

基于工程实测的开式冷却塔改造优化分析

黄凯良,郝禹翔,冯国会,王贵强,李旭林

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 为降低建筑能耗,选取实际空调系统工程的开式冷却塔进行实测和改造优化分析,对冷却塔进行节能潜力分析。方法 对某大厦空调系统的冷却塔进行全年运行工况测试,通过实测数据分析判断其换热效率与风水比,进一步分析冷却塔运行效果较差的具体原因,提出改造优化方案。结果 既有冷却塔换热效率在 55% ~ 59% 之间,风水比远远低于最优值 1.0 ~ 1.5。比较而言,换装高效节能防堵塞的螺旋形喷嘴,加高冷却塔屏障结构及更新并增加塔内填料更适合解决实际问题。结论 冷却塔周边条件和运行维护对性能具有重要影响。进风口被墙体阻隔时,进风温度高,换热效果差。经过计算可知,冷却塔经过加装变频器之后每年可节省 9 212 万 kW·h 的电量。

关键词 空调系统;冷却塔;性能测试;改造分析;变频

中图分类号 TU111

文献标志码 A

Retrofitting Optimization Analysis of Open Cooling Tower Based on Engineering Measurement

HUANG Kailiang, HAO Yuxiang, FENG Guohui, WANG Guiqiang, LI Xulin

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to reduce building energy consumption, the energy-saving potential for the cooling tower is analyzed by actual measurement and optimization analysis. The annual operation conditions for the cooling tower of the air conditioning system in a building is tested. Through the analysis of annual operation data, the heat exchange efficiency and air-water ratio are judged, and the reasons for the poor effect of the cooling tower are further analyzed to put forward the retrofitting optimization scheme. The results show that the location and operation maintenance of the cooling tower have an important impact on the performance. The air inlet is blocked by the wall, the air inlet temperature is high, the heat exchange effect is poor, the heat exchange efficiency

收稿日期:2021-12-28

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52038009);辽宁省教育厅高等学校创新人才支持计划项目(2020389);沈阳市科学技术计划项目(21-108-9-03)

作者简介:黄凯良(1985—),男,教授,博士,主要从事可再生能源利用及室内空气质量技术等方面研究。

is between 55% ~ 59% and the air water ratio is far lower than the optimal value of 1.0 ~ 1.5. In comparison, replacing the high-efficiency spiral nozzle, energy-saving and anti-blocking and heightening the enclosure structure can solve the practical problems. According to the calculation, the cooling tower can further save 9 212 kW/h of power every year after installing frequency converter.

Key words: air conditioning system; cooling tower; performance test; transformation analysis; frequency conversion

冷却塔是一种常见的冷源设备,分为开式冷却塔和闭式冷却塔。开式冷却塔的工作原理是将冷机运行产生的高温冷却水雾化,小液滴在填料表面形成水膜,水膜与空气充分接触,通过对流的显热传递和蒸发的潜热传递将热量散出;通过集水盘将低温冷却水收集后再次输送回机组。传热介质为水,整个换热过程中用水量、耗电量巨大,为实现节能,避免能源浪费,保障冷却塔正常运行和提高冷却塔的运行效率至关重要。

冷却塔的设计参数、运行维护与运行条件决定了冷却塔的实际运行效果。在对冷却塔的现有研究中,采用模拟分析方法较多。S. P. Fisenko^[1]等给出了评价冷却塔性能的数学模型,该模型由两个相互依存的边值问题组成。第一个边界值问题描述了水滴在冷却塔喷淋区的蒸发冷却;第二个边界值问题描述了塔中填料的冷却,并将实验数据与模拟得出的计算值进行比较。赵元宾^[2]等指出在 0 ~ 5 m/s 自然风常见风速条件下,填料的非均匀布置方式可使该塔出塔水温降低 0.105 ~ 0.288 ℃。胡丹梅^[3]等指出,进风口的导叶板长度为 6 m 时出塔水温最低,冷却效果最好,降温可达 0.367 7 ℃。牛润萍^[4]等通过对冷却塔内换热机理的分析,建立了冷却塔传热传质的数学模型,分析空气及喷淋水等参数对其性能的影响。宋嘉梁^[5]等基于冷却塔的实际测试数据采用 BP 神经网络对冷却塔出塔水温、冷却数、蒸发损失水率进行预测。李杨等^[6]指出将两台冷却塔以并联方式连接,出水温度 30 ℃ 时,空气流速降低 1.5 m/s。一些学者也对冷却塔水泵与

风机的节能进行了研究,徐菱虹^[7]等根据冷却水进出口温度差,采用变频调速水泵代替调节阀,冷却水泵耗能节约 20% 以上。尹应德^[8]等提出根据冷却塔出水温度值对风机采取两种控制模式运行,当出水温度提高时,节能更多。

以往的研究都是基于冷却塔某个部某个方面进行,由于冷却塔日常管理维护的难度很大,加上冷却塔的改造对商业体运营造成的影响也很大,因此对冷却塔进行整体运行长时间监测研究很少,基于实测的改造研究更少。基于此,笔者对深圳某大厦冷却塔实际运行过程进行长时间的监测,通过实测数据分析其换热效率与风水比,针对冷却塔效率低的现状提出解决方案,并通过计算得到了冷却塔风机进行变频控制的最优解。

1 工程概况

本大厦位于深圳市,总建筑面积为 84 313 m²。地下 4 层,地上 30 层(大厦的裙楼、主楼设置独立的中央空调),总空调面积为 44 042 m²。夏季空调冷负荷约 8 600 kW,空调制冷机房设置在地下 4 层,制冷机房采用 3 台单机制冷容量为 700 RT 的高心式水冷冷水机组和 1 台单机制冷量为 350 RT 的螺杆式冷水机组。空调冷冻水供回水温度为 6 ℃/11 ℃。22 层以上办公区(高区)的水系统通过设置在 22 层的换热站与低区水系统分开,通过两台板式热交换器向高区提供 7 ℃/12 ℃ 的空调冷冻水。设计选用 5 台方形不锈钢冷却塔,3 台单台循环水量为 700 m³/h,额定制冷量为 4 070 kW/h,额定

风量 452 400 m³/h, 风机功率 22 kW。2 台单台循环水量为 175 m³/h, 额定制冷量为 1 018 kW/h, 额定风量 106 700 m³/h, 风机功率为 5.5 kW, 冷却塔的设计进回水温度为 37/32 ℃(如表 1 所示)。

表 1 冷却塔性能设计参数

Table 1 Performance design parameters of cooling tower				
冷却塔编号	额定水流量/(m ³ ·h ⁻¹)	额定制冷量/(kW·h ⁻¹)	额定风量/(m ³ ·h ⁻¹)	风机功率/kW
1	700	4 070	452 400	22
2	700	4 070	452 400	22
3	700	4 070	452 400	22
4	175	1 018	106 700	5.5
5	175	1 018	106 700	5.5

2 冷却塔的评价指标

由于冷却塔的运行不仅受到自身运行条件的限制,外界条件以及机组的运行工况对冷却塔效率的影响也很大,造成了冷却塔实际运行工况与设计差别较大。对冷却塔的工程实例分析,通常采用冷却塔的换热效率、冷却塔等效换热系数、冷却塔风水比等参数作为冷却塔性能的评价标准^[9]。笔者引入冷却塔特性数表示在一定的淋水填料及冷却塔型式下冷却塔所具有的冷却能力。

冷却塔换热效率:

$$\eta_{CT} = \frac{t_{in} - t_{out}}{t_{in} - t_{wb}} \tag{1}$$

式中: η_{CT} 为冷却塔换热效率; t_{in} 为冷却水进冷却塔温度,℃; t_{out} 为冷却水出冷却塔温度,℃; t_{wb} 为冷却塔进口空气湿球温度,℃。

冷却塔等效换热系数:

$$KF_{CT} = \frac{Q}{\Delta h_m} \tag{2}$$

式中: KF_{CT} 为冷却塔换热系数,kg/s; Q 为水侧换热量,kW; Δh_m 为对数平均比焓差,kJ/kg,定义如式(3)所示:

$$\Delta h_m = \frac{(h_{w,i} - h_{a,o}) - (h_{w,o} - h_{a,i})}{n \frac{h_{w,i} - h_{a,o}}{h_{w,o} - h_{a,i}}} \tag{3}$$

式中: $h_{w,i}$ 为冷却水进水比焓,kJ/kg; $h_{w,o}$ 为冷却水出水比焓,kJ/kg; $h_{a,i}$ 为冷却塔进风比

焓,kJ/kg; $h_{a,o}$ 为冷却塔出风比焓,kJ/kg。

冷却塔风水比:

$$\alpha = \frac{\rho_a G_a}{\rho_w G_w} \tag{4}$$

式中: α 为冷却塔风、水质量流量比; ρ_a 为空气的密度,kg/m³; ρ_w 为水的密度,kg/m³; G_a 为空气的体积流量,m³/h; G_w 为水的体积流量,m³/h。

冷却塔逼近温度:

$$\Delta t_{CT} = t_{out} - t_{wb} \tag{5}$$

冷却塔特性数:

$$\Omega' = \frac{\beta_{xv} V}{Q} = A \lambda^m \tag{6}$$

式中: Ω' 为冷却塔特性数; λ 为空气的质量比; A 为水的质量比; m 为冷却塔特性数的拟合系数。

笔者以工程中常用的薄膜式淋水填料为例,应用焓差法对冷却塔出水温度进行分析计算,得出薄膜式淋水填料的特性参数为: $\Omega' = 1.38 \lambda^{0.45}$ 。

3 全年运行工况测试分析

深圳市属于夏热冬暖地区,笔者在 2020 年对某大厦冷却塔进行监测,包括进出水温度、冷却水流量、室外空气湿球温度、风量等。使用实验室标定过的仪器进行测试,具体如下:采用 PT100 温度传感器对水温进行测量(精度 ±0.3 ℃),采用温湿度传感器对空气

干球温度及相对湿度进行测量(干球温度测试精度 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度测试精度 $\pm 3\%$),采用超声波流量计(富士FSC型)对冷却水循环水量进行测量(精度 $\pm 1\%$),采用热球式风速仪(ZRQF—F30J)对空气流速进行测量(精度 $\pm 3\%$)。对7~8月份监测数据进行整理可见,7月份平均干球温度 $30.31\text{ }^{\circ}\text{C}$,

平均湿球温度 $27.42\text{ }^{\circ}\text{C}$,8月份平均干球温度 $31.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均湿球温度 $28.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。将室外气候特点与冷却塔运行工况结合考虑,选取7月24日、7月27日、8月1日、8月3日、8月7日14时的运行状态作为典型工况进行分析。5台冷却塔全部开启,选取2#塔进行测试分析,统计结果见表2。

表2 夏季典型工况
Table 2 Typical working conditions in summer

入塔水温/ $^{\circ}\text{C}$	出塔水温/ $^{\circ}\text{C}$	水流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	室外空气 湿球温度/ $^{\circ}\text{C}$	风量/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	逼近温度/ $^{\circ}\text{C}$	换热 效率	风水比	风机频 率/Hz	风机功 率/kW	冷却塔 特性数
34.6	31.1	648.88	28.47	395 730	2.63	0.57	0.79	50	22	1.24
35.4	31.8	660.56	29.37	415 817	2.43	0.59	0.81	50	22	1.25
31.5	29.5	628.63	27.95	364 919	1.55	0.56	0.75	50	22	1.23
34.7	31.3	638.94	28.78	347 531	2.52	0.57	0.70	50	22	1.17
35.2	32.0	659.42	29.43	365 821	2.57	0.55	0.71	50	22	1.18

在一定条件下,冷却塔的热湿交换效果与布水条件、风量及水与填料接触情况等有关。对于冷却塔,单位质量冷却水所接触的风量增加,换热越充分,逼近温度越小,冷却水出塔水温越低。由表2可看出,冷却塔流量在正常范围内,冷却水出水温度与室外湿球温度相差约 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,换热效率在 $55\%\sim 59\%$ 之间,相对偏低。风水比较小,远远低于最优值 $1.0\sim 1.5$,说明整个冷却塔运行状态是“大流量小温差”,即冷却水流量正常,但塔内的冷却水温降小,冷却塔的换热性能应进行优化。

过渡季节时冷却塔充分利用自然冷源来制冷,具有可行性,适用于过渡季节须供冷的场所。特别是室内负荷较大,冬季还须供冷的场所,节能环保效益显著。对11~12月份数据进行整理可见,11月份平均干球温度 $23.31\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均湿球温度 $20.24\text{ }^{\circ}\text{C}$,12月份平均干球温度 $17.35\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均湿球温度 $13.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在冷却塔冬季运行期间,选取11月18日、11月19日、11月23日、11月27日、12月1日作为典型工况进行分析,只开启2#塔进行测试,结果如表3所示。

表3 冬季典型工况
Table 3 Typical working conditions in winter

入塔水 温/ $^{\circ}\text{C}$	出塔水 温/ $^{\circ}\text{C}$	水流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	室外空气湿 球温度/ $^{\circ}\text{C}$	风量/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	逼近 温度/ $^{\circ}\text{C}$	换热 效率	风水比	风机频 率/Hz	风机功 率/kW	冷却塔 特性数
31.8	27.8	610.31	25.49	385 332	2.31	0.63	0.82	50	22	1.26
34.9	30.9	630.17	26.15	421 915	4.75	0.46	0.87	50	22	1.29
29.7	25.9	598.79	23.53	336 556	2.37	0.62	0.73	50	22	1.20
27.8	24.6	578.46	22.62	349 970	1.98	0.62	0.78	50	22	1.24
24.3	20.7	559.68	19.43	309 729	1.27	0.73	0.72	50	22	1.19

测试期间,深圳市冬季冷暖变化剧烈,干球温度最高可达 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低可达 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由

表3中数据可得出结论,冷却塔的流量在正常范围内波动。室外湿球温度较低时,逼近温度小,通过充分利用自然冷源使冷却塔降温。可对风机进行变频以及将冷却塔的运行策略进行优化,实现节能目的。

4 冷却塔优化改造方案

4.1 原因分析

本工程冷却塔运行不良的主要原因在于布水结构差,且通风效果不良,严重影响了冷水机组的正常运行,夏季最高温时甚至需要补充自来水协助降低冷却塔的回水温度。经过观察、分析总结得知,存在问题原因主要有两个方面。

4.1.1 布水结构差

观察塔顶部测点的实际情况发现,填料面积并未被充分利用。在现场对测点的温、湿度进行测试时,距离布水装置较远区域的湿度为70%~80%,而其附近区域湿度为96%~99%。由此可以得出结论,布水结构不合理,喷淋水量较小,填料面积未充分利用,导致冷却水降温速度慢,与空气换热效果差,在一定程度上造成了能源浪费。

4.1.2 通风效果不良

该大厦采取的冷却塔均为逆流式冷却塔,即在底部四周进风,冷却水与空气直接接触逆流换热。冷却塔的效率与通风状况关系较大。将冷却塔底部进风处设为测点,放置温湿度传感器。测得该冷却塔进风处测点的

温度高于室外实时温度2~3℃,进风状况较差。冷却塔位于凹部位置,自然通风的效果较差。

4.2 优化改造方案分析

4.2.1 方案一

(1)换装高效节能防堵塞的螺旋形喷嘴,该喷嘴的平均喷流速率高,具有优良的雾化效果,更为节能^[10,13]。该喷嘴可使冷却水均匀分布,改变“布水装置附近区域水流大,其他区域水流小”的现状,使得填料面积得到充分利用,提高冷却塔效率。大冷却塔须在5根水管上各更换1个喷头方可达到最佳效果,小冷却塔在主水管更换1个即可。

(2)加高屏障结构,减少一部分换热后的空气再次进入塔内,且可增加并更新塔内的填料^[11-12]。改造完成后,布水装置工作良好,循环水与空气接触面积增大,热交换效果显著提升,出塔水温平均降低约0.8℃,冷水机组COP值提升约3%^[13-15]。

4.2.2 方案二

由于原有冷却塔运行时间长,冷却效果差。可更换3台700t逆流式冷却塔。在安装时,需考虑各个管段的承压能力,且工期较长,参数如表4所示。可从设计角度解决布水结构差和通风不良问题。根据厂商所提供的工况数据,改造完成后,该塔出塔水温平均降低约1.8℃,冷水机组COP值提升约8%^[14-15]。

表4 逆流式冷却塔性能设计参数

Table 4 Performance design parameters of counterflow cooling tower

型号	额定水流量/(m ³ ·h ⁻¹)	额定制冷量/(kW·h ⁻¹)	额定风量/(m ³ ·h ⁻¹)	风机功率/kW
tower1~3	700	4 230	452 400	22

比较两种方案可知,方案一对空调系统性能提升相对偏小。但冷却塔喷淋装置、屏障结构和填料可逐步进行施工更换,不影响大厦空调系统正常运行,成本相对很低,且易于操作。方案二对空调系统优化效果更好,

但废弃冷却塔造成浪费,其成本远高于方案一,且施工难度大,需在冬季空调系统长时间不使用时安装。综合而言,方案一更适合解决实际问题。

4.3 风机变频方案优化分析

对冷却塔的运行方式进行优化,应为多台同时开启,并对风机进行统一变频处理,充分利用冷却塔的换热面积^[16]。采用变频器驱动的风机初投资较大,但风机的性能得以大幅提高,初投资也可在运行过程中逐步回收^[17]。

风机采用转速调节,改变风量、流量,可以节电。原理^[18]如下:

$$P=F\times V.$$

(7)

式中: P 为风机功率; F 为扭力; V 为线速度。

$$F=T/R.$$

(8)

式中: T 为转矩; R 为作用半径。

$$V=2\pi R\times n.$$

(9)

$$n_1/n=f_1/f.$$

(10)

$$P_1/P=(f_1/f)^3.$$

(11)

式中: n 为转速, r/min ; n_1 为变频后转速,

r/min ; f_1 为变频后风机频率, Hz ; P_1 为变频后风机功率, kW 。

变频处理后,可减少风量,有效降低冷却塔漂水率,进而达到节水的效果;其次,对风机变频后,电机、皮带、轴承的磨损程度会减小,可有效延长使用寿命。除此之外,将风机变频有助于减小设备噪音。对加装变频器从经济性角度进行分析:变频器每台约为0.5万元,3台大塔中每台风机的额定功率为22 kW。变频后,每台冷却塔冬季运行期间至少可节省电量4 265 kW·h。通过对运行策略的调整,过渡季节每台冷却塔运行可节省电量4 947 kW·h。经过计算可知,每台风机变频之后至少可节省约电量9 212 kW·h。具体数据如表5所示。

表5 变频前后数据

Table 5 Data before and after frequency conversion

月份	变频前风机频率/Hz	变频后风机频率/Hz	变频前耗电量/(kW·h)	变频后耗电量/(kW·h)	节约电量/(kW·h)
11、12	50	24 或关闭风机	10 912	6 647	4 265
3、4、5	50	44 或 36	20 460	15 513	4 947

5 结 论

(1)对深圳市某大厦空调系统进行全年运行工况的测试。通过分析实际测试数据发现夏季冷却塔运行效率低,换热效率在55%~59%;风水比较小,远远低于最优值1.0~1.5。这一问题容易导致冷机过热,到了必须改造的严重程度。冬季冷却塔运行效率低,具有较好的节能潜力。

(2)冷却塔效率偏低的原因在于布水结构差,且通风效果不良,严重影响了冷水机组的正常运行,比较而言,换装高效节能防堵塞的螺旋形喷嘴,加高冷却塔屏障,更新并增加塔内填料相对更适合解决实际问题。

(3)冷却塔的运行方式应为多台同时开启,并对风机进行变频处理。有效利用换热面积的同时也可减少设备损耗,经过计算可

知,冷却塔经过加装变频器之后可节省约9 212 万kW·h 的电量,降低了运行维护费用。

参考文献

[1] FISENKO S P, PETRUCHIK A I, SOLODUKHIN A D. Evaporative cooling of water in natural draft cooling tower [J]. International journal of heat and mass transfer, 2002, 45 (23) :4683 - 4694.

[2] 赵元宾,杨志,高明,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, 33 (20) :96 - 103.
(ZHAO Yuanbin, YANG Zhi, GAO Ming, et al. Impact of fill non-uniform layout on cooling performance of large-scale cooling towers [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33 (20) :96 - 103.)

[3] 胡丹梅,宗涛,张志超,等. 自然通风逆流湿式冷却塔进风口导叶板结构参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (11) :30 - 38.
(HU Danmei, ZONG Tao, ZHANG Zhichao, et al. Optimization on inlet deflectors structural parameters of a natural draft counter-flow wet cooling tower [J]. Proceedings of the CSEE,

- 2013,33(11):30-38.)
- [4] 牛润萍,由世俊,陈其针,等.用于供冷的闭式冷却塔换热模型与性能分析化[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2007,23(3):453-456.
(NIU Runping, YOU Shijun, CHEN Qizhen, et al. Modeling and performance analysis of the closed cooling tower [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2007, 23(3):453-456.)
- [5] 宋嘉梁,阮圣奇,陈永东,等.基于神经网络模型的自然通风逆流湿式冷却塔的热力性能研究[J].流体机械,2019,47(3):79-83.
(SONG Jialiang, RUAN Shengqi, CHEN Yongdong, et al. Research on thermal performance of natural draft counterflow wet cooling tower based on artificial neural network [J]. Fluid machinery, 2019, 47(3):79-83.)
- [6] 李杨,魏星.薄膜式机械通风冷却塔的性能优化[J].流体机械,2010,38(10):61-64.
(LI Yang, WEI Xing. Performance optimization of mechanical draft cooling tower of film type [J]. Fluid machinery, 2010, 38(10):61-64.)
- [7] 徐菱虹,王凌云.集中空调冷却水系统的节能运行[J].暖通空调,2000,30(3):82-84.
(XU Linghong, WANG Lingyun. Energy-efficient operation of the cooling water circuit in central air-conditioning systems [J]. Heating ventilating and air conditioning, 2000, 30(3):82-84.)
- [8] 尹应德,张冷,兰丽,等.逆流式冷却塔的优化控制模式和节能分析[J].制冷与空调,2005(1):13-18.
(YIN Yingde, ZHANG Ling, LAN Li, et al. The Optimizing control mode and energy-conservation analysis of the counter-flow cooling towers [J]. Refrigeration and air conditioning, 2005(1):13-18.)
- [9] 邓杰文,何适,魏庆芃,等.公共建筑空调系统运行调试方法研究[J].暖通空调,2020,49(8):85-91.
(DENG Jiewen, HE Shi, WEI Qingpeng, et al. Research on commissioning method of air conditioning systems in public buildings [J]. Heating ventilating and air conditioning, 2020, 49(8):85-91.)
- [10] 张文斌,毛红艳,李建波,等.螺旋形喷嘴在循环水冷却塔布水器改造中的应用[J].石油化工设备技术,2008,29(4):10-12.
(ZHANG Wenbin, MAO Hongyan, LI Jianbo, et al. Application of spiral nozzle in the transformation of water distributor of circulating water cooling tower [J]. Petro-chemical equipment technology, 2008, 29(4):10-12.)
- [11] 郝功涛,姜佳旭,胡姐,等.大型自然通风冷却塔淋水噪声综合治理技术研究[J].华电技术,2018,40(4):9-12.
(HAO Gongtao, JIANG Jiaxu, HU Da, et al. Research on comprehensive control technology of water spraying noise of large natural draft cooling tower [J]. Huadian technology, 2018, 40(4):9-12.)
- [12] 刘官郡.加高型冷却塔替代标准型冷却塔[J].工业用水与废水,2006,37(增刊1):68-71.
(LIU Guanjun. Heightened cooling tower in place of conventional cooling tower [J]. Industrial water and wastewater, 2006, 37(S1):68-71.)
- [13] 徐驰.热电厂自然通风冷却塔的提效改造[J].节能,2015,34(12):29-33.
(XU Chi. Efficiency improvement and transformation of natural draft cooling tower in thermal power plant [J]. Energy conservation, 2015, 34(12):29-33.)
- [14] 宋一平.集中空调冷水系统全面优化运行研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.
(SONG Yiping. Research on the comprehensive optimization operation of central air conditioning water system [D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2022.)
- [15] 王天旭.基于实测的冷水机组及冷冻水泵运行优化研究[D].大连:大连理工大学,2018.
(WANG Tianxu. Research on the optimizing of the chiller and cooling water pumps based on real-time monitoring [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.)
- [16] 王亮,卢军,王曦,等.空调系统冷却塔优化运行方式研究[J].暖通空调,2011,41(7):141-144.
(WANG Liang, LU Jun, WANG Xi, et al. Optimal operation method of cooling towers of air conditioning system [J]. Heating ventilating and air conditioning, 2011, 41(7):141-144.)
- [17] 杨杰.风机系统的经济节能运行[J].流体机械,1999,27(11):41-42.
(YANG Jie. Energy-saving and economic operation of fan system [J]. Fluid machinery, 1999, 27(11):41-42.)
- [18] 许振茂.变频调速器在风机中的节能应用[J].风机技术,2003(2):44-46.
(XU Zhenmao. Application of converter speed governor on fan energy-saving [J]. Chinese journal of turbomachinery, 2003(2):44-46.)
(责任编辑:王国业 英文审校:唐玉兰)