



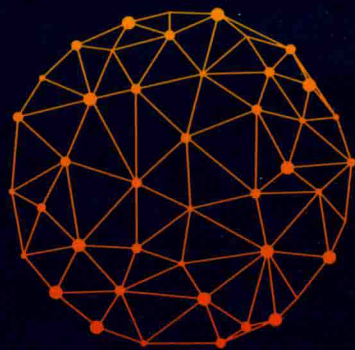
湖北省学术著作出版专项资金资助项目
智能制造与机器人理论及技术研究丛书

总主编 丁汉 孙容磊



工业无线传感器网络 抗毁性关键技术研究

李文锋 符修文◎著

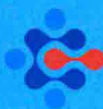


GONGYE WUXIAN CHUANGANQI WANGLUO
KANGHUIXING GUANJIAN JISHU YANJIU



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

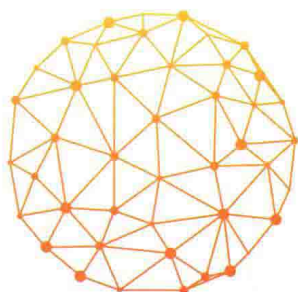


湖北省学术著作出版专项资金资助项目
智能制造与机器人理论及技术研究丛书

总主编 丁 汉 孙容磊

工业无线传感器网络 抗毁性关键技术研究

李文锋 符修文◎著



GONGYE WUXIAN CHUANGANQI WANGLUO
KANGHUIXING GUANJIAN JISHU YANJIU



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

内 容 简 介

无线传感器网络(WSNs)已成为各种工业物联网应用中的核心技术。全书共分为十章,主要针对工业无线传感器网络规模化应用的主要技术瓶颈——抗毁性问题,从复杂网络角度出发,对工业无线传感器网络抗毁性能进行系统深入的研究:网络拓扑演化与优化配置机制;负载-容量模型与优化策略;容错路由选择算法;故障检测与诊断方法;基于移动智能体的智能车间数据传输方案。最后,给出了抗毁性仿真测试平台和工程实验系统。本书可作为计算机、物联网、物流工程、机械制造及自动化等专业高校学生的参考用书,也可供从事工业物联网及复杂网络系统优化研究和从事工业系统控制及智能制造等领域工程开发的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工业无线传感器网络抗毁性关键技术研究/李文锋,符修文著. —武汉:华中科技大学出版社,2018.2

(智能制造与机器人理论及技术研究丛书)

ISBN 978-7-5680-3589-7

I. ①工… II. ①李… ②符… III. ①工业自动化控制-无线电通信-传感器-计算机网络-研究 IV. ①TB114.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 318986 号

工业无线传感器网络抗毁性关键技术研究

Gongye Wuxian Chuanganqi Wangluo Kanghuixing Guanjian Jishu Yanjiu

李文锋 著
符修文

策划编辑:俞道凯

责任编辑:刘 飞

封面设计:原色设计

责任校对:祝 菲

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:武汉市金港彩印有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:14

字 数:238 千字

版 次:2018 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:128.00 元



华中科技大学出版社

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



智能制造与机器人理论及技术研究丛书

专家委员会

主任委员 熊有伦（华中科技大学）

委 员（按姓氏笔画排序）

卢秉恒（西安交通大学）

朱 荻（南京航空航天大学）

阮雪榆（上海交通大学）

杨华勇（浙江大学）

张建伟（德国汉堡大学）

邵新宇（华中科技大学）

林忠钦（上海交通大学）

蒋庄德（西安交通大学）

谭建荣（浙江大学）

顾问委员会

主任委员 李国民（佐治亚理工学院）

委 员（按姓氏笔画排序）

于海斌（中国科学院沈阳自动化研究所）

王飞跃（中国科学院自动化研究所）

王田苗（北京航空航天大学）

尹周平（华中科技大学）

甘中学（宁波市智能制造产业研究院）

史铁林（华中科技大学）

朱向阳（上海交通大学）

刘 宏（哈尔滨工业大学）

孙立宁（苏州大学）

李 斌（华中科技大学）

杨桂林（中国科学院宁波材料技术与工程研究所）

张 丹（北京交通大学）

孟 光（上海航天技术研究院）

姜忠平（美国纽约大学）

黄 田（天津大学）

黄明辉（中南大学）

编写委员会

主任委员 丁 汉（华中科技大学） 孙容磊（华中科技大学）

委 员（按姓氏笔画排序）

王成恩（东北大学）

方勇纯（南开大学）

史玉升（华中科技大学）

乔 红（中国科学院自动化研究所）

孙树栋（西北工业大学）

杜志江（哈尔滨工业大学）

张定华（西北工业大学）

张宪民（华南理工大学）

范大鹏（国防科技大学）

顾新建（浙江大学）

陶 波（华中科技大学）

韩建达（中国科学院沈阳自动化研究所）

蔺永诚（中南大学）

熊 刚（中国科学院自动化研究所）

熊振华（上海交通大学）

作者简介



► **李文锋** 武汉理工大学二级教授，博士生导师。瑞典皇家工学院自治系统研究中心访问学者，美国新泽西理工大学和美国纽约大学访问教授。湖北省有突出贡献的中青年专家。中国人工智能学会智能制造专业委员会常务委员，中国机械工程学会机器人专业委员会委员，教育部高等学校物流管理与工程类教学指导委员会委员，IEEE 高级会员。主要研究方向为环境感知与系统协作控制，物流自动化与机器人技术，物流供应链仿真与规划，物联网与物流信息化技术，智能制造，人机工程与健康监护。先后承担国家自然科学基金项目、国家“十一五”“十二五”科技支撑计划项目、国家“863计划”项目。先后发表科研论文近300篇，专著6本，有100余篇次被三大检索（SCI、EI、ISTP）收录，获国家发明专利10多项。先后获得省部级科技进步一等奖2项、二等奖7项、三等奖1项。



► **符修文** 河南洛阳人，讲师，博士。博士毕业于武汉理工大学机械工程专业，现就职于上海海事大学物流科学与工程研究院。主要研究方向为工业无线传感器网络，已发表论文12篇，其中SCI/EI检索论文8篇，获得国家授权发明专利3项。



总序

近年来,“智能制造+共融机器人”特别引人注目,呈现出“万物感知、万物互联、万物智能”的时代特征。智能制造与共融机器人产业将成为优先发展的战略性新兴产业,也是中国制造 2049 创新驱动发展的巨大引擎。值得注意的是,智能汽车与无人机、水下机器人等一起所形成的规模宏大的共融机器人产业,将是今后 30 年各国争夺的战略高地,并将对世界经济发展、社会进步、战争形态产生重大影响。与之相关的制造科学和机器人学属于综合性学科,是联系和涵盖物质科学、信息科学、生命科学的大科学。与其他工程科学、技术科学一样,它也是将认识世界和改造世界融合为一体的大科学。20 世纪中叶,《Cybernetics》与《Engineering Cybernetics》等专著的发表开创了工程科学的新纪元。21 世纪以来,制造科学、机器人学和人工智能等领域异常活跃,影响深远,是“智能制造+共融机器人”原始创新的源泉。

华中科技大学出版社紧跟时代潮流,瞄准智能制造和机器人的科技前沿,组织策划了本套“智能制造与机器人理论及技术研究丛书”。丛书涉及的内容十分广泛。热烈欢迎专家、教授从不同的视野、不同的角度、不同的领域著书立说。选题要点包括但不限于:智能制造的各个环节,如研究、开发、设计、加工、成型和装配等;智能制造的各个学科领域,如智能控制、智能感知、智能装备、智能系统、智能物流和智能自动化等;各类机器人,如工业机器人、服务机器人、极端机器人、海陆空机器人、仿生/类生/拟人机器人、软体机器人和微纳机器人等的发展和应用;与机器人学有关的机构学与力学、机动性与操作性、运动规划与运动控制、智能驾驶与智能网联、人机交互与人机共融等;人工智能、认知科学、大数据、云制造、车联网、物联网和互联网等。

本套丛书将成为有关领域专家、学者学术交流与合作的平台,青年科学家茁壮成长的园地,科学家展示研究成果的国际舞台。华中科技大学出版社将与



施普林格(Springer)出版社等国际学术出版机构一起,针对本套丛书进行全球联合出版发行,同时该社也与有关国际学术会议、国际学术期刊建立了密切联系,为提升本套丛书的学术水平和实用价值,扩大丛书的国际影响营造了良好的学术生态环境。

近年来,各界人士、高校师生、各领域专家和科技工作者对智能制造和机器人的热情与日俱增。这套丛书将成为有关领域专家、学者、高校师生与工程技术人员之间的纽带,增强作者、编者与读者之间的联系,加快发现知识、传授知识、增长知识和更新知识的进程,为经济建设、社会进步、科技发展做出贡献。

最后,衷心感谢为本套丛书做出贡献的作者、编者和读者,感谢他们为创新驱动发展增添正能量、聚集正能量、发挥正能量。感谢华中科技大学出版社相关人员在组织、策划过程中的辛勤劳动。

华中科技大学教授

中国科学院院士

2017年9月



前言

伴随“中国制造 2025”战略的全面实施,我国工业正加速结构调整,淘汰落后产能,使应用信息化、智能化手段推进工业化转型升级的进程日益加快,一股机器人技术应用热潮正在到来。工业物联网作为驱动工业向网络化、智能化升级的重要引擎,它的出现为突破我国工业当前所面临的信息化、智能化发展瓶颈提供了新的机遇。由于具有成本低、组网便捷、布置简便、嵌入能力强、集成方便等优点,无线传感器网络(WSNs)已成为各种工业物联网应用中的核心技术,并将在这场工业信息化革命中发挥至关重要的作用。在工业场景中,由于受到规模巨大、网络异构、传递时延、有向传输等内在因素以及外部环境干扰因素的共同作用,无线传感器网络的工作环境面临着十分严峻的考验,其抗毁性问题已经成为制约工业物联网规模化应用的主要技术瓶颈。如何维持无线传感器网络长时间稳定可靠运行,提升其抗毁性,是国内外学者普遍关注的热点学术问题。当前围绕工业无线传感器网络抗毁性问题,尚有许多关键理论和技术问题待解决和完善。

本书依据网络构建流程从四个方面探讨工业无线传感器网络抗毁性能优化:① 在网络初始化阶段,通过对拓扑与容量参数进行优化配置,提升网络抵御随机失效与级联失效的能力;② 在网络运行阶段,通过路由选择优化,实现感知数据的安全可靠传输;③ 在网络维护阶段,通过引入故障检测与诊断机制,解决网络因节点故障状态信息缺失所导致的后期维护难题;④ 在此基础上,面向智能工厂中的移动智能体设备,将车间中的现场总线网络和无线传感器网络集成为一个数据分层传输网络,通过合理运用移动智能体载运数据来提高车间网络的数据传输能力和效率,从而进一步提高网络的抗毁性能。

本书主要的内容结构如下:

(1) 设计了一种工业无线传感器网络分簇拓扑演化机制。针对无线传感器



网络在复杂工业环境下的拓扑抗毁性难题,构建了一种分簇无标度局域世界演化模型,使所生成的网络拓扑贴近真实工业情形且容错性能较优。基于平均场理论证明了拓扑度分布符合幂律分布。考虑数据传输有向性,构造了一种用于评估网络负载均衡程度的有效测度——有向介数网络结构熵,并基于小世界网络理论提出了一种长程连接布局策略,有效解决了因无标度拓扑度分布异质性所引发的能量空洞问题。

(2) 提出了一种面向级联失效的工业无线传感器网络容量优化策略。针对工业无线传感器网络因遭受数据流量冲击所导致的级联失效问题,通过分析真实分簇网络动态负载变化规律,引入感知负载与中继负载概念,构建了一种参数可调的负载——容量模型,并分别研究了分簇无标度网络与分簇随机网络应对级联失效的抗毁性能。基于容量扩充方式,分别给出了扩容对象选择策略与新增容量分配策略,用于提升网络级联失效抗毁性能。

(3) 设计了一种工业无线传感器网络容错路由算法。考虑工业场景中的复杂环境因素(如温度、湿度等)对网络路由性能的影响,算法将工业无线传感器网络抽象为人工势场,且势场受环境场、能量场与深度场共同作用。通过构建权重可调的目标场,确保路由在满足低能耗与低延时等关键性能指标的基础上,使所建立的不相交多路径传输路由可动态规避危险环境区域,提升消息路由抗毁性能。

(4) 提出了工业无线传感器网络故障检测与诊断算法。为满足工业无线传感器网络对实时故障检测与低延时故障诊断的迫切需求,基于邻近传感器节点数据采集所表现出的趋势相关性,设计了一种分布式故障检测算法,以消除故障检测触发时刻对检测精度的影响。

(5) 提出了一种基于人工免疫理论的故障诊断算法,通过抗原分类、抗体库训练、抗体-抗原匹配等一系列步骤完成故障辨识。所提算法在具有较高诊断精度的同时,运算耗时明显缩短,满足工业场景对服务低延时的要求。

(6) 提出了一种基于移动智能体的数据分层传输方案。在该方案中,传感器节点收集到的数据首先传输到附近的现场总线节点,然后将现场总线节点中的数据划分为不同的优先级,高优先级数据通过现场总线传输到基站,低优先级数据通过移动智能体传输到基站。该方案可显著提升现场总线的数据传输效率,并明显改善传感器节点的使用寿命。

(7) 搭建了工业无线传感器网络抗毁性仿真平台,用于测试所提理论方法。针对工业无线传感器网络抗毁性仿真平台匮乏现状,结合工业无线传感器网络

性能明显受环境因素影响与抗毁性行为受事件驱动等特征,引入部署环境组件与事件生成器,构建了一个工业无线传感器网络抗毁性仿真平台。

(8) 选取典型工业场景,搭建了一个工业无线传感器网络实验系统,验证了所提理论方法的实际性能。实际测试结果表明:所提理论方法能够有效提升实际工业无线传感器网络系统的抗毁性能。

本书以解决工业无线传感器网络抗毁性问题为目标,研究用于提升网络抗毁性能的相关理论与方法,得到了国家自然科学基金(61571336)和湖北省自然科学基金(2014CFB875)的资助。在全书内容研究与编写过程中,武汉理工大学物流与机器人技术实验室的老师、博士生和硕士生们投入了很大的精力。大家广泛查阅当前工业物联网特别是工业无线传感器网络的国内外最新研究成果,以理论联系实际为准则,注重所提出理论的创新性与方法的实用性,使其能够用于解决实际工程问题。在全书的编写和订正过程中,博士生段莹和罗云做了大量工作,并具体撰写了第8章。

在本书的编写和出版过程中,得到了国内外许多专家、学者的热情帮助,也得到了华中科技大学出版社编辑们的大力支持。在此,我们一并致以由衷的感谢。由于时间紧迫,成稿仓促,难免挂一漏万,书中也难免存在不妥甚至错误之处,我们诚恳地希望各位专家读者不吝赐教与指正。这将是完善研究成果,推进工程应用的重要途径,对此我们表示诚挚的感谢。

作 者

2017 年 11 月



目录

第 1 章 概述 /1

- 1.1 工业物联网 /1
- 1.2 工业无线传感器网络 /2
- 1.3 工业场景对传感器网络性能的影响 /4
- 1.4 工业无线传感器网络抗毁性的定义 /5
- 1.5 研究趋势与存在的问题 /6
 - 1.5.1 研究趋势 /6
 - 1.5.2 存在的问题 /7
- 1.6 本书研究的目的与意义 /8

本章参考文献 /10

第 2 章 网络受损类型与抗毁性测度 /13

- 2.1 网络受损类型 /13
 - 2.1.1 随机性受损 /13
 - 2.1.2 被选择性受损 /13
 - 2.1.3 组织性受损 /15
- 2.2 受损起因 /16
 - 2.2.1 能耗失效 /16
 - 2.2.2 故障失效 /16
 - 2.2.3 攻击失效 /17
- 2.3 抗毁性测度 /19



2.3.1	非拓扑性测度	/20
2.3.2	拓扑性测度	/20
2.3.3	无线传感器网络抗毁性测度	/21
2.3.4	工业无线传感器网络抗毁性测度设计	/22
2.4	本章小结	/23
	本章参考文献	/23
第3章	抗毁性拓扑优化	/29
3.1	研究现状	/29
3.1.1	无标度网络	/30
3.1.2	小世界网络	/32
3.2	分簇无标度局域世界演化模型	/34
3.2.1	网络模型说明	/34
3.2.2	拓扑演化模型	/36
3.2.3	度分布理论分析	/37
3.2.4	仿真结果与分析	/41
3.3	基于小世界网络的长程连接布局策略	/51
3.3.1	有向介数网络结构熵	/51
3.3.2	长程连接布局策略	/54
3.3.3	仿真结果与分析	/56
3.4	本章小结	/61
	本章参考文献	/61
第4章	抗毁性容量优化	/65
4.1	研究现状	/65
4.2	分簇网络级联失效分析	/66
4.2.1	负载-容量模型	/66
4.2.2	负载分配策略	/67
4.2.3	级联失效抗毁性测度	/69
4.2.4	能量无关的分簇演化模型	/70
4.2.5	理论分析	/72
4.2.6	仿真结果与分析	/75

4.3 面向级联失效的节点容量优化策略 /79

4.3.1 扩容节点选择策略研究 /79

4.3.2 新增容量分配策略研究 /80

4.4 本章小结 /84

本章参考文献 /84

第5章 抗毁性路由优化 /86

5.1 研究现状 /86

5.1.1 多路径路由基本原理 /87

5.1.2 多路径路由典型算法 /88

5.2 势场建模方法 /90

5.2.1 环境场 /90

5.2.2 其他势场 /93

5.3 基于势场的不相交多路径容错路由算法 /94

5.3.1 算法流程说明 /94

5.3.2 消息与缓存列表格式 /95

5.3.3 主路径建立过程 /98

5.3.4 第2条路径建立过程 /101

5.3.5 退火机制 /103

5.3.6 数据分发策略 /104

5.3.7 路由维护机制 /104

5.4 仿真结果与分析 /105

5.4.1 仿真参数设定 /105

5.4.2 势场分析 /107

5.4.3 不同参数设定下路由性能分析 /111

5.4.4 不同算法的路由性能对比分析 /116

5.5 本章小结 /118

本章参考文献 /118

第6章 网络故障检测 /120

6.1 研究现状 /120

6.2 故障分类 /122



6.3 基于趋势相关性的故障检测算法 /123

6.3.1 趋势相关性 /124

6.3.2 邻域中值 /125

6.3.3 故障检测算法流程 /126

6.3.4 故障检测触发机制 /127

6.3.5 分簇故障检测算法改进 /130

6.4 仿真结果与分析 /130

6.4.1 仿真实验设置 /130

6.4.2 仿真实验结果 /131

6.5 本章小结 /136

本章参考文献 /137

第7章 网络故障诊断 /138

7.1 研究现状 /138

7.2 基于人工免疫理论的故障诊断相关概念 /139

7.3 基于人工免疫理论的故障诊断算法 /142

7.3.1 抗原分类 /142

7.3.2 抗体库训练 /143

7.3.3 抗体-抗原匹配 /145

7.3.4 系统实现流程 /145

7.4 仿真结果与分析 /146

7.4.1 仿真设置 /146

7.4.2 仿真结果 /147

7.4.3 诊断算法复杂度分析 /149

7.5 本章小结 /150

本章参考文献 /150

第8章 基于移动智能体的数据分层传输方案 /153

8.1 引言 /153

8.2 研究现状 /154

8.3 问题描述 /155

8.4 移动智能体调度方案设计 /158

8.4.1	算法变量描述	/159
8.4.2	非加工任务资源需求评估	/161
8.4.3	AGV 任务资源需求评估过程	/162
8.5	仿真结果与分析	/165
8.5.1	度量指标和初始值设定	/165
8.5.2	仿真结果	/166
8.6	本章小结	/168
	本章参考文献	/168
第9章	抗毁性仿真测试平台	/170
9.1	研究现状	/170
9.2	平台体系架构	/171
9.3	功能模块设计	/172
9.3.1	部署环境组件	/172
9.3.2	个体节点组件	/173
9.3.3	网络拓扑组件	/174
9.3.4	路由组件	/175
9.3.5	事件生成器	/176
9.3.6	事件调度中心	/176
9.3.7	数据静态统计与分析组件	/177
9.3.8	数据动态统计与分析组件	/178
9.3.9	静态/动态显示组件	/178
9.4	仿真流程设计	/178
9.5	用户界面设计	/179
9.6	节点故障与外部环境关联设定	/180
9.6.1	故障概率函数	/180
9.6.2	性能衰减函数	/181
9.7	平台性能测试	/182
9.7.1	对比性能测试	/182
9.7.2	抗毁性功能测试	/183
9.8	本章小结	/185



本章参考文献 /185

第 10 章 实验系统搭建与测试 /187

10.1 实验系统 /187

10.1.1 实验系统组成 /187

10.1.2 实验系统搭建 /189

10.2 实验分析 /190

10.2.1 网络拓扑性能测试 /190

10.2.2 容量优化性能测试 /195

10.2.3 路由性能测试 /197

10.2.4 故障检测性能测试 /199

10.2.5 故障诊断性能测试 /201

10.3 本章小结 /203

本章参考文献 /204



第 1 章 概述

1.1 工业物联网

当前全球主要工业化国家为构建全球制造业竞争新优势,无一例外地将工业生产制造智能化作为核心发展方向。如德国提出的“工业 4.0 战略”、美国提出的“先进制造伙伴计划”、中国提出的“中国制造 2025 战略”等。总体而言,尽管各国制造业的基础和特色各有不同,但提升制造业智能化水平的愿景与战略方向基本一致,其核心思想均是围绕现代工业生产的结构网络化、控制分散化、环境宜人化与系统集成化等基本特征,通过应用新一代信息技术与制造技术,实现生产过程智能化、制造资源协同化、制造流程柔性化,提升产品全生命周期服务智能化水平。因此,面对智能制造发展的迫切需求,需要更加智能、互联、协同的全新技术载体,以实现设备的泛在互联、数据集成管理与深度智能应用,在此背景下工业物联网应运而生。工业物联网是指在传统工业网络的基础上融合互联网、局域网、WSN 和现场总线网络等异构网络,将具有感知或者监控能力的各类器件、云计算与边缘计算、移动通信、实时通信等不断融入工业生产的各个环节的网络。简而言之,工业物联网就是利用统一的网络协议栈融合现有各种异构网络协议的一类混杂网络。它不仅具有网络协议转换的功能,而且可以从感知层网络采集到的大量数据中剔除冗余信息,进而利用云计算对网络层的数据进行处理^[1,2]。工业物联网可以大幅提升制造效率和信息透明度,改善产品质量,降低产品成本和资源消耗,最终实现传统工业的智能化。

作为物联网的一个重要子类,工业物联网将面临更为严苛的要求:

(1) 工业物联网有更严格的实时性和准确性要求。这也是工业物联网需要面对的技术难点之一。

(2) 工业物联网的工作条件较为复杂多变,干扰因素多。比如:高温、潮湿、油污、粉尘等环境因素,以及机械振动和电磁干扰等强物理干扰因素。因此,工