



普通高等教育机械类国家级特色专业系列规划教材



机械原理与机械设计实验教程

闫玉涛 李翠玲 张风和 主 编



科学出版社

普通高等教育机械类国家级特色专业系列规划教材

机械原理与机械设计实验教程

闫玉涛 李翠玲 张风和 主 编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是在机械原理与机械设计课程教学体系及内容改革研究和实践的基础上编写而成的,紧密结合机械原理与机械设计课程实验教学,以培养学生的创新能力和实践动手能力为目标,加强学生对机械原理与机械设计的基本理论的理解,提高学生的基本技能。

全书共分6章。第1章阐述了实验课程的意义、性质、任务和要求;第2章介绍常用传感器、测量误差和实验数据的分析和处理方法;第3章介绍机械原理课程实验;第4章介绍机械设计课程实验;第5章介绍虚拟设计与仿真实验;第6章介绍科技创新实践。许多综合型、设计型、创新型的实验项目及科技实践为培养全面素质的创新型人才提供了基础。

本书可作为高等工科学学校本科机械类专业机械原理和机械设计课程的实验教材,也可作为有关教师、工程技术人员和科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机械原理与机械设计实验教程 / 刁玉涛, 李翠玲, 张凤和主编. —北京: 科学出版社, 2015.8

普通高等教育机械类国家级特色专业系列规划教材

ISBN 978-7-03-045323-5

I. ①机… II. ①刁…②李…③张… III. ①机构学—实验—高等学校—教材②机械设计—实验—高等学校—教材 IV. ①TH111-33②TH122-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 184559 号

责任编辑: 毛 莹 张丽花 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 霍 兵 / 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>

三河市骏志印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2015 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015 年 8 月第一次印刷 印张: 14

字数: 340 000

定价: 39.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

机械原理与机械设计课程实验教学是培养学生基本实验技能和创新设计能力,以及高等工科大学机械类专业教学中不可缺少的实践性教学环节。为培养能够适应现代化建设需要的高级工程技术人员,机械原理与机械设计课程实验需要不断的深化改革,探索出一条新路。为便于机械原理与机械设计课程实验教学,编者基于多年的教学经验和教学改革成果,编写了这本具有特色的实验教材。

本书以培养学生动手能力、创新能力和综合设计能力为目标,以机械原理和机械设计课程实验系统为主线,对实验教学体系进行新的构建。通过对实验项目重新开发和配置,改革原有的单一验证型实验项目,开发了综合型、设计型、创新型及研究型的实验项目,实现了实验内容由单一型、局部型向综合型、设计型的转变,实验测试手段实现了手动测试和计算机辅助测试的综合。

全书共6章。第1章和第2章为机械原理和机械设计课程设计实验基础理论,包括绪论、常用传感器及数据处理方法;第3章和第4章包括基本型、设计型、综合型、创新型实验项目18项;第5章为虚拟实验项目;第6章为研究型项目。

本书由闫玉涛、李翠玲、张风和担任主编,参加编写的还有孟祥志、宋万里、杨强、马交成、张禹、郭瑜、印明昂等。本书由东北大学孙志礼教授主审。在本书编写过程中得到了东北大学机械工程与自动化学院现代传动与数字化技术研究所教师和机械基础实验中心教师的积极配合和全力支持,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中若存在不妥之处,殷切希望广大读者批评指正,以便再版时修改。

编 者

2015年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 实验课程的目的和意义	1
1.2 实验课程的建设体系和内容	1
1.3 实验课程的性质和任务	4
1.4 实验课程的要求和学习方法	5
第 2 章 常用传感器及数据处理方法	6
2.1 常用传感器	6
2.2 实验数据处理方法	25
第 3 章 机械原理课程实验	49
3.1 机构及零部件认知	49
3.2 机构运动简图测绘与分析	55
3.3 平面机构组合创新设计与运动分析	60
3.4 空间机构创新设计搭接	71
3.5 轮系创新设计搭接	74
3.6 渐开线齿轮范成原理及直齿圆柱齿轮基本参数测量与分析	83
3.7 凸轮机构运动参数测试	88
3.8 周转轮系传动效率测试	93
3.9 刚性转子动平衡	96
第 4 章 机械设计课程实验	101
4.1 典型机械零件失效分析	101
4.2 螺栓连接静、动态测试	106
4.3 多功能螺栓组连接特性综合测试	112
4.4 多种螺旋传动参数与效率测试	115
4.5 带传动效率测试分析	124
4.6 齿轮传动效率测试分析	129
4.7 滚动轴承性能测试	132
4.8 流体动压滑动轴承性能测试	137
4.9 机械传动性能综合测试	142

第 5 章 虚拟设计与仿真实验	147
5.1 连杆机构虚拟设计与仿真	147
5.2 凸轮机构虚拟设计与仿真	160
5.3 组合机构虚拟设计与仿真	166
5.4 转子平衡虚拟样机仿真分析	171
第 6 章 科技创新实践	180
6.1 摩擦、磨损、润滑实验研究	180
6.2 “慧鱼”创意设计与制作	203
参考文献	218

第1章 绪 论

1.1 实验课程的目的和意义

实验教学是理工科教学中的重要环节,是学生获取知识的重要途径,对培养学生实际工作能力、科学研究能力和创新能力具有非常重要的意义。教育部《国家教育事业发展规划第十二个五年规划》指出,面向当今世界的大发展、大调整、大变革时期和科技创新的新突破,迎接日益加剧的全球人才、科技和教育竞争,迫切需要全面提高教育质量,加快拔尖创新人才培养,提高高等教育学校的自主创新能力,推动“中国制造”到“中国创造”的转变。实施“本科教学工程”,加大教学投入。加强图书馆、实验室、实践教学基地、工程实训中心等基本建设,加强社会实践、岗位实习和学生参与科学研究等关键环节。实验教学是学生实践的重要部分,关系到学生创新能力的培养。

实验一般多指科学实验,按照一定的目的,运用相关的仪器设备,在人为控制条件下,模拟自然现象进行研究,认识自然界事物的本质和规律。实验是纯化、简化或强化和再现科学研究对象,延缓或加速自然过程,为理论概括准备充分可靠的客观依据,可以超越现实生产所及的范围,缩短认识周期。纵观机械的发展史,人类从使用原始工具到原始机械、古代机械、近代机械到今天的智能机器人、宇航飞机等现代机械,都历经了科学实验的探索和验证。随着科学技术的发展,科学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是来自科学实验。据文献统计,诺贝尔物理奖自1901年以来的奖项中,有72%以上是授予实验项目的。实验工作对理论性极强的物理学都很重要,而对实践素质和能力要求更高的机械工程专业的学生来说,其重要性就更是不言而喻了。

科学实验是理论的源泉、科学的基础、发明的沃土、创新人才的育床,是将新思想、新设想、新信息转化为新技术、新产品的孵化室,甚至是高科技转化为市场的中试基地。高等院校的绝大多数科研成果和高科技产品均是在实验室里诞生的,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、增强综合国力具有重要意义。

1.2 实验课程的建设体系和内容

机械原理与机械设计课程实验是机械类专业的一门主干技术基础实验课程,在机械本科生教学体系中占有十分重要的地位,是教学中重要的组成部分,对高校实现知识、能力、素质并重的培养目标起着关键作用。随着教学改革的不深入,培养学生的实践动手能力越来越重要,国内重点学校正逐步将其列为独立的实践教学环节。因此,为了适应教学发展的需要,提高课程的教学质量,必须配有独立的实验教材与之相适应,对学生在实验方法和实验内容上进行全面的指导,使学生能够在一定的时间内掌握课程的基本内容,以提高综合设计和创新的能力。通过多年实验教学的体会和总结以及充分调研,组织了具有实

验教学经验的教师编写本书，本书既符合我校的实验教学情况，又具有很好的使用价值，主要对实验项目的实验目的、实验原理、实验设备和仪器、实验内容、实验要求等进行详细的分析和阐述，能够充分调动学生对待实验的积极性，对提高实验教学质量具有很大的帮助。

新的机械原理与机械设计实验课程体系改变了以往实验课仅仅是理论课堂教学复述、实验成绩无法反映学生的实际能力和水平、学生不重视实验的状况，而以培养学生创新能力和综合设计能力为目标，以机械原理与机械设计实验方法自身系统为主线，独立设置课程，采用单独考核方式，重视实验教学与科学研究、生产相结合。新的课程体系将实验分为基本型、综合型、设计型、创新型、虚拟实验、科技创新实验等几个部分。根据实验项目的内容、特点和教学基本要求，将实验项目分为必做和选做两种类型，必做实验和选做实验结合并行，增强了实验内容和选题的柔性和开放性，注重学生的个性化培养，为学生提供更好的锻炼机会和发展空间。

根据课程体系建设，结合学校实验教学及拥有的实验仪器设备的实际情况，共设置 24 个实验项目，按照教学计划开展实验教学。实验项目的设置及要求如表 1.1 所示。

表 1.1 实验项目设置及要求

序号	实验项目	实验简介	学时	人数/组	类型	要求
1	机构及零部件认知	了解各种常用机械、机构的基本结构；了解机械、机构的类型、特点、功能及应用；初步了解机械的组成原理，增强对机器的感性认识	2	5	基本	必做
2	机构运动简图测绘与分析	学会观察和分析各种机构中的运动转换及传递过程；根据机构模型或实际机器，学会从运动学的观点来分析、测绘机构运动简图；掌握和巩固机构自由度的计算方法	2	2	基本	必做
3	平面机构组合创新设计与运动分析	熟悉基本杆组的概念，利用若干不同的杆组搭接组成各种不同的机构，进而加深学生对机构组成原理的深刻理解；培养学生机构设计的创新意识，综合设计能力，训练学生的实践动手能力；使学生了解所组装机构的运动特性，提高机构运动分析能力	4	2	创新	选做
4	空间机构创新设计搭接	通过空间机构拼装实验训练，了解空间机构中构件和空间运动副结构的运动特点；培养学生空间机构的结构分析能力，包括空间机构运动简图的绘制、空间机构自由度计算等；培养学生机构设计的创新意识、综合设计能力，训练学生的实践动手能力	4	2	创新	选做
5	轮系创新设计搭接	加深学生对定轴轮系、周转轮系和复合轮系的结构特点、分类依据及方式、分析与运用等基本概念的理解；增强学生对轮系的传动比计算，行星轮系的类型选择、传动效率计算与各齿轮齿数确定等基本设计问题的处理能力；激励学生的学习主动性、培养学生的独立工作能力，引导学生进行积极思维、创新设计、培养学生综合设计能力和实践动手能力	4	2	创新	选做
6	渐开线齿轮范成原理及直齿圆柱齿轮基本参数测量与分析	掌握范成法切制渐开线齿轮的基本方法，了解产生根切现象的原因及避免根切的方法；了解变位齿轮与标准齿轮的异同；掌握渐开线直齿圆柱齿轮基本参数的测量方法；熟练应用理论公式计算齿轮各基本尺寸	2	2	基本	必做

续表

序号	实验项目	实验简介	学时	人数/组	类型	要求
7	凸轮机构运动参数测试	通过测试常见凸轮(盘形、圆柱)的运动参数,了解凸轮机构的运动特点;通过测试几种不同的盘型凸轮机构的运动参数,了解凸轮轮廓对推杆运动的影响;掌握凸轮机构运动参数测试的原理和计算机辅助测试的方法	2	2	综合	必做
8	周转轮系效率测试	测定定轴、行星轮系的传动比,差动轮系输入和输出轴的转速;测定定轴、行星轮系的传动效率;了解定轴轮系、周转轮系(行星轮系和差动轮系)和复合轮系的结构	2	2	综合	必做
9	刚性转子动平衡	了解转子不平衡的危害;了解转子不平衡的利用;掌握用动平衡机进行刚性转子动平衡的原理与方法	2	2	综合	必做
10	典型机械零件失效分析	了解机械零件典型失效形式的特点;掌握机械零件失效分析的一般方法和步骤;了解机械零件失效的原因及提高机械零件承载能力的对策	2	5	基本	必做
11	螺栓连接静、动态测试	了解螺栓连接在拧紧过程中各部分的受力情况;计算螺栓相对刚度,并绘制螺栓连接的受力变形图;验证受轴向工作载荷时,受预紧螺栓连接的变形规律及对螺栓总拉力的影响,分析影响螺栓总拉力的因素;通过螺栓的动载实验,改变螺栓连接的相对刚度,观察螺栓动应力幅的变化,以验证提高螺栓连接强度的措施;通过动载实验,改变被连接件的相对刚度,观察螺栓动应力幅的变化,以验证提高螺栓连接强度的措施	2	2	综合	必做
12	多功能螺栓组连接特性综合测试	测试螺栓组连接在翻转力矩作用下各螺栓所受的载荷;深化课程学习中对螺栓组连接受力分析的认识;初步掌握电阻应变仪的工作原理和使用方法	2	2	综合	必做
13	多种螺旋传动参数与效率测试	了解螺旋传动的几何关系和运动关系;测定螺旋传动效率,掌握测试方法;测定螺旋传动效率和螺旋升角的关系,掌握测试方法;了解测定螺旋传动效率和螺旋升角关系的原理	2	2	综合	必做
14	带传动效率测试分析	观测带传动中的弹性滑动和打滑现象,以及它们与带传递载荷之间的关系;比较预紧力大小对带传动承载能力的影响;比较分析平带、V带和圆带传动的承载能力;测定并绘制带传动的弹性滑动曲线和效率曲线,了解带传动所传递载荷与弹性滑差率及传动效率之间的关系;了解带传动实验台的构造和工作原理,掌握带传动转矩、转速的测量方法	4	2	综合	必做
15	齿轮传动效率测试分析	测定齿轮传动效率,掌握测试方法;了解微机测试传动效率的原理;了解封闭式功率流测定机械传动效率的原理	2	2	基本	必做
16	滚动轴承性能测试	轴承外圈分布载荷的测试;轴承外圈载荷及应力变化规律测试;滚动体及内圈载荷应力变化规律的模拟;对成对组合安装的向心角接触轴承进行载荷分析及当量动载荷、轴承寿命的计算,观察不同载荷下内部轴向力引起的“放松”和“压紧”现象	2	2	综合	必做
17	流体动压滑动轴承性能测试	观察径向滑动轴承流体动压润滑油膜的形成过程和现象;观察载荷和转速改变时径向油膜压力的变化情况;观察径向滑动轴承油膜的轴向压力分布情况;测定和绘制径向滑动轴承径向油膜压力曲线,求轴承的承载能力;了解径向滑动轴承的摩擦系数 f 的测量方法和摩擦特性曲线 λ 的绘制方法	2	2	综合	必做

续表

序号	实验项目	实验简介	学时	人数/组	类型	要求
18	机械传动性能综合测试	通过测试常见机械传动装置(带传动、链传动、齿轮传动、蜗杆传动等)在传递运动与动力过程中的参数(速度、转矩、传动比、功率、传动效率、振动等)及其变化规律,加深对常见机械传动性能的认识和理解;通过测试由常见机械传动组成的不同传动系统的参数曲线,掌握机械传动合理布置的基本要求;通过实验认识智能化机械传动性能综合测试实验台的工作原理,掌握计算机辅助实验的新方法,培养进行设计性实验与创新性实验的能力	4	2	设计	必做
19	连杆机构虚拟设计与仿真	巩固连杆机构的运动分析与设计的相关知识;掌握应用工程软件 ADAMS 建立连杆机构虚拟样机及进行仿真分析的方法;)通过利用自编软件进行连杆机构虚拟设计,熟悉Ⅱ级机构的组成原理与结构分析的实际应用;了解机械工程人才必须掌握的一些基本知识和技能	4	2	虚拟	选做
20	凸轮机构虚拟设计与仿真	巩固凸轮机构设计的相关知识;掌握应用 ADAMS 进行凸轮机构设计的方法;通过利用自编软件进行凸轮机构设计,掌握影响凸轮机构的一些参数;培养应用先进技术解决问题的能力	4	2	虚拟	选做
21	组合机构虚拟设计与仿真	掌握各种机构的特点与设计的相关知识;掌握应用工程软件 ADAMS 建立组合机构虚拟样机及进行仿真分析的方法;通过利用自编软件进行组合机构虚拟设计,了解不同机构组合后的新特性	4	2	虚拟	选做
22	转子平衡虚拟样机仿真分析	巩固刚性转子静平衡和动平衡的相关知识;掌握应用 ADAMS 进行转子平衡的虚拟样机仿真分析与验证方法;培养应用先进技术解决问题的能力	4	2	虚拟	选做
23	摩擦、磨损、润滑实验研究	了解润滑剂的调配方式和评定指标,测试润滑剂的性能方法;了解润滑油添加剂对润滑剂性能的影响;熟悉材料摩擦磨损性能的常用测试和分析方法;掌握典型材料摩擦副的磨损机理及分析方法	16	2	科技	选做
24	慧鱼创新设计与制作	通过对机构的设计及对机械系统整体的布局、机构的装配与调整,以及机、光、电对机械系统的控制等方面的训练,使学生对机械系统有一个整体的认识与了解;加深对各种机构的组合应用以及机械系统中各执行构件实现运动协调性的理解;通过学生的自行设计、安装、调试机构,最终实现机电一体化的机械系统,激发学生的创新意识、培养学生的综合设计能力及动手能力	16	2	科技	选做

1.3 实验课程的性质和任务

机械原理与机械设计实验是一门技术基础课,是教学中重要的实践性教学环节,是深化感性认识、理解抽象概念、运用基础理论的主要方法。本课程要求学生先修完机械制图、机械原理、工程材料与热处理、互换性与技术测量、机械设计及现代测试技术等课程,再按照实验教学计划完成相应的实验项目。

本课程的主要任务有:

- (1)了解实验基本方法和力学参数、机械量等测定方法。
- (2)加强学生理解、巩固理论知识,接受实验技能基本训练,掌握软件实际操作的基本

技能。

(3) 培养学生实验动手能力,综合运用知识分析和解决实际问题能力。

(4) 提高学生动手能力、观察分析能力和创新能力。

1.4 实验课程的要求和学习方法

1.4.1 实验课程的要求

(1) 充分认识科学实验的内涵和意义。

(2) 实验前做好充分的实验预习,了解实验设备和仪器、实验目的、实验原理、实验方法、测试技术、数据采集和处理、误差分析及处理方法。

(3) 按时上课,不得迟到、早退或缺课,按照科学规律认真独立完成实验项目,遵守操作规程,注意人身和设备仪器的安全,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指导教师造成他人或自身受到伤害的,由本人承担责任,导致仪器损坏的应按照规定进行相应赔偿。

(4) 实验过程中认真观察实验现象,不放过“异常”现象,要敢于“存疑、探索、创新”,对实验测试实事求是,不允许主观臆断、弄虚作假等。树立实验能验证理论,也能够发展和创造理论的观点。

(5) 认真完成实验结果整理、分析和计算,完成实验报告并按要求及时递交。

1.4.2 实验课程学习方法

(1) 理论与实践相结合,综合运用所学习的知识。在实验教学学习中,运用理论联系实际的方法分析和解决与课程有关的工程实际问题,巩固所学的理论知识。实验中的综合设计型实验需要多门学科知识的有机结合和应用,实验中要注意多学科理论知识的应用,在理论指导下综合利用各种实验设备和仪器构思创新实验方案,培养实践能力。

(2) 重视实践动手能力的培养。机械原理与机械设计实验过程中会使用到多种设备、仪器和工具,要求学生具有较强的实践动手能力。通过实验环节不仅能很好地培养学生学会正确使用各种仪器设备和工具,还能够培养学生注意细节,掌握各种仪器设备和工具的使用规范和注意事项。

(3) 培养创新能力。实验课程中要有意识地对实验原理、实验过程、实验结果等进行思考和分析,充分发挥想象力,在培养动手能力的同时,培养创新能力,正确处理独创与继承的关系。

(4) 培养团队合作精神。机械原理与机械设计实验课是一门实践性极强的教学环节,与工程实践密切相关,多种综合型、设计型及创新型实验需要学生之间通力合作完成,可以培养学生间的团结协作能力。

第2章 常用传感器及数据处理方法

2.1 常用传感器

机械原理与机械设计课程实验中的测试工作主要是对机械量进行测试,有时也对某些热工量进行测试。所谓机械量,通常是指力、力矩、压强、位移、速度、加速度、转速、功率、效率、摩擦系数、磨损量等。热工量主要是指温度、流体压力、流速、流量、物位等。这些物理量可统称为非电量。非电量的测试,现在主要是采用电测方法。因为电测技术具有测量精度高、反应速度快、能连续测量、便于自动记录等优点,所以它广泛应用于机械工程测试中。典型非电量的电测系统如图 2.1(a)所示。

传感器是把被测的非电量转换成电量的装置,它是测量系统中的关键环节,传感器的敏感程度和获得信息是否正确,将直接影响整个测试系统的精度。测量电路是把传感器的输出变为电压或电流信号,经放大处理后使之能在显示仪表上显示出读数来。指示仪即显示部分,它是将测得的非电量用模拟、数字或图像的方式显示出来。模拟显示的仪表有毫伏表、毫安表、微安表等指针式仪表。数字显示的有数字电压表、数字电流表、数字频率表等。图像显示是用屏幕显示数值或曲线。记录仪是用来自动记录被测信号的变化过程,特别是动态变化过程。常用的自动记录仪有笔式记录仪(如函数记录仪、电平记录仪、电子电位差计等)、光线示波器、磁带记录仪、电传打字机等。数据处理器是在动态信号测试时对信号进行数值分析和处理。所用仪器有频谱分析仪、波形分析仪、实时信号分析仪、快速傅里叶变换仪等。

在上述的电测系统中,传感器、测量电路和指示仪表这三部分是必需的,记录仪和数据处理器这两部分视需要而定。

随着计算机技术的普及,非电量的测试采用计算机测试系统的越来越多,典型的计算机测试系统如图 2.1(b)所示。

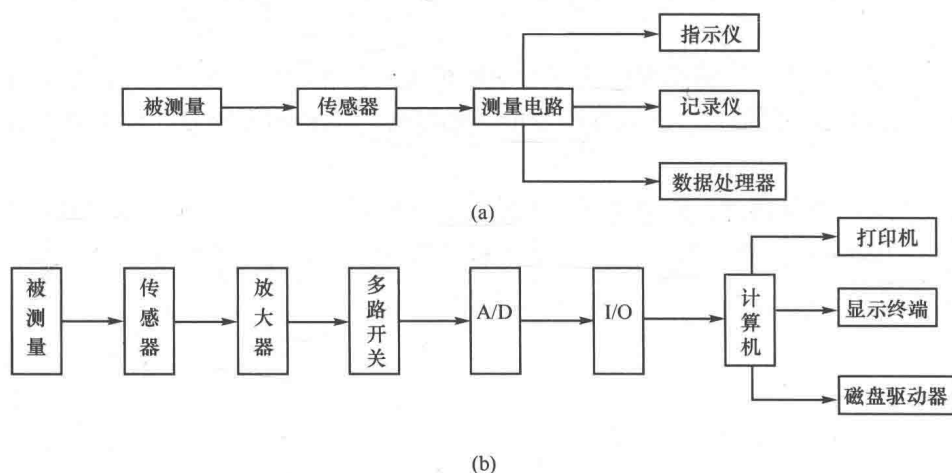


图 2.1 测试系统

测试时,传感器的输出经过放大器放大,再经过多路开关、模/数转换器(A/D)、I/O接口进入计算机进行数据处理。测试结果可在终端显示,打印机输出并保存在磁盘中。

2.1.1 常用传感器分类

传感器种类繁多,同一被测量可用不同类型传感器来检测,同一原理的传感器又可以测试不同的被测量。因此,传感器可按被测对象分类,如位移传感器、速度传感器、压力传感器等;也可按工作原理分类。本章按传感器工作原理分类,介绍传感器的工作原理及其主要应用。常用的将机械量直接转换为电量的传感器有以下几种。

(1)电阻式:如电阻应变计(片)、滑线变阻器等。

(2)电感式:按变换原理有自感式、互感式和电涡流式等;按结构形式有变气隙式、变截面式和螺旋管式等。

(3)电容式:有可变间隙型和可变面积型等。

(4)磁电式:有恒定磁通式和变磁通式。

(5)压电式:有单晶压电晶体和多晶压电陶瓷。

(6)光电式:有模拟式和数字式。

2.1.2 电阻应变式传感器

1. 电阻应变片的结构、特点和分类

电阻应变式传感器的传感元件是电阻应变片。图 2.2 所示为电阻应变片的结构,它是将一根具有高电阻率的金属丝(康铜或镍铬合金等,直径 0.025mm 左右)绕排成栅型,粘贴在绝缘的基片和覆盖层之间,电阻丝的两端焊有引线。应变片的规格一般用使用面积 $l \times b$ 和电阻值来表示,如 $3 \times 10\text{mm}^2$, $12\ \Omega$ 。

在测试时,将应变片用黏合剂牢固地粘贴在试件表面上。当试件受力产生应变时,电阻丝也随着变形,因而导致电阻的变化,通过测量电路(如电阻应变仪)将其测量出来。因此电阻应变式传感器可以用于测量应变、力、位移、加速度、扭矩等参量。

电阻应变片是机械量电测技术中非常重要而且应用很广的传感元件,它具有优点为:①灵敏度高,能测到 $1 \sim 2\mu\epsilon$,精确度高,误差小于 1%;②测量变形范围大,既可测弹性变形,也可测塑性变形;③动态响应快,不仅可用于静态测量,也可用于动态测量;④尺寸小,重量轻,便于多点测量,使用简便;⑤能适应各种环境,如高温、超低温、高压、水下、强磁场、核辐射等。

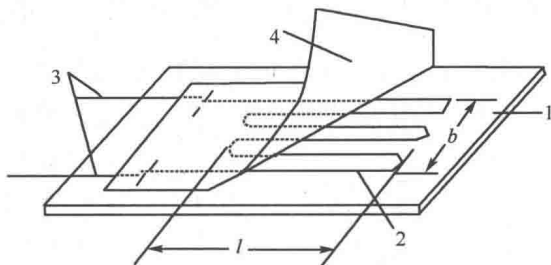


图 2.2 电阻应变片

1-基片; 2-电阻丝式敏感栅; 3-引线; 4-覆盖层

2. 金属电阻应变片工作原理

金属丝的电阻 R 与导线长度 L 成正比,与截面积 A 成反比,比例系数为电阻率 ρ ,即

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.1)$$

当电阻丝随试件受力变形时, L 、 A 、 ρ 均将变化, 因此电阻的变化为

$$dR = \frac{L}{A} d\rho + \frac{\rho}{A} dL - \frac{\rho L}{A^2} dA \quad (2.2)$$

电阻变化率为

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (2.3)$$

对于圆形截面电阻丝

$$A = \pi r^2, \quad \frac{dA}{A} = 2 \frac{dr}{r} \quad (2.4)$$

根据材料力学知识

$$\frac{dr}{r} = -\mu \frac{dL}{L} = -\mu \varepsilon \quad (2.5)$$

式中, $\varepsilon = \frac{dL}{L}$ 为电阻丝轴向应变; μ 为电阻丝泊松比。

有

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu) \varepsilon + \frac{d\rho}{\rho} = \left(1 + 2\mu + \frac{d\rho}{\varepsilon \rho}\right) \varepsilon = k_0 \varepsilon \quad (2.6)$$

式中, $k_0 = \left(1 + 2\mu + \frac{d\rho}{\varepsilon \rho}\right)$ 称为金属丝的灵敏系数, 其物理意义是单位应变所引起的电阻变化率。对于大多数金属丝, $\frac{d\rho}{\varepsilon \rho}$ 变化很小; 在弹性限度内 $(1 + 2\mu)$ 近似为常量, 故 k_0 值可近似为常量, 则电阻变化率 $\frac{dR}{R}$ 与应变 ε 成正比, 这就是电阻应变片将机械量-应变转换为电

量-电阻变化率的工作原理。通常金属电阻丝的 $k_0 = 1.7 \sim 4.6$ 。电阻应变片中的电阻丝被制成丝栅状, 由于形状发生了改变, 应变片的灵敏度系数一般低于金属丝, 记为 k 。

电阻应变片的测量电路通常采用惠斯通电桥, 它可有效测量电阻微小的变化, 其精度高, 稳定性好, 又易于进行补偿。

图 2.3 为电桥电路, R_1 代表应变片电阻, R_3 、 R_4 为比率臂的电阻, R_2 为可精确调节的电阻, G 为检流计, 其内阻为 R_0 , U_i 为供桥电压, U_o 为输出电压。

当电桥平衡时 ($U_o = 0$), 应满足

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (2.7)$$

当试件受力变形使应变片电阻由 R_1 变为 R'_1 时, 电桥便失去平衡 ($U_o \neq 0$, 检流计有电流通过, 指针有示值)。欲使电桥重新平衡, 可精确调节 R_2 , 使 R_2 变为 R'_2 , 满足

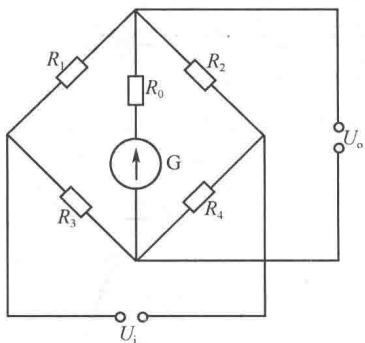


图 2.3 电桥电路

$$\frac{R'_1}{R'_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (2.8)$$

由此可求得 R'_1 ， $R'_1 - R_1 = \Delta R$ 。因 $\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon$ ，则可在电阻应变仪的读数盘上读出微应变值。

3. 半导体应变片工作原理

半导体应变片的工作原理是基于半导体材料的压阻效应，即单晶半导体材料(硅、锗等)受应力作用时，其电阻率发生显著的变化，因而电阻产生变化。

半导体应变片的结构如图 2.4 所示。其使用方法与金属电阻应变片相同，用黏合剂将它粘贴在试件表面上，随试件受力产生应变而发生电阻的变化。

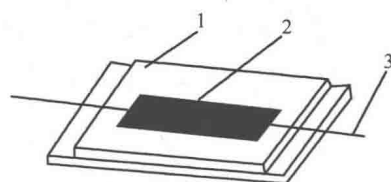


图 2.4 半导体应变片

1-胶膜基片；2-硅片；3-引线

半导体应变片的主要优点是灵敏度高，机械滞后小、横向效应小和本身体积小。主要缺点是温度稳定性差。

4. 电阻应变式传感器的应用

1) 力测量

电阻应变式测力传感器是将力作用在弹性元件上，弹性元件在力的作用下产生应变，利用贴在其上的应变片，将应变转换成电阻的变化，测得力的大小。

弹性元件有柱形、薄壁环形和梁形三种。柱形弹性元件有圆柱形(图 2.5(a))和圆筒形(图 2.5(b))等几种。薄壁环形弹性元件也可根据需要制成各种形状，在图 2.6 中，图(a)用于测拉力，图(b)用于测压力。图 2.7 是梁形弹性元件。

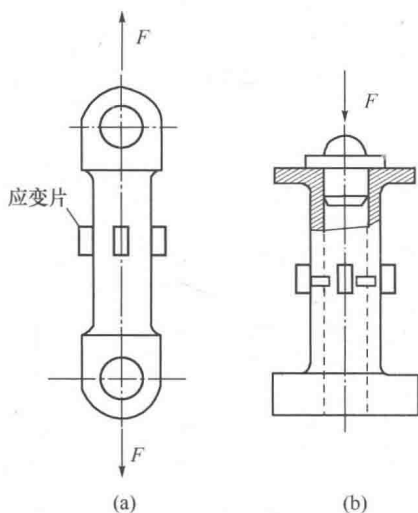


图 2.5 柱形弹性元件

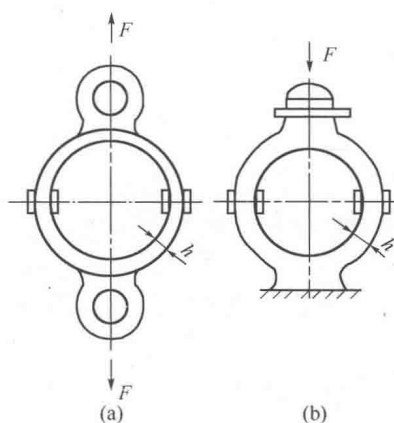


图 2.6 薄壁环形弹性元件

图 2.8 是 BLR-1 型应变式拉(压)力传感器结构图。弹性元件圆筒的两端有螺纹以便传递外力。筒的中间贴有应变片，通过接线座将信号引出。

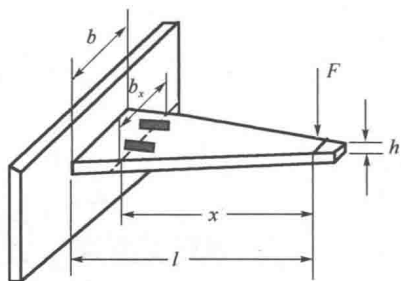


图 2.7 梁型弹性元件

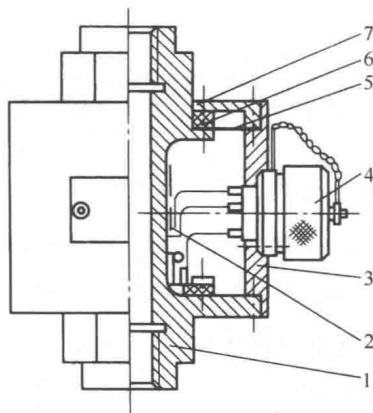


图 2.8 BLR-1 型拉(压)力传感器
1-弹性圆筒; 2-应变片; 3-壳体; 4-接线座;
5-密封圈; 6-内压环; 7-压盖

2) 加速度测量

图 2.9 为 BAR-6 型应变式加速度传感器结构图。在应变梁 2 的一端固定惯性质量块 1，另一端固定在壳体 9 上，在应变梁的正反两面粘贴应变片 5。在测量加速度时，传感器刚性地在被测物体上。被测物体受加速度作用时，应变梁上的惯性质量也以同样的加速度运动，产生一个正比于加速度的惯性力 F ，使梁产生弯曲变形，并被粘贴在梁表面的应变片所感受，这样测得的应变正比于被测加速度。这种应变式传感器具有较好的低频响应特性，可测直流信号。

图 2.10 是 A II-2 型应变式加速度传感器，它通过测量惯性质量在加速度作用下的位移测量加速度。传感器中包括平行片簧 1，其上固定着惯性质量块 2，通过弹性元件 3 与传感器壳体 5 相连，在弹性元件上固定着应变片 4。

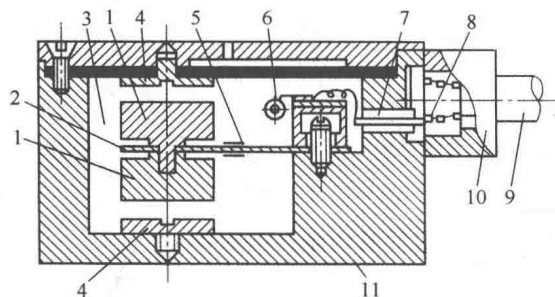


图 2.9 BAR-6 型加速度传感器

1-质量块; 2-应变梁; 3-硅油阻尼液; 4-保护块; 5-应变片;
6-温度补偿电阻; 7-绝缘套管; 8-接线柱; 9-壳体;
10-压线板; 11-电缆

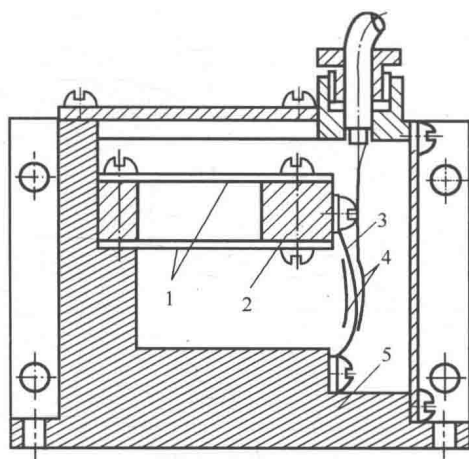


图 2.10 A II-2 型应变式加速度传感器

1-平行片簧; 2-惯性质量; 3-弹性元件;
4-应变片; 5-壳体;

3) 位移测量

应变式位移传感器是把被测位移量转变成弹性元件的变形和应变, 然后通过应变计和应变电桥, 输出正比于被测位移的电量。它可用来近测或远测静态与动态的位移量。图 2.11 为国产 YW 系列应变式位移传感器结构图。这种传感器采用了悬臂梁-螺旋弹簧串联的组合结构, 悬臂梁的一端固定于壳体 3 上, 另一端通过弹簧 4 与测杆 5 相连, 悬臂梁 1 及贴在其上的应变片 2 将位移转换成电量。这种传感器适用于较大位移(量程>10~100 mm)测量。

2.1.3 电感式传感器

电感式传感器基于电磁感应原理, 使位移、振动、压力、应变, 流量、相对密度等参量变换为电感量。电感式传感器种类很多, 按变换方式的不同, 可分为自感式和互感式两类。自感式传感器有变气隙式、变截面式和螺管式等; 互感式也有变气隙式和螺管式等。通常所说电感式传感器是指自感式传感器(包括可变磁阻式和涡流式)。而互感式传感器由于利用变压器原理, 并常制成差动式, 故常称为差动变压器。

电感式传感器的优点有: ①分辨率较高, 最小刻度值可达 $0.1\mu\text{m}$; ②测量精度高, 输出的线性度可达 $\pm 0.1\%$; ③零点稳定, 最高为 $0.1\mu\text{m}$; ④输出信号较大, 不用放大器时也有 $0.1\sim 5\text{V/mm}$ 的输出值; ⑤结构简单, 可靠, 电磁吸力小。

电感式传感器的缺点主要是: 传感器本身频率响应低, 不适于快速动态测量; 测量范围大时分辨率低。

1. 自感型电感传感器

图 2.12(a) 所示为变隙式自感传感器的结构原理图, 传感器主要由铁心、线圈和衔铁组成。在铁心与衔铁之间有空气隙 δ 。衔铁与被测件相连, 当被测件产生位移时, 气隙 δ 发生变化使磁路的磁阻发生变化, 从而使线圈电感值发生变化。若线圈匝数为 N , 气隙导磁面积为 A_0 , 空气磁导率为 μ_0 , 忽略铁心磁阻, 则自感电量为

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{N^2}{2\delta/(\mu_0 A_0)} \quad (2.9)$$

式中, $R_m = 2\delta/(\mu_0 A_0)$ 为磁路的磁阻。由式(2.9)可知, 自感 L 与气隙 δ 成反比。

改变气隙截面积 A_0 , 也可改变自感 L , 如图 2.12(b) 所示。

2. 互感型差动变压器

图 2.13(a) 所示为变隙式互感型差动变压器, 中间衔铁与试件相连, 当衔铁位于气隙中

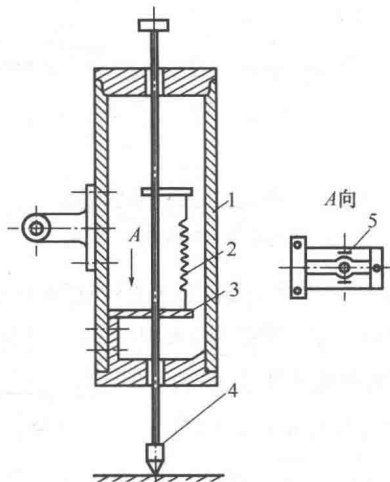


图 2.11 应变式位移传感器

1-悬臂梁; 2-应变片; 3-壳体; 4-弹簧; 5-测杆