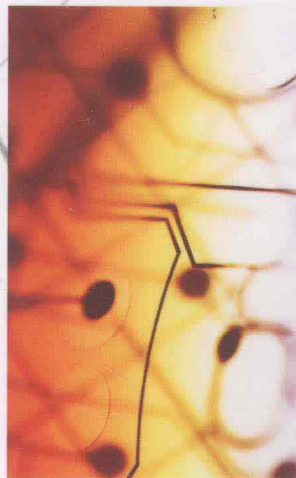


# 智能网络传感器与 无线传感器网络

景博 张劼 孙勇 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 智能网络传感器与 无线传感器网络

景博 张劼 孙勇 著

国防工业出版社

·北京·

# 序

互联网和大规模移动通信技术的出现改变了人类的生产和生活方式,对经济社会的发展起到了巨大推动作用。进入 21 世纪以来,人类对物理世界即时感知的需求也越来越强烈。无线传感器网络作为传感技术、计算机技术、网络技术和通信技术交叉与融合的产物,它将地域上分散的、具有通信能力的传感器节点有机互联起来,为实现全球物理感知提供了可能,并在工业安全、交通管控、精细农业、环境监测、智能家居、远程医疗以及国防等领域都有广阔的应用前景。当前,世界不少发达国家都加大了对无线传感器网络研究的投入,力图占据领先地位。

本书从智能网络传感器和无线传感器网络的角度,分别讲解了网络化传感器和传感器网络化两大问题。事实上,网络化传感器早已有之,符合各种工业总线标准的智能化、网络化传感器已经得到广泛应用,但大规模传感器的组网问题无论从技术难度还是应用前景来看都很值得去研究、去探索。本书对无线传感器网络的基础理论、关键技术和国内外研究现状做了较为清晰和详实的论述。

无线传感器网络这一新兴产业的出现,为我国产业结构调整和优化提供了机遇。我国已将这项技术发展列入国家中长期科技发展规划,以抢占战略性新兴产业发展制高点。温总理深刻指出,“必须依靠科技创新和提高人才素质,培育新的增长点,在经济发展和科技创新上占领制高点,这样才能保证国家可持续发展能力和竞争力。”希望该书的出版能够为发展具有我国特色的传感器网络产业和培养信息科技人才发挥积极作用。

适逢出版之际,谨为之序。

张钟华

2010 年 1 月 20 日

## 前 言

信息科学是众多学科中发展较快的一门科学,也是最具发展活力的学科之一。21 世纪是人类全面进入信息电子化的时代,随着探索领域和空间的不断拓展,人们不再满足于多个传感器独立地对环境进行感知,而是希望通过大量传感器之间的相互协作实现更为广泛与精细的监测任务,同时将监测结果通过网络传送给相应的用户,以使用户完成更为复杂的计算、分析和处理。在此需求之下,无线传感器网络应运而生,成为当前国际上备受关注的热点研究领域。

传感器网络的发展大致经历了 4 个阶段。第一代传感器网络是由传统传感器组成的点到点信号传输的测控系统,采用二线制 4mA ~ 20mA 电流或 1V ~ 5V 电压实现传感器信号传输。这种系统曾经一度在测控领域广为应用,但由于其布线复杂、成本昂贵,抗干扰性差,已逐渐淡出市场。第二代传感器网络则是由智能传感器和现场控制器组成的测控系统,采用数字信号实现传感器信号传输,如 RS - 232、RS - 485、RS - 429 等数字通信标准。这种系统是微处理器与传感器的发展相结合的产物,传感器具有了计算能力,可有效消除传统的通信方式所带来的传感器发展瓶颈。第三代传感器网络是基于现场总线的智能传感器网络,采用全数字、开放式的双向通信,可实现与互联网的连接。现场总线技术利用数字通信代替了传统的模拟信号,大大减少了传感器与主控系统的连线以及通信带宽,有效降低了系统成本与复杂度,特有的分层体系结构实现了分布式智能。

第四代传感器网络就是目前被广泛研究的无线传感器网络,它集成了嵌入式计算技术、微型传感器技术、无线网络技术、MEMS 技术和低功耗电路技术等,通过各类集成化的微型传感器协作地实时监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息,利用嵌入式系统对信息进行处理,并通过自组织无线通信网络以多跳方式将所感知信息传送到用户终端,从而真正实现“无处不在”的计算理念。无线传感节点之间利用无线链路取代电缆收发数据,这就克服了前三代传感器网络的诸多缺点。

无线传感网络在新一代网络中具有关键性,甚至决定性的角色,作为一种新的计算模式,推动科技发展和社会进步,已成为国际竞争的焦点和制高点。在国家安全、航空航天、环境监测、医疗救护、制造业和反恐抗灾等领域,特别是在未来军事领域中将掀起一股产业浪潮,引起一场划时代的军事技术革命和未来战争的变革。我国十分重视无线传感器网络的研究及其产业化,《中国未来 20 年技术预见研究》提出的 157 个技术课题中有 7 项直接涉及无线传感器网络。2006 年初发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》为信息技术确定了 3 个前沿方向,其中,“传感器网络与智能信息处理”和“自组织网络技术”两个方向与无线传感器网络研究直接相关。

从无线传感器网络研究现状来看,未来的智能传感器网络难以被某一种架构所统治,

但会受应用需求的驱使而不断发展。可以说,无线传感器网络将是对 21 世纪产生巨大影响力的重要技术。

本书分为 5 篇,共 18 章。第 1 篇为智能网络传感器技术概述,分别介绍了基于以太网、无线网两种智能传感器系统。第 2 篇讲述了无线传感器网络体系结构与拓扑结构,分析了体系结构、网络拓扑结构及控制与网络部署、连通与覆盖等问题。第 3 篇集中介绍了无线传感器网络的通信协议,重点介绍了无线传感器网络物理层协议、MAC 协议和路由协议。第 4 篇主要阐述了应用支撑与关键技术,包括时钟同步、节点定位、网络接入技术、服务质量保障与网络安全与可靠性等问题,尤其对 Sink 节点接入以太网传输协议进行了研究。第 5 篇给出了无线传感器网络系统平台及开发实例,描述了当前无线传感器网络的应用范例和原型验证系统,特别提出了无线传感器网络模拟器的设计,并介绍了无线传感器网络硬件平台开发和设计的基本方法,最后列出了国内外有影响的实例。

在本书部分资料收集、图表制作、文字校对过程中还包含了杨洲、周宇、郝中波、姜兴旺、程帅的辛勤劳动,在此表示衷心感谢。撰写和出版过程中得到了国防工业出版社和空军工程大学领导的大力支持,正是你们的辛勤工作,才使得本书如期付梓。

本书编写过程中参考了大量文献和资料,互联网是其中一个重要来源,在此对原作者深表谢意。书中内容如有涉及相关人士的知识产权,请给予谅解并及时与我们联系。感谢您对本书内容提出批评和修改建议,我们将不胜感激。

作者

2010 年 1 月于西安

# 目 录

## 第 1 篇 智能网络传感器技术

<b>第 1 章 智能网络传感器系统</b> .....	2
1.1 传感器技术发展概述 .....	2
1.2 智能网络传感器概述 .....	3
1.2.1 智能网络传感器概念与原理 .....	3
1.2.2 智能网络传感器实现途径 .....	4
1.2.3 有线智能网络传感器 .....	6
1.2.4 无线智能网络传感器 .....	8
1.3 智能网络传感器系统体系结构 .....	14
1.3.1 基于 IEEE1451.2 标准的智能网络传感器体系结构 .....	14
1.3.2 基于 TCP/IP 协议的智能网络传感器体系结构 .....	15
1.4 智能网络传感器系统发展趋势 .....	17
<b>第 2 章 基于以太网的智能网络传感器系统</b> .....	18
2.1 基于以太网的智能网络传感器系统概述 .....	18
2.2 以太网协议标准与 TCP/IP 协议栈 .....	19
2.2.1 工业以太网协议 .....	19
2.2.2 以太网协议 .....	21
2.2.3 以太网协议与 TCP/IP 协议栈的关系 .....	22
2.2.4 嵌入式以太网技术的优势 .....	25
2.3 基于以太网的智能网络传感器硬件结构 .....	25
2.3.1 硬件平台通用总体结构 .....	25
2.3.2 存储设备 .....	26
2.4 基于以太网的智能网络传感器软件结构 .....	29
2.4.1 硬件模块驱动程序设计 .....	30
2.4.2 嵌入式操作系统 .....	32
2.4.3 嵌入式 TCP/IP 协议栈 .....	33
参考文献 .....	35

<b>第3章 无线智能网络传感器</b>	36
3.1 无线智能网络传感器构成	36
3.1.1 微处理器与存储模块	36
3.1.2 电源模块	39
3.1.3 传感器模块	39
3.1.4 无线通信模块	40
3.2 无线智能网络传感器实例	42
3.2.1 智能灰尘	42
3.2.2 Mica 系列节点	45
3.2.3 GAINS 节点	46
3.2.4 SIA - MS - 1.0 节点	48
3.2.5 WMNMCS	49
3.3 无线智能网络传感器天线设计	51
3.3.1 天线类型选择	51
3.3.2 天线特性	53
3.3.3 鞭状天线	54
3.3.4 PCB 微带环形天线	55
3.4 无线智能网络传感器研究中的若干问题	57
参考文献	58

## 第2篇 无线传感器网络体系结构与拓扑结构

<b>第4章 无线传感器网络概述</b>	60
4.1 无线传感器网络的概念、特点及应用	60
4.1.1 无线传感器网络的概念	60
4.1.2 无线传感器网络的特点	62
4.1.3 无线传感器网络的应用	64
4.2 无线传感器网络与现有网络比较	68
4.2.1 无线传感器网络与现场总线的区别	69
4.2.2 无线传感器网络与无线自组织网络的区别	69
4.2.3 无线传感器网络与无线自组织网络的共性	70
4.3 无线传感器网络关键技术及研究进展	71
4.3.1 无线传感器网络关键技术	71
4.3.2 无线传感器网络国外研究进展	73

4.3.3 无线传感器网络国内研究进展 .....	77
4.4 无线传感器网络研究新动态及发展趋势 .....	79
参考文献 .....	81
<b>第5章 无线传感器网络体系结构与拓扑结构 .....</b>	<b>82</b>
5.1 无线传感器网络体系结构 .....	82
5.1.1 应用需求与应用模式 .....	82
5.1.2 无线传感器网络功能结构、逻辑结构及典型体系结构 .....	84
5.1.3 网络节点体系结构 .....	87
5.1.4 层次化网络结构 .....	90
5.2 无线传感器网络拓扑结构及控制 .....	98
5.2.1 拓扑结构分类及拓扑发现 .....	98
5.2.2 无线传感器网络拓扑控制 .....	103
5.2.3 无线传感器网络拓扑控制算法 .....	104
参考文献 .....	115
<b>第6章 无线传感器网络覆盖与连通 .....</b>	<b>117</b>
6.1 无线传感器网络覆盖与连通问题概述 .....	117
6.1.1 网络覆盖问题概述 .....	118
6.1.2 网络连通问题概述 .....	120
6.1.3 覆盖与连通基本理论 .....	120
6.1.4 网络连通可靠性 .....	122
6.2 无线传感器网络覆盖与连通模型 .....	125
6.2.1 覆盖与连通模型 .....	125
6.2.2 网络节点数目计算 .....	128
6.2.3 覆盖率计算 .....	129
6.3 最优分簇数目 .....	130
6.3.1 节点能耗模型与基本假设 .....	130
6.3.2 簇头聚集能力不受限时的最优分簇数目 .....	131
6.3.3 簇头聚集能力受限时的最优分簇数目 .....	133
参考文献 .....	134

### 第3篇 无线传感器网络组网协议

<b>第7章 无线传感器网络物理层协议 .....</b>	<b>138</b>
7.1 物理层概述 .....	138



7.2	物理层主要技术 .....	139
7.2.1	通信介质及频段 .....	140
7.2.2	调制与解调技术 .....	140
7.2.3	扩频技术 .....	146
7.3	无线传感器网络物理层协议研究现状 .....	150
7.3.1	介质和频段选择研究 .....	150
7.3.2	休眠机制 .....	151
7.3.3	调制和扩频机制 .....	152
7.4	物理层面临的挑战与有待解决的问题 .....	156
7.4.1	物理层面临的挑战 .....	156
7.4.2	物理层有待解决的问题 .....	157
	参考文献 .....	159
<b>第8章</b>	<b>无线传感器网络 MAC 协议 .....</b>	<b>160</b>
8.1	无线传感器网络 MAC 协议概述 .....	160
8.2	典型 MAC 协议分析 .....	161
8.2.1	多收发器式 MAC 协议 .....	162
8.2.2	调度式 MAC 协议 .....	163
8.2.3	非调度式 MAC 协议 .....	165
8.2.4	混合式 MAC 协议 .....	167
8.2.5	基于跨层设计的 MAC 协议 .....	167
8.2.6	典型 MAC 协议性能比较 .....	168
8.3	无线传感器网络 MAC 协议设计策略 .....	169
8.4	基于动态非等分时隙的 MAC 协议 .....	170
8.4.1	ASVMAC 协议相关定义 .....	170
8.4.2	ASVMAC 协议总体描述 .....	171
8.4.3	非等分时隙协议设计与选举算法 .....	171
8.4.4	ASVMAC 协议能耗有效性分析 .....	175
	参考文献 .....	176
<b>第9章</b>	<b>无线传感器网络路由协议 .....</b>	<b>178</b>
9.1	路由协议概述 .....	178
9.2	路由协议分类 .....	179
9.3	路由协议研究现状 .....	181
9.3.1	典型路由协议原理 .....	181
9.3.2	路由协议性能比较 .....	187

9.3.3	路由协议的设计原则 .....	190
9.4	基于优先级的 PMRP 多径路由算法 .....	190
9.4.1	PMRP 多径路由算法原理 .....	191
9.4.2	PMRP 算法仿真 .....	193
9.5	基于动态负载均衡树的 DLBTP 路由算法 .....	194
9.5.1	DLBTP 路由算法原理 .....	197
9.5.2	DLBTP 路由算法仿真 .....	200
9.6	无尺度混合跳分层路由协议 .....	202
9.6.1	网络分层路由的数学模型 .....	202
9.6.2	FSSMH 路由协议相关阐述 .....	203
9.6.3	FSSMH 路由协议设计 .....	204
9.6.4	FSSMH 路由协议仿真试验与性能评价 .....	207
9.7	路由协议面临的挑战与有待解决的问题 .....	210
9.7.1	路由协议面临的挑战 .....	210
9.7.2	路由协议有待解决的问题 .....	211
	参考文献 .....	212

## 第 4 篇 无线传感器应用支撑与关键技术

<b>第 10 章</b>	<b>无线传感器网络时钟同步 .....</b>	<b>216</b>
10.1	时钟同步概述 .....	216
10.1.1	时钟模型 .....	216
10.1.2	时钟同步算法执行周期 .....	217
10.1.3	时钟同步评价指标 .....	217
10.2	传统网络时钟同步算法 .....	218
10.3	典型时钟同步算法 .....	218
10.3.1	额外硬件支持的时钟同步 .....	220
10.3.2	单向广播式时钟同步算法 .....	220
10.3.3	双向成对时钟同步 .....	223
10.3.4	基于锁相环的时间同步机制与算法 .....	225
10.3.5	同步算法性能比较 .....	226
10.4	时钟同步研究展望 .....	227
	参考文献 .....	227
<b>第 11 章</b>	<b>无线传感器网络节点定位 .....</b>	<b>229</b>
11.1	节点定位概述 .....	229

11.2	典型定位方法	230
11.2.1	基于距离的定位算法	230
11.2.2	非基于距离的定位算法	236
11.3	基于时间差的节点定位方法	238
11.3.1	网络模型与定位算法	238
11.3.2	定位误差分析	241
11.3.3	定位试验	241
11.4	节点定位过程中的安全问题	242
11.4.1	攻击样式	242
11.4.2	安全定位系统及算法	243
	参考文献	245
<b>第 12 章</b>	<b>无线传感器网络接入技术</b>	<b>247</b>
12.1	接入技术概述	247
12.2	接入方式研究现状	248
12.2.1	代理接入方式	248
12.2.2	直接接入方式	249
12.3	无线传感器网络接入因特网	250
12.3.1	网络互联结构	250
12.3.2	基于嵌入式 Web 服务器的互联结构	251
12.4	Sink 的多接入模式	252
12.5	Sink 节点接入以太网通信传输协议研究	256
12.5.1	嵌入式 TCP/IP 协议栈 $\mu$ LwIP 的设计	256
12.5.2	$\mu$ LwIP 层次协议设计	257
12.5.3	$\mu$ LwIP 的 Sink 节点嵌入与移植	264
12.5.4	嵌入式 Web 服务器的实现	266
12.5.5	Sink 节点动态网页和本地文件读写与保存的中间件	267
12.6	无线传感器网络接入网格	269
12.6.1	相关研究工作及关键技术	270
12.6.2	无线传感器网络接入网格的结合框架	271
	参考文献	275
<b>第 13 章</b>	<b>无线传感器网络 QoS 技术</b>	<b>276</b>
13.1	无线传感器网络 QoS 概述	276
13.1.1	传统数据网络 QoS 技术	276
13.1.2	Ad Hoc 网络 QoS 技术	277

13.1.3	无线传感器网络 QoS 需求	278
13.1.4	无线传感器网络 QoS 特点	280
13.1.5	无线传感器网络 QoS 研究现状	282
13.2	无线传感器网络 QoS 关键技术	284
13.2.1	能源管理	284
13.2.2	覆盖控制	285
13.2.3	数据融合	286
13.2.4	拥塞控制	287
13.3	无线传感器网络 QoS 评价指标	288
13.4	无线传感器网络 QoS 路由协议	289
13.5	基于跨层设计的 QoS 保障机制	290
13.5.1	无线传感器网络基于 QoS 的总体框架	290
13.5.2	无线传感器网络 QoS 需求的权衡关系	292
13.5.3	基于 QoS 保证的跨层设计	293
13.6	其他 QoS 保障机制	293
13.6.1	基于中间件的主动 QoS 机制	293
13.6.2	QoS 动态资源管理方式	293
13.6.3	确保实时业务的 QoS 方法	294
13.7	无线传感器网络 QoS 研究面临的挑战	295
	参考文献	296
<b>第 14 章</b>	<b>无线传感器网络安全技术</b>	<b>298</b>
14.1	无线传感器网络安全概述	298
14.1.1	网络安全需求	299
14.1.2	网络安全问题特点	300
14.1.3	安全问题研究现状	302
14.1.4	安全问题研究的挑战	305
14.2	安全问题策略分析	307
14.2.1	物理层安全问题	307
14.2.2	链路层安全问题	308
14.2.3	网络层与数据融合层安全问题	309
14.2.4	传输层与应用层安全问题	310
14.3	无线传感器网络认证机制	310
14.3.1	信息安全威胁与认证目标	310
14.3.2	基本认证协议	311
14.3.3	双向认证和广播认证协议	312

14.3.4	高级认证协议 .....	313
14.4	无线传感器网络密钥管理机制 .....	315
14.4.1	密钥管理基础 .....	315
14.4.2	密钥管理模型 .....	316
14.5	网络入侵检测技术 .....	319
14.5.1	入侵检测需求 .....	319
14.5.2	入侵检测基础 .....	320
14.5.3	几种入侵检测方案 .....	322
14.5.4	入侵检测研究方向 .....	325
14.6	基于比较的多源网络簇节点故障判定算法 .....	326
14.6.1	节点故障判定系统模型 .....	326
14.6.2	网络簇节点故障判定模型 .....	328
14.6.3	故障判定模型评价标准 .....	329
14.6.4	网络节点判定处理过程 .....	330
14.6.5	仿真试验与性能分析 .....	330
	参考文献 .....	332

## 第 5 篇 无线传感器原型系统与应用实例

<b>第 15 章</b>	<b>无线传感器网络节点平台开发实例 .....</b>	<b>336</b>
15.1	网络节点低功耗设计策略 .....	336
15.1.1	微控制器模块低功耗设计 .....	336
15.1.2	无线通信低功耗设计 .....	337
15.2	传感器节点模块设计 .....	338
15.2.1	微处理器模块设计 .....	338
15.2.2	无线通信模块设计 .....	339
15.2.3	传感节点软件设计 .....	341
15.3	Sink 节点的特殊性设计 .....	348
15.3.1	处理模块设计 .....	348
15.3.2	以太网互联模块设计 .....	350
15.3.3	无线通信软件设计 .....	350
15.3.4	电源模块设计 .....	355
15.4	网络节点系统实现与功耗测试 .....	356
15.4.1	节点系统实现 .....	356
15.4.2	传感节点功耗测试 .....	356

参考文献	357
<b>第 16 章 无线传感器网络原型验证系统</b>	<b>359</b>
16.1 智能监测原型系统体系结构	359
16.2 原型系统模块构成与功能描述	360
16.3 组网算法设计	361
16.3.1 网络协议低功耗设计策略	361
16.3.2 物理层数据传输协议设计	362
16.3.3 数据融合算法设计	363
16.4 监测系统应用软件设计	367
16.5 基于电源实验台的无线传感器网络功能测试床	369
16.5.1 测试床场景	369
16.5.2 功能性试验与结论	370
16.6 可靠性测试设备整体性能监测	371
16.6.1 监测需求分析	371
16.6.2 传感器节点数据采集软硬件设计	372
16.6.3 监测系统体系结构描述	373
16.6.4 监测系统性能测试与运行结果分析	375
参考文献	378
<b>第 17 章 无线传感器网络模拟器</b>	<b>379</b>
17.1 常用模拟器原理及特点	379
17.1.1 无线网络模拟器	379
17.1.2 无线传感器网络模拟器	383
17.1.3 无线传感器网络后台软件	384
17.2 分簇型无线传感器网络模拟器 CWSNS 的设计与实现	388
17.2.1 CWSNS 的结构与原理	388
17.2.2 典型类的设计	389
17.2.3 类的相互关系	392
17.3 CWSNS 仿真流程及仿真实例	392
17.3.1 CWSNS 仿真流程	392
17.3.2 仿真实例	393
参考文献	395
<b>第 18 章 无线传感器网络应用实例</b>	<b>396</b>
18.1 军事应用	396
18.2 国家安全	399

18.3	工业领域	399
18.3.1	工业安全	399
18.3.2	先进制造	400
18.3.3	交通控制管理	400
18.3.4	安防系统	401
18.3.5	仓储物流管理	401
18.4	农业领域	402
18.5	其他领域的典型应用	404
18.5.1	环保监测	404
18.5.2	智能家居	406
18.5.3	医疗监护	406
18.5.4	建筑领域	408
18.5.5	自然灾害预警	410
18.5.6	目标跟踪应用	411
18.5.7	空间和海洋应用	413
18.6	各种应用方案中共性问题与解决思路	414
18.6.1	无线传感器网络中节点的能量问题	414
18.6.2	传感器节点的时钟同步要求	414
18.6.3	各方案中共性问题解决思路	415
	参考文献	415

# 第 1 篇

---

## 智能网络传感器技术

第 1 章 智能网络传感器系统

第 2 章 基于以太网的智能网络传感器系统

第 3 章 无线智能网络传感器



# 第 1 章 智能网络传感器系统

传感器技术、通信技术与计算机技术构成现代信息技术的三大基础,它们分别完成对被测量的信息感知、信息传输及信息处理,是当代科学发展的重要标志。随着科学技术的发展,数字化、智能化和网络化已成为时代发展趋势;计算机技术和通信技术结合产生了计算机网络技术;计算机技术和传感器技术结合产生了智能传感器技术;将两者融为一体,即计算机网络技术与智能传感器技术结合,便产生了智能网络传感技术。智能网络传感器是以嵌入式微处理器为核心,集成了传感单元、信号处理单元和网络接口单元,使传感器具备自检、自校、自诊断及网络通信功能,从而实现信息的采集、处理和传输真正统一协调的新型智能传感器。它使传感器不再仅仅是采集与处理器件,而是集采集、处理与通信于一体的智能体。

网络化智能传感技术实现了传感器的网络化和智能化,从根本上改变了信息获取能力和信息控制能力。从空间域上讲,将会大大突破人类获取信息的地理空间限制,实现真正意义上的大规模信息获取与控制;从时域上讲,各种“即插即用(Plug & Play)”传感器的应用将会大大缩短传感器应用和配置的时间。这种新的信息获取能力和控制能力将会大大提高工业生产效率,改变工业、农业、军事、医疗、教育等诸多领域的现状。

## 1.1 传感器技术发展概述

传感器是工业应用的灵魂,是人类探知自然界信息的触角,它可将人们需要探知的各种非电量信息转化成可测的电量信息,是信息系统的第一道门槛,为人们认识和控制相应的对象提供条件和依据。作为现代信息技术 3 大核心技术之一的传感器技术,从诞生至今,已经经历了“聋哑传感器”(Dumb Sensor)→“智能传感器”(Smart Sensor)→“智能网络传感器”(Networked Sensor)的发展历程。

### 1. 聋哑传感器

这种传统的传感器是模拟仪器仪表或模拟计算机时代的产物,其设计指导思想是把外部信息变换成模拟电压或电流信号,输出幅值小、灵敏度低,且功能单一,因而被称为聋哑传感器。

### 2. 智能传感器

随着时代的进步,传统的传感器已经不能满足现代工农业生产甚至战争的需求,20 世纪 70 年代以来,计算机技术、微电子技术、光电子技术获得迅猛发展,加工工艺逐步成熟,新型敏感材料不断出现,在高新技术的渗透下,尤其是计算机硬件和软件技术的渗入,人们把微处理器和传感器相结合,开发了具备一定数据处理能力,并能自检、自校、自补偿的新一代传感器——“智能传感器”。智能传感器的出现是传感技术的一次革命,对传感