

水蒸气环境下金属表面温度红外测量的试验研究

张 进,王 坤,吕方明,安 军

(华中科技大学 能源与动力工程学院 湖北 武汉 430074)

摘 要: 分析了在高温蒸汽环境的条件下,通过红外辐射方式对转子表面温度进行测量的可行性及影响测量精度的各种因素。同时通过试验方式研究了高温蒸汽及石英视窗玻璃对单色、双色及宽波段红外测温精度的影响。研究表明,以红外辐射方式对高温蒸汽环境中的物体(转子)进行表面红外测温是基本可行的,其响应速度能满足热应力分析的需求;单/双波段测温方式各有其优缺点;红外石英视窗玻璃对红外能量透射的干扰可控制在能接受范围内。上述结论为利用红外测温技术对汽轮机转子表面进行直接温度测量奠定基础。

关 键 词: 汽轮机转子; 温度测量; 红外辐射; 蒸汽

中图分类号: TK262 文献标识码: A

引 言

转子是汽轮机内部高速旋转的重要部件,在机组参加频繁调峰作业时,转子承受着严酷的低周疲劳损伤;随着汽轮机组蒸汽参数的提高,正常负荷状态下高温带来的蠕变损伤对汽轮机转子服役寿命的影响也越来越大。因此,准确评价转子高温损伤对提高汽轮机组的运行安全性和经济性具有十分重要的意义^[1]。

转子表面温度一直是分析、评价、监控转子热应力分布、热疲劳及高温蠕变损伤分析的关键依据。由于缸内高温高压蒸汽环境下高速旋转的特殊性导致国内外尚无其温度和应力的直接测量方法,目前仍基于经验公式或数值技术获取汽轮机转子温度场和热应力分布。哈尔滨工业大学的刘占生、黄世勇等人对第三类边界条件转子非稳态导热微分方程,采用有限差分格式分析计算,实时在线监测转子应力变化^[2]。华北电力大学的郝润田等利用汽轮机转子危险部位附近的蒸汽参数、传热经验公式及简化热应力计算模型,建立了一个在线寿命监测系统,可对汽轮机转子的温度、热应力、寿命进行在线评价^[3]。法国 BBC 公司通过在转子关键部位附近的

汽缸上装温差探针通过热模拟方法来近似指示转子内外温差^[4],及直接用热力学方法通过计算获得关键部位的蒸汽温度^[5]。虽然上述方法及研究对了解汽轮机转子表面热应力分布有较大的帮助,但并不是通过直接测量方式来获得转子壁面温度,不可避免存在较大的误差,很难精确的获得转子体的温度场、热应力场。研究表明,采用不同来源的经验公式所获得的蒸汽与转子表面之间的换热系数可达 10 倍以上^[6]。

近年来,日本通过在转子、叶片表面切槽埋入热电偶的方法,试图直接对叶片及叶轮的溫度进行测量。试验一方面表明转动附件温度的重要性,但同时试验过程中也发现由于环境恶劣,与热电偶连接的电缆线会出现断裂的概率非常大,其实际操作的可行性并不高^[7];但是试验本身也表明了对转子表面进行温度检测的重要性和工程价值。

红外辐射测温法是一种非接触式测温方法,具有测量范围广、测温速度快、准确度高、灵敏度高、使用安全等优点,理论上可以实现对汽轮机转子实时、准确的测量。

本研究通过理论和试验两个方面,对利用红外辐射方法进行汽轮机转子表面温度测量的可行性及影响因素进行了研究。

1 影响测量精度的主要因素及试验方案

1.1 响应波长的选择

由于转子体处于高参数的水蒸气环境下,为了利用红外辐射技术对汽轮机内部高速旋转的转子进行直接测量,红外测温探头需与耐温、耐压、耐水蒸气腐蚀的视窗结构配套使用,同时视窗能获取汽轮机转子表面所辐射的红外能而不会为水蒸气自身的红外辐射所干扰。

红外光学石英及蓝宝石材料作为常用的视窗玻

收稿日期: 2010 - 09 - 08; 修订日期: 2010 - 12 - 08

基金项目: 国家高技术“863”计划项目基金资助(2008AA04Z404)

作者简介: 张 进(1986 -) ,男,贵州贵阳人,华中科技大学硕士研究生。

璃材料,均具有较高的窗口透红外特性,前者在 $0.26 \sim 3.5 \mu\text{m}$ 波长范围内的透过率高达 85% 以上,后者在 $0.2 \sim 7 \mu\text{m}$ 波段内,透过率不小于 80%。同时二者的长期使用温度高达 $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上,且具有较强的硬度。

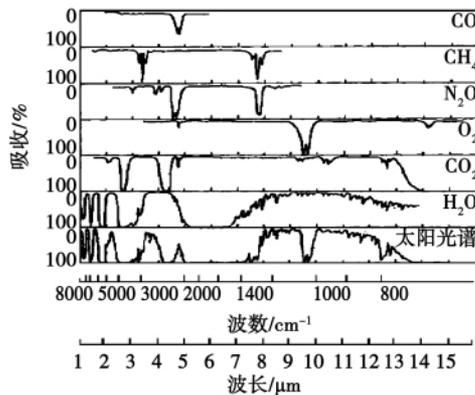


图 1 1 ~ 15 μm 红外辐射光谱^[12]

Fig. 1 1 ~ 15 μm infrared radiation spectrum

图 1 为大气及水蒸气的红外辐射光谱图。由图可知, H_2O 气的主要辐射光带为 $2.55 \sim 2.84 \mu\text{m}$, $5.6 \sim 7.6 \mu\text{m}$, $12 \sim 18 \mu\text{m}$ 。在这些波段内,水蒸汽对辐射能有强烈的吸收和辐射的选择性^[9~10]。显然,在对水蒸气环境下的物体进行红外测温时,测温仪的测量波段应避免包括上述波段在内的所有相关波段(包括空气)。

1.2 目标表面的红外发射率

物体的发射率,又称黑度系数,是反映物质辐射特性的重要参数,它是辐射波长、温度、方向和表面状况的函数,并在很大程度上取决于物体的表面状况,影响测温系统的测量精度^[11]。

试验研究过程中,为了减小发射率对试验精度的影响,在测量物体的目标位置涂上特种红外涂料,从而使目标在较宽的温度范围内表面发射率基本维持恒定,利于试验分析。

1.3 测量距离的确定

测量距离对测温探头接收红外辐射能具有重要影响,在测量距离的选择中,应考虑两个因素:

(1) 被测目标的辐射特性及光路对辐射功率的衰减。距离越远,光路衰减越大,探测器所接收的目标辐射功率越小。红外透过率的经验公式:

$$\tau_\lambda = \exp\left(-\frac{3.912}{V}\left(\frac{\lambda}{0.55}\right)^* L\right)$$

式中: τ_λ —红外辐射透过率; V —能见度, km; L —测量距离, km。

由式(1)可以看出,在情况允许的条件下,红外测温仪应该尽可能的靠近被测目标。

(2) 红外探测器的设计光路必须与被测目标相匹配,如果不满足系统视场的要求,则会使测量结果存在较大误差^[8]。

根据不同红外测温仪的距离系数($D:S$,即测温探头到目标之间的距离 D 与光斑尺寸 S 之比)和试验台架的实际情况,确定测温仪与目标之间的测量距离为 180 mm。

经计算,

Raytek 单色红外测温仪探测区域直径: $s = 16 \text{ mm}$,

Raytek 双色红外测温仪探测区域下径: $s = 16 \text{ mm}$,

MS Pro 宽波段红外测温仪探测区域下径:

$s = 14.5 \text{ mm}$ 。

测量目标上红外涂料填充区域是边长为 20 mm 正方形,可覆盖测温仪的测温区域。

2 试验装置及试验方法

为了尽可能的模拟汽轮机转子所处的高温蒸汽环境,建立了高温蒸汽台架,主要包括高温蒸汽发生装置、红外测量系统及测量目标 3 部分组成,如图 2 所示。

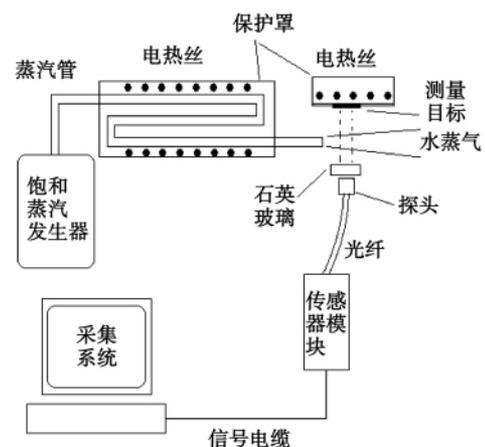


图 2 试验台架原理示意图

Fig. 2 Schematic drawing of the test rig

饱和蒸汽发生器可获得温度在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右的常压水蒸气,再经电热丝加热可获得最高达 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 的过热蒸汽,且由调压器通过功率来控制温度。蒸汽管喷口出来的蒸汽将流过红外测温仪探头与测量目标之间的空间区域(大于红外测温仪的设计光路区域)。测量目标的表面温度由另一调压器通过功率

调节控制。采集程序可对测量目标(热电阻)、蒸汽的温度(热电阻)进行数据记录和采集,时间间隔为 1s;红外测温仪的数据记录间隔为 10 ms(单色、比色) 500 ms(宽波段)。

Raytek 单色红外测温仪响应波段为 1.0 μm

Raytek 双色红外测温仪响应波段为 1.6 μm

MS Pro 宽波段红外测温仪响应波段为 8 ~ 14 μm

根据不同红外测温仪的距离系数($D:S$,即测温探头到目标之间的距离 D 与光斑尺寸 S 之比)和试验台架的实际情况,确定测温仪与目标之间的测量距离为 180 mm。经计算,不同型号测温仪设计光路落在测量目标上的探测区域直径均小于特种红外涂料填充区域。

试验中使用的石英视窗玻璃 A 厚度为 25 mm,视窗石英玻璃 B 厚度为 55 mm。

试验过程中一般目标管温度保持恒定,蒸汽状态发生改变(湿度及过热度)。通过试验过程模拟常压下蒸汽温度及湿度等参数变化对红外测温的影响。

3 试验数据及分析

3.1 宽波段红外测温试验

调节调压器电压使目标温度稳定在 236 °C 时,再调节测温仪的发射率,使其温度示值与目标热电阻测点温度示值一致。当蒸汽发生器开始产生蒸汽后,红外温度测量值有约 3 °C 的明显下降,如图 3 ~ 图 4 所示,由于蒸汽通道对饱和蒸汽的吸热效应,此时蒸汽温度测点示值小于 100 °C,表明此时蒸汽为湿蒸汽状态。

随着蒸汽通道温度的上升,300 s 后喷口处蒸汽温度逐渐接近大气压对应饱和点,湿度减小。红外测温示值与目标管温度示值基本一致。如图 4 所示。

由上述试验过程可知,蒸汽湿度对宽波段红外测温精度具有一定影响。

试验中,通过在探头前加设红外石英玻璃,测试了其对于红外测温的影响。石英玻璃 A 使其测量示值骤降至 12 °C,由于宽波段红外测温仪的响应波段为 8 ~ 14 μm,而红外石英的透射波段为 1 ~ 3 μm,所以红外测温仪显示值发生了显著变化。该试验表明目标产生的红外辐射能力大部分难以透过石英玻璃,从而对红外测量结果产生严重干扰。

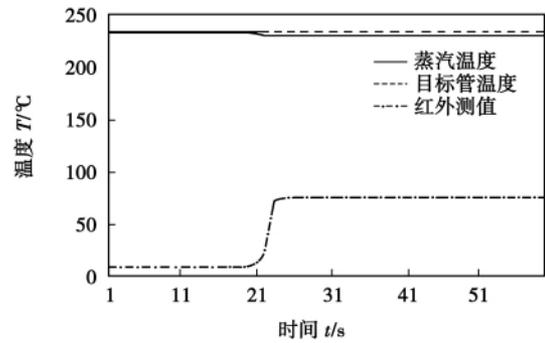


图 3 目标温度示值与红外测量温度示值比较
Fig. 3 Comparison of the target temperature indication value with the infrared measurement temperature indication value

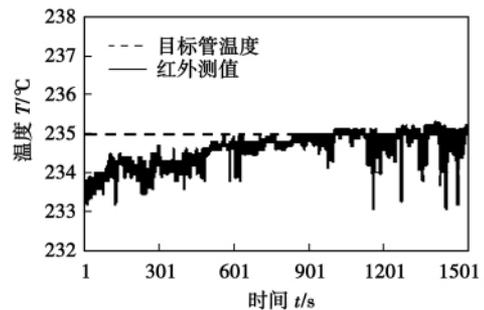


图 4 目标温度示值与红外测温示值放大比较
Fig. 4 Amplified comparison of the target temperature indication value with the infrared measurement temperature indication value

3.2 单色红外测温试验

采用单色测温仪进行上述蒸汽湿度试验。其结果如图 5 ~ 图 6 所示。

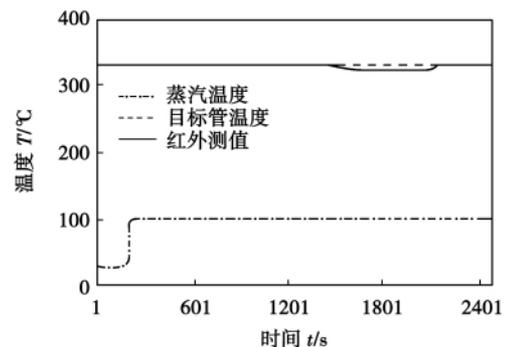


图 5 蒸汽湿度对单色红外测温的影响
Fig. 5 Effect of the steam humidity on the single color infrared temperature measurement

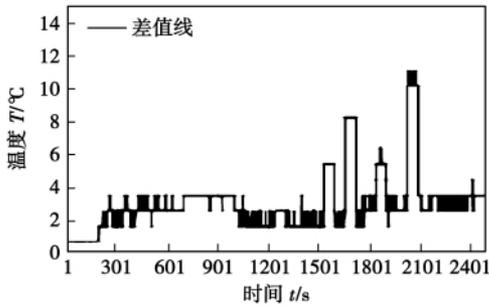


图 6 蒸汽湿度变化的目标热电阻与红外测温之间的差值及视窗玻璃的干扰

Fig. 6 The difference between the target thermal resistance due to a change of the steam humidity and the temperature measured by using the infrared and the interference of the inspection window glass

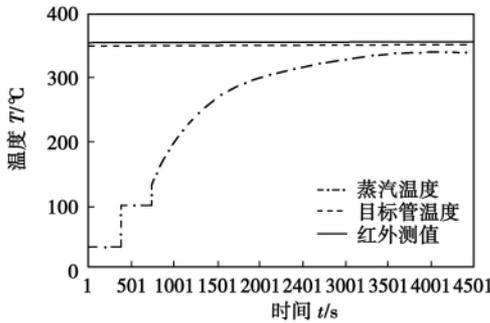


图 7 蒸汽温度对红外测温的影响

Fig. 7 Effect of the steam temperature on the infrared temperature measurement

图 7 中,当蒸汽略低于 100 °C 时,单色红外测温仪示值有 1~3 °C 的下降。观察表明在出口蒸汽流速较低的情况下,蒸汽流有小幅摆动,使得红外测温仪示值发生一定的波动。图中 1 500~2 100 s 时在测量探头前依次加设石英 A 一块;石英 A 两块;石英 B 一块;石英 A 一块,表面有液膜。

随后目标温度保持在 350 °C,蒸汽温度持续升高至接近 350 °C,试验结果如图 7~图 8 所示。试验表明,随着蒸汽温度、流速的升高及蒸汽湿度的减小及消失,蒸汽对单色红外测温的影响逐渐减小,当蒸汽达到 350 °C 以上时,影响可忽略不计。

温度稳定在 350 °C 以后,在测温探头前加设一块红外石英玻璃 A,其温度示值有 4~5 °C 的下降;加载两块红外石英玻璃 A 有 8~9 °C 的下降;加载一块红外石英玻璃 B 有 4~5 °C 的下降,图 8 为 3800 s 到 4300 s 之间的曲线变化。

由试验及数据可知:

(1) 蒸汽湿度对单色红外测温有一定影响。过热蒸汽温度本身(蒸汽红外辐射能)对单色红外测温影响不明显。

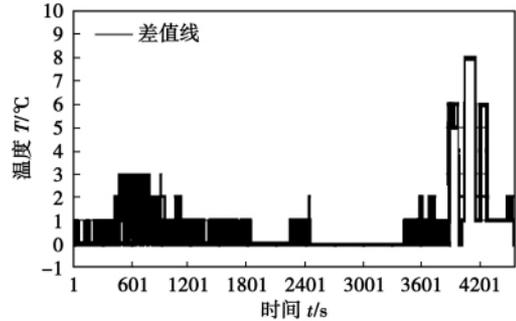


图 8 视窗玻璃对目标热电阻与红外测温之间差值的影响

Fig. 8 Effect of the inspection window glass on the difference between the target thermal resistance and infrared temperature measurement

(2) 石英玻璃对单色红外测温精度的影响也不受蒸汽温度变化的影响,与其厚度没有明显关系。红外辐射能通道损耗主要与石英玻璃界面损失有关系。

3.3 双色红外测温试验

试验过程中使测量目标温度稳定于 570 °C 左右,蒸汽状态由湿蒸汽缓慢升温至饱和温度,最后至接近 500 °C 的过热蒸汽。数据如图 9~图 10 所示。

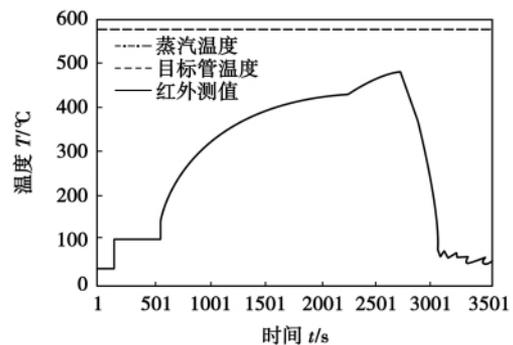


图 9 红外测温和热电阻所测温度对比
Fig. 9 Comparison of the infrared temperature measurement value with that measured by using a thermal resistance

图 9~图 10 中,1 800~2 400 s 的时间段内进行了石英玻璃干扰及水膜试验。在 1 800~2 400 s 之间依次在探头前加设石英 A 一块;石英 B

一块; 石英 A 两块; 石英 A 一块, 表面有液膜。

由试验数据得知, 与单色红外测温相比, 蒸汽参数变化对双色红外测温的影响较小, 在 1~2 °C 的范围内; 而红外石英玻璃与双色红外测温示值波动之间没有明显的相关性。

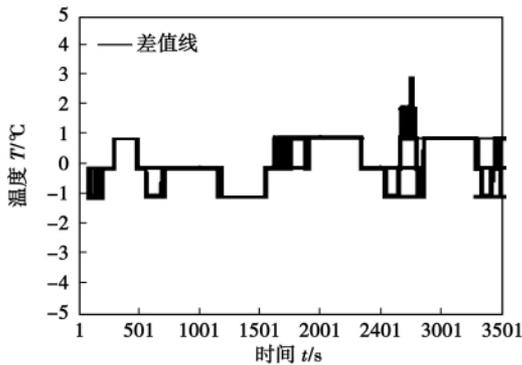


图 10 红外测温仪和热电阻所测温度的差值
Fig. 10 Difference of the temperature measured by using an infrared temperature measuring device with that by using a thermal resistance

3.4 超临界参数水蒸气环境下红外测温的初步验证

在高参数压力容器内加入 300 mL 除盐水, 设定单色测温仪 FA2A 发射率为 0.85, 红外石英视窗厚度 30 mm。在一个升降温的过程测量釜底金属壁面温度(红外)、反应釜内部蒸汽温度(热电阻) 压力参数, 同时反应釜底部壁内所安装的热电偶对釜底壁内温度进行测量。最高参数达 480 °C, 23 MPa。所测数据如图 11~图 12 所示。

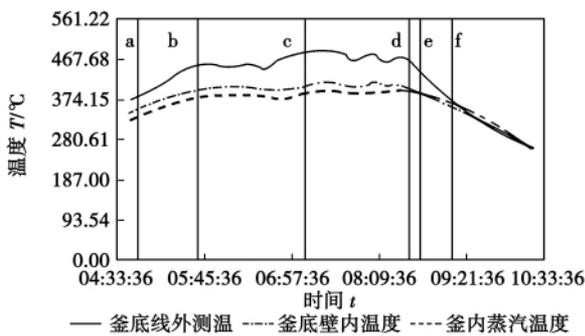


图 11 3 个温度测点数据变化趋势
Fig. 11 Variation tendency of the data at the three temperature measuring points

图 11、12 中自左向右在不同时间有六个特殊时刻点, 用 a、b、c、d、e、f 线标示出来, a、f 时刻线分别表示通过水蒸气等容加热热工过程理论估算的釜内

液态水消失和出现时刻点; b、e 时刻分别表示釜内蒸汽温度上升超过, 或下降低于 374.15 °C 这一临界温度参数点; c、d 时刻线分别表示釜内蒸汽压力上升超过, 或下降低于 22.12 这一临界压力值。

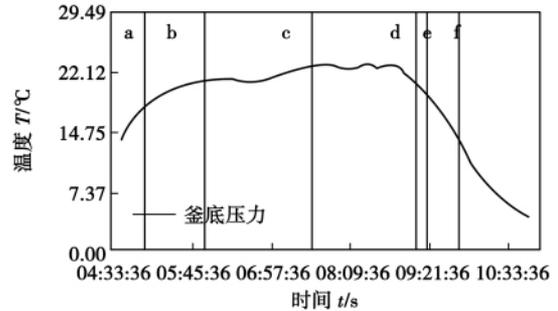


图 12 釜内压力数据变化趋势
Fig. 12 Variation tendency of the pressure data in the autoclave

由上述数据曲线图可知:

- (1) 在设定发射率条件下, 试验所用红外测量系统所测温度值与釜内环境温度热电阻所测温度值比较接近, 且相似度较高, 而与釜底壁内温度值相差较大。
- (2) 釜底有无液态水对图 11 和图 12 所示温度差值存在显著影响, 这可能是由于水在蒸发过程中将很好的吸热, 使壁温能维持一个相对稳定而缓慢的温度变化速率, 参见图 11; 同时, 液态水的存在也可能对金属壁面辐射的红外能量进入探头产生不利影响。
- (3) 釜内温度是否超过临界温度点, 对如图 1 所示温度差值也存在显著影响。

4 结 论

对于处于高速旋转并被高温蒸汽包围的汽轮机转子而言, 红外辐射的测温方法是具有较强可行性的非接触式测温方法之一。

通过试验方法研究了高温过热蒸汽环境及红外光学石英玻璃对单色、双色及宽波段红外测温精度的影响, 并进行了超临界参数下的初步校验和对比分析, 得出以下结论:

- (1) 通过合理选择探测窗口波段, 以红外辐射方式对在高温蒸汽环境中的物体进行表面红外测温是可行的。
- (2) 从大型汽轮机设备运行规程可知^[13], 变工

况过程中对缸内部件温度变化速率的要求为应在 1 ~ 6 °C /min 之间, 红外测温技术的响应速度(秒级)应可完全满足汽轮机转子热应力分析及热疲劳和蠕变寿命评价的要求。

(3) 蒸汽湿度对不同红外测温方式的影响差异较大。宽波段红外测温仪的温度示值有约 3 °C 的降低; 单色红外测温仪的温度示值有 1 ~ 3 °C 的变化; 而双色红外温度示值的变化基本保持在 1 °C 的范围内。

(4) 红外石英视窗玻璃对宽波段测温仪有严重影响, 其温度值从上百度骤降为十几度, 难以用于蒸汽环境下的温度测量; 单色测温仪的温度示值分别有约 4 ~ 5 °C 的降低, 双色测量时温度示值与红外透镜的加设与否没有明显相关性。从单色、比色红外测温仪的镜头前加载石英的试验情况来看, 石英厚度的变化及有无水膜不会对其测温精度产生附加影响。

值得注意的是对于汽轮机转子表面红外温度测量而言, 包括缸内红外环境的复杂性、转子表面状态随运行时间的变化、视窗结构的可靠性等因素均将是本研究内容最终能否成功应用于工程需要深入研究和解决的关键问题。

参考文献:

- [1] 孙奉仲. 大型汽轮机运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
SUN Feng-zhong. Operation of large-sized steam turbines[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [2] 刘占生, 黄世勇. 汽轮机转子热应力在线监测与疲劳寿命分析[J]. 汽轮机技术, 2008, 50(1): 9-12, 28.
LIU Zhan-sheng, HUANG Shi-yong. Online monitor and fatigue life analysis of the thermal stress of a steam turbine rotor[J]. Turbine Technology, 2008, 50(1): 9-12, 28.
- [3] 郝润田, 刘彦丰, 高建强. 汽轮机转子在线寿命监测系统介绍[J]. 电力科学与工程, 2007, 23(2): 48-50.
HAO Run-tian, LIU Yan-feng, GAO Jian-qiang. Introduction of an on-line life monitoring system for steam turbine rotors[J]. Electric Power Science and Engineering, 2007, 23(2): 48-50.
- [4] 希尔维斯里·乔治·约瑟夫. 汽轮机冲击级温度测量方法及测量装置[P]. 中国专利: 88103636.6, 1989.
Silver George Joseph. Method and device for measuring the temperature in the impulse stage of a steam turbine[P]. China Patent: 88103636.6, 1989.
- [5] 桑托索 N I. 汽轮机叶片温度预测方法[P]. 中国专利: 97180635.7, 2000.
Santos N I. Method for predicting the temperature of a blade in a steam turbine[P]. China Patent: 97180635.7, 2000.
- [6] 张保衡. 大容量火电机组寿命管理与调峰运行[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
ZHANG Bao-heng. Service life management and peak-shaving operation of large capacity thermal power plant units[M]. Beijing: Hydropower and Power Press, 1988.
- [7] Sugita Yuji. Blade vibration and temperature measurement in steam turbine HP control stage and LP stages[J]. Thermal and Nuclear Power, 2000, 51(3): 310-318.
- [8] 张伟, 高魁明. 发射率对辐射测温精度的影响及其在线测量技术[J]. 沈阳工业学院学报, 1990, 9(2): 69-76.
ZHANG Wei, GAO Kui-ming. Influence of the emissivity on the radiation temperature measurement precision and its on-line measurement technique[J]. Journal of Shenyang Polytechnic College, 1990, 9(2): 69-76.
- [9] 田理达, 毕纯辉, 梁彬. 红外光纤式辐射测温技术在发电设备中的应用[J]. 自动化技术与应用, 2003, 22(2): 57-59.
TIAN Li-da, BI Chun-hui, LIANG Bin. Application of infrared optic fibre type radiative temperature measurement technology in power generation equipment[J]. Automation Technology and Applications, 2003, 22(2): 57-59.
- [10] 刘玉英, 张欣欣, 黄志伟. 水雾遮蔽表面辐射测温问题的实验研究[J]. 工业加热, 2008, 37(5): 16-18.
LIU Yu-ying, ZHANG Xin-xin, HUANG Zhi-wei. Experimental study of the radiative temperature measurement problems of water-mist-shielded surfaces[J]. Industrial Heating, 2008, 37(5): 16-18.
- [11] 戴敏, 张荣克. 正确使用红外辐射测温仪[J]. 石油化工设备技术, 2002, 23(4): 14-17.
DAI Min, ZHANG Rong-ke. Correct use of an infrared radiative temperature measurement device[J]. Petroleum and Chemical Industry Equipment Technology, 2002, 23(4): 14-17.
- [12] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第三版)[M]. 高等教育出版社, 1998.
YANG Shi-ming, TAO Wen-quan. Heat transfer (Third Edition)[M]. Higher Education Press, 1998.
- [13] 柯鸿明. 660 MW 机组汽机运行规程[R]. 华能国际电力股份有限公司井冈山电厂, 2009.
KE Hong-ming. Specification for operation of a 600 MW steam turbine unit[R]. Huaneng International Electric Power Stock Co. Ltd. Jinggangshan Power Plant, 2009.

撰写论文摘要注意事项

《热能动力工程》期刊是国内外公开出版刊物, 它不仅是国家核心期刊, 还被多家国外重要检索机构数据库收录。为使语言规范, 请在撰写论文摘要时, 注意以下事项:

1. 论文摘要 200 字为宜, 要求语言通顺、精炼, 具有实质性内容, 全面地将论文主要内容反映出来。
2. 将研究目的、试验方法、结果和结论等部分要表述清楚。
3. 语法运用恰当, 逻辑关系清楚, 指代明确, 词句搭配合理; 开头不用“本文”字样。
3. 对背景材料、评论性语言和公式不宜写入摘要中。
4. 必须将摘要译成英文。摘要中的英文缩略语在第一次出现时, 应标注全称。

船用燃气轮机挤压油膜阻尼器阻尼特性试验研究 = **Experimental Study of the Damping Characteristics of an Extruded Oil Film Damper in a Marine Gas Turbine** [刊, 汉] XU Ning, WANG Xu (CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150078), ZHANG Min, XU Fang-cheng (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2012 27(1). -13 ~ 17

By using the pulsation excitation method, studied was the law governing the influence of the structural parameters of an extruded oil film damper in a marine gas turbine on its damping characteristics. The research results show that the effective length and the oil film radius clearance of the damper have a remarkable influence on the damping characteristics. However, when the eccentricity is in a range of 0-0.3, such an influence is not big. Furthermore, the tiny bubbles and noise signals in the oil film during the test process have certain influence on the test results while the pulsation excitation has little influence. In the meantime, the feasibility of the present test and study scheme was also verified. **Key words:** extruded oil film damper, pulsation excitation method, effective working length, oil film radius clearance, eccentricity

水蒸气环境下金属表面温度红外测量的试验研究 = **Experimental Study of the Infrared Measurement of the Temperature on Metallic Surfaces in a Steam Environment** [刊, 汉] ZHANG Jin, WANG Kun, LU Fang-ming, AN Jun (College of Energy Source and Power Engineering, Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2012 27(1). -18 ~ 23

In a high temperature steam environment, the authors have conducted an analysis of the feasibility to measure the temperature of the rotor surface and various factors influencing the measurement precision through an infrared radiation mode. In the meantime, through a test mode, studied was the influence of the high temperature steam and quartz inspection window glass on the single and dual color and wide wave band infrared temperature measurement precision. The research results show that to measure the surface temperature of an object (rotor) in a high temperature steam environment through an infrared radiation mode is basically feasible and the response speed can meet the requirement for thermal stress analysis. The single/dual wave band temperature measurement modes have their separate merits and demerits. The interference to the infrared energy penetration by the infrared inspection window glass can be controlled within the range acceptable. The foregoing has laid a foundation for directly measuring the surface of the rotor of a steam turbine by utilizing the infrared temperature measurement technology. **Key words:** steam turbine rotor, temperature measurement, infrared radiation, steam