

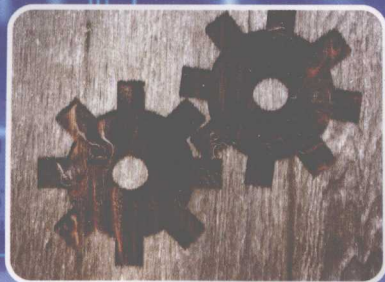
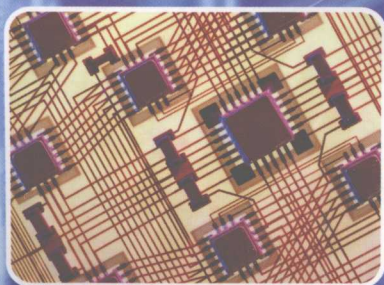
高等学校理工科规划教材

测试技术基础

实验教程

——非电类实验系列教材之一

苗华明 编著



大连理工大学出版社

高等学校理工科规划教材

前言

前言(919)目录附录并图

测试技术基础实验教程

(非电类实验系列教材之一)

大连理工大学机械工程学院中心实验室 组编

苗华明 编著

大连理工大学出版社

© 苗华明 2005

林姓做账师工野对学善高

图书在版编目(CIP)数据

非电类实验系列教材之一 测试技术基础实验教程 / 苗华明编著. — 大连:
大连理工大学出版社, 2005. 3

ISBN 7-5611-2822-3

I. 测… II. 苗… III. 机械工程—测试技术—实验—高等学校—教材
IV. TG806-33 (一六林姓做账师工野对学善高)

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 012769 号

林姓做账师工野对学善高

林姓做账师工野对学善高

大连理工大学出版社出版

地址:大连市凌水河 邮政编码:116024

电话:0411-84708842 传真:0411-84701466 邮购:0411-84707961

E-mail: dutp@dutp.cn URL: http://www. dutp. cn

大连理工印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:185mm×260mm 印张:4.5 字数:105 千字

印数:1~1 000

2005 年 3 月第 1 版

2005 年 3 月第 1 次印刷

责任编辑:范业婷

责任校对:江美华

封面设计:季 强

定 价:19.50 元(共 3 册)

前 言

本系列教材是高等院校机械类及近机类专业技术基础课实验教程,其中包括《测试技术基础实验教程》、《PLC 可编程序控制器实验教程》、《控制工程基础实验教程》。此三门课程介于基础课与专业课之间,所以本系列教材既加强理论知识方面的内容,又强调实验的操作技能,有利于培养学生理论联系实际及分析问题与解决问题的能力。

本书是根据高等工科院校《机械工程测试技术基础》课程实验教学大纲的基本要求,依据“传感器→信号调理→显示记录分析”的顺序编写而成的。学生在学习掌握机械工程测试技术理论的基础上,通过实验教学进一步加深对理论知识的理解和认识,使学生具有初步处理实际测试工作的能力。本课程具有很强的实践性,要求理论联系实际,加强实验训练,注意物理概念,掌握比较完整的动态测试工作知识。

本书是在我校自编实验讲义的基础上,参考兄弟院校的有关教学资料编写而成。由大连理工大学苗华明编写,王殿龙教授统稿审定。大连理工大学副教授张军、辽宁省大连石英辉绿岩制品厂高级工程师张宁、大连理工大学教授张松涛也参加了编写工作,在此表示衷心感谢。

由于作者的水平有限,不妥之处在所难免,恳请读者指正。

编者
2005 年 1 月

第0目 录 论

第0章 绪 论

- 0.1 非电量测量技术的作用 /1
- 0.2 非电量测量系统的组成 /3
- 0.3 非电量测量技术的发展 /4

第1章 压电式传感器的性能测试

- 1.1 引 言 /6
- 1.2 实验基本原理 /6
- 1.3 实验目的 /11
- 1.4 实验仪器 /11
- 1.5 实验系统与原理 /11
- 1.6 实验步骤 /12
- 1.7 实验数据处理 /13
- 1.8 实验报告 /14

第2章 电阻式传感器的性能测试

- 2.1 引 言 /17
- 2.2 实验基本原理 /17
- 2.3 实验目的 /19
- 2.4 实验仪器 /20
- 2.5 实验系统与原理 /20
- 2.6 实验步骤 /20
- 2.7 实验报告 /21

第3章 光线示波器的使用及振动子的性能测试

- 3.1 引 言 /22
- 3.2 实验基本原理 /22
- 3.3 实验目的 /26
- 3.4 实验仪器 /26
- 3.5 实验系统与原理 /27
- 3.6 实验步骤 /28

- 3.7 实验数据处理 /29

- 3.8 实验报告 /30

第4章 热电式传感器测温电路的设计

- 4.1 引 言 /32
- 4.2 实验基本原理 /32
- 4.3 实验内容 /33
- 4.4 实验仪器 /34
- 4.5 实验步骤 /34
- 4.6 注意事项 /35
- 4.7 思考题 /35

第5章 相关分析与同频检测

- 5.1 引 言 /36
- 5.2 实验基本原理 /36
- 5.3 互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 曲线的绘制(实验内容一) /42
- 5.4 信号与噪声的合成及同频检测的排噪能力(实验内容二) /45
- 5.5 实验报告 /47

第6章 现代数据采集系统

- 6.1 引 言 /50
- 6.2 现代数据采集系统综述 /50
- 6.3 信号分析与处理的实验 /56

附录

- 附录1 YE5850 电荷放大器 /60
- 附录2 YD-15 动态电阻应变仪 /61
- 附录3 SC-16 光线示波器 /63

参考文献 /65

第0章 绪论

0.1 非电量测量技术的作用

测量是借助专门的仪器设备,把一个未知物理量与作为计量单位的标准量进行定量检查和比较,从而确定被测量的过程。简言之,测量是以确定被测量量值为目的的一系列操作。

测量有多种分类方法,常用的有按测量值的获得方法分类、按测量目的分类等。

按测量值的获得方法,可分为直接测量、间接测量和组合测量。

直接测量是直接得到被测量的测量方法;间接测量是直接测量与被测量之间有一定函数关系的其他量,再根据直接测量值与被测量的函数关系计算得到被测量;组合测量是用直接测量和间接测量得到的量值与相对应的被测量按已知关系组合,求出其拟合方程,再通过解方程的方法得到被测量。

按测量目的,可分为定值测量和参数检测。

定值测量是按一定不确定度确定被测量实际值的测量;参数检测是以技术标准、规范或检定规程为依据,判断被测量是否合格的测量。

非电量测量技术所涉及的内容主要是将除电量以外的物理量(及化学量),如温度、压力、振动、化学成分、位移等用各种手段变换为电量,从而进行准确测量的技术。

在科学实验中,为了了解一个物理现象或验证一个理论,必须对实验中有关物理量进行测量,以获得确切的数和量的概念;在生产过程中,为了检查、监督和控制生产过程,使之处于最佳工作状态,也必须对描述它们特性的各种参数进行测量,如大小、方向、变化速度等,以便掌握它们。

人类要想更好地认识和改造自然,推进工农业生产自动化的发展,加快国防现代化的步伐,就要正确地获取自然界、工农业生产及各种武器试验中所产生的物理量信息。只有正确地认识世界,才能更好地改造世界。所以,现代化的非电量测量技术水平是科学技术和生产力发展的重要标志。没有现代化的非电量测量技术就不可能快速发展国民经济,也不可能现代化的国防事业。

测量与科学技术的关系如此紧密,它的应用之广是不言而喻的。现代工业、农业、国防、教育、医疗、交通、贸易等,各行各业都迫切需要测量技术。现代化的测量技术促进了人类社会的不断进步。

测量技术虽然从古代就开始了,但是现代测量技术却是在近 50 多年才发展起来的。

现代化的非电量测量技术具有许多突出的优点:

- ①它的反应速度快,可以测量物理量的瞬态值及变化过程;
- ②可以测量微弱信号,并将转换的电信号进行长距离传输,以便于远距离操作与控制;

③测量精度高、功能齐全、灵活方便,并能自动、连续地进行测量;

④可输出的电信号易于与计算机连接、记录和处理数据。

所以,在工农业生产、国防试验及各科学技术部门非电量测量技术都得到了广泛应用。

例如,在机械工业中最常用的机床,通过采用压电加速度计、力传感器和速度传感器等非电量测试仪表再配合单片机进行控制处理,便可以实时测量到机床工作时切削力的大小和变化、刀具的磨损情况、工件表面质量的变化以及在切削状态下的动态稳定性等情况,从而更好地控制机床的工作,大大地提高了自动化程度和产品精度。

又如,在石化行业的炼油自动化生产系统中,必须对炼油生产过程中各环节的工作状态如流体的压力、温度及成分等进行实时监测和控制,以确保炼制出合格产品。

此外,为了确保安全生产,对动力设备的工作情况也要实时进行严格地监测和控制等等,所有这些都离不开非电量测量技术。

在国防工业中则更是离不开非电量测量技术。例如,作为现代科学技术尖端之一的火箭发动机,从开始设计到样机试飞,中间要进行成百上千次试验。火箭发动机的地面试车台就是一套完整的非电量测量系统,在进行地面热试车(火箭发动机地面试验术语)时,为了研究发动机的强度,需要有上百个应变片和测振传感器;为了研究燃料工作的情况,需要测量发动机工作时有关部位的压力、流量、温度及转速等。现在理论和实践已证明,试验次数将随着测试系统精度的提高而减少。因而,要想取得火箭发动机准确、可靠的试验数据,要想节省火箭发动机试验的资金和时间,就必须采用现代化的非电量测量技术。

又如,每架新设计的飞机,均需要通过风洞试验测定机身、机翼的受力和振动分布情况,以验证和改进设计,仅此一项就要用到上千块应变片和相应的测量电路。而且还需要测量发动机的转速、扭矩、振动、温度、压力、气流等各种物理量。每架飞机上都装有上百个传感器,用以监测飞行时各部位的工作状态,并将其转换成电信号传送到驾驶舱的指示仪表上。

在医学生物领域,由于心电图机、CT多层螺旋扫描仪、磁共振成像设备、动态心电图/动态血压测试系统、多普勒脑血管测量仪、超声诊断设备等现代医用诊断治疗仪的出现,使得人体各部位的生理状态、温度分布等情况能快速、准确地诊断出来,再通过积极配合药物治疗,可使人类诊断疾病的效率、准确性和可靠性大大提高,增加了人类战胜疾病的机会,提高了人类的寿命。

人类最杰出成果之一的机器人更是离不开非电量测量技术。在机器人上装有测量外部信号和内部信号的多种非电量传感器,例如,视觉传感器、位移传感器、速度传感器、听觉传感器等。内部信号传感器用来测量机器人的内部状态,而外部信号传感器用来测量与机器人的对象相关的各种物理量,由获取的信息去识别对象,然后再发出信号控制机器人的动作。

在其他各学科研究中也都要用到非电量测量技术,例如,环境工程中噪声、大气成分、水质等的测量;在农业机械中,对所研制的农业机械,如拖拉机、收割机等牵引力和悬杆应力的测量、牵引效率、轴的传递功率和强度等都需要进行测量。

现在,非电量测量技术已经广泛应用到人们的日常生活中,例如,空调、电饭锅、洗衣机、电子报警器等。美国已经出现了全自动的电子住宅,在电子住宅中温度、湿度是时时刻刻要监测的物理量。

非电量测量技术的应用实例举不胜举。总之,非电量测量技术已渗透到工业、农业、国

防、科学研究及人类生活的各个领域,其应用的广泛性和重要性已越来越为人们所关注。

0.2 非电量测量系统的组成

非电量测量一般是指非电量的电测量。现代的非电量测量技术,首先是将非电量转换为电量,然后通过信号的转换,加以显示和记录。一个完整的非电量测量系统应该包括传感器、信号调节器和显示记录器等3个主要部分,它们之间的关系如图0-1所示。

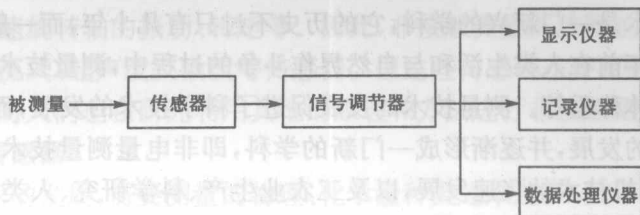


图0-1 非电量测量系统组成方框图

1. 传感器

传感器(sensor)是一种把物理量和化学量转换为电量的仪表。它的作用是直接感受被测物理量,并将其转换成与被测物理量有一定函数关系的电压、电流或电路参量(如电阻、电感、电容),再输出给其他仪表。显然,传感器获得信息的正确与否,关系到整个测试系统的精度。如果传感器的误差很大,后面的信号调节电路、显示器、记录器精度再高也难以提高整个测试系统的精度。所以传感器是测试系统的第一个环节,也是最重要的一个环节。

传感器类型很多,分类方法也不同。例如,按输入物理量分类,可分为压力、振动、温度等传感器。这种分类方法对使用者来说很方便,它可以根据被测参数选择传感器。但这种分类方法不便于对传感器的工作原理、特性等作归纳性分析研究,因而在理论学习中通常按工作原理分类,例如,应变式、电容式、电感式传感器等。

2. 信号调节器

信号调节器的作用是把传感器输出的电信号或电参数调节变换为显示记录器所需要的标准电压、电流信号,并输送到显示记录器中记录和显示。由于传感器种类很多,它所转换出的信号类型、特点不同,因而与其相配的信号调节器内部电路也不同,较常见的有放大电路、电桥电路、滤波电路、相敏检波电路、谐振电路、阻抗变换电路、调制解调电路等。

3. 显示记录器

显示记录器是非电量测量系统的最后一个环节,也是必不可少的部分。因为测量的目的就是要知道被测物理量的数值,所以必须有显示记录器把测量结果显示并记录下来。常用的显示方式有3类:模拟显示、数字显示和图形显示。

①模拟显示是利用指针对标尺的相对位置来表示读数,常用的有毫伏表、微安表等。

②数字显示是直接利用数字形式来显示读数,例如数字电压表、数字频率计等。

③图形显示是用屏幕显示数值或变化的曲线,例如示波器等。

对于动态过程的变化,特别是瞬态过程的变化,根本无法用显示仪器指示,此时就要用记录器把信号自动记录下来。常用的自动记录器有笔式记录器、瞬态记录仪等,或者用计算机的磁盘记录下来,再用打印机或绘图仪打印记录结果。

20 世纪 90 年代以前曾经把测量系统的这 3 部分称为一次仪表、二次仪表、三次仪表,也有过各自独立的仪表。但近年随着计算机技术、电子技术、半导体技术的发展,测量系统也有了很大变化,现在有些系统是把一次仪表、二次仪表组合在一起,有些系统是把二次仪表、三次仪表组合在一起,还有直接把三者组合在一起的仪器。

0.3 非电量测量技术的发展

非电量测量技术是一门新兴的学科,它的历史不过只有几十年,而一般的测量技术则由来已久。早在几千年前在人类生活和与自然界作斗争的过程中,测量技术就逐步发展起来。例如,土地丈量、物体称重等。测量技术的发展促进了科学技术的发展,而科学技术的发展又推进了测量技术的发展,并逐渐形成一门新的学科,即非电量测量技术。近三四十年来,由于电子技术、计算机技术的飞速发展,以及工农业生产、科学研究、人类生活的需求,使非电量测量技术也得到迅猛发展。目前非电量测量技术发展的总趋势有如下几个方面。

1. 不断扩大测量范围,提高可靠性和精度

随着科学技术的发展,对非电量测量技术的要求也在不断提高,尤其是测量范围的进一步扩大。例如,为了满足超低温技术发展的要求,利用超导体的约瑟夫逊效应已开发出能测量 10^{-6} K 的超低温传感器;用热电偶长时间连续测量高温介质的温度已可达 $2\,500 \sim 3\,000^{\circ}\text{C}$,辐射型温度传感器最高测量温度原理上可达 10^5 K,但可控聚核反应理想温度却要达到 10^8 K,这就要求超高温测量的范围进一步扩大。此外,微差压(几十个帕)测量、超高压测量、大吨位(3×10^7 N 以上)测量等也都需要扩大测量范围。

随着测量范围的不断扩大,测量环境将变得越来越复杂和恶劣,这就要求测量的可靠性随之提高。例如,在导弹和卫星上安装的测量仪器,既要能耐高温,又要能在极低温和强辐射的环境下保持正常工作,因此它必须有极高的可靠性和工作寿命。总之,可靠性是仪器质量的重要因素,已越来越受到重视。

科学技术的发展,对测量精度的要求也在不断提高。因为只有测量精度更高,才能更准确地反映被测量的真实情况。例如,一般体温计的测温精度为 $\pm 0.1 \sim \pm 1^{\circ}\text{C}$,当人体内存在病变时,人体的温度分布场就会发生相应的变化,这种变化有时很微小,需要用精度为 $\pm 0.01 \sim \pm 1^{\circ}\text{C}$ 的温度计才能测量出来。

2. 开发集成化、一体化、多功能的传感器

由于传感器与信号调节电路分开,容易受到传输电缆干扰信号的影响,且体积大,使用麻烦。随着半导体技术的发展,现在已有部分传感器实现了传感器与信号调节电路的集成化、一体化。在半导体技术基础上,利用某些固体材料的物理性质变化(机械特性、电特性、热特性等)实现物理量的变换,同时把调节电路也组合在一起,可直接转换为所需要的电压、电流,供三次仪表使用,例如压阻式传感器。还有一种情况是把信号调节电路做成一个小组件,与传感器组装在一个壳体中。例如,现在很多压力传感器内部都加了放大电路。此外,多功能化是指把两种或两种以上的敏感元件集成于一体,在一块芯片上可实现多种功能。例如,将热敏元件和湿敏元件集成在一起,可同时完成温度和湿度的测量。以上做法的优点是结构简单、体积小、抗干扰好、成本低等。也有把信号调节电路和显示记录器组合在一起的情况,例如,数据采集系统就是把这两部分组装在一起的。又如,CCD 摄像机,是把排成

阵列的上万个光敏元件及扫描电路集成在一块芯片上。另外,其他领域也在不断开发新型的集成化、功能化的传感器。

3. 非接触测量技术

接触式测量是把传感器安装在被测对象上,直接感受其物理量的变化,在有些情况下,这会使被测对象增加负担,工作状态受到干扰。例如,把加速度计安置在被测对象上,相当于给它增加了一个负载,会影响其测量精度。又如,把温度传感器贴于被测物体上,会使被测物体的散热、导热状态发生变化,影响测温精度。此外,在有些被测物体上,不可能安装传感器,例如测量高速旋转轴的振动、转矩等。因此,非接触测量传感器越来越受到重视,已开发出光电式、电涡流式、超声波及微波等传感器。但这些传感器还存在测量精度不够高等问题,有待解决。同时人们也在研究利用其他的原理和方法进行非接触测量。

4. 开发新型传感器

随着科学技术的发展,需要测量的物理、化学量种类越来越多(例如,判断距离、味觉、嗅觉、识别颜色及光的强度等),范围也越来越大(例如,超高温、超高压、超低温等)。因此,要求人们继续探索新的测量原理,开发新型传感器。

5. 利用计算机,使测量智能化,提高测试水平

自从微处理器特别是单片机问世以来,新的技术迅速应用到非电量测量技术中,使传统的测量仪器变为智能仪器,增加了功能,提高了精度,例如,智能仪器一般都可完成自校准、自调零、自动测试,能对传感器的非线性及仪器零点进行校准,并可根据工作条件的变化修正测试结果,从而提高精度,增加可靠性。

此外,配备计算机的大型数据采集系统,可以同时采集多达数千路信号,具有更多、更强的数据处理功能;可根据误差理论对测量数据进行处理,求出误差,并自动剔除;可以对瞬态数据进行处理;可实现自动校准、自动修正、信号调节、故障诊断;处理后的结果,既可以用磁盘长期储存、用打印机打印、用绘图仪绘出曲线,又可以直接在计算机屏幕上观看。因而大大增强了数据采集的功能和测量水平。

20 世纪末,在计算机迅速发展和普及、软件对测量与控制技术起巨大作用的基础上,国外提出了虚拟仪器的概念。虚拟仪器最核心的思想是利用计算机的强大资源,使本来需要用硬件实现的功能用软件实现。也可以理解为,在通用计算机系统上,利用与此计算机相配的硬件板卡和组态软件所形成的具有测量控制功能的系统。在虚拟仪器中软件集成了数据的采集、控制、处理、打印输出及用户界面等功能。用户可以方便地根据自己的需要,组建自己专用的测量仪器。虚拟仪器的强大功能和高度灵活性给用户一个充分发挥自己才能的空间,打破了传统测量仪器由厂家定义而用户无法改变的方式,给测量领域注入了新的活力。

第1章 压电式传感器的性能测试

1.1 引言

工程上通常把直接作用于被测量,能按一定规律将其转换成同种或别种量值输出的器件,称为传感器。

传感器的作用类似于人的感觉器官。它将被测物理量,如力、位移、温度等转换为可测信号,传递给测量系统的信号调理环节。

工程中应用的传感器种类繁多。其中,物性型传感器是依靠敏感元件材料本身物理化学性质的变化来实现信号的变换的。压电式传感器就是其中一种。可逆型换能器,既可以将机械能转换为电能,又可以将电能转换为机械能。这种性质使它被广泛应用于力、压力、加速度测量,也被应用于超声波发射与接收装置。这种传感器具有体积小、重量轻、精确度及灵敏度高等优点。

1.2 实验基本原理

1.2.1 压电式传感器的工作原理

压电式传感器的工作原理是建立在某些材料的压电效应的基础上的,它利用具有压电效应的材料作为传感器的敏感元件,将被测量转换为电信号,实现对非电量的检测。所谓压电效应是指某些电介质材料,当沿着某些特定方向对其施加作用力使其发生变形时,这种材料的内部就会产生极化现象,在其相对的两个表面会形成正负电荷。一旦外力消失后又会重新恢复到不带电状态,这种应变致电现象叫压电效应。当改变作用力的方向时,电荷的极性也随之改变。我们把由机械能转换成电能的现象叫“正压电效应”;反之,若在电介质的极化方向上施加一定的电场,它们就会产生变形,我们称之为“逆压电效应”或叫“电致伸缩效应”。

具有压电效应的材料称之为压电材料,常见的压电材料有两类:压电单晶体,如石英、酒石酸钾钠等;多晶压电陶瓷,如钛酸钡、锆钛酸铅等。

石英(SiO_2)晶体结晶形状为六角形晶柱(图1-1(a)),两端为一对对称的棱锥。六棱柱是它的基本组织。纵轴线 z - z 称为光轴;通过六角棱线而垂直于光轴

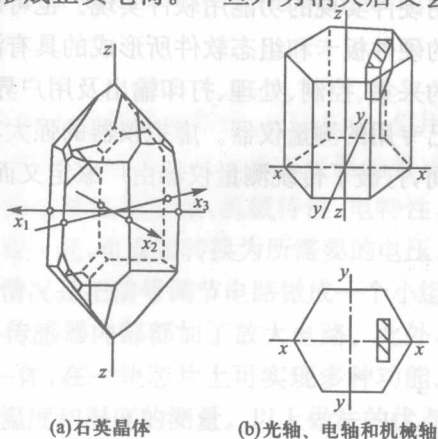


图1-1 石英晶体

的轴线 $x-x$ 称为电轴;垂直于棱面的轴线 $y-y$ 称为机械轴,如图 1-1(b) 所示。

如果从晶体中切下一个平行六面体,并使其晶面分别平行于 $z-z$ 、 $y-y$ 、 $x-x$ 轴线,这个晶片在正常状态下不呈现电性。当施加外力时,将沿 $x-x$ 方向形成电场,其电荷分布在垂直于 $x-x$ 轴的平面上。沿 x 轴加力产生纵向效应;沿 y 轴加力产生横向效应;沿相对两平面加力产生切向效应(图 1-2)。

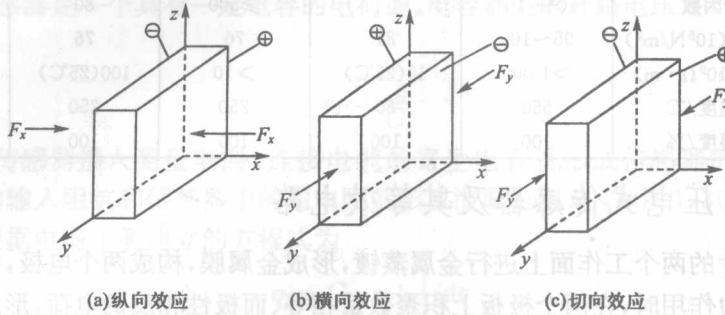


图 1-2 压电效应模型

自然界中的许多晶体都具有压电效应,衡量压电材料的性能参数主要有:

(1) 压电常数:它是衡量材料压电效应强弱的参数,直接关系到输出灵敏度。

(2) 弹性常数:它与压电器件的固有频率和动态特性有关。

(3) 介电常数:对于一定形状、尺寸的压电元件,其固有电容与介电常数有关;而固有电容又影响着压电传感器的频率下限。

(4) 机械耦合系数:在压电效应中,其值等于转换输出能量(如电能)与输入能量(如机械能)之比的平方根;它是衡量压电材料机电能量转换效率的一个重要参数。

(5) 电阻:压电材料的绝缘电阻将减小电荷泄漏,从而改善压电传感器的低频特性。

(6) 居里点:压电材料开始丧失压电特性时的温度称为居里点。

1.2.2 常用压电材料

目前的压电材料主要有石英晶体、钛酸钡(BaTiO_3)、锆钛酸铅(PZT)等很多种类。石英晶体材料的压电系数很稳定,但其灵敏度较低且介电常数小,因此已渐渐地被其他压电材料代替;钛酸钡材料有较高的压电系数且价格低廉,但只适用于 70°C 以下的低温场合;锆钛酸铅系压电材料是钛酸铅(PbTiO_3)和锆酸铅(PbZrO_3)组成的固溶体。这种陶瓷的压电性能大约是钛酸钡的两倍,特别是在 $-55^\circ\text{C} \sim 220^\circ\text{C}$ 的温度范围内无晶相转变,已成为压电陶瓷研究的主要对象。它的缺点是烧结过程中氧化铅(PbO)的挥发问题,难以获得致密的烧结体,以及压电性能依赖于钛和锆的组成比,难以保证性能的均匀一致。克服的办法主要是通过置换原组成元素或添加微量杂质及热压法等。表 1-1 给出了常用压电材料的主要性能参数。

表 1-1

常用压电材料主要性能参数

参数名称	石英	钛酸钡	PZT-4	PZT-5	PZT-6
压电系数/(pC/N)	$d_{11}=2.31$ $d_{14}=0.73$	$d_{15}=260$ $d_{31}=-78$ $d_{33}=190$	$d_{15}\approx 410$ $d_{31}=-100$ $d_{33}=230$	$d_{15}\approx 670$ $d_{31}=-185$ $d_{33}=600$	$d_{15}\approx 3\,300$ $d_{31}=-90$ $d_{33}=200$

(续表)

参数名称	石英	钛酸钡	PZT-4	PZT-5	PZT-6
相对介电常数 ϵ_r	4.5	1 200	1 050	2 100	1 000
居里点/℃	573	115	310	260	300
密度/(10^3 kg/m^3)	2.65	505	7.45	7.5	7.45
弹性模量/(10^3 N/m^2)	80	110	83.3	117	123
机械品质因数	$10^5 \sim 10^6$		≥ 500	80	≥ 800
最大安全应力/(10^5 N/m^2)	95~100	81	76	76	83
体积电阻率/($10^9 \Omega \cdot \text{m}$)	$> 1\ 000$	$10(25^\circ\text{C})$	> 10	$100(25^\circ\text{C})$	
最高允许温度/℃	550	80	250	250	
最高允许湿度/%	100	100	100	100	

1.2.3 压电式传感器及其等效电路

在压电晶片的两个工作面上进行金属蒸镀,形成金属膜,构成两个电极,如图 1-3 所示。当晶片受到外力作用时,在两个极板上积聚数量相等、而极性相反的电荷,形成了电场。因此压电传感器可以看做是一个电荷发生器,也是一个电容器,其电容量按式(1-1) 计算。

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{\delta} \quad (1-1)$$

式中, ϵ 为压电材料的相对介电常数,石英晶体 $\epsilon = 4.5$;钛酸钡 $\epsilon = 1\ 200$; δ 为极板间距,即晶片厚度(m); A 为压电晶片工作面的面积(m^2)。

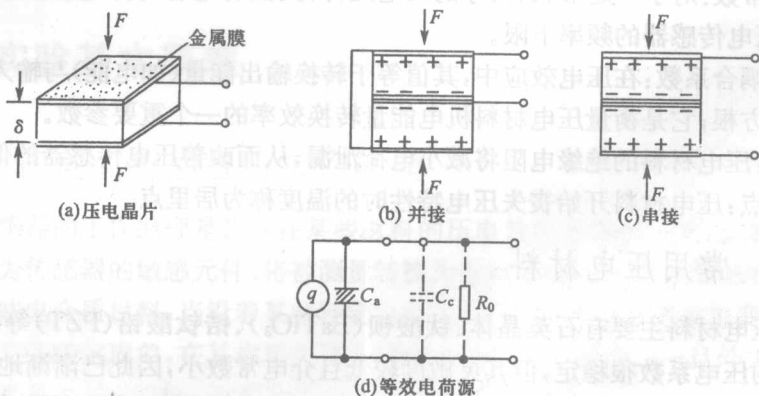


图 1-3 压电晶片及等效电路

如果施加于晶片的外力不变时,积聚在极板上的电荷又无泄漏,那么在外力继续作用时,电荷量是保持不变的,而在力的作用终止时,电荷就随之消失。

实验证明,在极板上积聚的电荷量 q 与作用力 F 成正比,即

$$q = DF \quad (1-2)$$

式中, q 为电荷量(C); D 为压电常数(C/N),与材质及切片方向有关; F 为作用力(N)。

显然,对于一个压电式力传感器,若要测得力值 F ,主要问题是如何测得电荷量值。原则上讲,必须采用不消耗极板上电荷的方法,即所采用的测量手段不从信号源吸取能量。显然,这在实现原理上是困难的。从此点出发,利用压电式传感器测量静态或准静态量值时,必须采取一定措施,使电荷从压电晶片经测量电路的漏失减小到足够小的程度。而在动态交变力作用下,电荷可以不断补充,可以供给测量电路一定的电流,故压电传感器适宜作动态测量。

实际压电传感器中,往往用两个或两个以上的晶片进行串接或并接。并接时(图1-3(b))两晶片负极集中在中间极板上,正极在两侧的电极上。并接时电容量大,输出电荷量大,时间常数大,宜于测量缓变信号,适宜于以电荷量输出的场合。串接时(图1-3(c)),正电荷集中在上极板,负电荷集中在下极板。串接法传感器本身电容小,输出电压大,适用于以电压作为输出信号。

压电式传感器是一个具有一定电容的电荷源。电容器上的开路电压 e_0 与电荷 q 、电容 C_a 存在下列关系

$$e_0 = \frac{q}{C_a} \quad (1-3)$$

当压电式传感器接入测量电路,连接电缆的寄生电容就形成传感器的并联寄生电容 C_c ,后续电路的输入阻抗和传感器中的漏电阻就形成泄漏电阻 R_0 ,如图1-3(d)所示。当考虑负载影响时,根据电荷平衡建立的方程式为

$$q = C \cdot e + \int i dt \quad (1-4)$$

式中, q 为压电元件在外力作用下产生的电荷。 $q = DF = DF_0 \sin \omega t = q_0 \sin \omega t$, ω 为外力的圆频率; C 为电容。 $C = C_a + C_c + C_i$,其中 C_i 为外接电路的输入端电容; C_a 为传感器电容; C_c 为电缆电容; e 为电容上建立的电压, $e = R_0 i$, i 为泄漏电流。

$$\text{式(1-4)可写为} \quad CR_0 i + \int i dt = q_0 \sin \omega t$$

或

$$CR_0 \frac{di}{dt} + i = q_0 \omega \cos \omega t$$

忽略过渡过程,其稳态解为

$$i = \frac{\omega q_0}{\sqrt{1 + (\omega CR_0)^2}} \sin(\omega t + \varphi)$$

$$\varphi = \arctan \frac{1}{\omega CR_0}$$

电容上的电压值为

$$e = R_0 i = \frac{q_0}{C} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega CR_0}\right)^2}} \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-5)$$

式(1-5)表明压电元件的电压输出还取决于回路的时间常数 $R_0 C$ 。在测试动态量时,为了建立一定的输出电压并为了不失真地测量,压电式传感器的测量电路必须有高输入阻抗并在输入端并联一定的电容 C_i 以加大时间常数 $R_0 C$ 。但并联电容过大也会使输出电压降低过多。

1.2.4 测量电路简介

压电式传感器本身具有很高的内阻抗,而输出的能量又非常微弱,因此它的测量电路通常需要有一个高输入阻抗的前置放大级作为阻抗匹配,方可接入到一般的放大、检波和显示等处理电路,或者再经功率放大器至记录仪器。

压电式传感器的前置放大级起到以下两个方面的作用:一是把传感器的高输出阻抗转换成低输出阻抗;二是放大传感器输出的微弱信号。压电式传感器的输出可以是压电信号,也可以是电荷信号。因此,前置放大器也有两种形式:一种是电压放大器,它的输出电压与输入电压(传感器的输出电压)成正比;另一种是电荷放大器,其输出电压与传感器的输出电荷成正比。下面分别介绍电压放大器和电荷放大器的工作原理。

1. 电压放大器(阻抗变换器)

电压放大器的工作原理如图 1-4(a) 和图 1-4(b) 所示,图 1-4(a) 为电路原理,图 1-4(b) 为等效电路图。其中,电阻 $R = R_a R_i / (R_a + R_i)$, 电容 $C = C_c + C_i$, 而 $U_a = q / C_a$, 若压电敏感元件受正弦力 $f = F_m \sin \omega t$ 的作用, 则其输出电压 u_a 可表示为

$$u_a = \frac{dF_m}{C_a} \sin \omega t = U_m \sin \omega t$$

式中, U_m 为压电传感器输出电压幅值, $U_m = dF_m / C_a$; d 是压电系数。

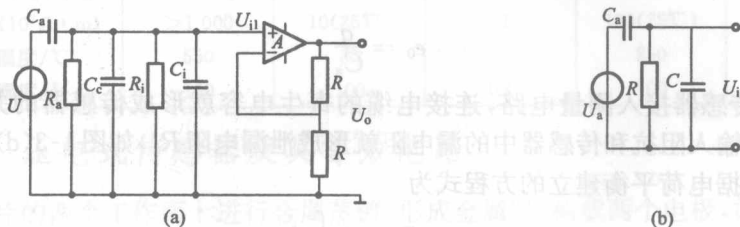


图 1-4 电压放大器工作原理图

由此可得放大器输入端电压 U_i , 其复数形式为

$$U_i = dF_m \frac{jR\omega}{1 + jR\omega(C_i + C_c + C_a)}$$

U_i 的幅值为

$$U_{im} = \frac{dF_m R \omega}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 (C_i + C_c + C_a)^2}} \quad (1-6)$$

输入电压与作用力的相位差为

$$\Phi = \frac{\pi}{2} - \arctan[R(C_a + C_c + C_i)\omega]$$

在理想状态下, 传感器的 R_a 与前置放大器的 R_i 均为无穷大, 即 $\omega R(C_a + C_c + C_i)$ 远大于 1, 所以由式(1-6) 可得理想状态时的输入电压幅值为

$$U_{im} = \frac{dF_m}{C_i + C_c + C_a} \quad (1-7)$$

上式说明前置放大器输入电压与频率无关。一般认为 $\omega/\omega_0 > 3$ 时, 就可以忽略频率的影响了。 ω_0 为测量电路时间常数之倒数, 即 $\omega_0 = 1/R(C_a + C_c + C_i)$, 这表明压电传感器有很好的高频响应, 但是当作用力为静态力($\omega = 0$) 时, 则前置放大器的输入电压为零, 因为电荷会通过放大器输入电阻和传感器本身漏电阻漏掉, 所以压电式传感器不能用于静态力(变形) 的测量, 只能用于动态测量中。由于 U_{im} 与 C_c (电缆分布电容) 有关, 故传感器与前置放大器之间的连接电缆不能随意更换, 否则会引起测量不准确。

2. 电荷放大器

电荷放大器通常作为压电传感器的输出电路, 它由一个反馈电容和高增益运算放大器组成。当忽略并联电阻的影响后, 其等效电路如图 1-5 所示。图中 A 为运算放大器增益, 由于运算放大器输入阻抗极高, 故放大器输入端几乎没有分流, 其输出电压 U_o 为

$$U_o \approx U_d = -\frac{q}{C_f} \quad (1-8)$$

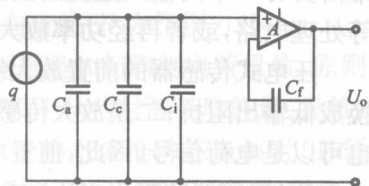


图 1-5 电荷放大器原理图

式中, U_o 为放大器输出电压; U_d 为反馈电容上的压降; 由此可见, 电荷放大器的输出电压与电缆的分布电容无关、而与压电传感器产生的电荷成正比。

1.3 实验目的

- (1) 了解压电式传感器的结构及工作原理, 更好地理解相关的理论知识, 为使用这种传感器, 打下坚实的基础。
- (2) 掌握传感器的静态标定方法, 作出静态标定曲线, 并求出传感器的直线性, 滞后量, 灵敏度。
- (3) 了解这种传感器在工程实际中的应用状况, 弄清其性能特点和应用范围。
- (4) 学习实验结果的处理方法。

1.4 实验仪器

- (1) YD78-1 型单相石英晶体压电测力传感器。
- (2) YE5850 电荷放大器。
- (3) DT9203 数字万用表。
- (4) ES-03、ES-06 型测力环。
- (5) 螺旋加载器。

1.5 实验系统与原理

1.5.1 实验系统

图 1-6 是压电测力传感器静态标定系统框图。

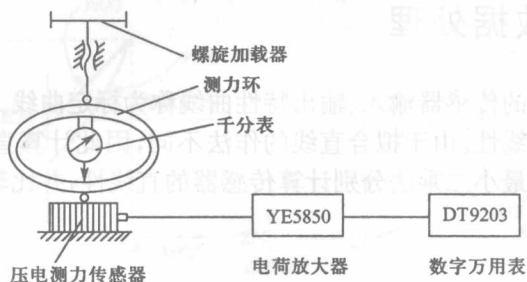


图 1-6

1.5.2 实验原理

由于压电测力传感器的绝缘阻抗很高, 一般大于 $10^{13} \Omega$, 所以可用来测量准静态力。特别是压电测力传感器的固有频率很高, 如 YD78-1 型压电测力传感器在机械扰动和冲击测量中得到广泛的应用。

YD78-1 型压电测力传感器的核心元件是两片 X^0 度切型的石英晶片, 结构上采用双片并联形式, 利用纵向压电效应进行力电转换, 当石英晶片受到机械力作用时, 在其表面将产

生电荷,产生的电荷多少与所施加的机械力成严格的线性关系。即传感器输出的电荷量与传感器所受的外载荷成正比关系。因此测得传感器输出的电荷量,就可以求出外载荷的大小。

在静态标定中,如图 1-6 所示。由螺旋加载器将外载荷通过测力环加到压电测力传感器上。施加的外载荷数值由测力环中的千分表测出。传感器在外载荷作用下产生的电荷经过电荷放大器放大,由数字万用表显示出值。

1.6 实验步骤

1. 熟悉静态标定所用仪器的使用方法

2. 安装与调整仪器

将压电测力传感器和测力环安装在螺旋加载实验台上。并通过螺旋加载器垂直向压电测力传感器施加预载荷 10 公斤力,以消除各接触面的间隙,然后将千分表对零,并将传感器、电荷放大器、数字万用表按使用要求正确地连接起来,经检查无误后接通电源,并预热 10 分钟。

电荷放大器的使用说明见附录 1。

3. 预加载、卸载

本次实验满荷为 100 公斤力,加卸载三次不做记录,目的是使系统处于比较稳定的状态。

4. 加载与卸载

用螺旋加载器向测力传感器加载,每次加载 10 公斤力,加载至 100 公斤力,每次加载的载荷值由测力环中的千分表测出,压电测力传感器对已知外载荷的响应由数字万用表读出示值。

加载至 100 公斤力后,进行卸载,每次卸载 10 公斤力,卸至 0 公斤力。

连续加载,卸载三次,得六组数据。记录于表 1-2 中。

在加载、卸载时,注意旋转螺旋加载器时做到从一个方向接近千分表指示的数值。不要回旋,以提高测量精度。

1.7 实验数据处理

用实验的方法测得的传感器输入、输出特性曲线称为标定曲线。标定曲线和拟合线的接近程度称为传感器的直线性。由于拟合直线的作法不同,因此计算直线性的方法也不相同。本实验采用满量程法和最小二乘法分别计算传感器的直线性,并比较其结果。工程上通常采用满量程法计算直线性。

1. 最小二乘法

最小二乘法拟合直线的拟合原则是 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 为最小值, Δ_i 为标定曲线与拟合直线第 i 点对应值之间的残差。

根据实验数据,运用最小二乘法可以获得一条最佳的拟合直线。其方程为 $y = a + bx$ 。其中

$$a = \frac{(\sum_{i=1}^n X_i^2) \cdot (\sum_{i=1}^n Y_i) - (\sum_{i=1}^n X_i) \cdot (\sum_{i=1}^n X_i \cdot Y_i)}{n \cdot \sum_{i=1}^n X_i^2 - (\sum_{i=1}^n X_i)^2}$$