

高等学校试用教材

电 磁 场

(电工原理II)

冯慈璋 主编

人 民 教 育 出 版 社

高等学校试用教材

电 磁 场

(电工原理 II)

冯慈璋 主编

人 民 教 育 出 版 社

本书根据一九七七年十一月高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议通过的《电磁场(电工原理Ⅱ)》编写大纲写成。

邱关源主编的《电路(电工原理Ⅰ)》与本书系上下篇。

全书共分九章,即静电场,恒定电场,恒定磁场,边值问题,时变场,平面电磁波波导,均匀传输线中的导行电磁波,等离子体中的电磁场,运动系统中的电磁场。

本书由哈尔滨工业大学主审,并经一九七八年十一月重庆审稿会议审查通过,作为试用教材,供高等工业学校电力类专业通用,兼顾电子类专业的需要。也可供一般电气、无线电和自动控制等方面工程技术人员参考。

本书责任编辑杨陵康。

高等学校试用教材

电 磁 场

(电工原理Ⅱ)

冯慈璋 主编

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 18 字数 435,000

1979年4月第1版 1979年12月第1次印刷

印数 00,001—63,000

书号 15012·0154 定价 1.45 元

序 言

本书根据一九七七年十一月高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议通过的《电磁场(电工原理Ⅱ)》编写大纲写成。

邱关源主编的《电路(电工原理Ⅰ)》与本书系上下篇。这样的定名是考虑到当前多数学校仍把“电路”与“电磁场”合为一门电工原理课程的实际情况。

“电磁场”是工科电类专业的一门理论性较强的基础技术课，它的任务是阐明电磁场的基本概念、基本规律和基本的分析计算方法。编写中，既重视基础理论，也注意适应现代科学技术发展的需要。

全书共九章。第一、二、三章分别系统地阐述静电场、恒定电场和恒定磁场的基本规律和性质。对于与物理电磁学衔接的部分，既保持理论体系的完整，同时尽量避免不必要的重复。第四章介绍位场的各种分析计算法，除了传统内容如分离变量法、保角变换法以及位场的模拟外，还详细阐述了网格法，并介绍了应用日益广泛的有限元法，以适应当前科技领域中由于计算技术的发展而引起的变化。第五章介绍时变电磁场的基本理论。第六章讨论平面电磁波及波导。第七章介绍均匀传输线中的导行电磁波，从电磁场方程组出发讨论二线传输线的电磁现象，并归结为分布参数电路。这部分内容放在电磁场中，就电工原理的教学传统来说，也是一种尝试；是否合适，有待于实践的检验。最后两章(第八章：等离子体中的电磁场，第九章：运动系统中的电磁场)是在我国电工原理教材中初次引入的内容。书中各章都附有习题。书末有附录，供参考。

本书是按六十个学时的讲授时数为参考编写的。考虑到各类学校及专业的不同情况,编写时适当增添了些内容与份量,以利选用。

对于本书的使用,编者有后列几点看法。一、第七章的内容可以移到电路部分去讲授,并不影响本书的连贯性。二、第八、九两章,对于扩展学生的知识面,使他们对电磁场有较完整的概念是有益的,也是加强基础理论所需要的,但与前面七章相比,要求应有所不同,也可以作为参考内容。三、数值计算法的处理,与算法语言等课程有一定联系,可以根据各方面条件,灵活掌握。四、其余各章,虽多属传统的基本内容,但可以结合专业情况及其它具体情况决定取舍,不宜强求一律。

参加本书编写工作的有冯慈璋、盛剑霓、江慰德、倪光正四同志,由冯慈璋主编。编写中,汲取了西安交通大学电工原理教研室的教学经验,教研室的同志们多次讨论书稿,并对本书的编写从精神和物质两方面都给予很大的帮助和支持。编者认为,本书是西安交大电工原理教研室的集体成果。

本书承哈尔滨工业大学周长源、马国强、刘润同志初审,并经一九七八年十一月重庆审稿会议通过。参加会议的有上海交通大学、北京工业大学、吉林电力学院、成都工学院、南京工学院、河北工学院、河北电力学院、重庆大学、哈尔滨工业大学、浙江大学、西安交通大学以及其它九所高等学校的代表。主审单位(哈工大)及与会代表们对书稿都提出很多宝贵意见,编者在此谨致以深切的谢意。

限于我们的水平,书中不妥和错误之处可能不少,衷心欢迎使用本书的师生和其它读者批评指正。

编 者

一九七九年一月 于西安交大

目 录

序 言	1
第一章 静电场	3
§ 1-1 电场强度	3
§ 1-2 电位及其梯度	13
§ 1-3 高斯通量定理	23
§ 1-4 静电场的基本方程·分界面上的边界条件	31
§ 1-5 泊松方程和拉普拉斯方程	38
§ 1-6 电轴法	49
§ 1-7 镜象法	56
§ 1-8 部分电容	65
§ 1-9 电场能量	74
§ 1-10 电场力	81
习题	87
第二章 恒定电场	93
§ 2-1 电流与电流密度	93
§ 2-2 导电媒质中恒定电场的基本方程	97
§ 2-3 分界面上的边界条件	102
§ 2-4 恒定电场与静电场的比拟	106
§ 2-5 电导与部分电导	108
§ 2-6 接地电阻	112
§ 2-7 能量与功率	117
习题	119
第三章 恒定磁场	121
§ 3-1 磁感应强度·磁通	121
§ 3-2 安培环路定律	131
§ 3-3 恒定磁场的基本方程·分界面上的边界条件	137
§ 3-4 标量磁位	140
§ 3-5 向量磁位	147
§ 3-6 镜象法	153
§ 3-7 电感	156

§ 3-8 磁场能量	168
§ 3-9 磁场力	175
习题	182
第四章 边值问题	185
§ 4-1 概述	185
§ 4-2 分离变量法	189
§ 4-3 复位函数法	198
§ 4-4 保角变换法	210
§ 4-5 网格法	215
§ 4-6 有限元法	240
§ 4-7 图解法	269
§ 4-8 场的实验研究	274
习题	288
第五章 时变场	293
§ 5-1 电磁感应定律	293
§ 5-2 全电流定律	296
§ 5-3 电磁场的基本方程	300
§ 5-4 坡印亭定理和坡印亭向量	309
§ 5-5 电磁场方程和坡印亭向量的复数形式	314
§ 5-6 动态位	318
§ 5-7 达朗贝尔方程的解答	321
§ 5-8 辐射	328
习题	338
第六章 平面电磁波·波导	340
§ 6-1 理想介质中的均匀平面波	340
§ 6-2 导电媒质中的均匀平面波	352
§ 6-3 薄平板中的涡流	360
§ 6-4 集肤效应·邻近效应·电磁屏蔽	365
§ 6-5 线性极化波的正入射·驻波	367
§ 6-6 平行导板间的电磁波	372
§ 6-7 矩形波导和谐振腔	379
§ 6-8 光波导	384
习题	386
第七章 均匀传输线中的导行电磁波	389

§ 7-1 均匀传输线的基本方程	339
§ 7-2 均匀传输线基本方程的正弦稳态解	399
§ 7-3 均匀传输线的副参数	402
§ 7-4 接有不同负载时的均匀传输线	407
§ 7-5 均匀传输线的入端阻抗	415
§ 7-6 均匀传输线中电压、电流的计算	421
§ 7-7 均匀传输线的等值电路	427
§ 7-8 传输线中电压、电流波和空间平面波的相似	431
§ 7-9 传输线中的过渡过程	435
§ 7-10 无损耗线的过渡过程	441
§ 7-11 波的多次反射	446
§ 7-12 电磁场方程与电路定律	449
习题	456
第八章 等离子体中的电磁场	460
§ 8-1 引言	460
§ 8-2 电场、磁场中的带电粒子	461
§ 8-3 等离子体的一些物理性质	469
§ 8-4 等离子体的等效参数	478
§ 8-5 等离子体中电磁波的传播	483
§ 8-6 法拉第旋转	491
习题	495
第九章 运动系统的电磁场	498
§ 9-1 相对性原理与洛伦兹变换	498
§ 9-2 速度与力的变换	509
§ 9-3 电流密度与电荷密度的变换	512
§ 9-4 相对论中电场与磁场的变换关系	518
§ 9-5 电磁场方程的四维形式	525
习题	535
附录一 坐标制	537
附录二 向量分析	538
附录三 复变函数示例	549
附录四 电磁单位制	551
习题答案	556

序 言

本书根据一九七七年十一月高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议通过的《电磁场(电工原理II)》编写大纲写成。

邱关源主编的《电路(电工原理I)》与本书系上下篇。这样的定名是考虑到当前多数学校仍把“电路”与“电磁场”合为一门电工原理课程的实际情况。

“电磁场”是工科电类专业的一门理论性较强的基础技术课,它的任务是阐明电磁场的基本概念、基本规律和基本的分析计算方法。编写中,既重视基础理论,也注意适应现代科学技术发展的需要。

全书共九章。第一、二、三章分别系统地阐述静电场、恒定电场和恒定磁场的基本规律和性质。对于与物理电磁学衔接的部分,既保持理论体系的完整,同时尽量避免不必要的重复。第四章介绍位场的各种分析算法,除了传统内容如分离变量法、保角变换法以及位场的模拟外,还详细阐述了网格法,并介绍了应用日益广泛的有限元法,以适应当前科技领域中由于计算技术的发展而引起的变化。第五章介绍时变电磁场的基本理论。第六章讨论平面电磁波及波导。第七章介绍均匀传输线中的导行电磁波,从电磁场方程组出发讨论二线传输线的电磁现象,并归结为分布参数电路。这部分内容放在电磁场中,就电工原理的教学传统来说,也是一种尝试;是否合适,有待于实践的检验。最后两章(第八章:等离子体中的电磁场,第九章:运动系统中的电磁场)是在我国电工原理教材中初次引入的内容。书中各章都附有习题。书末有附录,供参考。

本书是按六十个学时的讲授时数为参考编写的。考虑到各类学校及专业的不同情况，编写时适当增添了些内容与份量，以利选用。

对于本书的使用，编者有后列几点看法。一、第七章的内容可以移到电路部分去讲授，并不影响本书的连贯性。二、第八、九两章，对于扩展学生的知识面，使他们对电磁场有较完整的概念是有益的，也是加强基础理论所需要的，但与前面七章相比，要求应有所不同，也可以作为参考内容。三、数值计算法的处理，与算法语言等课程有一定联系，可以根据各方面条件，灵活掌握。四、其余各章，虽多属传统的基本内容，但可以结合专业情况及其它具体情况决定取舍，不宜强求一律。

参加本书编写工作的有冯慈璋、盛剑霓、江慰德、倪光正四同志，由冯慈璋主编。编写中，汲取了西安交通大学电工原理教研室的教学经验，教研室的同志们多次讨论书稿，并对本书的编写从精神和物质两方面都给予很大的帮助和支持。编者认为，本书是西安交大电工原理教研室的集体成果。

本书承哈尔滨工业大学周长源、马国强、刘润同志初审，并经一九七八年十一月重庆审稿会议通过。参加会议的有上海交通大学、北京工业大学、吉林电力学院、成都工学院、南京工学院、河北工学院、河北电力学院、重庆大学、哈尔滨工业大学、浙江大学、西安交通大学以及其它九所高等学校的代表。主审单位（哈工大）及与会代表们对书稿都提出很多宝贵意见，编者在此谨致以深切的谢意。

限于我们的水平，书中不妥和错误之处可能不少，衷心欢迎使用本书的师生和其它读者批评指正。

编 者

一九七九年一月 于西安交大

第一章 静 电 场

内 容 提 要

本章首先介绍静电场中最主要的场量——电场强度向量和标量电位，并讨论如何根据已知的电荷分布应用迭加原理计算静电场。对于电介质中的电场，用极化电荷考虑其附加作用，从而引入极化强度向量。在研究不均匀介质中电场强度向量闭合面积分的基础上，引入电位移向量，并得到高斯通量定理 $\left(\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = q\right)$ ，它与静电场无旋特性 $\left(\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0\right)$ 一起，构成静电场的基本方程。

应用积分形式的基本方程，导得不同介质分界面上的边界条件。应用微分形式的基本方程 $(\nabla \times \mathbf{E} = 0)$ 和 $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$ 导得泊松方程 $(\nabla^2 \varphi = -\rho/\epsilon)$ 和拉普拉斯方程 $(\nabla^2 \varphi = 0)$ 。静电场问题都可归结为求解这两个方程。

在唯一性定理的基础上，介绍两种间接解法——电轴法与镜象法。

本章把电容概念扩充到多导体系统而引入部分电容。从场的角度，讨论了电场能量，电场能量密度及它们的计算式。最后，重点讨论应用虚位移法求电场力并导得计算式。

§ 1-1 电 场 强 度

1) 电荷的周围存在着一种特殊形式的物质，称为电场。

相对于观察者为静止的、且其电量不随时间而变的电荷的电场,即为静电场。

电场的表现是对于引入场中的静止电荷有力相作用。人们通常就利用这一表现来探索电场的存在,确定电场的特性。也就是说,电场的性质,可以通过另一带电体在场中各点所受作用力的情况来确定。我们把这种带电体称为试体,并用 q_i 表示它的电荷。为了使被研究的电场尽量少受到由于试体的引入而产生的影响,要求试体的几何尺寸很小,同时它所带的电量也必须相当少。也就是说试体是一个电量很少的点电荷。

表征电场特性的基本场向量是电场强度,我们用符号 E 表示之。它被定义为

$$E(x, y, z) = \lim_{q_i \rightarrow 0} \frac{f(x, y, z)}{q_i} \quad (1-1)$$

式中的 $f(x, y, z)$ 表示试体 q_i 在点 (x, y, z) 所受的力。显然,向量 $E(x, y, z)$ 仅与该点的电场有关而与试体的电荷无关。通常把电场强度简称为场强。

2) 在无限大真空中,两个点电荷 q_1 和 q_2 之间的作用力,可由库仑定律确定。例如 q_2 所受到(q_1 对它)的力,在国际单位制(简称国际制,代号为 SI)中,可表示成

$$f_{21} = \frac{q_2 q_1}{4\pi\epsilon_0 r^2} r_{12}^0 \quad (1-2)$$

同理, q_1 所受到(q_2 对它)的力为

$$f_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} r_{21}^0 \quad (1-3)$$

上面两式中, r 是两电荷间的距离, r_{12}^0 和 r_{21}^0 都是单位向量,且 $r_{12}^0 = -r_{21}^0$, 即前者由 q_1 指向 q_2 , 后者由 q_2 指向 q_1 , 如图 1-1 所示。 ϵ_0 是真空的介电常数,在国际制中,其值为 $10^{-9}/36\pi = 8.85 \times 10^{-12}$ 法拉/米(F/m)。

如果把两个点电荷 q_2 和 q_1 置于无限大均匀介质中, 则它们所受之力分别为

$$f_{21} = \frac{q_2 q_1}{4\pi\epsilon r^2} r_{12}^0 \quad (1-4)$$

和

$$f_{12} = -\frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon r^2} r_{21}^0 \quad (1-5)$$

式中的 ϵ 是介质的介电常数, 它和真空的介电常数的关系是

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (1-6)$$

ϵ_r 称为相对介电常数, 是一个纯数。对于空气, $\epsilon_r = 1$ 。

在库仑定律的表达式中, 电荷的单位用库仑(C), 距离的单位用米(m), 力的单位用牛顿(N)。

在线性介质 (即其介电常数不随电场强度而变的电介质) 中, 如有多个点电荷, 则某一个点电荷 (例如 q_0) 所受到的其它点电荷对它的作

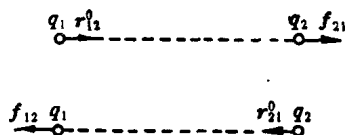


图 1-1

用力, 等于这些电荷各别地作用于该点电荷的力的向量和 [即合力 (例如 f_0), 如图 1-2 所示]。也就是说, 在线性介质中, 可以应用叠加原理。

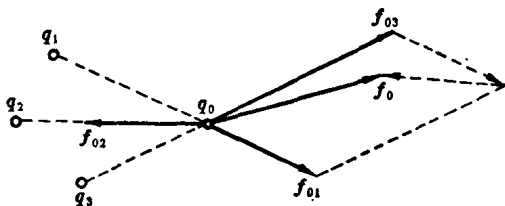


图 1-2

3) 这里来说明以后要采用的记法。在场的问题中, 必须经常地同时考虑两类点。一类是表明场源所在的点, 简称源点, 我们记之为 (x', y', z') ; 另一类是需要确定场量的点, 简称场点, 我们记

之为 (x, y, z) 。这样区分清楚, 将有助于对问题的分析和计算。另外, 我们规定用 $\mathbf{R}'$ 表示从坐标原点到源点的向量, 用 $\mathbf{R}$ 表示由坐标原点到

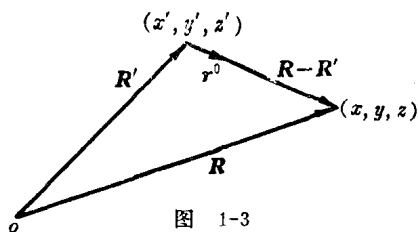


图 1-3

场点的向量, 因此向量差 $\mathbf{R} - \mathbf{R}'$ 就表示由源点到场点的向量(见图 1-3)。为了简便, 我们用小写字母 r 表示向量 $\mathbf{R} - \mathbf{R}'$ 的量值, 同时用 $\mathbf{r}^0$ 表示 $\mathbf{R} - \mathbf{R}'$ 方向的单位向量; 这样, 可得关系式

$$r = |\mathbf{R} - \mathbf{R}'| = [(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2]^{1/2}$$

$$\mathbf{r}^0 = \frac{\mathbf{R} - \mathbf{R}'}{|\mathbf{R} - \mathbf{R}'|}$$

如有多个源点, 我们把从坐标原点到第 k 个源点 (x'_k, y'_k, z'_k) 的距离向量用 $\mathbf{R}'_k$ 表示, 且令 $\mathbf{r}_k = \mathbf{R} - \mathbf{R}'_k$ 和 $\mathbf{r}^0_k = (\mathbf{R} - \mathbf{R}'_k) / |\mathbf{R} - \mathbf{R}'_k|$ 。例如有点电荷 $q_1, q_2, \dots, q_k, \dots, q_n$ 分别位于 $(x'_1, y'_1, z'_1), (x'_2, y'_2, z'_2), \dots, (x'_k, y'_k, z'_k), \dots, (x'_n, y'_n, z'_n)$, 则它们对位于 (x, y, z) 处的电荷 q_0 的作用力, 可表示成

$$\mathbf{f}_0 = \frac{q_0}{4\pi\epsilon} \sum_{k=1}^n \frac{q_k}{|\mathbf{R} - \mathbf{R}'_k|^2} \cdot \frac{\mathbf{R} - \mathbf{R}'_k}{|\mathbf{R} - \mathbf{R}'_k|} = \frac{q_0}{4\pi\epsilon} \sum_{k=1}^n \frac{q_k}{r_k^2} \mathbf{r}^0_k \quad (1-7)$$

4) 根据电场强度的定义和库仑定律, 可以求得位于无限大真空中 (x', y', z') 处的点电荷 q 在 (x, y, z) 点所产生的电场强度

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 |\mathbf{R} - \mathbf{R}'|^2} \cdot \frac{\mathbf{R} - \mathbf{R}'}{|\mathbf{R} - \mathbf{R}'|} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}^0 \quad (1-8)$$

如点电荷 q 不是在真空中, 而是在无限大均匀电介质(介电常数为 ϵ)中, 则它所产生的电场强度应为

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2} \mathbf{r}^0 \quad (1-9)$$

上两式中, r 是源点到场点的距离, $\mathbf{r}^0$ 是由源点指向场点的单位向

量(见图 1-4)。

前面已经提到,在线性介质中,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。据此,多个点电荷在无限大均匀介质中所产生的电场强度应等于各个点电荷各自在该点产生的电场强度之向量和,也就是说可以应用迭加原理。这样,我们可把 n 个点电荷在无限大真空和在无限大均匀电介质中一点 (x, y, z) 所产生的电场强度分别表示成

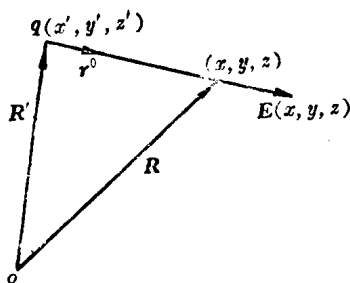


图 1-4

$$E(x, y, z) = E_1 + E_2 + \cdots + E_n = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^n \frac{q_k}{r_k^2} \mathbf{r}_k^0 \quad (1-10)$$

和
$$E(x, y, z) = E_1 + E_2 + \cdots + E_n = \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_{k=1}^n \frac{q_k}{r_k^2} \mathbf{r}_k^0 \quad (1-11)$$

式中 r_k 是点电荷 q_k 与场点 (x, y, z) 的距离, $\mathbf{r}_k^0$ 是由 q_k 所在点 (x'_k, y'_k, z'_k) 指向场点的单位向量。

由式(1-8)可以推导出国际制中电场强度的单位是

$$[E] = \frac{\text{库}}{(\text{法拉/米}) \cdot \text{米}^2} = \frac{\text{库}}{\text{法拉} \cdot \text{米}} = \frac{\text{伏 (V)}}{\text{米 (m)}}$$

5) 根据物质结构理论,我们知道电荷的分布,实际上是不连续的。可是当我们考察电的宏观现象时,可以不考虑电的粒子结构而把电荷看成是连续分布的。这样就可以引入电荷密度的概念。

当电荷作体分布(即分布在一定体积内)时,我们定义其体密度

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta V} = \frac{dq}{dV} \quad (\text{库/米}^3)$$

当电荷分布在厚度可以忽略的面积上时,我们定义其面密度

$$\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta S} = \frac{dq}{dS} \quad (\text{库/米}^2)$$

当电荷分布在截面积可以忽略的线形区域内时, 我们定义其线密度

$$\tau = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta l} = \frac{dq}{dl} \quad (\text{库/米})$$

计算电场时, 对于任何电荷分布, 可以把它们分成许多元电荷 dq , 而把每一元电荷看成点电荷。因此, 根据式(1-9), 在无限大均匀介质中, 元电荷 dq 在离它 r 远处所产生的元场强为

$$dE = \frac{dq}{4\pi\epsilon r^2} \mathbf{r}^0$$

应用迭加原理, 全部电荷在该点所产生的电场强度即为

$$\mathbf{E} = \int dE = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int \frac{dq}{r^2} \mathbf{r}^0 \quad (1-12)$$

这是给定电荷分布求电场强度的一般公式。式中的 dq 随电荷作体分布、面分布或线分布可分别表示成 ρdV , σdS 或 τdl 。因此式(1-12)应相应分别写成

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_V \frac{\rho(x', y', z')}{r^2} dV \mathbf{r}^0 \quad (1-13)$$

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_S \frac{\sigma(x', y', z')}{r^2} dS \mathbf{r}^0 \quad (1-14)$$

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_l \frac{\tau(x', y', z')}{r^2} dl \mathbf{r}^0 \quad (1-15)$$

例 1-1 图 1-5 示真空中一长度为 $2L$ 的均匀带电直线, 电荷的线密度为 τ , 试决定场中任意点 P 的电场强度。

解 对于这一电场, 如采用圆柱坐标, 则场强 $\mathbf{E}$ 将与 α 无关。从图可以看出:

$$R = r \csc \theta$$

$$l = z - r \cot \theta$$

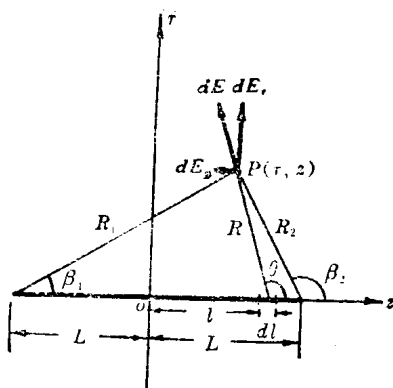


图 1-5

从而

$$dl = r \csc^2 \theta d\theta$$

元电荷 $dq (= \tau dl)$ 在场点 $P(r, z)$ 产生的电场强度

$$dE = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 R^2} = \frac{\tau dl}{4\pi\epsilon_0 R^2} = \frac{\tau r \csc^2 \theta d\theta}{4\pi\epsilon_0 r^2 \csc^2 \theta} = \frac{\tau d\theta}{4\pi\epsilon_0 r}$$

它的两个分量:

$$dE_z = dE \cos \theta = \frac{\tau \cos \theta d\theta}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$dE_r = dE \sin \theta = \frac{\tau \sin \theta d\theta}{4\pi\epsilon_0 r}$$

分别积分之, 可得

$$E_z = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0 r} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \cos \theta d\theta = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0 r} (\sin \beta_2 - \sin \beta_1) \quad (1-16)$$

$$E_r = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0 r} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \theta d\theta = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0 r} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2) \quad (1-17)$$

如果是无限长带电直线, 即 $L \rightarrow \infty$, 这时 $\beta_1 = 0$, $\beta_2 = \pi$ 。由式 (1-16) 和 (1-17) 即得 $E_z = 0$

$$E = E_r = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (1-18)$$

6) 根据导电性能, 我们可以把物体分成两大类, 一类是导体

• • •