



# 商业建筑空调系统参与城市电网负荷调控综述

吴桐, 惠红勋, 张洪财

(智慧城市物联网国家重点实验室(澳门大学), 澳门 999078)

**摘要:** 实现“碳达峰、碳中和”目标的关键在于城市电网的经济和高效运行。然而, 波动性新能源的增加以及负荷峰谷差的扩大等因素为城市电网带来了挑战。传统发电机组通过频繁调节出力来维持系统的稳定运行, 这种方式能效较低, 而且还面临可调节资源不足的问题。作为城市电网总耗电量的重要组成部分, 商业建筑空调系统有潜力作为调节资源参与电网调控。同时, 借助建筑的热储能特性, 可以在满足用户室内温度舒适需求的同时进行调控, 其潜力巨大。为了更好地发掘商业建筑空调系统的调控能力, 展示了典型商业建筑空调系统的单体模型和聚合模型, 并概述了商业建筑空调系统的调控潜力评估方法和控制技术。同时还对比分析了国内外的典型商业建筑空调系统示范工程, 并针对当前的发展状况提出了一些建议和展望。

**关键词:** 商业建筑; 空调系统; 需求响应; 负荷调控; 削峰填谷

**DOI:** 10.11930/j.issn.1004-9649.202209064

## 0 引言

城市是能源消耗的主要区域, 其碳排放约占全球碳排放总量的 80%<sup>[1]</sup>。电网在城市能源消耗中占据重要份额, 其经济高效运行是实现“碳达峰、碳中和”目标的关键。为了降低电网的碳排放, 中国提出了到 2030 年非化石能源的消费占比达到 25% 左右, 风力、光伏的发电装机容量达到 12 亿 kW 以上的目标<sup>[2]</sup>。然而, 与火力、燃气等传统发电机组相比, 风力、光伏等新能源发电受到天气影响, 出力具有间歇性与波动性<sup>[3-4]</sup>。为维持电网发电侧和需求侧的实时平衡, 传统发电机组需要频繁调节出力, 提高了运行能耗<sup>[5]</sup>, 且随着新能源装机容量的进一步增加, 传统发电机组的调节容量面临不足的问题<sup>[6-7]</sup>。

随着物联网技术的发展, 需求侧的负荷资源也具备了调节能力, 称为需求响应<sup>[8]</sup>。需求响应是以动态电价、补贴等激励手段, 利用物联网、通信等技术手段以实现对需求侧负荷资源的用电调控, 提升电网的灵活性, 达到削峰填谷、消纳

新能源等目的<sup>[9-10]</sup>。需求响应一般包括基于价格的需求响应和基于激励的需求响应<sup>[11]</sup>。基于价格的需求响应是利用实时电价、分时电价、尖峰电价等动态电价, 引导需求侧负荷在电价较高时减少用电或转移用电时段<sup>[12]</sup>。基于激励的需求响应包括可中断负荷项目、需求侧报价等<sup>[13]</sup>。

在广泛的城市负荷资源种类中, 商业建筑空调系统的耗电量占城市总耗电量的较高比重。尤其是面对夏季高温环境, 空调系统的负荷占比显著上升, 可达到电网尖峰负荷的 30% 以上<sup>[14]</sup>。2010 年 7 月, 由于受到极端高温影响, 南方电网的总调度量首次超过了 1 亿 kW, 其中广东的空调负荷达到了 1600 万 kW, 占全省负荷的 25%。在澳门, 商业建筑耗电量占总负荷的 70%, 其中空调在商业建筑耗电量中占据最高比例。同时, 中国目前的人均空凋制冷量仍远低于美国、日本和韩国, 还具有很大的上升空间<sup>[15]</sup>, 拥有巨大的调节潜力。此外, 空调系统需求响应可以利用建筑的热储能特点, 在调控过程中保证用户室内温度的舒适需求, 对用户的生产和生活影响较小<sup>[16-17]</sup>。

本文针对商业建筑空调系统参与城市电网负荷调控的研究, 展示了典型商业建筑空调系统单体模型和聚合模型, 概述了商业建筑空调系统的调控潜力评估方法与控制技术, 对比分析了国内

**收稿日期:** 2022-09-26; **修回日期:** 2023-06-08。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52007200); 澳门特别行政区科学技术发展基金资助项目(0011/2022/AGJ)。

外典型商业建筑空调系统示范工程，并针对目前的发展现状提出了建议与展望。

## 1 典型商业建筑空调系统建模方法

典型商业建筑空调系统建模方法主要包括基于热交换的建筑模型、基于等效热参数 (equivalent thermal parameters, ETP) 的负荷模型、灰箱热力模型等，通常是为了反映空调系统能耗、制冷/热量与室温的时变关系。除了典型商业建筑空调系统的单体模型，还可以通过蒙特卡洛抽样、自组织映射神经网络等方法建立大规模空调负荷集群的聚合模型。

### 1.1 基于热交换的建筑模型

拥有空调系统的商业建筑可以被视为一种具有热量储存能力的整体，以热量的形式存储电能，从而参与电网的负荷调控。建筑物内外环境的热交换关系如图 1 所示，建筑内的热量来源主要包括太阳辐射、室内外空气交换、墙体热传导、内部产热等；建筑内的冷量来源主要是空调系统，根据能量守恒定理，拥有空调系统的建筑热量变化等于建筑所获得的热量与空调的制冷/制热量之差。表示模型参数关系的公式为

$$\frac{dT_i}{dt} = \alpha(T_o - T_i) + \beta - \delta Q \quad (1)$$

式中： $T_i$ 为室内温度； $T_o$ 为室外环境温度； $Q$ 为空调制冷制热量； $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$ 分别为基于建筑设定的常数。

这种模型计算简单快速，但关于建筑的热力学参数可能需要基于经验进行设定，无法保证准确。

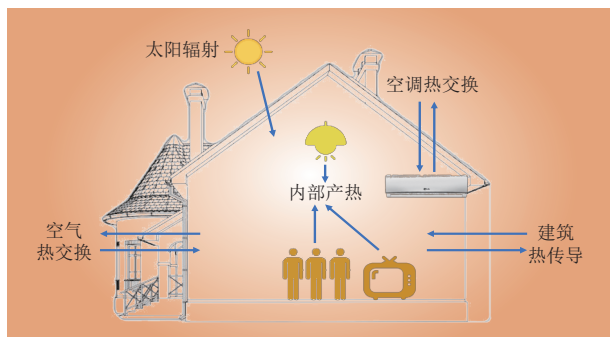


图 1 基于热交换的建筑模型  
Fig. 1 Thermal model of the building

### 1.2 ETP 负荷模型

ETP 模型将室内外环境的热交换等效替换成电路的能量流动，用电阻、电容来替代建筑热交换中的墙体热传导率、空气热质量、制冷量等因素<sup>[18]</sup>。模型中各项参数可以准确量化，模型精确度也有一定保证。一种二阶 ETP 模型如图 2 所示，模型公式为

$$\begin{cases} \frac{dT_a}{dt} = \frac{1}{C_a} [T_m H_m - (U_a + H_m) T_a(t) + Q_a + T_o U_o] \\ \frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{C_m} [H_m (T_a(t) - T_m(t)) + Q_m] \end{cases} \quad (2)$$

式中： $T_a$ 为室内温度； $T_m$ 为由家具和建筑材料决定的建筑内部质量温度； $U_o$ 为建筑外部的导热率； $H_m$ 为室内空气与固体材料的导热率； $C_a$ 为空气热质量； $C_m$ 为建材热质量； $Q_a$ 为制冷/制热量； $Q_m$ 为流入建筑内部固体材料的热量。

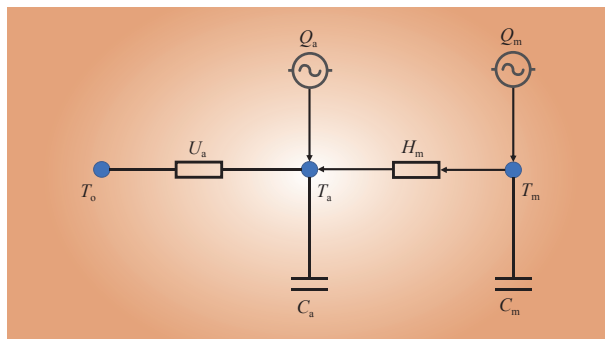


图 2 二阶 ETP 负荷模型  
Fig. 2 The second-order ETP model

二阶 ETP 模型描述了热量的变化规律，这种模型忽略了空气与建筑材料导热率的差异，从而一定程度上降低了计算难度。如果再忽略室内固体材料和室内空气的热质量差，则可得到一阶 ETP 模型如图 3 所示，该模型的参数关系公式为

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{R_i C_a} (T_o - T_i) - \frac{Q_a}{C_a} \quad (3)$$

式中： $R_i$ 为等效传热阻抗。

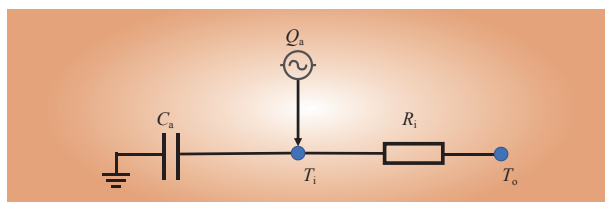


图 3 一阶 ETP 负荷模型  
Fig. 3 The first-order ETP model



文献 [19] 使用二阶 ETP 模型对新型室内智能恒温系统进行了模拟，帮助其确定环境温度与空调耗能的关系，提高了恒温系统精度，实验结果表明相比传统的恒温系统，这种新型恒温系统能够节能 11.5%。文献 [20] 提出了一种动态需求响应控制器并用于调整空调系统的设定温度，其中采用了 ETP 模型对室内温度进行估计，使控制器做出对应的操作。最终实验结果表明在气候最寒冷的一月份，空调系统的用电量减少了 12%，电力成本降低了 29%。在最炎热的八月份，空调系统用电量降低了 29%，电力成本降低了 31%。

### 1.3 灰箱热力模型

灰箱热力模型也可以视为一种进阶的 ETP 模型，如图 4 所示。模型主要涉及 4 个节点：室内实体、室内环境、围护结构和室外环境。灰箱热力模型整合了建筑热响应的物理原理和数据驱动优化技术，通过对智能家居能源管理系统与气象台采集到的数据进行训练，可以更准确地对需求响应过程中空调温度设定值调节程度进行预测。

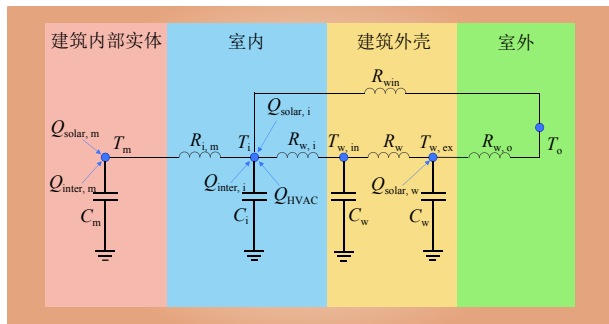


图 4 灰箱热力模型  
Fig. 4 Grey box thermal model

文献 [21] 通过建立灰箱热力模型，研究了香港民宅负荷的响应潜力，通过考虑香港的实际气候与大部分住宅建筑采用轻质墙体，即没有隔热材料的情况下，将外墙考虑为 1 个热阻和 2 个相等的热容。研究表明这种热模型既能反映空调房间的基本热动力学，又具有结构简单的特点。在实地测试中，模型预测温度与实际测量结果的均方差可低至 0.28 °C，能够有效降低居民的能源成本。此外，公用事业公司可以利用灰箱热力模型进行大规模的需求响应预测，并据此制定相应的激励政策，协助电网公司开展负荷调控。文献 [22] 提出了一种基于灰箱模型的负荷预测方法，在提

取建筑负荷的季节特征后利用灰箱模型对动态负荷的行为进行预测。

### 1.4 大规模聚合建模

当对单个空调建筑进行建模后，可以通过蒙特卡罗方法、自组织映射神经网络的  $k$  均值聚类等方法对单体空调系统模型进行聚合。例如，文献 [18] 利用蒙特卡罗方法对二阶 ETP 模型聚合计算，得到大规模空调参与需求响应前的基线负荷，并通过大量仿真证明，这种方法可以有效地对大规模空调系统进行管理，从而提供调频削峰的服务。文献 [23] 仿真计算了 75 万台空调系统的运行情况，通过直接负荷控制来改变空调的设定温度，从而进行负荷调控协助电网削峰填谷。文献 [24] 提出了一种基于大规模空调聚合的微电网调控策略，具体如图 5 所示，研究了光伏系统与储能系统下负荷的灵活调度优化，仿真实验表明此方法可以有效协助电网降低峰谷差。

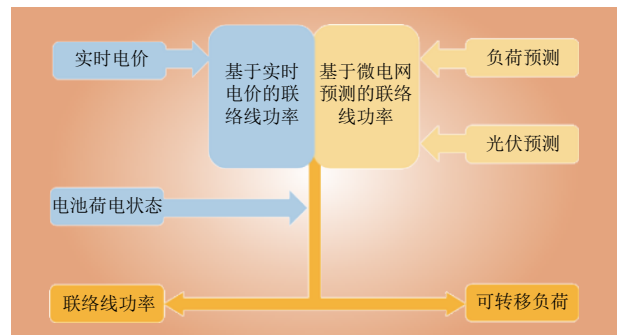


图 5 微电网灵活负荷调控方法  
Fig. 5 Flexible load regulation method in microgrids

此外，文献 [25] 利用自组织映射神经网络无监督、高效率的特性，对大规模用户的多种负荷类型进行识别并分类聚合，建立了一种负荷预测模型，从而实现了电力价格变化下的大规模用户响应预测，帮助制定需求响应调控策略以降低用电成本。文献 [26] 利用偏微分方程描述了一定温度范围内负荷数量在单位时间的变化，建立了一阶 ETP 的负荷聚合模型，并以这种偏微分方程模型为基础，设计了一种针对空调系统的需求响应控制器。实验表明这种控制器具有良好的鲁棒性，在系统含高比例波动性风力发电的条件下可以达到良好的节能效果。

### 1.5 基于大型商业建筑的综合模型

大型商业建筑的空调系统大多使用中央空调

系统。中央空调系统的结构相比单体空调更加复杂。以基于水冷的中央空调为例，主要可以分为冷水机组、一次水泵、二次水泵、风机盘管，其中冷水机组是电力消耗的主要部分，因此对中央空调冷水机组的负荷调控可以迅速降低建筑的耗电量<sup>[27]</sup>。但是如果只简单的切断冷水机组负荷会导致空调系统的冷水分配不均问题，建筑内部分区域的温度可能会超出可接受范围，同时空调系统其他设备的功耗也会受到很大影响，存在影响设备使用寿命的可能。因此需要更复杂全面的一种模型来辅助需求响应决策。在文献<sup>[27]</sup>提出的一种调控方案中综合了3种模型，热舒适度牺牲决定模型、建筑制冷需求预测模型、负荷决定模型。热舒适度牺牲决定模型用于得到用户在需求响应过程中愿意接受的建筑室内温度上升量。用户的接受度与电力公司给出的激励量呈正相关。当用户接受令室内温度上升的条件后，建筑制冷需求预测模型用于计算当前情况所需要的空调制冷量，即

$$\Delta Q_{\text{dem}}^k = \Delta Q_{\text{dis}}^k + C_{\text{in}}(dT_{\text{in}}/dt) M_{\text{air}} \quad (4)$$

式中： $\Delta Q_{\text{dem}}^k$ 为在 $k$ 时刻商业建筑需求的制冷量； $\Delta Q_{\text{dis}}^k$ 为因为建筑热质量散失的制冷量，其可由文献<sup>[28]</sup>提出的热储能模型计算得到； $C_{\text{in}}$ 为空气比热容； $dT_{\text{in}}/dt$ 为需求响应过程中室内温度的上升速率； $M_{\text{air}}$ 为室内的空气总质量。

负荷决定模型对中央空调系统中冷水机组、一次水泵、二次水泵、风机盘管4个部分分别建模，基于建筑制冷需求预测模型输出的结果和几种设备各自的运作方式分别计算所需要的负荷量。在基于这种模型的实验中，商业建筑可以削减34%的负荷量，同时维持室内温度保持在可接受的范围。

表1列举了前文所述的几种需求响应策略，并根据它们各自的特点做出了对比。

## 2 空调系统调控潜力评估方法

### 2.1 基于模型的调控潜力评估

商业建筑空调系统调控潜力评估有助于发掘潜在的用户，对提高负荷响应的规模、制定合理的负荷响应激励方案意义重大。然而，商业建筑空调系统的调控潜力除了受到物理条件的影响，

表 1 商业建筑空调系统参与需求响应建模方法对比  
Table 1 Comparison of modelling methods of commercial buildings for demand response

控制方法	结构复杂度	隐私性	精确度
基于热交换的建筑模型	计算便捷结构简单	要明确室内热源信息，隐私保护度低	参数为估计值，精确度较低
ETP负荷模型	复杂度随阶数上升	主要关注空调的供冷量和建筑参数，隐私保护度适中	参数制定标准比较明确，精确度随阶数上升
灰箱热力模型	参数考虑和计算步骤多，复杂度较高	需要采集智能家居管理系统数据，隐私保护度不高	模型设计全面，精确度高
大规模聚合建模	要整合大量单体模型，复杂度高	不考虑单体用户的具体信息，隐私保护度高	精确度高
基于大型商业建筑的综合模型	需要多层模型，复杂度高	需要设备具体数据，隐私保护度低	精确度高

也受到用户自身的价格偏好、舒适度、数据隐私等限制，以及外界环境、生活习惯等不确定因素的影响。文献<sup>[29]</sup>通过建立一种恒温控制负载（thermostatically controlled load, TCL）系统模型，如图6所示，对消费者行为和需求响应过程进行描述，在优化用户满意度与需求响应调节效果的同时，提高了空调系统调控潜力的评估精度。文献<sup>[30]</sup>通过智能电表每小时测得的数据，利用隐藏马尔可夫模型对热环境和空调负荷进行建模，得到了用户热负荷曲线并实现了可调控潜力评估。文献<sup>[31]</sup>基于马尔可夫模型和美国采暖、制冷与空调工程师学会标准<sup>[32]</sup>，提出了用户舒适度约束的负荷调控潜力评估方法。

文献<sup>[33]</sup>通过聚类方法得到一个离散的状态空间，使用隐藏马尔可夫方法将供冷供暖的部分从房屋整体中分离，实现了建筑负荷分解，提高了负荷调控潜力评估的准确度。文献<sup>[34]</sup>设计了如图7所示的一套评估负荷调控潜力的方案，并对中国江苏、美国德克萨斯州奥斯汀、美国西部马萨诸塞州等发达省市进行了试点研究。通过使用智能电表和温度传感器对能耗和温度数据进行了相同时间尺度的计量，将记录的数据按冬季、夏季、春秋季节分类，并采用 $k$ 均值聚类方法区分如工作日和非工作日中空调的开闭情况。基于获取的空调负荷数据，利用二阶ETP模型和参数辨识算法，评估得到单个建筑的负荷调控潜力，并利用区间潮流或仿射潮流方法得到了区域负荷调

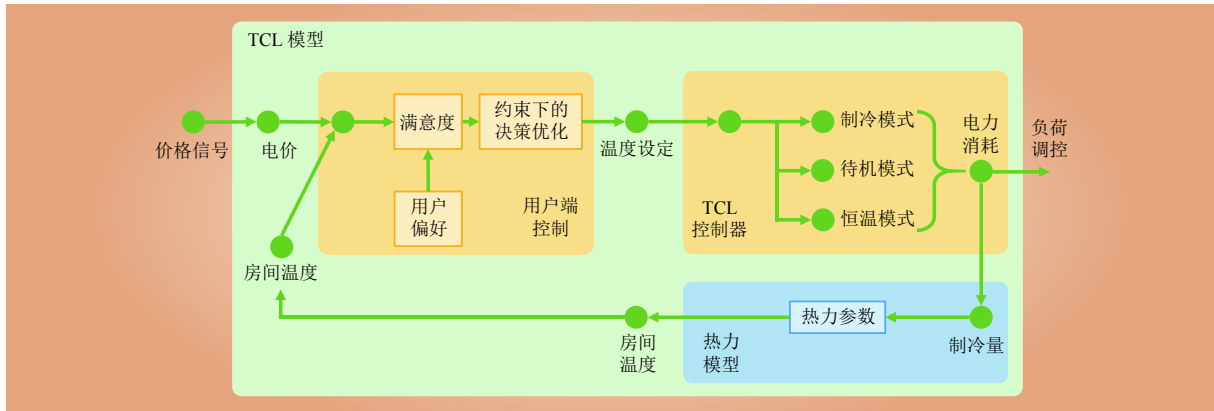


图 6 恒温控制负载系统模型与控制架构

Fig. 6 Modelling and control of thermostatically controlled load

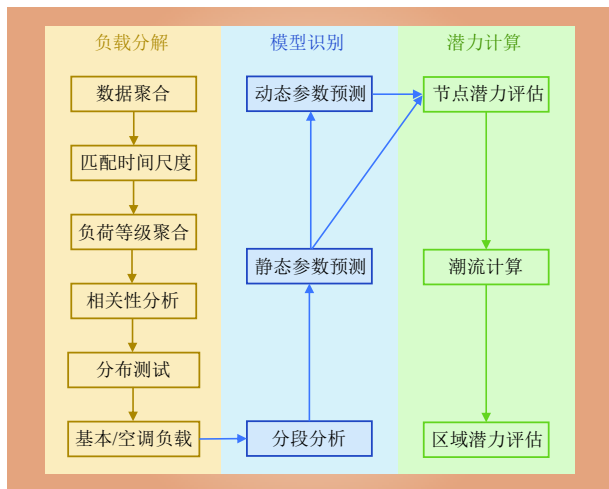


图 7 负荷调控潜力评估流程

Fig. 7 Load regulation potential evaluating process

控潜力的评估结果。

文献 [35] 设计了一种基于建筑热质量和制冷设备模型优化的需求响应潜力预测方法。通过 EnergyPlus 软件建立大型商业办公建筑的热模型，采用粒子群优化算法得到了空调制冷系统中各设备流程对建筑温度和能耗的影响。通过设定的舒适温度界限后模拟出了空调系统整体和系统下的冷却塔、冷水机组、组合式空调箱、水泵在保持室内舒适温度的情况下所能降低的能耗，并通过优化算法得到了最佳控制策略。这种预测方法被应用到休斯顿某大型商业建筑中，并在维持舒适温度的情况下减少了 23%~47% 的能耗需求。

## 2.2 基于数据的调控潜力评估

文献 [36] 对欧洲地区多种行业的需求响应潜力进行了评估。通过各地多行业实际的用电数据

与典型负荷特征模型估计了灵活可调负荷的装机量。并通过气候数据估计了多地的供冷、供暖需求，得到了欧洲多个国家多种行业类型的需求响应潜力预测结果。同时关注了不同行业的地理位置分布和其可以进行需求响应的的时间特征，完善了对地区范围内需求响应潜力预测的全面性研究。通过对预测结果的分析，肯定了商业建筑空调系统在需求响应中的时间灵活性和可调资源量，拥有良好的潜力。

文献 [37] 采集能源密集型企业一天中几个不同时段的最大负荷值、最低负荷值、负荷中位值等负荷指标，通过聚类方法构建了企业的负荷特征数据库，建立了一种不同能耗等级企业的需求响应潜力指标，可用于描述企业对于电价的敏感度和需求响应潜力。文献 [38] 利用电力信息采集系统和大数据挖掘技术对河南 17 个主要行业的需求响应潜力进行了评估。在确立企业的典型负荷特征数据后，得到该企业的可调负荷量和需求响应周期，在考虑企业用电规模的基础上对区域整体和区域内的需求响应目标客户进行了筛选。

## 3 商业建筑空调系统的控制方法

### 3.1 直接负荷控制

直接负荷控制的开关控制允许管理侧利用通信和终端操控装置直接对用户的电器进行开闭操作，适用于时间尺度上较为细分的电网系统，比如居民住宅和小型工商业用户 [39]。文献 [23] 提出了一种面向大规模商业建筑空调系统的直接跟踪

负荷控制方法，如图 8 所示。利用典型夏季日负荷通过聚合建模计算得到预测的空调系统负荷曲线，用于面向空调集群的设定温度参考信号，基于此设计了一种自适应爬坡的负荷跟踪控制器，控制器的原理公式为

$$T_{\text{set}}(t) = T_{\text{set}}(t-1) + K\Delta e(t) \quad (5)$$

式中： $T_{\text{set}}(t)$ 为  $t$  时刻空调的设定温度； $K$ 为通过类似遗传算法等优化方法确定的预定参数； $\Delta e(t)$ 为通过空调实际功率计算产生的误差信号。

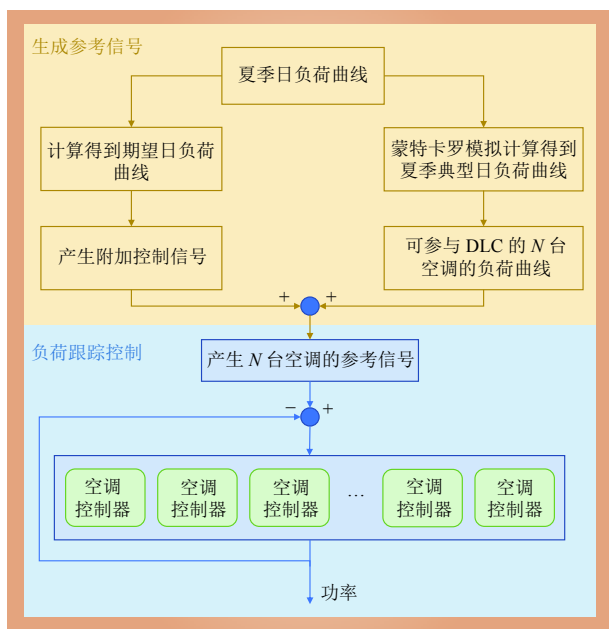


图 8 大规模建筑空调系统直接负荷控制

Fig. 8 Direct load control of large-scale air conditioners

### 3.2 周期性轮停控制

周期性轮停控制（duty cycling control, DCC）又被称为“轮停”，是对空调压缩机进行的周期性开闭控制。压缩机启动的时间在一个控制周期内所占比值被称为“占空比”，不同的占空比控制方案给用户提供了灵活多样的调控方式和补偿种类<sup>[40]</sup>。因此，与传统开闭控制相比，DCC 更能注重保证用户的舒适度。文献<sup>[41]</sup>提出了一种基于 DCC 的优化模型，以占空比作为决策变量，考虑了室温的变化，满足了用户舒适度的差异性需求，并根据建筑参数提出了空调开闭与室温的时变公式，即

$$T_{k,n}^{\text{in-on}}(t) = \frac{A_{k,n} - Q_k}{B_k} - \left[ \frac{A_{k,n} - Q_k}{B_k} - T_{k,n}^{\text{in-on}}(0) \right] e^{-\frac{B_k}{X_k}t} \quad (6)$$

$$T_{k,n}^{\text{in-off}}(t) = \frac{A_{k,n}}{B_k} - \frac{C_k/X_k}{a - B_k/X_k} \left( e^{-\frac{B_k}{X_k}t} - e^{-at} \right) - \left[ \frac{A_{k,n}}{B_k} - T_{k,n}^{\text{in-off}}(0) \right] e^{-\frac{B_k}{X_k}t} \quad (7)$$

式中： $T_{k,n}^{\text{in-on}}$ 和 $T_{k,n}^{\text{in-off}}$ 分别为开启或停机期间用户  $k$  在控制周期  $n$  中  $t$  时刻的室温； $Q_k$ 为空调的额定制冷量； $A_k$ 、 $B_k$ 、 $C_k$ 、 $X_k$ 、 $a$ 分别为用户  $k$  的建筑和空调参数。

文献<sup>[41]</sup>以上海某商业区的中央空调为例测试了该模型，分析发现 DCC 控制有优良的负荷调峰效果，并能满足多种舒适度要求。

### 3.3 交互式柔性控制

交互式柔性控制与直接负荷控制相比，更多地考虑了用户的用电需求。例如，文献<sup>[42]</sup>提出了一种云边协同的空调集群控制架构，多元用户可以设置异质性舒适温度需求，电网下发调控需求指令后并不需要对空调进行开关操作，通过调整压缩机运行频率来改变空调的运行功率，实现快速柔性灵活调节。文献<sup>[43]</sup>提出了一种面向商业建筑空调系统的双层控制架构，通过对空调系统电热模型的量化评估，设计了一种在线自适应分配方法去满足电网调控需求，在满足室内温度舒适区间要求下，保证了电网功率的调节精度。此外，文献<sup>[44]</sup>提出了一种能充分利用空调子系统的市场框架，如图 9 所示。通过建立双向的竞价拍卖机制，提出了商业建筑空调系统参与电力市场、天然气市场、冷气市场以及暖水市场的框架，通过算法迭代交互，得到期望的市场价格和ari 需求响应量。实验结果表明，所提出的交易市场机制对建筑室内温度的影响很小，同时达到了调

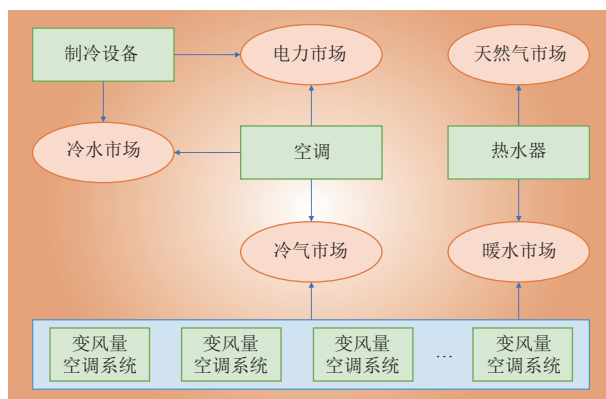


图 9 空调系统参与多能源市场

Fig. 9 Air conditioners participate in multi-market



峰、负荷转移和降低能耗的效果。文献 [45] 提出了一种针对虚拟电厂的两阶段优化调度方法，依据电力市场的日前预测，通过使用模型预测控制策略对日内的运行计划进行调整，有效提高了可再生能源设备的利用率，提高了经济效益。

### 3.4 考虑功率反弹的全流程控制

空调系统在参与需求响应时如果有计划外的设备参与到响应中，或者在需求响应结束后有大量设备重新启动并接入系统，在系统负荷恢复过程中有可能导致系统的负荷峰值提升到高于平时的水平，这种现象被称为需求响应反弹 [46]。这种现象会对需求响应效果造成负面影响，并有可能造成严重的电力系统故障。在早期的研究中，对系统中部分负荷进行随机启停被当做一种解决需求响应反弹的方法 [47]，文献 [48] 将蓄电池和热水器作为储能设备，设计了一种调控策略，有效地缓解了需求响应反弹。文献 [49] 提出了一种针对空调系统的最优化调度策略，这种调控策略将系统中的空调分成若干组进行顺序控制。在需求响应过程中，一组空调产生的需求响应反弹被视为下一组空调的需求响应容量，通过对多组空调进行调度缓解每一组空调产生的反弹效应。文献 [50] 将电能、天然气等多种能源作为可调度资源，设计了一种基于多能源的综合需求响应策略。通过建立多能源热动力模型，研究了多能源耗能与室温的关系。在需求响应结束阶段，调度其他能源对室内温度进行调整，避免了大量空调负载接入系统造成的电网压力，缓解了系统的需求响应反弹现象。文献 [43] 针对中央空调调节电力系统设计了一种定量评估方法和两层协调控制方案。通过中央空调电热模型得到离散化的中央空调电热运行特性，通过自适应控制算法进行了大规模中央空调的聚合控制。实验表明，这种控制方法能快速地实现电网所需的需求响应调控效果，同时能协调资源的合理调度，缓解 95% 以上的功率反弹。

本文概述的几种控制方法在控制难度、敏捷性等方面各有特点，具体在表 2 中做出了对比。

## 4 商业建筑空调系统典型示范

随着商业建筑空调系统参与城市电网负荷调控技术的发展，空调系统调控从理论研究逐渐进

表 2 商业建筑空调系统参与需求响应控制方法对比  
Table 2 Comparison of control methods of commercial buildings for demand response

控制方式	控制难度	敏捷性	可靠性	灵活性
直接负荷控制	管理侧直接发送指令，难度较低	设备直接接收指令，敏捷性高	控制逻辑明确，可靠性高	进行开闭控制，灵活性不高
周期性轮停控制	策略复杂，难度较高	设备直接接收指令，敏捷性高	控制逻辑明确，可靠性高	控制策略多样，灵活性高
交互式柔性控制	算法复杂，难度高	直接调整空调压缩机，敏捷性高	由控制端统一发送策略，可靠性高	依据电力市场制定策略，灵活性高
考虑功率反弹的全流程控制	需制定顺序控制策略，难度高	需分多个步骤完成调整，敏捷性适中	能避免功率反弹现象，可靠性高	能利用多能源系统分多次步骤调整，灵活性高

入示范应用阶段，尤其是在部分较早展开需求响应研究、拥有较为成熟的自动需求响应控制技术的国家和地区。本文以中国、美国、澳大利亚为例，分析展示了商业建筑空调系统的典型示范项目。

2014 年 7 月，上海设立针对大型商业建筑的需求响应试点，建筑超过 80% 的部分有空调系统覆盖，系统包括 2 台 504 kW 的冷水机和 1 台 314 kW 的冷水机，通过对空调系统的开闭控制实现需求响应。在预测的需求响应时间发生前，2 台 504 kW 的冷水机组对建筑进行预冷；当需求响应发生时，关闭其中 1 台 504 kW 的机组，启动 314 kW 的机组。实验结果表明，该建筑可以通过需求响应有效降低耗电量，并能维持室内的舒适温度。在实行了每度电补贴 2 元的激励情况下，该商业建筑一天中获得了 1580 元的补贴，且电费较平时降低了 2528 元 [51]。2020 年，上海黄浦区开展了需求响应示范项目，通过将商业建筑空调系统集群等效为虚拟电厂，参与电网调控。该项目共包含 300 栋建筑，利用强化学习技术，调节空调系统出回水温度，降低了 38.4% 负荷峰谷差 [52]。

美国某需求响应研究中心从 2003 年开始，进行了数年的商业建筑空调系统实地测试，测试中使用了全局温度调节策略（global temperature adjustment, GTA），允许控制端通过人机界面（human machine interface, HMI）和能源管理控制系统（electrical monitoring and control system,



EMCS) 调节整个建筑的温度设定值<sup>[53]</sup>。测试结果表明, 在需求响应发生的 3 h~6 h 中, 空调系统的峰值需求平均减少了约 8%, 其中最高时可减少 56%。此外, 美国加州在 2006 年也开展了需求响应测试项目, 除了利用 GTA 技术, 还加入了风机变频限制的调控策略, 实现了控制端基于电力价格调整整栋建筑的温度。在电价高峰时刻前将温度设定提高, 高峰到达时再次提高温度, 产生了显著的负荷削减效果<sup>[54]</sup>。

澳大利亚的空调负荷在夏季高峰占比高, 空调系统被作为商业建筑需求响应的参与主体, 并在多地开展了试点项目。澳大利亚某能源公司自 2017 年起在新南威士州进行了一系列工商业需求响应试点项目, 对多种商业建筑的空调系统进行负荷调控。在 2020 年 1 月 23 日, 新南威士州多地遭受极端高温天气、多场森林大火、风暴、泥雨等灾害, 各地出现用电压力上升, 造成政策冲突、通信失败、用户不配合等问题, 导致响应效果未达预期。事后该能源公司以此结果作为参考, 对相关地区进行了备用能源升级措施。

## 5 结语

随着城市中波动性新能源的增加, 电网面临着负荷峰谷差增大, 系统不稳定等问题。依赖传统发电机组通过调节出力以维持系统稳定运行的方式能效较低, 可调节资源不充足。商业建筑空调系统作为城市电网总负荷的重要部分, 可以作为调节资源参与电网调控。而且由于建筑拥有热储能特点, 空调系统可以在参与电网调控的过程中保证用户室内温度的舒适需求, 拥有巨大的调控潜力。本文对需求响应的概念与类型进行了详细介绍, 描述了不同的建模、评估、控制方法与典型案例。

虽然国内外已经开展了大量商业建筑空调系统调控研究, 但是仍然存在部分技术局限。首先, 针对商业建筑的建模仍然较为粗糙, 商业建筑空间较大, 当前的模型很难考虑室内不同位置的温度差异; 其次, 调控潜力评估方法以模型和物理参数为主, 尚未实现与实体建筑的实时互动评估。因此, 可以基于数字孪生技术对在线可调节容量评估策略进行进一步研究, 设计针对不同类

型空调系统的柔性灵活控制技术。此外, 目前大部分研究是集中式控制架构, 响应速度较慢, 亟须探索分布式、混合式等控制架构, 提高系统响应速度。中国目前对于需求响应的实践项目还相对较少, 须进一步开发更完善的模型和算法, 扩大运行试点范围, 确立符合国情的需求响应商业化运作模式, 挖掘商业建筑在高比例新能源电力系统中的调节价值。

## 参考文献:

- [1] 王林钰, 张富强, 龚一蕊, 等. 中国跨能源品种可调节资源潜力与开发利用情景 [J]. 中国电力, 2023, 56(6): 1-10.  
WANG Linyu, ZHANG Fuqiang, GONG Yichun, *et al.* Potential and utilization scenarios for regulation resources across energy varieties in China[J]. *Electric Power*, 2023, 56(6): 1-10.
- [2] 王金丽, 李丰胜, 解芳, 等. “双碳”战略背景下新型配电系统技术标准体系 [J]. 中国电力, 2023, 56(5): 22-31.  
WANG Jinli, LI Fengsheng, XIE Fang, *et al.* Research on technical standard system of new distribution system under double-carbon strategy[J]. *Electric Power*, 2023, 56(5): 22-31.
- [3] 宋永华, 林今, 胡泽春, 等. 能源局域网: 物理架构、运行模式与市场机制 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5776-5787, 6020.  
SONG Yonghua, LIN Jin, HU Zechun, *et al.* Energy distribution network: infrastructure, operation mode and market mechanism[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(21): 5776-5787, 6020.
- [4] 王成山, 刘梦璇, 陆宁. 采用居民温控负荷控制的微网联络线功率波动平滑方法 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 36-43, 8.  
WANG Chengshan, LIU Mengxuan, LU Ning. A tie-line power smoothing method for microgrid using residential thermostatically-controlled loads[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(25): 36-43, 8.
- [5] 代贤忠, 韩新阳, 靳晓凌. 需求响应参与电力平衡的成本效益评估方法 [J]. 中国电力, 2022, 55(10): 170-177.  
DAI Xianzhong, HAN Xinyang, JIN Xiaoling. Cost-benefit assessment method for demand response participating in power balance[J]. *Electric Power*, 2022, 55(10): 170-177.
- [6] 丁一, 惠红勋, 林振智, 等. 面向电力需求侧主动响应的商业模式及市场框架设计 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 2-9, 189.  
DING Yi, HUI Hongxun, LIN Zhenzhi, *et al.* Design of business model and market framework oriented to active demand response of power demand side[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(14): 2-9, 189.

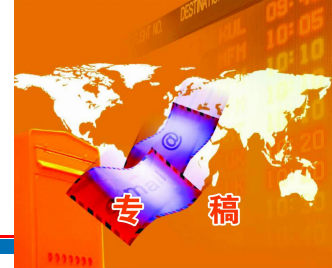




- [7] 薛禹胜, 罗运虎, 李碧君, 等. 关于可中断负荷参与系统备用的评述 [J]. *电力系统自动化*, 2007, 31(10): 1–6.  
XUE Yusheng, LUO Yunhu, LI Bijun, *et al.* A review of interruptible load participating in system reserve[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(10): 1–6.
- [8] 丁一, 吴华华, 惠红勋, 等. 适合需求侧主动响应的中国电力市场机制的思考与建议 [J]. *南方电网技术*, 2016, 10(3): 24–31, 3.  
DING Yi, WU Huahua, HUI Hongxun, *et al.* Analysis and related suggestions on power market mechanism of demand side response in China[J]. *Southern Power System Technology*, 2016, 10(3): 24–31, 3.
- [9] 陈灏, 田琳, 盛剑胜, 等. 考虑风险规避和需求响应的电力市场可再生能源综合交易决策研究 [J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(1): 27–34.  
CHEN Hao, TIAN Lin, SHENG Jiansheng, *et al.* Research on comprehensive trading decision of renewable energy in power market considering the risk aversion and demand response[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(1): 27–34.
- [10] ALBADI M H, EL-SAADANY E F. A summary of demand response in electricity markets[J]. *Electric Power Systems Research*, 2008, 78(11): 1989–1996.
- [11] 党东升, 韩松, 周珏, 等. 需求响应参与系统调峰研究综述 [J]. *电力需求侧管理*, 2017, 19(5): 13–17.  
DANG Dongsheng, HAN Song, ZHOU Jue, *et al.* Review of demand response participating in power system peak shifting[J]. *Power Demand Side Management*, 2017, 19(5): 13–17.
- [12] 张钦, 王锡凡, 王建学, 等. 电力市场下需求响应研究综述 [J]. *电力系统自动化*, 2008, 32(3): 97–106.  
ZHANG Qin, WANG Xifan, WANG Jianxue, *et al.* Survey of demand response research in deregulated electricity markets[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(3): 97–106.
- [13] 陈爱博, 王存旭. 需求响应对电力市场的效益影响研究综述 [J]. *沈阳工程学院学报(自然科学版)*, 2019, 15(4): 338–342.  
CHEN Aibo, WANG Cunxu. Review on the effect of demand response on power market efficiency[J]. *Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science)*, 2019, 15(4): 338–342.
- [14] 谭鸣隼, 王玲玲, 蒋传文, 等. 考虑负荷聚合商调节潜力的需求响应双层优化模型 [J]. *中国电力*, 2022, 55(10): 32–44.  
TAN Mingcong, WANG Lingling, JIANG Chuanwen, *et al.* Bi-level optimization model of demand response considering regulation potential of load aggregator[J]. *Electric Power*, 2022, 55(10): 32–44.
- [15] The Tsinghua University Building Energy Research Center. The future of cooling in China delivering on action plans for sustainable air conditioning[R]. 2019.
- [16] 杨梓俊, 丁小叶, 陆晓, 等. 面向需求响应的变频空调负荷建模与运行控制 [J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(15): 132–140.  
YANG Zijun, DING Xiaoye, LU Xiao, *et al.* Inverter air conditioner load modeling and operational control for demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(15): 132–140.
- [17] HUI H X, DING Y, LIU W D, *et al.* Operating reserve evaluation of aggregated air conditioners[J]. *Applied Energy*, 2017, 196: 218–228.
- [18] ZHANG W, LIAN J M, CHANG C Y, *et al.* Aggregated modeling and control of air conditioning loads for demand response[C]//2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition. National Harbor, MD, USA. IEEE, 2014: 1.
- [19] LI Y L, DE LA REE J, GONG Y F. The smart thermostat of HVAC systems based on PMV-PPD model for energy efficiency and demand response[C]//2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing, China. IEEE, 2018: 1–6.
- [20] YOON J H, BALDICK R, NOVOSELAC A. Dynamic demand response controller based on real-time retail price for residential buildings[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(1): 121–129.
- [21] HU M M, XIAO F. Investigation of the demand response potentials of residential air conditioners using grey-box room thermal model[J]. *Energy Procedia*, 2017, 105: 2759–2765.
- [22] GARULLI A, PAOLETTI S, VICINO A. Models and techniques for electric load forecasting in the presence of demand response[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(3): 1087–1097.
- [23] 王婷, 刘潇, 武媚, 等. 大规模空调负荷聚合建模及跟踪控制方案研究 [J]. *电力需求侧管理*, 2020, 22(6): 51–56.  
WANG Ting, LIU Xiao, WU Mei, *et al.* Research on load aggregation modeling and tracking control scheme for large scale air conditioning[J]. *Power Demand Side Management*, 2020, 22(6): 51–56.
- [24] 漆淘懿, 惠红勋, 徐立中, 等. 基于 GridLAB-D 的微电网广义需求响应建模与控制 [J]. *供用电*, 2020, 37(7): 3–10.  
QI Taoyi, HUI Hongxun, XU Lizhong, *et al.* Modeling and control of generalized demand response in micro-grids based on GridLAB-D[J]. *Distribution & Utilization*, 2020, 37(7): 3–10.
- [25] VALERO S, ORTIZ M, SENABRE C, *et al.* Methods for customer and demand response policies selection in new electricity markets[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2007, 1(1): 104.
- [26] BASHASH S, FATHY H K. Modeling and control of aggregate air conditioning loads for robust renewable power management[J]. *IEEE*



- Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1318–1327.
- [27] TANG R, WANG S W, YAN C C. A direct load control strategy of centralized air-conditioning systems for building fast demand response to urgent requests of smart grids[J]. *Automation in Construction*, 2018, 87: 74–83.
- [28] XUE X, WANG S W, SUN Y J, *et al.* An interactive building power demand management strategy for facilitating smart grid optimization[J]. *Applied Energy*, 2014, 116: 297–310.
- [29] XIE D J, HUI H X, DING Y, *et al.* Operating reserve capacity evaluation of aggregated heterogeneous TCLs with price signals[J]. *Applied Energy*, 2018, 216: 338–347.
- [30] ULMEANU A P, BARBU V S, TANASIEV V, *et al.* Hidden Markov models revealing the household thermal profiling from smart meter data[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 154: 127–140.
- [31] ERICKSON V L, CERPA A E. Occupancy based demand response HVAC control strategy[C]//Proceedings of the 2nd ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Building. Zurich, Switzerland. New York: ACM, 2010: 7–12.
- [32] DE DEAR R J, BRAGER G S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55[J]. *Energy and Buildings*, 2002, 34(6): 549–561.
- [33] ALBERT A, RAJAGOPAL R. Thermal profiling of residential energy use[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(2): 602–611.
- [34] QI N, CHENG L, XU H L, *et al.* Smart meter data-driven evaluation of operational demand response potential of residential air conditioning loads[J]. *Applied Energy*, 2020, 279: 115708.
- [35] OLIVIERI S J, HENZE G P, CORBIN C D, *et al.* Evaluation of commercial building demand response potential using optimal short-term curtailment of heating, ventilation, and air-conditioning loads[J]. *Journal of Building Performance Simulation*, 2014, 7(2): 100–118.
- [36] GILS H C. Assessment of the theoretical demand response potential in Europe[J]. *Energy*, 2014, 67: 1–18.
- [37] XIANG R, LUO M, ZHOU S L, *et al.* Demand response potential assessment for energy-intensive enterprises based on clustering with dimensionality reduction[C]//2022 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Changsha, China. IEEE, 2022: 83–86.
- [38] LIU J H, YANG M, DENG F Z, *et al.* Evaluation of adjustable load potential of industrial and commercial users based on power demand response[J]. *IOP Conference Series:Earth and Environmental Science*, 2021, 769(4): 042058.
- [39] ALBADI M H, EL-SAADANY E F. Demand response in electricity markets: an overview[C]//2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa, FL, USA. IEEE, 2007: 1–5.
- [40] 程林, 万宇翔, 张放, 等. 基于负荷聚合商业业务的空调服务运作模式及控制策略 [J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(18): 8–16.
- CHENG Lin, WAN Yuxiang, ZHANG Fang, *et al.* Operation mode and control strategy for air-conditioning service based on business of load aggregator[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(18): 8–16.
- [41] 辛洁晴, 吴亮. 商务楼中央空调周期性暂停分档控制策略 [J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(5): 49–54.
- XIN Jieqing, WU Liang. Hierarchical strategies for duty cycling control of air conditioners in business buildings[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(5): 49–54.
- [42] HUI H X, DING Y, SONG Y H, *et al.* Modeling and control of flexible loads for frequency regulation services considering compensation of communication latency and detection error[J]. *Applied Energy*, 2019, 250: 161–174.
- [43] XIE K, HUI H X, DING Y, *et al.* Modeling and control of central air conditionings for providing regulation services for power systems[J]. *Applied Energy*, 2022, 315: 119035.
- [44] HAO H, CORBIN C D, KALSI K, *et al.* Transactive control of commercial buildings for demand response[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 32(1): 774–783.
- [45] 赵力航, 常伟光, 杨敏, 等. 电力市场环境 下虚拟电厂两阶段能量经济优化调度 [J]. *中国电力*, 2022, 55(10): 14–22.
- ZHAO Lihang, CHANG Weiguang, YANG Min, *et al.* Two-stage energy economic optimal dispatch of virtual power plant in deregulated electricity market[J]. *Electric Power*, 2022, 55(10): 14–22.
- [46] WAI C H, BEAUDIN M, ZAREIPOUR H, *et al.* Cooling devices in demand response: a comparison of control methods[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(1): 249–260.
- [47] ABIRI-JAHROMI A, BOUFFARD F. Contingency-type reserve leveraged through aggregated thermostatically-controlled loads-part I: characterization and control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(3): 1972–1980.
- [48] HALBE S, CHOWDHURY B, ABBAS A. Mitigating rebound effect of demand response using battery energy storage and electric water heaters[C]//2019 IEEE 16th International Conference on Smart Cities: Improving Quality of Life Using ICT & IoT and AI (HONET-



- ICT). Charlotte, NC, USA. IEEE, 2019: 95–99.
- [49] CUI W Q, DING Y, HUI H X, *et al.* Evaluation and sequential dispatch of operating reserve provided by air conditioners considering lead-lag rebound effect[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(6): 6935–6950.
- [50] ZHOU X M, SANG M S, BAO M L, *et al.* Exploiting integrated demand response for operating reserve provision considering rebound effects[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 15151–15162.
- [51] LI W, XU P, YE Y. Case study of demand response in a large commercial building—a pilot program in Shanghai[C]//9th International Conference on Indoor Air Quality Ventilation & Energy Conservation Buildings. 2018: 1–6.
- [52] CHEN T, CUI Q S, GAO C W, *et al.* Optimal demand response strategy of commercial building-based virtual power plant using reinforcement learning[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2021, 15(16): 2309–2318.
- [53] SHAN K, WANG S W, YAN C C, *et al.* Building demand response and control methods for smart grids: a review[J]. *Science and Technology for the Built Environment*, 2016, 22(6): 692–704.
- [54] 孔赞, 潘棋, 王蓓蓓, 等. 空调自动需求响应控制策略在美国商业建筑中的应用案例分析 [J]. *电力需求侧管理*, 2017, 19(1): 60–64.
- KONG Yun, PAN Qi, WANG Beibei *et al.* The performance analysis of automated demand response control strategies for air conditionings adopted in American commercial buildings[J]. *Power Demand Side Management*, 2017, 19(1): 60–64.

#### 作者简介:

吴桐 (1996—), 男, 硕士研究生, 从事电力系统负荷调控技术研究, E-mail: MC14944@um.edu.mo;

惠红勋 (1992—), 男, 通信作者, 博士, 研究助理教授, 从事电力系统需求侧资源优化与控制方法研究, E-mail: hongxunhui@um.edu.mo;

张洪财 (1990—), 男, 博士, 助理教授, 从事综合能源系统运行控制、交通电气化研究, E-mail: hc Zhang@um.edu.mo.

(责任编辑 杨彪)

## Review of Commercial Air Conditioners for Participating in Urban Grid Regulation

WU Tong, HUI Hongxun, ZHANG Hongcai

(State Key Laboratory of Internet of Things in Smart City (University of Macau), Macao 999078, China)

**Abstract:** The key to achieving the goals of “carbon peak and carbon neutrality” lies in the economic and efficient operation of urban power grids. However, factors such as the increase of volatile new energy and the widening of load peak-valley differences bring challenges to urban power grids. Traditional power generation units maintain the stable operation of the power system by frequently adjusting their output, which is not only inefficient but also faces a shortage of adjustable resources. As an important part of the total electricity consumption of the urban grids, the air conditioning system of commercial buildings has the potential to act as an adjustable resource involved in grid regulation. Simultaneously, with the thermal storage characteristics of buildings, it can carry out regulation while meeting the comfort needs of indoor temperature for users, demonstrating its immense potential. In order to better tap into the regulatory capacity of the air conditioning system in commercial buildings, the case of both the single and aggregated models of typical commercial building air conditioning systems is shown, and the methods for assessing the potential of these systems for regulation and their control technologies are outlined. A comparative analysis of typical commercial building air conditioning system demonstration projects both at home and abroad is made, and some suggestions and prospects based on the current development situation are also provided.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.52007200), Science and Technology Development Fund of the Macao Special Administrative Region (No.0011/2022/AGJ).

**Keywords:** commercial buildings; air conditioner systems; demand response; load control; peak reduction