

下

21世纪

大学物理 实验

朱伯申 主编

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

21 世纪大学物理实验 (下)

朱伯申 主 编

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书为《21 世纪大学物理实验》一书的下册。共安排了 17 个实验,其中大多数实验是在当代高科技各领域中具有广泛影响的一些新领域和新技术,如高温超导、核磁共振、全息照相、霍尔效应和传感器系列实验等。这些实验将极大地提高学者的视野,扩大知识面,使学者的知识更贴近国民经济的主战场。本书中还同时介绍了一些历史上著名的、科学史上关键性的实验,如迈克耳逊干涉仪、氢原子光谱实验、密立根油滴仪和夫兰克-赫兹实验等。这些实验不但具有重大的科学意义,而且设计精巧,极富创造性。

本书为理工科大学的本科生必修课教材。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

21 世纪大学物理实验. 下/朱伯申主编. —北京:北京理工大学出版社,2004.12
ISBN 7-5640-0376-6

I .2… II .朱… III .物理学-实验-高等学校-教材
IV .04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 109677 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(发行部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

电子邮箱 / chiefedit@bitpress.com.cn

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京国马印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 9

字 数 / 182 千字

版 次 / 2004 年 12 月第 1 版 2004 年 12 月第 1 次印刷

印 数 / 1~4000 册

定 价 / 15.00 元

责任校对 / 张 宏

责任印制 / 刘京凤

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前 言

在本书上册介绍的基础实验和必修实验中，介绍了力、电、光等各学科的基本实验知识，它们的基本操作方法和技能；介绍了各学科的基本实验仪器和这些仪器的操作要领；也介绍了物理学一些实验研究方法，如分析综合、模拟、放大、补偿、干涉等；同时还介绍了实验数据处理理论，并给了大量的数据处理的训练。相信这两个层次的学习和实验，能使年轻学者为今后的多学科的实验知识和技能奠定良好的基础，也会对学者一生全面的科学素质养成和发展有大的裨益。在“第三层次的物理实验”（下册）中共安排了17个实验，其中大多数实验是在当代高科技各领域中具有广泛影响的一些新领域和新技术，如高温超导、核磁共振、全息照相、霍尔效应和传感器系列实验等，这些实验将极大地提高学者的视野，扩大知识面，使学者的知识更贴近国民经济的主战场。本阶段实验中，同时还介绍了一些历史上著名的、科学史上关键性的实验，如迈克耳逊干涉仪、氢原子光谱实验、密立根油滴仪和夫兰克-赫兹实验等。这些实验不但具有重大的科学意义（因而获得了诺贝尔奖），而且设计精巧，极富创造性。从这些前辈大师们的作品中，年轻的学者将能为以后的创造性工作获得心灵深处的启发、借鉴和鼓励。从这个意义上说，“第三层次的物理实验”更需要用“心”去做。在实验课内容的设置上，我们也把学时安排得相对宽松些，以留出更多时间让同学们能好好想一想，去总结一下，以期引燃您的灵感，碰撞出思想的火花来！“电位差计”作为测量仪器今天虽已逐渐“淡出江湖”，但它“平衡、补偿”的思想，用低精度仪器获得了高精度的测量结果的巧妙构思，今天仍闪闪发光，是很多人发明、创造的灵感源泉。这里我们把它设为一个设计性实验。

第三层次的实验无论从学术的高度上，从涉及学科广泛性，从应用到的高科技水平和它的综合性以及从和当代国民经济实际的联系紧密性来说，都是上两个层次实验无法比拟的，也是年轻学者（不论是哪个专业的）在今后一生的学习中很难再遇到的。如果说上两个层次的实验您做的是辛勤的耕耘，那么本层次的实验您将得到全面的丰收和提高。一分汗水一分收获，用心去体会吧，用青春的热情和全身心的投入，您将会一辈子来享受收获的喜悦。

上述第三层次的所有实验都是对所有学生开放的，但同学们由于学时有限，只能选修其中几个实验。年轻的学者要放出眼光来，挑选你认为最重要、最能用得上、最有趣的几个实验。能亲身参加、亲自动手来做实验当然最好，未能亲自动手做的其他实验，您也不妨来看看，来问问，来摸摸，这也会有一种收获。见多识广是学者的重要科学素质，也是您享受不尽的财富。一种事情，完全不知道怎么回事和知道一点，其结果常常是天壤之别！这在科学研究上，管理决策时，直至日常生活中都是一样的。

编 者
2004年4月

编者说明

与上册一样，本教材下册的出版是北京理工大学物理实验中心几代人工作的成果，是中心全体同仁共同努力的结晶。本课程的设计、教学体系的规划、实验项目的选择、实验内容的组织安排和实验要求的制订等等都是集体工作的成果。

参加本书执笔和讨论修改的主要情况如下：实验十、实验十二和实验二十由范朝霞编写；实验十一、实验十三由万葆红编写；实验二十一由万葆红和陈新编写；实验十四和实验二十三由李维晖编写；实验十五由李林编写；实验十六和实验二十二由陈新编写；实验十八和实验十九由鲁长宏编写，实验二十五由鲁长宏和北京大学物理系陆果编写；实验二十四由张宏编写；实验十七由朱伯申和李维晖编写；实验二十六由朱伯申和范朝霞编写。朱伯申编写、修订了一些实验的前言部分。

本书承李本桐先生十分仔细地审阅，提出了很多改进意见和建议，在此谨表衷心感谢。

目 录

实验十 模拟法研究静电场·····	(1)
实验十一 利用光的全内反射测定介质的折射率·····	(8)
实验十二 电位差计的原理和使用·····	(16)
实验十三 氢原子光谱的研究·····	(23)
实验十四 全息照相实验·····	(29)
实验十五 密立根油滴实验·····	(36)
实验十六 声速测量·····	(44)
实验十七 迈克耳逊干涉仪·····	(50)
实验十八 核磁共振实验·····	(59)
实验十九 夫兰克-赫兹实验·····	(68)
实验二十 铁磁材料的磁滞回线和基本磁化曲线·····	(74)
实验二十一 光的衍射·····	(85)
实验二十二 霍尔效应及其参数测定·····	(92)
实验二十三 光的偏振·····	(99)
实验二十四 光电效应和普朗克常数测定·····	(107)
实验二十五 高温超导·····	(113)
实验二十六 传感器系列实验·····	(122)

实验十 模拟法研究静电场

带电体在它周围的空间产生电场，电场可以用电场强度或电位的空间分布来描述。带电体的形状、位置、数目及各自的电荷分布情况不同，它们周围空间的电场分布就不同。静电场的研究对粒子加速器设计，对新型超平、纯平大屏幕显像管的研制等科研和工业生产具有重要、关键的作用。

描述静电场的主要参量是电势的空间分布。我们知道，库仑定律已经总结出了静止电荷在空间形成的静电场的电势分布的基本规律

$$U = k \iiint_V \frac{dq}{r}$$

理论上，根据库仑定律，我们可以计算出任意形状、任意电荷密度分布的带电体的静电场电势分布。

但实际上，只要稍做计算，我们马上就可明白，我们真正可以用有理函数形式表达空间各点电势分布的，通过上述积分来计算出带电体的形状、电荷分布的种类是极其有限的。事实上我们只能计算出圆球、圆壳和无限长圆柱形带电体的静电场分布。我们甚至连一般很规则形状的带电体，例如，最简单的长方形甚至正方形的静电场分布都不能通过积分用有理函数形式计算出来。目前，人们只能对简单形状的带电体，用数值积分（有限元方法）的方法来进行计算。而用数值积分的方法，常常遇到计算十分困难、工作量巨大等问题。即使如此，这些方法在处理任意形状的，任意电荷密度分布带电体时，也常常困难得使人不敢去碰它。

用实验方法，通过测绘，来找出带电体的静电场分布常常更为简单和迅速，特别对复杂形状的带电体的测量，更显出它的优势。所以实际上静电场的实验测量方法往往比理论计算方法要简单和快速，常常是一种十分有用，有时甚至是惟一可用的方法。本实验就是学习用手工的方法，来测绘两种不同形状的带电体的静电场分布。

但是，直接测量静电场的电位分布通常是很困难的。

第一，测量仪器要求必须有电流来驱动。而静电场一般不能提供足够大的电流来驱动仪表（此即所谓静电场不能提供电流），所以一般不能用仪表进行静电场测量。

第二，仪表或它的探测头本身总是导体或电介质，当它引入到静电场中时，必将引起原静电场的分布发生改变。若要使探测头对原静电场的影响降低（比如，使用带电量很少的试探电荷），则测量仪器不易有足够的灵敏度。事实上，国内外至今还找不到足够灵敏的仪器和探测装置来测量微弱的电荷（例如人的头发上的电荷）所产生的静电场。

为了解决这一困难，通常使用模拟法来代替直接测绘静电场。

模拟法本质上是用一种易于实现、便于测量的物理状态或过程，来模拟不易实现、不便测量的状态或过程。条件是：这两种物理状态或过程满足数学形式相同的方程及边值条件。模拟法在目前的科学技术研究中得到了广泛应用，是科学研究和工农业生产上一种基本的实验方法。本实验即是用稳恒电流场来模拟静电场进行的实验测绘。

一、实验目的

- (1) 学习模拟法的基本思想和应用。
- (2) 学会用模拟法测量和研究静电场。

二、实验原理

1. 用恒定电流场模拟静电场

静电场和稳恒电流场本来是两种不同性质的场，但这两种场的电位分布都遵守拉普拉斯方程（这个方程可在电动力学课中学到）。也就是说，如果一个静电场，它由几个带电导体所激发，每个带电导体的位置、形状和电位 $V_1, V_2, V_3 \cdots$ 均已知（如图 10-1），那么，我们可以把同样形状的良好导体按同样的位置放置到导电媒质中，并在各个良导体上加上直流电压，使它们的电位也是 $V_1, V_2, V_3 \cdots$ （如图 10-2），这样得到的电流场，它上面任一点 P' 的直流电位 $V'_{P'}$ 跟静电场对应点 P 的静电电位 V_P 完全一样。由于稳恒电流场可以提供驱动测量仪表的电流而不会明显地改变它原来的电位空间分布，这样只要测量出稳恒电流场中各点的直流电位分布，对应的静电场的电位分布也就确定了。这就是著名的“模拟法”的核心思想。

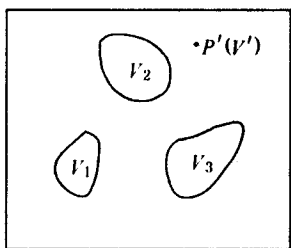


图 10-1 静电场

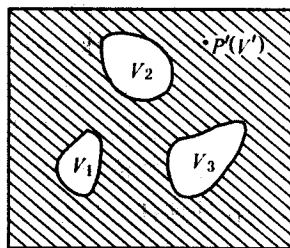


图 10-2 稳恒电流场

注意：

(1) 静电场中的介质相应于电流场中的导电媒质，如果是真空（或空气）中的静电场，相应的是均匀分布的导电媒质。

(2) 静电场中的带电导体的表面是一个等位面，要求电流场中的良导体也是一个等位面。即良导体的电导率要远远大于周围导电媒质的电导率。所以，导电媒质应是导电能力较弱的导体，如石墨、水等。而电极必须用良导体（如铜，银）制作。

这样就满足方程相同，边界条件相同的模拟条件。

2. 模拟法描绘二维静电场的电位分布

为了测量静电场空间各点的情况，一般模拟用的电流场也应该是三维的，也就是导电媒质应充满整个模拟的空间。但对长同轴电缆内的电场，长平行直导线间的电场等，除靠近两端的区域外，它们的中间区域都可近似看做与坐标 Z 无关的二维场。因此在这种情况下，三维场的问题就可转化为二维场的问题。为了简化实验，这里采用二维场来进行模拟。实验上，只要在相应带电体的位置安装良导体做相应电极，再在电极间充以电导率较小的均匀导电媒质薄层（或垫上导电纸）即可。

上面说过，稳恒电流场可以提供驱动测量仪表的电流，但测量仪表的引入总会干扰稳恒电流场的原始状态。为了尽量降低这种干扰，就要求分流到测量仪表上的电流尽量少，这就要求测量仪表的输入阻抗尽量大。数字式万用表的输入阻抗（一般为 $10\text{ M}\Omega$ ）远大于模拟式仪表（一般为几百千欧），所以这里使用了数字式万用表来测量电压。

二维稳恒电流场的电位分布的测量，一般用测量它的不同电压的等位线来实现。实验测量出各点电位，然后画出等位线，再从等位线的垂线画出电力线。

上面说过，模拟法要求两种物理状态或过程必须满足相同的数学方程和相同的边值条件。下面以同心圆电极（如图 10-3 中同轴圆柱形导体电极的横截面）间的稳恒电流场和图 10-4 中所示同尺寸的同轴圆柱形导体的静电场的电位分布为例，来证明它们满足上述条件。

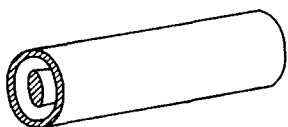


图 10-3 一段同轴圆柱形导体

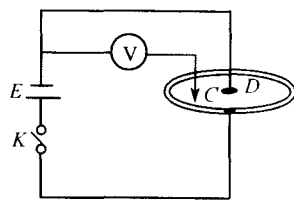


图 10-4 同轴圆柱形导体的静电场电位分布

同心圆电极的稳恒电流场的电位分布（长同轴圆柱形导体间的电场的横截面）如图 10-5 所示。

设同轴圆柱形导体的内电极半径为 r_1 ，外电极内半径为 r_2 。极间电压为 V_0 。由对称原理，当两电极间的电流为 I 时，在两电极间、距中心为 r 点处流过的径向电流密度为

$$j_r = I/2\pi r b \quad (10-1)$$

式中 b ——薄导电层的厚度。

设导电层的电导率为 σ ，则有

$$I = V_0/R = V_0/\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{2\pi\sigma b r} = 2\pi b\sigma V_0/\ln(r_2/r_1) \quad (10-2)$$

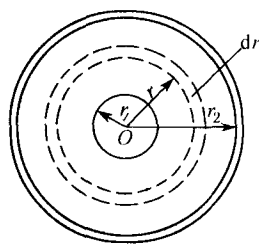


图 10-5 同轴圆柱形导体的横截面

由欧姆定律的微分形式

$$j_r = \sigma E \quad (10-3)$$

式中 E ——对应点处的电场强度大小。

由式 (10-1)、(10-2)、(10-3) 整理可得

$$E = [V_0/\ln(r_2/r_1)](1/r) \quad (10-4)$$

取内电极电位为零，则距中心为 r 各点的电位为

$$V_r = \int_{r_1}^r E dr = V_0 \ln(r/r_1)/\ln(r_2/r_1) \quad (10-5)$$

以上是稳恒电流场中的电位分布情况。

作为对比，下面我们来看一下同样形状和大小的无限长同轴圆柱形电极带等量异种电荷

时所形成的静电场，以及内外电极间的电位分布情况。

设内外层之间的电位差也是 V_0 ，内外层导体上电荷的线密度分别为 $-\lambda$ ， $+\lambda$ ，导体之间空间的介电常数为 ϵ_0 ，则由高斯定律可知，距中心轴为 r 处任意一点上的电场强度 E 为

$$E = -\lambda / 2\pi r \epsilon_0 \quad (r_2 > r > r_1) \quad (10-6)$$

电场强度 E 与电位 V 之间的关系为

$$E = -dV/dr \quad (10-7)$$

同样，取圆柱形内电极导体（半径为 r_1 ）处的电位为零，外层导体的电位为 V_0 ，距轴 r 处任意一点的电位应该为

$$V_r = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\lambda}{2\pi \epsilon_0 r} dr = \frac{\lambda}{2\pi \epsilon_0} \ln(r/r_1) \quad (10-8)$$

所以
$$V_{r_2} = \frac{\lambda}{2\pi \epsilon_0} \ln(r_2/r_1) = V_0 \quad (10-9)$$

由式 (10-8) 和 (10-9) 得

$$V_r = V_0 \ln(r/r_1) / \ln(r_2/r_1) \quad (10-10)$$

由式 (10-5) 和 (10-10) 可见，同轴圆柱形电极间稳恒电流场中的电位分布与对应的无限长同轴圆柱形电极间静电场的电位分布完全相同，且满足相同的边界条件，故可以用同轴圆柱形电极间稳恒电流场来模拟长同轴圆柱形导体间的静电场。

对于聚焦电极，稳恒电流场和静电场间的电位分布有类似的对应性，但它的数学证明比较复杂和困难，我们就不在这里证明了。

三、实验仪器介绍和使用

数字万用表：数字式万用表已在“电学基础实验”中作过介绍。用它测量直流电压时，将红表笔插入 V/Ω 插孔，黑表笔插入 COM 插孔。将量程选择开关置于 DCV 量程范围的合适挡（本实验用 20V 挡）。电源开关 POWER 置于 ON 后就可使用（注意：有的数字式万用表在使用约 15 min 左右后，会自动切断电源，这时只要重新打开即可）。

同轴圆柱形电极，模拟示波管聚焦电极，偶极子等测试板：这是三块玻璃基质测试板，在它们的无导线面上镀了一层均匀的极薄不良导电膜，电极处镀有一层良导体。

探针及测试架（图 10-6）：把测试板导线面向下放置于测试架上，将探针与电压表的

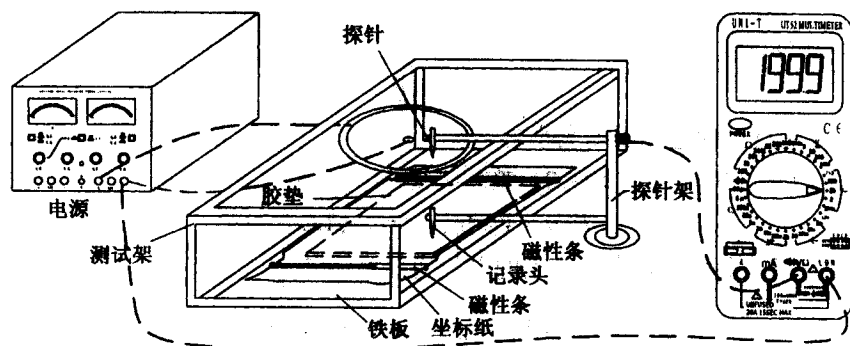


图 10-6 静电场测绘实验连线示意图

“+”极（红表笔）相连，当两电极间加有电压 V_0 后，两电极间就形成了稳恒电场，两电极间等位线的位置和形状可通过探针用万用表测出。为记录其位置，在测试架下方的橡胶垫上，用两条黑色磁性橡胶条压一张坐标纸 P ，纸上的探针（常称为“记录头”）和测试板上的探针固定在同一柱体上，记录头垂直于纸面。应该指出，上探针与记录头常常不在同一条直线上，两者的中心线会有几个毫米甚至 10 mm 的偏差。这对精确的静电场测绘带来了困难。但是，如果在整个测试过程中，保证探针架始终为平动，避免任何转动，则探针和记录头就将具有同样的运动轨迹，这就可以有效地消除测试架不可避免的偏差，使静电场测绘达到很好的测量精度。测绘时，使上探针与测试板上的导电层接触，且使万用表读数为需要值，此时轻轻按下记录头，就可在坐标纸上打出小孔。万用表上读数（即被测点的电位）相同的一系列点的轨迹，就是一条等位线。

双路跟踪稳压稳流电源：该电源在“电学基础实验”中已介绍过。在本实验中，它作为稳压电源使用，所以它的电压/电流功能切换按键应处于凸出状态。实验中两个同学使用一台电源。

四、实验内容和步骤

注意：本实验应自带两张 16 开坐标纸。作等位线和电力线时必须用圆规、三角板和曲线板，不要徒手画。

1. 测绘长同轴圆柱形导体间的电位分布

(1) 按图 10-6 所示，放好坐标纸，连好电路。注意检查一下，电源面板上表头下的三个功能切换按键应全部抬起，以使本电源构成两个互相独立的稳压电压源。

把 VOLTAGE 旋钮（电压调节）逆时针旋到头，把 CURRENT 旋钮（电流调节）顺时针旋大一点，然后打开电源开关，调节 VOLTAGE 钮，使电源上表头的指示值为 6.00 V，再逆时针旋 CURRENT 钮，减小电流至电压显示仍能保持在 6.00 V。

(2) 平移探针架，使探针落在外电极上，此时数字万用表显示两电极上所加电压，如不是 6.00 V 需进一步调节电源上的电压调节电位器，使数字式万用表上的读数为 6.00 V。

注意：下面实验中输出电压的大小一定以数字式万用表的读数为准，电源表头上的指示值只能作为参考。

(3) 平移探针，分别在坐标纸上打出万用表读数为 1.50 V，3.00 V，4.50 V 的三组等位点。每组至少找 8 个等位点，并尽量使各点均匀分布。（建议把三角板或直尺依次放到圆的均匀分布的 8 个半径上，沿着其边移动探针，在每条半径上找到所需点。）

注意：移动探针架时，要保持探针架在整个测量过程中做平动，不能发生转动。

(4) 根据一组等位点找出圆心，用圆规依次画出各等位线。然后作等位线的垂线即得电力线（不少于 8 条）。

(5) 量出等位线的直径，求出半径 r_m ；同时根据理论公式（10-10）算出各等位线半径的理论值 r_l 列于数据表 10-1 中。

$$V_0 = 6.00 \text{ V}, r_1 = 1 \text{ cm}, r_2 = 10 \text{ cm}.$$

表 10-1 计算值结果

V_r/V	r_t (理论值) /cm	r_m (实验值) /cm	$\Delta r = r_t - r_m /\text{cm}$	$(\Delta r/r_t) \%$
1.50				
3.00				
4.50				

2. 测绘聚焦电极间的电位分布

(绘制区域是图 10-7 中虚线框内) 方法同前, 极间电压仍用 6.00 V。依次测绘三种等位线 (它们分别是: 电位为 2.50 V; 5.25 V; 以及通过中心交叉点的等位线: 其电位约为 4.75 V)。找等位点时要注意, 在整个测绘过程中, 移动探针架要保持探针架为平动。

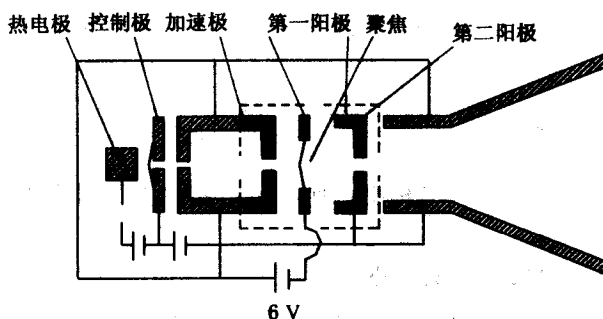


图 10-7 阴极射线管结构原理图

测绘时请注意, 以上三种电位线的每种, 各有 2 条, 故共有 6 条等位线。要求每条等位线至少测 20 个点。测绘时, 等位线变化比较激烈的地方, 测绘的点要密一些; 等位线变化平缓的地方, 测绘点的间隔可大一些。同时, 还要看到, 由于实验仪器的限制, 本实验的测量的准确度是有限的; 以 2.50 V 等位线为例, 测量点的值可允许在 2.45 ~ 2.55 V 之间。其他等位线的测量可作类似处理。

实验结束后, 回去画出等位线和电力线, 画电力线时, 注意使其与等位线处处垂直, 且使电力线的密度能反映电场强度的大小。

五、预习思考题

- (1) 在测绘静电场实验中, 带电体是否真带静电? 为什么测绘结果又和静电场一致?
- (2) 用二维稳恒电流场来模拟静电场, 对实验条件有哪些要求?
- (3) 实验中测电位分布时我们用了数字万用表, 主要理由是什么?
- (4) 电力线与等位面有哪些性质? 它们有哪些关系?
- (5) 对于同轴电缆的等位线, 实验中, 如所得各点不在同一圆上, 你将如何处理?

六、思考题

- (1) 出现下列情况之一时, 用图 10-4 装置绘出的电力线和等位线形状有无变化? 为什么?

- ① 电源电压提高一倍;
 - ② 导电层导电材料的电导率相同但厚度不均匀;
 - ③ 万用表的读数有比实际值大 10% 的系统误差;
 - ④ 测量时电源电压不稳定, 有缓慢增加;
 - ⑤ 万用表的内阻和电极间导电层的总电阻值相近。
- (2) 能否用二维稳恒电流场来模拟带电导体球的空间静电场分布?

参 考 文 献

- 1 丁慎训, 张孔时. 物理实验教程. 北京: 清华大学出版社, 1993
- 2 林抒, 龚镇雄. 普通物理实验. 北京: 人民教育出版社, 1983
- 3 查述传主编. 物理实验. 北京: 北京理工大学出版社, 1989
- 4 张三惠等. 电磁学. 北京: 清华大学出版社, 1998

实验十一 利用光的全内反射测定介质的折射率

折射率是描述材料光学特性的基本参量，光在材料中传播的所有情况都与折射率有关。例如光在该材料中的传播速度、折射角、光的反射率、光在材料中传播过程中的衰减情况、双折射等。折射率与介质材料的分子结构有关，同时也与密度、温度、浓度等物理量有关，因此测量介质的折射率不但可以掌握光在该材料传播过程中的所有特性，还可由此了解和析材料的分子结构和它的成分、状态等各种物理量。

应该注意：折射率不但与材料本身性质有关，也与光的性质（如波长）有关，一个重要的例子就是，折射率是光的波长的函数，一般不是一个常数。

所有材料，包括透明的、不透明的、或者金属导体、半导体和占物质世界 95% 以上的介质等，都免不了要与光打交道，因而都需要折射率这个参数。世界上物质千变万化，对应各种材料的折射率不但在形式上，而且在数值上也就十分多样，这使测定材料的折射率常常不是一件容易的事。由于折射率的重要性，所以就出现了很多种方法来测量材料的折射率。下面介绍的光的全内反射方法是其中之一，它在测定一些透明介质（包括固体和液体）时简单易用，并且有较好的测量精度，在科研和生产中有较多的使用。

光的全内反射是一种常见的光学现象，利用光的全内反射（常常简称为全反射）原理测量介质的折射率是全反射现象应用的一个例子。除此之外，在光学实验中，在某些光学仪器中，还经常利用光的全反射来改变光路的进行方向。光导纤维目前已成为一种新的光学元件，并广泛地应用在通讯、医学等领域。光学纤维能传送图像也是利用了光在玻璃纤维光滑内壁上接连不断的全反射。所以，了解和掌握产生全反射的条件及方法对于正确地利用全反射是很必要的。

一、实验目的

- (1) 了解利用光的全内反射测定介质折射率的方法。
- (2) 了解阿贝折射仪的结构及测量原理，掌握该仪器的调整与使用方法。
- (3) 学习测定固体和液体介质的折射率的方法。

二、实验仪器

阿贝折射仪；白炽灯；蒸馏水；溴代苯；酒精乙醚混合液；待测介质。

三、实验原理

当光线照射在两种介质的分界面上时，一般情况下都分为两条光线。一条光线从分界面反射到原来的介质，该光线常被称为“反射光”；另一条光线经分界面折射进入另一种介质，该光线常被称为“折射光”，反射光和折射光的强弱是互补的。

图 11-1 中 n_1 、 n_2 为两种介质的折射率，在 n_1 介质内的某一点 E 向各方向发出光线，其中照射在介质 n_1 和 n_2 分界面

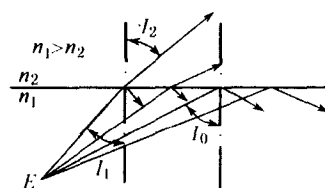


图 11-1 光的折射和全反射

上的每一条光线都可分成一条折射光和一条反射光。当 $n_1 > n_2$ ，此即所谓光线由光密介质射向光疏介质时，根据折射定律 $n_1 \sin I_1 = n_2 \sin I_2$ ，可知折射角 I_2 大于入射角 I_1 。随着入射角 I_1 的逐渐增大，相应的折射角 I_2 也增大，同时反射光的光强随之增大，而折射光的光强逐渐减弱。当入射角增大到某一值时（如图 11-1 中的 I_0 ），相应的折射角 $I_2 = 90^\circ$ 。这时有一条很弱的光线（光强趋于零）沿界面传播，而反射光很强。当入射角继续增大，即 $I_1 > I_0$ 时，折射光不再存在，入射光全部被反射，这种现象叫全反射。因为全反射总是发生在光密介质内部，所以也称之为全内反射。折射角 $I_2 = 90^\circ$ 时对应的入射角 I_0 称为临界角。根据折射定律

$$n_1 \sin I_0 = n_2 \sin I_2 \quad (I_2 = 90^\circ)$$

则有

$$\sin I_0 = n_2 / n_1 \quad (11-1)$$

可见，发生全反射的条件是光线以大于临界角由光密介质进入光疏介质。

利用光的全内反射现象可以测定介质的折射率（参看图 11-2）。棱镜 ABC 是用已知折射率为 n_1 的介质（玻璃）制成， Q 是折射率为 n_2 的待测介质。设 $n_1 > n_2$ ，假如光线以 I_0 角（临界角）由 n_1 中入射，折射光线将沿界面射出（称掠射方向），该光线在图 11-2 中以双箭头表示。根据光的可逆原理，如果光线由 n_2 中沿掠射方向（对分界面的入射角等于 90° ）入射，如图中 a 光线，则折射光线以全反射临界角 I_0 进入折射率为 n_1 的棱镜，然后又以角 ϕ 从棱镜射出到空气中。该光线在图中以单箭头表示。所有在 n_2 中对分界面的入射角小于 90° 的光线（如图中 b, c 光线），在 n_1 中折射时的折射角均小于 I_0 ，所以全部折射光线（ a', b', c' ）均包括在 I_0 角的范围内，这些光线从棱镜射出后都偏向下方，由于入射角大于 90° 的一方没有光线进入棱镜，所以在 n_1 中超过 I_0 角便无折射光线存在。此时如果用望远镜对准出射光方向观察，就会看到以光线 a' 为分界线的一半明一半暗的视场。由图 11-2 可看出，三棱镜棱角 A （ $\angle BAC$ ）与临界角 I_0 及角 ϕ 的关系为

$$A = I_0 + \phi \quad (11-2)$$

对从界面 AC 出射的光线 a' 来说，由折射定律得

$$\sin \phi = n_1 \sin \psi \quad (11-3)$$

用式 (11-1)，(11-2)，(11-3) 消去 I_0 和 ψ 后得

$$n_2 = \sin A \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \phi} - \cos A \sin \phi \quad (11-4)$$

当三棱镜的棱角 A 及折射率 n_1 已知时，测出 ϕ 角便可计算出待测介质的折射率 n_2 。这种测定折射率的方法称为掠入射法（或称折射极限法）。

根据全内反射原理测量介质的折射率，除掠入射法外，还有全反射法（参看图 11-3）。将发散光线照射在棱镜的磨砂面 BC 上， BC 面就成为一个平面光源，面上各点均有光线（如 a, b, c, d ）以不同的方向射到 AB 面

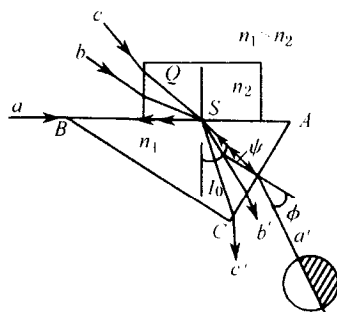


图 11-2 掠射法测折射率

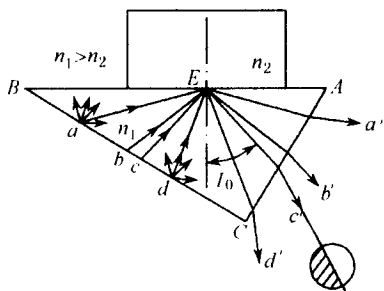


图 11-3 全内反射法测折射率

上任意一点 E ，凡对 AB 面的入射角大于临界角 I_0 的光线（如 a, b, c ，它们对应的出射光线分别为 a', b', c' ）均系全反射，入射角小于临界角的光线（如 d ）将有部分光线经 AC 面折射到 n_2 介质中， d 的反射光经 AC 面出射为 d' ，可见出射光线 d' 的强度必小于全反射的光线，即 d' 的光强小于 a', b', c' 。因而当用望远镜对准出射光方向观察时，同样在视场中可以看到以 c' 为分界线的半明半暗的视场，只是明暗分布的情况与用掠入射法时相反，而且明暗对比度不如掠入射法看到的清晰。

以上介绍的方法可测固体介质折射率，也可测液体介质折射率。测液体介质的折射率时，应将待测液体滴于棱镜的光学面上（ AB 面），加毛玻璃或三棱镜覆盖，使其间形成液体薄层。

四、阿贝折射仪介绍

阿贝折射仪是根据全内反射原理设计的，是专门用来测量介质折射率的仪器。利用它可以快速而准确地测出待测介质的折射率值，折射率的测量范围是 $1.3000 \sim 1.7000$ 。

用阿贝折射仪还可测量介质的平均色散值及测量糖溶液的浓度，糖溶液浓度的测量范围为 $0\% \sim 95\%$ 。

图 11-4 所示为阿贝折射仪的外形结构。阿贝折射仪主要由阿贝棱镜组、望远系统、读数系统三部分组成。

图 11-5 所示为阿贝折射仪的光学系统，它包括望远系统和读数系统两部分。

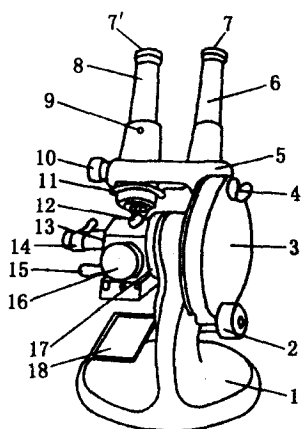


图 11-4 阿贝折射仪外形结构图

1—底座；2—棱镜（转动）手轮；3—圆盘组（内有刻度盘）；4—小反光镜；5—支架；6—读数望远镜；7—显微镜目镜；7'—望远镜目镜；8—望远镜筒；9—示值调节螺钉；10—阿米西棱镜转动手轮；11—色散刻度圈；12—棱镜锁紧扳手；13—棱镜组；14—温度计座；15—恒温器接头；16—保护罩；17—主轴；18—反光镜

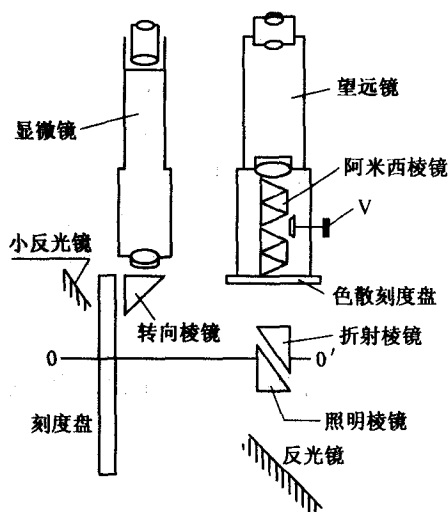


图 11-5 阿贝折射仪内部光学系统

阿贝棱镜组中照明棱镜的弦面是磨砂面，它的作用是形成均匀的扩展光源。另一棱镜是折射棱镜，它是用于测量折射率的测量棱镜。实验时被测介质（液体）应夹在这两个棱镜的弦面之间。入射光进入照明棱镜，并在其磨砂弦面产生漫射光，该光穿过待测介质进入折射

棱镜。转动棱镜手轮（图 11-4 中的 2），使一部分光沿着弦面掠入射进入折射棱镜，此时掠入射光的出射角为 ϕ 。阿贝折射仪在设计时就已将对应该角度的折射率值换算出来并标于刻度盘上，因此我们可由仪器直接读取被测介质的折射率值。

望远系统由望远镜及阿米西棱镜组（或称消色补偿器）组成。进入望远系统的光线首先要通过阿米西棱镜组，由阿米西棱镜组射出的光线进入望远镜成像于分划板上，使我们通过望远镜目镜观察到半明半暗的视场。由于折射棱镜的色散作用，会在明暗视场的分界处出现彩色的分界线。阿米西棱镜组的作用就是消除这一色散现象。阿米西棱镜组有两块相同而且可反向转动的阿米西棱镜。如果两块棱镜的相对位置相同，则入射光经第一块棱镜色散后，又经第二块棱镜色散，总的色散应为二者之和。如果将棱镜反向转动，使两棱镜相对位置相反（相当于一块棱镜相对另一块棱镜转了 180° ），则第一块棱镜的色散被第二块棱镜的色散抵消，总的色散为零。这时由阿米西棱镜出射的各色光线的极限方向都与钠黄光的极限方向重合，得到清晰的明暗分界线。因为阿米西棱镜是按钠黄光 D 谱线的入射与出射方向相同（不偏折）的条件设计的，所以达到消色散时用阿贝折射仪测出的折射率就是介质对钠黄光 D 谱线波长（589.0 nm）的折射率 n_D 。阿米西棱镜的相对位置可用阿米西棱镜调节手轮改变，其调节方位可由色散刻度圈上读出。

读数系统由显微镜及刻度盘组成。把小反光镜的位置调整好，使光线通过反光镜的反射照亮刻度盘，再经直角转向棱镜和显微镜的物镜，将刻度成像于显微镜的分划板上。通过显微镜的目镜，我们可以读取刻度盘上的数据。读取数据时，明暗分界线必须位于望远镜分划板叉丝交点上。如果位置不对，应该用棱镜转动手轮 2 调节。在显微镜中看到的刻度盘有两排刻度如图 11-6 所示，右侧刻度为折射率值 n_D ，左侧刻度为糖溶液的浓度。

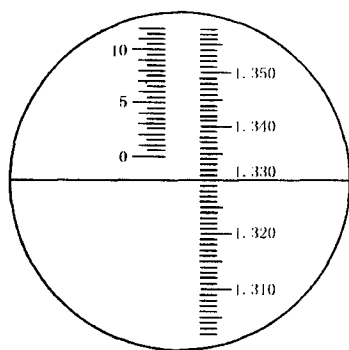


图 11-6 刻度盘示意图

五、实验内容及操作步骤

1. 校准阿贝折射仪

为了使测量结果准确，在测量前要先对阿贝折射仪进行校准，校准时可用蒸馏水或已知折射率标准值的标准玻璃（本实验用蒸馏水）。校准步骤如下：

（1）调节望远镜目镜的焦距。方法：旋转望远镜目镜外边的套圈（图 11-4 中的 7'），同时通过目镜观看望远镜分划板上的叉丝，直至调整到叉丝最清晰为止。

（2）调节显微镜目镜的焦距。方法：首先打开小反光镜（图 11-4 中的 4），并将它调整到能使反射光线进入小窗口照亮刻度盘的位置（通过显微镜的目镜来观看），然后旋转显微镜目镜外边的套圈（图 11-4 中的 7），直至调整到显微镜分划板上的刻度达到最清晰为止。

注意：旋转目镜外边的套圈时动作要轻，转动速度要慢。

（3）清洗。转动阿贝棱镜组棱镜锁紧扳手（图 11-4 中的 12），使照明棱镜和折射棱镜的弦面处于打开的状态。用滴上酒精乙醚混合液的脱脂棉球，将两棱镜弦面及其边框清洗干净。

注意：清洗时一定要特别仔细，不要划伤棱镜的光学面。