

光储低碳建筑能源系统研究及案例分析

祝宏毅, 刘红宇, 谭娟, 王得水*
中能建城市发展有限公司, 北京, 中国
*通讯作者

【摘要】通过深入研究能-水-碳关联机制, 可以为建筑社区提供高效、清洁的能源解决方案, 实现资源高效利用。本文提出光储低碳建筑的系统集成框架, 还对建筑供能系统中燃气轮机、溴化锂吸收式冷/热水机组、空气源热泵、蓄电及蓄冷/蓄热设备等关键设备建模; 在此基础上, 以北京某社区建筑为案例, 分别模拟普通住宅、高层住宅、办公建筑及商业建筑的冷热电负荷, 评估各类建筑屋顶及南墙立面的光伏集成性能, 进而获得不同类型建筑的光伏电量产出性能。本文所研究社区全年日均光伏产电 11.9 小时, 建筑屋顶及光伏产电总量与其结构、外表面积可安装面积相关, 各类建筑立面光伏发电量均超屋顶, 其中办公建筑独栋总量最大; 该社区采用光伏建筑一体化技术时, 光伏供电总量仅占社区用电总量的 4.63%, 办公建筑发电总量占自身用电量的 8.05%, 普通多层住宅供电占比仅 2.50%。

【关键词】低碳建筑; 清洁能源; 建筑功能; 光伏集成性能; 光伏供电

【基金项目】中国能建重大科技项目“八网融合发展体系研究”(编号: HDJT-CY-FW-2024-08)

1.引言

随着科技快速发展、资源过量消耗、气候环境加速恶化及各类不可抗力的影响, 全球社会正面临将能源与资源管理纳入可持续发展轨道的严峻考验。据国际能源署数据, 建筑行业占全球能源消耗的 30%以上, 且承担近 40%的相关温室气体排放^[1]。在建筑行业能耗与碳排放持续攀升的背景下, 如何通过多元途径达成能耗削减与碳减排目标, 已成为该领域亟待解决的核心问题。基于此, 对低碳建筑的需求日益增长, 而太阳能、储能与建筑的融合成为潜在解决方案——既能为建筑提供可再生能源, 又可实现能源高效利用。

目前, 实现建筑低碳发展的核心措施主要包括三类: 利用可再生能源^[2]、跨时间储能^[3]及降低建筑能耗^[4]。其中, 光储低碳建筑通过实现建筑用电的自我调节与自主优化^[5], 使建筑自身成为具备智能输配电功能的“绿色发电站”, 有效弥补了太阳能发电因随机性、波动性导致的不稳定性短板^[6], 已成为当前建筑领域的重要发展趋势。

对于光储低碳建筑的研究, 国内外学者进行了广泛的研究。Hamzah 等^[7]进行了彩色光伏建筑一体化系统性能的试验研究, 结果表明拟建的系统每年可产生 679.72MW 的能源, 并可节约 10367.66 吨/年的二氧化碳排放

量; Abdelrazik 等^[8]研究了系统对建筑性能、用能和节能等方面的影响。结果表明, 如果正确选择理想设计的特性, 光电/光热系统可以实现最佳性能; 刘文沛等^[9]探讨了不同围护结构部位传热系数对建筑节能效果的影响, 结果表明提高屋面和外墙的温性能建筑节能效果有显著的提升; 邹风华等^[10]分析了建筑能源系统的发展趋势, 结果表明新型建筑能源系统以“光储直柔”为主要特征, 电热/冷气等多能流将实现高效协同。Giovanni 等^[11]评估不同节能技术和策略的相关潜在效益, 结果表明通过建筑围护结构的优化, 可以减少建筑 12%的能耗; Qudama 等^[12]研究了不同厚度的发泡聚苯乙烯隔热材料与组合相变材料集成的作用, 结果表明, 集成发泡聚苯乙烯与组合相变材料的建筑围护表现出更好的热性能; Wang 等^[13]提出了一个三阶段数据包络分析模型来评估建筑节能改造的效率。结果表明通过适当扩大建筑改造的规模可以获得更好的节能效果。Hickman 等^[14]研究了可再生能源对耦合基础设施的能源-水关系系统的协同影响, 结果表明太阳能可以同时降低系统成本、取水量和碳排放。Wang 等^[15]研究了能源结构对碳减排和能源安全水平的影响, 结果表明, 通过改造常规能源设施、发展可再生能源、完善建筑节能对于减少碳排放至关重要; Fu 等^[16]提出了一

种模糊多目标方法，对经济-能源-环境-水控制系统中存在的多种不确定性和复杂性进行解决，结果表明而建筑业的过度增长将会对经济-能-水-碳系统造成明显影响。

综上所述，通过深入研究能-水-碳关联机制，有望为建筑社区提供高效、清洁的能源解决方案，实现对资源的高效利用，并最大限度地减少对外部资源的依赖。因此，本文提出一种基于光伏和光热建筑集成的光储建筑能源系统，围绕光伏和光热在建筑中的集成方式，构建集光伏阵列和真空管集热器的性能评估模型，并对燃气轮机、溴化锂吸收式冷/热水机组、空气源热泵、蓄电及蓄热/冷设备等关键设备进行建模；在此基础上，以北京某一社区建筑为例，分别对普通住宅、高层住宅、办公建筑及商业建筑等不同类型的建筑冷热电负荷进行模拟，并评估各类型建筑屋顶及南墙立面的光伏集成性能。

2.光储低碳建筑能源系统集成与建模

本文中所描述的光储低碳建筑能源系统框架如图1所示^[17]，主要依托于清洁且高效的天然气燃料和太阳能可再生能源的互补，并通过外部电网进行电力交互。与传统建筑能源系统相比，这种交互运行的系统模式不仅实现了能源的自由交换和智慧协同运行，从而促进了能源高效利用，最终构建了一个高效、可持续发展的低碳能源系统。如图1所示，总的光储低碳建筑能源系统由两部分组成：太阳能建筑集成与综合能源系统集成两部分，太阳能建筑集成主要包括太阳能集热器、光伏电池板等太阳能技术在建筑上的集成和使用，而综合能源系统主要是通过燃气轮机驱动装置对天然气的综合利用，形成冷热电联供的系统形式。

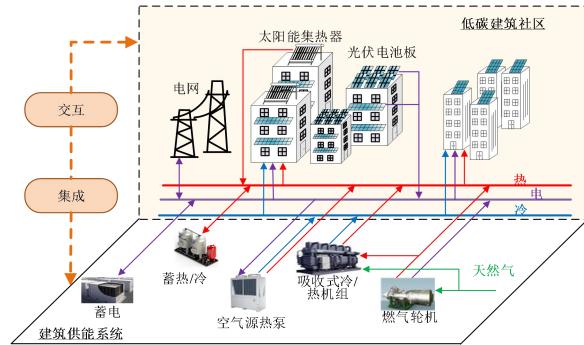


图1.光储低碳建筑能源系统

2.1 光储低碳建筑的集成

光伏/光热建筑一体化技术（Building Integrated Photovoltaic /Thermal， BIPV/T）是将太阳能与建筑结构相结合来满足建筑中

多种用能需求的技术^[18]。与传统的光伏附着在具有支撑作用的建筑物表面（Building Applied Photovoltaics， BAPV）的技术不同，BIPV/T 所需的设备不仅要具备较高的发电性能，还必须满足建筑材料的特性，形成如光伏光热屋顶、墙体、窗户、遮阳设施等。在系统发电时，由系统中的冷却介质带走电池热量加以利用，这些光伏设备与外电网相连，从而向用户和电网输送电能，形成一个集成了光伏/光热设备、支架系统和配电装置的并网光伏系统。太阳能建筑集成技术主要包括太阳能集热器、光伏电池板和光伏/光热综合利用等三大类，本文采用的太阳能建筑集成技术主要包括真空管集热器（Evacuated tube solar collectors， ETC）和光伏电池板两大类。

2.2 建筑供能系统建模

图2为图1中的光储低碳建筑能源系统中的综合能源系统部分能流图。

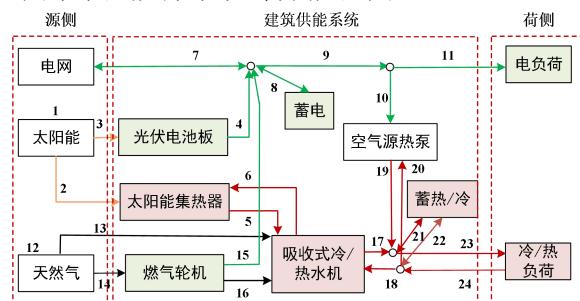


图2.光储低碳建筑能源系统能流图

由图可知，天然气驱动燃气轮机发电，与光伏电池板发电电网共同供电^[19]，供建筑及空气源热泵使用，多余的电力可存储至电池蓄电系统中，待电力不足的时候使用；燃气轮机的余热驱动吸收式冷/热水机组产生冷冻水或热水为建筑供冷或供热；空气源热泵机组作为电热转换设备可灵活调控系统中的电、热（冷），根据不同能源需求将电能转换为热（冷）；蓄电和蓄热（冷）装置集成进供能系统中，可有效调控系统中的热电比，在有多余能量产生的时候进行充储，在能量产生不足的时候进行释放补充。

2.2.1 燃气轮机

燃气轮机（Gas turbine， GT），是一种利用燃料燃烧来产生高热、高压的气流，从而推动叶轮旋转的发电设备^[20]。在燃气轮机工作过程中，空气首先被吸入压缩机，压缩后的空气在燃烧室与喷入的燃料混合后燃烧，成为高温燃气，随即通过喷嘴喷入轴流式汽轮机中推动轴流叶片旋转，产生轴功。

这种发电技术应用广泛，具有效率高、启动快速、燃料适应性强等优点。

$$E_{\text{GT}} = \eta_e \cdot F_{\text{GT}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{GT}} = (1 - \eta_e) \cdot \eta_{\text{rec}} \cdot F_{\text{GT}} \quad (2)$$

式中，下标 GT 表示燃机， E_{GT} (kW) 表示燃气轮机发电机组输出电功率， F_{GT} 表示燃料输入能量 (kW)， η_e 表示燃机发电效率， Q_{GT} (kW) 表示燃气轮机的余热回收量， η_{rec} 为热回收效率。

2.2.2 空气源热泵

空气源热泵 (Air source heat pump, ASHP) 是一种使热量从低位热源空气流向高位热源的节能装置^[21]。在热泵系统运行过程中，调节系统主要通过控制压缩机转速来影响系统内工质的循环流量，进而控制热 (冷) 量。空气源热泵技术具有节能、环保、高效等优点，被广泛应用于居民住宅、商业建筑等领域。

根据热泵的基本原理，以热力学中的第一定律作为基础，即能量守恒定律，则热泵的数学模型可简化为：

$$Q_c = W + Q_e \quad (3)$$

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{W} \quad (4)$$

式中， Q_c 为机组热量输出， Q_e 为低品位热源输入， W 为高品位电能输入，COP 为机组性能系数 (coefficient of performance, COP)，是系统能效计算的关键参数，为了准确计算系统能效，不同的模型会设定适合的 COP 值，使之能够反映出边界条件 (如热源和汇的温度) 的变化情况。

因此针对空气源热泵的不同运行模式，即采暖、生活热水及制冷等不同工况，对于生活热水的供能形式，提升值是基于与 COP 相同的源温度以及标准值 55°C 的汇温计算得出的。而针对制冷工况下，是热流方向的反转，基于室内热汇温度与当前源值之间的差异计算提升值。

这样，在基于 COP 拟合结果的基础上，空气源热泵的输入与输出平衡方程可表示为：

$$Q_{\text{ASHP}} = E_{\text{ASHP}} \cdot \text{COP}_{\text{ASHP}} \quad (5)$$

式中， Q_{ASHP} 为空气源热泵输出热/冷量， E_{ASHP} 为输入电功率， COP_{ASHP} 为机组 COP。

2.2.3 溴化锂吸收式冷/热水机组

溴化锂吸收式冷/热水机组，采用“溴化锂-水”作为工质对，核心部件包括发生器、冷凝器、蒸发器、吸收器和热交换器。制冷工况工作原理主要涉及两个循环：溴化锂溶液循环和制冷剂 (水) 循环。在本文所探讨的能源系统中，溴化锂吸收式冷/热水机组采用双效机组，可利用的热量包括：燃气轮机产生的余热量 Q_{GT} (kW)、太阳能集热量 (Q_{sol})；另外，还可以通过天然气补燃的形式来提供热量 Q_{dcz} (kW)，或者部分供能系统中采用高温蓄热量来驱动机组 Q_{TES} (kW)。由于输入热源形式及比例的不同，与之相对应的机组性能系数 COP 将呈现不同的大小。针对本文如图 3 所示的系统流程，溴化锂吸收式冷/热水机组采用 Q_{GT} 、 Q_{sol} 和 Q_{dcz} 共同驱动，而蓄热采用低温蓄热/冷的方式，集成在机组的下游，因此，溴化锂吸收式冷/热水机组在制冷工况下，其输入输出的平衡关系式可表示为：

$$Q_{\text{AC/H}} = (Q_{\text{GT}} + Q_{\text{sol}} + Q_{\text{dcz}}) \cdot \text{COP}_{\text{AC/H}} \quad (6)$$

式中，下标 AC/H、sol 和 dcz 分别代表吸收式制冷、太阳能、直燃区与蓄热设备； COP_{AC} 表示机组制冷性能系数。由于溴化锂吸收式冷/热水机组采用三种不同类型的热源形式驱动，其制冷 COP 通过如下拟合关系式求得：

$$\text{COP}_{\text{AC/H}} = 0.0251 \left(\frac{Q_{\text{LG}}}{Q_{\text{HG}}} \right)^2 - 0.2158 \left(\frac{Q_{\text{LG}}}{Q_{\text{HG}}} \right) + 1.4058 \quad (7)$$

式中， Q_{HG} 和 Q_{LG} 分别为吸收式机组中高压发生器和低压发生器输入的热量。

另外，在制热工况下，溴化锂吸收式冷/热水机组为换热器形式，则其输入输出关系可表示为：

$$Q_{\text{AC/H}} = (Q_{\text{GT}} + Q_{\text{sol}} + Q_{\text{dcz}}) \cdot \eta_{\text{AC/H}} \quad (8)$$

式中， $\eta_{\text{AC/H}}$ 为机组换热效率。

2.2.4 蓄电

蓄电池作为一种关键的能源储存装置，可将化学能转换为电能，并能通过可逆化学反应实现再充电，在光储低碳建筑能源系统中起到重要作用。

(1) 电池容量

电池容量以安时 (Ah) 为单位。这一单位表示一个充满电的电池，以一定的电流大

小进行放电直至电池被完全放电所能工作的小时数。电池容量的大小受多个因素的影响，例如放电电流、温度等参数。放电电流越大，电池容量越小，反之亦然。

(2) 电池的自放电

电池的自放电率对于电池运行及支撑系统的时间至关重要。如果电池的自放电率高，即使在未使用和无负载条件下，也需要定期充电，以此得到期望得到的能量输出和电池的使用寿命。因此，根据所选电池的类型和它们的自放电率，可以确定无负载条件下充电的频率。典型的锂离子电池每月自放电率约为2%到3%，镍氢电池和铅酸电池在3%到6%之间，而镍镉电池高达15%到20%。

表1列出了用于光储系统中四种常用的可充电电池的特性。基于这些参数性能，不同的建筑光储系统可选择适宜类型的电池。例如，如果电池用于偏远地区，其循环寿命可能是其考虑的主要因素，要减少更换频率；如果电池安装的建筑光储系统中的空间条件有限，则其体积容量等性能可能是其主要关注的参数。

基于电池的充放电过程，电池的充电及放电能量平衡可表示为^[22]：

$$S_{EES,t} = S_{EES,t-1} \cdot (1 - \eta_{EES,t}) + (E_{EES,t,im} \cdot \eta_{EES,im} - E_{EES,t,ex} / \eta_{EES,ex}) \cdot \Delta t \quad (9)$$

式中， $S_{EES,t}$ 是时刻t的电能储存(kWh)， $E_{EES,t,im}$ 和 $E_{EES,t,ex}$ 分别是时刻t的充电功率和放电功率(kW)， $\eta_{EES,im}$ 和 $\eta_{EES,ex}$ 分别是电能储存的充电和放电效率(%)， Δt 是时间间隔(h)， $\eta_{EES,t}$ 是损耗系数(%)，在蓄电池运行过程中，其容量约束如下：

$$\omega_{\min} \cdot N_{EES} \leq S_{EES,t} \leq \omega_{\max} \cdot N_{EES} \quad (10)$$

电池在充电和放电过程中，充放电功率及状态服从如下约束：

$$\begin{cases} 0 \leq E_{EES,t,im} \leq \gamma_{EES,t,im} \cdot E_{EES}^{\max} \\ 0 \leq E_{EES,t,ex} \leq \gamma_{EES,t,ex} \cdot E_{EES}^{\max} \\ \gamma_{EES,t,ex} \in \{0,1\} \\ \gamma_{EES,t,im} \in \{0,1\} \\ \gamma_{EES,t,im} + \gamma_{EES,t,ex} \leq 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中，下标EES代表蓄电装置； E_{EES}^{\max} 是电能储存的最大充电和放电功率(kW)； $\gamma_{EES,t,im}$ 和 $\gamma_{EES,t,ex}$ 是电能储存的充电和放电状态。当

$\gamma_{EES,t,im} = 1$ 时，电能储存正在充电，而 $\gamma_{EES,t,ex} = 0$ 。相反，当 $\gamma_{EES,t,ex} = 1$ 时，电能储存正在放电。通常， E_{EES}^{\max} 与电池蓄电容量(S_{EES})之间的关系可以表示为：

$$E_{EES}^{\max} = \beta S_{EES} \quad (12)$$

式中， β 是 E_{EES}^{\max} 和 S_{EES} 的比率，即电池的充放电功率与容量之间的关联系数。

表1.不同电池特性对比

规格	铅酸	镍镉	镍氢	锂基		
				钴	锰	磷酸盐
比能量密度(Wh/kg)	30-50	45-80	60-80	150-190	100-135	90-120
寿命(循环次数)	200-300	1000	300-500	500-1000	500-1000	1000-2000
充电时长	8-16h	1h	2-4h	2-4h	1h以下	1h以下
过充容忍度	高	中	低	不能容忍		
每月自放电率	5%	20%	30%	<5%		
电池电压	2V	1.2V	1.2V	3.6V	3.6V	3.3V
充电温度	-20至50°C	0-45°C				
安全要求	温度稳定	强制热保护				

2.2.5 蓄热/冷

蓄热/冷设备(Thermal energy storage, TES)的主要功能是通过对热能进行存储、转移和释放来调节冷热量，以解决当前能源供需不匹配的问题，并提高能源的利用效率^[23]。常见的蓄能技术有水蓄热/冷、冰蓄冷、熔盐蓄热、相变蓄热、热化学蓄热等。在实际应用中，它往往与太阳能、地热等多种能源系统耦合，实现能源供应的平衡和高效利用，同时增强系统运行的灵活性和可靠性。在建筑用能侧，由于用热温度较低，典型的水箱蓄热方式更常被采用。

与电池的充放电模型类似，蓄热/冷设备的能量平衡数学模型表示如下：

$$S_{TES,t} = S_{TES,t-1} \cdot (1 - \eta_{TES,t}) + (Q_{TES,t,im} \cdot \eta_{TES,im} - Q_{TES,t,ex} / \eta_{TES,ex}) \cdot \Delta t \quad (13)$$

式中，下标TES代表蓄热/冷装置； $S_{TES,t}$ (kWh)和 $S_{TES,t-1}$ (kWh)分别表示蓄热设备前后时刻的蓄存能量的状态； $\eta_{TES,t}(\%)$ ， $\eta_{TES,im}(\%)$ 和 $\eta_{TES,ex}(\%)$ 分别代表蓄热设备的热自损率与蓄、放热效率。

3.案例分析

3.1 基础建筑参数及负荷

本文选取北京某一典型建筑社区为研究

对象，其中包括建筑类型有普通住宅建筑、高层住宅建筑、商业建筑、办公建筑四种典型功能建筑，各典型建筑参数如表2所示。

表 2.某社区建筑类型及组成

建筑类型	建筑面积 (m ²)	层 数	层 高	窗墙 比	南 度比	东 长	建 筑 数 量
普通住宅	3000	6	2.8	0.4	3	2	
高层住宅	6800	9	2.8	0.4	3	4	
办公	14300	10	4.5	0.4	3	2	
商业	12000	8	4.5	0.4	3	1	

北京的气候类型属于暖温带半湿润半干旱季风气候，夏季炎热，雨水丰富；冬季寒冷干燥，降水稀少。根据气候特点，所研究社区实行夏季供冷和冬季供暖措施，以确保了人们在不同季节都能享受到适宜的热环境。北京地区典型年的室外环境温度和太阳辐射强度逐时变化数据见图3，该地区最低温度约为-14°C，出现在1月份和12月份；最高温度约为38°C，出现在6月份和7月份，年平均气温约13°C。平均太阳辐照强度约为176W/m²，全年太阳能资源分布较为均匀。

这四类典型建筑的冷热电逐时负荷模拟采用DesT软件，围护结构采用符合北方地区的保温措施，室内人员在室率、电气设备使用率等参数与建筑类型相关，并采用典型参数设定，冬季采暖和夏季供冷时间按照冬夏室内的设定温度来计算所需的冷热负荷，并未按照日期设定采暖和供冷时间。四类典型建筑负荷如图4至图7所示。

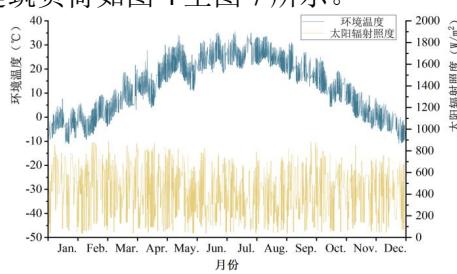


图 3.北京地区典型的逐时室外环境温度和太阳辐射强度

普通住宅建筑的冷热电负荷如图4所示。从图中数据可知，用户热负荷需求日期从11月5日至次年4月4日，在1月18日出现热负荷最大值1421.8kW。冷负荷需求日期从4月22日至10月3日，最大值为2848.6kW，出现在8月2日。普通住宅建筑用电高峰期一般在每天19:00-23:00，该时段建筑内人员密集，且电器大都处于使用状态，其余时刻用电量波动不明显。

高层住宅建筑的冷热电负荷如图5所示。从图中数据可知，用户热负荷需求日期从11月5日至次年4月8日，在1月18日出现热负荷最大值1602.2kW。冷负荷需求日期从4月27日至10月1日，最大值为3847.3kW，出现在7月31日。高层住宅建筑用电低谷期一般在每天的13:00-16:00，其余时刻电负荷稳定于较高值。

办公建筑的冷热电负荷如图6所示。由于该类建筑的办公时间为9:00-19:00，热电冷负荷只存在于该时段内。从图中数据可知，用户热负荷需求日期从11月15日至次年3月15日，在1月15日出现热负荷最大值为6994.5kW。冷负荷需求日期从5月1日至10月1日，在7月25日出现冷负荷最大值14782.7kW。办公建筑在使用时段内电负荷需求较为稳定。

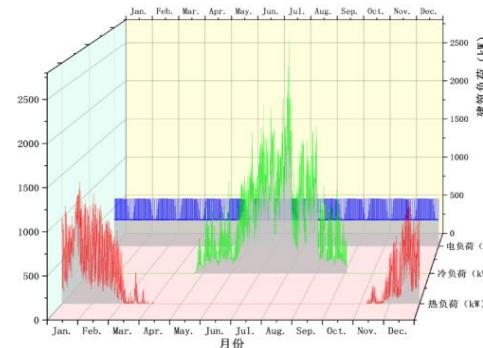


图 4.普通住宅建筑的冷热电负荷

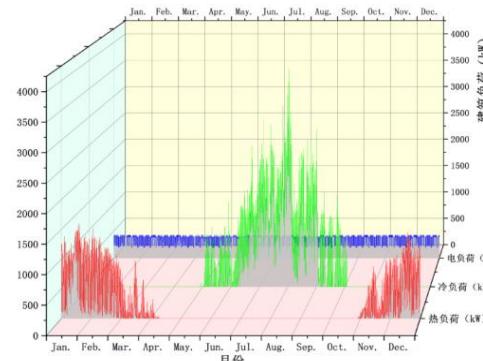


图 5.独栋高层住宅建筑的冷热电负荷

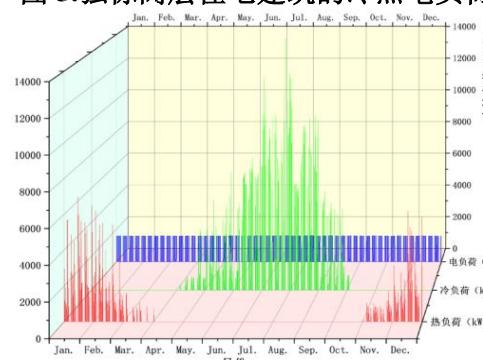
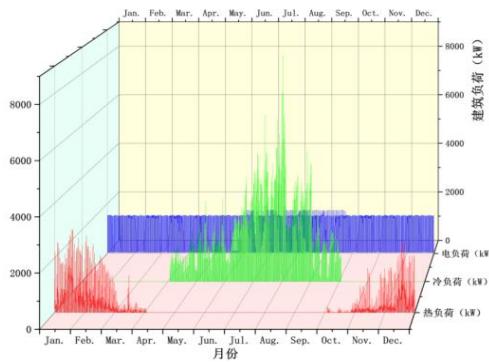


图 6.办公建筑的冷热电负荷


图 7.商业建筑的冷热电负荷

商业建筑的冷热电负荷如图 7 所示。从图中数据可知, 用户热负荷需求日期主要从 10 月 2 日至次年 4 月 2 日, 在 1 月 19 日出现热负荷最大值为 3049.3kW。冷负荷需求日期从 4 月 3 日至 10 月 1 日, 在 8 月 1 日出现冷负荷最大值 8693.1kW。商业建筑主要工作时间为 8:00-21:00, 在该时段内电负荷需求较为稳定。

3.2 建筑光伏发电量评估

由于建筑物的体量与其功能属性紧密相关, 普通住宅、高层住宅、办公和商业建筑的光伏电池设备可利用面积的存在显著差异。高层住宅建筑、办公建筑和商业建筑的建筑容量较大, 可安装面积资源更丰富, 在这三种建筑中安装光伏电池设备时, 建筑立面面积在可安装资源中占比较高。而普通住宅建筑的立面面积通常与顶部光伏设备面积差距不大, 因此光伏电池设备可安装面积有限。

基于各类型建筑的屋顶和南墙面面积, 采用如表 3 所示的光伏电池板, 利用太阳能光伏阵列的安装倾角优化方法, 最终获得如表 3 所示的光伏阵列安装组数, 其中商业建筑的屋顶安装组数最多, 而办公建筑的南墙立面在四类建筑中安装组数最多。

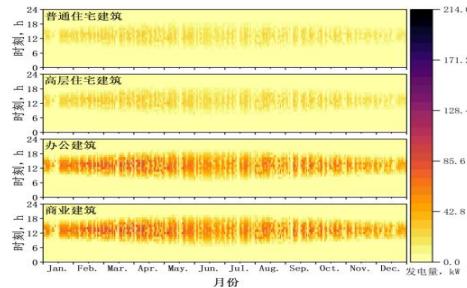
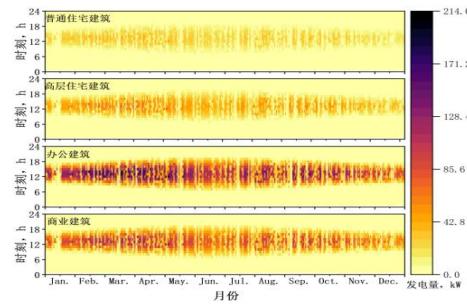
表 3.光伏阵列优化结果

光伏组件		光伏安装参数	
参数	数值	参数	数值
组件长度/m	1.65	屋顶安装角度	37.55°
组件宽度/m	1	立面安装角度	90°
额定容量/W	325	屋顶组件前后间距/m	4.23
组件材料	单晶硅	安装组数 (普通住宅/高层住宅/办公/商业)	111/129/320/330
逆变器效率	0.90	楼顶/高层住宅/办公/立面	189/327/857/585

考虑到四类建筑类型的南墙立面和屋顶

安装形式及面积的不同, 对四类建筑的南墙立面和屋顶的光伏全年逐时发电性能分别进行评估和计算, 可得如图 8 和图 9 屋顶和南墙立面安装光伏电池板的年逐时发电量。该地区全年日均光伏产电小时数为 11.9 小时, 从图中数据可知, 四类单栋建筑屋顶光伏年产电总量对比来看: 商业建筑(119.7MWh)>办公建筑(116.0MWh)>高层住宅(46.8MWh)>普通住宅(40.2MWh); 四类建筑立面光伏年产电总量对比如下: 办公建筑(220.1MWh)>商业建筑(150.3MWh)>高层住宅(84.0MWh)>普通住宅(48.5MWh)。由于建筑立面光伏可利用面积较大, 各类建筑的立面光伏发电量均不同程度地高于屋顶光伏, 而办公建筑独栋光伏发电量最大。

在四类建筑中, 普通住宅、高层住宅、办公和商业建筑的屋顶光伏电池组最大光电功率分别是 34、40、99 和 102kW, 可看到办公和商业建筑的光电功率是住宅的 2 倍多, 主要原因在于办公和商业建筑的屋顶面积较大, 其输出电功率也最大; 由于南墙立面比屋顶面积大, 则输出最大光电功率比屋顶大, 四类建筑的最大输出可分别达 47、82、214 和 146kW。


图 8.四类建筑屋顶光伏全年逐时发电评估

图 9.四类建筑立面光伏全年逐时发电评估

若整个建筑社区仅集成光伏电池板, 而不考虑太阳能集热器的集成, 则汇总独栋建筑数据可得如图 10 和图 11 混合社区的冷热电负荷及光伏发电图。由图可知: 社区热负荷需求日期从 10 月 2 日到次年 4 月 2 日, 冷负荷需求日期从 4 月 3 日到 10 月 1 日; 其

中，最大冷热电负荷分别是 50379kW、24355kW 和 7131kW。屋顶、立面及合计最大光电功率分别是 527.4kW、993.9kW 和 1521.3kW。社区全年光伏发电总量为 1643MWh。

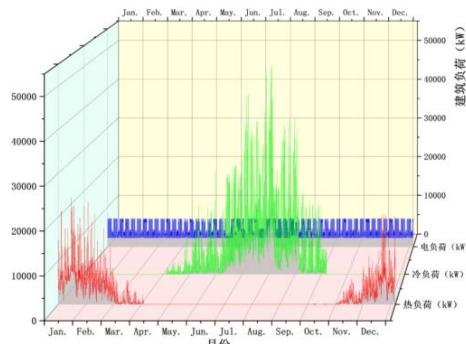


图 10. 混合社区的逐时冷热电负荷图

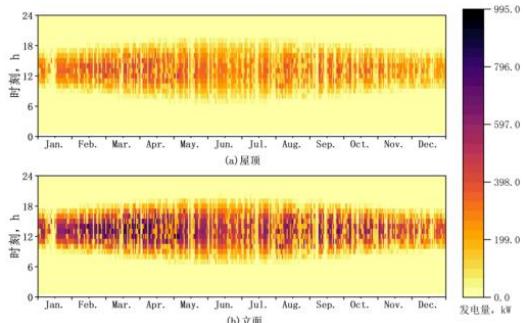


图 11. 混合社区逐时光伏发电图

整个社区各类型建筑的光伏电池年发电量及冷热电需求量如表 4 所示，可知：四种类型建筑的光伏供电量若全被建筑所利用，则供电份额仅分别为 2.50%、4.17%、8.05% 和 3.59%，总的供电量占社区用电量的 4.63%。

表 4. 社区年光伏电量及冷热电需求量汇总
(MWh)

建筑类型	屋 顶 发 电 量	立 面 发 电 量	冷 量	热 量	电 量
普通住宅	80	97	5605	2747	7069
高层住宅	187	335	12903	7747	12512
办公	232	440	7789	2680	8344
商业	119	150	4160	1190	7498

4. 结论

本文建立了光储低碳建筑的系统集成框架，并就建筑供能系统中的燃气轮机、溴化锂吸收式冷/热水机组、空气源热泵、蓄电及蓄热/冷设备等关键设备进行了建模；在此基础上，以北京某一社区建筑为例，分别对普通住宅、高层住宅、办公建筑及商业建筑等不同类型的建筑冷热电负荷进行了模拟，并评估了各类建筑屋顶及南墙立面的光伏集成

性能，获得了不同类型建筑的光伏电量产出性能。通过对该社区的算例分析，可得如下结论：

(1) 所研究社区案例的全年日均光伏产电小时数为 11.9 小时，四类建筑的屋顶和光伏产电总量与其建筑结构、外表面可安装面积密切相关；由于建筑立面光伏可利用面积较大，各类建筑的立面光伏发电量均不同程度地高于屋顶光伏，而办公建筑独栋光伏发电量最大。

(2) 当整个社区建筑采用光伏建筑一体化技术时，光伏系统全年供电总量仅占社区用电总量的 4.63%，占比较小；其中，由于办公建筑的可安装光伏面积最大，其发电总量占用电量的 8.05%，而对于普通多层住宅来说，供电占比仅为 2.50%。

参考文献

- [1] IEA. Buildings: A source of enormous untapped efficiency potential. [EB/OL] 2021.
- [2] 季海霞, 鲁月红, 刘雪梅, 吕涛, 关于发展可再生能源的可持续能源政策述评[J]. 暖通空调, 2023, 53(02):32-40.
- [3] 王利珍, 季亮, 孙铭悦, 杨将铎, 张改景, 建筑光伏储能技术研究综述[J]. 现代建筑电气, 2023, 14(02):5-11.
- [4] 严丽叶, 王天一, 我国居住建筑能耗现状和节能降碳途径[J]. 建设科技, 2023(03):26-8.
- [5] 况东, 绿色低碳建筑电气设计的几大环节及“光储直柔”系统的应用研究[J]. 电气应用, 2023, 42(01):54-9.
- [6] 胡春雨, “光储直柔”技术在“零碳”建筑中的设计与应用[J]. 安装, 2023(05):80-2.
- [7] Hamzah, A.H., Go, Y.I., Design and assessment of building integrated PV (BIPV) system towards net zero energy building for tropical climate [J]. e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 2023, 3: 100105.
- [8] Abdelrazik, A.S., Shboul, B., Elwardany, M., Zohny, R.N., Osama, A., The recent advancements in the building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) systems: An updated review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 170: 112988.
- [9] 刘文沛, 曹静, 陈源, 夏热冬冷地区公共建筑围护结构的节能影响研究[J]. 江苏建筑, 2022(06):147-9.

- [10]邹风华,朱星阳,殷俊平,孟诗语,江海燕,陈爱康,刘澜,“双碳”目标下建筑能源系统发展趋势分析[J].综合智慧能源:1-5.
- [11]Barone, G., Buonomano, A., Giuzio, G.F., Palombo, A., Towards zero energy infrastructure buildings: Optimal design for building envelope and cooling systems for distributed equipment [J]. Energy, 2023: 128039.
- [12]Al-Yasiri, Q., Szabó, M., Building envelope-combined phase change material and thermal insulation for energy-effective buildings during harsh summer: Simulation-based analysis [J]. Energy for Sustainable Development, 2023. 72: 326-39.
- [13]Wang, Z., Liu, Q., Zhang, B., What kinds of building energy-saving retrofit projects should be preferred? Efficiency evaluation with three-stage data envelopment analysis (DEA) [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022. 161: 112392.
- [14]Hickman, W., Muzhikyan, A., Farid, A.M., The synergistic role of renewable energy integration into the unit commitment of the energy water nexus [J]. Renewable Energy, 2017. 108: 220-9.
- [15]Wang, P., Huang, R., Zhang, S., Liu, X., Pathways of carbon emissions reduction under the water-energy constraint: A case study of Beijing in China [J]. Energy Policy, 2023. 173: 113343.
- [16]Fu, Z., Zhang, Y., He, S., Wang, H., Jiang, X., Wang, S., Multi-objective programming for economy - energy - environment system and policy mix with dual constraints of carbon emission and water consumption based on multi-scenario analysis [J]. Energy Reports, 2022. 8: 7884-91.
- [17]Liu, W., Wang, J., Wang, Y., Building solar integrated energy systems considering power and heat coordination: Optimization and evaluation [J]. Solar Energy, 2024. 279: 112821.
- [18]Moghadam, H., Tabrizi, F.F., Sharak, A.Z., Optimization of solar flat collector inclination [J]. Desalination, 2011. 265(1): 107-11.
- [19]Kacira, M., Simsek, M., Babur, Y., Demirkol, S., Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey [J]. Renewable Energy, 2004. 29(8): 1265-75.
- [20]Durisch, W., Bitnar, B., Mayor, J.-C., Kiess, H., Lam, K.-h., Close, J., Efficiency model for photovoltaic modules and demonstration of its application to energy yield estimation [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2007. 91(1): 79-84.
- [21]Staffell, I., Brett, D., Brandon, N., Hawkes, A., A review of domestic heat pumps [J]. Energy & Environmental Science, 2012. 5(11): 9291-306.
- [22]Bradford, J., Carmichael, E., Bean, F. The Energy Saving Trust heat pump field trial [C]. in ECEEE 2011 Summer Study: Energy Efficiency First: The Foundation of a Low-Carbon Society. Year.: ECEEE Belambra Presqu' île de Giens, France.
- [23]Gupta, R., Irving, R., Development and application of a domestic heat pump model for estimating CO₂ emissions reductions from domestic space heating, hot water and potential cooling demand in the future [J]. Energy and Buildings, 2013. 60: 60-74.