

电涡流无损检测技术的 理论建模研究

范孟豹 曹丙花 张光新 著



科学出版社

电涡流无损检测技术的 理论建模研究

范孟豹 曹丙花 张光新 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对平板结构、管棒材结构件的电涡流无损检测问题,通过解析求解和有限元软件建立了探头响应的理论模型,并结合傅里叶变换、拉普拉斯变换,将模型拓展到脉冲涡流检测技术。

本书适用于无损检测专业的博士和硕士研究生及科研人员,无损检测技术人员,电磁场与电磁波从业人员,测试与仪表从业人员等阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

电涡流无损检测技术的理论建模研究/范孟豹,曹丙花,张光新著. —北京:科学出版社, 2015.11

ISBN 978-7-03-046245-9

I. ①电… II. ①范… ②曹… ③张… III. ①电涡流-无损检验-研究 IV. ①TM930.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 264616 号

责任编辑:周 丹 孙 静/责任校对:张怡君

责任印制:徐晓晨/封面设计:许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 11 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2015 年 11 月第一次印刷 印张: 10

字数: 202 000

定价: 49.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

基于电磁感应原理的电涡流检测技术是五大常规无损检测技术之一，具有速度快、成本低、无须接触试件等优点，广泛用于金属材料、零件及装备的质量与结构完整性检测与评估。当给线圈通以正弦交变的激励信号时，根据法拉第电磁感应原理可知，在被测对象中会产生感应电流即涡流，而感应产生的涡流会引起空间磁场的变化。通过应用传感器测量空间磁场的变化即获取并分析传感器的响应信号可对被测试件的质量或结构完整性进行评估。

传感响应信号的理论模型不仅是一种理解电涡流检测机理、优化探头及检测系统参数的高效低成本工具，而且也是模型法求解反问题的关键。传感器信号的理论模型有解析模型和数值模型，均是源自 Maxwell 方程组的偏微分方程的解。进入 21 世纪以来，随着有限元算法及商用软件的普及和计算能力的日益增强，数值模型应用越来越广泛，似有取代解析模型之势。虽然如此，作者认为解析模型仍然不可替代，且相关研究也在稳步推进。与数值模型相比，作者认为解析模型具有如下优势：

- (1) 解析模型提供了传感器信号与各物理参数之间清晰明确的函数关系，因此借助解析模型可更清晰地理解电涡流检测技术的物理机理；
- (2) 解析模型的计算量几乎不受线圈尺寸、激励参数和被测试件参数等影响，且计算量远小于数值模型，特别适用于基于现象法的反问题求解；
- (3) 解析模型的计算噪声远小于数值模型，因此特别适用于计算参数的微小变化对传感器信号的影响。

针对工程中最典型的平板类和管（棒）类结构件，全书阐述了常规涡流和脉冲涡流检测传感器信号的理论模型。本书第 1 章主要概述了电涡流检测技术原理、发展和理论建模的研究进展。第 2~4 章介绍了正弦激励下平板结构的线圈磁场解析模型。第 5 章应用傅里叶级数、傅里叶变换和拉普拉斯变换将第 2~4 章建立的理论模型推广到脉冲涡流响应信号的建模与仿真。第 6 章介绍了正弦激励下被测试件为管（棒）状结构时，内穿式和外穿式线圈磁场的解析模型。第 7 章研究了内穿式线圈探头与管状结构件不同心时线圈磁场的解析模型。第 8 章介绍了用于验证解析模型的有限元方法，并以实例介绍了应用 ANSYS Maxwell 软件建立有限元模型及计算的过程。第 9 章介绍了电涡流检测实验系统，特别提及了用于模型验证的实验系统与常规商业化仪器的区别。

本书第 2~8 章由范孟豹副教授执笔，第 9 章和附录由曹丙花副教授执笔撰写，

第 1 章由张光新教授、范孟豹副教授共同撰写。本书汇集了作者的博士学位论文、公开发表的学术论文及研究总结。在本书即将付印之际，作者首先感谢周泽魁教授、李威教授、侯迪波教授、黄平捷副教授多年来对作者的指导、帮助和支持。其次，作者也非常感谢国家自然科学基金(51307172)、高等学校博士学科点专项科研基金(20120095120027)、江苏省“六大人才高峰”基金(ZBZZ-041)等项目提供的资助经费，使研究得以持续进行、本书得以出版。最后，作者衷心感谢同窗叶波副教授、龚翔博士、贺光琳硕士、蔡文硕士，和自己的学生：尹亚丹硕士、刘芳沁硕士，以及在读的硕士研究生李超、谢伟、王琪、杨盼盼、吴根龙、张振林等为模型研究、验证和本书的顺利出版付出的辛勤劳动。

本书所进行的研究得到了机械电子工程江苏省重点学科、江苏高校优势学科建设工程资助项目、江苏省矿山机电装备高校重点实验室(中国矿业大学)、江苏省矿山智能采掘装备协同创新中心的大力支持，作者在此表示衷心的感谢。

在本书的出版过程中，科学出版社的相关领导与周丹编辑等给予了大力支持，并付出了辛勤劳动，作者在此表示衷心的感谢。由于作者水平有限，时间紧迫，书中难免存在错误与不足之处，欢迎读者来信批评赐教或进行学术探讨，Email:wuzhi3495@cumt.edu.cn。

作者

2015 年 11 月

符号列表

A	矢量磁位
A	矢量磁位的周向分量
A_1	线圈上方的矢量磁位周向分量
A_{fl}	线圈与导体之间的矢量磁位周向分量
A_0^{ec}	由感应涡流产生的矢量磁位周向分量
B	磁感应强度
B^{s}	线圈激励源产生的磁感应强度
B^{ec}	感应涡流场产生的磁感应强度
ω	激励信号的角频率
μ_0	真空磁导率, 为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$
μ	导电材料的磁导率
σ	导电材料的电导率
ε	介电常数
r_1	线圈内半径
r_2	线圈外半径
N_c	线圈匝数
$\delta(r, z)$	Dirac 函数, 定义 $\delta(r, z) = \begin{cases} \infty & r = 0, z = 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$
J_s	激励电流密度的周向分量幅值
$J_1(x)$	第一类一阶 Bessel 函数
$Y_1(x)$	第二类一阶 Bessel 函数
$I_1(x)$	第一类一阶虚宗量 Bessel 函数
$K_1(x)$	第二类一阶虚宗量 Bessel 函数
Z_{air}	线圈在空气中的阻抗
ΔZ	线圈阻抗变化量
ρ	求解区域半径
j	纯虚数单位
W	二阶矢量磁位

目 录

前言

符号列表

第 1 章 绪论	1
1.1 电涡流无损检测技术概述	1
1.1.1 集肤效应与渗透深度	2
1.1.2 电涡流检测技术的应用及特点	2
1.2 电涡流检测技术的发展简史	3
1.3 电涡流检测新技术	4
1.3.1 脉冲涡流检测技术	4
1.3.2 远场涡流检测技术	5
1.3.3 电涡流阵列检测技术	5
1.4 电涡流检测建模理论的研究进展与现状	6
1.4.1 常规涡流检测技术的建模理论	6
1.4.2 脉冲涡流检测技术的建模理论	9
第 2 章 多层导电结构常规涡流场的积分解析模型	11
2.1 引言	11
2.2 空气中线圈磁场的积分解析模型	13
2.2.1 空气中单匝线圈磁场的积分解析模型	13
2.2.2 空气中多匝线圈磁场的积分解析模型	15
2.3 单层导电结构常规涡流场的积分解析模型	17
2.3.1 单匝线圈激励下单层导电结构常规涡流场的积分解析模型	17
2.3.2 多匝线圈激励下单层导电结构常规涡流场的积分解析模型	18
2.4 多层导电结构常规涡流场的积分解析模型	19
2.5 电涡流检测探头响应的积分解析模型	22
2.5.1 磁场传感器输出响应的积分解析模型	22
2.5.2 线圈阻抗的积分解析模型	23
2.6 线圈阻抗变化量积分解析模型的函数特性	23
2.6.1 被积函数在零点处的极限	24
2.6.2 被积函数的收敛性	25
2.7 线圈阻抗变化量积分解析模型的数值计算	25

2.7.1	自适应辛普森算法	25
2.7.2	高斯-勒让德积分算法	26
2.7.3	数值计算注意事项	27
2.8	数值计算及实验验证	27
2.9	本章小结	29
第 3 章	多层导电结构常规涡流场的级数解析模型	30
3.1	引言	30
3.2	导电结构常规涡流场的空间分布特性	31
3.3	空气中线圈磁场的级数解析模型	32
3.3.1	空气中单匝线圈磁场的级数解析模型	32
3.3.2	空气中多匝线圈磁场的级数解析模型	36
3.4	单层导电结构常规涡流场的级数解析模型	36
3.5	多层导电结构常规涡流场的级数解析模型	37
3.6	电涡流检测探头响应的级数解析模型	38
3.7	应用实例	39
3.7.1	研究对象	39
3.7.2	线圈阻抗变化量的级数解析模型精度的影响因素分析	40
3.7.3	线圈阻抗变化量的积分解析模型与级数解析模型比较	42
3.8	本章小结	43
第 4 章	基于反射-透射理论的多层导电结构常规涡流场解析模型	45
4.1	引言	45
4.2	电磁波在多层介质中的反射与透射	46
4.2.1	半空间的反射与透射	46
4.2.2	三层介质中电磁波的反射与透射	47
4.2.3	任意层介质中电磁波的反射与透射	49
4.3	应用基于反射-透射理论的新方法求解导电结构涡流场的解析模型	51
4.3.1	单层导电结构常规涡流场的级数解析模型	51
4.3.2	两层导电结构常规涡流场的级数解析模型	53
4.3.3	多层导电结构常规涡流场的级数解析模型	54
4.4	基于 Cheng 矩阵法的模型和基于反射-透射理论模型的对比	55
4.5	模型应用	58
4.6	Luquire 建立的多层导电结构线圈阻抗变化量积分解析模型的数学证明	60
4.7	本章小结	61
第 5 章	多层导电结构脉冲涡流场的时域解析模型	62

5.1	引言	62
5.2	基于傅里叶反变换的脉冲涡流场时域解析模型	63
5.2.1	激励脉冲的傅里叶级数展开式及吉布斯现象	63
5.2.2	线性叠加傅里叶谐波响应求解脉冲涡流场	65
5.2.3	基于傅里叶反变换法脉冲涡流场时域解析模型的应用与实验验证	66
5.3	基于拉普拉斯反变换的脉冲涡流场时域解析模型	68
5.3.1	解析求解脉冲涡流场的拉普拉斯反变换	68
5.3.2	数值求解脉冲涡流场的拉普拉斯反变换	74
5.3.3	脉冲涡流场时域解析模型的比较与应用	75
5.4	任意线圈激励下多层导电结构瞬态涡流场的时域解析模型	77
5.5	本章小结	78
第 6 章	金属管件涡流响应的解析模型	79
6.1	引言	79
6.2	线圈阻抗的积分解析模型	80
6.3	内穿式线圈阻抗的级数解析模型	85
6.3.1	单层管材试件	85
6.3.2	多层管材试件	86
6.4	外穿式线圈阻抗的级数解析模型	87
6.5	模型的数值计算	88
6.6	仿真验证	89
6.7	本章小结	90
第 7 章	偏心状态下探头响应的解析模型	91
7.1	引言	91
7.2	偏心状态下探头的阻抗解析模型	92
7.3	线圈阻抗模型的数值计算	94
7.4	探头偏心影响的仿真与分析	95
7.4.1	仿真参数	95
7.4.2	偏心状态下的探头阻抗轨迹	95
7.4.3	探头偏心引入的信号误差	96
7.5	本章小结	98
第 8 章	电涡流检测探头响应的有限元模型	99
8.1	涡流场有限元理论基础	99
8.1.1	Maxwell 方程组	99
8.1.2	边界条件	100
8.1.3	涡流场有限元算法	101

8.1.4	涡流场有限元求解后处理	104
8.2	ANSYS Maxwell 软件及应用	106
8.3	仿真实例	108
8.4	本章小结	124
第 9 章	实验系统的设计与开发	125
9.1	引言	125
9.2	系统总体设计	126
9.3	实验系统电源研制	126
9.4	基于 DDS 技术的信号发生电路	127
9.5	锁相放大技术	128
9.5.1	模拟式锁相放大技术	128
9.5.2	数字式锁相放大技术	131
9.6	探头设计与研制	132
9.6.1	探头的机械结构	132
9.6.2	探头的电路连接与激励电流的采样	132
9.7	XY 运动控制系统的设计与开发	133
9.7.1	运动控制系统的硬件设计	133
9.7.2	运动控制系统的软件开发	134
9.8	实验系统的软件设计与开发	135
9.9	本章小结	136
参考文献		137
附录		144
A.1	电磁场中的三种对称场	144
A.2	梯度、散度、旋度在三种坐标系下的展开式	146

第1章 绪 论

本章概述了电涡流无损检测技术的基本原理、应用及特点,简单介绍了电涡流检测技术的发展历史,然后从常规涡流和脉冲涡流两个方面比较系统地总结了电涡流检测技术建模理论的研究进展及现状。

1.1 电涡流无损检测技术概述

无损检测技术在工业中被广泛用于产品的质量控制和装备的在役检测与结构完整性评估^[1-3]。术语“无损检测”通常指在不破坏被测对象使用性能的前提下对其质量、服役状态以及结构完整性进行检测与评估。很多机械装备承受疲劳载荷,并长期工作于高温、高压、潮湿等恶劣的环境中。长期服役后,装备中可能产生疲劳裂纹、腐蚀等缺陷,影响了装备的力学性能可能导致装备失效,进而可能引发危险品泄漏、爆炸、火车脱轨等恶性安全事故。因此,发展无损检测技术对保障机械装备产品质量和在役安全运行至关重要^[3]。世界上不存在完美无瑕的产品和材料,因此,如果某个产品的各项性能指标在规定的容差范围内,则该产品应该是合格的。概言之,无损检测的目的可归纳为判断材料或者产品的性能指标是否满足性能要求。

迄今,无损检测技术有几百种。然而,工程中常用的主要有视觉、超声波、射线、涡流、磁粉和渗透六大常规无损检测方法。基于法拉第电磁感应原理的电涡流法是一种快速、低成本的无损检测方法^[4],其基本原理如图 1.1 所示。

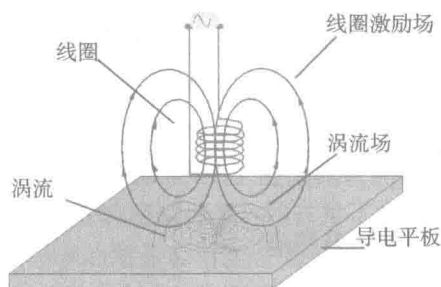


图 1.1 电涡流检测技术的基本原理

当给线圈施以交变信号时,线圈周围及导电平板内产生交变磁场。由法拉第电磁感应定律可知,导电平板内会产生旋涡状的电场,进而形成旋涡状的电流,即涡

流。涡流的强弱与导电平板的电磁属性有密切关系，而涡流的存在也会引起空间磁场的变化。若利用线圈、霍尔等磁场传感器测量磁场的变化，就可以获知导电平板的电磁属性信息，如其电导率、磁导率、厚度以及平板中是否存在腐蚀、裂纹等缺陷。

1.1.1 集肤效应与渗透深度

将导电平板放置在变化的磁场中，或在导电平板中通以交变电流，在交变磁场产生的感应电场作用下，电磁场会在导体表面密集分布，且沿纵深方向衰减。频率越高，电磁场在导体表面分布越密集，沿纵深方向衰减也越快，这个现象称为集肤效应^[4,5](图 1.2)。集肤效应使得涡流密度在导电材料内部分布不均匀，在靠近线圈表面一侧最密集，且随着深度增加以指数的速度衰减。规定涡流密度衰减到表面 $1/e$ (约为 36.8%) 的深度称为渗透深度。渗透深度可用于衡量电涡流检测方法的探测能力。电涡流的渗透深度与激励频率、被测试件的电导率和磁导率有关，各参数之间的函数关系为

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (1.1)$$

式中， δ 为渗透深度， f 为线圈激励频率， σ 和 μ 分别为试件的电导率和磁导率。

由上式 (1.1) 可知，当检测表面有缺陷或者很薄的材料的厚度时，需要给线圈通以高频激励信号以提高灵敏度；当检测较厚材料的内部缺陷时，必须降低工作频率以增加电涡流的渗透深度。

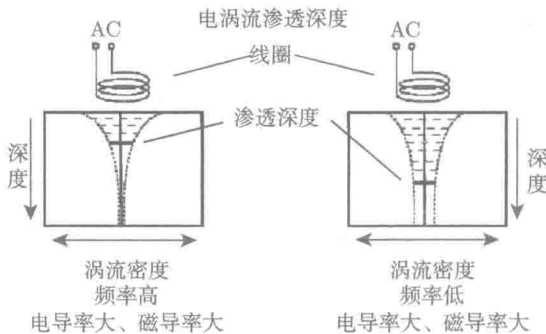


图 1.2 集肤效应

1.1.2 电涡流检测技术的应用及特点

理论上，只要是含有导电材料的零件或装备，都可应用电涡流检测技术进行检测与评估，因此电涡流检测技术的应用领域是极其广泛的，根据试件的测量属性可分为：

- (1) 测量微小位移。如通过测量位移变化监测轴的振动和磨损状况。

(2) 涂镀层厚度检测。如渗碳层深度测量。

(3) 电导率、磁导率测量。如材料分类与识别、传热过程监测等。

(4) 缺陷检测。检测飞机、铁轨、管道等中的腐蚀、疲劳裂纹等，并评估设备需要维修还是继续服役。

任何检测技术都有优点和缺点，电涡流检测技术当然也不例外。电涡流检测技术的主要优点是能检测材料表面和内部的各种缺陷、检测结果具有实时性、仪器设备携带方便、检测前不需要太多的准备工作、检测成本低、检测速度快、可实施在线检测。

电涡流检测技术的局限性主要表现在：受限于电磁场的集肤效应，多用于导电材料的表面及亚表面检测与评估，检测结果受缺陷方向和探头扫描方向的影响^[3]。

1.2 电涡流检测技术的发展简史

电涡流检测技术的起源可追溯到 1831 年法拉第发现电磁感应定律。法拉第是 19 世纪初的化学家，却因发现电磁感应和磁光效应等现象闻名于世。电涡流现象最早是由法国物理学家 Léon Foucault 发现的，因此电涡流时常被称为“Foucault 电流”^[6]。Foucault 通过让铜盘在强磁场中运动证实了在磁场中运动的导电材料会产生涡流。1879 年电涡流检测技术又有了突破性进展。英国科学家 David Hughes 发现，在通有交变信号的线圈附近放置电导率和磁导率不同的材料时，线圈的感应电压会发生变化^[6]。但这个发现直到第二次世界大战结束后才开始得到工业应用，因为当时电涡流检测技术缺乏理论基础，仪器性能差、灵敏度低，只能测量信号的幅值变化，无法有效地克服各种干扰因素，检测结果重复性差。



Michael Faraday(1791~1867)

真正在理论上和实践中完善电涡流检测技术，并将之实用的是德国的 Foerster 博士^[4-6]。从 1933 年开始，Foerster 在 Kaiser-Wilhelm 研究所工作期间就开始了电涡流检测技术的理论与应用研究。Foerster 清晰地阐释了复数平面信号分析方法，并将其应用于仪器信号分析。他将线圈实部即电阻分量作为横坐标，将线圈虚部即电抗作为纵坐标，由此创立了电涡流检测信号二维平面阻抗图分析法^[4]。Foerster 不仅建立了完整的理论体系，还开发了实用的电涡流检测装置。他设计的实验装置能用于电导率的测量和对混合的铁磁物体进行分类。Foerster 因建立了实用完善的分析理论而被称为“电涡流检测技术之父”^[4]。

20 世纪 50~60 年代是电涡流检测技术发展的黄金时期，涌现了大量的研究成果，特别是在飞机、航空器以及核工业领域。当时，美国、苏联等工业发达国家对电涡流检测技术的研究都投入了大量的人力和物力。在 Foerster 之后，Libby、Dodd、

Schmidt 等验证完善了 Foerster 的理论, 研制开发了性能更好的电涡流仪器设备, 并发展了多频涡流、脉冲涡流、远场涡流等新的检测技术。这些研究成果不仅极大地提升了仪器性能, 而且也大大拓宽了电涡流检测技术的应用领域。至今, 电涡流检测技术已经广泛应用于导电结构的检测与评估中。

1.3 电涡流检测新技术

1.3.1 脉冲涡流检测技术

脉冲涡流检测技术虽然在 20 世纪 70 年代就已经出现, 但直到 21 世纪初才得到重视, 并获得快速发展。脉冲涡流检测技术采用周期性或非周期性脉冲激励探头, 典型探头响应曲线如图 1.3 所示。

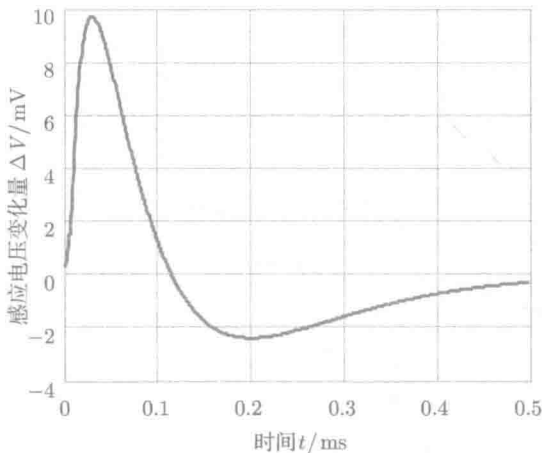


图 1.3 典型的脉冲涡流检测探头响应曲线

脉冲涡流探头响应的信号特征不再是幅值和相位, 而是峰值、峰值时间和过零时间等。与常规涡流检测技术相比, 脉冲涡流检测技术具有频谱范围宽、探头响应的信息量丰富、仪器成本低、渗透深度大等优点^[7], 这些独特优势吸引了很多优秀学者从事相关研究。脉冲涡流检测技术主要应用于缺陷 (尤其是深层缺陷) 检测和铁磁性材料的腐蚀减薄检测与评估。

脉冲激励具有连续频谱, 且低频分量起主导作用。根据集肤效应和电涡流传播速度, 高频分量最先返回, 而低频分量因传播深度大而后返回。这样探头信号中既含有试件表面缺陷信息, 又含有内部缺陷信息, 非常适用于不同深度处导电材料的量化无损检测。

1.3.2 远场涡流检测技术

远场涡流 (remote field eddy current, RFEC) 检测技术是一种能穿透金属管壁的低频涡流检测技术, 最早是由 W. R. McLean 于 1951 年提出的^[8-10]。T. Schmidt 首次设计了远场涡流装置, 并用来检测试件底部孔型缺陷^[8-10]。远场涡流检测技术的原理如图 1.4 所示。

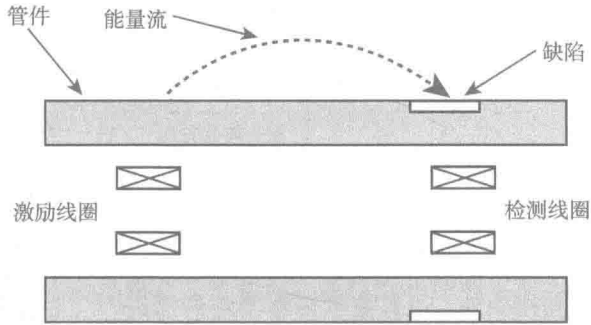


图 1.4 远场涡流检测技术的基本原理

运用 RFEC 技术的探头由激励和检测两个线圈组成。激励线圈和检测线圈的距离一般为待检测管件直径的 2~3 倍。激励线圈产生的磁场 (能量) 穿过管壁向外扩散, 在远场区又再次穿过管壁向内传播, 从而被检测线圈接收。RFEC 技术的工作频率一般为 10Hz ~ 1kHz, 是一种能穿透金属管壁的低频涡流检测技术。

虽然远场涡流检测技术早在 1951 年就出现了, 但因当时人们对远场涡流技术的认识很有限, 且电子技术也不发达, RFEC 检测技术并没有得到充分发展和广泛的工程应用。直到 20 世纪 80 年代中期, Schmidt 在论文中详细阐释了远场涡流效应机理, 以后随着 RFEC 理论的逐步完善和实验验证, 远场技术用于管道 (特别是铁磁性管道) 检测的优越性才逐渐为人们所接受^[8-10]。随后, 一些先进的 RFEC 检测系统也陆续出现, 并在核反应堆压力管、石油及天然气输送管和城市煤气管道的检测中得到实际应用。目前, RFEC 检测技术被认为是管道在役检测最有前途的技术。此外, 通过采取屏蔽技术减小能量间的直接耦合能力, RFEC 检测技术也被推广到平板试件中深层缺陷的检测, 而脉冲 RFEC 检测技术也开始得到重视与研究^[11]。

1.3.3 电涡流阵列检测技术

电涡流阵列 (eddy current array) 检测技术是 20 世纪 80 年代末期出现的一种新型涡流检测技术。它通过磁场传感器结构的特殊设计, 借助于电涡流仪器的强大分析、计算及处理功能, 实现对材料和零件的快速、有效检测^[12]。图 1.5 显示了一种典型的检测线圈阵列探头结构。

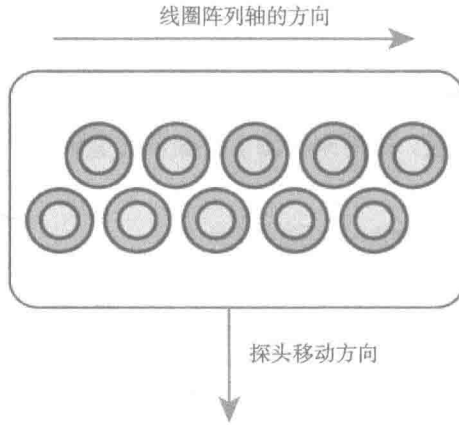


图 1.5 检测线圈阵列探头结构图

除了线圈式阵列探头外,还有霍尔传感器阵列探头^[13]、巨磁电阻阵列探头^[14]等。电涡流阵列检测技术的主要优点有:

- (1) 检测线圈尺寸大,扫描覆盖区域大,能有效消除机械结构运动引起的噪声,其检测效率是常规涡流的 10 倍以上;
- (2) 阵列探头由几个或几十个线圈和磁场传感器有序排列组成,能检测各种深度和各种方向的缺陷;
- (3) 能根据被测零部件设计专用的阵列探头,可不需要设计复杂的机械扫描装置。

电涡流阵列检测技术的探头优化研究已成为当前的一个研究热点,而市场化的电涡流阵列检测仪器也已经出现。如 A. McNab^[15] 设计了阵列探头涡流检测仪,能够更快更可靠地检测铁磁材料焊缝,并以图像的形式实时显示检测结果。传统的电涡流检测技术很难识别深层的和螺栓孔附近的早期疲劳裂纹。为了能检测出上述缺陷以在最大程度上避免事故和减少维修成本,R. Grimberg^[16] 改进了常规的 2-D 涡流传感器阵列探头,专门研发了阵列探头输出信号的处理技术,最终实现了缺陷信号的可视化处理。

结合了快速发展的计算机技术、集成电路技术以及图像处理技术,电涡流阵列检测技术的发展前景是非常乐观的,而且必将在航空航天、铁路运输、核工业等领域扮演越来越重要的角色。

1.4 电涡流检测建模理论的研究进展与现状

1.4.1 常规涡流检测技术的建模理论

在电涡流检测技术研究中,模型建立是非常重要的—部分。仿真模型可用于员

工培训、理解电涡流检测技术的物理机理,优化探头设计和检测系统参数,构建反演模型,甚至可以计算和评估缺陷的检出概率等^[17]。迄今建立的理论模型种类繁多,各有千秋,但大体上所有的理论模型可分为两类:解析模型和数值模型。需要说明的是两者的界限也是人为划定的,实际上两者间并没有本质区别。因为所有的解析模型都需要数值计算方法近似计算,而数值模型也是以电磁理论为基础的,只不过基于 Maxwell 方程组的偏微分方程的求解方法不同^[18]。虽然如此,在综述电涡流检测建模理论的研究进展时,作者沿袭传统,仍然从解析模型和数值模型两个方面叙述。

1) 解析建模理论

根据已有文献, Foerster 是最早建立电涡流检测解析模型的学者之一^[18]。Foerster 应用解析模型验证实验结果,并预估材料属性对实验结果的影响。对电涡流检测解析模型的建立做出了重要贡献的是 Dodd、Deeds^[19-23] 和 Luquire 等^[22,23],他们在 20 世纪 60 年代后期建立了平板型、圆柱型和球型多层导电结构件圆柱型线圈阻抗的解析模型(以下简称 Dodd-Deeds 模型),并推导了线圈阻抗的积分表达式。Dodd-Deeds 模型求解的关键是引入矢量磁位,将偏微分方程从矢量方程变为标量方程,之后应用分离变量法,并在导电结构界面处应用边界条件得到方程组并求解之。当导电结构层数较多时,方程组的求解非常困难。Cheng 矩阵法的出现将多层导电结构的可求解层数推广到任意多层^[20,21]。之后,有很多研究学者将 Dodd-Deeds 模型和 Cheng 矩阵法用于其他问题的探头响应解析建模,如导电材料的电导率和磁导率连续变化的电涡流检测问题^[24-28]。

尽管上述模型在今天仍然有着广泛应用,但近年来仍有众多学者推广和改进了 Dodd-Deeds 模型^[29-32]。作者认为,在这些学者中希腊 T. P. Theodoulidis 教授应该是电涡流检测解析建模研究方面最著名的学者之一^[29-32]。他将偏微分方程理论中的特征函数展开式法应用到电涡流检测解析建模中,把 Dodd-Deeds 模型中的无限大求解区域用有限半径的圆柱体代替,这样线圈阻抗的解析模型就不再是二重广义积分表达式,而是无穷级数和(以下简称 T. P. Theodoulidis 模型)^[29-31]。T. P. Theodoulidis 模型的提出大大简化了线圈阻抗的数值计算过程,提高了计算效率,因为 T. P. Theodoulidis 模型不需要确定积分上限,只需要设置求解区域大小和调整级数的求和项数就可非常容易地调整计算精度。T. P. Theodoulidis 教授将其方法命名为截断区域特征函数展开式(truncated region eigenfunction expansion, TREE)法^[31]。TREE 法的价值不仅仅体现在 Dodd-Deeds 模型的改进方面,更重要的是它的应用使得原来被认为根本不可能的解析建模问题成为可能,并推导了相应的解析模型,如含有铁心的线圈阻抗解析模型^[33-37]、管材和棒材的端部效应对线圈阻抗的影响^[38,39]、平板型导电材料的边缘效应对线圈阻抗的影响^[40]、线圈探头和孔型缺陷共轴时的线圈阻抗模型^[41]等。也就是说, TREE 法的应用大大拓宽了应用