

大学物理实验

王良甚 张琳丽 王凯君 主 编

史毅敏 潘 雍 李 隆 副主编

电子工业出版社版权所有
盗版必究

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京•BEIJING

内 容 简 介

本书是根据《理工科类大学物理课程教学基本要求·理工科类大学物理实验课程教学基本要求（2023 年版）》编写的大学物理实验教材。本书按照基础性物理实验、综合性物理实验、设计性物理实验的顺序编排，注重教材的数字化建设，添加了课件、微课等数字教学资源，运用 AR 技术使教学内容以 3D 形式呈现。

本书可作为高等学校物理实验课程的教材或教学参考书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 王良甚, 张琳丽, 王凯君主编. — 北京: 电子工业出版社, 2023.11

ISBN 978-7-121-46738-7

I. ①大… II. ①王… ②张… ③王… III. ①物理学—实验—高等学校—教材 IV. ①O4-33

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2023) 第 223531 号

责任编辑: 孟 宇

印 刷:

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 19.5 字数: 499 千字

版 次: 2023 年 11 月第 1 版

印 次: 2023 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 49.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: mengyu@phei.com.cn。

前言

本书是根据教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求·理工科类大学物理实验课程教学基本要求（2023 年版）》，结合我校近些年大学物理实验的教学经验、仪器设备现状和技术发展趋势编写而成的。

全书分 5 章。第 1 章物理实验数据处理基本知识，根据 GB/T 27418—2017《测量不确定度评定和表示》、JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》等国际、国家或行业标准的规定，结合实际实验教学情况，对有效数字、测量不确定度的评定等内容做出了修改与补充，增加了用 WPS 表格处理实验数据的介绍。第 2 章物理实验基本测量方法与测量技术，介绍了《理工科类大学物理课程教学基本要求·理工科类大学物理实验课程教学基本要求（2010 年版）》中要求学生了解的物理实验的基本测量方法、物理实验常用仪器的使用、物理实验的基本调节技术与操作规程。第 3 章基础性物理实验，选编了 18 个基础性物理实验项目。第 4 章综合性物理实验，选编了 18 个综合性物理实验项目。第 5 章设计性物理实验，介绍了设计性物理实验的基本知识和实验项目、全国大学生物理实验竞赛（创新）以及 phyphox 和 Origin 软件。

本书由西安建筑科技大学王良甚、张琳丽、王凯君、史毅敏、潘雍、李隆共同编写完成，史彭教授对本书的编写提出了宝贵的意见。绪论和第 1 章由王良甚编写，第 2 章由王良甚和张琳丽编写，第 3 章由张琳丽和史毅敏编写，第 4 章由王凯君和潘雍编写，第 5 章由潘雍和李隆编写，附录由王良甚和史毅敏编写。实验教材的基础是实验，它反映了实验教学改革的实验室建设的成果，这些都是广大教师和实验技术人员长期、共同努力完成的，因此，本书是物理实验中心的集体成果，在此谨向共同工作的各位同事表示衷心感谢。

在编写本书过程中参考了大量国家标准、专著和兄弟院校的大学物理实验教材，在此向所有参考文献的作者表示诚挚的感谢。由于编者的水平有限，书中难免有不妥和疏漏之处，恳请使用本书的读者批评指正。

编 者
2023 年 10 月

目 录

绪论	1
第 1 章 物理实验数据处理基本知识	5
1.1 测量、误差与有效数字	5
1.1.1 测量的基本概念	5
1.1.2 误差的基本概念	6
1.1.3 有效数字	9
1.2 误差的基本性质	13
1.2.1 系统误差的基本性质	13
1.2.2 随机误差的基本性质	14
1.2.3 粗大误差的基本性质	20
1.3 测量不确定度的评定	22
1.3.1 测量不确定度的基本概念	22
1.3.2 直接测量标准不确定度的评定	23
1.3.3 间接测量标准不确定度的评定	30
1.4 数据处理的基本方法	33
1.4.1 列表法	34
1.4.2 作图法	35
1.4.3 逐差法	38
1.4.4 最小二乘法	41
1.5 用 WPS 表格处理实验数据的方法	43
1.5.1 用 WPS 表格以逐差法处理实验数据	43
1.5.2 用 WPS 表格以作图法处理实验数据	46
1.5.3 用 WPS 表格以最小二乘法处理实验数据	48
习题	50
第 2 章 物理实验基本测量方法与测量技术	51
2.1 物理实验的基本测量方法	51
2.1.1 比较法	51
2.1.2 放大法	51
2.1.3 转换法	53
2.1.4 补偿法	54
2.1.5 平衡法	55

2.1.6	模拟法	55
2.2	物理实验常用仪器的使用	56
2.2.1	常用长度测量仪器的使用	56
2.2.2	常用质量测量仪器的使用	60
2.2.3	常用时间测量仪器的使用	62
2.2.4	常用温度测量仪器的使用	63
2.2.5	常用电磁学仪器的使用	65
2.2.6	常用光学仪器的使用	75
2.3	物理实验的基本调节技术与操作规程	79
2.3.1	物理实验的基本调节技术	79
2.3.2	物理实验的操作规程	84
第3章	基础性物理实验	86
3.1	质量和密度的测量	86
3.2	单摆法测量重力加速度	88
3.3	液体表面张力系数的测量	90
3.4	扭摆法测量物体的转动惯量	93
3.5	气垫导轨的应用	97
3.5.1	速度和加速度的测量	98
3.5.2	动量守恒定律的验证	101
3.6	稳态法测量热导率	104
3.7	金属线膨胀系数的测量	107
3.8	模拟法描绘静电场	109
3.9	元件的伏安特性	113
3.10	示波器的原理及应用	116
3.11	电位差计的原理及应用	120
3.12	单臂电桥测量电阻	123
3.13	双臂电桥测量电阻	127
3.14	透镜焦距的测量	131
3.15	分光计的调节及使用	135
3.16	衍射光栅	142
3.17	等厚干涉的应用	146
3.18	迈克耳孙干涉仪的应用	150

第4章 综合性物理实验	157
4.1 旋转液体综合实验	157
4.2 空气中声速的测量	161
4.3 拉伸法测量弹性模量	166
4.4 密立根油滴法测量电子电荷	169
4.5 温度传感器特性的测量	173
4.6 数字万用表的设计	180
4.7 测量铁磁材料的磁滞回线	191
4.8 霍尔效应	197
4.9 光纤温度传感器的应用	202
4.10 磁光调制与解调	205
4.11 液晶电光效应	208
4.12 双光栅法测量微弱振动	212
4.13 白光 LED 特性的测量	217
4.14 新能源综合实验	222
4.14.1 太阳能电池特性及应用	222
4.14.2 质子交换膜的应用	229
4.15 塞曼效应	233
4.16 拉曼光谱	238
4.17 偏振光和旋光	242
4.18 光学全息	247
第5章 设计性物理实验	252
5.1 设计性物理实验的基本知识	252
5.1.1 设计性物理实验的意义	252
5.1.2 设计性物理实验的一般过程	252
5.1.3 设计性物理实验的设计过程示例	257
5.2 设计性物理实验项目	259
5.2.1 单摆法测定重力加速度和待测金属球材料的电导率	259
5.2.2 液体中的“气包”——一种模拟微重力环境的设计	260
5.2.3 利用负温度系数热敏电阻设计制作数字体温计	261
5.2.4 直流电源特性的研究	262
5.2.5 稳恒磁场的场强的测量	262
5.2.6 小灯泡发光问题的研究	263

5.2.7	用超声光栅测量超声波在水中传播的速度	264
5.2.8	研究玻璃材料折射率与入射光波长间的色散关系	265
5.2.9	测量钠黄光在液体中传播的速度	265
5.2.10	光压的测量	266
5.3	基于智能手机的实验设计	267
5.3.1	智能手机常见的传感器	267
5.3.2	phyphox 入门	268
5.3.3	基于 phyphox 的设计性物理实验	271
5.4	全国大学生物理实验竞赛(创新)	273
5.4.1	全国大学生物理实验竞赛(创新)简介	273
5.4.2	全国大学生物理实验竞赛(创新)规则	274
5.4.3	全国大学生物理实验竞赛(创新)命题类题目	276
5.5	用 Origin 处理实验数据的方法	278
5.5.1	Origin 入门	278
5.5.2	Origin 在物理实验数据处理中的应用	281
附录 A	中华人民共和国法定计量单位	284
附表 A-1	国际单位制 SI 基本单位	284
附表 A-2	SI 辅助单位	284
附表 A-3	具有专门名称的 SI 导出单位	284
附表 A-4	SI 词头	285
附表 A-5	可与 SI 并用的我国法定计量单位	285
附录 B	常用仪器的仪器误差限	286
附表 B-1	棒式玻璃温度计的仪器误差限 Δ_{ins}	286
附表 B-2	金属直尺的仪器误差限 Δ_{ins}	286
附表 B-3	钢卷尺的仪器误差限 Δ_{ins}	286
附表 B-4	游标卡尺的仪器误差限 Δ_{ins}	286
附表 B-5	千分尺的仪器误差限 Δ_{ins}	287
附表 B-6	其他仪器的仪器误差限 Δ_{ins}	287
附录 C	常用物理参数	288
附表 C-1	基本物理常量	288
附表 C-2	$P(t \geq t_a) = \alpha$ 的 t_a 值	288
附表 C-3	不同概率 p 与自由度 ν 时的 t 分布表	289
附表 C-4	20℃ 某些物质的密度 ρ	290

附表 C-5	标准大气压下不同温度时水的密度 ρ	290
附表 C-6	我国部分城市重力加速度 g	290
附表 C-7	20℃时与空气接触的液体的表面张力 α	290
附表 C-8	不同温度时与空气接触的水的表面张力 α	291
附表 C-9	不同温度时水的黏滞系数 η	291
附表 C-10	不同温度时蓖麻油的黏滞系数 η	291
附表 C-11	20℃时某些金属的杨氏模量 E	291
附表 C-12	某些固体的线膨胀系数 α	291
附表 C-13	20℃时某些物质的比热容 c	292
附表 C-14	某些物质的热导率 λ	292
附表 C-15	20℃时某些金属的电阻率 ρ 和温度系数 α	292
附表 C-16	色码电阻器色码颜色的意义	292
附表 C-17	仪表相关的常用电气符号及含义	292
附表 C-18	某些固体中的声速 v	293
附表 C-19	20℃时某些液体中的声速 v	293
附表 C-20	不同温度时干燥空气中的声速 v	294
附表 C-21	可见光区谱线波长及颜色	294
附表 C-22	氢 (H) 可见光区部分较强谱线波长、强度及颜色	294
附表 C-23	氦 (He) 可见光区部分较强谱线波长、强度及颜色	294
附表 C-24	氖 (Ne) 可见光区部分较强谱线波长、强度及颜色	294
附表 C-25	钠 (Na) 可见光区部分较强谱线波长、强度及颜色	294
附表 C-26	汞 (Hg) 可见光区部分较强谱线波长、强度及颜色	294
关键词索引		295
参考文献		299

第3章 基础性物理实验

3.1 质量和密度的测量

若物体的质量为 m ，体积为 V ，则其密度 ρ 为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.1-1)$$

质量 m 可以用天平测量，形状规则的物体的体积 V 可以根据几何尺寸计算，通过式 (3.1-1) 可得到其密度。形状不规则的物体的体积无法直接测量，它们的密度可以用静力称衡法或比重瓶法测量。工业上常通过测定密度来进行原料成分的分析 and 纯度的鉴定^[22]。

1. 实验目的

- (1) 掌握测量固体、液体密度的方法。
- (2) 掌握游标卡尺、千分尺、物理天平的使用方法。
- (3) 理解有效数字的概念，能给出正确结果。

2. 实验器材

物理天平、游标卡尺、千分尺、金属圆筒、温度计、比重瓶、待测固体、待测液体、玻璃棒等。

3. 实验原理

1) 形状规则物体的密度

金属圆筒的内径为 d 、外径为 D 、高为 h ，由式 (3.1-1) 可知其密度

$$\rho = \frac{4m}{\pi(D^2 - d^2)h} \quad (3.1-2)$$

2) 静力称衡法测量密度

如果不计空气的阻力，设物体在空气中称得质量为 m_1 ，把它全部浸没在密度为 ρ_0 的液体中称得质量为 m_2 ，根据阿基米德原理，物体在液体中受到的浮力等于它排开的液体的重力，即

$$F = (m_1 - m_2)g = \rho_0 Vg \quad (3.1-3)$$

式中， V 为物体的体积，即物体排开液体的体积。由此，物体的密度为

$$\rho = \frac{m_1}{V} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \rho_0 \quad (3.1-4)$$

如果将上述物体再浸入密度为 ρ' 的待测液体中，称得物体质量为 m_3 ，可得该待测液体的密度为

$$\rho' = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \rho_0 \quad (3.1-5)$$

3) 比重瓶法测量密度

比重瓶是容积固定的玻璃瓶。设干燥比重瓶的质量为 m_0 ，盛满水后的总质量为 m_1 ，盛满待测液体后的总质量为 m_2 ，则水的质量为 $m_1 - m_0$ ，同体积的待测液体的质量为 $m_2 - m_0$ 。通过计算可得待测液体的密度为

$$\rho = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \rho_0 \quad (3.1-6)$$

利用比重瓶，还可以测量不溶于水的小块固体的密度。设比重瓶装满水后的总质量为 m_1 ，质量为 m_2 的待测干燥固体投入装满水的比重瓶内，多余的水溢出瓶外。比重瓶、瓶内的水和待测固体的总质量为 m_3 ，则排出瓶外的水的总质量为 $m_1 + m_2 - m_3$ 。而排出瓶外的水的体积就是待测固体的体积，所以待测固体的密度为

$$\rho = \frac{m_2}{m_1 + m_2 - m_3} \rho_0 \quad (3.1-7)$$

4. 实验内容及步骤

1) 测量形状规则的金属圆筒的密度

- (1) 用游标卡尺（详见 2.2.1 节）测量金属圆筒不同部位的高度 6 次。
- (2) 对千分尺进行零位检查和校正（详见 2.2.1 节）后，用千分尺测量金属圆筒不同部位的直径 6 次。
- (3) 将金属圆筒放在物理天平（详见 2.2.2 节）的左盘，称量其质量 m_1 ，再将金属圆筒放在物理天平的右盘，称量其质量 m_2 。

2) 静力称衡法测量待测固体的密度

- (1) 用天平称出待测固体的质量 m_1 。
- (2) 将待测固体全部浸没在水中，用玻璃棒驱除附在待测固体上的气泡，用物理天平测量其在水中的质量 m_2 。
- (3) 测出实验时的水温，通过附表 C-5 查出水在该温度下的密度 ρ_0 。

3) 比重瓶法测量待测液体的密度

- (1) 称量出空的干燥比重瓶的质量 m_0 。
- (2) 称量出比重瓶装满水后的总质量 m_1 。
- (3) 称量出比重瓶装满待测液体后的总质量 m_2 。
- (4) 测出实验时的水温，通过附表 C-5 查出水在该温度下的密度 ρ_0 。

4) 比重瓶法测小块固体的密度

- (1) 称量出小块固体在空气中的质量 m_2 。
- (2) 将比重瓶装满水，塞上瓶塞，擦去流出的水，称量出比重瓶和水的质量 m_1 。
- (3) 将小块固体倒入比重瓶内，称量出比重瓶、小块固体和水的总质量 m_3 。
- (4) 测出实验时的水温，通过附表 C-5 查出水在该温度下的密度 ρ_0 。

5. 注意事项

- (1) 天平使用前应调节底脚螺钉，使水平仪（详见 2.3.1 节）中气泡在中心，以保证立柱

铅直。

(2) 称物体时，被称物体放在左盘，砝码放在右盘，加减砝码必须使用镊子，严禁用手。

(3) 取放物体和砝码、移动游码或调节天平时，都应先将横梁制动，以免损坏刀口。

(4) 比重瓶注入液体时，不应使比重瓶内留有气泡，并用吸水纸把瓶外擦干，擦去瓶口与塞子缝隙中的液体。

6. 实验数据记录与处理

1) 测量形状规则的金属圆筒的密度

自己设计表格，记录金属圆筒的高度、直径、质量，根据交换法可得金属圆筒的质量为 $m = \sqrt{m_1 m_2}$ ，计算金属圆筒的密度，评定测量不确定度，写出测量结果的完整表达式。

2) 静力称衡法测量待测固体的密度

自己设计表格，记录水温、待测固体的质量、待测固体在水中的质量；根据式 (3.1-4) 计算待测固体的密度，评定测量不确定度，写出测量结果的完整表达式。

3) 比重瓶法测待测液体的密度

自己设计表格，记录空比重瓶的质量、比重瓶装满水后的质量、比重瓶装满待测液体后的质量，根据式 (3.1-6) 计算待测液体的密度，评定测量不确定度，写出测量结果的完整表达式。

4) 比重瓶法测小块固体的密度

自己设计表格，记录小块固体在空气中的质量、比重瓶装满水后的质量、放入小块固体后的比重瓶和水的质量，根据式 (3.1-7) 计算小块固体的密度，评定测量不确定度，写出测量结果的完整表达式。

7. 思考题

(1) 为什么测量金属圆筒高度时用游标卡尺，而测量它的直径时用千分尺？

(2) 为什么交换法能消除天平两臂不等长引起的系统误差，试证明。

(3) 如何测量有空隙的固体材料（如活性炭、海绵等）的表观密度（体积包括空隙在内）和实际密度？

(4) 假如待测固体的密度比水的密度小，现欲采用静力称衡法测量此固体的密度，应如何测量？

3.2 单摆法测量重力加速度

重力加速度是物理学中的一个重要参量，它反映了地球引力的强弱，随着地球上各个地区的经纬度、海拔高度及地下资源的分布不同而略有不同。一般来说，在赤道附近，重力加速度最小，越靠近南、北极，重力加速度越大，最大值与最小值之差约为 $1/300^{[23]}$ 。准确测量它的量值，在科研、工程技术等方面都有着极其重要的意义。测定重力加速度的方法很多，单摆法和自由落体法是两种简单而常用的方法。本实验采用单摆法测量重力加速度。

1. 实验目的

- (1) 掌握用单摆法测量重力加速度的方法，加深对简谐运动规律的认识。
- (2) 研究单摆摆动周期 T 与摆长 L 的关系。
- (3) 熟悉数字秒表的使用。

2. 实验器材

长约 1 m 的细线、小铁球（小球）、铁架台、米尺、秒表。

3. 实验原理

一根质量可忽略不计、不可伸长的细线和一个悬于此线下端体积可忽略的小球即构成理想的单摆。将单摆推离平衡位置，让它自由运动，单摆就在平衡位置附近做周期性摆动。

如图 3.2-1 所示， G 是摆球受到的重力， T 是绳子的张力，当单摆摆角 θ 很小（小于 5° ）且忽略空气阻力时，摆球所受合力 F 必沿着轨迹的切线方向且指向平衡位置，故有

$$F = -mg \sin \theta \quad (3.2-1)$$

单摆摆动时， θ 角很小，故 $\sin \theta \approx \theta$ 。于是式 (3.2-1) 可写为

$$F = -mg\theta \quad (3.2-2)$$

设 L 为单摆的长度，即从悬点到小球球心的距离，根据牛顿第二定律 $F = ma$ ，并注意到加速度只有切向分量

$a = a_\tau = L \frac{d^2\theta}{dt^2}$ ，可得

$$L \frac{d^2\theta}{dt^2} = -g\theta \quad (3.2-3)$$

令 $\omega^2 = \frac{g}{L}$ ，代入式 (3.2-3) 可得

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \omega^2\theta = 0 \quad (3.2-4)$$

由上式可知，单摆做简谐振动，其振动周期为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (3.2-5)$$

由式 (3.2-5) 可得重力加速度为

$$g = 4\pi^2 \frac{L}{T^2} \quad (3.2-6)$$

故只要测定摆长 L 和周期 T ，即可算出重力加速度 g 。

由于单摆的周期一般都不长，例如，摆长 1 m 左右的单摆其周期约为 2 s。人为控制秒表启停时相对误差较大，故本实验采用累计放大法（详见 2.1.2 节）测量 50 个周期所用的时间 t ，用公式 $T = t / 50$ 求出单摆的平均周期。

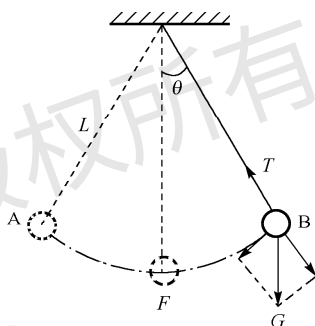


图 3.2-1 单摆法测重力加速度示意图

4. 实验内容及步骤

(1) 测量单摆的摆长。用直尺测量摆线长度 l ，用游标卡尺测量小球直径 D ，则摆长 $L = l + D/2$ 。

(2) 测量单摆的周期。将摆球从平衡位置拉开一个小角度（小于 5° ），然后放开摆球，使摆球在竖直平面内摆动，用秒表测量摆动 50 个周期的时间 t ，重复测量 3 次，取平均值，计算出单摆的周期 T 。

(3) 改变摆长，重新测量摆长和周期。

5. 注意事项

(1) 细线不可伸缩，长度约 1 m。小球应选用直径较小（最好不超过 2 cm）、密度较大的金属球。

(2) 单摆的上端不要卷在夹子上，而要用夹子加紧，以免单摆摆动时摆线滑动或者摆长改变。

(3) 最大摆角小于 5° ，可用量角器测量，然后通过振幅来掌握。

(4) 摆球摆动时要在同一个竖直平面内。

(5) 计算单摆的摆动次数时，应从摆球通过最低点时开始计时，以摆球从同一方向通过最低点时进行计数，在计数的同时按下秒表，并且要测多次全摆动的总时间，然后除以摆动次数，如此反复 3 次，求得周期的平均值。

6. 实验数据记录与处理

(1) 自己设计表格，记录摆线长度 l 、小球直径 D 、摆动 50 个周期的时间 t ，计算摆长 L 和周期 T 。

(2) 根据式 (3.2-6) 计算出重力加速度 g ，评定测量不确定度，写出测量结果的完整表达式。

7. 思考题

(1) 公式 $g = 4\pi^2 \frac{L}{T^2}$ 成立的条件是什么？在实验中如何保证这一条件的实现？

(2) 影响重力加速度结果的主要因素是什么？若摆线长度改为 10 cm 甚至 5 cm，会产生什么影响？

(3) 能否用作图法求解重力加速度？如何求解？

3.3 液体表面张力系数的测量

液体表层厚度约 10^{-10} m 内的分子所处的条件与液体内部不同：液体内部每个分子都被周围其他分子所包围，分子所受的作用力的合力为零；由于液体表面上方接触的气体分子的密度远小于液体分子，因此液面每个分子受到向外的引力比向内的引力要小得多，也就是说，所受的合力不为零，力的方向是垂直于液面并指向液体内部的，该力使液体表面收缩，直至达到动态平衡。

因此，在宏观上，液体具有尽量缩小其表面积的趋势，液体表面好像张紧的橡皮膜。这种使液体表面收缩的力称为**表面张力**。用表面张力能解释液体的许多现象，如润湿现象、毛细管现象及泡沫的形成等。了解液体表面的性质和现象，掌握测量液体表面张力系数的方法具有重要的实际意义。测量液体表面张力系数的方法有拉脱法、毛细管升高法和液滴测重法等。本实验介绍拉脱法测量液体的表面张力系数。

1. 实验目的

- (1) 掌握用标准砝码对力敏传感器进行定标的方法，并计算传感器的灵敏度。
- (2) 观察用拉脱法测量液体表面张力系数的物理过程和物理现象，并用物理学基本概念和定律进行分析和研究，加深对物理规律的认识。
- (3) 掌握用拉脱法测量纯净水的表面张力系数及用逐差法处理数据的方法。

2. 实验器材

液体表面张力系数测定仪。

3. 实验原理

如果将洁净的圆筒形吊环浸入液体中，然后缓慢地提起吊环，吊环将带起一层液膜。如图 3.3-1 所示，使液面收缩的表面张力 f 沿液面的切线方向，角 φ 称为湿润角（或接触角）。当继续提起吊环时， φ 逐渐变小而接近零，这时所拉出的液膜的里、外两个表面的张力 f 均垂直向下，设拉起液膜破裂时的拉力为 F ，则有

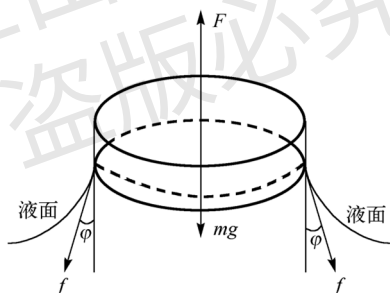


图 3.3-1 吊环从液面缓慢拉起受力示意图

$$F = (m + m_0)g + 2f \quad (3.3-1)$$

式中， m 为黏附在吊环上的液体的质量； m_0 为吊环质量。因表面张力的与接触面的边界长度成正比，故有

$$2f = \pi(D_{\text{内}} + D_{\text{外}})\alpha = l\alpha \quad (3.3-2)$$

式中， $D_{\text{内}}$ 为圆筒形吊环的内环直径； $D_{\text{外}}$ 为圆筒形吊环的外环直径； l 为圆筒形吊环内、外环的周长之和；比例系数 α 称为表面张力系数，单位是 $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。 α 在数值上等于单位长度上的表面张力，则有

$$\alpha = \frac{F - (m + m_0)g}{l} \quad (3.3-3)$$

由于吊环很薄，被拉起的液膜也很薄， m 很小可以忽略，式 (3.3-3) 简化为

$$\alpha = \frac{F - m_0g}{l} \quad (3.3-4)$$

表面张力系数 α 与液体的种类、纯度、温度和它上方的气体成分有关。实验表明，液体的温度越高， α 值越小；所含杂质越多， α 值越小。

4. 实验内容及步骤

液体表面张力系数测定仪如图 3.3-2 所示，主要组成部件有底座、立柱、传感器固定支架、力敏传感器、数字式毫伏表、有机玻璃器皿（连通器）、标准砝码（砝码盘）、圆筒形吊环。



图 3.3-2 液体表面张力系数测定仪

1) 力敏传感器灵敏度 K 的测量

- (1) 实验时先接通电源，将仪器预热 15 min。
- (2) 在传感器挂钩上挂上砝码盘，调节调零旋钮使数字电压表示数为零，调零后不能再调节此旋钮。
- (3) 在砝码盘中依次加入 500.00 mg 的砝码，待稳定后记录每加一个砝码的电压表示数 U_i' ，直到加到 3 500.00 mg；再依次取下砝码，记录每减一个砝码对应的示数 U_i'' 。

2) 液体表面张力系数的测量

- (1) 选取吊环不同位置，用游标卡尺（详见 2.2.1 节）测量其内外径各 3 次，并计算其平均值。
- (2) 清洗有机玻璃器皿和吊环，用吹风机吹干后，在有机玻璃器皿内倒入适量被测液体。
- (3) 将吊环挂在传感器的小钩上，逆时针转动活塞调节旋钮，使液面上升，当吊环下沿接近液面时，仔细调节吊环的悬挂线，使吊环水平。
- (4) 把吊环部分浸入液体中，将仪器调至峰值测量功能，缓慢地顺时针转动活塞调节旋钮，这时液面逐渐下降（相对而言，吊环往上提拉），观察吊环浸入液体中及从液体中拉起时的物理过程和现象。当吊环拉断液柱的一瞬间数字电压表显示拉力峰值 U_1 ，记录该数值。拉断后，释放按钮开关，数字电压表恢复随机测量功能，静止后其示数为 U_2 ，记录该数值。重复测量 6 次。

5. 注意事项

- (1) 吊环须严格处理干净。可用 NaOH 溶液洗净后，用清水冲洗，再用吹风机烘干。
- (2) 吊环须调水平，以免引起较大的实验误差。
- (3) 在调节液面升降活塞时，要缓慢调节，尽量减小液体的波动。
- (4) 工作环境应避免风吹，以免吊环摆动致使零点波动，造成所测系数不准确。

- (5) 实验过程中要防止灰尘、油污及其他杂质污染。特别注意，手指不要接触被测液体。
- (6) 力敏传感器使用时用力不宜大于 0.098 N，过大的拉力容易损坏传感器。
- (7) 配件盒中各元件只能用镊子夹取，不能用手接触。

6. 实验数据记录与处理

1) 力敏传感器灵敏度 K 的测量

自己设计表格，记录力敏传感器的定标数据，用逐差法求出每 500.00 mg 对应的传感器的输出电压 $\overline{\Delta U}$ ，灵敏度 $K = \frac{\overline{\Delta U}}{\Delta mg}$ mV·N⁻¹（西安地区重力加速度 $g = 9.796\ 83\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ）。

2) 吊环的内、外径的测量

自己设计表格，记录吊环的内、外径的测量数据，计算吊环的内、外径。

3) 计算液体表面张力系数 α

自己设计表格，记录拉脱时最大示数 U_1 和静止后的示数 U_2 。 $F - m_0g = 2f = F_1 - F_2 = \frac{U_1 - U_2}{K}$ ，则表面张力系数 $\alpha = \frac{F - m_0g}{l} = \frac{2f}{l} = \frac{U_1 - U_2}{lK} = \frac{U_1 - U_2}{\pi(D_1 + D_2)K} = \frac{\Delta U}{\pi(D_1 + D_2)K}$ 。根据以上数据，计算 $\bar{\alpha} = \frac{\overline{\Delta U}}{\pi(\bar{D}_1 + \bar{D}_2)K}$ ，从附表 C-8 中查出理论值 α_0 ，计算百分差 $E = \frac{|\bar{\alpha} - \alpha_0|}{\alpha_0} \times 100\%$ 。

7. 思考题

- (1) 在测量拉脱力的过程中，为何不记录电压达到最大值时的数据，而是记录拉脱前后的两个瞬间的电压值？
- (2) 在测量拉脱力的过程中，测量电压值 U_1 和 U_2 之前需要进行调零吗？为什么？
- (3) 计算液体表面张力的公式中，为什么是用拉脱表面周长乘以表面张力系数，而不是用拉脱表面的面积来计算？
- (4) 拉脱法的物理本质是什么？若考虑拉起液膜的质量，实验结果应如何修正？

3.4 扭摆法测量物体的转动惯量

转动惯量是对刚体转动时惯性大小的量度，是表明刚体特性的一个物理量。刚体相对于某转轴的转动惯量，是组成刚体的各质元质量与它们各自到该转轴距离平方的乘积之和。刚体的转动惯量除与物体质量有关外，还与转轴的位置和物体相对转轴的质量分布有关。如果刚体的形状简单，质量分布均匀，可以直接计算出它绕特定转轴的转动惯量。对于形状复杂、质量分布不均匀的刚体，转动惯量的计算极为复杂，通常采用实验的方法来测量。测量特定物体的转动惯量对某些研究工作具有重要意义，如电动机的转子、枪炮的弹丸、飞轮的设计等^[26,27]。

转动惯量的测量，一般是使刚体以一定形式运动，通过表征这种运动特征的物理量与转动惯量的关系，进行转换测量。本实验使物体做扭转摆动，通过对摆动周期及其他参数的测量计算出物体的转动惯量。

1. 实验目的

- (1) 掌握力学基本量的测量方法。
- (2) 掌握扭摆法测量物体的转动惯量的方法。
- (3) 验证平行轴定理。
- (4) 掌握百分差的概念和计算方法。

2. 实验器材

智能转动惯量实验仪、电子天平、游标卡尺、直尺等。

3. 实验原理

1) 仪器介绍

智能转动惯量实验仪的结构如图 3.4-1 所示。在垂直轴下方装有一个薄片状的螺旋弹簧，用来产生恢复力矩；在垂直轴的上方可以安装各种待测物体；垂直轴与基座间装有轴承，以降低摩擦力矩；水平仪（详见 2.3.1 节）用来调节系统平衡。



图 3.4-1 智能转动惯量实验仪的结构

2) 扭摆的简谐振动

将安装在垂直轴上的物体在水平面内转过一个角度 θ 后，在弹簧的恢复力矩作用下物体绕垂直轴做往返扭转运动。根据胡克定律，弹簧受扭转而产生的恢复力矩 M 与物体所转过的角度 θ 成正比（负号代表受力方向），即

$$M = -K\theta \quad (3.4-1)$$

式中， K 为弹簧的扭转常量（ $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ）。根据转动定律，有

$$M = J\beta \quad (3.4-2)$$

式中， J 为物体绕转轴的转动惯量（ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ）； β 为角加速度。忽略轴承的摩擦力矩，由式（3.4-1）和式（3.4-2）得

$$\begin{aligned} -K\theta &= J\beta \\ \beta &= \frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{K}{J}\theta \end{aligned}$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{K}{J}\theta = 0$$

令 $\omega^2 = \frac{K}{J}$, 则

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \omega^2\theta = 0$$

上述微分方程表示扭摆运动具有角简谐振动的特征, 角加速度与角位移成正比, 且方向相反。此方程的解为

$$\theta = \theta_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

式中, θ_0 为角简谐振动的角振幅; φ 为角简谐振动的初相角; ω 为角速度或角频率。此角简谐振动的周期为

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{J}{K}} \quad (3.4-3)$$

由式 (3.4-3) 可知, 只要测得物体的摆动周期 T , 且 J 、 K 中任一个量已知时, 即可计算出另一个量。

假设载物盘绕转轴的转动惯量为 J_0 , 质量为 m_1 、直径为 D_1 的圆柱体绕中心轴的转动惯量理论值为 $J_1' = \frac{1}{8}m_1D_1^2$, 测量载物盘的摆动周期为 T_0 以及载物盘上安装圆柱体后的摆动周期为 T_1 , 根据式 (3.4-3) 可知

$$\frac{J_0}{J_1'} = \frac{T_0^2}{T_1^2 - T_0^2} \quad (3.4-4)$$

由式 (3.4-3) 和式 (3.4-4) 可推导出弹簧的扭转常量

$$K = \frac{4\pi^2 J_0}{T_0^2} = \frac{4\pi^2 J_1'}{T_1^2 - T_0^2} \quad (3.4-5)$$

得到弹簧的扭转常量后, 将其他形状的待测物体分别安装在仪器的垂直轴上, 测量出其摆动周期, 由式 (3.4-3) 即可计算出待测物体的转动惯量。

3) 平行轴定理

如图 3.4-2 所示, 当质量为 m 的物体绕通过质心的轴的转动惯量为 J_C 且转轴平行移动距离 x 时, 此物体对新转轴的转动惯量 $J = J_C + mx^2$, 此为平行轴定理。

为了避免相对转轴出现非对称情况, 使摆轴不垂直而增大测量误差, 实验中采用两个滑块辅助细杆的测量方法, 验证滑块的平行轴定理。 J_C 为两个滑块绕通过质心的轴的转动惯量, m 为两个滑块的质量, 杆绕转轴的转动惯量为 $J_{\text{杆}}$, 当转轴平行移动距离为 x 时, 测得的转动惯量为

$$J' = J_{\text{杆}} + J_C + mx^2 \quad (3.4-6)$$

两个滑块的转动惯量为

$$J = J' - J_{\text{杆}} = J_C + mx^2 \quad (3.4-7)$$

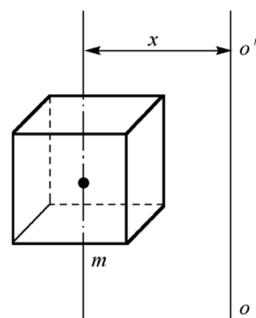


图 3.4-2 平行轴定理示意图

4. 实验内容及步骤

- (1) 用游标卡尺（详见 2.2.1 节）测量圆柱体的外径、圆筒的内外径、球体的直径、滑块的内外径及长度，用直尺（详见 2.2.1 节）测量细杆的长度。
- (2) 用电子天平（详见 2.2.2 节）测量圆柱体、圆筒、球体、细杆、细杆支架、滑块的质量。
- (3) 调节转动惯量实验仪基座底脚螺钉，使扭摆水平（详见 2.3.1 节）。
- (4) 将光电探头放置在挡光杆的平衡位置处，使载物盘上的挡光杆处于光电探头的中央，且能遮住发射和接收红外线的小孔。
- (5) 把数字毫秒仪的功能设置为摆动测量，周期次数设置为 10。转动金属载物盘偏离平衡位置约 90° 后松手使其自由摆动，按【执行】键测量载物盘空载时的摆动周期，连续测量 3 次。
- (6) 重复步骤（5），依次测量圆柱体、圆筒、细杆支架、球体、细杆的摆动周期。
- (7) 验证平行轴定理。如图 3.4-3 所示，将滑块对称放置在细杆两边的凹槽内，在滑块的质心离转轴的距离为 5.00 cm、10.00 cm、15.00 cm、20.00 cm、25.00 cm 时，分别测量摆动周期。



图 3.4-3 验证平行轴定理

5. 注意事项

- (1) 转动惯量实验仪的基座应保持水平状态。
- (2) 测量周期时，要控制扭摆初始角度基本保持 90° 。
- (3) 光电探头宜放置在挡光杆的平衡位置处，挡光杆不能和它接触。
- (4) 在安装待测物体时，待测物体支架必须全部套入扭摆主轴，将制动螺钉旋紧，否则转动惯量实验仪不能正常工作。
- (5) 在称量细杆的质量时，必须取下支架。
- (6) 计算细杆的转动惯量和验证平行轴定理时，应扣除细杆支架的转动惯量。
- (7) 测量时，应先使载物盘自由摆动，然后按【执行】键进行计时。
- (8) 扭摆的弹簧有一定的使用寿命和强度，不能随意扭转。

6. 实验数据记录与处理

1) 测量弹簧的扭转常量 K

以圆柱体为标准件，计算其转动惯量理论值 $J_1' = \frac{1}{8} m_1 D_1^2$ ，利用式 (3.4-5) 计算弹簧的扭转常量。

2) 各物体转动惯量的计算

利用测量数据，计算转动惯量的理论值、实验值和百分差，记入表 3.4-1 中。

球体支架转动惯量实验值： $J_3'' = 1.79 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。球体支架质量： $m_3' = 34.8 \text{ g}$ 。

表 3.4-1 各物体转动惯量的计算

物体名称	周期 $\bar{T} / \text{s}$	转动惯量理论值 $J' / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	转动惯量实验值 $J / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	百分差 $E = \frac{ J_i - J'_i }{J'_i} \times 100\%$
载物盘	$\bar{T}_0 =$		$J_0 = \frac{K\bar{T}_0^2}{4\pi^2}$	
圆柱体	$\bar{T}_1 =$	$J'_1 = \frac{1}{8}m_1D_1^2$	$J_1 = \frac{K\bar{T}_1^2}{4\pi^2} - J_0$	
球体	$\bar{T}_3 =$	$J'_3 = \frac{1}{10}(m_3 - m'_3)D_{\text{直}}^2$	$J_3 = \frac{K\bar{T}_3^2}{4\pi^2} - J_3''$	
细杆支架	$T_4' =$		$J_4'' = \frac{k\bar{T}_4'^2}{4\pi^2} - J_0$	
细杆	$T_4 =$	$J'_4 = \frac{1}{12}m_4L^2$	$J_4 = \frac{k\bar{T}_4^2}{4\pi^2} - J_4''$	

3) 平行轴定理的验证

利用测量数据, 计算转动惯量的理论值、实验值和百分差, 记入表 3.4-2 中, 验证平行轴定理。

单个滑块绕过质心并垂直几何轴时的转动惯量: $J_5 = \frac{1}{16}\bar{m}_{\text{滑}}(D_{\text{内}}'^2 + D_{\text{外}}'^2) + \frac{1}{12}\bar{m}_{\text{滑}}l_{\text{滑}}^2 = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

两个滑块转动惯量的理论值: $J' = 2J_5 + 2\bar{m}_{\text{滑}}x^2 = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

两个滑块转动惯量的实验值: $J = \frac{k}{4\pi^2}\bar{T}^2 - J_4 - J_4'' = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

表 3.4-2 平行轴定理的验证

滑块位置 x / cm	周期 $\bar{T} / \text{s}$	理论值 $J' / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	实验值 $J / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	百分差 E
5.00				
10.00				
15.00				
20.00				
25.00				

7. 思考题

- (1) 为什么在测量细杆质量时必须将支架取下? 为什么支架的转动惯量在计算中又未考虑?
- (2) 数字毫秒仪的仪器误差限为 0.01 s, 实验中为什么要测量 10 个周期的时间 t ?

3.5 气垫导轨的应用

在物理实验中, 摩擦力的存在会使某些力学实验结果的误差很大, 甚至会使有些实验无法

进行。采用气垫技术,可使被测物体在气垫上运动,大大减小摩擦力,从而进行一些较为准确的定量研究。

气垫导轨是一个一端封闭的中空长直导轨,其表面有几排小孔,压缩空气从小孔喷出,从而在导轨表面与运动物体间形成一层薄薄的空气层,我们称之为“气垫”。应用气垫技术可以减少机械或器件的磨损,延长其使用寿命,提高其速度和机械效率。所以,气垫技术在机械、纺织、运输等领域都有着广泛的应用,如气垫船、空气轴承等。本节将介绍速度和加速度的测量、动量守恒定律的验证。

3.5.1 速度和加速度的测量

1. 实验目的

- (1) 掌握气垫导轨和光电计时装置的调节与使用方法。
- (2) 了解在低摩擦情况下研究力学问题的方法。
- (3) 掌握在气垫导轨上测量物体速度和加速度的方法。
- (4) 掌握测量瞬时速度的方法。

2. 实验器材

气垫导轨及滑块、计时器、光电门、气泵、游标卡尺等。

3. 实验原理

1) 瞬时速度的测量

一个做直线运动的物体,在 Δt 时间内经过的位移为 Δs , 则该物体在 Δt 时间内的平均速度为

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (3.5-1)$$

为了精确地描述物体在某点的瞬时速度, Δt 取得越小越好。 Δt 越小,所计算出的平均速度越接近瞬时速度。当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,平均速度趋近于一个极限,即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{v} \quad (3.5-2)$$

这就是物体在该点的瞬时速度。

但是,在实验中直接测量极限值是不可能的,本实验中采用作图法(详见 1.4.2 节)得到瞬时速度。先测量不同的微小有限量 Δt 及相应时间段的位移量 Δs , 求得各 Δt 内物体的平均速度 $\bar{v}$, 然后用作图法或回归法得出平均速度 $\bar{v}$ 与 Δt 的趋势规律,最后由趋势图或趋势函数求得 $\Delta t = 0$ 时的 $\bar{v}$ 值,此值即为物体通过测量点时的瞬时速度 v 。由于 $\Delta t = 0$ 的点在 Δt 的实测范围外,故此法称为外推法。

本实验中采用两块挡光片组成组合挡光片,将其中一块挡光片沿运动方向固定在滑块前端,另一块挡光片根据测量需要固定在滑块的不同位置上,使滑块从倾斜的气垫导轨上某一固定位置自由下滑,当挡光片通过光电门时,仪器会自动记录两块挡光片通过光电门的时间,这样就可得到不同的距离 Δs 通过测量点(光电门所在位置)的时间 Δt , 然后通过外推法求出滑块经过测量点的瞬时速度 v 。

2) 加速度的测量

如图 3.5-1 所示, 当滑块在气垫导轨上做加速直线运动时, 滑块通过光电门 P_1 、 P_2 的瞬时速度分别为 v_1 、 v_2 , 滑块在 P_1 、 P_2 间运动的时间为 t_{12} , 两个光电门的间距为 L , 则滑块的加速度为

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t_{12}} \quad \text{或} \quad a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2L} \quad (3.5-3)$$

实验中, 由外推法得到 v_1 、 v_2 , 由计时器测量出 t_{12} , 则可由上式计算出滑块的加速度 a 。

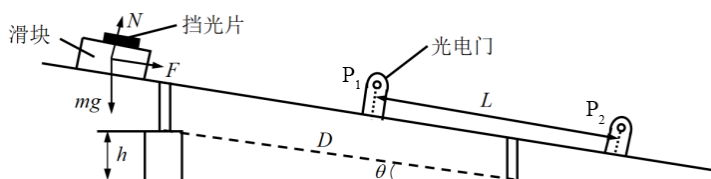


图 3.5-1 加速度的测量示意图

3) 重力加速度的测量

如图 3.5-1 所示, 滑块做加速直线运动, 滑块在斜面上所受合力 $mg \sin \theta$ 为常量。因此

$$a = g \sin \theta \approx g \tan \theta = g \frac{h}{D} \quad (3.5-4)$$

式中, D 为气垫导轨下方单脚水平调节螺钉与双脚水平调节螺钉之间的距离; h 为垫块的厚度。由式 (3.5-3) 和式 (3.5-4) 可得

$$g = \frac{(v_2^2 - v_1^2)D}{2hL} \quad (3.5-5)$$

只要测量出 D 和 L , 即可求出重力加速度 g 。

4. 实验内容及步骤

(1) 实验装置如图 3.5-2 所示。先打开气泵给导轨送气, 然后将滑块放在气垫导轨上, 调节气垫导轨下的单脚水平调节螺钉, 使气垫导轨处于水平状态 (滑块在气垫导轨上各处都能保持静止状态或在气垫导轨上做匀速直线运动)。

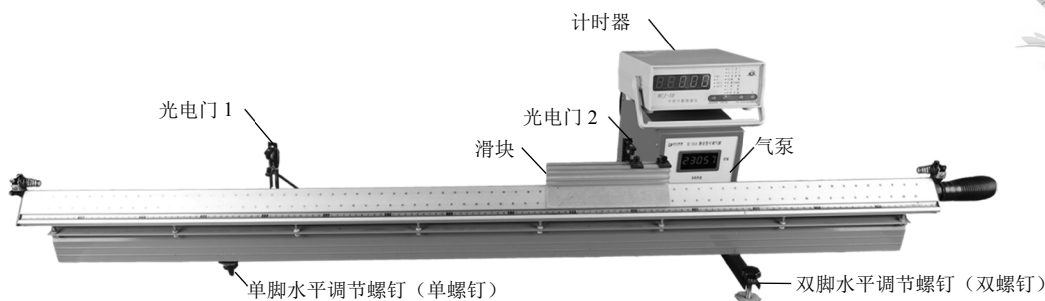


图 3.5-2 气垫导轨测量速度、加速度实验装置

(2) 在气垫导轨单脚水平调节螺钉下加约 30.00 mm 厚的垫块, 使导轨倾斜; 将一块挡光片固定在滑块前端 (沿运动方向), 另一块挡光片固定于组合挡光宽度 $S \approx 60.00$ mm 处 (见图 3.5-3, 图中 G 为有效挡光宽度, $G = S - S_0$); 将滑块放在气垫导轨上的某一固定位置处。

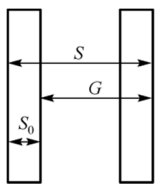


图 3.5-3 S 与 G 的关系

(3) 多次按下计时器面板上的功能键，直至加速度指示灯亮；使滑块在导轨上自由下滑，计时器循环显示滑块分别通过 P_1 、 P_2 的时间及通过 P_1 、 P_2 之间距离的时间 t_1 、 t_2 、 t_{12} ，并在显示时间之前有相应的提示符 1、2、1-2，记录 t_1 、 t_2 、 t_{12} 。

(4) 每次测量记录完毕，按功能键清零，重复测量 6 次。

(5) 组合挡光宽度分别调为约 70.00 mm、80.00 mm、90.00 mm、100.00 mm、110.00 mm，重复上面的测量。

5. 注意事项

(1) 测量中应保证滑块每次从同一位置下滑，使第一块挡光片的前沿到光电门的距离始终保持不变。

(2) 导轨和滑块配套使用，不能随意更换；导轨未通气时严禁将滑块放在导轨表面滑动，以免划伤导轨；调节挡光片位置时，要将滑块从导轨上取下。

(3) 不建议初学者调节气垫导轨下的双螺钉，必要时可由实验室专业人员调节。

(4) 调节挡光片时一定要保证位于滑块前端的挡光片固定不动。

(5) 滑块不能有任何磕碰，以防变形。

(6) 实验完毕，要先取下滑块，再关闭气源。

6. 实验数据记录与处理

重力加速度 $g = 9.796\ 83\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ （西安）。

遮光片宽度 $S_0 =$ _____ mm，斜面长度 $D =$ _____ mm，垫块厚度 $h =$ _____ mm。

自己设计表格，记录不同组合遮光宽度 S_i 对应的运动时间 t_1 、 t_2 、 t_{12} ，每一种组合遮光宽度测量 6 次。

1) 计算滑块通过两个光电门的平均速度

自己设计表格，计算 $D_i = S_i - S_0$ ， $\bar{t}_{1i} = \frac{1}{6} \sum t_{1j}$ ， $\bar{t}_{2i} = \frac{1}{6} \sum t_{2j}$ ， $\bar{v}_{1i} = \frac{D_i}{\bar{t}_{1i}}$ ， $\bar{v}_{2i} = \frac{D_i}{\bar{t}_{2i}}$ 。

2) 计算滑块通过两个光电门的瞬时速度

绘制 $\bar{v}_1 - \bar{t}_1$ 和 $\bar{v}_2 - \bar{t}_2$ 图线，利用外推法分别求出瞬时速度 v_{10} 、 v_{20} 。

3) 计算滑块的加速度 a

(1) 计算滑块通过两个光电门的时间的平均值 $\bar{t}_{12} = \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} t_{12i}$ 。

(2) 计算加速度的测得值 $a = \frac{|v_{20} - v_{10}|}{\bar{t}_{12}}$ 。

(3) 计算加速度的理论值 $a_0 = \frac{h}{D} g$ 。

(4) 计算加速度的百分差 $E = \frac{|a_0 - a|}{a_0} \times 100\%$ 。

7. 思考题

- (1) 气垫导轨在使用中气压过小会产生什么影响？气压过大会产生什么影响？
- (2) 在气垫导轨上做力学实验的特点是什么？
- (3) 实验中使用的挡光片的宽度能否很窄，如 $S_0 = 0.50 \text{ mm}$ ，为什么？

3.5.2 动量守恒定律的验证

1. 实验目的

- (1) 用气垫导轨研究碰撞过程，验证动量守恒定律。
- (2) 观察完全弹性碰撞和完全非弹性碰撞。

2. 实验器材

气垫导轨及滑块、计时器、光电门、气泵、电子天平、配重块、尼龙搭扣（或橡皮泥）等。

3. 实验原理

当两滑块在水平导轨上沿直线做对心碰撞时，若忽略滑块运动过程中受到的黏滞性阻力和空气阻力，则两滑块在水平方向除受到碰撞时相互作用的内力外，不受其他力的作用，根据动量守恒定律，两滑块的总动量在碰撞前后保持不变^[22,28]。

如图 3.5-4 所示，滑块 1、2 的质量分别为 M_1 、 M_2 ，碰撞前的速度分别为 v_{10} 、 v_{20} ，碰撞后的速度分别为 v_1 、 v_2 ，则根据动量守恒定律有

$$M_1 v_{10} + M_2 v_{20} = M_1 v_1 + M_2 v_2 \quad (3.5-6)$$

写成标量形式为

$$M_1 v_{10} + M_2 v_{20} = M_1 v_1 + M_2 v_2 \quad (3.5-7)$$

式中各速度均为代数值，值的正负号取决于速度的方向与所选取的坐标轴方向是否一致。

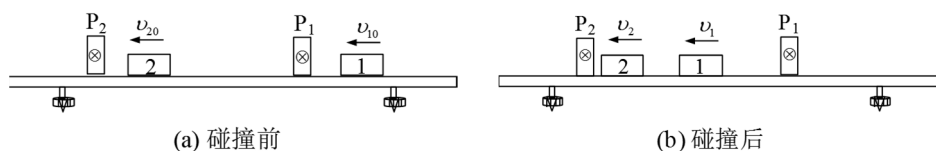


图 3.5-4 碰撞实验原理图

一般来说，按两物体碰撞前后的相对速度把碰撞分成以下几类：碰撞前后的相对速度相等的碰撞称为完全弹性碰撞，碰撞后的相对速度为 0（碰撞后两物体以同一速度运动）的碰撞称为完全非弹性碰撞，碰撞后的相对速度小于碰撞前的相对速度的碰撞称为非完全弹性碰撞。

恢复系数定义为碰撞后的相对速度与碰撞前的相对速度的比值，用 e 表示，即

$$e = \frac{v_2 - v_1}{v_{10} - v_{20}} \quad (3.5-8)$$

上面三类碰撞的总动能因碰撞物体的材料性质不同而不同，碰撞前后总动能的变化为

$$\begin{aligned}\Delta E_k &= \frac{1}{2}(M_1 v_1^2 + M_2 v_2^2) - \frac{1}{2}(M_1 v_{10}^2 + M_2 v_{20}^2) \\ &= \frac{M_1 M_2}{2(M_1 + M_2)}(1 - e^2)(v_{10} - v_{20})^2\end{aligned}\quad (3.5-9)$$

1) 完全弹性碰撞

$e=1$, $\Delta E_k=0$, 即无动能损失。在这种情况下, 碰撞后两滑块的速度分别为

$$v_1 = \frac{(M_1 - M_2)v_{10} + 2M_2 v_{20}}{M_1 + M_2} \quad (3.5-10)$$

$$v_2 = \frac{(M_2 - M_1)v_{20} + 2M_1 v_{10}}{M_1 + M_2} \quad (3.5-11)$$

若两滑块质量相等, 即 $M_1 = M_2 = M$, 且 $v_{20} = 0$, 则由式 (3.5-10) 和式 (3.5-11) 可得

$$v_1 = 0, v_2 = v_{10} \quad (3.5-12)$$

这表示两滑块在碰撞前后交换了速度。

若 $M_1 \neq M_2$, 但 $v_{20} = 0$, 则有

$$v_1 = \frac{(M_1 - M_2)v_{10}}{M_1 + M_2} \quad (3.5-13)$$

$$v_2 = \frac{2M_1 v_{10}}{M_1 + M_2} \quad (3.5-14)$$

2) 完全非弹性碰撞

$e=0$ 时, 总动能的变化为

$$\Delta E_{km} = \frac{M_1 M_2}{2(M_1 + M_2)}(v_{10} - v_{20})^2 \quad (3.5-15)$$

即动能损失最大。

若 $M_1 = M_2$, 且 $v_{20} = 0$, 碰撞后两滑块黏在一起, 以相同的速度运动, 即 $v_1 = v_2 = v$, 则可得

$$v = \frac{v_{10}}{2}$$

如果质量不相等, 但 $v_{20} = 0$, 则有

$$v = \frac{M_1 v_{10}}{M_1 + M_2} \quad (3.5-16)$$

3) 非完全弹性碰撞

恢复系数 e 在 $0 \sim 1$ 之间, 动能损失 ΔE_k 在 0 到 ΔE_{km} 之间。

4. 实验内容及步骤

1) 观测完全弹性碰撞

实现完全弹性碰撞所用的附件有很多, 可在滑块的端部装弹性极佳的缓冲弹簧, 也可装小磁铁, 还可在特制的碰撞叉上装橡皮筋, 这些附件只要安装和调节得当, 都可获得满意的实验效果。本实验采用装缓冲弹簧的方法实现完全弹性碰撞。

(1) 把导轨调成水平状态。

(2) 把两个光电门置于导轨中部相距一定距离处, 以便能测量、记录滑块在碰撞前后的两个时间, 取两个带有缓冲弹簧且质量相等的滑块, 其中滑块 2 静止放置在光电门 P_2 附近, 用安装在导轨端的橡皮筋发射器把滑块 1 (质量为 M_1) 以一定的速度发射出去, 分别由光电门 P_1 和 P_2 测量出碰撞前滑块 1 及碰撞后滑块 2 的速度。重复多次, 计算碰撞前后动量及动能的百分差, 验证弹性碰撞中动量是否守恒。

(3) 用不同质量的滑块 (在滑块 1 上加配重块) 重复上述实验, 测量出 u_{10} 、 u_1 和 u_2 , 验证式 (3.5-13)、式 (3.5-14), 以及碰撞前后动量是否守恒。

2) 观测完全非弹性碰撞

有多种方法可实现完全非弹性碰撞, 即碰撞后两滑块黏在一起以同一速度运动, 比较常用的是采用尼龙搭扣或橡皮泥。尼龙搭扣也称尼龙黏胶带, 把它安装在碰撞面上, 两滑块在碰撞后就能很好地黏在一起, 其缺点是碰撞后滑块会微微振动, 引起误差。在尼龙搭扣的内侧垫上一小块软橡皮, 就能有效避免振动。用橡皮泥来实现完全非弹性碰撞效果较好, 但缺点是橡皮泥黏在碰撞面上要敷贴平整, 要求较高。橡皮泥的另一缺点是冬天容易发硬, 缺少黏性。

测量方法同前, 为了避免同时测量几个时间, 使滑块 2 在碰撞前保持静止, 即 $u_{20} = 0$ 。然后分别对相同质量和不同质量的滑块进行测量, 验证完全非弹性碰撞中的动量守恒定律。

5. 注意事项

(1) 气垫导轨表面和气孔是精密加工而成的, 在实验中必须小心操作, 避免导轨因碰撞、摩擦而变形、损伤。没有给导轨通气时, 禁止在导轨上强行推动滑块。

(2) 导轨轨面及滑块不得磕碰, 滑块应轻拿轻放, 严防滑块跌落受损; 实验时滑块的速度不能太快, 以免在与导轨两端缓冲弹簧碰撞后跌落受损。

(3) 为使被碰滑块在碰撞前静止, 可用手轻扶滑块, 直至快要碰撞时放开。

(4) 实验中推动滑块时要轻缓, 应尽量避免滑块因碰撞而振动。

(5) 完成实验后, 应及时取下滑块。

6. 实验数据记录与处理

1) 完全弹性碰撞

(1) 自己设计表格, 记录滑块 1 及滑块 2 的质量、碰撞前后滑块 1 及滑块 2 的速度, 计算完全弹性碰撞前后动量及动能的百分差, 验证弹性碰撞中动量是否守恒。

(2) 自己设计表格, 记录滑块 1 及滑块 2 的质量、碰撞前后滑块 1 及滑块 2 的速度, 验证式 (3.5-13)、式 (3.5-14) 以及碰撞前后动量是否守恒。

2) 完全非弹性碰撞

自己设计表格, 记录滑块 1 及滑块 2 的质量、碰撞前后滑块 1 及滑块 2 的速度, 验证完全非弹性碰撞中动量是否守恒。

7. 思考题

(1) 实验中怎样实现系统所受的合外力为零?

(2) 碰撞实验中两个光电门之间的距离应如何设置? 为什么?

3.6 稳态法测量热导率

热导率也称导热系数，是表征材料热传导性质的物理量。材料结构的变化与所含杂质的不同对热导率都有明显的影响，因此，材料的热导率通常需要通过实验来测定。

测量热导率的实验方法一般分为稳态法和动态法。在稳态法中，先利用热源对样品加热，样品内部的温差使热量从高温向低温传导，样品内部各点的温度将随加热速率和传热速率的变化而变动；适当控制实验条件和实验参数使加热和传热的过程达到平衡状态，待测样品内部就会形成稳定的温度分布，根据这一温度分布就可以计算出热导率。在动态法中，最终在样品内部所形成的温度分布是随时间变化的，变化的周期和幅度受实验条件和加热速率的影响。

热导率大、导热性能较好的材料称为热的良导体，可作为导热材料；而热导率小、导热性能较差的材料称为热的不良导体，可作为保温材料（也称为隔热材料）。一般来说，气体的热导率最小，固体的热导率比液体大，金属的热导率比非金属大。

本实验采用稳态法测量热的不良导体的热导率。

1. 实验目的

- (1) 掌握稳态法测量热的不良导体热导率的方法。
- (2) 了解物体散热速率和传热速率的关系。

2. 实验器材

热导率测定仪、待测样品、电子天平、游标卡尺。

3. 实验原理

当物体内部各处的温度不均匀时，就会有热量从温度较高处传递到温度较低处，这种现象称为热传导现象。无论固体、液体还是气体，都能以热传导的方式传递热量。1822年，法国著名数学家、物理学家约瑟夫·傅里叶提出了热传导的基本定律。

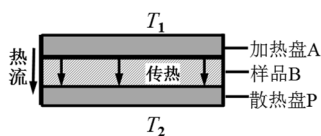


图 3.6-1 实验装置示意图

如图 3.6-1 所示，将样品制成平板状，其上端面与稳定加热盘 A 充分接触，下端与均匀散热盘 P 充分接触。由于平板状样品的侧面积比底面积小得多，由侧面散去的热量可以忽略不计，因此可以认为热量只沿着垂直于样品平面的方向传递，即只在此方向上有温度梯度，在样品内同一平面上，各处的温度相同。

设稳态时，样品的上下平面温度分别为 T_1 、 T_2 ，根据傅里叶传导方程，在 Δt 时间内通过样品的热量 ΔQ 满足

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{h_B} S \quad (3.6-1)$$

式中， $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ 为热流量，即传热速率； h_B 为样品的厚度； S 为样品的平面面积； λ 为样品的热导率（ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ），在数值上等于相距单位长度的两平行平面温度相差 1 K 时，在单位时间内垂直通过单位面积的热量。

实验中的样品为圆盘状，设圆盘状样品的直径为 d_B ，则由式 (3.6-1) 得

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{4h_B} \pi d_B^2 \quad (3.6-2)$$

单位时间内通过截面积的热量 $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ 很难直接测量，只能设法将这个量转化为较为容易测量的量。实验中，加热盘 A 加热时，热量通过样品 B 传到散热盘 P，当传热达到稳定状态时，样品上下表面的温度 T_1 和 T_2 不变，这时可以认为加热盘 A 通过样品传递的热流量与散热盘 P 向周围环境散发的热量（散热速率）相等。因此，可以通过散热盘 P 在稳定温度 T_2 时的散热速率来求出热流量 $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ 。

实验时，当测得稳态时的样品上、下表面温度 T_1 和 T_2 后，将样品 B 移开，让加热盘 A 与散热盘 P 接触，当散热盘 P 的温度上升到高于稳态时温度 T_2 约 10°C 后，移开加热盘 A，让散热盘 P 在风扇作用下冷却，观察散热盘 P 的温度 T 随时间 t 的变化情况，求出散热盘 P 在 T_2 时的冷却速率 $\left. \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_{T=T_2}$ ，则散热盘 P 在 T_2 时的散热速率为

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = mc \left. \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_{T=T_2} \quad (3.6-3)$$

式中， m 为散热盘 P 的质量； c 为其比热容（详见附表 C-13）。

但要注意，式 (3.6-3) 中的冷却速率 $\left. \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_{T=T_2}$ 是散热盘 P 的全部表面暴露于空气中的冷却速率，其散热表面积是 $2\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p$ （ R_p 与 h_p 分别为散热盘 P 的半径与厚度）。然而，在样品达到稳态的过程中，散热盘 P 的上表面是被样品覆盖着的，并未暴露在空气中，根据物体的冷却速率与其散热表面积成正比的原理，散热盘 P 上表面的面积在计算时应予以扣除。因此，稳态时散热盘 P 的散热速率的表达式应修正为

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = mc \left. \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_{T=T_2} \frac{(\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p)}{(2\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p)} \quad (3.6-4)$$

由式 (3.6-2) 和式 (3.6-4) 可得

$$\lambda \frac{T_1 - T_2}{4h_B} \pi d_B^2 = mc \left. \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_{T=T_2} \frac{(\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p)}{(2\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p)} \quad (3.6-5)$$

则样品的热导率

$$\lambda = mc \left. \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_{T=T_2} \frac{(R_p + 2h_p)}{(2R_p + 2h_p)} \frac{4h_B}{(T_1 - T_2)} \frac{1}{\pi d_B^2} \quad (3.6-6)$$

4. 实验内容及步骤

(1) 用游标卡尺（详见 2.2.1 节）分别测量样品盘和散热盘的厚度、直径各 3 次，然后取平均值；用电子天平测量散热盘的质量。

(2) 热导率测定仪如图 3.6-2 所示。将样品盘放在加热盘与散热盘中间，使加热盘和散热盘上放置温度传感器的小孔上下对齐。调节底部的三颗微调螺钉，使样品盘与加热盘、散热盘接触良好。

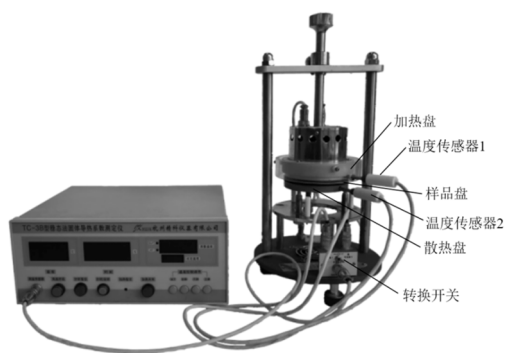


图 3.6-2 热导率测定仪

(3) 将两个温度传感器涂抹导热硅脂后，分别插入加热盘和散热盘，以确保传感器与加热盘和散热盘接触良好。两个温度传感器共用一个显示器，使用转换开关进行切换。

(4) 开启电源，设定加热温度为 $65.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，按加热开关，打开散热风扇。

(5) 当加热盘的温度上升到设定温度时，开始观察散热盘的温度，若在 15 min 或更长时间内加热盘和散热盘的温度值基本不变，可以认为系统已经达到稳态，记录稳态时加热盘和散热盘的温度 T_1 和 T_2 。

(6) 停止加热，向上提起加热盘，移去样品盘；将加热盘直接放在散热盘上，调节三颗微调螺钉使加热盘和散热盘接触良好，给散热盘加热，使散热盘温度上升到高于稳态时的温度 T_2 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

(7) 停止加热，向上提起并固定好加热盘，让散热盘在风扇作用下冷却，待散热盘温度降到 $T_2 + 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时，每隔 20 s 记录一次散热盘的温度，选取 20 组数据，确保 T_2 位于数据组的中段，用作图法计算冷却速率 $\left. \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_{T=T_2}$ 。

(8) 根据稳态时测得的温度 T_1 和 T_2 ，以及在温度 T_2 时的冷却速率，由式 (3.6-6) 计算样品的热导率。

5. 注意事项

(1) 为了准确测定加热盘和散热盘的温度，实验中应该在两个温度传感器上涂抹导热硅脂，使温度传感器和加热盘、散热盘充分接触，避免因温度传感器接触不良造成温度测量不准。

(2) 加热样品盘时，为实现稳定的传热，调节底部的三颗微调螺钉，使样品盘与加热盘、散热盘紧密接触，不要有空气间隙；也不要将微调螺钉旋得太紧，以免影响样品盘的厚度。

(3) 实验中，抽出样品盘时，应先旋松加热圆筒上端的固定螺钉；取出样品盘后，小心将加热圆筒降下，使加热盘与散热盘接触，重新拧紧固定螺钉。

(4) 热导率测定仪下方的散热风扇用于强迫对流换热，可减小样品盘侧面与底面的散热比，增加样品盘内部竖直方向的温度梯度，从而减小实验误差，所以实验过程中，风扇要始终打开。

(5) 实验操作过程中要注意防止高温烫伤。

6. 实验数据记录与处理

1) 待测样品和散热盘尺寸及质量的测量

自己设计表格，记录待测样品的直径 d_B 、厚度 h_B ，散热盘（紫铜）的比热容 c 、质量 m 、直径 d_p 、厚度 h_p 。

2) 测量散热盘 P 的冷却速率 $\frac{\Delta T}{\Delta t}$

(1) 自己设计表格，记录稳态时样品上、下表面温度 T_1 、 T_2 ，散热盘冷却时间 t 与温度 T 。

(2) 根据散热盘冷却数据作冷却曲线, 用作图法作曲线在 T_2 点的切线, 根据切线斜率求出冷却速率 $\left. \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_{T=T_2}$, 代入式 (3.6-6) 计算样品的热导率。

7. 思考题

- (1) 用稳态法是否可以测量热的良导体的热导率? 如果可以, 对实验样品有什么要求? 在实验方法上与测热的不良导体的热导率有什么区别?
- (2) 待测圆盘是厚一点好还是薄一点好? 为什么?
- (3) 实验过程中, 环境温度的变化对实验有无影响? 为什么?
- (4) 样品几何尺寸的测量应在实验前还是在实验后进行?

3.7 金属线膨胀系数的测量

绝大多数物质具有“热胀冷缩”的特性, 这是物体内部分子热运动加剧或减弱造成的。这个特性在工程结构设计、设备制造、材料加工中都应予以考虑, 否则, 将影响结构的稳定性和设备的准确度, 甚至会造成设备失灵、材料加工缺陷或失败等。

1. 实验目的

- (1) 掌握测量金属线膨胀系数的方法。
- (2) 学会用千分表测量长度的微小增量。

2. 实验器材

金属线膨胀系数测定仪、千分表。

3. 实验原理

材料的线膨胀是材料受热膨胀时在一维方向的伸长。固体受热后其长度的增加称为线膨胀。经验表明, 在一定的温度范围内, 原长为 L 的物体, 受热后其伸长量 ΔL 与其温度的增加量 Δt 及原长 L 成正比, 即

$$\Delta L = \alpha L \Delta t \quad (3.7-1)$$

式中, α 称为固体的**线膨胀系数**, 简称线胀系数。

大量实验表明, 不同材料的线胀系数不同, 塑料的线胀系数最大, 金属次之, 殷钢和石英玻璃的线胀系数很小。殷钢和石英玻璃的这一特性使其在精密测量仪器的制造中有较多的应用。实验还发现, 同一材料在不同温度区域的线胀系数不一定相同, 某些合金在金相组织发生变化的温度附近会出现线胀系数突变的现象。另外, 线胀系数还与材料纯度有关, 某些材料掺杂后, 线胀系数变化很大, 因此, 测定线胀系数也是了解材料特性的一种手段。

在温度变化不大的范围内, 线胀系数可认为是一个常量^[30,31]。为了测量线胀系数, 一般将材料做成条状或管状。由式 (3.7-1) 可知, 测量出温度 t_1 时的管长 L 、受热后温度从 t_1 升高到 t_2 时的伸长量 ΔL 和受热前后的温度升高量 Δt ($\Delta t = t_2 - t_1$), 则该材料在 (t_1, t_2) 温度区域的线胀系数为

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L \Delta t} \quad (3.7-2)$$

式中, α 为线胀系数 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$), 其物理意义是固体材料在 (t_1, t_2) 温度区域内, 每升高 1°C 材料的相对伸长量。

测量线胀系数的主要问题是如何测量伸长量 ΔL 。先粗略估算 ΔL 的大小, 若 $L = 250 \text{ mm}$, 温度变化 $\Delta t \approx 100^{\circ}\text{C}$, 金属线胀系数的数量级为 $10^{-5}^{\circ}\text{C}^{-1}$, 估算 $\Delta L = \alpha L \Delta t \approx 0.25 \text{ mm}$ 。对于这么微小的伸长量, 用普通量具无法准确测量, 可采用千分表 (分度值为 0.001 mm)、读数显微镜、光杠杆放大法、光学干涉法等进行测量。本实验用分度值为 0.001 mm 的千分表测量微小的伸长量。

4. 实验内容及步骤

- (1) 在室温下用米尺测量待测金属管 (空心铜管、铝管) 的原有长度 3 次, 并求平均值。
- (2) 把空心铜管、铝管安装在测试架上, 参照图 3.7-1 连接好皮管, 打开电源开关, 可从仪器面板水位屏幕上观察水位情况, 水箱容积大约为 750 mL 。
- (3) 将待测铜管 (或铝管) 对应的温度传感器信号输出插座与测定仪的温度传感器插座相连接。将千分表 (详见 2.2.1 节) 装在待测铜管 (或铝管) 的自由伸缩端固定位置上, 使千分表测试端与待测介质接触。为了保证接触良好, 一般可使千分表初读数为 0.2 mm 左右, 不必调零。
- (4) 设置待测金属管的加热温度 (例如 35.0°C)。
- (5) 测量时, 按下加热按钮 (高速或低速均可, 低速挡由于功率小, 一般最多只能加热到 50.0°C 左右), 观察被测金属管温度的变化, 直至金属管温度等于所需温度。

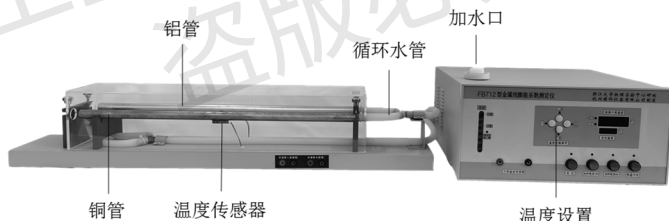


图 3.7-1 金属线膨胀系数测定仪

- (6) 在 $35.0 \sim 70.0^{\circ}\text{C}$ 间, 每隔 5.0°C , 记录样品温度及千分表读数。
- (7) 用逐差法求出温度每升高 5°C 金属管的平均伸长量, 再由式 (3.7-2) 求出金属管在 $(35.0^{\circ}\text{C}, 70.0^{\circ}\text{C})$ 温度区域的线胀系数。

5. 注意事项

- (1) 测量中更换待测金属管时只需将固定螺钉旋出即可, 装置其他部分不动。
- (2) 为了避免在系统缺水的情况下加热器加热, 仪器设置了缺水报警和保护系统, 循环水一旦缺少, 设备将自动停机, 只有水量足够时才能恢复正常。
- (3) 加热按钮按下时, 强制冷却功能被锁住, 只有按下复位键, 先停止加热, 强制风冷降温功能才能启动。在加热或降温工作状态下, 热水泵总是处于工作状态, 只有按复位键, 热水泵才停止工作。
- (4) 若设备长期不用, 应从主机底部放水阀门把水放掉。

6. 实验数据记录与处理

1) 金属管（空心铜管、铝管）长度的测量

自己设计表格，记录空心铜管、铝管的有效长度。有效长度等于总长度减去固定螺钉外的一小段（约 5 mm）。

2) 待测金属管（空心铜管、铝管）伸长量 ΔL 的测量

自己设计表格，记录空心铜管、铝管的温度及千分表读数。

3) 线胀系数 α 的计算

用逐差法求出温度每升高 5.0 °C 空心铜管、铝管的平均伸长量，再由式 (3.7-2) 求出它们在 (35.0 °C, 70.0 °C) 温度区域的线胀系数 $\alpha_{\text{铜}}$ 和 $\alpha_{\text{铝}}$ 。

7. 思考题

- (1) 利用千分表读数时应注意哪些问题？如何消除误差？
- (2) 若实验过程中加热时间过长，仪器支架受热膨胀，对实验结果将产生怎样的影响？

3.8 模拟法描绘静电场

电场可以用电场强度 E 描述，也可以用电势的空间分布描述。电势是标量，在计算与测量电场分布时使用起来更为方便。

带电体周围的电场，除电荷分布比较规则的简单情况外，一般很难用数学公式计算出电场中的电势分布，只能用实验的方法测量。但对静电场而言，直接测量它的电势分布很困难，因为任何测量工具被引入静电场后受电场作用都会产生感应或束缚电荷，从而引起被测静电场分布产生畸变。采用模拟测量法（详见 2.1.6 节）可以解决这一问题^[34]。

本实验构造了一个稳恒电流场，使它与要测绘的静电场具有相同的分布规律。使用探针去探测稳恒电流场时，该场不会受到干扰，这样就可以间接地测绘出静电场的分布。同样，可以用稳恒电流场模拟稳定热流场的分布。

1. 实验目的

- (1) 了解模拟法的概念和使用模拟法的条件。
- (2) 掌握用模拟法测量和研究静电场的基本方法。
- (3) 测量给定形状的电极间的电场分布，加深对电场强度和电势的理解。

2. 实验器材

静电场模拟测绘仪。

3. 实验原理

1) 用稳恒电流场模拟静电场

静电场与稳恒电流场在本质上是完全不同的两个场，但是它们之间在一定条件下具有相似的空间分布，即两个场遵守的规律在形式上相似，它们可用表 3.8-1 中的两组对应的物理量

及其遵循的规律来表述。

表 3.8-1 静电场和稳恒电流场的对应关系

静 电 场	稳恒电流场
电介质中带电体所带电量 Q	导电介质中电极流过的电流 I
电势分布函数 U	电位分布函数 U
电场强度矢量 $\boldsymbol{E}$	电场强度矢量 $\boldsymbol{E}$
介质介电常数 ε	媒质电导率 σ
电位移矢量 $\boldsymbol{D} = \varepsilon \boldsymbol{E} = -\varepsilon \nabla U$	电流密度矢量 $\boldsymbol{J} = \sigma \boldsymbol{E} = -\sigma \nabla U$
在无自由电荷分布区域 $\nabla^2 U = 0$	在均匀介质中 $\nabla^2 U = 0$
介质内无自由电荷时 $\oiint \boldsymbol{D} \cdot d\boldsymbol{S} = 0$	导电介质内无电流时 $\oiint \boldsymbol{J} \cdot d\boldsymbol{S} = 0$
在无自由面电荷分布的界面上 $U = \text{恒量}, \quad \varepsilon_1 \left(\frac{\partial U}{\partial n} \right)_1 = \varepsilon_2 \left(\frac{\partial U}{\partial n} \right)_2$	在不同导体的分界面上 $U = \text{恒量}, \quad \sigma_1 \left(\frac{\partial U}{\partial n} \right)_1 = \sigma_2 \left(\frac{\partial U}{\partial n} \right)_2$

由此可见，静电场和稳恒电流场服从相同的偏微分方程，也满足相同类型的边界条件，即它们所遵循的数学规律是相同的。根据电动力学的理论可以证明，只要方程和边界条件相同，它们的解就应该相同，所以这两个场的分布相同。

2) 同轴电缆的电场分布

如图 3.8-1 (a) 所示，两个同轴圆柱形电极中间充满均匀电介质（同轴电缆），当两个电极分别带上等量异号电荷时，其间分布着图 3.8-1 (b) 所示的辐射状电场，即在横截面上电场线呈辐射状，等势线为同心圆。根据高斯定理，其电场强度

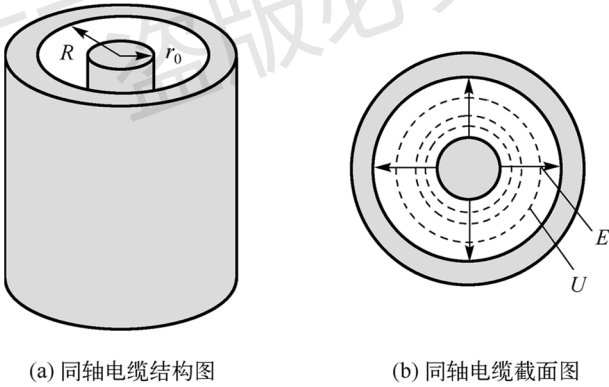


图 3.8-1 同轴电缆及其静电场分布

$$\begin{cases} E = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon r} = K \frac{1}{r}, & r_0 \leq r \leq R \\ E = 0 & , \quad r_0 > r \text{ 或 } r > R \end{cases} \quad (3.8-1)$$

式中， λ 为轴线所带电荷的线密度； r 为任一点到轴线的垂直距离； R 为外电极的内半径； r_0 为内电极的半径。

如图 3.8-2 所示，为了模拟静电场，将导电性能良好的材料做成电极，涂在导电性均匀的导电玻璃上，与直流电源相接。这样，电流将从内电极流向 electrodes。由于导电玻璃的导电性是均匀的，所以电流在同一圆周上任一处的电流密度 $\boldsymbol{J}$ 大小相等，当电流为 I 时，在半径 r 处，电流

密度大小为

$$J = \frac{I}{2\pi r} \quad (3.8-2)$$

由欧姆定律的微分形式 $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ 可知, r 处的电场强度大小为

$$E' = \frac{I}{2\pi\sigma R} = K' \frac{1}{r} \quad (3.8-3)$$

此式与式 (3.8-1) 具有相同的数学表达形式, 所以可以用它来模拟同轴电缆的静电场。

用电压表测量出导电玻璃上各点的电势 (测量各点与外电极的电势差), 画出等势线和电场线, 就可得到被模拟的静电场的分布。

由电学理论可知, 电场中任意两点间的电势差等于在电场力作用下将单位正电荷由一点移到另一点 (位移 l) 电场力所做的功。设内电极的半径为 r_0 , 外电极的内半径为 R , 环内任一点 (半径为 r) 与外电极间的电势差为

$$U'_r - U_R = - \int_R^r E dl = \int_r^R K \frac{1}{r} dr = K \ln \frac{R}{r} \quad (3.8-4)$$

设 $U_{r_0} - U_R = U_0$, 则

$$U_0 = K \ln \frac{R}{r_0} \quad (3.8-5)$$

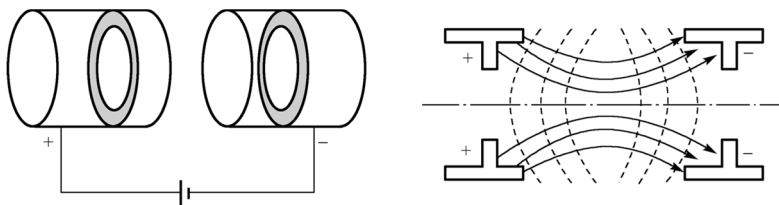
这样环内任一点与外电极间的电势差为

$$U_r = U'_r - U_R = U_0 \frac{\ln \frac{R}{r}}{\ln \frac{R}{r_0}} \quad (3.8-6)$$

此式是同轴电极电势分布的理论规律, 可将实验结果与之进行对比。

3) 示波管中聚焦电场的模拟

如图 3.8-3 (a) 所示, 示波管中聚焦电极为两个筒形电极, 筒形电极中装有带有中孔的金属板, 其纵剖面如图 3.8-3 (b) 所示。聚焦电场 (两极加压时形成的电场) 的等势线在两极中的形状如凸透镜, 对穿过该电场的电子束有聚焦作用。



(a) 聚焦电极结构图

(b) 聚焦电极纵剖面

图 3.8-3 聚焦电极及其静电场分布

类似上述模拟方法, 给按图 3.8-3 (b) 所示的聚焦电极的纵剖面特征制作的模拟电极加上电压, 即可测量出电极间相应各点的电势分布, 进而可描绘出等势线和电场线, 这样就展现出了聚焦电场的分布及特征。

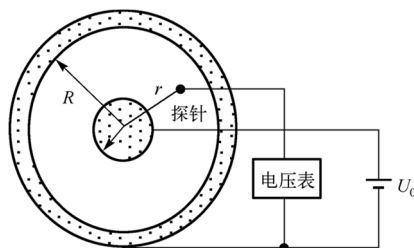


图 3.8-2 同轴电缆的模拟图

4. 实验内容及步骤

静电场描绘仪如图 3.8-4 所示。仪器分上、下两层，下层为导电玻璃及模拟电极，上层用于铺放记录纸。可自由移动的金属探针架上、下两臂相互平行，并分别在端头装有探针，当探针架在水平面上平移时，上、下探针将各自划出完全相同的图线。

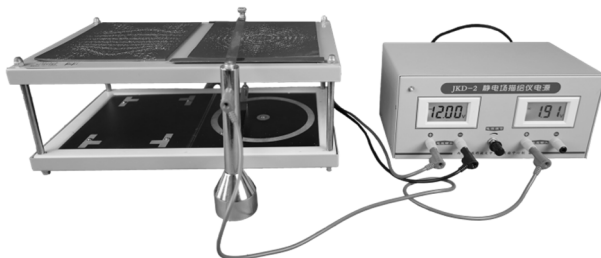


图 3.8-4 静电场描绘仪

1) 同轴电缆电场横截面的模拟测量

- (1) 按图 3.8-2 将电源与静电场描绘仪的同轴电极相连接。
- (2) 将下探针放置在中间电极上，调节专用稳压电源，使两极间电压 U_0 约为 12.00 V。
- (3) 下探针分别与内电极外侧、外电极内侧任意三点（注意：应保证电压分别为 U_0 和 0）相接触，用上探针将相应的点记录在记录纸上。分别用这六点找出圆心，测量出内电极的半径 r_0 和外电极的内半径 R 。
- (4) 平移探针，分别在导电玻璃上测绘出电压为 1.00 V、2.00 V、3.00 V、4.00 V、6.00 V、8.00 V 共 6 条等势线，每条等势线在记录纸上应均匀、对称地记录至少 8 个点。

2) 聚焦电极间电场的模拟

- (1) 将电源与静电场描绘仪的聚焦电极相连接。
- (2) 调节专用稳压电源，使两极间电压 U_0 约为 12.00 V。
- (3) 将下探针分别与各电极的各棱角相接触，在记录纸上记录下相应的位置，描绘出电极的形状。
- (4) 分别测绘出 1.50 V、3.00 V、4.50 V、6.00 V、7.50 V、9.00 V、10.50 V 共 7 条等势线，每条等势线上相邻两测绘点间距应在 1 cm 左右，等势线密集处相邻两点的间距应更小一些。

5. 注意事项

- (1) 测量中，移动探针架时必须平行移动。
- (2) 下探针在导电玻璃上应缓慢移动，以免划伤导电玻璃，破坏其导电均匀性。

6. 实验数据记录与处理

1) 同轴电缆电场的模拟

- (1) 在记录纸上绘出电极、等势线和电场线。
- (2) 自己设计表格，记录内电极半径 r_0 、外电极内半径 R 、两极间电压 U_0 、等势线上各点到圆心的距离。
- (3) 自己设计表格，计算各等势线的电势理论值 U_{r_0} 和百分差。

2) 聚焦电极电场的模拟

在记录纸上绘出电极、等势线和电场线。

7. 思考题

- (1) 实验时, 应选用内阻较高的电压表, 否则会对实验结果有何影响?
- (2) 电源电压大幅增加或减少, 等势线、电场线的形状是否会发生变化? 电场强度和电势分布是否会发生变化?
- (3) 实验结果能否说明导电玻璃的导电性是均匀的?
- (4) 模拟法的特点是什么? 本实验属于物理模拟还是数学模拟?

3.9 元件的伏安特性

根据欧姆定律, 测量出电阻两端的电压及通过该电阻的电流, 就可计算出阻值, 这种测量电阻阻值的方法称为伏安法。伏安法原理简单、操作方便, 但由于电压表或电流表内阻的影响, 需要选择合适的实验方法和仪器, 修正电表(电压表或电流表)内阻的影响后才能获得较准确的结果^[35]。

1. 实验目的

- (1) 掌握常用的基本电学仪器的使用方法。
- (2) 掌握用伏安法测量电子元件阻值的方法。
- (3) 了解电子元件的伏安特性曲线。

2. 实验器材

直流稳压电源、电压表、电流表、滑动变阻器、待测电阻、单刀双掷开关等。

3. 实验原理

1) 伏安特性曲线

- (1) 线性电阻元件。

实验室常用的线绕电阻、碳膜电阻和金属膜电阻等都具有以下特性: 加在电阻两端的电压与通过的电流成正比(忽略电流热效应对电阻的影响), 即满足欧姆定律。若以横轴表示电流, 纵轴表示电压, 可得到一条直线, 该直线即为该电阻的**伏安特性曲线**。伏安特性曲线为直线的电阻元件称为线性电阻元件。

- (2) 非线性电阻元件。

不满足欧姆定律或加在电阻两端的电压与通过的电流不呈线性关系的电阻元件, 称为非线性电阻元件, 如热敏电阻、二极管、灯泡等。非线性电阻元件的特点是电阻随加在它两端电压的改变而改变, 其伏安特性曲线上各点的电压与电流的比值不是一个常数, 一般用伏安特性曲线来反映非线性电阻元件的这种特性。

2) 伏安法的两种接线方式

伏安法测电阻阻值有两种接线方式, 分别为电流表内接法和电流表外接法。

(1) 电流表内接法。

电流表内接法如图 3.9-1 (a) 所示, 电流表与待测电阻串联后, 再与电压表并联。此时, 电流表上的读数与流过待测电阻 R_x 的电流相等, 但是电压表上的读数 U_{AB} 则包括了待测电阻 R_x 上的电压 U_x 和电流表 (电流表内阻 R_A) 两端的电压 U_A , 即

$$U_{AB} = U_x + U_A = I(R_x + R_A) \quad (3.9-1)$$

则

$$R_x = \frac{U_x}{I} = \frac{U_{AB}}{I} - R_A = R_{AB} - R_A \quad (3.9-2)$$

式中, $R_{AB} = \frac{U_{AB}}{I}$ 为由实验测量中电压表、电流表的读数计算出的结果; R_x 为修正了电流表内阻 R_A 的影响之后的结果。

由式 (3.9-2) 可知, 当 $R_x \gg R_A$ 时, $R_x \approx R_{AB}$ 。由于电流表的内阻一般很小, 只有几欧姆或更小, 所以当待测电阻的阻值大于几千欧姆时, 一般可采用电流表内接法来测量阻值, 这时电流表的内阻对测量结果的影响较小, 通常可以忽略不计。

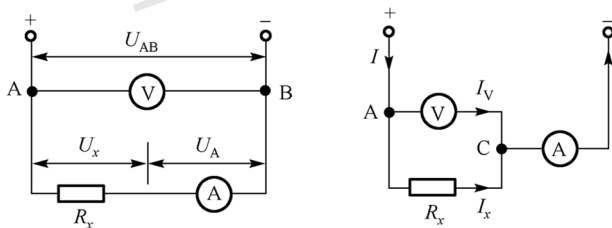
(2) 电流表外接法。

电流表外接法如图 3.9-1 (b) 所示, 电压表与 R_x 并联后再与电流表串联。此时, 电压表的读数 U_{AC} 就是 R_x 上的电压 U_x , 而电流表的读数 I 包括了电阻 R_x 上的电流 I_x 和流过电压表 (内阻为 R_V) 的电流 I_V , 即

$$I = I_x + I_V = U_{AC} \left(\frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_V} \right) \quad (3.9-3)$$

则

$$\frac{I}{U_{AC}} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_V} \quad (3.9-4)$$



(a) 电流表内接法

(b) 电流表外接法

图 3.9-1 伏安法测电阻阻值的两种接法

设 A、C 之间的阻值为 $R_{AC} = \frac{U_{AC}}{I}$, 则

$$\frac{1}{R_{AC}} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_V} \quad (3.9-5)$$

$$R_x = \frac{R_{AC} R_V}{R_V - R_{AC}} \quad (3.9-6)$$

R_x 为修正了电压表内阻 R_V 的影响之后的结果。

由式 (3.9-6) 可知, 当 $R_V \gg R_x$ 时, $R_x \approx R_{AC}$ 。电压表的内阻较大, 其阻值一般为几千欧

姆或更大,所以当待测电阻的阻值相对较小时,可采用电流表外接法测量其阻值,这时电压表的内阻对测量结果的影响就可以忽略不计。

实际测量时常采用多次测量的方法,改变测量电路中的电压和电流,得到一组电压值或电流值,绘制元件伏安特性曲线。纯电阻的伏安特性曲线应该是一条通过原点的直线,利用作图法求出直线的斜率即可求出元件的阻值。

4. 实验内容及步骤

实验电路如图 3.9-2 所示,当 K_2 合向 1 端时为电流表内接电路,当 K_2 合向 2 端时为电流表外接电路。

1) 测量线性电阻元件的阻值

调节直流稳压电源输出合适的电压,合理选择电压表、电流表(详见 2.2.5 节)的量程,用电流表内接法测量待测电阻的阻值($R_{x1} \approx 330.0 \Omega$, $R_{x2} \approx 1\,000 \Omega$)。测量时,电压表、电流表的指针偏转均应在满刻度的 $2/3$ 以上。

2) 绘制线性电阻元件的伏安特性曲线

选取 $R_{x1} = 330.0 \Omega$ 的电阻,用电流表外接电路测定电阻的伏安特性并绘制该电阻的伏安特性曲线。适当选择电流表、电压表的量程,使电压表的指针偏转在 $2/3$ 满刻度以上,均匀改变电压值 8 次,记录电压值及相应的电流值。

3) 绘制非线性电阻元件的伏安特性曲线

用电流表外接电路测定灯泡的伏安特性并绘制灯泡的伏安特性曲线。适当选择电流表、电压表的量程,从 0 mA 开始每隔 10 mA 左右记录一次电流值和对应的电压值,测量过程中注意灯泡两端的电压值不得超过额定电压。

5. 注意事项

- (1) 适当选择电源电压,以防烧坏电阻元件。
- (2) 通电前,滑动变阻器的滑动端应滑到分压最小处。
- (3) 测量前,应先校准电流表、电压表的零点。
- (4) 注意电表的极性,严禁在带电状态下换接电路。
- (5) 电压表、电流表要选择合适的量程,读数时原则上要使指针位于 $2/3$ 满刻度以上。

6. 实验数据记录与处理

1) 电流表内接法测量线性电阻元件的阻值

自己设计表格,记录 $R_{x1} \approx 330.0 \Omega$, $R_{x2} \approx 1\,000 \Omega$ 时电压表的量程、电压值,电流表的量程、电流值及内阻;计算电阻元件的阻值和测量不确定度,写出结果的完整表达式。

2) 电流表外接法绘制线性电阻元件的伏安特性曲线

自己设计表格,记录电流表量程,电压表量程、内阻,电流表、电压表的一系列读数;绘制伏安特性曲线,在图中标出 ΔV 、 ΔI , 求出斜率,利用式 (3.9-6) 计算 R_x 。

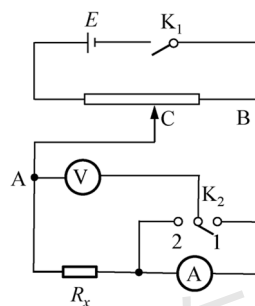


图 3.9-2 伏安法测电阻电路图

3) 电流表外接法绘制非线性电阻元件的伏安特性曲线

自己设计表格,记录电压表、电流表量程,以及电流表、电压表的一系列读数;绘制伏安特性曲线,并对曲线进行分析。

7. 思考题

(1) 用一个量程为100 mA 的 1.0 级的电流表,测量一个大约为80 mA 的电流,其测量结果的相对不确定度为多少?若用1 000 mA 量程的呢?

(2) 若不修正电表内阻引入的系统误差,在电流表的内、外接电路中将给测量带来多大的不确定度和相对不确定度?

(3) 实验中使用的电压表共有多少个分格?指针分别在哪个区间可以读出1、2、3、4位有效数字?

3.10 示波器的原理及应用

示波器是一种观测电信号波形及其相关参数的电子测量仪器,它能把人眼看不见的电信号转换成看得见的图像,便于观测研究。一切可以转化为电压的电学量、非电学量,以及它们随时间变化的过程都可用示波器来观测。示波器不仅能定性观察信号的动态过程,还能定量测量信号的各种电参数,在电子产品的生产、测试、检修过程中都有着广泛的应用。

1. 实验目的

- (1) 了解示波器的原理和功能。
- (2) 掌握示波器的调节和使用的基本方法。
- (3) 掌握用示波器观察电信号波形的方法。
- (4) 掌握用示波器测量电信号的电压和频率的方法。

2. 实验器材

数字示波器、函数信号发生器、整流滤波线路板等。

3. 实验原理

按工作原理分类,示波器可分为模拟示波器和数字示波器。

模拟示波器是以模拟电路为基础的示波器。它以直角坐标系为参数系、以时间扫描为时基二维地显示电学量的瞬时变化,能对其表征的参量进行分析和测量。模拟示波器一般由示波管、竖直放大器、水平放大器、扫描发生器、触发同步器和直流电源等部件组成。示波管内的电子枪向屏幕发射电子,经聚焦形成电子束打到屏幕上,屏幕的内表面涂有荧光物质,电子束打中荧光物质,显示屏就会发光。模拟示波器具有垂直分辨率高、数据更新快、可实时显示的优点,但模拟示波器需要与带宽相适应的放大器和示波管,随着频率的提高,对阴极射线示波管的工艺要求更高,成本大幅增加。

数字示波器是一种以数字电路为基础的示波器,它集数据采集、A/D 转换、软件编程等多种技术为一体。数字示波器具有体积小、质量轻、操作简单、频带宽、波形处理能力强等优点;

它的缺点是不能实时显示输入信号的变化，测量失真较大，测量复杂信号的能力较差^[26]。

1) 数字示波器的原理

数字示波器的原理图如图 3.10-1 所示。待测信号通过探头输入衰减与放大电路，调节信号的电压在 A/D（模拟信号/数字信号）转换器的输入电压要求范围内。衰减与放大电路决定了示波器的输入带宽，在仪器面板上调节垂直偏转系数就是调节该电路的衰减比。经过衰减与放大电路后，由采样电路按一定采样频率对连续变化的模拟波形进行采样（在仪器面板上调节扫描时基就是改变采样率），然后经 A/D 转换电路，将采样的模拟量转换成数字量，并存放在存储器中，这样就可以随时通过 CPU 和逻辑控制电路将数字波形显示在屏幕上，供使用者观察和测量。

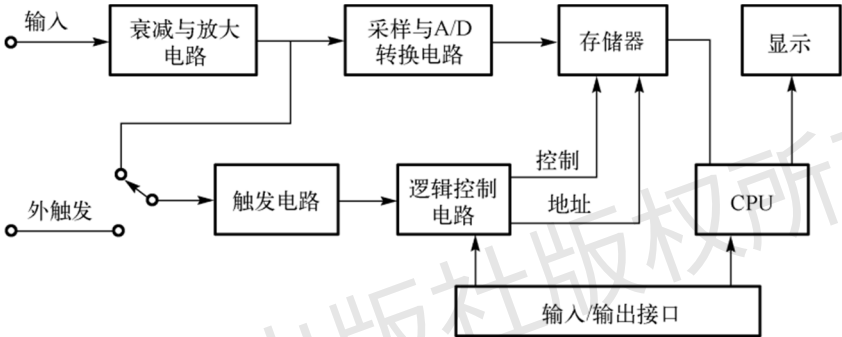


图 3.10-1 数字示波器的原理图

为了实时稳定地显示出信号波形，示波器必须不断重复地从存储器（RAM）中调出存储数据并显示在屏幕上。为了使每次显示的曲线与前一次显示的曲线重合，必须采用触发技术。一般的触发方式为：输入的模拟信号经过衰减与放大电路处理后同时送至 A/D 转换电路和触发电路，触发电路根据已设定的触发条件（如信号的电压达到某一数值并处于下降沿）产生触发信号，逻辑控制电路一旦收到来自触发电路发出的触发信号，就启动一次数据采集并写入存储器，如此循环^[37]。

2) 李萨如图形

如果在示波器的 X、Y 偏转板上分别加上正弦波，当两个正弦波形的频率成简单整数比时，将出现一个封闭稳定的几何图形，称为李萨如图形。图 3.10-2 给出了几种不同频率的李萨如图形。根据这个图形可以确定两个正弦波形的频率比，从而确定待测频率的大小。设 n_x 代表 x 方向切线与图形的切点数， n_y 代表 y 方向切线与图形的切点数，则有

$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{n_x}{n_y} \tag{3.10-1}$$

式中，若 f_x 为已知，则由李萨如图形切点数 n_x 、 n_y 可求出 f_y 。李萨如图形提供了一种比较两个信号频率的简便方法。将一个未知信号与已知信号合成李萨如图形，根据式（3.10-1）可求得未知信号的频率。

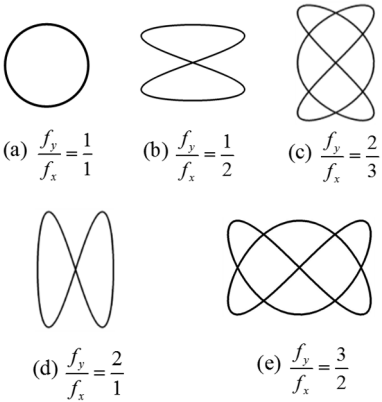


图 3.10-2 李萨如图形

4. 实验内容及步骤

1) 熟悉示波器各功能区和调节方法

数字示波器面板如图 3.10-3 所示。数字示波器的左侧为屏幕显示区，右侧为由按键、旋钮、端口组成的操作控制区。操作控制区分为：控制菜单区、功能菜单区、多功能旋钮、垂直控制区、水平控制区、触发控制区和模拟通道输入端等。

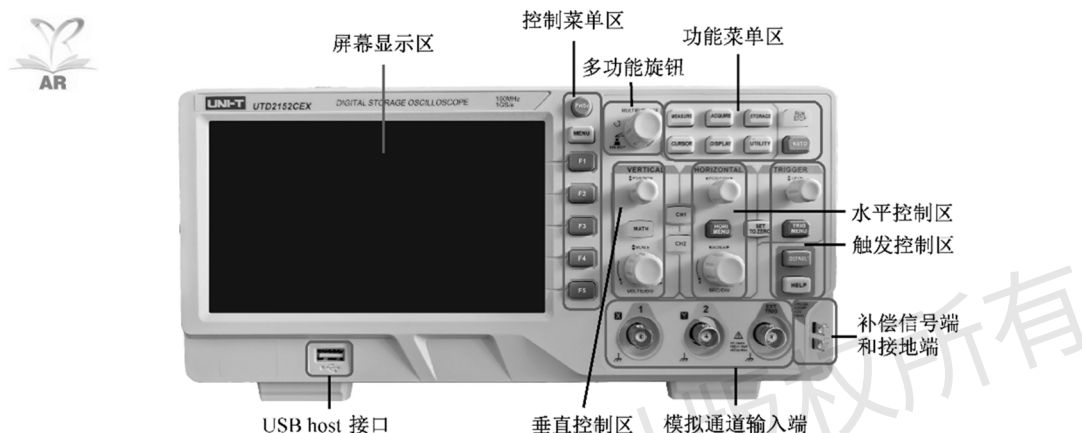


图 3.10-3 数字示波器面板

(1) 功能菜单区：【AUTO】为自动执行键，【RUN/STOP】为运行/停止键，【MEASURE】为测量键，【ACQUIRE】为设置采样方式键，【STORAGE】为存储键，【CURSOR】为光标测量键，【DISPLAY】为显示方式键，【UTILITY】为辅助功能设置键。

按【AUTO】键，数字示波器将自动设置垂直偏转系数、扫描时基和触发方式。如果需要进一步观察，自动设置完成后可再进行手动调整，直至使波形显示达到想要的效果。

(2) 【MULTIPURPOSE】多功能旋钮。旋转此旋钮切换选项，按下此旋钮确认选项。

(3) 垂直控制区：【CH1】为通道 1 选择键，【CH2】为通道 2 选择键，【MATH】为数学运算功能键，垂直【SCALE】为垂直偏转系数调节旋钮，垂直【POSITION】为垂直位置调节旋钮。

按【CH1】、【CH2】、【MATH】键，屏幕显示对应通道的操作菜单、标志、波形和挡位状态信息；再按【CH1】、【CH2】、【MATH】键，关闭相应的通道。

旋转垂直【SCALE】旋钮，可以改变垂直偏转系数，按 1-2-5 方式步进，单位是 V / DIV 或 mV / DIV (DIV 可用 cm 或格代替)。测量信号幅度时，要调节垂直【SCALE】旋钮，使屏幕上显示的波形大小适中，信号的幅度值 $U = \text{垂直偏转系数} \times \text{信号格数}$ 。垂直偏转系数等信息在屏幕下方状态栏对应通道的挡位显示。例如，显示“1~5.00 V 1X”，表示通道 1 的耦合方式为交流，垂直偏转系数为 5.00 V/DIV，探头衰减倍率为 1。

旋转垂直【POSITION】旋钮，可移动当前通道波形的垂直位置，基线光标处显示垂直位移值，按下该旋钮可使通道显示位置回到垂直中点。

(4) 水平控制区：水平【SCALE】为扫描时基调节旋钮，水平【POSITION】为水平位置调节旋钮，【HORI MENU】为水平参数调节键。

旋转水平【SCALE】旋钮可改变水平时基（水平扫描时间系数）挡位，按 1-2-5 方式步进，

单位是 s/DIV 、 ms/DIV 、 $\mu s/DIV$ 或 ns/DIV 。测量信号周期或频率时,要调节水平【SCALE】旋钮使屏幕上显示的波形大小适中,信号的周期 $T = \text{水平时基} \times \text{信号一个周期的格数}$,信号频率 $f = 1/T$ 。水平时基的设定值在屏幕上方状态栏显示。例如,显示“M 20.0 ms”,表示水平时基为 $20.0 ms/DIV$ 。

旋转水平【POSITION】旋钮,可移动当前通道波形的水平位置,屏幕上方状态栏显示位移量,按下该旋钮可使波形回到水平中点。

(5) 触发控制区:【LEVEL】为触发电平旋钮,【TRIG MENU】为触发模式设置键,【SET TO ZERO】为零点快捷键,【DEFAULT】为恢复出厂设置键,【HELP】为帮助键。

(6) 控制菜单区:【PrtSc】为屏幕复制键,【MENU】为菜单键,【F1】、【F2】、【F3】、【F4】、【F5】为菜单选项操作键。

(7) 模拟通道输入端:【1】为通道 1 (CH1) 信号输入端,【2】为通道 2 (CH2) 信号输入端,【EXT TRIG】为外触发信号输入端。

2) 测量交流电的电压有效值

将函数信号发生器输出的 50 Hz 交流信号输入示波器 CH2,按【AUTO】键使示波器自动调整各项参数,必要时手动调节使图形大小、位置合适,记录波形波峰与波谷间的格数 M_2 (DIV) 和 CH2 的垂直偏转系数 D_2 (V/DIV)。

3) 观测整流滤波电路的输出波形

将函数信号发生器输出的频率为 50 Hz 、峰峰值为 20 V 的正弦波信号作为图 3.10-4 所示各电路的交流电源,输出的直流电由 CH2 输入示波器,依次观测各电路的输出波形,定性绘制 $U_Y - t$ 曲线。

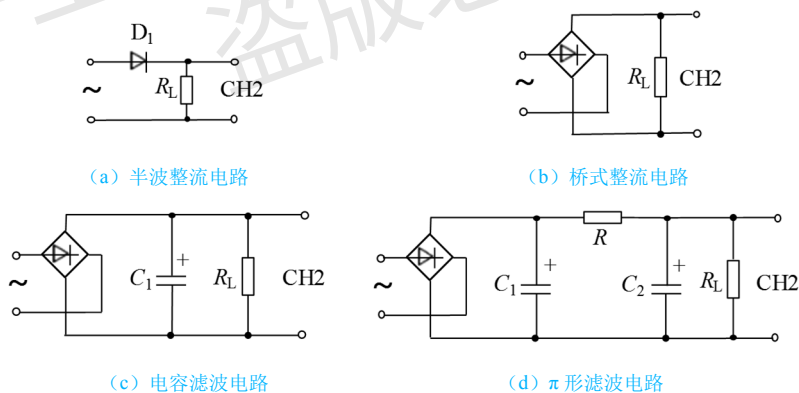


图 3.10-4 各整流滤波电路图

4) 测量交流电整流滤波后的纹波因数

交流电整流滤波后输出的电压中除直流电压外,还有一些交流成分,称为纹波电压,交流分量与直流分量的百分比称为纹波因数 γ 。

(1) 测量整流滤波后的交流分量。

将 CH2 耦合方式设置为交流,调节水平【SCALE】旋钮和垂直【SCALE】旋钮使图形大小适中,记录交流分量峰峰距离 h (见图 3.10-5) 和 CH2 垂直偏转系数 D_2 ,滤波后的交流成分的波形比较复杂,这里按正弦波处理。

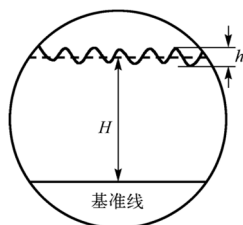


图 3.10-5 测量纹波因数示意图

(2) 测量整流滤波后的直流分量。

①按【CH1】键同时显示 CH1 和 CH2，将 CH2 耦合方式设置为接地，将 CH1 和 CH2 两条水平扫描线在屏幕下方重合，确定基准线。

②将 CH2 耦合方式设置为直流，调节垂直【SCALE】键使信号显示在屏幕上方，记录直流分量至基准线的距离 H （见图 3.10-5）和 CH2 垂直偏转系数 D'_2 。

5. 注意事项

- (1) 阅读数字示波器、信号发生器说明书，掌握仪器面板上各旋钮的作用后再操作。
- (2) 数字示波器上所有按键或旋钮都有一定调节角度，使用时应轻轻按压或旋转。

6. 实验数据记录与处理

1) 测量交流电的电压有效值

记录正弦波波峰与波谷间的格数 M (DIV) 和 CH2 垂直偏转系数 D ，根据公式 $U = \frac{MD}{2\sqrt{2}}$ 计算电压有效值，评定测量不确定度，写出测量结果的完整表达式。

2) 计算交流电整流滤波后的纹波因数

自己设计表格，记录交流分量峰峰距离 h 和 CH2 垂直偏转系数 D_2 ，直流分量至基准线的距离 H 和 CH2 垂直偏转系数 D'_2 ，利用公式 $\gamma = \frac{U_{\sim}}{U_{\sim}} \times 100\% = \frac{hD_2}{2\sqrt{2}HD'_2} \times 100\%$ 计算纹波因数。

7. 思考题

- (1) 观察两个信号合成的李萨如图形时，应如何操作示波器？
- (2) 如果在示波器上看到的波形幅度太小，调节哪个旋钮可以使波形的大小适中？

3.11 电位差计的原理及应用

电位差计是测量电动势或电压的仪器，由于运用了比较法（详见 2.1.1 节）、补偿法（详见 2.1.4 节）和平衡法（详见 2.1.5 节），它具有测量准确度高、使用方便等特点，广泛应用于计量和高准确度测量中。电位差计具有较大的灵活性，配以其他标准附件，利用转换法可测量电流、较高的电压、电功率、电阻等物理量^[38]。

电位差计的类型较多，按测量回路的阻值大小可分为高电阻电位差计和低电阻电位差计；按测量电势的高低可分为高电势电位差计和低电势电位差计，它们测量的电势大小分别为伏与毫伏数量级。

1. 实验目的

- (1) 了解电位差计的测量原理和使用方法。
- (2) 掌握补偿法、比较法和平衡法的特点。

(3) 应用电位差计测量电学量。

2. 实验器材

电位差计、直流稳压电源、滑动变阻器、干电池、电压表、电流表、标准电阻等。

3. 实验原理

1) 补偿原理和电位差计

如图 3.11-1 所示, 电压表并联在未知电源的两端测电源电动势时, 假设回路的电流为 I 、电源内阻为 r , 则电压表的读数不是待测电源的电动势, 而是电源两端的端电压 $U = E_x - Ir$ 。只有当 $I = 0$ 时, 电源两端的端电压 U 才等于电源电动势 E_x 。使用电压补偿法, 可以对上述测量进行等效补偿, 使 $I = 0$, 从而准确测量出电源电动势 E_x 。

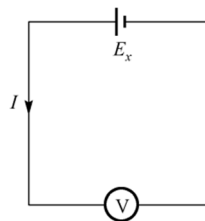


图 3.11-1 电压表并联测电动势

电位差计原理图如图 3.11-2 所示。由直流稳压电源 E 、电位器 R_p 、标准电阻 R_N 、可调电阻 R_x 组成工作回路, 该回路中的电流称为工作电流 I ; 由检流计 G 、标准电池 E_N 、标准电阻 R_N 组成标准电流回路, 用来确定工作回路的电流为规定值; 由检流计 G 、待测电源 E_x 、A 与 B 间的电阻 R_{AB} 构成补偿测量回路。

测量时, 先将单刀双掷开关 K_2 合向标准端 (标准电池 E_N 一侧), 调节电位器 R_p 使检流计指针指零, 此时工作回路被补偿到位, 标准电池的电动势 E_N 等于标准电阻 R_N 两端的电压, 则工作回路中的电流

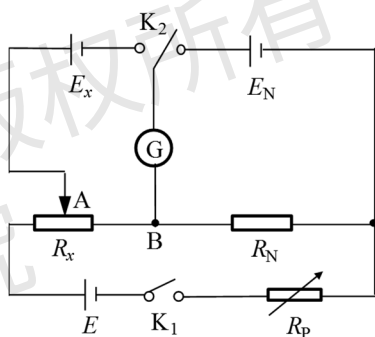


图 3.11-2 电位差计原理图

$$I = \frac{E_N}{R_N} \quad (3.11-1)$$

这一步操作使工作回路中的电流为规定值, 称为标定工作电流, 所以 R_p 称为工作电流调节电阻。再将开关 K_2 合向未知端 (待测电源 E_x 一侧), 改变 R_{AB} 的阻值, 使检流计的指针指零, 这时电压补偿到位, 待测电源的电动势 E_x 等于 R_{AB} 两端的电压, 即

$$E_x = IR_{AB} = \frac{E_N}{R_N} R_{AB} \quad (3.11-2)$$

由于 E_N 、 R_N 的值已知且具有较高的准确度, 在使用灵敏度合适的检流计时, 可以保证测量结果的高准确度。当电路完全补偿时, 测量电路与被测电路无电流通过, 被测电动势不因接入测量电路而变化, 所以测量准确度很高。另外, 如果要测量任一电路两点间的电势差, 只要将待测两点接入补偿测量回路代替 E_x 即可。

2) 电位差计的灵敏度 S

由于电位差计使用了平衡测量法, 所以仪器灵敏度 S 是一个很重要的概念。当测量电路被补偿时, 如果 R_{AB} 两端的电压发生一个微小变化 ΔE_x , 检流计 G 的指针偏转了 Δn 格, 把 Δn 和 ΔE_x 的比值称为电位差计的灵敏度, 即

$$S = \frac{\Delta n}{\Delta E_x} = \frac{\Delta n}{|E'_x - E_x|} \quad (3.11-3)$$

电位差计的灵敏度和所用的检流计的灵敏度成正比。要提高电位差计的灵敏度 S ，可选用灵敏度高的检流计。

3) 电表的校准

校准是指用被校电表与标准表同时测量一定的电学量，观察指示值与标准值相符合的程度。校准可以用来评定电表的准确度等级（详见 2.1.5 节），绘制的校准曲线可以用来对读数进行修正。准确度等级是国家对电表规定的质量指标，磁电式电表的国家标准分为 10 个级别：0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 5.0, 10, 20，一般以数字形式标注在电表的表盘上。

以校准电压表为例，设被校电表的电压指示值为 U ，标准表的读数为 U' ，则当对被校电表的整个标度盘上等间隔的几个校准点进行校准时，便可获得一组相应的数据 U_i 和 U'_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$)，以及每个校准点的校正值 $\Delta U_i = U_i - U'_i$ 。取 n 个 ΔU_i 中绝对值最大的一个计算被校电表的实际级别为

$$\frac{|\Delta U_i|_{\max}}{U_m} \times 100 \quad (3.11-4)$$

式中， U_m 为电压表的量程， $\frac{|\Delta U_i|_{\max}}{U_m} \times 100$ 的值落在两个级别之间，取两个级别中较大的值为

被测电压表的实际级别。例如， $0.5 < \frac{|\Delta U_i|_{\max}}{U_m} \times 100 < 1.0$ ，则该电表为 1.0 级。

校准曲线（详见 1.4.2 节）是以被校电表的指示值 U 为横坐标轴、以校正值 ΔU 为纵坐标轴、根据校正数据 U'_i 和 ΔU_i 绘制的呈折线状的曲线，供使用时根据电表的校准曲线进行读数修正。

4. 实验内容及步骤

1) 测量干电池电动势和电位差计的灵敏度



图 3.11-3 UJ33B 型电位差计

测量干电池的电动势及电位差计的灵敏度 S 。

(1) 电位差计的面板如图 3.11-3 所示。未通电前，观察检流计的指针是否指零，若不指零，用螺钉旋具调节检流计面板下方的螺钉进行机械调零。

(2) 接通电位差计的电源，将开关 K_2 置【断】挡，调节检流计下方的【调零】旋钮，使检流计指零。

(3) 将被测电压接到电位差计的【未知】端，注意正负端不可接错。

(4) 根据被测电压的估计值，选择合适的倍率，并预置面板上可变电阻 R_x 的 $\times 10$, $\times 1$ 的步进盘和 $\times 0.1$ 的滑线盘。

(5) 将开关 K_2 置【标准】挡，调节【工作电流调节】旋钮，使检流计指零，再将开关 K_2 置【断】挡。

(6) 将开关 K_2 置【未知】挡，调节步进盘和滑线盘，使检流计再次指零，再将开关 K_2 置

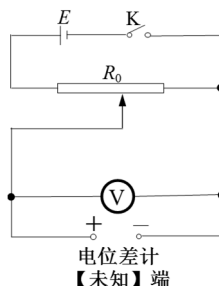
【断】挡，此时待测电压或电动势 $E_x = (\text{步进盘读数} + \text{滑线盘读数}) \times \text{倍率}$ ，单位为 mV。

(7) 重复第(5)步，微调步进盘和滑线盘，使检流计指针偏转 Δn 格 ($5.0 \text{格} \leq \Delta n \leq 10.0 \text{格}$)，记录 Δn 和此时的电压值 E'_x 。

2) 校准电压表

(1) 按图 3.11-4 连接电路， R_0 为滑动变阻器，图中为分压式接法，电位差计的未知端与电压表并联。

(2) 校准电压表的 1.5 V 量程挡。调节滑动变阻器，让电压表的电压从 0.000 V 增大到 1.500 V，每隔约 0.150 V 为一个测量点，重复内容 1) 中的(4)~(6)步，记录各测量点电压表读数 U 和电位差计读数 U' 。



5. 注意事项

(1) 电位差计的灵敏度比较高，操作时必须先估测出待测电压值的大小，然后将电位差计上的旋钮预置在此电压上。

(2) 标准化工作电流时，要快速准确，不能长时间将开关 K_2 置于

【标准】挡。

(3) 一次测量结束后，应迅速将开关 K_2 断开。

6. 实验数据记录与处理

1) 测量干电池电动势和电位差计的灵敏度

记录干电池的电动势 E_x ，记录检流计不指零时的偏转格数 Δn 及此时的电压值 E'_x ，根据式 (3.11-3) 计算电位差计的灵敏度 S 。

2) 校准电压表

自己设计表格，记录电压表读数 U 、电位差计读数 U' 及差值 $\Delta U = U - U'$ ，绘出电压表的校准曲线，根据式 (3.11-4) 计算所校准电压表的级别。

7. 思考题

- (1) 与电压表比较，用电位差计测量电动势有何优缺点？
- (2) 电位差计与电桥对工作电源的稳定性要求有何不同？
- (3) 如何用电位差计测量电路中的电流、电阻？
- (4) 如何用电位差计校准毫安表？

3.12 单臂电桥测量电阻

测量电阻阻值有多种方法，如万用法、伏安法、电桥法等，电桥法以其准确度高、使用方便等特点，成为测量电阻阻值的常用方法之一。电桥法同时使用了平衡法和比较法，即在平衡条件下，将待测电阻与已知电阻进行比较以确定待测电阻的阻值。电桥法在测量中避开了电源随时间变化造成的误差，也避免了电流表分压、电压表分流、过多导线分压等问题。目前，电桥法已广泛应用于工程测量中。

电桥分为直流电桥和交流电桥。直流电桥主要用来测量电阻的阻值，又分为单臂电桥（惠斯通电桥）和双臂电桥（开尔文电桥）。电阻按其阻值的大小分为三类： 10Ω 以下的为低值电阻， $10\sim 10^6\Omega$ 的为中值电阻， $10^6\Omega$ 以上的为高值电阻。单臂电桥主要用于精确测量中值电阻；双臂电桥适用于测量低值电阻。交流电桥除了可以测量阻值，还可以测量电容量和电感量。

1. 实验目的

- (1) 掌握用单臂电桥测量电阻阻值的原理和特点。
- (2) 了解平衡测量法的特点。
- (3) 学习电路连接和简单故障排除的方法。

2. 实验器材

直流稳压电源、自组式单臂电桥实验仪、电阻箱、检流计等。

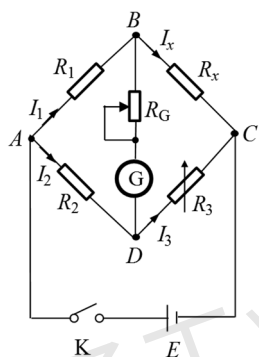


图 3.12-1 单臂电桥电路原理图

3. 实验原理

1) 电桥基本原理

图 3.12-1 为单臂电桥电路原理图， R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_x 连成一个四边形 $ABCD$ ，每条边称为电桥的一个桥臂，在四边形的对角 A 和 C 之间接有直流电源 E ，称为电源对角线，在另一对角 B 和 D 之间接有检流计 G 及其保护电位器 R_G ，称为测量对角线。单臂电桥的“桥”就是指这条测量对角线，其作用就是将“桥”两端 B 和 D 的电势进行比较。

选择合适的 R_1 、 R_2 值，调节电阻 R_3 使流过检流计的电流为零，即图 3.12-1 中 B 和 D 两点的电势相等，此时电桥达到平衡状态，有 $U_{AB} = U_{AD}$ ， $U_{BC} = U_{DC}$ ，所以

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 \quad (3.12-1)$$

$$I_x R_x = I_3 R_3 \quad (3.12-2)$$

由于 $I_1 = I_x$ ， $I_2 = I_3$ ，则

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3 \quad (3.12-3)$$

式中， $\frac{R_1}{R_2}$ 称为电桥的倍率， R_1 、 R_2 所在的桥臂称为比例臂； R_3 是用来与被测电阻 R_x 进行比较的电阻，其所在的桥臂称为比较臂； R_x 所在的桥臂称为测量臂。只要组成桥臂的四个电阻满足式 (3.12-3)，不论流经桥臂的电流大小如何变化，都不会影响电桥的平衡。

当电桥平衡后，保持 $\frac{R_1}{R_2}$ 不变，把 R_3 与 R_x 的位置交换，再调节 R_3 使电桥平衡，测量电桥再次达到平衡时 R_3 为 R'_3 ，则有

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R'_3 \quad (3.12-4)$$

联立式 (3.12-3) 和式 (3.12-4) 可得

$$R_x = \sqrt{R_3 R'_3} \quad (3.12-5)$$

此时, 被测电阻的阻值 R_x 只与比较臂电阻的阻值 R_3 有关, 可以消除比例臂 R_1 、 R_2 的数值不准带来的系统误差。这种将测量中的某些元件互换位置, 从而消除系统误差的方法称为交换法^[35]。

2) 电桥的灵敏度

检流计的灵敏度总是有限的, 如果通过它的电流小到它检测不出来, 仍会认为电桥处于平衡状态。当检流计指针的偏转小于 0.1 格时, 人眼就很难觉察, 为了定量表示检流计的误差, 需要引入电桥灵敏度的概念。

对于已平衡的电桥, 如果比较臂的电阻 R_3 改变 ΔR_3 , 检流计指针偏离平衡位置 Δn (或数字式平衡指示仪的显示由零变为 Δn), 则电桥的灵敏度定义为

$$S = \frac{\Delta n}{\Delta R_x} = \frac{\Delta n}{\frac{R_1}{R_2} \Delta R_3} \quad (3.12-6)$$

显然, 电桥的灵敏度 S 越大, 当比较臂电阻变化一个单位值时, 检流计指针偏离平衡位置的数值就越大, 对电桥平衡的判断也越容易, 测量结果越准确。电桥的灵敏度还可以写为

$$S = \frac{\Delta n}{\Delta R_x} = \frac{\Delta n}{\Delta I_g} \cdot \frac{\Delta I_g}{\Delta R_x} = S_g \cdot S_l \quad (3.12-7)$$

式中, ΔI_g 为通过检流计的电流的改变量; $S_g = \frac{\Delta n}{\Delta I_g}$ 为检流计的电流灵敏度; $S_l = \frac{\Delta I_g}{\Delta R_x}$ 为电桥电路的灵敏度。可见, 要提高电桥的灵敏度, 应设法提高检流计的灵敏度和电桥电路的灵敏度。

应用基尔霍夫定律, 推导出电桥的灵敏度为

$$S = \frac{S_g E}{R_3(R_1 + R_2 + R_3 + R_x) + \left(2 + \frac{R_x}{R_2} + \frac{R_1}{R_3}\right) R_3 R_g} \quad (3.12-8)$$

式中, R_g 为检流计内阻; E 为电源电压。

由式 (3.12-8) 可知, 适当提高电源电压 E , 选择灵敏度高、内阻低的检流计, 适当减小桥臂电阻 ($R_1 + R_2 + R_3 + R_x$), 尽量把桥臂配置成均匀状态 (四臂电阻相等), 使 $\left(2 + \frac{R_x}{R_2} + \frac{R_1}{R_3}\right)$ 值最小, 都有利于提高电桥的灵敏度。实际上, 由于许多其他因素的制约, 上述提高灵敏度的方法应根据具体情况灵活运用。

当电桥的灵敏度很高时, 影响测量阻值的不确定度来源于

$$u_j = R_x \sqrt{E_{R_1}^2 + E_{R_2}^2 + E_{R_3}^2} \quad (3.12-9)$$

4. 实验内容及步骤

自组式单臂电桥实验仪、电阻箱、直流稳压电源如图 3.12-2 所示, 用作 R_1 、 R_2 的四个电阻 (仪器左上角的四个电阻) 的阻值分别为 10 Ω 、100 Ω 、100 Ω 、1 000 Ω , 允许偏差为 $\pm 0.5\%$, 待测电阻分别为 51 Ω 、240 Ω 、4 300 Ω 、10 000 Ω , 允许偏差为 $\pm 1\%$ 。

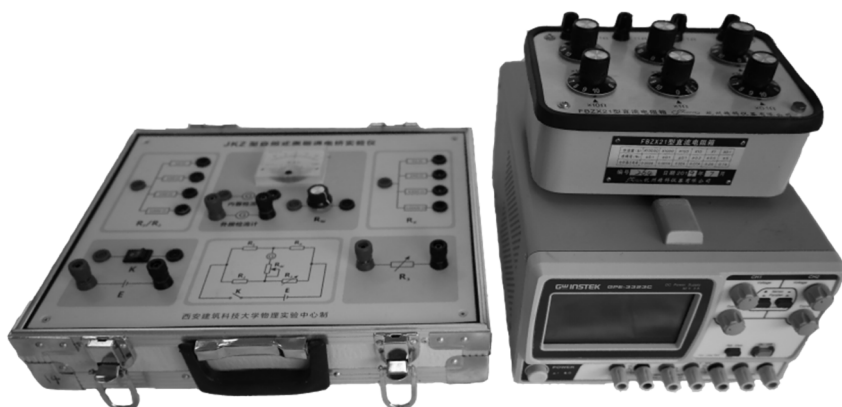


图 3.12-2 自组式单臂电桥实验仪、电阻箱、直流稳压电源

1) 相同比例臂下不同待测电阻对单臂电桥灵敏度的影响

- (1) 未通电前, 检查检流计是否指零, 如果不指零, 对检流计进行机械调零。
- (2) 根据待测电阻 R_x 的估计值选择合适的比例臂 R_1 、 R_2 , 根据式 (3.12-3) 在电阻箱上预置 R_3 , 按图 3.12-1 连接电路, 注意应使 R_G 处于阻值最大处。
- (3) 接通电源, 点按开关 K, 观察检流计指针偏转情况, 调节 R_3 使检流计指零, 调小电位器 R_G 使检流计满偏, 再次调节 R_3 使检流计指零, 往复操作直至电位器 R_G 调到最小时检流计指零, 此时电桥达到平衡状态, 记录此时 R_3 的读数。
- (4) 调节 R_3 使检流计指针偏离平衡位置 5.0~10.0 格, 记录偏转格数 Δn 和 R_3 的读数 R_3'' 。

2) 不同比例臂对单臂电桥灵敏度的影响

- (1) 选择一个待测电阻 R_x , 用不同比例臂 R_1 、 R_2 , 将电桥调平衡, 记录电桥平衡时的 R_3 。
- (2) 调节 R_3 使检流计指针偏离平衡位置 5.0~10.0 格, 记录偏转格数 Δn 和 R_3 的读数 R_3' 。

3) 相同电桥倍率下不同比例臂对单臂电桥灵敏度的影响

- (1) 选择一个待测电阻 R_x , 在保持电桥倍率不变的情况下, 用不同的比例臂 R_1 、 R_2 , 将电桥调平衡, 记录电桥平衡时的 R_3 。
- (2) 调节 R_3 使检流计指针偏离平衡位置 5.0~10.0 格, 记录偏转格数 Δn 和 R_3 的读数 R_3' 。

4) 电源电压对电桥灵敏度的影响

- (1) 选择一个待测电阻 R_x , 在保持比例臂 R_1 、 R_2 不变的情况下, 在电源电压分别是 3.0V、6.0V、9.0 V 时, 将电桥调平衡, 记录电桥平衡时的 R_3 。
- (2) 调节 R_3 使检流计指针偏离平衡位置 5.0~10.0 格, 记录偏转格数 Δn 和 R_3 的读数 R_3' 。

5. 注意事项

- (1) 为了保护检流计, 开始测量时, 要将电位器 R_G 调至阻值最大处; 为了获得最大的灵敏度, 测量时应把电位器 R_G 调至最小。
- (2) 正确选择电源电压, 控制电流大小, 电阻的实际功率不允许超过电阻的额定功率 (0.25 W), 以防烧坏电阻、电阻箱。

6. 实验数据记录与处理

(1) 相同比例臂下不同待测电阻对单臂电桥灵敏度的影响。

①自己设计表格, 利用式(3.12-3)、式(3.12-6)计算待测电阻的阻值和电桥的灵敏度, 其中 $\Delta R_3 = |R_3 - R_3'|$ 。

②分析讨论相同比例臂下, 待测电阻的阻值对单臂电桥灵敏度的影响。

(2) 不同比例臂对单臂电桥灵敏度的影响。

①自己设计表格, 利用式(3.12-3)、式(3.12-6)计算待测电阻的阻值和电桥的灵敏度, 其中 $\Delta R_3 = |R_3 - R_3'|$ 。

②分析讨论待测电阻相同时, 不同比例臂对单臂电桥灵敏度的影响。

(3) 相同电桥倍率下不同比例臂对单臂电桥灵敏度的影响。

①自己设计表格, 利用式(3.12-3)、式(3.12-6)计算待测电阻的阻值和电桥的灵敏度, 其中 $\Delta R_3 = |R_3 - R_3'|$ 。

②分析讨论待测电阻和电桥倍率相同时, 不同比例臂对单臂电桥灵敏度的影响。

(4) 电源电压对电桥灵敏度的影响。

①自己设计表格, 利用式(3.12-3)、式(3.12-6)计算待测电阻的阻值和电桥的灵敏度, 其中 $\Delta R_3 = |R_3 - R_3'|$ 。

②分析讨论待测电阻和比例臂相同时, 不同电源电压对单臂电桥灵敏度的影响。

(5) 从上述测量中任选一组数据, 评定测量不确定度, 写出测量结果的完整表达式。

7. 思考题

(1) 如果在电桥测量过程中, 电桥四臂中有一处断路, 会出现什么现象?

(2) 当单臂电桥达到平衡时, 若交换电源和检流计的位置, 电桥是否仍能保持平衡? 试证明之。

(3) 用单臂电桥测电阻时, 若比例臂选择不当, 对测量结果有何影响?

(4) 用交换法能够消除比例臂误差对测量结果影响的原因是什么?

(5) 比较伏安法测电阻和电桥法测电阻的优缺点。

3.13 双臂电桥测量电阻

双臂电桥也称开尔文电桥, 一般用来测量较低阻值的电阻。例如, 测量金属材料的电阻率、分流器的阻值、电机或变压器绕组的阻值、低阻值线圈的阻值等。双臂电桥是在单臂电桥的基础上发展而来的, 它可以消除附加电阻对测量结果的影响。

1. 实验目的

(1) 了解双臂电桥测量低值电阻的原理。

(2) 掌握双臂电桥测量低值电阻的方法。

(3) 通过用双臂电桥测量铜电阻的温度系数, 了解铜电阻的温度特性。

(4) 掌握用最小二乘法处理数据的方法。

2. 实验器材

双臂电桥、标准电阻、待测电阻、温度计等。

3. 实验原理

1) 双臂电桥的工作原理

(1) 附加电阻。

测量电阻时，被测电阻 R_x 接入电路的导线和接线端的电阻称为附加电阻，阻值为 $10^{-4} \sim 10^{-2} \Omega$ 数量级。如果 R_x 为中、高值电阻，附加电阻对测量结果的影响可以忽略不计；如果 R_x 为低值电阻，附加电阻对测量结果的影响就会很大。为了准确测量低值电阻，必须设法消除附加电阻的影响。

(2) 双臂电桥消除附加电阻影响的方法。

为了消除附加电阻的影响，双臂电桥中被测低值电阻和标准电阻均采用图 3.13-1 (a) 所示的**四端接法**，将通过电流的接线端（简称电流端） C_1 、 C_2 与测量电压的接线端（简称电压端） P_1 、 P_2 分开。图 3.13-1 (b) 是考虑附加电阻后测量低值电阻的等效电路^[22,39]，从图中可以看出，虽然附加电阻 r_1 、 r_2 的阻值与待测电阻 R 可以比较，但因电压表内阻很大，流过 r_1 和 r_2 的电流很小， r_1 和 r_2 两端的电压要比 R 两端的电压小得多，故对 R 两端电压测量的影响大为减小。附加电阻 r_3 、 r_4 、 r_5 、 r_6 对电阻 R 两端电压的测量均无影响。

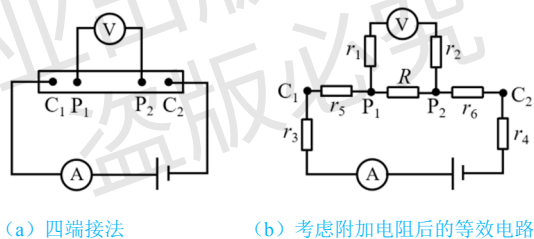


图 3.13-1 四端接法及等效电路

双臂电桥电路原理图如图 3.13-2 所示，图中电桥各臂电阻为 R_x 、 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R'_3 、 R_N ，设 r 为 R_x 与 R_N 之间的附加电阻的总和。电路中 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R'_3 远比 R_x 、 R_N 及附加电阻大得多，因此，附加电阻可忽略不计，而且支路中的电流 I_1 、 I_2 远比 I_3 小得多。

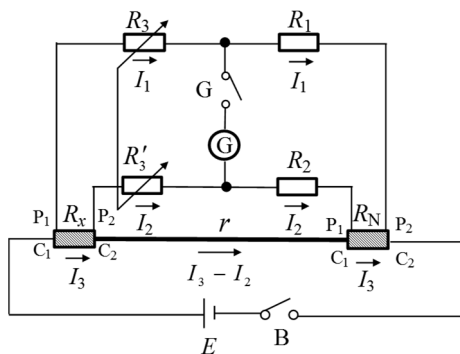


图 3.13-2 双臂电桥电路原理图

(3) 测量公式。

当电桥平衡时，检流计中无电流流过，检流计两端的电势相等。可以得出

$$\begin{aligned} I_1 R_3 &= I_3 R_x + I_2 R'_3 \\ I_1 R_1 &= I_3 R_N + I_2 R_2 \\ I_2 (R'_3 + R_2) &= (I_3 - I_2) r \end{aligned}$$

联立以上各式求解，得

$$R_x = \frac{R_N}{R_1} R_3 + \frac{r R_2}{R'_3 + R_2 + r} \left(\frac{R_3}{R_1} - \frac{R'_3}{R_2} \right) \quad (3.13-1)$$

如果 $R'_3 = R_3$ ， $R_1 = R_2$ ，则上式第二项为零，故有

$$R_x = \frac{R_N}{R_1} R_3 \quad (3.13-2)$$

可见，只要满足上述条件，双臂电桥和单臂电桥测量电阻的计算公式同样简单。

为了保证 $R'_3 = R_3$ ，双臂电桥在制造时将 R_3 和 R'_3 制成同轴电阻，即在电桥中，将两个相同十进电阻箱的转臂连接在同一转轴上，因此在转臂的任一位置上都可以保持 $R'_3 = R_3$ 。测量时，只要使 R_1 和 R_2 阻值相同，就能保证式 (3.13-2) 成立。在实际制造中，任何电阻都会有误差，式 (3.13-1) 第二项不可能绝对为零，因此， r 应越小越好，测量时应用粗铜线连接 R_x 和 R_N ，以减小 r 。

双臂电桥的级别、仪器误差限、电桥灵敏度、灵敏度误差限和单臂电桥（详见 3.12 节）相似。一般来说，当电压相同，并使用相同的检流计时，双臂电桥的灵敏度比单臂电桥要低，所以双臂电桥需要使用灵敏度更高的检流计，以提高电桥的灵敏度。

2) 金属电阻的温度系数

导体的阻值随温度而变化。金属电阻的阻值一般随着温度的升高而增大，可用以下经验公式表示：

$$R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3 + \dots) \quad (3.13-3)$$

式中， R_t 和 R_0 分别是温度为 $t^\circ\text{C}$ 和 0°C 时的电阻值； α 、 β 、 γ 分别为一、二、三次电阻温度系数。纯金属在温度不太高时，其阻值和温度的关系近似为线性关系，即

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (3.13-4)$$

本实验用双臂电桥和温度计（详见 2.2.4 节）测量对应的 R_t 和 t ，用作图法或最小二乘法求出 $R_t - t$ 回归直线的截距 R_0 和斜率 $K = R_0 \alpha$ ，则

$$\alpha = \frac{K}{R_0} \quad (3.13-5)$$

式中， α 为温度系数 ($^\circ\text{C}^{-1}$)。当 α 为正时，表示电阻的阻值随温度的升高而增大；当 α 为负时，表示电阻的阻值随温度的升高而减小。

4. 实验内容及步骤

1) 测量室温下铜电阻的阻值 R_x 和电桥灵敏度 S

(1) 双臂电桥实验仪如图 3.13-3 所示。选择合适的 R_1 、 R_2 、 R_N ，根据铜电阻的估计值预置 R_3 。

(2) 将 R_N 的电流端 C_1 、 C_2 分别接实验仪 1、4 接线端，电压端 P_1 、 P_2 分别接 2、3 接线



图 3.13-3 双臂电桥实验仪

端；将 R_x 的电流端 C_1 、 C_2 分别接实验仪 5、9 接线端，电压端 P_1 、 P_2 分别接 6、8 接线端。

(3) 选择工作方式为双桥，检流计使用内置的数字毫伏表。

(4) 接通电源，先后按下 B、G 按键，调节 R_3 直至数字毫伏表显示为零，记录 R_3 的阻值。

(5) 调节 R_3 使数字毫伏表指针偏移平衡位置 5.0~10.0 格，记录改变量 Δn 和 R_3 的读数 R_3'' 。

2) 测量铜电阻的电阻温度系数 α

(1) 将铜电阻放入热水杯中，插入温度计，温度计的储液泡应没入水中且不与杯底接触。

(2) 待温度稳定后，从最高温度开始，每隔 5°C 左右先后按下 B、G 按键，调节电阻 R_3 使电桥平衡，记录此时的温度 t 和对应的阻值 R_3 ，再将 B、G 按键弹起，连续测量 8 组数据。

5. 注意事项

(1) 如果电桥不能调节平衡，应检查线路连接是否正确， R_1 、 R_2 的设置是否正确，被测电阻是否超出了测量量程。

(2) B、G 按键应只在调节 R_3 时按下，每次测量完，都应将 B、G 按键弹起，以免电桥长时间通电。

6. 实验数据记录与处理

1) 测量室温下铜电阻的阻值 R_x 和电桥灵敏度 S

(1) 记录 R_1 、 R_2 、 R_N 及电桥平衡时的 R_3 ，利用式 (3.13-2) 计算铜电阻的阻值。

(2) 记录数字毫伏表指针偏离平衡位置的格数 Δn 和 R_3 的读数 R_3'' ，利用公式 $S = \frac{\Delta n}{\Delta R_x} =$

$\frac{\Delta n}{\frac{R_N}{R_1} |R_3 - R_3''|}$ 计算电桥的灵敏度。

2) 测量铜电阻的温度系数 α

(1) 自己设计表格，记录 R_1 、 R_2 、 R_N ，记录不同温度 t 下电桥平衡时的 R_3 。

(2) 利用式 (3.13-2) 计算铜电阻在不同温度下的阻值 R_t ，用最小二乘法（详见 1.4.4 节）计算出铜电阻的温度系数 α ，写出与式 (3.13-4) 相似的表达式。

7. 思考题

(1) 讨论双臂电桥与单臂电桥的异同。

(2) 为什么通过双臂电桥的电流不能太大，也不能太小（通常在 0.5~1.0 A 之间）？为什么通电时间不能太长？

(3) 可以采用哪些方法提高双臂电桥的灵敏度？这些方法有什么限制？

3.14 透镜焦距的测量

透镜是光学仪器中最基本的光学元件，焦距是透镜的一个重要参量，它决定了透镜成像的位置和性质（大小、虚实、倒立）。不同的使用场合往往需要选择不同的透镜或透镜组，这就需要测定透镜的焦距。本实验采用物距像距法、自准直法和共轭法^[40]测量透镜的焦距。

1. 实验目的

- (1) 学会简单光路的分析和调节方法。
- (2) 掌握测量薄透镜焦距的方法。
- (3) 掌握薄透镜成像规律。

2. 实验器材

光具座、光源、平面镜、物屏、像屏、凸透镜、凹透镜。

3. 实验原理

透镜分为凸透镜和凹透镜，凸透镜对光线具有会聚作用，凹透镜对光线具有发散作用。厚度与焦距相比可以忽略不计的透镜称为**薄透镜**，本实验中使用的就是薄透镜。如图 3.14-1 所示， F 为透镜的焦点，透镜光心 O 到焦点 F 的距离 f 为透镜的焦距。

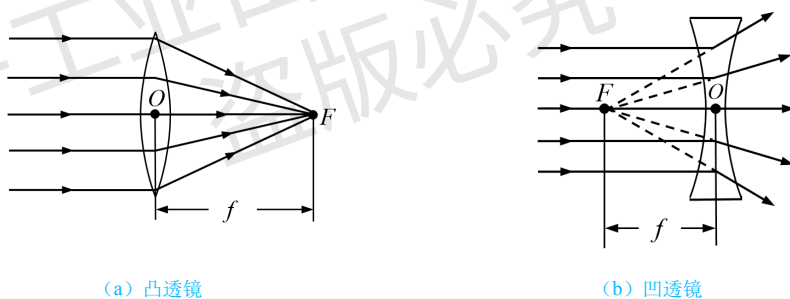


图 3.14-1 透镜焦点与焦距

在近轴光线（通过透镜中心附近并与透镜主光轴夹角很小的光线）条件下，薄透镜的成像规律可表示为

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad (3.14-1)$$

式中， u 为物距，实物的 u 为正，虚物的 u 为负； v 为像距，实像的 v 为正，虚像的 v 为负； f 为焦距，凸透镜的 f 为正，凹透镜的 f 为负。

1) 测量凸透镜焦距的方法

(1) 物距像距法。

如图 3.14-2 所示，光源发出的光线经过凸透镜折射后成实像于另一侧。测量出物距 u 和像距 v 后，代入式 (3.14-1) 即可计算出凸透镜的焦距 f （式中 u 、 v 、 f 均取正值）。

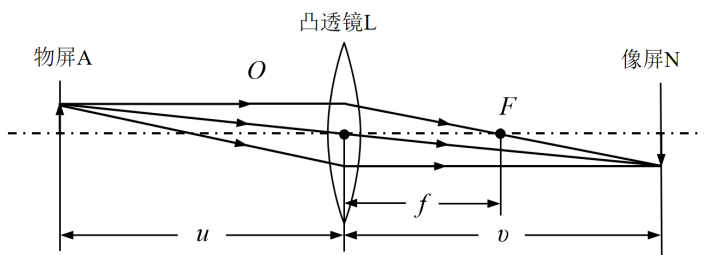


图 3.14-2 物距像距法测焦距示意图

(2) 自准直法。

如图 3.14-3 所示，在凸透镜的一侧放置被光源照亮的物屏，在另一侧放一个与主光轴垂直的平面镜。移动凸透镜的位置即可以改变物距的大小，当物屏正好处于凸透镜的焦平面上时，物屏上 S 各点发出的光线经凸透镜折射后成为不同方向的平行光线，经过平面镜反射回来，反射光再经凸透镜折射后仍会聚于它的焦平面上，即原物屏平面上形成一个与原物等大的倒立实像 S'，此时物屏到凸透镜的距离就是该凸透镜的焦距。

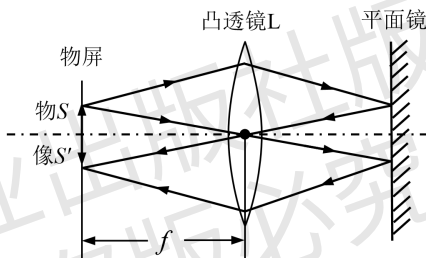


图 3.14-3 自准直法测焦距示意图

通过调节实验装置使之产生平行光以达到聚焦的目的的调节方法称为**自准直法**，它的特点是物、像在同一焦平面上。自准直法除用于测量凸透镜焦距外，还常用于光学仪器调节，如分光计的望远镜和平行光管的调节。

(3) 共轭法。

若物屏和像屏之间的距离 D 保持不变，且 $D > 4f$ ，令凸透镜沿光轴方向在物屏和像屏之间移动时，可以实现两次成像，形成一个大像和一个小像，这就是**共轭法**，也称二次成像法。

如图 3.14-4 所示，设物距为 u_1 时得放大的倒立实像，物距为 u_2 时得缩小的倒立实像，凸透镜两次成像之间的位移为 d ，根据透镜成像公式 (3.14-1)，得

$$\frac{1}{u_1} + \frac{1}{v_1} = \frac{1}{f} \quad (3.14-2)$$

$$\frac{1}{u_1 + d} + \frac{1}{v_1 - d} = \frac{1}{f} \quad (3.14-3)$$

利用 $v_1 = f - u_1$ 可解得

$$f = \frac{D^2 - d^2}{4D} \quad (3.14-4)$$

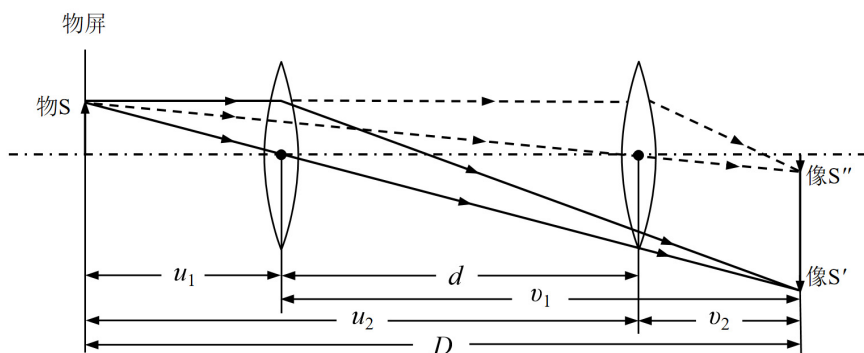


图 3.14-4 共轭法测焦距示意图

可见，只要在光具座上确定物屏、像屏及透镜两次成像时的位置，就可求出焦距 f 。物距像距法、自准直法都因透镜的光心位置不易确定而引入了一定的误差，而共轭法避免了这一缺点，无须考虑透镜光心的位置。

2) 测量凹透镜焦距的方法

凹透镜是发散透镜，所成像为虚像，不能用像屏直接接收，常借助凸透镜，采用辅助成像法测定凹透镜的焦距。

如图 3.14-5 所示，实物 B 经凸透镜 L_1 成实像 B' 。在 L_1 和 B' 之间的合适位置插入待测凹透镜 L_2 。此时， B' 作为 L_2 的“虚物”，经凹透镜 L_2 再成像为 B'' （实像，可用像屏接收）。这里凹透镜的焦距和物距均取负值，而像是实像，像距为正值，以 f_2 、 u 、 v 分别表示它们的绝对值，则式 (3.14-1) 可表示成

$$-\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = -\frac{1}{f_2} \quad (3.14-5)$$

则凹透镜的焦距为

$$f_2 = \frac{uv}{v-u} \quad (3.14-6)$$

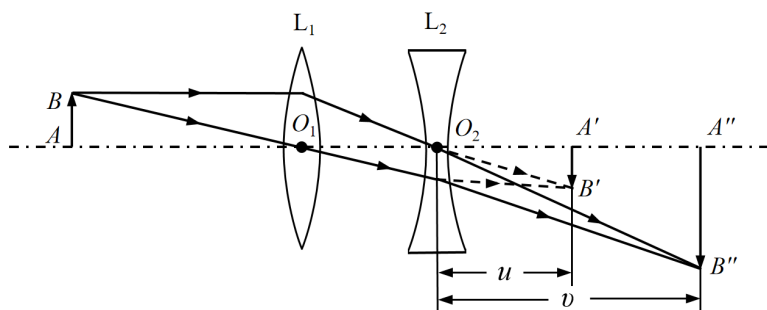


图 3.14-5 凹透镜的焦距测量示意图

4. 实验内容及步骤

1) 光具座上光学元件等高共轴的调节

为了避免像差，需要对光学系统进行等高共轴调节，使各透镜的光轴重合且与光具座的导轨严格平行，物屏中心处在光轴上，并且物屏面、像屏面垂直于光轴。此外，照明光束也应大

体沿光轴方向。

(1) 粗调。

把光源、物屏、透镜、像屏等元件放置于光具座上，并使它们向光源尽量靠拢，用眼睛观察，调节各元件的高低、左右位置，使各元件的中心大致在与导轨平行的同一条直线上，并使物屏面、透镜面和像屏面三者相互平行且垂直于光具座的导轨。

(2) 细调。

点亮光源，利用共轭法判断是否共轴。当物屏与像屏的距离大于凸透镜焦距的 4 倍时，移动透镜会成一大、一小两个实像。若两像中心均与像屏中心重合，说明各元件已共轴等高；否则，应采取以下方法对各元件进行等高共轴调节。固定光源、物的位置不动，成小像时调像屏的高低、左右位置，使像屏中心与小像中心重合；成大量时调透镜的高低、左右位置，使像屏中心与大量中心重合，如此反复几次，便可调好。

如果光路中有多个透镜，则应先调好一个透镜共轴并保持不动；再逐个加入其余透镜，逐一调节它们的光轴使其与原系统的光轴一致。

2) 凸透镜焦距的测量

(1) 物距像距法。

按图 3.14-2 在光具座上依次放置光源、物屏、待测凸透镜、像屏，在等高共轴调好后，移动凸透镜与像屏的位置，使在像屏上得到大小合适、清晰的实像。记录此时的物屏位置、凸透镜位置和像屏位置，重复测量 3 次。

(2) 自准直法。

将物屏、待测凸透镜和平面镜置于光具座上并使之等高共轴，然后反复移动凸透镜，令平面镜靠近凸透镜并调节其高低和左右位置，直至物屏上得到一个与原物等大倒立的、清晰的像，即实现自准直。记录此时的物屏位置和凸透镜位置，重复测量 3 次。

(3) 共轭法。

固定物屏与像屏之间的距离 D 略大于 $4f$ ，将待测凸透镜放在物屏与像屏之间，移动凸透镜，分别记录成大量和小像时凸透镜的位置，重复测量 3 次。

3) 凹透镜焦距的测量

将物屏、凸透镜、像屏等光学元件置于光具座上，调节各光学元件至等高共轴。使物屏和凸透镜距离大于 2 倍凸透镜焦距，记录凸透镜位置 x_0 ；移动像屏，待清晰缩小的像出现在像屏上时，记录像屏的位置 x_1 ；然后在凸透镜和像屏之间加入待测凹透镜，记录其位置 x_2 ，移动像屏直至像屏上出现清晰的像，调节凹透镜的高低、左右位置，使像中心与第一次凸透镜成像的中心相同；仔细慢慢移动像屏直至成像最清晰，记录此时像屏的位置 x_3 。保持凸透镜位置不变，重复测量 3 次。

5. 注意事项

(1) 已调至等高共轴状态的透镜，在后续的调节、测量中绝不允许再次变动。

(2) 测量凹透镜焦距过程中，要保持凸透镜位置不变。

(3) 安装和取下光学元件时要轻拿轻放，以免损坏。

(4) 禁止用手直接触摸透镜的表面，以免影响其透光性能。

6. 实验数据记录与处理

1) 凸透镜焦距的测量

(1) 物距像距法。

自己设计表格，记录物屏、凸透镜、像屏的位置，计算物距 u 、像距 v ，利用式 (3.14-1) 计算凸透镜焦距 f 。

(2) 自准直法。

自己设计表格，记录物屏、凸透镜的位置，物屏到凸透镜的距离就是凸透镜的焦距 f 。

(3) 共轭法。

自己设计表格，记录物屏、像屏的位置及成大、小像时凸透镜的位置，计算物屏与像屏之间的距离 D 及两次成像之间的位移 d ，利用式 (3.14-4) 计算凸透镜焦距 f 。

2) 凹透镜焦距的测量

自己设计表格，记录凸透镜、凹透镜、像屏、物经凸透镜成像位置，计算物距 u 、像距 v ，利用式 (3.14-6) 计算凹透镜焦距 f 。

7. 思考题

(1) 为什么要对光学系统进行等高共轴调节？如何调节？

(2) 用共轭法测量凸透镜焦距时，为什么必须满足物像屏间距大于四倍焦距这一条件？在满足此条件时，物像屏间距为什么又不宜太大？

(3) 用自准直法测量凸透镜的焦距时，平面镜起什么作用？平面镜离凸透镜距离不同，对成像有无影响？

(4) 为何在测量凹透镜焦距时，先使凸透镜成一缩小的实像？当放上凹透镜后，这个像位于凹透镜的焦点之外还是之内？为什么？

3.15 分光计的调节及使用

分光计是一种能精确测量光线偏转角度的基本光学仪器，常用来测量折射率、光波波长、色散率，观测光谱等。分光计的基本部件和调节原理与其他更复杂的光学仪器（如单色仪、摄谱仪等）有许多相似之处，学习和使用分光计，可为今后使用精密光学仪器打下良好的基础。

光的反射定律和折射定律定量描述了光线发生偏折时角度之间的关系，光在传播过程中的衍射、散射等现象都与角度有关。因此，精确测量光线偏折角度是光学实验的重要内容之一。

1. 实验目的

- (1) 了解分光计的结构及各部件的作用。
- (2) 掌握分光计的调节和使用方法。
- (3) 掌握用分光计测量角度的方法。

2. 实验器材

分光计、汞灯、三棱镜、双面反射镜。

3. 实验原理

1) 分光计的结构

实验室中常用的 JJY 型分光计的结构如图 3.15-1 所示, 分光计主要由底座、平行光管、望远镜、载物台、读数装置五部分组成。1 为狭缝装置, 2 为狭缝装置锁紧螺钉, 3 为平行光管, 4 为游标盘制动架, 5 为载物台, 6 为载物台调节螺钉, 7 为载物台锁紧螺钉, 8 为望远镜, 9 为目镜锁紧螺钉, 10 为自准直目镜, 11 为目镜调节手轮, 12 为望远镜光轴高低调节螺钉, 13 为望远镜光轴水平调节螺钉, 14 为望远镜支架, 15 为望远镜微调螺钉, 16 为望远镜与刻度盘连接螺钉, 17 为望远镜止动螺钉, 18 为望远镜制动架, 19 为底座, 20 为望远镜转座, 21 为刻度盘, 22 为游标盘, 23 为平行光管立柱, 24 为游标盘微调螺钉, 25 为游标盘止动螺钉, 26 为平行光管光轴水平调节螺钉, 27 为平行光管光轴高低调节螺钉, 28 为狭缝宽度调节手轮。

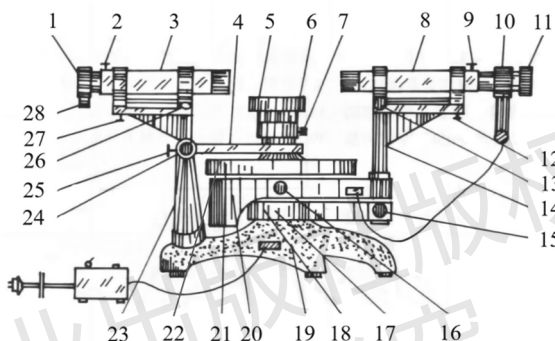


图 3.15-1 JJY 型分光计的结构

(1) 底座。

底座上安装着中心轴（又称主轴），轴上装有可绕中心轴转动的望远镜、读数刻度盘、游标盘、载物台和平行光管。

(2) 平行光管。

平行光管用来出射平行光束。它的一端装有消色差物镜，另一端装有狭缝套筒，调节狭缝宽度调节手轮可改变狭缝的宽度，狭缝套筒可沿光轴移动和转动，若狭缝正好移动到物镜的焦平面上，当狭缝被平行光管前的光源照亮时，由狭缝入射的光经物镜后出射平行光束。

(3) 望远镜。

望远镜用来确定平行光方位。它主要由消色差物镜和阿贝式自准直目镜组成，具体结构如图 3.15-2 所示。

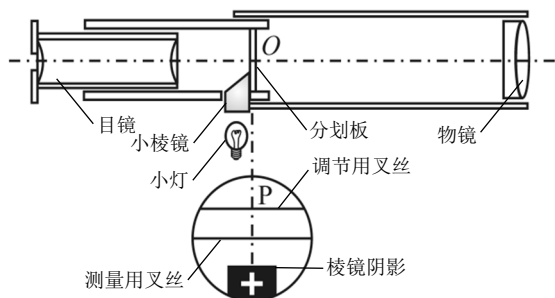


图 3.15-2 分光计望远镜的结构

图 3.15-2 所示。物镜装在镜筒的一端，目镜装在另一端的套筒中。装有分划板的套筒位于中间，分划板的下方与一个小棱镜的直角面紧贴。小棱镜的直角面上刻有一个“+”形透光叉丝。分划板套筒下方装有一盏小灯，小灯的光线经小棱镜将“+”形叉丝照亮后从物镜射出。若小棱镜的直角面恰好位于物镜的焦平面，则自物镜出射的光将为平行光。若在物镜前放置一平面镜，则光线经

平面镜反射后再经物镜，将成像于物镜的焦平面上，即小棱镜的直角面上，从目镜中将不仅可以清晰地看到分划板上的叉丝，还可以看到“+”形叉丝的像。

(4) 载物台。

载物台是用来放置光学元件的平台，可绕分光计的中心轴转动；松开该平台锁紧螺钉，可使平台沿中心轴升降；载物台下方有 3 个调节螺钉，用于调节平台的水平度。

(5) 读数装置。

读数装置由刻度盘和游标盘两部分组成。刻度盘一周为 360° ，最小分度值为 $30'$ ，游标盘上刻有 31 根小刻线，其最小分度值为 $1'$ ，测量原理和读数方法详见 2.2.1 节。为了消除刻度盘和分光计中心轴之间的偏心差，在刻度盘同一直径的两端各装一个角游标。测量角度时，对一个角度的两个位置，两个游标都应读数，算出每个游标在两个位置上的读数差，再取它们的平均值作为望远镜转过的角度。

2) 用最小偏向角法测量玻璃三棱镜的折射率和色散曲线

玻璃棱镜的折射率可用最小偏向角法测量。如图 3.15-3 所示， $\triangle ABC$ 是三棱镜的主截面，波长为 λ 的光线以入射角 i_1 投射到三棱镜 AB 面上，经 AB 和 AC 两个面折射后以 i_4 角从 AC 面出射，出射光线与入射光线的夹角 θ 称为偏向角。 θ 的大小随入射角 i_1 而改变。在入射光线和出射光线对称时，即当 $i_1 = i_4$ 时，偏向角有最小值，记为 $\theta_{\min}$ 。可以证明，玻璃三棱镜的折射率 n 由式 (3.15-1) 给出^[41]：

$$n = \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{\sin \frac{\alpha + \theta_{\min}}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} \quad (3.15-1)$$

式中， α 为三棱镜的顶角； $\theta_{\min}$ 为最小偏向角。

若入射光为非单色光，经棱镜折射后，不同波长的光将产生不同的偏折而被分散开来，这就是色散现象。因此，最小偏向角 $\theta_{\min}$ 与入射光的波长有关。折射率 n 与波长 λ 之间的关系曲线称为色散曲线。实验中，只要测量出 α 和 $\theta_{\min}(\lambda)$ ，由式 (3.15-1) 可计算出 $n(\lambda)$ ，就可绘制出该棱镜材料的色散曲线。

3) 验证光的反射定律

如图 3.15-4 所示，设光的入射角为 i_1 ，反射角为 i_2 ，根据反射定律有 $i_1 = i_2$ 。可用分光计分别测量入射光线、反射光线及法线的位置，从而对反射定律进行验证。

4. 实验内容及步骤

1) 分光计的调节

使用分光计前，必须仔细调节，使之处于正常工作状态：望远镜聚焦于无穷远处，其光轴与分光计主轴垂直；载物台平面与分光计主轴垂直；平行光管出射平行光，其光轴与分光计主轴垂直。

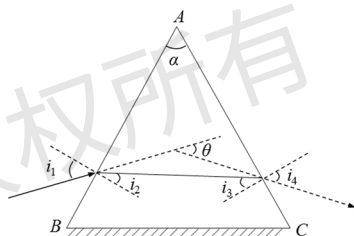


图 3.15-3 三棱镜最小偏向角

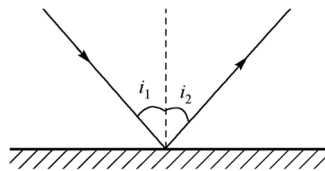


图 3.15-4 光的反射定律

(1) 粗调。

目测调节望远镜和平行光管的光轴高低调节螺钉,使二者大致垂直于分光计主轴;目测调节载物台调节螺钉,使上、下两平台有 1 mm 左右的间距,且与分光计主轴垂直。目测粗调是重要的一步,是进一步细调的基础,可以缩短细调的时间。

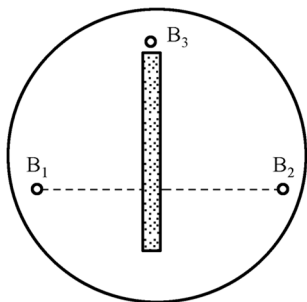


图 3.15-5 双面反射镜放置位置 1

(2) 调节望远镜聚焦于无穷远处。

①开启望远镜照明小灯,此时望远镜的目镜视场中“十”形叉丝可能不清晰,旋转目镜调节手轮,调节目镜与分划板的相对位置,使叉丝清晰,这时,分划板位于目镜的焦平面上。

②如图 3.15-5 所示,在载物台中部放置双面反射镜,使双面反射镜的平面与载物台下螺钉 B_1 、 B_2 连线垂直。

使双面反射镜的一个镜面和望远镜的镜筒垂直,通过望远镜观察由双面反射镜反射回来的“+”形叉丝像,此时反射像一般为不清晰的光斑,应松开目镜锁紧螺钉,前后移动目镜套筒,对望远镜进行调焦,使“+”形叉丝像清晰。

使双面反射镜的另一个镜面正对望远镜,通过望远镜观察由镜面反射回来的“+”形叉丝像。若只能观察到其中一个面的,则需进一步调节望远镜的光轴高低调节螺钉或载物台调节螺钉,直到两个镜面的反射像都出现在望远镜的视场中。

若在望远镜中找不到双面反射镜反射的“+”形叉丝像,可能是粗调未达到要求,应重新进行粗调。

③消除视差(详见 2.3.1 节)。当眼睛上下、左右微动时,若看到的“+”形叉丝像和分划板上的“十”形叉丝间有相对运动,则说明存在视差,应再仔细调节目镜套筒,直到无视差为止(“+”形叉丝像和分划板上的“十”形叉丝处于同一平面,没有前后的感觉),并将目镜锁紧螺钉锁紧。此时,叉丝平面已处于物镜的第二平面上,即望远镜已调焦于无穷远处。

(3) 调节望远镜光轴与分光计主轴垂直。

①依次使双面反射镜的两个镜面正对望远镜,通过望远镜观察由两个镜面反射回来的“+”形叉丝像在望远镜视场中的位置,采用各半渐进法将“+”形叉丝像调节到分划板的调节用叉丝处,即图 3.15-6 中所示的 P 点。

②“+”形叉丝像初始位置如图 3.15-6 (a) 所示,先调节载物台调节螺钉(图 3.15-5 中的 B_1 或 B_2 螺钉),使“+”形叉丝像与 P 点间的距离减少一半到图 3.15-6 (b) 所示位置;再调节望远镜光轴高低调节螺钉,使“+”形叉丝像与 P 点重合,如图 3.15-6 (c) 所示。

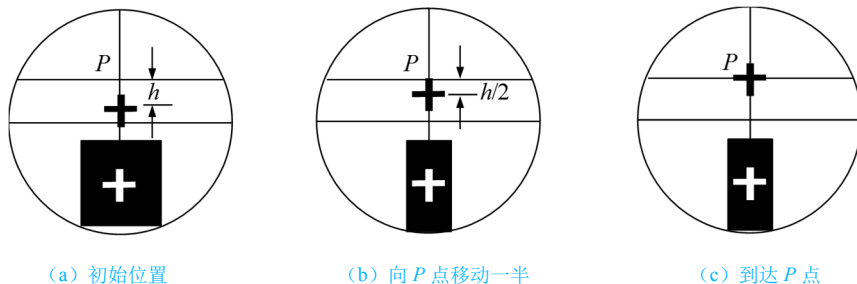


图 3.15-6 各半渐进法示意图

③将载物台旋转 180° ，使双面反射镜的另一镜面与望远镜镜筒垂直，同样，先调节载物台调节螺钉（图 3.15-5 中的 B_1 或 B_2 螺钉），使“+”形叉丝像与 P 点间距离减少一半；再调节望远镜光轴高低调节螺钉，使“+”形叉丝像与 P 点重合。

④将载物台旋转 180° ，回到第一个反射镜面，继续用上述方法调节。如此反复几次，直到双面反射镜的任一镜面反射的“+”形叉丝像均与 P 点重合。此时，望远镜光轴与分光计主轴垂直，此后不能再调节载物台调节螺钉 B_1 、 B_2 和望远镜光轴高低调节螺钉。

注意：在上述调节过程中，螺钉 B_3 不能动。

(4) 调节载物台平面与分光计主轴垂直。

将双面反射镜转动 90° ，使镜面与 B_1 、 B_2 的连线平行，如图 3.15-7 所示。转动载物台，使双面反射镜的一个镜面与望远镜镜筒垂直，调节载物台调节螺钉 B_3 （只能动 B_3 ，不能动 B_1 、 B_2 和望远镜光轴高低调节螺钉），使“+”形叉丝像与 P 点重合。此时，载物台平面与分光计主轴垂直。

(5) 调节平行光管出射平行光。

①打开汞灯（详见 2.2.6 节）电源，使平行光管对准汞灯。转动已调节好的望远镜，使其与平行光管处于同一直线，接收平行光管出射的光束。松开狭缝装置锁紧螺钉，调节平行光管的狭缝伸缩套筒，使狭缝处于平行光管物镜的前焦面上，此时，从望远镜中能看到清晰的狭缝像。

②调节狭缝宽度调节手轮，使从望远镜中看到的狭缝像约为 0.5 mm 宽，仔细调节狭缝伸缩套筒，直至它与叉丝无视差。此时，平行光管出射平行光。

(6) 调节平行光管光轴与分光计主轴垂直。

①转动狭缝套筒，使狭缝像呈水平状态；调节平行光管光轴高低调节螺钉，使狭缝像与分划板上“+”形叉丝的下叉丝（测量用叉丝）重合，如图 3.15-8（a）所示。此时，平行光管光轴与望远镜光轴重合，即与分光计主轴垂直。

②将狭缝旋转 90° 到图 3.15-8（b）所示的竖直状态，拧紧狭缝装置锁紧螺钉。

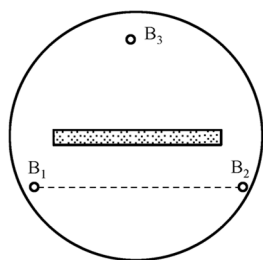
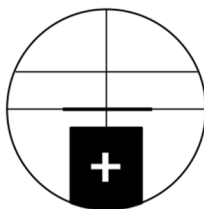
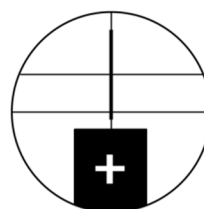


图 3.15-7 双面反射镜放置位置



(a) 狭缝水平放置



(b) 狭缝竖直放置

图 3.15-8 平行光管光轴调节时狭缝像位置图

在调节平行光管时，不能调节望远镜光轴高低调节螺钉和载物台调节螺钉，否则需重新调节望远镜和载物台的状态。

至此，分光计调节完毕，将游标盘对称置于平行光管两侧，锁紧游标盘止动螺钉，将望远镜与刻度盘连接螺钉锁紧，使其能同步转动，就可以进行实验测量了。

2) 验证光的反射定律

如图 3.15-9 所示，将双面反射镜放在已经调节好的分光计载物台上。 S 为平行光入射方向， T_1 为入射光位置（与平行光管相对）， T_2 为双面反射镜法线反方向位置（与镜面的法线 N

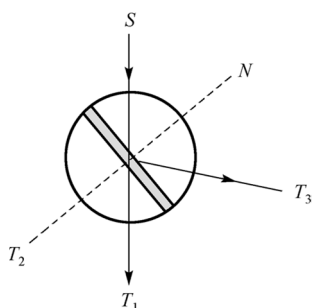


图 3.15-9 验证光的反射定律图

相对), T_3 为反射光位置。

转动望远镜至 T_1 位置, 使狭缝像与分划板上“十”形叉丝的竖线重合, 记下游标一、游标二的示数 θ_1 和 θ'_1 ; 转动望远镜至 T_2 位置, 使“+”形叉丝像与分划板的 P 点重合, 记下游标一、游标二的示数 θ_2 和 θ'_2 ; 转动望远镜至 T_3 位置, 使狭缝像与分划板上“十”形叉丝的竖线重合, 记下游标一、游标二的示数 θ_3 和 θ'_3 , 则入射角 θ_λ 为

$$\theta_\lambda = \frac{|\theta_2 - \theta_1| + |\theta'_2 - \theta'_1|}{2} \quad (3.15-2)$$

反射角

$$\theta_{\text{反}} = 180^\circ - \frac{|\theta_3 - \theta_2| + |\theta'_3 - \theta'_2|}{2} \quad (3.15-3)$$

百分差

$$E = \frac{|\theta_{\text{反}} - \theta_\lambda|}{\frac{1}{2}(\theta_{\text{反}} + \theta_\lambda)} \times 100\% \quad (3.15-4)$$

3) 测量三棱镜材料的折射率

(1) 测量三棱镜的顶角。

①三棱镜的调节。

将待测三棱镜放在已调节好的分光计载物台上, 为便于调节, 使棱镜的三个顶角分别对准载物台下的三个螺钉。

转动载物台, 使三棱镜的通光面 AB 面对准望远镜 (图 3.15-10 中 T_1 位置), 用自准直法调节三棱镜主截面的位置。调节 C 角对应的载物台调节螺钉 (此时不能再调节望远镜光轴高低调节螺钉), 使从 AB 面反射回来的“+”形叉丝像与分划板上的 P 点重合, 即使 AB 面垂直于望远镜的光轴; 再转动载物台使 AC 面对准望远镜 (图 3.15-10 中 T_2 位置), 调节 B 角对应的载物台调节螺钉, 使 AC 面垂直于望远镜的光轴。如此反复数次, 使 AB 面和 AC 面同时垂直于望远镜的光轴, 即三棱镜的主截面和分光计的主轴垂直。

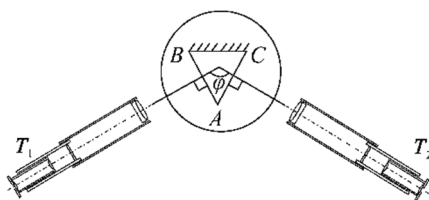


图 3.15-10 自准直法测量三棱镜的顶角

②自准直法测量三棱镜的顶角。

如图 3.15-10 所示, 转动望远镜, 使 AB 面反射回来的“+”形叉丝像与分划板上的 P 点重合, 记录游标一、游标二的示数 θ_1 和 θ_2 ; 然后转动望远镜, 使 AC 面反射回来的“+”形叉丝像与分划板上的 P 点重合, 记录游标一、游标二的示数 θ'_1 和 θ'_2 , 则望远镜转过的角度为

$$\varphi = \frac{|\theta_2 - \theta'_2| + |\theta_1 - \theta'_1|}{2} \quad (3.15-5)$$

于是，三棱镜的顶角为

$$\alpha = 180^\circ - \varphi = 180^\circ - \frac{|\theta_2 - \theta'_2| + |\theta_1 - \theta'_1|}{2} \quad (3.15-6)$$

③反射法测量三棱镜的顶角。

如图 3.15-11 所示，平行光管出射的平行光被三棱镜的两个通光的光学面反射后分成两束反射平行光 T_1 、 T_2 ，测量出这两束光之间的夹角 Φ ，则三棱镜的顶角为

$$\alpha = \frac{\Phi}{2} \quad (3.15-7)$$

(2) 测量最小偏向角 $\theta_{\min}$ 。

①确定出射光线的方位。

将三棱镜按图 3.15-12 所示放置，用汞灯照亮平行光管的狭缝，光线经三棱镜折射而偏转，先用眼睛观察，找到经三棱镜 AB 面、 AC 面折射后的狭缝像，然后用望远镜观察出射光线的光谱（汞灯为复色光源，经三棱镜折射后会形成按波长由大到小依次排列的狭缝的单色像），这时的偏向角一般不是最小偏向角。

将望远镜对准其中某一条谱线（例如 $\lambda = 435.833 \text{ nm}$ 的紫色谱线），沿一个方向慢慢转动载物台，使观察到的谱线向入射光线靠拢（偏向角在减小），同时转动望远镜使狭缝像保持在视场中，直到三棱镜转到某个位置时，谱线不再向前移动，而是向相反方向移动（偏向角增大）为止，这个位置就是棱镜对该谱线的最小偏向角位置。

固定载物台、游标盘，缓慢转动望远镜，使分划板上“ $\neq$ ”形叉丝的竖线与谱线中心重合，记录游标一、游标二的示数 θ 和 θ' 。

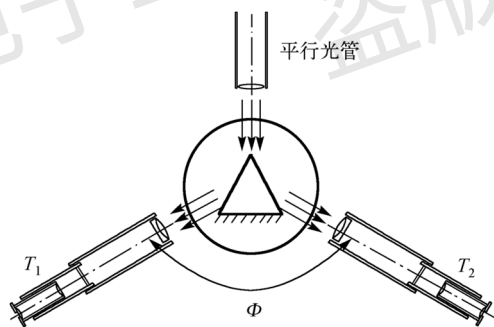


图 3.15-11 反射法测量三棱镜的顶角

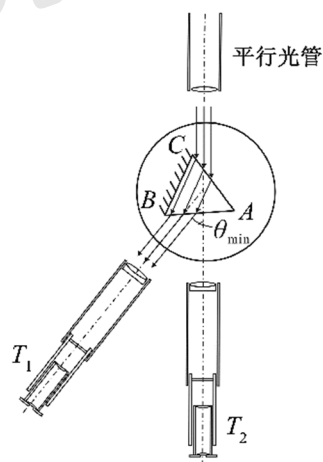


图 3.15-12 测量最小偏向角

②确定入射光线的方位。

将三棱镜取下，转动望远镜，使其与平行光管相对，望远镜分划板上“ $\neq$ ”形叉丝的竖线与平行光原传播方向重合，记录此时游标一、游标二的示数 θ_0 和 θ'_0 ，则最小偏向角为

$$\theta_{\min} = \frac{|\theta - \theta_0| + |\theta' - \theta'_0|}{2} \quad (3.15-8)$$

为了测量准确，要使用望远镜的微调螺钉。先将望远镜转动到待测位置附近，固定望远镜；仔细调节望远镜微调螺钉，使分划板上“ $\neq$ ”形叉丝的竖线与谱线中心重合。

5. 注意事项

- (1) 光学仪器螺钉的调节动作要轻柔，锁紧螺钉不可用力过大，以免损坏仪器。
- (2) 正式测量之前必须将游标盘锁定，将刻度盘与望远镜锁定在一起。
- (3) 在测量某一角度 φ 时，若望远镜位置由 T_1 转到 T_2 ，某一游标的读数经过了刻度盘的零刻度，则望远镜转过的角度应为 $\varphi = 360^\circ - |\theta_2 - \theta_1|$ 。
- (4) 不能在望远镜止动螺钉锁紧时强行转动望远镜。

6. 实验数据记录与处理

1) 验证光的反射定律

测量游标一示数、游标二示数，并填入表 3.15-1。

表 3.15-1 验证光的反射定律的测量数据记录

望远镜位置	游标一示数 θ_i		游标二示数 θ'_i	
位置 1: 入射光线方向	θ_1		θ'_1	
位置 2: 法线反方向	θ_2		θ'_2	
位置 3: 反射光线方向	θ_3		θ'_3	

利用式 (3.15-2) ~ 式 (3.15-4) 计算入射角、反射角和百分差，验证反射定律。

2) 计算三棱镜的折射率

- (1) 测量三棱镜的顶角。

自己设计表格，分别记录 AB 面、 AC 面反射回来的“+”形叉丝像与分划板上的 P 点重合时的游标一、游标二的示数，重复测量 3 次，利用式 (3.15-6) 计算三棱镜的顶角 α 。

- (2) 测量最小偏向角。

自己设计表格，分别记录汞灯 435.833 nm、546.074 nm、576.960 nm、579.066 nm 谱线最小偏向角 $\theta_{\min}$ 的出射光线、入射光线位置的游标一与游标二的示数，重复测量 3 次，利用式 (3.15-8) 计算各谱线对应的最小偏向角 $\theta_{\min}$ 。

7. 思考题

- (1) 分光计主要由几部分组成？已调好的分光计应处于何种状态？
- (2) 测量中，平行光管的狭缝调节得太宽或太窄会产生什么影响？
- (3) 借助双面反射镜调节望远镜的光轴使其与分光计的主轴垂直时，为什么要将载物台旋转 180° 使双面反射镜两镜面的“+”形叉丝像均与目镜叉丝 P 点重合？只调一个镜面行吗？
- (4) 对同一种材料来说，红光和紫光中哪个的折射率小？哪个的偏向角最小？当转动三棱镜找最小偏向角时，应使谱线向着红光移动，还是向着紫光移动？

3.16 衍射光栅

衍射光栅是一种重要的分光元件。它不仅用于光谱学，还广泛用于计量、光通信、信息处理等方面。它由大量等宽、等间距的平行狭缝（或刻痕）组成。光栅可以用精密的刻划机制作，

也可以用化学蚀刻法制作，一般 1 mm 内可刻上 100~1000 条刻痕。光栅是光栅摄谱仪的核心组成部分，一般可分为透射光栅和反射光栅，本实验研究的是透射光栅。

1. 实验目的

- (1) 观察光栅的衍射光谱，理解光栅衍射的基本规律。
- (2) 进一步熟悉分光计的调节和使用。
- (3) 掌握利用光栅衍射测定光栅常数、光的波长、光栅的角色散率的方法。

2. 实验器材

分光计、透射光栅、汞灯、双面反射镜。

3. 实验原理

1) 光栅方程

如图 3.16-1 所示，平行光垂直照射到透射光栅上时，在位于透镜焦平面处的接收屏上可观察到分得很开的衍射条纹。根据光栅方程，各级主极大明条纹位置为

$$(a+b)\sin\varphi = d\sin\varphi = \pm k\lambda \quad k=0,1,2,3,\dots \quad (3.16-1)$$

式中， $d=a+b$ 称为**光栅常数**，其中 a 为光栅狭缝宽度（透光部分）； b 为刻痕宽度（不透光部分）； φ 为衍射角； λ 为入射光波长； k 为主极大明条纹的级数， $k=0$ 的条纹称为中央明条纹， $k=\pm 1$ 的条纹是对称分布在中央明条纹两侧的第一级主极大明条纹，其余以此类推。

由式 (3.16-1) 可知，利用光栅衍射可以测量光的波长或光栅常数。若由分光计测量出 k 级谱线的衍射角 φ ，且波长 λ 已知，可求出光栅常数 d ；反之，如果光栅常数 d 已知，则可以求出波长 λ 。

如果入射光是复色光，由式 (3.16-1) 可知，对于相同的级数 k ，波长 λ 不同，衍射角 φ 也不同，复色光被分解，此即光栅的分光作用。因此，除中央明条纹外，在中央明条纹两侧对称分布着按波长由小到大依次排开的各级谱线，此谱线称为光栅的衍射光谱^[41,42]。

图 3.16-2 是低压汞灯的第一级衍射光谱示意图。汞灯的每一级光谱中有 4 条特征谱线：紫线 $\lambda_1 = 435.833 \text{ nm}$ ，绿线 $\lambda_2 = 546.074 \text{ nm}$ ，两条黄线 $\lambda_3 = 576.960 \text{ nm}$ 和 $\lambda_4 = 579.066 \text{ nm}$ 。

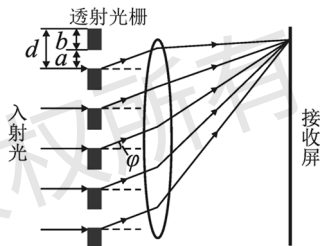


图 3.16-1 光栅衍射示意图

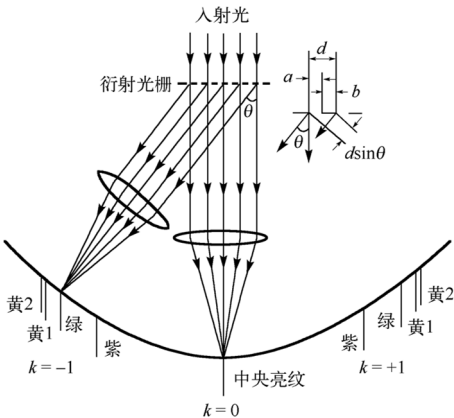


图 3.16-2 低压汞灯的第一级衍射光谱示意图

2) 光栅的角色散率 D

角色散率是光栅、棱镜等分光元件的重要参数,从光栅方程可知,衍射角 φ 是波长 λ 的函数,这是光栅有色散作用的原因。衍射光栅的角色散率 D 定义为在同级光谱中两条谱线的衍射角之差 $\Delta\varphi$ 与其波长之差 $\Delta\lambda$ 之比,即

$$D = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda} \quad (3.16-2)$$

将式 (3.16-1) 对 λ 微分得到 $d \cos \varphi d\varphi = k d\lambda$, 则角色散率可表示为

$$D = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda} = \frac{k}{d \cos \varphi} \quad (3.16-3)$$

由上式可知,光栅的角色散率与光栅常数 d 成反比,与谱线级数 k 成正比,它只反映两条谱线中心分开的程度,而不涉及谱线能否分辨。

4. 实验内容及步骤

1) 分光计的调节

分光计的调节方法见 3.15 节。

2) 测量光栅的光栅常数 d 、角色散率 D

使用汞灯照亮平行光管狭缝,转动望远镜,使狭缝中央对准分划板上“丰”形叉丝的竖线,固定望远镜。

(1) 调节光栅。

①调节光栅平面与平行光管光轴垂直。

如图 3.16-3 (a) 所示,将光栅置于载物台上。转动载物台,目视使光栅平面垂直于平行光管光轴,并通过望远镜找到由光栅平面反射回来的“+”形叉丝像。调节载物台调节螺钉 B_1 或 B_2 , 用自准直法 (详见 3.14 节) 调节光栅平面与平行光管光轴垂直 (不允许调节望远镜的光轴高低调节螺钉,只需对光栅的一个表面进行调节即可)。此时,通过望远镜可以观察到图 3.16-3 (b) 所示的图像,固定载物台。

②调节光栅,使其刻线与分光计转轴平行。

如图 3.16-4 所示,转动望远镜观察中央明条纹两侧的光谱线是否等高。若光栅刻线与分光计主轴不平行,则光谱线不等高,这时应调节载物台调节螺钉 B_3 , 直到各条谱线等高为止。调节后再检查光栅平面是否仍与平行光管光轴垂直,若有变化,则再次调节,直到两个条件同时满足为止。

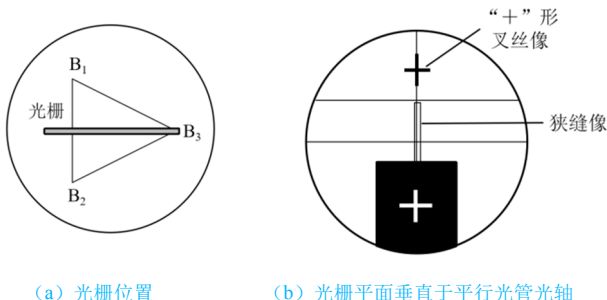


图 3.16-3 光栅调节示意图

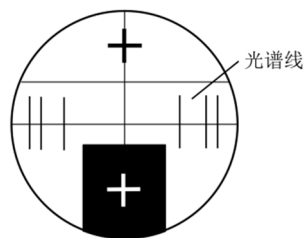


图 3.16-4 光谱线高度

调节结束，固定载物台，光栅位置不能再改变。

(2) 测量光栅常数 d 。

光线垂直光栅入射时，衍射光栅光谱相对于零级明条纹对称。为提高测量的准确度，测量第 k 级光谱线时，应测量出 $+k$ 级和 $-k$ 级光谱线的角位置 θ_{+k} 和 θ_{-k} ，两角位置之差的一半即为该级光谱线的衍射角 φ_k ，即

$$\varphi_k = \frac{1}{2}(\theta_{+k} - \theta_{-k}) \quad (3.16-4)$$

从分光计游标一、游标二上读出两级光谱线各自的 θ_{+k} 和 θ_{-k} ，分别计算出 $\varphi_{k左}$ 和 $\varphi_{k右}$ ，取两者的平均值，以消除刻度盘偏心误差，有

$$\bar{\varphi}_k = \frac{1}{2}(\varphi_{k左} + \varphi_{k右}) \quad (3.16-5)$$

测量汞灯的第一级特征谱线 ($k = \pm 1$) 的衍射角，记入表 3.16-1 中。

表 3.16-1 汞灯第一级谱线衍射角的测量数据

分光计型号：_____。分度值：_____。

波长/ nm	角坐标读数			$\varphi_i = \frac{ \theta_{+1} - \theta_{-1} }{2}$	$\bar{\varphi}_i$
	游标	θ_{+1}	θ_{-1}		
紫线 $\lambda_1 = 435.833$	游标一				
	游标二				
绿线 $\lambda_2 = 546.074$	游标一				
	游标二				
黄线 1 $\lambda_3 = 576.960$	游标一				
	游标二				
黄线 2 $\lambda'_3 = 579.066$	游标一				
	游标二				

(3) 测量光栅角色散率 D 。

测量 $k = 1$ 时汞灯光谱双黄线处角色散率，求出计算值 $D = \frac{k}{d \cos \varphi}$ 和测得值 $D' = \frac{\Delta \varphi}{\Delta \lambda}$ ，并计算百分差。

5. 注意事项

- (1) 正式测量之前必须将游标盘锁定，将刻度盘与望远镜锁定在一起。
- (2) 在测量某一角度 φ 时，若望远镜位置由 T_1 转到 T_2 ，某一游标的读数经过了刻度盘的零刻度，则望远镜转过的角度应为 $\varphi = 360^\circ - |\theta_2 - \theta_1|$ 。
- (3) 分光计应按操作规程正确使用，光栅是易碎、易损的精密光学元件，必须轻拿轻放，严禁用手触摸光栅表面。
- (4) 避免用眼睛直视汞灯，以免紫外线灼伤眼睛。
- (5) 为了提高灵敏度，狭缝宽度应适当调窄一些。
- (6) 计算角色散率测得值 $D' = \frac{\Delta \varphi}{\Delta \lambda}$ 时， $\Delta \varphi$ 的单位为弧度。

6. 实验数据记录与处理

1) 计算光栅常数

根据式 (3.6-1), 利用表 3.16-1 中汞灯第一级各谱线对应的波长和衍射角, 计算光栅常数 d_i 及其平均值 $\bar{d}$, 并计算百分差。

2) 计算光栅的角色散率

计算光栅在 $k=1$ 时对汞灯光谱双黄线的角色散率计算值 $D = \frac{1}{\bar{d} \cos \bar{\varphi}}$ 、角色散率测得值 $D' = \frac{\Delta \varphi}{\Delta \lambda}$ 和百分差 $E = \frac{|D' - D|}{D} \times 100\%$ 。其中, $\bar{d} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 d_i$, $\bar{\varphi} = \frac{(\bar{\varphi}_3 + \bar{\varphi}_4)}{2}$, $\Delta \varphi = \bar{\varphi}_4 - \bar{\varphi}_3$, $\Delta \lambda = \lambda_4 - \lambda_3$ 。

7. 思考题

- (1) 为什么测量时必须使光栅平面与平行光管光轴垂直?
- (2) 光栅光谱与棱镜光谱有何不同?
- (3) 如果光栅平面和分光计转轴平行, 但刻痕线和转轴不平行, 那么光谱有什么异常? 对测量结果有无影响?

3.17 等厚干涉的应用

等厚干涉是分振幅干涉现象, 等厚干涉中同一级干涉条纹对应的薄膜厚度相同, 条纹的形状取决于薄膜层上等厚点的分布。由于条纹的分布与薄膜层厚度变化的关系简单明了, 产生装置简单, 测量过程易于操作, 结果便于观测, 所以等厚干涉在科学研究和工业技术上有着广泛的应用, 例如, 光的波长的测量、微小长度的测量、工件表面平整度的检验、机械零件内应力分布的研究、光学元件镀膜层厚度及半导体材料上氧化层厚度的测量等。本实验应用典型的等厚干涉装置——牛顿环和劈尖, 实现对凸透镜曲率半径和微小厚度的测量^[34,43]。

1. 实验目的

- (1) 观察等厚干涉现象, 了解等厚干涉的特点。
- (2) 掌握读数显微镜的使用方法。
- (3) 掌握用干涉法测量透镜曲率半径与微小厚度的原理、装置和方法。

2. 实验器材

牛顿环、劈尖、读数显微镜、低压钠灯。

3. 实验原理

1) 牛顿环

如图 3.17-1 所示, 一块曲率半径较大的平凸透镜放在一块光学平板玻璃上, 在平凸透镜和平板玻璃之间形成一个上表面为球面、下表面为平面的空气薄层。若平行单色光垂直照射到

牛顿环装置上,经空气薄层上、下表面反射的两光束将发生干涉,可以观察到以玻璃接触点为中心的一系列明暗相间的圆环(牛顿环)。由于同一干涉环上各处的空气薄层厚度是相同的,因此,牛顿环属于等厚干涉。

图 3.17-1 中,设平凸透镜的曲率半径为 R , 与接触点 O 相距为 r 处的空气薄层厚度为 e , 其几何关系式为

$$r^2 = R^2 - (R - e)^2 = 2Re - e^2 \quad (3.17-1)$$

由于 $R \gg e$, 式 (3.17-1) 中略去 e^2 项, 则有

$$e = \frac{r^2}{2R} \quad (3.17-2)$$

若光线是垂直入射的, 则对于空气薄层的任一厚度 e 处, 上、下表面反射光的相干条件为

$$\Delta = 2e + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda & k=1,2,\dots \text{明条纹} \\ (2k+1)\frac{\lambda}{2} & k=0,1,2,\dots \text{暗条纹} \end{cases} \quad (3.17-3)$$

将式 (3.17-2) 代入上式, 可得到第 k 级暗环的半径为

$$r_k^2 = kR\lambda \quad (3.17-4)$$

如图 3.17-2 所示, 由于平凸透镜和平板玻璃的接触压力会引起局部形变, 使接触处成为一个圆形平面, 而非理想的点接触, 即使得干涉环中心为一暗斑, 无法确定环的几何中心。实际测量时, 为了保证测量的精度, 先测量距中心较远的两个暗环的直径 D_m 和 D_n , 再由它们的平方差来计算曲率半径 R 。

由式 (3.17-4) 可得 $D_m^2 = 4mR\lambda$, $D_n^2 = 4nR\lambda$, 则平凸透镜的曲率半径为

$$R = \frac{D_m^2 - D_n^2}{4(m-n)\lambda} \quad (3.17-5)$$

由此可知, 当入射光波长 λ 已知时, 只要测量出 D_m 和 D_n , 就能计算出曲率半径 R 。

2) 空气劈尖

如图 3.17-3 所示, 两块平板玻璃一端自然接触, 另一端夹一厚度为 d 的薄片(或细丝), 在两块平板玻璃之间会形成一个夹角为 α 的空气劈尖。

当单色光垂直入射空气劈尖时, 被劈尖中空气薄层的上、下表面反射, 这些反射光在空气薄层上表面附近相遇产生干涉。在劈尖厚度为 e 的地方, 上、下表面反射光之间的光程差为

$$\Delta = 2e + \frac{\lambda}{2} \quad (3.17-6)$$

式中, $\frac{\lambda}{2}$ 是光在空气薄层下表面反射时产生的半波损失。于是, 上、下表面反射光的干涉条件为

$$\Delta = 2e + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda & k=1,2,\dots \text{明条纹} \\ (2k+1)\frac{\lambda}{2} & k=0,1,2,\dots \text{暗条纹} \end{cases} \quad (3.17-7)$$

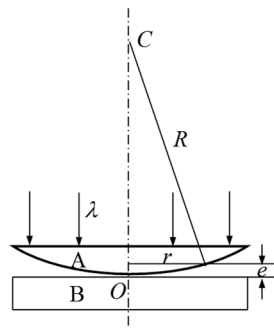


图 3.17-1 牛顿环装置图

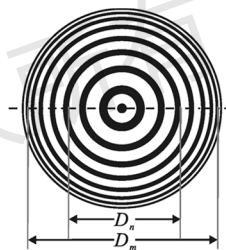


图 3.17-2 牛顿环干涉图样

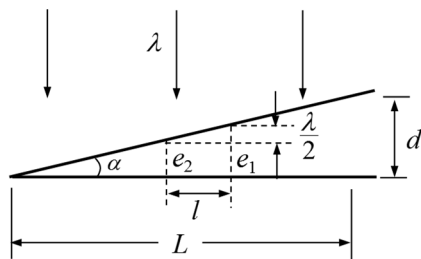


图 3.17-3 劈尖干涉图

由上式可知, 在 e 相同的地方光程差相等, 形成同一级干涉条纹, 此为等厚干涉, 干涉条纹是平行于棱边的一系列明暗相间的直条纹。在 $e=0$ 处, $\Delta=\frac{\lambda}{2}$, 所以棱边处为暗条纹, 并且任何两相邻明纹或暗纹之间的空气薄层的厚度差为 $\frac{\lambda}{2}$ 。

设相邻两条纹间距为 l , 劈尖棱边到薄片 (或细丝) 的距离为 L , 由于夹角 α 很小, 有 $l\alpha=\frac{\lambda}{2}$, 于是薄片厚度 (或细丝直径) 为

$$d=L\alpha=\frac{L\lambda}{2l} \quad (3.17-8)$$

用劈尖干涉还可以检测玻璃的平整度。根据干涉条纹的弯曲方向, 可以判断平板玻璃表面有凹陷还是凸起。设凹陷 (凸起) 的深 (高) 度为 h , 根据计算可以得到, h 与入射光波长 λ 、相邻条纹间距 l 、条纹变形宽度 a 之间的关系为

$$h=\frac{a}{l}\frac{\lambda}{2} \quad (3.17-9)$$

已知入射光波长 λ , 通过劈尖产生的平行条纹测量出 l 、 a , 即可计算出缺陷的高度或深度 h 。

4. 实验内容及步骤

1) 测量平凸透镜的曲率半径

(1) 读数显微镜的结构如图 3.17-4 所示。将牛顿环放置于读数显微镜的载物台中部, 调节读数显微镜和光源的高度, 使光源水平照射显微镜镜头下 45° 的半射镜, 微调半射镜的角度, 使读数显微镜视场中的亮度达到最大。

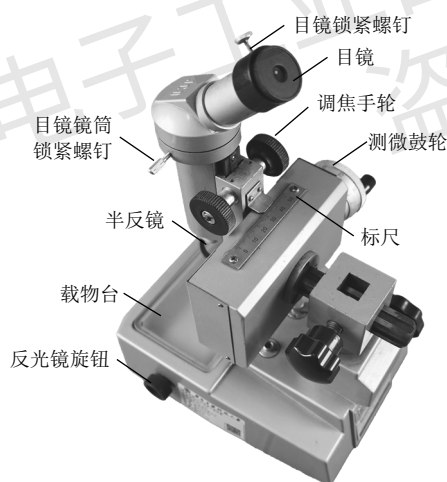


图 3.17-4 读数显微镜

光源为低压钠灯 (详见 2.2.6 节), 其光谱中波长为 588.995 nm, 589.592 nm 的两种黄光最强, 在一般应用时, 可用其平均值 589.294 nm 作为钠灯发出光的波长。

(2) 调节目镜, 使十字叉丝清晰。

①旋转调焦手轮使读数显微镜镜筒下降 (**注意: 此时从显微镜外边看, 而不是从目镜中看**) 至接近牛顿环的上表面。

②旋转调焦手轮, 自下而上缓慢升起显微镜镜筒, 当目镜的视场中有干涉条纹时, 稍微旋转调焦手轮以及微调半射镜的角度, 将干涉条纹调节至清晰无视差。

(3) 缓慢移动牛顿环, 使干涉条纹的圆心位于显微镜视场中心; 调节读数显微镜的十字叉丝, 使其纵丝与显微镜主刻度尺垂直。

(4) 旋转读数显微镜测微鼓轮, 从中心暗圆斑 (零级暗纹) 向左或向右数暗环数。为了消除读数显微镜的空程差 (详见 2.3.1 节), 应采用单向移动的方法测量第 5、10、15、20 级暗环的直径。

①将读数显微镜十字叉丝的纵丝移到一侧的第 25 级暗纹处。

②反方向旋转测微鼓轮, 并一直沿此方向使纵丝分别与第 20、15、10、5 级暗环外侧 (或

内侧)相切,记录各次相切时显微镜的读数。

③使读数显微镜十字叉丝的纵丝沿同方向经过中心的暗圆斑继续移动到干涉条纹的另一侧,并分别与第5、10、15、20级暗环内侧(或外侧)相切,记录各次相切时显微镜的读数。

2) 利用劈尖干涉测量箔片的厚度

(1)将一端夹有箔片的劈尖放置在显微镜的载物台中部,调节读数显微镜,使读数显微镜视场中的亮度达到最大。

(2)调节目镜,使十字叉丝清晰。

①旋转调焦手轮使读数显微镜镜筒下降(注意:此时从显微镜外边看,而不是从目镜中看)至接近劈尖的上表面。

②旋转调焦手轮,自下而上缓慢升起显微镜镜筒,当目镜的视场中有干涉条纹时,稍微旋转调焦手轮以及微调半射镜的角度,将干涉条纹调节至清晰无视差。

(3)调节读数显微镜的十字叉丝,使其纵丝与显微镜主刻度尺垂直。

(4)测量劈尖长度 L 。

旋转读数显微镜测微鼓轮,采用单向移动的方法测量劈尖棱边和箔片的位置。

(5)测量干涉条纹间距 l 。

①找到一段质量较好的干涉条纹分布,消除空程差后,选择任意一条暗纹为第0个条纹。

②沿同一方向移动显微镜镜筒,分别记录第0、10、20、30、40、50、60、70个条纹所在位置的读数。

3) 探查平板玻璃表面上某处的缺陷深度(高度)

移动劈尖,在视场中找到干涉条纹的变形部位,从弯曲的条纹中选一条较规则的干涉条纹,测量出变形宽度 a 。

5. 注意事项

(1)测量过程中注意消除读数显微镜的空程差。使用读数显微镜进行测量时,显微镜的测微鼓轮只能向一个方向旋转,即镜筒在测量中只能沿着一个方向移动,测量中途不能反向。

(2)测量劈尖干涉条纹的间距 l 时,纵丝每次应与明、暗条纹的交界线重合;测量劈尖长度 L 时,劈尖棱边和箔片处均以内侧位置为准。

(3)由于读数显微镜的量程较短,所以每次测量前均应将显微镜镜筒放置在主刻度尺的适当位置,以避免未测量完成而镜筒却已移到了主刻度尺的极限位置。

(4)严禁调节牛顿环的三个螺钉和劈尖细丝的位置,取放牛顿环和劈尖时一定要小心,以免损坏光学元件。

6. 实验数据记录与处理

1) 测量平凸透镜的曲率半径

自己设计表格,记录目镜纵丝分别与第20、15、10、5级暗环左侧外切(或内切)以及右侧内切(或外切)时显微镜的读数,利用式(3.17-5)计算平凸透镜的曲率半径。其中,钠灯发出光的波长 $\lambda = 589.294 \text{ nm}$,级数差 $m - n = 10$ 。

2) 测量金属箔的厚度(读数显微镜的 $\Delta_{\text{ins}} = 0.01 \text{ mm}$)

(1)劈尖长度 L 的测量。

自己设计表格,记录劈尖棱边和箔片的位置,计算劈尖长度 L 及测量不确定度,写出测量

结果的完整表达式。

(2) 干涉条纹间距 l 的测量。

自己设计表格,记录第 0、10、20、30、40、50、60、70 个条纹所在位置的读数,用逐差法处理数据,计算干涉条纹间距 l 及测量不确定度,写出测量结果的完整表达式。

(3) 计算箔片厚度 d 。

利用式 (3.17-8) 计算出箔片厚度 d , 评定测量不确定度, 写出测量结果的完整表达式。

3) 探查平板玻璃上某处的缺陷深度(高度)

记录条纹的变形宽度 a , 利用式 (3.17-9) 计算出该处缺陷的深度(高度) h 。

7. 思考题

(1) 牛顿环实验中,若平板玻璃上有微小凸起,这时的干涉条纹在局部是凸向外环还是凸向内环,为什么?

(2) 测量劈尖的干涉条纹间距 l 时,若发现逐项逐差 $\Delta l = l_{i+1} - l_i$ 递增或递减,说明什么?可能是什么原因引起的?

(3) 为什么牛顿环离环心越远,条纹越密?

3.18 迈克耳孙干涉仪的应用

迈克耳孙干涉仪是根据光的干涉原理制成的一种精密仪器,在近代物理学的发展和计量技术中发挥了重要的作用,它可以精确测量光的波长、微小位移、光源的相干长度等,在科研生产中有着广泛的应用。

1887 年,迈克耳孙完成了近代物理学史上著名的迈克耳孙-莫雷实验,实验结果否定了“以太”的存在,并为爱因斯坦发现相对论提供了实验依据。随后迈克耳孙又进行了标定米尺长度和推断光谱精细结构两个著名实验,前者实现了长度单位的标准化,对近代计量技术的发展做出了重要贡献;后者利用干涉条纹视见度随光程差变化的规律推断出光谱的精细结构。由于制造了精密的光学仪器和利用这些仪器所完成的光谱学和基本度量学的研究,迈克耳孙获得了 1907 年诺贝尔物理学奖^[42,44]。

1. 实验目的

- (1) 了解迈克耳孙干涉仪的结构及原理。
- (2) 掌握迈克耳孙干涉仪的调节方法。
- (3) 观察定域和非定域干涉。
- (4) 掌握使用迈克耳孙干涉仪测量光的波长的方法。
- (5) 观察白光的干涉条纹,学会测量相干长度。

2. 实验器材

迈克耳孙干涉仪、氦氖激光器、钠灯、白炽灯、扩束透镜。

3. 实验原理

1) 迈克耳孙干涉仪的光路结构

(1) 迈克耳孙干涉仪的光路。

迈克耳孙干涉仪的光路如图 3.18-1 所示, S 为光源, G_1 、 G_2 为平行放置的两块平板玻璃。 G_1 为分光镜, 后表面镀有半透膜; G_2 为补偿板, 其材料、厚度与 G_1 相同, 作用是补偿光线 2 的光程。如果没有 G_2 , 则光线 1 会三次经过平板玻璃 G_1 , 而光线 2 只能经过平板玻璃 G_1 一次。 G_2 的存在使得光线 1、2 经过平板玻璃的光程相等, 从而使光线 1、2 的光程差只由其他几何路程决定。为了确保 G_1 、 G_2 有相同的厚度和折射率, 一般在制作时将同一块平板玻璃分割为两块, 一块用作分光镜, 一块用作补偿板。 M_1 、 M_2 均为反射镜, 镜面均与 G_1 成 45° 角。

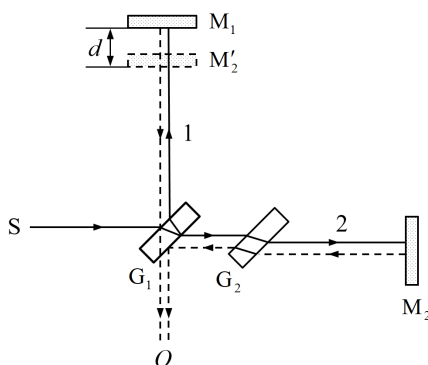


图 3.18-1 迈克耳孙干涉仪的光路

从光源 S 发出的光束, 被分光镜 G_1 后表面的半透膜分成光强相近、相互垂直的反射光 1 和透射光 2。光束 1 经 G_1 出射后入射到平面镜 M_1 , 经 M_1 反射后再次穿过 G_1 到达 O 处; 光束 2 穿过 G_2 后入射到平面镜 M_2 , 经 M_2 反射后再次穿过 G_2 , 经 G_1 后表面的半透膜反射后也到达 O 处, 这两束相干光在空间 O 处相遇发生干涉。

(2) 迈克耳孙干涉仪的结构。

迈克耳孙干涉仪的结构如图 3.18-2 所示, 除可移动反射镜 (简称动镜) M_1 、固定反射镜 (简称固定镜) M_2 、分光镜 G_1 、补偿板 G_2 外, 它还有动镜移动系统和反射镜调节系统。

动镜移动系统主要由螺距为 1 mm 的精密丝杠及齿轮系统组成。转动手轮一圈, 丝杠沿导轨移动一个螺距, 即 1 mm 。手轮上有 100 格, 当转动手轮一个分度时, 动镜移动 0.01 mm , 其数值可由读数窗读出。微调鼓轮和手轮相连接, 转动微调鼓轮一圈, 手轮随之转动一个分度。微调鼓轮上有 100 格, 当转动微调鼓轮一个分度时, 动镜移动 0.000 1 mm 。测量动镜的位置时, 应先由主尺读出整数位 (单位为 mm), 然后由读数窗读出小数点后两位, 再由微调鼓轮的标线读出小数点后的第三、四位并估读出第五位。

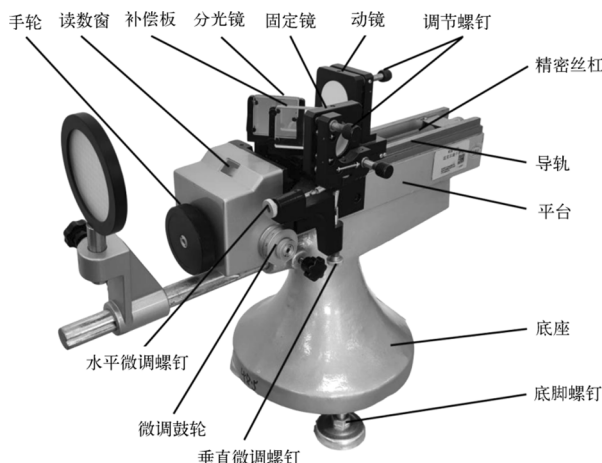


图 3.18-2 迈克耳孙干涉仪的结构

反射镜调节系统由调节螺钉和水平微调螺钉、垂直微调螺钉组成。调节螺钉用于粗调动镜和固定镜的倾斜度，水平微调螺钉和垂直微调螺钉用于细调固定镜的水平和垂直倾斜度。

2) 定域干涉现象的观察

当扩展光源发出的光入射时，迈克耳孙干涉仪产生的干涉条纹仅在空间某一区域出现，这类干涉称为**定域干涉**。等厚干涉条纹出现在膜表面附近，而等倾干涉条纹则出现在无穷远处，观察时需要在接收屏前加凸透镜成像或直接用眼睛观察。

若以 M_2' 表示 M_2 对 G_1 所成的像，则两束光在 O 处产生的干涉可以看成由 M_1 与 M_2' 间的空气薄膜形成。考虑 M_1 与 M_2' 的相对位置，可以把干涉分为等倾干涉和等厚干涉。

(1) 等倾干涉。

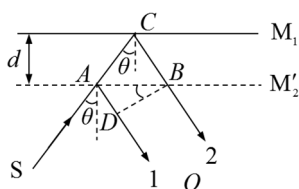


图 3.18-3 等倾干涉示意图

当 M_1 与 M_2 垂直，即 M_1 与 M_2' 平行时，以倾角 θ 入射的平行光由 G_1 反射后，经过 M_1 、 M_2' 反射形成的光束 1 和 2 相互平行，如图 3.18-3 所示，在无穷远处相交，若在 O 处放置一凸透镜（或用眼睛直接观察），则会在焦平面上形成干涉图样。这两束光的光程差为

$$\Delta = 2d \cos \theta \quad (3.18-1)$$

式中， d 为 M_1 与 M_2' 之间的距离； θ 为入射角。

从式 (3.18-1) 可以看出，在倾角 θ 相同的方向上两束相干光的光程差 Δ 均相等，此时具有相同倾角的入射光在无限远处或透镜焦平面上形成的干涉条纹呈圆环状，具有不同倾角的入射光形成明暗相间的同心圆环，这种干涉称为**等倾干涉**。

等倾干涉形成亮纹的条件为

$$\Delta = 2d \cos \theta = k\lambda \quad k=1,2,3,\dots \quad (3.18-2)$$

由上式可以得到：

①当 d 一定时， θ 越小， $\cos \theta$ 越大，因此光程差越大，形成的干涉条纹级数 k 就越高； θ 越大，所形成的干涉圆环的直径就越小。因此，圆心处光程差最大，条纹级数最高，由圆心向外级数降低。

②当移动 M_1 的位置使 d 逐渐增大时，对第 k 级明纹而言，应逐渐减小 $\cos \theta$ 的值来满足式 (3.18-2)，对应的 θ 将变大，即该干涉圆环的半径将逐渐变大。连续增大 d 时，观察者将看到圆环一个接一个由中心“冒出”；反之，逐渐减小 d 时，便会观察到圆环一个接一个往中心“缩进”。

③对于圆心处的条纹来说，由于 $\theta = 0$ ，有 $d = k \frac{\lambda}{2}$ ，表明每“冒出”或“缩进”一个圆环，对应于 M_1 被移远或移近的距离为半个波长。若观察到 Δk 个圆环的变化， M_1 与 M_2' 的距离则变化了 Δd ，即

$$\Delta d = \Delta k \frac{\lambda}{2} \quad (3.18-3)$$

或

$$\lambda = \frac{2\Delta d}{\Delta k} \quad (3.18-4)$$

由式 (3.18-4) 可知，只要测出 M_1 移动的距离 Δd ，并记录“冒出”或“缩进”的圆环的数目 Δk ，便可算出单色光的波长。

(2) 等厚干涉。

如图 3.18-4 所示, 当 M_1 与 M'_2 有一个很小的交角时, 此时的干涉为等厚干涉。由于 θ 角很小, M_1 、 M_2 反射的两束光的光程差仍可近似为

$$\Delta = 2d \cos \theta \quad (3.18-5)$$

当 θ 足够小时, $\cos \theta \approx 1 - \frac{\theta^2}{2}$, 因此有

$$\Delta \approx 2d - d\theta^2 \quad (3.18-6)$$

在 M_1 、 M_2 的交线上 $d = 0$, 则 $\Delta = 0$, 因而在交线处产生的干涉条纹为一直接纹, 称为中央条纹, 在交线左、右两边, 由于 θ 、 d 都很小, $d\theta^2 \ll 2d$, 则

$$\Delta \approx 2d \quad (3.18-7)$$

产生的干涉条纹近似为直线条纹, 与中央条纹平行, 如图 3.18-5 (b) 所示。离中央条纹较远处, 由于 d 增大, $d\theta^2$ 项的影响也增大, 条纹发生显著的弯曲, 凸向中央条纹。离交线越远, d 越大, 条纹越弯曲, 如图 3.18-5 (a)、(c) 所示。

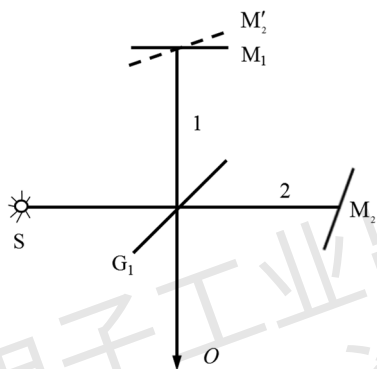


图 3.18-4 等厚干涉的产生示意图

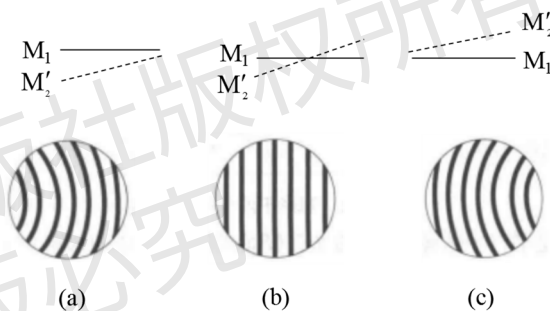


图 3.18-5 等厚干涉条纹图

3) 非定域干涉现象的观察

如图 3.18-6 所示, 光源 S 为点光源, 对于空间任一点 P , 都可以在 M_1 、 M'_2 上找到两个入射点 A 、 B , 使光源 S 发出的光经 M_1 、 M'_2 反射后在 P 点相遇而发生干涉。两束相干光也可以认为由虚光源 S_1 与 S_2 发出、在 P 点相遇发生干涉, S_1 与 S_2 是 S 相对于 M_1 与 M'_2 所成的虚像, 它们发出的球面波在相遇空间处处相干, 即在空间各处都可以产生干涉条纹, 这种干涉现象称为**非定域干涉**。

非定域干涉的光程差也可近似为 $2d \cos \theta$, 所以它具有前述的等倾干涉的性质, 可以用式 (3.18-4) 求波长。

4) 钠黄光双线的波长差

钠灯 (详见 2.2.6 节) 发出的光并非单色光, 其中波长为 $\lambda_1 = 588.995 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 589.592 \text{ nm}$ 的两种黄光最强, 因而钠灯产生的等倾干涉条纹实际上是上述两种单色光各自干涉条纹的叠加。这种叠加是非相干的, 由于 λ_1 与 λ_2 有一个较小的波长差, 因而, 对应于 λ_1 的亮纹位置 and 对应于 λ_2 的亮纹位置将随 d 的变化而呈周期性的重合与错开。即当 d 变化时, 视场中看到的叠

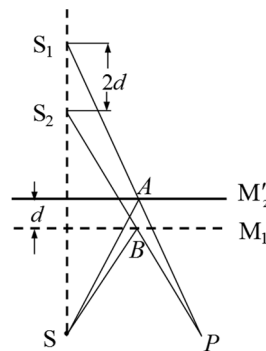


图 3.18-6 非定域干涉示意图

加后的干涉条纹交替出现“清晰”和“模糊”状态。

若移动 M_1 ，当迈克耳孙干涉仪上等效空气隙的厚度为 d 时， λ_1 光在中心处形成的第 k_1 级明纹恰好同 λ_2 光的第 k_2 级暗纹重合，即光程差满足

$$\Delta = 2d = k_1\lambda_1 = \left(k_2 + \frac{1}{2}\right)\lambda_2 \quad (3.18-8)$$

此时，视场中心部分呈现一片均匀黄色，条纹的可见度最小。继续移动 M_1 时，干涉条纹将逐渐变清晰。向同一方向继续改变 d 的大小，条纹的可见度又一次变得最小。设此时的空气隙的厚度为 d' ， λ_1 光相对于空气隙的厚度为 d 时干涉条纹级数的改变量为 k ，则 λ_2 光相对于空气隙的厚度为 d 时干涉条纹级数的改变量为 $k-1$ ，即

$$\Delta' = 2d' = (k_1 + k)\lambda_1 = \left[k_2 + \frac{1}{2} + (k-1)\right]\lambda_2 \quad (3.18-9)$$

用式 (3.18-8) 减去式 (3.18-9) 可得

$$2(d' - d) = k\lambda_1 = (k-1)\lambda_2 \quad (3.18-10)$$

解得

$$k = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (3.18-11)$$

$$2(d' - d) = \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (3.18-12)$$

令 $\Delta d = d' - d$ ， $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ ，由式 (3.18-12) 可得

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_1\lambda_2}{2\Delta d} = \frac{\bar{\lambda}^2}{2\Delta d} \quad (3.18-13)$$

式中， $\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$ ，是 λ_1 和 λ_2 的平均值； Δd 为相邻两次出现条纹可见度最小时等效空气隙厚度的改变量，也就是迈克耳孙干涉仪动镜 M_1 位置的改变量。由式 (3.18-13) 即可求出钠黄光双线的波长差。

5) 光源的时间相干性

光源发出的光不是无限长的正弦波，而是一段一段有限长的振幅不变或缓慢变化的正弦波，称为**波列**。由于各波列之间无固定的相位关系，所以各波列之间不会发生稳定的干涉。因此，用分振幅法（如用分束镜将一束光分成两束）所形成的两束光只能在波列持续时间 Δt 内发生稳定干涉。把波列持续时间 Δt 称为光源的**相干时间**，把波列的长度 $\Delta L = c\Delta t$ 称为**相干长度**（ c 为光速）。

时间相干问题也可以理解为实际光源发射的光不是绝对单色光，而是在其中心波长 λ_0 附近按某种光强分布的波带，当 $d = 0$ 时，波带内各种波长的光形成的干涉条纹叠加在一起，当 $d \neq 0$ 时，这些条纹将相互错位并出现明暗条纹交叠。当 Δd 满足 $2\Delta d = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}$ 时，条纹可见度为 0，令 $\Delta\lambda$ 为光强分布中的腰宽，则相干长度为

$$\Delta L = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} = 2\Delta d \quad (3.18-14)$$

氦氖激光器（详见 2.2.6 节）发出的激光波长 $\lambda = 632.816 \text{ nm}$ ， $\Delta\lambda$ 的范围是 $1 \times 10^{-15} \sim 1 \times 10^{-13} \text{ m}$ ，故相干长度可达几米至几千米，而白光是一种波长为 $380 \sim 750 \text{ nm}$ 的复色光，其

光谱为连续光谱。它的相干长度约为波长数量级,即 $\Delta\lambda = \lambda$,如果用它作为光源,不同波长的光所产生的干涉条纹明暗相互重叠,因此,一般情况下看不到干涉条纹,只能在 M_1 与 M_2 相交所形成的中央条纹旁看到几条彩色的直条纹,这种干涉称为白光干涉。

4. 实验内容及步骤

1) 观测非定域干涉并测量氦氖激光器的波长

(1) 迈克耳孙干涉仪的调节。

①转动手轮,将动镜 M_1 的位置调至零光程处,此时 M_2 的像 M'_2 与 M_1 大致重合。

②在观察位置放置观察屏,使激光束大致垂直于迈克耳孙干涉仪的导轨并射向分光镜 G_1 的中部,此时观察屏上会出现图 3.18-7 所示的两排小光斑,其中每排中最亮的一个光斑分别是 M_1 、 M_2 第一次反射产生的,另几个较暗的光斑,是补偿板反射及 M_1 、 M_2 多次反射产生的,要注意区别。

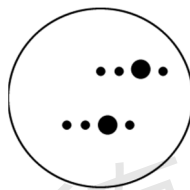


图 3.18-7 观察屏上的两排小光斑示意图

③仔细调节 M_1 和 M_2 背面的两个调节螺钉,使两个最亮的光斑重合,此时,已能在光斑中看到干涉条纹。在光源与迈克耳孙干涉仪间加一个扩束镜,使激光束通过扩束镜后形成点光源,将其产生的扩束光均匀地照射在 G_1 、 G_2 、 M_1 、 M_2 中部,通过观察屏,根据干涉条纹的形状,仔细调节 M_2 水平和垂直微调螺钉,直至看到明暗相间的同心圆环。

④轻轻转动微调鼓轮,在消除了空程差(详见 2.3.1 节)后,即可进行相关测量。

(2) 观测非定域干涉条纹。

当 d 不变时,观察条纹的粗细和疏密情况;转动微调鼓轮,观察中心条纹的“冒出”或“缩进”与 d 增大还是减小之间的关系,条纹的粗细和疏密程度的变化与 d 之间的关系。

(3) 测量氦氖激光器的波长。

沿一个方向转动微调鼓轮,使条纹“冒出”或“缩进”几十个后,测量每“冒出”或“缩进”50 个条纹时 M_1 的位置,从 $N = 0$ 测量到 $N = 250$ 。

2) 观察定域干涉并测量钠黄光双线的波长差

(1) 迈克耳孙干涉仪的调节。

①在钠灯灯罩通光孔处放置毛玻璃片或半透明白纸,使光源经漫透射后成为扩展光源。去掉观察屏,用眼睛在观察屏处直接观察 M_1 ,可以观察到定域干涉条纹。当眼睛上下或左右移动时,若看到同心圆的圆心随眼睛的移动而移动,并有“冒出”或“缩进”的现象,说明 M_1 和 M_2 没有完全垂直,观察到的是定域等厚干涉条纹。应仔细调节水平微调螺钉和垂直微调螺钉,直到圆心仅随眼睛的移动而移动,但没有条纹“冒出”或“缩进”的现象。此时 M_1 和 M_2 严格垂直,观察到的条纹即为等倾干涉条纹。

②转动微调鼓轮,在消除了传动系统的空程差后,即可进行相关测量。

(2) 测量钠灯双黄线的波长差。

沿一个方向旋转微调鼓轮,记录连续 6 次条纹可见度最小时动镜的位置。

3) 测量白炽灯光的相干长度和相干时间

以白炽灯为光源,将 M_1 移到 M'_2 附近(零光程附近),仔细调节微调鼓轮,直到观察到彩

色干涉条纹为止，测量出彩色条纹从出现到消失过程中 M_1 移动的距离 Δd ，共测量 6 组数据，计算出白光相干长度 $\Delta L = 2\overline{\Delta d}$ 和相干时间 $\Delta t = \frac{\Delta L}{c}$ 。

5. 注意事项

- (1) 迈克耳孙干涉仪是精密光学仪器，决不允许用手触摸光学元件表面。
- (2) 不能用眼镜直视激光。
- (3) 调节动镜的调节螺钉、水平微调螺钉和垂直微调螺钉时动作应尽量缓慢轻柔，切勿大力大幅调节。
- (4) 测量中应注意消除空程差。

6. 实验数据记录与处理

1) 测量氦氖激光器的波长 ($\lambda_0 = 632.816 \text{ nm}$)

在表 3.18-1 中记录每“冒出”或“缩进”50 个条纹时 M_1 的位置，用逐差法求出 $N = 150$ 时的 $\overline{\Delta d}$ ，计算出氦氖激光波长和百分差。

表 3.18-1 测量氦氖激光器的波长

次序 i	1	2	3	4	5	6
中心产生（消失）条纹数 N	0	50	100	150	200	250
动镜位置 d_i / mm						
逐项逐差 $\Delta d'_i = d_{i+1} - d_i / \text{mm}$						
分组逐差 $\Delta d_i = d_{i+3} - d_i / \text{mm}$						

2) 钠黄光双线波长差的测量

在表 3.18-2 中记录连续 6 次条纹可见度最小时 M_1 的位置，计算出钠黄光双线波长差 $\Delta \lambda$ 和百分差。

表 3.18-2 钠黄光双线的波长差的测量数据

次序 i	1	2	3	4	5	6
条纹可见度最小时动镜位置 d_i / mm						
逐项逐差 $\Delta d'_i = d_{i+1} - d_i / \text{mm}$						
分组逐差 $\Delta d_i = d_{i+3} - d_i / \text{mm}$						

7. 思考题

- (1) 迈克耳孙干涉仪主要由哪几部分组成？
- (2) 在迈克耳孙干涉仪的调节过程中，为什么会出现干涉条纹从直条纹到弧形条纹再到同心圆环条纹的变化？
- (3) 在调节定域等倾干涉条纹时，左右移动眼睛，看到圆环从中心“冒出”或“缩进”，则应调节水平微调螺钉还是垂直微调螺钉？
- (4) 如何确定零光程差时动镜的位置？