



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

信息化与工业化 两化融合
研究与应用

信息物理融合能源系统

管晓宏 赵千川 贾庆山 著
吴 江 刘 烺

 科学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

信息化与工业化两化融合研究与应用

信息物理融合能源系统

管晓宏 赵千川 贾庆山 吴江 刘炅 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书全面阐述了信息物理融合能源系统的基础理论、最新研究方法以及相关应用。信息物理融合能源系统是信息网络与能源电力物理系统高度融合和集成的结果,为能源系统的节能减排、优化运行提供了新的途径。信息物理融合能源系统主要由智能电网、企业能源系统、智能楼宇能源系统、智能家居能源系统等能源终端系统组成。本书结合当前最新的科学前沿、关键技术和应用需求,系统讨论了信息物理融合能源系统的体系结构、感知技术、优化理论、可再生新能源、需求侧响应、综合安全等内容。

本书可作为信息物理融合系统、能源电力系统、智能电网等相关领域的研究人员和工程技术人员的参考书,也可作为高等院校自动化、计算机、信息工程、电气工程、物联网等专业研究生和高年级本科生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

信息物理融合能源系统/管晓宏等著. —北京:科学出版社,2016

(信息化与工业化两化融合研究与应用)

ISBN 978-7-03-048408-6

I. ①信… II. ①管… III. ①信息技术-应用-物理学-研究 IV. ①O4-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 117769 号

责任编辑:姚庆爽 / 责任校对:蒋 萍

责任印制:张 倩 / 封面设计:黄华斌

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>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张:19 3/4

字数:390 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书编委会

顾问委员会 戴汝为 孙优贤 李衍达 吴启迪 郑南宁 王天然
 吴宏鑫 席裕庚 郭 雷 周 康 王常力 王飞跃

编委会主任 吴 澄 孙优贤

编委会副主任 柴天佑 吴宏鑫 席裕庚 王飞跃 王成红

编委会秘书 张纪峰 卢建刚 姚庆爽

编委会委员（按姓氏笔画排序）

于海斌（中国科学院沈阳自动化研究所）	张纪峰（中科院数学与系统科学研究院）
王 龙（北京大学）	陈 杰（北京理工大学）
王化祥（天津大学）	陈 虹（吉林大学）
王红卫（华中科技大学）	范 铠（上海工业自动化仪表研究院）
王耀南（湖南大学）	周东华（清华大学）
卢建刚（浙江大学）	荣 冈（浙江大学）
朱群雄（北京化工大学）	段广仁（哈尔滨工业大学）
乔 非（同济大学）	俞 立（浙江工业大学）
刘 飞（江南大学）	胥布工（华南理工大学）
刘德荣（中国科学院自动化研究所）	桂卫华（中南大学）
关新平（上海交通大学）	贾 磊（山东大学）
许晓鸣（上海理工大学）	贾英民（北京航空航天大学）
孙长银（北京科技大学）	钱 锋（华东理工大学）
孙彦广（冶金自动化研究设计院）	徐 昕（国防科学技术大学）
李少远（上海交通大学）	唐 涛（北京交通大学）
吴 敏（中南大学）	曹建福（西安交通大学）
邹 云（南京理工大学）	彭 瑜（上海工业自动化仪表研究院）
张化光（东北大学）	薛安克（杭州电子科技大学）

“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书序

传统的工业化道路,在发展生产力的同时付出了过量消耗资源的代价:产业革命 200 多年以来,占全球人口不到 15% 的英国、德国、美国等 40 多个国家相继完成了工业化,在此进程中消耗了全球已探明能源的 70% 和其他矿产资源的 60%。

发达国家是在完成工业化以后实行信息化的,而我国则是在工业化过程中就出现了信息化问题。回顾我国工业化和信息化的发展历程,从中国共产党的十五大提出“改造和提高传统产业,发展新兴产业和高技术产业,推进国民经济信息化”,到党的十六大提出“以信息化带动工业化,以工业化促进信息化”,再到党的十七大明确提出“坚持走中国特色新型工业化道路,大力推进信息化与工业化融合”,充分体现了我国对信息化与工业化关系的认识在不断深化。

工业信息化是“两化融合”的主要内容,它主要包括生产设备、过程、装置、企业的信息化,产品的信息化和产品设计、制造、管理、销售等过程的信息化。其目的是建立起资源节约型产业技术和生产体系,大幅度降低资源消耗;在保持经济高速增长和社会发展过程中,有效地解决发展与生态环境之间的矛盾,积极发展循环经济。这对我国科学技术的发展提出了十分迫切的战略需求,特别是对控制科学与工程学科提出了十分急需的殷切期望。

“两化融合”将是今后一个历史时期里,实现经济发展方式转变和产业结构优化升级的必由之路,也是中国特色新型工业化道路的一个基本特征。为此,中国自动化学会与科学出版社共同策划出版“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书,旨在展示两化融合领域的最新研究成果,促进多学科多领域的交叉融合,推动国际间的学术交流与合作,提升控制科学与工程学科的学术水平。丛书内容既可以是新的研究方向,也可以是至今仍然活跃的传统方向;既注意横向的共性技术的应用研究,又注意纵向的行业技术的应用研究;既重视“两化融合”的软件技术,也关注相关的硬件技术;特别强调那些有助于将科学技术转化

为生产力以及对国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信,有广大专家、学者的积极参与和大力支持,以及丛书编委会的共同努力,本丛书将为繁荣我国“两化融合”的科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

最后,衷心感谢所有关心本丛书并为其出版提供帮助的专家,感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助,感谢广大读者对本丛书的厚爱。

A stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to Sun Yizhang, the Chinese Academy of Engineering member mentioned in the text below.

中国工程院院士

2010年11月

前 言

信息物理融合系统是信息网络融入物理系统,在环境和状态感知基础上,集通信、计算和控制于一身的网络化系统,是孕育中的第四次工业革命的基础,也是我国信息化与工业化“两化融合”、“信息化带动工业化”的基础。本书围绕新型感知、传输、计算等信息技术应用于能源系统的优化和安全的主题,讨论如何通过可再生能源、可再生能源与传统能源、能源生产与需求等之间的配合协调,实现能源电力系统的安全节能优化。

本书首先从我国面临的能源环境严峻挑战出发,概述了从能源电力系统设计与运行的层面解决和改善能源环境问题的意义和可能性,介绍了信息物理融合系统以高度数字化、网络化、机器自组织为标志,论述了信息物理融合能源系统是信息网络与能源物理系统高度融合和集成的结果,也是能源电力系统规划和优化运行的基础。

本书包括四部分。第一部分主要介绍信息物理融合能源系统的典型结构和信息感知技术。其中第2章介绍了信息物理融合能源系统的组成,包括连接电源的智能电网和连接需求的企业能源系统、楼宇能源系统、家居能源系统等终端能源系统,简述这几类能源系统的典型结构,并且与传统能源电力系统的结构比较,讨论了信息物理融合的优势、信息物理融合能源系统的技术特征及挑战。

第3章介绍了信息物理融合能源系统信息感知框架。以无线传感器网络为代表的新一代智能感知与传感技术,为信息物理融合能源系统的大规模信息感知提供了经济高效和安全可靠解决方案,讨论感知气象环境、能源信息的示例和面临的挑战。

第二部分主要讨论不确定可再生新能源的随机特性和预测方法,接入电力系统面临的问题和解决方法。第4章以风能为例,介绍了可再生能源在未来能源系统中的发展前景,以及风能的随机特性对信息物理融合能源系统的影响,进而分析了风力气象信息和风电信息的感知、风电场群的发电功率的预测与分析,引入实时相关性的概念,用以分析风电场群发电功率的随机特性。

第5章介绍了电力系统发电优化调度的背景、重要性和确定性电源优化调度的混合优化数学模型与方法,分析了接入风能和太阳能的可再生新能源后,系统调度面临的发电不确定性新问题,讨论了随机优化的新方法,给出了基于实际系统的数值测试和验证实例。

第三部分包括第6章~第9章,主要分析了需求侧的控制和优化方法,包括高耗能企业、楼宇和电动汽车等。第6章介绍了能源密集型企业中多种能源系统的特点:结构复杂、相互耦合、不确定性,且其能源成本占生产成本中的比重较高。本章以钢铁企业为例,从企业能源系统的信息感知、实现能源系统与生产计划调度的协调优化方面阐述了企业能源系统中信息物理融合的作用。

第7章分析并讨论了楼宇能源系统中人员感知与估计的方法,包括基于进出事件特征估计的人员分布信息协同感知和基于异质信息融合的人员分布信息协同感知两种方法。人员信息感知与估计方法对于感知建筑内各个区域的人员分布信息,控制包括暖通空调、照明等在内的楼宇能源系统的节能减排,提高运行效率至关重要。

楼宇建筑能耗占社会总能耗的比例近40%,提高楼宇能源系统的效率,对于信息物理融合能源系统整体的节能减排具有极其重要的作用。第8章分析并讨论了楼宇能源系统终端设备的优化运行和基于微电网的新能源系统、终端设备、蓄电池系统及热电联产的楼宇能源系统联合优化运行。

第9章介绍了电动汽车和高耗能企业这两类典型柔性能源需求的控制与优化。针对电动汽车充电负荷需求,提出了车辆行驶行为特性模型和“最低费用-最小波动”的电动汽车充放电控制策略;针对高耗能企业内电力系统与煤气系统的关联运行,建立了高耗能企业电力-煤气耦合系统的产储耗一体化调度模型,在基于价格的需求响应机制下,综合协调负荷转移、自发电调度和煤气柜位调节,降低企业的总用电成本。

本书第四部分从网络可靠性和综合安全的角度讨论信息物理融合能源系统的安全稳定运行。第10章介绍了如何在异常情况下保持信息网络的连通性,从而提高信息物理融合能源系统的鲁棒性。对于一连通和不连通的信息网络,介绍了如何利用优化配置无线通信,实现系统的二连通并使得通信效率最高。对于部分节点受损失的信息物理融合系统,本章介绍最少资源的重构方法以实现网络重构。

第11章提出信息物理融合能源系统安全性不但是工程故障造成的物理安全(safety)问题,同时网络信息安全(security)的综合安全问题。本章介绍了实际故障数据与随机分支过程模型相结合分析故障连锁传播规模的方法,为应对大电网灾变情形下的潜在电网崩溃问题,提供了一个系统性的解决思路。针对电力系统状态估计的不良数据注入攻击,介绍了异常流量索引的智能电网信息-物理关联安全监控方法。针对物理融合能源系统的通信安全,介绍了基于通信信道物理特征的通信加密方法。

本书讨论国际学术前沿的重要问题,介绍关键技术及应用,对信息物理融合系统、能源电力系统、智能电网等相关领域的研究人员具有重要参考价值,也可以作

为相关学科研究生选择研究课题的入门书。

作者感谢科学出版社姚庆爽编辑的宝贵意见和大力支持,同时感谢西安交通大学电子与信息工程学院智能网络与网络安全教育部重点实验室博士生李轩协助撰写了第5章的5.4节,研究生程兴瑞、顾运、桂宇虹、季建廷、李轩、刘坤、刘杨、苏曼、孙鸿、孙亚楠、唐哲、田决、姚娜娜等对本书细心校对。

作 者

2016年1月于西安交通大学

目 录

“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 我国能源环境问题的严峻挑战	1
1.2 信息物理融合系统概述	3
1.3 信息物理融合能源系统概述	5
1.4 本章小结	8
参考文献	8
第 2 章 信息物理融合能源系统的典型结构	11
2.1 智能电网	11
2.1.1 智能电网的特点	11
2.1.2 智能电网的结构	12
2.1.3 智能电网的技术特征	12
2.2 企业能源系统	14
2.3 楼宇能源系统	17
2.3.1 楼宇能源系统的结构	17
2.3.2 楼宇能源系统的节能优化问题及挑战	19
2.4 本章小结	21
参考文献	21
第 3 章 信息物理融合能源系统的信息感知	23
3.1 信息物理融合能源系统信息感知框架	23
3.2 气象环境信息感知	26
3.2.1 气象环境信息感知与获取	26
3.2.2 数值天气预报	27
3.3 能源信息感知	28
3.3.1 能源管理系统	28
3.3.2 高级测量体系	28
3.3.3 楼宇能耗及相关信息感知	32
3.4 本章小结	37

参考文献	37
第4章 不确定可再生新能源的预测与随机特性	39
4.0 本章符号列表	39
4.1 风电并网对电网调度运行的影响	41
4.2 风力气象信息与风电感知	42
4.2.1 风力气象信息感知	43
4.2.2 风电感知	45
4.3 基于气象模型与感知的风电概率预测	48
4.3.1 风电功率预测方法介绍	48
4.3.2 基于气象模型和风电感知的风电场群功率概率预测	49
4.3.3 数值算例	54
4.4 风电场群总体发电随机特性分析	56
4.4.1 风电场群发电功率实时相关性分析与应用	56
4.4.2 数值算例	59
4.5 本章小结	62
参考文献	62
第5章 包含可再生新能源的电力系统发电优化调度	66
5.0 本章符号列表	66
5.1 电力系统调度简介	68
5.2 电力系统的确定性调度模型	69
5.3 电力系统的确定性优化调度方法	70
5.3.1 拉格朗日松弛法	71
5.3.2 通用混合整数规划方法	73
5.4 含可再生新能源的随机优化调度模型与方法	77
5.4.1 含可再生能源的可行近似期望优化调度模型	78
5.4.2 机组开关机状态可行的充要条件	79
5.4.3 基于列合并方法的可行近似期望模型求解	81
5.5 本章小结	82
参考文献	82
第6章 企业能源系统的运行优化	85
6.0 本章符号列表	85
6.1 企业能源管理系统与制造执行系统概述	87
6.1.1 企业能源管理系统	87
6.1.2 企业制造执行系统	88

6.2 企业多能源系统	88
6.2.1 高耗能企业多能源系统	88
6.2.2 企业多能源系统运行优化的研究	89
6.2.3 企业网络化能源系统结构	90
6.2.4 企业多能源供求特性	91
6.2.5 多能源系统调度问题分析与简化	93
6.3 企业多能源系统优化调度	94
6.3.1 多能源联合优化调度模型	94
6.3.2 多目标网络化多能源联合调度	98
6.4 企业多能源系统算例分析	100
6.4.1 算例参数数据设定	100
6.4.2 确定性多能源短期调度模型算例分析	102
6.5 本章小结	104
参考文献	104
第7章 楼宇能源系统的人员信息感知与估计	106
7.0 本章符号列表	106
7.1 与楼宇能耗相关的人员分布信息获取	107
7.2 楼宇驻在人员的估计	108
7.3 基于进出事件特征估计的人员分布信息协同感知	108
7.3.1 问题模型	108
7.3.2 基于离开时间间隔的累积误差估计方法	111
7.3.3 人员总数守恒约束下的误差推送方法	112
7.3.4 算法设计	114
7.3.5 算例测试	116
7.4 基于异质信息融合的人员分布信息协同感知	120
7.4.1 问题模型	120
7.4.2 信息融合方法	122
7.4.3 算例测试	125
7.4.4 融合优势证明与相关性对融合估计精度的影响	131
7.5 本章小结	135
参考文献	135
第8章 楼宇能源系统的控制与优化	138
8.0 本章符号列表	138
8.1 楼宇能源系统节能优化关联模型	140

8.1.1 终端负荷及能耗	140
8.1.2 能源供给端	143
8.2 楼宇能源需求终端的节能优化	144
8.2.1 系统终端设备模型	144
8.2.2 联合优化问题的求解方法	153
8.2.3 算例测试	160
8.3 楼宇能源供应系统的节能优化	169
8.3.1 能源供给端的机理模型	170
8.3.2 针对所建立模型的两种求解方式	173
8.3.3 数值算例	176
8.4 本章小结	187
参考文献	187
第9章 能源系统的需求控制与优化	189
9.0 本章符号列表	189
9.1 能源电力系统需求响应概述	191
9.1.1 基于价格的需求响应	192
9.1.2 基于激励的需求响应	192
9.2 柔性移动能源需求的模型与特性	193
9.3 柔性(电动汽车)能源需求控制与优化	196
9.3.1 充电控制策略分类	196
9.3.2 “最低费用-最小波动”优化模型	197
9.3.3 实验算例	199
9.4 企业多能源系统的需求响应	203
9.4.1 问题简介	203
9.4.2 日常调度中的用电成本	206
9.4.3 负荷模型	207
9.4.4 煤气柜柜位控制	208
9.4.5 煤气调度和自发电调度的耦合关系	210
9.4.6 优化问题目标函数	210
9.4.7 模型求解	210
9.5 楼宇多能源系统的需求响应	213
9.5.1 系统模型	213
9.5.2 求解方法	219
9.5.3 数值测试	222

9.6 本章小结	226
参考文献	227
第 10 章 信息物理融合能源系统的网络重构	231
10.0 本章符号列表	231
10.1 网络化系统拓扑鲁棒性与重构概述	232
10.2 混合网络拓扑重构模型	233
10.2.1 重构资源配置问题	234
10.2.2 拓扑重构策略问题	234
10.3 混合网络拓扑重构的优化方法	235
10.3.1 最优配置问题解的属性	237
10.3.2 拓扑重构资源最优配置算法	241
10.3.3 拓扑重构策略的优化	245
10.4 拓扑重构算法的数值实验	246
10.4.1 可重构资源优化配置的实验	246
10.4.2 拓扑重构策略实验	248
10.5 本章小结	250
参考文献	250
第 11 章 信息物理融合能源系统的综合安全	253
11.0 本章符号列表	253
11.1 信息物理融合能源系统综合安全概述	254
11.1.1 智能电网的网络信息安全问题	254
11.1.2 智能电网信息安全监控	257
11.2 故障连锁传播与电网崩溃	260
11.2.1 故障连锁传播问题	260
11.2.2 故障连锁传播问题研究面临的挑战	261
11.2.3 故障连锁传播问题的研究方法概述	262
11.2.4 研究方法举例:预备知识(分支过程)	263
11.2.5 利用分支过程和实际数据估计故障连锁传播范围	263
11.3 电网解列问题的系统化方法	265
11.3.1 电网解列问题的形式描述	265
11.3.2 电网解列问题的 NP 难性	267
11.3.3 预备知识:布尔表达式及其 OBDD	268
11.3.4 电网解列面搜索问题的约束条件	270
11.3.5 基于验证的电网解列面搜索算法	271

11.4 基于信息物理融合的网络信息安全监控.....	272
11.4.1 电力系统状态估计与不良数据注入攻击	272
11.4.2 异常流量索引的智能电网信息-物理关联安全监控	278
11.5 信息物理融合系统的数据安全.....	285
11.5.1 电力系统数据安全技术	285
11.5.2 基于数据包重传的智能电网动态密钥生成方法	287
11.6 基于信息-物理关联的综合能源系统安全面临的挑战	292
11.7 本章小结.....	293
参考文献.....	294
索引.....	297

第 1 章 绪 论

本章提要

本章从我国能源环境面临的严峻挑战出发,概述了从能源电力系统设计与运行的层面解决能源环境问题的意义和可能性。介绍了信息物理融合系统是以生产高度数字化、网络化、机器自组织为标志的第四次工业革命的基础。由此引入的信息物理融合能源系统,作为一类信息物理融合系统,是信息网络与能源物理系统高度融合和集成的最新发展,由供应能源的智能电网和企业能源系统、智能楼宇能源系统、智能家居能源系统等多能源终端系统组成,为能源系统的节能优化提供了新途径。

1.1 我国能源环境问题的严峻挑战

能源与环境问题事关人类社会的生存和可持续发展。完全消耗煤、石油等化石能源的能耗模式难以为继。优化能源结构,充分利用多种能源特别是可再生能源,协调优化能源生产与需求,实现能源产需过程整体的节能减排,是满足新世纪日益增长的能源需求的必由之路^[1-3]。

近年来,我国很多地区都出现了大面积、持续性的严重雾霾污染,所引起的环境危机直接关系到人民的生存环境。在系统整体层次上优化能源结构、优化能源系统运行、节能减排,是减少空气污染排放的重要途径之一。

我国一次能源的 70% 是燃煤,发电用煤占我国原煤消耗量的 50% 左右^[4]。燃煤火力发电的生产过程是煤燃烧的能源转换过程,也是我国空气污染物和温室气体排放的主要源头之一。燃煤发电的节能减排能够从源头上减少工业生产的能耗和污染。

电力系统发电机组的节能优化调度能够保证以最节能的机组组合方式生产电能。获得准确的发电机组能耗特性是发电节能调度的基础。由于我国发电企业目前缺乏实时能耗曲线计算的关键参数测量技术和动态计算模型,实时能耗特性也很难精确获取。因此,即便火电机组实施了系统节能优化调度也很难真正达到节能效果。

我国化工、建材、黑色金属冶炼、有色金属冶炼四大高耗能行业用电量占全社

会总用电量的近三分之一,单位产值的能源与国际先进水平相距甚远^[5],不仅工艺过程的节能潜力很大,优化运行企业能源系统也能够取得节能减排的巨大效益。

企业生产环境控制通常是高耗能的过程。许多对环境温度、湿度和空气质量有严格要求的过程如喷涂、焊接等需要严格的生产环境控制,需要消耗大量能源。已有研究表明,根据企业所处的气候和生产工艺条件,合理调度控制系统、协调生产调度和生产环境控制系统(包括厂房、空调系统、余热利用环节等),可带来显著的节能效果和可观的经济效益。

由于电能生产无法全部经济存储,生产量必须与系统需求或负荷实时匹配。同时,电能生产能耗与生产量之间具有非线性关系,系统需求的峰值与低谷之间电能生产的单位能耗可能相差2倍以上。因此,在不改变企业生产工艺的情况下,将企业生产调度、生产环境控制与能源生产系统运行特别是电力系统的运行协调配合、优化调度,或者说优化控制与调度能源需求,就能够在满足企业产品生产需求下(如交付期限、生产效率等),大大降低企业用能成本,相当于大大降低电力系统的一次能源能耗。

充分利用水能、风能、太阳能等可再生能源并与传统化石能源协调配合使用,是满足能源需求、保护人类生存环境的必由之路。风能、太阳能等可再生新能源大规模接入电力系统是历史的必然,也已经成为现实。2015年中国风电累计装机容量达到1.29亿kW,占全部发电装机容量的8.6%;风电发电量1863亿kWh,占全部发电量的3.3%。

我国太阳能资源也十分丰富,太阳能光伏发电虽起步较晚,但增长迅速。2006年以来,太阳能发电装机容量年增长速度均超过一倍,远超国际平均水平。近两年“太阳能屋顶计划”“金太阳”等应用示范工程以及一些大型光伏发电示范项目的实施,大大推进了太阳能的大规模利用,拟建的光伏发电项目总量超过9GW^[6]。

风能、太阳能等可再生新能源的共同特点是产能的不确定性,即能量的产生完全由风速、光照强度等自然条件决定,无法大规模经济存储。尽管全球的风能、太阳能资源总量足以满足人类全部的能源需求^[7,8],但由于自然环境状态的高度不确定性,且预测困难,很难按传统的方法在保证电网安全稳定运行的前提下,有效消纳新能源的大规模接入来满足实时需求。根据可再生新能源生产的特性,与水电、火电等传统能源恰当配合,对系统进行综合优化调度,能够显著提高对可再生新能源的消纳能力,从而大幅降低电力生产中化石燃料的消耗。

为提高可再生新能源的利用率,降低其不确定性对电网造成的影响,目前最可行的有效方法是规划可再生新能源与可存储的传统水电和抽水蓄能配合或“打包”使用^[9,10],存储消纳一部分随机变化的可再生能源,以便按照系统需求控制能源生产,同时为系统提供备用。然而,水电的生产涉及水资源的利用,要同时考虑防洪、输水、灌溉、航运、环保、生态等多个目标 and 需求。水电与其他能源系统协调配合、