

中央空调负荷直接控制策略及其可调度潜力评估

朱宇超,王建学,曹晓宇

(西安交通大学 电气工程学院 陕西省智能电网重点实验室,陕西 西安 710049)

摘要:如何挖掘和评估电力系统负荷的可调度潜力是当前国内外关注的热点。选择城市负荷中比重较大的空调负荷进行研究。在用户室内温度模型的基础上,研究了空调周期性间断运行的特性;建立了考虑类周期性温度变化、中央空调用户的舒适度需求以及响应电网调度需求等多种核心影响因素的优化模型,提出了分时段的直接负荷控制策略;从削峰填谷、负荷管理、节电潜力3个层面归纳得出了一种适用于所提模型的负荷可调度潜力评估方法;构建算例对空调负荷实施优化控制、应用可调度潜力评估方法,验证所提策略与方法的有效性和可行性。

关键词:中央空调负荷;需求侧管理;用户侧技术;直接负荷控制;可调度潜力;模型

中图分类号:TM 73

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.05.032

0 引言

智能电网环境下,如何从负荷侧挖掘可调度潜力从而增加电力系统的柔性是当前国内外关注的热点^[1],本文选择对空调负荷进行研究。空调降温负荷已成为城市高峰负荷的重要组成部分^[2]。据报道,2015年江苏电网夏季空调负荷最高达27 000 MW,接近当年最高负荷的1/3。空调负荷的高速增长给系统带来了峰谷差过大、调节困难等问题。同时,在智能电网环境下,新能源渗透率逐年提高、发电侧随机性不断增大^[3],如果能快速调节空调负荷,将可以提高新能源的消纳能力,提高电网运行的稳定性和经济性^[4-5]。

空调负荷的优化调度技术主要通过直接负荷控制DLC(Direct Load Control)实现^[6]。空调负荷的DLC是指调度侧根据电网侧的需求,依托智能电网技术对用户的空调负荷进行直接管理控制。一般通过对空调主机、循环系统、风机设备的循环开启,设定温度和其他参数,达到负荷管理的目的。通过对空调负荷实施DLC,不仅可以达到削减高峰负荷、降低用户费用、控制负荷形状的目的,也能够在节约电力电量的同时避免断电造成的温度不适。据报道,2016年南京市率先实施了中央空调DLC改造,共计200多户商业用户参与,达到了较好的效果。

目前,对空调DLC优化调度问题的研究集中于降低峰荷、降低用电量、降低用户成本等方面^[7]。文献[8]建立了包含多策略的商业楼宇空调负荷控制系统,实现了用电监测、控制策略生成和执行、调控

效果评价,论证了空调负荷控制技术的可行性和削峰效果;文献[9]通过建立中央空调集群降负荷潜力模型,合理调度激励型需求响应项目中的空调负荷;文献[10]提出了一种新型的双向实时优化控制方法,通过双向通信能够迅速进行负荷分配和控制,以达到跟随调度需求进行负荷削减的目的;文献[11]研究了DLC下的集群空调负荷在消纳风电功率中体现的虚拟储能特性和相应的储能容量。因此,商业中央空调负荷的DLC优化调度,将充分挖掘中央空调负荷的可调度潜力、改善系统负荷率、提高强随机性清洁能源的消纳能力、为系统提供辅助服务、丰富电力系统的运行方式。

空调负荷DLC主要有2种方式:启停控制和温度控制^[12]。对于商业中央空调,尤其是未装有温度控制设备的中央空调而言,启停控制是一种有效的控制方式。国内外学者针对中央空调间断运行方式的直接启停控制优化调度控制策略已经开展了相关的研究^[13-16]。文献[17]提出了一种空调负荷调控双层优化策略,以最小化负荷调度成本和最大化负荷聚合商利益为目标实现空调启停决策;文献[18]提出了具有周期性特点的中央空调优化控制策略,证明了启停控制在满足用户热舒适度的前提下削峰节电的效果;文献[19]对实施中央空调轮停策略的技术方案、实施成效等方面进行了分析;文献[20]对单个用户群的空调周期性启停的控制周期进行了研究,提出应对居民用户和商业用户实施不同的控制方案。

启停控制策略大多基于以下2个设定。①在某固定的空调温度设定值的基础上进行空调启停控制,通过附加温度的波动范围,使温度在更大范围内周期性波动,实现空调间歇工作,进而达到削峰、节能的目的。然而固定的设定温度有较大的局限性,可能对用户舒适度产生影响;室温周期性波动的设定使空调的控制方式较为单一,而室温实际上可以

收稿日期:2017-12-22;修回日期:2018-03-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777155);陕西省重点研发计划重点产业创新链项目(2017ZDCXL-GY-02-03)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777155) and Shaanxi Key Industry Innovation Chain Project of Key Research Project(2017ZDCXL-GY-02-03)

存在多种非周期性变化方式,对应的控制方式具有更大的灵活性。②以中央空调主机的启/停为决策变量,设定占空比为固定值。这种控制方式相对单一,对数量大、差异性大的空调负荷难以实现统一控制,实践难度较大;在市场环境下,空调负荷作为快速需求响应资源,随时响应调度需求、灵活调整自身负荷水平的能力在这种设定下得不到充分体现。针对以上问题,本文在启停控制的基础上辅以温度控制,提供多个空调设定温度点、允许波动范围灵活调整的温度方案,以相对节能效果最佳为控制目标,以占空比和部分用户的温度方案选择为决策变量进行建模。对中央空调的 2 种典型运行方式,尤其是类周期性温度变化的运行方式进行研究;考虑类周期性温度变化、用户参与需求侧管理 DSM (Demand Side Management) 的意愿、服从电网侧调度需求等因素建立空调优化控制综合模型,进行可调度潜力的挖掘;从削峰填谷、负荷管理、节电潜力 3 个层面给出了适用于本文模型的空调负荷可调度潜力评价指标,进行可调度潜力的评估。

1 中央空调周期性间断运行方式

1.1 中央空调系统温度模型的建立

商业用户如商场、写字楼、宾馆酒店,通常使用半集中式中央空调系统,由主机(冷热源系统)和末端系统(空气调节系统)共同构成^[21]。制冷压缩机作为制冷源和制冷系统的核心,是主要的耗电设备,提供室内降温所需要全部冷量。为了简便起见,本文讨论的空调机组的用电量只包括制冷压缩机的用电量。

为了研究中央空调的用电规律,首先需要研究中央空调控制作用下的室内温度变化规律。本文采用等效热参数 ETP (Equivalent Thermal Parameter) 模型进行模拟,其温度表达式可简化为^[22]:

$$T_{in}^{off}(m) = T_{out} - (T_{out} - T_{in}^{off}(0)) e^{-\frac{m}{RC}} \quad (1)$$

$$T_{in}^{on}(m) = T_{out} - RP\eta_{COP} - (T_{out} - RP\eta_{COP} - T_{in}^{on}(0)) e^{-\frac{m}{RC}} \quad (2)$$

其中, $T_{in}^{on}(m)$ 和 $T_{in}^{off}(m)$ 分别为 m 时刻空调制冷、停机时的室内温度; T_{out} 为室外温度; C 和 R 分别为房间的热容、热阻参数; P 为空调耗电功率; η_{COP} 为空调制冷能效比。

设 T_{max} 、 T_{min} 分别为空调设定温度的上限和下限,推导得到停机期时间长度 τ_{off} 和制冷期时间长度 τ_{on} 的表达式分别如下:

$$\tau_{off} = RC \ln \frac{T_{out} - T_{min}}{T_{out} - T_{max}} \quad (3)$$

$$\tau_{on} = RC \ln \frac{RP\eta_{COP} + T_{max} - T_{out}}{RP\eta_{COP} + T_{min} - T_{out}} \quad (4)$$

假设对空调设定温度值 T_{set} , 允许温度偏差为 δ , 则在空调正常工作时,室内温度会在 $[T_{set} - \delta, T_{set} + \delta]$ 范围内波动,并且呈现周期性,如图 1 所示。

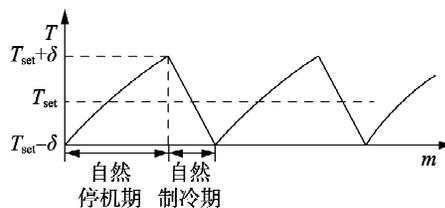


图 1 空调自发控制下的室内温度变化规律

Fig.1 Indoor temperature variation under air-conditioning spontaneous control

由图 1 可知,当制冷机处于开机状态时,温度不断降低直到最低温度,此时制冷机关闭;然后温度不断上升直到最高温度,此时制冷机重新开启,如此往复。在不受外界强制启停机干预的情况下,制冷机的启停机全部由空调自控系统根据温度和实时制冷机启/停的状态进行主动控制。此时,室内的温度呈现小范围周期性波动的特点。

1.2 中央空调间断运行方式

为了挖掘空调负荷的可调度潜力,通常开展 DLC 对空调进行启停控制,使空调以间断方式运行。扩大空调控制区域的温度波动范围,在不对用户的热舒适度产生过大影响的情况下,减少用电量(不适用于温度敏感负荷)。

考虑到有大量的空调负荷群参与 DLC,为了便于统一合同签订与管理,负荷聚合商提供几种固定的温度方案(室温最大波动范围,包括温度的上限和下限)。对参与同一温度方案的所有负荷,负荷聚合商的周期性控制动作是:周期初始时关停制冷机,经过一段停机时间后,重新开启制冷机,如此往复。为了降低电网操作的复杂程度、提高 DLC 实施的可靠性,本文为同一温度方案的所有负荷设置相同的停机时长。这样,在负荷聚合商的统一动作下,外界环境温度、受控端热工参量、设备电气参量等的不同使得各空调个体控制下的室温呈现不同的变化曲线,可归纳为周期性和类周期性温度变化,对应 2 种典型空调间断运行方式^[20],分别如图 2 和图 3 所示。

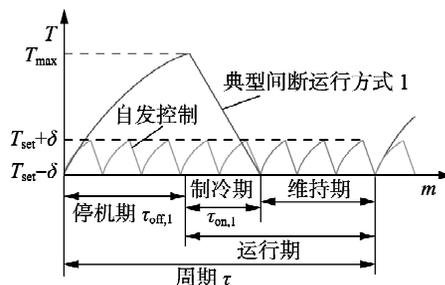


图 2 典型空调间断运行方式 1 下的温度变化

Fig.2 Temperature of air-conditioning in typical intermittent operation mode 1

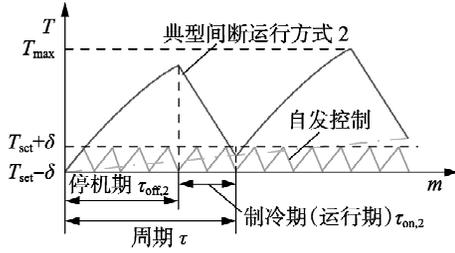


图 3 典型空调间断运行方式 2 下的温度变化
Fig.3 Temperature of air-conditioning in typical intermittent operation mode 2

由图 2、3 可看出,间断运行方式 1 和 2 的区别在于运行期。对于间断运行方式 1 而言,制冷期结束时室温降至最低,主机进入由空调自发控制的周期性启停模式,温度在小范围内呈周期性波动,本文称之为“周期性温度变化”;对于间断运行方式 2 而言,其不存在维持期,周期期末室温并未降至最低允许温度,每一周期内的室温都比前一周期对应时刻的温度增加一个固定值,温度不是沿时间轴而是沿图 3 中点划线呈周期性变化,本文称之为“类周期性温度变化”。

虽然间断运行方式 2 的室温平均水平较运行方式 1 偏高,但由于空调负荷一般只针对电力尖峰^[17](一般 1~3 h)进行需求响应,本文认为这段时间内间断运行方式 2 的温度变化情况对用户舒适度的影响是有限的,所以允许空调以间断运行方式 2 运行。由于负荷聚合商需要统筹的空调负荷数量多、差异性大,综合利用空调的 2 种运行方式可提高运行方式的灵活性,更好地挖掘空调负荷群的峰时可调度潜力。针对更长时间尺度的控制则需要设计另外的控制策略。

当空调的运行周期和停机期的时长给定时,由式(4)计算由停机期末的温度降低至最低允许温度 T_{\min} 所需的时间,如果这段时间与停机期时长之和小于整个周期,则可判断用户以间断运行方式 1 运行;如果不小于整个周期,则判断用户以间断运行方式 2 运行。

一般而言,大、中型商业用户的制冷压缩机主要采用螺杆式压缩机和分体式离心式压缩机,也有部分采用活塞式压缩机^[23]。螺杆式或活塞式压缩机的启/停对空调的磨损影响不大,对寿命几乎没有影响。本文对采用螺杆式或活塞式压缩机的商用中央空调系统进行研究,认为此类中央空调系统在满足最小启/停机时间约束时启停机的磨损很小,并忽略不计。

1.3 中央空调 DLC 策略及其实施框架

负荷聚合商在对中央空调实施周期性 DLC 的调度策略时,为了满足用户参与 DSM 的愿意,一般设立多种温度方案供用户选择(用户将获得与其参与的温度方案对应的经济补贴)。文献[24]虽

然设定了 3 种温度方案,但各方案中空调的设定温度值相同,在一定程度上限制了用户的热舒适度和负荷可调度潜力的挖掘。为此,本文设定的多种温度方案的设定温度、温度控制范围均有所不同。

本文的控制策略以启停控制为主,辅以温度控制。为了减少电网控制的难度、提高策略的可行性,对温度方案相同的用户采用统一的占空比(停机时间)。由于不同时段室外温度变化较大,本文认为用户温度方案的选择情况及对应的占空比可变。控制时段结束时,若温度方案发生改变,则对空调温度设定值进行一次调整。

需要说明的是,由于本文控制策略具有室温变化过程缓慢、人体热舒适度范围模糊等特点,智能电网通信技术可以满足控制需求,且随着智能电网高性能、高安全可靠的网络通信体系的不断完善,本文所提电网调度中心-负荷聚合商-用户群的分层控制模式将具有更好的实施效果。

2 基于单一间断运行方式的基础 DLC 模型

假设空调只以间断运行方式 1 运行,负荷聚合商以占空比和温度方案为核心决策变量实现空调的 DLC,以下简称为单一间断运行方式基础模型。

以空调实施 DLC 策略相比自发控制运行节省的电能为目标函数(固定设定温度)。目标函数的表达式如下:

$$\max \sum_i \sum_d x_{i,i,d} K P_i [\tau r_{i,i,d} - \tau_{i,i,d}^{\text{on}} - (\tau - \tau_{i,i,d}^{\text{on}} - \tau_{i,i,d}^{\text{off}}) r_{i,i,d}] \quad (5)$$

其中,下标 t, i, d 分别表示第 t 个控制时段、第 i 个用户、第 d 种温度方案; K 为每个时段包含的控制周期数; P_i 为空调功率; $x_{i,i,d}$ 为决策变量, $x_{i,i,d} = 1$ 表示第 i 个用户参与第 d 种温度方案,反之表示不参与; τ 、 $\tau_{i,i,d}^{\text{on}}$ 、 $\tau_{i,i,d}^{\text{off}}$ 分别为周期、制冷期和停机期的时长; $r_{i,i,d}$ 为自然占空比。

化简目标函数可得:

$$\max \sum_i \sum_d x_{i,i,d} K P_i [(\tau_{i,i,d}^{\text{on}} + \tau_{i,i,d}^{\text{off}}) r_{i,i,d} - \tau_{i,i,d}^{\text{on}}] \quad (6)$$

在维持期空调的运行方式与自发控制运行时相同,无节能效果,故只需计算停机期和制冷期节约的电能。

约束条件如下。

空调最小启/停机时间约束为:

$$\begin{cases} \tau_{i,i,d}^{\text{on}} \geq \tau_{\min}^{\text{on}} \\ \tau_{i,i,d}^{\text{off}} \geq \tau_{\min}^{\text{off}} \end{cases} \quad (7)$$

其中, τ_{\min}^{on} 为最小开机时间; τ_{\min}^{off} 为最小停机时间。

设定温度 $T_{\text{set}} = T_{\min,d}$,自发控制运行时的温度范围为 $[T_{\min,d}, T_{\min,d} + 2\delta]$ 。结合式(3)、(4),求得自然占空比(即自然制冷期占总周期的比值)为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{t,i,d}^{\text{off},0} = RC \ln \frac{T_{\text{out},t} - T_{\text{min},d}}{T_{\text{out},t} - T_{\text{min},d} - 2\delta} \\ \tau_{t,i,d}^{\text{on},0} = RC \ln \frac{P_i R_i \eta_{\text{Copt}} + T_{\text{min},d} + 2\delta - T_{\text{out},t}}{P_i R_i \eta_{\text{Copt}} + T_{\text{min},d} - T_{\text{out},t}} \\ r_{t,i,d} = \frac{\tau_{t,i,d}^{\text{on},0}}{\tau_{t,i,d}^{\text{on},0} + \tau_{t,i,d}^{\text{off},0}} \end{array} \right. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T(m) \leq T_{\text{max},d} \\ m = (K-1)\tau + \tau_{t,i,d}^{\text{off}} \end{array} \right. \quad (15)$$

通常占空比 $R_{t,d}$ 为运行期占总周期的比值。但对于本文研究的直接控制中央空调负荷而言,从图2可以看出,在运行期内空调主机未必都处于开机状态。因此,定义等效占空比 $R'_{t,d}$ 用以表征周期内空调开机时间占比,有:

$$R'_{t,d} = \frac{1}{\tau} [\tau_{t,i,d}^{\text{on}} + r_{t,i,d}(\tau - \tau_{t,i,d}^{\text{off}} - \tau_{t,i,d}^{\text{on}})] \quad (9)$$

同一温度方案选用相同的占空比和停机期。

$$\tau_{t,i,d}^{\text{off}} = \tau(1 - R_{t,d}) \quad (10)$$

最高温度均出现在每个控制周期的停机期末,且不超过该温度方案允许的最高温度,即:

$$T(\tau_{t,i,d}^{\text{off}}) \leq T_{\text{max},d} \quad (11)$$

制冷时间等于温降时间,初始温度等于停机期末的温度,即:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{t,i,d}^{\text{on}} = R_i C_i \ln \frac{P_i R_i \eta_{\text{Copt}} + T_{t,i,d}^{\text{on}}(0) - T_{\text{out},t}}{P_i R_i \eta_{\text{Copt}} + T_{\text{min},d} - T_{\text{out},t}} \\ T_{t,i,d}^{\text{on}}(0) = T(\tau_{t,i,d}^{\text{off}}) \end{array} \right. \quad (12)$$

控制周期长度约束为:

$$\tau_{t,i,d}^{\text{on}} + \tau_{t,i,d}^{\text{off}} \leq \tau \quad (13)$$

决策变量范围约束为:

$$R_{t,d} \in (0,1), x_{t,i,d} \in \{0,1\}, \sum_{d \in D} x_{t,i,d} \leq 1 \quad (14)$$

其中, D 为所有温控方案的集合。

式(8)给出了目标函数中自然占空比的表达式,并表明了温度方案对自然占空比的影响;而式(11)、(12)为本文模型的核心约束,在考虑温度连续性的基础上,对最高温度进行限制,并根据温度变化表达式(2)求出具体制冷时间表达式。式(12)包含最低温度限制约束。

3 基于多种核心影响因素的模型改进

3.1 类周期性温度变化分析

在基础模型的基础上,进一步考虑温度的类周期性变化,以更贴近实际地刻画不同用户的温度变化和用电规律,挖掘空调负荷的可调度潜力。考虑在一个周期结束时,部分用户的温度没有恢复到设定的最低温度(不存在维持期)的情况。

不论是间断运行方式1或方式2,最高温度均可认为出现在最后一个控制周期的停机期末,即:

其中, $T(m)$ 为温度函数,是与时间 m 相关的不能突变的连续函数,每个控制周期的停机期初的温度都等于上一控制周期的制冷期末的温度,每一周期的制冷期初的温度都等于本周期的停机期末的温度。

若从初始温度 $T_{t,i,d}^{\text{on}}(0)$ 降到最低温度所需的时间 $\tau'_{t,i,d}$ 大于运行期长度 $\tau R_{t,d}$,则不存在维持期,可判断空调以间断运行方式2运行;反之,可判断空调以间断运行方式1运行。所以,制冷期 $\tau_{t,i,d}^{\text{on}}$ 的表达式如式(16)、(17)所示。

$$\tau_{t,i,d}^{\text{on}} = \min \{ \tau'_{t,i,d}, \tau R_{t,d} \} \quad (16)$$

$$\tau'_{t,i,d} = R_i C_i \ln \frac{P_i R_i \eta_{\text{Copt}} + T_{t,i,d}^{\text{on}}(0) - T_{\text{out},t}}{P_i R_i \eta_{\text{Copt}} + T_{\text{min},d} - T_{\text{out},t}} \quad (17)$$

3.2 考虑用户参与 DSM 意愿的影响

负荷聚合商在进行统一资源整合时,需考虑用户参与 DSM 意愿的影响。为了满足部分用户可能存在的特殊温度舒适度需求,在式(6)中加入代表用户意愿的变量 $y_{t,i,d}$,在满足用户意愿的前提下最大化节电效果:

$$\max \sum_i \sum_d x_{t,i,d} y_{t,i,d} K P_i [(\tau_{t,i,d}^{\text{on}} + \tau_{t,i,d}^{\text{off}}) r_{t,i,d} - \tau_{t,i,d}^{\text{on}}] \quad (18)$$

其中, $y_{t,i,d} = 1$ 表示第 i 个用户在第 t 个时段愿意参与第 d 种温度方案,反之表示不愿意。用户意愿限制温度方案的选择情况:若第 i 个用户愿意服从优化结果而不指定温度方案 ($y_{t,i,d} = 1$),则不限制 $x_{t,i,d}$;反之,若用户不愿参与第 d 种温度方案 ($y_{t,i,d} = 0$),则 $x_{t,i,d} = 0$ 。即:

$$x_{t,i,d} = x_{t,i,d} y_{t,i,d} \quad (19)$$

3.3 考虑电网侧的调度需求

为了配合电网调度需求,将特定时段的负荷限制在调度所需的范围之内,在模型中添加调度需求约束,使空调负荷作为一种可快速调节的灵活需求响应资源,在一定范围之内配合电网的需求达到负荷控制的目的。

第 t 个时段空调平均负荷 P_d 的表达式为:

$$P_d = \frac{1}{\tau} \sum_i \sum_d y_{t,i,d} K \{ \tau_{t,i,d}^{\text{on}} P_i + [\tau - (\tau_{t,i,d}^{\text{on}} + \tau_{t,i,d}^{\text{off}})] r_{t,i,d} P_i \} \quad (20)$$

同一时段每个控制周期的用电量一致,故只考虑单个控制周期的用电量情况, $\tau_{t,i,d}^{\text{on}} P_i$ 为制冷期的耗电量; $[\tau - (\tau_{t,i,d}^{\text{on}} + \tau_{t,i,d}^{\text{off}})] r_{t,i,d} P_i$ 为维持期的耗电量。

在第 t 个时段,电网发送调度需求,总负荷在

$P_{\min,d} \sim P_{\max,d}$ 之间,调度需求约束为:

$$\begin{cases} P_{\min,d} \leq P_d \leq P_{\max,d} \\ P_d = \frac{1}{\tau} \sum_t \sum_d x_{t,i,d} K \{ \tau_{t,i,d}^{\text{on}} P_i + \\ [\tau - (\tau_{t,i,d}^{\text{on}} + \tau_{t,i,d}^{\text{off}})] r_{t,i,d} P_i \} \end{cases} \quad (21)$$

考虑用户参与 DSM 的意愿,调度需求约束更新为:

$$\begin{cases} P_{\min,d} \leq P_d \leq P_{\max,d} \\ P_d = \frac{1}{\tau} \sum_t \sum_d x_{t,i,d} y_{t,i,d} K \{ \tau_{t,i,d}^{\text{on}} P_i + \\ [\tau - (\tau_{t,i,d}^{\text{on}} + \tau_{t,i,d}^{\text{off}})] r_{t,i,d} P_i \} \end{cases} \quad (22)$$

在上述重要影响因素分析和建模的基础上,可以得到综合改进模型。综合改进模型的目标函数为式(18),约束条件为式(7)、(11)–(17)、(19)、(21)、(22)。

本文所建立的模型为混合整数非线性模型。由于式(1)、(2)描述的室温指数变化程度较为缓慢,在式(15)、(17)中将温度的变化近似为一次线性变化^[18],从而对相关约束条件进行适当简化,并对式(16)中制冷期的分段函数做了一定的变形,调用 CPLEX 进行优化求解。

4 空调负荷可调度潜力评估方法

可调度潜力指可调度资源参与 DSM 的潜力,对其进行评估可为电网调度下发的激励补偿提供参考标准。本节从削峰填谷、负荷管理、节电潜力 3 个层面的效果出发,归纳并采用已有评价指标,得出一种适用于本文所提模型的负荷可调度潜力评估方法,该方法计算简单、易于直观理解,因而具有较强的实用性。

4.1 削峰填谷

削峰率是电网侧的重要参数,削峰有利于降低区域峰值负荷,进而减少发电机组和输配电网络的投资费用,提高供电安全性与可靠性。

削峰率定义如下^[25]:

$$\gamma_{\Delta P_{\max}} = \frac{P_{\max} - P'_{\max}}{P_{\max}} \quad (23)$$

其中, $\gamma_{\Delta P_{\max}}$ 为削峰率; P_{\max} 和 P'_{\max} 分别为峰荷时段修正前、后的最大功率。此外,如果认为同一个用户在峰荷时段对应的室外温度和温度方案保持不变,那么削峰率可用峰时段的节能率来表示。

4.2 最大可中断时间和负荷跟随

负荷控制的目标之一是进行负荷管理,因此需要计算最大可中断时间,并判断负荷跟随电网调度需求的能力。将所有用户所有控制时段的加权(以 $N_{t,d}/N$ 为权重)平均最大停机期定义为最大可中断

时间 τ_{\max} :

$$\tau_{\max} = \frac{\sum_t \sum_d N_{t,d} \tau (1 - R_{t,d})}{NM} \quad (24)$$

其中, $\tau(1 - R_{t,d})$ 、 $N_{t,d}$ 分别为第 t 个时段选择第 d 种温度方案的最大停机期与用户数量; N 为总用户数量; M 为总时段数。

采用实际负荷与调度需求之差的绝对值来衡量空调负荷的跟随效果。若满足式(25),则认为经本文所提模型优化控制后的空调负荷具有负荷跟随能力。

$$\frac{|P_d - P_{\text{real}}|}{\Delta P_{\max}} \leq 100\% \quad (25)$$

其中, P_d 为电网在某时段的调度需求; P_{real} 为实际负荷; ΔP_{\max} 为允许的最大跟随误差。

4.3 节电潜力

节电潜力是可调度潜力的辅助指标,可节约的电量资源越大,节能效果越显著。

全天的节电率^[18]定义如下:

$$\zeta_{\Delta E'_{t,i,d}} = \frac{\sum_t \sum_i (E_{t,i,d} - E'_{t,i,d})}{\sum_t \sum_i E_{t,i,d}} \quad (26)$$

$$E_{t,i,d} = x_{t,i,d} K \tau r_{t,i,d} P_i$$

其中, $E_{t,i,d}$ 为未采取任何直接控制手段,空调自发控制运行下(修正前)的用电量; $E'_{t,i,d}$ 为经上述多用户多温度方案分时段空调负荷控制模型后的用电量; $\zeta_{\Delta E'_{t,i,d}}$ 为基于上述模型产生的节电率。

由于用户电价可能实行峰谷电价,为了更好地考虑用户的利益,定义节省费用百分比 $\delta_{\Delta F}$ 对可调度潜力进行进一步描述^[26]。

$$\delta_{\Delta F} = \frac{\sum_t \sum_i \sum_d (E_{t,i,d} - E'_{t,i,d}) C_{\text{cost}}}{\sum_t \sum_i \sum_d E_{t,i,d} C_{\text{cost}}} \quad (27)$$

其中, C_{cost} 为第 t 个时段的电价

5 算例结果与分析

为了验证本文所提控制策略及可调度潜力评估方法的合理性,对夏季商业用户营业时间(09:00—21:00)内的 6 个时段分别进行模拟。假定经负荷聚合商聚合后有 6 类用户群参与 DLC 项目,每类用户群包含 100 个控制对象;用户与负荷聚合商的合同期内实施了 6 次 DLC,其控制时段互不连续。用户的建筑参数和空调参数见表 1;各时段的时间范围和室外平均温度和调度需求见表 2;允许功率偏差 ± 5 kW;分时电价情况见表 3。

表 1 用户的热力学参数

Table 1 Thermodynamic parameters of users

用户	热容/ (kW·h·°C ⁻¹)	热阻/ (C·kW ⁻¹)	功率/ kW	制冷能效比
1	0.16	5.60	250	2.70
2	0.17	5.46	220	1.20
3	0.19	5.76	500	3.13
4	0.16	5.36	400	2.00
5	0.19	6.00	350	2.70
6	0.18	5.56	230	1.10

表 2 各时段的时间范围、室外平均温度及调度需求

Table 2 Time range, average outdoor temperature and dispatch demand of each period

时段	时间范围	室外平均气温/°C	调度需求/kW
1	19:00—21:00	32	385
2	11:00—13:00	35	570
3	09:00—11:00	33	445
4	15:00—17:00	34	510
5	13:00—15:00	36	620
6	17:00—19:00	33	445

表 3 分时电价

Table 3 Time-of-use electricity price

	时段	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]
峰时段	07:00—11:00, 19:00—23:00	1.247 3
平时段	11:00—19:00	0.845 1
谷时段	23:00 至次日 07:00	0.443 0

特别地,在允许用户自主选择温度方案时,用户 1 指定参与特定的温度方案[23,25.5]°C,用户 6 指

定参与特定的温度方案[25.5,28]°C,其余用户选择服从电网侧的调度需求。

5.1 空调负荷的直接控制策略结果

空调负荷的直接控制策略主要由温度方案和占空比两部分构成,控制结果如表 4 所示。

从表 4 中可以看出,除了用户 1 和 6 指定了温度方案外,用户 2 由于容量小、能效不高、调节性能不强,其控制策略在各个控制时段都选择了固定的温度方案,且需要较长的制冷时间;用户 3—5 的空调调节性能较好,可以根据室外温度进行统筹调节,例如时段 5 的室外温度较高,这 3 类用户的控制策略可以选择各自合适的温度方案,等效占空比与其他时段相比较较大。

5.2 空调负荷的可调度潜力评估结果

将各个模型修正前和修正后的用电量和费用、节电率、节费率、最大可中断时间和削峰率等可调度潜力参数进行对比,对空调用户的可调度潜力进行评估,结果见表 5(表中“×”表示不具备负荷跟随能力,“√”表示具备负荷跟随能力)。

从表 5 中可以得到以下结论。

a. 计及类周期性温度变化的模型比基础模型有更高的削峰率、最大可中断时间、节电率、节费率等可调度潜力指标,可见考虑计及类周期性温度变化的运行方式能更好地刻画实际运行特性,挖掘空调负荷的可调度潜力。

表 4 综合改进模型下空调负荷的直接控制结果

Table 4 Direct control results of air-conditioning load under synthetic improved model

用户	最大温度范围/°C						等效占空比/%					
	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4	时段 5	时段 6	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4	时段 5	时段 6
1	[23,25.5]	[23,25.5]	[23,25.5]	[23,25.5]	[23,25.5]	[23,25.5]	20.93	29.21	23.72	26.48	31.98	23.72
2	[23,26]	[23,26]	[23,26]	[23,26]	[23,26]	[23,26]	48.04	68.38	55.05	61.81	74.88	55.05
3	[25,27.5]	[25,27.5]	[25,27.5]	[25,27.5]	[24,26.5]	[24,26.5]	6.22	9.91	8.73	8.73	11.09	8.73
4	[23,26]	[23,26]	[23,26]	[23,25.5]	[23,26]	[23,26]	18.23	25.79	20.76	23.27	28.23	20.76
5	[24,26.5]	[24,26.5]	[24,26.5]	[25,27.5]	[25,27.5]	[25,27.5]	11.83	17.52	11.83	15.66	17.56	11.83
6	[25.5,28]	[25.5,28]	[25.5,28]	[25.5,28]	[25.5,28]	[25.5,28]	33.27	55.57	41.03	48.45	62.42	41.03

表 5 可调度潜力评估结果

Table 5 Evaluation results of schedulable potential

模型	峰荷/kW		削峰量/ kW	削峰率/ %	用电量/(kW·h)		节电量/ (kW·h)	节电率/ %	电费/元		节省电 费/元	节费率/ %	最大可 中断时 间/min	负荷跟 随能力
	修正前	修正后			修正前	修正后			修正前	修正后				
基础模型	669.8	630.5	39.3	5.87	6 576.2	6 020.3	555.9	8.45	6 313.9	5 761.9	552.0	8.74	16.84	×
计及类周 期性温度 变化模型	678.8	609.5	69.3	10.21	6 594.2	5 746.7	847.5	12.85	6 329.1	5 495.5	833.6	13.17	17.67	×
计及用户 参与 DSM 意愿模型	667.9	608.4	59.5	8.91	6 542.1	5 806.8	735.3	11.24	6 283.3	5 558.7	724.5	11.53	16.64	×
计及电网 侧调度 需求模型	687.6	618.3	69.3	10.07	6 808.8	5 963.3	845.5	12.42	6 543.9	5 712.2	831.7	12.71	16.99	√
综合改进 模型	677.3	618.1	59.2	8.74	6 638.8	5 908.6	730.2	11.00	6 374.4	5 655.2	719.2	11.28	16.28	√

b. 对于计及用户参与 DSM 意愿的模型,其削峰率、最大可中断时间、节电率、节费率等可调度潜力指标均比计及类周期性温度变化的模型低,这是因为以牺牲部分控制效果为代价,优先满足了部分用户的舒适度需求,但此模型充分考虑了用户参与 DSM 的意愿。

c. 计及电网侧调度需求的模型的节电率和节费率均低于类周期性温度变化的模型,而削峰率、最大可中断时间相差不大。这说明计及电网侧调度需求的模型在电力高峰时有很好的削峰效果;在其他时段,可以很好地跟随调度需求(主要体现在适当增加非高峰时段负荷),在允许的误差范围内满足供电侧对平衡电力需求、快速改善负荷曲线形状的要求。

d. 分析可知:在考虑多种核心影响因素的情况下,改进综合模型下中央空调负荷的节电率、削峰率分别可达 11.00% 和 8.74%,节费率为 11.28%,最大可中断时间达 16.28 min,空调负荷具备跟随调度需求以达负荷控制目的的能力。

此外,室外温度、空调参数、建筑参数等因素的灵敏度分析见附录。

6 结论

本文提出的多用户多方案分时段空调负荷控制策略,包含 2 种间断运行方式,可满足用户侧需求、配合电网调度,并对空调负荷进行了可调度潜力评估,得出的研究结论如下:

a. 通过模型对比可知,考虑类周期性温度变化的间断运行方式能够取得更好的节电效果,用户参与 DSM 意愿可以得到满足和优化,修正后的空调负荷可以在一定范围内跟随调度需求,满足负荷控制的要求;

b. 考虑多种核心因素影响之后,综合改进模型可以实现节电率 11.00%、削峰率 8.74%、节省费用 11.28%、最大可中断时间达 16.28 min。

综上,依托“智能电网+”的思想,对用户侧的空调负荷进行 DLC,可有效地实现削峰节能、增加负荷的柔性,在分布式能源消纳、微网规划与运行、售电市场、实时电价等各个方面均具有广阔的应用前景。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 王锡凡,肖云鹏,王秀丽. 新形势下电力系统供需互动问题研究及分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5018-5028.
WANG Xifan, XIAO Yunpeng, WANG Xiuli. Study and analysis on supply-demand interaction of power systems under new circumstances [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5018-5028.
- [2] 王志成,辛洁晴,管国兵. 中央空调节电运行方案及其适用性分

析[J]. 电力自动化设备,2017,37(3):126-131.

WANG Zhicheng, XIN Jieqing, GUAN Guobing. Cost-saving operation scheme of central air conditioner and its applicability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 126-131.

- [3] 鞠平,秦川,黄桦,等. 面向智能电网的建模研究展望[J]. 电力系统自动化,2012,36(11):1-6.
JU Ping, QIN Chuan, HUANG Hua, et al. Research trends of power system modeling geared to smart grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 1-6.
- [4] LIU M, SHI Y. Model predictive control for thermostatically controlled appliances providing balancing service [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(6): 2082-2093.
- [5] SANANDAJI B M, HAO H, POOLLA K. Fast regulation service provision via aggregation of thermostatically controlled loads [C] // 2014 47th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). [S.l.]: IEEE, 2014: 2388-2397.
- [6] 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. A survey of demand response in electricity market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 97-106.
- [7] CALLAWAY D S, HISKENS I A. Achieving controllability of electric loads [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 184-199.
- [8] 李天阳,赵兴旺,肖文举. 面向峰谷平衡的商业楼宇空调负荷调控技术[J]. 电力系统自动化,2015,39(16):96-102.
LI Tianyang, ZHAO Xingwang, XIAO Wenju. Air conditioning load regulation technology for commercial buildings based on peak valley equilibrium [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 96-102.
- [9] 王蓓蓓,朱峰,嵇文路,等. 中央空调降负荷潜力建模及影响因素分析[J]. 电力系统自动化,2016,40(19):44-52.
WANG Beibei, ZHU Feng, JI Wenlu, et al. Modeling and analysis of the influence factors of central air conditioning load reduction [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19): 44-52.
- [10] YAO L, LU H R. A two-way direct control of central air-conditioning load via the internet [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 240-248.
- [11] 艾欣,赵阅群,周树鹏. 空调负荷直接负荷控制虚拟储能特性研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(6):1596-1603.
AI Xin, ZHAO Yuequn, ZHOU Shupeng. Study on virtual energy storage characteristics of air conditioning load direct load control [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1596-1603.
- [12] 张钦,王锡凡,别朝红,等. 电力市场下直接负荷控制决策模型[J]. 电力系统自动化,2010,34(9):23-28.
ZHANG Qin, WANG Xifan, BIE Chaohong, et al. Direct load control decision model in electricity market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 23-28.
- [13] NORDELL D E. Forced duty cycling of air conditioning units for load management [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 2(4): 1110-1116.
- [14] WU L, XIN J Q, WU D, et al. Grouping and grading strategies for duty cycling control of residential air conditioning [C] // International Conference on Power System Technology. Chengdu, China: IEEE, 2014: 1-7.
- [15] KARA E C, KOLTER Z, BERGES M, et al. A moving horizon state estimator in the control of thermostatically controlled loads for demand response [C] // IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2013: 253-258.

- [16] CHU C M, JONG T L, HUANG Y W. Mitigating DLC constraints of air-conditioning loads using a group-DLC method[C]//Power Engineering Society General Meeting. [S.l.]: IEEE, 2007: 1-6.
- [17] 高赐威, 李倩玉, 李扬. 基于 DLC 的空调负荷双层优化调度和控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1546-1555.
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Yang. Bilevel optimal scheduling and control strategy of air conditioning load based on DLC[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1546-1555.
- [18] 徐青山, 杨辰星, 颜庆国. 计及规模化空调热平衡惯性的电力负荷日前削峰策略[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 156-163.
XU Qingshan, YANG Chenxing, YAN Qingguo. Peak load and strategy on large scale air conditioning heat balance of inertia before [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 156-163.
- [19] 杜小瑾. 中央空调轮停技术在夏季缺电形势下的应用[D]. 南京: 东南大学, 2006.
DU Xiaojin. Application of central air conditioning wheel stop technology in summer power shortage situation[D]. Nanjing: Southeast China University, 2006.
- [20] 管国兵, 王志成, 辛洁晴, 等. 空调间歇性轮停最佳控制周期研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(12): 31-42.
GUAN Guobing, WANG Zhicheng, XIN Jieqing, et al. Study on optimal control cycle of intermittent wheel stop in air conditioning[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(12): 31-42.
- [21] 赵荣义, 范存养, 薛殿华. 空气调节[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 105-131.
- [22] 宋梦, 高赐威, 苏卫华. 面向需求响应应用的空调负荷建模及控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 158-167.
SONG Meng, GAO Ciwei, SU Weihua. Modeling and control of air conditioning load based on demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 158-167
- [23] 尚磊, 曾妍文, 王磊, 等. 2015 年度中国制冷行业发展分析报告压缩机市场发展分析[J]. 制冷技术, 2016, (增刊 1): 8-24.
SHANG Lei, ZENG Yanwen, WANG Lei, et al. China refrigeration industry development report 2015 [J]. Refrigeration Technology, 2016, (Supplement 1): 8-24.
- [24] 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. The control strategy of periodical pause in the central air conditioning of commercial building [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 49-54.
- [25] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网储能系统的多目标优化配置[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 46-52.
YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Multi-objective optimal placement of energy storage systems in an active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 46-52.
- [26] 沈百新. 海安县负荷特性与 DSM 潜力分析[D]. 南京: 东南大学, 2005.
SHEN Baixin. Load characteristic and DSM potential analysis in Haian [D]. Nanjing: Southeast China University, 2005.

作者简介:



朱宇超

朱宇超(1994—),女,江苏扬州人,硕士研究生,主要研究方向为电力市场与需求管理、微电网运行(**E-mail**: shannie@stu.xjtu.edu.cn);

王建学(1976—),男,重庆人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力市场与需求侧管理、电力系统规划与运行、新能源与分布式发电等(**E-mail**: jxwang@mail.xjtu.edu.cn);

曹晓宇(1990—),男,浙江温州人,博士研究生,主要研究方向为分布式发电微网的规划与运行(**E-mail**: cxyeven2013@stu.xjtu.edu.cn)。

Direct control strategy of central air-conditioning load and its schedulable potential evaluation

ZHU Yuchao, WANG Jianxue, CAO Xiaoyu

(Shaanxi Key Laboratory of Smart Grid, School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: How to exploit and evaluate the schedulable potential of power system load is a hot concern at home and abroad at present, so the air-conditioning load with larger proportion in the city load is studied. The cycling intermittent operation characteristics of the air-conditioning system are analyzed based on the customer's indoor temperature model. The optimal models are established considering various core influencing factors, i.e. quasi-periodic temperature change, comfort demand of customer, demand response to grid dispatch and so on, and the direct load control strategy of different periods is proposed. Then, an evaluation method of load schedulable potential applicable to the proposed model is summarized from three aspects of peak load shifting, load management and power saving potential. Finally, the optimal air-conditioning load control is conducted and the schedulable potential evaluation method is employed through a simulation example, and the validity and practicability of the proposed strategy and method are verified.

Key words: central air-conditioning load; demand side management; demand side technology; direct load control; schedulable potential; models

附录

为了说明本文所提模型和方法对一定范围内的室外温度参数、空调参数和建筑参数都有效，对重要参数的灵敏度进行分析。

(1) 室外温度的影响分析。

只改变室外温度进行模拟，其余参数设置与算例一致，结果如附表 1 所示。

附表 1 室外平均气温的影响

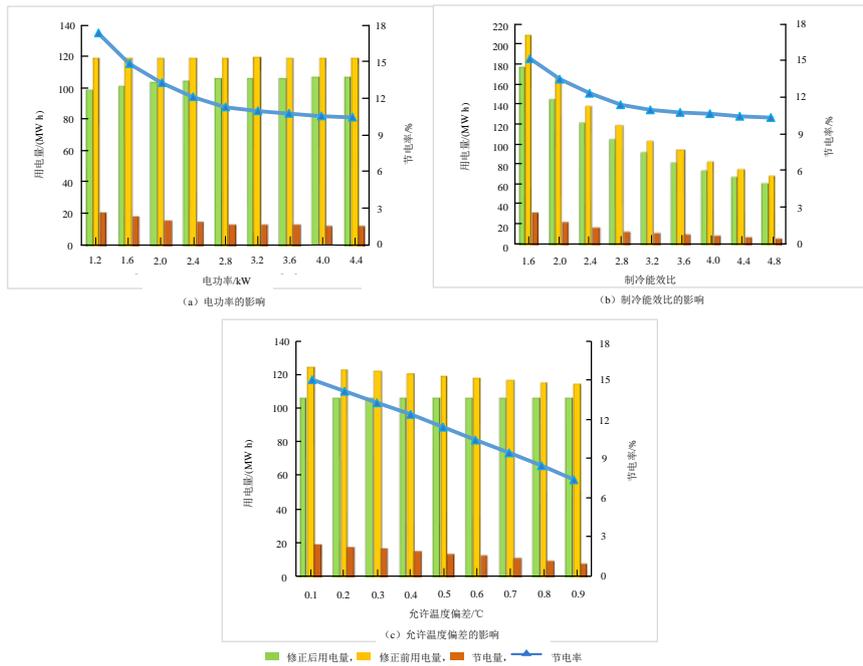
Table 1 Influence of average outdoor temperature

室外温度/℃	修正前用电量/(kW h)	修正后用电量/(kW h)	节电量/(kW h)	节电率/%
31	746.4	599.5	146.89	19.68
32	865.3	731.5	133.85	15.47
33	984.2	860.0	124.19	12.62
34	1103.1	983.6	119.45	10.83
35	1222.0	1104.3	117.74	9.64
36	1322.6	1203.5	119.16	9.01

由附表 1 可知，随着室外平均气温的升高，用电量、节电量上升，节电率减小，34℃之后节电率的变化趋势平缓，一直保持在大于 9% 的水平。室外温度在 31~36℃ 时，各个用户的最优温度方案选择保持不变。

(2) 用户空调参数的影响分析。

在进行用户空调参数的影响分析时，取热容 $C=0.2\text{kW h}/\text{℃}$ ，热阻 $R=5.7\text{C}/\text{kW}$ ，室外温度为 33℃，空调制冷能效比 $\eta_{\text{COP}}=2.8$ 。电功率、制冷能效比、允许温度偏差的影响如附图 1 所示。



附图 1 用户空调参数的影响

Fig.1 Influence of air-conditioning parameters

a. 电功率的影响。

由附图 1 (a) 可知，随着电功率的不断增大，修正前用电量几乎不变，修正后的节电量、节电率不断降低，在电功率大于 3.2kW 后下降趋势减缓，节电率始终不低于 10%。这是因为电功率变大，由式 (4) 得制冷期变短，制冷期变短幅度小于功率增大幅度，故修正后的用电量上升；当电功率增大到一定数值后，制冷期变短的幅度几乎等于功率增大的幅度，用电量和节电率几乎不再变化。

b. 制冷能效比的影响。

取电功率 $P=2.6\text{kW}$ 。由附图 1 (b) 可看出，随着空调制冷能效比的增大，修正前、后的用电量减小（制冷能效比越大，制冷效率越高），节电量和节电率不断减少；当制冷能效比达到一定数值后，节电率几乎不变（大于 10%）。

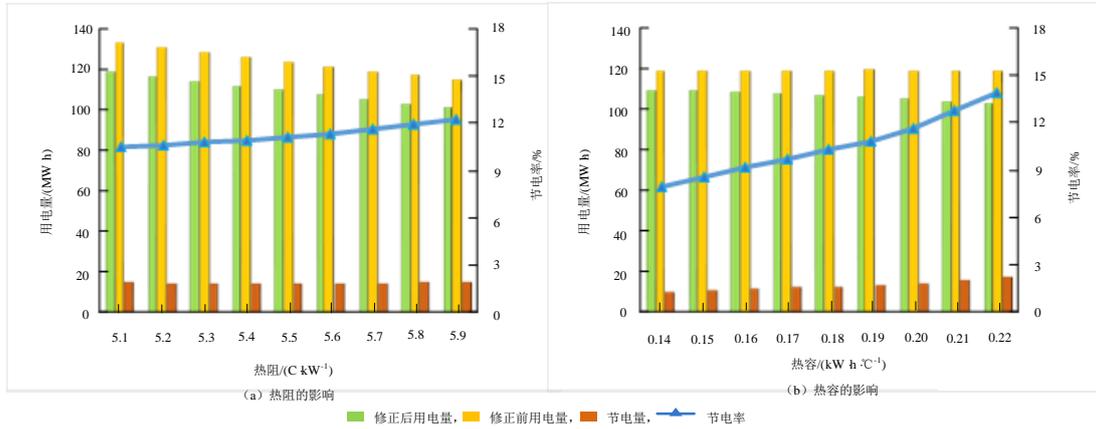
c. 允许温度偏差的影响。

取电功率 $P=2.7\text{kW}$ 。由附图 1 (c) 可知，随着允许温度偏差不断增大，修正前的用电量下降，修正后的

用电量几乎不变，节电量、节电率下降，节电率始终大于 8%。可以预见，随着空调技术的不断发展，允许温度偏差将不断变小，节电率将进一步提升。

(3) 建筑参数的影响分析。

在进行用户建筑参数的影响分析时，取空调功率 $P=2.6\text{kW}$ ，制冷能效比 $\eta_{\text{COP}}=2.8$ ，室外温度为 33°C 。热阻和热容的影响如附图 2 所示。



附图 2 建筑参数的影响

Fig.2 Influence of architecture parameters

a. 热阻的影响。

取建筑材料热容 $C=0.2 \text{ kW h}/^\circ\text{C}$ 。由附图 2 (a) 可知，随着热阻不断增大，用电量和节电量均下降，这是因为热阻越大，建筑的传热能力越差，空调为了达一定的制冷效果而需提供的冷量越少；节电率不断上升，一直大于 10%。

b. 热容的影响。

取建筑材料热阻 $R=5.7\text{C}/\text{kW}$ 。由附图 2 (b) 可知，随着热容的不断增大，修正前的用电量保持不变，修正后的用电量下降，节电量、节电率升高，节电率始终大于 8%。这是因为由式 (8) 得出热容 C 不影响自然占空比，由式 (22) 得出修正前的用电量不变；热容越大，建筑的蓄热能力越强，由式 (3)、(4) 可看出停机期和制冷期变长，而停机期一般比制冷期长很多，故由式 (6) 得出节电量增大。