



中国自动化学会通讯

COMMUNICATIONS OF CAA

主办：中国自动化学会

<http://www.caa.org.cn>

E-mail: caa@ia.ac.cn



能源互联系统

ISSN 2151-335X



6 915920 700067

2014年6月

第2期

第35卷 总第175期

Contents



第35卷 第2期 总第175期 2014年6月

www.caa.org.cn

主办单位：中国自动化学会



主编的话

能源互联系统是一种构建在可再生能源发电和分布式储能装置基础上的新型电网结构，是智能电网的发展方向。大力发展智能电网和智能微网，优化能源使用，有利于可再生能源的利用，推动节能减排。为了应对全球能源和环境挑战，面对即将到来的“第三次工业革命”，探索适合我国未来发展的能源互联系统具有十分重大的现实意义。

为促进自动化领域的研究人员了解能源互联系统的最新研究进展，《中国自动化学会通讯》2014年的第二期专刊关注的主题是能源互联系统。本期专刊共包含了5篇优秀的文章，在此向为本专刊贡献稿件的各位专家学者表示衷心的感谢。

华北电力大学的刘向杰教授等综述了互联电力系统数学模型和负荷频率控制的理论研究和应用现状，并分析了分布式预测控制在带有可再生间歇新能源的电力系统中的应用前景。重庆大学的宋永端教授等阐述了多智能体系统的协同控制在微网中的应用进展，并结合现有研究情况，提出了多智能体系统在微网中有待解决的几个问题。南京邮电大学的岳东教授等分析了现有电力信息物理系统的安全现状、安全需求、安全威胁以及相应的防护措施，介绍了电力信息物理融合系统的静态和动态模型的建模方法以及其综合控制策略。沈阳工程学院的张铁岩教授等对近年来含分布式电源的配电网故障诊断理论和方法的研究进行了调查分析，总结了含分布式电源的配电网主要信息处理、建模和典型故障诊断方法，指出了含分布式电源的配电网故障诊断发展趋势。东北大学的孙秋野副教授等介绍了能源互联系统的研究背景和现状，分析了能源互联系统的基础框架，阐述了能源互联系统的关键技术及电力电子设备的未来发展方向。

可再生能源的大量利用是电力发展的趋势，能源互联系统在降低能耗、提高电力系统可靠性和灵活性等方面具有巨大潜力。能源互联系统的发展尚处于起步阶段，希望这期专刊能够起到抛砖引玉的作用，推动我国在能源互联系统领域的创新和发展。

刘向杰 杨志达

专题

- 4 互联电力系统的负荷频率控制——现状与挑战
- 15 多智能体协同控制理论在微电网中的应用
- 20 电力信息物理融合系统安全及建模控制技术综述
- 27 含分布式电源的配电网故障诊断综述
- 32 能源互联系统的基础架构及关键技术
- 40 基于用户关联关系的微博数据采集系统设计与实现

译文

- 47 智能电网取证：应用、挑战及未解决的问题

新闻

- 54 2014中国科协学术建设发布会召开
- 54 中国自动化学会十届三次秘书长工作会议在京召开
- 55 中国自动化学会十届三次理事长、十届四次秘书长工作会议在京召开
- 55 学会组织4个研发成果项目参加津洽会
- 56 宁波市科协党组书记、主席杨志达一行五人访问我会
- 57 中国自动化学会2014年全国秘书长工作会议在承德召开

本刊声明

为支持学术争鸣，本刊会登载学术观点彼此相左的不同文章。来稿是否采用并不反映本刊在学术分歧或争论中的立场。每篇文章只反映作者自身的观点，与本刊无涉。

会员园地

- 58 成都自动化研究会第七次会员代表大会暨“两化融合”创新论坛隆重召开
- 60 中国自动化学会发电自动化专业委员会成立大会在浙江绍兴召开
- 61 控制理论专委会主办的第六届控制科学与工程前沿论坛在承德召开
- 62 第七届ABB杯全国自动化论文大赛正式启动
- 63 第三届全国技术过程故障诊断与安全性战略研讨会成功召开
- 64 江西省自动化学会第六次会员代表大会在南昌大学召开
- 64 “2014全国大学生嵌入式物联网设计大赛山东省分区赛”暨“第二届山东省大学生嵌入式物联网设计大赛”成功举行
- 65 菲尼克斯智能未来，自动化成就梦想——“I Love Control”中国自动化大奖赛正式拉开帷幕

党建强会

- 66 中国自动化学会党支部再次获得中国科协2014年“党建强会”项目
- 66 中国自动化学会党支部组织参加2014年天津投资贸易洽谈会

刊名题字：宋 健

编辑：中国自动化学会办公室

地址：北京市海淀区中关村东路95号 邮编：100190

电话：(010)8254 4542 E-mail:caa@ia.ac.cn

传真：(010)6252 2248 http://www.caa.org.cn

编辑委员会

荣誉主编

戴汝为 中国科学院院士、中国科学院自动化研究所研究员
 孙优贤 中国工程院院士、浙江大学教授
 郑南宁 CAA理事长、中国工程院院士、西安交通大学教授

主 编

刘德荣 CAA常务理事、中国科学院自动化研究所研究员、复杂系统管理与控制国家重点实验室副主任

副主编

陈俊龙 CAA常务理事、澳门大学教授
 张化光 CAA理事、控制理论专业委员会委员、东北大学教授

专题栏目

主 编

周东华 CAA副理事长、清华大学教授

编 委

蒋昌俊 CAA常务理事、同济大学教授
 戴国忠 计算机图形学与人机交互专业委员会主任委员、中国科学院软件研究所研究员
 张丽清 CAA荣誉理事、生物控制论与生物医学工程专业委员会主任委员、上海交通大学教授

观点栏目

主 编

孙彦广 CAA常务理事、副秘书长、冶金自动化研究设计院教授级高工

编 委

范 铠 CAA理事、仪表与装置专业委员会主任委员、上海工业自动化仪表研究院教授级高工
 陈宗海 CAA理事、系统仿真专业委员会主任委员、中国科技大学教授
 张文生 CAA理事、计算机图形学与人机交互专业委员会秘书长、中国科学院自动化研究所研究员

新闻栏目

主 编

陈 杰 CAA副理事长、北京理工大学教授

编 委

熊范纶 CAA理事、农业知识工程专业委员会主任委员、中国科学院合肥物质科学研究院研究员
 李艳华 CAA理事、遥测遥感遥控专业委员会主任委员、中国航天科技集团公司第704研究所研究员
 郝 宏 系统复杂性专业委员会秘书长、中国科学院自动化研究所高级工程师

译文栏目

主 编

刘 民 CAA理事、名词委员会主任委员、清华大学教授

编 委

王庆林 北京理工大学教授

会员栏目

主 编

张 楠 CAA常务理事、常务副秘书长、办公室主任

编 委

孙长银 CAA常务理事、副秘书长
 王兆魁 CAA理事、平行控制与管理专业委员会秘书长、清华大学副教授

互联电力系统的负荷频率控制 ——现状与挑战

刘向杰¹, 张怡^{1,2}

1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206

2. 河北联合大学轻工学院, 唐山 063000

摘要: 过去40年来, 互联电力系统负荷频率控制 (Load Frequency Control, LFC) 的理论和技术的都得到了长足的发展, 但是间歇性可再生能源并网发电不断增长对互联电力系统的稳定提出了更高的要求, 现有的负荷频率控制理论和技术仍面临着巨大挑战。本文全面回顾了电力系统数学模型和电力系统负荷频率控制的理论研究和应用现状, 分析了现有控制理论和技术存在的局限性, 提出需要加强针对分布式互联电力系统的数学模型、控制算法和稳定性研究。简要综述了分布式预测控制理论与应用研究的新动向, 并指出了分布式预测控制在带有可再生间歇性可再生能源的电力系统中应用前景。

关键词: 负荷频率控制, 互联电力系统, 分布式预测控制

引言

负荷频率控制 (Load Frequency Control, LFC) 的研究始于上世纪70年代, 研究对象从最初的单个机组研究发展成为电力市场环境下的大规模多区域互联电力系统。负荷频率控制的任务是在电力系统负荷随机变化以及扰动情况下, 保证频率偏差维持在一个稳定的区间内; 同时使得区域间的联络线交换功率维持在计划值, 并实现在线经济负荷分配。基于此目标, LFC构造有效的控制策略使得负荷频率的控制信号 (区域控制偏差, Area Control Error, ACE) 在有限时间内趋近于零。有关LFC问题的研究, 国际控制、能源领域的许多重要期刊都刊登了综述文章, 在

近十年较为著名的是H.Shayeghi等刊登在Energy Conversion and Management上的一篇综述文章Load frequency control strategies: A state of the art survey for the researcher^[1]。此外, 最新的文章A literature survey on load frequency control for conventional and distribution generation power systems^[2]从传统电力系统和分布式电力系统角度分别展开综述。概括而言, 传统的控制方法如自适应和变结构控制方法、鲁棒控制方法以及基于人工智能的神经网络、模糊逻辑等控制算法由于其良好的非线性性能在传统电力系统LFC中能获得较好的动态性能。LFC问题概述如图1所示。

近年来, 包括风电、太阳能等间歇性可再生能源发展较快, 如图2所示。间歇性可再生新

基金项目: 国家自然科学基金 (60974051, 61273144) 资助; 北京市自然科学基金 (4122071) 资助

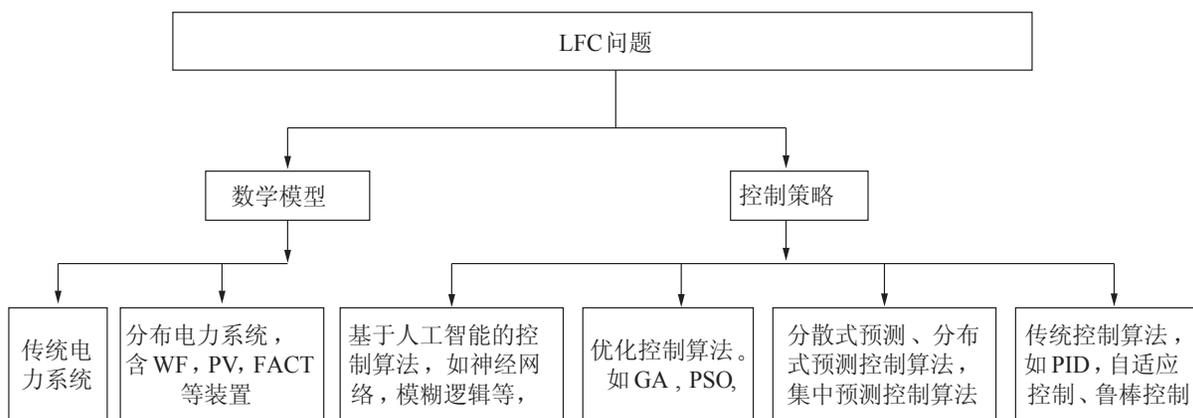


图1 LFC问题概述

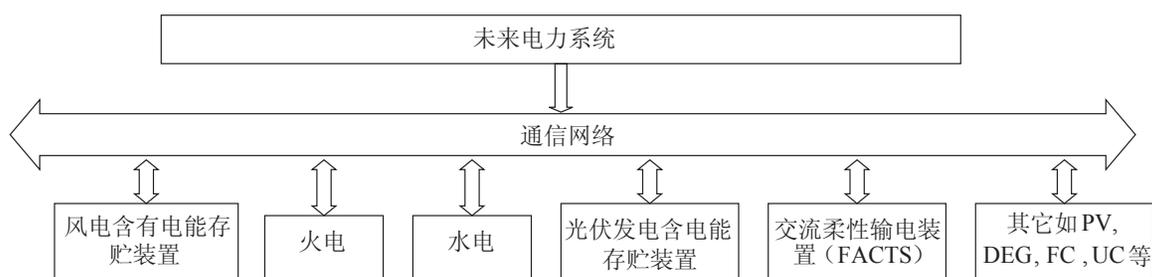


图2 未来电力系统构成

能源介入会引起电网功率的波动。另一方面，未来电力系统中将大量采用柔性交流传输系统装置(FACTS)，从而提高经济和安全性能。因此，在保证互联电力系统稳定的前提下，同时要提高电力市场效率，降低生产成本，这必然对负荷频率控制提出更高的要求。由此，互联电力系统的LFC已经不单单是控制问题，而是控制和经济相结合的问题。与此同时，通常需要满足多种约束条件，如发电机变化速率(GRC: Generation Rate Constraint)，阀门非线性约束等，还要考虑实现以减少机组疲劳和磨损为核心的经济目标等约束，这对负荷频率控制提出了新的挑战。现有的大多数先进控制策略，往往仅考虑控制的性能，改善系统的动态响应，提高LFC控制品质，而对控制的成本和经济性则较少顾及。模型预测控制作为一种优化控制策略，以及其处理复杂约束优化控制问题的能力，在大型互联电力系统中的应用

潜力巨大。本文将综述传统电力系统的LFC理论及应用现状，分析目前控制理论应用于分布式电力系统的局限性，综述分布式预测控制的理论和应用研究，并对分布式预测控制算法在含有可间歇新能源多区域互联电力系统负荷频率预测控制中未来可能的研究应用提出若干看法。

1 现有电力系统数学模型和存在的问题

电力系统是一个复杂的且包含非线性动态特性的大型互联系统。文献[3]中给出了互联电力系统的多种形式数学模型，包括集中式数学模型，不考虑区域间互联的分散数学模型，含有区域间耦合的分布式数学模型。文献[4]对互联电力系统发展和目前的研究现状做了完整的综述，目前大量的研究都集中在线性模型如单区域^[5-10]，两区

域^[11-13]，三区域^[14-20]，四区域^[21-25]等，各个区域由水电机组、火电机组、再热式火电机组和核电机组等形式组成。文献[7]中给出了单个区域中包含水电、再热式火电以及核电的电力系统数学模型。文献[10]中分析的电力系统：包括由两个水电机组和两个火电机组、一个水电机组和一个火电机组混合组构成的两区域电力系统。文献[16]研究了包括两个再热式火电机组和一个水电机组三个区域互联电力系统。文献[21]中研究四区域互联电力系统包含两个火电机组和两个水电机组。由于电力系统中存在相当数量的阀门非线性和GRC环节，因此线性系统模型显然不能反应真实的电力系统的响应性能。文献[26-27]研究GRC约束对系统的影响，并分别给出电力系统连续数学模型和离散数学模型。在电力市场环境下，集中模型不再适用。文献[28]综述了电力市场下的互联电力系统负荷频率控制。文献[29]研究在解除管制条件下电力系统LFC问题，提出了配电公司参与矩阵。基于此，文献[30]建立了解除管制环境下电力系统广义动态模型。文献[31]分别研究在电力市场条件下两区域电力系统模型，三区域电力系统模型和四区域电力系统模型。以上研究多为传统的多区域互联电力系统集中模型，随着风能，太阳能等可再生新能源的介入，分布式电力系统为可再生能源接入电网从而实现远程电力供应、降低经济成本提供可靠保证。分布式电力系统数学模型包括风机，光伏设备以及FACT装置等^[32]。文献[33-40]提出了混合能源发电以及能量存储系统数学模型，其中包括风电机组，光伏装置，柴油发电机等发电机组以及电池等能量存储装置。

互联电力系统的分散模型和分布模型都得到了广泛的研究，大多数控制算法依赖于数学模型，而可再生间歇能源的介入使得目前数学模型的建立依然存在局限：

1) 从现有的电力系统数学模型组成来看，主要还是集中于一个区域含有一个机组，因此大大

限制了其实际中的应用推广

现有的电力系统数学模型一般形式为多区域互联，且每个区域只含有一个发电机组，即使如此，数学模型的维数相当高，由此涉及很大的计算量。而实际的电力系统中，每个区域不只含有一个机组。文献[13]提出混合建模方法，但是该文中只给出了火电、水电以及燃气机组的方框图形式，具体的数学模型以及细节均未涉及。

2) 从电力系统数学模型形式来看，主要限于线性过程

现有的电力系统数学模型主流是线性的，且大多数控制算法也是基于线性数学模型的，电力系统中的两个突出非线性环节：GRC和阀门死区在数学模型中被当作约束进行处理。文献[27]采用优化控制策略解决了带有阀门非线性和GRC约束的两区域再热式火电机组LFC问题。其中阀门非线性以及GRC约束作为优化问题求解中的状态约束。

3) 从电力系统数学模型发展来看，主要还是传统能源

现有的电力系统数学模型多数由火电，再热式火电，水电以及核电等比较成熟的参数模型。风电机组、太阳能和其他可再生间歇能源的介入、柔性交流输电装置（FACTS）的使用，给传统建模方法带来本质的困难。在同一区域内，可再生间歇能源与传统能源形式可一起建立数学模型，文献[38]研究了混合能源发电机组构成的互联电力系统LFC控制问题。到目前为止，含有可再生间歇能源的多区域互联系统的LFC问题仍处于起步阶段^[40]。

综上所述，实际的非线性电力系统常常采用降阶模型来近似。但是，这些模型只在特定的工作范围内有效，不同的模型需要不同的工作环境，或者控制系统要采用新的系统模型参数。电力系统的复杂性和多变量的特性，以及各种新能源和FACTS的加入，这都是建立互联电力系统数

学模型亟待解决的新问题。

2 互联电力系统LFC控制的有效方法

近十几年,国际上围绕着自动发电控制展开广泛研究。在经典控制方法的基础上,不断推出自适应和变结构控制方法、鲁棒控制方法、智能控制策略和模型预测控制等先进控制策略。

1) 经典控制方法

传统的负荷频率控制(Load Frequency Control, LFC)中最为经典的是PID控制。该方法直接、简单,便于实际执行,所设计的控制器可获得零稳态频率偏差和区域控制偏差,但是系统的动态性能差,特别是存在参数变化和非线性效应时,系统频率偏差较大,调节时间较长^[41,42],难以满足系统的动态性能要求。

文献[43, 44]最早提出以现代最优控制理论为基础的负荷频率控制方法。该方法要求所有状态变量能够产生反馈信号。如果系统的状态向量是区域可观测的,这一要求是能得到满足的。但是,即使可观测条件满足,由此构造的带有观测器的控制器非常复杂,因此,这些方法难以适应状态变量较多的大型互联电力系统。

2) 自适应和变结构控制策略

自适应控制具有对过程参数的变化和对未建模部分的动态过程不敏感等特点,因而被引入电力系统自动发电控制中来解决系统参数变化的问题。文献[45]提出的自适应性控制器,采用比例积分进行调整以满足超稳定性条件要求。文献[46]提出了一个多变量自适应控制器,通过定义一个控制变量约束的代价函数,对其进行最小化求解,满足了控制量的约束。文献[47]采用具有动态参数的频率偏差与功率偏差加权和指标,提出了一种改进的双路自校正负荷-频率控制器,由于引入了具有动态权值的指标和双路自校正技术,该设计

优于其他控制方案。文献[48]利用自适应模糊策略优化PI控制并设计了最优控制器,虽然该控制器取得了理想的效果,但该控制算法较为复杂并且要求对系统模型进行在线辨识,这在实际电力系统中较难实现。

在电力系统负荷频率控制中,由于负荷是经常变化的,所以系统中的参数、扰动难以精确获得,因此,将变结构控制理论应用于电力系统的负荷频率控制器的设计也是十分必要的。80年代初,变结构系统(VSC: Variable Structure Controllers)应用到单区域和多区域的负荷频率控制器的设计中,有效地控制了系统的暂态响应^[49]。但是,这种方法在切换矢量参数的选择上是基于一种不等式约束,没有对切换矢量的参数选择提供系统的方法。变结构系统具有反应快,对对象参数不敏感以及对外界干扰鲁棒性好等特点,如文献[50]中变结构控制器对系统参数发生变化时,系统的动态特性几乎不受影响,但该方法在考虑发电机变化率约束(GRC: Generation Rate Constraint)和死区非线性的影响时,系统往往不收敛,且有时还会引起不稳定。文献[51]利用遗传算法来选择变结构控制器的反馈矩阵参数,并将它应用到单区域的负荷频率控制中,不仅系统暂态过程得到了改善,同时控制器的输出也得到了改善。

采用滑模变结构控制方法研究AGC问题,其实质是利用在滑模上系统对外界干扰和对参数变化的不变性解决鲁棒性问题。文献[52]提出了一种用于多区域互联电力系统的负荷频率综合PI滑模控制的方法,选用带积分的滑模超面方程使系统从一开始就直接进入滑模状态。当系统进入滑模状态后,转化为基于新区域控制偏差的比例-积分控制。这种控制方法具有所希望的动态特性,并且对系统参数和外部干扰的变化具有完全的鲁棒性,消除了抖振,且在考虑发电机变化率约束和死区非线性的影响时,仍能保证系统具有较好的性能。文献[53]将模糊变结构控制应用到互联

电力系统负荷频率控制中, 具有较好的性能和鲁棒性。文献[54]针对火电-水电多区域互连电力系统, 构造离散时间滑动模态控制, 并考虑了系统的非线性。当然, 变结构控制结构复杂, 算法本身的抖动问题很难消除。此外, 对基于状态方程的线性化模型控制器要求对无法访问的状态变量进行估测, 虽然可设计观察器来实现这一点, 但额外的数据传输成本较高。

3) 鲁棒控制

鲁棒控制自80年代末90年代初提出以来, 已有不少学者将其应用到互联电力系统中。在电力系统中, 每个控制区域都包含了各种不确定性和扰动, 这些不确定性和扰动的产生是由于系统参数、动态特性的变化、负荷的改变以及建模和线性化过程中的误差或环境条件的影响。另一方面, 一个电力系统的工作点在每天循环中会随机变化。正因如此, 基于标称系统参数值的最优调节器设计难以解决LFC问题, 而且系统中这些调节器的执行可能不足以提供所需的系统运行情况。这会严重影响降阶系统的动态性能, 有时还会破坏系统的稳定性。所以, 人们做了大量努力, 运用各种鲁棒方法^[55-59]设计出更好性能的控制器的适应系统参数变化, 不仅满足标称稳定和标称性能要求, 而且保证鲁棒稳定性和电力系统中LFC问题的鲁棒性能^[59]。

文献[60, 61]提出了基于Riccati方程方法解决鲁棒负荷频率控制问题, 该文对Riccati方程中的某些参数的确定没有给出系统的方法, 所以这些方法在应用上受到了一定的限制。文献[62]提出的互联电力系统鲁棒负荷频率控制器的设计方法, 用匹配条件和Lyapunov稳定性理论来设计鲁棒稳定控制器, 并且考虑了系统参数的不确定性。总之, 在鲁棒控制设计方法中, 要对电力系统进行物理分析, 并且综合考虑系统不确定性。

4) 智能控制策略

模型预测控制是一种优化算法, 大量的预测

控制权威性文献都无一例外的指出, 预测控制最大的吸引力在于它具有显式处理约束的能力。其优点在于控制算法嵌入显式过程模型并且直接考虑被控过程的输入、状态和输出的约束条件, 因此, 为了评价类似系统的特性, 人们提出了更为灵活的控制方法。最近几年里, 现代智能技术如模糊逻辑、人工神经网络(ANN)等在很大程度上解决了上述问题。如: 文献[63]结合PI控制和模糊逻辑控制结构二者的优点, 采用模糊增益构造比例-积分控制方法, 该法能够对非线性和其它可预测的系统动态变化进行有效的补偿。文献[64]提出了一种用于多区域互联电力系统的PI增益模糊控制方法, 这种控制方法有效地削弱由负荷扰动产生的系统振荡。文献[65]针对两区域电力系统运用微粒群优化算法进行负荷频率控制, 并在负荷频率控制中引入模糊决策控制, 该方法消除了由时延引起的系统振荡。

文献[66]针对两区域互联系统负荷频率控制(LFC)的非线性、参数的不确定和纯延迟特性的问题, 提出了一种基于CPS的神经网络模糊预测控制器。采用递归神经网络与模糊控制策略, 根据当前时刻的区域控制偏差(ACE)和预测的ACE变化值, 预测下一时刻的控制输出和系统在未来时刻的ACE。同时, 为了提高其控制性能与电网质量, 其模糊控制策略引入了基于CPS性能的标准进行优化控制, 从而使其动态性能更加良好。文献[67]针对电力市场背景下的两区域互联系统负荷频率控制(LFC)的非线性、参数的不确定和纯延迟特性的问题, 提出了一种基于模糊RBF神经网络的自适应控制器。利用RBF神经网络进行自学习、修正与完善模糊规则, 改善其动态性能。文献[68]提出了一种基于动态神经网络的自适应负荷频率控制器, 该动态小波神经网络有着滞后的动态特性, 取小波母函数作为激励函数和连接权值。自适应性是以调整负荷频率控制的动态神经网络参数为基础, 它是通过最小化负荷频率误差的阈值

函数来实现的。文献[69]提出了一种基于 μ 综合的非线性智能神经网络控制器。为了避免大的建模误差和最小化区域负荷扰动的作用，文中使用 μ 综合的思想来训练基于负荷频率控制的智能神经网络控制器。此方法将二者的优点结合了起来，既能较好地克服系统的模型误差，参数偏离带来的问题，也能将外部负荷扰动的影响降低到较小的程度。控制器被应用于两区域互联电力系统模型中，并将其控制效果与普通的PI控制器进行了对比。

经过数十年的发展，互联电力系统负荷频率控制已经取得很多成果，尤其针对发电机变化速率约束做了大量的研究。但就目前的研究来看，经典控制策略和智能控制算法也存在着本质的不足。

a) 控制GRC的方法难以与应用实践联系

实际电力系统中，当出现负荷大范围变化时，系统显示出强非线性特点，同时存在发电机变化率约束（GRC），传统的控制策略往往采用自然饱和约束方法，即强制系统变量在约束边界，这不仅使得系统经济性无法保证，甚至系统的稳定性动态性能也变差。

b) 基于经济指标下LFC问题传统控制算法难以建立

经典和智能算法解决LFC问题的出发点是保证频率偏差和区域控制偏差为零，进一步保证闭环系统在算法实施时的稳定性。从出发点即可看出这些控制算法研究重点几乎是放在保证控制性能，而未考虑减少能耗，节约成本。虽然近年来，这一问题开始得到重视，但是互联电力系统规模大，结构复杂，很少有在实际中成功应用的案例。

综合以上对传统控制算法在互联电力系统LFC问题的理论发展和应用状况的分析可以看出，经典和智能控制算法的理论研究体系也相当的完善，但是在实际电力系统中仍存在瓶颈而受到局

限，对于经济目标的LFC控制，传统的控制算法几乎与之没有联系，也没有从中汲取相关的成果来指导，因此，传统控制算法在解决由于经济社会所带来的各类新问题时，还面临一系列挑战。

3 经济目标下电力系统自动发电控制的预测控制方法

模型预测控制是一种优化控制算法，预测控制最大的吸引力在于它具有显式处理约束的能力^[70]，其突出优点在于控制算法嵌入显示过程模型并且直接考虑被控过程的输入、状态和输出的约束条件。模型预测控制作为典型的优化控制策略，已在生产过程控制中取得了广泛应用^[71-73]。它能够对复杂的多变量对象提供整体的设计方案；可以在线直接处理系统的输入、输出或状态约束；文献[74]针对电厂提出了带有约束的非线性预测控制策略。文献[75]通过建立锅炉汽机过程非线性模糊模型并提出模糊模型预测控制策略。模型预测控制主要是在于它的滚动时域控制（receding horizon control, RHC）策略增强了控制系统在线处理各种扰动和不确定性的能力，在每一采样时刻都能通过求解一个优化问题得到控制律，其控制行为不仅能有效地控制生产过程，还能有效提高系统运行的经济性。

近年来，在电力系统负荷频率控制中，模型预测控制引起了广泛关注。文献[76]中在每个采样点都对性能指标进行优化计算得到最优的控制量，利用边缘控制理论最小化机组调度和机组逆转发，从而降低负荷频率控制的成本^[77]。提出的算法实现了两个目标，第一：在NERC（北美电力可靠性协会）的CPS（控制性能标准）标准下，利用分散模型预测控制方法产生一个设定点信号作为调速器设定值，满足了CPS1和CPS2性能标准。第二：降低了发电机组疲劳和磨损。文献[78]提出一种基于状态收缩约束的模型预测控制策略

(SCC-MPC)。这种控制策略具有一般有限时域模型预测控制的特点，并且在算法中引入了一个状态收缩约束，从而保证了模型预测控制算法的稳定性。

在电力系统负荷频率控制中，尽管模型预测控制的应用能够有效地降低成本、保证控制算法的稳定性，但并没有完全发挥出预测控制自身的优势。现代互联电力系统是由多个地域分布广泛的区域子系统构成的复杂系统，传统的集中模型复杂，模型维数高，且带有输入和状态约束，求解此类优化问题的传统集中控制在实际中几乎不可行。基于此，一些学者提出了分散模型预测控制，并将其应用到互联电力系统自动发电控制。核心思想是将互联电力系统分解成多个子系统，但忽略了各个子系统之间的联系。文献[79]构造分散模型预测控制策略应用到四区域互联的自动发电控制系统中。文献[80]构造分散模型预测控制策略有效克服了系统的不确定性和负荷干扰。但是，分散模型预测控制策略忽略了各个子系统之间的耦合关联以及相互间的信息交换，使得系统的全局稳定性大大降低。

分散预测控制存在的问题随着分布式预测控制理论的出现得到了妥善解决。分布式预测控制是多目标、多约束运行优化控制理论与技术，关于分布式预测控制理论的发展，近十年较为著名的是Riccardo Scattolini刊登在Journal of Process Control上的一篇综述文章Architectures for distributed and hierarchical model predictive control^[81]。分布式预测控制研究基于局部信息控制局部的思想，将大规模约束优化问题转化为多个小规模问题，并重点研究各个子系统之间的关联处理，子系统的优化决策以及信息交换，保证系统的全局稳定。分布式控制结构如图3所示。在这里特别要提到的是由Aswin研究的分布式预测控制理论^[82]，它通过对数学模型的分析，先后给出了集中模型、完全分散数学模型、基于合作的数学模

型和已知部分信息的数学模型，以此为基础，构建了分布式线性模型预测控制，基于合作的分布式模型预测控制的相关控制理论，并给出相继可行性和闭环稳定性证明。更值得一提的是，基于输出反馈的分布式状态估计理论也进行了深入研究，分布式状态估计器和分布式状态调节器的设计能够有效地降低模型错误和未知扰动对系统稳定性的影响。进一步给出了在化工过程和不完全互联电力系统中的应用实例。文献[83]提出了一种基于协调的分布式预测控制算法，该算法通过各个局部控制器之间协调实现负荷频率控制。文献[84]提出了一种基于分布式预测控制思想的协调模型预测控制器，该算法运用分布式电力系统数学模型。

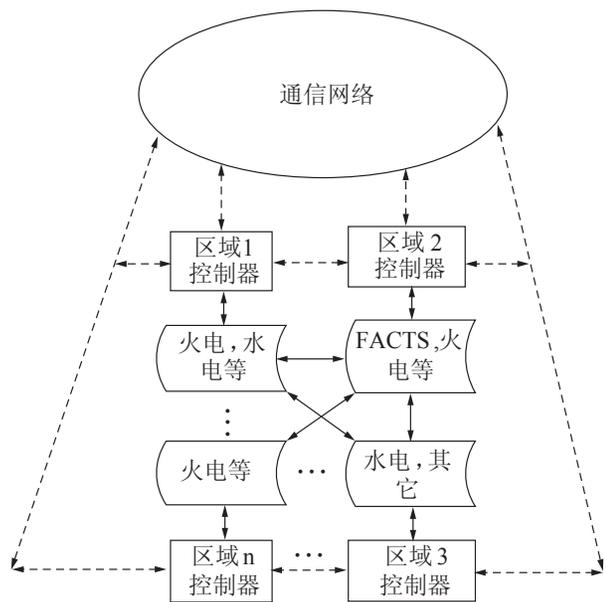


图3 分布式预测控制结构

仿真验证了该算法不仅能实现全局最优还保证系统的闭环稳定性。文献[85]针对互联电力系统提出了一种分布式模型预测控制策略，每个控制器通过迭代和协调合作满足系统设定的全局控制目标，该算法在降低计算时间的基础上，实现与集中模型预测控制算法相同的性能。不仅如此，该算法能够保证满足终止迭代条件下闭环稳定。文献[86]设计鲁棒分布式预测控制器，并将其应用

至四区域电力系统符合频率控制中，但是约束问题在此文中并未解决。文献[87]给出了带有状态和输入约束分布式预测控制迭代算法，并将其成功应用到三区域互联电力系统负荷频率控制中。

以上对近阶段集中预测控制、分散预测控制和分布式预测控制理论和算法发展动态的分析表明，在环境和经济双重指标体系下对电力系统LFC控制不断提出挑战的今天，分布式预测控制已经成为此领域共同关注的热点。国内外相关研究人员正在多方努力发展对实际电力系统应用更有针对性和指导性的分布式预测控制算法。

4 展望和可能的研究方向

根据对互联电力系统LFC问题的理论研究及应用中存在的问题和近期研究状态可以看出，研究和发​​展分布式预测控制理论和高效算法为当今研究热点。其重点应该建立含有FACTS控制和间歇性可再生能源的互联电力系统的分布式数学模型，围绕着LFC问题中的状态耦合难点开展分布式预测控制算法中带有输入耦合约束和状态耦合约束情况下的全局优化问题研究，并且研究存在不确定性扰动和时延、通信错误等情况下分布式模型预测控制算法的实时性、相继可行性和鲁棒性。

1) 互联电力系统建模

分布式预测控制的成功在很大程度上依赖于可靠的数学模型，互联电力系统中的每个区域都存在大量非线性不确定对象。由于风电、太阳能等间歇性可再生能源的介入，使得系统数学模型的拓扑结构也存在着极大的不确定性。互联电力系统数学模型呈现模型混杂、分布参数以及非线性等特性，虽然传统的机理建模仍然是描述系统的主要工具，但是它使得系统的描述极为复杂。因此，有效的系统辨识方法和基于数据驱动的方法是解决复杂系统建模的有效途径。

2) 输入和状态耦合约束

互联电力系统中存在着大量的输入和状态耦合约束，现有的未考虑优化的分布式反馈控制率和面对固定电力系统数学模型拓扑结构的分布式预测控制算法不能简单的套用。需要针对物理约束、拓扑结构约束发展构造有效的分布式预测控制算法，并评估算法在受到约束时的全局优化是否存在可行性解的问题。

3) 通信错误、延时情况下的分布式预测控制

互联电力系统是具有分布式特征的大系统，信息量以及数据处理量庞大，在处理过程中可能存在通信错误和延时。因此，要致力于研究存在延时的分布式预测控制算法，并保证系统全局稳定性及鲁棒性、性能次优性。另一方面，发展有效的分布式状态估计算法也能避免延时和通信错误给系统稳定性带来的影响。

未来的互联电力系统将大量采用柔性交流输电系统装置（FACTS），从而提高经济和安全性能。FACTS控制器需要与AGC协作运行。另一方面，包括风能、太阳能在内的间歇式可再生能源的介入会引起电网功率的波动。因此，对互联电力系统LFC控制提出了更高的要求。建立满足电网需要、适用运行环境和机组特性的新能源电力系统多目标、多约束运行优化控制理论与技术，从而实现多元发电过程互补优化运行。分布式模型预测控制作为一种具有处理约束优化能力的优秀控制算法，能有效地协调系统控制器，在解决大型分布式互联电力系统LFC问题被寄予很高的期望。当然，分布式电力系统数学模型应该努力实现接近实际，发展非线性环节的建模方法，分布式模型预测控制的研究应该针对耦合输入和状态约束情况下的优化问题，兼顾研究在通信错误及时延状态下优化与稳定性要求的系统理论和算法，并以此推动分布式预测控制理论与技术的进一步发展，这也是互联电力系统负荷频率控制未来发展的方向。

参 考 文 献

- [1] H. Shayeghi, H.A. Shayanfar, A. Jalili, “ Load frequency control strategies: A state-of-the-art survey for the researcher” , Energy Conversion and Management, vol. 50, pp. 244–253, 2009.
- [2] Shashi Kant Pandey, Soumya R. Mohanty, Nand Kishor. “ A literature survey on load of frequency control for conventional and distribution generation power systems” , Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 25, pp. 318-334, 2013.
- [3] Aswin N. Venkat, Ian A. Hiskens, James B. Rawlings, and Stephen J. Wright, Distributed MPC strategies with application to power system automatic generation control, IEEE Transactions on Control Systems Technology 16(6)(2008) 1192-1206.
- [4] Ibraheem, Prabhat Kumar, and Dwarka P. Kothari, “ Recent philosophies of automatic generation control strategies in power systems” , IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21 no.1, pp. 346-357, Feb. 2005.
- [5] Ashmore PH, Battebury DR, Bowdler RK. Power-system model for large frequency disturbances. Proceedings of the IEEE 1974;121(7):601–8.
- [6] Pan CT, Liaw CM. Anadaptive controller for power system load–frequency control. IEEE Transactions on Power Systems 1989;4(1):122–8.
- [7] Wang Y, Zhou R, Wen C. Robust load–frequency controller design for power systems. IEE Proceeding-C 1993;140(1).
- [8] Wang Y, Zhou R, Wen C. New robust adaptive load–frequency control with system parametric uncertainties. IEE Proceedings—Generation Transmission and Distribution 1994;141(3).
- [9] Jiang, en L, Yao W, Wu QH, Wen JY, Cheng SJ. Delay-dependent stability for load frequency control with constant and time-varying delays. IEEE Transactions on Power Systems 2012;27(2):932–41.
- [10] Singh Parmar KP, Majhi S, Kothari DP. Load frequency control of a realistic power system with multi-source power generation. Electrical Power and Energy Systems 2012;42:426–33.
- [11] Foord TR. Step response of a governed hydro-generator. Proceedings of the IEEE 1978;125(11).
- [12] Kusic GL, et al. Automatic generation control for hydro systems. IEEE Transactions on Energy Conversion 1988;3(1):33–9.
- [13] Doolla S, Bhatti TS. Load frequency control of an isolated small-hydro power plant with reduced dumped load. IEEE Transactions on Power Systems 2006;21(4):1912–9.
- [14] Calovic Milan. Linear regulator design for a load and frequency control. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1972;91(6):2271–85 PAS-vol.
- [15] Bengiamin, Chan. Multilevel load–frequency control of interconnected power systems. Proceedings of the IEEE 1978;125(6).
- [16] Davison Edward J, Tripathi Nand K. The optimal decentralized control of a large power system: load and frequency control. IEEE Transactions on automatic Control 1978; AC-23(2):312–24.
- [17] Lim KY, Wang Y, Zhou R. Robust decentralized load-frequency control of multi-area power systems. IEEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution 1996;143(5):377–86.
- [18] Rerkpreedapong D, Hasanovic A, Feliachi A. Robust load frequency control using genetic algorithms and linear matrix inequalities. IEEE Transactions on Power Systems 2003;18(2):855–61.
- [19] Ghoshal SP. Multi-area frequency and tie-line power ?ow control with fuzzy logic based integral gain scheduling. IE(I) Journal—EL 2003;84:135–41.
- [20] Ghoshal SP. GA-fuzzy based fast acting adaptive active power-frequency control of interconnected multiple thermal generating areas. IE (I) Journal—EL 2005;85:209–15.
- [21] Hiyama T. Design of decentralized load–frequency regulators for interconnected power systems. Proceedings of the IEE 1982;129(1):17–23.
- [22] Kumar A, Malik OP. Discrete variable structure controller for load frequency control of multi-area interconnected power systems. Proceedings of the IEEE 1987;134(Pt. C, 2):116–22.
- [23] Malik OP, Kumar Ashok, Hope GS. A load frequency control algorithm based on a generalized approach. IEEE Transactions on Power Systems 1988;3 (2):375–82.
- [24] Tan Wen. Uni?ed tuning of PID load frequency controller for power systems via IMC. IEEE Transactions on Power Systems 2010;25(1):341–50.
- [25] Tan W, Zhou H. Robust analysis of decentralized load frequency control for multi-area power systems. Electrical Power and Energy Systems 2012;43:996–1005.
- [26] X. Liu, X. Zhan, D. Qian, Load frequency control considering generation rate constraints, Proceeding of the 8th world congress on intelligent control and automation. Jinan, China. July 6-9, 2010.
- [27] Xiangjie Liu, Xiaobing Kong, Xizhi Deng. Power system model predictive load frequency control, 2012 American Control Conference, pp:6602-6607, June 2012.
- [28] Kumar Jayant, Ng Kah-Hoe, Sheble Gerald. AGC simulator for price-based operation part-II: case study results. IEEE Transactions on Power Systems 1997;12(2):533–8.
- [29] Christie RD, Bose A. Load frequency control issues in power system operations after deregulation. IEEE Transactions on Power Systems 1996;11 (3):1191–200.
- [30] Bakken BH, Grand OS. Automatic generation control in a deregulated power system. IEEE Transactions on Power Systems 1998;13(4):1401–6.

- [31] Abraham RJ, Das D, Patra A. Load following in a bilateral market with local controllers. *Electrical Power and Energy Systems* 2011;33:1648–57.
- [32] Jovanovic S, Fox B. Intelligent adaptive turbine controller. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 1995;10(1):195–8.
- [33] Michael Hughes F, et al. Control of DFIG-based wind generation for power network support. *IEEE Transactions on Power Systems* 2005;20(4):1958–66.
- [34] Li Risheng, Bozhko Serhiy, Asher Greg. Frequency control design for offshore wind farm grid with LCC-HVDC link connection. *IEEE Transactions on Power Electronics* 2008;23(3):1085–92.
- [35] Singh Bhim, Sheeja V, et al., Voltage–frequency controller for standalone WECS employing permanent magnet synchronous generator. In: Third international conference on power systems, Kharagpur, India; Dec. 2009. p. 27–29.
- [36] Goel PK, Singh Bhim, Murthy SS, Kishore N. Isolated wind-hydro hybrid system using cage generators and battery storage. *IEEE Industrial Electronics* 2011;58(4).
- [37] Salamah AM, Finney SJ, Williams BW. Autonomous controller for improved dynamic performance of AC grid, parallel-connected, single-phase inverters. *IET Generation Transmission & Distribution* 2008;2(2):209–18.
- [38] Senjyu Tomonobu, et al. A hybrid power system using alternative energy facilities in isolated island. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2005;20(2):406–14.
- [39] Sedghigarchi K, Feliachi A. Dynamic and transient analysis of power distribution systems with fuel cells-part I: fuelcell dynamic model. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2004;19(2):423–8.
- [40] Sedghigarchi K, Feliachi A. Dynamic and transient analysis of power distribution systems with fuel cells-part II: Control and stability enhancement. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2004;19(2):429–34.
- [41] J.D.Glover, and F.C.Schweppes, Advance load – frequency control. *IEEE Trans.[C]*, 1972, PAS-91, pp:2095~2103.
- [42] Kundur P. *Power system stability and control*. New York: McGraw-Hill; 1994.
- [43] Velusami S, Ramar K. Design of observer-based decentralized load-frequency controllers for interconnected power systems. *Int J Power Energy Syst* 1997;17(2):152–60.
- [44] Hain Y, Kulesky R, Nudelman G. Identification-based power unit model for load-frequency control purposes. *IEEE Trans Power Syst* 2000;15(4):1313–21.
- [45] Pan CT, Liaw CM. An adaptive controller for power system and load frequency control. *IEEE Trans Power Syst* 1989;4(1):122–8.
- [46] Rubaai A, Udo V. Self-tuning LFC: multilevel adaptive approach. *IEE Proc Gen Transm Distri* 1994;141(4):285–90.
- [47] Y.H.Chen,G.Leitmann and X.Z,Kai.Robusr control design for interconnected systems with time-varying uncertainties.*Int. J.Control*,1991,54,pp:1119-1142.
- [48] Talaq J, Al-Basri F. Adaptive fuzzy gain scheduling for load-frequency control. *IEEE Trans Power Syst* 1999;14(1):145–50.
- [49] N.N.Bengiamin,W.C.Chan.Variable structure control of electric power generation.*IEEE Transaction. Power System*, 101, 1982, pp:376~380.
- [50] Al-hamouz A Z,Abdel Magid Y L.Variable structure load frequency controller for multi area interconnected power systems[J]. *Int.J.Electric Power Energy System*, 1993,15(4):293~300.
- [51] Z.M.Al-Hamouz,H.N.Al-Duwaish.A New Load Frequency Variable Structure Controller Using Genetic Algorithms.*Electric Power Systems Research Vol.55* 2000,Pages:1-6.
- [52] 孟祥萍,薛昌飞,张化光.多区域互联电力系统的PI滑模负荷频率控制[J].*中国电机工程学报*,2001,21(3):6-11.
- [53] Ha Q, Trinh H. A variable-structure based controller with fuzzy tuning for load frequency control. *Int J Power Energy Syst* 2001.
- [54] K. Vrdoljak, N. Perić, I. Petrović. Sliding mode based load-frequency control in power systems. *Electric Power Systems Research* 80 (2010) 514–527.
- [55] Wang Y, Zhou R, Wen C. New robust adaptive load frequency control with system parameter uncertainties. *Proc IEE Proc Gen Transm Distri* 1994;141(3):184–90.
- [56] Stankovi AM, Tadmor G, Sakharuk TA. On robust control analysis and design for load frequency regulation. *IEEE Trans Power Syst* 1998;13(2):449–54.
- [57] Azzam M. Robust automatic generation control. *Energy Convers Manage* 1999;40(13):1413–21.
- [58] Goshaidas R, Prasad AN, Prasad GD. A new approach to the design of load frequency controller for large scale power system. *Electr Power Syst Res*.1999;51:13–22.
- [59] Azzam M, Mohamed YS. Robust controller design for automatic generation control based on Q-parameterization. *Energy Convers Manage* 2002;43(13):1663–73.
- [60] Y. Wang, R. Zhou, W. Chua, Felix S. M. Fong. Discrete-time Robust Controller for load frequency control of power systems. Second IEEE Conference on Control Applications. 1993; 891~893
- [61] K. Y. Lim, Y. Wang, R. Zhou. Robust decentralized load frequency control of multi-area power systems. *IEEProc. Gener. Transm. Distrib*,143(5),pp:337-386,1996.
- [62] M. zzam .Robust automatic generation control .*Energy Conversion*

- &Management. 1999 (40): 1413-1421.
- [63] C.S.Chang, Weihui Fu. Area load frequency control using fuzzy gain scheduling of PI controllers[J]. Electrical Power Systems Research, 42(1997)145-152.
- [64] İlhan Kocaarslan, Ertugrul Cam. Fuzzy logic controller in interconnected electrical power systems for load-frequency control[J]. Electrical Power and Energy System, 27(2005)542-549.
- [65] 刘向杰, 阎冬梅. 微扰群优化负荷频率控制. 电力系统及其自动化学报. 2010, (21):2.
- [66] Xiangjie Li and Jianwu Zhang. CPS Compliant Fuzzy Neural Network Load Frequency Control. 2009 American Control Conference. St. Louis, Missouri, USA, June 10 - 12, 2009, pp.2755-2760.
- [67] 张建武, 刘向杰. 电力市场环境下的新型负荷频率控制方法. 电网技术. 2008, 32(12):64-69.
- [68] M.Zribi, Al-Rashed, M.Alrifai. Adaptive Decentralized Load-Frequency Control of Multi-Area Systems. Electrical Power and Energy Systems Vol.27 Issue 8 Oct.2005.
- [69] H.Shayeghi, H.A.Shayanfar. Application of ANN technique based on μ -synthesis to load frequency control of interconnected power system. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 28, Issue 7, September 2006, Pages 503-511.
- [70] 席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制—现状与挑战. 自动化学报. 2013, 39(3):222-237.
- [71] Xiang-Jie Liu, C.W. Chan. Neuro-fuzzy generalized predictive control of boiler steam temperature. IEEE Trans. Energy Conversion, Vol.21, no.4, December, pp.900-908, 2006.
- [72] Prasad G., E.Swidanbank and B.W.Hogg. A local model networks based multivariable predictive control strategy for thermal power plants. Automatica, 1998, 34(10), 1195-1204.
- [73] 刘向杰, 殷冲, 侯国莲, 张建华. 联合循环电厂余热锅炉的监督预测控制策略. 中国电机工程学报. 2007, 27(7), 52-58.
- [74] X. J. Liu, Ping Guan, & Chan, C.W.. Nonlinear multivariable power plant coordinate control by constrained predictive scheme, IEEE Trans. Control Systems Technology, vol. 18, no.5, pp.1116-1125, 2010.
- [75] X. J. Liu and X.B. Kong, “ Nonlinear fuzzy model predictive iterative learning control for drum-type boiler-turbine system,” Journal of Process Control, vol. 23, pp. 1023–1040, Sep.2013.
- [76] Rerkpreedapong, D., Atic, N., and Feliachi, A., “Economy Oriented Model Predictive Load Frequency Control”, 2003 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, pp. 12-16, May, 2003.
- [77] Nedzad Atic, Dulpichet Rerkpreedapong, Amer Hasanovic, Ali Feliachi. NERC Compliant Decentralized Load Frequency Control Design Using Model Predictive Control. 2003
- [78] 孔莲芳, 罗天祥, 吴捷. 基于状态收缩约束的模型预测负荷频率控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 18-22.
- [79] T. C. Yang, Z. T. Ding, H. Yu, Decentralized power system load frequency control beyond the limit of diagonal dominance, Electric Power Energy System, vol. 24, no. 3, pp:173-184, 2002.
- [80] T.H. Mohamed, H. Bevrani, A.A. Hassan, T. Hiyama, “Decentralized model predictive based load frequency control in an interconnected power system”, Energy Conversion and Management, vol. 52, no.2, pp. 1208–1214, 2011.
- [81] Riccardo Scattolini. Architectures for distributed and hierarchical model predictive control-A review. Journal of process control, vol. 19, pp.723-731, 2009.
- [82] Aswin N. Venkat Distributed model predictive control: theory and applications, PHD. dissertation of university of Wisconsin-Madison, 2006.
- [83] X. J. Liu, Ping Guan, & Chan, C.W.. Nonlinear multivariable power plant coordinate control by constrained predictive scheme, IEEE Trans. Control Systems Technology, vol. 18, no.5, pp.1116-1125, 2010.
- [84] Y. Zheng, H. Qiu and S. Li, Networked Coordination-Based Distributed Model Predictive Control for Large-Scale System, IEEE Transactions on Control System Technology, 21(3): 991–998, 2013.
- [85] X. J. Liu and X.B. Kong, “ Nonlinear fuzzy model predictive iterative learning control for drum-type boiler-turbine system,” Journal of Process Control, vol. 23, pp. 1023–1040, Sep.2013.
- [86] X. J. Liu, H.Y. Nong, K. Xi and X. M. Yao, Robust distributed model predictive load frequency control interconnected power system, Mathematical Problem in Engineering, 1-10, 2013.
- [87] Miao-miao. Ma, Hong. Chen, Xiang-Jie. Liu, and Frank Allgower, Distributed model predictive load frequency control of multi-area interconnected power system, Electrical Power and Energy System, 289-298, 2014.

作者简介

刘向杰 华北电力大学控制与计算机工程学院教授。1989年获东北大学自控系工业电气自动化专业学士学位。1997年获东北大学自动化研究中心博士学位。主要研究方向为先进控制策略在电力过程控制中的应用。本文通信作者。E-mail: liuxj@ncepu.edu.cn

张怡 华北电力大学控制与计算机工程学院博士研究生。2008年获华北电力大学自动化系硕士学位。主要研究方向为模型预测控制理论及其在能源电力系统控制中的应用。

多智能体协同控制理论在微电网中的应用

宋永端, 马铁东

重庆大学 自动化学院, 重庆 400030

摘要: 近年来, 多智能体系统理论及协同控制技术在军事、航天和工业系统(如智能电网, 网络通信, 环境监测)等方面获得广泛关注, 并有系列成功应用。本文以微网电压二次控制为例, 着重阐述了多智能体系统的协同控制在微网中的应用进展。并结合现有研究情况, 提出了多智能体系统在微网中有待解决的几个问题。

关键词: 多智能体系统, 协同控制, 微电网

引言

随着科学技术的蓬勃发展, 许多控制系统变得越来越复杂, 规模越来越大, 其显著特点是组成部分性质各异且形式上比较分散。传统的集中式控制系统对于处理上述实际问题, 已无法达到预期的控制目标。20世纪70年代以后, 分布式人工智能方法的出现, 克服了传统集中式控制的若干不足, 在实际工业系统中得到了非常快速的发展。多智能体(multi-Agent)技术的提出与发展便是人工智能发展的必然结果, 其中多智能体系统协同控制技术为电力系统优化控制等问题开辟了新的途径。

微电网(Micro-Grid)是电力系统中一种新型网络结构, 主要包括微电源、负荷、储能系统和控制装置四个部分(一个最为简单的微电网单元结构如图1所示)。微电网的概念是相对于传统大电网或主电网而言的, 是指多个分布式电源及其相关负载按照一定的拓扑结构组成的网络, 并通过静态开关关联至常规电网^[1-5]。在正常工作模式

下, 微电网与主网并网运行, 而一旦外网发生故障或受到扰动, 则微电网可实现自我控制、保护和管理, 并进入孤岛运行模式(即孤立运行而不依赖于外网)。在孤岛运行中, 需要施加一次控制(Primary Control)来保持电压与电流的稳定性^[6-8]。但是, 稳定性实现的同时, 电压与频率已偏于正常值。显然, 一次控制暂无法兼顾稳定性与准确性二者的矛盾, 需要引入二次控制(Second Control)^[9,10]。

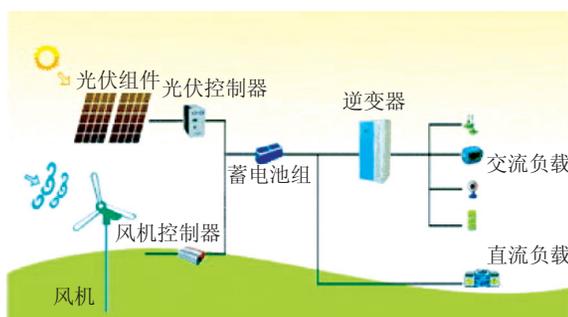


图1 微电网结构图(此图来源于“百度百科”之“微电网”)

传统的二次控制需要微电网中的分布式电源以复杂的通信网络连接, 并采用集中式控制(Centralized Control)结构^[11,12], 复杂的连接结构

大大降低了系统的可靠性。与集中式控制相比，分布式协同控制（Distributed Cooperative Control）不仅可有效降低通信网络的连接复杂度，提高微电网系统的可靠性，针对系统故障和建模误差也有一定的鲁棒性（即对系统故障等不敏感，仍然能够实现控制目标）。

在多智能体系统中，各智能体之间互相通信，彼此协调，并行地求解问题，因此能有效地提高问题求解的能力。因此，近年来，网络多智能体系统相关研究得到了广泛关注^[13-22]。在网络多智能体系统中，协同（或同步）过程需要各子系统在某通信拓扑连接下交换信息。对应的分布式协同控制也主要分为二类：调节同步问题（Regulator Synchronization Problem）和跟踪同步问题（Tracking Synchronization Problem）。前者是指多智能体系统中所有的子系统都将与某一状态值同步，但该状态值并不固定；后者是指所有子系统（Followers）状态都将同步于一个预先给定系统（Leader）的状态，其中待跟踪系统（Leader）起到了命令发生器的作用^[23-25]。

基于上述针对多智能体系统的介绍可知，一个微电网系统可看做是一个多智能体系统，其中每个分布式电源（Distributed Generator）就对应一个智能体系统（agent），而微电网的二次控制问题相当于分布式协同控制中的跟踪同步问题，目的是设计有效的分布式控制器实现分布式电源的终端电压和频率跟踪至参考值。本文将以上述跟踪同步问题为例，给出目前多智能体协同控制在微电网中的应用方法。

1 微电网分层结构概述

与大规模电力系统类似，微电网也可包括三层控制结构，即一次控制（Primary Control）、二次控制（Second Control）和三次控制（Tertiary Control），具体结构如图2所示^[7]。其中，一次控

制利用下垂控制技术分别施加于各个子系统，下垂控制的优势在于可以获得频率与有功功率、电压幅度与无功功率之间的理想特性曲线。二次控制将实现电压幅度与频率趋近预先给定的正常工作值。三次控制主要从微电网系统经济成本分配的优化考虑，参与管理微电网和主网间的信息流动^[6,7]。

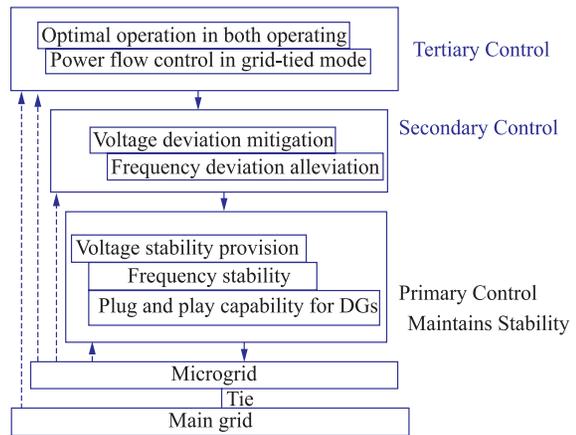


图2 微电网分层控制结构框图（该图来源于文献[7]）

2 应用实例一：基于分布式协同控制方法的微电网二次控制

传统的集中式二次控制与分布式二次控制框图分别如图3、4所示^[26]，由图3可知，集中式控制要求所有分布式电源（DGs）通过星形通信网络连接，而该连接结构容易受到外来干扰的影响，严重时会导致系统崩溃，可靠性不高。相比之下，分布式控制只需子系统与相邻系统完成信息传递，拓扑结构简单，鲁棒性和可靠性大大提高。

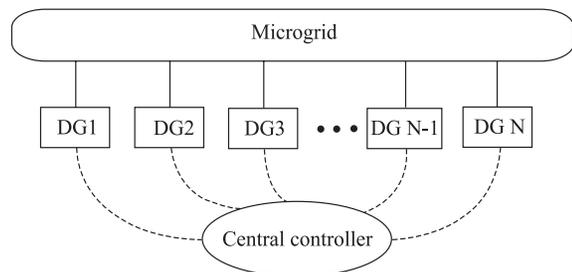


图3 微电网集中式控制框图

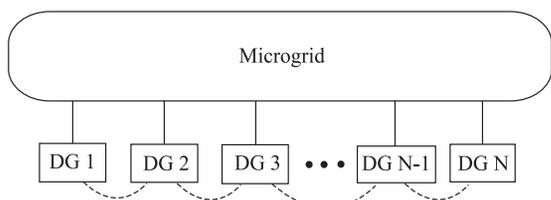


图4 微电网分布式控制框图

微电网中单个分布式电源的数学模型如下所示^[26,27]:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = f_i(x_i) + k_i(x_i)D_i + g_i(x_i)u_i, \\ y_i = h_i(x_i) + d_i u_i, i \in \{1, 2, \dots, N\}. \end{cases} \quad (1)$$

上述模型中各变量含义请参考文献[27]。以电压二次控制为例，控制目标是设计合适的控制器 u_i ，使得输出 y_i 均能同步于参考值。通常情况下，分布式控制器将采用诸如 $u_i = c(\sum_j a_{ij}(x_j - x_i) + g_i(x_0 - x_i))$ 的形式来实现系统同步。易知系统不仅是非线性系统，同时对应 N 个子系统模型的结构都不同，这由不同的非线性函数 (f_i, k_i, g_i, h_i) 可知。因此，微电网二次控制问题转化为了不同结构多智能体非线性系统的一致性同步问题。目前针对上述不同结构的非线性多智能体系统协同控制问题，比较常用的方法包括内模法^[28,29]、自适应神经网络辨识法^[19-22]、反馈线性化控制方法^[26,27]。不同结构的引入，往往使得同步误差系统结构更为复杂，对应的控制器结构也较为复杂，且部分近似误差无法消除，只能通过控制器的强度尽量减少。因此，如何获得结构简单且控制性更佳的控制器的仍然是热点难点问题。

3 应用实例二：基于多智能体系统的微网故障诊断技术

随着工业的迅猛发展，人们对电网的需求越来越大，电网的故障诊断与继电保护技术越发显得重要，国内外学者已经提出很多方法，如基于贝叶斯网络的方法、基于专家系统的方法、基于

Pertri网络的方法等^[30-34]。但是当大规模电网系统发生复杂故障时，仅靠传统的诊断方法很难有效率地解决故障诊断问题，而基于多智能体系统理论为电网故障诊断提供了新方法。大规模智能电网的故障诊断系统可分为五个智能体单元：全局决策机制智能体单元、高压系统故障诊断智能体单元、变电站故障诊断智能体单元、低压系统故障诊断智能体单元和电网系统智能体单元^[35]。各个智能体单元的通信方向如图5所示。

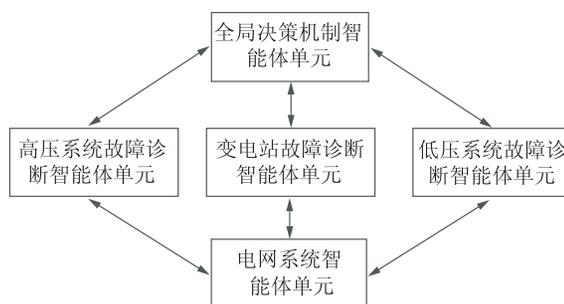


图5 多智能体故障诊断系统的结构

文献[35]提出的基于多智能体故障诊断过程可分为三步：

(1) 首先，高压系统故障诊断智能体单元、变电站故障诊断智能体单元和低压系统故障诊断智能体单元通过电网系统智能单元的遥测信息库查询故障遥测信息。

(2) 当查询到故障遥测信息时，故障诊断程序开始初始化。高压系统故障诊断智能体单元、变电站故障诊断智能体单元和低压系统故障诊断智能体单元分别生成基于本模块侦测信息的故障检测与隔离策略。

(3) 最后，全局决策机制智能体单元接收到(2)中的故障检测与隔离策略，对高压系统故障诊断智能体单元、变电站故障诊断智能体单元和低压系统故障诊断智能体单元各模块进行调节、补偿与配置，直到全局决策机制智能体单元做出相应的故障诊断的最终方案。

这种基于多智能体系统理论的故障诊断方法，应用于当前的微电网系统中，具有更好的适

应性、交互诊断性和智能性，并有一定的应用潜力。

4 应用实例三：基于多智能体系统的微网优化调度方法

建立多智能体模型，实现对微网内分布式电源、负载和储能单元的优化调度，是多智能体系统在微网中的重要应用^[36]。其基本思想是在相应的分布式电源、负载和储能单元等多个智能体中选择一个控制智能体，来对其他智能体进行协调和调度。当微网或者主电网内部的电能供需变化时，控制智能体通过智能体的通信和对话交换机制，根据供需变化的具体情况，对同一系统中的其他智能体发出电能需求增加或者减少的命令。接收命令的智能体做出相应的输出调整，同时反馈给控制智能体，从而实现微网的优化调度。另外，还要定义一个数据智能体，存储各个智能体的信息和系统的实时数据，为智能体的协商通信提供信息支持，也就是说，这种调度模式必须依靠微网内各个单元之间充分的实时数据。

5 总结与展望

微网作为分布式发电的有效应用模式，具有十分广阔的发展前景，而考虑微网本身环境的复杂性和动态性，对控制手段和策略提出了更高的要求。智能体系统作为一种有效的解决途径，可以更有效地实现微网稳定运行、故障诊断、优化调度等实际问题。虽然多智能体系统在微网中的应用研究已经进行了几十年，取得了一些令人瞩目的成就，但是仍没有形成普遍使用的理论和方法。另一方面，一些研究成果只是停留在理论和实验室中，并没有应用于实际电网。今后的研究工作可以从以下几个方面来扩展：

(1) 分布式电源种类繁多，除了常用的基于

逆变器的电源外，新能源发电机也被广泛应用。因此，在利用多智能体系统的协同控制时，要根据不同的微网单元设计不同特性的智能体，以提高微网的整体控制质量，其中针对不同结构多智能体系统的协同问题将为该应用提供理论基础和支撑。

(2) 在实际应用中，微网中的各个单元都散布在不同的地域，智能体之间相互通信会受到自然或人为因素的干扰，通信设施和维护成本相应提高。因此，通过智能体仅仅以自身信息或局部环境信息为依据，不需要相互通信来确定自身的输出状态，实现微网整体的控制目标，是多智能体系统在微网中应用的发展趋势。

(3) 孤岛模式下，需要进一步研究故障诊断和预测，根据微网的自身供电能力，确定最优的负荷切换方案。同时，要考虑电力市场化趋势和未来分布式发电大规模应用的环境下，微网执行怎样的电力竞价拍卖机制，形成未来市场化条件下成熟的微网运行模式。

参考文献

- [1] Fahimi B, Kwasinski A, Davoudi A, Balog R S, Kiani M. Charge it. Power Energy Mag 2011; 9(4):54-64.
- [2] Tanaka K, Oshiro M, Toma S, et al. Decentralised control of voltage in distribution systems by distributed generators. IET Generation Transmission & Distribution 2010; 4(44):1251-1260.
- [3] Rokrok E, Golshan M E H. Adaptive voltage droop scheme for voltage source converters in an islanded multibus microgrid. IET Generation Transmission & Distribution 2010; 4(5):562-578.
- [4] Bidram A, Hamedani-golshan M E, Davoudi A. Loading constraints for first swing stability margin enhancement of distributed generation. IET Generation Transmission & Distribution 2012; 6(12):1292-1300.
- [5] Bidram A, Hamedani-golshan M E, Davoudi A. Capacitor design considering first swing stability of distributed generations. IEEE Transactions on Power Systems 2012; 27(4):1941-1948.
- [6] Guerrero J M, Vasquez J C, Matas J, Castilla M, de Vicuna L G, Castilla M. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids-A general approach toward standardization. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2011; 58(1):158-172.
- [7] Bidram A, Davoudi A. Hierarchical structure of microgrids control system.

- IEEE Transactions on Smart Grid 2012; 3(4):1963-1976.
- [8] Sao C K, Lehn P W. Control and power management of converter fed microgrids. IEEE Transactions on Power Systems 2008; 23(3):1088-1098.
- [9] Katiraei F, Irvani A R, Lehn P W. Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process. IEEE Transactions on Power Delivery 2005; 20(1):248-257.
- [10] Savaghebi M, Jalilian A, Vasquez J C, Guerrero J M. Secondary control scheme for voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid. IEEE Transactions on Smart Grid 2012; 3(2):797-807.
- [11] Ilie M D, Liu S. Hierarchical power systems control: its value in a changing industry. Springer, London, UK, 1996.
- [12] Mehrizi-Sani A, Irvani R. Potential-function based control of a microgrid in islanded and grid-connected models. IEEE Transactions on Power Systems 2010; 25(4):1883-1891.
- [13] Qu Z. Cooperative Control of Dynamical Systems: Applications to Autonomous Vehicles. Springer-Verlag: London, 2009.
- [14] Wen G, Hu G, Yu W, Cao J, Chen G. Consensus tracking for higher-order multi-agent systems with switching directed topologies and occasionally missing control inputs. Systems & Control Letters 2013; 62(12):1151-1158.
- [15] Zhang H, Lewis F L, Qu Z. Lyapunov, adaptive, and optimal design techniques for cooperative systems on directed communication graphs. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2012; 59(7):3026-3041.
- [16] Zhang H, Lewis F L, Das A. Optimal design for synchronization of cooperative systems: state feedback, observer and output feedback. IEEE Transactions on Automatic Control 2011; 56(8):1948-1952.
- [17] Zhao Y, Duan Z, Wen G, Chen G. Robust consensus tracking of multi-agent systems with uncertain lur'e-type non-linear dynamics. IET Control Theory & Applications 2013; 7(9):1249-1260.
- [18] Wen G, Duan Z, Chen G, Yu W. Consensus tracking of multi-agent systems with lipschitz-type node dynamics and switching topologies. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers 2014; 61(2):499-511.
- [19] Das A, Lewis F L. Distributed adaptive control for synchronization of unknown nonlinear networked systems. Automatica 2010; 46(12):2014-2021.
- [20] Das A, Lewis F L. Cooperative adaptive control for synchronization of second-order systems with unknown nonlinearities. International Journal of Robust and Nonlinear Control 2011; 21(13):1509-1524.
- [21] Zhang H, Lewis F L. Adaptive cooperative tracking control of higher-order nonlinear systems with unknown dynamics. Automatica 2012; 48(7):1432-1439.
- [22] El-Ferik S, Qureshi A, Lewis F L. Neuro-adaptive cooperative tracking control of unknown higher-order affine nonlinear systems. Automatica 2014; 50(3):798-808.
- [23] Li Z, Duan Z, Chen G, Huang L. Consensus of multiagent systems and synchronization of complex networks: a unified viewpoint. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers 2010; 57(1):213-224.
- [24] Jadbabaie A, Lin J, Morse A S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules. IEEE Transactions on Automatic Control 2003; 48(6):988-1001.
- [25] Li X, Wang X, Chen G. Pinning a complex dynamical network to its equilibrium. IEEE Transactions on Circuits and System I: Regular Papers 2004; 51(10):2074-2087.
- [26] Bidram A, Davoudi A, Lewis F L, Qu Z. Secondary control of microgrids based on distributed cooperative control of multi-agent systems. IET Generation Transmission & Distribution 2013; 7(8):822-831.
- [27] Bidram A, Davoudi A, Lewis F L, Guerrero J M. Distributed cooperative secondary control of microgrids using feedback linearization. IEEE Transactions on Power Systems 2012; 28(3):3462-3470.
- [28] Kim H, Shim H, Seo J H. Output consensus of heterogeneous uncertain linear multi-agent systems. IEEE Transactions on Automatic Control 2011; 56(1):200-206.
- [29] Ding Z. Consensus output regulation of a class of heterogeneous nonlinear systems. IEEE Transactions on Automatic Control 2013; 58(10):2648-2653.
- [30] Sun J, Qin S Y, Song Y H. Fault diagnosis of electric power systems based on fuzzy Petri nets. IEEE Transactions on Power Systems 2004; 19(4):2053-2059.
- [31] Zhu Y L, Huo L M, Lu J L. Bayesian networks-based approach for power systems fault diagnosis. IEEE Transactions on Power Systems 2006; 21(2):634-639.
- [32] 王永强, 律方成, 李和明. 基于粗糙集理论和贝叶斯网络的电力变压器故障诊断方法. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 137-141.
- [33] Zhang B D, Ma Z K, Chan W L, Tsang K M. The fault diagnosis for substation based on the fault-mass. The 6th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management Proceedings Volume 1; 2003:308-311.
- [34] 周明, 任建文, 李庚银. 基于模糊推理的分布式电力系统故障诊断专家系统. 电力系统自动化, 2001, 25(24): 78-82.
- [35] 刘京津. 基于多智能体系统的故障诊断技术在智能电网中的应用. 电子与封装, 2013, 12:43-48.
- [36] 李福东. 基于分布式发电的微网智能优化控制策略研究. 中南大学博士学位论文. 2013.

作者简介

宋永端 重庆大学自动化学院教授、博士生导师, 主要研究方向为可再生能源系统、容错控制、仿生智能控制, 协调控制理论及其应用等。

马铁东 重庆大学自动化学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为混沌系统控制、脉冲控制、多智能体系统协同控制等。

电力信息物理融合系统安全及建模控制技术综述

邓 松，解相朋，岳 东

南京邮电大学先进技术研究院，南京 210023

摘要：本文从电力信息物理融合系统的安全需求出发，系统全面的分析现有的电力信息物理系统的安全现状、安全需求、安全威胁以及相应的防护措施；继而介绍了电力信息物理融合系统的静态和动态模型的建模方法以及其综合控制策略。最后，针对目前电力信息物理融合系统的若干发展动态，对电力信息物理融合系统安全及建模控制技术方面的未来研究做了展望。

关键词：信息物理融合，电力系统，安全防护，建模控制

引 言

为了实现智能电网信息化、数字化、自动化以及互动化的特征，必须要引入新的计算、通信和控制技术，实现发、输、变、配、用电及调度各类信息数据在电力物理系统中的双向流动和交互，从而提高电力系统自身的信息感知和智能处理能力。随着云计算、物联网、无线通信等技术的发展与成熟，信息物理融合系统（Cyber Physical System, CPS）成为信息技术的研究热点，CPS实现了信息系统与物理系统的综合整体设计，使该系统更加可靠、高效、实时协同。因此，它是实现电力信息系统和物理系统之间的融合协作的新途径^[1-3]。

随着信息通信技术在智能电网关键领域中的日益广泛应用，智能电网已经逐渐演变成信息空间与物理空间相融合的信息物理系统，其中物理

空间主要包括所有电力一次设备，信息空间包括所有电力二次系统和信息系统。通过信息通信技术的广泛应用，极大地增强了信息通信技术对电力系统的控制作用，实现了电力系统信息流、电力流和控制流的深度融合。

当信息系统和物理系统深度融合，且信息系统对物理系统的运行控制产生影响后，原有信息系统的各类安全风险也自然会被引入到电网物理系统中。随着云计算、无线通信等信息通信技术在智能电网发电、输电、配电、用电等环节的不断深入应用，必将产生大量新的安全风险和漏洞，导致从互联网对电力物理系统的入侵和攻击的概率大大增加。传统的电网停电事故，大都是跟自身物理系统的安全性遭受破坏紧密相关。但随着智能电网复杂性的日益增加，黑客通过信息系统的安全漏洞对电力物理系统进行恶意攻击的技术手段也在不断增加。由于电力物理系

统对信息系统和控制系统的依赖性、控制网络自身脆弱性和电网自身复杂性，从而对电力控制系统的网络攻击都会造成电力物理系统的大面积崩溃，最终发生大面积停电事故。在电力CPS中显著的安全隐患就是信息空间中的信息安全风险必然会影响到电力物理空间中，形成连锁反应，最终导致物理空间的崩溃。2010年9月的伊朗“震网”病毒爆发恰证实了这种跨越信息空间和电力空间边界并引发严重后果的可能性。因此，信息通信的高速发展在提高电力运行控制能力的同时，也给电力物理系统埋下重要的安全隐患。

本文从电力CPS的安全需求出发，系统全面的分析现有的电力信息物理系统的安全现状、安全需求、安全威胁以及相应的防护措施，继而介绍了电力信息物理融合系统的静态和动态模型的建模方法以及其综合控制策略。最后，针对目前电力信息物理融合系统的若干发展动态，对电力信息物理融合系统安全及建模控制技术方面的未来研究做了展望。

1 电力CPS安全威胁及防护

1.1 安全威胁

整个电力CPS的安全威胁主要来自于电力物理

空间和电力信息空间，从物理空间层面，文献[1]指出电力物理系统存在的安全风险主要包括本地电源符合匹配度、自然灾害、分区负荷变化、输电线路故障、分区供电可靠性、小扰动稳定、暂态稳定、电压稳定、继电保护设备故障、电网通信设备故障等。从信息空间层面，目前电力信息系统存在的安全风险主要包括软硬件故障、物理环境影响、恶意代码、各类网络攻击、各类物理攻击、泄密、篡改、抵赖、操作失误、管理不到位、越权或滥用等。图1显示了电力信息物理融合系统安全威胁的几个重要方面。

1.2 安全需求

在电力信息系统与物理系统相互融合的过程中，其安全是电力CPS安全稳定运行的前提和基础。根据传统的信息安全特性将电力CPS的安全需求归为以下三类：

(1) 机密性：由于电力CPS是由多种网络系统构成，极易造成用户隐私泄露，电力CPS的机密性重点表现为电力CPS中所涉及到的所有信息只能被授权方使用。

(2) 完整性：电力CPS的完整性主要是指数据在传输过程中不被窃取、篡改、删除等行为，从而接收方收的数据和发送方一样。

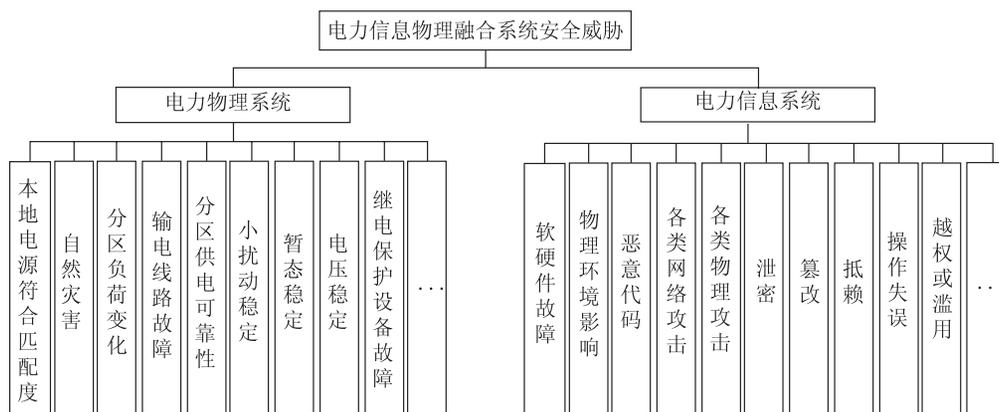


图1 电力信息物理融合系统安全威胁

(3) 可用性: 电力CPS的可用性也贯穿于数据流动的全过程, 主要是指时刻保持电力CPS中的各类数据或者信息系统随时为授权的用户提供服务。

1.3 安全方法的研究现状

电力信息物理系统是国家的關鍵基础设施之一, 如何保障其安全性和可靠性是当前国内外学术界和产业界重点研究的热点问题。现有的研究大都集中在电力信息物理系统生存性、网络及应用安全、脆弱性及分析评估等方面。

1.3.1 电力信息物理系统自身安全性

整个电力信息物理系统的安全性分析主要包括物理系统的安全性和信息系统的安全性两部分^[1]。传统的物理系统的安全性(包括暂态稳定、电压稳定等)已广泛引起电力领域专家的研究和关注, 但信息系统的安全性同样对于大电网的安全稳定运行也起到至关重要的支撑作用^[4]。文献[5]讨论了在有限的信息条件下, 针对互联电力系统的漏洞进行恶意攻击的问题, 文献[6]讨论了信息网和电力网之间存在的脆弱性相互依存关系, 文献[7]讨论了级联网络中可能出现的灾难性连锁故障。文献[8]把未来智能电网视为信息和物理融合的超大规模二元复合网络(CPPG), 阐述了其安全性问题, 并从复杂网络的角度提出了CPPG的网络建模、连锁故障机理分析和脆弱度评估等方面的新思路。

1.3.2 网络及应用安全

Thomas M. Chen等针对智能电网的信息物理攻击, 基于Petri网灵活丰富的功能^[9], 结合智能电网信息安全需求, 设计一种分层结构来构建大的Petri网, 该Petri网囊括了智能电网众多领域专家给出的信息安全风险。文献[10]研究了一种通过控制计

量终端来对电力系统进行恶意数据攻击的行为, 同时针对电力控制中心深入分析了攻击者的攻击方法, 并提出相应的应对措施。文献[11]针对电力交易行为的恶意数据注入攻击的经济影响进行了深入分析, 描述了针对IEEE 14-bus系统的实时市场交易的恶意数据攻击的潜在影响。由于智能电网网络架构复杂, 任意智能计量设备、传感器或子网都有可能给整个智能电网带来新的脆弱性风险。文献[12]提出了一种针对智能电网多层网络架构的分布式入侵检测系统, 通过在智能电网各个层次中分布式部署智能入侵检测模块来实时检测针对智能电网的入侵行为。

1.3.3 脆弱性及风险评估

Nian Liu等提出了基于IEC 61850的电力控制系统的信息安全风险评估中资产识别和评估方法及在变电站中的应用, 但在文中并没有给出一个完整的针对电力控制系统的信息安全风险评估方法和流程^[13]。Chee-Wooi Ten等构建了系统性评估电力CPS脆弱度的基本框架, 同时分析了网络攻击对电力系统的数据采集和监控(SCADA)系统的影响^[4]。文献[15]提出基于故障链理论的电力系统输电网络脆弱性评估方案, 以此评估电力系统发生级联故障时的输电脆弱性。Ettore Bompard等提出针对电力系统恶意攻击的风险评估方案^[6]。Anurag Srivastava建了基于电网信息通信脆弱性的攻击模型^[17]。文献[18]给出了错误数据注入攻击下AC状态估计的脆弱性评估方法。

随着电力信息物理系统的进一步发展, 未来将从电力信息系统和物理系统作为一个整体的角度, 归纳分析影响电网安全稳定的信息系统和物理系统的安全风险, 构建电力信息物理系统整体安全模型以及电力信息系统安全与物理系统安全之间的相互制约模型, 从而为电网安全稳定提供决策。

1.4 防护技术的研究现状

为了更好地保证电力CPS从物理和信息两个层面的安全，重点需要引入安全认证、访问控制、隐私保护、加密等技术。

1.4.1 安全认证

从信息安全的角度考虑，认证主要包括身份认证和消息认证两种。其中身份认证主要使通信双方确信对方的身份并交换会话密钥，从而保证通信双方身份的安全可信；消息认证主要用于验证传输消息的完整性，保证接收方接收的消息确实来自真正的发送方，且没有被恶意篡改。文献[19]提出针对多服务器环境下的基于配对的用户认证协议，由于该协议使用椭圆曲线离散对数，使得该协议更加的安全和高效。文献[20]在文献[19]基础上提出了一个改进的用户认证方案，进一步提高了安全性，更加适用于现实的应用环境中。由于电力CPS中大量地使用嵌入式终端，使得终端计算和存储资源都有限，因此未来认证技术必须尽可能地降低计算和通信开销，从而满足实际需求。

1.4.2 访问控制

访问控制是对用户合法使用资源的认证和控制，主要包括自主访问控制、强制访问控制以及基于角色的访问控制（role-based access control, RBAC）。文献[21]从理论和应用研究两个角度分析和总结了现有访问控制技术、访问控制策略冲突检测与消解方法的研究现状，提出了目前访问控制模型及其冲突检测与消解研究在面向信息物理社会的泛在网络互联环境中存在的问题，并给出了细粒度多级安全的访问控制模型及其策略可伸缩调整方法的发展趋势。

1.4.3 隐私保护

由于电力CPS环境下的信息感知设备无处不

在，因此信息泄露的风险也较大；同时，采集得到的信息在节点之间、核心承载网络传输过程中也会导致隐私的泄露。因此，保护用户隐私，防止其泄露是电力CPS安全稳定运行必须解决的问题。文献[22]提出了一种面向数据发布和分析的差分隐私保护算法，更好地解决隐私数据保护和防止敏感信息泄露的问题。文献[23]提出了一种新的无线传感器网络数据隐私保护技术，解决了无线传感器网络中数据聚集、数据查询和访问控制中的数据隐私保护问题。

1.4.4 加密

加密是实现电力CPS中信息传输、存储等过程中安全保证的一项重要技术，也是实现认证和隐私保护的基础技术。现在常用的加密算法包括3-DES、RSA等，随着用户对加解密性能以及加密数据直接处理的需求，同态加密、半同态加密将越来越受到重视。2009年 Gentry 在他的博士论文^[24]中提出了一个基于理想格的全同态加密算法。文献[25]提出利用容错学习问题构造基于身份的全同态加密体制，克服了公钥尺寸对于全同态加密应用效率的影响。文献[26]设计了一个基于RLWE 的非自举的层次化全同态加密方案，并给出了给出一个降低解密算法复杂度的新方法。

2 电力CPS建模控制技术

2.1 电力CPS的稳态和动态模型

与电力物理系统相类似，电力信息系统亦是一个网络化系统，因此其稳态模型也可表示为一个网络流量模型。在电力信息系统中，传感设备和部分计算设备是信息流的起点，它们的作用是产生信息流并将其输送至通信网络中。而剩余部分计算设备的功能则是接收信息流并进行相应的分析处理，也就是作为信息流的终点。通信网络

是传输信息的媒介，其中路由器等信息交换设备的主要功能是决定每一个到达交换设备的数据包下一步应该被交换到哪一个节点。换言之，路由器的功能即是决定信息流在通讯网络中的具体流向。通常情况下，领域内的专家学者使用节点信息流量平衡方程、节点最大信息流量约束、线路最大信息流量约束等数学模型对信息系统作稳态分析，求取其稳态运行点^[27]。

电力信息系统的稳态模型主要用于解决信息流在通信网络中的路径分配问题。在理想情况下，所有线路和路由器上的信息流量均不应大于其带宽和交换能力上限，此时电力信息系统处于稳定运行状态。然而在实际运行中，由于信息源注入信息的速率过快，部分线路和路由器上注入的信息流量常常会超过其带宽或处理能力，其结果是有可能造成信息传输的显著延迟和部分数据包的丢失。这就就是所谓的通信网络阻塞问题。当通信网络发生阻塞发生时，电力信息系统会从稳态进入到一个动态过程，并在通信网络控制系统的作用下，过渡到另一个新的稳态。然而这个过渡过程中采取的不当控制措施可能导致所在通信网络的阻塞崩溃。在通信网络的实际运行中经常会发生网络阻塞现象，因而为电力信息系统建立准确的动态模型对于评估其性能是非常必要的。领域内的专家学者利用微分代数方程组、有穷自动机、随机过程、排队论等工具，建立起电力信息系统的动态模型^[28]。将电力信息系统的动态模型与电力物理系统的动态模型联立即可得到电力CPS的动态模型。

2.2 电力CPS的综合控制策略

电力CPS从实质上来看是一种分布式网络化控制系统，尽管目前已有多种方式处理分布式网络化控制系统安全控制问题，但甚少考虑安全性机制对系统性能的影响。电力CPS的安全性与其系统性能的需求通常是相互制约的，在处理其安全性

问题时，一种可行的途径是建立性能-安全权衡模型进行分析。首先，基于电力系统的控制目标建立其性能度量；其次，建立描述各安全机制下安全性强度的安全度量。基于这两种度量指标进一步确定出每种安全机制的使用能够提供多少安全性及削减多少系统性能，进而可以基于这两种度量设定权衡目标函数，建立优化问题模型并进行求解，最终综合电力CPS的安全性和系统性能的双重考虑，获取能够保障电力信息系统和物理的系统安全性能和优化控制的综合控制策略，最终目的是达到电力信息系统和物理系统安全性能和平衡，促进电力信息物理系统在信息安全方面的健康有序的发展。

此外，未来的电力系统将高度依赖于通信技术，电网中的各元件基于所构建的通信网络交互彼此的信息，进而形成适用于电力系统运行要求的控制策略，由此可见，电力系统将向着物理关联拓扑和通信连接拓扑相互融合的结构框架发展。任何一种拓扑结构上的不安全因素不仅会影响到单个结构上的电气元件的运行，同时还会经由另一种拓扑结构扩散影响至更多的电气元件，不安全因素在两种拓扑结构间的交叉传播将对电力系统的稳定运行造成严重危害。为此，电力CPS的安全防护必须考虑双网（物理关联网、通信连接网）耦合的因素，建立相应的评判体系。

3 展望

传统的电力系统研究中，由于缺乏考虑信息系统与物理系统的融合与耦合特性，在相关理论与方法研究中通常是从系统解耦的角度进行分别研究，这也是阻碍电力信息系统与物理系统深度融合并最终实现智能电网的主要障碍之一；实际应用中，这些研究工作和所得到的成果并不能适应电力物理融合系统的安全运行需求。而我们知道，从电力CPS的安全运行的实际需求出发，作者

认为有两方面的工作值得去研究：首先，将从电力信息系统和物理系统作为一个整体的角度，归纳分析影响电网安全稳定的信息系统和物理系统的安全风险，构建电力信息物理系统整体安全模型以及电力信息系统安全与物理系统安全之间的相互制约模型，从而为电网安全稳定提供决策；其次，综合电力CPS的安全性和系统性能的双重考虑，获取能够保障电力信息系统和物理的系统安全性和优化控制的综合控制策略。上述研究内容的最终目的是达到电力信息系统和物理系统安全性和平衡，促进电力信息物理系统在信息安全方面的健康有序的发展。

参考文献

- [1] 赵俊华,文福拴,薛禹胜. 电力CPS的架构及其实现技术与挑战. 电力系统自动化, 2010,34(16):1~7.
- [2] 鞠平,秦川,黄桦,吴峰,金宇清. 面向智能电网的建模研究展望. 电力系统自动化, 2012,36(11):1~6.
- [3] 余贻鑫,栾文鹏. 智能电网的基本理念. 天津大学学报, 2011,44(5):377~384.
- [4] Saman Zonouz, Katherine M. Rogers, Robin Berthier, Rakesh B. Bobba, William H. Sanders, Thomas J. Overbye. SCPSE: Security-Oriented Cyber-Physical State Estimation for Power Grid Critical Infrastructures. IEEE Transactions of Smart Grid, 2012, 3(4):1790~1799.
- [5] BOMPARD E, NAPOLI R, XUE E. Vulnerability of interconnected power systems to malicious attacks under limited information. European Transactions on Electrical Power, 2008, 18(2): 820~834.
- [6] VESPIGNANI A. The fragility of interdependency. Nature, 2010, 464(15): 984~985.
- [7] BULDYREV S PARSHANI R PAUL G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. Nature, 2010, 464(15):1025-1028.
- [8] MEI Sheng-wei, WANG Ying-ying, CHEN Lai-jun. Overviews and Prospects of the Cyber Security of Smart Grid from the View of Complex Network Theory. High Voltage Engineering, 2011,37(3):672~679.
- [9] Thomas Chen, Juan Carlos Sanchez-Aarnoutse, and John Buford. Petri Net Modeling of Cyber-Physical Attacks on Smart Grid. IEEE Transactions of Smart Grid, 2011, 2(4):741~749.
- [10] Oliver Kosut, Liyan Jia, Robert Thomas, and Lang Tong. Malicious Data Attacks on the Smart Grid. IEEE Transactions of Smart Grid, 2011, 2(4):645~658.
- [11] Le Xie, Yilin Mo, and Bruno Sinopoli. Integrity Data Attacks in Power Market Operations. IEEE Transactions of Smart Grid, 2011, 2(4):659~666.
- [12] Yichi Zhang, Lingfeng Wang, Weiqing Sun, Robert C. Green II, and Mansoor Alam. Distributed Intrusion Detection System in a Multi-Layer Network Architecture of Smart Grids. IEEE Transactions of Smart Grid, 2011, 2(4):796~808.
- [13] Nian Liu, Jianhua Zhang, Xu Wu. Asset Analysis of Risk Assessment for IEC 61850-Based Power Control Systems-Part II: Application in Substation. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011,26(2):876~881.
- [14] Chee-Wooi Ten, Chen-Ching Liu, Govindarasu Manimaran. Vulnerability Assessment of Cybersecurity for SCADA Systems. IEEE Transactions on Power Systems, 2008,23(4):1836~1846.
- [15] Ansi Wang, Yi Luo, Guangyu Tu, and Pei Liu. Vulnerability Assessment Scheme for Power System Transmission Networks Based on the Fault Chain Theory. IEEE Transactions on Power Systems, 2011,26(1):442~450.
- [16] Ettore Bompard, Ciwei Gao, Roberto Napoli, Angela Russo, Marcelo Masera, and Alberto Stefanini. Risk Assessment of Malicious Attacks Against Power Systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2009,39(5):1074~1085.
- [17] Anurag Srivastava, Thomas Morris, Timothy Ernster, Ceeman Vellaithurai, Shengyi Pan, Uttam Adhikari. Modeling Cyber-Physical Vulnerability of the Smart Grid With Incomplete Information. IEEE Transactions of Smart Grid, 2013,4(1):235~244.
- [18] Gabriela Hug, Joseph Andrew Giampapa. Vulnerability Assessment of AC State Estimation With Respect to False Data Injection Cyber-Attacks. IEEE Transactions of Smart Grid, 2012, 3(3):1362~1370.
- [19] Liao Y P, Hsiao C M. A novel multi-server remote user authentication scheme using self-certified public keys for mobile clients [J]. Future Generation Computer Systems, 2013, 29(3): 886-900.
- [20] Hsieh W B, Leu J S. An anonymous mobile user authentication protocol using self-certified public keys based on multi-server architectures [J]. The Journal of Supercomputing, 2014:1-16.
- [21] 李凤华,苏芒,史国振,马建峰. 访问控制模型研究进展及发展趋势[J]. 电子学报, 2012,40(4):805-813.

- [22] 张啸剑,孟小峰. 面向数据发布和分析的差分隐私保护[J]. 计算机学报, 2014,37(4):927-949.
- [23] 范永健,陈红,张晓莹. 无线传感器网络数据隐私保护技术[J]. 计算机学报, 2012,35(6):1131-1146.
- [24] Gentry C. A fully homomorphic encryption scheme [D]. Stanford University, 2009.
- [25] 光焱,跃飞,费金龙,顾纯祥,郑永辉. 利用容错学习问题构造基于身份的全同态加密体制[J]. 通信学报, 2014,35(2):111-117.
- [26] 汤殿华,祝世雄,王林,杨浩森,范佳. 基于RLWE 的全同态加密方案[J]. 通信学报, 2014,35(1):173-182.
- [27] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 董朝阳. 电力信息物理融合系统的建模分析与控制研究框架, 电力系统自动化, 2011, 35(16): 1-8.
- [28] Lee J, Bohaced S, Hespaha J P, et al. Modeling communication networks with hybrid systems[J]. IEEE/ACM Trans. On Networking, 2007, 25(3):630-643.

作者简介

岳 东 男, 1964年6月出生, 南京邮电大学先进技术研究院院长, 教授、博导、教育部长江学者特聘教授。目前担任IEEE Senior Member, 国际刊物Int.J.Systems Science的Associate Editor, Members of IEEE CSS Conference Editorial Board, Associate Editor, 中国自动化学会控制理论专业委员会委员, 中国自动化学会过程控制专业委员会委员, 中国自动化学会智能自动化专业委员会委员, 江苏省自动化学会常务理事。目前研究方向: 网络化控制、智能电网优化协调控制、物联网与CPS、煤矿信息化与远程监控以及工业自动化装备等。

邓 松 男, 1980年10月生, 博士, 南京邮电大学先进技术研究院高级工程师。中国计算机学会会员、江苏省电子学会信息安全专委会委员。主要研究方向智能电网信息安全、大数据等。

解相朋 男, 1982年5月生, 博士, 南京邮电大学先进技术研究院副教授。主要研究方向网络化控制、电力CPS等。

含分布式电源的配电网故障诊断综述

张铁岩, 关焕新, 于宏涛

沈阳工程学院 自动化学院, 沈阳 110136

摘要: 能源紧缺和环境恶化日趋严重, 节能减排是当今世界急于解决的大问题。大力发展分布式发电, 有助于转变能源生产与消费方式、优化能源结构、防治大气污染。随着新能源技术的不断进步和发展, 光伏、风电等分布式电源广泛地接入电网, 分布式电源有着极强的随机性和波动性, 造成配电网潮流分布大小和方向的极其不确定性, 进而使得传统意义上的潮流和故障特性发生根本性改变, 给电网的运行与维护提出了许多新的挑战。本文对近几年来含分布式电源的配电网故障诊断理论和方法的研究进行了深入的调查分析。总结了含分布式电源的配电网主要信息处理、建模和典型故障诊断方法, 指出了含分布式电源的配电网故障诊断发展趋势。

关键词: 分布式电源, 配电网, 故障诊断

引言

分布式电源接入配电网带来清洁环保、供电可靠和发电方式灵活好处的同时, 由于以风电、太阳能发电为代表的分布式能源具有较大波动性, 所以, 分布式电源的并入, 增加了配电网的复杂性和极其不确定性, 导致配电网运行安全性和可靠性受到严重威胁。因此, 含分布式电源配电网故障诊断应该成为世界性电网运行安全领域的重点研究方向。

目前, 对传统配电网故障具有较好的实时诊断与定位技术, 但缺乏对含有分布式电源配电网发生小电流接地、孤岛效应和混沌振荡等故障的有效诊断方法研究。发生接地故障时, 由于真实故障电流本身微弱, 加之, 分布式电源有着极强的随机性、波动性和不对称性, 使得故障难以判定, 容易导致事故扩大, 影响供电可靠性; 发生孤岛效应时, 对系统和用电设备等造成危害,

低劣的电能质量损害孤岛中的负荷, 甚至威胁电力线路上的工作人员的生命安全; 发生混沌振荡时, 导致电力系统产生一种非周期的、无规则的、突发性或阵发性的机电振荡, 严重时导致电力系统的解列, 甚至崩溃。含分布式电源配电网小电流接地故障、孤岛效应和混沌振荡的诊断是目前国际公认的难题, 至今从理论上和方法上的探讨还很少。

1 含分布式电源的配电网故障诊断研究现状

1.1 含分布式电源的配电网故障信息处理

故障信息的智能处理是配电网故障诊断的前提。随着智能配电网的发展, 分布式电源并网的容量占比逐渐日益增大, 其数字化信息呈爆炸性增长态势, 对配电网的信息处理技术进一步提

出了新的挑战。关于配电网信息处理的研究,毕睿华等^[1]提出在多智能体系统模型基础上构建面向服务架构结构体系解决电力信息系统集成问题。Prymek等^[2]提出了基于智能体的配电网模型。El-Zonkoly^[3]提出了基于多智能体技术的含分布式电源配电故障诊断方法。Rumley等^[4]提出了一种新的基于多智能体技术的配电网组态方法。

1.2 含分布式电源的配电网数学模型

数据驱动模型法是指利用系统的实时和历史数据,实现系统基于数据的故障诊断方法^[5,6]。孙秋野等^[7]提出了一类直觉不确定粗糙集及其约简算法,考虑了智能电网故障的随机因素影响,特别是信息判断因素的影响,实现了对智能电网故障诊断原始规则的约简方法设计。Akhavan-Rezai等^[8]提出了基于数据驱动模型表示瞬时故障率,以此对配电网的故障进行诊断的方法。李晗等^[9]介绍了基于数据驱动的故障诊断方法研究动机和国内外发展现状,并指出了基于数据驱动故障诊断方法的几个具有前景的研究方向。Weng^[10]提出了基于数据驱动对电力系统在线状态估计。

神经网络起源于20世纪40年代,此后引起了国内外学者的广泛关注,对各种类型神经网络^[11-16]进行了大量的研究和分析。Javadian等^[17]提出了基于神经网络的一种新型含分布式电源配电网故障定位和保护方法,这种方法使用MLP神经网络能够得到准确的故障类型、故障位置。刘文轩等^[18]研究了应用LVQ神经网络实现了故障分支的判别。Zayandehroodi等^[19]2010年提出了基于径向基函数神经网络的含分布式电源配电网故障测距方法,该方法具有较好的测距精度。Zayandehroodi等^[20]2012年又进一步提出了用继电器保护的协调策略故障定位方法,该方法使用两个径向基神经网络,第一个神经网络确定每个故障源的故障距离,第二个神经网络识别故障

线路,确定故障线路后,再用保护继电器协调实施,使用回溯算法来调整运行状态。

1.3 含分布式电源的配电网典型故障

小电流接地故障是指电力系统的中性点不接地或经过消弧线圈接地,这样当发生相线对地故障时,流过故障点的电流(电容电流)比直接接地时的电流(单相短路电流)小。小电流接地的中低压配电网是我国配电网的显著特征,小电流接地故障是主要故障,发生小电流接地故障时,由于故障电流微弱、电弧不稳定等原因,难以准确判断。文献[21,22]利用小波包多尺度分解的分频特性,按照能量最大的观点确定出各条线路故障特征较为明显的特征频带,然后在该特征频带下通过比较它们幅值或极性的关系判断出故障线路。郑顾平等^[23]提出一种小电流接地故障区段定位新方法,通过在线路上配置广域相量测量固定测点,获取小电流电网单相接地故障的特征信息。张林利等^[24]提出一种基于线电压和零模电流暂态分量的故障定位新方法,该方法借助馈线自动化系统实现,不需要额外增加设备。

孤岛效应是指包括分布式发电系统的电网因为故障事故或停电维修而跳闸时,各个用户端的分布式发电系统未能及时检测出停电状态而将自身切离市电网络,最终形成由分布式并网发电系统及其相连负载所组成的一个自给供电的孤岛发电系统。顾和荣等^[25]采用有源负序分量扰动法,其检测速度快,但会导致保护发生误动作。Zeineldin^[26]提出了一种带Q-f下垂曲线的孤岛检测方法,并按IEEE 1547和UL 1741标准进行了详细的测试,但其未考虑功率外环对检测算法的影响。杨秋霞等^[27]分析了电流扰动孤岛检测对进网电流的影响,指出该方法简单实用,但容易导致检测失误。Samantary等^[28]提出了基于规则的模糊分类器检测分布式发电中孤岛效应。Chao等^[29]提出基于

小脑模型控制器 (CMAC) 神经网络光伏发电的孤岛检测方法, 首先利用孤岛现象的测试数据作为训练样本训练CMAC神经网络, 然后, 测试光伏发电系统的孤岛现象。由于CMAC神经网络具有联想和归纳能力和特点, 从而减少了训练时间, 量化的输入信号能够提高检测能力。

混沌振荡是指那些非周期的、似乎无规则的、突发性或阵发性的病态机电振荡。混沌振荡是非线性系统中各参数相互作用导致的一种非常复杂的现象, 它在电力系统中出现时, 伴随运行参数的改变, 系统将出现持续无规则的振荡, 可能导致系统失稳, 严重危害系统的安全运行。Yu等^[30]研究了混沌振荡与电力系统不同失稳模式的关系。Yang等^[31]运用拓扑马蹄理论通过计算机计算拓扑熵证明了简单电力系统混沌的存在性。倪骏康等^[32]提出了等效快速终端模糊滑模控制来抑制电力系统混沌振荡, 使其恢复到同步运行状态。

2 含分布式电源的配电网故障诊断未来研究方向

2.1 含分布式电源的配电网故障信息处理方法

随着含分布式电源的配电网对数据处理能力的要求日益提高, 智能化手段的应用就成为了未来含分布式电源的配电网数据获取和处理的主要发展趋势。在数据获取和处理方面, 未来研究主要集中在高精度、微型化、微功耗、智能化及可靠性五个方向。

2.2 含分布式电源的配电网建模方法

数据驱动模型不要求对研究对象的复杂机理加以分析, 无需建立精确的数学模型, 基于该模型诊断配电网中等程度或大程度的故障效果较

好, 而诊断含大量分布式电源配电网小故障时, 容易造成错报, 效果较差。神经网络模型法具有很强的非线性拟合能力, 可映射任意复杂的非线性关系, 而且学习规则简单, 便于实现, 但神经网络的权重和阈值对其性能影响较大。结合数据驱动模型和神经网络模型两者优势的混合模型将成为一个有意义的研究方向。

2.3 含分布式电源的配电网故障诊断方法

对于小电流接地故障诊断和混沌振荡抑制已有文献并没有考虑分布式电源的接入, 对于这两方面的研究今后将成为重要的研究方向。孤岛检测常通过采集电压, 频率, 相位等参数, 基于远程或本地检测法来检测孤岛。由于远程检测法成本高, 本地检测方法比较常用, 本地检测方法包括主动检测法和被动检测法, 被动检测法阈值难以准确界定; 主动检测法由于向电网中施加了扰动, 导致降低逆变系统的效率, 进而影响电能质量, 因此, 主动检测法和被动检测法的结合及智能方法的应用是未来孤岛检测研究发展趋势。

3 结论

为了解决能源紧缺和环境污染严重问题, 分布式电源接入配电网成为了发展趋势。配电网接入分布式电源在优化了能源结构的同时, 也增加了其复杂性和不确定性, 从而保障配电网安全可靠运行成为了重要的研究课题。本文首先总结了含分布式电源的配电网的信息处理、建模和故障诊断方法, 可以归纳为目前含分布式电源的配电网信息处理主要基于多智能体技术, 数学建模主要采用数据驱动法, 典型故障及其诊断主要包括小电流接地、孤岛检测和混沌振荡抑制等, 最后指出了含分布式电源的配电网故障诊断研究发展方向。

参 考 文 献

[1] 毕睿华, 杨志超, 王玉忠. 基于多智能体SOA模型的电力系统信息集成的应用研究. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 63-68.

[2] Prymek M, Horak A. Multi-agent approach to power distribution network modeling. Integrated Computer-Aided Engineering, 2010, 17(4): 291-303.

[3] El-Zonkoly A M. Fault diagnosis in distribution networks with distributed generation. Electric Power Systems Research, 2011, 81(7): 1482-1490.

[4] Rumley S, Kagi E, Rudnick H, et al. Multi-agent approach to electrical distribution networks control. Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference, 2008: 575- 580.

[5] 侯忠生, 许建新. 数据驱动控制理论及方法的回顾和展望. 自动化学报, 2009, 35(6): 650-667.

[6] Xu J X, Hou Z S. Notes on data-driven system approaches. ACTA Automatica SINICA, 2009, 35(6): 668-675.

[7] 孙秋野, 张化光, 李钟旭等. 数据驱动的不确定信息下智能电网故障诊断. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(1): 905-911.

[8] Akhavan-Rezai E, Haghifam M R, Fereidunian A. Data-driven reliability modeling, based on data mining in distribution network fault statistics. PowerTech, 2009 IEEE Bucharest, 2009: 1-6.

[9] 李晗, 萧德云. 基于数据驱动的故障诊断方法综述. 控制与决策, 2011, 26(1): 1-9, 16.

[10] Weng Y. Historical data-driven state estimation for electric power systems. 2013 IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 2013: 97-102.

[11] Guan Huanxin, Wang Zhanshan, Zhang Huaguang. Adaptive synchronization of different kinds of chaotic neural networks. Journal of Control Theory and Applications, 2008, 6(2): 201-207.

[12] 关焕新, 王占山, 张化光. 不确定双向联想记忆神经网络的稳定性分析. 控制理论与应用, 2008, 25(3): 421-426.

[13] 关焕新, 王占山, 张化光. 具有时滞的双向联想记忆神经网络的鲁棒稳定性?. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28(8): 1069-1072.

[14] Zhang Huaguang, Guan Huanxin, Wang Zhanshan. Adaptive synchronization of neural networks with different attractors. Progress in Natural Science, 2007, 17(6): 687-695.

[15] Liu Zhenwei, Zhang Huaguang, Zhang Qingling. Novel stability analysis for recurrent neural networks with multiple delays via line integral-type L-K functional. IEEE Transactions on Neural Networks, 2011, 21(11): 1710-1718.

[16] Ma Dazhong, Zhang Huaguang, Wang Zhanshan, Feng Jian. Fault tolerant synchronization of chaotic systems based on T-S fuzzy model with fuzzy sampled-data controller. Chinese Physics B, 2010, 19(5): 050506.

[17] Javadian S A M, Haghifam M R, Rezaei N. A fault location and protection scheme for distribution systems in presence of DG using MLP neural networks. 2009 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2009: 1-8.

[18] 刘文轩, 严凤, 田霖等. 基于LVQ神经网络的配电网故障定位方法. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 90-95.

[19] Zayandehroodi H, Mohamed A, Shareef H, et al. Performance comparison of MLP and RBF neural networks for fault location in distribution networks with DGs. 2010 IEEE International Conference on Power and Energy, 2010: 341-345.

[20] Zayandehroodi H, Mohamed A, Shareef H, et al. A novel neural network and backtracking based protection coordination scheme for distribution system with distributed generation. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1): 868-879.

[21] 戴剑锋, 张艳霞. 基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 44-47.

[22] 潘露, 吕艳萍, 于芳等. 基于相频特性与多频带分析的小电流接地系统故障选线. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 76-79.

[23] 郑顾平, 姜超, 李刚等. 配网自动化系统中小电流接地故障区段定位方法. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 103-109.

[24] 张林利, 徐丙垠, 薛永端等. 基于线电压和零模电流的小电流接地故障暂态定位方法. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 110-115.

[25] 顾和荣, 赵清林, 伞国成等. 三相并网逆变器有源孤岛检测方法研究. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 44-47.

[26] Zeineldin H H. A Q-f droop curve for facilitating islanding detection of inverter-based distributed generation. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 665-673.

[27] 杨秋霞, 赵清林, 郭小强. 三相光伏并网逆变器电流扰动孤岛检测建模及分析. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 45-49.

[28] Samantary S R, EI-Arroudi K, Joos G, et al. A fuzzy rule-based approach for islanding detection in distributed generation. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1427-1433.

[29] Chao K H, Yang M S, Hung C P. Islanding detection method of a photovoltaic power generation system based on a CMAC neural

- network. Energies, 2013, 6(8): 4152-4169.
- [30] Yu Y X, Jia H J, Li P, et al. Electric power systems research. Electric Power Systems Research, 2003, 65(3): 187-195.
- [31] Yang X S, Li Q D, Cheng S J. Horseshoe chaos and topological entropy estimate in a simple power system. Applied Mathematics and Computation, 2009, 211(2): 467-473.
- [32] 倪骏康, 刘崇新, 庞霞. 电力系统混沌振荡的等效快速终端模糊滑模控制. 物理学报, 2013, 62(19): 190507.

作者简介

张铁岩 博士, 教授, IEEE会员, 现任沈阳工程学院院长, 兼任辽宁省电力仿真控制工程技术中心主任, 辽宁省高等学校“智能电网故障诊断-安全预警-自愈控制”创新团队负责人, 辽宁省电机工程学会常务理事, 2008入选辽宁省第五批省级优秀专家。主要研究方向为变压器优化控制、智能电网分析及组网技术、分布式发电系统建模及分析等。先后主持完成国家自然科学基金、辽宁省科技攻关项目、沈阳市重点科研项目等国家、省、市级纵向科研课题10余项, 横向科研课题近20项; 获辽宁省科技进步一等奖1项, 辽宁省科技进步二等奖3项, 辽宁省技术发明三等奖1项, 辽宁省科技进步三等奖2项, 获2项中国或美国发明专利授权, 申请公开中国发明专利5项; 出版学术专著1部、教材3部, 在公开出版的学术刊物上发表学术论文40余篇, 其中SCI、EI收录近20篇。

关焕新 沈阳工程学院自动化学学院院长, 硕士生导师, 主要研究方向为智能控制、信息处理、故障诊断和电力系统自动化等。主持省级科研项目1项, 横向科研项目2项, 已获得发明专利2项, 实用新型专利3项。发表学术论文16篇, 其中3篇被SCI检索, 9篇被EI检索, 出版学术专著1部。

于宏涛 沈阳工程学院自动化学学院教师, 主要研究方向为智能控制与决策。

能源互联系统的基础架构及关键技术

孙秋野, 郭 靖

东北大学 信息科学与工程学院电气自动化所, 沈阳 110819

摘要: 未来能源网中, 小型的分布式电源和大型的分布式电源并存。相比传统的集中发电技术, 采用本地能源发电可以实现本地区域灵活供电, 提高供电质量, 在出现大电网系统性瓦解等灾难性停电事件时, 分布式发电系统可以对敏感负荷持续供电, 同时也可以有助于大电网恢复供电, 降低停电所造成的经济损失。随着社会的发展, 用户的需求也越来越多样化, 分布式发电在实际应用中可以提供多种服务, 如备用发电, 削峰填谷等, 综上分布式发电技术将成为未来智能电网的有力补充和有效支撑, 所以更加复杂的电网结构和能量传输技术是未来发展的研究的必然趋势, 能源互联系统的概念由此诞生。该论文首先介绍了能源互联系统的研究背景和意义, 接下来分析了能源互联系统的研究现状, 然后阐述了能源互联系统智能互联系统的基础框架, 最后阐述了能源互联系统的关键技术及电力电子设备的未来发展方向。

关键词: 能源互联系统, 智能优化, 故障诊断

1 能源互联系统的研究背景及意义

当今能源消耗有相当一部分是由不可再生能源(化石燃料、天然气等)产生的, 而可再生能源的利用率却非常低, 目前世界各国电力系统都基本发展成为集中发电, 远距离输电的大规模电力系统, 但是随着电力系统规模的增大使得它的一些问题也逐渐显现出来, 其中包括运行难度增加, 整体成本增高, 系统运行方式改变困难。此外, 电网不易感知负荷的细微变化, 无法很好的跟踪负荷改变, 不能满足用户对电能质量越来越高的要求。

鉴于上述背景, 针对我国微网的特点, 面对即将到来的“第三次工业革命”, 应对全球能源和环境挑战, 推动节能减排, 重视可再生能源的

利用, 优化能源使用, 大力发展智能电网和智能微网的战略, 探索适合我国未来能源网发展的智能微网架构具有十分重大的现实意义, 其主要意义有如下两点:

(1) 落实国家能源战略构建现代能源产业体系:

温家宝在批示中表示: “国家电网公司认真贯彻中央决策部署, 狠抓风电发展的基础性工作和关键环节, 有效解决了风电发展中的各种困难和问题, 在不太长的时间内使我国并网风电跃居世界第一, 成绩来之不易。要再接再厉, 完善制度和规范, 加强统一调度和管理, 积极推动技术进步和产业升级, 加快构建风能、太阳能等新能源开发利用、高效配置、安全运营平台, 为我国新能源长期、稳定、健康、可持续发展作出新的更大的贡献。”(2012年8月13日, 中共中央政治

局常委、国务院总理温家宝对国家电网公司促进风电等新能源发展工作作出重要批示)

(2) 建设坚强智能电网促进新能源可持续发展:

新能源发展还面临着新的挑战, 新能源具有显著随机性和间歇性, 大规模并网后, 需要增加快速调峰电源(抽水蓄能、燃气电站等)保障电网安全。全球风电装机规模最大的几个国家中, 西班牙的快速调峰电源比重达到34%, 是风电的1.7倍, 美国高达47%, 是风电的13倍。我国“三北”地区电源结构单一, 快速调峰电源比重不足2%, 难以适应风电更大规模建设的要求。

2 能源互联系统研究现状

2008年, 美国国家科学基金(NSF) 目未来可再生电力能源传输与管理系统(The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management system, FREEDM system) 提出了能源互联网这一概念, 指出能源互联网是一种构建在可再生能源发电和分布式储能装置基础上的新型电网结构, 是智能电网的发展方向。目前, 该研究在国内外都还处在理论和起步阶段。文献[1,2]提出了一个未来可再生电能传输和管理系统FREEDM(Future Renewable Electric Energy Delivery and Management systems), 目的是为了实现在未来能源系统的“即插即用”, 然而只是给出了能源互联系统的大致框架, 并且也没有考虑到当微网端发生故障时系统的反应以及负载的节能和优化问题。文献[3]利用联合电网智能管理CIMEG(Consortium for Intelligent Management of Electric-power Grid) 来构建能源互联网, CIMEG的任务是电网智能管理提供一个平台, 但是它主要的侧重点是在电力市场上。文献[4]研究了在构建能源互联系统的三个主要的问题及解决方案, 即能量加油站的位置和布局、能量需求和供应的最佳传输匹配、供热管

道的最佳路径设计。文献[5]利用博弈论在能源互联系统放松管制的电力市场中找到一个纳什均衡点。文献[6]考虑未来能源分散性、间歇性、昂贵性原因, 构建能源互联系统, 但是仍然有许多问题没有考虑到, 例如昼夜和季节的影响等。而在我国, 随着智能电网的深入研究和实施, 催生了智能能源网的问世。2009年立项的《中国智能能源网发展模式 and 实施方案课题》, 现已完成并向国内外发布其研究成果, 获得了国际智能电网联盟等权威单位的高度评价和认可。文献[7,8]详细论述了我国智能能源网的领先特点, 及其在推动电力、油气、储能、水务、建筑、交通等行业的变革, 以及当前开展的智能电网和智能能源网的整合问题。

在能源互联系统中, 传统电力变压器将由固态变压器(Solid State Transformer, SST)代替, SST作为能源互联系统中的能量控制关口, 是该系统中的关键设备。SST是近年来随着大功率电力电子元器件及其控制技术的发展而兴起的, 国内外展开了广泛而深入的研究。文献[9]利用固态变压器SST的容量和设计优势来作为能源互联网的保护策略, 减少了系统线路和通信需求。文献[10]提出了利用SST作为直流微网系统的分布式能量管理策略, 该策略控制算法只依赖本地信息就能保证系统中每个模块的充分利用。文献[11]提出了一种基于四活性桥(QAB)转换器拓扑结构的SST, 它不仅能够隔离负载、DG、存储单元。文献[12]旨在建立一个包括高频变压器的三阶段固态变压器, 以减少在启动瞬间高频变压器电流。

通过上面分析可以发现, 国内外对能源互联系统的研究正处于起步、理论阶段, 只是提出了一些有关能源互联的框架, 到目前为止并没有有关的实际系统。然而能源互联系统因其开放性、稳定性、可靠性, 从理论上被证明了是未来解决新能源大规模并网十分有效的方法, 可以很好地解决新能源并网所带来的不稳定影响, 更好的促进新能源的利用和发展, 为解决未来能源危机

提供了很好的出路。所以我们应抓住这个历史机遇，抢占科研前列，为我国智能电网的发展做出更大的贡献。

3 能源互联系统智能优化控制与故障诊断系统结构

能源互联系统融合了大量分布式可再生能源发电装置和分布式储能装置，通过智能接入式能量整定装置，能量监控核与开放式的通信接口协议、结合智能的能量分配和管理、综合优化与控制决策支持系统技术，实现能量和信息的安全可靠、高效经济和智能接入式的分配和控制，同时保证分布式能源联合供能系统同主网间的高效、

稳定协同运行，研发具有灵活性、可控性、可拓展性、经济性以及满足用户对能量质量和可靠稳定性等不同要求的系统一体化控制平台。

能源互联系统的智能优化和故障诊断技术，包括由分布式新能源发电联合供电系统集成与并网控制、能量监控核的能量智能分配与协调优化控制、智能接入式的分布式新能源与储能设备的协调控制、能源互联系统的多维故障诊断及自愈控制、接入能源互联系统的典型工业负载的综合节能与优化控制等部分。构建能源互联系统的智能综合优化和控制的集成框架和技术支撑体系，突破含分布式能源/微网/储能装置/工业负载的能源互联系统的能量管理、态势分析、安全预警、自愈恢复、优化控制技术，其结构如图1所示。

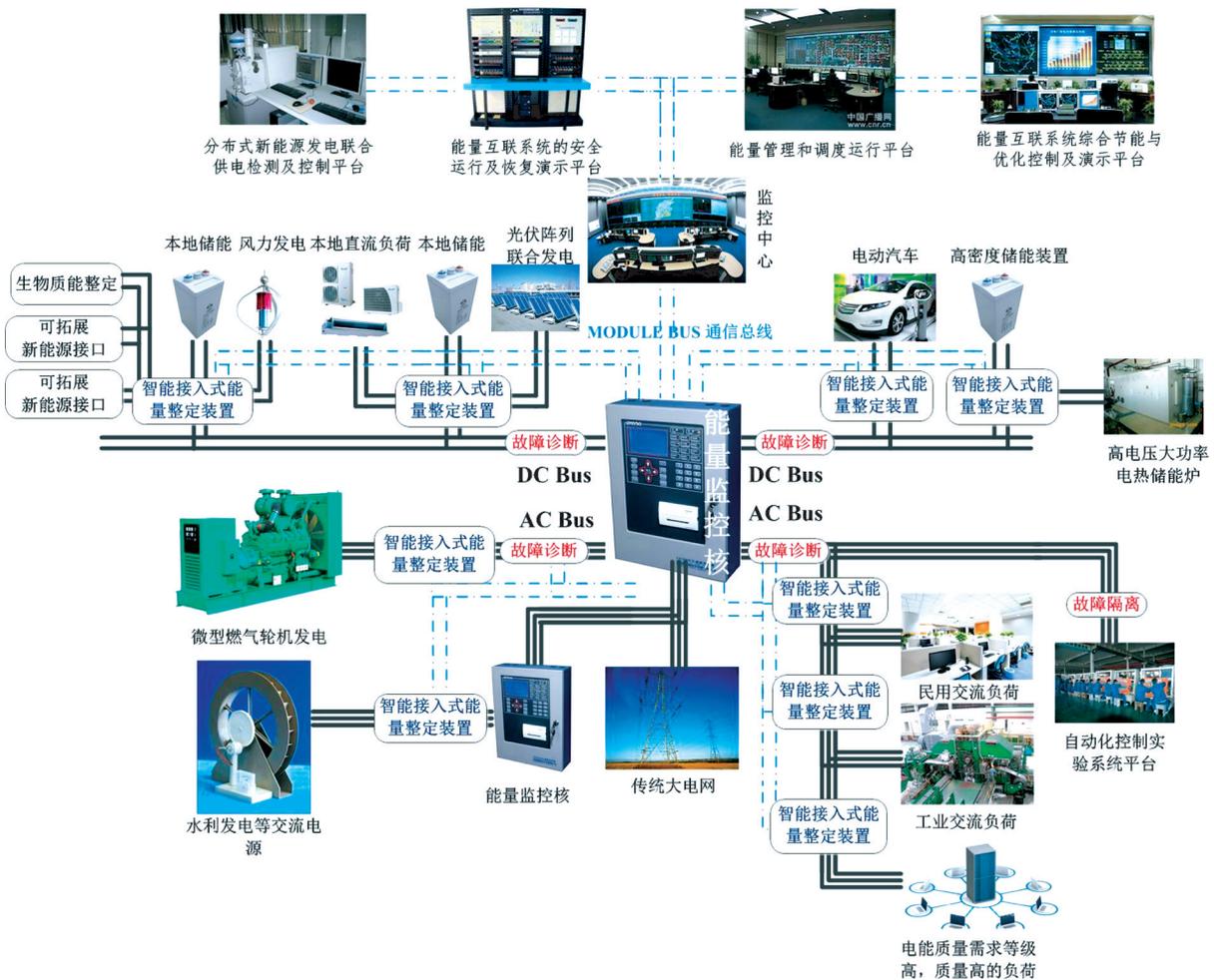


图1 面向节能的能源互智能控制与优化平台

除了以上讨论的智能能量管理装置，智能故障管理装置将被用于隔离高压输电主电路的潜在故障和为用户提供具有重构能力和持续供电特性的电源。智能能量管理系统和智能故障管理系统将通过安全可靠的通信网络相互通信。能源互联系统的控制将由嵌入到每个智能能源和智能故障管理节点中的分布式电网智能操作系统提供。大多数能量存储的需求是由分布式能量存储设备或者变电站能量存储设备提供的。能源互联系统通过一个高功率智能能量管理变电站连接到高压输电系统。

4 能源互联系统的关键技术

4.1 分布式发电联合供能系统集成与并网控制优化方法

本项目是针对未来发电系统必须要广泛适应分布式可再生能源和替代能源的要求提出的，而且必须具备额外的存储能力。作为一个特殊的微型环状系统，回路由电缆或传输线连接，各种分布式电源、储能设备和负载通过变流装置接入系统。其中分布式电源可以为太阳能光伏阵列、小型风力发电机或风场、氧燃料电池和微型燃气轮机，冷热电联产等；储能设备可以是传统的蓄电池或储氧设备、超级电容、飞轮等，储能设备

用来维持网络中的功率平衡，实现负荷的削峰填谷；负载包括居民负载、工业负载、敏感负载；各电源、储能设备和负载之间实现并联联接。分布式发电联供系统结构如图2所示。

4.1.1 多种新能源多联供系统并网和控制

多种新能源联合并网和控制系统结构如图2所示。由于多种规模化新能源接入电力系统，必将显著影响系统潮流、频率、电压及稳定水平，激励系统的多种振荡模式，给系统安全和经济运行带来深刻的影响。针对这些情况，建立时空多尺度下新能源电力系统的不确定非线性动力学模型，研究新能源电力系统在随机波动激励下的非线性动力学特性，揭示规模化强波动新能源电源与主网的相互影响机理，寻求利用不确定性度量信息实现系统恰当热备用冗余度调度的可能途径，为新能源电力系统的经济调度与安全控制提供动力学特性和建模方面的理论支撑。

4.1.2 分布式电源并网控制系统

为构建以可再生能源为主、可并网或离网运行的位于用户附近的小型电力系统，根据分散式太阳能发电的特点，引入Agent概念，提出一个采用分布式MAS（Multi-Agent System）体系结构描述的能量管理系统，分析单体Agent概念模型的各个组成模块及其功能。Agent通信内容采用FIPL消

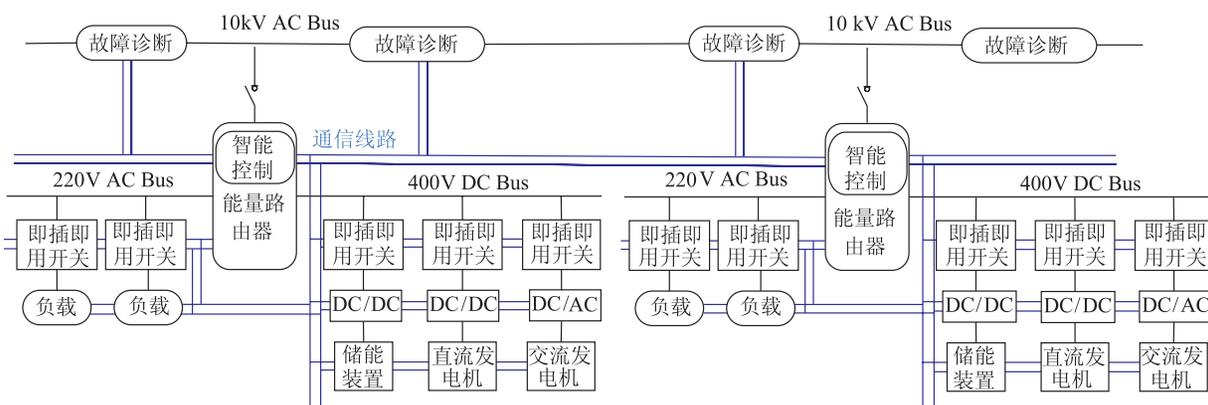


图2 分布式光伏联供系统示意图

息格式，由JADE平台实现各个Agent之间的交互，由TCP/IP协议完成消息的传递。

4.2 分布式能源智能接入式能量整定装置与能量控制核

由于分布式能源输出电能形式多样，光伏发电（Photovoltaic, PV）输出的为直流电能，风力发电和微型燃气轮机能源输出的交流电能，此外输出电能电压等级各异。为了实现不同能源形式和不同电压等级的电能互联，实现大规模能源互联系统，克服单一能源网络输出能源稳定性差，波动幅度大的缺点，需对能源输出电能进行并要的功率变换，以满足能源互联的需求。

4.2.1 PV发电单元智能接入式接口开关

PV智能接入式接口开关分为直流接口开关和交流接口开关，其中直流接口开关采用新型推挽变换电路DC/DC接口，将PV发电单元输出的直流电压升压为400V，供给400V直流微电网中的直流负载，例如铝电解槽；交流接口开关采用现今主流的高效率六开关（H6）拓扑结构的DC/AC接口，将PV发电单元输出的电能变换为220V，50Hz交流电，供给220V交流微电网中的交流负载，三个220V交流微电网组成一个三相交流微电网。

4.2.2 风力发电单元智能接入式接口开关

风力发电单元智能接入式接口开关为交流接口开关，接口开关采用传统的四开关管（H4）拓扑结构的DC/AC接口，将风力发电单元输出的直流电能转换为220V，50Hz交流电。输出滤波器为LC滤波器，抑制输出电流含有的高次谐波，提升逆变电能的电能质量。

4.2.3 储能单元智能接入式接口开关

由于风力发电单元和PV发电单元的间歇性和不稳定性，需要系统中配置一定容量的储能装置

来提升系统输出电能的稳定性，这就决定了储能单元的智能接入式开关设备具有能量双向流通的功能。

能源互联系统是一个革命性的能源网络，它基于高带宽数字通信、分布式控制和电力电子技术。在系统中，很多传统的机械电磁式设备都将由新型电力电子设备代替。其中，传统电网连接使用的电力变压器将由智能能量管理功率变换器（Intelligent Energy Management Power Converter, IEMPC）代替；IEMPC是近年来随着大功率电力电子元器件及其控制技术的发展而兴起的，是能源互联系统的主要设备。

IEMPC是一种将电力电子变换技术和基于电磁感应原理的高频电能变换技术相结合的新型变压器。与传统变压器相比，IEMPC具有体积小、重量轻、空载损耗小、不需要绝缘油等优点，不仅有变换电压、传递能量的作用，而且兼具限制故障电流、无功功率补偿、改善电能质量以及为各种设备提供标准化接口等多种功能。电能可以在IEMPC中可以双向流动，IEMPC是实现能源互联系统能源因特网的核心设备。IEMPC的基本原理是在原方将工频信号通过电力电子电路转化为高频信号，即升频，然后通过中间高频隔离变压器耦合到副方，再还原成工频信号，即降频；并通过采用适当的控制方案来控制电力电子装置的工作，从而将一种频率、电压、波形的电能变换为另一种频率、电压、波形的电能。由于中间隔离高频变压器的体积主要取决于铁芯材质的饱和磁通密度，而饱和磁通密度与工作频率成反比，这样提高工作频率就可提高铁芯的利用率，从而大幅减小变压器的体积并提高整体效率。

4.3 能源互联系统的通信和监测控制系统

作为独立的能量互联系统，在功率平衡控制、系统运行优化、故障监测与保护等方面都依靠自身的监测控制及管理功能实现，系统中包含

的电源种类和智能设备较多，独立性及随机性较强。因此，为了确保系统的安全可靠运行，系统的通信和检测控制系统除了具备运行控制、数据采集和运行操作等基本功能，还应包括可再生电源发电预测、功率平衡控制、经济调度和优化运行、对现场设备智能接入式的识别和管理等。

如图3所示，能量互联系统的通信和检测控制系统采用冗余双光纤环形网络架构的MODULE BUS RS485现场总线。系统主站采用冗余单主系统结构，与分布式智能从站组成总线网络，实现现场设备和监控单元的通讯。该系统的特点是拥有可升级、安全可靠的通信和检测网络，为核心设备IEMPC、网络数据采集装置和各实验设备的标准化接口，实现分布式电源、储能装置和负荷的智能接入。

网络控制层实现的功能：①监控中心上位机通过安全可靠信息通道对IEMPC、分布式电源、负荷和分布式储能设备的运行状态进行监控。根据电网运行状态对能源互联系统内的各种智能电子装置的状态和动作信息进行实时处理，实现所有设备的安全运行；②运行人员根据能源互联系统的运行需要和大电网的调度要求，通过对断路器、隔离开关的投切操作，实现能源互联系统和大电网的协调控制。③通信和检测系统根据能源互联系统的实时运行状态，自动协调所有IEMPC以及分布式电源、储能装置和负荷的运行状况，实现分布式电源的最大能效和负荷的可靠供电。网络控制层采集的数据包含风力发电部分、光伏发电部分、蓄电池部分和负荷部分，这些数据为大电网调度提供依据；专业人员进行科学研究。

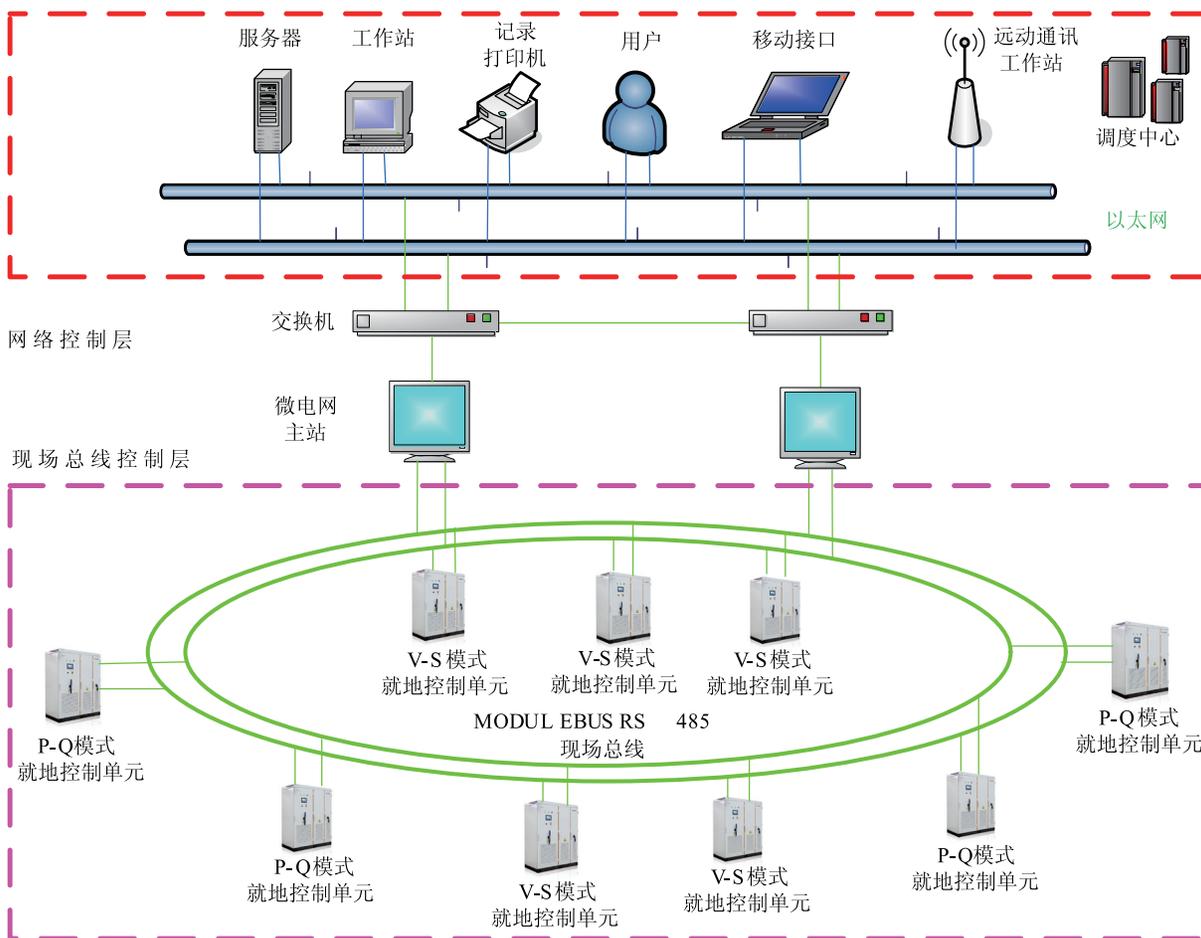


图3 现场总线采用冗余双光纤环形网络架构

现场总线控制层实现的功能：①采集和上传 IEMPC 自身运行状态和所配置分布式电源、储能装置和负荷的运行状态，还可以与能源互联系统网络监控中心和其它分布式就地控制单元之间通信，根据预先的控制策略，实现对分布式电源、储能装置和负荷的智能化管理；②协调分布式电源、储能装置和负荷之间的功率流动，向负荷提供高质量的供电，同时实现分布式电源的最大功率利用和环网的经济运行。

4.4 智能能量管理和调度运行控制

能量管理系统（EMS）是整个能源互联系统的协调控制核心，是太阳能等可再生能源有效利用，系统实现安全可靠、高效经济运行的重要保障。对系统进行能量管理与控制的基础就是保持系统中功率的供需平衡，即系统中的供能单元，储能单元及负载耗能间的平衡。能源互联系统的经济优化运行可以由能量管理系统来完成。能量管理系统使用系统所在地的信息来满足当地的热、电、冷的需求、电能质量的要求、主网的特殊要求、需求侧管理等，从而决定分布式发电系统的配置运行以及负荷系统所提供的电能总量，并汇总当地的环境、实时电价和电-热的需求量等信息进行合理优化。智能能量管理系统功能包括：①规范系统各个发电单元的功率、电压设定值；②尽可能使用户侧电-热需求得到满足；③可靠、安全的运行以满足微电网与大电网之间的运行规则；④对环境的污染达到最小的同时提

高运行效率；⑤降低系统损耗；⑥故障排除后，为系统重新并网提供必要的控制。

能源互联系统能量管理系统将发电计划功能完全或部分转移到交易管理系统，在编制调度计划的过程中，由EMS的安全分析软件进行安全校核，调度计划形成后传给EMS；同时在交易管理系统中单独设置发电计划和安全校核功能，编制调度计划过程中不与EMS交换数据，调度计划形成后传给EMS；在EMS原有功能的基础上，增加报价排序和在安全约束下编排调度计划的功能，达到系统整体优化。对可传输容量的校核，全方位建立电网的安全防护机制。该系统使正常、紧急和恢复控制三位一体，建立安全防护体系，同时将继电保护和稳定补救系统纳入EMS管理，增加实时信息采集量，实现综合的故障和扰动分析、建立广域测量系统，实现快速准确的状态估计，进一步实现继电保护和稳定补救系统的自适应控制等。图4为能源互联系统能量管理系统的示意图。

4.5 能源互联系统的动态分析，安全评估与自愈控制

能源互联系统中各供电区间在故障作用下具有相互关联性，并因而表现出自组织临界特性。当小扰动故障情况下，具有自组织临界性的控制输出及其相关事件在其强度超过一定阈值时，也会在系统中引发大量故障，可能造成系统故障的自组织临界性。

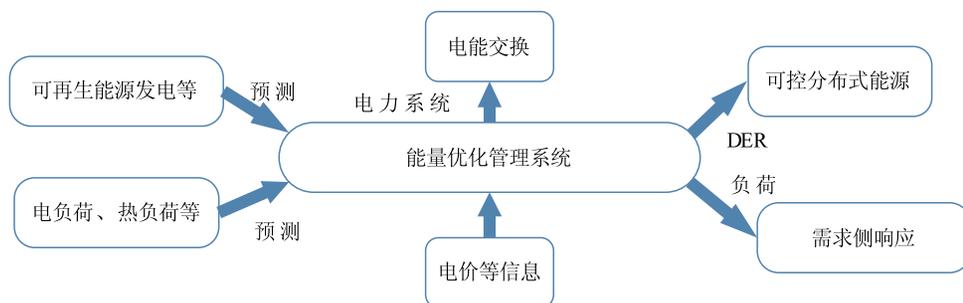


图4 能源互联系统能量管理系统的示意图

考虑多DG并网运行中多模态接入并网点电压跌落和冲击电流等现象所引起的能源互联系统扰动,结合上述模型研究工作,研究能源互联系统中各种扰动的参数化表征方法;考虑到实际系统中扰动、潮流转移等影响及其相互耦合影响下所造成的振荡、过负荷等现象,基于统计动力学分析不同能源模态接入场景中系统暂态、快动态、慢动态多尺度下“网”、“源”之间相互激励与响应过程中状态的变化。在此基础上,针对能源互联系统故障演化的不确定性和自组织性,考虑环境变化与新能源发电系统间的耦合、发电系统与输配系统间的耦合、输配系统与柔性负荷间的耦合、以及其它相互关联情况下的复杂耦合等,基于自组织临界性分析方法,分析研究各种扰动对系统行为的影响,揭示异常转化为故障的动态演化规律。

参考文献

- [1] Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
- [2] Huang A Q, Baliga J. FREEDM System: Role of power electronics and power semiconductors in developing an energy internet[C]//Power Semiconductor Devices & IC's, 2009. ISPSD 2009. 21st International Symposium on. IEEE, 2009: 9-12.
- [3] Tsoukalas L H, Gao R. From smart grids to an energy internet: Assumptions, architectures and requirements[C]//Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on. IEEE, 2008: 94-98.
- [4] Hao L, Weiding L. Future Energy System in Low-Carbon Community-Energy Internet[C]//Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM), 2011 International Conference on. IEEE, 2011: 227-230.
- [5] Su W, Huang A Q. Proposing a electricity market framework for the Energy Internet[C]//Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE. IEEE, 2013: 1-5.
- [6] Raghavan B, Irwin D, Albrecht J, et al. An intermittent energy internet architecture[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Future Energy Systems: Where Energy, Computing and Communication Meet. ACM, 2012: 5.

- [7] 王明俊.智能能源网展望[J].电网技术, 2010, 34(12): 1-5.
- [8] 王明俊.智能电网与智能能源网[J].电网技术, 2010, 34(10): 1-5.
- [9] Tatcho P, Li H, Jiang Y, et al. A Novel Hierarchical Section Protection Based on the Solid State Transformer for the Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System [J]. Smart Grid, IEEE Transactions on, 2013, 4(2): 1096-1104.
- [10] Yu X, She X, Zhou X, et al. Power Management for DC Microgrid Enabled by Solid-State Transformer [J]. Smart Grid, IEEE Transactions on, 2014, 5(2): 954-965.
- [11] Falcones S, Ayyanar R, Mao X. A DC-DC Multiport-Converter-Based Solid-State Transformer Integrating Distributed Generation and Storage [J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2013, 28(5): 2192-2203.
- [12] Liu X, Li H, Wang Z. A start-up scheme for a three-stage solid-state transformer with minimized transformer current response [J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2012, 27(12): 4832-4836.
- [13] 张明锐,徐而峰.P-Q模式固态变压器的工作特性分析及实现[J].电力自动化设备, 2012, 32(11):65-71.

作者简介

孙秋野 目前为东北大学教师。主要研究方向为输配电系统的不确定信息分析与诊断,智能电网电能质量管理,分布式发电系统的网络控制等。研究的将粗糙集用于解决配电系统大规模连锁故障诊断问题先后被授予沈阳市和辽宁省技术发明一等奖,被中国科学院院士张嗣瀛、中国工程院院士黄其励等专家评价为具有国际领先水平。2007年曾应联合国教科文组织/弗劳恩霍夫协会工业与环境信息技术教席的特邀进行了题为“配电系统分析与故障诊断”的大会报告。并曾先后担任ISNN2006、ICEMI2007、2008全国博士生学术论坛、中国电机工程学会第十届青年学术会议的讨论小组主席。并作为中国科技论文在线特聘专家及当选为青年学者。曾在中国电机工程学报等重要学术刊物及会议上发表或被录用学术论文55篇。其中8篇被SCI收录,40篇被EI收录,13篇被ISTP收录。作为主编出版著作8部(其中专著2部),参编英文专著1部(Boston: BirkhÄuser)。曾作为负责人或主要参加人完成国家自然科学基金重点基金,国家863高科技重大专项,辽宁省科技攻关项目,沈阳市科技攻关项目,国家电网公司重大科技攻关项目等多项课题,获得或公开国家科技发明专利59项(其中美国专利4项,欧洲专利1项),获得国家科技进步二等奖,辽宁省技术发明一等奖,教育部科技进步二等奖,电子学会及沈阳市科技进步一等奖各一项。

基于用户关联关系的微博数据采集系统设计与实现

林俊杰¹, 王 磊², 毛熙哲³, 郑晓龙¹

1. 中国科学院自动化研究所 复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190

2. 天津大学 经济与管理学部, 天津 300072

3. 四川大学 电子信息学院, 成都 610065

摘要: 目前的微博数据采集工具主要针对单个用户的微博内容进行采集, 在采集包含关键词的微博内容的过程中并未考虑用户之间存在的关联关系。为全面、高效、准确地获取微博数据, 本文提出一个基于用户关联关系的微博数据采集算法。该算法以用户之间的粉丝关系和评论关系作为网络主题爬虫的链接, 对包含关键词的微博内容及其相关信息(包括: 评论信息、博主信息等)进行采集, 在此基础上针对新浪微博, 采用网页解析技术和加V用户关注信息爬虫, 设计并实现了一个基于用户关联关系的微博数据采集系统。实验结果表明, 该系统不仅能够采集到比新浪微博关键词搜索页面更加全面的微博数据, 具有良好的性能, 同时实现了对包含屏蔽词的微博内容的获取。

关键词: 微博数据采集, 用户关联关系, 网络爬虫, 网页解析技术

引言

随着互联网时代的到来以及移动设备的深入发展和普及, 微博作为一个基于用户关系的信息分享、传播以及获取平台, 近年来得到广泛应用, 已经成为用户表达意愿、分享心情的重要渠道。同时, 微博作为一个巨大的信息仓库, 蕴含了丰富的社会、文化、商业和个人交互等信息, 成为企业、政府部门等进行分析决策的一项重要依据。另一方面, 微博具有“发布信息快速, 信息传播速度快”的特点, 这使得微博在突发事件的传播以及舆论的扩散方面具有更强的作用力。因此, 高效、全面、准确地获取微博数据不仅是对这些数据进行分析、监控和预警的基础与前提, 而且对及时了解社会舆情和决策支持具有十分重要的意义。

由于微博内容是由用户产生的, 用户关系对微博内容的传播至关重要。然而, 现有的微博数据采集方法大多局限于单个用户的微博信息和个人信息等, 采集包含关键词微博的过程中并未考虑到用户之间的关联关系, 如: 关注、粉丝等。而这类用户关联信息恰恰可以在微博数据采集, 特别是与主题相关的数据采集中发挥重要作用。鉴于此, 本文对基于用户关联关系的微博数据采集进行研究, 提出一种基于用户关联关系对包含关键词的微博内容进行采集的主题网络爬虫算法, 并针对新浪微博, 通过设计加V用户关注信息爬虫和网页解析, 实现了一个基于用户关联关系的微博数据采集系统。

1 相关工作

目前对微博数据的采集和挖掘主要通过两种

方式：网络爬虫和微博API。主题网络爬虫是网络爬虫的一种主要类型，它能够利用特定的网页分析算法，对与主题无关的链接进行过滤，而将与主题相关的链接放入待爬行的URL队列中，并根据事先设定的某种策略从队列中选择下一个要爬行的网页URL，重复上述过程，直至满足系统的某一条件时终止。

主题网络爬虫的实现方法可以分为三类^[1]：基于文字内容的启发式方法^[2]、基于Web超链图评价的方法^[3]和基于分类器预测的方法^[4]。此外，A. Rungsawang等人也提出了一个能够自学习的主题网络爬虫^[5]，它能够根据以往的爬行经验建立知识库，知识库中包括了爬虫起始URL、主题相关的关键词以及对URL的预测结果。该爬虫会在爬行过程中不断丰富知识库，从而在之后的爬行过程中更好地获得感兴趣的网页。

在微博API的研究方面，文献[6]针对新浪微博数据，比较了采用API和网络爬虫技术的微博数据采集效果，并提出了一个结合API与网络爬虫的微博数据挖掘方案。实验结果表明网络爬虫能够获得较大信息量的数据，而新浪API方式能够获得更加全面的用户信息以及用户的最新微博。然而，该工作仅提出了一个方案的原型，并未考虑实际应用中对用户微博数据的大规模采集。

针对新浪微博API的请求次数限制和返回结果的大小限制，文献[7]通过在程序中设定定时器等方法，设计了采用新浪微博API的数据挖掘算法，对用户的关注网络、粉丝网络和双向关注网络进行挖掘，根据挖掘结果构建了新浪微博用户的网络结构图。该算法较适用于采集用户关系，但并不适用于采集大量的用户微博信息，并且由于定时器的存在，该算法的数据采集效率较低。

用户和用户之间的关系对微博内容的产生和传播所起的重要作用，但目前的微博数据采集和挖掘工作中尚未考虑结合用户之间的关联关系。因此，本文基于微博用户之间的关系挖掘，提出

一种普适的基于用户关联关系的微博数据采集算法，以提高数据采集的全面性、准确性和效率。该算法利用微博用户之间的粉丝关系和评论关系设计主题网络爬虫，对包含关键词的微博内容以及对应的博主信息、微博评论信息等进行采集和搜索，获取效率与微博API方法相比具有较大的提升，并且避免了微博API方法本身固有的种种限制。同时，由于传统的网络爬虫技术基于网页上的超链接，抓取网页时可能得到许多无用页面，而本文设计实现的主题爬虫以用户作为爬虫的链接，这大大减少了无意义的网页爬取，有效提高了搜索过程的准确性。此外，针对新浪微博无法获得用户所有粉丝这一问题，本文提出一种对新浪微博加V博主的关注信息进行采集的方法，该方法通过关注信息反向获得粉丝信息，从而减少了重要粉丝的遗漏，使数据采集的结果更加全面。在此基础上，本文针对新浪微博，设计实现了一个基于用户关联关系的微博数据采集系统，并基于大规模数据验证了所提出方法和系统的全面性和有效性。

2 微博数据采集系统设计

为全面、准确、高效地实现对新浪微博平台上包含指定关键词的微博信息获取，本文设计的微博数据采集系统包含四大模块及相应的数据库实体，系统总体结构如图1所示。

2.1 系统模块

本文提出的微博数据采集系统包括关键词爬虫、加V用户关注信息爬虫、网页获取与解析和关键词查询四个系统模块。具体如下：

2.1.1 关键词爬虫模块

利用基于用户关联关系的微博数据采集算法设计了一个主题网络爬虫，采用抓取网页的方式对新浪微博平台上包含用户输入关键词的微博信息（包括微博内容、博主信息和评论信息）进行采集。

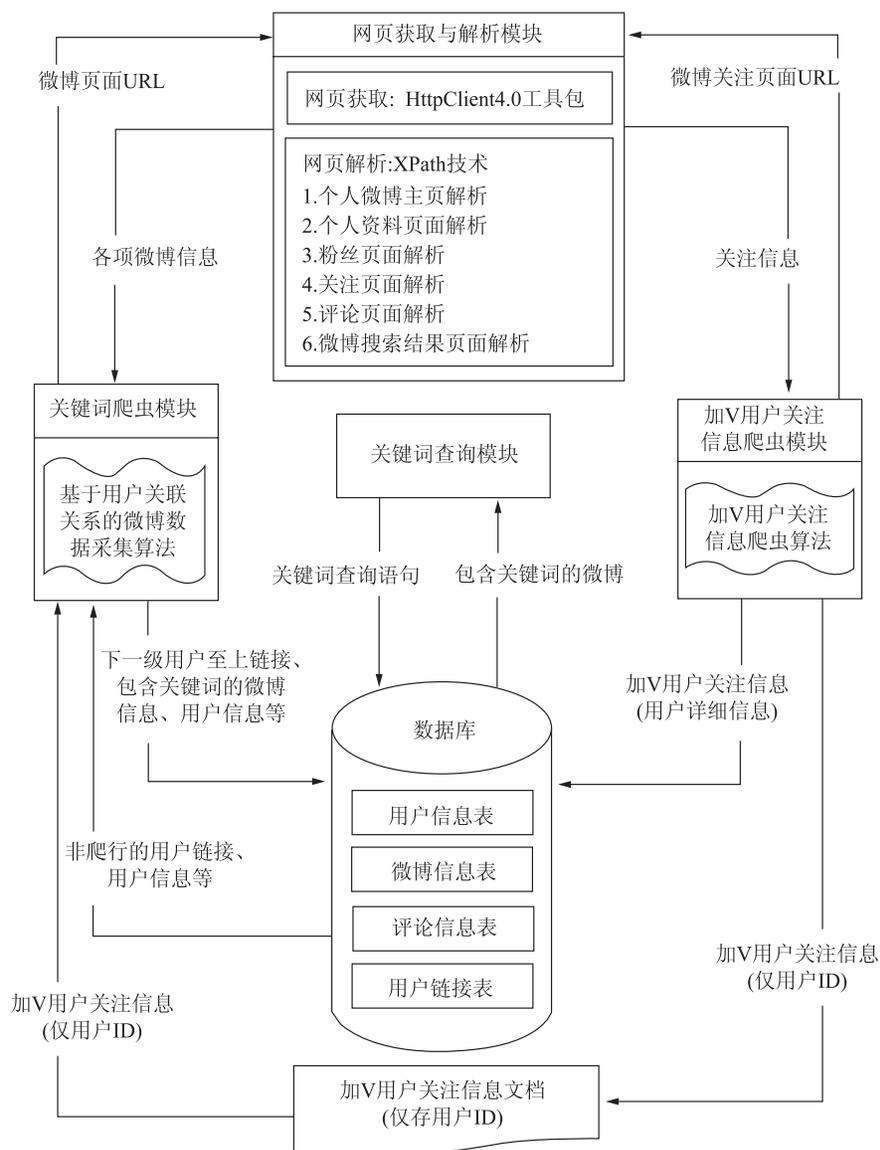


图1 微博数据采集系统结构图

2.1.2 加V用户关注信息爬虫模块

实现对新浪微博中加V用户关注信息的采集。由于关键词爬虫在微博数据采集过程中用到了微博用户之间的粉丝关系，而在新浪微博中无法通过抓取网页的方式获取用户的所有粉丝，采用新浪微博API方式获取用户粉丝又存在请求次数限制，因此，本系统设计并实现了另一个爬虫——加V用户关注信息爬虫。加V用户即认证用户，是新浪微博中的重要用户。该爬虫能够在新浪微博的用户关系网络中采集加V用户的关注信息，根据

加V用户关注信息，系统可以逆向获得微博用户的加V粉丝，从而减少重要粉丝的遗漏。

2.1.3 网页获取与解析模块

通过XPath技术解析采用HttpClient 4.0工具包下载得到的指定URL的网页源代码，从而获得具体的微博信息、用户信息等，并存储在本地数据库中。

2.1.4 关键词查询模块

通过构造相应的数据库查询语句实现对已采集到的微博内容的查询。

3.2 数据库设计

根据微博爬虫的实际需求,本文提出的系统设计了四个数据库实体:用户、微博、评论以及用户链接。这四个实体的具体含义如下:

(1) 用户:存储微博博主的各项基本信息,包括:用户id、用户名、个人描述、个性域名、头像地址、微博数、粉丝数、关注数、加V信息等。

(2) 微博:存储每条新浪微博的具体信息,包括:微博id、微博URL、微博内容、微博来源、发布时间、图片地址、转发数、评论数等。

(3) 评论:存储微博的评论信息,包括:评论id、评论内容、发布时间、评论来源等。

(4) 用户链接:存储爬虫爬行过程中的下一级链接,其内容包括:链接深度、是否被搜索过等。

这四个实体之间的相互关系如图2所示。

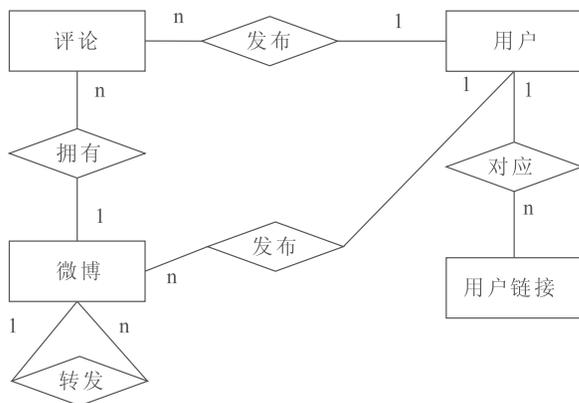


图2 微博数据采集系统数据库实体间的关系

3 基于用户关联关系的微博数据采集算法

3.1 微博用户关联关系

用户关系在微博的传播过程中起着至关重要的作用,微博社交网络用户之间的关系可以分为四种类型:关注关系、提及关系、转发关系以及互粉关系^[8]。其中,关注关系是指用户作为粉丝对另一个用户进行关注,它是一种单向关注形式,展

现了一种拓扑结构;转发关系和提及关系是指用户由于其关注者的微博内容感兴趣而产生的关系,这两种关系的基础是关注关系;互粉关系是指用户之间互相关注的关系,它是一种强关系。

微博用户的关系网络存在无标度和小世界的特性^[9]。无标度特性是指微博网络中仅有少量用户关系数量很多,大部分用户的关系数量都比较少;小世界特性是指微博网络中用户之间的平均路径长度较短,因此信息可以在微博网络中迅速传播开来。由此可见,用户关联关系对于微博数据的采集具有重要的意义。

3.2 算法描述

基于用户关联关系的微博数据采集算法的具体步骤如算法1所示。

算法1 (基于用户关联关系的微博数据采集算法)

1. 分析微博搜索页对关键词的搜索结果,判断关键词是否被屏蔽;
2. IF 关键词未被屏蔽
THEN 将搜索结果页上所有博主的粉丝以及微博的评论者作为爬虫的种子,存入数据库D;
ELSE 将D中系统事先设定好的重点博主作为爬虫的种子,存入D;
END IF;
3. WHILE D中存在未分析的用户链接
4. 取出一个未分析的用户链接;
5. IF 该用户链接的深度未超过爬虫深度
THEN 分析该用户的个人微博页面;
IF 存在包含关键词的微博
THEN 将所有包含关键词的微博保存至D;
将这些微博的评论者和该用户的粉丝作为微博爬虫的下一级链接,存入D;
END IF;
将该用户链接标识为已分析;
END IF;
END WHILE;

6. 将属于本次搜索的所有用户链接从D中删除, 算法结束。

算法1实现了针对关键词的微博内容搜索, 对于各大微博是通用的。传统的基于网页超链接的网络爬虫算法在数据采集过程中可能得到较多不相关网页, 影响爬虫效率。鉴于此, 算法1结合微博这一实际应用场景, 以用户之间的粉丝关系和微博评论关系替代超链接, 指导爬虫的爬行过程, 具有较高的准确性。算法1以微博关键词搜索结果中的用户或系统中事先设定的重点博主作为网络爬虫的种子。对于每个微博用户, 在搜索到包含关键词的微博之后, 将该用户的粉丝和包含关键词微博的评论者放入待爬行队列中, 实现网络爬虫的逐层爬行。特别地, 算法对于微博关键词搜索结果中没有搜索结果和被屏蔽关键词依然适用。

算法1首先根据新浪微博搜索页对关键词的搜索结果判断其是否被屏蔽。若未被屏蔽, 则将搜索页上所有博主的粉丝以及评论者作为爬虫种子, 存入数据库; 若被屏蔽, 则将数据库中系统事先设定好的重点博主作为爬虫种子, 存入数据库。接下来, 算法执行如下循环操作, 直至到达爬虫深度或搜索结束: 从数据库中取出一个未分析的用户链接, 判断该用户链接的深度是否超过爬虫深度, 若超过则丢弃该用户链接, 重复循环; 若不超过, 则分析该用户的个人微博页面, 若存在包含关键词的微博, 则先将所有包含关键词的微博保存至数据库, 然后将这些微博的评论者和该用户的粉丝作为爬虫的下一级链接并将该用户链接标识为已分析; 否则, 将该用户链接标识为已分析后直接重复循环即可。最后, 将属于本次搜索的所有用户链接从数据库中删除。

4 针对新浪微博的数据采集

上述基于用户关联关系的微博数据采集算法可以有效提升微博数据获取的效率和准确性。为

进一步提高数据获取的全面性, 本文针对新浪微博, 提出一种对加V博主的关注信息进行采集的方法。本节首先介绍针对新浪微博的网页获取与解析相关技术, 然后给出加V用户关注信息爬虫的算法设计。

4.1 新浪微博网页的获取与解析

本文提出的微博爬虫采用模拟Http请求的方式获取新浪微博的各个网页, 为了从微博网页源代码中得到所需的各项微博信息, 本文采用XPath技术解析获取到的新浪微博页面(包括: 用户个人主页、用户个人资料页、搜索结果页、微博详细信息页、用户粉丝页和用户关注页), 并针对网页上每个需要提取的信息构建其对应的XPath表达式, 然后通过XPath API实现对个人微博主页、个人资料页面、粉丝页面、关注页面、评论页面、微博搜索结果页面的信息提取。

以新浪微博搜索结果页面为例, 对其获取与解析的算法步骤参见算法2。

算法2 (新浪微博页面获取与解析算法)

1. 根据输入的关键词构造新浪微博关键词搜索页面的URL;
- WHILE TRUE
2. 通过构造的URL获取搜索结果页面网页源代码;
3. 构造XPath表达式从网页源代码中提取搜索结果总页数并分离出各条微博搜索结果;
4. WHILE 存在未分析的微博搜索结果
取出一条微博搜索结果;
5. 分别针对微博的发布时间、博文URL、微博来源及来源URL、微博id、博文内容、图片地址、博主信息、转发数、评论数和转发的原微博信息构造相应的XPath解析语句, 提取对应的各项微博信息, 存入数据库中;
- ENDWHILE;
6. IF 关键词搜索结果存在下一页

```

THEN 构造下一页关键词搜索结果的URL;
ELSE 退出;
ENDIF;
ENDWHILE;

```

4.2 加V用户关注信息爬虫

在本文提出的微博数据采集算法中需要使用用户的粉丝作为微博爬虫的下一级链接，而在新浪微博中通过抓取网页的方式无法获得某个用户的所有粉丝。加V用户即认证用户，是新浪微博中的重要用户。为了减少重要粉丝的遗漏，同时考虑到加V用户的关注数一般远远小于其粉丝数，因此本文设计了加V用户关注信息爬虫，通过采集加V用户的关注信息，反向获得微博用户的加V粉丝，以保证微博爬虫的关键词搜索结果更加全面。为了让该算法与算法1一起有效工作，只需稍微调整算法1中用户粉丝的获取方式即可，即：用户粉丝既包括通过网页抓取获得的粉丝，又包括通过该算法得到的用户加V粉丝。具体算法参见算法3。

算法3（加V用户关注信息爬虫算法）

1. 初始化待爬行列表为空；
2. 以用户输入的起始用户id作为网络爬虫的种子，通过Http请求的方式获取该用户的关注页面；
3. 从关注页面中获取并存储关注者的id及加V情况，同时将其中的所有加V关注者插入待爬行列表中；
4. WHILE 待爬行列表非空
5. 从待爬行列表中取出一个用户；
6. IF 该用户的深度未超过爬虫深度
7. THEN IF 该用户的关注信息不存在 OR 该用户的关注者信息已存在且用户选择更新关注信息
8. THEN 通过Http请求的方式获取该用户的关注页面，从关注页面中获得并存储关注者的id及加V情况；
9. 将其中的所有加V关注者插入待爬行列表

中；

10. ELSE 从已存在关注者信息中取出其中的加V用户加入待爬行列表中；
- END IF；
- END IF；
- ENDWHILE；

5 实验结果及分析

基于本文提出的微博数据采集系统，在JDK1.6、Eclipse 3.5、MySQL Server 5.1、Windows XP的软件平台和Intel Core2 Duo CPU(2.53GHz)、2GB内存的硬件平台下分别针对非屏蔽关键词和屏蔽关键词进行新浪微博数据采集实验。这里，屏蔽关键词是指新浪微博的关键词搜索页对该关键词不返回任何搜索结果，并提示“根据相关法律法规和政策，搜索结果未予显示”。

在微博数据采集过程中，对于被屏蔽的关键词，分别控制微博爬虫的深度为1层、2层和3层，观察搜索结果数量与爬虫深度之间的关系；而对于非屏蔽关键词，由于第一层搜索结果数量已经很大，因此不对爬虫深度进行控制。以关键词“北京”为例，对本文设计实现的微博数据采集系统进行非屏蔽关键词实验。微博爬虫第1层的搜索结果数量超过23471条，远远大于新浪微博搜索页提供的最大搜索结果数（约1000条）。针对被屏蔽的关键词进行实验，以关键词“共产党”、“艾未未”等为例，微博爬虫前3层的搜索结果总数接近甚至超过新浪微博搜索页对非屏蔽关键词的最大搜索结果数。本文提出的系统对于被屏蔽关键词的实验结果如表1所示。

表1 被屏蔽关键词的微博数据采集实验结果

关键词	前1层搜索结果数	前2层搜索结果数	前3层搜索结果数
关键词1	19	9367	≥16109
关键词2	9	263	845

由此可见,不论是对于被屏蔽还是未被屏蔽的关键词,与新浪微博提供的搜索引擎相比,本文提出的微博数据采集系统都能更加全面地采集新浪微博数据,克服以往采集方法所带来的技术瓶颈。由于采集到的微博内容均含有关键词,因此本系统采集的准确性很高。

同时,从表1针对被屏蔽关键词的微博搜索结果中也可以看出,随着微博爬虫深度的增加,系统采集到的包含关键词的微博数量呈现指数上升的趋势。由于本系统以用户的粉丝和微博评论者作为爬虫下一层的链接,因而在数据采集的针对性和精准性上具有较明显的优势。上述实验结果初步验证了本文设计实现的基于用户关联关系的微博数据采集系统的可行性和有效性。

6 结束语

本文提出的微博数据采集系统采用了基于用户关联关系的微博数据采集算法,通过微博用户之间的粉丝关系和微博评论关系得到微博爬虫的下一级链接,实现了对新浪微博平台上包含关键词(包括屏蔽词和非屏蔽词)的微博内容及其相关信息(如:用户信息、评论信息等)的更加全面的采集。本系统还有如下可改进之处:

(1) 目前本系统部署在单机上,由于网络带宽和计算机性能的限制,网络爬虫的速度并不是很快。在将来的工作中可以考虑将系统部署在Hadoop等分布式平台上,实现微博爬虫的分布式爬行^[10],以提高爬虫效率。

(2) 目前本系统并未将微博爬虫在爬行过程中采集到的用户粉丝信息进行存储,导致不同关键词的爬虫之间不能共享粉丝信息,因此下一步的工作可以考虑将获得的粉丝信息以合适的方式进行存储,并以适当的策略更新粉丝信息,减少爬虫的工作量。

参考文献

- [1] 刘金红, 陆余良. 主题网络爬虫研究综述[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(10):27-29.
- [2] Cho J, Garcia-Molina H and Page L. Efficient crawling through URL ordering[J]. Computer Networks and ISDN Systems, 1998, 30(1):161-172.
- [3] Hersovic M, Jacovi M, Maarek Y S, et al. The shark-search algorithm. An application: tailored Web site mapping[J]. Computer Networks and ISDN Systems, 1998, 30(1):317-326.
- [4] Brin S and Page L. The anatomy of a large-scale hypertextual Web search engine[J]. Computer Networks and ISDN Systems, 1998, 30(1):107-117.
- [5] Rungsawang A and Angkawattanawit N. Learnable topic-specific web crawler[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2005, 28(2):97-114.
- [6] 廉捷, 周欣, 曹伟等. 新浪微博数据挖掘方案[J]. 清华大学学报, 2011, 51(10):1300-1305.
- [7] 周鑫, 彭斯俊, 罗燕. 基于新浪微博开放平台的用户数据挖掘[OL]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201211-146>, 2013年5月.
- [8] 范超然, 黄曙光, 李永成. 微博社交网络社区发现方法研究[J]. 微型机与应用, 2012, 31(23):67-70.
- [9] 尹书华. 基于复杂网络的微博用户关系网络特性研究[J]. 西南师范大学学报, 2011, 36(6):57-61.
- [10] Thelwall M. A web crawler design for data mining[J]. Journal of Information Science, 2001, 27(5): 319-325.

作者简介

林俊杰 男, 1991年生, 获学士学位, 目前为中国科学院自动化研究所研究生, 主要研究方向: 智能信息处理、社交媒体分析与挖掘。

王磊 男, 1984年生, 获硕士学位, 目前为天津大学经济与管理学部博士研究生, 主要研究方向: 社会计算、情报与安全信息学。

毛熙哲 男, 1991年生, 四川大学电子信息学院学生, 主要研究方向: 智能信息处理、计算机应用。

郑晓龙 男, 1982年生, 获博士学位, 现任中科院自动化研究所副研究员, 主要研究方向: 人工智能、社会网络分析与挖掘。

原文取自: IEEE Communications Magazine, 2013,1 (51): 68-74.

智能电网取证: 应用、挑战及未解决的问题

原作者: Melike Erol-Kantarci and Hussein T. Mouftah, *University of Ottawa*

译者: 杨东升, 邸峰

东北大学信息科学与工程学院

摘要: 智能电网刑事技术是一个新兴的研究领域, 与智能电网的网络和物理安全紧密相关。它能够为电力系统遭受网络攻击或自然灾害后的事后分析提供对系统所存在漏洞的最准确的理解, 这有助于保护电网应对今后发生类似的袭击事件, 以及在灾害期间避免发生故障。除了增加智能电网的安全等级, 它还为刑事司法提供辅助性证据收集的服务。例如, 从智能电表和数据采集器中所提取的数据能够为窃电案件的法律诉讼提供证据。此外, 利用电网频率进行身份认证和时间戳录音的方法已被应用在最近的学术研究中, 伦敦大都会警察局法医音频实验室也利用了该方法。简要地说, 智能电网取证是一种新的电力系统安全组件。另一方面, 它对大量的数据存储和处理以及隐私问题带来了重大的挑战。本文主要介绍智能电网取证的新兴应用领域, 讨论其所面临的挑战, 并对其未解决的问题进行概述。本文旨在为未来智能电网取证研究提供路线图。

关键词: 智能电网取证, 电网保护, 电力系统安全, 大数据存储

1 引言: 智能电网, 攻击以及自然灾害

信息和通信技术 (ICT) 是智能电网的主要推动者, 但同时携带了增加电网安全漏洞的风险, 它允许攻击者轻易地进入权力系统进行内部操作或窃取国家机密和知识产权。这些攻击可以来源于电力系统的不同部分, 包括智能电表、先进计量基础设施 (AMI)、电动交通基础设施 (如插电式混合动力电动汽车、混合动力汽车、充电站)、能量存储子系统、广域测量和态势感知组件配电自动化系统、数据采集与监控系统 (SCADA) 网络, 以及智能电网目标的重要组成部分。

在智能电网实现之前, 一些严重的网络攻击

事件已被报道。例如, 在文献[1]中, Amin报道早在2003年, SQL服务器蠕虫导致位于俄亥俄州橡树港某核电厂的安全监测系统瘫痪长达几个小时。从中央情报局获得的另一事件显示, 在过去的几年里, 黑客旨在破坏一些海外城市的电力供应。在这些事件中, 由于缺乏取证分析能力, 攻击者以及其动机仍不明确。同时, 预计这些攻击的影响、覆盖范围、以及类似攻击的发生频率在智能电网配置中会增加。因此, 对攻击进行取证分析成为智能电网研究人员应掌握的重要研究方向和开发领域。

由于电网的物理安全漏洞可能会产生比一些攻击更严重的故障, 因此智能电网法律研究还需涵盖灾难后的结果。在文献[2]中, Kwasinski讨论

了海啸之后的地震对日本电网的损害。在日本灾难发生后，作者在电网基础设施的物理安全性上给出了明确的见解。

1.1 数字法学

智能电网取证研究可以从数字法学领域的多种文献中获益。数字取证是指将数学、统计学和计算机科学的方法应用于数字数据中，用来收集、识别、分析和解释数字证据。如今，先进的数字取证方法能够提取数字媒体的指纹。例如，文献[3]表明数字图像取证允许访问摄像头指纹，同时，由文献[4]可知计算机网络取证可以从无线网络提供用户指纹。类似地，电网频率（ENF）可以被认为是电网的指纹。由文献[5]可知，近日伦敦大都会警察局法医音频实验室已经开始采用电网频率的方法对证据录音进行核查。

1.2 智能电网取证

智能电网取证研究在识别涉及电力盗窃的人员和攻击者上、获取有关灾害引发故障的洞察力上、验证犯罪调查录制的数字音频和视频上，以及确定和解决智能电网网络和物理安全漏洞上是有用的。

智能电表和先进计量基础设施所收集的详细的消费信息提供了高级的方法来确定窃电，这往往是与大麻种植的操作有关。智能电网取证可以在调查和确定窃电及相关罪行方面发挥了显著的作用。

智能电网取证研究将在调查网络犯罪中发挥关键作用，包括黑客、病毒、数字间谍和网络恐怖主义对电网运行进行操纵或窃取有价值的资料，包括知识产权和国家机密。系统存在的漏洞、攻击的来源以及危害成分的识别可以通过取证功能集成到SCADA系统和可行的新兴的广域测量和态势感知组件上。

自然灾害可能比人为的攻击更具破坏性。智能电网取证也可用于处理电力系统灾后故障后的调查。此外，智能电网取证可能有助于系统性地收集和分析电网频率，能允许快速时间戳和验证录音。

在智能电网取证的潜力得到充分的利用之前，还有一些需要被解决的问题。极高的数据量引入了存储和处理的挑战。此外，调查可能需要访问不同的管理域，这可能使其难以实现或需要法律许可。实时分析也极具挑战性；系统运行期间收集取证数据未必可行。此外，从智能仪表、传感器、或其它仪器取得的数据可以被操控，会误导分析。因此，验证分析数据也是另一个挑战。

2 关键技术分析

本文的结构如下。本文首先对智能电表和辅助计量设备在智能电网取证研究中的作用进行介绍，并分别将取证工具应用于SCADA和广域态势感知系统中。然后文章讨论了智能电网取证在灾害调查中的作用，并提出了利用智能电网数据进行音频录音认证，同时讨论了取证分析的挑战。最后，我们提出了待解决的问题，并对文章进行了总结。

2.1 智能电表和辅助计量

如图1所示，基本智能电表的功能包括收集详细的消费信息，如电力使用时间，报告中断以及通过AMI远程计量。安装智能电表的预期之一是预防电力盗窃。在欠发达国家，没能力交电费的人们通过钩住电线架空线进行电力盗窃的行为很常见。在另一方面，在发达国家窃电通常与大麻种植有关，这需要大量的能量来驱动空调和灯光。举例来说，加拿大的一家电力公司报道称在其服务领域的大多数在窃电都发生在与大麻种植有关的地区。

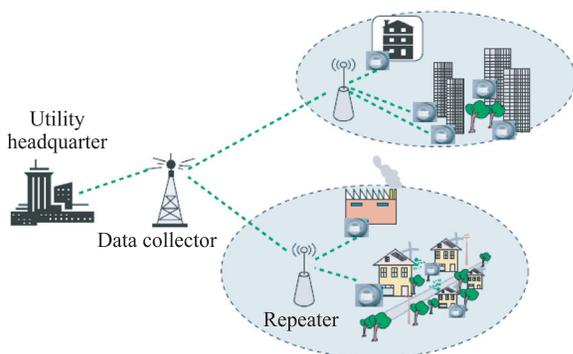


图1 智能电表和先进计量基础设施

由于智能电表已采用了多种保护方案能防止篡改,因此智能电表和AMI可以在调查和预防窃电中起到显著的作用。例如,它们能够在发生物理篡改时发送中断通知,并且它们还可以存储远程仪表的访问尝试。一旦未经授权的访问超过一定的阈值时,智能电表可以给公司发送消息。因此,智能电表可以为与电力盗窃案件有关的刑事收集证据。

相对于模拟仪表,智能电表能提供精密的消费数据,但他们测量并存储多个设备和消费品的总消费,而插头分表计量可以提供更精密的信息。消耗的准确击穿可以通过折中设备用于检测攻击。消费场所的设备都比较容易妥协,几乎不需要控制。因此,改进的消费者数据可以很容易地产生并传送到实用程序,这可能会对电网运营造成不便。智能电网取证用于寻找折中设备和组织变负荷攻击的攻击者。

简单地说,智能电表在防止窃电以及提供攻击见解等犯罪调查方面都很有效果。同时,核查和验证智能电表的数据,也就是要确认正在验证中的数据有一定的计量装置,这也是智能电网取证的因素之一。除了电力公用事业(例如,天然气和水)采用智能仪表以外,在犯罪现场或者某人活动场所将会出现大量数据。这些证据可以验证以下数据是有效的。此外,合法的取证方法需要被实行。未经授权擅自访问智能电表的数据不应该被允许。数据应该只从法律手令访问。因

此,智能电网取证的域名并没有在调查公民的私有数据。它关系到收集犯罪证据,要证明一个人是否犯了罪与否。即使在这种情况下,智能电网取证需要与其他法律方法来增强。

智能电表和AMI的调查数据有以下几方面挑战。在大多数情况下,由于存储限制,它不可能在很长一段时间来存储原始智能仪表的数据。在经过账单处理和其他公共事业管理后,数据需要被压缩。在压缩过程中,数据可能会被合并或者失去了一些内容,而这可能有利于未来的调查。此外,即使在很短的时间内处理大量的数据也是消耗时间和资源的。

2.2 SCADA网络取证分析

SCADA是电网中常见的监测和控制系统。它也被广泛应用在工业和其他基础设施如炼油厂、污水处理设施和运输系统。SCADA系统组成成分是人机接口、监控系统、通信网络、远程终端单元(RTU)、I/O设备、以及控制设备。I/O设备基本上传感器和执行机构,控制装置为可编程逻辑控制器(PLC)和智能电子设备(IED)。SCADA网络、远程站点和他们到公司局域网的连接如图2所示。

SCADA系统初步应用在具有专有协议和操作系统的封闭系统上。由于这种相对安全的执行环境,SCADA系统的安全性还没有得到很好阐述。随着网络和信息系统为主的企业和开放标准成为主流,几起事件表明,SCADA系统可能有严重的安全漏洞。例如,由文献[6]可知,在2003年三个月期间,澳大利亚昆士兰州阳光海岸的废水管理系统在当地水道泄露了百万升未经处理的污水。这件事是一名前承包商由于复仇的动机利用SCADA系统控制水泵来实施攻击的结果。这次袭击是由人工监控所有通过SCADA系统的数据后发现的。

传统的SCADA网络没有事后分析机制或采用

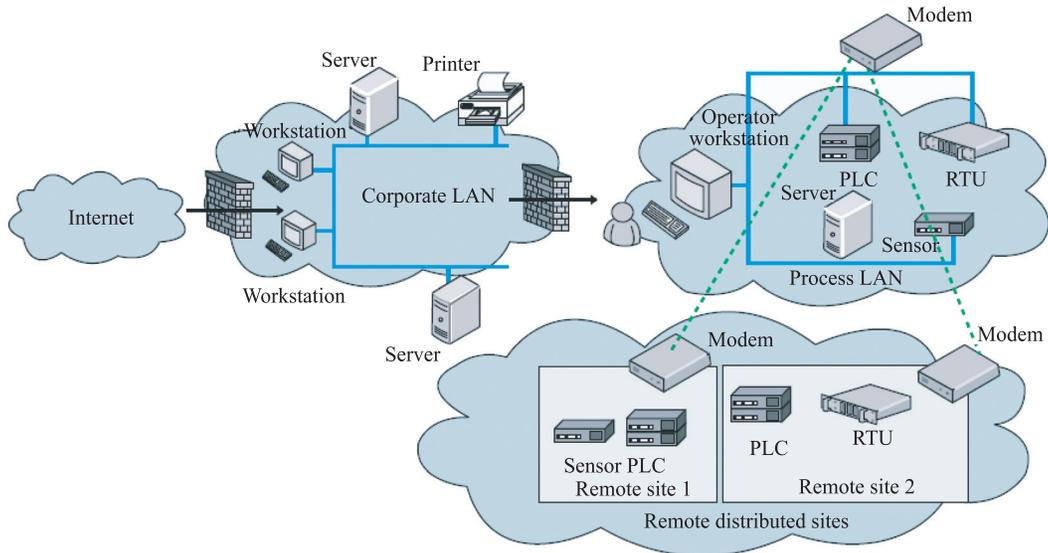


图2 SCADA网络、公司局域网与远程终端之间的联系

允许系统在运行时进行调查的实时分析机制。在文献[7]中，作者描述了这样一个架构，允许为工业环境中的SCADA网络事件进行取证调查。作者的主要焦点是发现犯罪者的身份和安全漏洞的原因。为此，“法医剂”已被放置在给数据仓库发送数据包并进行后续处理和存储的战略位置上。通过这种方法，作者已经能够重建网络事件，并将获得SCADA网络的历史。这种方法有一些缺陷，因为它包括额外的代理和数据仓库导致成本可能会增加，而这些组件可能会引入其他安全漏洞。

SCADA系统的取证准备是一个新的研究和开发领域。很少有研究试图在SCADA系统出厂设置时提供取证能力（例如参考文献[7]）。当考虑非常大规模的智能电网时，这些机制不具有可扩展性。在智能电网中，可扩展的解决方案是能够收集到足够多的来自SCADA系统的证据来证明系统存在安全漏洞，这是一个尚未解决的问题。此外，该SCADA系统的现场分析是极具挑战性的，因为任何外界因素试图模仿攻击行为时都可能对电网的稳定性产生不良影响。

2.3 广域系统取证分析

智能电网用于提高电网的可靠性和可视化的

能力将主要取决于广域测量和态势感知系统。NASPI，这是美国能源署（DOE）、北美电力可靠性公司（NERC）与几个电力公司的一个合作计划，旨在通过在美国电网部署大量的相量测量单元（电源管理单元）和其他广域测量仪器，以实现这一愿景。由文献[8]可知，目前，美国电网的房屋约200电源管理单元，其中大部分都是安装在变电站和发电厂，并计划到2013年安装600多个额外的PMU（电源管理单元）。

电源管理单元提供时间戳和同步相量测量值，它们基本上代表了电压、电流的幅值和相位角以及信号的频率。两个节点的相位角之间的差异意味着功率由高相位的节点流向低相位的节点，功率流量随之增加。如果超过某阈值，电网可能会变得不稳定；因此，相量监测是至关重要的。相量的时间同步是在特定时间获得电网的完整视图的关键。为此目的，相量是由全球定位系统（GPS）同步，并且同步相量被称为同步相。PMUs每一秒完成30至60测量，提供比SCADA更高分辨率的测量，每隔几秒就可以提供样品。如图3所示，从多个电源管理单元收集数据并在相量数据集中器（PDC）上与时间对准的。在一般情况下，一些PDC运行在实用水平，而超级PDC处于区

域独立的系统运营商（ISO）水平。ISO从多个实用程序存储同相测量。

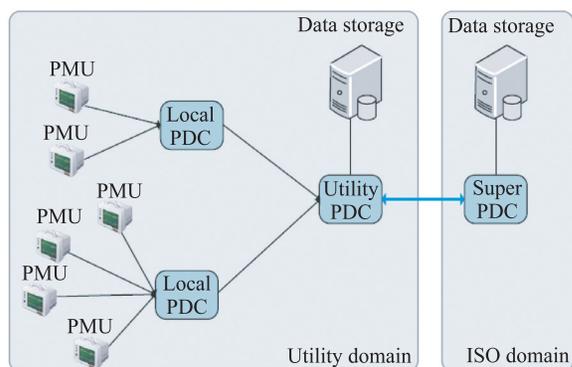


图3 PMUs、PDCs、储能、超级PDCs以及ISO域之间的联系

同步测量对存在时间差的大型互联地区进行实时控制操作和微调规划尤为重要。同步相在电网扰动的取证分析中也发挥了显著作用。互连系统干扰前和干扰后的实时图像可对故障提供解释。此外，PMU数据取证分析可以揭示由于攻击而受损的节点位置。

传统上，广域电力系统是基于负载的攻击，通常选择具有最大负荷的节点作为攻击目标。然而，由文献[9]中可知，最近的研究报道能够引起更严重的级联故障的节点已经被选作攻击的对象。此外，GPS的假攻击为PMU提供伪造的时间戳，从而误导电网运营商的控制决策。广域态势感知（WASA）的取证分析系统有助于识别以及确定攻击的来源。广域态势感知（WASA）取证分析的意义将会在采用间歇性的可再生能源发电机组和PHEV中更加明显。分布式电力资源和移动存储更容易受到影响，易被攻击者利用来破坏电网的稳定性。

综上所述，电源管理单元可以提供有价值的取证信息，同时它们的安全问题需要小心处理。目前，没有明确规定PMU网络的安全标准，但NERC关键基础设施保护标准被认为是适用于未来。极大量PMU数据的存储也是将要面临的挑战。在参考文献[8]中，在国际标准下十个

公共事业，每个公共事业有40个电源管理单元（PMU），一年中PMU数据单元所需的存储单元据估计多达60TB（太字节）。PMU数据需要压缩和归档，所以取证研究呼吁成熟的压缩技术以及增强数据处理技术来对存档数据进行分析。

2.4 灾害取证分析

电网以及其他关键基础设施在建造时都能承受适度的自然灾害，但在面临严重的灾难时可能会瘫痪。在文献[2]中，Kwasinski调查了2011年3月日本发生的地震和海啸对电网所造成的影响。作者报告说，日本的电网在沿海地区遭到破坏的原因主要是由海啸。然而，在电力中断跨越更大的区域，即使电网有轻微损坏也将无法分配电力。此外，虽然许多房子有太阳能电池板，这些电池板并没有按规定安装，因此禁止在中断时使用。

日本灾难的取证分析表明，集中发电和分配，以及缺乏微型电网使得日本电网更加脆弱。作者发现卡特里娜飓风后的结果是相似的，即在即使是很小的损害也会对电力基础设施造成大区域停电。

智能电网引入许多增强措施便于对电网进行控制，将改善电网的物理安全性。另一方面，网络的控制变得更加依赖于通信系统，通信系统的物理安全性与电网资产的安全性同样重要。出于这个原因，智能电网应对灾害后的取证分析还应该包括调查通信系统。能够在出现故障前收集信息秒也同样重要。类似于飞行记录关键资产灾难取证工具仍有待开发。此外，由文献[10]可知，最近的研究已经表明，智能微电网能增加电力网络的生存能力。而目前对微电网灾难影响的调查仍是一个待解决的问题。

2.5 音频/视频认证及时间戳

数字音频和视频记录包括美洲60Hz和世界其他地区的50Hz的附加频率成分。这种成分是电网

标称频率的结果，称为ENF。录音设备的供电电源从电源插座上接收ENF，而电池供电的录音设备都受到从附近的电源线发出的电磁场的影响。

由于负载的变化，ENF偏离其标称值。ENF是一个随机信号，作为电网的指纹，能在向下抽样的信号的频域清楚地观察到，可以通过周围电网频率的标称值的带通滤波器进行滤波。在取证分析中，该指纹被看成ENF信号的历史模式数据库，在同一个网络中可被其他设备检索出来。利用这种技术，超过10分钟的录音问题才能解决。此外，它还可以用来确认由于复制和粘贴等操作会影响ENF信号，并导致相位变化。由参考文献[5]可知，ENF已经被伦敦大都会警察局法医实验室使用。

由于其数据密集型的性质，智能电网辅助音效认证和时间戳与上面提到的应用面临相类似的挑战。ENF模式数据库需要附加的存储以及处理能力。然而与智能电表或WASA的数据不同的是，ENF信号的收集不执行任何安全和隐私措施，因为任何用数码录音机的人就能够观察到信号。

3 智能电网取证面临的挑战

隐私和安全是智能电网取证研究所面对的最具挑战性的问题。特别是计量和辅助计量数据可能会揭示私人信息，如健康、心理和经济状况、以及活动和一个人的选择。由文献[11,12]中可知，获得包括人存在与否、个体的数量、睡眠周期、用餐时间以及淋浴等的详细的图形属性是可能的。取证方法不应该侵犯公民的隐私权，但要为犯罪行为提供有效的证据。除非有法律依据，否则数据是不可靠的，这一点非常重要。

证据数据的安全及大容量存储，在成本方面具有挑战性。原始计量数据和智能电网的测量需要长时间周期。因此，旧的数据将在压缩和聚集后存档。数据在汇总时可能会丢失一些有利于取证分析的内容。在这种情况下，导出关联数据极

具挑战性并且需要复杂的数据处理算法。取证分析通常依赖于精确的时钟，而WASA系统可能会受到时间戳攻击。这些攻击可以很容易地通过GPS实现并非法设置PMU时钟。不正确的时间戳测量可能误导变电站自动化和电网运营商的决定。

SCADA系统的挑战是难于进行实时分析以及取证方法的可扩展性。工厂里在一个中央数据仓库记录所有的SCADA消息和控制行动是可行的；然而，在电力系统中，它会产生过度的通信开销，对关键监测和控制消息的传输有很大的挑战。智能电网取证面临的挑战如表1所示。

4 待解决的问题及结论

智能电网取证是一个新兴的研究和开发领域，旨在以有效合法的方式从智能电网中提取证据资料。在充分发挥其潜力之前，还有很多待解决的问题。

安全和隐私是主要的问题。专为取证分析收集信息而设计的系统，很容易成为攻击的目标。因此，收集取证分析数据需要安全的通信链路。存储设备应采用身份验证机制，以防止未经授权的访问。另一个悬而未决的问题是处理大量的数据，并提取有用的特征。从AMI、SCADA网络、以及PMU采集的数据需要复杂的处理算法，从而可以找到数据之间的关联。此外，数据归档应该实现不失报警来。

SCADA系统的取证准备是一个新兴的研究和开发领域。可扩展的解决方案，是能够从SCADA系统中收集足够多的证据，这一点还有待开发。此外，在出现故障前几秒发生的事件可能会提供对系统漏洞的有价值的见解。然而，对于高度临界功率的电网资产，仍然没有廉价和实用的事件记录硬件可供采用。

在智能电网中，供应和移动存储的分布式特性以复杂化的电动车取证分析的形式体现出来。

表1 有关智能电网取证的应用、挑战和待解决问题的总结

应用	挑战	待解决的问题
测量	<ul style="list-style-type: none"> • 个人信息的隐私 • 安全数据收集和存储 • 数据存储和处理成本 	<ul style="list-style-type: none"> • 压缩技术，不会丢失报警内容 • 先进的数据处理算法得出从大量的数据关联
SCADA网络	<ul style="list-style-type: none"> • 可扩展性 • 缺乏实时分析工具 	<ul style="list-style-type: none"> • 可扩展的数据采集
广域测量和控制	<ul style="list-style-type: none"> • 数据处理和存储 • 安全数据收集和存储 • GPS欺骗攻击 	<ul style="list-style-type: none"> • 压缩技术，不会丢失报警内容 • 先进的数据处理算法得出从大量的数据关联
灾难取证	<ul style="list-style-type: none"> • 在严重的灾害数据采集 • 在通信智能电网控制系统故障或损坏 	<ul style="list-style-type: none"> • 事件日志记录的硬件非常关键资产（类似飞行数据记录仪）
通过ENF进行音频/视频认证	<ul style="list-style-type: none"> • 获取数据库模式为老录音 	<ul style="list-style-type: none"> • 信号处理短录音和录像

取证研究需要能够指出错误配置与恶意行为之间的区别，因为分散资源和移动存储可能会受到影响而被迫采取行动，并危及电网的稳定性。

在这篇文章中，我们介绍了智能电网取证法，这是一个新兴的课题，需要电网的专业知识、沟通研究人员、安全专家和刑事司法专家。我们已经确定了一些可能的应用方向，概述了该领域所面临的挑战，并指出了待解决的问题。在表1中，我们总结了智能电网取证应用领域的挑战和待解决的问题。本文旨在为未来智能电网的取证研究提供一个路线图。

参考文献

- [1] M. Amin, "Toward A More Secure, Strong and Smart Electric Power Grid," IEEE Smart Grid Newsletter, Jan.2011.
- [2] A. Kwasinski, "Disaster Forensics," IEEE Spectrum, Dec.2011.
- [3] J. Fridrich "Digital Image Forensics," IEEE Signal Proc.Mag., vol. 26, no. 2, 2009, pp. 26-37.
- [4] D. Takahashi et al., "IEEE 802.11 User Fingerprinting and Its Applications for Intrusion Detection," Computers and Mathematics with Applications, vol. 60, no. 2, July 2010, pp. 307-18.

- [5] A. Cooper, "The Electric Network Frequency (ENF) as an Aid to Authenticating Forensic Digital Audio Recordings-an Automated Approach," Proc. 33rd Int'l. Conf.:Audio Forensics - Theory and Practice, June 2008, Denver, CO, USA.
- [6] J. Slay, E. Sitnikova, "The Development of a Generic Framework for the Forensic Analysis of SCADA and Process Control Systems," Proc. Forensics in Telecommunications, Information and Multimedia, vol. 8, 2009, pp. 76-81.
- [7] T. Kilpatrick et al., "Forensic Analysis of SCADA Systems and Networks," Int'l. J. Security and Networks, vol. 3, no. 2, 2008, pp. 95-102.
- [8] M. Patel et al., "Real-Time Application of Synchrophasors for Improving Reliability," Oct. 2010, <http://www.nerc.com/filez/rapirtf.html>; last accessed on Jan. 2012.
- [9] W. Wang et al., "Risk-aware Attacks and Catastrophic Cascading Failures in U.S. Power Grid," Proc. IEEE GLOBECOM, Houston, TX, Dec. 2011.
- [10] M. Erol-Kantarci, B. Kantarci, and H. T. Mouftah, "Reliable Overlay Topology Design for the Smart Microgrid Network," IEEE Network, Special Issue on Communication Infrastructures for Smart Grid, vol. 25, no. 5, Sept./Oct. 2011, pp. 38-43.
- [11] Y. Yan et al. "A Survey on Cyber Security for Smart Grid Communications," IEEE Commun. Surveys & Tutorials, vol. 14, no. 4, 2012.
- [12] M. A. Lisovich, D. K. Mulligan, and S. B. Wicker, "Inferring Personal Information from Demand-Response Systems," IEEE Security & Privacy, vol. 8, no. 1, Jan.-Feb.2010, pp. 11-20.

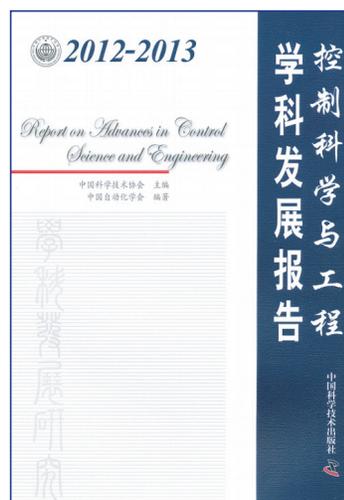
2014中国科协 学术建设发布会召开

2014年4月2日，2014中国科协学术建设发布会在北京举行，本次发布会是中国科协举行的第7次学术建设发布会。

中国自动化学会第三次组织撰写的《2012-2013控制科学与工程学科发展报告》正式出版。在历时两年的组织撰写过程中，项目组与专家组紧密结合，开拓性地采取了定量与定性相结合的方法对本领域科研进展进行描述。该方法以数据驱动的知识自动化为指导，围绕控制科学与工程领域（控制理论与控制工程；模式识别与智能系统；系统工程；检测技术与自动化装置；导航、制导与控制；）五个二级学科的2011-2013年度网络文献及数据资源，以integrated China Automation

Network (iCAN) 解析平台为分析工具，采取有效机制与各二级学科专家互动，专家用数据说话，避免了传统报告的一些局限性。采用新方法，该报告较为全面地总结了国内控制科学与工程领域

在近三年来的主要研究成果，并对学科的现状与发展态势进行了概述、分析和展望。



中国自动化学会十届三次秘书长 工作会议在京召开

2014年4月28日，中国自动化学会十届三次正副秘书长工作会议在北京中科院自动化所召开。秘书长王飞跃主持会议，副秘书长张楠、戴琼海（派代表）、孙彦广、石红芳、赵延龙、孙长银（派代表）出席会议，学会办公室部分工作人员列席会议。

会议审议讨论通过了第十届理事会第二次正副秘书长工作会议纪要；各位副秘书长分别从学

会管理、学术、财务、会员发展和奖励、学术会议和会展、出版宣传、国防、工业、社会服务工作等方面汇报了相关工作的进展情况；各位副秘书长围绕中国自动化学会秘书长工作会议议事规则，分支机构会员发展，学会主办会议对会员优惠，IFAC大会具体方案展开了讨论，大家集思广益，各抒己见，为学会下一步工作提出了很多宝贵的意见和建议，并形成会议决议。

中国自动化学会十届三次理事长、 十届四次秘书长工作会议在京召开

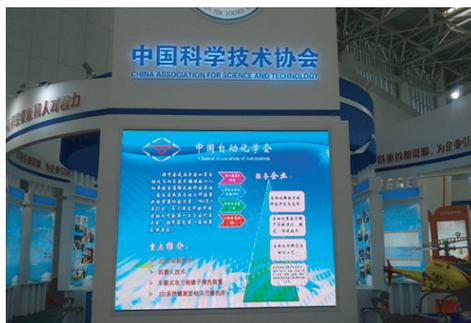
2014年6月27日，中国自动化学会第十届三次理事长工作会议、中国自动化学会第十届四次秘书长工作会议在北京中科院自动化所召开。理事长郑南宁主持会议，副理事长王飞跃、柴天佑、张剑武、张纪峰、陈杰、杨孟飞、黄星（请假）、于海斌（派代表）、李少远、周东华，副秘书长张楠、石红芳、乔非、孙长银、孙彦广、陈积明、赵延龙、黄华、董海荣、戴琼海（派代表）出席会议，学会秘书处办公室工作人员列席会议。

会议审议讨论通过了学会十届二次理事长工作会议会议纪要和中国自动化学会第十届三次秘书长工作会议会议纪要，进一步明确了会议议事规则；各位副理事长、副秘书长分别从学会管理、学术、财务、会员发展和奖励、学术会议和会展、出版宣传、国防、工业、社会服务工作等方面汇报了上次会议以来相关工作的进展情况；对学会下一步工作大家展开讨论，集思广益，各抒己见，提出了很多宝贵的意见和建议，并形成会议决议。

学会组织4个研发成果项目参加津洽会

2014年5月8-13日，2014中国·天津投资贸易洽谈会暨PECC国际贸易投资博览会（以下简称津洽会）在天津梅江会展中心召开。为落实2014年2月26日中国科协与天津市政府签署的全面合作协议，中国自动化学会作为中国科协推荐的与天津市支柱产业密切相关的9家全国学会之一，组织了中科院自动化所“精密装配机器人”、“3D打印”，东北大学“SD系列螺旋面钻头尖刃磨机床”以及重庆电力公司“车载式电力绝缘子清洗装置”四个项目参展展示。5月8日，全国人大常委、中国科协副主席冯长根参加本届津洽会重点活动。全国人大常委、天津市委原常委史莲喜，市政协副主席李文喜参观了学会展区，并对所展示的项目给予高度评价。

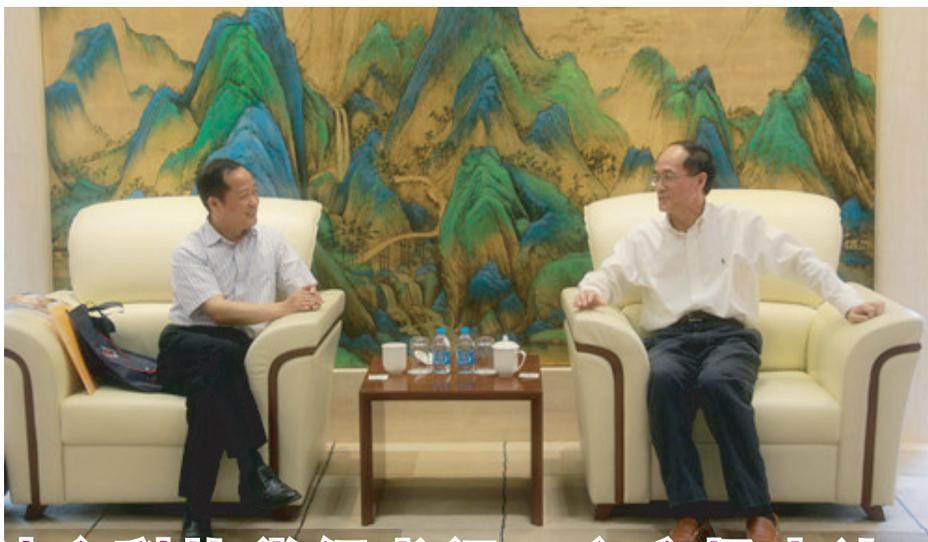
此次是中国自动化学会首次组团参加津洽



会，借助人才荟萃、联系广泛的的优势，为企业搭建人才引进、技术咨询、科技成果推广转化、科技中介等技术服务平台，受到了中国科协和天津市政府等单位的高度重视和充分肯定。

津洽会期间，学会党支部应邀走访了天津市自动化学会和其挂靠单位天津工业自动化仪表研究所有限公司，与学会和挂靠单位领导就学会发展等问题进行了深入、富有成效的交流与探讨。

天津市自动化学会自1979年9月成立至今，不断发展壮大，在学术交流、技术服务等方面取得了显著的成绩，自2004年连续三届被天津市科协评委学会之星，并先后荣获天津市先进民间组织和全国省级学会之星荣誉称号，此外，积极发挥自身优势和资源，协助我会成功组织了此次津洽会的企业对接等工作。



宁波市科协党组书记、主席杨志达一行 五人访问我会

2014年6月18日上午，在中国科协牵线搭桥下，宁波市科协党组书记、主席杨志达、学会部副部长宁冰、宁波市电子学会、宁波市自动化学会主要领导等一行五人访问中国自动化学会，学会副理事长兼秘书长王飞跃携秘书处全体人员接待了此次来访。

会见中，王飞跃副理事长首先对杨主席一行人的到来表示了热烈的欢迎，并详细介绍了学会的发展历程和整体现状，展示了学会在促进自动化科学技术发展和产业升级方面所取得的成绩，同时也表示正在进一步推进学会自身改革和能力建设，积极承担政府职能转移。

杨志达主席简要介绍了宁波市科协、宁波市民营企业所有量和发展现状、以及宁波市科协所开展的全国学会宁波行活动等具体情况，宁波市电子学会副理事长王耀和宁波市自动化学会副秘书长钟晓强结合学会工作体会介绍了宁波市民营

企业在发展中所遇到的一些具体技术瓶颈等问题，学术部副部长宁冰详细阐述了宁波市科协“智力引进，会企合作”的框架性合作协议。来访一行殷切表达了寻求全国性学会智力支持的强烈愿望，希望通过宁波市科协为学会和宁波地方企业搭建桥梁，通过探索会企间多样可行的合作模式，为地方企业创新发展提供实实在在的支持。

随后，张楠副秘书长就来访一行所提出的具体问题逐一答复。学会将在现有工作基础上，进一步整合自身的人力、智力资源优势，借助会企合作平台，在决策咨询、联合攻关、成果转化、人才培养等方面为地方民营企业做出实际的贡献。

双方纷纷表示以此次来访为契机，中国自动化学会将会与宁波市科协加深彼此了解，进一步明确宁波市民营企业的需求，努力在未来合作中为服务地方经济发展发挥更大更有效的作用。

中国自动化学会 2014年全国秘书长 工作会议在承德召开

中国自动化学会2014年全国秘书长工作会议于2014年5月13日在承德召开。来自省级学会和分支机构的秘书长、学会所属期刊代表,以及学会秘书处工作人员共计五十余人参加会议。学会副理事长兼秘书长王飞跃,副理事长张纪峰、李少远出席会议。会议由常务副秘书长张楠主持。本次会议的主题是“总结工作、交流经验、讨论问题、共谋发展”。

王飞跃秘书长首先代表学会秘书处向在百忙中前来参会的各位秘书长和代表表示热烈的欢迎,同时指出本次秘书长工作会议是新一届理事会成立以来的第一次非常重要的会议。在建设社会主义和谐社会的时代背景下,促进学会之间的交流与合作,实现地区间的共同进步,是使学会又快又好发展的大事,是全国各地区建立和谐自动化,实现自动化领域中国梦的重要举措。希望大家充分意识到自己肩上的重担,把自动化学会的事业时刻放在心上,同时借此机会进行学会之间的交流和沟通,总结成绩与不足,明确未来工作重点,共唱学会发展大戏。随后副理事长张纪峰研究员、李少远教授为会议致辞。

张楠副秘书长受王飞跃秘书长的委托介绍了第十届理事会的构成及本届理事会所采取的几项

新的改革性措施;传达贯彻中国科协八届五次全委会会议的精神;介绍了民政部出台的关于分支机构的最新政策;总结了学会近期各项工作的进展情况。

会上,各分支机构秘书长、省级自动化学会秘书长、期刊编辑部负责人分别对各级分支机构、省级自动化学会、期刊编辑部的各项工作和情况进行了简短而精彩的介绍。

在具体议题讨论阶段,全体参会代表就“中国自动化学会会员发展工作”、“中国自动化学会分支机构工作条例(草)”、“中国自动化学会分支机构评估办法(草)”、“中国自动化学会刊物管理条例(草)”、“中国自动化学会刊物实施细则条例(草)”等议题展开了热烈的讨论,分享了经验,交流了体会,并对学会下一步工作提出很多宝贵的意见和建议。

会议最后,王飞跃秘书长做总结发言。他相信中国自动化学会在上级领导的支持下,在秘书处、省级学会秘书处及分支机构等部门的共同努力下,将继续加强与各省级自动化学会、分支机构、期刊编辑部之间的合作,充分发挥自动化技术在经济社会发展建设中的支撑作用,在2014年取得更大的成果。

成都自动化研究会第七次会员代表大会 暨“两化融合”创新论坛隆重召开

2014年4月18日，成都自动化研究会第七次会员代表大会暨“两化融合”创新论坛在东方电气集团隆重召开。成都市科学技术协会党组成员、副主席卢晓东、成



都市民政局民间组织管理处调研员苟兴勇、成都市科学技术协会学会部部长张进、副部长张耘、成都科学技术服务中心主任杨靖等领导同志出席“七大”开幕式。省自动化与仪器仪表学会、省电工技术学会、成都市科协企事业部、市电子学会、市电力电子学会、市药学会、市环境科学学会、市老科协、市科技企业协会、市外商投资企业协会、成飞公司科协、自来水公司科协及国航维修基地科协的领导和代表应邀出席了会议。

来自成都市自动化科技战线的150余名会员代表参加了会议。会议传达学习了成都市科协“八大”会议精神；总结2008年-2013年成都自动化研究会工作成绩，安排部署2014年-2019年研究会各项工作；修订通过了研究会章程；选举产生了新一届领导机构。

东方东汽集团电子电力与控制事业部党委书记、总经理、成都自动化研究会第六届理事会理事长肖珉代表研究会致开幕词。成都市电子学会

谭滇文秘书长代表兄弟学会致贺词。

杨靖代表挂靠单位向大会的成功召开表示热烈祝贺，希望研究会围绕全市科技工作战略部署，开展具有自身特点的活动，发扬民主团

结的优良传统，融洽和谐的学术氛围，不懈创新的科学态度，坚持为会员服务的奉献精神，在新的征程中创造新的业绩，使研究会工作再上一个新的台阶。成都科技服务中心将一如既往地给研究会给予更加有力的支持，协调解决制约发展的困难和问题，创造更好地工作条件，推动研究会事业取得新的发展。

苟兴勇代表成都市社会组织登记管理机关讲话，他希望成都自动化研究会继续做好民政部的“中央财政支持成都自动化研究会农村扶贫救助发展示范项目”，做实项目品牌，努力开创成都自动化研究会社会服务工作的新局面。

卢晓东代表市科协向大会表示热烈祝贺，充分肯定成都自动化研究会过去五年的工作。他希望研究会深入学习领会成都市科协“八大”会议精神，提高社会组织服务社会能力；希望成都自动化研究会引导全体会员紧密结合实际，服务大局，抢抓“学会能力提升专项”及政府职能转移

等重大机遇，充分发挥研究会“人才库”、“智囊团”的优势和作用，为政府建诤言、献良策，参在关键处，议在点子上，助推自动化、信息化科学技术发展；要发挥研究会自身优势，注意整合各方面资源，实现资源集聚。

肖珉代表成都自动化研究会第六届理事会作工作报告。报告总结了成都自动化研究会五年的工作，分析了过去工作中存在的不足和问题，提出了今后五年研究会工作的指导思想和奋斗目标。

会议经过审议通过了《成都自动化研究会第七次会员代表大会筹备工作报告》、《成都自动化研究会六届理事会工作报告》、《成都自动化研究会章程》修改说明报告、《成都自动化研究会第六届理事会财务工作报告》、《成都自动化研究会会费收取标准及管理辦法》、《关于聘请成都自动化研究会高级顾问的决定》、《关于聘请成都自动化研究会副秘书长的决定》、《关于授予成都自动化研究会荣誉理事职务的决定》。

大会通过无记名投票选举产生了由85名理事组成的成都自动化研究会第七届理事会和3名监事组成的成都自动化研究会第七届监事会，东方电气集团电子电力与控制事业部党委书记、总经理肖珉再次当选为理事长，攀钢集团成都钢钒有限公司副总经理季柳岷当选为监事长。

大会认为，成都自动化研究会第六次会员代表大会以来，在成都市科技局、市科协和市民政局的领导下，在中国自动化学会和成都科学技术服务中心的指导和支持下，贯彻落实科学发展观，团结广大会员，抓住机遇，发挥优势，开拓创新，圆满完成了“六大”以来的各项工作目标，开创了研究会工作新局面。

大会强调，在成都市科协第八次代表大会

上，市委对全市科技工作者和科技社团提出了殷切期望，我们要认真学习深刻领会，在围绕中心、服务大局，助推领先发展、服务科技人才、加强自身建设、提升服务能力上有更大作为。

大会同意《成都自动化研究会第六届理事会工作报告》提出的今后五年下一届工作的方向。进一步加强学术交流活动，形成工作的品牌效应；进一步发挥人才智力优势，积极建言献策，提高决策咨询的针对性和实效性；进一步增强服务能力，拓展研究会发展空间；进一步加强自身建设，不断提高研究会工作的质量和水平。

大会号召，全体会员要在新一届理事会、监事会的带领下，乘全面深化改革的东风，在发展自动化科技、建设创新型国家，在实现中国梦之强会梦的实践中迈出新的步伐，在服务成都建设创新型引领城市中作出新贡献。

新当选的成都自动化研究会第七届理事长肖珉致闭幕词后，大会在热烈、高效、有序的气氛中宣布闭幕。

下午，大会进行的《“两化融合创新论坛”——工业机器人产业发展及应用研讨》，来自西南科技大学的张华教授作了《特殊环境机器人技术及应用研究》报告，富士康科技集团的李雷经理作了《智能装备发展报告》，成都环龙智能系统设备有限公司的梁祥义运营总监作了《工业机器人市场分析及发展》报告，中国市政工程西南设计研究总院有限公司刘卫民总工作了《无线通讯在市政行业的应用》报告，成都中嵌自动化科技有限公司张辉副总经理作了《微工控时代悄然来临》报告。以上几位专家分别对工业机器人产业发展及应用进行研讨，为把我市建设成为中西部创新驱动发展引领城市而献计出力。

(成都自动化研究会 供稿)



中国自动化学会发电自动化专业委员会成立大会在浙江绍兴召开

2014年4月23日下午，“中国自动化学会发电自动化专业委员会（简称委员会）成立大会”在浙江绍兴召开，中国自动化学会副秘书长张楠、委员会名誉主任委员孙优贤院士的代表王文海、名誉副主任委员侯子良教授级高工和来自各大发电集团公司和部份地方发电集团公司，省和集团研究院、设计院、发电厂（包括核电厂）、高等院校、设备厂家等单位推荐的候选人或代表，共70多人参加了会议。

中国自动化学会发电自动化专业委员会，是经2013年1月份中国自动化学会第九届八次常务理事会议讨论通过，报中国科协批准创建。成立大会上，张楠副秘书长代表中国自动化学会，宣读了“中国自动化学会关于成立发电自动化专业委员会的批复”。

会议选举产生了第一届委员会65位委员、副主任委员、主任委员和秘书长，推举了委员会名誉正副主任委员，主要领导成员如下：

名誉主任委员：孙优贤

名誉副主任委员：侯子良

主任委员：金耀华

副主任委员：尹 淞 许继刚 沈 炯 金 丰

朱北恒 刘志远 杨新民

秘书长：孙长生

会议审议了委员会工作条例，对秘书处所做的2014年工作计划进行了认真研究。会议休息间隙，全体参会委员与代表拍照合影。

选举产生的第一届委员会会议上，张楠副秘书长代表中国自动化学会在会上发言，热烈祝贺委员会成立。希望委员会在推动我国发电厂自动化技术发展的前进步伐，促进我国发电自动化专业科学技术的繁荣发展上作出努力。

名誉副主任委员侯子良在会上讲话，他首先简述了我国火电厂实时生产过程控制方式从就地控制方式向集中控制方式发展的长达三十年的第一次历史变革，揭示了当前正在进入一个以SIS技术深入发展为基础的控制方式的第二次变革，一个融合“高层监管级控制”的全新复合控制方式必将诞生，呼吁以创新的精神和加强顶层设计的方法积极推动这场变革的健康发展。其次，还论述了当前行业管理和服务工作中对自动化重大技术政策和标准及时指导的缺失阻碍了行业技术的

快速发展，建议学会等行业组织打破传统束缚，探索在新形势下承担这方面任务的职责和方法。同时希望这个平台，在推动发电自动化的产、学、研、用联合研究与交流上发挥作用，

最后，主任委员、大唐集团副总经理金耀华在会上讲话。他指出，中国自动化学会发电自动化专业委员会成立，是发电行业热工专业的一件喜事。在回顾了“电力行业热工自动化技术委员会”2008年成立以来，围绕着发电企业最迫切需要解决的技术问题所开展的工作并给予高度评价

后，说明了新成立发电委员会的必要性，并对今后的工作提出，要求以关注前沿技术政策研究、解决关键技术问题、推广先进技术应用、完善行业标准规范、搭建专业交流平台为己任，更好地促进发电自动化专业先进技术的研究、交流、应用与繁荣发展，推动我国发电厂自动化技术发展的前进步伐。

会议得到与会领导的好评和全体代表的一致认同，取得圆满成功。

(发电自动化专业委员会 供稿)

控制理论专委会主办的第六届控制科学与工程前沿论坛在承德召开

第六届控制科学与工程前沿论坛于2014年5月15日至17日在承德紫御国际假日酒店召开。本次论坛由中国自动化学会控制理论专业委员会主办，北京科技大学



自动化学院和北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院共同承办。会议围绕大数据处理、智能系统理论、不连续控制系统、惯性技术、热连轧生产控制系统等主题，探讨了控制科学与工程领域的最新研究动态。控制理论专业委员会顾问委员陈翰馥院士、郭雷院士、程代展研究员，60余位委员，以及各高校从事控制理论与应用研究的学者共计110余人参加了本次论坛。

论坛开幕式由北京科技大学自动化学学院院长孙长银教授主持，随后，北京科技大学副校长孙冬柏教授和控制理论专业委员会主任张纪峰研究

员分别致欢迎辞。

论坛安排了5场报告。国家自然科学基金委员会信息科学部三处王成红处长、香港中文大学徐雷教授、澳大利亚皇家墨尔本理工大学余星火教授、北京航空航天大学房建成教授、北科麦思科公司葛良松总经理分别从大数据处理的若干问题、An Intelligent System Theory of Attention, Recognition, and Learning: Recent Advances on BYY Harmony Learning、不连续控制系统未来发展及挑战、高分辨率对地观测系统中的惯性技术：研究与实践、热连轧生产控制系统前沿技术等角度分享了相关领域的最新研究进展。这些精彩的报告，引发了与会者的积极讨论，会场气氛热烈。

(控制理论专业委员会 供稿)

第七届ABB杯全国自动化论文 大赛正式启动

“第七届ABB杯全国自动化系统工程论文大赛”启动仪式于2014年5月16日在广州盛大开幕。本届大赛由中国自动化学会主办、ABB赞助，以“智能产业和智慧城市”为主题，倡导

通过大力发展智能产业实现产业升级，推动智慧城市从概念走向实践。中国自动化学会的副理事长兼秘书长王飞跃研究员、ABB集团过程自动化北亚区及中国的负责人欧阳瑞先生、北京天问智讯科技有限公司的项目部主管杨薇女士等都出席了签约启动仪式。

中国自动化学会副理事长兼秘书长、国际智能控制领域专家王飞跃教授表示：“作为中国大力发展的七大战略性新兴产业之一，智能产业在助力产业结构调整 and 工业转型升级方面起到了关键作用，它能够促进我们生活的环境更加友好、城市更加和谐。自动化论文大赛作为业内重要的技术交流和经验分享平台，每届以行业热点话题或最新市场趋势为主题，有力推动了学术研究和产业发展，并已成为中国自动化行业年度旗舰活动。”



ABB过程自动化业务部北亚区及中国负责人欧阳瑞表示：“ABB一直致力于自动化技术的创新和优秀专业人才的培养。七年来，我们携手中国自动化学会举办论文大赛，目的就是

要促进自动化行业的学术交流 and 成果应用，提升中国自动化行业的技术和研发水平。”

本届论文大赛面向企事业单位从事自动化系统及相关专业工作的科技、设计、管理、施工、运行、维护及培训人员，以及高等院校或科研院所从事自动化、信息化专业教学或科研工作的教师或工程技术人员等。大赛将于2015年2月底截稿，同年10月公布获奖文章。秉承公平、公正、公开的原则，大赛评委会成员均为国内一流院校资深教授和国内科研院所的工程技术专家，确保在理论和实践两个方面对参赛稿件给予权威与公正的评定。

从2005年首次举办至今，“ABB杯全国自动化系统工程论文大赛”共收到5,436名作者的有效论文2,679篇，共评选出获奖论文181篇，公开出版发行6本论文集，收录高质量优秀论文近500篇。



第三届全国技术过程故障诊断与安全性 战略研讨会成功召开

2014年5月31号到6月1号，第三届全国技术过程故障诊断与安全性战略研讨会在广东石油化工学院成功召开，会议由中国自动化学会技术过程故障诊断与安全性专业委员会主办，广东石油化工学院承办。专委会部分委员、承办单位部分领导和代表共计40余人参加了研讨会，部分未能参会的委员也发来了建议。

会议由专委会主任委员周东华教授主持。周东华教授首先回顾了前两届战略研讨会的概况，以及四年来战略研讨会的讨论议题在促进专委会委员申请重大项目、加强专委会凝聚力和人才培养方面的重要作用。张清华校长介绍了广东石油化工学院的发展历史和现状。

与会代表就一些就本领域内需要关注的研究背景或重要问题进行了介绍与交流，包括知识自动化，检测、诊断与维护自动化，城市管网的安全监测与智能维护，桥梁、楼宇等大型构件的缺陷监测，深海潜水器的故障诊断，航天器在轨故

障诊断和维护，航天器发射平台可靠性，现场总线及自动化，大数据及基于数据驱动的方法面临的问题，故障诊断与智能维护的关系，沿海大型石化设备的腐蚀在线监测，从系统设计、安装、应用和实施的角度来研究最优维护策略等。此外，代表们还就973、自然科学基金仪器专项等项目的申请交流了各自的经验。

在以上讨论基础上，代表们建议从深海潜水器的故障诊断、航天器发射平台可靠性、和沿海大型石化设备的腐蚀在线监测三方面，考虑联合申请国家重大项目。此外，还有委员通过电子邮件建议就重大海洋装备（包括舰船、海洋平台、机电设备等）的故障诊断、容错控制、以及预测维修与生命周期评估申请国家重大项目。

讨论后，与会代表还参观了广东省石化装备故障诊断重点实验室。

（技术过程的故障诊断与安全性专业委员会供稿）

江西省自动化学会第六次会员代表大会 在南昌大学召开

2014年5月24日，江西省自动化学会第六次会员代表大会在南昌大学隆重召开。南昌大学副校长、省计算机学会理事长李建民出席大会并讲话，南昌大学副校长邓晓华，南昌航空大学副校长黎明、东华理工大学副校长汤彬等领导出席代表大会。省电机工程学会、省计算机学会等学术团体代表到会祝贺大会召开。江西省科协学会部派员参加。来自全省的自动化学及相关专业的科研院所、大专院校和有关企业的会员代表共80余人参加了会议。

江西省自动化学会第五届理事会陈垦理事长

主持开幕式并代表理事会作了省自动化学会第五届理事会工作报告。大会审议通过了省自动化学会五届理事会工作报告、财务报告、《章程修正案》，选举产生了省自动化学会第六届理事会、常务理事会，选举邓晓华为理事长，欧阳伟、汤彬、杨辉、张海平、代冀阳、万益民、熊墨辉为副理事长，万晓凤为秘书长。会上，加拿大国家研究委员会杨春生博士应邀作了题为《人工智能技术发展的回顾与展望》的学术报告。

(江西省自动化学会 供稿)

“2014全国大学生嵌入式物联网设计大赛 山东省分区赛”暨“第二届山东省大学生 嵌入式物联网设计大赛”成功举行

2014年6月7日，由山东省自动化学会和山东省计算机学会联合承办的第十届“全国大学生嵌入式物联网设计大赛山东省分区赛”暨“第二届山东省大学生嵌入式物联网设计大赛”在临沂大学隆重举行。该项竞赛被列入了山东省科协2014山东省大学生科技节活动之一。来自省内外11所高校30多个大学生代表队的150余名师生参加了标准赛项、智能车个人赛和智能车团体赛等赛项竞赛。

山东省科协副主席纪洪波教授、中国电子学会嵌入式系统专家委员会主任委员、国家

“十二五”服务机器人重点专项专家组组长王田苗教授、省教育厅领导和山东省自动化学会理事长贾磊教授等出席了竞赛活动开幕式。临沂大学校长杨波教授为活动开幕式致词。

山东省自动化学会组织承办大学生嵌入式物联网设计大赛活动的开展，顺应了当前物联网技术和产业发展的趋势，为推动我国高校嵌入式系统设计、软件技术开发、物联网实验平台和机器人实践教学的发展，激励大学生创新设计和创新成果的涌现，培养增强大学生科学实践和技术应用能力，加强高校之间学术交流，密切高校和企

业的合作，形成高新技术企业选拔优秀科技人才与解决学生就业等搭建了广阔的平台。

经过紧张的角逐，所有大学生代表队都充分展示了卓越的创新水平和能力，取得了优异成绩。青岛农业大学、济南大学、曲阜师范大学、

临沂大学、山东科技大学五支代表队获得标准赛项比赛特等奖；南阳理工学院、山东工商学院、山东科技大学获得智能车个人赛特等奖；山东工商学院获得智能车团体赛特等奖等奖项。

(山东省自动化学会 供稿)

菲尼克斯智能未来，自动化成就梦想——“I Love Control”中国自动化大奖赛正式拉开帷幕

2014年5月28日，杭州，随着一盏代表着全体中国自动化人梦想的明灯被瞬间点亮，由中国自动化学会、教育部教育管理信息中心IAAT项目管理办公室联合



主办，菲尼克斯（中国）投资有限公司承办的“**I Love Control**”中国自动化大奖赛正式拉开帷幕。近300多位高等院校相关专业师生参加了本次启动仪式。

本届大赛以“智能未来，自动化成就梦想”为主题，旨在通过提倡自动化创新，促进自动化领域的学术交流与发展，沟通自动化领域的创新成果与实践经验，为发掘和培养更多优秀的自动化科技人才，开拓从业人员的视野，推动自动化产业与学术研究的紧密结合，从而更好地利用自动化技术创新推动产业升级。

中国自动化学会副理事长黄星、副秘书长张楠、陈积明，教育部教育管理信息中心专项负责人陈海涛主任、菲尼克斯（中国）投资有限公司总裁顾建党、控制系统和行业解决方案营销组织负责人缪竞红女士出席了本次启动仪式。黄副理

事长为启动仪式致辞，预祝大赛成功；顾建党总裁向在座嘉宾、师生全面介绍了菲尼克斯电气中国公司的发展之路；缪竞红总监对菲尼克斯电气自动化做了全面介

绍；陈积明副秘书长做题为《基于WIFI的室内定位系统》的报告。

本届“**I Love Control**”中国自动化大奖赛将秉持公平、公正、公开的原则开展，接收自动化领域精英们的创新成果，为各行业实现产业升级，提高生产效率和资源利用效率，促进中国自动化行业的整体发展给予强有力的助推力量。

本届大赛的参与对象主要包括：全国工业企业事业单位从事自动化系统及相关专业工作的人员；高等院校或科研院所自动化、机电一体化及信息化等专业学生和工作人员。

2014年8月底截止报名，并将在9月评出进入决赛的项目，2015年5月进行决赛并颁布最后获奖结果。大赛评委会成员均为国内一流院校资深教授和国内自动化相关科研院所、企业专家，力争确保为参赛作品给予权威与公正的评定。

中国自动化学会党支部再次获得中国科协2014年“党建强会”项目

按照党的十八大、十八届三中全会精神和中央书记处关于继续实施好“党建强会”特色活动的要求，为深入贯彻落实中央《关于加强基层服务型党组织建设的意见》和中国科协党组关于学会党建工作的指示精神，中国科协机关党委决定在全国学会党组织中继续开展“党建强会”十百千特色活动。特色活动将围绕倡导社会主义核心价值观，继续以“十百千”活动为载体，总结开展特色活动3年来的主要经验，促进学会党组织切实发挥坚持正确的发展方向、服务广大人民群

众、反映科技工作者诉求、规范学会自身发展的积极作用。

通过精心设计活动方案，认真填写申报材料，我学会党支部再次获得中国科协《2014年党建强会》项目。今后，学会党支部将结合学会实际，凸显党建工作项目化、业务化的工作特色，通过开展一系列特色活动，发挥学会组织优势，建设服务型党组织，使学会工作中有党的工作、有党的声音、有党组织和党员作用的发挥，提高党组织的凝聚力和影响力，进一步做好党建工作。

中国自动化学会党支部组织参加2014年天津投资贸易洽谈会

2014年5月8-13日，2014中国·天津投资贸易洽谈会暨PECC国际贸易投资博览会（以下简称津洽会）在天津梅江会展中心召开。为落实2014年2月26日中国科协与天津市政府签署的全面合作协议，中国自动化学会作为中国科协推荐的与天津市支柱产业密切相关的9家全国学会之一，组织了中国科学院自动化研究所“精密装配机器人”、“3D打印”，东北大学“SD系列螺旋面钻头尖刃

磨机床”以及重庆电力公司“车载式电力绝缘子清洗装置”四个项目参展展览展示。

党支部积极配合学会秘书处工作，组织全体党员参加此次津洽会，并在博览会期间，应邀走访了天津市自动化学会和其挂靠单位天津工业自动化仪表研究所，与学会和挂靠单位领导就学会发展等问题进行了深入、富有成效的交流与探讨。



中国自动化学会会员申请表

填表时间 _____年__月__日

姓名		性别		出生年月		(照片)
专业		职称		职务		
工作单位				联系电话		
身份证号				电子邮件		
通信地址				邮编		
工作简历 及主要业绩						
选择参加 专委会名称						
选择赠阅的 刊物	刊物名称： <input type="checkbox"/> 《自动化学报》 <input type="checkbox"/> 《电气传动》 <input type="checkbox"/> 《自动化博览》					
推荐意见	介绍人签名（或推荐单位盖章）： _____ 年 月 日					
学会审查 意见	_____ （盖章） _____ 年 月 日					

注：（1） 请附本人《专业技术职务资格证书》复印件。

（2） 邮寄地址：北京市海淀区中关村东路 95 号中国自动化学会办公室（100190）

Tel: 010-62544415

Fax: 010-62522248

E-mail: caa@ia.ac.cn

入会条件：

- （1） **会士**：在自动化科学领域中成绩卓著，学术上有较深造诣，在自动化科研、生产、教育和管理方面有重大贡献的科技人员。
- （2） **高级会员**：具有两年以上会龄；获得相当于副教授以上的专业职称，或具有自动化领域博士学位；或在与自动化及相关领域从业 5 年以上，并有显著成就的科技人员。
- （3） **普通会员**：已获得工程师、自动化系统工程师（ASE）、讲师、助理研究员以上职称，或具有相当于上述水平的自动化领域的科技人员，以及从事本学科范围内工作并热心倡导本学会工作的有关管理者。
- （4） **预备会员**：大学本科毕业后在科研、教学、生产单位从事自动化领域工作的助理工程师、助教等相当于上述水平的科技人员，以及在读研究生、大学本科三年级以上成绩优良的学生；（预备会员只缴纳一次性注册费，不缴纳会费；预备会员无选举权和被选举权；预备会员达到普通会员学术水平者，经本人申请并经批准后可成为普通会员。）
- （5） 请登录中国自动化学会网站www.caa.org.cn了解详细情况。



欢迎加入

中国自动化学会

Chinese Association of Automation

这里可以 **获取技术信息** **结识业内专家**
获得同行认可 **施展个人才华**

作为个人会员，你可以

- 优惠或免费获得学会提供的技术咨询和资料（以电子邮件方式为主）
- 优惠或免费参加学会或其所属专业委员会举办的学术活动
- 优惠或免费订阅学会通讯及与学会签约的学术期刊
- 优惠参加学会提供的继续工程教育培训
- 通过学会申请各类奖项和荣誉资格
- 其它可能由学会提供的服务

作为团体会员，你可以

- 派出代表参加全国会员代表大会
- 优惠参加学会组织的有关学术论坛、科技展览等活动
- 优惠或免费获得学会提供的有关资料、学术期刊和服务
- 优惠取得学会的技术咨询、新产品鉴定、工程项目验收等服务
- 优惠获得学会为单位员工进修而举办的新产品、新技术培训活动
- 其它可能由学会提供的服务

中国自动化学会办公室

地址：北京市海淀区中关村东路 95 号自动化大厦 509 室

邮编：100190

传真：010-62522248

电话：010-82544542

<http://www.caa.org.cn> E-mail: caa@ia.ac.cn