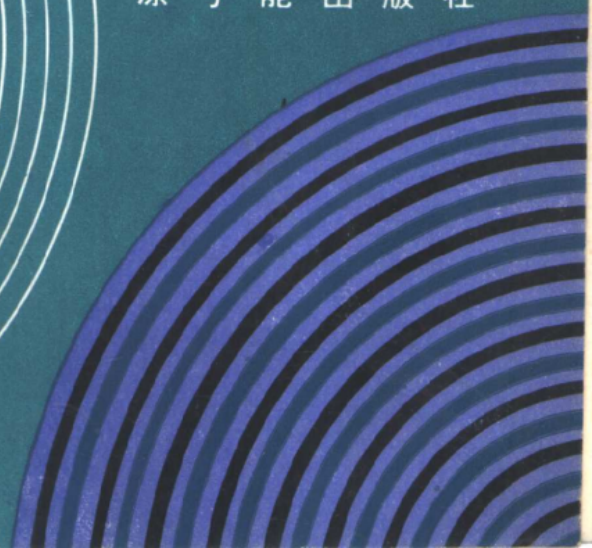
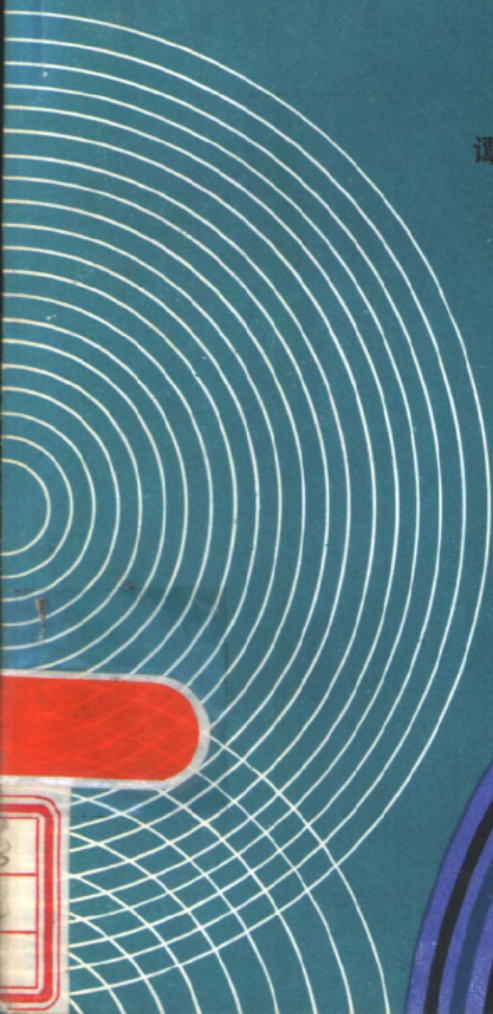


电涡流检测技术

谭祖根 汪乐宇 编著

原子能出版社



051078

TM 93
2134

封面设计：李 松 林

科技新书目：114-

统一书号：15175·579

定 价：1.35元

电涡流检测技术

谭祖根 汪乐宇 编著

原子能出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了电涡流检测技术的基本理论，传感器的工作原理、设计计算和校准方法，测量仪表电路，以及在各种工业和科学试验中的应用实例。

电涡流检测技术是一种新兴的无损、无接触检测技术，目前正广泛地应用于机械制造，电力，化工，石油，纺织，航空，地震，原子能等许多部门中的位移、尺寸、厚度、振动、转速、压力、电导率、温度、液面等的测量，以及探测金属材料 and 加工件表面裂纹及缺陷等。本书可供上述诸部门从事自动控制，仪器仪表，机械加工，产品检验和科学实验的工程技术人员使用，也可供大专院校有关专业的师生参考。

电 涡 流 检 测 技 术

谭祖根 汪乐宇 编著

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/32·印张6·5·字数 135 千字

1986年1月北京第一版·1986年1月北京第一次印刷

印数 1—2320 ·统一书号：15175·570

定价： 1.35元

前 言

电涡流检测技术是一种无损、无接触测量的检测技术。由于采用的电涡流传感器具有结构简单，灵敏度高，测量的线性范围大，不受油污等介质的影响，抗干扰能力强等优点，所以在机械，电力，化工，石油，纺织，航空，原子能…等工业部门得到广泛的应用，例如，用来测量位移，尺寸，厚度，振动，转速，压力，电导率，温度等等参数和探测金属材料表面的裂纹和缺陷。

我国研制电涡流检测仪表的历史还比较短，作为产品生产还不到十年，同时目前的产品品种远不能满足使用者的要求，可以说电涡流检测技术和电涡流检测仪表在我国还正在发展中。许多研究这种技术、制造和使用这种仪器的科技人员都希望对它能有全面的了解，而国内还没有一本专门介绍电涡流检测技术或仪器方面的书籍，为此，本书是在作者过去几年从事电涡流检测仪表工作的实践经验和积累的资料的基础上，较系统地介绍电涡流检测仪表的基本理论，工作原理及其在实际中的应用，便于广大读者参考。

全书共五章，分三个部分介绍。第一部分是基本理论，阐述了有关电涡流传感器的数学基础与基本理论，作为研究和设计电涡流传感器的理论基础。第二部分包括电涡流传感器、测量电路和校准方法三章，介绍电涡流传感器的工作原理，结构形式，设计方法以及所用的几种测量电路，其中还提出了利用小型电子计算机对传感器进行辅助设计和最优设计的方法。第三部分是应用实例，其中大部分是作者

和同事们与一些兄弟单位合作，利用电涡流检测仪表进行测试的实践结果，可供读者应用电涡流检测仪表时参考。

本书编写过程中，曾得到很多同志的鼓励。初稿完成后，上海工业大学何国森教授，核工业部科技情报所孔昭育工程师，上海纺织科学研究院王延熹工程师等同志提出不少宝贵意见，作者在此深表感谢。

由于作者水平有限，实践经验不够，书中如有不足，甚至错误之处，望读者批评指正。

编著者

绪 论

随着科学技术的发展，在测试技术中，已广泛地采用非电量电测技术及其仪器。在很多地方还要求能对被测体进行无接触测量，这是因为：（1）传感器的测头与被测体表面接触，将会损害表面的质量，或者使测头很快地磨损；（2）在传感器与被测体接触，或者把传感器固定连接于被测体上时，相当于对被测体加一负载，这样会影响测量的精度；（3）在有些场合下，根本无法用接触的方法来测量，例如测量高速旋转轴的振动等。因此在非电量电测技术领域中，一直在研究和探讨无接触测量的方法及其仪器，这也是检测技术的发展方向之一。

作为无接触测量的方法，目前虽然已经有好多种，如电感检测法，电容检测法，光电检测法，电涡流检测法，核辐射检测法，超声波检测法，微波检测法等，但是在工业生产过程或科学实验中普遍适用的检测方法却不多，以前用得较多的是电感检测法和电容检测法。电感检测法中检测用的电感传感器，结构简单，使用可靠，但是体积大，测量的线性范围小。电容检测法中的电容传感器，体积小，结构简单，灵敏度高，但是测量的范围小，加工工艺要求较高，测量值受介质和电磁场的影响较大，特别是在生产现场使用时有一定的困难。至于光电检测法，以前主要由于光电器件的质量问题而受到限制，随着电子技术的发展，光电器件有了很大的发展，尤其是采用大规模集成电路工艺之后，出现了一些新型光电器件，因此光电检测法也成了一种有前途的无接触

II

测量的非电量电测技术。电涡流是一种古老的物理现象，但是随着近代电子技术的发展，人们利用电涡流效应发展了一种新型的无接触检测方法。电涡流传感器具有结构简单，灵敏度高，测量的线性范围大，不受油污等介质的影响，抗干扰能力强等优点，因此很快地在各个工业部门得到了广泛的应用。

电涡流检测法的原理是利用电涡流传感器的线圈产生交变磁场，使被测导体表面产生电涡流，从而改变线圈电参数。电涡流检测仪表一般包括传感器，测量电路、指示仪等几个部分。电涡流传感器的主要元件是固定在框架上的一只线圈，在高频电流激励下，它会产生一交变磁场。当传感器接近被测体时，被测导体由于受交变磁场的作用，便在表面产生了电涡流。电涡流的产生将损耗传感器线圈的能量，线圈与被测体靠得愈近，能量损耗愈大。线圈能量的损耗，则导致传感器线圈电参数（如阻抗、电感等）的改变[被测体的物理性质（如电导率、磁导率等）也会使传感器的电参数改变]。因此，通过电涡流传感器可以把被测的非电量转换成电参数，并可由测量电路测得，然后由指示仪显示，或由记录仪器进行自动记录。

首先将电涡流这种物理现象与测量方法联系起来的是休斯 (D. E. Hughes)，他在 1879 年用钟表、话筒和感应线圈做成一个实验装置，用一个感应线圈在不同的金属和合金中，诱导出电涡流。在实验中他听到了电话传送器中传来钟表的滴答声，并记录下每当材料，外形和成分变化时，声音消失所需的时间。休斯虽然把电涡流的物理现象与测量联系起来，但未形成一种检测技术，以后也没有得到发展，直到二十世纪四十年代至五十年代，德国的 Reutique 研究所和

美国的 Bently Nevada 公司相继研究了电涡流传感器的原理，并把它应用于测量位移、振动、电导率等，生产出了电涡流传感器及检测仪表。此后，日本不少公司和研究所也研制和生产了许多不同用途的电涡流检测仪表。目前国际上已有各种形式和各种用途的电涡流检测仪表供应市场，并已形成系列。其测量范围最小的为 $0 \sim 15\mu\text{m}$ ，最大的达到 $0 \sim 100\text{mm}$ ，个别科研成果中测量范围已超过 100mm ；分辨率最高的达到 $0.05\mu\text{m}$ 。

我国研制电涡流检测仪表的历史不过十余年，作为产品生产还不到十年。由于该类仪表本身的一些优点，当一些仪表研制出来后，很快被工业部门采用。现在已经在机械，电力，化工，石油，纺织，航空，原子能，造船…等各工业部门和科研机构，用来测量位移，厚度，尺寸，振动，转速，压力，电导率，温度，硬度等参数以及探测金属材料表面的裂纹和缺陷。例如，电力部门用电涡流式位移振幅测量仪测量汽轮机主轴的轴向位移和径向振动；机械工业部门用来测量机床部件的相对运动，零部件表面的形位误差，大型加工件的尺寸等；纺织工业部门用它来测量各机件的运动规律，锭子的振动；冶金工业部门用电涡流测厚仪测量金属板材的厚度等等。有的部门利用电涡流检测原理正在研究他们所需测量参数的仪器，如地震部门把这种仪表做成能测量连通管中液面的仪器来预报地震，军工部门用这种仪表来测量某些运动体的轨迹等。由此可见，电涡流检测技术是一种很有生命力的新兴的检测技术。

从电涡流检测仪表在我国各部门的应用情况及有关方面提出的要求来看，今后电涡流仪表的研制和发展方向可归纳为以下几点：

1. 在现有产品的基础上, 逐步实现系列化, 使各个使用部门能根据不同的测量对象, 选择不同参数、不同测量范围的电涡流传感器。

2. 不断提高仪表的可靠性, 保证仪表和测量系统的质量。特别是用来作为发电厂、化工厂中汽轮机的监护系统中的仪表, 其质量更为重要, 要求在长期工作状态下有较好的稳定性和可靠性。

3. 继续扩大电涡流检测仪表的用途, 特别要发挥它的远距离、无接触测量, 测量范围大, 抗干扰能力强等优点, 使它作为一种自动检测技术而发挥更大的作用。例如, 在核电站的建造中, 用它对核燃料元件进行无损、无接触探伤; 对主循环密封泵轴的检验和监测; 对汽轮机轴和叶片的检验和监测等。

4. 从单机发展成一个测试系统。目前一套仪表一般只包括传感器、前置变换器(测量电路和前置放大器)和显示仪表; 今后将逐步发展成为一个测试系统或者监视保护系统, 这样可以成套地与机器配套, 例如作为汽轮机, 航空发动机等机器的机械保护系统。

5. 采用微处理机来提高和扩大仪器的功能, 如校准非线性, 补偿温度误差, 自动调零, 参数运算等, 这样可以提高测量的精度和速度。此外还可利用取得的信号, 对机器出现的故障进行分析, 形成机器故障诊断系统。

目 录

前言	1
绪论	I
第一章 基本理论	1
第一节 电磁现象的基本理论	1
一、稳恒磁场及其矢势	1
二、时变电磁场与麦克斯韦方程组	11
第二节 集肤效应和导体内阻抗	17
一、集肤效应的概念	17
二、导体中的电荷电流分布	19
三、集肤厚度	22
四、平面导体的内阻抗	25
第三节 自感和互感	26
一、互感	26
二、自感	32
三、自感磁能和互感磁能	35
第四节 激励线圈的交流阻抗计算	37
一、线圈的电感系数计算	37
二、线圈的交流电阻计算	43
第二章 电涡流传感器	49
第一节 基本工作原理	49
一、基本原理	49
二、等效电路与阻抗特性	51
第二节 结构形式	61
一、圆柱形传感器	61
二、环形传感器	64

第三节	传感器线圈的形状和大小	65
第四节	数学模型	72
第五节	计算机辅助设计	81
一、	交流阻抗与互感计算	82
二、	辅助设计计算公式	85
三、	椭圆积分算法	87
四、	实例	90
第六节	最优化设计方法	93
一、	目标函数	93
二、	参数选择与约束简化	97
三、	计算方法	99
四、	应用实例	104
第三章	测量电路	107
第一节	恒定频率调幅电路	107
第二节	变频调幅电路	115
第三节	调频电路	118
第四节	电桥电路	120
第五节	反馈放大电路	122
第六节	显示仪表	125
一、	放大电路	127
二、	峰值检波器	135
三、	报警电路	139
第四章	电涡流传感器的校准和使用	144
第一节	校准的意义	144
第二节	校准设备和校准方法	145
一、	静态校准	146
二、	动态校准	150
第三节	传感器的使用	152
一、	被测体大小的影响	153
二、	被测体形状的影响	154

三、被测体材料的影响	154
四、传感器在被测体中安装的影响	156
五、传感器安装时的注意事项	157
第五章 电涡流检测技术的应用	159
第一节 位移测量	159
第二节 尺寸及形位测量	167
第三节 厚度测量	170
第四节 液位测量	174
第五节 压力和力的测量	176
第六节 振动测量	179
第七节 转速测量	184
第八节 电导率测量	186
第九节 温度测量	187
第十节 硬度测量	191
第十一节 材料缺陷的检测	193
参考文献	194

第一章 基本理论

第一节 电磁现象的基本理论

一、稳恒磁场及其矢势

1. 稳恒磁场 在电荷周围的空里，会产生一种对其它电荷具有作用力的场，称为静电场。与此相似，在电流周围的空里，也会产生一种特殊的场，当载流导体（或运动电荷）引入该场后，将受到力的作用，我们称之为磁场。稳恒电流产生的磁场不随时间变化，故称为稳恒磁场。

对电流有作用力是磁场的特征和属性，人们就利用这一特性来描述磁场。表征磁场的基本物理量是磁感应强度矢量，用符号 \mathbf{B} 来表示。电流元 $I d\mathbf{l}$ 在磁场中所受之力 $d\mathbf{F}$ 可表示为

$$d\mathbf{F} = I d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (1-1)$$

显然，上式可以作为磁感应强度 \mathbf{B} 定义的表达式。

稳恒电流激发磁场的规律可用毕奥-萨伐定律来解释。若已知电流在空间的分布，即已知电流密度矢量 $\mathbf{J}(x', y', z')$ ，并设 \mathbf{r} 是由 (x', y', z') 到观察点 (x, y, z) 的矢径，则该点的磁感应强度

$$\mathbf{B}(x, y, z) = \frac{\mu}{4\pi} \iiint \frac{\mathbf{J}(x', y', z') dV' \times \mathbf{r}}{r^3} \quad (1-2)$$

上述积分应该遍及整个电流分布区域。

如果电流是集中在细导线上，由于

$$\mathbf{J}dV = Jdsnd\mathbf{l} = I d\mathbf{l}$$

因此，细导线上稳恒电流激发磁场的毕奥-萨伐定律可写成

$$\mathbf{B}(x, y, z) = \frac{\mu}{4\pi} \oint \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3} \quad (1-3)$$

上式积分是沿着整个导线环路进行的。式中 μ 为媒质的磁导率， $\mu = \mu_r \mu_0$ ， μ_r 称为相对磁导率，它是一个纯数； μ_0 为真空的磁导率，它的单位应为牛顿/安培²（符号为 N/A^2 ），即有

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{N/A}^2 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$$

磁感应强度 \mathbf{B} 的单位是 $\text{N}/(\text{A} \cdot \text{m})$ ，它有一个专门的单位叫特斯拉，用 T 表示。即

$$1\text{T} = 1\text{N}/(\text{A} \cdot \text{m}) = 1\text{Wb}/\text{m}^2$$

毕奥-萨伐定律是由电流决定磁场分布的积分形式。利用它，可以直接计算某些简单载流回路所激发的磁场。

2. B 的散度和旋度 在磁场中，磁感应强度线既无始

① 本书电磁学单位采用 MKSA 单位制。在这单位制中有四个基本量：长度以米为单位，质量以千克为单位，时间以秒为单位，电流强度以安培为单位，其它的物理量单位都可从这些单位导出。

端又无终端，总是成闭合曲线。这一特性称为磁通连续性原理。不管磁场是存在于真空中还是存在于其它任何介质中，不论产生磁场的电流回路形状如何复杂，只要能用实验直接观察，我们总是可以证实磁通连续原理。其数学表达式为

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (1-4)$$

它表明， \mathbf{B} 对任何封闭曲面的总通量恒等于零，即进去的磁通等于出来的磁通。由于式 (1-4) 对于任意封闭曲面都成立，通过矢量分析中的奥氏公式

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \iiint_V (\nabla \cdot \mathbf{B}) dV$$

则可得到式 (1-4) 的微分形式，即 \mathbf{B} 的散度

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1-5)$$

这说明稳恒磁场的散度为零，故磁场是无源的。

再考虑 \mathbf{B} 的环路线积分。从毕奥-萨伐定律出发，可以导出安培环路定律：磁感应强度沿任何闭合曲线 L 的环量与穿过闭合曲线所跨曲面 S 的总电流 I 成正比，即

$$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu I \quad (1-6)$$

式中 I 的正负方向与回路的环绕方向符合右手螺旋关系。利用安培环路定律可以计算某些具有对称性的载流导线的磁场。

【例 1】求长同轴导线的磁场 (图 1-1)

同轴线的内导体通有电流 I ，外导体通有 $-I$ (回路电流)。考虑两导体之间任一点 P 的磁场，设 P 点离中心轴线的距离为 r 。若沿半径为 r 而圆心在轴线上的圆周路径取积

分，由于电流分布的对称性，此圆周上任意点处 \mathbf{B} 的方向均为圆周的切线方向且大小相等。据安培环路定律有

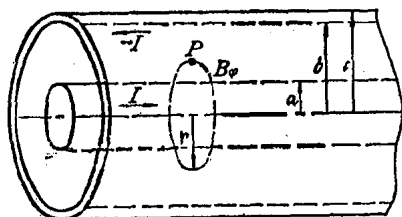


图1-1 载流同轴导线间的磁场

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \int B \cos\theta dl = B \int dl = 2\pi r B = \mu I$$

则得
$$B = \frac{\mu I}{2\pi r} \quad a < r < b$$

而对于外导体的外部空间 ($r > c$) 来说，由于圆周路径所包围的电流代数和为零，故该区域的磁场亦就为零。

对于连续电流分布 \mathbf{J} ，在计算磁场沿回路 L 的环量时，只需考虑通过以 L 为边界的曲面 S 的电流，在 S 以外流过的电流没有贡献。故环路定律可表示为

$$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu \iint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} \quad (1-7)$$

上式和式 (1-6) 是电流与磁场关系的积分形式。通过矢量分析中的斯托克斯公式，即

$$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \iint_S (\nabla \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{s}$$

则由式 (1-7) 可得

$$\iint_S (\nabla \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{s} = \mu \iint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s}$$