

DOI: 10.19666/j.rlfid.202307387

Arabelle 型核电汽轮发电机轴系振动与密封瓦运行状态分析

张恒¹, 张卫军¹, 胡启龙¹, 李振², 张立军³, 赵博¹

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2.福建福清核电有限公司, 福建 福清 350318;
3.辽宁红沿河核电有限公司, 辽宁 大连 116000)

[摘要] 以某百万千瓦级核电半速汽轮发电机组为研究对象, 采用转子动力学的专业分析软件 ARMD, 建立弹簧基础-轴承-转子的动力学模型, 通过动力学计算获得轴系动力学特性, 现场实测轴系临界转速与计算值吻合, 验证了该计算模型的准确性。在此基础上计算了发电机密封瓦热不平衡导致的振动响应, 发现其振动变化主要集中于发电机转子处, 密封瓦动静摩擦仅是轴系振动波动问题的直接影响因素之一, 而非根本原因。同时对不同运行状态下密封瓦油膜受力进行分析, 发现轴向倾斜对密封瓦受力影响最大, 因此机组在检修调整过程中应保证加工及安装工艺, 严防密封瓦运行过程中出现轴向倾斜。

[关键词] 核电汽轮机; 振动波动; 密封瓦; 轴向倾斜; ARMD 软件

[引用本文格式] 张恒, 张卫军, 胡启龙, 等. Arabelle 型核电汽轮发电机轴系振动与密封瓦运行状态分析[J]. 热力发电, 2023, 52(10): 138-143. ZHANG Heng, ZHANG Weijun, HU Qilong, et al. Analyse on shafting vibration and operating state of sealing pad of Arabelle type nuclear power turbo generator[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(10): 138-143.

Analyse on shafting vibration and operating state of sealing pad of Arabelle type nuclear power turbo generator

ZHANG Heng¹, ZHANG Weijun¹, HU Qilong¹, LI Zhen², ZHANG Lijun³, ZHAO Bo¹

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. Fujian Fuqing Nuclear Power Co., Ltd., Fuqing 350318, China;
3. Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co., Ltd., Dalian 116000, China)

Abstract: Taking a million kilowatt nuclear power half speed steam turbine generator set as the research object, a dynamic model of spring foundation bearing rotor is established by using the rotor dynamics professional analysis software ARMD. The dynamic characteristics of the shafting are obtained through dynamic calculation and analysis. The accuracy of the calculation model is verified by the coincidence of the field measured critical speed of the shafting and the calculated value. On this basis, the vibration response caused by the thermal imbalance of the seal pad of the generator is calculated. It is found that the vibration changes are mainly concentrated at the rotor of the generator, and the thermal imbalance of the seal pad is only the direct influence factor of the vibration fluctuation of the shaft system, but not the root cause. At the same time, the oil film stress of the seal pad under different operating conditions is analyzed, and it is found that the axial inclination has the greatest impact on the stress of the seal pad. Therefore, the processing and installation process shall be ensured during the maintenance and adjustment of the unit to prevent the shaft system deflection during the operation of the seal pad.

Key words: nuclear turbine; vibration fluctuation; sealing pad; axial deflection; ARMD software

近年来,我国核电事业发展迅猛,截至 2022 年,已有 53 台机组在运,其中 Arabelle 型机组达到 24 台,占比接近一半,在现在及未来很长时间内该

型核电机组将是我国核电的主力机型之一。

据不完全统计,目前 24 台已投产 Arabelle 型机组中已有 10 台发生过轴系振动周期性波动现象。

修回日期: 2023-07-11

基金项目: 西安热工研究院有限公司众创/研究开发基金(GB-22-TYK23); 中国华能集团有限公司总部科技项目(HNKJ21-H59)

Supported by: Mass Innovation/Research and Development Fund of Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. (GB-22-TYK23); Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ21-H59)

第一作者简介: 张恒(1988),男,硕士,工程师,主要研究方向为旋转设备轴系振动故障诊断及处理, zhanghengj@tpri.com.cn.

表现为运行过程中多个轴承振动幅值和相位均呈周期性变化，每个波动周期大约 4~5 h，重复性好，且长期存在。从波动位置看，机组全轴系均存在振动波动，但主要集中在发电机侧，发电机和相邻的低压转子波动最大，高压侧轴振波动较小。

振动波动发生时，发电机密封油参数（流量和压力）也存在周期性波动，二者波动周期一致。检修中发现密封瓦及对应轴颈存在摩擦痕迹，对密封瓦进行精加工，严格控制安装工艺对周期性波动有抑制作用^[1-3]，即周期性波动与密封瓦摩擦（或温黏效应）存在直接关联，但其根本原因及影响因素尚不明确。

振动波动的发生对机组安全运行造成了威胁，同时故障机理不明确也给检修工作带来很大的不确定性。本文基于三低压缸结构的 Arabelle 型百万千瓦级核电半速汽轮发电机组轴系及密封瓦数学模型，对振动波动的影响因素进行计算研究，希望为后续振动波动治理及密封瓦检修工作提供重要参考信息。

1 机组轴系及密封瓦简介

Arabelle 型机组汽轮机是单轴、中间再热四缸（高中压合缸）六排汽、凝汽式、1 000 MW 等级的核电半速型汽轮机，采用静态无刷励磁。机组轴系是由 1 根高中压转子（HP/IP）、3 根低压转子（LP）、1 根发电机转子（GEN）以及各转子按双支承方式支撑的 10 个可倾瓦轴承组成，机组全长 62.9 m。其轴系结构如图 1 所示。

机组使用的是弹簧基础，由底板、2×7 根立柱及顶板组成，立柱及顶板间加入了弹簧隔振器，共使用了 TK 和 TVEK 2 个系列共 4 种型号的弹簧隔振器。

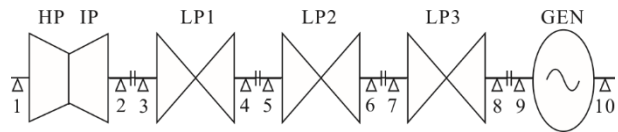


图 1 机组轴系结构

Fig.1 Structural diagram of unit shafting

Arabelle 型机组发电机密封瓦采用单流环结构，密封油从密封瓦块和密封瓦座之间的腔室注入，通过密封瓦块间隙，并从瓦块和大轴之间的间隙流出，从而阻隔发电机腔内的氢气和外部空气，起到密封作用。密封瓦结构如图 2 所示。

2 轴系动力学计算及密封瓦受力分析

2.1 数学模型及算法

汽轮发电机组的轴系是一个质量连续分布的弹

性系统，具有无穷多个自由度，离散化处理后，可将其看作有限自由度系统来分析。相较于传递矩阵法，有限元法分析转子动力学特性的计算精度更高^[4-5]。

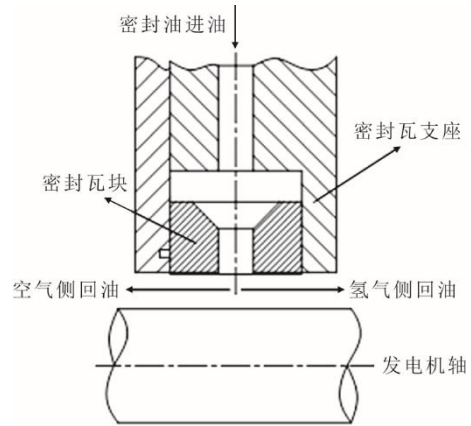


图 2 密封瓦结构示意图

Fig.2 Structural diagram of sealing pad

本文使用高级旋转机械动力学（advanced rotating machinery dynamics, ARMD）软件对机组轴系进行动力学分析，轴系动力学计算中先对 10 个支撑轴承进行建模计算，得到其动力学特性参数曲线，然后将轴系 5 根转子模化。出现振动波动的机组与常规火电机组不同，均采用弹簧基础作为支撑方式，因此将弹簧基础模型的计算结果（参振质量、支撑刚度及阻尼）作为轴承的支撑条件，建立弹簧基础-轴承-转子的动力学模型进行综合计算分析。

2.1.1 弹簧基础模化

Arabelle 型核电半转速汽轮机组使用弹簧减震基础，建立弹簧基础的动力学模型进行计算，得到弹簧基础横梁中点（支撑轴承安装位置）的动刚度曲线。

2.1.2 支撑轴承模化

Arabelle 型核电半速汽轮发电机组采用 3 瓦块可倾瓦支撑轴承，同一轴承的 3 块瓦块包角、槽角大小和支点比例各不相同，需要建立不对称轴承模型。通过计算轴承特性，可以得出可倾瓦轴承的特性系数曲线（即 4 个油膜刚度系数和 4 个油膜阻尼系数），并求出可倾瓦轴承的油膜压力分布等。

2.1.3 转子的模化

汽轮发电机组轴系建模时把各转子模化为离散的数学模型，由离散的等厚叶轮、具有分布质量和弹性的轴段组成，通过应变能法得到等效刚度具有更高的精度，并与实测值相关性较好^[6-9]，核电汽轮机组焊接空心段转子的等效刚度就是采用应变

能法提前求得。建模时将轴系离散成 236 个轴段、附加 50 个转动惯量的动力学模型。如图 3 所示。



图 3 3D 转子模型
Fig.3 3D turbo shafts

2.1.4 基础-轴承-转子动力学模型

将弹簧隔振器上方的水泥台板及其上的固定设备作为基础参振质量，水泥台板横梁中心处的动刚度作为基础动刚度用以支撑轴承，并计入弹簧隔振器的阻尼，可以建立弹簧基础-可倾瓦轴承-转子系统的动力学模型^[10-13]，如图 4 所示。图 4 中 m_i 为转子在第 i 个支座处的集中质量， m_{fi} 为基础

质量， k_i 和 r_i 分别为轴承油膜的刚度和阻尼，基础的轴承油膜刚度系数为 k_{fi} ，阻尼系数为 r_{fi} 。

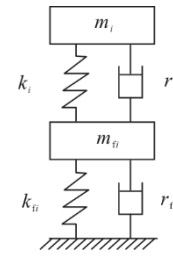


图 4 动力学模型
Fig.4 dynamical model

2.2 模型验证

求解模型的运动方程，在计算时计入转子的陀螺效应，求出轴系的前 6 阶临界转速，结果见表 1。

机组启停机过程中实测所得的临界转速区间见表 2。由表 1、表 2 可以看出，计算值与实测值基本符合，说明所建模型与算法精确度满足工程要求。

表 1 各转子临界转速计算值
Tab.1 Each rotor critical speed calculated values

阶次	高中压转子/(r·min ⁻¹)	1 号低压转子/(r·min ⁻¹)	2 号低压转子/(r·min ⁻¹)	3 号低压转子/(r·min ⁻¹)	发电机转子/(r·min ⁻¹)
一阶	943	1 098	1 092	1 053	874
二阶					2 812

表 2 各转子临界转速实测值
Tab.2 Measured values of each rotor critical speed

阶次	高中压转子/(r·min ⁻¹)	1 号低压转子/(r·min ⁻¹)	2 号低压转子/(r·min ⁻¹)	3 号低压转子/(r·min ⁻¹)	发电机转子/(r·min ⁻¹)
一阶	900~1 000	1 000~1 200	1 000~1 200	1 000~1 200	800~1 050
二阶					

2.3 轴承标高或弹簧基础刚度变化时轴系振动响应

与常规火电机组不同，Arabelle 型核电半速汽轮发电机组均采用弹簧基础，环境温度变化导致弹簧温度变化时，可能会影响到弹簧的支撑刚度及伸缩量，支撑刚度变化或弹簧伸缩导致的轴承标高变化会引发轴系振动变化，因此需要分析周期性的环境温度变化对轴系振动周期性波动的影响。

在转子模型的不同节点随机施加不平衡质量（表 3），以模拟正常运行状态下的轴系振动，计算其振动响应。

调整模型中支撑弹簧刚度至原刚度的 50% 时（实际环境温度变化范围内导致的弹簧刚度变化量小于 10%），其余参数不变，将变化后支撑动刚度计入基础-轴承-转子模型中计算转子振动变化。计算结果发现，工作转速下（1 500 r/min）弹簧刚度变

化对轴系所有轴瓦振动的影响均小于 1 μm，与实测振动波动幅度不相符。

表 3 不平衡质量分布
Tab.3 Unbalanced mass distribution

位置	质量/(kg·mm)	角度/(°)
3 号低压转子末级叶片（调端）	200	0
3 号低压转子次末级叶片（调端）	200	100
3 号低压转子中部	400	180
3 号低压转子次末级叶片（电端）	200	280
3 号低压转子末级叶片（电端）	200	0
发电机转子风扇环（调端）	300	50
发电机转子中部	500	150
发电机转子风扇环（电端）	300	230

机组周期性波动振动变化最大的位置出现在低压转子与发电机转子连接处（8 号和 9 号轴承），将 8 号和 9 号轴承所在的横梁标高在模型中抬高

1 mm, 在其他参数均相同的前提下, 重新计算油膜力及轴系振动响应。计算结果显示轴系振动变化最大的是 8 号轴瓦振动, 其振动变化如图 5 所示。由图 5 可以看出, 1 500 r/min 的运行转速下 8 号轴瓦振动变化量在 5 μm 左右。

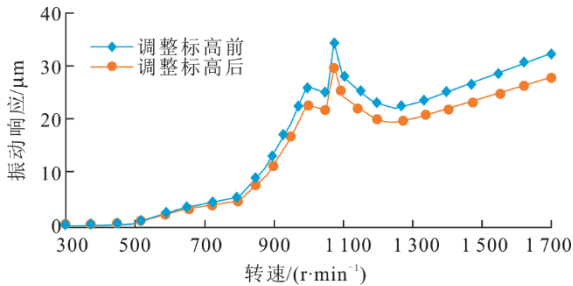


图 5 标高变化 1 mm 时 8 号轴瓦振动响应变化
Fig.5 Vibration response change of bearing 8 when elevation changes 1 mm

该核电机组 8 号轴瓦振动周期性波动最大变化量超过 50 μm, 如果振动波动是由标高变化导致的, 通过模型计算可知, 此时 8 号和 9 号轴承对应横梁处的标高变化量需超过 10 mm。现场对该机组 8 号和 9 号轴承对应横梁的标高进行了长期监测, 波动发生时标高不存在毫米级变化。即弹簧基础可能受温度影响导致的蠕变松弛不是轴系振动周期性波动的原因。

2.4 密封瓦处轴颈热不平衡时轴系振动响应

发电机密封油温度、压力与周期性波动存在同步变化, 且出现周期性波动的机组多次观察到密封瓦的磨损痕迹, 因此密封瓦处的动静摩擦(或温黏效应)与轴系周期性波动直接相关。

动静摩擦或温黏效应的作用机理都是在密封瓦对应轴颈表面产生热不平衡。当转子工作转速高于临界转速, 转子振动的滞后角大于 90°, 如图 6 所示。

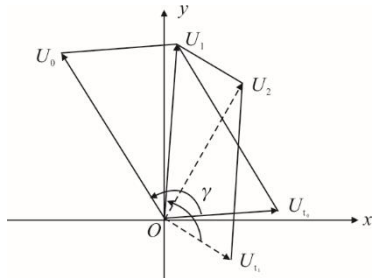


图 6 高于临界转速时不平衡量关系
Fig.6 Unbalance relation above critical speed

图 6 中 γ 为转子振动的滞后角, 初始不平衡量为 U_0 , 由此引发的 t_0 时刻热不平衡量为 U_{t_0} , 合成不平衡量 $U_1 < U_0$ 。以同样的方式, 可以得到 t_1 时刻热

不平衡量 U_{t_1} 以及合成不平衡量 $U_2 < U_1$ 。在此过程中, 合成不平衡量越来越小, 振动也越来越小, 转子热弯曲逐渐恢复。一段时间后, 在原始不平衡量作用下振动又开始逐渐增大, 这种状态下发电机转子的振动可能出现周期性波动现象。

在模型中计算 1 个周期内热不平衡最大时的轴系振动响应, 假设热不平衡同时发生在发电机转子两侧密封瓦处, 当轴颈表面最大温差均为 1 °C 时, 计算温差引起的转子热挠度, 将热挠度导致的静止质量不平衡施加在发电机转子模型的每一段集中质量上, 可以计算稳态下的轴系振动响应, 计算结果如图 7 所示。图 7 中振动幅值最大的 9 号、10 号轴瓦是发电机转子的支撑轴承, 1 500 r/min 时振动响应在 25 μm 左右, 相邻 3 号低压转子的支撑轴承 7 号、8 号轴瓦振动小于 3 μm, 轴系其余轴承处振动均为 0。

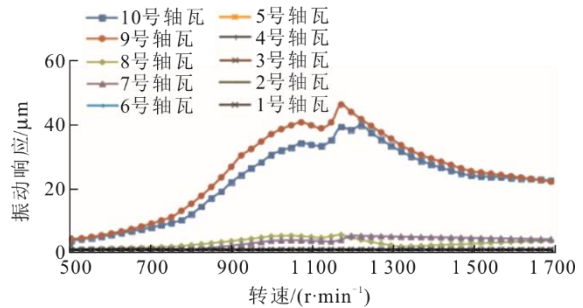


图 7 密封瓦处热不平衡时振动响应
Fig.7 Vibration response of seal pad under thermal unbalance

由图 7 可以看出, 密封瓦处热不平衡导致的振动主要集中于发电机转子, 相邻的 3 号低压转子振动响应只有发电机转子的 10% 左右, 即密封瓦处的动静摩擦只会导致发电机转子和相邻的 3 号低压转子出现振动变化, 与 Arabelle 型机组全轴系存在振动波动的现象不相符。

因此单纯密封瓦处热不平衡不是导致全轴系振动周期性波动的直接影响因素, 非根本原因。

2.5 转子及密封瓦受热变形分析

密封瓦处的热不平衡虽然不是振动波动的根本原因, 但是是影响振动波动的直接因素之一, 研究密封瓦运行时的状态, 有利于制定更准确的检修方案, 以更好地抑制振动波动的发生。

运行状态下转子及密封瓦均受热膨胀, 若转子径向膨胀程度超过密封瓦, 且密封瓦间隙设计值偏小, 密封间隙变小甚至消失, 会增加转子与密封瓦动静接触的可能, 因此建立密封瓦及转子热变形的

局部模型，如图 8 所示。

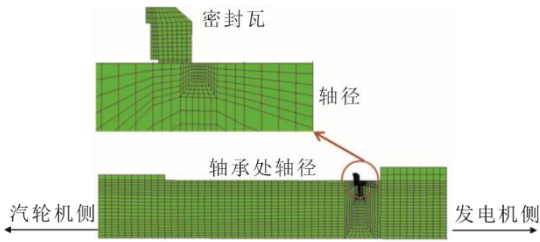


图 8 发电机转子及密封瓦模型

Fig.8 Model of generator rotor and sealing pad

按照正常运行时的温度设定边界条件，考虑温度场变化和离心力导致的转子变形，发电机转子及密封瓦变形计算结果如图 9 所示。由图 9 可见，与密封瓦表面对应的发电机转子表面径向最大膨胀量为 0.180 mm，密封瓦最小膨胀量为 0.196 mm，热态下密封瓦单侧间隙增大了 0.016 mm，可以得出密封瓦处可能发生的动静摩擦并非是由温度场变化导致的径向热膨胀引起的。

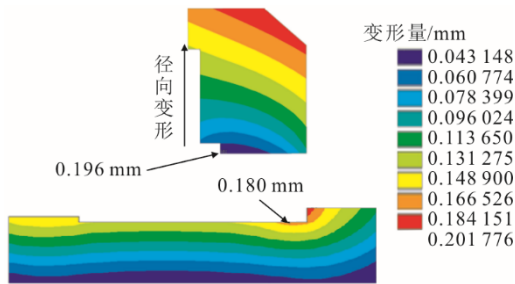


图 9 发电机转子及密封瓦变形计算

Fig.9 Deformation calculation of generator rotor and sealing pad

2.6 密封瓦油膜力分析

Arabelle 型机组密封瓦为浮动式结构，密封瓦沿径向所受外力包括自身重力 g 、摩擦力 f 及油膜力，如图 10 所示。本文忽略摩擦力的影响，仅考虑密封瓦能自由浮动的理想状态，此时油膜浮升力总和等于密封瓦重力，即运行状态下密封瓦的浮升力应保持不变。当密封瓦油膜间隙过小，或油膜浮升力不足以支撑密封瓦重力时，密封瓦处更容易出现动静摩擦。

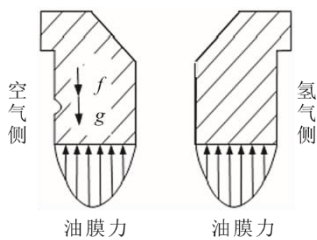


图 10 密封瓦受力

Fig.10 Stress diagram of sealing pad

本文使用 Dyrobes 软件(转子动力学计算软件)对密封瓦模型进行分析计算。当加工过程中，密封瓦间隙、椭圆度存在差别，或者运行中密封瓦受力不均导致运行时出现轴向倾斜，密封瓦的油膜厚度及压力分布均会相应发生变化。

密封瓦总间隙变化时，沿圆周方向的油膜压力分布随之变化，进而导致最小密封油膜厚度的变化。表 4 为间隙变化时密封瓦油膜参数变化。由表 4 可见，间隙越大时，最小油膜厚度越大，密封瓦发生摩擦的可能越小，但在间隙变化计算范围内，最小油膜厚度总变化量小于 10%。

表 4 间隙变化时密封瓦油膜参数变化

Tab.4 Changes of oil film parameters with the clearance of sealing pad

间隙变化量/mm	偏心率	流量/(L·min ⁻¹)	最小油膜厚度/ μ m	最大油膜压力/MPa
0	0.753	21.857	63.2	0.411 3
0.02	0.757	22.573	64.5	0.408 5
0.04	0.760	23.214	65.7	0.405 1
0.06	0.764	23.998	67.1	0.401 9
0.08	0.767	24.712	68.7	0.398 8

密封瓦椭圆度出现变化时，油膜周向压力分布如图 11 所示。由图 11 可以看出，密封油膜额外出现水平方向的压力分布，会导致密封瓦发生水平方向的位移偏斜。

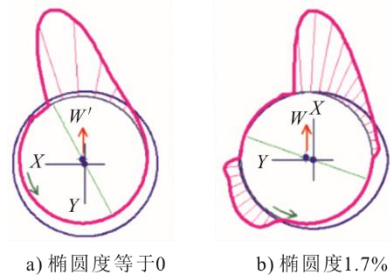


图 11 密封瓦油膜压力分布变化

Fig.11 Oil film pressure distribution of sealing pad

当密封瓦沿轴向出现偏斜时，密封瓦端泄增大，油膜压力出现变化，进而导致最小密封油膜厚度发生明显变化，轴向偏斜导致的油膜厚度变化量超过 50%，此时最小油膜厚度明显减小，浮升力不变的情况下，油膜最薄处油温升高，也更容易引发动静摩擦。当倾斜度进一步变化时，油膜提供的浮升力已不足以抵消密封瓦重力，此时油膜厚度为 0，密封瓦与轴颈直接接触，导致摩擦发生。

表 5 为轴向倾斜时密封瓦油膜参数变化。由表 5 可以看出，对最小油膜厚度影响较大的是轴向倾斜度，椭圆度主要影响了密封瓦的水平偏斜。计算中

忽略了端面摩擦力的影响, 考虑端面摩擦力时, 密封瓦油膜力等于摩擦力及重力的总和, 油膜力增大, 最小油膜间隙变小, 密封瓦更容易出现摩擦。

表 5 轴向倾斜时密封瓦油膜参数变化

Tab.5 Change of oil film parameters of seal pad when axial inclination

倾斜度/(mm·mm ⁻¹)	偏心率	最小油膜厚度/ μm	最大油膜压力/MPa
0	0.753	63.2	0.411 3
0.001	0.788	55.6	0.423 7
0.002	0.814	47.1	0.449 3
0.003	0.846	38.8	0.530 4
0.004	0.879	29.7	0.662 3

3 结 论

1) 通过 ARMD 软件建立了 Arabelle 型百万千瓦级核电半速汽轮发电机组轴系的数学模型, 模型考虑了弹簧基础对轴系动力学的影响, 并通过计算临界转速与实测值的比较对模型进行了验证。

2) 通过计算排除了弹簧基础弹簧刚度变化及标高变化导致轴系振动周期性波动的可能。

3) 分析发现发电机密封瓦处的热不平衡与全轴系周期性波动直接相关, 但非根本原因, 同时运行状态下受热膨胀后密封瓦径向间隙增大, 单纯受热膨胀不会导致密封瓦出现动静摩擦。

4) 通过计算可以看出, 密封瓦总间隙对油膜厚度影响较小, 轴向偏斜度对油膜厚度影响很大, 椭圆度会改变密封瓦油膜压力分布出现水平方向偏斜, 端面摩擦力会恶化密封瓦运行状态, 因此在密封瓦精加工及安装时, 应重点控制密封瓦的椭圆度、端面光洁度及轴向偏斜程度, 以增大油膜厚度, 减少摩擦, 更有利于减小轴系周期性波动。

[参 考 文 献]

- [1] 何斌, 杨璋, 李诚. 核电汽轮发电机组轴振周期性变化故障分析处理[J]. 东方汽轮机, 2021(3): 68-73.
HE Bin, YANG Zhang, LI Cheng. Analysis and treatment of periodically fluctuating vibration of nuclear power steam turbine generator unit[J]. Dongfang Turbine, 2021(3): 68-73.
- [2] 李振, 王洪凯, 何明圆, 等. 核电汽轮机组周期性振动报警分析及处理[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(增刊 2): 350-357.
LI Zhen, WANG Hongkai, HE Mingyuan, et al. Analysis and treatment of periodic vibration alarm of nuclear power turbine unit[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, 55(Suppl.2): 350-357.
- [3] 杨璋, 尹小波, 舒相挺. 某型核能汽轮发电机组轴系振动的稳定性分析及动平衡治理[J]. 热力发电, 2022, 51(5): 121-126.

- YANG Zhang, YIN Xiaobo, SHU Xiangting. Stability analysis and dynamic balance treatment of shafting vibration in a nuclear steam turbine generator unit[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(5): 121-126.
- [4] 谢沅博. 不对中-松动-碰摩转子系统的动力学特性分析[J]. 机械, 2021, 48(8): 37-45.
XIE Ruanbo. Dynamic analysis of rotor system with misalignment, loose and rub-Impact[J]. Machinery, 2021, 48(8): 37-45.
- [5] 王文斌. 柔性支承的滑动轴承-刚性转子系统动力学特性分析[J]. 机械传动, 2021, 45(6): 46-50.
WANG Wenbin. Dynamics characteristic analysis of sliding bearing-rigid Rotor system with flexible support[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2021, 45(6): 46-50.
- [6] 吴龙. 百万千瓦核电汽轮机轴系弯扭振动特性分析及模化方法研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2013: 23-40.
WU Long. Bending and torsional vibration analysis of the 1 000 MW nuclear rotor-shaft system and the modeling method[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2013: 23-40.
- [7] 喻文广. 基于应变能法的转子刚度研究[J]. 上海电气技术, 2013, 6(4): 29-32.
YU Wenguang. The research of rotor stiffness based on strain energy method[J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2013, 6(4): 29-32.
- [8] 孙立权. 应变能法在燃气轮机转子动力学计算中的应用[J]. 机械工程师, 2017(12): 105-106.
SUN Liquan. Application of strain energy method in rotor dynamic calculation of a gas turbine rotor[J]. Mechanical Engineer, 2017(12): 105-106.
- [9] 张恒, 杨璋, 张学延. 核电 1 000 MW 机组汽轮机高中压转子弯曲振动特性[J]. 热力发电, 2016, 45(11): 25-28.
ZHANG Heng, YANG Zhang, ZHANG Xueyan. Flexuous vibration characteristics of HP/IP rotor in a 1 000 MW nuclear power unit[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(11): 25-28.
- [10] 王永亮, 崔颖, 韩聿, 等. 具有柔性支承的刚性转子系统的动力学分析模型[J]. 大连海事大学学报, 2016, 42(4): 73-78.
WANG Yongliang, CUI Ying, HAN Yu, et al. Dynamic analysis model of rigid rotor system with flexible support[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2016, 42(4): 73-78.
- [11] HEIDARI H, ASHKOOR M. The influence of asymmetry in centralizing spring of squeeze film damper on stability and bifurcation of rigid rotor response[J]. Alexandria Engineering Journal, 2016, 55(4): 3321-3330.
- [12] 何国安, 黄潜, 张福海, 等. 计入弹簧基础的 1 060 MW 核电机组轴承载荷灵敏度分析[J]. 机械工程师, 2010(10): 108-110.
HE Guoan, HUANG Qian, ZHANG Fuhai, et al. Analysis of the bearing load sensitivity of 1 060 MW nuclear turbo-generator unit considering spring foundation[J]. Mechanical Engineer, 2010(10): 108-110.
- [13] 刘军. 某汽轮机转子振动故障数值仿真解决方案[J]. 热力透平, 2022, 51(2): 85-88.
LIU Jun. Numerical simulation solution of vibration fault of a steam turbine rotor[J]. Thermal Turbine, 2022, 51(2): 85-88.

(责任编辑 杜亚勤)