

高等教育公共基础课精品系列规划教材

近代物理实验

黄槐仁 / 编著

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

高等教育公共基础课精品系列规划教材

近代物理实验

黄槐仁 编著

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

内 容 简 介

本书是参照教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理学类专业教学指导分委员会编制的《高等学校物理学本科指导性专业规范(2010版)》规定的实验内容编写的。本书选编近代物理发展过程中一些起过重大作用的著名实验,以及近代物理实验技术中有广泛应用的18个典型实验,包括原子物理、核物理、激光、真空、X射线、低温、固体物理、声学、微波、磁共振、计算机模拟和微弱信号检测技术等方面。全书重点在于阐述实验的物理思想和方法,注重培养学生的实验能力,提高其科学素质。

本书适合高等师范院校和理工大学物理专业及相关专业本科生、有关专业的研究生、科技人员和中学物理教师使用,也可作为高等学校应用物理专业近代物理实验的教材或相关专业的教学参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

近代物理实验 / 黄槐仁编著. —北京:北京理工大学出版社,2019.5

ISBN 978-7-5682-7008-3

I. ①近… II. ①黄… III. ①物理学-实验-高等学校-教材 IV. ①O41-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第078039号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 /

开 本 / 787毫米×1092毫米 1/16

印 张 / 12.5

字 数 / 310千字

版 次 / 2019年5月第1版 2019年5月第1次印刷

定 价 / 39.80元

责任编辑 / 高 芳

文案编辑 / 赵 轩

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

近代物理实验课程是为物理专业高年级学生和研究生开设的一门综合性实验课。随着21世纪知识经济时代的到来，社会对人才的培养提出了更高的要求；面对新的形势和要求，近代物理实验的教学对于物理学专业学生来讲就显得更为重要。各高校物理学专业根据培养目标、课程特点及本校实际情况，对近代物理实验课程建设提出了自己的构想，并不断在教学内容、教学方式等方面进行了改革。在加强基础理论教学的同时，考虑到作为师范类物理学专业的实验教学特点，在选择实验内容时，本书参照了《2010 高等学校物理学本科指导性专业规范 高等学校应用物理学本科指导性专业规范》确定的高等学校理科物理学专业“近代物理实验”课程教学基本要求，既注重在物理学发展史上具有里程碑性质的典型实验，又结合当今科技发展，注重应用技术性实验，注重吸取现代科技中广泛使用的实验方法，努力把握内容选择上的广度和深度。本书基本覆盖了原子物理学、原子核物理学、现代光学、真空技术、磁共振技术、微波技术、X射线技术、半导体物理学、低温物理学、微弱信号检测、CCD光敏检测技术、计算机虚拟实验等各领域，注重结合当代信息产业的发展，以适应当今科技发展的趋势。

本书在每个实验项目的前面，都安排了一定篇幅的实验内容简介，对实验的时代背景、科学家的实验经历、实验的巧妙构思，以及取得的成就进行介绍，以此来激发学生的实验兴趣和探究精神。

为了使学生对实验中出现的各种现象和规律能独立地分析和解释，本书力争把有关的基础理论叙述清楚。在原理的介绍上，尽量避免烦琐的数学推导，力求物理图像清晰，使学生在实验前对实验原理和方法有比较清楚的了解，尽可能在理解的基础上做好实验，有的数学推导安排在实验的末尾作为附录或给出有关的参考文献。在实验的操作部分，部分技术性不太强的操作和某些特殊的实验，不列操作步骤，让学生在掌握了实验原理和方法的基础上，根据实验要求和仪器说明书自己设计实验的步骤。

编著本书时，本书编者结合多年的教学实践，努力做到“点”和“面”的结合。本书内容既有必修内容，也安排了一定量的选做内容；通过选做内容，拓宽学生的知识面和能力。选做内容中通过开设自选实验、提高实验、设计性实验等多种形式来实施教学。

由于物理知识的普适性，本书的内容设计不仅考虑了物理学专业学生的需要，也考虑了非物理学专业学生及研究生的需要。越来越多的事实表明，现代各个领域的高新技术支

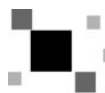
撑点，无一不是物理的基本原理，也无一不是物理实验的基本方法。通过近代物理实验丰富和活跃的物理思想，培养学生对物理现象的观察能力和分析能力，引导学生了解物理实验在物理概念的产生、形成和发展过程中的作用，学习近代物理实验中一些常用的方法、技术、仪器和知识，进一步培养正确且良好的实验习惯以及严谨的科学作风，使学生获得一定程度的独立工作能力，为学生掌握、应用和发展新技术打好坚实的物理实验基础。

本书可作为理工科大学物理专业或物理相近专业的近代物理实验课的教学用书，可供非物理专业理工科大学学生和研究生参考，也可作为从事实验教学的教师和工程技术人员的参考书。

本书在成书过程中得到海南热带海洋学院校级教材建设专项基金和海南省高等学校教育教学改革重大项目（Hnjgzd2014-09）的资助，在此一并表示感谢。

编者：黄槐仁
2018年7月

第 1 章 导 论	(1)
1.1 近代物理实验课程的教学要求、目的与教学方法	(1)
1.2 近代物理实验的基本测量方法	(3)
1.3 近代物理实验中常用的数据处理方法	(9)
1.4 测量的不确定度	(17)
第 2 章 实验内容和项目	(23)
2.1 密立根油滴实验	(23)
2.2 弗兰克-赫兹实验	(36)
2.3 光谱的定性和定量分析	(45)
2.4 氢原子光谱的研究	(52)
2.5 塞曼效应实验	(58)
2.6 核磁共振实验	(69)
2.7 巨磁阻效应及其应用实验	(77)
2.8 声光效应实验	(87)
2.9 光拍频法测量光速	(97)
2.10 黑体实验	(102)
2.11 电子自旋共振实验	(118)
2.12 半导体激光特性测量	(124)
2.13 光纤光学系列实验	(128)
2.14 法拉第磁光效应实验	(139)
2.15 电光调制实验	(159)
2.16 真空的获得与测量	(167)
2.17 X 光系列实验——X 光的吸收、吸收边和莫塞莱定律等	(172)
2.18 拉曼光谱	(182)
参考文献	(193)



第 1 章

导 论



“近代物理实验”是继“普通物理实验”之后，面向理科物理学类（师范、非师范）专业高年级学生开设的专业实验课程，材料、化学等相关专业学生也可以选修。实验内容涵盖原子物理、原子核物理、激光与近代光学、真空、X 射线、电子衍射、磁共振、微波、低温和半导体等物理学各主要分支领域，主要是近现代物理学发展过程中具有开拓性意义并且其核心思想仍然在当今科学技术发展中发挥作用的实验，是培养学生实验技能的重要课程之一，具有承上启下的作用。“近代物理实验”课程着眼于掌握物理学领域科学研究工作必备的实验方法，使学生进一步综合掌握物理学严谨的基本概念和实验思想，提高学生运用并发展现代科学技术的创新能力。本课程在综合性、设计性的基础上，强调研究性，加入 10 学时的虚拟仿真实验内容，对危险实验、实验室条件难以实现或无法实现的物理现象进行分析，培养学生的探索精神。

1.1 近代物理实验课程的教学要求、目的与教学方法

1.1.1 课程教学基本要求

“近代物理实验”作为高年级学生的一门重要专业基础课，涉及的物理知识面广，综合性和技术性强，对丰富和活跃学生的物理思想，锻炼他们对物理现象的洞察力，引导他们了解实验物理在物理学中的地位，使其正确认识新物理概念的产生、形成和发展的过程，培养学生严谨的科学作风都起着非常重要的作用。通过本课程的学习，掌握科学研究中广泛应用的一些基本实验技术和方法，是培养学生独立分析和解决问题的能力，学习如何用实验方法研究物理现象和规律的关键性一环。经过本课程的训练，学生应达到下列要求。

(1) 进一步巩固和加深对物理学各门专业课基本概念、定理和基本规律的理解和掌握。

(2) 在近现代物理实验的基本方法、基本思想等方面受到较全面的训练，领会物理研究的基本规律。

(3) 具有综合利用各分支学科的知识与技能, 进行研究性实验的能力。

(4) 养成良好的科学研究素质。

(5) 熟悉相关研究性物理虚拟仿真实验开发平台, 能够在平台上根据需要创建实验项目, 提升创新精神和开拓能力。

1.1.2 课程教学目的

“近代物理实验”是一门面向物理学类专业开设的专业基础实验课程。要求学生通过本课程的学习, 掌握一些比较先进的综合性实验方法和技能, 加强理论与实验相结合、综合运用各种技术的能力, 养成严谨的科学工作作风和良好的实验操作习惯; 进一步加深对有关物理学概念和规律的理解, 扩大知识面, 培养学生独立进行科学实验的能力; 丰富和活跃物理思想, 提高对物理现象的洞察力和分析力, 正确认识物理实验在物理学创立和发展中的地位和作用; 正确认识物理概念及物理规律的产生、完善、发展过程与物理实验之间的密切关系; 了解和掌握近代物理学中常用的实验方法、实验技术、实验仪器和相关科学知识; 具有利用近代物理学实验方法和技术, 观测物理现象和研究探索未知世界物理规律的创造性能力。

1.1.3 实验教学方式与基本要求

(1) 本课程将真实实验与虚拟仿真实验相结合, 虚拟仿真实验的课堂教学控制在10%~15%, 每个实验项目安排30分钟左右; 实验相关知识和要求的讲解, 内容包括实验的理论知识、测量的不确定度等。在课程开始前统一安排4学时的集中培训, 讲解课程的性质、任务、要求, 课程安排和进度, 预习要求, 平时考核内容, 期末考试办法, 实验守则及实验室安全制度, 实验原始数据记录和实验报告的格式及书写要求, 实验的基本技术与方法, 课程论文的书写等。

(2) 该课程要求学生在进入实验室进行实验前, 必须对所做实验进行预习并写好实验预习报告。在实验课程开始之前, 学生首先把实验预习报告交给指导老师, 经老师检查许可实验讲解完后, 方可进行实验项目操作。

(3) 实验设备2~4人/套, 在规定的时间内, 由学生独立完成实验。指导老师对于学生提出的问题, 要以启发思考的讨论方式激发学生独立分析处理。

(4) 学生在每个实验项目操作过程中应该及时填写实验原始记录, 包括实验原理、公式、仪器装置(线路结构原理)图、实验器材、原始数据等, 特别是原始数据记录一定要规范化, 如物理量符号、物理量单位与单位符号(SI单位制)、有效数字、数据图表绘制规则等。

(5) 学生在完成实验项目以后, 按照仪器设备使用规范负责把所用仪器恢复到原来状态, 并做清洁卫生, 并且按照实验项目分小组填写所在实验室的运行记录, 然后把实验原始记录交给指导老师检查、签字, 方可结束实验课程离开实验室。

(6) 学生对所完成的实验项目按照规定格式及时(做完实验一周之内)写出实验报告, 担任实验课程的指导教师对于学生提交的实验预习报告和实验报告实行全批改, 并且

及时登记成绩。

(7) 实验教学模式应采用开放、自主式实验教学模式，鼓励教学改革与创新。

(8) 除了统一安排虚拟仿真实验，学生可在课余时间进入机房，自行开发微结构材料设计与性能分析项目，其余项目可登录网站进行预习、学习和复习等。

1.2 近代物理实验的基本测量方法

任何物理实验都离不开物理量的测量。物理量的测量泛指以物理理论为依据，以实验装置和实验技术为手段进行测量的过程。待测物理量的内容非常广泛，它包括运动力学量、分子物理热学量、电磁学量和光学量等。对于同一物理量，通常有多种测量方法。测量的方法及其分类方法名目繁多：按测量内容来分，可分为电量测量和非电量测量；按测量数据获得的方式来分，可分为直接测量、间接测量和组合测量；按测量进行方式来分，可分为直读法、比较法、替代法和差值法；按被测量与时间的关系来分，可分为静态测量、动态测量和积算测量等。本章将对物理实验中最常用的几种基本测量方法作概括的介绍。

1.2.1 比较法

比较法是将相同类型的被测量与标准量直接或间接地进行比较，测出其大小的测量方法。比较法可分为直接比较法和间接比较法两种。

1. 直接比较法

将被测量直接与已知其值的同类量进行比较，测出被测量大小的测量方法，称为直接比较法。它所使用的测量仪表，通常是直读指示式仪表，所测量的物理量一般为基本量。例如：用米尺、游标卡尺和螺旋测微器测量长度，用秒表和数字毫秒计测量时间，用伏特表测量电压等。仪表刻度预先用标准量仪进行分度和校准，在测量过程中，指示标记的位移使标尺上出现相应的刻度值，这就表示了被测物理量的大小。对测量人员来说，除了将其指示值乘以测量仪器的常数或倍率外，无需作附加的操作或计算。由于测量过程简单方便，直接比较法在物理量测量中的应用较广泛。

2. 间接比较法

当一些物理量难以用直接比较法测量时，可以利用物理量之间的函数关系将被测量与同类标准量进行间接比较测出其值。

图 1-1 是将待测电阻 R_x 与一个可调节的标准电阻 R_s 进行间接比较的测量示意图。若稳压电源输出 U 保持不变，调节标准电阻值 R_s ，使开关 S 在“1”和“2”两个位置时，电流指示值不变，则

$$R_x = R_s = \frac{U}{I}$$

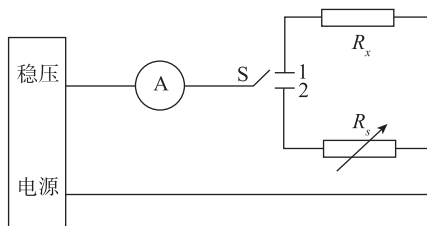


图 1-1 间接比较法

如果在示波器的 X 偏转板和 Y 偏转板上分别输入正弦电压信号，其中一个为频率待测电信号，另一个为频率可调的标准电信号。若调节标准电信号的频率，当两个电信号的频率相同或成简单的整数比时，则可以利用在荧光屏上呈现的李萨如图形间接比较两个电信号的频率。设 N_x 、 N_y 分别为 X 方向和 Y 方向上切线与李萨如图形的切点数，则

$$\frac{f_Y}{f_X} = \frac{N_X}{N_Y}$$

1.2.2 放大法

物理实验中常遇到一些微小物理量的测量。为提高测量精度，常需要采用合适的放大方法，选用相应的测量装置将被测物理量进行放大后再进行测量。常用的放大法有机械放大法、光学放大法、电子放大法等。

1. 机械放大法

螺旋测微放大法是一种典型的机械放大法。螺旋测微器、读数显微镜和迈克尔逊干涉仪等测量系统的机械部分都是采用螺旋测微装置进行测量的。常用的读数显微镜的测微丝杆的螺距是 1 mm ，当丝杆转动一圈时，滑动平台就沿轴向前或后退 1 mm ，在丝杆的一端固定一测微鼓轮，其周界上刻成 100 分格，因此当鼓轮转动一分格时，滑动平台移动了 0.01 mm ，从而使沿轴线方向的微小位移用鼓轮圆周上较大的弧长精确地表示出来，大大提高了测量精度。

2. 光学放大法

常用的光学放大法有两种，一种是使被测物通过光学装置放大视角形成放大像，从而便于观察判别，提高测量精度，如放大镜、显微镜、望远镜等。另一种是使用光学装置将待测微小物理量进行间接放大，通过测量放大的物理量来获得微小物理量，如测量微小长度和微小角度变化的光杠杆镜尺法。

3. 电子放大法

在物理实验中往往需要测量变化微弱的电信号（电流、电压或功率），或者利用微弱的电信号去控制某些机构的动作，这时必须用电子放大器将微弱电信号放大后才能有效地进行观察、控制和测量。电子放大作用是由三极管完成的。最基本的交流放大电路是共发射极三极管放大电路，如图 1-2 所示。当微弱信号 U_i 由基极和发射极之间输入时，在输出端就可获得放大了一定倍数的电信号 U_o 。

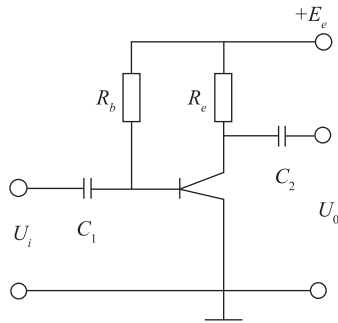


图 1-2 电子放大法

1.2.3 补偿法

补偿测量法是通过调整一个或几个与被测物理量有已知平衡关系（或已知其值）的同类标准物理量，去抵消（或补偿）被测物理量的作用，使系统处于补偿（或平衡）状态。处于补偿状态的测量系统，被测量与标准量具有确定的关系，由此可测得被测量的值，这种测量方法称为补偿法，也称为平衡测量法。

如图 1-3 所示，两个电池与检流计串接成闭合回路，两个电池正极对正极、负极对负极相接。调节标准电池的电动势 E_0 的大小，当 E_0 等于 E_x 时，则回路中没有电流通过（检流计指针指零），这时两个电池的电动势相互补偿了，电路处于补偿状态。因此利用检流计就可判断电路是否处于补偿状态，一旦处于补偿状态，则 E_x 与 E_0 大小相等，就可知道待测电池的电动势大小了。这种测量电动势（或电压）的方法就是典型的补偿法。

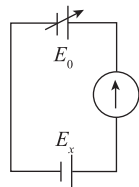


图 1-3 补偿法

图 1-4 所示的惠斯通电桥，图中 R_s 、 R_1 和 R_2 为标准电阻， R_x 为待测电阻，调节 R_s ，当通过检流计的电流为零时， C 和 D 两点的电势相等，桥臂上的电压相互补偿，此时电桥处于平衡状态，则有 $R_x = \frac{R_1}{R_2} R_s = KR_s$ 。

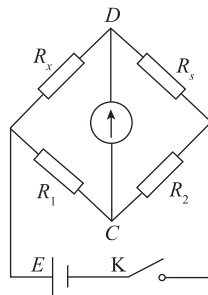


图 1-4 惠斯通电桥

当比较臂 R_s 和比率臂 K 已知时, 就可测得 R_x 值。

由上可见, 补偿测量法的特点是测量系统中包含有标准量具, 还有一个指零部件, 在测量过程中, 被测量与标准量直接比较, 测量时要调整标准量, 使标准量与被测量之差为零, 这个过程称为补偿或平衡操作。采用补偿测量法进行测量的优点是可以获得比较高的精确度, 但是测量过程比较复杂, 在测量时要进行补偿操作。这种测量方法在工程参数测量和实验室测量中应用很广泛, 如用天平测质量、零位式活塞压力计测压力、电位差计测毫伏信号及平衡电桥测电阻值等。

1.2.4 模拟法

人们在研究物质运动规律、各种自然现象和进行科学研究、解决工程技术问题时, 常会遇到一些情况, 如研究对象过分庞大, 变化过程太迅猛或太缓慢, 所处环境太恶劣太危险等, 以致对这些研究对象难以进行直接研究和实地测量。于是, 人们以相似理论为基础, 在实验室中, 通过模仿实验情况, 制造一个与研究对象的物理现象或过程相似的模型, 使现象重现, 并通过延缓或加速实验过程等来进行研究和测量, 这种方法称为模拟法。模拟法可分为物理模拟法和数学模拟法两类。

1. 物理模拟法

物理模拟法就是使人为制造的模型与实际研究对象保持相同物理本质的一种模拟方法。例如: 为研制新型飞机, 必须掌握飞机在空中高速飞行时的动力学特性。通常在实验前先制造一个与实际飞机几何形状相似的模型, 然后将此飞机模型放入风洞 (高速气流装置), 创造一个与原飞机在空中实际飞行完全相似的运动状态; 通过对飞机模型受力情况的测试, 便可方便地在较短时间内以较小的代价取得可靠的有关数据。

2. 数学模拟法

数学模拟法是指把两个物理本质完全不同, 但具有相同的数学形式的物理现象或过程进行模拟的一种方法。例如: 静电场与稳恒电流场本来是两种不同性质的场, 但这两种场所遵循的物理规律具有相同的数学形式。因此, 可以用稳恒电流场来模拟难以直接测量的静电场, 用稳恒电流场中的电势分布来模拟静电场中的电势分布。

综上所述, 把上述两种模拟法很好地配合使用, 能使实验成效显著。近年来, 随着微机的不断发展和广泛应用, 用微机进行模拟实验更为方便, 并能将两者很好地结合起来。

模拟法是一种极其简单易行、有效的测试方法, 在现代科学研究和工程设计中被广泛地使用。例如, 在发展空间科学技术的研究中, 通常先进行模拟实验, 获得可靠、必要的实验数据。此外模拟法在水电建设、地下矿物勘探、电真空器件设计等方面都大有用处。

1.2.5 干涉法

干涉法是应用相干波产生干涉时所遵循的规律进行有关物理量测量的方法。通常利用干涉法来测量长度、角度、波长、气体或液体的折射率和各种光学元件的质量等。现举例如下。

1. 应用瑞利干涉仪测定气体折射率

瑞利干涉仪是以双缝干涉原理为基础设计的。如图 1-5 所示，线光源 S 发出的单色光，经凸透镜 L₁ 后成为平行光线，这些平行光垂直地照射到双缝 S₁、S₂ 上，由 S₁、S₂ 发出的相干光在凸透镜 L₂ 的焦平面 a 上产生明暗相间的干涉条纹，在焦平面 a 上任意一点 P 相交的相干光线 1、2 间的光程差 δ 为

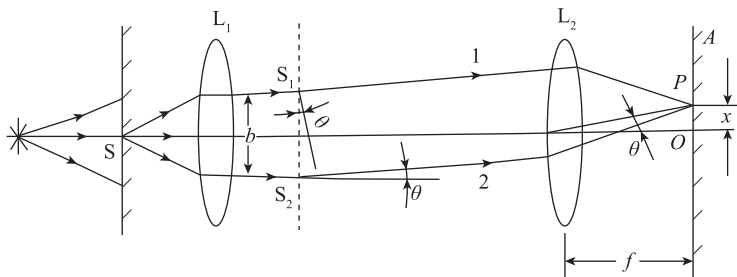


图 1-5 双缝干涉原理

$$\delta = b \sin \theta$$

式中 θ 为光线 1、2 与 L₂ 的光轴间的夹角， b 为双缝 S₁ 和 S₂ 的间距。当 θ 很小时

$$\delta = b\theta$$

$$x = f \tan \theta = f\theta$$

$$\delta = b \frac{x}{f}$$

当 $\delta = \pm k\lambda$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) 时，产生明条纹，由此可得干涉明条纹中心位置

$$x = \frac{f}{b} \delta = \pm \frac{f}{b} k\lambda \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \tag{1-2-1}$$

式中 f 为 L₂ 的焦距， λ 为入射单色光波长。

由 $\delta = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) 得出暗条纹中心位置

$$x = \pm (2k + 1) \frac{f}{b} \frac{\lambda}{2} \tag{1-2-2}$$

相邻明（或暗）干涉条纹之间的距离

$$e = \frac{f}{b} \lambda$$

瑞利干涉仪测气体折射率的工作原理如图 1-6 所示。与图 1-5 相比，仅在双缝 S₁、S₂ 与 L₂ 之间，设置两个几何形状和材料都完全一样的相互平行的长方形气室。若气室长为 l ，一个盛满已知折射率为 n_0 的气体（或抽成真空），另一个盛满待测折射率为 n_x 的气体，这样由于光线 1、2 在传播过程中经过不同折射率的介质，使它们到焦平面上点 P 的光程差变为

$$\begin{aligned} \delta &= (n_x - n_0) l + b\theta \\ &= (n_x - n_0) l + b \frac{x}{f} \end{aligned} \tag{1-2-3}$$

$$= \frac{b}{f} \left[x + \frac{f}{b} (n_x - n_0) l \right]$$

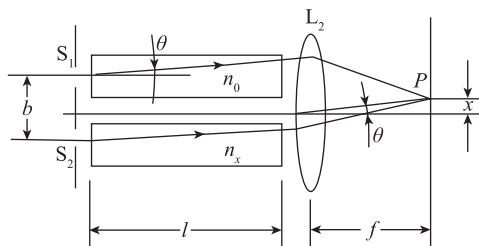


图 1-6 瑞利干涉仪工作原理图

比较式 (1-2-1) 和式 (1-2-3), 可知同级明、暗条纹将向折射率较大的气体一侧平移 $\frac{f}{b}(n_x - n_0)l$ 的距离, 但相邻明 (或暗) 条纹的间距保持不变。用相邻明条纹间距去除以平移距离, 就得到焦平面上任一点处平移过去的条纹数 N , 其表达式为

$$N = \frac{(n_x - n_0) l}{\lambda}$$

$$n_x = \frac{N\lambda}{l} + n_0$$

因此, 通过瑞利干涉仪测量出平移的条纹数 N , 就可测出待测气体的折射率。瑞利干涉仪也可用来测定液体的折射率。

2. 用劈尖干涉法测量玻璃细丝的直径

劈尖干涉法是以光的等厚干涉原理为基础的。如图 1-7 所示, 将待测的玻璃细丝放在两块平板玻璃之间的一端, 由此形成劈形空气隙。当用波长为 λ 的单色光垂直照射在玻璃板上时, 则在空气隙的上表面形成一组平行于劈棱的明暗相间的等间距干涉条纹, 且两相邻明 (或暗) 条纹所对应的空气隙厚度之差为半个波长。因此, 若劈尖的长度为 L , 单位长度中所含的干涉条纹数为 n , 则细玻璃丝的直径为 $d = nL \frac{\lambda}{2}$ 。

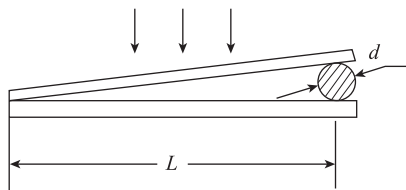


图 1-7 劈尖干涉法

劈尖干涉法检测光学玻璃表面光洁度时, 只需将待测玻璃面与一块平板光学玻璃构成劈尖; 当用单色光垂直照射时, 观察其形成的等厚干涉条纹, 若条纹产生弯曲, 则说明该处的待测玻璃面不平整。

1.3 近代物理实验中常用的数据处理方法

测量获得了大量的实验数据，而要通过这些数据得到可靠的实验结果或物理规律，则需要学会正确的数据处理方法。本节将介绍在物理实验中常用的列表法、作图法、逐差法和最小二乘法等数据处理的基本方法。

1. 列表法

在记录和处理实验测量数据时，人们经常把数据列成表格，这样可以简单而明确地表示出有关物理量之间的对应关系，便于随时检查测量结果是否正确合理，及时发现问题，利于计算和分析误差，并可在必要时对数据随时查对。通过列表法有助于找出有关物理量之间的规律性，便于得出定量的结论或经验公式等。列表法是工程技术人员经常使用的一种方法。

列表时，一般应遵循下列规则。

- (1) 表格应简单明了，这样便于看出有关物理量之间的关系，便于处理数据。
- (2) 在表格中均应标明物理量的名称和单位。
- (3) 表格中数据要正确反映出有效数字。
- (4) 必要时应对某些项目加以说明，并计算出平均值、标准误差和相对误差。举例来说，空心圆柱体的测量数据如表 1-1 所示。

表 1-1 空心圆柱体的测量数据

次 数	1	2	3	4	5	6	7	8	平均值	标准误差	相对误差
R/cm											
$\Delta R/cm$											
r/cm											
$\Delta r/cm$											
h/cm											
$\Delta h/cm$											

2. 作图法

物理实验中得到的一系列测量数据，也可以用图线直观地表示出来，作图法就是在坐标纸上描绘出一系列与数据对应的图线。它是研究物理量之间变化规律、找出对应的函数关系、求经验公式的常用方法之一。作图法是科学实验中最常用的一种数据处理方法。

(1) 图示法。

物理实验所揭示的物理量之间的关系，可以用一个解析函数关系式来表示，也可以用坐标纸在某一坐标平面内由一条曲线表示，后者称为实验数据的图形表示法，简称图示法。

图示法的作图规则如下。

①选取坐标纸。

首先，作图一定要用坐标纸，根据不同实验内容和函数形式来选取不同的坐标纸，在普通物理实验中最常用的是直角坐标纸。其次，根据所测得数据的有效数字和对测量结果的要求来定坐标纸的大小，原则上是以不损失实验数据的有效数字和能包括所有实验点作为选择依据，一般图上的最小分格至少应是有效数字的最后一位可靠数字。

②定坐标和坐标标度。

在坐标纸上通常以横坐标表示自变量，纵坐标表示因变量，并写出坐标轴所代表的物理量的名称和单位。为了使图线在坐标纸上的布局合理和充分利用坐标纸，坐标轴的起点不一定从变量的“0”开始。图线若是直线，尽量使图线比较对称地充满整个图纸，不要使图线偏于一角或一边。为此，应适当放大（或缩小）纵坐标轴和横坐标轴的比例。在坐标轴上按选定的比例标出若干等距离的整齐数值标度，标度的数值位数应与实验数据的有效数字位数一致。选定比例时，应使最小分格代表“1”“2”或“5”，不要用“3”“6”“7”“9”表示一个最小分格。因为这样不仅使标点和读数不方便，而且也容易出错。

③标点。

根据测量数据，找到每个实验点在坐标纸上的位置，用铅笔以“×”标出各点坐标，要求与测量数据对应的坐标准确地落在“×”的交点上。一张图上要画几条曲线时，每条曲线可用不同标记如“+”“⊙”“△”等以示区别。

④连线。

用直尺、曲线板、铅笔将测量点连成直线或光滑曲线，校正曲线要通过校正点连成折线。因为实验值有一定误差，所以曲线不一定要通过所有实验点，只要在线的两旁实验点分布均匀且离曲线较近，并在曲线的转折处多测几个点即可。对个别偏离很大的点，要重新审核，进行分析后决定取舍。

⑤写出图纸名称。

要求在图纸的明显位置标明图纸的名称，即图名、作者姓名、日期、班级等。

(2) 图解法。

图解法就是根据实验数据所作好的图线，用解析法找出相应的函数形式，如线性函数、二次函数、幂函数等，并求出其函数的参数，得出具体的方程式。特别是当图线是直线时，采用此法更为方便。

①直线图解法。

a. 取点。

在直线上任取两点 $A(x_1, y_1)$, $B(x_2, y_2)$ ，其坐标值最好是整数。用“Δ”符号表示所取的点，与实验点相区别，一般不要取原实验点。所取两点在实验范围内应尽量彼此分开一些，以减小误差。

b. 求斜率 k 。

在坐标纸的适当空白的位置，由直线方程 $y = kx + b$ ，写出斜率的计算公式

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (1-3-1)$$

将两点坐标值代入上式，写出计算结果。

c. 求截距 b 。

如果横坐标的起点为零，其截距 b 为 $x = 0$ 时的 y 值，其直线的截距即由图上直接读出。

如果起点不为零，可由式

$$b = \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{x_2 - x_1} \quad (1-3-2)$$

求出截距。

②曲线的改直。

在实际工作中，许多物理量之间的函数关系形式是复杂的，并非都为线性，但是可以经过适当变换后成为线性关系，即把曲线变成直线，这种方法叫曲线改直。

例1：方程 $l = -\frac{g}{4\pi^2} T^2$ ， l 与 T^2 具有线性关系，故可将 $l - T$ 图改成 $l - T^2$ 图，图线就直线化了。

例2： $PV = C$ ， C 为常数，由 $P = C \frac{1}{V}$ 作 $P - \frac{1}{V}$ 图得一直线，直线斜率为 C 。

例3： $y = ax^b$ ， a 、 b 为常数，两边取对数，得 $\lg y = \lg a + b \lg x$ 。以 $\lg x$ 为横坐标， $\lg y$ 为纵坐标作图，得一直线。该直线的截距为 $\lg a$ ，直线斜率为 b 。

例4： $S = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$ ， v_0 、 a 为常数。两边除以 t 得 $\frac{S}{t} = v_0 + \frac{1}{2} at$ ，作 $\frac{S}{t} - t$ 图为一一直线，其直线斜率为 $\frac{1}{2}a$ ，截距为 v_0 。

(3) 作图法的优点。

①直观。直观是作图法的最大优点之一，可根据曲线形状，很直观很清楚地表示在一定条件下，某一物理量与另一物理量之间的相互关系，找出物理规律。

②简便。在测量精度要求不高时，由曲线形状探索函数关系，作图法比其他数据处理方法要简便。

③可以发现某些测量错误。若在曲线上个别点偏离特别大，可提醒人们重新核对。

在图线上，可以直接读出没有进行测量的对应于某 x 的 y 值（内插法）。在一定条件下，也可以从图线的延伸部分读出测量数据范围以外的点（外推法）。

但也应看到作图法有其局限性。特别是受图纸大小的限制，不能严格建立物理量之间的函数关系，同时受到人为主观性进行的描点、连线的影响，不可避免地会带来误差。

3. 逐差法

逐差法也是物理实验中经常采用的数据处理方法之一。该方法一般用于等间隔线性变化的测量中。由误差理论知道，算术平均值是多次测量的最佳值，为减少随机误差，在实验过程中测量的次数应尽量多。但在等间隔线性变化测量中，如果仍用一般的求平均值的方法，结果将发现只有第一次测量值和最后一次测量值有作用，其中间值全部抵消了，这