

第 1 篇 测试技术基础

第 1 章 绪 论

1.1 测试技术概述

1.1.1 测试技术的基本含义

测试技术是一门古老的学科,人们对客观世界的认识活动及改造活动都离不开测试。自古以来,人们在从事生产活动的过程中就已掌握了对长度、重量、面积、时间等进行测量的方法。我国是世界上最早统一度量衡的国家,秦始皇统一度量衡的举措使得测试工作具有了广泛的社会性。

在信息化社会,推动科学技术不断向前发展的当属信息技术,信息技术包括测试技术、计算机技术和通信技术。测试技术是信息技术的重要组成部分,更是信息技术的源头,是信息技术的关键和基础,而且也是现代科学技术与现代化生产中重要的技术手段之一,几乎涵盖了国民经济和社会生活的方方面面。在科学技术领域,信息的获得一般都要以各种测试结果为依据,任何科学理论的建立都需要借助于大量的测试工作;在工农业生产方面,生产工艺过程的自动控制、监视、产品质量的检测、质量控制、性能测试、故障诊断等都离不开测试工作;在社会生活中,经济交往、日常生活同样离不开测试手段。因此可以毫不夸张地讲,没有测试技术便没有科学研究今天的成就和明天的发展,没有测试技术便会导致制造业产品质量体系的彻底崩溃。因此,测试技术是已经或将要从事科研和生产的人员必须了解和掌握的一门重要技术。

测试是具有试验性质的测量,包括测量和试验两个方面。其中,测量指的是使用测试装置来确定被测对象的量值而进行的全部操作;试验指的是在获取被测量量值的基础上,借助于人、计算机或一些数据分析与处理系统,从被测量中提取出有用信息的过程。因此,测试的目的是获取被测对象的有用信息,其过程为:首先通过测量的手段检测出被测对象的有关信息,然后借助于试验的方法加以处理,最后将结果提供给观察者或输入后续信息处理装置或控制系统。

1.1.2 测试技术的内容和任务

1. 测试技术的内容

测试技术的研究内容主要包括四个方面,即测量原理、测量方法、测量系统和数据处理。

测量原理是指实现测量所依据的物理、化学、生物等现象及有关定律。不同性质的被测量可以利用不同的原理进行测量,如加速度可以利用压电晶体的压电效应、温度可以利用热电偶的热电效应来测量,而同一性质的被测量也可以运用不同的原理实现测量,如位移既可以基于电阻应变效应也可以基于电磁感应定律或光电效应来测量。

在确定了测量原理后,可根据测量任务的具体要求和现场实际情况选择不同的测量方

法,如直接测量法或间接测量法、接触测量法或非接触测量法、破坏测量法或非破坏测量法、电测法或非电测法、动态测量法或静态测量法等。

在被测量的测量原理和测量方法确定之后,就可以进行测量装置的设计或选用,从而完成测量系统的构建。

数据处理指的是对测量系统得到的数据加以处理,以获得正确可靠的结果。

2. 测试技术的任务

1) 产品的验收检测

检测产品的某些参数和指标,以判断产品是否满足预期的设计或使用要求,如机械零件的尺寸及形位误差测量等。

2) 工艺过程的工况监测

对工作状态随时间连续变化的工艺过程的某些参数进行动态监视,以便了解其工作状态,预测其运行趋势,及时发现运行过程中可能出现的问题,从而避免重大事故的发生。如自动加工过程中刀具的磨损和断裂情况、发电机组运行状态以及运载火箭飞行参数的监测等。

3) 振动和噪声测量

测量振动和噪声的强度及频谱,经分析找出振动源,进而采取相应的减振防噪措施,以改善劳动条件与工作环境。例如,机床的振动对加工后零件的表面质量及生产率影响较大,为了改善机床的振动性能,有必要对机床进行振动测试研究,从中发现产生振动的主要原因及其影响程度,并对其施以相应的改进措施。

4) 故障诊断

故障诊断有两层含义:一是出现故障时判定故障种类及其位置,以便及时修复;二是故障尚未发生时,确定产品中有关零件距离极限状态的程度,查明产品工作能力下降的原因,以便采取维护措施,防止故障发生。

例如,在图 1.1 所示的车床主轴箱振动监测系统中,压电式加速度计实时拾取主轴箱的振动信号,经电荷放大器处理后送入信号处理系统或计算机进行信号分析。由振动信号的概率密度函数曲线的变化可以判断机床主轴箱工作状态的变化,由振动信号的功率谱、倒频谱图等可以判断故障类型及故障源。

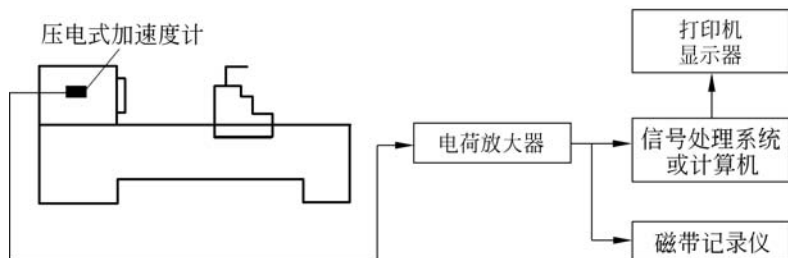


图 1.1 车床主轴箱振动监测系统

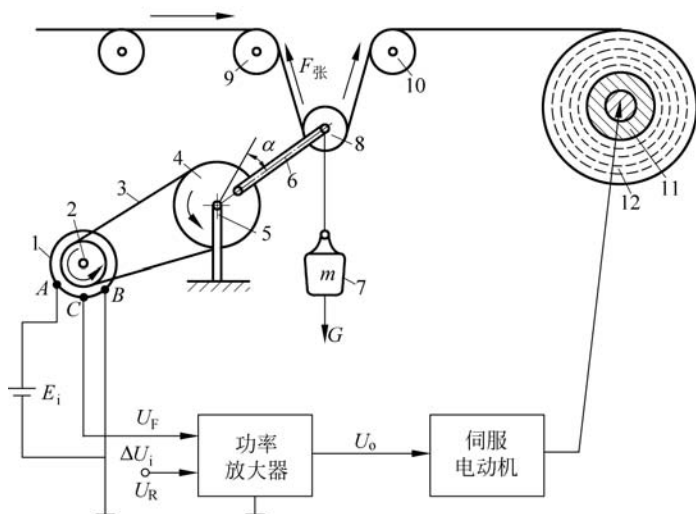
5) 作为自动化闭环测控系统的核心环节

针对闭环测控系统(如数控机床加工工件的尺寸控制、石油炼制过程中的压力控制、家用电冰箱的温度控制、工业锅炉中的汽包水位控制等)的某些参数进行测量,将测量结果与系

统所要达到的标准状态作比较。如果二者之间存在差异,则通过执行机构实施自动调节,从而达到控制这些参数的目的,使系统始终处于预期的状态之下。

例如,在纺织品、印染品、塑料薄膜、纸张的生产中,需要实时检测物料卷取过程中的张力并加以控制,以确保张力维持恒定,以获得厚薄均匀、外形良好的成品卷。图 1.2 所示为布料张力测控原理示意图。卷取辊在伺服电动机的驱动下,将布料顺时针卷成筒状。卷取张力 $F_{\text{张}}$ 与卷取速度有关,过大或过小均会影响成品布卷的质量。

在砝码的重力作用下,张力辊将布料向下拉伸,其拉力 G 与张力 $F_{\text{张}}$ 成正比。当张力发生变化时,张力辊将上下移动,并通过摆动杆带动摆动轮(主动轮)产生较小的角位移 α 。该角位移通过同步带传递给从动轮,从动轮以及与之同轴连接的角位移型电位器式传感器的转动角度放大为 α 的 Z_1/Z_2 倍(Z_1 、 Z_2 分别为主动轮、从动轮的齿数)。传感器输出一个与 α 和 $F_{\text{张}}$ 均成正比的输出电压 U_F , U_F 与设定电压 U_R 相比较后产生差值 ΔU_i ,经功率放大器放大后输出信号 U_o ,再去控制驱动卷取辊的伺服电动机,使卷取辊的旋转速度满足恒张力的要求。



1—角位移型电位器式位移传感器；2—从动轮；3—同步带；4—摆动轮；5—支架；6—摆动杆；
7—砝码；8—张力辊；9、10—传动辊；11—卷取辊；12—布料

图 1.2 布料张力测控原理示意图

1.2 测试技术的发展

测试技术的发展具体体现在以下几个方面。

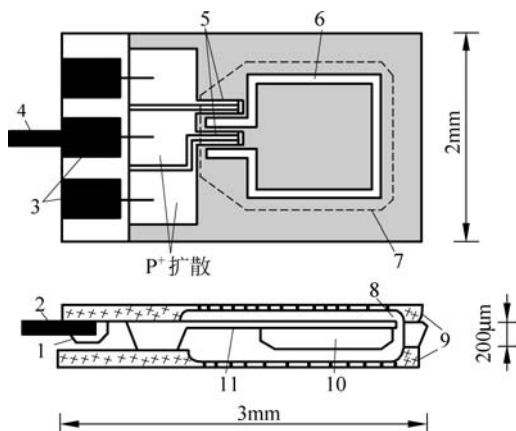
(1) 传感器不断向新型、微型、智能化方向发展。

新型传感器的发展体现在：①发现并利用新现象。日本 Sharp 公司利用超导技术成功研制的高温超导磁性传感器是传感器技术的重大突破,其灵敏度高,仅次于超导量子干涉器件,而它的制造工艺却远比超导量子干涉器件简单,可用于磁成像技术领域。②开发利用新的功能材料。陶瓷、光纤、磁性材料、智能材料、纳米材料的研制成功为新型传感器的制造创造了条件。③开发仿生传感器。仿生传感器就是模仿人的感官的传感器,如视觉传感器、听

觉传感器、嗅觉传感器、味觉传感器、触觉传感器、力觉传感器等。目前,视觉传感器、触觉传感器和力觉传感器已有较好的发展,在智能化高级机器人中具有重要应用。

微型传感器的发展源于不断采用新的制造工艺,如氧化、光刻、扩散、沉积、平面电子工艺、各向异性腐蚀、蒸镀、溅射薄膜、集成工艺、离子注入技术、微细加工技术等,这些先进制造工艺的引入为制造性能稳定、可靠性高、体积小、重量轻的敏感元件提供了充分的技术保证。

图 1.3 所示的悬臂梁式压阻式加速度微传感器由一块硅片(包括敏感质量块和悬臂梁)和玻璃键合而成。使用扩散法,在悬臂梁上集成了 4 个压敏电阻。当质量块在被测加速度作用下运动时,悬臂梁弯曲,通过压敏电阻的阻值变化来感知加速度的大小。该传感器的整体尺寸为 $2\text{mm} \times 3\text{mm} \times 0.6\text{mm}$,可植入人体内测量心脏的加速度,测量的最低加速度值可达 $0.001g$ 。



1—导电环氧树脂; 2,4—引线; 3—键合盘; 5—压敏电阻; 6,8—气隙;
7—玻璃盖板上腐蚀的封闭腔轮廓; 9—玻璃; 10—质量块; 11—硅梁

图 1.3 悬臂梁式加速度微传感器

智能传感器是将传感器与微处理器集成在一起,如图 1.4 所示,使传感器具有判断和信息处理功能,能对测量值进行修正和误差补偿,提高了测量精度;可实现多传感器多参数测量;具有自诊断和自校准功能,提高了测量可靠性;可对测量数据进行存取;有数据通信接口,能与微机等设备直接通信。

(2) 测试向多功能、集成化、智能化发展,从静态测试向动态测试发展,以更好地实现在

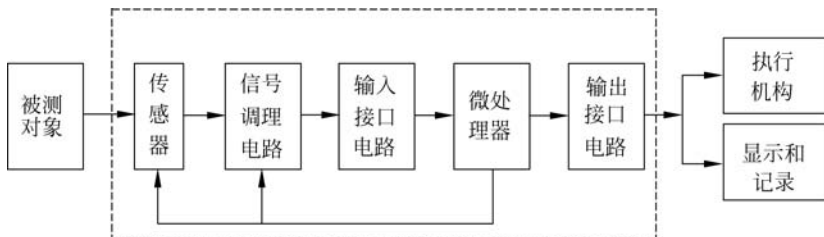


图 1.4 智能传感器的基本组成

线、动态、实时监测与控制。组合式测试方法可以增强测试系统的柔性,从而实现不同层次、不同目标的测试目的。另外,测量方式日益多样化,如便携式光纤干涉测量仪、便携式大量程三维测量系统可用来解决现场大尺寸的测量问题。

(3) 测量尺寸继续向相对于目前测量尺寸的大尺寸和小尺寸的两个极端发展。

随着国民经济的快速发展,生产和工程中的许多测试要求已超出目前所能测试的范围。例如,飞机外形测量、大型机械关键部件测量、高层建筑电梯导轨的准直度测量、油罐车的现场校准等都要求能进行大尺寸测量。另一方面,随着微电子技术、生物技术的快速发展,探索物质微观世界的需求和测量精度的不断提高又要求进行微米、纳米级测量。常见的纳米测量仪器有光干涉测量仪、量子干涉仪、电容测微仪、X射线干涉仪、扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、扫描隧道显微镜(scanning tunnel microscope, STM)、原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)、分子测量机(molecular measuring machine)等。

(4) 信息处理向高在线实时能力、高精度、专用功能、小型化、性能标准化和低价格发展。

(5) 计算机测试技术迅速发展,如多传感器信息融合技术、视觉测试技术以及虚拟仪器得到越来越广泛的应用。

引入多传感器信息融合技术主要是由于多传感器是以不同的方法或从不同的角度来获取信息的,因此可以通过不同的传感器所获取的信息去伪存真,大大提高测量信息的准确性和测量精度。

视觉测试技术是建立在计算机视觉基础上的新兴测试技术,重点研究物体的几何尺寸及物体的位置测量,如三维面形的快速测量、大型工件的同轴度测量、共面性测量,可广泛应用于在线测量、逆向工程等主动、实时测量过程。

虚拟仪器是虚拟现实技术在精密测试领域中的应用。传统的测量仪器主要由信号的采集与控制单元、信号的分析与处理单元、结果的表达与输出单元等三个功能块组成。由于这些功能块基本上是由硬件组成或以固化的软件形式存在,仪器只能由生产厂家来定义和制造,因此传统仪器设计复杂、灵活性差,未能摆脱独立使用、手动操作的模式,整个测试过程几乎仅局限于简单地模仿人工测试的步骤,在一些较为复杂和测试参数较多的场合下,使用起来很不方便。

计算机科学和微电子技术的迅速发展和普及有力地促进了虚拟仪器(virtual instrument, VI)这一新型仪器概念的出现。虚拟仪器的基本构成包括计算机、虚拟仪器软件、硬件接口模块等。虚拟仪器通过软件将计算机硬件资源与仪器硬件有机地融合为一体,从而将计算机强大的计算及处理能力和仪器硬件的测量与控制能力相结合,大大缩减了仪器硬件的成本和体积,并通过软件实现对数据的显示、存储以及分析处理。虚拟仪器应用软件集成了传统仪器的采集、控制、数据分析、结果输出和用户界面等所有功能,使传统仪器的某些硬件甚至整个仪器都被计算机软件替代。虚拟仪器凭借其开发周期短、成本低、易于维护和升级等诸多优势,已成为当今测试仪器领域的主要发展方向。

1.3 本课程的主要内容与思政设计

本课程主要研究机械工程中所需信号的获取、传输、分析及处理,具体内容包括信号及其描述、测试系统的基本组成及其动静态特性的评价方法、机械工程测试中常用传感器的原理与应用、测试信号的分析与调理等。通过本课程的学习,学生能够对测试技术的地位及作用有充分的了解和认识,掌握解决工程中遇到的测试问题所需的基本知识和基本技能,提升实践能力和创新能力,为将来进行工业机器人、数控机床等智能制造装备研发以及人工智能产品设计、自动化生产线开发等工作奠定坚实的基础。

本课程与“高度重视高端制造与智能制造”的国家发展战略高度相关,目前炙手可热的工业机器人、人工智能、新能源动力、航空航天、数控加工等行业均离不开测试技术。另外,本课程的学科专业性较强,其显性的思政教育内容较少,而隐性的思政教育内容非常丰富。因此,我们结合本课程的自身特色及各章节的知识要点,深入挖掘思政案例,提炼其中所蕴含的思政元素,将它们之间的映射关系列入表 1.1 中。

表 1.1 本课程部分知识点、思政案例与思政元素的映射关系

第 1 章 绪论	
知识点	测试技术的地位和作用
案例 1	介绍《中国制造 2025》,深刻领会制造业工业化与信息化融合的重大意义,包括传感器在智能制造装备(如工业机器人、数控机床)、智能化生产线、智能物流管理、状态信息监测与控制、工业物联网等方面的应用及重要作用
思政元素	自主技术创新和钻研敬业精神
案例 2	以“复兴号”动车组上的智能化感知系统为例,介绍我国国家在测试技术方面的创新与领先
思政元素	民族自豪感,科技创新精神
案例 3	上海洋山港全自动码头使用大量的传感器,并结合先进的控制技术,实现了从集装箱装卸到车辆运输所有环节的智能化、无人化操作,如地面上布置有 6 万多个磁钉(磁导航传感器),为自动引导运输车(AGV)的精确定位、无人驾驶、自动导航、路径规划以及自主避障提供必要的信息
思政元素	激发使命感和责任感,树立“科技强国、创新兴邦”的理想
第 2 章 信号分类及描述	
知识点	随机信号
案例	作为随机信号中的一种,振动通常是有害的,如广州虎门大桥的涡振,直接影响桥梁及通行者的安全;机床的振动不仅会影响机件加工质量,而且随之产生的噪声还会影响生产者的身心健康
思政元素	增强安全意识和环保意识,提高对各种振动造成不利影响的防范;做一切工作都应有科学严谨的态度,否则任何一点疏忽都将造成意想不到的损害
第 3 章 测试系统的基本特性	
知识点	测试系统的基本组成
案例	传感器位于测试系统的最前沿,其性能好坏对测试有着重大影响。据报道,某市车管所的车载测速仪将 38、47、52km/h 的车速均检测为 57km/h,直接影响了处罚结果
思政元素	执法部门应秉公执法,提高公信力;普通公民不但要遵章守法,而且也应合理维权

续表

第 4 章 传感器的分类及选用	
知识点 1	传感器的分类
案例	为保障运行的绝对安全,高铁规定全程全列禁烟。列车上装有大量的故障传感器和烟雾报警器,一旦检测到有人抽烟,将自动启动报警系统,迫使列车减速甚至停止运行。但是因乘客抽烟导致高铁被逼停的事件屡有报道
思政元素	遵守社会公德,文明出行
知识点 2	传感器的选用原则
案例 1	个别不良商家通过调整电子秤的灵敏度,或在下面铺垫物品来影响电子秤的平衡,进而影响其准确度,以此达到短斤少两的目的,坑害消费者
案例 2	有些环保部门的工作人员因监测数据造假而获罪
思政元素	遵纪守法、诚实守信
第 5 章 常用传感器及其工程应用	
知识点	光电式传感器的原理与应用
案例	我国的光伏发电科技领先世界,这种清洁能源将逐渐淘汰煤炭发电
思政元素	切合“绿水青山就是金山银山”的绿色发展理念,树立“保护自然环境就是保护人类、建立生态文明就是造福人类”的思想
第 6 章 新型传感器及其工程应用	
知识点	激光传感器的原理与应用
案例	在 2020 年 5 月的珠峰高程(珠峰峰顶相对于黄海平均海平面的高程)测量中,使用 GNSS(全球导航卫星系统)接收机通过北斗卫星进行定位测量,使用雪深雷达探测仪探测峰顶雪深,使用重力仪进行重力测量,采用激光测距技术测量珠峰的海拔高度,利用 5G 技术实现测量数据和视频资料的高速传输。在我国 1975 年和 2005 年的两次珠峰测量中,核心仪器和装备均依赖于进口,而此次测量所用的装备都是我国自主研发的
思政元素	激发爱国之情和民族自豪感,树立探索世界、勇攀高峰的精神
第 7 章 信号分析	
知识点	常用信号分析方法及其应用
案例	为了治理城市环境噪声污染,国内很多城市在重要路段安装了“乱鸣喇叭自动抓拍系统”。该系统由多个声音传感器构成麦克风阵列,并结合定位算法,可准确定位乱鸣喇叭的机动车位置,并在显示屏上标记出其位置,记录乱鸣喇叭的时间和地点,自动识别车辆号牌。利用信号时域分析和频域分析等方法,将机动车喇叭声和电动车喇叭声以及车辆刹车声、轰鸣声、雨滴声、鸟鸣声等噪声精确区分
思政元素	为构建社会主义和谐社会,人人都应养成文明守礼的良好习惯
第 10 章 信号调理	
知识点	滤波器的分类与应用
案例	目前,全球手机微声滤波器主要被美国和日本的公司所垄断,国内厂商占高端微声滤波器的市场份额几乎为零。中国航天科工集团第二研究院 23 所的一支平均年龄 30 岁的研究团队正在进行微声滤波器的国产化研发,他们计划在未来的几年内实现绝大部分滤波器的国产化替代目标
思政元素	勇于尝试,不墨守成规,敢闯能干

习题与思考题

- 1.1 测试的含义是什么？测试技术的内容和任务分别是什么？
- 1.2 测试技术的发展主要体现在哪些方面？
- 1.3 试列举几个日常生活及本专业技术领域中测试技术应用的例子。
- 1.4 结合上海洋山港全自动码头这一典型示例，说明自动引导运输车（AGV）如何实现精确定位及自动导航。