

“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*

# 电磁无损检测数值 模拟方法

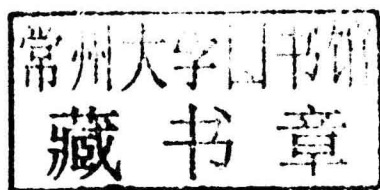
陈振茂 解社娟 曾志伟 裴翠祥 著  
康宜华 康宜华 审



“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

# 电磁无损检测数值模拟方法

陈振茂 解社娟 曾志伟 裴翠祥 著  
康宜华 审



机械工业出版社

本书以作者长年科学研究成果为基础,结合学科最新研究进展,针对典型电磁无损检测方法,包括涡流检测、脉冲涡流检测、直流电位检测、漏磁检测及电磁超声检测的数值模拟方法进行了系统介绍。针对各种检测方法,给出了电磁场有限元分析、信号计算的理论公式和具体计算步骤、程序开发思路,以及针对典型检测探头和检测对象的数值模拟结果计算实例。同时,以典型缺陷反演重构为目的,给出了检测信号反演的各种方法和计算实例,并介绍了几种检测信号的高效计算方法。最后给出了核电站换热管材料、复合材料、超轻多孔材料检测等方面的应用实例。

本书首次系统归纳了电磁无损检测数值模拟理论和方法,对研究电磁无损检测和计算电磁场的学生和研究人员具有参考意义。

## 图书在版编目(CIP)数据

电磁无损检测数值模拟方法/陈振茂等著. —北京:机械工业出版社, 2017. 3

(现代电磁无损检测学术丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-111-55919-1

I. ①电… II. ①陈… III. ①电磁检验-无损检验-数值模拟  
IV. ①TG115. 28

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第008669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:李超群 刘良超 武晋

责任校对:刘雅娜 刘秀芝 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·15.25印张·367千字

0001—1500册

标准书号:ISBN 978-7-111-55919-1

定价:148.00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

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

# 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



丙申秋

# 前 言

随着现代社会的发展，现代装备和结构趋于大型、复杂、高性能化，随之而来的是结构和材料的失效可能导致严重事故，危及人民生命财产安全。如何避免灾难性事故的发生是现代装备和结构必须解决的问题，是国家的重大需求。保障结构完整性的需求凸显了在役和役前无损检测的重要性，同时为避免过度维护导致的经济性和可靠性问题，定量无损评价已成为重要手段。

在众多无损检测手段中，电磁无损检测具有非接触、快速、信号处理简便等优点，广泛应用于众多工业领域。数值模拟是理解电磁无损检测信号发生机理、设计和优化探头、基于信号反演对缺陷进行定量重构的关键手段。电磁无损检测的基本原理主要是低频电磁场问题，涉及瞬态、稳态线性涡流场，非线性静、动态磁场，恒定电流场等问题，同时针对复合材料无损检测还需考虑材料各向异性。因此，电磁无损检测的数值模拟涉及低频电磁场数值分析的基本理论、方法和学科前沿问题。

本书以作者多年的科学研究成果为基础，结合学科最新研究进展，针对典型电磁无损检测方法，包括涡流检测（Eddy Current Testing, ECT）、脉冲涡流检测（Pulsed ECT, PECT）、漏磁检测（Magnetic Flux Leakage Testing, MFLT）、直流电位检测（DC Potential Drop, DCPD）以及电磁超声检测（Electromagnetic Acoustic Testing, EMAT）的数值模拟方法进行了系统深入的介绍。针对上述各种检测方法，分别给出了电磁场控制方程、有限元分析、信号计算的理论公式和具体计算步骤，以及程序开发的主要思路，还给出了针对典型检测探头和对象的数值模拟结果算例。同时，以典型缺陷反演重构为目的，给出了检测信号反演的各种方法和计算实例，并介绍了几种检测信号的高效计算方法。最后给出了电磁无损检测数值模拟在核能结构、超轻多孔材料等方面的应用实例。本书首次系统归纳了主要电磁无损检测数值模拟方法和计算程序思路，对从事电磁无损检测和计算电磁场理论及应用的研究人员和研究生具有参考意义。

本书首次尝试归纳电磁无损检测数值模拟相关的经典方法和最新研究成果，对作者研究组以外的研究成果也做了一些介绍。其中，部分内容是作者在国外学习研究期间涉及的工作内容，得到了日本东京大学、日本东北大学、日本原子能机构（JAEA）及美国密歇根大学等相关国内外大学和研究机构学者的支持和协助，部分内容是作者指导的博士和硕士研究生的学位论文内容。曾志伟负责的内容得到了课题组李俭老师的协助。在此对相关学者和学生表示衷心感谢。本书成稿过程中，参照现代电磁无损检测技术丛书编委会各位委员非常有价值



的意见和建议进行了多次修改。华中科技大学康宜华教授任本书主审，对全书进行了全面审定。在此，对他们一并表示衷心感谢。本书部分公式和图表的绘制、校对等得到陕西省无损检测与结构完整性评价工程技术研究中心研究生的鼎力帮助，这里也向他们表示衷心的感谢。

本书第1章、第2章、第6章主要内容和第8章部分内容由西安交通大学陈振茂执笔，第3章全部内容和第2章、第8章部分内容由厦门大学曾志伟执笔，第4章、第5章全部和第6章及第1章的部分内容由西安交通大学解社娟执笔，第7章全部及第8章部分内容由西安交通大学裴翠祥执笔。全书由陈振茂、解社娟整理统稿。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。

鉴于作者的知识范围和编排时间等因素，书中难免有不妥甚至错误之处，敬请读者批评指正。

作者

# 目 录

序 1	
序 2	
前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 无损检测和电磁无损检测	1
1.1.1 无损检测的基本概念	1
1.1.2 无损检测一般原理	2
1.1.3 电磁无损检测方法	3
1.1.4 无损检测实际应用要点	5
1.2 无损检测典型工程背景	6
1.2.1 核电站结构应力腐蚀裂纹无损检测	6
1.2.2 燃气轮机热端叶片热障涂层无损评价	7
1.2.3 超轻多孔材料无损检测	8
1.2.4 碳纤维增强树脂基复合材料无损检测	9
1.3 电磁无损检测研究历史和现状	10
1.4 电磁无损检测数值模拟方法研究现状	12
1.4.1 电磁无损检测数值模拟基本过程	12
1.4.2 电磁无损检测正问题数值模拟方法	13
1.4.3 电磁无损检测反问题数值模拟方法	14
1.5 本书主要内容和框架	15
第 2 章 涡流检测数值模拟方法	17
2.1 涡流检测问题基本方程	17
2.1.1 涡流场基本控制方程	17
2.1.2 $A-\phi$ 表述涡流场基本方程	18
2.1.3 $A^*$ 表述涡流场基本方程	20
2.2 涡流检测轴对称问题	21
2.2.1 涡流场轴对称问题控制方程	21
2.2.2 轴对称问题有限元离散	22
2.3 三维涡流检测正问题数值模拟方法	25
2.3.1 基于 $A-\phi$ 方程的有限元-边界元混合法	25
2.3.2 基于退化磁向量位和棱边有限元的 $A_r$ 方法	30
2.3.3 涡流检测体积分计算方法	32
2.3.4 涡流检测信号计算公式	34
2.4 基于数据库的正问题高效求解方法	38
2.5 正问题求解方法验证算例	40
2.5.1 轴对称问题算例	40
2.5.2 三维涡流检测正问题算例	40

2.6	涡流检测反问题方法 .....	42
2.6.1	基于共轭梯度方法的裂纹形状重构 .....	42
2.6.2	复杂裂纹随机组合反演重构 .....	49
2.6.3	基于神经网络的裂纹重构 .....	55
<b>第3章</b>	<b>涡流检测数值模拟新进展 .....</b>	<b>60</b>
3.1	带磁心涡流探头检测信号计算 .....	60
3.1.1	传统三维涡流有限元模拟方法存在的问题 .....	60
3.1.2	区域分解方法基本思想 .....	61
3.1.3	基于插值耦合的区域分解方法 .....	63
3.1.4	基于解析计算耦合的区域分解方法 .....	67
3.2	各向异性复合材料的涡流检测数值模拟方法 .....	73
3.2.1	碳纤维增强树脂基复合材料涡流检测及其数值模拟研究概况 .....	74
3.2.2	电各向异性材料涡流分析的 $A_e$ , $A_e-V$ 表述 .....	75
3.2.3	电各向异性对平面内涡流分布的影响 .....	79
3.2.4	纤维方向对平面内涡流分布的影响 .....	79
3.2.5	碳纤维增强树脂基复合材料中的涡流衰减规律 .....	82
3.2.6	纤维断裂涡流检测模拟 .....	83
3.3	无网格伽辽金法涡流检测数值模拟 .....	85
3.3.1	移动最小二乘法构造近似解 .....	85
3.3.2	涡流场的无网格伽辽金法求解基本原理 .....	86
3.3.3	无网格伽辽金法求解电磁场问题应用实例 .....	93
3.3.4	无网格伽辽金法存在的问题 .....	95
<b>第4章</b>	<b>脉冲涡流检测信号数值模拟方法 .....</b>	<b>97</b>
4.1	脉冲涡流检测信号数值计算方法 .....	97
4.1.1	基于傅里叶级数的脉冲涡流检测信号计算方法 .....	97
4.1.2	脉冲涡流信号时域积分法 .....	102
4.1.3	验证与应用 .....	103
4.2	脉冲涡流信号的高效数值模拟方法 .....	104
4.2.1	脉冲涡流信号高效数值求解的重要性 .....	104
4.2.2	体缺陷涡流检测快速求解算法 .....	104
4.2.3	体缺陷脉冲涡流检测快速算法及其验证 .....	109
4.3	基于共轭梯度方法的脉冲涡流反问题 .....	110
4.3.1	三维管壁局部减薄缺陷的定量反演算法 .....	110
4.3.2	双层结构冷却管道的管壁减薄脉冲涡流检测实验 .....	115
4.3.3	基于实验信号的管壁减薄缺陷重构结果 .....	117
4.4	神经网络-共轭梯度复合脉冲涡流信号反演方法 .....	119
4.4.1	脉冲涡流信号的人工神经网络反演算法 .....	120
4.4.2	神经网络和共轭梯度混合法 .....	122
<b>第5章</b>	<b>直流电位检测数值模拟方法 .....</b>	<b>124</b>
5.1	直流电位检测电阻网络正问题方法 .....	124
5.1.1	电阻网络模型 .....	124
5.1.2	电阻网络法控制方程 .....	125

5.1.3 电阻网络法求解过程	126
5.2 直流电位检测有限元数值模拟方法	127
5.2.1 直流电位检测信号有限元法数值模拟理论	127
5.2.2 数值模拟程序及算例	129
5.3 复杂边界缺陷处理方法	130
5.3.1 多介质有限单元	130
5.3.2 多介质单元系数矩阵计算方法	131
5.3.3 基于多介质单元的直流电位信号计算程序和算例	132
5.4 直流电位检测信号的高效计算	133
5.4.1 直流电位检测信号的高效数值计算理论	133
5.4.2 快速算法中数据库的建立方法	135
5.4.3 高效数值模拟方法程序的开发与正确性验证	135
5.4.4 基于多介质单元的数据库型快速算法	135
5.5 直流电位检测反问题方法	137
5.5.1 基于随机优化方法的直流电位检测信号反演	137
5.5.2 基于最速下降法的泡沫金属缺陷定量重构	140
5.5.3 基于混合反问题方法的泡沫金属复杂缺陷定量重构	141
<b>第6章 漏磁检测数值模拟方法</b>	<b>143</b>
6.1 静态磁场等效磁极化计算方法	143
6.1.1 非线性静态磁场问题控制方程	143
6.1.2 非线性磁性材料静磁问题的三维 FEM-BEM 混合解法	144
6.1.3 程序开发和有效性验证	148
6.2 漏磁检测信号的高效计算方法	150
6.2.1 快速正问题算法基本方程	151
6.2.2 计算区域的缩减	151
6.2.3 快速算法的数值实现	152
6.2.4 数值算例	153
6.3 漏磁检测反问题	154
6.3.1 裂纹形状的参数化	155
6.3.2 裂纹形状重构算法	155
6.3.3 反问题求解算例	156
<b>第7章 电磁超声检测数值模拟方法</b>	<b>158</b>
7.1 电磁超声检测概述	158
7.1.1 电磁超声换能器的基本构造	158
7.1.2 电磁超声检测基本原理	159
7.2 洛伦兹力电磁超声检测数值模拟方法	160
7.2.1 基于等效磁荷法的静态磁场计算	160
7.2.2 脉冲涡流场和洛伦兹力的计算	162
7.2.3 超声波的有限差分数值计算方法	163
7.2.4 超声波的有限元数值模拟方法	167
7.2.5 基于洛伦兹力的电磁超声有限元数值计算实例	172
7.3 考虑磁致伸缩的电磁超声检测数值计算方法	175
7.3.1 基于等效磁极化法的磁性介质静态磁场数值计算方法	175

7.3.2	铁磁性材料涡流场和洛伦兹力的数值计算	179
7.3.3	磁化效应和磁致伸缩效应	182
7.3.4	电磁超声检测信号数值计算方法	189
7.3.5	铁磁性材料电磁超声检测二维有限元数值模拟算例	189
7.3.6	铁磁性材料电磁超声三维有限元数值模拟算例	192
7.3.7	铁磁性材料电磁超声检测数值模拟程序的实验验证	194
<b>第8章</b>	<b>电磁无损检测数值模拟典型应用</b>	<b>195</b>
8.1	金属夹芯板焊接部位缺陷涡流检测信号数值模拟	195
8.1.1	夹芯板数值计算模型	195
8.1.2	噪声与缺陷信号特征计算	197
8.1.3	多频演算法对焊接部位涡流检测信号的演算效果	199
8.2	热障涂层电磁超声无损检测数值模拟	201
8.2.1	热障涂层电磁超声检测初步方案及原理	201
8.2.2	热障涂层电磁超声检测数值模拟算例	202
8.2.3	热障涂层电磁超声检测特性	204
8.3	基于数值模拟的核电站换热管涡流检测探头评价	206
8.3.1	核电站蒸汽发生器换热管涡流检测	206
8.3.2	数值计算模型	208
8.3.3	数值计算结果及分析	209
8.4	飞机蒙皮多层铆接结构涡流检测数值模拟	212
8.4.1	磁光成像检测数值模拟	212
8.4.2	常规涡流检测高效数值模拟	217
<b>参考文献</b>		<b>220</b>

# 第1章 绪 论

## 内容摘要

本章首先简要介绍无损检测研究相关背景、典型应用，主要电磁无损检测方法的原理和特点，电磁无损检测相关研究开发的历史和现状，电磁无损检测数值模拟的主要内容和研究现状，最后给出本书框架和各章的主要内容概要。

## 1.1 无损检测和电磁无损检测

人类社会的进步要求不断发展新型装备和结构，以满足日益增长的能源、交通运输、日常生活以及安全等需求，现代装备越来越向大型、复杂、高性能化发展，其使用环境也趋向超高温、超高压、放射腐蚀、超强电磁场等，随之而来的是结构和材料的失效可能带来巨大危害。如何避免灾难性事故是现代装备和结构必须解决的问题，是国家的重大需求。同时，水、电、气、通信等社会保障系统虽多属常规结构，但其失效不仅会给人民生活带来极大的不便，而且可能危及人民生命财产安全和社会稳定。确保社会保障系统的安全可靠同样也是国家重大需求。保障结构完整性的需求凸显了结构和材料在役和役前无损检测和评价的重要性。同时，为避免过度维护而降低系统经济性及其伴生的资源、环境问题，定量无损评价已成为现代产业必需的重要手段。

在众多无损检测手段中，电磁无损检测由于其检测信号为电学参量，具有非接触、快速、信号处理便捷等优点，广泛应用于众多产业领域，是被检部件数量最多的无损检测方法。无损检测方法的数值模拟是理解无损检测信号发生机理，设计、升级和优化探头结构和检测系统，以及基于检测信号对缺陷进行定量反演重构的关键手段。电磁无损检测的检测用物理场主要为电磁场，属于低频电磁场问题，涉及瞬态电磁场，稳态线性涡流场，非线性静、动态磁场，恒定电流场等问题；复合材料的电磁无损检测还涉及材料各向异性；部分高频电磁无损方法（如微波检测），还涉及电磁波等高频电磁场问题。电磁无损检测的数值模拟不但涉及低频电磁场数值分析的基本理论、方法、高效计算、程序开发，也涉及非线性、履历性磁性介质电磁场计算、各向异性材料建模、复杂缺陷的建模和重构、高精度高效检测新方法开发等学科前沿问题。

### 1.1.1 无损检测的基本概念

在不对检测对象结构和材料造成损伤的前提下，通过向检测对象施加物理场并测量分析其反应，以实现对检测对象进行缺陷（损伤）检测的活动称为无损检测。无损检测不仅要求检测后对结构材料不造成宏观损伤，也要求不因检测本身对相应结构的完整性带来影响。无损检测方法可以对结构的关键部位进行定点反复在线检测（无损监测），也可以通过定期检测对服役结构的安全性进行有效确认。除检测探头无法接近的部位外，无损检测技术可以实现大部分结构的表面缺陷和体积缺陷检测。

结构内部和表面没有过度的缺陷和损伤是保障机械强度和完整性的关键。表面缺陷或损伤可能带来表面状态如形态、色调等的变化,通过肉眼观察,即通过可见光即可进行识别和评估。但材料内部缺陷必须依靠入射其他物理能量代替可见光对缺陷状态进行定性和定量检测。这种能量应能有效穿透进入材料内部,并且缺陷和损伤能对其传播特性和反应产生明显影响。不对结构造成损伤的物理能量的入射和测量分析是无损检测的关键要素。

无损检测中的检测对象一般可分为宏观缺陷和微观缺陷(损伤)。宏观缺陷的尺度一般为毫米量级,而微观缺陷应为微米量级。虽然塑性变形和疲劳损伤一般并不称为缺陷,但由于其位错、滑移等现象的存在,也可列入微观缺陷的范畴。

宏观缺陷可能在材料与结构的制造、加工和服役过程中产生,包含裂纹、空洞、夹杂、磨损减薄等。设备在运行过程中,由于内外流和腐蚀作用(如流动加速腐蚀、液滴冲击腐蚀)等,可能发生管道、容器壁的局部和全面厚度减薄,即腐蚀缺陷。同时,很多构件由于温度/机械拉应力、腐蚀环境和应力腐蚀耐受性因素,可能在低应力条件下产生很大的应力腐蚀裂纹。而机械/温度等脉动应力的长期作用,是疲劳裂纹的主因。壁厚减薄、应力腐蚀裂纹、疲劳裂纹以及空洞和夹杂等是典型的宏观缺陷,其大小超出一定尺度则可能危及结构安全。

设备长期运行伴随的材料老化,多为微观缺陷的发生和汇聚造成材料的组织和形态变化而引起。例如,核电站压力容器、管道和聚变堆包层结构材料的辐照脆化主要起因于中子辐照造成不纯物的产生和累积以及相关的微观缺陷。材料的塑性变形、疲劳损伤、蠕变等也伴随有材料内部的微观损伤,如位错、滑移、微空洞等。对这种微观损伤进行定量评价也是无损检测的重要目标。本书中将发生微观损伤和宏观缺陷的部位统称为损伤部位,而将没有损伤和缺陷的部位称为健全部位。另外,对各种待检部件、结构称为对象结构或材料,对为开发、验证和标定检测手段模拟检测对象结构制作的检测对象则称为试样或试块。

无损检测的主要应用对象为金属材料结构,近几年在陶瓷、复合材料、木材、混凝土等材料的研究上也有很好的应用。对于不同的材料和结构,由于能量传播特性的差异,同一检测方法也会有不同的检测效果。一般说来,对于一定检测对象的材料和结构需要开发相应的检测方法和工艺,并不存在普通适用的无损检测方法和仪器。

无损检测方法由于入射和测量物理能量种类和在介质中的传播方式、检测信号的抽出、处理和可视化手段等的不同,而具有非常多的种类,其相应的检测性能、泛用性、经济性等也各不相同。电磁无损检测的入射能量是电磁能,由于其相应的响应信号多直接为电磁信号且一般检测不需要物理接触,因此具有适用性强、设备简单、检测效率高等特点。本书主要围绕电磁无损检测方法,就其物理原理、检测信号数值模拟方法等理论部分开展重点说明,为电磁无损检测系统的开发、优化和信号处理方法的便捷高效化等提供必要的手段和支撑。

### 1.1.2 无损检测一般原理

无损检测方法即为在不对检测对象结构造成损伤的前提下,通过向检测对象入射物理场,并测量和分析其反应,对材料内部缺陷和损伤状况进行推测、判定的方法。不同种类的无损检测方法对应不同的入射能量,如射线、超声波、热流、电磁场、机械振动等。由于缺陷和损伤部位的材料特性变化会影响入射物理场的传播特性,如射线的吸收,声波的反射、折射、衍射,电导率、磁导率的变化等,通过对物理场传播特性变化进行测量即可实现缺陷

和损伤的检测和评价。因此,不同的检测对象需要根据其材料、几何特征选择相应的人射物理能量和检测方法。一般而言,人工主动施加入射能量并检测其反应的方法称为主动无损检测方法,它是无损检测方法的主流。也有部分无损检测方法无需人工入射能量,而是直接测量并分析结构和材料损伤所诱发的物理场变化,这些方法称为被动无损检测方法。

对于主动无损检测方法,如图 1-1 所示,其检测过程可用如下公式定性描述:

$$N_{\text{output}} = F(N_{\text{input}}) \quad (1-1)$$

式中,  $N_{\text{output}}$  和  $N_{\text{input}}$  分别为无损检测中入射和检出物理能量参数向量;  $F$  为检测对象和物理场的相互作用函数。

函数  $F$  一般为检测对象的物理特性  $M$  和几何特征参数  $G$  的函数,可表示为

$$F = F(M, G_1, G_2) \quad (1-2)$$

式中,变量  $M$  为材料结构、分布函数系数等;  $G_1$ 、 $G_2$  分别为材料几何信息和缺陷信息的状态向量。

由于材料几何信息一般已知,缺陷信息状态向量  $G_2$  可从式 (1-2) 进行求解,一般表达为

$$G_2 = F^{-1}(N_{\text{output}}, N_{\text{input}}, M, G_1) \quad (1-3)$$

式 (1-3) 表示,通过入射能量并测量其反应,结合物理定律以及对象材料几何信息,可以得到材料内部缺陷的状态向量,此即定量无损检测的目标。式 (1-1) 表征了输入物理量和测量所得物理量的关系,即对应无损检测理论正问题。而式 (1-3) 则对应反问题,即从检测所得输出量确定函数  $F$  中包含的检测对象信息。

材料特征量  $M$  一般与物理场和检测对象相互作用过程中能量传播路径上的材料物理参数  $m(g)$  相关,可定性用积分表示为

$$M = \int_{in}^{out} m(g) dg \quad (1-4)$$

式中,  $in$  和  $out$  分别为能量进入和离开检测对象的位置,即路径的起点和终点。例如,对于涡流检测,则对应涡流路径的电导率、磁导率等材料特征。如果物理场的传播路径中包含缺陷(损伤)区域,可以利用缺陷和健全部位的物理参数的量值和缺陷部位的大小来描述材料特征量  $M$ ,即可表示为

$$M = M(m_s, m_d, g_s, g_d) \quad (1-5)$$

式中,  $m_s$ 、 $m_d$ 、 $g_s$ 、 $g_d$  中的  $m$  表示分布物理参数,  $g$  表示几何大小参量,下角标  $s$  表示健全部位,下角标  $d$  表示缺陷部位。

在实际无损检测试验中,  $N_{\text{input}}$  即对应探头的激励单元向检测对象入射的物理场的标度变量,  $N_{\text{output}}$  即为探头的检测单元测量所得信息,两者在检测试验后均为已知量。对这些测量结果,利用式 (1-3) 和式 (1-5),从原理上可以获得缺陷、损伤相应的物理参数的变化,进而可获得缺陷和损伤的状态,即材料内部信息  $g_d$  和  $m_d$ ,其中  $g_d$  对应缺陷部位几何信息,  $m_d$  对应缺陷部位的损伤状态的程度。

### 1.1.3 电磁无损检测方法

电磁无损检测方法即为入射或测量物理场为电场和(或)磁场的无损检测方法。涉及

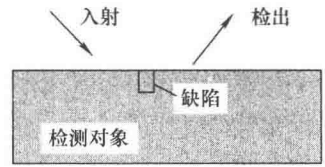


图 1-1 无损检测基本原理



的物理能量主要包括恒定电场、恒定磁场、涡流场、交变电场、交变磁场、电磁波等，相应的材料特性主要有电导率、磁导率、压电/压磁系数等，也包括描述电磁材料特性的具体参量，如矫顽力、剩磁强度、居里点、增量磁导率、磁噪声强度等。具体的电磁无损检测方法包括常规涡流检测、远场涡流检测、非线性涡流检测、脉冲涡流检测、漏磁检测、脉冲漏磁检测、电磁超声检测、直流电位检测、交流电位检测、磁噪声检测、磁记忆检测、增量磁导率检测等方法。

把材料中的传导电流作为检测物理量的代表方法是直流电位检测方法。其原理为通过电极向检测对象施加恒定直流电流，然后扫描电极，测量导电性检测对象表面的电位分布，以对检测对象进行缺陷判定和定量分析。缺陷或损伤会导致材料局部电导率发生变化，从而导致传导电流在缺陷部位发生绕流等，进而影响表面电位分布，这正是直流电位检测方法的检测原理。直流电位检测方法需要探针接触试样进行测量，所必需的表面处理等会影响其检测效率和适用范围。作为一种变型，向检测对象材料施加交流传导电流的方法即为交流电位方法。由于导体中的交流电流分布可以通过线圈进行非接触测量，可以解决直流电位方法的接触电阻的噪声问题。但交变电流的趋肤效应也限制了交流电位方法对内部/深层缺陷的检测能力。

采用磁场能和基于材料磁特性进行无损检测的代表性方法即为漏磁检测法。其基本原理是通过施加外部磁场使检测对象磁化，在缺陷附近由于磁阻的变化会引起磁力线/磁场能的外泄形成漏磁场。对漏磁场采用磁粉、磁场传感器等进行测量即可发现缺陷，对信号进一步处理分析也可获得缺陷的几何图像信息。材料的磁学特性还包括很多其他效应，如巴克豪森磁噪声、非线性磁滞效应、磁致伸缩和力磁效应等。基于残余应力和塑性变形等微观损伤对磁畴运动的影响，巴克豪森磁噪声方法通过测量磁噪声推断磁畴运动（转动），进而对残余应力和塑性/疲劳损伤进行评价。而基于非线性磁滞效应的非线性磁导率、矫顽力、剩磁以及增量磁导率的测量则主要着眼于损伤对磁滞回线参量的影响，即入射磁场能量和响应磁场信号的非线性相关性。通过入射磁场能并测量磁性特性参数可有效实现对磁性金属材料机械损伤的检测。自然磁化方法和磁记忆方法机理有所不同，前者主要基于奥氏体不锈钢的磁性相变导致的损伤诱发磁化和漏磁场，而后者主要是由于力磁效应导致磁性介质产生漏磁场。由于相变和力磁效应与材料中的应力场和塑性变形场相关，自然磁化法和磁记忆方法是测量评价残余应力和塑性变形的有效手段。

基于电磁感应涡流能量进行缺陷和损伤检测的方法通称为涡流检测方法。根据具体方法的特点，又可分为常规涡流检测方法、脉冲涡流检测方法、非线性涡流检测方法和远场涡流检测方法等。在导体检测对象附近施加时变磁场会在导体表层感生涡流，由于导体内部的缺陷和损伤导致电导率变化，使缺陷部位和健全部位的涡流会有所不同，通过检测涡流产生的二次磁场，即可对材料中的缺陷进行检测和定量评价。常规涡流检测方法一般采用正弦波激励电流，并通过检波获取特定频率检测信号。而脉冲涡流检测方法则采用脉冲激励磁场，并一般采用磁场传感器直接测量相应的二次磁场信号，基于信号峰值和过零点等特征信号参数对缺陷进行检测和评价。由于脉冲信号包含更多频率成分，且可使用更大激励磁场，对深部缺陷和多层结构的检测相对具有优势。非线性涡流检测主要着眼于电导率和磁导率的非线性特性，通过检测感应涡流产生的二次磁场中的高次谐波成分对材料中的损伤进行检测和评价。另外，远场涡流检测本质上是一种具有特殊探头结构的涡流检测方法，主要用于磁性管