文章编号: 1000-8608(2019)03-0244-07

# 考虑环境参数不确定性的闭式冷却塔随机模拟研究

刘 桦,朱其萍,谢晓翠,何 畅\*,张冰剑,潘 明,陈清林

(中山大学化学工程与技术学院广东省石化过程节能工程技术研究中心,广东广州 510275)

摘要:利用随机模拟的方法探讨了地理位置和季节性环境参数的变化对闭式冷却塔热效率 的潜在影响.首先,通过试验设计对不确定性随机变量进行量化和表征以确定合理的采样方 案.以北京和广州为例,统计了当地各季有代表性的环境温度和相对湿度数据,结合核密度估 计和皮尔逊积矩相关系数法来计算原始数据的累积概率分布函数以及相关系数矩阵,再利用 哈默斯利序列采样将随机变量离散化以确定样本方案.接下来,将生成的样本方案传递到闭 式冷却塔的过程模型中,使用 COMSOL 软件实现对其热质传递过程的三维严格模拟,并得 到采样空间内的热效率概率分布模型.随机模拟结果显示,使用现有确定性设计方法有较大 概率导致闭式冷却塔处于设计不足的状态,不同城市间环境参数不确定性的差异会对闭式冷 却塔热效率概率分布有较大影响,这表明需要对闭式冷却塔进行详细的柔性设计.

关键词:闭式冷却塔;随机模拟;不确定性;采样方案;CFD 模型 中图分类号:TQ021.3 **文献标识码:**A **doi**:10.7511/dllgxb201903004

#### 0 引 言

闭式冷却塔凭借其节水减排和清洁高效等优势,正被逐步应用于过程工业的循环水冷却系统中.闭式冷却塔主要利用喷淋水蒸发传热为盘管内循环水降温,其运行工况与外界环境条件,尤其是湿球温度紧密相关<sup>[1]</sup>.但是,我国各地气候状态差异明显,南北地区的表观温度、空气湿度、风速和降雨量等环境参数在地域和时间两个维度上均跨越较大,这对闭式冷却塔的优化设计提出了新的挑战.因此,在闭式冷却塔的优化设计提出了新的挑战.因此,在闭式冷却塔的优化设计提出了新的挑战.因此,在闭式冷却塔的设计和开发阶段,更应充分量化考虑气候环境条件的不确定性问题,以同时提高冷却过程的柔性和可靠性,避免出现过度设计或设计不足等问题.

数值模拟计算是获得冷却塔内部气液两相流体物理性质、流动特性以及传质传热过程模型最为重要的手段之一. Merkel<sup>[2]</sup>结合试验研究和数值模拟,开创性地提出了 Merkel模型,但由于做出了 Lewis 数恒定等多个理想假设,模型与实际结果仍有一定偏差. Mizushina 等<sup>[3]</sup>修正了 Merkel模

型,并提出两种传热模式的计算方法. Hasan 等<sup>[4]</sup> 研究了塔内液膜温度分布情况,并进一步比较了 装配光滑管和强化管对冷却塔热效率影响的差 别.尽管已有大量的研究案例,数值模拟计算受限 于计算能力和成本投入,往往只能采用一维计算 的简捷方法,且需要设置诸多假设条件,精度不 足;同时,冷却塔简捷模拟的传质传热系数仍需要 试验拟合得到,普适性较差.CFD(computational fluid dynamics)技术的广泛应用使闭式冷却塔的 严格计算成为可能. Riffat 等<sup>[5]</sup>利用离散相模型 (dispersed phase model)准确地模拟了管外喷淋 水膜与空气间的热质传递过程,但管内循环水温 在非设计条件下的模拟结果仍存在 2 ℃左右的误 差. Xie 等<sup>[6]</sup>研究了纳米流体对闭式冷却塔冷却 性能的强化效果,并借助 CFD 技术三维严格模拟 优化了喷淋水流量和纳米流体浓度等操作参数.

注意到,上述传统的闭式冷却塔建模方法均 是在确定的环境参数下进行,着重于实现准确且 严格的半经验模型,难以量化不确定性因素的潜

**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(21606261,51776228).

收稿日期: 2018-09-15; 修回日期: 2019-03-27.

作者简介: 刘 桦(1995-),男,硕士生,E-mail:liuh66@mail2.sysu.edu.cn;何 畅\*(1985-),男,博士,副教授,博士生导师,E-mail: hechang6@mail.sysu.edu.cn.

在影响.随机模拟技术的出现使得表征不确定性 参数范围,挖掘过程瓶颈成为可能.Domínguez-Muñoz 等<sup>[7]</sup>研究了供热通风与空气调节系统高 峰负荷在信息缺失、条件随机等固有缺陷下多种 不确定性因素的作用方式.Salazar 等<sup>[8]</sup>研究了煤 粉热电过程中,不确定性电站负载和空气条件对 耗水量、排放量和效率的影响,并进一步优化了发 电站功率性能<sup>[9]</sup>.

针对上述现状与问题,本文利用随机模拟方法,结合科学的统计试验设计和严格的三维 CFD 建模方法,研究包括环境温度和相对湿度在内的 随机参数不确定性对闭式冷却塔热效率的影响, 以期为循环水冷却系统的柔性设计和鲁棒优化研 究提供基础数据和模型参数.

#### 1 随机模拟

随机模拟方法的特点是结合统计学和过程系 统模型,能充分考虑实际运行可能遇到的风险和 不确定性因素,并对其潜在影响进行量化和评估. 如图1所示,本研究中随机模型构建包括以下5 个步骤<sup>[8]</sup>:(1)不确定性表征,对环境参数不确定 性问题进行分析量化;(2)样本生成,确定能代表 实际环境参数的样本方案;(3)模型建立,针对闭 式冷却塔传热传质过程的计算方法;(4)概率传 递,以样本方案依次运行数学模型;(5)结果分析.

#### 1.1 不确定性表征

利用科学合理的试验设计方法对不确定性参数进行量化表征是随机模拟最重要的步骤之一. 闭式冷却塔的热效率受环境影响很大<sup>[1]</sup>,特别是 环境温度 t<sub>amb</sub>和相对湿度 q.环境参数的概率分布 可从全国气象监测站气象数据中提取,收集全年 日均干球温度 t<sub>dry</sub>、露点温度 t<sub>dew</sub> 及压力 p 后,以 Buck 公式<sup>[10]</sup>分别计算两个温度下的水分分压 p<sub>w,i</sub>,并进一步得到相对湿度 q:

 $p_{w,i} = 1.0007 + 3.46 \times 10^{-6} p \times$ 

6. 112 
$$1\exp\left(\frac{17.502t_i}{240.97+t_i}\right)$$
;  $i = dry, dew$  (1)  
 $\alpha = t_{rr} dry / t_{rr}$  (2)

注意到,由于所收集的原始环境数据受全球 气候循环等多种因素协同影响,各个参数自身存 在某种分布的同时,参数之间可能存在潜在的相 互联系,因此,本文依次利用核密度估计(kernel density estimation,KDE)和皮尔逊积矩相关系数 (Pearson product-moment correlation coefficient) 计算原始数据的累积概率分布函数(cumulative distribution function,CDF)和相关系数矩阵  $M_0$ , 用于生成能代表原始数据的样本方案.





Fig. 1 Framework of stochastic modeling

#### 1.2 样本生成

图 2 比较了 4 种采样方法,分别是蒙特卡罗 采样(Monte Carlo sampling, MCS)、拉丁超立方 采样(Latin hypercube sampling,LHS)、Sobol 序 列采样(Sobol sequence sampling, S3S)、哈默斯 利序列采样(Hammersley sequence sampling, HSS). 由图可见, 传统的伪随机数方法, 包括 MCS和LHS,生成的样本点分布不均,容易出现 点积聚现象.这些重复计算不仅浪费了计算资源, 而且需要更多的样本方案来弥补采样空隙模拟数 据的缺失,因此不适用于计算成本较大的 CFD 模 拟.本文选择的 HSS 是一种高效的低差异性样本 确定方法,与 S3S 及伪随机数方法相比,能在多 维变量空间内生成更加均匀的样本点集,并显著 提升收敛效率[11]. 均匀样本方案 X。先通过 HSS 在多维变量空间内生成,将其输入各参数的 CDF 反函数中,获得与原始数据概率分布相符的样本 空间 X<sub>1</sub>. 之后利用 Iman 等<sup>[12]</sup>的方法调整新点集 的相关系数,对相关系数矩阵  $M_0$  做 Cholesky 分 数矩阵  $M^*$  与  $M_0$  近似的样本点集  $X^*$ . 最后,将  $X^*$  输入模拟过程,即可得到输出参数的概率分 布.



图 2 100 个样本容量下单位方形中采样结果 Fig. 2 Generation of 100 sample points on a unit square

# 2 闭式冷却塔过程三维模型建立

#### 2.1 理论分析

如图 3 所示,闭式冷却塔的工质包括喷淋水、 循环水和空气.喷淋水自塔顶喷淋装置洒下,在盘 管表面形成稳定的液膜并补充蒸发水分;塔顶风 机抽风加速液膜的蒸发,为盘管内的循环水降温. 管内循环水到空气的传热过程(见图 4)包括以下 几个部分:循环水换热量 Q<sub>ew</sub>、液膜换热量 Q<sub>sw</sub>及 湿空气换热量 Q<sub>a</sub>,它们满足能量守恒:



$$\mathrm{d}Q_{\mathrm{cw}} + \mathrm{d}Q_{\mathrm{sw}} + \mathrm{d}Q_{\mathrm{a}} = 0 \tag{3}$$





图 4 闭式冷却塔换热管控制体

Fig. 4 The control volume of coil in closed cooling tower

假设循环水流量为 m<sub>cw</sub>,入口温度为 t<sub>cw1</sub>,进 入盘管并与管外温度为 t<sub>sw</sub>的喷淋水液膜换热后, 以出口温度 t<sub>cw2</sub>流出冷却塔.循环水热损失为

 $dQ_{cw} = m_{cw}c_{p,w}dt_{cw} = -U_o(t_{cw} - t_{sw})dA$  (4) 其中  $c_{p,w}$ 为水的比定压热容, $U_o$ 为基于外管壁的 总传热系数,A为外管面积.

实际运行中,在塔顶收水器辅助下,喷淋水实际质量损失在1%~3%,基本可忽略不计.因此喷淋水流量 m...下的液膜换热量可以写成

$$\mathrm{d}Q_{\mathrm{sw}} = m_{\mathrm{sw}}c_{h,\mathrm{w}}\,\mathrm{d}t_{\mathrm{sw}} \tag{5}$$

湿空气与液膜的换热量 Q<sub>a</sub> 可分为温变换热量 Q<sub>a</sub>和相变换热量 Q<sub>l</sub>:

$$\mathrm{d}Q_{\mathrm{a}} = m_{\mathrm{a}} \mathrm{d}h_{\mathrm{a}} = \mathrm{d}Q_{\mathrm{sh}} + \mathrm{d}Q_{\mathrm{l}} \tag{6}$$

湿空气焓值可表示为

$$h_{\rm a} = c_{p,{\rm a}} t_{\rm a} + h_{\rm fg} \omega \tag{7}$$

其中,*c<sub>p</sub>*,<sub>a</sub>为湿空气比定压热容,通常是常数;*h*<sub>fg</sub>为 蒸发热;ω为湿空气含湿量.

至此,式(3)可表示为

$$m_{cw}c_{p,w}dt_{cw}+m_{sw}c_{p,w}dt_{sw}+m_{a}dh_{a}=0$$
 (8)  
设喷淋水蒸发量为 $m_{e}$ ,基于质量守恒有

$$m_e = m_a d\omega = k_m (\omega'_{sw} - \omega) dA \qquad (9)$$

其中  $k_{\rm m}$  为传质系数, $\omega'_{\rm sw}$ 为饱和空气湿度.

#### 2.2 数学模型

COMSOL软件适用于多物理场耦合模拟,被 广泛用于流体力学、结构力学等领域.本文以其为 工具,模拟闭式冷却塔内复杂的三维传热传质耦 合过程,由于 x 轴方向各个盘管之间流动状态非 常相似,故以管垂直截面处作为模型对称面,达到 简化模型的目的,所建模型如图 5 所示.假设管内 外为不可压缩流体,管壁无滑移.利用 k-ε 模型计 算湍流流动状态,对应的控制方程如下:

$$\rho \boldsymbol{u} \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{k}} \right) \nabla k \right) + P_{k} - \rho \varepsilon$$

$$P_{k} = \mu_{t} \left( \nabla \boldsymbol{u} : \left( \nabla \boldsymbol{u} + \left( \nabla \boldsymbol{u} \right)^{\mathrm{T}} \right) \right)$$

$$\rho \boldsymbol{u} \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_{k} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^{2}}{k}$$
(10)

其中μ,为湍流动力黏度:

$$\mu_{t} = \rho C_{\mu} \frac{k^{2}}{\epsilon} \tag{11}$$





当换热管表面被液膜均匀覆盖,液膜蒸发,与 流动的空气存在质量传递.为了计算气相质量分 数场,需要求解气相组分传输方程:

$$M_{v} \frac{\partial c_{v}}{\partial t} + M_{v} \boldsymbol{u} \cdot \nabla c_{v} + \nabla \cdot \boldsymbol{g} = 0 \qquad (12)$$

 $\boldsymbol{g} = -\boldsymbol{M}_{\mathrm{v}}(\boldsymbol{D} + \boldsymbol{D}_{\mathrm{t}}) \nabla \boldsymbol{c}_{\mathrm{v}} \tag{13}$ 

$$c_{\rm v} = \varphi c_{\rm sat} \tag{14}$$

其中 $M_v$ 为水蒸气相对分子质量, $\varphi$ 为相对湿度,  $c_{sat}$ 为饱和气相浓度,g为潮湿水分扩散量,D为空 气中蒸汽扩散系数,湍流扩散系数 $D_t$ 与湍流运 动黏度 $\nu_t$ 和湍流 Schmidt 数 $Sc_t$ 相关:

$$D_{t} = \frac{\nu_{t}}{Sc_{t}} \tag{15}$$

为简化模型,取 Sc<sub>t</sub>=0.71.

### 3 结果与讨论

本研究所涉及的闭式冷却塔物理模型使用 COMSOL Multiphysics 5.3a 进行建立及计算, 在 Matlab 2017b 中完成随机过程的试验设计数 据统计和采样分析,计算过程运行于 Dell Power Edge R630 服务器,配置如下: Intel Xeon E5-2609 v4 CPU @1.70 GHz,64 GB RAM.

#### 3.1 物理模型计算设置及验证

本工作主要利用 Hasan 等<sup>[4]</sup>提供的试验数 据作为 CFD 模型参数输入来源,管束由 19 根管 径为 10 mm 的盘管组成,设计负荷 10 kW,名义 操作参数如下:空气入口流量  $m_a$ =3.0 kg • s<sup>-1</sup>, 循环水入口流量  $m_{ew}$ =0.8 kg • s<sup>-1</sup>,喷淋水流量  $m_{sw}$ =1.37 g • s<sup>-1</sup>,环境露点温度  $t_{dew}$ =16 ℃,相 对湿度 φ=0.78.

以自由四面体网格构建模型主体,在管壁辅助添加边界层网格,先后以网格数1022226(精细)、439087(常规)和288896(粗糙)计算.如图6 所示,3种不同网格规模下的模拟误差均在3%以内,说明该模型参数和模拟结果非常有效.为了在保持精度的同时尽量减少计算量,本研究基于常规网格规模439087进行后续计算.





图 7 展示了闭式冷却塔模型主要运行结果. 从空气侧露点温度和相对湿度云图中可以看出, 湿空气从喷洒在管壁上的均匀液膜中逐级吸收水 分,相对湿度沿 z 轴方向逐渐增加;同时,湿度场 与速度场分布规律基本匹配.这首先说明湿空气 水分扩散主要由速度控制,受温度梯度影响不大; 其次,管内循环水侧温度逐级下降,而管外干球温 度变化不大,证明盘管内循环水热量主要由喷淋 水液膜蒸发吸收,与文献[4]中相变换热量远大于 温变换热量的结果一致.

#### 3.2 随机模拟

本工作从国家气象信息中心(CMDC)<sup>[13]</sup>及 美国国家海洋和大气管理局(NOAA)<sup>[14]</sup>获取到 北京、广州两座城市在 2015—2017 年日均气象统 计数据,经初步处理后,得到如图 8 所示的相对湿 度概率分布标准化直方图.注意到,图中各个季节 相对湿度的标准偏差多在 10%以上,于较广范围 内分布,而不是局限于某一窄区间内.

纵向比较不同季节相对湿度的分布规律,春、 冬两季的湿度分布更为集中,比夏、秋两季更为干燥.以北京为例,春季相对湿度标准偏差比夏季低 6%,春季相对湿度期望值比夏季低 0.21.虽然 夏、秋两季分布模式非常类似,但是,夏季的相对



图 7 闭式冷却塔模拟结果 Fig. 7 Simulation results of closed cooling tower





湿度标准偏差高于秋季 4%,相对湿度期望值亦 比秋季低 0.05,意味着夏季的相对湿度分布更为 均匀.由于夏季温度相对秋季高,在同样的空气含 水量下,更高的饱和湿度使得相对湿度更低;另外 夏季雨水丰厚,延长了高湿度天气的时间.以上两 点是引起夏、秋两季概率分布差异的主要原因.

通过横向比较两座城市各个季节的相对湿度 概率分布可以看到,广州的相对湿度概率分布重 心较北京更为靠右,相对湿度的期望值高出 0.12~0.22.这主要是因为,广州处于南亚热带季 风气候区,比北京的温带季风气候区温度更高,湿 度更大.我国跨越多个气候区域,环境参数分布规 律在时间和地域两个维度的变化对闭式冷却塔设 计提出较高要求,在设计前统计当地气候规律才 能设计出全年有效运行的闭式冷却塔.

气候条件的南北差异直接导致两座城市环境 参数分布概率的不同,而环境参数又进一步决定 着进料空气的状态和性质.由于南北两座城市的 春、冬两季温度较低,甚至需要以干塔模式运行来 避免结冰的情况,本工作只对夏、秋两季不确定性 变量(温度和相对湿度)进行研究分析.在样本容 量为 200 前提下,将两座城市的样本点集逐一输 入 COMSOL模型中,操作参数及设计变量沿用 3.1节中已验证过的试验条件,以闭式冷却塔热 效率 η 作为目标输出值.该研究目标与循环水进 出口温度及露点温度相关,计算公式如下:

 $\eta = (t_{\rm cw1} - t_{\rm cw2}) / (t_{\rm cw1} - t_{\rm dew})$ (16)

图 9 展示了闭式冷却塔热效率在环境参数概 率分布下的随机模拟结果.与相对湿度概率分布 类似,热效率的分布同样伴随着长尾现象,可注意 到各个季节热效率概率波峰均出现在原始设计条 件热效率的左侧,说明多于 50%的不确定性样本 方案正以低于设计能力的工作状态运行.在实际 运行中,这类设计不足会使得闭式冷却塔冷却能 力无法满足公用工程的冷却需求,形成巨大隐患. 这间接反映出确定性的设计方法缺乏对环境变化 影响的充分考虑,无法满足实际需求或导致较大 的投资浪费.







通过纵向对比两个季节的闭式冷却塔热效率 概率分布,可注意到夏季的分布趋势较秋季向右 移动5%左右,以高效率运行的概率更大.从前文 的分析中可知,由于低湿度空气下塔的运行热效 率更高,同时闭式冷却塔于低湿度环境的运行时 间在夏季更长,因此出现了概率分布在两个季节 间的偏移. 通过横向比较两座城市在各个季节的 热效率概率分布可以看到,闭式冷却塔在北京以 高效率运行的时间更长,其热效率期望值较广州 高出4%左右.平均环境参数下,北京夏季热效率 高出广州夏季 6%. 这说明高温高湿的气候状况 不适合闭式冷却塔的高效运行,有必要针对南方 环境增加设计裕量.这也证明了柔性设计可行域 顶点位置在不同城市的环境参数分布下出现位 移,将在下一步工作中继续研究环境参数对闭式 冷却塔设计柔性指数的影响,并进一步针对闭式 冷却塔及循环水系统进行柔性优化设计.

## 4 结 论

(1)有别于确定性设计方法,随机模拟方法能 有效反映闭式冷却塔在实际中的运行工况,量化 不同效率下的运行时间,并为下一步循环水系统 柔性设计提供基础数据.

(2)各个季节之间的相对湿度概率分布差异显著,夏季的低湿度时间更长,闭式冷却塔热效率期望值高出秋季5%左右.

(3)北京比广州更适合在该操作条件下运行, 热效率期望值比广州高4%左右.闭式冷却塔在 南方地区需要更大的设计裕量,以避免出现设计 不足的问题.

# 参考文献:

[1] 章立新,陈岩永,沈 艳,等. 湿球温度与闭式冷却 塔蒸发冷却能力关系的研究 [J]. 工业用水与废 水,2011,42(2):65-68.

ZHANG Lixin, CHEN Yanyong, SHEN Yan, et al. Study on relationship between wet bulb temperature and evaporative cooling capacity of closed circuit cooling tower [J]. Industrial Water & Wastewater, 2011, 42(2):65-68. (in Chinese)

- [2] MERKEL F. Verdunstungskühlung [M] // VDI Forschungsarbeiten Heft 275. Berlin: VDI-Verlag, 1925.
- [3] MIZUSHINA T, ITO R, MIYASHITA H. Characteristics and methods of thermal design of evaporative coolers [J]. International Chemical Engineering, 1968, 8(3):532-538.
- [4] HASAN A, SIRÉN K. Theoretical and computational analysis of closed wet cooling towers and its applications in cooling of buildings [J].
   Energy and Buildings, 2002, 34(5):477-486.
- [5] RIFFAT S, OLIVEIRA A, FACÃO J, et al. Thermal performance of a closed wet cooling tower for chilled ceilings: measurement and CFD simulation [J]. International Journal of Energy Research, 2000, 24(13):1171-1179.
- [6] XIE Xiaocui, ZHANG Yi, HE Chang, et al. Bench-scale experimental study on the heat transfer intensification of a closed wet cooling tower using aluminum oxide nanofluids [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2017, 56 (20): 6022-6034.
- [7] DOMÍNGUEZ-MUÑOZ F, CEJUDO-LÓPEZ J M,

CARRILLO-ANDRÉS A. Uncertainty in peak cooling load calculations [J]. Energy and Buildings, 2010, **42**(7):1010-1018.

- [8] SALAZAR J M, DIWEKAR U M, ZITNEY S E. Stochastic simulation of pulverized coal (PC) processes [J]. Energy & Fuels, 2010, 24(9):4961-4970.
- [9] SALAZAR J M, DIWEKAR U, CONSTANTINESCU E, et al. Stochastic optimization approach to water management in cooling-constrained power plants [J]. Applied Energy, 2013, 112:12-22.
- [10] BUCK A L. New equations for computing vapor pressure and enhancement factor [J]. Journal of Applied Meteorology, 1981, 20(12):1527-1532.
- [11] KALAGNANAM J R, DIWEKAR U M. An

efficient sampling technique for off-line quality control [J]. Technometrics, 1997, **39**(3):308-319.

- [12] IMAN R L, CONOVER W J. A distribution-free approach to inducing rank correlation among input variables [ J ]. Communications in Statistics-Simulation and Computation, 1982, 11(3):311-334.
- [13] 国家气象信息中心.中国地面气象站逐小时观测资料 [DB/OL]. [2018-04-16]. http://data.cma.cn/site/index.html.
  National Meteorological Information Center. Hourly data from surface meteorological stations in China [DB/OL]. [2018-04-16]. http://data.cma.cn/site/index.html. (in Chinese)
- [14] National Oceanic and Atmospheric Administration. Global Summary of the Day [DB/OL]. [2018-04-16]. http://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/.

# Study of stochastic modeling of closed cooling tower considering uncertainty of ambient parameters

LIU Hua, ZHU Qiping, XIE Xiaocui, HE Chang<sup>\*</sup>, ZHANG Bingjian, PAN Ming, CHEN Qinglin

(Guangdong Engineering Center for Petrochemical Energy Conservation, School of Chemical Engineering and Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The implying impacts of plant locations and season-related environmental parameters on the thermal efficiency of a closed cooling tower are systematically investigated using stochastic modeling. The first step is experimental design in which the uncertain random variables are characterized and quantified to determine an appropriate sampling strategy. Taking Beijing and Guangzhou as examples, the representative statistics of ambient temperature and relative humidity in each season are collected and processed to determine their cumulative distribution functions and correlation coefficient matrix by combining kernel density estimation with Pearson product-moment correlation coefficient methods. Hammersley sequence sampling is used to discretize the random values and sample from these probability distributions that generates a set of scenarios. Thereafter, the sampled scenarios can be passed through the rigorous three-dimensional modeling of the closed cooling tower with COMSOL software so that the heat-mass transfer process can be simulated and the probability distribution of thermal efficiency in the input space can be obtained. The stochastic modeling results show that the existing deterministic design methods for the closed cooling tower have a relatively high probability of being under designed. The differences in environmental parameters between cities have a great influence on the probability distribution of thermal efficiency, which highlights the necessity of flexible design for the closed cooling tower.

Key words: closed cooling tower; stochastic modeling; uncertainty; sampling strategy; CFD model