



高职高专电子信息类专业“十二五”课改规划教材

电波与天线

张照锋 谭立容 袁迎春 编著 ■



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高职高专电子信息类专业“十二五”课改规划教材

电波与天线

张照锋 谭立容 袁迎春 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书根据职业教育教学改革的理论,在作者多年的课程改革实践经验的基础上编写而成,是一本实用性强、易于教学的项目式课程教材。主要内容包括8个项目,分别是:用模拟法描绘静电场、测量地磁场、用 HFSS 观察平面电磁波、用 HFSS 仿真线天线、用 HFSS 仿真天线阵、用 HFSS 仿真宽频带天线、用 HFSS 仿真波导缝隙天线、用 HFSS 仿真喇叭天线。

本书可作为高职高专院校无线电专业的教材,也可供从事与天线相关工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电波与天线/张照锋,谭立容,袁迎春编著.

—西安:西安电子科技大学出版社,2012.8

高职高专电子信息类专业“十二五”课改规划教材

ISBN 978-7-5606-2815-8

I. ① 电… II. ① 张… ② 谭… ③ 袁… III. ① 电波传播—高等职业教育—教材 ② 天线—高等职业教育—教材

IV. ① TN011 ② TN82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 111708 号

策 划 张 媛

责任编辑 张 媛 苗 娟

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2012年8月第1版 2012年8月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 11.5

字 数 268千字

印 数 1~3000册

定 价 18.00元

ISBN 978-7-5606-2815-8/TN·0658

XDUP 3107001-1

如有印装问题可调换

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

根据高等职业教育的人才培养目标要求,在教学实施中,不仅要求学生掌握一定的基础理论知识,更要强调培养学生的实践能力及分析问题与解决问题的能力,以提高学生的综合职业能力。如何在有限的时间内,有效地完成课程的理论与实践两个部分的教学任务,使学生具有较强的实践技能和技术应用能力,一直是困扰专业课教学的一大难题。究其原因,笔者认为,一方面,在大多数职业技术学院中,学生的基础较差,理解能力较弱,使教学进度与学生的掌握程度不容易同步,很难形成教与学的良性循环;另一方面,教学手段单一,理论课老师往往是“一支粉笔一本书”,内容的讲解常常是“空”而“虚”,难以被学生消化吸收,实验课老师则经常重复一些机械动作,实验内容更多的是简单验证理论结果,很少能引发学生对理论知识本身的深层思考。因此,传统的教学模式很难激发学生的学习兴趣,教学效果欠佳,教学效率不高。

为了解决上述问题,近年来国内外教育部门和相关专家大力倡导一种新的教学模式——项目式教学,它是以工作任务为中心选择和组织课程内容,并以完成工作任务为主要学习方式的课程模式,其目的在于加强课程与工作之间的相关性,整合理论与实践,提高学生职业能力培养的效率。本教材就是笔者在长期教学积累的基础上,将项目式教学的模式应用在“电波与天线”这门专业课的一次尝试。

HFSS(High Frequency Structure Simulator)是美国 Ansoft 公司推出的三维电磁仿真软件,是世界上第一个商业化的三维结构电磁场仿真软件,是被业界公认的三维电磁场设计和分析的电子设计工业标准,是天线设计、仿真不可或缺的工具。

学习“电波与天线”这门课,除了掌握必要的基本理论外,更重要的是掌握如何用 HFSS 对典型天线进行设计、分析,从而得到天线的各种特性参数(即教材中所选择的项目式教学内容)。

本教材共分 8 个项目:分别是用模拟法描绘静电场;测量地磁场;用 HFSS 观察平面电磁波;用 HFSS 仿真线天线;用 HFSS 仿真天线阵;用 HFSS 仿真宽频带天线;用 HFSS 仿真波导缝隙天线;用 HFSS 仿真喇叭天线。前两个项目主要对静电场和静磁场进行研究,第三个项目主要围绕电磁场进行研究,后面五个项目则针对不同形式的典型天线进行分析、设计、仿真。

本教材由张照锋老师负责总体框架的构建并执笔教材中有关理论部分的编写,由谭立容老师负责 HFSS 实例的设计,由袁迎春老师负责教材中的例题以及课后题的编写,并对教材图片文字进行了润色。

本教材在编写过程中参考了大量国内外优秀教材和资料,还得到了相关领导及教师的

帮助和指导，在此一并表示感谢。

最后，本教材虽然力求满足高职高专无线电专业“电波与天线”的教学要求，但由于时间仓促，水平有限，书中难免有错漏之处，恳请广大读者批评指正。若有问题请发邮件至 zhangzf@njcit.cn 联系。

编 者

2011 年 12 月于南京

目 录

项目一 用模拟法描绘静电场	1
1.1 探究静电场基本规律	2
1.1.1 电荷 库仑定律	2
1.1.2 电场 电场强度	2
1.1.3 电通量 高斯定理	4
1.1.4 静电场环路定理	5
1.2 用模拟法描绘静电场的分布	6
1.2.1 模拟法描绘电场	6
1.2.2 等势线的探测	8
1.3 导体和介质对电场分布的影响	8
1.3.1 静电平衡	8
1.3.2 孤立带电导体表面的电场分布	9
1.3.3 封闭导体壳内的电场分布	9
1.3.4 电偶极子	11
1.3.5 电介质的极化	11
1.3.6 有介质时的静电场方程	13
1.3.7 两介质边界处的电场分布	13
1.3.8 电场的能量	14
课后练习题	15
项目二 测量地磁场	16
2.1 静磁场的基本规律	17
2.1.1 电流 电流密度	17
2.1.2 安培定律 磁场 磁感应强度	18
2.1.3 磁感线 静磁场的“高斯定理”	21
2.1.4 安培环路定理	22
2.2 介质对磁场分布规律的影响	24
2.2.1 磁矩	24
2.2.2 有介质存在时磁场的分布特点	25
2.2.3 磁化电流	26
2.2.4 磁场强度 有介质时的磁场环路定理	27
2.2.5 磁场的能量	29
2.3 测量地磁场的水平分量	30
2.3.1 地磁场	30
2.3.2 正切电流计	30
课后练习题	32
项目三 用 HFSS 观察平面电磁波	33
3.1 平面电磁波	34

3.1.1	电磁感应	34
3.1.2	动生电动势 感生电动势	34
3.1.3	感生电场的性质	35
3.1.4	位移电流	36
3.1.5	电磁场	37
3.1.6	麦克斯韦方程组	37
3.1.7	平面电磁波	38
3.1.8	能流密度 波印廷矢量	39
3.2	学习使用高频仿真软件 HFSS	40
3.2.1	认识 HFSS	40
3.2.2	熟悉 HFSS 的基本操作	41
3.2.3	用 HFSS 观察平面电磁波	43
3.3	电磁波的无线传播	54
3.3.1	视距传播	54
3.3.2	电离层传播	54
3.3.3	外层空间传播	54
3.3.4	地面波传播	55
3.3.5	电磁场边界条件	55
3.3.6	电磁波对理想导体的正入射	57
3.3.7	电磁波对介质的正入射	58
3.3.8	导体的趋肤效应	59
3.4	电磁波的有线传播	59
3.4.1	传输线	59
3.4.2	传输线的工作状态	64
3.4.3	传输线的参数	65
3.4.4	波导传输原理	65
3.4.5	矩形波导中的主模	65
3.4.6	矩形波导中其他模式的电磁波	67
3.4.7	常见微波器件	68
	课后练习题	69
项目四 用 HFSS 仿真线天线		71
4.1	天线的基本概念	72
4.1.1	电基本振子及其辐射特点	72
4.1.2	近区场	73
4.1.3	远区场	73
4.1.4	天线的主要特性参数	74
4.1.5	接收天线的特性参数	79
4.2	对称振子	79
4.2.1	对称振子上的电流分布	79
4.2.2	对称振子的辐射场	80
4.2.3	对称振子的方向特性	80
4.2.4	对称振子的辐射功率	82
4.2.5	对称振子的辐射阻抗	82

4.2.6	对称振子的输入阻抗	83
4.3	用 HFSS 仿真对称振子	84
4.3.1	初始步骤	84
4.3.2	定义变量	84
4.3.3	创建 3D 模型	86
4.3.4	创建空气盒	90
4.3.5	设置求解条件	91
4.3.6	天线的 HFSS 仿真结果	93
	课后练习题	95
项目五	用 HFSS 仿真天线阵	96
5.1	天线阵	96
5.1.1	天线阵原理	97
5.1.2	二元阵的方向特性	98
5.1.3	均匀直线式天线阵	101
5.2	引向天线	101
5.2.1	引向天线的工作原理	102
5.2.2	引向天线的设计	103
5.2.3	在 HFSS 中仿真引向天线	104
5.3	电视发射天线	113
5.3.1	电视发射天线的特点和要求	113
5.3.2	旋转场天线	114
	课后练习题	115
项目六	用 HFSS 仿真宽频带天线	116
6.1	螺旋天线	116
6.1.1	宽频带天线的条件	116
6.1.2	平面等角螺旋天线	117
6.1.3	阿基米德螺旋天线	118
6.1.4	在 HFSS 中仿真平面对数螺旋天线	119
6.2	对数周期天线	139
6.2.1	齿状对数周期天线的结构	139
6.2.2	齿状对数周期天线的原理	140
	课后练习题	140
项目七	用 HFSS 仿真波导缝隙天线	141
7.1	缝隙天线	142
7.1.1	理想缝隙天线	142
7.1.2	波导缝隙天线	143
7.1.3	用 HFSS 仿真计算波导缝隙天线	144
7.2	微带天线	156
7.2.1	微带天线的结构	156
7.2.2	微带天线的辐射原理	156
	课后练习题	158
项目八	用 HFSS 仿真喇叭天线	159

8.1 面天线辐射的基本原理	159
8.1.1 面元的辐射	159
8.1.2 同相等幅矩形口径面的辐射特性	162
8.2 喇叭天线	163
8.2.1 喇叭天线的结构特点	163
8.2.2 矩形口径喇叭天线	164
8.2.3 用 HFSS 仿真喇叭天线的方向性	165
课后练习题	175
参考文献	176

项目一 用模拟法描绘静电场

❖ 学习目标 ❖

- 能用物理和数学语言描述静电场。
- 学习用模拟法研究静电场。
- 理解高斯定理内容并会简单应用。
- 掌握导体周围静电场的分布特点。
- 了解静电屏蔽的规律。
- 知道电场的有势性。
- 能计算静电场的能量。

❖ 工作任务 ❖

- 描绘出无限长同轴电缆中的静电场。
- 描绘出无限长平行直导线周围的电场。



人类对电的认识是在长期实践活动中不断发展、逐步深化的，它经历了一个漫长而曲折的过程。人们对电现象的初步认识，可追溯到公元前 6 世纪，希腊哲学家泰勒斯那时已发现并记载了摩擦过的琥珀能吸引轻小物体。我国东汉时期，王充在《论衡》一书中也提到摩擦琥珀能吸引轻小物体。

第一位认真研究电现象的人是英国的医生、物理学家吉尔伯特。1600 年，他发现金刚石、水晶、硫磺、火漆和玻璃等物质，用呢绒、毛皮和丝绸摩擦后，能吸引轻小物体，有“琥珀之力”，他认为这可能是蕴藏在一切物质中的一种看不见的液体在起作用，并把这种液体称之为“琥珀性物质”。后来根据希腊文“琥珀”一词的词根，拟定了一个新名词——“电”。但吉尔伯特的工作仅停留在定性阶段。

美国学者富兰克林把自然界的两种电叫“正电”和“负电”，他认为，电是一种流质；摩擦琥珀时，电从琥珀流出使它带负电；摩擦玻璃时，电流入玻璃，使它带正电；两者接触时，电从正流向负，直到中性平衡为止。富兰克林还揭露了雷电的秘密。他冒着生命危险，把“天电”吸引到莱顿瓶中，令人信服地证明了“天电”与“地电”完全相同。接着他发明了避雷针，这是人类用已有的电学知识征服自然界所迈出的第一步。用电的科学取代了对上帝的一部分迷信，也推动了人们对电的研究和探索。

到了 20 世纪，物理学解开了物质分子、原子的结构之谜，人们对电现象的本质又有了更深入的了解。本章将对和静电场有关的规律进行研究。

1.1 探究静电场基本规律

1.1.1 电荷 库仑定律

大家知道,用丝绸摩擦过的玻璃棒或用毛皮摩擦过的橡胶棒等能吸引轻小物体,这表明它们在摩擦后进入一种特殊的状态,我们把处于这种状态的物体叫带电体,并说它们带有电荷。大量实验表明,自然界中的电荷只有两种,一种叫正电荷,一种叫负电荷,同种电荷间相互排斥,异种电荷间相互吸引。

真空中两个静止的点电荷之间的相互作用力,跟它们的电荷量的乘积成正比,跟它们的距离的平方成反比,作用力的方向在它们的连线上,这就是库仑定律,即:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1-1)$$

其中, $k \approx 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$, 称为静电力常量。

为了研究非真空中两电荷之间的作用力,常常将上式改写成:

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

其中, $\epsilon_0 \approx 8.9 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{m}^2\text{N}$ 是真空的介电常数。如果两个点电荷处于其他介质中,只需将真空的介电常数 ϵ_0 改为该介质的介电常数 ϵ 即可。

库仑定律对两个点电荷间的静电力的大小和方向都做了明确的描述,但式(1-1)和式(1-2)只反映了静电力的大小,并未涉及静电力的方向。要想反映出方向就需要把它改写成矢量形式:

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}_{12} \quad (1-3)$$

其中, \mathbf{F}_{12} 表示电荷 1 对电荷 2 的作用力, $\hat{\mathbf{r}}_{12}$ 表示由电荷 1 指向电荷 2 的单位矢量。这样,计算时只要把电荷量(包含正负号)带入式(1-3),不但可以求出电荷间作用力的大小,也可以求出作用力的方向。可见,矢量表达式具有更丰富的内涵。

库仑定律讨论的是两个点电荷间的作用力,当空间有两个以上点电荷时,作用于每一个电荷上的总的静电力等于其他点电荷单独存在时作用于该电荷的静电力的矢量和。当空间出现带电体时,可利用数学的微分思想,将带电体看成是由无数个点电荷叠加而成的,再用积分的方法求出其所受的库仑力。

1.1.2 电场 电场强度

对于电荷间作用力的性质,历史上有过几种不同的观点。一种观点认为静电力是“超距作用”,它的传递不需要媒介,也不需要时间;另一观点认为静电力是物质间的相互作用,既然电荷 q_1 处在 q_2 周围任意一点都要受力,说明 q_2 周围空间存在一种特殊物质,它虽然不像实物那样由电子、质子和中子构成,但确是一种物质。这种特殊的、由电荷激发的物质叫电场。

两个电荷之间的作用力,实际上是一个电荷的电场作用在另一个电荷上的电场力。相

对于观察者, 静止的电荷激发的电场叫静电场, 这也是本章内容研究的对象。

为了研究电场, 首先要描述电场, 为此引入一个描述电场的物理量——电场强度(简称场强):

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q} \quad (1-4)$$

由该式可知, 场强是描述电场中某一点性质的矢量, 其大小等于单位试探电荷在该点所受电场力的大小, 其方向与正的检验电荷在该点所受电场力方向相同。在电场中任意指定一点, 就有一个确定的场强 \mathbf{E} , 对同一电场中的不同点, \mathbf{E} 一般可以不同, 这种与电场点一一对应的物理量叫做点函数, 即点的坐标的函数。点函数又可按物理量是标量还是矢量分为标量点函数和矢量点函数。场强是矢量点函数, 可以记做 $\mathbf{E} = \mathbf{E}(x, y, z)$ 。“求某一区域的静电场”意思就是“求某一区域场强的矢量点函数 $\mathbf{E} = \mathbf{E}(x, y, z)$ 的表达式”。

[例 1-1] 求真空中点电荷 Q 在其周围产生的电场。

解: 在 Q 周围空间某点引入检验电荷 q , 由库仑定律式(1-3)可知 q 受到的电场力为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r^2} \cdot \hat{\mathbf{r}}$$

再由电场强度的定义式(1-4), 可得点电荷 Q 在其周围产生的电场强度的大小为

$$E = \frac{F}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

这就是点电荷的电场在空间的分布函数。这个函数是在球坐标中的表达形式, 其自变量为 r 。如果换在直角坐标系中(将自变量换为 x, y, z), 则上式可以写成:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{x^2 + y^2 + z^2}$$

以后的学习过程中, 我们会根据需要进行选择不同的坐标系。常见的坐标系有直角坐标系、柱坐标系、球坐标系。

若要求多个点电荷在空间激发的总场强, 可求出每个点电荷单独存在时所激发的电场场强在该点的矢量和, 这叫做电场叠加原理。

对于电荷连续分布的带电体, 我们引入电荷密度的概念。电荷体密度 ρ 是一个标量点函数, 如果某个区域中各点的 ρ 相等, 则电荷在该区域内是均匀分布的。为了计算场强, 可把带电区域分为许多小体积元 $d\tau$, 每个 $d\tau$ 可以看做电量为 $\rho d\tau$ 的点电荷, 它在空间某点 P 激发的场强为

$$d\mathbf{E} = \frac{\rho d\tau}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \hat{\mathbf{r}}$$

根据叠加原理, 整个带电区域在 P 点激发的总场强等于所有 $d\mathbf{E}$ 的矢量和, 即:

$$\mathbf{E} = \iiint \frac{\rho d\tau}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \hat{\mathbf{r}}$$

积分区域遍及整个带电体。

当电荷分布在一薄层上时, 可以用面密度 σ 来描述电荷的分布情况。我们把一个带电薄层抽象为一个“带电面”, 计算带电面激发的场强时, 可以把每一个面元 $d\mathbf{S}$ 看做电量为 $\sigma d\mathbf{S}$ 的点电荷, 场强的计算归结为如下的积分:

$$\mathbf{E} = \iint \frac{\sigma d\mathbf{S}}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \hat{\mathbf{r}}$$

积分区域遍及整个带电面。

当电荷分布在一条细棒上时，可以用线密度 η 来描述电荷的分布情况。我们把一个带电细棒抽象为一个“带电线”，计算带电线激发的场强时，可以把每一个线元 dl 看做电量为 ηdl 的点电荷，场强的计算归结为如下的积分：

$$\mathbf{E} = \int \frac{\eta dl}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

积分区域遍及整个带电线。

用函数表达式来描述电场是最精确的方法，但这种描写不够直观，有时求解函数表达式还比较困难。为了形象地描述电场，人们用曲线来大致描述电场，曲线上每点的切线方向与该点的场强方向相同，曲线的疏密程度表示场强的大小，我们把这种曲线叫做电场线。

电场线是为了直观方便而引入的一种曲线，其实并不存在。电场线从正电荷（或无穷远）出发，到负电荷（或无穷远）结束，中间不间断，也不相交。综上所述，电场线的性质，我们可以用“三不”来概括，即：不存在，不闭合，不相交。

1.1.3 电通量 高斯定理

通量的概念最初是在流体力学中引入的，在流体力学中，流体的速度 \mathbf{v} 是一个矢量点函数，即液体每一点都有一个确定的速度，整个流体是一个速度场。在流体里取一个面元 dS 。单位时间内流过 dS 的流体的体积叫 dS 的通量 ϕ 。

由于 dS 很小，可认为其上各点的 \mathbf{v} 相同， \mathbf{v} 可分解为垂直于 dS 的速度分量 v_n 和平行于 dS 的速度分量 v_t ，其中 v_t 对 dS 的通量不做贡献。所以 dS 的通量为

$$d\phi = v_n dS = v \cos\theta dS$$

其中， θ 是 \mathbf{v} 的方向和 dS 法线方向的夹角。按照矢量点乘的定义，上式可以写为

$$d\phi = \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} \quad (1-5)$$

此积分在数值上等于以 dS 为底面，以 \mathbf{v} 为母线的柱体的体积，如图 1-1 所示。

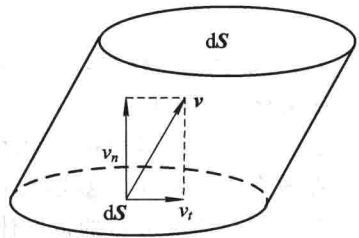


图 1-1

如果把前面的速度场 \mathbf{v} 改为电场 $\mathbf{E}(x, y, z)$ ，则电场中面元 dS 的电通量为

$$d\phi_E = \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}$$

电通量是标量，但有正负之分。一般情况下，一个面分为正面、反面，如果规定从正面穿过的电通量为正值，那么从反面穿过的电通量就是负值，反之亦然。计算总的电通量时，将通过该面的所有电通量的代数值相加即可。

现在讨论一个点电荷的情况。设电场由点电荷 q 激发，以 q 为圆心做半径为 r 的球，在球面上任取一面元 dS ，因 dS 和电场方向处处垂直，所以其电通量为

$$d\phi_E = \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{qr}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot dS = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} dS$$

则通过整个球面的电通量为

$$\phi_E = \oint_{\text{球面}} \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} dS = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \oint_{\text{球面}} dS = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (1-6)$$

这说明通过球面的电通量与球面内电荷的电量成正比，而与球面的半径无关。

虽然这是一个特殊的例子，但很容易进一步扩展到任意闭合曲面：真空中，静电场对任意一个闭合曲面的电通量等于该曲面内电荷的代数和除以 ϵ_0 ，即：

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (1-7)$$

这就是高斯定理。我们把这种闭合的曲面叫高斯面。

需要说明的是，根据高斯定理，闭合面外的电荷对闭合面的电通量没有贡献，但这并不意味着这些电荷对闭合面上各点的电场没有贡献。只是它们在闭合面上的电场所产生的电通量之和为零而已。

1.1.4 静电场环路定理

电荷在电场中运动时电场力会对其做功，研究电场力做功的规律，对于了解静电场的性质具有重要的意义。

我们假设电荷 q 在电荷 Q 的电场中从 P_1 点沿某一路径运动到 P_2 点(如图 1-2 所示)，任取一元位移 $d\mathbf{l}$ ，设 q 在运动 $d\mathbf{l}$ 前后与电荷 Q 的距离分别为 r 及 r' ($r' - r = dr$)，则电场力在这一元位移上所做的微功为

$$d\omega = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = F d\mathbf{l} \cos\alpha$$

其中， α 是 $d\mathbf{l}$ 与 \mathbf{F} 的夹角，由图可知， $d\mathbf{l} \cos\alpha = dr$ 。又有：

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

所以

$$d\omega = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \frac{dr}{r^2}$$

q 从 P_1 到 P_2 的过程中，电场力所做的总功为

$$d\omega = \int_{r_1}^{r_2} \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \frac{dr}{r^2} = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

此式说明，当电荷 q 在点电荷 Q 的场中运动时，电场力所做的功只取决于运动电荷的始末位置而与路径无关。下面证明，这个结论适合于任何静电场。设点电荷 q 从静电场中的一点沿某一曲线 L 运动至另一点，则电场力所做的功为

$$W = \int_L \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = \int_L q\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

把激发电场的电荷分为许多个点电荷，根据电场叠加原理可知：

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \cdots + \mathbf{E}_n$$

则

$$W = \int_L q\mathbf{E}_1 \cdot d\mathbf{l} + \int_L q\mathbf{E}_2 \cdot d\mathbf{l} + \cdots + \int_L q\mathbf{E}_n \cdot d\mathbf{l}$$

因为 $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \cdots, \mathbf{E}_n$ 都是点电荷的电场，前面已证明点电荷电场中电场力的功与路径无关，可见，当点电荷 q 在任意静电场中运动时，电场力所做的功只取决于运动的始末位

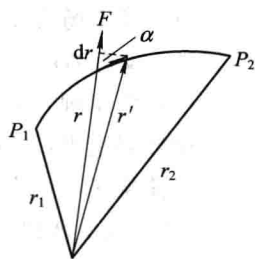


图 1-2

置而与路径无关。这是静电场的一个重要性质，称为有位性(或称有势性)。

静电场的有位性还可以用另一种形式来描述。如果点电荷 q 在静电场中沿某一闭合曲线 L 移动一周，则根据上面的讨论，电场力所做的功应为

$$W = \int_L \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = \int_L q\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

因积分路径是闭合的，所以上式常写成：

$$W = \oint_L \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = \oint_L q\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

现在 L 上任取两点 A 和 B 把 L 分成两部分 L_1 和 L_2 (如图 1-3 所示)，则

$$W = \oint_L q\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_A^B q\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} + \int_B^A q\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_A^B q\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} - \int_A^B q\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

若取点电荷 q 为单位电荷(即令 $q=1$)，则上式可写成：

$$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad (L \text{ 为闭合曲线}) \quad (1-8)$$

可见，静电场沿任一闭合曲线的环路积分为零，这是静电场中与高斯定理并列的一个重要定理，没有通用的名称，我们可称之为静电场环路定理。

利用环路定理，不难证明静电场的电场线不能闭合这一性质。

利用环路定理，可以引入电势(电位)的概念。在电场中任取一点 P_0 (叫做参考点)，设单位正电荷从场中一点 P 移到 P_0 ，无论路径如何，场力所做的功都是同一个值，它只与 P 及 P_0 两点有关，所以这个功自然可以反映 P 点的性质。于是规定：单位正电荷从 P 点移动到参考点 P_0 时电场力所做的功，叫做 P 点的电势(电位)，记作 U 。设点电荷 q 从 P 点到 P_0 点时电场力所做的功为 W ，则 P 点的电势为

$$U = \frac{W}{q} = \frac{1}{q} \int_P^{P_0} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = \int_P^{P_0} \frac{\mathbf{F}}{q} \cdot d\mathbf{l} = \int_P^{P_0} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (1-9)$$

上式也说明了电势与场强之间的关系。

由场强的叠加原理，不难理解电势的叠加原理。 n 个点电荷在某点产生的电势等于每个点电荷单独存在时在该点产生电势的代数和。

电场中电势相等的点组成的曲面叫做等势面，等势面处处与电场线垂直。一般说来，过电场中任一点都可以做等势面，为了使等势面更直接地反映电场的性质，现对等势面的画法作一附加的规定：场中任两相邻的等势面的电势差为常数。容易证明，按照这个附加规定画等势面，场强较大处等势面较密，反之较疏，因此，等势面的疏密程度也可以反映场强的大小。

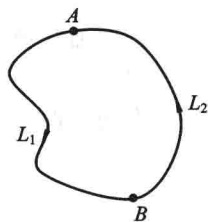


图 1-3

1.2 用模拟法描绘静电场的分布

1.2.1 模拟法描绘电场

真正的静电场不能直接用电表测量，因为静电场中没有运动的电荷，不能使电表的指

针偏转。如果将带电体放在导电的介质里,维持带电体间的电势差不变,介质里便会有恒定不变的电流,这样就可以用电压表测量介质中各点的电势值,找到等势面,再根据等势面和电场的关系求出电场强度。导电介质里由恒定电流建立的场称为恒定电流场。

静电场和稳恒电流场虽是两个截然不同的电场,但可以用稳恒电流场中的电位分布来模拟静电场的电位分布。对于均匀带电的长直同轴柱面的静电场可以用圆片形金属电极 A 和圆环形金属电极 B 所形成的电流场来描绘。如图 1-4 所示,同轴形电容器中,由于轴对称性,场强和电位都与轴向坐标 z 无关,所以我们只研究与轴垂直的平面内的电场(即二维场)的规律。

根据上面的实验装置和欧姆定律可知,从中心极板经过导电纸流到圆环上的电流强度为

$$I = U/R \quad (1-10)$$

式中, U 是电源电压, R 是导电纸的电阻,它取决于导电纸的厚度、大小和电导率。鉴于导电纸的均匀性和电容器的对称性,总电流可以写成:

$$I = \oint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = j2\pi rh \quad (1-11)$$

式中 h 为导电纸的厚度, r 为离开中心轴的距离, j 为 r 处的电流强度,它与该处的电场强度成正比,即:

$$\mathbf{j} = \sigma\mathbf{E} \quad (1-12)$$

将 $\mathbf{j} = \sigma\mathbf{E}$ 代入 $I = \oint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = j2\pi rh$, 再代入 $I = U/R$ 可以得到:

$$E = \frac{U}{2\pi h\sigma R} \cdot \frac{1}{r} = c \frac{1}{r} \quad (1-13)$$

式中, c 是一个常量,所以上式是恒定电流场的场强分布表示式,与圆柱形电容器中静电场分布的关系式完全相同,所以用电流场模拟静电场是完全可行的。

项目 1-1 同轴圆柱形电容器中静电场的模拟。

任务要求: 描绘同轴圆柱形电容器中的电场分布。

所需设备: 直流稳压电源、电压表、微安计、滑线变阻器、导电纸、静电描绘仪等。

测量过程:

(1) 按图 1-5 所示装置连接好测量系统。将导电纸上内外两电极分别与直流稳压电源的正负极相连接,电压表正负极分别与同步探针及电源负极相连接。调节电源电压到 10.0 V。

(2) 移动同步探针测绘同轴电缆的等位线簇。相邻两个等位线间的电位差为 1 V,共测 8 条等位线,每条等位线测定出 8 个均匀分布的点。

(3) 以每条等位线上各点到原点的平均距离为半径画出等位线的同心圆簇。然后根据电力线与等位线正交原理,再画出电力线,标明等位线的电压大小,并指出电场强度方向,从而得到一张完整的电场分布图。

(4) 在坐标纸上做出相对电位 U_r/U_0 和 $\ln r$ 的关系曲线,并与理论结果比较。

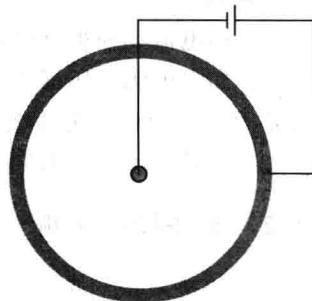


图 1-4

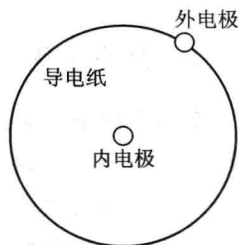


图 1-5

注意事项：

测量时，探针每次应该从外向里或者从里向外沿一个方向移动，测量一个点时不要来回移动测量，因为探针会小幅转动，向前或向后测量同一点会导致打孔出现偏差。

思考题：

- (1) 用电流场模拟静电场的条件是什么？
- (2) 如果电源电压增加一倍，等位线和电力线的形状是否发生变化？电场强度和电位分布是否发生变化？为什么？
- (3) 测量电场产生畸变，试分析原因。

1.2.2 等势线的探测

寻找等势线最简单的办法是用电压计测量，即测出对同一电极电压相等的点。但在测量过程中电压计还要流过微小电流，这给探测引入误差，使用如图 1-6 所示的补偿电路，可以排除这种误差。

图 1-6 中 G 为检流计，V 为电压计，C 为探针，A 为接收电极，E 为补偿电源，R 为分压器。当寻找电势为 V 的等势线时，悬空 C 端，调分压器 R 使电压计示值为 V，先用万用表找到 V 电势的大概位置，再用探针 C 去该位置附近找，当 G 的指针不动时，该点电势为 V。

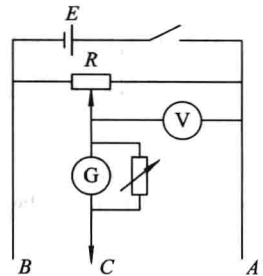


图 1-6

这种补偿电路使用电压计显示被测点的电压，而电压计中的电流又不需要导电纸供给，因而减少了误差。

项目 1-2 两根无限长平直导线间静电场的模拟。

任务要求：描绘两根无限长平直导线间的电场分布。

所需设备：直流稳压电源、电压表、微安计、滑线变阻器、导电纸、电极等。

测量过程：

测量过程类似于项目 1-1。

1.3 导体和介质对电场分布的影响

1.3.1 静电平衡

金属导体中有大量的自由电子，它们时刻做无规则的运动，当自由电子受到电场力（或其他力）时，还要在热运动的基础上附加一种有规则的宏观运动，形成电流。当电子不做宏观有规则的运动时，我们说导体处于静电平衡状态。

导体处于静电平衡状态时，其内部各点的场强为零。这可以很容易地用反证法得到证明。

处于静电平衡状态的导体是等势体，其表面是等势面，所以在导体外，紧靠导体表面的场强方向与导体表面垂直。这可以用电势的定义和性质得证。

处于静电平衡状态的导体内部没有电荷，电荷只能分布在导体表面。这可以用高斯定