

高等学校教材

非电量检测技术

王凤鸣 等

国防工业出版社

内 容 简 介

本书共分十二章,主要讲授机械量、流体量、温度、磁、光、气体及湿度等非电量电测的基本原理及检测方法,所用传感器的类别、性能及应用,以及将传感器获取的信号进行处理并数字化的数据采集系统的构成。本书的特点在于重点叙述各种类型的物性传感器,从实际非电量检测需要出发,力求系统性、实用性及先进性。

本书可作为高等学校工科电子技术及相近专业研究生及本科生的教材,也可供有关专业的工程技术人员参考。

非电量检测技术

王凤鸣 等

责任编辑 王晓光

*

国防工业出版社出版

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京市大兴兴达印刷厂印装

*

787×1092 1/16 23³/₄印张 547千字

1991年5月第一版 1991年5月北京第一次印刷 印数: 00001—2500册

ISBN 7-118-00796-X/TM·26

定价: 6.10元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部制定的工科电子类专业教材 1986~1990 年编审出版规划,由无线电技术与信息系统教材编审委员会仪表与测量编审组征稿、评选、推荐出版。

本教材由哈尔滨电工学院王凤鸣副教授担任主编,王奉国、王凤昌副教授参加了第一、二章的编写工作,范茂军、戴宝梁高级工程师参加了第三、四章的编写工作,薛栋、姜德潭副教授参加了第十~十二章的编写工作。哈尔滨工业大学孙圣和教授为本书的主审人。

本课程的参考学时数为 40 学时,其主要内容为机械量、流体量、温度、磁、光、气体和湿度等非电量电测的基本原理及检测方法,传感器的类别、性能和应用,以及将传感器获取的信号进行处理并数字化的数据采集系统的构成。在内容上力求达到系统、实用、先进三者统一。

全书共分十二章。第一章综述非电量检测的意义和重要性、非电量检测系统的构成、检测量与传感器的分类,以及非电量检测技术的展望。第二章概述测量与误差以及检测系统的静态与动态特性。第三章至第八章分别阐述机械量等七种传感器的分类、工作原理、结构特点、特性与应用。第九章阐述超声波检测技术的基本原理、超声波传感器的结构,以及超声波在检测方面的应用。第十章概述光纤传感器的基本原理、特点、构成,以及测量各种物理量的应用举例。第十一章概述传感器的输出信号分类,以及将各种输出信号转换成统一的电压信号(或频率信号)的方法。第十二章综述数据采集系统的构成、模拟量传输与采样,以及模拟量—数字量转换,综合分析数据采集系统的精度与速度。

在本书编写过程中,孙圣和教授对书稿进行了细致的审阅和修改,费正生教授对本书的编写工作给与热情关怀,马怀俭副教授也给与不少帮助,谨此一并致以深切谢意。

由于编者水平所限,无论在体系、内容或编写方法上一定会存在缺点和错误,恳切希望读者批评指正。

编 者

1990.3

目 录

第一章 总论	1
§ 1-1 非电量检测技术的重要作用	1
§ 1-2 非电量检测系统	2
§ 1-3 检测量与传感器的分类	2
§ 1-4 非电量检测技术展望	8
第二章 检测系统的一般特性	12
§ 2-1 测量与误差	12
§ 2-2 检测系统的静态特性	14
§ 2-3 检测系统的动态特性	22
第三章 机械量传感器	29
§ 3-1 概述	29
§ 3-2 弹性元件	30
§ 3-3 电阻应变片	35
§ 3-4 力学量传感器	43
§ 3-5 位移传感器	51
§ 3-6 振动与加速度传感器	65
第四章 流体量传感器	75
§ 4-1 压力传感器	75
§ 4-2 真空度检测	92
§ 4-3 流量(流速)计	97
第五章 温度传感器	105
§ 5-1 概述	105
§ 5-2 热电偶	105
§ 5-3 金属热电阻	115
§ 5-4 半导体热敏电阻	118
§ 5-5 pn 结型温度传感器	129
§ 5-6 NQR 温度计	132
§ 5-7 石英温度传感器	134
§ 5-8 热噪声温度计	135
§ 5-9 辐射温度计与热辐射传感器	136
§ 5-10 热流传感器	137
第六章 磁传感器	139
§ 6-1 概述	139
§ 6-2 霍尔元件	139
§ 6-3 磁敏电阻	153
§ 6-4 磁敏二极管	158
§ 6-5 磁敏晶体管	161
§ 6-6 强磁性合金薄膜磁阻元件	166

§ 6-7 魏干特合金磁传感器	169
§ 6-8 量子型传感器——超导量子干涉器件	170
第七章 光传感器	178
§ 7-1 概述	178
§ 7-2 光电子发射型光传感器	178
§ 7-3 光电导型光传感器	185
§ 7-4 光敏二极管	193
§ 7-5 光电池与光伏探测器	202
§ 7-6 硅光敏晶体管	203
§ 7-7 电荷耦合器件 (CCD)	207
§ 7-8 热效应型光传感器	210
§ 7-9 光敏管的应用	213
§ 7-10 光电耦合器	217
第八章 气体传感器与湿度传感器	225
§ 8-1 气体传感器概述	225
§ 8-2 电阻变化型半导体气体传感器	227
§ 8-3 MOS 场效应气体传感器	234
§ 8-4 接触燃烧式气体传感器	236
§ 8-5 固体电解质式气体传感器	238
§ 8-6 气体传感器的应用	239
§ 8-7 湿度传感器概述	244
§ 8-8 烧结型半导体陶瓷湿度传感器	247
§ 8-9 涂覆膜型陶瓷湿度传感器	254
§ 8-10 其它湿度传感器	255
§ 8-11 湿度传感器的测量与应用电路	257
第九章 超声波传感器	262
§ 9-1 超声波物理基础	262
§ 9-2 超声波传感器的结构及工作原理	268
§ 9-3 超声波探伤	271
§ 9-4 超声波传感器的其它应用	278
第十章 光纤传感器	283
§ 10-1 概述	283
§ 10-2 光导纤维	286
§ 10-3 光源 (发光元件)	293
§ 10-4 光探测器	299
§ 10-5 光纤传感器工作原理	299
§ 10-6 光纤传感器的应用举例	309
第十一章 传感器输出与信号预处理	314
§ 11-1 概述	314
§ 11-2 开/关式传感器	315
§ 11-3 模拟脉冲式传感器	318
§ 11-4 模拟连续式传感器	321

§ 11-5	模拟频率变化式和脉冲重复频率式传感器	332
§ 11-6	数字脉冲数式传感器	334
§ 11-7	数字编码式传感器	335
第十二章	数据采集系统	337
§ 12-1	系统结构配置	337
§ 12-2	模拟多路转换器 (MUX)	338
§ 12-3	采样保持电路 (SHA)	343
§ 12-4	测量放大器 (仪用放大器, IA)	347
§ 12-5	模—数转换器 (ADC)	349
§ 12-6	数—模转换器 (DAC)	358
§ 12-7	系统的设计与分析	363
参考资料		368

第一章 总 论

§ 1-1 非电量检测技术的重要作用

获取自然界、工农业生产和科学实验中包含的各种物理量、化学量及生物量信息是人类认识和改造自然的首要条件。科学技术的发展与信息检测手段的进步密不可分,可以说,各种信息检测手段的技术水平是科学技术和生产力发展水平的重要标志。

自 18 世纪发明蒸汽机起,人类经历了第一次劳动方式的革命—用机械代替人的体力劳动。与此相应,对自然界及工农业生产中物理量的检测,也多采用机械手段,所检测的物理量主要是机械量和热工量,这种局面一直延续到本世纪 50 年代。

自 60 年代起,半导体、微电子技术的崛起和电子计算机(特别是微型机)的迅猛发展,使人类进入第二次劳动方式革命时期—用电子装置代替人的脑力劳动,人们常形象地称作人类已进入信息时代。信息时代的主要标志是用基于微电子学和新型功能材料的检测技术获取信息,用微型机处理信息。检测技术的进步不但扩大了物理量的检测范围,扩宽了量程,提高了灵敏度和精度,而且为开发化学量和生物量检测装置(传感器)开辟了新的途径。

非电量检测技术对工农业生产和科学技术发展的推动作用的例子不胜枚举。

检测车床切削工件时切削力大小及变化对监视工件表面质量、刀具磨损,避免车床过载、控制切削过程稳定度,以及对研究金属切削原理、确定切削量、设计机床和夹具等都有重要意义。在自动化机床中,通过各种非电量检测电路检测工件的尺寸、形状及表面质量等信息来控制机床运行,实现生产自动化。

在化工生产的自动化系统中,必须对整个生产过程中各环节的工作状态(如流体压力、温度、流速及成分等)进行监测与控制,使之能确保严格按工艺要求完成各道工序,以求得到合格产品。此外,为了确保安全生产和节能需要,也必须对动力设备工作状态进行严格监测与保护,……这些均依赖于非电量检测技术。随着微型机的发展,自动化生产的故障诊断系统也日臻完善。

设计一架新型飞机,需要通过风洞试验测定机身机翼受力和振动分布,仅此一项就需用上千块应变片和相应的测量电路,而研制发动机系统更需测量和记录转速、扭矩、振动、温度、压力、气流及应力等各种非电量。一架飞机上装有数以百计的传感器,这些传感器获取各部位的非电量信息,并将其转换成电量信息,经密布的线路传送到驾驶舱的指示仪表,使飞行员和机械师掌握飞机的工作状态。任何部位检测失灵,都会带来极大的麻烦,甚至严重的后果。

人体是结构最复杂、最精巧、信息参量最丰富的系统,各部位的生物电、生物磁,心脏的工作状态,循环系统的血流量、流速、压力以及血液成分,人体温度分布等等,都是信息参量。为了掌握人体的生理状态,诊断疾病,需用适合人体的各种专用检测手段。人体信息检测技术现代化,可以说是医学现代化的基石。其中,CT 断层扫描技术就

是人体检测手段现代化的生动例证。基于约瑟夫逊效应和超导材料的 SQUID, 可以检测到人体大脑发出的仅为地磁场强度的 10^{-8} 的微弱磁场变化, 因而用 SQUID 获取脑磁图、心磁图将成为医学现代化的新高峰。

仅由以上几例即可看出非电量检测技术在整个国计民生的重要作用及应用的广泛性。

§ 1-2 非电量检测系统

非电量检测实际上即为非电量电测, 现代所用的非电量检测技术, 首先是将非电量转换成电量, 而后加以测量。非电量检测系统包括图 1-1 所示的四个部分: 传感器; 测量电路; 记录, 显示或处理装置; 辅助电源。

传感器是获取非电量信号并将其转换成电量信号的装置 (或元件), 是非电量检测系统的关键部分。传感器能否灵敏而准确地转换信号, 将直接影响整个检测系统的检测精度。非电量种类繁多, 每一类非电量的检测范围又都很大, 加之, 用于测量非电量的传感器的工作原理、结构、材料和特性也各异。因此, 传感器技术是非电量检测技术的关键。

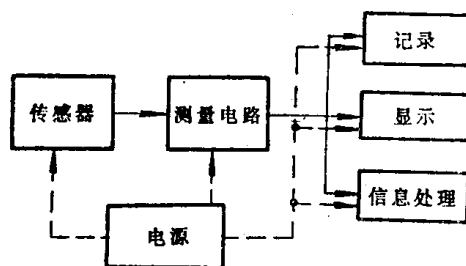


图1-1 非电量检测系统方框图

测量电路用于对传感器输出的电信号进行放大、变换及处理, 使之变为便于显示、记录或作反馈调节和控制的电信号。通常, 包括电桥、放大电路、检波滤波电路、运算电路、模—数转换电路 (ADC) 及数—模转换电路 (DAC)。

显示、记录器是将测量电路的输出用模拟量, 数字量或曲线、图像形式显示或记录的电表、仪表、显示屏及存储装置等。随着微型机技术的发展, 在非电量电测系统中采用微处理机, 可有效地提高信息处理能力, 使测量系统自动化、智能化。

§ 1-3 检测量与传感器的分类

自然界中待测量包括范围极广, 大致可分为物理量、化学量和生物量三大类。现已能检测的待测量分类列于表 1-1。

现今, 已开发的用作检测物理量的检测元件——物理量传感器, 种类繁多、性能优良且具有较好的稳定性, 已广泛应用于工农业生产、科学研究、交通、医疗诊断及日常生活等各个领域, 而化学量和生物量传感器尚处于研究和初期开发阶段。

传感器的分类方法很多: 可按检测信号参量 (输入量) 分, 可按输出量分, 可按信号参量间变换原理分, 也可按传感器结构或所用的敏感材料分等。

从传感器技术发展过程看, 50年代以前开发和使用的传感器基本上是结构型的, 即外界非电量的作用引起传感器结构上的形变, 使输出量发生变化, 如电容式、电感式、涡流式、电位器式和金属电阻式传感器等。60年代以后, 随着新型物性材料的开发和应用, 物性型传感器得到很大发展, 并逐步成为传感器发展的主流, 这类传感器是利用某

表1-1 检测量及检测对象分类

类 别		检测量及检测对象
物理量	几何学量	长度、位移、应变、厚度、角度、角位移
	运动学量	速度、角速度、加速度、角加速度、振动、频率、时间
	力学量	力、力矩、应力、质量、荷重
	流体量、	压力、真空度、液位、粘度、流速、流量
	温度	温度、热量、比热
	电量	电流、电压、电场、电荷、电功率、电阻、电感、电容、电磁波
	磁场	磁通、磁场强度、磁感应强度
	光	光度、照度、色、紫外光、红外光、可见光、光位移
	湿度	湿度、露点、水分
	放射线	X、 α 、 β 、 γ 射线
化学量		气体、液体、固体分析、pH值、浓度
生物量		酶、微生物、免疫抗原、抗体

些物质（如半导体、陶瓷、压电晶体、强磁性体及超导体等）的物性随外界待测量作用发生变化的原理制成。物性型传感器具有尺寸小、结构紧凑、灵敏度与可靠性高、制作容易等优点。由于多制成固体元件，故常称作固体元件传感器，或简称敏感元件。

表 1-2 列出物性型传感器按检测对象、所用材料及信号转换所依据物理效应的分类。

表1-2 物性型传感器分类表

	材料	利用的物理效应	主 要 材 料	传感器举例
应变	半导体	压阻效应	Si, Ge, GaP, InSb	应变片, 应力计, 流量计等机械量传感器
		pn结受压力变化	Si, Ge	压敏二极管
	压电体	压电效应	石英, BaTaO ₃ , PZT, ZnO, PVF ₂	压电元件
			ZnO + MOSFET	压电MOS元件
		表面弹性波延迟效应	石英, ZnO + Si	表面波元件
	强磁性体	磁应变效应	坡莫合金, Ni, 铁氧体, 铝铁合金	磁应变元件
温度	半导体	电阻变化	金属氧化物, Si, Ge, 有机半导体	热敏电阻
			同上, InSb, Hg-Te-Cd, Sn-Pb-Te	热辐射计
		二极管, 晶体管, 可控硅特性变化	Si, Ge, GaAs	二极管, 晶体管可控硅
		pn结电动势效应	Bi ₂ Te ₃ , Bi ₂ Se ₃ , InSb, Hg-Cd-Te, Sn-Pb-Te	热电偶
	电介质	介电系数变化	BaTiO ₃	强介电质温敏元件
		压电效应	PZT, PLZT	
		热电效应	TGS, LiTaO ₃ PZT, PbTiO ₃ , PVF ₂	驻极(电介)体温敏元件

(续)

	材料	利用的物理效应	主要材料	传感器举例
温度	强磁性体	导磁率变化	铁氧体等	强磁性体温敏元件
	半导体	电导率变化	CdS, CdSe, a-Si:H	光敏电阻
光	半导体	光电动势效应	Si, Ge	光敏二极管、雪崩二极管、光敏晶体管、固体摄像光敏元件、肖特基光敏二极管
		肖特基势垒效应	Pt-Si	
磁	半导体	霍尔效应	Si, Ge, GaAs, InAs	霍尔元件
		pin二极管中的磁阻效应	Ge	磁敏二极管
		磁阻效应	InSb, InAs	磁阻元件
	强磁性体	磁阻效应	Ni-Co合金	磁阻元件
		魏干特效应	魏干特合金 (Fe-Ni, V-Co-Fe)	魏干特元件
	超导体	约瑟夫逊效应	Pb, Sn, Nb ₃ Sn, Nb-Ti	SQUID
放射线	半导体	pn结电动势效应	Si, Ge	(射线敏) 二极管
			渗入Li的Ge, Si, HgCl ₂	pin二极管
			Au-Si	肖特基二极管
			金属-聚脂膜-Ge	MIS二极管
		2次电子倍增作用	玻璃半导体 (氧化铝系, NESA膜系) 陶瓷半导体 (BaTiO ₃ , ZnTiO ₃)	沟道二次电子倍增管
气体	半导体	表面电阻效应 体电阻效应	SnO ₂ , ZnO γ -Fe ₂ O ₃ , TiO ₂ , CoO-MgO, Al ₂ O ₃	气敏 (电阻) 元件
		二极管、晶体管特性 场效应	Pd/TiO ₂ , Pd-MOS	MOS气敏二极管, MOSFET (气敏)
		浓淡电池效应	ZrO ₂ -Y ₂ O ₃	浓淡电池型气体传感器
湿度水分	半导体	电阻效应	ZnO-Cr ₂ O ₃ , MgCr ₂ O ₄ -TiO ₂	湿敏元件 (湿度传感器)
		电容效应	F ₂ O ₃ -K ₂ O, Al ₂ O ₃	
	有机物	谐振频率效应	聚酰胺 + 石英振子	
	电解质	电阻效应	LiCl, P ₂ O ₅	
	电介质	电容效应	K ₂ PO ₃ , Al ₂ O ₃	

实际上, 传感器并非均为单一固体敏感元件, 有些则是由具有不同机能的敏感元件组合而成。由于测定量种类繁多、测定条件各异, 现有的单一固体敏感元件不可能将各种非电量都直接转换成电量信号输出。有的类型虽然在原理上能直接转换成电量信号, 但由于技术上或经济上的原因, 难以实现直接变换, 因而也需将待测的非电量先转换成其它非电量, 再由相应的敏感元件转换成电量信号输出。例如, 压电元件在原理上可以直接将压力转换成电压或电荷量输出, 但由于绝缘电阻有限, 给直流或准直流负荷状态下的压力测定带来困难, 不仅需要电荷放大器, 而且工作稳定性及信噪比都较差, 因而常常是先使用膜片、弹簧管等弹性元件将压力转换成位移或应变, 再采用应变片等元件将位移或应变转换成电量信号。

接缩小、扩大或放大的装置。

表 1-4 列出检测多种待测量常用的传感器类别及各类的测量范围。

表1-4 各种物理量传感器的类别及测量范围

(1) 线位移传感器的测量范围

输出量	传感器种类及测量范围 (m)
电压	霍尔效应式 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ 磁尺式 $10^{-6} \sim 10^2$ 涡流式 $10^{-5} \sim 10^{-2}$ 感应同步器 $10^{-6} \sim 10^0$ 差动变压器 $10^{-3} \sim 0.5$
电流	放射线测厚 $10^{-6} \sim 5 \times 10^{-2}$
频率	振动弦 $10^{-8} \sim 10^{-6}$
电阻	应变片式 $10^{-8} \sim 10^{-4}$ 电位器式 $10^{-6} \sim 10^{-2}$
电容	微电容器 $10^{-8} \sim 10^{-4}$
电感	可动铁芯 $10^{-6} \sim 10^{-2}$
光学量	光导纤维式 $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-6}$ 光波干涉 $10^{-8} \sim 10^{-6}$ ($\sim 10^2$)

(2) 角位移传感器的测量范围

输出量	传感器种类及测量范围 (rad)
电压	光电自动准直仪 $10^{-8} \sim 10^{-3}$ 变动变压器 $10^{-8} \sim 10^{-2}$ 旋转变压器 $10^{-4} \sim 10^2$ 旋转仪 $10^{-3} \sim 10^2$
电流	可动电极方式 $10^{-4} \sim 10^{-2}$
频率	磁鼓式 $10^{-2} \sim 10^0$
电阻	对流式 $10^{-6} \sim 10^9$ 电位器式 $10^{-4} \sim 10^2$
电容	可变电容式 $10^{-2} \sim 10^0$
电感	旋转磁铁式 $10^{-2} \sim 10^0$
光学量	符号板式 $10^{-4} \sim 10^0$ ($\sim 10^2$) 光波干涉 $10^{-8} \sim 10^{-4}$

(3) 速度传感器的测量范围

输出量	传感器种类及测量范围 (m/s)
电压	动圈式 $10^{-6} \sim 10^4$
频率	多普勒效应 $10^{-1} \sim 10^2$
电感	可动铁芯式 $10^{-2} \sim 10^2$ 可动磁铁式 $10^{-3} \sim 10^1$

(4) 加速度传感器

输出量	传感器种类及测量范围 (m/s^2)
电压	振动子 + 压电元件: $10^{-2} \sim 10^5$ 振动子 + 差动变压器 $10^{-5} \sim 10^3$
电阻	振动子 + 电位器式 $10^{-1} \sim 10^3$ 振动子 + 应变片 $10^{-3} \sim 10^4$
电容	振动子 + 电极 $10^{-3} \sim 10^3$

(5) 角速度传感器的测量范围

输出量	传感器种类及测量范围 (rad/s)
电压	旋转发电机 $10^{-3} \sim 10^3$
频率	齿轮式 $10 \sim 10^3$ 环形激光器 $10^{-3} \sim 10$

(6) 力传感器

输出量	传感器种类及测量范围 (N)
电压	弹性体 + 差动变压器 $10^{-2} \sim 10^5$
电流	电流电瓶10
频率	压电元件共振 $10^{-3} \sim 10$
电阻	应变片式测力传感器 $10^{-3} \sim 10^7$
电感	磁致伸缩 $10 \sim 10^5$
光量	光弹性 $10^{-3} \sim 10^2$

(7) 压力传感器

输出量	传感器种类及测量范围 (Pa)
电压	压电元件 $10^4 \sim 10^9$
电流	压敏二极管 $10^5 \sim 10^{11}$
频率	石英振子 $10^5 \sim 10^8$
电阻	应变片 压敏电阻 $10^5 \sim 10^{11}$
电容	介电系数 $10^5 \sim 10^7$
电感	磁致伸缩 $10^5 \sim 10^8$

(8) 扭矩传感器

输出量	传感器种类及测量范围 (N·m)
电阻	扭杆、应变片 $10^{-7} \sim 10^7$
电感	磁致伸缩 $10 \sim 10^5$

(9) 真空度传感器

输出量	传感器种类及测量范围 (Pa)
电压	热电偶 $10^{-1} \sim 10^2$
电流	潘宁计 $10^{-5} \sim 10^{-1}$ 电离真空计 $10^{-7} \sim 10^{-3}$ 磁控电离真空计 $10^{-10} \sim 10^{-5}$
电阻	皮式计 $2 \times 10^{-2} \sim 10^2$ 热敏电阻 $2 \times 10^{-2} \sim 10$

(10) 流速传感器

输出量	传感器种类及测量范围 (m/s)
电压	电磁流量计 $10^{-4} \sim 10^0$ 温度分布式 $10^{-2} \sim 10^1$
频率	卡门涡旋 $10^{-2} \sim 10^0$ 激光多普勒 $10^{-2} \sim 10^2$
电阻	热金属丝 $10^{-2} \sim 10^2$ 热敏电阻 $10^{-2} \sim 10^0$

(11) 液位传感器

输出量	传感器种类及测量范围 (m)
电压	超声波 $10^{-3} \sim 10^2$
电流	放射线 $10^{-2} \sim 10^2$
电阻	短路 $10^{-3} \sim 10^2$
电容	电极 $10^{-4} \sim 10^0$

(12) 温度传感器

输出量	传感器种类及测量范围 (K)
电压	热辐射 $273 \sim 10^5$ 热电偶 $10^2 \sim 10^4$ 热噪声 $10^{-2} \sim 10^5$
频率	石英晶体 $10^2 \sim 10^3$
电阻	碳电阻 $10^{-3} \sim 10$ 铂电阻 $10 \sim 10^3$ 热敏电阻 $273 \sim 10^3$
电容	介电系数 $273 \sim 10^5$
电感	磁化率 $10^{-1} \sim 10$
光量	红外线辐射 $10^2 \sim 10^4$

(13) 湿度传感器

输出量	传感器种类及测量范围 (%RH)
电阻	LiCl、Fe ₃ O ₄ 等 $10 \sim 90$
电容	介电系数 $10 \sim 100$
光量	红外线吸收 $10^{-2} \sim 10$

(14) 热功率传感器

输出量	传感器种类及测量范围 (W)
电压	热电偶 $10^{-5} \sim 10^3$ 热电堆 $10^{-8} \sim 10^{-3}$
电阻	热辐射计 $10^{-8} \sim 10^0$
电容	薄膜 $10^{-7} \sim 10^{-4}$
光量	红外线探测器 $10^{-3} \sim 10^{-4}$

(15) 光量传感器

输出量	传感器种类及测量范围 (lm)
电压	光电池 $10^{-4} \sim 10^3$
电流	光电管 $10^{-5} \sim 10$ 光电倍增管 $10^{-12} \sim 10^{-2}$ 光敏晶体管 $10^{-3} \sim 10$
电阻	光电导元件 $10^{-8} \sim 10^2$

(16) 电压传感器

输出量	传感器种类及测量范围 (V)
电流	$10^{-8} \sim 10^{-2}$
电容	变容二极管 $10 \sim 10^3$
频率	振动电容 $10^{-6} \sim 10^{-2}$
光量	普克尔斯效应 $10^2 \sim 10^3$ 放电发光 $10^0 \sim 10^2$ 阴极射线管 $10^0 \sim 10^3$

(17) 电流传感器

输出量	传感器种类及测量范围 (A)
电压	霍尔效应 $10^{-3} \sim 10^0$ 真空热电偶 $10^{-4} \sim 10^{-1}$
光量	发光二极管 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ 法拉第效应 磁致伸缩效应

(18) 电离放射线传感器

输出量	传感器种类及测量范围 (Gy)
电流	电离箱 $10^{-2} \sim 10^6$ 半导体 $10^{-6} \sim 10^{-4}$
光量	闪烁 $10^{-6} \sim 10^{-4}$

(19) 磁场传感器

输出量	传感器种类及测量范围 (T)
电压	探测线圈 $10^{-7} \sim 10^0$ 霍尔效应 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ 磁调制 $10^{-8} \sim 10^{-2}$ SQUID $10^{-14} \sim 10^{-12}$
电流	电子束 $10^{-10} \sim 10^{-3}$ 磁控管 $10^{-3} \sim 10^0$
频率	核磁共振 $10^{-4} \sim 10^0$
电阻	磁敏电阻 $10^{-3} \sim 10^{-1}$
光量	法拉第效应 $10^{-9} \sim 10^{-4}$

(20) 气体成分传感器

输出量	传感器种类及测量范围 (ppm)
电压	浓淡电池 10
电流	放射线 $10^{-4} \sim 10^{-3}$
电阻	吸收液导电度 $10^{-4} \sim 10^1$
	热电导 $10^0 \sim 10$ 磁
光量	红外线吸收 $10^{-3} \sim 10$ 比色计 $10^{-4} \sim 10^{-2}$

(21) 浓度传感器

输出量	传感器种类及测量范围 (%)
电压	核磁共振 $1 \sim 10^2$
电阻	导电率 $1 \sim 10^2$
电容	介电系数 $1 \sim 10^2$
光量	折射率 $10^{-5} \sim 1$

§ 1-4 非电量检测技术展望

非电量检测技术的现代化有力地促进了工农业生产和科学技术的发展, 而工农业生产及科学技术的现代化, 则既对非电量检测技术提出更高的要求, 也为非电量检测技术的发展提供更加有利的条件, 因而促进其不断发展。

非电量检测技术的发展方向有以下几项:

- (1) 不断扩大测量范围, 提高测量精度及工作可靠性;
- (2) 开发非电量检测新领域;
- (3) 开发无接触检测技术;
- (4) 开发集成化、多功能化传感器, 使非电量检测系统一体化、微型化;
- (5) 非电量检测数字化;

(6) 开展仿生学研究, 使用微电子技术, 将微处理机与高集成度传感器相结合, 实现检测技术智能化。

科学技术的发展要求检测量的覆盖范围不断扩大。为了满足超低温技术开发的需要, 利用超导体的约瑟夫逊效应已开发出能检测 10^{-6} K 超低温传感器, 利用热电偶测温的最高测量温度为 3000°C , 辐射型温度传感器最高测量温度原理上可达 10^5 K, 而可控聚核反应理想温度要求 1×10^8 K, 这对超高温检测技术提出了新的课题。生物医学工程的发展, 要求能检测出包括脑磁图在内的各种人体信息, 核磁共振仪的测磁灵敏度虽已达到胎儿心脏磁场值 ($\approx 10^{-11}$ T), 但尚不能检测脑磁场 ($\approx 10^{-12}$ T), 只有 SQUID 器件问世才能实现脑磁场测量。

科学技术的发展对检测精度的要求亦愈来愈高。仍以温度检测为例, 一般实用温度计的测温精度为 $\pm 0.1 \sim \pm 1^{\circ}\text{C}$, 标准铂电阻温度计的精度可达 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 。人体各部位的温度分布构成温度场, 一旦体内存在病变, 人体的温度分布场就会产生相应的变化, 但这种变化量很小, 需用精度为 $\pm 10^{-2} \sim 10^{-3}^{\circ}\text{C}$ 的温度计才能检测出来。用于测量微生物的传感器中则需要能分辨出小于 10^{-3}°C 温差的热敏元件。

随着人类探求自然奥秘的范围不断扩大, 检测环境变得愈来愈复杂, 检测可靠性要求也愈来愈高。例如, 科学探测卫星装有探测太空各种参量的检测装置, 这些检测装置不仅要求体积小、省电, 而且要求具有极高的可靠性和工作寿命, 需在极低温、强辐射下保持正常工作。

前已述, 目前已广泛开发和应用的是物理量的检测技术, 这是由于物理量传感器的非电量转换所依赖的效应主要是电子过程, 人们对电子过程的机理较为熟知, 微电子技术及电子型物性材料发展较快, 因此在 70~80 年代物理量传感器得到了飞快的发展。相比之下, 化学量及生物量检测技术尚处于研究和初期开发阶段, 化学量及生物量传感器的信号转换效应主要是离子过程, 人们尚未很好掌握离子过程的机理, 相应的敏感材料开发水平尚达不到制作高性能、高稳定度化学量及生物量敏感元件的要求, 因而至今尚难以实现这些量的绝对量准确检测。例如, 相当于人类五官感觉的视觉、听觉、触觉(皮肤)和嗅觉(鼻)的光敏、压敏、力敏、磁敏、热敏、气敏及湿敏元件已达到一定的水平, 而相当于味觉(舌)的味敏元件至今尚属空白。随着化学、生物学、生物工程学、环境保护工程以及生化产品、食品加工等技术的发展, 化学传感器及生物传感器必将在 90 年代乃至下个世纪大放异彩。

开发集成化传感器有三个目标:

第一个目标是将众多相同单体敏感元件集成在同一衬底上, 构成一维或二维信号图像的敏感器件, 主要用于光、图像传感器领域。电荷耦合器件 (CCD) 和 MOS 摄像元件就是典型例子。现已制成含有 2048 个光敏单元 (每个 $13 \times 13 \mu\text{m}$) 的一维 CCD 和 MOS 摄像元件, 也已制成含有 492×660 个光敏单元的二维 CCD 和摄像元件。这种集成元件跟有 525 条扫描线的电视摄像管相比, 它们有同样的分辨率。若配用雪崩光敏二极管 (APD) 阵列, 就能以 10^{-9} s 的超速检测出物体的形象, 这样即可准确地摄取人类肉眼观看不到的高速运动物体的动态图像。

集成化的第二个目标是将非电量检测系统的测量电路与传感器 (敏感元件) 集成在一起。这样的集成传感器结构简单、体积小、无可动部件、反应快、灵敏度高、抗干扰

性强及可靠性好。

集成化的第三个目标是将两种及两种以上非电量的检测敏感元件集成于一体。例如，将热敏元件与压力敏感元件集成在一起，用以补偿压力敏感元件因温度变化带来的灵敏度变化。又如，将热敏元件与湿敏元件集成在一起，可同时完成温度与湿度的检测，将热敏元件与开关闸流管集成在一起构成热敏闸流管，可兼有温度传感器与开关量两种功能。

接触式传感器需将其直接与被测对象接触，这样，自然使被测对象增加了负担，工作状态受到干扰，影响检测精度。例如在检测温度时，将温度传感器贴附于被测物体上，将会使被测物体的导热、散热状态发生变化，因而导致温度状态变化。又如在进行人体检测时，若将传感器探头插入人体，则不仅会给患者带来痛苦，而且还会由此导致患者体内生理状态发生变化，使测量结果不能准确反映人体内原来的状态。在检测某些对象的参数（例如测定高速旋转轴的转速与振动或检测天体的物理量）时，无法采用接触式传感器，因此无接触式传感器的开发有着重要的意义。例如，现已开发的光、磁、超声、同位素、微波等传感器均为无接触式传感器。目前，无接触式传感器尚存在检测精度不高等缺点，有待今后进一步提高。与此同时，人们也正在研究利用新的原理和方法开发新型无接触式传感器。

仿生学的研究、微电子技术的发展及微处理机的应用为检测技术固体化、智能化发展开辟了广阔道路。例如，人的肉眼能分辨出同是白色粉末的盐和糖，而现今的光色传感器则尚无此鉴别能力。蝙蝠的声波检测系统（声纳）的灵敏度比雷达和声纳高出几十亿倍。蛇对红外光检测灵敏度高得惊人，甚至能以三维红外光图像检测出小动物的形象。而现有的红外摄像机用的红外传感器，则必须在低温冷却条件下才能正常工作，即便如此，其灵敏度也远不及蛇。类似的例子不胜枚举。所有这些差距，关键在于生物体内具有无数个细胞级的“传感器”、信息传输系统——神经系统以及无数个细胞级的“微型机”，并由它们构成精巧的非电量检测智能系统。而发展至今日的非电量检测技术，所依赖的敏感材料基本上是低分子无机材料；所依据的变换原理只是物理效应；传感器尺寸与生物体“传感器”相比，需用天文数字形容；微型机虽然已相当先进，但与脑细胞相比，仍无法同日而语。

从仿生学研究中可得到的启示是：检测技术的发展依赖于新型敏感材料的开发、微电子技术的进步以及新转换效应的发现。

检测系统固体化、智能化的构成及发展过程示意于图 1-2。由图可知，固体化、智能化的结果逐渐模糊了检测系统与传感器的界限，智能化的传感器本身就是智能化检测系统。

图 1-3 为待开发的单片智能化图像传感器构成示意图。这种结构拟采用分子级的超微电子技术，在单晶硅片上沿厚度逐层设置电源驱动部分、运算部分、存储部分、传输部分及光电转换部分，构成具有立体结构的固体化智能传感器。这种结构正是人造细胞的雏形。

机器人的研制和应用是人工智能开发的典型成果和标志。机器人的感觉功能的直接作用可分为两大类：一是检测待测对象与环境的各种物理量，二是识别待测对象。

机器人上装有检测外部信号及机器人自身的内部信号两类非电量传感器。表 1-5 列