

核电厂区低温余热跨季节储热利用方案设计与能效测算

李文倩

中国核动力研究设计院

DOI:10.32629/jpm.v7i6.8930

[摘要] 针对核电站的低品位余热排放量大、季节性供需不匹配、全年资源利用率不高等实际问题，以电站为例，围绕电站内的跨季节存储和能源效率进行研究。从隔热结构、传热匹配、输配节能和智能调度四个层面，建立符合工程应用需求的能源效率评估指标。采用工业实际测量资料，比较了各种优化措施的减损、增效和减排效应。研究发现，通过多维度的优化设计，可以明显减少储热系统的热量损失，并可以大大减少输送过程中的能量消耗，提高整个年度的低品位热量利用率，能够充分保证工厂冬季的供暖需要。

[关键词] 核电厂区；低温余热；跨季节储热；能效

Design and Energy Efficiency Assessment of Cross-Seasonal Thermal Storage Utilization for Low-Temperature Waste Heat in Nuclear Power Plant Sites

Li Wenqian

China Nuclear Power Research and Design Institute

[Abstract] Addressing practical challenges such as substantial low-grade waste heat emissions, seasonal supply-demand mismatches, and low annual resource utilization rates in nuclear power plants, this study focuses on cross-seasonal thermal storage and energy efficiency within power plants. Energy efficiency evaluation metrics tailored to engineering applications are established across four dimensions: thermal insulation design, heat transfer optimization, energy-saving transmission/distribution systems, and intelligent scheduling. Using industrial measurement data, the study compares the loss reduction, efficiency enhancement, and emission mitigation effects of various optimization measures. The findings demonstrate that multidimensional optimization design can significantly reduce heat losses in thermal storage systems, substantially lower energy consumption during transportation, improve annual low-grade heat utilization rates, and fully meet winter heating demands at power plants.

[Key words] Nuclear power plant site; Low-temperature waste heat; Cross-seasonal thermal storage; Energy efficiency

压水堆核电站在正常工作条件下，会不断地产生较多的低温循环水余热，这是一种高品质的清洁低碳新能源。我国目前大部分核电站都是以实时直送方式进行余热利用，且冬季和夏季温差较大，既导致了清洁能源的消耗，又容易引起区域水体

的热污染，这对于提高核能系统的整体效率和生态环境都是不利的。通过实施“夏储冬用”的方式，解决供热系统中热量空间和时间上的不匹配问题，是未来核能发电系统的一个主要发展趋势。

一、核电厂低温余热资源分析

(一) 核电厂低温余热来源与资源现状

我国千万千瓦压水反应堆常规岛的循环水系统是该核电站最重要的低温余热来源,其年均负载系数为 0.92,其基本水量为 $60 \text{ m}^3/\text{s}$,年均升温 8.2°C ,在夏季 6-9 月,排水温度为 34.8°C ,而在冬季的一个月内,则可实现 128.6 万吉焦的综合利用。目前工厂采用温排污方式处理海水,只有在冬天才会有很小一部分剩余的热能经板式换热设备输送到工厂,年的剩余热能只有 14.2%,大部分多余的热能都被排放到了水中,不仅导致化石能源替代潜能的巨大损失,还不断形成了海洋热污染,破坏了近岸的水生生态系统^[1]。核电站的辅助热和厂房通风散热的废热一般都在 40°C 以下,是一种低品质的热资源,其长距离传输的经济性不高,只适用于工厂内的就地排放。

(二) 厂区全年热负荷供需错配特征

核电厂由办公建筑、职工宿舍、维修辅房和后勤辅助用房组成,其供暖建筑面积为 32,000 平方米,其建筑用热量在季节上表现出明显的不平衡现象。在采暖期,采暖期 120 天的最高热负荷为 12.7 MW,采暖期的用热总量为 18.3 万千瓦;在夏天,只满足家庭用水的需要,平均用电 1.2 MW;春季和秋季的平均日均热负荷低于 0.8 MW。我国的传统供暖方式依赖于工厂内的自带煤锅炉,其全年能耗较大,且污染指数较高;而直接供热只能在冬天起到有效作用,而夏天过剩的热能却没有存储渠道,一般的热交换装置很难解决供求之间的时空不匹配问题。

二、核电厂区低温余热跨季节储热利用方案

目前我国沿海千万千瓦压水反应堆常规岛在使用时会不断地生成大批的低品位废热,此类废热具有总量大、连续性强、品位稳定等特征,但由于季节性热负载不平衡,致使其资源利用效率不高。核电站厂房用热以冬供暖为主,夏、秋、冬转换期的用热负荷非常小,且有很多剩余的低温废热通过污水排放到海洋,既浪费了洁净的能量,又引起了水体的热污染,影响了水体的生态环境。常规的废热直接供应方式只能在冬天进行短时的集中供暖,而不能有效地平衡利用整个年度的废热,且具有显著的空间和时间上的不匹配性。针对以上问题,综合考虑核电站的全年运行条件和热载荷特性,从保温结构、热交换系统、输配设备、运行调度等四个方面提出针对性的优化设计。

(一) 蓄热器本体隔热层的最佳设计

现有的地下储热池只依靠墙体设置保温材料来进行蓄热,且其上部与大气发生了直接的接触,导致其损失超过 60%,且在长时间的蓄冷过程中损失严重。为了弥补这一缺陷,使用漂浮式封闭隔热的方式,将储热池表面全部用高密度的聚氨酯隔热材料覆盖,密封连接彻底切断了水和大气的对流传热^[2]。同时,对原有的池壁和池底隔热层进行了整修和增厚,修补了旧

的、损坏的隔热构造,减少了池壁的导热、散热损失。这种方法不需要进行大型的土建建设,能够适应核电站工厂的安全控制需求,可以减少静止储存在不同季节的无用热量损耗,提高静止蓄热性能。

(二) 余热回收装置的精确匹配

常规的平板式换热器以定端差方式工作,难以适应冬季和夏季的水温波动,造成了传热条件的不匹配。在夏天,由于循环水的水温较高,而在固定的换热器中,存在着较多的换热面积和较大的操作负荷,使系统在设计时的运行工况不能满足设计要求,从而增加了系统的能耗。在此基础上,通过在传热管线上增加电动温度控制模块,构建基于实时冷却水温度和环境温度的自适应传热控制机理,动态调节末端差和传热负载,达到“夏天适当控温换热,冬天充分收集余热”的分级利用方式,以克服四季温差较小的难题,不断提高低温余热收集利用率,见图 1。

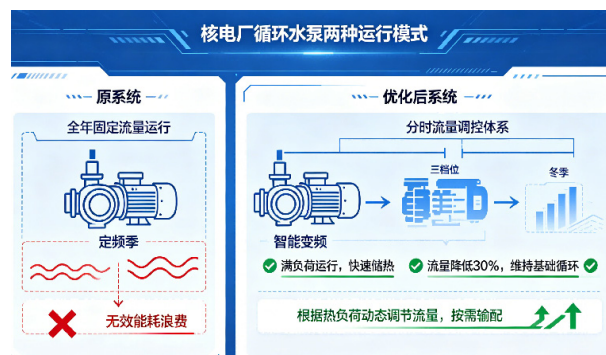


图1 核电厂水泵系统优化的示意图

(三) 配电网络的节能调节与最优控制

原有的系统中,循环泵为定频率定流量,未区分蓄热、释热等不同状态,春夏转换季厂区的热负载非常小,只需要维护一个周期,而定频率的运转则会造成巨大的无效传输能量。这一次的优化,用智能变频设备取代了原来的固定频率的泵,建立了时间分配的流动调节系统,划分了三个操作区间:在夏天,供热和储存时都是满负荷运行,以保证快速的储存。在夏季转换期,保持供热时,只需减少 30%的操作流量,保持基本的循环。在放热供暖的过程中,按照工厂的实际供暖负荷,对管网的输送进行动态调整,从而达到节能减排的目的。

(四) 储释热联动智能调度优化

为了从根本上缓解电力系统中的热量供应与需求的季节性不匹配问题,构建电力系统的储能与释热系统的耦合调控机制。根据核电站全年废热释放规律和工厂用热时间序列特点,提出差别性调控方案:在夏天剩余热量充足的时候,尽量存储不能及时释放的较低温度热量,并将其存储在地下蓄热水池中。在春季和秋季的转换阶段,重点是隔热、保热,保持系统平稳备用,使散热损失降到最低;在冬季供暖高峰时段,以蓄

热的方式代替常规的煤炭供暖，实现整个工厂的冬天用热^[3]。通过时序化的智能化调度，对“夏储冬用”的能源进行跨季配置，使整个年度内的低品位热能资源得到最大限度的消纳。

三、系统多维能效测算分析

（一）储热保温降耗效果测算及优化落地措施

传统开放式和半地下非绝热式蓄热装置在三个月内的热损失均为 15%~20%，而在较陈旧的隔热建筑条件下，其能耗更高，是影响蓄热效率的重要因素。现有核能蓄热池只依赖于固定的墙壁隔热层，且其上部与大气直接接触，其热损耗约为 60%以上，且在长时间的蓄热过程中，大量剩余的低温热能难以有效保存到冬季。为了有针对性地解决这一问题，优化采取了两个具体的落地措施，一是安装了一块完全覆盖的高密度聚氨酯浮动隔热板，采用橡胶密封接合技术将板材表面的裂缝封闭起来，完全切断了水和大气之间的对流传热，从而减少了表面的热量损失^[4]。二是对池壁和池底的老化隔热材料进行修补和增厚，对开裂、脱落和老化破损部位进行修补，以提高整个建筑的热阻，减少土体的导热和散热损耗。在节能效益方面，通过该项目的实施，可以最大程度地保留核能源过剩的低品位热能，降低其

在不同季节的存储过程中的无用耗损，从而提高了整个冬天的可用能源，实现工厂的“存不住、耗损大”的工程痛点。

（二）余热回收效率提升测算及工况匹配优化措施

核电站的循环冷却系统具有全年连续排放、总量稳定的特点，但其水温具有明显的夏、冬两季波动，使得常规的定端差换热方式难以与其相适应，造成全年余热利用率波动大、资源利用率低。传统的空调制冷系统以常值换热方式操作，在夏天较高的温度下容易产生热冗余和设备过载，而在冬天较低温度下则不能完全回收，导致了大量的低品位热量得不到高效收集和利用。为了提高全年的换热和匹配性，此次对换热器进行了精细的操作控制，在换热器的主要管路上增加了一个电子温度控制阀门和一个温度测量的传感器，建立了一个根据季节水温和环境温度进行动态调节的系统。在夏天水温高的情况下，适当减小末端差，以防止因过量收集而引起的能源消耗；在低温环境下，应适当延长换热区间隔，延长换热时间，使中低品质废热资源得到充分开发。在此基础上，结合水域储能热电耦合操作的实践，进行多工况的精确匹配与优化，可有效抑制年度热量的波动，达到热能的梯级利用，具体见表 1。

表 1 评价系统优化成效核心能效指标对比数据表

测算指标	优化前数值	优化后数值	变化幅度
单季节储热损耗率	25.7%	17.2%	下降 8.5 个百分点
系统全年余热利用率	56.2%	61.6%	提升 5.4 个百分点
全年辅机耗电量（单位：万 kWh）	216.40	148.20	节电 31.5%
单位供热量输送电耗（单位：kWh/GJ）	0.0299	0.0205	下降 31.4%
年替代标煤量（单位：万吨）	6.21	6.75	增加 0.54 万吨
年 CO ₂ 减排量（单位：万吨）	14.90	16.20	增加 1.3 万吨

（三）系统综合利用效益测算及调度优化措施

通过对秦山核-热电联产示范项目的测算和计量方法的研究，提出了一种新型的热电联产技术方案。通过该方案的实施，可以实现对电厂锅炉的全面改造，减少石化燃料的使用，减轻环境污染。与常规的燃煤供暖方式相比，该体系不但完全去除了燃烧过程中产生的二氧化硫、氮氧化物、粉尘等污染物，而且还可以显著降低因核能采暖废水排放引起的水体热量污染，从而改善了电厂周围水体的生态环境。与此同时，该项目在不依靠外部电力和燃煤等能源的情况下，实现了一种不依靠外部电力和燃煤等能源的连续供暖，在保证工程安全性、经济性和生态效益的前提下，能够实现工厂运行的节能降耗。

四、结束语

核电厂区低温余热跨季节储热系统优化基于保温结构改造、换热工况匹配、输配系统节能控制和储能系统智能化调度四种手段，可有效解决常规储能系统热损失大、适应性差、输配能耗高、资源利用率低等问题。实验结果显示，经过优化的

空调制冷设备，其蓄热和保热性能得到了明显提高，使整个年度的废热利用和运营经济性都得到了极大的提升，其节能减排成效十分明显，可以实现对工厂冬季供暖的平稳覆盖。整体优化设计符合核电站的安全管理需求，施工简单，可行性高，对促进核电余热资源的规模化利用和清洁低碳发展有着重要的工程示范作用。

【参考文献】

- [1]赵彦. 核电厂余热综合利用技术创新及市场拓展研究[J]. 新发现, 2025, (19): 37-39.
- [2]张明, 郭树生, 李剑波. 核电厂乏汽余热利用技术研究[J]. 中国设备工程, 2025, (15): 203-205.
- [3]赵雅卓, 张文杰, 廖颖慧, 等. 核电厂低品位余热发电技术研究[J]. 发电技术, 2025, 46 (4): 818-828.
- [4]车娟, 林阿彪, 陈石, 等. 压水堆核电厂设计基准工况方法研究[J]. 核科学与工程, 2025, 45 (2): 306-314.