



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

机 · 械 · 制 · 造 · 系 · 列

# 机械工程检测技术 **第三版**

陈瑞阳 田宏宇 主编



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
机械制造系列

# 机械工程检测技术

Jixie Gongcheng Jiance Jishu

第三版

陈瑞阳 田宏宇 主编  
毛智勇 晁 华 刘晓彤 李一男 编



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,根据近年来应用性、技能型人才培养的教学需要,对本书第二版进行了修订,删除了一些陈旧的内容,增加了有关新技术、新知识。全书共9章,分为基础理论和应用技术两部分。基础理论部分介绍检测方法、检测误差、数据处理、常用传感器等基础知识。应用技术部分介绍位移、速度、转速、压力、流量、应变、力、温度、湿度、开关量和数字量、几何量的检测方法,并介绍工程中常用的检测软件 LabVIEW 的使用方法。每章有学习目的、小结和思考题与习题,书后附录为实验指导书,可供各专业根据各自的教学要求组织实训。

本书适用于应用性、技能型人才培养的各类教育,也可供有关工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

机械工程检测技术/陈瑞阳,田宏宇主编.—3版.

—北京:高等教育出版社,2010.11

ISBN 978-7-04-030342-1

I. ①机… II. ①陈… ②田… III. ①机械工程-  
检测-高等学校:技术学校-教材 IV. ①TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 187719 号

|      |     |      |     |      |     |      |    |
|------|-----|------|-----|------|-----|------|----|
| 策划编辑 | 查成东 | 责任编辑 | 贺玲  | 封面设计 | 张雨微 | 责任绘图 | 尹莉 |
| 版式设计 | 余杨  | 责任校对 | 杨凤玲 | 责任印制 | 韩刚  |      |    |

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司  
印 刷 三河市骏杰印刷厂

开 本 787×1092 1/16  
印 张 15.25  
字 数 370 000

购书热线 010-58581118  
咨询电话 400-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landracom.com>  
<http://www.landracom.com.cn>  
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2008年8月第1版  
2010年11月第3版  
印 次 2010年11月第1次印刷  
定 价 23.90元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 30342-00

## 第三版前言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,根据近年来应用性、技能型人才培养的教学需要,本版在第二版的基础上增加了开关量和数字量的测量,介绍了工程中常用的检测软件 LabVIEW 的使用方法等内容,修订了检测技术基础部分,弱化了测试系统理论及信号处理部分,调整了几何测量部分内容的位置,并补充了互换性和公差的相关内容,使该部分趋于完备,成为一个完整体系,以利于不单独开设“互换性与公差”课程的学校选用。

本书以培养学生从事实际工作的基本能力和基本技能为目的,本着理论知识必需、够用为度和少而精的原则,注意理论知识的讲解与工程检测实践的有机结合,从实用性出发,以介绍典型机械量的检测方法为主线,将常用传感器、测量电路和数据分析处理技术等内容有机地融汇到检测方法中讲解,使学生对检测系统和方法有一个完整的认识,能够针对被测对象选用检测装置,实施检测过程,并给出测量结果。

本书在编写时,以技术应用为出发点,在内容上力求概念清楚、通俗易懂、由浅入深,加强实验、实训等实践环节,强调理论知识和实践训练的统一,着重培养学生的科学实践能力、分析问题和解决问题的能力以及创新精神。

全书共 9 章,第 1 章为基础理论部分,讲述检测技术的基础知识、误差处理方法、有关测试信号的描述、常用传感器等知识;第 2 章介绍位移的测量方法;第 3 章介绍速度的测量方法,包括线速度和转速的测量;第 4 章介绍压力和流量的测量方法;第 5 章介绍应变和力的测试方法;第 6 章介绍温度和湿度的测量方法;第 7 章介绍开关量和数字量的测量方法;第 8 章介绍 LabVIEW 检测软件及其应用;第 9 章介绍几何量误差检测方法。在本书的最后附有实验指导书,可供各专业根据各自的教学要求选择组织实训。

本书由北京联合大学机电学院陈瑞阳和田宏宇主编,参加编写的有刘晓彤(第 1 章)、陈瑞阳(绪论、第 2 章、第 3 章)、毛智勇(第 4 章、第 5 章)、田宏宇(第 6 章、第 7 章、第 8 章)、咎华(第 9 章)、李一男(附录),全书由田宏宇负责统稿。本书由孙建东、程光审阅。

本书在编写过程中参考了众多专家的大量著作,这些著作对于本书的编写提供了重要的帮助,在此表示由衷的感谢。

由于作者水平所限,书中难免有错误和不足,衷心希望读者将错误与不足反馈给我们,对此深表感谢。

编 者  
2010 年 9 月

# 目 录

|                        |    |                            |    |
|------------------------|----|----------------------------|----|
| 绪论 .....               | 1  | 3.1.2 相关法测速 .....          | 57 |
| 第1章 检测技术基础 .....       | 5  | 3.2 转速的测量 .....            | 58 |
| 1.1 检测方法和检测误差概述 .....  | 5  | 3.2.1 机械式转速计 .....         | 58 |
| 1.1.1 检测方法 .....       | 5  | 3.2.2 闪光测转速法 .....         | 59 |
| 1.1.2 检测误差的基本概念 .....  | 6  | 3.2.3 数字式转速测量系统 .....      | 59 |
| 1.1.3 随机误差的估算 .....    | 8  | 本章小结 .....                 | 66 |
| 1.1.4 系统误差 .....       | 11 | 思考题与习题 .....               | 66 |
| 1.1.5 粗大误差 .....       | 12 | 第4章 压力与流量的测量 .....         | 68 |
| 1.1.6 测量数据的处理 .....    | 12 | 4.1 压力的表示方法及单位 .....       | 68 |
| 1.2 检测装置的基本特性 .....    | 16 | 4.2 压力传感器 .....            | 69 |
| 1.2.1 线性系统及其主要性质 ..... | 16 | 4.2.1 弹性式压力计 .....         | 69 |
| 1.2.2 检测系统的静态特性 .....  | 17 | 4.2.2 霍尔式压力传感器 .....       | 69 |
| 1.2.3 检测系统的动态特性 .....  | 19 | 4.2.3 应变式压力传感器 .....       | 71 |
| 1.2.4 不失真测试条件 .....    | 24 | 4.2.4 压阻式压力传感器 .....       | 72 |
| 1.3 常用传感器 .....        | 25 | 4.3 压力测量仪表的选择和使用 .....     | 72 |
| 1.3.1 传感器的构成与分类 .....  | 25 | 4.4 流量的测量 .....            | 73 |
| 1.3.2 传感器的命名及代码 .....  | 27 | 4.4.1 体积流量的测量仪表及测量方法 ..... | 73 |
| 1.3.3 传感器的选用 .....     | 28 | 4.4.2 流量计的校验和静态标定 .....    | 75 |
| 本章小结 .....             | 31 | 本章小结 .....                 | 77 |
| 思考题与习题 .....           | 31 | 思考题与习题 .....               | 77 |
| 第2章 位移的测量 .....        | 33 | 第5章 应变和力的测试 .....          | 79 |
| 2.1 概述 .....           | 33 | 5.1 应变的测试 .....            | 79 |
| 2.2 常用位移传感器及测量电路 ..... | 33 | 5.1.1 应变片的工作原理 .....       | 79 |
| 2.2.1 电感式传感器 .....     | 33 | 5.1.2 电桥测量电路 .....         | 81 |
| 2.2.2 涡流式传感器 .....     | 40 | 5.1.3 应变片的选择 .....         | 82 |
| 2.2.3 电容式传感器 .....     | 44 | 5.1.4 应变片的粘贴 .....         | 83 |
| 2.2.4 数字式位移传感器 .....   | 47 | 5.1.5 试件上的布片与接桥 .....      | 83 |
| 2.3 位移测量实例 .....       | 47 | 5.1.6 提高应变测试精度的措施 .....    | 86 |
| 2.3.1 一般线位移测量 .....    | 47 | 5.1.7 应变测试信号的处理分析 .....    | 86 |
| 2.3.2 回转轴误差运动的测量 ..... | 50 | 5.2 力的测试 .....             | 87 |
| 本章小结 .....             | 53 | 5.2.1 测力传感器 .....          | 87 |
| 思考题与习题 .....           | 54 | 5.2.2 切削力测试应用实例 .....      | 92 |
| 第3章 运动速度和转速的测量 .....   | 56 | 5.3 扭矩的测量 .....            | 94 |
| 3.1 运动速度的测量 .....      | 56 | 5.3.1 力臂型扭矩测量装置 .....      | 94 |
| 3.1.1 激光多普勒测速 .....    | 56 | 5.3.2 应变式扭矩传感器 .....       | 95 |

|                             |     |                                     |     |
|-----------------------------|-----|-------------------------------------|-----|
| 5.3.3 数字相位差式扭矩仪 .....       | 96  | 8.2.1 虚拟仪器的组成 .....                 | 140 |
| 本章小结 .....                  | 98  | 8.2.2 硬件模块的功能 .....                 | 142 |
| 思考题与习题 .....                | 99  | 8.2.3 驱动程序 .....                    | 144 |
| <b>第6章 温度和湿度的测量</b> .....   | 100 | 8.2.4 应用软件 .....                    | 145 |
| 6.1 温度的测量 .....             | 100 | 8.3 虚拟仪器软件 .....                    | 146 |
| 6.1.1 温度和温标 .....           | 100 | 8.4 虚拟仪器典型单元模块 .....                | 150 |
| 6.1.2 测温方法 .....            | 101 | 8.5 虚拟仪器应用举例 .....                  | 151 |
| 6.1.3 接触式测温 .....           | 102 | 8.6 虚拟仪器的前景 .....                   | 155 |
| 6.1.4 热电偶传感器 .....          | 102 | 本章小结 .....                          | 157 |
| 6.1.5 热电阻温度传感器 .....        | 107 | 思考题与习题 .....                        | 157 |
| 6.1.6 热敏电阻温度传感器 .....       | 108 | <b>第9章 几何量误差检测</b> .....            | 158 |
| 6.1.7 集成温度传感器 .....         | 108 | 9.1 长度测量基础知识 .....                  | 158 |
| 6.1.8 数字式温度仪表 .....         | 109 | 9.1.1 尺寸传递 .....                    | 158 |
| 6.2 湿度的测量 .....             | 109 | 9.1.2 计量器具 .....                    | 161 |
| 6.2.1 大气湿度与露点 .....         | 110 | 9.2 尺寸误差的测量 .....                   | 162 |
| 6.2.2 测量湿度的传感器 .....        | 110 | 9.2.1 普通计量器具的测量原理、基本结构<br>和功能 ..... | 162 |
| 6.3 无损检测技术 .....            | 113 | 9.2.2 尺寸误差检测举例 .....                | 171 |
| 6.3.1 无损检测方法 .....          | 113 | 9.3 角度的测量 .....                     | 172 |
| 6.3.2 无损检测应用实例 .....        | 115 | 9.3.1 角度测量的基本方法与器具 .....            | 172 |
| 本章小结 .....                  | 116 | 9.3.2 小角度测量 .....                   | 175 |
| 思考题与习题 .....                | 116 | 9.4 几何量误差测量 .....                   | 176 |
| <b>第7章 开关量和数字量的测量</b> ..... | 118 | 9.4.1 概述 .....                      | 176 |
| 7.1 开关量的测量 .....            | 118 | 9.4.2 直线度误差的测量 .....                | 178 |
| 7.1.1 接近开关的规格及接线方式 .....    | 120 | 9.4.3 圆度误差的测量 .....                 | 181 |
| 7.1.2 电感接近开关应用实例 .....      | 120 | 9.4.4 同轴度误差的测量 .....                | 185 |
| 7.1.3 电容接近开关应用实例 .....      | 122 | 9.5 跳动误差的测量 .....                   | 188 |
| 7.1.4 磁性干簧管接近开关应用实例 .....   | 123 | 9.5.1 跳动误差的测量方法 .....               | 188 |
| 7.1.5 霍尔接近开关应用实例 .....      | 124 | 9.5.2 跳动测量基准的体现方式与比较 .....          | 190 |
| 7.1.6 光电开关及光电断续器 .....      | 125 | 9.6 螺纹精度的测量 .....                   | 190 |
| 7.2 数字量的测量 .....            | 127 | 9.6.1 概述 .....                      | 190 |
| 7.2.1 旋转编码器 .....           | 128 | 9.6.2 螺纹的样板检测 .....                 | 191 |
| 7.2.2 光栅传感器 .....           | 130 | 9.6.3 螺纹的综合测量 .....                 | 192 |
| 7.3 工程项目举例 .....            | 133 | 9.6.4 螺纹的单项测量 .....                 | 194 |
| 7.3.1 检测行驶中电车位置的实例 .....    | 133 | 9.7 表面粗糙度的测量 .....                  | 195 |
| 7.3.2 自动化生产线物料分类实例 .....    | 135 | 9.7.1 表面粗糙度及其测量的一般概念 .....          | 195 |
| 本章小结 .....                  | 136 | 9.7.2 比较法评定表面粗糙度 .....              | 197 |
| 思考题与习题 .....                | 137 | 9.7.3 双管显微镜测量表面粗糙度 .....            | 198 |
| <b>第8章 检测软件及其应用</b> .....   | 138 | 9.7.4 TR 系列粗糙度仪简介 .....             | 200 |
| 8.1 虚拟仪器的概念 .....           | 138 | 9.8 三坐标测量机简介 .....                  | 203 |
| 8.2 虚拟仪器的组成及功能 .....        | 140 |                                     |     |

|                       |                         |     |                   |                          |     |
|-----------------------|-------------------------|-----|-------------------|--------------------------|-----|
| 9.8.1                 | 三坐标测量机的工作原理 .....       | 203 | 实验四               | 用自准直仪测量导轨直线度<br>误差 ..... | 220 |
| 9.8.2                 | 三坐标测量机的特点及主要用途 .....    | 204 | 实验五               | 金属箔式应变片性能实验 .....        | 223 |
| 9.8.3                 | 三坐标测量机的主要结构形式 .....     | 204 | 实验六               | 电容式传感器特性 .....           | 225 |
| 9.8.4                 | 三坐标测量机的组成 .....         | 207 | 实验七               | 光电测速传感器特性实验 .....        | 226 |
| 9.8.5                 | 三坐标测量机的应用 .....         | 209 | 实验八               | 差动电感传感器测量位移和<br>振幅 ..... | 227 |
| 本章小结 .....            |                         | 209 | 实验九               | 环形输送线实验台综合<br>实验 .....   | 228 |
| 思考题与习题 .....          |                         | 209 | 实验十               | 转子实验台综合实验 .....          | 231 |
| <b>附录 实验指导书</b> ..... |                         | 211 | <b>参考文献</b> ..... |                          | 234 |
| 实验一                   | 用立式光学计测量塞规 .....        | 212 |                   |                          |     |
| 实验二                   | 用合像水平仪测量直线度<br>误差 ..... | 215 |                   |                          |     |
| 实验三                   | 表面粗糙度的测量 .....          | 218 |                   |                          |     |

# 绪 论

## 1. 检测技术在国民经济中的地位和作用

在人类的各项生产活动和科学实验中,为了了解和掌握整个过程的进展及其最后结果,经常需要对各种基本参数或物理量进行检查和测量,从而获得必要的信息,作为分析、判断和决策的依据。检测技术就是利用各种物理效应,选择合适的方法与装置,将生产、科研、生活中的有关信息,通过检查与测量手段,进行定性的了解和定量的分析所采取的一系列技术措施。

自然科学的产生与发展离不开检测。科学技术的进步是与检测方法、检测技术的不断完善分不开的。著名科学家门捷列夫说过:“科学,只有当人类懂得测量时才开始。”这说明,测量是人类认识自然的主要武器。只有借助于检测技术,人们才有可能发现、掌握自然界中的规律,并利用这些规律为人类服务。

现代科学技术的发展离不开检测技术,特别是科学技术迅猛发展的今天,机械工程、电子通信、交通运输、军事技术、空间技术等许多领域都离不开检测技术。

机械工业在我国社会主义经济建设中占有相当重要的地位。它既要以各种技术装备服务于国民经济各部门,又要提供大量的日用机电产品来满足人们日益增长的物质需求。经过五十多年的努力和发展,现在我国不但可以生产大型、重载的冶金、矿山设备以及高精度的仪器、仪表和机床,而且还可以生产具有尖端技术的航天、航空和航海设备等。

在机械制造行业中,通过对机床的许多静态、动态参数如工件的加工精度、切削速度、床身振动等进行在线检测,从而控制加工质量。在化工、电力等行业中,如果不随时对生产工艺过程中的温度、压力、流量等参数进行自动检测,生产过程就无法控制甚至发生危险。在交通领域,一辆现代化汽车装备的传感器有十几种,分别用于检测车速、方位、转矩、振动、油压、油量、温度等。在国防科研中,检测技术用得更多,许多尖端的检测技术都是因国防工业需要而发展起来的。例如,研究飞机的强度时,要在机身、机翼上贴上几百片应变片并进行动态测量。在导弹、卫星、飞船的研制中,检测技术就更为重要。例如,阿波罗宇宙飞船用了1 218个传感器,运载火箭部分用了2 077个传感器,对加速度、温度、压力、应变、振动、流量、位置、声学等进行监测。近年来,随着家电工业的兴起,检测技术也进入了人们的日常生活中。例如,自动检测并调节房间的温度、湿度等。

总之,检测技术已广泛地应用于工农业生产、科学研究、国内外贸易、国防建设、交通运输、医疗卫生、环境保护和人民生活的各个方面,起着越来越重要的作用,成为国民经济发展和科技进步的一项必不可少的重要基础技术。因而,先进检测技术的应用正成为经济高度发展和科技现代化的重要标志之一。

从另一方面看,现代化生产和科学技术的发展不断地对检测技术提出新的要求,成为促进检测技术向前发展的动力。科学技术的新发现和新成果不断应用于检测技术中,有力地促进了检测技术自身的现代化。

检测技术与现代化生产和科学技术的密切关系,使它成为一门十分活跃的技术学科,几乎参

透到人类的一切活动领域,发挥着愈来愈大的作用。

## 2. 检测系统的组成

完整的检测系统或检测装置通常是由传感器、信号处理电路和显示记录装置等部分组成,分别完成信息获取、转换、显示和处理等功能。图 0.1 给出了检测系统的组成框图。

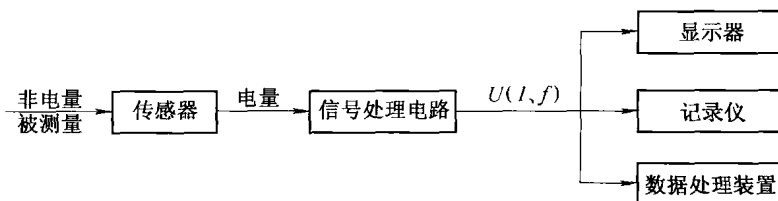


图 0.1 检测系统的组成框图

### (1) 传感器

传感器又称变换器或转换器、变送器,是检测系统的信号拾取部分,作用是感受被测量并将其转换成可用信号输出,通常这种输出是电信号。如将机械位移量转换成电阻、电容或电感等参数的变化,将振动或声音信号转换成电压或电荷的变化。

### (2) 信号处理电路

信号处理电路又称测量电路或中间变换电路。用于对传感器输出的信号进行加工,作用是把传感器输出的微弱信号变成具有一定功率的电压、电流或频率信号,以满足显示记录装置的要求。如将阻抗的变化转换成电压或电流的变化;又如将信号进行放大、调制与解调、线性化以及转换成数字信号等。经过这样的加工使之变成一些合乎需要,便于传送、显示或记录以及可作进一步处理的信号。对于电阻应变式传感器,被测量引起传感器直接变化的是粘贴在传感器弹性元件上的应变片的电阻变化。信号处理电路通过测量电桥电路及放大电路等,把该电阻量变化转换成电压量输出。对于电感、电容、压电传感器,被测量引起传感器直接变化的是电感量、电容量和电荷量,然后经过信号处理电路,可获得足够大量值的电压或电流输出。信号处理电路还能起阻抗变换的作用,如压电传感器具有高的输出阻抗,经过信号处理电路后,输出阻抗降低,这样才能与某些记录仪相匹配。

应当指出,测量电路的种类和构成是由传感器的类型决定的,不同的传感器所要求配用的测量电路经常具有自己的特色。在以后各章节中,我们将针对不同的传感器作详细介绍。

### (3) 显示、记录部分

显示、记录部分的作用是将信号处理电路输出的被测信号转换成人们可以感知的形式,如指针的偏转、数码管的显示、荧光屏上的图像等。还可将此电信号记录在适当的介质(如磁带、记录纸等)上,以供人们观测和分析。目前,常用的显示器有四类:模拟显示、数字显示、图像显示及记录仪等。

模拟显示是利用指针对标尺的相对位置表示被测量数值的大小。如各种指针式电气测量仪表,常见的有毫伏表、微安表、模拟光柱等,其特点是读数方便、直观,结构简单,价格低廉,在检测系统中一直被大量应用。但这种显示方式的精度受标尺最小分度限制,而且读数时易引入主观误差。

数字显示则直接以十进制数字形式来显示读数,专用的数字表它可以附加打印机,打印记录

测量数值,并且易于和计算机联机,使数据处理更加方便。这种方式有利于消除读数的主观误差,目前多采用发光二极管(LED)和液晶(LCD)等以数字的形式来显示读数。前者亮度高,后者耗电省。

图像显示,如果被测量处于动态变化之中,用一般的显示仪表读数就十分困难,这时可以将输出信号送至显示装置,用示波管(CRT)或LCD屏幕来显示被测参数的变化曲线或读数,有时还可用图表、彩色图等形式来反映整个生产线上的多组数据。

记录仪主要用来记录被测量随时间变化的曲线,作为检测结果,供分析使用。常用的记录仪有笔式记录仪、光线示波器、磁带记录仪、快速打印机等。

显示、记录部分通常都是选用市场上现售的标准设备。

### 3. 检测技术发展概况

检测技术是随着现代科学技术的发展而迅速发展起来的一门新兴学科。20世纪20年代,检测技术已经应用在机械工程试验和生产过程的自动控制中。1946年电子数字计算机诞生,并很快渗透到机械行业。20世纪50年代初期出现了第一批机电一体化产品——数控机床,它将机械加工、检测技术和计算机技术结合在一起,大大提高了加工精度和生产效率。目前,在现代机械制造最具代表性的产品中,如数控机床、机器人、柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统(CIMS)等,检测技术已成为不可缺少的重要组成部分。

近年来,由于物理学、化学、材料学,特别是半导体材料学、微电子学等方面的新成就,使新型检测系统正在向器件集成化、信息数字化和控制智能化方向发展,新型或具有特殊功能的传感器不断涌现出来。检测技术的新进展主要表现在以下几个方面:

#### (1) 不断提高检测系统的测量精度、量程范围,延长使用寿命,提高可靠性

随着科学技术的不断发展,对检测系统测量精度的要求也相应地在提高。近年来,人们研制出许多高精度的检测仪器以满足各种需要。例如,用直线光栅测量直线位移时,测量范围可达二三十米,而分辨率可达微米级。人们已研制出能测量小至几十帕的微压力和大到几千兆帕高压的压力传感器,开发了能够检测出极微弱磁场的磁敏传感器。从20世纪60年代开始,人们对传感器的可靠性和故障率的数学模型进行了大量的研究,使得检测系统的可靠性及寿命大幅度地提高,现在许多检测系统可以在极其恶劣的环境下连续工作数万小时。目前,人们正在不断努力,以进一步提高检测系统的各项性能指标。

#### (2) 应用新技术和新的物理效应,扩大检测领域

检测原理大多以各种物理效应为基础,人们根据新原理、新材料和新工艺研究所取得的成果,将研制出更多品质优良的新型传感器。例如光纤传感器、液晶传感器、以高分子有机材料为敏感元件的压敏传感器、微生物传感器等。近代物理学的成果如激光、红外、超声、微波、光纤、放射性同位素等的应用,都为检测技术的发展提供了更多的途径。如激光测距、红外测温、超声波无损探伤、放射性测厚等非接触测量的迅速发展。另外,代替视觉、嗅觉、味觉和听觉的各种仿生传感器和检测超高温、超高压、超低温和超高真空等极端参数的新型传感器,将是今后传感器技术研究和发展的重要方向。

#### (3) 发展集成化、功能化的传感器

随着超大规模集成电路技术的发展,硅电子元件的集成化有可能大量地向传感器领域渗透。人们将传感器与信号处理电路制作在同一块硅片上,得到体积小、性能好、功能强的集成传感器,

使传感器本身具有检测、放大、判断和一定的信号处理功能。例如,已研制出高精度的 PN 结测温集成电路;又如,人们已能将排成阵列的成千上万个光敏元件及扫描放大电路制作在一块芯片上,制成 CCD 摄像机。今后,还将在光、磁、温度、压力等领域开发新型的集成化、功能化的传感器。

#### (4) 采用微机技术,使检测技术智能化

从 20 世纪 60 年代微处理器问世后,人们已逐渐将计算机技术应用到检测系统中,使检测仪器智能化,从而扩展了功能,提高了精度和可靠性。计算机技术在检测技术中的应用,还突出地表现在整个检测工作可在计算机控制下,自动按照给定的检测实验程序进行,并直接给出检测结果,构成自动检测系统。其它诸如波形存储、数据采集、非线性校正和系统误差的消除、数字滤波、参数估计等方面,也都是计算机技术在检测领域中应用的重要成果。目前,新研制的检测系统大都带有微处理器。

### 4. 本课程的任务和学习要求

“检测”是测量,“计量”也是测量,两者的区别在于:“计量”是指用精度等级更高的标准量具、器具或标准仪器,对送检量具、仪器或被测样品、样机进行考核性质的测量,这种测量通常具有非实时及离线和标定的性质,一般在规定的具有良好环境条件的计量室、实验室,采用比被测样品、样机更高精度的并按有关计量法规定期校准的标准量具、器具或标准仪器进行测量;而“检测”通常是指在生产、实验等现场,利用某种合适的检测仪器或综合测试系统对被测对象进行在线、连续的测量。

对于机械及机电一体化专业来说,本课程是一门技术基础课。通过本课程的学习,使学生初步掌握静、动态测试所需要的基本理论、基本知识和基本技能。对机械工程中常见的被测量能够较正确地选用检测装置并完成检测任务。

学生在学完本课程后应具有以下几方面的知识:

- (1) 了解机械工程检测的基本概念和测量数据的处理方法。
- (2) 基本掌握常用传感器及其测量电路的工作原理和性能。
- (3) 针对常见的机械量,能够正确地选用检测装置。
- (4) 掌握典型机械量的检测方法。
- (5) 掌握典型几何量的测量方法,初步学会使用常用的计量器具。

本课程涉及的学科面广,需要有较广泛的基础和专业知识,学好本门课的关键在于理论联系实际。要富于设想,善于借鉴,重视实验环节,参加必要的实验,这样才能得到检测能力的训练。

本书各章均附有数量较多的应用实例及思考题与习题,引导学生循序渐进地掌握检测技术的实际应用能力。

# 第1章 检测技术基础

通过本章的学习,你将能够:

- 了解常用的检测方法及其特点。
- 懂得产生测量误差的原因及不同类型误差的处理方法。
- 对检测装置的基本特性有一个全面的了解,知道不失真检测的条件。
- 了解传感器的构成、分类及选用方法。

## 1.1 检测方法和检测误差概述

为了实现对一种特定物理量的检测,需要涉及检测原理、检测方法和检测系统三个要素。所谓检测原理,是指实现测量所依据的物理现象和物理定律的总体。例如,热电偶测温依据热电效应,压电晶体测力依据压电效应,激光测距依据多普勒效应等。检测方法是指实现测量所使用的原理和设备。检测系统是指具有一定特性并用于测量的装置。

### 1.1.1 检测方法

根据检测时被测量具有的不同特征,检测方法有许多种分类。

#### 1. 电测法和非电测法

两者的差别在于检测回路中是否有检测信息的电信号转换。在现代检测技术中都是采用电测方法来检测非电量。广泛采用非电量电测法的原因是电测法可以获得很高的灵敏度和精度,可以实现远距离传输,便于实现测量过程的自动化,便于实现测量与控制的联动。

#### 2. 静态测量和动态测量

这两种测量方法是根据被测物理量的性质来划分的。静态测量即测量那些不随时间变化或变化很缓慢的物理量,例如工件几何尺寸的测量。动态测量即测量那些随时间快速变化的物理量,例如机械振动的测试。

静态与动态是相对的,可以把静态测量看作是动态测量的一种特殊形式。动态测量的误差分析比静态测量要复杂得多。

#### 3. 直接测量和间接测量

直接测量是用预先标定好的测量仪表,对某一未知量直接进行测量,得到测量结果。例如,用压力表测量压力、用游标卡尺测出轴径的大小等。直接测量的优点是简单而迅速,所以在工程上被广泛应用。

间接测量是对几个与被测物理量有确切函数关系的物理量进行直接测量,然后把所得的数据代入关系式中进行计算,从而求出被测物理量。例如,如图 1.1 所示,对于小于半圆的圆弧形工件,可以通过测量圆弧的弦长  $L$  和弓高  $H$  计算出工件的直径  $D$ :

$$D = \frac{L^2}{4H} + H$$

#### 4. 接触测量和非接触测量

接触测量是指测量时,仪器的测头与工件表面直接接触,由于有接触变形的影响,将给测量带来误差。

非接触测量是指测量时,仪器的敏感元件与工件表面不直接接触,因而没有接触变形的影响。一般利用光、气、磁等物理量关系使敏感元件与工件建立联系。

#### 5. 绝对测量和相对测量

绝对测量是指能直接从计量器具的读数装置读出被测量整个数值的测量。如用千分表测量轴的直径。

相对测量又称比较测量,是先用标准器具调整计量器具的零位,测量时由仪器的读数装置读出被测量相对于标准器具的偏差,被测量的整个量值等于所示的偏差与标准量的代数和。例如用量块调整比较仪进行相对测量。

#### 6. 离线测量和在线测量

离线测量又称被动测量,是在零件加工完成后进行的测量,其作用仅限于发现并剔除废品。

在线测量又称主动测量,是在工件加工过程中进行的测量。它可直接用来控制零件的加工过程,决定是否需要继续加工或调整机床,能及时防止废品的产生。

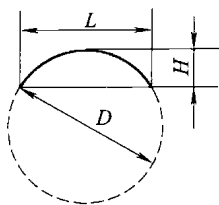


图 1.1 弦长弓高测量法

### 1.1.2 检测误差的基本概念

#### 1. 误差的定义

被测物理量所具有的客观存在的量值,称为真值,记为  $x_0$ 。由检测装置测得的结果称为测量值,记为  $x$ 。测量值与真值之差称为误差。误差一般有以下两种表达形式。

##### (1) 绝对误差 $\delta$

测量值  $x$  与真值  $x_0$  之差称为绝对误差,它表示误差的大小。

$$\delta = x - x_0$$

真值是一个理想概念,一般无法得到。实际测量中常用高精度的量值或平均值代表真值,称为“约定真值”。

##### (2) 相对误差 $\varepsilon$

绝对误差  $\delta$  与被测量的真值  $x_0$  之比称为相对误差,一般用百分比(%)表示。因测量值与真值接近,所以也可近似用绝对误差与测量值之比作为相对误差。

$$\varepsilon = \frac{\delta}{x_0} \times 100\% \approx \frac{\delta}{x} \times 100\%$$

绝对误差只能表示出误差量值的大小,不便于比较测量结果的精度。例如,有两个温度测量结果  $(15 \pm 1)^\circ\text{C}$  和  $(50 \pm 1)^\circ\text{C}$ ,尽管它们的绝对误差都是  $\pm 1^\circ\text{C}$ ,但后者的精度显然高于前者。

##### (3) 引用误差 $\gamma$

为了使用方便,对计量器具还常常使用“引用误差”的概念,它是以测量仪表某一刻度值的绝对误差为分子,满刻度值为分母所得的比值。

$$\text{引用误差} = \frac{\text{某一刻度值的误差}}{\text{满刻度值}} \times 100\%$$

引用误差是一种实用方便的相对误差,常在多挡和连续刻度的仪器仪表中应用。

## 2. 误差的来源

测量误差产生的原因可以归纳为以下五个方面:

### (1) 基准件误差

如量块和标准线纹尺等长度基准的制造或检定误差会带入测量值中。一般取基准件误差为测量误差的  $1/5 \sim 1/3$ 。

### (2) 测量装置误差

测量装置的误差包括仪器的原理误差和制造、调整误差,仪器附件及附属工具的误差,被测件与仪器的相互位置的安置误差,接触测量中测力及测力变化引起的误差等。

### (3) 方法误差

由于测量方法不完善而引起的误差,如经验公式、函数类型选择的近似性引入的误差,尺寸对准方式引起的对准误差,在拟定测量方法时由于知识不足或研究不充分而引起的误差等。

### (4) 环境误差

环境条件不符合标准而引起的误差,如温度、湿度、气压、振动等。在几何量测量中,温度是主要因素。测量时的标准温度定为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,精密工件、刀具和量具的测量需要在计量室中进行。一般车间没有控制温度的条件,应使量仪与工件等温后测量。

### (5) 人员误差

由于测量者受分辨能力的限制、固有习惯引起的读数误差以及精神因素产生的一时疏忽等引起的误差。

总之,产生测量误差的因素是多种多样的,在分析误差时,应找出产生误差的主要原因,并采取相应的措施,以保证测量精度。

## 3. 误差按特征的分类

根据测量误差的特征,可将误差分为三类:系统误差、随机误差和粗大误差。

### (1) 系统误差

在同一测量条件下,对同一被测量进行多次测量时,误差的绝对值和符号保持不变或在条件改变时按一定规律变化的误差称为系统误差。例如,仪表的刻度误差和零位误差、应变片电阻值随温度的变化等都属于系统误差。

因为系统误差有规律性,所以应尽可能通过分析和试验的方法加以消除,或通过引入修正值的方法加以修正。

### (2) 随机误差

在同一测量条件下,对同一被测量进行多次测量时,误差的绝对值和符号以不可预定的方式变化的误差称为随机误差。例如,仪表中传动件的间隙和摩擦、连接件的变形、测量温度的波动等因素引起的误差。

应当指出,在任何一次测量中,系统误差和随机误差一般都是同时存在的,而且它们之间并不存在严格界限,在一定的条件下还可以互相转化。例如,仪表的分度误差,对制造者来说具有

随机的性质,为随机误差;而对检测部门来说就转化为系统误差了。随着人们对误差来源及其变化规律认识的深入和检测技术的发展,对系统误差与随机误差的区分会越来越明确。

(3) 粗大误差

粗大误差是一种显然与实际值不符的误差,主要是由于测量人员的粗心大意、操作错误、记录 and 运算错误或外界条件的突然变化等原因产生的。由于粗大误差明显地歪曲了测量结果,因此在处理测量数据时,应根据判别粗大误差的准则将其剔除。

4. 测量结果的精度

测量结果与真值接近的程度称为精度。它可细分为:

(1) 精密度

精密度反映测量结果中随机误差的大小程度,即在一定条件下进行多次重复测量时,所得结果的分散程度。

(2) 准确度

准确度反映测量结果中系统误差的大小程度,即测量结果偏离真值的程度。

(3) 精确度

精确度反映系统误差与随机误差综合影响的程度,即测量结果与真值的一致程度。

如图 1.2 所示的三种打靶结果,图 1.2a 表示系统误差小而随机误差大,即准确度高而精密度低;图 1.2b 表示系统误差大而随机误差小,即准确度低而精密度高;图 1.2c 表示两种误差都小,即精确度高。

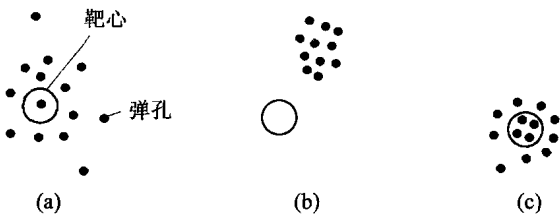


图 1.2 精度

1.1.3 随机误差的估算

虽然一次测量的随机误差的产生没有规律,但是通过大量的测量发现,在多次重复测量的总体上,随机误差却服从一定的统计规律,最常见的就是正态分布规律。

1. 随机误差的分布及其特征

现进行如下实验,对一个工件的某一部位用同一方法进行 150 次重复测量,所得的一系列测得值常称为测量列。将测得的尺寸进行分组,从 7.130 5 mm 到 7.141 5 mm 每隔 0.001 mm 为一组,共分 11 组,其每一组的尺寸范围如表 1.1 中第 1 列所示,每组中工件尺寸出现的次数为  $n_i$ ,列于表中第 3 列。若总的测量次数用  $N$  表示,则可算出各组的相对出现次数  $n_i/N$ ,列于表中第 4 列。用横坐标表示测得值  $x$ ,纵坐标表示相对出现次数  $n_i/N$ ,则得图 1.3a 所示的图形,称为频率直方图。连接每个小方框上部的中点,得一折线,称为实际分布曲线。若将上述测量次数  $N$  无限增大,而分组间隔取值很小,  $\Delta x$  就趋近于零,且用测量的绝对误差  $\delta$  代替测得尺寸  $x_i$ ,则得图 1.3b 所示的光滑曲线,即随机误差的正态分布曲线。

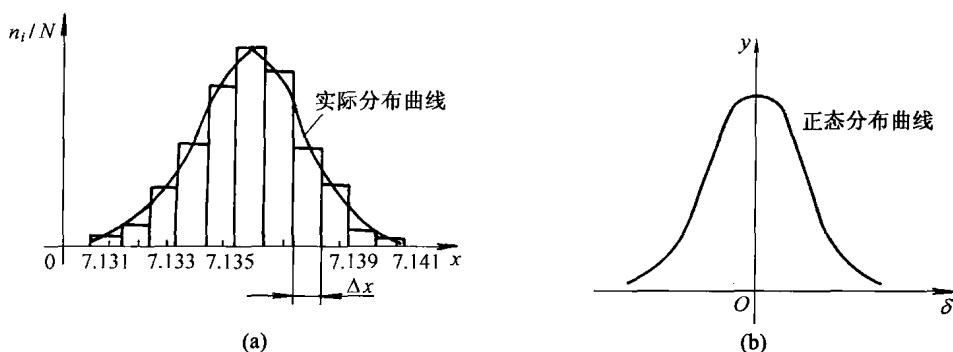


图 1.3 频率直方图和正态分布曲线

表 1.1 频率计算示例

| 测量值范围             | 测量中值             | 出现次数 $n_i$   | 相对出现次数 $n_i/N$ |
|-------------------|------------------|--------------|----------------|
| 7.130 5 ~ 7.131 5 | $x_1 = 7.131$    | $n_1 = 1$    | 0.007          |
| 7.131 5 ~ 7.132 5 | $x_2 = 7.132$    | $n_2 = 3$    | 0.020          |
| 7.132 5 ~ 7.133 5 | $x_3 = 7.133$    | $n_3 = 8$    | 0.054          |
| 7.133 5 ~ 7.134 5 | $x_4 = 7.134$    | $n_4 = 18$   | 0.120          |
| 7.134 5 ~ 7.135 5 | $x_5 = 7.135$    | $n_5 = 28$   | 0.187          |
| 7.135 5 ~ 7.136 5 | $x_6 = 7.136$    | $n_6 = 34$   | 0.227          |
| 7.136 5 ~ 7.137 5 | $x_7 = 7.137$    | $n_7 = 29$   | 0.193          |
| 7.137 5 ~ 7.138 5 | $x_8 = 7.138$    | $n_8 = 17$   | 0.113          |
| 7.138 5 ~ 7.139 5 | $x_9 = 7.139$    | $n_9 = 9$    | 0.060          |
| 7.139 5 ~ 7.140 5 | $x_{10} = 7.140$ | $n_{10} = 2$ | 0.013          |
| 7.140 5 ~ 7.141 5 | $x_{11} = 7.141$ | $n_{11} = 1$ | 0.007          |

根据概率论,正态分布密度曲线可用下式表示:

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1.1)$$

式中, $y$  为概率密度; $\sigma$  为标准偏差; $e$  为常数, $e=2.718\ 28$ ; $\delta$  为随机误差(绝对误差)。

随机误差的正态分布有以下基本性质:

- 1) 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的机会要多,即单峰性。
- 2) 测量次数很多时,绝对值相等的正负误差出现的机会相等,即对称性。由此推理,随着测量次数趋于无穷大,随机误差的算术平均值将趋于零,即抵偿性。
- 3) 在一定条件下,误差的绝对值不会超过一定的限度,即有界性。

随机误差的分布多数属于正态分布。正态分布随机误差的评定指标有两类:一类表示分布中心的位置,其数字特征为算术平均值;另一类表示分散的程度,其数字特征为标准偏差(均方根偏差)。

## 2. 算术平均值

对某量进行  $n$  次等精度的、无系统误差的测量,测得值为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 则算术平均值为

$$\bar{X} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1.2)$$

当测量次数无限大时,被测量的算术平均值即为真值。但实际上进行无限多次测量是不可能的,真值也就难以得到。而作为有限次测量,算术平均值则最接近真值,因此以算术平均值作为测量结果是可靠而合理的。

## 3. 标准偏差

由式(1.1)可知,当  $\delta=0$  时,概率密度最大,即  $y_{\max} = 1/(\sigma\sqrt{2\pi})$ 。若  $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ , 则  $y_{1\max} > y_{2\max} > y_{3\max}$ 。即  $\sigma$  越小,  $y_{\max}$  越大,正态分布曲线越陡,随机误差的分布越集中,测量的精密度越高。图 1.4 表示了三种不同标准偏差的正态分布曲线。

由上述可知,测量的精密度可用标准偏差  $\sigma$  来表示。

### (1) 单次测量值的标准偏差

在一定的条件下,对某一被测量进行连续多次的重复测量,得到的一系列测量值称为测量列,其中每一个测量值称为单次测量值。

单次测量值的标准偏差可表示为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{n}} \quad (1.3)$$

由于  $\delta = x - x_0$ , 而  $x_0$  为真值,不易得到。实际上常采用残余误差(简称残差)  $\nu_i$  计算标准偏差的估计值。残余误差为某测量值与算术平均值之差,即

$$\nu_i = x_i - \bar{X} \quad (1.4)$$

通过数学推导,单次测量的标准偏差可用下式表示:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \nu_i^2}{n-1}} \quad (1.5)$$

### (2) 测量列算术平均值的标准偏差

算术平均值的标准偏差可表示为

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1.6)$$

增加测量次数可以提高测量精度。但当  $\sigma$  一定时,在  $n > 10$  以后,测量次数的增加对提高精度的影响已很小。因此,一般情况下取  $n \leq 10$ 。若要进一步提高测量精度,则需采取其它措施来解决。

## 4. 极限误差

用标准偏差  $\sigma$  评价随机误差是一个统计平均值,在许多情况下需要知道其极限误差的大小。由于随机误差具有一定分布,可以通过分布去估计随机误差的最大取值范围。

设测量结果(单次测量值或测量列的算术平均值)的误差不超过某极端误差的概率为  $P$ , 若

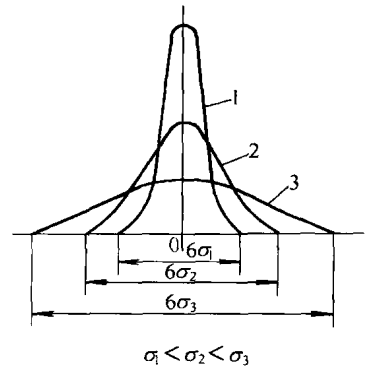


图 1.4 标准偏差对随机误差分布性质的影响