

文章编号: 1006—2610(2023)06—0113—04

塔式光热电站熔盐储罐设计优化探讨

许立国¹, 祁林攀², 沈亚军², 戴雨薇²

(1. 中电建新能源集团股份有限公司华北分公司, 天津 301700;

2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065)

摘要: 塔式太阳能光热发电站中, 熔盐储罐是工程的重要组成部分, 其设计方案对工程成本影响巨大, 从价值工程的角度, 对其进行合理的优化设计具有重要意义。通过青海某光热项目实践, 在对已建项目熔盐储罐设计方案分析研究的基础上, 从降低熔盐储罐死液位下冗余设计的角度, 提出了多种设计优化方案, 能够有效降低此类工程的建设成本。

关键词: 塔式光热电站; 熔盐储热系统; 设计优化

中图分类号: TK512

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-2610.2023.06.019

Design Optimization of Molten Salt Storage Tank of Tower Solar Thermal Power Station

XU Ligu¹, QI Linpan², SHEN Yajun², DAI Yuwei²

(1. North China Branch of PowerChina Renewable Energy Co., Ltd., Tianjin 301700, China;

2. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: The molten salt storage tank is an important part of the tower type solar thermal power station, and its design scheme has a huge impact on the project cost, so it is of great significance to optimize the design from the perspective of value engineering. Through engineering practice of a solar thermal power station in Qinghai province and based on the analysis and study of the design scheme of molten salt storage tank of the existing project, and from the perspective of reducing the redundancy design of molten salt storage tank under the dead liquid level of molten salt storage tank, a variety of design optimization schemes are proposed, which can effectively reduce the construction cost of such projects.

Key words: tower solar thermal power station; molten salt heat storage system; design optimization

0 前言

随着国家“双碳”战略目标的提出, 中国正在加速构建新型电力系统。作为一种清洁电力以及有效解决新能源发电波动性问题的成熟路径, 太阳能光热发电成为国内电力行业发展的新方向。太阳能光热发电站(见图1)是通过聚光集热系统捕获并聚集太阳能后传热至高温热流体, 再通过熔盐储热系统和换热系统传热至高温高压蒸汽, 从而驱动传统汽轮机来发电, 具有可储热、可调峰、可稳定输出和可非日照时发电等优点^[1]。

熔盐储热系统是塔式光热电站关键环节之一,

能有效的提供能量在时间上的延迟供给, 保障系统的有效运行, 其对整个光热发电项目的工程成本、安全及可靠运行影响极大^[2]。

目前国内现有熔盐储热系统的研究成果中, 对于熔盐储罐基础设计、结构强度分析、温度场分析、散热损失分析和建造质量管理方面的研究成果较多, 对于储罐方案和体型的创新和优化研究目前尚未有涉及。本文通过青海某光热项目实践, 在对已建项目熔盐储罐设计方案分析研究的基础上, 从降低熔盐储罐死液位下冗余设计的角度, 提出多种设计优化方案, 为有效降低此类工程建设成本提供借鉴。

1 储罐概况

调研青海某光热项目(见图2)和其它国内已建光热项目熔盐储罐典型设计方案发现, 目前国内主流储热系统设计采用高/低温熔盐储罐的双罐设计

收稿日期: 2023-01-30

作者简介: 许立国(1979-), 男, 吉林省长春市人, 高级工程师, 主要从事新能源工程发电技术、土建及结构技术研究工作。

方案。低温熔盐从低温熔盐罐中通过熔盐泵抽送至吸热器中,吸收热量变为高温熔盐后,进入高温熔盐罐中储存,发电时通过高温熔盐泵送至换热系统,与汽水进行换热后,温度降低变为低温熔盐,进入到低温熔盐储罐储存。通过高温与低温储罐间的熔盐循环往复流动,实现储热和放热功能^[3]。储热系统如图3所示。



图1 某塔式光热电站实景



(a) 熔盐储热系统 (b) 高温熔盐储罐

图2 某塔式光热电站熔盐储热系统建设实景

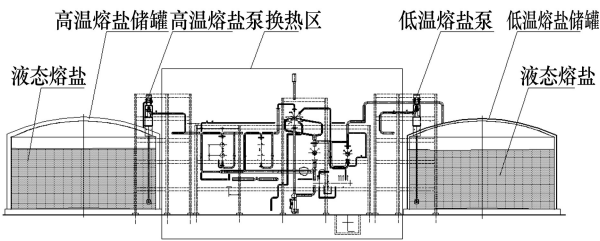


图3 塔式光热电站熔盐储热系统

由于熔盐储罐底部采用近似平底设计,熔盐泵下插至罐底时须预留0.5~1.0 m不等的最低操作液位,此液位以下的熔盐不能充分参与系统循环,处于无功效状态。对于装机规模达到100 MW及以上的塔式光热电站,熔盐储罐往往体积很大,直径30~50 m,熔盐储量过万吨,成本过亿,储罐死液位占用了熔盐储热系统的工程成本,对造价影响大。

从价值工程原理讲,在确保功能不变的前提下减少成本,是实现价值提高的有效途径,有必要对熔盐储罐的设计方案优化给予足够的重视^[4]。本文通过青海某国家示范性光热项目实践,对已建项目熔盐储罐设计方案进行了分析,从降低熔盐储罐最

低操作液位的角度,创新和优化熔盐储罐设计方案,减少工程熔盐用量,以降低工程建设成本,提升系统价值,经济效益显著。

2 典型项目优化流程

以某装机容量为100 MW的典型塔式太阳能光热发电站为研究对象,引入PDCA管理循环的工作程序^[5],开展熔盐储罐的设计优化探讨。

PDCA设计优化循环分Plan、Do、Check和Action 4个阶段和8个事项,按照顺序依次开展工作^[6],PDCA设计优化循环如图4所示。

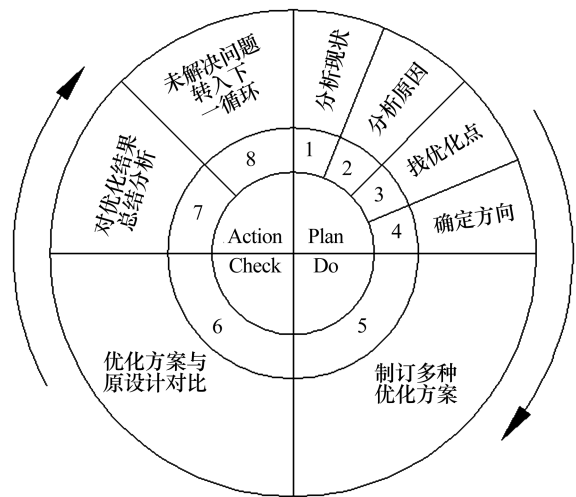


图4 PDCA设计优化循环

将此循环流程应用在研究项目熔盐储热系统设计优化上,具体过程详见表1^[7-9]。

表1 设计优化工作流程

序号	工作阶段	工作流程	工作效果
1	计划阶段 (Plan)	分析现状	熔盐储热系统二元熔盐冗余量大
2		分析原因	熔盐储罐最低操作液位以下的熔盐不能充分参与系统循环,存在设计冗余
3	执行阶段 (Do)	找优化点	降低熔盐储罐最低操作液位以下熔盐量。调研国内现有熔盐储热系统的研究成果,此方向尚未有研究;熔盐储罐的结构受力主要以静熔盐压力为主,从结构和工艺的分析设计优化方向可行
4		确定方向	创新熔盐储罐设计方案,优化储罐结构,以减少项目二元熔盐用量,降低工程建设成本
5	检查阶段 (Check)	制订多种优化方案	方案1:多点局部下沉设计;方案2:连通凹槽下沉设计;方案3:局部渐变下沉设计;方案4:罐外下沉小罐设计
6		优化方案与常规设计方案对比	调研国内现有熔盐储热系统的研究成果和引用文献分析,四种优化方案与常规方案对比,从结构和工艺的角度看对系统稳定性影响很小设计优化可行且经济效率显著,详见表2
7	处理阶段 (Action)	对优化结果总结分析	方案1~4各有特点,均可节省项目熔盐用量,降低工程成本
8		未解决问题转入下一循环	问题解决

3 设计优化方案对比

二元熔盐和高、低温熔盐储罐是熔盐储热系统成本最重要的组成部分,是降低系统成本和实现价值的关键^[10]。研究项目高、低温熔盐储罐罐壁高度均为15 m,熔盐高度均为13.65 m。低温熔盐储罐直径为35.5 m,最低操作液位0.75 m,高温熔盐储罐直径为36.6 m,最低操作液位0.5 m。依据PD-CA设计优化循环流程,以典型塔式太阳能光热发电站主流熔盐储罐系统设计方案为基础,从改变罐底体型以降低最低操作液位角度进行创新,以典型塔式太阳能光热发电站主流熔盐储罐系统设计方案为基础,提出4种不同技术路线的优化方案。研究项目常规设计方案二元熔盐用量26 000 t,二元熔盐单价按6 700元/t计算,二元熔盐总成本1.742亿元。低温熔盐储罐1台,成本3 500万元;高温熔盐储罐1台,成本5 900万元/台。由于最低操作液位以下熔盐未有效进行系统循环,此部分熔盐用量高达2 320 t,4种方案(见图5)以不同的罐底体型进行了设计优化,将操作液位控制在局部体型范围内,从而减少了系统二元熔盐总用量。

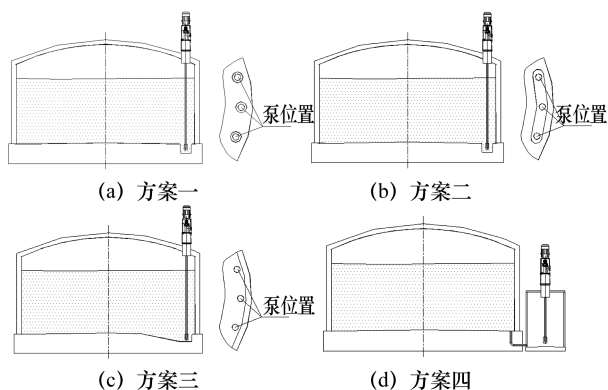


图5 熔盐储热系统设计4种优化方案

方案1:多点局部下沉设计。考虑最低操作液位要求,将储罐底部设计为多点局部下沉结构。即在每个熔盐泵与储罐底部配合位置设计局部下沉结构,各个熔盐泵对应的下沉结构互相独立,各泵对应点的下沉高度以满足最低操作液位要求为原则,下沉平面布置以泵轴为中心局部扩大,为泵正常工作和熔盐回流预留足够空间,多点下沉结构之间互不联通。

方案2:连通凹槽下沉设计。考虑最低操作液位要求和熔盐流动性需求,将储罐底部设计为连通凹槽下沉结构。即在每个熔盐泵与储罐底部配合位

置设计下沉结构,各下沉式结构之间相互连通。连通凹槽各个泵对应点的下沉高度以满足最低操作液位要求为原则,平面上以泵轴为中心局部扩大,熔盐可在连通凹槽之间相互流动。

方案3:局部渐变下沉设计。考虑最低操作液位要求和储罐结构体型的平滑过渡需求,将储罐底部与熔盐泵对接区域设计为局部渐变式下沉结构,每个熔盐泵与储罐底部配合位置均位于渐变式下沉结构的深液位区,高低液位区之间采用平滑过渡,熔盐可从高液位区流动到低液位区,再被各熔盐泵从罐内抽出至其它各系统。

方案4:罐外下沉小罐设计。考虑熔盐储罐直径大,为降低罐底最低操作液位以下熔盐的浪费,熔盐储热系统在高、低温熔盐储罐外增设下沉小罐,高、低温熔盐储罐与下沉小罐之间结构独立但通过底部管路连通,系统循环时,使熔盐先流出至小罐,再从小罐内用泵抽出至其它各系统。

总体而言,方案1~4通过不同的方式,降低了常规设计方案熔盐储罐最低操作液位以下的冗余熔盐,节省二元熔盐的总用量,降低熔盐储罐的整体高度,从而节省了工程成本。与常规设计方案对比,方案1~3均采用储罐底板下沉式设计的思路,由于技术路线的差异,一方面会引起节省熔盐用量和熔盐储罐成本的不同;另一方面,不同的下沉结构,对应熔盐储罐底板在下沉位置的流动性和适应温度变化能力会有所不同^[11]。方案4采用的罐外下沉小罐设计理念,能够避免熔盐储罐底板的下沉设计,但会额外增加小罐的成本和附属管路,但会减少熔盐泵的成本。为全面反映以上4种优化方案在经济和技术上与常规设计方案的差别,将优化方案与常规设计技术经济对比分析,具体见表2。

表2 优化方案与常规设计技术经济对比

对比项目	节省二元熔盐用量/t	节省二元熔盐成本/万元	节省储罐成本/万元	节省熔盐泵成本/万元	总节省成本/万元	罐底熔盐流动性	温度变化适应性	方案可行性
方案1	2300	1541	220		1761	多点不连通,流动性一般	一般	可行
方案2	2200	1474	178		1652	多点连通,流动性较好	较好	可行
方案3	2000	1340	130		1470	渐变式结构,流动性好	好	可行
方案4	1600	1072	50	200	1322	罐外下沉小罐,流动性好	一般	可行

注:研究项目常规设计方案2元熔盐用量26 000 t,二元熔盐单价按6 700元/t计算;综合考虑熔盐成本和储罐的建造成本影响,按储罐高度降低和罐底体型改变综合考虑储罐成本变化。

从对比结果可知,4种方案可节省研究项目熔盐储热系统成本分布在1322万~1761万元,经济效益显著。从节省成本的角度讲,方案1最佳,方案2次之,方案3再次之,方案4一般;从罐底熔盐的流动性讲,方案3和方案4最佳,方案2次之,方案1一般;从熔盐储罐底部对温度变化的适应性讲,方案3最佳,方案2次之,方案1和方案4一般。总之,4种方案从不同的技术路径,创新了熔盐储热系统,与常规设计方案对比各有其特点,但均能够有效减少项目二元熔盐用量和降低项目的建设成本。

4 结论

熔盐储罐的设计方案对塔式太阳能光热发电站的工程成本影响巨大,从价值工程的角度,对其进行合理的优化设计,具有重要意义。本文从降低熔盐储罐最低操作液位的角度,创新和优化了熔盐储罐设计方案,能够减少工程熔盐用量、降低建设成本、提升系统价值,经济效益显著,可为后续类似光热项目熔盐储罐的建设提供参考。主要结论如下:

(1) 通过引入了PDCA管理循环的工作程序,从减少熔盐储罐最低操作液位的角度提出了设计优化思路。以典型塔式太阳能光热发电站主流熔盐储罐系统设计方案为基础,从改变罐底局部体型的角度提4种不同的优化设计方案。

(上接第112页)

3.3.10 质量检查与表面封闭处理

每台风机灌浆完成,强度达到70%后采用压浆试验法进行质量检查。检查孔布置在吸浆量较大的孔之间。合格标准为初始10min内注入量小于0.01L/min。浆液固化后1~2d,去除灌浆管,用树脂砂浆封填平整,用HK-EQ环氧胶泥涂刷1~2道。

4 经验教训

在方案编制时计划通过压水试验检测风机基础混凝土内缝隙大小,为后期灌浆提供参考依据,但在项目实施过程中,经过分析认为灌浆前压水试验可能导致混凝土小缝隙内注入的水灌浆时无法排除,影响灌浆质量,因此,不建议灌浆前进行压水试验。

5 结语

经实践证明采用千斤顶顶升纠偏基础环水平度与环氧树脂灌浆加固处理的风机,在环境温度不变的情况下,未重复出现因基础环抬动或混凝土空洞,

(2) 优化方案对熔盐泵处罐底局部体型进行了创新,以局部空间的改变适应熔盐泵最低操作液位的要求,从而避免罐底整体空间因适应最低操作液位要求造成的设计冗余。从节省成本、罐底熔盐流动性和温度变化适应性方面,推荐方案3。

此次开展的塔式光热电站熔盐储热系统设计优化理念探讨成果具有显著的技术经济效益,能够有效降低此类工程的建设成本,对于类似项目的设计优化及管理工作具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 高肖肖. 熔盐储热系统的结构设计及性能研究[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- [2] 王鹏. 太阳能光热发电熔盐储热系统设计技术研究[J]. 青海电力, 2018, 37(3): 37-40.
- [3] 韩伟, 崔凯平, 赵晓辉, 等. 光热电站储热系统设计及储罐预热方案研究[J]. 华电技术, 2020, 42(4): 42-46.
- [4] 祁林攀, 宋棋凡, 余攀. 塔式光热电站熔盐储罐的全面质量管理应用[J]. 西北水电, 2022(1): 111-114.
- [5] 孙云昊. 光热电站储热系统熔盐量设计优化及工程应用[J]. 工程建设与设计, 2020(22): 101-103.
- [6] 韩伟, 崔凯平, 赵晓辉, 等. 光热电站储热系统设计及储罐预热方案研究[J]. 华电技术, 2020, 42(4): 42-46.
- [7] 赵伟, 徐卫兵, 王晓. 大直径冷熔盐储罐温度场及应力场的研究[J]. 太阳能, 2020(10): 75-80.
- [8] 曾鑫, 蔡君, 郑维栋, 等. 基于风险指引的光热电站高温熔盐储罐结构强度设计研究[J]. 机械强度, 2022, 44(3): 676-683.
- [9] 吕光阳, 滕飞. 两种不同形式大容量储热系统分析[J]. 机械工程师, 2015(12): 47-48.
- [10] 梁甜, 糜又晚, 李清元, 等. 多场耦合作用下某槽式光热电站熔盐储罐基础温度分布与沉降变形[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(5): 120-126.
- [11] 牛东圣, 周治. 光热电站熔盐储罐散热损失特性研究[J]. 西北水电, 2021(5): 149-153, 161.

导致基础环水平度超标、风机横向摆幅加剧, 风机沉降观测系统报警停机事故, 该方案可行、管用, 为类似风机法兰基础处理提供了重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 田伟辉, 瓮文芳, 田永进, 等. 基础环底法兰下混凝土受力及影响因素分析[J]. 西北水电, 2019(3): 81-84.
- [2] 刘俊. 浅谈基础环式风电机组基础裂缝产生的原因及修复措施[C]//中国农业机械工业协会风力机械分会. 第八届中国风电后市场交流合作大会论文集. 包头: 中国农业机械工业协会风力机械分会, 2021: 80-82.
- [3] 朱树军. 环氧树脂混凝土在设备基础修理中的应用[J]. 混凝土, 2004(11): 80-81.
- [4] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 混凝土裂缝用环氧树脂灌浆材料: JC/T 1041-2007[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2007.
- [5] 王青石. 浅谈环氧树脂在桥梁工程混凝土缺陷修补中的应用[J]. 华东科技(学术版), 2012(7): 217.
- [6] 胡玉贵. 某山地风电场风机塔架基础加固处理[J]. 红水河, 2015, 34(1): 22-24.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑物倾斜纠偏技术规程: JGJ 270-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [8] 国家能源局. 水工建筑物化学灌浆施工规范: DL/T 5406-2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [9] 张峰, 李清石, 胡辉. 基于基础环的风机基础缺陷加固处理分析[J]. 科技风, 2020(35): 174-175, 178.
- [10] 汪宏伟. 风机基础环松动原因分析和注浆加固[J]. 中国安全生产科学技术 2016, 12(3): 104-107.