

储热储冷多场景应用专刊



融合多元储能的碳中和校园综合能源系统协同规划

徐宝萍, 窦研哲, 王 锡, 杜小泽

(华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

摘 要: 本研究旨在解决高比例可再生能源与全面电气化背景下, 校园综合能源系统面临的供需动态失配核心挑战, 提出了融合多元储能的供需协同规划方法。首先, 构建了以园区核算边界碳中和为目标的源-荷-储协同规划框架。其次, 对电气化场景下的校园冷-热-电动态负荷逐时模拟, 并评估以屋顶光伏及热泵为主的可再生能源潜力, 量化其时序供需匹配特性。在此基础上, 重点研究多元储能的协同配置: 分析从日间到季节性的储热/冷与储电需求; 提出融合被动式(建筑与冷热系统热惰性)与主动式(跨季节储热水池、车网互动)的储能技术策略并确定其容量。以某典型校园为案例构建系统规划方案进行评估, 结果表明: 本研究所提方法通过多元储能的配置与协同优化, 能够有效提升系统对可再生能源的消纳能力, 在实现园区运营阶段碳中和的同时, 保障了能源供应的经济性与灵活性。

关键词: 综合能源系统; 多元储能; 协同规划; 跨季节储热; 被动储热; 车网互动

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0076

中图分类号: TK 01; TU 83

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-1012-11

Coordinated planning of carbon-neutral campus integrated energy system incorporating multi-energy storage

XU Baoping, DOU Yanzhe, WANG Xi, DU Xiaoze

(School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: High shares of renewable energy and electrification create major challenges for campus integrated energy systems (IESs), particularly the dynamic mismatch between energy supply and demand. To address this issue, this paper proposes a supply-demand coordinated planning method based on multi-energy storage. A source-load-storage planning framework is developed with campus-level carbon neutrality as the primary objective. Under electrification scenarios, the dynamic electricity, heating, and cooling loads of a campus are simulated. The renewable energy potential of rooftop photovoltaic systems and heat pumps is evaluated. The multi-timescale matching between renewable energy supply and load demand is quantitatively analyzed. Based on these results, the coordinated configuration of multi-energy storage is studied across daily to seasonal time scales, considering both electrical and thermal storage needs. An integrated storage strategy is proposed by combining passive storage, such as the thermal inertia of buildings and heating/cooling systems, with active storage technologies, including thermal storage tanks and vehicle-to-grid (V2G) systems. System planning schemes

收稿日期: 2026-01-26; 修改稿日期: 2026-02-21。

基金项目: 国家自然科学基金 (52278106)。

第一作者及通信联系人: 徐宝萍 (1979—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为区域能源规划与柔性调控, E-mail: xubp@ncepu.edu.cn。

引用本文: 徐宝萍, 窦研哲, 王锡, 等. 融合多元储能的碳中和校园综合能源系统协同规划[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 1012-1022.

Citation: XU Baoping, DOU Yanzhe, WANG Xi, et al. Coordinated planning of carbon-neutral campus integrated energy system incorporating multi-energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 1012-1022.

are finally evaluated. The results show that the proposed method improves renewable energy utilization through coordinated energy storage, achieving campus operational carbon neutrality while maintaining economic performance and system flexibility.

Keywords: integrated energy system; multi-energy storage; coordinated planning; seasonal thermal energy storage; passive thermal storage; vehicle-to-grid

应对气候变化,推动绿色低碳发展,是我国实现可持续发展的内在要求与战略选择。作为人才培养、科技创新与社会服务的重要基地,校园建筑类型多样、用能需求集中且兼具研发与示范功能,理应在践行国家“双碳”战略中承担起时代使命,其能源系统的低碳化转型具有显著的现实意义与广泛的示范价值^[1-2]。当前,以太阳能光伏为代表的分布式可再生能源和以热泵为核心的电气化技术,已成为校园能源系统转型的两大关键支柱^[3-4]。然而,光伏发电的间歇性、波动性与校园用能(尤其是热泵负荷)的动态特性之间,存在着显著的时序错配矛盾,这使得系统的高效、稳定与经济运行面临严峻挑战^[5]。

实现校园能源系统碳中和的关键,在于解决可再生能源供给与电气化负荷需求之间的动态平衡问题。综合能源系统规划通过统筹优化“源-网-荷-储”各环节,是破解这一难题的系统性方案^[6-7]。其中,储能技术因其能量时空平移能力,已成为调节供需矛盾、提升系统灵活性与可再生能源消纳率的核心^[8-9]。然而,现有研究多聚焦于单一储能技术:文献[9]针对校园配电网开展电池储能容量优化,文献[10]对电池储能与光伏系统集成进行经济技术分析,文献[11]则聚焦于跨季节储热系统的模拟与优化。针对储热、储冷、储电等多种储能在校园综合能源系统中的协同配置与集成应用,尚缺乏系统深入的探讨。更为关键的是,传统规划多将储能作为既定方案的配套或后置选项,未能充分发挥其主动塑造系统架构、协同优化的潜力。在时间尺度方面,短期储能与长时储能的协同价值正逐渐被认识,如有学者引入氢燃料储能系统以减少电池配置容量,通过氢内燃机实现跨季节储能^[12],这为校园场景下融合跨季节储热与日内主动式储能的多元协同配置提供了有益借鉴。综上,当前研究在多元储能协同配置、多时间尺度供需匹配,以及储能作为主动变量的系统规划方法等方面仍存在明显缺口。

本研究聚焦于融合多元储能的碳中和校园综合

能源系统供需协同规划,旨在建立一个系统的规划框架与方法体系,核心工作内容是:构建考虑碳约束的源-荷-储协同优化模型;动态仿真模拟电气化转型下的负荷特性与可再生能源出力;量化分析系统在不同时间尺度下的储能需求;研究主-被动储能技术的协同选型与容量配置方法;最终通过多维度评估,验证规划方案在实现碳中和、保障经济性与可靠性方面的综合效益。

1 面向碳中和的校园综合能源系统规划框架

1.1 源-荷-储协同规划框架

从校园建筑“源-荷-储”动态匹配特性分析出发,构建校园低碳综合能源系统,如图1所示。首先,基于DeST软件建立校内典型建筑模型,依据逐时负荷动态预测校园建筑群冷、热、电负荷。其次,系统评估太阳能、浅层/深层地热、污水源等本地可再生能源的开发潜力。随后,通过量化分析光伏发电与建筑用电的时序匹配特性,明晰源-荷失配问题及不同时间尺度储能需求,并提出融合日间与跨季节储能的协同配置。最后,构建以多元储能为核心的碳中和校园综合能源系统,并评估其碳中和潜力。

1.2 主要数学模型

1.2.1 园区碳中和核算模型

采用联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)规定的排放系数法计算碳排放量。园区消耗能源产生的碳排放量:

$$CE = \sum_i AD_i \times EF_i \quad (1)$$

式中,CE为碳排放总量;AD为第*i*类能源消耗量;EF为第*i*类能源的碳排放因子。

在引入可再生能源系统后,园区内产生的清洁能源可通过替代常规化石能源或电网电力,形成碳减排贡献。可再生能源带来的碳减排量计算如下:

$$CE_{\text{off}} = \sum_i E_i \times EF_{\text{ref}} \quad (2)$$

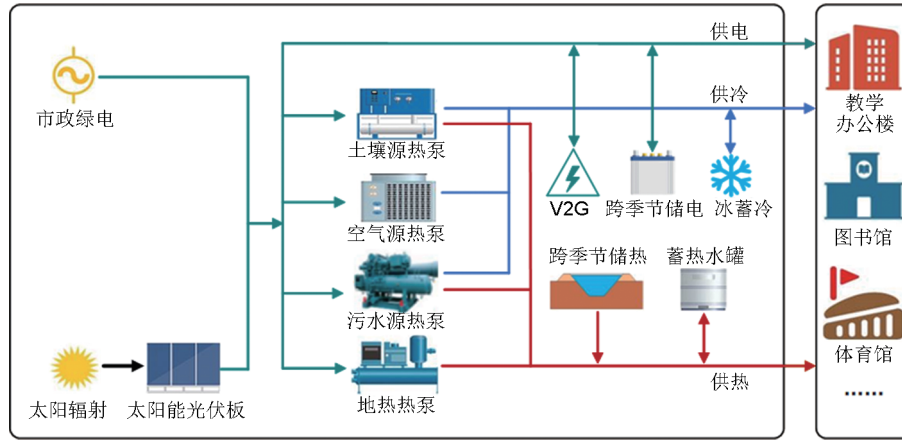


图1 校园综合能源系统“源-荷-储”协同架构

Fig. 1 Collaborative framework of source-load-storage in campus IES

式中, CE_{off} 为园区可再生能源发电形成的碳减排量; E_j 为第 j 类可再生能源的发电量; EF_{ref} 为被替代常规能源或电网电力的碳排放因子。

在全面电气化情景下, 园区运行阶段不再涉及化石能源的直接燃烧, 碳排放来源可简化为外购电力所隐含的间接排放。此时, 园区年度净碳排放量可进一步表示为:

$$CE_{\text{net}} = CE_{\text{grid}} - CE_{\text{off}} \quad (3)$$

式中, CE_{grid} 为园区外购电力对应的碳排放量。基于上述模型, 本研究将园区运营阶段碳中和定义为在既定核算边界内, 园区年度净碳排放量满足 $CE_{\text{net}} \leq 0$, 该判据作为后续综合能源系统规划方案碳中和评估的依据。

1.2.2 电-热转换模型

本研究构建的校园综合能源系统以电力为一次能源核心, 通过电热转换技术满足冷/热负荷, 并借助储热/储冷系统实现能量的跨时段平移。对储热与放热工况分别列出公式, 系统遵循如下能量平衡方程:

$$\begin{cases} P_{\text{grid}} + P_{\text{PV}} = \sum_i P_{\text{hp}, i} + P_{\text{build}} + P_{\text{V2G}, \text{ch}} - P_{\text{V2G}, \text{dis}} + \frac{E_{\text{ch}}}{\text{COP}_{\text{ch}}} \\ P_{\text{grid}} + P_{\text{PV}} = \sum_i P_{\text{hp}, i} + P_{\text{build}} + P_{\text{V2G}, \text{ch}} - P_{\text{V2G}, \text{dis}} - \frac{E_{\text{tes}}}{\text{COP}_{\text{dis}}} \end{cases} \quad (4)$$

式中, P_{grid} 为从市政电网购入电量, kWh; P_{PV} 为校内光伏发电量, kWh; P_{hp} 为基准情景(不考虑储/放热)热泵供热耗电量, kWh; P_{build} 为建筑运行耗电量, kWh; $P_{\text{V2G}, \text{ch}}$ 和 $P_{\text{V2G}, \text{dis}}$ 分别为V2G集群的充电与放电量, kWh; E_{ch} 为储能系统储热量, kWh; E_{tes} 为储能系统放热量, kWh; COP_{ch} 为热泵用于储热时的制热性能系数; COP_{dis} 为储热系统释

放热量替代热泵产热的性能系数。

系统中热力平衡遵循如下表达式:

$$\sum_i Q_{\text{hp}, i} + Q_{\text{dis}} = Q_{\text{load}} + Q_{\text{ch}} \quad (5)$$

式中, $Q_{\text{hp}, i}$ 为热泵产热量; Q_{dis} 为储热设施放热量; Q_{load} 为建筑群热负荷量; Q_{ch} 为储热量。系统中的电-热转换设备主要为各类电动热泵, 其电能至热能的转换关系由性能系数(COP)决定:

$$Q_{\text{hp}, i} = \text{COP}_i \times P_{\text{hp}, i} \quad (6)$$

1.2.3 跨季节储热模型

跨季节储热系统主要用于调节太阳能资源与冷热负荷之间的季节性差异, 其集成利用了校园内几种可回收的低品位余热(如建筑空调散热、数据中心余热、食堂烟气余热等)。校园可供储存的热量如下:

$$Q_{\text{h}}^{\text{sum}} = \sum_i \eta_i \cdot Q_i \cdot \left(1 + \frac{1}{\text{COP}_{\text{h}}}\right) \quad (7)$$

式中, $Q_{\text{h}}^{\text{sum}}$ 为总储热量; η_i 为第 i 种余热的回收系数; Q_i 为第 i 种热源的可回收热量; COP_{h} 为余热回收热泵性能系数。

根据储热需求, 储热水池所需容积为:

$$V_{\text{h}} = \frac{Q_{\text{h}}^{\text{sum}}}{\rho c_p (T_{\text{st}} - T_{\text{re}})} \quad (8)$$

式中, V_{h} 为储热水池所需容积; ρ 和 c_p 分别为水的密度和比热容; T_{st} 和 T_{re} 分别为储热水池储热温度和初始温度。

跨季节储冷系统用于解决夏季集中供冷需求与春季光伏出力富余之间的季节性错配问题。跨季节可储存冷量表示:

$$Q_{\text{c}}^{\text{sum}} = \sum_j E_j \cdot \text{COP}_{\text{c}} \cdot \eta_{\text{ec}} \quad (9)$$

式中, Q_h^{sum} 为跨季节储存的总冷量; E_j 为在春季第 j 时段可利用的剩余光伏电量; COP_c 为电动热泵制冰浆工况性能系数; η_{ec} 为冷量储存与释放过程的综合效率。

相应的, 储冷池所需容积可表示为:

$$V_c = \frac{Q_c^{\text{sum}}}{r + \rho c_p (T_{\text{sr},h} - T_{\text{re},h})} \quad (10)$$

式中, V_c 为蓄冷池所需容积; r 为 0°C 、一定比例含冰量的冰浆转化为冷水释放的潜热; $T_{\text{sr},h}$ 和 $T_{\text{re},h}$ 分别为蓄冷水池储冷温度和初始冷水温度。

1.2.4 经济模型

为系统评估综合能源系统方案的技术经济可行性, 构建全生命周期经济分析模型, 包含初始投资、运行成本及多元收益, 为校园低碳转型的投资决策提供量化依据。

初始投资计算如下:

$$C_{\text{CAPEX}} = C_{\text{RE}} + C_{\text{ST}} + C_{\text{V2G}} + C_{\text{OTHER}} \quad (11)$$

式中, C_{CAPEX} 为总投资成本; C_{RE} 为可再生能源系统投资; C_{ST} 为储能系统投资; C_{V2G} 为智能充电与 V2G 设施投资; C_{OTHER} 为其他辅助设施、系统集成与设计费用。

运行与维护成本为:

$$C_{\text{OP}} = C_{\text{Grid}} + G_{\text{Gas}} + C_{\text{OM}} - R_{\text{REC}} \quad (12)$$

式中, C_{Grid} 为外购电费; G_{Gas} 为外购天然气费; C_{OM} 为系统运维成本; R_{REC} 为绿电交易收入。

2 电气化场景下校园动态负荷模拟与特性

2.1 校园建筑概况与电气化转型

本研究对象为北京市一所综合性高校校园, 占地面积约 1150 亩, 既有建筑存量 73 座(组), 建筑面积 580000 m^2 ; 拟新建建筑 1 座, 建筑面积 44000 m^2 。校园建筑主要包括教学办公建筑、宿舍

建筑、图书馆建筑, 以及体育馆、食堂和实验室等辅助功能建筑。

在现状运行条件下, 校园能源供应以市政电力、燃气锅炉供热、中央制冷系统为主, 部分建筑采用分散式电制冷设备。考虑“双碳”目标约束及校园低碳转型需求, 本研究构建了以终端用能电气化为核心的校园能源转型路径, 即以电动热泵系统替代燃气锅炉供热和分散式制冷方式, 实现冷、热负荷的电气化供应, 从而形成以电力为核心的校园综合能源系统。

2.2 冷-热-电动态负荷模拟

基于 DeST 软件进行校园典型建筑全年冷-热-电逐时负荷模拟, 进而分析建筑群负荷在不同季节和时段的动态变化。选取教学办公建筑、宿舍楼和图书馆等作为代表建筑, 在 DeST 中建立各建筑物理模型, 如图 2 所示。主要依据两点: ①三类建筑的总面积占校园既有建筑总面积的 86.3%, 构成了校园建筑主体; ②用能强度的显著性, 据实际统计数据, 三类建筑用能约占校园既有建筑能耗的 84.9%, 构成了校园用能主体。

模拟的关键参数设定包括建筑围护结构热工性能、室内采暖空调设定参数、内热扰功率密度以及运行模式。其中, 围护结构热工参数依据施工设计图纸说明确定, 见表 1。采暖空调设定温度、内热扰(人员、灯光、设备)功率密度及运行模式, 依据 DB11/T 687—2024《公共建筑节能设计标准》、DB11/891—2020《居住建筑节能设计标准》并结合大学作息日历进行设置。

2.3 校园负荷特性

代表建筑典型日逐时负荷模拟结果, 如图 3 所示。教学办公建筑和宿舍建筑的逐时负荷分布呈明显互补趋势, 当进行综合能源系统联合供给时, 可使得总负荷波动较为平缓, 机组的部分负荷调节性能更好。

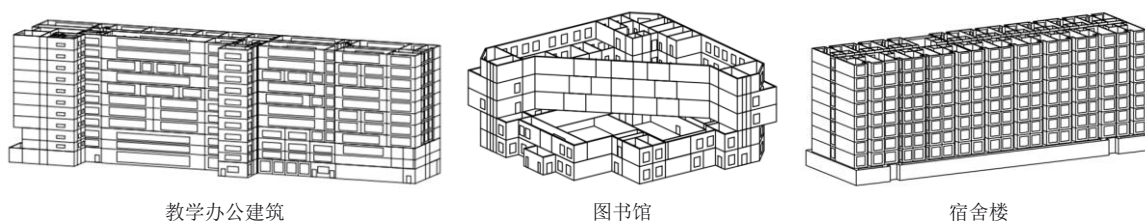


图2 代表建筑物理模型

Fig. 2 Represents building physical model

表1 围护结构主要热工参数
Table 1 Main thermal parameters of enclosure structure

建筑类型	围护结构	建筑材料	导热热阻/[$(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$]	传热系数/[$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]
教学办公建筑	外墙	陶粒180_苯50_灰砂180	1.694	0.54
宿舍楼	外墙	混凝土墙	1.45	0.62
图书馆	外墙	混凝土墙_珍_85	1.898	0.49
以上各类建筑	屋顶	加气混凝土保温屋面	1.074	0.81
	楼地	40 mm 混凝土楼地	0.047	0.85
	外窗	真空+镀low-e膜玻璃	—	2.2

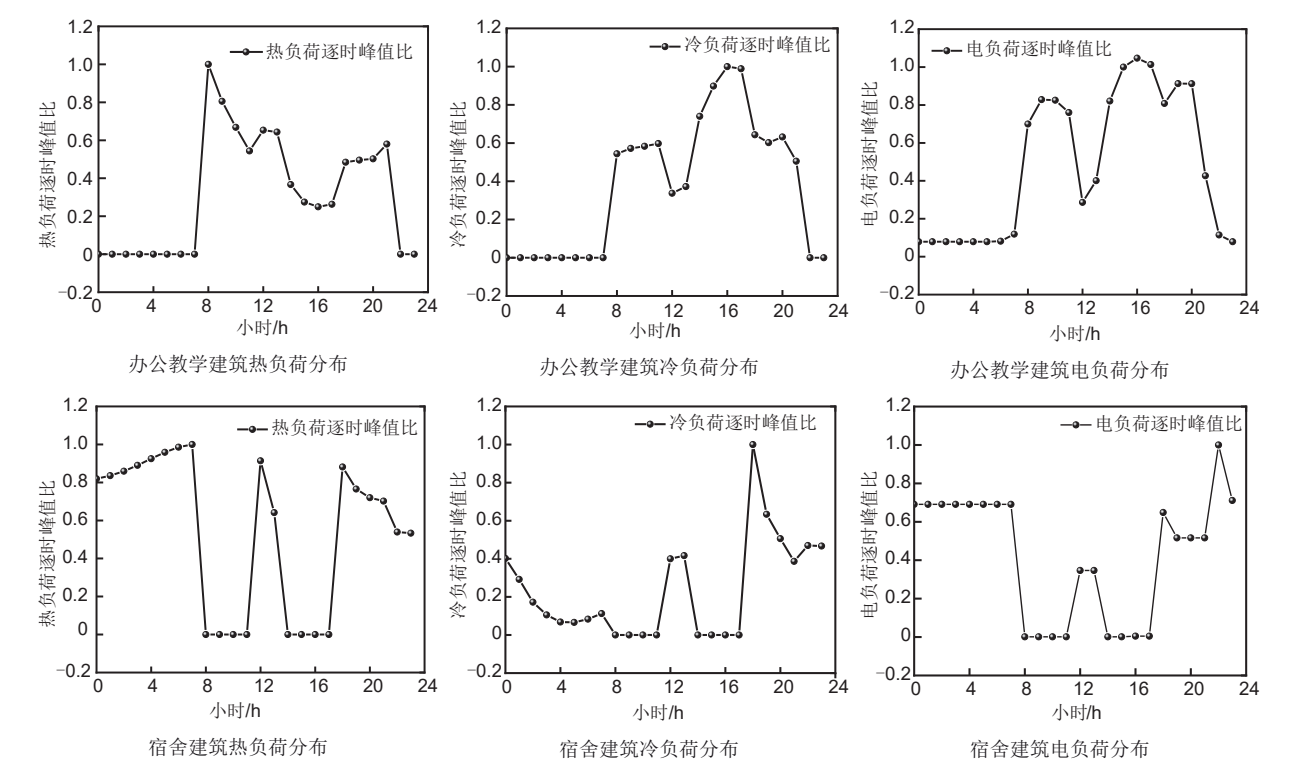


图3 代表建筑典型日逐时负荷分布
Fig. 3 Typical day hourly load of building

图4为典型建筑全年逐时冷热负荷。建筑热负荷峰值出现在2月19日，冷负荷峰值出现在7月6日。代表建筑在寒暑假期间，由于部分学生返乡、教师放假，冷热负荷有所减小，体现出明显的校园用能负荷季节性波动特征。

经校园建筑群负荷聚类统计分析，当校园冷热负荷由电动热泵系统承担，校园电负荷需求显著提升。如图5所示，电气化场景下校园电负荷达到31.19 MW，需配置变压器容量37430 kVA，比现状变压器容量24580 kVA高出52.3%。

3 校园可再生能源潜力与出力特性

3.1 屋顶光伏可利用潜力评估

为评估校园屋顶光伏的可利用潜力，对校园建筑

屋顶的资源进行统计。如图6所示，校园建筑平屋顶可用面积87633 m²，斜屋顶可用面积12929 m²。结合中国气象数据网获取的北京市太阳辐射数据，水平面年总辐照量为1404 kWh/m²，年折算日照时间取1300 h。计算得出，校园屋顶光伏系统的装机容量为10229 kWp，年发电量约为13290 MWh。

3.2 地热与污水源可利用潜力评估

基于校区自然资源条件，评估地热能 and 污水源等可再生能源的利用潜力。根据北京市地质勘察数据^[13]，校区位于冲洪积扇中下部，地层颗粒细，地层可钻性好，属于土壤源热泵适宜区，如图7所示。校内可布置地埋管的绿地资源约48500 m²，如图8所示。

区东 15 km 地热井运行参数(51.5℃, 1200 t/d), 规划校区范围内深层地热孔 1 个, 热泵装机容量可达 2200 kW。

污水源热泵技术利用污水处理厂的污水进行热量交换, 有效回收污水中的低品位热能。校区内两个污水处理站, 其日处理能力为 1000 t/d 和 500 t/d。换热温差取 5~8℃, 冬季 COP 取 4, 夏季 COP 取 5, 可得污水热泵供热容量 484 kW、供冷容量 581 kW。

3.3 可再生能源潜力小结

结合校区资源禀赋与负荷需求, 合理开发可再生能源, 为校园综合能源系统提供了多元化绿色能源供给, 其潜力评估见表 3。

表 3 校内可再生能源潜力	
Table 3 Renewable energy potential on campus	
能源种类	潜力计算结果
太阳能光伏	装机容量 10229 kWp
	年发电量 13290 MWh
土壤源热泵	供热容量 13552 kW
	供冷容量 16940 kW
深层地热能	供热容量 2200 kW
污水源热泵	供冷容量 581 kW
	供热容量 484 kW

4 基于供需协同的校园多元储能配置

4.1 储能需求分析

4.1.1 跨季节储能需求

校园市政电力来自京津唐电网, 其风光发电波动与电负荷波动特征为: 春秋电量较为充裕, 夏季与冬季缺电, 未来扩大热泵供热, 冬季用电更加不足。校园建筑群全年耗电量与太阳能辐照度的逐月匹配关系, 如图 9 所示, 校园受寒暑假作息影响, 夏季电力不足问题有所缓解, 而冬季供暖期仍存在光伏电力供应不足的情况。因此, 综合考虑市政电网与校园微电网的可再生能源发电与电气化负荷之间的时序波动性, 引入跨季节储能技术, 着重解决冬季电力短缺、春季电力过剩的矛盾。据校园全年动态负荷与既有太阳光伏系统发电量统计分析, 须考虑跨季节储热容量 1146 万 kWh、跨季节储电容量 565 万 kWh。

4.1.2 日间储能需求

校园建筑的日间运行中, 太阳能光伏发电出力与校园整体电力需求之间的时序差异如图 10 所示。

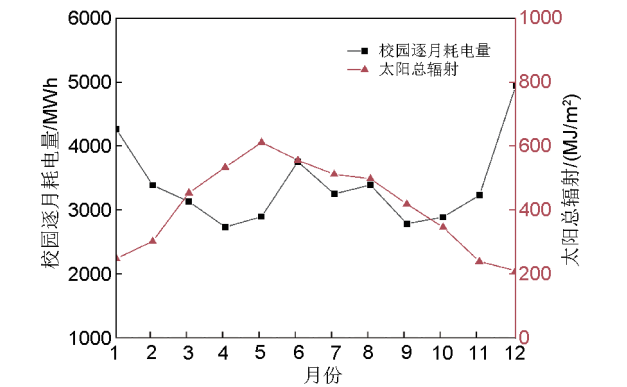


图9 校园耗电量与太阳总辐射逐月匹配关系
Fig. 9 Electricity use and solar radiation on campus

结果显示, 光伏发电的高峰通常出现在午间师生休息时段, 而校园电力需求高峰则集中于上午及下午的工作时段。因此, 两者在时间上存在错位, 尤其是在光伏发电量较高而电力需求相对较低的情况下, 光伏电力难以被有效利用。典型日校园建筑负荷率介于 30%~90%, 需通过柔性调控激活系统主被动蓄放热, 提升校园用能灵活性; 其次, 规划光伏系统 10229 kWp, 需配置等规模储电设施, 以应对其日内变化。

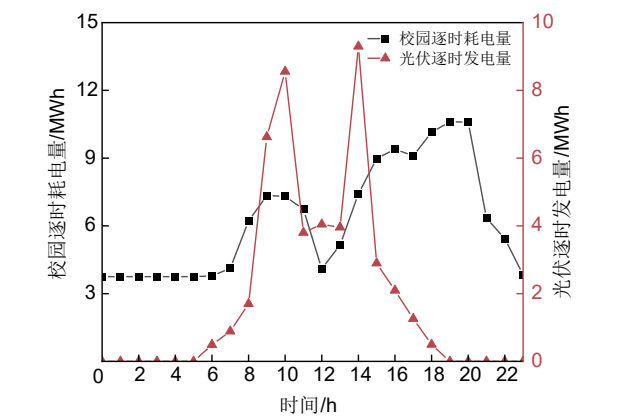


图10 日间校园逐时耗电量与光伏逐时发电量
Fig. 10 Hourly campus power demand and PV output during daytime

4.2 多元储能技术选择

4.2.1 跨季节储能技术

(1) 跨季节储热

储热设施的建造成本远低于直接储电方式和抽水蓄能、空气压缩等间接储电方式^[4], 本研究优先通过电动热泵实现“电-冷/热”转换, 引入跨季节储冷与储热机制: 在光伏出力富余季节, 将电能转化并存储为冷量和热量, 分别用于夏季供冷和冬季

供暖,从而在系统层面实现电力负荷的季节平移。

跨季节蓄热系统如图11所示,通过电动热泵提取建筑中央空调散热、数据中心余热等热量并储存于蓄热水池中,用于冬季供暖。将动态负荷模拟结果代入式(7)计算得出,可回收热量约1146万kWh,取储热温差 75°C ,代入式(8)得出需建设 125000 m^3 储热水池,约可满足冬季供暖量50%。水池在冬季释热供暖同时蓄存冷量,并在春季光伏富余时驱动热泵制冰浆,用于夏季供冷,结合式(9)计算得可存储冷量约1059万kWh。经核算,当储冷温差 30°C 、冰浆含量60%时,需蓄冷池容积为 123000 m^3 。因此,按储热容量确定水池体积,可同时满足跨季节储热/冷需求。

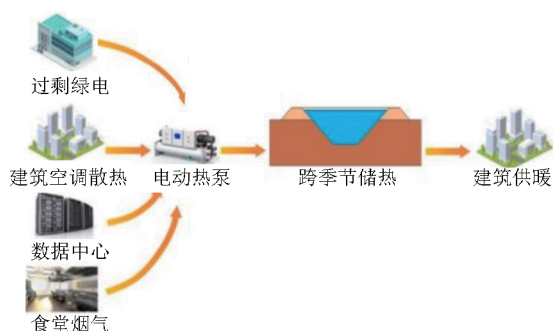


图11 跨季节储热系统

Fig. 11 Seasonal thermal storage system

(2) 跨季节储电

跨季节储热虽不直接产电,但能极大程度上替代冬季热泵耗电,这是削减冬季电力负荷最经济有效的手段。经测算,通过跨季节储热可削减校园冬季热泵耗电量约382万kWh。当通过以上手段最大限度“瘦身”后,校园仍存在冬季电力缺口约565万kWh,接入外部绿色电力市场:将“跨季节储能”的功能,外包给更宏观的电力系统。例如,在冬季通过采购绿电(来自远方的大型风电、光伏基地或水电)来填补缺口。

4.2.2 日间储能技术

被动式储能主要依靠建筑的热惰性和热泵系统供暖产生的热能,以平衡日间能量供需。建筑围护结构能够在冬季供暖期间吸收并储存热泵系统产生的多余热量,从而解决光伏发电与供热需求的时序错配问题。利用系统被动蓄放热,在日内需求响应事件中的削峰率可达40%~87%^[15]。

冰蓄冷与储热罐系统是成熟的主动式储能技术。

办公科研大楼利用冰蓄冷系统夜间制冰,白天融冰释冷,为电力高峰期提供空调冷源,可实现高峰期制冷系统用电削峰率约60%^[16]。储热罐系统则在光伏发电出力过剩时,将热泵提供的热量储存起来,高峰用电期蓄热水罐供暖,实现高峰期热泵系统用电削峰。

随着电动汽车的普及,V2G技术成为日间短期储能的重要方法。V2G技术通过智能充电桩与车载电池之间互动,将车载电池作为一个可调度的储能单元。日间校园内的光伏发电出力超过建筑的用电需求时,多余电能通过V2G系统存入车载电池中;在电力需求高峰时段,车载电池向校园电网反向放电,缓解电网负荷,并支撑校园建筑的用电需求。经统计,校园地上停车位827个,每辆汽车的电池容量50~100 kWh,13.3 kW/车位计,V2G智能充电可支撑11026 kWp光伏系统日间调蓄。校园充电站分布如图12所示。



图12 校园充电站分布

Fig. 12 Campus charging station distribution

4.3 多元储能容量配置

基于校园建筑负荷特性与可再生能源潜力分析,确定日间、季节性等不同时间尺度储能需求,进而提出适用于校园场景的多元储能配置方案,见表4。

5 规划方案评估

5.1 能源结构

本研究构建了基于“源-荷-储”协同规划框架的碳中和校园综合能源系统。该系统以本地可再生能源与多元储能为核心,通过热泵技术整合多种品位热源,并协同主动与被动储能策略,形成了互补、高效、灵活的能源供应结构。系统的冷、热、电供应结构依据校园资源条件与负荷特性进行配置,如图13所示。

表4 多元储能容量配置

Table 4 Multi-type energy storage capacity configuration

储能类型	容量配置	储能技术	应用描述
跨季节储热	1 146 万 kWh	热泵系统+储热水池	校园各类余热转化为热量储存，供冬季供暖使用
跨季节储冷	1 059 万 kWh	热泵系统+储冷池	消纳春季绿色电力转化为冷量储存，供夏季供冷使用
日间储冷/热	30 万 kWh	冰蓄冷/储热罐	电力低负荷制冷/热储能，白天需求高峰期释放，平衡日内负荷
V2G 储电	11 000 kWp	智能充电桩	在充电时储存电力，并在需求高峰时段向电网反向送电，平衡电力波动

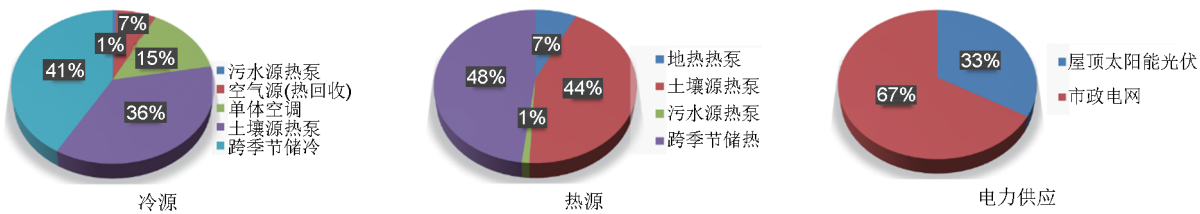


图13 校园综合能源系统的能源结构

Fig. 13 Energy structure of the campus IES

5.2 碳中和评估

基于校园碳中和核算模型，对提出的综合能源系统在运营阶段的碳排放定量评估。核算边界限定为校园运行阶段的能源消费活动，包括外购电力产生的间接排放以及园区内可再生能源发电带来的碳减排贡献。

在全面电气化情景下，校园运行阶段碳排放全部源于外购电力。规划目标年市政电网绿色电力占比为60%。校园全年碳基用电量约为1315万kWh，屋顶光伏系统年发电量约为1329万kWh。校园可再生能源发电的碳减排量可完全抵消其外购电力对应的间接碳排放，年度净碳排放量满足 $CE_{net} \leq 0$ 。因此，所构建的融合多元储能的校园综合能源系统在运营阶段实现了核算边界内的碳中和目标。

5.3 经济性概算

为了评估校园综合能源系统的经济可行性，对系统初始投资、运行成本以及经济效益进行分析。初始投资主要包括可再生能源系统(如太阳能光伏、地热源热泵等)、跨季节储能系统、V2G智能充电设施的建设费用，预计总投资额为1.93亿元人民币，见表5。

系统的年运行成本主要包括外购电力费用和系统运维费用。根据负荷模拟与电价预测结果，校园全年总用电需求中，约需外购电力3276万kWh；依据区域电网规划绿电比例(60%)，约1966万kWh通过采购绿电满足(其中565万kWh满足冬季电力调峰缺口)，其余1310万kWh购买常规电力。

表5 校园综合能源系统初投资

Table 5 Campus IES initial cost

系统名称	投资概算	运维费率/运维	运维费用
	/万元	单价	/万元
地热泵系统	354	3.8% ^[17]	13.5
土壤源热泵系统	4830	2.7% ^[18]	130
污水源热泵系统	210	4.6% ^[19]	9.7
太阳能光伏系统	3826	0.038元/W ^[20]	38.9
跨季节蓄热水池/蓄冷池	7688	3.5% ^[21]	269.1
V2G智能充电设备	1300	4.0%	52.0
主动蓄冷、蓄热	1079	3.0%	32.4
总计	19287	—	545.6

参考国家能源局发布的可再生能源绿色电力证书管理实施细则及北京市2026年绿电采购项目价格，绿电费用约735万元(其中10万元为绿证成本)，常规电力费用约662万元，校园每年外购电力费用约1397万元。系统运维费用按表4概算，每年约546万元，全年总运行费用约1943万元。在校园全面电气化并实现碳中和情境下，相较于既有系统(分体式空调承担冷负荷、天然气锅炉承担热负荷、电力全部外购)，每年可节省约1399万元。

与单一储电情景下的校园能源系统方案相比，本研究方案在经济性上进一步提升：通过跨季节储热替代部分高价储电(约382万kWh)，并引入大市政绿色电力调峰，解决约40%跨季节储电容量需求。其次，本研究方案通过融合主-被动储冷热策略与V2G技术，日内可调节负荷率达30%~60%，提升了系统用能灵活性。综上，相较于以单一储电

为核心的校园能源系统方案, 本研究所提多元储能协同规划方法在经济性、系统灵活性等方面均展现出明显优越性。

6 小 结

针对高比例可再生能源与全面电气化背景下校园综合能源系统的供需动态失配问题, 提出了一种融合多元储能的供需协同规划方法。主要研究结论如下:

(1) 构建了“源-荷-储”协同规划框架: 通过动态模拟校园负荷并评估可再生能源潜力, 量化分析了多时间尺度的供需动态匹配特性, 明晰了电力增容与储能需求, 为同类园区低碳能源规划提供了系统性的方法支撑。

(2) 提出了经济高效的多元储能协同配置方案: 针对季节性不平衡, 采用储热替代储电的热电协同策略, 可解决约40%跨季节储电需求; 针对日内不平衡, 融合建筑热惰性与V2G等主被动储能技术, 实现系统柔性调控削峰率达30%~60%, 显著提升了灵活性。

(3) 验证了方案在碳中和目标下的技术经济可行性: 相较于既有能源系统方案, 本研究方案在实现运营阶段碳中和的同时, 年运行费用节省约41.9%, 证明了多元储能在兼顾低碳性与经济性方面的综合优势。

本研究侧重于规划层面的宏观框架设计, 对跨季节储热水池的热力学性能优化、多元储能系统在多时间尺度下的调控策略尚未深入展开。后续研究将结合动态仿真与优化控制方法, 进一步探索储热系统与热泵耦合运行机理、主被动储能实时电价下的协同调控策略, 推进研究成果向工程实践的深入转化。

参 考 文 献

- [1] 新华社. 中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]. [2021-10-24]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
- [2] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告2022[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
Building Energy Research Center, Tsinghua University. China building energy conservation annual development research report 2022[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2022.

- [3] International Energy Agency (IEA). Renewables 2024: Analysis and forecast to 2030[R]. Paris: IEA, 2024.
- [4] 陈洪银, 王松岑, 芋耀贤, 等. 新型电力系统下电热双向灵活转换技术研究进展及展望[J]. 新型电力系统, 2025, 3(2): 157-176.
CHEN H Y, WANG S C, YU Y X, et al. Research progress and prospects of technologies for bidirectional and flexible conversion between electricity and heat in the new type power systems[J]. New Type Power Systems, 2025, 3(2): 157-176.
- [5] 刘吉臻, 王庆华, 胡阳, 等. 新型电力系统的内涵、特征及关键技术[J]. 新型电力系统, 2023, 1(1): 49-65.
LIU J Z, WANG Q H, HU Y, et al. Connotation, characteristics and key technologies of new power systems[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(1): 49-65.
- [6] DING Y, WANG Q C, TIAN Z, et al. A graph-theory-based dynamic programming planning method for distributed energy system planning: Campus area as a case study[J]. Applied Energy, 2023, 329: 120258. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.120258.
- [7] 陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2024年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(6): 2149-2192.
CHEN H S, LI H, XU Y J, et al. Research progress on China's energy storage technology in 2024[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(6): 2149-2192.
- [8] 赵波, 林达, 陈哲, 等. 面向新能源消纳的长短周期混合储能关键技术及展望[J]. 新型电力系统, 2024, 2(2): 162-178. DOI: 10.20121/j.2097-2784.https.240007.
ZHAO B, LIN D, CHEN Z, et al. Key technologies and prospects of long-short-cycle hybrid energy storage for renewable energy consumption[J]. New Type Power Systems, 2024, 2(2): 162-178. DOI: 10.20121/j.2097-2784.https.240007.
- [9] İSÇAN S, ARIKAN O. Optimizing battery energy storage system for campus micro grid: Economic and environmental benefits of strategic sizing[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 124: 116905. DOI: 10.1016/j.est.2025.116905.
- [10] ZHOU H Y, BI J P, LÜ Y X, et al. Techno-economic analysis of solar photovoltaic systems integrated with battery energy storage for university campuses[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 129: 117360. DOI: 10.1016/j.est.2025.117360.
- [11] ZHANG R Y, LI Z, LIU P. Modeling and optimization of a heating and cooling combined seasonal thermal energy storage system towards a carbon-neutral community: A university campus case study[J]. Energy, 2025, 319: 135122. DOI: 10.1016/j.energy.2025.135122.
- [12] 杨倩鹏, 陈晓文, 王辉, 等. 基于氢燃料储能的离网式风-光-储混合能源系统配置规划及运行策略研究[J]. 燃烧科学与技术, 2025, 31(2): 138-149. DOI: 10.11715/rskxjs.R202404004.
YANG Q P, CHEN X W, WANG H, et al. Configuration planning and operation strategy of off-grid wind solar storage hybrid energy system based on hydrogen fuel energy storage[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2025, 31(2): 138-149. DOI: 10.11715/rskxjs.R202404004.
- [13] 董殿伟, 江剑, 王立发, 等. 北京市平原地区地源热泵系统适宜性分区评价[J]. 北京水务, 2010(2): 12-14. DOI: 10.3969/j.issn.1673-

- 4637.2010.02.006.
DONG D W, JIANG J, WANG L F, et al. AHP applied to appraise suitability of geothermal pumping system in Beijing[J]. Beijing Water, 2010(2): 12-14. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4637.2010.02.006.
- [14] 江亿. 怎样改造中国的供热系统[EB/OL]. [2026-1-12]. <https://news.qq.com/rain/a/20260112A049XE00>.
- [15] FOTEINAKI K, LI R L, PÉAN T, et al. Evaluation of energy flexibility of low-energy residential buildings connected to district heating[J]. Energy and Buildings, 2020, 213: 109804. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.109804.
- [16] LUO N, HONG T Z, LI H, et al. Data analytics and optimization of an ice-based energy storage system for commercial buildings[J]. Applied Energy, 2017, 204: 459-475. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.07.048.
- [17] YILMAZ C, ARSLAN M, TOKGOZ N, et al. Thermoeconomic performance evaluation and optimization of a geothermal heat pump system for greenhouse heating in low-temperature resources [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2025, 82: 104574. DOI: 10.1016/j.seta.2025.104574.
- [18] 黄冬, 刘洋, 王选, 等. 寒冷地区近零能耗办公建筑节能减碳技术与经济性分析[J]. 建筑科学, 2025, 41(12): 127-137. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2025.12.15.
- HUANG D, LIU Y, WANG X, et al. Energy saving and carbon reduction technology and economic analysis of nearly-zero energy office buildings in cold regions[J]. Building Science, 2025, 41(12): 127-137. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2025.12.15.
- [19] 张杨杰, 毛丁, 王芑, 等. 沧州污水源热泵供热系统经济与节能减排分析[J]. 煤气与热力, 2021, 41(9): 1-4, 9, 41. DOI: 10.13608/j.cnki.1000-4416.2021.09.001.
- ZHANG Y J, MAO D, WANG P, et al. Analysis on economy, energy saving and emission reduction of Cangzhou sewage source heat pump heating system[J]. Gas & Heat, 2021, 41(9): 1-4, 9, 41. DOI: 10.13608/j.cnki.1000-4416.2021.09.001.
- [20] 中国光伏行业协会. 2024—2025年中国光伏产业发展路线图[R/OL]. [2025-11-24]. https://www.chinapv.org.cn/Industry/resource_1405.html.
- [21] YANG T R, LIU W, KRAMER G J, et al. Seasonal thermal energy storage: A techno-economic literature review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 139(C): DOI: 10.1016/j.rser.2021.110732.