

上海市教委重点课程项目 资助
上海理工大学“精品本科”系列教材建设项目

材料力学

综合实验教程

主 编 姚胜卫
副主编 倪维宇 石培蕾

上海市教委重点课程项目 资助
上海理工大学“精品本科”系列教材建设项目

材料力学综合实验教程

主 编 姚胜卫

副主编 倪维宇 石培蕾



中国质检出版社
中国标准出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

材料力学综合实验教程/姚胜卫主编. —北京:中国质检出版社,2018.8

ISBN 978-7-5026-4607-3

I. ①材 II. ①姚… III. ①材料力学—实验—高等学校—教材
IV. ①TB301-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 108396 号

中国质检出版社 出版发行
中国标准出版社

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100029)

北京市西城区三里河北街 16 号(100045)

网址:www.spc.net.cn

总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 5.75 字数 112 千字

2018 年 8 月第一版 2018 年 8 月第一次印刷

*

定价:19.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68510107

前言

科学发展的历史表明,许多伟大的发现、发明都是来自于科学实验。科学实验是理论的源泉,通过实验可帮助人类认识和掌握自然界各种事物的本质和规律。实验教学是高等学校理工科教学的重要组成部分,它不仅是学生获取知识的重要途径,而且对培养学生的学风和素质、实际工作能力、科研能力以及创新能力都具有重要的作用。

材料力学实验是一门应用性较强的专业基础课程,是现代工程技术的基础理论之一,在诸多领域中有着广泛的应用。上海理工大学机械工程实验中心是上海市实验教学示范中心,中心根据学校提出的人才培养总体目标,在机械基础实验教学领域打破了实践教学依附于理论教学的模式,建立了与理论教学并行,既相对独立又相互联系的实验教学体系,独立开设了力学实验等课程。

本书以认知实验、基础实验为依托,同时对创新、综合性实验进行拓展,内容基本涵盖了材料力学理论课程要求的知识点,注重实验项目设置的系统性和科学性,力求构建新的机械基础实验课程体系,加强培养学生的设计能力、研究能力、综合应用能力和实践动手能力。本书系统地介绍了材料力学实验的目的、内容、原理、方法及操作等,在实验的设计方法、实验手段、实验数据的处理方法等环节对学生进行科学的指导。

本书共分四章。第一章 绪论,主要介绍实验课程的任务、内容、要求与学习方法;第二章 工程实验基础知识,主要介绍实验数据的采集与处理,实验报告的撰写;第三章 材料力学实验,主要介绍材料力学相关实验的具体操作;第四章 实验仪器与设备,主要介绍材料力学实验中拉伸试验机,扭转

试验机及电阻应变仪的使用。

参加本书编写的有倪维宇、石培蕾、张玮,全书由姚胜卫统稿。

本书被列入上海市教委重点课程项目及上海理工大学“精品本科”系列教材建设项目。在本书编写过程中相关教研室、研究所、实验中心的教师提供了各种指导和帮助,在此表示衷心感谢。

本书受编写时间和编者水平所限,难免存在不妥之处,恳请广大读者提出宝贵意见。

编者

2018年4月

目 录



第一章 绪 论	1
第一节 机械基础实验课程的重要性、性质和任务	1
第二节 机械基础实验课程的主要内容	3
第三节 机械基础实验课程的要求与学习方法	4
第二章 工程实验基础知识	6
第一节 常用物理量的测量	6
第二节 实验数据误差分析与处理简介	16
第三节 实验报告的撰写	22
第三章 材料力学实验	30
第一节 应用理论力学实验	30
第二节 金属材料的拉伸与压缩实验	35
第三节 金属材料的扭转实验	38
第四节 金属材料条件比例极限 σ_p 的测定	42
第五节 桥路联接变换实验	44
第六节 金属材料的弹性模量 E 和泊松比 μ 的测定	48
第七节 纯弯曲梁横截面上的正应力测定	51
第八节 薄壁圆管主应力测定	54
第九节 压杆稳定实验	57
第十节 偏心拉伸实验	61
第十一节 电阻应变测量的贴片实验	64

第十二节 薄壁圆管弯扭组合变形应变测定实验.....	66
第四章 实验仪器与设备	71
第一节 Zwick 电子万能材料试验机	71
第二节 PowerTest 型扭转试验机.....	73
第三节 多功能实验装置.....	76
第四节 静态数字电阻应变仪.....	77
参考文献	85

第一章 绪 论

第一节 机械基础实验课程的重要性、性质和任务

一、基础实验课程的重要性

实验一般指科学实验,即自然科学实验。科学实验是根据一定的目的(或要求),运用必要的手段和方法,在人为控制的条件下,模拟自然现象来进行研究、分析,从而认识各种事物的本质和规律的方法。实验是将各种新思想、新设想、新信息转化为新技术、新产品的必要环节。科学技术发展的历史表明,许多伟大的发现、发明和重大的研究成果都来自于科学实验。回顾机械的发展历史,人类从使用原始工具到创造发明原始机械、古代机械、近代机械乃至今天的智能机器人、加工中心、载人宇宙飞船、航天飞机等具有高科技含量的现代机械,都经历过艰辛的科学实验。随着科学技术的发展,科学实验的范围和深度不断拓展和深入,科学实验具有越来越重要的作用,成为自然科学理论和工程技术的直接基础。资料表明,诺贝尔物理奖自 1900 年以来的 100 多个奖项中,可以认为 70% 以上是授予实验项目的。由此可见实验对理论和科学研究的重要性。科学实验是探索未知、推动科学发展的强大武器,对经济持续发展、提高综合国力也具有十分重大的、深远的现实意义。

机械工业历来是国家经济建设的支柱产业之一。随着科学技术的不断发展,社会对机械学科和机械类专业人才也提出了更高的要求。时代要求培养更多的高素质、有开拓进取精神的创新型人才。高等学校工科学生,尤其是机械类专业的学生,必须具有良好的实践能力、创新能力和综合设计能力。实验正是培养学生具有这些能力的极好的实践教学环节。实验教学是理工科专业教学中重要的组成部分,它不仅是学生获得知识和经验的重要途径,而且对培养学生的自学能力、工作态度、实际工作能力、科学研究能力和创新思维具有十分重要的作用,对实现培养学生成为适合国家和社会需要的高素质人才的目标起着关键的作用。

素质教育强调培养学生的实践能力、想象力和创造性,对理工科学生,特别是对机械专业的学生来说,基础实验教学是不可或缺的重要手段。实验教学不仅要使学生通过实验来掌握基本实验手段,更重要的是要使学生具备应用这些手段从事科学研究的独立工作能力。实验教学的重要性是让学生自己动手实验,注重能力的培养,使学生在知识和能力方面得到全面发展。

二、机械基础实验课程的性质和任务

机械基础实验是旨在培养机械类学生具有初步的实验设计能力、基本参数测定和相关测试仪器操作能力和实验分析能力的技术基础课程,是机械基础系列课程教学中重要的实践性教学环节之一。它是深化感性认识、理解抽象概念、应用基础理论的主要方法。

机械基础系列课程是连接基础课与专业课的重要环节,由一系列的实验来支撑。为了使实验教学的内容和水平符合培养高素质技术人才的要求,我们尝试对机械基础系列课程的实验进行整合、优化,形成系列课程互相衔接、互相配合、互相支撑的实验教学体系,并尽可能地利用先进的实验设备、虚拟实验等新技术,丰富实验教学内容,提高实验的质量和水平,开设独立的机械基础综合实验等课程。

机械基础实验课程的任务是培养学生以下方面技能与素质:

- 1) 认知和熟识机械工程领域基础实验的常用工具、仪器和设备系统,掌握使用相关工具,操作实验仪器、设备系统的基本技能。
- 2) 掌握机械设计基础基本实验的实验原理、实验方法、调试技术、测试技术、数据采集、误差分析等基本理论和基本技能。
- 3) 具有理解、构思、改进机械基础实验方案的基本能力。
- 4) 养成严格按科学规律从事实验工作,遵守实验操作规程的基本素质和不怕困难、勇于探索创新和实事求是的科学态度。
- 5) 养成善于观察、分析事物和现象的良好习惯,提倡综合思考的创新思维,特别在进行综合性、设计性实验时,应充分利用实验条件,进行实验研究,开展实验创新。
- 6) 培养和提高自学能力、科学研究能力、分析思维能力、实际动手能力、撰写实验报告的表达能力、独立工作能力和团队合作精神。

第二节 机械基础实验课程的主要内容

机械基础实验课程是以机械基础实验自身的系统为主线独立设置的实验课,成绩单独考核和计分。实验课的教学内容注意培养学生的创新能力和综合设计能力。实验内容应尽量由“验证性”向“开发性”,“单一性”向“综合性”转变,注意实验内容的创新性,增加实验内容,提高学生选题的自主性,改进实验指导方法,尽量发挥学生在实验过程中的主导作用。

机械基础实验课程分为基本实验和综合实验两个层次。基本实验包括必修和选修两个部分。不同的选修实验内容可供不同专业的学生使用。综合实验要求学生能综合应用多门理论课程的知识以及各种实验仪器设备、检测与分析手段来进行实验,获取和处理实验数据,并撰写有分析的实验报告,完成预定实验目标。机械基础实验课程增加了实验内容和选题的柔性及开放性,以发挥学生的个性和创造能力,鼓励学生充分自主,发挥想象力,敢于打破思维定势的约束,提出新方案、新方法,应用新技术。本教程在有的章节还安排了创新设计实验项目,比如机构创新设计,鼓励学生打破思维定势,充分发挥想象力设计并实现实验方案,培养其创新意识,提高其创新能力。

机械基础实验课程的实验内容反映机械学科的发展方向,必须改革陈旧的实验内容和实验装置。因此,我们采取了:①开发更新实验装置;②增加实验设计;③引进先进的数据采集和数据处理手段,实现计算机技术在机械基础实验中的应用等方式来达到培养学生的创新能力、综合设计能力和掌握新的科学技术的目的。机械基础实验课程应有较多的创新设计实验内容,允许学生实现自己构思的原理方案,为了节省经费又不约束学生的新构思,可以在部分机械基础实验中采用计算机仿真技术和虚拟实验,以增加实验的柔性,让学生在实验中能充分体现自主性。

本教程各实验项目之间具有相对独立性,由实验目的、实验内容、实验仪器、仪器设备操作及原理、实验步骤、注意事项等部分有机组成,便于不同学校、不同层次要求的学生根据具体实际情况使用。

第三节 机械基础实验课程的要求与学习方法

一、机械基础实验课程的要求

机械基础实验课程是机械基础系列课程的重要教学内容和组成部分。学生通过机械基础实验课程的原理和方法的学习、实验操作训练实践及数据分析总结,要掌握以下基本内容:

- 1)了解机械基础实验在机械学科研究中的重要地位,培养科学、系统的科学实验观;
- 2)综合运用先修课程中所学的有关知识与技能,掌握基本实验的原理和方法,不断提高实验技术和理论水平;
- 3)了解和熟悉机械基础实验常用的仪器和装置,能熟练使用机械基础实验常用的仪器、工具、量具;
- 4)掌握机械基础实验中常用的测试技术、数据采集、误差分析与处理等基本理论和基本技能;
- 5)了解现代工程实验方法在机械基础实验领域中的应用。

二、机械基础实验课程的学习方法

1)多动手,细观察,提高实践操作技能

机械基础实验课程是以学生实际操作为主的技术基础课程,在具体的实验过程中需要使用多种仪器设备和工具。因此,学生要注重培养自己的动手能力,不仅仅要学会操作使用各种仪器设备和工具,还要培养自己科学严谨的工作作风,搞清楚各种工具的使用规范和注意事项。克服粗糙马虎的不良习惯,注意观察实验过程的各种现象,认真记录实验数据,为发现问题、解决问题奠定基础。

2)勤于思考,提高分析、解决问题能力

在本课程的学习中,既有一些基本的验证型实验,也有综合型的创新性实验。许多学生在做实验的过程中,尤其对于验证性实验,认为其无非是对理论的检验,往往是按照实验步骤机械模仿,对于实验过程和实验结果很少进行分析和思考。这种做法使学生在做完实验后只是验证了某个定理或者公式,并不能得到任何实用性结论,失去了做实验的意义。学习本门课程应该有意地对实验过程和实验结果进行思考,无论

哪种实验获得的实验结果,我们都要本着实事求是的态度,从测试手段或方法、数据采集和处理等方面进行思考和探索,实验得到的数据和理论是完全一致的吗?什么原因导致了误差甚至实验的失败?通过这样的思考可以很好地培养自己的分析能力,得到实用性结论,提高自身的工程实践能力。

3) 注意理论知识的综合应用,培养创新能力

机械基础实验课程作为技术基础课涉及多门理论课程的知识,特别是一些较复杂的综合设计型实验更是对多门学科知识的有机结合的应用,因而是培养学生创新能力的重要平台。在学习机械基础实验课程的过程中,学生既要重视动手能力的培养,也要注意夯实自己的理论基础。因为实验是根据一定目的,运用必要的手段,在人为控制的条件下,观察、研究事物本质的一种实践活动。实验本身的目的性、被控制性决定了人们在实验开始时先要作实验设计,而实验设计人员必须要掌握本学科的理论知识和相关的测试技术,能够完成选择测试仪器设备并掌握其使用方法以及数据处理的相关理论。所以只有将多门学科的知识有机结合,在理论指导下综合利用各种实验设备和仪器设计出新的实验方案,才能提高学生的创新能力。

4)吃苦耐劳,具有团队协作精神

机械基础实验课是实践性很强的课程,它与工程实践密切相关,实验过程中,环境条件要远比在课堂上理论课差。学生应该克服实验环境的不利影响,严格按照要求完成实验。绝大多数的机械工程实验不同于“科学研究性”实验,规模和复杂程度较大,实施过程中不仅涉及各种技术和知识,而且需要多人的协作。所以要注意培养团队协作精神,须知,个人的能力和精力是有限的,在规定的时间内完成一个较复杂的综合设计型实验往往需要多人的协作,各行其是常常降低实验的效率,甚至导致实验的失败。

5) 重视实验报告的撰写

实验报告是在实验过程中,实验者把实验的目的、方法、步骤、结果等,用简洁的语言写成的书面报告。

无论一个实验有多么重大的发现,只有将这个实验的信息通过实验报告的形式公之于世,让他人知道,才有价值,否则实验就没有意义。实验报告是对实验过程、实验结果的科学总结,是分析、反映实验成果的重要资料,也是实验评价的重要依据。所以学会正确撰写实验报告是每个学生在机械基础实验课程中的一个重要内容。

第二章 工程实验基础知识

实验是根据一定的目的(或要求),运用必要的手段和方法,在人为控制的条件下,模拟自然现象来进行研究、分析,从而认识各种事物的本质和规律的方法。任何实验都离不开对参数的测量、观察与分析。英国物理学家汤姆生说过:“一切科学上的重大发现,几乎完全来自精确的测量。”对于科学技术研究而言,精确测量是必要的基础。在工程技术领域,测量则是不可或缺的技术手段和技术保障。测量技术水平的提高往往会直接带来科学和技术的进步。

无论一个实验是多么成功或有多么重大的发现,只有将这个实验的信息通过实验报告的形式公之于世,让他人了解,实验才有价值,否则实验就没有意义。实验报告是对实验过程、实验结果的科学总结,是分析、反映实验成果的重要资料,也是实验评价的重要依据。撰写实验报告是实验研究工作的重要环节。

因此,对于每一个理工科的学生在进行实验课程的实际操作之前,熟悉测量的基本原理,掌握测量的方法,了解撰写实验报告的基本知识是十分必要的。

第一节 常用物理量的测量

一、测量的基本知识

测量的定义:通过实验获得并可合理赋予某量一个或多个量值的过程。其实质是根据相关理论,用专门的仪器或设备,通过实验和必要的数据处理,求得被测量量值的过程。测量具有 3 个要素,即被测量、测量仪器和测量方法。

1. 被测量的类型

被测量可以是基本量,如长度、质量、温度等;也可以是导出量,如速度、加速度、功率、摩擦系数等。被测量可分为静态和动态两种。

1) 静态量

所测量的物理量在整个测量过程中其数值始终保持不变,即被测量不随时间的变

化而变化,这种量称为静态量。例如:机械零件的几何量,它包括尺寸(长度、角度)、形状和位置误差、表面粗糙度等;稳定状态下物体所受的压力、温度等。

2) 动态量

所测量的物理量在测量过程中随时间的不同而不断改变其数值,这种量称为动态量。例如:机器运动过程中的位移、速度、加速度、功率等;非稳定状态下的压力、温度。

2. 测量仪器的主要性能和指标

测量仪器通常包含以下几部分:传感元件、信号转换和处理单元、输出单元。传感元件的作用是通过某种方式感知待测的物理量及其变化;信号转换和处理单元则将传感器感知的信号进行转换处理并传输到输出单元,最终获得物理量数值。测量方法是利用测量仪器获取物理量数值的方式。为了正确地选择和使用测量仪器,应当了解测量仪器的主要性能和指标。

1) 量程

仪表的量程是指仪表能测量的最大输入量与最小输入量之间的范围,量程也可称为测量范围。如仪表的测量范围从 $-10\text{V}\sim+10\text{V}$,其量程为 20V 。选用仪表时,首先要对被测量有一个大致估计,必须使测量值落在仪表量程之内,而且最好落在 $2/3$ 量程附近,否则会损坏仪表或使测量误差较大。

2) 准确度

仪表的准确度是指测量某物理量时,测量值与真值的符合程度。仪表准确度常用满量程时仪表所允许的最大相对误差来表示,采用百分数形式,即

$$\delta = (\Delta_{\max} / A_0) \times 100\%$$

式中: $\Delta_{\max}$ ——仪表所允许的最大误差;

A_0 ——仪表的量程。

仪表的准确度越高,其测量误差越小,但仪表的价格越贵,因此,在满足使用条件下,应尽可能选用准确度等级低的仪表。

3) 灵敏度

灵敏度是指测量仪器在作测量时,测量仪器输出端的信号增量 Δy 与输入端信号增量 Δx 之比,即

$$K = \Delta y / \Delta x$$

当上式中分子与分母为同种量时,灵敏度也称为放大比或放大倍数。一般情况下,分辨力值越小,灵敏度越高。

4) 分辨力

分辨力是指仪器仪表能够检测出被测量最小变化的能力,用标尺或分度盘表示测

量值的仪器中称为标尺分度值。在准确度较高的指示仪表上,为了提高分辨力,刻度盘的刻度又密又细,或是数字表的位数更多。数字表的分辨力一般为最后一位所显示的单位值。

5) 稳定性

仪器的稳定性是指在规定的条件下和规定的时间内,仪器性能的稳定程度。它用观测时间内的误差来表示。例如,用毫伏计测量热电偶的温差电动势时,在测点温度和环境温度不变的条件下,24h内示值变化 1.5mV ,则该仪表的稳定度为 $(1.5/24)\text{mV/h}$ 。

6) 重复性

重复性通常表示为在相同测量条件(包括仪器、人员、方法等相同)下,对同一被测量进行连续多次测量时,测量结果的一致程度。通常以测量重复性误差的极限值(正、负偏差)来表示,重复性误差反映的是数据的离散程度,属于随机误差。

7) 动态特性

在对随时间变化而变化的物理量进行测量时,仪表在动态下的读数和它在同一瞬间相应量值的静态读数之间的差值,称仪表的动态误差或称动态特性。它是衡量仪表动态响应的性能指标,表明仪表指示值是否能及时、准确地跟随被测量的变化而变化。由于仪表通常都有惯性,指示值存在滞后失真,必然存在动态测量误差。

8) 频率响应特性

测量系统对正弦信号的稳态响应称为频率响应。仪表和传感器在正弦信号的作用下,其稳态的输出仍为正弦信号,但其幅值与相角通常已与输入量不同。在不同频率的正弦信号作用下,测量系统的稳态输出与输入间的幅值比、相角与角频率之间的关系称为频率响应特性,简称频率特性。它是一个复数量,表示仪表与传感器在不同频率下的传递正弦信号的性能。

3. 测量方法

对同一被测物理量,可能有多种不同的测量方法,能否选择正确的测量方法,将关系到测量结果是否符合规定的技术要求,甚至于影响到测量工作是否能正常进行。因此,必须根据不同的测量要求,找出切实可行的测量方法,然后选择合适的测量工具组成测量系统,进行实际测量。如果测量方法不合理,即使有高级精密的测量仪器或设备,也不能得到理想的测量结果。

根据不同的分类方法,测量可分为以下几种:

1) 直接测量

通过与标准值进行比较或利用经过标定的测量仪器直接得到被测物理量的值,如

用工具显微镜测量轴的直径尺寸,用电表测量电压或电流等。直接测量又可分为绝对测量和相对测量,绝对测量指测量时被测量的绝对数值由计量器具的显示系统直接读出。如用测长仪测量轴径,其尺寸由仪器标尺直接读出。相对测量亦即比较测量法,测量时先用标准件调整计量器具零位,再由标尺读出被测几何量相对于标准件的偏差,被测量的数值等于此偏差与标准件量值之和。一般来说,相对测量法比绝对测量法准确度高。

2) 间接测量

被测量不能直接得到,必须经过一定的处理和计算才能得到,如功率、摩擦系数测量等。

3) 静态测量

被测量不随时间发生变化,如静止物体质量的测量等。

4) 动态测量

被测量随时间发生改变,如冲击力的测量等。

5) 接触测量

测量过程中被测量物体与传感元件发生直接接触,如千分尺测量轴径。

6) 非接触测量

测量过程中被测量物体与传感元件之间没有直接接触,如工具显微镜测量零件几何尺寸等。

接触测量对被测表面上的油污、灰尘等不敏感,但由于测量力的存在,会引起被测表面和测量器具的变形,因而影响测量准确度。非接触测量则与其相反。

二、力的测量

力是物质之间的相互作用,力的作用使物体改变运动状态或使物体产生变形。力的 SI 单位是牛顿(N),1 牛顿(N)是使 1 千克(kg)质量的物体产生 1 米每二次方秒(m/s^2)的加速度所需要的力。

力的测量在机械工程领域的应用非常普遍,如机械加工过程中的切削力测量、钢材生产过程中的轧制力测量、物体运动过程中的摩擦力测量等。

力的测量大多数情况下是借助于传感器来进行的。测力传感器种类很多,常用的有电阻应变式、压电式、电感式、电容式、压磁式和压阻式传感器等。表 2-1 列出了常用测力传感器的适用范围和特点,供选用时参考。

表 2-1 常用测力传感器

传感器类型	基本原理	适用范围	测量范围	特点
电阻应变式	电阻应变片在受力时产生应变而引起电阻变化	静态、准静态、动态力	微牛(μN)~兆牛(MN)	方便、简单、惯性小、频率响应好,温度特性稍差
压电式	石英晶体受力时产生的电荷变化	静态、动态力	毫牛(mN)~兆牛(MN)	灵敏度高、线性度好、动态特性好
电感式	弹性元件受力产生位移而引起电感量变化	动态力	毫牛(mN)~兆牛(MN)	灵敏度高、零点附近非线性度较大
电容式	电容材料受力引起电容的变化	静态、动态力	牛顿(N)~兆牛(MN)	灵敏度较高,主要用于大载荷测量
压磁式	铁磁材料受力时引起的磁阻变化	静态、准静态力	千牛(kN)~兆牛(MN)	抗干扰,线性好,适用于恶劣工况
压阻式	半导体材料受力时电阻率变化	静态、动态力	毫牛(mN)~兆牛(MN)	体积小、质量轻,适用于恶劣工况

三、位移的测量

位移是向量,它包括大小与方向,测量时应使测量方向与位移方向一致,这样才能真实地测出位移量的大小,否则测出的仅仅是测量方向上的分量。它是一个可以直接获得的基本参量,分为线位移和角位移两类,线位移是指构件沿某方向作直线运动的距离;角位移是指构件绕固定轴线转动的角度。

位移测量为其他机械参量的测量提供了重要的基础,因此在机械参量测量中占据着十分重要的地位。机械设备中大量回转体的旋转误差的测定、机床传动链运动精度的测量、数控机床中定位精度的控制、计算机中磁头磁盘运动间隙的控制等都是建立在位移测量的基础之上的。

位移测量的方法很多,根据所采用的传感器类型不同,相应构建的测量系统也有所不同。表 2-2 列出了常用位移测量方法的测量范围和使用特点,供选用时参考。