



物联网工程研究丛书

# 工业物联网技术与应用

王平 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版  
物联网工程研究丛书

# 工业物联网技术与应用

王 平 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

以工业无线技术为代表的工业物联网技术是物联网领域最活跃的主流发展方向。本书主要介绍了工业物联网技术与三大工业无线标准的发展历程,探讨了工业无线技术的融合趋势与 Heathrow 融合标准;以作者的科研成果为基础,重点介绍了精确时间同步、确定性调度、自适应跳信道、通信链路冗余、轻量级加密等关键技术与实现方法;在叙述 IEEE 802.15.4 协议簇标准和物理层、MAC 层的相关技术基础上,介绍了无线 HART、WIA-PA、ISA 100.11a 三大标准体系的协议栈、关键模块、典型产品的开发技术与测控系统的开发实例;同时,结合全球首款工业物联网核心芯片——“渝芯一号”,介绍了工业物联网芯片的设计方法、开发技术、开发平台和产品开发案例。

本书可供物联网和自动化领域的科研人员、工程技术人员使用,也可作为自动化、物联网等专业高等院校本科生和研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

工业物联网技术与应用(工业篇)——北京:科学出版社,2014.8  
(物联网工程研究丛书)

ISBN 978-7-03-040713-9

I.①工… II.①王… III.①互联网络—应用—工业产业②智能技术—应用—工业产业 IV.①F4-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 107518 号

责任编辑:王 哲 / 责任校对:张怡君  
责任印制:阎 磊 / 封面设计:迷底书装

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>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014 年 8 月第 一 版 开本:720×1 000 1/16

2014 年 8 月第一次印刷 印张:27 1/4

字数:550 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

工业物联网（亦称工业无线）作为一种在实时性与确定性、可靠性与环境适应性、互操作性与安全性、移动性与组网灵活性等方面满足工业自动化应用需求的无线通信技术，为现场仪表、控制设备和操作人员间的信息交互提供了一种低成本的有效手段，为工业生产提供了低成本、高可靠、高灵活的新一代泛在制造信息系统，是影响未来制造业发展的革命性技术，也是降低自动化成本、提高自动化系统应用范围的最有潜力技术，更是未来几年工业自动化产品新的增长点。美国总统科技顾问委员会在《面向 21 世纪的联邦能源研究与发展规划》中指出“低成本的工业无线技术将使工业生产效率提高 10%，并使排放和污染降低 25%”。

自 2004 年美国能源部发起成立无线工业控制网络联盟以来，工业物联网领域形成了 HART 基金会的 WirelessHART（IEC 62591）、中国 WIA 联盟的 WIA-PA（IEC 62601）、国际仪器仪表协会的 ISA100.11a（IEC/PAS 62734）三大主流国际标准共存的局面，而三个标准共存带来了标准之间互通性差、多标准支持设备研发周期长、成本高等问题。为此，以 NAMUR 为首的用户组织经过研究发布了 NE133（无线传感器网络：对现有标准的融合需求）报告，希望三种工业无线国际标准能够融合为单一的标准，从而方便全球工业物联网设备和网络的部署。为了响应用户需求，业界于 2010 年 8 月在伦敦的 Heathrow 机场召开了第一次融合工作组会议，并命名为 Heathrow 融合工作组。Heathrow 工作组负责工作组规则、融合策略、融合路线、融合标准的制定，以确保最终融合目标的完成。

本书作者在国家重大科技专项项目、国家 863 项目的支持下，作为核心成员参加制定了工业无线领域三大主流国际标准中的 WIA-PA 标准（IEC 62601）、ISA 100.11a 标准（IEC/PAS 62734），成为 Heathrow 融合标准 Steco 总体组的 5 人小组成员和 Technical 技术组核心成员，突破了精确时间同步、确定性调度、自适应节能、网络安全等技术瓶颈，核心技术初步形成了专利群（获得发明专利授权 20 余项，其中美国专利 1 项），与台湾达盛电子股份有限公司联合推出了工业物联网核心芯片——UZ/CY2420，首次通过硬件实现了自适应跳信道、超帧调度引擎、TAI 时间管理器、精确时间同步和时隙通信等工业无线核心功能，是全球第一款能够为工业无线三大国际主流标准关键技术提供硬件支持的芯片，这标志着我国在工业物联网领域处于世界前列。

本书是基于作者所在团队解决的工业物联网关键技术问题、具有自主知识产权的技术积累、参加制定的工业无线国际标准等成果撰写的，汇集国内外相关研

究成果，代表了技术的最新发展动向。本书力求以标准为主线、技术为核心、产品为重点，结合作者针对工业物联网标准研制的产品开发平台，让读者对工业物联网技术、标准与核心产品有一个系统、全面、深入的理解，并能自主开发相应的工业物联网产品。为了便于读者理解和掌握，本书列举了大量有关工业物联网产品与工业物联网测控系统开发的典型例子，并力求达到重点突出，层次分明，语言精练，易于理解。

全书共分7章。第1章介绍了工业物联网技术与三大工业无线标准的发展历程，重点介绍了工业无线技术的融合趋势与 Heathrow 融合标准；第2章以作者的发明专利为基础，重点介绍了精确时间同步、确定性调度、自适应跳信道、通信链路冗余、轻量级加密等关键技术与实现方法；第3章介绍了 IEEE 802.15.4 协议簇标准和物理层、MAC 层的相关技术；第4~6章结合作者的科研成果，介绍了 WIA-PA、ISA 100.11a、无线 HART 三大标准体系的协议栈、关键模块、典型产品的开发技术，并讲解了测控系统的开发实例；第7章介绍了工业物联网核心芯片 UZ/CY2420 的设计方法、开发技术、开发平台和产品开发案例。

本书是重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室全体同仁多年来在工业通信技术、传感网及物联网技术、网络化控制系统等方面从事研究、开发与应用工作的总结。本书由王平教授统稿并负责第1、2章的拟写；王恒副教授负责第5章和第7章的拟写；魏旻副教授负责第4章的拟写并参加第1章的撰写；李勇副教授负责第3章的撰写；王泉博士负责第6章的撰写；王浩教授承担安全相关内容的撰写；严冬副教授参加硬件相关内容的拟定。本书在著述过程中得到了中科院沈阳自动化所王天然院士、中国四联仪器仪表集团公司张军总工程师和刘进副总工程师、台湾达盛电子公司翟骏逸博士、重庆大学石为人教授的关心与支持，在此对他们表示衷心的感谢。

作者

2014年8月

# 目 录

## 前言

第 1 章 概述 .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 工业物联网发展历程 .....	1
1.3 工业物联网标准的发展 .....	3
1.4 工业物联网的发展趋势 .....	6
第 2 章 工业物联网关键技术 .....	9
2.1 工业物联网关键技术分析 .....	9
2.2 工业无线网络的精确时间同步方法 .....	11
2.3 工业无线网络的确定性调度机制 .....	17
2.4 基于确定性调度的工业无线网络 Mesh 路由 .....	27
2.5 基于时隙通信的自适应跳信道方法 .....	33
2.6 工业无线网络的冗余路径建立方法 .....	40
2.7 基于轻量级加密算法的安全通信方法 .....	47
第 3 章 IEEE 802.15.4 系列标准 .....	58
3.1 引言 .....	58
3.2 IEEE 802.15.4—2006 标准 .....	59
3.2.1 IEEE 802.15.4 网络拓扑结构 .....	59
3.2.2 IEEE 802.15.4 报文格式 .....	61
3.2.3 IEEE 802.15.4 网络形成与维护 .....	62
3.2.4 IEEE 802.15.4 标准的介质访问控制 .....	65
3.3 IEEE 802.15.4 MAC 协议 .....	69
3.3.1 MAC 层管理服务 .....	69
3.3.2 MAC 层数据服务 .....	79
3.4 IEEE 802.15.4 物理层协议 .....	79
3.4.1 物理层管理服务 .....	80
3.4.2 物理层数据服务 .....	81
3.5 IEEE 802.15.4 协议簇 .....	82
3.5.1 IEEE 802.15.4a 标准 .....	82

3.5.2	IEEE 802.15.4b 标准	84
3.5.3	IEEE 802.15.4c 标准	85
3.5.4	IEEE 802.15.4d 标准	87
3.5.5	IEEE 802.15.4e 标准	88
3.5.6	IEEE 802.15.4f 标准	105
3.5.7	IEEE 802.15.4g 标准	106
3.5.8	IEEE 802.15.4k 标准	115
<b>第 4 章</b>	<b>WIA-PA 技术</b>	<b>117</b>
4.1	WIA-PA 标准的发展	117
4.1.1	WIA-PA 标准概述	117
4.1.2	WIA-PA 的技术特征	118
4.2	WIA-PA 网络构成	119
4.2.1	WIA-PA 网络的拓扑结构	119
4.2.2	WIA-PA 的设备分类与功能	120
4.3	WIA-PA 协议体系	120
4.4	WIA-PA 协议栈的设计	123
4.4.1	WIA-PA 协议栈总体设计	123
4.4.2	WIA-PA 数据结构设计与实现	125
4.4.3	WIA-PA 主要流程及接口设计与实现	126
4.4.4	WIA-PA 协议栈的实现	130
4.5	WIA-PA 开发实例	157
4.5.1	WIA-PA 开发平台	157
4.5.2	WIA-PA 通信模块开发	165
4.5.3	WIA-PA 路由设备	172
4.5.4	WIA-PA 网关设备	179
4.5.5	WIA-PA 手持设备	192
4.5.6	WIA-PA 现场设备	200
4.6	WIA-PA 测控系统开发	206
4.6.1	WIA-PA 测控系统设计	206
4.6.2	WIA-PA 测控系统实例	208
<b>第 5 章</b>	<b>ISA100 技术</b>	<b>214</b>
5.1	ISA100 的发展	214
5.1.1	ISA 简介	214
5.1.2	ISA100 简介	214

5.1.3	ISA100.11a 工作组	217
5.2	ISA100.11a 网络结构	218
5.2.1	ISA100.11a 网络拓扑	218
5.2.2	ISA100.11a 的设备类型与逻辑角色	220
5.2.3	ISA100.11a 的设备状态	221
5.3	ISA100.11a 协议栈开发	223
5.3.1	ISA100.11a 协议体系	223
5.3.2	ISA100.11a 协议栈状态机	225
5.3.3	数据服务流程	227
5.4	ISA100.11a 各层详细设计与实现	229
5.4.1	数据链路层的设计与实现	229
5.4.2	网络层的设计与实现	251
5.4.3	传输层的设计与实现	264
5.4.4	应用层的设计与实现	266
5.5	ISA100.11a 协议栈系统管理	275
5.5.1	设备管理应用进程定义的对象	275
5.5.2	系统管理应用进程定义的对象	275
5.5.3	安全管理信息库	279
5.6	协议栈预配置	280
5.6.1	预配置网络	280
5.6.2	状态转移图	282
5.6.3	预配置时设备管理应用协议对象	283
5.7	ISA100.11a 产品开发实例	285
5.7.1	ISA100.11a 设备开发平台	285
5.7.2	ISA100.11a 通信模块的开发	293
5.7.3	ISA100.11a 路由设备	296
5.7.4	ISA100.11a 网关设备	298
5.7.5	ISA100.11a 无线烟雾浓度传感器节点	301
5.7.6	ISA100.11a 无线压力变送器	306
5.8	ISA100.11a 系统开发案例	307
5.8.1	ISA100.11a 系统验证平台	307
5.8.2	ISA100.11a 测控系统实例	309
第 6 章	无线 HART 技术	317
6.1	无线 HART 标准	317
6.2	无线 HART 协议栈体系结构	320



6.3	物理层	325
6.4	数据链路层	328
6.4.1	数据链路层的层次模型	328
6.4.2	逻辑链路控制子层	331
6.4.3	错误检测和安全	338
6.5	介质访问控制子层	338
6.5.1	时隙通信	339
6.5.2	通信表和缓冲区	341
6.5.3	链路调度	346
6.5.4	MAC 层操作	349
6.6	网络层	357
6.6.1	路由功能	357
6.6.2	NPDU 结构	360
6.6.3	安全功能	362
6.6.4	网络层列表	366
6.6.5	NLE 状态机	369
6.6.6	网络层管理信息	371
6.7	传输层	372
6.7.1	传输层数据单元结构	372
6.7.2	传输通道表	373
6.7.3	TLE 状态机	374
6.8	应用层	378
6.8.1	应用层接口	378
6.8.2	动态和设备变量	382
6.8.3	主机一致性分类	382
6.9	无线 HART 系统应用案例	383
6.9.1	基于无线 HART 的控制应用	383
6.9.2	基于无线 HART 网络的流程工业控制	388
<b>第 7 章</b>	<b>工业无线通信核心芯片</b>	<b>393</b>
7.1	工业物联网核心芯片设计	393
7.1.1	工业物联网核心芯片总体方案设计	393
7.1.2	基于时隙方式的 DLL 处理单元设计	394
7.1.3	芯片主要单元设计	397
7.1.4	芯片硬件时间同步设计	400
7.1.5	芯片硬件超帧调度设计	403

7.1.6	芯片硬件安全引擎设计 .....	407
7.2	工业物联网核心芯片 UZ/CY2420 .....	408
7.2.1	芯片特性 .....	408
7.2.2	芯片引脚配置 .....	409
7.2.3	芯片封装规格 .....	412
7.3	基于 UZ/CY2420 的工业物联网产品开发平台 .....	413
7.3.1	开发平台硬件组成 .....	413
7.3.2	开发平台软件组件 .....	415
7.4	基于 UZ/CY2420 的工业物联网产品开发案例 .....	417
7.4.1	基于 UZ/CY2420 的通信模块开发 .....	417
7.4.2	基于 UZ/CY2420 的温湿度传感器的开发 .....	418
7.4.3	基于 UZ/CY2420 的压力变送器的开发 .....	420
7.4.4	基于 UZ/CY2420 的测控系统开发 .....	423

# 第 1 章 概 述

## 1.1 引 言

网络改变着人类的生产和生活方式。欧盟对物联网的定义指出：物联网是一个动态的全球网络基础设施，它具有基于标准和互操作通信协议的自组织能力，其中物理的和虚拟的“物”具有身份标识、物理属性、虚拟的特性和智能的接口，并与信息网络无缝整合。中国工程院院士邬贺铨指出了物联网具备的三大特征：联网的每一个物件均可寻址；联网的每一个物件均可通信；联网的每一个物件均可控制。

通过物联网技术“泛在感知”工业全流程、实施优化控制，已经成为企业提高设备可靠性和产品质量、降低人工成本与减少生产消耗、增强核心竞争力的主要手段。以工业无线为代表的工业物联网技术（本书在后面的论述中将不加区分地使用工业无线和工业物联网两个概念）是继现场总线之后，工业控制领域的又一个热点技术，是降低自动化成本、提高自动化系统应用范围、实现工业化与信息化深度融合的最佳技术，也是未来几年工业自动化产品新的增长点。美国能源部（Department of Energy, DOE）在 2004 年发布的“未来工业计划（Industries of the Future, IOF）”中指出：这种基于工业无线技术的新型测控模式是实现“到 2020 年美国工业整体能耗降低 5%”目标的主要手段。美国总统科技顾问委员会在《面向 21 世纪的联邦能源研究与发展规划》中也指出：工业无线技术的应用将使工业生产效率提高 10%，并使排放和污染降低 25%。随后，工业无线技术成为工业界研究的热点，被称为工业控制领域的革命性技术。

## 1.2 工业物联网发展历程

当前，国际上工业技术的发展趋势是网络化和智能化。网络化是适应工业现场仪表和控制设备不断增加、测控系统规模不断扩大的要求，将工业现场需要交互信息的单元组织成高效的通信系统；智能化是适应降低使用和维护成本、提高系统可靠性和易用性的要求，使测控系统具备自配置、自适应、自修复能力。因此，具有环境感知能力的各类终端、基于泛在技术的计算模式、适应恶劣环境的移动通信等融入工业生产的各个环节，是工业技术向网络化、智能化方向发展的必然结果。

工业物联网作为一种在实时性与确定性、可靠性与环境适应性、互操作性与安全性、移动性与组网灵活性等方面满足工业自动化应用需求的无线通信技术，它为现场仪表、控制设备和操作人员间的信息交互提供了一种低成本的有效手段。

在计算机、通信、网络和嵌入式技术发展的推动下，经过几个阶段的发展，工业物联网技术正在逐渐成熟并被广泛应用。

第一阶段，20世纪60~70年代模拟仪表控制系统占主导地位，现场仪表之间使用二线制的4~20mA电流和1~5V电压标准的模拟信号通信，只是初步实现了信息的单向传递，其缺点是布线复杂、抗干扰性差。虽然目前仍有应用，但随着技术的进步，最终将被淘汰。

第二阶段，集散控制系统（Distributed Control System, DCS）于20世纪80~90年代占主导地位，实现分布式控制，各上下机之间通过控制网络互连实现相互之间的信息传递。现场控制站间的通信是数字化的，数据通信标准RS-232、RS-485等被广泛应用，克服了模拟仪表控制系统中模拟信号精度低的缺陷，提高了系统的抗干扰能力。

第三阶段，现场总线控制系统（Fieldbus Control System, FCS）在21世纪初占主导地位，FCS采用全数字、开放式的双向通信网络将现场各控制器与仪表设备互连，将控制功能彻底下放到现场，进一步提高了系统的可靠性和易用性。同时，随着以太网技术的迅速发展和广泛应用，FCS已从信息层渗透到控制层和设备层，工业以太网已经成为现场总线控制网络的重要成员，逐步向现场层延伸。

第四阶段，随着组网灵活、扩展方便、使用简单的工业无线通信技术的出现，智能终端、泛在计算、移动互连等技术被应用到工业生产的各个环节，实现了对工业生产实施全流程的“泛在感知”和优化控制，为提高设备可靠性与产品质量、降低生产与人工成本、节能降耗、建设资源节约与环境友好型社会、促进产业结构调整与产品优化升级等提供了有效手段。

随着测控系统规模的不断扩大，降低投资和使用成本成为工业通信技术发展的迫切要求。据美国市场研究机构Freedonia统计，2001年全球工业用传感器的市场份额是110亿美元，而安装和使用成本（主要是布线成本）超过1000亿美元，成为阻碍工业通信技术发展的主要难题。在这一背景下，无线通信技术安装和维护成本低特征引起了人们的广泛关注。2003年美国能源部组织研究机构，对在工业现场环境下利用低成本无线网络技术实现高效数据采集的可行性及其对工业控制领域的影响进行了深入的分析。2004年由美国能源部发起GE、Honeywell、RAE等70多家大公司参与成立了无线工业控制网络联盟（Wireless Industrial Networking Alliance, WINA），该联盟专门讨论无线技术在工业控制领域的应用问题。同年，美国工业技术计划在传感器和自动化方向设立了4个重点项目，分别推进无线网络技术在电解铝、采矿、化工、玻璃、钢铁等行业的应用。在这些项

目的支持下, GE、Honeywell、Emerson、Eaton 等工业自动化领域的著名公司针对无线网络技术在工业现场环境下使用面临的问题开展了研究。同时, Accutech、SIEMENS、Ember 和 Crossbow 等公司也利用自有技术开发面向工业数据采集应用的无线通信模块和无线仪表来满足市场的需求。

与此同时, 国内的重庆邮电大学、中国科学院沈阳自动化研究所、浙江大学等单位也相继开展了工业无线技术的研究, 我国工业物联网技术与标准的研究始终与国际同步, 并正在形成自己的核心技术专利群。特别是重庆邮电大学联合达盛电子股份有限公司(中国台湾)推出了全球首款工业物联网核心芯片——渝芯一号(UZ/CY2420), 创新性的数据链接库(Data Link Layer, DLL)处理单元设计首次通过芯片实现了超帧调度引擎、精确时间同步、跳信道机制和时隙通信等功能, 为ISA(International Society of Automation)100.11a(国际仪器仪表协会)、WIA-PA(Wireless Networks for Industrial Automation Process Automation)(中国WIA-PA联盟)和无线HART(Highway Addressable Remote Transducer)(HART基金会)标准的数据链路层核心技术提供硬件直接支持, 具有低功耗、低成本、微型化、高可靠性的优势。

工业物联网技术是工业化与信息化深度融合的强大推手, 将有效地提高智能化和大规模定制化生产能力, 促进生产型制造向服务型制造转变, 无论生产过程控制、故障诊断还是节能减排、提高效率、降低成本、增加产品附加值都会带来新的发展机遇, 从而必将引发工业行业的一场新技术革命。

### 1.3 工业物联网标准的发展

自2004年美国能源部成立WINA以来, 工业物联网领域形成了ISA100.11a、无线HART、WIA-PA三大主流国际标准共存的局面, 三个标准皆引用IEEE 802.15.4作为物理层和媒体访问控制(Media Access Control, MAC)层标准。

(1) 无线HART标准是HART通信协议的扩展, 专为工业环境中的过程监视和控制等应用所设计, 是第一个过程自动化领域的工业无线网络国际标准。

2007年6月, HART通信基金会批准无线HART标准成为HART通信协议族的组成部分, 并于2008年1月正式发布了包含无线HART的HART 7技术规范。

2008年7月18日, 瑞士国家委员会向IEC/SC65C提交了无线HART的NP(New Proposal)和PAS(Public Available Specification)文件。

2008年9月, 无线HART通过PAS投票, 成为IEC/PAS 62591 Ed.1。

2008年10月, 无线HART通过NP投票, 成立IEC/SC65C/WG16无线工作组。

2009年2~4月, 无线HART CD(Committee Draft)阶段。

2009年6~11月, 无线HART CDV(Committee Draft for Vote)投票。

2010年1~3月, FDIS (Final Draft International Standard) 投票通过成为 IEC 62591。

国际电工委员会于2010年4月正式发布 *HART Wireless Devices Specification* 的1.0版本为 IEC 62591, 这是第一个过程自动化领域的无线传感器网络国际标准。

(2) WIA-PA (Wireless Networks for Industrial Automation-Process Automation) 是我国拥有自主知识产权的工业无线标准, 国家标准和国际标准制定工作同步进行, WIA-PA 国际标准的正式发布标志着我国在工业物联网技术领域与世界同步。

2006~2008年, WIA-PA 标准工作组确立了具有我国自主知识产权工业无线网络 WIA 标准体系。

2008年8月, 工作组完成了《工业无线网络 WIA 规范 第1部分: 用于过程自动化的 WIA 系统结构与通信规范 (征求意见稿)》的制定, 并通过中国国家标准化管理委员会向 IEC/SC65C 提交了 WIA-PA 的 PAS 文件。

2008年10月, WIA-PA 以96%的得票率成为 IEC/PAS 62601, 成为国际上与无线 HART 被同时承认的两个国际标准化文件之一。

2009年7月, 中国向 IEC/SC65C 提交的 WIA-PA 的 NP 文件以100%的得票率通过 65C/533/NP 投票, 德国、法国、美国、日本、瑞典都指派专家参加 WIA-PA 国际标准起草项目组。

2009年9月, 《工业无线网络 WIA 规范 第1部分: 用于过程自动化的 WIA 系统结构与通信规范 (送审稿)》通过 SAC/TC124 和 SAC/TC124/SC4 的投票。

2011年7月, 国家标准化委员会正式批复《工业无线网络 WIA 规范 第1部分: 用于过程自动化的 WIA 系统结构与通信规范》成为 GB/T 26790.1—2011。

2011年10月, *Industrial Communication Networks-Fieldbus Specification-WIA-PA Communication Network and Communication Profile* 正式成为 IEC 国际标准 IEC 62601, 是第二个过程自动化领域的专业无线网络国际标准, 标志着 WIA-PA 标准得到了国际上的广泛认可。

(3) ISA100 (ISA100: Wireless Systems for Automation) 致力于通过制定一系列标准规范和技术报告来确定工业自动化控制环境下的无线系统实现技术, 是国际自动化协会 (International Society of Automation, ISA) 负责工业无线技术与系列标准制定的下属机构。考虑到其广泛的覆盖范围, ISA100 成立了若干工作组分别从事不同的具体任务。其中, 制定 ISA100.11a 标准是其核心工作; ISA100 无线符合性测试机构 (Wireless Compliance Institute, WCI) 负责提供 ISA100 标准族的符合性认证服务。重庆邮电大学作为国内第一个投票成员和 ISA WCI 工作组专家参加 ISA100 标准制定工作。

2006年10月, 在美国休斯敦会议上以投票方式确定将 SP100.14 与 SP100.11 工作组合并为 SP100.11a, 其后更名为 ISA100.11a 工作组。

2009年4月24日, ISA100.11a标准以81.0%的赞成率通过了ISA100委员会的阶段投票。

2011年9月, ISA100.11a通过IEC投票成为IEC PAS 62734。

2012年1月, ISA100.11a成为美国标准。

2013年10月, ISA100.11a(IEC 62734/Ed.1: Industrial Communication Networks-Wireless Communication Network and Communication Profiles-ISA100.11a)以100%的赞成率通过IEC投票,正式成为IEC 62734 CDV。

目前,委员会将继续完善该标准,拟于2014年9月对FDIS进行投票,使之成为国际标准IEC 62734,并将取代现有的IEC PAS 62734。

(4) 工业物联网三大主流国际标准性能对比如表1-1所示。

表 1-1 工业物联网三大主流国际标准性能对比

相关技术	无线 HART	WIA-PA	ISA100.11a	
物理层	IEEE 802.15.4—2006 2.4GHz, 信道 26 排除	IEEE 802.15.4—2006 2.4GHz	IEEE 802.15.4—2006 2.4GHz, 信道 26 可选	
数据链路层	概述	基于超帧和跳频的时隙通信、重传机制,用于时间同步、TDMA 和 CSMA 混合信道访问机制,链路配置和性能度量	MAC 子层兼容 IEEE 802.15.4 协议; MAC 扩展层完成传统的 DLL 层功能; DLL 上层完成 Mesh 子网内的路由功能。支持 3 种跳信道机制、超帧调度、时间同步、TDMA/CSMA 信道接入	
	时间同步	可根据广播帧、确认帧同步	可根据信标帧、时间同步命令帧同步	可根据广播帧、确认帧同步
	跳频	自适应信道,黑名单技术	星型网内支持自适应跳频,时隙跳频	支持基于黑名单技术的自适应调频机制、时隙跳频、慢跳频,混合跳频
	超帧	使用一般超帧	使用 IEEE 802.15.4 超帧结构	使用一般超帧
	时隙	固定长度	可变长度	可变长度
	CSMA/CA	支持,共享 CSMA/CA 时隙	CSMA/CA 在特定时隙支持	支持,共享 CSMA/CA 时隙,任何时隙可配置为 CSMA/CA
	邻居	支持	只支持与簇头通信	支持邻居组
	链路实现	收发独立, QoS 链路管理,避免跨层设计	管理和数据分开,基于网络管理者	收发独立, QoS 链路管理,避免跨层设计
	MIC	32 位	支持 IEEE 802.15.4 安全策略,加密和校验可选	支持 IEEE 802.15.4 安全策略
	邻居发现	使用广播帧	使用 IEEE 802.15.4 信标帧	使用广播帧,支持主动邻居发现
长地址和短地址	支持 64 位长地址,无分配短地址规则	支持 64 位长地址, 16 位短地址分配的第一个字节是簇地址	支持 64 位长地址, 无分配短地址规则	

续表

相关技术	无线 HART	WIA-PA	ISA100.11a
网络层	不支持 IPv6, 采用图路由和源路由方式, 动态网络带宽管理, TTL (Time to Live) 使用跳数	不支持 IPv6, 寻址路由(支持静态路由)分段与重组, TTL 基于时间戳	使用 IPv6, 采用图路由和源路由方式, 采用 6LoWPAN 标准的地址转换, 分片与重组, 骨干网间的路由, TTL 使用跳数
传输层	无	无	基于 RFC786 协议 (UDP); 实现端到端安全
应用层	支持周期性信息, 支持报警等信息, 基于 HART 命令, 支持数据批处理	支持周期性信息, 支持报警等信息, 基于服务, 面向对象, 不支持数据批处理, 实现端到端安全	支持周期性信息, 支持报警等信息, 基于服务, 面向对象, 支持数据批处理
预配置	网络和安全信息需要预配置, 定义了维护端口	网络和安全信息需要预配置, 未定义维护端口	网络和安全信息需要预配置, 采用无线 (over-the-air) 的方式进行预配置
网关	每一个网络仅允许一个网关	允许有冗余网关	DL 子网允许一个网关, 骨干网络中可允许多个
安全	安全策略针对网络进行定义, 定义 AES 加密, 用于通信设备之间数据加密、消息鉴别、设备认证、健壮性操作等	安全策略针对任务, 未定义加密算法, 分层分级实施不同的安全策略和措施, 数据加密、数据校验、设备认证	安全策略针对任务, 定义 AES 加密, 数据加密和完整性鉴别保护点到点和端到端安全、消息/设备认证、入网设备安全处理

## 1.4 工业物联网的发展趋势

目前工业无线领域形成了 ISA100.11a、无线 HART、WIA-PA 三个标准共存的局面, 由此带来了标准之间互通性差、多标准支持设备研发周期长、成本高等问题。为此, 以流程工业自动化用户协会为首的用户组织经过研究发布了 NE133 (无线传感器网络: 对现有标准的融合需求) 报告, 希望三种工业无线国际标准能够融合为单一的标准, 从而方便全球工业物联网设备和网络的部署。

为了响应用户需求, 业界于 2010 年 8 月在伦敦的希思罗 (Heathrow) 机场召开了第一次融合工作组会议, 工作组即以 Heathrow 命名。Heathrow 融合工作组通过 Steco 总体组和 Technical 技术组两个组开展工作。其中, Steco 总体组负责工作组规则、融合策略、融合路线的制定, 以确保最终融合目标的完成, 同时直接指导 Technical 技术组的工作。

目前, Steco 总体组工作组主席由西门子公司的前 Hans-Georg Kumpfmüller 担任, 成员来自西门子、艾默生、ABB、横河、Honeywell、Endress+Hauser、Invensys、重庆邮电大学、机械工业仪器仪表综合技术经济研究所和中国科学院沈阳自动化研究所等十多家单位。2010 年以来, Steco 总体组分别在英国、德国、瑞士、中



国召开多次面对面会议并定期召开电话会议，形成了多项决议和共识。

为更好地凝聚共识、起草相关文档、寻找最好的解决方案，2011年12月，Steco总体组决定成立五人工作小组。由ABB公司的Sean Keeping作为召集人，成员有艾默生公司的Martin Zielinski、Honeywell公司的paymond pogowski、Invensys公司的Hesh Kagan以及重庆邮电大学的魏旻。该小组完成了融合标准工业无线网络架构的修改，以及工作组白皮书（position paper）的修订，所提交的文档得到Steco总体组其他专家的认可和一致同意。截至2012年年初，工作组已完成了用户需求的编辑和整理，分析和比较了三个标准的异同，明确了完成单一标准制定的步骤和路线图，如图1-1所示。

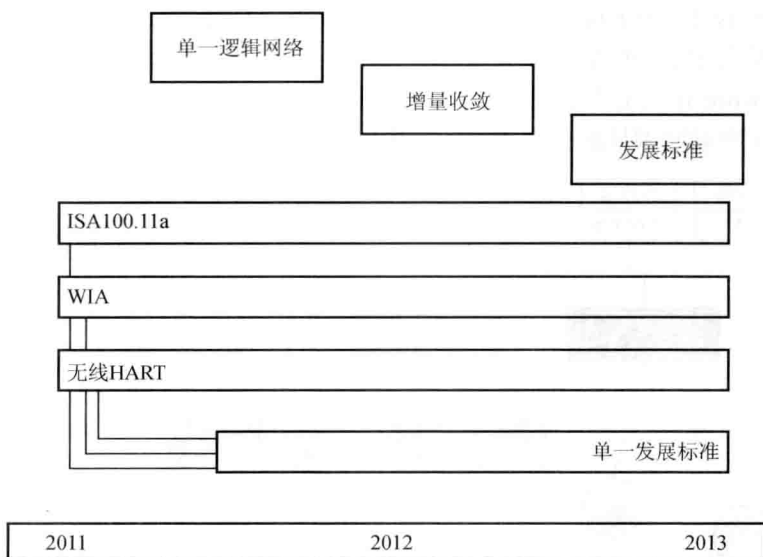


图 1-1 Heathrow 融合路线图

Technical 技术组由各单位的技术专家组成，具体负责起草和制定用于过程工业单一无线标准的指导性文档，该文档并非最终的融合标准，而是制定和描述标准工作组需要对工业无线的哪些技术进行规范和标准化，以完成最终的融合标准。Technical 技术组的中国代表有重庆邮电大学的王恒、中国科学院沈阳自动化研究所的张晓玲以及北京科技大学的王沁等专家。

为了保障融合工作组的工作顺利开展，同时明确标准中技术专利的归属，从 2011 年下半年开始，Heathrow 融合工作组开始起草谅解备忘录（Memorandum of Understanding, MOU）。经过长时间的讨论和磋商，2011 年 12 月，Heathrow 融合工作组 MOU 形成初稿，开始征求各成员单位意见，之后各成员单位陆续表态同意。2012 年 2 月，Steco 总体组的各家单位代表在 MOU 上签字。