

社会能源：从社会中获取能源

张俊^{1,2}, 王飞跃³, 方舟¹

(1. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072;

2. 青岛智能产业技术研究院, 山东 青岛 266109;

3. 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)

摘要: 能源的内在本质——物质性、社会性以及信息性解释了能源系统和社会系统之间不可避免的强烈的相互作用。讨论了能源的本质, 并提出了社会能源系统在电力方面的概念和内涵。提出了一种基于 ACP 方法的用于构建和研究社会能源系统的一般方法, 以美国某大学的校园电网作为算例进行了研究。最后, 分别从社会科学和自然科学两方面讨论了社会能源的技术路线, 并提出了对未来的展望。

关键词: ACP 方法; 配网节点边际价格; 平行控制; 平行智能; 平行管理; 社会能源; 社会技术能源系统; 电力系统中的智能操作

中图分类号: TM743

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.201901

Social energy: mining energy from the society

ZHANG Jun^{1,2}, WANG Fei-yue³, FANG Zhou¹

1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China

2. Qingdao Academy of Intelligent Industries, Qingdao 266109, China

3. The State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: The inherent nature of energy, i.e., physicality, sociality and informatization, implies the inevitable and intensive interaction between energy systems and social systems. In this paper, the nature of energy was proposed, and then the concept and intention of social energy systems for electrical power were proposed. A general methodology of establishing and investigating social energy was proposed. A case study on the University of Denver (DU) campus grid was provided and studied to demonstrate the social energy concept. In the concluding remarks, the technical pathway was discussed in both social and nature sciences, to social energy, and our vision on its future.

Key words: ACP, distribution locational marginal pricing, parallel control, parallel intelligence, parallel management, social energy, socio-technical energy systems, intelligent operation in power systems

1 建立社会能源的一般方法

1.1 ACP 方法

ACP 方法是由“人造系统”(artificial systems)、“计算实验”(computational experiments)以及“平

行执行”(parallel execution)^[1-2]构成的方法。“人造系统”主要用于构造复杂模型, 并通过运用默顿法则构造信息与行为之间的反馈交换机制。用于构造该模型的数据均是通过数据驱动方法以及语义建模方法从实际物理世界中采集得到的。“计算实

收稿日期: 2019-01-22; 修回日期: 2019-03-02

通信作者: 王飞跃, feiyue.wang@ia.ac.cn

基金项目: 国家高技术研究发展计划基金资助项目(“863”计划)(No.2006AA01Z117); 中国科学院知识创新工程领域前沿项目(No.20076032)

Foundation Items: The National High Technology Research and Development Program of China (“863” Program) (No.2006AA01Z117), The Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (No.20076032)

验”着眼于对数据的精确分析,由于人类社会活动的数字表达形式很难被提取并进行定量分析,因此,必须采用社会计算方法^[3]进行处理。“平行执行”的目标是制订创新的决策,人造能源系统与物理能源系统构成了一对平行的能源系统,这种平行系统构成了一种新的基于虚实交互的反馈控制机制。

从某种意义上来说,ACP 方法解决了复杂系统“科学解决方案”中的“科学方法悖论”问题。在大多数复杂系统中,由于系统复杂度高,因此人们无法在系统中进行试验。同时,在多数案例中,解决方案需要依赖诸如复杂系统的输出等结果来对其进行评估。“科学解决方案”的求取需要满足两个基本条件:可修改和可重复。然而,目前的主要问题是,在涉及人类和社会的复杂系统中,无法对系统进行修改,产生这种问题的原因有成本高昂、法律限制以及道德规范等多个方面,最重要的是不存在恒定不变的实验条件。因此,ACP 方法追求“计算实验”的次优方法,当无法对系统进行模拟实验时,可以使用计算实验替代对物理系统的模拟,这样就使得解决复杂问题的过程变得可控、可观并且可重复,同时解决方案也具有可修改和可重复的特性,从而满足了求解科学方法的基本要求。

1.2 平行控制系统

基于 ACP 方法,平行智能可以被定义为在真实系统和虚拟系统之间的交互和执行过程中产生的一种智能形式^[4]。平行智能具有数据驱动、基于仿真系统的建模以及基于计算实验的系统行为分析和评估 3 个特点,对于一个复杂的系统,平行智能的核心理念就是构建一个由真实物理系统和人造系统组成的平行系统(如图 1 所示,图中 $\dot{u}=f_u(q,u,x)$ 为一般性动态系统状态方程, u 为系统状态变量, q 、 x 为系统输入变量; $\dot{x}=f_N(p,x,u)$ 为一般性控制变量求解

方程, x 为系统控制变量, p 、 u 为系统输入变量),其最终目标是得到能够推动真实系统并使其趋向于虚拟系统的决策。这样便可利用虚拟人工系统简化复杂系统问题,并实现复杂系统的管理和控制。图 2 所示为一个平行系统的框架结构,在这个框架结构中,平行智能可以用于 3 种操作模式:1) 学习与训练:采用平行智能构建一个虚拟系统。在此模式中,主要采用历史数据对构造的虚拟系统进行训练,使虚拟系统具备模拟实际物理系统的能力,能够在实验中反映实际物理系统的真实情况。2) 试验和评估:在此模式下,平行智能通过建立和执行计算实验来测试和评估各种系统场景以及解决方案。3) 控制和管理:在这种操作模式中,平行执行起主要作用,虚拟仿真系统与真实的物理系统通过平行实时交互实现对复杂系统的控制和管理。

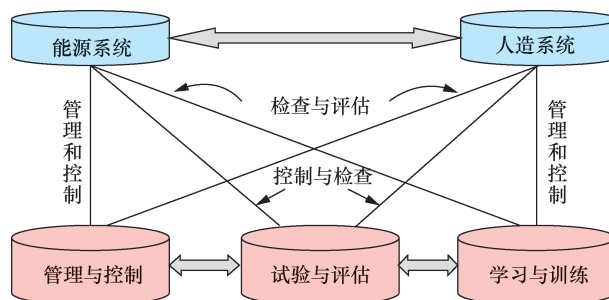


图 2 实时虚拟交互系统控制和管理的平行系统方法

需要指出的是,一个单一的物理系统可以与多个虚拟人造系统进行交互,例如为了响应不同应用的不同需求,一个物理系统可以和数据可视化人工系统、理想人工系统、试验人工系统、应急人工系统、优化人工系统、评估人工系统、训练人工系统以及学习人工系统等同时或者通过分时的方式进行交互。

ACP 方法和平行系统方法目前已应用于智能

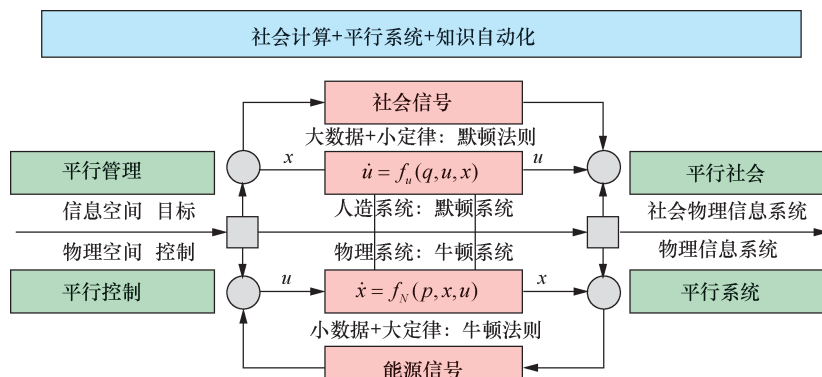


图 1 ACP 方法

交通系统、社会老年医疗保健系统、大规模生产系统管理以及社会计算和安全管理等几个主要的社会难题,并取得了显著的成效。ACP方法和平行系统方法的成功也为研究提出的社会能源系统提供了一条可行且有前途的技术路径。

2 社会能源的定义及特性

2.1 社会能源的定义

社会能源系统是物理能源系统、物理社会系统以及由物理系统派生的虚拟系统的复合体。利用从社会技术系统中收集到的多方面的数据,通过充分的互动和大量的计算,可以得到系统的知识自动化,并产生能够对系统进行控制和管理智能。将知识和智能应用于社会能源系统,可以实现真正的自动化和智能联合的社会技术系统的设计和管理。

本文提出使用ACP方法和平行系统的一般方法来建立所提出的社会能源系统,接下来将主要介绍其特性。

2.2 社会能源的特性

(1) 人造系统

传统电力系统控制和管理方案的规划和设计通常只考虑能源流动的物理性质,大多数情况下往往忽略了能源的社会性质和信息性,而随着智能能源转换、输送和使用模式的兴起,能源系统需要接纳具有间歇性的可再生能源、适应快速的需求变化并且积极满足节能减排的要求,这就要求深入理解和分析诸如包含复杂性和不确定性的个人、组织以及社会行为信息的社会系统信息。为了探究这些社会因素是如何影响能源系统的,并进一步协助改善社会技术系统的设计、运营和维护,对社会学、管理学、经济学、人类学以及行为学等学科的理解和结合十分重要。

目前还未在物理、社会以及信息属性之间进行上述交互以及合作机制的研发,并且由于传统电力系统仿真模型仅仅考虑诸如功率需求这类极少量的社会信息,导致上述交互及合作机制无法在传统的电力系统仿真模型中实现。此外,为了提供智能决策,社会物理信息系统这3个组成部分之间的合作策略应根据实时工作条件进行适应性更新。而与传统的基于确定性或概率性的仿真模型不同,大多数变量是无法被预测的,所以系统模型应该具有实时变化的结构。

需要具有革新性的理论和技术作为支撑来分

析、管理以及控制这样一个复杂的系统。为响应这一需求,作者认为基于平行系统理念的人造能源系统概念是目前比较适合社会能源的方法。社会物理信息系统中存在的不确定性和人类社会的复杂性从本质上决定了整个系统的高复杂度,因此,为了实现从牛顿定律到默顿定律以及从控制到指导的过渡,建立人造系统是一项十分迫切的研究项目。

虚拟人造能源系统将建立在基于语义建模^[5]、数据驱动或者其他建模技术的“网络空间”中,该系统应与实际物理能源系统平行运行,从而使两个系统相互作用并交换反馈。一方面,人工系统应该能够反映物理系统的实时工作情况;另一方面,人工系统需要通过平行计算为物理系统的性能提供优化的解决方案和建议。以此为前提,相信将虚拟人造系统引入复杂的能源控制系统将在能源行业开创一个革命性的新时代。

(2) 通过交互和计算实现知识自动化

一个社会能源系统通常包含高度复杂的物理和信息化过程,社会能源社会技术系统的复杂程度远远超出了工业自动化系统可以处理的范围,这意味着包括手动控制、单回路控制、多回路控制、分布式控制系统(distributed control systems, DCS)、制造执行系统(manufacturing executive system, MES)以及企业资源规划(enterprise resource planning, ERP)等在内的传统工业自动化方法已经不能满足社会能源的需求了。

由社会系统和能源系统衍生而来的人造系统将在处理来自能源系统和社会系统的巨大数据和信息方面发挥核心作用。物理系统的数据和信息具有不确定性、冗余性以及不一致性,而人类本身不具备处理和分析这些数据和信息的能力。因此,有必要开创知识自动化系统^[6],通过采用数据驱动、多代理系统以及其他人工智能技术来达到人造系统的预期结果。

(3) 社会技术反馈机制与现实之间的博弈

通过社会、技术以及人造系统之间的频繁交互能够得到一种反馈机制,其能够直接或间接地达成系统期望的目标。物理社会技术系统可以与多个虚拟人工系统进行交互,例如消费者行为人工系统、组织行为人工系统、应急人工系统、调度和优化人工系统以及实时管理人工系统等,每个人造系统对应不同的应用程序,并通过互动和计算的自动化知识生成用于建模和塑造真实的物理社会和能源系

统的反馈信号。这种反馈可能包含对技术系统的直接控制、对分布式社会技术代理的间接操纵、对社会和经济实体的影响以及对最大限度的信息传播的公开，甚至是对个人行为心理暗示。文献[7]从哲学的角度将有效和高效的反馈作为游戏的核心特征。在社会能源社会技术系统中，强大有效的反馈机制提高了与现实进行博弈的可能性，在此情况下，将更迅速地物理系统进行塑造并将其导向理想的结果。有了如此强大的反馈机制，社会技术系统有望具备先进的闭环运行能力与稳定性、较快的系统收敛速度以及系统适应敏捷性。

3 美国大学校园能源网络案例研究

在这一节中，将通过一项案例研究来进一步介绍社会能源的概念。此案例包括对电力系统运行、智能建筑建模、实时定价机制以及人类行为建模等部分的研究。在已有的文献中，许多研究证明了环境的舒适性与工作表现之间的关系，研究表明室内温度是室内环境中的一个关键因素，它可以从多个方面影响人类的行为，例如感知的空气质量、工作表现以及温度舒适度等^[8]。文献[9]表明，降低环境的舒适度会导致工作人员的工作效率降低，致使相同的成果需要更多的时间去完成，这将间接导致更多的能源消耗。文献[10-11]表明当室内温度在舒适范围内时，每个雇主将节约 2 美元，而当室内温度高于 25℃ 时，每超过 1℃ 工作人员的工作效率将降低 2%。

本案例通过研究校园电网与社区人工系统之间的交互作用，提出了一种智能建筑能耗策略。案例选用了美国某大学的 6 栋建筑作为演示的目标建筑，这些建筑的具体信息见表 1。由于在不同的室内温度下工作表现差异很大，所以可以认为工作效率是一个重要的因素。在此案例中，假设建筑中的能耗与室内设定温度以及室外温度有关。通过神经网络学习和训练每座建筑物的能耗曲线模型，训练数据由通过软件 eQUEST 构建的智能建筑模型产生。需要注意的是，这里通过配网节点边际实时价格（DLMP）来反映能源使用和公共事业费用的变化，配网节点边际价格计算是基于在 MATLAB 环境下开发的 MATPOWER 仿真工具箱进行的^[11]。基于人类工作绩效模型、能耗模型和 DLMP，采用分布式迭代自适应编程^[12]能够找出 6 个目标建筑物的最佳室内温度设置值。

表 1 6 个目标建筑的信息

	建筑名	建筑类型	面积（平方英尺）	层数
1	里奇中心	健身中心	44 000	4
2	法律大楼	学术中心	18 100	4
3	斯特姆礼堂	学术中心	24 500	4
4	丹尼尔大楼	学术中心	110 536	6
5	纽曼中心	艺术中心	18 000	5
6	奥林中心	学术中心	4000	2

3.1 人类工作绩效模型

室内温度是室内环境的基本特性之一，可以依靠建筑物特性及其采暖、通风和空调（HVAC）系统对其进行一定精度的控制。室内温度影响温度舒适度、感知空气质量、病态建筑物综合征和工作表现^[10]。在本研究中，工作效率取决于室内温度对办公室工作效率的影响^[8]，则人力工作绩效模型可表示为

$$\xi = g(T_{in}) = 0.164\,752\,4 \times \left(\frac{5}{9} \times (T_{in} - 32) \right) - 0.005\,827\,4 \times \left(\frac{5}{9} \times (T_{in} - 32) \right)^2 + 0.000\,062\,3 \times \left(\frac{5}{9} \times (T_{in} - 32) \right)^3 - 0.468\,532\,8 \quad (1)$$

其中， ξ 表示工作效率， T_{in} 表示室内温度设定值并满足不等式 $64^{\circ}\text{F} < T_{in} < 79^{\circ}\text{F}$ 。图 3 所示为室内温度与相应的工作效率的关系曲线。应该指出的是，尽管文献[12]认为大学建筑的理想温度为 $68^{\circ}\text{F} \sim 74^{\circ}\text{F}$ ，本研究中的温度设置为 $64^{\circ}\text{F} \sim 79^{\circ}\text{F}$ 。

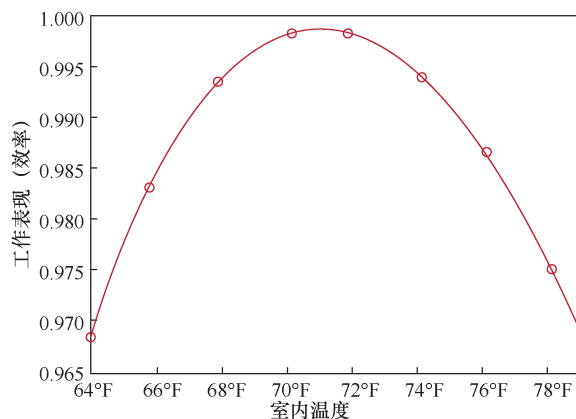


图 3 室内温度与工作效率的关系曲线

设 $\xi_{k,t}$ 和 $x_{k,t}$ 分别表示第 k 个建筑 t 时刻的工作效率和室内温度设定值，则式（1）可被写成

$$\xi_{k,t} = g(x_{k,t}) \quad (2)$$

此外，设有 $\xi_t = [\xi_{1,t}, \xi_{2,t}, \dots, \xi_{6,t}]^T$ ， $x_t = [x_{1,t}, x_{2,t}, \dots, x_{6,t}]^T$ ，其中， x_t 是此案例研究中的控制变量。

3.2 基于神经网络的能耗分析模型

将 eQUEST 作为建筑模拟工具，可以提供 HVAC 系统、照明和插头负载的全面和详细的模型，模拟系统的小时时间尺度报告可以提供足够的信息来训练预测功耗的神经网络模型。表 2 显示了 7 月 1 日 Ritchie 中心每小时能源消耗的部分模拟。基于 eQUEST 的仿真产生了足够多的数据，但由于空间限制，本文仅展示以下内容。

表 2 Ritchie 中心于 7 月 1 日
15:00 至 20:00 的部分模拟结果

时间	室内温度 T_{in}	室外温度 T_{out}	能耗 (Btu)
15:00	64°F	94°F	1.08×10^7
16:00	64°F	92°F	1.31×10^7
17:00	64°F	92°F	1.70×10^7
18:00	64°F	93°F	2.03×10^7
19:00	64°F	89°F	2.22×10^7
20:00	64°F	85°F	2.19×10^7

对所有 6 座建筑物生成一整年的室内温度设置分别为 64°F、67°F、70°F、73°F、76°F 和 79°F 的模拟数据，并使用工作日的数据训练神经网络能源消耗模型。对于每个单独的建筑物，使用 Levenberg Marquardt 反向传播算法对具有 Sigmoid 激励函数的隐藏神经元和线性输出神经元的两层前馈网络进行训练。

该神经网络模型中以小时数、室内温度设定值以及室外温度作为输入，以能源消耗作为输出。随机选取样本数据的 75% 作为训练数据，15% 作为验证数据，15% 作为测试数据。表 3 列出了用于训练每个建筑物能耗模型的隐含神经元的数量和训练结果的回归 R 值，据统计，平均 R 值为 0.92，这表明 6 个能源消耗神经网络模型是可接受的。因此，第 k 栋建筑在 t 时刻的能源消耗 $e_{k,t}$ 可以表示为室内温度设定值 $x_{k,t}$ 、时间 t 以及室外温度 $T_{out,t}$ 的函数。

$$\begin{aligned} e_{k,t} &= h_k(x_{k,t}, t, T_{out,t}) \\ e_t &= H(x_t, t, T_{out,t}) \end{aligned} \quad (3)$$

其中， $e_t = [e_{1,t}, e_{2,t}, \dots, e_{6,t}]^T$ 。

3.3 校园网络的配网节点边际价格

为了说明负荷变化对经济和校园电力系统的影响，引入配网节点边际价格将物理系统与人工系统联系起来。详细的校园电源系统配置在文献[12]中有所描述，该大学校园电源系统的拓扑结构如图 4 所示。

表 3 用于训练目标建筑物的隐藏神经元的数量和训练结果的回归 R 值

编号	建筑名	隐藏层数 (层)	R 值
1	里奇中心	30	0.88
2	法律大楼	20	0.96
3	斯特姆礼堂	30	0.96
4	丹尼尔大楼	30	0.86
5	纽曼中心	50	0.86
6	奥林中心	5	0.94

利用基于本案例中美国某大学校园电力系统开发的电力系统仿真器，引入基于交流电力最优潮流 (AC-OPF) 的 DLMP，实现实时定价机制。

$$\arg \max_{p_j^b, p_j^s} s = \sum_{j=1}^N (c_j - p_j^b) q_{c_j} - \sum_{i=1}^M (p_i^s - u_i) q_{u_i} \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^M q_{u_i} - \sum_{j=1}^N q_{c_j} - L_p(V, \theta) = 0 \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^M Q_{u_i} - \sum_{j=1}^N Q_{c_j} - L_Q(V, \theta) = 0 \quad (6)$$

$$f_i(V, \theta) \leq f_j^{\max} \quad (7)$$

$$q_{u_i}^{\min} \leq q_{u_i} \leq q_{u_i}^{\max} \quad (8)$$

$$Q_{u_i}^{\min} \leq Q_{u_i} \leq Q_{u_i}^{\max} \quad (9)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (10)$$

其中， s 是从 DLMP 计算中获得的系统社会盈余， $N=57$ 是校园建筑总数， j 是建筑编号； $M=3$ 是发电机总数， i 是发电机编号； c_j 代表每次发电的建筑投标价格， u_i 代表每次发电的报价； p_j^b 是每个建筑物 j 的配网节点边际价格， p_i^s 代表发电机总线 i 的配网节点边际价格； q_{c_j} 是建筑 j 的电力需求； q_{u_i} 是总线 i 的电力供应量； V 和 θ 分别表示电压幅值和相角， f_i 标识第 j 条线路的潮流，其约束条件为 $f_j^{\max}=400$ A； q_{u_i} 是各电源的有功输出，其最大容量为 $q_{u_i}^{\max}=12.7$ MW， Q_{u_i} 是相应电源的无功输出，其最大容量为 $Q_{u_i}^{\max}=11$ MVar； V_i 代表有功功率注入的第 i 条母线的电压幅度，在此案例中， $V_i^{\min}=0.90$ pu， $V_i^{\max}=1.10$ pu。 $L_p(V, \theta)$ 和 $L_Q(V, \theta)$ 分别是该大学校园电网的总有功功率损失和无功损耗。为了计算方

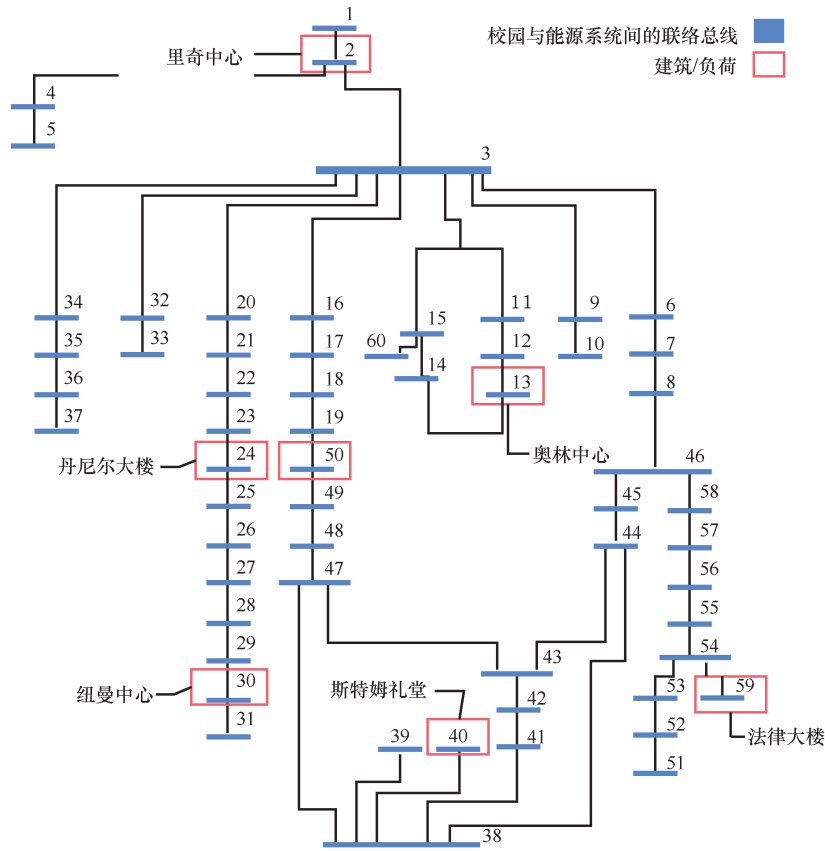


图 4 美国某大学校园网的网络拓扑

便, 将目标建筑物的 DLMP $p_t = [p_{1,t}, p_{2,t}, \dots, p_{6,t}]^T$ 简单地表示为能耗 e_t 的高度非线性和复杂函数 $\Gamma(\cdot)$, 并且作为控制变量 x_t 的函数如下所示。

$$p_t = \Gamma(e_t) = \Gamma(H(x_t, t, T_{\text{out}_t})) \quad (11)$$

3.4 总体社会成本

为了解决整体社会成本问题, 本章提出了一种新方法。基于前述的系统配置和社会能源方法, 整体社会成本的制定包括两个主要部分: 效用成本, 由终端能源和相应的 DLMP 计算得出; 工作效率的成本, 这取决于性能下降的成本和工作人员的数量。在本案例中, 社会成本指的是每个建筑的电能消耗所产生的电费成本以及工作人员在工作中产生的成本的加权和, 式 (12) 定义了用于计算该大学校园网格中目标建筑物在 t 时刻的总社会成本 ψ_t 的公式。

$$\begin{aligned} \psi_t &= \sum_{k=1}^6 [p_{k,t} \cdot e_{k,t} + \alpha(1 - \xi_{k,t}) \cdot o_{k,t}] \\ &= p_t \cdot e_t + \alpha(1 - \xi_t) \cdot o_t \\ &= \Gamma[H(x_t, t, T_{\text{out}_t})] \cdot H(x_t, t, T_{\text{out}_t}) \\ &\quad + \alpha[1 - g(x_t)] \cdot o_t = \Psi(x_t, t, T_{\text{out}_t}, o_t) \end{aligned} \quad (12)$$

其中, ψ_t 为 t 时刻的整体成本, α 是每个人在工作生产力为 1 时的年度节约成本, $o_t = [o_{1,t}, o_{2,t}, \dots, o_{6,t}]^T$ 中的 $o_{k,t}$ 是 t 时刻建筑 k 中的人数。需要指出的是, 室外温度 T_{out_t} 和工作人员人数 o_t 是通过历史数据获取的, 并且与一天中的时刻 t 直接相关。因此, 在确定的时刻 t , t 、 T_{out_t} 以及 o_t 是已知的并且没有其他变化。因此, 整体社会成本完全是室内温度设定值 x_t 的函数。本研究案例的目的是找到在 t 时刻可以得到最经济的供热通风与空气调节 (HVAC) 成本和工作效率之间的组合的最佳室内温度设定值 $\hat{x}_t$ 。因此, 问题可以表述如下。

$$\begin{aligned} \hat{x}_t &= \arg \min_{x_t} \Psi(x_t) \\ \text{s.t.} \quad &64 \leq x_{k,t} \leq 79 \end{aligned} \quad (13)$$

3.5 解决最小社会成本的分布式迭代自适应规划

在 $x_t = [x_{1,t}, x_{2,t}, \dots, x_{6,t}]^T$ 的向量空间中搜索可能效率低下且计算成本高昂——尤其是当目标建筑物数量增加时。因此, 选择了分布式迭代自适应编程 (DIAP) [14] 算法来解式 (13)。简单来说, DIAP 算法一次仅更新一个建筑物的控制变量, 并遍历所有

建筑物，直到控制序列停止显著变化。这些详细步骤叙述如下。

定义 $\kappa=\{1,2,\dots,6\}$ 为建筑编号集，表示 $x_{\bar{\eta},t}=\{x_{k,t} \mid k \in \kappa, k \neq \eta\}$ ，对象成本函数可以写为 $\Psi(x_{\eta,t}, x_{\bar{\eta},t})$ 。以 $l=0,1,2,\dots$ 作为迭代编号， $\{\eta_l\}$ 为满足 $\eta_l \in \kappa$ ，对于 $\forall l=0,1,2,\dots$ 的序列。当 $l=0$ 时，构建初始化控制序列 $x_{\eta_0,t}=[x_{1,t}^0, x_{2,t}^0, \dots, x_{6,t}^0]^T$ ，对于 $\forall t=1,2,\dots,24$ 采取下述形式进行迭代。

$$\tilde{x}_{\eta_0,t} = \arg \min_{x_{\eta_0,t}^0} \Psi(x_{\eta_0,t}^0, x_{\bar{\eta}_0,t}^0) \quad (14)$$

$$\tilde{\psi}_{\eta_0,t} = \Psi(\tilde{x}_{\eta_0,t}, x_{\bar{\eta}_0,t}^0) \quad (15)$$

基于式 (14) 和式 (15) 构建一个新的控制序列 $x_{\eta_0,t}=[x_{1,t}^l, x_{2,t}^l, \dots, x_{6,t}^l]^T$ ，其中，当 $k \neq \eta_0$ 时， $x_{k,t}^l = x_{k,t}^0$ ，而当 $k = \eta_0$ 时， $x_{k,t}^l = x_{\eta_0,t}$ 。然后，对于所有 $l=0,1,2,3,\dots$ 以及对应的 η_l ，DIAP 算法将如下式进行。

$$\tilde{x}_{\eta_l,t} = \arg \min_{x_{\eta_l,t}^l} \Psi(x_{\eta_l,t}^l, x_{\bar{\eta}_l,t}^l) \quad (16)$$

$$\tilde{\psi}_{\eta_l,t} = \Psi(\tilde{x}_{\eta_l,t}, x_{\bar{\eta}_l,t}^l) \quad (17)$$

然后构造下一个新的控制序列 $x_{\eta_{l+1},t}=[x_{1,t}^{l+1}, x_{2,t}^{l+1}, \dots, x_{6,t}^{l+1}]^T$ ，其中当 $k \neq \eta_l$ 时， $x_{k,t}^{l+1} = x_{k,t}^l$ ，而当 $k = \eta_l$ 时， $x_{k,t}^{l+1} = \tilde{x}_{\eta_l,t}$ 。

当 $l=L$ ， $|\tilde{\psi}_{\eta_L,t} - \tilde{\psi}_{\eta_{L-\delta},t}| \leq \beta_1$ 以及 $|x_{\eta_L,t} - x_{\eta_{L-\delta},t}| \leq \beta_2$ 时迭代停止，其中 $\delta=1,2,\dots,5$ ， β_1 、 β_2 是门槛限制。因此， t 时刻的最优室内温度设定值为 $\hat{x}_t = x_{\eta_L,t}$ ，同时，最小社会成本为 $\hat{\psi}_t = \hat{\psi}_{\eta_L,t}$ 。

3.6 结果与讨论

选择了一个典型的夏季周（7月25~29日），以及一个典型的冬季周（2月22~26日）来演示社会能源概念的试验周期。图5至图10为夏季结果。6个目标建筑物在夏季的整体社会成本如图11所示，图12至图17是冬季结果。图18为冬季周的整体社会成本。

这里，假设每个建筑物的占用率变化是相同的。图(a)显示了由DIAP算法计算出的优化室内温度设置，图(b)和图(c)分别显示了与优化的温度设置相对应的能耗和小时成本，图(d)显示了每天（左轴）的室外温度变化以及相对于时间的工作人员数量（右边的蓝色粗曲线）。

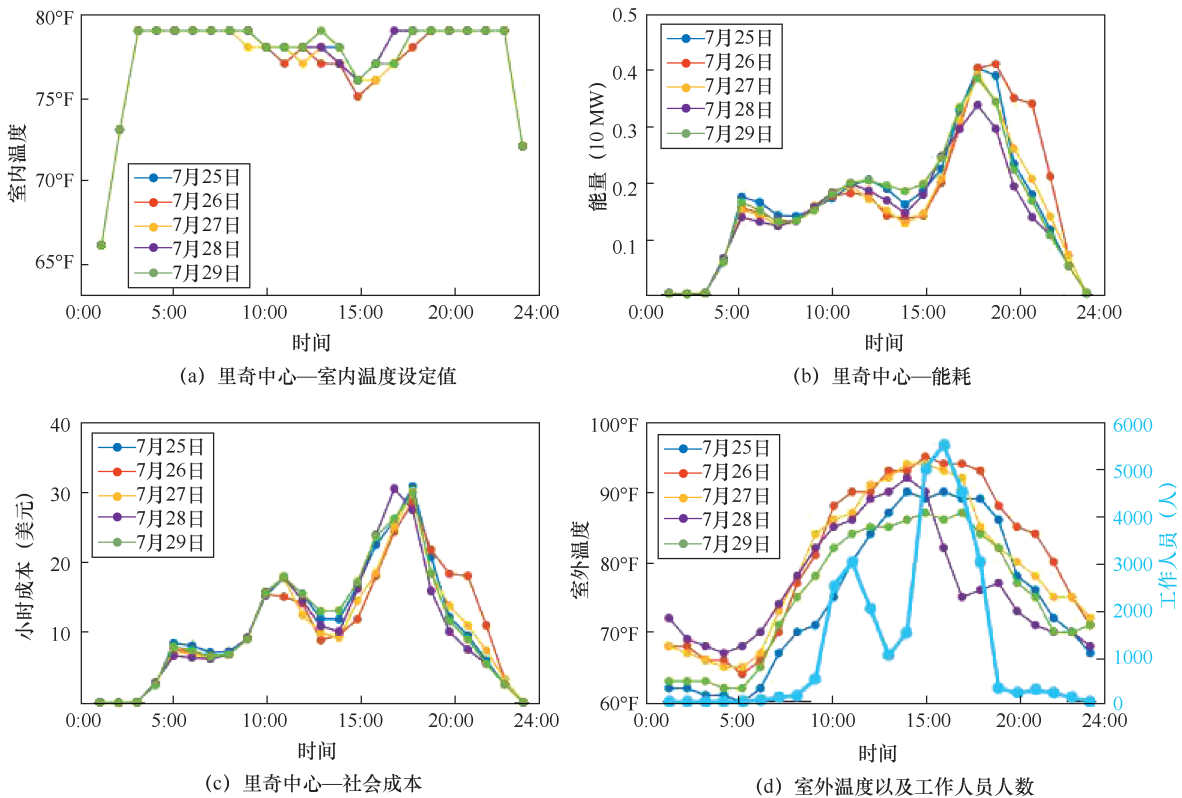


图5 在一个典型的夏季周里对里奇中心的测试条件和结果

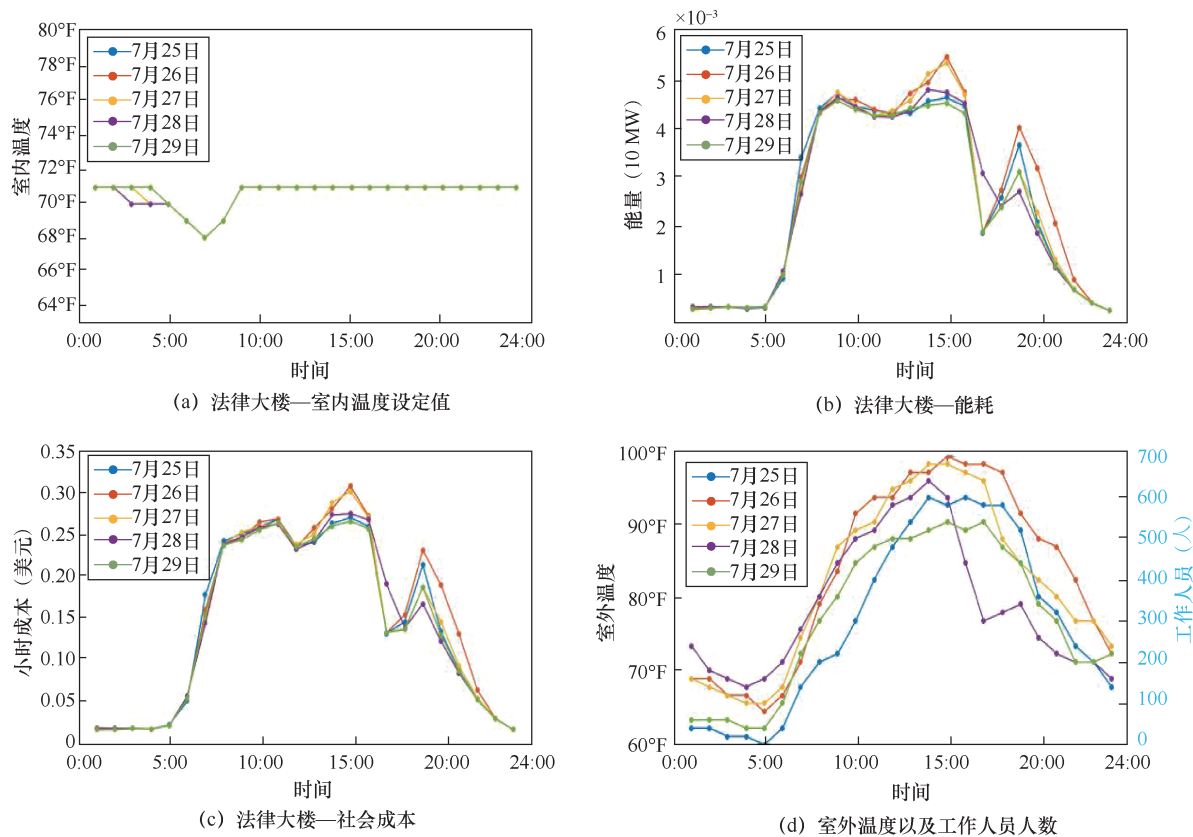


图6 在一个典型的夏季周里对法律大楼的测试条件和结果

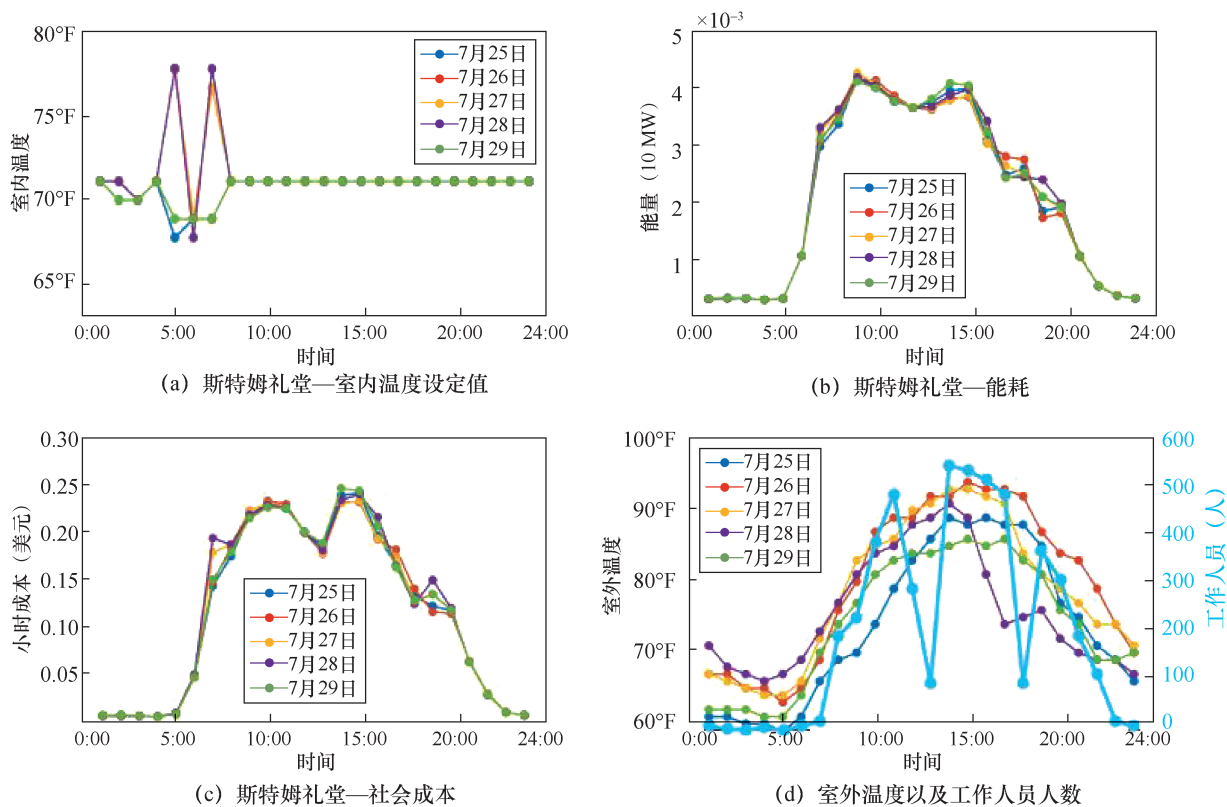


图7 在一个典型的夏季周里对斯特姆礼堂的测试条件和结果

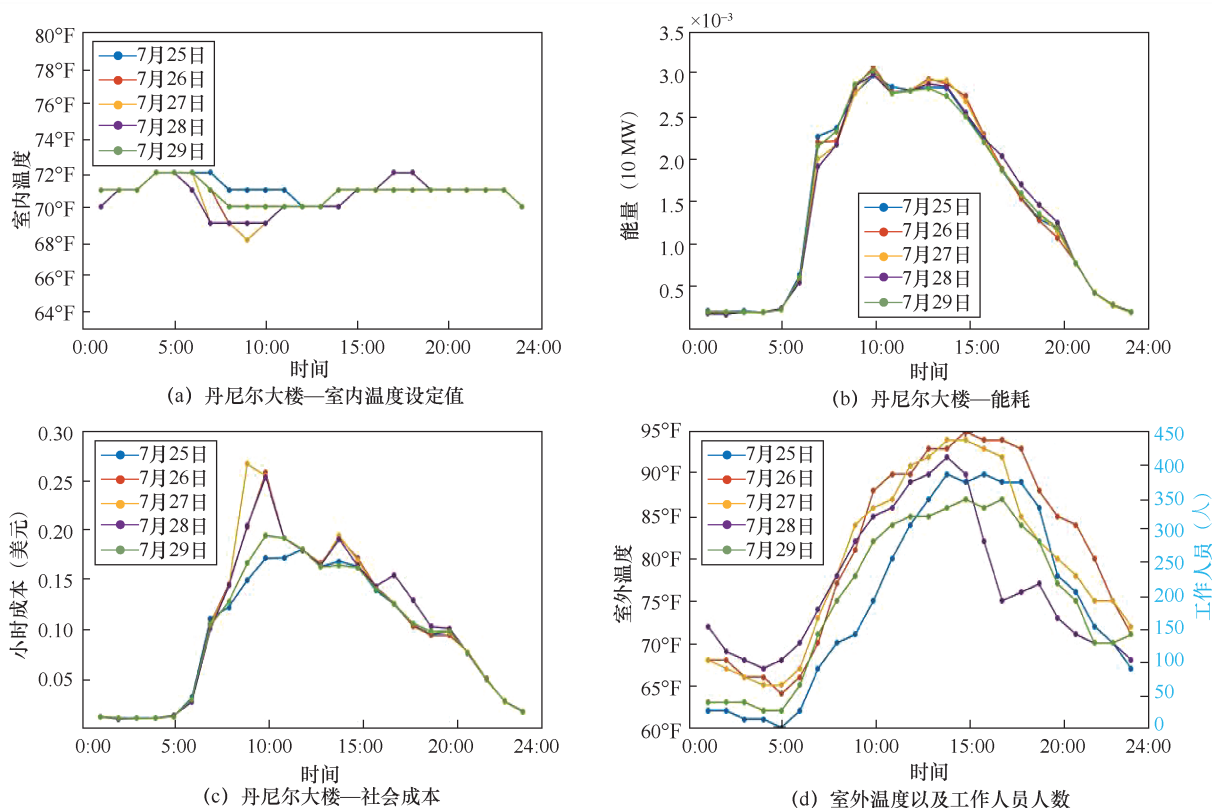


图8 在一个典型的夏季周里对丹尼尔大楼的测试条件和结果

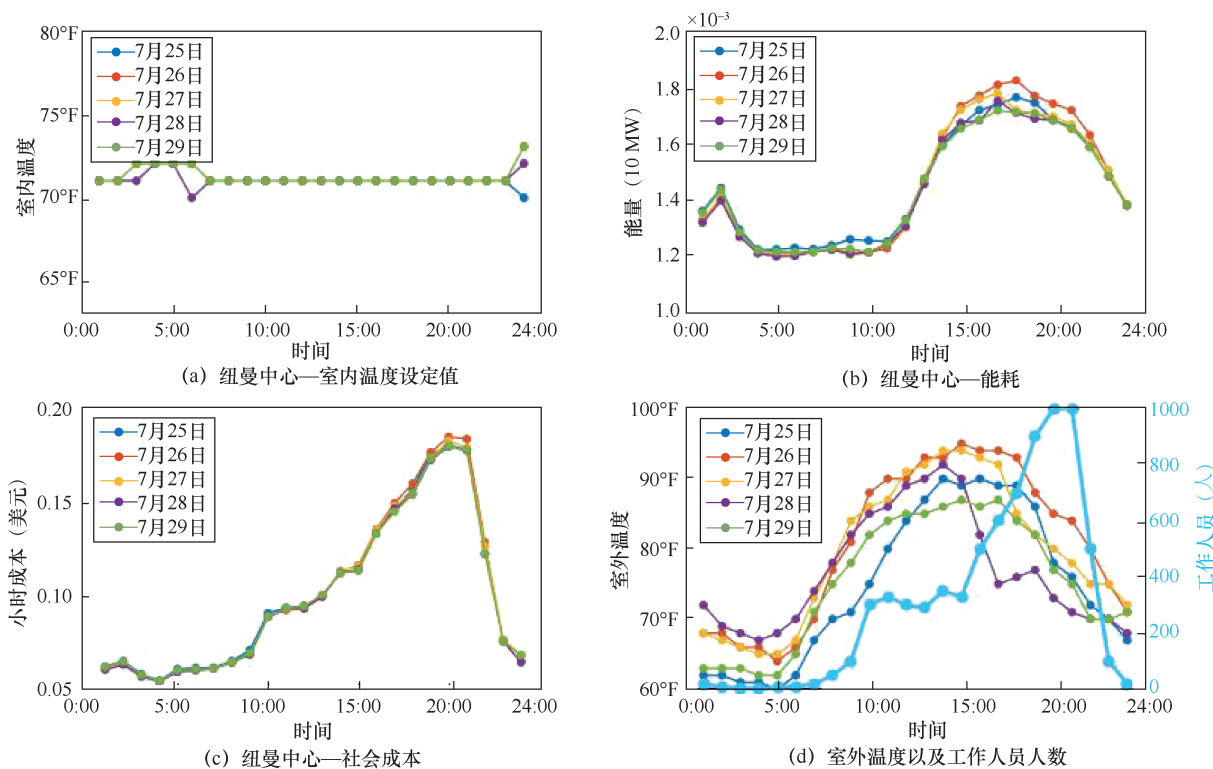


图9 在一个典型的夏季周里对纽曼中心的测试条件和结果

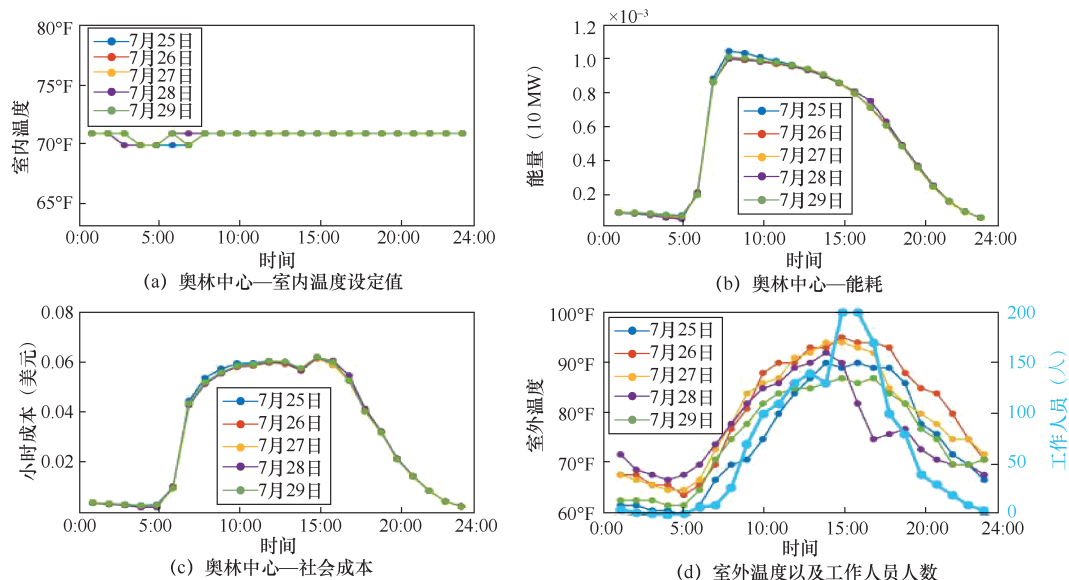


图 10 在一个典型的夏季周里对奥林中心的测试条件和结果

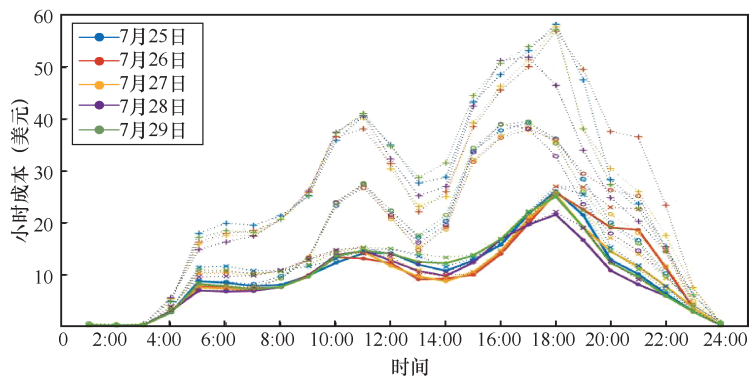


图 11 在夏季测试中 6 个目标建筑的总体社会成本与不同室内温度设置的比较

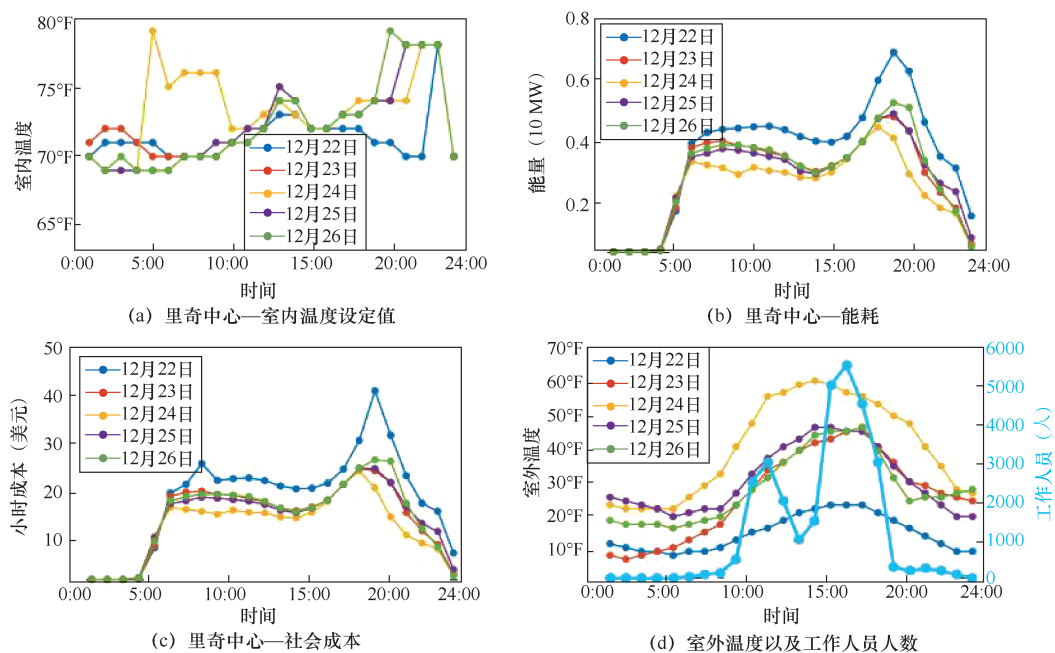


图 12 在一个典型的冬季周里对里奇中心的测试条件和结果

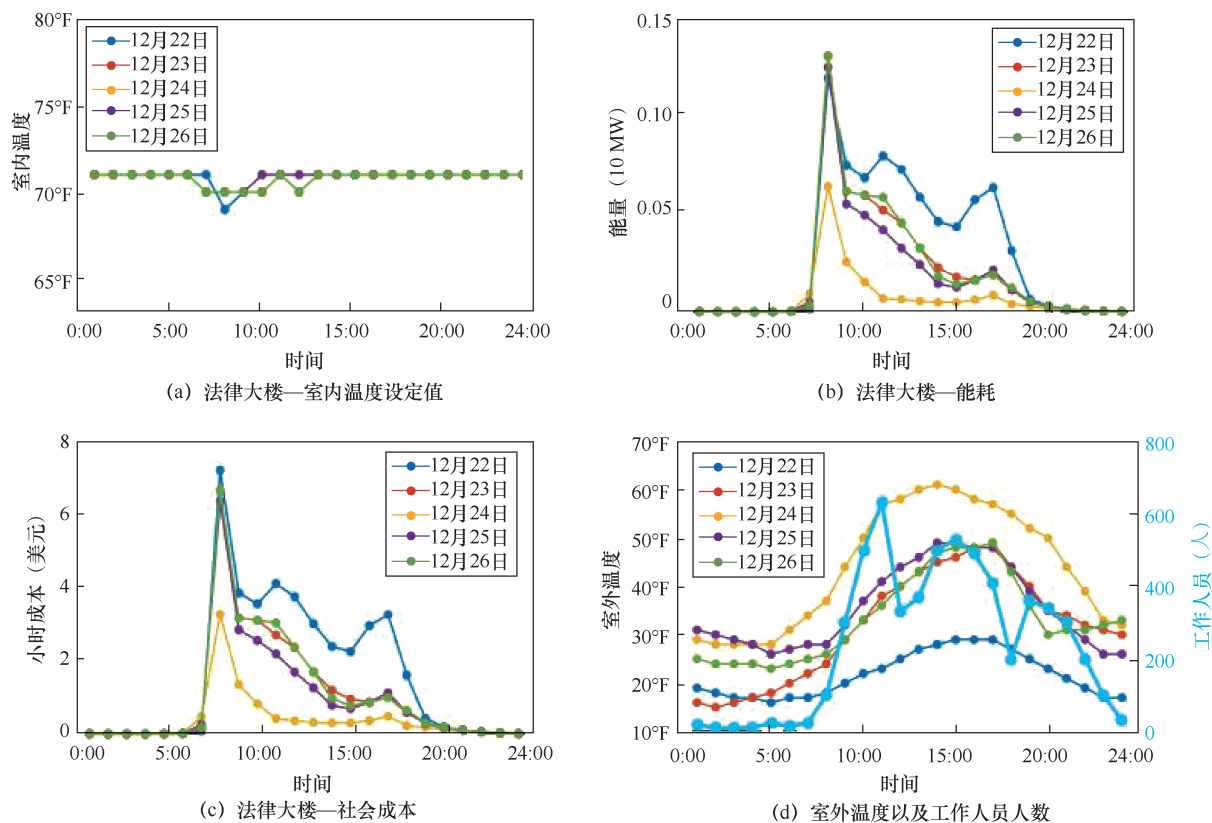


图 13 在一个典型的冬季周里对法律大楼的测试条件和结果

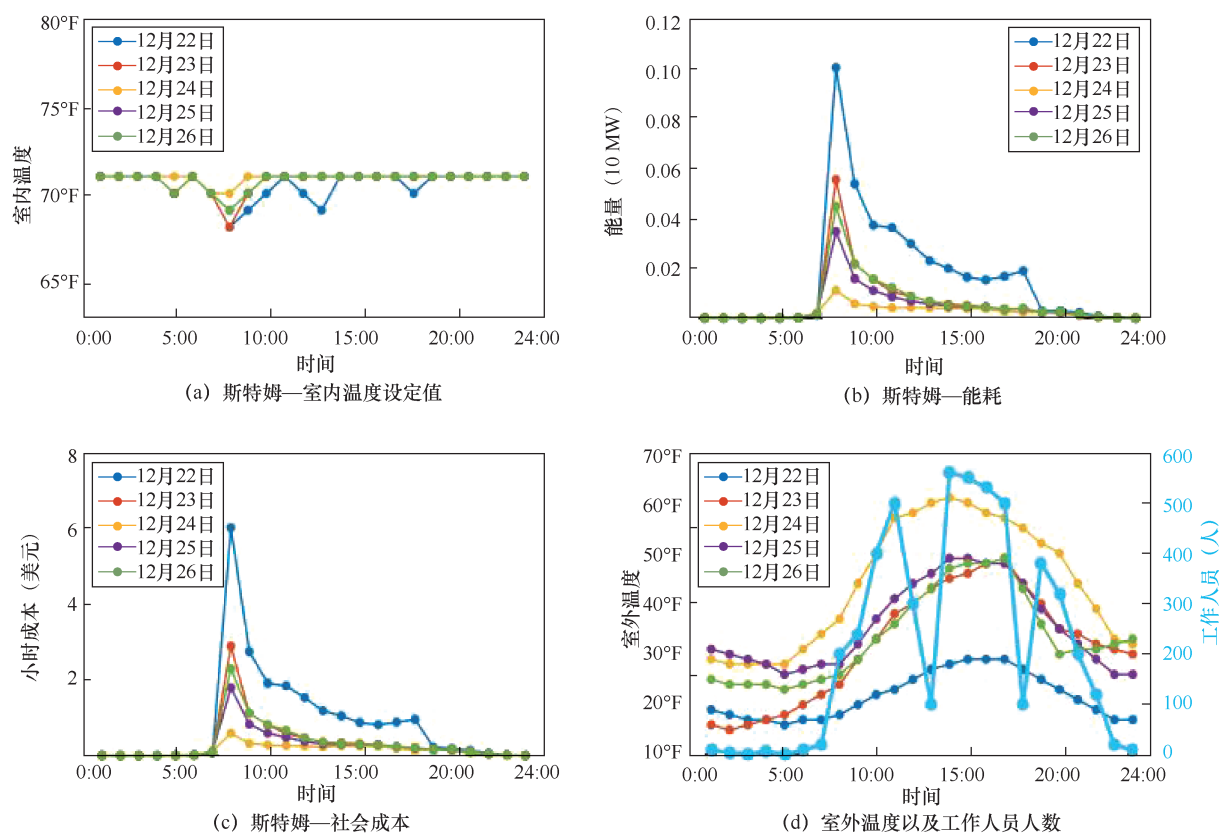


图 14 在一个典型的冬季周里对斯特姆礼堂的测试条件和结果

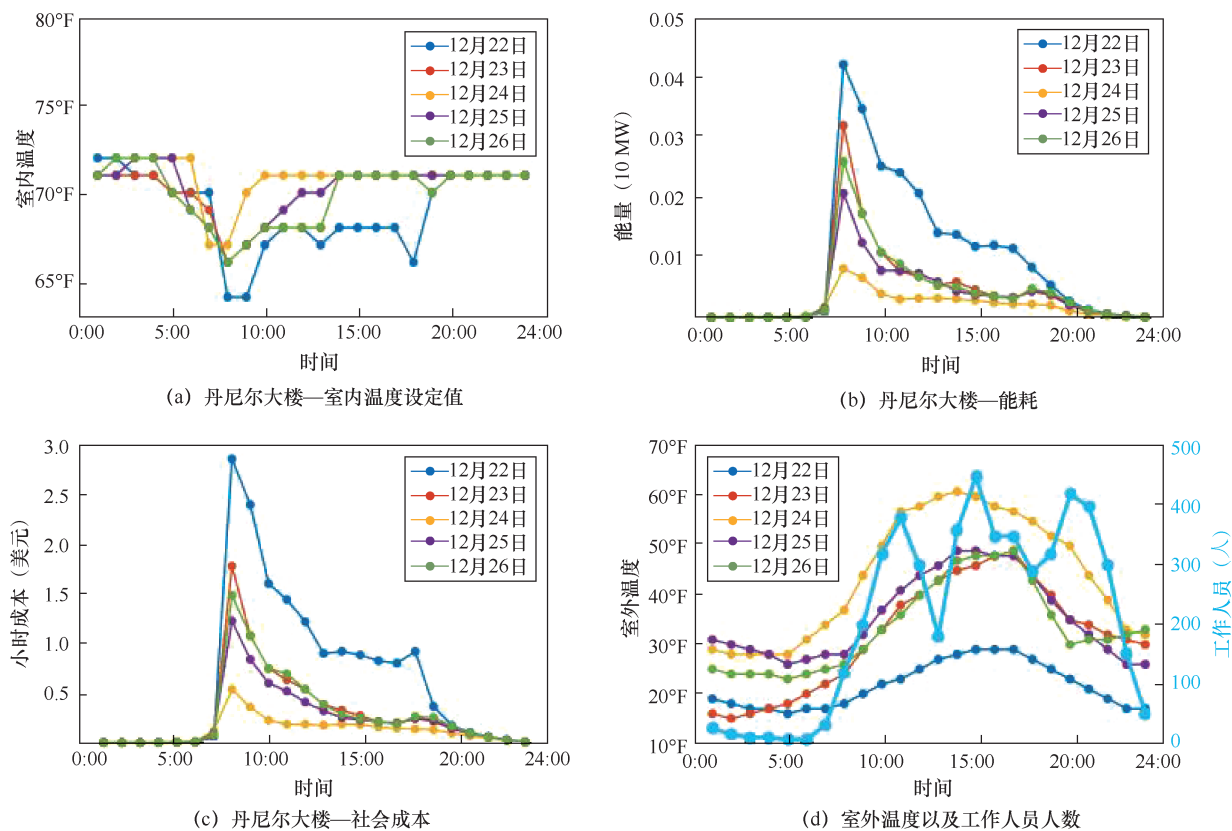


图 15 在一个典型的冬季周里对丹尼尔大楼的测试条件和结果

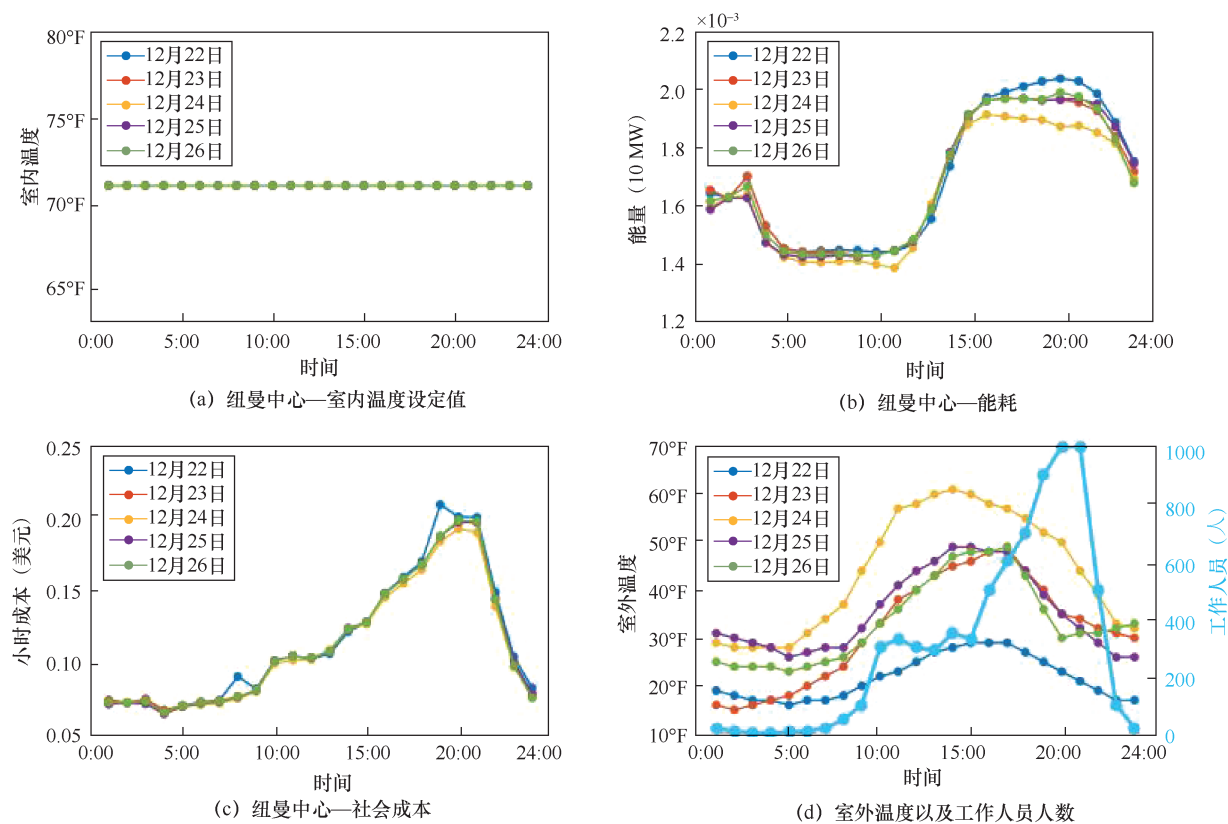


图 16 在一个典型的冬季周里对纽曼中心的测试条件和结果

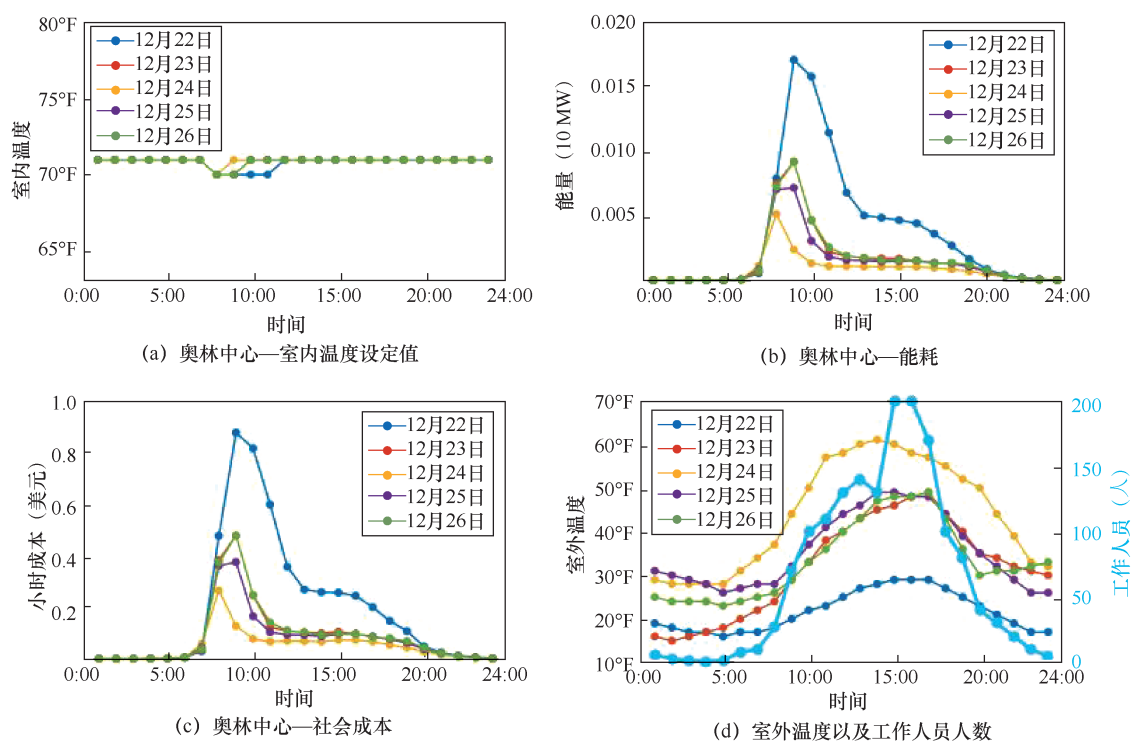


图 17 在一个典型的冬季周里对奥林中心的测试条件和结果

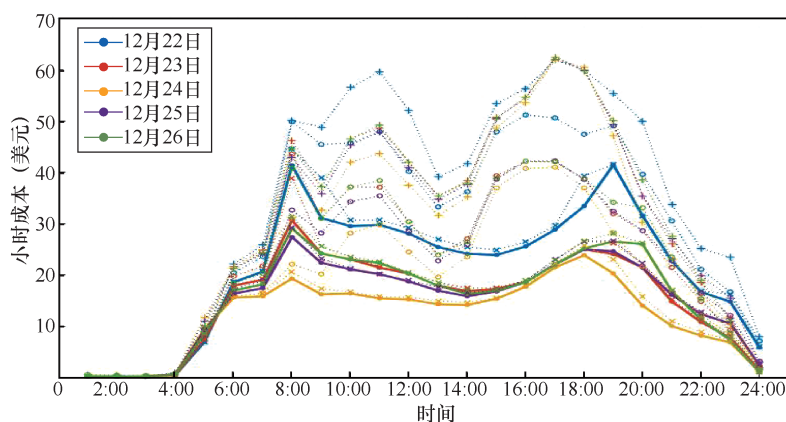


图 18 冬季测试中 6 个目标建筑的总体社会成本与不同室内温度设置的比较

从这些图中可以观察到, 小时成本的变化并不完全遵循能耗变化的模式, 而成本受到能耗和占用数量变化的影响。例如, 在图 7 和图 8 中的 13 h 处有一个由入住率大幅下降导致的明显的成本下降。而在图 9 中, 占用率的变化对成本曲线的影响要比消费变化对成本曲线的影响要大。

图 11 和图 18 所示为 6 个目标建筑物在测试期间的总体社会成本, 在这两幅图中, 带有“...”标记的实线是应用优化室内温度设定值的目标建筑物的小时总成本, 不同的颜色表示不同的天数。此外, 还提供了更多的测试结果与 3 个基线参考温度设置进行比较, 带有标记“+”“o”和“•”的虚线

分别显示室内温度设置为 64°F、71°F 和 79°F 时的总成本。比较具有相同颜色但不同标记的曲线, 很容易发现应用优化室内温度设定值的目标建筑物在相同天数的前提下的小时总成本是最低的, 即试验所得到的室内最优温度是有效的。

4 结束语

本文初步探讨了社会能源概念的内涵和外延, 并详细描述了构建和研究社会能源系统的一般方法, 对 ACP 方法和平行智能系统进行了详细的介绍。在此基础上, 提出了一种基于虚实平行系统的能源管控系统, 并通过对美国某大学的校园电网进

行案例研究,进一步展示了该管控系统的运作方法以及管理效果,根据案例研究的结果可知,该管控系统的效果十分显著。

本文中展示的案例只是提供了一个相对较小的智能社区的应用场景,而作者希望社会能源系统能够适用于不同的社会和技术尺度,能够提供一个多层次的解决方案,以使社会技术系统受益。具体地说,可以对电力系统建立跨区域的社会能源系统来管理洲际、国际和区域间的能源系统,解决多国市场中的社会技术问题。除了电力系统之外,诸如汽油、天然气、热和冷却等其他形式的能源系统,均可以采用与 ACP 方法相同的方法和平行虚实系统进行研究。

社会能源的社会技术属性要求高质量和定量的科学研究。然而,现有的研究大多是定性的,而不是定量的,这是社会能源发展的主要障碍。通过采用 ACP 方法、平行智能和人工系统数值实验的一般方法,运用诸如深度学习等人工智能技术对从个人、组织、国家市场的社会系统、政策和法规中搜集到的社会大数据进行整理和分析,能够使得对社会能源系统的定量研究成为可能。

参考文献:

- [1] WANG F Y. Toward a paradigm shift in social computing: the ACP approach[J]. IEEE Intelligent Systems, 2007,22(5):65-67.
- [2] WANG F Y, WONG P K. Intelligent systems and technology for integrative and predictive medicine: an ACP approach[M]. New York: ACM Press, 2013.
- [3] WANG F Y. Social computing: concepts, contents, and methods[J]. International Journal of Intelligent Control & Systems, 2004:91-96.
- [4] WANG F Y, WANG X, LI L, et al. Steps toward parallel intelligence[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016,3(4):345-348.
- [5] WANG F Y. Social energy and parallel energy systems: towards the age of energy 5.0[C]// in Distributed Energy Systems and Annu. Symp. IEEE ITSS, Beijing Chapter, 2015.
- [6] WANG F Y. Software-defined systems and knowledge automation: a parallel paradigm shift from Newton to Merton[J]. Acta automatica sinica, 2015, 41(1):1-8.
- [7] WERBACH K, HUNTER D. For the win: how game thinking can

revolutionize your business[M]. Philadelphia, Wharton Digital Press, 2012.

- [8] SEPPANEN O, FISK W J, LEI Q H. Efficient of temperature on task performance in o-ce environment[C]// 5th International Conference on Cold Climate Heating, Ventilating and Air Conditioning, Moscow, Russia, May 21-24,2006.
- [9] TOM S. Managing energy and comfort[J]. Ashrae Journal, 2008, 50(6):18-20, 22, 24, 26.
- [10] SEPPANEN O, FISK W J, FAULKNER D. Control of temperature for health and productivity in o-ces[J]. Ashrae Transactions, 2004, 111(pt2).
- [11] ZIMMERMAN R D, MURILLO-SANCHEZ C E, THOMAS R J. MATPOWER: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education[J]. IEEE Trans. Power Syst., 2011, 26(1): 12-19.
- [12] WEI Q L, LIU D R, SHI G, et al. Multibattery optimal coordination control for home energy management systems via distributed iterative adaptive dynamic programming[J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2015, 62(7): 4203-4214.

[作者简介]



张俊(1981-), 博士, 武汉大学电气与自动化学院教授, 主要研究方向为智能系统、人工智能、知识自动化及其在智能电力和能源系统中的应用。



王飞跃(1961-), 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主任, 国防科技大学军事计算实验与平行系统技术研究中心主任, 中国科学院大学中国经济与社会安全研究中心主任, 青岛智能产业技术研究院院长, 主要研究方向为平行系统的方法与应用、社会计算、平行智能以及知识自动化。



方舟(1994-), 武汉大学电气工程学院硕士生, 主要研究方向为区块链技术在电力系统中的应用。