

超大型冷却塔多竖井分区配水系统的优化设计

李江云, 盛旺, 陈知超, 汪慧
(武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 随着超大型自然通风冷却塔淋水面积的增加, 淋水填料的均匀配风、配水出现困难, 传质、传热效率下降。基于大型树状管网节点水压法对超大型冷却塔的管渠配水系统进行计算, 通过获取每个喷淋节点的实际配水压力和流量, 评价配水管网设计的合理性, 并根据超大型冷却塔的配水要求, 对管网进行局部调整。对比结果证明, 设计模型的优化效果明显, 可较便捷地为工程设计提供各典型工况的配水方案, 并可为冷却塔的热质传递数值仿真提供更精确的配水数据。

关键词: 超大型自然通风冷却塔; 配水; 喷淋; 管网; 优化设计

中图分类号: TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)11-0040-05

Optimal Design of Multi-shaft Water Distribution System in Super Large Natural Draft Cooling Tower

LI Jiang-yun, SHENG Wang, CHEN Zhi-chao, WANG Hui
(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: With the increase of water spray area of the super large natural draft cooling tower, it is difficult to realize uniform air and water distribution in the cooling fillers, which also leads to the decrease of mass transfer efficiency and heat transfer efficiency. Based on the tree-type pipe network node pressure method, the conduit water distribution system of super large cooling tower was calculated. Rationality of the water distribution network design was evaluated by obtaining the actual pressure and flow rate of each spray node, and the distribution network was partially adjusted according to the water distribution requirement of super large cooling tower. The comparison results showed that obvious optimization effect was achieved by the design model, so water distribution scheme of typical working conditions could be provided for engineering design, and more accurate water distribution data was provided for heat transfer numerical simulation of the cooling tower.

Key words: super large natural draft cooling tower; water distribution; water spray; pipe network; optimal design

随着国内百万级核电项目的陆续启动,超大型自然通风湿式冷却塔(简称“超大冷却塔”)的研发成为当务之急。由于超大冷却塔的淋水面积大大增加,配水管长及空气进塔配风路径随之增加,因沿程阻力所造成的不均匀配风和配水对填料区、喷淋区的有序换热产生显著影响。基于常规冷却塔设计的配水系统设计理论及性能预测已无法满足超大冷却塔的工程设计及运行要求,而自然通风冷却塔的冷

效与淋水密度及配水均匀性密切相关^[1,2],因此有必要进行精细化设计理论的研究。之前在涉及常规冷却塔热质交换问题时,其配水系统一般按预先设定的淋水密度均匀分布,不考虑配水管首尾水压的差异。而在超大型自然通风冷却塔设计中,由于淋水填料的截面积巨大,配水管线增多,分流水力损失无法忽略,首尾喷头作用水压失控。笔者在冷却塔塔型设计已定的前提下,基于节点水压法建立不依

赖于管网拓扑结构的冷却塔配水系统计算理论,使塔内各处的淋水密度与配风分布相配合,其工程措施较之利用配风墙优化配风更便利且更灵活。

1 配水系统计算理论

目前我国相关计算程序多将冷却塔配水系统从竖井处断开,拆分为循环供水及配水喷淋两套系统独立计算。由于管段存在水力损失,一根配水管上喷淋头的实际出水流量是逐渐减小的,各区的实际淋水密度并不均匀。如何通过分区及管道和喷淋装置的布置控制淋水填料配水的均匀度,且进一步获得与填料和配水相配合的淋水密度是设计难点。针对上述情况,赵顺安^[3,4]提出以树状管网的计算方法为基础,从每根配水管的末端逆流向上求出每个喷头的流量,计算管段水损及配水管的流量,最后推至整个配水槽,求得配水总流量及竖井水位。由于在计算过程中,需针对不同管渠系统对程序进行调整,不利于多方案的优化比较。为解决不依赖于管网拓扑结构的配水系统计算问题,笔者拟直接采用大型管网节点水压法。

1.1 配水系统的简化

冷却塔主要由塔体、配水喷淋、淋水填料、雨区及集水池等部分组成。其中,配水系统包括中央竖井、配水管渠及喷淋头;循环水系统由集水池、配水管沟到循环泵、凝汽器、供水母管到中央竖井与配水系统相连。水力计算时中央竖井被简化为稳定的水位将两套系统分开独立考虑,竖井内部为自由液面,筒壁设有若干个配水渠出口,内外区的配水渠相互独立,以便根据冷、热季节控制运行方式(见图1);与之匹配的配水管,根据内外区配水范围,其长度、管径不等,喷头接到其与分流孔连接的分流管上。以中央竖井配水为例,配水管渠布置见图2。

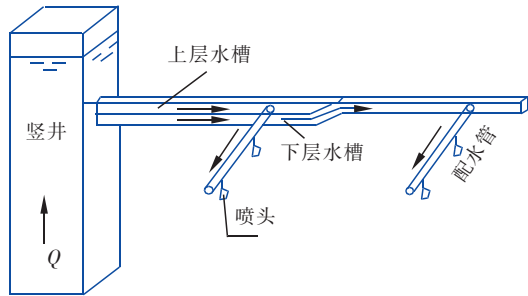


图1 1/4 中央竖井及配水槽、管、喷头连接示意

Fig.1 Connection of a quarter of central well, water tanks, pipes and nozzles

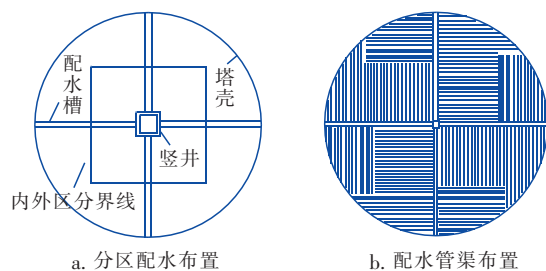


图2 中央竖井配水管渠系统示意

Fig.2 Water distribution system of central well

1.2 节点水压法控制方程的建立

大型管网求解方法中,节点水压法直接利用节点流量连续方程和管段压降方程进行求解,能量方程及管段方程均以节点水压形式代入到连续方程中,所需输入的数据少,计算内存小、速度快,工程上应用广泛^[5]。由于冷却塔包括特殊的配水管渠及喷淋分流,故需要对其管段方程形式及参数进行讨论。表达管段方程的水力损失公式可表示为节点水压的线化形式:

$$q_{ij} = \left(\frac{h_{ij} d_{ij}^m}{k L_{ij}} \right)^{\frac{1}{n}} = h_{ij}^{\frac{1}{n}} / S_{ij}^{\frac{1}{n}} = (1/S_{ij}^{\frac{1}{n}}) \times (H_i - H_j)^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

式中: S_{ij} 为管路阻力特征系数; H_i 、 H_j 为管段两端的节点压力,其压降 $h_{ij} = H_i - H_j$; d_{ij} 、 L_{ij} 分别为管段直径和长度; k 为管段沿程阻力系数; m 、 n 为经验指数,本研究中 $n=2$ 。

根据冷却塔管渠材料及水力特性,配水渠采用曼宁公式、配水管采用达西公式,在没有实测资料的情况下,分流点局部损失系数 ζ 按 EPANET 软件建议,对三通直流局部损失系数取值为 0.6,三通分流局部损失系数取值为 1.8。配水渠、配水管以及节点分流的压降公式中阻力特征系数 S_{ij} 按表 1 进行计算。其中:配水管雷诺数 $Re > 3\,000$; Δ 为绝对粗糙高度, mm。

表1 水头损失公式中阻力特征系数的取值

Tab.1 Figures of resistance coefficient in head loss equation

管段/节点	S_{ij}
配水渠(曼宁公式)	$10.29 n^2 d_{ij}^{-5.33} L$
配水管(达西公式)	$0.021 L d_{ij}^{-5} \left[\lg \left(\frac{1}{3.7} \frac{\Delta}{d_{ij}} \right) + \frac{5.62}{Re^{0.9}} \right]^{-2}$
分流节点损失系数	$0.082 \, 7 \zeta d_{ij}^{-4}$

冷却塔配水系统中特殊节点压降的计算方法如下:

① 分流节点。分流节点属于普通节点,其损失系数的计算方法采用表1中第3行公式。若分流为直通流向,则局部损失系数 ζ 取0.6,流量公式见式(2);若分流为旁通流向,则局部损失系数 ζ 取1.8,流量公式见式(3)。

$$q_{ij} = 4.49 d_{ij}^2 (H_i - H_j)^{0.5} \quad (2)$$

$$q_{ij} = 2.59 d_{ij}^2 (H_i - H_j)^{0.5} \quad (3)$$

② 出流节点。喷头流量公式如下:

$$q_i = 11\,522.93 d_i^2 H_i^{0.5} \quad (4)$$

式中: d_i 为喷嘴直径,m; H_i 为自由水头,m(1 m水柱产生的压力约为10 kPa,下同)。

③ 竖井节点。竖井向配水渠供水按孔口流量公式计算:

$$q_i = \mu A (2gH_i)^{0.5} \quad (5)$$

式中: μ 为孔口流量系数; A 为配水渠横截面积, m^2 ; H_i 为竖井水位与配水渠中心标高的水压差,m。

④ 泵节点。可用扬程的负值代表水头损失的增加:

$$h_{\text{pump}} = -H = -H_x + S_x q_i^2 \quad (6)$$

$$q_i = -[(H_x - H_i)/S_x]^{0.5} \quad (7)$$

式中: H_x 、 S_x 分别为泵的虚扬程和虚阻耗。将上游水泵节点管段压降写为:

$$H_i - H_j + H_x = h_{ij} = S_{ij} q_{ij}^2 + (k_i + S_x) q_{ij}^2 \quad (8)$$

根据上述对管段及节点的简化处理,可建立包括水泵、竖井、管渠、喷头等构件的冷却塔配水系统的节点水压法控制方程组,并采用平方根法,可得到所有喷头节点水压及配水流量。

2 优化实例

本研究采用以下工程实例,基于上述模型进行管渠配水系统设计,获取每个喷头的作用压力以及流量,并且通过绘制水压、流量分布云图进行验证和优化。

某冷却塔塔高 $H = 160$ m,喉部半径为37.1 m,填料的截面积为10 005 m^2 ,对夏季、春秋季节和冬季三种工况进行计算,根据工艺设计循环水量分别为64 121、42 425、42 425 m^3/h ,夏季和春秋季节全塔配水,冬季因气温低而采取关闭内区配水管进水阀门的办法来实现外围配水。

工程设计的具体尺寸及处理如下:配水竖井为6.17 m \times 6.17 m,全塔设有内、外区主水槽各4条,内区主水槽负担内区配水,其断面(0.9 m \times 2.0 m)按水力半径相等原则转化为当量管径为1 240 mm的圆管;外区主水槽负担外区配水,其断面(1.4 m \times 2.0 m)转化为当量管径为1 650 mm的圆管。具体分区及配水管、喷头布置的计算简图见图3(a)、(b),其中,配水管采用UPVC轻型塑料管,设计压力 ≥ 0.60 MPa,管中心距为2.0 m。

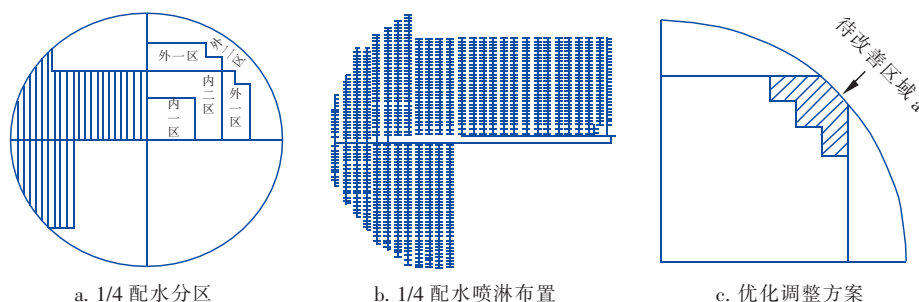


图3 1/4配水分区及优化设计示意

Fig. 3 A quarter of water distribution design and optimization

全塔均匀布置方案见表2,即采用相同的配水管和喷头直径。针对三种典型工况,节点水压法的计算结果见图4(a)、图5(a)和图6(a),发现原方案内区的淋水密度大于外区,且均布系数较大。由于超大塔进风困难,外区的空气冷却能力高于内区,因此外区的淋水密度应大于内区,于是优化方案I通过调节配水管径及喷嘴直径,加大了外区配水同时减小了内区配水(见表2),从而与超大塔配风特点

相适应,节点水压法的计算结果见图4(b)、图5(b)和图6(b)。但是,如图3(c)所示,外二区中的待改善区域a的淋水密度仍较小,需要继续优化,于是将外一区的配水管直径从300 mm增加到350 mm,以减小外二区的输水阻力,即优化方案II(见表2),其管网计算结果见图4(c)、图5(c)和图6(c),可以看出外区喷头流量增加且更加均匀。表3给出了三种方案的淋水密度及均布系数对比。

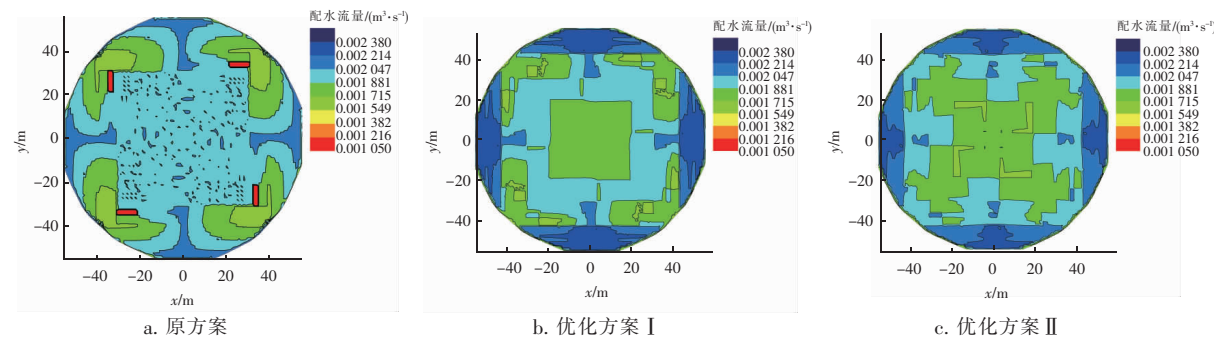


图 4 夏季工况配水优化调整效果
Fig. 4 Optimizing effect of water distribution in summer

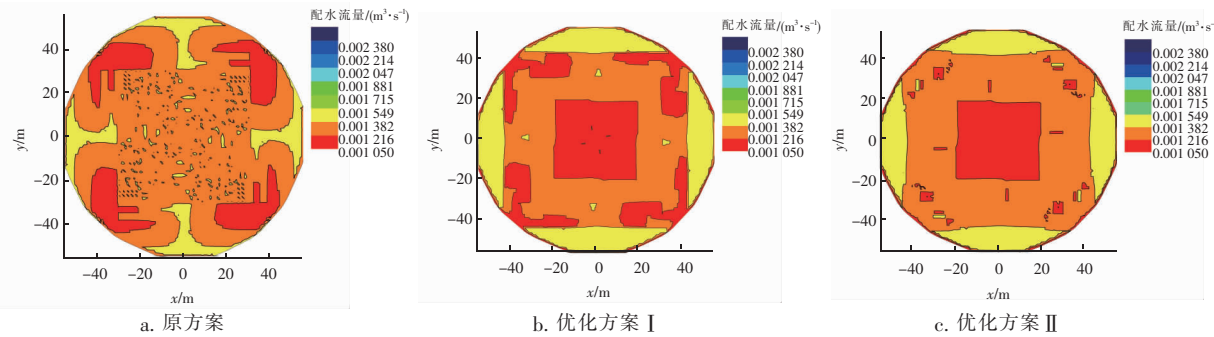


图 5 春秋季配水优化调整效果
Fig. 5 Optimizing effect of water distribution in spring and autumn

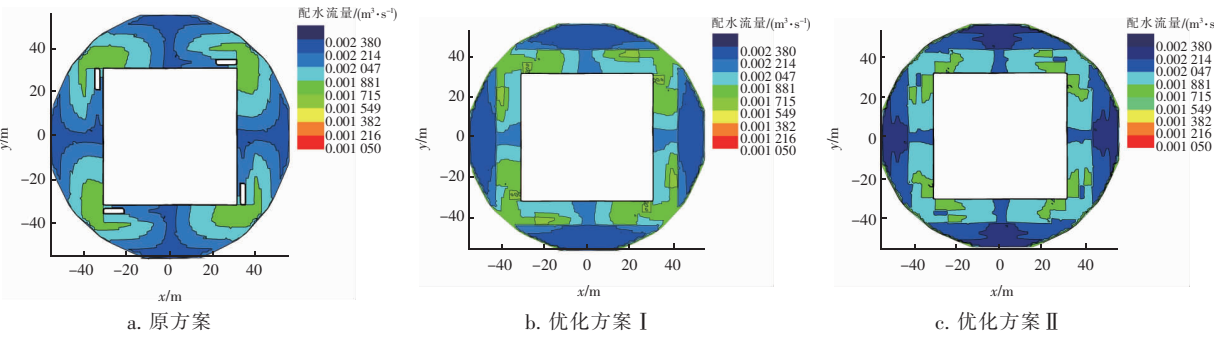


图 6 冬季配水优化调整效果
Fig. 6 Optimizing effect of water distribution in winter

表 2 各方案喷嘴及配水管设计

Tab. 2 Design of nozzles and water distribution pipes

项 目		内 区		外 区	
		内一区	内二区	外一区	外二区
原方案	喷头直径	38	38	38	38
	配水管径	300	300	300	300
优化方案 I	喷头直径	34	36	38	40
	配水管径	350	350,250	300,280	300,250
优化方案 II	喷头直径	34	36	38	40
	配水管径	350	350,250	350,280	300,250

表 3 优化前后平均淋水密度、均布系数对比

Tab. 3 Comparison of average shower water density and uniform coefficient before and after optimization

项 目		夏 季		春 秋 季		冬 季	
		内区	外区	内区	外区	内区	外区
淋水密度/ ($L \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$)	原方案	1.793	1.772	1.187	1.173	—	1.875
	优化方案 I	1.675	1.842	1.109	1.219	—	1.875
	优化方案 II	1.643	1.861	1.087	1.231	—	1.875
均布系数	原方案	0.037	0.110	0.038	0.110	—	0.110
	优化方案 I	0.040	0.100	0.040	0.100	—	0.100
	优化方案 II	0.040	0.074	0.040	0.075	—	0.074

3 结论

冷却塔的冷却效果与配水系统的均匀性密切相关,超大型自然通风冷却塔由于其截面半径大,配水过程的管道水头损失不可忽略,截面上不同位置的淋水密度可能有较大差异,加上冷却塔塔体外围比塔体中心的冷却能力要强,所以横截面半径方向上不均匀配水有助于提高冷却塔的冷却性能,降低出塔水温。通过对冷却塔配水管渠系统的建模,采用节点水压法进行计算,得出全塔喷淋节点的实际配水流量。利用可视化的流量分布图直观调节配水管径及喷头尺寸,使得配水系统的淋水密度与超大型冷却塔配风相匹配,该方法可为超大型冷却塔的配水优化设计提供方便、简洁、灵活的计算手段。

参考文献:

- [1] 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):67-70.
Zhao Yunchi, Hou Yanhong, Wang Donghai, *et al.* Process design discussion of super large natural draft cooling tower [J]. Electric Power Construction, 2009, 30(10):67-70 (in Chinese).
- [2] 赵顺安,冯春平,顾建华,等. 超大型自然通风逆流式冷却塔的配水设计[J]. 电力建设,2009,30(1):53-55.
Zhao Shun'an, Feng Chunping, Gu Jianhua, *et al.* Water distribution design for large natural draft counter flow cooling tower [J]. Electric Power Construction, 2009, 30(1):53-55 (in Chinese).
- [3] 赵顺安. 海水冷却塔[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.

Zhao Shun'an. Salt Water Cooling Tower [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007 (in Chinese).

- [4] 赵顺安. 逆流式自然通风冷却塔中央竖井槽管结合配水水力计算与验证[J]. 热力发电,2005,34(10):18-21.

Zhao Shun'an. Hydraulic computation for water distribution system combined with channel tubes in central shaft of counter-flow type natural cooling tower and verification [J]. Thermal Power Generation, 2005, 34(10):18-21 (in Chinese).

- [5] 赵洪宾. 给水管网系统理论与分析[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.

Zhao Hongbin. Water Network System Theories and Analysis [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003 (in Chinese).



作者简介:李江云(1967-),女,湖北武汉人,博士,教授,研究方向为流体输送系统优化设计及运行。

E-mail: lijy@whu.edu.cn

收稿日期:2017-10-11

大力推进水利薄弱环节建设,
提高防灾减灾能力