

912531

电磁无损检测

任吉林 主编

912532

DIANJI
WUSUN
JIANCE

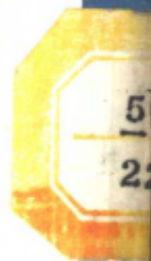
航空工业出版社

责任编辑：袁名美 武剑伦

封面设计：万 臻

ISBN 7-80046-164-5/TN·006

定价：4.30元



电磁无损检测

任吉林 主编

航空工业出版社

1989

内 容 提 要

本书系根据无损检测专业《电磁检测》课程的教学大纲而编写的，主要介绍涡流、磁粉检测技术，包括电磁基本理论、检测原理、设备材料、工艺规范、主要应用和发展动向等方面的内容。

本书内容比较丰富，文字简练，流畅易懂，联系实际，力求实用。既可作为高等院校无损检测专业的试用教材，也可供有关专业的师生及生产、科研单位从事无损检测工作的专业技术人员参考。

电 磁 无 损 检 测

任 吉 林 主 编

航空工业出版社出版发行
(北京市和平里小关东里14号)

— 邮 政 编 码 ， 100013 —

全国各地新华书店经销
南昌航空工业学院印刷厂印装

1989年9月第1版	1989年9月第1次印刷
开本：787×1092毫米 1/16	印张：21.25
印数：1-1170	字数：520千字

ISBN 7-80046-164-5/TN·006

定价：4.30元

前 言

本书是根据无损检测专业《电磁检测》课程的教学大纲编写的。主要作为高等院校无损检测专业的试用教材，也可供大、中专院校有关专业的师生以及生产、科研等单位从事无损检测专业工作的工程技术人员参考。

近年来，随着对工业产品质量和安全要求的不断提高，无损检测在科学研究和工业生产中的地位和作用日益重要，从而对无损检测人员也提出了相应的要求，因此，迫切需要编写一套比较系统的阐述无损检测技术的书籍，以满足各方面培养无损检测技术人材的需要。本书即为重点介绍有关涡流和磁粉检测专业基础知识的教学用书，由于它们都是以电磁基本原理为理论基础的常规无损检测技术，所以，定名为《电磁无损检测》。

本书从电磁基本理论开始，全面讨论了涡流和磁粉检测的基本原理、设备材料、工艺规范、主要应用和发展动向等方面的内容。以介绍基本概念和基本理论为主，注意各个环节的特点及相互之间的关系与衔接。力图做到有较好的系统性与完整性，密切联系生产实际，并有一定的深度与广度。以便读者在学习后能掌握有关的基本原理和主要应用，为今后的学习和工作打下必要的基础。

全书共分三篇十九章。参加编写的有任吉林（绪论，第一篇一、二、三章，第二篇三、四、七、八章，第三篇五、六、七、八章）、谢昂（第二篇一、二章）、高春法（第二篇五、六章）、陶旺斌（第三篇一、二、三、四章）等同志，由任吉林主编。

本书承北京理工大学王信义教授审阅，并对书稿提出了很多宝贵的意见，谨致谢意。

本书在编写过程中还得到许多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讲义，在此，一并表示衷心的感谢！

由于编者水平有限、经验不足，加之时间仓促，书中的错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

一九八八年二月

目 录

绪 论	(1)
第一篇 电磁基本理论.....	(5)
第一章 静电场和恒定电场	(6)
第一节 电场强度、电位、电位梯度.....	(6)
第二节 静电场的基本方程式.....	(8)
第三节 电流、电流密度.....	(11)
第四节 恒定电场的基本方程式.....	(12)
第二章 恒定磁场	(15)
第一节 磁感应强度.....	(15)
第二节 载流回路的磁场.....	(15)
第三节 磁通连续定理和安培环路定理.....	(18)
第四节 恒定磁场的基本方程式.....	(20)
第五节 磁路.....	(21)
第三章 电磁场	(24)
第一节 电磁感应定律.....	(24)
第二节 自感与互感.....	(25)
第三节 电磁场的基本方程式.....	(26)
第四节 似稳电磁场和似稳电路.....	(28)
第二篇 涡流检测.....	(33)
第一章 涡流检测的电磁基本理论	(34)
第一节 涡流检测概述.....	(34)
第二节 涡流方程和求解说明.....	(35)
第三节 半无限平面导体中的电磁场.....	(37)
第四节 导电长圆柱体中的电磁场.....	(40)
第五节 导水管材中的电磁场.....	(42)
第六节 导体球内的电磁场.....	(43)
第二章 阻抗分析法	(47)
第一节 线圈的阻抗和阻抗归一化.....	(47)

第二节	有效磁导率和特征频率	(49)
第三节	含导电圆柱体的无限长线圈的复阻抗平面	(52)
第四节	涡流试验相似律和模型试验	(56)
第五节	含导电圆柱体穿过式线圈的阻抗分析	(58)
第六节	含导电管材的穿过式线圈的阻抗分析	(62)
第七节	其它典型线圈的阻抗分析	(67)
第八节	复平面在定量试验中的应用	(73)
第三章	检测线圈	(79)
第一节	检测线圈的型式	(79)
第二节	检测线圈的性能	(82)
第三节	检测线圈中信号的形成	(85)
第四节	检测线圈信号检出电路	(87)
第四章	涡流检测仪器	(91)
第一节	涡流仪的分类	(91)
第二节	基本电路	(96)
第三节	信号处理电路	(104)
第四节	辅助装置	(116)
第五章	基本试验技术	(119)
第一节	试验规范	(119)
第二节	试验准备	(119)
第三节	试验条件的选择	(122)
第四节	试验结果及其处理	(126)
第五节	对比试件	(128)
第六章	应 用	(132)
第一节	涡流探伤	(132)
第二节	材质试验	(141)
第三节	厚度、位移等的测量	(149)
第七章	多参数涡流检测技术	(156)
第一节	多参数试验方法的基本原理	(156)
第二节	多频率涡流法	(158)
第三节	脉冲涡流法	(164)
第四节	多参数涡流检测的应用	(166)

第八章 微型计算机在涡流检测中的应用	(170)
第一节 概述.....	(170)
第二节 微型机在检测中的控制功能.....	(172)
第三节 微型机在检测中的数据处理功能.....	(176)
第四节 应用实例.....	(180)
第三篇 磁粉检测	(187)
第一章 磁化的基本理论	(188)
第一节 物质的磁化.....	(188)
第二节 弱磁质的磁化规律.....	(190)
第三节 铁磁物质的磁化规律.....	(195)
第四节 钢铁材料的磁特性.....	(202)
第二章 磁粉检测原理	(205)
第一节 磁荷的基本理论.....	(205)
第二节 退磁场与退磁因子.....	(211)
第三节 磁偶极子.....	(216)
第四节 漏磁场.....	(219)
第五节 磁粉在漏磁场中的受力.....	(224)
第三章 磁化与退磁	(228)
第一节 磁化电流.....	(228)
第二节 周向磁化.....	(232)
第三节 纵向磁化.....	(236)
第四节 复合磁化.....	(240)
第五节 退磁.....	(243)
第四章 磁粉检测规范	(245)
第一节 确定磁化规范的几种方法.....	(245)
第二节 经验数值法.....	(247)
第三节 标准试片法.....	(250)
第四节 磁特性曲线法.....	(254)
第五章 设备与材料	(258)
第一节 磁粉探伤机的种类和特点.....	(258)
第二节 磁化装置.....	(261)
第三节 控制电路.....	(265)

第四节	附属装置	.....	( 268)
第五节	磁粉	.....	( 273)
第六节	磁悬液	.....	( 276)
第六章	工艺与质量管理	.....	( 281)
第一节	工件的磁粉检验	.....	( 281)
第二节	预处理及工序安排	.....	( 283)
第三节	磁化——施加磁粉——观察	.....	( 285)
第四节	退磁——后处理	.....	( 287)
第五节	质量控制与安全防护	.....	( 290)
第七章	磁粉检测的应用	.....	( 295)
第一节	磁痕分析	.....	( 295)
第二节	铸锻件的磁粉检测	.....	( 303)
第三节	焊缝的磁粉检测	.....	( 305)
第四节	磁橡胶检查法	.....	( 308)
第八章	其它漏磁检测技术	.....	( 312)
第一节	概述	.....	( 312)
第二节	磁场测定式漏磁检测	.....	( 314)
第三节	录磁成象漏磁检测	.....	( 319)
附录		.....	( 323)
附录一	电磁检测标准	.....	( 323)
附录二	正交坐标系和微分算子	.....	( 326)
附录三	贝塞尔函数	.....	( 328)
参考文献		.....	( 331)

绪 论

无损检测是一门新兴的综合性科学技术。它以不改变被检测对象的状态和使用性能为前提,应用物理和化学等现象,对各种工程材料、零部件和产品进行有效的检验和测试,借以评价它们的完整性、连续性、安全可靠性及其它机械、物理性能。由于无损检测具有不破坏试件、可以对试件进行百分之百的检测等优点,在实现质量控制、改进工艺、降低成本、提高劳动生产率和保证设备的运行安全等方面都具有现实意义。因此,在一定的程度上取代了过去的破坏性试验,成为现代工业产品的制造和使用过程中不可缺少的重要组成部分。

现代工业和科学技术的发展,为无损检测技术的发展提供了更加完善的理论和新的物质基础,也进一步推动了无损检测技术的广泛应用,并使无损检测从单纯的质量检验发展成为多功能的一门技术。它的主要用途有:

1. 探伤:发现材料或工件中的缺陷,确定缺陷的位置、数量、大小、形状及性质。以便对产品(或材料)的质量作出评价,为产品设计、制订(或修改)工艺提供重要依据。
2. 测试:测定材料的机械或物理性能(如裂纹扩展速率、机械强度、硬度、电导率、磁性等),检查产品的性质和状态(如热处理状态、应力应变特性、硬化层深度、应力腐蚀等),以及进行产品的几何度量(如产品的几何尺寸、涂层、镀层或板厚的测量等)等。
3. 监控:对正在运行的设备中的重要部件进行现场或动态检测,将部件中产生缺陷的变化信息连续地提供给检测者,从而实行现场监控,保障设备的运行安全。

无损检测技术是应用物理、电子技术与材料科学等各门科学相互渗透和结合的产物。随着无损检测技术应用的日益广泛和伴随着其它基础科学的综合应用,当前已发展了数十种无损检测的方法。如以检测的基本原理来分类,常见的分类形式如表1所示:

表 1 无损检测方法的分类

类 别	主 要 方 法
射 线 法	x射线透照法、中子射线照相法、 γ 射线照相法、x射线光谱法、正电子湮没法、x射线衍射法
声 学 法	超声法、声发射法、声振法、电磁超声法、涡流一声法
电 磁 法	涡流法、漏磁法(磁粉法、磁场测定法、录磁法)、微波法、电阻法、电位法、巴克豪森效应法
化学、分析法	渗透法(荧光法、着色法)、点滴法、化学定位法、俄歇分析法、电解检测法
机械、光学、热学法	机械测试法、全息照相干涉法、光弹法、红外法、接触测温法、热电势法

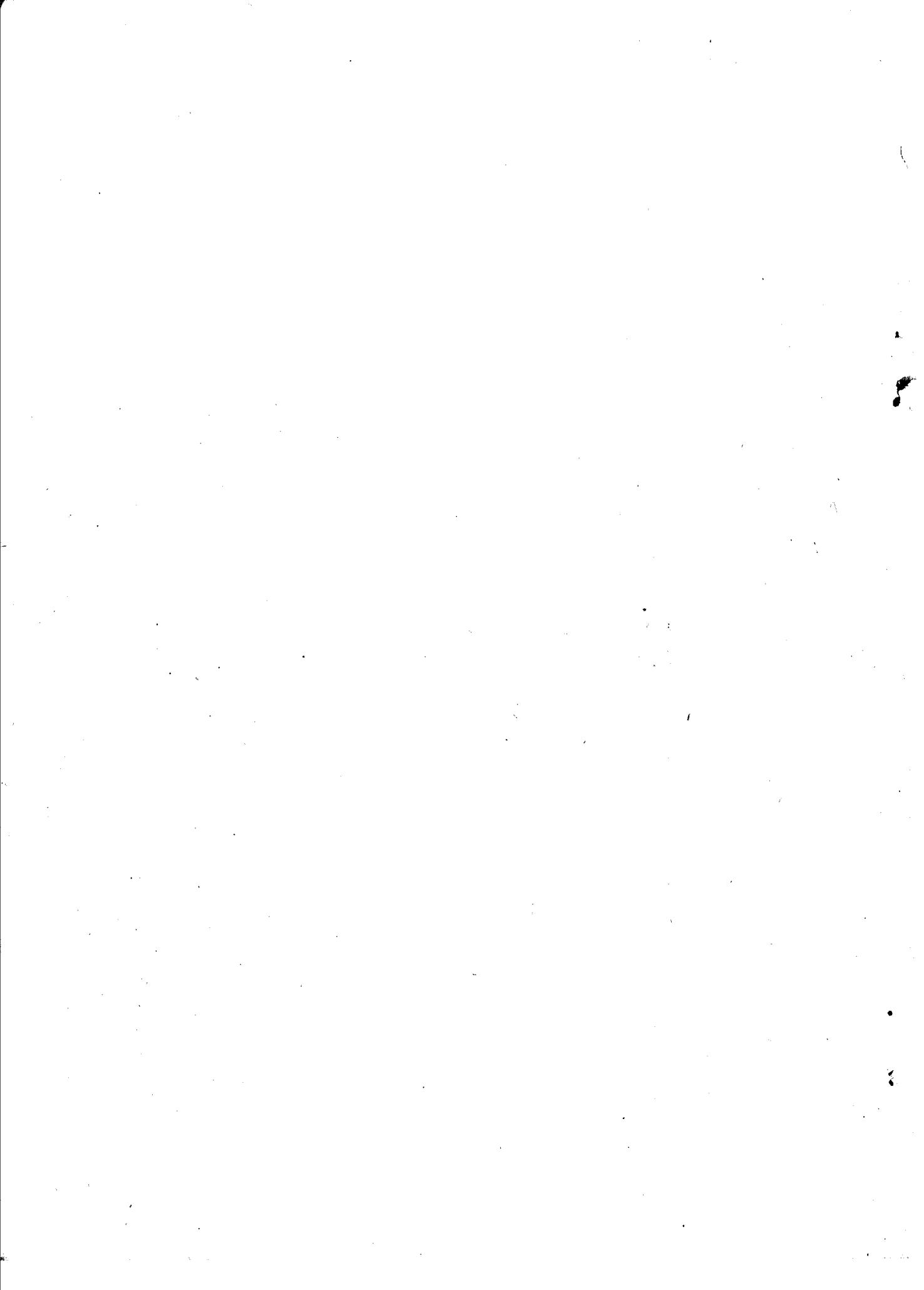
其中,较为成熟并在工程技术中得到比较广泛应用的检测方法有:x射线、超声、涡流、磁粉、渗透等五种常规的试验方法。此外,激光全息干涉、声发射、声振、微波、红外等无损检测技术也已经得到日益广泛的研究和初步应用。可以预期,随着现代科学技术的飞

速发展，必将进一步促进无损检测这一边缘科学的发展。

本课程主要介绍常规的电磁无损检测——涡流和磁粉检测。它们都是以电磁基本原理为理论基础的无损检测技术，即利用材料在电磁作用下呈现出来的电学和磁学性质，从而来判断材料内部组织、有关性能和几何形状变化的试验方法。由于涡流及磁粉检测在探测导电材料或铁磁性材料的表面、近表面缺陷以及其它应用（如材质试验、厚度测量等）方面各具特点，因此，在各个工业部门得到了广泛的应用，与射线、超声、渗透检测相互补充，成为常规无损检测技术的重要组成部分。

为了适应各层次教学的需要，本课程将从电磁学的有关基础理论开始，简要地引出电磁学的基本物理量、重要定律和麦克斯韦电磁方程。然后系统讨论涡流、磁粉检测的基本原理、设备材料、检测工艺、实际应用及发展动向等方面的专业基础知识，有关检测标准等也在附录中作了必要的介绍。以便学生通过本课程的学习，在解决常规电磁无损检测的问题中，有继续深入进行机理研究的理论基础；能提出实现检测的合理方案和工艺规范；正确选择仪器设备及具备一定的测量电路的分析能力。

第一篇 电磁基本理论



第一篇 电磁基本理论

在科学技术发展的进程中，电和磁现象的发现都可以追溯到远古时期。有关电和磁现象的系统论述也在1600年由吉尔伯特（Gilbert）写进了他的著作（尽管在这部著作中，他把电和磁现象看成是没有任何联系的单一现象，这是一种片面的认识）。但是，直到十八世纪末，特别是十九世纪初，由于生产发展的需要，在社会生产力的推动下，经过许多科学工作者的大量科学实践，电磁学的研究工作才获得了巨大的进展。

在电磁学的诸多重大发明与创造中，库仑（Coulomb）定律（1785年）、奥斯特（Oersted）实验（1819年）、安培（Ampere）环路定理（1820年）、法拉弟（Faraday）发现的电磁感应现象及其规律（1831年）等，在不同的时期，一次又一次地深化了人类对于电磁现象本质的认识，并揭示了电磁之间的相互关系。到1873年，麦克斯韦（Maxwell）科学地总结了前人有关电磁学说的全部成就并加以发展，技巧地修正了当时已经存在的描写电磁场基本定律的方程，然后加以归纳和演绎，得出了一组以他的名字命名的新的电磁方程组，建立了系统的严密的电磁场理论。

麦克斯韦的创造性工作是电磁理论发展史上重要的里程碑。著名的麦克斯韦电磁方程组严密地描述了一切宏观的电磁现象，用数学的方式揭示了电场和磁场之间的联系以及它们所服从的规律。利用这种理论原则上可以解决各种宏观的电磁学问题。因此，它是讨论宏观电磁现象的理论基础，也是对电磁检测试验方法进行理论分析的基本工具。

本篇在对电磁检测问题进行具体讨论之前，先回顾一下电磁学中的有关理论基础，采用精简扼要的方式简略地提出电磁学中的基础概念和重要定律、电场和磁场的关系及其它有关的电磁学知识，以便进一步从理论上阐述电磁检测的基本原理。

第一章 静电场和恒定电场

第一节 电场强度、电位、电位梯度

人们在实践中，不仅认识到自然界中存在着“电荷”这种物质，而且还认识到“电荷”在它的附近空间产生物质的“场”，称为“电场”，而相对于观测者为静止状态的所谓“静止电荷”产生的场便是“静电场”。

静电场具有的一个基本性质是，它对于处在场中的任何其它电荷都有作用力，称作电场力。表征电场力特性的物理量叫电场强度，用 E 表示，它是个有大小和方向的矢量。定义是：电场中某点的电场强度矢量为处于该点的试验电荷 q_0 所受的力 f 与电量 q_0 的比值（试验电荷 q_0 在理论上为无限小电荷，以至它的放入不使电场产生畸变）。用公式表示为

$$E = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{f}{q_0} \quad (1-1-1)$$

单位为 牛顿/库仑 = 伏特/米。

静电场可以用电力线来描述，场中任一点的电场强度的方向，就是通过该点的电力线在这一点的切线方向。

由库仑定律可知，位于真空中的两个点电荷 q_1 和 q_2 之间的作用力为

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \frac{r_{12}^0}{r_{12}^2} \quad (1-1-2)$$

式中 r_{12} 为点电荷 q_1 和 q_2 之间的距离；

r_{12}^0 为 r_{12} 上的单位矢量（下同）。

因而，在位于真空中的点电荷 q 的电场中，与 q 相距为 r 的一点 P 的电场强度 E （见图1-1-1）用公式表示为

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{r^0}{r^2} \quad (1-1-3)$$

式中 $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9} \approx 8.85 \times 10^{-12}$ 法拉/米，真空的介电常数。

电场力是矢量，服从迭加原理。也就是说，真空中，一个点电荷所受其它点电荷的作用力可以应用迭加原理求得。由此，多个点电荷在真空中某点所产生的电场强度也应等于各个点电荷各自在这一点产生的电场强度的矢量和，这就是电场强度迭加原理。

静电场的另一个重要性质是，它是一个位场，即具有能量。

我们知道，力是个矢量，它所作的功是个标量。当电荷 q_0 在电场中受电场力 F 的作用从 P 点作微小位移 $d\mathbf{l}$ 时，电场力作功为



图 1-1-1 点电荷的电场

$$dA = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = q_0 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = q_0 E dl \cos\theta$$

所以，当电荷 q_0 从P点移动到Q点（见图1-1-2），电场力所作的总功为

$$A_{PQ} = q_0 \int_{PQ} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = q_0 \int_{PQ} E dl \cos\theta \quad (1-1-4)$$

如果分析电荷 q_0 在一个点电荷 q 的电场中运动时电场力所作的功，由图1-1-3可知，则在路径上一点M， q_0 移动 $d\mathbf{l}$ 时，电场力做功为

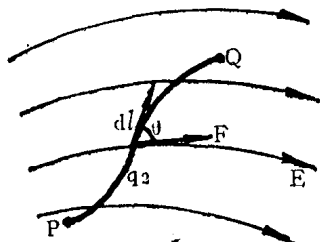


图 1-1-2 电场力对电荷做功

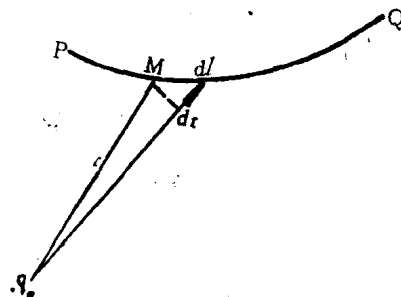


图 1-1-3 q_0 在点电荷场中运动时做功

$$dA = q_0 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = q_0 \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{r^0}{r^2} \cdot d\mathbf{l} = \frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr$$

式中 $dr = r^0 \cdot d\mathbf{l} = dl \cos\theta$

所以，电荷 q_0 沿某一路径从P点移动到Q点时电场力所作的功为

$$\begin{aligned} A &= \int dA = q_0 \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0} \int_{R_P}^{R_Q} \frac{dr}{r^2} \\ &= \frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{R_P} - \frac{1}{R_Q} \right] \end{aligned} \quad (1-1-5)$$

式中 R_P 和 R_Q 分别是P、Q两点与点电荷 q 的距离。可见，在点电荷的电场中，电荷 q_0 从P点沿某一路径移至Q点时，电场力所作的功仅与电荷的始、终点位置有关，而与路径无关。

取电场力做功A与电荷 q_0 的比值定义为PQ两点间的电压，记作 V_{PQ} ，单位为伏特，它表示电场对单位正电荷所作的功，即

$$V_{PQ} = \frac{A}{q_0} = \int_{PQ} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (1-1-6)$$

可见，PQ两点间的电压同样与所取路径无关，只与P点和Q点的位置有关。

如果在电场中任选一个定点Q作为参考点，则单位正电荷由场中任一点P移到参考点Q时，电场力所作的功不仅与路径无关，而且只与P点的坐标有关。我们把P点到参考点Q的电压，称为P点的电位，并用 φ 表示，则有

$$\varphi_P = \int_P^Q \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (1-1-7)$$

电位的单位与电压相同，也是伏特。对于一定的电场，当参考点选定后，场中各点的电位有确定的值；参考点不同，各点的电位都增加（或减小）一个常数，很显然，静电场中任意两点的电压，就是这两点间的电位差。

顺便指出，电场中电位相同的点所构成的面称为等位面。等位面和电力线之间有一个重要的关系，即等位面与电力线是互相垂直的。

既然电场强度和电位是描述同一电场的特性，两者之间必定有密切的关系。根据电位的

定义可以得到由电场强度求电位的关系式，反之，如果已知电位，也可以求得电场强度。

如图1-1-4所示，设a和b是电场中相距很近的两个点，可以认为dI段上各点的电场强度都相等。dI和E之间夹角为θ。当单位正电荷从a到b时电场力所作的功应等于a、b两点间的电位差，即

$$\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \varphi_a - \varphi_b$$

令

$$\varphi_b = \varphi_a + d\varphi$$

则有

$$-d\varphi = \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

或

$$d\varphi = -\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (1-1-8)$$

由上式可知，电场强度E的方向总是指向电位减小的方向。

我们再设E_l = Ecosθ，则dφ = -EcosθdI = -E · dI，这样，可以写成

$$E_l = -\frac{\partial \varphi}{\partial l} \quad (1-1-9)$$

式中 E_l是E在dI上的投影，说明电场中给定点的电场强度沿任意方向l的投影等于电位对l方向的导数的负值。

如果分别把座标x、y、z轴方向作为l方向，就可以得到E沿直角座标轴x、y、z的投影分别为

$$E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}, E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (1-1-10)$$

由于

$$\mathbf{E} = E_x \mathbf{i} + E_y \mathbf{j} + E_z \mathbf{k} \quad (1-1-11)$$

将式(1-1-10)代入，可得

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= -\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \mathbf{k}\right) \\ &= -\left(\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}\right) \varphi \\ &= -\text{grad } \varphi \end{aligned} \quad (1-1-12)$$

式中 符号gradφ为一个矢量，称为电位梯度。很显然，电位梯度的模等于电位的最大变化率，方向为电位增加最快的方向。若以矢量算符∇来表示，电位梯度可以表示为∇φ，故式(1-1-12)可以写成

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi \quad (1-1-13)$$

第二节 静电场的基本方程式

静电场是一个矢量场，根据场论的定义，穿过任意面积S的电场强度E的通量为

$$\Psi_E = \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} \quad (1-1-14)$$

Ψ_E是一个标量，可能为正，也可能为负。在电场中任取一个面积元dS，因为元面积在空间有不同的取向，我们取它的一个法线方向为正，对于穿过元面积dS的元通量dΨ(E · ds)，其正负号则随场强方向与所取元面积法线正方向间的夹角θ的余弦而定，即有

$$d\Psi = \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = E dS \cos\theta \quad (1-1-15)$$

如果面积S是一封闭曲面，则