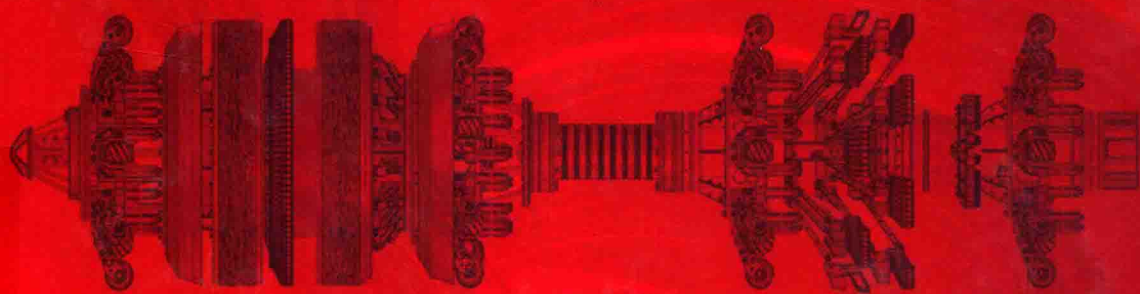


“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代电磁无损检测学术丛书

Electromagnetic Nondestructive Testing

长输油气管道漏磁 内检测技术

刘斌 杨理践 著
康宜华 审



长输油气管道漏磁内检测技术属于垄断技术,在国际上,仅有少数国家掌握该项技术。目前,国际管道内检测领域普遍关注的前沿问题包括应力检测、裂纹检测、几何检测和测绘检测。本书针对上述前沿问题,系统地总结了多年的研究成果,介绍了管道漏磁内检测基础知识、管道漏磁内检测系统、管道轴向励磁和周向励磁漏磁内检测技术、管道磁记忆应力内检测技术、漏磁内检测器速度控制技术、管道惯性测绘内检测技术、管道漏磁内检测数据处理方法、管道漏磁内检测缺陷量化方法、管道漏磁内检测工程项目的实施以及基于漏磁内检测的长输油气管道评价技术。

本书可供油气管道运营、维护、检测的工程技术人员,电磁无损检测相关工程技术人员,以及在读本科生、研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

长输油气管道漏磁内检测技术/刘斌,杨理践著. —北京:机械工业出版社, 2017. 1

“十二五”国家重点图书出版规划项目 现代电磁无损检测学术丛书

ISBN 978-7-111-55712-8

I. ①长… II. ①刘…②杨… III. ①长输管道—石油管道—漏磁—管道检测 IV. ①TE973

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第306667号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:薛礼 责任编辑:王海峰 蓝伙金 武晋

责任校对:刘岚 封面设计:鞠杨

责任印制:李飞

北京铭成印刷有限公司印刷

2017年3月第1版第1次印刷

184mm×260mm·16.25印张·2插页·390千字

0 001—1 500册

标准书号:ISBN 978-7-111-55712-8

定价:158.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

现代电磁无损检测学术丛书编委会

学术顾问：程开甲（院士，国家最高科学技术奖获得者，“两弹一星”功勋奖章获得者）

主 任：杨叔子（院士）

副 主 任：徐滨士（院士）陈达（院士）

委 员（按姓氏笔画排序）：

叶 琛 田贵云 伍剑波 任吉林 严仍春 李光浩 李路明

杨叔子（院士） 杨理践 沈建中 宋 凯 张履谦（院士）

陈 达（院士） 陈振茂 范 弘 林俊明 胡先龙 钱七虎（院士）

徐可北 徐滨士（院士） 黄松岭 康宜华 董世运 程开甲（院士）

曾志伟 雷 洪 雷银照 蔡桂喜

序 1

利用大自然的赋予，人类从未停止发明创造的脚步。尤其是近代，科技发展突飞猛进，仅电磁领域，就涌现出法拉第、麦克斯韦等一批伟大的科学家，他们为人类社会的文明与进步立下了不可磨灭的功绩。

电磁波是宇宙物质的一种存在形式，是组成世间万物的能量之一。人类应用电磁原理，已经实现了许多梦想。电磁无损检测作为电磁原理的重要应用之一，在工业、航空航天、核能、医疗、食品安全等领域得到了广泛应用，在人类实现探月、火星探测、无痛诊疗等梦想的过程中发挥了重要作用。它还可以帮助人类实现更多的梦想。

我很高兴地看到，我国的无损检测领域有一个勇于探索研究的群体。他们在前人科技成果的基础上，对行业的发展进行了有益的思考和大胆预测，开展了深入的理论和应用研究，形成了这套“现代电磁无损检测学术丛书”。无论他们的这些思想能否成为原创技术的基础，他们的科学精神难能可贵，值得鼓励。我相信，只要有更多为科学无私奉献的科研人员不懈创新、拼搏，我们的国家就有希望在不久的将来屹立于世界科技文明之巅。

科学发现永无止境，无损检测技术发展前景光明！

中国科学院院士

程开甲

2015 年秋日

序 2

无损检测是一门在不破坏材料或构件的前提下对被检对象内部或表面损伤以及材料性质进行探测的学科,随着现代科学技术的进步,综合应用多学科及技术领域发展成果的现代无损检测发挥着越来越重要的作用,已成为衡量一个国家科技发展水平的重要标志之一。

现代电磁无损检测是近十几年来发展最快、应用最广、研究最热门的无损检测方法之一。物理学中有关电场、磁场的基本特性一旦运用到电磁无损检测实践中,由于作用边界的复杂性,从“无序”的电磁场信息中提取“有用”的检测信号,便可成为电磁无损检测技术理论和应用工作的目标。为此,本套现代电磁无损检测学术丛书的字里行间无不浸透着作者们努力的汗水,闪烁着作者们智慧的光芒,汇聚着学术性、技术性和实用性。

丛书缘起。2013年9月20—23日,全国无损检测学会第10届学术年会在南昌召开。期间,在电磁检测专业委员会的工作会议上,与会专家学者通过热烈讨论,一致认为:当下科技进步日趋强劲,编织了新的知识经纬,改变了人们的时空观念,特别是互联网构建、大数据登场,既给现代科技,亦给电磁检测技术注入了全新的活力。是时,华中科技大学康宜华教授率先提出:敞开思路、总结过往、预测未来,编写一套反映现代电磁无损检测技术进步的丛书是电磁检测工作者义不容辞的崇高使命。此建议一经提出,立即得到与会专家的热烈响应和大力支持。

随后,由福建省爱德森院士专家工作站出面,邀请了两弹一星功勋科学家程开甲院士担任丛书总顾问,钱七虎院士、徐滨士院士、陈达院士、杨叔子院士、张履谦院士等为顾问委员会成员,为丛书定位、把脉,力争将国际上电磁无损检测技术、理论的研究现状和前沿写入丛书中。2013年12月7日,丛书编委会第一次工作会议在北京未来科技城国电研究院举行,制订出18本丛书的撰写名录,构建了相应的写作班子。随后开展了系列活动:2014年8月8日,编委会第二次工作会议在华中科技大学召开;2015年8月8日,编委会第三次工作会议在国电研究院召开;2015年12月19日,编委会第四次工作会议在西安交通大学召开;2016年5月15日,编委会第五次工作会议在成都电子科技大学召开;2016年6月4日,编委会第六次工作会议在爱德森驻京办召开。

好事多磨。本丛书的出版计划一推再推。主要因为丛书作者繁忙,常“心有意而力不逮”;再者丛书提出了“会当凌绝顶,一览众山小”高度,故其更难矣。然诸君一诺千金,知难而进,经编委会数度研究、讨论精简,如今终于成

集，圆了我国电磁无损检测学术界的一个梦！

最终决定出版的丛书，在知识板块上，力求横不缺项，纵不断残，理论立新，实证鲜活，预测严谨。丛书共包括九个分册，分别是：《钢丝绳电磁无损检测》《电磁无损检测数值模拟方法》《钢管漏磁自动无损检测》《电磁无损检测传感与成像》《现代漏磁无损检测》《电磁无损检测集成技术及云检测/监测》《长输油气管道漏磁内检测技术》《金属磁记忆无损检测理论与技术》《电磁无损检测的工业应用》，代表了我国在电磁无损检测领域的最新研究和应用水平。

丛书在手，即如丰畴拾穗，金瓯一掬，灿灿然皆因心仪。从丛书作者的身上可以感受到电磁检测界人才辈出、薪火相传、生生不息的独特风景。

概言之，本丛书每位辛勤耕耘、不倦探索的执笔者，都是电磁检测新天地的开拓者、观念创新的实践者，余由衷地向他们致敬！

经编委会讨论，推举笔者为本丛书总召集人。余自知才学浅薄，诚惶诚恐，心之所系，实属难能。老子曰：“夫代大匠斫者，希有不伤其手者矣”。好在前有程开甲院士屈为总顾问领航，后有业界专家学者扶掖护驾，多了几分底气，也就无从推诿，勉强受命。值此成书在即，始觉“千淘万漉虽辛苦，吹尽狂沙始到金”限于篇幅，经芟选，终稿。

洋洋数百万字，仅是学海撷英。由于本丛书学术性强、信息量大、知识面宽，而笔者的水平局限，疵漏之处在所难免，望读者见谅，不吝赐教。

丛书的编写得到了中国无损检测学会、机械工业出版社的大力支持和帮助，在此一并致谢！

丛书付梓费经年，几度惶然夜不眠。

笔润三秋修正果，欣欣青绿满良田。

是为序。

现代电磁无损检测学术丛书编委会总召集人
中国无损检测学会副理事长

林俊明

丙申秋

前 言

管道运输是国际油气运输的主要方式之一，具有运量大、不受气候和地面其他因素限制、可连续作业以及成本低等优点。自 1865 年美国宾夕法尼亚州建成世界上第一条输油管道至今，管道运输业已有一百多年的历史。随着世界各国对能源需求的增加，长输油气管道的建设呈持续高速发展的趋势，目前全球运行的管道已经超过 350 万公里，如果取赤道周长为 40075.04 公里，那么油气管道可绕地球近 90 圈，其中北美洲管线最密，约为 240 万公里。我国油气管道规模的快速发展，对油气管道完整性体系法规的逐渐健全需求更为迫切；我国在役长距离油气输送管道总长为 4 万余公里，在建和拟建管道长达近万公里。全球每天有近 4000 万桶原油经海上运输通道或石油管道被运往世界各地，如果再算上天然气的运输管道，可以说这些海上通道及陆地管道是世界的“动脉血管”。过去，曼德海峡、霍尔木兹海峡、波斯普鲁斯海峡、马六甲海峡、苏伊士运河、巴拿马运河这六大自然或人工运输通道是“动脉血管”中的关键节点，但随着各国能源需求的增加，六大通道早已超负荷运转，油气管道开始成为“动脉血管”新的组成部分。

管道运输在创造巨大经济效益的同时，层出不穷的管道泄漏等事故也给国家财产、人民生命安全带来了巨大威胁。所以，安全问题自始至终都是油气管道输送行业最为关键、首要解决的问题，它直接影响国民经济运行的稳定性，世界各国对此均极为重视。国际上已有相关立法，明确了应用内检测方法进行管道检测，确定管道的变形、腐蚀、裂纹、缺陷程度，为管道运行、维护、安全评价提供科学依据。我国实施的 SY 6186—2007《石油天然气管道安全规程》中规定，对管道外部一年至少检测一次，由运营单位的专业技术人员进行。对新建管道应在投产后 3 年内进行首次全面检验，以后根据检验报告和管道安全运行状况确定检验周期。长输油气管道漏磁内检测技术在国际上属于垄断技术，被美国 GE-PH 和德国 ROSEN 等公司所垄断，国际上只有少数几家公司掌握该项技术，在国内该技术领域已得到了较广泛的关注，在一些大学和研究机构已开展该技术的研发。本书作者所在的研究团队经过不懈努力，已经突破国外技术封锁，开发了拥有自主知识产权的“长输油气管道漏磁内检测系统”，在大庆油田、吉林油田、新疆油田、四川气田及“西气东输”工程中得到了推广应用，前后共完成近万公里的管道内检测工程，创造了良好的经济效益和社会效益。

本书针对国际油气管道内检测行业关注的前沿问题，系统地介绍了长输油气管道漏磁内检测技术。主要包括管道漏磁内检测基础知识、管道漏磁内

检测系统、管道轴向励磁和周向励磁漏磁内检测技术、管道磁记忆应力内检测技术、漏磁内检测器速度控制技术、管道惯性测绘内检测技术、管道漏磁内检测数据处理方法、管道漏磁内检测缺陷量化方法、管道漏磁内检测工程项目的实施以及基于漏磁内检测的长输油气管道评价技术。希望本书能够为油气管道运营、维护、检测的工程技术人员，以及电磁无损检测相关技术和工程人员提供参考。

本书编写过程中，得到国家自然科学基金委员会的资助，亦获得了中国石油天然气集团公司、中国石油化工集团公司、中国海洋石油总公司和中国特种设备检测研究院等相关单位的支持，书中部分内容来源于作者指导的硕士研究生、博士研究生学位论文。康宜华教授负责全书的审稿工作，并提出了宝贵的修改意见。在此一并表示衷心的感谢！

长输油气管道内检测技术是不断更新的技术，书中难免存在疏漏之处，欢迎读者提出宝贵意见，并可通过电子邮件与作者联系：syuotwenwu@sina.com。

作 者

目 录

序 1	
序 2	
前言	
第 1 章 管道漏磁内检测基础知识	1
1.1 管道基本概念	1
1.2 长输油气管道腐蚀及其防护	1
1.3 管道漏磁内检测技术的发展状况	2
1.4 漏磁检测原理	4
1.4.1 缺陷漏磁场的形成机理	4
1.4.2 缺陷漏磁场的分布	6
1.5 漏磁检测的磁化技术	7
1.5.1 磁化方式	7
1.5.2 磁化强度的选择	7
1.6 漏磁场信号的测量	8
1.6.1 基本要求	8
1.6.2 磁测量元件	9
第 2 章 管道漏磁内检测系统	11
2.1 管道漏磁内检测技术	11
2.2 管道漏磁内检测系统概述	11
2.2.1 管道漏磁内检测系统的基本组成	11
2.2.2 管道漏磁内检测系统的特点	12
2.2.3 管道漏磁内检测装置的要求	13
2.2.4 管道漏磁内检测装置的技术指标	13
2.3 管道漏磁内检测装置机械设计	14
2.3.1 总体机械结构	14
2.3.2 部件功能	14
2.4 检测装置的可靠性工艺	17
2.4.1 装置的密封及耐压工艺	17
2.4.2 检测装置的耐温及耐油工艺	18
2.4.3 消除影响被测磁场分布因素的工艺措施	19
第 3 章 管道轴向励磁漏磁内检测技术	20
3.1 管道轴向励磁方式检测原理	20
3.2 管道轴向励磁漏磁检测信号特征及影响因素	20
3.2.1 漏磁信号特征量的定义与提取	21
3.2.2 缺陷长度对漏磁信号的影响	22
3.2.3 缺陷深度对漏磁信号的影响	24
3.2.4 传感器提离值对漏磁信号的影响	26

3.2.5	磁化器提离值对漏磁信号的影响	28
3.2.6	共同发生提离值对漏磁信号的影响	29
3.2.7	不同类型提离值对漏磁信号的影响	30
3.2.8	焊缝对漏磁信号的影响	31
3.2.9	检测器运行速度对漏磁信号的影响	32
3.3	轴向励磁实验结果及分析	33
3.3.1	不同类型缺陷的对比	33
3.3.2	不同宽度缺陷的对比	35
3.3.3	不同深度缺陷的对比	35
3.3.4	不同长度缺陷的对比	37
3.3.5	螺旋焊缝信号分析	39
第4章	管道周向励磁漏磁内检测技术	41
4.1	管道周向励磁检测方法的检测原理	41
4.2	磁化系统优化设计	42
4.2.1	磁化器结构	42
4.2.2	等效磁回路	44
4.2.3	磁回路计算程序设计	45
4.2.4	永磁体参数	46
4.3	管道周向励磁漏磁检测信号特征及影响因素	48
4.3.1	漏磁信号及其特征量定义	48
4.3.2	缺陷距磁极的距离对漏磁信号的影响	49
4.3.3	缺陷深度对漏磁信号的影响	54
4.3.4	缺陷周向宽度对漏磁信号的影响	56
4.3.5	缺陷轴向长度对漏磁信号的影响	58
4.4	缺陷参数定量化研究	60
4.4.1	多元回归分析理论	61
4.4.2	缺陷宽度的量化	61
4.4.3	缺陷长度的量化	61
4.4.4	缺陷深度的量化	62
第5章	管道磁记忆应力内检测技术	63
5.1	力-磁耦合模型的建立	63
5.2	力-磁耦合关系的计算	64
5.2.1	力-磁耦合关系的计算方法	64
5.2.2	力-磁耦合关系基态特性计算	64
5.2.3	计算结果与讨论	65
5.3	磁记忆效应影响因素的研究	68
5.3.1	掺杂效应的影响	68
5.3.2	晶格畸变的影响	69
5.3.3	外界磁场作用的影响	70
第6章	漏磁内检测器速度控制技术	71
6.1	气体管道的结构特点	71
6.2	内检测器与加速度计	72

6.3 加速度控制系统模型	72
6.3.1 水平直管道中的加速度控制系统模型	72
6.3.2 坡道上升管道中的加速度控制系统模型	74
6.3.3 坡道下降管道中的加速度控制系统模型	75
6.3.4 垂直上升管道中的加速度控制系统模型	75
6.3.5 垂直下降管道中的加速度控制系统模型	76
6.4 控制算法介绍	76
6.4.1 PID 控制	76
6.4.2 模糊逻辑系统的结构	77
6.4.3 T-S 模糊模型	78
6.5 速度控制器设计	79
6.5.1 PI 速度控制器	79
6.5.2 T-S 模糊模型确定 PI 速度控制器的参数	81
6.6 仿真计算	83
第7章 管道惯性测绘内检测技术	84
7.1 管道惯性测绘内检测技术基础	84
7.1.1 惯性技术概述	84
7.1.2 管道惯性测绘技术的发展	86
7.1.3 管道惯性测绘内检测的工程解决方案	87
7.2 管道惯性测绘内检测关键技术	88
7.2.1 参考坐标系及坐标转换方法	88
7.2.2 捷联惯性导航技术	92
7.2.3 捷联惯性导航初始对准算法	99
7.2.4 捷联惯性导航系统的卡尔曼滤波方程	101
7.2.5 捷联惯性导航系统/里程轮组合导航系统的信息融合	109
7.2.6 管道地理坐标的终止点校正算法	111
7.2.7 磁标记在长输管道内检测中的应用	114
7.2.8 IMU 传感器原始数据去噪效果的评价方法	117
7.3 管道惯性测绘内检测典型工程实验	118
7.3.1 实验系统概述	118
7.3.2 典型实验及简要分析	119
第8章 管道漏磁内检测数据处理方法	127
8.1 基于 FPGA 的多通道高速数据采集系统	127
8.1.1 现场可编程逻辑门阵列 (FPGA) 的特点和设计流程	127
8.1.2 基于 FPGA 的多通道高速数据采集系统概述	131
8.1.3 系统硬件设计	132
8.2 数据压缩方法	135
8.2.1 数据压缩方法分析	135
8.2.2 编码的基本理论和实现方法	138
8.2.3 管道漏磁检测数据的检测无损压缩方法	146
8.2.4 压缩算法的 FPGA 实现	152

第 9 章 管道漏磁内检测缺陷量化方法 155

9.1 漏磁内检测中的正问题和反问题 155

9.2 多变量统计分析方法 156

9.2.1 曲线拟合基本理论 156

9.2.2 管道漏磁曲线拟合的 MATLAB 实现 159

9.2.3 共轭梯度迭代法在管道漏磁内检测缺陷量化中的应用 163

9.3 神经网络量化方法 168

9.3.1 BP 神经网络的结构及算法 168

9.3.2 基于 BP 神经网络的缺陷量化 170

9.4 支持向量机量化方法 171

9.4.1 支持向量机基础理论 171

9.4.2 LIBSVM 支持向量机工具 179

9.4.3 支持向量机缺陷量化 179

第 10 章 管道漏磁内检测工程项目的实施 182

10.1 内检测器检测作业 182

10.1.1 检测前的准备工作 182

10.1.2 内检测器现场调试 182

10.1.3 检测器的投放 182

10.1.4 检测器的跟踪 183

10.1.5 检测器的接收 184

10.1.6 检测器的检查和维修 184

10.2 检测数据预处理 184

10.2.1 检测数据备份与分析 184

10.2.2 检测数据预处理 185

10.3 检测数据的分析与判读 185

10.3.1 管道连接焊缝的判别 185

10.3.2 管道缺陷补疤的判别 186

10.3.3 管道缺陷的判别 187

10.4 缺陷所在位置的确定 187

10.5 开挖验证 188

第 11 章 基于漏磁内检测的长输油气管道评价技术 190

11.1 长输油气管道评价技术 190

11.2 管道完整性评价标准 192

11.2.1 ASME B31G 标准 192

11.2.2 RSTRENG 标准 195

11.2.3 DNV RP - F101 标准 197

11.2.4 评价管道完整性的主要参数 201

11.2.5 腐蚀缺陷的修复时限 202

11.2.6 管道维护维修方法 202

11.3 管道完整性评价软件 204

11.3.1 管道完整性评价软件简介 205

11.3.2 逐点分析评价 206

11.3.3 漏磁缺陷表导入评价	213
11.4 腐蚀缺陷参数对评价标准的影响	217
11.4.1 不同评价标准的评价结果	217
11.4.2 腐蚀缺陷长度对安全运行压力的影响	220
11.4.3 腐蚀缺陷深度对安全运行压力的影响	223
11.5 有限元仿真方法	225
11.5.1 管道失效判定准则	225
11.5.2 基于 ANSYS 的有限元仿真	226
11.5.3 腐蚀缺陷参数对等效应力的影响	228
11.6 评价标准与有限元仿真对比分析	236
11.6.1 不同长度腐蚀缺陷评价结果对比分析	237
11.6.2 不同深度腐蚀缺陷评价结果对比分析	237
11.6.3 不同宽度腐蚀缺陷评价结果对比分析	238
11.6.4 不同位置腐蚀缺陷评价结果对比分析	239
参考文献	241

第 1 章 管道漏磁内检测基础知识

1.1 管道基本概念

1. 管道定义

管道：用管子、管子连接件和阀门等连接而成的用于输送气体、液体或带固体颗粒的流体的装置。

压力管道：利用一定的压力，用于输送气体或者液体的管状设备，其输送介质范围规定为最高工作压力大于或等于 0.1MPa（表压）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等于标准沸点的液体介质，且管道公称直径大于 $\phi 25\text{mm}$ 。

长输管道：产地、储存库、使用单位间的用于输送油、气介质的管道（输送距离一般大于 50km）。具体讲就是跨越地、市输送商品介质的管道和跨越省、自治区、直辖市输送商品介质的管道。

2. 管道的基本术语

管件：弯头、弯管、三通、异径接头和管封头等管道上各种异形连接件的统称。

弯头：曲率半径小于 4 倍公称直径的弯曲管段。

冷弯管：在不加热条件下，用模具（或夹具）将管子弯制成需要角度的弯管。

管道附件：管件、法兰、阀门及其组合件、绝缘法兰、绝缘接头等管道专用部件的统称。

热煨弯管：在加热条件下，在夹具上将管子弯曲成需要角度的弯管。

1.2 长输油气管道腐蚀及其防护

1. 腐蚀的危害

腐蚀是影响管道系统可靠性和使用寿命的关键因素，腐蚀破坏引起的恶性突发事件，往往造成巨大的经济损失和严重的社会后果。据美国国家运输安全局统计，美国 45% 的管道损坏是由钢管外壁腐蚀引起的。1981—1987 年的苏联输油管道事故统计表明，总长 24 万 km 的管线上曾发生事故 1210 起，其中外部腐蚀造成的事故有 517 起，占事故总数 42.7%；内部腐蚀造成的事故有 29 起，占事故总数 2.4%；因施工质量问题造成的事故有 280 起，占事故总数 23.2%。相关资料也表明，在美国管道事故中首要原因是外部腐蚀，比例高达 59%；其次是第三者破坏，约占 20%。我国的地下油气管道投产 1~2 年后即发生腐蚀穿孔的情况也屡见不鲜，这不仅造成因穿孔引起的油、气、水泄漏损失，而且还可能因腐蚀造成火灾。特别是输气管道因腐蚀引起的爆炸，威胁人身安全，污染环境，后果极其严重。

2. 长输油气管道缺陷

管道易出现的缺陷主要为原有缺陷和新增缺陷两大类。原有缺陷主要表现在主环焊缝未超标的气孔、夹渣等，新增缺陷主要为内外表面腐蚀、撞伤、划伤和裂纹等。

缺陷通常可分为体积型缺陷、平面型缺陷、弥散损伤缺陷、几何缺陷和机械损伤缺陷五大类。五大类缺陷的主要表现形式见表 1-1。

表 1-1 管道缺陷的主要表现形式

缺陷类型	缺陷表现形式
体积型缺陷	缺陷打磨造成的局部减薄、沟槽状和片状腐蚀缺陷等
平面型缺陷	未熔合、未焊透、焊接裂纹、疲劳裂纹、应力腐蚀裂纹等
弥散损伤缺陷	点腐蚀、氢鼓泡、氢致微裂纹等
几何缺陷	焊缝“掀嘴”、错边、管体不圆、壁厚不均匀等
机械损伤缺陷	凹坑、沟槽、凹坑 + 沟槽

3. 防护

当前埋地钢质管道的防腐蚀系统采用防腐涂层和阴极保护联合防护形式。具体实施是将防腐材料均匀致密地涂敷在已经除锈的管道外表上，使其与腐蚀介质隔离，形成防腐绝缘层，亦称防腐涂层；同时，以某种方式在被保护金属构件上施以足够的阴极电流，通过阴极极化使金属电位负偏移，从而使发生金属腐蚀的阳极溶解速度大幅度减小，甚至完全停止。防腐涂层使腐蚀电池回路电阻增大，或使金属表面保持钝化的状态，或使金属与外部介质剥离出来，从而减缓金属的腐蚀速度。防腐涂层应具有较好的耐蚀性、较好的防渗性、较好的附着力和柔韧性；但由于其本身的微孔、老化，往往也会出现龟裂、剥离，因而在施工过程中难免会产生机械损伤，这些因素都会使防腐涂层的寿命大大缩短。因此，裸露部分的金属与带防腐涂层部分的金属形成小阳极和大阴极的局部电池，会导致金属的腐蚀。而采用阴极保护和防腐涂层联合防腐蚀，则裸露部分得到阴极保护，这就弥补了防腐层的上述缺陷。对埋地管线的阴极保护通常分为牺牲阳极保护法和强制电流保护法两种形式。牺牲阳极保护是采用具有较负电位的金属阳极与被保护管道实行连接；强制电流保护法又称外加电流法，是使用外部电流为被保护管道提供负电流的方法。

4. 漏磁内检测方法

针对管道内检测的技术主要有压电超声检测法、电磁超声检测法以及漏磁检测法等。其中，压电超声检测法精度高，但检测期间需要耦合剂，对工作环境要求高；电磁超声检测技术是利用电磁耦合方法，不需要耦合介质，可用于石油、天然气管道检测，但其换能效率低、受噪声干扰严重。漏磁检测技术可检测出油气管道金属损失缺陷，准确识别出管道全线各种特征及管道历史修复记录，对管道裂纹异常具有一定的检出能力。相对于其他检测技术，漏磁检测技术不需要耦合剂，受外界干扰小，检测速度快，对体积型缺陷十分敏感，能够解决由于腐蚀引起的管道失效，更适合大面积、长距离的管道的快速检测，是目前国内外应用最为普遍的管道内检测技术。

1.3 管道漏磁内检测技术的发展状况

20 世纪 90 年代，美国研究学者 P. Ramuhalli, L. Udpa, SS. Udpa 等人深入地研究了漏

磁检测技术在石油、天然气管道检测方面的理论和工程的相关问题。美国爱荷华州立大学(Iowa State University)的SunhoY.等人对影响漏磁场和漏磁信号的因素进行了研究,得到了关于漏磁场的矢量偏微分方程。Afzal M.成功地进行了直流励磁的表面裂纹三维尺寸评估的理论计算和实验部分的工作。Wilson J. W. 和 Tian G Y 利用了一个高灵敏度的三维磁场传感器,改善了目前漏磁系统的性能缺陷问题。

目前国际上在漏磁内检测技术研究工作方面走在前列的有美国、英国、德国、加拿大等。1965年,美国Tuboscope公司研制出了Linalog漏磁通型内检测器并且投入使用,尽管在当时这种内检测器还只能用于定性检测,但对管道检测研究做出了巨大的贡献,具有划时代的意义。1977年,英国研制出了 $\phi 600\text{mm}$ 管道漏磁内检测设备,并且利用该设备对其管辖的天然气管道进行了在役检测,第一次采用定量分析方法对管道材料的特性及失效机理进行了分析。20世纪80年代后,发达国家都相继投入了大量人力和经费在这方面开展研究。目前,国外较有名的漏磁内检测公司有美国的Tuboscope公司、英国的British Gas公司、美国的GE-P II公司及德国ROSEN公司等,其生产的产品已经基本达到了系列化和多样化,完全具备向用户提供检测服务和系列检测设备的能力。漏磁内检测装置可以有效地检测腐蚀刨槽、腐蚀凹坑、金属缺失和孔缺陷,其独特的磁化器和传感器设计确保较高的检测灵敏度和准确性,可有效维护管道的完整性。

在国内,清华大学、华中科技大学、上海交通大学、天津大学、沈阳工业大学、合肥工业大学等高等院校的学者对漏磁无损检测进行了深入的、广泛的研究,目前已经在漏磁检测机理、数据处理、系统构成、算法和部分环境的应用方面展开研究并取得了一系列的成果。

管道漏磁内检测技术的应用在我国起步比较晚,从20世纪90年代开始,中国石油天然气管道局(以下简称管道局)和原四川石油管理局一同将国外漏磁内检测技术引入国内,进行工程化应用。1994年,管道局从美国Vetco公司引进 $\phi 273\text{mm}$ 型和 $\phi 529\text{mm}$ 型管道漏磁腐蚀和变形内检测器。使用 $\phi 273\text{mm}$ 型内检测器在国内完成了阿塞线360km、新疆北火三线130km及青海花格线430km等管道的腐蚀及变形检测。使用 $\phi 529\text{mm}$ 型内检测器完成了秦京线360km和新疆克乌线295km等管道的腐蚀及变形检测。1997年从美国Tuboscope公司引进 $\phi 720\text{mm}$ 型管道漏磁内检测器,并利用其在国内完成了鲁宁线、东北管网等管道的腐蚀检测,在国外完成了苏丹1500km管道的腐蚀检测。检测发现,由于历史原因,国内的在役老油气管道在设计、建设时,没有考虑管道的在线检测问题,管径、弯头规格多样且不规范,国外的检测器不完全适用于我国的在役老管道缺陷检测。中国石油天然气管道局管道技术公司于1998年合作研制出了 $\phi 377\text{mm}$ 型管道漏磁内检测器,可在线检测出管道内外腐蚀的程度和位置,以及管道的机械损伤、材质缺陷,对防止原油泄漏、保障管道正常输送具有重要意义。近年来,管道局又开发研制了大量不同口径的漏磁内检测设备,实现了 $\phi 273 \sim \phi 720\text{mm}$ 所有口径管道检测器的系列化。中国石油天然气管道局管道技术公司与英国Advantica公司合作,研制出适用于输气管道检测的 $\phi 660\text{mm}$ 型管道漏磁检器,并成功应用于陕京一线管道的全线检测。2005年两个公司合作研制的 $\phi 1016\text{mm}$ 型高清晰度管道漏磁检测器已投入工业现场应用,其运行指标为:探头间距6.9mm,探头数量800个,检测距离350km,检测壁厚 $\leq 32\text{mm}$,最大压力14MPa,检测速度0.5~7m/s,运行温度 $-10 \sim +70^{\circ}\text{C}$,最小孔径 $\phi 859\text{mm}$,最小弯头1.5D;其精度指标为:最小缺陷深度(5%~10%)壁厚,测量精度 $\pm 10\%$ 壁厚,距最近参考点的轴向定位精度 $\pm 0.1\%$,周向定位精度 $\pm 5^{\circ}$,可信度水平

>80%。

2000 年,沈阳工业大学杨理践教授领导的课题组与新疆三叶管道技术有限责任公司合作,开展了“高精度管道漏磁在线检测系统”项目的研究,解决了管道内检测技术的大量基础技术问题和理论问题,提出了漏磁检测技术的实现方法,研制成功了 $\phi 377\text{mm}$ 型管道内检测设备样机,并利用其进行管道工程检测,完成管道缺陷、管壁几何结构变化、管壁材质变化、缺陷内外分辨、管道特征分辨(管箍、补疤、弯头、焊缝、三通等)的检测,提供了缺陷面积、深度、方向、位置等较为全面的信息。该项目的完成使我国具有了自主知识产权的高精度管道漏磁在线检测智能系统,从此我国长距离油气输送管道等的安全检测不再受制于人。2004 年开展高精度管道漏磁在线检测系统的研制,研究成功 $\phi 273\text{mm}$ 型、 $\phi 325\text{mm}$ 型、 $\phi 425\text{mm}$ 型、 $\phi 529\text{mm}$ 型等管道内检测设备,这些检测设备近年来已完成近 4000km 管道的工程检测。该项目的成功完成,填补了国内空白,很好地推进了国内长输油气管道内检测技术的发展和运用。目前,我国已拥有具有独立知识产权的智能 PIG,成为国际上进行智能 PIG 研究、制造、服务的少数国家之一。2007 年为中国石油化工股份有限公司成功研制的 $\phi 720\text{mm}$ 型长输管道漏磁内检测器,可实现管道缺陷壁厚探伤分辨率达 0.01T、精度达 0.05T (T 为管道壁厚)。

1.4 漏磁检测原理

1.4.1 缺陷漏磁场的形成机理

漏磁检测法是建立在铁磁性材料高磁导率特性基础上的。铁磁性材料被外加磁场磁化后,若材料的材质是连续、均匀的,则材料中的磁力线将被约束在材料中,磁通是平行于材料表面的,几乎没有磁力线从被检表面穿出,即被检表面没有磁场。但当材料中存在着切割磁力线的缺陷时,由于缺陷的磁导率很小,磁阻很大,磁力线将会改变途径,这种磁通的泄漏同时使缺陷两侧部位产生磁极化,形成所谓的漏磁场。漏磁检测法就是通过测量被磁化的铁磁性材料表面泄漏的磁场强度来判定缺陷大小的。

漏磁现象可以用缺陷附近磁导率 μ 和磁感应强度 B 的变化来解释。铁磁性材料的磁化强度和泄漏的磁力线强弱直接相关,在外磁场作用下,铁磁性材料的磁感应强度 B 与磁场强度 H 关系为 $B=\mu H$,由于材料磁导率 μ 是一个随磁场强度 H 变化的量,所以 B 随 H 变化并不是一个线性关系,而呈现出一个非线性变化的磁特性曲线。铁磁性材料的典型磁特性曲线如图 1-1 所示。

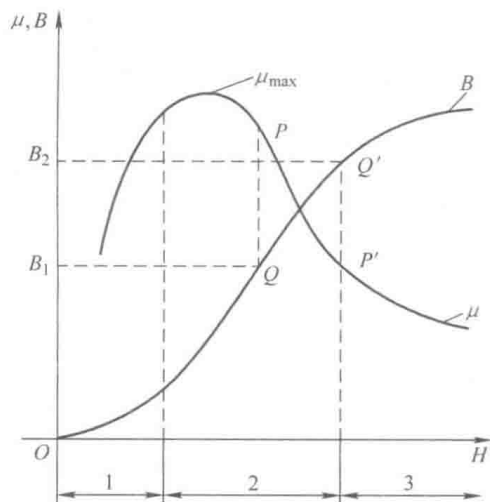


图 1-1 铁磁性材料的磁特性曲线

铁磁性材料被永磁体或励磁线圈磁化时遵循该曲线所示的磁化规律。通常磁特性曲线分成三个区域。

第 1 区域： B 随 H 的增加而上升的速率缓慢，曲线平缓。