

数字化

磁性无损检测技术

SHU ZI HUA CI XING

WU SUN JIAN CE JI SHU

康宜华 武新军 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

数字化磁性无损检测技术

康宜华 武新军 著



机械工业出版社

本书系统论述了数字化磁性无损检测的基本方法和应用技术,主要包括检测探头设计、检测信号的计算机辅助分析处理、退磁、横向缺陷检测方法、纵向缺陷检测方法、管壁厚和金属截面积检测、自动化机械化检测技术等几个方面的内容,共8章。前3章论述了磁性无损检测的共性问题,如磁化、磁场信号测量、退磁方法等,后几章则针对不同的检测对象,如录井钢丝、抽油杆、油管、钢管、钢棒等,逐步深入阐述磁性检测方法的具体应用。

本书的内容是作者近10年来理论和应用研究成果的总结。本书可供电磁无损检测相关技术和应用人员参考,也可作为无损检测人员的资格培训和高等院校相关专业的参考教材,书中有关数字化和机械化无损检测方面的内容亦可被其他无损检测开发人员借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

数字化磁性无损检测技术/康宜华,武新军著. —北京:机械工业出版社, 2006.10

ISBN 7-111-20150-7

I. 数... II. ①康...②武... III. 数字技术—应用—无损检验—磁性检验 IV. TG115.28-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第124720号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:蔡开颖 版式设计:张世琴 责任校对:申春香

封面设计:马精明 责任印制:李妍

北京中兴印刷有限公司印刷

2007年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·11印张·270千字

定价:20.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

编辑热线电话(010)88379711

封面无防伪标均为盗版

前 言

磁性无损检测方法对铁磁性构件检测见长,它与传统的磁粉检测有着共同的理论基础,但又不局限于漏磁检测方法;与涡流检测有着相通的技术基础,但又产生不同的信号特征;它是以恒定磁场激励为基础、以磁敏感检测探头为核心、以计算机技术为先导的一类无损检测技术。数字化磁性无损检测的显著特点是:以计算机技术为主的数字化,包括缺陷的自动显示和报警、信号存储和回放、信号重构和反演等;以机械化检测和现代控制技术为基础的自动化,包括检测动作的机械化、检测流程的自动化和检测系统的网络化等。这些特点使得磁性无损检测方法蕴含了区别于众多无损检测方法的不同内容,因而可以成为独立的检测方法和技术。

本书介绍数字化磁性无损检测的基本方法和应用技术,主要包括检测探头设计、检测信号的计算机辅助分析处理、退磁、横向缺陷检测方法、纵向缺陷检测方法、管壁厚和金属截面积检测、自动化机械化检测技术等几个方面。本着由浅入深的原则,上述几个方面的内容分布在全书的8章中,前3章为基础和共性的内容,更深入的论述安排在后几章的具体事例应用中。各章节的侧重点如下:

章 节	探头设计	信号分析处理	退磁	横向缺陷检测	纵向缺陷检测	壁厚和截面积检测	自动化机械化检测
第1章 磁性无损检测传感器设计基础	✓						
第2章 数字化磁电信号处理技术		✓					
第3章 细长导磁构件的直流退磁			✓				
第4章 录井钢丝裂纹定量检测技术		✓		✓			
第5章 抽油杆无损检测的方法与技术	✓	✓		✓			✓
第6章 油管无损检测的方法与技术	✓			✓	✓	✓	✓
第7章 钢管高速漏磁检测方法		✓			✓	✓	✓
第8章 钢棒纵向裂纹检测方法	✓				✓		

本书的内容是作者近10年来在磁性无损检测方面不断研究和实践工作的总结,书中大部分内容来源于作者指导的硕士和博士研究生的学位论文,这些学生是金建华、张松、邹应国、徐江、张华明、程顺峰、张武翔、吴义峰、周奇等,全书由康宜华、武新军编写。在相关技术的实施中,得到华中理工大学机电工程公司的大力支持;本研究项目能够在实践中不断改进和完善,还得益于国内各油田的领导和工程技术人员的大力协助,在此表示衷心感谢!本书的作者和研究工作得到了杨叔子院士的长期关心,在此表示由衷的感谢!

在国外,磁性无损检测技术研究较早,有些技术至今仍垄断着国内的市场。随着国内需求的增长,我国的研究工作越来越得到重视,研究队伍不断壮大,研究内容不断丰富,工业应用也越为广泛,希望本书的出版能为广大的研究开发人员和工程技术人员提供参考;在无损检测的机械化方面,也希望给其他无损检测方法提供借鉴。本书仅是我们众多研究成果的一部分,内容上还很不全面,错误和不妥之处难免,敬请读者批评指正。

作 者
于华中科技大学

目 录

前言

第1章 磁性无损检测传感器

设计基础 1

- 1.1 磁性无损检测新技术的分类和应用 1
 - 1.1.1 按磁场信号形成的分类 1
 - 1.1.2 按磁场信号测量的分类 2
 - 1.1.3 按磁电信号的解释形式分类 4
 - 1.1.4 磁性无损检测的应用 5
- 1.2 铁磁性构件的磁化技术 5
 - 1.2.1 磁化方式 5
 - 1.2.2 磁化强度的选择 6
 - 1.2.3 永磁励磁磁路分析 8
 - 1.2.4 线圈励磁磁路分析 9
- 1.3 磁信号测量技术 13
 - 1.3.1 磁场信号测量的基本要求 13
 - 1.3.2 磁场测量的原理和元件 14
 - 1.3.3 磁场的测量方法 16
 - 1.3.4 磁测量探头设计 18
- 1.4 本章小结 18

第2章 数字化磁电信号

处理技术 19

- 2.1 磁电信号预处理技术 19
- 2.2 磁电信号的时空域采样方法 22
- 2.3 便携式数据采集器 23
 - 2.3.1 基于串行口的数据采集卡 23
 - 2.3.2 基于并行口的数据采集卡 25
 - 2.3.3 基于USB的数据采集卡 28
- 2.4 磁电数字信号处理技术 30

- 2.4.1 信号的频域数字滤波 30
- 2.4.2 基于小波分析的漏磁检测信号提取 33
- 2.4.3 波形信号特征量分析 38
- 2.4.4 磁电信号的定量解释 39
- 2.5 本章小结 40

第3章 细长导磁构件的

直流退磁 41

- 3.1 退磁方法概述 41
 - 3.1.1 居里点热退磁方法 41
 - 3.1.2 电磁退磁方法 41
- 3.2 退磁的相关规范 43
- 3.3 退磁方法及过程 43
 - 3.3.1 离散化分析方法 43
 - 3.3.2 离散化分析方法在钢管退磁过程中的应用 44
- 3.4 应用实例 45
- 3.5 本章小结 47

第4章 录井钢丝裂纹定量

检测技术 48

- 4.1 钢丝的涡流检测 48
- 4.2 裂纹漏磁定量检测的试验研究 49
 - 4.2.1 裂纹漏磁场的试验分析 49
 - 4.2.2 漏磁定量检测的误差来源 55
- 4.3 录井钢丝裂纹定量检测原理 56
 - 4.3.1 钢丝裂纹漏磁场的计算 56
 - 4.3.2 录井钢丝裂纹定量检测的试验分析 58
 - 4.3.3 录井钢丝裂纹定量检测方法 60
- 4.4 录井钢丝裂纹定量检测传感器的设计 61

4.4.1 检测元件提高距离对裂纹 检测信号的影响	61	5.6 本章小结	97
4.4.2 结构方案比较	62	第6章 油管无损检测的 方法与技术	98
4.5 录井钢丝裂纹定量 检测系统	63	6.1 油管的主要缺陷形式	99
4.5.1 系统组成	63	6.1.1 横向缺陷	99
4.5.2 裂纹检测信号的定量 识别策略	64	6.1.2 纵向缺陷	102
4.5.3 探伤试验及定量检测系统 的性能指标	69	6.1.3 其他形式的缺陷	103
4.6 本章小结	70	6.2 磁性无损检测实施方案	103
第5章 抽油杆无损检测 的方法与技术	71	6.3 油管纵横向缺陷检测 探头的设计	107
5.1 缺陷形式及检测方案	71	6.3.1 横向检测单元结构设计	107
5.1.1 结构及服役条件	71	6.3.2 纵向检测单元结构设计	110
5.1.2 主要缺陷形式	72	6.4 油管剩余壁厚测量方法	113
5.1.3 检测方案	74	6.5 井口油管检测仪	115
5.2 井口检测仪	75	6.5.1 仪器构成	115
5.2.1 井口检测的要求	75	6.5.2 井口油管检测仪实验室 测试	115
5.2.2 井口检测装置	76	6.5.3 井口油管检测仪的应用	116
5.2.3 井口检测信号处理系统	76	6.5.4 井口检测的局限性	122
5.2.4 井口检测仪试验测试	77	6.6 室内油管纵、横向缺陷 检测系统	122
5.2.5 现场应用	77	6.6.1 检测系统的结构	122
5.3 杆体检测方法	80	6.6.2 检测系统的检测流程	124
5.3.1 直流线圈磁化器设计	80	6.6.3 现场应用	125
5.3.2 基于线圈磁化的杆体检测 探头设计	81	6.7 多规格油管自动 检测系统	127
5.3.3 试验分析	82	6.7.1 检测探头的工作原理	127
5.4 杆端过渡区检测方法	84	6.7.2 自动检测系统的构成	128
5.4.1 杆体检测时盲区的形成	85	6.8 撬装式油管纵横缺陷 检测系统	130
5.4.2 杆端过渡区检测探头 设计	85	6.8.1 纵横局部缺陷检测 探头设计	130
5.4.3 杆端过渡区检测性能 测试	87	6.8.2 系统设计	132
5.4.4 杆端过渡区检测信号的 分析和处理	88	6.8.3 检测结果及讨论	132
5.5 无盲区检测系统设计	89	6.9 本章小结	137
5.5.1 检测总成设计	90	第7章 钢管高速漏磁检测方法	138
5.5.2 辅助机构设计	91	7.1 国内外研究概况	138
5.5.3 自动控制系统设计	92	7.1.1 钢管在线检测方法	138
5.5.4 现场应用	93	7.1.2 钢管电磁检测标准	140

7.2 大口径钢管检测的典型	
工厂条件	141
7.3 高速漏磁检测工艺设计	144
7.4 关键部件的结构设计	146
7.4.1 横向检测系统的设计	146
7.4.2 纵向检测系统的设计	147
7.4.3 信号处理和控制系统	149
7.4.4 标定系统	150
7.4.5 主要技术指标和生产	
能力	150
7.5 本章小结	151
第8章 钢棒纵向裂纹检测	
方法	153

8.1 缺陷特征分析	153
8.2 检测系统方案设计	153
8.2.1 检测系统总体布置设计	153
8.2.2 不同磁化方式的试验	154
8.3 钢棒裂纹的点磁源	
检测方法	163
8.3.1 点磁源检测原理	163
8.3.2 基于点磁源方法的纵向裂纹	
检测装置设计	165
8.4 本章小结	167
参考文献	168

第 1 章 磁性无损检测传感器设计基础

1.1 磁性无损检测新技术的分类和应用

常规无损检测方法依次有超声检测、射线检测、涡流检测、磁粉检测、渗透检测、声发射检测和红外检测。另外,在一些检测中人们研究和应用了其他的检测方法,如光声检测、光电检测、光热检测、磁电检测、磁声检测、磁应力检测、微波检测等。随着工业应用的需要,新的检测方法和原理将不断涌现,并得到深入的研究。

磁性无损检测或磁性检测通过测量特征磁场对铁磁性原材料、半成品、成品零部件、在用零部件的结构、几何状态、物理性能、化学成分等进行测定,或对设备构件间几何关系、运动特征等进行测量。这一检测的主要依据是,裂纹或其他缺陷以及内应力等因素对铁磁性材料(钢、铁和其他铁合金)的内禀性质或磁化状态有影响。由于磁性的变化易于非接触检测和实现在线实时检测,磁性检测的应用越来越广泛,磁粉检测就是这一检测方法的典型应用。随着磁性材料、磁敏检测元件、检测信号处理技术、磁效应(现象)以及计算机技术的应用,当采用磁测量探头测量磁场特性时,便形成一类有别于磁粉检测的新技术,在此称为磁性无损检测新技术。

磁性检测方法以磁场为媒介将被测物理量或状态转换为可测量的磁场信号,再由磁电转换器件或传感器转换成对应的电信号,然后进行需要的分析处理。磁性检测方法主要指对材料磁特性和磁路磁特性进行检测、测量或评估的一类方法,是一类测磁无损检测方法。像磁巴克豪生效应、磁声发射、磁致伸缩、磁感生声速变化以及磁与电、光、热的耦合效应(磁场电效应、磁光效应、磁致热效应等)的应用而形成的检测方法则不在本方法的范畴内。因此,形成磁场信号和测量磁场信号是这一检测技术的两个基本部分,分析处理电信号是这一检测技术的核心,而新材料、新元件、新原理和基本计算机的信息处理技术的综合应用是这一新技术的显著特点。

下面将探讨磁性无损检测新技术的分类,并对各种检测方法进行论述。

1.1.1 按磁场信号形成的分类

从磁场信号的形成来看,磁性检测可分为剩余磁场检测法、有源磁场检测法和金属磁记忆检测法。

1. 剩余磁场检测法

由于铁磁性材料均具有一定的矫顽力,当采用直流磁场对它们进行磁化,磁化磁场源退出后,材料中会留有剩余磁场,剩余磁场检测法就是对剩余磁场形成的磁场信号进行检测。由于剩余磁场强度一般较微弱,剩余磁场检测法要求高灵敏度的磁电转换器件来测量磁场信号。它的检测过程分为三步,第一步磁化被测材料或零部件;第二步测量磁场信号;第三步,需要的话,给被测对象退磁。上述三步工作一般分开进行。

2. 有源磁场检测法

有源磁场检测法将被测对象的磁化和磁场信号的测量合于一体,通过磁源磁化被测对象产生磁场信号,并同时测量这一信号。因此,有源磁场检测法主要由两部分组成,一部分为磁化铁磁性材料的磁化装置,称为磁化器;另一部分为磁场信号的测量装置,称为检测探头或探头组。根据励磁器中磁源的不同,励磁器可采用交变磁场磁化方式和恒定磁场磁化方式,其中恒定磁场源有直流有源磁源(如直流电磁铁)和永久磁铁两种。由于集肤效应,交变磁场磁化时磁力线将集中于被测材料的表层,因而对材料表面或近表面的状态具有较高的检测灵敏度,深层状态则不能检测。使用中,交变磁场的频率通常在几千赫兹以内,频率越低,磁场的穿透能力越强,被检测的深度也就越深。交变磁场磁化后铁磁性材料中不会产生剩磁,所以,检测后材料不需要退磁处理。恒定磁场磁化时,内、外部状态的可检测性与磁化场强度直接相关,磁场越强,磁场信号相应增强,至饱和磁化后趋于恒定。有些检测场合,材料被检测后要求退磁处理。

3. 金属磁记忆检测法

金属磁记忆检测法是近年来发展起来的一种新的检测方法。金属材料在受到内部应力作用时会自身产生磁场而被纪录于本体中,通过测量这一磁场可以评价材料的力学性能,如疲劳强度、应力大小等,从而对被测材料的物理特性而非几何特征进行探测。金属材料不同,其产生磁场和记忆磁场的程度也不一样,一般来讲,铁磁性构件的这一现象更明显,因而应用相对广泛。

金属磁记忆检测中磁场的强度非常弱,通常小于地磁场的强度,因而磁场测量上必须采取一些特殊的措施以排除地磁的影响。

1.1.2 按磁场信号测量的分类

从磁场信号的测量来看,磁性检测可分为漏磁场检测法、主磁通检测法、磁阻检测法、磁导率检测法。

1. 漏磁场检测法

漏磁场检测法是通过测量被测对象本体外的磁场,一般是磁感应强度及其分布(二维的或三维的),来探测和评价被测对象内的裂纹、锈蚀、气孔等缺陷状况以及被测物体的几何形状、位置关系等。采用有源磁场检测法时,被测磁场往往是由磁回路各组成单元本体中向外泄漏的磁场,因而将之称为漏磁场测量。当用磁化器磁化被检测材料时,材料表面出现的裂纹或坑点等使得局部区域中的磁导降低、磁阻增加,磁化磁场将会有一小部分从材料裂纹或坑点处外泄出来,形成可检测的磁场信号。采用磁敏感探头随励磁器同步运动并扫描裂纹区域可获得有缺陷的电信号。当材料中的磁力线遇到铁磁体中的间断时,将会发生聚集或畸变,这一畸变扩散到材料本身之外即可形成可被检测的磁场信号。当直接测量磁源本身向外扩散的磁场时,可以确定磁源的位置及运动关系,从而可用来测量物体位置或运动状态,磁性编码器即为这一方法的典型应用。

漏磁场检测法检测时,对应于缺陷等的磁场信号的产生由磁化器决定,铁磁性材料被磁化的强度与磁场信号的大小、分布有着直接的关系,并影响着检测时的缺陷可检测性、分辨能力、灵敏度、信噪比等,磁化器的磁化方式、方向、强度等的选择非常重要。漏磁场信号的测量和分析处理可以采用多种方法,如磁粉检测法、录磁检测法、橡胶铸型检测法、感应

线圈检测法、霍尔效应检测法、磁通门检测法等，主要是选择适用、方便、简洁、高灵敏度、高分辨力的磁测量方法。因此，针对测量方法的不同，漏磁场检测法又可分为多种方法。

2. 主磁通检测法

主磁通检测法是通过测量被测对象本体内的磁通来探测被测对象内的气孔、结构变化、锈蚀、几何形状等。由于被测物体内的磁场强度及分布在其体外难以测量，一般只能在体外测量其中的磁通。磁通的测量可以采用直接测量法和间接测量法。直接测量法在被测铁磁性材料外进行，由于材料的连续性，一般采用感应线圈，如图 1-1 所示。当采用恒定磁场磁化被测材料时，感应线圈只能测量材料横截面上磁通的相对变化量；当采用交变磁场时，感应线圈可测量对应的交变磁通的变动量，所以可以获得磁通变化幅度的绝对量值。当被测材料金属横截面积发生变化，或者因缺陷等引起金属横截面积损失时，横截面中的磁通将发生变化，所以，主磁通检测法适合于检测铁磁性金属截面积的变化，这一变化可由材料结构、几何形状等产生，亦可由材料中裂纹、气孔、锈蚀等引起。

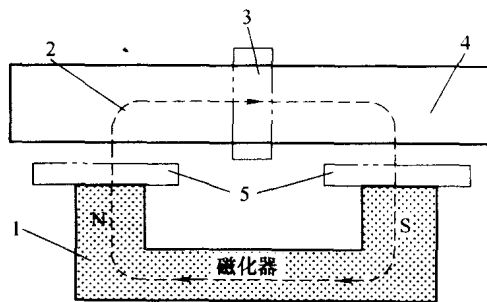


图 1-1 主磁通测量方法

1—磁化器 2—主磁通 3—直接测量单元
4—被测对象 5—间接测量单元

根据电磁场计算理论，被测材料横截面中的磁通为

$$\Phi_t = B_t \cdot A_t \quad (1-1)$$

式中， B_t 为材料中的磁感应强度； A_t 为材料的金属截面积。

因此，若 B_t 恒定不变，则磁通 Φ_t 是 A_t 的线性函数，所以，这种检测方法一般要求将被测铁磁性材料磁化至饱和或者深度磁饱和，以减少截面积等变化时，材料中磁感应强度的波动。

磁通的间隙测量法通过在被测对象构成的磁回路体以外设置测量探头实现。磁化器通过被测材料构成磁回路，若在包括被测材料的这一磁路上安置测量探头，则可以测得进入材料中的磁通。由于测量探头只能安装于磁回路中的空气间隙中，所以称这一测量法为间隙磁通测量法。一般在磁化器与被测材料间构成的气隙内安装测量探头，测得材料中磁通的近似值，如图 1-1 所示。

磁回路中气隙内的磁通 Φ_a 为

$$\Phi_a = B_a \cdot A_a \quad (1-2)$$

式中， B_a 为空气隙内的磁感应强度； A_a 为空气隙磁路横截面积，即测量面积。

与直接磁通测量法不同，间隙磁通测量法中 A_a 为已知且恒定，而在测量截面上 B_a 非均匀，因此，为了较为精确测定进入被测材料中的磁通， A_a 要足够大，以便尽可能地收集空气隙磁路上的分散磁通。由于在此处可以安装感应线圈或磁敏元件，所以不论励磁磁场如何，均可以测量磁通的相对变化量和绝对量。

另外，在励磁磁路中增设测量磁路也可实现材料中绝对磁通测量，称为辅助磁路测量法。如图 1-2 所示，在励磁源上并联一测量磁路，在测量磁路上安置探头，测量该磁回路中

的磁通。当通过磁路设计,使得两侧的漏磁磁通相对较小而可忽略不计时,有

$$\Phi_t \approx \Phi_s - \Phi_l \quad (1-3)$$

式中, Φ_s 为源磁场提供的磁通; Φ_t 为测量磁路内的磁通; Φ_l 为测量磁极间的磁通。

于是,测量出 Φ_s 和 Φ_l 可计算出被测对象中的磁通。

主磁通检测法基于磁路来进行测量,其关键在于相关磁通的测定上。由于构成磁路的磁源(如永久磁铁)、导磁连接体、被测材料等的磁特性均呈非线性,且磁场的分布受到多种因素的影响,因此,对测量磁场的准确评定也是主磁通检测法较难解决的问题之一。

3. 磁阻检测法

磁阻检测法通过测量磁路中局部区域磁阻的变化来进行检测,磁阻的变化可能由磁路中的空气间隙、铁磁性材料特性、磁源特性等变化产生。磁阻的测量一般通过测量磁感应强度后计算得到。由于磁源的磁特性曲线一般为非线性曲线,加上磁路中其他磁阻的影响以及难以精确计算磁阻等因素,磁阻测量的误差较大。但对小范围内的磁阻变动,通过精确测定磁感应强度,可以获得较高的测量精度和线性度。

4. 磁导率检测法

磁导率检测法通过测量被测材料的磁导率来检测其疲劳、材料、锈蚀、残余应力等。根据材料的磁特性,当材料成分、疲劳状况、残余应力、锈蚀等变化时,材料自身的磁导率随之变化,因此,测定磁导率可实现材料的分选以及疲劳、寿命、残余应力状况和锈蚀程度等的测量。

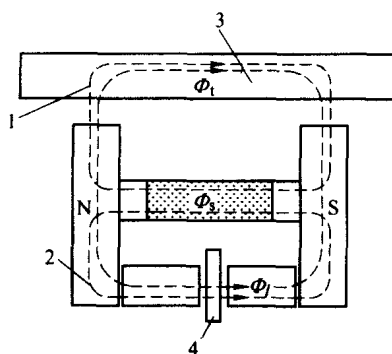


图 1-2 辅助磁路测量原理

1—磁回路 A 2—磁回路 B 3—被测材料

4—磁通测量单元

1.1.3 按磁电信号的解释形式分类

根据磁电信号的解释形式的不同,磁性检测可分为定性检测、定量检测和磁成像三类。

1. 定性检测

定性检测对检测特征的有无、超限等进行处理,并给予报警或指示,例如,钢丝绳上有没有断丝,管棒上的裂纹是否超限,它是二值处理,不对检测特征作进一步分析处理。因此,处理的方法和手段比较简单,如放大、滤波、峰值保持、阈值处理、示波、记录、报警、标记等。

2. 定量检测

定量检测对检测特征给予度量,不但给出某一位置上有没有缺陷,而且在一定的精度下给出量值,是无损检测技术的发展方向。例如,对裂纹的检测,不但要指出它的位置,而且对它的深度、宽度、长度等也应给出量值的大小。因此,必须结合计算机、人工智能、现代信号处理等技术,开拓无损检测的原理和方法。这也是磁性无损检测新技术的关键所在。

3. 磁成像

磁成像可分为两类,第一类为磁场成像,主要是将磁场(信号)可视化,形成磁图(磁场图)。因而,它只对测量的精度、分辨率、扫描方式等提出较高的要求。另一类为磁性成像,它通过磁图进行反演,以得到铁磁性构件的几何尺寸,缺陷的大小、位置和形状等,也就是磁性 CT 技术。与射线、红外、超声波 CT 技术不同,磁性 CT,从数学上讲,是一类

非线性反演问题, 源于磁力线走向的可变性。

1.1.4 磁性无损检测的应用

基于探头的磁性无损检测方法的实现主要在于磁化器和磁检测探头两方面, 同时, 对检测信号的分析处理及对用该方法检测时的灵敏度、分辨力、准确度等起着决定性的作用。由于磁场信号不受被测材料表面污染状态的影响, 磁性检测时被测材料表面不需要清洗, 因此, 将会提高检测的效率, 减小工作量。与其他无损检测方法相比, 基于探头的磁性无损检测装置结构简单、易于实现、成本低、操作简单, 对铁磁性材料表面、近表面、内部的裂纹以及锈蚀等均可获得满意的检测效果, 现已被成功地应用于钢丝绳、钢丝、钢管、钢棒、钢板、钢丝绳运输带、链条等在役零部件的检测。随着电子技术, 特别是计算机技术的发展, 基于计算机辅助检测的磁性无损检测方法将会与磁粉检测方法一样在各类铁磁性材料的检测中得到广泛应用。

1.2 铁磁性构件的磁化技术

在磁性无损检测新技术中磁化是实现检测的第一步。它决定着被测量对象(如裂纹)能否产生出足够的可被测量和可被分辨的磁场信号, 同时也影响着检测信号的性能特性和检测装置的结构特性。被测构件的磁化由磁化器实现, 主要包括磁场源和磁回路等几个主要部分, 因此, 针对被测构件的结构特点和测量目的选择源磁场和设计磁回路是磁化器优化设计的关键。本节将从磁化方式、磁化强度选择、磁路分析以及磁化器结构设计等几个方面对磁性检测新技术中的磁化技术进行论述。

1.2.1 磁化方式

磁化的方式按所用励磁磁源的不同分为下述几种。

1. 交流磁化方式

交流磁化方式以交流电流激励电磁铁产生磁场磁化被测构件。在被测构件中, 交流磁场易产生集肤效应和涡流, 且磁化的深度随电流频率的增高而减小。因此, 在漏磁场检测法中这种磁化方法只能检测构件表面或近表层裂纹等缺陷; 在主磁通检测法中具有一定的应用特点。交流磁化强度容易控制, 大功率 50Hz 交流电流源易于获得, 磁化器结构简单, 成本低廉。

2. 直流磁化方式

直流磁化方式以直流电流激励电磁铁产生磁场磁化被测构件。它又分为直流脉动电流磁化方式和直流恒定电流磁化方式。前者在电气实现上比后者简单, 一般用于剩余磁场检测法中构件的磁化; 在有源磁场检测中, 这一磁化会在检测信号中产生很强的交流磁场信号, 增加检测信号处理的复杂性, 降低检测信号的信噪比。直流恒定电流磁化方法对电流源具有较高的要求, 激励电流一般为几安培甚至上百安培。随着大功率电子整流技术及元器件的发展, 满足直流恒定电流磁化的整流器在体积和质量上目前都可以做得很小, 为这种磁化方式的应用提供了方便。与交流磁化方式一样, 直流磁化方法磁化的强度可通过控制电流的大小来方便地调节, 但随着连续使用时间的加长, 电磁铁的发热是难以避免的。

3. 永磁磁化方式

永磁磁化方式以永久磁铁作为励磁磁源。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、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、质量轻、无需电源等特点，在磁性检测中将得到很好的应用。以永久磁铁为磁源的磁性检测装置具有使用方便、灵活、体积小、质量轻等特点，所以永磁磁化方式是在线磁性检测设备中磁化被测构件的优选方式。

在励磁磁源选择后，随着磁源在磁路中的布置位置不同又可产生多种方法。在这些方法的实施中，软磁材料是不可缺少的，起着引导磁场和减小磁阻等作用。软磁材料有电工钢片、坡莫合金、工业纯铁、低碳钢等。在交流磁化中选用电工钢片；在恒定磁场磁化中可选择多种软磁材料，其中以工业纯铁和低碳钢价格最便宜，机械加工性能较好。但注意其中通过的磁感应强度应低于 2T。在磁路设计中软磁材料截面尺寸的选择以不产生饱和为原则，确保软磁材料的高磁导率。

4. 复合磁化方式

在上述几种磁化方式中，一个独立的磁化回路只能沿某一方向磁化铁磁构件，即单方向磁化。单方向磁化在检测中会产生不足。例如，用漏磁场检测法测量铁磁构件中的裂纹，且磁化方向垂直于裂纹走向时，其产生的漏磁场信号最大，而当磁化方向平行于裂纹走向时，漏磁场很小，甚至微弱到难以检测。为了能对不同走向的裂纹等缺陷的检测获得最大且相同的灵敏度，可让磁化场方向周期性变化，这就必须采用复合磁化方法。复合磁化时将直流磁场与直流磁场、直流磁场与交流磁场、交流磁场与交流磁场成一定角度（如相互垂直）合成磁场，从而形成所需方向或不断变化的可控的磁化方向来磁化构件。显然，这类磁化器的结构复杂，且控制电路要求较高。

5. 综合磁化法

在某些测量中，如主磁通检测中，直流磁场难以激发出检测信号，而只用交流磁化时又会受到磁导率急剧变化的影响，因而需要用到直流和交流磁场综合磁化方式，即先用直流励磁器将被测构件磁化到近饱和区域，此时材料的磁导率曲线呈缓慢下降的直线，再在直流磁场上叠加一交变磁化场激发，从而获得较好线性度的输出信号。通常称此时的直流磁场为偏磁场，它的主要作用是减小磁导率变化以及材料局部不均匀的影响，这种磁化方式在磁致伸缩检测方法中得到了广泛应用。

1.2.2 磁化强度的选择

在磁性检测中，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、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、质量以及成本将随之升高。因此,必须多方面综合考虑,最优地选择磁化的强度。

磁化应针对铁磁性材料的磁特性进行。如图 1-3 所示为某一优质钢材的磁化特性曲线和相对磁导率随磁场强度变化的曲线,图中 P_m 点为材料的最大相对磁导率点, M 点在磁化特性曲线上,对应于 P_m 点, $H_{\mu m}$ 为相对磁导率取最大值时的磁场强度。一般来讲,相对磁导率随材料被磁化的强度非线性变化,远大于空气隙磁导率 μ_0 。

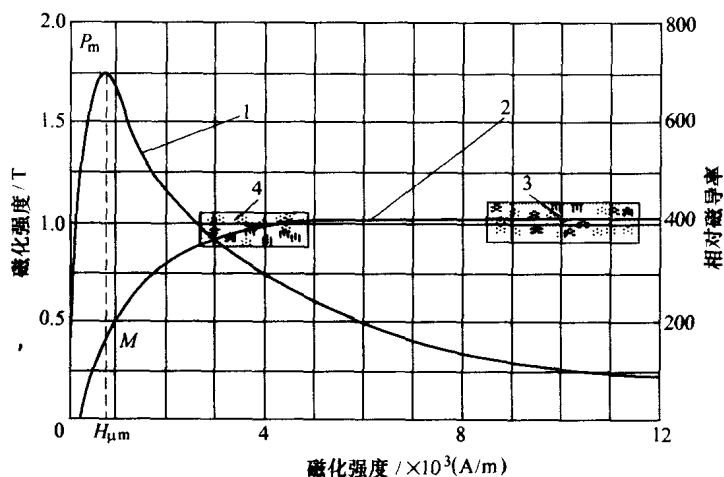


图 1-3 铁磁性材料的典型磁化特性曲线

1—相对磁导率曲线 2—磁化特性曲线 3—深度饱和区 4—近饱和区

在剩余磁场检测方法中,为了获得最大的剩磁,磁化时的强度应选择在材料深度磁饱和处,在激励磁场退去后材料中的剩磁强度相对较大。

在漏磁检测方法中,当被磁化的铁磁性材料为连续体且表面光滑时(裂纹等尺寸远大于表面粗糙),从有利于缺陷信号检测来看,材料中的磁化强度应大于 $H_{\mu m}$,此时材料的相对磁导率处于 P_m 点右侧。激励磁场施加后,在缺陷附近的局部区域中,通过该区域横截面(垂直于磁化场方向)上的磁通几乎不变化,因裂纹中的空气隙的磁导远小于材料磁导,一部分磁场将会绕过裂纹从其附近的材料中通过,致使它们中的磁场强度升高,相对磁导率下降,从而通过裂纹口空气隙外泄的漏磁通量相对增大。相反,当材料中的磁场强度小于 $H_{\mu m}$ 时,材料的相对磁导率处于 P_m 点左侧,随裂纹附近材料中的磁场的增强,相对磁导率将增大,这样,裂纹口附近空气隙外泄的漏磁通相对减小。因此,当材料的磁化磁场强度大于 $H_{\mu m}$ 后,裂纹等缺陷产生的漏磁场强度和磁通将随着激励磁场强度的增大而增加,当磁化至近饱和区以后,磁感应强度的增加缓慢。

当被检测的铁磁性材料表面粗糙时(裂纹尺寸与表面粗糙度值在同一数量级)或存在凹凸不平的结构形状时,粗糙不平的表面也将产生漏磁场,此时裂纹等缺陷漏磁场将叠加于这些背景漏磁场之上,因此,当激励磁场加强时,缺陷漏磁增加的同时,表面背景漏磁场也同样加强,漏磁检测信号中的缺陷检测信号的信噪比不一定得到提高。但是,当材料中的磁化强度处于 P_m 点所对应的 $H_{\mu m}$ 值附近时,裂纹产生的漏磁场畸变将达到最大,从而可获得相对于背景漏磁场的最大的变化磁场,也即在检测信号中得到最佳的信噪比。不过,当材料表面粗糙结构产生的漏磁场变化具有规律性时,这一背景磁场信号可以采用适

当的信号处理方法加以消除,这时,磁化强度的选择如光滑表面时的处理。表面不平产生的漏磁场信号往往为随机信号,在检测信号中为噪声,一般难以消除。因此,当被测构件表面光滑时,可测量的最小裂纹尺寸会很小;而当表面粗糙时,对裂纹的测量能力和分辨力相对要低得多。

当缺陷在材料内部时,其产生的漏磁场将受到外围铁磁性材料的屏蔽,因而,扩散到材料表面的漏磁场将大大减弱。为了减弱外层材料的磁屏蔽效应,则需要极大地减小外层材料的相对磁导率,最理想的情况是让其与空气磁导率接近,但一般情况下是不可能实现的。为了增强构件体表上缺陷产生的扩散漏磁场的强度,一般需将材料深度饱和和磁化。如图 1-3 所示,磁化在材料的最大磁导率处与深度磁饱和处时的相对磁导率之比约为 7,因此,同一位置上相同尺寸的裂纹在两种磁化状态下泄漏至材料表面的漏磁场通量,深度饱和时至少是前者的 7 倍。事实上,由于材料中磁场强度的增加,外层铁磁材料的磁导率下降,这一比值还要高一些。所以,对内部缺陷的检测,深度磁饱和非常重要。值得注意的是,当内部裂纹太小或埋藏深度太深,磁化场再强,在外表面上也测不出漏磁场。所以,内部缺陷检测的灵敏度比外部小很多。由于提高效应和屏蔽效应,漏磁场的测量点应尽可能靠近被测的缺陷。例如,检测钢管内壁上的裂纹等缺陷时,最优的方案应是从管内布置测量单元而不应选择在管外测量。

从磁场测量来看,铁磁性材料被磁化后,裂纹等缺陷将会产生扩散漏磁场,这一漏磁场强度随磁化强度、缺陷几何尺寸及位置的变化而变化。当磁敏感元件的灵敏度不同时,其所能测得的最小磁场强度也将不同。当采用高灵敏度元件时,磁化强度可以较弱;相反,元件的灵敏度较差时,要求的磁化强度较强。磁化强度的增加以加大磁化器体积、质量和成本为代价,灵敏度的提高则增加元件成本。因此,磁化强度的选择应根据检测目的、检测装置要求,结合磁场测量方法和检测信号信噪比等要求综合考虑,以在体积、质量、性能、价格上求得最优。

在磁性检测中,检测装置的体积和质量主要集中于磁化器上,而这些又决定了检测装置的现场使用性能,因此,磁化强度的选择应在确保检测灵敏度的同时以减轻磁化器的质量为主要目标。

1.2.3 永磁励磁磁路分析

在磁性检测中,磁化被测构件的方式有直接通电流方法、线圈法、磁轭法等,其中以磁轭法用得最多。磁轭法励磁磁路主要由磁源、导磁连接体、气隙、被测构件等组成,如图 1-4 所示。在这一磁路中,起决定性影响的结构尺寸有导磁连接体与被测构件间的气隙 δ 和两导磁连接体间的间距 L_M 。磁路分析表明, δ 决定了包括被测构件的主磁路中的磁阻大小,影响着磁源的工作点; L_M 决定了两导磁连接体间的磁场分布特性。

在磁性检测中,以被测构件内的磁感应强度为磁路计算和校核的指标。粗略的计算方法可采用磁导法,较为精确的计算可采用有限元等方法。磁导法通过求解磁路中各组成部件间的磁导,由

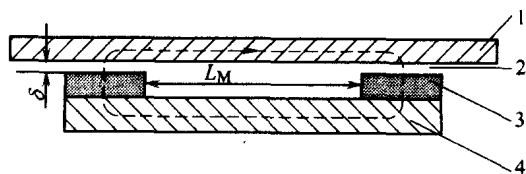


图 1-4 励磁磁路

1—被测构件 2—气隙 3—磁源 4—导磁连接体

磁路分析计算基本理论求得各部件的磁特性参数。图 1-4 所示的磁路的磁导分析模型如图 1-5 所示, 磁路设计的优劣用磁源有效率 λ_m 来衡量, λ_m 定义为进入被测构件中的磁通与磁源磁通之比, 对应于图 1-4 所示的磁路, 有

$$\lambda_m = \Phi_t / \Phi_m = \Lambda_a / (\Lambda_a + 2\Lambda_L)$$

式中, Λ_a 为空气隙的磁导; Λ_L 为漏磁导。

为了提高 λ_m , 从三个方面着手:

1) 增大 Λ_a , 即减小 δ , 增大导磁连接体与被测构件间的接触面积。

2) 减小 Λ_L , 即增大 L_M , 增加磁源磁化长度, 减小磁源自身的漏磁, 对于不同结构形状的被测构件, 应适当选择磁化的磁路和其结构尺寸。

3) 适当选择磁源在磁路中的位置和组合形式。图 1-6 所示为相同磁源在磁路中不同位置时, 被测构件中的磁感应强度值。试验中稀土永久磁铁尺寸为 20mm(长)×20mm(宽)×10mm(高, 磁化方向), 导磁连接体尺寸为 140mm(长)×20mm(宽)×20mm(高), 构件尺寸为 300mm(长)×20mm(宽)×20mm(高), 气隙为 1mm。

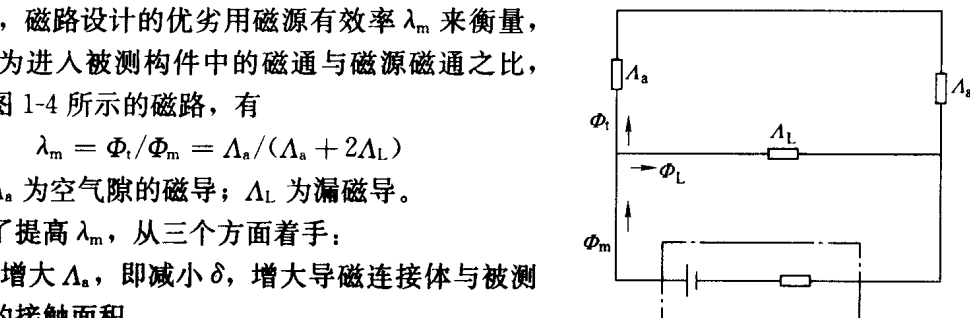


图 1-5 磁导分析模型

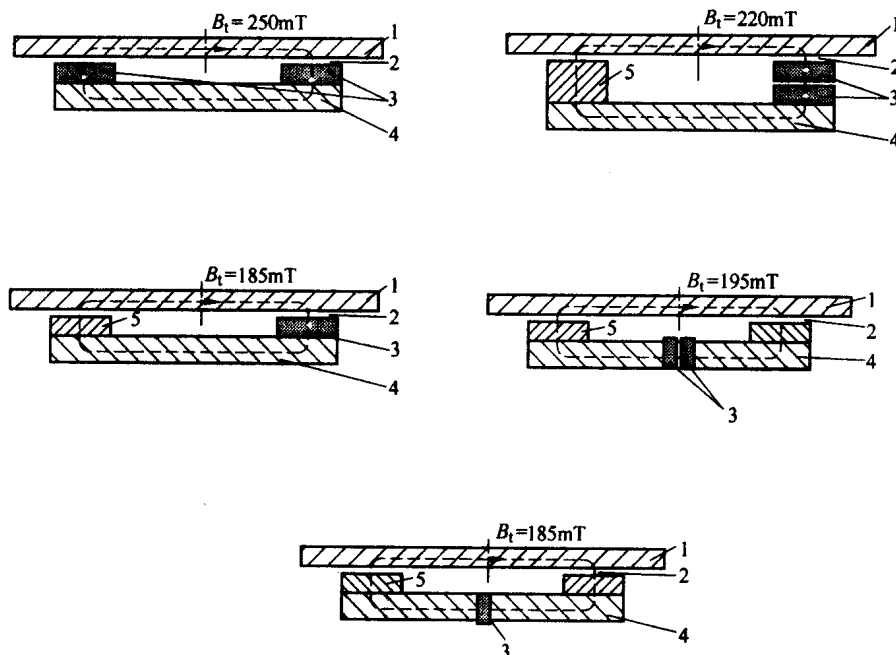


图 1-6 不同磁源位置的磁感应强度值

1—被测构件 2—气隙 3—磁铁 4—导磁连接体 5—铁块

磁化器的结构随被测构件的几何形状变化, 并与磁化方向和漏磁测量装置相关。

1.2.4 线圈励磁磁路分析

直流线圈磁化是漏磁检测中经常用到的方式, 因此, 有必要了解线圈磁化的基本特性。

用物理试验的方法研究线圈的磁化特性，将耗费大量人力物力，而用数值计算的方法可以容易地解决这个问题。通过有限元方法，不同的线圈磁化方式对应的缺陷漏磁场分布，可以通过整个场的计算获得，对于复杂的形状，也可以很好的逼近。为此，应用 ANSYS 软件，对线圈励磁的二维静态磁场进行分析，得出一些基本结论。

1. 有限元计算模型

在管道漏磁检测中，一般采用穿过式线圈磁化。因而，分析模型具有明显的轴对称特征。在 ANSYS 的二维轴对称分析中， y 轴定义为对称轴，可以只在 x 轴上建立一部分模型。研究中，最关键的是空气中的漏磁场，所以，环绕管道的空气隙大小对漏磁场的计算有很大影响，ANSYS 的无限边界模型（远场单元）解决了这一难题，应用中需要为无限边界加远场方向标志（INF），用于说明单元边朝向开放区域。本节建立的分析模型如图 1-7 所示，模型中需要定义空气、管道、聚磁板的无限边界区域。定义空气和线圈相对磁导率为 1，钢管材料有 Q235、X60、X70、X50 等多种牌号，本试验模型选用 X50，查找磁特性手册，输入 $B-H$ 曲线；聚磁板采用低碳钢，无限边界区域默认的相对磁导率为 1。在本模型中，需在图 1-7 中的 BC 、 DA 、 AB 三条边上设定无限表面标志。

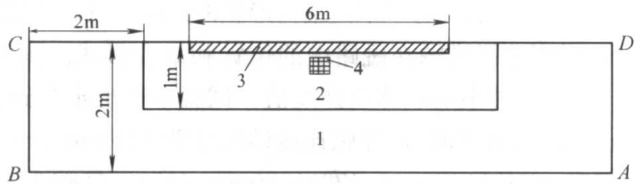


图 1-7 管道漏磁检测模型

1—无限边界区域 2—空气区域 3—管道 4—磁化线圈

根据上述方法，对图 1-8 所示的六种线圈磁化方式分别进行计算。这六种磁化方式反映了线圈长度、宽度、有无聚磁板以及聚磁板和管道间隙的变化情况，从图中可看出磁场分布情况。

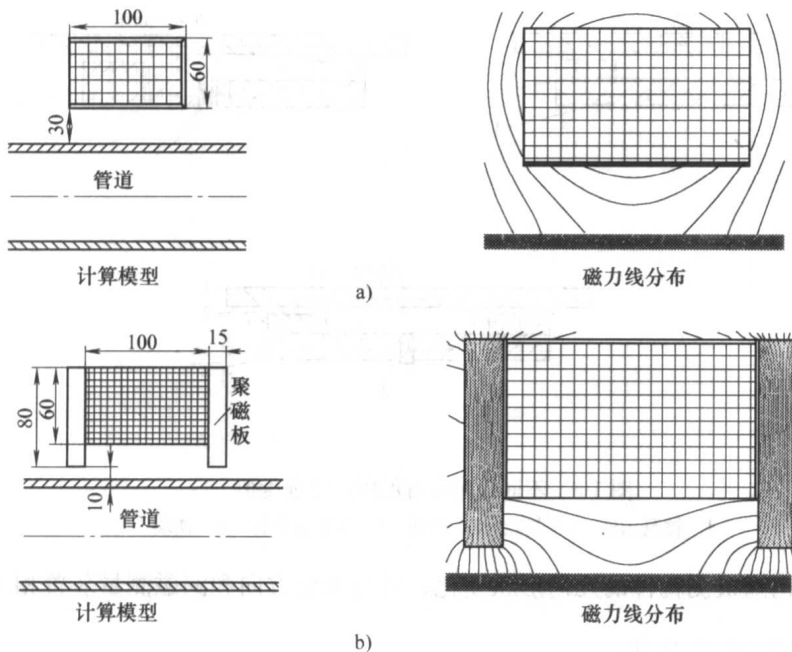


图 1-8 六种磁化方式

a) 方式 1：单线圈磁化 b) 方式 2：加聚磁板磁化