

研究生教学用书

教育部学位管理与研究生教育司推荐

非电量电测技术

The Electric Measurement Techniques of Non-electric Quantities

(第3版)

吴道悌 主编

吴道悌 刘晓辉 郑明 编著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

研究生教学用书

教育部学位管理与研究生教育司推荐

非电量电测技术

(第3版)

The Electric Measurement Techniques
of Non-electric Quantities

(Third edition)

主编 吴道悌

编著 吴道悌 刘晓辉 郑明

西安交通大学出版社

内 容 提 要

本书根据工科非电类专业硕士研究生对测试技术的培养要求,系统地阐述了非电量的电测技术。主要内容包括:测量的基本知识和误差;常用传感器的工作原理、特性、测量电路和应用实例;信号的放大、滤波、转换等调理电路;信号的分析 and 处理基础;测量系统与计算机的接口及虚拟仪器。本书在撰写和内容选取上力求针对工科非电类专业研究生的特点,侧重于应用,并注意反映近年来该领域中的新器件、新技术和发展趋势。

本书也可作为工科高等院校师生及从事检测技术和自动化工作的工程技术人员教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

非电量电测技术(第3版) / 吴道悌主编. 刘晓辉, 郑明编著.
— 西安: 西安交通大学出版社, 2004. 10
ISBN 7-5605-1425-1

I. 非… II. ①吴… ②刘… ③郑… III. 非电量测量
IV. TM938.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 061851 号

书 名	非电量电测技术(第3版)
主 编	吴道悌
编 著	吴道悌 刘晓辉 郑 明
出版发行	西安交通大学出版社
地 址	西安市兴庆南路 25 号 (邮政编码: 710049)
电 话	(029)82668315 82669096(总编办) (029)82668357 82667874(发行部)
印 刷	西安东江印务有限公司
字 数	555 千字
开 本	727 mm×960 mm 1/16
印 张	30
版 次	2004 年 10 月第 3 版 2004 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0 001~3 000
书 号	ISBN 7-5605-1425-1/TM·50
定 价	39.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

《非电量电测技术》教材第一版于 1990 年由西安交通大学出版社出版,到 20 世纪 90 年代后期,已先后印刷三次。本书主要针对工科非电类专业硕士研究生的特点及其在测试技术方面的培养要求,同时也兼顾其他人员的需要而编写。

当今人类已进入信息时代,传感和测试技术的重要性已越来越被人们所认识和广泛采用。随着微电子技术和计算机技术的迅速发展,传感和测试技术也有了很大进展,因此本书第一版内容急需修改、充实和更新,第二版就是在此背景下于 2001 年 9 月问世的。

本书第二版仍保持第一版覆盖面较广,内容较为系统全面,侧重于原理和应用,不涉及设计制造方面的内容,以及尽量避免一些对介绍原理无关的数学推导等特点。增加了测量系统和计算机的接口、虚拟仪器、动态信号的分析 and 处理;并在不削弱传统传感器基本内容的前提下,增加了光纤传感器、CCD 图像传感器、光敏集成器件、集成霍尔器件、集成化测温器件及智能传感器等反映近代传感技术的新内容;又根据近 10 年的教学使用情况,对原教材内容也作了不少修改和增删。但限于篇幅和学时,有些内容如核辐射、化学、生物等传感器,仪表的抗干扰和测量结果的显示与记录等在第二版中仍未能介绍。

2004 年上半年本书第二版入选教育部学位管理与研究生教育司 2003~2004 年度推荐的研究生教学用书,并将于 2004 年出版第三版。第三版除对计算机与测量系统的接口和虚拟仪器方面稍作修改和增补新的内容外,其它内容均与第二版相同。

本教材共 16 章,分成三大部分。第一部分(1,2 章)为测量的基本知识和测量误差,介绍测量仪表的静态、动态特性,测量误差的基本理论。第二部分(3~10 章)介绍各种传感器的工作原理、特性、测量电路和应用举例。第三部分(11~16 章)介绍信号的放大、滤波、转换等调理电路、传感器特性的线性化及温度补偿、信号的分析 and 处理基础、测量系统与计算机的接口及虚拟仪器等内容。

本书第 1~10 章由西安交通大学吴道悌编写,第 11~15 章由西安交通大学刘晓晖编写,西安交通大学郑明编写第 16 章和光纤传感器、CCD 图像传感器。全书由吴道悌任主编。

本书也可作为高等学校工科非电类专业本科生和有关的电类专业本

科生的教材或参考书,对从事检测技术和自动化工作的工程技术人员也有参考价值。

本书第二版由上海交通大学朱承高教授担任主审,对全书作了仔细的审阅,提出了许多宝贵意见;西安交通大学葛文运教授对全书进行了认真的初审,对本书的编写给予了很大的帮助;在编写过程中还得到西安交通大学王采堂教授的支持,在此一并表示衷心的感谢。本书部分内容参考了许多校、院、所等编写的教材及文献资料,在此也致以谢意。

由于本书涉及的学科众多,而作者学识有限,书中定有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2004 年 9 月

目 录

绪 论

第 1 章 测量的基本知识

1.1 测量方法及其分类	(6)
1.1.1 概 述	(6)
1.1.2 直接测量、间接测量与组合测量	(6)
1.1.3 偏差式测量法、零位式测量法与微差式测量法	(7)
1.2 测量仪表的基本性能	(9)
1.2.1 精确度	(9)
1.2.2 稳定性	(10)
1.2.3 仪表的输出-输入特性	(11)
1.3 传感器的分类和性能指标	(19)
1.3.1 传感器的分类	(19)
1.3.2 传感器的性能指标	(21)

第 2 章 测量误差

2.1 误差定义及分类	(22)
2.1.1 误差定义	(22)
2.1.2 误差的分类与来源	(24)
2.1.3 系差和随差的表达式	(26)
2.2 随机误差	(26)
2.2.1 正态分布	(26)
2.2.2 方均根误差	(28)
2.2.3 误差概率的计算	(30)
2.2.4 最佳值的确定	(31)
2.2.5 算术平均值 $\bar{x}$ 的方均根误差 $\hat{\sigma}_x$	(32)
2.3 系统误差	(33)
2.3.1 发现系统误差的方法	(34)
2.3.2 削弱和消除系统误差的基本方法	(35)
2.4 粗 差	(38)
2.4.1 拉依达准则	(38)

2.4.2 格罗布斯准则·····	(40)
2.5 测量结果的数据处理实例·····	(41)
2.6 间接测量中误差的传递·····	(43)
2.6.1 绝对误差和相对误差的传递·····	(43)
2.6.2 标准差(方均根误差)的传递·····	(45)
2.6.3 误差传递公式在间接测量中的应用·····	(45)

第3章 电阻式传感器

3.1 线绕电位器式电阻传感器·····	(48)
3.1.1 工作原理·····	(48)
3.1.2 非线性误差·····	(49)
3.1.3 线绕电位器的结构和分辨力·····	(50)
3.2 应变式电阻传感器·····	(51)
3.2.1 应变效应和灵敏系数·····	(51)
3.2.2 电阻应变片的种类·····	(53)
3.2.3 测量电路·····	(55)
3.2.4 电阻应变片的温度误差及其补偿·····	(65)
3.2.5 电阻应变仪·····	(67)
3.3 电阻式传感器应用举例·····	(69)
3.3.1 电位器式压力传感器·····	(69)
3.3.2 半导体力敏应变片在电子皮带秤上的应用·····	(69)

第4章 电感式传感器

4.1 变气隙式自感传感器·····	(71)
4.1.1 工作原理·····	(71)
4.1.2 等效电路·····	(73)
4.1.3 特性·····	(73)
4.2 差动式自感传感器·····	(75)
4.2.1 结构和工作原理·····	(75)
4.2.2 输出特性·····	(76)
4.2.3 测量电路·····	(77)
4.3 差动变压器(互感式电感传感器)·····	(78)
4.3.1 结构与工作原理·····	(78)
4.3.2 等效电路·····	(79)

4.3.3	测量电路	(80)
4.4	应用举例	(83)
4.4.1	JGH 型电感测厚仪	(83)
4.4.2	差压计	(84)
4.4.3	远传浮子液位测量	(85)
4.5	电涡流式传感器	(86)
4.5.1	基本原理	(86)
4.5.2	等效电路	(87)
4.5.3	测量电路	(87)
4.5.4	应用举例	(88)

第 5 章 电容式传感器

5.1	工作原理与结构形式	(91)
5.1.1	基本工作原理	(91)
5.1.2	结构形式	(92)
5.2	输出特性	(93)
5.2.1	变间隙式	(93)
5.2.2	变面积式	(95)
5.2.3	变介电常数式	(95)
5.3	测量电路	(96)
5.3.1	桥式电路	(96)
5.3.2	二极管不平衡环形电路	(99)
5.3.3	差动脉冲宽度调制电路	(100)
5.3.4	运算放大器式电路	(102)
5.3.5	调频电路	(103)
5.4	应用举例	(104)
5.4.1	电容式差压传感器	(104)
5.4.2	电容式液位计	(105)
5.4.3	电容测厚仪	(105)
5.4.4	利用电容量变化效应的温度传感器	(106)

第 6 章 电动势式传感器

6.1	磁电式传感器	(108)
6.1.1	工作原理及结构	(108)

6.1.2	传感器的灵敏度和温度补偿	(109)
6.1.3	测量电路	(111)
6.1.4	应用举例	(111)
6.2	压电晶体传感器	(114)
6.2.1	压电效应	(114)
6.2.2	压电材料简介	(116)
6.2.3	压电传感器及其等效电路	(118)
6.2.4	压电传感器的测量电路	(121)
6.2.5	应用举例	(125)
6.3	霍尔传感器	(129)
6.3.1	霍尔元件的基本工作原理	(129)
6.3.2	霍尔元件的测量误差及其补偿	(131)
6.3.3	霍尔元件的使用	(134)
6.3.4	集成霍尔器件	(136)
6.3.5	霍尔元件在非电量电测技术中的应用举例	(137)

第7章 热电传感器

7.1	热电偶	(141)
7.1.1	热电偶测温原理	(141)
7.1.2	热电偶的结构与种类	(150)
7.1.3	热电偶的冷端温度补偿	(153)
7.1.4	热电偶实用测温电路	(156)
7.2	热电阻	(159)
7.2.1	常用热电阻	(159)
7.2.2	热电阻的测量电路与应用举例	(162)
7.3	热敏电阻	(163)
7.3.1	热敏电阻的电阻-温度特性	(164)
7.3.2	主要技术参数	(166)
7.3.3	热敏电阻的应用举例	(167)
7.4	PN结型和集成温度传感器	(173)
7.4.1	分立元件PN结型温度传感器	(173)
7.4.2	集成温度传感器	(176)

第8章 光传感器

8.1	外光电效应和光电管、光电倍增管	(181)
-----	-----------------------	-------

8.1.1	光电管	(181)
8.1.2	光电倍增管	(184)
8.2	内光电效应及相应的器件	(187)
8.2.1	光导效应及光敏电阻	(187)
8.2.2	光生伏特效应及光电池、光敏二极管、光敏三极管 ...	(190)
8.3	光电传感器的类型及应用举例	(196)
8.3.1	类 型	(196)
8.3.2	应用举例	(197)
8.4	光敏集成器件	(200)
8.4.1	达林顿光敏管	(200)
8.4.2	光电耦合器件	(201)
8.5	光纤传感器	(203)
8.5.1	光纤的结构和传光原理	(204)
8.5.2	光纤的性能	(205)
8.5.3	光纤传感器的工作原理及其组成	(206)
8.5.4	光纤传感器的应用举例	(208)
8.6	CCD 图像传感器	(211)
8.6.1	CCD 的基本结构和工作原理	(211)
8.6.2	电荷的注入和输出	(214)
8.6.3	线型和面型 CCD 图像传感器	(215)
8.6.4	CCD 的主要参数	(218)
8.6.5	CCD 输出信号的特点及应用举例	(221)

第 9 章 气敏及湿敏传感器

9.1	气敏传感器	(224)
9.1.1	电阻型半导体气敏传感器的结构	(225)
9.1.2	半导体气敏材料的气敏机理概述	(227)
9.1.3	SnO ₂ 系列气敏器件	(228)
9.1.4	应用举例	(230)
9.2	湿敏传感器	(233)
9.2.1	湿敏器件的特性参数	(234)
9.2.2	湿敏器件的种类	(235)
9.2.3	典型器件介绍	(238)
9.2.4	应用举例	(245)

第 10 章 数字式传感器

10.1 编码器	(247)
10.1.1 码盘式编码器	(247)
10.1.2 脉冲盘式编码器	(252)
10.2 感应同步器	(254)
10.2.1 直线式感应同步器的结构	(254)
10.2.2 感应同步器的工作原理	(255)
10.2.3 感应同步器输出信号的检测	(257)
10.2.4 感应同步器位移数字显示装置(鉴相型检测系统)	(258)
10.3 计量光栅	(261)
10.3.1 黑白透射型长光栅的结构和工作原理	(261)
10.3.2 光电转换	(264)
10.3.3 辨向与细分原理	(266)
10.4 频率式数字传感器	(267)
10.4.1 改变力学系统固有频率的频率传感器	(267)
10.4.2 振荡器式频率传感器	(271)
10.4.3 压控振荡器式频率传感器	(272)
10.4.4 频率式传感器的基本测量电路	(273)
10.5 智能传感器简介	(274)
10.5.1 智能传感器的功能和特点	(274)
10.5.2 智能传感器实现的技术途径	(275)
10.5.3 智能传感器举例	(275)

第 11 章 信号的放大和调理电路

11.1 信号放大电路	(278)
11.1.1 理想运算放大器及其应用	(278)
11.1.2 实际运算放大器存在的问题	(284)
11.1.3 仪器放大器(测量放大器)	(287)
11.1.4 程控增益放大器	(289)
11.1.5 隔离放大器	(291)
11.1.6 调制型直流放大器	(293)
11.2 模拟滤波器	(298)

11.2.1	一阶无源滤波器	(298)
11.2.2	二阶有源滤波器	(301)
11.2.3	开关电容滤波器	(303)
11.2.4	集成电路滤波器	(305)
11.3	信号处理电路	(308)
11.3.1	绝对值转换电路	(308)
11.3.2	有效值转换电路	(311)
11.3.3	峰值保持电路(峰值检波器)	(317)

第 12 章 信号的转换

12.1	D/A 转换电路	(321)
12.1.1	D/A 转换电路的工作原理	(322)
12.1.2	D/A 转换电路的主要参数	(324)
12.1.3	D/A 集成芯片	(324)
12.2	A/D 转换电路	(328)
12.2.1	转换原理	(329)
12.2.2	A/D 转换电路的主要参数	(332)
12.2.3	A/D 集成芯片	(335)
12.3	A/D 转换器的外围电路	(341)
12.3.1	采样/保持电路	(341)
12.3.2	多路模拟开关	(345)
12.4	U/F 转换电路	(348)
12.4.1	U/F 转换电路的工作原理	(348)
12.4.2	集成 U/F 转换器	(350)

第 13 章 传感器特性的线性化及温度补偿

13.1	传感器非线性特性的线性化	(352)
13.1.1	模拟线性化	(352)
13.1.2	数字线性化	(362)
13.2	温度补偿	(366)
13.2.1	温度补偿原理	(366)
13.2.2	温度补偿方法	(368)

第 14 章 信号分析和处理基础

14.1	信号概述	(372)
------	------	-------

14.1.1	周期信号	(373)
14.1.2	非周期性信号的频谱	(376)
14.1.3	随机信号	(380)
14.2	测试系统特性	(383)
14.2.1	测试系统特性的频域描述和频率响应函数	(384)
14.2.2	线性系统的脉冲响应	(386)
14.3	信号的采样和窗函数	(387)
14.3.1	采样定理与抗混迭滤波	(387)
14.3.2	窗口函数	(391)
14.4	数字滤波	(394)
14.4.1	数字滤波器的分类	(395)
14.4.2	数字滤波器的算法结构	(396)
14.5	相关检测	(398)
14.5.1	自相关检测	(399)
14.5.2	互相关检测	(400)
14.5.3	锁定放大器	(401)

第 15 章 计算机与测量系统的接口

15.1	微型计算机系统的基本结构	(403)
15.2	PC 机总线	(405)
15.2.1	PC/XT 总线	(405)
15.2.2	ISA 总线	(406)
15.2.3	PCI 局部总线	(408)
15.3	GPIB 通用接口总线	(410)
15.3.1	GPIB 总线的结构	(411)
15.3.2	三线挂钩原理	(415)
15.4	串行接口	(416)
15.4.1	串行通信的一般概念	(416)
15.4.2	串行通信的接口电路	(418)
15.4.3	RS—232C 接口	(419)
15.4.4	USB 接口	(422)
15.5	现场总线	(424)
15.5.1	现场总线的特点	(424)
15.5.2	现场总线协议模型	(425)

15.5.3	PROFIBUS 总线	(427)
15.5.4	基金会现场总线(FF)	(429)
15.5.5	LONWORKS 总线	(431)
15.6	数据采集接口	(433)
15.6.1	数字信号的采集	(433)
15.6.2	模拟信号的采集	(436)
15.6.3	地址译码电路	(437)
 第 16 章 虚拟仪器		
16.1	虚拟仪器的产生	(440)
16.2	虚拟仪器的结构及特点	(441)
16.2.1	虚拟仪器的结构	(441)
16.2.2	虚拟仪器的特点	(442)
16.2.3	虚拟仪器技术优势	(442)
16.3	虚拟仪器的分类	(443)
16.3.1	PC 总线-插卡式虚拟仪器	(444)
16.3.2	并行口式虚拟仪器	(444)
16.3.3	GPIB 总线方式的虚拟仪器	(444)
16.3.4	VXI 总线方式的虚拟仪器	(444)
16.3.5	PXI 总线方式的虚拟仪器	(445)
16.4	虚拟仪器的系统组成	(445)
16.4.1	GPIB 总线	(446)
16.4.2	VXI 总线	(447)
16.4.3	PXI 总线	(451)
16.5	虚拟仪器软件开发平台	(453)
16.5.1	Lab VIEW 软件开发平台	(453)
16.5.2	Lab Windows/CVI 软件开发平台	(458)
16.6	虚拟仪器技术的应用	(459)
16.6.1	工程应用现状	(459)
16.6.2	基于 Lab VIEW 的应用实例	(461)
 主要参考文献		(464)

绪 论

在工农业生产、科学研究、国防建设及国民经济的各部门中,经常需要检测各种参数和物理量,获取被测对象的定量信息,以便进行监视和控制,使设备或系统处于最佳运行状态,并保证生产的安全、经济及高质量。在现代科学研究和新产品设计中,为了掌握事物的规律性,人们必须测试许多有关参数,用以检验是否符合预期要求和事物的客观规律性。

在被测物理量中,非电量占了绝大部分,例如压力、温度、湿度、流量、液位、力、应变、位移、速度、加速度、振幅等等,虽然对它们的测量可以用机械、气动等方法,但是电测技术具有一系列明显优点,尤其随着微电子技术和计算机技术的飞速发展,更显示出其突出的优势,所以许多非电量的测量广泛应用电测技术。

电测技术具有下列主要优点:

- 测量的准确度和灵敏度高,测量范围广。
- 由于电磁仪表和电子装置的惯性小,测量的反应速度快,具有比较宽的频率范围,不仅适用于静态测量,亦适用于动态测量。
- 能自动连续地进行测量,便于自动记录,并能根据测量结果,配合调节装置,进行自动调节和自动控制。
- 采用微处理器组成智能化仪器,可与微型计算机一起构成测量系统,实现数据处理、误差校正、自监视和仪器校准等功能。
- 可以进行远距离测量,从而能实现集中控制和远程控制。
- 从被测对象取用功率小,甚至完全不取用功率,并可以进行无接触测量,减少对被测对象的影响,提高测量精度。

1. 非电量电测系统的组成

非电量电测技术的任务,就是把待测的非电量,通过一种器件或装置,把非电量变换成与它有关的电信号(电压、电流、频率等等),然后利用电气测量的方法,对该电信号进行测量,从而确定被测非电量的值。

非电量电测系统的结构框图如图 0-1 所示。它由传感器、信号调理、信号分析与处理或微计算机等环节组成,或经信号调理环节后,直接

显示和记录。

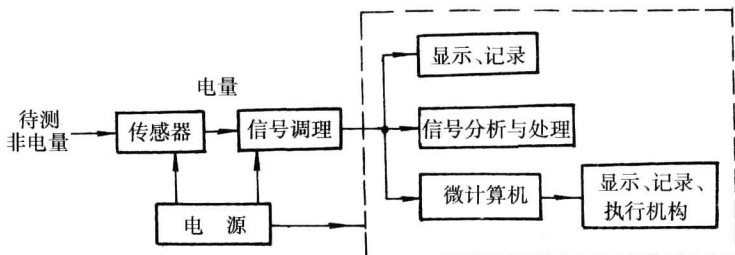


图 0-1 非电量电测系统结构框图

传感器是将外界信息按一定规律转换成电量的装置,它是实现自动检测和自动控制的首要环节。目前除利用传统的结构型传感器外,大量物性型传感器被广泛采用。结构型传感器是以物体(如金属膜片)的变形或位移来检测被测量的;物性型传感器是利用材料固有特性来实现对外界信息的检测,它有半导体类、陶瓷类、光纤类及其它新型材料等。

信号调理环节是对传感器输出的电信号进行加工,如将信号放大、调制与解调、阻抗变换、线性化、将电阻阻抗变换为电压或电流等等,原始信号经这个环节处理后,就转换成符合要求、便于输送、显示、记录、转换以及可作进一步后续处理的中间信号。这个环节常用的模拟电路是电桥电路、相敏电路、测量放大器、振荡器等;常用的数字电路有门电路、各种触发器、A/D 和 D/A 转换器等。信号调理环节有时可能是许多仪器的组合,有时也可能仅有一个电路,甚至仅是一根导线。

对于动态信号的测量,即动态测试,在现代测试中已占了很大的比重。它常常需要对测得的信号进行分析、计算和处理,从原始的测试信号中提取表征被测对象某一方面本质信息的特征量,以利于对动态过程作更深入的了解。这个领域中采用的仪器有频谱分析仪、波形分析仪、实时信号分析仪、快速傅里叶变换仪等,但计算机技术在信号处理中已被广泛应用。

整个测试系统中还必须包括电源,在一些便携式仪器中,一般采用电池供电。

图 0-1 所示的测量系统是目前常用的。图 0-2(a)所示的是由两块芯片组成的测试系统,一块芯片是传感器件与信号调理电路为一体的集成敏感器件,另一块芯片是带 A/D 转换的微处理器。图 0-2(b)是包括上述全部功能的单一芯片测试系统,这是今后的发展方向。

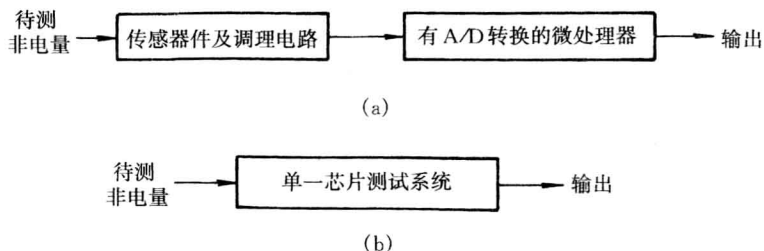


图 0-2 由芯片构成的测试系统示意图

2. 传感器的发展趋势

在非电量电测系统中,如果没有传感器对原始信息进行精确、可靠的捕获和转换,则一切测量和控制都是不可能实现的。当前与计算机处理信息的能力相比,传感器检测信息的能力,无论在数量、质量和功能上都远不适应社会多方面发展的需要。因此,传感器技术的发展,目前正处在方兴未艾状态,世界上先进国家都把传感器技术列为核心技术。传感器发展的趋势有以下几方面:

(1)研究开发新原理、新材料。测量领域不断扩大,测量对象不断增加,如空间技术、海洋开发、环境保护、生命科学等,原有的传感器已远不能适应这种需要,因此需研究开发新原理、新材料的新型物性型传感器。例如利用约瑟夫逊效应的热噪声温度传感器,可测量 10^{-6} K 的超低温;利用光子滞后效应,出现了响应速度极快的红外传感器。硅材料及其它派生物是目前最成熟和应用研究最广的材料,许多微型传感器都是基于硅材料上形成的;其它陶瓷材料、高分子材料也对新传感器的研究和开发起了很大的推动作用。

(2)集成化和多功能化。传感器集成化即是将多个相同传感器配置在同一平面上,形成一维、二维或三维阵列,甚至能加上时序,变单一信息检测为多信息检测。

传感器的多功能化是指一个传感器可检测两种或两种以上的参数,或者将传感器件与调理、补偿等电路集成一体化,意味着传感器自身不仅有检测功能,还具有信号处理和其它功能。近年来,已研制多种能检测两个以上不同物理量的传感器,例如利用特殊陶瓷能分别检测湿度和气体、温度和湿度的多功能传感器也已经迈向实用化。

(3)智能化。传感器与微处理器集成在同一芯片上,组成智能传感