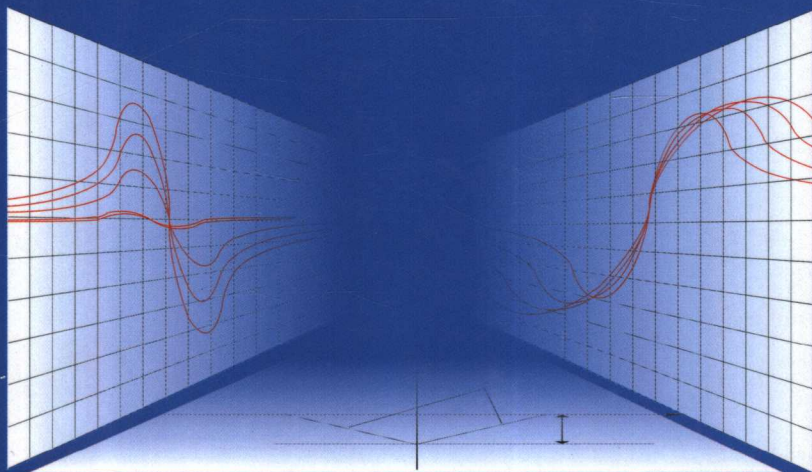


裂纹漏磁定量 检测原理与应用

The Principle and Application of Crack Leakage
Magnetic Quantitative Test

徐章遂 徐英 王建斌 谢颖 著



裂纹漏磁定量检测 原理与应用

**The Principle and Application of Crack
Leakage Magnetic Quantitative Test**

徐章遂 徐英 王建斌 谢颖 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

裂纹漏磁定量检测原理与应用/徐章遂等著. —北京:
国防工业出版社, 2005. 9
ISBN 7-118-04019-3

I. 裂... II. 徐... III. 裂纹-磁性检验
IV. TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 074863 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 6 147 千字

2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 25.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

IV

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植

顾问 黄 宁

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘 书 长 张又栋

副 秘 书 长 彭华良 蔡 镭

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成

(按姓名笔画排序) 刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生

何新贵 佟玉民 宋家树 张立同

张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇

崔尔杰 韩祖南 舒长胜

前 言

钢铁是工业和国民经济多个行业中常用的材料,广泛用于武器装备、桥梁、铁路、交通、管道等方面,凡是要求强度较高的机件,几乎都采用钢质材料。由于冲击、疲劳等因素的影响,钢铁材料在生产和使用中常会产生裂纹等缺陷,检测这些缺陷,对于保障设备可靠运行及人身安全有重要意义。由于材料存在裂纹等缺陷造成的损失是惊人的,如在飞机坠毁、舰船沉没、锅炉爆炸、管道崩裂等重大事故中,机件裂纹等缺陷的因素所占比例极大,尤其现代设备大多数在高温、高压、高速、高负载条件下运行,如果零部件带有裂纹或在运行中产生裂纹等缺陷,就必然会降低其安全可靠性的,甚至导致恶性事故发生。

对于钢质材料中的裂纹缺陷一般都采用无损检测技术来检测。目前无损检测方法很多,如常用的超声法、射线法、电磁法等。超声法是比较成熟的探伤技术,对工件表面裂纹和内部裂纹都可探测,但这种方法对工件外形和清洁度要求高,探头与被测件之间要加耦合剂,对轴向裂纹分辨力差,小裂纹容易漏检,同时也不易实现裂纹定量检测。射线法是以检测材料密度的变化来发现缺陷的,适于检测突变性的缺陷(如孔洞等),但对渐变性缺陷(如裂纹)检测效果差,且污染严重。电磁法又可分为磁粉法、电涡流法、漏磁法等,其中磁粉法和电涡流法适于探测材料表面或近表面的缺陷,其缺点是自动化程度低,工艺复杂,难以实现定量检测,需人工观察、判断,对操作人员的技术要求较高;漏磁法对材料内部、表面缺陷都可检测,对铁磁性材料的缺陷极为敏感,可检测微米级的缺陷且检测中无需对工件进行清洗、打磨,也不需加耦合剂,在有铁锈、油污等污染条件下也可检测,因此这种方法受到人们

欢迎。

随着磁传感器的发展漏磁检测方法应用越来越广,但在漏磁机理、裂纹信号定量分析、缺陷类别的智能识别等方面都需进一步探讨。本书作者从1991年起就开始进行漏磁检测方面的研究,在国家自然科学基金委员会的支持下(“厚壁钢管裂纹等缺陷定量检测原理研究”、“基于漏磁激波检测的三维图像信息重建原理研究”先后被资助),在漏磁检测原理、裂纹信号定量分析等方面进行了研究,并结合设备原位无损检测研制出漏磁裂纹检测仪、微磁裂纹检测仪、火炮损伤缺陷检测设备等,为本书的撰写打下了坚实的基础。因此本书既包含了作者在该领域从事教学与科研的实践经验,也反映了国内外有关科学技术的最新成果。

全书共6章。第一章绪论,介绍了漏磁检测的基本概念、重要意义、发展概况及当前重点需要解决的问题;第二章根据物质微观原子结构理论阐述了裂纹漏磁机理,提出了裂纹微磁结点概念,建立了裂纹、孔洞等缺陷的磁荷模型;第三章在分析漏磁信号特性的基础上介绍了裂纹漏磁信号预处理,针对漏磁信号极其微弱、信噪比低的特点提出了裂纹信息压缩、特征提取、择集滤波等漏磁检测信号处理方法;第四章基于优化理论的漏磁信号定量分析,在介绍优化基本理论的基础上,探讨了奇异值分解,搜索技术等求解方法,并结合漏磁裂纹信号提出了基于搜索循环逼近的裂纹信号定量分析方法,并探讨了基于奇异值分解—模拟进化的裂纹定位方法;第五章在介绍裂纹扩展一般规律的基础上,探讨了裂纹扩展预测基本方法,并结合裂纹扩展预测实际,提出了基于灰色模型的裂纹扩展预测和基于信息神经网络的裂纹扩展预测方法。第六章介绍了结合装备无损检测实践研制的几种漏磁裂纹检测仪器的原理、结构、特性及其使用方法。

本书是作者长期从事漏磁检测教学和科研的结晶,书中所引用的实例是作者进行装备检测的成果。本书由徐章遂制定写作大纲、统稿并撰写第一章、第三章、第五章,谢颖撰写第二章,王锋进行了修改,徐英撰写第四章,王建斌撰写第六章。书中的图稿由谢

VIII

颖、王锋等人制作。参加本书编写工作的还有陈鹏、刘美全、张政保、靳英卫、许月定、尹志勇、王瑾等,没有这些人的共同努力,是不可能完成这些工作的,在此表示衷心感谢。

为不使篇幅过大,书中涉及的数学、力学等方面的知识只能做简述,请读者谅解。

由于作者水平有限,书中会有许多缺点和错误,衷心希望读者提出宝贵意见,我们不胜感谢。

作者

2005年4月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 漏磁检测的基本概念	2
1.2 漏磁检测技术的发展情况	3
1.3 漏磁检测技术的基本问题	5
1.3.1 磁化方式	5
1.3.2 缺陷的漏磁场分析	8
1.3.3 漏磁检测用传感器	11
1.4 磁传感技术的发展	12
1.4.1 新材料的开发和研究	13
1.4.2 逐步实现微型化、集成化、系统化、智能化	15
1.4.3 发展永无止境	17
1.5 漏磁检测技术发展趋势	18
参考文献	19
第二章 裂纹磁荷模型	21
2.1 缺陷漏磁机理	22
2.2 恒定磁场的基本性质和方程	24
2.3 磁场穿过两种介质交界面的特性	26
2.3.1 磁通量密度 B 通过不同介质交界的特性	26
2.3.2 磁通量密度 B 通过边界时的折射特点	27
2.4 磁路工作点的确定	27
2.5 磁路尺寸计算	28
2.6 裂纹磁荷模型	29
2.6.1 对裂纹几何形状的统计分析	30
2.6.2 V 型裂纹区域磁荷分布变异	32

2.6.3 裂纹磁荷模型	33
2.6.4 裂纹磁荷模型分析	35
2.7 磁敏传感器	40
2.7.1 霍尔器件	40
2.7.2 磁阻器件	43
2.7.3 磁通门检测器	46
参考文献	47
第三章 漏磁检测信号处理方法	48
3.1 信号预处理	48
3.1.1 信号放大及平滑滤波	48
3.1.2 异点剔除	51
3.2 信号采样	52
3.2.1 时域采样方法	52
3.2.2 空域等距采样	54
3.3 基于裂纹信息重要度分析的数据压缩	56
3.3.1 裂纹—特征信息函数	57
3.3.2 裂纹信息分级判定原则	58
3.4 特征信息提取	59
3.4.1 缺陷信号特征分析	59
3.4.2 缺陷特征的时域提取	60
3.5 择集滤波	65
3.5.1 择集滤波的概念	65
3.5.2 择集滤波的数学定义	66
3.5.3 裂纹信号区域聚类择集滤波	67
参考文献	72
第四章 基于优化理论的漏磁裂纹信号定量分析方法	73
4.1 最优化理论	73
4.1.1 最优化问题的一般表示方法	75
4.1.2 最优化方法的结构	75
4.2 奇异值分解	77
4.2.1 测量方程	77
4.2.2 测量方程的求解	79

4.2.3 奇异值分解 SVD 在漏磁裂纹定量分析中的应用	83
4.2.4 奇异值分解 SVD 的改进	84
4.3 搜索技术	88
4.3.1 一维搜索	89
4.3.2 搜索算法改进	90
4.4 基于搜索循环逼近定量分析裂纹信号	93
4.4.1 作出表格	93
4.4.2 循环搜索	98
4.4.3 循环搜索逼近定量分析裂纹信号	98
4.5 裂纹长度的确定	103
4.6 基于模拟进化原理的裂纹位置的确定	103
4.6.1 裂纹水平位置的确定	103
4.6.2 裂纹埋藏深度的确定	104
参考文献	113
第五章 裂纹扩展预测	115
5.1 疲劳裂纹扩展规律	116
5.1.1 疲劳裂纹的亚临界扩展	116
5.1.2 疲劳裂纹萌生的机理	118
5.1.3 疲劳裂纹的扩展	119
5.1.4 可靠性预计	127
5.2 裂纹扩展预测基本方法	129
5.3 基于灰色模型裂纹扩展预测	133
5.3.1 灰色模型 GM	133
5.3.2 裂纹扩展预测实例	135
5.4 信息神经网络	139
5.4.1 网络结构	139
5.4.2 平滑因子的选择	140
5.5 基于信息神经网络的裂纹扩展预测	143
5.5.1 神经网络预测的基本原理	143
5.5.2 基于相似理论的多步预测	146
5.5.3 模拟实验	147
5.6 裂纹扩展预测实施	149

参考文献	150
第六章 检测仪器及其应用	152
6.1 JFY-1A 漏磁裂纹检测仪	152
6.1.1 工作原理及结构	153
6.1.2 功能及技术指标	154
6.1.3 面板说明	155
6.1.4 检出可靠性分析	156
6.2 JLY-1B 智能微磁裂纹检测仪	160
6.2.1 工作原理及结构	161
6.2.2 功能及技术指标	162
6.2.3 面板说明	163
6.2.4 使用说明	163
6.3 漏磁成像检测设备	166
6.3.1 工作原理及结构	166
6.3.2 功能及技术指标	169
6.3.3 系统安装	170
6.3.4 使用说明	171

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Conception of Magnetic Flux Leakage Testing	2
1.2 Present State of Magnetic Flux Leakage Testing	3
1.3 Main Contents of Magnetic Flux Leakage Testing	5
1.3.1 Magnetization Manner	5
1.3.2 Magnetic Flux Leakage Field Analysis of Flaw	8
1.3.3 Sensors for Magnetic Flux Leakage Testing	11
1.4 Development of Magnetism Sensor Technology	12
1.4.1 Research and Development of New Material	13
1.4.2 Achieving Micromation, Integration, Systematism and Intelligentize Gradually	15
1.4.3 Endless Development	17
1.5 Development Direction of Magnetic Flux Leakage Testing	18
Reference	19
Chapter 2 Magnetic Charge Model of Crack	21
2.1 Principle of Flaw Magnetic Flux Leakage	22
2.2 Basic Feature and Equation of Constant Magnetic Field	24
2.3 Magnetic Field Characteristic at the Interface between Two Kinds of Mediums	26
2.3.1 Characteristic of Magnetic Flux Density B at the Interface between Different Mediums	26
2.3.2 Refraction Characteristic of Magnetic Flux Density B at the Interface between Different Mediums	27

2.4	Determining the Working Point of Magnetic Circuit	27
2.5	Calculating the Size of Magnetic Circuit	28
2.6	Magnetic Charge Model of Crack	29
2.6.1	Statistical Analysis of Geometric Figure of Crack	30
2.6.2	Magnetic Charge Distribution Variation around V Crack Area	32
2.6.3	Magnetic Charge Model of Crack	33
2.6.4	Analysis of Magnetic Charge Model of Crack	35
2.7	Magneto Sensor	40
2.7.1	Hall Probe	40
2.7.2	Magnetoresistive Probe	43
2.7.3	Fluxgate Probe	46
	Reference	47

Chapter 3 Magnetic Flux Leakage Testing Signal

	Processing Methods	48
3.1	Signal Pre-processing	48
3.1.1	Signal Amplification and Smoothing Filtering	48
3.1.2	Singular Point Rejecting	51
3.2	Signal Sampling	52
3.2.1	Sampling Method in Time Domain	52
3.2.2	Equidistant Sampling in Spatial Domain	54
3.3	Data Compression Based on Importance Analysis of Crack Information	56
3.3.1	Crack-Feature Information Function	57
3.3.2	Classifying Principle of Crack Information	58
3.4	Collection of Feature Information	59
3.4.1	Flaw Signal Feature Analysis	59
3.4.2	Flaw Feature Extraction in Time Domain	60
3.5	Selective Collection Filtering	65
3.5.1	Conception of Selective Collection Filtering	65
3.5.2	Mathematics Definition of Selective Collection Filtering	66
3.5.3	Regional Classification of Selective Collection Filtering for Crack Signal	67

Reference	72
Chapter 4 Quantitative Analysis of Crack Leakage Magnetic Signal Based on Optimization Theory	73
4.1 Optimization theory	73
4.1.1 General Expressing Methods of Optimization Problem	75
4.1.2 Structure of Optimization Methods	75
4.2 Singular Value Decomposition	77
4.2.1 Measuring Equation	77
4.2.2 Solution to Measuring Equation	79
4.2.3 SVD in Crack Leakage Magnetic Signal Quantitative Analysis	83
4.2.4 Improvement of SVD	84
4.3 Search Technology	88
4.3.1 One-Dimensional Search	89
4.3.2 Improvement of Search Algorithm	90
4.4 Crack Signal Quantitative Analysis Based on Search Cycle Approximation	93
4.4.1 Work out Sheet	93
4.4.2 Search Circularly	98
4.4.3 Search Circularly Approximating to Quantitative Analysis of Crack Signal	98
4.5 Determining the Length of Crack	103
4.6 Determining the Position of Crack Based on Simulated Evolution Theory	103
4.6.1 Determining the Horizontal Position of Crack	103
4.6.2 Determining the Imbed Depth of Crack	104
Reference	113
Chapter 5 Forecast of Crack Expansion	115
5.1 Regularity of Fatigue Crack Expansion	116
5.1.1 Sub-critical Expansion of Fatigue Crack	116
5.1.2 Mechanism of Fatigue Crack Generation	118
5.1.3 Fatigue Crack Expansion	119
5.1.4 Reliability Forecast	127

5.2	Basic Methods of Crack Expansion Forecast	129
5.3	Forecast of Crack Expansion Based on Gray Model ...	133
5.3.1	Gray Model GM(1,1)	133
5.3.2	Examples of Crack Expansion Forecast	135
5.4	Information Neural Network	139
5.4.1	Network Structure	139
5.4.2	Choice of Smoothing Parameter	140
5.5	Forecast of Crack Expansion According to Information Neural Network	143
5.5.1	Principle of Information Neural Network Forecast	143
5.5.2	Multi-step Predicting Based on Similarity Theory	146
5.5.3	Simulation Experiment	147
5.6	Applying Forecast of Crack Expansion to Practice	149
	Reference	150
Chapter 6	Measuring Instrument and Its Applications	152
6.1	JFY-1A Crack Leakage Magnetic Measuring Instrument	152
6.1.1	Working Principle and Structure	153
6.1.2	Function and Technical Index	154
6.1.3	Panel Introduction	155
6.1.4	Reliability Analysis of the Checked Result	156
6.2	JLY-1B Intelligence Crack Micro-magnetic Measuring Instrument	160
6.2.1	Working Principle and Structure	161
6.2.2	Function and Technical Index	162
6.2.3	Panel Introduction	163
6.2.4	Directions for Use	163
6.3	Magnetic Flux Leakage Imaging Measuring Instrument	166
6.3.1	Working Principle and Structure	166
6.3.2	Function and Technical Index	169
6.3.3	System Installing	170
6.3.4	Direction for Use	171