

逆流式冷却塔的热力计算研究与红外热像温控系统设计

胡 扬, 陈 成, 华桑瞰, 邱亚峰

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 以冷却塔红外热像温控系统设计为目的, 根据水电混合动力冷却塔的结构特性, 基于冷却塔内热质交换平衡方程及 Merkel 数学模型建立水电混合动力冷却塔热力计算理论模型。运用红外热成像技术建立逆流式冷却塔热力性能监测模型, 完成冷却塔的温控系统设计, 并分析冷却塔温控系统温控精度误差产生原因。通过使用手持式红外测温仪进行现场实验, 验证了热力计算模型的准确性和其应用于冷却塔温控系统设计的可行性。

关键词: 红外热成像; 热力计算理论模型; 温控系统

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2021)03-0225-05

Thermal Calculation of Countercurrent Cooling Tower and Design of Infrared Thermal Image Temperature Control System

HU Yang, CHEN Cheng, HUA Sangtun, QIU Yafeng

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In this study, a temperature control system was designed based on an infrared thermal image of a hydroelectric hybrid cooling tower. A theoretical model of a cooling tower thermal calculation was deduced based on the structural characteristics of a hydroelectric hybrid cooling tower, as well as the balance equation of heat and mass exchange in a cooling tower and the Merkel mathematical model. A thermal performance monitoring model of a countercurrent cooling tower was first developed using infrared thermal imaging technology, and then the temperature control system for a cooling tower was designed. The causes of temperature control precision errors in the cooling tower temperature control system were analyzed. The accuracy of the thermal calculation model and the feasibility of using a hand-held infrared thermometer for designing the temperature control system of a cooling tower were verified by field experiments.

Key words: infrared thermal image, theoretical model of thermal calculation, temperature control system

0 引言

在化工、冶金、火电等工业项目以及一些制冷相关系统的民用项目中, 都存在着需要对项目内部温度进行控制的环节, 以保证项目内部的温度符合工业或民用需求。此外, 为了节约水资源, 项目中常采用循环水冷却系统作为制冷系统。这种循环冷却水系统在设计时于系统中换热器、管路、冷却塔布水器以及水泵处都留有 2%~5% 的压力余能(水头)^[1-2], 系统中这些压力余能累积就有相当可观的剩余能量。因此, 在此理论基础之上, 多位工程师成功研制出纯水动力冷却塔以达到节约能源的目的。

然而, 由于水动力冷却塔是通过循环水系统中的

余压进行工作所以相较于电动力冷却塔而言工作情况更复杂, 而且, 运行过程中水轮机整机性能也会一直受到富余水头变化情况的影响。因此为了避免由水循环系统中富余水头变化带来的冷却塔制冷功率变化, 可在纯水动力冷却塔的基础上进行结构优化, 设计出水电混合动力冷却塔, 同时基于热学成像原理设计出适用于水电混合动力冷却塔的温控系统, 以保证在任何情况下冷却塔都能有效地完成工作。在设计冷却塔时, 需构建冷却塔热力计算模型进行热力计算。本文将根据逆流式冷却塔热交换的基本原理以及水电混合动力冷却塔的结构特性, 基于 Merkel 方程构建数学模型进行热力计算。同时, 为了能够正确地识别冷却塔所在的瞬时工况并判断其是否需要接入电

收稿日期: 2020-05-06; 修订日期: 2020-12-31.

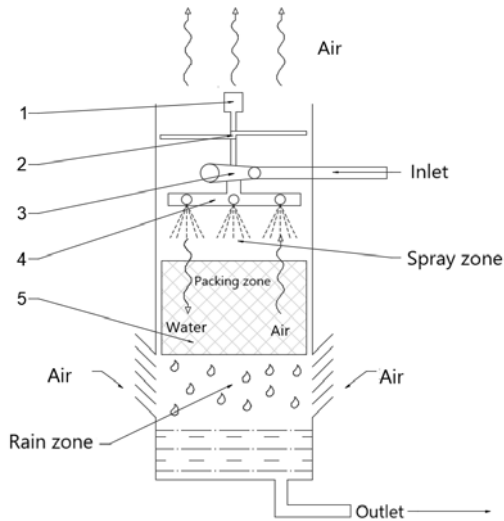
作者简介: 胡扬(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向是热学分析与红外技术。E-mail: wshy990@qq.com.

通信作者: 邱亚峰(1966-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光电子物理与技术。E-mail: njlghcn@sina.com.

机以进行动力补偿工作,使冷却塔能够完成冷却目标,本文也基于冷却塔的工作环境进行了用于冷却塔的红外热像温控系统设计。并通过设计的温控系统进行实验对所建立热学计算模型进行验证。

1 冷却塔热力计算模型

逆流式水电混合动力冷却塔内,温度较高的循环水在经由进水管导入水轮机做功后由尾水管导出至洒水机构,并经过喷头由上至下经过喷洒区、填料区以及雨区^[3]。其中,在喷洒区和雨区中,水以水滴的形式通过,在中间的薄膜式填料区内,水以水流的形式通过。冷却塔内空气的方向则与水流方向相反,自下而上,依次在雨区、填料区和喷洒区内部与水进行热质交换,整个热力交换过程如图1所示。



1 Motor; 2 Fan; 3 Water turbine; 4 Sprayer; 5 Packing
图1 冷却塔热力交换示意图

Fig.1 Heat exchange of cooling tower schematic diagram

为了便于计算,将图1中的冷却塔内部热力交换过程进行简化,建立冷却塔热力计算模型示意图,如图2所示。

如图2所示,循环水系统中冷却水自上而下运动,进口和出口处的水温和水质量流率分别为 t_w 、 $t_w - dt_w$ 和 m_w 、 $m_w - dm_w$,空气自下而上运动,空气焓、空气温度、空气含湿量以及空气质量流率在进口和出口处分别为 h 、 $h + dh$, t_a 、 $t_a + dt_a$, ϕ 、 $\phi + d\phi$ 以及 m_a 、 $m_a + d m_a$ 。

由此根据质量守恒定律,可基于循环水量的变化等于空气含湿量的变化的原理建立空气含湿量的变化方程:

$$d\phi = dm_w = \beta_{xv}(\phi'' - \phi)dV \quad (1)$$

式中: ϕ 为初始空气含湿量; ϕ'' 为饱和空气含湿量,

β_{xv} 为填料容积散质系数, $\text{kg}[\text{水}]/\text{m}^3$; dV 为填料微元体积, m^3 ; m_w 为水质量流率, kg/s 。

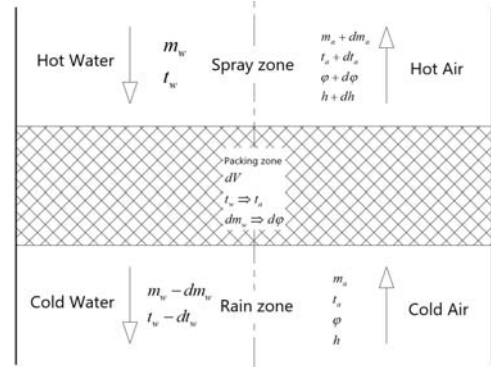


图2 冷却塔热力计算模型示意图

Fig.2 Thermal calculation model of cooling tower schematic diagram

在冷却塔内热质交换过程中,空气温度升高,湿度变大,依靠风机旋转产生的压力差驱动源源不断地流入塔内。由于冷却塔内水和空气之间相对温差较小,因此可将辐射传热忽略,两者之间只考虑接触传热和蒸发传热的存在,其传热过程主要发生于填料区,故可从填料体积微元 dV 内的质量和能量守恒方程建立冷却塔的基本热力计算理论模型^[4],即 Merkel 模型。

在冷却塔填料体积微元 dV 内,热量交换方程可分为由水汽化传递的热量方程(2)和循环水降温传递的热量方程(3)两部分:

$$dh_1 = \gamma\beta_{xv}(\phi'' - \phi)dV \quad (2)$$

$$dh_2 = \alpha(t - \theta)dV \quad (3)$$

式中: γ 为水的汽化热, $\text{kJ}/\text{kg}[\text{水}]$; α 为水的散热系数, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{C})$; t 为当前水温, $^{\circ}\text{C}$; θ 为当前湿空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

综上式(2)、式(3),可得出冷却塔内部交换的总热量为:

$$dh = \gamma\beta_{xv}(\phi'' - \phi)dV + \alpha(t - \theta)dV \quad (4)$$

同时,根据质量与能量守恒定律可得循环水在热交换过程中散发的总热量:

$$dh = Cp_w m_w dt = \gamma\beta_{xv}(\phi'' - \phi)dV + \alpha(t - \theta)dV \quad (5)$$

式中: Cp_w 为水的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{C})$; dt 为填料体积微元 dV 中循环水的温降, $^{\circ}\text{C}$ 。

式(5)为逆流式冷却塔内部热交换的基本方程。

在式(5)的基础上,根据 Merkel 方程热力计算模型^[5]引入焓概念的理论基础进行简化,获得 Merkel 数(冷却数) Me :

$$Me = \frac{\beta_{xv} V}{m_w} = \int_{t_2}^{t_1} \frac{Cp_w dt}{h'' - h} \quad (6)$$

式中： t_1 、 t_2 分别表示冷却塔内循环水的进塔和出塔水温； h'' 为水温 t ℃时饱和湿空气的比焓； h 为湿空气温度 θ ℃时饱和湿空气的比焓。

最终，根据上文建立的冷却塔热力计算模型可获得冷却塔出口空气温度 θ_2 ：

$$\theta_2 = t_1 - \frac{\int_{t_2}^{t_1} e^{Me/\lambda} dt + t_2 - \theta_1}{e^{Me/\lambda}} \quad (7)$$

式中： θ_1 为进口空气温度，℃； λ 为气水比。

2 运用红外热成像技术建立冷却塔温控系统

2.1 冷却塔温控系统的构建

红外热成像技术是将不可见的红外辐射转化为可见图像的技术，利用这一技术研制的装置统称为红外热成像装置或红外热像仪。红外热像仪的主要特点为：①为非接触式测量，能够检测运动目标、微小目标及带电目标温度^[6]；②测温范围广：高于-273.15℃绝对零度的物体都会向外产生红外辐射能，所以理论上讲，红外辐射测温是没有上限的，具有宽广的测温范围^[7]；③温度分辨率高，可准确区分较小温差，获取精确温度值；④数据输出方式主要为灰度或彩色云图，目标各点温度值读取方便；⑤可进行数据存储和计算机处理，便于自动化设计。

根据上文所建冷却塔热力计算模型，设计出如图3所示的逆流式冷却塔热力性能监测模型，将实时测量获得的环境参数、运行参数、电参数代入监测计算模型，求解方程结果，实现冷却塔工作状态的动态测量。

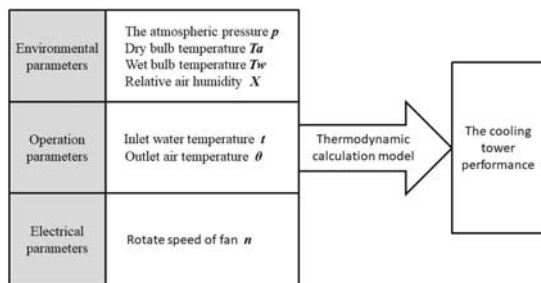


图3 逆流式冷却塔热力性能监测模型

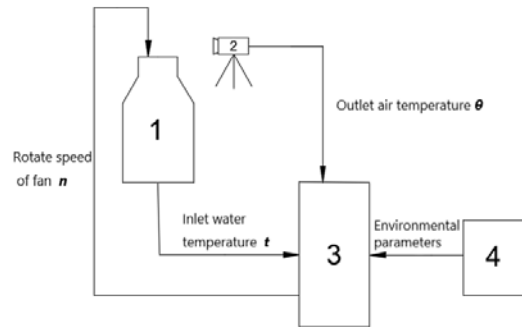
Fig.3 Thermal performance monitoring model of countercurrent cooling tower

在设计冷却塔温控系统时，可利用红外热成像技术进行冷却塔出口空气温度的采集，并将所获取数据反馈至控制器中进行分析，判断冷却塔所需风量是否满足需求，最终通过控制器对风机进行转速调节，形

成温控系统闭环，温控系统示意图如图4所示。

2.2 冷却塔温控系统温控精度误差分析

红外热成像仪通过光学系统采集被测物体产生的红外辐射，经传感器将光信号转换为电信号，再通过放大电路及补偿电路处理后，并最终由系统终端输出结果，其系统结构如图5所示。



1 The cooling tower; 2 Thermal infrared imager; 3 The controller; 4 Environmental parameter sensor

图4 冷却塔温控系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of temperature control system of cooling tower

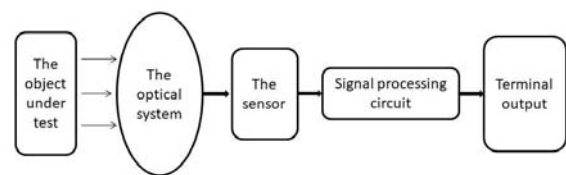


图5 红外热成像仪系统结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of infrared thermal imaging system

由于红外热成像仪为非接触式测量仪器，其测量精度较低，根据其技术原理及系统结构可以推断出，红外热成像仪的测量误差主要为光学系统造成的误差。光学系统误差产生的因素较复杂：①发射率，被测物体的材料形状、表面粗糙度及凹凸度均可影响物体的发射率，而红外热成像仪能从物体上接受的辐射能量大小与其发射率成正比，因此，当红外热成像仪对形状怪异以及表面质量较差的物体进行测温时测量精度较低，测量误差较大。②被测物体尺寸，当被测物体小于等于红外热成像仪的测温视场时，仪器会受到测量区域以外的环境影响，从而产生测量误差。③被测物体与红外成像仪之间的距离，当热成像仪与被测物体之间的距离过大时，热成像仪的分辨率越低，测量精度越差。④环境因素，由于红外热成像仪时非接触式测量，因此被测物体与热成像仪之间存在其它物质，这些物质不仅会和被测物体产生热交换，也会吸收被测物体产生的红外线辐射能量并将其转变成其它形式的能量，从而产生测量误差。

综上所述因素所产生的红外热成像仪中光学系统的测量误差最终会经过传感器变为电信号后，并通过热成像仪内部的信号处理电路进行信号处理后由终端输出至冷却塔温控系统中的控制器中影响整个温控系统的温控精度。

由图6可以得知，由红外热成像仪的终端输出的出口空气温度是冷却塔温控系统运行的重要依据之一，因此红外热成像仪的测量精度误差是影响冷却塔温控系统精度的重要原因。相较之下，温控系统中的其它传感器均为接触式传感器，测量精度高，对温控系统的温控精度误差影响小。最终，根据红外热成像仪测量精度 F_1 、出口水温温度传感器测量精度 F_2 、环境参数传感器测量精度 F_3 以及安全系数 S 设定冷却塔温控系统温控精度 F ：

$$F = \{1 - [(1 - F_1) \times (1 - F_2) \times (1 - F_3)]\} \times S \times 100\% \quad (8)$$

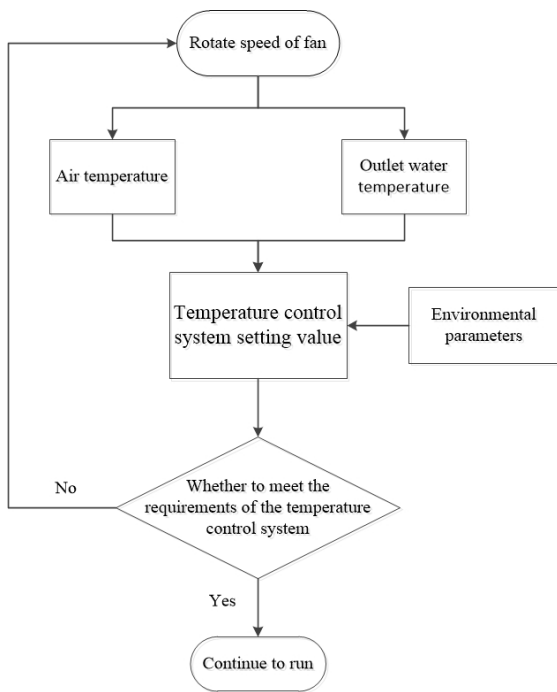


图6 温控系统运行流程图

Fig.6 Operation flow chart of temperature control system

3 利用手持式红外测温仪进行实验与分析

为了进一步验证冷却塔热力计算模型的准确性，本应该利用红外热成像技术对冷却塔工作过程进行温度监控，根据红外特性判别冷却塔出口处空气温度，如图7所示。

然而由于红外温控系统结构复杂，建造周期长，故将实验中的探测过程简化，特采用手持式红外测温仪进行真机的现场实验。

1) 实验装置

实验装置如图8所示。

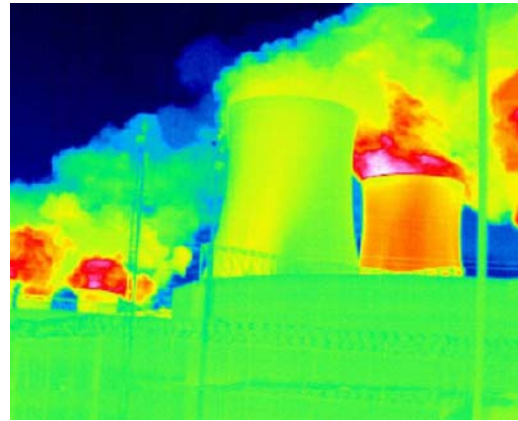


图7 红外热像温控系统监测图

Fig.7 Monitoring diagram of infrared imaging temperature control system



(a) 冷却塔

(a) The cooling tower



(b) 手持式红外测温仪

(b) Hand-held infrared thermometer

图8 实验装置图

Fig.8 Diagram of experimental device

2) 实验装置参数

冷却塔参数：流量 $Q=100$ t/h，工作水头 $H=10$ m，

塔高 $h=3.1\text{ m}$ ，水轮机效率 $\eta=0.85$ ，风机额定转速 $n=360\text{ r/min}$ ，风机额定功率 $P=5\text{ kW}$ ，风机叶片直径 $D=1.8\text{ m}$ 。

手持式红外测温仪参数：测温范围： $-32\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 330\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，测量精确度 $\pm 2\%$ ，分辨率： $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3) 实验步骤

①通过温度计获得实验当地空气干球温度 $29.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，湿球温度 $23.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 70.9% 。

②预设冷却塔进塔水温，根据冷却塔热力计算模型以及文献[8]获得理论出塔空气温度。

③根据预设进塔水温进行真机实验，获得实际出塔空气温度并将其与理论出塔空气温度进行对比分析。

④现场实验数据及分析

现场实验数据与理论数据对比分析如图9所示。

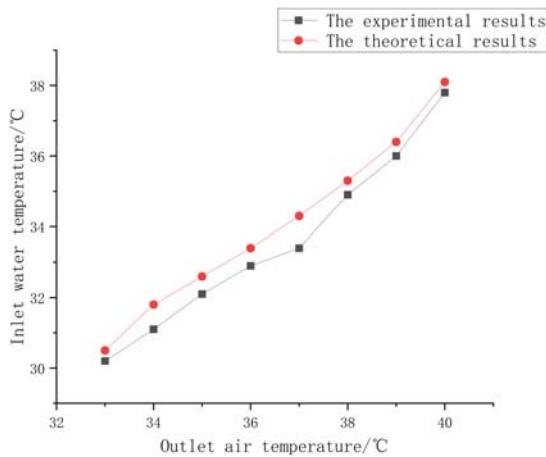


图9 实验数据与理论数据对比图

Fig.9 Comparison of experimental data and theoretical data

从图中可以明显地看出现场实验数据与理论计算模型得出的数据之间存在着——对应关系，成功验证了上文所建立的冷却塔热力计算模型的正确性，同时也能证明手持式红外测温仪的参数能够满足实验要求。

4 结论

根据水电混合动力冷却塔的结构特性，基于热质平衡方程可成功建立适用于冷却塔温控系统的热力计算模型。由于实验条件难以实现，故将实验过程简化，使用手持式红外测温仪进行真机的现场实验。虽然手持式红外测温仪的分辨率较低，实验结果与理论数据之间有所偏差，但从获得现场实验数据和理论计算数据的对比图中可以看出，数据之间存在对应关系，可成功验证冷却塔热力计算模型的正确性以及该

模型应用于冷却塔温控系统设计的可行性。未来实验条件允许的情况下，可采用红外热像技术进行真机实验，在提高设备分辨率的前提下获得更加准确的实验数据进行实验论证。

参考文献：

- [1] 李延频. 冷却塔专用超低比转速混流式水轮机的特性研究[D]. 西安: 西安理工大学水利水电学院, 2011.
LI Yanping. Research on the Characteristics of special Cooling Tower Ultra-low specific Speed Mixed-flow Turbine[D]. Xi'an: School of Water Conservancy and Hydropower, Xi'an University of Technology, 2011.
- [2] 李延频, 南海鹏, 陈德新. 冷却塔专用水轮机的工作特性与选型[J]. 水力发电学报, 2011, 30(1): 175-179.
LI Yanpin, NAN Haipeng, CHEN Dexin. Working Characteristics and Model selection of special water turbine for cooling tower[J]. *Journal of Hydroelectricity*, 2011, 30(1): 175-179.
- [3] 王嘉进. 基于三维数值模型的自然通风湿式冷却塔性能优化研究[D]. 北京: 北京交通大学土木建筑工程学院, 2016.
WANG Jiajin. Research on Performance Optimization of Natural Ventilation Cooling Tower Based on 3D Numerical Model [D]. Beijing: School of Civil and Architectural Engineering, Beijing Jiaotong University, 2016.
- [4] 谭中侠. 逆流冷却塔热力计算及精确度判断方法探讨[J]. 工业用水与废水, 2018, 49(5): 59-62.
TAN Zhongxia. Thermodynamic Calculation and Accuracy Judgment Method of countercurrent Cooling Tower[J]. *Industrial Water and Wastewater*, 2018, 49(5): 59-62.
- [5] Cooling Technology Institute. CTI Code Tower Standard Specifications for Acceptance Test Code for Water Cooling Towers: CTI 105-ATC(00)[S]. 2000 Version, [2020-05-03].
- [6] 石东平, 吴超, 李孜军, 等. 红外热像技术在安全领域的研究进展[J]. 红外技术, 2015, 37(6): 528-535.
SHI Dongping, WU Chao, LI Zhijun, et al. Research progress of infrared thermal imaging technology in the field of security[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(6): 528-535.
- [7] 吕事桂, 刘学业. 红外热像检测技术的发展和研究现状[J]. 红外技术, 2018, 40(3): 214-219.
LYU Shigui, LIU Xueye. Development and Research Status of infrared thermal image detection technology[J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(3): 214-219.
- [8] 冯旭东, 王华星, 陈立宏, 等. 给水排水设计手册[M]. 2版, 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
FENG Xudong, WANG Huaxing, CHEN Lihong, et al. *Water Supply and Drainage Design Manual*[M]. 2nd Ed., Beijing: China Building Industry Press, 2002.