

科学实验导论

许定奇 孙荣文 编著



石油大学出版社

科学实验导论

许定奇 孙荣文 编著

石油大学出版社

内 容 提 要

本书主要介绍了实验方案的设计和实验步骤、测量方法和仪器的正确选择、测量误差的评定和计算以及如何根据实验数据确定函数关系建立经验公式,还对如何撰写技术报告进行了深入的讨论。

本书基本概念明确,公式推导严谨,语言通俗易懂,实用性较强。可作为工科类大学生的选修课教材,也可供工程技术人员和科学实验工作者参考。

理 学 实 验 导 论

许家奇 孙荣文 编著

石油大学出版社出版

山东省 东营市

石油大学印刷厂印刷

山东省新华书店发行

*

开本850×1168 1/32 4.625印张 120千字

1990年3月第1版 1990年3月第1次印刷

印数1—3000册

ISBN 7-5636-0058-2/TH·01

定价: 1.16元

前 言

科学实验在各个学科领域中都有着极其重要的作用，一切科学技术成就的取得，科学理论的发展，都必须通过科学实验取得精确的数据，经过分析、判断、推理来验证所取得的成果或形成新的理论。因此，科学实验技能不仅在高等学校中已成为培养学生智力和能力的主要内容之一，也是一切科学技术工作者应具有的基本功。

本书除论述了科学实验技术的重要作用外，着重介绍了：实验的分类和步骤；测量方法和测量仪器的正确选择；测量误差的评定和计算；如何根据实验数据确定函数及如何建立经验公式；如何将试验所得结果写出科学的技术报告。

本书编写的目的在于培养未来的工程师、教师、科学实验工作者掌握科学的实验方法，正确地选用实验仪器并能以科学的思维方法和技术对实验所得到的数据进行分析和处理，以具备独立进行科学实验的能力。

本书可作为工科类大学生的选修课教材，也可作为工程技术人员和科学实验工作者的参考书。

由于编者经验、水平和选修课教材篇幅所限，本书只讲述了有关科学实验的一些基本问题，错误和不当之处在所难免，欢迎广大读者给予批评指正。

在本书写作过程中，曾得到石油大学武汉民副教授的支持，并在百忙中仔细地进行了审阅，提出了宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。

编 者

1989年2月于青岛

目 录

第一章 绪论	1
1-1 为什么要进行实验.....	1
1-2 什么是实验.....	4
1-3 实验的类别.....	5
1-4 典型实验的各步.....	6
第二章 测量方法和仪器的正确选择	9
2-1 概述.....	9
2-2 分辨率.....	11
2-3 仪器的精确度与测量误差.....	15
2-4 外径千分尺的误差.....	16
2-5 三坐标测量机的误差.....	20
2-6 测量方法和测量仪器的正确选择.....	29
第三章 测量误差	35
3-1 测量误差的主观评定和客观评定.....	35
3-2 误差的客观评定.....	36
3-3 误差的独立性和非独立性.....	39
3-4 如何评定测量的客观误差.....	42
3-5 误差的主观评定.....	43
3-6 正态分布的特性.....	45
3-7 用正态分布去剔除反常数据.....	50
3-8 用正态分布叙述各误差的定义.....	52
3-9 用正态分布去评定分布的极端值.....	54
3-10 用正态分布计算 $\bar{x}$ 的随机误差.....	54
3-11 用标准误差判断数据的相容性.....	56
3-12 如何计算正态分布.....	58
3-13 检验分布的正态性: χ^2 检验.....	66

3-14 非正态分布	73
第四章 函数关系的确立	81
4-1 通过一批实验数据点 如何作最佳直线	81
4-2 最小二乘法	85
4-3 相 关	99
第五章 怎样从测试数据 建立经验公式	109
5-1 经验公式形式的选择	109
5-2 经验公式中系数的确定	114
5-3 经验公式可靠程度的评定	118
5-4 建立经验公式的实例	126
第六章 技术报告	131
6-1 技术报告的特点	131
6-2 技术报告的格式	133
6-3 关于防止实验工作中的主观性问题	139
参 考 文 献	141

第一章 绪 论

1-1 为什么要进行实验

在我们想象中都有一个关于实验者的形象，他也许是一个身穿白色工作服，脸色严肃认真的科学家，在充满奇特形状的玻璃器皿的实验室里用显微镜进行观察；或许是个大夫在动物身上精心地做着试验，探索着解决疑难病的基因；或许是一个有些焦急的工程师，在他的前额滴着油珠，用手操纵着大型现代化机械的控制器，同时注意着显示装置或记录仪显示的结果。这些实验者的社会价值及实验的重要作用是如此明显。然而，在现实中也有许多人忽视科学实验，其主要原因之一是对实验的重大意义认识不足，如有些大学生不了解实验课是培养他们计划中的重要组成部分，因而不能认真对待老师提出的实验要求；有些工程技术人员不知道或不会通过实验这个手段来解决工程中的实际问题；有的对实验结果的分散性不会进行科学处理，甚至认为无法处理，因此不能对实验结果的可靠性作出科学的评价，而妨碍了许多理论工作的进行。举一个古典的例子，因为月球加速度的测量值与理想值相差约10%，牛顿推迟20年才发表他的引力理论。牛顿显然没有想到，在他的计算中用到地球半径的实验误差会达到如此程度。现在一些实验中也往往出现类似的现象。

实验在各学科中都有着极重要的作用，科学技术成就的取得，必须通过科学实验，科学理论的发展不仅是以生产实践为基础，而且要依靠科学实验提供精确的数据，再经过分析、判断、推理而形成理论；科学理论是否正确，也都必须经过实践的检验，其中就包括科学实验。

在高等学校中，实验教学最重要的任务是发展学生的智力，培养具有自学能力和分析解决问题的能力。

1. 智力因素的组成

教育研究表明，智力因素由以下几种能力组成：

(1) 动手能力。包括实验和观测的各种操作，平常说：“百闻不如一见”。在科学的学习中则是“百见不如一练”，练就是动手。

(2) 观测能力。在事物的自然条件或控制条件下，借助仪器进行有目的、有计划观察和测量，求得事物定性及定量的数据或特征。

(3) 查阅文献资料的能力。科学知识之繁多难以数计，个人亲自经验而得的直接知识极为有限，大部分为阅读而得的间接知识，但所得直接和间接知识能牢记供随时应用的仍属有限，但是现在只要具有查阅书刊文献资料的能力，即可说天下知识皆能为我所用。

科学实验必须在前人基础上进行，所以查阅文献资料的能力是搞好科学实验的前提。

(4) 思维能力。思维是在知识和表象的感性知识基础上进行抽象、分析、概括、判断、推理等认识活动的过程，是其它各种智力因素的核心。它贯穿于分析、解决问题的全过程。也就是在“动手”做实验的过程中要积极思维，如在仪器的选择与安装、试样制备、进行各种操作中应遵循的规范以及在各实验阶段的要求和意义等皆需要开动脑筋，手脑并用，实验才能成功。

(5) 表达能力。实验的结果要通过正确表达使之有条理、合逻辑、通畅而准确，这与思维密切相关。

因此，实验是培养人才智力的重要手段。通过实验可以使學生巩固和加深所学过的知识，从而比较系统、扎实地掌握本专业的基础理论和专业知识，同时使學生受到严谨的科学作风和求实的科学态度的训练，全面提高學生的智力。下面我们再进一步探

讨创造性思维、科学精神和科学品德问题。

2. 创造性思维、科学精神和品德

实验需要科学的方法，更要有创造性思维及科学精神和品德才能取得预想的效果。

(1) 创造性思维。创造性的重要标志是创新、推陈出新，其主要特征是：

a. 独创性。敢于突破框框，提出与众人或前人不同的看法。

飞机的发明就是一个很好的例子。十九世纪一些有胆有识的人开始认真探索怎样实现人类上天飞行的宿愿，但当时有许多知名科学家出来反对和阻挠。例如法国著名天文学家勒让德（最早用三角方法测得地球和月亮间距离的人），德国物理学家赫尔姆霍茨（能量守恒原理发现者之一）都认为制造比空气重的装置进行飞行是不可能的，使德国金融界和工业集团撤销了原先对飞机研究事业的支持，后来美国天文学家纽康又根据科学数据作了大量计算，证明“飞机”甚至无法离开地面。但是，1903年美国的莱特兄弟他们首次把飞机送上了天，他们没有上过大学，凭着刻苦自学成才，他们思想活跃，勇于探索未知领域。他们仔细观察各种鸟类的飞翔动作，再运用数学和空气动力学知识进行创造性的研究、试验、研制、历经艰辛，终于获得了成功。莱特兄弟就是具有独创性的人才。

b. 推理性。对于任何现象或想法善于由此及彼进行合理的逻辑推理。推理可以是多方面的：纵向推理引导问题的深入；横向推理使问题能在相似或有关联的更多领域得以广泛推广；反向推理分析问题的相反方面，从正反两方面综合寻求合理的试验结果。

c. 多向性。善于分析影响一个问题的多种因素，通过发散、换元、转向等途径从不同角度提出问题，寻找新的思路和解法。

d. 综合性。善于把信息、现象、概念等综合概括，用以解决问题。

(2) 科学精神。可以概括为：

崇实：就是尊重事实。

贵确：科学知识既要准确又要精确，不仅要定性，而且要定量。

求真：要求不断追求事物的本质现象，由宏观进入微观。

存疑：凡证据缺乏的不做结论应作为疑问待解。

(3) 科学品德，主要表现在：

a. 高尚理想，为此献身。有成就的科学家大多有崇高的理想。或为人类的幸福，或为科学的发展，终身孜孜不倦，甚至不惜有所牺牲。如法国化学家摩瓦桑鉴于氟单质由于活泼性和毒性极高，长期未能分离出来，他于1844年开始进行制取单质氟的实验，在进行过程中几次中毒病倒，但每次不等痊愈就继续实验，终于取得了成功，1906年荣获诺贝尔奖金。

b. 艰苦创业，勤奋不懈。居里夫人以破旧的厂棚为实验室，进行元素钋和镭的分离和研究，开创了放射化学。

c. 谦虚好学，乐于协作。科学知识浩如烟海，发展无止境，而一人所知有限。因此，科学家多虚怀若谷，孜孜不息地钻研，牛顿在临终前不久曾写道：“我仅象一个在海边沙滩上游玩的幼童，偶然拾得较光滑的卵石或较美丽的贝壳。而在面前的则是广阔的真理海洋。…如果我们所见的比前人远一些，那是因为我站在巨人们肩上的缘故”。现在的科学技术是在前人成就的基础上有所前进，有所创造。

1-2 什么是实验

实验是将事物置于控制的或特定的条件下加以观测。或具体一点说：实验是人们根据研究的目的，利用科学仪器和设备，人为地控制或模拟自然现象（指自然科学实验），排除干扰，突出主要因素，在有利的条件下研究自然规律。

例如，一定量气体的体积是随温度和压力的不同而改变，故欲观测一气体的密度，必须把温度和压力加以控制，才能得到有

意义的结果。自然，实验可分成许多不同的种类。从最基本的计算空间星系的分布，检验宇宙理论，到许多实际测量新型合金的强度以确定合金是否有使用价值，或测量某零件的几何尺寸，分析其工艺因素的影响等等。虽然这些实验目的是如此不同，但它们有许多共同点，在所有的情况下，例如我们通过仪器或装置进行测量，以一定的精确度来确定一个量，不管你喜欢或不喜欢，总有各种不同的误差影响测量。任何时候测量总是根据手头的任务和条件选择适当的仪器和有效的方法进行。最后，这些测量的数据必须得到说明，以便确定实验结果能否被应用。

上述典型的实验是在机器、系统或装置运行中的一个过程。也是对一个量或一个现象进行一次或一系列测量。然而，在许多情况下这些是同时测量的。因此，必须认识到一个孤立的实验通常就象调查研究那样只是研究问题的一步，任何完整的调查研究常需要各方面的努力。

1-3 实验的类别

如上所述，实验的范围很广，概括起来大致有以下几种类型。

A. 按 科学研究的类型可分为：

- (1) 基础理论研究实验；
- (2) 应用科学研究实验；
- (3) 开发研究实验。

B. 对 高等学校教学实验又可分为：

(1) 基础阶段实验 这一阶段的实验课的主要任务是培养学生基本的实验方法和实验技能，以基本技能和实验素质为主线。通过实验教学，使学生掌握基本的实验方法和实验基础理论，会正确使用仪器，学会写较完整的技术报告，启迪学生的观察力和分析力，为后续课打下基础。

(2) 第二阶段实验——技术基础课实验 这一阶段以巩固基础课实验成果，启发学生发现问题和解决问题为主线。

(3) 专业课实验 主要培养学生专业所需要的实验手段、实验理论和方法，以培养能力为主线。

我们还可以把上述教学实验概括为：

(1) 常规性实验 指各门课程大纲要求开出的单项实验。

(2) 综合性实验 指需要运用某一课程或多种课程的综合知识进行的一种复合性实验。

(3) 设计性实验(研究性实验) 结合课程或结合某个专题进行探索性实验。这种实验教学应有一定深度，应使学生查阅文献资料，设计实验方案，选择仪器和参数，培养综合分析能力。

1-4 典型实验的各步

一项实验研究工作可认为是由三个阶段组成：制订实验方案阶段；实验阶段；写技术报告阶段。

1. 制订方案

制订实验方案阶段是完成一项实验研究工作的最重要部分。在制订方案前首先应该回答下面几个问题：研究什么问题？这些结果用在何处？需要进行哪些工作？

然后，对问题进行初步分析，即根据前人研究的有关资料，经过综合、思考和分析，设想一些可用来解决问题的方案或数学模型。这时需要引入一些新的概念，与原有想法进行衡量和综合，使研究的问题深化。

在上述基础上制订实验方案，根据实验的目的，它的内容可以包括为了测定某一个量，或为了检验某些假设而把预言的东西和测定的量作比较。

制订实验方案时，要使实验的不确定度最小，并使信息的容量最大，也就是尽可能使实验误差最小。此外，还要考虑时间、

资金、实验所用设备等问题，所制订的方案应保证能最有效地利用现有的实验手段来测量。一个好的方案只是一个必要而非充分条件，但是往往出色的实验是以出色的方案为基础的。

不过，制订实验方案不是一学就会的，它需要丰富的经验和与经验紧密相联的成熟的见解。最初的实验通常由教师制订方案，并说明一般的细节，而学生通过实验来了解这个方案的全貌：测量什么，为什么要进行某些检验性的测量等等。在实验的实践中，逐步理解分析实验的方法，人们就能较快地掌握制订方案的要点。

2. 实验

研究和认识过程的第一步是“搜集事实”。搜集的方式为观测和实验，这一步非常重要，因为事实是产生一切理论的唯一根源，又是检验一切理论的唯一标准。研究和认识过程的第二步是“进行验证”，也就是通过设计并进行实验，进一步搜集事实以证实或否定第一步中提出的模型的有效性，这时我们总是尽量作那种“判断性实验”，它可以对提出的理论加以肯定或否定。根据实验结果来检验方案或模型。如果得到的实验结果是正确的或尚存在某些问题，则可确认或修改方案或模型。

第1、2步，通常要反复进行直到得到预想的实验结果为止。

3. 写技术报告

将实验所得的结果，进行分析、归纳、写成技术报告。

上述步骤讲起来很简单和直截了当，然而通常的情况并不如此。这是由于在机器、系统或装置运行中进行实验时，往往有许多因素影响实验，使许多研究工作在实验过程中，混进一些误差，导致实验的结果至少局部不正确，有时甚至得出相反的结论。因此，必须反复的实验研究才能得出理想的实验结果。

实验者的主要任务之一是必须发现这些误差，或者必须使自己知道误差存在的概率和可能的大小，以便进行校正。为此，实验者用自己设计的简单装置进行实验时，当然要考虑该装置的能量

力和精度。但若购置市场上的现成测量设备时，则必须了解其能否满足测量的需要。在实验过程中必须仔细操作和观测，以防引入误差。此外，计算机程序如不是自己亲自编写，而且在编者不大了解实验情况时，实验者要警惕由此而引起的潜在危险。

第二章 测量方法和测量仪器的 正确选择

2-1 概 述

实验方法的确定，需要认真地探讨，以确定最佳方案。测量方法也是多种多样的，通常可分为直接测量与间接测量；综合测量与个别测量；接触测量与非接触测量；被动测量与主动测量；静态测量与动态测量等。现代技术领域的一个突出特点是实验者可选用多种测量方法，所用仪器的原理常常差别也很大，结构往往随原理而不同，而且显示方法也不一样。例如，图2-1和图2-2所示为两种不同类型的仪器和两种不同方法测量的例子。

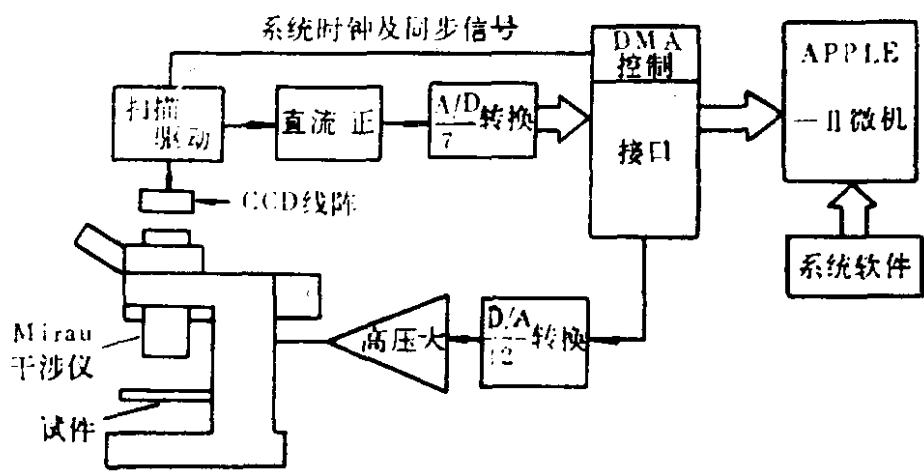


图 2-1

图 2-1 所示为光学显微轮廓仪的框图。光学显微轮廓仪是以商品化的普通金相显微镜为基础，将其物镜转换器部分改装成Mirau*显微干涉装置。用APPLE-II微机对整个仪器进行控制，

* 由美国Arizona大学光学中心J. C. Wyant教授研制成功。

完成数据采集和结果分析。

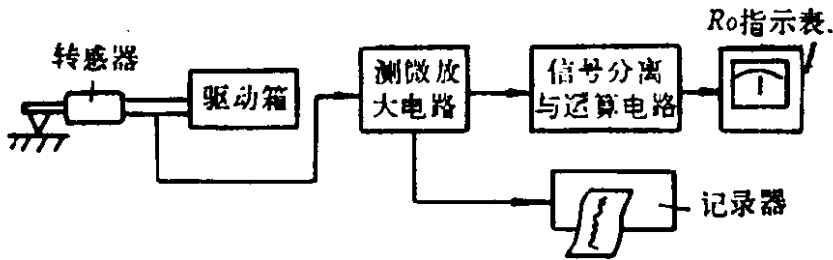


图 2-2

首先由Mirau显微干涉仪产生定位于被测件表面的白光干涉条纹，这样试样表面的微观不平就转化为干涉条纹的位相起伏。白光条纹经过干涉滤光片后成为单色光干涉图样成象于CCD线阵上，扫描驱动电路串行输出CCD各像素的光强信号，该信号经直流成分恢复和视频放大后送到高速A/D转换接口。A/D转换输出的数据在直接存储器存取（DMA）接口的控制下传送到APPLE-II微机内存中，随后系统软件对测量数据进行分析，计算出表面轮廓及各种粗糙度参数，也可给出表面轮廓的功率谱。

图2-2所示为一种电动轮廓仪。它是目前测量表面粗糙度广泛应用的仪器，具有性能稳定、示数客观、使用方便等优点。它由传感器、测量电路和显示或记录装置三个基本部分组成。传感器的测量头是一根极光的触针，把它轻轻放在工件表面上，驱动箱拖动传感器使触针沿垂直于被测面的加工痕迹方向慢慢以均匀速度滑行。工件表面的微观起伏不平就会使触针上下运动，传感器把触针位移量变换成电信号，此信号就代表工件截面的轮廓。微弱信号经放大电路放大，并经滤波电路滤掉高频干扰，再输给运算电路。这种带有触针传感器的仪器与唱机工作原理相似。

比较上例可见，目前最常用的电动轮廓仪，其优点是测试精度和重复性都好，缺点是接触式测量，当被测表面硬度较低时，容易造成被测表面的损伤。利用光学显微轮廓仪测量，可以实现

表面粗糙度的非接触测量。图2-1所示的Mirau显微干涉仪，在利用条纹扫描技术后，能达到较高的测量精度，垂直测量精度为1nm，而且有测量速度快等优点。

由以上例子可见，实验者为了很好地完成任务，必须根据仪器或测量装置的特性，以及应用的环境条件等来正确的选择。反映仪器及测量装置特性的指标主要有以下几方面：

1.分辨率。2.精确度。3.使用方便。4.成本低。

一般前面两点是主要的，后两点是应在满足前面两点的前提下考虑。

仪器的分辨率可定义为仪器能觉察被测量的最小值，仪器的精确度可定义为进行测量时的微小误差。这两个术语比较难理解，高的分辨率和高的精确度实际上表示这些量值小。这两个因素有时是完全独立的。通常分辨率与仪器精度在数值上是相互适应的。一般来说，仪器的分辨率高，仪器的精度也高，反之则低。也就是如果仪器的精度很低，而把分辨率做得很高是没有意义的。

2-2 分辨率

分辨率和分度值是测量仪器的一项重要指标。分度值为对应于分度的被测量值。分度值是指一台仪器所能读出的最小读数(不包括估读的值)。对于指示式仪器，分度值是指刻尺上或度盘上每个刻度间隔所代表的被测量值。如百分表的分度值为0.01毫米；光学计的分度值为0.001毫米。对于数字式量仪，因为没有度盘，故一般不称作分度值，而称作分辨率。分辨率是指仪器显示的最末一位数字间隔所代表的被测量值。例如，莱兹(Leitz)光栅分度头的分辨率为1角秒等。

将近距离的微小物体经物镜和目镜放大以后由眼睛观察的光学仪器称为显微镜。显微镜在各种科学实验中应用很广泛。在