

基于遗传算法的冷却塔管式配水系统 优化设计计算研究

王 丰¹, 吉庆丰¹, 王东海², 周 领³

(1. 扬州大学 水利与能源动力学院, 江苏 扬州 225127; 2. 中国核电工程有限公司, 北京 100840;
3. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 采用遗传算法, 针对自然通风冷却塔管式配水系统, 将单个配水系统的设计方案作为进化个体, 把单根配水管的理想流量系数作为配水管的进化方向, 以整体均布系数作为评价目标, 在应用配水系统的水力计算方法进行分析的基础上, 提出了基于遗传算法的冷却塔管式配水系统优化设计计算方法。工程实践证明, 应用本文提出的计算方法能够快速、有效的完成冷却塔管式配水系统中配水管与喷头的自动优化选型, 对比经验设计的配水系统方案, 优化计算得到的配水系统设计方案均布系数更小(2%以内), 水力性能更优。

关 键 词: 冷却塔; 管式配水; 水力计算; 遗传算法; 优化设计

中图分类号: TK264.1 文献标识码: A
DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.06.025

引 言

冷却塔配水系统的配水均匀性是影响冷却塔冷却性能的重要因素, 目前, 配水系统的设计大多是根据工程经验进行初步方案设计、应用配水系统水力计算进行方案评价, 并根据配水均匀性指标对方案进行反复修改调整, 最终使其满足工程设计要求。该设计方法存在以下不足: (1) 设计工作对工程设计的经验性要求较强; (2) 方案的修改调整以及计算工作量相对较大, 且容易出错; (3) 设计指标(如配水均匀分布系数) 往往仅需满足工程设计要求或达到某一预设值即可, 在一定程度上制约了配水水力性能的充分利用; (4) 随着大型冷却塔及超大型冷却塔方案的不断应用, 配水系统的水力均匀性越来越难以得到保证。因此, 探索更加先进的设计方法, 实现配水系统的优化布置设计, 同时提高配水系统水力性能, 对冷却塔设计水平的提高有重要的经

济价值和现实意义。

目前, 对于大中型自然通风冷却塔工程来说, 配水系统多采用管式配水的设计方案, 以保证其良好的配水均匀性^[1]。作为自然通风冷却塔管式配水系统优化设计的基础, 在系统水力计算方法、数学模型、经验公式及系数取值等方面, 已进行了大量、详尽的研究^[2-5], 能够保证复杂配水系统计算的精确性。在冷却塔管式配水系统优化设计方面, 也取得了很多有价值的研究成果, 主要集中在: 内外分区比例对换热效果的影响、喷头与配水管的特性及布置对配水均匀性和换热性能的影响、改进配水设计型式及调整各分区的淋水密度以提高冷却效率、改进配水设计型式以提高配水均匀性、侧风及填料布置对冷却塔散热性能的影响^[6-13]。

本研究针对冷却塔管式配水系统的优化设计, 从配水系统水力计算出发, 在优化计算中引入遗传算法, 以提高配水系统的均匀性作为优化计算目标, 提出了管式配水系统的优化设计计算方法。最后, 通过工程实例对该方法的合理性和有效性进行验证。

1 配水系统的水力简化计算方法

冷却塔配水系统水力计算是实现系统设计优化计算的基础条件。管式配水系统是由竖井、配水槽、配水管、喷头组成的复杂水力管网系统, 配水水力计算的实现需要进行单根配水管上各喷头水力迭代、单个配水槽上各配水管水力迭代、配水系统中不同配水槽水力迭代的3层迭代计算, 直至整个系统最终达到水力平衡。一般来说, 配水系统的水力计算

收稿日期: 2015-04-13; 修订日期: 2015-06-16

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51209073); 教育部高等学校博士学科点专项基金资助项目(20120094120002); 江苏省高校自然科学研究面上项目(15KJB570003)

作者简介: 王 丰(1981-), 男, 河南周口人, 扬州大学讲师。

时间相对较长,因此,需要选取合适的配水系统简化计算方法,以满足配水系统优化计算的需求。

丁伟等人针对管式配水系统,以单根配水管为研究对象,推导得到了配水管进口水头 H_0 与配水管流量的关系^[14]:

$$H_0 = RQ_0^2 + (E_0 - \Delta Z) \tag{1}$$

式中: Q_0 —配水管流量, m^3/s ; E_0 —配水管中心高程, m ; ΔZ —配水管中心高程, m ; R —配水管等效阻力系数, s/m^2 。

当假定配水管各喷头型号及水力特性相同、喷头流量均匀分布、配水管各管段材质相同时,配水管等效阻力系数的计算表达式为:

$$R = \sum_{j=1}^n \frac{2\lambda_j l_j (n-j+1)^2}{g\pi^2 d_{1j}^5 n^2} + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{8}{g\pi^2 d_{1j}^4 n^2} \times [0.03(n-j)^2 + 0.35 - 0.2(n-j)] + \frac{8}{g\pi^2 d_{1n}^4 n^2} [1 + (0.4 - 0.1 \frac{d_{2n}^2}{d_{1n}^2}) \frac{d_{1n}^4}{d_{2n}^4}] + \frac{1}{2g\mu^2 A_p^2 n^2} \tag{2}$$

式中: n —配水管的管段数,个; d_{1j} —配水管第 j 段管道直径, m ; λ_j —配水管各段沿程阻力系数; l_j —配水管各段长度, m ; μ —配水喷头的流量系数; A_p —配水喷头的喷嘴面积, m^2 。

由于该公式的推导是基于“喷头流量均匀分布”的假设下简化得到的,实际工程中当配水管各管段直径和喷头水力特性一定时,配水管喷头流量并不相等。针对“配水管等效阻力系数”的精确计算,可采用单根配水管完整水力数学模型进行计算。

配水管沿程水头损失的阿利特舒利计算公式:

$$\Delta H_i = 0.11 \left(\bar{\Delta} + \frac{68}{Re_i} \right)^{0.25} \frac{L_i v_i^2}{D_i 2g} \tag{3}$$

式中: ΔH_i —配水管各管段的沿程水头损失, m ; $\bar{\Delta}$ —配水管各管段的相对粗糙度; Re_i —配水管各管段的雷诺数; L_i —配水管各管段的长度, m ; D_i —配水管各管段的直径, m ; v_i —配水管各管段的直径, m/s ; g —重力加速度, m/s^2 。

配水管至喷头连接管的分流阻力:

$$\Delta H_{13} = [0.95(1-q)^2 + q^2(1.3 \text{ctg} \frac{180-\theta}{2} + \frac{0.4-0.1a}{a^2} - 0.3) + 0.4q(1-q)(1 + \frac{1}{a}) \text{ctg} (\frac{180-\theta}{2}) \frac{v_i^2}{2g}] \tag{4}$$

式中: q —喷头流量与配水管流量的比值; a —喷头连

接管面积与配水管面积的比值; θ —连接管与配水管的夹角,度。

配水管分流后的阻力根据 Gardel 公式计算:

$$\Delta H_{12} = [0.03(1-q)^2 + 0.35q^2 - 0.2q(1-q)] \frac{v_i^2}{2g} \tag{5}$$

采用式(3) - 式(5) 结合配水管各管段水头平衡方程,即可求得式(1)中的配水管等效阻力系数 R 。

对于布置方案一定的配水系统,各配水管等效阻力系数可在数学意义上反应配水管的水力特性,并将配水系统 3 层水力平衡的迭代计算简化为 2 层迭代计算,在保证计算精度的基础上有效降低运算时间。经验证,对于 18 000 m^2 的超大型冷却塔管式配水系统,采用该方法进行配水系统水力平衡计算的时间约为 0.01 s 左右,能够满足配水系统优化计算的基本需求。

2 基于遗传算法的冷却塔管式配水系统优化计算

从实际工程设计的角度分析,配水系统的优化计算是通过针对不同管径的配水管管段、不同型号和口径的喷头进行组合配置,得到多组不同的配水系统布置方案,并采用一定的优化算法对布置方案进行计算、筛选,最终得到满足设计要求的系统布置方案。

2.1 智能算法的选择分析

由于冷却塔配水管数目多,且每根配水管不同直径管段搭配的种类也很多,所以冷却塔配水方案数不计其数,传统的穷举法无法解决,因而需要考虑智能算法,即启发式算法。常见的启发式算法有 BP 神经网络算法(ANN)、蚁群算法(ACO)、禁忌搜索算法(TS)、模拟退火算法(SA)、遗传算法(GA)等。ANN 和 ACO 算法分别侧重于输入层、隐含层以及输出层节点之间连接权的训练和信息素的反馈,而实际配水管结构组合方案中,难以通过配水均匀系数的变化规律对此进行定义;而 TS 和 SA 算法则侧重于全局搜索最优解,无法将不同配水管、喷头组合的冷却塔配水方案与冷却塔整体配水均匀系数进行有效关联,且对于配水系统来说进行运算量巨大的全局最优解是非必须的;而 GA 算法中,交叉和变异的思想可以直接用在对冷却塔单根配水不同管径的

组合上,且可以采用配水均匀系数作为遗传算法的适应度函数进行不断进化,比较适合冷却塔配水系统的优化计算。因此,本研究采用遗传算法作为冷却塔配水系统优化设计的计算方法。

2.2 配水管理理想流量系数

假设全塔配水完全均匀的情况下,根据竖井水位、配水系统总流量及主水槽水头损失计算模型,求得各配水管进口水头和流量的关系,并采用式(1)计算得到阻力系数作为每根配水管在保证全塔均匀配水情况下应具有的理想流量系数。同时,将配水管可选管径作为基础数据库,针对配水管不同管段直径的组合方案,分别求得各组合方案下配水管的等效阻力系数,作为遗传算法中配水管选择的基准值。对于单根配水管来说,其等效阻力系数与理想流量系数越接近,其水力性能越接近全塔均匀配水的理想情况。

2.3 基于遗传算法的配水系统优化计算方法

配水系统优化计算之前,首先需要对配水系统设计方案的好坏进行评价判别,一般采用喷头流量的均方差作为均匀分布系数。即在配水系统水力计算完成后,可得到每个喷头的水量,根据每个喷头的水量可以计算冷却塔各喷头水量的均方差:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{q_i - q_a}{q_a}\right)^2 / n} \quad (6)$$

式中: σ —配水系统均布系数; n —喷头数量,个; q_a —单个喷头的平均水量, m^3/s ; q_i —第 i 个喷头的水量, m^3/s 。

另外,采用遗传算法进行配水优化计算时,对遗传算法中的计算条件进行选定:(1) 初始种群: 初始种群中的 1 个个体对应 1 个冷却塔配水方案,其中分别采用 3 个矩阵分别表征冷却塔布置方案中的内区、外右区和外左区,矩阵的行列分别对应各配水管段数和配水管直径;(2) 个体适应度函数的设定: 选取全塔配水均布系数的倒数作为配水方案适应度函数;均布系数越小,适应度越大,方案越好;(3) 选择算子: 采用轮盘赌选择法对各个方案进行选择,按照个体适应度进行选择对象的排序;(4) 交叉算子: 将被选择的方案随机地两两配对组成多个交配对,随机选定交配对中参与交叉的配水管,并将被选择配水管随机生产 2 个交叉点位置,对交配对的 2 个方案的相同部位进行交叉操作。(5) 变异算子的合理选定: 随机选定需要进行变异的配水方案,按照给定

的变异率或变异条件,选定需要进行变异的配水管,随机生成新的配水管代替原配水管。

2.4 优化计算流程

基于遗传算法的冷却塔配水系统的优化计算流程如图 1 所示。优化计算中: 喷头的布置按照同一分区布置相同喷头、不同分区采用穷举组合的方法; 各配水管管径的组合在基础管道数据库基础上采用等效阻力系数进行替代,并通过配水系统的总体适应值函数进行配水管组合方案的最终判定。其中,进化代数可根据优化计算需要进行设定。

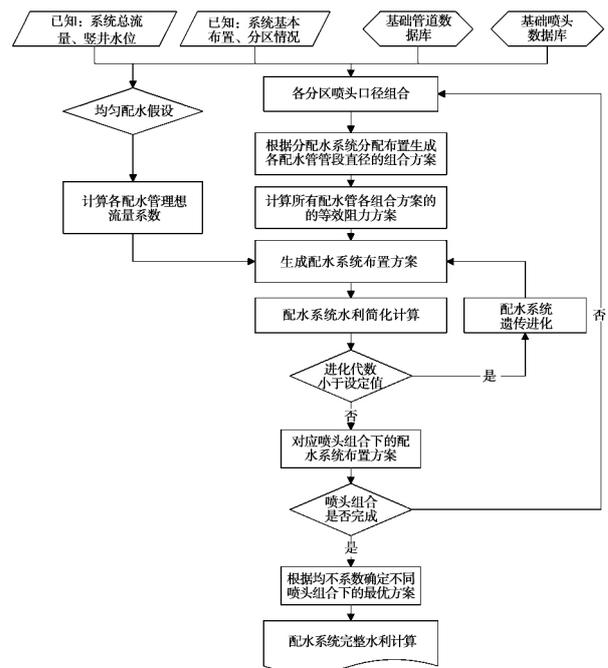


图 1 配水系统的优化计算流程图

Fig. 1 Optimal calculation flow diagram of the system

优化计算完成后,即可得到各喷头组合情况下的配水系统优化布置方案及总体最优布置方案。经计算测试,遗传进化一般经过 50 - 100 代即可得到较好的配水系统设计方案。为减小优选方案的计算参数误差,遗传进化完成后可采用完整配水系统水力计算模型,最终得到配水系统最优设计方案的精确计算结果。

3 工程算例

3.1 工程算例参数

针对某 18 000 m^2 单竖井内区两配水槽反射型

冷却塔配水系统,采用本研究提出的系统优化计算方法,进行工程算例计算验证。系统基本参数如表 1 所示。

表 1 算例基本参数

Tab.1 Basic parameters of the example

循环水	内区水	内区水	内区下水	内区下水	外区水	外区水	配水管	内外区	砼槽粗	管粗	管中心至喷	水槽阻	喷头连接
量/ $t \cdot h^{-1}$	槽高/m	槽宽/m	槽高/m	槽宽/m	槽高/m	槽宽/m	间距/m	面积比	糙度/m	糙度/m	头间距/m	力系数	管直径/m
166 644	1.4	2.0	3.5	2.0	3.5	2.0	1.0	0.467	2.5E-4	2.5E-5	0.15	0.5	0.08

配水管数据库中的可选管径分别为: 0.150 6、0.188 3、0.235 4、0.296 6、0.336 2 m; 喷头数据库中的可选喷头类型分别为: FS-II-26(口径 0.026 m)、FS-II-28(口径 0.028 m)、FS-II-30(口径 0.030 m), 流量系数均为 0.91。

3.2 优化计算结果

针对该工程算例的优化计算结果如表 2 所示。其中,喷头布置分别给出了全区 FS-II-26 型、FS-II-28 型 2 种优化方案; 并给出了基于工程经验的系统设计方案,优化方案与基于经验的设计方案的对比如图 2 所示。

表 2 算例计算结果

Tab.2 Calculation results of the example

参 数	经验方案	优化方案 1	优化方案 2
喷头布置	全区 FS-II-28	全区 FS-II-26	全区 FS-II-28
总体均布系数	0.027 8	0.018 5	0.024 5
总流量/ $t \cdot h^{-1}$	166 631.06	166 638.73	166 630.59
内区总流量/ $t \cdot h^{-1}$	49 449.09	49 711.69	49 537.74
外区总流量/ $t \cdot h^{-1}$	117 181.98	116 927.05	117 092.85
喷头平均流量/ $t \cdot h^{-1}$	9.89	9.87	9.87
竖井水位/m	1.303 2	1.69	1.27

通过对该工程算例的优化计算,可以看出,配水系统优化计算方法能够较好的实现配水系统自动优化布置,证明了该方法的有效性。同时,对优化计算结果分析可知,采用全塔均匀配水优化计算方法得到的配水系统设计方案均能满足相关工程设计要求,最优方案的均布系数为 1.85%; 相对基于经验设计的配水系统方案,当采用相同喷头布置时,优化计算得到配水管布置方案均布系数更小,设计方案的水力性能更优,证明了该方法的正确性和先进性。

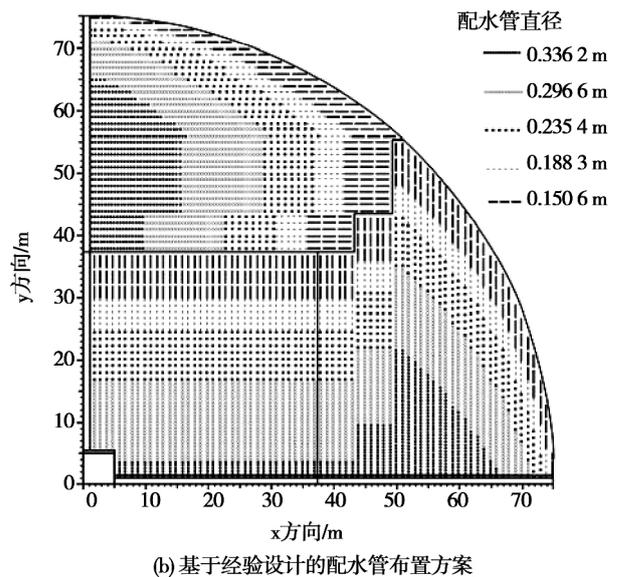
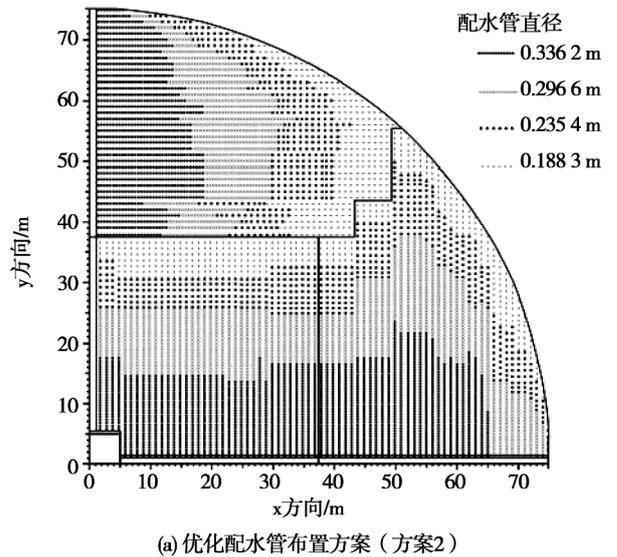


图 2 优化方案与经验设计方案的配水管布置对比图

Fig. 2 Distribution scheme comparison of optimized results and experience-based design

4 结 论

本研究针对冷却塔管式配水系统,在对水力简化计算方法研究分析的基础上,提出了基于遗传算法的配水系统优化设计计算方法。工程实践证明,应用该优化计算方法能够快速、有效的完成冷却塔管式配水系统中配水管与喷头的自动优化选型,且优选方案对比经验设计的配水系统方案均布系数更小(2%以内),水力性能更优。

对于实际冷却塔工程的配水系统设计,尤其是大型和超大型冷却塔来说,应用本文提出的优化计算方法,可以在保证计算准确性的前提下,降低冷却塔工程优化设计的技术难度并减少设计工作量,同时可有效提升冷却塔工艺设计水平,提高设计工作效率。

参考文献:

- [1] 赵振国. 冷却塔中配水的试验研究[J]. 水动力学研究与进展, 1999(3): 295-302.
ZHAO Zhen-guo. An experimental research on the water distribution in a cooling tower[J]. Journal of Hydrodynamics, 1999(3): 295-302.
- [2] 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, 2004(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 thereof[J]. Thermal Power Generation, 2004(10): 18-21.
- [3] 胡连江, 骆碧君. 冷却塔配水系统布水研究与数学模型的建立[J]. 江苏大学学报, 2009(4): 405-409.
HU Lian-jiang, Luo Bi-jun. Analysis and mathematic modeling of cooling tower water distribution system[J]. Journal of Jiangsu University, 2009(4): 405-409.
- [4] 翁迅干, 陆振铎. 自然通风逆流式冷却塔虹吸式竖井配水的探讨[J]. 电力建设, 2001(05): 9-13.
WENG Xun-gan, LU Zhen-duo. Inquire into suction type shaft water distribution for natural ventilation reverse flow cooling towers[J]. Electric Power Construction, 2001(05): 9-13.
- [5] 杨志, 刁丽红, 刘强等. 冷却塔配水管喷头流量的三维数值计算方法[J]. 工业用水与废水, 2013(2): 55-58.
YANG Zhi, DIAO Li-hong, LIU Qiang, et al. 3-D numerical calculation method of nozzle flow rate for water distribution pipe in cooling tower[J]. INDUSTRIAL WATER & WASTEWATER, 2013(2): 55-58.
- [6] 张慧超. 自然通风逆流湿式冷却塔数值模拟及配水系统优化[M]. 华北电力大学, 2012.
ZHANG Hui-chao. Numerical simulation and water distribution system optimization of natural draft counter-flow wet cooling tower[D]. North China Electric Power University, 2012.
- [7] S. C. Kranc. Optimal spray patterns for counter flow cooling towers with structured packing[J]. Applied Mathematical Modelling, 2007(4): 676-686.
- [8] Pavol Vitkovi, viktor syrovatka. Optimal water distribution in the cooling tower[J]. Journal of flow visualization and image processing, 2009(4): 367-375.
- [9] 牛修富. 侧风环境下自然通风逆流湿式冷却塔的配水系统研究[D]. 山东大学, 2008.
NIU Xiu-fu. Research on water distribution system of natural draft counter-flow wet cooling towers under cross-wind conditions[D]. Shandong University, 2008.
- [10] 黄东涛, 杜成琪. 逆流式冷却塔填料及淋水分布的数值优化设计[J]. 应用力学学报, 2000(1): 102-109.
HUANG Dong-tao, DU Cheng-qi. Numerical optimization on arrangement of the filling material and spraying water in cooling tower[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2000(1): 102-109.
- [11] 赵顺安, 冯春平. 超大型自然通风逆流式冷却塔的配水设计[J]. 电力设计, 2009(1): 53-55.
ZHAO Shun-an, FENG Chun-ping. Water distribution design for large natural draft counter flow cooling tower[J]. Electric Power Construction, 2009(1): 53-55.
- [12] Mohsen Goodarzi, Hossein Amooie. A proposed heterogeneous distribution of water for natural draft dry cooling tower to improve cooling efficiency under crosswind[A]. Thermal Power Plants (CTPP) 2012 4th Conference on[C]. 2012, 18-19 Dec. 2012, 1-6.
- [13] 赵元宾, 高明, 杨志等. 填料非均匀布置对大型冷却塔冷却性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2013(20): 96-103.
ZHAO Yuan-bin, GAO Ming, YANG Zhi, et al. Impact of fill non-uniform layout on cooling performance of large-scale cooling towers[J]. Proceedings of the CSEE, 2013(20): 96-103.
- [14] 丁伟, 刘德有, 王丰等. 冷却塔管式配水系统配水计算新方法[J]. 中国给水排水, 2014(14): 62-66.
DING Wei, LIU De-you, WANG Feng, et al. New calculation method of piped water distribution in cooling tower[J]. CHINA WATER & WASTEWATER, 2014(14): 62-66.

(姜雪梅 编辑)

er ,Baoding ,China ,Post Code: 071003) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30(6) .
-916 -920

By making use of a simplified non-linear dynamic model for typical 300 MW steam extraction type cogeneration units ,designed was a conventional coordinated control system for cogeneration units. The simulation results show that under the manual control mode ,the fact that gains in parameters of the object under control will decrease with an increase of the heating load constitutes the main cause for deterioration in the performance of the coordinated control system. The authors designed a gain compensation logic ,thus compensating changes in the gains of the object at the side of the boiler and steam turbine and effectively improving the quality in controlling the pressure before the unit under the condition of the steam extraction regulating butterfly valve being in a manual control mode or under the automatic control mode when the setting of the parameters is very weak. **Key words:** cogeneration unit ,coordinated control ,gain compensation ,simulation analysis

基于遗传算法的冷却塔管式配水系统优化设计计算研究 = Study of the Optimized Design and Calculation of a Tube Type Water Distribution System for Cooling Towers Based on the Genetic Algorithm [刊 ,汉]

WANG Feng ,JI Qing-feng (College of Water Conservation ,Energy Source and Power ,Yangzhou University ,Yangzhou ,China ,Post Code: 225127) ,WANG Dong-hai (China Nuclear Power Engineering Co. Ltd. ,Beijing ,China ,Post Code: 100840) ,ZHOU Ling (College of Water Conservation and Hydropower ,Hehai University ,Nanjing ,China ,Post Code: 210098) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30(6) . -921 -925

For a natural ventilation cooling tower tube type water distribution system ,with the design version for a single distribution system serving as the evolution individual ,the ideal flow coefficient for a single water distribution tube as the evolution direction and the integral uniform distribution coefficient as the evaluation target ,on the basis of an analysis of the methods for hydraulic calculation ,the genetic algorithm was used and a method for optimized design and calculation of cooling tower tube type water distribution systems was proposed based on the genetic algorithm. Through a check calculation of a case in an engineering project ,it has been proven that the calculation method above mentioned can effectively and quickly fulfill the automatically optimized type selection and design of the water distribution pipes and sprinklers in the water distribution system and relative to the water distribution system version empirically designed ,the water distribution system design version finalized after the optimization and calculation has

a smaller uniformly distribution factor (within 2%) and better hydraulic performance. **Key words:** cooling tower , tube type water distribution ,hydraulic calculation ,genetic algorithm ,optimized design

基于 PID 型神经网络的除氧器压力和水位解耦控制研究 = **Study of the Decoupled Control Over the Pressure and Water Level of a Deaerator Based on a PID (Proportional ,Integral and Differential) Type Neural Network** [刊 ,汉] WANG Peng ,MENG Hao (College of Automation ,Harbin Engineering University ,Harbin ,China ,Post Code: 150001) ZHANG Wei (CSIC No. 703 Research Institute ,Harbin ,China ,Post Code: 150078) ,DAI Ri-hui (Naval Representative Office Resident in Harbin No. 703 Research Institute ,Harbin ,China ,Post Code: 150078) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30(6) . -926 -931

In marine steam power plants ,the pressure and water level in deaerators are correlated and have a strong coupling property. As a result ,it is very difficult for the traditional PID control to achieve satisfactory control effectiveness and it is mandatory to take corresponding decoupling measures. PID type neural networks not only have the merits of the traditional PID control but also have an ability of performing a self-learning and approaching to any function. A model for the pressure and water level in deaerators was established and through establishing a neuron corresponding to the proportional ,integral and differential control ,the PID control and the neural network were integrated and a PID type neural network decoupling control method was proposed. By making use of the model thus established ,a simulation by using the PID type neural network decoupling control method was performed. It has been found that compared with the single loop PID control method ,the method in question boasts a better decoupling result ,the stabilization time durations of the pressure and water level in the deaerator can be shortened by 100 s and 60 s respectively and both overshoots can be reduced by 0. 6 KPa and 0. 005 m respectively. **Key words:** steam power ,pressure in a deaerator ,water level in a deaerator ,PID type neural network ,multi-variable decoupled control

某核电机组凝结水溶解氧超标问题分析及试验研究 = **Analysis and Experimental Study of the Problem That the Dissolved Oxygen Content of Condensate Water in a Nuclear Power Unit Exceeds the Standard** [刊 ,汉] YANG Zhang ,WANG Yu ,JIANG Yan-long (College of Astronautics ,Nanjing University of Aeronautics and Astronautics ,Nanjing ,China ,Post Code: 210016) ,YANG Zhang (Fujian Ningde Nuclear Power Co. Ltd. ,Ningde ,China ,Post Code: 355200) ,SHI Jian-zhong (China Guangdong Nuclear Power Engineering Design Co.