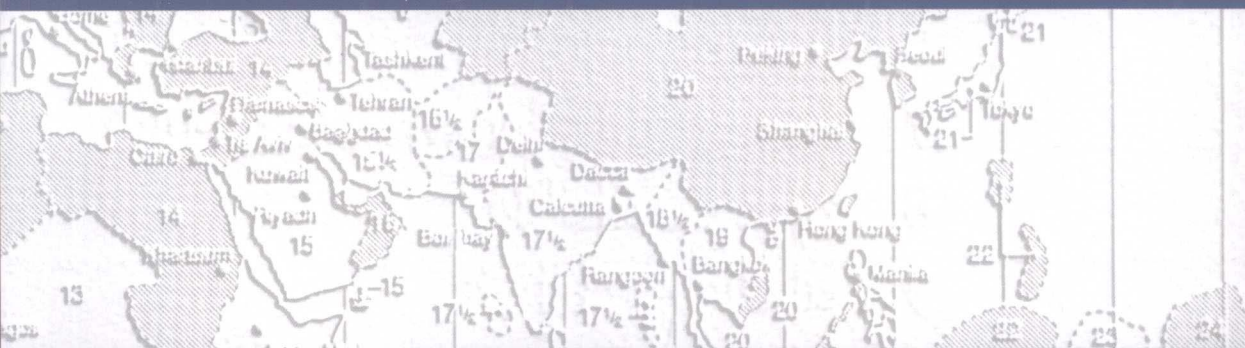




卓越系列 · 21世纪高职高专精品规划教材



传感检测技术

SENSING DETECTION
TECHNOLOGY

主 编 王淼



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

卓越系列·21 世纪高职高专精品规划教材

传感检测技术

Sensing Detection Technology

主 编 王 森

副主编 赵剑锋 杨 敏 刘丹洁



内 容 提 要

本书共分 12 章。第 1 章讲述检测技术的基本知识,第 2~10 章介绍常用传感器的工作原理、基本结构、主要性能、测量电路和应用方法,第 11 章讲述检测技术在实际生产技术中的典型应用,第 12 章着重介绍检测装置中微弱信号的放大、变换和线性化处理及与微机的接口技术。

本书可作为电气自动化、机电一体化、汽车制造、电子技术应用等专业的专业教材或教学参考书,也可供测控领域的工程技术人员、科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感检测技术/王森主编. —天津:天津大学出版社,
2009.1

ISBN 978 - 7 - 5618 - 2232 - 6

I. 传… II. 王… III. 传感器 - 检测 - 基本知识
IV. TP212.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 165469 号

出版发行 天津大学出版社

出 版 人 杨欢

地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)

电 话 发行部:022 - 27403647 邮购部:022 - 27402742

印 刷 廊坊市长虹印刷有限公司

经 销 全国各地新华书店

开 本 169mm × 239mm

印 张 15.75

字 数 327 千

版 次 2009 年 1 月第 1 版

印 次 2009 年 1 月第 1 次

印 数 1 - 3 000

定 价 25.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

作为信息获取的重要手段之一,传感器是将电子系统无法处理的外界物理量或化学量转换为电信号的重要器件。检测技术的功能就是对传感器输出信号进行处理与转换,使其能够被计算机接收,从而实现对被控对象的控制。传感检测技术是实现信息化的关键技术之一,在当代科学技术领域中占有十分重要的地位。

本书作为高等工科学校电气应用类专业“传感检测技术”课程教材,主要介绍了在工业、科研领域常用传感器的工作原理、特性参数、综合应用等方面的知识,对检测技术的基本概念、现代测试技术也作了介绍。本书力图使学生获得传感器、现代检测系统等方面的基本理论和应用技术。本书在介绍传感器的工作原理时把传感器的应用归并到检测系统中的信号处理及检测技术的综合应用中。这样编排既便于读者理解传感器的工作原理,又便于了解多种测量方法在实践中的具体应用。本书除了介绍温度、压力、流量、位移、厚度、转速、加速度等常用过程参数的检测外,还介绍了水分、湿度、密度、气体浓度和成分、接近开关、位置检测、无损探伤等的检测方法,有利于拓宽学生的专业面,增强学生的适应性。

本书共分12章。第1章讲述了检测技术的基本知识,第2~10章介绍了常用传感器的工作原理、基本结构、主要性能、测量电路和应用方法,第11章讲述了检测技术在实际生产技术中的典型应用,第12章着重介绍了检测装置中微弱信号的放大、变换和线性化处理及与微机的接口技术。

全书由王淼担任主编,其中第1、2、9~11章由王淼编写,第3、4、12章由赵剑锋编写,第5、6章由杨敏编写,第7、8章由刘丹洁编写。全书计划为64学时。

由于编者水平有限,缺点和错误之处在所难免,恳请各位读者批评指正。

编 者

2008年8月

目 录

第 1 章 传感检测技术的基础知识	1
1.1 传感检测系统的组成	1
1.2 传感检测技术的应用及发展方向	5
1.3 传感检测系统基本特性的评价指标	8
1.4 误差的基本概念	13
习题与思考题一	21
第 2 章 电阻式传感器	24
2.1 电阻应变式传感器	24
2.2 气敏电阻传感器	36
2.3 湿敏电阻传感器	40
习题与思考题二	44
第 3 章 电容式传感器	47
3.1 电容式传感器的工作原理	47
3.2 电容式传感器的测量电路	52
3.3 电容式传感器的应用	54
习题与思考题三	58
第 4 章 电感式传感器	62
4.1 自感式电感传感器	62
4.2 差动变压器	69
4.3 电涡流式传感器	72
4.4 接近开关简介	78
习题与思考题四	82
第 5 章 压电式传感器	90
5.1 压电式传感器的工作原理	90
5.2 压电式传感器的等效电路和前置放大器	94
5.3 压电式传感器的应用	97
习题与思考题五	99
第 6 章 磁电式传感器	103
6.1 霍尔式传感器	103
6.2 磁电感应式传感器	109
6.3 压磁式传感器	111
习题与思考题六	113

第 7 章 温度传感器	117
7.1 温度的概念及温标	117
7.2 热电阻测温法	119
7.3 集成温度传感器	124
7.4 热电偶	128
7.5 辐射式温度传感器	142
习题与思考题七	148
第 8 章 光电式传感器	154
8.1 光的性质及光电效应	154
8.2 光电器件	156
8.3 光电检测	165
8.4 CCD 图像传感器及应用	169
习题与思考题八	173
第 9 章 数字式传感器	179
9.1 位置测量的方式	179
9.2 数字式角编码器	180
9.3 光栅传感器	185
9.4 磁栅传感器	195
9.5 容栅传感器	199
习题与思考题九	202
第 10 章 波式和射线式传感器	204
10.1 超声波传感器	204
10.2 红外传感器	209
10.3 激光传感器	212
10.4 光导纤维传感器	217
习题与思考题十	220
第 11 章 检测技术的综合应用	224
11.1 传感器在现代汽车中的应用	224
11.2 传感器在数控机床中的应用	228
第 12 章 检测系统中的信号处理	234
12.1 微弱信号放大	234
12.2 信号在传输过程中的变换技术	240
12.3 信号的非线性补偿技术	241
参考文献	245

第 1 章 传感检测技术的基础知识

检测技术就是人们为了对被测对象包含的信息进行定性的了解和定量的掌握所采取的一系列技术措施。传感器就是能感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件。传感检测技术就是按照被测量的特点,选用合适的传感器和测量电路,从而获得必要的信息,将这些信息在不同层次上进行分析计算,得到准确的被测量数值,并利用它支配或约束整个生产过程,实现生产自动化。

作为信息获取的重要手段之一,传感检测技术已渗透到生产和生活的各个领域,从尖端武器装备、航空航天技术,到机械设备、工业过程控制、交通运输、纺织印刷、家用电器、医疗卫生、办公室设备及环境保护等,得到了广泛应用,在现代化生产和生活中发挥着重要作用。

1.1 传感检测系统的组成

客观世界的信息虽然很多,但可分为电量与非电量两种类型。电量可以借助于电压表、电流表、频率计等仪器仪表加以测量;而压力、温度、速度等非电量却难以直接进行测试,且本身信号不宜远传和遥控。目前,非电量的检测多采用电测量法,即首先将各种非电量通过传感器转变为电量,然后经过一系列的处理,再将非电量参数显示出来,其原理框图如图 1-1 所示。

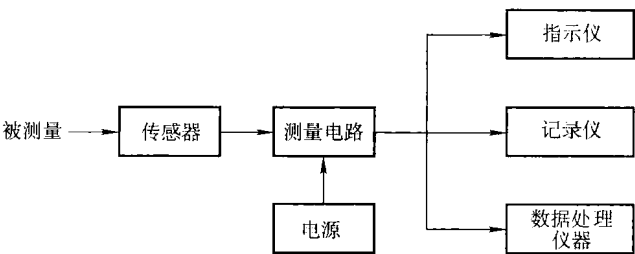


图 1-1 检测系统原理框图

1.1.1 传感器

1. 传感器的定义

传感器是一种能将被测的非电量(包括物理量、化学量、生物量等)按一定规律转换成便于处理和传输的另一种物理量(一般为电量)的装置。传感器可视为人体五种感觉器官的延伸,主要用于检测机电一体化系统自身、作业对象和作业环境的状态,

为有效控制机电一体化系统的运行提供信息。

传感器一般由敏感元件和转换元件组成。敏感元件是直接感受被测物理量,并以确定关系输出另一物理量的元件(如弹性敏感元件将力、力矩转换为位移或应变输出);转换元件是将敏感元件输出的非电量转换成电路参数(电阻、电感、电容)及电流或电压等电信号的元件。传感器是获得信息的手段。它获得信息的正确与否关系到整个检测与控制系统的精度。如果传感器的误差很大,后面的测量电路、放大器、指示仪、计算机系统等精度再高也难以提高整个控制系统的精度。

2. 传感器的分类

检测技术中使用的传感器种类繁多,分类的方法也各不相同。

(1)按被测量的性质分类

从传感器应用的目的出发,可以按被测量的性质将传感器分为以下四种。

- ①机械量传感器,包括位移传感器、力传感器、速度传感器、加速度传感器等。
- ②热工量传感器,包括温度传感器、压力传感器、流量传感器等。
- ③化学量传感器,包括气体、液体、固体分析,pH 值,浓度等。
- ④生物量传感器,包括酶、微生物、抗体、免疫抗原等。

(2)按输出量的性质分类

从研究的目的出发,可以将传感器按输出量的性质分为以下两种。

1)参量型传感器 参量型传感器的工作原理是将被测物理量转换为电参量,即电阻、电感、电容等无源电参量。该类传感器需要外加电源才能输出电压或电流信号,故又称为有源型传感器。相应的有电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器等。

2)发电型传感器 发电型传感器的工作原理是将被测物理量转换为电源量,它的输出是电动势或电流,该类传感器不需要外加电源,而是将被测量的相关能量转换成电量输出,故又称为无源型传感器。相应的有热电偶、光电池、磁电式传感器、霍尔传感器、压电式传感器等。

工业检测涉及传感器分类如表 1-1 所示。

表 1-1 工业检测涉及传感器的分类

传感器分类	转换原理	传感器名称	典型应用
电阻式	通过移动电位器触点改变电阻	电位器传感器	位移
	改变电阻丝或片的尺寸	电阻丝应变传感器	应变、力、负荷、加速度
		半导体应变传感器	
	利用电阻的温度效应	金属电阻温度传感器	温度、辐射热、液体流量
		热敏温度传感器	温度

续表

传感器分类	转换原理	传感器名称	典型应用
电阻式	利用电阻的光敏效应	光敏电阻传感器	光强
	利用电阻的湿度效应	湿敏电阻传感器	湿度
电容式	改变电容的尺寸	电容传感器	力、压力、负荷、位移
	改变电容的介电常数		液位、厚度、位移
电感式	改变磁路几何尺寸、导磁体位置	电感传感器	位移、力、压力、加速度
	涡流去磁	涡流传感器	位移、厚度、硬度
	利用压磁效应	压磁传感器	力、压力、超声波
	改变互感	差动变压器	位移、力、压力、加速度
		旋转变压器	角位移
数字式	利用莫尔效应	光栅传感器	角位移、直线位移
	利用拾磁信号	磁栅传感器	
	改变互感	感应同步器	
	两个平面电容的电容量周期变化	容栅传感器	
	利用数字编码	角度编码器	角位移
电动势式	利用热电动势	热电偶传感器	温度、热流
	利用霍尔效应	霍尔传感器	磁通、电流
	电磁感应	磁电传感器	速度、加速度
	利用光电效应	光电传感器	光强
电荷式	辐射电离	电离式传感器	离子计数、放射性强度
	利用正压电效应	压电传感器	动态力、加速度
电压式	利用逆压电效应、磁致伸缩效应	超声波传感器	探伤、物位、厚度
		激光传感器	位移、表面粗糙度
	利用光电效应	红外线传感器	温度、速度、探伤
频率式	改变谐振回路中的固有参数	振弦式传感器	力、压力
		振筒式传感器	气体压力
		石英谐振传感器	力、温度等

1.1.2 测量电路

测量电路的作用是把传感器输出的电量转换成便于传输、处理的电量,即具有一定驱动和传输能力的电压、电流或频率信号等,以推动后级的显示器、数据处理装置及执行机构。通常传感器输出信号是微弱的,这就需要经由测量电路加以放大,以满

足显示记录装置的要求。根据需要测量电路还能进行阻抗匹配、微分、积分、线性化补偿等信号处理工作。这些工作一般由电桥、放大电路、相敏检波电路、滤波电路、运算电路、补偿电路、模数转换电路及数模转换电路等来完成。

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,不同传感器要求配用的测量电路也不同。

1.1.3 显示器

显示、记录装置是检测人员和检测系统联系的主要环节,主要作用是将测量电路的输出用模拟量、数字量、曲线、图像形式显示并记录下来,以便人们了解检测数值的大小或变化过程。

目前常用的显示器有三类:模拟显示、数字显示和图像显示。

1)模拟显示 模拟显示是利用指针对标尺的相对位置表示读数的,常见的有毫伏表、微安表和模拟光柱等。

2)数字显示 数字显示目前多采用发光二极管(LED)和液晶(LCD)显示器等,以数字的形式显示读数。前者亮度高,耐振动,可适应较宽的温度范围;后者耗电少,集成度高。目前还研制出了带背光板的LCD,便于在夜间观看LCD的内容。

3)图像显示 图像显示是用CRT或点阵LCD显示读数或被测参数的变化曲线,有时还可用图表或彩色图等形式反映整个生产线上的多组数据。

如果被测量处于动态变化之中,可用记录仪记录被检测对象的动态变化过程。一般显示器都附加记录仪,可以打印检测结果。

1.1.4 数据处理装置

数据处理装置用于对测试所得的实验数据进行运算、处理、逻辑判断、线性变换,对动态测试结果作频谱分析等,完成这些工作必须采用计算机技术。数据处理的结果通常送到显示器和执行机构,以显示经过运算、处理的各种数据或控制各种被控对象。

从检测系统的组成可以看出,对各种被测量的测量,通常的做法是先通过传感器将其转换为电学量,然后使用成熟的电子测量手段对传感器输出的电信号进行各种处理和显示记录。因此这种非电量电测法构成了检测技术中最重要的内容,利用这种方法几乎可以测量各种非电学量。

非电学量电测法主要有以下优点:

- ①能够连续、自动地对被测量进行测量和记录;
- ②电子装置精度高、频率响应好,不仅能适用于静态测量,选用适当的传感器和记录装置还可以进行动态测量甚至瞬态测量;
- ③电信号可以远距离传输,便于实现远距离测量和集中控制;
- ④电子测量装置能方便地改变量程,因此测量的范围广;

⑤可以方便地与计算机相连,进行数据的自动运算、分析和处理。

1.2 传感检测技术的应用及发展方向

1.2.1 传感检测技术的应用和实例

1. 传感检测技术的主要应用

(1)检测技术是产品检验和质量控制的重要手段

借助于检测工具对产品进行质量评价是检测技术重要的应用领域。被动检测方法只能将产品区分为合格品和废品,起到产品验收和废品剔除的作用,对废品的出现并没有预先防止的能力。主动检测技术(或称在线检测技术)使检测和生产加工同时进行,及时地用检测结果对生产过程进行控制,使之适应生产条件的变化或自动地调整到最佳状态。这样检测的作用已经不只是单纯地检查产品的最终结果,而且要通过问和干预造成这些结果的原因,从而进入质量控制的领域。

(2)传感检测技术在大型设备安全经济运行监测中得到广泛应用

电力、石油、化工、机械等行业的一些大型设备通常在高温、高压、高速和大功率状态下运行,保证这些关键设备安全运行在国民经济中具有重大意义。为此,通常设置故障监测系统对温度、压力、流量、转速、振动和噪声等多种参数进行长期动态监测,以便及时发现异常情况,加强故障预防,达到早期诊断的目的。这样做可以避免严重的突发事件,保证设备和人员安全,提高经济效益。随着计算机技术的发展,这类监测系统已经发展到故障自诊断系统。该系统可以采用计算机处理监测信息,进行分析、判断,及时诊断出设备故障并自动报警或采取相应的对策。

(3)传感检测技术和装置是自动化系统中不可缺少的组成部分

一个自动化系统通常由多个环节组成,分别完成信息获取、信息转换、信息处理、信息传送及信息执行等功能。在实现自动化的过程中,信息的获取与转换是极其重要的组成环节,只有精确及时地将被控对象的各项参数检测出来并转换成易于传送和处理的信号,整个系统才能正常地工作。因此,自动检测与转换是自动化技术中不可缺少的组成部分。

(4)传感检测技术的完善和发展推动着现代科学技术的进步

现代化检测手段所达到的水平在很大程度上决定了科学研究的深度和广度。检测技术达到的水平愈高,提供的信息愈丰富、愈可靠,科学研究取得突破性进展的可能性就愈大。此外,理论研究的一些成果也必须通过实验或观测来加以验证,这同样离不开必要的检测手段。

从另一方面看,现代化生产和科学技术的发展也不断地对检测技术提出新的要求和新的课题,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,也有力地促进了检测技术自身的现代化。

2. 自动检测系统举例

当代检测系统越来越多地使用计算机或微处理器来控制执行机构的工作。检测技术、计算机技术与执行机构等结合就能构成某些工业控制系统。所谓执行机构通常是指各种继电器、电磁铁、电磁阀门、电磁调节阀、伺服电动机等,它们在电路中起通断、控制、调节、保护等作用。许多检测系统能输出与被测量有关的电流或电压信号,作为自动控制系统的控制信号驱动这些执行机构。

图 1-2 所示的自动磨削控制系统就是一个典型的例子。图中的传感器快速检测出工件的直径参数 D ,计算机一方面对该参数作一系列的运算、比较、判断等,然后将有关参数送到显示器显示出来;另一方面发出控制信号,控制砂轮的径向位移 x ,直到将工件加工到符合要求为止。很显然,该系统是一个自动检测与控制的闭环系统。

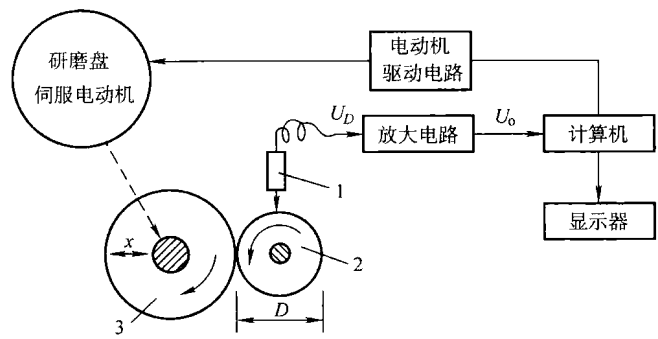


图 1-2 自动磨削控制系统
1—传感器;2—被磨削工件;3—砂轮

汽车用传感器按照其功用大致可以分为两大类：一类是使驾驶员了解汽车各部分状态的传感器,另一类传感器是用于控制汽车运行状态的控制传感器。汽车常用传感器的主要种类见表 1-2。

表 1-2 汽车用传感器的种类

传感器的种类	检测对象
温度传感器	冷却水、排出气体、吸入空气、发动机机油、室内外空气
压力传感器	进气歧管、大气压力、燃烧压、发动机油压、制动压、各种泵压、轮胎压
转速传感器	曲柄转角、曲柄转速、车轮速度
速度、加速度传感器	车速(绝对值)、负加速度
流量传感器	吸入空气流量、燃料流量、排气再循环量、二次空气量
液量传感器	燃料、冷却水、电解液、洗窗器液、机油、制动液

续表

传感器的种类	检 测 对 象
位移方位传感器	节气门开度、排气再循环阀开量、车高(悬架、位移)、行驶距离、行驶方位
排出气体浓度传感器	O ₂ 、CO ₂ 、碳氢化合物浓度,柴油烟度
其他传感器	转矩、爆震、燃料酒精成分、湿度、玻璃结露、鉴别饮酒、睡眠状态、蓄电池电压、蓄电池容量、灯泡断线、荷重、冲击物、轮胎失效率

1.2.2 传感检测技术的发展方向

近年来,随着半导体、计算机技术的发展,新型或具有特殊功能的传感器不断涌现出来,检测装置也向小型化、固体化及智能化方向发展,应用领域也更加宽广。上至茫茫太空,下至海底、井下,大至工业生产系统,小至家用电器、个人用品,都可以发现检测技术的广泛应用。当前,检测技术的发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,分辨力可达微米级;人们已研制出能测量小至几个帕的微压力和大到几千兆帕高压的压力传感器;开发了能够测出极微弱磁场的磁敏传感器等。

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,使检测系统的可靠性及寿命得以大幅度提高。现在许多检测系统可以在极其恶劣的环境下连续工作数十万小时。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。近代物理学的进展如纳米技术、激光、红外、超声波、微波、光纤、放射性同位素等都为检测技术的发展提供了更多的依据。如图像识别、激光测距、红外测温、C型超声波无损探伤、放射性测厚、中子探测爆炸物等非接触测量得到迅速的发展。

如今,检测领域正扩大到整个社会需要的各个方面,不仅包括工程、海洋开发、宇宙航行等尖端科学技术和新兴工业领域,涉及生物、医疗、环境污染监测、危险品和毒品的侦察、安全监测等方面,而且已开始渗入到人类的日常生活设施之中。

3. 发展集成化、功能化的传感器

随着半导体集成电路技术的发展,硅和砷化镓电子元器件的高度集成化有可能大量地向传感器领域渗透。人们将传感元件与信号处理电路制作在同一块硅片上,从而研制出体积更小、性能更好、功能更强的传感器。例如,已研制出高精度的PN结测温集成电路;又如,将排成阵列的上千万个光敏元器件及扫描放大电路制作在一块芯片上,制成彩色CCD数码照相机、摄像机以及可摄影的手机等。今后还将在光、

磁、温度、压力等领域开发新型的集成度更高的传感器。

4. 采用计算机技术,使检测技术智能化

人们已迅速将计算机技术应用到测量技术中,使检测仪器智能化,从而扩展了功能,提高了精度和可靠性。目前研制的检测系统大多都带有微处理器。

5. 发展网络化传感器及检测系统

随着微电子技术的发展,传感器的输出不再是模拟量,而是符合某种协议格式(如可即插即用)的数字信号。可以通过企业内部网络,也可以通过 Internet 网,实现多个系统之间的数据交换和共享,从而构成网络化的检测系统。还可以远在千里之外,随时随地浏览现场情况,实现远程调试、远程故障诊断、远程数据采集和实时操作。

1.3 传感检测系统基本特性的评价指标

1.3.1 传感检测系统的基本特性

传感检测系统的特性一般分为静态特性和动态特性两种。当被测量不随时间变化或变化很慢时,可以认为检测系统的输入量和输出量都与时间无关。表示它们之间关系的是一个不含时间变量的代数方程,在这种关系的基础上确定的检测装置性能参数通常称为静态特性。当被测量随时间变化很快时,就必须考虑输入量和输出量之间的动态关系,这时,表示它们之间关系的是一个含有时间变量的微分方程。由此引出的检测系统针对快速变化的被测量的响应特性称为动态特性。

1.3.2 静态特性

1. 测量范围与量程

测量范围是指在正常工作条件下,检测系统或仪表能够测量的被测量值的总范围。通常以测量范围的下限值和上限值来表示。如某温度计的测量范围是 $-20 \sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

量程是测量范围上限值与下限值的代数差。如上述温度计的量程是 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2. 灵敏度与分辨力

灵敏度是指传感检测系统在稳态下输出量的变化量 Δy 和引起此变化的输入量的变化量 Δx 的比值,可表示为

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} \text{ 或 } K = \frac{dy}{dx} \quad (1-1)$$

式中 K 为输入输出特性曲线的斜率。

如果系统的输出和输入之间有线性关系,则灵敏度 K 是一个常数。否则,它将随输入量的大小而变化,如图 1-3 所示。

一般希望灵敏度 K 在整个测量范围内为常数。这样,可得到均匀刻度的标尺,使读数方便,也便于分析和处理测量结果。

由于输入和输出的变化量一般都有不同的量纲,所以灵敏度 K 也是有量纲的。如输入量为温度($^{\circ}\text{C}$),输出量为标尺上的位移(格),则 K 的单位为格/ $^{\circ}\text{C}$ 。如果输入量和输出量是同类量,则此时 K 可理解为放大倍数。因此,灵敏度比放大倍数有更广泛的含义。

如果检测系统由多个环节组成,各环节的灵敏度分别为 K_1 、 K_2 和 K_3 ,而且各环节以串联的方式相连接,则整个系统的灵敏度可表示为

$$K = K_1 \times K_2 \times K_3 \quad (1-2)$$

提高灵敏度,可得到较高测量精度,但应当注意,灵敏度愈高,测量范围往往愈窄,稳定性愈差。

分辨力是指检测仪表能够精确检测出被测量的最小变化的能力。输入量从某个任意值(非零值)缓慢增加,直到可以测量到输出的变化为止,此时的输入量就是分辨力。它可以用绝对值,也可以用量程的百分数来表示。它说明了检测仪表响应与分辨输入量微小变化的能力。灵敏度愈高,分辨力愈好。一般模拟式仪表的分辨力规定为最小刻度分格值的一半。数字式仪表的分辨力是最后一位数。

【例 1-1】 有一台测量流量的仪表,测量范围为 $0 \sim 10 \text{ m}^3/\text{s}$,输入输出特性曲线如图 1-4 所示,请用作图法求该仪表在 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $8 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的灵敏度 K_1 和 K_2 。

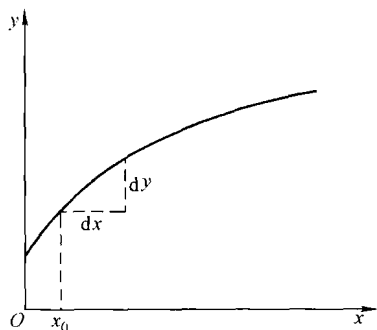


图 1-3 传感检测系统灵敏度

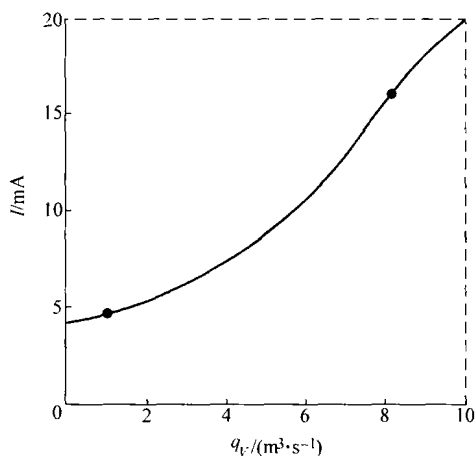


图 1-4 流量仪表的输入输出特性曲线

解:根据灵敏度公式 $K = \frac{\Delta y}{\Delta x}$ 得: $K_1 = 0.44 \text{ mA}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$; $K_2 = 2.4 \text{ mA}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ 。

3. 线性度

线性度是用实测的检测系统输入输出特性曲线与拟合直线之间的最大偏差 Δ_m 与满量程输出值 $Y_{FS} (= y_{\max} - y_{\min})$ 的百分比来表示,即

$$\gamma_L = \frac{\Delta_m}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-3)$$

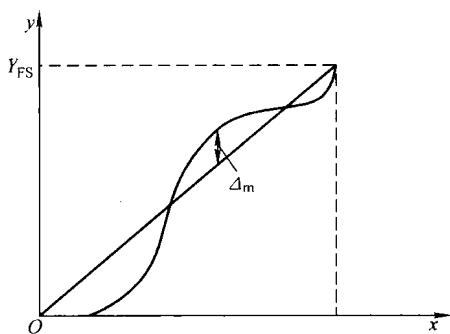


图 1-5 理论线性度示意图

由于线性度(非线性误差)是以所参考的拟合直线为基准线算得的,所以基准线不同,所得线性度就不同。拟合直线的选取方法很多,如图 1-5 所示采用端基直线作为拟合直线,拟合直线取连接输入输出特性曲线坐标零点和满量程输出点的直线。

拟合精度最高的是依据最小二乘法原则做的拟合直线,它使拟合直线与特性曲线上各点偏差的平方和为最小。

【例 1-2】 有一只压力传感器校准数据如表 1-3 所示。要求根据这些数据求最小二乘法线性度的拟合直线方程。

表 1-3 校准数据

$x_i \times 10^5 / \text{Pa}$		0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
y_i / V	正行程	0.002 0	0.201 5	0.400 5	0.600 0	0.799 5	1.000 0
	反行程	0.003 0	0.202 0	0.402 0	0.601 0	0.800 5	
	正行程	0.002 5	0.202 0	0.401 0	0.600 0	0.799 5	0.999 5
	反行程	0.003 5	0.203 0	0.402 0	0.601 5	0.800 5	
	正行程	0.003 5	0.202 0	0.401 0	0.600 0	0.799 5	0.999 0
	反行程	0.004 0	0.203 0	0.402 0	0.601 0	0.800 5	

解: 为了求得直线方程式 $y = a + Kx$, 必须先算出各数值之和。校准次数 $n = 33$, 所求各数值如下:

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^n x_i &= \sum_{i=1}^{33} x_i = 37.5 & \sum_{i=1}^{33} y_i &= 15.042\ 5 \\
 \sum_{i=1}^{33} x_i y_i &= 25.516\ 8 & \sum_{i=1}^{33} x_i^2 &= 63.75 \\
 K &= \frac{n \sum_{i=1}^{33} x_i y_i - \sum_{i=1}^{33} x_i \sum_{i=1}^{33} y_i}{n \sum_{i=1}^{33} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{33} x_i \right)^2} = 0.398\ 50
 \end{aligned}$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{33} x_i^2 \sum_{i=1}^{33} y_i - \sum_{i=1}^{33} x_i \sum_{i=1}^{33} x_i y_i}{n \sum_{i=1}^{33} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{33} x_i \right)^2} = 0.002\ 98$$

于是,得到最小二乘法的拟合直线方程为

$$y = 0.002\ 98 + 0.398\ 50x$$

由此可得到最小二乘法直线的各点数值如表 1-4 所示。

表 1-4 最小二乘法直线的各点数值

$x_i \times 10^5 / \text{Pa}$	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
y_i / V	0.002 98	0.202 20	0.401 50	0.600 70	0.800 00	0.999 20

按表中数据和例题中给出的数据绘出曲线,可依次找出输出输入校准值与上述理论拟合直线相应点数值之间的最大偏差。根据式(1-3)便可求出该传感器的非线性误差。

【例 1-3】市售电子秤多以应变片作为传感元件测量物体的质量,各环节的准确度如下:应变梁的蠕变及迟滞误差为 0.03%,应变片温漂为 0.1%,应变电桥为 0.07%,放大器为 0.08%,A/D 转换器为 0.02%,桥路电源为 0.01%。

(1)请用绝对值合成法和方均根合成法计算系统可能产生的总的最大满刻度相对误差。

(2)认为哪一个环节引起的误差起主要作用?应采用哪些措施才可以提高该电子秤的测量准确度?

解:(1)绝对值合成法计算测量误差为

$$\begin{aligned} \gamma_{m1} &= \pm (|\gamma_1| + |\gamma_2| + |\gamma_3| + |\gamma_4| + |\gamma_5| + |\gamma_6|) \\ &= \pm (0.03 + 0.1 + 0.07 + 0.08 + 0.02 + 0.01) \% = \pm 0.31 \% \end{aligned}$$

方均根合成法计算测量误差为

$$\begin{aligned} \gamma_{m2} &= \pm \sqrt{(0.03\%)^2 + (0.1\%)^2 + (0.07\%)^2 + (0.08\%)^2 + (0.02\%)^2 + (0.01\%)^2} \\ &= \pm 0.15 \% \end{aligned}$$

(2)应变片温漂引起的误差起主要作用,需要加温度补偿片或采用差动半桥或差动全桥实现温度自补偿。

另外应变电桥和放大器必须设置调零电路,确保在未受力时,桥路的输出电压严格为零。

4. 迟滞

如图 1-6 所示,迟滞特性表明检测系统在正向(输入量增大)和反向(输入量减小)行程期间,输入输出特性曲线不一致的程度。也就是说,对同样大小的输入量,检测系统在正、反行程中,往往对应两个大小不同的输出量。通过实验,找出输出量的这种最大差值 Δ_m ,并以满量程输出 Y_{FS} 的百分比进

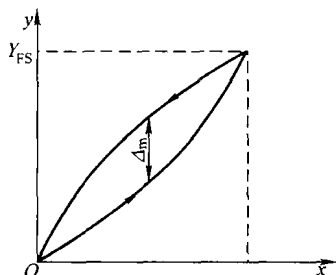


图 1-6 迟滞特性示意图