

具有多级中间水道的循环冷却水系统优化研究

周长军,孔令启*,李玉刚,郭海林

(青岛科技大学计算机与化工研究所,山东 青岛 266042)

摘要:结合当前水资源短缺形势的日益严峻,对工业中热物流温度差别大、水冷器数量多的循环冷却水系统进行了优化研究,并引入新的优化方案,即水冷器网络采用多级中间水道的系统结构。总结出多级中间水道的设计规则,并在此结构下考虑水冷器、冷却塔等装置的设备投资,建立包括设备费用和操作费用的数学模型,确定系统的运行方式。经过实例验证可知,系统中水冷器网络采用多级中间水道后的运行费用明显减少,所建数学模型行之有效。

关键词:循环冷却水系统;优化;多级中间水道;数学模型

中图分类号:O643.36

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2017)01-0192-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2017.01.046

Optimization of circulating cooling water system with multistage intermediate cooling water mains

ZHOU Chang-jun, KONG Ling-qi*, LI Yu-gang, GUO Hai-lin

(Computers and Chemical Research Institute, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 26042, China)

Abstract: Considering more and more serious situation of water resource shortage, a new optimization scheme for circulating cooling water system with more water coolers and big temperature difference of hot process stream is introduced, in which water cooler network structure adopts multistage intermediate cooling water mains. The design rules of multistage intermediate channel are summarized. The equipment investment of water coolers and cooling tower is taken into account. A mathematical model of circulating cooling water system including capital cost and operating cost is established. The optimal operation mode is eventually confirmed. The experimental results show that the running cost of circulating cooling water system is significantly decreased and the mathematical model is effective.

Key words: circulating cooling water system; optimization; multistage intermediate cooling water mains; mathematical model

随着经济的飞速发展,工业用水量越来越大,很多地区出现了不同程度的水资源短缺。循环冷却水系统作为工业用水的重要部分,主要作用是为用户提供循环使用的冷却水,可避免自来水的直接排放,是有效的节水措施^[1]。随着节能减排工作的大力推进,循环冷却水系统在生产中的应用越来越广泛。然而,循环冷却水系统具有用户多、水量大、能耗高等特点^[2],而且针对热物流温度差别大、水冷器数量多的大型循环冷却水系统的优化方案寥寥无几。本文中通过引入新的水冷器网络结构,改善系统中用水网络的结构配置,提高冷却水在用水网络中换热次数,进而降低冷却水的循环量和系统的运行能耗,使整个系统达到更好的节水节能效果。

1 循环冷却水系统的过程描述

循环冷却水系统的典型结构如图1所示。

冷却塔作为循环冷却水系统的重要部分,主要

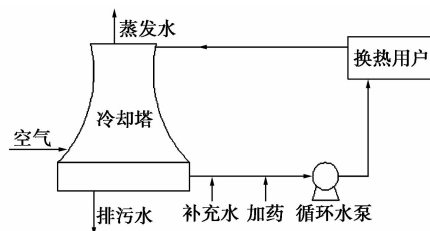


图1 循环冷却水系统组成图

作用是降低换热后冷却水的温度。冷却塔的性能常用效率来表示,定义为系统实际移除热量与最大可移除热量的比值。当进塔水温越高、流量越低时,冷却塔的效率越高^[3]。循环水泵为系统中冷却水循环换热提供动力,该输送过程需要消耗大量的电能,其用电负荷约占整个单元项目用电量的20%~30%^[4]。水冷器网络作为换热用户,多为并联连接^[5]。补水系统和加药设备作为辅助装置,是必不可少的。随着水蒸汽不断逸出,冷却水总量逐渐减少,使得水中的溶解物质不断浓缩,并伴随着微生物

收稿日期:2016-05-17;修回日期:2016-10-31

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2011BL010)

作者简介:周长军(1991-),男,硕士生;孔令启(1973-),男,博士,副教授,研究方向为化工过程系统工程,通讯联系人,0532-84022515,klq

@putech.com.cn。

的滋生。为保持循环水水质的稳定,需对系统进行不断排污及补充新鲜水^[6],并往系统内投加缓蚀阻垢剂和杀生剂^[7]。

因此,本文中从循环水泵、冷却塔、换热用户及辅助装置入手,将系统内各部分损耗转化为费用,并将水冷器网络结构视为影响系统运行的主要因素,综合考虑大型循环冷却水系统的节能降耗^[8]。

2 具有多级中间水道的水冷器网络及其设计

中间水道^[9]是指水温介于冷却塔所提供的冷却水和换热后返回冷却塔的冷却水之间的水道,它源于一些水冷器的较低温度的排放,又用于另一些可用较高温度的水冷器。与常规的平行设计相比,这种水冷器结构能够明显减少循环水量。但当热物流温度差别大且水冷器结构规模较大时,用水网络中置入一级中间水道,冷却水在系统中最多被利用2次,其节水节能效率仍然不高,还有优化空间。

对于热物流温度差别大、水冷器数量多的循环冷却水系统,用水网络中放置多级中间水道后,冷却水的换热次数得到有效提升,循环水量进一步降低,而且中间水道设置越多,冷却水在用水网络中的换热次数越多,循环水量越少,冷却水的进塔水温越高,如图2所示。因此,多级中间水道比一级中间水道更具有节水节能的优势。但并不是用水网络中置入的中间水道越多越好,需要视实际情况设定其上限。

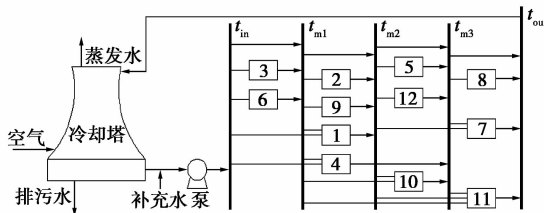


图2 具有三级中间水道的循环冷却水系统组成图

通过对系统中水冷器网络结构的研究,总结出用水网络置入多级中间水道的设计规则。

(1) 根据热物流的温度参数确定冷却水的极限温度,一般热物流与冷却水之间最小温差为 10°C 。

(2) 在图中表示出冷却水的温度变化,找出换热负荷大且极限流量高的水冷器,并对它们的温度变化进行排序,从而划分出冷却水温度变化的区间。

(3) 根据所划分的温度变化区间确定中间水道的大体位置,进而确定水冷器的网络结构。

3 数学模型的建立

循环冷却水系统的经济运行研究就是要寻找一

种合理的运行方式^[10]。在确定水冷器网络结构的前提下,根据各水冷器内冷却水的热量平衡关系,综合考虑冷却塔、水冷器的设备投资及其他各项操作费用,以系统运行1年的总费用为目标值建立数学模型,该数学模型的目标函数:

$$\min Z = CC + OC \quad (1)$$

式中, Z 为系统运行1年的总费用; CC 为设备折旧费用; OC 为系统运行时的操作费用。

设备折旧费用主要考虑水冷器和冷却塔运行1年的折旧费用,根据国家出台的新所得税法折旧年限^[11]规定,生产设备折旧年限为10年,残值率为5%。则系统运行1年的折旧费用:

$$CC = (CC_1 + CC_2)(1 - 5\%) / 10$$

式中, CC_1 为冷却塔的设备费用; CC_2 为水冷器的设备费用。

冷却塔费用模型^[12]:

$$CC_1 = 746.749(F_{in}/1000)^{0.79}(t_{ou} - t_{in})^{0.57}(t_{in} - t_{wb})^{-0.9924} + (0.022t_{wb} + 0.39)^{2.447} \quad (2)$$

式中, F_{in} 为循环水量, kg/h ; t_{in} 为用水网络的入口水温, $^{\circ}\text{C}$; t_{ou} 为用水网络的出口温度, $^{\circ}\text{C}$; t_{wb} 为湿球温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

水冷器费用模型^[13]:

$$CC_2 = P_c \cdot \sum S(i) (i \in P) \quad (3)$$

$$S = S(Q, K, T_1, T_2, t_1, t_2) \quad (4)$$

式中, S 为水冷器的换热面积; Q 为水冷器的热负荷; K 为水冷器的传热系数; P_c 为水冷器的制造单价; T_1 为热物流的进口温度; T_2 为热物流的出口温度; t_1 为冷却水的进口温度; t_2 为冷却水的出口温度。

操作费用主要考虑泵的耗电费用、补充新鲜水费用及杀生剂投加费用。由于随着系统内进出塔水温温差加大,循环水量减小,则将冷却水冷却到预定温度所需空气量变化不大,风机用风量变化可忽略不计^[14]。

循环水泵电机轴功率计算如下^[15]:

$$N = N(F_b, \gamma, H, \eta) \quad (5)$$

式中, N 为循环水泵轴功率; γ 为水的密度; F_b 为水泵的流量; H 为水泵的扬程; η 为水泵的效率。

杀生剂投加量的计算如下^[16]:

$$G_0 = F_{in} \cdot g_0 / 1000 \quad (6)$$

式中, G_0 为杀生剂加药量, kg/h ; g_0 为杀生剂质量浓度, mg/L 。

补充新鲜水量计算公式如下^[17]:

$$F_a = \lambda \cdot F_{in} \quad (7)$$

式中, F_a 为补充新鲜水量, kg/h ; λ 为节水率; F_{in} 为循环水量, kg/h 。

该费用模型的约束条件如下。

(1) 水冷器 i 的热量平衡:

$$F(i)(t_2(i) - t_1(i)) = Q(i) \quad (i \in P) \quad (8)$$

(2) 水冷器 i 进口混合处热量平衡:

$$F_{inc}(i)t_{in} + \sum F_{m(j)}(i)t_{m(j)} = (F_{in}(i) + \sum F_{m(j)}(i))t_1(i) \quad (i \in P, j \in U) \quad (9)$$

(3) 水冷器 i 进出口及中间水道温度要求:

$$0 < t_1(i) \leq t_{1,max}(i) \quad (i \in P) \quad (10)$$

$$0 < t_2(i) \leq t_{2,max}(i) \quad (i \in P) \quad (11)$$

$$t_{in} < t_{m(j-1)} < t_{m(j)} < t_{ou} \quad (i \in P, j \in U) \quad (12)$$

上述变量均为非负变量。 P 为水冷器集合; U 为中间水道集合; $F_{inc}(i)$ 为用水网络入口流入水冷器 i 的流量, kg/h; $F(i)$ 为水冷器 i 的流量, kg/h; $F_{m(j)}(i)$ 为中间水道 j 流入水冷器 i 的流量, kg/h; $t_{1,max}(i)$ 为水冷器 i 的进口水温的最大值, °C; $t_{2,max}(i)$ 为水冷器 i 的出口水温的最大值, °C; $t_{m(j)}$ 为中间水道 j 的水温, °C。

4 案例分析

以某聚氨酯厂为例进行研究, 该厂某生产车间共有 18 个水冷器。通过调研可知, 热物流的流量、换热负荷等参数如表 1 所示。设最小传热温差为 10°C, 则所需冷却水的极限进出口温度(允许的最大值)如表 2 所示。该车间循环冷却水系统中水冷器结构在优化前采用并联连接的运行方式, 其用水网络的入口水温为 30°C, 出口水温为 44.6°C, 冷却水的循环量为 2.11×10^6 kg/h。

表 1 热物流参数

水冷器	热物流进口 温度/°C	热物流出口 温度/°C	热容流率/ (kW·°C ⁻¹)	热负荷/ kW
1	60.0	52.9	317.3	2253.0
2	65.0	41.0	17.0	408.0
3	85.0	40.0	7.2	324.0
4	98.0	40.0	11.2	648.4
5	45.0	37.0	94.4	754.9
6	54.0	50.0	412.5	1650.0
7	80.0	40.0	8.3	330.0
8	46.0	40.0	11.2	66.9
9	71.0	40.0	21.0	650.2
10	48.0	40.0	820.0	6560.0
11	93.0	85.0	593.8	4750.0
12	94.0	50.0	3.9	171.4
13	86.0	42.0	78.9	3469.4
14	60.0	40.0	20.2	404.0
15	70.0	60.0	21.3	213.2
16	43.4	40.0	36.9	125.4
17	95.0	83.0	285.6	3427.2
18	77.0	49.0	74.5	2086.0

表 2 所需冷却水的极限参数

水冷器	冷却水进口 温度/°C	冷却水出口 温度/°C	热容流率/ (kW·°C ⁻¹)	热负荷/ kW
1	42.9	50.0	317.3	2253.0
2	31.0	55.0	17.0	408.0
3	30.0	75.0	7.2	324.0
4	30.0	88.0	11.2	648.4
5	27.0	35.0	94.4	754.9
6	40.0	44.0	412.5	1650.0
7	30.0	70.0	8.3	330.0
8	30.0	36.0	11.2	66.9
9	30.0	61.0	21.0	650.2
10	30.0	38.0	820.0	6560.0
11	75.0	83.0	593.8	4750.0
12	40.0	84.0	3.9	171.4
13	32.0	76.0	78.9	3469.4
14	30.0	50.0	20.2	404.0
15	50.0	60.0	21.3	213.2
16	30.0	33.4	36.9	125.4
17	73.0	85.0	285.6	3427.2
18	39.0	67.0	74.5	2086.0

若该生产车间采用一级中间水道的用水网络, 根据各水冷器所需冷却水的温度变化确定出一级中间水道的大致位置, 从而确定其网络结构^[18], 如图 3(图中单位均为 t/h)。采用本文中的数学模型对该系统进行具有一级中间水道的用水网络进行设计可知, 此时用水网络入口水温为 27°C, 中间水道的温度为 39.7°C。

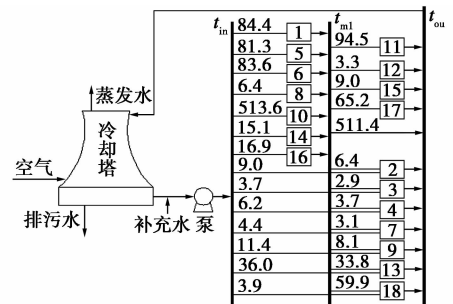


图 3 实例采用一级中间水道的用水网络组成图

若该生产车间采用多级中间水道的用水网络, 通过对温度变化图的分析可知, 水冷器 1、6、10、11、17 的热负荷大且冷却水极限流量大, 这些水冷器的冷却水温度变化共分为 3 个区间, 因此该系统最多可置入二级中间水道, 水冷器网络结构如图 4 所示。通过求解可知, 中间水道温度 $t_{m1} = 37.5^\circ\text{C}$, $t_{m2} = 56.7^\circ\text{C}$ 。

将该生产车间的数据代入已建立的数学模型, 其中水冷器的制作成本取 1 500 元/m³, 泵的效率

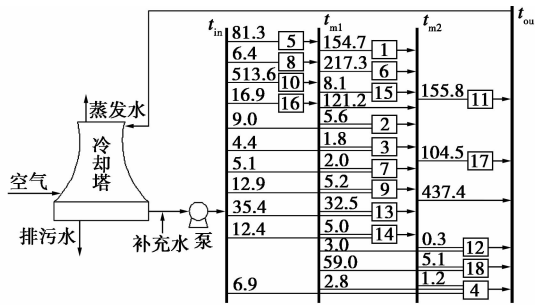


图4 实例采用二级中间水道的用水网络组成图

均为80%,用电单价取平时段用电单价,约为0.8元/kWh,杀生剂的单价取100元/kg,其投放标准为0.5 mg/L,当地的湿球温度为20℃,该企业的补水率为0.54%,新鲜水的单价为1.6元/t。利用GAMS软件分别求解出系统采用并联连接、一级中间水道网络结构、二级中间水道网络结构后的循环水量、换热后的冷却水水温、操作费用、设备运行1年的折旧费用及整个系统运行1年的总费用,其对比结果如表3所示。

表3 运行结果对比

水冷器网络结构	用水网络入口水温/℃	用水网络出口水温/℃	循环水量/(t·h ⁻¹)	设备费用/万元	操作费用/万元	总费用/万元
并联连接	30	44.6	2110	32.2	171.8	204
一级水道	27	54.8	875.9	40.3	71.3	111.6
二级水道	27	68.2	704.3	42.4	57.4	99.8

通过对比可知,该循环冷却水系统采用二级中间水道后循环水量比水冷器并联连接时降低了66.6%,比采用一级中间水道时降低了19.6%,与此同时用水网络的出口温度也得到相应提升。随着循环水量的减少、冷却水进塔水温的升高,冷却水在用水网络中被利用的次数得到有效提高,相比采用一级中间水道的用水网络,二级中间水道的用水网络的冷却塔效率也相应提高,包含泵的耗电、药剂的投加以及新鲜水的补充等相关操作费用降低了19.6%,包含冷却塔、水冷器的设备投资增大了5.1%,系统运行1年的总费用比采用一级中间水道的用水网络降低了10.6%,约合人民币11.8万元(按年运行7 200 h计)。

5 结论

通过对现阶段企业中循环冷却水系统的调研和分析可知,常规的节水节能措施并不能使水冷器规模较大且热物流温度变化幅度大的用水网络达到最

大效果的节水节能。

针对水冷器数量多且热物流温度差别大的循环冷却水系统进行了具体研究,引入具有多级中间水道的用水网络结构,并总结出多级中间水道的设计规则。这种结构不仅有效地避免了水冷器之间的直接连接,使系统结构简单且易于控制,还能使系统获得更高的进塔水温和更低的循环水量。通过建立相应的数学模型并求解可知,大型循环冷却水系统中水冷器网络采用多级中间水道后的节水节能效果更加显著。

参考文献

- [1] 李慧平. 大型冷却循环水系统方案优化设计及其可靠性[J]. 质量与可靠性, 2012, (3): 20-23.
- [2] 王锋. 工业循环冷却水系统安全与节能设计对策[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [3] Kim J K, Smith R. Cooling water system design[J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(12): 3641-3658.
- [4] 洪宏贤. 试论水的节约、回用与再生[A]. 全国水处理技术研讨会论文集[C]. 浙江千岛湖, 2004: 34-37.
- [5] 崔玉峰, 李晨光, 付世杰, 等. 炼油企业循环水用水网络优化技术与应用[J]. 中外能源, 2014, 19(8): 105-109.
- [6] 刘伟, 陈敏, 宋仁委. 循环冷却水系统补水科学配比技术研究[J]. 河南化工, 2012, (14): 29-31.
- [7] 王凤宁, 霍玉龙. 循环冷却水处理存在的问题及处理措施[J]. 城镇供水, 2011, (2): 68-71.
- [8] 龙德晓, 贾晓朵, 任若飞, 等. 循环水系统操作费用的优化研究[J]. 节能技术, 2009, 27(5): 430-434.
- [9] Xiao F, Shen R, Wang B. Recirculating cooling-water network with an intermediate cooling-water main[J]. Energy & Fuels, 2005, 19(4): 1723-1728.
- [10] 李伟. 循环水系统的优化分析[J]. 节能技术, 2006, 24(5): 470-473.
- [11] 王新奎. 浅议新企业所得税法[J]. 会计之友旬刊, 2007, (12): 64-64.
- [12] Panjeshahi M H, Ataei A, Gharraie M, et al. Optimum design of cooling water systems for energy and water conservation[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2009, 87(87): 200-209.
- [13] 夏清, 陈常贵. 化工原理(上册)[M]. 天津: 天津大学出版社, 2005: 241-244.
- [14] 胡爱英. 工业循环冷却水系统节水节能措施分析[J]. 工业用水与废水, 2011, 42(3): 1-4.
- [15] 于遵宏. 化工过程开发与设计[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 1997: 347-350.
- [16] GB 50050—2007. 工业循环冷却水处理设计规范[S].
- [17] 牛卫东, 赵森德. 循环冷却水系统节水分析[J]. 山东电力技术, 2003, (6): 47-48.
- [18] 冯霄, 沈人杰. 夹点技术在循环冷却水系统优化中的应用[C]//全国石油与化工行业节能减排技术交流暨炼油化工企业公用工程系统节能节水研讨会, 2010. ■