

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106666

谐振腔在线测量汽轮机排汽湿度温度敏感性分析*

李路江¹ 杨海生¹ 唐广通¹ 闫晓沛¹ 李振宇² 韩旭²

(1. 国网河北能源技术服务有限公司 石家庄 050000; 2. 华北电力大学 电站能量传递转化与系统教育部重点实验室 保定 071000)

摘要: 蒸汽湿度在线测量对凝汽式汽轮机安全运行有着重要影响。为了准确计算出谐振腔受温度影响的实验误差,进行了谐振腔温度特性理论分析及实验研究。基于国内外研究现状,根据已有的 Maxwell 方程对排汽湿度进行测量。根据实验腔体在温度变化中的尺寸变化以及对不同温度下测得蒸汽湿度数据的分析,得出温度对谐振腔测量蒸汽湿度的影响程度。在不考虑温度影响的时候,通过微波谐振腔测得实验空气湿度为 43%,而影响因素修正后与采用光学法测得的结果在 13%左右。根据更改优化谐振腔安装方式可以大幅降低测量误差,研究结果对提高蒸汽湿度在线测量精度具有重要意义。

关键词: 谐振腔;蒸汽湿度;测量误差;在线测量

中图分类号: TM931 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

Error analysis of vapor humidity measured by resonant cavity affected by temperature

Li Lujiang¹ Yang Haisheng¹ Tang Guangtong¹ Yan Xiaopei¹ Li Zhenyu² Han Xu²

(1. State Grid Hebei Energy Technology Service Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China; 2. Key Laboratory of Power Station Energy Transfer Conversion and System, North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

Abstract: The on-line measurement of steam humidity has an important effect on the safe operation of condensing steam turbine. In order to accurately calculate the experimental error of the resonant cavity affected by temperature, the theoretical analysis and experimental study of the resonant cavity temperature characteristics were carried out. Based on the research status at home and abroad, exhaust steam humidity is measured according to Maxwell equation. According to the size change of the cavity in the temperature change and the analysis of the vapor humidity data measured at different temperatures, the influence degree of temperature on the vapor humidity measured by the resonant cavity is obtained. According to the data, the conversion is about 43% steam humidity, and the normal steam turbine exhaust steam humidity is not more than 13%. The measurement error can be greatly reduced by changing the resonant cavity installation mode. The research results are of great significance to improve the on-line measurement accuracy of steam humidity.

Keywords: cavity; steam humidity; measurement error; the online measurement

0 引言

常规发电站经常使用到凝汽式汽轮机,而其低压缸的末几级和应用到水冷堆发电的核电站中的汽轮机全部级都在湿蒸汽区进行工作。汽轮机若要正常、经济、安全的运行,湿蒸汽的各项参数需要严格控制的安全范围之内。而各项参数中,蒸汽湿度是极为重要但不能轻易获得的参数。长久以来,蒸汽湿度的测量困扰着中外学者,而不少研

究学者也不断改善前人提出的方法。目前,主要测量方法有热力学法、电容法、微波法、光学法、示踪元素法和化学法等^[1-4]。因为测量汽轮机排汽的特殊环境,这些方法都受到极大地限制,因而不便测量。其中应用微波谐振腔测量蒸汽湿度可以克服其他方法的不足。其具有结构系统简单、对蒸汽湿度的测量精度高并且可实现在线连续测量的优点。但实际测量中,测量结果受到很多方面因素影响,例如谐振腔传感器的受温度影响而发生变形、取样不均匀产生

收稿日期:2021-05-12

* 基金项目:国网河北能源技术服务有限公司科技项目(TSS2020-08)资助

误差或者蒸汽状态参数发生突然变化等都会对结果产生很大影响^[3,7]。而温度自补偿结构可以大幅度减少由腔体热胀冷缩而造成的测量误差,理论上其误差值不大于 $0.42\%^{[8-9]}$ 。为了更加精确的得到所测湿蒸汽的湿度,需要综合考虑对测量结果产生影响的多重因素,本文建立了微波谐振腔传感器的热膨胀模型,采用控制变量的方法,对影响测量精度的因素进行研究,研究结果对汽轮机排汽湿度监测具有重要意义^[10]。

1 测量原理

利用微波谐振腔方法测量蒸汽湿度的基本原理为:介质(湿蒸汽)流过谐振腔内部时,由于其自身的介电性质会对谐振腔产生微扰,影响谐振腔内的频率偏移。而湿度与其介电性质有关,不同的湿度会产生不同的频率偏移量,故可以利用此法测量蒸汽湿度。谐振腔传感器三维立体图如图1所示。

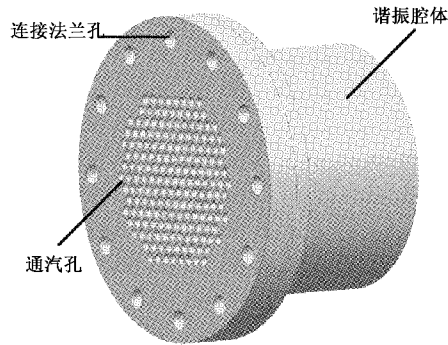


图1 谐振腔三维立体示意图

在其他条件如温度、压力恒定下,湿蒸汽的介电常数只与湿度有关。当湿蒸汽流过腔内时,可测量出频率偏移量,进而计算出蒸汽湿度值。根据湿度、介电常数及频偏的关系,结合计算可得蒸汽湿度与频偏的关系^[11]:

$$Y = \frac{1}{1 - \frac{\rho_w}{\rho_f} \left[\frac{3(\epsilon'_f - \epsilon'_v)(\epsilon'_f + \epsilon'_v) - \epsilon''_f{}^2}{2(\epsilon'_f + 2\epsilon'_v)^2 + \epsilon''_f{}^2} \cdot \frac{f_0}{\Delta f} + 1 \right]} \quad (1)$$

$$f_t = \sqrt{\left[\frac{3.382}{r_0 + \alpha_t(t - t_0) + \alpha'_t(t - t_0)^2} \right]^2 + \left[\frac{\pi}{l_0 + \alpha_t(t - t_0) + \alpha'_t(t - t_0)^2} \right]^2} \quad (5)$$

谐振频率与温度变化关系如图2所示。

假设测量温度范围为 $20\text{ }^\circ\text{C} \sim 50\text{ }^\circ\text{C}$,如图2所示,随温差增大,测得的谐振频率逐步减小。经计算在 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 变化范围内,每摄氏度对频率的影响程度为 $-199.034\text{ kHz}/^\circ\text{C}$ 。其引起的误差不容忽视,为了提高测量精度,必须对谐振腔传感器尺寸变化进行误差分析。

3 谐振腔传感器温度特性实验研究

在进行理论分析之后,需要通过实验确定理论分析的正确性。为了进一步了解分析腔体热胀冷缩导致的测量

式中:角标 f, v 分别为离散项和连续相; ϵ' 为介电常数的实部; ϵ'' 为介电常数的虚部; Y 为湿蒸汽的质量湿度; ρ_f, ρ_v 分别为干饱和蒸汽和饱和水的密度, kg/m^3 。

因此,只需要测得在其他因素不变的情况下,仅由温度改变导致谐振腔腔体的尺寸变化,进而造成的频偏即可得出对应的湿度变化,从而进行谐振腔热膨胀而导致的误差分析。

2 谐振腔传感器温度特性理论分析

测量中,温度会对谐振腔的尺寸产生影响,进而影响谐振腔的测量值。传感器的温度特性对蒸汽湿度测量的准确性产生重要影响。在实验中,谐振腔用黄铜制成。材料的极化特性^[12]和膨胀特性都会对腔体产生影响,为了便于研究腔体的膨胀特性,可假设谐振腔为一个整体,各处膨胀特性一致,温度分布均匀。因此,腔体整体尺寸变化量仅温度有关。由泰勒公式可得谐振腔尺寸与温度的函数:

$$L_{t_0+\Delta t} = L_{t_0} + \left(\frac{dL}{dt} \right)_{t_0} \Delta t + \left(\frac{d^2L}{dt^2} \right)_{t_0} \Delta t^2 \quad (2)$$

式中: t_0 初始温度, $^\circ\text{C}$; L 为谐振腔尺寸, m 。这里仅计算到泰勒公式的二次项。

根据GB/T 4339-1999规定,并对黄铜标准铸件的热膨胀系数拟合可得方程如下:

$$\alpha_t = 5 \times 10^{-5} t^2 + 1.5 \times 10^{-3} t + 19.44 \quad (3)$$

在 TE_{mnp} 模式下,谐振频率与谐振波长的函数关系为^[13]:

$$f_r = \frac{c}{\lambda_r} = \frac{1}{2\pi \sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{4(\mu_{mn}/D)^2 + (p\pi/l)^2} \quad (4)$$

式中: f_r 为谐振频率, Hz ; c 为光速, m/s ; λ_r 为谐振波长, m ; μ, ϵ 为磁导率和介电常数; μ_{mn} 为 m 阶贝塞尔函数导函数的第 n 个根值; D 为腔体内直径, m ; l 为腔体高度, m ; p 为腔长度方向的驻波数。

本文选择 TE_{011} 模式下, 12 GHz 高频传感器进行实验; $D=36\text{ mm}$; $l=24\text{ mm}$; $p=1$; $f_r=11.959380\text{ GHz}$ 。结合 TE_{011} 模式下谐振腔特性并将式(2)、(3)代入式(4)整理可得谐振频率与温度的函数关系:

误差,进行了如下实验。

3.1 空气介电常数改变对频率偏移得影响

随着实验温度增加,空气温度随之变化。而空气介电性质不仅与温度有关,而且会影响谐振频率偏移。因此,只有排除空气介电常数随温度变化对频偏的影响才能进一步分析由腔体尺寸引起频偏。空气的介电常数与温度和压力之间的函数关系为^[14]:

$$\frac{(\epsilon - 1)_{t,p}}{(\epsilon - 1)_{20\text{ }^\circ\text{C}, 1\text{大气压}}} = \frac{P}{760[1 + 0.003411(t - 20)]} \quad (6)$$

式中: t 为温度, $^\circ\text{C}$; P 为压力, Pa ; $(\epsilon - 1)_{20\text{ }^\circ\text{C}, 1\text{大气压}}$ 为常数,

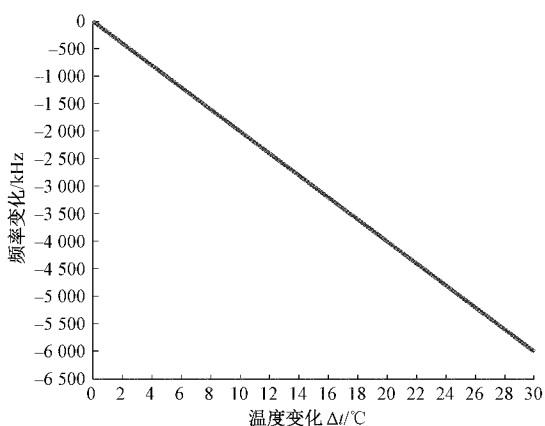


图2 理论谐振频率与温度变化关系

0.000 536 4。

谐振腔频偏与湿蒸汽介电常数关系为^[1]:

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{\epsilon_t - \epsilon_0}{2\epsilon_0} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)可得理想谐振频率与空气介电常数的函数关系:

$$\Delta f = f \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{2\epsilon_0} - \frac{\epsilon_0 - 1}{2\epsilon_0 [1 + 0.003 411(t - 20)]} \right\} \quad (8)$$

由上述分析可得空气介电常数随着温度上升而降低,而测得的频偏在此过程中逐渐增大。经计算在实验温度范围内,每摄氏度对空气导致的频偏平均影响程度为 9.919 kHz/°C,远小于腔体尺寸引起的误差。

3.2 谐振腔传感器温度特性实验及分析

实验采用的仪器包括:T-HWS-150UH 的恒湿恒温箱,天一仪器;E5071 型号矢量网络分析仪,安捷伦。矢量网络分析仪用于获得腔体设计尺寸下的谐振点。将谐振腔置于恒湿恒温箱内,矢量网络分析仪置于恒湿恒温箱外,通过同轴线进行连接。设置步长为 2 °C,温度逐步从 20 °C 增加到 50 °C。每次变化维持时长为 30 min,以保证腔体温度达到一致。现场实验设备安装情况如图 3 所示。



图3 现场实验测试图

理论计算和实验测量得到的谐振点如图 4 所示。确定腔体谐振频率基准点是正式实验的基础,通过实验与仿真模拟两相对比,验证实验状态下得到的谐振频率点的正确性。结合谐振点的功率损耗情况以及制作腔体的加工误差等因素,选取图 4 中靠左的谐振点为实验的谐振频率基准点,频率为 11 776 754 kHz。记录下每次实验中各个温度下测得的实验数据,在实验中,不可避免的得到一些不合理数据,将其剔除后的实验数据分布如图 5 所示。

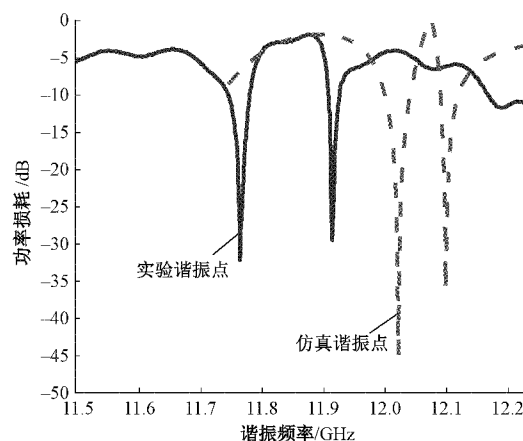


图4 实验与仿真模拟谐振点对比

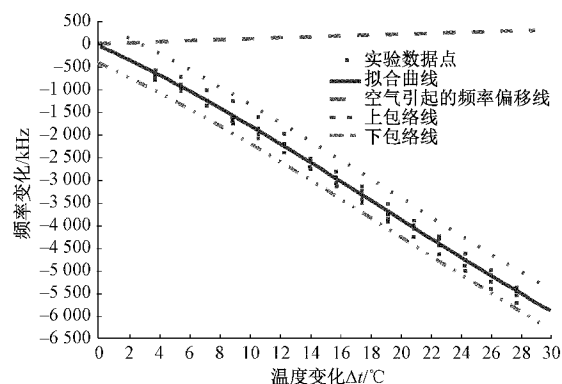


图5 实验数据分析

对实验数据进行处理,将实验数据中由于空气产生的影响去除并对所得数据进行拟合。经过计算可以得到仅由腔体尺寸变化而引起的频率偏移与温度的函数关系:

$$\Delta f = -3.305\Delta t^2 - 137.9\Delta t - 21.59 \quad (9)$$

根据式(9)计算可得腔体尺寸变化引起的频偏为 -206.47 kHz/°C,与理论计算结果 -199.034 kHz/°C 基本吻合。若不做修正,由于热膨胀引起谐振腔尺寸变化产生的频率偏移,根据式(1)折算为蒸汽湿度约为 43%。而通过使用上海理工的湿度测量仪,利用光学法原理测量测得实验空气湿度为 13%,可见谐振腔热膨胀对湿度测量的影响非常大。因此,在实际测量中,必须要解决腔体热膨胀对蒸汽湿度测量的影响。而光学法在实验室中测量精度较高,但不适用于汽轮机内复杂流动的实时在线测量。

3.3 谐振腔传感器动态温度特性实验研究

在蒸汽湿度测量过程中,湿蒸汽流过谐振腔,由于温度不同,会产生热量传递。在传热过程中,腔体温度并不能突变,而是慢慢改变。故仅由以上所得结果进行误差修正并不能解决基准频率采集滞后的问题,即在湿度测量中,实时性较差的缺点并没有得到很好地解决。为了解决该问题,需要对腔体进行动态温度特性实验,了解腔体尺寸随时间变化的速度。为了便于测量,可以转化为频率变化与时间的关系。

为了进一步减小误差,需要在动态实验中同时记录空气温度,以便后续对腔体动态实验进行修正。在实验时,分别在 20 °C~30 °C(低温区)和 30 °C~40 °C(高温区)进行升降温,以 1 min 为步长,得到腔体动态温度特性实验数据,分别记录每时刻的频率变化及空气温度。先处理空气温度及其相关数据,空气温度随时间变化曲线如图 6 所示。

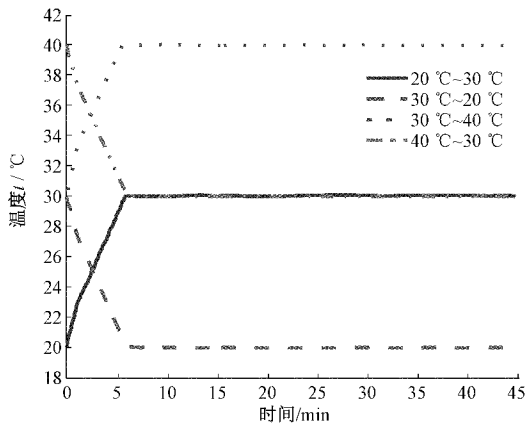


图 6 空气温度随时间变化图

由图 6 可知,不同温度范围的升温曲线趋势一致,不同温度范围的降温曲线趋势也一样。所有曲线变化几乎都是在 5 min 左右完成,并且曲线斜率高度吻合。根据实验数据,每摄氏度对空气导致频偏的平均影响程度为 9.919 kHz/°C,结合图 6 得到空气动态温度特性数据分析,如图 7 所示。

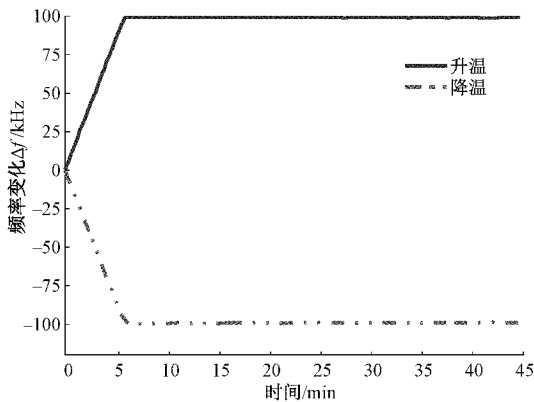


图 7 空气动态温度特性数据分析

结合图 7,排除空气干扰因素后对实验数据进行处理,得到单一的腔体动态温度特性试验数据,处理结果如图 8 所示。由图 8 可知,在各个温度变化区域,腔体频偏绝对值都在减小。原因是实验开始时,腔体与环境温差较大,热传导速率快。随着时间的推移,两者温差逐渐减小,热传导速率降低。在 30 min 以后,4 条曲线皆趋于平缓,此时谐振腔与周围环境温度几乎相同,达到热平衡状态。实验表明,当温度发生变化时,由于腔体温度变化需要时间,故腔体基准谐振频率采集往往落后于蒸汽工况的变化。因此在汽轮机内测量蒸汽湿度时,需进行基准频率的实时采集,并以此来解决难以实时测量频率偏移的问题。根据文献[15]中介绍的方法并进行优化,设计减小误差的方案如图 9 所示。

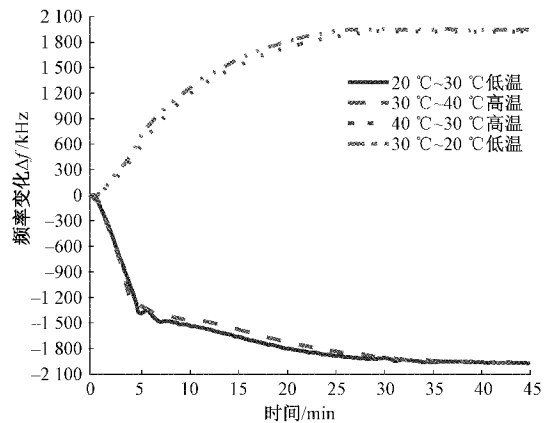


图 8 腔体动态温度特性数据分析

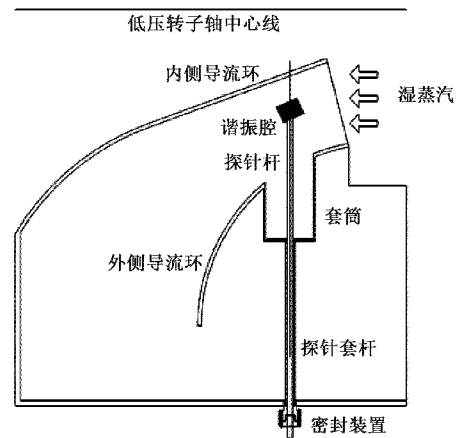


图 9 湿度测量谐振腔安装图

通过该设计,可以赋予谐振腔两种模式,一种是测量汽轮机排汽湿度的工作模式,另一种是专门用来采集基准频率的工作模式。探针套杆经密封装置与外缸相连。谐振腔的位置也可以通过探针杆来发生改变,进入不同的工作模式。当谐振腔在套筒内时,可以采集基准频率;而另一种情况下便可以采集实时温度下的谐振频率。采用这种方式,利用不同的工作模式,腔体尺寸便不会影响基准

频率的采集,对实现蒸汽湿度实时测量具有重要帮助。但是由于其膨胀特性,腔体及空气热膨胀滞后,由图8可知,谐振腔需要30 min左右的时间达到气流温度,故在开始测量的前30 min,需要不断的将谐振腔探针伸入、拉回,而30 min之后,则可以一直停留在湿蒸汽流过的区域进行数据采集,这样可以极大地减小甚至避免由此而产生误差。

4 结 论

为了准确计算谐振腔受温度影响的实验误差,进行了谐振腔温度特性理论分析及实验研究。

1) 对谐振腔尺寸的热膨胀进行理论分析,根据金属膨胀率,结合腔体尺寸进行计算,得出每摄氏度对频率的影响程度为 $-199.034 \text{ kHz}/^\circ\text{C}$ 。

2) 进行谐振腔传感器温度特性实验,论证了理论计算的正确性,实验测得蒸汽湿度约为43%,而正常情况下,汽轮机排汽的蒸汽湿度值不会超过13%,因此,在实际测量中,必须要解决腔体热膨胀对蒸汽湿度测量的影响。

3) 进行动态温度特性实验,实验表面在谐振腔工作的前30 min并不稳定,因而其对测量结果的影响程度也不同,很难采集准确的基准频率。

根据文献并进一步设计出一套可以解决基准频率难以采集的谐振腔安装系统。可以大幅降低谐振腔尺寸对测量精度的影响。

参考文献

- [1] 唐振洲,黄竹青,黄章俊,等.后向散射法测量蒸汽湿度中理论计算模型的优化[J].激光与红外,2019,49(1):26-30.
- [2] 邹阳,林超群,叶荣.油纸绝缘特性研究及微水含量评估[J].仪器仪表学报,2020,41(7):117-125.
- [3] 杜海龙,张靖宇,王启鑫,等.基于SHT75的温湿度检测系统的设计[J].物联网技术,2021,11(1):10-12,15.
- [4] 杨麟,张潇潇,何舒冰.工业锅炉蒸汽湿度的测量方法[J].工业锅炉,2014(2):31-34.
- [5] 任勇峰,李晋涛,李辉景,等.一种温度补偿的压力测量电路设计[J].国外电子测量技术,2020,39(12):86-89.
- [6] 钱江波,韩中合,张美凤,等.蒸汽参数突变对蒸汽湿度测量的影响分析[J].工程热物理学报,2013,34(5):888-891.
- [7] 韩中合,张美凤,钱江波.微波谐振腔测量蒸汽湿度非等动能取样误差分析[J].动力工程学报,2012,32(5):383-387.
- [8] 钱江波,严晓哲,韩中合,等.微波谐振腔蒸汽湿度测量系统不确定度分析[J].动力工程学报,2014,34(9):701-707.
- [9] 钱江波,韩中合.谐振腔微扰技术测量湿蒸汽两相流的理论分析[J].中国电机工程学报,2012,32(26):79-85.
- [10] 韩中合,李恒凡,严晓哲,等.谐振腔内水膜和积盐厚度对蒸汽湿度测量的影响[J].热力发电,2014,43(7):119-123.
- [11] 钱江波,周伟伟,谷青峰,等.环境温度对E级燃气-蒸汽联合循环机组全工况影响[J].北京理工大学学报,2018,38(9):905-911.
- [12] 张峰,杨文阳.微电极材料极化特性研究[J].电子测量与仪器学报,2021,35(3):187-196.
- [13] 李恒凡,庞永超,赵豫晋,等.蒸汽湿度测量谐振腔的时间响应特性[J].汽轮机技术,2017,59(2):104-106.
- [14] 孙艳辉,何广平,马国正.物理化学实用手册[M].北京:化学工业出版社,2016.
- [15] 张位.谐振腔测量湿蒸汽湿度系统设计与实验研究[D].保定:华北电力大学,2018.

作者简介

李路江,学士,正高级工程师,主要研究方向为电站热力设备及运行等。

E-mail:hbdyllj@163.com

韩旭,博士,副教授,主要研究方向为汽轮机设备状态监测等。

E-mail:xuhan@ncepu.edu.cn