

# 工程力学实验指导

周 岭 主编



科学出版社

# 工程力学实验指导

主 编 周 岭

副主编 李治宇

李 平

王 龙

贵州师范学院内部使用

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书以培养学生分析问题、解决问题以及理论运用的综合能力为目的,根据多年来的教学经验,并参考同类著作,以实用为原则编写而成。本书在以实验基础知识与常用实验为实践教学内容以外,还增加了机械性能测试实践案例、机械性能测试国家标准等内容。

全书共分两部分,第1部分主要介绍了数据采集与误差分析等实验基础知识、理论力学实验、材料力学实验、电测应力分析实验、综合设计实验;第2部分内容为专题试验,包括棉花秸秆的力学试验、红枣果肉的抗压试验、香梨准静态力学试验、核桃的破壳压缩试验、塑料地膜力学试验;另外,书末附有机械性能测试国家标准。

本书可作为普通高等院校工程类专业的教材,也可作为相关专业课程的参考用书,同时可供工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程力学实验指导/周岭主编. —北京:科学出版社,2019.9

ISBN 978-7-03-061499-5

I. ①工… II. ①周… III. ①工程力学—实验—高等学校—教材  
IV. ①TB12-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 110092 号

责任编辑:朱晓颖 / 责任校对:彭珍珠

责任印制:张伟 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年9月第一版 开本:787×1092 1/16

2019年11月第二次印刷 印张:7

字数:179 000

定价:35.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

在“新工科”背景下，学生理论联系实际和工程系统能力的培养受到越来越广泛的重视，这就要求建立与之相匹配的理论与实践教学体系，从而促进教学资源的重整与创新。目前，工程力学实验主要以材料力学内容为主，涉及的实验内容多为拉伸、剪切、扭转以及机械性能参数(弹性模量、泊松比)的测试等。本书以原有实验体系为基础，在内容层次上设置了通识实验、综合实验、创新实验等模块，是集实验数据分析、理论力学实验、材料力学实验、综合设计实验，以及科学研究过程中的实验案例、实验标准选取等内容为一体的实践教学指导书。本书将为提升学生的学习能力和工程素养、加强系统意识提供一定的帮助。本书的编写具有以下特点。

(1) 本书集成了实验基础知识、理论力学实验、材料力学实验、电测应力分析实验以及综合设计实践，建立了较为系统的工程实验实践教学资源体系，便于培养学生从基础理论知识到实践应用过程的工程能力，建立由表及里的认知思维。

(2) 本书在集成工程力学通识实验内容外，收集整合了工程课题中典型材料机械性能测试试验案例(棉花秸秆、红枣果肉、香梨、核桃、塑料地膜机械性能的测试)，内容贴近生产实际，让力学实验走进生活，激发学生学习的积极性和创新性，同时培养学生学以致用。

(3) 附录选编了部分材料的机械性能测试实验的国家标准，方便读者在研究过程中建立标准、规范的操作流程，同时培养学生严谨、规范的标准意识，对培养学生的工程素质起到潜移默化的影响。

(4) 本书的结构设计从通识力学实验(基础实验、验证实验、综合设计实验)、工程案例到参考资料(附录)，在编写上符合教学规律和学生的认知规律，注重工程系统能力的熏陶与培养。书中根据需要附有思考题、习题，以便于学生将理论学习与实践验证相结合。

本书由周岭主编，参与编写的有：塔里木大学李平(第1章)，王龙(第2章)，李凤娟、李健(第3章)，伍恒(第4章部分内容)，胡灿、张航(第5章)、周岭(第6~10章)；山东理工大学李治宇(第4章部分内容)；新疆理工学院秦翠兰、王磊元(附录)。

在本书编写过程中参考了同类著作(具体主要书目作为参考文献列于书末)，在此向作者表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2019年3月

# 目 录

导言 .....	1
----------	---

## 第 1 部分 实验基础知识与常用实验

第 1 章 实验基础知识 .....	3
1.1 实验注意事项 .....	3
1.2 实验数据的搜集 .....	3
1.3 实验误差分析 .....	4
1.4 实验数据的统计处理 .....	11
第 2 章 理论力学实验 .....	18
2.1 摩擦因数测定实验 .....	18
2.2 刚体基本运动特性分析和机构认知实验 .....	20
2.3 复合运动分析实验 .....	21
2.4 转动惯量实验 .....	23
第 3 章 材料力学实验 .....	28
3.1 拉伸实验 .....	28
3.2 压缩实验 .....	33
3.3 扭转实验 .....	36
3.4 冲击实验 .....	39
3.5 金属疲劳实验 .....	42
第 4 章 电测应力分析实验 .....	46
4.1 应变电测原理与技术 .....	46
4.2 弹性模量 $E$ 、泊松比 $\mu$ 的测定 .....	52
4.3 弯曲正应力分布规律实验 .....	54
4.4 等强度梁实验 .....	55
4.5 偏心拉伸实验 .....	57
4.6 薄壁圆筒弯扭组合实验 .....	61
4.7 压杆稳定性实验 .....	63
第 5 章 综合设计实验 .....	66
5.1 超静定桁架结构设计与应力分析实验 .....	66

5.2	组合梁应力分析实验 .....	68
5.3	薄壁构件拉伸实验 .....	70
5.4	薄壁圆筒压、弯、扭组合实验 .....	71
5.5	开口薄壁构件应力测试实验 .....	73

## 第 2 部分 专题试验

第 6 章	棉花秸秆的力学试验 .....	75
6.1	弯曲试验 .....	75
6.2	拉伸试验 .....	77
6.3	剪切试验 .....	78
第 7 章	红枣果肉的抗压试验 .....	81
第 8 章	香梨准静态力学试验 .....	83
第 9 章	核桃的破壳压缩试验 .....	85
第 10 章	塑料地膜力学试验 .....	87
10.1	拉断力和膜-土黏附力试验 .....	87
10.2	地膜拉伸性能试验 .....	88
10.3	地膜直角撕裂性能试验 .....	90
参考文献	.....	92
附录 I	基础力学实验国家标准 .....	93
附录 II	常用仪器介绍 .....	95
附录 III	实验报告样板 .....	101

# 导 言

## 1. 本课程的目的和意义

实践是理论的基础，实验是进行科学研究的重要手段。工程力学是在实验观察的基础上，抓住主要矛盾，经过科学抽象，由表及里，去伪存真，将真实材料理想化、实际构建典型化、公式推导假设化的学科。同时，基础力学实验是工科专业教学中的一个重要环节，基础力学相关理论知识的结论及定律、力学性质(机械性质)都要通过实验来验证或测定。各种复杂构件的强度和刚度的问题，也需要通过实验解决。在结构设计及新材料开发中，需要了解材料的力学性能参数，这些数据要通过材料的力学性能实验进行测定。在工程实际中，构件的几何形状、受力条件和支承条件往往十分复杂，使用实验应力分析方法是解决此类难题的可靠途径。

工程力学实验不但可以使学生巩固和深化工程力学理论，而且使学生学会测试材料各种力学性能的方法，学习常用的应力分析方法和各种仪器的正确使用、操作方法，锻炼动手能力，培养独立分析、解决问题的能力 and 科学严谨的工作态度。

课程内容分为以下几个方面。

### 1) 理论力学实验

作为理论力学重要组成部分，本部分实验的目的是通过实践教学环节的实施，开阔学生的视野，加强理论力学的工程概念，了解这门课程与工程实际的紧密关系，培养、锻炼学生的创新思维，要求学生通过参观实物、实验演示以及自己观察、分析和动手实践达到实验的目的。

### 2) 材料力学实验

构件设计时，需要了解所用材料的力学性质，这些性质所涉及的数据是通过拉伸、压缩、扭转等实验测定的。学生通过此类实验的基本训练，可以掌握材料力学性质的基本测定方法，进一步巩固有关材料力学性质的知识。

### 3) 电测应力分析实验

工程实际中常会遇到构件形状和载荷十分复杂的情况，关于其强度理论的计算很难解决实际问题，因此需要通过实验测量，进一步进行应力、应变分析。本部分主要包括弯曲正应力、等强度梁、弯扭组合、偏心拉伸等实验。

### 4) 其他

本指导书通过专题形式总结了科学研究过程中的一些材料机械性能的测试实验方法与实验条件，如棉秆、红枣、香梨等机械性能的检测，同时总结了力学测试过程应用的国家标准，为学生在第二课堂的创新活动提供借鉴。

## 2. 力学实验基本要求

### 1) 实验前的准备

实验课前认真预习本教材，明确实验目的、原理和步骤。明确实验要测取的参数、需要选择的仪器设备，以及如何正确操作仪器设备和操作中应注意的问题等。

### 2) 实验过程中的要求

在做材料力学实验前，要检查试验机测力度盘指针是否对准零点、试件安装是否正确等。试运行正常后，经指导教师检查好才可开机实验。实验完毕后检查数据是否齐全，最后清理设备，把仪器回归原位并关机，其他工具放回原处，经指导教师检查后，方可离开。

### 3) 实验报告的书写要求

实验报告是实验者对实验过程的总结，实验报告包括以下内容：

- (1) 实验名称、实验日期，实验人员名称、同组者名单。
- (2) 实验目的及原理。
- (3) 使用的仪器、仪表并注明名称、型号、精度(或方法倍数)等，其他用具也要注明。
- (4) 实验数据及处理数据要正确填入记录表格内，注意测量单位。

# 第 1 部分 实验基础知识与常用实验

## 第 1 章 实验基础知识

### 1.1 实验注意事项

(1) 进入实验室前,认真预习,理解涉及的主要理论内容,了解本次实验的目的、内容和步骤,并要清楚使用的机器和仪器的基本原理。

(2) 实验室禁止穿背心、短裤或裙子等暴露过多皮肤的衣服,不得佩戴隐形眼镜,长发必须扎起。

(3) 在实验室内严禁嬉笑打闹、严禁把食物带入实验室。

(4) 在实验室内必须自觉遵守实验室规则及机器和仪器的操作规程,不是本次实验使用的机器和仪器不能随意乱动。

(5) 使用电器设备(万能试验机)时禁止用湿手或在眼睛旁视时开关电器。实验完毕后,拔下电源插头,切断电源。

(6) 如发生不小心被压伤、夹伤、割伤等意外情况时,应立即报告老师,并做相应的初步处理。

(7) 实验操作过程中不要靠近观看,以防试件破坏时碎屑飞出伤人。

(8) 实验结束后,仪器设备、座椅恢复原位,指定学生值日打扫卫生。

### 1.2 实验数据的搜集

任何实验都离不开对参数的测量、观察与分析。本书中有不少测量方面的实验,例如,在进行拉伸、压缩、扭转、压杆、弯曲和电阻应变片粘贴等实验时,都需要对力、应力、应变、位移等物理量进行测量。这些原始数据的收集方法主要有两类:观察法和实验法。

观察法是以旁观者的身份对以上具体实验的演变过程进行记录的数据收集方法。例如，施加一定的力使杆件断裂时，杆件的受力变化就需要通过记录杆件从变形到断裂过程中其受力的大小。

实验法中，实验数据是在获得的过程中对数据产生的条件实施了控制而得到的。获得数据的方法主要是通过实验。实验法是通过实验来研究变量之间因果关系的一种方法。例如，施加不同大小的力，观察受压杆件的径向尺寸和轴向尺寸的变化过程，随着施加力的增大，受压杆件径向方向的尺寸增大，而轴向方向的尺寸在减少，可以通过实验的方法得到该变化数据。

## 1.3 实验误差分析

### 1.3.1 真值与平均值

#### 1. 真值

任何实验都离不开对量的测量，被测量的量在某一时刻、某一位置或某一状态下的客观真实的大小，称为被测量的真值。

在绝大多数情况下，被测量的真值一般是未知的，但从相对的意义来说，真值又是已知的。例如，平面三角形三内角之和(恒为  $180^\circ$ )，准确度高一级的测量仪器所测的值、多次实验值的平均值、国家标准样品的标称值、国际上公认的计量值(如  $C_{12}$  的相对原子质量为 12，绝对零度等于  $-273.15^\circ\text{C}$  等)。

#### 2. 平均值

在科学实验中，虽然实验误差在所难免，但平均值可综合反映实验值在一定条件下的一般水平，所以在科学实验中，经常将多次实验值的平均值作为真值的近似值。平均值的种类很多，在处理实验结果时常用的有以下几种。

##### 1) 算术平均值

算术平均值是最常用的一种平均值。设有  $n$  个实验值  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，则它们的算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1-1)$$

式中， $x_i$  表示第  $i$  个实验值。

同样实验条件下，如果多次实验值服从正态分布，则算术平均值是这组等精度实验值中的最佳值或最可信赖值。

##### 2) 加权平均值

如果某组实验值是用不同的方法获得的，或由不同的实验人员得到的，则这组数据中不同值的精度或可靠性不一致，为了突出可靠性高的数值，则可采用加权平均值。设有  $n$  个实验值  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，则它们的加权平均值为

$$\bar{x}_w = \frac{w_1x_1 + w_2x_2 + \cdots + w_nx_n}{w_1 + w_2 + \cdots + w_n} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1-2)$$

式中,  $w_1, w_2, \dots, w_n$  表示单个实验值对应的权。如果某值精度较高, 则可给较大的权数, 加重它在平均值中的分量。

### 3) 对数平均值

如果实验数据的分布曲线具有对数特性, 则宜使用对数平均值。设有两个数字  $x_1, x_2$ , 都为正数, 则它们的对数平均值为

$$\bar{x}_L = \frac{x_1 - x_2}{\ln x_1 - \ln x_2} = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}} = \frac{x_2 - x_1}{\ln \frac{x_2}{x_1}} \quad (1-3)$$

注意: 量数的对数平均值总小于或等于它们的算术平均值。当  $\frac{1}{2} \leq \frac{x_1}{x_2} \leq 2$  时, 可用算术平均值代替对数平均值, 而且误差不大 ( $\leq 4.4\%$ )。

### 4) 几何平均值

设有  $n$  个正实验值  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 则它们的几何平均值为

$$\bar{x}_G = \sqrt[n]{x_1 x_2 \cdots x_n} = (x_1 x_2 \cdots x_n)^{\frac{1}{n}} \quad (1-4)$$

对上式两边同时取对数得

$$\lg \bar{x}_G = \frac{\sum_{i=1}^n \lg x_i}{n} \quad (1-5)$$

可见, 当一组实验值取对数后所得数据的分布曲线更加对称时, 宜采用几何平均值。一组实验值的几何平均值常小于它们的算术平均值。

### 5) 调和平均值

设有  $n$  个正实验值  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 它们的调和平均值为

$$H = \frac{n}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \cdots + \frac{1}{x_n}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}} \quad (1-6)$$

或

$$\frac{1}{H} = \frac{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \cdots + \frac{1}{x_n}}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}}{n} \quad (1-7)$$

可见调和平均值是实验值倒数的算术平均值的倒数, 它常用在涉及一些量的倒数的场合。调和平均值一般小于对应的几何平均值和算术平均值。

综上, 不同平均值都有各自适用的场合, 选择哪种方法求平均值取决于实验数据本身的特点, 如分布类型、可靠性程度等。

### 1.3.2 误差的基本概念及分类

#### 1. 误差的基本概念

一个物理量的真实值，是指在一定的时空条件下，该物理量客观存在的实际数值。真值是用理想的方法定性、定量地反映被测物理量的理论值，通常由理论给定或由计量标准规定。为了表征实测值与真值的差异，在这里引进了误差的概念。误差是普遍存在的，就是说，任何科学实验测量的实验数据都不可避免地存在着误差。

误差是指实测值与真值之差。它被用来表征测量结果的准确度。所谓准确度是指一定条件下，多次测定结果的均值与真值相吻合的程度。准确度是与系统误差相对应的。误差分为绝对误差和相对误差。

$$\text{绝对误差} = \text{实测值} - \text{真值}$$

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}} \approx \frac{\text{绝对误差}}{\text{实测值}}$$

前面已指出，真值是客观存在的，但人们不可能测得真值。在未知真值情况下，为表示测量结果优劣，又引进偏差的概念。所谓偏差是指实测值与测定平均值之差，相对偏差为偏差与测定平均值的比值，即

$$\text{偏差} = \text{实测值} - \text{平均值}$$

$$\text{相对偏差} = \frac{\text{偏差}}{\text{平均值}}$$

偏差反映了测定的精密度，精密度是指在同一条件下，对同一个物理量进行多次重复测定时，实测值的离散程度。实测值越集中，测量的精密度越高。精密度是与随机误差相对应的。通常用以下 3 个量来度量：

$$\text{算术平均值} \quad d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \quad (1-8)$$

$$\text{极差} \quad L = x_{\max} - x_{\min} \quad (1-9)$$

$$\text{标准差} \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-10)$$

其中，标准差的应用最广泛，它表征整个实测值的离散程度。当一组测定数据中出现极值时，标准差即明显增大，实测值变动越大，标准差也越大。标准差还表示测定的重复性及被测物理量本身的稳定性。若被测物理量本身和测定条件均稳定， $s$  则表示测定条件的随机波动性；若被测物理量本身不稳定，而测定条件是稳定的， $s$  则表示被测物理量本身的随机波动性；若被测物理量本身和测定条件二者都不稳定， $s$  则表示二者随机波动性的综合效应。

## 2. 误差分类

在进行力、应力、应变、位移等物理量的测量实验时，不可避免地会存在着各方面的误差，就其性质来讲，大体可分为系统误差和偶然误差(随机误差)两大类，还有一种过失误差是人为原因造成的，本书不予讨论。

系统误差是一种规则的、恒定的误差，是由确定的系统产生的固定不变的因素引起的误差。该误差的偏向及大小总是相同的。例如：仪器的零点不准、天平不等臂、标尺刻度不准、应变片灵敏系数偏大等。

偶然误差是一种不规则的随机误差，无法预测它的大小，其误差没有固定的大小和偏向。

系统误差有固定的偏向及规律性，可采取适当的措施予以校正和消除。而偶然误差，只有当测量次数足够多时，服从统计规律，其大小才可由概率决定。

### 1.3.3 系统误差

#### 1. 系统误差的来源

按来源，系统误差可分为如下4种类型。

(1) 仪器误差：包括仪器制造不精确，使用过久精度下降，仪器未调至最佳状态，器皿未予校正，使用试剂不纯等。

(2) 操作误差：包括人为因素(视力不佳导致读数不准，操作人员存有偏见使终点观察超前或滞后)，取样代表性不好，反应条件控制不当，灼烧沉淀温度选择不合适等。

(3) 方法误差：包括测试方法不完善，采用的原理不严密，选用的经验公式不完全符合实际情况，采用理论公式时实验条件与之不吻合，空白实验不正确等。

(4) 环境误差：包括环境温度变化引起仪器及器皿精度改变，大气污染严重影响空白实验和试样实验的测定结果，照明情况变化引起视差使读数不准确等。

#### 2. 系统误差的判定

实验结果有无系统误差，必须进行检验，以便能及时减小或消除系统误差，提高实验结果的正确度。相同条件下的多次重复实验不能发现系统误差，只有改变形成系统误差的条件，才能发现系统误差。

下面介绍一种方便、有效的检验方法——秩和检验法。利用该检验方法可以检验两组数据之间是否存在显著性差异，所以当其中一组数据无系统误差时，就可以利用该检验方法判断另一组数据有无系统误差。显然，利用秩和检验法，还可以证明新实验方法的可靠性。

设有两组实验数据  $x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_{n_1}^{(1)}$  与  $x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, \dots, x_{n_2}^{(2)}$ ，其中  $n_1$ 、 $n_2$  分别是两组数据的个数，这里假定  $n_1 \leq n_2$ 。假设这两组实验数据是相互独立的，如果其中一组数据无系统误差，则可以用秩和检验法检验另一组数据有无系统误差。

首先，将这  $n_1+n_2$  个实验数据混在一起，按从小到大的次序排列，每个实验值在序

列中的次序叫作该值的秩，然后将属于第 1 组数据的秩相加，其和记为  $R_1$ ，称为第 1 组数据的秩和；同理可以求得第 2 组数据的和  $R_2$ 。如果两组数据之间无显著差异，则  $R_1$  就不应该太大或太小。对于给定的显著性水平  $\alpha$  (表示检验的可信程度为  $1-\alpha$ ) 和  $n_1$ 、 $n_2$ ，由秩和临界值表(表 1-1)可查得  $R_1$  的上、下限  $T_2$  和  $T_1$ ，如果  $R_1 \geq T_2$  或  $R_1 \leq T_1$ ，则认为两组数据有显著差异，另一组数据有系统误差；如果  $T_1 < R_1 < T_2$ ，则两组数据无显著差异，另一组数据也无系统误差。

表 1-1 秩和检验临界值表

(2,4)			(4,4)			(6,7)		
3	11	0.067	11	25	0.029	28	56	0.026
(2,5)			12	24	0.057	30	54	0.051
3	13	0.047	(4,5)			(6,8)		
(2,6)			12	28	0.032	29	61	0.021
3	15	0.036	13	27	0.056	32	58	0.054
4	14	0.071	(4,6)			(6,9)		
(2,7)			12	32	0.019	31	65	0.025
3	17	0.028	14	30	0.057	33	63	0.044
4	16	0.056	(4,7)			(6,10)		
(2,8)			13	35	0.021	33	69	0.028
3	19	0.022	15	33	0.055	35	67	0.047
4	18	0.044	(4,8)			(7,7)		
(2,9)			14	38	0.024	37	68	0.027
3	21	0.018	16	36	0.055	39	66	0.049
4	20	0.036	(4,9)			(7,8)		
(1,10)			15	41	0.025	39	73	0.027
4	22	0.03	17	39	0.053	41	71	0.047
5	21	0.061	(4,10)			(7,9)		
(3,3)			16	44	0.026	41	78	0.027
6	15	0.05	18	42	0.053	43	76	0.045
(3,4)			(5,5)			(7,10)		
6	18	0.028	18	37	0.028	43	83	0.028
7	17	0.057	19	36	0.048	46	80	0.054
(3,5)			(5,6)			(8,8)		
6	21	0.018	19	41	0.026	49	87	0.025
7	20	0.036	20	40	0.041	52	84	0.052
(3,6)			(5,7)			(8,9)		
7	23	0.024	20	45	0.024	51	93	0.023
8	22	0.048	22	43	0.053	54	90	0.046

续表

(3,7)			(5,8)			(8,10)		
8	25	0.033	21	49	0.023	54	98	0.027
9	24	0.058	23	47	0.047	57	95	0.051
(3,8)			(5,9)			(9,9)		
8	28	0.024	22	53	0.021	63	108	0.025
9	28	0.042	25	50	0.056	66	105	0.047
(3,9)			(5,10)			(9,10)		
9	30	0.032	24	56	0.028	66	114	0.027
11	29	0.05	26	54	0.05	69	111	0.047
(3,10)			(6,6)			(10,10)		
9	33	0.024	26	52	0.021	79	131	0.026
11	31	0.056	28	50	0.047	83	127	0.053

注：括号数值表示样本容量 $(n_1, n_2)$ 。

【例 1-1】 设  $A$ 、 $B$  两组测定值为

$A$ : 8.6, 10.0, 9.9, 8.8, 9.1, 9.1

$B$ : 8.7, 8.4, 9.2, 8.9, 7.4, 8.0, 7.3, 8.1, 6.8

已知  $A$  组数据无系统误差，试用秩和检验法检验  $B$  组测定值是否有系统误差 ( $\alpha=0.05$ )。

解：先求出各数据的秩，如表 1-2 所示。

表 1-2  $A$ 、 $B$  两组实验数据的秩

秩	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11.5	11.5	13	14	15
$A$							8.6		8.8		9.1	9.1		9.9	10.0
$B$	6.8	7.3	7.4	8.0	8.1	8.4		8.7		8.9			9.2		

此时， $n_1=6$ ， $n_2=9$ ， $n=n_1+n_2=15$ ， $R_1=7+9+11.5+11.5+14+15=68$ 。

对于  $\alpha=0.05$ ，查秩和临界值表，得  $T_1=33$ ， $T_2=63$ 。

所以  $R_1 > T_2$ 。

故两组数据有显著差异， $B$  组测定值有系统误差。

注意：在进行秩和检验时，如果几个数据相等，则它们的秩应该是相等的，等于相应几个秩的算术平均值。如例 1-1 中，两个 9.1 的秩均为 11.5。

### 3. 系统误差的限制和消除

要限制和消除系统误差，需要根据不同物理量的测量运用有关专业知识去解决，这里仅从原则上提出限制和消除系统误差的几种方法。

(1) 通过理论分析和实验观测，充分了解测量中可能引起系统误差的原因。针对测量对象研究测量方法。选择测量仪器，调整仪器的工作状态和参数，以消除可能产生的系统误差。

(2)对各种误差因素进行研究,相应地引入修正项。

(3)在某些情况下,对某种固定的或有规则变化的系统误差,可巧妙地设计测量方法加以消除。

### 1.3.4 实验数据的有效数字表示

#### 1. 有效数字

能够代表一定物理量的数字,称为有效数字。研究数据误差的内容之一,就是要正确确定实验数据的有效位数,因为在数据处理时要求数据的有效数字应与误差相匹配。换句话说,数据的有效数字不宜太多,也不宜太少。太多使人误解为数据精度很高,太少则又损失精度。

如果某一物理量的计量结果  $L$  的极限误差是某一位上的半个单位,则该位到  $L$  的左起第一个非零数字一共有  $n$  位,即认定  $L$  有  $n$  位有效数字。

当书写不带误差的任一数字时,应写出由左起第一个不为零的数一直到最后一个数为止,都是有效数字。例如,极限误差为  $1/2 \times 10^{-4}$ ,则 0.0023 的近似数不应写成 0.002300,因后者的极限误差为  $1/2 \times 10^{-6}$ 。又如极限误差为  $1/2 \times 10^2$  时,8700 的近似数应写成  $87 \times 10^2$ ,而不应写成 8700,因后者的极限误差为  $1/2$ 。

带误差的数据,一般误差保留一个数字,而该数据最后一位应取至与该保留误差数字同一量级。如活塞压力计的有效截面积,极限误差为  $\Delta = 0.000005 \text{cm}^2$ ,假设测定的有效面积为  $L = 0.050145 \text{cm}^2$ ,最后该数据应写为  $(0.050145 \pm 0.000005) \text{cm}^2$ 。因误差取了一个数字 5,因此  $L$  取至与  $\Delta$  相同的 0.000001 位。

**注意:**“0”在有效数字中,可以是有效数字,也可以不是有效数字。例如,3.0202 是 5 位有效数字,其中“0”都是有效数字。0.3305,左数第 1 个“0”不是有效数字,只起定位作用,第二个“0”是有效数字,因此,这个数是 4 位有效数字。0.0390 是 3 位有效数字。0.0070 是 2 位有效数字。0.06 是 1 位有效数字。400 的有效数字不好确定,可能是 3 位有效数字,也可能是 2 位有效数字,应根据有效数字的要求,写成  $4.00 \times 10^2$  为 3 位有效数字,写成  $4.0 \times 10^2$  则为 2 位有效数字。

#### 2. 有效数字的运算

(1)加、减运算:以小数点后位数最少的数为准。

(2)乘、除运算:以有效数字位数最少的数为准。

(3)乘方、开方运算:与其底数相同,例如  $2.3^2 = 5.3$ 。

(4)对数运算:与其真数相同,例如  $\ln 6.84 = 1.92$ 。

(5)在 4 个以上数的平均值计算中,平均值的有效数字可增加一位。

(6)所有取自手册上的数据,其有效数字位数按实际需要取,但原始数据如有限制,则应服从原始数据。

(7)一些常数的有效数字的位数可以认为是无限制的,例如,圆周率  $\pi$ 、重力加速度  $g$ 、 $1/3$  等,可根据需要取有效数字。

(8)一般在工程计算中,取2~3位有效数字就足够精确了,只有在少数情况下需要取到4位有效数字。

### 3. 有效数字的修约规则

“四舍五入”法的弊端,是遇5进位往往导致数据取值偏高,且引入了5本身的误差。为了克服此弊端和适应科技工作的需要,国家标准化委员会颁发了《数值修约规则与极限数值的表示和判定》。通常称为“四舍六入五成双”规则。即当位数 $\leq 4$ 时舍去,位数 $\geq 6$ 时进位,位数=5时,“5”后面位数为“0”,则要看它前面的一个数,如果是奇数就入,是偶数就舍,这样数据的末位数都是偶数,即为“双数”,“5”后面位数不为“0”的任何数,均进位。例如,下列数字修约为4位有效数字为

$$27.0241 \rightarrow 27.02$$

$$27.0261 \rightarrow 27.03$$

$$27.0250 \rightarrow 27.02$$

$$27.0150 \rightarrow 27.02$$

$$27.0251 \rightarrow 27.03$$

## 1.4 实验数据的统计处理

力学实验中测量得到的许多数据需要处理后才能表示测量的最终结果。对实验数据进行记录、整理、计算、分析和拟合等,从中获得实验结果和寻找物理量变化规律或经验公式的过程就是数据处理。它是实验方法的一个重要组成部分,是实验课的基本训练内容。本节主要介绍列表法、作图法、图解法、逐差法和最小二乘法。

### 1.4.1 列表法

列表法就是将一组实验数据和计算的中间数据依据一定的形式和顺序列成表格。列表法可以简单明确地表示出物理量之间的对应关系,便于分析和发现数据的规律性,也有助于检查和发现实验中的问题,这就是列表法的优点。设计记录表格时要做到:

(1)表格设计要合理,以利于记录、检查、运算和分析。

(2)表格中涉及的各物理量,其符号、单位及量值的数量级均要表示清楚。但不要把单位写在数字后。

(3)表中数据要正确反映测量结果的有效数字和不确定度。列入表中的除原始数据外,计算过程中的一些中间结果和最后结果也可以列入表中。

(4)表格要加上必要的说明。实验时所给的数据或查得的单项数据应列在表格的上部,说明写在表格的下部。

### 1.4.2 作图法

作图法是在坐标纸上用图线表示物理量之间的关系,揭示物理量之间的联系。作图