



北京市高等教育精品教材立项项目

机械设计基础系列课程教材

机械基础实验技术

Experimental Technique of
Mechanical Foundation

- 刘莹 邵天敏 主编
- Liu Ying Shao Tianmin

清华大学出版社

机械设计基础系列课程教材

机械基础实验技术

Experimental Technique of
Mechanical Foundation

● 刘莹 邵天敏 主编

● Liu Ying Shao Tianmin

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是为了贯彻“新世纪高等教育教学改革工程”的精神,适应高等学校机械工程专业教学改革的需要,提高学生的学习能力、实践能力和创新能力,全面推进素质教育而编写的。全书分上、下两篇,共11章。上篇实验理论基础,共4章,较系统地介绍了机械实验与常用设计方法、机械基础实验中的基本物理量测量、实验数据的误差分析及处理、实验报告的撰写;下篇实验技术方法,共7章,内容包括机械动力学性能参数实验技术、机械系统的效率测定实验技术、摩擦磨损与润滑测量技术、机械系统的精度测定实验技术、机械振动与噪声测定实验技术、液压传动与控制技术实验、机电一体化实验技术。每章另有思考题和参考文献,以便读者练习和查阅更多相关信息。本书附有光盘,内容包括针对上述实验技术开设的适用于本科生实验教学的相关实验指导书,可用于指导学生实验。本书可以作为本科生机械基础实验课程教材,也可供其他从事机械设计的工程技术人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

机械基础实验技术/刘莹,邵天敏主编. —北京:清华大学出版社,2006.5

(机械设计基础系列课程教材)

ISBN 7-302-12558-9

I. 机… II. ①刘… ②邵… III. 机械学—实验—高等学校—教材 IV. TH11-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 010819 号

出 版 者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

责任编辑:张秋玲

印 刷 者:北京市清华园胶印厂

装 订 者:三河市金元印装有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×230 印张:18 字数:381千字

版 次:2006年5月第1版 2006年5月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-12558-9/TH·195

印 数:1~4000

定 价:29.80元(含光盘)



刘莹,工学博士,清华大学精密仪器与机械学系副教授。长期从事机械设计和摩擦学设计等领域的本科生教学和科研工作。作为主要完成人,参加了国家“八五”、国家863、国家自然科学基金、国防创新项目、国家有关部委重点攻关项目和多个横向合作课题。发表论文30余篇,获国家发明专利1项。主持编写教材2部,参编3部。现任北京市高等教育学会理事,北京市高等教育学会机械设计分会副理事长兼秘书长。



邵天敏,工学博士,清华大学精密仪器与机械学系副教授。长期从事摩擦学设计、材料表面技术、与摩擦学相关的实验分析等方面的教学和科研工作。负责国家自然科学基金和部委基金等多项研究课题。在国内外学术刊物上发表论文50余篇,获国家发明专利4项。目前兼任全国摩擦学会摩擦学设计专业委员会副主任委员,摩擦学会青年工作委员会副主任委员等职。

前言

《机械基础实验技术》是为了贯彻“新世纪高等教育教学改革工程”的精神,适应高等学校教学工作着眼于国家发展和人的全面发展需要,坚持知识、能力、素质协调发展,深化教学改革,注重学生的能力培养,着力提高学生的学习能力、实践能力和创新能力,全面推进素质教育而编写的。

随着高等教育改革的不断深入,高等学校人才培养的目标已经从单一的工程师培养模式转变为分层次培养。一些重点院校提出要改变学生培养的职业化教育方式,应该在拓宽学生知识面,培养学生的综合能力、研究能力、创新能力等方面下功夫。对于机械工教育,机械基础系列课程的改革取得了令人瞩目的成绩。但是,其中的实验教学与理论教学相比有较大的差距。主要表现为传统的验证型、演示型实验还占有相当大的比例,已经严重影响了学生参与实验的积极性。另外,传统的实验教学模式重结果轻过程,特别是对实验设计的原理、实验数据的处理等方面缺乏理论指导,对培养学生的设计能力、研究能力和综合能力是不利的。因此,我们希望能够通过本教材的编写和研究工作,对上述机械基础实验中的问题进行探索,力求使学生对机械基础实验的设计方法、实验手段、实验数据的处理方法、实验报告的设计等环节获得科学的理论指导,并通过教材编写工作促进机械基础实验教学课程的改革和水平的提高。

本书有如下特点:

- (1) 突出机械基础实验的设计方法及其相关知识的理论系统性。
- (2) 从机械系统的整体性能评价角度介绍机械基本参数或性能指标的一般实验方法、实验设备仪器和测试手段,使读者对现代先进的测试和评价方法有初步的了解,拓宽机械基础实验的内容,充分体现内容的通用性及典型实验的启发性。
- (3) 突出教材的实用性,选择合适的载体,以丰富的实例讲授各类典型实验方法及其在机械性能实验中的应用。

(4) 为便于学生学习和掌握基本内容,教材中提供了一定数量的实验训练题目,供读者进行实验设计和实施的训练。

全书分上、下两篇。上篇共4章,介绍机械基础实验技术的一般知识;下篇共7章,介绍机械基础实验的专门技术。为了便于读者能够在本教材的指导下,进行有关的实验设计和实践训练,本书将本科生机械基础系列课程中的部分典型实验收录在光盘中,主要是近年来教学实验改革中新开发的综合型、研究型实验。每个实验按照一般指导书的格式撰写,可直接用于实验教学。

参加本书编写的有:刘莹(绪论,第1章),邵天敏(第2,7章),潘尚锋(第3章),阎绍泽(第5章),肖丽英(第4,6章),赵彤(第8章),刘莉(第9章),魏喜新(第10章),叶佩青(第11章)。

全书由清华大学吴宗泽教授担任主审,他对本书的编写工作提出了很多建设性的意见,为提高本书的质量和水平起到很大作用。在此表示衷心感谢。

清华大学申永胜教授也在本书的编写过程中给予了热情的关注和指导,在此表示诚挚的谢意。

另外,对在本书编写过程中提供各种指导和帮助的同行表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者提出宝贵意见。

编者

2006年1月于北京

目录



0 绪论	1
0.1 机械基础实验技术课程的性质与任务	1
0.2 机械基础实验技术课程的内容	2
0.3 机械基础实验技术课程的学习方法	2

上篇 实验理论基础

1 机械实验与常用设计方法	6
1.1 机械实验的意义	6
1.2 机械实验的主要类型	6
1.2.1 验证实验	7
1.2.2 模型实验	7
1.2.3 性能测定实验	7
1.2.4 计算机仿真实验	8
1.3 实验设计	8
1.3.1 实验的基本要素	8
1.3.2 实验的基本特性	9
1.3.3 实验的一般程序	10
1.3.4 实验设计	14
1.3.5 实验设计过程举例	17
1.4 常用的实验设计方法	23

1.4.1	求值实验设计	23
1.4.2	比较实验设计	26
1.4.3	析因实验设计	27
思考题		30
参考文献		30
2	机械基础实验中的基本物理量测量	31
2.1	概述	31
2.2	力的测量	32
2.2.1	基本概念	32
2.2.2	常用的测力传感器	33
2.2.3	电阻应变式力的测量	33
2.2.4	压电式力传感器原理	37
2.2.5	微小力的测量	38
2.3	位移、速度、加速度测量	39
2.3.1	基本概念	39
2.3.2	常用的位移测量方法	39
2.3.3	速度测量	42
2.3.4	加速度测量	44
2.4	温度测量	45
2.4.1	温标	46
2.4.2	热膨胀式温度测量	46
2.4.3	电阻式温度测量	47
2.4.4	热电偶测温	48
2.4.5	红外测温	48
2.4.6	微区温度测量	49
2.4.7	各种测温方法的测量范围	49
2.5	转矩和功率测量	50
2.5.1	基本概念	50
2.5.2	转矩测量原理	50
2.5.3	功率测量	51
2.6	压力测量	53
2.6.1	基本概念	53
2.6.2	压力测量方法	54

思考题	55
参考文献	56
推荐网址	56

3 实验数据的误差分析及处理 57

3.1 基本概念	57
3.1.1 研究误差的意义	57
3.1.2 误差的定义及表示方法	57
3.1.3 精度的基本概念	58
3.1.4 有效数字与数据运算	59
3.2 误差的分类及其基本性质	60
3.2.1 随机误差	60
3.2.2 系统误差	69
3.2.3 粗大误差	73
3.3 实验数据采集与处理方法	76
3.3.1 实验数据的采集	76
3.3.2 实验数据处理的一般步骤	80
3.3.3 测量结果的数据处理实例	81
3.4 回归分析	83
3.4.1 回归分析的基本概念	84
3.4.2 线性参数的最小二乘法处理	85
3.4.3 一元线性回归	90
思考题	93
参考文献	95

4 实验报告的撰写 96

4.1 实验报告的内容	96
4.1.1 实验名称	96
4.1.2 实验目的	97
4.1.3 实验方案	97
4.1.4 实验记录	97
4.1.5 实验结果	99
4.1.6 实验结果分析	106
4.1.7 实验结论	107

4.2 实验报告撰写的步骤	107
4.3 实验报告撰写的要求	107
思考题	108
参考文献	108

下篇 实验技术方法

5 机械动力学性能参数实验技术	112
5.1 概述	112
5.2 机构动力学性能参数测试实验	113
5.2.1 测试原理和方法	113
5.2.2 多功能机构动力学性能参数测试平台	114
5.2.3 实验内容及要求	118
5.3 机械平衡测试技术	118
5.3.1 刚性转子的静平衡试验	119
5.3.2 刚性转子的动平衡试验	120
5.3.3 转子在线动平衡试验	122
5.4 机械系统动力学调速实验	124
5.4.1 原理和方法	125
5.4.2 实验原理及步骤	126
5.5 弹性机构动力学实验	126
5.5.1 实验装置	127
5.5.2 实验测试原理	127
5.5.3 实验内容及分析	129
思考题	129
参考文献	130
6 机械系统的效率测定实验技术	131
6.1 概述	131
6.2 机械效率测定的主要实验方法	131
6.2.1 效率测定的原理	131
6.2.2 转矩测量的常用仪器	132
6.3 典型机械效率测定实验举例(见光盘中实验3和实验4)	136

思考题.....	136
参考文献.....	137
7 摩擦磨损与润滑测量技术	138
7.1 概述	138
7.2 摩擦测量技术	138
7.2.1 静摩擦系数的测量.....	138
7.2.2 动摩擦系数的测量.....	140
7.3 磨损测量及分析技术	141
7.3.1 磨损测量.....	141
7.3.2 磨损分析.....	142
7.4 润滑膜厚测量技术	143
7.4.1 电阻法.....	143
7.4.2 光干涉法.....	143
7.5 摩擦磨损试验设备及试验方法	145
7.5.1 摩擦磨损试验机的基本类型.....	145
7.5.2 常用的摩擦磨损试验.....	146
7.6 四球摩擦磨损试验	148
7.6.1 四球摩擦磨损试验机.....	148
7.6.2 润滑油极压性能试验.....	149
7.6.3 润滑油品的抗磨损性能试验.....	150
7.7 环块摩擦磨损试验	150
7.7.1 环块摩擦磨损试验机.....	150
7.7.2 摩擦磨损及润滑性能评定.....	152
7.8 润滑油粘度测量	152
7.8.1 概述.....	152
7.8.2 粘度测量方法.....	154
7.9 硬度测量方法	156
7.9.1 概述.....	156
7.9.2 静压入硬度试验.....	157
思考题.....	162
参考文献.....	162

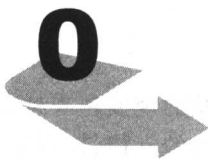
8	机械系统的精度测定实验技术	164
8.1	概述	164
8.1.1	实验目的和内容	164
8.1.2	精度测量的基本原则和注意事项	165
8.2	机械系统定位精度测定实验	166
8.2.1	实验目的及内容	166
8.2.2	定位精度实验的设计	169
8.2.3	定位精度实验(见光盘中实验7)	180
8.3	机械系统其他精度测定实验	180
8.3.1	几何精度测定实验	180
8.3.2	运动精度测定实验	182
8.3.3	传动精度测定实验	183
8.4	机械系统精度测量的新技术	184
8.4.1	在线测量	184
8.4.2	纳米测量	185
	思考题	186
	参考文献	186
9	机械振动与噪声测定实验技术	187
9.1	概述	187
9.2	机械振动测定技术及其分析方法	188
9.2.1	振动测定的力学原理	188
9.2.2	振动的测量方法、传感器及合理选择	192
9.2.3	振动测量系统及其校准	195
9.2.4	振动的分析方法与仪器	195
9.3	机械噪声测定技术及其分析方法	196
9.3.1	噪声测量的基本概念	196
9.3.2	噪声测量系统及其分析方法	197
9.3.3	噪声测量中的注意事项	198
9.4	机械结构模态分析实验	200
9.4.1	实验目的	200
9.4.2	模态实验设备和工作原理	200

9.4.3 实验结果	204
9.5 机械系统噪声测试实验(见光盘中实验8)	205
9.5.1 测量目的	205
9.5.2 机器设备噪声的测量内容与测量项目	205
9.5.3 测量方法	205
9.5.4 测量记录与数据处理	206
9.5.5 测量条件	206
思考题	206
参考文献	206

10 液压传动与控制技术实验 207

10.1 概述	207
10.1.1 液压传动与控制技术实验的内容	207
10.1.2 综合性能实验台简介	208
10.2 液压系统中压力的形成与传递	210
10.2.1 概述	210
10.2.2 实验目的	210
10.2.3 实验原理	210
10.2.4 实验步骤	211
10.3 调速性能实验	212
10.3.1 概述	212
10.3.2 实验目的	212
10.3.3 实验内容	213
10.3.4 实验原理	213
10.3.5 实验步骤	214
10.3.6 实验数据记录表	215
10.3.7 填写数据表,计算数据	218
10.3.8 思考题	218
10.4 其他基本回路(见光盘中实验9~实验15)	218
10.5 电液伺服阀的性能测试	218
10.5.1 电液伺服阀的静态特性	218
10.5.2 电液伺服阀的动态特性	223
10.5.3 思考题	226

思考题·····	226
参考文献·····	226
11 机电一体化实验技术 ·····	227
11.1 概述·····	227
11.2 机电系统电气控制实验·····	227
11.2.1 机电系统中常用的电气元件和驱动元件·····	228
11.2.2 机电系统电气控制实验·····	232
11.3 数控机械的传动实验·····	233
11.4 伺服驱动系统的调试及使用实验·····	239
11.4.1 步进电机驱动系统的调试和使用实验·····	239
11.4.2 交流伺服电机驱动系统的调试及使用·····	243
11.5 X-Y 工作台轨迹插补控制实验 ·····	249
11.5.1 基于 PC 的硬件控制接口电路 ·····	249
11.5.2 与轨迹控制相关的参考接口软件·····	257
11.5.3 实验内容·····	260
11.6 可编程逻辑控制实验·····	262
11.6.1 梯形图的化简·····	263
11.6.2 基本应用程序·····	264
11.6.3 输入/输出接口电路 ·····	264
11.6.4 五层电梯控制实验·····	265
参考文献·····	267
附录 A 正态分布表 ·····	268
附录 B t 分布表 ·····	271
附录 C 随机数据表 ·····	273



绪 论

0.1 机械基础实验技术课程的性质与任务

机械基础实验技术是一门旨在培养机械类学生具有初步的实验设计能力、基本参数测定与相关测试仪器操作能力和实验分析能力的技术基础课程。

科学实验作为人类三大实践活动之一,是人们正确认识客观世界、评价理论科学性与真理性的标准,同时对提高人类的生产力水平也起到巨大的推动作用。作为培养未来的机械工程师和创新型人才的高等机械工程教育,使学生掌握科学的实验方法和基本的实验技能是十分重要的。

长期以来,在高等工程教育中偏重基础理论体系的改革而忽视了学生实验技能的培养,使得许多工科毕业生不具备简单的、具有一定精度的工程实验的能力。特别是在当今计算机与信息技术高速发展的社会环境中,学生对实际动手操作和真实实现的工程实验渐渐失去兴趣,而对计算机辅助实验或“虚拟现实”实验非常热衷。当被问及“实验数据是否可靠”时,学生往往很茫然,因为在他们的头脑中会有一种观念:“从计算机中输出的测定结果难道还会不准确吗?”虽然数字和信息技术的引入使实验技术从规模上、精度上和速度上都有了质的飞跃,但是实验设计方法和实验基本技能的培养仍然是培养学生进行科学实验的基础。本课程的主要任务是通过一定的科学实验方法的理论学习和机械基础实验的实际训练,做到以下几点:

(1) 使学生了解机械基础实验在机械设计中的重要作用,了解其中的科学理论方法,培养学生科学、系统的工程实验观念。

(2) 掌握机械基础实验中常用评价参数的内容、测定方法及相关仪器设备的选择和使用方法。

(3) 初步具备根据工程实际情况正确设计实验、进行实验及分析实验结果的能力。

(4) 培养具备在实验过程中独立发现问题、解决问题、动手实践和分析研究的能力。

(5) 了解现代工程实验方法和理论的新发展及其在机械基础实验领域中的应用。

0.2 机械基础实验技术课程的内容

随着科学技术的迅猛发展和现代化工业生产的发展需要,工程实验的规模越来越大,不仅需要占用越来越多的实验仪器,还需要有多方面的资金、人力、物力的支持,特别是多种学科的支持,工程实验已经成为一个系统工程,而其理论和方法的研究亦已经发展成为一门独立的学科。工程实验理论指导人们在实验之初对实验进行规划、选择足够精密的测试仪器和适当的方法、确定必要的实验次数等,以保证实验条件的一致性、实验数据的可靠性和实验结果的科学性。工程实验理论作为一门技术基础理论涉及许多行业的多种科学实验的共性问题,需要以数学(特别是概率论、数理统计和随机过程理论)、物理学、计量学等作为它的理论基础,因此其知识范围是极其广泛和复杂的。在本书中,仅就机械基础实验中涉及的一些工程实验理论作为各类实验的理论基础给读者作简单介绍,以期使读者在学习过程中加深对实验方法科学性和系统性的认识,并能够在实验技能的学习中运用这些基本理论,即理论联系实际。另外,机械基础实验的内容广义上应该是涵盖了工程材料、金属工艺、机械设计、机械制造、互换性与公差测量等学科,但本书仅以机械设计和机械制造中涉及的一些机械基本性能测试实验技术为载体,介绍机械基础实验中所用到的基本参数及其测量手段和方法,从而达到培养学生基本实验技能的目的。这是因为机械产品的设计和制造是为了满足人们的消费需要而进行的,而所设计和制造的产品是否满足消费者对其功能的需求,最终是要依据一些基本机械性能指标(例如,产品的运动和动力特性、噪声、振动、工作效率、工作精度、摩擦磨损特性等)来评价的。了解和掌握这些基本参数的测量与评价实验方法,对学生今后从事机械设计和科学研究工作具有指导意义。

0.3 机械基础实验技术课程的学习方法

机械基础实验不是简单地观察一些物理现象或验证一些基本理论。通过对本课程的学习,学生应该体会到科学实验的意义,学会科学实验所需的基本技能。因此,在学习本课程的过程中要注意以下几个问题。

1. 正确的科学理论指导是完成一个成功实验的基本保证

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、研究事物本质和规律的一种实践活动。实验本身的目的性、被控制性决定了人们在实验开始时必须先进行设计。而实验设计需要工程设计人员不仅掌握本学科领域的专业理论知识,还要熟悉相关的测试技术,了解能够完成一定精度要求的可选测试仪器设备及其使用方法以及数

据处理的相关理论等。例如,在实验设计初始阶段,工程设计人员就必须根据所要达到的实验目的确定要测试哪些物理量,这些被测物理量将在后续的实验分析中起到什么作用。简而言之,即在设计实验时要明确被测定的物理参数是什么和为什么要测量这些参数。因此,工程设计人员只有具备一定的专业知识,才能选准影响实验结果的相关物理量,减少实验的盲目性。又如,在获得大量实验数据后,要正确处理实验结果,也需要具备实验数据处理的相关数学知识,以得到真实可信的实验分析结果。

2. 正确认识实验结果对科学理论的作用,培养勤于思考、严谨求实的科学作风

理论分析和实验研究是科学研究工作的两个重要手段。科学家们总是试图解释或预测基于已经存在的理论建立起来的分析模型所做实验而获得的结果,一旦发现实验结果与现存的理论不符时,他们首先会将怀疑的目光投向实验结果,然后是相关的理论。有些情况下,在确认了实验结果的合理性后,会根据获得的新实验结果修正一些理论。无论怎样,理论分析的结果只有通过相应的实验验证才能最终成为科学理论。在工程实验中,工程设计人员同样需要通过一定数量的实验才能验证其根据相关理论设计的产品是否满足工作要求。

在本课程的学习中,既有一些基本的验证型实验,也有提高实验能力的综合型和研究型实验。无论哪种实验获得的实验结果,我们都应该本着实事求是的态度,对获得的“不理想数据”从实验物理模型、测试手段或方法、数据采集和处理等方面认真地进行反思和探究,直到找到问题的症结所在。要敢于问为什么。在实验技术课程的学习中要杜绝篡改和杜撰实验结果的行为,应该使自己增加探求未知的欲望,培养善于思考、严谨求实的科学作风。

3. 循序渐进,注重实验基本理论和基本技能的学习和训练

机械基础实验技术课程一般是机械类学生第一次接触到较系统和较专业的基本实验技能训练,它与前序理论基础课程中一些偏重验证型的实验相比较,在被测物理量的复杂程度、随机特性、实验规模、数据处理的方法等方面都有较大的差别,因此学习上有一个逐渐适应的过程,要注意基本实验技能的培养。它包括:①对给定的验证型实验方案原理的理解,进而对综合型和研究型实验方案进行设计的能力;②掌握常用测量仪器设备的类型与操作方法,进而能够根据实验精度要求正确选择测试仪器设备的能力;③初步掌握原始实验数据的记录要求、实验数据处理的基本理论和分析实验结果的能力;④撰写实验报告的能力。另外,实验基础理论部分的知识是进行实验设计所需要的初步知识,学生要有意识地在后续实验技术的学习过程中加强联系和应用,以建立科学的实验观念。

4. 认识工程实验的复杂性和综合性,在实验中培养团队协作精神

绝大部分的机械工程实验不同于一般的“科学研究”实验,如在普通物理或普通化学