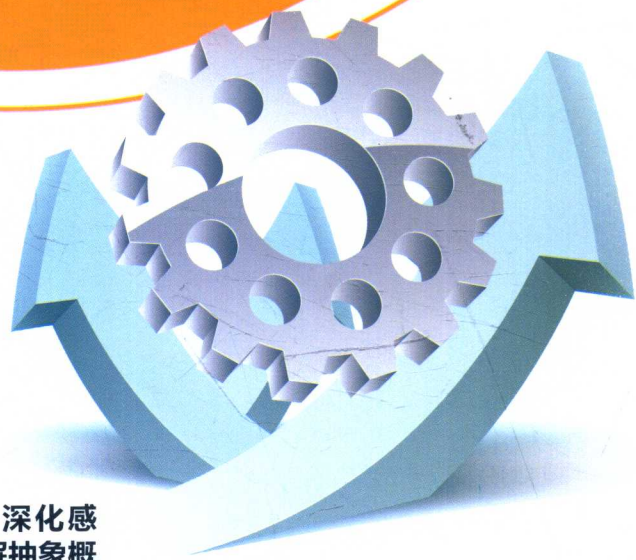




普通高等教育机械类应用型人才及卓越工程师培养规划教材

# 机械基础实验

◎ 郭宏亮 魏衍侠 主 编



➤ 由不同层次模块构成，涵盖基础实验，内容丰富

➤ 有助于深化感性认识、理解抽象概念和运用基础理论

➤ 培养实际工作能力、科研能力、综合设计与创新能力



中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育机械类应用型人才及卓越工程师培养规划教材

# 机械基础实验

郭宏亮 魏衍侠 主 编

张 珂 王锋波 姜永成 副主编

李恒宇 王 涛 刘云平 王勇智 参 编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是按照高等工科院校机械类本科学生的培养计划,根据机械基础实验课程教学的基本要求而编写的。全书分为7章:绪论、实验数据测量和数据处理、机械零件几何量的精密测量、金属材料性能测定、机械机构的组成和运动、液压与气压传动、机械创新实验。

本书自成体系,系统地介绍了机械基础类课程的基本实验项目、实验方法、实验过程、实验原理等内容。

本书主要作为高等院校机械类及近机类专业的机械基础实验教材,也可供其他有关专业的师生和工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

机械基础实验/郭宏亮,魏衍侠主编. —北京:电子工业出版社,2016.1  
普通高等教育机械类应用型人才及卓越工程师培养规划教材  
ISBN 978-7-121-27606-4

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第277636号

策划编辑:郭穗娟

责任编辑:郭穗娟 特约编辑:刘丽丽

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

装 订:北京中新伟业印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编100036

开 本:787×1092 1/16 印张:12.75 字数:323千字

版 次:2016年1月第1版

印 次:2016年1月第1次印刷

定 价:39.80元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线:(010)88258888。

《普通高等教育机械类应用型人才及卓越工程师培养规划教材》

## 专家编审委员会

主任委员 黄传真

副主任委员 许崇海 张德勤 魏绍亮 朱林森

委员 (排名不分先后)

李养良	高 荣	刘良文	郭宏亮	刘 军
史岩彬	张玉伟	王 毅	杨玉璋	赵润平
张建国	张 静	张永清	包春江	于文强
李西兵	刘元朋	褚 忠	庄宿涛	惠鸿忠
康宝来	宫建红	宁淑荣	许树勤	马言召
沈洪雷	陈 原	安虎平	赵建琴	高 进
王国星	张铁军	马明亮	张丽丽	楚晓华
魏列江	关跃奇	沈 浩	鲁 杰	胡启国
陈树海	王宗彦	刘占军	刘仕平	姚林娜
李长河	杨建军	刘琨明	马大国	

# 前 言

实验教学是理工科教学中重要的组成部分，是深化感性认识、理解抽象概念、运用基础理论的主要方法，对培养学生实际工作能力、科学研究能力、综合设计与创新能力，具有十分重要的作用。

在实验教学的过程中，学生在教师的指导下，根据在理论教学中获得的理论知识，借助实验室的设备、仪器等特定条件，选择适当的方法，对理论中的对象进行实验研究，将其固有的某些属性呈现出来，以揭示其本质及规律，使学生完成从理性到感性、再回到理性的认识过程。实验教学既是加深学生对基本理论的记忆和理解的重要方式，是理论学习的继续、补充、扩展和深化，又是帮助学生扩大知识面的重要手段；也是加强学生的智能培养，增强其获取知识和运用知识的能力，提高其用科学方法进行探索的能力，还可以培养学生具有科技工作者的综合实验能力。基于实验教学的重要性，编者特地编写了本书。

本书是按照高等工科院校机械类本科学生的培养计划，根据机械基础实验课程教学的基本要求编写而成的，也是按照单独设置机械基础实验课程的思想而编写的，力求构建系统化的机械基础实验课程体系。本书内容涵盖数据测量与处理的基本知识、互换性与技术测量、工程材料与机械制造基础、材料力学、机械原理、机械设计、液压与气压传动、机械创新设计等课程的基本实验，内容丰富。

本书力求加强培养学生的实践操作、数据分析、计算机应用、机电一体化、机械创新设计等能力。全书内容由不同层次模块构成，自成体系，各个院校可以根据自己学校的具体教学实际情况进行取舍。本书可供大、中专工科院校机械类专业（机械设计制造及其自动化、机械电子工程、过程装备与控制、车辆工程等）的师生做基本实验使用。

本书由聊城大学郭宏亮和魏衍侠担任主编，编写分工如下：第1、2章由郭宏亮编写，第3章由张珂编写，第4章由王锋波、刘云平编写，第5章由王勇智、李恒宇编写，第6章由魏衍侠编写，第7章由王涛、姜永成（佳木斯大学）编写。全书由郭宏亮统稿。

由于本书内容较为广泛、编者水平有限，书中难免有疏漏和不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

2015年10月

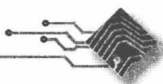
# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 机械基础实验在教学中的作用及意义	1
1.2 实验教学的目的	1
1.3 实验课程的要求	2
第 2 章 实验数据测量技术和数据处理	4
2.1 测量基础概述	4
2.2 测量基本知识	4
2.2.1 测量标准	4
2.2.2 测量的单位	5
2.2.3 国际单位制	5
2.2.4 基本单位和导出单位	5
2.3 基本物理量的测量	6
2.3.1 力的测量	7
2.3.2 位移、速度、加速度的测量	9
2.3.3 温度的测量	15
2.3.4 转矩的测量	19
2.3.5 功率的测量	20
2.3.6 流量测量	22
2.4 实验数据误差分析与处理	23
2.4.1 误差的概念	23
2.4.2 误差的分类	23
2.4.3 测量精度	24
2.4.4 有效数字	24
2.4.5 实验数据处理	25
第 3 章 机械零件几何量的精密测量	29
3.1 几何尺寸的精密测量	29
3.1.1 用立式光学计测量塞规外径	29
3.1.2 用内径百分表测量内径	33
3.2 形状和位置误差的测量	35
3.2.1 合像水平仪测量直线度	35
3.2.2 用双向自准直仪测量直线度误差	39
3.3 表面粗糙度测量	43



3.4	角度和锥度测量 .....	47
3.4.1	万能角度尺的使用 .....	47
3.4.2	用正弦尺测量圆锥角偏差 .....	51
3.5	螺纹测量 .....	54
3.6	圆柱齿轮参数和误差测量 .....	58
3.6.1	公法线平均长度偏差与公法线长度变动测量 .....	58
3.6.2	齿厚偏差测量 .....	62
<b>第 4 章</b>	<b>金属材料性能测定 .....</b>	<b>65</b>
4.1	金属材料表面硬度测定 .....	65
4.2	金属的塑性变形和再结晶实验 .....	70
4.3	铁碳合金试样制备及其平衡组织分析 .....	73
4.4	常用铸铁的显微分析实验 .....	78
4.5	钢的普通热处理实验 .....	81
4.6	钢的淬透性测定实验 .....	84
4.7	金属材料的拉伸、压缩实验 .....	87
4.8	金属材料扭转实验 .....	93
4.9	材料的冲击实验 .....	96
4.10	弹性模量和泊松比测定实验 .....	98
4.11	纯弯曲梁正应力测定 .....	101
4.12	薄壁圆筒弯扭组合应力测定 .....	105
<b>第 5 章</b>	<b>机械机构的组成和运动 .....</b>	<b>111</b>
5.1	常用机构的认识、分析与测绘 .....	111
5.2	渐开线齿轮范成实验 .....	115
5.3	渐开线直齿圆柱齿轮的参数测定 .....	118
5.4	转子动平衡实验 .....	124
5.5	机组运转及飞轮调节实验 .....	128
5.6	螺栓连接综合实验 .....	132
5.7	带传动实验 .....	137
5.8	齿轮传动效率测定 .....	141
5.9	液体动力润滑轴承油膜压力与摩擦测试实验 .....	146
5.10	减速器的拆装与结构分析实验 .....	149
<b>第 6 章</b>	<b>液压与气压传动 .....</b>	<b>153</b>
6.1	液压元件结构观察及方向控制回路实验 .....	153
6.2	液压传动压力控制回路实验 .....	159
6.3	液压传动速度控制回路实验 .....	162
6.4	液压传动多缸运动控制回路实验 .....	167
6.5	液压传动油泵性能测定实验 .....	170





6.6	液压传动溢流阀静、动态性能实验.....	174
6.7	电气联合控制多缸顺序动作回路演示实验.....	179
<b>第 7 章</b>	<b>机械创新设计实验</b> .....	<b>182</b>
7.1	概述 .....	182
7.2	机械传动运动参数测试与分析.....	184
7.3	机械传动系统方案的设计 .....	188
7.4	CAD/CAM/CAE 综合实验.....	191
7.5	机器人设计与制作综合实验 .....	192
<b>参考文献</b>	.....	<b>194</b>





# 第 1 章 绪 论

## 1.1 机械基础实验在教学中的作用及意义

实验教学是理工科教学中重要的组成部分，是深化感性认识、理解抽象概念、运用基础理论的主要方法，对培养学生实际工作能力、科学研究能力、综合设计与创新能力，具有十分重要的作用。

对实验这一概念，从不同的角度有不同的认识和看法，但从实验的本质而言，比较准确的概念应该是指为阐明或检验某一现象，在特定的条件下，观察其变化和结果的过程中所做的工作。也就是说人们按照一定的研究目的，借助某些工具、仪器、设备和特定环境，人为地控制或模拟自然现象，对自然现象和事物进行精确地、反复地观察和测试，以探索内在的规律性。

随着科学技术的发展，实验的广度和深度不断拓展，科学实验具有越来越重要的作用，成为自然科学理论的直接基础。许多伟大的发现、发明和突破性理论都来自于科学实验。实验是理论的源泉、科学的基础，是将新思想、新设想、新信息转化为新技术、新产品的摇篮。

德国著名物理学家、X射线的发现者威廉·康拉德·伦琴曾指出：“实验是最有力量、最可靠的手段，它能使我们揭示自然之谜，实验是判断假设应当保留还是放弃的最后鉴定。”

高校的绝大多数科研成果和高科技产品，均是在实验室中诞生的。科学实验是探索未知、推动科学发展的强大武器，对实验素质和能力要求较高的机械工程专业的学生来说具有重要意义。

## 1.2 实验教学的目的是

### 1. 验证理论，扩大知识面

在实验教学的过程中，学生在教师的指导下，根据在理论教学中获得的理论知识，借助于实验室的设备、仪器等特定条件，选择适当的方法，对理论中的对象进行实验研究，将其固有的某些属性呈现出来，以揭示其本质及规律，使学生完成从理性到感性、再回到理性的认识过程。实验教学既是加深学生对基本理论的记忆和理解的重要方式，又是理论学习的继续、补充、扩展和深化，是帮助学生扩大知识面的重要手段。



### 2. 开发智力, 培养实验能力

实验教学的核心是加强学生的智能培养, 增强其获取知识和运用知识的能力, 提高其用科学方法进行探索的能力, 也就是培养学生具有科技工作者的综合实验能力。它包括两个方面: 一是基本实验能力, 要求掌握本专业常用科学仪器的基本原理和测试技术、技巧, 熟悉本专业的基本实验方法和一般实验程序、掌握应用计算机的能力等; 二是创造性实验能力, 所做实验的总体设计、实验方向的选择、实验方案的确定、综合性分析和新知识的探索等。

### 3. 探索未知知识领域, 完善科学理论

实验教学的发展是让学生结合专业实验、毕业设计和毕业论文等, 开发部分设计性的和学生自拟的大型综合实验项目, 或直接参与科学研究和新产品开发等工作。使实验教学不仅是学习已知的基本理论和培养实验能力, 而且是探索未知的知识领域, 开发新产品, 总结新的科学理论。

### 4. 加强品德修养, 培养基本素质

实验教学在育人方面有其独特的作用。不仅可以授人以知识和技术, 培养学生动手能力与分析问题、解决问题的能力, 而且影响学生的世界观、思维方法和工作作风。通过实验教学让学生学习辩证唯物主义的观点, 树立艰苦奋斗的献身精神, 养成实事求是、一丝不苟的严谨作风, 培养团结协作、密切配合、讲科学道德的良好思想品德, 使学生具备一个科技工作者不可缺少的基本素质。

## 1.3 实验课程的要求

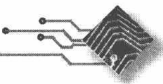
(1) 参加实验的同学在实验前要做好本次实验的预习并写出预习报告。不预习或预习没有达到要求者, 不准上实验课。

(2) 按时上课, 不得迟到、早退或缺课。上实验课时, 要提前十分钟进入实验室, 以便做好实验前的准备工作。

(3) 严格按照实验指导教师的安排和要求, 独立认真地完成各项实验任务, 并做好实验记录。

(4) 在实验的过程当中, 要遵守实验室的各种规章制度; 爱护仪器设备; 注意节约原材料; 不要做与实验无关的事情。

(5) 各项实验设备在使用前要进行详细检查, 实验做完后要及时切断电源, 将仪器设备工具等整理摆放好, 发现丢失或损坏应立即报告。



(6) 要遵守设备仪器的操作规程，注意人身和设备的安全。学生不严格遵守实验室安全操作规程、违反操作规程或不听从教师指导造成他人或自身受到伤害的，由本人承担责任；造成仪器损坏的应按照规定进行赔偿。

(7) 要保持实验室内和仪器设备的清洁和整齐美观。工作台面要干净并要搞好室内卫生。

(8) 在离开实验室之前，要主动要求指导教师查验仪器设备等，并由指导教师在课内用纸上签字。

(9) 对实验结果要进行分析、整理和计算，认真填写实验报告并及时递交实验报告。不得弄虚作假，不得抄袭他人的实验记录和实验报告。若有违反者，则取消该实验课成绩。

# 第2章 实验数据测量技术和数据处理

## 2.1 测量基础概述

测量一般是指使用计量器具测定各种物理量的过程和行为，是生产活动和工程技术不可或缺的技术基础。工程中经常会涉及力、压力、位移、速度、加速度、温度、功率、转矩和流量等基本物理量的测量。

一个完整的测量过程应包括测量对象、计量单位、测量方法和测量精确度4个要素。

### 1) 测量对象

测量对象可以是力、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）是以定量标示同种量的量值而约定采用的特定值。

### 3) 测量方法

测量方法是指测量时所采用的方法、计量器具和测量条件的综合。在实施测量过程中，应该根据测量对象的特点（如外形尺寸、生产批量、制造精度等）和测量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。

测量方法可以分为以下几种。

(1) 直接测量：通过与标准值进行直接比较得到被测量值，如用游标卡尺测量长度等。

(2) 间接测量：通过使用一个标定的系统做间接比较，如功率测量等。

(3) 静态测量：被测物理量不随时间发生变化，如物体质量的测量。

(4) 动态测量：被测物理量随时间发生变化，如冲击力的测量。

(5) 接触测量：测量过程中仪器的测量头与被测量物体直接接触，如液体压力测量等。

(6) 非接触测量，测量过程中仪器的测量头与被测量物体之间没有直接接触，如红外测温等。

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。

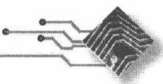
### 4) 测量精确度

测量精确度是测量结果与真值的一致程度。任何测量过程不可避免地会出现测量误差，不考虑测量精度而得到的测量结果是没有任何意义的。对于每一个测量值都应给出相应的测量误差范围，说明测量结果的可信度。

## 2.2 测量基本知识

### 2.2.1 测量标准

一般而言，测量结果的获取是通过一个预定标准与一个被测量之间的定量比较获得。



测量标准主要包括国际标准（ISO）和国家标准（GB）。测量标准充分强调了测量的四个基本特性，即测量不确定度、稳定性、重复性和再现性。

（1）测量不确定度：指表征合理赋予被测量值的分散性。

（2）稳定性：指计量器具保持其计量特性随时间恒定的能力。

（3）重复性：指在相同测量条件下（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），同一被测量连续多次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。

（4）再现性：指在已改变的测量条件（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。

### 2.2.2 测量的单位

为了测量某物理量且得到一个被他人承认和理解的测量结果，必须经过双方协议建立一个基本的测量单位。当使用数字来对物质的属性进行量化时，需要一个能够用于这些物理量的单位制，这个单位制应该具有以下特征：

（1）全面详尽。

（2）国际公认并广泛采用。

（3）使用方便。

（4）能够定期审核和修正。

在科学技术领域，国际单位制是被国际上广泛使用的最通用的单位制，通常简称为 SI。

### 2.2.3 国际单位制

国际单位制是在米制基础上发展起来的单位制，于 1960 年第十一届国际计量大会通过，推荐各国采用。1972 年 6 月，国际标准化组织（ISO）批准国际标准 ISO 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。

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）的单位使用方法做了规定。

### 2.2.4 基本单位和导出单位

国际单位制有三级测量单位：①基本单位；②辅助单位；③导出单位。国际单位制 SI 由 7 个基本单位组成，如表 2-1 所示。国际单位制有两个辅助单位，即弧度（rad）和球面度（sr）。由国际单位制基本单位组合而产生的单位称为导出单位。例如，平均速度  $v$  由距离  $l$  和时间  $t$  通过下面的等式组合而成，即

$$v = \frac{l}{t} \quad (2-1)$$



由基本单位可得平均速度的单位,即速度单位 $=\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,也可以写作 $\text{m/s}$ 或 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。有些导出单位没有专有的名称,有些则有其专有单位名称,如力(牛顿),能量(焦耳),在表2-2中给出了国际单位制中部分常用的导出单位。

表 2-1 国际单位制中的基本单位

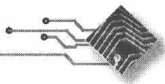
量的名称	物理量符号	单位名称	单位符号
长度	$l$	米	m
质量	$m$	千克	kg
时间	$t$	秒	s
热力学温度	$T$	开尔文	K
电流	$I$	安培	A
物质的量	$n$ (V)	摩尔	mol
发光强度	$I$ (IV)	坎德拉	cd

表 2-2 国际单位制中的部分常用导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	用 SI 基本单位表示法
力	牛顿	N	$\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
压力	帕斯卡	Pa	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$
力矩	牛顿米	M	$\text{N}\cdot\text{m}$
能量、功	焦耳	J	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$
功率	瓦特	W	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$
速度	米每秒	v	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
加速度	米每二次方秒	a	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
角速度	弧度每秒	$\omega$	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
角加速度	弧度每二次方秒	$\varepsilon$	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$
频率	赫兹	Hz	$\text{s}^{-1}$
电势差、电压	伏特	V	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{A}^{-1}$
电荷	库仑	C	$\text{s}\cdot\text{A}$
电容	法拉	F	$\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^4\cdot\text{A}^2$
电阻	欧姆	$\Omega$	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{A}^{-2}$
电导	西门子	S	$\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^3\cdot\text{A}^2$
电感	亨利	H	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{A}^{-2}$
磁通	韦伯	Wb	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{A}^{-1}$
磁感应强度	特斯拉	T	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{A}^{-1}$
面积	平方米	A (S)	$\text{m}^2$
密度	千克每立方米	$\rho$	$\text{kg}/\text{m}^3$

## 2.3 基本物理量的测量

在机械工程领域有很多种物理量,最常见的基本物理量有力、力矩、位移、速度、加速度、温度、功率和流量等。这些物理量的组合体现了机械部件或机械系统状态的基本信



息, 对这些基本物理量的测量可以评判(直接或间接)机械系统的状态和属性。机械基础实验的主要内容就是对上述这些基本物理量进行测量。

### 2.3.1 力的测量

力的测量在机械工程领域的应用非常普遍, 力的测量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。从国际单位制可以看出, 力不是一个基本单位, 而是导出单位。根据牛顿第二定律, 使 1kg 质量的物体产生 1 m/s<sup>2</sup> 的加速度所需要的力定义为 1N (牛顿, 简称牛) 牛顿单位之间的关系为 1MN (兆牛) = 10<sup>6</sup>N, 1kN (千牛) = 10<sup>3</sup>N, 1mN (毫牛) = 10<sup>-3</sup>N, 1μN (微牛) = 10<sup>-6</sup>N, 1nN (纳牛) = 10<sup>-9</sup>N。

力的测量大多数是借助于测力传感器来进行的。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、压磁式和压阻式等, 表 2-3 列出了常用测力传感器的情况。

表 2-3 常用测力测量方法

力传感器类型	测量原理	测量范围	应用场合	测量特点
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	N~MN	静态、准静态、动态力	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	mN~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	mN~MN	动态力	灵明度高、零点附近非线性大
电容式	受力元件作为电容的一部分, 受力导致电容变化	N~MN	静态、动态力测量	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	kN~MN	静态、准静态	抗干扰好、线性度好、适用于恶劣工况, 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	mN~MN	静态、动态	体积小、质量轻、适合恶劣条件、受温度影响较大

#### 1. 电阻应变式力传感器

电阻应变式力传感器(图 2-1)是被测力作用在弹性元件上, 而它的变形又被其上的电阻应变片所感受, 即通过被测力引起应变片伸缩变形导致电阻变化来获得应变, 进而得到应力和力。

电阻应变片的结构如图 2-2 所示, 一般由敏感栅(金属丝或箔)、引出线、黏合剂、覆盖层和基底组成。敏感栅是转换元件, 它把感受到的应变转换为电阻变化; 基底是用来将弹性体表面应变准确地传送到敏感栅上, 并起到敏感栅与弹性体之间的绝缘作用; 覆盖层起着保护敏感栅的作用; 黏合剂是把敏感栅与基底粘贴在一起; 引出线连接测量导线。工作时, 将应变片用黏合剂粘贴在弹性体上, 弹性体受外力作用变形所产生的应变就会传递







到应变片上，从而使应变片电阻值发生变化，通过测量阻值的变化，就能得知外界测量力的大小。贴片时，应选择最能反映被测应力的位置布片，且应沿主应力方向贴片，避开非线性区。

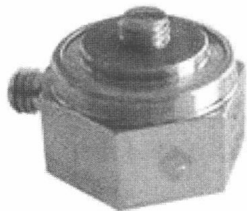


图 2-1 电阻应变式力传感器

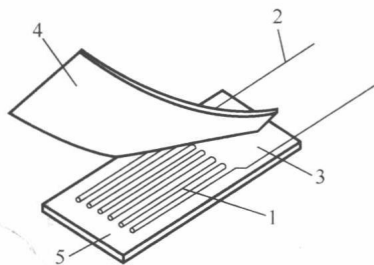


图 2-2 电阻应变片结构示意图

1—敏感栅；2—引出线；3—黏合剂；4—覆盖层；5—基底

在实际应用中，通常采用测量电桥将应变片的电阻变化量转换成电信号，如图 2-3 (a) 所示。采用直流电源的测量电桥根据不同的连接方式可以分为半桥单臂连接、半桥双臂连接和全桥连接等，其连接方式分别如图 2-3 (b)、图 2-3 (c)、图 2-3 (d) 所示。通常情况下，测量电桥中各电阻具有相同的阻值，即  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$ ，设为  $U_0$  和  $R_0$  定值，则有

$$U = (\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4) \frac{U_0}{4R_0} \quad (2-2)$$

式中， $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$  分别为电阻  $R_1, R_2, R_3, R_4$  的变化量。

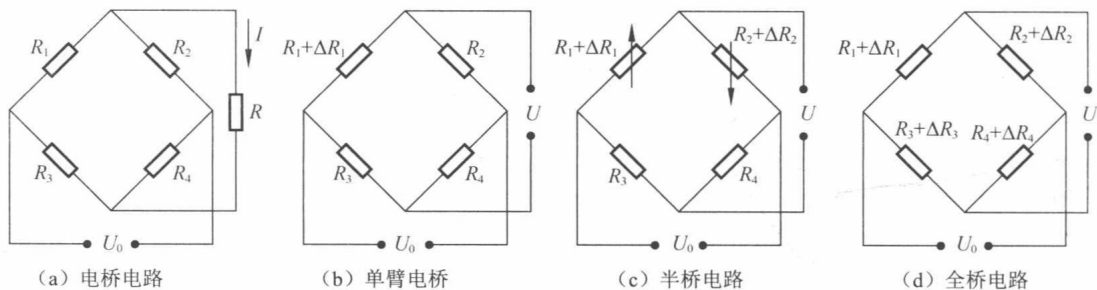


图 2-3 直流测量电桥与其连接方式

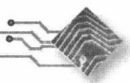
式 (2-2) 反映了测量电桥的和差特性，即相对两桥电阻变化所产生的输出电压等于该两桥臂阻值变化所产生的输出电压之和，相邻两桥臂电阻变化所产生的输出电压等于该两桥臂阻值变化所产生的输出电压之差。

对于半桥单臂电桥，可得

$$U = \frac{\Delta R U_0}{4R_0} \quad (2-3)$$

对于半桥双臂电桥，若  $\Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R$ ，则

$$U = \frac{\Delta R U_0}{2R_0} \quad (2-4)$$



对于全桥, 若  $\Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R_3 = -\Delta R_4 = \Delta R$ , 则

$$U = \frac{\Delta R U_0}{R_0} \quad (2-5)$$

值得注意的是, 电阻应变片力传感器是靠电阻值来度量应变和应力的, 存在温度影响应变片电阻变化的温度效应, 因此, 在有较大温度变化的场合, 应按和差特性布置补偿应变片接入电路电桥, 以消除温度的影响。

## 2. 电感式传感器测力

电感式力传感器是利用磁性材料和空气磁导率不同, 压力作用在膜片上靠膜片改变空气气隙大小, 去改变固定线圈的电感, 电路中这种电感变化变为相应的电压或电流输出, 将测量力变为电量达到测力的目的。

电感式力传感器按磁路的特性可分为变磁阻和变磁导两种。它的特点是灵敏度高、输出较大、结构牢固、对动态加速度干扰不敏感, 但不适用于高频动态测量, 测量仪器较笨重。

## 3. 压阻式半导体传感器测力

压阻式半导体力传感器是由平面应变传感器发展起来的一种新型传感器。在国内外受到普遍的重视, 它的特点是结构简单、频响高、体积小、灵敏度高、输出电平大。

传感器的核心部件是一个硅膜片, 它是用集成电路工艺在膜上制成四个等值电阻, 组成惠斯登电桥。硅片被支撑在一个硅环上, 当力施于硅膜片时, 由于硅的压阻效应, 使四个桥臂阻值发生了变化, 造成电桥不平衡, 即得相应的电压输出。工作时, 膜片感受力的作用而产生变形, 应力在膜片不同位置上有很大差异。在膜片受力时, 边缘和中心区域的应力最大, 且方向相反, 因而电桥基本电阻应放在这一区域。

### 2.3.2 位移、速度、加速度的测量

位移、速度、加速度是描述物体运动的重要参数。位移是一个基本测量量纲, 可以直接测量, 速度和加速度是导出量纲, 需要间接测量。

位移分为直线位移和角位移; 速度可分为线速度和角速度, 也可分为瞬时速度和平均速度; 加速度可以分为线加速度和角加速度, 也可分为瞬时加速度和平均加速度; 位移、速度、加速度的测量为其他机械量的测量提供了重要的基础, 因而在机械测量中占有重要的地位。

#### 1. 位移的测量

位移的测量是一种最基本的测量工作, 它的特性是测量空间距离的大小。按照位移的特征, 可分为线位移和角位移。线位移是指机构沿某一条直线移动的距离, 角位移是机构沿着某一定点转动的角度。这里列出常用的位移测量方法如表 2-4 所示。

