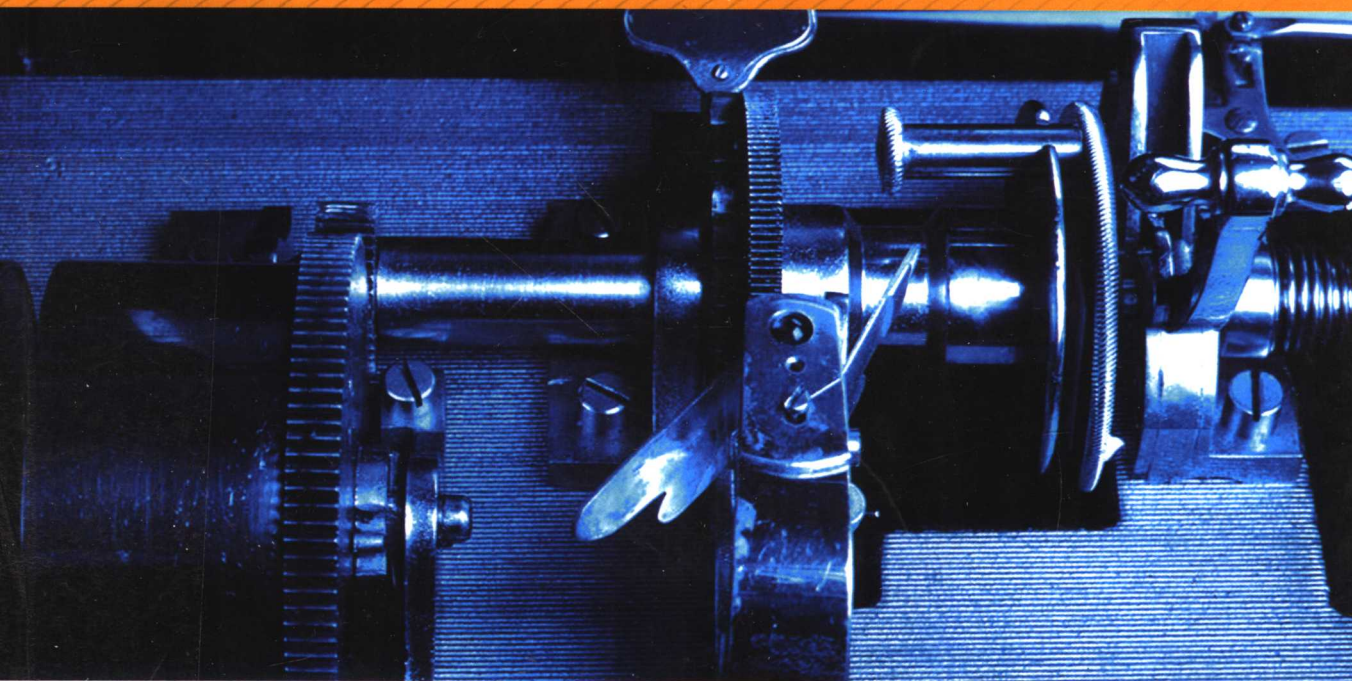


21 世纪高等院校规划教材

机械基础实验教程

主 编 刘 莹
主 审 吴宗泽



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

TH11-33/3

2007

21 世纪高等院校规划教材

机械基础实验教程

主编 刘 莹
主审 吴宗泽

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书是为了适应高等院校机械类课程教学改革的需求,为加强学生动手实践能力、创新能力的培养,在现有的机械设计基础、机械原理、机械设计实验的基础上,经过多年的改革与实践,形成了多层次、多形式的机械设计实验体系。

本书主要包括9章内容:绪论;基本物理量测量技术基础;实验数据的误差分析与处理;实验设计方法;认知实验;基本实验;综合性、设计性实验;研究性、创新性实验;实验报告的撰写与格式。每个实验后面还附有一些思考题。

本书可作为高等院校或成人高校机械类及其相关专业机械设计基础、机械原理、机械设计及机械基础等课程的实验教材,也可作为有关人员进行教学、科研和工程实践的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

机械基础实验教程/刘莹主编. —北京:北京理工大学出版社, 2007. 8
ISBN 978 - 7 - 5640 - 1195 - 6

I. 机… II. 刘… 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 (2007) 第 132284 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中国美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米 × 960 毫米 1/16

印 张 / 14.25

字 数 / 286 千字

版 次 / 2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 5000 册

定 价 / 22.80 元

责任校对 / 陈玉梅

责任印制 / 吴皓云

图书出现印装质量问题,本社负责调换

序

今天自主创新和建设创新型国家已经成为我国的一项重大战略任务。在制造业中不断地、迅速地设计、制造出具有创新性的产品是从事机械行业人员的重要任务，因此在机械设计教学中必须把培养创新能力作为一项重要的任务。许多创新性的机械产品工作条件严酷（如高温、低温、真空、放射性、潮湿等），技术要求特殊（如尺寸很大或很小，重量大，高速，重载等）。设计这些产品时，经常超出了现有设计资料的范围，为了保证设计成功，减少反复，必须进行实验。因此培养实验能力是培养学生创新性和科学研究能力不可缺少的组成部分。

阅读了南昌大学刘莹教授主编的《机械基础实验教程》，我认为本书在总结过去多年教学实践经验的基础上，针对当前的教学要求和发展的需要，作出了很好的贡献。本书具有以下特点：

1. 根据教学要求、学时安排和实验条件把机械基础实验分为认知、基本实验，综合、设计性实验和研究创新性实验三大类型，既可满足多种类型和层次的要求，又明确地以培养实验研究和创新能力为目标，目标明确，层次清楚。
2. 注意加强基本实验能力的培养、教材中包括基本物理量测量技术基础，实验数据处理和误差分析，实验设计等内容，使本课程的内容更加系统和全面。
3. 强调科学方法的培养。如对实验原始记录和实验报告的要求以及对实验学习方法的指导等，对学生掌握实验科学方法和培养科学作风有重要的指导作用；对于学生今后参加科学研究工作和创新性设计实验，有参考价值 and 指导意义。
4. 有利于因材施教。本教材适用于必修、选修、开放实验等不同类型的要求，适应性强。
5. 每个实验有思考题，引导学生深入思考，提高分析能力。
6. 本书的主要实验选用了具有先进性的实验设备和方法，如滑动轴承实验、机构运动参数测试与分析、机械创新设计、慧鱼创新设计等。
7. 南昌大学在教学实践中的许多成功的经验，纳入了本书的内容。如对“全国大学生机械设计创新设计”的介绍等。

因此，我认为，本书综合了南昌大学从事机械基础实验教师多年来的教学成果，有助于推动本课程教学质量的进一步提高。

清华大学精密仪器与机械学系

吴宗泽

前 言

本书是为了适应高等院校机械类课程教学改革的需求,为加强培养具有动手实践能力、创新能力的高素质的人才,在本校现有的机械原理、机械设计基础和机械设计实验课程的基础上,经过多年的改革与实践,逐渐形成了多层次、多形式、灵活的机械基础课程实验体系。

机械基础实验是高等院校普遍开设的实验课程,对于培养学生的工程实践能力、综合设计与分析能力、科学研究能力以及创新能力起着重要的作用。针对机械基础课程的教学学时以及实验条件,将实验分为认知实验,基本实验,综合性、设计性实验,研究性、创新性实验4个不同层次,以满足不同层次学校和专业实验教学的需要,各校可以根据各自的实验教学要求、实验学时和实验条件,采取必修、选修、开放实验等灵活多样的方式开设实验。

本书主要包括9章内容:第0章绪论,包括机械基础实验的目的和意义、实验内容、学习方法等;第1章基本物理量测量技术基础,包括机械基础实验中涉及的各种参数量的测量技术与方法;第2章实验数据的误差分析与处理,包括实验数据的误差分析、回归分析等;第3章实验设计方法,包括常用的实验设计方法和设计实例;第4章认知实验,包括3个认知实验和实验指导;第5章基本实验;第6章综合性、设计性实验,包括8个综合性、设计性实验和实验指导;第7章研究性、创新性实验,包括6个实验和实验指导;第8章实验报告的撰写与格式。每一个实验后面还附有一些思考题。

参加本书编写的有南昌大学刘莹、李小兵、张文钰、石志新,刘莹担任主编。

全书由清华大学吴宗泽教授写序担任主审,吴宗泽教授对本书的编写提出了许多宝贵意见和建议,为提高本书的质量和水平给予了极大的帮助,在此表示衷心的感谢!本书涉及的一些实验项目和内容是在编者所在教研室新老教师的实验教学工作基础上加以继承和创新,有关教师为此曾付出了辛勤劳动,在此表示衷心的感谢!本书得到南昌大学的资助,编写过程中还得到南昌大学罗丽萍副教授和南昌大学机电工程学院现代设计研究所微系统与表面工程研究室的研究生们的支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

0 绪论	(1)
0.1 机械基础实验的目的和任务	(1)
0.2 机械基础实验的内容	(2)
0.3 机械基础实验的学习方法	(3)
1 基本物理量测量技术基础	(6)
1.1 测量概述	(6)
1.2 测量标准和量纲单位	(7)
1.3 力的测量	(10)
1.4 位移、速度、加速度的测量	(12)
1.5 温度的测量	(18)
1.6 转矩、功率的测量	(21)
2 实验数据的误差分析与处理	(24)
2.1 实验误差的定义	(24)
2.2 实验误差的分类	(25)
2.3 实验数据的误差分析	(31)
2.4 实验数据的处理方法	(34)
3 实验设计方法	(48)
3.1 概述	(48)
3.2 单因子实验设计	(50)
3.3 正交设计	(56)
3.4 回归设计	(70)
3.5 均匀设计	(77)
4 认知实验	(81)
4.1 概述	(81)
4.2 机构及机构组成认知实验	(81)
4.3 零件与部件认知实验	(88)
4.4 机械创新设计认知实验	(102)

5 基本实验	(113)
5.1 概述	(113)
5.2 机构运动简图测绘与分析实验	(113)
5.3 渐开线齿轮范成原理实验	(116)
5.4 渐开线齿轮几何参数测定实验	(121)
6 综合性、设计性实验	(126)
6.1 概述	(126)
6.2 螺栓连接的力学特性实验	(126)
6.3 带传动的弹性滑动与效率实验	(131)
6.4 液体动力润滑径向滑动轴承承载能力测试实验	(136)
6.5 组合轴系结构设计实验	(143)
6.6 机械传动系统性能参数测试实验	(146)
6.7 机械传动系统性能综合测试与分析实验	(148)
6.8 减速器结构与分析实验	(152)
6.9 动平衡实验	(156)
7 研究性、创新性实验	(160)
7.1 概述	(160)
7.2 材料摩擦磨损性能实验	(160)
7.3 机构运动参数测试与分析	(166)
7.4 机械系统设计及性能研究实验	(175)
7.5 机构运动方案创新设计实验	(177)
7.6 机械创新设计实践	(193)
7.7 基于慧鱼创意模型的创新设计	(195)
8 实验报告的撰写与格式	(201)
8.1 实验报告的内容	(201)
8.2 实验报告的格式	(203)
8.3 机械基础实验报告示例	(204)
附录	(210)
参考文献	(217)



绪 论

0.1 机械基础实验的目的和任务

实验是科学研究的重要方法之一,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,同时对提高生产力水平起到巨大的推动作用。实验技术在工程实践中得到了广泛的应用,对于培养学生掌握科学实验的基本方法和技能具有十分重要的意义。

“高等学校本科教学质量与教学改革工程”(以下简称“质量工程”)是教育部、财政部对提高高等教育质量而采取的具有深远意义的重要举措。提高高等学校本科教学质量,就是要全面贯彻党的教育方针,树立正确的高等教育人才培养质量观,通过改革创新,着力培养学生的社会主义人文精神和科学的创新精神,提高学生的创新能力和可持续发展能力。“质量工程”中强调实践教学与人才培养模式改革创新,通过大力加强实验、实践教学改革,推进高校实验教学内容、方法、手段、队伍、管理及实验教学模式的改革与创新,提高学生的学习和研究兴趣,培养学生动手能力和创新精神。

高等教育在探索如何实施以人的全面发展为价值取向的素质教育过程中,逐步认识到理论教学和实验教学具有同等重要的地位和作用。实验过程中涉及掌握实验仪器设备的使用、实验现象的观察、实验数据的采集与处理、实验报告的撰写等一系列实践性教学环节,有利于培养学生动手操作技能、独立工作能力、科学研究能力、创新精神和创新能力等,有效地培养学生严肃认真、一丝不苟、实事求是的科学工作作风和团结协作的精神与能力,使自身素质得到全面提高,对于今后工作更有其深远意义。

机械基础实验是高等工科院校普遍开设的基础实验,是机械基础课程中实践性、设计性很强的的重要实践环节,对于培养学生的工程实践能力、综合设计与分析能力、科学研究能力以及创新能力起着重要的作用。

针对机械基础课程的教学学时以及实验条件,将实验分为认知、基本实验,综合性、设计性实验,研究性、创新性实验3大类型,并采取必修、选修、开放实验等3种灵活多样的方式开设实验。认知、基本实验使学生对所学的理论知识有更深的认识和理解,让学生通过

实验来验证课堂所学的理论。综合性、设计性实验使得学生掌握机械系统的工作原理、承载特性、影响因素分析方法,了解典型机械零件的实验方法和力学参数、机械量的测定原理和方法,进一步了解机器性能指标的重要性,促进学生在机械设计中的能力的提高,有利于培养学生的动手实践能力、分析解决问题的能力。研究性、创新性实验重在培养学生的创新意识和创新能力。此外,通过提供开放性实验,为学有余力的同学提供个性化培养条件,实现因材施教,使优秀学生得到更好锻炼和个性化发展。

0.2 机械基础实验的内容

机械工程实验不仅涉及力、位移、速度、转矩、功率等物理量的测量技术,实验方法的设计,实验数据的误差分析与处理等实验理论与技术基础知识,还包括实验仪器设备的操作和使用、实验数据的分析以及实验报告的撰写等内容,因此机械基础实验课程既含有基础理论知识,又包括工程实践技术,是一个系统工程。本书主要由基本的机械物理量测量技术基础、实验数据处理与误差分析、实验设计、认知实验、基本实验、综合设计性实验、研究创新性实验、实验报告的撰写与格式等内容组成。

根据机械基础课程的实验体系,将实验分为认知、基本实验,综合性、设计性实验,研究性、创新性实验3个层次,采用必修、选修和开放3种方法开设实验。具体实验项目、类型,如表0-1所示。

表 0-1 机械基础实验项目

实验类型	实验名称
认知实验	机构及机构组成认知实验 零件与部件认知实验 机械创新设计认知实验
基本实验	机构运动简图测绘与分析实验 渐开线齿轮范成原理实验 渐开线齿轮几何参数测定实验
综合性、设计性实验	螺栓连接的力学特性实验 带传动的弹性滑动与效率实验 液体动力润滑径向滑动轴承承载能力测试实验 组合轴系结构设计实验 机械传动系统性能参数测试实验 机械系统性能综合测试与分析实验 减速器结构与分析实验 动平衡实验

续表

实验类型	实验名称
研究性、创新性实验	材料摩擦磨损性能实验 机构运动参数测试与分析 机械系统设计及性能研究实验 机构运动方案创新设计实践 机械创新设计实践 基于慧鱼创意模型的创新设计

0.3 机械基础实验的学习方法

通过对机械基础实验的学习和实践，学生应学会基本的机械实验方法与实验技术，具备一定的科学实验能力。

0.3.1 实验学习的方法

1. 有正确的科学理论指导

正确的科学理论指导是成功完成一个实验的根本保证，要掌握涉及实验内容的专业理论知识和实验仪器有关的测试技术，才能顺利、成功地完成实验内容，满足实验要求，达到实验目的。

2. 要观察与思考相结合

在实验观察的同时还要积极地思维，要及时发现实验过程中出现的各种现象，从而有效地获得可靠的实验数据和结果。不管是认知、基本实验，还是综合性、设计性和研究性、创新性实验，对观察到的实验现象和获得的实验数据都要认真地进行反思和探究，寻其根本。对于实验过程中出现的不理想或者意外的数据和结果，都要寻根问底，直到找到问题的症结所在。

实验学习过程中，要敢于问为什么，要培养善于思考、严谨求实的科学作风。

3. 要提高动手实践能力和创新能力

实验作为实践教学中的一个重要环节，旨在通过实验巩固、加深和拓展所学理论知识的同时，提高学生的动手实践能力，包括实验仪器和设备的操作能力、实验数据的分析能力、实验报告的撰写能力等。通过研究性、创新性实验，培养科学研究的基本素质和能力，培养创新意识、创新思维、创新技法和创新能力。

4. 要培养团队协作精神

机械基础实验与机械工程实际相联系,在一定规模和复杂程度,因此在实验过程中往往需要多人的协同合作。本课程中的很多实验都需要以小组的形式组织完成,不仅需要每个组员能独立完成部分实验工作,而且还需要成员之间具有相互沟通、交流和配合的能力,从而在实验过程中要培养团队协作精神和合作能力。

0.3.2 实验学习的步骤

实验不仅需要学生有一个正确的学习态度,而且需要有一个正确的学习方法。现将实验的学习步骤归纳成如下几方面。

1. 预习

预习是做好实验的前提和保证,预习工作可以归纳为看、查、写。

(1)“看”就是要认真阅读实验项目的有关章节、有关教科书及参考资料,做到明确目的、了解实验原理,熟悉实验内容、主要操作步骤及数据的处理方法,提出注意事项,合理安排实验时间。

(2)“查”就是要通过查阅附录或有关手册,列出实验所需的数据。

(3)“写”就是要在“看”和“查”的基础上认真做好预习笔记。

2. 讨论

实验前以提问的形式,师生共同讨论,以掌握实验原理、操作要点和注意事项。观看操作录像,或由教师操作示范,使基本操作规范化。

实验后组织课堂讨论,对实验现象、结果进行分析,对实验操作和实验结论进行评说,以达到共同提高的目的。

3. 实验

按拟定的实验方案和实验步骤操作,既要胆大,又要心细,仔细观察实验现象,认真测定实验数据,并做到边实验、边思考、边记录。

观察到的现象和测定的数据,要如实记录在报告本上。不用铅笔记录,不记在草稿纸、小纸片上。不凭主观意愿删去自己认为不对的数据,不杜撰原始数据。原始数据不得涂改或用橡皮擦拭,如有记错可在原始数据上划一道杠,再在旁边写上正确值。

实验中要勤于思考,仔细分析,力争自己解决问题。碰到疑难问题可查资料,亦可与同学或指导教师讨论。如对实验现象有怀疑,在分析和查原因的同时,可以做对照实验或自行设计实验进行核对,必要时应多次实验,从中得到有益的结论。如果实验失败,要检查原因,经指导教师同意后重做实验。

4. 实验分析

做实验仅是完成实验的一半,更为重要的是分析实验现象、整理实验数据,把直接的感性认识提高到理性思维阶段。要认真、独立完成实验报告,对实验现象进行解释,对实验数

据进行处理（包括计算、作图、误差分析），得出结论。

分析误差产生的原因，对实验现象以及出现的一些问题进行讨论，敢于提出自己的见解。对实验提出改进的意见或建议，回答问题。

5. 实验报告

要求按格式书写，字迹端正，叙述简明扼要，实验记录、数据处理使用表格形式，作图准确清楚。



基本物理量测量技术基础

1.1 测量概述

测量是指用仪器测定各种物理量的过程或行为，是工程技术领域不可或缺的技术手段和技术保证。在机械基础实验中，涉及到力、压力、位移、速度、加速度、温度、湿度、功率、转矩等基本物理量的测量。

测量包括被测量、计量单位、测量方法（含测量仪器）和测量精度等4个要素。

（1）被测量

被测量可以是力、长度、质量、时间、温度等基本物理量，也可以是速度、加速度、功率等导出量。

（2）计量单位

计量单位（简称单位）是以定量表示同种量的量值而约定采用的特定量。

（3）测量方法

测量方法是根据一定的测量原理，在实施测量过程中对测量原理的运用及其实际操作。广义地说，测量方法可以理解为测量原理、测量器具（计量器具）和测量条件（环境和操作者）的总和。在实施测量过程中，应该根据被测对象的特点（如材料硬度、外形尺寸、生产批量、制造精度、测量目的等）和被测参数的定义来拟定测量方案、选择测量器具和规定测量条件，合理地获得可靠的测量结果。

测量方法可以分为直接测量和间接测量，前者是通过与标准值进行直接比较得到被测量值，如利用尺子测量长度、天平测量质量等；后者是通过使用一个标定的系统做间接比较，例如功率测量等。

而根据测量时间的状态又可分为静态测量和动态测量，前者被测量不随时间发生变化，如物体质量的测量；后者被测量随时间发生变化，如冲击力的测量。

此外，根据测量过程是否接触物体，分为接触测量和非接触测量，前者如天平测量质量；后者如红外测量温度等。

(4) 测量精度

测量精度是测量结果与真值的一致程度。不考虑测量精度而得到的测量结果是没有任何意义的。

真值的定义为：当某量能被完善地确定并能排除所有测量上的缺陷时，通过测量所得到的量值。由于测量会受到许多因素的影响，其过程总是不完善的，即任何测量都不可能没有误差。对于每一个测量值都应给出相应的测量误差范围，说明其可信度。

测量仪器通常包括传感元件、信号转换、处理单元和输出单元等部分，如图 1-1 所示。

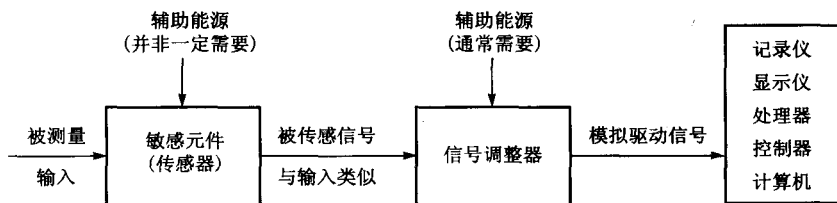


图 1-1 测量系统方框图

1.2 测量标准和量纲单位

1.2.1 测量标准

测量的过程包括获取的一个预定标准与一个被测量之间的定量比较，如图 1-2 所示。

测量标准有国际标准和国家标准。例如国家标准 GB/T 6379《测量方法与结果的准确度（正确度与精密度）》。

测量的特性包括测量不确定度、稳定性、最大允许误差、重复性、再现性等。

(1) 测量不确定度（uncertainty of measurement）指表征合理赋予被测量值的分散性，是与测量结果相联系的参数。

(2) 稳定性（stability）指测量仪器保持其计量特性随时间恒定的能力。

(3) 重复性（repeatability）指在相同测量条件（包括测量程序、测量仪器、测量人员、测量地点、短时间内重复测量等）下，对同一被测量进行连续多次测量所得结果之间的一致性，可以用测量结果的分散性定量表示。

(4) 再现性（复现性）（reproducibility）指在改变了的测量条件（测量原理、测量方法、测量仪器、测量标准、测量地点、测量人员、测量时间等）下，同一被测量的测量结果之间的一致性，可以用测量结果的分散性定量表示。

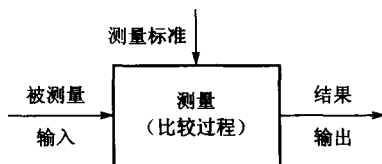


图 1-2 基本测量过程

1.2.2 量纲单位

“量纲”是被测量实体的确定特征，而“量纲单位”是被测量实体的量化基础。例如，长度是量纲，而米是长度的一个单位；时间是量纲，而秒是时间的一个单位。一个量纲是唯一的，而对应的量纲单位可能有多种。而不同的单位制必须被标准化，即必须建立不同单位之间的转换机制。

国际单位制（SI 制）于 1960 年第 11 届国际度量大会建立，1972 年 6 月，国际标准化组织（ISO）批准国际标准 1000，称为 SI 单位以及采用它们的倍数和某些其他单位的建议，该单位制经常被称为米制。它是由一组选定的基本单位和由定义公式与比例因数确定的导出单位所组成的。其中有三级测量单位：① 基本单位；② 补充单位；③ 导出单位。部分基本单位、补充单位、导出单位，分别见表 1-1、表 1-2 所示。

表 1-1 基本单位和补充单位

量	单位名称	单位符号
基本单位		
长度	米	m
质量	千克	kg
时间	秒	s
电流	安培	A
热力学温度	开尔文	K
物质的量	摩尔	mol
照明强度	坎德拉	cd
补充单位		
平面角	弧度	rad
立体角	球面弧度	sr

表 1-2 导出单位

量	单位符号	量	单位符号
电容	F	速度	m/s
电导	S	加速度	m/s ²
电感	H	角速度	rad/s
电势（电压）	V	角加速度	rad/s ²

续表

量	单位符号	量	单位符号
电阻	Ω	面积	m^2
能力 (功、势量)	J	体积	m^3
力	N	密度 (质量)	kg/m^3
频率	Hz	密度 (能量)	J/m^3
磁通量	Wb	热通量	W/m^2
磁通密度	T	力矩	$\text{N} \cdot \text{m}$
功率	W	粘度	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
压强、压力	Pa		
电荷量	C		

我国国家标准 GB 3100—1993《国际单位制及其应用》、GB 3101—1993《有关量、单位和符号的一般原则》，对国际单位制 (SI) 的单位使用方法作了规定，并与国际标准 ISO 1000:1992 和 ISO 31-0:1992 的规定一致。

在测量过程中，测量单位必须以物质形式来体现，能体现计量单位和标准量的物质形式有：光波波长、精密量块、线纹尺、各种圆分度盘等。

1.2.3 单位制之间的转换

目前常见的单位制有五种，如表 1-3 所示。

表 1-3 单位制

量	SI 制	绝对米制 (CGS)	英国工程制	绝对英制	技术英制
长度	米 (m)	厘米 (cm)	英尺 (ft)	英尺 (ft)	英尺 (ft)
时间	秒 (s)	秒 (s)	秒 (s)	秒 (s)	秒 (s)
质量	千克 (kg)	克 (g)	磅-质量 (lbm)	磅-质量 (lbm)	磅-质量 (lbm)
力	牛顿 (N)	达因 (dyne)	磅-力 (lbf)	磅-力 (lbf)	磅-力 (lbf)
能量	焦耳 (J)	尔格 (dyne · cm)	英尺 · (磅-力)	英尺 · (磅-力)	英尺 · (磅-力)
量纲常数	$1 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{N} \cdot \text{s}^2$	$1 \text{ g} \cdot \text{cm}/\text{dyne} \cdot \text{s}^2$	$3.217 \text{ lbm} \cdot \text{ft}/\text{lbf} \cdot \text{s}^2$	$1 \text{ lbm} \cdot \text{ft}/\text{poundal} \cdot \text{s}^2$	$1 \text{ slug} \cdot \text{ft}/\text{lbf} \cdot \text{s}^2$

1.3 力的测量

质量、时间和位移是基本测量量纲，力是导出单位。力的测量在机械工程领域的应用非常普遍，如物体运动过程中的摩擦力测量、机械加工过程中的切削力测量等。

根据牛顿第二定律，使 1 kg 质量的物体产生 1 m/s^2 的加速度所需要的力定义为 1 N （牛顿，简称牛）。牛顿单位之间的关系为

1 MN （兆牛） $=10^6\text{ N}$ ， 1 kN （千牛） $=10^3\text{ N}$ ， 1 mN （毫牛） $=10^{-3}\text{ N}$ ， $1\text{ }\mu\text{N}$ （微牛） $=10^{-6}\text{ N}$ ， 1 nN （纳牛） $=10^{-9}\text{ N}$ 。

力的测量可分为直接测量和间接测量，也可分为机械测量和传感器测量。

力的测量大多数是借助于传感器来进行的。测力传感器的种类有很多，按工作原理可分为电阻应变式、压电式、电感式、电容式、压磁式和压阻式等，表 1-4 列出了常用的测力传感器。

表 1-4 常用的测力传感器

传感器类型	基本原理	测量范围	应用对象	特点
电阻应变式	基于电阻应变片受力产生应变而导致电阻变化	$\mu\text{N} \sim \text{MN}$	静态、准静态、动态	测量方便、简单、惯性小、频率响应好、温度特性稍差
压电式	基于石英晶体受外力作用而产生电荷	$\text{mN} \sim \text{MN}$	准静态、动态、瞬态力	灵敏度高、线性度好、动态特性好
电感式	基于弹性元件受力产生位移而导致电感量变化	$\text{mN} \sim \text{MN}$	动态	灵敏度高、零点附近非线性较大
电容式	受力元件作为电容的一部分，受力导致电容变化	$\text{N} \sim \text{MN}$	静态、动态	灵敏度较高、主要用于大载荷测量
压磁式	测量磁铁材料受力引起磁阻变化	$\text{kN} \sim \text{MN}$	静态、准静态	抗干扰好、线性度好、适合于恶劣工况、用于大载荷测量
压阻式	基于掺杂半导体材料受力产生电阻率变化	$\text{mN} \sim \text{MN}$	静态、动态	体积小、质量轻、适合恶劣条件、但受温度影响较大

以下主要介绍电阻应变式力传感器测量。

1. 电阻应变片的原理

设有长为 l 、半径为 r 、电阻率为 ρ 的圆形截面金属丝，其电阻为