

电子工程师手册

ELECTRONICS ENGINEERS' HANDBOOK

上册

第 2 篇 电磁学与电路基础

主 编 丁润涛

执 笔 王金刚

杨兆选

主 审 杨 山

电子工程师手册

电子工程师手册编辑委员会 编

下 册



机械工业出版社

(京)新登字054号

本手册系统地概括了电子技术基础及其应用领域的主要技术内容,有一定的深度和广度。

全书按其内容,大体上可分为如下三个部分:

1. 基础知识部分,包括:常用符号、物理化学常数、单位、标准和数学公式;电磁学与电路基础;信号与系统分析等。
2. 技术基础部分,包括:电子材料;电子元器件;模拟电路;数字电路;微波、电波传播与天线;电子产品的工艺、结构、电磁兼容与可靠性。
3. 技术应用部分,包括:电力电子技术;电子测量与电子仪器;机械量的电子测量;电子计算机与人工智能;自动控制系统与控制仪表;数控技术与机器人;广播、电视与声像处理技术;通信、雷达、导航与电子对抗;医疗电子技术。

本书在编写上,力求简明扼要、深入浅出、直观易懂、归类便查。注意理论阐述的严谨和采用数据、图表和公式的准确可靠。努力做到既反映我国电子技术近年来的主要成就,也介绍国外的先进技术和发展动向。

本手册主要供机电工业系统和其他行业系统的工程技术人员在处理专业工作中涉及电子技术问题时查阅使用,也可供大专院校有关专业师生参考。

电子工程师手册

电子工程师手册编辑委员会 编

责任编辑:贾 馨 版式设计:霍永明
封面设计:姚 毅 责任校对:肖新民
责任印制:路 琳

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京房山区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092¹/₁₆·印张 182¹/₂·插页 8·字数 5756 千字

1995年4月北京第1版·1995年4月北京第1次印刷

印数 00,001—10 000 定价:上、下册共198.00元

ISBN 7-111-04178-X/TM·523

发展电子技术促
进经济繁荣与社
会进步

孙俊人

一九八二年六月

中国电子学会理事长孙俊人为本书题词

电子工程师手册编委会

主任委员

吴咏诗

副主任委员

胡健栋

邹洵

罗命钧(常务)

委

员

翁瑞琪

(常务)

秦起佑

(常务)

张长生

黄仕机

周孝琪

阚石

俞斯乐

丁润涛

郭维廉

徐苓安

张国雄

朱梦周

总编辑

吴咏诗

副总编辑

秦起佑

翁瑞琪

秘

书

尹明丽

序

电子技术是一门发展迅速,应用广泛的技术。它的发展可以说是日新月异,新技术层出不穷。它的应用则已遍及工业、农业、国防、科技、文教和人民日常生活的各个领域,对于经济发展和社会进步有着重要的促进作用。当前第三次新的技术革命正在兴起,如果说第一次技术革命是以机械化为标志,第二次技术革命是以电气化为标志的话,那么,第三次新的技术革命就应该说是以电子化作为标志。前两次技术革命主要都是人类体能的延伸,而第三次新的技术革命则主要是人类智能的扩展,其基础就是电子技术。也有人说目前已是信息时代,而信息的获取、处理、传输也是要依赖于电子技术的。所以为了加速我国的现代化建设,体现“科学技术是第一生产力”的伟大作用,在各个领域,尤其是机电工业系统中推广与普及电子技术是十分重要的。在这种情况下,编写和出版这部《电子工程师手册》是很有必要的。

这部手册是为机电工业系统和其他行业系统中具有中等以上技术水平的工程技术人员在处理专业工作中涉及电子技术问题时查阅而编写的,是以应用为主的、综合性的电子技术手册。它是一部工具书,主要为工程技术人员在研究、处理电子技术问题时起备查、提示和启发的作用。它也可为高等学校有关专业师生及其他有关人员提供参考。

这部手册系统地概括了电子技术及其主要应用领域的基本技术内容。在内容取舍上力求做到:科学性、实用性和先进性。科学性是要体现现代电子科学技术的基本内容,介绍必要的基础知识,注意理论阐述的严谨,采用数据、图表的准确可靠;实用性是要从实用出发建立自己的体系,主要提供一些结论性的技术内容以及这些结论的应用,在编写上简明扼要,深入浅出,直观易懂,归类便查;先进性则是既要反映我国电子技术近年的主要成就,也要介绍国外的先进技术和发展动向,注意反映电子技术的时代特征。

整个手册共17篇,按其内容大体上可分为以下三个部分:

(1) 基础知识 共2篇,分别是:常用资料(符号、常数、单位、标准和数学公式);电磁学与电路基础。

(2) 技术基础 共6篇,分别是:电子材料;电子元器件;模拟电路;数字电路;微波技术、电波传播与天线;电子产品的工艺、结构与可靠性。

(3) 技术应用 共9篇,分别是:电力电子技术;电子测量与电子仪器;机械量的电子测量;电子计算机;自动控制与控制仪表;电子技术在机械制造方面的应用;广播、电视与声像技术;通信、雷达、导航与电子对抗;医疗电子技术。

这部手册的编写方式也是一种改革的尝试。过去一部综合性手册的编写一般是组织全国各地的有关专家分头编写,然后集中统稿编辑的。由于专家分散在全国各地,联系讨论不便,统稿、编辑过程中也要往返于各地进行讨论、修改,这就不能不拖延时日,往往要5~6年,大型的甚至要8~10年才能出版。电子技术发展非常迅速,如果从编写到出版要花这样长的时间,那么,手册出版之日可能已是内容陈旧之时。因此,这部手册是主要聘请天

津、北京两地的有关专家编写、审稿，而且由机械工业出版社委托天津大学承担了具体的组织工作。由于编写人员居住相对集中，便于交流与讨论，主编与主审也能及时交换意见，除出版社外，还有一个专业面较宽的学术单位负责组织工作，这就使整个手册的编写、审稿和定稿工作在两年之内顺利完成，而且保证了质量，基本上达到了预定的目标和要求。应该说这种做法是成功的，不足之处则可能是未能充分反映其他各地有关专家的经验与成就，这就希望各位专家和广大读者对本手册多提宝贵意见，以便今后能予以修改和补充。

这部手册能以顺利地完成和出版，我愿诚挚地感谢编委会各位委员、各篇的主编、主审以及全体编者所付出的辛勤劳动，感谢他们认真负责的态度和友好合作的精神。我还要特别感谢机械工业出版社的罗命钧、秦起佑、贾馨三位同志和天津大学的翁瑞琪教授，他们为本手册的组织编写、统稿定稿、编辑出版做了大量的工作，为保证手册的质量做出了重要的贡献。

我希望，这部手册的出版，能为有关专业的工程技术人员和高等学校的师生，在从事电子技术应用与推广工作中提供一本实用的工具书。如果它能为我国电子技术的广泛应用起到一些促进作用的话，这将使我们所有这些参加手册编写、出版工作的同志感到荣幸和欣慰。

吴咏诗

目 录

第1章 电磁学基础

1 电场和磁场的基本物理量	2-1
1.1 电场强度与电力线	2-1
1.2 极化强度	2-2
1.3 电位移	2-3
1.4 磁感应强度与磁力线	2-3
1.5 磁场强度	2-3
1.6 电位	2-4
1.7 标量磁位与矢量磁位	2-4
2 电磁场的基本定律	2-4
2.1 高斯定律	2-4
2.2 安培环路定律	2-5
2.3 电磁感应定律	2-5
2.4 全电流定律	2-5
2.5 麦克斯韦方程组	2-6
3 电容与电感	2-7
4 电磁场中的能量、力及某些效应	2-10
4.1 恒定电磁场中的能量	2-10
4.2 恒定电磁场中的力	2-10
4.3 交变磁场中的磁滞与涡流	2-11
4.4 交变磁场中的介质损耗、集肤效应与邻近效应	2-11

第2章 电路基础

1 电路与电路定律	2-12
1.1 电路的基本概念	2-12
1.2 欧姆定律	2-17
1.3 基尔霍夫第一、第二定律	2-17
1.4 电能与电功率	2-17
2 电路基本分析方法	2-18
2.1 支路电流法	2-18
2.2 支路电压法	2-19
2.3 网孔分析法	2-19
2.4 节点分析法	2-20
2.5 割集分析法	2-20
2.6 回路分析法	2-22

3 网络定理	2-23
3.1 叠加定理	2-23
3.2 置换定理	2-23
3.3 戴维南定理	2-24
3.4 诺顿定理	2-24
3.5 特勒根定理	2-25
3.6 互易网络	2-26
4 线性动态电路	2-27
4.1 动态电路	2-27
4.2 动态电路的各种响应	2-27
4.3 三要素法	2-27
5 正弦稳态分析	2-29
5.1 正弦稳态响应	2-29
5.2 正弦量的相量表示	2-29
5.3 电路的相量模型	2-30
5.4 正弦稳态电路的相量分析	2-31
5.5 正弦稳态电路的功率	2-32
5.6 谐振与频率特性	2-33
5.7 三相正弦交流电路	2-41
5.8 电路的等效变换	2-43
6 二端口网络	2-47
6.1 二端口网络的参数和方程	2-47
6.2 二端口网络的等效电路	2-47
6.3 二端口网络的连接和参数	2-54
6.4 网络函数	2-55

第3章 信号与系统分析

1 信号与系统	2-55
1.1 信号	2-58
1.2 系统	2-59
2 连续系统的时域分析	2-60
2.1 系统响应的分解特性	2-60
2.2 冲激响应与阶跃响应	2-60
2.3 卷积积分	2-60
2.4 系统的零状态响应	2-61
2.5 杜阿密尔积分	2-61
2.6 卷积表	2-61
3 连续系统的傅里叶分析	2-62

3.1 周期信号的傅里叶级数	2-62	5 离散时间信号与系统	2-89
3.2 傅里叶变换及变换表	2-67	5.1 离散时间信号与抽样定理	2-89
3.3 连续系统的傅里叶分析	2-78	5.2 离散系统的时域分析	2-90
3.4 信号通过线性系统的无失真传输 条件	2-79	5.3 Z变换	2-93
4 连续系统的复频域分析	2-79	5.4 离散系统的Z域分析	2-97
4.1 拉普拉斯变换	2-79	6 系统的模拟与稳定性	2-97
4.2 拉普拉斯变换的性质	2-79	6.1 线性系统的信号流图表示与模拟	2-97
4.3 拉普拉斯反变换	2-80	6.2 连续系统的稳定性	2-100
4.4 拉普拉斯变换表	2-81	6.3 离散系统的稳定性	2-101
4.5 复频域(s 域)分析	2-87	参考文献	2-102

本篇主要介绍电子工程师常用的基本理论和基本分析方法。前两章分别为电磁学和电路分析的基本理论。第三章为信号与系统的基本概念和分析方法。

在电子学领域中,常常利用通信系统、控制系统、计算机系统与指挥系统进行信号的传输与处理。通常,组成通信、控制与计算机系统的主要部件中包括大量的、多种类型的电路。电路也称为网络。当研究一般性的抽象规律时多用网络一词,而研究一些指定的具体问题时常称之为电路。系统可以认为是比网络更复杂、规模更大的组合体。然而,由于大规模集成化技术的发展以及各种复杂系统部件的直接采用,使电路、网络、系统这些名词的区分发生了困难。通常勿需严格区分各名词之间的差异。信号、网络(或电路)与系统之间有着十分密切的关系。离开了信号,网络与系统将失去意义。信号作为待传输消息的表现形式,可以看作运载消息的工具,而网络或系统则是为传送信号或对信号进行加工处理而构成的某种组合。系统所关心的是对于给定信号形式与传输、处理的要求,系统能否与其相匹配,它应具有怎样的功能和特性。

系统与网络理论研究,包括系统分析与系统综

合(网络分析与网络综合)两个方面。在给定系统的条件下,研究系统对于输入激励信号所产生的输出响应,这是系统分析。系统综合则是按某种需要先提出对于给定激励的响应,而后根据此要求设计(综合)系统。分析与综合两者关系密切,但又有各自的体系和研究方法。一般地说,系统分析是系统综合的基础。

众所周知,信号与系统的理论一直在不断地演变和发展着,以响应各种新问题、新技术和新机遇的挑战。随着技术的进步和超大规模集成电路的应用,使得更复杂的系统和信号处理技术的实现成为可能。我们定会看到,信号与系统的分析方法和概念能够应用到更广泛的领域中去。值得指出的是,在近几十年内,连续时间和离散时间信号与系统变得日益交织在一起,而在应用上也日益结合。其主要原因是由于高速数字计算机和高密度器件制造技术的飞速发展,使用等间隔采样信号表示和处理连续时间信号具有越来越多的优点。

本篇以通信系统和控制系统的某些问题为背景,给出信号(连续与离散)经系统(连续与离散)传输或处理的一般规律,着重基本概念和基本分析方法。

第1章 电磁学基础

1 电场和磁场的基本物理量

1.1 电场强度与电力线

1. 电场强度 电场强度是描述电场特性的基本物理量,电场强度是一个矢量。电场是伴随电荷产生的。点电荷的电场强度,定义为作用在电场中的单位正电荷的力,可以表示为

$$E_a = \frac{F_{ab}}{Q_b} = \frac{Q_a}{4\pi\epsilon_0 r^2 r_1} \quad (\text{V/m})$$

式中 E_a 为点电荷 Q_a 产生的电场的电场强度(V/m); Q_b 为位于电场中的试探单位正电荷(C); F_{ab} 为试探单位正电荷在电场中受到的力(N); Q_a 为产生点电荷电场的点电荷(C); ϵ_0 为真空介电常数, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$; r 为点电荷 Q_a 与试探电荷 Q_b 之间的距离(m); r_1 为是由 Q_a 指向 Q_b 的单位矢

量。

若电场是由多于1个电荷产生的,可由电场强度的叠加原理求得。

2. 电场强度的叠加原理 若电场是由几个电荷($q_1, q_2, \dots, q_n$)产生的,电场中某点处的电场强度 E 等于每个电荷单独作用产生的电场强度的矢量和,即

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n$$

3. 静电场中的导体 导体内部任一点的电场强度为零,导体表面上任一点的电场强度方向一定垂直于导体表面,整个导体表面是一个等位体。

4. 电力线 是电场内画出的假想曲线,它形象地描述了电场强度的分布情况。在电场中,电力线起于带正电荷的物体,终止于带负电荷的物体;电力线既不闭合,也不中断,也不会相交;电力线

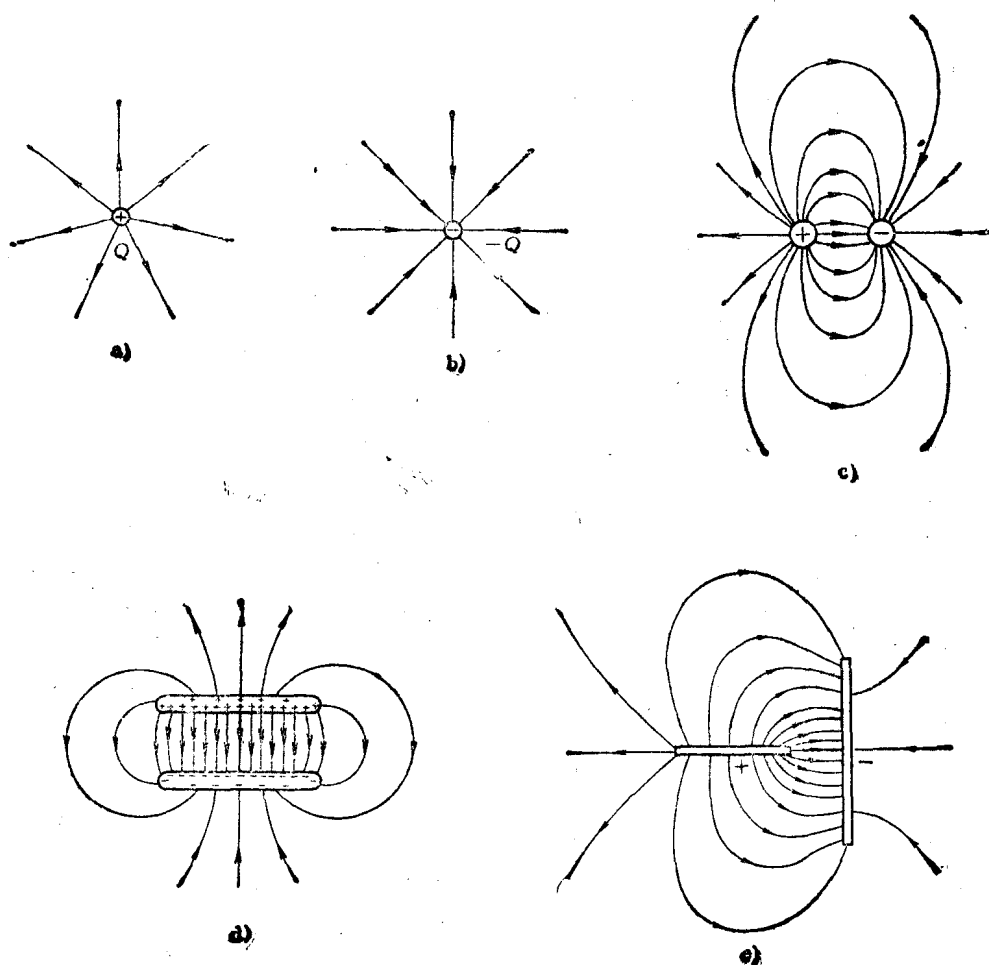


图 2-1-1 电场中的电力线

a) 带正电荷物体 b) 带负电荷物体 c) 分别带正负电荷物体 d) 平行带电薄板 e) 互相垂直带电薄板

上任何一点的切线方向就是该点电场强度方向。电力线的密度表示场强的大小。电场中电力线分布情况见图2-1-1所示。

1-2 极化强度

在外电场的作用下,电介质内部量值相等的正、负电荷的宏观作用中心作极其微小的位移,形成电偶极子。这种现象称为电介质的极化现象。电偶极子的特性可以用电偶极子的电偶极矩 p 表示,可以定义为:

$$p = qh \quad (\text{C} \cdot \text{m})$$

式中 q 为电荷数量(C); h 为由负电荷指向正电荷的有向距离(m)。

在电介质中,单位体积内由于极化而出现的电矩矢量之和定义为电极化强度 P ,可表示为

$$P = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum p}{\Delta V} \quad (\text{C}/\text{m}^2)$$

电介质内部电场,是由介质中的束缚电荷的电场与外部电场的合成,在各向同性的线性电介质中,极化强度 P 与合成电场强度 E 成正比关系,可表示为

$$P = \chi E \quad (\text{C}/\text{m}^2)$$

式中 χ 为比例常数,常称之为电极化率; E 为合成电场强度。

许多电介质在极化过程中,当受到外电场作用时,产生电介质的极化;当外电场作用消失时,极化同时消失。当外电场作用消失后,而极化不消失者,称为驻极体。

1.3 电位移

电位移 D ，也称为电通密度，它是一个矢量。电位移 D 是描述电场特性的物理量之一。电位移 D 定义为下列两矢量之和：其一是表示真空中电场特性的矢量 $\epsilon_0 E$ ；另一是表示在观察点处介质极化能力的电极化强度矢量 P 。其表示为：

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (\text{C/m}^2)$$

在真空中， $P = 0$ ，所以电位移

$$D = \epsilon_0 E \quad (\text{C/m}^2)$$

1.4 磁感应强度与磁力线

1. 磁感应强度 磁感应强度 B 是表示空间中某一点磁场特性的物理量，是表示场的力特性的物理量。定义为单位正电荷以单位速度向与磁场方向相垂直的方向运动时受到的磁场力，可表示为：

$$f = q(v \times B)$$

式中 B 为磁感应强度(T)。

磁感应强度是一个矢量。其方向可以根据右手螺旋定则确定。磁场作用于运动电荷的力 f ，电荷的运动方向 v 及磁感应强度 B 的方向间的关系如图 2-1-2 所示。

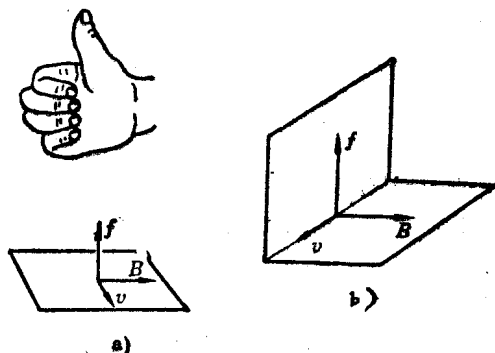


图 2-1-2 f 、 v 、 B 间的方向关系

a) f 、 v 、 B 方向关系的右手定则

b) f 、 v 、 B 方向关系

2. 磁力线 磁力线是描述磁场中磁感应强度分布情况的曲线，见图 2-1-3。磁场中任何一点磁力线的切线方向，就是该点磁感应强度 B 的方向；磁力线的疏密程度正比于 B 的大小。磁力线是环绕电流的闭合曲线，既无起点，也无终点，也不会中断和相交。

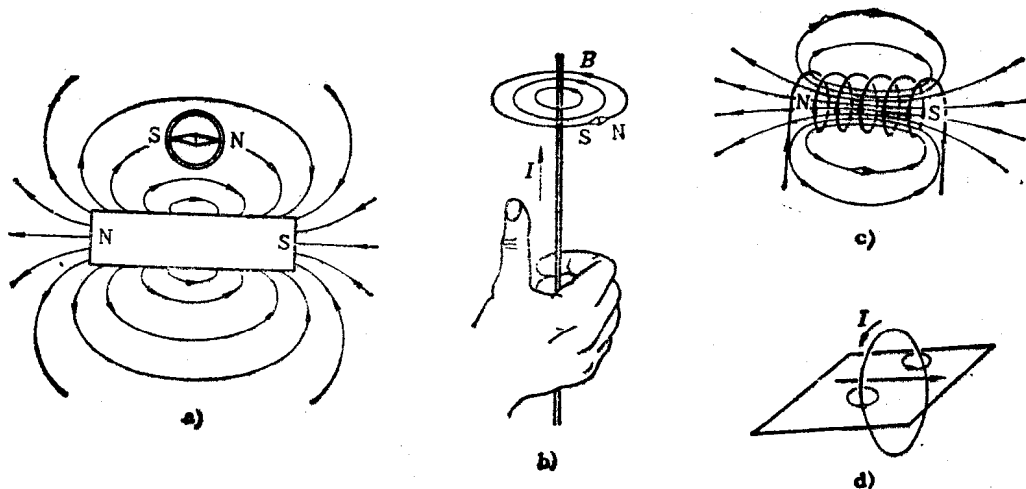


图 2-1-3 磁场的磁力线

a) 磁棒周围的磁力线 b) 载流直线周围的磁力线 c) 螺线管周围的磁力线
d) 环形导线周围的磁力线

1.5 磁场强度

磁场强度 H 是描述磁场特性的物理量，它与磁感应强度的关系可以表示为：

$$H = \frac{B}{\mu_0} - M \quad (\text{A/m})$$

式中 μ_0 为真空导磁系数， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (\text{H/m})$ ；

M 为磁化强度(A/m)。

对于各向同性的导磁物质，磁场强度 H 与磁感应强度 B 的关系可表示为：

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (\text{A/m})$$

式中 μ 为磁导率， $\mu = \mu_0 \mu_r$ ， μ_r 称为相对磁导率。

在各向同性的抗磁物质和顺磁物质中,磁化强度 M 与磁场强度 H 是成正比的,可以表示为

$$M = \chi_m H \quad (\text{A/m})$$

式中 χ_m 为磁化率,无量纲。抗磁物质的磁化率 $\chi_m < 0$,与温度无关;顺磁物质的磁化率 $\chi_m > 0$,与绝对温度成反比。

对于铁磁物质, M 和 H 的关系一般是非线性的。

1.6 电位

电位 U 是表征电场特性的物理量,它是标量,单位是伏特(V)。在电场中单位正电荷从 P_0 点移到 P 点时,电场力所做的功

$$U_{PP_0} = - \int_{P_0}^P E dl = U_P - U_{P_0}$$

U_{PP_0} 称为 P_0 点到 P 点的电位差(电压)。如果选定 P_0

点为参考点(电位为零),则 $U_P = - \int_{P_0}^P E dl$ 称为

P 点的电位。 U_P 只与 P 点的位置有关,与所取的积分路径无关。电位的参考点常取大地或无限远点。

电场强度 E 与电位梯度 ($\text{grad}U$) 的关系可以用下式表达:

$$\begin{aligned} E &= - \left(\frac{\partial U}{\partial x} i + \frac{\partial U}{\partial y} j + \frac{\partial U}{\partial z} k \right) \\ &= - \frac{\partial U}{\partial n} n^\circ = - \text{grad}U (\text{V}) \end{aligned}$$

式中 n° 表示该点电位增长率最大的方向的单位矢量, n 为该方向的距离 (m); i 、 j 、 k 是直角坐标系中 x 、 y 、 z 轴上的单位矢量; $\partial U/\partial x$ 、 $\partial U/\partial y$ 、 $\partial U/\partial z$ 分别为电压在 x 、 y 、 z 轴三个方向的变化。

电场中电位相等的各点所组成的曲面称为等位面,它与电力线处处正交。

1.7 标量磁位与矢量磁位

1. 标量磁位 是描述磁场特性的一个物理量。磁场中某一点 P 相对于参考点 Q 的磁位 U_m , 即 P 点到 Q 点的磁压 U_{mPQ} , 可表示为:

$$U_{mP} = U_{mPQ} = \int_P^Q H \cdot dl \quad (\text{A})$$

在无电流分布区域内,即 $\delta = 0$,磁位与积分路径无关,磁场强度 H 与标量磁位的关系为

$$H = - \text{grad}U_m$$

2. 矢量磁位 矢量磁位 A 是表征磁场特性的物理量,它既可以用于无电流区域,又可以用于有

电流区域。矢量磁位与磁感应强度 B 的关系如下式:

$$B = \text{rot}A$$

A 的单位是 Wb/m

2 电磁场的基本定律

2.1 高斯定律

在电场中,不论介质如何分布,由任一闭合面穿出的电位移矢量 D 的通量,只与面内自由电荷有关,而与电介质无关,即

$$\oint D \cdot dS = \Sigma q$$

但是电介质的分布改变, D 的分布也改变,只要闭合面内所带电荷量不变,则 D 通量总数不变。

2.2 安培环路定律

在磁场中,不论导磁介质如何分布,磁场强度矢量 H 沿任一闭合路径的线积分等于穿过该积分回路所限定面积的电流 i 的代数和,即

$$\oint H \cdot dl = \Sigma i$$

如果电流的方向和积分回路的绕行方向符合右手螺旋关系,则上式中的电流为正,否则为负。 H 的分布与电流、导磁介质的分布有关。

2.3 电磁感应定律

在磁场中,当穿过任一闭合回路中的磁通量发生变化时,在回路中产生的感应电动势 e 等于磁通量变化率的负值,可表示为

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{V})$$

式中,感应电动势 e 的正方向和磁通正方向应符合右手螺旋关系,如图2-1-4所示。

与回路相交链的磁通的变化可以是回路相对于磁场的相对运动引起的,也可以是回路不动,磁通随时间的变化,也可以是两者同时变化而引起的磁通的变化。

2.4 全电流定律

在电磁场中,传导电流、运流电流(徙动电流)和位移电流三者合称为全电流。

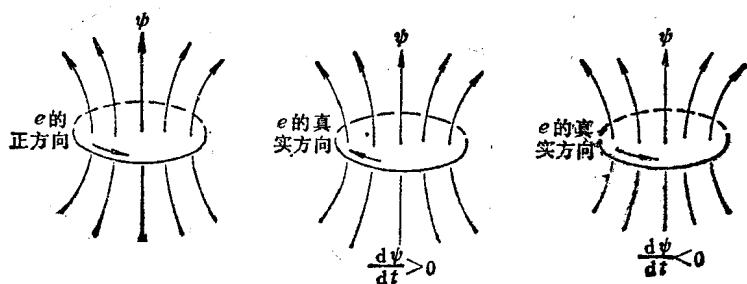
1. 传导电流 是由电荷在导电介质中有规则地运动形成。传导电流的密度

$$\delta_c = \rho v \quad (\text{A/m}^2)$$

式中 ρ 为电荷的体密度 (C/m^3); v 为电荷运动的平均速度 (m/s)。

传导电流服从欧姆定律,即

$$\delta_c = \gamma E$$

图 2-1-4 用右手定则表示 e 和 Φ 的正方向的关系

式中 γ 为导体的电导率(S/m); E 为电场强度(V/m)。

2. 运流电流 是由宏观带电物体或带电粒子在真空中或稀薄气体中运动形成。运流电流不服从欧姆定律。运流电流密度

$$\delta_v = \rho v \quad (\text{A/m}^2)$$

式中 v 为带电物体或带电粒子的运动速度; ρ 为电荷的体密度(C/m^3)

3. 位移电流 是通过任一曲面的电位移(即电感应强度)通量随时间的变化率称为位移电流。位移电流的密度

$$\delta_d = \frac{\partial D}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t} \quad (\text{A/m}^2)$$

式中 D 为电位移矢量(C/m^2)。 δ_d 的方向与 $\partial D / \partial t$ 的方向一致。

一般情况下, 位移电流很小, 只有在电场变化频率特别高的情况下, 导体中的位移电流才可能显得重要而必须加以考虑。

4. 全电流定律 磁场强度 H 沿任一闭合路径的线积分等于这个路径为边界所限定的曲面中通过的全电流, 称之为全电流定律, 表示为

$$\oint_l H \cdot dl = \int_s \left(\delta_c + \frac{\partial D}{\partial t} \right) d\mathbf{s}$$

式中 δ 为等于传导电流密度 δ_c 或等于运流电流密度 δ_v , 而不能是 δ_c 与 δ_v 之和; $\partial D / \partial t$ 为电位移矢量变化率亦称, 位移电流密度 $\delta_d = \partial D / \partial t$ 。

对安培环路定律的推广, 磁场强度 H 沿任一闭合路径的线积分等于以这个路径为边界所限定的曲面中通过的全电流, 即

$$\oint H \cdot dl = \Sigma i = \int_s (\delta_c + \delta_v + \delta_d) d\mathbf{s}$$

上式表明, 磁场不仅由传导电流、运流电流产生,

而且变动的电场也要产生磁场。

2.5 麦克斯韦方程组

在电磁场中以 E 、 D 、 B 、 H 分别表示电磁场中的电场强度、电位移、磁感应强度及磁场强度各矢量, 用 e 、 q 和 i 分别表示感应电动势、电荷及电流。在任何电磁场中, 可以表征其基本性质的方程组的积分形式是

$$\oint H \cdot dl = \int_s (\delta_c + \delta_v + \delta_d) d\mathbf{s} = \Sigma i$$

$$\oint E \cdot dl = - \frac{\partial \Phi}{\partial t} = - \int_s \frac{\partial B}{\partial t} d\mathbf{s} = e$$

$$\oint B \cdot d\mathbf{s} = 0$$

$$\oint_s D \cdot d\mathbf{s} = \Sigma q$$

称为麦克斯韦方程组, 其相应的微分形式为

$$\text{rot} H = \delta + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.1-1)$$

$$\text{rot} E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.1-2)$$

$$\text{div} B = 0 \quad (2.1-3)$$

$$\text{div} D = \rho \quad (2.1-4)$$

式中 δ 表示 δ_c 或 δ_v 。

方程式(2.1-1)表示同一场点上的磁场强度的旋度与电流密度的关系, 即某一场点上电位移矢量随时间的任何变化(即在该点产生的位移电流)像传导电流一样, 在该点引起磁场的旋涡, 即产生有旋磁场。

方程式(2.1-2)表示磁场随时间的任何变化 $\left(\frac{\partial B}{\partial t} \right)$, 将在同一点上产生电场的旋涡, 即产生有旋电场。

方程式(2.1-3)表示磁场连续性原理。

方程式(2.1-4)表示电场强度的来源和自由电

荷密度的关系。

麦克斯韦方程组表明：一个变动的电场总是伴随着一个变动的磁场；一个变动的磁场总是伴随着一个变动的电场，介质中的任何扰动都将以有限的速度向空间传播，形成电磁波，其速度约为 3×10^8 m/s。

3 电容与电感

1. 电容 电容 C 是宏观地表征两导体间电介质特性的参量，电容只和导体的形状、尺寸、相互间距离及介质的特性 (ϵ 的大小) 有关。两金属导体间的电容

$$C = \frac{Q}{U} \quad (\text{F})$$

式中 Q 为两导体分别带有的正、负电荷量 (C)； U 为两导体间的电压 (V)； C 是 Q/U 之比的绝对值。

孤立导体的电容是当组成电容的两导体之一移至无穷远点时，该导体的电荷量与其电位之比值。

只要介质是线性的， C 就是常数，单位是法拉 (F)。

2. 电感 电感可分为两类：自感和互感。

自感 L 是表征一个线圈的电流和导磁性能的参量，自感只与线圈的几何形状、介质的导磁特性有关，自感与电容相同永远是正值，可以表示为

$$L = \frac{N\Phi(t)}{i(t)} = \frac{\psi(t)}{i(t)} \quad (\text{H})$$

式中 N 为线圈的匝数，无量纲； $\Phi(t)$ 为与线圈相交链的磁通 (W_b)； $\psi(t)$ 为线圈的磁链 (W_b)； $i(t)$ 为流过线圈的电流。

互感 M 是表征两个线圈及其间导磁物质特性的参量，互感只和两个线圈的几何形状、相对位置及其周围介质的特性有关，线圈 2 对线圈 1 的互感

$$M_{12} = \frac{\psi_{12}}{i_2} \quad (\text{H})$$

式中 ψ_{12} 为互感磁链，是由线圈 2 中产生的磁通与线圈 1 相交链的磁链； i_2 为线圈 2 中的电流。

同理，得到线圈 1 对线圈 2 的互感

$$M_{21} = \frac{\psi_{21}}{i_1} \quad (\text{H})$$

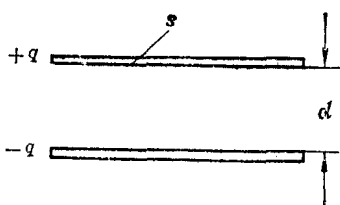
可以证明： $M_{12} = M_{21} = M$ 。

如果导磁物质是线性的，则 L 和 M 都是常数；否则 L 和 M 都是随 i 或 ψ 而改变的变量。互感的作用也可以推广到多个线圈互相间有磁链相交链的情况。 M 与 L 一样，均为正值。

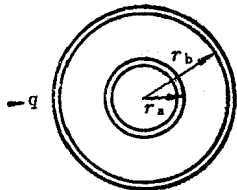
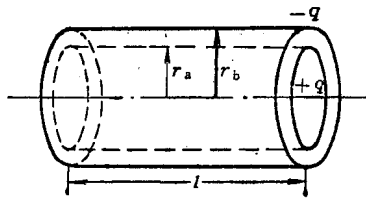
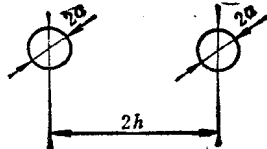
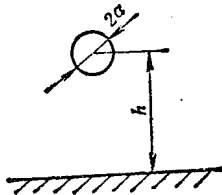
关于两个线圈间的互感 M 的计算问题，见第 2 章。

3. 几种典型结构的电容，电感的计算公式见表 2·1-1 及表 2·1-2。

表 2·1-1 几种典型结构的电容计算公式

电 容	结构图形	电 容 C	说 明
平板电容		$C = \frac{\epsilon s}{d} \quad (\text{F})$	s —极板面积 (m^2) d —极板间的距离 (m), 且远小于边长尺寸 ϵ —介电常数 (F/m)

(续)

电 容	结构图形	电 容 C	说 明
球形电容		$C = \frac{4\pi\epsilon r_a r_b}{r_b - r_a} \text{ (F)}$ 当 $r_b \rightarrow \infty$ 时, 即为孤立球形导体的电容 $C = 4\pi\epsilon r_a \text{ (F)}$	r_a, r_b —内球外表面与外球内表面的半径(m)
圆柱形电容		$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_b}{r_a}} \text{ (F)}$	l —电容器长度(m) r_a, r_b —分别为内柱外表面与外柱内表面的半径(m)
两输电线间的电容 (地面影响忽略不计)		$C = \frac{\pi\epsilon l}{\ln \left[\frac{h}{a} + \sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 - 1} \right]} \text{ (F)}$ $a \ll h$ 时 $C = \frac{\pi\epsilon l}{\ln \left(\frac{2h}{a} \right)} \text{ (F)}$	l —输电线长度(m) $2h$ —导线轴线间的距离(m) a —导线的半径
单极架空输电线的对地电容		$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \left[\frac{h}{a} + \sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 - 1} \right]} \text{ (F)}$ $a \ll h$ 时 $C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \left(\frac{2h}{a} \right)} \text{ (F)}$	h —导线轴线与地面的距离(m) a —导线的半径(m) l —输电线长度(m)