

文章编号: 1671-6612 (2025) 05-678-10

光伏消纳驱动下 建筑水蓄冷系统的设计优化与运行特性研究

闵晓丹 戎向阳 刘希臣

(中国建筑西南设计研究院有限公司 成都 610041)

【摘要】 传统的水蓄冷系统设计主要侧重于峰谷电价差的经济性优化, 未充分考虑光伏发电特性及其与建筑能耗的匹配问题。以某机场新建 T2 航站楼为例, 探讨了光伏消纳驱动下水蓄冷系统的设计优化与运行特性。首先, 结合当地的气候特征和太阳能资源情况, 预测了机场光伏系统的全年动态发电量; 通过对现有 T1 航站楼的现场调研数据, 进一步推算了 T2 航站楼的全年用能特性。基于光伏发电与建筑能耗的匹配性分析结果, 在未采取任何储能措施的情况下, 光伏发电自消纳率仅为 55%。为提升光伏产能的消纳水平, 提出了“白天蓄冷、夜间放冷”的设计理念, 以有效吸纳白天产生的过剩光伏电量, 并保障夜间冷量的稳定供应。同时探讨了蓄冷系统主机配置与运行策略, 提出了蓄冷系统容量优化的确定方法, 可使蓄水装置全年平均负载率提升至 79%, 系统全年可消纳光伏电量 24.25 万 kWh, 占全年总发电量的 7.3%, 为新型电力结构下建筑柔性用能系统的设计提供了技术支持。

【关键词】 光伏发电; 水蓄冷; 柔性用能; 光伏消纳

中图分类号 TU211.2 文献标志码 A

Research on the Design Optimization and Operational Characteristics of Building Water-based Thermal Storage System Driven by Photovoltaic Power Consumption

Min Xiaodan Rong Xiangyang Liu Xichen

(China Southwest Architectural Design and Research Institute Co., Ltd, Chengdu, 610041)

【Abstract】 Traditional design of water-based thermal storage system mainly focuses on economic optimization based on peak-valley electricity price differences, without fully considering the characteristics of photovoltaic (PV) power generation and its matching with building energy consumption. This paper explores the design optimization and operational characteristics of an airport water-based thermal storage system driven by photovoltaic power consumption, using the T2 terminal of an Airport as a case study. Firstly, the paper predicts the annual dynamic power generation of the airport's PV system, based on an analysis of the climate characteristics and solar energy resources. Additionally, through on-site survey data from the existing T1 terminal, the paper further estimates the annual energy consumption characteristics of the T2 terminal. Based on a matching analysis between photovoltaic (PV) generation and building energy consumption, the self-consumption rate of PV electricity is only 55% in the absence of any energy storage measures. To enhance the utilization of PV output, a design concept of “daytime cooling storage and nighttime cooling release” is proposed, aiming to effectively absorb the surplus PV generation during the day while ensuring a stable supply of cooling demand at night. The paper also discusses the configuration of the thermal storage system and operational

基金项目: 中建西南院重点课题 (R-2023-08-M-A-2024); 天府永兴实验室开放课题 (2024KFXM02)

作者简介: 闵晓丹 (1984.01-), 女, 硕士, 高级工程师, E-mail: 469536835@qq.com

通讯作者: 戎向阳 (1964.12-), 男, 学士, 教授级高级工程师, E-mail: rxy_cswadi@qq.com

收稿日期: 2025-07-14

strategies, and proposes a method for optimizing the thermal storage system’s capacity, which increased the annual average load factor of the chilled-water storage unit to 79%. Under this configuration, the system could consume 242,500 kWh of PV electricity annually, accounting for 7.3% of the total annual PV generation, thus providing technical support for the design of flexible energy systems in buildings under the new energy structure.

【Keywords】 Photovoltaic power generation; Water-based thermal storage; Flexible energy use; Photovoltaic power consumption

0 引言

在当前“双碳”目标背景下，低碳建筑和零碳建筑的建设逐渐成为主流，甚至负碳建筑成为新的发展趋势^[1,2]。建筑不仅仅扮演着能耗端的角色，更需向生产端转型，具备能源的自给自足能力。因此，太阳能光伏发电技术作为一种可持续的能源形式，已在建筑领域得到广泛应用。通过光伏发电与建筑本身能耗的匹配，力求实现能量的平衡，从而实现零碳建筑的目标^[3,4]。

尽管光伏发电具有清洁、绿色的优势，但其生产特性具有不稳定性、波动性等特点，使得其与建筑的用能特性并非完全匹配。在不采用上网措施的情况下，为避免过剩的电能浪费，就需要建筑具备需求侧响应和柔性调节的能力。蓄电池虽然具备良好的蓄能和柔性调节功能，但其高初投资和有限的使用寿命限制了其在系统中的大规模广泛应用^[5]。相较之下，空调系统的蓄冷、蓄热技术作为一种可行的柔性调节手段，特别是在空间较为宽裕的机场建筑中展现出其独特优势^[6,7]。

然而，当前蓄冷、蓄热技术应用主要基于传统电力结构下的峰谷电价差，以提高系统运行的经济性^[8,9]，目前设计手册与相关文献也大多围绕这一方向展开。在光伏消纳背景下，蓄冷、蓄热技术的应用尚缺乏具体的设计方法和容量优化策略。因此，如何在光伏消纳的前提下进行空调蓄能系统的合理设计，特别是在需求侧响应和柔性调节方面进行深入探讨，成为亟待解决的问题。

本文将以某机场 T2 航站楼为例，探讨光伏消纳作用下的水蓄冷系统设计方法，分析系统容量的合理配置与运行控制策略。通过对水蓄冷技术在光伏发电和建筑需求侧响应中的应用进行研究，为类似工程提供借鉴，推动建筑用能柔性化发展，助力实现零碳建筑目标。

1 机场产能能力分析

本新建 T2 航站楼的建筑面积为 3.3 万 m²，位于夏热冬暖地区。当地的太阳能年总辐射量数据为 1600kWh/m²，结合太阳能资源分区划分，该区域被归类为 II 类地区，属于太阳能资源相对丰富的区域。在此背景下，为实现航站楼低碳、零碳排放的目标，本项目采用在航站楼屋顶全覆盖太阳能光伏系统的方案。为了兼顾建筑外观与绿色节能要求，新建航站楼的屋顶设计采用定制化的光伏瓦组件，以确保其与周围建筑风貌的协调性，光伏瓦组件的具体规格为每块组件尺寸：1180mm×530mm，共铺设约 33000 块光伏瓦实现屋顶的满铺，在保证高效的光伏转化率的同时具备良好的抗风压能力和耐久性，光伏组件参数如表 1 所示。

表 1 光伏系统参数

Table 1 Photovoltaic System Parameters	
材质	单晶硅
尺寸 mm	1180×530
最大功率 W	100
峰值功率电压 V	11.97
峰值功率电流 A	8.35
开路电压 V	14.08
短路电流 A	8.79
组件效率	16%

为了评估光伏发电系统的整体效率及逐时发电量，采用数值模拟方法对系统性能进行了详细分析。由于屋顶造型的影响，光伏瓦在不同铺设区域的安装角度和方位存在差异，直接影响其发电效率。此外，室外气象参数的变化，如太阳辐射、环境温度和风速等，也对光伏系统的效率产生影响。为全面评估上述因素对光伏发电效率的综合作用，本研究采用了 EnergyPlus 软件中的 Generator PVWatts 计算模块。该模块结合气象数据（包括太阳辐射、环境温度和风速）、光伏组件性能以及铺设方位等多个因素进行综合计算，计算得出光伏系

统全年发电量为 331 万 kWh, 且其发电量分布如图 1 所示。

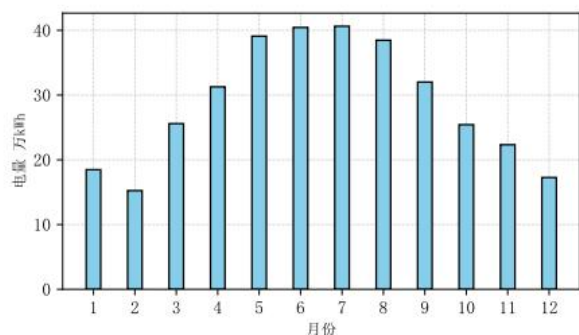


图 1 光伏发电量

Fig.1 Photovoltaic Power Generation

2 用能强度分析

2.1 现有 T1 航站楼调研

鉴于 T2 航站楼为新建航站楼, 当前尚无法获取其具体的用电强度和用电规律, 因而本研究通过对现有 T1 航站楼的用能进行实地调研与数据分析, 揭示既有航站楼的用能构成、不同系统的逐时用电强度以及典型日的逐时用电变化规律, 以此为基础, 预测新建航站楼的用能特性。

2.1.1 现有机场 T1 航站楼日电负荷调研

本研究仅聚焦于航站楼的用能特性, 因此调研过程中排除了对陆侧停车场及空侧特种车辆的用能考虑。T1 航站楼的能源消耗主要来自电力, 主要耗能包括空调、照明和动力系统。图 2 展示了夏季典型日的 T1 航站楼能源调研结果。

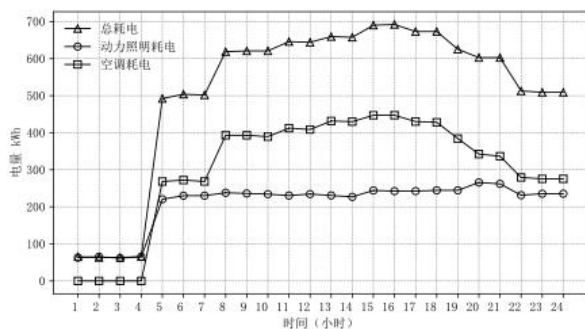


图 2 现有航站楼典型日逐时耗电量

Fig.2 Hourly Electricity Consumption on a Typical Day of the Existing Terminal

由调研数据可知, 现有机场 T1 航站楼的空调开启时间从早上 4:00 到晚上 24:00。空调占总耗电

量比例较大, 为 59%, 其他照明动力占比约为 41%。空调系统是能源消耗的主要来源, 并呈现出典型的季节性特征, 同时受气象条件、航站楼造型、围护结构热工参数、航班运行、设备能效等因素的影响, 空调系统的能耗同时具有逐时波动性。与此不同, 照明和动力系统的用电特征不存在明显的季节波动及逐时波动, 表现出较为平稳的能耗模式。

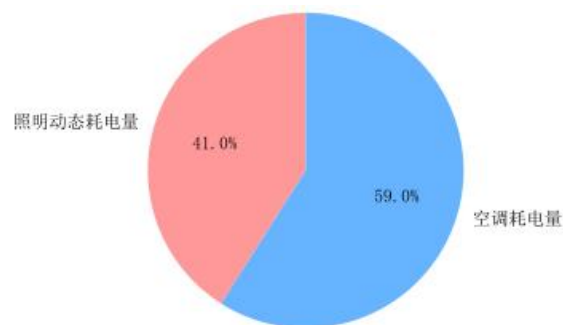


图 3 现有航站楼典型日耗电量占比

Fig.3 Proportion of Electricity Consumption on a Typical Day of the Existing Terminal

2.1.2 现有机场月电负荷指标调研

收集到的 2021、2022 年的机场既有航站楼月电力消耗情况如图 4 所示。

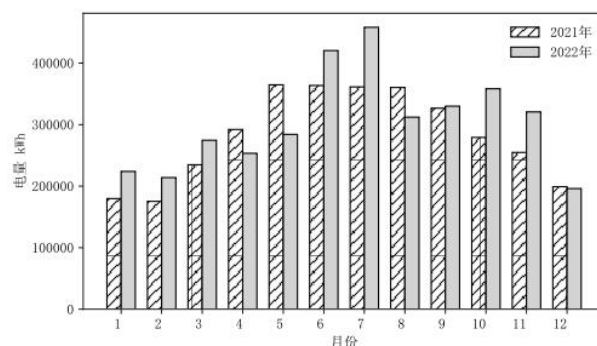


图 4 不同月份机场既有航站楼电耗

Fig.4 Electricity Consumption of the Existing Terminal at the Airport in Different Months

从图 4 可观察到, 3 月至 11 月的电耗较大, 而 12 月至次年 2 月的电耗相对较低。其主要原因在于 3 月至 11 月期间, 室外气温较高, 导致空调系统的能耗显著增加, 从而推动了整体电耗的上升。2021 年和 2022 年, 航站楼的总电耗分别为 339 万 kWh 和 365 万 kWh。

2.2 T2 航站楼用电量预测

T2 航站楼的主要能源消耗系统包括空调、照

明和动力系统。在能耗波动特性方面, T2 航站楼与 T1 航站楼遵循相似的规律, 因此, 其能耗特征也可分为波动性部分和稳定性部分。

对于具有波动性的空调能耗, 其波动性表现为日波动与季节波动的叠加。由于现有调研数据和规律不足以反向推导出新建航站楼逐时空调系统的能耗数据, 因此, 本研究采用软件模拟的方法进行该部分能耗预测。在模拟过程中, 综合考虑了气象条件、航站楼的造型、围护结构的热工性能、室内扰动因素及设备能效等多重影响因素, 从而实现对空调系统能耗的准确预测。

对于照明和动力系统的能耗, 由于其波动性较小, 能够基于调研数据进行逐时能耗预测。具体预测方法如下: 首先, 根据相关标准确定 T2 航站楼的总能耗目标, 在此基础上扣除预测得到的空调能耗, 从而获得照明与动力系统的总能耗。鉴于照明和动力能耗未表现出明显的波动性, 假定其每日变化规律一致。因此, 通过结合调研得到的典型日照明与动力能耗逐时变化规律以及计算得到的照明

与动力系统总能耗, 可以进一步推导出照明与动力系统的逐时能耗分布。

2.2.1 预测 T2 航站楼全年总耗电量

根据团体标准《公共交通建筑能耗标准》T/CECA20042 给出的不同气候区航站楼建筑能耗指标的约束值及引导值相关规定, 该项目所在地属于夏热冬暖地区, 其约束值为 $156\text{kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 引导值为 $97\text{kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。本机场航站楼的建设目标为绿色低碳航站楼, 其建筑与机电设计的各项节能指标均高于国标的相关要求。因此, 能耗指标按照引导值 $97\text{kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 来进行预测。新航站楼的建筑面积约为 3.3万 m^2 , 由此可以预测出新航站楼的总能耗为 320万 kWh 。

2.2.2 预测 T2 航站楼空调逐时耗电量

基于 EnergyPlus 能耗模拟软件对航站楼空调系统的能耗进行动态计算, 计算模型热工参数、内扰强度及波动情况根据设计参数、现场 T1 航站楼调研情况及《公共交通建筑节能设计标准》T/CECA 20041 等综合确定, 如表 2 所示。

表 2 主要围护结构部位热工参数
Table 2 Thermal Properties of Major Envelope Elements

围护结构类型	部位	技术措施	主要热工参数	
			$\text{kW}/\text{m}^2\cdot\text{K}$	SHGC
透明围护结构	玻璃幕墙	断热桥铝合金双银中空玻璃 6 双银 Low-E+12A+6 透明	2.5	0.33
	天窗	断热桥铝合金三银中空玻璃 6 三银 Low-E+12A+6 透明	2.5	0.25
非透明围护结构	外墙	加气混凝土	0.955	—
	屋顶	细石混凝土/水泥砂浆/聚苯板/钢筋混凝土屋面	0.37	—

对于值机厅、安检区域及候机厅等出发流程区域, 其客流变化模式依据表 3 所示的出港客流变化规律进行设定; 对于到达厅、行李提取厅等到达流程区域, 则参考表 3 中的进港客流变化规律进行设

定。由于航站楼内的设备与照明系统主要服务于旅客, 其内扰变化特征与客流强度变化具有一定相关性, 因此可基于表 3 所示的客流强度, 确定各对应区域设备及照明系统的内扰变化规律。

表 3 航站楼逐时客流强度系数

Table 3 Hourly Passenger Flow Intensity Factors for Terminal Building

时刻	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
出港	0	0	0	0	0.03	0.05	0.51	0.78	0.29	0.34	0.77	0.56
进港	0.06	0	0	0	0	0	0	0.05	0.28	0.5	0.56	0.97
时刻	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
出港	0.91	0.57	1	0.99	0.78	0.85	0.75	0.32	0.2	0.15	0	0
进港	0.67	1	0.68	0.66	0.74	0.57	0.44	0.57	0.49	0.42	0	0

根据设计文件, 该航站楼的空调系统源侧配置为 2 台 700RT 磁悬浮变频离心冷水机组 (国标工况 COP: 6.3)、1 台 350RT 磁悬浮变频离心冷水

机组 (国标工况 COP: 6.3); 水系统为一级泵变流量两管制, 冷冻水供回水设计温度为 $9/14^{\circ}\text{C}$; 末端的高大空间, 如值机大厅、出发大厅、候机、安

检等区域，采用区域变风量一次回风全空气系统，对于业务用房、休息室及卫生间等区域，采用风机盘管加新风系统。

根据上述的模拟边界条件情况，在软件内搭建

计算模型，对全年空调系统耗电量进行了动态模拟计算，月累计及典型日的能耗情况如图 5 所示。通过统计分析，航站楼空调系统的总耗电量为 163.47 万 kWh。

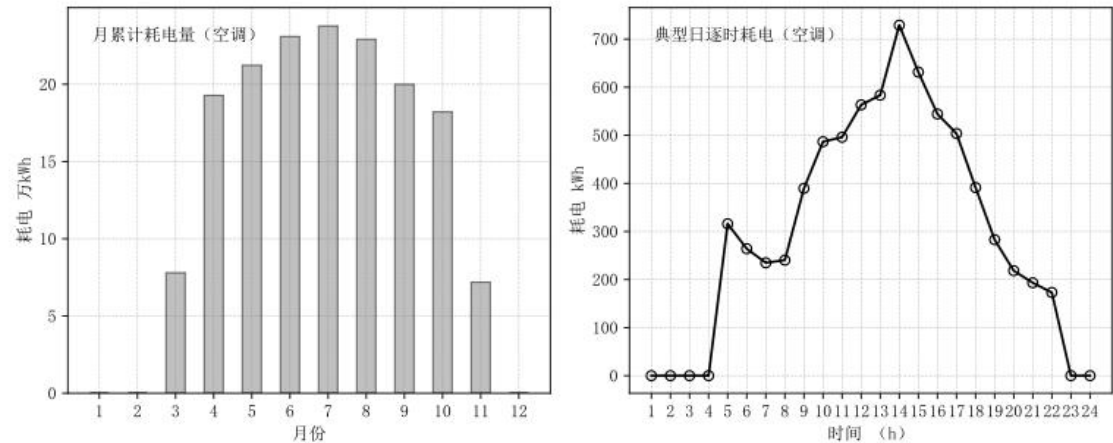


图 5 航站楼空调耗电量模拟结果

Fig.5 Air Conditioning Electricity Consumption Simulation for the Terminal

2.2.3 预测 T2 航站楼照明动力逐时耗电量

表 4 新航站楼建筑能耗

Table 4 Building Energy Consumption of the New Terminal	
电量	消耗
总耗电量/万 kWh	320.1
空调耗电量/万 kWh	163.47
照明动力耗电量/万 kWh	156.63

全年照明动力系统的耗电量可通过全年总耗电量减去空调系统的耗电量得出，具体数据如表 4

所示。根据计算结果，空调系统的电耗占总能耗的约 51%，而照明动力系统的电耗占比约为 49%，结果与调研分析的结论基本一致，证明了预测电量的准确性。

已知全年照明动力系统的总耗电量，结合调研得到的典型日照明动力系统耗电量曲线，可以进一步推算出逐时的照明动力耗电量。

2.2.4 预测 T2 航站楼全年逐时耗电量

将上述测算得到的逐时照明动力耗电量与逐时空调耗电量相加，可以得到航站楼的总耗电量，具体结果如图 6 所示。

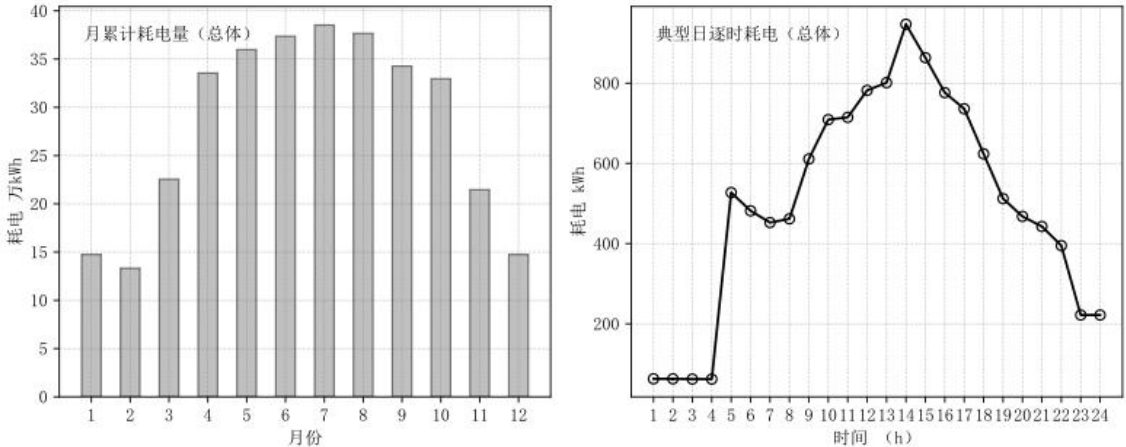


图 6 T2 航站楼总耗电量预测

Fig.6 Total Electricity Consumption Forecast for the T2 Terminal

3 蓄冷系统设计思路

本项目的蓄冷方案与常规蓄冷系统有所不同。常规蓄冷系统主要依赖于峰谷电价差, 通过夜间蓄冷、白天放冷来实现经济效益。然而, 本项目当地电价不执行峰谷电价差, 其蓄冷的目的是为解决太阳能光伏发电的消纳问题。由于光伏发电主要发生在白天, 因此, 本项目的蓄冷思路与常规系统相反, 即白天蓄冷消纳盈余电量、夜间放冷, 实现电量的转移。因此, 白天的盈余发电量与夜间供冷需求电量之间的匹配关系, 是决定蓄冷系统容量配置的关键因素。现以日为统计单位, 对每日的盈余电量累计值与夜间供冷累计需求电量进行对比分析, 其结果如图 7 所示。

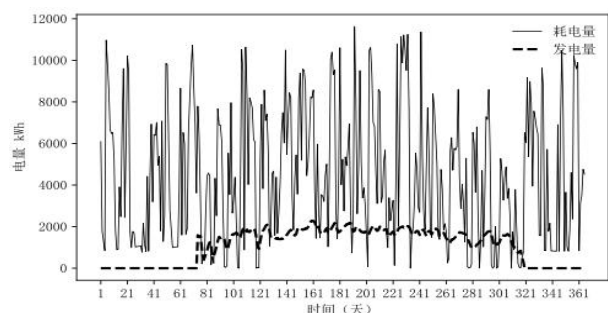


图 7 盈余电量与需求电量关系

Fig.7 Relationship between Surplus Electricity and Demand

本项目为航站楼建筑, 其屋顶面积在整体建筑面积中占比偏高, 因而光伏系统的发电量较大, 昼间产生的盈余电量远超夜间供冷所需电量。为避免因蓄冷容量过大而导致夜间蓄存冷量无法完全释放的情况, 在蓄冷容量确定时, 应以夜间供冷耗电量作为主要依据。鉴于空调设计日为空调系统耗电量的峰值日, 首先选取该日作为典型日进行分析, 其光伏发电量与空调耗电量的关系如图 8 所示。

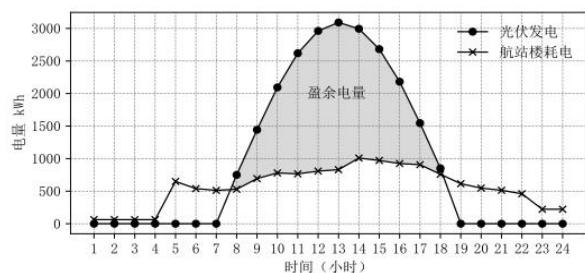


图 8 空调设计日航站楼的光伏发电量和耗电量

Fig.8 Photovoltaic Power Generation and Electricity Consumption of the Terminal on the Air Conditioning Design Day

从图 8 可观察到, 光伏发电主要集中在白天的 8:00 至 18:00 时段。在此期间, 大部分时间光伏发电量均大于航站楼的耗电量, 导致产生了多余电量。基于此, 本项目的空调供冷策略如下:

(1) 白天供冷: 直接利用光伏发电量驱动空调系统进行供冷;

(2) 白天蓄冷: 将白天盈余的发电量(需要蓄存、转移使用的电量)用于蓄冷;

(3) 夜间供冷: 优先使用白天蓄冷的冷量进行供冷, 若冷量不足, 则由市电进行补充。

4 蓄冷系统容量分析

本项目的蓄冷方案与常规系统有所不同, 因此在蓄水罐容量的确定上也采取了与传统方法不同的原则。常规系统通常仅从经济性角度出发, 通过优化经济效益来确定蓄水罐的容量。而本项目中, 蓄水罐的容量设计则重点考虑光伏发电的消纳需求, 因此, 蓄水罐容积的确定既需要满足系统功能性要求, 确保能够充分吸收并利用多余电力, 又需在满足功能需求的基础上兼顾经济性。

4.1 初定蓄水罐容量

按照设计日夜间负荷初定蓄水罐容量, 该容量可满足设计日 100% 的夜间负荷需求。通过空调负荷计算, 计算出设计日逐时负荷情况如图 9 所示。

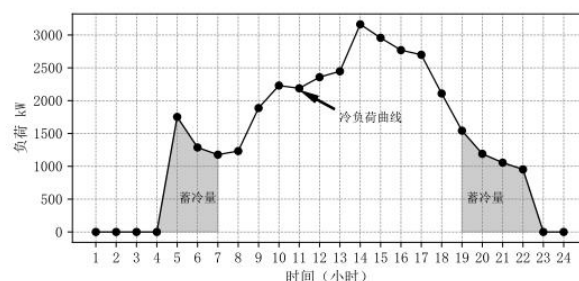


图 9 设计日逐时冷负荷

Fig.9 Hourly Cooling Load on Design Day

由此可以看出, 夜间负荷(19:00~次日 7:00)的累计值为 8959kWh, 占全天负荷累计值的比例为 26%, 如果该时段的冷量全部由水蓄冷提供, 即全量蓄冷的模式, 则蓄水罐的蓄冷量为 8959kWh (暂不考虑各种冷损耗)。

4.2 确定蓄冷全年运行策略

以设计日为例, 可以看出光伏发电量、总耗电量、空调主机系统耗电量的分布情况如图 10 所示。

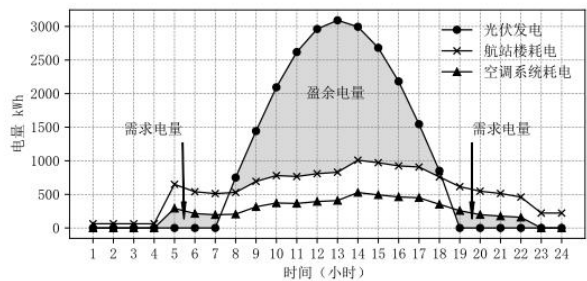


图 10 设计日电量统计

Fig.10 Daily Energy Consumption Statistics on Design Day

由图 10 可知，白天时段，当光伏的发电量大于航站楼总耗电量时，产生的多余发电量可以用来蓄冷，将多余发电量称为白天盈余电量 Q_1 （供应侧）；晚上空调主机系统耗电量（不包括空调末端和水泵）可以通过光伏电所蓄存的冷量来替代，称为夜间需求电量 Q_2 ，也就是可转移的白天光伏系统盈余电量，确定蓄冷系统的全年运行策略如下：

（1）在全年的某 N 天（ $N=1\sim365$ 天），当 $Q_1>Q_2$ ，即供应侧电量大于需求侧电量时，此时按需求侧电量 Q_2 确定蓄冷量，白天盈余的供应侧电量上网或储电；

（2）当 $Q_1<Q_2$ ，即供应侧电量小于需求侧电量时，此时按供应侧电量 Q_1 确定蓄冷量，晚上蓄冷量无法满足全部负荷需求时，则开启主机通过电网取电制冷进行补充。

4.3 计算蓄水罐的全年平均负载率

按照上述确定的全量蓄冷模式及其全年运行策略，供冷运行时间为：3 月 15 日~11 月 15 日，计算出蓄水容量在 8959kWh 的前提下，蓄水罐的全年使用率情况如表 5 所示。

表 5 蓄水罐全年使用率（8959kWh）

Table 5 Annual Utilization Rate of the Storage Tank (8959 kWh)

蓄水罐	情况
蓄水罐容量/kWh	8959
蓄水罐平均负载率	66%
负载率大于 80%天数	33%
负载率大于 60%天数	77%
蓄冷量/万 kWh	145.44
夜间冷负荷/万 kWh	157.69
蓄冷量可供夜间冷负荷比例	92%

可以看出，按照设计日负荷初定的蓄水罐容

量，虽然蓄冷量可供夜间冷负荷的比例高达 92%，但是蓄水罐全年平均负载率较低，仅有 66%，负载率大于 80%天数占比仅为 33%，蓄水罐的使用率较低，经济性较差。为了提高蓄水罐的全年使用率，需要对蓄水罐容量进行修正。

4.4 修正蓄水罐容量修正

为提高全年蓄冷系统的使用率，体现其经济性，研究对蓄水罐的容量进行了修正，在全量蓄冷模式的基础上分别按 0.9~0.6 的修正系数对容量进行折减，分析计算不同修正系数下的蓄水罐全年使用率情况如图 11 所示。

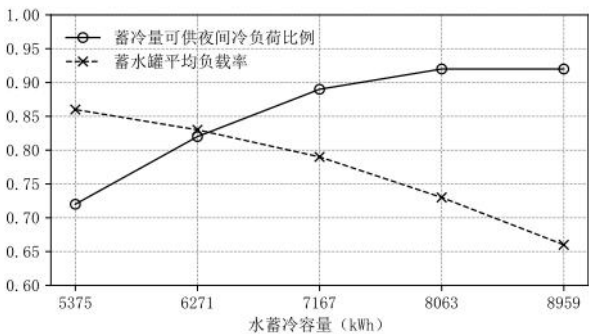


图 11 不同蓄水罐容量下的平均负载率和蓄冷量占比

Fig.11 Average Load Factor and Proportion of Cooling Storage under Different Storage Tank Capacities

可以看出，随着蓄水罐容量的减小，蓄水罐平均负载率明显上升，在 7167kWh 以后的上升幅度减小；同时蓄冷量可供夜间冷负荷的比例下降，在 8959 至 7167kWh 区间变化范围内，下降不明显，仅从 92%降到 89%，在小于 7167kWh 后，降低趋势变得明显，从 89%降到 72%。

对于项目来说，蓄水罐平均负载率越高、蓄冷量可供夜间冷负荷的比例越大，项目越有利，而此两参数的趋势相反，因此综合考虑二者因素，选择 7167kWh 最佳，该容量即保证了蓄冷量可供夜间冷负荷的比例达到 89%，满足消纳日间多余发电量的功能性，同时蓄水罐平均负载率也处于高位的 79%，兼顾了经济性。

5 全年运行分析

5.1 主机配置

本项目由于蓄冷的特殊性，因此主机配置也不同于常规蓄冷系统。常规项目一般为白天供冷，晚上蓄冷，供冷主机和蓄冷主机可采用同一套设备；

本项目由于蓄冷和供冷均在白天运行,一方面主机需满足白天的供冷需求,另一方面还需消纳光伏盈余电力,需要为蓄冷系统配备专门的制冷主机。因此,供冷主机和蓄冷主机必须分别配置,主机配置原则如下:

- (1) 供冷主机配置: 按照设计日峰值冷负荷配置供冷主机,保障峰值冷负荷;
- (2) 蓄冷主机配置: 从经济性角度,按设计日光伏系统盈余时段设置蓄冷开启时段,8:00-18:00 时间段内(11 小时)将蓄水罐蓄满,这样蓄冷主机配置容量最小,经济性相对较好。

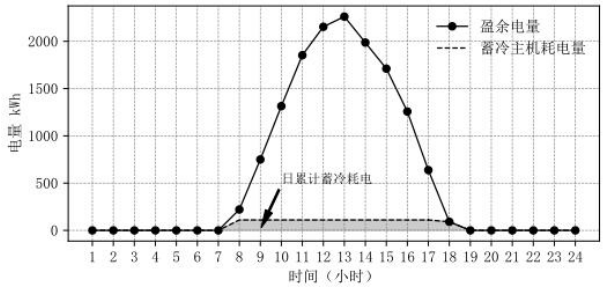
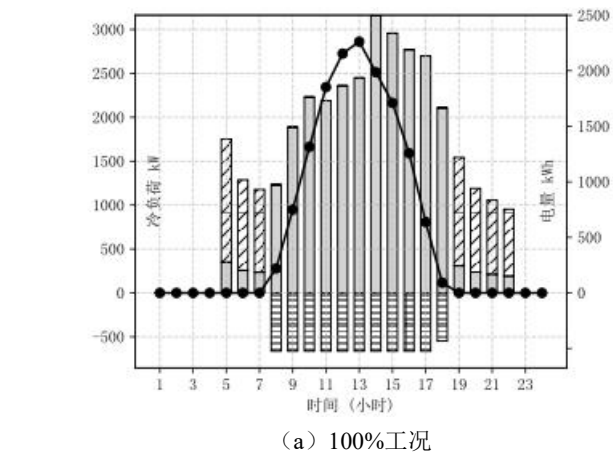


图 12 设计日主机蓄冷

Fig.12 Cooling Storage on Design Day
按照上述原则,配置出主机容量如表 6 所示。
表 6 主机配置容量

Table 6 Chiller Configuration Capacity	
主机	配置
供冷主机总容量/kW	3163
蓄冷主机总容量/kW	662
总装机容量/kW	3825
蓄冷主机装机占比	17%



5.2 蓄冷方案

本项目水蓄冷系统的原理图如图 13 所示。

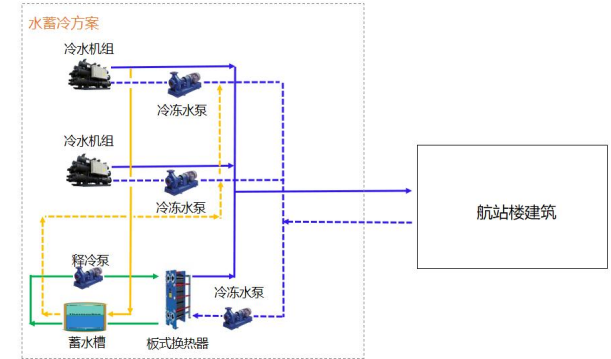


图 13 水蓄冷方案原理图

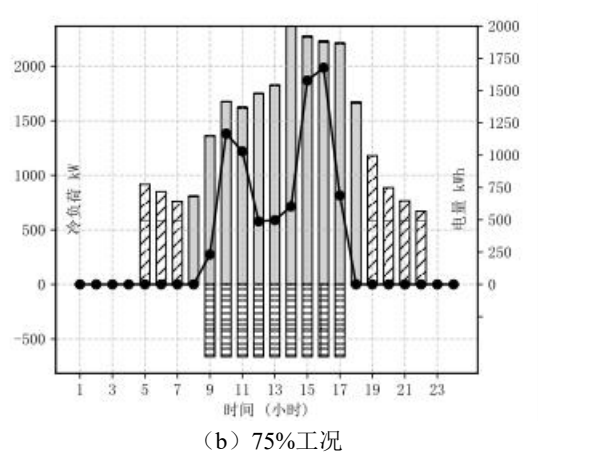
Fig.13 Schematic Diagram of the Water Cooling Storage System

方案的运行策略为:白天直接采用光伏发电量驱动空调系统供冷,白天盈余电量用于蓄冷;夜间优先采用白天的蓄冷量进行供冷,不足部分由市电补充。

运行时,依据预测的负荷曲线(此曲线可依据运行数据的积累调整)来制定水蓄冷系统的运行模式,为了最大限度发挥水蓄冷的功能性、经济性并保证负荷需求,确定基本原则如下:

- (1) 蓄冷供冷量+冷水机组供冷量应能满足逐时的负荷需求,且能满足峰值负荷的需求;
- (2) 在释冷时段,优先将蓄冷量用完;
- (3) 保证设备运行有一定的连续性,避免频繁启停。

几个典型日的各制冷主机的运行工况及供能量如图 14 所示。



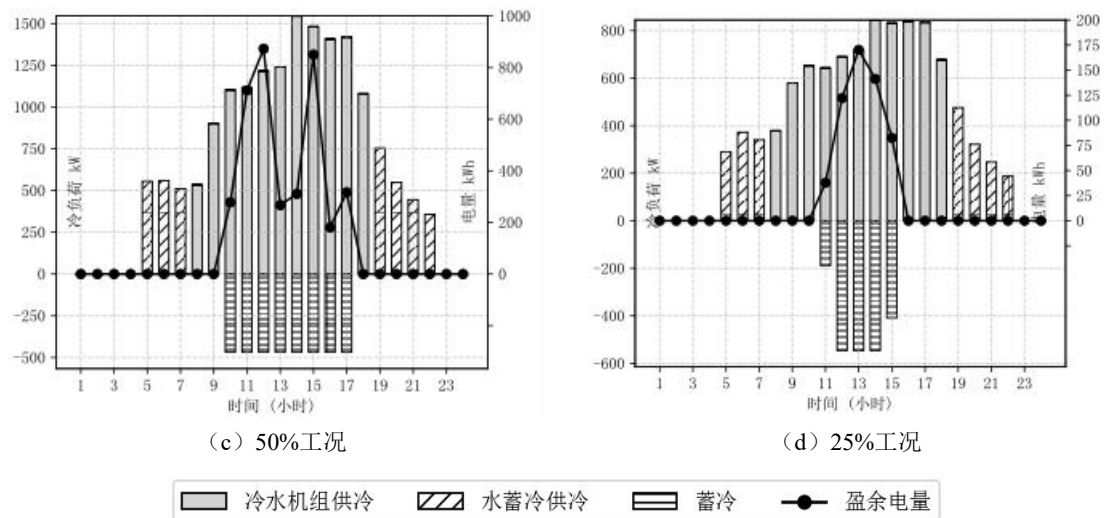


图 14 不同供冷负荷率下运行工况

Fig.14 Operating Conditions under Different Cooling Load Rates

通过全年动态计算结果显示,光伏系统全年发电量中,55.1%的电量被直接消纳,7.3%则通过水蓄冷系统进行消纳,剩余 37.6%的电量未能实时得到有效消纳。

5.3 经济性分析

本项目在航站楼顶部采用建筑集成光伏(BIPV)模式进行光伏板铺设。由于光伏系统的引入,虽然项目的初期投资有所增加,但通过 BIPV 模式,光伏板的铺设有效节省了部分原屋顶结构成本。综合分析,光伏系统的增量投资为 1500 万元,系统的全年发电量为 331 万 kWh。在考虑全部发电量自用的基础上,预计全年可节省运行电费 264 万元。初步测算表明,光伏系统的静态投资回收期为 5.7 年,显示出较为良好的经济性。

在能源使用方面,航站楼全年总用电量为 320 万 kWh,光伏系统的年发电量与总用电量基本持平。然而,从逐时电量供需的角度来看,二者的匹配性较差,因此需采取额外措施来消纳、储存及转移多余的电量。为此,本项目提出了三种处理盈余电量的方式:一是通过并网将电量输配至航站区的其他区域使用;二是利用蓄电池储存;三是通过水蓄冷系统进行存储。

鉴于本文重点探讨基于光伏消纳的水系统设计,因此,本文将着重分析水蓄冷系统的经济性。本项目采用水蓄冷方案来进行电力消纳,实现柔性调节,相比无蓄冷方案,增加了蓄水罐、蓄冷主机及相关配套设备,两种方案主要设备容量配置对比

如表 7 所示。

表 7 蓄冷和无蓄冷方案设备容量配置对比

Table 7 Comparison of Equipment Capacity Configuration between Water Cooling Storage and Non-Water Cooling Storage Solutions

	无蓄冷方案	蓄冷方案
供冷主机/kW	3163	3163
蓄冷主机/kW	—	662
蓄水罐/kWh	—	7167
冷冻水泵/(m ³ /h)	544	658
冷却水泵/(m ³ /h)	635	767
冷却塔/kW	3690	4463

可以看出,蓄冷方案增加了蓄水罐、蓄冷主机及相应配套的冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔等设备,投资增量估算为 119 万元。

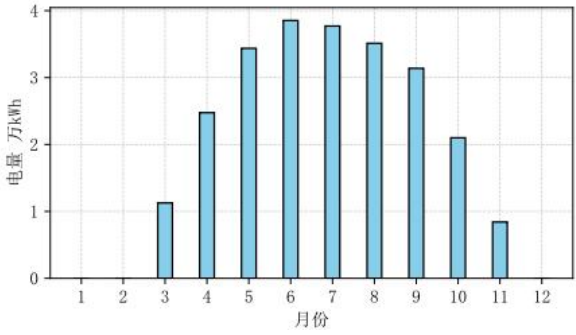


图 15 水蓄冷系统逐时消纳光伏电量

Fig.15 Hourly Photovoltaic Power Utilization by the Water Storage Cooling System

但项目采用了水蓄冷系统,消纳了光伏发电量进行制冷,并在夜晚的时候进行释放,减少了夜间空调运行对市电的需求,提高了空调系统运行的经济性,通过全年动态分析,水蓄冷系统逐月累计消纳的光伏电量如图15所示。

根据上述数据统计,水蓄冷系统全年累计可消纳光伏电24.25万kWh,提供冷量140万kWh,按机场0.8元/kWh的电价进行测算,全年可节约电费19万元,与投资增量进行对比,其静态回收期为6.2年,体现了良好的经济性。

6 结论

本研究结合某机场T2航站楼工程实例,探讨了以光伏消纳为驱动的机场水蓄冷系统的设计优化与运行特性,以某机场T2航站楼为例,基于光伏发电与建筑能耗的匹配性,对水蓄冷的设计思路、容量优化、全年运行策略等方面进行了分析,主要结论如下:

(1) 光伏产能与航站楼用能间存在较为明显的时序不匹配性,不考虑任何储能手段时,光伏产能的全年自消纳率仅为55%,需配备储能系统以提高光伏发电自消纳率。

(2) 蓄冷设计理念:与传统的基于峰谷电价差的水蓄冷系统不同,本系统的设计理念侧重于光伏发电特性与建筑用能特性的匹配,提出了“白天蓄冷、夜间放冷”的策略。

(3) 容量优化与系统性能:提出了基于全年利用率的蓄冷系统容量优化方法,实现了功能性与

经济性的平衡,使得蓄冷系统的全年平均负载率提升至79%。

(4) 经济性:采用水蓄冷方案显著提高了空调系统的经济性,系统全年可消纳光伏电量24.25万kWh,占全年总发电量的7.3%,同时节约电费约19万元,静态回收期为6.2年。

参考文献:

- [1] 任军,孙熠文,邱扬.城市建筑低碳设计技术与实践-从超低能耗、近零能耗到零碳[J].城市学报,2024,(5):27-36.
- [2] 张时聪,王珂,徐伟.低碳、近零碳、零碳公共建筑碳排放控制指标研究[J].建筑科学,2023,39(2):1-10,35.
- [3] 张燕.太阳能光伏发电在超低能耗建筑中的应用[J].绿色建筑,2025,17(3):55-58,112.
- [4] 廖巍.低碳背景下建筑屋顶光伏一体化设计研究[J].城市开发,2025,(4):36-38.
- [5] 周有南.建筑电气设计中消防设备供电设计要点与应用分析[J].中国建筑金属结构,2025,24(2):129-131.
- [6] 杨文晓.厦门某在建机场制冷站水蓄冷空调系统优化运行分析[J].福建建筑,2024,(10):129-133.
- [7] 徐誉玮,胡宗宝,周涛,等.高效制冷与蓄冷耦合集中供冷系统经济运行敏感因素分析-以超大型城市核心区供冷项目为例[J].暖通空调,2023,53(S2):89-92.
- [8] 黄碧琴,胡自林.地铁车站水蓄冷空调系统经济性分析[J].暖通空调,2024,54(S2):367-370.
- [9] 张铭蕾.某大型数据中心削峰填谷水蓄冷空调系统控制逻辑简析[J].智能建筑电气技术,2024,18(3):70-75.
- [10] 任军,孙熠文,邱扬.城市建筑低碳设计技术与实践-从超低能耗、近零能耗到零碳[J].城市学报,2024,(5):27-36.
- [11] 张时聪,王珂,徐伟.低碳、近零碳、零碳公共建筑碳排放控制指标研究[J].建筑科学,2023,39(2):1-10,35.
- [12] 张燕.太阳能光伏发电在超低能耗建筑中的应用[J].绿色建筑,2025,17(3):55-58,112.
- [13] Constantine S. Infrared radiative drying in food engineering: a process analysis[J]. Biotechnology Progress, 2010,2(3):109-119.
- [14] Krishnamurthy K, Khurana H K, Soojin J, et al. Infrared Heating in Food Processing: An Overview[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2008,7(1):2-13.
- [15] Riba J R, Cantero R, Canals T, et al. Circular economy of post-consumer textile waste: Classification through infrared spectroscopy[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,272:123011.
- [16] Gagge A P, Nish Y. Heat Exchange Between Human Skin Surface and Thermal Environment[J]. Comprehensive Physiology, Supplement 26, 2011:69-92.