

Research and Application of
Networked Intelligent Sensing Technology

网络化智能传感技术 研究与应用

叶廷东 著



科学出版社

网络化智能传感技术 研究与应用

叶廷东 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书围绕现代先进传感技术中的网络化、智能化、高准确度监测的特点,系统地介绍网络化传感系统建模设计方法、多传感信息预处理方法、多维传感信息自校正技术、传感网络信息实时预测方法和网络化协同传感等方面的研究成果,并进一步介绍相关实验仿真、系统开发及应用研究进展。

本书适合工程技术人员、专业领域本科高年级学生及研究生参考与学习。

图书在版编目(CIP)数据

网络化智能传感技术研究与应用/叶廷东著. —北京:科学出版社, 2018.5

ISBN 978-7-03-057235-6

I. ①网… II. ①叶… III. ①智能传感器—研究 IV. ①TP212.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 084244 号

责任编辑:胡庆家 张茂发 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:张伟 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 5 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018 年 5 月第一次印刷 印张:13 3/4

字数:280 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

科学是从测量开始的，作为测量控制与仪器仪表的前端设备，传感器技术在当今我国国民经济和科学技术发展中的作用日益凸显。传感器是信息数据获取的源头，它是各种现代化智能装备与机器人感知世界的媒介，传感器具备了自己特有的一整套基础理论和技术，包括传感器件及设计、信号转换与处理、检测误差分析、网络化通信等，它的核心作用是信息获取，“精确”是其技术特征，即信息属性完整、量值准确。

传感器及其技术创新发展和应用，与当今国内外仪器仪表学科及产业应用发展领域紧密相连，主要包括：

- (1) 工业自动化测控技术及工业自动化仪表与控制系统；
- (2) 科学测量、分析技术及科学仪器；
- (3) 人体诊疗技术及医疗仪器；
- (4) 信息计测技术及电测仪器（主要是电子测量仪器和电工测量仪器，包括仪表校验装置和计量基准）；
- (5) 专用检测技术及各类专用测量仪器；
- (6) 相关传感器、元器件、材料及技术。

因此，传感器技术涉及国民经济及工业领域的各个行业，它是工业生产的“倍增器”，在高性能制造装备中，传感测量系统的成本已经达到装备总成本的 30%~50%；在现代工程装备中，传感检测环节的成本占 50%~70%；在钢铁、电力中占投资的 10%~15%，宝钢集团有限公司有 1/3 的经费用于购买仪器和自动化控制系统；重大工程项目的投入，传感仪器平均占设备投资的 8%~12%。美国商务部国家标准局分析指出，传感仪器工业占工业总产值的 4%，对国民经济总产值的影响却达 66%。因此，传感器技术与检测仪器在

各行业、领域有着“四两拨千斤”的巨大倍增作用。

从产业技术发展的角度，传感器技术将向数字化、智能化、网络化、微型化的方向发展。从用户的需求出发，传感器的智能化程度将会越来越高，与自动控制、机器人等技术相结合，具有自动完成指定测量任务的功能，尽可能地降低人工操作带来的误差和失误；与人工智能等技术相结合，具有自校准、自检测、自诊断、自适应等功能，保障产品的可靠性；作为物联网的重要组成部分，传感器将与微机电系统（MEMS）技术、移动互联网技术、云计算技术等新一代信息技术相结合，微型化传感器，高效地将各种测量数据传输到需要的网络服务器或网络节点，同时借助云计算、数据分析和分享能力，充分发挥传感器对社会发展、人类生活改善的应用价值。

当今世界已进入信息时代，信息技术成为推动科学技术和国民经济高速发展的关键技术。传感器技术属于信息获取技术范畴，它与信息传输技术、信息处理技术共同构成当代信息科学技术的三大组成部分。“信息获取”是“信息传输”“信息处理”工作的重要基础，传感器技术是获取自然界信息的工具，它是综合计算、网络和物理环境的多维复杂系统的重要关键技术。

随着“中国制造 2025”“互联网+”“新一代人工智能发展规划”等的提出，国内新经济的发展呼唤“新工科”人才的培养。到 2020 年，我国新一代信息技术产业、电力装备、高档数控机床和机器人、新材料将成为人才缺口最大的几个专业，其中新一代信息技术产业人才缺口将达到 750 万人。“缺人才”不只发生在未来，还发生在当下，目前迅猛发展的大数据、物联网、人工智能、网络安全、大健康等新经济领域都出现人才供给不足现象，成为我国工程教育与新兴产业和新经济发展的短板。教育部《教育部高等教育司关于开展新工科研究与实践的通知》（教高司函〔2017〕6 号）指出“新工科研究和实践围绕工程教育改革的新理念、新结构、新模式、新质量、新体系开展”，网络化传感器技术在新工科专业发展中将大有作为。

因此，本书针对智能制造的需求，围绕现代先进传感技术中的网络化、智能化、高准确度监测的特点，系统地介绍网络化传感系统建模设计方法、多传感信息预处理方法、多维传感信息自校正技术、传感网络信息实时预测方法和网络化协同传感等方面的研究及其应用，恰逢其时。

本书的相关研究工作得到了中国博士后基金（2013M542157）、广东省自然科学基金（S2012040007521）、广东省教育部产学研结合项目（2007A090302039）、广东省科技计划项目（2015A020214025，2015A070710030）、广州市科技计划项目（201604020049，2013J4100077）、广东轻工职业技术学院省级“千百十工程”人才资助项目（RC2016-005）和创新强校工程项目（2A11105）等的支持，在此表示感谢！同时感谢作者单位广东轻工职业技术学院提供的科研环境，感谢华南理工大学博士生导师刘桂雄教授和广东省科学院的博士后合作导师程韬波研究员的悉心指导。

作 者

2018年2月

目 录

序

第 1 章 网络化智能传感技术基础与研究进展	1
1.1 智能传感器及技术功能特点	1
1.1.1 智能传感器的概念	1
1.1.2 智能传感器的基本结构	2
1.1.3 智能传感器技术功能特点	3
1.2 典型的智能传感技术及发展趋势	6
1.2.1 IEEE 1451 网络化智能传感技术	6
1.2.2 模糊传感器技术	9
1.2.3 多传感器数据融合技术	11
1.2.4 智能传感技术发展趋势	13
1.3 网络智能传感技术相关研究现状	14
1.3.1 智能传感系统建模方法	14
1.3.2 多传感信息预处理技术	17
1.3.3 多传感信息建模自校正方法	20
1.3.4 传感信息传输与实时预测方法	27
1.3.5 网络化协同传感技术	28
1.4 本章小结	32
第 2 章 网络化传感系统建模设计方法	33
2.1 多参数网络化智能传感系统模型	33
2.2 多参数网络化智能传感系统建模实现	34
2.2.1 智能传感系统传感用例模型图与协作图	35
2.2.2 TEDS 配置与传感器初始化	36
2.2.3 UML 系统部署建模	38
2.3 网络化智能传感系统数据交换	39
2.3.1 数据交换动态描述	39

2.3.2 数据统一建模	40
2.4 室内微环境监测系统应用例	41
2.4.1 室内微环境监测系统建模	42
2.4.2 室内微环境监测系统数据交换	43
2.5 海洋环境监测系统应用例	45
2.5.1 渔业海洋环境多参数监测子系统模型	45
2.5.2 多参数监测子系统的 TEDS 配置	47
2.5.3 海洋水环境监测系统实现	49
2.6 高精度智能应变检测仪的开发	51
2.6.1 高精度智能应变检测仪模型	52
2.6.2 高精度可编程基准源	53
2.6.3 高精度测量与数据转换	54
2.6.4 实验测试	55
2.7 本章小结	57
第3章 基于多项式外模型-内模型 NPLS 的多传感信息预处理与建模	59
3.1 基于多项式外模型-内模型 NPLS 的多传感信息预处理与 建模框架	59
3.1.1 PLS 回归分析方法的外模型与内模型	60
3.1.2 多项式外模型-内模型 NPLS 建模方法的模型结构	63
3.2 基于 PLS 的多传感信息预处理	64
3.2.1 基于变量投影重要性-PLS 回归系数变量筛选方法	64
3.2.2 变量筛选准则 ΔE_l 的计算	66
3.2.3 基于 PLS 回归系数的试验设计	68
3.3 多项式外模型-内模型 NPLS 的数学建模过程	69
3.4 多项式外模型-内模型 NPLS 方法在多传感信息系统中的 应用流程	71
3.5 鱼类超微弱发光检测应用	73
3.5.1 基于 PLS 的多传感信息预处理	74
3.5.2 多项式外模型-内模型 NPLS 建模仿真	77
3.6 本章小结	78
第4章 多维传感信息自校正技术	80
4.1 多传感信息自校正模型	80

4.2 传感信息自评估技术	81
4.3 基于多尺度逼近的多传感信息解耦自校正技术	83
4.3.1 传感信息尺度特征估计方法	83
4.3.2 多传感信息插值解耦自校正方法	86
4.3.3 基于预估准确度目标的解耦分辨阈值 δ 确定	89
4.4 基于方差可靠性的分辨阈值自适应解耦	90
4.5 基于多节点样条和 TEDS 的多传感信息自校正	94
4.5.1 多节点样条插值	94
4.5.2 基于 TEDS 的多维空间插值自校正	95
4.6 试验及应用	95
4.6.1 传感信息自评估试验	96
4.6.2 基于多尺度逼近的解耦自校正技术仿真分析	97
4.6.3 基于方差可靠性的分辨阈值自适应解耦仿真	99
4.6.4 多维空间插值方法在机器人示教中的应用	102
4.7 本章小结	106
第 5 章 传感信息动态预测方法	108
5.1 网络化传感系统信息流模型	108
5.2 传感信息动态预测模型	109
5.3 传感信息快速小波计算	110
5.4 小波计算信息的动态预测	112
5.4.1 平滑层信息动态预测	112
5.4.2 分辨层信息动态预测	114
5.5 实现传感器滞后补偿的动态预测算法	116
5.6 基于时间同步的网络化传感信息预测	118
5.6.1 面向延迟测算的 DMTS 时间同步技术	119
5.6.2 基于分段拟合的时间自校准方法	120
5.6.3 异常数据处理	121
5.6.4 网络化传感信息实时动态预测补偿	122
5.7 动态预测补偿方法性能分析	123
5.7.1 小波计算结果分析	123
5.7.2 动态预测补偿性能	124
5.7.3 滚动混合式多步预测补偿性能	125

5.7.4 基于时间同步的网络传感信息预测实验与仿真	126
5.8 本章小结	130
第6章 网络化多层次协同传感技术	132
6.1 感知信号层多传感融合技术	132
6.1.1 传感信息的一致性测度	133
6.1.2 基于变窗的方差递推估计方法	134
6.1.3 基于变窗一致可靠性测度的多传感信息融合	135
6.1.4 多传感信息融合计算仿真	136
6.2 感知层协同检测业务流调度方法	139
6.2.1 WRR 调度算法	139
6.2.2 WRR 算法总体设计	140
6.2.3 WRR 的优点与缺陷	141
6.2.4 WRR 的设计与实现	141
6.2.5 基于 WRR 的物联网感知层优化调度方法	146
6.2.6 仿真分析	149
6.3 物联网系统协同机制	151
6.3.1 基于协同学的协同机制引入	151
6.3.2 协同测量动力学方程的建立及推导	153
6.3.3 基于协同测量机理模型的决策方法	156
6.3.4 基于协同测量机理模型决策的应用	161
6.4 本章小结	163
第7章 基于智能传感节点的网络化检测系统研制及试验	165
7.1 用于多传感网络化检测模型的嵌入式智能传感节点	165
7.1.1 嵌入式智能检测节点硬件设计	166
7.1.2 DSP 信息处理与 ARM 网络通信实现	170
7.2 基于 C/S 模式的网络检测平台	173
7.2.1 网络检测平台的软件结构与运行机制	174
7.2.2 基于 XML 的跨平台数据交换技术	176
7.2.3 基于 XML 数据的检测平台实时数据库技术	177
7.3 在流程工业生产过程中的初步应用	179
7.3.1 乙醇在线检测传感模式与试验装置	179
7.3.2 在发酵过程中的检测试验与初步应用	181

7.4 网络化检测初步应用与结果分析	188
7.5 在精馏过程中的建模应用	190
7.5.1 试验与 PLS 预处理	190
7.5.2 多项式外模型-内模型 NPLS 建模应用	192
7.6 本章小结	193
 参考文献	 194

第1章 网络化智能传感技术基础与研究进展

在现代工业生产和智能制造过程中，要提升产品质量、生产效率，必须对生产制造过程的各环节进行监控以实时了解生产过程中的状态，从而进行反馈、决策和调整达到控制优化的目的。作为现代工业过程检测信息获取的最前端，许多传感器通常存在较大的温度系数差异、非线性的灵敏度特性曲线、响应速度慢、交叉敏感性等问题。同时，很多工业过程本身具有多变量、强干扰、滞后和强耦合等特点，如复杂机械零件制造、乙醇发酵精馏过程等，这些使得过程检测存在一些不可避免的误差。因此，如何实现工业过程的在线、高准确度测量是工业生产自动化领域中的研究热点，同时也是测量控制与仪器仪表产业发展中的综合关键技术。

同时，伴随着物联网信息时代的到来，智能传感技术的功能、内涵得到不断加强和完善，地位也越来越重要，其中综合应用现代传感技术、智能理论与算法、嵌入式技术和通信技术的网络化智能传感理论与应用技术，代表着新型传感理论技术的发展潮流，符合《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》中的重点领域优先主题。为此，本书针对智能制造与物联网技术应用的需求，围绕现代先进传感技术中的网络化、智能化、高准确度监测的特点，系统地介绍网络化传感系统建模设计方法、多传感信息预处理方法、多维传感信息自校正技术、传感网络信息实时预测方法等方面的研究成果，并进一步介绍相关实验仿真、系统开发及应用研究进展。为了更好地进行阐述，本章将介绍网络化智能传感技术基础与研究进展。

1.1 智能传感器及技术功能特点

1.1.1 智能传感器的概念

智能传感器的概念及雏形是美国宇航局在开发宇宙飞船的过程中形成的。

宇宙飞船需要大量的传感器检测飞船的状态（如温度、湿度、气压、速度、加速度和姿态等），同时，为了保证飞船的正常运行和安全，要求这些传感器精度高、响应快、稳定性好、可靠性高，还要求其具有数据存储与处理、自校准、自诊断、自补偿和远程通信等功能^[1]。传统传感器在性能、功能上无法满足上述要求，所以智能传感器由此产生。

现代航空航天、自动化生产、高品质生活等领域对智能传感器的需求量急剧增大，同时微处理器技术、微电子技术、人工智能理论等快速发展，极大推动了智能传感器的飞速发展，智能传感技术已成为现代测控技术的主要发展方向之一。目前，智能传感器广泛应用于航空航天、国防、现代工农业、医疗、交通、智能家居等领域。

智能传感器在发展的同时，其功能、内涵得到不断的加强和完善，所以智能传感器至今尚无统一、确切的定义。但是，业界普遍认为智能传感器是利用传感技术和微处理器技术，在实现高性能检测的基础上，还具备记忆存储、信息处理、逻辑思维、推理判断等智能化功能的新型传感器。如图 1-1 所示，智能传感器已具备了人类的某些智能思维与行为。人类通过眼睛、鼻子、耳朵和皮肤感知获得外部环境多重传感信息，这些传感信息在人类大脑中归纳、推理并积累形成知识与经验；当再次遇到相似外部环境时，人类大脑根据积累的知识、经验对环境进行推理判断，做出相应反应。智能传感器与人类智能相类似，其传感器相当于人类的感知器官，其微处理器相当于人类大脑，可进行信息处理、逻辑思维与推理判断，存储设备存储“知识、经验”与采集的有用数据。

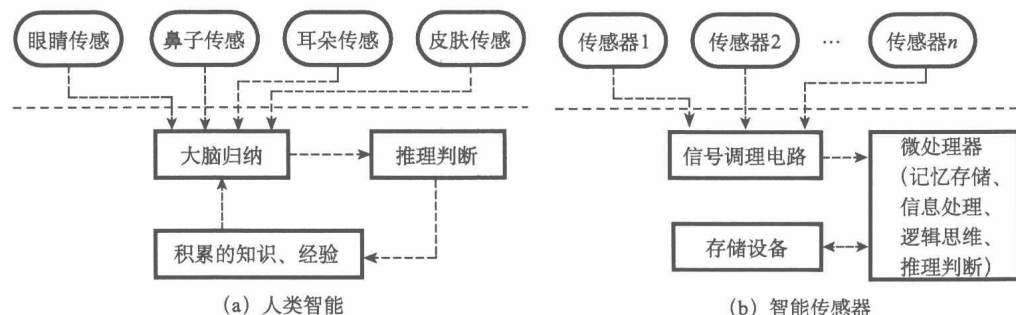


图 1-1 人类智能与智能传感器类比图

1.1.2 智能传感器的基本结构

智能传感器主要由传感器、微处理器及相关电路组成，其基本结构框图如

图 1-2 所示。传感器将被测的物理、化学量等转换成相应的电信号，送到信号调理电路中，经过滤波、放大、模-数转换等信号调理处理后送到微处理器。微处理器对接收的信号进行计算、存储、数据分析和处理后，一方面通过反馈回路对传感器与信号调理电路进行调节以实现测量过程的调节和控制，另一方面将处理后的结果传送到输出接口，经过接口电路的处理后按照输出格式输出数字化的测量结果。其中，微处理器可以是微控制器（Microcontroller Unit, MCU）、数字信号处理器（Digital Signal Processing, DSP）、专用集成电路（Application-Specific Integrated Circuit, ASIC）、现场可编程逻辑门阵列（Field-Programmable Gate Array, FPGA）、微型计算机。

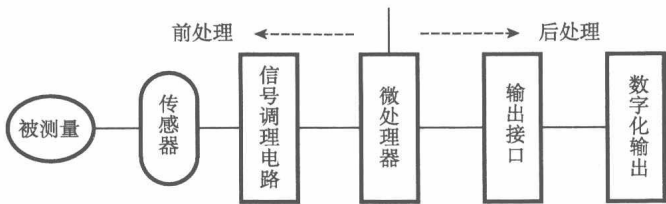


图 1-2 智能传感器的基本结构框图

1.1.3 智能传感器技术功能特点

首先，通过图 1-3 所示的智能称重传感器系统来认识智能传感器技术的功能特点。称重传感器将被测目标的重量转换为电信号，经过模-数转换为数字信号后输入单片机，此时测量的目标重量电信号受温度、非线性等因素的影响，并不能较准确地反映目标的真正重量。所以，智能称重传感器可以加入温度传感器测量环境温度，同样通过模-数转换为电信号输入单片机。存储设备中存储有用于非线性校正的数据。称重传感器测得的目标重量数据经过单片机进行计算处理、消除非线性误差，同时根据温度传感器测得的环境温度进行温度补偿、零点自校正、数据校正，并将处理后的数据存入存储设备中，还可以在显示设备上显示，以及通过 RS-232，USB 等接口与微型计算机进行数字化双向通信。

可见，由于智能传感器引入了微处理器进行信息处理、逻辑思维、推理判断，使其除了传统传感器的检测功能外，还具有数据处理、数据存储、数据通信等功能，其功能已经延伸至仪器的领域，具有如下功能特点。

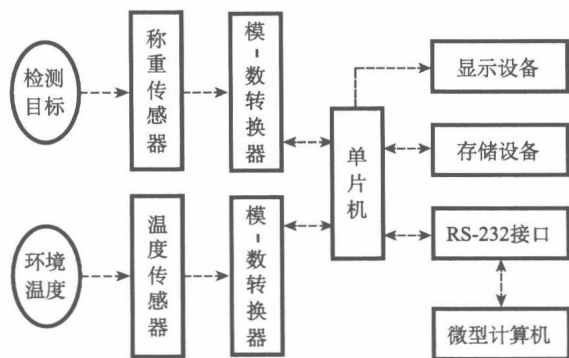


图 1-3 智能称重传感器系统原理框图

(1) 自校零、自标定、自校正、自适应量程功能。

这是智能传感器技术的重要功能之一。操作者输入零值或某一标准量值后，智能传感器中自动校准软件可以自动对传感器进行在线校准。智能传感器还可以通过环境的判断自动调整零位和增益等参数，可以根据微处理器中的算法和 EPROM 中的计量特性数据与实测数据对比校对和在线校正。甚至，部分智能传感器可以根据不同测量对象自动选择最合适量程，以获取更准确的测量数据。

(2) 自补偿功能。

智能传感器技术可以自动对传感器的非线性、温度漂移、时间漂移、响应时间等进行有效补偿，这也是智能传感器技术的重要功能之一。智能传感器利用微处理器对测量的数据进行计算，采用多次拟合、差值计算或神经网络方法对漂移和非线性等进行补偿，从而获得较精确的测量结果。

(3) 自诊断（自检）功能。

智能传感器在上电及工作工程中可以进行自检，利用检测电路或算法检查硬件资源（包括传感器和电路模块）和软件资源有无异常或故障。其中，传感器故障诊断是智能传感器自诊断技术的核心内容，对于传感数据异常、硬件故障需及时报警，并实现故障定位、故障类型判别，以便采取相应措施。常用的传感器自诊断方法包括硬件冗余诊断法、基于数学模型的诊断法、基于信号处理的诊断法和基于人工智能的故障诊断法（包括基于专家系统的诊断法和基于神经网络的诊断法）。

(4) 信息处理与数据存储记忆功能。

智能传感器技术利用微处理器及其中的算法可以对采集的数据进行预处理

(如剔除异常值、数字滤波等),可以对数据进行统计分析、数据融合,甚至逻辑推理、判断。智能传感器也可以存储各种信息,如校正数据、工作日期等。

(5) 双向通信和数字输出功能。

数字式双向通信是智能传感器关键标志之一。智能传感器的微处理器不仅能接收、处理传感器的测量数据,也能将控制信息发送至传感器,在测量过程中对传感器进行调节、控制。智能传感器的标准化数字输出接口可与计算机或接口总线方便连接,进行通信与信息管理,可以与计算机或网络适配器连接进行远程通信与管理。

(6) 组态功能。

智能传感器中可设置多种模块化的硬件和软件,用户可通过微处理器发出指令,改变智能传感器的硬件模块和软件模块的组合状态,完成不同的测量功能。

由于智能传感器技术具有以上功能,使得它与传统传感器相比,具有如下特点。

(1) 测量精度高。

智能传感器技术具有自校零、自校正、自适应量程、自补偿和数字滤波等多项新技术,可以有效修正各种确定性系统误差和一定程度补偿随机误差,降低噪声,大大提高了测量精度。

(2) 可靠性和稳定性高。

集成式智能传感器消除了传统电路结构的某些不可靠因素,提高了抗干扰性能;同时,智能传感器技术能定时或不定时对软硬件资源进行自诊断,对于异常情况或故障能及时报警或处理,甚至自恢复,这些都大大提高了智能传感器的可靠性和稳定性。

(3) 性价比高。

与普通传感器相比,智能传感器更容易实现,而且其使用低价的微处理器、集成电路工艺和编程技术实现,其具有更高的性价比。

(4) 智能化、多功能化。

智能传感器技术由于采用微处理器及相关算法,使其具有某些与人类相似的智能思维与行为,实现多种提高测量性能、简化操作的功能。

1.2 典型的智能传感技术与发展趋势

1.2.1 IEEE 1451 网络化智能传感技术

为了解决智能传感器总线标准兼容性、通用性差的问题,统一不同智能传感器接口与组网协议,美国国家标准与技术研究院(NIST)和国际电子电气工程师协会 IEEE 组织制定了 IEEE 1451 智能变换器(包括传感器与执行器)接口系列标准,使智能传感器具有互换性、互操作性及即插即用。IEEE 1451 网络化智能传感技术已经是智能传感技术的主要发展趋势之一。

(1) IEEE 1451 智能传感器技术概述。

制定 IEEE 1451 标准的目标是开发一种软、硬件的连接方案,使变换器同微处理器、仪器系统或通信网络相连接,该标准不仅实现智能传感器支持多种通信网络,还允许用户根据实际情况选择不同厂家传感器和网络(有线或无线),通过该标准特有的变换器电子数据表格(Transducers Electronic Data Sheet, TEDS)实现传感器的“即插即用”,最终实现不同厂家产品的互换性与互操作性。IEEE 1451 的特点在于:①软件应用层可移植性;②应用网络独立性;③传感器互换性,可使用“即插即用”方案将传感器连接到网络中。

迄今为止,IEEE 1451 系列标准已有 IEEE 1451.0 到 IEEE 1451.7 共八个子标准,分为软件接口、硬件接口两大类。软件接口部分由 IEEE 1451.0 和 IEEE 1451.1 组成,定义了通用功能、通信协议及电子数据表格式,以加强 IEEE 1451 系列标准之间的互操作性;硬件接口部分由 IEEE 1451. x (x 代表 2~7) 组成,针对具体应用对象和传感器接口,包括点对点接口 TII (Transducer Independent Interface) /UART/RS-232/RS-485/RS-422/USB (IEEE 1451.2 及 IEEE P1451.2)、多点分布式接口 HPNA (Home Phoneline Networking Alliance, IEEE 1451.3)、数-模信号混合模式接口 (IEEE 1451.4)、无线接口 Bluetooth/ZigBee/IEEE 802.11/6LoWPAN (IEEE 1451.5)、CAN 总线接口 (IEEE P1451.6)、RFID 接口 (IEEE 1451.7),图 1-4 是 IEEE 1451 标准族,表 1-1 是 IEEE 1451 系列标准体系和特征。IEEE 1451 标准将网络化智能传感器划分为网络适配器(Network Capable Application Processor, NCAP)、智能变换器接口模块(Transducer Interface Module, TIM),两者通过 IEEE 1451. x (x 代表 2~7) 传感器接口连接。