

# 超大型高位收水塔和常规塔热力性能 研究与优化分析

乔日平<sup>1</sup>, 何辉<sup>2</sup>

(1. 神华国华清远发电有限责任公司, 清远 51300; 2. 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:** 由于高位塔收水板间流道的导向作用, 高位塔收水装置上部主要传热传质区, 特别是填料上方, 空气流速基本以塔心最高, 而塔壁附近区域空气流速则相对较小, 而常规塔最高速度出现在半径的三分之二左右; 结合常规塔和高位收水塔各自特点, 可通过优化塔型几何尺寸、配风配水、填料不均与布置、增设导流装置等措施降低出塔水温, 从而进一步降低机组热耗。为防止高速环境风下高位塔热力性能急剧恶化, 需结合厂址气象条件对塔内流场进行整流优化, 在塔外进风口增设导流装置等措施可能是今后研究重点。

**关键词:** 高位收水塔; 常规塔; 优化分析。

中图分类号: TM621

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)02-0141-05

## Discussion of the Super High-level Water Collecting Cooling Tower and the Conventional Tower About Thermal Performance Research and Optimization

QIAO Riping<sup>1</sup>, HE Hui<sup>2</sup>

(1. Shenhua Guohua Qingyuan Power Co., Ltd., Qingyuan 51300, China;

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

**Abstract:** Due to the flow path guiding role of the high-level tower between the collection board, the high-level tower to close the upper device mainly heat and mass transfer area, especially over the filling, air flow rate substantially at the heart of the highest tower, and the tower wall area near the air flow rate is relatively small, whereas the conventional column appears in about two-thirds of the maximum speed of the radius; Combined with conventional tower and high-level tower's characteristics of each tower, by optimizing the geometry size, by optimizing the wind and the water, by optimizing the filling the uneven arrangement, additional measures such as deflector reduce the tower water temperature, thereby further reducing heat consumption. To prevent the high ambient wind speed under the high-level tower thermal performance deteriorated sharply, it requires a combination of meteorological conditions on the site rectifying tower to optimize the flow field, in the tower inlet adding deflector measures may be the focus of future research.

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

由于常规塔的冷却水经填料自由跌落的高度(即雨区)较大, 导致常规塔供水高度较高, 故循环水泵扬程较高、功率较大。为减少循环水系统电耗, 在本世纪 70 年代末, 由法国电力公司和比利时哈蒙冷却塔公司在常规塔的基础上设计研究出一种能降低冷却塔供水高度的节能型冷却塔, 即逆流

式自然通风高位收水冷却塔, 并于上世纪 80 年代初期在法国几个 1 300 MW 级内陆核电站(贝尔维尔/BELLEVILLE 1、2 号塔, 诺让/NOZENT 1、2 号塔, 舒兹/CHOOZ 1、2 号塔及戈尔费什/GOLFECH 1、2 号塔)投入使用, 最近投运的项目在 2000 年, 目前均运行良好, 其后因欧美核电基本处于停滞阶段, 很少有新项目投运<sup>[1]</sup>。

我国电力行业在 20 世纪 80 年代末引进哈蒙冷却塔技术时, 具有代表性的有蒲城电厂一期 2 × 330 MW 机组。随着二次循环机组逐渐增多, 且高位收水塔具有节能、降噪等优势, 尤其对大机组节能效

收稿日期: 2015-01-26

作者简介: 乔日平(1974), 男, 山西人, 工程师, 学士, 主要从事电站工程管理及新技术研究及应用工作(e-mail)38658791@qq.com。

果更加显著,高位收水塔应用业绩也逐渐增多,近期相继投产的重庆万州 $2 \times 1\,000\text{ MW}$ 、安庆二期 $2 \times 1\,000\text{ MW}$ 等,以及在建的九江 $2 \times 1\,000\text{ MW}$ 、寿光 $2 \times 1\,000\text{ MW}$ 、清远 $2 \times 1\,000\text{ MW}$ 新建工程,目前正在建的江西彭泽核电站等项目也采用了高位收水塔方案。从早期的进口塔芯填料,到目前塔芯材料逐步国产化,国内电厂高位收水塔应用前景广阔。

随着电力建设水平的发展,电力工程(含核电工程)多采用高效率、大容量发电机组,冷却塔设计成为突出问题。现行有关设计规范和设计院普遍使用的设计程序已不能完全适用<sup>[2]</sup>。以下根据某工程高位塔和常规塔数值模拟比较,对高位塔与常规塔热力性能进行相关对比研究,同时提出目前国内外对两种塔型相关优化的一些手段,为冷却塔设计选型提供一定依据和借鉴。

## 1 高位塔和常规塔热力性能对比分析

常规塔型和高位塔进风口高度分别为 $13.9\text{ m}$ 和 $14.4\text{ m}$ ,塔高分别为 $196\text{ m}$ 和 $205\text{ m}$ ,室外地面直径分别为 $145.3\text{ m}$ 和 $145.7\text{ m}$ ,喉部直径分别为 $84.1\text{ m}$ 和 $81.6\text{ m}$ ,喉部高度分别为 $147\text{ m}$ 和 $154\text{ m}$ ,塔出口直径分别为 $89.6\text{ m}$ 和 $86.0\text{ m}$ 。两种塔型按照年平均气象条件冷却效果相同原则进行对比分析。

### 1.1 空气流场对比分析

高位冷却塔与常规塔由于其内部核心结构存在有无收水装置差异,导致其空气流场结构也存在较大的不同,图1给出了无环境自然风时两塔传热传质区的局部空气动力场。

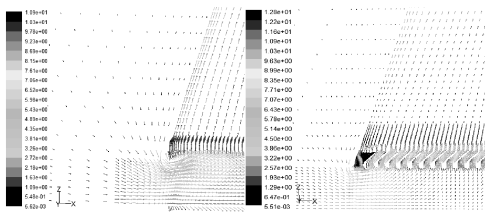


图1  $y=1\text{ m}$  纵剖面高位塔和常规塔传热传质区局部空气动力场(无环境自然风时)

Fig. 1 Air Force Field of the High-level Water Collecting and Conventional Tower ( $y=1\text{ m}$ ,  $v=0\text{ m/s}$ )

由图1(a)可知,对于常规冷却塔,环境空气加速进入塔内后,沿雨区径向空气流速逐渐减小,在进风口上缘存在一定的纵向漩涡区域。对比图1

(b),环境空气进入塔内后,在高位塔进风口外缘侧所引起的低速纵向漩涡区域较大。

高位塔收水板间流道具有一定的导向作用,使得收水板上部空间和下部空间风速分布发生较大的变化:高位塔收水器下部以塔心最小,但高位塔收水器上部空间,特别是填料上方,基本以塔心最高,而塔壁附近区域空气流速则相对较小。

图2为 $2\text{ m/s}$ 环境自然风下高位塔和常规塔两塔传热传质区的局部空气动力场。图3为 $7\text{ m/s}$ 高环境自然风下高位塔和常规塔传热传质区的局部空气动力场。图4为 $4\text{ m/s}$ 侧风下高位塔和常规塔 $z=6\text{ m}$ 高度处空气流场。

高位塔进风口空气流速沿高度分布相对均匀,高位塔迎风侧进风口上缘产生的纵向漩涡较大,基本充满第一个流道。

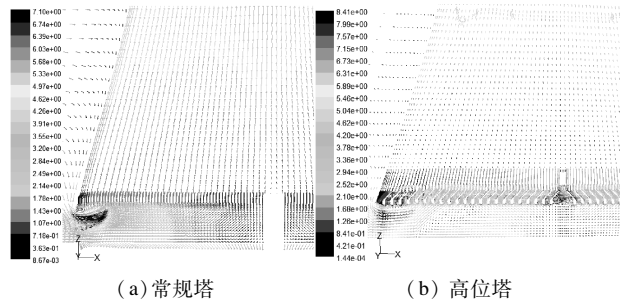


图2  $y=1\text{ m}$  纵剖面高位塔和常规塔传热传质区局部空气动力场( $2\text{ m/s}$ 环境自然风时)

Fig. 2 Air Force Field of the High-level Water Collecting and Conventional Tower ( $y=1\text{ m}$ ,  $v=2\text{ m/s}$ )

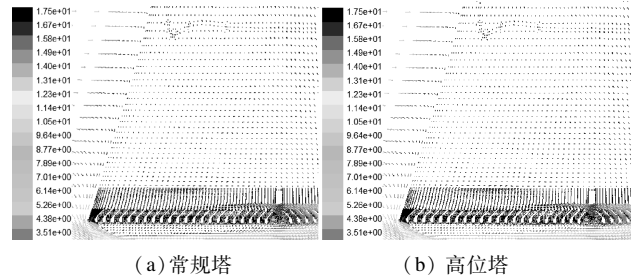


图3  $y=1\text{ m}$  纵剖面高位塔和常规塔传热传质区局部空气动力场( $7\text{ m/s}$ 环境自然风时)

Fig. 3 Air Force Field of the High-level Water Collecting and Conventional Tower ( $y=1\text{ m}$ ,  $v=7\text{ m/s}$ )

$2\text{ m/s}$ 环境自然风下,高位塔迎风侧进风口上缘产生的纵向漩涡更大,低速区域基本可充满4个流道。背风侧纵向漩涡有所减小。填料上方空气流速依然呈现外小内大的趋势。

7 m/s 环境自然风下, 高位塔迎风侧纵向漩涡过大, 几乎影响了整个半塔计算域, 造成迎风侧半塔所有收水板间空气流速过小。背风侧进风情况相对较好。由此可见侧风下高位塔迎风侧纵向漩涡是影响高位塔冷却性能的主要因素。为在大环境自然风下改善高位塔冷却性能, 必须改善塔内空气流场。

对比图 4(a)、(b)可知, 4 m/s 环境自然风下高位塔背风侧进风量相对于常规塔较小。这表明环境自然风对高位塔冷却性能的影响更大。其主要原因即是高位塔收水装置下方空气几乎没有流动阻力。为在侧风环境下改善高位塔冷却性能, 必须针对高位塔背风侧空气流场结构进行改善。可考虑塔周加装导风板改善背风侧空气流场, 增大高位塔背风侧进风, 以提高高位塔冷却性能。

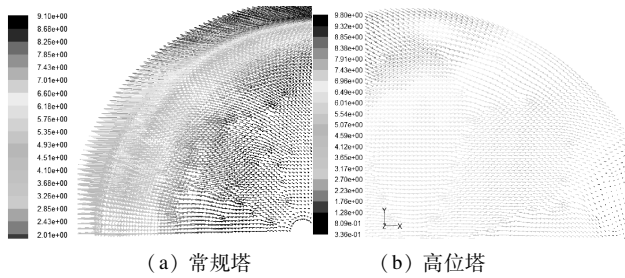


图 4 高位塔和常规塔  $z=6\text{ m}$  横截面局部空气动力场 (4 m/s 环境自然风时)

Fig. 4 Air Force Field of the High-level Water Collecting and Conventional Tower ( $z=6\text{ m}$ ,  $v=4\text{ m/s}$ )

高位塔进风口上缘填料下方易出现较大的纵向漩涡, 影响其上方填料内气水两相的传热传质强度。受收水装置结构和收水装置下方空气横向流动阻力过小的原因, 环境自然风下迎风侧填料下方极易出现大的纵向漩涡: 2 m/s 环境风时迎风侧纵向漩涡即充满 4 个流道; 7 m/s 环境自然风时, 迎风侧产生大的纵向漩涡造成进半塔收水板间空气流速较低。

高位塔收水板下方, 空气横向流动阻力远小于常规自然通风湿式冷却塔, 使得环境自然风对高位塔的影响更大, 低风速下高位塔背风侧即出现空气出流区域。

相比高位塔, 常规塔由于雨区空气横向运动阻力较大, 其纵剖面空气流场结构受环境风影响相对较小, 4 m/s 环境风时背风侧也没有空气出流区域。常规塔由于填料底部与进风口上缘间距较小(0.75 m 左右), 且雨区存在较大的阻力, 其进风口上缘填料下方纵向漩涡相对较小。

### 1.2 温度流场对比分析

图 5 为无环境自然风条件下, 常规塔和高位塔空气温度场分布图。由图可知, 高位塔和常规塔内空气温度场基本均呈对称分布, 其中高位塔内空气温度分布相对均匀。

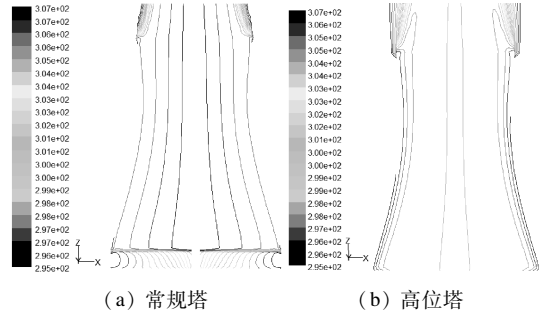


图 5 高位塔和常规塔空气温度场 (无环境自然风时)  
Fig. 5 Pool Water Temperature Field of the High-level Water Collecting and Conventional Tower ( $v=0\text{ m/s}$ )

图 6 对比给出了 2 m/s 环境自然风对常规塔和高位塔空气温度场的影响。图 7 给出了 7 m/s 环境自然风对常规塔和高位塔空气温度场的影响。由图对比可知, 环境自然风对高位塔空气温度场影响较大。环境自然风下, 高位塔迎风侧漩涡区上方填料处空气温度相对较高, 降低了该区气水两相传热传质能力。

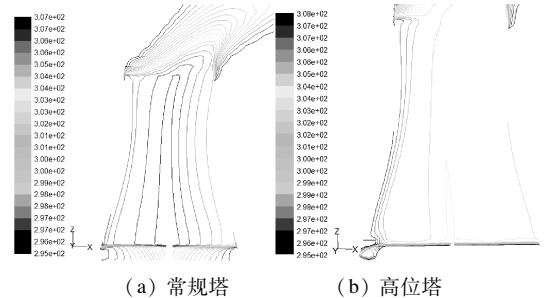


图 6 高位塔和常规塔空气温度场 (2 m/s 环境自然风时)  
Fig. 6 Pool Water Temperature Field of the High-level Water Collecting and Conventional Tower ( $v=2\text{ m/s}$ )

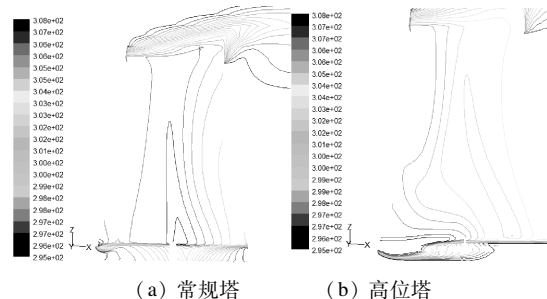
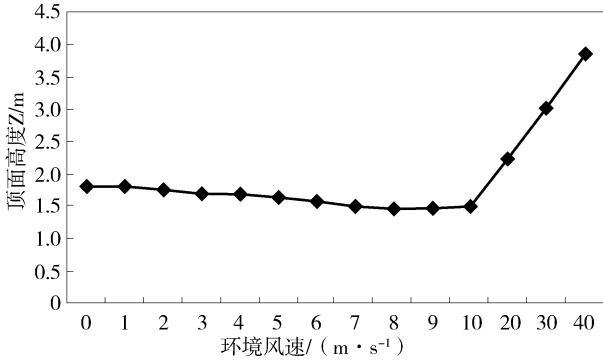


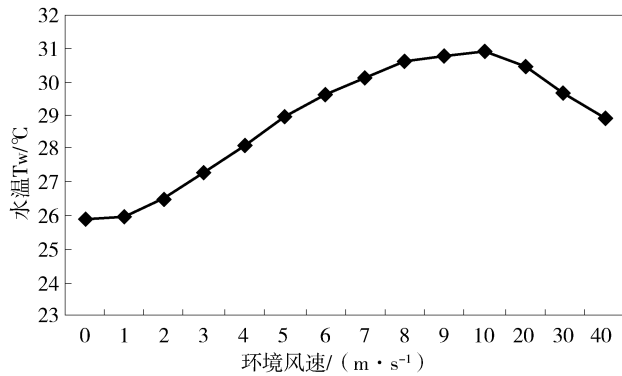
图 7 高位塔和常规塔空气温度场 (7 m/s 环境自然风时)  
Fig. 7 Pool Water Temperature Field of the High-level Water Collecting and Conventional Tower ( $v=7\text{ m/s}$ )

### 1.3 高位塔与常规塔冷却性能比较

图8(a)、(b)分别给出了高位塔填料截面Z向平均风速和出水温度随环境自然风的变化规律(两种塔型填料均匀布置,高度按1.5 m计)。由图8(a)可知,随环境自然风的增大,低环境自然风速范围内,填料顶面风速 $v_z$ 持续减小,出塔水温持续升高。在高速环境自然风下,填料顶面风速 $v_z$ 开始急剧增加,出塔水温有所降低。



(a) 环境风对填料顶面z向风速 $v_z$ (m/s)的影响



(b) 环境风对出塔水温 $T_w$ (°C)的影响

图8 环境风对高位塔冷却性能的影响规律

Fig. 8 Thermal Performance of the High-level Water Collecting on Environment Wind Speed Influence

为重点分析常见风速范围高位塔和常规塔冷却性能的差异,将所分析风速范围取为 $0 \sim 10 \text{ m/s}$ 。图9给出了环境自然风对高位塔、常规塔填料顶面风速 $v_z$ 的影响,图10给出了环境自然风对高位塔、常规塔出塔水温 $T_w$ 的影响。

由图9可知,高位塔内填料顶面风速普遍高于常规塔相应值,这主要是由于高位塔采用收水器代替大雨区后,其通风阻力明显下降。高位塔采用收水装置代替大雨区,降低了通风阻力,但同时也牺牲了大雨区的传热传质效果。

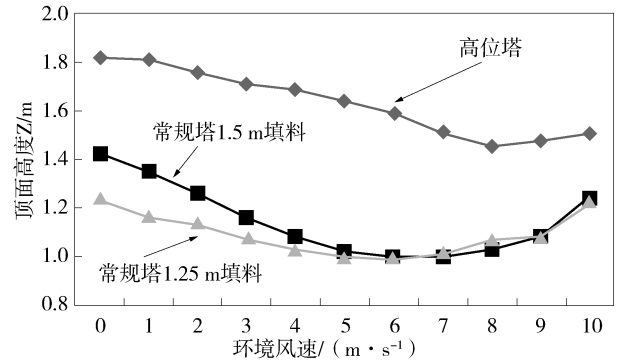


图9 高位塔、常规塔填料顶面风速 $v_z$ 随环境风速的变化

Fig. 9 Top Filling Wind Speed with Environment Wind Speed Influence

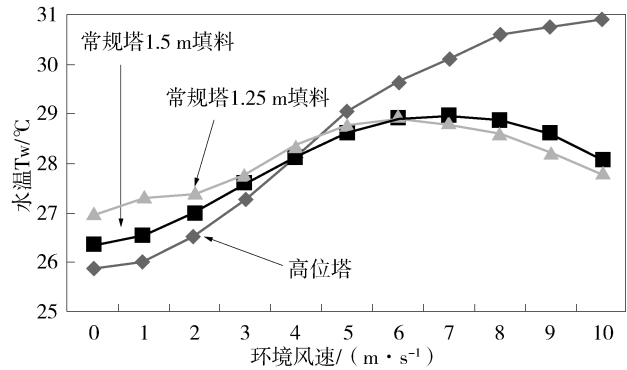


图10 高位塔、常规塔出塔水温 $T_w$ 随环境风速的变化

Fig. 10 Cooling Towers Water Temperature with Environment Wind Speed Influence

由图10可知,在风速小于 $4 \text{ m/s}$ 时,高位收水冷却塔出塔水温普遍小于常规塔。以性能保证工况为例,在无环境自然风时,所设计高位塔出塔水温比 $1.5 \text{ m}$ 填料常规塔出塔水温低 $0.45 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,比 $1.25 \text{ m}$ 填料常规塔出塔水温低 $1.13 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。在性能保证工况下,高位塔配水区、填料区和小雨区三区冷却水温降分别为 $0.94 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $7.82 \text{ } ^\circ\text{C}$ 和 $0.35 \text{ } ^\circ\text{C}$ 约占冷却水总温降 $9.10 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的 $10.32\%$ 、 $85.92\%$ 和 $3.76\%$ 。在高位塔相对于常规塔总体温降增加的基础上,可知高位塔雨区的取消可增加通风量、强化填料区传热传质能力、实现高位塔相对常规塔冷却性能的改善提高。

但在环境风速大于 $4 \text{ m/s}$ 时,由于收水装置下方空气流动几乎没有阻力,高位收水冷却塔受环境自然风的不利影响较大,其出塔水温快速飞升,远大于常规冷却塔。因此为保证高位收水冷却塔对环境风速的适应性,建议采用优化措施在环境自然风条件下改善高位塔内外空气流场。

表1 常规塔和高位收水冷却塔优化措施汇总

Table1 Optimization Measures Summary of the Conventional Tower and the High-level Water Collecting Tower

优化措施	常规塔	高位收水塔
塔型几何尺寸优化	出塔水温一定, 通过调整高径比、进风口高度等塔型参数, 寻求一种造价最低的冷却塔。 国内采用瘦高塔较多, 高径比在 0.70~0.80 (江西某百万、广东某 60 万、湖南某 60 万电厂分别为 0.75、0.74 和 0.75) <sup>[3]</sup> 。 进风口高度优化数值变化不大, 主要考虑增加进风口高度, 会增加循泵静扬程, 年运行费用会大幅增加。	通过调整高径比、进风口高度进行优化, 但有本质区别。 1) 因进风口高度增加不会增加循泵静扬程, 同时还需考虑收水装置布置等因素, 一般进风口高度比同容量常规塔略高; 2) 因取消雨区增加收水装置, 塔内阻力略大于常规塔, 塔高、喉部与出口直径也应相应变化, 适当考虑增加其尺寸。
配水分区布置优化	塔内流场分布不均, 外围应增加淋水密度, 内外减少淋水密度, 一般分区 2~4 个分区为宜。	塔内流场分布不均, 但趋势和常规塔相反, 外围应减少淋水密度, 内外增加淋水密度, 一般分区 2~4 个分区为宜。
填料不均匀布置优化	塔内空气流速沿径向往内逐渐降低, 应充分利用外围散热能力, 增加外围淋水填料厚度、选用片距较小的淋水填料, 一般分区和配水同步进行。	塔内空气流速沿径向往内逐渐增加, 应充分利用塔心区域的散热能力, 增加内围淋水填料厚度、选用片距较小的淋水填料, 一般分区和配水同步进行。
其它措施优化	塔外进风口设导流装置, 如导风板 (一般环境风速大于 2 m/s 可考虑, 否则收益不明显), 浙江宁海某百万电厂在海水冷却塔进风口外檐沿径向设置多块导风板, 目前已运行一段时间 <sup>[4]</sup> 。 塔内设十字隔墙等。	收水斜板高度优化: 收水斜板高度越高, 效果越好, 考虑塔内布置空间等因素, 收水斜板 U 型槽底一般与进风口高度基本一致。 收水斜板角度优化: 50°为宜, 但与 45°差异不大。 导流装置如导风板优化: 有环境侧风条件下, 2 m/s 时有导风板可明显增加风量, 出塔水温可降低约 0.5°。 塔内十字隔墙优化: 高环境风速, 设置隔墙可使塔内流场分布更均匀, 出塔水温略低。

#### 1.4 两者冷却性能比较及差异分析

常规塔存在雨区, 高位塔存在收水装置。

常规塔雨区阻力大, 但有一定的传热传质能力。雨区阻力大同时降低了环境自然风对常规塔热力性能的影响。

高位塔采用收水装置收水, 以取消大雨区, 可明显降低通风阻力, 增大通风量, 从而通过填料区和配水区传热传质的加强来弥补雨区取消所带来的不利影响。

由于收水装置下方空气横向流动阻力很小, 环境自然风在高位塔收水装置下方具有较大的穿透能力, 从而降低了背风侧进风量。同时, 大穿透能力侧风也在高位塔迎风侧进风口上缘收水装置下方引起较大的纵向漩涡, 大幅弱化了迎风侧填料的冷却能力。从而使高速环境下, 高位塔热力性能急剧恶化。

两种塔型年平均气象条件热力性能相同, 但流场分布不尽相同, 不同环境风速塔内流场分布规律也不尽相同, 造成该原因主要是由两种塔型塔内构造不同所致; 经济性上, 高位塔塔高较高, 即土建费用略大于常规塔, 塔芯材料也高于常规塔, 但循泵扬程比常规塔低约 1/3, 折合年运行费用具有一定优势, 目前是超大型冷却塔应用的发展方向。

#### 2 两种塔型优化设计分析

结合常规塔和高位收水塔各自特点, 目前已有较多手段实现如何降低出塔水温, 从而提高冷却塔热力性能, 进一步降低机组热耗。

表1 给出国内外两种塔型优化比较常见的措施。

#### 3 结论

1) 由于高位塔收水板间流道的导向作用, 高位塔收水装置上部主要传热传质区, 特别是填料上方, 空气流速基本以塔心最高, 而塔壁附近区域空气流速则相对较小。而常规塔最高速度出现在半径的 2/3 左右。

2) 由于高位塔收水装置下方空气流动阻力小, 高位塔迎风侧进风口上缘产生较大的纵向漩涡, 而常规塔纵向漩涡则相对较小。高位塔迎风侧纵向漩涡随环境风的增大, 降低了所影响区域收水板间空气的上升速度。

3) 高位塔内温度径向分布相对均匀。

4) 高位塔采用收水装置收水, 以取消大雨区, 可明显降低通风阻力, 增大通风量, 从而通过填料

(上转第 140 页 Continued on Page 140)

好的标记效果。

## 5 结论

本文通过对被测图像进行灰度化处理,得到浆叶的灰度图,并由引导滤波器进行图像增强处理,增强后的图像再经显著性区域检测以后,进行二值分割得到裂痕图像的二值图,最后经基于连通域的裂纹提取算法将风机浆叶上的裂纹提取出来,得到了较为理想的结果。

### 参考文献:

- [1] 张磊. 基于计算机视觉的风力机叶片缺陷诊断研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [2] KAIMING He, JIAN Sun, XIAO Outang. Guided Image Filtering [J]. IEEE(35): 2013.
- [3] 王伟鹏, 戴声奎. 引导滤波在雾天图像清晰化中的应用 [J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(3): 263-268. WANG Weipeng, DAI Shengkui. Application of Guided Filter to Haze Image Sharpening [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2015, 36(3): 263-268.
- [4] 胡世昆. 基于数字图像处理技术的路面裂缝检测算法研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2012.
- [5] 徐威, 唐振民. 利用层次先验估计的显著性目标检测 [J]. 自动化学报, 2015, 41(4): 799-812. XU Wei, TANG Zhenmin. Exploiting Hierarchical Prior Estimation for Salient Object Detection [J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(4): 799-812.
- [6] 姜霞霞, 李宗民, 匡振中, 等. 融合双层信息的显著性检测 [J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(3): 0340-0348.

- JIANG Xiaxia, LI Zongmin, KUANG Zhenzhong, et al. Image Saliency Detection Based on Two-layer Information Fusion [J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(3): 0340-0348.
- [7] HOU Xiaodi, ZHANG Liqing. Saliency Detection: A Spectral Residual Approach [C]. Proceedings of 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, USA: IEEE, 2007: 1-8.
  - [8] CHENG Mingming, NILOY J. Mitra, HUANG Xiaolei, et al. "Global Contrast Based Salient Region Detection" in CVPR, [C]. IEEE TPAMI, 2015: 409-416.
  - [9] 厉荣宣, 沈希忠, 张树行, 等. 基于图像处理的轴类零件表面裂纹检测 [J]. 图学学报, 2015, 36(1): 62-67. LI Rongxuan, SHEN Xizhong, ZHANG Shuxing, et al. Surface Crack Detection of Shaft Components Based on Image Processing [J]. Journal of Graphics, 2015, 36(1): 62-67.
  - [10] 张大奇, 曲仕茹, 李卫斌, 等. 道路裂纹线检测中的脊波域图像增强算法 [J]. 中国公路学报, 2009, 22(2): 26-30 + 76. ZHANG Daqi, QU Shiru, LI Weibin, et al. Image Enhancement Algorithm on Ridgelet Domain in Detection of Road Cracks [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(2): 26-30, 76.
  - [11] 刘新瀚, 钱侃, 王宇飞, 等. 自然场景下基于连通域检测的文字识别算法研究 [J]. 计算机技术与发展, 2015, 25(5): 41-45. LIU Xinhan, QIAN Kan, WANG Yufei, et al. Research on Character Recognition Algorithm Based on Connected Domain Detection in Natural Scene [J]. 2015, 25(5): 41-45.

(责任编辑 高春萌)

(下接第 145 页 Continued from Page 145)

区和配水区传热传质的加强来弥补雨区取消所带来的不利影响,使得低风速环境自然风下高位塔冷却性能由于常规塔。

5) 由于收水装置下方空气横向流动阻力很小,环境自然风在高位塔收水装置下方具有较大的穿透能力,从而降低了背风侧进风量。同时,大穿透能力侧风也在高位塔迎风侧进风口上缘收水装置下方引起较大的纵向漩涡,大幅弱化了迎风侧填料的冷却能力。从而使高速环境下,高位塔热力性能急剧恶化。

6) 为防止高速环境下高位塔热力性能急剧恶化,需结合厂址气象条件对塔内流场进行整流优

化,在塔外进风口增设导流装置等措施可能是今后研究重点。

### 参考文献:

- [1] 金熹卿, 谢化一, 倪季良, 等. 高位收水冷却塔的设计 [J]. 中国电力, 1993, X(6): 39-42.
- [2] 石诚, 罗书祥, 廖内平, 等. 德国大型自然通风冷却塔、海水自然通风冷却塔和烟道式自然通风冷却塔简介 [J]. 电力建设, 2008, 29(5)82-85.
- [3] 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, (11), 35: 69-72.
- [4] 赵元宾, 孙奉仲, 王凯, 等. 自然通风湿式冷却塔传热传质的三维数值分析 [J]. 山东大学学报: 工学版, 2008(5): 3-41.

(责任编辑 郑文棠)