

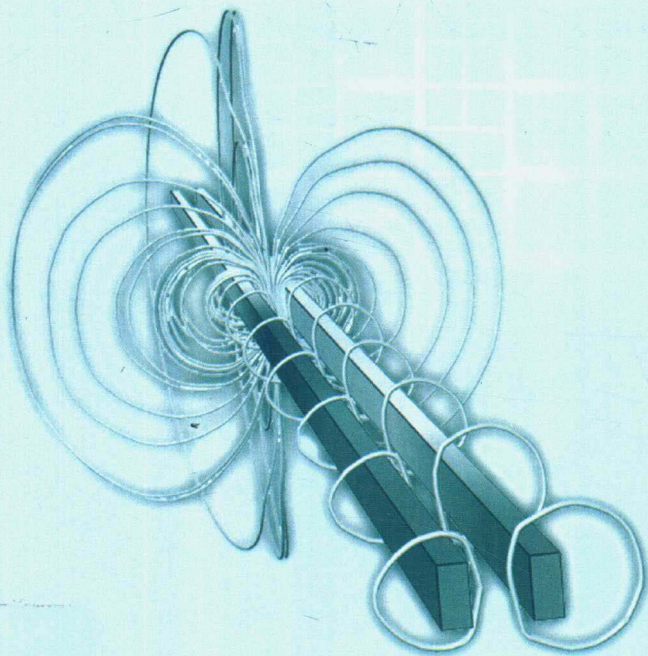


普通高等教育电气类专业“十三五”规划教材

电磁场实验、演示及仿真

(第2版)

赵彦珍 应柏青 陈 锋 王仲奕 编著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

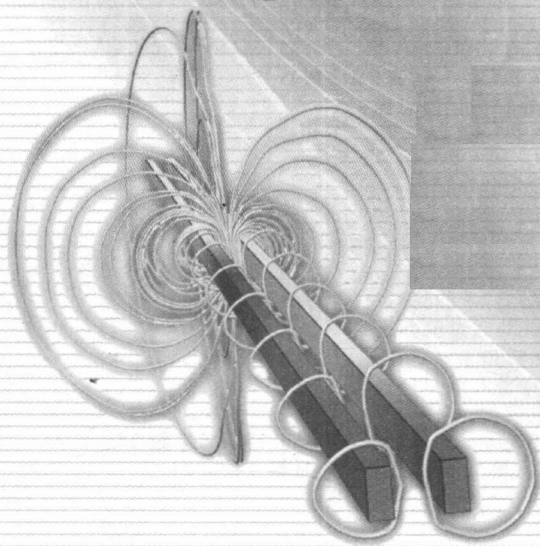


普通高等教育电气类专业“十三五”规划教材

电磁场实验、演示及仿真

(第2版)

赵彦珍 应柏青 陈 锋 王仲奕 编著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书是与“电磁场与波”课程配套的实验与上机指导书。本书内容分为4章,包括电磁场基础实验、演示实验、仿真实验及开放实验。

本书以验证、巩固和加深电磁场与波的理论知识为主,以注重培养学生的实验操作能力、综合分析能力、解决问题能力以及科研创新能力为目标。对第1版中原有的个别实验内容安排进行了一些修改和调整;结合教学实践,增加了较多的开放实验内容;对全书的文字表达、记号采用等进行了仔细推敲。所有这些修订都是为了使本书更加完善,更好地满足教学需要。

本书可作为电气信息类专业本科生的“电磁场与波”课程的实验与上机教学用书,也可作为其它相关专业教师、研究生以及工程技术人员的参考实验教材。

图书在版编目(CIP)数据

电磁场实验、演示及仿真/赵彦珍等编著. —2版. —西安:西安交通大学出版社,2016.12

ISBN 978-7-5605-9201-5

I. ①电… II. ①赵… III. ①电磁场-实验-高等学校-教材
②电磁场-计算机仿真-实验-高等学校-教材 IV. ①O441.4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 288091 号

书 名	电磁场实验、演示及仿真(第2版)
策 划	程光旭 成永红 徐忠锋
编 著	赵彦珍 应柏青 陈 锋 王仲奕
责任编辑	杨 瑶

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路10号 邮政编码 710049)

网 址 <http://www.xjtupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315(总编办)

传 真 (029)82668280
印 刷 陕西奇彩印务有限责任公司

开 本	727mm×960mm 1/16	印张	9.75	字数	168千字
版次印次	2017年1月第2版 2017年1月第1次印刷				
书 号	ISBN 978-7-5605-9201-5				
定 价	23.00元				

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82665355

读者信箱:lg_book@163.com

版权所有 侵权必究

编审委员会

主 任 冯博琴

委 员 （按姓氏笔画排序）

邓建国 何茂刚 张建保 陈雪峰

罗先觉 郑智平 徐忠锋 黄 辰

Preface 序

教育部《关于全面提高高等教育质量的若干意见》(教高〔2012〕4号)第八条“强化实践育人环节”指出,要制定加强高校实践育人工作的办法。《意见》要求高校分类制订实践教学标准;增加实践教学比重,确保各类专业实践教学必要的学分(学时);组织编写一批优秀实验教材;重点建设一批国家级实验教学示范中心、国家大学生校外实践教育基地……。这一被我们习惯称之为“质量30条”的文件,“实践育人”被专门列了一条,意义深远。

目前,我国正处在努力建设人才资源强国的关键时期,高等学校更需具备战略性眼光,从造就强国之才的长远观点出发,重新审视实验教学的定位。事实上,精心设计的实验教学更适合承担起培养多学科综合素质人才的重任,为培养复合型创新人才服务。

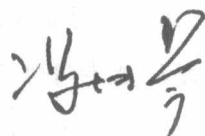
早在1995年,西安交通大学就率先提出创建基础教学实验中心的构想,通过实验中心的建立和完善,将基本知识、基本技能、实验能力训练融为一炉,实现教师资源、设备资源和管理人员一体化管理,突破以课程或专业设置实验室的传统管理模式,向根据学科群组建基础实验和跨学科专业基础实验大平台的模式转变。以此为起点,学校以高素质创新人才培养为核心,相继建成8个国家级、6个省级实验教学示范中心和16个校级实验教学中心,形成了重点学科有布局的国家、省、校三级实验教学中心体系。2012年7月,学校从“985工程”三期重点建设经费中专门划拨经费资助立项系列实验教材,并纳入到“西安交通大学本科‘十二五’规划教材”系列,反映了学校对实验教学的重视。从教材的立项到建设,教师们热情相当高,经过近一年的努力,这批教材已见端倪。

我很高兴地看到这次立项教材有几个优点：一是覆盖面较宽，能确实解决实验教学中的一些问题，系列实验教材涉及全校 12 个学院和一批重要的课程；二是质量有保证，90% 的教材都是在多年使用的讲义的基础上编写而成的，教材的作者大多是具有丰富教学经验的一线教师，新教材贴近教学实际；三是按西安交大《2010 版本科培养方案》编写，紧密结合学校当前教学方案，符合西安交大人才培养规格和学科特色。

最后，我要向这些作者表示感谢，对他们的奉献表示敬意，并期望这些书能受到学生欢迎，同时希望作者不断改版，形成精品，为中国的高等教育做出贡献。

西安交通大学教授

国家级教学名师



2013 年 6 月 1 日

Foreword 第 2 版 前 言

本次修订工作是在响应西安交通大学“建设世界一流大学和一流学科”的目标要求下进行的。修订的内容主要包括以下几个方面:

1. 对第 1 版书中原有的个别实验内容安排进行了一些修改和调整。具体地,对第 3 章 3.2 小节的“分片均匀导电媒质内恒定电场的模拟研究”、“静电屏蔽、磁屏蔽及电磁屏蔽的仿真研究”和“集肤效应及邻近效应的研究”等 3 个仿真实验增添了“仿真提示”的内容;对 3.2 节的仿真实验“超高压输电线路绝缘子串电压分布的仿真研究”的内容进行了重新编写,将实际的工程参数进行简化,设计出易于教学实验的三维模型,并在“仿真提示”中给出了详细的三维模型建立过程。

2. 结合教学实践,由第 1 版的 27 个实验增加到 32 个实验。主要增加的是开放实验内容。具体地,增加了 1 个仿真实验“涡流效应的仿真研究”;增加了“避雷针防护区域的可视化实现”、“家电保护器的设计与制作”、“利用电涡流传感器实现对金属表面的无损检测”以及“分裂导线周围的电场分析及其设计”等 4 个新的开放实验内容。

3. 对全书的文字表达、记号的采用进行了仔细推敲,力求更加规范、准确。

4. 修正了第 1 版中的疏漏之处。

本书的修订吸取了读者提出的宝贵意见和建议,在此编者谨向他们表达诚挚的谢意。

本书的修订工作由赵彦珍、应柏青、陈锋和王仲奕完成,马西奎教授对本书的修订给予了指导性建议,在此,向他致以衷心的感谢。

新版中存在的问题,欢迎广大专家、同仁和读者继续给予批评指正。来信请寄西安交通大学电气工程学院(邮编 710049),或者通过电子邮件 zhaoyzh@mail.xjtu.edu.cn 与我们联系。

编 者

2016 年 12 月

Foreword 第 1 版 前 言

实验教学对于培养学生实验技能、科学精神、创新能力具有无可替代的意义。“电磁场与波”课程是高等学校电气信息类专业本科生必修的一门专业技术基础课。为配合“电磁场与波”课程建设,更好地进行电磁场实验教学,保证和提高实验教学质量,我们积极开展了电磁场实验教学改革,对原有的电磁场实验内容进行了充实和丰富,并结合多年的教学及科研课题,开设了系列综合性开放实验,同时,基于目前主流电磁场数值仿真软件平台,开设了电磁场仿真实验。

在这本专门的电磁场实验教材编写过程中,我们将新开设的系列综合开放实验与仿真实验内容列入其中,将电磁场领域的新进展、新技术纳入我们的实验教学中,将前沿的科研课题有机地融入到学生的课外实践当中来,以开阔学生的视野,激发学生的学习热情,使学生明白“电磁场与波”不再是一门枯燥抽象的课程,而是一项与工程实践及前沿科研紧密相关的关键技术。

本书的宗旨是以验证、巩固和加深理论知识为主,以培养学生的实验操作能力、综合分析能力、解决问题能力以及科研创新能力为目标,内容涵盖电磁场基础实验、演示实验、仿真实验及开放实验等 4 个章节,共 27 个实验。

第 1 章为电磁场的基础实验,结合“电磁场与波”理论教材《工程电磁场导论》,新编实验覆盖静电场、恒定电场、恒定磁场、时变场、均匀平面电磁波以及传输线等方面内容,实验编排顺序也考虑到授课计划进度,与教材内容紧密配合以保证完成相关理论学习之后,及时地通过实验来验证、巩固和加深所学的理论知识。本章包括静电场模拟、部分电容的测定、接地电阻的测定、霍尔效应的研究、螺线管线圈磁场的研究、两线圈互感的测定、无损耗均匀传输线的研究等 7 个实验。

第 2 章为电磁场演示实验,结合电磁场在工程实际中的应用,通过这些演示实验,引导学生观察、思考及分析实验过程、现象和原理。本章包括静电除尘、时变电磁场演示、电磁感应现象的观测、激光与光纤通信等 4 个实验。

第 3 章为电磁场仿真实验,结合当前主流的计算机编程软件、电磁场数值分析

Ansoft 软件和工程仿真软件 PSpice 软件平台,综合训练学生对电磁场问题数值计算的编程能力、使用 Ansoft 软件分析典型工程电磁场问题的技能、使用 PSpice 软件分析典型电阻网络和波传输特性等工程问题的技能,使理论知识和实际工程技术应用相结合,拓宽学生视野,提高专业能力,激发学习热情。本章包括计算机编程实验、Ansoft Maxwell 2D 工程软件仿真实验及 PSpice 工程软件仿真实验 3 节。其中,3.1 节包含了应用有限差分法求解接地金属槽内部的电位分布、应用模拟电荷法计算球-板电极系统间的电位分布、应用直接积分法计算螺线管线圈的磁场以及应用有限元法求解整流子与同轴接地圆管之间的电场等 4 个编程仿真实验。3.2 节包含了采用 Ansoft Maxwell 2D 工程软件平台求解分析典型工程电磁场问题,包含了分片均匀导电媒质内恒定电场的模拟研究,静电屏蔽、磁屏蔽及电磁屏蔽的研究,集肤效应及邻近效应的研究以及特高压输电线路绝缘子串电压分布的仿真研究等 4 个仿真实验。3.3 节包含了采用 PSpice 工程软件仿真实验平台进行静电场的电阻网络模拟、电磁波传播特性的仿真研究以及无损耗均匀传输线的仿真研究等 3 个仿真实验。

第 4 章为电磁场开放实验,结合当前的新知识、新技术以及与前沿的科研活动相关的内容,选取典型、有趣的实际工程问题作为开放性实验,通过综合分析和综合设计能力的训练,增强学生的自信心,激发学生的学习热情,培育学生科研创新能力。本章包括导体对电场分布的调整和控制作用的研究、均匀磁场实现方法的研究、电磁炮模型的设计与制作、电感线圈设计程序的实现以及干式空芯电抗器匝间短路故障在线检测等 5 个开放实验。

本书内容丰富、全面,富有代表性、趣味性及先进性;编排按先易后难、先基本后综合再创新的顺序,具有层次化、模块化的结构,便于选用。

本书由赵彦珍、应柏青、陈锋、王仲奕编写。马西奎教授对本书的编写工作给予了指导性的建议,在此,编者向他致以衷心的感谢。

限于作者的水平和实践经验,书中定有不少疏漏和不足之处,敬请读者赐教。来信请寄西安交通大学电气工程学院(邮编 710049),或者可通过电子邮件 zhaoyzh@mail.xjtu.edu.cn 与我们联系。

编者

2013 年 4 月

Contents 目录

第 1 章 电磁场基础实验	(001)
1.1 静电场模拟	(001)
1.2 部分电容的测定	(008)
1.3 接地电阻的测定	(017)
1.4 霍尔效应的研究	(022)
1.5 螺线管线圈磁场的研究	(030)
1.6 两线圈互感的测定	(035)
1.7 无损耗均匀传输线的研究	(040)
第 2 章 电磁场演示实验	(047)
2.1 静电除尘	(047)
2.2 时变电磁场演示	(050)
2.3 电磁感应现象的观测	(058)
2.4 激光与光纤通信	(062)
第 3 章 电磁场仿真实验	(065)
3.1 计算机编程实验	(065)
3.1.1 应用有限差分法求解接地金属槽内部的电位分布	(065)
3.1.2 应用模拟电荷法计算球—板电极系统间的电位分布	(071)
3.1.3 应用直接积分法计算螺线管线圈的磁场	(074)
3.1.4 应用有限元法求解整流子与同轴接地圆管之间的电场	(078)
3.2 Ansoft Maxwell 2D 工程软件仿真实验	(084)
3.2.1 分片均匀导电媒质内恒定电场的模拟研究	(084)
3.2.2 静电屏蔽、磁屏蔽及电磁屏蔽的仿真研究	(087)
3.2.3 集肤效应及邻近效应的研究	(091)

3.2.4	超高压输电线路绝缘子串电压分布的仿真研究	(094)
3.2.5	涡流效应的仿真研究	(098)
3.3	PSpice 工程软件仿真实验	(101)
3.3.1	静电场的电阻网络模拟	(101)
3.3.2	电磁波传播特性的仿真研究	(105)
3.3.3	无损耗均匀传输线的仿真研究	(107)
第4章	电磁场开放实验	(111)
4.1	导体对电场分布的调整和控制作用的研究	(111)
4.2	均匀磁场实现方法的研究	(112)
4.3	电磁炮模型的设计与制作	(113)
4.4	电感线圈设计程序的实现	(114)
4.5	干式空芯电抗器匝间短路故障在线检测	(117)
4.6	避雷针防护区域的可视化实现	(119)
4.7	家电保护器的设计与制作	(120)
4.8	利用电涡流传感器实现对金属表面的无损检测	(121)
4.9	分裂导线周围的电场分析及其设计	(122)
附录 I	学生实验制度	(124)
附录 II	主要仪器介绍	(125)
II.1	THME-1 型静电场描绘实验仪	(125)
II.2	CT3-A 型特斯拉计	(126)
II.3	YS1127 微波信号发生器	(127)
II.4	YS3892 选频放大器	(128)
II.5	DQ-3 型数字式冲击电流计	(130)
附录 III	Ansoft Maxwell 2D/3D 软件使用介绍	(132)
附录 IV	PSpice9 工程软件使用介绍	(135)
参考文献		(140)

第 1 章 电磁场基础实验

1.1 静电场模拟

一、实验目的

- (1) 掌握静电场模拟的原理,学习应用恒定电流场模拟静电场的实验方法。
- (2) 学习导电媒质中模拟场的测试方法。
- (3) 通过对几种典型电极的模拟,研究电场的分布规律,加强对电场强度和电位的理解。

二、原理与说明

(1) 在电源外均匀导电媒质内部的恒定电流场方程和无电荷分布区域中均匀介质内部的静电场方程如表 1.1-1 所示。由此可见,两种场的方程有相似的形式;恒定电流场的电流密度 $\mathbf{J}$ 对应于静电场的电位移矢量 $\mathbf{D}$,电流线对应于电场线;两种场的位函数均满足拉普拉斯方程。因此,当恒定电流场与静电场的边界条件相同时,两者等位线的分布一致,电流密度 $\mathbf{J}$ 的分布与电位移矢量 $\mathbf{D}$ 的分布也完全相同。根据这种相似性,可以根据静电场的计算结果求解恒定电流场,或反之。这种方法称为静电比拟法。

表 1.1-1 恒定电流场与静电场的方程

恒定电场(电源外)	静电场($\rho = 0$ 处)
$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$	$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$
$\oint_s \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = 0$	$\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = 0$
$\nabla \times \mathbf{E} = 0$	$\nabla \times \mathbf{E} = 0$
$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$	$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$

续表 1.1-1

恒定电场(电源外)	静电场($\rho = 0$ 处)
$E = -\nabla\varphi$	$E = -\nabla\varphi$
$\nabla^2\varphi = 0$	$\nabla^2\varphi = 0$
$\varphi = \int E \cdot dl$	$\varphi = \int E \cdot dl$

在实际工程中,我们常常需要研究各种电极或带电体的静电场。在许多情况下很难求得静电场的解析解,此时,采用实验的方法来确定静电场分布是一种行之有效的方法。而直接对静电场进行测量是相当困难的,这是因为,静电场中没有电流,无法用普通的电压表进行测量,只能采用静电仪表。另外,仪表本身总是导体或电介质,一旦把仪器放入静电场中,原静电场将被改变,导致测量失真。相反,由于恒定电场中的电流、电位分布易于测量,因此,可用边界条件与静电场相同的恒定电流场来研究待求的静电场特性。

本实验将采用静电比拟法,通过恒定电流场模型来研究 4 种典型电极周围的静电场分布。

(2) 采用恒定电流场模拟静电场时,必须满足以下条件:

- ① 选用均匀的各向同性的导电材料作为恒定电流场的导电媒质;
- ② 制作电极的金属材料的电导率必须远大于导电媒质的电导率,以使电极与导电媒质的分界面是等位面;
- ③ 电极电压必须稳定,以使电极及场域的电位分布稳定。

(3) 在测量恒定电流场的场量时,需注意,若电极形状和导电媒质具有对称性,则场分布也具有对称性,因此,可测量局部区域的场量,再根据对称性得到整个场域的场分布。另外,在实验中,只需测出等位线的分布图,再根据电力线与等位线处处正交的性质即可绘出电力线图,还可根据 $E = -\nabla\varphi$ 求出场中任意点的电场强度。

(4) 几种典型模型的电场计算公式如下。

① 平板电容器:设电容器极板的尺度远大于极板间距离,如图 1.1-1 所示,忽略端部边缘效应,极板可视为无限大平板,那么,电容器两极板间的电场强度为

$$E = \frac{U}{d} e_x \quad (1)$$

电位 φ 仅为 x 坐标的函数,且

$$\varphi = U - \frac{U}{d} x \quad (2)$$

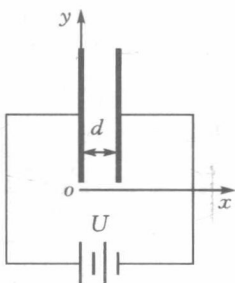


图 1.1-1

式中, d 为电容器两极板间距离, U 为电容器两极板间电压。

②长直同轴电缆: 设同轴电缆长度远大于其横截面半径, 忽略端部边缘效应, 对垂直于电缆轴的任意圆截面, 如图 1.1-2 所示, 采用圆柱坐标系, 其内外导体间的电场强度仅有随径向坐标变量 ρ 变化的径向分量, 且

$$\mathbf{E} = \frac{U}{\rho \ln \frac{b}{a}} \mathbf{e}_\rho \quad (3)$$

电位为

$$\varphi = \frac{U \ln \frac{b}{\rho}}{\ln \frac{b}{a}} \quad (4)$$

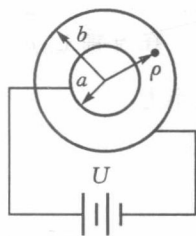


图 1.1-2

式中, a 、 b 分别为同轴电缆内外导体半径, U 为同轴电缆内外导体间电压。

③两平行长直带电线: 两带有等量异号电荷的平行长直导线, 导线半径均为 a , 如图 1.1-3(a) 所示, 设两导线长度均为 l , 且 l 远大于两导线间距 $2h$, 那么, 可忽略端部边缘效应。根据电轴法, 两平行长直带电线外部的电场可视为相距为 $2b$ 的两线电荷的电场, 如图 1.1-3(b) 所示。

场域中任一点 P 处的电位为

$$\varphi = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} + C \quad (5)$$

若已知两导线间电压为 U , 则

$$\varphi = \frac{U}{2 \ln \frac{b+(h-a)}{b-(h-a)}} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} + \frac{U}{2} \quad (6)$$

其中

$$a^2 + b^2 = h^2$$

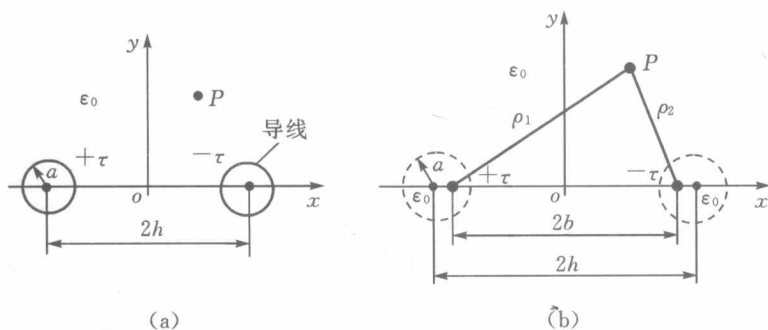


图 1.1-3

在 y 轴上, $\rho_1 = \rho_2$, 那么, $\varphi = \frac{U}{2}$, 即 y 轴为一等位线, 电场强度仅有 x 分量, 且大小为

$$E = \frac{\tau}{\pi\epsilon_0\rho}\cos\theta = \frac{\tau}{\pi\epsilon_0 b}\cos^2\theta = \frac{U}{b\ln\frac{b+(h-a)}{b-(h-a)}}\cos^2\theta \quad (7)$$

方向为 $+x$ 方向, 如图 1.1-4 所示。

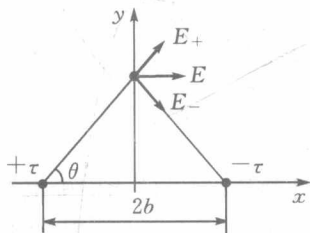


图 1.1-4

在 x 轴上, 当 $-b < x < b$ 时, $\rho_1 = b+x$, $\rho_2 = b-x$, 则电位大小为

$$\varphi = \frac{U}{2\ln\frac{b+(h-a)}{b-(h-a)}}\ln\frac{b-x}{b+x} + \frac{U}{2} \quad (8)$$

电场强度大小为

$$E = \frac{U}{2\ln\frac{b+(h-a)}{b-(h-a)}}\left(\frac{1}{b+x} + \frac{1}{b-x}\right) \quad (9)$$

方向沿 $+x$ 方向。

④位于无限大接地平面上方的长直带电导线:位于无限大接地平面上方的长直带电导线如图 1.1-5 所示。将长直带电导线视为无限长,那么,在垂直于导线的任一横截面上,电场分布相同,且求解场域为上半平面。可利用镜像法来求解其场分布,用一镜像线电荷 $-\tau$ 来代替大地的影响,将原问题转换为求解无限大空间中两线电荷的电场问题,如图 1.1-6 所示。在上半空间,其解即为原问题的解。其求解过程与典型模型③所讨论相同。

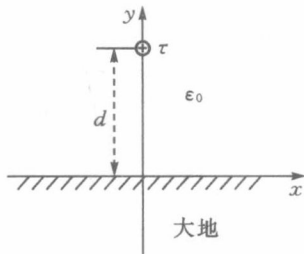


图 1.1-5

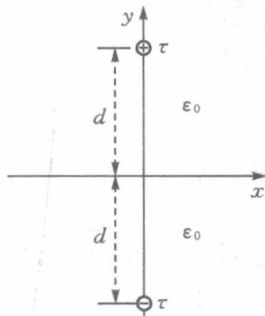


图 1.1-6

(5)本实验采用 THME-1 型静电场描绘实验仪来模拟研究静电场的分布特性。描绘仪由 0~2 V 可调电源、高阻抗输入数字电压表、电极板、探针等组成。描绘仪电源可提供 0~2 V 连续可调的稳定电压并由数字表头显示其电压值。电极板由不同形状的铜电极固定在导电玻璃板上制成。导电玻璃由普通玻璃上镀覆一层均匀厚度的导电薄膜制成。电极板的一侧装有 2 个电压输入插孔,可分别与电源的两极相连。本实验仪附带了 4 种类型电极,如图 1.1-7 所示,可分别用于模拟研究上述平板电容器、同轴电缆、两平行长直带电导线及位于无限大接地平面上方的长直带电导线的电场分布。

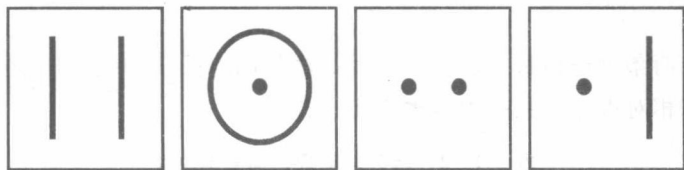


图 1.1-7 4 种类型电极

三、仪器设备

THME-1 型静电场描绘实验仪	1 台
两条型电极板	1 块
两小圆电极板	1 块
小圆、环型电极板	1 块
小圆、条型电极板	1 块
微型计算机	1 台

四、实验任务

(1) 选取两小圆电极板或小圆、条型电极板, 将稳压源的电压输出连接到电极板的输入端, 探针连接到显示表头输入端的正极, 且将显示表头输入端的负极与稳压源输出的负极连通, 电源电压调节到 2 V, 如图 1.1-8 所示。用探针在电极上寻找等位点, 并在坐标纸上相应的位置处进行标记, 测绘该模型的等位线分布图 (测量 3 条等位线即可)。注意, 在曲率变化较大处应多测一些数据。根据等位线与电力线处处正交的原理, 画出相应的电力线分布图。

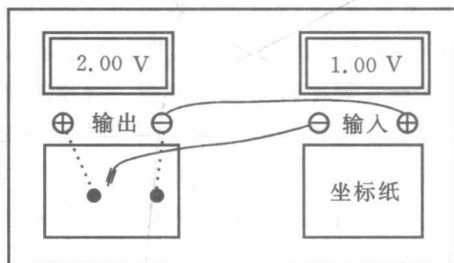


图 1.1-8 实验连线图

(2) 选取两条型电极板, 接入 2 V 电源, 测量两电极间的电位值, 并与解析解的值相比较, 求相对误差。数据填入表 1.1-2 中。

表 1.1-2 两条型电极板间的电位值

位置	解析解/V	测量值/V	相对误差
1			
2			
3			