

大学公共基础课“十三五”课改规划教材

上海理工大学精品本科教材

大学物理

创新设计实验

◎主 编 周 群
◎副主编 杨 欣 陆 剑

大学公共基础课“十三五”课改规划教材
上海理工大学精品本科教材

大学物理创新设计实验

主 编 周 群

副主编 杨 欣 陆 剑

参 编 郭露芳 林立华 崔连敏 汤 猛 马珊珊

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书分为实验基本知识、物理实验设计与应用、物理实验创新研究三个部分。内容由浅入深,充实丰富并兼顾不同专业的需要,同时又纳入了一些与生产实践或科研密切联系的当今热点实验项目。每个实验以相关的趣味知识为引导,既开阔了学生视野,又增加了趣味性。本书注重学生动手能力的培养,引入了两个DIY实验和计算机仿真实验,在扩充教材内容的基础上使本书更符合社会对人才培养的要求。

本书可作为理工科院校各专业本科生的物理实验教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理创新设计实验/周群主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2016.3

大学公共基础课“十三五”课改规划教材

ISBN 978-7-5606-4007-5

I. ①大… II. ①周… III. ①物理学—实验—高等学校—教材

IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 021588 号

策 划 毛红兵

责任编辑 毛红兵 杨 璠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2016年3月第1版 2016年3月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 7

字 数 160千字

印 数 1~1000册

定 价 13.00元

ISBN 978-7-5606-4007-5/O

XDUP 4299001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

创新开放实验能使学生在具有一定实验能力的基础上,把学到的知识和技能运用到解决实际问题或实际测量中去。大学物理创新实验强调开发学生自主创新的潜力,注重培养学生的实践创新精神,使学生的定性分析和定量计算逐步和工程估算及实验手段结合起来,从而逐步掌握工程设计的常规步骤方法,了解科学实验的程序和实施方法,培养工程技术意识与综合应用能力。这一类实验更能激发学生学习物理知识、研究与探索物理规律的热情和积极性,加深对物理规律的切身感受和实际体会,提高他们的动手、动脑能力,激励创新精神,为他们今后参加工程实验、进行科学实验奠定基础。

本书在物理实验讲义的基础上,结合编者多年的教学实践经验编写而成。编者对原讲义的内容进行了修订,增加了一些与目前生产、生活热点相关的新实验。

本书内容涵盖了物理学中的力学、热学、声学、电学和光学实验,包括目前比较热门的汽车燃料电池的特性实验、探究液晶显示器原理的液晶电光效应实验、利用脉冲反射法进行超声无损探伤的超声诊断与超声特性综合实验、了解人体心律和血压的测量原理的压力传感器特性实验等。这些实验或者与目前社会科技发展热点相结合,或者与人们的日常生活息息相关,在增强理论知识和专业技术联系的基础上,可以拓宽学生的知识面和视野。

本书的 2.1、2.2、2.3、3.1、3.2 小节由周群编写;1.4、2.8、2.9、2.18、3.8 小节由杨欣编写;1.3、2.4、2.5、2.16、2.17 小节由陆剑编写;1.1、3.5、3.6、3.7 小节由林立华编写;3.3、3.4 小节由崔连敏编写;1.2、2.6、2.7 小节由郭露芳编写;2.10、2.11、2.12 小节由汤猛编写;2.13、2.14、2.15 小节由马珊珊编写。

本书的出版得到了各级领导及友好人士的热情鼓励和帮助,在编写过程中还参考了许多院校出版的有关教材,在此一并表示衷心的感谢。

编 者
2015.9

目 录

第 1 章 实验基本知识	1
1.1 物理实验研究方法	1
1.2 创新思维与创新方法	3
1.3 计算机处理物理实验数据的方法	5
1.4 创新实验报告的撰写规范	8
第 2 章 物理实验设计与应用	10
2.1 蚂蚁、壁虎等生物的吸附力研究	10
2.2 燃料电池特性的测量与分析	13
2.3 A 类超声诊断与超声特性综合实验	20
2.4 液晶电光效应实验	25
2.5 气体压力传感器特性及人体心律、血压测量实验	29
2.6 透镜的焦距测量	32
2.7 光偏振现象的研究	35
2.8 固体介质折射率的测定	39
2.9 单缝、单丝衍射实验	42
2.10 温度传感器的温度特性测量实验	44
2.11 用计算机实测技术研究冷却规律	51
2.12 用计算机实测技术研究声波和拍	54
2.13 用计算机实测技术研究弹簧振子的振动	57
2.14 用计算机实测技术研究单摆	60
2.15 用计算机实测技术研究点光源的光照度与距离的关系	61
2.16 用纵向磁聚焦法测定电子荷质比	64
2.17 用示波器和微机测动态磁滞回线	67
2.18 太阳能电池特性的研究	75
第 3 章 物理实验创新研究	79
3.1 DIY 电磁混合磁悬浮实验	79
3.2 DIY 磁耦合谐振式无线电力传输实验	81
3.3 高级光学干涉组合实验	84
3.4 利用不同方法研究金属的线胀系数	90
3.5 利用不同方法研究物体的转动惯量	94
3.6 全息干板	101
3.7 温差发电实验	102
3.8 计算机仿真实验	104
参考文献	105

第 1 章 实验基本知识

1.1 物理实验研究方法

物理学是一门重要的基础科学，是现代技术的支柱。同时物理学又是一门实验科学，许多理论和规律都是以实验的新发现为依据被提出来而又进一步被实验所证实的。因此，实验是物理学研究的重要方法，也是物理学科教学的重要手段。掌握恰当的物理实验研究方法，对提高学生的实验理解能力、创新能力和设计能力都是至关重要的。下面概括介绍几种较常用的实验方法：理想化法、平衡法、放大法、转换法、补偿法、干涉法、光谱法和模拟法。

1. 理想化法

影响物理现象的因素往往复杂多变，实验中常可采用忽略某些次要因素或假设一些理想条件的办法突出现象的本质因素，以便于深入研究，从而取得实际情况下合理的近似结果（通俗地说就是只关注主要因素，忽略次要因素）。例如在“用单摆测定重力加速度”的实验中，假设悬线不可伸长，不计悬点的摩擦和小球在摆动过程中的空气阻力；在电学实验中把电压表看做内阻是无穷大的理想电压表，电流表看做内阻为零的理想电流表，等等，都采用了理想化的方法。

2. 平衡法

平衡法是利用物理学中平衡态的概念，将处于比较的物理量之间的差异逐步减小到零的状态，判断测量系统是否达到平衡态来实现测量。在平衡法中，并不研究被测物理量本身，而是将其与一个已知物理量或相对参考量进行比较，当两物理量差值为零时，用已知参考量或相对参考量描述待测物理量。例如，用物理天平称物体质量、惠更斯电桥测电阻都是运用平衡法进行测量的。

3. 放大法

放大法是将被测量进行放大，以提高测量的分辨率和灵敏度的方法。在测量中有时由于被测量很小，甚至无法被实验者或仪器直接感觉和反应，如果直接用给定的某种仪器进行测量就会造成很大的误差。此时可以借助一些方法将待测量放大后再进行测量。常用的放大法有机械放大法、光学放大法、电学放大法和累积放大法等。

（1）机械放大法：通过机械原理和装置放大被测量。测量长度所用的游标卡尺和螺旋测微器就分别利用游标原理和螺旋放大原理使读数更为精确。

（2）光学放大法：常用的光学放大法有两种。一种是视角放大，它使被测物通过光学仪器形成放大的像，便于观察，例如放大镜、显微镜和望远镜等。另一种是测量放大后的物理量，如光杠杆、复式光电检流计。

(3) 电学放大法：物理实验中最常用的技术之一，包括电压放大、电流放大、功率放大等。由于电信号放大技术成熟且易于实现，所以也常将其他非电量转换为电量放大后再进行测量。例如利用光电效应法测量普朗克常数的实验就是将微弱的光信号先转换为电信号再放大后进行测量，声速测量实验中的压电换能器是将声波的压力信号先转换为电信号，再放大后进行测量。

(4) 累积放大法：对某些物理量进行单次测量可能会产生较大的误差，如测量单摆的周期、等厚干涉相邻明条纹的间隔、纸张的厚度等，此时可将这些物理量累积放大若干倍后再进行测量，以减小测量误差、提高测量精度。

4. 转换法

许多物理量之间存在着各种各样的效应和定量的函数关系，转换法就是以此为依据，将某些因条件所限无法直接用仪器测量的物理量转换成可以测量的物理量来进行测量，或者为了提高待测物理量的测量精度，将待测量转换成为另一种形式的物理量的测量方法。常用的转换方法如下：

(1) 光电转换：利用光敏元件将光信号转换成电信号进行测量。

(2) 磁电转换：利用磁敏元件或磁感应组件将磁学参量转换成电压、电流或电阻。典型的磁敏元件有霍尔元件、磁记录元件，如读写磁头、磁带和磁盘等。

(3) 热电转换：利用热敏元件将温度的测量转换成电压或电阻的测量。常用的热敏元件有半导体热敏元件、热电偶等。

(4) 压电转换：利用压敏元件或压敏材料的压电效应将压力转换成电信号，与激励压敏材料产生共振，从而进行测量的方法。常用的压敏材料有压电陶瓷、石英晶体等。

5. 补偿法

补偿法是通过调整一个或几个与被测物理量有已知平衡关系的同类标准量，来补偿被测物理量，使系统处于补偿状态，从而得到待测量与标准量之间的确定关系，测得被测量的方法。补偿法通常与平衡法、比较法结合使用。例如，用电势差计测电动势就运用了补偿法，而迈克尔逊干涉实验中有一个补偿板，起到补偿光程的作用。

6. 干涉法

干涉法是通过对于相干波产生干涉时形成稳定的干涉图样的分析，进行有关物理量测量的方法。干涉法使瞬息变化、难以测量的动态研究对象变成稳定的静态对象，因而简化了研究方法，提高了测量精度。无论是声波、水波和光波，只要满足相干条件，相邻干涉条纹的波程差均等于相干波的波长。因此，通过计量干涉条纹的数目或条纹的改变量，可以对一些相关物理量进行测量，如物体的长度、位移与角度，薄膜的厚度，透镜的曲率半径，气体或液体的折射率等。牛顿环实验及迈克尔逊干涉实验中都用到了干涉法。

7. 光谱法

光谱法是基于多数光源发出的光都不是单色光，通过分光元件和仪器，将复色光进行分解，将不同波长的光按一定规律分开排列形成光谱，然后对光谱进行有关物理量测量的方法。光谱法通常用来测定谱线波长。

8. 模拟法

模拟法是一种间接测量方法，对一些特殊的研究对象人为地制造一个类似的模型来进

行实验。模拟法能方便地使自然现象重现,可将抽象的理论具体化,可进行单因素或多因素的交叉实验,可加速或减缓物理过程。利用模拟法可以节省时间和物力,提高实验效率。

模拟法可分为物理模拟和数学模拟两种方法。物理模拟是在模拟的过程中保持物理本质不变的方法。数学模拟则采用内在的物理规律类比两种物理现象,例如用恒定电流来模拟静电场、用计算机仿真实验模拟半导体热敏电阻中电阻与温度的关系等。

此外,物理实验的研究方法还有:比较法、控制变量法、留迹法、等效替代法、比值定义法、归纳法和图像法等。

1.2 创新思维与创新方法

1.2.1 创新思维

创新思维是指人们通过应用已经掌握的知识、经验和方法,以及对客观事物的观察、类比、联系、分析和综合,探索新的现象和规律,从而产生新思想、新理论、新方法和新成果的一种思维形式。在创新思维的过程中,往往还需要综合运用各种思维形态或思维方法。在大学物理创新实验中,传统思维方法往往会阻碍创造性地解决问题,对于创新是非常不利的。要进行创新思维,必须要突破思维障碍,转换思维视角。

在大学物理创新实验中,创新思维主要包括以下五个思维能力:

1. 发散思维

发散思维,又称为辐射思维、扩散思维或求异思维,是指面对问题沿着多方面思考而产生出多种设想或答案的思维方式。例如,测定电子的荷质比时可以采用偏转法,根据电子在高速运动中因电场和磁场发生偏转进行测定,也可以用光源分析法测定。在解决问题时,不能只想出一个办法就停止思考,这样就放弃了创新的机会,一定要找到更好、新颖、高效的解决方案。

2. 逆向思维

逆向思维,是指从相反方向思考问题的方法,也叫做反向思维。比如,电动机利用了电磁感应原理(电生磁),反过来,利用旋转的闭合线圈不断切割磁场而产生磁电感应电流(磁生电),从而产生了发电机这种将动能转换为电能的能源设备。

3. 联想思维

联想思维,是由此想到彼,并同时发现共同或类似规律的思维方式。例如:贝尔在实验研究中,就是由音叉联想到金属簧片,继而发明了电话。

4. 横向思维

纵向思维是一种常规的直上直下的思考方式,这种逻辑思维解决问题严密但过于狭隘。横向思维是指接受和利用其他事物的功能、特征和性质的启发而产生新思想的思维方式,是一种提高创造力的系统性的手段。

5. 批判性思维

批判性思维,意味着利用恰当的评估标准确定某物的真实价值,以明确形成有充分根

据的判断。物理实验是对真理的检验，一定要以事实为依据，不盲从权威，敢于标新立异，勇于提出自己的观点与看法。

1.2.2 创新方法

创新方法，是指根据创造性思维发展规律和大量成功的创造与创新的实例总结出来的一些原理、技巧和方法。大学物理创新实验中主要的创新设计方法有以下几种：

1. 项目原理设计法

项目原理设计法，是指在理解实验项目和实验原理的基础上，分析实验的设计思想、原理使用的条件等特点，提出新颖的、与实践相结合的设计方案。例如，在物理学史上，托马斯·杨为了在人为条件下产生光的干涉，首先深入了解光的相干条件，对光的传播和干涉有了清晰、生动的物理模型和物理概念之后，才设计出具有创造意义的实验。

要成功地进行项目原理创新设计，必须具备三种能力：一是综合应用能力，善于应用实验原理中涉及的理论知识和实验的设计思想，通过巧妙整合，形成新的设计；二是融会贯通能力，将实验原理与自身的物理基础相结合，找到合适的仪器、适合的条件；三是分析与研究能力，把大量的实验方法、实验过程和实验数据进行综合、分析，并加以整理，形成科学的思想和方法。

2. 实验方案改进法

当原有方案有缺点或满足不了测量要求时，需要在原有的设计方案基础上，对实验仪器的结构、性能等方面进行改进，以适应实验要求，提高实验测量精度。改进实验方案法是在原有设计方案的基础上进行改进和创新，需充分突出创新点和优势。

方案改进法主要包括三类：一是仪器设备结构的改进，即在基本仪器的基础上，加入辅助设备，或在基本型仪器的基础上，对其作用原理、结构等进行设计，使其功能性更强。例如，为满足测量低值电阻的要求，将四端电阻器和伏安法相结合制成双臂电阻器，实现对低值电阻测量的同时提高测量精度；二是实验方法的改进，包括实验条件、实验环境以及实验材料的选择等；三是对数据采集、数据处理方法的改进，在数据采集以及处理过程中往往会加入人为因素，导致误差增大，通过改进数据采集以及处理的方法，可提高实验的准确性。

3. 联想设计法

联想设计法是由一个实验项目联想到类似的实验项目，或由一个实验的实验原理、实验方法等，联想到另一个或多个实验的实验原理、实验方法，将多个类似实验进行类比总结，进行新的设想，设计出新的实验方案。

联想设计法有两个特点：一是相似性，几个类比的实验项目有相似性，测量同一个参数，或者用同一个仪器，通过对比类比实验，找到实验方案的突破口，相互结合之后给出最佳方案；二是整合性，将类比实验中对测量项目有用的关键技术融会贯通，并进行整合，这就需要将类比实验中的优势和劣势进行分析对比，找出针对测量项目的有效方法。

4. 组合设计法

组合设计法是将现有的技术、方法和仪器等按照一定的科学方法有效地组合在一起，用于测量新的物理量。在实验中，对每台仪器以及每项技术进行深入了解和整合，利用各

种测试技术及方法的特点，通过科学的方法整合出互补的新型方案。

组合设计法可从以下三方面入手：一是创新实验方案，将不同的实验方法组合在一起，产生新的实验方案，或更新实验测量内容，提高实验测量精度；二是研制开发新仪器，将几种不同实验原理的仪器相互组合，开发出一种新的仪器，例如，将小量程的微安表并联或串联适当阻值的电阻后改装成不同量程的电流表和电压表；三是开发数据采集系统，将 CCD、光电转换、信号处理、传感器等技术相结合，把实验中的不同信号通过计算机显示，提高实验的效率并增强实验现象的直观性，如利用激光光电传感器结合单片机计时，可减小落球法测量液体黏滞系数时人工秒表计时的误差，提高测量的准确度。

1.3 计算机处理物理实验数据的方法

数据处理是物理实验中重要的组成部分，常规的数据处理方法有列表法、作图法、最小二乘法和逐差法等。其中最小二乘法限于直线的拟合，其数据的计算繁琐，使用计算机替代人工计算可以大大降低运算量，同时避免计算的错误，节省时间，提高效率。数据处理时常用的计算机处理工具有 Excel、Origin、Matlab、VB、VC++ 和 C 语言等。其中 Matlab、VB、VC++ 和 C 语言需要编程的基础，而 Excel 和 Origin 不需要。本节主要介绍 Excel 和 Origin 软件在数据处理中常见的应用。

1.3.1 Excel 软件数据处理的应用简介

Excel 是日常生活中经常使用的电子表格之一。本节主要介绍如何利用它计算测量结果的标准差、合成不确定度，计算线性最小二乘法校准的不确定度等。

Excel 的工作窗口如图 1-1 所示，它的基本工作界面由标题栏、菜单栏、工具栏、滚动条、数据编辑栏、工作表选项卡和状态栏组成。菜单栏的下拉菜单包含一组相关操作或命令。工具栏由一些工具按钮组成。数据编辑栏用来输入或编辑单元格的值或公式，也可以显示活动单元格中使用的常数或公式。 f_x 是插入函数，单击 f_x 后可弹出“插入函数”对话框，根据需要建立函数。

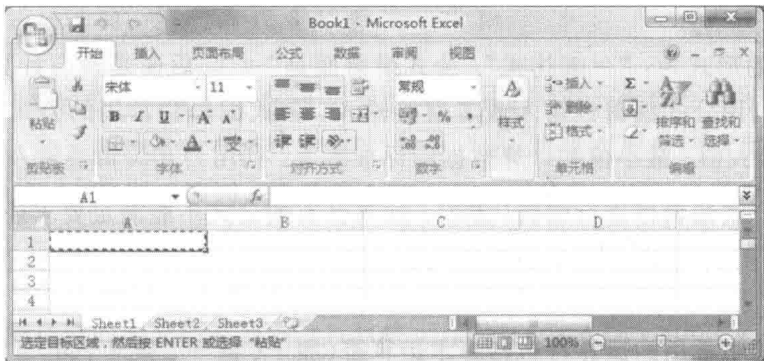


图 1-1 Excel 工作窗口

Excel 软件的基本操作如下：

1. 选定单元格

选定一个单元格，只要将光标指向该单元格，单击鼠标左键即可。选定整行或整列单元格只要用鼠标左键单击行号或者列号即可。选定某个矩形区域，只要将鼠标指向区域的第一个单元格，按住鼠标左键，然后沿着对角线从第一格拖动光标到最后一格，松开鼠标即可。选定不相邻的区域，需先按住 Ctrl 键，然后单击鼠标左键选中需要的单元格或区域。

2. 数据的输入

工作表可以储存多种形式的数 据，在数据处理中，可以在工作表中输入两类数据：常量和公式。常量可以直接在单元格中输入，可以是数字或文字。输入数字时 Excel 默认的是通用数字格式，一般采用整数、小数格式。数字可以包括数字字符(0~9)和特殊字符中的任意字符：+、-、%、.、E、e，例如：-7.5E-05。

在实际计算中经常需要设置单元格格式，下面以科学计数格式的设置为例，介绍单元格格式的设置方法：选中要设置的单元格或单元格区域，选择“格式”下拉菜单中的“设置单元格格式”命令，选定“数字”选项卡，单击“分类”列表中的“科学计数”，如图 1-2 所示，并根据需要调整“小数位数”，单击“确定”退出。



图 1-2 设置单元格格式

3. 公式的输入

输入公式的形式为：“=表达式”。公式最前面是“=”，后面是参与计算的元素和运算符。公式可以利用公式编辑栏输入或者直接输入。公式编辑栏常用的公式有：求和、取平均值、计数、最大值、最小值和计算数据的标准差等。利用公式编辑栏输入的方法：单击单元格，再单击公式编辑栏进行编辑(Σ)。如果已有的公式不能满足要求还可以直接输入。直接输入的顺序是：鼠标左键单击要输入公式的单元格，输入“=”，输入公式内容后按回车键(Enter)。

注意：公式中常用的运算符包括算术运算符(加+、减-、乘*、除/、指数^)和区域运算符(冒号：它表示对冒号两边单元格之间的所有单元格进行引用)。例如：测量钢球直径的误差分析，如图 1-3 所示。

求算术平均值的方法：单击 G3 单元格，点击公式编辑栏(Σ)下拉菜单中的“平均值(A)”即可，或者直接在 G3 单元格中输入“=AVERAGE(B3:F3)”。求测量值的标准偏差

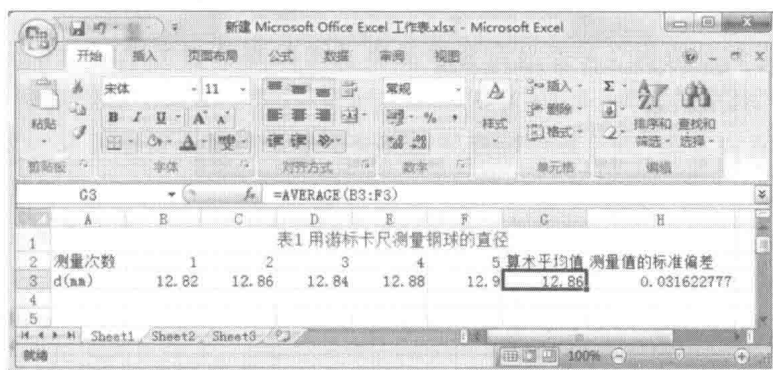


图 1-3 测量钢球直径的误差分析

类似：选中单元格，选择公式编辑栏下拉菜单中的“其他函数”，在“或选择类别”的下拉菜单中选择“统计”，在“选择函数”选项卡中选择“STDEV”，点击“确定”，在弹出的“函数参数”对话框中填入“B3:F3”后点击“确定”即可。

1.3.2 Origin 软件数据处理的应用简介

Origin 软件可以完成物理实验中常用的数据处理、误差计算、绘图和曲线拟合等工作，并且具有强大的绘图功能。Origin 像 Excel 一样，不需要编程知识就可使用。它的功能主要具有两大类：数据制图和数据分析。Origin 的数据制图主要是利用模板来完成的，软件提供了 50 多种 2D 和 3D 图形模板。用户可以使用这些模板制图，也可以根据需要自己设置模板。Origin 的数据分析包括排序、计算、统计、平滑、拟合、频谱分析等强大的分析工具。这些工具可以通过单击工具条或者选择菜单命令来实现。软件将所有的工作内容都保存在 Project(*.opj)文件中。该文件可包含多个子窗口，各子窗口相互关联，可以实现数据的即时更新。

例如：利用游标卡尺测钢球直径的误差计算，见表 1-1。

表 1-1 游标卡尺测钢球直径

次数	1	2	3	4	5
d/mm	12.82	12.86	12.84	12.88	12.90

打开 Origin 或在 Origin 窗口下新建一个工程(Project)时，软件会自动打开空的数据表，供输入数据。默认的数据表有两列：A(X)和 B(Y)。将某次测量的数据输入到数据表的 A 列。鼠标单击 A(X)选中该列，然后单击“Statistics”菜单，在下拉菜单中依次选择菜单命令“Descriptive Statistics”→“Statistics on Columns”，即可对该列数据进行统计分析。“Descriptive Statistics”菜单下会创建一个新的工作窗口，给出直径平均值 d (软件记作“Mean”)、单次测量值的实验标准差 $S(x)$ (软件记作“Standard Deviation”)、平均值的实验标准差 $S(\bar{x})$ (软件记作“se”)的统计计算结果，如图 1-4 所示。

绘图时只要将坐标轴的数据输入到 A(x)和 B(Y)两列，选中 B 列，在“Plot”下拉菜单中选择“Line”或“Symbol”→“Scatter”或“Line+Symbol”即可绘出图形。

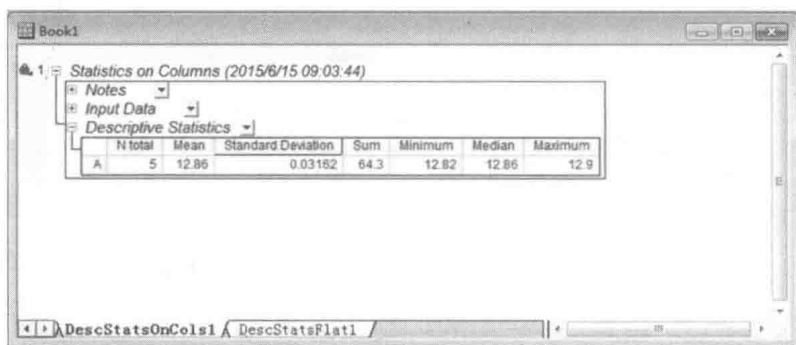


图 1-4 统计计算结果

1.4 创新实验报告的撰写规范

大学物理创新性实验是一种类似科学物理实验的高层次训练，与基础物理实验相比，对学生的创新能力、动手能力及总结能力要求更高。实验报告是从理论、方法和实践三个方面对实验工作的总结，是实验课程学习的重要环节。创新实验报告的撰写和总结对学生将来从事科学研究工作及工程开发等有很大的帮助。创新实验报告的撰写不同于基础实验，具有更明确的规范性，具体规范如下：

一、实验题目

根据实验室现有条件及参考书所提供的创新实验题目进行选择，也可自行提出感兴趣的实验题目，搭建实验平台。

二、实验背景介绍

通过相关参考书及网络知识对课题进行相应的背景研究，明确该实验的来源、目前实验的进展情况及取得的实验结果、研究意义及创新点、实验前的相关准备工作等。如在“光偏振现象的研究”实验中，要了解光偏振现象的发现过程、原理及 $1/4$ 波片与 $1/2$ 波片的作用及应用；在“高级光学干涉组合实验”中，要了解迈克尔逊干涉仪与马赫-曾德尔干涉仪的相关结构及钠灯的波长以及钠黄光双线的波长差。

三、实验目的

实验目的要明确，不同的实验有不同的训练目的，目前所开设的创新性实验以验证性实验为主。

四、实验仪器

选择实验所需的仪器及材料，并对特殊的装置给予图示。实验者要了解相关仪器的注意事项、使用方法及调试过程，方可进行实验。

五、实验原理

在充分理解实验理论依据的基础上，以自己的语言简明扼要地解释实验的理论依据。在写实验原理时应注意以下三点：

(1) 写清楚必要的文字叙述。为了使更深刻地理解实验原理，参考书通常比较详细，实验原理要进行一定的缩减，能概括出必要的原理内容即可，切勿照书全搬。

(2) 写出相关的公式来源，必要时可简单地写出推导过程。如在“用纵向磁聚焦法测定

电子荷质比”的实验中,对于速度和轨道均不相同的电子,影响周期的主要原因在于磁感应强度,故可利用这个原理得到磁聚焦及相应的荷质比公式,因此这里要简略写清推导公式。

(3) 画出为阐述原理而必要的原理图或实验装置示意图。如“透镜的焦距测量”实验中就要画出相应光路图。

六、实验步骤及内容

实验步骤是实验的重点,逻辑的清楚程度决定实验能否顺利进行,故实验步骤应阐明实验中所选用的研究方法及相关的具体操作,给出实验中所选取的相应参数,使读者通过具体的步骤可以进行重复实验。

七、数据记录及处理

数据记录及处理是检验学生实验情况的重要标准,这里不仅包括所测量得到的数据结果,还要进行必要的分析和处理,从而进行误差分析。原始数据记录时要注明所用测量仪器的型号、量程和准确度等级等。记录必须使用规范化的专业术语和国际标准计量单位。常用的英文缩写必须符合规范,首次出现的缩写必须用中文加以注释。数据处理及误差分析主要包括:

(1) 采用相应的处理方法,对测得的数据加工并得到相应的实验值。常用的处理方法包括列表法、作图法及最小二乘法。比如“不良导体导热系数的测定”实验中,在求冷却速率时,一般采用作图法进行,但是若选取的温度值较低,则斜率将无法通过作图法来获得,此时可以结合计算机相关软件或者最小二乘法来完成。

(2) 对处理后的数据进行初判。若实验为验证性实验可将测量物理量与标准值(理论值或者公认值)对比,对有较大差异的测量值进行分析或者重新测量。

(3) 对实验结果进行相应的误差分析,求出相关的百分比误差或者不确定度。首先从理论角度分析误差产生的原因,比如在“声速的测量”实验中,温度对测量结果会有很大的影响,实验过程中如果室温发生变化就会引起相应的误差;其次从实验者实验操作的过程中分析可能产生误差或出现结果偏差的原因,比如在“用三线摆测定物体的转动惯量”实验中,如果圆环未置于悬盘中心处,将导致转轴位置发生变化,引起测量误差。

(4) 选择两个具有深刻体会的课后思考题进行回答。通过独立思考实验中所遇到的问题,对提出的问题展开回答,应做到逻辑清楚,有理有据。

八、实验结果及讨论

给出实验结果的最终表达式,并针对本实验所验证的概念、原则或理论进行简明的总结,总结应是从实验结果中归纳出的一般性、概括性的判断。同时,对实验方法的可靠性和局限性进行分析,并可针对实验结果提出可供深入研究的问题及未来实验的改进方法。

第2章 物理实验设计与应用

物理实验设计与应用的各项实验与传统的测量性验证不同,它没有详细的实验步骤,只有与实验相关的趣味知识、背景及方法介绍、一系列的问题及实验要求。学生要在查找和阅读参考材料的基础上回答这些问题,才能明确实验原理并设计实验来完成实验要求。通过这样的实验训练,学生能深入理解物理原理,提高学习能力、实践应用能力和研究创新能力。

物理实验设计与应用包含 22 个实验项目,特别注重物理实验知识与技术的应用,激发学生的学习兴趣,培养学生将知识与技能转化为解决实际问题的能力。

2.1 蚂蚁、壁虎等生物的吸附力研究

【趣味知识】

蚂蚁和苍蝇可以在墙壁上随处停留,壁虎可以“飞檐走壁”。动物脚上的黏性吸盘几百年来吸引了无数生物学家的兴趣,并以此开展了广泛的研究。实验表明,一些昆虫在光滑表面能抵抗超过它们自身重量 100 倍的分离力,并且还能在这些表面上自由行走。这些能够自由爬行的动物的吸附机构显示了惊人的多样性结构和卓越的性能,这给特种机器人的组装、设计以及仿生机械应用带来了启示,给摩擦机械等学科带来了新的研究内容。美国的 Sitti M 提出了为将来爬壁机器人制作人造壁虎足部刚毛的技术,并模拟了这种人造毛的设计问题。

对动物在光滑表面上行走机制的研究很早就吸引了众多科学家的注意。最先报道描述黏着结构并给出了关于吸附的可能机制的文献大概源于 19 世纪。他们假设这种机制作用可能为吸管产生的力或是静电作用力。

利用电子显微镜,人们发现动物有两种类型的黏附垫对光滑表面产生吸附作用。第一种是利用刚毛结构,这种昆虫或动物有壁虎、苍蝇和蜜蜂。刚毛是一种长而细的毛发,其长度在几十到几百微米之间,直径为几微米,有的是独立的一支,有的是呈树状的分支,如图 2-1 所示。另一种黏附垫结构是光滑可变形的表皮垫子,叫做蹼或肢垫,呈半圆形。蚂蚁、蟑螂、蚱蜢和臭虫就具有这样的软的可变形的结构。

生物吸附机制的研究已有很长一段历史了。通过该项研究不仅可以帮助我们更清晰地洞察生物系统,而且能够探索出自然界的普遍原理,用于指导制作仿生黏合剂。不同动物的吸附机制已经成为近几年研究的重要领域,研究者提出了多种吸附机制,如钩子、微型

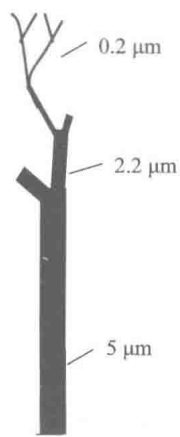


图 2-1 一种刚毛结构

吸盘、静电力等。研究者基于大量的实验和观察同时也否决了一些机制。还有人断定范德华力(干吸)和毛细力相互作用(湿吸)是两种主要的生物学吸附机制。

许多动物的吸附系统是“湿”的,这种状态由分泌到接触区域的液体来保持。本实验试图理解昆虫足垫的湿吸机制,在自行搭建的微小力测试平台上测量了蚂蚁的吸附力。

【实验目的】

- (1) 了解吸附力的几种构成。
- (2) 测试并计算蚂蚁的吸附力。

【实验原理】

液体作用能产生的力包括表面张力、毛细作用力和液体黏性力。

1. 表面张力

先估计表面张力在多大程度上会对水平力产生影响。假定在足垫和地面之间有一薄层黏性分泌液。为简化,模拟接触面积为正方形(边长为 $2R$),由表面张力引起的一个足垫的水平方向的力为

$$F = 4Rf(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) \tag{2-1}$$

式中: f 为表面张力; α_1 和 α_2 为分泌液与接触面前面和后面的接触角。

2. 毛细作用力

通过毛细作用力,两表面间的一滴液体能使两表面吸在一起。两表面间的越过空气—液体分界面的流体静力学压力降(P)是与接触面积无关的,则

$$P = \frac{\gamma}{\delta}(\cos\theta_1 + \cos\theta_2) \tag{2-2}$$

式中: γ 为表面张力; δ 为爪垫和地面间的距离; θ_1 和 θ_2 分别为分泌液与足垫和地面的接触角。吸附力则为

$$F = PA \tag{2-3}$$

式中: A 为接触面积。这个力将拉动两表面靠近,直到液体半月板达到吸附器官的边缘。蚂蚁自身能分泌黏液作为媒介,这个方法对蚂蚁来说就是十分重要的。

3. 液体黏性力

液体黏性力可以表达为

$$F = \frac{\mu Av}{h} \tag{2-4}$$

式中: μ 为液体黏性; v 为滑行速度; h 为液体膜厚度。当黏液薄膜厚度被挤压到只有几纳米厚时,会呈现类固状态,黏性急剧增加且成发散趋势,这样就产生了很大的黏性力,可作为吸附力。

【实验内容】

1. 吸附力测试

为了对活体微小动物(如蚂蚁)和仿生材料进行黏着力测试,需要利用一个基于高速

图像反馈的黏着力测试平台，如图 2-2 所示。整个实验平台由伺服电机驱动，电机转速由工控机控制，蚂蚁被放在测试平台上进行测试，斜面倾角 θ 分别调为 0° 和 90° ， 0° 时测试水平吸附力； 90° 时测试垂直吸附力。平台上的高速摄像机 ($100 \text{ 帧} \cdot \text{S}^{-1}$) 可以记录整个试验过程中的实时信息。当电机转动时，蚂蚁若要有效地吸附在玻璃上而不与之脱离，需要由吸附力提供向心力；当离心分离机的转速增加到一定值时，蚂蚁就无法提供如此大的向心力而沿着运动的切线方向飞离，从而与接触面脱离；边缘检测算法即可从高速摄像机捕获到的分离状态图像中提取出计算机可识别的分离信息，并反馈给工控机；工控机根据相关信息确定分离时刻的系统状态，如电机转速、斜面倾斜度、蚂蚁所处的半径等，计算出蚂蚁在此条件下的最大吸附力和持续时间。

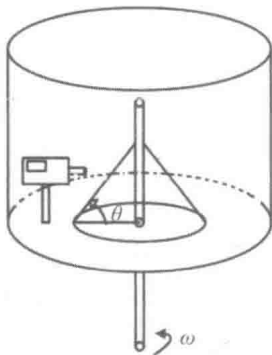


图 2-2 测试平台示意图

平台为光滑玻璃，在实验前需用酒精清洗，并自然风干作为亲水性表面(用显微镜观察到水在玻璃表面的平衡接触角约为 10°)。对 20 只蚂蚁分别在玻璃上进行吸附力测试，测试完后在玻璃表面涂上一薄层蜡作为疏水性表面(水在蜡表面的平衡接触角接近 90°)。每次测试电机转速从 0 缓慢地以 10 转/分的速度逐渐增加，随着速度的增加，观察到蚂蚁调整为头朝着转盘中心的姿势，离心力纵向作用于蚂蚁躯体，最后蚂蚁飞离出去。由如下公式计算离心力的大小。

$$F = m\omega^2 r \tag{2-5}$$

式中： F 为吸附力； m 为蚂蚁的质量； ω 为蚂蚁分离时的平台转速； r 为蚂蚁分离时所处半径， r 在本实验中为 20 cm。取蚂蚁的平均质量 5 mg，可计算出离心力的大小。

2. ANSYS 分析

用有限元软件对蚂蚁滑行时分泌液内部的压力和速度变化进行分析。有限元模型采用液体桥模型。这种液体桥模型常被用在液体湿吸力分析的研究中。分析结果参考图 2-3。

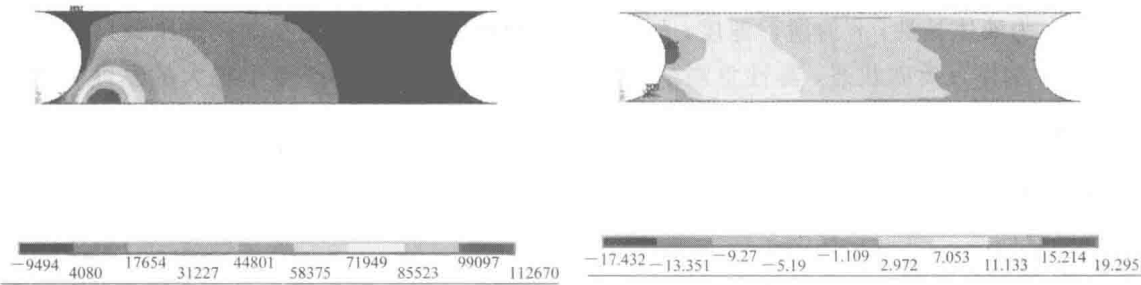


图 2-3 水平滑动时分泌液内部的压力及速度分布