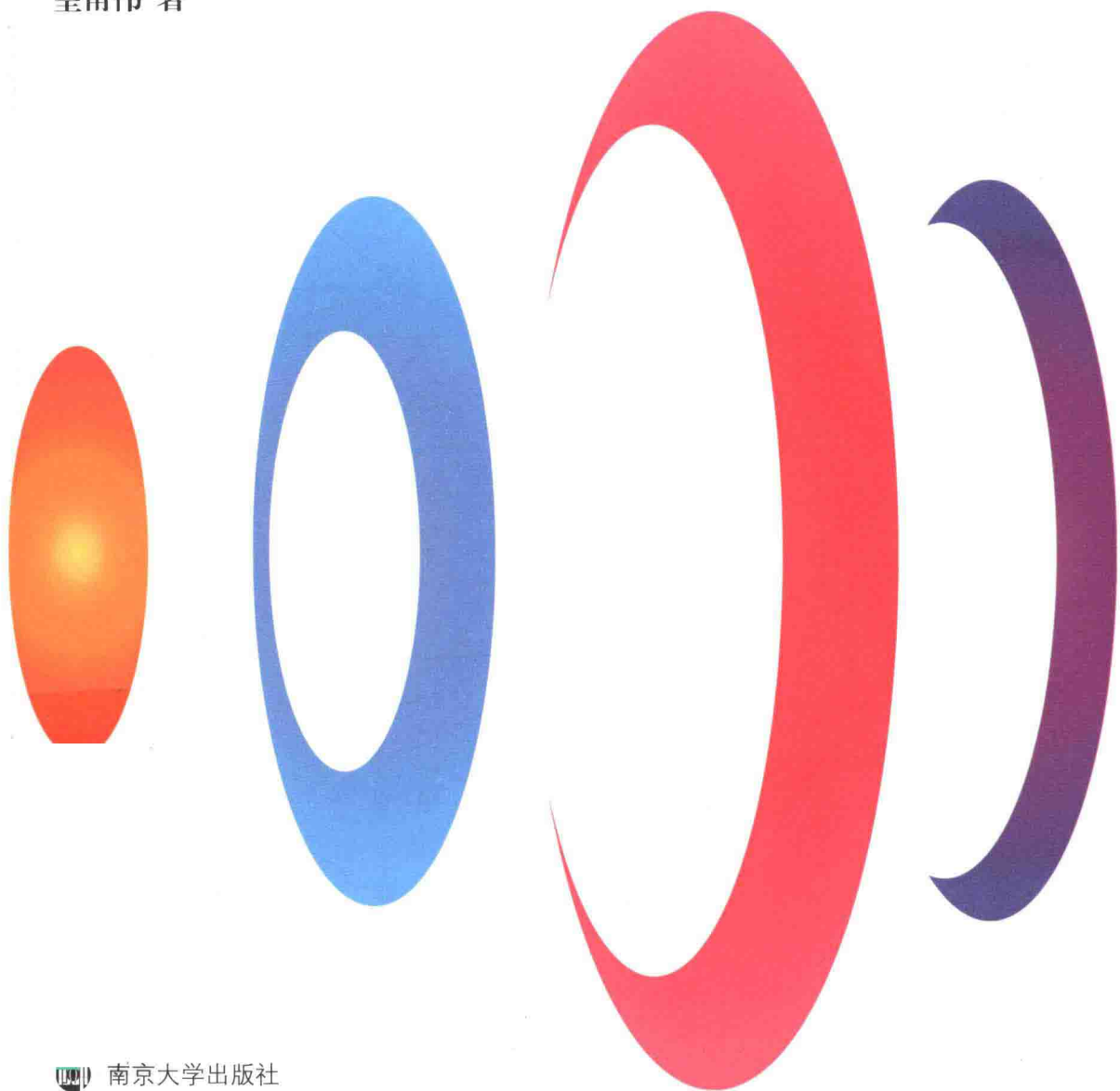


TEST AND MEASUREMENT TECHNOLOGIES
FOR WIRELESS SENSOR NETWORK

无线传感器网络 测试测量技术

皇甫伟 著



TEST AND MEASUREMENT TECHNOLOGIES
FOR WIRELESS SENSOR NETWORK

无线传感器网络 测试测量技术

皇甫伟 著



南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络测试测量技术/皇甫伟著. —南京:
南京大学出版社, 2022.3

ISBN 978 - 7 - 305 - 25296 - 9

I. ①无… II. ①皇… III. ①无线电通信—传感器—
测试技术 ②无线电通信—传感器—测量技术 IV.
①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 001989 号

出版发行 南京大学出版社

社 址 南京市汉口路 22 号 邮 编 210093

出 版 人 金鑫荣

书 名 无线传感器网络测试测量技术

著 者 皇甫伟

责任编辑 荣卫红 编辑热线 025 - 83685720

照 排 南京开卷文化传媒有限公司

印 刷 江苏苏中印刷有限公司

开 本 718×1000 1/16 印张 16.5 字数 230 千

版 次 2022 年 3 月第 1 版 2022 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 305 - 25296 - 9

定 价 49.80 元

网 址: <http://www.njupco.com>

官方微博: <http://weibo.com/njupco>

微信服务号: njyuxue

销售咨询热线: (025)83594756

* 版权所有, 侵权必究

* 凡购买南大版图书, 如有印装质量问题, 请与所购
图书销售部门联系调换

皇甫伟

北京科技大学教授，计算机与通信工程学院物联网与电子工程系副主任，北京市融合网络与泛在业务工程中心副主任，任中国图象图形学学会图像智能边缘计算专业委员会委员、北京嵌入式系统技术行业协会理事、北京电子电器协会人工智能与物联网分会理事等。1996年于西安交通大学信息与控制工程系获学士学位，2001年于清华大学电子工程系获博士学位。主要研究领域包括无线网络与无线通信、无线传感器网络、物联网与人工智能等，主持国家自然科学基金、教育部-中国移动联合基金等课题多项，在无线传感器网络及无线通信领域发表论文30篇，获得国家发明专利授权20余项，获国际会议最佳论文奖3次及最佳演示奖1次。

图书简介

无线传感器网络是由部署在监测区域内的大量微型低功耗节点组成的无线多跳网络，在工业控制、智能交通、环境监测、抢险救灾等领域具有广阔的应用前景。无线传感器网络测试测量作为网络性能指标度量与网络能力评估的关键技术，具有重要的科学价值与工程意义。与面向互联网的测试测量技术相比，无线传感器网络测试测量技术面临更大挑战。

本书针对无线传感器网络的特征，聚焦无线传感器网络系统级、实物型的测试测量技术，以无线传感器网络研发、验证、标准化认证和部署运维所处的产品生命周期为线索，对无线传感器网络测试床、系统测试、协议一致性测试和在线性能测量等内容进行了系列化、全方位的细致分析和深入讨论。

本书不仅可作为科研人员和从事实际应用的工程技术人员的研究资料，亦可以作为高年级本科生及研究生的教材或参考书。

责任编辑 荣卫红
装帧设计 张 欧

前 言

无线传感器网络是多学科高度交叉的前沿研究领域,涉及传感器、无线通信、网络协议、嵌入式系统、数据融合和智能信息处理技术等多方面内容,承担着更广泛、更深刻、更灵活、更精细地感知物理世界的功能。未来,在信息技术向传统行业深入渗透的过程中,无线传感器网络作为物联网信息基础设施的关键组成部分,势必成为这些行业数字化和智能化转型的重要赋能者之一。因此,无线传感器网络得到了世界范围的广泛重视,不仅是21世纪最有影响的21项技术与改变未来世界的十大新兴技术之一,同时也是我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要》重点领域中信息产业的7大主题之一。

测试测量技术作为无线传感器网络的支撑技术之一,具有重要的科学价值与工程意义,涵盖故障诊断、软硬件测试、系统验证和性能指标量化评估等重要内容,用于验证无线传感器网络的软硬件设计与实现的正确性,诊断无线传感器网络故障或缺陷,测量无线传感器网络运行期间的性能指标等。测试测量技术贯穿无线传感器网络的需求分析、方案设计、规划部署和运行维护的全程生命周期的各个阶段。

本书是一部无线传感器网络测试测量技术的专题性学术著作,聚焦无线传感器网络系统级、实物型的测试测量系列技术,以无线传感器网络研发、验证、标准化认证和部署运维所处的产品生命周期阶段为线索,对无线传感器网络测试床(见第二章)、系统测试(见第三章)、协议

一致性测试(见第四章)和在线性能测量(见第五章)进行深入讨论。

本书在无线传感器网络测试测量技术的探讨、分析和研究过程中突出下述三方面的特色。首先是注重“一以贯之”,主要体现在测试测量的共性基本模型上。该模型通过划分出测试任务的施事者和受事者,界定了二者间的互动机制,凸显了测试的基本思想和共性框架。面向无线传感器网络产品生命周期不同阶段的不同测试需求,针对性地提出具体技术方案。虽然这些方案中测试施事者和受事者所依托的物理实体存在差异,测试激励的产生和测试响应的收集方式存在差异,技术选型和实现策略也存在差异,但它们都遵循着相同的测试基本模型。因此测试基本模型和相关章节的具体技术方案之间是“源”与“流”的关系。其次,本书在讨论无线传感器网络测试测量技术时,不仅对概念、模型、技术方案进行了必要的界定和介绍,而且从无线传感器网络特征出发,循序渐进地进行推演分析,指出这些概念是如何形成的,为什么要选用这样的方案,不仅帮助读者知其然,而且知其所以然。最后,在具体技术方案的介绍中,本书尽量运用语言和图表等形式探讨具体技术方案,务求行文生动,深入浅出。

本书既可作为科研人员和从事实际应用的工程技术人员的研究资料,也可作为高年级本科生及研究生的教材或参考书。

本书相关的研究工作和出版得到了国家自然科学基金“无线传感器网络性能测量评估理论及关键技术的研究”(60903211)的资助,在此表示感谢。

限于作者水平,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

著 者

2021年6月1日

于北京科技大学

图表索引

- 图 0-1 基于身体直接认识世界示意图
- 图 0-2 人类借助外部工具探索世界示意图
- 图 0-3 基于传感器感知世界示意图
- 图 0-4 传感器的数字化示意图
- 图 0-5 传感器的智能化示意图
- 图 0-6 传感器的网络化示意图
- 图 0-7 单跳和多跳无线通信能量消耗对比示意图
- 图 0-8 无线传感器网络的节点功能模块示意图
- 表 0-1 典型的传感器网络节点
- 图 0-9 TelosB 无线传感器网络节点的构成示意图
- 图 0-10 无线传感器网络的协议层次示意图
- 图 0-11 无线传感器网络的功能模块示意图
- 图 0-12 章节安排示意图
- 图 1-1 无线传感器网络的生命周期及其测试测量技术内容示意图
- 图 1-2 无线传感器网络测试测量技术的系统规模与真实度示意图
- 图 1-3 无线传感器网络测试测量的基本模型示意图
- 表 1-1 互联网和无线传感器网络测试测量技术比较
- 图 1-4 施加测试测量对无线传感器网络行为的影响示意图
- 图 2-1 无线传感器网络测试床的模型与功能单元示意图
- 图 2-2 深侵入式测试床的逻辑角色与物理载体构成示意图
- 图 2-3 深侵入式测试床的组成示意图
- 图 2-4 深侵入式测试床中的测试数据流示意图
- 图 2-5 深侵入式测试床的节点测试代理示意图
- 图 2-6 MoteWorks 平台体系结构示意图

- 图 2-7 浅侵入式测试床的逻辑角色与物理载体构成示意图
- 图 2-8 浅侵入式测试床中的测试数据流示意图
- 图 2-9 浅侵入式测试床中的节点测试代理示意图
- 图 2-10 MoteLab 测试床构成示意图
- 图 2-11 非侵入式测试床的逻辑角色与物理载体构成示意图
- 图 2-12 非侵入式测试床的组成与测试数据流示意图
- 图 2-13 HINT 测试床的测试数据流示意图
- 图 2-14 测试上行方向的数据处理流程示意图
- 图 2-15 测试下行方向的数据处理流程示意图
- 图 2-16 TelosB 节点核心电路原理示意图
- 图 2-17 HINT 测试单元的组成及连接示意图
- 图 2-18 模拟电压信号的侦听示意图
- 图 2-19 模拟信号的周期采样示意图
- 图 2-20 模拟电流信号的侦听示意图
- 图 2-21 传感器节点功率的测量示意图
- 图 2-22 数字信号的侦听示意图
- 图 2-23 数字信号的异步周期采样示意图
- 图 2-24 模拟信号的分段常数压缩示意图
- 图 2-25 原始模拟信号与压缩后的分段常数序列对比示意图
- 图 2-26 数字信号的分段常数压缩示意图
- 图 2-27 聚合数字信号的分段常数压缩示意图
- 图 2-28 通过 SPI 接口连接多个设备示意图
- 图 2-29 SPI 接口时序示意图
- 图 2-30 SPI 总线接口数据压缩示意图
- 图 2-31 MCU 和 CC2420 间的互连信号示意图
- 图 2-32 基于 SPI 总线读写 CC2420 寄存器的时序示意图
- 图 2-33 IEEE 802.15.4 标准的物理层和 MAC 协议数据单元示意图
- 图 2-34 CC2420 发送射频分组时的引脚状态示意图
- 图 2-35 CC2420 接收射频分组时的引脚状态示意图
- 图 2-36 接收分组时 CC2420 将 FCS 替换为 RSSI、LQI 和校验正确标志示意图
- 图 2-37 测试板与测试服务器间的粗同步示意图
- 图 2-38 发送和接收节点间 SFD 信号精确对齐示意图

- 图 2-39 测试板模块框示意图
- 图 2-40 测试板实物图
- 图 2-41 测试板和测试节点间的连接示意图
- 图 2-42 测试板和测试节点间的连接实物图
- 图 2-43 测试服务器内部模块的实现示意图
- 图 2-44 测试床的简易部署示意图
- 图 2-45 HINT 测试床的三层测试能力示意图
- 图 2-46 HINT 测试床对数字信号的捕获示意图
- 图 2-47 HINT 测试床对模拟信号的捕获示意图
- 图 2-48 基于 HINT 测试床测量单跳延时示意图
- 表 2-1 HINT 测试床的单跳延时实测结果
- 图 2-49 传感器节点内部互连信号的插入式测试示意图
- 表 2-2 不同类型测试床的特点
- 图 3-1 系统及其边界示意图
- 图 3-2 无线传感器网络系统在物理与信息世界侧的输入输出示意图
- 图 3-3 系统测试示意图
- 图 3-4 无线传感器网络系统的数据处理流程和数据层次示意图
- 图 3-5 无线传感器网络功能范畴系统测试模型示意图
- 图 3-6 自恰测试法示意图
- 图 3-7 参考测试法示意图
- 图 3-8 参考实现测试法示意图
- 图 3-9 参考模型测试法示意图
- 图 3-10 物理激励测试法示意图
- 表 3-1 不同感知模式下各测试方法的适用性
- 表 3-2 感知模式与测试方法、PCO 设置和性能指标
- 图 4-1 协议一致性测试示意图
- 图 4-2 协议一致性测试的需求条款、测试意图和测试套示意图
- 图 4-3 ISO/IEC 9646 建议的一致性测试模型示意图
- 图 4-4 本地测试法示意图
- 图 4-5 分布式测试法示意图
- 图 4-6 协调测试法示意图
- 图 4-7 远程测试法示意图

- 图 4-8 协议一致性测试流程图
- 图 4-9 无线传感器网络标准体系框架示意图
- 图 4-10 IEEE 802.15.4/6LoWPAN/RPL 协议栈示意图
- 表 4-1 协议栈标准化进展
- 表 4-2 IEEE 802.15.4 媒体接入控制层协议一致性测试主要用例
- 表 4-3 6LoWPAN 适配层协议一致性测试主要用例
- 表 4-4 RPL 路由协议一致性测试主要用例
- 图 4-11 开放型协议一致性测试平台框架与模块组成示意图
- 图 4-12 开放型协议一致性测试平台的分布式测试法连接示意图
- 图 4-13 开放型协议一致性测试平台的远程测试法连接示意图
- 图 4-14 开放型协议一致性测试平台的穿越测试法连接示意图
- 图 4-15 渡夹测试法示意图
- 图 5-1 无线传感器网络在线性能测量的两个环节示意图
- 图 5-2 无线传感器网络在线性能测量模型示意图
- 图 5-3 无线传感器网络的节点分裂模型示意图
- 图 5-4 无线传感器网络在线测量的 AEM 架构示意图
- 图 5-5 基于 AEM 架构的节点模块构成示意图
- 图 5-6 NMS-A 数据流示意图
- 图 5-7 局部和簇内 E-E 数据流示意图
- 图 5-8 业务路由和指定路由上的 E-E 数据流示意图
- 图 5-9 洪泛 E-E 数据流示意图
- 图 5-10 共享叶节点的管理信息库树结构设计示意图
- 表 5-1 FCAPS 网络管理功能域
- 图 5-11 在线性能测量与网络管理各功能域的关系示意图
- 图 5-12 测试代理在节点中的实现示意图
- 表 5-2 SNMP 的基本操作
- 图 5-13 在线性能测量中的节点角色示意图
- 图 5-14 无线传感器网络测量引擎设计示意图
- 表 6-1 无线传感器网络测试测量技术的内容与特征

目 录

绪 论	1
0.1 无线传感器网络的缘起与发展	2
0.1.1 基于身体对世界的认知	2
0.1.2 基于早期观测工具对世界的认知	4
0.1.3 基于传感器对世界的认知	7
0.1.4 传感器的数字化、智能化和网络化	9
0.1.5 无线传感器网络的诞生	12
0.1.6 无线传感器网络的演进发展	13
0.2 无线传感器网络的特征与技术框架	15
0.2.1 无线传感器网络的特征	15
0.2.2 无线传感器网络的技术框架	19
0.3 无线传感器网络测试测量的科学价值与工程意义	24
0.4 本书章节安排	27
第 1 章 无线传感器网络测试测量技术概述	32
1.1 测试与测量的基本概念	32
1.2 无线传感器网络测试测量的技术内容	34
1.3 无线传感器网络测试测量的模型与术语	38
1.3.1 模型	38

1.3.2 术语	39
1.4 无线传感器网络测试测量的特征与技术难点	44
1.4.1 无线传感器网络测试测量的特征	44
1.4.2 无线传感器网络测试测量的难点	48
1.5 小结	51
第2章 无线传感器网络测试床技术	54
2.1 无线传感器网络测试床的概念与特性	54
2.2 无线传感器网络测试床的模型与分类	55
2.2.1 无线传感器网络测试床的模型	56
2.2.2 无线传感器网络测试床的分类	57
2.3 深侵入式测试床	59
2.3.1 深侵入式测试床的构成	59
2.3.2 深侵入式测试床的典型案例	62
2.4 浅侵入式测试床	64
2.4.1 浅侵入式测试床的构成	65
2.4.2 浅侵入式测试床的典型案例	67
2.5 非侵入式测试床	70
2.5.1 非侵入式测试床的构成	70
2.5.2 非侵入式测试床的设计	72
2.5.3 非侵入式测试床的实现	98
2.5.4 非侵入式测试床的功能展示	101
2.5.5 未来工作与拓展	104
2.6 小结	105
第3章 无线传感器网络系统测试技术	110
3.1 无线传感器网络系统测试的概念与意义	110

3.2 无线传感器网络应用与需求分析	114
3.2.1 无线传感器网络典型应用领域	114
3.2.2 无线传感器网络功能范畴的系统需求分析	120
3.2.3 无线传感器网络非功能范畴的系统需求分析	123
3.3 无线传感器网络功能范畴系统测试	124
3.3.1 无线传感器网络系统功能测试模型	124
3.3.2 无线传感器网络系统功能测试方法	125
3.3.3 感知模式与系统功能测试方法选择	132
3.4 无线传感器网络非功能范畴系统测试	140
3.5 小 结	142
第 4 章 无线传感器网络协议一致性测试技术	148
4.1 无线传感器网络协议一致性测试的意义	148
4.2 协议一致性测试的通用模型与技术方法	150
4.2.1 协议一致性测试的概念与进展	150
4.2.2 协议一致性测试的相关术语	152
4.2.3 协议一致性测试的模型与方法	155
4.3 无线传感器网络的协议标准分析	159
4.3.1 国际无线传感器网络标准化状况	159
4.3.2 国内无线传感器网络标准化状况	165
4.3.3 无线传感器网络协议标准的体系与特征	168
4.4 无线传感器网络协议一致性测试的挑战与进展	170
4.4.1 无线传感器网络协议一致性测试的挑战	170
4.4.2 无线传感器网络协议一致性测试的研究进展	171
4.5 开放型无线传感器网络协议一致性测试平台	174
4.5.1 抽象测试套设计	174
4.5.2 测试平台的设计与实现	179
4.5.3 改进策略	186

4.6 小 结	187
第 5 章 无线传感器网络在线性能测量技术	191
5.1 无线传感器网络在线性能测量技术概述	191
5.1.1 无线传感器网络在线性能测量的概念与特点	192
5.1.2 无线传感器网络在线性能测量的研究内容与现状	194
5.2 无线传感器网络在线性能测量的模型与框架	196
5.2.1 无线传感器网络在线性能测量的模型	196
5.2.2 无线传感器网络在线性能测量架构	198
5.2.3 无线传感器网络在线性能测量的数据流与协议	201
5.3 无线传感器网络的性能指标体系与信息库	204
5.3.1 无线传感器网络的性能指标体系	204
5.3.2 无线传感器网络的管理信息库设计	206
5.4 面向在线性能测量的无线传感器网络测试代理	208
5.4.1 无线传感器网络管理的功能域	208
5.4.2 无线传感器网络测试代理模块设计	210
5.4.3 无线传感器网络的性能管理协议	212
5.5 无线传感器网络的在线性能测量方法与测量引擎	214
5.5.1 在线性能测量方法分类	214
5.5.2 无线传感器网络的在线性能测量方法	217
5.5.3 无线传感器网络的测量引擎设计	226
5.6 小 结	228
第 6 章 结 语	238
后 记	242
重要缩略语表	244

绪 论

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是由大量微型低功耗传感器节点构成的无线多跳网络,用以实现对覆盖范围内环境参量的感知和信息收集。其应用领域极为广阔,包括环境监测、精准农业、工业控制、交通物流和抢险救灾等,得到了学术界和工业界的广泛重视,不仅是对 21 世纪产生重大影响的技术之一^[1],同时也是我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要》重点领域信息产业的 7 个主题之一。

10 余年间,学术界与工业界对无线传感器网络的关键技术进行了相当充分的研究,取得了丰富的研究成果,积极推进了无线传感器网络的实用化与商业化进程。同时,伴随着无线传感器网络在各领域不同规模的实际应用,已有的应用实践又为理论研究的深入提供了需求牵引与支撑条件。在无线传感器网络的诸多关键技术中,测试测量技术贯穿无线传感器网络从研究、设计、规划、部署到运行维护的全生命周期的各个阶段,具有重要的科学价值和工程意义。

在绪论中,首先简要回顾无线传感器网络的缘起和发展,分析并讨论无线传感器网络的特征与技术框架;其次,阐述测试测量对无线传感器网络的科学价值和工程意义;最后,简要介绍全书的结构和章节安排。

0.1 无线传感器网络的缘起与发展

对未知世界的探索是人类进步的原动力之一,基于身体探索世界是其中最原始和最直接的方式。随着科学技术的进步,人类可以制造并利用外部的工具和仪器,拓展自身的感官来更好地观察世界,传感器的诞生更极大地拓展了人类认知世界的方式和范围。无线传感器网络则是传感器数字化、智能化和网络化过程的延续和发展,它为人类探索世界提供了一种更为广泛、更为深刻、更为精细、更为灵活的方式。

0.1.1 基于身体对世界的认知

人类对世界的感知首先基于自身的感官。庞加莱(Henri Poincaré)在《最后的沉思》^[2]中讲道:“我们的身体是我们的第一个测量仪器。”(Our body is our first measuring instrument.)当物理世界的光线、声音和气味等作用于人体的感觉器官时,将引起感官的神经冲动并在大脑皮层的特定部位产生感觉,如光线引起视觉、声波引起听觉等。传统认为,人类的感知包括视觉、听觉、味觉、嗅觉和触觉等“五感”(Five senses)。在现代分类体系中,上述感觉中还进一步细分出温度觉(Thermoception)、痛觉(Nociception)和平衡觉(Equilibrioception)等。

感觉是人类对刺激的初步认识。在感觉的基础上,人脑还将进一步形成对外界的看法和理解,即知觉。人脑的感觉与知觉紧密联系,两者统称为“感知觉”。以身体的感觉和知觉直接认知世界,这是人类最为基本和原始的认知方式,如图0-1所示。



图0-1 基于身体直接认识世界示意图

人类的感官是存在局限的,