

# 漏磁检测培训讲义

中国特种设备检验协会

2020 年 10 月



# 漏磁检测培训讲义

中国特种设备检验协会

2020 年 10 月

# 目 录

第一部分长输（油气）管道基础知识.....	1
1.1 长输（油气）管道法律法规标准.....	1
1.1.1 中美两国压力管道安全完整性法规与标准体系.....	1
1.1.2 我国压力管道安全法规标准体系.....	3
1.1.3 压力管道的定义.....	8
1.1.4 输气管道分类和特点.....	10
1.1.5 输油管道的分类及特点.....	12
1.2 长输（油气）管道输配系统组成.....	14
1.2.1 输气管道常用设备.....	14
1.2.2 天然气管道输送工艺概述.....	18
1.2.3 输气干线基本技术指标.....	19
1.2.4 输气管线的调峰及调度方法.....	20
1.2.5 输气管道水合物的堵塞原因及处理.....	20
1.2.6 原油和成品油管道输送工艺.....	20
1.2.7 管道的输送方式.....	21
1.3 长输（油气）管道腐蚀与缺陷.....	25
1.3.1 长输（油气）管道外腐蚀.....	25
1.3.2 长输（油气）管道内腐蚀.....	25
1.3.3 长输（油气）管道应力腐蚀.....	27
1.4 长输（油气）管道运行与使用管理.....	33
1.4.1 安全生产管理基本原理概述.....	33
1.4.2 安全生产常用概念.....	34
1.4.3 输油运行的安全要求.....	36
1.4.4 输油管线的日常维护.....	37
1.4.5 进入输油站场的安全要求.....	38
1.4.6 天然气运行的安全要求.....	38
1.4.7 天然气管线的日常维护.....	40
1.4.8 进入输气站场的安全要求.....	40
1.4.9 工业动火有关安全要求.....	40
第二部分漏磁检测原理与基础知识.....	42
2.1 漏磁检测的磁学基础.....	42
2.1.1 磁场的基本概念.....	42
2.1.2 电磁感应的定律.....	44
2.1.3 磁介质.....	45
2.1.4 磁路及其基本定律.....	48
2.2 漏磁检测原理.....	50
2.2.1 漏磁场的形成.....	50
2.2.2 漏磁检测.....	50
2.2.3 缺陷漏磁场的分布特征.....	51
2.2.4 漏磁检测的磁化技术.....	51
2.3 漏磁场测量和信号的影响因素.....	53



2.3.1 漏磁场信号的测量.....	53
2.3.2 漏磁场分析方法.....	55
2.3.2 漏磁信号的影响因素.....	57
第三部分 漏磁外检测技术.....	69
3.1 管道漏磁外检测技术.....	69
3.1.1 管道漏磁外检测磁化方法.....	69
3.1.2 管道漏磁外检测工艺.....	72
3.1.3 工程案例.....	76
3.2 储罐底板漏磁检测技术.....	79
3.2.1 储罐底板漏磁检测设备.....	80
3.2.2 储罐底板漏磁检测工艺.....	80
3.2.3 工程案例.....	86
第四部分长输（油气）管道漏磁内检测系统.....	91
4.1 长输（油气）管道漏磁内检测系统设计.....	91
4.1.1 管道漏磁内检测系统概述.....	91
4.1.2 管道漏磁内检测系统介绍.....	92
4.1.3 管道漏磁内检测磁化装置.....	94
4.1.4 检测装置硬件系统总体设计.....	97
4.1.5 漏磁信号测量电路的设计.....	101
4.1.6 采集触发信号和里程判定.....	104
4.1.7 检测装置的跟踪和定位.....	105
4.1.8 电源.....	108
4.2 长输（油气）管道漏磁内检测器机械结构.....	108
4.2.1 检测装置的机械结构.....	108
4.2.2 检测装置的工艺结构.....	113
4.3 长输（油气）管道漏磁内检测器操作.....	115
4.3.1 内检测器现场调试.....	115
4.3.2 检测器的投放.....	116
4.3.3 检测器的跟踪定位.....	116
4.3.4 检测器的接收.....	116
4.3.5 检测数据读出.....	117
第五部分长输（油气）管道漏磁内检测工艺.....	118
5.1 管线资料调查、现场勘察.....	118
5.1.1 管线调查表.....	118
5.1.2 现场勘察.....	121
5.2 长输（油气）管道漏磁内检测方案编制.....	129
5.3 长输（油气）管道漏磁内检测设备准备.....	130
5.3.1 清管器.....	130
5.3.2 检测器.....	137
5.3.3 定位跟踪设备.....	140
5.3.4 收发球工具.....	142
5.4 长输（油气）管道漏磁内检测清管检测作业.....	142
5.4.1 踏勘设标.....	142



5.4.2 作业前准备.....	143
5.4.3 清管作业.....	144
5.4.4 几何检测作业.....	149
5.4.5 漏磁检测作业.....	150
5.5 长输(油气)管道漏磁内检测开挖验证.....	150
5.6 长输(油气)管道漏磁内检测报告出具.....	154
第六部分长输(油气)管道漏磁内检测工艺案例.....	155
6.1 内检测实施过程中常见问题及处置措施.....	155
6.1.1 跟踪仪信号丢失.....	155
6.1.2 杂质过多,清管器不能正常进入收球筒.....	155
6.1.3 清管器无法发出.....	155
6.1.4 快开盲板存在泄露.....	155
6.1.5 阀室泄露.....	156
6.1.6 清管器破损停滞.....	156
6.1.7 清管器卡堵.....	157
6.1.8 冰堵.....	158
6.1.9 管道发生穿孔泄露、爆管.....	160
6.1.10 气堵.....	160
6.1.11 清管器停球处理的常用方法.....	161
6.1.12 可停输天然气管线清管器卡堵取球常用方法.....	162
6.1.13 成品油、原油管线清管器卡堵取球常用方法.....	162
6.1.14 内检测期间常见问题.....	162
6.2 内检测现场施工典型风险.....	164
6.2.1 物体打击.....	164
6.2.2 起重伤害.....	165
6.2.3 中毒窒息.....	167
6.2.4 硫化亚铁自燃.....	168
6.3 现场施工案例.....	170
6.3.1 天然气管道施工案例.....	170
第七部分管道漏磁内检测数据分析与报告出具.....	186
7.1 管道漏磁内检测数据的类型.....	186
7.2 管道漏磁内检测信号识别.....	188
7.3 管道漏磁检测与识别的金属损失.....	189
7.4 管道漏磁内检测金属损失类型.....	190
7.4.1 金属损失几何参数.....	190
7.4.2 金属损失类型及定义.....	191
7.5 管道漏磁内检测数据分析软件功能.....	192
7.6 管道漏磁内检测数据分析流程与质量控制.....	194
7.6.1 管道漏磁内检测数据分析流程.....	194
7.6.2 管道漏磁内检测数据分析质量控制.....	195
7.7 管道漏磁内检测报告要素.....	202
7.7.1 变形检测报告内容.....	203
7.7.2 漏磁检测报告内容.....	204



7.7.3 完整性评价报告内容.....	206
7.7.4 用户化软件报告内容.....	207
7.8 管道漏磁内检测结果验证.....	208
7.8.1 验证过程.....	208
7.8.1 验证报告.....	208
7.9 管道漏磁内检测结果提交.....	209

YH ASTS

# 第一部分 长输（油气）管道基础知识

## 1.1 长输(油气)管道法律法规标准

### 1.1.1 中美两国压力管道安全完整性法规与标准体系

自 1865 年美国建成世界上第一条输油管道至今，管道运输业已有近 140 年的历史。美国拥有危险液体管道 27.5 万公里、天然气输送管道 47.5 万公里，配气管线 306 万公里，管道总长度位居世界第一，也是世界上管道技术最为先进的国家。

美国 2002 年颁布了《管道安全改进法》（HR3609）、2006 年颁布了《管道检测、保护、执法安全法令》（S. 3961），它们既是对美国《管道安全法》（49-USC-601）的补充，也大力推行了完整性管理的法令。表 1 是美国关于长输和输配管道安全完整性检测评价的法规与标准体系。同时，按照法律法律的要求，美国运输部颁布了联邦（Code of Federal Regulations, DFR), 49-CFR-190~198。基于大量坚实的技术研究与工程实、际经验，形成了一套体系完善的法规与标准体系。包括：管道完整性管理标准、管道安全检测标准、管道安全评价标准、管道维修与维护标准、管道完整性检测评价人员资质标准等内容，它完全支撑了美国法律、法规要求。

表 1 美国长输管道与输配管道安全完整性检测评价法规与标准体系

法律	49USC601 《管道安全法》、HR3609 《管道安全改法》、49USC0501 《联邦危险品法》、S. 3961 《管道检测、防护与执行安全法令》、2011 年《管道安全、监管和创造就业法案》
联邦规章	CFR190 管道安全程序与法规制定流程 CFR191 天然气和其他气体的管道运输年度报告、事故报告以及相关安全条件报告 CFR192 天然气和其他气体的管道运输的联邦最低安全要求 CFR190 管道安全程序与法规制定流程 CFR191 天然气和其他气体的管道运输年度报告、事故报告以及相关安全条件报告 CFR192 天然气和其他气体的管道运输的联邦最低安全要求 CFR193 液化天然气设施联邦安全规定 CFR194 陆上石油管道应急方案 CFR195 危险液体的管道运输安全 CFR198 州内管道安全授权规则 (Regulations for grants to aid State pipeline safety programs)

技术标准	完整性管理类	ASME B31.8S-2016 输气管道系统完整性管理 API 1160-2019 有害液体管道完整性管理 API 1129-1996 危险性液体管道系统完整性的保证措施
	检测类	API RP574-2016 管道系统组件检验推荐作法 API 577-2013 焊接工业检验和冶金 API 578-2018 新建及现有合金管道系统的材料费校验大纲 NACE RP0102-2017 管道在线内检测 API 1163-2013 管道内检测系统合格标准 NACE pub 35100-20017 管道内检测（报告） NACE SP0502-2010 外腐蚀直接评价 NACE 0206-2016 干气天然气内腐蚀直接评价 NACE SP0208-2008 液体石油管道内腐蚀直接评价 NACE SP0204-2015 应力腐蚀开裂直接评价 API RP580-2016 基于风险的检测 API RP581-2016 基于风险的检测—基础源文件 NACE TM0109-2009 埋地钢质管道防腐系统地面不开挖检测方法 NACE TM0102-2002 管道防腐层导电性检测方法 NACE TM0497-2018 埋地钢质管道阴极保护测试技术 NACE RP0169-2002 埋地或水下金属管线系统的外腐蚀控制
	评估类	ASMEEB31G-2012 确定腐蚀管线剩余强度手册 NACE SP0502-2010 外腐蚀直接评价 NACE SP0206-2006 干气天然气内腐蚀直接评价 NACE SP208-2008 液体石油管道内腐蚀直接评价 NACE SP0204-2015 应力腐蚀开裂直接评价 API 579-1/ASME FFS-1 -2016 合于使用评价 API 579-2/ASME FFS-2 2009 合于使用评价案例手册 NACE TM 0284-2016 耐氢致开裂的管道钢的评价 NACE MR0175-2015 防硫化氢应力开裂的油田设备材料
	维修与维护类	API 570-2016 管道检验规范—在用管道系统检验，修理，改造和再定级 API RP2200-2015 石油管道，液化石油管道、成品油管道的修理施工 API RP 1162-2010 管道操作者的公共注意事项 ASME PCC-2-2015 承压设备与管理修复
	人员资格评定、认证类	ASMEB31Q-2018 输气管道从业人员资质标准 ANSI/ASNT SP-189-2011 无损检测人员资格评定导则 API RP 1120 液体管道维修人员的培训与认证 API RP 1162-2010 管道操作者的公共注意事项 API RP 1163-2013 管道内检测系统认证

		ASNTILI-PQ-2017 管道内检测员工的资格
--	--	----------------------------

表 1 说明, 在完整性检测评价环节, 美国针对了不同失效模式, 采取有针对性的完整性管理过程。49USC601《管道安全法》、HR3609《管道安全改进法》、S. 3961《管道检测、防护与执行法令》三部法令明确针对运行与维护中完整性理念, 提出具体的要求, 联邦规则针对具体类型的管理, 提出针对性的检测与管理要求。针对具体的失效模式, 提出系列的技术标准, 在从检测方法、评价准则、维修维护与相关人员资质要求方面, 均给出的明确要求。

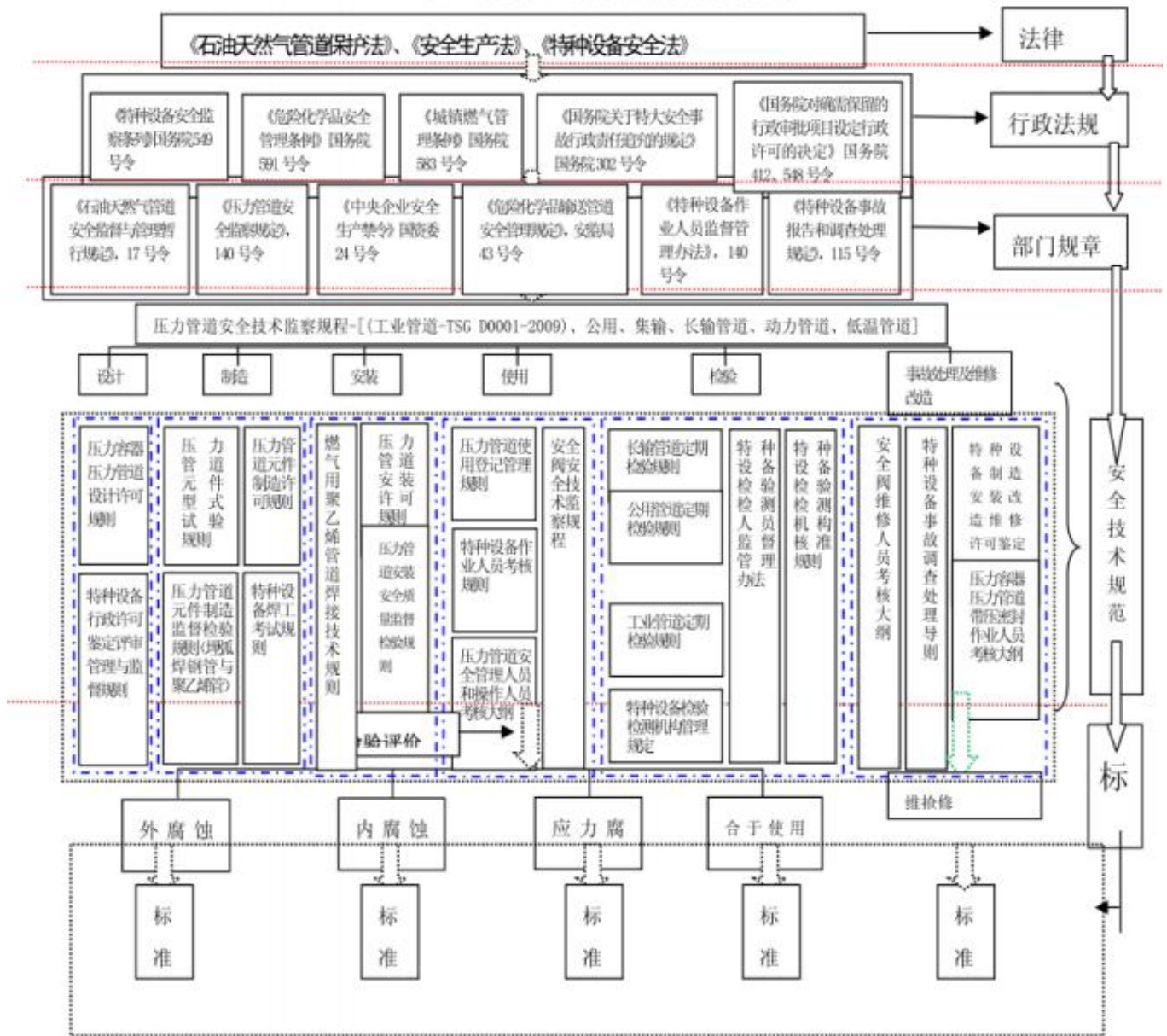
### 1.1.2 我国压力管道安全法规标准体系

随着我国经济持续、快速发展, 特别是石油化工、能源、电力、冶金、城市建设的发展, 人民生活水平的提高, 社会对压力管道的需求也迅速增加, 压力管道安全逐步成为了国家公共安全的重要组成部分。

鉴于国家高度重视压力管道的重大战略地位, 我国相继出台了有关法律、法规、标准, 如:《中华人民共和国石油天然气管道保护法》、《特种设备安全监察条例》、《危险化学品安全管理条例》, 部门规章《中央企业安全生产禁令》, 安全技术规范《压力管道定期检验规则: 长输(油气)管道》(TSGD7003-2010)、《压力管道定期检验规则: 公用管道》(TSGD7004-2010), 相关文件《特种设备安全发展战略纲要》(埋地管道部分), 标准《埋地钢质管道腐蚀防护工程检验》、《基于风险的埋地钢质管道外损伤检验评价方法》, 以规范和规划压力管道行业的发展见表 2。



表 2 管道安全法律法规标准体系图谱

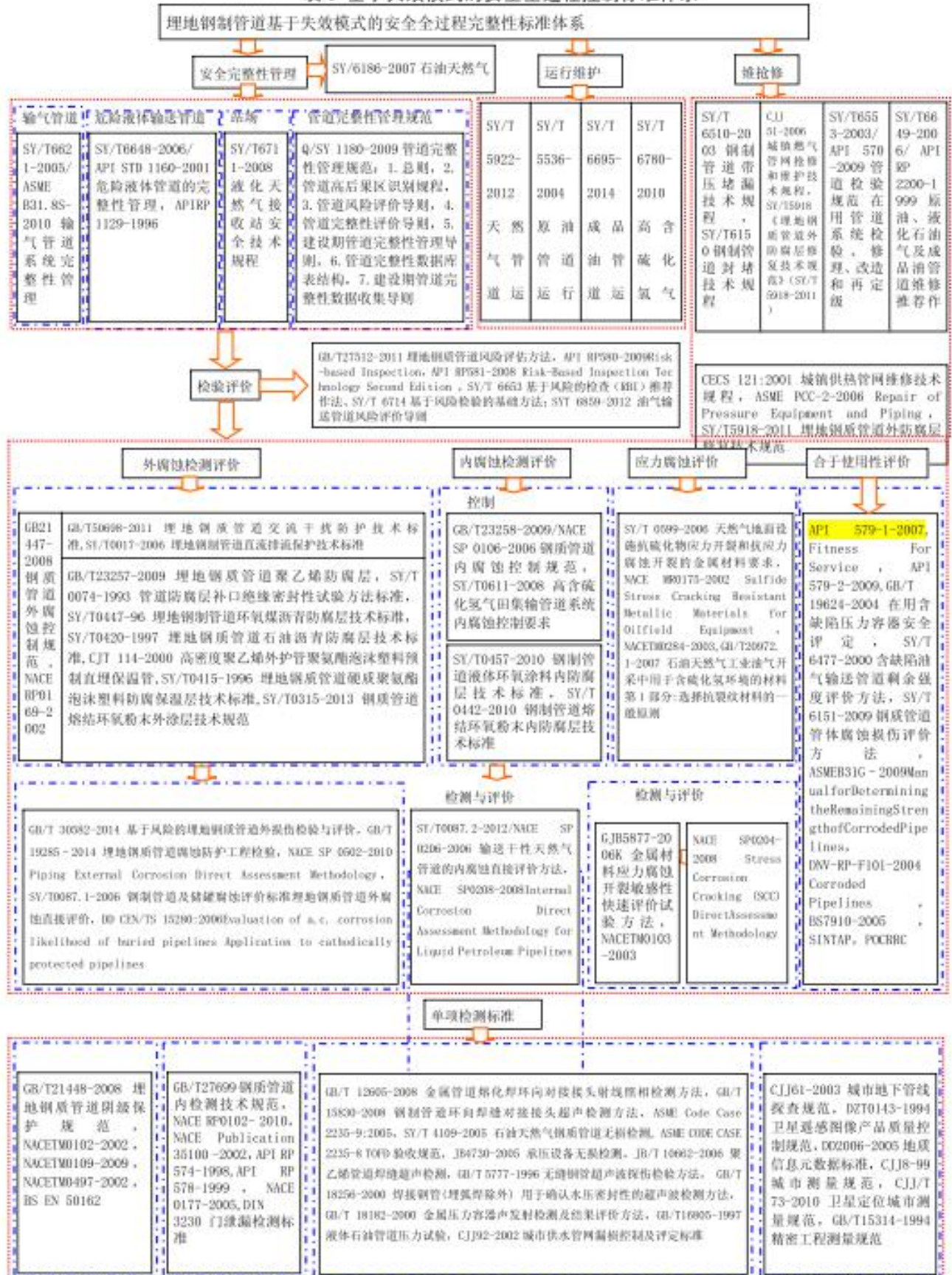


由表 2 可见，关于压力管道全过程安全完整性监管体系的基本框架已经建立，在设计、制造、安装、检验与维修改造等方面的行政许可工作已有序开展，但在长输管道与公用管道的使用登记、作业人员等环节的行政许可工作正在展开。这是由于该项工作起步较晚、管理薄弱，现在仍然面临诸多法规与管理方面的问题和困难，主要表现在：一是立法不完善，《特种设备安全监察条例》将压力管道纳入特种设备范围，明确了安全监管主体，但由于客观原因，没有对压力管道设计、安装使用的安全监督管理提出具体规定，因此压力管道安全监察工作难以全面、有效地开展；二是历史欠帐多、基础薄弱，由于安全管理基础差，安全投入不足，检验工作不到位，存在很多事故隐患；三是主体责任难以有效落实。因此，以安全完整性为基础的压力管道全过程监管体系，尚需进一步完善。除了上述原因外，与我国关于压力管道的技术基础薄弱有关联：一是针对各个环节的具体评价指标体系，不完善、不完整，有的还是空白；二是技术研究薄弱，尤其是在用阶段的检测与评价技术研究；三是缺少标准

体系, 法规只是解决了“做什么”的问题, 但是\*如何做”的问题, 需要标准来解决, 而我国现阶段针对在用环节的检测评价标准缺失, 即使有部分行业标准, 但基本上是照抄国外的指标体系, 不符合中国国情。

针对上述问题, 配合已出台的管道安全法规, 对我国现有的标准体系统进行了梳理, 并与国外同类标准进行了比较, 详见表 3。

表 3 基于失效模式的安全全过程控制标准体系





由表 3 可见, 总体上, 关于安全管理与维抢修的标准体系不完善, 尤其是国家标准方面还存大的缺失现象, 而已经颁布的行业标准, 可操作性不强, 尚不能支撑表 2 所提的国家法律、法规、部门规章、安全技术规范。具体特点如下: 1) 在关于腐蚀控制方面, 国内已参照国外的相关标准, 结合我国工程实践, 建立了较为完善的腐蚀控制体系, 但是随着高强度管线钢的使用、管道输送压力增大, 环境应力腐蚀导致的失效案例将越来越多, 这方面的控制标准还是空白; 2) 在基于失效模式的检测评价方面, 在国家十五、十一五科技支撑课题、科技支撑计划项目以及国家行业公益科技项目的资助下, 以制定了较为完善的外腐蚀检测评价方面的标准, 但在内腐蚀、应力腐蚀(含介质与环境)方面的检测评价标准, 基本上是空白; 3) 在合于使用评价方面, 缺少关于弯头、三通、特殊结构管等管件以及含扭矩的管道腐蚀性缺陷安全评定, 关于裂纹与材料失效评估方面的标准也缺失, 并需要完善埋地管道在特殊工况与地表条件下的力学分析与安全评定标准; 4) 在维、抢修方面, 缺少补强方面的技术标准; 5) 在站场类, 安全控制标准基本没有; 6) 在管道安全运行过程监控(诊断)方面, 基本是空白; 7) 目前, 大量的电磁技术(漏磁、低频电磁、涡流、磁记忆、电磁超声、磁致伸缩、脉冲涡流)和声(超声波、超声导波)、红外、射线技术在管体腐蚀检测工程上得到的一定的应用, 但缺少相关标准; 8) 已有的少部分国家和行业标准基本照搬国外的相关规定, 缺少实验数据支撑, 进而导致不适合中国国情, 可操作性差等问题。

### 1.1.3 压力管道的定义

人们在生产、生活中广泛利用管道来输送介质,管道输送已经成为与铁路、公路、水运、航运并列的运输行业之一。在生产、生活中所使用的管道中的部分管道是压力管道,它作为一种特殊承压设备越来越广泛的应用于石油、石化、化工、电力等行业及城市燃气和供热工程中。

《特种设备目录》对压力管道作了明确定义:压力管道是指利用一定的压力,用于输送气体或者液体的管状设备,其范围规定为最高工作压力大于或等于 **0.1MPa(表压)**,介质为气体、液化气体、蒸汽或者可燃、易爆、有毒、有腐蚀性、最高工作温度高于或者等于标准沸点的液体,且公称直径大于或者等于 **50mm** 的管道。公称直径小于 **150mm**,且其最高工作压力小于 **1.6Mpa(表压)**是输送无毒、不可燃、无腐蚀性气体的管道和设备本体所属管道除外。其中,石油天然气管道的安全监督管理还应按照《安全生产法》、《石油天然气管道保护法》等法律法规实施。

#### (1) 压力管道的工作原理及用途

对单条压力管道而言,其工作原理就是依靠外界的动力或者是介质本身的驱动力将该条压力管道源头的介质输送到该条压力管道的终点。

压力管道的主要用途就是输送介质,而除此用途之外还可以延伸出储存功能(主要用于长输管道)和热交换功能(主要用于工业管道)等。

#### (2) 压力管道输送的介质

管道输送的是流体介质,包括 **0.1MPa** 以上的气体、液化气体、蒸汽介质或者可燃、易爆、有毒、有腐蚀性、最高工作温度高于或者等于标准沸点的液体介质。具体定义如下:

**可燃流体:**指闪点高于 **45℃**的流体(在生产操作条件下,可以点燃和连续燃烧的气体或可以汽化的液体),如 **35#**轻柴油、重柴油、变压器油、甘油等。

**易燃液体:**指闪点低于 **45℃**的液体,如原油、汽油、煤油、乙醚等。

**易爆(气体、液体)流体:**指闪点低于环境温度的流体,如汽油、乙醚、丙酮等。

**有毒流体:**这类物质一旦泄漏,被人吸入或与人体接触,若治疗及时不至于对人体造成不易恢复的危害。相当 **GB5044**《职业性接触毒物危害程度分级》中Ⅱ级以下危害程度的毒物。如甲醛、乙醚、氯水等

**剧毒流体:**指有极少量这类物质泄漏到环境中,被人吸入或与人体接触,即使迅速治疗,也能对人体造成严重的危害和难以治疗的后果的物质。相当 **GB5044**《职业性接触毒物危害程度分级》中Ⅰ级危害程度的毒物。如汞、苯、硫化氢、氯乙烯等,最高允许浓度 $\leq 0.1\text{mg}/\text{m}^3$ 。

**有腐蚀性液体:**是指能灼伤人体组织并对管道材料造成损坏的液体,如:硫酸、硝酸等。

**最高工作温度高于或者等于标准沸点的液体:**指介质在最高工作温度下,处在沸腾状态的液体。

#### (3) 压力管道的分类

压力管道的用途广泛,品种繁多。不同领域内使用的管道,其分类方法也不同。一般可以按主体材料、敷设位置、输送介质特性和用途等进行分类,另外,为便于安全监督管理,还按照安全监督管理的需要进行分类。

压力管道的一般分类:

按主体材料划分,可分为金属管道和非金属管道。金属管道又可分为铸铁管道、碳钢管道、低合金钢管道、不锈钢管道、有色金属管道等。非金属管道包括塑料管道、玻璃钢管道、金属复合管道、非金属复合管道;

按敷设位置划分,可分为架空管道、埋地管道、地沟敷设管道;

按介质压力分类,通常可分为:超高压管道( $>42\text{MPa}$ )、高压管道( $10\sim 42\text{MPa}$ )、中压管道( $1.6\sim 10\text{MPa}$ )、低压管道( $<1.6\text{MPa}$ );

按介质温度分类,一般可分为:高温管道( $>200^\circ\text{C}$ )、常温管道( $-29\sim 200^\circ\text{C}$ )、低温管道( $<-29^\circ\text{C}$ );

按介质毒性分类,可分为:剧毒管道(极度危害)、有毒管道(非极度危害)、无毒管道;

按介质可燃性分类,分为可燃介质管道、非可燃介质管道;

以介质腐蚀性分类,分为强腐蚀性介质管道、腐蚀性介质管道、非腐蚀性介质管道;

按管道用途分类,分为长输油气管道、城镇燃气管道、热力管道、工业管道(包括工艺管道、公用工程管道)、动力管道、制冷管道。

安全监督管理的分类:

为满足安全监督管理的需要,《特种设备目录》将压力管道分成长输(油气)管道(输油管道、输气管道)、公用管道(燃气管道、热力管道)、工业管道(工艺管道、制冷管道)和动力管道4个类别及压力管道元件品种。在安全监督管理中,还对各类压力管道与压力元件品种进行分级以便于分级管理。

#### (4) 压力管道的主要工艺参数及特点

压力管道的主要工艺参数:

由于压力管道种类繁多,运行工况多样化和复杂化,通常认为压力管道的工作参数包括以下几个方面:

##### ①设计压力

在相应的设计温度下,用以确定管道及其它元件尺寸的压力值,该压力为管道的内压力时,称为设计内压力,为外部压力时称设计外压力。设计压力不得低于工作过程中可能出现的由压力与温度形成的最苛刻条件下的压力。

##### ②操作压力

在稳定操作条件下,压力管道系统内介质的压力。

##### ③最大操作压力

在正常操作条件下,压力管道系统中的最大实际操作压力。

##### ④最大允许操作压力

压力管道系统遵循相关标准的规定,所能连续操作的最大压力,等于或小于设计压力。

##### 1) 设计温度

压力管道在正常工况下,管壁或元件金属可能达到的最高或最低温度。设计温度不得高于(或低于)工作过程中可能出现的由压力与温度形成的最苛刻条件下的最高温度(最低温度)。

#### ⑤管输介质温度

管道输送介质在管道内输送时的流动温度。

#### ⑥公称直径(DN)

由字母 DN 和无因次整数数字组合的尺寸标志, 代表管道组成件的规格。数字反映管道组成件连接端部的孔径或外径(mm)。公称是一种数字标记, 作为尺寸、容积、额定值或其它特征的标称, 不是一种精确的度量。

#### ⑦公称压力(PN)

由字母 PN 和无因次整数数字组合的尺寸标志, 代表管道组成件的压力等级, 数字反映管道组成件的(以" bar" 计)。

#### ⑧设计壁厚

在相应的设计内压力和公称直径下, 根据选用钢管的许用应力, 设计得出满足工艺条件的管壁厚度。

#### (5)压力管道的特点:

①应用广泛, 随着经济的发展, 管道的数量越来越多。由于应用的领域不同, 各个领域所使用的压力管道又各有其特点, 如化工、石化系统有大量的压力管道, 它们的工作条件各种各样, 工作压力由真空、负压到 300MPa 以上的高压、超高压。而工作温度由-200℃到 1000℃以上, 所转载的介质又多是 toxic、易燃、易爆。

②管道体系庞大, 由多个组成件、支承件组成, 任一环节出现问题都会造成整条管线的失效。

③管道的空间变化大。要么是长距离却经过复杂多变的地质条件、地形地貌、人文环境、天气环境; 要么实在一个环境里。但是其立体空间变幻莫测。

④腐蚀机理与材料损伤的复杂性。易受周围介质或设施的影响, 容易受诸如腐蚀介质、杂散电流影响, 而且还容易遭受第三方破坏。

⑤失效的模式多样。地质灾害、采空区、洪水、第三方破坏等导致的非控因素的失效。

⑥载荷的多样性, 除介质的压力外, 还有重力载荷、土壤载荷以及位移载荷等。

⑦材质的多样性, 可能一条管道上就需要用几种材质。

⑧安装方式多样, 有的架空安装, 有的埋地敷设。

⑨实施检验的难度大, 如对于高空和埋地管道的检验始终是难点。

⑩压力管道元件数量多, 标准多。

另外, 我们在研究压力管道时, 始终要注意管道是整个设备装置系统的一部分, 有时还是最主要的一部分。研究管道也要从系统的角度去考虑问题。

#### 1.1.4 输气管道分类和特点

天然气从气井采出, 经集气管线输送到集气站, 在集气站进行调压、分离、计量后再输送到天然气净化厂(如果天然气气质已达到管输标准, 可以不经过净化处理), 在净化厂内进行脱水、脱油、脱硫。使天然气气质达到管输标准后输入输气干线或直接输往用户。若气井压力不够, 还需在进入输气干线前或在干线沿途, 建立压气站, 使天然气能通过长距离输送以满足用户的需要。

### (1) 天然气输送的分类

天然气的输送方式有管道输送和液化输送两种。

#### ① 管道输送

天然气的管道输送方式,是将油气井采出的天然气通过与油气井相连接的各种管道及相应的设施、设备网络输送到不同地区的不同用户。天然气管道输送方式输送的天然气气量大,给用户供应的气源稳定,用户多、地域广、距离长、供应连续不断。因此管输天然气事业发展迅速,是目前天然气输送的主要方式。我国天然气管道输送始于 50-60 年代,70 年代快速发展。

#### ② 液化输送

天然气的液化输送方式,是将油气井采出的天然气在液化厂中进行降温压缩升压,使之液化,即平常所说的液化天然气(LNG),然后分装于特别的绝热容器内,用交通工具如油轮、油槽火车、汽车运至城镇等用户。对于高度分散的用量小的用户,偏远山区不便铺设输气管线的地区,天然气液化输送方式有其特殊的灵活性和适应性。但是,储存 LNG 需要巨大的低温储罐,一般直径 70m,高 45m,约装 10 万  $\text{m}^3$  LNG,客户端要有基础设备,能再处理大量来自于 LNG 的天然气。这些基础设备的费用很高且易遭受破坏。

### (2) 天然气管道的分类

输气管道可分为矿场输气管道、干线输气管道及城市配气管道,通常称内部集输管线、长距离输气管线和城市输配管网。

天然气从气井开采出来后,通过矿场集输-净化脱硫-长输管道输送到城市输配管网,供用户使用。矿场输气管道根据其气田构造规模和形状可布置成直线型、环型和放射型,它所输送的是没有经净化处理的原料气,通常有输送距离短(一般为几公里至几十公里)、管径小(一般在 100~300mm 以下)、压力变化大(在开采初期可高达 10MPa 或更高,而在开采后期可能降至 10MPa 甚至 0.1~0.2MPa)等特点。

干线输气管道是把经脱硫净化处理后的天然气送到城市,连接净化厂与城市门站之间的输气管道,它输送距离长(从几百公里至几千公里),管径大(一般在 400mm 以上),压力高(4.0~12.5MPa),是天然气远距离运输的主要工具。

城市输气管道是天然气的分配管网,它遍布整个城市和近郊,一般总是成环形布置,且根据压力高低严格区分。

本教材主要介绍长距离输气管道。

### (3) 长输天然气管道的特点

长距离输气管道与压缩机站组成一个复杂的动力系统,由于它所输的气量大,通常采用大口径高压力的输送系统,与矿场输气管和城市管网有很大差别,其主要特点是:

(1) 长输管道是天然气长距离连续运输系统,它不需要常规的运输工具和设备,也不需要大量的建筑和



占用大片土地, 可以用自身运输的物质消耗克服其摩擦阻力就能迅速地将天然气运达目的地, 所以是最有效的、最大规模的运输系统, 由于这些突出优点, 不但用它来运输气体和液体, 国外已经开始用它来输送固体物质如水煤浆;

②天然气的产供销是由来气、净化、输气和供气等环节组成的, 是在完全密闭的管道中完成的, 上下游之间紧密相连、互相制约。形成一个庞大而复杂的输送系统, 长输管道作为这个系统小的中间环节, 必须协调好上下游之间的关系, 这使得它的设计和操作管理比其它管道更为复杂;

③由于长输管道担负着某一城市或地区的供气任务, 而且所供应的能量(或作为化工原料)数目庞大, 涉及国计民生和千家万户, 一旦中断, 将影响整个城市或地区工业生产和人民生活的正常秩序。甚至带来巨大损失, 因此必须保证安全、连续、可靠地供气。这就需要在设计和管理上采取特别有效的措施予以保证;

④由于采气生产的均衡性和用户用气的波动性, 使得长输管道的运行长期处于上游(进口)压力相对稳定而下游(出门)压力不断变化的矛盾之中。这就要求管道有一定储气能力, 以适应用气量的变化。当然, 用户用气量是随季节和昼夜每小时不断地变化。峰谷差别悬殊, 单靠输气管道调节是无法解决的, 也不一定经济;

⑤一般气田的地层压力在开采初期都比较高, 长输管道投产初期可充分利用地层压力进行输送, 随着开采程度的提高和地层压力不断下降, 输气管道应根据气田压力的变化逐步建增压站, 可节约投资和经营费用;

⑥长输管道要求有与之配套的完善的附属设施, 尤其是通信和自控系统。在天然气工业迅猛发展的今天, 几千公里, 跨地区跨省市输送已成常事, 因此要求有先进完善的通信调度系统作保证以维持管道的正常运行;

⑦由于现代管道输送在国民经济中的地位日趋重要, 如何利用冶金、机械制造、自动控制和施工安装等综合技术来提高运行效率已成为管输工艺研究的中心。

### 1.1.5 输油管道的分类及特点

输油的管道一般按其输送距离和经营方式分为两类: 一类属于企业内部, 如油田类短距离的油气集输管道, 炼厂、油库内部管道, 油田炼厂附近企业的输油管道等。其长度一般较短, 不是独立的经营系统; 另一类是长距离输油管道, 如油田将原油送至较远的炼厂或码头的外输管道等。长距离输油管道一般管径大, 运输距离长, 配备各种辅助配套工程。这种输油管道是独立经营的企业, 由自己完整的组织机构, 进行独立的经营管理。

输油管道按所输油品的种类可分为原油管道和成品油管道两种。原油管道是将油品生产的原油送至炼厂、港口或铁路转运站, 具有管径大, 输量大, 运输距离长, 分输点多的特点, 多采用顺序输送。

长距离输油管由输油站和线路两部分组成(图 1.3)。输油管起点有起点输油站。也称首站。它的任务是收集原油或石油产品, 经计量后向下一站输送。首站的主要组成部分是油罐区, 输油泵房和油品计量装置。有的为了加热油品还设有加热系统。输油泵从油罐汲取油

品经加压(有的也称加热), 计量后输入干线管道。

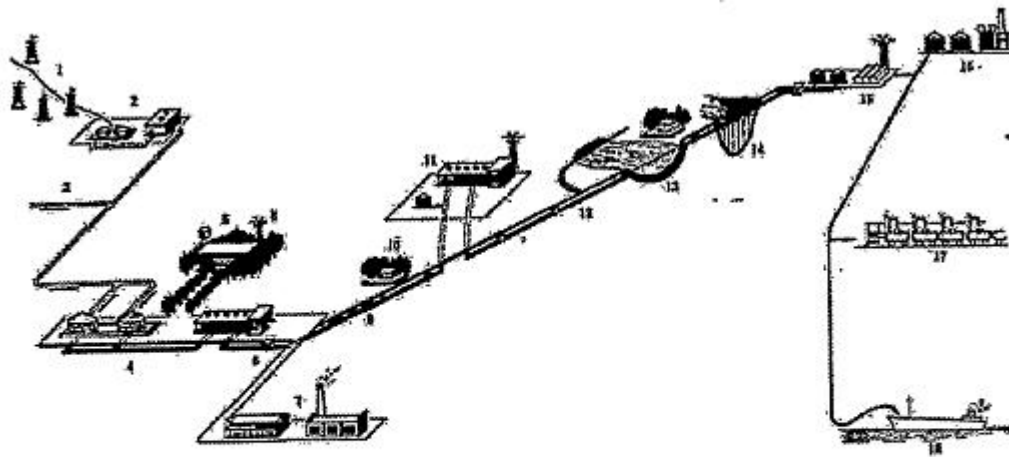


图 1.1 长距离原油管道

1-井场; 2-转油站; 3-来自油田输油管; 4-首站罐区和泵房; 5-全线调度中心; 6-清管器发放室; 7-首站锅炉房; 8-微波通讯塔; 9-线路阀室; 10-管理维修人员住所; 11-中间输油站; 12-穿越铁路; 13-穿越河流; 14-跨越工程; 15-末站; 16-炼厂; 17-火车装由栈桥; 18-油轮装油。

油品沿着管道向前流动, 压力下降, 需要沿途设置中间输油泵站继续加压, 直至将油品送至终点, 为了继续加热, 则设置中间加热站。加热站与输油泵站设在一起的, 称为热泵站。

输油管的终点又称末站, 它可能是属于长距离输油管道的转运油库, 也可能是其它企业的附属油库。末站的任务是接受来油和向用油单位供油, 所以有较多的油罐与准确的计量系统。

为了满足沿线地区用油, 可在中间输油站或中间阀室分出一部分油品, 输往它处。也可在中途接受附近矿区或炼厂来油, 汇集于中间输油站或干管, 输往终点。

长距离输油管的线路部分包括管道本身, 沿线阀室, 通过河流, 公路, 山谷的穿(跨)越构筑物, 阴极保护设施, 以及沿线简易公路, 通讯于自控线路, 巡线人员住所等。

长距离输油管道由钢管焊接而成。为了防止土壤对钢管的腐蚀, 管外都包有防腐绝缘层, 并采用电法保护措施。为了防止含硫原油对管壁的腐蚀, 有时采用内壁涂层。内壁涂层还有降低管壁粗糙度提高输量的作用。

长距离输油管道上每隔一定距离设有截断阀门, 大型穿(跨)越构筑物两端也有。一旦发生事故可以及时截断管道内流体, 防止事故扩大和便于抢修。

有线或无线通讯系统是长距离输油管道不可缺少的设施之一, 是全线生产调度和指挥的重要工具。近年来通讯卫星和微波技术被广泛地用于输油管的通讯系统和生产自动化的信息传输系统, 使通讯和信息传输更加可靠和现代化。

## 1.2 长输（油气）管道输配系统组成

### 1.2.1 输气管道常用设备

#### (1) 压缩机

压缩机是提高气体压力、输送气体的机器，又称压气机。它的种类很多，按工作原理可分为容积型和速度型两大类。容积型压缩机中，气体压力的提高是由于体积被压缩，密度增大而引起的。速度型压缩机中，压力的提高是由气体的动能转化而来，就是先让气体获得一个很高的速度，然后又使速度降下来，让动能转化为压力能。

输气管线上主要是使用容积型的活塞式往复压缩机和速度型的离心式旋转压缩机。由于输气管道的管径和流量日益增大，以及离心式压缩机本身的优点，使得离心式压缩机在输气干线上占有绝对优势。

#### ① 两种压缩机类型的特点

##### 往复式压缩机

优点：排出压力稳定，能够适应广泛的压力变化范围和较宽的流量调节范围，一般效率较高，对制造压缩机的金属材料要求不苛刻；

缺点：结构复杂，易损件多，安装及基础工作量也较大，运转中的振动和噪音也大。

一般说来，往复式活塞压缩机适用于要求升压较高而输气量不大的场合。

##### 离心式压缩机

优点：

- 1) 结构紧凑，尺寸小，重量轻；
- 2) 排气均匀，连续，不需级间的缓冲容器，可以直接进行串联运行；
- 3) 无往复运动部件，振动小，易损件少，不需庞大而笨重的基础；
- 4) 除轴承外，机内部件不需要润滑，节省油料，且不会污染所输送的气体；
- 5) 转速高，可与蒸汽轮机或燃气轮机直接联动，便于调节流量，利于节能；
- 6) 维修工作量小，调节方便。

缺点：由于喘振的关系，难以同时满足小流量和高压力的要求，并且效率较低，但近年来有所改进，效率可达到84%以上。

就天然气输送干线来说，压力一般都在4.0~7.5MPa之间或更高，输气量大，一般选用离心式压缩机。一些中小输量的管道，离心式和往复式都可使用。

#### (2) 阀门

阀门安装在各种管路系统中，用于控制管路中介质的压力、流量及流向等。

由于介质的压力、温度、流量等物理性质及化学性质的不同，以及系统的控制要求和使用要求的不同，所以阀门的种类和规格繁多。

一个阀门的损坏或误操作，往往直接影响全线生产，甚至造成重大事故，因此，了解各种阀门的结构，特点及其应用，掌握其操作和维护方法，是保证安全生产平稳输气的重要一环。



阀门可定义为截断、接通流体通道或改变流向、流量及压力值的装置。

阀门的五大功能:

- a) 接通或截断流体通路;
- b) 调节和节流;
- c) 防止倒流;
- d) 调节压力;
- e) 释放过剩的压力。

#### ①分类

常用的分类方法有以下几种:

##### 1) 按结构特征分

截止阀 - 关闭件沿阀座中心线移动。

闸阀 - 关闭件沿垂直于阀座中心线移动。

球阀(旋塞阀) - 关闭件是球或锥塞, 围绕本身的中心线旋转。

旋启型 - 关闭件围绕阀座外的轴旋转。

蝶阀 - 关闭件是圆盘, 它围绕阀座内的轴旋转。

##### 2) 按用途分

开断用 - 用来切断或接通管路介质。如截止阀、闸阀、球阀、旋塞等。

调节用 - 用来调节介质的压力和流量。如减压阀、调节阀等。

分配用 - 用来改变介质的流向, 起分配介质的作用。如三通旋塞、三通截止阀等。

止回用 - 用来防止介质倒流。如止回阀。

安全用 - 在介质压力超过规定数值时, 用来排放多余介质, 以保证管路系统及设备的安全。如安全阀、事故阀等。

其它特殊用途——如疏水阀、放空阀、排污阀等。

##### 3) 按驱动方式分

手动 - 借助手轮、手柄、杠杆、链轮、齿轮、蜗轮等, 由人力来驱动。

电动 - 借助电机、电磁力来驱动。

气动 - 借助压缩气体来驱动。

液动 - 借助水、油等液体传递外力来驱动。

##### 4) 按压力分

真空阀 - 工作压力低于标准大气压的阀门。

低压阀 - 公称压力 PN 小于 1.6MPa 的阀门。

中压阀 - 公称压力 PN 在 2.5~6.4MPa 的阀门。

高压阀 - 公称压力 PN 在 10.0~80.0MPa 的阀门。

超高压阀 - 公称压力 PN 大于 100MPa 的阀门,

5) 按介质温度分

普通阀门 - 适用于介质温度 $-40\sim 450^{\circ}\text{C}$ 的阀门。

高温阀门 - 适用于介质温度 $450\sim 600^{\circ}\text{C}$ 的阀门。

耐热阀门 - 适用于介质温度 $600^{\circ}\text{C}$ 以上的阀门。

低温阀门 - 适用于介质温度 $-40\sim -70^{\circ}\text{C}$ 的阀门。

深冷阀门 - 适用于介质温度 $-70\sim -196^{\circ}\text{C}$ 的阀门。

超低温阀门 - 适用于介质温度 $-196^{\circ}\text{C}$ 以下的阀门。

6) 按公称通径分

小口径阀门 - 公称通径 DN 小于 40mm 的阀门。

中口径阀门 - 公称通径 DN 在 $50\sim 300\text{mm}$ 的阀门。

大口径阀门 - 公称通径 DN 在 $350\sim 1200\text{mm}$ 的阀门。

特大口径阀门 - 公称通径 DN 大于 1400mm 的阀门。

(3) 泵

泵是一种把机械能或其他能量转变为液体的位能、压能的水力机械。在输油管道中, 泵的应用十分广泛、它是输油站的“心脏”, 是输油管道系统中最主要的设备之一。

泵的种类很多, 按其结构和工作原理, 可将泵分为以下三类:

① 叶片式泵

叶片式泵主要通过叶轮旋转产生离心力, 使液体获得能量。常见的有离心泵、轴流泵、旋涡泵等、

② 容积泵

容积泵利用泵内工作室容积的周期性变化, 用往复运动的活塞或旋转运动部件来压送液体。主要有往复泵、齿轮泵、水环真空泵等。

③ 其他类型的泵

如喷射泵、空气升液泵等。

(4) 管式加热炉

管式加热炉由于可以连续大量地加热原油(重质油), 操作方便, 容易实现自动化, 运行成本低, 所以获得了广泛的应用。它也是我国长输原油管道系统中主要的设备之一。

加热炉一般由四个部分组成, 即辐射室(炉膛)、对流室、烟囱和燃烧设备(火嘴)。低温原油 (被加热的油品)先经过对流室炉管加热, 再经辐射室炉管被加热到所需要的温度, 这种加热方式 称为直接加热(即原油往加热炉炉管内直接加热)。另一种加热方式 - 间接加热将在后面介绍。直接加热的流程见图 1.2。

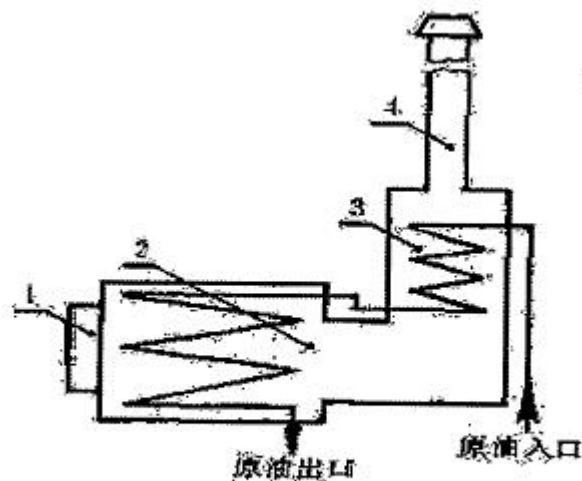


图 1.2 原油直接加热炉流程图

1-燃烧器；2-辐射；3-对流室；4-烟囱

#### (5) 锅炉

锅炉是把燃料的化学能转变为蒸汽或热水的热能的能量变换和传递设备。燃料在锅炉炉膛内燃烧，在炉膛和烟道中放热，通过锅炉的受热面(炉管)将热量传给水。如果锅炉的出口是热水，称为热水锅炉。如果锅炉出口是饱和或过热蒸汽，称为蒸汽锅炉。

无论哪种锅炉，进入锅炉炉管中的工作介质都是水。锅炉进水称给水，由给水泵供应。根据给水泵出口压力决定锅炉的工作压力，额定工作压力在 2.5MPa 以下的称为低压锅炉；2.5~4.0MPa 的称为中压锅炉；6.0MPa 以上称为高压锅炉。利用热水或蒸汽热能的工业锅炉一般是低压锅(如输油站所用的锅炉)；而以产生蒸汽作动力的锅炉常采用中、高压锅炉(如油田热采中用的高压蒸汽锅)。

#### (6) 换热器

两种温度不同的介质进行热量的交换，使一种介质温度下降，而另一种介质温度上升，从而达到加热或冷却的目的。这样的设备称为换热器。根据冷热流体是否直接接触可将换热器分为直接接触式换热器(如除氧器)和非直接接触式换热器，后者又进一步分为回热式和间壁式两类：

##### ① 回热式换热器

它先让热流体流过固体壁面，将热量传递给壁面，然后让冷流体流过同体壁面，壁面将热量传递给冷流体。这种换热器通常只能用于气体介质之间的换热。

##### ② 间壁式换热器

此类换热器中，冷热两种流体不直接接触，而是分别在固体壁面的两侧流过。热流体的热量主要以对流方式传递壁面，经壁面导热热量再以对流方式传给冷流体。这是应用最广的一类换热器。

## 1.2.2 天然气管道输送工艺概述

### (1)天然气管输系统的基本组成

天然气管输系统是一个联系采气井与用户间的由复杂而庞大的管道及设备组成的采、输、供网络。一般而言,天然气从气井中采出至输送到用户,其基本输送过程(即输送流程)是:气井(或油井)→油气田矿场集输管网→天然气净化及增压→输气干线→城镇或工业区配气管网→用户。

天然气管输系统虽然复杂而庞大,但将其系统中的管线、设备及设施进行分析归纳,一般可分为以下几个基本组成部分,即:集气、配气管线及输气干线;天然气增压站及天然气净化处理厂;集输配气场站;清管站。天然气管输系统各部分以不同方式相互连接,组成一个密闭的天然气输送系统,从而实现天然气的连续输送。

集气管线是将气井开采出来的天然气输送到集气站,经过初步处理,如分离出水和杂质,脱除凝析油,计量等,再将气体输送到气体净化厂或增压站或输气干线的首站的管线。

输气干线是天然气净化厂或输气干线首站到城市配气站或门站间的管线。

配气管线是输气干线的分输站到城市配气站或门站以及到各用户的管线。

天然气压气站的任务,是给天然气补充能量,将机械能转换为天然气的压能,提高天然气的压力。

天然气净化厂,它的任务是将天然气中的含硫成分和气态水脱除,使之达到管输气质的要求,减少天然气中含硫成分和水对管线的腐蚀。

输气站的任务是将上游输来的天然气进行分离除尘输往下游,同时按照用户的需要,经过调压计量后,平稳地为用户分输气。输气站还有控制和切断输气干线天然气气流的作用,放空干线内气体,以备检修。另外还起到对管线阴极保护的作用。

清管站的任务是向下游输气干线内发送清管装置,或接收上游输气干线的清管装置。通过收发清管装置,来清除输气管线内的积水污物,提高输气干线的输气能力。

天然气管输系统是一个整体,一处发生问题,将影响全局,牵一发而动全身。因此,作为管道运行管理单位,应认真履行职责,加强维护保养,按规程操作,严格管理,以保证管线安全平稳输供气。因此,在输气中应遵守以下原则:

- 1) 掌握气(油)田生产规律,保证气(油)田的平稳生产;
- 2) 掌握用气规律,合理配气。利用长距离输气管线容积大的有利条件,在用气低谷时储气,高峰时补充;
- 3) 掌握用户用气季节性高低峰规律,在低谷季节,动员常年性平稳用气的用户(如化肥、电厂等)适当多用气,在高峰时限量供应;
- 4) 掌握管道的腐蚀情况和运行状况,保证管道安全生产,提高管道输送能力;
- 5) 做好突发事故情况下的气量调节工作;
- 6) 输气管线整改最好安排在净化厂或用户停气检修时进行;
- 7) 坚持二十四小时调度值班生产,及时收集并掌握天然气压力、气量、温度参数的变化情况及有关

单位的工作情况,以调配气量。

## (2)输气工艺设计

输气工艺设计必须在掌握大量有关资料的基础上进行,这些资料包括:(1)气温情况,即气温的地理位置、气量、气质、天然气组分、压力以及近、远期发展规划;还应了解气温周围地区资源情况和沿线经过地区有无进气可能,以及气温的分年度开发方案;(2)沿线自然条件包括沿线地形地貌、交通条件、水电供应条件、气象资料、工程地质、水文地质资料及沿线工农业发展现状和城镇发展规划;(3)用户情况和要求,包括供气的主要对象、用途、用气波动规律;用户对气质、气压及储气调峰的措施和要求;城市用气发展规划,有无其他补充气温;城市管网压力等级;储配站设置等。

当输送不符合管输气质量标准的气体时,应在工艺设计中采取相应的措施加以保护;但供给城镇作城市燃料气源的天然气,从安全和环保的角度,硫化氢含量不允许超标。

由于气源和用户的负荷变化、气温变化以及管线系统的维修、事故、清管等原因,不可能始终是满负荷运行,因此确定管道的输送能力时,应留有 9~10%的裕量。当用户有特殊要求时,应按用户要求设计。

当供气城市还有补充气源时,干线末站的气体参数和站的设置应互相协调一致,以便发挥各自最大效能和优势。

输气管的工艺设计除满足正常输气的工艺要求外,还应考虑各种变工况运行的可能情况及快速有效的事故处理对策。以便把事故的损失和影响降到最低限度。

输气管道的工艺设计是根据任务要求和气源条件进行多方案比较的过程,首先是是否增压的问题。在增压输送的情况下,管径、压比、输气压力等之间存在某种函数关系,选取最佳参数进行计算和比较,根据以往经验和国外情况,输距在 500Km 内,气源压力在 4.0MPa 以上时,可不考虑增压。

输气工艺设计通常包括以下内容:

- (1)确定输气干线总流程和各站分流程;
- (2)合理选择各站的进出口参数;
- (3)确定各种站场的数量和站间距;
- (4)确定输气管的管径和壁厚。

在有压气站时还要确定最高输气压力和站压比;在确定输送压力时应充分利用气源的地层能量。

### 1.2.3 输气干线基本技术指标

干线输气管是整个输气系统重要组成部分之一。干线输气的参数必然受到气源供气和城市消费两者的约束。它的参数选择、设计与管理不可能与整个输气系统完全脱节与分离,只能而且应该作为整个系统的优化设计与管理的一个组成部分。但是当干线输气管与输气系统的其它部分相互联系参数(如输气量、首站进站压力、终点配气站的最低压力和配气员等)确定之后,它又可以作为一个独立的环节进行工艺设计。反过来,独立进行的干线输气管设计所获得的参数与指标,又可作



为整个输气系统优化设计的内容之一,参与输气系统的整体方案的确定。

干线输气管与输气系统其它部分相联的参数确定之后,进行工艺设计的两个主要内容:干线输气管的优参数选择与压气站布置。这两者是互相渗透的,有了参数才能布站,而压气站布置又往往为选择参数提供比较方案。实质上是在一定的参数数值下解决管线与压气站的匹配问题,它的计算结果理论上就是运行工况的再现。

#### 1.2.4 输气管线的调峰及调度方法

城市的用气量随时间而变化,每月、每日和每时不相同,而气源供气一般变化不大,尤其是长距离气管求得最高的效率和最好的经济效益:总希望在最佳输量下工作,供气和用气经常发生不平衡。时而供大于用,时而又转为用大于供。为了保证按用户要求供气,必须解决供气与用气的不平衡问题,解决供气与用气之间不平衡问题的途径。

(1)随首用气量的变化及时调节气源的供气能力或者设置机动气源:

(2)利用一些大型工业企业,加热电站等作为城市用气的缓冲用户,气体多余时用气,少时让它改用其它燃料:

以上两点必然受气源和用户某种条件的限调,不可能完全解决不平衡问题。

(3)设置备用储气设施。

解决月(季度)、日或小时的不均可采用不同的储气方法:如地下储气,气罐储气,液态或固储气,输气管道末段储气等。

#### 1.2.5 输气管道水合物的堵塞原因及处理

在天然气的集输过程中,在一定的温度、压力等条件下,天然气中的饱和水可能在管道和站场装置中冷凝、积累而生成水合物。天然气水合物(Gas Hydrate)是由碳氢化合物和水组成的白色结晶体,它们的外观像雪或者松散的冰,在气体水合物中,水分子之间通过氢键形成晶格,其他小的气体分子如甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、二氧化碳和硫化氢等充填在晶格之间的空隙里,在范德华力的作用下被包围在晶格中。在天然气长输过程中,因地形起伏导致凹处管线积液、形成局部节流,加剧了天然气水合物的形成。水合物的形成不仅可能导致管线堵塞,也可造成分离设备和仪表的堵塞,因此在天然气输送过程中,对水合物生成温度和压力的预测、管线中水合物生成位置的确定以及水合物防治的研究是很有必要的。

处理措施:

(1)清管,破坏生成水合物的水分条件;

(2)从源头上保证进入管线的天然气水分合乎标准。

如下图 2-2 为天然气输送首站的典型工艺流程图,首站的主要任务是接受油气田来气,对天然气中所含的杂质和水进行分离,对天然气进行计量,发送清管器及对输气干线中的天然气进行放空等。另外,如需要增压,一般首站还需要增加增压设备:

首站的工艺流程主要有:

(1)正常流程:油田来气、分离器分离、计量、增压、出站;

(2)越站流程:油田来气直接经越站阀后出站,此流程一般是在故障或检修状态下进行。

#### 1.2.6 原油和成品油管道输送工艺

输油管道由管路与若干个输油站组成。输油站提供能量使管路中的油向前流动、输送低粘、低凝固点原油和轻质成品油的长输管道,沿线不需加热,管内油温一般接近管线埋深处地温。这种输

油管道称为等温输油管道或常温输油管道。

#### (1)等温输送工艺

等温输油管道消耗的能量主要是压力能,它用于克服管路的摩阻损失和起终点的高差。一般用液柱高度来表示,即

$$H=h+Z_2+Z_1$$

(1-1)

式中  $H$  - 管路消耗的压力能,  $m$

$h$  - 管路的降阻损失,  $m$ ;

$Z_2$  管路终点的高程,  $m$ ;

$Z_1$  管路起点的高程,  $m$

管路的摩阻损失就是油品沿管道流动时产生的摩擦及撞击阻力,它分为沿程摩阻损失和局部摩阻损失两类。

#### (2)加热输送工艺

易凝、高粘原油、燃料油和润滑油等,在常温时粘度很大,流动性差,有的甚至凝固。如果不采取降凝、降粘措施,直接在环境温度下用管道输送这类油品,一般非常困难,或者很不经济。

目前最常用的办法是加热输送、使易凝油品的温度保持在凝固点以下;使高粘油品因温度升高而粘度变小,减少摩阻损失。

加热输送的特点是:在输送油品的过程中,既存在摩阻损失,又存在热能损失。因此,必须从这两个方面给油品提供能量。即泵站提供压力能,使油品流动。加热站提供热能,使油品温度升高。摩阻损失与热能损失又是相互制约的,如果油品的加热温度高,其粘度就低。因而摩阻损失小、但热能损失大。反之,油品的加热温度低,其粘度就高,因而摩阻损失大,但热能损失小。怎样正确处理好这个矛盾,选择经济的加热输送方案是加热输送工艺所要解决的问题。加热输送的方法有直接加热和间接加热两种。

直接加热就是用加热炉直接给油品加热。油品直接流过加热炉膛内的管道,使油品被炉膛中的火焰加热。一般长输管道每隔几十公里建一个加热站,每站安装若干台加热炉,国外近年兴起的电热法也是直接加热,它是让电流通过一段待制的工艺管道,油品流过这段管道时被加热,或者把电热元件直接放置在油品中加热。直接加热法的特点是热效率高,而且容易在较大的范围内调节温度。

间接加热是热源先加热的载体,载体再通过一定的装置去加热油品。例如用热煤炉先加热一种性质稳定的有机液体(即通常所说的“热媒”),有机液体再通过热交换器把热量传递给油品;又如锅炉使处理过的水变成蒸汽,蒸汽通过伴热管线把热量传递给油品。间接加热较直接加热安全可靠。

### 1.2.7 管道的输送方式

#### (1)管道的输送方式

##### ①“旁接油罐”输送方式

前一站接过来的管道在与下站输油泵连接的同时,还与一储油罐旁接。这种输送方式“旁

接油罐”输送方式。如图 1-3 所示。

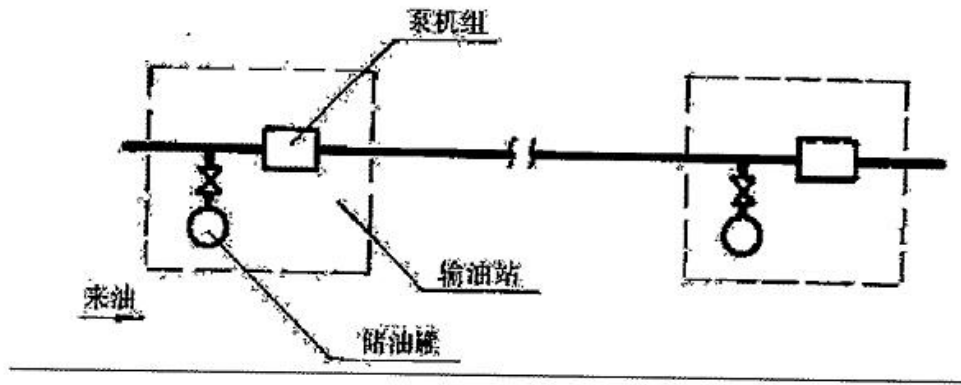


图 1.3 “旁接油罐”输送方式示意图

该输送方式可使上站来油同时进入输油泵和油罐。当相邻输油站的输量与本站不一样时，油罐起调节作用，即上站来油多于本站输量，多余部分进罐；上站来油少于本站输量，不足部分由罐内的存油补充；当上站来油与本站的输相等时，则罐内油量不变。

“旁接油罐”输送方式，将每个输油站和下一站间的管道组成一个独立的水力系统。给全线输量调节和事故处理带来一定的灵活性。其特点是：各输油站的输量可以不一致；各输油站出站压力互相没有直接影响。所以，短期内（因油罐储量有限）输油站调整运行参数时，不会影响其他各站。但这种输油方式存在在工艺流程较复杂、设备较多、流程不密闭而能量损失多、油品蒸发损耗较大等问题。

## (2) 密闭输送方式

密闭输送方式也称为“从泵到泵”输送方式。即前一站接过来的管道直接与下站输油泵相连。中间没有起调节作用的油罐，全线各站的泵机组直接串联工作。整个管路形成一个密闭的水力系统。如图 1-4 所示。出于密闭输送，能量得到充分别用，油品损耗大大减少，工艺流程也较简单。因此，它是国外普遍采用的输送方式。

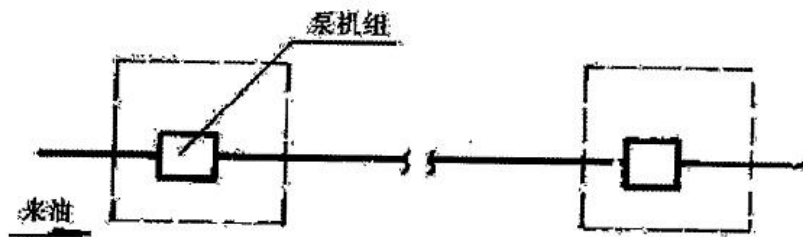


图 1.4 密闭输送方式示意图

因为密闭输送是各站的泵机组串联工作，所以各站的工作参数（压力、流量等）由全线总的泵站特性和总的管道特性所决定。

## (2) 顺序输送

在同一条管道内、按一定的顺序，连续地以直接接触或间接接触的方式输送几种油品，这种输送方法称为顺序输送，或称交替输送。

炼油厂（或大型油库）的各种石油产品（如汽油、煤油、柴油等），目前主要通过车运、船运等输送



方式外运, 供应用户。如果每种油品单独敷设一条输油管道, 不仅投资增加。且由于管径较小以致输油成本上升, 所以是不经济的。而采用顺序输送的方法, 把流向相同的几种油品沿一条管道输送到转运油库或用户, 则能获得较好的经济效益。其主要的优点是:

①成品油可以从产地(炼油厂)直接送到消费中心和主要用户, 大大减少了转运环节。运输的均衡件很强, 灵活性也较大。

②所消耗的动力、人力均低于任何其它运输方式。在合理的经济运量条件下, 能耗约为铁路运输的 20%~40%, 人力仅需 50%, 因而运输成本也可相应降低。

③密闭输送, 减少蒸发损耗, 降低了油品损耗率, 而且安全性高, 不污染环境。

④可以适应比较复杂的地形环境与气候条件。

顺序输送也存在不足之处。在顺序输送管道中, 两种油品交替时, 在接触面上将形成一段混油。这段混油不符合产品的质量指标, 不能直接进入终点站的纯净油品储罐内, 而需要设置专门的混油罐, 以接收管道内形式的混油。这些混油可重新加工, 或掺入纯净油罐内调制, 或降级使用。

### (一) 输油站

输油站包括生产区和生活区两部分, 生产区内又分主要作业区和辅助作业区。

输油泵站主要作业区内包括:

(1) 输油泵房: 它是全站的核心。泵房内主要是泵机组, 以及与其配套的辅助设施

(2) 总阀组(室): 内阀门和管汇组成, 是全站改换输油工艺流程的操作中枢:

(3) 清管器(或隔离球)收发装置: 一般首站设发放装置, 中间站设收、发装置。而末站设接收装置, 它们可单独设置也可设置于总阀组(室)内:

(4) 油罐区: 首, 末站油罐多, 容量大, 作计量和储存之用, 中间泵站一般只有一个小容量油罐, 作为缓冲(“旁接油罐”流程)或处理事故(密闭输送流程)之用;

(5) 计量间: 设有流量计和标定装置;

(6) 加热输送的输油站中, 设有给油品加热的加热炉或换热器。

辅助作业区内包括:

(1) 供电系统: 主要有变电所、配电间等, 并有两个独立电源, 有的中间泵站采用单电源, 并有自设的发电间作为备用电源;

(2) 供水系统: 包括水源、水泵房、供水管网、水塔、蓄水池及软化水装置等, 供生产、生活和消防之用;

(3) 供热系统: 包括锅炉房、燃料油罐、热力管网等;

(4) 排污及净化系统: 包括污油回收管网、油水分离池(隔油池)、污油泵房、污油罐及含油污水处理装置等;

(5) 通信系统: 包括通信站、电信电源、通信线路等;

(6) 消防设施及消防管网;

(7) 阴极保护间;



(8) 机修间、油品化验室、车库、材料库及办公室等。

主要作业区的设施，由工艺管线相互连通，组成整体，协同完成输油任务。

辅助作业系统的任务是为了保证主要作业，特别是泵机组的正常运行。因此，所有设施必须以泵房为核心，合理布局，组成有机的整体。

YHEASTS

## 1.3 长输(油气)管道的腐蚀与缺陷

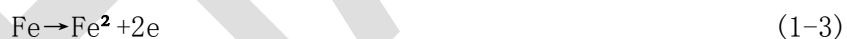
### 1.3.1 长输(油气)管道外腐蚀

管道在土壤中的外腐蚀大部分属于电化学腐蚀。大多数管道在土壤中的腐蚀是氧的去极化腐蚀,只有在强酸性土壤中,才发生氢去极化型的腐蚀。从整个腐蚀反应来说,无论是化学腐蚀或是电化学腐蚀都是金属的价态升高而介质中某一物质中的元素的价态降低的反应,也即,都是氧化还原反应,不过在电化学腐蚀过程中,这种氧化还原反应是通过阳极反应(氧化反应)和阴极反应(还原反应)同时而分别地进行的。这种情况酷似将化学能直接转变为电能的原电池。在原电池中进行的总的反应也是氧化还原反应,氧化反应在阳极(在原电池的插入端称为负极)上进行;还原反应在阴极(在原电池的输出端称为正极)上进行。电化学腐蚀的情况与此类似,但金属本身起着将原电池的负极和正极短路的作用。因此一个电化学腐蚀体系(金属+腐蚀介质)可以看作是一个短路的原电池。这一短路原电池的阳极反应使金属材料破坏,但由于金属本身已起着短路作用,不能输出电能,腐蚀体系中进行的氧化还原反应的化学能全部以热能的形式散失。我们把这种导致金属材料破坏的短路原电池称为腐蚀电池。

依靠腐蚀原电流的作用而进行的腐蚀过程叫做电化学腐蚀。电化学腐蚀是腐蚀原电池电极反应的结果。土壤中的腐蚀基本上可归结为电化学腐蚀。化学腐蚀仅指化学反应中各化学元素的化合价保持不变的腐蚀,即没有元素被氧化或还原。电化学腐蚀是一种电化学反应过程,在这一过程中至少一种元素的化合价发生变化。例如  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ; 沉淀物的生成是一种纯化学反应:



在这一反应中各元素的化合价没有发生变化;  $\text{Fe}^{2+}$  离子和  $\text{OH}^-$  离子始终是二价,  $\text{H}^+$  离子是一价,但产生铁例子的过程是电化学反应,通过把原子态的  $\text{Fe}$  氧化产生:



为了使上述反应能够发生,产生的 2 个电子必须在另一个还原反应中消耗掉。



如果把上述 (1-3)、(1-4) 氧化反应和还原反应距离很近,因式 (1-1) 的化学反应可以在钢材表面生成一层覆盖物。因此化学反应和电化学反应有时是紧密联系在一起。

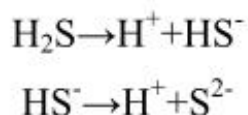
腐蚀产生需要 4 个必要条件: ①阳极(金属发生氧化反应); ②阴极(发生还原反应,另一种化学物种消失); ③两个反应电极之间的电解质通道; ④两个反应电极之间的电子通道。

### 1.3.2 长输(油气)管道内腐蚀

#### (1) $\text{H}_2\text{S}$ 腐蚀

现在已普遍认同硫化氢对钢具有极强的腐蚀性;而且它还是一种很强的渗氢介质。但是关于硫化氢渗氢的机制、氢在钢中的存在状态、运行过程及氢脆本质至今还看法不一。硫化氢电化学腐蚀过程。与  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  相比,  $\text{H}_2\text{S}$  在水中的溶解度最高。 $\text{H}_2\text{S}$  一旦溶于水便立即呈酸性。

硫化氢在水中离解:



阳极反应:  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$

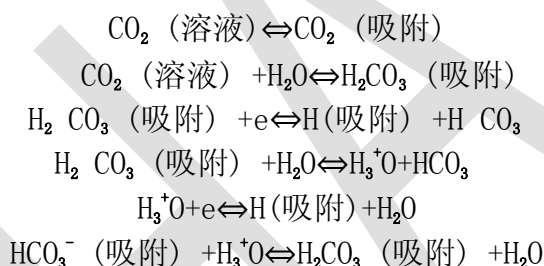
阴极反应:  $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$

$\text{H}_2\text{S}$  离解产物  $\text{HS}^-$ 、 $\text{S}^{2-}$  吸附在金属的表面, 形成加速的吸附复合物离子  $\text{Fe}(\text{HS})^-$ 。吸附的  $\text{HS}^-$ 、 $\text{S}^{2-}$  使金属的电位移向负值, 促进阴极放氢的加速, 而氢原子为强去极化剂, 易在阴极得到电子, 同时使铁原子间金属键的强度大大削弱, 进一步促进阳极溶解反应而使钢铁腐蚀。

氢在钢中的存在状态而导致钢基体开裂的过程, 至今还尚无统一的定论。但普遍认为, 萌生裂纹的部位必须富集足够的氢。钢材的缺陷处(晶界、相界)、位错、三维应力区等, 这些缺陷与氢的结合能力很强, 可将氢捕捉, 这些缺陷处便成为氢的富集区。通常把这些缺陷叫陷阱。当氢在金属内部陷阱富集到一定程度, 便会沉淀出氢气。据估算这种氢气的强度可达 300MPa, 于是促进钢材的脆化, 局部区域发生塑性变形, 萌生裂纹导致开裂。

## 二、 $\text{CO}_2$ 腐蚀

$\text{CO}_2$  对碳钢的腐蚀是一个不可低估的因素。钢铁在含  $\text{CO}_2$  水溶液的溶解过程中有两个不同的还原过程, 其一是  $\text{HCO}_3^-$  直接还原析出氢。其二是金属表面的  $\text{HCO}_3^-$  离子浓度极低时,  $\text{H}_2\text{O}$  被还原析出氢。 $\text{CO}_2$  的腐蚀机理如下:



腐蚀开始时, 金属表面早已形成结合力较强的  $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ , 该膜可发生变化:  $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2 + \text{Fe} \rightarrow 2\text{FeCO}_3 + \text{H}_2 \uparrow$ , 从而形成和金属基体结合力较差的  $\text{FeCO}_3$  膜。该转化过程中,  $\text{FeCO}_3$  的体积较  $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$  的体积小, 转化过程中体积收缩, 形成微孔的保护性较差的  $\text{FeCO}_3$  膜, 因而引发碳钢的腐蚀(主要为点蚀)。所以, 虽然碳钢在较宽的 pH 值范围内、在饱和的  $\text{CO}_2$  盐溶液中可形成一层牢固的  $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$  膜, 该膜对碳钢有一定的保护作用, 但随着时间的延长,  $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$  会逐渐转化为与金属结合力较差的  $\text{FeCO}_3$ , 而失去保护作用。钢铁表面覆盖的不同产物的区域和不同腐蚀产物的边界处可能因为电偶作用而导致局部腐蚀。

$\text{CO}_2$  引起应力腐蚀开裂问题, 目前观点还不统一。其中 Schmitt 等人认为  $\text{CO}_2$  对氢原子渗入钢起了促进作用。因为在 pH 值相同的条件下,  $\text{CO}_2$  饱和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液的渗氢电流密度为  $4.7\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$  而无  $\text{CO}_2$  的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液的渗氢电流密度为  $2.2\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

在油田生产中, 常常用诺漠图来确定在集输油温度下油气集输系统所允许的  $\text{CO}_2$  浓度值。

### (4) 多相流腐蚀

多相流按其腐蚀环境有以下几种类型: 清洁环境(无固体、无腐蚀): 冲蚀环境(固体(沙)存在、

无腐蚀): 腐蚀环境(无沙、有腐蚀): 冲蚀和腐蚀运行(固体和腐蚀介质都存在). 流动形态对腐蚀也有很大的影响。而流态与许多因素有关, 如流速、流体粘度、介质组成及含量、管子倾角等。对于油田油、气、水多相流, 按流态可分为分层流、波状流、段塞流、环状流和环雾流等类型。在低的气、液(相)速度下, 常出现平滑的或波状的层状流, 特别是在水平和稍微倾斜的管流中, 由于重力的作用, 相态趋于分层, 水层常出现在管底, 而油流在其上; 当气相速度低而液相速度较高时, 会产生段塞流; 当气相速度较高时, 会观察到段塞流——一种间歇流态。在段塞流的前面形成一个夹带着气体的高紊流混合区。研究表明, 在各种多相流型态中, 段塞流对管道腐蚀最严重。这是由于高速紊流造成管壁出现很高的剪应力, 在流体冲刷和剪切的作用下, 管壁表面膜(缓蚀剂膜和腐蚀沉积物)被损坏剥落, 加剧了腐蚀及冲蚀效应, 使腐蚀显著增大。

在分层流和环雾流型中, 管道顶部会有凝析水生成而引起结露腐蚀。1991 年, 由 A. Dugstad 和 Lunde 在 1991 年完成的研究中采用了环道和高压釜两种实验系统, 分别测量了  $\text{CO}_2$  气体在流动和静止两种条件下的结露腐蚀数据。结果表明: ①由凝析水所引起的结露腐蚀速度比含水的  $\text{CO}_2$  气体的腐蚀速度小; ②温度高于  $60^\circ\text{C}$  或凝析速度中等或较低时, 可形成保护膜减缓结露腐蚀速度; ③在气体温度较低时, 所形成的保护膜是多孔的, 几乎无保护作用; ④腐蚀速度随气体和钢管壁的温差增大而增大; ⑤多数缓蚀剂的挥发性差, 只溶于混输管道的水相, 不能够显著降低结露腐蚀的速度。

### 1.3.3 长输(油气)管道应力腐蚀

国内外资料量示, 油气输送管道内外表面均可能发生应力腐蚀开裂, 由于腐蚀环境不同, 发生应力腐蚀开裂的形式是各不相同的。管道内表面由于油气中含有硫化氢、二氧化碳、氯离子、水等多种腐蚀介质, 其腐蚀开裂主要是  $\text{H}_2\text{S}$  等介质引起的氢致开裂(HIC)或硫化物应力腐蚀开裂(SSCC)。在管道外表面, 应力腐蚀开裂主要和土壤溶液中的碳酸盐浓聚有关, 它存在两种形式: 高 pH SCC 和近中性 pH SCC, 这里的 pH 值不是指土壤的酸碱度, 而是遭到腐蚀的管体表面接触环境的 pH 值。高 pH SCC 是最早发现的管道外表面应力腐蚀开裂形式, 对它的研究已有 40 余年的历史, 目前它仍是报道最多的一种土壤应力腐蚀开裂形式。近中性 pH SCC 是 1985 年在加拿大东部安大略省北区的管线发生的 SCC 失效事故中才首次发现的, 此类型的 SCC 特征与以前在世界上其他管线上发现的高 pH SCC 不同, 当时被称为低 pH SCC, 后来改为更确切的近中性 pH SCC。此后国外纷纷报道了管道在近中性土壤环境中的应力腐蚀开裂问题。由于内表面应力腐蚀开裂频率和范围都比外表面高, 管道内表面应力腐蚀开裂一直以来都是防止管进开裂的重点研究内容、二十世纪 60 年代开始, 随着管道外表面应力腐蚀开裂事故开始凸现, 管道外表山应力腐蚀开裂才逐渐成为管道应力腐蚀开裂的关注领域。

#### (1)应力腐蚀的生成条件

应力腐蚀的发生, 必须同时满足以下三个条件, 如图 1.5 所示:



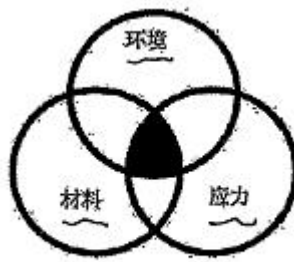


图 1.5 应力腐蚀形成条件

## 1) 超过门槛值的拉伸应力

产生应力腐蚀的有效应力是拉伸应力，而压应力不但不会导致应力腐蚀而且会减轻和阻止应力腐蚀。拉应力的来源有工程应力、残余应力、装配应力和腐蚀产物的楔入应力等。对于腐蚀来讲，焊接残留应力最主要，由此所引起事故占应力腐蚀破裂事故总数的 80% 以上、故焊接完毕后一般应进行消除应力的热处理。

对大多数体系，增加应力水平则破裂时间缩短，多数合金都有一个临界应力  $\sigma_f$  和临界应力强度  $K_{Iscc}$ ，低于该值时，在所规定的时间内不发生断裂，

## 2) 材料成分和组织容易遭受应力腐蚀)

高纯金属难以发生应力腐破裂，而几乎所有金属的合金，在特定腐蚀介质中均能产生应力腐蚀破裂、碳钢中增加碳含量，可使应力腐蚀的敏感性增加，含碳量为 0.12% 左右时，敏感性最大，再增加碳含量时，敏感性又反而下降、不锈钢中加入适量的 Ni、Al、Si 有利于提高钢的抗应力腐蚀性能。另外合金成分相同，加工处理不同、组织结构不同，破裂敏感性可产生很大的差别。可见冶金因素影响的复杂性。

## 3) 倾向于产生裂纹的腐蚀环境，

环境对应力腐蚀的影响很复杂，且对不同腐蚀体系的影响也不同，不同材料产生应力腐蚀的腐蚀体系的组合见表 7-2、奥氏体不锈钢在中性氧化物介质中，只有当氧含量超过  $10^{-6}$  时才会发生应力腐蚀破裂。而在酸性氯化物(如  $MgCl_2$  溶液)中，溶解氧不一定是必须的，主要是  $Cl^-$  起作用，一般说来，腐蚀剂的浓度越高，应力腐蚀越严重，

不同金属在一定介质中，引起应力腐蚀所需温度不同。镁合金通常在常温下便产生应力腐蚀破裂，而碳钢需在沸腾温度的介质中才发生破裂。通常，应力腐蚀破裂随介质温度的升高而加剧，不过金属在破裂前都有一个最小温度，亦称临界温度，只有高于此值，材料才会破裂，低于此值，材料不会发生破裂。

表 4 产生应力腐蚀的材料和介质的组合

金属或合金	腐蚀介质
碳钢和低合金钢	NaOH 溶液, NaOH+ $Na_2SiO_3$ 溶液, $NO_3$ 溶液, HCN 溶液, 乙酸, 浓硝酸, 混酸(硝酸+硫酸), $H_2S$ 水溶液, $Na_3PO_4$ 溶液, 液氨(水<0.2%), 海滨大气, 工业大气
奥氏体不锈钢	氯化物水溶液, 海水, 高温高压蒸馏水, ( $NaCl + H_2O_2$ ) 水溶液, ( $Na_2CO_3 + 0.1\%NaCl$ ) 水溶液, 浓缩锅炉给水, $H_2S$ 水溶液, 明矾水溶液, 连多硫酸水溶液



## 第一部分 长输(油气)管道基础知识

铁素体铬不锈钢	海水, $\text{MgCl}_2$ , $\text{NaCl}$ , $\text{NaOH}$ , $\text{NH}_3$ , $\text{H}_2\text{S}$ 水溶液, 硝酸, 硫酸, 高温高压水, 高温碱
铜和铜合金镍和镍合金蒙乃尔因康镍 (inconel)	氨, 水蒸气, 氨蒸气, 胺的水溶液, 汞盐溶液, 含 $\text{SO}_2$ 的大气 熔融 $\text{NaOH}$ , $\text{NaOH}$ 水溶液, 水蒸气( $>430^\circ\text{C}$ ) 氢氟酸, 氟硅酸溶液, 有机氯化物, 沸腾 75% $\text{NaOH}$ 溶液, 水蒸气( $>430^\circ\text{C}$ ) $\text{NaOH}$ 水溶液( $260\sim 420^\circ\text{C}$ ), 浓缩锅炉水( $260\sim 420^\circ\text{C}$ ), 水蒸气+ $\text{SO}_2$ , 浓 $\text{Na}_2\text{S}$ , 水溶液
铝合金	熔融 $\text{NaCl}$ , $\text{NaCl}$ 水溶液, 海水, 水蒸气, 含 $\text{SO}_2$ 的大气
钛及钛合金	红色硝酸, 盐酸, 熔融 $\text{NaCl}$ , 有机酸, 海水, 食盐水, 熔融 $\text{N}_2\text{O}_4$ , 三氯代, 乙烯
铅	$\text{Pb}(\text{Ac})_2$ 溶液, $[\text{Pb}(\text{Ac})_2+\text{HNO}_3]$ 水溶液, 土壤, 空气

## (2)高 pH 值和中性 pH 值下的应力腐蚀

### ①高 pH 值下的应力腐蚀

当钢管图层破损导致管体暴露于周围腐蚀环境时, 容易遭受腐蚀。因为土壤腐蚀是点化学腐蚀, 通常采用阴极保护系统减缓管线的腐蚀。研究发现在高 pH 值环境下, 高浓度的  $\text{CO}_3\text{-HCO}_3$  溶液十分容易导致应力腐蚀。这种溶液是由阴极保护系统的阴极反应产生  $\text{OH}^-$  和土壤中有有机物腐烂生成的  $\text{CO}_2$  发生反应而生成的。阴极反应导致涂层剥离处 pH 值提高, 从而生成  $\text{CO}_3\text{-HCO}_3$  溶液。该电解液的 pH 值由  $\text{CO}_3\text{-HCO}_3$  的浓度确定, 通常发生开裂时 pH 值在 8-11 之间。

管体开裂表面裂纹开口处通常呈黑色, 主要由没有光泽的氧化物 (磁铁矿) 组成。如果在裂纹表面有几处呈指甲盖形状的黑色缺陷, 通常预示裂纹由应力腐蚀产生, 见图 1.6。

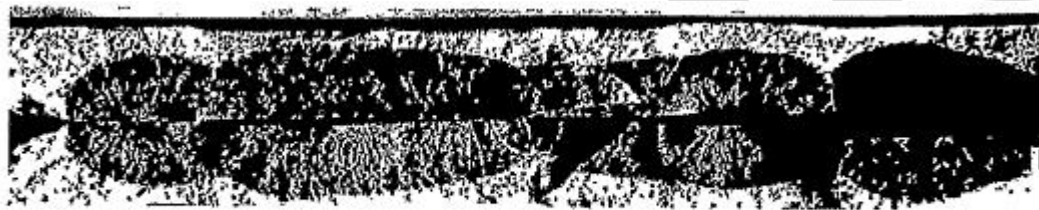


图 1.6 高 pH 值下的应力腐蚀裂纹

在涂层剥离处或裂纹处收集液滴, 进行分析发生 pH 值在 8-9 之间, 或者更高。在显微镜下对裂纹进行金相检查发现开裂位置位于晶界上, 并且这些裂纹还有小分支, 如图 7-10 所示。利用标本在实验室模拟表明这种形式的 SCC 具有温度敏感性, 超过  $38^\circ\text{C}$  时随着温度的升高发生应力腐蚀开裂的倾向逐渐增加。因此当压缩机出口处操作温度达到  $66^\circ\text{C}$  时, 极有可能发生应力腐蚀。

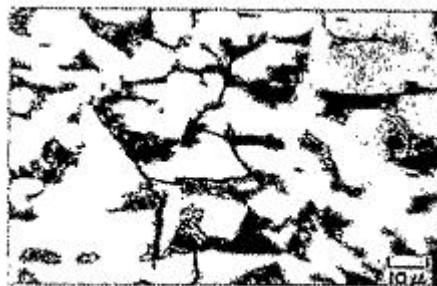


图 1.7 晶间裂纹

### ②pH 值接近中性时的应力腐蚀

最早有记录的近中性 pH 值的应力腐蚀发生在上世纪 80 年代一条加拿大的埋地管线上。在检查缠绕防腐层胶带的褶皱上残存的液滴时, 发现 pH 值在 5.5 到 7.5 之间。裂纹的腐蚀环境是溶解  $\text{CO}_2$  的地下水, 土壤中有有机物的腐烂和地质化学反应通常产生  $\text{CO}_2$ 。产生这种类型的裂纹时, 通常由于涂层的屏蔽作用或者土壤电阻率很高, 或者阴极保护系统无效, 阴极保护电流长期不能到达管体表面。通常 SCC 从产生均匀腐蚀或者腐蚀麻坑的管体外表面开始产生, 此时肉眼可以观察到; 但是有时并非如此, 肉眼很难发现。pH 值接近中性的管体金相检查表明, 裂纹为穿晶开裂为主 (图 1.8), 并且比高 pH 值情况下更宽。即裂纹开口处已经由于腐蚀产生了金属损失。这种形态的裂纹通常意味着开裂机理复杂; 然而肉眼观察的裂纹形状与高 pH 下的相似。





图 3-11 管线上的穿晶裂纹

上述两种形态的裂纹有许多相似之处。他们都由许多平行裂纹组成，裂纹发生在管体外表面并且方向与最大应力方向一致。他们通常沿深度和长度方向扩展，多个裂纹合并在一起形成更长的裂纹。当这些裂纹的深度和长度达到一定的临界值时管体发生破裂。也有可能在裂纹的长度还没有达到临界值之前，裂纹深度穿透管体从而产生泄漏。请注意应力腐蚀发生破裂并不需要临界尺寸穿透整个管壁，有时候虽然裂纹很浅，但是长度方向达到临界尺寸也会发生破裂。

表 5 高 pH 值和中等 pH 值下 SCC 的特征

因素	中等 pH 值下 SCC	高 pH 值下 SCC (普遍)
位置	65%发生在压缩机站和下游第一个切断阀之间 (通常 16~30km) ; 12%发生在下游第一个阀门和第二个阀门之间; 5%发生在下游第二个阀门和第三个阀门之间; 18%发生在下游第三个阀门之后; SCC 的发生与特定的土壤有关, 通常干湿交替的土壤, 以及倾向于与涂层剥离或损坏涂层的土壤易发生 SCC	通常在泵或压缩机的下游 20km 内; 随着离压缩机/泵距离的增加和温度的降低, SCC 失效的数量明显下降; SCC 的发生与特定的土壤有关, 通常干湿交替的土壤, 以及倾向于与涂层剥离或损坏涂层的土壤易发生 SCC
温度	与管体温度没有明显的关联; 似乎在较冷的天气内发生的频率增加, 因为此时 CO <sub>2</sub> 在地面的浓度增加	裂纹成长速度随着温度的升高呈指数增长
电解液	稀释的重碳酸盐溶液, pH 值在 5.5~7.5 之间	CO <sub>3</sub> HCO <sub>3</sub> 的浓溶液, pH 值大 9.3
化学电动势	自由腐蚀电动势: -760~790mV (CSE); 在发生 SCC 的地方阴极保护电流不能到达管体表面	-600~750mV (CSE); 阴保有效

第一部分 长输（油气）管道基础知识

裂纹路径和形貌	大部分是穿晶裂纹； 裂纹较宽，裂纹口部腐蚀较明显	大部分是晶间裂纹； 裂纹狭窄，无明显腐蚀迹象
---------	-----------------------------	---------------------------

③应力腐蚀裂纹的生长

裂纹的生长周期通常分为四个阶段，如图 1.9 所示。第一阶段聚集能量，形成开裂条件，接着条件成熟裂纹开始生成。接着裂纹继续扩展，同时在第三阶段还生成其他裂纹。最后，在第四阶段较大裂纹相互合并最终导致管体破裂失效。

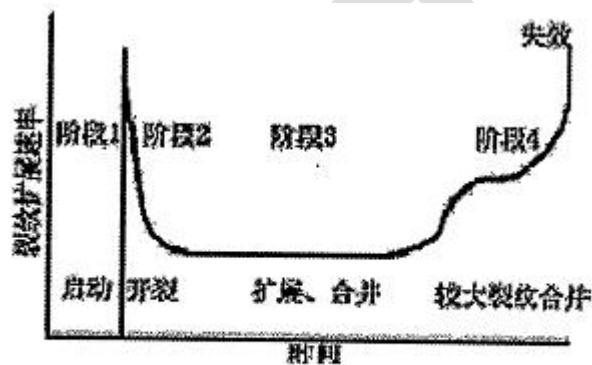


图 1.9 裂纹生长的 4 个阶段

## 1.4 长输（油气）管道运行使用及管理

### 1.4.1 安全生产管理基本原理概述

安全生产管理是管理者对安全生产工作进行的计划、组织、指挥、协调和控制的一系列活动，目的是保证在生产、经营活动中的人身安全与健康，以及财产安全，促进生产的发展，保持社会的稳定。

安全生产管理作为经济生活的一部分，是管理范畴的一个分支，也遵循管理的一般规律和基本原理、管理的基本原理有：系统原理、整分合原理、反馈原理、封闭原理、弹性原理、人本原理、能级原理、动力原理、激励原理等。系统原理和人本原理是属一级原理，其他原理均分别属于它们的二级原理。

#### (1) 系统原理

所谓系统是由若干相互作用又相互依赖的部分组合而成，具有特定功能，并处于一定环境中的有机整体，系统论的基本思想是整体性、相关性、目的性、阶层性、综合性、环境适应性。

#### (2) 整分合原理

整分合原理是现代高效率的管理必须在整体规划下明确分工，在分工基础上进行有效的综合。整体把握、科学分解、组织综合是整分合原理的主要含义。

#### (3) 反馈原理

反馈原理是控制论的一个非常重要的基本概念。反馈是把控制系统输出信号反送回来，对输入与输出信号进行比较，比较差值作为系统输入信号，再作用系统，对系统起到控制的作用。在现化管理中，灵敏、正确、有力的反馈对管理有着举足轻重的作用、实际管理工作是计划、实施、检查、处理，也就是决策、执行、反馈、再决策、再执行、再反馈的过程。

#### (4) 封闭原理

封闭原理是指任何一个系统内的管理手段必须构成一个连续封闭的回路，才能形成有效的管理运动。一个有效的现代管理系统，必须是一个封闭系统，而且为使系统运转状态优良，可以采用多级闭环反馈系统。

#### (5) 弹性原理

弹性原理是在系统外部环境和内部条件千变万化和形势下进行的，管理必须要有很强的适应性和灵活性，才能有效地实现动态管理。特别是在建立社会主义市场经济的今天管理工作更需要不断改革，以利于驾驭新形势，解决新问题，适应社会发展的需要，

#### (6) 人本原理

人本原理是管理以人为本，以调动人的积极性为根本。人既是管理的主体，同时又是管理的客体，其核心是如何调动人的积极性。隶属于人本原理的二级原理有，能级原理、动力原理和激励原理。

#### (7) 能级原理

能级原理是管理系统必须是由若干分别具有不同能级的不同层次有规律地组合而成。在实际管理中如决策层、执行层、操作层就体现能级原理。人所常说的人尽其才，各尽所能，责权利的统一等也都利用了能级原理。

## (8) 动力原理

动力原理是指管理要有强大的动力,要正确地运用动力,使管理运动持续而有效地进行下去。

## (9) 激励原理

激励原理就是用科学的手段,激发人的内在潜力,充分发挥人的积极性和创造性。

以上 9 种管理方面的原理,在现代化经济活动中经常要使用。无论管理者有意识或无意识利用这些管理原理,但有一点可以肯定,优秀的管理者都遵循了这些基本原理,在实际工作中都不断运用这些原理来分析和解决问题。

### 1.4.2 安全生产常用概念

#### (一) 安全生产管理制度

安全生产管理制度是根据我国安全生产方针及有关政策和法规制定的,是企业和职工在生产活动中共同遵守的安全行为的规范和准则。

安全生产管理制度是企业规章制度的职工重要组成部分,通过安全生产管理制度,可以把广大组织起来,围绕安全目标进行生产活动。

#### (二) 管生产必须管安全原则

这是指企业各级领导和广大职工在生产过程中必须坚持的一项原则。国家和企业的职责,就是要保护劳动者的安全与健康,保证财产和人民生命的安全,这是一,其次,企业的最优化目标是高产、低耗、优质、安全的统一,这是体现安全与生产的统一。

#### (三) 安全生产目标管理

安全生产目标管理是指企业根据自己的整体目标,在分析外部环境和内部条件的基础上,确定安全生产所要达到的目标,并采取措施去努力实现目标的活动过程。安全生产目标以千人负伤率、某万吨产品死亡率、尘毒作业点合格率、噪声作业点合格率及设备完好率等预期达到的目标值来表示。

推行安全生产目标管理体现“安全生产人人有责”的原则,使安全生产工作实现全员管理,而且有利于提高企业职工的安全素质。

安全生产目标管理的任务是制定目标,明确责任,落实措施,实行严格的考核奖惩,以激励全体参加全面、全员、全过程的安全生产管理,主动按照安全生产的目标和安全生产目标和安全生产责任制的要求,落实安全措施,消除人的不安全行为和物的不安全状态。

安全生产目标管理的特点是:强调安全生产管理的结果,一切决策以实现目标为准绳,依据相互衔接、相互制约的目标体系有组织地开展全体员工都参加的安全生产管理活动,并随生产经营活动而持久地进行下去,以此激发各级目标责任者为实现安全生产目标而自觉采取措施。

安全生产目标管理的基本内容包括目标体系的确立、目标的实施及目标成果的检查与考核,具体有以下几个方面:

①确定切实可行的目标值。采用科学的目标预测法,根据企业的需要和可能,采取系统分析方法,确定合适的目标值,并研究为此而应采取的措施和手段;

②根据安全决策和目标的要求,制定实施办法,做到有具体的保证措施,包括组织技术措施,明确完成程序和时间,承担责任的具体负责人,并签订有关合同,措施力求定量化,以便实施和考核;

③规定具体考核标准和奖惩办法。企业要认真贯彻执行《安全生产目标管理考核标准》。考核标准不仅要规定目标值,而且要把目标值分解为若干个具体要求加以考核;

④安全生产目标管理必须与安全生产责任制挂钩,层层负责,实行个人保班组、班组保工段、工段保车间、车间保全厂;

⑤安全生产目标管理必须与企业经营承包责任制挂钩,作为整个企业目标管理的一个重要组成部分。实行经理任期目标责任制、租凭制和各种经营承包制的单位负责人,应把安全生产目标管理实现与所受到的奖惩挂钩;

⑥企业与主管部门对安全生产目标管理计划的执行要定期进行检查和考核。

#### (一) 安全检查

安全检查是指国家安全生产检查部分、企业主管部门或企业自身对贯彻国家安全生产法律法规的情况、安全生产状况、劳动条件、事故隐患等所进行的检查。

安全生产检查的主要内容:思想认真、管理制度、劳动纪律、机电设备、安全卫生设施、个人防护用品使用、各种事故隐患等。

企业安全检查分定期检查、专业检查和季节性检查。定期检查是企业组织的定期全面安全检查。专业检查根据设备和季节特点进行专项的专业检查,如防火、防爆、防尘、防毒等。季节性检查如冬季防寒,夏季的防暑降温以及雨季的防汛、防雷检查等。

#### (二) 三同时

“三同时”是指凡新建、改建、扩建的基本建设项目(工程)、技术改造项目(工程)和引进的建设项目,其劳动安全卫生设施必须符合国家规定的标准,必须与主体工程同时设计、同时施工、同时投入生产和使用。

进行劳动安全卫生预评价的建设项目有以下 6 类:

- (1) 大中型和限额以上的建设项目;
- (2) 爆炸危险生产场所等级为特别危险场所和高度危险场所的建设项目;
- (3) 火灾危险生产场所等级为甲类的建设项目;
- (4) 大量生产或使用 I、II 级危害程度的职业性接触毒物的建设项目;
- (5) 大量生产或使用石棉粉料或含有 10% 以上游离二氧化硅粉料的建设项目;
- (6) 安全生产行政部门确认的其他危险、危害因素大的建设项目。

建设项目在编制设计文件时必须编制劳动安全卫生专篇,并应包括以下内容:

- (1) 设计依据;
- (2) 工程概述;
- (3) 建筑及场所布置;
- (4) 生产过程中职业危险、危害因素的分析;
- (5) 劳动安全卫生设计中采用的主要防范措施;
- (6) 劳动安全卫生机构设置及人员配备情况;
- (7) 专用投资概算;
- (8) 建设项目劳动卫生预评价的主要结论;
- (9) 预期效果及存在的问题与建议。



### （三）五同时

“五同时”指企业生产组织及领导者在计划、布置、检查、总结、评比生产的时候，同时计划、布置、检查、总结、评比安全工作。

“五同时”要求企业把安全生产工作落实到每一个生产组织管理环节中去。

“五同时”使得企业在管理生产的同时必须认真贯彻执行国家安全生产法规、法律法规，建立健全各种安全生产规章制度，如安全生产责任制、安全生产管理的有关制度、安全卫生技术规范、标准、技术措施，各工种安全操作规程等，配置安全管理机构和人员。

### （四）四不放过

“四不放过”事故原因没有查清不放过，责任追究不到位不放过，防范措施不落实不放过，职工群众没有受到教育不放过。

## 1.4.3 输油运行的安全要求

### （一）输油输送管线的特点

介质的特性：输油具有易燃易爆、已蒸发和易于聚集静电等特点，当气体与空气混合到一定的比例范围之内时，即形成可燃性气体，若遇明火（包括电火花）立即爆炸，从而造成极大的破坏。输油还有一定的毒性，如果大量泄露或不合理排放，将会造成中毒事件。

生产工艺：长距离输油管线由于输送量大、连续性强、线长、站多，而且输送的又是易燃易爆的气体，其危险性是很大的。

### （二）输油管线运行的安全要求

输油是易燃易爆物质，若空气中的浓度在爆炸极限范围内，遇火即爆炸，破坏性极大。当输油压力超过管道允许工作压力或因材质、焊接缺陷、腐蚀壁厚减薄等使其承压能力下降到输油压力以下，很容易产生爆管、泄露，高压气流从管道坡口中急剧冲出，撕裂管道，破坏设备，往往就会发生爆炸，造成人员伤亡和重大火灾。

当输油管道穿过人口较稠密地区或靠近一些有货源的重要设施时，若输有泄漏，极易爆炸起火，损失重大。在荒野山区，管道一旦爆炸起火，往往因火势迅猛，同时受到消防力量不足等条件的限制，灭火非常困难，抢修机具也无法到达事故现场。输油管道的事故不但给输油系统造成破坏，危及工作人员和附近地区群众的生命财产安全，还会造成环境污染，还由于突然停止供气，使用气的工矿企业停工停产，造成很大的间接影响和损失。因此，在输油的输送中应做到：

#### （1）防火

在危险场所应严格控制货源：

- ① 在危险场所应设置防火安全装置、自动报警系统；
- ② 采用与生产性质相适应的耐火建筑等级；
- ③ 采用能够限制火焰发展规模的技术措施；
- ④ 严防生产设备的“跑、冒、滴、漏”
- ⑤ 组织训练消防队伍，建立健全防火与消防的组织机构；

⑥ 配备相应的消防器材、

(2) 防爆

① 防止爆炸性混合气体的形成:

② 在有爆炸危险的场所, 严格控制火源的进入:

③ 一旦燃爆发生就及时泄出压力、使之转化为单纯的燃烧, 以减少其危害:

④ 切断爆炸传播途径、

(3) 防雷防静电

静电产生的途径很多, 静电所产生的电压可高达几万伏, 在有爆炸危险物质的场所内, 可能会引爆危险物质、雷电是大自然的静电放电现象, 石油工业构筑物及工艺装备等设施遭到雷电袭击时, 会产生极高的过电压和极大的过电流, 在其波及范围内, 可能造成设备或设施的毁坏, 导致火灾和爆炸, 并直接或间接地造成人员伤亡。

(4) 防泄漏

杜绝输油输送过程中的“跑、冒、滴、漏”现象, 严禁不合理排放输油。加强管理, 勤检查勤维修、增设安全报警装置及实现生产的自动化。

(5) 防中毒

输油具有一定的毒性, 进入人的呼吸系统, 能使人体器官受害而产生急性或慢性中毒, 当空气中输油含量为 0.28% 时, 人在环境中经过 12~14min 便会有头量感, 如含量达到 1.13~2.22% 时, 将会使人难以支持, 含量更高时, 则会使人立即晕倒, 失去知觉。

(三) 输油管线的日常维护

输油管道运行中, 除严格遵守各项安全操作规程外, 维护好管道及其设施, 减轻管道腐蚀, 是延长管道寿命, 防止泄漏、堵塞隐患, 保证输油安全的重要措施。控制输油中水分和硫化氢的含量是减轻内腐蚀的关键, 因此, 运行中应重点做好以下工作:

(1) 严格控制管道输送输油质量, 进入长输管道的输油应经过净化处理, 达到管道输送输油质量标准:

(2) 运行中的输油管道应定期用清管器或清管球清管, 排除管内的积水和污物。站场的分离器应经常检查, 定时排污, 避免积水带入下游管段:

(3) 定期检查管道的安全保护设施:

(4) 定期进行管壁厚度测量, 调查腐蚀引起的壁厚减薄程度, 对减薄严重的管段进行维修或更换:

(5) 要严格管道、设备受压和泄压保护设施的管理, 防止因承压能力超限引起的爆炸:

经常检查输油站的厂房、仪表间、线路阀室等处的输油浓度, 防止漏气和输油聚积。定期检查、调校各种仪表, 作到测量准确。动作灵活。

#### 1.4.4 输油管线的日常维护

输油管道运行中, 除严格遵守各项安全操作规程外, 维护好管道及其设施, 减轻管道腐蚀, 是延长管道寿命, 防止泄露、堵塞隐患, 保证输油安全的重要措施。控制输油中水分和硫化氢的含量是减轻内腐蚀的关键, 因此, 运行中应重点做好以下工作:

(1) 严格控制管道输送输油质量, 进入长输管道的输油应经过净化处理, 达到管道输送输油质量标准:

(2) 运行中的输油管道应定期用清管器或清管球清管, 排除管内的积水和污物。站场的分离器应经常检查, 定时排污, 避免积水带入 F 游管段

(3) 定期检查管道的安全保护措施:

(4) 定期进行管壁厚度测量, 调查腐蚀引起的壁厚减薄程度, 对减薄严重的管段进行维修或更换

(5) 要严格管道、设备受压和泄压保护设施的管理, 防止因承压能力超限引起的爆炸;

(6) 经常检查输油的厂房、仪表间、线路阀室等处的输油浓度, 防止漏气的输油聚积。定期检查、调校各种仪表, 做到测量准确、动作灵活。

#### 1.4.5 进入输油站场的安全要求

(1) 必须劳保着装, 不得携带火种和穿钉子鞋:

(2) 进入工艺区必须穿戴防静电服;

(3) 进入站区应关闭闪光灯、摄象机、手机、传呼机等非防爆电子设备的电源, 工艺区内严禁带入非防爆电子设备:

(4) 进入站区严禁携带火种, 站区内严禁吸烟:

(5) 在站区内行走时, 严禁在管道、容器及工艺装置附近逗留, 严禁在发生火灾或处于事故状态的区域逗留。

(6) 进入工艺站场的车辆, 必须接受检查, 进站车辆戴防火帽, 经检查合格后方可进站, 严格按交通标志行驶、停放, 确保消防道路畅通。

#### 1.4.6 天然气运行的安全要求

(1) 天然气输送管线的特点

介质的特性: 天然气具有易燃易爆、易蒸发和易于聚集静电等特点, 当气体与空气混合到一定的比例范围之内时, 即形成可燃性气体, 若遇明火(包括电火花)立即爆炸, 从而造成极大的破坏。天然气还有一定的毒性, 如果大量泄漏或不合理排放, 将会造成中毒事件。

生产方式: 输气生产具有自动化、密闭化和连续化的特点, 对人与人及人与机之间的协调有很高的要求, 这就需要通过严格的规章制度, 严密的劳动组织和生产指挥系统, 以及严细的技术要求等。

生产工艺: 长距离输气管线由于输送量大、连续性强、线长、站多, 而且输送的又是易燃易爆的气体, 其危险性是很大的。

(2) 天然气管线运行的安全要求

天然气是易燃易爆物质, 着空气中的浓度在爆炸极限范围内, 遇火即爆炸, 破坏性极大。当输气压力超过管道允许工作压力或因材质、焊接缺陷、腐蚀壁厚减薄等使其承压能力下降到输气压力以下, 很容易产生爆管、泄漏, 高压气流从管道破口中急剧冲出, 撕裂管道, 破坏设备, 往往就会发生爆炸, 造成人员伤亡和重大火灾。

当输气管道穿过人口较稠密地区或靠近一些有火源的重要设施时, 若天然气泄漏, 极易爆炸起火, 损失重大。在荒野山区, 管道一旦爆炸起火, 往往因火势迅猛, 同时受到消防力量不足等条件的限制, 灭火非常困难。抢修机具也无法到达事故现场。输气管道的事故不但给输气系统造成破坏, 危及工作人员和附近地区群众的生命财产安全, 还会造成环境污染, 还由于突然停止供气, 使用气的工矿企业停工停产, 造成很大的间接影响和损失。因此, 在天然气的输送中应做到:

### 1) 防火

- ①在危险场所应严格控制火源:
- ②在危险场所应设置防火安全装置、自动报警系统:
- ③采用与生产性质相适应的耐火建筑等级:
- ④采用能够限制火焰发展规模的技术措施:
- ⑤严防生产设备的“跑、冒、滴、漏”,
- ⑥组织训练消防队伍, 建立健全防火与消防的组织机构:
- ⑦配备相应的消防器材。

### 2) 防爆

- ⑧防止爆炸性混合气体的形成:
- ⑨在有爆炸危险的场所, 严格控制火源的进入:
- ⑩一旦燃爆发生就及时泄出压力、使之转化为单纯的燃烧, 以减少其危害:
- ⑪切断爆炸传播途径。
- ⑫防雷防静电

静电产生的途径很多, 静电所产生的电压可高达几万伏, 在有爆炸危险物质的场所内, 可能会引爆危险物质。雷电是大自然的静电放电现象, 石油工业构筑物及工艺装备等设施遭到雷电袭击时, 会产生极高的过电压和极大的过电流, 在其波及范围内, 可能造成设备或设施的毁坏, 导致火灾和爆炸, 并直接或间接地造成人员伤亡。

#### a. 防雷电措施

防止雷击措施: 装设独立避雷针或架空避雷线, 使被保护的构筑物和设备及突出物体(如放空管等)均处于避雷针或避雷线的保护范围内。

防雷电感应措施: 为防止雷电感应产生火花, 构筑物和设备及突出物体(如放空管等)均应接到防雷电感应的接地装置上。

防止雷电波侵入的措施: 低压线路的电缆或金属管道应与防雷电感应的接地装置相连。

定期检测房屋建筑、场站、放空管、变压器、配电柜等设备接地电阻, 不合格及时整改。

遇有雷雨天气, 在不影响生产的情况下, 电气设备应断电。

雷雨天气应注意: 车辆和人员不要停在大树、高压电杆、放空管和高大建筑物下, 但同时避免将车停在空旷地带, 以防止雷击事件的发生, 确保人身和车辆安全。

电气设备加雷击熔断器。

#### b. 防静电措施

进入站场前释放身上静电, 工作时穿防静电服, 喷静电消除剂或用静电消除装置消除静电

在有防雷接地系统的条件下, 可与防静电措施与之共用。

在有危险气体存在的区域应使用那些不易产生静电的材料。

严防静电放电现象, 尤其是火花放电的产生。

### 3) 防泄漏

杜绝天然气输送过程中的“跑、冒、滴、漏”现象, 严禁不合理排放天然气。加强管理, 勤检查



勤维修、增设安全报警装置及实现生产的自动化。

#### 4) 防中毒

天然气具有一定的毒性,进入人的呼吸系统,能使人体器官受害而产生急性或慢性中毒。当空气中天然气含量为 0.28%时,人在环境中经过 12~14min 便会有头晕感,如含量达到 1.13~2.22% 时,将会使人难以支持,含量更高时,则会使人立即外倒,失去知觉。

#### 1.4.7 天然气管线的日常维护

输气管道运行中,除严格遵守各项安全操作规程外,维护好管道及其设施,减轻管道腐蚀,是延长管道寿命,防止泄漏、堵塞隐患,保证输气安全的重要措施。控制天然气中水分和硫化氢的含量是减轻内腐蚀的关键,因此,运行中应重点做好以下工作:

1) 严格控制管道输送天然气质量,进入长输管道的天然气应经过净化处理,达到管道输送天然气质量标准,

2) 运行中的输气管道应定期用清管器或清管球清管,排除管内的积水和污物。站场的分离器应经常检查,定时排污,避免积水带入下游管段。

3) 定期检查管道的安全保护设施。

4) 定期进行管壁厚度测量,调查腐蚀引起的壁厚减程度,对减薄严重的管段进行维修或更换。

5) 要严格管道、设备受压和泄压保护设施的管理,防止因承压能力超限引起的爆炸。

6) 经常检查输气站的厂房、仪表间、线路阀室等处的天然气浓度,防止漏气和天然气聚积。

定期检查、调校各种仪表,做到测量准确。动作灵活。

#### 1.4.8 进入输气站场的安全要求

1) 必须劳保着装,不得携带火种和穿钉子鞋;

2) 进入工艺区必须穿戴防静电服;

3) 进入站区应关闭闪光灯、摄像机、手机、传呼机等非防爆电子设备的电源,工艺区内严禁带入非防爆电子设备;

4) 进入站区严禁携带火种,站区内严禁吸烟;

5) 在站区内行走时,严禁在管道、容器及工艺装置附近逗留,严禁在发生火灾或处于事故状态的区域逗留。

6) 进入工艺站场的车辆,必须接受检查,进站车辆戴防火帽,经检查合格后方可进站,严格按交通标志行驶,停放,确保消防道路畅通,

#### 1.4.9 工业动火有关安全要求

在天然气易燃易爆危险区域内和输气容器、管线、设备或盛装过易燃易爆物品的容器上,从事任何能直接产生热和火花的工作被称为工业动火,如:焊、气割、燃烧、研磨、打磨、钻孔、破碎、锤击及使用不具备本质安全的电器设备和内燃发动机设备。

动火作业前,由施工单位申请动火作业,施工单位负责办理《工业动火许可证》,按审批权限,逐级上报,分级负责,批准后方可进行动火作业。工业动火许可证的审批由动火施工单位负责



填写工业动火许可证,与动火作业方案一并提交批准人,动火批准人或其授权人必须与生产单位、施工单位负责人至动火施工现场,对照动火作业方案和动火许可证逐项进行安全措施的检查确认,符合动火条件并经气体检测合格方可签字批准,

《工业动火许可证》是动火现场的操作依据,不得涂改、代签。动火许可证只限一处一次使用。一般情况下,一级工业动火许可证有效时间不超过 8 小时,如在动火作业本班不能完成,作业应在交接班时重新确认,进行技术交底,并由接班相应人员签字后方可持续有效。二级工业动火许可证有效时间不超过 3 天,三级工业动火许可证有效时间不超过 5 天;二级、三级动火作业超过一天时,每天在开工前,应由动火负责人、监护人共同检查动火现场,核对安全措施,合格后经签字确认方可动火。

## 第二部分 漏磁检测原理与基础知识

### 1 漏磁检测的磁学基础

#### 1.1 磁场的基本概念

##### (1) 磁性、磁体、磁极

物体能够吸引铁、钴、镍等物质的性质叫做磁性,具有磁性的物体叫磁体。能够长期保持磁性的物体叫永磁体。磁体上磁性最强的区域叫磁极。永磁体有天然磁体和人造磁体两种。条形磁体两端磁性最强,中间磁性最弱。磁体在地磁场的作用下,指向北的磁极叫北极(或称为 N 极),指向南的磁极叫南极(或称为 S 极),同性磁极相互排斥,异性磁极相互吸引。使原来没有磁性的物体具有磁性的过程叫做磁化,铁和钢制的物体都能被磁化。使原来具有磁性的物体失去磁性的过程叫做去磁(或称为退磁)。

##### (2) 磁场

磁场是存在于磁体、运动电荷周围的一种物质。

磁场的基本性质:它对处于其中的磁体、电流、运动电荷有力的作用,这种力称为磁场力。

磁现象的电本质:所有的磁现象都可归结为运动电荷之间通过磁场而发生的相互作用。

磁场的特性:①磁场看不见,摸不着,但磁场具有物质性,它能对磁体或电流产生力的作用,两个磁体相互作用就是通过磁场这种特殊物质传递的;②磁体周围有磁场,电流周围也有磁场;③N 极在磁场中受力的方向就是该点的磁场的方向。

##### (3) 磁感应线(磁力线)

为了描述磁场的强弱与方向,人们想象在磁场中画出一组有方向的曲线,称为磁感应线(磁力线)。磁感应线的特点如下。

①疏密表示磁场的强弱。

②每一点切线方向表示该点磁场的方向,也就是磁感应强度的方向)。

③是闭合的曲线,在磁体外部由 N 极至 S 极,在磁体的内部由 S 极至 N 极:磁感应线不相切、不相交、不中断。

④匀强磁场的磁感应线平行且距离相等,没有画出磁感应线的地方不一定没有磁场。

⑤安培定则:姆指指向电流方向,四指指向磁场的方向。注意这里的磁感应线是一个个同心圆,每点磁场方向是在该点切线方向。

##### (4) 磁场强度

在磁场中任意一点放一个单位磁极(N 极),作用于该磁极的磁力大小表示该点的磁场大小,作用力的方向代表磁场方向。磁场具有大小和方向,磁场大小和方向的总称叫磁场强度矢量(简称:磁场强度)。

磁场强度用符号  $H$  来表示。在 SI(现行法定计量国际单位制)单位制中,磁场强度单位是安培, /米(A/m): 在 CGS(一种国际通用的单位制式, 厘米; 克: 秒) 单位制中, 磁场强度单位是奥斯特(Oe)。

两种单位的换算关系为:  $1\text{A/m} = 4\pi \times 10^{-3}\text{Oe} = 0.0125\text{Oe}$ ,  $1\text{Oe} = 1/4\pi \times 10^3 \text{ A/m} \approx 80 \text{ A/m}$

#### (5) 磁感应强度

描述介质中磁场强弱的物理量称为磁感应强度(又称为磁通密度), 用符号  $B$  来表示。

磁场强度是用单位磁极(N 极)在真空介质中受的作用力(包括大小和方向)来表示。磁感应强度是用单位磁极(N 极)在介质中受的作用力(包括大小和方向)来表示。 $B$  和  $H$  的关系是:

$$B = \mu H \quad (2-1)$$

式中,  $B$  为磁感应强度,  $H$  为磁场强度,  $\mu$  为介质磁导率。

在SI单位制中, 磁感应强度单位是特斯拉 (T); 在CGS单位制中, 磁感应强度单位是高斯 (GS)。两种单位的换算关系为:  $1\text{T} = 10^4\text{Gs}$ ,  $1\text{Gs} = 10^{-4}\text{T}$ 。

#### (6) 磁导率

介质中磁感应强度  $B$  与磁场强度  $H$  之比称为磁导率。或称绝对磁导率, 用符号  $\mu$  来表示。

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2-2)$$

磁导率表示材料被磁化的难易程度或导磁能力的强弱。 $\mu$  大, 表示该材料易磁化, 导磁能力强;  $\mu$  小, 表示该材料难磁化, 导磁能力弱。在SI单位制中, 磁导率单位是亨利/密 (H/m)。磁导率不是常数是随磁场大小不同而改变的变量, 有最大值和最小值。

真空磁导率: 真空中磁导率是一个不变的恒量值, 用  $\mu_0$  表示, 且有  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)}$ 。

相对磁导率: 为了比较各种材料的导磁能力, 通常使用的磁介质的相对磁导率, 用符号  $\mu_r$  来表示, 其定义为磁导率  $\mu$  与真空磁导率  $\mu_0$  之比。相比磁导率  $\mu_r$  是无量纲的蠢数。磁导率与真空磁导率和相对磁导率之间的关系是:

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (2-3)$$

最大磁导率: 在磁化曲线上,  $B/H$  值最大时的磁导率称为最大磁导率, 用符号  $\mu_m$  来表示。

有效磁导率: 工件在线圈中磁化产生的  $B$  与空载线圈产生的  $H$  的比值。有效磁导率不完全由材料性质决定, 在很大程度上与工件的形状有关。

起始磁导率: 在  $H$  接近零时, 测得的磁导率称为起始磁导率, 用  $\mu_i$  表示。

#### (7) 磁通量

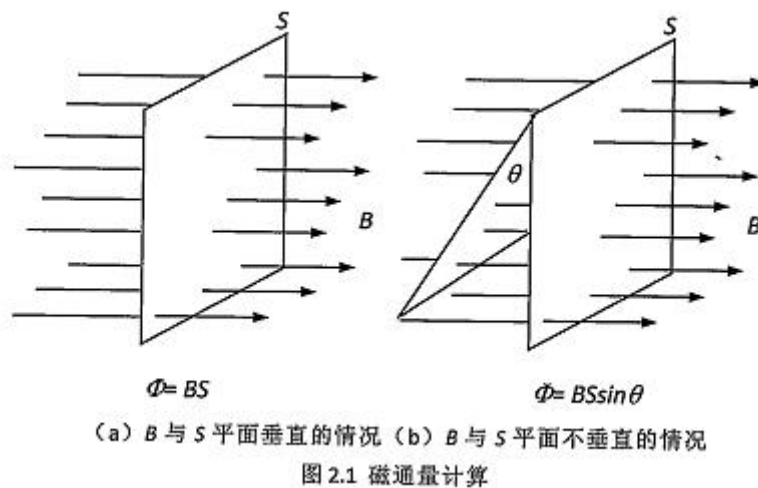
定义: 设在磁感应强度为  $B$  的匀强磁场中, 有一个面积为  $S$  且与磁场方向垂直的平面, 磁感应强度  $B$  与面积  $S$  的乘积, 叫做穿过这个平面的磁通量, 简称磁通。标量, 符号 “ $\Phi$ ”。磁通量计算公式为:

$$\Phi = BS \quad (2-4)$$

适合条件是B与S平面垂直,如图2.1(a)所示;当S与B的垂面存在夹角 $\theta$ 时,如图2.1(b)所示,磁通量计算公式为:

$$\Phi = BS\cos\theta \quad (2-5)$$

单位:在SI单位制中,磁通量的单位是韦伯,符号是Wb;在CGS单位制中,磁通单位是麦克斯韦(Mx),1麦克斯韦表示通过1根磁力线。 $1\text{Wb} = 10^8\text{Mx} = 1\text{T} \cdot \text{m}^2 = 1\text{V} \cdot \text{s}$ 。磁通量是标量,但有正负,正负仅代表穿向。



意义:磁通量的意义可以用磁感应线形象地加以说明。我们知道在同一磁场的图式中,磁感应线越密的地方,也就是穿过单位面积的磁感应线条数越多的地方,磁感应强度B越大。因此,B越大,S越大,穿过这个面的磁感应线条数就越多,磁通量就越大。

磁感应强度在数值上等于单位面积的磁通量 $B = \Phi/S$ ,因此,磁感应强度也叫磁通密度。磁感应强度和磁场强度一样,具体大小和方向,可以在磁感应线表示。磁感应线上没一点的切线方向代表该点的磁感应强度的方向,磁感应强度的大小等于穿过与磁感应线垂直的单位面积上的磁通量。

磁场强度与磁感应强度不同的是:磁场强度只与励磁电流有关,而磁感应强度还与被磁化的材料的性质有关,即与磁导率 $\mu$ 有关。因为 $B=\mu H$ ,所以铁磁性材料的磁感应强度B远大于磁场强度H。

### 2.1.2 电磁感应定律

#### (1) 楞次定律与右手定则

楞次定律:感应电动势趋于产生一个电流,该电流的方向趋于阻碍产生此感应电动势的磁通变化。

右手定则:伸开右手,让大拇指与其余四指垂直,并且都跟手掌心在一平面内,让磁感应线垂直穿入掌心,大拇指指向导体运动的方向,其余四指所指的方向就是感应电流方向。

右手定则只适用切割磁感应线而产生感应电流的判定。而楞次定律适用一般情况的感应电流方向判定。

右手螺旋定则:用右手握螺线管,让四指弯向螺线管的电流方向,大拇指所指的那一端就是通电螺线管的北极。直线电流的磁场的话,大拇指指向电流方向,另外四指弯曲指的方向为磁感线的方向(磁场方向或是小磁针北极所指方向或是小磁针受力方向)。

## (2) 法拉第电磁感应定律

电磁感应定律:电路中感应电动势的大小与穿过这一电路的磁通量的时间变化率成正比。

本定律可用以下的公式表达:

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (2-6)$$

式中,  $\varepsilon$  为感应电动势,单位为伏特;  $N$  为线圈匝数;  $\Delta \Phi$  为通过线圈磁通量变化量,单位为韦伯;  $\Delta t$  是磁通量变化所用时间,单位是秒;电动势的方向(公式中的负号)由楞次定律提供。

磁通量的变化产生的可能原因有:闭合电路面积变化而产生;磁感应强度的变化而产生;磁通量和闭合电路面积同时变化而产生。

若闭合电路中的  $\Phi$  随时间均匀变化,产生的感应电动势就是恒定的;若  $\Phi$  随时间变化非均匀,这时用(2.6)式求得的感应电动势  $\varepsilon$  是  $\Delta t$  时间内平均电动势。

### 2.1.3 磁介质

#### (1) 磁介质分类

能影响磁场的物质称为磁介质。各种宏观物质对磁场都有不同程度的影响,因此一般都是磁介质。根据物质在磁场中的磁化性能,磁介质一般可分为三大类:顺磁性、抗磁性、铁磁性。

##### ① 顺磁材料

相对磁导率  $\mu_r$ , 略大于 1, 在外加磁场中呈现微弱磁性, 并产生与外加磁场同方向的附加磁场。顺磁性材料(如铝、铬和锰等)能被磁体轻微吸引。铝的相对磁导率  $\mu_r=1.000021$ 。

##### ② 抗磁材料

相对磁导率  $\mu_r$  略小于 1, 在外加磁场中呈现微弱磁性, 并产生与外加磁场反方向的附加磁场, 抗磁性材料(如铜、银和金等)能够被磁体轻微排斥。铜的  $\mu_r=0.99993$ 。

通常把顺磁性材料和抗磁性材料统称为非磁性材料。

##### ③ 铁磁材料

相对磁导率  $\mu_r$  远远大于 1, 在外加磁场中呈现很强的磁性, 并产生与外加磁场同方向的附加磁场, 铁磁性材料(如铁、镍、钴及其合金等)能被磁体强烈吸引。工业纯铁  $\mu_r=5000$  左右。磁粉检测和漏磁检测只适用于铁磁性材料。)

根据铁磁材料在反复磁化过程中所得到的磁滞回线的不同, 通常将其分为三大类: 软磁材料, 硬磁材料, 矩磁材料。

① 软磁材料的特点是易磁化也易去磁, 磁滞回线较窄, 剩磁、矫顽力都较小(如: 软铁、硅钢



片、铁氧体等)。常用来制作电机, 变压器等的铁芯。

②硬磁材料的特点是不易磁化, 也不易去磁, 磁滞回线很宽, 剩磁、矫顽力都很大(如: 碳钢、钨钢等)。常用来作永久磁铁, 扬声器磁钢等。

③矩磁材料的特点是在很小的外磁作用下就能磁化, 一经磁化便达到饱和, 去掉外磁后, 磁性仍能保持在饱和值, 剩磁很大, 但矫顽力很小。常用来作记忆元件, 如计算机中存储器的磁芯。

## (2)磁化

磁介质在磁场作用下内部状态的变化叫做磁化。

铁磁材料被磁化, 就变成磁体, 显示出很强的磁性来。去掉外加磁场后, 仍保留一定的剩余磁性。在高温情况下, 会使磁体的磁性削弱。超过某一温度后, 磁体的磁性全部消失, 实现了材料的退磁。铁磁性材料在加热时, 铁磁性消失变为非磁性材料的临界温度称为居里点。对一般碳钢而言, 居里点约为  $769^{\circ}\text{C}$ 、

磁化曲线(B-H 曲线)是表征铁磁性材料磁特性的曲线, 用以表示外加磁场强度  $H$  与磁感应强度  $B$  的变化的关系。

将铁磁材料做成环形样品, 绕上一定匝数的线圈, 线圈经过换向开关  $K$  和可变电阻  $R$  接到直流电源上, 如图 1.2 所示, 通过测量线圈中电流  $I$  可求出材料内部的磁场强度  $H$  值。用磁通计测量此时穿过环形样品横截面的磁通量  $\Phi$ , 从而算出磁感应强度  $B$  值, 由此可得该材料的磁化曲线。

试样中的磁场强度  $H$  为

$$H = \frac{N_1 I}{L} \quad (2-7)$$

式中,  $L$  为试样的有效长度,  $N_1$  为磁化线圈匝数。

磁感应强度  $B$  为:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{N_2 S} \quad (2-8)$$

式中  $S$  为试样的截面积,  $\Phi$  为试样中的磁通量 (磁通计测量),  $N_2$  为测试线圈匝数。

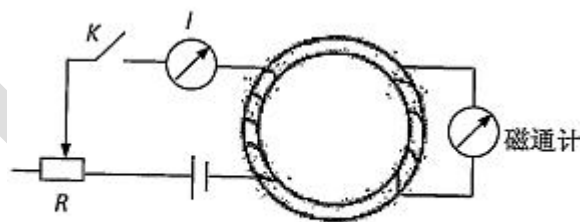


图 2.2 磁化曲线测量示意图

## (3) 初始磁化曲线

磁性材料由磁中性状态 ( $B=0$ 、 $H=0$ , 没有磁化的铁磁质), 在  $H$  缓慢单调增大的情况

下测得的磁化曲线 ( $B-H$  曲线)。如图 2.3 所示。

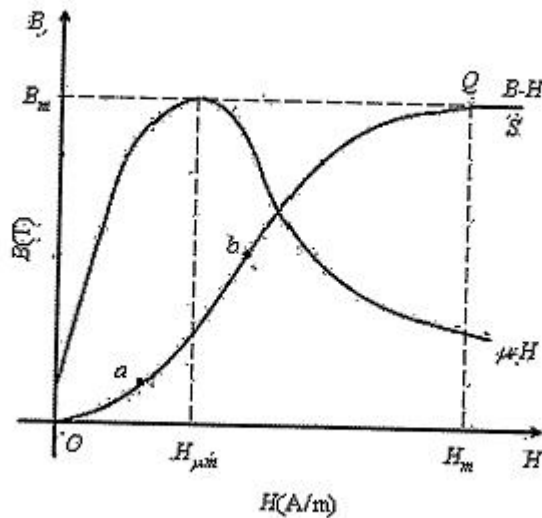


图 2.3 铁磁性材料磁化曲线

在磁化前铁磁材料为磁中性，铁磁环中  $H=0$ 、 $B=0$ 。当磁化场  $H$  逐渐增加时， $B$  随之增加。开始时  $B$  增加的比较缓慢，如图 1.3 中  $0a$  段。然后  $B$  经过一段急剧上升过程( $ab$  段)，又进入缓慢变化的阶段( $bQ$  段)。此后再继续增大磁化场， $B$  却几乎不变( $QS$  段)，铁磁材料已磁化到饱和状态。

分段说明：

“ $0a$ ”段：这一段称为初始磁化区，这一段  $B$  随  $H$  增加缓慢增加，并且磁化是可逆的，即若磁化到  $a$  点后磁化场  $H$  又逐渐减小到 0，试件中的磁感应强度  $B$  沿  $a0$  曲线也缓慢减小到零。

“ $ab$ ”段：磁感应强度  $B$  随  $H$  增加急剧增大，此时若去掉磁化场，磁感应强度不再回到零，而保留相当大的剩磁。因此“ $ab$ ”段称为不可逆的急剧磁化区。最大磁导率  $\mu_m$  就出现在这个区域内。

“ $bQ$ ”段：磁感应强度  $B$  随  $H$  的增加开始减慢，这段称为旋转磁化区。

“ $QS$ ”段：随  $H$  增加磁感应强度  $B$  变化很小，这个区域称为近饱和区，不同的铁磁性物质， $B$  的饱和值是不同的，但对每一种材料， $B$  的饱和值却是一定的。

不同铁磁材料的初始磁化曲线是不一样的，软磁材料（如工业纯铁、低碳钢等）的此画曲线比较陡峭，这说明材料易于磁化；硬磁材料（如高碳钢、高合金钢等）的磁化曲线比较平坦，说明这种材料不易磁化。

#### (4) 磁滞回线

当铁磁材料磁化到饱和后，外加磁场  $H$  开始逐渐减小，材料也开始退磁。但是，在这个退磁过程中，磁感应强度  $B$  并不沿原来的磁化曲线减小，而是沿另一条曲线  $SR$  缓慢地下降，如图 1.4 所示。也就是说，在同样的磁场强度  $H$  下，退磁时的磁感应强度比磁化时大。

这种  $B$  的变化落后于  $H$  变化的现象, 简称磁滞。

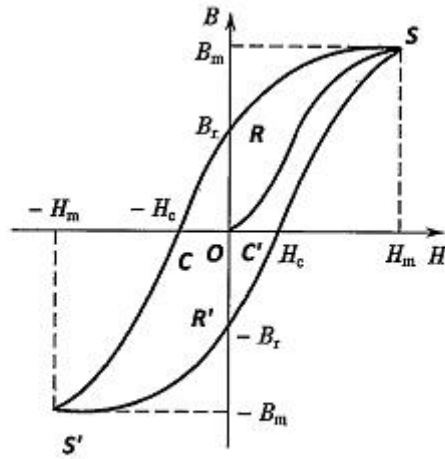


图 2.4 磁滞回线

由于存在磁滞的缘故, 当外磁场减小到零时, 磁感应强度  $B$  并不等于零, 而保留一定的数值  $B_r$ , 称为剩余磁感应强度, 简称剩磁。

为了消除剩磁, 即使  $B_r = 0$ , 必须加一个反向磁场。当反向磁场增加到某一个数值  $H_c$  时,  $B$  才降到零。通常把  $H_c$  称为矫顽力。

若反向磁场继续增加, 铁磁材料开始反向磁化。当反向磁场增大到  $-H_s$  时, 材料达到反向饱和磁化点  $S'$ 。此后, 再进行反向退磁, 随  $H$  的减小, 退磁曲线沿  $S'R'C'$  进行, 随着  $H$  的增加, 磁化曲线沿  $C'S$  进行。当  $H=H_s$  时, 又达到正向饱和磁化点  $S$ , 曲线  $SRCS'$  和  $S'R'C'S$  对于坐标原点  $O$  是对称的, 如图 1.4 所示。该闭合曲线称为磁滞回线。

磁滞回线所包围的面积代表在一个反复磁化的循环过程中单位体积的铁芯内损耗的能量, 简称铁损。

#### (5) 磁导率曲线

在初始磁化曲线上  $B$  与  $H$  虽然呈非线性关系, 但却呈单值关系, 即一个  $H$  值对应一个唯一的  $B$  值, 因此在这种情况下, 我们仍可以采用磁导率的概念。不过此时它不是常数, 二是  $H$  的函数, 即有:

$$\mu = \mu(H) \quad (2-9)$$

$B-H$  曲线上任何一点连接到原点  $O$  的直线斜率就代表该磁化状态下该点的磁导率, 即  $\mu = B/H$ 。显然  $B-H$  曲线上个点对应的  $\mu$  值都不相同。将  $B-H$  曲线上个点的  $B$  和  $H$  的比值作一条相应的曲线, 可得到磁导率曲线, 如图 1.3 所示。

$\mu$  值大时, 铁磁材料易于磁化;  $\mu$  值小时, 铁磁材料难以磁化。因此, 磁导率  $\mu$  在漏磁检测中起着重要作用。

### 2.1.4 磁路及其基本定律

#### (1) 磁路的概念

磁通所通过的路径称为磁路。磁路一般由产生磁场的源、此材料和空气隙三部分组成。产生磁场的源可以是通电流的线圈，或者是永久磁体。

磁阻是表征磁路中磁位降与其中磁通关系的参数。它与电路中的电阻相似。

一段长为  $l$  截面为  $S$  的导磁体的磁阻  $R_m$ ，如果其中磁场均匀，方向与其长度方向平行，也可用 (2-10) 式计算。

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (2-10)$$

磁阻的单位为  $A/Wb$ ，磁阻的倒数称为磁导。

在磁路中如有一磁通经过若干段磁路，则此各段磁路的总磁位降等于各段磁路上磁位降之和，每一段磁路的磁位降等于该段磁路的磁阻与磁通的乘积。从而可得总磁阻等于各段磁路的磁阻之和。这种情形与电路中串联电阻电路的总电阻等于其中各电阻之和相似。

在磁路中如有多个磁路支路并联，则此各支路的两端间有同一磁位降。各磁路支路的磁通之和即等于总磁通。从而可得这些并联支路的总磁导等于此各支路磁导之和，这种情形与并联电导电路的总电导等于其中各电导之和相似。

## (2) 磁路的基本定律

### ① 磁路的欧姆定律

$$F = R_m \Phi \quad (2-11)$$

式中， $F$  称为磁路的磁动势（单位为  $A$ ）， $\Phi$  为磁路中的磁通量， $R_m$  为磁阻。

式 (2.11) 表明，作用在磁路上的磁动势  $F$  等于磁路内的磁通量  $\Phi$  乘以磁阻  $R_m$ ，此关系与电路中的欧姆定律在形式上十分相似。

### ② 磁路的基尔霍夫第一定律

$$\sum \Phi = 0 \quad (2-12)$$

式 (2.12) 表明，穿出（或进入）任一闭和面的总磁通量恒等于零（或者说，进入任一闭合面的磁通量恒等于穿出该闭和面的磁通量），这就是磁通连续性定律，比拟于电路中的基尔霍夫电流定律，该定律亦称为磁路的基尔霍夫第一定律。

### ③ 磁路的基尔霍夫第二定律

$$\sum F_m = \sum U_m = \sum Hl \quad (2-13)$$

式中， $F_m$  称为磁路的磁动势， $U_m$  为磁路中的磁位降， $H$  为每一段磁路中的磁场强度， $l$  为每一段磁路的长度。

式中 (2-13) 表明，沿任何闭合磁路的总磁动势恒等于各段磁路磁位降的代数和。类比于电路中的基尔霍夫电压定律，该定律就称为磁路的基尔霍夫第二定律。

## 2.2 漏磁检测原理

### 2.2.1 漏磁场的形成

由于空气的磁导率远远低于铁磁材料的磁导率，如果在铁磁材料上存在不连续性或裂纹，则磁感应线优先通过磁导率高的材料区域，这就迫使一部分磁感应线从缺陷周围绕过，形成磁感应线的压缩。但是，材料连续部分可容纳的磁感应线数目是有限的，同时由于同性磁感应线相斥，所以导致一部分磁感应线在材料内部绕过缺陷，少部分磁感应线从不连续性中穿过，而另一部分磁感应线遵从工件表面溢出进入空气中，在绕过缺陷后又折回工件，从而形成了漏磁场。如图 2.5 所示。

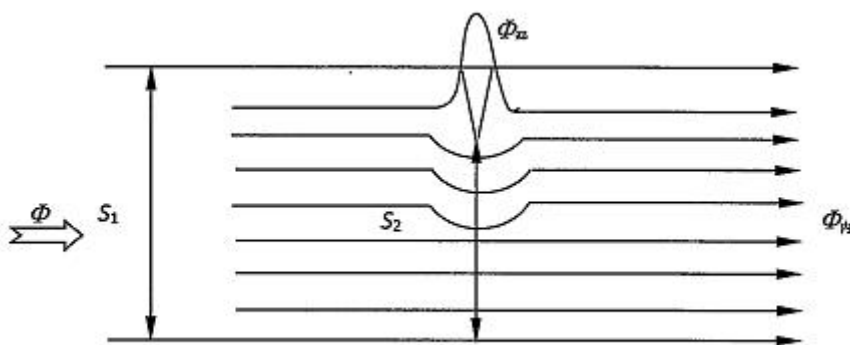


图 2.5 磁场的形成

漏磁场的形成也可理解为：将铁磁性试样置于磁场  $\Phi$  中，无缺陷处试样的截面积是  $S_1$ ，在缺陷处试样的截面积为  $S_2$ ，显然  $S_1 > S_2$ 。磁阻  $R = l/\mu S$ ，所以  $S_2$  处的磁阻  $R_2$  就要大于  $S_1$  处的磁阻  $R_1$ ，即  $R_2 > R_1$ ，如图 2.5 示。根据连续性原理，磁通  $\Phi$  通过  $S_2$ ，就要被分流，而形成泄露到空气中的漏磁通。

### 2.2.2 漏磁检测

利用一定的励磁方法对被检工件进行磁化，若被测工件表面光滑，内部没有缺陷，磁通将全部通过被测工件；若工件存在缺陷，会导致缺陷处及其附近区域磁导率降低，磁阻增加，从而使缺陷附近的磁场发生畸变，一部分磁力线泄露出试样的内、外表面，形成漏磁场。通过一定方式检测漏磁场的变化发现工件的缺陷，对其分析处理从而达到无损检测和评价的目的。

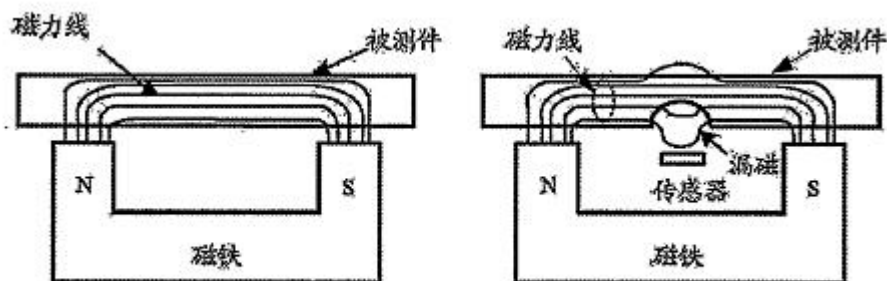


图 2.6 磁检测原理



### 2.2.3 缺陷漏磁场的分布特征

缺陷漏磁场可以分解为径向分量（垂直分量） $B_x$ 和轴向分量（水平分量） $B_y$ 。径向分量和工件表面垂直，轴向分量与工件表面平行。假设有一矩形缺陷，则在矩形中心，漏磁场径向分量为通过中心点的曲线：在缺陷的左边缘处达到正的最大值，在缺陷的右边缘达到负的最大值，在缺陷的中心处为零，是关于缺陷中心对称的；轴向分量有极大值并左右对称。如图 2.7 示。

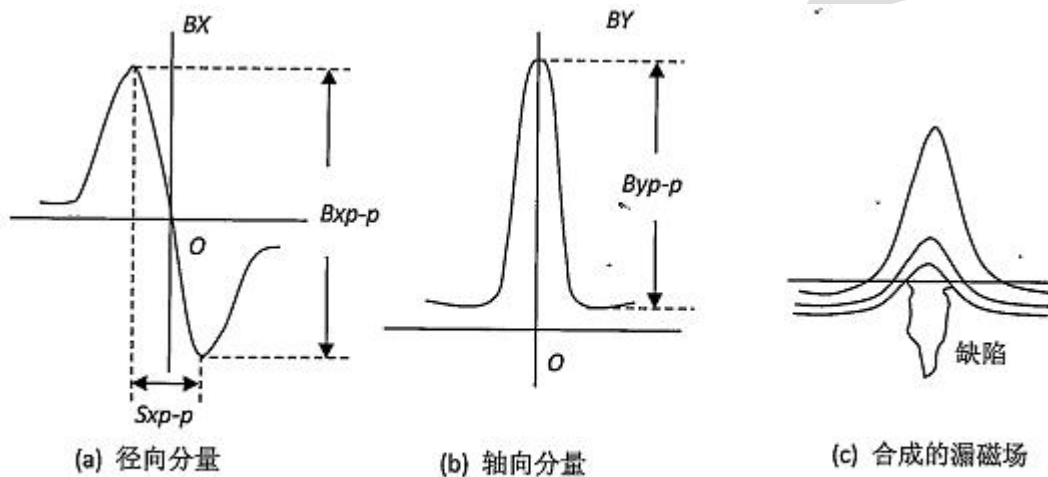


图 2.7 缺陷磁场分布

在漏磁检测中，通过漏磁场信号的特征量对缺陷进行分析评价，如图 2.7 所示，缺陷的漏磁信号特征量包括：

**BX 峰峰值 ( $B_{xp-p}$ )**：径向分量  $B_X$  的重要特点是具有正、负峰值，将  $B_X$  分量的最大值和最小值之差定义为峰峰值。

**BX 峰峰间距 ( $S_{xp-p}$ )**：径向分量  $B_X$  的最大值与最小值之间的横向距离。

**BY 峰谷值 ( $B_{yp-p}$ )**：轴向分量  $B_Y$  的重要特点是具有一个波峰和两个波谷，将  $B_Y$  分量的波峰值与波谷值之差定义为峰谷值。

### 2.2.4 漏磁检测的磁化技术

#### 2.5.1 磁化方式

磁化方式按所用励磁磁源分为交流磁化、直流磁化和永磁磁化三种。

#### 交流磁化

交流磁场易产生趋肤效应和涡流，且磁化的深度随电流频率的增高而减小，因此，这种方法只能检测表面和近表面缺陷，但交流磁化的强度容易控制，大功率 50Hz 交流电流源易于获得，磁化器结构简单，成本低廉。

交流磁化的优点：①可以用来检测表面较为粗糙的试件；②信号幅度与缺陷的深度之间比直流磁化有更好的对应关系；③应用趋肤效应适合于对试件进行局部磁化，因而可用于检测较大工件。

交流磁化的缺点: ①不适合于检测表面以下的缺陷; ②对于管材来说, 在管外壁磁化不能同时检测管壁内侧缺陷。

### 直流磁化

直流磁化分直流脉动电流磁化和直流恒定电流磁化, 后者在电气实现上比前者简单。但直流恒定电流磁化法对电流源具有一定的要求, 激励电流一般为几安培, 甚至上百安培。磁化强度可通过控制电流的大小方便地调节。

直流磁化的优点: 可以检测出深达十几毫米表层下缺陷; 缺陷信号幅度与缺陷在表面下埋藏深度成比例关系; 在管材检测中, 用直流磁化可直接检测管子的内外壁缺陷。

直流磁化的缺点: 要达到较大的磁化强度相对较难; 需要退磁。

### 永磁磁化

永磁磁化以永久磁铁作为励磁源, 它是一种不需电流源的磁化方式, 与直流恒定电流磁化方式具有相同的特性, 但在磁化强度的调整上不及直流磁化方式方便, 其磁化强度一般通过磁路设计来保证。

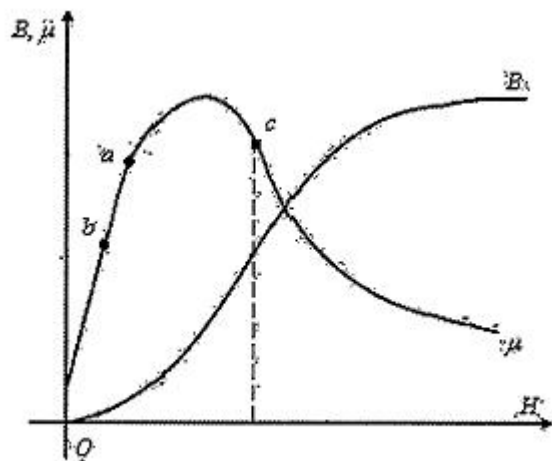
在永磁磁化方式中, 永久磁铁可以采用永磁铁氧体、铝镍钴永磁及稀土永磁等, 永磁铁氧体价格低、廉、矫顽力高但剩磁低; 铝镍钴永磁剩磁高但矫顽力低; 稀土永磁价格较贵, 但矫顽力很大, 剩磁较高, 是永磁材料发展上的第三代材料。对于不同的永久磁铁, 在磁路设计上应根据各自的磁特性, 充分发挥其优点, 以使磁路达到最优。

由于永久磁铁, 特别是稀土永磁, 具有磁能积高、体积小、重量轻及无需电源等特点, 在漏磁检测中将得到很好的应用。以永久磁铁为磁源的漏磁检测装置具有使用方便、灵活、体积小及重量轻等特点, 所以永磁磁化方式是在线漏磁检测设备中磁化被测构件的优选方式,

### (2) 磁化强度选择

在漏磁检测中, 虽然检测目的不同, 但磁化强度的选择首先以缺陷或结构特征产生的磁场能否被检测到为前提, 一般要求以足够强的磁场进行励磁以获得磁敏感器件可以测量的磁场。另外, 检测信号的信噪比和检测装置的经济性等也应成为考虑的因素。很明显, 随着磁化强度的加强, 磁化器的体积重量和成本将随之升高, 因此, 必须多方面综合考虑, 择优选择磁化强度。

铁磁材料的磁导率随磁场强度而变, 磁化应针对铁磁性材料的磁特性进行, 在磁化曲线上恰当选择磁化工作点。如前所述, 缺陷的存在会产生漏磁场, 但由于铁磁材料的磁导率远大于空气中磁导率, 所以缺陷的存在同时会增大试样中的磁感应强度, 这就等于在一个原有的磁感应强度上叠加一个由于缺陷存在而产生附加磁感应强度。如果把磁化场强选在 $\mu-H$ 曲线的上升区, 如图 2.8, 则由于缺陷存在而增大了内部磁感应强度, 因而使磁导率反而会上升, 这对于检测漏磁不利。如将磁场强度选在 $\mu-H$ 曲线上的 $\mu$ 值下降斜率较大区, 则由于缺陷存在会使 $\mu$ 值急剧下降, 这有利于漏磁场的检测, 此区对应于  $B-H$  曲线的靠近膝部处, 如图 2.8C 点处, 在实际检测中常用标准试样来选择磁场强度。

图 2.8 导率 $\mu$ 与磁场强度 $H$ 的关系

## 2.3 漏磁场测量和信号的影响因素

### 2.3.1 漏磁场信号的测量

#### (1) 基本要求

漏磁场信号是通过可以把磁信号转换为电信号的传感器获得的。漏磁场检测传感器是漏磁场检测的关键部分,要完整,不失真地反映缺陷的漏磁场。从实际应用来看,磁敏感元器件和磁场测量原理的选择,应综合考虑下述几方面的要求。

①灵敏度灵敏度的选择应根据被测磁场的强弱选用适当的元件,并满足信号传输的不失真或干扰影响最小的要求。

②空间分辨力 磁场信号是一空间域信号,测量元件的敏感区域是局部的,一般由元件的尺寸和性能决定。为了能测量出空间域变化频率较高的磁场信号,必须要求测量元件或单元具有相应的空间分辨能力。

③信噪比在磁性检测中,信噪比可定义为电信号中有用信号(如裂纹检测信号)与无用信号(如测量中的电噪声和被测磁场中的磁噪声)幅度之比。一般而言,测量过程中的上述信噪比处须大于 1,否则被测对象(如裂纹)将无法识别。

④覆盖范围磁场在空间上是广泛分布的,因而每一测量元件或单元均只能在有限的范围或区间上对磁信号敏感。在检测中,如果要求一次测量较大的空间区域或防止检测时的漏检,则需要安置和选择多组测量单元。很明显,在某一方向上覆盖范围越大,在该方向上的空间分辨力将越差,因而,必须根据测量目的和要求,最优设计和选择测量单元。

⑤稳定性测量单元应具备对检测环境和状态的适应性,测量信号特征应不受环境条件影响.因此,应对测量单元结构进行考虑,减小检测过程中随机因素的影响。

⑥可靠性可靠性表现为多次检测时信号的重复性。由于测量信号大小与测量点同被测磁物信号源间位置远近关系密切,重复检测时上述位置关系会有所改变,测量方法选择不当时会增大几次测量信号的差异。

⑦性能价格比选择检测元件和测量方法时, 根据测量目的和要求设计最优性能价格比的使测探头。

## (2)磁测量元件

实际检测中, 磁电转换原理和元件主要的下述几种。

### ①感应线圈

感应线圈的测磁原理是: 当线圈贴着管道表面扫查时, 缺陷产生的漏磁场会引起穿过线圈磁通量的变化, 从而线圈中会产生感生电动势形成缺陷信号。当检测用的线圈与管道作相对运动时, 线圈检测漏磁场所产生的感应电动势为:

$$V = N \frac{d\Phi}{dt} = N \frac{d(B \cdot S)}{dt} \quad (2-15)$$

其中  $N$  为线圈匝数,  $\Phi$  为线圈中通过的漏磁场磁通量,  $B$  为漏磁场的磁感应强度,  $S$  为线圈的横截面积。感应线圈测量的是磁场的相对变化量, 对高频磁场信号比较敏感。检测灵敏度取决于线圈匝数和相对移动速度, 结果易受线圈运动速度的影响, 信号处理电路较为复杂。

### ②霍尔元件

霍尔元件检测漏磁信号原理是: 当电流  $I$  沿与磁场  $B$  的垂直方向通过时, 在与电流和磁场垂直的霍尔元件两侧产生霍尔电势  $V_H$ 。由霍尔效应可知:

$$V_H = K_H \times I \times B \times \cos a \quad (2-16)$$

式中,  $K_H$  为霍尔系数,  $I$  为供电电流,  $B$  为磁感应强度,  $a$  为磁感应强度与霍尔元件的法线夹角。可见当霍尔元件的条件确定后, 霍尔电势直接反应的磁感应强度的大小。输出电势  $V_H$  与检测元件相对于磁场的运动速度无关, 因此霍尔元件不会受到管道检测的非匀速性的影响, 但是需要电源供应。

### ③磁敏二极管和磁敏三极管

磁敏二极管是一种新型磁电转换元件, 它的灵敏度比霍尔元件要高几百倍, 特别适合探测微小磁场变化, 具有体积小和灵敏度高等特点。磁敏二极管加一正向电压后, 其内阻随周围磁场大小和方向的变化而变化。通过磁敏二极管的电流越大, 则在同样磁场下输出电压越大; 而所加的电压一定时, 在正向磁场的作用下电流减小, 反向磁场时电流加大。磁敏二极管工作电压和灵敏度随温度升高而下降, 通常需要补偿。

磁敏三极管是对磁场敏感的半导体三极管, 与磁敏二极管一样, 为一种新型的磁敏传感器件。磁敏三极管可分 **NPN** 和 **PNP** 型两大类。

磁敏二极管和磁敏三极管灵敏度较高, 但由于温度系数和输出的非线性, 实际应用并不多见。

### (1) 磁通门

磁通门传感器原理建立在法拉第电磁感应定律和某些材料的磁化强度与磁场强度之间的非线性

性关系上。典型的磁通门一般有三个绕组,即激励绕组、输出绕组和控制绕组,磁心通常是跑道形的。这种磁通门的灵敏度很高可以测量  $10^{-5} \sim 10^{-7} \text{T}$  弱磁场,输出依赖于磁心的磁特性,分辨力等随磁心和线圈尺寸变化。近年来,某些学者采用非晶态合金作为磁通门的磁心,使得磁通门的灵敏度又有大幅度的提高。

#### ⑤磁敏电阻

磁敏电阻的灵敏度是霍尔元件裸件的 20 倍左右,一般为  $0.1\text{V/T}$ ,工作温度在  $-40 \sim 150^\circ\text{C}$  具有较宽的温度使用范围。空间分辨力等与元件感应面积有关。

### 2.3.2 漏磁场分析方法

#### (1) 解析法

解析法是用解方程的方法解出所求的量。建立可求解的、反应客观规律的数学模型是解析法的关键。最早的漏磁场解析方程数学模型是依据次偶极子理论建立的次偶极子模型。

磁偶极子理论认为:缺陷的漏磁场由极性相反的偶极子产生。以二维空间裂纹为例,偶极子模型如图 2.9 所示,两个磁偶极子位于缺陷的两侧,磁荷密度分别为  $-\sigma$  和  $+\sigma$ 。

在空间一点  $P(x,y)$  产生的漏磁场为

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2 = \frac{-\sigma}{4\pi\mu_0 r_1^3} \mathbf{r}_1 + \frac{\sigma}{4\pi\mu_0 r_2^3} \mathbf{r}_2 \quad (2-17)$$

式中,  $\mu_0$  为真空磁导率。

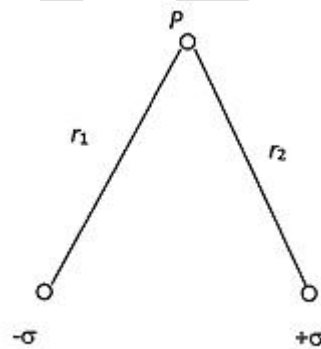


图 2.9 偶极子模型

这类模型较好地解决了漏磁场的空间分布问题。但磁荷模型是对复杂磁问题进行简化,当边界条件恶劣时,如缺陷形状复杂,这类模型就遇到了难以克服的障碍,在某种程度上限制了它的应用。

#### (2) 数值法

漏磁场的本质是缺陷引起的磁场的畸变,应用电磁学理论麦克斯韦方程予以分析。

电流密度  $\mathbf{J}$  在磁导率的介质中形成的稳定磁场  $\mathbf{H}$  和磁感应强度  $\mathbf{B}$  之间的关系由麦克斯韦方程组确定。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (2-18)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2-19)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2-20)$$

考虑相应的边界条件,即磁感应强度在法线方向连续,磁场强度在切向方向连续,公式表示为:



$$B_{1n} = B, H_{1t} = H_{2t} \quad (2-21)$$

引入矢量磁位  $A$ , 使得

$$\nabla \times A = B \quad (2-22)$$

由式 (2-18) 和 (2-19), 可得控制方程:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J \quad (2-23)$$

对于几何结构对称的管道, 磁场二维轴对称的情况, 矢量磁位  $A$  只有一个分量, 库伦规范  $\nabla \cdot A = 0$  自动满足。

利用矢量恒等式  $\nabla \times \nabla \times A = \nabla (\nabla \cdot A) - \nabla^2 A$ , 控制方程 (2-23) 可写为:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = -J \quad (2-24)$$

采用圆柱坐标系  $(r, \theta, Z)$ , 对于轴对称情况方程 (2.24) 简化为:

$$\frac{1}{\mu} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rA) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial A}{\partial z} \right) \right\} = -J \quad (2-25)$$

式中, 矢量磁位  $A$  和激励电流密度  $J$  只有周向 ( $\theta$ ) 分量, 因此可以看作为标量。

由式 (2-22) 可求得磁感应强度  $B$ :

$$B_r = -\frac{\partial A}{\partial z} \quad (2-26)$$

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial (rA)}{\partial r} \quad (2-27)$$

式中,  $B_r$  是  $B$  的径向分量,  $B_z$  是  $B$  的轴向分量。

用解析法求解上述问题是不可能的, 为此人们创造了数值方法。数值方法主要可分为有限差分方法、镜像法、积分法和变分法, 变分法的现代形式就是有限元法。

### 3.1 仿真分析法

随着电子计算机的发展, 通过计算机软件对电磁场问题进行仿真模拟分析已成为漏磁场研究的一种重要手段, 近些年来被普遍应用到缺陷漏磁场的仿真分析计算中。仿真与数值计算、求解方法的区别在于它首先是一种实验技术。仿真的过程包括建立仿真模型和进行仿真实验两个主要步骤。利用计算机实现对系统的仿真研究不仅方便、灵活, 而且也是经济的。

有限元方法作为一种数值分析方法不仅适应复杂的集合形状和边界条件, 而且能够成功用于多种介质和非均匀介质的问题。它将求解域分割 (或进行离散) 为有限个单元, 并在每个单元内采用假设的近似函数来表示未知场变量, 这种有限元的离散工作就把问题简化为有限个未知量的问题, 假定的函数常称为场变量模型或内插模型, 场变量模型由节点 (几个单元的交汇点) 处长变量的值确定, 场变量的节点值和单元的场变量模型完全确定了单元内场变量的性质。从数学上说, 有限元法是从变分原理出发, 首先把求解的微分方程问题转化为等价的变分问题, 然后通过离散化处理构造一个分片解析的有限元子空间, 把变分问题近似地转化为有限元子空间的多元函数极值问题, 最后转化为一组多元线性代数方程组的求解。

通过有限元仿真分析, 可以分析各种影响因素和干扰对漏磁场的影响及规律, 对漏磁检测到的缺陷外形和尺寸进行准确评价, 实现对缺陷产生的漏磁场空间分布及特征分析判断。

### 2.3.3 漏磁信号的影响因素

#### (1) 缺陷外形对漏磁信号影响的仿真分析

实际缺陷的形状是各种各样的, 没有规律可言。漏磁信号的大小通常要受缺陷长度、缺陷深度、缺陷宽度及缺陷渐变角度等几方面因素的影响。从腐蚀缺陷判别和管道腐蚀程度评价国家标准中得知, 腐蚀缺陷可从等效长度、等效宽度和最大深度这三个外形参数来评价。以管道为例, 通常将缺陷外形参数定义为: 缺陷沿管道轴向方向的尺寸被称为它的长度, 沿管道周向(环向)方向的尺寸被称为它的宽度, 沿管道壁厚方向的尺寸被称为它的深度(用缺陷深与管道壁厚的百分比表示)。

##### ① 缺陷长度对漏磁信号的影响

缺陷的宽度、深度、磁化强度等条件相同, 缺陷的长度分别为 5mm、10mm、15mm、20mm、25mm、和 30mm, 采用有限元法仿真研究缺陷轴向长度和漏磁信号之间的关系。

不同长度缺陷的漏磁信号径向分量 BX 如图 2.10 所示, 从图 2.11 可以看出, BX 峰峰值随着缺陷长度的增加而逐渐减小, BX 峰峰间距随着缺陷长度的增加明显增加。漏磁信号轴向分量 BY 如图 2.12 所示, 由图可知, 随着缺陷长度的增加, BY 峰谷值逐渐降低, 但 BY 与横轴围绕的面积逐渐增大, 说明泄露处的磁通总量增加。

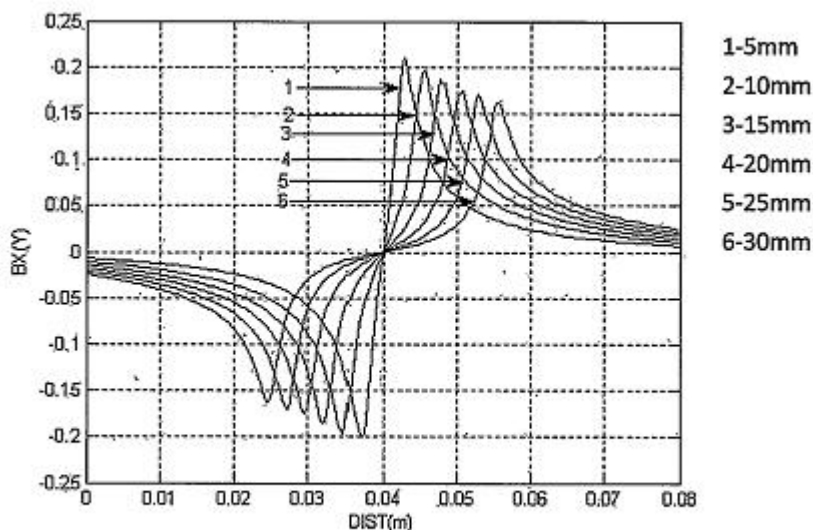


图 2.10 不同长度缺陷的漏磁信号径向分量

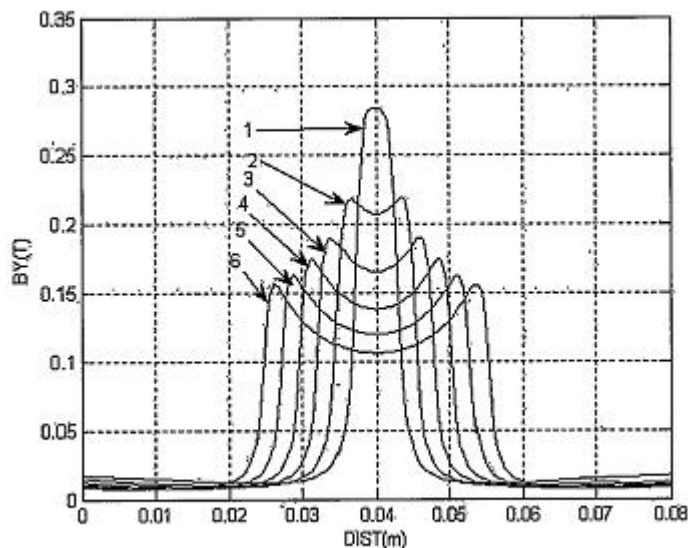


图 2.11 不同长度缺陷的漏磁信号轴向分量

综上所述, BX 峰峰间距可很好地描述缺陷长度, 作为评价缺陷长度的特征量。

### ②缺陷宽度对漏磁信号的影响

缺陷的宽度对漏磁信号的影响如图 2.12 所示。由图可见, 缺陷宽度对漏磁场的影响相应较小, 在缺陷宽度很小时, 随宽度的增大漏磁场有增加的趋势, 但当宽度较大时, 宽度增大, 漏磁场反而缓慢下降。

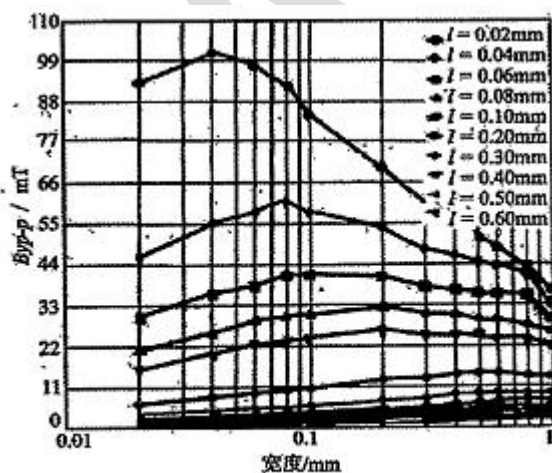


图 2.12 不同宽度缺陷的漏磁信号强度

### ③缺陷深度对漏磁信号的影响

缺陷的宽度、长度、磁化强度等条件相同, 缺陷的深度分别为 12.5%、25%、37.5%、50%、62.5%、75%、87.5%、和 100%, 其中 100% 深度的缺陷为通孔, 采用有限元法仿真研究缺陷深度和漏磁信号之间的关系。

不同深度缺陷的漏磁信号径向分量 BX 如图 2.13 所示, 漏磁信号轴向分量 BY 如图 2.14 所示。由图清晰可知, 漏磁信号曲线的形状基本相同, BX 峰峰值随着缺陷深度的增加而逐渐增加,

BY 峰谷值随着缺陷深度的增加而明显增加, 随着缺陷深度的增加泄露出的漏磁场就越多。

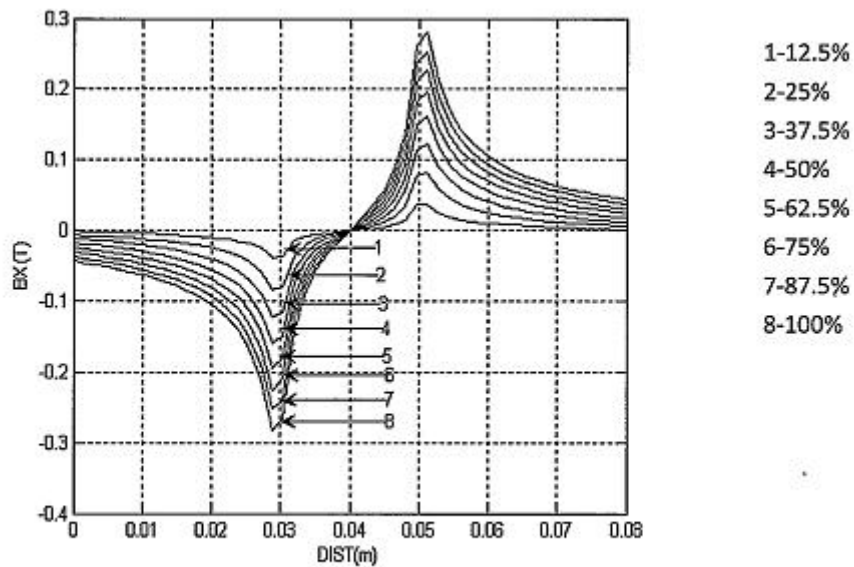


图 2.13 不同深度缺陷的漏磁信号径向分量

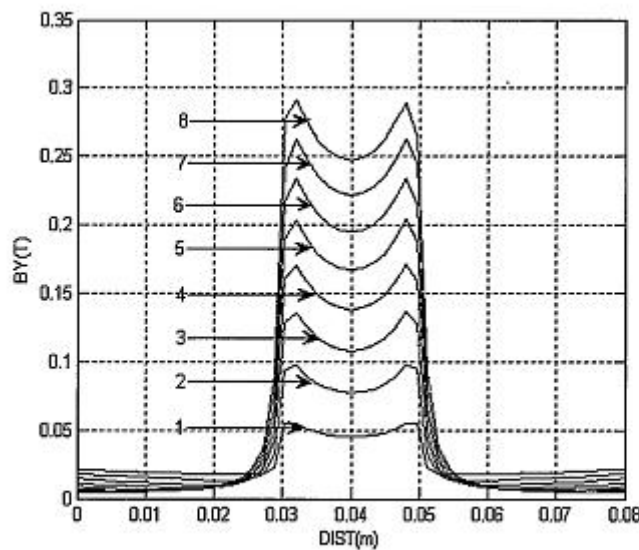


图 2.14 不同深度缺陷的漏磁信号轴向分量

从图看出, BX 峰峰值和 BY 峰谷值均与缺陷深度呈现很好的正比例线性关系, 随着缺陷深度增加而增加。BX 峰峰值和 BY 峰谷值均可很好地描述缺陷深度, 作为评价缺陷深度的特征量。

#### ④缺陷与磁场方向夹角对漏磁信号的影响

对于面状缺陷, 缺陷方向对漏磁场影响很大, 当缺陷主平面与磁化场方向垂直时, 产生的漏磁场最强; 当缺陷主平面与磁化方向平行时, 由于缺陷对磁力线的通过几乎没有影响,

所以漏磁场近似为零。如图 2.15 所示。

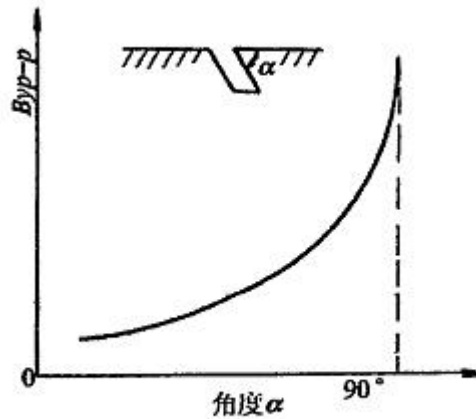


图 2.15 缺陷与磁场不同夹角对漏磁信号的影响

### (2) 磁化场强度对漏磁信号的影响

磁化场强度对漏磁信号的影响如图 2.16 所示。由图可见，当磁化程度较低时，漏磁场偏小，且增缓慢，当磁感应强度达到饱和值的 80%左右时，漏磁场不仅幅值较大，而且随着磁化场的增加会迅速增大。

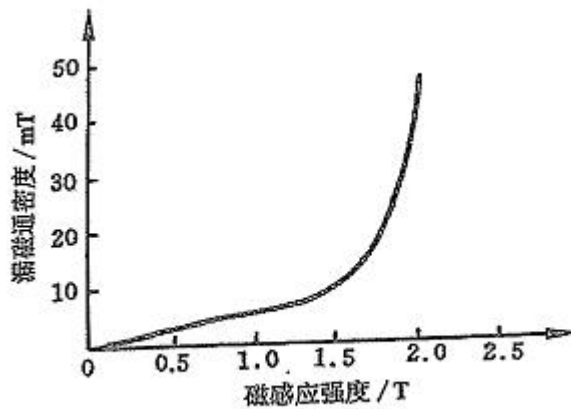


图 2.16 不同磁化场强度对漏磁信号的影响

### (3) 提离值对漏磁信号影响的仿真分析

漏磁检测中，存在大量因素影响漏磁检测数据的准确性。焊缝和管道异物等会引起传感器、磁化器或者两者同时发生的提离值，并且对获得的漏磁数据有潜在影响。

图 2.17 为管道漏磁检测原理示意图，其中，1 表示管壁，2 表示缺陷，3 表示钢刷，4 表示永久磁体，5 表示轭铁，6 表示空气，7 表示传感器， $d_1$  和  $d_2$  分别表示传感器提离值和磁化器提离值。采用有限元法仿真研究不同类型提离值赫尔漏磁信号之间的关系。



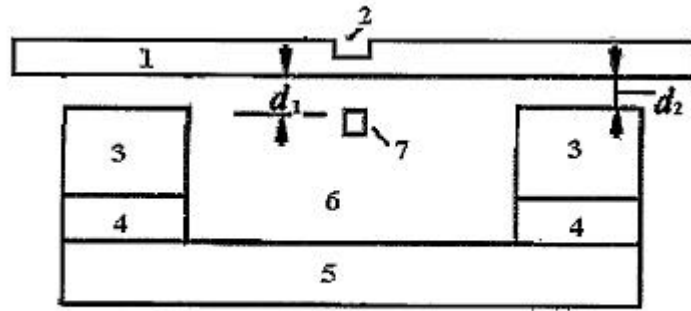


图 2.17 漏磁检测示意图

## ①传感器提离值对漏磁信号的影响

相同缺陷，磁化器提离值为零，传感器提离值从 2mm 至 20mm，从小到大依次取 6 个不同提离值。不同传感器提离值缺陷漏磁信号径向分量 BX 如图 2.18 所示，漏磁信号轴向分量 BY 如图 2.19 所示。由图清晰可知，漏磁信号径向的基线随着传感器提离值的增加而降低，BX 峰峰值随着传感器提离值的增加而明显降低；漏磁信号轴向分量的基线随着传感器提离值的增加而增加，BY 峰谷值随着传感器提离值的增加亦明显降低；当传感器提离值为 20mm 时，BX 峰峰值和 BY 峰谷值接近为零。

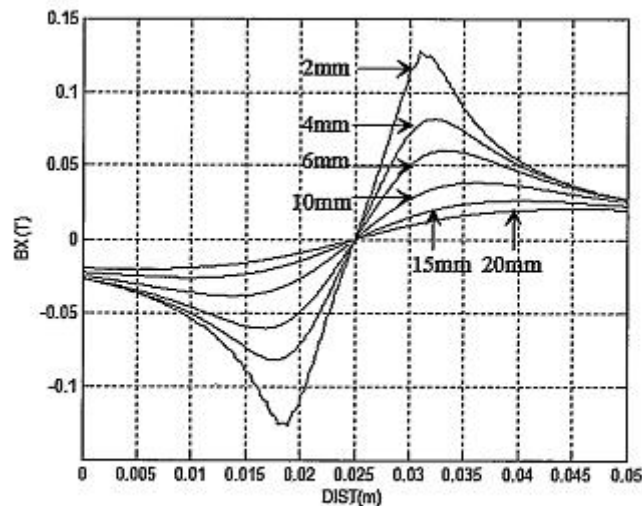


图 2.18 不同传感器提离值漏磁信号径向分量

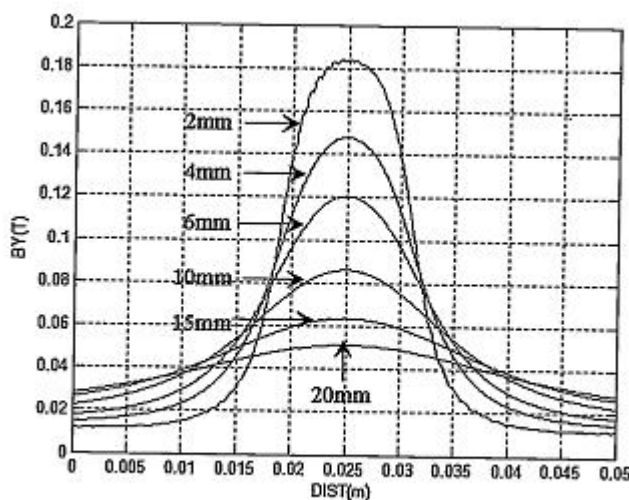


图 2.19 不同传感器提离值漏磁信号轴向分量

从图中结果可以看出,漏磁信号峰值随着传感器提离值的增大而迅速降低,但 BX 峰峰间距随之增加,这是由于漏磁信号 BX 基线降低造成的,将严重影响对缺陷特征的准确评价。

## ② 磁化器提离值对漏磁信号的影响

相同缺陷,传感器提离值为零,磁化器提离值从 2mm 至 20mm,从小到大依次取 6 个不同提离值。不同磁化器提离值缺陷漏磁信号径向分量 BX 如图 2.20 所示,漏磁信号轴向分量 BY 如图 2.21 所示。

由图可以看出,漏磁信号径向分量的基线随着磁化器提离值的增加略有降低,BX 峰峰值随着磁化器提离值的增加而缓慢降低;漏磁信号轴向分量的基线基本不随着磁化器提离值变化,BY 峰谷值随着磁化器提离值的增加比较明显降低。

BX 峰峰值和 BY 峰谷值随着磁化器提离值的增大缓慢下降,随着磁化器提离值的增大,BX 峰峰间距基本稳定,这是由于漏磁信号 BX 基线变化微弱。

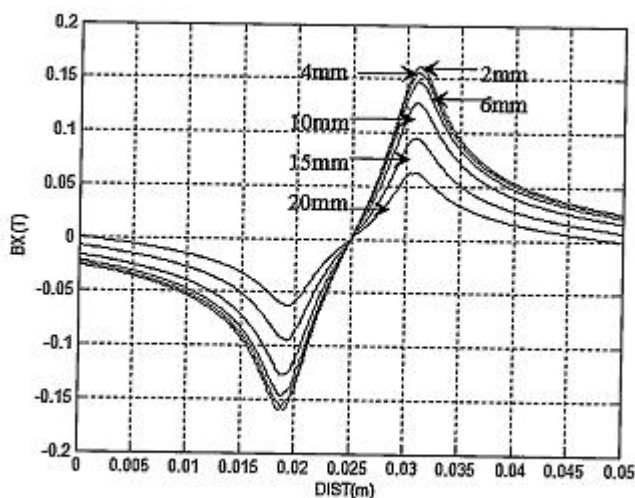


图 2.20 不同磁化器提离值漏磁信号径向分量

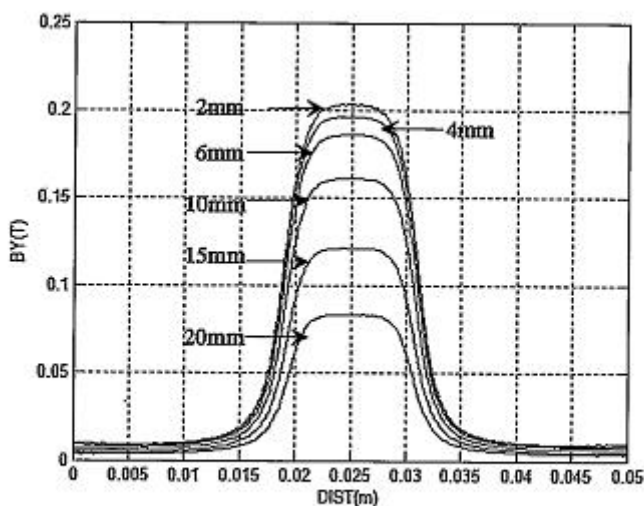


图 2.21 不同磁化器提高值漏磁信号轴向分量

### ③共同发生提高值对漏磁信号的影响

相同缺陷, 传感器和磁化器同时引起提高值, 提高值从 2mm 至 20mm, 从小到大依次取 6 个值, 传感器和磁化器同时引起不同提高值时缺陷漏磁信号径向分量 BX 如图 2.22 所示, 漏磁信号轴向分量 BY 如图 2.23 所示。

由图清晰可看出, 此信号径向的基线随着组合离值的增加而降低, BX 峰峰值随着组合提高值的增加而明显降低; 漏磁信号轴向分量基线随着组合提高值的增加而增加, BY 峰谷值随着组合提高值的增加亦明显降低, 当组合提高值为 20mm 时, BX 峰峰值和 BY 峰谷值接近为零。

漏磁信号峰值随着组合提高值增大而迅速降低, 但 BX 峰峰间距却随之增加, 这是由于漏磁信号 BX 基线降低造成的, 将影响对缺陷特征的准确评价。

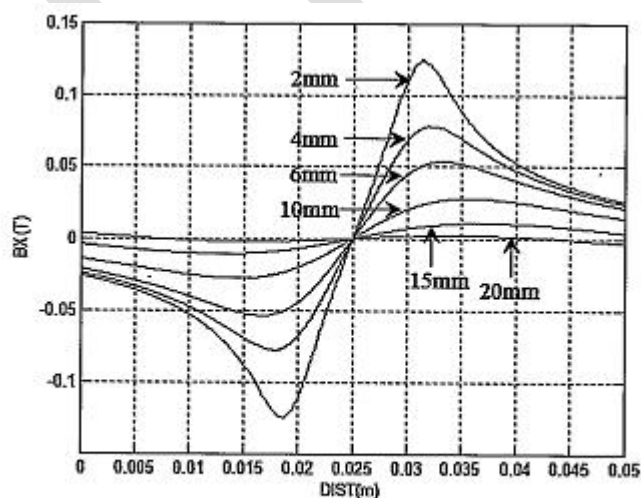


图 2.22 不同组合提高值漏磁信号径向分量

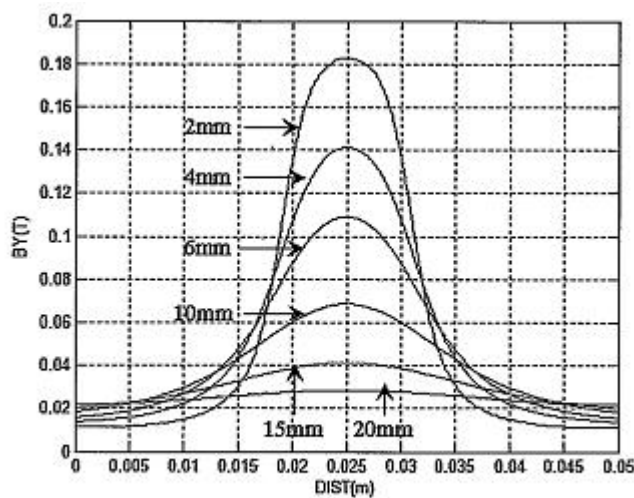


图 2.23 不同组合提离值漏磁信号轴向分量

### 3.6.4 不同类型提离值对漏磁信号的影响

相同缺陷, 各种提离值均为 10mm。图 2.24 为不同类型提离值漏磁径向分量比较, 图 2.25 为不同类型提离值漏磁向轴分量比较。

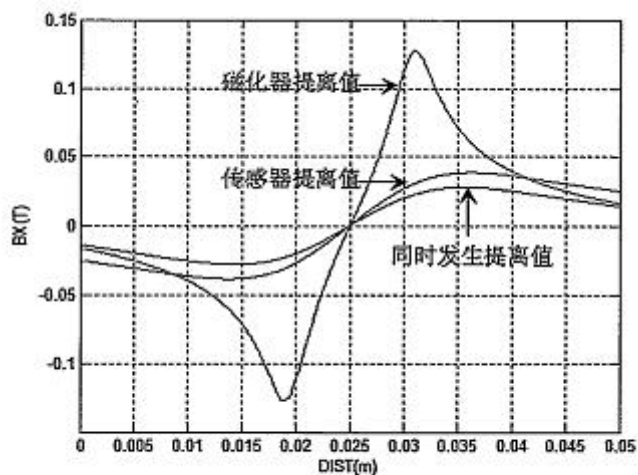


图 2.24 不同类型提离值漏磁信号径向分量

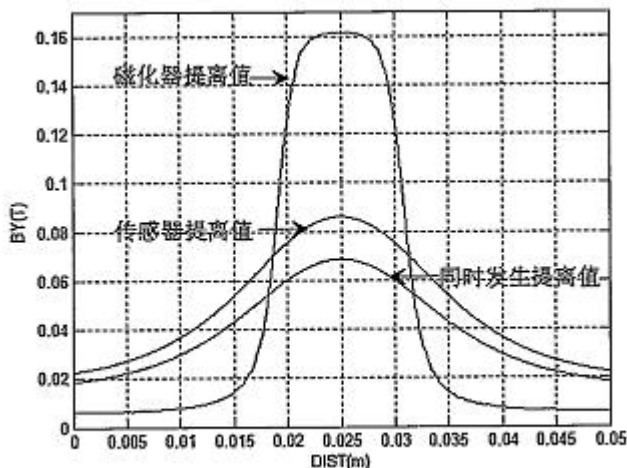


图 2.25 不同类型提高值漏磁信号轴向分量

从图中结果可以看出, 传感器提高值对漏磁信号峰值的影响远远大于相同大小的磁化器提高值的影响; 传感器和磁化器同时引起的提高值引起测量漏磁信号峰值的最大的降低。

综合上述分析, 提高值 (传感器, 磁化器, 和他们共同) 能引起测量峰值和基线漏磁通幅值的降低; 漏磁同幅值的降低引起测量的实际漏磁场信号大小的不准确, 对不准确的漏磁数据的分析将导致缺陷遗漏或测量量比实际量小的过时。在漏磁检测之前, 应该评价管道以确定其是否存在残骸。如果确定其存在残骸, 应该用适当的管道清洗方法清洗管道, 这将改善漏磁检测数据的质量, 并导致完整的评价。

#### (4) 检测器运行情况的仿真分析

在漏磁检测中, 利用传感器所获得的漏磁信号也受到检测装置运行速度的影响。不同运行速度下漏磁场分布有限元仿真结果如图 2.26 所示。由图可见, 检测装置运行速度引起磁力线的扭曲, 随着运行速度的增加, 磁力线扭曲越严重。



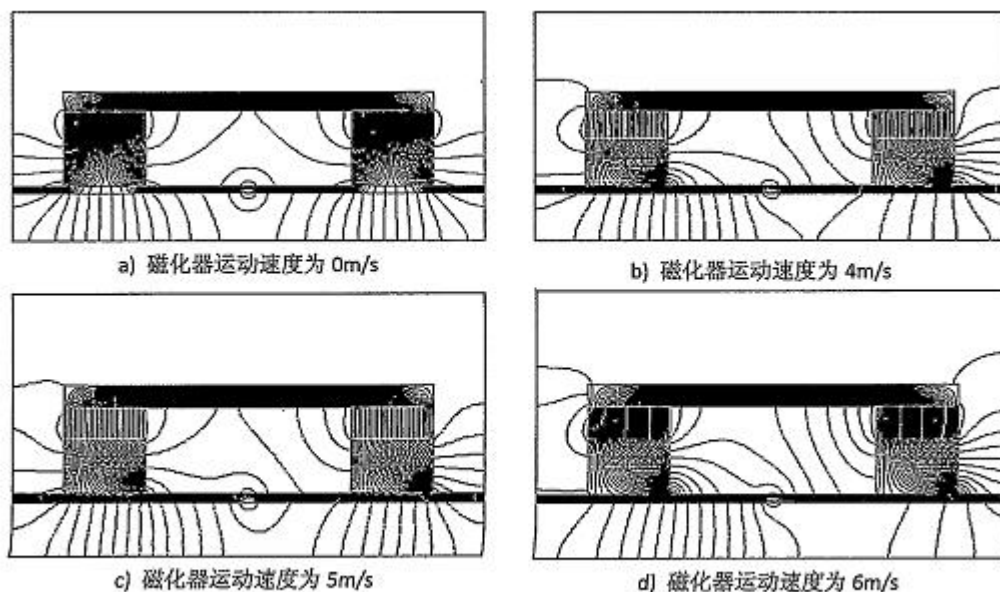


图 2.26 检测装置不同运行速度漏磁场分布图

其原因为：铁磁材料是一种导磁体，同时往往也是导电体，漏磁检测装置在运行时，径向方向磁场引起管壁上磁通量变化，在管道内部产生环形电流，形成反向磁场，这些涡流将延迟磁通对管壁的穿透，从而改变磁场的分布。

相同磁化水平情况下，不同检测器运行速度情况下，缺陷处漏磁场径向信号  $B_x$  和轴向信号  $B_y$  比较如图 2.27 所示。由图可见，不同运行速度下，径向信号  $B_x$  的形状相似，但 4m/s、5m/s、6m/s 下的  $B_x$  峰峰值相比与 0m/s 明显减小；在 4m/s、5m/s、6m/s 的运行速度下，轴向信号  $B_y$  的形状受速度影响与 0m/s 存在不同，且峰峰值明显降低。

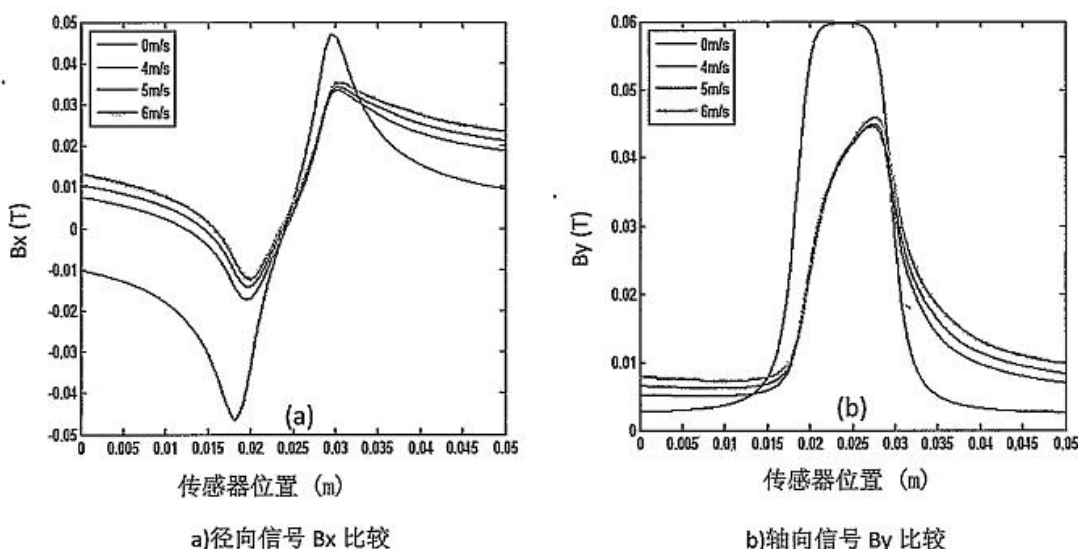


图 2.27 缺陷处漏磁场磁感应强度

针对不同运行速度下具有相同漏磁信号的磁化水平进行了仿真分析，结果如图 4.25 所示。由结果可见，在不考虑其他影响因素的条件下，获得相同缺陷漏磁场信号，不同的运动速度需要不同的励磁水平。以径向为例，如图 2.28 (a) 所示，获得 0.15T 的径向漏磁信号峰峰值，0m/s 运动时需要

570000A/m 对应形成的磁场励磁, 而 6m/s 运动时需要 700000A/m 对应形成的磁场励磁。

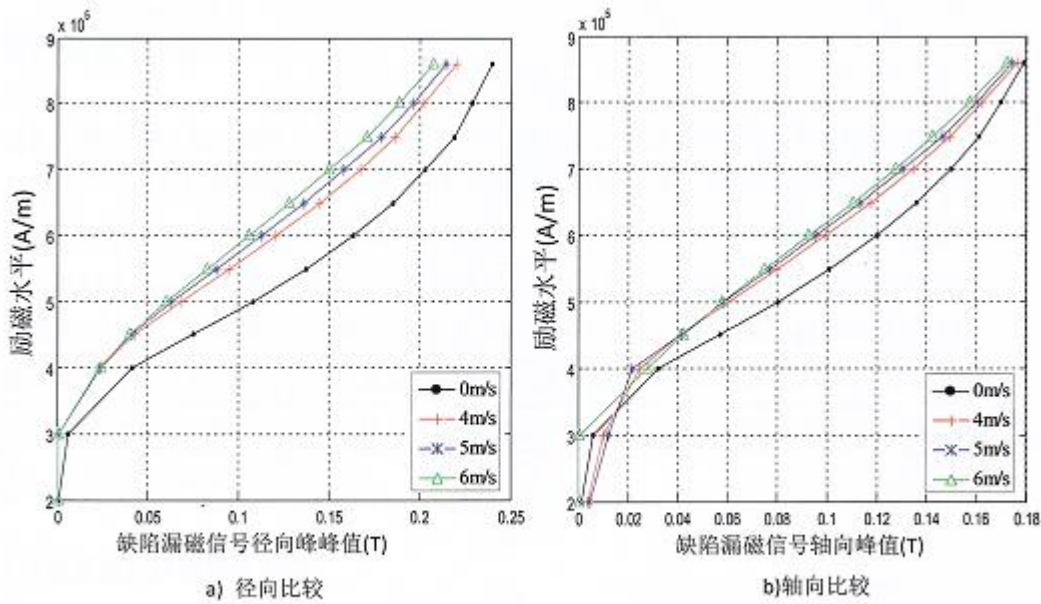


图 2.28 不同速度下相同漏磁信号磁化水平比较

#### (5) 焊缝产生的漏磁信号特征

在漏磁检测过程中, 除了缺陷外, 其它异物, 如焊缝、套管等也产生相应漏磁场信号。图 2.29 为焊缝漏磁信号特征图。

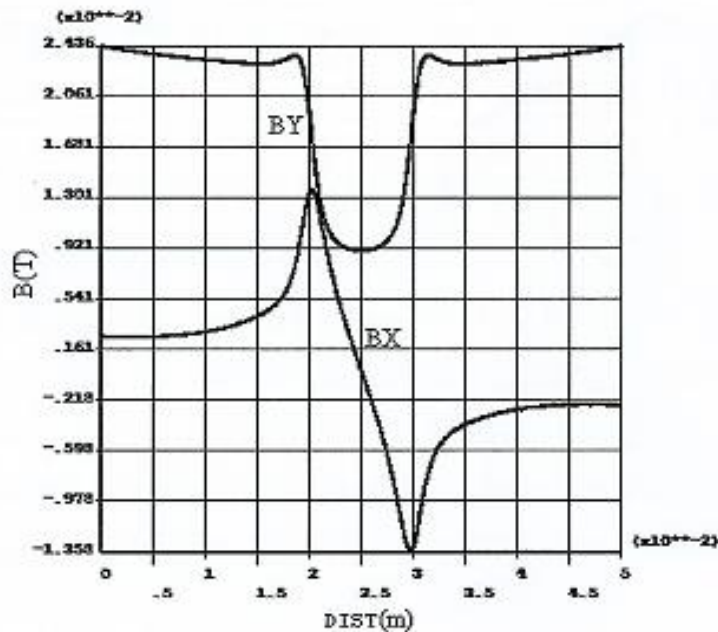


图 2.29 焊缝漏磁信号特征

由图可见, 焊缝区漏磁信号径向分量 BX 具有正、负两个峰值, 在焊缝上边缘达到正值的最大, 下边缘达到负值的最大。轴向分量 BY 有一个波谷。相比于缺陷的漏磁信号, 焊缝区的 BX 分量先达到波峰, 再下降到波谷, 缺陷的 BX 分量先到达波谷再增大到波峰, 两者相位相反, 焊缝的 BY 分量和缺陷的 BY 分量的相位也相

反。所以可以从漏磁信号分布的曲线的相位特性上区分焊缝和缺陷的信号。

YHASTS

## 第三部分 漏磁外检测技术

### 3.1 管道漏磁外检测技术

随着石油天然气及石油化工工业的发展,我国管道工业得到迅猛发展。管道在运行过程中通常受到来自内外环境的联合影响,由于外部环境、输送介质、管内积液、压力波动等原因,极易发生管壁腐蚀而直接影响管道的使用寿命。因此如何了解管道的腐蚀状况,有目的地对管道进行维修,减少事故发生,延长管道的服役时间,就成了检测人员关心的主要问题。目前管道的检测分为内检测和外检测两种方法,内部检测(简称内检测)对检测器的要求较高,且对管道情况的要求也比较苛刻,仪器被投放到高压的输送介质中,以检测器前后的压力差为动力,对管道进行检测。由于石油化工工业很多管道具有小直径、弯头多的特点,内检测难度大,常采用管道漏磁外检测方法。

#### 3.1.1 管道漏磁外检测磁化方法

漏磁检测作为管道外检测方法可以有效的对管道进行检测,特别是埋地管道开挖后或地面场站管道,采用管道外漏磁检测方法效果较好。针对不同的管道结构,可以采用不同的磁化方法:

- (1) 管径大的管道,可以采用可变径轴向局部磁化方法进行检测;
- (2) 无空间限制的长直管可以采用整体磁化方法进行检测;
- (3) 有空间限制的小径管可以采用局部固定管径磁化方法进行检测;
- (4) 油管、钻杆等可拆卸管道可以采用电磁磁化进行检测。
- (5) 为了保证轴向裂纹能够检出,可以采用周向磁化进行检测。

##### 3.1.1.1 管道漏磁外检测轴向可变径局部磁化

管道的直径是成系列化的,每种管径设计种磁化结构,成本高、操作灵活性低。需要采用变径磁化结构。单磁化单元模型即励磁结构与管道仅构成一个磁回路,这种模型结构简单,但一次检测的管道面积小,检测效率低。若增加磁化结构的宽度,由于实际管道为圆柱形壳体,管径变化时磁化单元极靴底面与管壁外径间距离将变得不均匀,就会导致边缘处磁化不能饱和,与磁化单元中间存在差异。为了增加每次扫描检测的宽度,同时适应不同管径。





图 3.1 可变径管道外漏磁检测仪

采用多磁化单元结构，多个磁化单元采用铰接的方式连接在一起，可以通过改变磁化单元间角度来适应不同管径，对于直径大于 60mm 的管道都可以用其进行检测。

管道可变径漏磁检测仪主要分为磁化单元、数据采集单元，驱动单元、定位装置和电源模块等，如图 3.1 所示。在每个磁化单元中，衔铁、磁铁、极靴和管壁形成闭合的磁回路，传感器盒固定到衔铁下方，两磁极之间，用以放置和保护磁敏元件。各磁化单元之间通过固持机构和连接螺栓固定连接。每个磁化单元两端均装有行进轮，可在人工驱动方式下沿管道匀速直线前进。

#### 3.1.1.2 管道漏磁外检测周向局部磁化

漏磁检测对于体积型缺陷检测效果非常好，但对于裂纹类缺陷，具有方向性。同磁化方向平行的裂纹类缺陷漏磁无法检出。而管道上有可能会有轴向裂纹，为了保证轴向裂纹能够检出，需要采用周向磁化方法，这种磁化方法一般适合直径比较大的管道外漏磁检测。管道外周向局部磁化结构如图 3.2 所示。

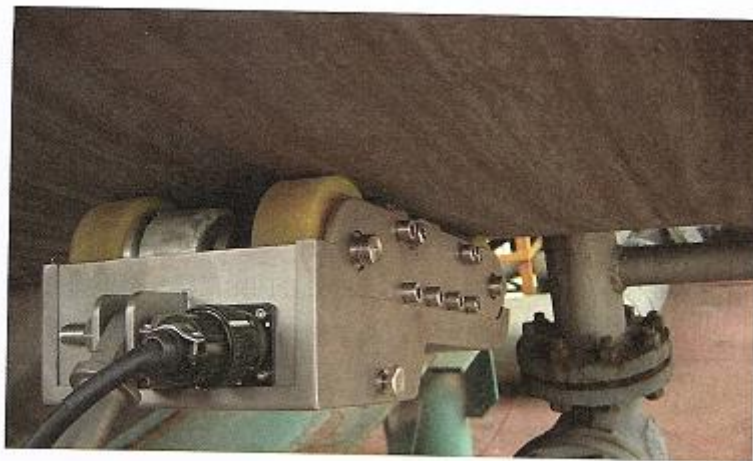


图 3.2 管道外周向局部磁化结构

#### 3.1.1.3 管道漏磁外检测永久磁铁整体磁化

对于直径较小的长直管道，可变径结构会出现结构上的干涉，可以采用固定管径整体磁化的结构，该种结构采用两个半圆形分合式的磁化结构，采用铰链进行连接，一次覆盖管



道 360°，可以对在线管道进行整体快速检测。

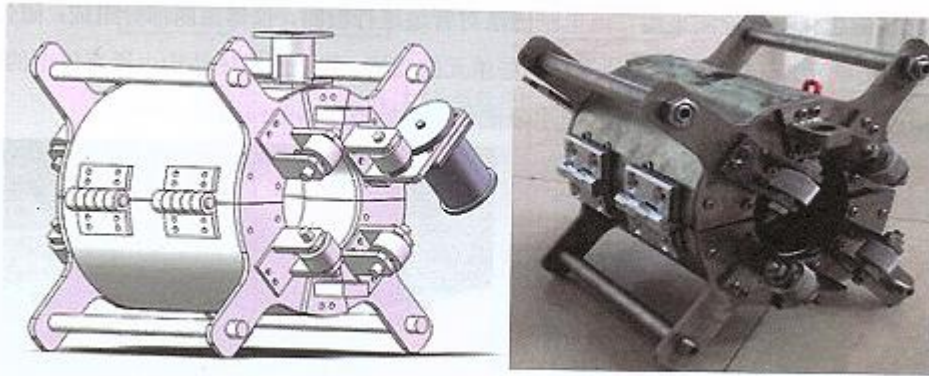


图 3.3 整体磁化管道外漏磁检测磁化结构

固定管径整体磁化的结构磁化结构如图 3.3 所示，由磁铁、极靴及检测传感器组成，其中选用永久磁铁作为励磁源，励磁磁路采用单回路形式。这种方法优点是检测体积小、速度快、重量轻，易携带。行走轮与其轮座呈对称安装，相邻轮座夹角均为 90°，这样可以最大限度的保证仪器平稳前进。检测后，可以对管道进行缺陷的定位与严重程度的评估，从而实现对管壁腐蚀缺陷的评价。

#### 3.1.1.4 管道漏磁外检测固定管径局部磁化

在现场，很多管道受空间限制，很难进行管道外永久磁铁整体磁化检测，需要采用固定管径局部磁化的检测结构，为狭小空间管道局部检测提供技术支持，局部磁化检测仪一般选取被检测管道的一部分(二分之一或三分之一)进行局部磁化。考虑管道管径较小，局部磁化检测仪由磁化单元、数据采集单元、行走单元、定位装置四部分组成，图 3.4 为直径 60mm 管道局部磁化漏磁检测仪的磁化结构。

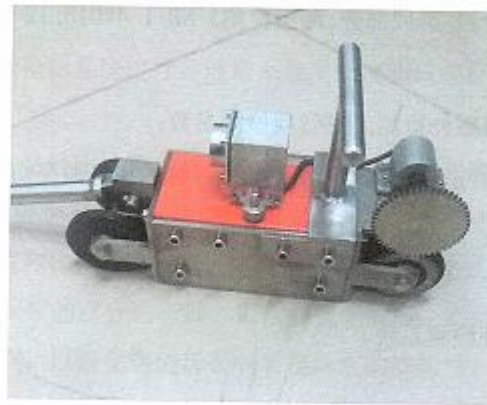


图 3.4 固定管径管道漏磁外检测磁化结构

#### 3.1.1.5 管道漏磁外检测电磁磁化

漏磁检测磁化方法方法分为电磁磁化和永磁磁化，永磁磁化结构磁化能力单一，管壁适用范围有限，对于厚壁管的缺陷检测难以达到精度要求。电磁磁化以其可调节磁场强度的特点可针对不同厚度的壁厚进行检测，但电磁磁化方式耗电量大，不适于野外作业，对于可

拆卸管道在厂房内检测具有很高的效率,针对不同壁厚调节磁场强度可提高检测的精度。

电磁磁化漏磁检测采用直流电励磁法对管道进行检测,仪器由四部分组成:磁化结构、数据采集单元、驱动结构与其他支撑这些单元的结构。其中的磁化结构由通直流电的缠绕线圈构成,图 3.5 为直径 102mm 管道电磁磁化漏磁检测仪器的结构图。



图 3.5 电磁磁化磁化结构

### 3.1.2 管道漏磁外检测工艺

#### 目的

为保证漏磁检测结果的准确性、可靠性,编制本检测工艺。

#### 适用范围

适用于管道漏磁外检测。

#### 编制依据

《承压设备无损检测第 12 部分:漏磁检测》NB/T 47013. 12-2015

#### 检测项目及要求

检测项目为管道漏磁外检测,包括 2 项检测参数:

- (1) 铁磁性金属管道母材内壁和外壁缺陷(腐蚀和机械损伤)的定位。
- (2) 缺陷的量化,至少按 20%, 40%, 60%和 80%分级。

#### 仪器设备情况

仪器名称:管道漏磁外检测系统。

#### 工作流程

#### 检测系统框图

检测系统框图如图 3.6。

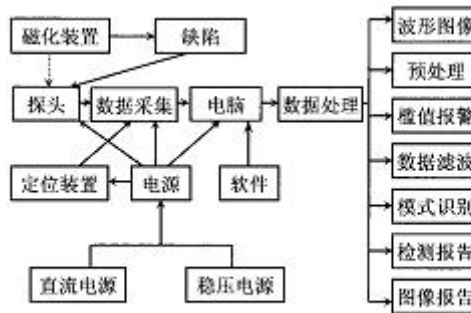


图 3.6 管道漏磁外检测仪系统框图

## 准备工作

### (1) 制定检验方案

- 1) 收集、审查被检管道的原始资料。
- 2) 根据管道的原始资料和现场实地考察获取相应的基本信息。
- 3) 对于在用管道的检测，需要将管道外保温拆除，并达到进入检测的要求。
- 4) 管道表面应无液体、厚的铁锈或污垢等固体残留物以及可能影响检测的其他障碍物。根据灵敏度的要求，管道表面可以有不大于 6 mm 的非金属涂层。
- 5) 检查接管、法兰和支撑件等地的情况。当出现无法进行漏磁检测的区域时，应设法采用超声检测。对于无法进行检测的区域，应记录其位置，并在检测结果评定时将其去除。
- 6) 根据检测任务和经讨论确定的检测方案，准备好要携带的仪器、设备、配件、消耗材料、工具、配套设施等。

### (2) 仪器的标定

- 1) 在仪器运输前，对漏磁检测系统进行各通道系统灵敏度测试或标定，确保仪器满足检测要求。
- 2) 标定是通过将检测仪器在对比试管上扫查通过人工钻孔缺陷来进行的。如果被检管道表面有涂层时，试管表面应先放置上非导体弹性垫片，其厚度应相当于被检测管道的涂层厚度。
- 3) 通过调节仪器的设定值和传感器的高度，使仪器扫查通过对比试管的人工缺陷时，信号指示与所需板厚人工缺陷深度的百分比一致。每次扫查完成后，必须将仪器反转 180 度，在相反的方向上重新扫查一次，以避免剩磁场影响系统标定的准确性。
- 4) 标定检查至少应在检测开始和工况改变时进行，以保证检查结果的准确性。每次标定均应记录。
- 5) 标定全部合格后，分类装箱。由装箱人填写装箱清单。装箱清单一式 2 份，一份带到现场，一份留在实验室内。
- 6) 标定和装箱工作均需 2 人以上进行。

## 运输

仪器运输过程应有防挤压、防振及防雨设施,并由专人负责

## 仪器工作环境要求

### (1) 仪器位置

现场检测时,仪器需要进入现场,要注意安全。

由于极强的磁铁,在把系统安装管道时必须小心,避免手指和其它肢体被夹在磁铁和管壁之间。强烈推荐在安装时,触摸屏式工业计算机和仪器的连线与系统分开。需要两个人把系统安装到管道上。磁化结构通过调整与管壁大约成  $45^{\circ}$  角放在管道上。

### (2) 仪器的空间环境条件

一般情况下,环境条件要求如下:

湿度:  $20\% \sim 90\%$  相对湿度,非冷凝:

温度:  $-10^{\circ} \sim 40^{\circ} \text{C}$  :

电源: 无需 220V 电源,要求现场检测时带备用蓄电池。

所有仪器应有防风、防尘、防静电、防水、防晒等措施,并密切注意天气变化情况,做好预防工作。

## 现场检测人员要求

检测人员必须戴安全帽,穿防静电工服,鞋底不能有金属钉,带防尘口罩:

按规定关闭传呼机、手机等一切可能产生静电或火花的设备;

检测人员,不论检测现场是否有禁烟火要求,一律不准携带烟火至检测现场。

## 现场检测步骤及要求

(1) 打开漏磁检测系统电源开关,预热十分钟。

(2) 根据管道厚度调节探头提离值,以保证检测结果的准确性。

(3) 根据检测方案,建立管道编号系统。

确定管道检测基准点,由于管道是由很多段管焊接而成的,在检测每块具体的管道之前,必须对它们进行编号。编号时首先要确定管道的检测基准点,这个检测基准点是管道编号系统、管道坐标系和实际缺陷位置的基准点。整个管道以上游焊缝 12 点方向为检测基准点。

进行编号配置,在管道编号系统中采用坐标。

确定管道参考点,在检测过程中允许操作者从管道的四个角中的任意一个开始扫描。为了正确的确定缺陷的位置,确定从哪个角开始扫描是必要的。这个角被称作管道参考点。因为用编号系统,管道参考点是检测基准点有关的,在确定管道参考点时必须加以注意,不要无目的的确定每段管道的参考点。

检测时一般应使仪器沿管道的轴向方向进行扫查,并在长轴两端距管道边沿等于磁场探头宽度的端部区域沿管道周向方向进行一次扫查,如有必要,也可对整个管道进行周向方向扫查。

(4) 确定扫描模式。



在管道的检测过程中采用两种类型的扫描模式，每种扫描模式对应不同的参考点位置不同，有八种扫描方法。这两种扫描模式是：单向扫描和光栅扫描：

单向扫描是指从管道同一面开始的每一次扫描，并且通常被用于管道一端焊缝不规则管道；

光栅扫描是指从管道焊缝相对开始的交替扫描。这是最有效的扫描方法，但是仅用于焊缝规则管道；

扫查可以采用手动或自动模式进行，扫查速度应尽量保持均匀。

扫描检测中应确认相邻扫描带之间的有效重叠，确保不引起漏检，从而影响检测结果。

检测时应根据用户的要求确定需报警的缺陷当量深度，在探测到超过此深度的缺陷信号时，仪器应报警：对于出现报警的部位，应在垂直原扫查方向 90 度的方向或其它多个方向进行再扫查验证，以确认是否为真实缺陷：若确定为真实缺陷，检测人员则应将发现的缺陷位置在底板和图纸上分别做出标识。

#### (5) 检测注意事项；

如有影响扫查的焊瘤、支管等障碍物，在允许的情况下应拆除障碍物后再进行扫查。对于检测设备无法到达的位置，可采用超声方法进行检测。

如管道表面太粗糙影响检测时，可铺 1-2mm 厚塑料胶片等不导磁材料进行检测，但检测设备的校准必须重新进行。

检测过程中必须注意数据的存储和记录。

#### (6) 检测过程中发生异常现象时的处理办法

检测过程中认真观察和分析计算机上显示的实时监测结果，并与管道情况保持密切联系，认为出现异常情况趋势时，如发现不可接受信号等，及时停止检测。首先必须采用目视和小锤敲击的方法进行检测，用以分辨是位于内壁或外壁的缺陷；对于外壁缺陷可采用深度尺直接测量缺陷的深度；对于内壁缺陷，应采用双晶直探头进行超声检测测量，以更精确的测量缺陷的深度。待问题得到解决，方可继续进行检测工作。

#### (7) 检测过程中发生意外事故的处理办法

因干扰（如蓄电池电量低）而中断检测，凡影响检测质量的，检测工作必须重新进行，并作好记录。

因检测仪器、设备故障或损坏而中断检测时，可用相同等级的满足检测要求的代用仪器、设备重新进行试验。无代用仪器、设备，经修复的仪器、设备需经重新检定或检验合格后才能重新开始检测。

检测过程中如果发生检测仪器、设备损坏及人身伤亡等事故时，应保护现场并及时向质量负责人报告，待妥善处理后再进行检测。

#### (8) 检测结果的处理方法



采用漏磁检测系统的数据分析软件对检测的数据进行分析处理。检测结果以彩色带图形式体现。彩色带图中可以清楚直观的得出缺陷的具体位置和严重程度。图中红色代表 $\geq 80\%$ 的缺陷,蓝色代表 $\geq 60\%$ 的缺陷,蓝绿色代表 $\geq 40\%$ 的缺陷,黄色代表 $\geq 20\%$ 的缺陷。

可以对整个管道缺陷数量和局部缺陷数量进行统计分析。

#### (9) 严重性缺陷的复验

根据漏磁检测结果,如需采用常规检测方法局部复验,首先采用目视和小锤敲击的方法进行检测,用以分辨是位于内壁或外壁的缺陷:对于外壁缺陷可采用深度尺直接测量缺陷的深度:对于内壁缺陷,应采用双晶直探头进行超声检测测量,以更精确的测量缺陷的深度。

#### (10) 检测结束

关机前将所有设置的数据采集程序、标定数据、检测数据进行备份,质量负责人对检测记录审核签字后方可关机。

关机顺序为:工业计算机→漏磁检测仪电源。

### 拆卸与装箱

拆卸工业计算机时要慎重,必须放置在专用的电脑箱内,以防从空中掉落。

稳压电源插头和数据线插头切勿直接扔到地面,以免摔坏接头,应将接头缓慢扭下或直接装箱。

所拆卸的稳压电源插头和数据线插头和各种连接电缆等,均需在地面认真擦拭、整理、清点,对出现的损坏、遗失问题及时处理并做好记录,并由仪器负责人签字。

按出发前的装箱单装箱。

### 检测现场卫生要求

清理检测现场,对检测过程中遗留在设备周围区域的废弃物如手套、砂纸等进行清扫,恢复设备区原来的面貌。

### 验收

所有仪器、设施运回实验室后,由仪器负责人及检测组长重新验收,验收内容为:

按出发时的装箱单清点仪器、配件数目,损坏情况及消耗品的剩余数量:

对仪器的重要功能是否在运输过程中产生问题进行抽查验证,如对漏磁检测仪各通道是否正常工作进行测试;

仪器负责人和检测组长在验收结果清单上签字并存档。

#### 3.1.3 工程案例

##### 3.1.3.1 某石化公司 $\Phi 219\text{mm} \times 6\text{mm}$ 地面管线漏磁外检测

某石化公司  $\Phi 219\text{mm} \times 6\text{mm}$  轻烃管线建于 1992 年,在运行的过程中,发现了管道泄漏。于 2011 年 10 月 29 日对该管线进行现场管道漏磁外检测抽查。在检测前,拆除管道外保温 17 处,每处拆除保温长度大约 2 米。对拆除保温管道进行漏磁外检测,检测现场如图 3.7 所示。在该轻烃管线漏磁外检测过程中,发现管道有大量的外腐蚀和内腐蚀,如图 3.8、图

3.9 所示, 最大腐蚀深度达到了管道壁厚的 64%。局部管道漏磁检测缺陷周向展开带图如图 3.10 所示。

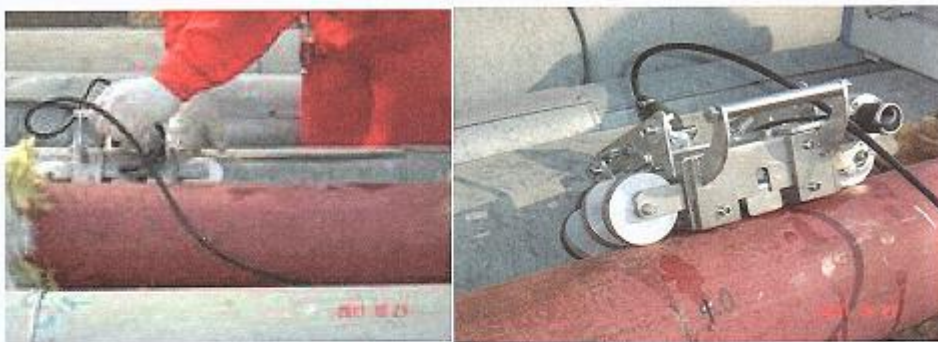


图 3.7  $\Phi 219\text{mm} \times 6\text{mm}$  轻烃管线检测现场



图 3.8 轻烃管线外腐蚀

图 3.9 轻烃管线内腐蚀

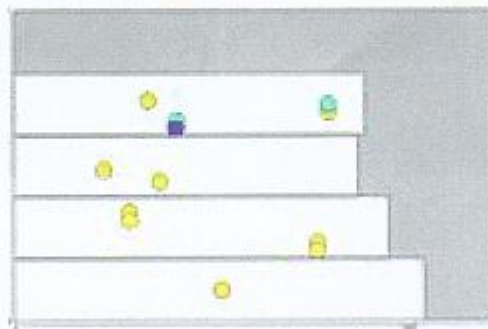


图 3.10 管道缺陷周向展开带图

对管道漏磁检测结果进行了超声测厚验证, 漏磁检测和超声测厚结果对比分析表如表 3-1 所示。管道中最大腐蚀缺陷漏磁检测量化误差为 4.0%, 定位误差最大为 2.3%。

表 3-1 漏磁检测-超声测厚结果对比分析表

项目	缺陷位置 坐标 x/mm	缺陷位置 坐标 y/mm	测量值/mm
超声测厚	350	410	3.40
漏磁检测	358	416	3.63
误差%	2.3	1.5	4.0

### 3.1.3.2 某公司 Dn530 埋地输油管线开挖漏磁外检测

黄岛管道爆炸事故发生后，于 2014 年 3 月对某公司一条与青岛爆炸管道同年建设同管



图 3.11 开挖管道漏磁外检测现场

径的埋地输油管线进行了局部开挖漏磁外检测。现场开挖了 28 处，因为埋地管道有外保温存在，对局部外保温拆除后，进行漏磁抽查检测。检测发现，该 Dn530 管线，在靠近码头侧局部防腐层破损，外腐蚀比较严重，最大腐蚀缺陷达到了管道壁厚的 52%。检测现场如图 3.11 所示，保温层内腐蚀如图 3.12 所示。



图 3.12 埋地管道保温层下腐蚀



### 3.2 储罐底板漏磁检测技术

石油、石化行业金属储罐是由铁磁性材料制成的,在长期运行过程中受到多种不利因素的影响,不可避免地受到各种损伤,如图 3.13 所示,储罐底板发生腐蚀甚至泄漏。根据规范要求,结合现场实际情况,必须定期对储罐底板进行检测,对储罐底板腐蚀程度做出准确的评估,以确保储罐的安全平稳运行。



图 3.13 原油储罐底板腐蚀泄漏

储罐底板的上下表面都容易发生腐蚀,但下表面腐蚀的检测一直以来是检测人员重点关注的问题。如图 3.14 所示,有很多储罐上表面非常光洁,但下表面已经腐蚀非常严重。目前常用的储罐底板检测方法主要包括:超声波检测(UT)、涡流检测(ET)、磁粉检测(MT)、



A 上表面腐蚀情况

B 下表面腐蚀情况

图 3.14 储罐底板腐蚀情况照片

漏磁扫描检测(MFL)。同其他无损检测方法相比,漏磁扫描检测具有操作方便、可以穿透钢板防腐涂层、能够同时检测出底板上、下表面的缺陷、缺陷显示直观、灵敏度高,检测成本低、效率高等优点。可以实现对储罐底板的全面检测与评价。检测结果表明漏磁检测技术可以准确对整个储罐底板上、下表面的腐蚀情况进行全面检测,是储罐底板腐蚀状态检测的有

效手段，为储罐的维修提供科学依据。

### 3.2.1 储罐底板漏磁检测设备

如图 3.15 所示，储罐底板漏磁检测设备包含两种，一种是电机驱动的储罐底板漏磁检测仪，主要用于储罐底板的大面积快速普查，一种是手持式储罐底板漏磁检测仪，与电机驱动的储罐底板漏磁检测仪配合使用，主要用于储罐内支柱、加热盘管下等边角位置的检测。如果是 100m<sup>3</sup> 以下小罐，也可以单独使用手持式储罐底板漏磁检测仪进行检测。目前，国内储罐最厚的边缘板 22.5mm，所以漏磁检测仪的检测厚度必须满足现场的要求，检测精度误差般要求在 10%壁厚以内。



图 3.15 储罐底板漏磁检测仪

### 3.2.2 储罐底板漏磁检测工艺

#### 目的

为保证漏磁检测结果的准确性、可靠性，编制本检测工艺。

#### 适用范围

适用于储罐底板漏磁检测。

#### 编制依据

《承压设备无损检测第 12 部分:漏磁检测》NB/T 47013. 12- 2015

《无损检测 常压金属储罐漏磁检测方法》JB/T10765-2007

#### 检测项目及要求



检测项目为储罐底板漏磁检测, 包括 2 项检测参数:

- (1) 储罐底板上下表面缺陷(腐蚀和机械损伤)的定位。
- (2) 缺陷的量化, 至少按 20%, 40%, 60%和 180%分级。

### 仪器设备情况

仪器名称: 储罐底板漏磁检测仪:

手持式储罐底板漏磁检测仪。

### 准备工作

#### (1) 制定检验方案

收集、审查被检储罐的原始资料。

根据储罐的原始资料和现场实地考察获取相应的基本信息。

储罐开罐漏磁检测, 需要将储罐排空、置换和清洗, 并达到进入储罐进行检测的要求。

储罐底板表面应无液体、厚的铁锈或污垢等固体残留物以及可能影响检测的其他障碍物。根据灵敏度的要求, 储罐底板表面可以有不大于 6 mm 的非金属涂层。

检查加热盘管和支撑柱等地的情况。当出现无法进行漏磁检测的区域时, 应设法采用超声检测。对于无法进行检测的区域, 应记录其位置, 并在检测结果评定时将其去除。

根据检测任务和经讨论确定的检测方案, 准备好要携带的仪器、设备、配件、消耗材料、工具、配套设施等。

#### (2) 仪器的标定

在仪器运输前, 对漏磁检测系统进行各通道系统灵敏度测试或标定, 确保仪器满足检测要求。

标定是通过将检测仪器在对比试板上扫查通过人工钻孔缺陷来进行的。如果被检底板表面有涂层时, 试板表面应先放置上非导体弹性垫片, 其厚度应相当于被检测储罐底板的涂层厚度。

通过调节仪器的设定值和传感器的高度, 使仪器扫查通过对比试板的人工缺陷时, 信号指示与所需板厚人工缺陷深度的百分比一致。每次扫查完成后, 必须将仪器反转 180 度, 在相反的方向上重新扫查一次, 以避免剩磁场影响系统标定的准确性。

标定检查至少应在检测开始和工况改变时进行, 以保证检查结果的准确性。每次标定均应记录。

标定全部合格后, 分类装箱。由装箱人填写装箱清单。装箱清单一式 2 份, 一份带到现场, 一份留在实验室内。

标定和装箱工作均需 2 人以上进行。

### 运输

仪器运输过程应有防挤压、防振及防雨设施, 并由专人负责

### 仪器工作环境要求

#### (1) 仪器位置

现场检测时,仪器需要进入现场,要注意安全。

任何时候操作储罐底板漏磁检测仪都要注意,它对任何铁磁性物体都有非常强的吸引力。如果磁极上吸附大最的铁磁性支出物和碎片,可能对漏磁检测仪造成严重的伤害。在着手操作仪器以前,要经常清除磁化结构上吸附的外来铁磁性物体。磁化结构用所提供的把手提起来,而不要抓车体的其它部分。特别要注意,在任何时候不要把肢体伸入磁化结构与钢板之间。

## (2) 仪器的空间环境条件

一般情况下,环境条件要求如下:

湿度: 20%~ 90%相对湿度,非冷凝:

温度: -10~40C;

电源:无需 220V 电源,要求现场检测时带备用蓄电池。

所有仪器应有防风、防尘、防静电、防水、防晒等措施,并密切注意天气变化情况,做好预防工作。

## 现场检测人员要求

检测人员必须戴安全帽,穿防静电工服,鞋底不能有金属钉,带防尘口罩:

按规定关闭传呼机、手机等一切可能产生静电或火花的设备;

检测人员,不论检测现场是否有禁烟火要求,一律不准携带烟火至检测现场。

## 现场检测步骤及要求

打开储罐底板漏磁检测仪电源开关,预热十分钟。

根据底板厚度调节探头提离值,以保证检测结果的准确性。

根据检测方案,建立储罐底板编号系统。

## 储罐底板检测基准点

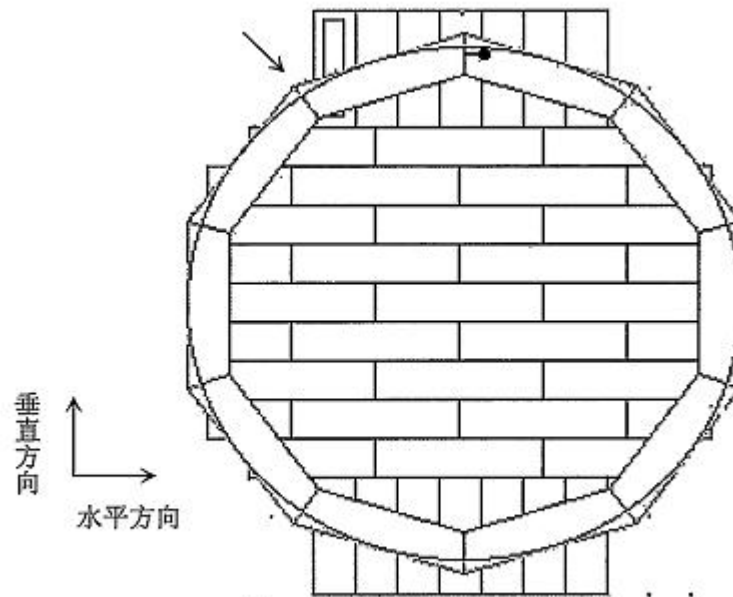


图 3.16 储罐底板检测基准点

由于储罐底板是由很多钢板焊接而成的，在检测每块具体的底板之前，必须对它们进行编号。编号时首先要确定储罐底板的检测基准点，这个检测基准点是储罐底板编号系统、底板坐标系和实际缺陷位置的基准点。整个储罐底板可以看成是由垂直和平行的钢板排列成的平面，如图 3.16 所示。选择图中箭头所指左上角第行板为储罐底板检测基准点。

### 编号配置

在储罐底板编号系统中采用行、板坐标，通常如图 3-17 所示从罐顶左拐角处的储罐检测基准点开始。行的编号垂直向下排列，板的编号从左到右水平排列。第 1 行，第 1 块板一直被设置在相对于储罐检测基准点的顶部左拐角处。当储罐底板有环形板出现时，它们也许会遮住一些板的编号，因此在通常的实际操作中，将显示板的编号并且在最终的报告中单独显示环形编号系统。

### 底板参考点

在检测过程中允许操作者从矩形或方形底板的四个角中的任意一个开始扫描。为了正确的确定缺陷的位置，确定从哪一个角开始扫描是必要的。这个角被称作底板参考点。因为用编号系统，底板参考点是与储罐检测基准点有关的，在确定底板参考点时必须加以注意，不要无目的的确定每块底板的参考点。为了确定整个储罐底板坐标系，规定每块底板的参考点所在的角都对着储罐底板检测基准点处。确定了参考点后，要确定每块底板自己的坐标系。规定板的水平向右的方向为 x 方向，第一行垂直向上的方向为 y 方向，第二行以后，垂直向下的方向为 y 方向。并且按照底板的方向，规定第一行和最后一行为垂直板，其余为水平板。

## 扫描模式

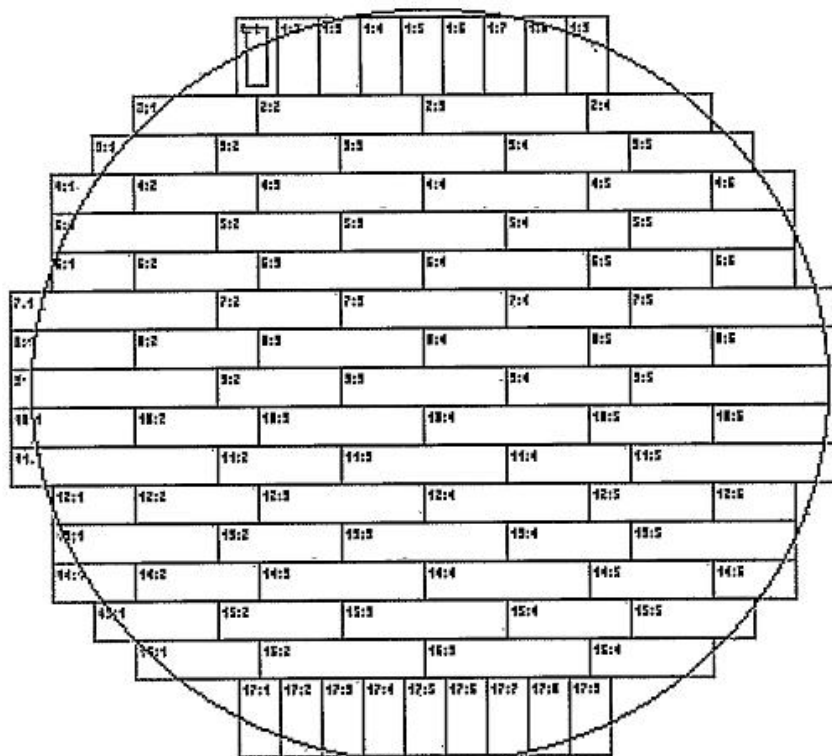


图 3.17 储罐底板编号系统

在储罐底板的检测过程中采用两种类型的扫描模式，每种扫描模式对应不同的水平板或垂直板的参考点位置不同，有八种扫描方法。这两种扫描模式是：

单向扫描

光栅扫描

**单向扫描**

单向扫描是指从底板同一面开始的每一次扫描，并且通常被用于扫描非矩形板，例如在图 3.17 中 2:1 板或 12:5 板。

**光栅扫描**

光栅扫描是指从底板相对端面开始的交替扫描。这是最有效的扫描方法，但是仅用于扫描矩形板，例如在图 3.17 的 6:2 板或 6:3 板。

检测时一般应使仪器沿底板的长轴方向进行扫查，并在长轴两端距底板边沿等于磁场探头宽度的端部区域沿底板短轴方向进行一次扫查，如有必要，也可对整个底板进行短轴方向扫查。

#### (4) 确定扫描模式。

在储罐底板的检测过程中采用两种类型的扫描模式，每种扫描模式对应不同的参考点位置不同，有八种扫描方法。

扫查可以采用手动或自动模式进行，扫查速度应尽量保持均匀。

扫描检测中应确认相邻扫描带之间的有效重叠，确保不引起漏检，从而影响检测结果。

检测时应根据用户的要求确定需报警的缺陷当量深度,在探测到超过此深度的缺陷信号时,仪器应报警:对于出现报警的部位,应在垂直原扫查方向 90 度的方向或其它多个方向进行再扫查验证,以确认是否为真实缺陷:若确定为真实缺陷,检测人员则应将发现的缺陷位置在底板和图纸上分别做出标识。

#### (5) 检测注意事项:

如有影响扫查的焊瘤、支管等障碍物,在允许的情况下应拆除障碍物后再进行扫查。对于检测设备无法到达的位置,可采用超声方法进行检测。

如储罐底板表面太粗糙影响检测时,可铺 1-2mm 厚塑料胶片等不导磁材料进行检测,但检测设备的校准必须重新进行。

检测过程中必须注意数据的存储和记录。

#### (6) 检测过程中发生异常现象时的处理办法

检测过程中认真观察和分析计算机上显示的实时监测结果,并与储罐底板情况保持密切联系,认为出现异常情况趋势时,如发现不可接受信号等,及时停止检测。首先必须采用目视和小锤敲击的方法进行检测,用以分辨是位于上表面或下表面的缺陷:对于上表面缺陷可采用深度尺直接测量缺陷的深度;对于下表面缺陷,应采用双晶直探头进行超声检测测量,以更精确的测量缺陷的深度。待问题得到解决,方可继续进行检测工作。

#### (7) 检测过程中发生意外事故的处理办法

因干扰(如蓄电池电量低)而中断检测,凡影响检测质量的,检测工作必须重新进行,并作好记录。

因检测仪器、设备故障或损坏而中断检测时,可用相同等级的满足检测要求的代用仪器、设备重新进行试验。无代用仪器、设备,经修复的仪器、设备需经重新检定或检验合格后才能重新开始检测。

检测过程中如果发生检测仪器、设备损坏及人身伤亡等事故时,应保护现场并及时向质量负责人报告,待妥善处理后再进行检测。

#### (8) 检测结果的处理方法

采用漏磁检测系统的数据分析软件对检测的数据进行分析处理。检测结果以彩色带图形式体现。彩色带图中可以清楚直观的得出缺陷的具体位置和严重程度。图中红色代表 $\geq 80\%$ 的缺陷,蓝色代表 $\geq 60\%$ 的缺陷,蓝绿色代表 $\geq 40\%$ 的缺陷,黄色代表 $\geq 20\%$ 的缺陷。

可以对整个储罐底板缺陷数量和局部缺陷数量进行统计分析。

#### (9) 严重性缺陷的复验

根据漏磁检测结果,如需采用常规检测方法局部复验,首先采用目视和小锤敲击的方法进行检测,用以分辨是位于上表面或下表面的缺陷:对于上表面缺陷可采用深度尺直接测量缺陷的深度;对于下表面缺陷,应采用双晶直探头进行超声检测测量,以更精确的测量缺陷的深度。

#### (10) 检测结束



关机前将所有设置的数据采集程序、标定数据、检测测数据进行备份,质量负责人对检测记录审核签字后方可关机。

关机顺序为:工业计算机—漏磁检测仪电源。

### 拆卸与装箱

拆卸工业计算机时要慎重,必须放置在专用的电脑箱内,以防从空中掉落。

稳压电源插头和数据线插头切勿直接扔到地面,以免摔坏接头,应将接头缓慢扭下或直接装箱。

所拆卸的稳压电源插头和数据线插头和各种连接电缆等,均需在地面认真擦拭、整理、清点,对出现的损坏、遗失问题及时处理并做好记录,并由仪器负责人签字。

按出发前的装箱单装箱。

### 检测现场卫生要求

清理检测现场,对检测过程中遗留在设备周围区域的废弃物如手套、砂纸等进行清扫,恢复设备区原来的面貌。

### 验收

所有仪器、设施运回实验室后,由仪器负责人及检测组长重新验收,验收内容为:

按出发时的装箱单清点仪器、配件数目,损坏情况及消耗品的剩余数量;

对仪器的重要功能是否在运输过程中产生问题进行抽查验证,如对漏磁检测仪各通道是否正常工作进行测试;

仪器负责人和检测组长在验收结果清单上签字并存档。

### 3.2.3 工程案例

受某沥青有限责任公司委托,对其 1 台 30000m<sup>3</sup> 常压储罐进行储罐底板漏磁检测工作。储罐基本信息如表 3-2 所示。

表 3-2 储罐基本信息表

编号	投用日期	储存介质	公称容积 (m <sup>3</sup> )	储罐形式	规格(mm)	保温
T4101C	/	原油	30000	外浮顶	46000×19350	有



图 3.18 底板上表面腐蚀

图 3.19 底板下表面腐蚀穿孔



图 3.20 割板下表面腐蚀情况

图 3.21 底板下表面腐蚀产物

## 检测过程

依据 30000m<sup>3</sup> 油罐 (T4101C) 的相关资料和图纸, 制定了检测方案。检测人员于 2019 年 12 月 19 日进入检测现场。建立了储罐底板编号系统, 确定了罐底定位的基准参考点和每块板的方向和坐标原点。罐内检测条件良好, 但由于进出料管、支柱、焊疤等的存在, 使储罐底板磁检测仪有些地方检测不到, 采用测厚和缺陷深度测量方法作为辅助检测手段对这些部位进行检验。对大于预先设定阈值的缺陷进行复验。

## 检测结果

通过对该罐底板进行全面漏磁检测, 认为该罐底板的防腐层脱落严重, 上表面存在大量腐蚀坑, 且下表面腐蚀严重, 底板多处腐蚀穿孔。有 131 块底板(共 173 块)局部点腐蚀超过了板厚 40%, 其中 35 块腐蚀超过了板厚 80%, 23 块中幅板穿孔: 罐底支柱或垫板连接处根部腐蚀严重。储罐底板腐蚀情况如图 3.18、3.19、3.20、3.21 所示, 储罐底板整体腐蚀情况如图 3.22 所示。

## 超声复验

在 30000<sup>3</sup> 油罐 (T4101C) 的检测过程中, 采用测厚和缺陷深度测量方法对部分含有大于预先设定阈值的缺陷的底板进行复验。复验结果与储罐底板磁检测仪的检测结果相吻合。

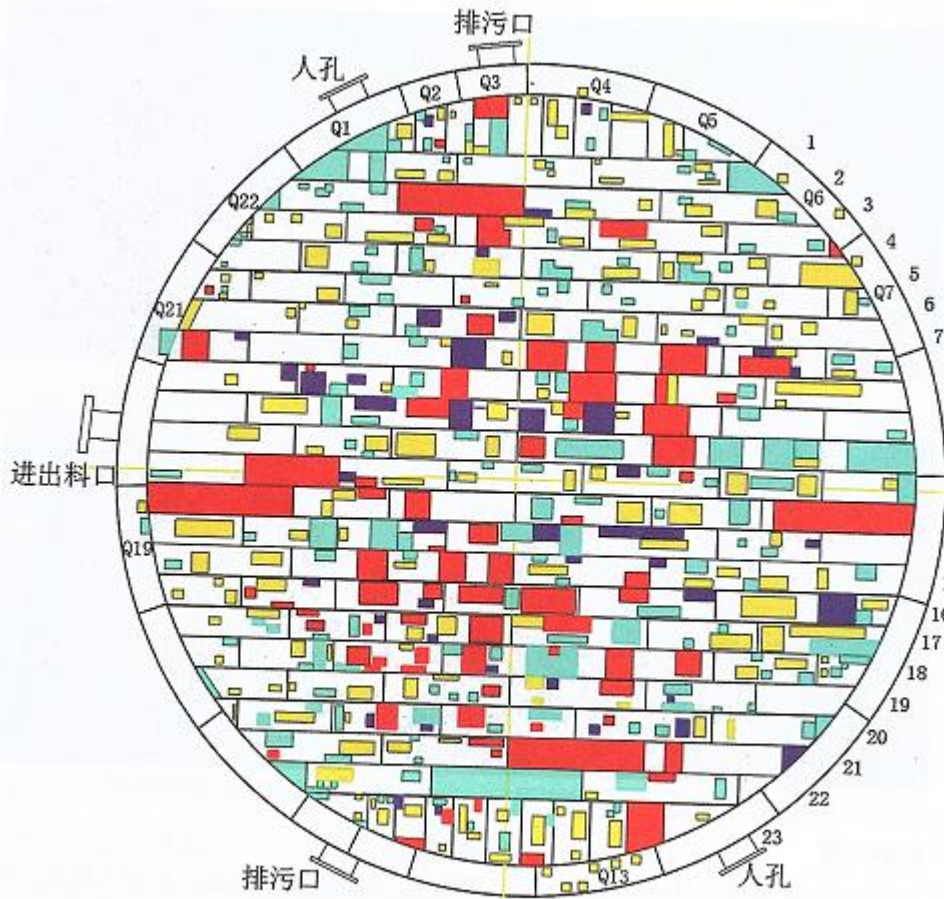
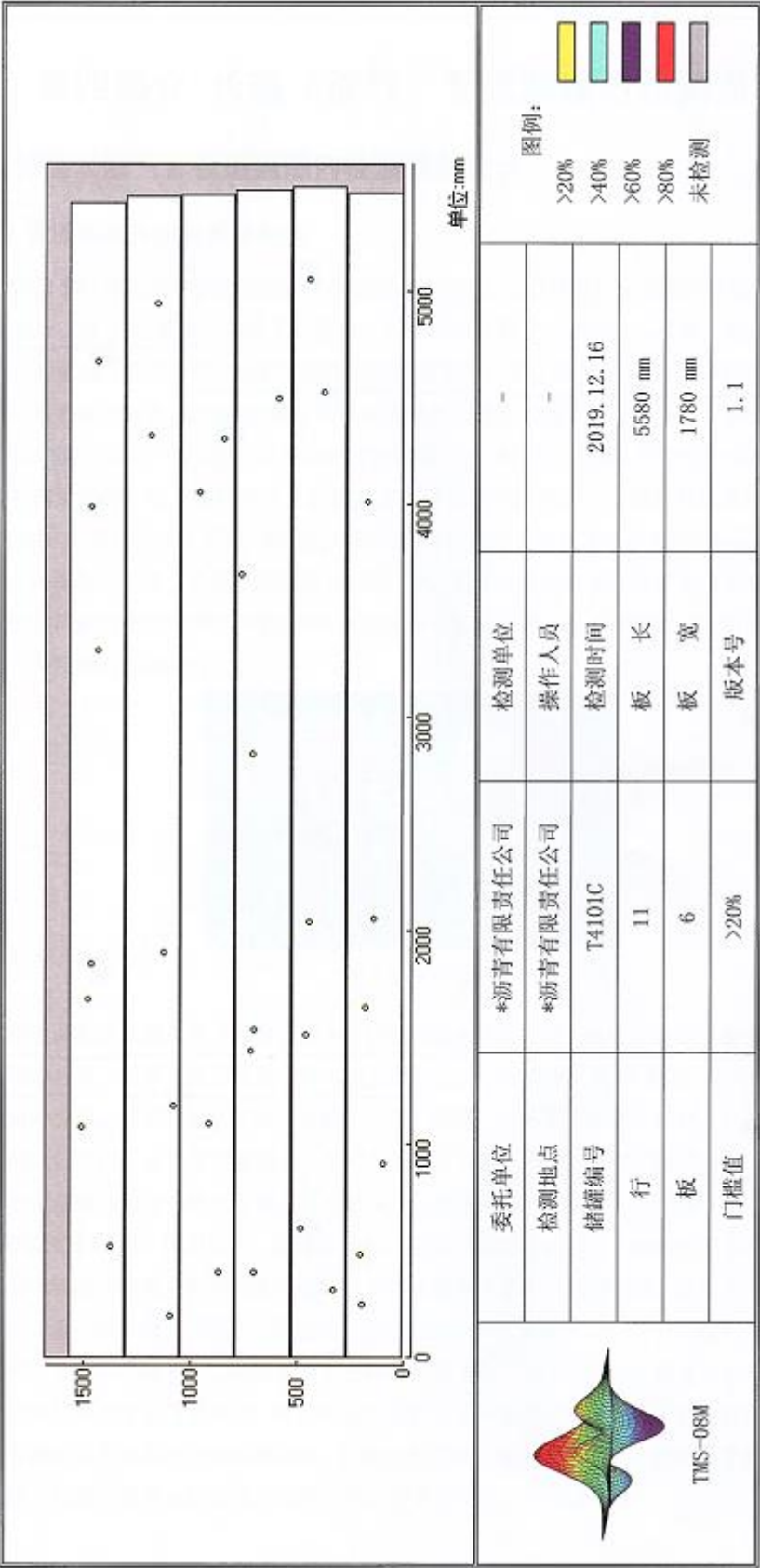


图 3.22 底板整体腐蚀情况图



储罐底板腐蚀缺陷彩色带图





YHASTS



## 第四部分 长输（油气）管道漏磁内检测系统

### 4.1 长输（油气）管道漏磁内检测系统设计

#### 4.1.1 管道漏磁内检测系统概述

美国是世界上发展管道运输最早的国家，因需要对油气管道进行定期的清管作业，发明了被称为 PIG 的清管器，如图 1.1 所示，后来的内检测器也沿用这一名称，国际上从事管道行业的通用定义是“任何依靠管道内部流体来驱动，在管道内运行的设备均称之为 PIG”。随着管道数量的增多、服役年龄的增加以及无数次的爆管泄露等危及环境与生命事故的发生，政府及管道运营商开始关注管线的内外腐蚀问题，为了实现在不影响正常输送的条件下对管道进行腐蚀检测，把无损检测设备和信息储存单元装配在 PIG 上，把原来单纯用于清管作业的 PIG 改为具有信息采集、数据处理和存储等功能的智能管道内检测器（Inner Inspection PIG）。在相关的专业文献中，也称为 SMART PIG。因此在线内检测器在管道内的驱动方式起源于管道清蜡所用的清管器，利用驱动皮碗获得的流动介质的动力来驱动内检测器在管道内行进，并实现长距离的行走。



图 4.1 清管器

管道漏磁内检测系统（俗称智能 PIG）应用漏磁检测原理，以管道输送介质为行进动力在管道中行走，对管道进行在线无损检测。完成管道缺陷、管壁变化、管壁材质变化、缺陷内外分辨、管道特征（管箍、补疤、弯头、焊缝、三通等）识别的检测，可提供缺陷面积、程度、方位、位置等全面信息，为管道运行、维护、安全评价提供科学依据。

管道漏磁内检测的发展历史可以归纳为三个发展阶段。第一阶段的内检测器仅能完成基本的、大面积缺陷的检测。体型庞大。通过能力弱，不能完成对接焊缝及小裂纹的识别，不足以实现对输气管道的检测；第二代内检测器在磁化材料上选用了钕硼磁铁，提高了对钢管的磁化强度，通过整体的优化设计，通过能力也得到很大程度的提高，同时由于检测元件灵敏度提高和存储技术的进步，检测精度和单次检测长度上有了较大地改善；随着材料科学，特别是计算机技术水平的飞速发展，内检测水平得到了充分的提高，目前先进的第三代输油管道内检测器具有超高分辨率和更高的检测精度，检测单程距离更长，同时由于计算机及图像处理技术的发展，检测结果的表达方式和对缺陷描述方面也得到大幅度地提高。

#### 4.1.2 管道漏磁内检测系统介绍

##### (1) 系统基本组成

管道漏磁内检测系统由管道漏磁内检测装置、里程标定装置和数据分析处理系统三部分组成。

管道漏磁内检测装置是在管道中运行的部分，一般可以分为四节：动力节、测量节、计算机节和电池节。其中，每个部分都是密闭的结构，具有较强的耐压性，保证检测装置能够正常工作。每节前后都设置有橡皮碗，具有支撑作用，将各个部分支撑在管道内。每节之间都设置有万向节，它是将检测器的四个节利用软连接的方式连接起来的。图 1.2 为管道漏磁内检测装置在管道内的基本结构示意图。

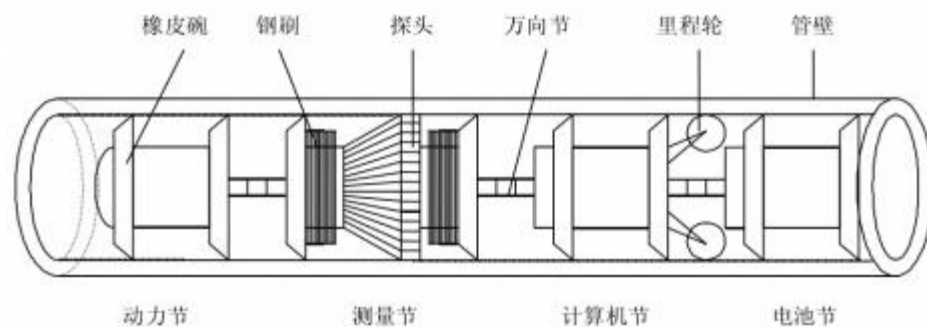


图 1.2 管道漏磁内检测装置结构示意图

组成管道漏磁内检测装置的四部分，即四个节（动力节、测量节、计算机节和电池节），都有其各自的功能和作用。

##### ①动力节

除了依靠管道输送的石油、天然气等推动管道漏磁内检测器在管道中行走，动力节还提供了检测器运行的动力，还可以有效的控制检测器的运行速度，使得检测器平稳的运行，并且保证管道充分被磁化。

##### ②测量节

测量节是管道漏磁内检测器中负责检测的部分，它包含了磁化装置、霍尔探头。其中，磁化装置又包含了钢刷、永磁铁、轭铁，该部分主要是使管壁磁化，产生漏磁通。霍尔探头内装有霍尔元件，前级放大电路由差动放大器构成，霍尔元件与管壁相连处为不导磁耐磨材料，整个探头完全封闭。霍尔元件用于测量漏磁通。

##### ③计算机节

计算机节是管道漏磁内检测器的核心部分，主要负责检测中的过程控制和检测数据的处理和存储，里程轮则通过脉冲式码盘来测量并记录里程。

##### ④电池节

因为管道漏磁内检测器在工作时，是密封在管道中的，不能使用外接电源来提供电能，但是要维持检测器正常工作，这就需要检测器自己携带一个大容量的电池，来为检测器正常检测、处理和存储数据提供充足的电能。

里程标定装置由管道外标记标定、管道内外时间同步标定和行走轮记录组成,完成缺陷位置的确定。

数据分析系统由数据格式处理软件、初步分析软件、人工判读软件、数据管理软件组成,生成最终检测结果。管道内的漏磁信号被绘成色土,可直观地通过色图察看缺陷及腐蚀程度。通过里程显示判定缺陷及腐蚀所在的位置,作为检测或评估管道寿命的依据。

### (2)管道漏磁内检测装置的特点

使用管道漏磁内检测系统,能在非开挖状况下,对埋地管道进行检测,实现对埋地管道的缺陷、管壁变化、管壁材质变化、缺陷内外分辨、管道特征(管箍、补疤、弯头、焊缝、三通等)的识别,可提供缺陷面积、程度、方位、位置等信息,可广泛用于原油、成品油、天然气等长输管道的检测,变管道的盲目被动维修为预知性主动维修。

### (3)管道漏磁内检测装置的要求

管道运营方和检测服务方的代表共同分析检测的目的和目标,并使内检测装置的能力和性能与管道检测的需求相适应。选择时应考虑以下方面:

- ①检测精度和检测能力:检测概率、分类和尺寸判定与预期相符;
- ②检测灵敏度:最小可探测异常尺寸小于期望探测的缺陷尺寸;
- ③类型识别能力:能够区分处目标缺陷类型;
- ④量化精度:足够用于评估或确定剩余强度;
- ⑤定位精度:能够定位异常;
- ⑥评价要求:内检测结果满足缺陷评价要求。

### (4)管道漏磁内检测装置的技术指标

漏磁检测装置的技术指标见表 4.1,其中 T 表示管道的壁厚。

表 4.1 漏磁内检测装置的技术指标

技术指标项目		技术指标
轴向采样距离		2mm,当采样时间确定时,采样距离随检测速度而变化。
周向传感器间距/mm		8~17
最小检测速度		0.5m/s(采用导电线圈);没有要求(采用霍尔元件)
最大检测速度/(m/s)		4~5
深度、宽度、长度检测精度 (对直/螺旋焊缝钢管)	普通金属损失	最小深度: 5%WT 深度检测精度: $\pm 10\%WT$ 宽度检测精度: $\pm 15mm$ 长度检测精度: $\pm 10mm$
	点蚀	最小深度: 8%WT 深度检测精度: $\pm 10\%WT$ 宽度检测精度: $\pm 15mm$ 长度检测精度: $\pm 10mm$

	轴向沟槽	最小深度: 8%WT 深度检测精度: -15%/+10%WT 宽度检测精度: $\pm 15\text{mm}$ 长度检测精度: $\pm 10\text{mm}$
	环向沟槽	最小深度: 5%WT 深度检测精度: -10%/+15%WT 宽度检测精度: $\pm 15\text{mm}$ 长度检测精度: $\pm 10\text{mm}$
定位精度	轴向	特征与参考环焊缝之间的距离误差小于 $\pm 0.1\text{m}$ 参考环焊缝与参考点之间的距离误差小于 1%
	环向: $\pm 15^\circ$	
可 信 度 (POD)/%	90	

#### 4.1.3 管道漏磁内检测磁化装置

##### (1) 磁化方式的选择

磁化被检管道是内检测的关键步骤, 对检测灵敏度和检测效率等影响很大。选择磁化方式时应综合考虑被检管道的特性、缺陷特性(种类、位置、取向)以及设备条件等因素, 尽可能使被检管道壁中的磁场方向与预计的缺陷取向垂直, 以获得尽可能强的缺陷漏磁场。

##### ① 轴向磁化

所谓轴向磁化, 是指在被检管道中建立其沿其轴向分布的轴向磁场的磁化方法。其目的是为了探测取向基本与管道轴向垂直的缺陷。

管道轴向励磁漏磁内检测装置磁化器由两个磁体组成, 其一位于管道被磁化区域的前部, 另一磁体位于管道被磁化区域的后部。磁化器使管壁局部达到磁饱和, 其产生的磁力线平行于管道轴线, 在存在缺陷处, 无论内外缺陷, 均会在管道的内外壁产生漏磁场, 如图 4.3 所示。可以检测管道周向延伸缺陷, 特别是对金属缺失、腐蚀缺陷、周向裂纹、斜焊缝等缺陷检测灵敏。

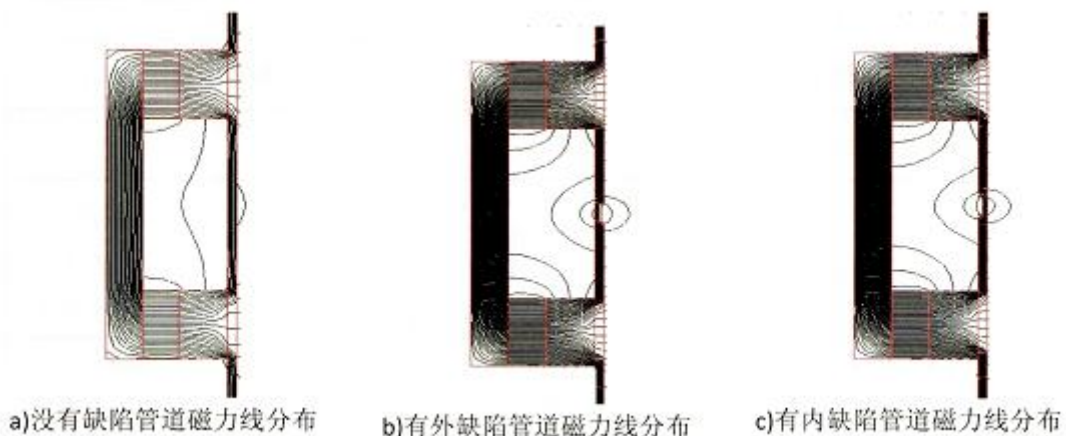


图 4.3 轴向励磁漏磁检测磁力线分布



## ②周向磁化

所谓周向磁化,是指磁化后被检管道中的磁力线沿管道周向(即垂直于管道轴向)分布的磁化方法。周向磁化用来弹出取向与管道轴向平行的缺陷。

管道周向励磁漏磁内检测方法依靠环绕管道(周向)分布的磁化场实现检测,磁化器由沿管道周向排列的磁体组成。磁化器使管壁局部达到磁饱和,其产生的磁力线垂直于管道轴线,在存在缺陷处,无论内外缺陷,均会在管道的内外壁产生漏磁场,如图 4.4 所示。可以检测管道轴向导向的狭窄裂纹、焊缝、机械损伤和腐蚀凹坑等缺陷以及直缝管焊缝。

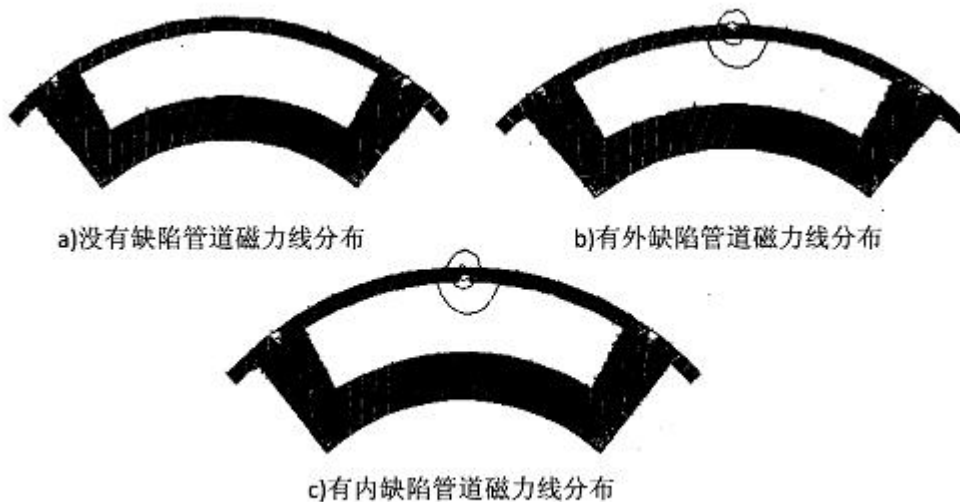


图 4.4 周向励磁漏磁检测磁力线分布

## (2)磁化装置的磁路设计

### ①材料选择

针对具体磁路的设计,首先要选择合适的材料。磁性材料的性能是不容易改变的,磁性材料一经选定后,性能就已确定,在设计时往往以利用材料的性能为主。对剩磁高、矫顽力相对小的永磁材料(单位相对磁导率 20 左右)宜采用细长磁体的磁路结构;对剩磁低、矫顽力相对高的永磁材料(单位相对磁导率 2-3),宜采用短粗磁体的磁路结构。这里选择剩磁高的钕铁硼材料 N42。轭铁选择磁导率相对较高,并且造价合理的 16 锰钢管。柔软的钢刷结构可以避免装置由于管壁沉积异物而滞留在管道内,因此选用钢刷作为永磁铁到钢管内壁的导磁通路。

### ②磁路结构

永磁体磁路一般由永磁体,软磁体,装配间隙及工作气隙组成。以轴向励磁漏磁内检测装置为例,磁路主要由永磁体、轭铁、钢刷、管壁以及工作气隙组成。磁路结构示意图如图 4.5。



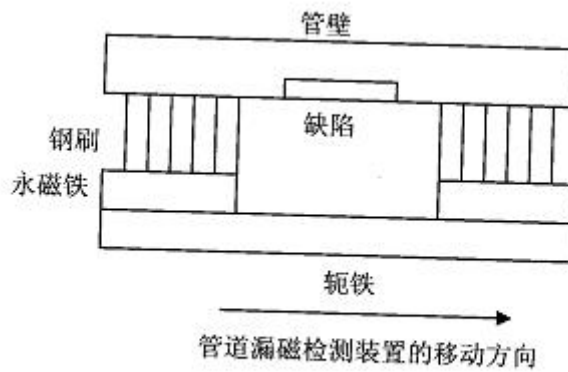


图 4.5 磁路结构设计图

图 4.5 中的磁路由轭铁、永磁铁、钢刷以及管壁成回路。在磁路内部安装有霍尔传感器，以检测缺陷处的漏磁通。

### (3) 磁路模型

利用近似集总参数等效网络方法，做出其等效网络并列方程，确定各部分磁体的工作点并计算空间各部分的磁导（或磁阻）。由图 4.5 所示磁路结构转化的等效磁路模型如图 4.6。

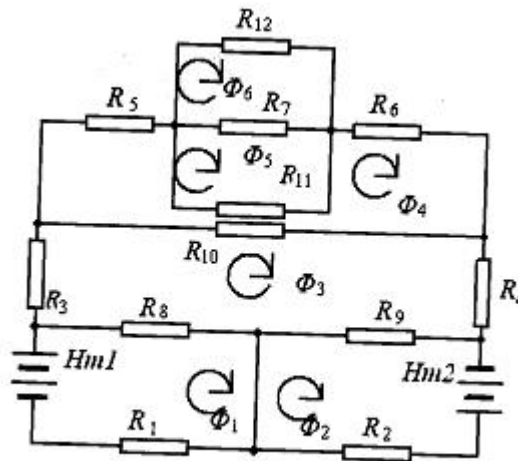


图 4.6 等效磁路模型

图中  $R_1 - R_{12}$  为分块后的各部分磁阻； $\Phi_1 - \Phi_6$  为各回路磁通； $H_{m1}, H_{m2}$  为两块永磁铁磁场强度  $L_{m1}, L_{m2}$  为两块永磁铁磁化方向的长度。

### ④ 建立磁路方程并求解

对于气隙磁导的计算有多种方法，包括解析法、磁场分割法、图解法以及经验公式法。解析法针对磁极几何形状比较规则时方可行；当磁极形状比较复杂，或必须考虑边缘磁通时，就要应用分割法；图解法是通过描绘气隙磁场的场土，根据场图计算气隙磁导的一种方法，它主要用于平行平面场和轴对称磁场；经验公式法是利用由大量实验数据归纳整理所得公式或曲线计算磁导的一种方法。针对磁路设计的模型，综合使用解析法和磁场分割法来计算各部分磁导  $R_1 - R_{12}$ 。

通过磁路基尔霍夫定律以及磁阻与磁导关系方程,可导出图 1.6 所示等效磁路模型的网络方程。

$$\begin{cases} (R_1 + R_8)\Phi_1 - R_8\Phi_3 = H_{m1}L_{m1} \\ (R_9 + R_2)\Phi_2 - R_9\Phi_3 = H_{m2}L_{m2} \\ -R_8\Phi_1 - R_9\Phi_2 + (R_3 + R_4 + R_8 + R_9 + R_{10})\Phi_3 - R_{10}\Phi_4 = 0 \\ -R_{10}\Phi_3 + (R_5 + R_6 + R_{10} + R_{11})\Phi_4 - R_{11}\Phi_5 = 0 \\ -R_{11}\Phi_4 + (R_7 + R_{11})\Phi_5 = 0 \\ -R_7\Phi_5 + (R_7 + R_{12})\Phi_6 = 0 \end{cases} \quad (1.1)$$

通过缺陷外  $S_T$  区域(测量区域)内平均漏磁通密度为:

$$B = (\Phi_5 - \Phi_4) / S_T \quad (1.2)$$

将计算出来的磁阻代入方程组(1.1),通过编制程序计算出缺陷处平均磁感应强度  $B$ ,满足条件的永磁体的截面积,综合考虑实际因素,确定磁路中各部分的具体尺寸。

#### 4.1.4 检测装置硬件系统总体设计

##### (1)检测装置硬件系统总体方案

管道检测装置硬件系统总体方案框图如图 1.7 所示,可分成供电部分、励磁部分、测量电路、采集电路、工控机、里程部分、低频发射接受装置和调试系统等几部分。其基本工作过程如下:

在检测装置装入管道之前,用上位机(笔记本电脑)对系统各部分调试无误后,启动检测装置,将装置放入管道内。由励磁部分对管壁进行磁化,有测量电路测得管壁上的漏磁信号送采集电路。当检测装置在管道中行走时,里程部分随仪器与管壁之间的相对运动,每 14mm 产生一个计数脉冲,送工控机,作为记录里程的累加信号。装置每 3ms(约对应 3mm 距离)测量一组数据,工控机对所得漏磁信号经简单处理后,存储于硬盘中。低频发射接收装置主要用于地面对地下检测装置的跟踪及腐蚀缺陷定位。供电部分完成对整个系统的供电。

管道缺陷检测装置硬件系统各部分功能如下:

①供电系统由电池和 DC-DC 变换板组成,电池提供整个装置所需的电能。DC-DC 板将电池电压逆变处系统所需的各种直流电源。

②励磁部分对被测管道进行磁化,该部分用永久磁铁作为磁化激励源,不耗费系统的电能,可以有效地节省功耗。

③测量电路由 48 个探头组成,放置于永磁铁两级之间,沿管壁截面排布一周,测量一个截面上各点的漏磁通信号,每个探头有稳压电路、磁敏传感器、恒流源和前置放大器组成。稳压电路为探头提供稳定的电源,提高抗干扰能力。探头磁敏传感器采用霍尔元件,恒流源为霍尔元件提供稳定的霍尔电流。前置放大器将霍尔输出的电压小信号放大,以便后续电路采集和处理。

④采集电路完成对漏磁信号的采集。由多路模拟选通开关、和 A/D 转换器组成。测量电路 48 路探头的输出电压信号进入采集电路的模拟选通开关, 经开关分时送 A/D 转换器进行转换。为提高采样速率, 使其与行走速度相当, 采用两片 A/D 同时转换。转换结果送工控机。

⑤工控机是装置的核心处理机构, 它主要负责把采集电路送来的数字量进行简单处理后存于硬盘中。同时完成对其它部分的控制及信号处理, 如接受里程轮的脉冲、启动 A/D 转换, 与向上位机进行通讯调试等。

⑥里程部分由里程轮、开关型霍尔元件和计数器构成。里程轮靠近边缘处装有小磁铁, 当检测装置在管道中行走时, 用霍尔元件接收轮上的磁信号, 产生脉冲电压信号送计数器。计数脉冲的积累可以记录系统行走的距离, 作为判定腐蚀缺陷所在位置的依据。

⑦低频发射接收装置包括由地下的低频发射器和地面的低频接收跟踪器两部分。这部分的主要作用是在地面对地下行走的检测装置进行跟踪, 确定检测装置所在的位置。检测装置在管道中行走时一旦卡住, 需挖开才能取出, 当管线很长时(几十公里), 知道它所在的位置就非常重要。由于管道通常埋在地下, 与地面隔着管道壁以及几米厚的土层, 一般信号很难穿透管壁和土层, 达到地面, 只有超低频信号(20-30Hz), 才能透出。当地下发射器经过地面接收器的垂直正下方时, 接收器会给出声光指示。

⑧调试系统是一台便携式笔记本电脑, 这里作为上位机。在每次检测装置放入管道之前, 将它通过 RS232 串行口与检测装置的工控机相连, 检测装置将各部分的数据及状态(如漏磁信号、行走轮脉冲等), 送向上位机, 以便观察各部分工作是否正常。如果正常, 则启动装置, 进行检测。当检测结束, 将检测装置从管道中取出时, 再与上位机相连, 上位机发出停机命令停止装置工作, 并查看是否有存储数据。

⑨旋转编码器用于确定缺陷在管壁横截面一周上所处的确切方位。

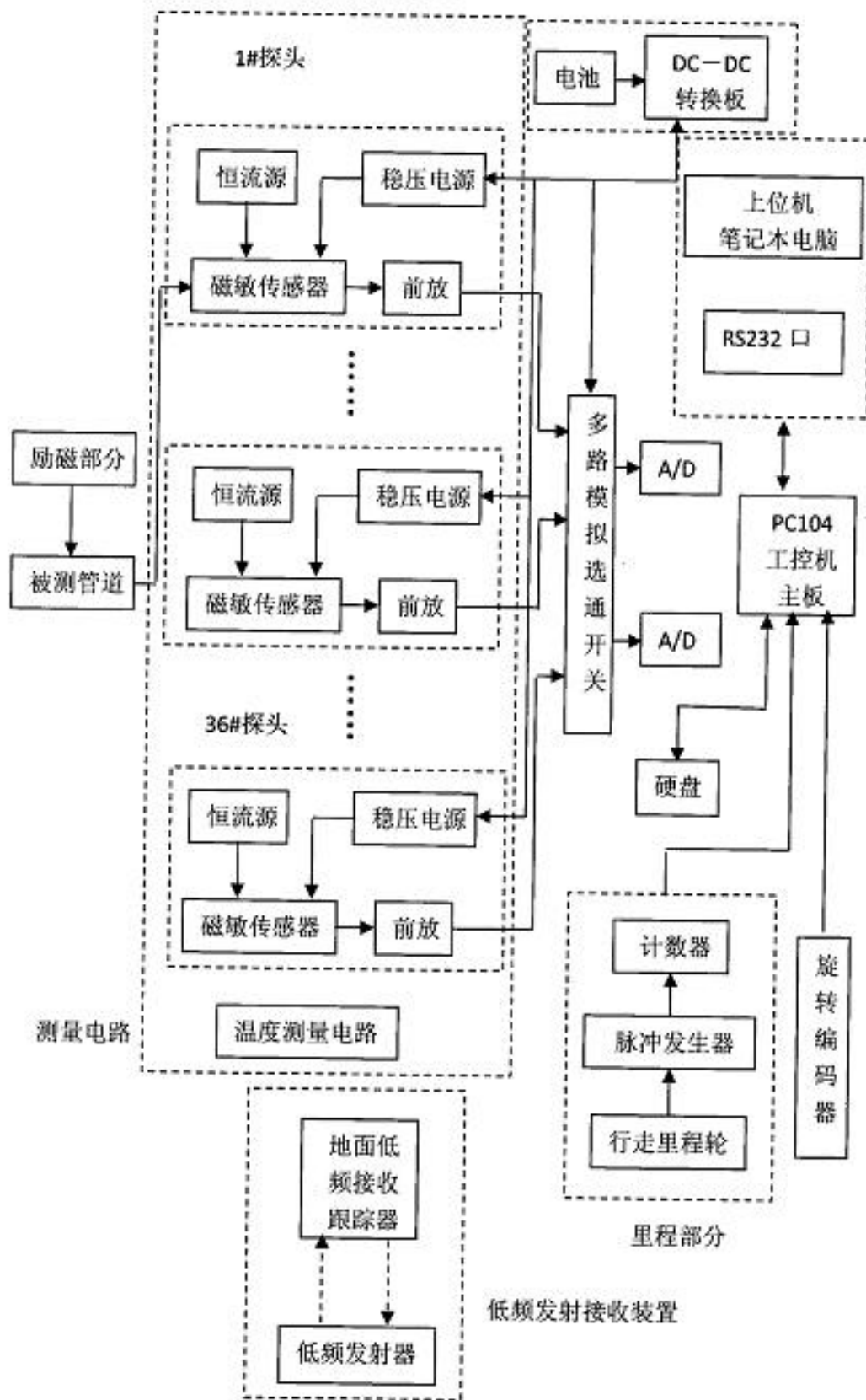


图 4.7 管道检测装置硬件系统总体方案框图

## (2) 数据采集卡

系统选用 PC104 工控机，其主板是一种体积很小的计算机主板，它的面积只有  $90 \times 95\text{mm}$  大小，却集 IDE 接口、软驱接口、多功能接口（包括键盘、复位键等）、一个并行口、两个串行口、AT

及 XT 总线扩展接口等功能与一板。

数据采集卡选用美国 Real Time Devices 公司的 DM406 卡, 他的体积与 PC104 总线结构的主板一样大小, 该卡具有 PC104 总线接口, 能与 PC104 总线的计算机主板连接。其结构框图如图 4.8 所示。

它具有如下功能:

- (1) 8 个差动或 16 个单极模拟多选一输入通道。
- (2) 一个 12 位 A/D 转换器 AD678, 转换速率为  $5\mu\text{S}$ , 吞吐速率为  $10\mu\text{S}$ 。
- (3) 模拟输入可为  $\pm 5$ ,  $\pm 10$  或  $0-10\text{V}$ 。
- (4) 具有一个可编程增益放大器, 放大倍数为 1, 2, 4, 8。
- (5) 三种 A/D 转换启动方式: 外触发、内触发和软件触发。
- (6) 一个 I/O 接口芯片 8255, 具有 16 个 TTL/CMOS 电平的 I/O 口。
- (7) 一个定时/计数芯片 82C54, 具有 3 个 16 位定时/计数器。
- (8) 两个 12 位的 D/A 转换器。

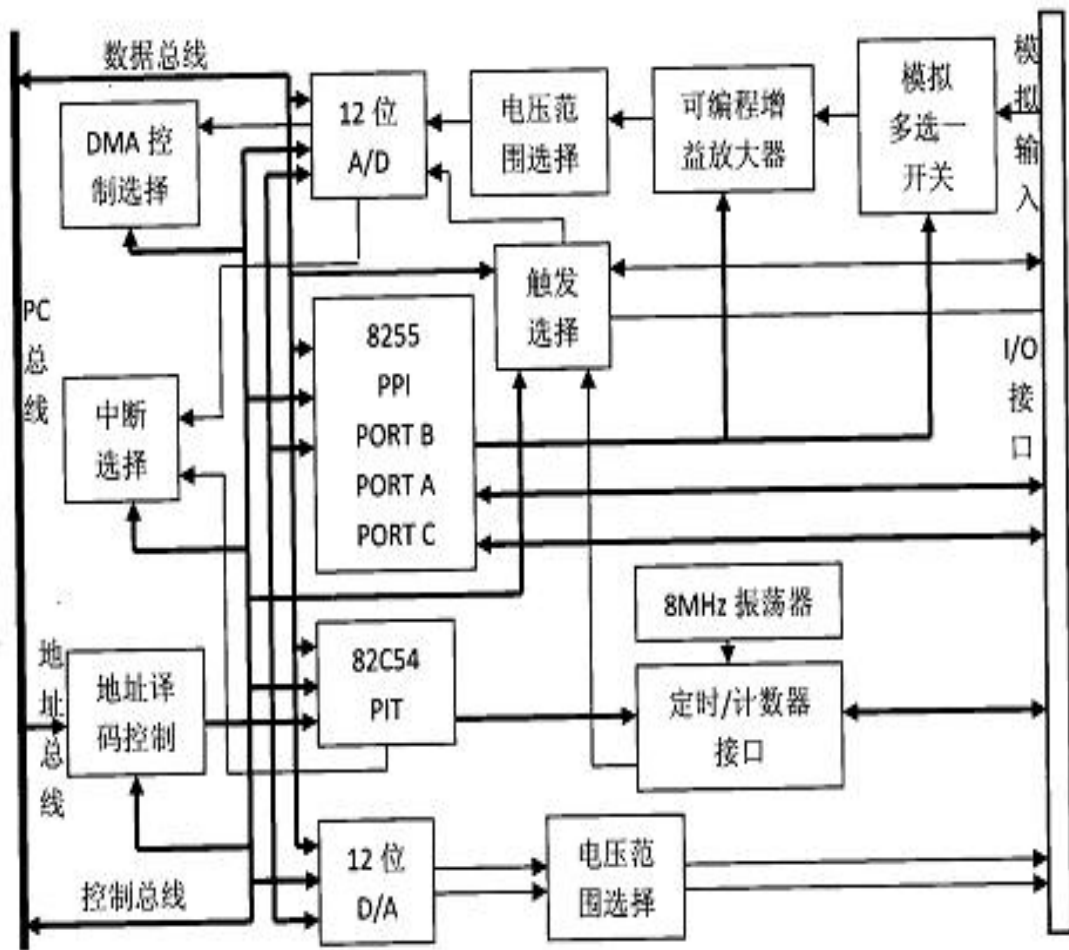


图 4.8 DM406 数据采集卡结构图

检测装置中采用单极性模拟输入, 每次可以有 16 组数据经模拟多选一通道输入, 输出信号经可编程增益放大器, 送到 A/D 转换器, 转换器对 16 个通道的数据分时转换, 转换后的数据通过总线送工控机。

### (3) 存储器件的选择

在选择存储器件时, 必须考虑两个问题: 数据存储容量问题和防磁问题。



### ①存储器的容量

由于检测装置在管道中每次要检测几十公里甚至上百公里,测得数据的容量是很大的。例如,如果每 3ms 测量一次管道截面一周的数据,测量 50 小时,每次记录约 58 字节数据(包括 48 个探头的值、温度、旋转编码器值、里程和时间)的话,所得数据的容量为:  $(50 \text{ 小时}/3\text{ms}) \times 58 \text{ 个数据} = 967\text{Mbyte}$ 。也就是说,要想能存储 50 小时的数据,存储容量必须大于 967M 字节。

### ②存储器的防磁场问题

由于检测装置用的是漏磁方法,装置中安装有磁性很强的永磁铁,而通常用的存储器件多为硬盘或磁带机,一旦受强磁场影响,会破坏其中的数据。甚至毁坏存储器件。

考虑到上述两个因素,选用固态硬盘,即闪存存储硬盘(Flash Hard Disk),该硬盘内部是用闪存可电擦除只读存储器(Flash E<sup>2</sup>PROM)芯片集成制作,存取速度快,且不怕磁场干扰。目前国外最新一代的管道漏磁检测装置都采用了固态硬盘。虽然固态硬盘的价格很昂贵,一般 1Gbyte 容量的硬盘要上万美元,但与整个检测装置的价格(上百万元人民币)相比,还是可取的。

设计检测装置选用美国 M-Systems 公司的 FFD-250-IDE-1216-N 型闪存硬盘,其体积与便携电脑硬盘一样,容量为 1.216Gbyte,寻道时间小于 0.1ms 连续读写速度为 16.7Mbyte/sec,温度范围为 -25—+75℃,满足设计需要的指标。

## 4.1.5 漏磁信号测量电路的设计

测量电路主要包括:探头电路、模拟通道转接电路和温度测量电路。

### (1)磁敏元件的选取及探头电路设计

#### ①磁敏元件的选取

磁敏探头中的主要器件就是磁敏元件,选用什么样的元件是测量精确与否的关键。目前常用的器件有霍尔元件、磁敏管、磁敏电阻和检测线圈。

磁敏管的灵敏度很高,但线性度太差,磁敏电阻温度特性很差且有局部非线性,检测线圈的灵敏度、温度特性和线性度都可以,但线圈是测量磁感应的,只能测量变化的磁场,当磁场变化缓慢时,线圈很难测到,而且线圈和磁场之间运动的相对速度变化也会影响测量值的大小。因此综合各方面参数,霍尔元件是相对稳定的器件。

#### ②探头电路设计

图 4.9 所示为探头内的电路原理图。它可分为霍尔元件、恒流源、差动放大、和稳压电路四个部分。

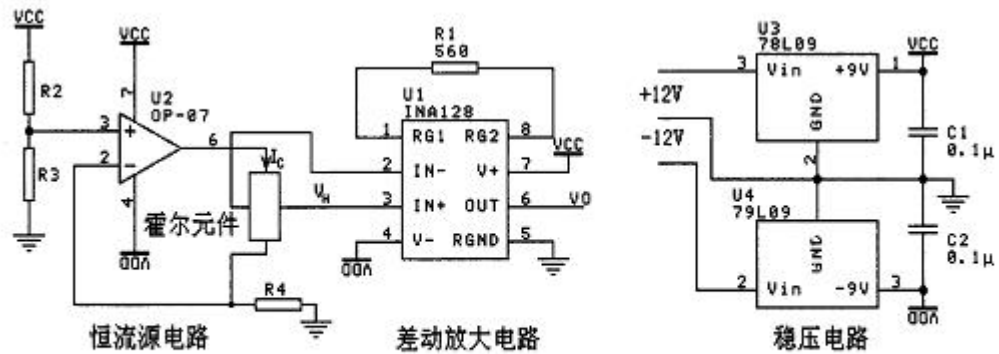


图 4.9 探头电路

霍尔元件尺寸为  $5 \times 20\text{mm}$ ，厚  $2\text{mm}$  可以测量管道截面  $20\text{mm}$  宽范围的漏磁信号。其输出灵敏度为  $15\text{--}20\text{mV}/\text{mA} \cdot 100\text{mT}$ 。恒流源电路为霍尔元件提供控制电流  $I_c$ ，考虑到电流小时温度特性好， $I_c$  取  $1\text{mA}$ 。

差动放大电路用于将霍尔输出的霍尔电动势  $U_H$  放大，放大器选用 INA128，它是一个集成的测量放大器，RG1 和 RG2 管脚之间的电阻  $R_G$  确定放大增益。其算法如下：

$$G = 1 + \frac{50\text{K}\Omega}{R_G} \quad (4.3)$$

取增益为 101，则

$$R_G = \frac{50\text{K}\Omega}{G - 1} = 500\Omega \quad (4.4)$$

稳压电路将系统送来的  $\pm 12\text{V}$  电源分别经 78L09 和 79L09 稳成  $\pm 9\text{V}$  的电压，供探头内元件使用。由于探头体积有限，集成元件都采用贴片微缩封装，其它器件也尽量选用体积和功耗小的元件。

### (3) 测量信号与数据采集卡的接口

数据采集部分用了两块 DM406 数据采集卡，每块是 16 个通道，而探头送来的漏磁信号就有 48 路，因此部分信号还需另经模拟选通开关送达采集卡的各通道。

#### ① 测量信号的模拟通道转接

模拟选通开关采用二选一开关 MAX4053，其管脚排列与 CD4053 兼容，当  $\pm 5\text{V}$  供电时，它的典型导通电阻值为  $50\Omega$ ，信号传输时间为  $75\text{ns}$ ，每片 MAX4053 内集成了三个二选一的模拟开关，其通道选择控制端接到数据采集卡的 I/O 输入输出断口（采集卡内部 8255 的 PC 口）上，由工控机对采集卡的 I/O 端口的电平操作来选择模拟开关的通道。

测量信号和数据采集卡的接口示意图如图 4.10 所示。部分输入信号经 MAX4053 后送采集卡，另一部分信号直接送采集卡。

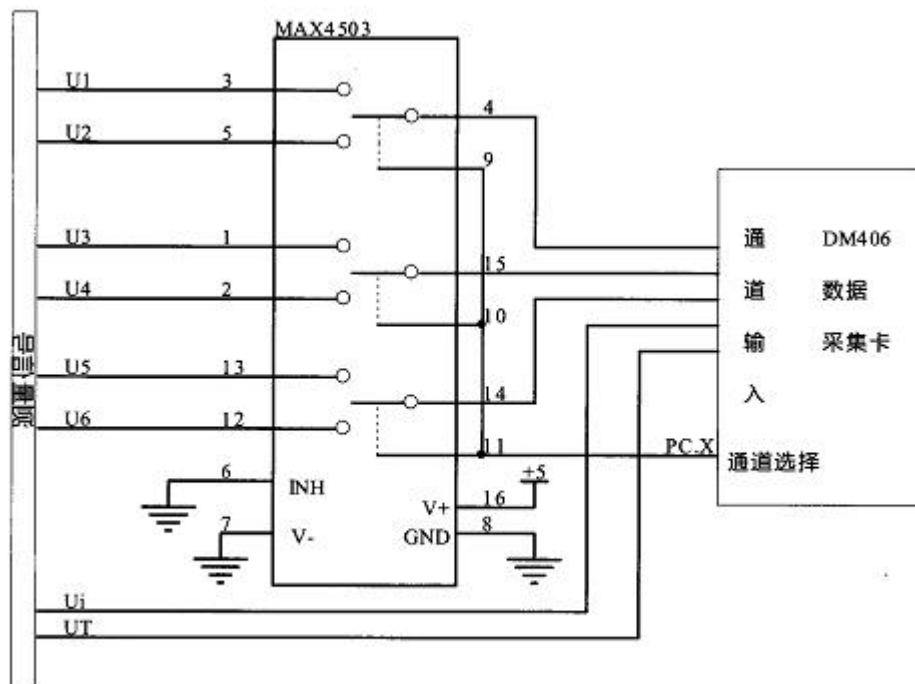


图 4.10 测量信号与采集卡接口电路

## ②温度测量电路原理

为提高测量精确度，消除温度对系统测量带来的误差，装置中加入温度检测电路，随时测量温度值并记录存储，作为对霍尔温度误差的补偿。

温度传感器选用美国 AD 公司的器件 AD590，它的温度测量范围是 $-55\sim+100^{\circ}\text{C}$ 。当器件外加 $4\sim 30\text{V}$ 电压时，能提供 $1\mu\text{A/K}$ 的恒定电流。器件出厂前经过激光调整，在 $298.2\text{K}$  ( $25^{\circ}\text{C}$ ) 时输出 $298.2\mu\text{A}$  电流。图 4.11 为 AD590 组成的测温电路，该电路温度每升高 $1^{\circ}\text{C}$ ，输出增大 $10\text{mV}$ ，且 $0^{\circ}\text{C}$ 时，输出为 $0\text{V}$ 。AD590 输出的电流信号经 $R_5$ 转换成电压信号 $U_T$  ( $R_4$ 与 $R_9$ 分流很小，可忽略)，从运放的同相端放大 $50$ 倍输出，而运放的反相端加入一个补偿电压 $U_k$ ，

则有公式 (4.5):

$$U_o = (U_T - U_k) \cdot 500\text{K} / 10\text{K} = 50(U_T - U_k) \quad (4.5)$$

在常温下 ( $25^{\circ}\text{C}$ )，调整 $W_2$ ，使输出电压 $U_o$ 为 $0.25\text{V}$ 。

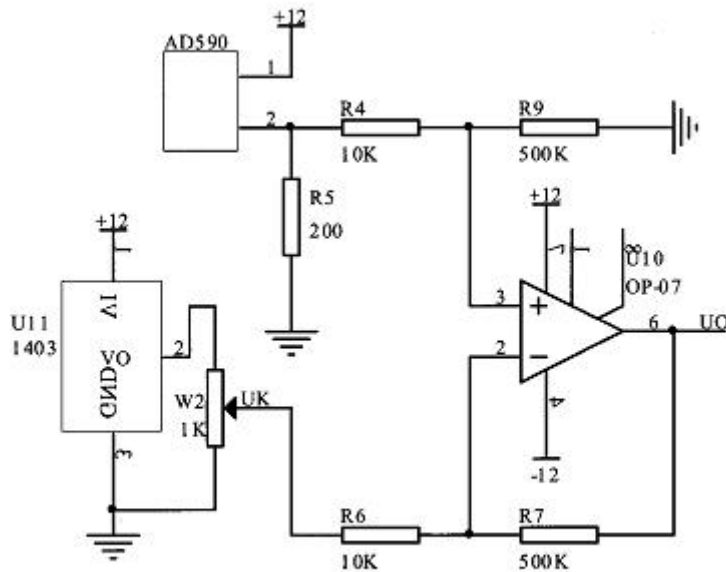


图 4.11 温度测量电路

#### 4.1.6 采集触发信号和里程判定

装置每隔 3ms 采集一次各通道数据，触发信号由数据采集卡上的定时/计数器产生，计数器工作在分频方式下，对卡上的 8MHz 信号进行 24000 分频，分频后的信号周期为 3ms。装置通过查询触发信号来启动数据采集。

里程判定部分是记录整个检测装置行走距离的基准。里程判定部分由里程轮、开关型霍尔元件和计数器组成。其中计数器直接利用数据采集卡中的 8254 计数器来实现，里程轮是一个紧贴在管壁上的金属轮，其周长为 350mm，里程轮在考虑圆周的边缘处等距离安放在 50 个  $\Phi 3 \times 5$  的小磁铁，在轮支架贴近磁铁处安装了一个开关型霍尔元件。当磁铁转至霍尔元件正下方时，霍尔输出低电平；当磁铁离开霍尔时，输出为高电平。轮子每转一周，就会产生 50 个脉冲，将脉冲送采集卡中的计数器。每个脉冲对应的距离为： $350\text{mm}/50=14\text{mm}$ 。

计算机读取当前的计数值，和上次测量时的值相差，就会得到这段时间行走的距离，计算机把脉冲值累加起来，随测得的数据一起存储，作为这组数据在管道中对应的里程值。

除对里程距离做记录外，装置还需记录每组数据中每一个数据对应管道一周的位置。因装置在管道中除了向前行走外，还会自身旋转，同一个探头每次测量的不一定是管道截面上的同一个位置。为确定每个探头测量的数据在管道截面的位置，在装置中安装一个旋转编码器，如图 4.12 所示，该编码器能输出一个 8 位二进制码，码值（0-255）能反应出编码器轴旋转的位置。在编码器的轴上安装一个重锤，无论如何旋转，重锤始终向下。假设图中编码器顺时针旋转时码值增大，1#探头从 a 点转到 b 点时，编码器增加了 n 值，则从 a 到 b 时，b 点对应管截面 a 点顺时针转  $360 \cdot n/256$  度处。

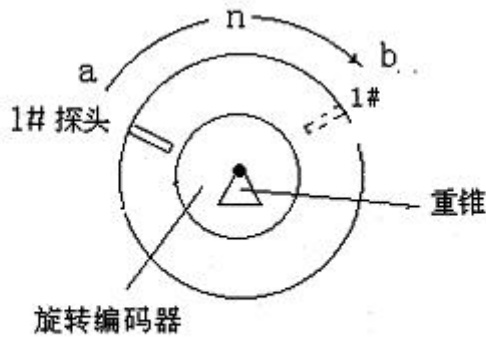


图 4.12 管道圆周定位示意图

#### 4.1.7 检测装置的跟踪和定位

检测装置的管道中工作时,有时会因意外情况而堵塞或卡死,如管壁局部变形过大,转弯半径过小,或管道中的杂质太多,检测时大量堆积造成堵塞等。遇到这种情况,必须尽快找到装置所在位置,挖开土层,焊开管道,取出装置。在几十或上百公里的管线上寻找检测装置是一件十分困难的工作,这就需要低频发射接受跟踪器来确定装置的位置。

##### (1) 低频发射接收器的基本工作原理

油气管道通常埋在地下,要想在地面能探测到地下装置所在的位置,必须在装置里安装发射源,通过地面的接受来确定装置的位置。发射器和接收器之间隔着 1-2 米深的土层和几十毫米厚的管壁,高频信号很难穿透这一厚层,只能依靠低频震荡磁场。低频信号有很好的穿透能力,能够穿透土层和管壁,达到地面。

如图 4.13 所示为该跟踪装置的原理,地下为两个低频磁场发射线圈,磁场交变频选 23Hz,以避开 50Hz 工频干扰。线圈安装在检测装置中,磁场方向相对顶,与管道平行。为研究方便,我们假设一个磁场方向,如图中箭头所示。地面用两个接收线圈,使用时将两线圈同轴排放在管道的正上方,相隔一定距离,其方向与管道平行。见图 4.13,地下的检测装置,由远而近接受线圈,当处在 a 位置时,接收不到发射磁场,接收线圈 1 和 2 的信号都为 0;当达到 b 位置时,两线圈都能接收到磁场信号,且两个线圈接收的信号同相(假设相位为  $0^\circ$ );当达到 c 位置时,线圈 1 接收的信号仍为原来的相位(为  $0^\circ$ ),而线圈 2 的信号则与原来反相(相位为  $180^\circ$ );达到 e 位置时,两线圈都收不到信号,回到 0 值。将两线圈的信号  $U_1$ 、 $U_2$  整形后得  $U_1'$  和  $U_2'$ ,将  $U_1'$  和  $U_2'$  进行逻辑异或,所得脉冲就是定位信号,但由于两个接收线圈的信号不可能完全同相,会有微小的相差,异或后可能会产生一系列小脉冲,为防止误判,只有当脉冲信号的宽度大于  $1/4$  的发射周期(即 23Hz 周期的  $1/4$ )时,才认为该脉冲是通过信号。发射器与接收器的垂直距离越近,定位精度越高。这种跟踪定位方法定位精度可以达到 0.2-1 米,并且抗干扰性强,能有效地滤除空间的其它 23Hz 杂波造成的误判。



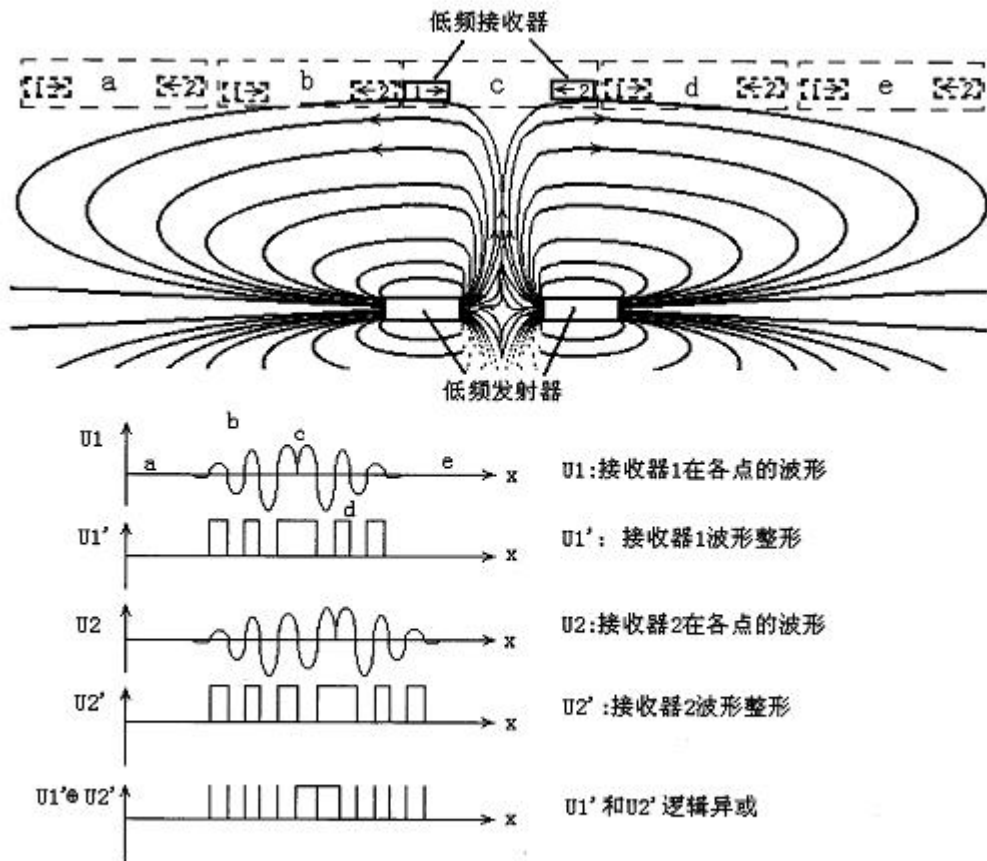


图 4.13 低频跟踪定位系统原理

## (2) 低频发射接收器的电路结构

低频发射电路如图 4.14 所示。由 555 振荡电路产生一个 23Hz 的低频振荡波，经两个三极管驱动后，推动两组 LC 振荡电路振荡，由电感线圈将振荡波发射出去。将发射器安装在检测装置上，通过接收发射器的信号就可以确定装置的位置。

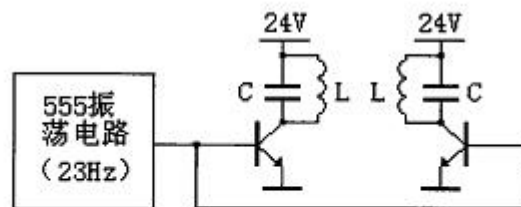


图 4.14 低频发射器原理图

低频接收器的原理框图如图 4.15 所示。

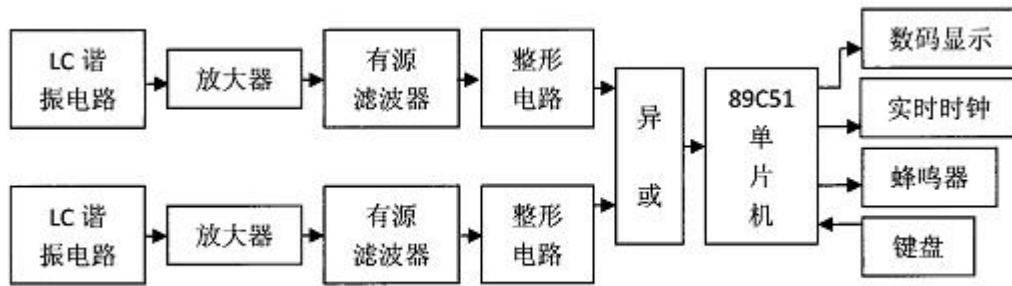


图 4.15 低频接收器原理图

每个接收线圈和电容构成一个 LC 谐振电路，线圈用 0.23mm 的漆包线绕制，铁心采用薄膜合金丝 1J79，电感量为 47.9H，电容选  $1\mu\text{F}$ ，则谐振频率可由公式 (4.6) 算出。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{49.7\text{H} \times 1\mu\text{F}}} = 23\text{Hz} \quad (4.6)$$

谐振电路输出信号经放大器放大后，送两级有源滤波器滤波，滤波器选用无线增益多端反馈带通滤波器，它是一种最简单的二阶带通电路，二阶带通滤波器的传递函数公式如式 (4.7)。

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{k\omega_0 S / Q}{S^2 + (\omega_0 / Q)S + \omega_0^2} \quad (4.7)$$

其中，K 为增益，Q 为品质因数， $\omega_0$  为中心频率，公式 (4.8) 为巴特沃斯和切比雪夫二阶带通滤波器二阶滤波节典型传递函数。

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\rho\omega_0 S}{S^2 + \beta\omega_0 S + \gamma\omega_0^2} \quad (4.8)$$

将 (4.7) 和 (4.8) 式联立可求得  $\rho$ 、 $\gamma$  和  $\beta$  值。

低频接收器的滤波器电路如图 4.16 所示，电路的中心频率  $\omega_0$  为 23Hz，K 取 16，由公式 (4.7) 和 (4.8) 可求得  $\rho=0.4$ ， $\beta=0.025$ ， $\gamma=1$ ，C1、C2 可任选，但一般 C1 选择 1/10 的中心频率，取  $C1=2.2\mu\text{F}$ ， $C2=0.01\mu\text{F}$ 。

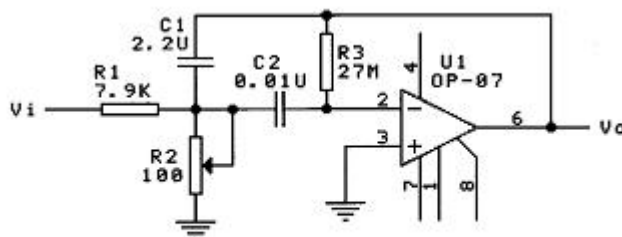


图 4.16 滤波器电路图

再由公式 (1.9)、(1.10) 和 (1.11) 计算出  $R1=7.9\Omega$ ， $R2=79.1\Omega$ ， $R3=27\text{M}\Omega$ ，为保证电路中心频率的准确性，R2 用  $100\Omega$  的多圈电位器，调整 R2 使中心频率达到精确的 23Hz。

$$R1 = \frac{1}{\rho\omega_0 C1} \quad (1.9)$$

$$R2 = \frac{\beta}{[C1(\gamma - \rho\beta) + \gamma C2]\omega_0} \quad (1.10)$$

$$R3 = \frac{1}{\beta\omega_0} \left( \frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} \right) \quad (1.11)$$

滤波后的信号经过零比较器整理成方波, 将两路整形后的方波进行异或运算, 再把异或运算后的波形送 89C51 单片机中, 由单片机检测异或信号高电平的宽度, 确定是否有低频发射器经过, 如方波高电平时间大于 23Hz 的 1/4 (11ms), 则断定有发射器经过。接收器读取实时时钟芯片 DS12887 中的时间值, 由数码管显示收到时的时间值并存储, 同时由蜂鸣器给出声音报警信号。

该装置使用时, 可以定点检测, 也可以跟踪搜寻。定点检测是在管道沿线每隔一段距离 (比如 2 公里) 放置一台接收器, 从各点接收信号的状况就可以知道检测装置所处的位置。一旦装置出现堵塞, 就将搜索范围缩小到两测量点之间 (2 公里), 再用跟踪搜寻方法, 手持接收器沿这段管线搜索, 当接收到发射信号时, 垂直正下方即为装置所在的位置。

#### 4.1.8 电源

电源部分采用电池供电, 8-30V 电压经 DC-DC 转换板产生  $\pm 12V$  和  $\pm 5V$ , 供装置使用。转换板采用 PC104 总线结构的逆变板, 转换效率为 82%, 最大转换功率可达 60W。

电池的选取必须考虑电池腔的容积和每节电池的电量。电池腔的体积受管道内空间的制约, 最多能装 154 节 1# 干电池。

据测量整个装置的总功耗约为 34W (包括电源板功耗), 如果工作 50 个小时, 需总安时量为

$$T \times U / I = 50h \times 34W / 1.5V = 1133.3Ah \quad (1.12)$$

需要 1.5V/1133.3 安时 (Ah)。如用 154 节 1# 干电池, 则每节的电量必须大于

$$1133.3Ah / 154 = 7.35Ah \quad (1.13)$$

## 4.2 长输 (油气) 管道漏磁内检测器机械结构

### 4.2.1 检测装置的机械结构

#### (1) 检测装置的总体机械结构

检测装置的机械结构设计必须以装置能否在管道中顺利穿行为前提。管道中阻碍装置行进的主要是弯头, 为保证通过弯头, 需把装置分成几节, 节间采用软连接, 以便在弯头处能够转弯通过。该装置的外形结构简图如图 4.17 所示。管道漏磁内检测器样机如图 4.18 所示。

检测装置由驱动节、磁化节、计算机节和电池节四部分组成。驱动节装有皮碗用于产生压差推动装置行走和清管工作；磁化节装有励磁装置和传感器，用于产生和测量漏磁信号；计算机节是系统的核心，主要负责测量过程的控制和测量数据的处理与存储；电池节为检测装置在管道中长时间工作提供充足的电能。对测得的数据进行处理和分析，可以判定处管道的内外伤及腐蚀情况，并能够从里程的显示来判定伤及腐蚀所在的位置，作为检漏或评估管道寿命的依据。

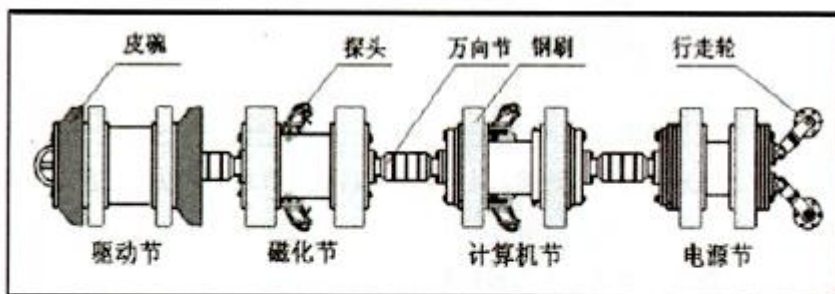


图 4.17 检测装置的总体机械结构简图

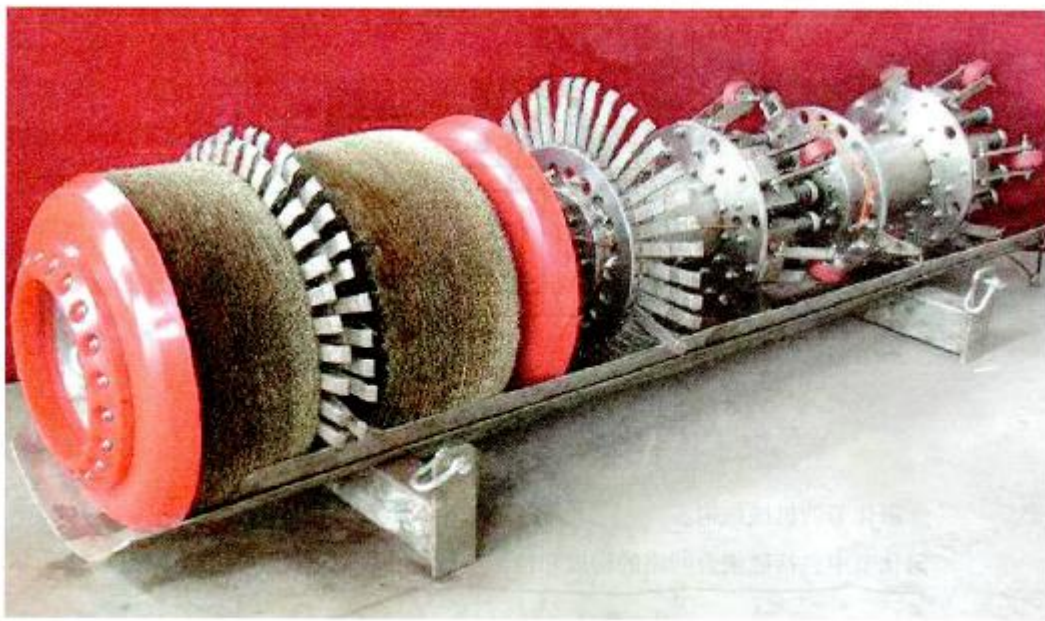


图 4.18 管道轴向励磁漏磁内检测器样机

## (2)机械部件结构功能及设计

### ①橡皮碗的外形及功能

装置每节的前后两端都用橡皮碗支撑，橡皮碗一般由耐油橡胶或聚氨酯制成，形状像碗一样，如图 4.19 所示，其外径略大于管内径，可以紧紧的撑在管壁上，隔离前后两端的油，使其产生压差，从而推动检测装置前行。橡皮碗有一定的弹性，在弯头处时，产生变形，使装置顺利通过。



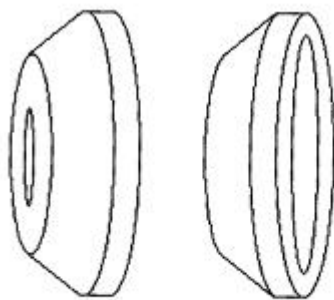


图 4.19 皮碗外形图

### ②万向节的结构及功能

装置的各节之间采用万向节连接，其特点是，前后两节之间可以按任意方向转动。装置在管道中除了向前走之外，还会沿轴向旋转，因节与节之间有电缆线连接，如果各节之间旋转的角度不同，电缆线会缠绕起来而被拉断。图 4.20 所示为本装置中采用的十字形万向节结构示意图，其特点是：前后两节间能按任意方向转动，而且两节在轴向上能保持相同的旋转角度，防止了电缆线缠绕。

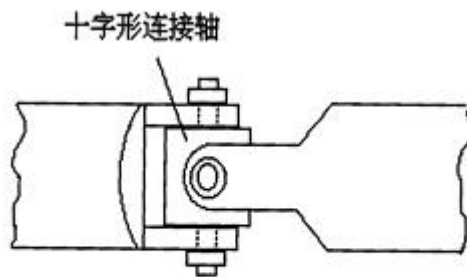


图 4.20 万向节结构图

### ③磁化节的机械结构

磁化节中包括磁闭合回路的构成和检测磁敏探头。磁化回路的结构如图 4.21 所示。



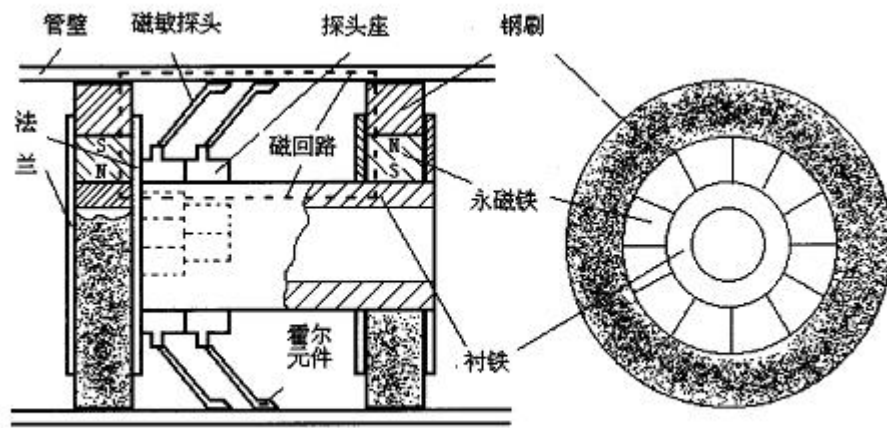


图 4.21 磁化部分结构图

磁化回路的主体为一块圆柱筒形的衬铁，衬铁两端分别装上一周圆环形的永磁铁（由若干块扇环形磁铁组成），永磁铁采用钕铁硼（Nd-Fe-B）材料制成，是当前最新、各种参数最优的永磁材料。两组磁铁的磁场方向相反，磁铁外套上圆环形钢刷，钢刷两边用法兰固定。钢刷用锰钢合金丝制成，呈刷子状，使用时支撑在管道内，其外径比管道内径略大，有一定的弹性和变形量，可以与管壁充分接触，增加磁化效率。这样，由衬铁、两端的永磁铁、钢刷及管道壁构成了一个封闭的磁回路，实现了对管壁的磁化作用。

磁敏探头安装在两组磁铁之间，探头内的霍尔传感器装在末端紧贴管壁处，以便有效测量漏磁信号。探头壳体通过探头座固定在衬铁上，探头与座之间由活动轴连接，并通过弹簧将探头抵在管壁上，使探头既能随管壁的凹凸而活动，又能有效地和管壁充分接触。为了使探头能够覆盖整个圆周，将探头分成两排，如图 4.22 所示，安装一排探头时，由于衬铁表面是弧形，探头之间有缝隙，而用两排探头错开安装，则可以覆盖整个圆周，防止漏测。

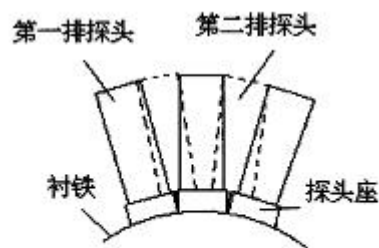


图 4.22 探头安装示意图

#### ④检测装置每节长度的选取

检测装置的长度直接影响装置是否能在管道内顺利通行，尤其是弯头和三通分歧处。装置与转弯半径的关系如图 4.23 所示。

首先，检测装置每一节的长度不能太长，否则无法转过弯头。一般来说，起支撑作用的橡皮碗，能够有很大的变形，约 10%~15%，对于磁化节，钢刷的变形则相对小，约为 5%。当检测器转弯时，

依靠橡皮碗和钢刷的变形通过弯头,如图 5.7a 所示。装置经过弯头时,a、b、c、d 四处会产生变形,装置越长,变形就越大,当变形超出橡皮碗和钢刷的可变范围时,检测装置就无法通过弯头。

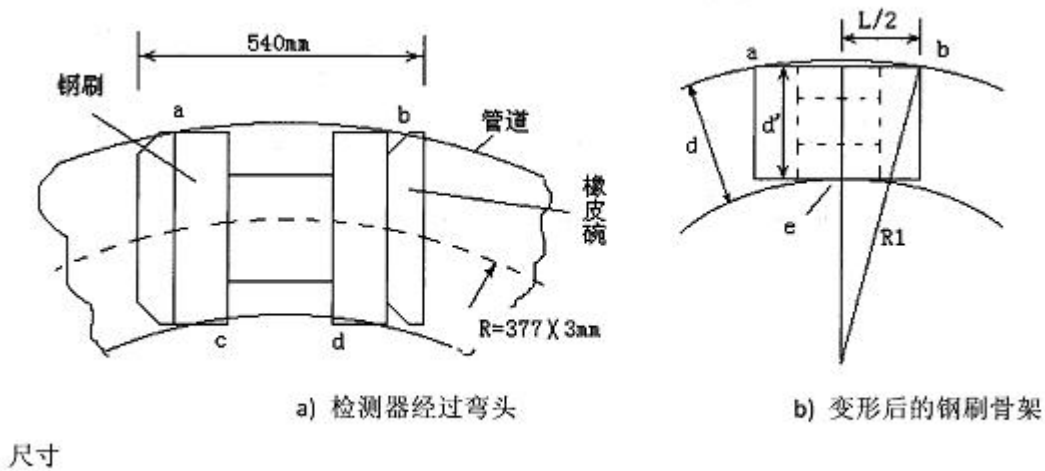


图 4.23 装置与转弯半径关系图

以  $\Phi 377\text{mm}$  管道为例,假设弯头的转弯半径为  $3D$ ,即管道轴心处的半径为管道直径的 3 倍,则有

$$R = 3D = 1131\text{mm} \quad (4.14)$$

选磁化节为例进行计算,因橡皮碗的变形远大于钢刷,计算可考虑钢刷的情形。见图 2.7b,管道内径  $d$  为  $363\text{mm}$ ,图示矩形为变形后的钢刷骨架的尺寸,如果变形为最大值  $5\%$ ,则钢刷两端之间的距离  $L$  最大,钢刷骨架在 a、b、e 点顶在管壁上,那么此时变形后的钢刷直径为

$$d' = 363 \times 95\% = 344.85\text{mm} \quad (4.15)$$

弯头外弧半径

$$R_1 = R + d/2 = 1312.5\text{mm} \quad (4.16)$$

则

$$L = 2 \times \sqrt{R_1^2 - [R_1 - (d - d')]^2} = 2 \times \sqrt{1213.5^2 - [1213.5 - (363 - 344.85)]^2} = 435 \quad (4.17)$$

取钢刷两端的距离为  $400\text{mm}$ ,加上橡皮碗的厚度  $70\text{mm}$ ,则该节的长度定为  $540\text{mm}$ 。

同理,取橡皮碗变形为  $10\%$ ,根据公式 (2.3) (2.4) 可计算出其它两节的最大长度  $L'$  为  $613\text{mm}$ ,实际设计中也选  $540\text{mm}$ 。实际上,由于每节的中间部分都是空的,图 4.23 (b) 中的 e 点不会顶在管壁上,理论估算的尺寸还有一些余量,使装置能更顺利地通过弯头。

但是,检测装置每节的长度也不能过短。一般,装置的长度不能小于管道的内径。这是由管线中的三通分歧点决定的。如图 4.24 所示,如果装置太短,经过三通分歧点时,可能造成装置漏到或卡在侧面的管道中。另外,装置前后的橡皮碗不能密封两端的油,会造成油直接从三通处流过装置,不能形成压差而推动装置前进。

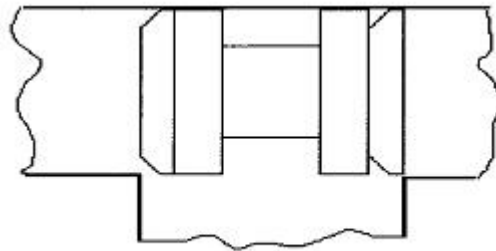


图 4.24 装置通过三通示意图

### 4.2.2 检测装置的工艺结构

检测装置在工艺结构设计上,要着重解决如下问题:

- 1、装置的密封耐压工艺。
- 2、装置的耐温、耐油工艺。
- 3、影响测量系统磁场分布的因素。

其中,密封工艺是关键,它关系到的不仅仅是能否正确测量数据,更重要的是装置能否完好无损,尤其是计算机节,价格昂贵,一旦损坏,损失巨大。

#### (1)装置的密封耐压工艺设计

由于检测装置在油中是依靠装置两端的压差而行走的,且压力最高可达 6.4Mpa,因此,必须保证装置在 6.4Mpa 以内的密封性能。对装置的密封主要包括计算机节及电池节筒体的密封、节与节之间电缆线连接处的密封和磁敏探头的密封三个部分。

##### ①计算机节及电池节筒体的密封

为增加密封性能,减少渗漏点,计算机节及电池节的筒体采用以端堵死的方法。如图 4.25 所示,筒体后端的法兰与筒体焊在一起,仅前段可活动,封堵的法兰上有一个环形沟槽,与筒体截面相同大小,槽内压入环行尼龙垫圈(聚四氟乙烯),活动法兰与固定法兰之间夹入橡皮碗,用螺栓把紧,使活动法兰紧紧地压在筒体的端部。尼龙垫圈有韧性,在压力很高时,比橡胶垫圈密封更好,且耐油、耐温。封堵法兰的侧面也开一个环形沟槽,内套 O 形圈,紧紧挤在筒内壁和法兰沟槽之间。这种密封工艺,具有双重保险作用,密封性能良好,尤其在压力很高时,可以保持长时间不泄露,能有效地保护筒内器件不受侵害。

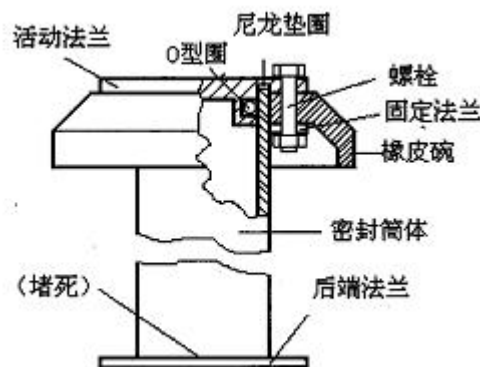


图 4.25 装置密封工艺示意图

## ②节间电缆线连接处的密封

由于油中含有杂质,如水、铁锈等,具有一定的导电性,因此,检测装置各节之间的连接电缆必须作密封处理。为便于各节拆装,节间采用接插件连接。接插件选用沈阳兴华电器公司的密封航空接插件,它的接插座采用玻璃烧结密封工艺,座内外压差可达 10MPa,但接插处不能密封。为此,特采用接插座在外,接插头在密封筒内的方法,如图 4.26 所示,接插座的接插点向内置于密封法兰上,之间夹尼龙垫圈,外盖压板,用螺栓紧固。外部接插件与电缆线连接处用改性丙烯酸脂胶粘剂密封。这种工艺即可防止接插件处渗漏,又能保证外部连线点不暴露在油中。

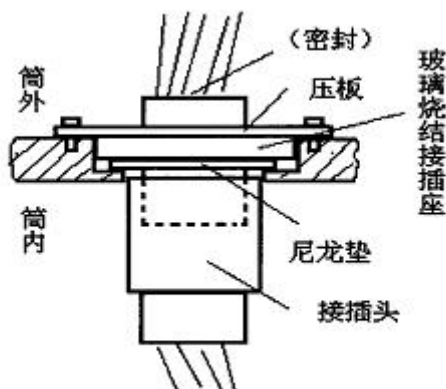


图 4.26 接插件密封工艺示意图

## ③磁敏探头的密封

磁敏探头中有磁敏传感器、稳压电路及前放等,必须进行密封处理。由于磁敏元件,如霍尔,当受到压力时,输出的霍尔电动势会发生变化,因此,密封时,除保证探头内电路不被油浸泡外,还要保证内部压力不随外部压力变化而变化。为此,如图 4.27 所示,在探头铸件上加一个盖板,盖板采用 1.5mm 厚的不锈钢板,以便能承受外界的压力,盖板和探头铸件之间的缝隙用改性丙烯酸酯胶粘剂密封。盖板上钻一个小孔,引出连接线,出线处也用胶密封。这样,可以使探头内部达到密封,且内部压力不会随外部压力的变化而变化。

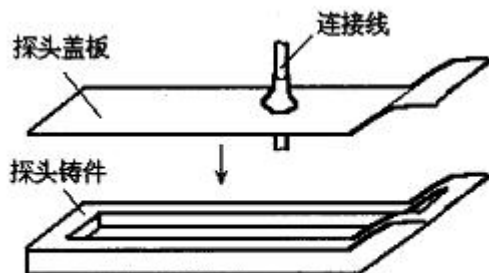


图 4.27 探头密封工艺示意图

## (2)检测装置的耐温及耐油工艺设计

石油在管道中运输时,为防止原油遇冷凝结,需在每个泵站加压的同时,对它进行加温。尤其在冬天时,更易凝结。一般从泵站刚出来的油温度要高一些,最高不到 70℃。因此检测装置的各个零部件必须能耐 0~70℃ 的温度。同时,浸泡在油中的部分,尤其是连接电缆线,须用耐油,耐腐蚀的材料。为解决这两方面问题,在选件工艺上,采取如下措施:

①所有的 O 形圈都采用耐油、耐温的橡胶制成。

②所有暴露在油中的连接线缆都采用耐油全塑电缆,且在线缆外包两层塑料皮,可有效防止油中所含腐蚀性杂质对电缆线慢性腐蚀带来的危害。

③所有密封用的胶都采用改性丙烯酸酯胶粘剂 HL-301,该产品粘合牢固,且有很高的耐温性,可在-60~120℃ 以下保持粘合特性不变,常用在储油罐的修补中,有很强的耐油性。

## (3)消除影响被测磁场分布因素的工艺措施

被测漏磁通信号是管道在腐蚀缺陷处由于磁场分布发生变化而产生的,如果有外接其他因素影响也会造成磁场分布发生变化,从而影响漏磁信号的测量。为消除其它影响因素,检测装置的所有金属工件,尤其是磁化节的工件,必须采用不导磁的金属材料制成。

①对磁化节,除衬铁、磁钢,钢刷这个磁化回路外,其它部分一律采用不导磁钢质材料。

②在探头处,由于这部分直接测量漏磁信号,它的材质会直接影响漏磁信号的分布,因此,探头铸件采用不导磁耐磨材料,便于漏磁信号传输和减小探头的磨损。

③其它两节的主要工件,包括万向节、法兰、密封筒及里程轮等,也都采用不导磁钢质材料。这些措施能有效地消除检测装置对磁场分布的影响。

## 4.3 长输(油气)管道漏磁内检测器操作

### 4.3.1 内检测器现场调试

内检测器现场调试主要进行内检测器运行前的工况检验工作,通过调试软件验证全部检测单元是否正常工作,如图

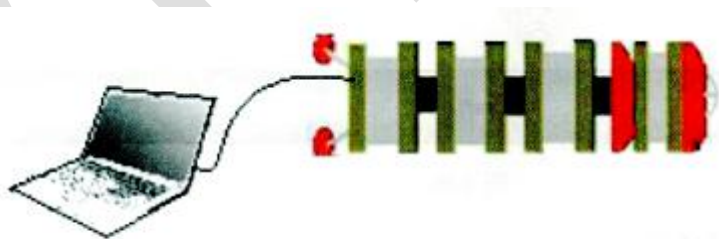


图 4.28 调试示意图



### 4.3.2 检测器的投放

打开旁通阀,使原油充进发球筒;打开发球筒的发球阀,等待检测器的发送;关闭出口阀,使发球筒的原油排量加大,压力升高,致使检测器启动,向前运动;检测器通过发球阀后,用跟踪器检查,证实检测器通过发球阀,方可确定检测器已进入干线,然后恢复正常输送流程。

打开快开盲板,将筒内清理干净;关闭快开盲板,待下次使用。发球示意图如图 4.29 所示。

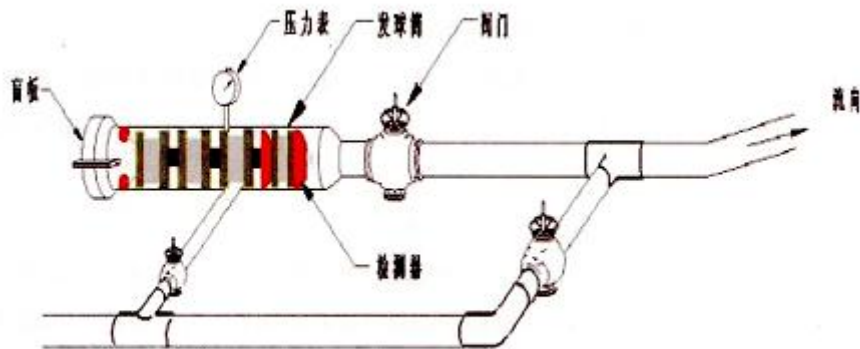


图 4.29 发球示意图

### 4.3.3 检测器的跟踪定位

采用低频发射接收定位装置进行里程修正。事先调整低频接收器和检测装置的时钟,使两者时间一致。使用接收器时,当检测装置经过接收器正下方时,接收器收到发射器信号的同时存储当前时间,而检测装置每测量和存储一组数据时,也存储当前的时间。这样,将接收器收到发射信号时记录的时间和存储数据的时间对照,就能确定地面接收器所在位置对应数据的位置,以该位置为零值,修正里程轮的值。

如果每 2 公里放置一台接收器,则 2 公里就可以修正一次里程值,该距离内的最大里程误差为:

$$2 \text{ 公里} \times 1/1000 = 2 \text{ 米}$$

在该误差范围内,可以通过挖掘的方法找到缺陷。如图 4.30 所示。

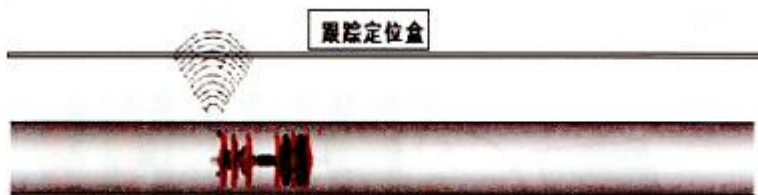


图 4.30 跟踪定位示意图

### 4.3.4 检测器的接收

当收球筒通过指示器动作后,用跟踪器确定检测器已进入收球筒后,立刻打开进球阀门,关闭收

球阀和旁通阀，泄掉收球筒的压力，打开排污阀，排净收球筒的杂物。打开快开盲板，清楚筒内的机械杂物，取出检测器，切断电源。

将收球筒清洗干净，管壁快开盲板和排污阀。收球示意图如图 4.31 所示。

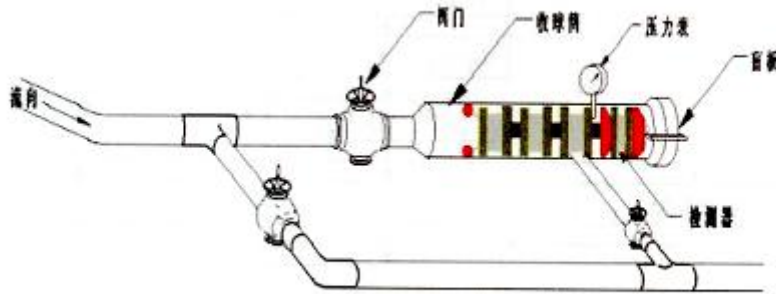
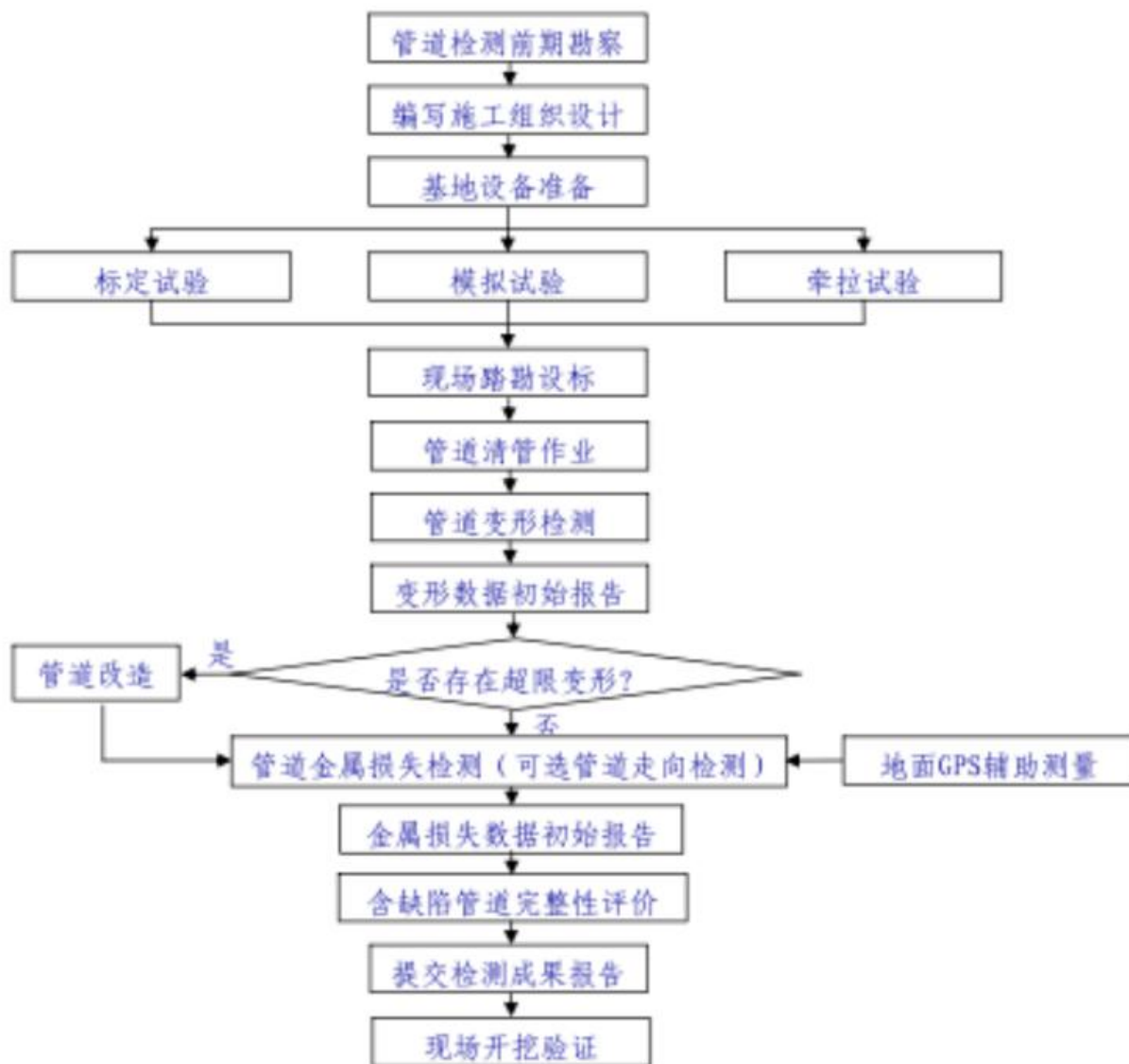


图 4.31 收球示意图

#### 4.3.5 检测数据读出

当检测器取出后，进行适当清洗。根据仪器的通讯方式，通过如 RS232、USB、LAN 等拷贝出记录数据，以进行后续数据的分析与判读。

## 第五部分 长输（油气）管道漏磁内检测工艺



内检测工艺流程

### 5.1 管线资料调查、现场勘察

确定了对某条管道要实施内检测之后，首要的任务就是通过管道调查对被检测的对象的情况了解清楚。对管道进行深入细致的调查是非常重要的，是制定管道清管检测方案的重要依据，也是决定检测成功与否的前提。管线资料调查一般通过业主（管道运营方）填写管线调查表和检测人员现场勘察的方式进行。

#### 5.1.1 管线调查表

管线调查表由业主方相关人员进行详细填写，并对内容的可靠性负责。业主方还应提供与管道建设、维修、维护资料及以前的检测结果。管线调查表主要内容如下：

管线调查表

管道运营公司名称:

管道这要力奥字作办管通资料的依据.

也址:

联系人:

电话:

传真:

### C.1 管道概况

管道名称:; 管道投产时间: 年 月 日:

管道长度:; 管道公称直径:mm 管道公称壁厚: mm;

管道焊缝类型: (无缝/直焊缝/螺旋焊缝); 输送介质:;

防腐类型:; 是否有内涂层: ☐ 否 ☐ 是 (涂层类型)。

三桩是否齐全:。

是否有并行管道:并行管道位置:。

是否有交叉管线:; 管线交叉位置:。

管道最大高程差:; 管道干线是否有变径。

### C.2 工艺参数

最大允许运行压力: MPa; 工作压力范围: MPa;

流量范围: m<sup>3</sup>/h;

运行温度:当前: °C; 最高: °C, 最低: °C;

表 C.1 沿线各站情况

序号	名称	距下站距离 km	功能	有/无收发球装置
1				
2				
3				

表 C.2 管道壁厚及材料

序号	起点 km	终点 km	壁厚 km	管道外径 km	材质 km
1					
2					
3					

### C.3 清管/检测历史

清管器类型:; 清管周期:; 近期清出污物质量: kg;

清出污物成分:。

曾进行过何种智能检测:; 检测时间:; 检测设备:;

已知管道最大变形%; 变形位置。

主要腐蚀类型(内腐蚀/外腐蚀):;

腐蚀主要分布区域:。

是否发生过穿孔泄漏:;

修复方式(套管、管卡、换管等);。

### C.4 收发球筒情况

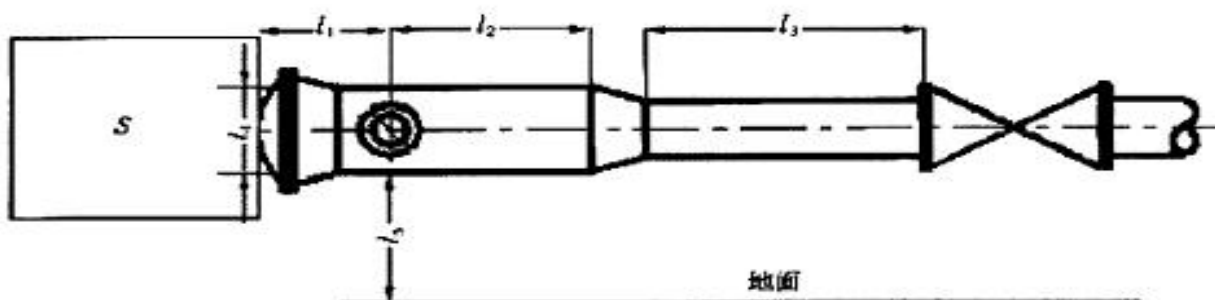


图 C.1 收发球筒示意图

表 C.3 收发球筒信息

单位为毫米

序号	站名	球筒类别	S	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$
1		发球筒						
2		收球筒						
		发球筒						
3		收球筒						

表 C.4 穿跨越信息

单位为米

序号	种类(穿/跨)	位置	穿跨越长度	支撑方式	悬空高度
1					
2					
3					

## C.5 相关管道附件情况

表 C.5 相关管道附件信息

弯头信息				
序号	位置	曲率半径	弯头角度 (°)	壁厚 mm
1				
2				
3				
相邻弯头间直管段长度 (mm):				
斜接信息				
序号	位置	斜接角度 (°)		
1				
2				
3				
开孔直径大于管道外径 30%的三通信息				
序号	位置	开孔直径	是否有挡条或挡板	
1				
2				



花板三通信息				
序号	位置	开孔区域轴向长度 m		
1				
2				
3				
阀门信息				
序号	位置	阀门类型	最小孔径 mm	工作状态
1				
2				
3				

## C.6 可提供的资料

以往检测结果 ( )    管道修复记录 ( )    管道腐蚀调查记录 ( )  
 管道设计图纸 ( )    管道竣工图 ( )    站区工艺流程图 ( )  
 阴极保护情况 ( )

填写人:    审核人:    单位盖章:

填写时间:    年    月    日

## 5.1.2 现场勘查

检测机构应在业主方相关人员的配合下对管线调查表中的内容进行现场勘查和核实。下面对勘查过程中可能遇到的问题及可能影响管道内检测结果的因素进行介绍。

## 1、输送介质

## (1) 原油

输送介质为原油的管道, 检验人员需关注原油的含蜡量和含硫量。

含蜡原油一般含有很高的石蜡成分, 在温度低于凝点时会产生凝胶结构。在管道输送过程中, 石蜡会随着油温下降而产生沉淀, 并在管壁上形成一定厚度的蜡层。检验人员调查时应重点关注其清管历史情况, 评估管壁的结蜡层厚度。在后续清管检测时慎重选择清管方案, 防止发生因清出的蜡较多, 导致管线停输卡堵。

为了降低作业风险, 对于含蜡较高的原油管道一般考虑提高原油的出站温度或添加降凝剂来抑制原油中的蜡析出。

含硫原油一般属轻质原油, 其中含有的硫元素、硫化氢等能与金属管壁直接发生反应, 生成硫化铁。在清管检测作业时, 管道内的硫化铁会被清管器清出至收球筒。作业人员打开收球筒盲板后, 球筒内的硫化铁与空气中的氧气迅速发生氧化反应, 反应同时放出热量。当

温度达到球筒内气体的闪点时, 会发生闪燃现象, 造成事故。

## (2) 成品油

成品油管道一般包括汽油、柴油和航空煤油。柴油和航空煤油闪电较高,作业时风险较小,汽油闪点低、挥发性高,在进行收发球操作时,容易发生闪燃。对于汽油专输管道,在检测作业时务必做好风险防护措施,防止事故发生。对于汽柴油混输管道,可选择输送柴油时进行现场作业,降低作业风险。

## (3) 化工原料

对于一些输送特殊化工原料的管道,检验人员需了解介质对人员的伤害特性、对检测设备部件的腐蚀特性等。

## (4) 天然气

天然气中的含硫量和水露点是影响内检测的两个关键参数。含硫较高的天然气,在检测过程中易与检测器中的钢制金属部件反应,导致检测器损坏。天然气水露点高于管线运行温度,会在管道内析出水合物,清管检测过程中,设备中的泄流处气体膨胀,产生制冷效果,逐渐结冰,当结冰量足够大时就会形成冰堵,造成设备卡堵,管道停输。

## (5) 新建未投产管线

新建管线进行首次内检测,一般也叫基线检测,可以掌握管道的全面基础数据,有利于管道的完整性管理。新建管线检测一般采用空气、氮气或水作为介质。采用空气或氮气时,检测时需要建立一定的背压,且背压不宜小于 0.4MPa。最大限度避免检测器运行速度过快,造成设备损坏和数据无效。采用水作为介质,需要考虑设备防水问题及水的来源和排放问题。

# 2、管道参数

## (1) 管径

管径一般指管道外径,按照 API 标准管径以英寸为单位,一般为偶数。国内管径通常以国际单位制 mm 表示,以  $\Phi$ \*\*\*\*表示,例如  $\Phi 508$ 。国内管径还有一些不在 API 标准之内的管道,如  $\Phi 377$ 、 $\Phi 426$ 、 $\Phi 529$ 、 $\Phi 630$ 、 $\Phi 720$  等。现场调查时要特别注意管道中是否含有变径管道,这决定着是否能进行常规的清管及检测。

## (2) 壁厚

长输管道一般要经过很多地区,在相同的设计压力下,不同的区域设计的壁厚会有所不同。不同的管径,壁厚范围也会有所不同。海底管道的壁厚等级一般要高于陆上管道。壁厚对于漏磁检测的精度和灵敏度存在很大影响。因此,掌握被检测管道的壁厚范围是非常重要的。

## (3) 长度

管道长度是制定清管检测方案和预算的主要依据。清管器皮碗的耐磨程度、跟踪仪的续航能力、检测器的数据存储空间以及检测器的电池容量等都与被检测的管道长度有关。管道长度是指清管器或检测器发送到接收站之间的长度,一般以 km 表示。如果发送接收站之间的距离超出了检测器的最大范围,可采用距离控制的方式分段进行检测。

## (4) 材质

管道的材质会影响管道的磁化,对于漏磁检测,了解管道的材质特性,通过牵拉实验建立该种材质的漏磁检测试验数据模型,可以保证检测结果的准确性。长输管道的材质一般为 API X52, X65, X80 等。材质不同,硬度不同,磁化曲线不同。

#### (5) 内涂层

特殊输气管道为提高输送效率,减小阻力,在管道的内壁进行了内涂层处理,需要了解内涂层的材料特性和涂层厚度,在进行清管或检测时,需确定对内涂层不能有很大的破坏,应该慎用安装有较硬钢刷的清管器或检测器。

### 3、运行参数

#### (1) 压力

了解管道的运行压力,确定其未超过检测器的承压极限。液体管道不要求压力下限。对于输气管道,需要确定其运行压力和输量在检测器要求的工况范围内,以保证获得较好质量的检测数据。

#### (2) 输量

调查输量的目的是需要根据输量计算介质在管道中的运行速度。在管道内检测器运行速度 $\approx$ 介质流速。对于输油管道来说,速度一般小于 2m/s;而对于输气管道速度则根据生产要求不同差异较大。一般最快能达到 10m/s 以上。

漏磁检测器为了保证检测数据质量及精度,降低速度效应影响,一般行业内认为速度要小于 5m/s。对于输量超过要求的天然气管道,可采取以下两种措施:

a、进行工况调整,寻找输送窗口期主动降低输量或提高管容;

b、设备中安装速度控制装置。该装置包括速度采样和泄放阀。当系统采集到速度过快时,主动打开阀门泄流,降低压差,达到降速目的。该方法属于后控制方式,不能完全避免速度过快现象。

同时,根据输量需要计算检测器在管道内的运行时间,保证检测器内的电池续航时间符合检测要求。根据时间计划现场作业跟踪方案。

#### (1) 液体管道速度计算:

一般输量单位: t/d、 m<sup>3</sup>/d

质量流量(t/d)  $\rightarrow$  体积流量(m<sup>3</sup>/d)  $\rightarrow$  体积流量 Q (m<sup>3</sup>/s)

根据外径、壁厚算出有效截面积 S;

$$v=Q/S$$

例:某输油管道管径 610mm,壁厚 8mm,输量 32037m<sup>3</sup>/d.

$$Q=32037 \div 24 \div 3600=0.3708 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$S=3.14 \times (0.61-2 \times 0.008)^2 \div 4=0.2770 \text{ m}^2$$

$$V=0.3708 \div 0.277=1.34 \text{ m/s}$$

#### (II) 气体管道速度计算:

输气管道一般给出的输量单位是 Nm<sup>3</sup>/d,含义为每天输气量标方数。Nm<sup>3</sup>是指 0℃,

一个标准大气压下气体体积, N 代表标准条件 (Nominal Condition) 通常情况下 N 省略。

我们已知气体具有可压缩性。给出的标况下输量不能用于管道内气体速度直接计算, 需进行换算。

根据理想气体状态方程

$$PV=nRT$$

$$P_0V_0=P_1V_1$$

$P_0$ : 标准情况下大气压, 约为 0.1MPa;  $V_0$ : 标准情况下体积流量;

$P_1$ : 管道内运行压力, 单位 MPa;  $V_1$ : 管道内体积流量;

$P_0$ 、 $V_0$ 、 $P_1$  已知可以换算出管道内体积流量  $V_1$

根据外径、壁厚算出截面积  $S$

$$V=Q/S \text{ 单位是 m/s}$$

$$V=Q/S \text{ 单位是 m/s}$$

例: 某输气管道管径 406mm, 壁厚 6mm, 运行压力 4MPa, 数量 250 万  $m^3/d$ 。

换算成 4MPa 下, 输量为  $2500000 \times 0.1/4 = 62500 m^3/d$

$$Q=62500/24/3600=0.7234 m^3/s$$

$$S=3.14 \times (0.406^2 - 2 \times 0.006^2) / 4 = 0.1219 m^2$$

$$V=0.7234/0.1219=5.93 m/s$$

### (3) 温度

这里所指温度是指管道输送介质的温度。天然气、成品油管道一般都是常温下运行。原油管道根据其油品的凝固点和析蜡点不同, 输送温度可能较高。需注意其温度是否符合检测器要求, 一般情况下检测器可承受的最高温度为 70℃。

## 4、管道上的其他设施

### (1) 弯头 (弯管) 转弯半径

转弯半径, 又叫曲率半径, 是指管道中心线至弯头 (弯管) 圆心的距离是几倍的管道外径, 按照 GB/T 34275 压力管道规范-长输管道中规定, 弯头为曲率半径  $< 4D$  的弯曲管段, 曲率半径  $\geq 4D$  的称为弯管。在内经侧行业内一般统称为弯头, 不进行区分。

调查时需要根据管线调查表及相关原始资料确定管线中弯头的最小转弯半径, 确定检测器是否能正常通过。对于资料不全及管道运营方不能确认的弯头, 有必要进行开挖确认, 以保证检测正常进行。一般检测器能通过的最小转弯半径为 1.5D。

确定是否存在连续弯头, GB/T 27699 钢质管道内检测技术规范对连续弯头要求是两连续弯头之间直管段长度大于管道外径。

弯头上存在的变形不应超过相应规格检测器的通过性能指标。

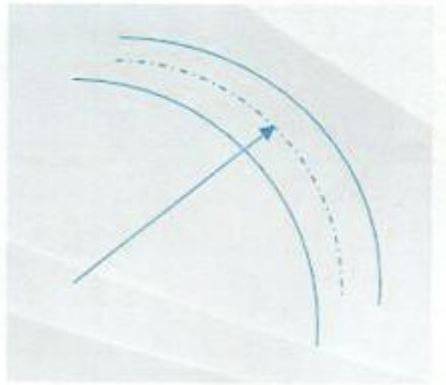


图 5.1 弯头转弯半径示意图

## (2) 三通

调查时对于三通的要求是开孔直径大于 30%管道外径的三通应有挡条和挡板。没有挡条的三通（尤其是等径三通）会造成清管器或者内检测器误入旁通管道内，造成卡堵。

挡条或挡板的内弧应与主管内表面弧度相同；轴向/周向挡条应等间距分布；轴向挡条和周向挡条应垂直交叉并焊接牢固，挡条两端与管道应焊接牢固。详细装要求参照 GB/T27699 钢质管道内检测技术规范。

按照 GB/T27699 钢质管道内检测技术规范要求，两个连续三通最小间距要满足  $1.5D+(d_1+d_2)/2$ ，其中  $D$  为管道外径， $d_1, d_2$  为两相邻三通的开孔直径。

还有一种常见三通是套管三通。

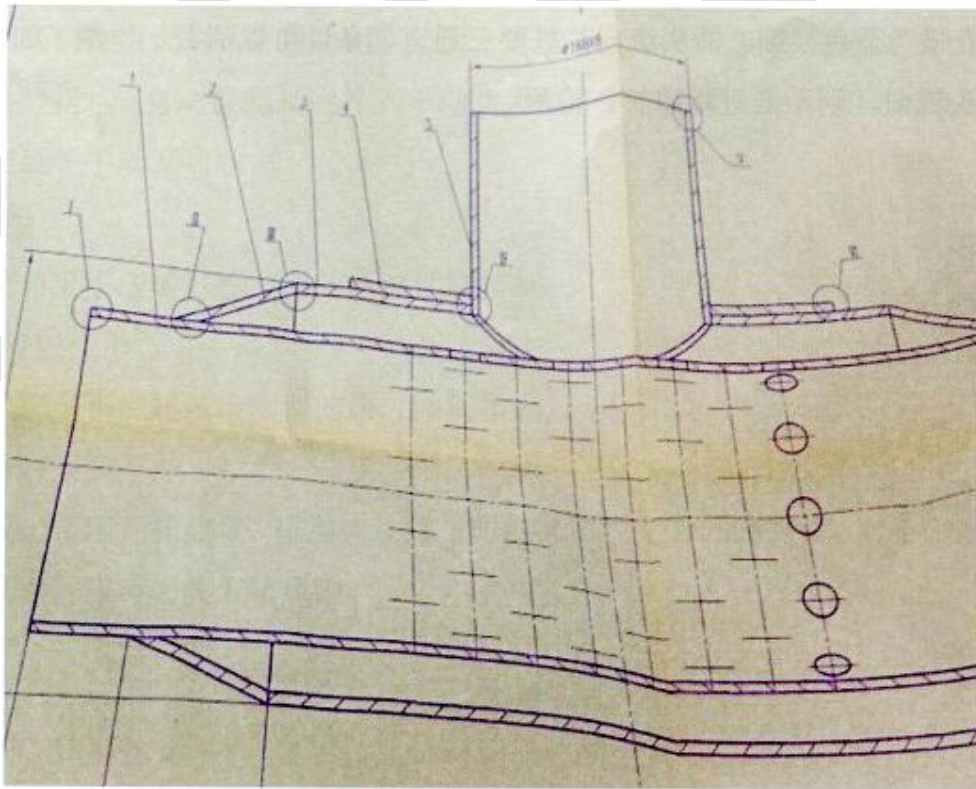


图 5.2 套管三通设计图样



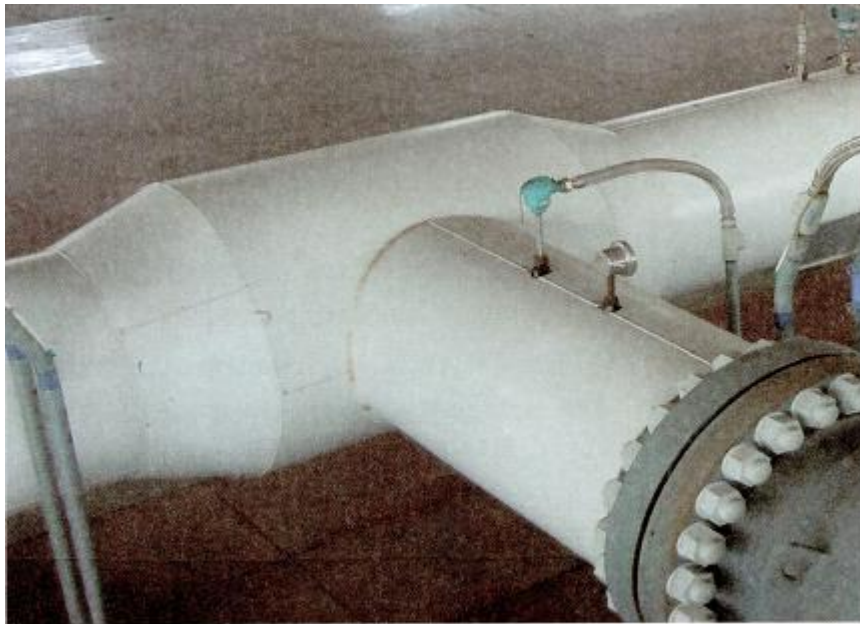


图 5.3 套管三通实物图

由双层钢管组成，内层钢管直径与管道直径相同，内层钢管与外层钢管之间有一定间隙。内层钢管圆周上分布泄流孔，旁通管孔开在外层钢管上。GB/T27699 钢质管道内检测技术规范对于套管三通的要求是套管三通开孔区域轴向长度应不大于管道外径。为了防止清管器停留在三通内，密封皮碗之间的间距要大于套管三通长度。

斜三通是一种管道中不常见的三通。如果在管道中出现，应予以重视。下图为一个斜三通。如果介质为蓝色（细）箭头流向，只要三通有挡条，可以清管、检测。如果介质为红色（粗）箭头流向，则不能进行清管、检测。



图 5.4 某管线上的斜三通

### (3) 阀门

管道沿线阀门开启灵活，检测期间应处于全开状态。全开状态下的阀门内径应满足检测器最低通过性能指标。自动截断阀应打到手动状态，避免检测期间的压力波动造成阀门误动作。单向阀应处于手动开启状态。

### (4) 斜接

管道斜接角度不应超过检测器的通过性能指标。

### (5) 直管段变形

直管段变形量不应超过检测器的通过性能指标。

### (6) 带压开孔

了解管线上带压开孔数量，重点关注施工时的鞍形板是否回装到位。对于确定没有鞍形板的带压开孔点，应考虑其卡堵风险。



图 5.5 某管线中带压开孔无鞍形板造成的清管器卡堵

## 5、收发球站场



图 5.6 球筒全貌

### (1) 操作空间及地面状况

进行发球筒勘察时，应确定收发球筒盲板前的操作空间及地面状况应符合检测要求。确认设备进出场路线是否受限制。

### (2) 球筒参数

测量并记录球筒高度，确认是否符合收发球车的升降高度；

测量并记录球筒直径、长度，确认是否符合设备要求。





图 5.7 检测器正在发球照片

收球筒长度要大于检测器长度并有一定裕量，防止检测器进入球筒时撞击盲板。

对于检测器只有一节装有驱动皮碗，其他节为驱动轮支撑，要注意阀门到异径管之间直管段的距离。距离过短会造成检测器驱动节进入球筒后失去动力停止前进，而后节仍停在阀门中。导致无法管壁阀门，进行流程切换。

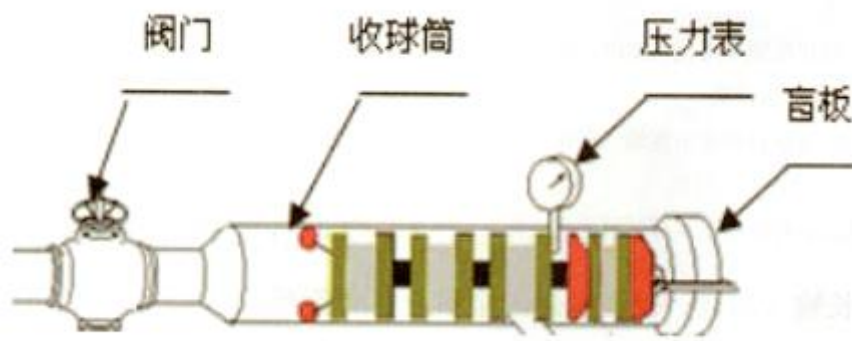


图 5.8 收球筒示意图

定位盒摆放位置

### (3) 流程相关

确认阀门是否存在内漏现象；

确认排污流程是否通常；

确认快开盲板是否密封完好。

## 5.2 长输（油气）管道漏磁内检测方案编制

检测机构根据现场核实后的管线调查表及实际情况制定切实可行的检测方案。特殊情况下，管线如果需要改造，则提出符合检测要求的改造建议。检测方案，也叫施工组织设计或实施方案，是根据检测机构的工艺规程编制的项目作业指导书。由检测机构编写，管道运营

方审阅同意后方可执行。

检测方案的内容一般包括:

(1) 项目基本情况

(2) 编制依据

填写依据标准。

(3) 检测施工进度计划

包括清管、几何检测、漏磁检测、开挖验证、出具检测报告的具体方案。

(4) 项目所需设备准备

介绍所需清管器、检测器的参数及其他设备。

(5) 作业流程

写明清管作业、几何检测作业、漏磁检测作业的详细步骤。

(6) 双方工作职责

写明双方职责。检测过程中涉及双方配合、交叉作业,涉及管道运营方的职责尽可能详细列出。

(7) 项目组织机构

内检测项目涉及部门较多,为了保障内检测项目顺利进行,需将项目组分若干小组,各司其责。

一般包括领导组、调度组、检测组、保驾组、配合组等。

(8) 应急预案

列出现场有可能出现的(卡堵)风险及应急处理措施。

(9) HSE 管理措施

认真执行安全、环境与健康管理体系程序文件。实现安全、环境与健康目标。

### 5.3 长输(油气)管道漏磁内检测设备准备

本节主要介绍内检测项目中可能用到的相关设备。一般包括清管器、几何检测器、漏磁检测器、定位跟踪设备、收发球工具等。实际检测项目中,检测机构依据编写的检测方案进行设备准备即可。不同的内检测项目由于其参数及工况不同,需要的清管器类型及所装皮碗类型数量都可能不同。

#### 5.3.1 清管器

管道清管是为了验证管道的基本通球能力和清除管道内杂质。也是为后续发送智能检测器做好准备。为了智能检测器成功完成有效的数据采集,管道内必须保证一定的清洁度。清管器的选型和投放次数必须做到恰到好处,既要避免由于一次性清出杂质过多造成堵管,也要达到理想的清管要求。因此必须充分考虑到管道输送的介质、口径、壁厚、管道清管历史等情况,选择合适的清管器类型,包括清管器的节数,皮碗的数量,皮碗的类型(碟形,直板型等),皮碗的过盈量等。常见的清管器包括泡沫清管器、普通清管器、测径清管器、钢



刷清管器、磁力清管器、强力重型清管器以及特殊清管器等。

### 1、泡沫清管器

泡沫清管器具有良好的柔韧性，收缩性强，能通过 40%管道变形。由聚氨酯发泡制成，密度为 220kg/m<sup>3</sup>。可携带低频发射机进行跟踪。一般用来验证管道的基本通球能力。对于长期未进行清管作业或情况较复杂的管道首次进行清管作业，一般采用该类型清管器。



图 5.9 泡沫清管器

海绵吸水清管器，泡沫吸水球（密度：15-30kg/m<sup>3</sup>）主要用于新建管线吸水、干燥、过盈量为 3-5%，有效运行距离≥5km。



图 5.10 海绵吸水清管器

钢针泡沫清管器（密度≥200kg/m<sup>3</sup>）是在光体泡沫清管器的基础上增加钢针而成，其表面布满螺旋状（杂序）排列钢针，对去除管壁内的焊渣、污垢有良好的效果。



图 5.11 钢针泡沫清管器

## 2、普通清管器

由清管器骨架、碟皮碗、直皮碗、低频发射机组成，碟皮碗和直皮碗材质为聚氨酯材料制成。影响聚氨酯皮碗性能的常规指标包括阿克隆磨耗、邵氏硬度、撕裂强度等。碟皮碗的密封性能较好，直皮碗清管能力较好。皮碗的过盈量一般在 3%-5%。

$$\text{过盈量} = (\text{皮碗直径} - \text{管道内径}) \div \text{管道内径} \times 100\%$$

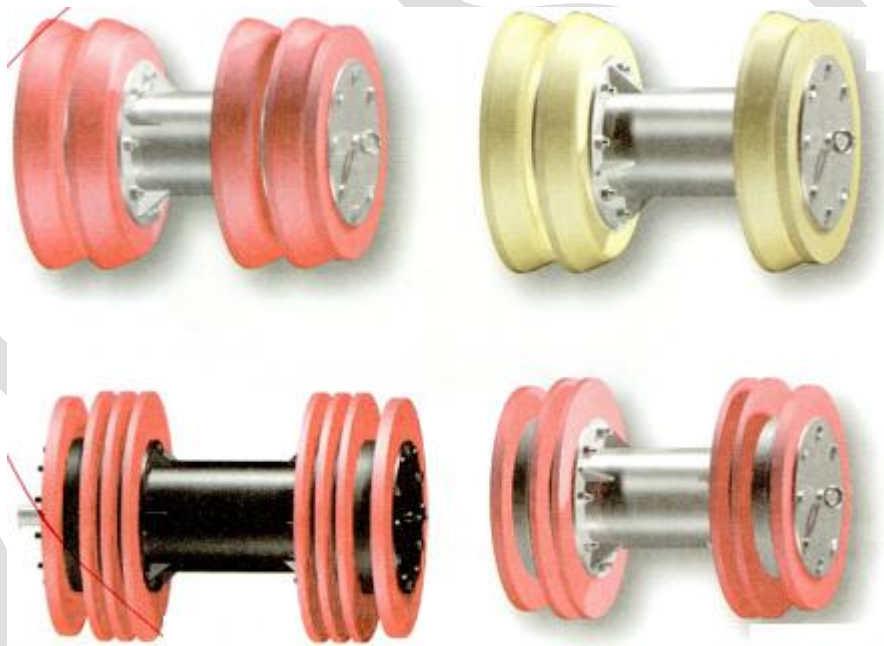


图 5.12 普通清管器

清管器皮碗组装没有固定形式，可以根据管线长度、管道清洁度及清管器的清管能力等选择碟皮碗、直皮碗或直碟混合组成不同的清管器。

选择清管器类型时, 应按照不同清管器通过能力由强到弱依次进行; 按照不同清管器的清管能力由弱到强依次进行。

### 3、测径清管器

测径清管器是将测径板安装在普通清管器末端皮碗之前, 并将皮碗与测径板用隔垫隔开, 给测径板变形留出空间。能够初步判断管道的变形情况, 并且根据变形情况判断是如何产生的。

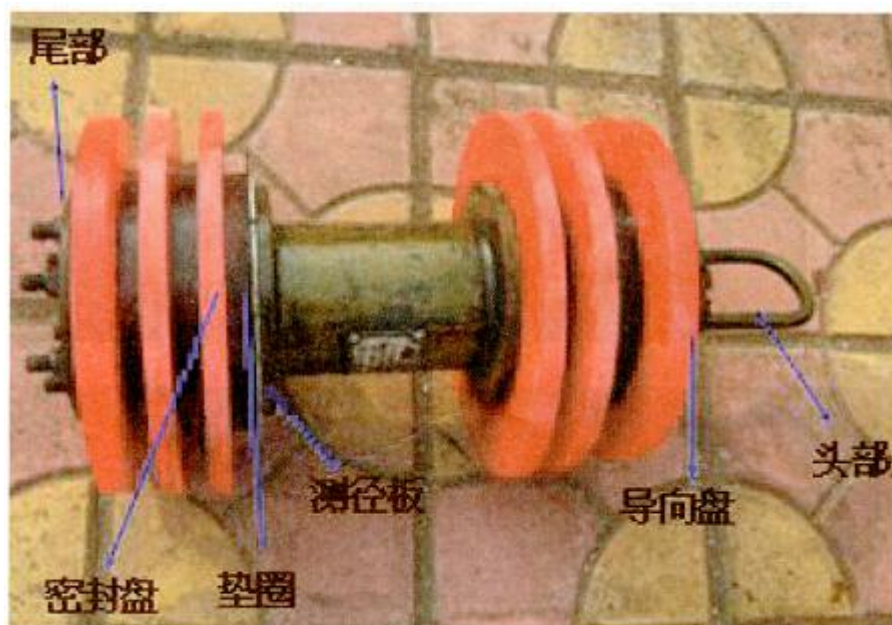


图 5.13 测径清管器

测径板为一定规格的圆形铝板, 外边缘一般均分为 8 或 12 等分, 用以测量管道内最大变形以及最小弯头等制约检测器通过的因素。不同规格的管径使用不同规格的测径板, 按照管道内径的 90%, 85%, 80% 等比例不等。测径板的厚度也不同, 有 3mm, 5mm, 6mm 等。





图 5.14 测径板



图 5.15 阀门没有全开造成的测径板刮痕

#### 4、钢刷清管器

钢刷清管器是在普通清管器基础上，增加柔性钢刷组合而成。其目的是清除附着在管壁上的硬垢，如铁锈、沉积物等杂质。



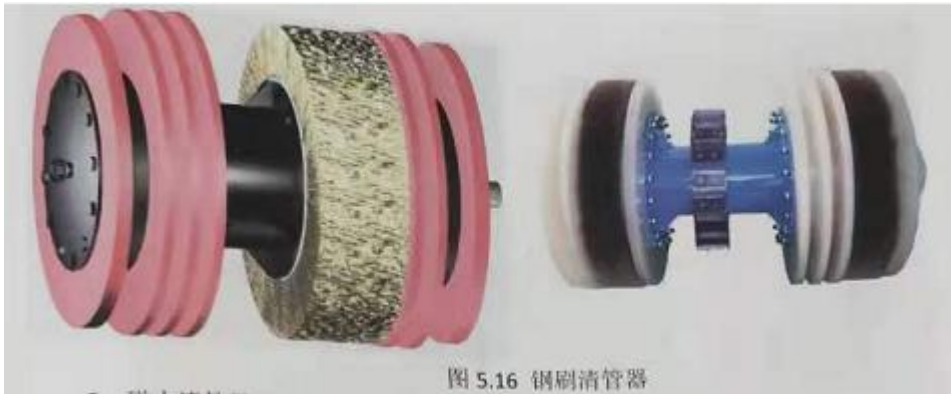


图 5.16 钢刷清管器

### 5、磁力清管器

磁力清管器是在普通清管器基础上，安装若干永磁铁清管器，其能够吸附管道内残余铁磁性渣滓，比如焊条头、施工工具等。



图 5.17 磁力清管器

工程中也常见有将钢刷与永磁铁同时安装在一起的清管器。

### 6、强力重型清管器

在某些杂质较多的天然气管道内检测项目中，往往采用以上各类型清管器清管若干次后，管道内杂质还是比较多，无法进行内检测。强力重型清管器是将永磁铁安装在钢刷下方，使钢刷具有磁性后达到强力清污的能力。近年来，该类型清管器已得到广泛应用。



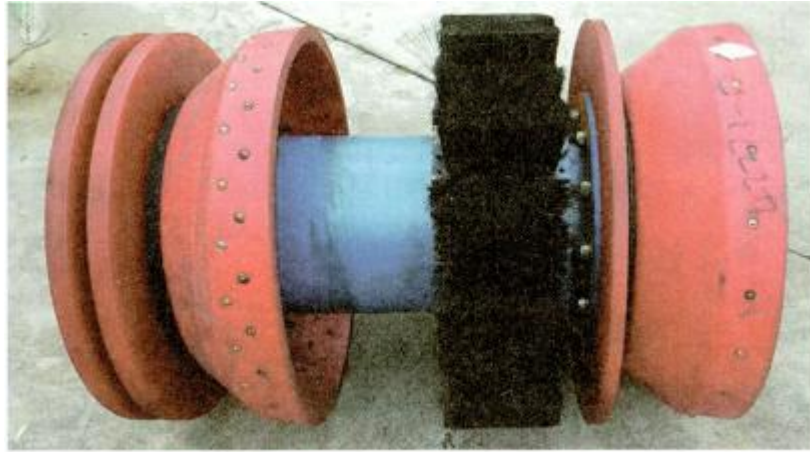


图 5.18 强力重型清管器

## 7、特殊清管器

在实际的工程项目中为了解决问题，还有很多特殊类型的清管器。

### (1) 橡胶球

橡胶清管器为传统意义上的清管球，其特点变形能力强，易通过，小口径（小于 ND150）为实心结构：大口径（不小于 ND150）为空心结构（内部注水），在管线及其复杂的情况下能顺利完成清管作业，一般主要用来清除管道内的积液。



图 5.19 橡胶球

### (2) 刮蜡清管器



图 5.20 刮蜡清管器

### (3) 软体清管器

主要由皮碗、连接体等构成，全部采用聚氨酯材料制成，可携带电子发射机。它具有通过能力强、变形量大、强度较高、不易卡堵、对弯头适应力强等特点。

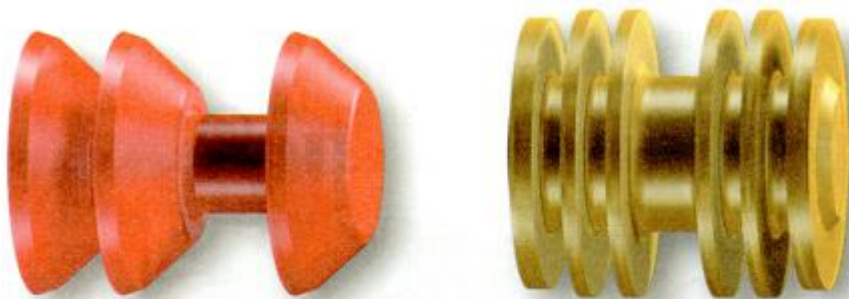


图 5.21 软体清管器

现场作业时为避免一次性清出过多的杂质而发生卡堵现象，可对清管器皮碗和钢刷进行开槽处理及打开清管器筒体上的射流孔：每种清管器的清管实际次数和选型根据现场清管效果进行调整。目的是为了清除某输油气管道内的粉尘、杂质、积液、积污，为下一步进行的管道内检测工作中检测器的运行提供一个清洁良好的管道内环境；同时初步了解管道变形情况以便采取相应措施，以利于管道内检测工作的顺利进行。编制清管方案的目的是规范细化清管作业的各项作业，为清管作业人员提供技术指导作用，从而保证清管作业的安全、平稳、有序进行。

工程上常用的清管器按照一般投运顺序主要包括泡沫清管器、普通清管器、测径清管器、钢刷清管器、磁力清管器。

## 5.3.2 检测器

### 1、标定试验

对只能检测器的传感器探头进行统一量化标定，其中包括多通道几何检测器的几何探头进行几何量化标定、漏磁检测器探头进行标准磁场量化标定，标定工具和标定设备需通过

国家制定的质检部门定期审核,且在审核有效期内使用。标定试验是保证检测设备准确量化管体变形和管壁金属损失的重要环节。

## 2、模拟试验

在检测器投入现场应用之前,需要对检测器系统进行一系列的模拟试验,其中包括温度试验(放置在恒温箱内进行 75℃ 持续 48 小时运行)、振动试验(安装在振动试验台上进行高频振动运行)、耐磨试验和压力试验等,以验证检测器的各项性能运行稳定。

## 3、牵拉试验

对于漏磁检测器,需要建立和被检管道材质、口径和壁厚相同的牵拉管段,并且在管体上制作大量不同类型、不同尺寸的标准缺陷,将检测器放入牵拉管段中通过模拟实际运行速度进行牵拉试验,建立缺陷模型的数据库,用数字方法拟合缺陷曲线,得到缺陷三维尺寸的量化模型公式,实现对后期现场检测缺陷数据进行自动量化。

## 7、几何检测器

几何检测器的功能是检测管道中存在的几何变形,首先通过数据分析判断变形量是否影响漏磁检测器通过,其次判断变形量对管道安全运行的影响。

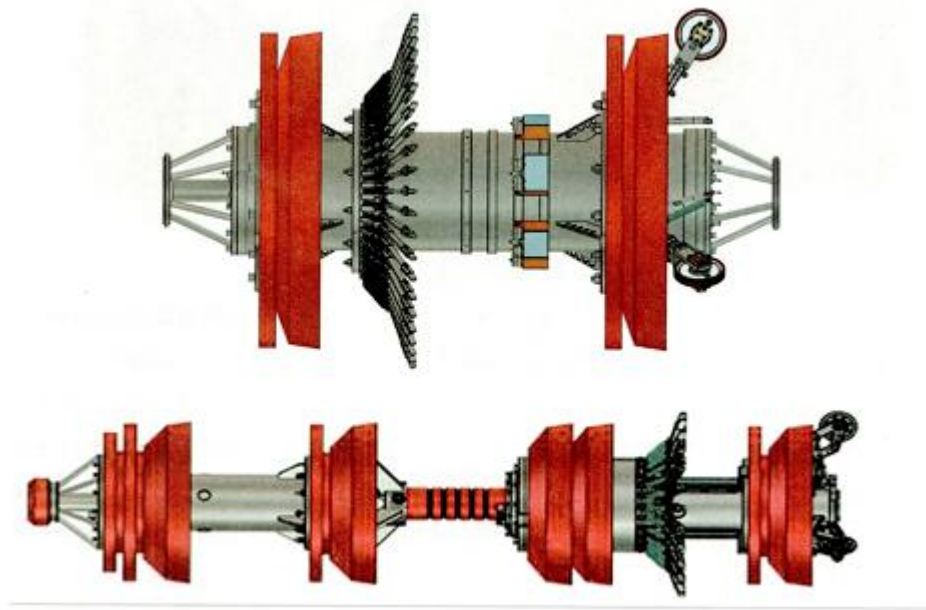


图 5.22 不同直径的几何检测器

设备发送至现场前将设备各部分功能调试准备好。

计算好电池工作时间,必须满足最长站间距运行时间,并留有裕量。以应对收发球过程中突发情况产生的收发球延缓,造成电池断电,数据不完整。

## 5、漏磁检测器



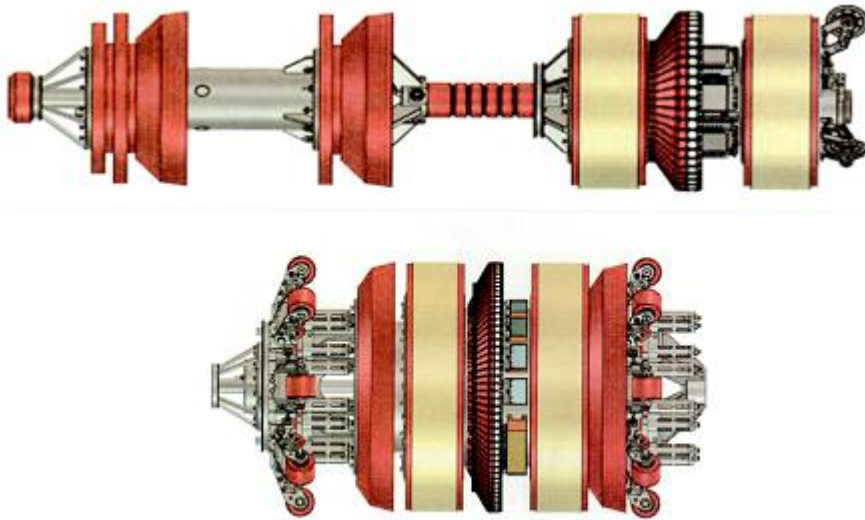


图 5.23 不同直径的漏磁检测器

设备发送至现场前将设备各部分功能调试准备好。

计算好电池工作时间，必须满足最长站间距运行时间，并留有裕量。以应对收发球过程中突发情况产生的收发球延缓，造成电池断电，数据不完整。

#### 6、IMU（Inertial measurement unit）惯性测量单元

包含三个单轴的加速度计和三个单轴的陀螺，加速度计检测物体在载体坐标系独立三轴的加速度信号，而陀螺检测载体相对于导航坐标系的角速度信号，测量物体在三维空间中的角速度和加速度，计算出管道的精确走向。一般与几何或漏磁检测器组合运行。多数情况下与漏磁组合，以获得更多的管道特征坐标。

要求：需要对每一个跟踪点进行坐标测量（纬度、经度、高程），用 IMU 坐标修正，提供测绘精度。

检测成果：管道中所有的管道特征（焊缝、阀门、金属损失点等）都能提供坐标。



图 5.24 IMU 测绘成果

### 5.3.3 定位跟踪设备

#### 1、低频跟踪设备

低频跟踪设备由安装在检测器或清管器上的低频发射机和由人员在地面携带的低频接收机组成。低频发射机通电后持续低频 23Hz 的脉冲信号。该信号可以穿过管壁，被低频接收机接受处理后进行报警提示。



图 5.25 低频发射机

低频接收机各厂家设备外形不同，但工作频率都为 23Hz，可以通过。一般包括探棒和主机两部分。



图 5.26 不同厂家的低频接收机

低频接收机按照检测方案中的跟踪计划配备，每个跟踪组至少 1 台，并配备备用机。



接收机包括两种，通过指示仪和定位接收机

- (1) 通过指示仪用于检测器跟踪，检测器通过时会一直发出声音报警，直至人员手动复位。
- (2) 定位接收机用于精确定位检测器位置，带有信号强度指示，无复位键。

使用方法：探棒摆放方向与管道走向平行，保证接受信号强度最大。使用时注意电池电量指示，有些类型接收机开机不能马上工作，需预热 30 秒钟。

如果在使用接收机跟踪时经常误报警，可能是由于探棒放置不稳定或有其他干扰源造成。常见的干扰源包括：高电压、发动的汽车、大型机械造成地面震动、探棒附近的磁场变化等。

## 2、定位盒（AGM 地面标记盒）

定位盒是一种能够在地面探测漏磁检测器通过时的磁场，并能够进行时间记录的数据采集存储设备。漏磁检测器虽然有里程记录装置，但因管线里程较长等多因素影响，里程记录装置累积误差较大，无法进行精确定位。



图 5.27 定位盒

进行漏磁检测器跟踪时，在管道沿线安放若干定位盒，检测器通过时记录下各个点的通过时间，各个点的通过时间可以在检测数据中找到对应位置。以此位置为相对零点定位附近缺陷即可消除累积误差影响，提高缺陷定位精度。



图 5.28 检测器在管道中运动示意图

定位盒根据检测项目中定位盒布置间距及跟踪方式不同所需准备的设备数量不同。

### 5.3.4 收发球工具

清管器、检测器在收发球时需要准备相应的收发球工具,包括收发球平台车、推球杆、收球钩、手扳葫芦、吊带等。

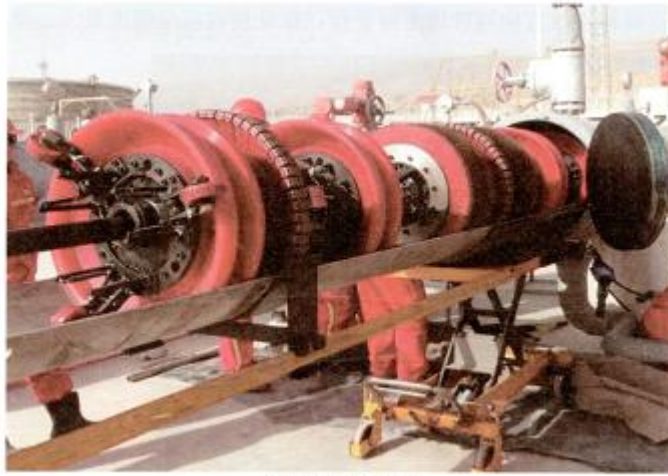


图 5.29 发球现场

## 5.4 长输（油气）管道漏磁内检测清管检测作业

### 5.4.1 踏勘设标

踏勘设标是沿待检测管道每隔一定距离设置固定标记点。该标记点用于后续清管、检测工作的定点跟踪点。标记点必须选在管道上方,设标时做好标记及记录,并熟悉进入设标点的道路。

设标的注意事项包括:

- 1、避开铁路、高压电线及车流量大的公路,因为使用低频接收机跟踪时容易收到干扰;
- 2、阀室、大型穿跨越两侧、带压开孔处等重点位置应进行设标;
- 3、埋深较深的位置避免选择,跟踪时探测信号较弱;
- 4、设标时应携带管线探测仪,使设标点处在管道正上方;
- 5、设标时应尽量选择管线标记桩等永久标志物;
- 6、设标间距一般不超过 1km,如有特殊情况,可适当调整距离。
- 7、设标时应记录好设标点的准确位置,可以使用 GPS 获取准确坐标,如检测项目中包含 IMU,则必须使用高精度 GPS 测量。



图 5.30 踏勘设标

除了定位盒之外还可以用永磁铁吸附在管壁上作为标记用。检测器通过磁标记时，漏磁检测器中的传感器检测到永磁铁产生的磁场异常并存储，分析数据时可以找到此规律性异常以此相对零点消除累积误差。

要求：对埋设点要进行详细记录，建议用 GPS 进行精确定位。否则因地貌变化大容易造成准确定位点丢失。

特点：

- (1) 永磁铁埋设完不用取出，定位方式可靠，可以在多个检测周期内重复使用。
- (2) 需开挖埋设坑，工程量大。



图 5.31 磁标记及磁标记开挖坑

#### 5.4.2 作业前准备

##### 1、管道运营方的准备工作

###### (1) 输量要求

需要清管、检测期间输量稳定，并符合检测器要求。

(2) 站场、阀室工艺设备（收发球工艺系统、放空系统、排污系统、过滤系统、消防系统、工艺状态监视系统等）操作灵活，密封性好，易损备件（如盲板密封圈等）齐全。

- (3) 在清管、检测期间, 应急保驾队伍及抢险设备、机具、材料处于就位待命状态。
- (4) 收发球站储备充足的氮气, 具备收发球作业期间进行氮气置换条件, 站场、阀室操作人员配置可燃气体检测仪。
- (5) 站场仪器仪表能准确监测合显示数据。
- (6) 在清管检测期间, 沿线干线阀门处于全开, 对于具有自动关闭功能的干线阀门在清管检测作业前屏蔽该功能。
- (7) 收发球站负责提供必要的设备存放、调试、清洗场地, 应有水源、电源及良好的照明条件。
- (8) 清管器运行期间, 业主应配备专人严密监测并记录管道的压力和排量变化情况。如遇异常, 应及时通知现场跟踪人员加密跟踪, 调度室进行监控并根据压力、输量推算清管器的位置。

## 2、检测方的准备工作

- (1) 将清管器、检测器调试好, 确保设备所有功能正常, 尤其是发射机、皮碗及螺栓连接等进行检查确认。
- (2) 根据现场人员数量及车辆制定好跟踪计划。

## 5.4.3 清管作业

### 1、氮气置换

天然气管道检测开启收球筒盲板前要进行置换(惰化), 以确保现场施工安全。打开盲板前将球筒通入惰性气体(一般是氮气)将球筒内可燃气体置换出来。需事先确定好相关工作界面。

#### (1) 驱赶法

从收发球筒一端入口将氮气缓慢注入球筒内。由于氮气( $N_2$ )比天然气(主要成分为 $CH_4$ )重, 进入的氮气首先在底部聚集, 而天然气在上部, 随着氮气的注入, 天然气就被从上部端口排挤出去。

#### (2) 压力稀释法(常用)

从收发球筒一端入口将氮气快速注入球筒内。关闭出口。升到一定压力后(0.5MPa), 打开出口, 快速泄放压力。反复几次, 直至浓度降低。

## 2、原油、成品油清管器发送和接收流程

### (1) 原油、成品油清管器发送

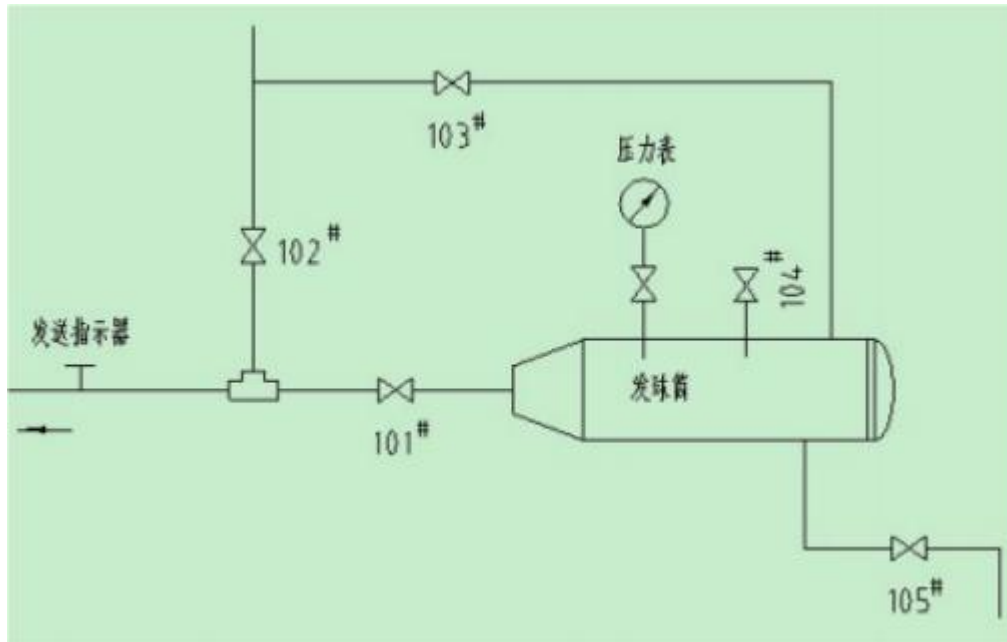
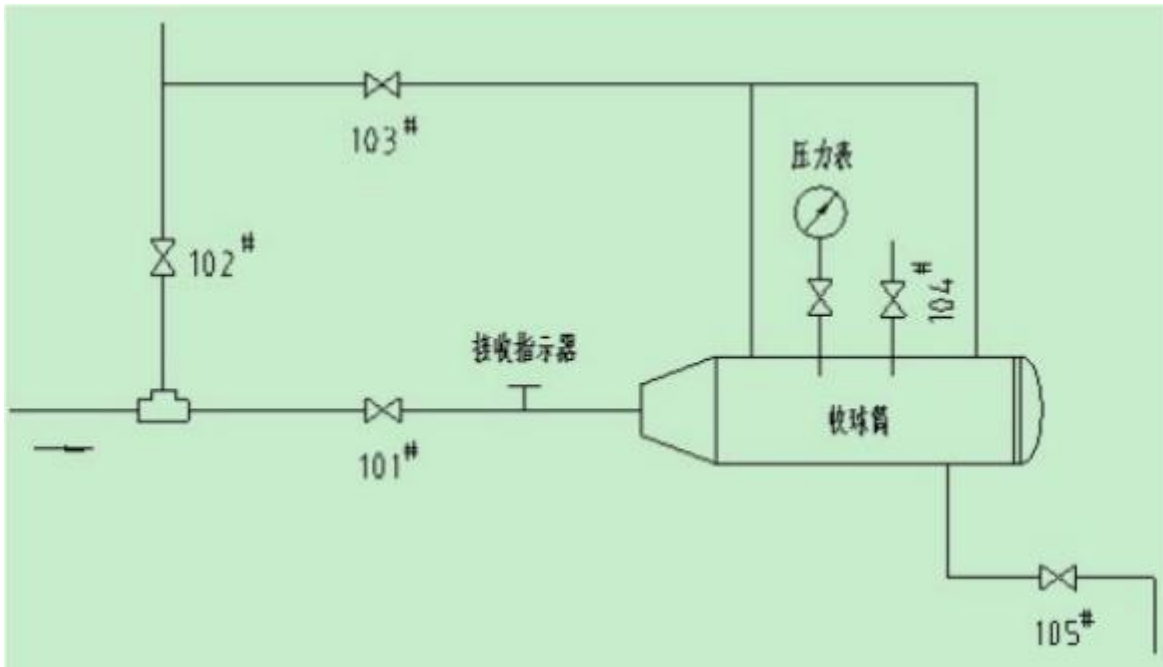


图 5.32 原油、成品油发球流程图

- ①打开发球筒盲板，使用气体监测仪监测可燃气体浓度在安全范围内，把清管器送入发球筒大小头处，并在大小头处塞紧。
- ②检查密封圈并关闭快开盲板，装好保护装置。
- ③缓慢打开 103#旁通阀，平衡发球筒与干线压力。
- ④缓慢打开 104#排气阀，排尽发球筒内气体，然后关闭 104#排气阀。
- ⑤全开 101#干线阀。
- ⑥缓慢关闭 102#阀，发送清管器。
- ⑦在通球指示器发出球过信号或用地面接收装置确认清管器发出后，打开 102#阀，关闭 101#干线阀，关闭 103#旁通阀。
- ⑧打开 105#排污阀，将收发球筒内的原油回收。
- ⑨注意事项：快开盲板正面和内侧面不得站人，且所有人员尽量站到快开盲板的上风口；清管器应送至发球筒大小头处；确认清管器发球筒 101#干线阀门全开到位。

## (2) 原油、成品油清管器接收





- ① 确认104#排气阀, 105#排污阀处于关闭状态, 缓慢打开103#旁通阀平衡收球筒与干线压力, 缓慢打开104#排气阀, 排尽收球筒内气体。
- ② 全开101#干线阀, 关闭102#阀, 收球筒处于接收状态。
- ③ 在通球指示器发出球过信号或用地面接收装置确认清管器进入收球筒后, 打开102#阀, 关闭101#干线阀和103#旁通阀, 恢复至正输流程。
- ④ 打开 105#排污阀排污, 排污完成并确认收球筒内压力为零后, 打开快开盲板, 使用气体监测仪监测可燃气体浓度在安全范围内, 取出清管器。
- ⑤ 清除收球筒内杂质, 并对杂质进行取样。清洗和检查密封圈后关闭快开盲板。
- ⑥ 注意事项: 确认收球筒101#干线阀全开到位; 开启排气阀和排污阀时, 动作应缓慢; 快开盲板正面和内侧面不得站人, 且所有人员尽量站到快开盲板的上风口。

### 3、天然气管线清管器发送和接收流程

#### (1) 天然气管线清管器发送

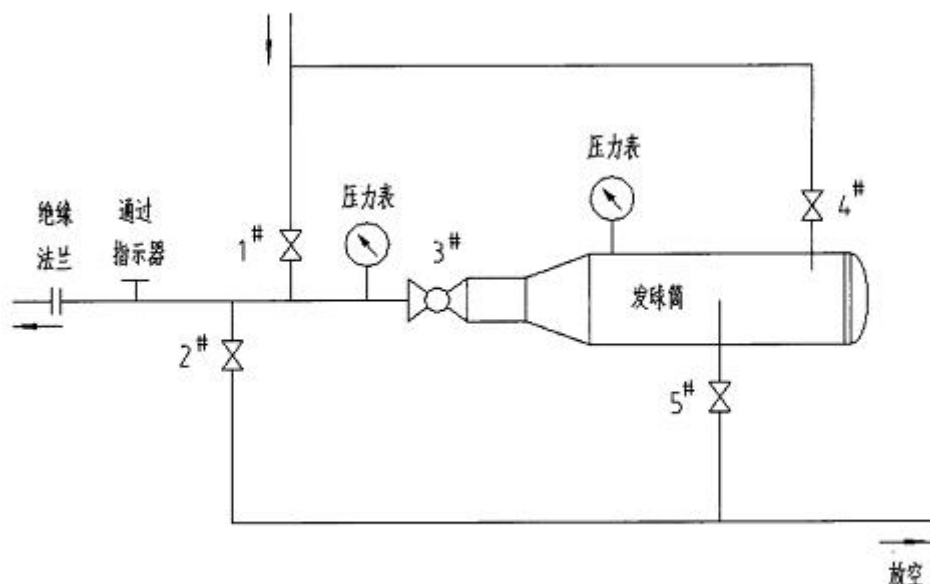


图 5.34 天然气管线发球流程

- ① 打开5#放空阀，确认发球筒内压力为零，并对发球筒进行氮气置换后，使用手持可燃气体监测仪监测可燃气体浓度在安全范围内，打开快开盲板，把清管器送入发球筒大小头处，并在大小头处塞紧。
- ② 检查密封圈并关闭快开盲板，装好保护装置。
- ③ 关闭5#放空阀。
- ④ 缓慢打开4#旁通阀，平衡发球筒与干线压力平衡。可以防止清管器撞击盲板。
- ⑤ 全开3#干线阀。
- ⑥ 关闭1#进气阀，发送清管器。
- ⑦ 在通球指示器发出球过信号或用地面接收装置确认清管器发出后，打开1#进气阀，关闭3#干线阀，关闭4#旁通阀。
- ⑧ 打开5#放空阀，将发球筒内压力释放至零。

## (2) 天然气管线清管器接收

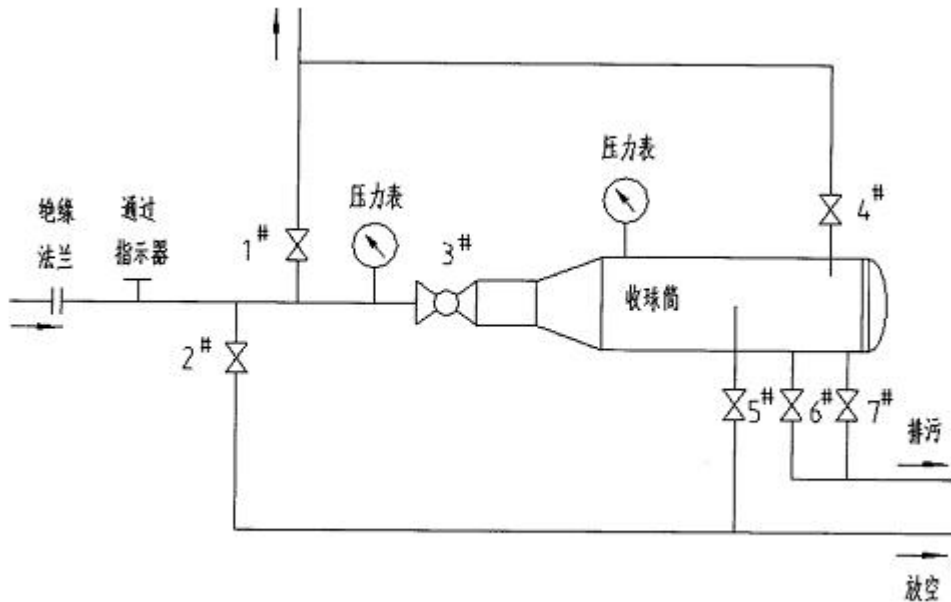


图 5.35 天然气管线收球流程

- ① 确认5#放空阀，6#、7#排污阀处于关闭状态，打开4#旁通阀平衡收球筒与干线压力，全开3#干线阀，关闭1#出气阀，收球筒处于接收状态。
- ② 在通球指示器发出球过信号或用地面接收装置确认清管器进入收球筒后，打开1#出气阀，关闭3#干线阀和4#旁通阀，恢复至正输流程。
- ③ 打开5#放空阀，将收球筒内压力释放至零（如需带压排污，可将收球筒内压力释放至低压后关闭5#放空阀）。打开6#、7#排污阀排污（如果遇到杂质较多的情况，应当在杂质到达收球筒后，关闭4#旁通阀，打开6#、7#排污阀排污）。
- ④ 排污完成，确认收球筒内压力为零，并且进行氮气置换后；用手持可燃气体检测仪监测可燃气体浓度在安全范围内，打开快开盲板（如天然气中含硫化氢，在打开盲板后应立即向收球筒内注水），取出清管器。
- ⑤ 清除收球筒内杂质，并对杂质进行取样。
- ⑥ 关闭5#放空阀，关闭6#、7#排污阀。清洗和检查密封圈后关闭快开盲板。

#### 4、清管器跟踪

清管器发出后，跟踪组按照预先定好的跟踪点进行跟踪，多组之间采取交叉跟踪方式。根据接收机信号指示，做好跟踪记录。

清管器运行期间，业主方应严密监视管道运行压力、输量参数。并与调度室保持密切联系，及时获取输量变化信息。防止输量变化引起球速变化，给跟踪造成困难。

初次清管作业，由于不了解管道的实际通过能力和杂质情况，应将跟踪密度增大，减小风险；对于多次投运清管器，如清管器的类型不变，可将跟踪密度减小。在清管期间，如排量、压力等参数变化或现场出现特殊情况，站控人员和跟踪人员应及时进行沟通。每个点都要记录清管器通过时间，如有特殊情况及时与监控室进行沟通。



清管作业应避免由于一次性清出杂质过多造成卡堵,因此要遵循循序渐进的原则。采用清管能力由弱到强、通过能力由强到弱的顺序,分批次将管道内杂质清除干净。一种类型的清管器在其清出的杂质量明显减少的情况下,才可以更换清管能力更强的另一种类型的清管器。最终的清管效果确认要根据管道的实际情况确定,须满足发送检测器要求。

#### 5、清管器卡堵

清管过程中可能由于管线几何变形、管道异物、杂质过多等造成清管器无法前进,发生卡堵。发生卡堵后应首先根据跟踪情况迅速定位卡堵位置,确定卡堵处有无特殊管道特征并初步分析卡堵原因。然后,在压力允许范围内提高压力,增大清管器前后压差,尝试能否通过。如果还不能解决,可在工艺允许的情况下尝试反推或断管取球。

#### 6、清管器接收及结果评估

清管器到达收球筒后,检测方通过接收机确认清管器位置。确认清管器到达球筒后。由业主方进行流程切换,收球筒排空(天然气管道进行置换)。打开盲板后取出清管器。

注意:含硫天然气管线收球时要准备好喷淋水源,防止设备上的粉末遇空气自燃。

清管器取出后,应对清管器外观、皮碗磨损情况等进行检查,记录清出的杂质量及成分。并判定是否符合下一步清管要求。

#### 5.4.4 几何检测作业

为确保漏磁检测器顺利通过,掌握管道变形程度与变形部位,需要进行管道几何检测。

对于几何检测器探头是弹簧探臂式的结构,其运行速度要小于 3m/s,因速度快易发生振动,影响检测精度。

在几何检测器发送之前,应调试好设备工作状态,确保所有器件工作正常。几何检测器的发送、接收工艺与投运清管器工艺一样。在几何检测器运行期间,使用地面标记器在地面设标点监测检测器的准确位置,同时采集几何检测器通过地面设标点的标记信息数据。几何检测器从收球筒取出后经专业技术人员对其进行简单清理及数据下载。

数据下载后,检测方进行初步数据分析,确定数据完整性,并判断是否存在影响漏磁检测器通过的管道变形。提供初步分析报告,如果存在超限变形,提供变形点数据给业主方,等待开挖修复后再进行漏磁检测。

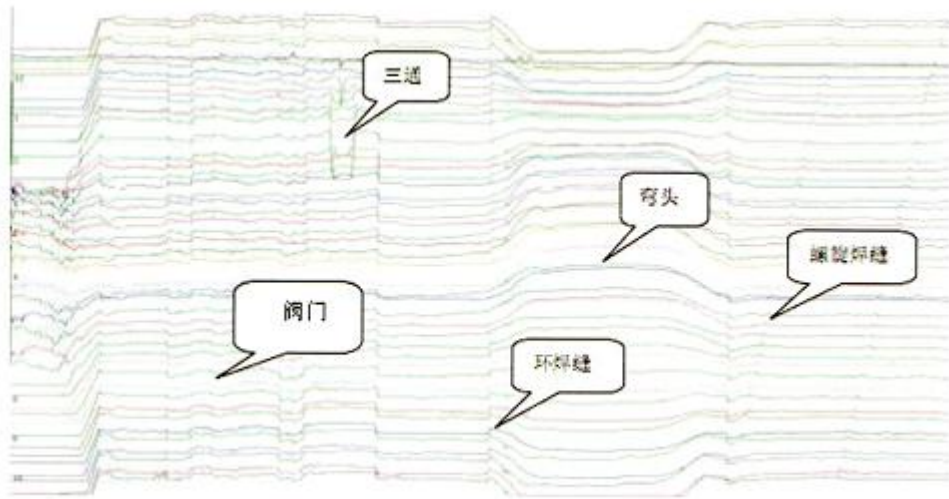


图 5.36 几何检测数据片段

#### 5.4.5 漏磁检测作业

漏磁检测作业是最后一道现场检测程序。投运前, 确认管道工况符合检测器要求。漏磁检测器速度运行过快, 检测数据会收到速度效应影响, 所以一般速度要求不宜超过 5m/s。发送、跟踪和接收程序与几何检测作业一致。

检测器接收并完成数据下载后, 检测方进行初步数据分析, 确定数据完整性。如不完整且影响数据有效性, 要及时总结原因, 告知业主方并讨论再次发送方案。再次发送前要确保导致检测失败的原因已解决。

#### 5.5 长输(油气)管道漏磁内检测开挖检测

开挖验证是对检测数据准确性进行验证。标准要求验证点数应不少于 5 个。由业主方在检测方提供的验证点数据中选取适合开挖的验证点。

确定开挖点后, 根据开挖单信息进行缺陷精确定位。将开挖完的缺陷的现场测量结果与检测结果进行对比, 出具开挖验证报告。



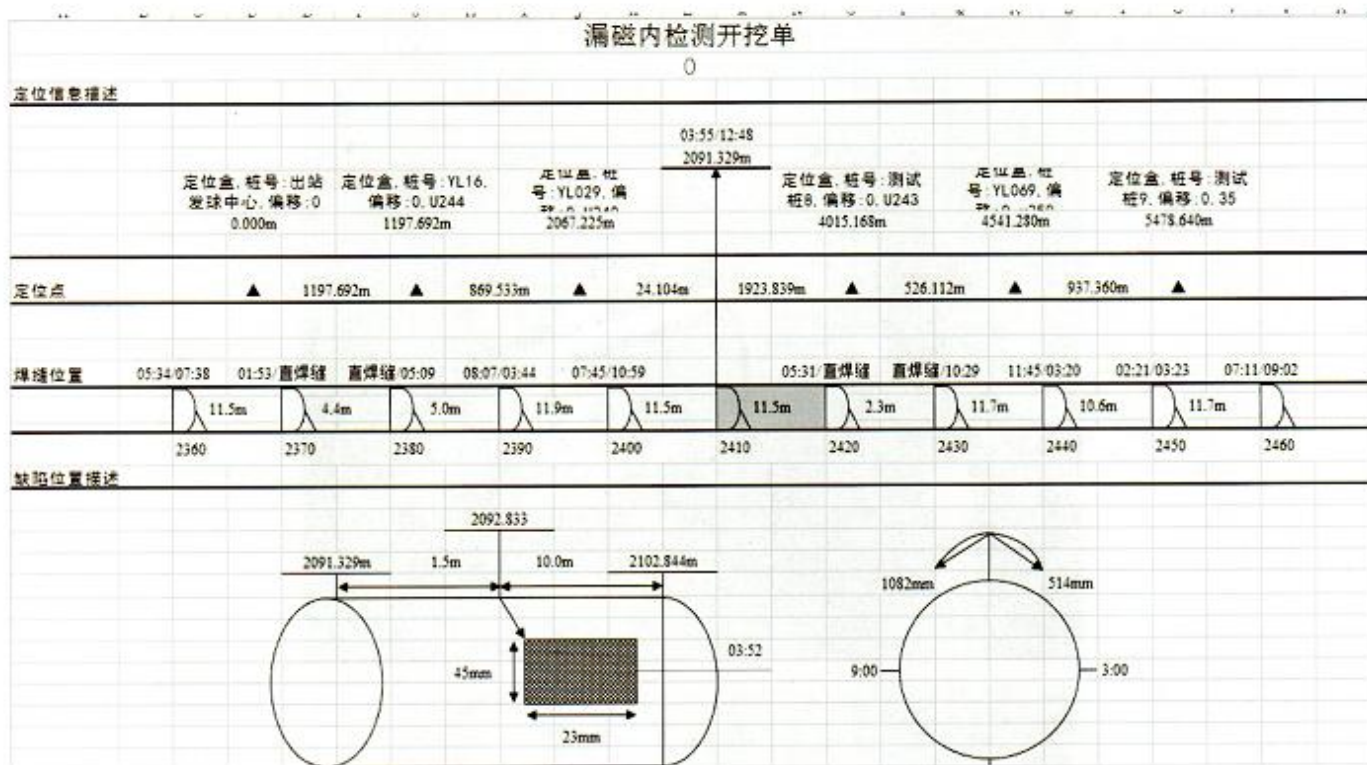


图 5.37 开挖单示例

### 1、开挖选点建议

- (1) 壁厚损失 50%以上的全选;
- (2) 外腐蚀、内腐蚀兼顾;
- (3) 不同缺陷类型;
- (4) 深浅兼顾。

### 2、开挖方法

- (1) 选择就近定标点;
- (2) 利用就近管道特征(弯头、三通、短节、锚固墩、套管等);
- (3) 找到腐蚀点所在管节上游焊缝或下游焊缝;
- (4) 以焊缝为基准进行准确定位。

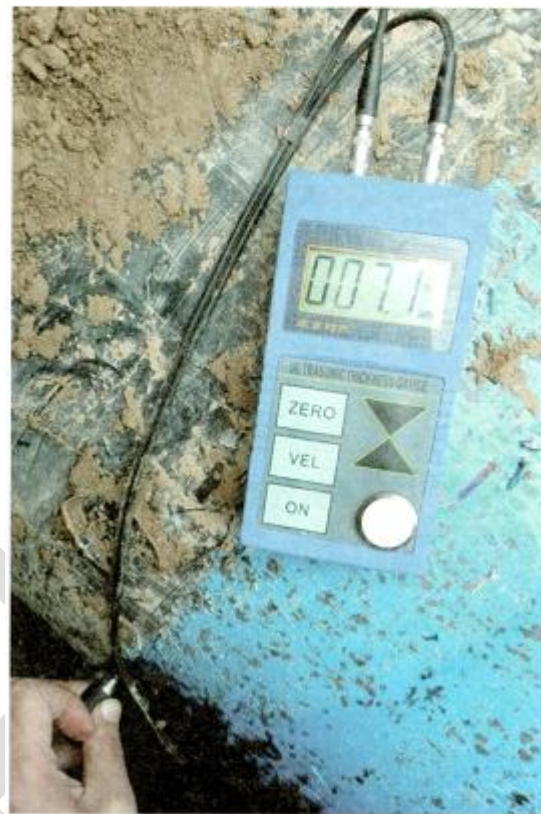
### 3、缺陷测量

测量工具: 卷尺、深度卡尺、超声测厚仪

外腐蚀: 深度卡尺、测厚仪

内腐蚀: 测厚仪、射线

夹层缺陷: 与外腐蚀特征一致, 需测厚仪或射线验证。



#### 4、开挖验证报告

根据开挖点实测数据与报告数据进行对比，形成书面报告。



图 5.39 正在使用的盗油孔



图 5.40 管体制造缺陷





图 5.41 褶皱



图 5.42 凹陷

## 5.6 长输（油气）管道漏磁内检测报告出具

通过对几何检测数据和漏磁检测数据的全面分析后，根据数据分析结果编制检测报告，一般包括：

- (1) 几何检测报告
- (2) 漏磁检测报告
- (3) 含缺陷的管道完整性评价报告

根据项目要求确定是否需要完整性评价报告。采用目前国际通用相关评价标准对管道缺陷数据进行评价，包括：ASME B31G-1991、RSTRENG、DNV RP-F101。评价过程需要采用管道类型、管道材质、管径、管道壁厚、地区类型、设计压力、最大允许操作压力、投产时间、输送介质、防腐保温形式、运行温度等管道参数。评价报告主要内容包括：管体缺陷对管道当前及将来完整性的影响，管道的维护维修计划，提供合理的再检测周期。

- (4) 数据对齐报告

对于经过多次内检测的管道，可以对多次数据进行数据对齐。焊缝对齐后，将同一缺陷进行对比，掌握管道缺陷的增长速率。为管道完整性管理及维护提供可靠依据。

## 第六部分 长输（油气）管道漏磁内检测工艺案例

### 6.1 内检测实施过程中常见问题及处置措施

#### 6.1.1 跟踪仪信号丢失

可以根据输量进行计算，并结合信号丢失前清管器的运行速度，判断大致方位，在该方位下游寻找特殊点（阀室等），也可临时在埋深较浅的地方开挖监听坑，通过仔细倾听，判断清管器是否通过。如果清管器顺利通过，再寻找下一个特殊点，直到清管器顺利进入收球筒。

#### 6.1.2 杂质过多，清管器不能正常进入收球筒

倒回正常流程，打开收球筒清理杂质后，再回复收球流程，等待清管器进入收球筒后取球。

#### 6.1.3 清管器无法拔出

检查清管器是否推到正确位置，流程是否正确，压差是否满足，然后重新发送。



图 6-1 发球筒

#### 6.1.4 快开盲板存在泄露

检查快开盲板是否变形，采取更换密封圈、清理杂质，涂抹密封脂等措施进行处理。



图 6-2 常见快开盲板



### 6.1.5 阀室泄露

天然气管线清管作业发出卡堵时,往往需要在卡堵点上下游邻近阀室操作阀门,采用人为建立大压差以及放空引球等方法解堵。在这种情况下,存在阀室泄露的风险。在执行操作过程中,应严格控制阀室上下游压差以及采用可燃气体测爆仪监测气体泄露情况。一旦发生天然气泄露情况,人员应立即撤离阀室,并向上风口方向疏散。

注意:在跟踪作业中,跟踪人员如进入阀室,需携带气体监测仪。



图 6-3 阀室泄漏



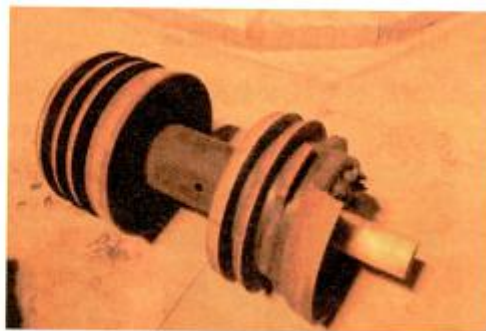
图 6-4 阀室放空

### 6.1.6 清管器破损停滞

跟踪人员迅速对清管器进行定位,如通过升压和增大输量仍无法移动,则重新发送一清管器将其推出。发生此情况,多为泡沫清管器受损或机械清管器皮碗材质较差所致。



图 6-5 泡沫清管器破损图



6-6 机械清管器皮碗破损



图 6-7 机械清管器皮碗脱落

### 6.1.7 清管器卡堵

由于管道变形、管道内异物、阀门缩径、不规则弯头、斜接杂质过多等原因造成的卡堵，跟踪人员迅速对清管器进行定位。先尝试在压力允许的范围内升压操作，如不能解决，则需进行断管取球。



图 6-8 管道变形图



6-9 不规则弯头



图 6-10 斜接

阀门开度不够或缩径，三通无挡条或花管三通。

- ✓ 快速确认卡堵的阀门、三通，如果阀门有旁通线，开启旁通线。
- ✓ 检查阀门开度，如果是阀门开度不够，把阀门开至 100%开度，关闭旁通线，在允许的范围内提高压力使清管器通过。
- ✓ 如以上措施不能解决清管器卡堵问题，则发送救援清管器。



图 6-11 闸板阀门图



6-12 花管三通



图 6-13 无挡条三通

#### 6.1.8 冰堵

现场跟踪人员及时对设备进行定位，启动应急预案，对卡堵点进行开挖，首先尝试增大卡堵点前后压差的方式进行处理，如达到管线的最大操作压力仍不能解堵，则准备脚手架、帆布等物资对开挖管段搭设帐篷；用蒸汽车对冰堵点喷洒蒸汽，融化水合物。



图 6-14 喷洒蒸汽



图 6-15 增加保温





图 6-16 管道内清出的水合物

附：水合物形成条件

- ✓ 气体处于水气得过饱和状态或者有液体水存在；
- ✓ 有足够高的压力和足够低的温度；
- ✓ 在具备上述条件时，还必须有一些辅助条件，如压力的波动、气体因流向突变产生的扰动、晶种的存在等。

水合物一旦形成后，就会减少管道的流通面积，产生节流，加速水合物进一步形成，严重影响管道的安全运行。



图 6-17 典型水合物

附：冰堵预防措施

- ✓ 定期监测管道沿线的水露点；
- ✓ 定期监测管道沿线的温度，并分析天然气的含水量是否饱和；
- ✓ 发挥 SCADA 系统的作用，对沿线压力和输量变化做实时及趋势分析；
- ✓ 定期分段向管线内注入水合物抑制剂。



图 6-18 阀室注醇操作

### 6.1.9 管道发生穿孔泄露、爆管

由于打孔盗油等管道外部原因，清管器在管道中发生卡堵，造成穿孔漏油、爆管事故。

- √ 跟踪人员及时向站控室调度汇报情况；
- √ 确定清管器卡堵位；
- √ 启动应急预案，准备封堵抢修作业。



图 6-19 典型打孔

### 6.1.10 气堵

预投产前的站间清管，发生气堵。

处置措施：预投产前管线内存在大量污水且站间地势起伏较大。在站间清管前，检查各阀室压力表是否是示值，如各阀室压力表示值异较大且该管地表起伏较大则管线内可能存在大量污水。

发球前沿线各阀室均放空排气，调用高压级空压机或增压机，一旦卡球则增加动力输出快速增大压差推球。如果清管器距离首站较远，可考虑在卡球点上游阀室连接空压机以缩短增压时间。





图 6-20 阀室放空



图 6-21 空气压缩机

#### 6.1.11 清管器停球处理的常用方法

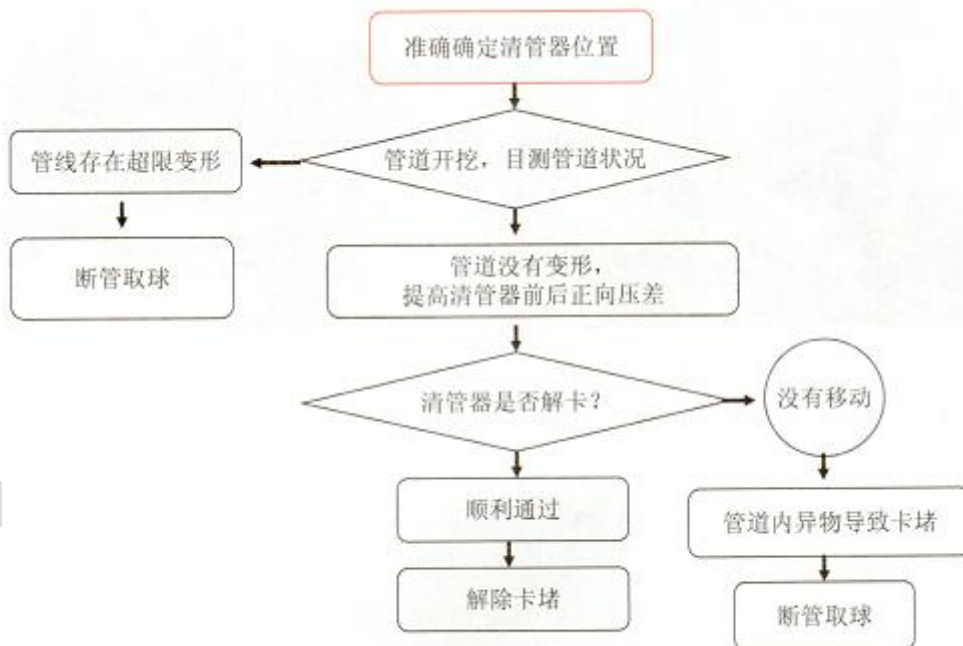


图 6-22 清管器停球处理流程图

#### 6.1.12 可停输天然气管线清管器卡堵取球常用方法

- 1) 调配下游用户用气量;
- 2) 关闭卡堵点上下游阀室;
- 3) 将截断管段内的天然气通过阀室放空;
- 4) 断管取球, 恢复管线;
- 5) 氮气置换, 恢复输气;



图 6-23 断管取球

#### 6.1.13 成品油、原油管线清管器卡堵取球常用方法

- 1) 停输封堵, 断管取球
- 2) 不停输封堵, 断管取球



图 6-24 不停输封堵

#### 6.1.14 内检测期间常见问题

##### 1、检测器部件脱落

内检测器由于结构复杂, 其上安装的传感器探头、支撑轮、里程轮、电子包等悬挂部件如果安装环节存在隐患极易脱落预管道内, 造成检测器运行故障、数据不完整, 以往国内外检测公司均发生过类似情况, 造成检测失败。因此, 在实施内检测作业过程中, 对于检测器的各项机械性能需严格进行测试检查, 对于易损部件需定期检查更换。



图 6-25 检测器部件脱落

## 2、工艺环境无法满足检测器运行条件

由于检测器的工作原理对于管内运行环境是有一定要求的, 往往漏磁检测器的运行速度和环境温度应控制在允许范围内, 一般运行速度应控制在 0.5-3.0m/s, 且运行速度尽可能平稳, 运行温度不宜超过 75℃。

当检测器运行速度超过上限与下限时, 会导致数据质量下降、数据丢失: 如果受速度漂移影响的距离超过检测管道总长度的 2%, 应重新运行检测器。在重新运行检测前, 应确保导致速度漂移的工艺参数得到处理与改进。

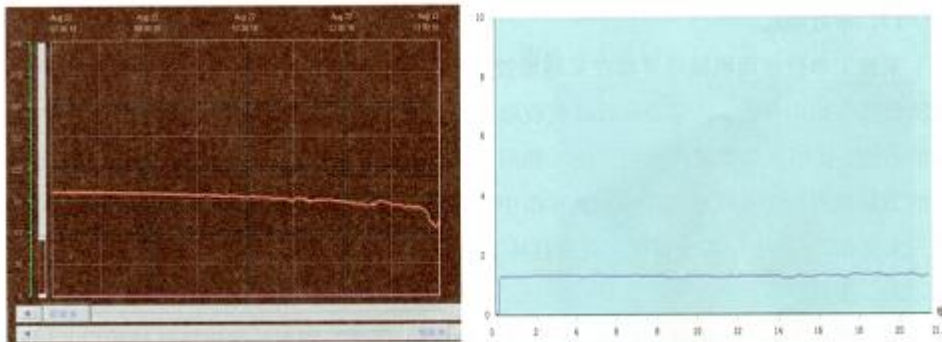


图 6-26 速度曲线图

## 3、前期清管不彻底, 管内遗留杂质过多, 影响检测器数据质量

影响检测器数据质量的管内杂质包括粉尘杂质(主要是铁磁性杂质)、管内壁结垢(锈蚀痂皮、硬蜡)及异物(焊条、石块等施工遗留物)等。因此, 投运内检测器的前期清管工作至关重要, 需采用不同类型清管器对管线严格清管, 避免因管内杂质影响数据质量甚至导致检测失败。



图 6-27 管道内部杂质



## 6.2 内检测现场施工典型风险

### 6.2.1 物体打击

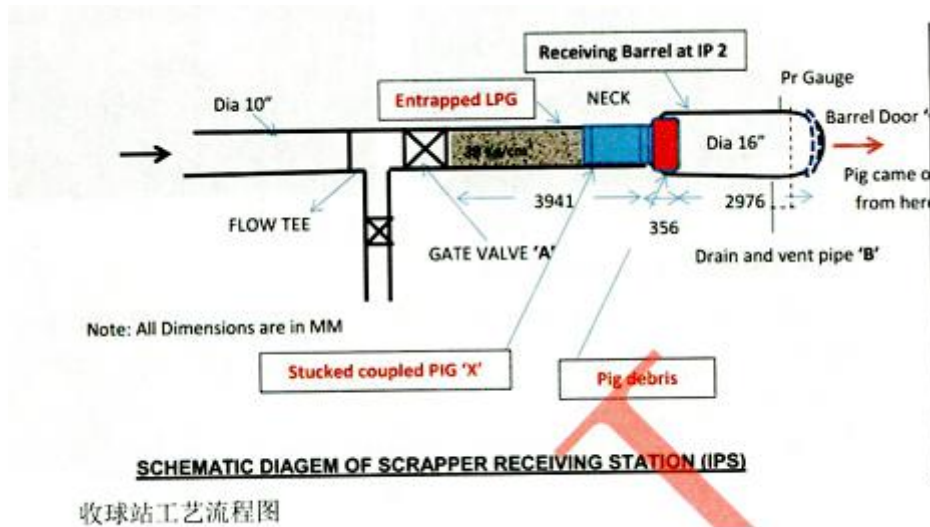


图 6-28 收球工艺流程图

#### 1)、 事故经过

某施工单位使用机械清管器在某越境管道中进行了清管，清管器由发球站发出，三天后在清管接收站中接收。清管器在收球筒收取期间，发现清管器卡堵在球筒中，球筒中含有大量的污物。使用水喷射清洗球筒中的污物后，试图把清管器拉出收球筒，此时突然有一股巨大的力量把清管器从收球筒中推出，并击中站在球筒前面的人员。造成两人死亡。此外，还有三人受伤，其中一人受重伤，并且打坏了组合墙和清管器基础座的金属构件。

#### 2)、 事故分析

从上图可以看到，收球筒由筒体阀门 A（API-6D 闸阀）隔离，泄压是从排放口 B 进行。液化石油气被困在阀门 A 和处于 X 处的清管器之间，打开球筒门 C，观察到清管器卡在球筒里面，由于磁力清管器的存在，污物中高铁含量起到了密封胶的作用，因此使液化石油气无法通过球筒释放。因此，实际上，只有清管器和球筒盲板之间的那部分减压，而阀门和清管器之间的那部分用液化石油气保持压力，压力为 38kg/cm<sup>2</sup>。在白天，随着温度的升高，可能会进一步增加球筒后部分的液化石油气的压力。当清管器前面的污物被人工清理干净后，处于高压的液化石油气将组合清管器以巨大的力量推出球筒。

值得注意的是污物中所含的铁（硫化亚铁）本质上是自燃的铁，当暴露于空气中时，随着热量的释放而被氧化为氧化铁。硫化铁与氧气之间的这种放热反应产生了相当大的热量：结果，自燃的铁变成更加炽热。当清管器的前部用喷水清洗时，空气在球筒和清管器之间的流动，形成了一种可燃混合物。自燃铁释放出的热量点燃了混合物，作为推进剂的球筒内发生爆炸，使清管器从敞开的球筒门中高速射出。



### 3)、事故教训



图 6-29 现场使用的清管器

- A. 危害因素辨识不充分是造成这次事故的原因:
- B. 使用组合清管器即把所有的清管器组合在一起运行。
- C. 收球筒的设计不合适。

### 6.2.2 起重伤害

#### 1)、事故经过

5月14日,某公司劳务分包人员在燃料油公司某仓储原油库事故现场 TA1201 储罐北侧进行挂罐小车吊装作业时,发生起重伤害事故,造成1人死亡。

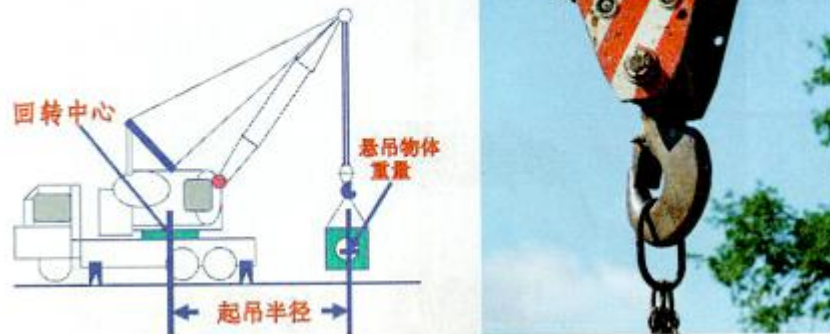


图 6-30 吊装示意图

#### 2)、事故分析

直接原因:站在罐壁内侧跳板上负责将钢丝绳绳套两端挂在吊钩上的王某挂钩错误,只是把钢丝绳一端绳套挂到防脱钩装置内,而另一端则挂在防脱钩装置外,造成小车下放触地后碰到预制件发生旋转,防脱钩装置外的绳套脱钩,小车倾覆,其上部横梁砸到李某华颈部致其死亡。间接原因:安装二机组负责人王某,无起重指挥证也未经过起重指挥和司索专业

培训,此次是第一次进行司索指挥,进行了错误的吊装捆绑,为钢丝绳脱钩埋下隐患。机组焊工班长李某都,未经过起重指挥和司索专业培训,超越职责指挥,且未佩戴标识,指挥将小车下放时碰到了地面上的预制件。起重机司机王某伟,在未确认起重指挥人员情况下,盲目按照地面人员的指挥,进行小车下放工作。李某华在小E未停稳情况下擅自进入作业现场,违章作业导致本人被小车砸中。

事故暴露出管理原因,一是吊装作业许可管理流于形式,吊装作业管理制度不落实;二是风险辨识管控不到位,未有效管控吊装作业风险;三是现场管理混乱,违反工艺和劳动纪律作业,劳动分包管理不到位,管理人员直线责任未落实,现场人员属地责任未履行。



图 6-31 常用吊带



图 6-32 典型内检测作业吊装

附:十不吊

- A. 起重臂和吊起的重物下面有人停留或行走不准吊。
- B. 起重指挥应由技术培训合格的专职人员担任,无指挥或信号不清不准吊。
- C. 钢筋、型钢、管材等细长和多根物件必须捆扎牢靠,多点起吊。单头“千斤”或捆扎不牢靠不准吊。

- D. 多孔板、积灰斗、手推翻斗车不用四点吊或大磨板外挂板不用卸甲不准吊。预制钢筋混凝土楼板不准双拼吊。
- E. 吊砌块必须使用安全可靠的砌块夹具, 吊砖必须使用砖笼, 并堆放整齐。木砖、预制埋件等零星物件要用盛器堆放稳妥, 叠放不齐不准吊。
- F. 楼板、大梁等吊物上站人不准吊。
- G. 埋入地面的板桩、井点管等以及粘连、附着的物件不准吊。
- H. 多机作业, 应保证所吊重物距离不小于 3 米, 在同一轨道上多机作业, 无安全措施不准吊。
- I. 六级以上强风区不准吊。
- J. 斜拉重物或超过机械允许载荷不准吊。

### 6.2.3 中毒窒息

#### 1)、事故经过

2018 年 5 月 31 日, 某油气田公司输气作业区在执行内检测项目, 实施漏磁检测器解卡作业中, 在某阀室发生含硫化氢天然气泄漏, 造成一名员工中毒身亡。

#### 2) 事故分析

事发前工况: 该管线全长 30.95km, 管径 508mm, 设计压力 4.9MPa, 设计输量  $400 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ , 材质 L360 直缝埋弧焊钢管。发球端起点压力 4.44MPa, 收球端终点压力 4.17MPa, 瞬时输量  $180 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ , 硫化氢含量 10.33g/m<sup>3</sup>。管线在阀室存在泄漏, 人员吸入含硫化氢气体中毒死亡是直接原因。间接原因: 人员在手动关闭气液联动球阀建立压差操作时, 管道内高压天然气进入球阀中腔和排污管线; 气液联动球阀中腔排污管线上的排污阀未关闭致使来自阀门中腔的含硫化氢天然气直接进入排污管线; 排污管线未按设计要求采用 20G 抗硫材质, 且排污立管存在不均匀下沉, 致使双公接头处应力集中, 在高速气流的冲击下发生断裂; 气液联动球阀驱动气未投用, 不能快速截断进入球阀中腔的含硫化氢天然气; 人员未佩带气体监测仪和空气呼吸器。

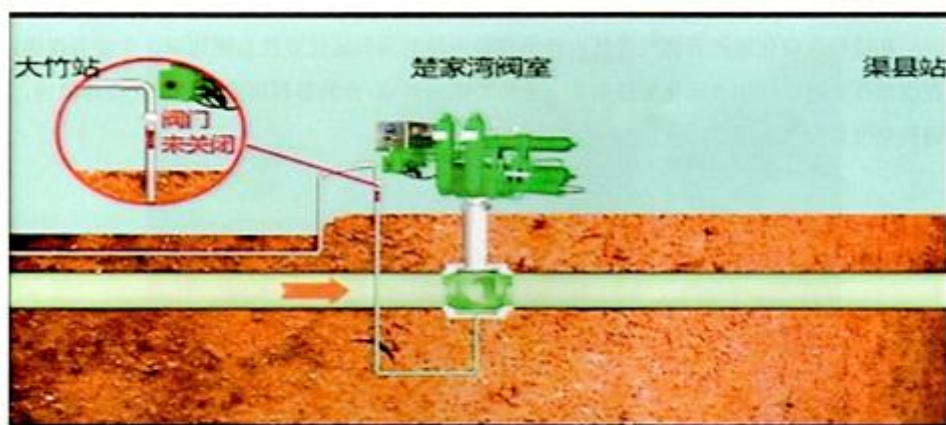


图 6-33 阀室工艺图

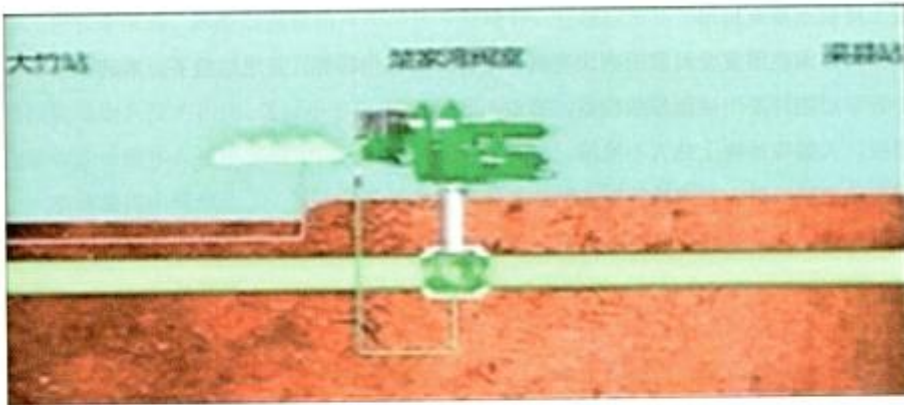


图 6-34 排污阀泄漏



图 6-35 气液联动阀驱动装置

### 3)、事故教训

- A. 跟踪作业或平时阀室巡护作业, 人员必须要携带气体监测仪和正压式呼吸器;
- B. 进入阀室要有专人进行监护。

#### 6.2.4 硫化亚铁自燃

在进行含硫化氢的天然气管线内检测作业中经常遇到硫化亚铁自燃情况, 主要表现为: 在收球作业时, 清出含硫化亚铁杂质, 多附着在清管器/检测器钢刷内或遗留在收球筒内, 遇到空气后发生自燃。





图 6-36 硫化亚铁自燃

针对这种情况需要在清管器/检测器到达收球筒后进行氮气置换, 打开盲板后采取“湿式”作业法, 进行注水操作。



图 6-37 氮气置换



图 6-38 注水操作

### 6.3 现场施工案例

#### 6.3.1 天然气管道施工案例

##### 6.3.1.1 管道情况

###### 1 管道基本情况

序号	项目	内容
1	管道名称	某天然气管道
2	投产时间	2013 年 11 月
3	管道长度	217.3km
4	输送介质	天然气
5	管道位置	陆上
6	管径	660mm
7	管道材质	L415
8	壁厚	7.1/9.5
9	防腐层类型	3LPE 加强级
10	焊接类型	埋弧焊
11	穿/跨越(河流、公路、铁路)	公路穿越 6 处, 跨越 1 处, 无河流穿跨越, 无铁路穿跨越
12	管道标志桩是否健全	每公里 1 个

###### 2 工艺参数

序号	项目	内容
1	设计压力	6.3MPa
2	最大操作压力(MAOP)	6.3 MPa
3	当前工作压力范围	4.0~5.0MPa
4	当前输气排量范围	110*10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /d
5	运行温度	10℃-27℃

### 3 工程特点、难点

天然气介质, 易燃、易爆、危险性较大, 收发球操作及阀室跟踪需按照规范进行。

该管道距离长 217 公里左右, 距离长对设备的要求高, 皮碗需要足够的耐磨性, 电池电

量要足够:同时跟踪作业要克服几天几夜的疲劳,对人员要求高。

天然气气体具有可压缩性,遇阻易停球,速度不稳定,同时管道距离长,有可能存在较多杂质或异物的可能性,有堵球和卡球的风险存在,因此业主方的保驾队伍要随时做好封堵断管取球的准备。

为防止卡球和停球,需要做好跟踪和压力监控。跟踪时重要的是做好跟踪时间预估计算。

### (1) 清管器/检测器运行速度计算

依据 SY/T5922- 2012 标准,对于天然气管道,清管器/检测器的运行速度  $V$  可按下公式计算:

$$V = \frac{Q}{240000 \times F \times P}$$

式中:  $V$  为估算速度, km/h;  $Q$  为管输流量, m<sup>3</sup>/d;  $F$  为管道内截面积, m<sup>2</sup>;  $P$  为清管器/检测器的压力 MPa。

依据本管道的规格,管径: 660, 壁厚: 7.1, 可计算管道的内截面积如下:

$$F = \pi r^2 = 3.1415926 \times \left( \frac{660 - 7.1 \times 2}{2 \times 1000} \right)^2 = 0.32756 \text{ m}^2$$

这样根据甲方的输气量参数和发球站压力,来计算清管器/检测器的运行速度,再根据管道的长度估算总运行时间。

依据本次清管/检测为例,如果发球站压力实时压力为 4.28MPa,甲方提供的实时输气排量约 110 万 m<sup>3</sup>/d,可计算清管/检测的实时速度如下:

$$V = \frac{Q}{240000 \times F \times P} = \frac{110 \times 10000}{240000 \times 0.32756 \times 4.28} = 3.269 \text{ km/h} = 0.908 \text{ m/s}$$

### (2) 清管器/检测器跟踪时间预估

清管器/检测器从当前跟踪点运行到下游跟踪点的时长  $\Delta t$ :

$$\Delta t = \frac{L}{V}$$

上式中:  $L$  为当前跟踪点距离下游跟踪的长度, m;  $V$  为清管器/检测器运动速度, m/s。

可计算清管器/检测器通过下一跟踪点的时间  $t_2$  为:

$$t_2 = t_1 + \Delta t$$

上式中:  $t_1$  为清管器/检测器通过当前跟踪点的时间, hh:mm:ss;  $\Delta t$  为清管器/检测器从当前跟踪点运行到下游跟踪点的时长 hh:mm:ss。

假设跟踪时,知道当前发球站压力实时压力为 4.28MPa,实时输气排量约 110 万 m<sup>3</sup>/d,当前跟踪点通过时间为 10 点 10 分 10 秒,下一跟踪点距离当前跟踪点的距离为 990m,可预估下一跟踪点的通过时间如下:

运行速度计算:

$$V = \frac{Q}{240000 \times F \times P} = \frac{110 \times 10000}{240000 \times 0.32756 \times 4.28} = 3.269 \text{ km/h} = 0.908 \text{ m/s}$$

运行时长计算:

$$\Delta t = \frac{L}{V} = \frac{990}{0.908} = 1090.3 \text{ s}$$

把上述时间 1090.3s 换算成 hh:mm:ss; 为 00:18:17。

这样下一跟踪点的预估通过时间为:

$$t_2 = t_1 + \Delta t = 10:10:10 + 00:18:17 = 10:28:27$$

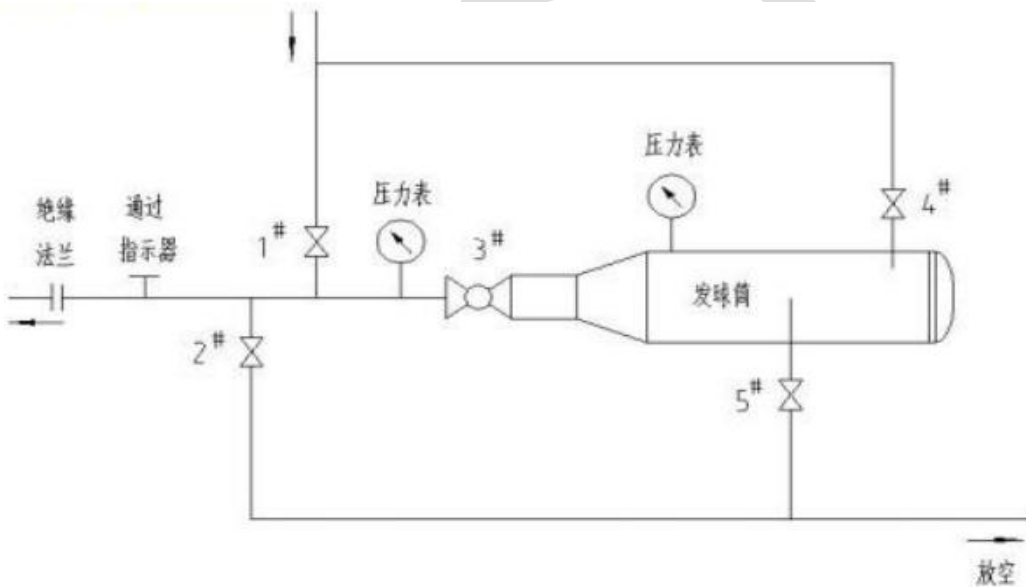
### 6.3.1.2 现场施工

#### 1 收发球筒情况

经过管道调查和现场实际查勘,收发球筒的尺寸和作业现场空间能满足本次的检测需求,不需要进行改造。

#### 2 清管/检测器收发球工艺流程

##### (1) 天然气管线清管器/检测器发送

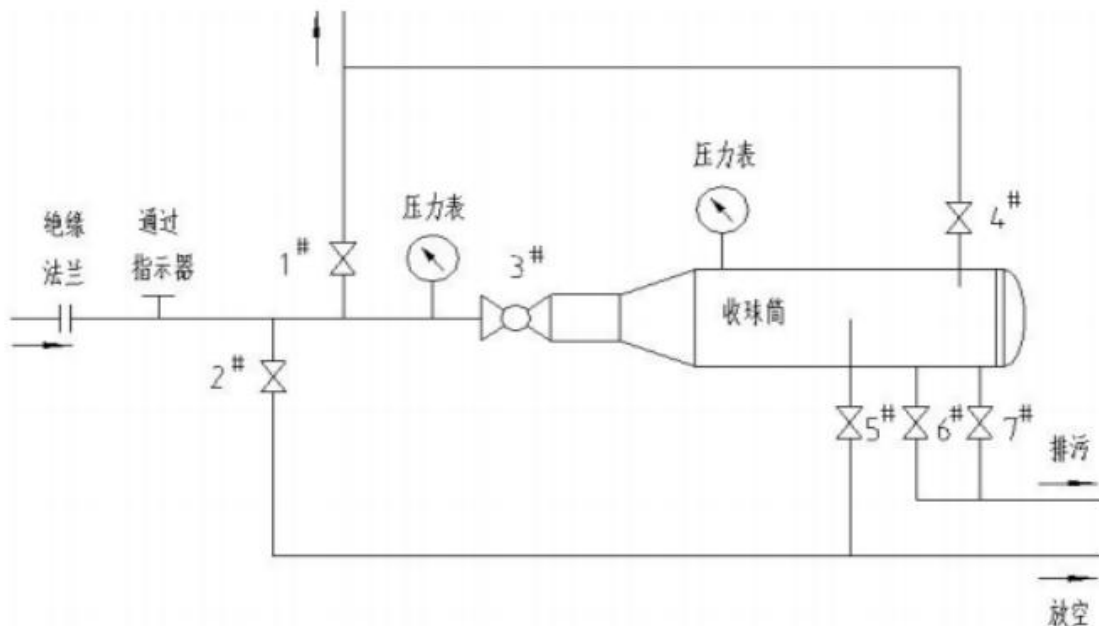


- ① 打开5#放空阀,确认发球筒内压力为零,并对发球筒进行氮气置换后,使用手持可燃气体监测仪监测可燃气体浓度在安全范围内,打开快开盲板,把清管器送入发球筒大小头处,并在大小头处塞紧。
- ② 检查密封圈并关闭快开盲板,装好保护装置。
- ③ 关闭5#放空阀。
- ④ 缓慢打开4#旁通阀,平衡发球筒与干线压力平衡。可以防止清管器撞击盲板。
- ⑤ 全开3#干线阀。
- ⑥ 关闭1#进气阀,发送清管器。





- ⑦ 在通球指示器发出球过信号或用地面接收装置确认清管器发出后，打开1#进气阀，关闭3#干线阀，关闭4#旁通阀。
- ⑧ 打开5#放空阀，将发球筒内压力释放至零。



- ① 确认5#放空阀，6#、7#排污阀处于关闭状态，打开4#旁通阀平衡收球筒与干线压力，全开3#干线阀，关闭1#出气阀，收球筒处于接收状态。
- ② 在通球指示器发出球过信号或用地面接收装置确认清管器进入收球筒后，打开1#出气阀，关闭3#干线阀和4#旁通阀，恢复至正输流程。
- ③ 打开5#放空阀，将收球筒内压力释放至零（如需带压排污，可将收球筒内压力释放至低压后关闭5#放空阀）。打开 6#、7#排污阀排污（如果遇到杂质较多的情况，应当在杂质到达收球筒后，关闭4#旁通阀，打开6#、7#排污阀排污）。
- ④ 排污完成，确认收球筒内压力为零，并且进行氮气置换后；用手持可燃气体监测仪监测可燃气体浓度在安全范围内，打开快开盲板（如天然气中含硫化氢，在打开盲板后应立即向收球筒内注水），取出清管器。
- ⑤ 清除收球筒内杂质，并对杂质进行取样。
- ⑥ 关闭5#放空阀，关闭 6#、7#排污阀。清洗和检查密封圈后关闭快开盲板。

### 3 管道清管

清管遵循安全稳健，循序渐进的原则，通过能力由大到小，清管能力由弱到强的原则。本次采取，先软体清管器再机械清管器的方式，逐步清出管道内的杂质和判断管体的大致变形情况。采取聚氨酯泡沫清管器→机械测径清管器→两直两碟清管器→磁力钢刷清管器。

#### (1) 软质清管器清管

因本次为 2013 年投产后的首次检测，投产清管时未发现有大的变形，为安全稳健，首

次清管选择通过能力较强的软质清管器，外径采取过盈 3%通过能力 40%的中密度聚氨酯泡沫清管器，带跟踪器方便进行全程跟踪。



图 6-39 泡沫清管器发球前照片



图 6-40 泡沫清管器收球后照片



图 6-41 泡沫清管器清管情况

泡沫清管器经过 4 天 3 夜的运行和跟踪，清管器外观完整，无破损，说明管道内无尖锐物体，也没有大的变形存在；本次清出物为黑色干粉块杂质，应为采气井伴生出来的黑色细粉遇水汽凝结，杂质重量约 80kg 左右。

## (2)机械清管器清管

机械清管采取钢制骨架，清管能力较强，通过能力较泡沫清管器弱，发球顺序采取，机械测径清管器→两直两碟清管器→磁力钢刷清管器。



图 6-42 机械测径清管器发球前照片 图 6-43 机械测径清管器收球后照片



图 6-44 机械测径清管器清管情况

机械测径清管器采用四碟测径清管器，外径过盈 3%，测径板 90%内径，带跟踪器方便进行全程跟踪。

机械测径清管器经过 4 天 3 夜的运行和跟踪，清管器外观完整，测径板最大外径无变化，未见明显磕碰，说明管体没有大于 10%的变形存在；同样清出物为黑色干粉块杂质，杂质重量约 50kg 左右，清出物重量低于软体泡沫清管器的清出量，说明管体内的杂质再减少。





图 6-45 两直两碟清管器发球前照片图 6-46 两直两碟清管器收球后照片



图 6-47 两直两碟清管器清管情况

为继续清出管道内的杂质，再采用带直板的两直两碟清管器，进一步加大杂质的清出力度，采取外径过盈 3%带跟踪器，方便进行全程跟踪。

两直两碟清管器经过 4 天 3 夜的运行和跟踪，清管器外观完整，清出的黑色干粉块杂质重量约 30ke 左右，清出物重量少于机被测径清管器的清出量，说明管体内的杂质再进一步减少。





图 6-48 磁力钢刷清管器发球前照片 图 6-49 磁力钢刷清管器收球后照片



图 6-50 磁力钢刷清管器清管情况

为继续清出管道内的杂质，最后采用四碟两钢刷磁力清管器，着重清出铁磁性杂质的清出力度，采取外径过盈 3%带跟踪器，方便进行全程跟踪。

磁力钢刷清管器经过 4 天 3 夜的运行和跟踪，清管器外观完整，清出的黑色干粉块杂质重量含机身磁铁上的铁磁性杂质约 10kg 左右，清出物重量进一步减少，说明管体内的杂质已经没有多少，符合检测作业的清管要求。

### 3 变形检测作业

经过清管阶段的机械测径，90%测径板的最大外径未发生变化，说明该管体不存在大于 10%OD(管道外径)的变形存在，同时最后一次磁力钢刷清管器清出的杂质量少于 10kg 且每次机械清管呈现逐步递减的趋势，说明清管满足要求，具备几何变形检测条件。

#### (1)变形检测器

本次变形检测器采用单节 32 通道的机械结构, 以便进一步精确定位管道存在的小变形的位臵及变形量。



图 6-52 Φ660mm 变形检测器收球后状态图

## (2)变形 检测过程

本次变形检测器的检测过程如下表检测过程状态, 依据收球后检测器的状态图, 可知运行后的检测器状态可见下表。

检测过程状况	
发球时间	2016-10-17 17:22
收球时间	2016-10-20 18:11
运行时间	72 小时 49 分钟
最小运行速度	0m/s
最大运行速度	2.86m/s
平均运行速度	0.83m/s
助推介质	天然气
发球站压力	4.25MPa
收球站压力	4.20MPa

检测器运行后的状况如下:

运行后检测器状况	
皮碗磨损	轻微
探壁损坏	无

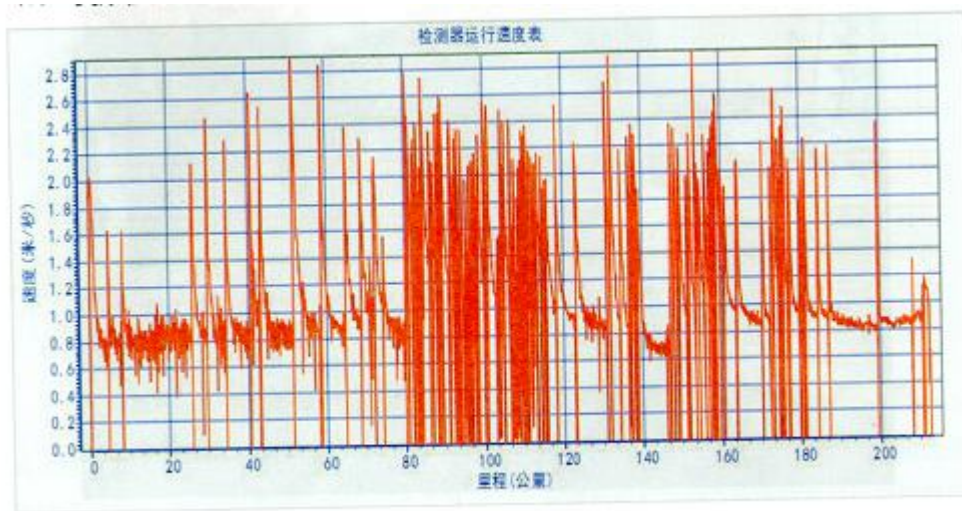


图 6-52 变形检测运行速度曲线

660 变形检测器要求运行速度范围是 0~5m/s, 本次检测设备运行最小速度为 0.00m/s, 最大运行速度为 2.86m/s, 运行期间平均速度为 0.83m/s。由于本次检测期间, 管道输送天然气流量较小, 检测器在管道壁厚加厚段及弯头位置会遇阻短暂停球, 造成检测器运行速度存在不平稳波动, 其不影响检测器数据采集, 满足变形检测器的运行速度要求, 检测器运行完成后, 数据完整有效。

#### (4) 变形 检测开挖验证

根据变形检测结果, 管道最大变形为 5%0D(管道外径), 不存在变形量大于 6%0D(管道外径)的超标变形存在, 同时按照标准也不存在大于 2%0D(管道外径)的位于焊缝区的异常变形, 也不存在要修复的其他异常变形点, 按照甲方要求为节约成本, 本次检测不进行变形检测对应的开挖验证。

### 4 漏磁检测作业

经过变形检测该管道的最大变形为 5%0D(管道外径), 同时管道清洁度满足检测要求(清出杂质逐步递减且量较少), 具备漏磁检测条件。

#### (1) 漏磁检测器

本次漏磁检测器采用双节高清三轴漏磁检测器, 以便高分辨率的检测管体缺陷和管道特征并进行精确定位。





图 6-53 Φ660mm 漏磁检测器收球后状态图

## (2) 漏磁检测过程

本次漏磁检测器的检测过程如下表检测过程状态，依据收球后检测器的状态图，可知运行后的检测器状态可见下表。

检测过程状况	
检测方向	发球站→收球站
发球时间	2016-10-23 13:33
收球时间	2016-10-26 09:23
运行时间	67 小时 50 分钟
最小运行速度	0.00m/s
最大运行速度	2.82 m/s
平均运行速度	0.89 m/s
助推介质	天然气
发球站压力	4.28MPa
收球站压力	4.21MPa

检测器运行后的状况如下:

运行后检测器状况	
皮碗磨损	轻微
探壁磨损	轻微
探头损坏	无
杂质	少量
破损	无

## (3) 漏磁检测器运行速度



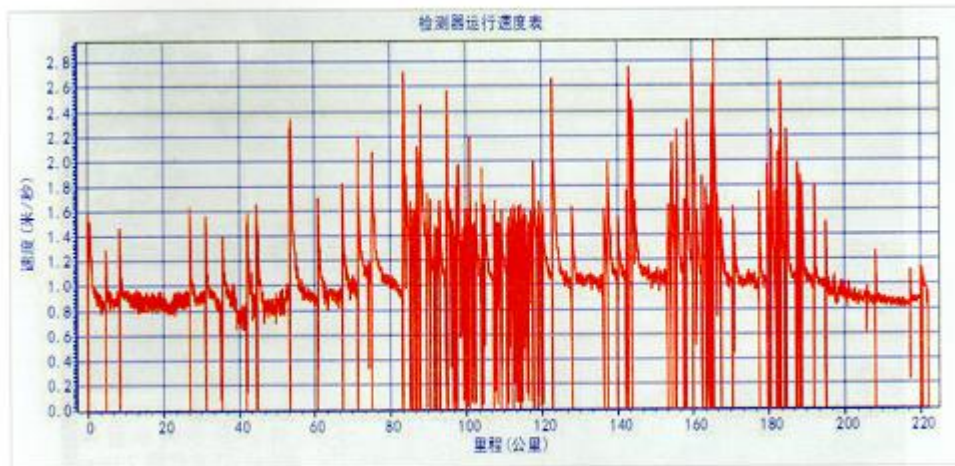


图 6-54 漏磁检测运行速度曲线

Φ660 漏磁检测器要求运行速度范围是 0~5m/s, 本次检测设备运行最小速度为 0.00m/s, 最大运行速度为 2.82m/s, 运行期间平均速度为 0.89m/s。由于本次检测期间, 管道输送天然气流量较小, 检测器在管道壁厚加厚段及弯头段会遇阻短暂停球, 造成检测器运行速度的存在不平稳波动, 其不影响检测器数据采集, 满足漏磁检测器的运行速度要求, 检测器运行完成后, 数据完整有效。

#### (4) 漏磁检测开挖验证

根据全线特征点分布情况, 并结合现场实际工况, 合理优化选择特征点进行开挖验证。开挖验证结果显示, 特征名称、检测里程、钟点方向、定位里程距离、所在管节前后环焊缝距离等重要新奇全部吻合, 以下为部分典型信号开挖验证照片(外壁制造缺陷、内壁腐蚀缺陷、环焊缝异常、螺旋焊缝异常)。

典型特征开挖图如下:

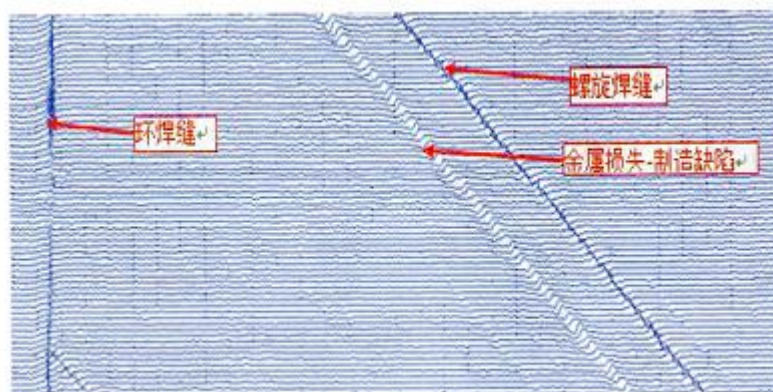


图 6-55 外壁制造缺陷漏磁信号图



图 6-56 外壁制造缺陷开挖验证图

从验证的外壁制造缺陷图可以看出，该缺陷为沿着螺旋焊缝成长条状的压痕和该缺陷的漏磁信号图对应，为制造管材时产生。

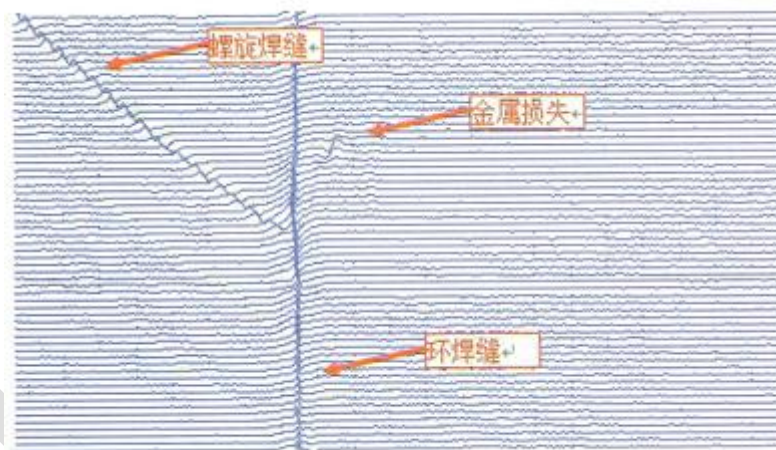


图 6-57 内壁缺陷漏磁信号图



图 6-58 内壁缺陷开挖验证图

从验证的内壁缺陷图可以看出，该缺陷管材验证部位无凹坑，经测厚仪测量该部位剩余壁厚发生变化，其为内部金属损失。

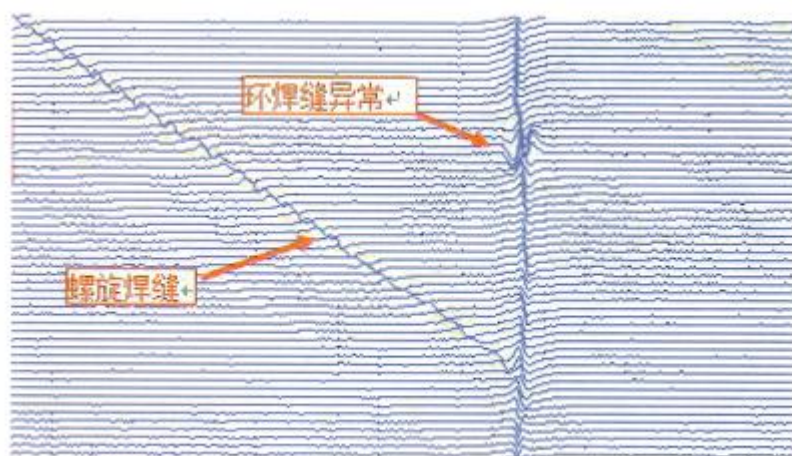


图 6-59 环焊缝异常漏磁信号图



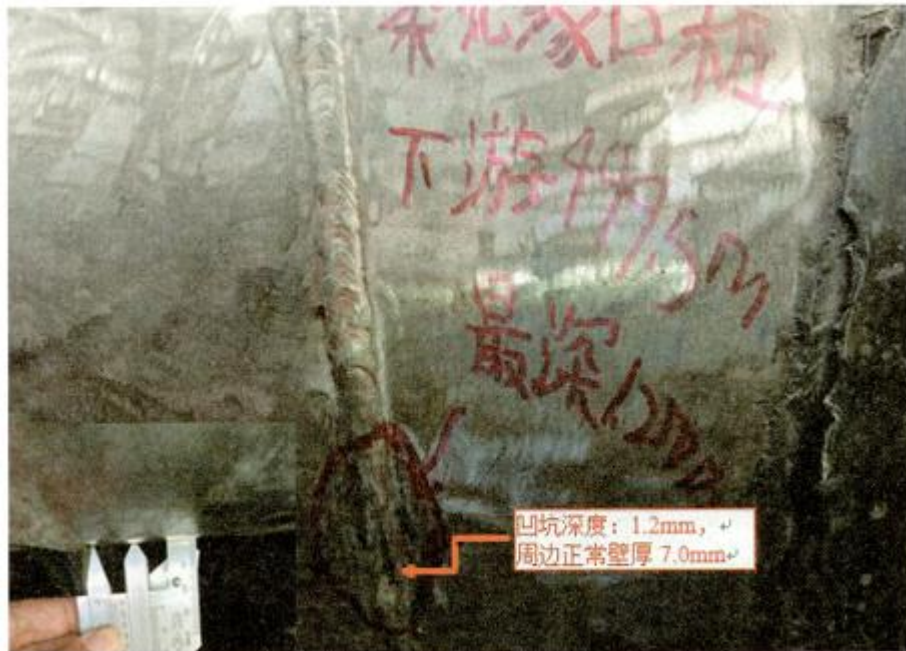


图 6-60 环焊缝异常开挖验证图

从验证的漏磁信号下图可以看出，环焊缝部位有一信号同环焊缝的信号图变化趋势相反，判断为异常，开挖图可知焊缝处有一凹坑，正常焊缝应有 2-3mm 的焊接余高，采用焊缝尺测量该凹坑深度为 1.2mm，为焊接盖面时操作不当导致。

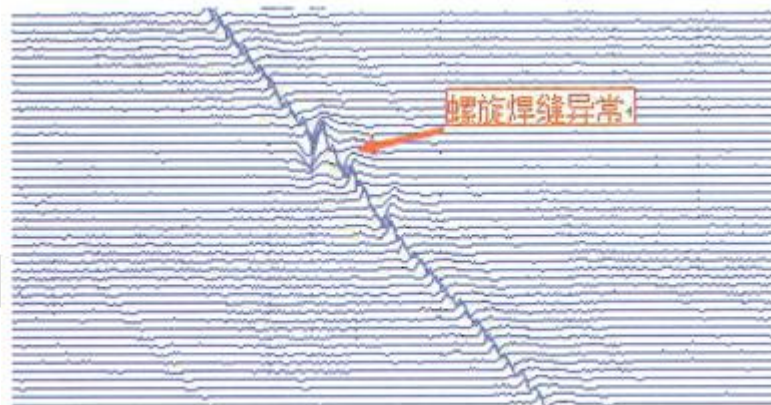


图 6-61 螺旋焊缝异常漏磁信号图





图 6-62 螺旋焊缝异常开挖验证图

从验证的漏磁信号上图可以看出,螺旋焊缝部位有两处信号同螺旋焊缝的信号图变化趋势相反,判断为异常,开挖图可知螺旋焊缝处有一处余高较平,采用焊缝尺测量管道螺旋焊缝 11:10 处焊缝余高 0.15mm,正常余高 3.15mm;管道螺旋焊缝 11:14 处,采用测厚仪测量焊缝上有埋藏缺陷埋深 5.2mm,管体周围正常壁厚 7.1mm。

## 第七部分 管道漏磁内检测数据分析与报告出具

### 7.1 管道漏磁内检测数据的类型

管道漏磁检测器是一个只能检测系统,检测器自身携带的强磁铁使管壁达到磁饱和,并且获得管壁的漏磁信号。可实时检测并记录管体上的腐蚀、机械损伤、制造缺陷、焊缝异常等管道缺陷信息及套管、补丁、阀门、三通等管道附件。通过后期数据分析处理,可以确定管道异常缺陷信息及相关管道附件的精确位置和尺寸。

漏磁检测器(MFL tool)按照磁化方向,一般可分为轴向磁化、环向磁化和螺旋方向磁化三种类型。

发展最早且技术最成熟的漏磁检测器沿管道轴向磁化,对环向缺陷比较敏感,对狭长的轴向缺陷不敏感。随着技术不断发展,基于管道轴向磁化的三轴高清检测技术蓬勃发展,2013年中油管道检测技术有限责任公司自主研发的三轴高清漏磁检测器成功在工业现场应用,标志着中国管道漏磁检测步入三轴高清检测时代。

环向磁化检测器对轴向缺陷更加敏感,与轴向磁化漏磁工具相比,具有不同的性能规格。螺旋方向磁化检测器的磁化方向为轴向磁化和环向磁化的结合,兼具轴向磁化检测器与环向磁化检测器的特点。

搭载管道走向测绘系统(Mapping)的变形或漏磁检测器可实现对管道走向和位移的检测,结合GPS(全球定位系统)能够准确测绘出管道轨迹的精确地理坐标,实现管道走向和位移检测的目的。通过后期数据处理,可提供检测到的特征点XYZ坐标,可生成与GIS地理信息系统结合的管道中心线,中心线上能够反映出所有检测到的缺陷、异常等特征点的属性信息。

随着内检测技术的不断发展,目前管道漏磁内检测数据的类型分为:单轴高清检测数据、三轴高清检测数据、环向磁化检测数据、螺旋方向磁化检测数据。

管道漏磁内检测数据分析是一项复杂的系统工程,是数据分析人员利用数据分析软件,凭借数据分析经验并结合管道建设、运营等信息对检测器采集到的海量检测数据进行分析,分类并表征管道上存在的金属损失、变形及其它管道特征信息,最终形成检测报告的过程。

部分数据分析术语定义见表7.1。

表 7.1 部分数据分析术语定义

地面标记: (Above Ground Marker)	靠近管道外面,用于探测并记录内检测工具的通过,或者其传输信号能被内检测设备探测并记录的一种装置。参考磁铁可应用于同样的目的。
异常: (Anomaly)	由管道内检测方式探测到的区别于正常管道材质、焊缝材质或防腐材质的不规则或偏差特征,或为真正的缺陷。
电弧烧伤: (Arc strike)	由电弧造成的管道局部表面熔化点。所形成的缺陷为管道表面注点,可能伴随局部硬度增长。

屈曲:	管道产生较大的塑性变形,造成管道整体或管道界面永久性起皱或变形。
-----	----------------------------------

(Buckle)	
套管: (Casing)	安装在管道周围的大直径管道组成的部件, 通常在高应力区域, 如道路交叉口或其他保护管道免受机械损伤的部件。
簇: (Cluster)	管壁或管道组件上的两个或多个邻近异常, 由于交互作用比各自孤立的异常更加削弱管道性能。
腐蚀: (Corrosion)	由于与所处环境发生化学或电化学反应, 造成某种材料 (通常是金属) 的劣化。
裂纹: (Crack)	具有大长宽比、锋利的尖端和可能的裂缝表面位移 (表面开度) 小于 0.1mm 的平面、二维异常特征。
碎片: (Debris)	管道内无关的物质。
凹陷: (Dent)	因外力撞击或挤压造成管道表面曲率明显变化的局部弹塑性变形。
特征: (Feature)	内检测器检测到的管道中的组件或异常。
打磨: (Grinding)	手工或电动打磨移除材质而造成的壁厚减少。
划痕: (Gouge)	金属机械切削造成的细长凹槽或凹腔。
管节: (Joint)	焊接起来组成整根管线的单节管段。
夹层: (Lamination)	金属内壁分离成多层, 通常平行于管壁。
金属损失: (Metalloss)	发生金属减损的任何体积型管道异常。金属损失包含: 腐蚀、划痕、打磨或制造异常。
制管异常: (mill anomaly)	制管期间出现的异常如: 搭接、裂缝、夹层、非金属夹杂、卷制痕迹及电弧烧伤。
管道附件: (Pipeline component)	正常管道必要的组成部分如阀门、三通、弯头、焊缝、套管、标记、分支管和壁厚变化等。
量化精度: (Sizing accuracy)	报告的异常尺寸或特性的精度。通常精度用公差和可信度表示。如金属损失的深度量化精度可表示为可信度为 90% 时, 公差为 $\pm 10\%$ 的壁厚。

焊缝: (Weld)	通过焊接实现连接的区域。与热影响区不同,但位于热影响区内。
焊缝异常: (Weld anomaly)	在焊缝上或热影响区域内的异常。
焊缝影响区域: (Weld affected area)	在焊缝两边,因为焊缝几何形状影响内检测测量的区域。
检测概率: (Probability of Detection)	检测器检测出特征的概率。
识别概率: (Probability of Identification)	能够正确识别被检测到的异常或其他特征的概率。

## 7.2 管道漏磁内检测信号识别

检测数据信号识别是数据分析中一项关键环节,数据分析软件将原始检测数据转换成每个探头传感器在管道内运行移动时的漏磁信号轨迹线,当管道上存在金属损失或金属增加时,该漏磁信号也会发生相应的波动。根据识别漏磁信号波动方向即可区分出金属损失或金属增加等管道特征;根据漏磁信号波动的幅度等信息,即可划分金属损失特征的种类及尺寸。但漏磁信号的分析也不仅仅是简单的对漏磁信号的形态判识,数据分析人员要充分结合管道建设及运营情况、腐蚀环境、管道以往检测信息、客户需求等多种因素对数据进行精确分析。轴向漏磁检测原理及相应的漏磁信号如图 7.2-1。

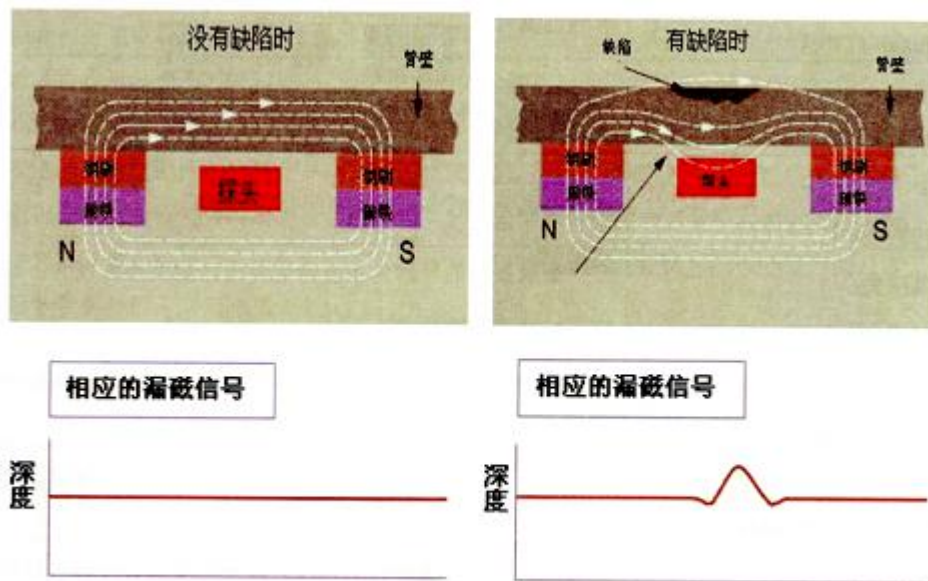


图7.2-1 轴向漏磁检测原理及相应的漏磁信号

不同方向的漏磁信号代表不同的信号特征,金属损失与金属增加的信号方向相反,这是



识别其他类型的缺陷及特征的基础。可通过设定信号的波峰和波谷指示,来判定是否为金属损失还是金属增加。若波峰信号代表金属损失,如腐蚀、机械损伤、制造缺陷、壁厚减少、焊缝异常、支管等特性;则波谷信号代表金属增加,如套管、壁厚增加、修复点及接触管壁的金属物等特征。漏磁检测波峰信号如图 7.2-2,漏磁检测波谷信号如图 7.2-3。

基于三轴漏磁检测数据的信号,通过识别轴向、径向和周向三维漏磁场分量,较传统的漏磁检测器相比,提升了对部分管道特征的识别概率,尤其对螺旋焊缝缺陷、环焊缝缺陷、三维尺寸小的金属损失、凹陷等。

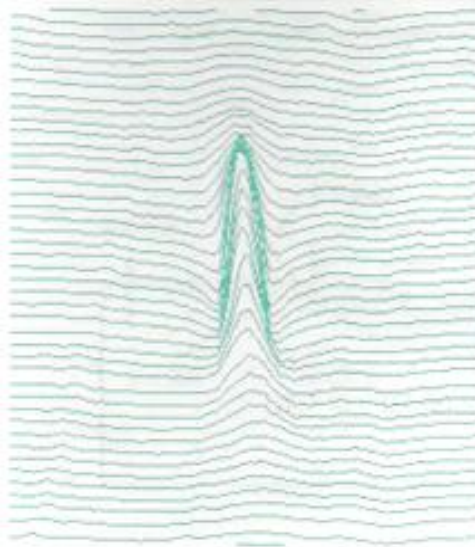


图7.2-2 漏磁检测波峰信号



图7.2-3 漏磁检测波谷信号

### 7.3 管道漏磁检测与识别的金属损失

管道漏磁内检测主要用来识别金属损失,金属损失可分为腐蚀、机械损伤、制造缺陷、环焊缝缺陷、螺旋焊缝缺陷、直焊缝缺陷等。

ASME B31.8S(天然气管道管理系统完整性)中第 2.2 完整性危险分类,对管道面临的危险类型进行了划分。国际管道研究委员会(PRCI)分析了输气管道的事故数据,将事故根源分为 22 种。22 种原因的每一种均代表影响管道完整性的一种危险,对应其进行管理。这 22 种事故原因中有一种是“未知”原因,即找不到根源或原因。其余 21 种按照性质和发展特点划分为 9 个失效类型,然后进一步划分为与时间有关的 3 大缺陷类型。根据这 9 个失效类型,可以界定影响管道完整性的潜在危险。应按照危险的时间因素和事故模式的分组,正确进行风险评估、完整性评价和减缓活动。

#### A 时效性因素

- (1) 外腐蚀
- (2) 内腐蚀
- (3) 应力腐蚀开裂

#### B 稳定因素

- (1) 与制造有关的缺陷

- (a) 焊缝缺陷
- (b) 制管缺陷
- (2) 与焊接, 制造有关的因素
  - (a) 环焊缝缺陷
  - (b) 制管焊缝缺陷
  - (c) 折皱弯头或折皱
  - (d) 螺纹滑丝/管破裂/对接失效
- (3) 设备因素
  - (a) 密封 O 形环失效
  - (b) 控制/泄压设备故障
  - (c) 泵密封, 填塞料失效
  - (d) 其它

### C 非时效性因素

- (1) 第三方, 机械破坏
  - (a) 第一、第二或第三方活动造成的损伤 (瞬时/立即失效)
  - (b) 管子的早期损坏 (延迟失效)
  - (c) 故意破坏
- (2) 误操作
  - (a) 不正确的操作规程
- (3) 气候和外力因素
  - (a) 天气过冷
  - (b) 雷击
  - (c) 大雨或洪水
  - (d) 地壳运动

数据分析人员要熟知管道面临的危险类型, 尤其关注管道上存在的与时间相关的缺陷。

## 7.4 管道漏磁内检测金属损失类型

### 7.4.1 金属损失几何参数

金属损失的几何参数是: 长度“L”, 宽度“W”, 深度“d”和参考壁厚。

金属损失特征的起、终点由图 7.4-1 中测量阈值确定。单独的金属损失特征的长度“L”是指该缺陷沿管道轴向的长度。单独金属损失特征的宽度“W”是指该缺陷沿管道周向的长度。

金属损失深度“d”是管道最大壁厚减少值, 其深度以参考壁厚的百分比给出。

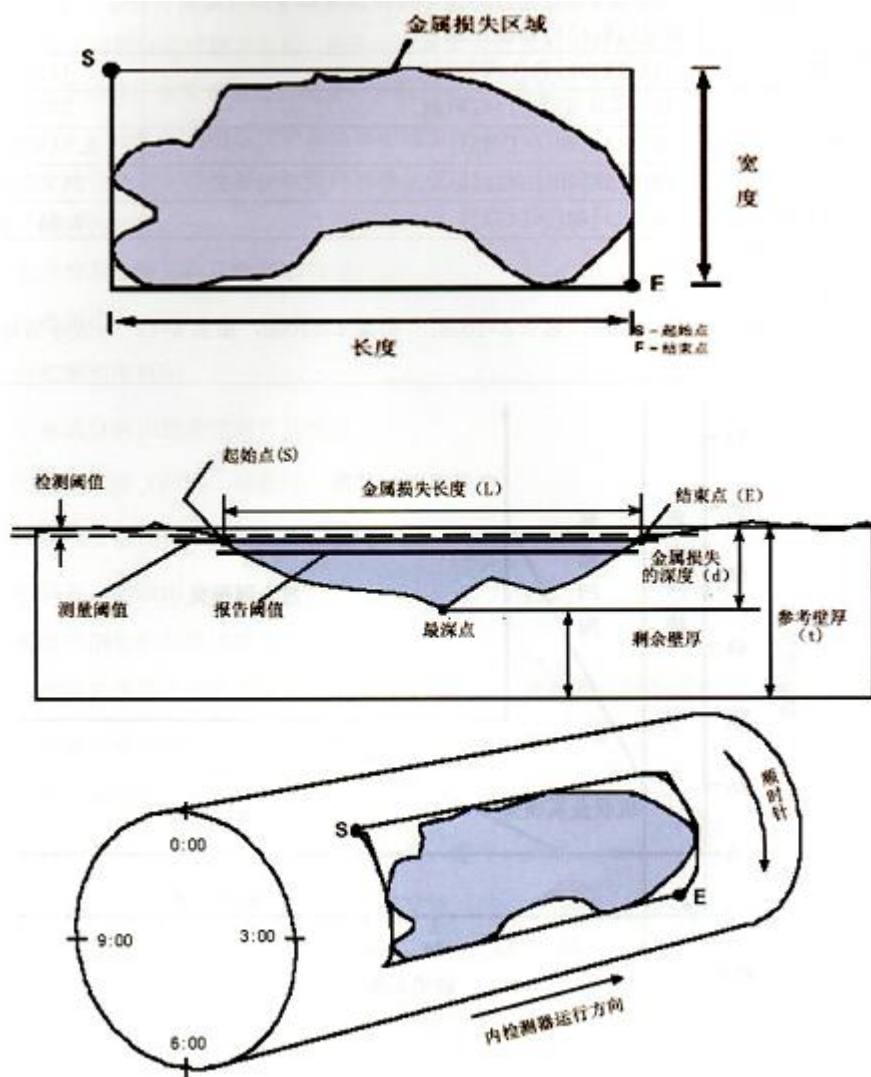


图7.4-1: 金属损失的位置和尺寸

#### 7.4.2 金属损失类型及定义

金属损失有不同的类型, 每种类型包括大量不同形状的缺陷。在众多形状中定义了一个参考点用于描述 POD 指标。即使是长度、宽度、深度的统计也要按照缺陷不同的尺寸分类来进行, 由此得到量化精度的统计结果。管道智能检测器检测的规范和要求 (POF) 中对金属损失类型定义见表 7.4-1, 金属损失类型定义图见图 7.4-2, 表 7.4-1 内的参考点是描述 POD 时使用的。

表 7.4-1

金属损失类型定义

金属损失类型	定义	参考点 ( $L \times W$ )
一般金属损失	$[W \geq 3A] \text{ 和 } [L \geq 3A]$	$4A \times 4A$

坑状金属损失	$\{([1A \leq W < 6A] \text{ 和 } [1A \leq L < 6A] \text{ 和 } [0.5 < L/W < 2]) \text{ 且 不能是 } ([W \geq 3A] \text{ 和 } [L \geq 3A])\}$	$2A \times 2A$
轴向凹沟	$\{[1A \leq W < 3A] \text{ 和 } [L/W \geq 2]\}$	$4A \times 2A$
环向凹沟	$\{[L/W \leq 0.5] \text{ 和 } [1A \leq W < 3A]\}$	$2A \times 4A$
针孔	$\{[0 < W < 1A] \text{ 和 } [0 < L < 1A]\}$	$0.5A \times 0.5A$
轴向凹槽	$\{[0 < W < 1A] \text{ 和 } [L \geq 1A]\}$	$2A \times 0.5A$
环向凹槽	$\{[W \geq 1A] \text{ 和 } [0 < L < 1A]\}$	$0.5A \times 2A$

注: L 表示缺陷长度。  
W 表示缺陷宽度。  
A 是几何参数, 如果  $t < 10\text{mm}$ , 那么  $A = 10\text{mm}$ ; 如果  $t \geq 10\text{mm}$ , 那么  $A = t$ ; t 表示管道公称壁厚。

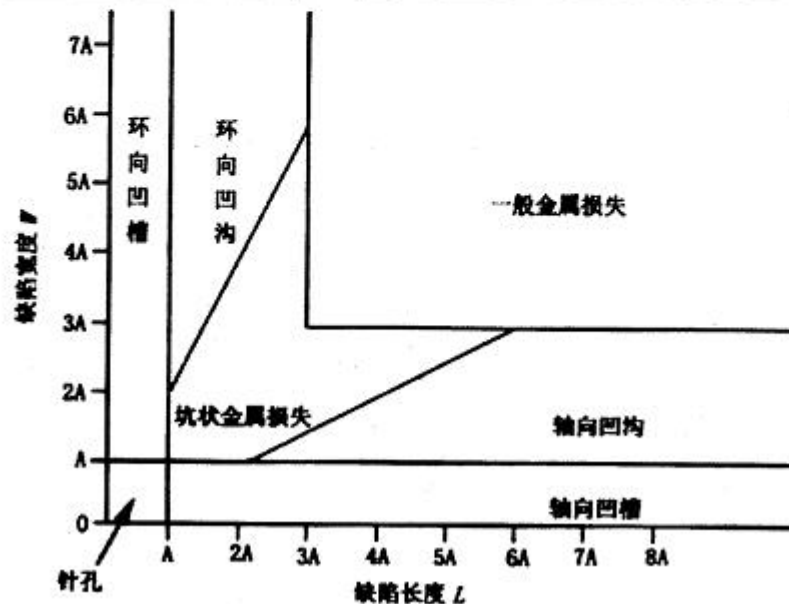


图7.4-2 金属损失类型定义图

## 7.5 管道漏磁内检测数据分析软件功能

管道内检测及完整性评价技术, 已成为管道完整性管理不可或缺的重要环节, 在保护管道安全运行、减少事故方面发挥着越来越重要的作用。管道内检测的成果就是管道检测报告, 而与这份珍贵的检测报告密切相关的就是管道内检测数据分析软件。检测数据分析软件共包括: 变形检测数据分析软件、漏磁检测数据分析软件、含缺陷管道完整性评价软件。

现代化的数据分析工作依靠的是人工经验和数据分析的有机结合, 数据分析软件是分析处理检测数据的重要工具, 应具备使用方便、自动化程度高、适用性强等特点。

具有较高智能化程度和精度的数据分析软件, 可以最大程度降低分析人员的工作强度, 避免人为出错的可能性, 提高数据分析工作效率, 确保检测报告质量。数据分析软件要自动从采集的检测数据中将管道上的金属损失、金属增加及管道附件等进行自动分类标示并



作相应处理。数据分析软件应实现多用户共享检测数据资源,即多台计算机可同时对一次检测数据的不同部分进行独立分析,系统可以将多台计算机用户的分析结果合并起来,作为统一的,完整的分析结果信息进行统计、分析和处理。数据分析软件应根据检测技术的不断提升及分析人员在软件使用过程中总结出的经验而随时升级。

含缺陷管道的完整性评价软件能够满足管道运营公司完整性评价的需要,保证管道安全、可靠、经济的运行。

1、变形检测数据分析软件基本功能:

- 1) 数据读入
- 2) 数据图形显示
- 3) 自动分析识别管道附件及变形
- 4) 量化变形(凹陷、椭圆度、褶皱、屈曲等)
- 5) 定位管道特征
- 6) 报告自动输出

2、腐蚀检测数据分析软件基本功能:

- 1) 提供多种形式的数据图形显示方式(曲线图、灰度图、彩色图)
- 2) 自动分析识别环焊缝及缺陷
- 3) 定义缺陷类别
- 4) 自动量化缺陷三维尺寸(缺陷的长度,宽度,深度)
- 5) 结合完整性评价及处理 GIS 数据等功能
- 6) 定制用户化报告
- 7) 数据导出

3、含缺陷管道完整性评价软件的基本功能:

- 1) 评价腐蚀缺陷的剩余强度
- 2) 预测含缺陷管道的剩余寿命
- 3) 评价变形的可接受性
- 4) 缺陷维护维修排序
- 5) 检测数据评价结果的统计分析
- 6) 定制用户化报告

## 7.6 管道漏磁内检测数据分析流程与质量控制

### 7.6.1 管道漏磁内检测数据分析流程

检测数据分析流程图，图 7.6-1

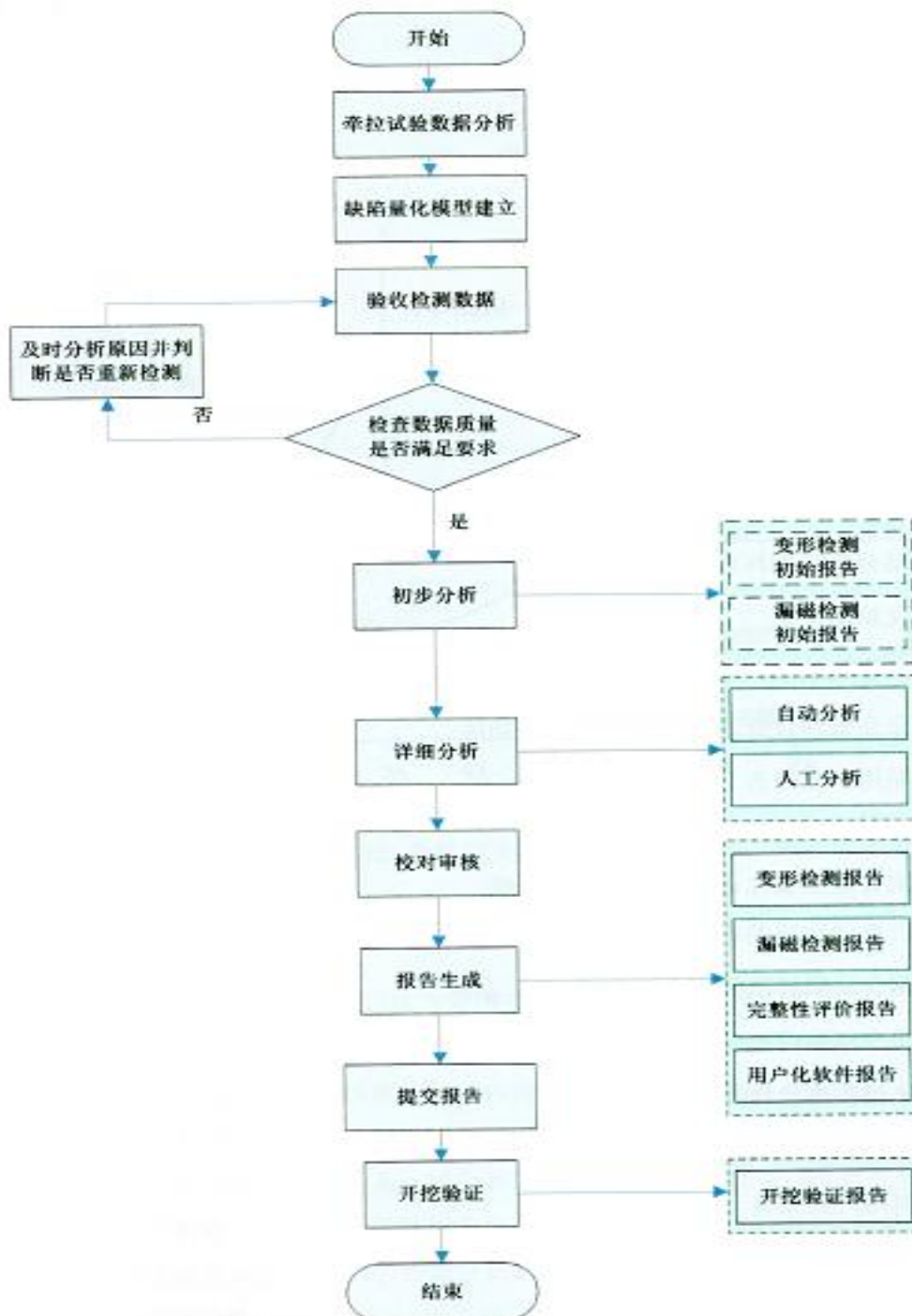


图 7.6-1 检测数据分析流程图

## 7.6.2 检测数据分析各工序技术要点

数据分析是管道漏磁内检测的关键环节, 数据分析质量将会直接影响到检测报告的质量, 会对管道的安全运行产生直接的影响。把控好管道漏磁内检测数据分析如下工序要点, 可达到提高数据分析质量的目的。

### 7.6.2.1 牵拉试验数据分析

检测公司应建立与被检管道材质、壁厚相同的牵拉管段, 并在管体上制作不同类型的人工缺陷, 通过模拟实际工况运行速度对检测器进行牵拉试验。通过牵拉试验, 验证检测器性能指标, 模拟出不同形状的缺陷在不同管道工况条件下的信号特征, 并建立缺陷三维尺寸量化模型。

在牵拉管段上制作的人工缺陷类型至少应包含 7.4.2 金属损失类型及定义中规定的 7 种类型缺陷, 并在不同壁厚管段上制作人工缺陷。为确定不同类型缺陷的检测阈值, 应制作深度较小的缺陷。

对牵拉试验数据分析前, 完成对牵拉试验信息调整, 建立如下信息档案:

- 1) 牵拉管道的口径、长度、壁厚、材质、连接方式。
- 2) 人工缺陷的长度、宽度、深度、周向位置、内外部、类型。
- 3) 牵拉过程中数据, 如检测器型号、牵拉速度、牵拉次数。

分析牵拉试验数据, 验证检测器性能如特征轴向定位精度、周向定位精度、检测概率及缺陷量化精度是否满足现场检测的要求, 并出具牵拉试验报告。

### 7.6.2.2 检测概率与识别概率

通过对牵拉试验数据的分析结果, 并结合实际工程检测数据分析经验, 应对管道特征的检测概率与识别概率做出统计。

管道内检测的规范和要求 (POF 标准) 中, 对特征识别概率的定义见表 7.6-1:

表 7.6-1 特征识别定义

Feature	Yes POI>90%	No POI<50%	May be 50%≤POI≤90%
Int. / ext. / mid wall discrimination			
Additional metal / material: 其他金属/材料			
- debris, magnetic 杂质, 磁性的			
- debris, non-magnetic 杂质, 非磁性的			
- touching metal to metal 金属接触			
- Other 其他			
Anode 阳极			
Anomaly: 异常			



Feature	Yes POI>90%	No POI<50%	May be 50%<=POI<=90%
- arc strike 电弧烧伤			
- artificial defect 人工缺陷			
-blister气孔			
-buckle global 整体屈曲			
-buckle local 局部屈曲			
-buckle propagation屈曲扩展			
-corrosion 腐蚀			
-corrosion cluster腐蚀簇			
-corrosion related to CRA耐蚀合金腐蚀			
-crack 裂纹			
-crack cluster 裂纹簇			
-dent kinked 弯折凹陷			
-dent plain 普通凹陷			
-dent smooth平滑凹陷			
-gouge 划痕			
-gouge cluster 划痕簇			
-grinding 磨痕			
-girth weld crack 环焊缝裂纹			
-girth weld anomaly环焊缝异常			
-longitudinal weld crack 直焊缝裂纹			
-longitudinal weld anomaly 直焊缝异常			
-mill anomaly -grinding 加工异常（打磨）			
-mill anomaly lamination加工异常（分层）			
-mill anomaly lap加工异常（搭接）			
-mill anomaly non-metallic inclusion加工异常（非金属夹杂）			
-mill anomaly cluster加工异常簇			
-ovality 椭圆度			





Feature	Yes POI>90%	No POI<50%	May be 50%≤POI≤90%
-ripple/wrinkle 波纹/褶皱			
-SCC 应力腐蚀开裂			
-spalling 防腐层剥离			
-spiral weld crack 螺旋焊缝裂纹			
-spiral weld anomaly 螺旋焊缝异常			
Eccentric pipeline casing 偏心套管			
Change in wall thickness 壁厚变化			
CP connection/anode 阴保连接/阳极			
External support 外部支撑			
Ground anchor 地面锚固			
Off take 支管			
Pipeline fixture 管道夹具			
Reference magnet 磁性参考点			
Repair: 修复			
-welded sleeve begin/end 焊接套筒开始/结束			
-composite sleeve begin/end 复合材料套筒开始/结束			
-weld deposit begin/end 焊接沉积开始/结束			
-coating begin/end 涂层开始/结束			
-crack arrestor begin/end 止裂器开始/结束			
Tee 三通			
Valve 阀门			
Weld: 焊缝			
-bend 弯头			
-diameter change 直径变化			
-wall thickness change (pipe/pipe connection) 壁厚变化 (管/管连接)			
-adjacent tapering 变径段			
-longitudinal weld 直焊缝			

Feature	Yes POI>90%	No POI<50%	May be 50%≤POI≤90%
-spiral weld 螺旋焊缝			
-not identifiable seam 不可识别焊缝			
-seamless 无缝			

### 7.6.2.3 建立缺陷量化模型

漏磁检测的基本原理是利用检测器使管壁达到磁饱和，并且获得管壁的漏磁信号，根据漏磁信号的特征数据推算管道上缺陷的尺寸。管道漏磁检测的关键环节是建立反映相应漏磁信号和缺陷尺寸的量化模型，以确定漏磁信号特征与缺陷特征之间的关系，实现对缺陷三维尺寸（长度、宽度、深度）的量化。缺陷量化模型的优劣决定了管道检测报告的可信度。

构建缺陷量化模型是数据分析过程中的重要工作，目前通用的方法为：神经网络法、回归分析法、有限元分析法、人工经验法。

牵拉试验后，应分析总结腐蚀检测器牵拉试验数据，建立缺陷数据库，构建缺陷三维尺寸量化模型。

### 7.6.2.4 量化精度

量化精度是指报告的异常尺寸或特性的精度。通常量化精度用公差和可信度表示。如金属损失深度的量化精度可表示为可信度为 90% 时，公差为 ±10% 的壁厚。

通过牵拉试验建立缺陷量化模型后，应统计分析量化模型对不同类型的金属损失的量化精度，管道漏磁内检测对金属损失量化精度见表 7.6-2。

表 7.6-2 管道漏磁内检测对金属损失量化精度表

	一般金属损失	坑状金属损失	轴向凹沟	环向凹沟	针孔	轴向凹槽	环向凹槽
POD=90% 时的深度阈值					/		
					见下面		
可信度=90% 时的深度精度							
可信度=90% 时的宽度精度							
可信度=90% 时的长度精度							
可信度=90% 时，深度=50%wt 时的最小针孔直径						/	
可信度=90% 时，深度=20%wt 时的最小针孔直径						/	

### 7.6.2.5 检测数据验收

检测数据质量直接影响检测报告的准确性,检测数据验收就是验证检测数据有效性的过程。因此,在检测器运行完成后,数据分析师应对检测数据进行众多专项数据质量检查,尽快完成对检测数据的验收,评估数据是否可接受,若不完整应及时分析原因,并判断是否需要重新检测。

#### 1. 变形检测数据验收应核实以下内容:

- 1) 检测里程完整性
- 2) 探头信号质量
- 3) 周向通道信号质量(单通道测径变形数据除外)
- 4) 地面标记信号质量

#### 2. 腐蚀检测数据验收应核实以下内容:

- 1) 检测里程完整性
- 2) 主探头信号质量
- 3) ID/OD 探头信号质量
- 4) 周向通道信号质量
- 5) 地面标记信号质量

### 9.5 检测数据初步分析

数据分析师应对质量合格的检测数据进行初步分析,首先利用数据分析软件识别出所有可能影响管道完整性的金属损失特征及变形点,进行人工确认后出具变形检测初始报告及漏磁检测初始报告,使管道运营方及时了解管道上存在的严重缺陷点,做好维修的准备,避免风险的发生。

#### 1. 变形检测初始报告

报告出变形量超过管道外径 5%的变形点及影响后续检测器通过的变形点。

#### 2. 漏磁检测初始报告

报告出深度超过管道正常壁厚 50%以上的严重金属损失点,5 个深度较深的金属损失点及 5 个预估维修比(ERF)较大的金属损失点。

### 7.6.2.7 检测数据详细分析

检测数据详细分析包括软件自动分析与人工分析两项流程。先进的数据分析软件能够实现对检测数据的自动分析,但是最关键的数据分析工作环节依然需要人工分析工序。数据分析员要接受培训和资格认证,并且检测公司应该制定数据分析规范,确保数据分析师按照严格的质量标准对检测数据进行分析。

#### 1. 自动分析

##### 1) 变形检测数据自动分析步骤:

- ◆ 环焊缝
- ◆ 管节交点



- ◆管道壁厚
- ◆变形点识别与量化

#### 2) 漏磁检测数据自动分析步骤:

- ◆环焊缝
- ◆管节交点
- ◆管道壁厚
- ◆缺陷识别与量化
- ◆缺陷分类

#### 2. 人工分析

数据分析员应对软件自动分析不能实现的工作进行人工分析, 尤其对于管道附件如阀门、法兰、弯头、三通、小开孔等应以人工分析为宜。

#### 3. 地面标记处理

地面标记能够为管体金属损失及管道特征的精确定位提供保障。

对于置于管道上方的便携式地面标记, 应分析处理地面标记信号, 并建立地面标记点和地上标识位置对照表, 并通过参考地面标记验证性能指标是否满足规定的定位精度。

对于置于管道上方的永久性地面标记, 应通过对检测数据的分析, 识别出地面标记并建立永久地面标记表。

#### 7.6.2.8 校对审核

接受了专业培训和认证的数据分析师要对软件自动分析结果进行校对和审核。在校对和审核过程中应对所有的管道特征点进行审核, 对于严重的金属损失要进行人工测量检验。

校对与审核步骤:

- ◆检查起始零点正确性;
- ◆检查地面标记文件;
- ◆检查缺陷及特征的正确性(内外部、周向、量化结果);
- ◆检查管道附件正确性;
- ◆检查缺陷安全评估评估结果正确性;
- ◆检查基本的八项列表的正确性, 八项列表内容如图 7.6-2。



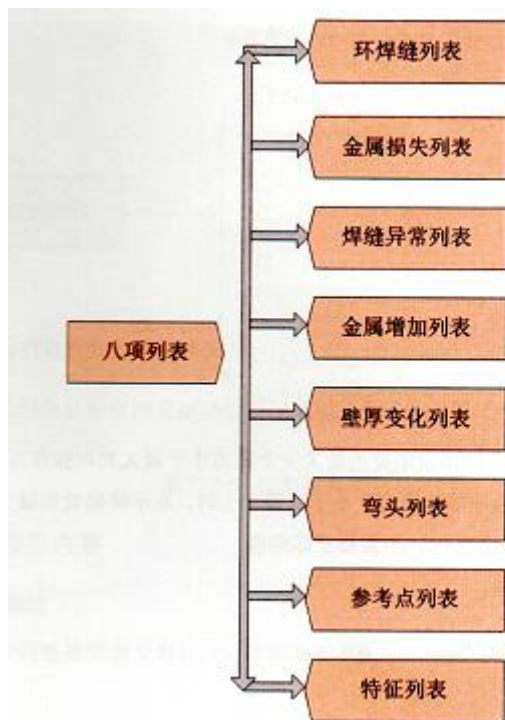


图 7.6-2 八项列表内容

#### 7.6.2.9 含缺陷管道完整性评价

数据分析校对审核完毕后,应根据数据分析得到的缺陷数据,结合管道的实际运行情况,应用含缺陷管道完整性评价软件对检测得到的缺陷进行分析与评价,确定管道当前及将来的完整性情况。

含缺陷管道完整性评价的意义:

- 1) 满足长期的管道完整性管理的需要
- 2) 保证管道安全、可靠、经济地运行
- 3) 确定最大检测时间间隔
- 4) 制定合理的维护维修计划,减小维护维修成本
- 5) 推荐合适的维护维修方法

##### (1) 评价数据准备

含缺陷管道完整性评价的数据基础是变形及漏磁检测到的所有缺陷数据,同时还需准备重要的管道参数,包括管径、管道类型、管道材质、管道壁厚、地区类型、设计压力、最大允许操作压力、投产时间、输送介质、防腐保温形式、运行温度、历史检测时间等。

##### (2) 评价方法

检测承包商必须确定适用于被检管道的最佳评价方法,或由管道运营公司选择确定。无论采

用何种评价方法计算剩余强度, 均应有据可查

目前国际通用的评价方法如下, 但不仅限于:

- 1) ASME B31G
- 2) API 579
- 3) DNV-RP-F101
- 4) BS 7910

### (3) 预估维修比

预估维修比 (ERF, Estimated Repair Factor) 是管道最大允许操作压力 (MAOP) 与缺陷处最大安全压力 ( $P_{safe}$ ) 的比值, 是判定缺陷是否需要立即维修及缺陷严重程度的重要依据。当 ERF 值大于 1 时, 表示缺陷处的最大安全压力小于最大允许操作压力 (MAOP), 缺陷需要立即维修; 反之, 当缺陷处的 ERF 小于或等于 1 时, 表示缺陷处的最大安全压力大于或等于最大允许操作压力 (MAOP), 不需要立即维修。

ERF 的计算公式如下:

$$ERF = MAOP / P_{safe}$$

这里:

$ERF$  = Estimated Repair Factor, 预估维修比;

$MAOP$  = 管道最大允许操作压力;

$P_{safe}$  = 利用评价方法计算得到的缺陷处的最大安全压力

### (4) 腐蚀生长速率估算

漏磁检测器可检测出管道当前的状态, 这一状态可作为时间的函数发生变化。采用漏磁检测器对管道进行周期性的检测, 可计算出腐蚀生长速率。

腐蚀生长速率确定普遍使用的方法是依据两次 (或多次) 检测的数据对比获得, 并且腐蚀生长速率计算采用保守的原则。根据腐蚀生长速率预测金属损失缺陷剩余寿命, 判断其在再检测周期内是否需要维修。

## 7.7 管道漏磁内检测报告要素

随着管道检测行业的飞速发展, 管道业主已经不满足于只得到纸质或电子版的检测报告文档。而是需要浏览管道检测数据, 更直观的查看管道检测结果, 因此用户软件报告应运而生。用户化软件报告具备美观丰富的界面, 能够实现检测数据、分析结果查询与各种统计图表间的相互调用, 并结合了完整性评价功能。

管道检测报告主要以纸质版与电子版、软件版的形式提供给管道业主, 检测报告类别及内容如图 10-1。

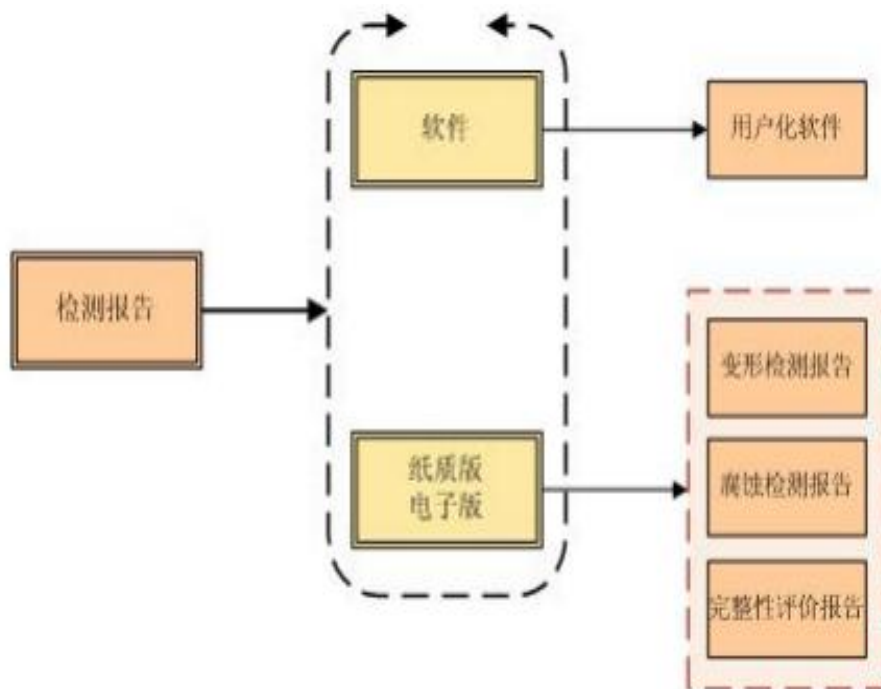


图 10-1 检测报告类别及内容

### 7.7.1 变形检测报告内容

#### 7.7.1.1 检测工程概述

概述内容至少应包括管道变形状况、检测器技术指标、检测日程表、管道运行参数、清管情况。

变形检测器技术指标应包括：

- 1) 轴向采样频率或里程
- 2) 探头环向间距或环向尺寸分辨率
- 3) 探头未覆盖的环向区域（探头之间的间隔）
- 4) 可检测到的最小变形尺寸（深度、长度、宽度）
- 5) 最小/最大椭圆度尺寸
- 6) 连续记录的探头数量
- 7) 时钟位置指示的分辨率
- 8) 特征相对于上游环焊缝，上游标记的定位精度

#### 7.7.1.2 特征统计

以数据、直方图、周向图的形式表示管道上几何变形的分类统计结果。

##### （1）统计数据包括

- 1) 全部几何变形点的数量；
- 2) 全部凹陷点的数量；
- 3) 全部椭圆度变形点的数量；
- 4)  $2\%OD \leq \text{变形量} < 6\%OD$  的凹陷数量；
- 5)  $6\%OD \leq \text{变形量} < 10\%OD$  的凹陷数量；
- 6) 变形量  $\geq 10\%OD$  的凹陷数量；
- 7) 全部椭圆度数量；



- 8)  $1\%OD \leq \text{变形量} < 5\%OD$  的椭圆度数量;
- 9)  $5\%OD \leq \text{变形量} < 10\%OD$  的椭圆度数量;
- 10) 变形量  $\geq 10\%OD$  的椭圆度数量;
- 11) 全部鼓胀、褶皱、屈曲的数量。

### (2) 统计图包括

- 1) 所有几何变形点沿管道里程的分布直方图;
- 2) 所有凹陷沿管道周向分布平面图。

#### 7.7.1.3 管道特征列表

变形检测特征列表应包括: 凹陷、椭圆度、褶皱、屈曲、壁厚变化、造成管道内径变化的管道附件等。

对变形点的描述应至少包括以下几个方面:

- 1) 管道特征名称;
- 2) 管道特征的检测里程;
- 3) 管道特征距最近参考点的距离;
- 4) 管道几何变形的变形量 (以绝对变形量或与管道外径的百分比表示);
- 5) 管道凹陷点的周向位置。

#### 7.7.1.4 地面标记点列表

地面标记点与管道上相对永久标记 (如里程桩) 的对应关系。

### 7.7.2 腐蚀检测报告内容

#### 7.7.2.1 检测工程概述

检测工程概述应包括: 管道腐蚀状况、检测器技术指标、检测日程表、管道运行参数、清管情况等内容。

**腐蚀检测器技术指标应包括:**

- 1) 数据采集频率或间距;
- 2) 检测阈值;
- 3) 报告阈值, 如果双方未指定则采用 90% 的 POD;
- 4) 检测器运行速度曲线;
- 5) 压力曲线和温度曲线;
- 6) 损坏的传感器统计;
- 7) 漏磁检测器的磁场强度;

#### 7.7.2.2 摘要和统计

以数据、直方图和标绘图的形式表示管道上金属损失的分类统计结果。

(1) 统计数据应包括:

- 1) 全部金属损失点的数量;





- 2) 内部金属损失点的数量;
- 3) 外部金属损失点的数量;
- 4) 一般金属损失点的数量;
- 5) 坑状金属损失点的数量;
- 6) 周向和环向凹沟的数量;
- 7) 满足  $0\%t \leq \text{深度} < 10\%t$  的金属损失点的数量;
- 8) 满足  $10\%t \leq \text{深度} < 20\%t$  的金属损失点的数量;
- 9) 满足  $20\%t \leq \text{深度} < 30\%t$  的金属损失点的数量;
- 10) 满足  $30\%t \leq \text{深度} < 40\%t$  的金属损失点的数量;
- 11) 满足  $40\%t \leq \text{深度} < 50\%t$  的金属损失点的数量;
- 12) 满足  $50\%t \leq \text{深度} < 60\%t$  的金属损失点的数量;
- 13) 满足  $60\%t \leq \text{深度} < 70\%t$  的金属损失点的数量;
- 14) 满足  $70\%t \leq \text{深度} < 80\%t$  的金属损失点的数量;
- 15) 满足  $80\%t \leq \text{深度} < 90\%t$  的金属损失点的数量;
- 16) 满足  $\text{深度} \geq 90\%t$  的金属损失点的数量;
- 17) 满足  $0.6 \leq \text{ERF} < 0.8$  的金属损失点的数量;
- 18) 满足  $0.8 \leq \text{ERF} < 0.9$  的金属损失点的数量;
- 19) 满足  $0.9 \leq \text{ERF} < 1.0$  的金属损失点的数量;
- 20) 满足  $\text{ERF} \geq 1.0$  的金属损失点的数量;

**(2) 统计直方图应提供管道全程的:**

- 1) 所有金属损失点的数量;
- 2) 满足  $\text{深度} < 40\%t$  的金属损失点的数量;
- 3) 满足  $\text{深度 } 40\%t \leq \text{深度} < 60\%t$  的金属损失点的数量;
- 4) 满足  $\text{深度 } 60\%t \leq \text{深度} < 80\%t$  的金属损失点的数量;
- 5) 满足  $\text{深度} \geq 80\%t$  的金属损失点的数量;

**(3) 标绘图**

- 1) 包括  $\text{ERF}=1$  曲线的判断标绘图。标绘图的横坐标为金属损失长度, 纵坐标为金属损失深度;
- 2) 管道全程所有金属损失周向标绘图;
- 3) 管道全程所有内部金属损失周向标绘图;
- 4) 管道全程所有外部金属损失周向标绘图。

**7.7.2.3 严重金属损失全面描述表**

严重金属损失全面评价表至少应包括 5 个最深的金属损失点和 5 个 ERF 值最高的金属损失点的相关信息。具体内容应包括:

- 1) 金属损失所在管节的长度和直焊缝或螺旋焊缝的在接头开始和结束的交点时间;



- 2) 金属损失所在管节上下游各三节管节的长度和直焊缝或螺旋焊缝交点时间;
- 3) 金属损失的里程;
- 4) 壁厚;
- 5) 上游参考环焊缝距上游参考点的距离;
- 6) 下游参考环焊缝距下游参考点的距离;
- 7) 金属损失距上游环焊缝和下游环焊缝的距离;
- 8) 金属损失的环向位置;
- 9) 特征描述和尺寸;
- 10) ERF;
- 11) GPS 坐标 (进行测绘检测);
- 12) 内/外部指示。

#### 7.7.2.4 管道特征列表

特征列表内容应包括: 金属损失、焊缝、弯头、三通、小开孔、法兰、阀门、套管、补丁、定位磁铁、贴近的金属等。

对金属损失的描述应包括以下几个方面:

- 1) 特征的里程位置;
- 2) 特征名称;
- 3) 特征所在管节的长度;
- 4) 特征距最近参考点的距离;
- 5) 特征距上、下游环焊缝的距离;
- 6) 特征的周向位置;
- 7) 特征的尺寸;
- 8) ERF;
- 9) 内/外部指示;
- 10) GPS 坐标 (进行测绘检测);

#### 7.7.2.5 地面标记点列表

地面标记点与管道上相对永久标记的对应关系。

#### 7.7.3 完整性评价报告内容

对检测到的所有缺陷进行统计分析, 以文字、统计图表的形式进行描述, 阐述通过统计数据所反应出的管道中可能存在的问题。通过使用适合的评价方法, 对管道检测到的金属损失缺陷进行评价, 结合管道的运营要求, 给出不满足当前完整性管理要求需要立即维修的金属损失缺陷点。对管道中存在的腐蚀生长速率进行统计分析, 结合管道运营条件, 对管道进行寿命预测。根据管道运营管理中的维护维修能力以及维护维修预算制定合理的再检测周期。

- 1) 分类分析内检测得到的缺陷数据;
- 2) 提供缺陷是否可接收的建议;
- 3) 确定管道存在的不可接受的缺陷并提供合理的维护维修建议;
- 4) 结合管道相关数据, 预测管道的腐蚀生长速率;
- 5) 确定缺陷的维修次序, 制定合理的维护维修计划;
- 6) 确定合适的再检测时间。

#### 7.7.4 用户化软件报告内容

用户化软件报告主要为了便于管道运营方管理检测数据, 为管线的生产运营提供及时有效的帮助。

用户化软件报告应基本具有如下功能:

- 1) 应具备检测数据浏览操作功能, 以曲线图、灰度图、彩色图方式显示数据, 以使用户可与未来检测数据信号进行直观的对比分析。
- 2) 应实现检测数据、分析查询结果与各种统计图表间的相互调用, 并应结合完整性评价功能。
- 3) 可展示管道特征的绝对距离、相对距离、周向位置及缺陷的尺寸及类型等信息。
- 4) 开挖单应自动输出, 能够为用户生成任意缺陷的开挖信息, 全面、准确、直观地为用户提供全面的开挖定位信息。

总之, 用户化软件报告能使用户一目了然的了解管道的健康情况, 能够全面查看检测结果、操作检测数据, 快速查询各种功能的图表、按各种条件检索分析结果, 提供信息全面的开挖单等功能。

##### 7.7.4.1 用户化软件报告图表

用户化软件报告图表中至少应包含以下内容:

- 1) 缺陷统计列表
  - 金属损失总体统计列表
  - 金属损失深度统计列表
  - 金属损失 ERF 统计列表
  - 严重金属损失列表
  - 焊缝异常点列表
  - 变形列表
- 2) 管道信息统计列表
  - 管节列表
  - 壁厚变化列表
  - 管道附件列表
  - 弯头列表
  - 注释列表

### 3) 图形报表

- 管道评估图
- 金属损失分布图- 基于深度
- 金属损失分布图-基于 ERF
- 金属损失面积/体积/数量图
- 金属损失分布平面图
- 金属损失周向分布图
- 管道壁厚变化图
- 速度图/压力图
- 温度图/磁场强度图

## 7.8 管道漏磁内检测结果验证

### 7.8.1 验证过程

最终检测报告提交后,管道运营方应选择适当的缺陷进行开挖验证,并形成检测结果验证报告(应根据管道条件和缺陷分布情况确定验证点数量)。报告中应以表格的形式详细描述验证开挖点的检测结果和实测结果。

将验证点的现场测量结果与检测结果进行比对,确认实际检测精度是否满足检测器的精度指标。

若检测结果验证合格,管道运营方现场代表签署检测结果验证报告;若不合格,应及时分析原因,采取有效措施,直至满足要求。

### 7.8.2 验证报告

验证报告应包括:

- 1) 验证点的全面描述;
- 2) 验证点现场测量结果;
- 3) 缺陷照片;
- 4) 检测报告与现场测量结果之间的误差,应包括:
  - a) 定位误差;
  - b) 深度误差;
  - c) 长度误差;
  - d) 宽度误差;
  - e) 周向误差。
- 5) 如有必要,可对检测结果的可信度进行进一步的计算、验证。





## 7.9 管道漏磁内检测成果提交

在合同规定日期内，完成检测数据分析和报告出具工作，并至少提供如下报告：

- 1) 检测报告电子版与纸质版；
- 2) 完整性评价报告电子版与纸质版（视合同规定）；
- 3) 用户化软件报告；
- 4) 检测结果验证报告