

某百万级核电站冷却塔配置研究与优化

何辉

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 基于某百万级核电站冷却塔配置比较及优化分析, 高位收水塔方案年运行费用优于常规塔方案, 冷却塔采用高位收水装置后, 能有效降低水泵几何扬程, 节省运行费用。淋水面积越大, 采用高位收水装置的经济优势越大。根据数模试验结论, 高位收水塔应进行塔内填料布置深度优化, 即减小外围填料厚度、增大内围填料厚度, 最终实现冷却塔整体热力性能的最大化。

关键词: 高位收水塔; 常规塔; 优化分析

中图分类号: TM756.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)03-0048-06

Allocation and Optimization of the Cooling Tower About 1 000 MW NPP

HE Hui

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Based on the 1000MW nuclear power station cooling tower's allocation and optimization, the high-level water collecting cooling tower's annual operating costs is less than the conventional tower's, it's used by collection device, and can effectively reduce the pump geometry head, and also can save the annual operating costs. The larger of the filling area, it can get the more economic advantages of using high-level collection device. The numerical simulation according to the conclusions, the high-level water collecting cooling tower should be used by depth optimization about filling arrangement, reducing the thickness of the external filling, increasing the thickness of the internal filling, and ultimately finishing the overall thermal performance of the cooling tower.

Key words: high-level water collecting cooling tower; conventional tower; optimization.

按照“十三五”规划, 到 2020 年, 我国运行核电装机容量将达到 5 800 万 kW, 在建 3 000 万 kW。2011 年受日本福岛核电事故影响, 全球核电发展受到影响, 直到 2015 年国内沿海核电项目才得以重启。内陆和近海核电建设将迎来解冻时期, 目前已完成初步可行性研究报告审查的厂址有 31 个。其中, 湖北咸宁核电项目、湖南桃花江和江西彭泽三大核电项目有望成为我国首批启动的内陆核电站。内陆和近海核电站基本都采用带逆流式自然通风冷却塔的二次循环冷却, 因循环水系统流量大, 核电站超大塔的工艺设计显得尤为重要。

核电超大塔在工艺、结构特性方面均比常规意义上的大塔有较大的飞跃, 而且随着冷却塔规模的

增大, 超大型自然通风冷却塔的造价在核电站初投资中比例重大, 而冷却塔的风筒、斜支柱及环形基础的工程费用约占全塔费用的 2/3, 因此在已知冷却任务的条件下, 经济合理的确定风筒各部分尺寸在核电超大塔设计中意义重大。塔型设计是冷却塔设计工作中的重要环节, 对工程安全经济运行具有重要意义^[1-4]。

以下结合国内某近海核电站工程实例, 对核电站冷却塔选型进行配置优化和经济比选, 为后续核电超大塔设计选型提供一定依据和相关借鉴。

1 工程概况

某近海核电站厂址距海岸线最近直线距离约 4.5 km, 场地自然标高在 3 ~ 35 m, 地势起伏不大, 场地开阔, 总平面布置回旋余地较大。项目为规划容量为 4 × 1 250 MWe 核电机组, 电厂设计寿命 60 年。厂区一次规划, 分期建设。一期工程建设规模

收稿日期: 2016-02-01

作者简介: 何辉(1983), 男, 湖南郴州人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电站水工系统研究工作(e-mail) hehui@gedi.com.cn。

为2 × 1 250 MWe 核电机组。

该厂址气象站年平均气象干球温度、湿球温度、大气压、相对湿度分别为 23.0 °C、21.1 °C、1 009.5 hPa 和 85%。

2 基本设计方案

根据冷端优化初步结论，本工程推荐采用 1 机 2 塔(常规塔)、1 机 2 塔(高位收水塔)、1 机 1 塔(常规塔)、1 机 1 塔(高位收水塔) 4 种不同塔型配置方案时，经济排名最优的四个方案如表 1 所示。

3 冷却塔塔型优化及经济比选

3.1 塔型优化设计流程

冷却塔塔型设计主要包括壳体型线和关键部位尺寸设计。目前内陆核电的机组单机容量一般不小于 1 000 MW，配套的冷却塔淋水面积都大于 14 000 m²，甚至达到 20 000 m² 以上，根据规范和经验确定的塔型基本比例关系是否仍适用，还有待进一步的论证研究。

塔型优化一般包括整体优化和局部优化，塔体进风口高度、塔高、底部直径、喉部高度等都是关键因素，目前塔型优化工艺流程线路也相对明确，核电超大型冷却塔塔型优化工艺流程见图 1。

3.2 淋水密度范围选取

淋水填料是冷却塔的核心部件，根据调研，国外冷却塔的优势更多的体现在淋水填料和配套的喷溅装置、除水器等产品的性能上，而国内大多数同类产品与国外产品在性能上尚有一定的距离。在设计中，国产填料的平均淋水密度普遍比国外的低，随着国产淋水填料和配套的喷溅装置、除水器等产品逐渐升级改进，国产淋水填料的淋水密度可达 9 ~ 10 m³ / (m² · h)，本工程双曲线自然通风冷却塔各塔型淋水密度优化范围按 8 ~ 10 m³ / (m² · h) 进行选取。

3.3 淋水填料选取

在中国水利水电科学研究院几种常用淋水填料基础上(1.5 m 和 2.0 m 高度)，以某工程为例计算填料高度、出塔水温与淋水面积的关系，结果表明

表 1 1 机 1 塔、1 机 2 塔较优方案配置参数表

Tab. 1 One unit to one tower、one unit to two towers about the cooling tower arrangement

方案类型	背压 /kPa	凝汽器面积 /m ²	冷却倍率	出塔水温 /°C	循环水温升 /°C	循环水量 / (t · h ⁻¹)	淋水面积 /m ²
1 机 2 塔(常规塔)	6.41	108 500	64	25.77	8.75	226 475	2 × 15 000
1 机 2 塔(高位收水塔)	6.81	108 700	56.8	25.83	9.86	200 922	2 × 13 000
1 机 1 塔(常规塔)	6.80	108 700	56.8	25.79	9.86	200 922	1 × 24 000
1 机 1 塔(高位收水塔)	6.69	108 200	59.3	25.91	9.43	210 114	1 × 24 000

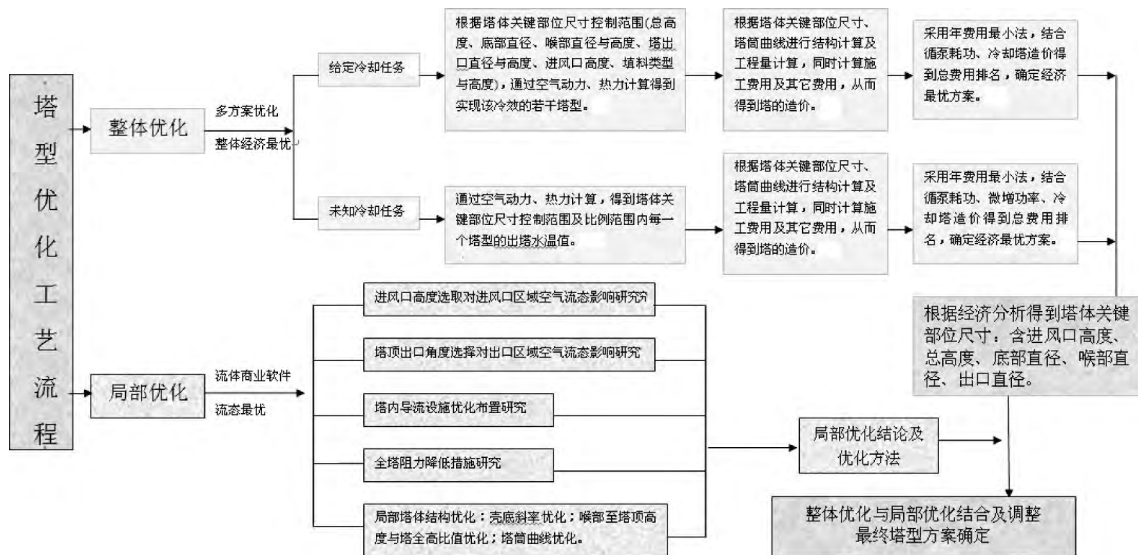


图 1 核电超大型冷却塔塔型优化工艺流程

Fig. 1 The large nuclear station of the cooling tower optimization process

随淋水面积的增大(塔的有效高度也增大), 填料高度增大至 2.0 m 时, 出塔水温降低幅度有所增大; 反之, 随淋水面积的减小淋水填料高度为 2.0 m 时, 出塔水温有可能不降低, 即不同的冷却塔淋水面积淋水填料高度增加到一定量后温度降低将不明显甚至会升高, 这是由于随淋水填料高度增大, 填料阻力增大塔内通风量减少, 通风量减少所带来的负效应大于填料高度增大的填料高冷却数的正效应。

在淋水填料 2.0 m 范围内, 随填料高度的增加出塔水温降低, 随淋水面积增大出塔水温也呈单值性降低。淋水填料增高 0.25 m 相当于淋水面积可减小约 1 000 m² (~5.6%) 面积, 填料阻力增大, 塔内的通风量有所减小, 热力特性增高, 最终出塔水温降低约 0.5 °C。夏季工况的气温一般较高, 填料高度增加后出塔水温降低值会变小。由此可看出, 冷却塔在参与冷端优化时, 填料的高度应至 2.0 m。

对于填料类型的选择, 中国水利水电科学研究院对 6 种常用国内外不同型式塑料薄膜淋水填料热力阻力性能进行系统试验研究, 得出如下结论:

1) 在相同条件下, S 波、双斜波、高效斜波及 GEA 斜波淋水填料的热力特性相对较高, 复合波和双向波填料的热力性能略低。

2) 在相同安装高度下, GEA 斜波、双斜波、高效斜波、S 波阻力较大, 复合波, 双向波填料阻力性能略低。另外, 填料阻力特性与热力特性呈比较明显的相关关系, 即热力性能高的填料, 阻力也相对较大。

因此, 关于淋水填料片型的设计选型, 需要在热力与阻力性能之间的对立关系中寻求平衡点。根据该研究成果, 并结合工程具体计算情况, 填料暂按 2.0 m 组装高度的国产 S 波淋水填料进行比较。

3.4 进风口高度选取

自然通风冷却塔的阻力主要集中在冷却塔的进风口区域, 进风口高度是影响进风口区域气流阻力的主要塔型参数。进风口高度的合理取值, 对冷却塔的气流阻力和塔内填料断面的风速分布都会产生影响, 从而影响整个冷却塔的热力特性。由于进风口高度与循环水泵的静扬程有关, 所以, 合理的进风口高度的选择要结合经济优化最终

确定。

根据我国现行规范 GB/T 50102—2003《工业循环水冷却设计规范》, 冷却塔进风口高度一般按进风口面积与淋水面积比值约为 0.35 ~ 0.40 设计, 对于大型核电机组配套的冷却塔, 如进风口每提高 1 m, 将增加循环水泵运行电耗约 600 kW。核电机组配套的超大型冷却塔, 随着塔型尺寸的增大和淋水填料断面风速的提高, 进风口的气流特性也会发生比较大的差异, 如果进风口高度的选取还沿用原有的范围, 将可能会导致进风口高度的优化难以找到经济最优点。因此, 广东某电力院联合国内知名科研院所, 对核电超大型冷却塔的进风口特性进行了专门的物模和数模研究, 并取得了相关研究成果和结论。

某超大型冷却塔在填料断面风速为 1.89 m/s 的情况下进风口高度对填料断面风速分布的影响如下图 2 所示。

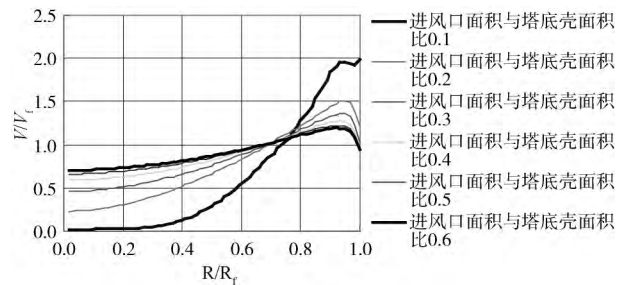


图2 进风口高度对填料断面风速分布的影响

Fig. 2 Effect of the air inlet height of the wind speed distribution to the filling section

分析结果可知: 不同进风口面积与塔底壳面积比从 0.1 变化到 0.6, 塔内的风速分布有较大的变化, 不同风速对填料断面风速影响不大, 面积比影响较大, 当面积比达到 0.1 时冷却塔内部约 20% 的半径范围内无新鲜风进入, 变为死区; 面积比由 0.2 增大至 0.3 时, 填料断面中心区域的风速与平均风速比由 0.25 增大至约 0.5, 而面积比由 0.3 增大至 0.4 时, 填料断面中心风速与平均风速比由 0.5 增大至 0.6, 说明当面积比小于 0.3 后塔内风速分布恶劣程度加剧迅速。

根据该研究成果, 对本工程核电大塔优化设计时, 常规塔型进风口面积与壳底面积比按 0.30 ~ 0.40 的范围进行优化, 高位收水塔由于进风口高度较常规塔高, 进风口面积与壳底面积比适当提高按 0.3 ~ 0.5 的范围进行优化。

3.5 高位塔和常规塔差异分析

在常规逆流式自然通风冷却塔中,热水由管道通过竖管(竖井)送入塔内热水分配系统,经配水管再通过喷溅装置,将水洒到填料上;经填料后成雨状自由跌落入至下部集水池,冷却后的水抽走重新使用。这种型式的冷却塔称为常规塔。

与采用常规冷却塔及其循环水系统相比,高位收水冷却塔取消了常规塔底部的混凝土集水池及雨区,配有高位收水装置,冷却后的循环水在淋水填料底部经高位收水装置截留汇入集水槽至循环水泵房进水间,再经过循环水泵升压后送回主厂房循环冷却使用,其他的配水系统、淋水装置、除水器与常规塔相似,高位收水装置如图3所示。在冷却效果相同的情况下,高位收水塔的总高度及直径等主要尺寸较常规塔基本相同,主要差异为进风口高度增加,以及由此引起的填料层位置上移而使淋水面积稍有减少。



图3 高位收水装置示意图

Fig. 3 High-level collection device schematic diagram

如图4所示,冷却塔供水扬程(竖井水位与集水池水位差)可分为二部分,即自由跌落高度与非自由跌落高度。对于塔体尺寸相当的常规自然塔与高位收水自然塔而言,非自由跌落高度(包括配水层水力高度、喷射配水高度、填料高度)并无区别,因此,他们的静扬程差异就在于自由跌落高度的差异。高位塔是一种节能型冷却塔,其节能的关键在于减少了常规自然塔雨区自由跌落的高度。高位塔静扬程的降低,使循环泵节能降耗优势明显。

常规冷却塔越大,高位收水塔节约的扬程就越多,其经济型越显著。如本工程采用 $24\ 000\text{ m}^2$ 常规自然通风冷却塔,其雨区自由跌落高度为 18.60 m ,如采用冷却效果相同的高位收水塔方案,

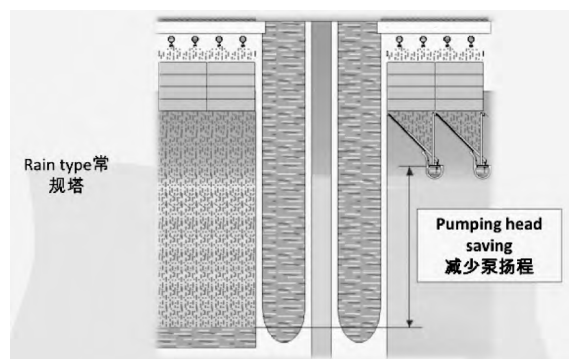


图4 高位收水塔与常规塔静扬程差异对比示意图

Fig. 4 Differences between the high-level water collecting and the conventional tower

其自由跌落高度仅为 3.5 m 。二者相差的 15.10 m 就是节约的静扬程,折算到每台机组循环泵电机功率减少约 $8\ 700\text{ kW}$,年节省电费约 $4.4 \times 10^7\text{ kWh}$ 。

根据上述分析,本工程在进行1机1塔和1机2塔方案的塔型优化时,分别考虑按常规塔和高位收水塔考虑,计算不同塔型的年费用差值,推荐适合本工程的最优塔型方案。

3.6 塔型优化结果

根据前面冷端优化的结果和塔型参数范围的分析结论,分别改变四组冷却塔塔型进行主要尺寸相对比例关系,组合出一系列塔型进行优化计算,选取四个较优配置方案的塔型,优化后参数如表2所示。

3.7 经济分析

对于表2的四个较优配置方案冷却塔优化塔型,再次进行系统的经济比较,如表3所示。

四个较优配置方案冷却塔塔型优化后综合经济比较结果分析:

1) 从初投资看,4个方案中1机1塔(常规塔)方案初投资最小,1机1塔(高位收水塔)方案最高,两者相差达 $8\ 828$ 万元。

2) 从年运行费用看,高位收水塔运行费用优势明显,4个方案中1机1塔(高位收水塔)年运行费用最低,1机1塔(常规塔)方案年运行费用最高,两者相差 $2\ 763$ 万元/年。

3) 从综合经济性看,1机2塔(高位收水塔)方案年费用最低,1机1塔(高位收水塔)次之,但两者年费用相差仅 14 万元/年,差别并不明显,在经济性上基本相当;1机1塔(常规塔)的年费用最高,经济性最差,与最优方案相差 $1\ 661$ 万元/年。

表2 四个较优配置方案冷却塔塔型优化尺寸参数

Tab. 2 Cooling tower configuration parameters about tower size optimization

方案编号	方案一	方案二	方案三	方案四
方案类型	1机2塔 (常规塔)	1机2塔 (高位收水塔)	1机1塔 (常规塔)	1机1塔 (高位收水塔)
优化前淋水面积/m ²	2 × 15 000	2 × 13 000	1 × 24 000	1 × 24 000
优化后淋水面积/m ²	2 × 14 790	2 × 13 430	1 × 23 980	1 × 23 150
0.0m 标高人字柱中心直径/m	147.068	144.274	188.979	188.83
冷却塔总高度/m	198	192	242	250
进风口高度/m	12	14.9	18.5	20.5
喉部高度/m	148.5	144	181.5	187.5
喉部直径/m	84.062	79.257	105.832	105.33
出口直径/m	89.562	88.877	112.788	113.788
填料配置	2.0 m S 波 (国产)	2.0 m S 波(国外 技术,国内生产)	2.0 m S 波 (国产)	2.0 m S 波(国外 技术,国内生产)
冷却倍率	64	56.8	56.8	59.3
年平均出塔水温/℃	25.8	25.8	25.8	25.9

4 冷却塔深度优化建议

从表3可以看出,无论是1机2塔(高位收水塔)还是1机1塔(高位收水塔),年运行总费用远低于常规塔方案,该结论与近几年大力发展高位收水塔,降低年运行费用趋势相吻合。目前国内高位收水塔基本采用填料等高布置,但经过数模试验发现,高位收水塔塔内流场分布并不均匀,且与常规塔流场分布相反。因此有必要充分挖掘塔内填料散热能力,对高位收水塔塔内填料进行重新布置,给出冷却塔深度优化建议。

表3 四个较优配置方案冷却塔塔型优化后

综合经济比较表

Tab. 3 Economic comparison about the cooling tower

方案	方案一	方案二	方案三	方案四
参数	1机2塔 (常规塔)	1机2塔 (高位收水塔)	1机1塔 (常规塔)	1机1塔 (高位塔)
淋水面积/m ²	14 790	13 430	23 980	23 150
冷却倍率	64	56.8	56.8	59.3
冷却塔造价/万元	31 169	39 510	30 383	41 735
循泵造价/万元	3 102	1 254	3 747	1 309
凝汽器造价/万元	18 445	18 479	18 479	18 394
循泵的运行费用/ (万元·年 ⁻¹)	2 988	1 208	3 609	1 261
微增功率费用/ (万元·年 ⁻¹)	612	1 479	1 580	1 164
初投资汇总/万元	52 716	59 243	52 610	61 438
年费用差值汇总/ (万元·年 ⁻¹)	10 207	10 112	11 783	10 126
年固定分摊/ (万元·年 ⁻¹)	6 607	7 425	6 594	7 700
年运行费用/ (万元·年 ⁻¹)	3 600	2 687	5 189	2 426
经济排名	3	1	4	2

注: 经济使用年限: 20年; 大修费率: 2.5%; 年利用小时数:

7 000 h; 占地面积未参与经济比较,对于首期两台 AP1000 核电机组,若采用高位收水冷却塔,“1机2塔”比“1机1塔”的塔区多占地约 1.5 万 m²。

结合某工程数值模拟分析,给出填料区顶部横切面空气流速、水温径向分布。无环境自然风影响时,冷却塔雨区横截面空气动力场和水池水面水温场呈轴对称分布^[5]。考虑到冷却塔内空气动力场和水温场分布的轴对称性,可通过某一径向空气参数和冷却水参数的分布,分析塔内气-水两相传热传质强度沿径向的分布。图5~图6以填料顶部高度径向直线为基准,分析了空气流速、水温等的径向分布。

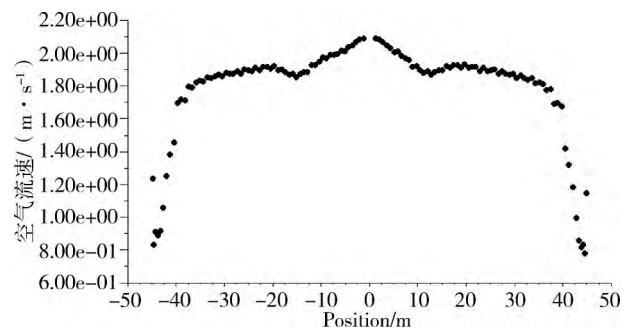


图5 填料区顶部横截面空气流速径向分布

Fig. 5 Upper filling of cross-sectional area air velocity radial distribution

如图5、图6可以得出,沿径向,内围空气流速高、水温低,外围空气流速低、水温高。

冷却塔内围水温最低值与其冷却极限环境空气湿球温度尚差距,这给内围循环水的进一步冷却提供了空间。为充分利用外围上升空气的吸热吸湿能力,进一步对内围循环水进行冷却,可增加内围填

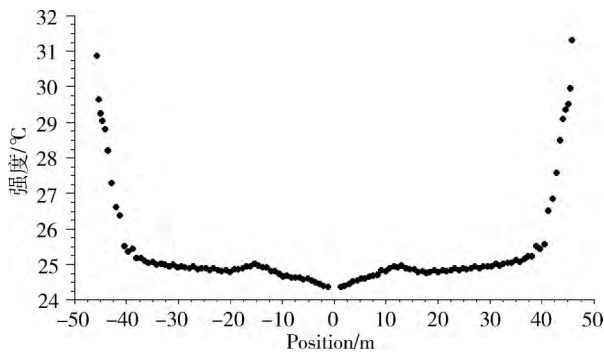


图6 填料区顶部横截面水温速径向分布

Fig. 6 Upper filling of cross-sectional area water temperature radial distribution

料厚度和降低外围填料厚度,即增大外围空气流速,实现外围循环水的进一步冷却。最终实现填料分布和填料内空气动力场的良好匹配,实现冷却塔整体热力性能的最大化。

通过上述分析,初步得到填料非均匀布置方案,即减小外围填料厚度、增大内围填料厚度。暂定沿径向以0~0.3、0.3~0.75和0.75~1.0为界分区,填料高度布置为2.25m—2.0m—1.75m的非等高填料出塔水温最低。

5 结论

1) 从综合经济性看,1机1塔(高位收水塔)与1机2塔(高位收水塔)方案基本相当,1机1塔方案从占地面积、外界侧风及塔群效应对冷效影响、水汽飘滴及雾羽扩散等方面看,均较有优势,推荐采用1机1塔(高位收水塔)方案。

2) 冷却塔采用高位收水装置后,能有效降低水泵几何扬程,节省运行费用。淋水面积越大,采用高位收水装置的经济优势越大。

3) 冷却塔造价对配置方案选择影响很大,冷却塔配置需结合总图布置等进行详细技术经济比较,初设和施工图阶段冷却塔准确定位后需再核实地质资料,并对冷却塔结构尺寸和造价资料进行复核。

4) 根据数模试验结论,高位收水塔应进行塔内填料布置深度优化,即减小外围填料厚度、增大内围填料厚度。最终实现冷却塔整体热力性能的最大化。

参考文献:

- [1] 金薰卿,谢化一,倪季良,等. 高位收水冷却塔的设计 [J]. 中国电力,1993(6): 39-42.
JIN X Q, XIE H Y, NI J L, et al. The process design of the super high-level water collecting cooling tower [J]. Chinese Electric, 1993(6): 39-42.
- [2] 赵云驰,侯燕鸿,王东海,等. 超大型高位收水冷却塔工艺设计探讨 [J]. 给水排水,2009,35(11): 69-72.
ZHAO Y C, HOU Y H, WANG D H, et al. Discussion of the process design of the super high-level water collecting cooling tower [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(11): 69-72.
- [3] 赵云驰,侯燕鸿,王东海,等. 超大型自然通风冷却塔工艺设计探讨 [J]. 电力建设,2009,30(10): 67-69.
ZHAO Y C, HOU Y H, WANG D H, et al. Discussion of the process design of the super natural draft wet cooling tower [J]. Electric Power Construction, 2009, 30(10): 67-69.
- [4] 费全昌. 我国冷却塔应用现状及面临的挑战 [J]. 勘测设计, 2014, 2(4): 29-33.
FEI Q C. Applications and challenges of cooling tower in China [J]. Electric Power Survey & Design, 2014, 2(4): 29-33.
- [5] 吴艳艳. 自然通风高位收水冷却塔三维热力特性的数值模拟与收水装置的优化研究 [D]. 济南: 山东大学能源与动力工程学院, 2015.

(责任编辑 郑文棠)

(上接第47页 Continued from Page 47)

污系统在SGTR事故下承担安全功能的要求。论文结论如下:

1) 经计算,设置公称直径为DN50的排放管线满足事故分析要求的排放流量和总排水量。

2) 排放管线上设置的隔离阀满足安全壳隔离的要求。

3) 新增管线不会对系统在其他工况下的运行产生影响。

参考文献:

- [1] 中国核电工程有限公司. 蒸汽发生器排污系统手册 (CP03XTTBXTS02) [M]. 北京: CNPE, 2015.
- [2] 中国核电工程有限公司. 运行技术规范 (0426XOTSX03) [M]. 北京: CNPE, 2011.
- [3] 张往锁,曹夏昕. 非能动余热排除系统敏感性分析 [J]. 原子能科学技术, 2013, 47(3): 409-415.
ZHANG W S, CAO X X. Sensitivity analysis of passive residual heat removal system [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(3): 409-415.

(责任编辑 高春萌)