低碳办公建筑储能系统优化配置研究

李 鹏[1,2]，肖 辉[2]，邵 頲[3]

（1. 中国建筑第八工程局有限公司，上海 201206；2. 同济大学电子与信息工程学院，上海 201804；
3. 上海华建工程建设咨询有限公司，上海 200041）

摘要：低碳建筑是解决能源危机的重要手段，阻碍低碳建筑发展的主要原因在于高昂的成本，而成本居高不下的关键则在于储能设备。为了解决储能设备成本过高问题，讨论了建筑能耗各组成部分，并给出了由水蓄能设备代替蓄电池为空调类负荷储能的解决方案。通过采用该方案，系统能效得以提高11.75%；通过分析具体案例，给出了储能设备投资费用节省数据，同时具有节约机房面积和安全环保的优点。由此表明，未来蓄电池结合水蓄能设备将是低碳建筑储能系统重要的选择方案。

关键词：低碳建筑；办公建筑；水蓄能；蓄电池；零碳建筑

Research on optimal configuration of energy storage system in office low-carbon buildings

LI Peng[1,2], XIAO Hui[2], SHAO Ting[3]

(1. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Shanghai 201206, China;
2. Department of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;
3. Shanghai Huajian Architecture, Engineering & Consulting Co., Ltd., Shanghai 200041, China)

Abstract: Low-carbon buildings are an important means to solve the energy crisis. However, the main reason that hinders the development of low-carbon buildings is the high cost, and the key to the high cost is energy storage equipment. In order to solve the cost problem of energy storage equipment, this paper discusses the components of building energy consumption, and gives a solution to replace the battery with water storage equipment for air conditioning load energy storage. By adopting this scheme, the energy efficiency of the system can be improved by 11.75%. This paper also analyzes specific cases, and gives the data of saving the investment cost of energy storage equipment, and at the same time, it can also bring the advantages of saving the area of the machine room, safety and environmental protection. The discussion in this paper shows that in the future, batteries combined with water storage devices will be an important option for low-carbon building energy storage systems.

Key words: low-carbon buildings; office building; water storage; battery; zero-carbon buildings

0 引言

为了应对世界能源危机，各行各业纷纷推出举措。其中，低碳建筑和零碳建筑是当前建筑领域的重要应对措施。英国率先在政府层面对零碳建筑做了定义，并开展了必要的示范案例分析。通过试点案例发现零碳建筑系统造价高昂，不易普及[1]。

此后，世界各国开始着手低碳建筑的研究，以避免零碳建筑造价过高的问题。澳大利亚、挪威和美国等国家随后均在政府层面对低碳建筑

和零碳建筑做了区分定义，旨在首先实现低碳建筑，待技术成熟后再推进零碳建筑的研究。中国香港地区也开展了一系列低碳建筑试点研究，为了避免投资过高，放弃了储能环节。在世界各地的定义中，储能环节是零碳建筑和低碳建筑的重要区分标志。目前储能技术通常在发电高峰时通过蓄电池储存电能，为发电低谷时期内用电设备供电的方式，这种储能设计方法导致零碳建筑中蓄电池设备设置庞大，成本高企。然而，面向未来的低碳建筑研究，应以严格的设计标准作为参考，以应对标准越来越高的碳排放政策。因此本文提及的低碳建筑储能环节很有必要，并能满足常规天气时的零碳排放；该类低碳建筑与零碳建筑的区别在于，零碳建筑要求以一年为周期，发电量不小于用电量，这便使得储能设备规模更为庞大[2]。

当前文献中并未查阅到国家标准规范对低碳建筑储能系统的具体规定，参考世界各地对低碳建筑储能技术的研究，便于总结其技术特点。文献[3]介绍了当前分布式发电领域储能设备的应用现状，总结了储能技术的具体应用模式，并指明了进一步的发展方向。文献[4]介绍了一个将蓄电池用于大型储能电源系统的案例，达到了峰谷电价平抑的效果。文献[5]提出了低碳建筑能源系统的关键技术，包括光伏、储能和直流配电等技术均已成熟，因此在技术上已经可行。文献[6]提出了一种将蓄电池与超级电容混合使用的混合储能系统，该系统用于直流系统中能够区分控制电流中的高频与低频分量，确保功率在两种储能设备间的合理分配。文献[7]研究了将蓄电池与超级电容混合使用的混合储能系统并应用于分布式光伏并网系统中，该研究通过算例证实可有效地平抑光伏出力波动。文献[8]提出了一种用于直流微电网的储能系统优化配置方案，该方案对储能系统功率分配可控性和可调度性有积极效果。

为了实现低碳建筑的目标，需采用现有技术中可利用的各类技术手段。文献[9]提出了一种构建分布式太阳能光伏直驱蓄冷系统的新方法。在该系统中，蒸汽压缩制冷循环（VCRC）由光伏阵列直接驱动，冰热能储存用作储能单元，而不是电池。文献[10]提出了一种适用于住宅建筑能源系统评价指标，即评价热泵、可再生能源、热和电存储系统用能参数，解决了住宅建筑中多部件电气和热力系统的能源灵活性评估指标不足问题。文献[11]介绍了现有的太阳能热水系统用于简单储能的技术手段，以及与其他设备配合的技术方法。其中配合设备包括木材、石油、天然气、电力和太阳能等。文献[12]介绍了一种可以通过光电催化反应实现碳封存的建筑反应器（RB）技术，该技术与柔性太阳能电池（FSCs）配合，可以实现建筑物能源零消耗，即实现零碳建筑目标。文献[13]介绍了一种热化学储能技术，即将太阳能通过化学键存储并用于建筑供暖需求的技术。该技术尚处于研究阶段，尚未进入商业化应用。文献[14]提出了一种结合风电和蓄电池的直流微电网，该直流电网通过二级能源控制，兼具灵活性和整体性，实现了不同天气条件下的系统闭环模拟。文献[15]提出了一种集成平板重力辅助热管的被动式太阳能建筑，该建筑物通过吸收太阳能实现了房子内温度平衡和零能耗。文献[16]提出了一种将空气源热泵（ASHP）与储水罐一体化联合使用的供暖系统，该系统白天ASHP加热、储水罐充电，晚上ASHP关闭、储水罐排放，保证了ASHP始终高效运转，节省了能源。文献[17]介绍了潜热热能储存（LHTES）在建筑中的应用，该技术夏季通过夜间通风储存自然冷气，白天将其释放以降低室温，从而减少空调系统负荷，节省能源。

为了应对蓄电池设备初期投资和后期维护成本高昂的问题，笔者提出采用水蓄能设备用作空调系统储能，节省大量蓄电池设备配置，可以大幅降低低碳建筑成本。水蓄能曾经用于调节峰谷电价，不仅有充分研究，而且获得了成熟应用。文献[18]详细介绍了水蓄能技术的系统形式和运行原理，在具体案例应用中显示能耗降低9.3%，静态回收期2.7年。文献[19]分析了某水蓄能能源站实测数据，冬季能效比为3.36，夏季

能效比为3.72，均高于传统系统。文献[20]介绍了水蓄能空调系统的多种运行模式，具体包括单独供能、协同供冷、蓄能过程和放冷过程等。文献[21]研究了水蓄能联合地源热泵运行的系统，并利用了消防水池。文献[22]对比了水蓄能和冰蓄冷系统，认为水蓄能系统具有结构简单、效率更高、冷热双畜功能、可以利用建筑自身蓄水设施及降低投资等众多优势，而缺点在于所需蓄能槽体积更大。文献[23]提供了蓄能槽的具体计算公式，并提出水蓄能与地源热泵复合系统可采用全蓄能和分量蓄能两种形式。文献[24]以上海地区某办公楼为例，研究了水蓄能空调系统蓄冷率，并根据蓄冷率的不同制定了各类系统配置方案。文献[25]首次提及低碳建筑能源系统中冰蓄冷和水蓄能系统应用的可能。

从现有文献可以看出，蓄电池储能技术研究非常充分，已经成熟应用于各类分布式发电系统之中；除了蓄电池技术，还有很多新颖的建筑储能技术正在研究之中，其中多数用于空调系统负荷储能；水蓄能技术的研究也非常充分，设备运行稳定，应用非常成熟，具有良好的削峰填谷、节省电费的优势。然而，低碳建筑作为兴起不久的能源危机解决方案，当前文献并无水蓄能设备应用于低碳建筑的具体讨论，也无具体实施方案和应用案例。如何将水蓄能技术纳入低碳建筑能源系统，是本文研究重点。

1 储能方案优化配置

低碳建筑是未来能源危机解决方案之一，目前受限于储能问题难以推广，因此有必要讨论当前储能方式，探索最佳储能方案。

1.1 办公建筑储能技术讨论

目前，用于建筑能源系统的储能方式中，技术成熟并取得大面积推广的包括蓄电池、抽水蓄能和氢蓄能。这些储能方式各有特点，也各有适用场合。

蓄电池属于化学储能，是当前应用最广泛的储能设备。蓄电池储能过程为电能转换成化学能，其释能过程为化学能转换成电能。蓄电池需安装在建筑物有特殊温湿度要求的房间内，且结构荷载要求较高。蓄电池的优点在于通用性强，几乎任何地域、任何环境的建筑物均可采用蓄电池作为储能设备；其缺点包括电气系统复杂，初始投资费用高，维护成本高，有火灾危险、废弃电池环境污染等。

抽水蓄能属于物理储能，其储能过程为电能转换成水势能，释能过程为水势能转换成电能。抽水蓄能的优点在于技术成熟、储能功率大，缺点在于适用地区有限、水系依赖性高、输电距离远、投资大和破坏环境等，无法广泛应用在办公建筑中。

氢储能结合了物理与化学储能，其储能过程为电解水过程，释能过程与蓄电池类似，不过采用氢气作为化学能媒介，能量转换过程中伴随着氢气的产生与燃烧。氢储能的优点在于清洁环保，运行过程无噪声无污染，氢气还可作为能源媒介用于氢能电动汽车等其他场合；缺点在于能源使用效率低，氢气储存技术难度高，有爆炸危险，因此也不允许用于办公建筑。

除了以上常见的储能方法，目前还在研究和应用的包括飞轮储能、超导储能、压缩空气储能和大电容储能等，然而由于各种原因，使用范围均很有限。综合目前建筑物储能技术，只有蓄电池满足大规模、普适性的使用条件。

由于可再生能源发电不够稳定，低碳建筑需采用储能设备在发电高峰储能，在发电低谷释能，这个能量转换过程与利用峰谷电价实现“削峰填谷”的技术思路相似。根据该技术思路，蓄电池设备应在发电量高于用电量时储能，在发电量低于用电量时释能，以满足建筑能耗需求。由于水蓄能设备同样具备“削峰填谷”效果，笔者考虑将水蓄能技术应用于低碳建筑中。

1.2 办公建筑能耗系统讨论

当前具有一定规模的城市在规划中会单独开辟一定区域作为办公用途，该区域的建筑物用于出租和出售。这类建筑的用户通常遵守国家作息规定，因而办公能耗也有一定规律。具体表现为：

1）工作日与节假日能耗差异巨大，通常工作日能耗显著高于节假日。

2）工作日的工作时间和非工作时间能耗差异巨大。通常9:00~18:00的工作时间内，能耗数据显著高于其余时间；而由于我国作息习惯存在午休，即12:00~14:00为休息时间，故工作日能耗数据呈马鞍形。

3）不同季节能耗差异巨大。中国大多数城市一年四季分明，夏季天气炎热，空调系统能耗高企；冬季天气寒冷，空调系统能耗也很高，不过低于夏季；春秋季空调系统能耗不高。

低碳办公建筑采用光伏、风力发电作为可再生能源，其发电规律与所在城市的气候条件关联密切。其中光伏发电与季节、天气关系密切，夏季发电量最高，春秋季次之，冬季最低；而风力发电与城市地理位置关系密切。

总之，低碳办公建筑发电和用电都具有很强的规律性，一旦善加利用，便于采用储能设备，从而实现低碳建筑的技术要求。

1.3 低碳建筑能源系统解决方案

由于办公建筑空调系统能耗规律性强，且能耗数据很大，本文提出采用水蓄能设备为空调系统储能，而蓄电池仅用于照明与动力负荷储能，从而减少蓄电池设置数量。办公建筑低碳能源系统同时采用蓄电池和水蓄能设备作为储能设备，其拓扑图如图1所示。

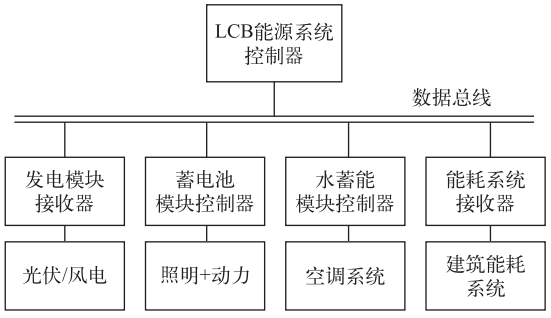

图 1 低碳办公建筑能源系统拓扑图

Fig. 1 Low carbon office building energy system topology

低碳办公建筑能源系统包含系统控制器、发电模块接收器、蓄电池模块控制器、水蓄能模块控制器以及建筑能耗系统接收器，各模块之间通过数据总线连接。低碳办公建筑控制器负责整个系统的数据调动；发电模块接收器接收可再生能源发电数据；蓄电池模块控制器负责控制蓄电池为照明系统及动力系统负荷储能；水蓄能模块控制器负责控制水蓄能设备为空调系统负荷储能；建筑能耗系统接收器接收建筑能耗系统数据。

低碳办公建筑能源系统的目标是实现办公建筑的低碳化，削峰填谷是重要的技术手段。能源系统为了实现削峰填谷，蓄电池和水蓄能设备均为有效手段；而经过前述章节的论述，同时采用蓄电池和水蓄能设备，是目前最优的解决方案。

1.4 水蓄能系统应用

水蓄能设备夏天蓄冷、冬天蓄热，而且比一般制冷设备节省10%左右电力，本身是一种高效的空调形式。低碳建筑采用水蓄能设备为空调类负荷储能，提高了该设备的节能效果。

水蓄能设备用于空调系统，需将水蓄能池与制冷机组并联，由此可以实现多种运行方式，还能随着负荷变化调整系统的运行状态。系统原理图如图2所示。

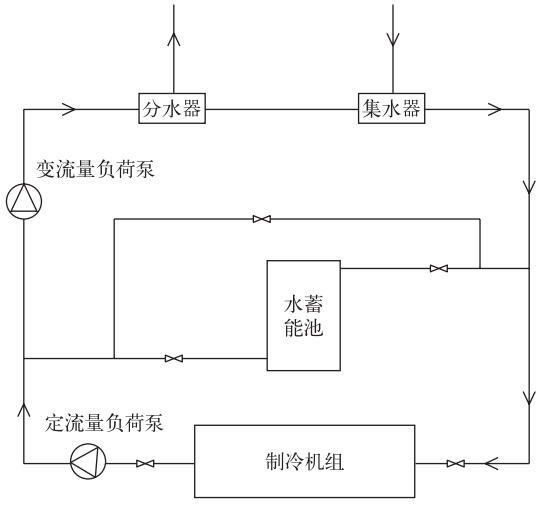

图 2 水蓄能系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of water storage system

图2中的空调系统采用了二次泵形式，由定流量负荷泵和变流量负荷泵构成，可以产生诸多运行状态，比如制冷机组蓄冷模式、制冷机组单独供冷模式、制冷机组蓄冷兼供冷模式、制冷机组及水蓄能池联合供冷模式和水蓄能池独立供冷

模式等。各种模式能够平稳切换，均具有良好的节能效果。另外，由于水蓄能设备适应性强，常用的制冷机组均可应用水蓄能设备。

作为水蓄能设备核心，水蓄能池可以采用消防水池，也可采用专用的水蓄能罐。如果采用消防水池作为水蓄能池，须在原设计基础上完善保温防水，并增加布水器和传感器即可工作。如果设置专用的水蓄能罐，设备投资除了包括蓄水罐本体外，还包括防腐、保温、检测系统和布水器。水蓄能池的体积计算式为

$$V=\frac{Q_x}{\Delta T\rho c_p\varepsilon\alpha} \tag{1}$$

式中，V为水蓄能池体积，m³；Q_x为水蓄能池内可用蓄能量，W·h；ρ为蓄能水的密度，kg/m³；c_p为水的定压比热容，kJ/(kg·K)；ΔT为回水温度与进水温度之间的温差，K，通常取10；ε为水蓄能池的完善度，考虑了混合、斜温层等因素影响，通常取0.85~0.9；α为水蓄能池体积利用率，考虑了散热器布置、水蓄能池内不可利用空间等因素影响，通常取0.95。

2 低碳办公建筑能源系统案例讨论

为了区别蓄电池和水蓄能设备技术应用，在此引入具体案例。由于当前尚无水蓄能设备应用于低碳建筑的案例，本文提供的案例仅用于讨论能耗系统；而水蓄能设备的应用则通过合理假设，对比该低碳办公建筑储能系统采用优化配置前后的必要数据；最终以此讨论水蓄能设备的应用场合。

2.1 水蓄能设备应用思路

通过分析办公建筑能耗系统，合理设置储能设备，利于实现低碳目标，得出同类低碳建筑能源系统设置储能方案的解决途径。图3为上海地区某低碳办公建筑发电与用电对比图。

图3中，曲线1为2021年7月15日上海某办公建筑逐时用电曲线图，曲线2为当日该建筑物光伏发电曲线图。由于光伏发电受到天气因素制约，势必有不同的峰谷电量。因此区域A中，发电量高于用电量，蓄电池将存储多余电量，并应用在区域B和区域C发电量低于用电量时。

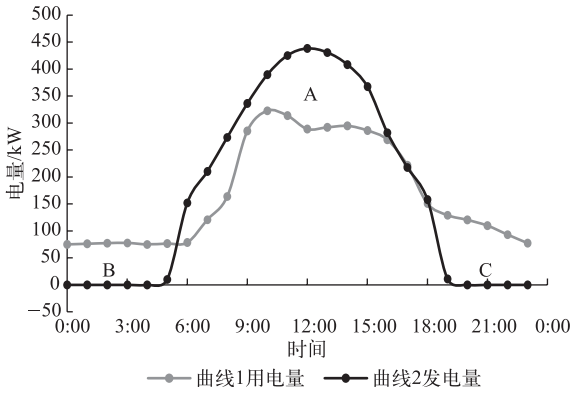

图 3 某低碳办公建筑某日发电与用电对比图

Fig. 3 Comparison between power generation and power consumption of a low carbon office building on a certain day

区域B和区域C内用电量须从蓄电池取用电能，计算式为

$$W_B=\sum_0^6(P_e-P_v)+\sum_{18}^{23}(P_e-P_v) \tag{2}$$

式中，W_B为蓄电池储能，kW·h；P_e为建筑物用电功率，kW；P_v为光伏发电功率，kW。

经计算，W_B=967 kW·h，故蓄电池设计功率计算式为

$$P_b=\frac{W_B}{T\times 80\%}=\frac{967}{(7+5)\times 80\%}=101.25\ \text{kW} \tag{3}$$

而蓄电池须设置容量$S_b=P_bT$=1 215 kW·h。式（3）中，80%为蓄电池设备荷电状态限制，如果超出该数据，则会影响其寿命。

根据绿色设计规范，建筑用电应区分为照明系统用电、空调系统用电和动力系统用电，该建筑物当日各类用电能耗对比如图4所示。

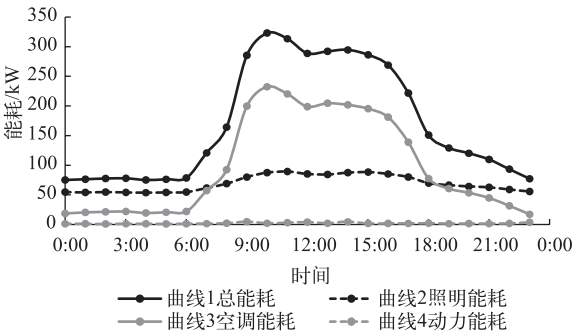

图 4 各类用电能耗对比图

Fig. 4 Comparison of various types of power consumption

经统计，该日空调系统能耗为2 353 kW·h，约占总能耗的58%。由此可见，一旦空调系统能耗储能改由水蓄能设备承担，而蓄电池设备仅承担照明与动力设备储能，将大量降低蓄电池设备安装容量。

将式（1）应用于本案例，可计算得到水蓄能池体积。如果机组性能系数COP取5.6，结合式（2），则水蓄能池蓄能量为

$$Q_x=\mathrm{COP}\times W=5.6\times 33\%\times W_B=5.6\times 33\%\times 967\ \mathrm{kW\cdot h}=1\ 787\ \mathrm{kW\cdot h} \tag{4}$$

计算得到水蓄能池的体积为

$$V=\frac{Q_x}{\Delta T\rho c_p\varepsilon\alpha}=\frac{1\ 787\times 1\ 000}{10\times 1\ 000\times 4.2\times 10\times 0.85\times 0.95}=5.27\ \mathrm{m^3} \tag{5}$$

本案例的讨论也为零碳建筑的实现提供了思路。为方便起见，本案例选取了一天能耗来讨论；实际的零碳建筑能源系统除了要满足当天的需求外，还要满足阴雨天能耗需求，因此设备容量会增大很多。

2.2 方案对比

将该建筑空调系统能耗由蓄电池调整为水蓄能储能，可在能效、建筑空间设计、初始投资、运行维护和安全环保等各个方面产生积极效果。

能效反映了能源利用效率，能效越高，说明电能利用越充分；能效越低，说明能量转换过程中浪费了越多能源。通过蓄电池为空调类负荷储能，需经3次能量转换过程，即充电过程将电能转换为化学能；放电过程将化学能转换为电能；供能过程将电能转换为热能。通过水蓄能设备为空调类负荷储能，经过1次能量转换即可，即电能转换为热能。

目前应用较多的蓄电池有铅酸蓄电池、镍镉蓄电池和磷酸铁锂电池，其充放电原理和效率有所差别；充电效率与电池的荷电状态有关，放电效率与电池的容量有关。因此计算蓄电池电能转换效率只能通过估算完成。通常认为蓄电池充电效率约为85%，放电效率约为90%。电能转换为热能的效率受空调系统型式、冷媒和建筑型式等各类条件制约，在此可采用50%的数据用于对比。

因此，采用蓄电池为空调类负荷储能，能源利用效率为85%×90%×50%=38.25%；采用水蓄能设备为空调类负荷储能，能源利用效率为50%。故相比蓄电池，水蓄能设备的能效提高了11.75%。

在图3的区域B和区域C中，经计算空调系统负荷占比为33%，照明与动力负荷占比为67%。即如采用水蓄能设备代替蓄电池为空调类负荷储能，蓄电池容量配置可降低33%；而水蓄能设备由于可借用消防水池等原有配置，增加的初始投资和维护费用几乎可以忽略不计。因此，采用水蓄能设备代替蓄电池为空调类负荷储能，储能设备初始投资和维护费用可降低33%；相应地，设备机房面积也可以降低33%。

蓄电池设备接入电气系统需经复杂的电气连接，而设备故障随复杂度的提高呈现指数提高；一旦出现设备故障，则容易带来电气火灾。大多数类型蓄电池使用寿命通常不超过5年，一旦淘汰，则容易产生废液污染，导致环境问题。因此，通过水蓄能设备代替蓄电池能够起到降低建筑物电气火灾和环境污染的效果。

2.3 水蓄能应用讨论

水蓄能设备的应用非常广泛，在常见的空调系统中能得到良好应用。

1）水蓄能系统配合常规冷水机组、热泵机组工作，空调系统末端及空调系统配管均不需要特别调整，可直接使用。因此水蓄能系统除了可用于新建项目，还可用于已有项目空调系统的增容和改造。

2）水蓄能系统的制冷工况或者制热工况与蓄能工况相比，水温差别不大，因此冷水机组和热泵机组在相应的两种工况下都可保持很高的工作效率。

3）如果仅使用制冷工况，则可利用消防水池作为蓄冷槽，如此可有效降低初始投资。通常当地消防部门要求做消防验收，保证水蓄能设备不影响消防设备的使用。

4）水蓄能设备易于控制，采用水蓄能设备的空调系统与常规系统的控制方式差别不大。

如果水蓄能设备应用于地源热泵系统中，则消防水池既可用于蓄冷，又可用于蓄热。原因在于地源热泵系统所需蓄热温度通常不高于45 ℃，满足消防水要求；而常规空调系统所需水温通常超过80 ℃，只能另行设置蓄水槽。地源热泵与水蓄能的结合，充分利用了建筑已有蓄水设备，利于降低初始投资。

由于不同项目设计方法差异较大，本文采用具体案例的方式对比两种设计的经济指标，虽然提供的不是统计意义上的指标，但也能反映水蓄能设备用于零碳建筑储能设备时的巨大优势。

3 结束语

本文提出了一种降低低碳建筑储能成本的方法，即通过水蓄能设备代替蓄电池作为空调类负荷的储能设备。目前，低碳建筑能源系统由于储能问题推广困难，本文讨论了低碳建筑能耗系统各组成部分，发现空调系统能耗较为独立，如由水蓄能设备代替蓄电池完成储能任务，将大幅降低能源系统成本，促进低碳建筑的推广。

1）水蓄能设备能效利用率高于蓄电池。采用水蓄能设备代替蓄电池，系统能效提高11.75%。

2）水蓄能设备在初始投资、运行维护和建筑空间利用方面优于蓄电池。本文以上海地区某办公建筑某日能耗数据为例，采用水蓄能设备代替蓄电池为空调类负荷储能，储能设备初始投资和维护费用均可降低33%；相应地，设备机房面积也可以降低33%。

3）采用水蓄能设备代替蓄电池为空调类负荷储能，能够减少电气连接复杂度，降低建筑物发生电气火灾的风险，减少电池废液处理，降低环境污染。

4）通过案例对比可以看出，采用蓄电池结合水蓄能设备优于采用单纯的蓄电池设备，作为低碳建筑储能设备。本文推荐低碳办公建筑储能采用蓄电池结合水蓄能设备。

5）以上海地区某办公建筑某日能耗数据为例，空调系统能耗占建筑总能耗58%，如采用水蓄能设备为空调类负荷储能，则水蓄能池体积为5.27 m^3。

本文选取了一天能耗进行讨论，除了要满足零碳建筑能源系统需求外，还需满足未来数日阴雨天能耗需求，因此蓄电池和水蓄能设备均比该讨论所提容量增大很多。未来将专注于具体设备配置的研究，进一步完善零碳建筑能源系统设计工作。

参考文献

[1] 诸大建，王翀，陈汉云．从低碳建筑到零碳建筑--概念辨析[J]．城市建筑，2014(2)：222-224．

[2] 周杰．碳中和目标下零碳建筑标准体系研究[J]．中国质量与标准导报，2021(3)：21-23．

[3] 李建林．分布式可再生能源领域中储能的应用现状及发展趋势[J]．电气应用，2018，37(1)：6-9．

[4] 陈宇，刘胜煜，李民英，等．储能电源系统工程设计与实现[J]．电气应用，2021，40(7)：23-29．

[5] 李叶茂，郝斌，李雨桐．直流建筑发展驱动力[J]．现代建筑电气，2020，11(9)：1-6．

[6] 孟康，解璞，张乐，等．直流光储系统混合储能分频控制策略研究[J]．电气应用，2018，37(11)：14-17，23．

[7] 王佳莉，韩肖清，姜文杰，等．复合储能系统在分布式光伏并网系统中优化方法研究[J]．电气应用，2020，39(6)：51-55．

[8] 华英，王鸿，王致杰．直流微电网混合储能系统优化配置研究[J]．电气应用，2019，38(10)：28-35．

[9] DU W，LI M，WANG Y，et al．Dynamic energy efficiency characteristics analysis of a distributed solar photovoltaic direct-drive solar cold storage[J]．Building and Environment，206，108324．https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108324

[10] BAMPOULAS A，SAFFARI M，PALLONETTO F，et al．A fundamental unified framework to quantify and characterise energy flexibility of residential

buildings with multiple electrical and thermal energy systems[J]. Applied Energy, 282, 116096.https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116096

[11] IBRAHIM O, FARDOUN F, YOUNES R, et al. Review of water-heating systems: General selection approach based on energy and environmental aspects[J]. Building and Environment, 72, 259-286. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.09.006

[12] BAI J, ZHANG S, LIANG J, et al. A systematic design method for green buildings based on the combined system of flexible solar cells and reactors on buildings[J]. Building and Environment, 209, 108657.https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108657

[13] KANT K, PITCHUMANI R. Advances and opportunities in thermochemical heat storage systems for buildings applications[J]. Applied Energy, 321, 119299.https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119299

[14] ARMGHAN H, YANG M, ALI N, et al. Quick reaching law based global terminal sliding mode control for wind/hydrogen/battery DC microgrid[J]. Applied Energy, 316, 119050.https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119050

[15] GONG Q, KOU F, SUN X, et al. Towards zero energy buildings: A novel passive solar house integrated with flat gravity-assisted heat pipes[J]. Applied Energy, 306, 117981.https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117981

[16] WU P, WANG Z, LI X, et al. Energy-saving analysis of air source heat pump integrated with a water storage tank for heating applications[J]. Building and Environment, 180, 107029. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107029

[17] ZHANG Y, ZHOU G, LIN K, et al. Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook[J]. Building and Environment, 2006, 42(6): 2197-2209.

[18] 孙铁. 水蓄能在空调系统节能中的应用[D]. 重庆：重庆大学，2018.

[19] 孙茂锟. 水蓄能能源站运行优化策略研究[D]. 南京：南京师范大学，2021.

[20] 柴梦. 水蓄能空调系统运行策略优化分析[D]. 北京：北京建筑大学，2017.

[21] 卢晗. 地源热泵与水蓄能复合系统的研究[D]. 济南：山东建筑大学，2012.

[22] 王瑞婷. 地源热泵水蓄能复合系统综合性能评价研究[D]. 天津：天津大学，2014.

[23] 杨静. 地源热泵与水蓄能复合系统的优化匹配及控制策略[D]. 武汉：华中科技大学，2014.

[24] 张钦，张爱华，岳玉亮. 水蓄能空调系统设计蓄冷率的确定[J]. 建筑科学，2013，29(8)：93-98.

[25] 江亿. 光储直柔——助力实现零碳电力的新型建筑配电系统[J]. 暖通空调，2021，51(10)：1-12.

作者简介

李鹏（1986—），男，高级工程师，研究方向为电气工程、智能化系统、零碳建筑能源系统。

（收稿日期：2022-09-07）