



国防科技图书出版基金

Visualization Technology
of Defect in
Magnetic Flux Leakage Testing

漏磁检测的 缺陷可视化技术

王长龙 陈自力 马晓琳 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

漏磁检测的缺陷 可视化技术

Visualization Technology of Defect
in Magnetic Flux Leakage Testing

王长龙 陈自力 马晓琳 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

漏磁检测的缺陷可视化技术/王长龙, 陈自力, 马晓琳著. —北京:
国防工业出版社, 2014.2

ISBN 978-7-118-09208-0

I. ①漏… II. ①王… ②陈… ③马… III. ①漏磁—缺陷
检测—可视化仿真 IV. ①TG115.28-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 015622 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 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 5% 字数 138 千字

2014 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 55.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

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
第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 陆军 芮筱亭

李言荣 李德仁 李德毅 杨伟

肖志力 吴宏鑫 张文栋 张信威

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

在部队武器装备中，很多都是由铁磁材料制成的，如火炮、装甲车辆、舰船、航天设备、试验基地承压类特种设备等，这些装备通常工作在高温、高压、高速和重载荷下，在使用过程中由于腐蚀、疲劳或其他原因，许多关键零部件的表面或内部会产生坑洞、裂纹等缺陷。为尽可能避免事故的发生，需对这些零部件定期进行无损检测。无损检测是在不损伤被检材料、工件或装备的情况下，检测其物理性能、状态和内部结构是否存在裂纹、夹杂等缺陷的新兴学科，是检验产品质量、保证产品安全、延长产品寿命必要的可靠技术手段。在众多的无损检测方法中，漏磁无损检测法由于对缺陷具有检测灵敏度较高、检测速度快、对工件表面清洁度要求不高、成本低、操作简单等优点，被广泛应用在铁磁材料无损检测中。

随着漏磁检测技术的发展，不仅要求能够定性检测，而且要求能将缺陷分布情况转换为人的视觉可以感受的图形和图像形式，在屏幕上直接显示出来，实现缺陷可视化。从理论上讲，用有限个离散方位的观测数据来重构缺陷轮廓属于不适定性问题，不具备唯一解，重构难度较大。因此，缺陷轮廓重构已成为漏磁检测的研究热点和工程应用瓶颈。针对此问题，本书结合漏磁检测的国内外现状及发展趋势，介绍了漏磁场分析的有限元神经网络快速计算模型、信号预处理和缺陷轮廓重构，探讨了漏磁检测的可视化。

全书共分为7章。第1章介绍了漏磁检测的重要意义，阐述了国内外研究动态，概括了本书的基本框架和主要内容。第2章介绍了漏磁检测的基本原理和漏磁信号特征，讨论了磁化装置优化设计，说明了漏磁检测仪的工作过程。第3章在介绍磁偶极子模型基础上，根据有限元离散单元结构与神经网络中神经元结构的相似性，建立了适用于漏磁场快速计算的三维有限元神经网络模型，说明了模型的拓扑结构和学习算法。第4章介绍了实际检测漏磁信号的降噪方法。将多尺度滤波和形态开、闭自适应加权组合滤波结合起来，探讨了检测漏磁信号的自适应多尺度形态滤波方法。第5章针对疲劳性裂纹等效的矩形缺陷，建立了自适应的双小波神经网络迭代模型，实现了缺陷三维轮廓的精确逼近。第6章针对腐蚀性孔洞缺陷轮廓重构，利用核偏最小二乘法（KPLS）对信号进行特征提取，将径向小波基网络与KPLS融合起来，建立了KPLS的非线性内部模型，提出了基于KPLS - RWBFNN的孔洞型缺陷重构方法，提高了重构的精度和泛化能力。第7章介绍了基于序贯贝叶斯估计方法的漏磁反演方法，通过建立缺陷轮廓与漏磁信号状态空间的模型，实现了漏磁缺陷的二维轮廓重构，避免了对样本的依赖性，同时对噪声具有很强的鲁棒性。

本书适合于航天、兵工、装备保障、机械、电力、化工等领域从事无损检测的研究人员阅读，还可以作为相关专业研究生学习的参考用书。本书的研究可为军用装备研制、生产、使用提供准确、可靠的依据，满足军用装备建设的急需。同时也可作为特种设备和重要金属部件的质量检验、寿命评估和安全性评价等方面奠定基础。

目前，公开发表的漏磁无损检测技术理论、机理、方法、工艺、技术和设备方面的资料较少，作者根据长期对漏磁无损检测技术研究经验和成果，编写了本书。本书的研究工作先后得到国防科技图书出版基金、国家自然科学基金、河北省自然科学基金和总装备

部院校创新工程等项目的资助，国防工业出版社的领导和冯晨编辑为本书的出版做了大量工作，在此一并致谢。参加本书编写工作的还有王永川、胡永江、徐超、苑希超、李兵等同志。虽然作者近年来在漏磁无损检测方面进行了一些有益的探讨和研究，但也深深感到很多方面存在不足，在本书章节安排和内容叙述等方面难免存在不妥之处，衷心希望获得同行专家的批评和指正，通过大家的帮助使本书能够得到不断的提高和完善。

作 者

2013-8-16

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 无损检测	1
1.2 漏磁检测的研究动态	4
1.2.1 正演问题	5
1.2.2 漏磁信号预处理	8
1.2.3 反演问题	9
1.3 本书主要内容及重点	12
参考文献	14
第 2 章 漏磁检测基础	17
2.1 概述	17
2.2 漏磁检测原理	18
2.2.1 漏磁场形成原因	18
2.2.2 漏磁检测原理分析	20
2.3 漏磁信号分析	21
2.3.1 漏磁信号特征	21
2.3.2 各种因素对漏磁信号的影响	22
2.4 磁化装置优化设计	27
2.4.1 磁化装置结构设计	28
2.4.2 磁化效果影响因素分析	30
2.4.3 磁化装置优化设计结论	34
2.5 漏磁检测仪器	35
参考文献	37

第 3 章 三维漏磁场的计算	39
3.1 概述	39
3.2 磁偶极子解析模型	40
3.2.1 点磁偶极子	40
3.2.2 磁偶极线	41
3.2.3 磁偶极带	42
3.3 有限元法	46
3.3.1 边值问题及变分公式	46
3.3.2 三维有限元分析	47
3.4 有限元神经网络	50
3.4.1 有限元神经网络模型	50
3.4.2 有限元神经网络迭代算法	53
3.4.3 有限元神经网络方程的建立和求解	54
3.5 有限元神经网络在漏磁场计算中的应用	60
3.5.1 三维漏磁场模型的建立	60
3.5.2 计算实例及分析	62
参考文献	68
第 4 章 漏磁检测信号处理方法	70
4.1 概述	70
4.2 形态滤波的基本理论	71
4.2.1 二值形态学	71
4.2.2 灰值形态学	73
4.3 数学形态学滤波器	76
4.4 基于广义形态滤波器的基线漂移处理	78
4.4.1 结构元素的选取	78
4.4.2 基线漂移的仿真和实验分析	80
4.5 基于自适应形态滤波器的噪声信号处理	84
4.5.1 自适应多尺度形态滤波器	84
4.5.2 信号处理的仿真和实验分析	86

参考文献	88
第 5 章 基于双小波神经网络迭代模型的矩形缺陷 三维轮廓重构	90
5.1 概述	90
5.2 漏磁反演的不适宜性	91
5.3 漏磁反演方法	93
5.3.1 优化法	93
5.3.2 神经网络法	96
5.4 径向小波基神经网络	97
5.4.1 小波神经网络基础	97
5.4.2 小波变换和多分辨率分析	99
5.4.3 径向小波基神经网络结构	101
5.4.4 径向小波基神经网络的自适应训练算法	103
5.4.5 自适应训练算法有效性的验证	105
5.5 并行径向小波基网络和双径向小波基网络迭代模型	108
5.5.1 并行径向小波基神经网络	108
5.5.2 双径向小波基神经网络迭代模型	109
5.6 缺陷轮廓重构	110
5.6.1 缺陷二维轮廓重构的迭代模型验证	110
5.6.2 缺陷三维轮廓重构	112
参考文献	122
第 6 章 基于 KPLS-RWBFNN 模型的孔洞型缺陷 三维轮廓重构	124
6.1 概述	124
6.2 偏最小二乘回归分析	125
6.3 核偏最小二乘回归分析	128
6.4 KPLS-RWBFNN 模型	131
6.5 KPLS-RWBFNN 模型的验证	132
6.5.1 二维缺陷样本库的建立	132

6.5.2	结果分析	133
6.6	孔洞型缺陷三维轮廓重构	136
6.6.1	三维缺陷样本库的建立	136
6.6.2	结果分析	137
	参考文献	141
第7章	基于粒子滤波的漏磁缺陷二维轮廓重构	142
7.1	概述	142
7.2	缺陷二维轮廓和漏磁信号表示	143
7.3	反演问题的状态空间描述	144
7.4	粒子滤波基础理论	145
7.4.1	贝叶斯滤波理论	145
7.4.2	蒙特卡罗方法	147
7.5	粒子滤波算法	149
7.5.1	序贯重要性采样算法	150
7.5.2	重采样算法	151
7.5.3	自适应改进残差重采样算法	152
7.6	缺陷二维轮廓重构	154
7.6.1	状态空间模型的建立	154
7.6.2	重构结果及分析	155
	参考文献	159

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 NDT	1
1.2 Dynamic Research of MFL Testing	4
1.2.1 Forward Problem	5
1.2.2 MFL Signal Pre-processing	8
1.2.3 Inversion Problem	9
1.3 Main Contents and Emphasis	12
Reference	14
Chapter 2 Fundamentals of MFL Testing	17
2.1 Introduction	17
2.2 MFL Testing Principle	18
2.2.1 Formation Cause of Magnetic Leakage Field	18
2.2.2 Analysis of MFL Testing Principle	20
2.3 Analysis of MFL Signals	21
2.3.1 Characteristics of MFL Signals	21
2.3.2 Influence of Various Factors on MFL Signals	22
2.4 Optimization Design of Magnetization Device	27
2.4.1 Structure Design of Magnetization Device	28
2.4.2 Influencing Factors Analysis of Magnetization	30
2.4.3 Conclusions of Optimization Design in Magnetization Device	34
2.5 MFL Testing Instrument	35

Reference	37
Chapter 3 Calculation of 3D Magnetic Leakage Field	39
3.1 Introduction	39
3.2 Analytical Models of Magnetic Dipoles	40
3.2.1 Point Magnetic Dipoles	40
3.2.2 Line Magnetic Dipoles	41
3.2.3 Strip Magnetic Dipoles	42
3.3 Finite-element Method	46
3.3.1 Boundary Value Problem and Variational Formulas	46
3.3.2 3D FEM Analysis	47
3.4 Finite-element Neural Network	50
3.4.1 FENN Model	50
3.4.2 Iterative Algorithm of FENN	53
3.4.3 Establishment and Solving of FENN Equation ...	54
3.5 Application of FENN in Magnetic Leakage Field Calculation	60
3.5.1 Establishment of 3D Magnetic Leakage Field Model	60
3.5.2 Calculation and Analysis Examples	62
Reference	68
Chapter 4 MFL Signals Processing	70
4.1 Introduction	70
4.2 Basic Theory of Morphological Filter	71
4.2.1 Binary Morphology Theory	71
4.2.2 Gray-level Morphology	73
4.3 Mathematical Morphology Filter	76
4.4 Baseline Drift Correction Based on Generalized	

Morphological Filter	78
4. 4. 1 Selection of Structure Elements	78
4. 4. 2 Simulation and Experiment of Baseline Drift ...	80
4. 5 Noise Processing Based on Adaptive Multi-scale	
Morphological Filter	84
4. 5. 1 Adaptive Multi-scale Morphological Filter	84
4. 5. 2 Simulation and Experiment Analysis in	
Signals Processing	86
Reference	88

Chapter 5 3D Profiles Reconstruction of Rectangular

Defect by Double RWBFNN	90
5. 1 Introduction	90
5. 2 Ill-posed of MFL Signals Inversion	91
5. 3 Inversion Methods of MFL	93
5. 3. 1 Optimization Method	93
5. 3. 2 Neural Network – based Method	96
5. 4 Radial Wavelet Basis Function Neural Network	97
5. 4. 1 Fundamentals of Wavelet Neural Network	97
5. 4. 2 Wavelet Transform and Multi-resolution	
Analysis	99
5. 4. 3 Architecture of RWBFNN	101
5. 4. 4 Adaptive Training Algorithm in RWBFNN	103
5. 4. 5 Effectiveness validating of Adaptive	
Training Algorithm	105
5. 5 Parallel RWBFNN and Iterative Model of	
Double RWBFNN	108
5. 5. 1 Parallel RWBFNN	108
5. 5. 2 Iterative Model of Double RWBFNN	109
5. 6 Reconstruction of Defect Profiles	110

5. 6. 1	Iteration Model Verification by 2D Defect Profiles Reconstruction	110
5. 6. 2	3D Defect Profiles Reconstruction	112
	Reference	122

Chapter 6 3D Profile Reconstruction of Hole Defect by

	KPLS-RWBFNN Model	124
6. 1	Introduction	124
6. 2	Partial Least-Squares Regressive Analysis	125
6. 3	Kernel Partial Least-Squares Regression Analysis	128
6. 4	KPLS-RWBFNN Model	131
6. 5	Verification of KPLS-RWBFNN	132
6. 5. 1	Establishment of Sample Database for 2D Defect	132
6. 5. 2	Result Analysis	133
6. 6	3D Profile Reconstruction of Hole Defect	136
6. 6. 1	Establishment of Sample Database for 3D Defect	136
6. 6. 2	Result Analysis	137
	Reference	141

Chapter 7 2D Defect Profiles Reconstruction Based on

	Particle Filter	142
7. 1	Introduction	142
7. 2	Representation of 2D Defect Profile and MFL Signal	143
7. 3	State Space Description of Inversion Problem	144
7. 4	Basic Theory of Particle Filter	145
7. 4. 1	Bayesian Filter	145
7. 4. 2	Monte Carlo Method	147
7. 5	Particle Filter Algorithm	149