

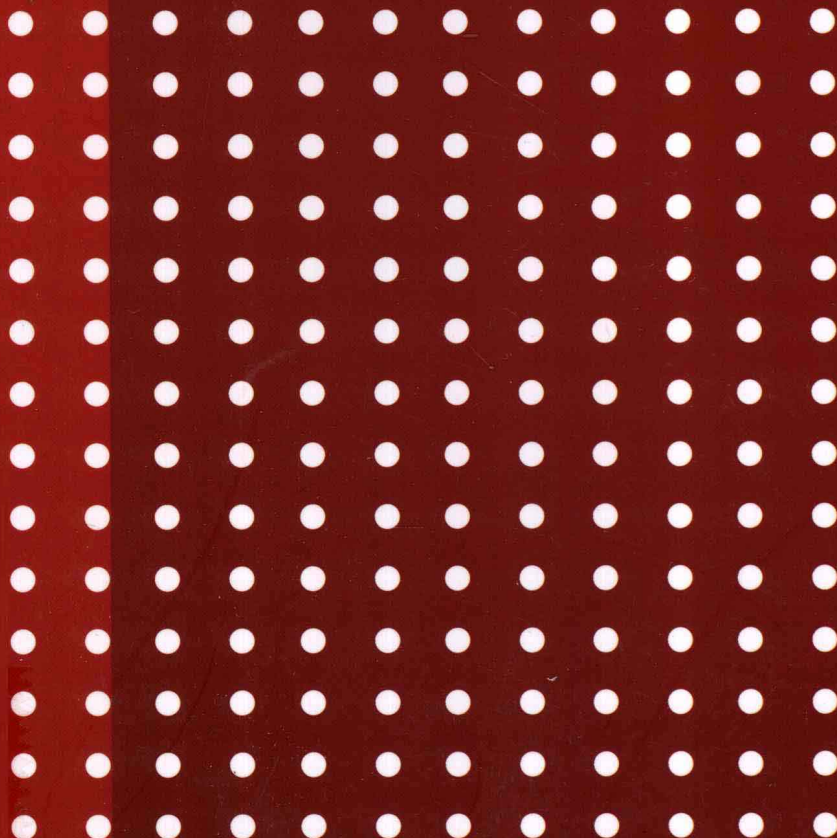
21世纪高等学校电子信息工程规划教材

可下载教学资料

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

智能传感技术

李邓化 陈雯柏 彭书华 编著

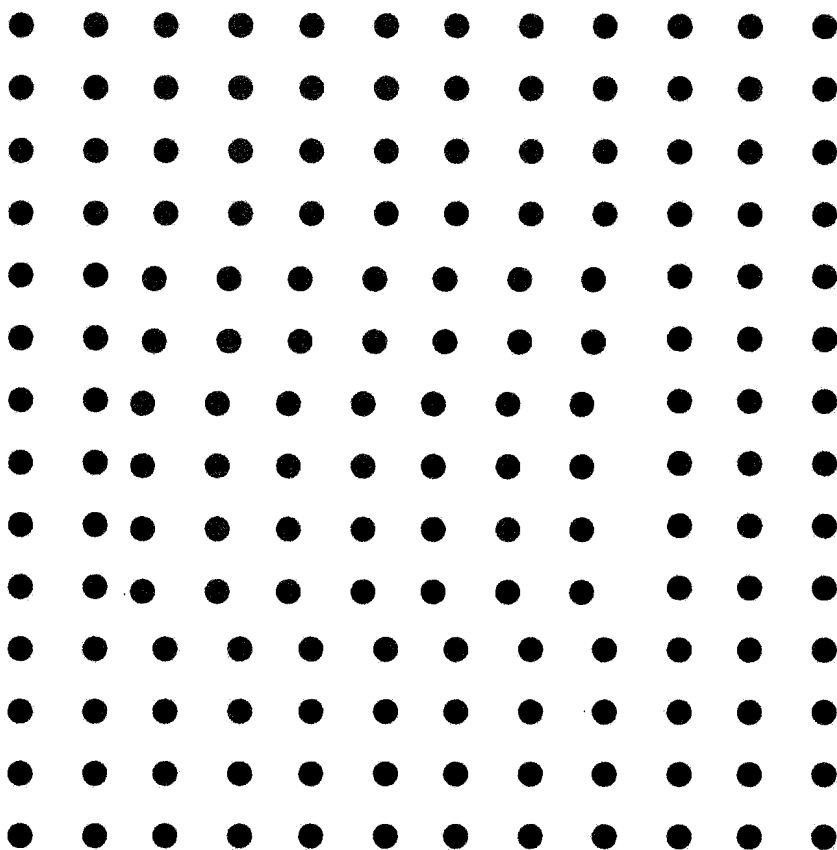


清华大学出版社

21 世纪高等学校电子信息工程规划教材

智能传感技术

李邓化 陈雯柏 彭书华 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书全面介绍智能检测技术的基本原理及典型应用,全书共分14章,第1章主要介绍检测技术的基本知识与智能检测系统的基本组成;第2~12章分别介绍各种常用传感器的基本原理与应用,主要包括热敏传感器及温度传感器、应变式电阻传感器、电感式传感器、电容式传感器、压电传感器、光电与光纤传感器、集成化与数字化传感器、超声波传感器、激光与红外传感器、气体传感器、视觉传感器等;第13章介绍微机电系统(MEMS);第14章介绍传感器网络技术。书后还附大量的习题和练习。全书以应用为核心,体现了理论教学与实践教学并重的宗旨。

本书可作为高等学校电子信息类及仪器仪表类专业的教材或参考用书,也可供有关专业技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

智能传感技术/李邓化,陈雯柏,彭书华编著. —北京:清华大学出版社,2011.9

(21世纪高等学校电子信息工程规划教材)

ISBN 978-7-302-26007-3

I. ①智… II. ①李… ②陈… ③彭… III. ①智能传感器—高等学校—教材 IV. ①TP212.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 131086 号

责任编辑:索梅 顾冰

责任校对:时翠兰

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62795954, jsjic@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:18 字 数:438 千字

版 次:2011 年 9 月第 1 版 印 次:2011 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:29.00 元

出版说明

随着我国高等教育规模的扩大和产业结构调整的进一步完善,社会对高层次应用型人才的需求将更加迫切。各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,合理调整和配置教育资源,在改革和改造传统学科专业的基础上,加强工程型和应用型学科专业建设,积极设置主要面向地方支柱产业、高新技术产业、服务业的工程型和应用型学科专业,积极为地方经济建设输送各类应用型人才。各高校加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的力度,从而实现传统学科专业向工程型和应用型学科专业的发展与转变。在发挥传统学科专业师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势的同时,不断更新其教学内容、改革课程体系,使工程型和应用型学科专业教育与经济建设相适应。

为了配合高校工程型和应用型学科专业的建设和发展,急需出版一批内容新、体系新、方法新、手段新的高水平电子信息类专业课程教材。目前,工程型和应用型学科专业电子信息类专业课程教材的建设工作仍滞后于教学改革的实践,如现有的电子信息类专业教材中有不少内容陈旧(依然用传统专业电子信息教材代替工程型和应用型学科专业教材),重理论、轻实践,不能满足新的教学计划、课程设置的需要;一些课程的教材可供选择的品种太少;一些基础课的教材虽然品种较多,但低水平重复严重;有些教材内容庞杂,书越编越厚;专业课教材、教学辅助教材及教学参考书短缺,等等,都不利于学生能力的提高和素质的培养。为此,在教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议下,清华大学出版社组织出版本系列教材,以满足工程型和应用型电子信息类专业课程教学的需要。本系列教材在规划过程中体现了如下一些基本原则和特点:

(1) 系列教材主要是电子信息学科基础课程教材,面向工程技术应用培养。本系列教材在内容上坚持基本理论适度,反映基本理论和原理的综合应用,强调工程实践和应用环节。电子信息学科历经了一个多世纪的发展,已经形成了一个完整、科学的理论体系,这些理论是这一领域技术发展的强大源泉,基于理论的技术创新、开发与应用显得更为重要。

(2) 系列教材体现了电子信息学科使用新的分析方法和手段解决工程实际问题。利用计算机强大功能和仿真设计软件,使得电子信息领域中大量复杂的理论计算、变换分析等变得快速简单。教材充分体现了利用计算机解决理论分析与解算实际工程电路的途径与方法。

(3) 系列教材体现了新技术、新器件的开发应用实践。电子信息产业中仪器、设备、产品都已使用高集成化的模块,且不仅仅由硬件来实现,而是大量使用软件和硬件相结合方法,使得产品性价比很高,如何使学生掌握这些先进的技术、创造性地开发应用新技术是本系列教材的一个重要特点。

(4) 以学生知识、能力、素质协调发展为宗旨,系列教材编写内容充分注意了学生创新

能力和实践能力的培养,加强了实验实践环节,各门课程均配有独立的实验课程和课程设计。

(5) 21 世纪是信息时代,学生获取知识可以是多种媒体形式和多种渠道的,而不再局限于课堂上,因而传授知识不再以教师为中心,以教材为唯一依托,而应该多为学生提供各类学习资料(如网络教材,CAI 课件,学习指导书等)。应创造一种新的学习环境(如讨论,自学,设计制作竞赛等),让学生成为学习主体。该系列教材以计算机、网络和实验室为载体,配有多种辅助学习资料,提高学生学习兴趣。

繁荣教材出版事业,提高教材质量的关键是教师。建立一支高水平的以老带新的教材编写队伍才能保证教材的编写质量和建设力度,希望有志于教材建设的教师能够加入到我们的编写队伍中来。

21 世纪高等学校电子信息工程规划教材编委会

联系人: 魏江江 weijj@tup.tsinghua.edu.cn

前 言

智能传感技术是伴随着自动化技术、计算机技术、检测技术和智能技术的深入发展而产生的新兴研究领域,智能传感技术是未来检测技术的主要发展方向。智能传感是将传统学科和新技术进行综合集成和应用的一门学科,体现了多学科的交叉、融合和延拓,其应用范围遍布国民经济的诸多方面。

本书是在作者多年教学实践的基础上,结合现有的教学讲义和最新技术发展编写形成的,书中融入了作者多年来大量的科研工作与成果。本书在内容安排上以传感技术基本原理为基础,结合智能传感技术的最新发展,以应用为核心,重点介绍了智能传感技术的基本原理和工程实现方法,体现了理论教学和实践教学并重的宗旨。

全书共分为 14 章,主要介绍智能传感技术领域的基本原理、最新进展及典型应用。其中第 1~8 章由李邓化编写,第 9、12、14 章由陈雯柏编写,第 10、11、13 章由彭书华编写,习题由许晓飞编写。

本书可作为自动化、智能科学与技术、检测技术与自动化装置、测试计量技术与仪器、测控技术、电子信息技术等专业的本科生和硕士生教材或参考书,也适用于相关专业的工程技术人员。不同学校与专业的学生也可根据实际情况和课时需要选学部分内容。

感谢“北京市属市管高等学校人才强教计划资助项目”(PHR200907124,PHR201107218)对本书提供的资助。

清华大学出版社的编辑们为本书的出版付出了辛勤的劳动,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有错误和不足之处,诚恳欢迎各位读者对本书提出批评指正意见。

作 者

2011 年 5 月

目 录

第 1 章 检测技术基础	1
1.1 基础知识	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 检测仪表(传感器)的品质指标	3
1.1.3 量值传递与仪表的校准	7
1.2 测量误差与数据处理基础	8
1.2.1 测量误差及其分类	9
1.2.2 系统误差的消除方法	12
1.2.3 随机误差及其估算	14
1.2.4 测量误差的合成及最小二乘法的应用	18
1.2.5 测量结果的数据处理	24
1.3 智能检测系统	30
1.3.1 智能检测系统中的传感器	30
1.3.2 数据采集	34
1.3.3 输入输出通道处理电路	38
1.3.4 智能检测系统中的软件	40
思考题与习题 1	41
第 2 章 热敏元件、温度传感器及其应用	44
2.1 热电偶	44
2.1.1 热电效应	44
2.1.2 热电偶的基本法则	46
2.1.3 热电偶冷端温度及其补偿	48
2.2 热电阻	53
2.2.1 铂电阻	54
2.2.2 铜热电阻	54
2.2.3 其他热电阻	54
2.3 热敏电阻	54
2.3.1 NTC 热敏电阻的温度特性	55
2.3.2 NTC 热敏电阻的温度系数	55

2.3.3 伏安特性 $U=f(I)$	56
2.3.4 NTC 热敏电阻的安时特性	57
思考题与习题 2	57
第 3 章 应变式电阻传感器及应用	60
3.1 应变式电阻传感器的工作原理	60
3.2 测量电路	62
3.2.1 直流电桥	62
3.2.2 交流电桥	67
3.3 应变式传感器的温度特性	69
3.3.1 使应变片产生热输出的因素	69
3.3.2 电阻应变片的温度补偿方法	70
3.4 应变式电阻传感器的应用	71
3.4.1 几种常见的弹性元件的应变值 ϵ 与外作用力 F 之间的关系	71
3.4.2 应变式电阻传感器的应用	73
思考题与习题 3	74
第 4 章 电感式传感器及应用	79
4.1 变磁阻式传感器	79
4.1.1 工作原理	79
4.1.2 输出特性	80
4.1.3 测量电路	82
4.1.4 变磁阻式传感器的应用	83
4.2 差动变压器式传感器	84
4.2.1 工作原理	84
4.2.2 基本特性	85
4.2.3 差动变压器式传感器测量电路	86
4.2.4 差动变压式传感器的应用	88
4.3 电涡流式传感器	89
4.3.1 工作原理	89
4.3.2 基本特性	90
4.3.3 电涡流形成范围	91
4.3.4 电涡流式传感器的应用	92
思考题与习题 4	94
第 5 章 电容式传感器及应用	98
5.1 电容式传感器的工作原理和结构	98
5.1.1 变极距型电容式传感器	98
5.1.2 变面积型电容式传感器	99

5.1.3 变介质型电容式传感器	100
5.2 电容式传感器的灵敏度和非线性	101
5.3 电容式传感器的信号调节电路	102
5.3.1 运算放大器式电路	102
5.3.2 电桥电路	103
5.4 电容器式传感器的应用	104
5.4.1 电容式位移传感器	104
5.4.2 电容式荷重传感器	105
5.4.3 电容式压力传感器	105
思考题与习题 5	106
第 6 章 压电传感器及应用	111
6.1 压电效应	111
6.1.1 压电材料的主要特性参数	111
6.1.2 压电晶体的压电效应	112
6.1.3 压电陶瓷的压电效应	113
6.2 压电方程	114
6.2.1 电场为零	114
6.2.2 应力为零	115
6.3 电荷放大器	115
6.3.1 电荷放大器的输出电压	115
6.3.2 实际电荷放大器的运算误差	117
6.3.3 电荷放大器的下限截止频率	117
6.3.4 电荷放大器的噪声及漂移特性	118
6.4 压电传感器的应用	120
6.4.1 压电水下声学接收换能器——水听器	120
6.4.2 压电式加速度传感器	122
6.4.3 压电式压力传感器	125
思考题与习题 6	126
第 7 章 光电与光纤传感器及应用	129
7.1 光电效应	129
7.1.1 外光电效应	129
7.1.2 内光电效应	129
7.2 光敏电阻	130
7.2.1 光敏电阻的原理和结构	130
7.2.2 光敏电阻的主要参数和基本特性	131
7.2.3 光敏电阻与负载的匹配	133
7.3 光电池	134

7.3.1	光电池的结构原理	135
7.3.2	基本特性	136
7.3.3	光电池的转换效率及最佳负载匹配	137
7.4	光敏二极管和光敏三极管	138
7.4.1	光敏管的结构和工作原理	138
7.4.2	光敏管的基本特性	139
7.4.3	光敏晶体电路的分析方法	141
7.5	光电传感器的类型及应用	142
7.5.1	光电传感器的类型	142
7.5.2	应用	143
7.6	光纤传感器	146
7.6.1	光导纤维导光的基本原理	147
7.6.2	光纤传感器及其应用	149
	思考题与习题 7	153
第 8 章	集成化与数字化传感器及其应用	155
8.1	集成传感器	155
8.1.1	概述	155
8.1.2	集成压阻式传感器	156
8.1.3	集成霍尔式传感器	159
8.2	数字传感器	173
8.2.1	概述	173
8.2.2	振弦式传感器	173
8.2.3	压电式谐振传感器	176
8.2.4	光栅传感器及应用	177
	思考题与习题 8	183
第 9 章	超声波传感器	186
9.1	超声波传感器的工作原理	186
9.1.1	超声波的激发	186
9.1.2	超声波的接收	186
9.2	超声波传感器的性能指标	186
9.3	超声波的特性	187
9.3.1	声场特性	188
9.3.2	传播特性	189
9.4	超声波传感器的应用	190
9.4.1	超声波测距	190
9.4.2	超声波测流速	192
9.4.3	超声波探伤	193

思考题与习题 9	197
第 10 章 激光与红外传感器	198
10.1 概述	198
10.1.1 激光传感器的基本概念	198
10.1.2 红外传感器基本概念	199
10.2 激光传感器的主要应用	200
10.2.1 激光测长	200
10.2.2 激光测距	201
10.2.3 激光测振	201
10.2.4 激光测速	201
10.2.5 激光传感器在工程机械中的应用	201
10.3 红外传感器的主要应用	205
10.3.1 红外测温仪	206
10.3.2 红外线气体分析仪	206
10.3.3 红外传感器在汽车改造技术中的应用	208
10.3.4 反射式红外传感器在智能型节水系统中的应用	208
思考题与习题 10	209
第 11 章 气体传感器	210
11.1 概述	210
11.1.1 气体传感器的分类和工作原理	210
11.1.2 几种常见气体的传感器	211
11.2 相关应用	214
11.2.1 气体传感器在潜水中的应用	214
11.2.2 气体传感器在瓦斯检测中的应用	215
11.2.3 气体传感器在多参数气体检测仪中的应用	215
11.2.4 矿用气体传感器校验装置	216
11.2.5 电化学气体传感器在烟气监测中的应用	217
11.2.6 QCM 气体传感器在安全检测中的应用	218
11.2.7 气体传感器的其他应用	219
思考题与习题 11	220
第 12 章 视觉传感器	221
12.1 视觉检测技术	221
12.1.1 机器视觉的发展	221
12.1.2 视觉检测的应用分类	221
12.1.3 视觉检测的特点	222

12.2	视觉传感器的硬件组成	223
12.2.1	照明系统	223
12.2.2	光学镜头	225
12.2.3	摄像机	227
12.2.4	图像处理器	228
12.3	视觉传感器的工作原理	228
12.3.1	视觉传感的成像模型	228
12.3.2	视觉传感的图像处理	232
12.4	视觉传感器的应用	234
12.4.1	单目视觉传感系统	234
12.4.2	双目视觉传感系统	235
	思考题与习题 12	236
第 13 章	微机电系统	237
13.1	概述	237
13.1.1	MEMS 简介	237
13.1.2	MEMS 现状及发展	239
13.2	MEMS 在军事航天领域的应用	242
13.2.1	MEMS 技术在军事领域的应用	242
13.2.2	MEMS 技术在航空航天领域的应用	246
13.3	MEMS 技术在民用领域的应用	247
13.3.1	MEMS 技术在汽车产业的应用	248
13.3.2	MEMS 技术在生物医学中的应用	250
13.3.3	MEMS 传感器实例——基于 MEMS 加速度传感器 ADXL311 的 倾角仪设计	252
	思考题与习题 13	254
第 14 章	传感器网络	255
14.1	传感器的网络化	255
14.1.1	传感器网络的概念	255
14.1.2	传感器网络的发展	255
14.2	多传感器信息融合	256
14.2.1	多传感器信息融合的必要性	257
14.2.2	多传感器信息的融合的层次模型	258
14.2.3	多传感器信息融合的结构模型	259
14.2.4	多传感器信息融合算法	260
14.3	无线传感器网络	262

14.3.1 无线传感器网络的体系结构	263
14.3.2 无线传感器网络的特点	265
14.3.3 无线传感器网络关键技术	267
14.3.4 无线传感器网络的应用	270
思考题与习题 14	272
参考文献	273

第 1 章 检测技术基础

1.1 基础知识

1.1.1 概述

1. 工业过程检测

工业过程检测是指在生产过程中,为及时掌握生产情况和监视、控制生产过程,而对其一些变量进行的定性检查和定量测量。

检测的目的是为了获取各过程变量值的信息。根据检测结果可对影响过程状况的变量进行自动调节或操纵,以达到提高质量、降低成本、节约能源、减少污染和安全生产等目的。

检测技术涉及的内容非常广泛,包括被检测信息的获取、转换、显示以及测量数据的处理等技术。随着科学技术的不断进步,特别是随着微电子技术、计算机技术等高新科技的发展以及新材料、新工艺的不断涌现,检测技术也在不断发展,已经成为一门实用性和综合性很强的新兴学科。

检测技术及仪表作为人类认识客观世界的重要手段和工具,应用领域十分广泛,工业过程是其最重要的应用领域之一。工业过程检测具有如下特点:

(1) 被测对象形态多样。有气态、液态、固态介质及其混合物,也有的被测对象具有特殊性质(如强腐蚀、强辐射、高温、高压、深冷、真空、高粘度、高速运动等)。

(2) 被测参数性质多样。有温度、压力、流量、液位等热工量,也有各种机械量、电工量、化学量、生物量,还有某些工业过程要求检测的特殊参数(如纸浆的打浆度)等。

(3) 被测变量的变化范围宽。如被测温度可以是 1000°C 以上的高温,也可以是 0°C 以下的低温甚至超低温。

(4) 检测方式多种多样。既有断续测量,又有连续测量;既有单参数检测,又有多参数同时检测;还有每隔一段时间检测各种不同参数的巡回检测,等等。

(5) 检测环境比较恶劣。在工业过程中,存在着许多不利于检测的影响因素,如电源电压波动,温度、压力变化,以及在工作现场存在水汽、烟雾、粉尘、辐射、振动等。

为了适应工业过程检测的上述特点,要求对原始信号的检测工具不但具有良好的静态特性和动态特性,而且要针对不同的被测对象和测量要求采用不同的测量原理和测量手段。因此,传感器的种类繁多,而且为了适应工业过程对检测技术提出的新要求,还将有各式各样的新型传感器和仪表不断涌现。

2. 检测仪表

检测仪表是能确定所感受的被测变量大小的仪表。它可以是传感器、变送器和自身兼

有检出元件和显示装置的仪表。

传感器是能接受被测信息,并按一定规律将其转换成同种或别种性质的输出变量的仪表。输出为标准信号的传感器称为变送器。所谓标准信号,是指变化范围的上下限已经标准化的信号(如 4~20mA DC 等)。

检测仪表可按下述方法进行分类:

(1) 按被测量分类。可分为温度检测仪表、压力检测仪表、流量检测仪表、物位检测仪表、机械量检测仪表以及过程分析仪表等。

(2) 按测量原理分类。有电容式、电磁式、压电式、光电式、超声波式、核辐射式检测仪表等。

(3) 按输出信号分类。可分为输出模拟信号的模拟式仪表、输出数字信号的数字式仪表,以及输出开关信号的检测开关(如振动式物位开关)等。

(4) 按结构和功能特点分类。可按照测量结果是否就地显示,分为测量与显示功能集于一身的一体化仪表和将测量结果转换为标准输出信号并远传至控制室集中显示的单元组合仪表;或者,按照仪表是否含有微处理器,而分为不带有微处理器的常规仪表和以微处理器为核心的微机化仪表。后者的集成度越来越高,功能越来越强,有的已具有一定的人工智能,常被称为智能化仪表。目前,有的仪表供应商又推出了“虚拟仪器”的概念。所谓“虚拟仪器”是在标准计算机的基础上加一组软件或(和)硬件,使用者操作这台计算机,即可充分利用最新的计算机技术来实现和扩展传统仪表的功能。这套以软件为主体的系统能够享用普通计算机的各种计算、显示和通信功能。在基本硬件确定之后,就可以通过改变软件的方法来适应不同的需求,实现不同的功能。虚拟仪器彻底打破了传统仪表只能由生产厂家定义,用户无法改变的局面。用户可以自己设计、自己定义,通过软件的改变来更新自己的仪表或检测系统,改变传统仪表功能单一或有些功能用不上的缺陷,从而节省开发、维护费用,减少开发专用检测系统的时间。

不同类型检测仪表的构成方式不尽相同,其组成环节也不完全一样。通常,检测仪表由原始敏感环节(传感器或检出元件)、变量转换与控制环节、数据传输环节、显示环节、数据处理环节等诸环节组成。检测仪表内各组成环节,可以构成一个开环测量系统,也可以构成闭环测量系统。开环测量系统是由一系列环节串联而成,其特点是信号只沿着从输入到输出的一个方向(正向)流动,如图 1-1 所示。一般较常见的检测仪表大多为开环测量系统。例如,图 1-2 所示的温度检测仪表,以被测温度为输入信号,以毫伏计指针的偏移作为输出信号的响应,信号在该系统内仅沿着正向流动。闭环测量系统的构成方式如图 1-3 所示,其特点是除了信号传输的正向通路外,还有一个反馈回路。在采用零值法进行测量的自动平衡式显示仪表中,各组成环节即构成一个闭环测量系统。

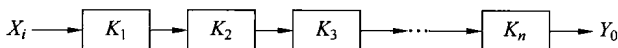


图 1-1 开环测量系统的构成方式

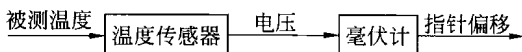


图 1-2 温度检测系统示意图

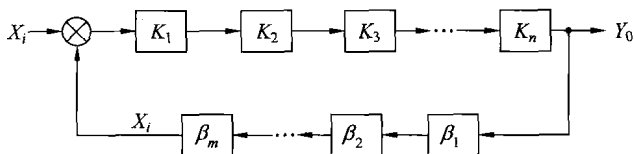


图 1-3 闭环测量系统的构成方式

1.1.2 检测仪表(传感器)的品质指标

1. 灵敏度

灵敏度(sensitivity)是指检测仪表在到达稳态后,输出增量与输入增量之比

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (1-1)$$

式中: \$K\$ 为灵敏度, \$\Delta Y\$ 为输出变量 \$Y\$ 的增量; \$\Delta X\$ 为输入变量 \$X\$ 的增量。

当仪表的输出输入关系为线性时,其灵敏度 \$K\$ 为一常数,如图 1-4 所示。反之,当仪表具有非线性时,其灵敏度将随着输入变量的变化而改变,以 \$dy/dx\$ 表示,如图 1-5 所示。

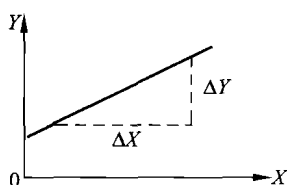


图 1-4 输出输入关系为线性

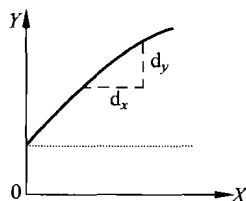


图 1-5 输出输入关系为非线性

2. 线性度

线性度(linearity)又称非线性(non-linear),是表征仪表输入输出校准曲线与所选定的拟合直线(作为工作直线)之间的吻合(或偏离)程度的指标,如图 1-6 所示。通常用相对误差来表示线性度:

$$\delta_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-2)$$

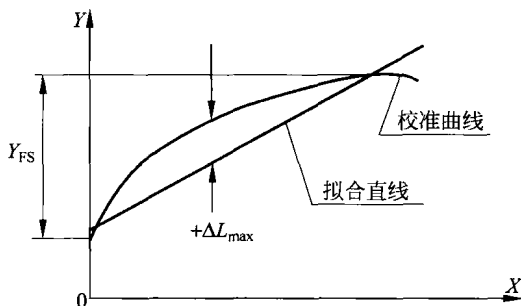


图 1-6 校准曲线与所选定的拟合直线

式中: $\Delta L_{\max}$ 为校准曲线与拟合直线间的最大偏差, Y_{FS} 为理论满量程输出值。

3. 分辨率

分辨率(resolution)反映仪表能检测出被测量的最小变化的能力, 又称分辨能力。当输入变量从某个任意值(非零值)缓慢增加, 直至可以观测到输出变量的变化时为止的输入变量的增量即为仪表的分辨率。分辨率可以用绝对值也可以用满刻度的百分比来表示。

例如, 角度传感器的满量程输出为 $10^\circ/1000\text{mV}$, 若其分辨率为 0.01° , 即每变化 0.01° , 其输出就应有 1mV 的变化。

4. 迟滞度

在外界条件不变的情况下, 当输入变量上升(从小到大)和下降(从大到小)时, 仪表对于同一输入所给出的两个相应输出平均值间(若无其他规定, 则指全行程范围内)的最大差值 $\Delta H_{\max}$ 即为迟滞度(hysteresis), 也叫回差, 如图 1-7 所示。通常以输出量程的百分数来表示

$$\delta_H = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-3)$$

回差是由于仪表内有吸收能量的元件(如弹性元件、磁化元件等)、机械结构中有间隙以及运动系统的摩擦等原因所造成的。

5. 重复性

在同一工作条件下, 对同一输入值按同一方向连续多次测量时, 所得输出值之间的相互一致程度为重复性(repeatability), 如图 1-8 所示。

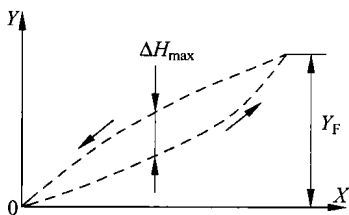


图 1-7 输入-输出的迟滞关系

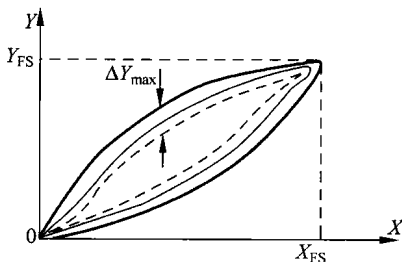


图 1-8 输入-输出的重复性

仪表的重复性用全测量范围内的各输入值所测得的最大重复性误差来确定。所谓重复性误差, 是对全范围行程在同一工作条件下, 从同方向对同一输入值进行多次连续测量所得输出值的两个极限值之间的代数差或均方根误差, 它反映的是校准数据的离散程度, 属随机误差, 因此应根据标准偏差计算:

$$\delta_R = \pm \frac{a\sigma_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中: $\sigma_{\max}$ 为各校准点正行程与反行程输出值的标准偏差中之最大值; a 为置信系数, 通常取 2 或 3。 $a=2$ 时, 置信概率为 95.4%; $a=3$ 时, 置信概率为 99.73%。

一般用贝塞尔公式法计算标准偏差: