



中国电机工程学报
Proceedings of the CSEE
ISSN 0258-8013, CN 11-2107/TM

《中国电机工程学报》网络首发论文

题目： 面向城市“微气候-能耗”恶性循环的建筑群梯级能效优化方法研究
作者： 张振威，惠红勋，胡厚鹏，宋永华
网络首发日期： 2026-01-02
引用格式： 张振威，惠红勋，胡厚鹏，宋永华. 面向城市“微气候-能耗”恶性循环的建筑群梯级能效优化方法研究[J/OL]. 中国电机工程学报.
<https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20251231.1422.007>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

文章编号：X251862

面向城市“微气候-能耗”恶性循环的建筑群梯级能效优化方法研究

张振威¹, 惠红勋^{1*}, 胡厚鹏², 宋永华¹

(1. 智慧城市物联网全国重点实验室(澳门大学电机及电脑工程系), 澳门 氹仔 999078; 2. 贵州电网有限责任公司, 贵州省 贵阳市 550005)

Hierarchical Energy Efficiency Optimization of Urban Building Clusters Under the “Microclimate–Energy Consumption” Vicious Cycle

ZHANG Zhenwei¹, HUI Hongxun^{1*}, HU Houpeng², SONG Yonghua¹

(1. State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City (Department of Electrical and Computer Engineering, University of Macau), Macao 999078, China; 2. Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550005, Guizhou Province, China)

ABSTRACT: With the combined effects of global warming and urban microclimate, heatwave events are occurring more frequently in urban areas, leading to a significant increase in cooling loads. Particularly in high-density urban districts, the interaction between microclimate and building energy consumption evolves into a vicious cycle of “load surge–heat environment deterioration,” aggravating energy supply burden and exacerbates heat risks. Therefore, this paper proposes a hierarchical energy efficiency optimization method for building clusters from energy system perspective. First, a district-scale interaction model of microclimate and building energy consumption is established to quantify dynamic response of building cooling loads to climate parameters and the temperature rise effect caused by cooling waste heat. Second, a dynamic operation model of building energy systems integrating photovoltaic modules and cooling equipment is developed to analyze the performance degradation of energy devices under high-temperature microclimate conditions. Furthermore, a hierarchical energy efficiency optimization approach is proposed, incorporating photovoltaic cooling, heat recovery, and air-conditioning

waste heat reutilization technologies, to collaboratively mitigate the vicious cycle between microclimate deterioration and energy consumption surge. Finally, a case study of building clusters in the Macao Peninsula is conducted to validate the effectiveness and adaptability of the proposed method in alleviating thermal environmental stress and improving overall system efficiency.

KEY WORDS: urban microclimate; building energy consumption; vicious cycle; hierarchical energy efficiency; waste heat utilization

摘要: 近年来, 气候变暖与城市微气候效应叠加, 导致热浪事件在城市区域频发, 引发建筑冷负荷激增。尤其在高密度建筑街区, 微气候与建筑能耗之间形成显著的动态交互, 并逐步演化为“负荷激增–局地升温”的恶性循环, 进一步加剧能源系统负担与环境热风险。为破解这一恶性循环, 本文从能源视角提出建筑群梯级能效优化方法。首先, 构建城市街区尺度微气候与建筑能耗交互模型, 量化分析建筑冷负荷对环境参数的动态响应, 以及制冷废热在局地空间积聚引发的温度上升效应。其次, 建立集成光伏组件与制冷设备的建筑能源系统动态模型, 分析高温微气候条件下能源设备的性能衰减特征。进一步, 提出融合光伏余热回收与空调废热再利用的梯级能效优化策略, 实现对微气候负效应与能耗激增之间恶性循环的协同调控。最后, 以澳门半岛建筑群为例, 验证所提方法在缓解热环境压力与提升系统能效方面的有效性与适应性。

关键词: 城市微气候; 建筑能耗; 恶性循环; 梯级能效; 余热利用

基金项目: 贵州电网有限责任公司科技项目(GZKJXM20240010); 智能电网国家科技重大专项(2030)低碳高可靠城市配电系统示范工程(2024ZD0800700); 国家自然科学基金项目(52407075); 澳门特别行政区科技发展基金项目(001/2024/SKL)。

This work was supported in part by Science and Technology Project of Guizhou Power Grid Co., Ltd. (GZKJXM20240010); in part by Smart Grid-National Science and Technology Major Project (2030) Pilot Project for Low-Carbon and High-Reliability Urban Distribution Power Systems (2024ZD0800700); in part by National Natural Science Foundation of China (52407075); in part by Science and Technology Development Fund, Macau SAR (001/2024/SKL).

0 引言

近年来,全球极端热浪事件不断加剧,多个城市屡次刷新高温纪录。2021年意大利西西里岛测得48.8°C,创欧洲历史最高气温^[1];2024年印度新德里气温高达52.3°C,并伴随大范围持续性热浪过程^[2]。极端高温事件导致城市制冷负荷骤增,进一步诱发能源系统失稳。2020年和2022年的美国加州热浪事件中电力需求多次突破历史峰值,被迫实施轮流停电以维持系统平衡^[3];2024年巴尔干半岛地区用电需求随气温飙升,引发西部区域大规模停电事故^[4]。上述案例表明,城市已成为气候变化影响最为集中的单元。尤其是在高密度建筑街区,峡谷式空间结构和大量人造表面加剧了热量滞留,形成典型的城市微气候-热岛效应。相较周边郊区,城市内部温度常高出5-8°C^[5],不仅显著放大热浪冲击,也使能源系统面临更严峻的运行压力。

城市微气候效应,尤其是热岛效应,是多种人为干预因素叠加作用下形成的复杂热环境响应过程。高密度建筑布局造成通风受阻,地表硬化增强了热量蓄积,大量能源活动排放废热,则进一步驱动了城市热岛效应的发展^[6]。与自然环境中相比,城市区域表现出夜间冷却速度减缓、温度峰值持续时间延长以及空间热聚集显著等特征,极易诱发连续性高温负荷过程^[7]。针对城市微气候的演化规律,已有研究提出了多尺度的分析方法:在观测层面,学者们通过遥感反演、地面监测和无人机巡测等手段获取城市热场分布与变化趋势^[8,9];在模拟层面,则利用城市尺度的CFD模拟^[10]、ENVI-met^[11]等软件重构建筑与气象要素的耦合过程。与此同时,部分研究开始关注建筑能源活动对微气候的反向作用,尝试将建筑冷负荷的废热排放纳入城市热环境分析框架^[12]。例如,基于局地能量守恒模型与热通量传输模型构建热源-热场反馈链,以揭示高能耗建筑集聚对局地热环境的扰动效应^[13,14]。尽管上述研究拓展了建筑与微气候之间的互动视角,但大多仍停留在单向耦合或静态边界设定的层面,尚未刻画建筑能耗与微气候之间的动态耦合反馈机制。尤其在高温事件频发、能源系统需实时响应的背景下,对热环境-能耗交互过程的动态模拟仍然不足。

在建筑能耗建模,尤其是冷负荷需求方面,目前常用的气象参数主要分为两类:中尺度空间

分辨率气象预报^[15]与城市气象站实测数据^[16]。然而,中尺度气象预报的空间分辨率通常在10km以上,难以刻画街区尺度微气候的差异性,尤其在街谷效应显著、高反照率材料普遍应用的城区环境中^[17]。气象站数据则多反映开放区域气象条件,难以代表密集街区内部的真实热环境^[18]。上述方法均易导致冷负荷评估出现系统性偏差。尤其在高密度建筑区,微气候效应与连续高温共同作用,导致制冷负荷快速攀升,不仅推高电力系统峰值负荷,还因制冷设备排热抬升局地温度,进一步加剧“制冷-排热-增温-再制冷”的“微气候-能耗”恶性循环^[19,20]。与此同时,建筑能源系统中的关键设备对环境条件高度敏感。研究表明,当光伏组件表面温度每升高1°C,其光电转换效率平均下降0.3%-0.5%^[21]。此外,空调系统的冷凝效率也会随环境温度升高而显著衰减,从而导致单位冷量能耗持续增加^[22]。在这种恶性循环下,城市内呈现出“设备衰退-能耗激增-环境恶化”的复杂耦合特征。然而,现有建筑能源系统优化框架大多聚焦于单方面静态分析,缺乏对上述能源与气候动态互动的系统建模与协调优化。

针对设备能效退化问题,近年来提出了多种建筑节能与环境优化技术,包括光伏发电、绿色屋顶、建筑遮阳、冷却通风及区域能源系统等^[23,24]。其中,梯级能效技术通过集成多种能源回收与再利用路径,在缓解系统负荷波动和能效退化方面展现出较大潜力。例如,专用光伏冷却系统可使组件温度降低10-15°C,从而提升光伏效率约20%^[25];空调余热回收则能将制冷系统产生的废热加以利用,不仅可为建筑提供辅助热源,还可用于温水供应或地暖驱动,显著降低能源浪费^[26]。相关技术已在部分商业建筑和高密度住宅小区得到应用,并结合智能控制系统实现了整体能耗的优化^[27]。在建筑群尺度引入此类能效技术,并结合实时监测与优化调节,不仅有助于缓解微气候-能耗恶性循环下的能效退化,还能促进建筑运行与城市微气候的协调联动。

为应对城市高密度建筑街区中“微气候-能耗”恶性循环问题,本文提出一种建筑群梯级能效优化策略。具体包括:(1)构建城市微气候-建筑能耗耦合模型,量化冷负荷响应与局地热风险之间的关系;(2)建立光伏与制冷系统动态运行模型,评估能源设备在高温微气候下的运行性

能与能效损失；(3) 提出集成梯级能效技术的密集建筑群与微气候互动优化策略，实现对微气候与能耗之间恶性循环的协同调控。最后，以澳门本岛建筑群为例，验证所提策略在缓解热环境压力 and 提升能源利用效率方面的有效性与适应性。

1 城市微气候-建筑能耗耦合建模

在城市高密度建筑街区，大量人造表面显著增强了街区的蓄热效应，同时建筑群对自然风的阻隔使人为热与太阳辐射热在局地空间不断积聚，从而抬升环境温度并形成典型的城市热岛效应，如图 1(a)。在此背景下，高温驱动建筑冷负荷需求快速增长，随之产生的制冷废热排放又叠加在局地环境中，形成“负荷激增-局地温升”的恶性循环。更为严重的是，过热的工况导致能源设备运行效率下降，进一步加剧了建筑的能耗需求。因此，为了准确刻画上述多重交互过程，有必要分别针对城市微气候、建筑负荷需求与设备动态能效开展系统建模研究。

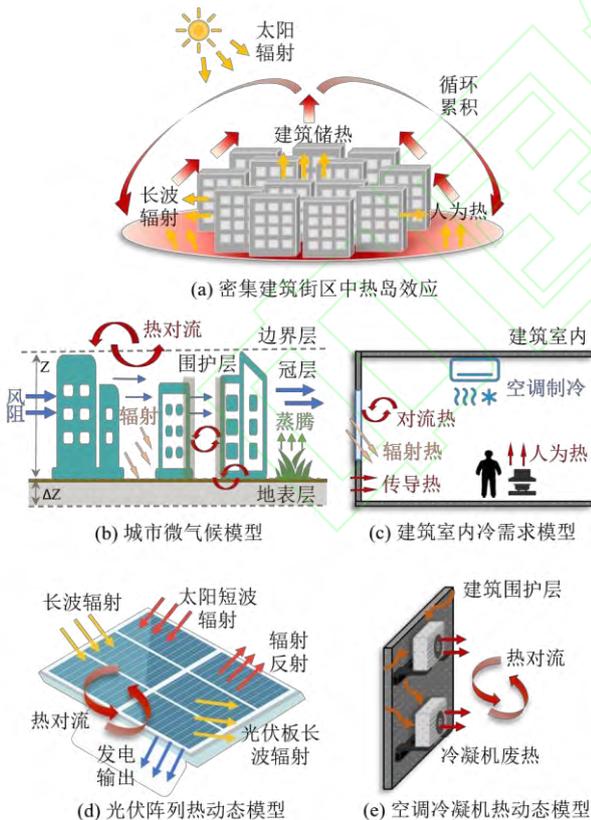


图 1 城市微气候-建筑能耗耦合模型

Fig. 1 The coupling model of urban microclimate and building energy consumption

1.1 计及建筑能源活动的城市微气候建模

为了刻画街区尺度下微气候与建筑能耗的动

态交互过程，本节采用统一热模型整合建筑废热排放、人造表面与地表热储、风阻、太阳辐射等因素，对局地热环境与建筑能源活动进行耦合建模。如图 1(b)，统一热模型将城市空间从垂直度依次划分为城市地表层、城市冠层、建筑围护层与城市边界层。

首先，城市地表层指代地表到地下均匀温度处，其热量来源为太阳辐射，同时与城市冠层发生热交换，通过植被蒸腾以及地面发射长波辐射进行散热^[14]，动态热平衡描述如下：

$$\begin{aligned} \sum \rho_i c_i \Delta x_i A_{sur,i} \frac{dT_{sur,t}}{dt} = & (1 - \gamma_{sur}) A_{sur} I_{sun,t} \\ & + K_r A_{sur,r} \frac{\bar{T}_{sur,r} - T_{sur,t}}{\Delta x_r} - Q_{rad} A_{sur,r} \\ & + K_v A_{sur,v} \frac{\bar{T}_{sur,v} - T_{sur,t}}{\Delta x_v} - Q_{evp} A_{sur,v} \\ & + h_{ex,t} A_{sur} (T_{uc,t} - T_{sur,t}) \end{aligned} \quad (1)$$

其中：下标 t 表示时刻；下标 i 表示城市地表层不同类型区域，包括 r 表示公路及其他人造表面， v 表示草地等绿植表面；下标 sur, uc, ub, en, in 在本文模型中分别表示城市地表层、城市冠层、城市边界层、建筑围护层以及建筑室内； $\rho, c, \Delta x, A, T$ 分别表示所在层的密度、热容、深度，表面积与温度； $\gamma_{sur}, I_{sun,t}$ 分别表示太阳辐射反射率与太阳辐射强度； K 为导热系数； Q_{rad}, Q_{evp} 分别为长波辐射强度与蒸腾强度； \bar{T}_{sur} 表示在深度 Δx 处的城市地表层均匀温度； $h_{ex,t}$ 为城市地表层与城市冠层的对流换热系数。

城市冠层为城市地表层上方与边界层下方的垂直空间，高度为地表到建筑平均高度处。城市冠层内累积建筑排放的废热，并与城市地表层、城市边界层以及建筑围护层发生对流热交换^[14]，其动态热平衡描述如下：

$$\begin{aligned} \rho_a c_a V_{uc} \frac{dT_{uc,t}}{dt} = & \rho_a c_a q_{ub,t} (T_{ub,t} - T_{uc,t}) \\ & + h_{ex,t} A_{sur} (T_{sur,t} - T_{uc,t}) + A_{total} Q_{eh,t} \\ & + \sum_{k \in \psi_k} \left\{ \rho_a c_a q_{ve,k} (T_{in,k,t} - T_{uc,t}) + Q_{waste,k,t} \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

其中：下标 a, k 分别表示空气和建筑； V 表示空间体积； $q_{ub,t}, q_{ve,k}$ 分别表示城市冠层与边界层之间的对流系数，以及冠层与建筑内空气的自然对流系数； A_{total} 表示建筑街区底面积； $Q_{eh,t}, Q_{waste,k,t}$ 分别表示街区内人为热强度以及建筑 k 向室外排放的废热功率； ψ_k 为街区内所有建筑个体集合。

建筑围护层为建筑外表面, 相比与空气, 建筑材料的高热容特性使其可以储存太阳辐射热能而不断升高温度^[20], 其热动态模型描述如下:

$$\begin{aligned} \rho_{en} c_{en} V_{en,k} \frac{dT_{en,k,t}}{dt} = & (1 - \alpha_k) \lambda_k A_{en,k} I_{sun,t} \\ & + h_{ex,t} A_{en,k} (T_{uc,t} - T_{en,k,t}) \\ & + h_{ei,k} A_{en,k} (T_{in,k,t} - T_{en,k,t}) \end{aligned} \quad (3)$$

其中: α_k, λ_k 分别为建筑 k 的墙壁反射系数与接受太阳照射的有效墙壁面积系数; $h_{ei,k}$ 为建筑围护层与室内的热传导系数。

上述式(1)-(3)构成了本节统一热模型的核心框架, 包含城市冠层、地表面、边界层与建筑围护层之间的热量收支与交互过程。其中, 地表面反映太阳辐射吸收与地表热储特性, 冠层反映空气温度与建筑废热的相互作用, 建筑围护层反映墙体的蓄热与放热过程。通过联立求解能量平衡方程, 实现对城市街区尺度热环境的动态模拟。同时, 城市边界层为统一热模型的外界气候背景, 位于城市冠层的上方。本文采用中尺度气象预报数据作为边界层的输入数据, 中尺度数据可有效承接区域气候背景与局地动力过程之间的尺度差异, 避免大尺度数据分辨率不足导致的边界条件平滑化问题^[20]。

1.2 城市微气候下建筑冷负荷需求建模

个体建筑的冷负荷需求与自身结构(墙壁面积、窗户面积、体积等)、室内热源以及外围气象条件(冠层空气温度、建筑围护层温度、太阳辐射)相关, 如图 1(c), 其热动态模型描述如下:

$$\begin{aligned} \rho_a c_a V_{in,k} \frac{dT_{in,k,t}}{dt} = & h_{ei,k} A_{en,k} (T_{en,k,t} - T_{in,k,t}) \\ & + \rho_a c_a q_{ve,k,t} (T_{uc,t} - T_{in,k,t}) - Q_{cool,k,t} \\ & + \beta_k A_{win,k} I_{sun,t} + N_{fl,k} A_{in,k} Q_{ih,k,t} \end{aligned} \quad (4)$$

其中: $Q_{cool,k,t}$ 为空调产生的制冷量; β_k 与 $A_{win,k}$ 分别为窗户的透光系数与面积; $N_{fl,k}, A_{in,k}, Q_{ih,k,t}$ 分别为建筑 k 的楼层数、底面积与室内人为热强度。

需要指出的是, 式(4)与前述冠层热平衡方程(2)构成了城市“微气候-能耗”交互的核心反馈链条。建筑在运行过程中需要的冷负荷 $Q_{cool,k,t}$ 通过制冷系统的废热排放项 $Q_{waste,k,t}$ 直接作用于冠层能量平衡, 导致冠层空气温度 $T_{uc,t}$ 以及围护层温度 $T_{en,k,t}$ 升高; 而升高的城市微气候温度又会反向影响建筑冷负荷, 引起冷负荷的进一步增加, 形成典型的正向循环过程。

1.3 城市微气候下能源设备能效退化建模

光伏组件与制冷系统为建筑的主要供能设备。其中, 光伏组件安装在建筑屋顶或墙壁表面, 表现出对周围环境条件敏感, 如图 1(d)。制冷系统, 即主要为空调, 其关键元件冷凝器安装在建筑外墙表面, 如图 1(e)。冷凝器通过制冷剂与环境温差将室内热量释放到室外, 当环境温度升高时, 冷凝器效率将明显下降。本节分别对微气候下的光伏组件与制冷系统运行能效进行建模。

1.3.1 光伏组件

光伏电池在吸收太阳辐射发电的同时, 部分辐射能量会加热光伏组件并持续累积热量, 引起光伏组件温度持续上升, 进而导致发电效率下降。图 1(d)描述了光伏组件运行中的能量转换过程, 其数值模型描述如下^[28]:

$$m_{pv} c_{pv} \frac{dT_{pv,t}}{dt} = Q_{rad,t}^{in} - Q_{rad,t}^{out} - Q_{cov,t} - P_{pv,t} \quad (5)$$

其中: 下标 pv 表示光伏板; m 表示质量; $Q_{rad,t}^{in}$ 表示光伏组件吸收辐射量, 由式(6)计算; $Q_{rad,t}^{out}$ 表示光伏组件发射长波辐射量, 由式(7)计算; $Q_{cov,t}$ 表示光伏组件与周围空气的对流换热量, 由式(8)计算; $P_{pv,t}$ 表示光伏组件发电量, 发电效率与光伏组件温度相关, 由式(9)计算。

$$Q_{rad,t}^{in} = \alpha_{pv} (I_{short,t} + I_{long,t}) A_{pv} \quad (6)$$

$$Q_{rad,t}^{out} = \varepsilon_{pv} \sigma A_{pv} (T_{pv,t}^4 - T_{uc,t}^4) \quad (7)$$

$$Q_{cov,t} = h_{pv} A_{pv} (T_{pv,t} - T_{uc,t}) \quad (8)$$

$$P_{pv,t} = I_{sun,t} A_{pv} \tau_{pv} \eta_{ref} [1 - \beta_{pv} (T_{pv,t} - T_{ref})] \quad (9)$$

其中: α_{pv} 与 A_{pv} 分别表示光伏组件辐射吸收系数与面积; $I_{short,t}$ 与 $I_{long,t}$ 分别表示入射光伏组件的短波辐射与长波辐射; ε_{pv} 表示光伏组件辐射率; σ 表示斯图芬-玻尔兹曼常数; h_{pv} 表示光伏组件与周围空气的对流换热系数; τ_{pv} 表示光伏组件的透光系数; $\eta_{ref}, \beta_{pv}, T_{ref}$ 分别表示光伏组件参考发电效率、温度系数与参考温度。

1.3.2 制冷系统

空调的制冷循环过程包含压缩机-冷凝器-膨胀阀-蒸发器。整个循环由压缩机耗电对制冷剂做功来驱动, 通过调整制冷剂的压力状态使其在室外冷凝器处放热以及室内蒸发器处吸热^[29]。首先, 忽略摩擦损耗时, 压缩机的做功近似为等熵过程, 其数学模型表示如下:

$$P_{com,t} = \dot{m} \cdot R \cdot T_{com,t}^{in} \cdot \ln \left(\frac{P_{com,t}^{ot}}{P_{com,t}^{in}} \right) \quad (10)$$

$$\left(\frac{P_{com,t}^{ot}}{P_{com,t}^{in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{T_{com,t}^{ot}}{T_{com,t}^{in}} \right) \Leftrightarrow T_{com,t}^{ot} = T_{com,t}^{in} \left(\frac{P_{com,t}^{ot}}{P_{com,t}^{in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (11)$$

其中：下标 com 表示压缩机；上标 in, ot 分别表示元件的入口处与出口处； $P_{com,t}$ 为压缩机消耗的电功率； p 表示制冷剂压力； \dot{m}, R 分别表示制冷剂质量流量与气体常数； γ 为压缩比。

制冷剂在压缩机处由中温低压气态转为高温高压气态，并进入冷凝器进行冷却，通过其相变过程释放大热到周围环境中，并在出口处到达饱和和液态。通常，为了保证出口处的制冷剂完全液化，会设定过冷度 ΔT_{co} 。在不考虑管道压力损失时，冷凝器处的能量变化为等压冷凝过程，其温度与焓变化过程描述如下：

$$p_{co,t}^{ot} = p_{co,t}^{in} = p_{com,t}^{ot} \quad (12)$$

$$T_{co,t}^{ot} = T_{en,t} \quad (13)$$

$$p_{co,t}^{ot} \propto f_p \left[\left(T_{co,t}^{ot} + \Delta T_{co} \right), Q=0, R134a \right] \quad (14)$$

$$h_{co,t}^{in} \propto f_h \left[p_{co,t}^{in}, T_{co,t}^{in}, R134a \right] \quad (15)$$

$$h_{co,t}^{ot} \propto f_h \left[p_{co,t}^{ot}, T_{co,t}^{ot}, R134a \right] \quad (16)$$

$$Q_{waste,t} = \dot{m} \left(h_{co,t}^{ot} - h_{co,t}^{in} \right) \quad (17)$$

其中：下标 co 表示冷凝器； Q 为制冷剂的状态指示变量，取 1 表示饱和气态，取 0 表示饱和液态；R134a 为本模型分析的典型制冷剂类型； $f[\]$ 表示制冷剂的通用状态函数，在本文中具体包括三类： $f_p[\]$ 为压力状态函数（依据制冷剂温度、相态与类型可获得饱和压力值）、 $f_h[\]$ 为焓值状态函数（依据制冷剂温度、压力与种类可获得焓值）、 $f_T[\]$ 为温度映射函数（依据制冷剂焓值、压力与种类可获得对应温度）。

上述模型中，式(12)描述在不考虑摩擦损耗时，制冷剂从压缩机出口到冷凝器出口的压力保持不变；式(13)描述经过冷凝器后制冷剂会被冷却到室外环境温度；式(14)描述在预设一定过冷度时，为保证制冷剂出口为饱和液态时，其对应压力值；式(15)与(16)描述了在已知温度与压力时，制冷剂在冷凝器的入口与出口处的焓值；式(17)描述了制冷剂向室外释放的废热。

制冷剂从冷凝器流出后进入膨胀阀，并由高压饱和液体变为低压气液混合体，忽略摩擦损耗时此过程为等焓膨胀，其物理过程可以描述为：

$$h_{ex,t}^{in} = h_{ex,t}^{ot} \quad (18)$$

$$\frac{P_{com,t}^{ot}}{P_{com,t}^{in}} = \frac{P_{ex,t}^{in}}{P_{ex,t}^{ot}} \quad (19)$$

$$T_{ex,t}^{ot} \propto f_T \left[h_{ex,t}^{ot}, P_{ex,t}^{ot}, R134a \right] \quad (20)$$

其中：下标 ex 表示膨胀阀。

制冷剂由膨胀阀流出后进入蒸发器，在蒸发器处吸收室内热量变为低压中温气体，同时为了保证充分气化，通常设定一定的过热度 ΔT_{ev} ，其物理过程可以描述为：

$$p_{ev,t}^{ot} = p_{ev,t}^{in} = p_{ex,t}^{ot} \quad (21)$$

$$T_{ev,t}^{ot} = T_{in,t} \quad (22)$$

$$p_{ev,t}^{ot} \propto f_p \left[\left(T_{in,t} - \Delta T_{ev} \right), Q=1, R134a \right] \quad (23)$$

$$h_{ev,t}^{ot} \propto f_h \left[p_{ev,t}^{ot}, T_{ev,t}^{ot}, R134a \right] \quad (24)$$

$$Q_{cool,t} = \dot{m} \left(h_{ev,t}^{in} - h_{ev,t}^{ot} \right) \quad (25)$$

其中：下标 ev 表示蒸发器。需要补充说明的是，在上述制冷循环模型中，均忽略管道的压力与温度损耗，因此制冷剂在流经管道时的压力、温度、焓值是守恒的。

2 集成梯级能效技术的密集建筑群与微气候互动优化模型

2.1 建筑梯级能效模型

集成梯级能效技术的建筑能源系统结构如图 2 所示，主要包含集成冷却管道的光伏系统 (①)，以及集成废热回收的空调制冷系统 (②)。通过对光伏与空调中的余热进行收集，并配合电加热器与蓄热水罐，可以高效满足建筑用户的热水负荷需求。同时，对于密集建筑群，废热的有效回收可以减少人为热在街区空间内积累，缓解气温持续升高。

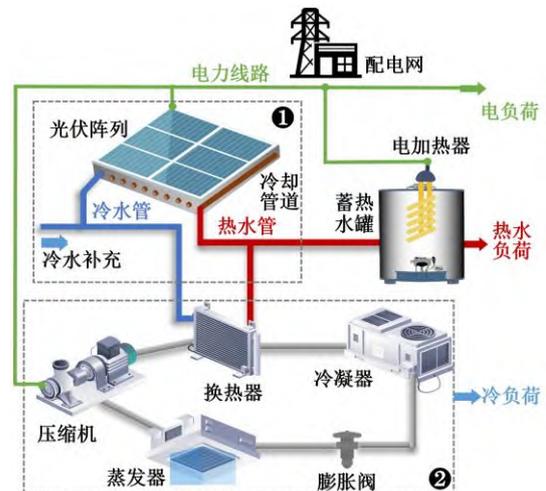


图2 集成梯级能效技术的建筑能源系统架构

Fig. 2 The structure of building energy system integrated cascade utilization

2.1.1 光伏冷却模型

如图2所示,光伏阵列下方铺设冷却管道实现对光伏电池的冷却,此时光伏阵列的热平衡方程(5)将进一步调整为如下形式:

$$m_{pv}c_{pv} \frac{dT_{pv,t}}{dt} = Q_{rad,t}^{in} - Q_{rad,t}^{out} - Q_{cov,t} - P_{pv,t} - Q_{rev,t} \quad (26)$$

$$Q_{rev,t} = h_{tu} \pi d_{tu} L_{tu} (T_{pv,t} - T_{tu,t}^{in}) \quad (27)$$

其中: $Q_{rev,t}$ 表示管道吸收的光伏电池热量;下标 tu 表示冷却管道; d, L 分别为管道的直径和长度; h_{tu} 为管道与光伏阵列之间的热交换系数。

2.1.2 空调余热回收模型

在压缩机与冷凝器之间安装板式换热器,将压缩机出口的高温高压制冷剂进行预冷却,减少冷凝器排放的废热,同时换热器回收的热能被回收利用供给热水负荷,如图2。相比于第1部分给出的制冷系统循环模型,冷凝器的入口温度替换为换热器的出口温度,压力保持不变。此时,换热器内的热过程描述如下:

$$m_r c_r \frac{dT_{hex-r,t}^{ot}}{dt} = h_{hex} \pi d_{hex} L_{hex} (T_{hex-r,t}^{in} - T_{hex-w,t}^{in}) \quad (28)$$

$$Q_{hex,t} = m_r c_r (T_{hex-r,t}^{in} - T_{hex-r,t}^{ot}) \quad (29)$$

$$T_{co,t}^{in'} = T_{hex-r,t}^{ot} \quad (30)$$

$$P_{co,t}^{in'} = P_{hex-r,t}^{ot} = P_{hex-r,t}^{in} = P_{com,t}^{ot} \quad (31)$$

其中:下标 r 与 w 分别表示制冷剂与冷却水;下标 hex 则表示位于换热器处;由此, $T_{hex-r,t}^{in}, T_{hex-w,t}^{in}$ 分别表示换热器处的入口制冷剂温度与入口冷却水温度; d_{hex}, L_{hex} 分别表示换热器内盘管的直径和有效长度; Q_{hex} 表示换热器回收到的热功率; $T_{co,t}^{ot'}, P_{co,t}^{in'}$ 分别表示安装换热器后冷凝器的入口温度与压力。

2.1.3 蓄热罐及电加热器模型

光伏与制冷系统回收的热均为低品质热,且热功率具有明显的随机性,需要配合电加热器来提高品质,同时采用蓄热水罐来保证对热水负荷的持续性供应,其运行模型描述如(32)-(33)所示。考虑光伏余热回收、制冷系统余热回收、蓄热罐与电加热器后的系统综合热功率平衡如式(34)所示:

$$H_{eh,t} = \eta_{eh} P_{eh,t} \quad (32)$$

$$E_{hs,t} = (1 - \varepsilon_{hs}) E_{hs,t-1} + \left[\eta_{ch} H_{ch,t} - \frac{H_{dis,t}}{\eta_{ch}} \right] \Delta t \quad (33)$$

$$H_{eh,t} + Q_{rev,t} + Q_{hex,t} + H_{dis,t} = H_{load,t} + H_{ch,t} \quad (34)$$

其中: $H_{eh,t}, \eta_{eh}, P_{eh,t}$ 分别表示电加热器的产热功率、电热转换效率以及耗电功率; $E_{hs,t}, \varepsilon_{hs}$ 分别表示蓄热水罐存储的热能容量与自损耗系数; Δt 为调度步长; $H_{ch,t}, H_{dis,t}$ 分别表示蓄热水罐的蓄热与放热功率; η_{ch}, η_{ch} 分别表示蓄热水罐的蓄热与放热效率; $H_{load,t}$ 为热水负荷功率。

2.2 优化模型

2.2.1 滚动优化框架

为提高模型精度与计算效率,本文采用滚动优化框架来执行对建筑群的优化,如图3所示。在 t_0 时刻,初始化微气候与建筑参数,并执行时常为 $t_0 + M\Delta T$ 的优化计算。当优化结束时,执行 $t_0 + \Delta T$ 的决策指令,同时根据执行后微气候与建筑状态变量的变化,更新 $t_0 + \Delta T$ 的初始值,进而执行 $t_0 + \Delta T$ 到 $t_0 + (M+1)\Delta T$ 的优化计算。由此持续执行步长为 ΔT 、周期为 $M\Delta T$ 的滚动优化,直到完成日内所有时段的优化计算。

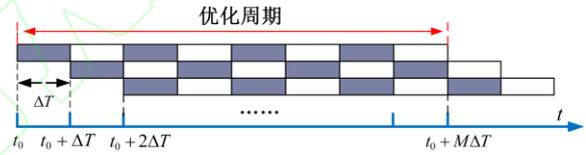


图3 滚动优化框架

Fig. 3 The framework of rolling optimization

2.2.2 目标函数

本模型目标函数考虑建筑群外购电成本以及由于废热排放带来的微气候惩罚成本,描述如下:

$$\min \sum_{\Delta T \in N_{\Delta T}} \sum_{k \in N_k} \left[C_p P_{mian,k}(t + \Delta T | t) + C_Q Q_{waste,k}(t + \Delta T | t) \right] \Delta T \quad (35)$$

其中: $P_{mian,k}$ 为建筑 k 从主网获取的电功率; C_p 为主网售电电价; $Q_{waste,k}$ 为建筑 k 向室外排放的废热功率; C_Q 为废热排放引发的惩罚成本系数。

2.2.3 运行约束

优化模型约束包含电功率平衡约束(35),光伏组件运行约束(36),空调系统运行约束(37),蓄热水罐运行约束(38),电加热器运行约束(39):

$$P_{main,k} + P_{pv,k,t} = P_{com,k,t} + P_{eh,k,t} + P_{load,k,t} \quad (36)$$

$$P_{pv,k}^{\min} \leq P_{pv,k,t} \leq P_{pv,k}^{\max} \quad (37)$$

$$P_{com,k}^{\min} \leq P_{com,k,t} \leq P_{com,k}^{\max} \quad (38)$$

$$E_{hs,k}^{\min} \leq E_{hs,k,t} \leq E_{hs,k}^{\max} \quad (39)$$

$$P_{eh,k}^{\min} \leq P_{eh,k,t} \leq P_{eh,k}^{\max} \quad (40)$$

其中： $P_{pv,k}^{\min}, P_{pv,k}^{\max}$ 分别为建筑 k 的光伏发电量运行下限与上限； $P_{com,k}^{\min}, P_{com,k}^{\max}$ 分别为建筑 k 的空调压缩机运行功率下限与上限； $E_{hs,k}^{\min}, E_{hs,k}^{\max}$ 分别为建筑 k 的蓄热水罐存储热功率下限与上限； $P_{eh,k}^{\min}, P_{eh,k}^{\max}$ 分别为建筑 k 的电加热器运行功率下限与上限。

2.2.4 差分线性化

本文优化模型中的一阶传热模型为非线性项，为提高求解效率，采用差分法对模型进行转化。首先，本文中一阶传热模型均可描述为以下基本形式：

$$C \frac{dT^{\chi_1}(t)}{dt} = R[T^{\chi_2}(t) - T^{\chi_1}(t)] + Q(t) \quad (41)$$

其中： C 表示等效热容； R 表示等效热阻； $T^{\chi_1}(t)$ 表示 χ_1 层在 t 时刻的温度； $Q(t)$ 为 χ_1 层在 t 时刻外部出入热量，在本文中指代人为热、辐射热、蒸腾热等参数。

在本文的滚动优化框架中，以 ΔT 为优化步长， $t_0 + M\Delta T$ 为一次滚动优化的计算周期。取差分步长 $\Delta\tau = (\Delta T / N_{\Delta\tau})$ ，则对于任意差分时刻 t_m ，微分方程可以转换为如下形式：

$$\frac{dT^{\chi_1}(t_m)}{dt} = \frac{T^{\chi_2}(t_m + \Delta\tau) - T^{\chi_1}(t_m)}{\Delta\tau}, t_m \in [t_1, t_{11}] \quad (42)$$

进一步，原微分方式可采用以下线性差分过程进行迭代求解：

$$T^{\chi_1}(t_1 + \Delta\tau) = \frac{R\Delta\tau}{C} [T^{\chi_2}(t_1) - T^{\chi_1}(t_1)] + \frac{\Delta\tau}{C} Q(t_1) + T^{\chi_1}(t_1) \quad (43)$$

$$T^{\chi_1}(t_m : t_1 + m\Delta\tau) = \frac{R\Delta\tau}{C} [T^{\chi_2}(t_1) - T^{\chi_1}(t_1 + (m-1)\Delta\tau)] + \frac{\Delta\tau}{C} Q(t_1) + T^{\chi_1}(t_1 + (m-1)\Delta\tau) \quad (44)$$

其中： $\Delta T = t_{11} - t_1$ 。

3 算例分析

3.1 算例概况

澳门地处中国南方高温高湿气候区，其电力负荷载体主要为建筑，且在供冷季超过一半的能源消耗为空调制冷。本文选取澳门半岛建筑群作为测试算例，如图 4。可以看出澳门半岛建筑分布密集，城区气候易受城市结构影响。本算例中考虑有效建筑个体 5216 个，占地面积 3.076 平方千米，屋顶面积的 70% 作为可安装光伏板的有效面积，绿地面积占比 23%，道路占比 14%。在本优化模型中，总调度周期为 24 小时，滚动优化周

期为 4 小时，步长为 15 分钟，差分段数取 20。

为了分析城市微气候与建筑能源活动之间的互动，以及本文提出的梯级能效优化策略的效果，设置如下四个对比场景：

场景 1：忽略微气候与建筑能源活动之间的互动，即微气候模拟中不考虑建筑废热影响，能源设备均保持理想运行能效；

场景 2：考虑微气候与建筑能源活动之间的互动，即建筑废热影响微气候，但不考虑设备能效退化，即能源设备仍保持理想运行能效；

场景 3：考虑微气候与建筑能源活动之间的互动，即建筑废热影响微气候，同时考虑设备能效退化；

场景 4：本文提出的优化模型，即考虑集成梯级能效技术后的城市建筑群能耗与微气候的协同优化。



图 4 澳门半岛建筑群算例

Fig. 4 The building cluster of Macau Peninsula

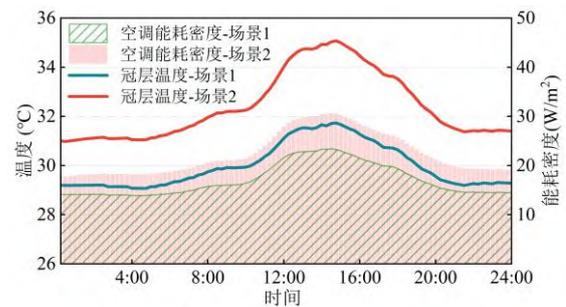


图 5 场景 1 与场景 2 中空调能耗与冠层温度变化对比

Fig. 5 Comparison of air conditioner energy density and canopy layer temperature change in Case 1 and 2

3.2 微气候与建筑能耗互动分析

图 5 展示了场景 1 与场景 2 中城市冠层温度与建筑群空调能耗密度的变化情况。首先，可以看出：1) 在考虑建筑废热对微气候影响的场景 2 中，城市冠层的温度具有明显的升高，特别是在正午 12:00-16:00 的高温时段，由废热引起的城市温度增加量可到达 3.5°C，整体的温度增加表现

为跟随外界环境温度升高而加剧。全天的平均温升为 2.43°C 。

2) 在城市微气候与建筑能耗的互动中, 在城市冠层温度被建筑废热抬升后, 又会进一步反馈影响建筑能耗。从方程(4)可以看出, 建筑冷负荷需求主要与周围城市冠层温度、建筑围护层温度相关。从图 5 可以看出, 建筑能耗密度的增量分布与冠层温度的增长分布具有明显的相关性, 同样在 12:00-16:00 时段增长明显, 最大能耗密度增长量为 $7.21\text{W}/\text{m}^2$, 增长比例到达 30.8%。全天平均能耗密度增长 $5.31\text{W}/\text{m}^2$ 。

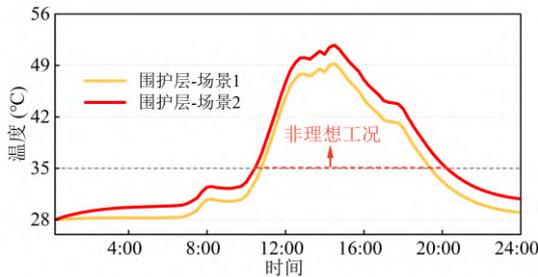


图 6 场景 1 与场景 2 中建筑围护层温度变化对比

Fig. 6 Comparison of building envelop layer temperature change in Case 1 and Case 2

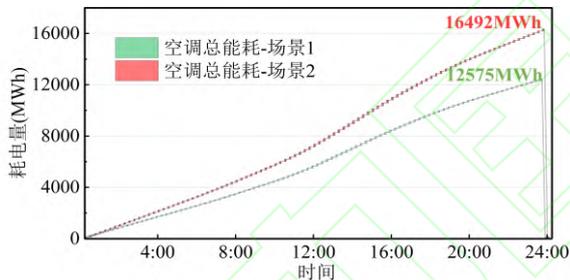


图 7 场景 1 与场景 2 中建筑制冷总能耗对比

Fig. 7 Comparison of air conditioner energy consumption in Case 1 and Case 2

在城市微气候与建筑能耗的互动中, 建筑废热在排放到城市冠层并抬升冠层气温时, 与城市冠层直接交互的其它城市层温度同样也受影响。图 6 展示了建筑围护层在场景 1 与场景 2 中的温度分布情况。可以看出建筑围护层温度在建筑废热影响下也有明显的温度升高, 同时其温度在正午时段远高于冠层的空气温度。这主要原因是, 建筑围护层(包含墙壁、屋顶等)的材料具有储热特性, 其吸收太阳辐射热后会持续存储和累积热量, 使得温度持续升高。同时, 围护层的热量散失主要通过和周围冠层空气的对流散热, 当冠层温度因废热升高时, 围护层的对流散热速率下降, 引起温度进一步升高。围护层温度的升高将

直接对制冷系统冷凝机组产生影响, 进而作用于整个制冷效率。在现有多数研究中, 常采用标准 35°C 理想环境下的制冷能效作为系统固定的电-冷转换能效。然而, 从图 6 可以看出, 冷凝机在正午及午后时段严重偏离理想运行工况, 此时制冷系统能效将迅速衰减。

图 7 展示了场景 1 与场景 2 中澳门半岛所选建筑群的总能耗分布情况。相比于场景 1, 场景 2 在一日运行后总耗电量增加 3917MWh, 占基线场景能耗的 30.2%。综合图 5-图 7 的结果可以进一步看出, 城市冠层温度的上升与建筑冷负荷增长呈现出显著的同步变化特征。当建筑废热排放被计入冠层热平衡方程后, 局地温度平均升高 2.43°C , 正午时段温升达到 3.5°C ; 相应地, 建筑能耗密度平均增加 $5.31\text{W}/\text{m}^2$, 峰值增长超过 30%。温度升高导致的冷负荷增长又反过来抬升废热排放, 形成“温升-能耗”正反馈。该结果定量验证了本文在建模中引入的微气候-能耗交互机制, 说明高密度城市建筑群在热环境下存在“负荷激增-局地温升-再负荷增长”的恶性循环现象。对于测试区域的澳门半岛拥有密集的建筑群, 建筑密度超过 50%。密集建筑导致的风阻会进一步放大互动的影

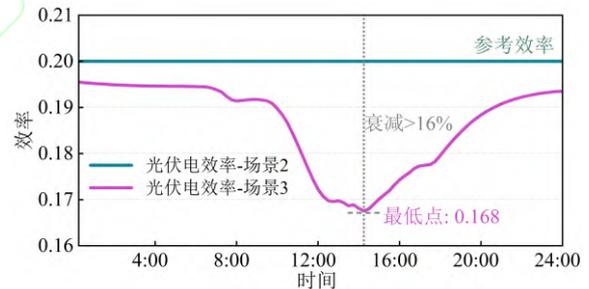


图 8 场景 2 与场景 3 中光伏发电效率对比

Fig. 8 Comparison of PV power generation efficiency in Case 2 and Case 3

3.3 微气候与设备能效互动分析

在场景 2 中分析了微气候与建筑能耗之间的互动, 在场景 3 中本文进一步分析微气候对建筑能源设备的影响。图 8 展示了场景 2 与场景 3 中光伏组件发电效率的变化曲线。其中在对比场景 2 中不考虑微气候变化对光伏阵列的影响, 始终保持固定参考效率 0.2。在场景 3 中, 光伏阵列在吸收太阳辐射后温度升高, 并与周围空气发生热对流和热辐射散热, 其散热速度根据式(6)-(8)可以看出随周围空气温度升高而下降。根据图 8 可

以看出在场景 3 中,随着光伏阵列温度升高,其实际发电效率在 14:00 衰减至 0.168,相比理想场景中减少 16%,整个效率曲线跟随外界温度与太阳辐射强度增加而减少,因此,尽管随着正午光伏板接收到的辐射增加而引起发电量增长(如图 14 中光伏发电功率分布),但其电效率衰减明显,仍引起能源浪费。

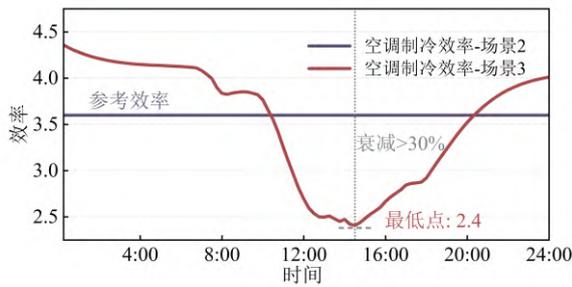


图 9 场景 2 与场景 3 中空调制冷效率对比

Fig. 9 Comparison of coefficient of performance of air conditioner in Case 2 and Case 3

图 9 展示了场景 2 与场景 3 中空调制冷效率的变化。在多数研究中,往往将空调的制冷效率默认为一个典型的恒定值,如本文场景 2 中的 3.6。然而,空调实际运行过程易受冷凝机与蒸发器处的空气温度影响,尤其是安装在建筑外墙表面的冷凝机,其实际运行工况温度近似为建筑围护层温度,如图 6 所示。此时,过高的冷凝出口温度导致空调压缩机不得不消耗更多电力来保证正常的制冷能力。从图 9 中可以看出,空调的制冷效率在一天内是处于动态波动的,在一天最热时段 13:00-14:00,空调效率衰减至低于 2.5,衰减超过 30%。在这种情况下,如果仍按照理想效率计算将极大低估实际建筑负荷尖峰。

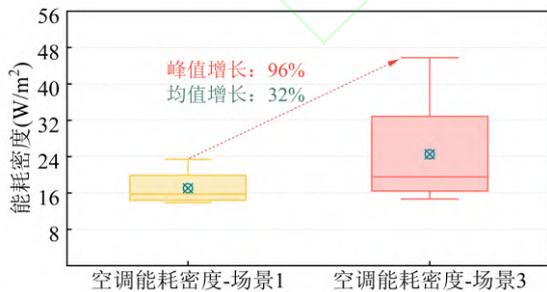


图 10 场景 1 与场景 3 中空调能耗密度对比

Fig. 10 Comparison of energy consumption density of air conditioner in Case 1 and Case 3

进一步,图 10 展示了在同时受微气候-能耗互动以及设备能效退化下的空调能耗密度对比。相比于场景 1,在场景 3 的中午时段,空调能耗

密度增长到接近 2 倍,其峰谷差明显增大,基于前文的分析,主要总结为两个关键原因:1) 城市微气候与建筑能源活动之间的互动恶化了微气候,此时城市冠层温度与建筑围护层温度并通过墙壁热传导、窗户热对流等方式加热室内空气,引起冷需求增长。2) 微气候的恶化同时影响空调制冷效率,冷凝温度升高导致制冷效率衰减。因此,冷需求增长的情况下设备效率却退化,在双重作用下空调的耗电量出现急速增长。

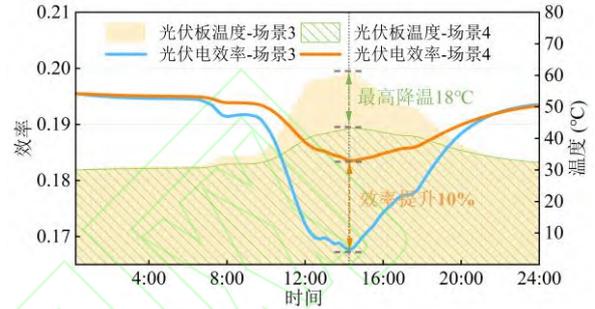


图 11 场景 3 与场景 4 中光伏组件温度与效率对比

Fig. 11 Comparison of temperature and generation efficiency of PV in Case 3 and Case 4

3.4 梯级能效优化分析

基于上文的讨论,城市微气候恶化、建筑能耗增长以及设备效率衰退的关键是热累积,其中既包含城市街区区内的人为废热以及设备内的热量。因此,在场景 4 中我们引入梯级能效技术,通过管道冷却与余热回收等手段,将废热转移并再利用,实现气候-能源友好互动,如图 2 所示。首先,图 11 展示了场景 3 与场景 4 中的光伏组件温度与发电效率变化情况。可以看出,相比场景 3,场景 4 中安装冷却管道之后,光伏板温度实现了显著的下,尤其在主要的发电时段 11:00-19:00。其中,在温度尖峰时刻可实现最大降温超过 20°C。光伏阵列温度降低后,其发电效率对应抬升,对比图 11 中橙色与蓝色曲线,在发电时段其效率均有提升,尤其在最低谷处,其效率由 0.168 恢复至 0.183,提升效果接近 10%。

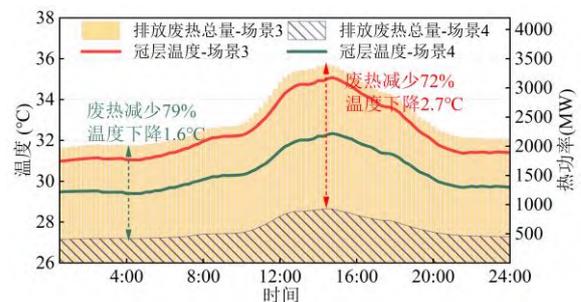


图 12 场景 3 与场景 4 中废热排放与冠层温度对比

Fig. 12 Comparison of waste heat emission and canopy layer temperature in Case 3 and Case 4

图 12 与图 13 展示了建筑空调采用余热回收装置后的城市微气候与制冷设备能效变化情况。从图 12 可以看出,建筑群排放的废热总量平均减少超过 70%。这主要由于空调内部制冷剂从压缩机出口处先进入换热器,将绝大部分热量传递给冷却水,剩余热量再由冷凝机进一步处理并释放到周围环境中。同时,由于废热排放量的减少,城市微气候与建筑能源活动之间的恶性互动得到缓解。从图 12 中两条曲线的分布可以看出,通过减少废热的排放,城市冠层温度相比于场景 3 中平均减少 1.99°C。室外环境温度的降低同时反馈给建筑减少了建筑冷需求,进一步减少了建筑的废热排放量。

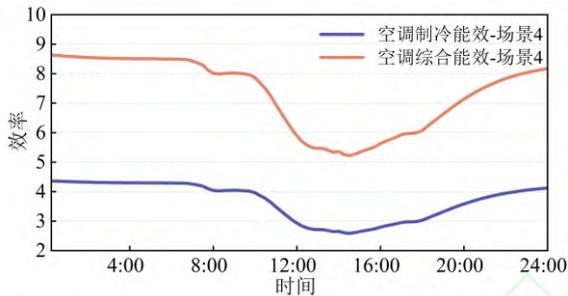


图 13 场景 4 中空调制冷能效与综合能效

Fig. 13 The coefficient of performance and integrated efficiency of air conditioner in Case 4

进一步,换热器获得的热量将回收用来供给热水负荷。本文以综合能效 $\eta_{ac,total}$ 为指标评价补充余热回收后的空调总能效,其计算方式如下式(44)所示。可以看出在场景 4 中空调的综合能效相比单一制冷能效增加约一倍。

$$\eta_{ac,total} = \frac{Q_{cool} + Q_{hex,t}}{P_{com}} \quad (45)$$

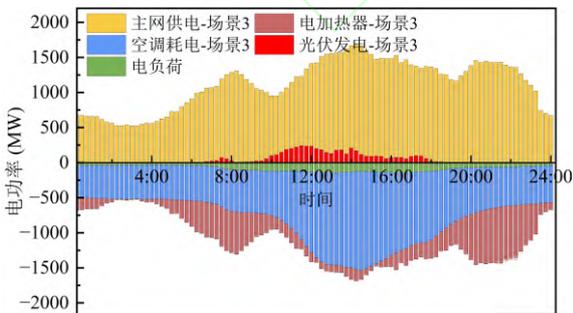


图 14 场景 3 中各机组运行电功率曲线

Fig. 14 The operating power curves of each unit in Case 3

3.5 节能分析

图 14 与图 15 分别展示了优化前后机组运行的电功率分布,可以看出:

1) 场景 4 中电加热耗电量明显减少。在场景 4 中,通过光伏与空调余热回收装置,将建筑废热再利用来供给热水负荷,同时通过与储热水罐的配合实现对建筑内的峰谷热水负荷补充。

2) 相比于场景 3,场景 4 中空调耗电量明显减少,尤其在天气温度较高的 12:00-16:00 时段,耗电功率平均下降 20.11%。这主要由于在安装余热回收装置后,空调减少废热排放量,此时室外城市冠层空气温度与建筑围护层温度得到降低,由此反馈给建筑系统引起建筑冷需求的下降,同时制冷设备的能效也因运行工况的改善而略有提高,综合引起空调耗电量的降低。

3) 相比于场景 3,整个澳门半岛建筑群向主网购买的总电量明显减少,尤其在时刻 14:30 的峰值功率从 1550.543MW 下降到 1123.871MW,同时,基于本文提出的提及能效优化模型,经过一日运行总耗电量减少 34.6%。

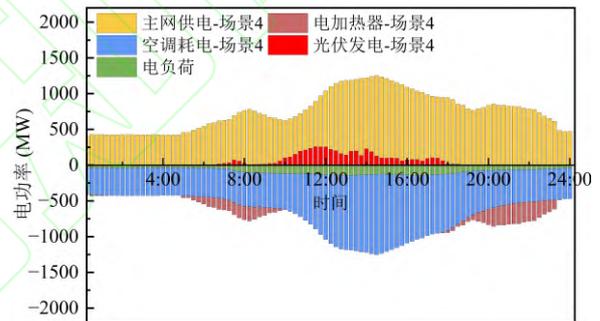


图 15 场景 4 中各机组运行电功率曲线

Fig. 15 The operating power curves of each unit in Case 4

4 结论

本文针对高密度城市建筑街区中微气候与建筑能源活动之间的“能耗—温升”恶性循环问题,建立了耦合城市微气候—建筑能耗—设备能效的多层动态模型,并提出面向建筑群的梯级能效优化方法。主要结论如下:

1) 本文提出的城市微气候—建筑能耗耦合建模框架能够定量揭示建筑群废热排放对局地热环境的反馈作用,并刻画微气候恶化对冷负荷增长的动态影响,为分析城市热环境与能耗交互提供了一种系统化建模思路。

2) 研究揭示了城市微气候对建筑能源设备的性能影响机制。在高温微气候条件下,光伏组件与制冷系统的运行效率显著退化,传统固定效率假设将低估能源系统的峰值负荷需求。本研究通过动态能效建模方法,为能耗预测与设备配置

提供了更精确的计算基础。

3) 本文提出的梯级能效优化策略通过集成光伏余热回收与制冷系统废热再利用技术,实现建筑群能耗与微气候影响的协同调节,有效削减建筑群废热排放,提升整体能源利用效率,具有良好的可扩展性和工程适用性。

本文的研究框架为城市能源系统与微气候耦合优化的定量化研究提供了通用方法,可为不同气候区和建筑类型的节能设计与环境治理提供理论支撑与决策参考。

参考文献

- [1] Merlone A, Pasotti L, Musacchio C, et al. Evaluation of the highest temperature WMO region VI (continental): 48.8 °C, Siracusa Sicilia, Italy on August 11, 2021[J]. *International Journal of Climatology*, 2024, 44(3): 721–728.
- [2] AFP. New Delhi records highest-ever temperature of 52.3 °C as north India swelters [EB/OL]. <https://www.dawn.com/news/1836406>.
- [3] CalMatters. California's power grid could buckle under rolling blackouts amid extreme heat wave [EB/OL]. <https://calmatters.org/newsletters/whatmatters/2022/09/california-heat-wave-blackouts/>.
- [4] ENTSO-E. Summer 2024: Heatwave leads to record electricity demand and regional blackouts in the Balkans [EB/OL]. <https://www.entsoe.eu/news>.
- [5] Zhao L, Lee X, Smith R B, et al. Strong contributions of local background climate to urban heat islands[J]. *Nature*, 2014, 511(7508): 216-219.
- [6] Sun Y, Zhang X, Ren G, et al. Contribution of urbanization to warming in China[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(7): 706-709.
- [7] 高红均,尚梦琪,贺帅佳,等.保障极端高温事件下负荷可靠供应的楼宇综合能源规划[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(19): 7636-7647.
Gao H, Shang M, et al. Integrated Energy Planning for Buildings to Ensure Reliable Load Supply During Extreme Heat Events[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(19): 7636-7647 (in Chinese).
- [8] 宋加颖,胡非凡,孟丹,等.基于 LCZ 的城市热环境及其驱动机制研究——以北京城区为例[J]. *环境生态学*, 2025, 7(02): 49-59.
Song J, Hu F, Meng D, et al. Study on the mechanisms driving urban thermal environment based on local climate zones: A case study of Beijing Urban Area[J]. *Environment Ecology*, 2025, 7(02): 49-59 (in Chinese).
- [9] Karimi A, Moreno-Rangel D, Garc á-Mart ínez A. Granular mapping of UHI and heatwave effects: Implications for building performance and urban resilience[J]. *Building and Environment*, 2025, 273: 112705.
- [10] Nascimento D, Ascenso A, Lopes D, et al. CFD modelling of an urban microclimate during a heat wave: Coupling solar radiation and heat transfer[J]. *Urban Climate*, 2025, 62: 102486.
- [11] Chen Y, Deng S, Hou Y, et al. Impact of environmental elements in classical Chinese gardens on microclimate and their optimization using ENVI-MET simulations[J]. *Energy and Buildings*, 2025, 329: 115238.
- [12] Craig M T, Wohland J, Stoop L P, et al. Overcoming the disconnect between energy system and climate modeling[J]. *Joule*, 2022, 6(7): 1405-1417.
- [13] Zhang Z, Hui H, Song Y. Mitigating the vicious cycle between urban heatwaves and building energy systems in Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area[J]. *The Innovation Energy*, 2025, 2(2): 100080.
- [14] Bueno B, Norford L, Hidalgo J, et al. The urban weather generator[J]. *Journal of Building Performance Simulation*, 2013, 6(4): 269-281.
- [15] 蒋思宇,惠红勋,胡厚鹏,等.建筑虚拟电厂可信调节能力概念与量化方法[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(20): 62-72.
Jiang S, Hui H, Hu H, et al. Concept and Quantification Method for Credible Regulation Capability of Building Virtual Power Plants[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(20): 62-72 (in Chinese).
- [16] Rosiek S, Battles F J. A microcontroller-based data-acquisition system for meteorological station monitoring[J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(12): 3746-3754.
- [17] Li, Y., Schubert, S., Kropp, J.P. et al. On the influence of density and morphology on the Urban Heat Island intensity[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 2647.
- [18] Pielke Sr R A. *Mesoscale meteorological modeling*[M]. Amsterdam: Academic Press, 2013.
- [19] Santamouris M. Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change[J]. *Energy and Buildings*, 2020, 207: 109482.
- [20] Zhang Z, Hui H, Song Y. Response capacity allocation of air conditioners for peak-valley regulation considering interaction with surrounding microclimate[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2025, 16(2): 1155-1167.
- [21] Elbreki A M, Alghoul M A, Al-Shamani A N, et al. The role of climatic-design-operational parameters on combined PV/T collector performance: A critical

review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 57: 602-647.

[22] Qian S, Ling J, Hwang Y, et al. Thermodynamics cycle analysis and numerical modeling of thermoelastic cooling systems[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2015, 56: 65-80.

[23] 漆淘懿,惠红勋,叶承晋,等.建筑虚拟电厂参与需求响应的报量报价机制设计[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(18): 14-24.

Qi T, Hui H, Ye C, et al. Bidding Mechanism Design for Building Virtual Power Plant to Participate in Demand Response Markets[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(18): 14-24.

[24] Li X, Sun B, Sui C, et al. Integration of daytime radiative cooling and solar heating for year-round energy saving in buildings[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 6101.

[25] 陈伟,张志恒,林洁,等.考虑热回收及光热电站动态辅助调节的电氢耦合系统优化调度策略. *电网技术*, 2025, 49(7): 1-11.

Chen W, Zhang Z, Lin J, et al. Optimized scheduling strategy of electric-hydrogen coupled system considering heat recovery and dynamic auxiliary regulation of photovoltaic power plant. *Power System Technology*, 2025, 49(7): 1-11 (in Chinese).

[26] 鲍全,庞旭,夏旭,夏热冬冷地区住宅建筑新风热回收系统节能性能测试与应用研究[J]. *建筑节能(中英文)*, 2024, 52(06): 122-127+142.

Bao Q, Pang X. Energy-saving performance test and application research of the fresh air heat recovery system for residential building in hot summer and cold winter zone[J]. *Building Energy Efficiency*, 2024, 52(06): 122-127+142 (in Chinese).

[27] 姚国财,唐勇辉,李芳芳,等.商业综合体余热回收在水源多联机系统中的应用[J]. *暖通空调*, 2022, 52(12): 109-113.

Yao G, Tang Y, Li F, et al. Application of waste heat recovery of commercial complex to water-source multi-split systems[J]. *Heating Ventilating and Air Conditioning*, 2022, 52(12): 109-113 (in Chinese).

[28] 季杰,裴刚,何伟,等.太阳能光伏光热综合利用研究[M].北京:科学出版社,2017.

J. Ji, G. Pei, W. He, et al., *Research on the Comprehensive Utilization of Solar Photovoltaic and Thermal Energy*[M], Beijing: Science Press, 2017 (in Chinese).

[29] 彦启森,石文星,田长青.空气调节用制冷技术.第4版[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.

Yan, Q., Shi, W., & Tian, C. *Refrigeration Technology for Air Conditioning* (4th ed.) [M]. Beijing: China

Architecture & Building Press, 2010 (in Chinese).

作者简介:



张振威

张振威 (1996), 男, 博士研究生, 主要从事电力需求响应管理、城市气象系统与综合能源系统跨学科互动与优化等方面研究工作, zw.zhang@connect.um.edu.mo



惠红勋

*通信作者: 惠红勋 (1992), 男, 助理教授, 博士生导师, 主要从事灵活负荷资源的建模、控制、优化和市场策略, hongxunhui@um.edu.mo



宋永华

宋永华 (1964), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析与控制等方面研究工作, yhsong@um.edu.mo