

采暖通风与空调系统中冷却塔传热效率的回归模型

庄露萍¹, 陈曦^{1†}, 管晓宏^{1,2}

(1. 清华大学自动化系, 北京 100084; 2. 西安交通大学电子与信息工程学院, 西安 710049)

摘要: 优化采暖通风与空调(HVAC)系统的控制策略能够节能降耗,但是HVAC系统模型的高复杂度不利于在规定时间内实施对HVAC系统控制策略的优化.为降低模型复杂度,提出HVAC系统中冷却塔水侧传热效率的回归模型,并利用回归分析得到模型的系数.数值分析显示,冷却塔水侧传热效率的回归模型的计算时间大约是原始模型计算时间的1%,所得数值结果与原始模型的相对误差小于0.4%.

关键词: 空调系统; 冷却塔; 传热效率; 回归分析

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Regression model of heat exchange efficiency of cooling tower in an HVAC system

ZHUANG Lu-ping¹, CHEN Xi^{1†}, GUAN Xiao-hong^{1,2}

(1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Improving the control strategy of an heating, ventilation, and air-conditioning(HVAC) system can result in substantial energy saving. However, it is challenging to obtain the optimal control strategy of the HVAC system due to the model's complexity. In this paper, to reduce the complexity of an HVAC system's model, we propose the regression model of the heat exchange efficiency of the cooling tower and use regression analysis to obtain the coefficients. The proposed model avoids the iterative computing process and reduces the complexity of an HVAC system's model. Numerical results show that the proposed model takes only 1% computing time to get the value of heat exchange efficiency, and the relative deviations are less than 0.4%, compared with the original model.

Keywords: HVAC system; cooling tower; heat exchange efficiency; regression analysis

0 引言

建筑的耗能约占全世界总能耗的40%^[1].在建筑中,采暖通风与空调(HVAC)系统是主要的耗能设备之一.据统计,我国空调系统的能耗约占建筑总能耗的40%^[2],而在欧洲、南非及美国等地区,HVAC系统的能耗更是高达建筑总能耗的50%^[3-5].大量研究表明,提升HVAC系统的运行效率能够大大降低建筑能耗,因此,求取HVAC系统的最优运行策略有着至关重要的意义.

HVAC系统包含多种耦合的设备,且各个设备的模型中包含多个变量,因此HVAC系统的模型很复杂.在实际应用中,因模型过于复杂,很难在有限的时间内找到HVAC系统的最优控制策略.例如利用

内点法求解HVAC系统每小时的控制策略时,所需计算时间常常超过1小时,有的甚至达到1.5小时^[6],很难保证在1小时的运算时间内求得HVAC系统在下一小时的控制策略,无法实现优化HVAC系统运行状态的目标.为解决这一问题,本文提出HVAC系统中冷却塔水侧传热效率的回归模型,以避免冷却塔模型中迭代求解的运算过程,从而降低HVAC系统模型的复杂度.

冷却塔是HVAC系统中重要的组成部分.冷却塔中的空气与冷却水的热量传递是HVAC系统正常运行的主要环节.在冷却塔中,空气吸收热量,温度升高;冷却水释放热量,温度降低.从冷却塔中排出的相对低温的冷却水进入冷机进行冷却水的制冷循

收稿日期: 2017-05-24; 修回日期: 2017-11-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1301254); 国家重点研发计划项目(2016YFB0901902, 2017YFC0704100).

责任编辑: 刘民.

作者简介: 庄露萍(1990—),女,博士生,从事HVAC系统优化与控制的研究; 陈曦(1965—),女,副研究员,从事系统优化等研究.

†通讯作者. E-mail: bjchenxi@mail.tsinghua.edu.cn

环. 因冷却塔在 HVAC 系统中的重要性, 许多学者对冷却塔进行了研究. 一些学者主要针对不同的天气情况^[7-8], 包括温度和相对湿度^[9], 研究其对冷却塔性能的影响. Alavi 等^[10] 在侧风和无风的条件下, 研究了进入的水温和水流速度等因素对冷却塔的制冷效率和性能的影响. Smrekar 等^[11] 分析了流经冷却塔的冷却水与空气之间的关系及传热机制, 寻找冷却水和空气的最佳流量比以优化冷却塔的制冷机制. Hosoz 等^[12] 基于反向传播算法, 考虑了冷却塔的热损失率和温度等因素的影响, 利用神经网络建立冷却塔的模型以预测其性能^[12].

针对冷却塔的热工计算, 国内外研究者提出了很多计算方法, 其中应用最广泛的一种方法是效能-传热单元数法, 简称 ε -NTU 法. 该方法利用推导对数平均温差时得出的无因次化方程建立一种换热器热工计算方法, 常用于冷却塔制冷性能的计算. Hasan^[13] 基于 ε -NTU 方法建立了冷却塔制冷器的分析模型, 并通过预制冷达到提升冷却塔制冷效率的目的. Lebrun 等^[14] 利用 ε -NTU 方法对冷却塔和冷凝器进行建模, 研究了利用湿球温度作为驱动力的冷却塔的制冷性能. 利用 ε -NTU 方法对冷却塔性能进行分析时, 需要计算空气焓值、热容比和传热单元数等多个中间变量, 且计算过程需要迭代运算求取收敛的解, 计算过程复杂且计算效率低.

本文首先介绍求解冷却塔稳定运行状态的 ε -NTU 法, 分析冷却塔的传热原理, 并在此基础上提出冷却塔水侧传热效率的回归模型. 数值分析结果显示, 以 ε -NTU 的原始模型的结果为基准, 利用回归模型得到的冷却塔水侧传热效率的数值结果误差足够小. 回归模型的计算过程避免迭代运算, 能够节省大量计算时间.

1 冷却塔水侧传热效率的原始模型

1.1 模型介绍

利用 ε -NTU 法求解冷却塔的稳定运行状态涉及到以下 3 个无因次量^[15]:

1) 热容比 C_r

$$C_r = \frac{\min(G_{\text{air}}C_{\text{awb}}, G_{\text{cw}}C_w)}{\max(G_{\text{air}}C_{\text{awb}}, G_{\text{cw}}C_w)}. \quad (1)$$

其中: G_{air} 和 G_{cw} 分别为流经冷却塔的空气和冷却水的流量; C_w 为流经冷却塔的冷却水的有效比热; C_{awb} 为流经冷却塔的湿空气的有效比热, 具体为

$$C_{\text{awb}} = \frac{h_{\text{awb,out}} - h_{\text{awb,in}}}{T_{\text{awb,out}} - T_{\text{awb,in}}}. \quad (2)$$

$T_{\text{awb,in}}$ 和 $T_{\text{awb,out}}$ 分别为流入和流出冷却塔的空气的湿球温度, $h_{\text{awb,in}}$ 和 $h_{\text{awb,out}}$ 分别为流入和流出冷

却塔的空气的焓值. 空气的湿球温度和焓值均由温度和含湿量共同决定.

2) 传热单元数 NTU

$$\text{NTU} = \frac{\text{UA} \cdot C_{\text{awb}}}{C_{\text{air}} \cdot \max(G_{\text{air}}C_{\text{awb}}, G_{\text{cw}}C_w)}. \quad (3)$$

其中 UA 为传热系数.

3) 空气侧热交换效率 e

$$e = \frac{1 - \exp[-\text{NTU}(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-\text{NTU}(1 - C_r)]}. \quad (4)$$

根据冷却塔的工作原理, 冷却塔水侧传热效率定义为冷却水的实际换热量与最大换热量的比值, 即

$$\eta = \frac{T_{\text{cw,in}} - T_{\text{cw,out}}}{T_{\text{cw,in}} - T_{\text{awb,in}}}. \quad (5)$$

其中: η 为冷却塔水侧的传热效率, $T_{\text{cw,in}}$ 和 $T_{\text{cw,out}}$ 分别为流入和流出冷却塔的冷却水的温度.

冷却塔的制冷量 Q 为

$$Q = e \cdot \min(G_{\text{air}}C_{\text{awb}}, G_{\text{cw}}C_w) \cdot (T_{\text{cw,in}} - T_{\text{awb,in}}). \quad (6)$$

1.2 求解过程

实际应用中, 先给定流出冷却塔的空气温度, 根据流入冷却塔的冷却水和空气的温度及流量等信息, 计算出冷却塔的有效比热、传热单元数和制冷量等数值; 根据制冷量与流入冷却塔的空气温度, 重新计

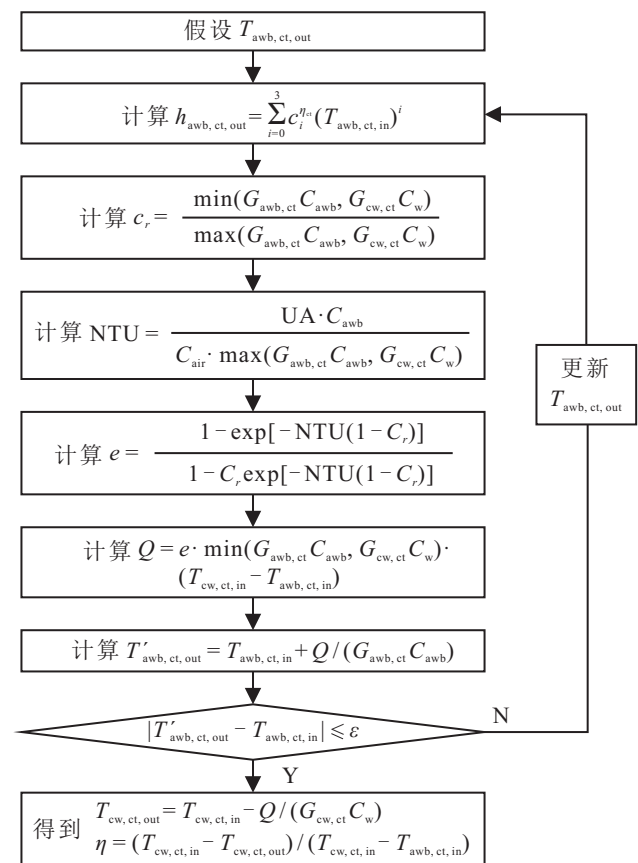


图1 冷却塔水侧传热效率计算过程

算流出冷却塔的空气温度. 如果流出冷却塔的空气温度的给定值与计算值之差小于一个足够小的数, 则输出当前的温度给定值作为流出冷却塔的空气温度的结果; 反之, 则根据计算值和给定值, 更新流出冷却塔的空气温度的数值, 再进行下一轮的迭代计算. 具体计算流程如图 1 所示.

2 冷却塔水侧传热效率的回归模型

2.1 一般化模型

在工程上, 直接接触式冷却塔的热力学计算一直使用薄膜理论, 其传热原理如图 2 所示.

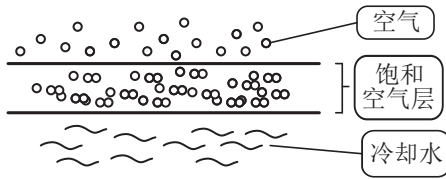


图 2 冷却塔传热原理

在冷却塔中, 当进入冷却塔的空气与流经其中的冷却水直接接触时, 根据两者的温度差异, 可能只进行显热交换, 也可能显热交换和潜热交换同时进行^[16].

由热质交换理论可知, 当冷却塔中的空气与冷却水接触时, 由于水分子的不规则运动, 在空气与冷却水的接触面形成一个饱和空气层, 该饱和空气层的温度与接触面冷却水的温度相等.

接触层与主体空气之间的温度差是空气与水之间进行显热交换的动力. 显热交换总量还依赖于单位时间内相互接触的空气量与水量, 即空气与冷却水的流量.

主体空气与接触层饱和空气的水蒸气分压力差, 是空气与水之间潜热交换的动力. 主体空气的水蒸气分压力主要由其含湿量决定, 而接触层的饱和空气的水蒸气分压力取决于其温度 (即冷却水的温度). 潜热交换总量同样依赖于空气与冷却水的流量.

从空气侧看, 空气的温度和含湿量都对总热交换 (包括显热交换和潜热交换) 有一定的影响. 为降低模型的复杂度, 在工程上, 常采用空气的湿球温度 (由空气的温度和含湿量直接决定) 代替温度和含湿量, 作为空气与水总热交换量的影响因素.

由直接接触式冷却塔的传热原理可知, 冷却塔的传热过程与流经冷却塔的冷却水的温度和流量以及流经冷却塔的空气的湿球温度和流量有关. 因此, 基于这些因素, 得到冷却塔水侧传热效率的一般化模型如下:

$$\eta = \sum_{l=L_1}^{L_2} \sum_{k=K_1}^{K_2} \sum_{j=J_1}^{J_2} \sum_{i=I_1}^{I_2} b_{ijkl} (T_{awb,in})^i (T_{cw,in})^j (G_{air})^k (G_{cw})^l \quad (7)$$

其中: b_{ijkl} 为系数; I_1, J_1, K_1 和 L_1 分别为 $T_{awb,in}, T_{cw,in}, G_{air}$ 和 G_{cw} 的最低次数, 是不小于 -5 的负整数; I_2, J_2, K_2 和 L_2 分别为 $T_{awb,in}, T_{cw,in}, G_{air}$ 和 G_{cw} 的最高次数, 是不大于 5 的正整数. 数值 ± 5 参考第 1.1 节中各项的阶次确定.

2.2 回归模型

实际应用中, 冷却塔处于稳定运行状态时的各参数组合的种类较少, 很难得到在各种不同参数组合下冷却塔稳定运行时的实测数据. 在工程上, 广泛应用第 1.1 节的原始模型计算和预测冷却塔稳定运行时的各项数值 (包括冷却塔水侧传热效率), 因此, 利用原始模型的数据求取一般化模型各项的系数, 并比较回归分析模型与原始模型得到的数值结果.

经过计算发现, 在式 (7) 中各项的不同组合下, 误差都远远超出允许范围 (小于 0.005), 因此, 采用分区的方式进行回归分析, 具体过程如图 3 所示, 其中待评价区域可以是整个区域, 也可以是子区域. 首先, 对于整个区域, 根据式 (7) 选定 $T_{awb,in}, T_{cw,in}, G_{air}$ 和 G_{cw} 的组合方式及各项的最高、低次数, 得到冷却塔水侧传热效率的一种表达式, 在整个区域中求各项系数并计算误差. 根据误差的分布情况将整个区域分为若干子区域, 在每一个子区域中重新求各项系数和相应误差. 若某子区域中的最大误差在允许范围内, 则输出当前表达式作为该区域的冷却塔水侧传热效率的回归模型. 反之, 若误差超出允许范围, 且该区域较大, 则根据误差分布情况, 将该区域继续进行分区, 并重新计算当前表达式的各项系数和误差, 再进行相应的分析和判断; 如果区域过小, 则将其与回归模型尚未确定的相邻区域进行整合, 得到新的待评价区域, 同时改变 $T_{awb,in}, T_{cw,in}, G_{air}$ 和 G_{cw} 的组合方式, 再按照对整个区域的处理方式, 进行回归分析. 重复这个过程, 直到得到所有区域中的冷却塔水侧传热效率的回归模型.

最终, 得到如下所示的冷却塔水侧传热效率的回归模型:

$$\eta = \sum_{i=0}^3 [a_{1,i} (T_{awb,in})^i + a_{2,i} (T_{cw,in} T_{awb,in})^i + a_{3,i} (G_{air}/G_{cw})^i + a_{4,i} (T_{cw,in} G_{air}/G_{cw})^i + a_{5,i} (T_{cw,in})^i + a_{6,i} (T_{awb,in} G_{air}/G_{cw})^i] \quad (8)$$

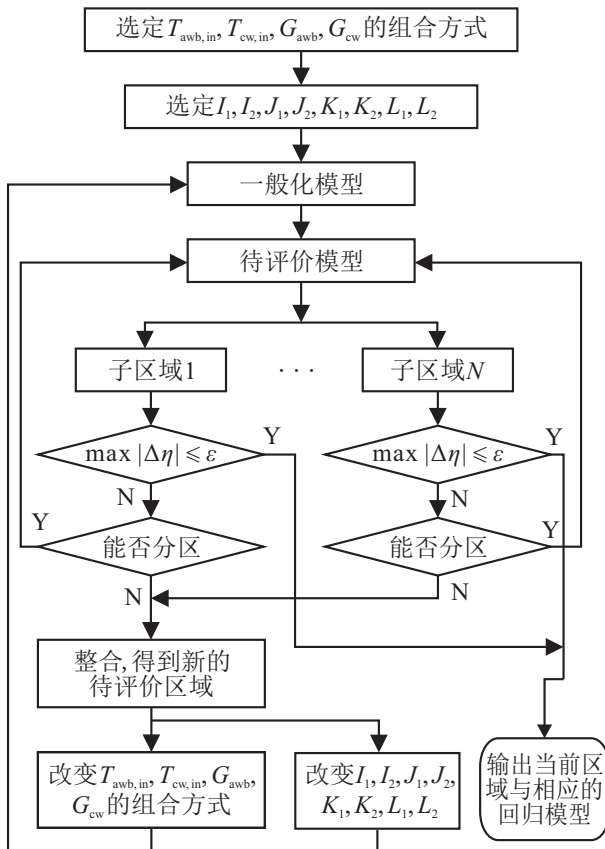


图3 回归模型分析过程

式(8)为1.1节所刻画的冷却塔水侧传热效率的回归模型,是它的一种近似.需要指出的是,在不同的误差范围或子区域划分下,可能会得到不同的回归模型.

3 算例分析

实际应用中,冷却塔处于稳定运行状态时的各参数组合的种类单一,很难得到在各种不同参数组合下冷却塔稳定运行时的实测数据,因此以工程上广泛应用的冷却塔原始模型^[15]得到的数据为基准,以流入空气的湿球温度5~36°C、流量37~95 kg/s、流入冷却水的温度25~40°C、流量1~30 kg/s为例,比较回归模型和原始数据模型得到的冷却塔的水侧传热效率的数值,以表明所提出冷却塔水侧传热效率的回归模型性能.具体分区情况如表1所示,其中 $S_i (i = 1, 2, \dots, 26)$ 是每个子区域的编号.

对于每个子区域,利用该子区域中1/3的数据进行回归分析,得到该子区域冷却塔水侧传热效率的回归模型的各项系数,其余2/3的数据用以检测由相应的回归模型得到的冷却塔水侧传热效率数值的准确性.部分系数如表2所示.

表1 冷却塔水侧传热效率的分区

G_{air}/G_{cw}	$T_{awb}/^{\circ}C$						
	[5, 10]	(10, 15]	(15, 20]	(20, 25]	(25, 26]	(26, 30]	(30, 36]
(0, 3]	S_1	S_2	S_3	S_4		S_5	
(3, 5.5]	S_6	S_7	S_8	S_9		S_{10}	S_{11}
(5.5, 10.5]	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{15}		S_{16}	S_{17}
(10.5, 20]	S_{18}	S_{19}		S_{20}			S_{21}
(20, 30]				S_{22}			
(30, 45]				S_{23}			
(45, 60]				S_{24}			
(60, 75]				S_{25}			
(75, 100]				S_{26}			

表2 冷却塔水侧传热效率的拟合系数

系数	S_1	S_5	S_7	S_9
$a_{1,2}$	3.94e-5	-1.41e-4	-5.14e-5	-3.01e-4
$a_{4,2}$	-1.02e-7	2.02e-7	1.17e-7	5.06e-7
$a_{5,1}$	-1.08e-3	-1.96e-4	-1.38e-3	-1.16e-3
$a_{6,2}$	8.18e-5	-1.34e-4	-1.25e-5	-6.30e-5

为直观展现由原始数据模型和回归模型得到的冷却塔水侧传热效率的数值差别,图4展现了3

种不同情况下,由两种模型得到的数值结果的绝对误差.图4(a)中,流经冷却塔的冷却水流量固定为15 kg/s,流经冷却塔的空气流量固定为56.3 kg/s;图4(b)中,流经冷却塔的空气湿球温度固定为28°C,流量固定为56.3 kg/s;图4(c)中,流经冷却塔的冷却水温度固定为35°C,流量固定为15 kg/s.图4中,绝对误差的数值不超出[-0.001 5, 0.001 5]的范围,表明由回归模型得到的冷却塔水侧传热效率的数值足够接近由原始数据模型得到的结果,因此,冷却塔水侧传热效率的回归模型足够准确.

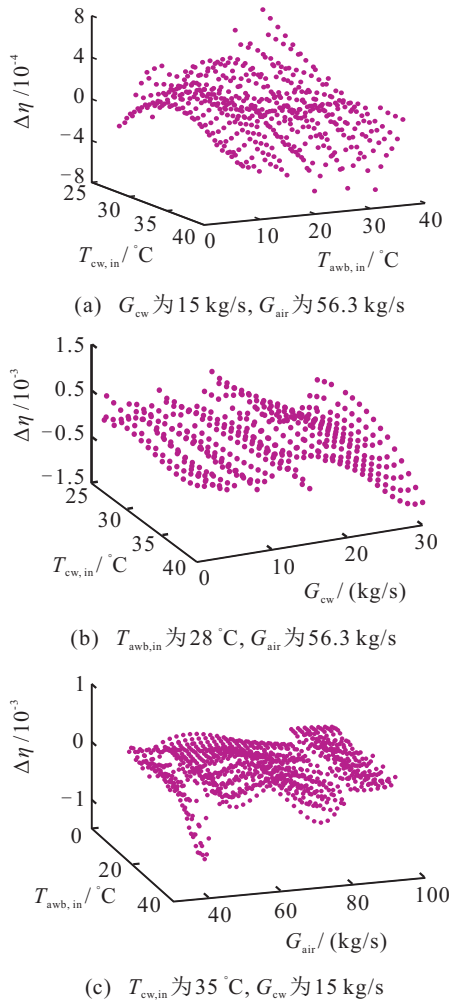


图4 冷却塔传热效率的数值结果

表3 冷却塔水侧传热效率的数值分析

分区号	R_{η}^2	$\max \Delta\eta $	$P_{ \Delta\eta >0.004}/\%$	$\max \Delta\eta/\eta /\%$	分区号	R_{η}^2	$\max \Delta\eta $	$P_{ \Delta\eta >0.004}/\%$	$\max \Delta\eta/\eta /\%$
S_1	1.0000	0.0014	0.0000	0.3126	S_{14}	0.9999	0.0011	0.0000	0.1135
S_2	1.0000	0.0012	0.0000	0.2532	S_{15}	0.9998	0.0016	0.0000	0.1569
S_3	1.0000	0.0025	0.0000	0.3918	S_{16}	0.9996	0.0013	0.0000	0.1280
S_4	1.0000	0.0026	0.0000	0.3683	S_{17}	0.9989	0.0009	0.0000	0.0947
S_5	0.9999	0.0048	0.0296	0.4054	S_{18}	0.9999	0.0011	0.0000	0.1102
S_6	1.0000	0.0007	0.0000	0.0849	S_{19}	0.9999	0.0006	0.0000	0.0643
S_7	1.0000	0.0008	0.0000	0.1022	S_{20}	0.9996	0.0012	0.0000	0.1242
S_8	1.0000	0.0017	0.0000	0.1812	S_{21}	0.9937	0.0010	0.0000	0.0961
S_9	1.0000	0.0017	0.0000	0.1786	S_{22}	0.9993	0.0015	0.0000	0.1498
S_{10}	0.9999	0.0019	0.0000	0.1953	S_{23}	0.9953	0.0013	0.0000	0.1293
S_{11}	0.9999	0.0020	0.0000	0.1990	S_{24}	0.9962	0.0006	0.0000	0.0562
S_{12}	1.0000	0.0009	0.0000	0.1034	S_{25}	0.9938	0.0004	0.0000	0.0389
S_{13}	1.0000	0.0010	0.0000	0.1012	S_{26}	0.9946	0.0006	0.0000	0.0573

为了说明回归模型的计算效率,运用 IntelCore TM2 P8600@2.4 GHz 的 Matlab 2012a 分别计算两种模型得到的冷却塔水侧传热效率. 在平均时间的计算过程中,随机选取 HVAC 系统仿真过程中出现的 500 种不同 $T_{awb,in}, T_{cw,in}, G_{air}, G_{cw}$ 组合,利用原始模型和得到的回归模型分别计算相对应的冷却塔水侧传热效率,并记录各自的计算时间,得到计算一次冷

进一步分析了两种模型得到的传热效率的数值结果,如表3所示. 在表3中, R_{η}^2 表示相关系数, $|\Delta\eta|$ 和 $|\Delta\eta/\eta|$ 表示由两种模型得到的冷却塔水侧传热效率数值之间的误差和相对误差. 假设 η 表示由原始数据模型得到的冷却塔水侧传热效率, η_s 表示由回归模型得到的冷却塔水侧传热效率,那么误差可以由 $|\Delta\eta| = |\eta_s - \eta|$ 求得,相对误差可以由 $|\Delta\eta/\eta| = |\eta_s - \eta|/\eta$ 求得. $P_{|\Delta\eta|>0.004}$ 表示每个子区域中,误差大于 0.004 的数值个数与整个子区域的数值个数的比值.

由表3可见,在 26 个子区域中,所有子区域的相关系数都大于 0.993 7,近似于 1,表明由回归分析得到的系数使得回归模型足够逼近原始数据模型. 同样可以看出,在 26 个子区域中,由两种模型得到的冷却塔水侧传热效率数值结果的最大误差小于 0.005,且每个子区域中,只有不超过 0.03% 的数据误差大于 0.004. 在 26 个子区域中,由两种模型得到的冷却塔水侧传热效率数值结果的最大相对误差小于 0.41%. 本文中 26 个子区域覆盖了冷却塔在夏季工作时会出现的绝大部分情况,未覆盖到的区域也可以使用所提出回归模型的分析过程得到满足相对误差小于 4% 的回归模型及相应系数. 由此可见,以原始数据模型为参考,回归模型得到的冷却塔水侧传热效率的数值足够准确.

却塔水侧传热效率所需的运算时间. 在这一计算过程中,不包括回归模型中参数确定这一过程. 若随机选取的 $T_{awb,in}, T_{cw,in}, G_{air}, G_{cw}$ 组合不在已知参数的 26 个区域内,则采用原始模型计算得到的冷却塔水侧传热效率.

表4列出了两种模型的平均运算时间. 利用原始数据模型,大约需要花费 0.02 s 才能计算得到一个冷

却塔水侧传热效率,而回归模型只需要0.000 15 s. 相比于原始数据模型,回归模型可以节约大约99%的运算时间.

表4 冷却塔传热效率的平均计算时间

模型	平均计算时间/s
回归模型	0.000 150
原始模型	0.019 084

利用类似方法,还可以得到湿球温度和风机盘管传热效率的回归模型. 将这3个回归模型用于实际HVAC系统的模型构建^[17-18],避免了迭代运算,降低了HVAC系统模型的复杂度,缩短了优化HVAC系统所需的计算时间. 相比于原始模型的常规控制策略,利用回归分析模型得到的HVAC系统的双目标优化控制策略和分散式控制策略分别可以节约40%和34%的能耗^[17-18].

4 结论

本文介绍了冷却塔的传热原理,在此基础上,构建了冷却塔水侧传热效率的回归模型. 与原始模型得到的数据相比,回归模型得到的数值结果足够精确,且所需的计算时间大幅度减少. 将回归模型应用于实际HVAC系统控制,缩短了优化HVAC系统运行状态的时间,降低了HVAC系统的运行能耗,为HVAC系统的优化控制提供了极大的方便.

参考文献(References)

- [1] Imbabi M S. Computer validation of scale model tests for building energy simulation[J]. *Int J of Energy Research*, 1990, 14(7): 727-736.
- [2] Sun B, Luh P B, Jia Q S, et al. Building energy management: Integrated control of active and passive heating, cooling, lighting, shading, and ventilation systems[J]. *IEEE Trans on Automation Science and Engineering*, 2013, 10(3): 588-602.
- [3] Ferreira P M, Silva S M, Ruano A E, et al. Neural network PMV estimation for model-based predictive control of HVAC systems[C]. *The 2012 Int Joint Conf on Neural Networks*. Brisbane: IEEE, 2012: 1-8.
- [4] Mathews E H, Botha C P, Arndt D C, et al. HVAC control strategies to enhance comfort and minimise energy usage[J]. *Energy and Buildings*, 2001, 33(8): 853-863.
- [5] Kusiak A, Tang F, Xu G. Multi-objective optimization of HVAC system with an evolutionary computation algorithm[J]. *Energy*, 2011, 36(5): 2440-2449.
- [6] Zhuang L, Chen X, Guan X. A decentralized ordinal optimization for energy saving of an HVAC system[C]. *American Control Conf(ACC)*. Boston: IEEE, 2016: 611-616.
- [7] Kröger D G. Air-cooled heat exchangers and cooling towers[M]. Tulsa: Pennwell Corporation, 2004: 1-55.
- [8] Fisenko S P, Petruichik A I, Solodukhin A D. Evaporative cooling of water in a natural draft cooling tower[J]. *Int J of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(23): 4683-4694.
- [9] Gao M, Shi Y, Wang N, et al. Artificial neural network model research on effects of cross-wind to performance parameters of wet cooling tower based on level Froude number[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 51(1): 1226-1234.
- [10] Alavi S R, Rahmati M. Experimental investigation on thermal performance of natural draft wet cooling towers employing an innovative wind-creator setup[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 122: 504-514.
- [11] Smrekar J, Oman J, Sirok B. Improving the efficiency of natural draft cooling towers[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(9): 1086-1100.
- [12] Hosoz M, Ertunc H M, Bulgurcu H. Performance prediction of a cooling tower using Artificial neural network[J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(4): 1349-1359.
- [13] Hasan A. Going below the wet-bulb temperature by indirect evaporative cooling: Analysis using a modified ϵ -NTU method[J]. *Applied Energy*, 2012, 89(1): 237-245.
- [14] Lebrun J, Silva C A, Trebilcock F, et al. Simplified models for direct and indirect contact cooling towers and evaporative condensers[J]. *Building Services Engineering Research and Technology*, 2004, 25(1): 25-31.
- [15] 连之伟, 张寅平, 陈宝明. 热质交换原理与设备[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 1-100. (Lian Z W, Zhang Y P, Chen B M. Principle and equipment of heat and mass exchange[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001: 1-100.)
- [16] 赵荣义, 范存养, 薛殿华, 等. 空气调节[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 4-20. (Zhao R Y, Fan C Y, Xue D H, et al. Air conditioning[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 4-20.)
- [17] Zhuang L P, Chen X, Guan X H. A bi-level optimization for an HVAC system[J]. *Cluster Computing*, DOI: 10.1007/s10586-017-1050-x.
- [18] 庄露萍, 杨卓, 陈曦, 等. 采暖通风与空调系统分散式节能优化研究[J]. *智慧电力*, 2017, 45(7): 31-36. (Zhuang L P, Yang Z, Chen X, et al. Decentralized optimization for energy conservation of HVAC system[J]. *Smart Power*, 2017, 45(7): 31-36.)

(责任编辑: 郑晓蕾)