从工业 4.0 到能源 5.0: 智能能源系统的概念、内涵及体系框架

邓建玲 [1] 王飞跃 [2, 3] 陈耀斌 [4] 赵向阳 [5]

摘 要 分析推动工业进程和能源进程交互发展的因素和趋势, 结合能源互联网的发展要求, 提出了建立能源 5.0 的迫切性和必要性. 着重讨论了在网络化之后, 能源系统呈现的社会性问题, 认为在传统方式之外, 必须引入人类社会学、管理学等软科学进行分析建模; 指出了虚拟人工系统根本不同于传统仿真系统等理念, 只有利用虚拟人工模型, 采用平行系统, 才能建立能源 5.0. 阐述了能源 5.0 的理论、框架和技术, 明确了能源 5.0、基于社会物理信息系统 (Cyber-physical-social system, CPSS) 的平行能源是等价的概念. 指出能源 5.0 核心是构建与实际能源系统同构的虚拟人工能源系统, 通过虚拟人工能源系统的计算实验, 确定优化控制策略, 引导实际能源系统运行, 并使虚拟人工系统和实际系统平行执行、共同演化, 形成智能能源系统. 最后以华电集团已经完成的分布式能源 5.0 示范项目和正在实施的火力发电 5.0 项目及智能家居能源系统, 探讨了能源 5.0 的研究内容、技术途径及应用前景.

关键词 能源 5.0, 人工能源系统, 平行能源系统, 智能能源系统, 社会物理信息系统

引用格式 邓建玲, 王飞跃, 陈耀斌, 赵向阳. 从工业 4.0 到能源 5.0: 智能能源系统的概念、内涵及体系框架. 自动化学报, 2015, **41**(12): 2003−2016

DOI 10.16383/j.aas.2015.c150259

From Industries 4.0 to Energy 5.0: Concept and Framework of Intelligent Energy Systems

DENG Jian-Ling[1] WANG Fei-Yue[2, 3] CHEN Yao-Bin[4] ZHAO Xiang-Yang[5]

Abstract In this paper, we propose a new framework called Energy 5.0 by analyzing the trends and interactions of industrial and energy development and advances in order to facilitate energy internet development. In particular, there are many inherent social properties in energy systems since social information and factors are introduced to energy systems. Hence, it is imperative to include human sociology and management science in modeling and analysis of such systems. This paper points out that the artificial system is fundamentally different from traditional simulation systems. In order to establish the proposed Energy 5.0, we have to use the artificial model and the parallel system. To this end, we describe the theory, structure and related techniques of Energy 5.0. We also discuss the equivalence of Energy 5.0, cyber-physical social system (CPSS) and parallel energy. Finally, we illustrate the potential research issues, technical approaches and applicability of Energy 5.0 by using several demonstration projects such as a distributed energy system, an intelligent thermal power plant, and smart building project.

Key words Energy 5.0, artificial energy systems, parallel energy systems, intelligent energy systems, cyber-physical social systems (CPSS)

Citation Deng Jian-Ling, Wang Fei-Yue, Chen Yao-Bin, Zhao Xiang-Yang. From Industries 4.0 to Energy 5.0: concept and framework of intelligent energy systems. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(12): 2003−2016

1 能源系统的再认识

1.1 能源概念

能源是一个物理化学的概念, 能源消耗是一种物理化学现象. 根据中国的《能源百科全书》: “能源是可以直接或经转换提供人类所需的光、热、动力等任一形式能量的载能体资源”. 能源是一种呈多种形式的, 且可以相互转换的能量源泉, 是自然界中能

收稿日期 2015-04-29 录用日期 2015-12-11
Manuscript received April 29, 2015; accepted December 11, 2015
国家自然科学基金 (71232006, 61533019, 61233001) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (71232006, 61533019, 61233001)
本文责任编委 魏庆来
Recommended by Associate Editor WEI Qing-Lai

1. 中国华电集团公司 北京 100031 2. 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 3. 国防科技大学军事计算实验与平行系统技术中心长沙 410073 4. 中国华电集团科学技术研究总院 北京 100031 5. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100191
1. China Huadian Corporation, Beijing 100031 2. The State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 3. Research Center of Military Computational Experiments and Parallel Systems, National University of Defense Technology, Changsha 410073 4. China Huadian Corporation Science and Technology Institute, Beijing 100031 5. School of Automation Science and Electrical Engineering, BeiHang University, Beijing 100191

为人类提供某种形式能量的物质资源.

能源转换的主要科学依据是牛顿定律、电磁定律、热力学定律等. 其中热力学第一定律认为在一个热力学系统内, 能量可转换, 即可从一种形式转变成另一种形式, 但不能自行产生, 也不能毁灭. 其基本观念是 "物质不灭" 和 "能量守恒", 且物质的转化存在一定的条件和边界. 热力学第二定律的基本观念是能量只能沿着耗散的方向转化, 因此热力学第二定律又称 "熵定律", 能量具有熵增特性. 即尽管能量是守恒的, 尽管物质是不灭的, 但能量的质量将会衰减, 有效、优质、便于利用和低成本的能量会越来越少, 无效、低品位、难以再利用和成本昂贵的能量将会越来越多[1−5].

工业发展离不开能源的支撑, 同时能源的发展也离不开工业技术的支持, 同时能源行业也属于工业的一个门类. 随着工业技术和信息技术进步, 人们可以充分利用信息控制技术有效控制能源系统, 使能源的开发、变换、使用和管理更加科学化, 即在有意的信息熵的控制下, 使能源熵增速度减缓, 从熵的角度, 实现能源熵和信息熵的平衡, 从而有效利用资源, 控制能源熵增的速率, 保持能源的可持续发展.

本论文正是基于能源熵和信息熵平衡的观念, 考虑能源生产消费的全过程中的设备、系统、管控、及社会等因素, 提出在更大范围更大程度上更加深入的系统整合, 使能源流和信息流充分融合、互动, 实现信息、物理 (能源) 和社会的深度融合, 即迈入能源 5.0 的时代.

1.2 工业发展历程

工业进程从机械化、电气化、信息化、网络化到平行化发展历程 (图 1), 可以看出其推动力在于工业技术的不断进步. 工业 1.0, 核心设备蒸汽机出现, 使人类社会从手工业进入初级工业的机械化时代; 工业 2.0, 核心设备电机等电力设备设施的出现, 引领工业进入电气化时代; 工业 3.0, 计算机和微电子芯片的出现, 实现了人脑部分功能, 进入了信息化时代; 工业 4.0, 核心设备路由器出现, 将众多计算机互联, 进入了网络化时代, 使得信息和物理系统融合加深, 形成了信息物理系统 (Cyber-physical system, CPS); 工业 5.0, 网络化应用的加深, 特别是互联网 +, 进一步加深信息和物理系统的融合、并使工业与人类社会充分融合, 形成了更为复杂的系统, 即社会物理信息系统 (Cyber-physical-social system, CPSS), 该系统的核心设备是虚拟人工系统, 运行模式将引领工业进入平行化时代.

1.3 能源发展历程

能源 1.0 是自然能源阶段, 主要是自然光和薪柴等自然能源的使用, 无需工业技术的支撑, 属于原始能源阶段; 在工业 1.0 技术推动下, 能源行业进入了 2.0 时代, 蒸汽机将化石能源转化为热能和机械能, 机械能和热能的应用是能源 2.0 的主要标志; 工业 2.0 的电力需求以及技术驱动, 能源进入了 3.0 时代, 主要是发电机实现电力系统及广泛的电机驱动系统, 能源进入了电气化时代. 随着工业 3.0 的信息化技术在电力系统的推广, 目前的电力系统本身具有较高的信息化水平, 但较少考虑一次能源和终端能源使用对能源系统的影响. 目前电力系统采用发电跟随负荷的基本控制模式, 致使电力呈现垂直化管理、运行低效等特征. 特别是在风光大量接入、分布式发展、电动车储能等需求推动和工业 4.0 技术提供的互联网支撑下, 能源进入了能源互联网时代, 即能源 4.0.

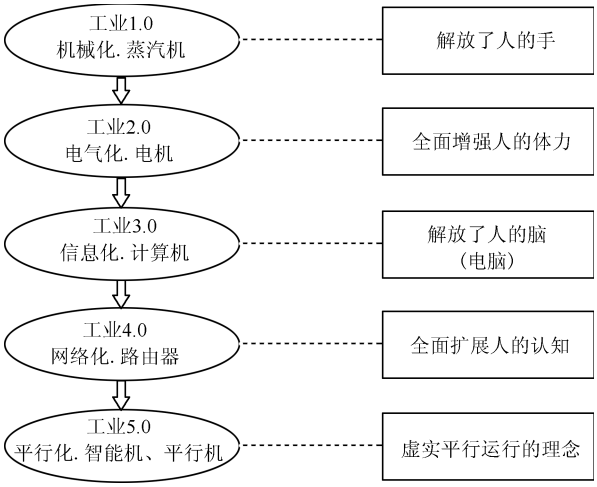

图 1 工业化进程

Fig. 1 The process of industrialization

可以看出正是由于能源本身具有熵增的趋势, 致使方便使用的能源越来越少, 因而必须借助于不断发展的先进工业技术, 充分利用风光等各种能源, 采用多能源互补模式, 才能实现能源的安全供应. 因而借助于互联网 +, 提出了能源 5.0. 充分利用工业 5.0 的平行理论和技术, 应用于能源行业, 形成平行能源[6].

1.4 能源 5.0 提出必要性和紧迫性

本文认为: 在能源 4.0 还没有完全实现的情况下, 迫切需要提出能源 5.0. 主要原因:

能源互联网将多种能源连接起来, 使多能耦合复杂; 基于能源价格、环保排放、安全等社会信息, 人类消费能源的行为和心理更为复杂; 能源转换和使用设备的信息化、能源耦合系统互动、人类社会信息对能源生产消费的影响等, 使信息控制对能源系统的影响更为深刻.

在社会及社会信息方面, 能源 4.0 很少考虑且很难考虑. 目前就电力负荷来说, 仅是给出负荷的统计曲线, 没有考虑人类活动和习惯与电力负荷和发电的交互影响. 人类活动属于社会学范畴, 能源负荷中存在大量的社会信息, 需要采用社会学的方式建

模分析. 特别是能源的本质就表明能源就是为人类社会服务的, 其生产和使用打上了强烈的人类社会属性. 因此研究能源 4.0 必须计及人类社会信息与能源的关系, 因此需要研究能源 5.0.

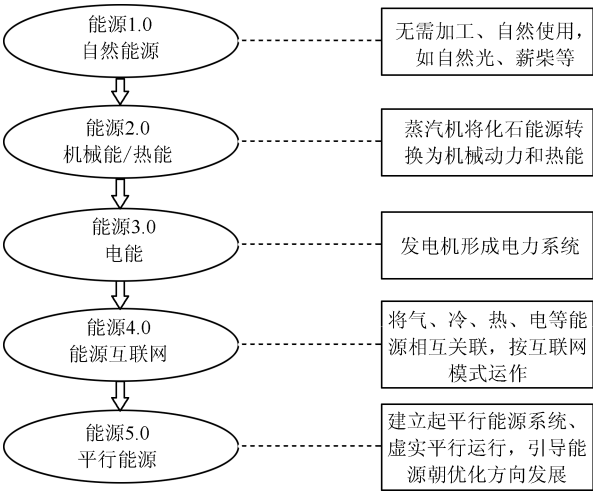

图 2　能源的发展历程

Fig. 2　Historical process of energy development

在信息和物理系统的融合作用方面, 传统 CPS 系统还没有找到可靠可信的理论和方法, 分析信息对物理系统的作用, 无法展开对工业系统的 CPS 深度融合的机理和控制方法研究. 如果能源 4.0 沿用工业 4.0 的理论和技术, 同样会陷入困境.

特别指出的是, 由于能源本身的社会属性, 与人类社会的活动及社会信息的密切耦合关系, 且能源互联网进一步将各种能源集成、各种通信方式综合、信息和能源联系更为密切, 使人类选择和使用能源的心理、经济、决策等更为复杂多样. 如果仅采用 4.0 的概念而不考虑复杂人类行为和社会信息对能源系统的影响, 则能源系统的运行会陷入更大的困境. 因此迫切需要采用能源 5.0 的相关理论和技术[7].

2　能源 5.0 的理论基础

2.1　能源的属性

1) 能源的物质属性 (P)

能源的物质属性表现为, 能源来源主要有: 煤炭、石油、天然气等化石能源; 水力、风力、太阳能、生物质能等可再生能源; 以及核电等. 能源的使用形式主要有: 冷、热、光、机械动力和电力等. 能源转换、使用设备和系统主要有: 锅炉、蒸汽机、汽轮机、发电机、电动机及各种用电设备等形成的复杂设备和系统. 近年来发展的分布式能源、储能、冷热电联产及电动车等更增加了能源生产和使用设备的多样性复杂性. 能源系统必然受到能源内在规律的支配, 如电力系统中的功率瞬时平衡, 使得能源的物质属性表现出强的关联性和因果律.

2) 能源的社会属性 (S)

能源的社会属性主要表现在三个方面:

a) 人类参与能源生产的社会特性

在能源生产过程中, 从能源系统的规划、设计、安装、运行控制、维修管理等各个环节, 均有人类参与. 人类的知识水平、技能及主观意识和心情都会影响到能源系统, 使能源系统表现出社会特性. 如在火力发电的锅炉控制中, 同样锅炉运行状态, 不同操作人员及操作人员在不同时段, 统计结果表明会引起锅炉效率至少 0.5 % 以上的变化, 特别是当锅炉运行在非额定状态下, 操作人员对锅炉效率影响更大.

b) 负荷特性的社会属性

当采用电力需求侧管理时, 人类会基于电价, 调整用电需要, 使负荷随人类活动、习惯及心理发生变化; 随着电动车逐步增加, 电力负荷特性会随着人类出行需求、思维判断、电价、交通状况等呈现出时空移动可变负荷; 随着能源系统中储热储电设备和容量的增加, 人民可以更方便选择储能备用、用能、及与电网的交互, 达到低成本用能和可靠用能, 显然人们的智力和判断在此过程中起着重要作用. 因此负荷特性表现出强烈的社会性.

c) 污染安全节能等社会政策法规信息

能源系统规划由资源、环境、经济和人口等制约, 随着能源熵逐步增大, 多能源的优化控制更迫切. 随着国家大力发展可再生能源的政策, 风光等可再生能源比重显著增加, 对电力系统的稳定运行提出了严峻挑战, 迫切需要火电机组变工况运行. 因此对火力机组在变工况运行下保持高效率低排放提出了更大挑战. 如何让火电系统在接受并实现来自于政府、社会或者同行业先进机组的有关比对信息, 如风光接入比例、排放要求、系统及机组的对标节能等社会信息, 实现火力发电系统的柔性控制, 会成为火电机组运行的新常态. 因此火电等能源系统的运行表现为社会属性.

3) 能源的信息属性 (C)

从能源熵定义看, 在能源不断开发、能源具有熵增的趋势, 表现出能源质量的不断下降的信息. 因此迫切需要规划和设计信息系统, 利用信息系统重构能源过程, 使得能源熵增减缓. 从这个意义上说, 信息也是能源, 连有些政治家也称: 信息也是石油. 采用信息技术, 可以使能源更有效地使用, 等价于能量的增加, 即能源本身具有信息属性.

从能源生产过程中看, 能源系统受到传感、计算、控制、监控、能量管理及调度等信息的作用, 使能源流与信息流强烈耦合, 反映出信息流对能源设备运行及能源流具有支配作用, 使能源具有信息属性.

能源系统的社会属性也使得众多社会信息及人类的思维判断等深刻影响能源的生产消费各个环节, 使能源具有社会信息属性.

2.2 人工系统的提出

在工业和能源 3.0 时代, 如目前的电力设计中, 使得电力流设计和信息流设计分离、没有实现信息物理系统的深度融合、没有实现电力 CPS 系统, 因此提出了电力 CPS 的概念和框架[8−15]. 能源 4.0 要实现 CPS, 需要研究信息和物理系统的融合, 特别是信息对物理系统的作用, 但目前还没有提供具体的理论和技术.

能源物质属性中, 着重研究能源转换、能源互补、梯级利用、清洁替代和电力替代中的能源流过程. 传统电力主要是基于电力流进行电力能源的规划设计, 而能源信息属性中, 着重研究信息控制、能源管理调度等对能源物质属性的影响和流程再造, 这是传统电力能源设计所没有考虑或很少考虑的信息流对电力流的影响; 能源的社会属性, 使能源的生产消费具有更大的机动性和柔性, 能充分接纳波动的风光等新能源、充分适应负荷需求的变化、满足节能和排放要求等. 而人类活动和社会相关信息具有社会性、不确定性, 需要从社会学、管理学、经济学和人类行为学等领域研究社会信息对能源系统的影响, 从而指导能源系统的设计、运行、维护[16−17].

上述能源的物质、信息和社会属性的融合交互关系是传统电力仿真系统还没有开展、也无法完成的工作, 迫切需要能源革命性的理论和方法, 实现这一涉及能源、信息和社会的复杂耦合系统的管理和控制. 因此提出采用平行系统的思想, 建立人工能源系统.

为了说明建立人工系统的必要性, 首先需要讨论传统仿真技术的主要不足:

人类社会性影响 (如价格激励机制、人类消费习惯及决策等) 属于社会学、经济学、人类行为学的范畴, 需要从社会学、经济学、行为学角度建立负荷模型, 传统电网的负荷建模策略很难建立该模型. 另外电力系统是非线性系统, 目前的电力仿真主要围绕某个工作点展开, 仿真不能充分反映电力系统运行状况、致使系统运行保守, 特别是随着能源互联网发展、多能耦合、需求侧管理等使电力能源系统呈现更严重非线性, 电力运行状态多变, 传统的仿真技术很难可信实现[18−22].

此外, 信息与物理和社会系统深度融合, 在运行的不同层次和不同时段上, 融合的过程都是实时变化的, 必须根据即时状态、环境信息, 形成新结构新模型, 做出智能决策, 是 “随机应变” 的设计, 与概率方法不同, 这是无法事先预定的, 而传统仿真的基本方法是确定论或概率方法、需要事先设置、是 “程式化” 的设计.

因此社会物理信息系统中存在信息的不确定性、人类的社会复杂特性, 使系统更复杂, 传统的牛顿定律需要过渡到默顿定律, 由控制到引导, 必须采用人工系统进行研究[23].

在计算机或网络空间中实现虚拟人工能源系统, 采用语义、数据驱动等建模方式, 实现人工系统的驱动. 虚拟人工能源系统必须和实际能源系统相互作用, 相互反馈, 平行执行. 虚拟人工能源系统可以反映实体能源系统的运行、同时更能根据虚拟空间的优化结果, 引导实体能源系统的优化运行. 由于该虚拟人工系统属于 Cyber 空间, 同样也列入信息空间 (C), 即在信息空间实现虚拟人工能源系统. 正如美国国家仪器公司提出 “软件即仪器” 的理念, 将虚拟仪器引入测试领域引起仪器革命一样, 将虚拟人工能源系统引入复杂能源系统控制, 必将引起能源系统的革命.

2.3 知识自动化

随着工业处理对象的复杂性和企业管理要求的提高, 工业自动化系统经历了手动控制、单回路、多回路、DCS、MES 及 ERP 等过程, 主要解放了人类的体力, 实现了人类对工业系统的掌控. 在虚拟人工系统中, 存在大量物理数据、社会信息, 具有较大的不确定性、冗余性、不一致性, 仅依靠人类的智力很难对海量大数据进行有效分析, 因此需要建立知识自动化系统, 采用数据驱动、多智能体等人工智能技术, 解放人类的智力, 实现对虚拟人工系统的掌控[24].

1) CPSS 基础

能源 5.0 时代会出现大量的数据, 进入大数据时代. 物理系统的传感、监控数据; 信息控制作用下, 物理系统会产生更多相关数据; 虚拟人工系统数据的社会计算数据及人工系统的建模、推理和控制; 泛在的社会大数据及社会政策等信息的建模和人类行为的数据等. 传统建模很难, 同时也无 “真” 可仿, 传统的仿真和控制不再适应, 需要采用知识自动化的理论、方法和技术. 让数据说话, 成为构筑平行系统中虚拟人工系统关键.

CPSS 的关注点和关键内容:

科学问题: 传统计算和物理模型相互独立, CPSS 要求统一的建模理论, 实现计算、物理和社会的动态交互、时空一致、处理不确定性, 使 CPSS 交互演化, 形成虚拟和实际系统的平行运行.

技术问题: 基于上述科学问题, 研究新的规划、设计、分析和实验工具, 体现交互和演化行为, 可采用社会计算、平行执行策略.

工程问题: 系统架构、设计、集成、可操作性等. 注意合理安排物理系统的时间管理、物理系统和虚拟系统的并发性等.

2) ACP 提出

由上述分析可知, 传统的仿真模型和仿真系统建立方式已经不适应虚拟人工世界的构建. 需要采用基于大数据解析的复杂系统分析方法, 包括: 基于人工系统的建模方法、计算实验与系统分析和评

估、平行执行与系统控制管理的实现[25−30].

ACP 的含义:

ACP 的核心就是把复杂的 CPSS 中虚的部分, 分解成可定量、可计算、可执行的过程.

人工系统 (A): 数据来自于实体物理世界, 采用数据驱动和语义建模, 采用默顿定律, 构建信息和行为之间的反馈; 数据来自于虚拟世界, 通过数据挖掘, 发现海量信息的 “民意”, 让数据来说话.

计算实验 (C): 对于电力电价和人类社会负荷, 少量可用统计定量分析, 多数难以抽象为数值模型, 必须用 “社会计算” 方法. 通过集成深度计算、群体广度计算、历史经验计算等社会计算, 可以获得虚拟人工系统的各种模态的结果. 社会计算必须基于人工社会, 采用人工智能建模, 而不是传统的利用计算机对社会建模.

如火力发电: 人力操作 — 单元单回路操作 — 单元多回路 — 多机组联合控制 — 总线化网络化 — DCS — ERP. 计算控制模式不断扩大, 计算控制复杂性增加, 其各环节模型、甚至 ERP 系统的管理模型也是基于业务流和人的确定操作模式, 进行建模, 因此仍属于传统的建模方式, 不属于社会计算.

能源 5.0 中, 人、社会、发电系统、设备、负荷、信息系统、经济、环境、安全等系统复杂程度大增. 由于能源流与信息流的深度融合、工作状态多变、存在严重非线性, 且需要建立经济学、管理学、人类行为学对能源系统影响的模型, 因此传统的建模计算方式已经不适应, 必须借助于社会计算实现从定性到定量的分析, 评估人、社会、信息及能源系统的之间相互深度融合的模型.

平行执行 (P): 虚拟人工能源系统和实体能源系统组成一对平行能源系统, 虚实互动构成新型反馈控制机制; 物理过程与人工计算过程的平行交互; 通过虚实互动进行求解.

ACP 流程: 针对火力发电的实际系统流程, 构造人工流程, 使来自物理、社会及信息社会的知识经验形式化、计算化、可视化, 以在线嵌入和实时反馈的方式实现描述解析、预测解析和诱导解析的功能. 目标就是促使实际流程趋向人工流程 (即主动控制技术, 不是传统仿真意义上的让人工系统逼近实际流程, 而是通过社会计算、比较、发现更优化的运行状态, 引导实际系统逼近人工系统), 从而借助人工流程减少火力发电系统相关目标的不确定性, 化多样为归一, 使复杂变简单, 以此实现火力发电的智慧灵巧管理.

ACP 步骤: 利用人工系统 (A) 对复杂问题 (物理、社会、信息) 建模; 利用计算实验 (C) 对复杂现象进行分析和评估; 将人工系统和实际系统并举, 通过虚实互动, 以平行执行 (P), 引导和管理物理过程.

3) 平行系统的控制

ACP 给出了复杂能源系统的人工伴生系统, 实际与人工系统基于 ACP 组合互动之后, 将整合虚实子系统的资源和能力, 形成一个新的、整体功能和性能更加优越的集成系统 (CPSS), 进而对实际系统进行有效的管理与控制.

为实现 ACP 的可操作性, 如图 3 所示, 需要虚拟人工系统通过观察和评估, 不断基于数据构造人工模型、反复计算实验, 从而实现平行执行的策略. 在这一过程中, 人工系统可被视为传统数学或解析建模之扩展, 是广义的知识模型, 是落实各种各样的灵捷性 (Agility) 的基础. 人工系统可采用多智能体技术等智能技术构建多层次的智能模型, 使系统能够根据环境条件及自身状态, 自主优化模型. 计算实验是仿真模拟的升华, 是分析、预测和选择复杂决策的途径, 也是确保复杂情况下能够正确聚焦 (Focus) 的手段. 平行执行是自适应控制和许多管理思想与方法的进一步推广, 是一种通过虚实互动而构成的新型反馈控制机制, 由此可以指导行动、锁定目标, 保证过程的收敛 (Convergence). 因此人工系统、计算实验、平行执行是灵捷、聚焦、收敛的基础, 灵捷、聚焦、收敛是实现 ACP 理念的有效控制手段. 因此采用 ACP 实现 AFC, 可以在各种复杂情况下优化系统、提出目标、并进而有效的具体控制实现目标.

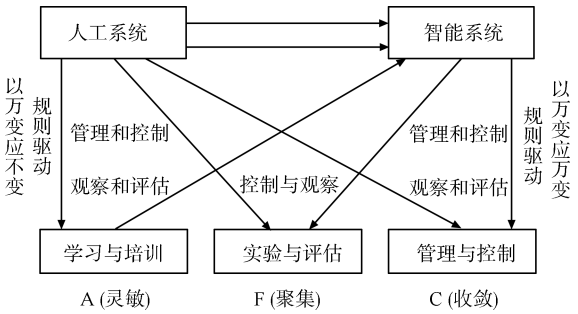

图 3　平行控制的有效执行形成

Fig. 3　Execution framework of parallel systems

3　平行能源体系及平台

3.1　能源 5.0 形成

能源 5.0 就是在能源 4.0 (CPS) 的基础上, 进一步纳入社会信息、虚拟空间的人工系统信息, 从而形成 CPSS 系统.

C 包括: 1) 物理世界中的信息系统, 如物理能源系统的监测、计算、控制、调度等信息; 能源社会系统的人类社会活动、消费习惯、操作、社会节能排放安全等社会信息. 2) 虚拟人工世界: 虚拟空间的人工系统、计算实验及平行执行中形成的数据和信息.

P 包括: 物理能源系统和社会用能系统.

S 包括: 人类社会系统, 包括人类社会的实体活动, 受人类习惯、思维、经济学、管理学和社会学等支配. 也包括虚拟人工系统中采用多智能体等技术形成的人工社会内容.

平行能源系统: 虚拟人工系统能反映并引导物理能源系统优化运行, 同时人工系统基于数据驱动, 引导虚拟人工系统运行. 因而实现虚拟人工世界和实际能源世界平行运行. 人工系统 (虚拟空间) 是实际系统 (物理空间) 的伴生系统. 它集成了外部物理世界的大数据资源和虚拟人工世界的内部信息系统的数据和模型, 实时跟踪记录信息, 按需描述系统的状态.

正如工业 4.0 是 CPS 一样, 能源 5.0 是从工业发展序列提出的, 实质是 CPSS. 由于 CPSS 系统含有大量人类社会信息以及前述传统仿真无法求解的因素, 为求解 CPSS, 提出了虚拟人工系统的概念, 进而采用平行系统的技术方法. 因此可以认为 CPSS、能源 5.0、平行能源三个概念在应用中可以等价通用.

由此可以看出, 本文的 CPSS 系统与目前的能源互联网是根本不同的概念[31−34]. 能源互联网强调了多能互补、电力核心纽带、梯级利用及 “互联网 +” 的概念, 没有阐述引入社会信息、人类的行为学等对能源系统的深刻影响. 特别是针对能源互联网及在 “互联网 +” 引入能源系统趋势下, 能源系统将更为复杂, 能源互联网没有提出构建虚拟人工系统的概念. 本文提出构建虚拟人工系统、采用社会计算和平行执行这一新的理论和方法解决传统仿真技术无法解决的问题.

3.2 能源 5.0 的管理

为实现虚实结合的平行控制, 能源 5.0 平行管理如图 5.

图 5 左侧为目前传统的能源生产消费的工业自动化领域, 包括底层过程控制系统 (DCS)、生产执行系统 (MES) 及企业资源规划管理系统 (ERP). 右侧为本文提出的虚拟人工系统, 对应的知识自动化领域. 采用构建人工系统、计算实验和平行执行 (ACP), 实现对工业自动化系统的建模、计算和控制; 基于 ACP 的虚拟人工系统和工业自动化系统形成社会物理信息系统 (CPSS); 采用 ACP 反复观察评估后, 通过虚实平行互动, 形成灵敏、聚焦、收敛 (AFC) 的分析、决策和执行过程, 最终利用虚拟系统对实际系统实施闭环有效的控制与管理.

虚拟人工系统从工业自动化领域通过大反馈获得能源系统的物理、现场运行及社会信息等大数据, 通过数据驱动和语义建模, 进入知识自动化领域. 知

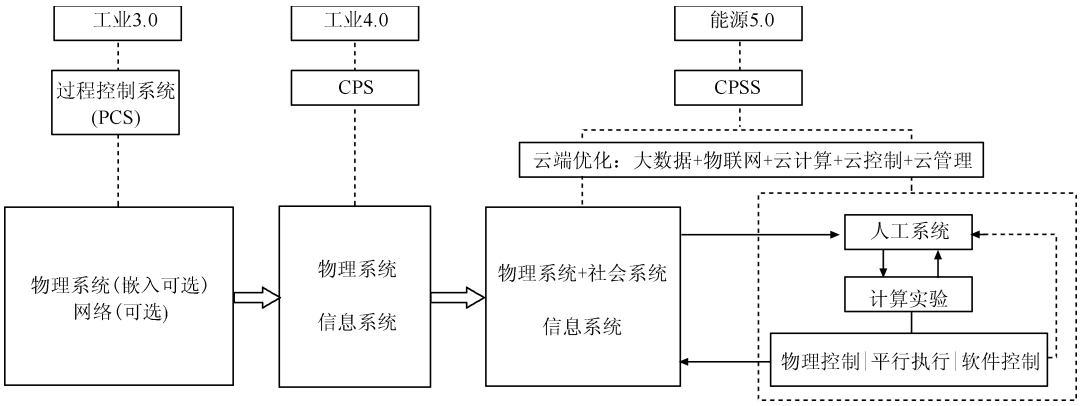

图 4 工业 4.0 到能源 5.0 内涵

Fig. 4 From Industries 4.0 to Energy 5.0: processes and tasks

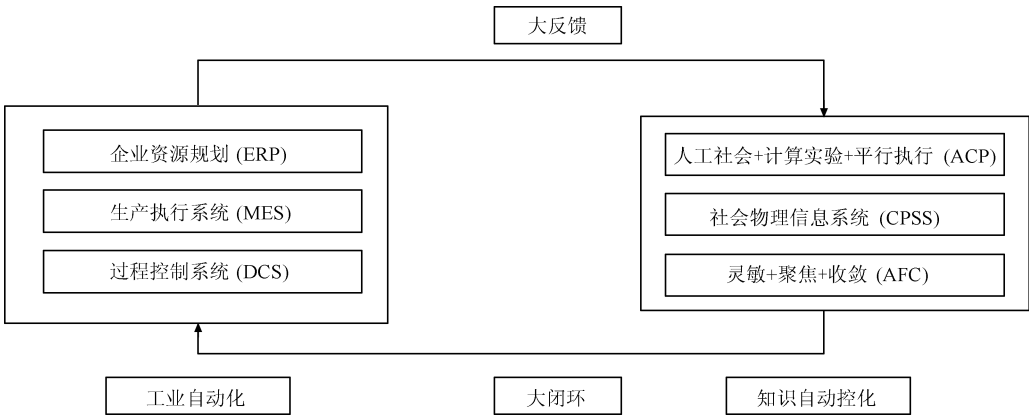

图 5 能源 5.0 系统的平行管理

Fig. 5 Parallel control and management of Energy 5.0 systems

识自动化基于 ACP、CPSS 及 AFC 等建模、计算和控制过程, 形成优化的控制决策、通过大闭环引导实际能源系统优化运行.

知识自动化领域完全在虚拟的计算机或网络空间, 可以根据工业自动化领域的大数据, 充分分析数据、进行各种计算实验、从而获得优化的决策. 如在接受各类社会信息、物理能源信息、排放节能信息后, 虚拟人工系统可充分进行各种计算实验进行比对, 在比对过程中不会干扰物理能源系统的可靠运行, 通过比对可以获得优化物理能源管理生产的优化控制策略, 从而指导工业自动化的运行.

3.3　架构和平台

系统架构分为六层:

对象层: 对应物理能源系统, 包括从能源生产到消费的各个环节, 包含人及社会对能源系统的影响.

数据采集与信息形成层: 分成两个部分, 一是目前已有的工业自动化系统及信息系统, 主要包括 DCS 系统、MES 系统及企业级 ERP 系统. 二是在互联网和多种通讯模式下, 人与社会对能源的互动, 将更加便捷和密切. 会经 Internet 等收集大量信息, 并作用于物理能源系统, 称为感知和执行; 感知和执行层产生的信息包含大量的人与社会因素, 需通过大数据分析、云计算和社会计算, 形成有效的信息.

存储层: 将数据采集和信息形成层形成的数据分门别类存入生产数据库、办公数据库等数据库中.

注 1. 目前的工业自动化系统已有相关数据库, 此处单列存储层, 是为了便于从功能上描述架构层级.

特征抽取及知识合成层: 采用自然语言处理、机器学习、计算智能方法等人工智能技术, 实现特征抽取和知识合成.

解析层: 基于特征抽取及知识合成层获得的知识和特征, 建立虚拟人工系统各环节模型和系统模型, 实现虚拟人工系统的构建, 完成对实际系统的解析.

平行控制层: 基于虚拟人工系统模型, 采用计算实验, 获得优化控制策略, 采用平行执行模式, 实现对虚拟人工系统和实际系统的同步反馈. 平行执行对实际能源系统, 可以通过工业自动化系统和感知及执行环节, 修改系统运行优化设定值, 引导人与社会的活动; 可以采用软件定义机器模式, 使现场传感器根据所需, 实现不同功能. 平行执行可以调整虚拟人工系统的模型、参数、运行方式, 使虚拟人工系统与实际系统一致, 为下一步引导实际系统做准备.

注 2. 对象层、数据采集与信息形成层和存储层, 既是传统工业自动化的组成, 同时也是虚拟人工系统的组成. 此部分形成的数据、信息可以共享[23, 35−36].

4　能源 5.0 的案例

4.1　分布式能源系统的智能监控和平行管理

中国华电集团建有国家能源局批准的国内唯一分布式能源技术研发中心, 针对公司的分布式能源

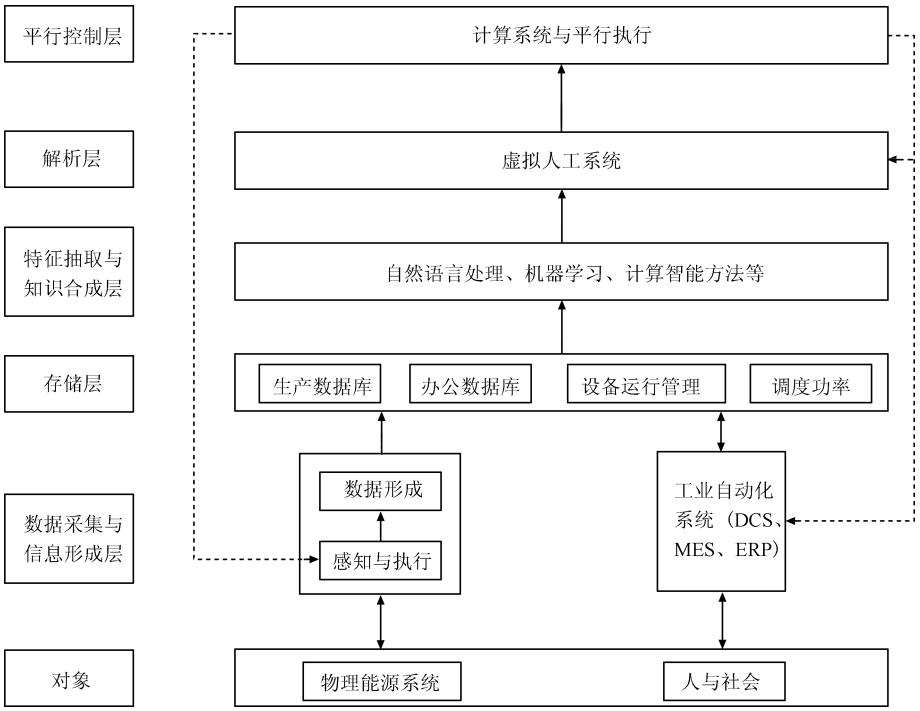

图 6　虚实互动的闭环组态式能源 5.0 的平行控制架构

Fig. 6　Parallel control of Energy 5.0 systems

发展战略, 结合某分布式能源站项目, 集团公司提出采用能源 5.0 理念, 从规划设计、运行控制到示范建设, 分阶段、分步骤实施分布式能源 5.0. 该分布式能源项目是国家能源局和美国能源部合作的中美能源示范项目, 能源站主要由燃气轮机、汽轮机、余热锅炉、工业热负荷和空调冷 (热) 负荷等组成. 华电集团将自主研发的智能决策优化技术成功应用于该项目, 有效体现了能源 5.0 的理念和运行过程[37−42].

分布式能源智能决策技术包括数字智能优化平台和智能决策优化系统 (图 7). 前者主要应用于设计优化阶段, 后者主要应用于运行优化阶段. 数字智能优化平台将动态的工艺系统数学模型与负荷预测模型无缝集成, 能够模拟负荷变化对分布式能源机组运行的影响, 并进行自动寻优计算, 给出最合适的设备型号、最优机组组合方式和最佳的运行模式, 为设计高水平的分布式能源站提供了技术保障. 智能决策优化系统以负荷动态优化分配为核心, 以实现经济效益、能源综合利用效率、安全性和环保性的综合指标最优为目标, 有机融合了负荷预测、在线辨识、数学建模、智能寻优、安全通讯、最优控制等先进技术, 形成了分布式能源系统运行优化的智能化解决方案, 以提高分布式能源站经济高效安全可靠运营水平.

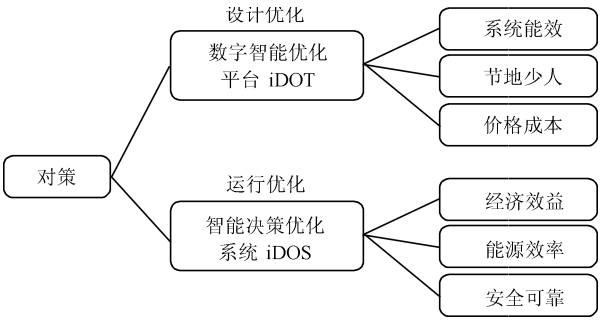

图 7 分布式能源智能决策因素

Fig. 7 Intelligent decision-making factors for distributed energy systems

1) 智能设计优化平台 (Intelligent design optimization tool, iDOT) 的开发

智能设计优化平台采用多层级、模块化的数学建模方法和面向对象的编程方法, 运用 Matlab/Simulink, 开发了集建模、模拟、优化、控制系统设计于一体的智能数字仿真优化软件研发平台. 该平台包括分布式能源系统设备的数学模型以及系统仿真模型, 涵盖负荷分析模块、机组性能模块、价格成本模块及智能寻优模块, 可利用系统集成的优化方法和系统运行的最优控制策略进行动态仿真与优化 (图 8).

该平台具备通用的系统数据库, 部件模型可装配, 系统功能可扩展, 能够对拟建的分布式能源工程进行系统设备参数匹配和控制方案优化设计, 有助于提高能源综合利用效率和能源站经济效益.

2) 智能运行决策优化系统 (Intelligent decision optimization system, iDOS) 的开发

智能运行决策优化系统是基于 CPSS 和工业互联网架构, 从系统层面分析入手, 以优化、决策、控制和管理的数据 “集成与融合” 为技术主导, 采用理论分析、数值模拟和实验研究相结合的研究方法, 提出分布式能源系统决策控制与能源管理一体化运营的最佳解决方案, 确保系统按照最优方式运行 (图 9).

3) 分布式能源站 iDOS 的工程示范

分布式能源站 iDOS 系统已在华电集团某分布式能源站上线运行, 其系统设计结构如图 10 所示. 该系统主要由一套实时可组态决策优化软件及相应硬件设备组成, 分为能效站、优化站、控制机柜三个部分.

能效站负责对机组运行数据的采集、分析、计算和管理, 主要包括采集机组的负荷信息、能耗信息以及过程数据等, 对厂区的逐时负荷及逐日负荷做出预测, 对各机组设备的能耗及性能进行计算和管理发布, 并将相关设备性能计算的结果共享给优化站.

优化站基于能效站给出的预测负荷及机组的实时性能计算结果, 以全厂经济效益最大为目标, 以机组能效为约束条件, 通过在线计算, 得到机组的最佳运行方式, 给出相应的运行决策优化指令. 决策优化指令通过 iDOS 控制机柜下达至 DCS/DEH 控制系统, 完成机组的运行优化控制.

4.2 火力发电的智能监控和平行管理规划

在能源革命、能源转型、风光等可再生新能源的大规模发展、核能、电动车等移动负荷出现、储能 (电和热)、电力改革以及电力能源安全形势等趋势下, 大能源电力系统已经成为典型的 CPSS 系统. 华电集团认为, 智能化火力发电技术须结合电力工业发展的新趋势、新常态, 着力提高机组安全性、自适应性、自诊断、主动预防维护性和可操作性等, 实现 “超低能耗、超低排放、智能调节” 的总目标, 使机组在不同负荷区都具有最佳的工作状况, 实现柔性发电. 需要深入研究在柔性发电下, 火力发电涉及的煤质分析、存储、煤仓管理、锅炉、汽机、发电机、排放、安全等环节. 由于上游涉及煤质来源广泛、成分复杂多变, 下游电力负荷受社会负荷及排放等需求约束, 中游各个设备, 如锅炉以煤定炉的设计理念, 致使实际运行偏离设计[43−44], 因此精确调控、智慧化运行系统及各个环节设备十分必要, 因此建立火力发电 5.0 势在必行.

华电公司的主业是火力发电, 为使主业引导电力 5.0 主流, 华电公司已选定信息化程度较好的某电厂进行试点工作, 初步规划了火力发电 5.0 的框架、研究内容、实施办法.

下面是集团近期在火力发电领域已开展重要和

难点设备的相关虚拟人工系统的工作:

1) 锅炉燃烧虚拟人工系统构建

锅炉燃烧系统是火力发电的核心、是最复杂的单元. 明确了建立基于虚拟人工模拟的锅炉燃烧优化及其控制研究, 实现虚拟平行锅炉. 建立三维温度场分析模型、煤质分析、火焰与氧气、排放的关系

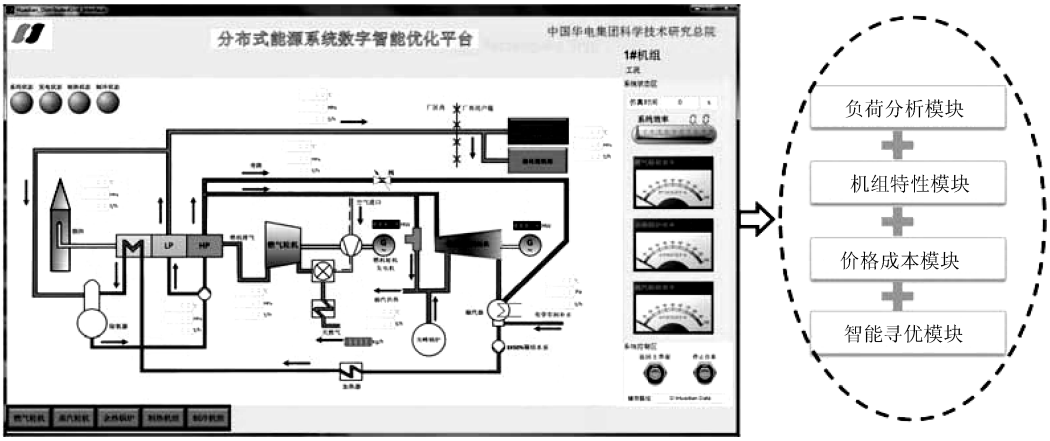

图 8　智能设计优化工具及主要模块

Fig. 8　Intelligent design optimization tool and its main modules

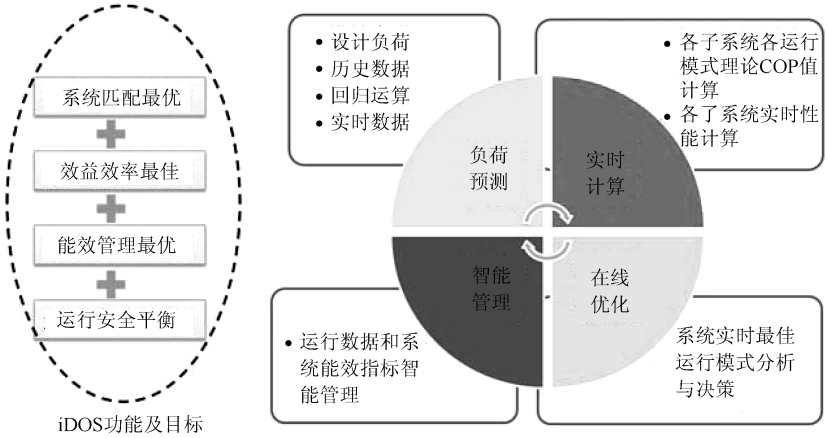

图 9　智能运行优化决策系统组成、功能及目标

Fig. 9　iDOS composition, functions and objectives

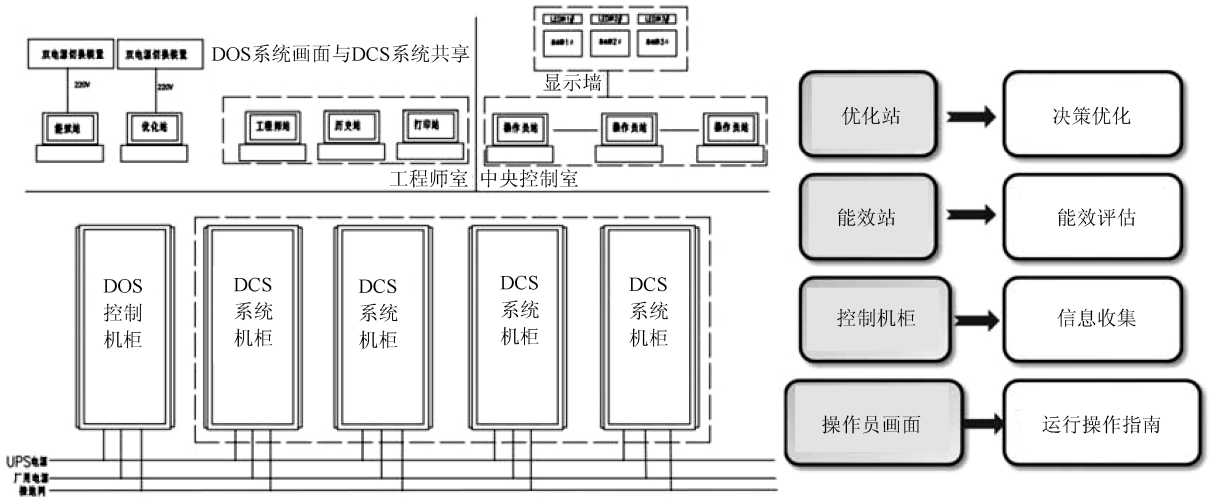

图 10　示范工程中分布式能源站 iDOS 系统设计结构

Fig. 10　iDOS system structure for a distributed energy demonstration project

等[45−47]. 工作流程如图 11.

虚拟人工锅炉与热态实验方式的优势比较如图 12.

2) 机组协调系统的虚拟人工系统

机组协调控制是火力发电的关键环节[48−52], 规划建立实现火电机组协调优化的虚拟人工系统. 采用大数据挖掘技术, 分析煤质变化、司炉经验、负荷变化、排放要求等[53−54], 形成虚拟人工模型; 采用知识发现等人工智能技术, 实现虚拟人工的协调控制模型. 如图 13, 虚拟人工系统和 DCS 中的协调控制系统之间采用信息交互, 实现数据驱动; 采用平行引导, 实现平行执行. 设置投入/切除环节是为了增加系统的可靠性.

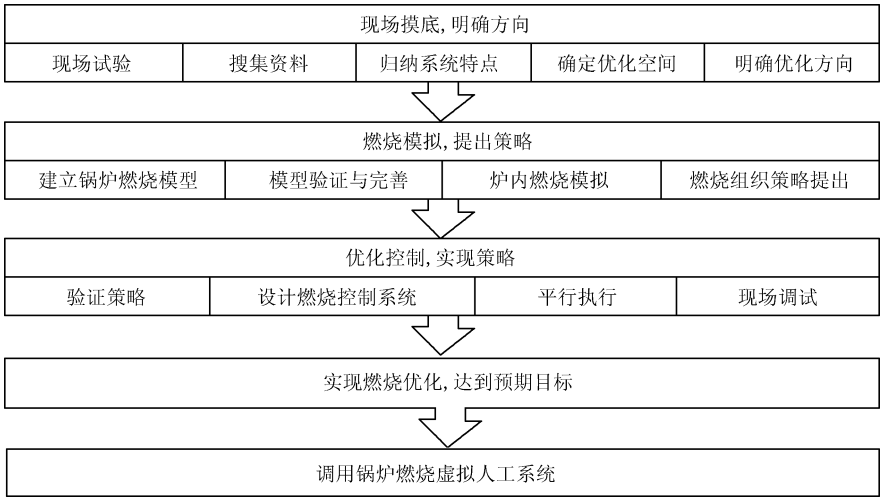

图 11 虚拟人工锅炉的研究内容和技术路线

Fig. 11 Research issues and technical approach of virtual utility boiler

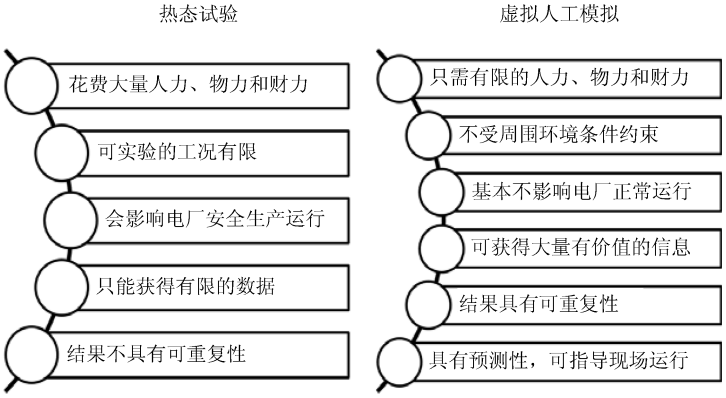

图 12 锅炉热态试验和虚拟人工锅炉试验的优势比较

Fig. 12 Comparison between combustion test and virtual test of utility boiler

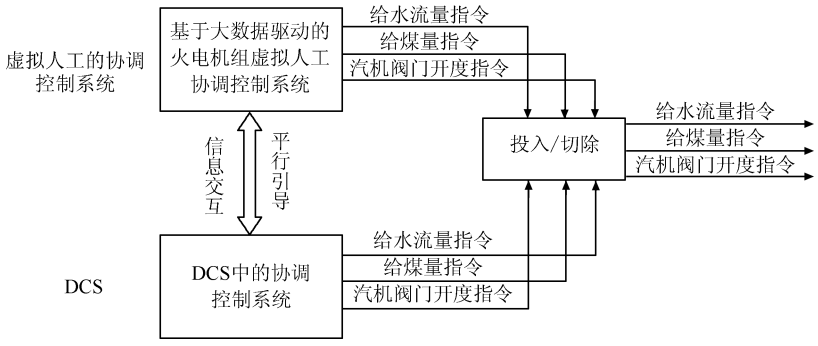

图 13 机组协调控制的平行系统

Fig. 13 Parallel coordination control system of a power generation unit

3) 虚拟人工系统的信息架构

在信息管理的虚拟人工系统中, 同样需要建设与传统信息系统对应的虚拟人工系统的信息系统, 其架构分为四层 (如图 14).

智能 IT 平台: 基础信息平台, 提供各种运行的历史数据、实时数据及未来的预测数据.

运行操作知识自动化: 利用手持移动设备、现场信息系统等, 及时反馈现场信息, 在后台知识库和远程专家指导下, 进行现场作业;

运营管理协同化: 业务战略驱动业务模型、业务模型驱动业务流程、业务流程驱动火力发电系统的运行, 形成流程高度集成、业务高度协同、价值全局最优;

运营决策科学化: 根据历史、实时及预测数据, 采用数据驱动方式, 实现事前科学预测、事中动态改进、事后全面分析.

例如当环保部门根据气象数据, 提出了具体的环保指标信息要求后, 虚拟的运行决策系统依据该指标, 首先根据运营决策的人工流程, 将指标分解到虚拟运行管理层; 虚拟运行管理层基于其人工流程, 进一步分解指标到运行操作层; 运行操作自动化层根据实体能源各环节和机组设备的历史、实时及预测数据, 通过社会计算方式, 确定将该指标分解到各环节和设备, 从而引导实际系统按优化方式运行.

4.3　智能家居的能源系统设计和运行管理

传统的用电家居主要包括空调、冰箱、照明等电器设备, 这些设备在用户侧, 将用户所需的冷热电等耦合起来, 根据人类的生活习惯、电网电价及其它信息进行运行管理, 可以实现节能降耗、电网友好、参与需求侧管理等. 如目前 Opower 公司拥有四成美国家庭的能源消费数据, 与电气公司合作, 获取家庭消费者的能源使用数据, 为电气公司提供面向消费群体的节能方案, 包括通过移动端推送能源账单, 群发节能贴士类邮件, 提供管控家用恒温器的软件服务等, 可以减少用户电费支出、实现电网消峰填谷.

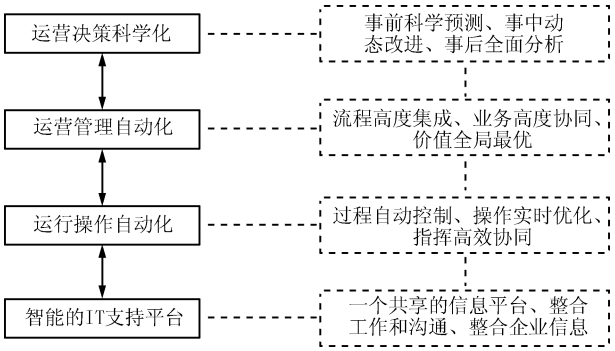

图 14　运行管控知识自动化的层次

Fig. 14　Hierarchy of knowledge automation for control and management

随着家庭分布式光伏发电、家用储能及家用电动车的发展, 家庭和商业用电在用电量、电力、用电时刻及运行方式 (可作为电网负荷从电网获取电力电量、也可作为发电电源向电网提供电力电量) 等方面都发生了更大变化[55]. 分布式光伏的一次能源具有间隙、波动和随机性, 形成光伏功率的不稳定性; 电动车与人的出行习惯、驾驶习惯及交通状况密切相关, 具有典型的社会性; 储能既为电动车提供电能、也可解决光伏发电的不稳定性, 同时给用户错时用更便宜的电提供了支撑. 随着家庭和商业用电占比的急剧增加, 需要研究其电力需求响应特性及需求侧管理. 目前有多家公司, 如美国 EnerNoc、新西兰 Powershop、德国 GreenPacket 和 ParceOne 等公司投资该领域, 特别是美国特斯拉公司开发出了家用壁挂式储能 (电) 产品, 与 SolarCity 光伏设备厂家联合采用该储能产品, 解决了家用光伏功率不稳定, 并可做移动电源使用. 该公司的目标就是实现光伏 + 用户储能 + 电动车 + 能源控制软件, 实现 “颠覆汽车”, 还要 “颠覆电网” 的目标.

为了实现家居能源系统的有效管理, 需要获得分布式光伏发电的预测、用能习惯、出行交通状况、参与需求侧的响应特性等. 家居用能大多具有显著的个性化、社会性特征, 是复杂系统. 需要采用虚拟人工系统进行家居能源系统的设计、运行和管理, 才能有效管理家居能源系统.

1) 能源系统设计

根据当地天气状况、建筑特点、负荷状况、电价信息, 确定光伏和储能. 基于天气变化、光伏板运行老化、电池技术进步和运行状况、负荷特征及参与需求侧响应等, 建立各环节的智能体模型, 形成虚拟人工的多智能体系统, 分析系统的经济性, 实现系统的最佳设计. 该系统需要适应天气变化、负荷变化及人类个性化和社会性影响, 属于开放系统. 可以基于虚拟人工系统, 采用信息熵引导能源熵实现优化设计.

2) 能源系统的运行控制

采集实际系统的各种运行信息, 采用数据驱动, 形成光伏预测智能体、光伏控制智能体、电池控制和管理智能体、负荷智能体、电动车智能体、配电网智能体及系统运行控制智能体等, 组成家居能源系统的运行控制多智能体系统. 基于历史、实时和预测信息, 与虚拟人工的设计系统互动, 在虚拟人工设计的搜索空间中, 通过社会计算, 获得最佳运行控制策略, 进而采用平行执行, 引导家居能源系统运行, 实现家庭能源管理, 如对家庭用电器的深度控制; 基于生活习惯的大数据分析, 提供能效分析和建议、个性化电价、节能方案等.

5　结论与展望

本文结合工业和能源进程, 分析在能源熵逐渐增加和能源 “互联网 +” 时代, 传统的仿真技术已不

再适用, 指出了发展能源 5.0 的必要性和迫切性, 提出了能源 5.0 的理论、框架和技术, 并说明能源 5.0、社会物理信息系统 (CPSS) 及平行能源三者在应用中的一致性. 最后将能源 5.0 理论和技术应用于具体案例中, 验证能源 5.0 的理论架构和技术正确性.

当前我国正处在能源革命的关键时期, 能源互联网是以电力系统为核心和纽带, 具有 "横向多能互补, 纵向源网荷储协调" 以及能源流和信息流双向流动强耦合的复杂互联系统, 从而可以实现整个能源网络的 "清洁替代、电力替代". 能源互联网是实现充分接纳波动的可再生能源、电动车规模化以及与人类密切关联的需求侧响应的基础架构和可靠依托, 是第三次工业革命的核心内容. 需要将管理学、社会学、心理学融入用户行为模型, 将人类社会泛在的节能、安全、排放、经济等信息, 以及人类的思维、习惯、行为等因素纳入能源互联网系统中. 因此能源互联网就形成典型的社会物理信息系统, 即能源 5.0.

通过能源 5.0, 可以实现: 对物理能源世界、虚拟人工世界以及两者平行执行过程, 进行动态监控, 从而掌控能源流、信息流、人工系统过程; "以网络为中心" 代替 "以设备为中心" 的管理和控制模式; 信息流的信息规律、能源流的物理规律、人工系统的知识规律相互深度融合, 从而引导能源系统符合社会需求、排放要求、具有个性化的优化运行.

在能源互联网中, 电力系统是核心和纽带. 为实现电力系统的柔性运行, 火力发电作为电力系统的主力机组, 其柔性运行和控制具有核心地位, 因此火力发电需要 5.0 化, 即基于互联网模式, 参与电网的运行控制, 使电网从垂直化走向水平化、从集中式走向分布式, 充分实现能源互联网, 实现能源 5.0.

致谢

本文内容是在 2015 年 3 月北方工业大学举办的中国自动化学会 "分布式能源专业委员会筹备会及 IEEE ITSS 北京分会" 上所做的特邀报告之基础上, 结合 2015 年 4 月中国华电集团公司在南京组织召开的 "智能发电技术研讨会" 的报告, 整理而成. 作者感谢李正熙教授、杨柳青研究员等与会人员的有益讨论.

References

1 Wang Yu-Ming. The analysis of entropy changes on the evolutional tendency of geographical environment. *Acta Geographica Sinica*, 2011, **66**(11): 1508−1517
(王玉明. 地理环境演化趋势的熵变化分析. 地理学报, 2011, **66**(11): 1508−1517)

2 Han Xiao-Ping. Scientific energy utility to deal with energy challenge. *Power Demand Side Management*, 2005, **7**(1): 22−25
(韩晓平. 科学用能 — 应对能源挑战. 电力需求侧管理, 2005, **7**(1): 22−25)

3 Prigogine I, Stengers I [Author], Zeng Qing-Hong, Shen Xiao-Feng [Translator]. *Order Out of Chaos*. Shanghai: Shanghai Translation Publishing House, 1987.
(Prigogine I, Stengers I [著], 曾庆宏, 沈小峰 [译]. 从混沌到有序. 上海: 上海译文出版社, 1987.)

4 Tang Su-Ye. *Entropy: An Analysis of Century Enigma*. Hefei: China Science and Technology University Press, 2004.
(汤甦野. 熵: 一个世纪之谜的解析. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2004.)

5 Zhang Dong, Zhang Ning. A study on entropy theory in physics and its application. *Journal of Beijing Union University: Natural Sciences*, 2007, **21**(1): 4−8
(张东, 张宁. 物理学中的熵理论及其应用研究. 北京联合大学学报: 自然科学版, 2007, **21**(1): 4−8)

6 Wang Fei-Yue. Social energy and parallel energy systems: towards the age of energy 5. 0. In: Workshop on Distributed Energy Systems and Annual Symposium of IEEE ITSS Beijing Chapter. Beijing: North China University of Technology, 2015.
(王飞跃. 社会能源与平行能源系统: 迈向能源 5. 0 的时代. 分布式能源专业委员会筹备会及 IEEE ITSS 北京分会. 北京: 北方工业大学, 2015.)

7 Wang Fei-Yue, Zhao Jie, Lun Shu-Xian. Artificial power systems for the operation and management of complex power grids. *Southern Power System Technology*, 2008, **2**(3): 1−6
(王飞跃, 赵杰, 伦淑娴. 人工电力系统与复杂大电网的运营和管理. 南方电网技术, 2008, **2**(3): 1−6)

8 Zhao Jun-Hua, Wen Fu-Shan, Xue Yu-Sheng, Dong Zhao-Yang. Modeling analysis and control research framework of cyber physical power systems. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, **35**(16): 1−8
(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)

9 Zhao Jun-Hua, Wen Fu-Shan, Xue Yu-Sheng, Li Xue, Dong Zhao-Yang. Cyber physical power systems: architecture, implementation techniques and challenges. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, **34**(16): 1−7
(赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 李雪, 董朝阳. 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)

10 Siddharth S, Adam H, Manimaran G. Cyber-physical system security for the electric power grid. *Proceedings of the IEEE*, 2012, **100**(1): 210−224

11 Ilic M D, Xie L, Khan U A, Moura J M F. Modeling of future cyber-physical energy systems for distributed sensing and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2010, **40**(4): 825−838

12 Xie L, Ilic M D. Module-based modeling of cyber-physical power systems. In: Proceedings of the 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Beijing, China: IEEE, 2008. 513−518

13 Li G, Du C L, Song C Y, Cai X B. Cyber-physical aware model based on IEC 61850 for advanced power grid. In: Proceedings of the 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Chengdu, China: IEEE, 2010. 1−5

14 Mcmillin B. Complexities of information security in cyber-physical power systems. In: Proceedings of the IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. Seattle, WA: IEEE, 2009. 1−2

15 Singh C, Sprintson A. Reliability assurance of cyber-physical power systems. In: Proceedings of the 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis, MN: IEEE, 2010. 1−6

16 Wang F Y. Social computing: concepts, contents, and methods. *International Journal of Intelligent Control and Systems*, 2004, **9**(2): 91−96

17 Wang Fei-Yue, Li Xiao-Chen, Mao Wen-Ji, Wang Tao. *Social Computing: Methods and Applications*. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2012.
(王飞跃, 李晓晨, 毛文吉, 王涛. 社会计算的基本方法与应用. 杭州: 浙江大学出版社, 2012.)

18 Xue Yu-Sheng. Proposed researches on stability theory and analysis techniques for modern power systems. *Automation of Electric Power Systems*, 2000, **24**(7): 1−6
(薛禹胜. 现代电网稳定理论和分析技术的研究方向. 电力系统自动化, 2000, **24**(7): 1−6)

19 Lu Qiang, Sun Yuan-Zhang. *Nonlinear Control of Power Systems*. Beijing: Science Press, 1993.
(卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制. 北京: 科学出版社, 1993.)

20 Yu Yi-Xin, Wang Cheng-Shan. *Stability Theory and Methods of Power System*. Beijing: Science Press, 1999.
(余贻鑫, 王成山. 电力系统稳定性理论与方法. 北京: 科学出版社, 1999.)

21 Zhao Xiang-Yang, Liu Jun-Hua, Zhu Chang-Chun. Identification of white noise and chaotic time series caused from Logist equation. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2002, **15**(4): 419−423
(赵向阳, 刘君华, 朱长纯. Logist 方程形成的混沌时间序列和白噪声的一种辨识方法. 模式识别与人工智能, 2002, **15**(4): 419−423)

22 Zhao Xiang-Yang, Ge Wen-Tao. Simulation research of fault model of detecting rotor dynamic eccentricity in brushless DC motor based on motor current signature analysis. *Proceedings of the CSEE*, 2011, **31**(36): 124−130
(赵向阳, 葛文韬. 基于定子电流法监测无刷直流电动机转子动态偏心的故障模型仿真研究. 中国电机工程学报, 2011, **31**(36): 124−130)

23 Wang Fei-Yue. Parallel control: a method for data-driven and computational control. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(4): 293−302
(王飞跃. 平行控制: 数据驱动的计算控制方法. 自动化学报, 2013, **39**(4): 293−302)

24 Wang Fei-Yue. Software-defined systems and knowledge automation: a parallel paradigm shift from Newton to Merton. *Acta Automatica Sinica*, **41**(1): 1−8
(王飞跃. 软件定义的系统与知识自动化: 从牛顿到默顿的平行升华. 自动化学报, 2015, **41**(1): 1−8)

25 Wang Fei-Yue. Parallel system methods for management and control of complex systems. *Control and Decision*, 2004, **19**(5): 485−489
(王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制. 控制与决策, 2004, **19**(5): 485−489)

26 Wang Fei-Yue. New mechanisms for control and management of complex systems: research and development. Project to the President′s Foundation for Special Projects, Chinese Academy of Sciences. Beijing, China, 2005
(王飞跃. 复杂系统的控制与管理机制研究及其应用. 中国科学院院长基金特别支持项目立项书. 2005)

27 Wang F Y, Wong P K. Intelligent systems and technology for integrative and predictive medicine: an ACP approach. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2013, **4**(2): Article No. 32

28 Wang F Y. Toward a paradigm shift in social computing: the ACP approach. *IEEE Intelligent Systems*, 2007, **22**(5): 65−67

29 Wang F Y. Parallel control and management for intelligent transportation systems: concepts, architectures, and applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, **11**(3): 630−638

30 Wang F Y. The emergence of intelligent enterprises: from CPS to CPSS. *IEEE Intelligent Systems*, 2010, **25**(4): 85−88

31 Dong Zhao-Yang, Zhao Jun-Hua, Wen Fu-Shuan, Xue Yu-Sheng. From smart grid to energy internet: basic concept and research framework. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, **38**(15): 1−11
(董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架. 电力系统自动化, 2014, **38**(15): 1−11)

32 Cao Jun-Wei, Meng Kun, Wang Ji-Ye, Yang Ming-Bo, Chen Zhen, Li Wen-Zhuo, Lin Chuang. An energy internet and energy routers. *Science China: Information Sciences*, 2014, **44**(6): 714−727
(曹军威, 孟坤, 王继业, 杨明博, 陈震, 李文焯, 林闯. 能源互联网与能源路由器. 中国科学: 信息科学, 2014, **44**(6): 714−727)

33 Rifkin J. *The Third Industrial Revolution: How Lateral Power is Transforming Energy, the Economy, and the World*. New York: St. Martin′s Press, 2011.

34 Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, Zheng J P, Dale S J. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet. *Proceedings of the IEEE*, 2011, **99**(1): 133−148

35 Wang Fei-Yue, Wang Xiao, Yuan Yong, Wang Tao, Lin Yi-Lun. Social computing and computational societies: the foundation and consequence of smart societies. *Chinese Science Bulletin*, 2015, **60**(5−6): 460−469
(王飞跃, 王晓, 袁勇, 王涛, 林懿伦. 社会计算与计算社会: 智慧社会的基础与必然. 科学通报, 2015, **60**(5−6): 460−469)

36 Zhao X Y, Liu S Y. Design of a monitoring system of microgrid. *Smart Grid and Renewable Energy*, 2013, **4**: 198−201

37 Chen Y B, Mintun T G. Intelligent Remote Visual Monitoring System for Home Health Care Service, U. S. Patent 5553609, September 1996.

38 Sullivan M S, Brost R D, Chen Y B, Eberhart R. Method and Apparatus for Determining Battery State-of-Charge Using Neural Network Architecture, U. S. Patent 6064180, May 2000.

39 Rovnvak S M, Chen Y B, Sheng Y, Rajput V S, Pahis T, George L, Malkoff J, Hu X H. Integrated and Optimized Distributed Generation and Interconnect System Controller, U. S. Patent 20100185336, May 2012.

40 Qu Y Z, Li L X, Chen Y B, Dai Y P. Fault detection in acyclic Petri net models. In: Proceedings of the 2010 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Xuzhou, China: IEEE, 2010. 4059−4063

41 Yang K, Du E Y, Delp E J, Jiang P G, Jiang F, Chen Y B, Sherony R, Takahashi H. An extreme learning machine-based pedestrian detection method. In: Proceedings of the 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Gold Coast, QLD: IEEE, 2013. 1404−1409

42 Lin X, Banvait H, Anwar S, Chen Y B. Optimal energy management for a plug-in hybrid electric vehicle: real-time controller. In: Proceedings of the 2010 American Control Conference (ACC). Baltimore, MD: IEEE, 2010. 5037−5042

43 Xia Ji, Hua Zhi-Gang, Peng Peng, Lu Pan, Zhang Cheng, Chen Gang. A model of unconstrained multi-objective optimization of coal blending based on the non-dominated sorting genetic algorithm. *Proceedings of the CSEE*, 2011, **31**(2): 85−90
(夏季, 华志刚, 彭鹏, 陆潘, 张成, 陈刚. 基于非支配排序遗传算法的无约束多目标优化配煤模型. 中国电机工程学报, 2011, **31**(2): 85−90)

44 Chen Gang, Hao Yong-Cai, Xu Yuan-Gang, Zhang Cheng. Application of fuzzy mathematics in evaluating boiler blended-coal schemes. *Journal of Power Engineering*, 2008, **28**(6): 856−858, 870
(陈刚, 郝永财, 徐远纲, 张成. 模糊数学在评价锅炉混煤方案中的应用. 动力工程, 2008, **28**(6): 856−858, 870)

45 Zhou Huai-Chun, Han Shu-Dong, Sheng Feng, Zheng Chu-Guang. Numerical simulation on a visualization monitoring method of three-dimensional temperature distribution in furnace. *Power Engineering*, 2003, **23**(1): 2154−2159
(周怀春, 韩曙东, 盛锋, 郑楚光. 炉膛燃烧温度场三维可视化监测方法模拟研究. 动力工程, 2003, **23**(1): 2154−2159)

46 Wu Yi-Quan, Song Yu, Zhou Huai-Chun. State identification of boiler combustion flame images based on gray entropy multiple thresholding and support vector machine. *Proceedings of the CSEE*, 2013, **33**(20): 66−73
(吴一全, 宋昱, 周怀春. 基于灰度熵多阈值分割和 SVM 的火焰图像状态识别. 中国电机工程学报, 2013, **33**(20): 66−73)

47 Wu Yi-Quan, Zhu Li, Zhou Huai-Chun. State recognition of flame images based on Krawtchouk moment and support vector machine. *Proceedings of the CSEE*, 2014, **34**(5): 734−740
(吴一全, 朱丽, 周怀春. 基于 Krawtchouk 矩和支持向量机的火焰状态识别. 中国电机工程学报, 2014, **34**(5): 734−740)

48 Ju Gang, Wei Hong-Qi, Chen Shao-Bing, Xu Zhi-Gao. Multivariable model predictive control for thermal power unit load system. *Proceedings of the CSEE*, 2002, **22**(4): 144−148
(雎刚, 韦红旗, 陈绍炳, 徐治皋. 单元机组负荷多变量模型预测控制. 中国电机工程学报, 2002, **22**(4): 144−148)

49 Zhao Liang, Ju Gang, Lv Jian-Hong. An improved genetic algorithm in multi-objective optimization and its application. *Proceedings of the CSEE*, 2008, **28**(2): 96−102
(赵亮, 雎刚, 吕剑虹. 一种改进的遗传多目标优化算法及其应用. 中国电机工程学报, 2008, **28**(2): 96−102)

50 Wei Yuan-Hua, Ren Xiao-Dong, Li Zhi, Dong Qing, Ma Xin-Xin, Zhu Huan, Kong Xiang-Zheng, Shao Yi-Ming, Zhao Yan. Concept and scheme research of digital power plant. *Electric Power Construction*, 2013, **34**(4): 51−54
(危元华, 任晓东, 李智, 董青, 马欣欣, 朱环, 孔祥正, 邵一鸣, 赵焱. 数字化电厂的概念及方案研究. 电力建设, 2013, **34**(4): 51−54)

51 Hua Zhi-Gang, Lv Jian-Hong, Zhang Tie-Jun. Research and application of state variable-predictive control in 600MW unit reheater temperature control system. *Proceedings of the CSEE*, 2005, **25**(12): 103−107
(华志刚, 吕剑虹, 张铁军. 状态变量–预测控制技术在 600MW 机组再热汽温控制中的研究与应用. 中国电机工程学报, 2005, **25**(12): 103−107)

52 Zhang Tie-Jun, Lv Jian-Hong, Hua Zhi-Gang. Fuzzy gain scheduled model predictive control for boiler-turbine coordinated system. *Proceedings of the CSEE*, 2005, **25**(4): 158−165
(张铁军, 吕剑虹, 华志刚. 机炉协调系统的模糊增益调度预测控制. 中国电机工程学报, 2005, **25**(4): 158−165)

53 Lin Yong-Ming, Gao Xiang, Shi Ping-Ping, Zhang Yong-Xin, Zhong Yi, Luo Zhong-Yang, Cen Ke-Fa. Numerical simulation on resistance characteristic of large scale wet flue gas desulphurization spraying scrubber. *Proceedings of the CSEE*, 2008, **28**(5): 28−33
(林永明, 高翔, 施平平, 张涌新, 钟毅, 骆仲泱, 岑可法. 大型湿法烟气脱硫喷淋塔内阻力特性数值模拟. 中国电机工程学报, 2008, **28**(5): 28−33)

54 Guo Rui-Tang, Gao Xiang, Ding Hong-Lei, Luo Zhong-Yang, Cen Ke-Fa. Study on flow field optimization in wet flue gas desulfurization spray scrubber. *Proceedings of the CSEE*, 2008, **28**(29): 70−77
(郭瑞堂, 高翔, 丁红蕾, 骆仲泱, 岑可法. 湿法烟气脱硫喷淋塔内流场的优化. 中国电机工程学报, 2008, **28**(29): 70−77)

55 Cheng X, Hu X Y, Yang L Q, Husain I, Inoue K, Krein P, Lefevre R, Li Y Y, Nishi H, Taiber J G, Wang F Y, Zha Y B, Gao W, Li Z X. Electrified vehicles and the smart grid: the ITS perspective. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, **15**(4): 1388−1404

邓建玲 中国华电集团公司党组成员、副总经理、教授级高级工程师.
E-mail: jianling-deng@chd.com.cn
(**DENG Jian-Lin** Member of the party group, deputy general manager, professor of engineering at China Huadian Corporation.)

王飞跃 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研究员. 主要研究方向为智能系统和复杂系统的建模, 分析与控制. 本文通信作者.
E-mail: feiyue.wang@ia.ac.cn
(**WANG Fei-Yue** Professor at the State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers modeling, analysis, and control of intelligent systems and complex systems. Corresponding author of this paper.)

陈耀斌 中国华电集团科学技术研究总院副院长. 主要研究方向为电力系统建模、优化、控制, 智能控制和自动化.
E-mail: yaobin-chen@chdi.ac.cn
(**CHEN Yao-Bin** Vice president at China Huadian Corporation Science and Technology Institute. His research interest covers modeling, analysis, and control of power system.)

赵向阳 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院副教授. 主要研究方向为分布式发电与微电网监控和控制、需求侧管理.
E-mail: zhaoxiangyang@buaa.edu.cn
(**ZHAO Xiang-Yang** Associate professor in the School of Automation Science and Electrical Engineering, Bei-Hang University. His research interest covers distributed generation, microgrid and demandside management.)