

21世纪高等教育规划教材——学习指导与考研系列
普通物理学同步辅导系列

电磁学释疑

Electromagnetism

谭金凤 王凤翔 李鲁艳◎编著

0441-43
09



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

014010854

0441-43

09

21 世纪高等教育规划教材——学习

普通物理学同步辅导系列

电 磁 学 释 疑

谭金凤 王凤翔 李鲁艳 编著



北航

C1697110

机械工业出版社

0441-43
09

作者把长期学习、讲授、研究电磁学积累的知识和体会以及多年指导学生考研复习的经验进行整理和总结,以“释疑”的形式写出来,编成本书。全书共分五章,其内容包括真空中的静电场、静电场中的导体和电介质、真空中的稳恒磁场、磁场中的磁介质、变化的电磁场。每章又由内容导读、问题释疑和典型题析三部分组成。特别需要指出的是:“典型题析”是从国内外的优秀教材和近几年来国内多所知名大学研究生入学考试试题中精选出的具有代表性的例题,不仅能够给学习电磁学的同学以很好的启迪和帮助,而且对准备考研的同学更是难得的电磁学复习资料。

本书可作为高等理工科院校、师范院校各相关专业师生电磁学教学或学习的参考书,也可作为考研复习的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电磁学释疑/谭金凤等编著. —北京:机械工业出版社, 2013. 11
21 世纪高等教育规划教材. 学习指导与考研系列
ISBN 978-7-111-43967-7

I. ①电… II. ①谭… III. ①电磁学—高等学校—教材
IV. ①0441

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 212017 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张金奎 责任编辑: 张金奎 贺 伟

版式设计: 霍永明 责任校对: 刘秀芝

封面设计: 张 静 责任印制: 杨 曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2013 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

140mm×203mm·4 印张·103 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-43967-7

定价: 12.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010)68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649 机工微博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203 封面无防伪标均为盗版

序

电磁学是理工科学生学习的重要基础课，因为课程中的概念、定理、原理等都比较抽象，很多学生在理解和应用时感到迷惘和困难；作者长期从事电磁学课程的教学和研究工作，积累了丰富的教学和指导学生学习的经验，本书即是对这些经验的总结和概括；“内容导读”“问题释疑”“典型题析”等是全面系统的学习指导，使读者不仅可以提纲挈领地掌握电磁学主要内容和知识结构，而且可以获得疑难问题的准确解答，有效掌握电磁学典型问题的解题方法；“方法点击”“拓展思考”“错解分析”是本书的特色和亮点，使读者在掌握电磁学主要内容和基本解题方法的基础上，进一步拓展思路，开阔视野，对在解题过程中容易出错的关键点有更深刻的认识；特别需要指出的是：作者精选了大量近几年国内多所知名大学的研究生入学考试试题作为本书的例题，不仅能够给学习电磁学的同学以很好的启迪和帮助，而且对准备考研的同学更是可贵的电磁学复习资料。毫无疑问，这是一本内容广泛、颇具特色的电磁学学习指导书，也是一本优秀的考研复习资料。

张永治

2013年5月20日

前 言

电磁学是高等院校物理类各相关专业“普通物理”以及理工科非物理专业“大学物理”课程的重要内容，一般在大一讲授。电磁学课程中的很多概念、定理和定律虽然学生在中学时都有所接触，但对概念和规律的理解还是初步的，随着课程内容的扩展和加深，尤其当必须使用高等数学知识来分析、解决问题时，很多学生感觉到听课时似乎明白了，而一旦面对具体问题时总觉得似是而非，不知从何着手。针对这一状况，作者把长期学习、讲授、研究电磁学积累的知识和体会以及多年指导学生考研复习的经验进行整理和总结，以“释疑”的形式写出来，编成本书，希望有助于大家对电磁学的学习和理解。

全书共分五章，每章由内容导读、问题释疑和典型题析三部分组成。“内容导读”呈现给读者的是简明扼要、层次分明的知识结构和内容要点，便于读者快速复习、高效掌握，形成稳固、扎实的知识网，为提高解题能力和物理思维水平夯实基础。“问题释疑”所列出的问题绝大多数是从学生中来的，精选了一些难以理解、容易混淆、必须掌握和某些似是而非的问题作了详细的剖析，某些问题还采用了正误对比的方式进行解惑，使读者对问题理解得更加透彻。“典型题析”是从国内外的优秀教材和近几年来国内多所知名大学研究生入学考试试题中精选出的具有代表性的例题，由“思路探索”来引导读者尽快找到解决问题的思路和方法，用“方法点击”来帮助读者归纳解决问题的关键、技巧与规律。对部分例题还增加了“错解分析”和“拓展思考”。“错解分析”是针对学生经常会出现的错误（学习中的错误往往是教学的一笔“财富”）而设计的；“拓展思考”是为了引导学生学会“举一反三，融会贯通”进行更深入的思考而设计的。

本书可作为高等理工科院校、师范院校各相关专业师生电磁学教学或学习的参考书，也可作为考研复习的参考书。

由于编者水平所限，书中的不妥和错误在所难免，敬请广大读者提出宝贵意见。

编 者

目 录

序

前言

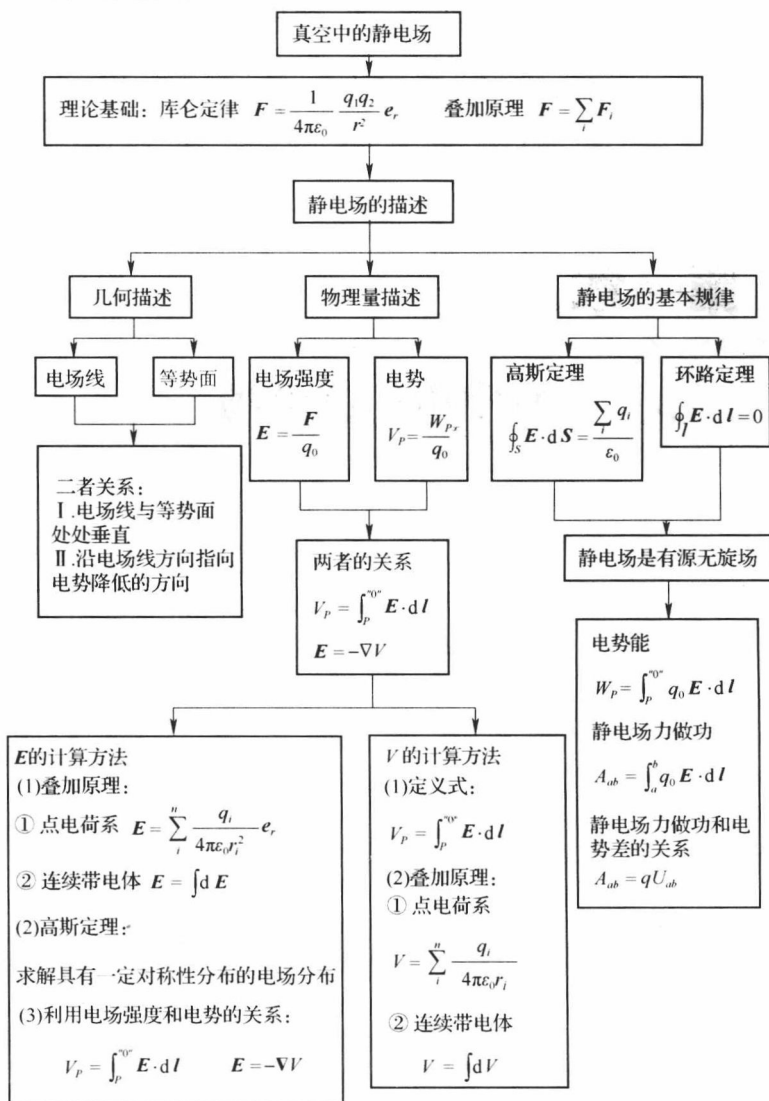
第一章 真空中的静电场	1
一、内容导读	2
二、问题释疑	5
三、典型题析	8
第二章 静电场中的导体和电介质	23
一、内容导读	24
二、问题释疑	26
三、典型题析	30
第三章 真空中的稳恒磁场	51
一、内容导读	52
二、问题释疑	55
三、典型题析	57
第四章 磁场中的磁介质	71
一、内容导读	72
二、问题释疑	74
三、典型题析	80
第五章 变化的电磁场	87
一、内容导读	88
二、问题释疑	91
三、典型题析	97
参考文献	119

第一章

真空中的静电场

一、内容导读

【知识结构】



【内容要点】

1. 库仑定律及静电力叠加原理

名 称	内 容	说 明
库仑定律	$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{e}_r (\mathbf{e}_r \text{ 为单位矢量})$	适用于点电荷
静电力 叠加原理	$\mathbf{F} = \sum_i \mathbf{F}_i = \sum_i \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q_i}{r_i^2} \mathbf{e}_r$	适用于点电荷系

2. 电场强度及电场强度叠加原理

名 称	内 容	说 明
电场强度	$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_0}$ 电场中某点电场强度 $\mathbf{E}$ 的大小等于单位正电荷 q_0 在该点受力大小, 其方向为正电荷在该点受力的方向	电荷在电场中受力——从该点性质出发, 引入了描述静电场性质的基本物理量——电场强度矢量
电场强度 叠加原理	$\mathbf{E} = \sum_i \mathbf{E}_i = \sum_i \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{e}_r \text{ (点电荷系)}$ $\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r^2} \mathbf{e}_r \text{ (电荷连续分布带电体)}$	电荷线分布 $dq = \lambda dl$ 电荷面分布 $dq = \sigma dS$ 电荷体分布 $dq = \rho dV$

3. 几种典型带电体的电场强度分布

名 称	内 容
点电荷	$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \mathbf{e}_r$
无限长均匀带电直线	$\mathbf{E} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r} \mathbf{e}_r (\lambda \text{ 为电荷线密度})$
半径为 R 的均匀带电球面	$E_{\text{内}} = 0 \quad E_{\text{外}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \mathbf{e}_r$
半径为 R 的均匀带电球体	$E_{\text{内}} = \frac{\rho r}{3\epsilon_0} \mathbf{e}_r \quad E_{\text{外}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \mathbf{e}_r$

(续)

名 称	内 容
半径为 R 的无限长均匀带电圆柱面	$E_{\text{内}} = 0$ $E_{\text{外}} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r} e_r$
半径为 R 的无限长均匀带电圆柱体	$E_{\text{内}} = \frac{\lambda r}{2\pi\epsilon_0 R^2} e_r$ $E_{\text{外}} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r} e_r$
无限大均匀带电平面	$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} i$ (σ 为电荷面密度)
半径为 R 的均匀带电细圆环	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qx}{(x^2 + R^2)^{3/2}} i$ (轴线上)
半径为 R 的均匀带电薄圆盘	$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left(1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 + R^2}} \right) i$ (轴线上)

4. 电势能和电势

名 称	内 容	说 明
电势能	$W_P = q_0 \int_P^{r_0} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$ 电荷在电场中某点的电势能在数值上等于将电荷 q_0 从该点移到电势能为零的点的过程中电场力所做的功	
电势	$V_P = \frac{W_P}{q_0} = \int_P^{r_0} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$ 电场中某点的电势在数值上等于单位正电荷 q_0 在该点具有的电势能	电荷在电场中具有势能——从该点性质出发, 引入了描述静电场性质的另一个基本物理量——电势
电势叠加原理	$V = \sum_i V_i = \sum_i \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i} \text{ (点电荷系)}$ $V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r} \text{ (电荷连续分布带电体)}$	
电势差	$U_{ab} = V_a - V_b = \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$	
电场强度与电势的关系	$\mathbf{E} = -\text{grad}V$ 在直角坐标系中 $\mathbf{E} = -\left(\frac{\partial V}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial V}{\partial z} \mathbf{k} \right)$	电场中某点的电场强度取决于该点处电势的空间变化率, 而与该点电势值本身无直接的关系

注: 若源电荷为有限分布, 可取无限远处为电势零点; 若源电荷为无限分布, 电势零点选取将视具体问题而定。

5. 静电场的基本定律

名 称	内 容	说 明
静电场的高斯定理	$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_i q_i$ 在真空中通过任一闭合曲面的电场强度通量，等于该闭合曲面内包围的电荷量的代数和除以真空电容率 ϵ_0	静电场的高斯定理表明静电场是有源场
静电场的环路定理	$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$ 在静电场中，电场强度沿任一闭合路径的线积分恒为零	静电场的环路定理表明静电场是无旋场（保守场）

注：高斯定理和环路定理反映了静电场的两个不同侧面，只有将两者有机结合，才能客观地描述静电场的性质。

6. 电场强度和电势的计算方法

名 称	内 容	说 明
电场强度的计算方法	I. 利用点电荷电场强度公式及电场强度叠加原理 II. 利用高斯定理 III. 利用电势和电场强度的微分关系	前提是已知场源电荷的分布
电势的计算方法	I. 利用点电荷电势公式及电势叠加原理 II. 利用电场强度和电势的积分关系	

注：当电荷分布具有特殊对称性时，电场分布也具有某种对称性，可用高斯定理求解电场分布。

二、问题释疑

1-1 点电荷是什么？一个点电荷在它所在处产生的电场强度是多大？

【答】点电荷是理想模型。当带电体的几何线度远小于带电体到观察点的距离时，将实际的带电体简化为一个带一定电荷量的几何点（实际上它本身的线度不一定很小）。

当观察点逼近点电荷时，它的形状、大小就不能忽略了，即

不能看做点电荷了。此时要讨论它在所在处产生的电场强度，就需要把它看做具有一定电荷分布的带电体来计算，若还根据点电荷的电场强度公式 $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \mathbf{e}_r$ 求该点的电场强度，显然没有物理意义。

1-2 什么样的电荷可作为试验电荷（检验电荷）？

【答】 试验电荷是为了测定电场的性质而引入电场中的带电体。试验电荷必须满足两个条件：

(1) 所带电荷量要足够小，以不至于影响原来的电场分布。

(2) 其线度要足够小，以至于所得的结果能精确反映电场各“点”的性质。

1-3 电场强度的物理意义是单位正电荷量所受的力。因为电荷量的单位是库仑，故某点的电场强度等于在该点放一个电荷量为 1C 的点电荷所受的力。你认为对吗？

【答】 不对。因为电场强度的定义式 $E = \frac{\mathbf{F}}{q}$ 中，要求试验电荷的电荷量 q 必须足够小，以便使它所产生的电场对原来电场分布影响很小，可以略去不计。而库仑是一个非常大的单位，需要 6.242×10^{18} 个质子的电荷加在一起，才够 1C 的电荷量。这样大的电荷量必然引起原来电场发生很大的变化，因此不符合试验电荷的要求。

1-4 库仑定律与高斯定理和环路定理的关系如何？

【答】 高斯定理和环路定理都是在库仑定律和电场叠加原理基础上推导出来的。库仑定律和叠加原理都是实验定律，原则上，应用库仑定律和叠加原理可以解决静电学的所有问题。应用高斯定理和环路定理也可以解决静电学的所有问题，并且可以推导出库仑定律。在静电学中高斯定理和环路定理与库仑定律和叠加原理等价，但库仑定律没有涉及场的概念，而高斯定理和环路定理是以电场为基本概念来描述矢量场结构特征的，所以高斯定理和环路定理包含的内容远比库仑定律和叠加原理丰富。正是由

于引入了电磁场的概念，电磁理论才得到了迅速发展和完善。

1-5 场与实物有何异同点？

【答】共同点：它们都是一种客观存在的物质。

(1) 场与实物一样，存在的形式多种多样，如电场、磁场、引力场和核力场等。

(2) 具有与实物相同的属性，如具有质量、能量、动量和角动量等。

(3) 在场内进行的物理过程遵循质量守恒定律、能量守恒定律、动量守恒定律、角动量守恒定律等。

(4) 场不能被创造，也不能消灭，只能由一种形式转变为另一种形式。

不同点：

(1) 实物是由分子、原子等微粒组成的，这些微粒占据的空间不能被其他微粒所占据。场是分布在空间中的一种看不见摸不着的特殊物质，它遵循叠加性。一种场所占据的空间，同时可被其他场占据，且互不影响。

(2) 一般情况下，场以光速传播（运动），而实物的速度不能达到光速。

(3) 场不能作为参考系。

1-6 静电场电势零点选取原则是什么？

【答】(1) 电势零点选取的任意性。

由静电场的安培环路定理，引入了电势的概念，电场中任一点的电势等于把单位正电荷从该点移到电势零点过程中电场力所做的功。可见，静电场中某一点的电势与电势零点选取有关，即电势具有相对值。那么，电势零点位置究竟选在哪里才合适呢？原则上，只要使电场中某一点的电势具有相对确定的值，使描述的静电场能够反映其在空间的分布就可以。即原则上电势零点的选取是任意的。

(2) 若源电荷为有限分布，可取无限远处为电势零点。

在涉及静电场的实际问题中，尽管带电体系的电荷量不同，

电荷分布各异,但带电体的电荷量总是有限的,带电体的线度也是有限的。一般来讲,带电体附近的场较强,电势变化较快;距离带电体较远处的场较弱,电势变化缓慢,即距离带电体足够远处的电场强度趋于零,电势恒定。所以,对有限大小的实际带电体的电场,通常取无限远处为电势零点。

(3) 若源电荷为无限分布,电势零点选取将视具体问题而定。

在理论研究中,通常遇到很多理想的带电模型,如无限大均匀带电平面、无限长均匀带电直线、无限长均匀带电圆柱面等。若选择无限远处为电势零点,在电场中任一点的电势便无确定的值(可能出现矛盾或电势发散等问题),即对电场的描述无确定的物理含义。可见,此时电势零点的位置不能选择在无限远处,即除无限远处及带电体本身的任一点外,其他点均可作为电势零点。

(4) 实际工程技术中,通常取大地为电势零点。

三、典型题析

例 1-1 如图 1-1 所示,在 $z=0$ 所对应的 x 、 y 平面上放置四个点电荷,求在 origin $(0, 0)$ 处的电势和电场强度。

(北京理工大学 2003 年硕士研究生入学考试试题)

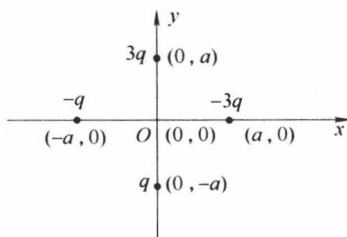


图 1-1

【思路探索】可应用电势叠加原理、电场强度叠加原理,计算 origin $(0, 0)$ 处的电势和电场强度。

解: 根据电势叠加原理, origin $(0, 0)$ 处的电势为

$$V = \frac{3q}{4\pi\epsilon_0 a} + \frac{q}{4\pi\epsilon_0 a} - \frac{3q}{4\pi\epsilon_0 a} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0 a} = 0$$

根据电场强度叠加原理, origin $(0, 0)$ 处的电场强度为

$$\mathbf{E} = \frac{2q}{4\pi\epsilon_0 a^2} \mathbf{i} - \frac{2q}{4\pi\epsilon_0 a^2} \mathbf{j} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 a^2} \mathbf{i} - \frac{q}{2\pi\epsilon_0 a^2} \mathbf{j}$$

【方法点击】在点电荷系的电场中，某一点的电场强度、电势等于各点电荷单独存在时在该点产生的电场强度、电势的叠加。但要注意：求点电荷系的电场强度时，是求每个点电荷电场

强度 $\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r$ 的矢量和；而求点电荷系的电势时，是求每个

点电荷电势 $V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$ 的代数和。

例 1-2 如图 1-2 所示，真空中两个点电荷 q_1 、 q_2 ，相距为 $2r$ ，以 q_1 为球心，以 r 为半径作高斯面 S ，若 $q_1 = q_2$ ，则通过高斯面 S 的电通量为多少？高斯面 S 上的 P 点的电场强度又为多大？

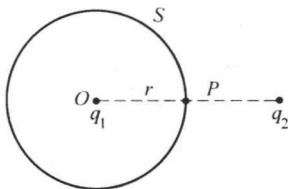


图 1-2

(浙江大学 2005 年硕士学位研究生入学考试试题)

【思路探索】可先由高斯定理求得通过高斯面 S 的电通量，再由电场强度叠加原理，求得 P 点电场强度。

解：根据高斯定理 $\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_i q_i$ 求得通过高斯面 S 的电通量为

$$\Phi = \oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{q_1}{\epsilon_0}$$

而高斯面 S 上的 P 点的电场强度为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_P &= \mathbf{E}_{q_1} + \mathbf{E}_{q_2} \\ E_P &= \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r^2} - \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \end{aligned}$$

式中，若 q_1 、 q_2 同号， $E_P = 0$ ；若 q_1 、 q_2 异号， $E_P = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0 r^2} =$

$$\frac{q_2}{2\pi\epsilon_0 r^2}。$$

【方法点击】该题可以由高斯定理求得电通量，但不能直接用高斯定理求得高斯面 S 上的 P 点的电场强度，因为高斯面 S 上的任一点的电场强度是由 q_1 、 q_2 共同产生的。当电场强度分布不具有对称性时，不能用高斯定理直接求 E_P ，必须用电场强度叠加原理来计算。

例 1-3 如图 1-3a 所示，用绝缘细线弯成的半圆环，半径为 R ，其上均匀带有总电荷 Q ，试求圆心 O 点处的电场强度。

(湖南大学 2007 年硕士学位研究生入学考试试题)

【思路探索】根据带电体电荷的分布，利用点电荷形成电场的电场强度公式写出所取电荷元在圆心 O 点处产生的电场强度 dE ，然后积分求圆心 O 点处的电场强度。

解：选取圆心 O 为坐标原点，建立如图 1-3b 所示的坐标系，其中 Ox 轴沿半圆环的对称轴。

在环上任取一小段圆弧 $dl = R d\theta$ ，其上带电量

$$dq = \frac{Q}{\pi R} dl = \frac{Q}{\pi R} R d\theta = \frac{Q}{\pi} d\theta$$

它在 O 点处产生的电场强度大小为

$$dE = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 R^2} = \frac{Q}{4\pi^2\epsilon_0 R^2} d\theta$$

在 x 、 y 方向的两个分量为

$$dE_x = dE \sin\theta = \frac{Q}{4\pi^2\epsilon_0 R^2} \sin\theta d\theta$$

$$dE_y = dE \cos\theta = \frac{Q}{4\pi^2\epsilon_0 R^2} \cos\theta d\theta$$

对以上两式分别积分得

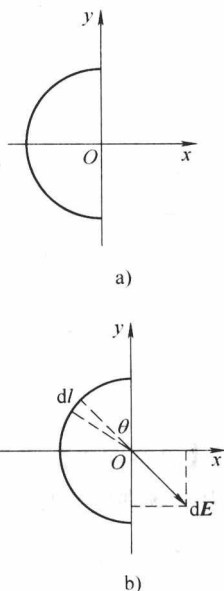


图 1-3