

974267

IMI
7743
1

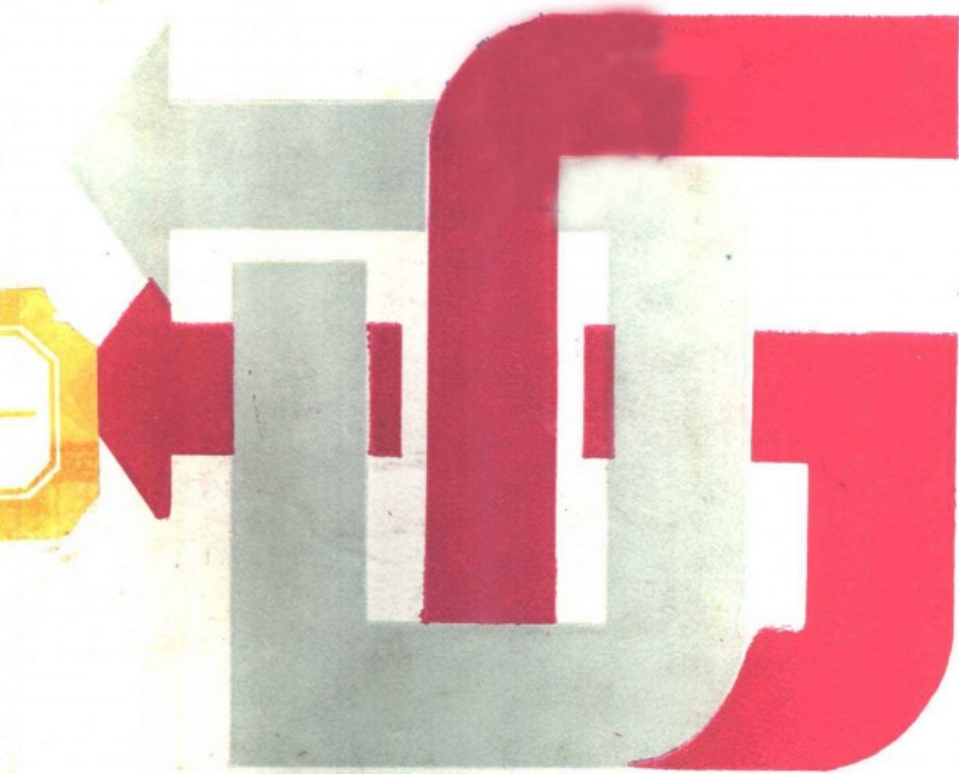
高等学校教材

电工理论基础

上册

(线性电路的稳态分析)

周克定 张文灿 主编



高等教育出版社

高等学校教材

电工理论基础

上册

(线性电路的稳态分析)

高等教育出版社

(京) 112 号

内 容 提 要

本书内容完整、基础宽厚、涉及面广，适合宽口径电类本科专业（如电气技术等专业）采用。删除某些内容，电类专科专业也可采用。还可供广大科技工作者和电工技术人员参考或作为培训教材使用。

本书分上、中、下三册出版。上册包括电路的基本概念和电路定理以及线性电路的稳态分析；中册包括线性电路的暂态分析、非线性电路及磁路和离散系统分析；下册包括分布参数电路和电磁场。

高等学校教材

电工理论基础

上 册

（线性电路的稳态分析）

周克定 张文灿 主编

高等教育出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

中国农业出版社印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 10.375 字数 249 000

1994 年 6 月第 1 版 1994 年 6 月第 1 次印刷

印数 00 001—4 285

ISBN 7-04-004789-6/TM·231

定价 4.70 元

出版说明

电气技术专业是电工学科领域内强弱电相结合的一个学科型宽口径专业。自1979年创办以来,已在教育部、航空航天部、机械工业部、轻工业部、水利电力部、冶金工业部、地质矿产部、城乡建设环境保护部以及地方的几十所高等和中等院校相继成立了电气技术专业。1984年教育部批准将该专业由试办改为正式专业。1986年12月,中国电工技术学会教育工作委员会组织同行专家评审通过全国电气技术教学研究会经调查研究而提出的《电气技术专业人才培养基本业务规格》,确定了该专业的主要课程。1987年成立全国电气技术专业教学指导委员会,挂靠在机械工业部。该委员会于1988年讨论通过了各课程研究组制定的主要课程和教学环节的基本要求,并据此组织编审有关教材,陆续出版,作为该专业的第一轮试用教材。

电气技术专业具有四个特性:其一是学科性,即它是面向整个电工学科而不是以某一特定的电气产品或工程对象来设置专业;其二是基础性,突出强调技术基础在人才培养过程中的重要性和技术基础课程自身学科体系的相对完整性;其三是综合性,强调学科相互交叉和相互渗透的重要性,因此提出四个结合,即强电弱电相结合,元件系统相结合,软硬件相结合和电与机相结合;其四是实践性,即在切实加强基础理论和基本技能的同时,特别强调培养综合运用这些基础和技能来分析解决实际工程问题的能力,为此必须加强实践性的教学环节,并重视自学能力的培养。因此,本专业的课程设置、课程改革和教材编写都力求体现这四个特性。

虽然这批教材的书稿都是在具有多年教学经验、师生反映较好的讲义中，经院校推荐，专业指导委员会组织有关教师根据专业改造的基本要求重新编写并组织专家进行评审的。各有关出版社为保证教材的质量也作出了很多的努力，但是，限于水平和经验，并且这毕竟也还是初次改革的尝试，不足之处希望使用单位、广大师生提出批评和建议，为不断提高电气技术专业教材的质量而努力。

全国电气技术专业指导委员会

• • •

前 言

电气技术专业是一个学科型的宽口径专业，它特别强调技术基础在整个培养过程中的重要性和技术基础课自身体系的相对完整性，强调应用技术基础知识解决工程问题能力的重要性。因此，编写一本内容相对完整、深浅适当、涉及面广、适于宽口径、强弱电相结合专业采用的电工理论基础教材是专业的需要，也是教学改革的需要。

电工基础是电类专业一门最重要的技术基础课，是一切电类专业后续课程以及今后开展工作的基础。我们受电气技术专业教学指导委员会（指委会）和教育研究会的委托，同时参照国家教委工科电工课程教学指导委员会制订的高等工业学校有关课程的基本要求，在广泛征求意见的基础上，编制了本课程的基本要求和参考性教学大纲，经1987年和1988年两次全国年会上讨论、修改，最后经电气技术专业指导委员会第二次全体会议通过，作为本学科的教学基本文件。本书就早根据该基本文件编写的。高等工业学校教育研究协作组就专业设置、调整、人才规格等问题进行讨论时指出：“……人才培养的要求应该是：一、理论基础厚，二、知识覆盖宽，三、实践能力强。即宽、厚、强三点兼备的人才，才具有较好的适应性，……”。本教材力图使读者通过本书的学习，能建立较宽厚的电工理论基础知识，为继续学习电类课程创造条件，并在今后工作中永远受益。

本书内容包括电路及磁路、网络分析、电磁场，以及信号与系统的基本部分，它覆盖目前开设的“电路”、“电磁场”、“信号与系

统”三门课程。附录中还编入了电路及电磁场机辅分析程序和若干其他内容。电路和电磁场虽自成体系,但是在理论上是统一的,书中加强了场路联系和场是路的物理基础这一基本观点。考虑到电路课程内容已覆盖信号与系统课程内容中的连续时间系统的基本部分和网络分析,故本书仅增添了离散系统一章作为补充。又考虑到后续课程的需要,增加了磁路一章。本书既包含了重要的经典内容,又充分照顾到某些现代分析方法,如网络图论法、状态变量法、时域分析和复频域分析中的某些内容和电磁场的数值计算等等。

考虑到不同专业的需要,全书分上、中、下三册出版,上册为电路的基本概念和线性电路的稳态分析,其中包含电路元件及电路定律、电阻电路的分析和网络定理、储能元件、正弦电流电路、三相正弦电流电路、非正弦周期电流电路、网络图论及矩阵分析以及二端口网络等八章。中册为线性电路的暂态分析和非线性电路及磁路和离散系统分析,其中包含电路的时域分析、复频域分析、状态变量法、非线性电路、磁路和离散系统分析等六章。下册为分布参数电路和电磁场,其中包含分布参数电路、静电场与恒定电流场、恒定磁场、时变场和电磁场的边值问题等五章。三册共计十九章。不同专业可根据实际情况,只讲上册,或只讲上、中册;也可删除某些章节(如磁路、网络图论、状态变量法、离散系统、分布参数电路、边值问题等),并不影响课程的衔接性和系统性。书中标“*”号者是选学内容。因此,删除某些内容,也可作为电类专科教材或培训班教材使用。另外应强调指出,由于本书是为宽口径专业编写的教材,涉及了三门课,鉴于我国的实际情况,可以作为两门或三门课程开出,每门课的名称可参照每册的副标题。

三门课合用一套教材,可沟通场、路之间的联系和强、弱电基础理论之间的联系,减少课程之间的重复,因而总学时减少较多,

这对于加强基础、拓宽知识面、改革教学都是有利的。1992年在国家教委的安排与资助和电气技术专业教学指导委员会的指导下，经高等教育出版社和许多兄弟院校的支持，在湖北工学院组织召开了《电工理论基础》教材审稿会，全书(三册)由电工界老前辈俞大光教授担任主审，张金如教授对电磁场部分会前也进行了审阅；参加审稿会的有中国工程物理研究院、东南大学、武汉大学、华中理工大学、水利电力大学、武汉工业大学、海军工程学院、钢铁学院、武汉工学院、高等教育出版社、湖北工学院等十余所院校和单位的专家、教授。与会的同志们对全书进行了详细的审阅，并提出了许多宝贵的修改意见，我们在此表示衷心的感谢。我们特别感谢俞大光教授在百忙中抽时间一丝不苟地对全书进行仔细审阅、校核和修正，使全书更为完善。

全书初稿过去以讲义形式曾在电类本、专科教学中试用过四遍(电气技术本科专业和电力系统及其自动化专科专业)，反映效果良好，审稿会上又得到专家们对三门课程教材合为一套教材这种有益尝试的充分肯定，这样的做法在国内尚属首次，专家们认为教材内容配合恰当，安排合理，符合宽口径专业的教学要求，兼顾了传统与现代内容，教材富有创新精神。

本书由周克定、张文灿主编，负责全书统稿和最后的校定工作。参加编写的还有贾福庭、徐美川、李振立。具体分工为：周克定编写第十一、十三章及第十六~十九章共计六章；张文灿编写第一~第五及第九、十四、十五章共计八章及“傅里叶变换”和“电路综合的概念”两节；贾福庭编写第七、八、十章；徐美川编写第十二章；李振立编写第六章。由于本课程改革较大，涉及范围较广，编者水平有限，考虑不周或错误不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

1993年10月于武汉

目 录

第一章 电路元件和电路定律	1
§1-1 电路的组成	1
§1-2 电路中常用的基本物理量	3
§1-3 基尔霍夫定律	10
§1-4 电阻元件	15
§1-5 独立电源	20
§1-6 电阻的串、并、混联	26
§1-7 受控源和受控源电路	30
习题	35
第二章 电阻电路的分析和网络定理	41
§2-1 网络图论的基本概念	41
§2-2 支路法	45
§2-3 回路法	49
§2-4 节点法	54
§2-5 叠加定理	59
§2-6 替代定理和互易定理	62
§2-7 星形-三角形电路·含受控源电路的等效变换	69
§2-8 等效电源定理	72
*§2-9 对称电路的分析	78
习题	79
第三章 储能元件	84
§3-1 激励函数	84
§3-2 电磁感应定律和电感元件	93
§3-3 互感电动势和互感系数	99

§3-4 电容元件	105
§3-5 电感元件、电容元件的串、并联	110
*§3-6 对偶原理	114
习题	118
第四章 正弦电流电路分析	123
§4-1 正弦量的基本概念	123
§4-2 正弦量的相量分析法	129
§4-3 正弦电路中的 R 、 L 、 C 元件	134
§4-4 R 、 L 、 C 元件的串联与并联, 阻抗与导纳	142
§4-5 正弦电流电路的计算	151
§4-6 正弦电流电路中的功率	156
§4-7 互感耦合电路	169
§4-8 空心变压器和理想变压器	176
§4-9 谐振电路	182
习题	191
第五章 三相正弦电流电路	198
§5-1 三相正弦电流电路的基本概念	198
§5-2 三相正弦电流电路的计算	207
§5-3 位形相量图·中性点位移	211
§5-4 三相电路的功率及其测量	214
习题	218
第六章 非正弦周期电流电路	222
§6-1 非正弦周期信号	222
§6-2 周期性信号的傅里叶级数展开	223
§6-3 非正弦周期信号的有效值、平均值	227
§6-4 非正弦周期电流电路中的功率	233
§6-5 非正弦周期电流电路的计算	235
§6-6 对称三相电路中的高次谐波	241
§6-7 周期性信号的频谱	244

§6-8 滤波器的概念	247
习题	250
第七章 网络图论及矩阵分析	255
§7-1 关联矩阵[A]及基尔霍夫电流定律	255
§7-2 回路矩阵[B]及基尔霍夫电压定律	257
§7-3 割集矩阵[Q]及基尔霍夫电流定律	259
§7-4 支路电压-电流关系的矩阵形式	262
§7-5 节点法	268
*§7-6 含纯电压源支路的节点法	271
§7-7 回路法	274
*§7-8 割集法	276
§7-9 特勒根定理	277
习题	281
第八章 二端口网络	284
§8-1 二端口网络方程及参数	285
§8-2 二端口网络的等效电路及其联接	296
§8-3 运算放大器	301
§8-4 回转器和负阻抗变换器	303
习题	308
习题答案	311

第一章 电路元件和电路定律

本章讨论电路模型的组成,电路中的基本变量及其参考方向。着重讨论电压、电流的约束关系,即基尔霍夫定律和电阻元件特性。基尔霍夫定律和元件特性以及参考方向的概念是对电路进行定量分析的重要依据。

向电路提供电能的独立电源,常可理想化为电压源和电流源,本章给出它们的定义。

受控源是构成电子器件的基本元件。本章讨论受控源的四种类型,并对电阻电路和含受控源的简单电路进行分析和计算。

§ 1-1 电路的组成

若干电气设备按一定方式用导线连接起来,构成电流的通路,称为电路或电网络,简言之,电路就是电流流通的路径。电路一般可分为四个部分:1. 电源,其作用是将其他形式的能量转换成电能,如蓄电池、发电机等;2. 负载,或称用电器,其作用是将电能转换为其他形式的能量,如电灯、电炉、电动机等;3. 连接导线,其作用是输送和分配电能;4. 控制设备和信号处理设备,其作用是执行控制任务和信号处理任务,如开关、继电器、放大器、调谐电路和各种控制电路等。有的电路相当庞大,如供应千家万户电能的电力系统可长达数百公里,有的电路体积很小,如密集在几平方毫米内的集成电路。电路的结构形式和功能多种多样,不胜枚举,像放大电路和调谐电路功能就是处理激励信号,使之成为所需要的响应。所谓激励就是在电路输入端口提供电能或信号的电源,而由输出

端口输出的电能或信号叫做响应。电路分析的任务，主要是由已知的特定激励求它所产生的响应。

电路理论中，实际的电气设备或器件称为实际电路器件。一个实际电路器件往往有好几种电磁现象，如一个电感线圈通电流后，电流周围有磁场，线匝间有电场，导线内也有电场和磁场，导线有电阻，因此，直接分析由实际器件组成的电路比较困难，通常采用模型化的方法，将实际电路器件抽象为所谓理想电路元件。它只显示一种电磁现象或物理现象。理想电路元件分为

理想电源元件：独立电压源，独立电流源。

理想负载元件：电阻元件，电感元件，电容元件等。

理想耦合元件：受控电源，理想变压器，耦合电感，理想回转器等。

这些理想元件都有它们的电路模型和数学模型，以后将陆续介绍。例如，电灯的实际装置和电路模型与数学模型如图 1-1 所示，它的数学模型就是欧姆定律。

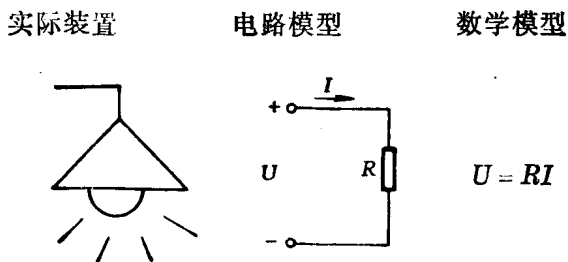


图 1-1

有了这些理想元件后，就可近似地用一个或多个理想元件代替实际电气设备，构成需要的电路模型，再根据电路的基本定律和定理列出数学方程组（即数学模型），求解后即得到所需要的结果，这就是电路分析的主要过程。

上述理想电路元件又称集中参数元件，由它们构成的电路称

为集中参数电路，本书上、中册都是讨论这种电路。对频率 f 为 50Hz，波长为 6000 km 的电力系统，如果电路的几何尺寸相对这一波长很小时，可把电路中的信号传播看成是瞬时完成的，如果电压也不是很高，则这样的电路完全可以忽略电路参数（电阻、电感、电容等）的分布性，而看作集中参数电路，这种电路中的电压、电流只是时间的函数，电路特性可用常微分方程描述。但是当电路中的工作频率很高或波长很短，以致电路的几何尺寸可与波长相比拟，或者电压很高，漏电流相对不可忽略时，则必须考虑电路参数的分布性，这种电路就称为分布参数电路。这种电路中的电压和电流既是时间 t 的函数，又是空间距离的函数，电路特性只能用偏微分方程描述，这种电路将在第十五章讨论。

根据电路元件的特性和电源的情况，可将电路分为线性电路和非线性电路、时变参数电路和非时变参数（定常参数）电路、直流电路和交流电路、有源电路和无源电路、连续时间电路和离散时间电路等，还可从不同使用角度对电路进行分类。这些电路以后将陆续介绍。

§ 1-2 电路中常用的基本物理量

本节从电磁学理论引出电路中常用的各电磁量，最后讨论电压、电流的参考方向问题。

一、电场强度、电位和电压

由库仑定律可得出一个点电荷 q 在无限大真空中某场点所产生的电场强度为

$$\mathbf{E} = \frac{q\mathbf{r}_0}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{q\mathbf{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad (1-1)$$

式中， \mathbf{r}_0 是由点电荷 q 指向场点的单位矢量， r 是点电荷到某场点的距离， $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ F/m}$ 是真空的介电常数。电场强度的

SI 单位为伏每米(V/m)。

当一正电荷在点电荷 q 的场中由 a 点移到 b 点时, 库仑电场所做的功与此正电荷量的比值称为 a 、 b 间的电压, 用 U_{ab} 表示, 应用上式可得

$$\begin{aligned}
 U_{ab} &= \int_{(a)}^{(b)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \textcircled{1} = \int_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_a}^{r_b} \frac{1}{r^2} dr \\
 &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b} \right) \quad (1-2)
 \end{aligned}$$

式中 r_a 和 r_b 分别是点电荷 q 到起点 a 和终点 b 的距离 (如图 1-2)。

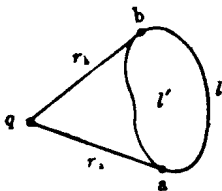


图 1-2

电压的 SI 单位为伏(V)。上式仅与起点和终点位置有关, 而与经过的路径无关, 或者说, 库仑电场在路径 l 上所作的功等于在路径 l' 上所做的功。库仑电场中, 电压与路径无关的基本事实是: 电路中任两点之间连接的电压表不管连接该表的导线如何弯曲, 只要这连接的两点不变, 则电压表读数不变。

如果单位正电荷从场中某点出发沿某一闭合路径移动又回到出发点, 则由于 $r_a = r_b$, 电场所做的功为零, 即有

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad (1-3)$$

任何带电体系都可以看成是许多点电荷的集合, 由于电场与点电荷具有线性关系[参见式(1-1)], 带电体的场可看作这些点电荷的场的叠加, 因此式(1-3)不仅对点电荷的电场成立, 对所有静电场都成立。 \mathbf{E} 的闭合线积分等于零, 是静电场的基本方程之一, 也是能量守恒在静电场中的具体体现。由这一式子容易看出 \mathbf{E} 的线积分与路径无关的特性, 因为(参见图 1-2)

$\textcircled{1}$ a, b 表示点, 不是数值, 不宜作积分上、下限, 特用括号括起来, 表示从 a 点到 b 点。以下同。

$$\begin{aligned}\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} &= \int_{a'lb'a} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_{a'lb} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} + \int_{bl'a} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \\ &= \int_{a'lb} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} - \int_{a'lb} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0\end{aligned}$$

故

$$\int_{a'b} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_{a'l'b} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

由于式(1-3)也能从库仑定律得出的场强式(1-1)来证明, 故电荷产生的电场称为库仑电场。

若把某点 P 选作参考点, 则 a 点对于参考点的电压称为电位, 用 φ_a 表示, 即

$$\varphi_a = U_{ap} = \int_{(a)}^{(p)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (1-4)$$

显然, 电位的 SI 单位也是 V。参考点的电位为零。

$$\begin{aligned}\varphi_a - \varphi_b &= \int_{(a)}^{(p)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} - \int_{(b)}^{(p)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_{(a)}^{(p)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} + \int_{(p)}^{(b)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \\ &= \int_{(a)}^{(b)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}\end{aligned} \quad (1-5)$$

由此可见, 在库仑电场中, 电压也就是电位差, 参考点的选择不影响任两点之间的电压。因此各点电位仅取决于它对参考点的位置, 位置一定, 电位即为定值, 这称为电位单值性。在电磁场理论中, 往往选择无限远作为电位参考点, 而在电路分析中, 往往选择接地点或任一点作为电位参考点。

二、电荷、电流和电流的连续性

电场或电位差的作用可使自由电子或离子定向运动, 形成电流。设空间有一束电荷流(如电荷沿导线运动), 任意选取一个截面 S, 若 dt 时间内穿过的电荷为 dq, 则通过 S 面的电流定义为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-6)$$

其数值等于单位时间内通过横截面的电荷值。电流的 SI 单位为

安[培]① (A), 是国际单位制中的七个基本单位之一②。此外, 还常用千安(kA)、毫安(mA)、微安(μA)及纳安(nA)等, 它们的关系为 $1\text{ kA} = 10^3\text{ A}$, $1\text{ mA} = 10^{-3}\text{ A}$, $1\text{ }\mu\text{A} = 10^{-6}\text{ A}$, $1\text{ nA} = 10^{-9}\text{ A}$ 。电荷量的 SI 单位为库[仑](C), 等于安秒, 即 $\text{C} = \text{A} \cdot \text{s}$ 。可见电流既是物理现象, 又是物理量。若电流的量值和流动方向不随时间变化, 即为恒定电流或直流, 用大写字母 I 表示。

在某点处垂直电荷运动方向取一面元 ΔS , 其上通过电流 Δi , 则定义一矢量 δ , 其量值为

$$\delta = \frac{\Delta i}{\Delta S} \quad (1-7)$$

其方向为该点正电荷运动的方向。由于电流是在体积中流动, 所以 δ 称为体电流的面密度矢量或体电流密度矢量, 简称为电流密度矢量, 其 SI 单位为安每平方米 (A/m^2)。

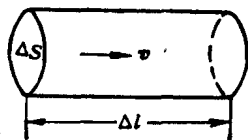


图 1-3

空间(包括导体)某点的电流密度与该点的电荷密度、电荷运动速度之间有一定的关系。如图 1-3 所示, 垂直于 δ 取面元 ΔS , 设 Δt 时间内电荷位移 Δl , 则柱形体积中

的自由电荷在 Δt 时间内都穿过 ΔS , 电流为

$$\Delta i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\rho \Delta l \Delta S}{\Delta t} = \rho v \Delta S$$

$$\delta = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta i}{\Delta S} = \rho v$$

即
$$\delta = \rho v \quad (1-8)$$

式中 ρ 为该点处的体电荷密度, 其 SI 单位为安每立方米 (A/m^3), v 是该点电荷运动的速度。于是, 在体积中通过任意面 S 的电流

① 本书文字中方括号内的字可以省略, 省略后为简称。

② 本书物理量单位采用国际单位制(SI), SI 的七个基本单位为: 米(m)、千克(kg)、秒(s)、安培(A)、开尔文(K)、摩尔(mol)和坎德拉(cd)。