

高等工科院校无损检测专业规划教材

# 涡流检测

WOLIU JIANCE

任吉林 林俊明 徐可北◎编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



赠电子课件

TG115.28-43  
06

· 013033848

高等工科院校无损检测专业规划教材

# 涡流检测

任吉林 林俊明 徐可北 编



TG115.28-43  
06



机械工业出版社



北航

C1642905

848880810

本书是根据高等工科院校专业课程教学的基本要求,结合南昌航空大学无损检测专业30年来的教学经验,在不断探索教学改革的基础上编写的。

本书从电磁基本理论开始,系统介绍了涡流检测方法的基础理论、基本原理、设备材料、主要应用、检测标准、规范工艺及新技术等知识。每章后均附有复习题,并在最后一章编写了部分有关基础原理及应用方面的实验,以利于读者对基本理论与概念的学习和对基本操作技能的掌握。

本书可作为本科及大专院校无损检测及相关专业的教材或教学参考书,也可供从事无损检测研究及工程应用的技术人员参考。

本书配有电子课件,凡使用本书作为教材的教师可登录机械工业出版社教材服务网 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 注册后下载。咨询邮箱: [cmpgaozhi@sina.com](mailto:cmpgaozhi@sina.com)。咨询电话:010-88379375。

## 图书在版编目(CIP)数据

涡流检测/任吉林等编. —北京:机械工业出版社,  
2013.3

高等工科院校无损检测专业规划教材  
ISBN 978-7-111-41811-5

I. ①涡… II. ①任… III. ①涡流检验-高等学校-  
教材 IV. ①TG115.28

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第049484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:王海峰 责任编辑:王海峰

版式设计:霍永明 责任校对:任秀丽

封面设计:马精明 责任印制:张楠

北京京丰印刷厂印刷

2013年4月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·15印张·368千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-41811-5

定价:29.00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

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

# 序

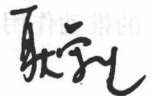
无损检测是一门综合性科学（边缘科学），它利用声、光、热、电、磁和射线等与物质的相互作用，在不损伤被检对象使用性能的前提下，探测其内部或表面的各种宏观缺陷，并判断缺陷位置、大小、形状和性质。无损检测的研究领域涉及物理学、材料学、力学、电子学、计算机、声学、自动控制和可靠性理论等多门学科。随着现代工业和科学技术的发展，该技术已在愈来愈多的行业得到了广泛的应用，其水平高低已在很大程度上反映了一个国家的工业和科技发展水平。

随着对无损检测技术人员在知识结构、理论基础、工程实践能力方面提出更高和更广的要求，对无损检测技术人才的培养也提出了不少新的和特殊的要求。南昌航空大学是我国最早创办无损检测本科专业的高等学校，30年来，已为我国航空、航天、石油、化工、核工业、电力、机械等行业输送了大批无损检测专业技术人才，有力地促进了我国无损检测事业的进步和发展，也为我国无损检测教育事业的发展作出了突出贡献，在国内无损检测界享有很高的声誉。

南昌航空大学在无损检测人才培养过程中，始终关注专业教材的建设，不仅编写了一套校内教学讲义，还先后由航空工业出版社、机械工业出版社正式出版发行了《射线检测工艺学》、《电磁无损检测》、《激光全息无损检测》、《无损检测技术》等教材，推动了我国的无损检测高等教育工作。2007年，南昌航空大学无损检测专业通过了教育部评审，批准为国家特色专业建设点。在国家特色专业建设中，他们继续把编写出版无损检测高等教育系列教材作为主要的建设任务之一。这次由机械工业出版社出版的这套教材，就是他们在原教材的基础上，结合多年来教学改革的经验体会，融入近年来无损检测技术发展成果重新编写改版的新教材。

这套教材对无损检测常规方法和几种非常规方法进行了系统介绍，不仅突出了各种检测方法的基本理论体系、方法工艺和检测技术这一架构，还对该领域的最新研究成果及应用前景作了系统介绍和分析，它既可作为无损检测高等教育的本科生教材，也可作为以无损检测为研究方向的硕士和博士研究生的参考教材，对从事无损检测专业的工程技术人员也必然会有重要参考价值。相信这套教材的出版一定会为促进我国无损检测高等教育事业和推动我国无损检测技术的发展发挥重大作用。

中国无损检测学会理事长



2011年11月



# 丛书序言

无损检测是一门涉及多学科的综合技术，其特点是在不破坏构件材质和使用性能的前提下，运用现代测试技术来确定被检测对象的特征及缺陷，以评价构件的使用性能。随着现代工业和科学技术的发展，无损检测技术正日益受到人们的重视，不仅它在产品质量控制中所起的不可替代的作用已为众多科技人员所认同，而且对从事无损检测技术的专业及相关人员提出了相应的要求。本套教材正是为了满足各方面人士对无损检测技术学习和参考的需要，促进无损检测技术的进一步发展，根据高等工科院校专业课程教学基本要求，结合南昌航空大学无损检测专业 30 年来的教学经验，在不断探索教学改革的基础上编写的。

南昌航空大学无损检测专业是 1984 年经原国家教委批准在国内率先创办的本科专业，经过近 30 年的建设与发展，随着本科专业名称的多次调整，南昌航空大学无损检测专业归类为“测控技术与仪器”专业。但学校始终坚持以无损检测为特色，始终坚持把“培养具有扎实理论基础和较强工程实践能力的高级无损检测技术专业人才”作为专业的培养目标。经过多年努力，把“测控技术与仪器”（即原无损检测）专业建设成为国家级特色专业。并且，在专业教学中，在全国无损检测学会的支持下，经过多年的艰苦努力，编写了国内首套无损检测专业教材。这套教材曾被国内多所高等院校同类及相近专业采用，其中，《射线检测工艺学》和《电磁无损检测》等还由航空工业出版社正式出版。近年来，在国家特色专业建设过程中，为了紧跟无损检测技术进步对人才培养提出的新要求，我们按照新的教学计划对教材进行了重新规划和编写。本套教材不仅汇集了当前无损检测技术的最新成果，有一定的深度和广度，注重理论联系实际，而且更加注意教材的系统性与可读性，以满足各层次读者的需要。

本套教材共 10 册，包括《超声检测》、《射线检测》、《磁粉检测》、《涡流检测》、《渗透检测》、《声发射检测》、《激光全息与电子散斑检测》、《质量控制》、《无损检测专业英语》、《无损检测技能训练教程》。

由于无损检测技术涉及的基础学科知识和工业应用领域十分广泛，而且，新材料、新工艺的出现，以及信息、电子、计算机等新技术在无损检测中的应用十分迅速，很难在教材编写中得到及时反映，因此所编教材难免会有疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

本套教材在编写过程中参考了国内外同类教学和培训教材，得到了国内诸多同行专家教授的指导和支持，在此一并致谢！愿本套教材能为提高及促进无损检测专业的发展起到积极的推动作用。

无损检测专业教材编写组

2011 年 10 月

# 前 言

无损检测是一门涉及多学科的综合性的技术，其特点是在不破坏构件材质和使用性能的条件下，运用现代测试技术来确定被检测对象的特征及缺陷，以评价构件的使用性能。随着现代工业和科学技术的发展，无损检测技术正日益受到人们的重视，不仅它在产品质量控制中所起的不可替代的作用已为众多科技人员所认同，而且对从事无损检测技术的专业及相关人员提出了相应的要求。本书的出版，正是为了满足各方面人士对无损检测技术学习和参考的需要，以促进无损检测技术的进一步发展。

随着无损检测技术应用的日益广泛，当前已发展了几十种无损检测方法。其中，以材料电磁性能变化为判断依据来对材料及构件实施缺陷探测和性能测试的一类检测方法通称为电磁法，其基本原理是以电磁学的理论为基础的。涡流检测技术即是以电磁感应为基本原理的一种常规无损检测方法。本书即为系统介绍涡流检测方法的技术书籍，全书从电磁基本理论开始，比较全面地讨论了涡流检测方法的基础理论、基本原理、设备材料、主要应用、检测标准、规范工艺及新技术等。在编写中，各章相对独立，力图做到有较好的系统性和完整性，以及较宽的理论知识面和一定的实用价值。同时，针对涡流检测多用途的特点，本书比较全面地介绍了涡流检测在管、棒材原材料探伤、在役设备管道的维修检验、非规则形状零件的缺陷检测与电导率测量、材质分选及膜层厚度测量等，用以满足不同检验要求读者的学习需要；以相当的篇幅介绍国内外涡流检测标准、规程及工艺卡编制等方面的知识，以利于读者学以致用，解决生产实际中遇到的问题；适当地介绍了数种涡流检测新技术的基本原理、特点及应用，以方便有兴趣和能力的读者拓展知识面。本书在每章的后面还附有一定数量的复习题，以便于读者对基本理论与概念的学习参考。

本书主要作为理工科大学无损检测专业和相关专业师生的参考教材，也可作为在职无损检测高、中级人员的系统培训参考教材，同时可供从事工程设计与应用、技术管理及质量控制等方面无损检测工作人员参考。

全书共分8章，第1、2、3章由任吉林编写，第4、5、6章由林俊明编写，第7、8章由徐可北编写，全书由任吉林统稿，沈功田负责主审。

本书在编写、出版过程中，始终得到全国无损检测学会电磁（涡流）检测专业委员会及教育工作委员会的关心和支持，谨此表示谢意！同时，还要感谢兄弟单位有关同志的大力支持和协助，为本书的编写提供了有益的建议和参考资料，书中有的内容还参考了部分专业书刊和手册，李寒林、陈曦、舒铭航等同志参与了本书部分图文的编辑工作，在此，一并表示谢意！

由于编者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

# 目 录

序	
丛书序言	
前言	
第1章 绪论	1
1.1 电磁学的发展	1
1.2 涡流检测的发展	4
1.3 涡流检测的应用与特点	7
复习题	8
第2章 电磁基本理论	9
2.1 电学与磁学基础	9
2.1.1 电学基本定律	9
2.1.2 金属的导电性	10
2.1.3 物质的磁化	14
2.1.4 金属的磁特性	24
2.2 交流电路	27
2.2.1 直流电流	27
2.2.2 交流电流	27
2.2.3 阻抗及其相量图	29
2.3 电磁现象的基本规律	30
2.3.1 毕奥—萨伐尔定律	30
2.3.2 电磁感应定律	31
2.3.3 自感与互感	32
2.3.4 电磁场基本方程式	34
2.3.5 似稳电磁场	35
2.4 导体中的电磁场	37
2.4.1 电磁渗透方程	37
2.4.2 半无限平面导体中的电磁场	39
2.4.3 导电长圆柱体中的电磁场	41
2.4.4 导水管材中的电磁场	43
复习题	45
第3章 涡流检测阻抗分析法	46
3.1 线圈的阻抗及其归一化	46
3.1.1 线圈的阻抗	46
3.1.2 阻抗归一化	47

3.2 有效磁导率和特征频率	48
3.2.1 有效磁导率	48
3.2.2 特征频率	50
3.3 涡流试验相似律和复阻抗平面图	52
3.3.1 涡流试验相似律及模型试验	52
3.3.2 复阻抗平面图	55
3.4 线圈的阻抗平面分析	57
3.4.1 含导电圆柱体线圈的阻抗分析	57
3.4.2 含导电管材的穿过式线圈的阻抗分析	61
3.4.3 放置式线圈阻抗分析	66
3.4.4 其他形式线圈的阻抗分析	69
复习题	71
<b>第4章 涡流检测设备</b>	<b>72</b>
4.1 涡流传感器	72
4.1.1 涡流传感器的分类	73
4.1.2 检测线圈信号检出电路	75
4.2 涡流检测仪器	78
4.2.1 涡流检测仪器的分类	78
4.2.2 涡流检测仪器的基本组成及电路	79
4.2.3 涡流检测仪器的智能化	89
4.3 试样与辅助装置	94
4.3.1 标准试样与对比试样	94
4.3.2 涡流检测辅助装置	99
4.3.3 涡流检测仪器的性能评价	102
4.4 涡流检测设备的新发展	105
4.4.1 多功能涡流检测仪	105
4.4.2 多功能检测同屏综合显示系统	106
4.4.3 涡流检测网络系统	107
4.4.4 视频涡流检测系统	109
4.4.5 探头推拔器	111
4.4.6 多功能集成检测设备	112
4.4.7 掌上型电磁检测仪器	114
复习题	114
<b>第5章 涡流检测应用</b>	<b>117</b>
5.1 涡流检测应用分类	117
5.2 涡流探伤	117
5.2.1 涡流探伤响应特点	117
5.2.2 管、棒材涡流探伤	118
5.2.3 非管、棒材涡流探伤	128

5.3	电导率测量与材质分选 .....	140
5.3.1	非铁磁性金属电导率的涡流检测 .....	140
5.3.2	铁磁性材料的电磁分选 .....	142
5.4	覆盖层厚度测量 .....	143
5.4.1	非导电覆盖层厚度的涡流法测量 .....	143
5.4.2	非铁磁性覆盖层厚度的磁性法测量 .....	147
5.5	涡流检测典型应用示例 .....	148
5.5.1	原材料涡流探伤 .....	148
5.5.2	在役设备探伤 .....	150
5.5.3	零件的涡流探伤 .....	152
5.5.4	导电材料电导率的涡流检测 .....	155
5.5.5	覆盖层厚度的涡流测量 .....	156
	复习题 .....	158
<b>第6章 涡流检测新技术</b> .....		161
6.1	概述 .....	161
6.2	多频涡流检测技术 .....	161
6.2.1	多频涡流检测基本原理 .....	162
6.2.2	多频分析处理法 .....	163
6.2.3	多频涡流仪器 .....	168
6.3	远场涡流检测技术 .....	169
6.3.1	远场涡流检测系统 .....	169
6.3.2	远场涡流方程 .....	171
6.3.3	远场涡流图 .....	172
6.3.4	远场涡流探头 .....	173
6.4	脉冲涡流检测技术 .....	174
6.5	磁光涡流检测技术 .....	176
6.5.1	基本原理 .....	176
6.5.2	磁光涡流检测特点及应用 .....	177
6.6	涡流阵列检测技术 .....	178
6.6.1	涡流阵列检测技术的原理 .....	179
6.6.2	涡流阵列检测技术特点及应用 .....	180
	复习题 .....	182
<b>第7章 涡流检测标准</b> .....		184
7.1	概述 .....	184
7.1.1	标准的基本知识 .....	184
7.1.2	国内外标准的代号 .....	185
7.1.3	涡流检测标准概况 .....	186
7.2	涡流检测标准 .....	187
7.2.1	国内主要涡流标准 .....	187



---

7.2.2 国外主要涡流标准 .....	198
7.2.3 验收标准 .....	203
复习题 .....	210
<b>第8章 涡流检测规程与工艺卡 .....</b>	<b>212</b>
8.1 概述 .....	212
8.1.1 相关术语的定义与层次划分 .....	212
8.1.2 检测规程与工艺卡的一般要求与区别 .....	213
8.1.3 涡流检测基本操作规程 .....	214
8.2 典型涡流检测规程与检测工艺的编制及分析 .....	217
8.2.1 管、棒材探伤 .....	218
8.2.2 零件或结构的探伤 .....	220
8.2.3 铝合金电导率的测量 .....	224
8.2.4 覆盖层厚度的测量 .....	227
复习题 .....	228
参考文献 .....	229

# 第1章 绪论

## 1.1 电磁学的发展

涡流检测是常规无损检测技术之一，是以电磁感应原理为基础，依据材料电磁性能变化来对材料及构件实施缺陷探测和性能测试的电磁检测方法，其基本原理是以电磁学的理论为基础的。可以说，在科学进步和社会实践发展史上，任何一种无损检测方法都无法与包括涡流检测在内的电磁检测的地位相比。

电磁学建立和发展的历史过程大致如下：从远古到18世纪中、晚期是电磁现象的早期研究阶段。在这一时期，以对电磁现象的观察、实验及定性研究为主。从18世纪晚期到19世纪上半叶，人类开始了对电、磁现象的定量研究，以及电磁感应现象的发现和深入研究。这一阶段的研究开始揭示了电现象和磁现象的本质联系，并逐步建立起电磁学理论体系，使电磁学理论日趋完善。19世纪下半叶，麦克斯韦（J. C. Maxwell）在原有电磁学理论的基础上提出了电磁场的概念，并建立了电磁场理论的完整体系。至此，电磁学继牛顿力学之后，经过人类几个世纪的工作，终于在20世纪前叶发展成为经典物理学的重要组成部分。

大约公元前6世纪，古希腊的“七贤”之一，米利都的泰勒斯（Thales）记录了磁石吸铁和摩擦后的琥珀吸引轻小物体的现象。但古希腊人对电磁现象的认识仅限于磁石吸铁和摩擦生电，还不知道磁铁的极性和可以存在于电荷之间或磁极之间的排斥现象。

中国古代对磁的认识可以追溯到冶铁业创建之初。《管子·地数》是最早记载磁石的文献，其中写道“上有慈石者，下有铜金”。“铜金”指的是一种铁矿或与铁矿共生的矿物，利用“慈石”（磁铁）可以找到它的位置。而《吕氏春秋》则对磁石的吸铁性作了明确的记载，即“慈石召铁，或引之也”（见《春秋纪·精通》）。到了公元1200年，古书中已有使用指南针的记载。中国古代对电的认识最早纪录是东汉王充对于摩擦起电现象的记载和解释。他说：“顿牟掇芥，磁石引针。……他类肖似，不能掇取者，何也？”（见《论衡·乱龙》）。西晋时期，《博物志》则记载了摩擦起电的现象。

对电现象和磁现象的系统研究直到17世纪才开始。1600年，英国医生吉尔伯特（William Gilbert）发表了《论磁、磁体和地球作为一个巨大的磁体》（简称《磁石论》）（*De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno magnete Tellure*）。总结了前人对磁的研究，记载了大量实验，周密地讨论了地磁的性质，使磁学开始从经验转变为科学。

在18世纪期间，没有一个物理学分支能像电学一样如此成功地得到发展。其中，斯蒂芬·格雷（S. Gray）发现了电传导性的区别取决于构成物体的物质，例如，金属丝能导电，蚕丝不能导电，并证明了人体是导体。杜费（Du Fay）的实验则作出了出乎预料的结论：所有的物体都可以带电。并且他发现有两种电，分别称为玻璃电和松香电。1660年，盖里克（Otto Von Guericke）发明了摩擦起电机。到1747年前后，美洲的富兰克林（Benjamin Franklin）与他的研究团体把他们的全部时间致力于电的实验。他们首先假定：电火是一种

普通元素，在所有的物体中存在。如果一个物体得到了比它正常的分量更多的电，就被称为带“阳电”；如果一个物体带少于它正常分量的电，就被指定为带“阴电”。两个带有不同性质电荷的带电体，相互接触后可以呈现中性。根据这种相消性和数学上的正、负数的概念，他把“阳电”称为正电，把“阴电”称为负电，并进一步从电荷的相消性，推出如下结论：①正电和负电在本质上不应有什么差别；②摩擦起电过程中，总是形成等量的异种电荷；③摩擦起电过程中，一方失去的电荷与另一方得到的电荷在数量上相等。于是，他总结出一个普遍的原理：电荷既不能创生也不能消灭，只不过是某一个带电体转移到另外一个带电体；在电荷转移过程中，电荷的总量是不变的。这是电荷守恒定律的最原始的表达方式。

由于富兰克林的贡献，电学的研究从单纯的现象观察进入到精密的定量描述，使人们开始有可能用数学方法来表示和研究电现象。因此后人把富兰克林称为电学理论的奠基人。

1754年，康顿（John Canton）用电流体假说解释了静电感应现象。至此，静电学三条基本原理（静电力基本特性、电荷守恒和静电感应原理）都已经建立，人们对电的认识已有了初步完整的成果。

然而，建立电学的定量规律的功劳应归功于库仑（Coulomb）。18世纪中叶，力学中引力理论的发展（即万有引力定律的确立），为静电学和静磁学提供了理论武器。这一阶段，德国柏林科学院院士爱皮努斯（F. U. T. Aepinus）等人用类比法进行了引力和电力（或磁力）相似性的推测，对发现库仑定律起到了借鉴作用。通过对毛发和金属丝的扭转弹性的研究，库仑不仅于1777年发明了扭转天平及扭秤，并精确性做了大量实验，证明了牛顿的反平方定律在电（及磁）的吸引和排斥中也适用，并且这种作用跟电量的乘积成正比。1785年，库仑发表了第一篇有关电荷作用力的论文，报道他对电力随距离变化的研究，公布了通过扭秤实验得到的库仑定律，使电学和磁学进入了定量研究的阶段。

18世纪末，电学从静电领域发展到电流领域。1780年，伽伐尼（Aloisio Galvani）发现动物可以带电。而伏打（Alessandro Volta）比他更深刻地探究了这个问题，并在多年实验的基础上，于1800年描述了伏打电堆，把它称为“人造发电机”。伏打电堆的发明，提供了产生恒定电流的电源，使人们有可能研究电流的规律和电流的各种效应，从此电学进入了一个飞速发展的时期——研究电流和电磁效应（电磁学）的新时期。

电磁学起源于1819年著名的电生磁的“奥斯特实验”。当年，奥斯特（Hans Christian Oersted）在哥本哈根大学的一次讲演结束后，用已经做了其他实验的强伽伐尼电池“试做了一次导线和磁针平行放置的试验”。这时，他十分震惊地发现：磁针发生了大的振动（几乎是和磁子午线成直角），并且当掉转电流的方向时，磁针就偏向相反的方向。奥斯的发现突破了电学与磁学彼此隔绝的情况，开辟了电学研究史上的新篇章。此后，电磁学的发展势如破竹。19世纪二三十年代成了电磁学大发展的时期。

首先是法国科学家安培（Andre-Marie Ampere），他在得知奥斯的发现之后，受“磁化力的作用在和导线成直角的平面上”这一事实的启发，把导线拧成螺旋形，以便强化对放在它内部的磁针的作用，进而提出了右手定则。安培还发现了一个电流对另一个电流的作用：相同方向的平行电流彼此相吸；相反方向的平行电流彼此相斥。他不仅提出了关于电流使磁体偏斜的方向法则——安培法则，还提出了电动力理论和分子电流假说，认为磁在本质上是由于电流的作用，并于1823年发表论文，给出了关于这个新现象的数学理论。应该说，

在电磁学规律的定量表述方面, 安培作出了特殊贡献, 他在一系列试验和理论研究的基础上得到的普遍的电动力公式, 为电动力学奠定了基础。

1821年毕奥(J. B. Biot)和萨伐尔(Felix Savart)通过磁针周期振荡的方法发现了毕奥-萨伐定律。1826年, 欧姆(George Simon Ohm)先后发表了两篇论文, 报道了他的实验结果, 从理论上推出了类似现在的欧姆定律等。

值得一提的是, 19世纪电磁领域中最伟大的实验家法拉第(Michael Faraday)受奥斯特实验的启示, 早在1824年, 他就认为磁体也应当对电流有反作用。经过近十年的潜心研究, 终于在1831年8月的一次试验中, 法拉第发现了磁生电的现象和感应电流, 证明电流是可以被磁激起的。法拉第对电磁学的贡献不仅是发现了电磁感应, 他还在大量试验的基础上构想出描绘电磁作用的“力线”图像, 创建了力线思想和场的概念, 为麦克斯韦电磁场理论奠定了基础。

法拉第发现电磁感应现象后不久, 又有两项有关电磁感应的重大发现问世。一是亨利(J. Henry)发现了自感现象。二是1833年, 楞茨(H. F. E. Lenz)发现了楞茨定则; 1834年, 由楞茨定义了电动势, 指出电磁场会产生作用力来阻止任何试图改变其强度和构造的作用力。电流磁效应的发现使电流的测量成为可能。

这一期间还有一位物理学家的的工作值得一提, 他就是欧姆。德国人欧姆(1789~1854年)是一个天才的研究者, 30岁时当了科隆大学预科的数学和物理学教师的他做了一个关于金属的相对传导率的试验。他发现同样粗细、不同材料的导线(铜、金、锌、黄铜、铁、铂、锡、铅等)在不同的长度下具有相同的传导率。此后, 经过各种有关电传导率和电流测量的进一步试验, 并进行科学归纳和理论分析, 欧姆在1826年发表了两篇论文后, 于次年出版《用数学推导的伽伐尼电路》一书, 严格推导了关于电压、电流与电阻之间关系的欧姆定律。欧姆定律的建立, 在电学发展史上有重要意义。但是, 当时欧姆的研究成果并没有得到德国科学界的重视。直到1841年, 英国皇家学会才肯定欧姆的功绩, 为他颁发了英国皇家学会的科普利奖。

之后, 在法拉第力线思想的激励下, 汤姆生(Joseph John Thomson)对电磁作用的规律进行过有益的尝试。他深感有必要把法拉第的力线思想翻译成数学公式, 定量地作出表述。于是他利用类比方法, 从弹性理论和热传导理论得到借鉴, 利用傅里叶的热分析方法, 把法拉第的力线思想与拉普拉斯、泊松等人已经建立的完整的静电理论结合在一起, 初步形成了电磁作用的统一理论。1847年, 汤姆生在题为《论电力、磁力和伽伐尼力的力学表征》一文中, 以不可压缩流体的流线连续性为基础, 论述了电磁现象和流体力学现象的共性。

英国人麦克斯韦(James Clerk Maxwell)及时地总结了前人已有的成就。他受到法拉第力线思想的鼓舞, 又得到汤姆生类比研究的启发, 感到有必要对力线的分布及应力性质给予机理性的说明, 乃转而运用模型理论。在这个过程中, 他发现电磁现象与流体力学现象有很大差别, 电现象与磁现象也不尽相同, 靠几何上的类比无法洞察事物的本质。于是他转向运用模型来建立假说, 敏锐地抓住了位移电流和电磁波这两个关键概念, 提出了“涡旋电场”和“位移电流”的假设, 很好地解释了电磁感应。最后, 他终于甩掉一切机械论点, 径直把电磁场作为客体摆在电磁理论的核心地位, 开创了物理学的又一个新的起点。

麦克斯韦提出的“位移电流”假设在电磁场理论中具有非常重要的地位。这是一个重大的突破, 不仅需要决断, 而且要有足够的胆略, 因为在这以前, 甚至到麦克斯韦去世时

(1879年)都还没有人做出过可靠的试验证明位移电流的存在。

在提出“涡旋电场”和“位移电流”的基础上,1865年,麦克斯韦发表了关于电磁场理论的论文:《电磁场的动力学理论》(A dynamical theory of the electromagnetic field),全面地论述了电磁场理论。他指出“电磁场是包含和围绕着处于电或磁状态的物体的那部分空间,它可能充入任何一种物质”,“介质可以接收和储存两类能量,即由于各部分运动的‘实际能’(即动能)和介质因弹性从位移恢复时要做功的‘位能’”。然后,麦克斯韦讨论了电磁感应,再次运用类比方法来说明电流的电磁动量(electromagnetic momentum),并提出了电磁场的普遍方程组。

对麦克斯韦的功绩,爱因斯坦(Albert Einstein)作了很高的评价,他在纪念麦克斯韦100周年的文集中写道“自从牛顿奠定理论物理学的基础以来,物理学公理基础的最伟大的变革,是由法拉第和麦克斯韦在电磁现象方面的工作所引起的”,“这样一次伟大的变革是同法拉第、麦克斯韦和赫兹的名字永远连在一起的。这次革命的最大部分出自麦克斯韦”。在麦克斯韦以后的一百多年的时间里,电学和磁学方面的物理学家及研究者们一直从事着麦克斯韦理论的应用研究。然而,尚未有人能在麦克斯韦的原理中增加任何有意义的新定律。麦克斯韦方程组归纳了有关电磁回路和场的所有知识,可以用来解释所有的宏观电磁现象。同样,也为分析所有的电磁检测,包括涡流检测问题奠定了电磁理论基础。

## 1.2 涡流检测的发展

1831年,法拉第发现了电磁感应现象,并在实验的基础上提出了电磁感应定律。在这以后的一百多年里,电磁学的理论及实验不断完善与发展,为电磁检测的创立奠定了坚实基础。

早在19世纪末期,人们就发现电磁方法可以用来进行金属材料的分选;在20世纪开始之前,电磁方法主要应用于材料分选和不连续性检测;从1890~1920年,人们致力于研究减少薄钢板中的涡流和磁滞损耗;1921~1935年间,涡流探伤仪和涡流测厚仪先后问世;二战期间(1935~1945年),许多领域技术的快速发展促进了对无损检测的需求和先进检测方法的发展。雷达与声呐系统、电子仪器和用于消磁船只及磁触发水雷的磁传感器的发展,也给无损检测的科学研究带来了新的活力。战争结束后,弗洛伊德·法尔斯(Freud. Fars)将用于超声检测的超声探伤仪、福斯特(Foster)的先进的涡流仪及磁强计系统等应用于工业无损检测系统中。这些系统提供了新的功能,可用于缺陷的探测与定位、材料特性的测试和相对尺寸的无损测量等。20世纪50~60年代,伴随着战争创伤的医治和工业生产的复苏,无损检测技术(包括电磁检测)进入到一个新的繁荣时期。其中,特别值得一提的是,由于德国福斯特博士的工作,卓有成效地推动了全世界涡流检测技术在工业部门中的实际应用和发展。20世纪80年代以后,电子技术和计算机技术的发展进入了一个崭新的时期,大规模集成电路、各种新型电子器件、超级计算机和微型计算机的出现不仅提供了强大的计算工具,进一步促进了电磁检测理论研究的深入,而且为研制各种类型自动化检测系统和数字化、智能化检测仪器奠定了可靠的电子技术基础。

涡流检测的最早应用可以追溯到1879年。1842年,加贝发现铜板对摆动着的磁铁有阻尼现象,用实验揭示了涡流的存在。1876年,亚历山大·格雷厄姆·贝尔(Alexander Gra-



ham Bell) 发明了实用电话。三年后, D·E·休斯(D. E. Hounsou) 用电话作为一种“弦音计”来检测两对感应线圈间的不平衡, 并首次用涡流法对金属硬币进行了对比检测。休斯在物理学会作了相应的试验后报告说, 如果我们在—对感应线圈中引入任何导体……在这些导体中建立的电流将对初级和次级线圈产生作用, 所产生的额外电流与导体的质量和它本身的导电力成正比。若将两个1先令的硬币分别置于两个线圈中, 两者“应完全平衡”。然而, 如果硬币有最轻度的磨损, 或者温度不同, 我们可立即察觉到这种差异。休斯把他的装置称为快速和精确的硬币检测仪, 能够“检测任何合金”。

然后休斯用铜作为参考值100, 测量不同金属的电导率, 得出—系列与现在的国际退火铜标准(IACS 导电百分比) 近似的值。他也对铁磁性材料进行了检测, 以区分软铁和硬钢。最后, 他给出了表示合金成分的百分比变化时的效应(银-金、铜-锡和锡-铅)。由此, 他创立了我们今天所用的涡流和磁感应检测、分析的基本原则。

但是, 在20世纪开始之前, 将电磁方法用于材料分选和不连续性检测的发现并没有得到更多的实际应用。究其原因, —是局限于当时工业的发展尚无这方面的迫切需要, 二是未能设计和制造出实用的检测仪器或装置。例如, 这一期间的众多发展成果(如交流电源系统、变压器和其他感应装置等) 虽然提供了进行实际应用设计的基础, 但电磁设备中所用磁心材料存在的过大损耗却给人们提出了新的研究课题。因而, 1890~1925年, 人们的研究重点主要集中在减少薄钢板中的涡流和磁滞损耗方面。采用的方法有: 在金属中加入硅或其他合金元素以减少其电导率, 用更纯净的铁合金直接卷合以获得最大的磁导率和最小的磁滞损耗, 使用更薄的板材或使用绝缘层隔离钢板以限制涡流通路等。这些成果虽然与电磁检测的应用没有直接的关系, 但说明了电导率、磁导率、晶粒分布、各向异性、机械应力、合金成分和杂质成分的不同等都会分别影响到铁磁性材料的电磁性能, 也会改变通过磁化线圈测量到的电感和磁滞损耗。另外, 用直流偏压调整电源控制饱和扼流圈和磁放大器来表现电感的方法也是减少磁导率和增加电感或感抗的一种方法。

值得一提的是, 19世纪90年代, 查理·普鲁图斯·斯坦麦茨(Charlie Brutus Steinmech) 在美国通用电气公司的一段工作。当时, 交流电源系统开始得到应用, 但交流电源系统的正弦振荡电压和电流与早期爱迪生的直流电源系统分析方法相比, 在电路特性分析上带来了新的复杂性(例如, 麦克斯韦方程的详细求解需要用到向量微积分法)。斯坦麦茨发展了一种简便的分析方法, 他用称为向量(即矢量)的旋转线段来表示正弦量, 当线段围绕其一端(坐标原点)旋转时, 将它们在纵坐标上的垂直投影作为时间的函数画出, 即为正弦函数曲线。使用这些矢量, 结合复数平面表示阻抗的技术, 可把对稳态交变电流的求解转换为简单的代数和三角方法, 而不是积分的方法。二战后, 这种复数平面信号分析方法经过弗雷德里希·福斯特(Friedrich Foster)的清晰阐释而被用于涡流检测原理的分析之中。他把涡流检测线圈的复阻抗用以感抗为纵坐标、电阻为横坐标的二维平面阻抗图来表示。从而, 涡流检测人员可以很直观地从涡流检测线圈的复阻抗平面图上进行各种因素对检测线圈阻抗影响的分析。

自1925年起, 在美国有不少电磁感应和涡流检测仪获得专利权。其中, 克拉茨(Karnz) 直接用涡流技术来测量金属管管壁厚度; 法罗(Farrow) 首次设计成功用于钢管探伤的涡流探伤设备。这些仪器都比较简单, 通常采用60 Hz、110V的交流电路, 使用常规的仪表(如电压计、安培计及瓦特计等)。大多数仪器是将圆棒或其他受检材料置于简单的比

较线圈中,通过检测信号产生简单的幅值变化或使简单的电桥产生不平衡来判断检测结果。这些仪器不可能对受检对象的缺陷、性质或尺寸等进行定量分析,灵敏度较低、重复性较差,因而极少为工业部门所应用,大多数仪器存在的时间都不长。只有对圆棒、管材及钢坯等钢铁材料的电磁感应检测得到了一定的发展,其中最有代表性的是当时美国海军研究实验室罗斯·冈恩(Ross Gunn)设计的一种新型探头线圈磁化系统,该系统将两个小直径的拾取线圈对称地置于磁化线圈的径向上。这是用一个线圈进行磁化而用另一个不同尺寸的非同心位置的线圈拾取信号的最早应用实例。

1935~1945年,多种工业的快速发展促进了对无损检测的需求和先进检测方法、仪器的发展,其中也包括涡流检测仪器的进步。这一时期,基于真空和充气电子管的电子仪器的发展达到了一个高峰,涡流检测系统的信号发生器、放大器、显示和电源装置等部件的性能得到了很大的改进,问世了一大批各种形式的涡流探伤仪器和钢铁材料分选装置,较多地应用于航空及军工企业的检验部门。但是,由于在实施涡流检测时存在着多种干扰因素,而当时还没有从理论或实验研究中成功地解决涡流信号处理的问题,难以从仪器拾取的涡流信息中有效地抑制干扰,提取出有用信号,因而影响了涡流检测的灵敏度和可靠性,在一定程度上限制了涡流检测的应用范围。

真正在理论和实践上完善涡流检测技术的是德国的福斯特博士。第二次世界大战前,他在大学从事物理学的教育和在研究所开展钢及非铁磁性金属构件的电磁测量的技术工作。二战后回到德国,开始了对电磁检测仪器的进一步研究。20世纪50年代,福斯特在基础实验和理论推导的基础上发表了一批有关涡流检测的论文,公开了他的研究成果,其中包括设计制作了绝对式、差分式和对比式检测系统和探头线圈;用这些线圈系统和水银模型(将小片绝缘体插入中间模拟不连续性)进行涡流检测的试验研究;用求解带一定边界条件的麦克斯韦方程的方法对这些线圈系统进行阻抗分析等。福斯特系统、完整地建立起一套以阻抗分析法为基础的可用于各种类型涡流检测的精确的理论体系,他当之无愧地被称为现代涡流检测之父。福斯特在德国雷廷根创办了福斯特研究所,他的涡流检测技术与仪器设备卓有成效地推动了全世界涡流检测技术在工业部门中的实际应用和发展。

由于福斯特的卓越贡献,自20世纪50年代起,美国、前苏联、法国、英国等工业发达国家的无损检测界引发了开展涡流检测研究的极大兴趣。以美国为例,不仅在美国无损检测学会《无损检测手册》第一版上全文刊登了福斯特有关电磁感应和涡流检测技术的理论及工艺成果,为学习涡流检测技术提供了完整的技术资料,而且,有一批技术人员前往德国雷廷根的福斯特研究所进行培训和学习交流;同时,邀请福斯特到美国进行交流、指导及合作。期间,首先与福斯特接触的磁通公司得到了许多福斯特技术的转让,双方合作了十年,磁通公司的研究人员在麦克路格(Michaelvgo)的领导下设计和制造了福斯特的各种仪器,以及使用美国元件对福斯特的原型仪器进行改进。在美国其他的许多实验室里也有一批工作人员进行了涡流检测技术的研究,如胡戈·利比(Hugo Libby)、罗伯特·奥利弗(Robert Oliver)、罗伯特·麦克凯伦(Robert McKellen)、卫尔·多德(Well Dodd)、特·施密特(Te Schmidt)及卫·洛德(V. Lord)等都有卓越的工作成绩。他们不仅验证了福斯特的理论和设备,而且受福斯特基本成果的启发,研发了采用新的半导体器件或集成电路的仪器,并在将单频涡流向多频涡流技术发展以及开发远场涡流检测等新的技术研究中作出了一定的贡献。

20世纪70年代以后,电子技术和计算机技术的飞速发展有效地带动了涡流检测仪器设备技术性能的改进,进一步突现了涡流检测在探测导电材料表面或近表面缺陷应用中的优越性。除了前西德,美国、前苏联、法国、英国、加拿大、日本等多个工业发达国家都先后作了大量的涡流检测技术和仪器的开发性工作,发表了许多理论研究论文,也研制生产了不少高水平涡流检测设备,其中包括计算机控制的带自动平衡、检测与分选的自动化检测系统和各种不同类型的带阻抗平面显示的智能化检测仪器,进一步扩大了涡流检测在各工业部门的应用范围。

我国从20世纪60年代起开展涡流检测的研究工作,并先后研制成功了一系列检测系统。从初期的YY-11型管材探伤仪,到后来相继研制成功的YY-17、YS-1、WTS-100、TC-1000、TC-2000、ED-251、T-5、NE-30和现在用途极为广泛的EEC-96型数字涡流检测设备。这些设备在我国的航空航天、冶金、机械、电力、化工、核能等领域中正发挥着越来越重要的作用。

### 1.3 涡流检测的应用与特点

涡流检测是以电磁感应原理为基础的无损检测方法。它的基本原理可以描述为:当载有交变电流的试验线圈靠近导体试件时,线圈产生的交变磁场会在导体中感生出涡流。涡流的大小、相位及流动形式受到试件性能及有无缺陷的影响,而涡流的反作用磁场又使线圈的阻抗发生变化。因此,通过测定试验线圈阻抗的变化,就可以推断出被检试件性能的变化及有无缺陷的结论。

由于涡流检测方法是以为电磁感应为基础的无损检测方法,所以原则上说,所有与电磁感应涡流有关的影响因素,都可以作为涡流检测方法的检测对象。影响电磁感应因素及可能作为涡流检测的应用对象如下:

- 1) 不连续性缺陷的检测:裂纹、夹杂物、材质不均匀等。
- 2) 电导率测量:对导电材料组织结构、硬度、应力、热处理状态等的判断。
- 3) 提离效应测量:对导电基体金属材料上膜层厚度的测量及金属材料上腐蚀层的检测。
- 4) 厚度效应等测量:对金属薄板厚度的测量及试件几何尺寸、形状、大小等的测量。

除以上应用外,涡流检测法还可以在特定条件下进行特定的开发。表1-1所示为涡流检测应用范围的分类情况。

表 1-1 涡流检测应用范围

分类		目 的
在线检测	工艺检查	在制造工艺过程中进行检测,可在生产中间阶段剔除不合格产品,或进行工艺管理
	产品检查	最后进行工艺检验,判断产品好与不好
在役检测		为机械零部件及热交换器管等设施的保养、管理进行检验。在大多数情况下为定期检验
加工工艺的监督		主要指对某个加工工艺的质量进行检验,如点焊、滚焊质量的监督与检查
其他应用		薄金属与涂层厚度的尺寸测量、材质分选、电导率测量、金属液面检测及非金属材料中的金属搜索