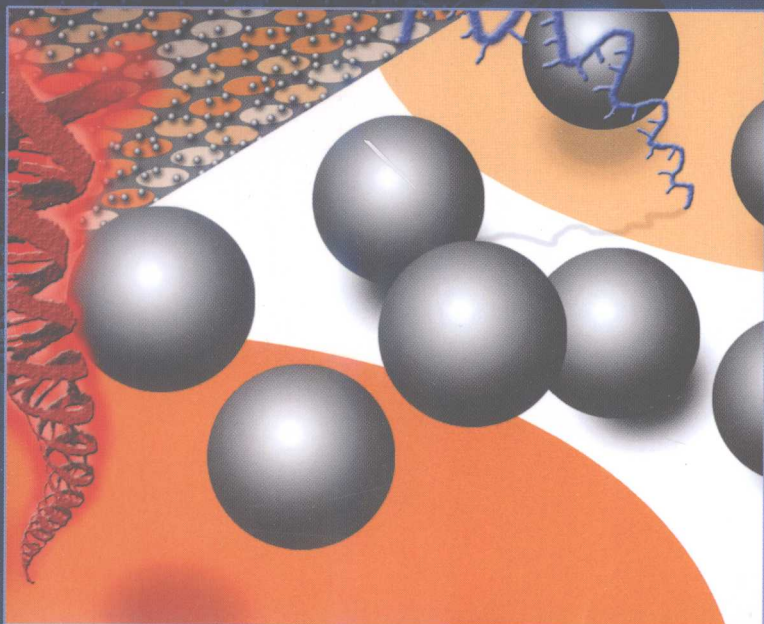




普通高等教育“十一五”国家级规划教材



主编/喀蔚波

全国医学高等院校教材

医用物理学实验

(第二版)



北京大学医学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
全国医学高等院校教材

医用物理学实验

(第二版)

主 编 喀蔚波

副主编 孙大公 严华刚

编 者 (以姓氏笔画为序)

王 铭 (北京大学医学部)

孙大公 (北京大学医学部)

许莉莉 (首都医科大学)

严华刚 (首都医科大学)

吴 瑞 (首都医科大学)

苑桂红 (北京大学医学部)

郭学谦 (首都医科大学)

高 嵩 (北京大学医学部)

喀蔚波 (北京大学医学部)

北京大学医学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

医用物理学实验/喀蔚波主编. —2 版. —北京: 北京大学医学出版社,
2008. 11

ISBN 978-7-81116-310-0

I. 医… II. 喀… III. 医用物理学—实验—高等学校—教材
IV. R312-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 154802 号

刘薇 主 编

阎平 公大伟 主 编

(孔庆国等主编) 参 编

(医学影像学) 王 王

(医学影像学) 公大伟

(医学影像学) 陈陈书

(医学影像学) 阎平

(医学影像学) 吴 昊

(医学影像学) 王 王

医用物理学实验 (第二版) 参 编

(医学影像学) 王 王

主 编 喀蔚波 (医学影像学) 刘薇

出版发行: 北京大学医学出版社 (电话: 010-82802230)

地 址: (100191) 北京市海淀区学院路 38 号 北京大学医学部院内

网 址: <http://www.pumpress.com.cn>

E - mail: booksale@bjmu.edu.cn

印 刷: 北京东方圣雅印刷有限公司

经 销: 新华书店

责任编辑: 暴海燕 责任校对: 杜 悦 责任印制: 郭桂兰

开 本: 787mm×960mm 1/16 印张: 12 字数: 230 千字

版 次: 2008 年 11 月第 2 版 2008 年 11 月第 1 次印刷 印数: 1—3000 册

书 号: ISBN 978-7-81116-310-0

定 价: 20.00 元

版权所有, 违者必究

(凡属质量问题请与本社发行部联系退换)

序

物理学研究物质世界最基本的运动与变化的现象及其规律，任何复杂的、高级的物质运动和变化，包括化学的、生物的和地学的运动、变化都是由最基本的物理运动和变化构成的。因此，物理学是一切自然科学或物质科学的基础，物理学的研究和思维方法贯穿渗透在所有自然科学研究中。历史上，物理学的研究曾极大地推动了人类科学思维能力的发展，奠定了机械唯物主义的基础，并使之进一步发展到辩证唯物主义。学习物理学对形成人的正确科学思维能力和提高科学素养发挥着重要作用。

物理学是一门实验科学。通过实验建立物理现象之间的因果关系，确定描述物理现象各参量之间精确的数量规律；物理理论最终要靠实验来验证。物理实验包含现象的观察描述、参数的提取测量、结果的处理分析、结论的归纳总结等等，当然还要有实验构思的形成、实验步骤的设计、仪器装置的制备等。物理学实验具有自己整套的原理、方法和技术体系。这样，学习实验原理、方法与技术成为学习物理学的必要内容。

医学是建立在研究人体生理病理过程的自然科学基础上的一门科学，同时又受人的心理和精神的重要影响而强烈地感受着人文社会科学因素的作用，它实际上是一门文理融会的学问。医学生既要有坚实的自然科学素养，还要具备厚重的人文情怀。物理学的修养是医学生建立实事求是的、科学的理性思维素养的一条重要途径。更何况当代医学诊断，乃至治疗技术都大量渗透了物理学的原理、方法和技术，从 X 射线、超声波、放射性、光谱、激光、计算机断层扫描 (CT)，直到磁共振和磁共振成像，可以说，物理学上的重大突破、创新进展、及其延伸出来的传感、变换与控制元件和各种先进仪器设备的诞生，都会直接、间接地对医药卫生事业产生积极影响。医学生掌握了先进的物理原理和方法技术，必将对医药业务和学科的发展产生创造性的作用。因此学习物理学与物理学实验对医学生是必不可少的。

和一般理工科大学物理课程教学，特别是物理实验教学相比，医药专业普遍有实验学时有限、仪器设备投入相对较少的状况。中国医学教学如何在这样的具体情况下，最大限度地使学生能够得到比较充分的物理实验训练？中国医学物理教学的同行们为此做了大量探索。北京大学医学部公共教学部物理教研

[illegible]

第二版前言

《物理实验》出版以来,作者于2003年起有幸全程参与了教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委员会制定《理工科类大学物理课程教学基本要求》和《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2008年版)(高等教育出版社2008年出版)的工作。同时,作为教育科学“十五”国家规划课题“21世纪中国高等学校农林/医药类专业数理化基础课程的创新与实践”医药类物理子课题的负责人,作者主持了医药类专业物理课程教学现状的调查、医药类专业本科物理课程的目标与定位以及医药类专业本科物理理论课和实验课教学内容和课程体系的创新与实践等项目的研究工作。这些经历使我们对国内高等教育的形势、国家对高等教育的要求、国内高等学校物理实验基础课程教学改革成果以及医药类专业物理实验课程教学的现状有比较深入的了解和分析。我国高等教育经历了规模上的跨越式发展,已经进入了全面提高教育质量的新阶段。而物理课程在医药人才培养中的地位和作用,我们认为应坚持物理基础,强调物理课程在培养学生科学素质方面所起的重要作用;反对过多偏重医学应用,将物理课程作为后续医药专业基础课程和专业课程的工具。医药院校物理教师应充分认识到包括物理实验在内的物理基础课程绝不仅仅是提供一些基本的物理知识,而在医药人才培养中具有其他课程不能替代的重要作用。我们正是本着这样的指导思想完成本书的改编工作,同时我们也将部分教学研究成果反映在这本教材中。

在《医用物理学实验》的改编过程中,我们参照《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2008年版),并结合医药类专业物理实验课程的现状和特点明确将22个实验分为基础性、综合性实验,设计性实验,近代物理实验及医学物理实验4个部分。基础性、综合性实验是物理实验的基础,使学生掌握基本的实验思想、实验方法和实验手段,训练实验操作技能。在此基础上,通过设计性实验逐步提高学生综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。考虑到医药院校较难找到相关物理参考文献的实际困难,我们在设计性实验中仍然较详细地给出了实验原理,以减轻学生的负担。为改变目前医药院校物理实验设备相对陈旧、落后的状况,并考虑到近代物理在医学基础研究及临床诊断、治疗中所发挥的重要作用,专门设立了近代物理实验部分。最后,在医学

物理实验部分介绍物理在医药学中的应用。本书实验内容在原《物理实验》16个实验的基础上增加了信息光学综合实验和超声波特性研究2个实验,以及以首都医科大学《物理实验(讲义)》为基础修改而成的静电场模拟、牛顿环法测定透镜的曲率半径、用拉伸法测金属的杨氏模量及分光计的调节和应用等4个实验。同时也对原《物理实验》中的其他实验进行了改写和补充,半数以上的实验作了较大的改动。书中为突出重点,将一些扩展性内容以“提示”方式与正文分开,或以附录形式列于实验后。

本书在实验的选择和设计上与国内其他医药院校使用的物理实验教材相比有以下特点:1. 实验内容、实验仪器和实验手段的现代化仍保持较高水平。本书在原《物理实验》中3个近代物理实验的基础上,又增加了包括全息照相、阿贝成像及空间滤波的信息光学综合实验。信息光学不仅在近代科学技术中有着广泛的应用,而且有助于激发学生的学习兴趣、促进学生思考,加深对光学现象的理解。据我们所知,这是首次将阿贝成像及空间滤波实验引入医药专业物理实验。近年来,许多医药院校已经意识到应在物理实验中加强近代物理实验内容,但由于经费等原因,一些院校选择使用计算机仿真实验代替动手操作的实验。这显然是有悖于物理实验的实践性特点。计算机仿真实验特别适用于通过网络进行远程教学以及预习时了解实验原理和熟悉仪器操作,而用计算机设计虚拟仪器强调了学生主动学习和创新能力的培养。但作为动手操作实验的补充,它们不能简单代替动手操作实验。2. 更注重物理思想、方法在医学中的应用。考虑到学生的专业特点,医药类专业物理实验一定要与医学应用相结合,这已经是医药院校物理教师的共识。但国内许多院校的做法是我们不敢苟同的,我们认为物理实验结合医学应用的目的是让学生了解、掌握用物理学的方法和技术解决实际问题的思路,而不是训练学生掌握某些医疗仪器的使用,因为这是物理课程。因此,我们不赞成一些医药院校在物理实验中安排心电图仪或A型超声仪的使用等内容。例如,本书新增的超声波特性研究实验的物理内容要比A型超声仪的超声测距丰富,包括超声波的三种波型及波型转换,超声波的反射、折射特性和超声测长等实验内容。本书除4个医学物理实验外,温度传感器的特性及其应用、用旋光计测定糖溶液的浓度、狭义相对论动能-动量关系的实验研究、用光学多道分析器研究氢原子光谱和核磁共振等5个实验也与物理学在医药学中的应用密切相关。我们认为本书中所有与医药学结合的实验,其物理原理及医学应用要比测量人耳的听阈曲线等实验更有意义。

全国高等学校教学研究会副理事长、教育部高等学校文化素质教育指导委员会顾问、北京大学王义道教授应邀为本书作序。令我们非常感动和钦佩的是,他在序中不仅肯定了我们所做的努力,而且对物理学、物理实验及其在医

学中的应用理解得非常深刻。这对指导物理学、物理实验的教学具有重要意义,需要我们医药专业物理教师认真领会,并在教学实践中贯彻、实施。在此向王义道教授表达我们的敬意及深深地感谢。

《医用物理学实验》可供医药类所有专业学生使用,也可供生物医学工程等相关专业学生使用。各校可根据学时、专业的不同选择其中部分实验。在《物理实验》部分实验安排选做内容的基础上,本书中更多的实验给出了选做内容,可供有进一步学习要求的学生选择使用,以满足个性化教学的需求。

本书由北京大学医学部公共教学部物理教研室及首都医科大学生物医学工程学院物理教研室的部分教师共同编写,喀蔚波负责全书的统稿和定稿。高等学校国家级名师奖获得者、中国科学技术大学霍剑青教授阅读了书稿,并提出了宝贵的意见和建议,对提高本书的质量和水平起了重要作用,在此表示衷心的感谢。衷心感谢北京大学医学部及教育处多年来对物理学课程的支持、帮助;感谢北京大学医学出版社为本书出版所作的努力。北京大学医学部物理教研室参与编写《物理实验》的全体人员以及首都医科大学物理教研室参与编写《物理实验(讲义)》的全体人员也为本书做出了贡献,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,加之受到仪器设备的限制,书中难免存在一些问题,甚至谬误,恳请读者提出指正。

喀蔚波

2008年10月

第一版前言

《物理实验》是在北京大学医学部(原北京医科大学)医学物理教研室使用多年的《物理学实验》(讲义)基础上修改、补充而成。

国内医学院校开设的物理实验最早大多是照搬理工院校物理实验的内容和模式,但与理工院校相比,医学院校物理实验普遍存在着课时少,设备投入少,学生重视程度不够等情况,这使得医学院校物理实验教学的水平与理工院校的差距逐渐加大。另一方面,现代医学在基础研究及临床诊断治疗中已大量运用了近代物理学原理和技术。例如:用于元素成分和分子结构研究的各种光谱分析技术;用于肿瘤放射治疗及核医学成像的核放射技术以及X射线计算机断层扫描(CT)、磁共振成像(MRI)等断层影像技术。因此,医学生与理工科学生相比更需要学习、掌握近代物理的知识以及现代实验方法及实验技术。这就造成了医学院校物理实验内容及实验仪器设备陈旧老化与学生需求不断增加之间的矛盾,这种情况显然不符合培养21世纪高素质医药学人才的要求。我们从20世纪80年代开始就在思考如何使物理实验充分体现医学院校的特点,让学生既能了解、掌握基本的物理实验方法和手段,又能接触到某些物理技术、手段在医学中的应用。通过多年来的探索和实践,我们认识到物理实验应定位在培养医学生的理科素质上,即培养学生用物理学的思想和方法分析、解决问题的能力,同时在教学形式上应更多地体现学生的学习主体地位。在物理实验内容的安排、设计上应具有一定的灵活性,给学生一定的选择余地并适应不同学制学生的需求。

1998年在原北京医科大学各级领导的大力支持下,使我们有条件对物理实验进行较大的改革。根据坚持物理基础、增加现代内容、结合医学应用的基本原则,我们把这次改革的重点放在物理实验的现代化上,即实验内容现代化,实验仪器及实验手段现代化,并尽可能结合医学应用。根据医学院校的特点和需要,新增了验证相对论动能-动量关系、氢原子光谱、核磁共振等近代物理实验;并将测量血液黏度及用激光衍射法测量红细胞变形性两个实验作为选作内容。这样物理实验在内容上就包括了普通物理实验、近代物理实验和医学物理实验三个部分,更符合医学生的特点。除了实验内容现代化以外,实验仪器和实验手段的现代化也是这次改革的一个重点。例如,随着近年来计算机

技术的飞速发展,利用计算机对数据进行采集、处理广泛应用于包括医学在内的各领域,因此我们在4个实验中引入计算机对数据进行实时采集、处理。

随着物理实验内容的改革,我们对原《物理学实验》讲义进行了多次修改和补充,除编写了新增实验内容外,还改写、充实了保留的实验内容,删除了多年来一直不做的实验内容。经过3年多的教学实践并根据同学们提出的意见和建议,对个别实验的内容进行了调整和改进,形成了现在的《物理实验》。

这本《物理实验》是供所有医药类专业学生使用的。由于物理实验的课时较少,没有时间完成书中全部实验,可根据学生的专业、学制选择其中部分实验。如对7年制、6年制或5年制的学生可以选择部分普通物理实验和全部近代物理实验;而对夜大或大专的学生则可以多做一些普通物理实验,少做一些近代物理实验。为培养学生的理科素质和分析问题、解决问题的能力,在一些实验中学生可选择不同的实验方法甚至部分实验内容;一些实验中给出了可以选做的内容。由于实验设备的限制,实验十五、实验十六两个医学物理实验还无法对全体学生开放,我们考虑可以作为个别优秀学生的选做实验。以体现因材施教的教育原则。

在本书出版之际,我们衷心感谢几十年来医学物理教研室所有对物理实验建设做出过贡献的同志,特别是王鸿儒、沈树声、戴学勋、文宗曜等同志组织编写、修改了原《物理学实验》讲义,并曾组织、实施了历次物理实验改革;张晓华、邓德宁等同志参加编写、修改了原《物理学实验》讲义。

本书还得到了北京大学医学部教育处及北京大学医学出版社的大力支持,并被列为北京大学医学部出版基金资助项目,在此一并表示感谢。

由于时间仓促加之水平有限,书中难免存在一些缺点、错误,恳请读者提出指正。

喀蔚波

2003年3月

绪 论

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的自然科学。在人类追求真理、探索未知世界的过程中，物理学展现了一系列科学的世界观和方法论，深刻影响着人类对物质世界的基本认识、人类的思维方式和社会生活，是人类文明的基石，在人才的科学素质培养中具有重要的地位。

物理学是实验的科学，人们通过观察物理现象，定量测量或测定物理量，并根据测量结果分析、确立这些物理量之间的关系，从而实现对物理规律的认识和证实。物理实验在物理学的建立发展过程中起着重要的和直接的推动作用，它是物理学的基础。对于已经建立起来的物理定律，如果和新的实验事实发生矛盾，就必须对原有理论加以修正和改造。物理学正是通过这样的过程不断发展、前进。同时，物理实验还有自身的特点以及一套实验知识、实验方法、实验技术等独特的内容。因此，物理实验和理论两门课程既有密切的联系，又有明显的区别。物理实验还是科学实验的先驱，体现了大多数科学实验的共性，具有丰富的实验思想、方法、手段，同时能提供综合性很强的基本实验技能训练。物理实验在树立科学的世界观、培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合能力等方面具有重要作用。

物理实验的内容极为广泛，在实验思想、实验方法以及实验手段等方面是各学科科学实验的基础。它的实验方法和测量技术被广泛地应用在其他科学技术中。物理学原理、方法和技术的应用不断推动着医学的发展。例如体温计、血压计的使用使医学进入定量测量的时代。光学及电子显微镜使人们看到了细胞、毛细血管网以及细菌甚至病毒，这不仅为细胞学说的创立奠定了基础，也使医生研究致病原因及其治疗方法成为可能。X射线的发现揭开了医学影像和肿瘤放射治疗的序幕，同时X射线衍射为最终确定DNA分子的双螺旋结构起了关键作用。目前，以物理学，特别是近代物理学原理、技术为基础的现代医学影像技术已经广泛应用于临床医学的各个领域，它不仅可以提供丰富的组织与器官的形态学信息，还可以提供大量组织与器官的功能性信息和细胞的物质与能量代谢信息，这对医生做出准确的临床诊断是非常重要的。物理学实验技

术也为生命科学基础研究提供了重要的工具,例如 X 射线衍射技术、核磁共振技术、电子衍射技术等已在结构生物学中起着极其重要的作用;各种时间分辨的光谱和能谱技术、特别是荧光标记技术对活细胞内分子的动态行为已能给出生动的描述;扫描探针技术已成为在微小的纳米世界中进行观察和操控的重要手段。从已有多位物理学家或物理背景的科学家获得了诺贝尔生理学及医学奖也可以看出物理学对现代医学发展所做的贡献。由于物理学技术、方法已渗透到医学基础研究及临床诊断、治疗的各个方面,因此,医药专业的学生学习物理学及实验课程是非常必要的。通过物理学及实验课程的学习不仅可以掌握一定的物理学知识,为后续课程的学习及今后的工作打下坚实的物理学基础;更重要的是使学生掌握物理学的基本思想和研究方法,培养学生的科学素质和动手能力。使其在今后的工作中能够运用物理学的原理和方法解决临床及科研中的实际问题。

医药类专业学生学习物理实验课程的目的主要分为三个层次,第一是使学生受到基本实验方法和实验技能的训练(包括常用物理量的测量,基本物理仪器的原理和使用,实验数据处理的方法等)。第二是加深理解并补充课堂所学的物理学理论知识。相对理论课程,物理实验观察现象更加直观,而且可以在一定程度上改变实验条件,这些都有利于深入理解、掌握物理学知识。同时由于一般医药类专业物理学课时有限,有些重要的物理内容在理论课上很少涉及,因此在物理实验中安排了一些与医学应用有关的内容作为补充。第三是通过实验培养学生严肃认真、实事求是的科学工作作风,以及分析问题和解决问题的能力。其实,素质和能力的培养才是为医药类专业学生开设物理实验课程的最终目的。

为了达到上述目的,我们要求同学在实验前、实验中和实验后做到以下几点:

一、实验前预习。实验前作好充分的课前预习,是保证能够独立地顺利完成实验的基本条件。预习必须达到以下五点要求:

1. 了解实验的目的和原理。
2. 明确实验所用的方法及实验步骤。
3. 在实验报告上写好实验目的、仪器用具和实验原理,作为预习报告。
4. 了解实验中对各物理量的测量要求和记录方法,为此预习时应该在预习报告上画好记录实验数据的表格。
5. 把预习思考题的答案写在预习报告上。

二、实验过程中应该有最大的独立性(在教师指导下的独立工作)并发挥个人的积极性,要充分利用实验课的机会获取感性知识。必须严肃认真地观察现象,记录原始数据,不要把数据先记在草稿上再誊到实验报告上,更不要算

好了再填上去,要培养清晰而整洁地记录原始数据的能力和习惯。在实验过程中要运用所学的知识积极思考如何进行合理而精确地测量、估算不确定度或误差的大小、分析产生测量误差的因素,并对实验现象作初步的分析。应该注意每个仪器的规格、性能和在全套实验装置中各种仪器的配备情况,训练正确和熟练的操作能力。在实验中还应注意人身安全,在实验室中接触激光、放射性物质等时必须严格执行安全防护操作规定。要爱护每一件仪器,遵守操作规程,并且要养成细致谨慎的实验习惯。在没有明了一件仪器的操作方法时,绝对不要盲目动手。

三、实验后,应在预习报告的基础上完成实验报告。实验报告是总结自己的实验结果而告之于人的,它应该是有事实,有计算,有分析,有结果;并且缮写整齐,图表明晰,重点突出,词句通顺,使人易于看懂。写实验报告也是学习的过程,它是今后撰写研究论文的初步训练。实验报告应包括下列内容:

1. 实验题目。
2. 实验时间、完成人及协助者(合作人)、仪器台号。
3. 实验目的。
4. 实验原理:用自己的语言简要地说明实验所根据的基本原理、所用的计算公式。
5. 仪器用具及实验条件:包括全部仪器和用具,主要仪器还应注明数量、规格及编号,以及实验环境和实验对象。
6. 实验数据:所有实验数据均应列表表示,必须记录原始数据。
7. 计算过程;要有必要的典型计算。
8. 实验结果及要求计算的误差或不确定度。
9. 指定的图表。
10. 思考题及讨论:通过预习、实验和完成实验报告,对实验有了较深的理解。在报告的最后一项里可以写上对实验结果和误差来源的分析,完成实验后的感想、体会以及改进实验的建议等。

(喀蔚波)

目 录

绪论	(1)
第一章 实验数据的处理	(1)
§1 测量与误差	(1)
§2 系统误差的分析与处理	(3)
§3 随机误差的分布和估算	(4)
§4 测量不确定度	(7)
§5 测量结果的表示	(9)
§6 有效数字和近似计算	(11)
§7 不确定度、误差和有效数字的实例	(13)
§8 常用的实验数据处理方法	(16)
第二章 普通物理实验 I 基础性、综合性实验	(23)
实验一 基本长度测量	(23)
实验二 验证刚体转动的基本定律	(31)
实验三 温度传感器的特性及其应用	(36)
实验四 示波器的使用	(45)
实验五 静电场模拟	(53)
实验六 用霍尔元件测量磁场	(59)
实验七 牛顿环法测定透镜的曲率半径	(62)
实验八 用旋光计测定糖溶液的浓度	(68)
第三章 普通物理实验 II 设计性实验	(72)
实验九 用拉伸法测金属的杨氏模量	(72)
实验十 液体黏度的测定	(76)
实验十一 测定空气中超声波的波速	(82)
实验十二 弦本征振动的观测	(85)
实验十三 分光计的调节和应用	(88)
实验十四 波动光学综合实验	(98)

第四章 近代物理实验	(105)
实验十五 信息光学综合实验	(105)
实验十六 狭义相对论动能-动量关系的实验研究	(114)
实验十七 用光学多道分析器研究氢原子光谱	(126)
实验十八 核磁共振	(134)
第五章 医学物理实验	(146)
实验十九 压力传感器测量脉搏	(146)
实验二十 超声波特性研究	(153)
实验二十一 血液黏度的测量	(163)
实验二十二 红细胞变形性的测量	(168)
(1)	
(2)	
(3)	
(4)	
(5)	
(6)	
(7)	
(8)	
(9)	
(10)	
(11)	
(12)	
(13)	
(14)	
(15)	
(16)	
(17)	
(18)	
(19)	
(20)	
(21)	
(22)	
(23)	
(24)	
(25)	
(26)	
(27)	
(28)	
(29)	
(30)	
(31)	
(32)	
(33)	
(34)	
(35)	
(36)	
(37)	
(38)	
(39)	
(40)	
(41)	
(42)	
(43)	
(44)	
(45)	
(46)	
(47)	
(48)	
(49)	
(50)	
(51)	
(52)	
(53)	
(54)	
(55)	
(56)	
(57)	
(58)	
(59)	
(60)	
(61)	
(62)	
(63)	
(64)	
(65)	
(66)	
(67)	
(68)	
(69)	
(70)	
(71)	
(72)	
(73)	
(74)	
(75)	
(76)	
(77)	
(78)	
(79)	
(80)	
(81)	
(82)	
(83)	
(84)	
(85)	
(86)	
(87)	
(88)	
(89)	
(90)	
(91)	
(92)	
(93)	
(94)	
(95)	
(96)	
(97)	
(98)	
(99)	
(100)	

第一章 实验数据的处理

物理实验是用实验的方法研究各种物理规律,因此要定量测量出各个相关物理量的数值,然后对测量到的数据进行运算处理,得到所需要的结果。但从一系列实验数据中找出事物的规律是一个复杂的问题,而且由于实验条件、实验仪器的精确度的限制,使得测量结果必然有一定的误差。这就需要了解有关测量、数据处理及误差分析的知识。由于误差理论及数据处理方法涉及较多和较深的数学知识,我们在这里不可能对它作全面的介绍,只能讨论初步的误差理论和常用的数据处理方法。

§ 1 测量与误差

一、物理量的测量

测量是用实验的方法获得被测量量值的过程。对物理量进行测量是物理实验的重要组成部分，而对某物理量的大小进行测定，就是将此物理量与规定作为标准单位的同类物理量相比较，或者与规定作为标准单位的可借以导出该物理量的异类物理量相比较。这样测量可以分为两类。

1. 直接测量：是指将被测物理量与已标定好的仪器、量具进行比较，直接从仪器、量具上读出被测量大小的测量。例如：用米尺测量长度，用天平测量质量，用秒表测量时间，用电表测量电压、电流，用温度计测量温度等等，这些可以通过相应的测量仪器直接测得的物理量称为直接测得量。实际上能够进行直接测量的物理量并不多。

2. 间接测量：是根据被测量与某些直接测得量的函数关系，求出被测量值的测量。例如测量铜柱的密度时，由直接测量得到铜柱的高度 h 、直径 D 和质量 M 代入密度公式

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{4M}{\pi D^2 h}$$

确定铜柱密度。这种由一些直接测得量通过一定的数学关系式计算出来的物理

量称为间接测得量。大多数物理量的测量属于间接测量。

二、测量误差

对物理量进行测量的目的是希望确定被测量的真值。但在任何一种实际测量中,测量结果都只能是被测量的近似值。这首先表现为当在同样条件下对同一被测量重复进行多次测量(称为等精度测量),得到的结果一般都不会相同。对这类测量,没有任何充分的理由说某次测量一定比另一次更准确,只能认为每次测量的准确程度是相同的。其次,因受所用测量仪器精确度和分辨率的限制,获得的结果也不会绝对准确,真值无法确定。还有在测量过程中,被测量往往要对测量仪器施加作用才能获得测量结果,这意味着测量过程本身会改变被测量原来的状态,如用温度计测量温度。总之,这些因素都会使测量结果与被测量的真值之间存在差异。我们把测量值与被测量真值之差称为误差,若被测量 X 的测量值为 x , 其真值为 a , 则误差 ε 为

$$\varepsilon = x - a \quad (0-1)$$

上式定义的误差又称绝对误差,它反映了测量值偏离真值的大小和方向(即正负)。绝对误差有与被测量相同的单位和量纲。

绝对误差与真值之比称为相对误差,一般用百分数表示,即

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{a} \times 100\% \quad (0-2)$$

相对误差没有单位和量纲。

误差和错误不同,错误是由于测量者不小心,或测量方法不正确所造成的。只要测量细心些,方法正确些,就能避免错误。但是误差是不可避免的,任何测量结果都可能误差。随着科学的发展、人们经验的丰富和测量技术的提高,误差可以被控制得越来越小,但是不能使误差降低到零。误差产生的必然性已被实践所证实,也为人们所公认。

实际上由于不知道真值(确定真值是我们测量的目的),误差也无法确知。所以在此情况下,测量的任务是:1. 给出被测量真值的最佳估计值;2. 给出真值最佳估计值的可靠程度的估计。

最佳估计值必定最接近真值,在实际测量中经常采用此最佳值来近似地代替真值计算误差。为了减小误差,就要分析在测量过程中误差产生的根源。误差按其产生的原因、性质和特点可以分为三类:

1. 系统误差:是由某些确定的原因产生的,对于测量结果的影响也是确定的,即绝对误差的大小和符号保持恒定,或按照一定规律变化。
2. 随机误差:是由不确定的原因产生的,对测量结果的影响也是随机的、不确定的。