

某核电机组发电机轴承温度偏差大分析处理

王志松 黄新龙 贾嵩

国核示范电站有限责任公司 山东省荣成市 264300

摘要：某核电站东方电气设计制造 QFSN-1500-4-27 型汽轮发电机在机组调试期间出现支持轴承温度高、单个轴承两个温度测点温度偏差大等现象，给机组后续调试运行带来隐患。为解决该问题，技术人员从设备结构、问题现象分析，一步一步进行现场操作验证、设备解体检查及历史运行数据查询，最终确定了问题根本原因及促成因素，并制定了相应的运行操作以避免类似问题重复发生。

关键词：发电机；轴承、温度高；偏差大

引言

某核电机组发电机使用东方电气设计制造 QFSN-1500-4-27 型汽轮发电机，发电机为隐极式、四极、三相同步发电机，采用水氢氢冷却方式。

在机组调试期间发现 2# 机组 9# 轴承（发电机汽侧轴承）金属温度 2-LOS-TE3978 为 56℃，2-LOS-TE3988 为 53℃，明显比其他轴承金属温度偏高。对 9# 轴承进行现场检查，油流平稳、未见异常摩擦声。10# 轴承（发电机励侧轴承）金属温度 2-LOS-JE-TE3989 为 52℃，2-LOS-JE-TE397 为 46℃，10# 轴承温差较 9# 轴承温差偏大。

本文通过分析轴承温度异常的可能原因，并针对性进行排查，找出了轴承温度异常的根本原因，通过解体检查轴承及制定相应运行要求解决了该问题。

1. 问题排查

1.1 轴承结构

轴承位于端盖内部，为上下分半椭圆轴承。端盖沿水平方向分为上下两半，由厚钢板焊接而成，端盖既是发电机外壳的一部分，又作为轴承的支撑。轴承与轴承座（端盖）的配合面为球面，使轴承可以根据转子挠度自动调节轴心。

1.2 发电机转子顶起高度检查

现场启动顶轴油系统，测量发电机转子顶起高度，9# 支撑轴承转子顶起 0.10mm，10# 支撑轴承转子顶起 0.07mm，厂家安装程序要求 0.05—0.15mm，满足程序要求。

1.3 润滑油孔板前后压力检查

现场安装临时测量压力表，测量轴承润滑油进油管节流孔板前后压力，9# 支撑轴承进油管路孔板前压力 0.22MPa，

9# 支撑轴承进油管路孔板后压力 0.21MPa；10# 支撑轴承进油管路孔板前压力 0.22MPa，10# 支撑轴承进油管路孔板后压力 0.21MPa；9#、10# 进油压力高于机组正常运行期间（1500RPM 转速）进油压力（0.14—0.18MPa），该异常主要是由于机组调试工况两台备用油泵同时运行，润滑油母管压力较机组正常运行期间压力高。通过目视观察轴承回油窥视窗，两侧润滑油回油流量相近。

1.4 发电机顶轴油压力检查

现场复测顶轴油压力时发现，与安装阶段的数据相比，顶轴油压力发生了显著变化。

通过与厂家讨论分析，基于厂家已有的项目经验，转子顶轴油压力的显著变化通常是由发电机支撑轴承的轴向平行度偏差所引起的。若轴承处于这种状态，机组启动后可能会出现同轴承前后温度差异过大，从而触发报警或导致机组跳机。

2. 处理策略

2.1 调整顶轴油分配器开度

现场尝试通过起停盘车、顶轴油以及调整顶轴油分配器开度的方式，使轴承平行度恢复正常。

现场停盘车前后顶轴油压力无明显变化，通过起停顶轴油复测顶轴油压力也无明显变化，调整轴承顶轴油分配器开度，现场尝试将所有阀门开度调整一致，顶轴油压力出现一定变化，但不明显。

根据 9、10# 轴承顶轴油分配器压力测量结果，可判断轴承平行度较安装阶段已变化，且通过启停盘车、顶轴油无法将轴承复位，也无法通过调整顶轴油压力的方式对轴承平

行度进行调整。

2.2 停盘车转子转速到零时间验证

由于无盘车电流在线监测数据,无法查询历史盘车电流数据,无法通过盘车电流大小对轴隙摩擦系数进行分析,现场停盘车期间记录转子从盘车转速到零转速时间,停盘车时间为45min,对比调试期间停盘车均为60min左右,说明因为9#、10#轴承状态发生改变,造成轴系摩擦系数增大。

2.3 轴承解体检查

2.3.1 9# 轴承解体检查

解体检查9#轴承盖与轴承间隙均(轴承紧力)存在异常,塞尺检查9#轴承靠近汽侧边缘位置0.05mm不入,压铅丝复测间隙:0.04—0.38mm。

	汽侧 (mm)	中间 (mm)	励侧 (mm)	理论值 (mm)
轴承紧力	-0.06	0.07	0.20	
顶部间隙	1.1	1.09	1.05	
侧间隙 1	0.75	NA	0.82	
侧间隙 2	0.85	NA	0.72	

下半轴承瓦面与轴颈接触痕迹整体呈梯形分布,轴颈靠近机外侧(汽轮机侧)表面存在接触痕迹。现场对轴承进行PT、UT检查均未发现异常。

轴承回装,测量轴颈与轴承顶部间隙、轴承侧面间隙、轴承与轴承盖间隙(轴承紧力)都满足或接近理论值要求,与安装时数据基本一致。

	汽侧 (mm)	中间 (mm)	励侧 (mm)	理论值 (mm)
轴承紧力	0.42	0.43	0.43	0.45~0.6
顶部间隙	1.07	1.07	1.07	1.05
侧间隙 1	0.83	NA	0.78	
侧间隙 2	0.77	NA	0.84	任意两点之差≤0.1)

2.3.2 10# 轴承解体检查

解体检查10#轴承盖与轴承间隙均(轴承紧力)存在异常。

	汽侧 (mm)	中间 (mm)	励侧 (mm)	理论值 (mm)
轴承紧力	0.06	0.27	0.38	
顶部间隙	1.11	1.10	1.07	
侧间隙 1	0.82	NA	0.80	
侧间隙 2	0.85	NA	0.81	

下半轴承瓦面接触痕迹呈断续分布,轴颈靠近机外侧存在接触痕迹。现场对轴承进行PT、UT检查均未发现异常。

轴承回装,测量轴颈与轴承顶部间隙、轴承侧面间隙、轴承与轴承盖间隙(轴承紧力)都满足或接近理论值要求(如表5所示),与安装时数据基本一致。

	汽侧 (mm)	中间 (mm)	励侧 (mm)	理论值 (mm)
轴承紧力	0.55	0.58	0.55	0.45~0.6
顶部间隙	1.10	1.10	1.10	1.05
侧间隙 1	0.83	NA	0.85	
侧间隙 2	0.83	NA	0.75	任意两点之差≤0.1)

根据9#、10#轴承翻瓦检查状态,可确定轴承平行度出现变化,且9#轴承较为严重。轴承回装后轴承平行度符合使用要求,复测各配合数据、尺寸与安装期间数据相近。

2.4 转子轴系顶起高度调整

9#、10#轴承回装完成后现场调整发电机组转子顶起高度,9#轴承顶轴油压偏差较大,现场尝试通过调整分配器开度使压力均等,调整开度对油压偏差情况影响不大。且顶轴油系统刚启动,4个分配器开度一致时压力已存在偏差,初步分析该顶轴油压偏差可能与转子与轴颈接触、顶轴油囊状态、瓦面状态等相关。最终调整9#、10#轴承顶轴油分配器开度及油压如下:

9#			10#		
分配器阀门对应油管	分配器开度(圈)	顶轴油压力(bar)	分配器阀门	分配器开度(圈)	顶轴油压力(bar)
TE-1	1.375	90	EE-1	1.375	100
TE-2	1.375	80	EE-2	1.375	100
TE-3	1.25	160	EE-3	1.375	110
TE-4	1.25	160	EE-4	1.375	110

调整后启动顶轴油系统30min,9#轴承温度28.9℃、28.9℃,10#轴承温度29.9℃、29.1℃,同一轴承前后温差不超过1℃。

3. 原因分析

3.1 历史运行数据分析

排查2#机历史运行数据,发现2025年2月20日—2月22日期间,轴系持续向发电机窜动,启动顶轴油后窜动量出现突变,2月25日同样存在类似情况,由此可知在此期间现场存在某些操作致使汽轮机转子出现膨胀,类似现象后续运行中也存在,3月17—18日未启动顶轴油期间也存在轴向突变。

3.2 顶轴油分配器开度对瓦温偏差影响

根据9#、10#轴承顶轴油分配器开度检查结果,顶轴油分配器开度大对应轴承温度高。9#轴承顶轴油四路分配器总开度明显高于10#轴承,导致9#轴承比10#轴承温度高;10#轴承靠近汽端顶轴油分配器开度大,导致10#轴承汽侧瓦温高于励侧瓦温。

3.3 轴承平行度对瓦温偏差的影响

根据顶轴油压力变化、翻瓦检查情况、停盘车时间变化、轴承接触情况分析：翻瓦前轴承处于一个倾斜的状态，且无法通过启停顶轴油、调整顶轴油压等方式使轴承回正，机组起动过程中存在瓦温偏差大导致停机风险。

轴承平行度变化可能原因如下：

润滑油投入运行，轴受热后膨胀，此时未启动顶轴油系统，轴与轴承钨金面直接接触，在热膨胀力的作用下，会出现机械学中的“爬行 (creep)” 现象。机械学中的爬行现象，是指在滑动摩擦副中从动件在匀速驱动和一定摩擦条件下产生的周期性时停时走或时慢时快的运动现象。每一个爬行周期都分两个阶段：一个是能量的贮存，另一个是能量达到临界值时的立即释放。程度较轻时爬行表现为肉眼所不能察觉的位移，显著时表现为较大距离的跳动。如：2月 20 日到 2月 26 日期间启动润滑油系统，持续约 6 天时间整个轴系轴颈及附近轴段已被润滑油充分加热，推力瓦 ~ 低发对轮共 6 处轴颈，每个轴颈热辐射区约为 1.3m， $L_0=6 \times 1.3\text{m}$ ；金属膨胀系数 $\alpha=12 \times 10^{-6} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$ ；转轴温升 $\Delta T=30\text{K}$ ；轴系在低发对轮联轴器处膨胀量 $\Delta L=L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T=6 \times 1.3 \times 12 \times 10^{-6} \times 30=0.0028\text{m}=2.8\text{mm}$ ，由此可计算出轴系在发电机端膨胀量约为 2.8mm，与曲线中转子膨胀量基本吻合。

轴颈与轴承接触，接触面积大，且钢与钨金之间静摩擦系数较大，产生摩擦力大于镶块与轴承座摩擦力，这会带动轴承向励端移动，并沿球面镶块接触处产生移动。

当存在高压顶轴油时，顶轴油顶起发电机转子，转子浮于轴承上，转子与轴承之间腔室内充满顶轴油。有顶轴油时摩擦系数很小、其摩擦力较小，该摩擦力小于轴承与轴承座之间的阻力，轴承静止不动、转子可以轻松自由轴向窜动。

当没有高压顶轴油时，发电机转子落在轴承上，转子与轴承合金面直接接触，转子与轴承之间仅有少量残留顶轴油。此时摩擦系数增大、摩擦力增大，当摩擦力大于轴承与轴承座之间的阻力，低压缸转子膨胀时轴系转子拖动轴承一起向发电机端轴向位移。

4. 运行操作建议

根据原因分析厂家给出了机组运行操作及顶轴油分配

器调整建议：

现场在汽轮机高压缸进汽金属壁温完全冷却之前 (130°C) 保持盘车、润滑油、顶轴油系统的运行状态。在盘车停止后，按如下间隔时间启动顶轴油泵的方式释放转子与轴承之间的摩擦力：

- a) 高压缸进汽金属壁温 $110^{\circ}\text{C} - 130^{\circ}\text{C}$ ，启动顶轴间歇时间 2h；
- b) 高压缸进汽金属壁温 $80^{\circ}\text{C} - 110^{\circ}\text{C}$ ，启动顶轴间歇时间 4h；
- c) 高压缸进汽金属壁温 $40^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$ ，启动顶轴间歇时间 8h。

每次顶轴油运行时间 5 ~ 10 分钟。

机组长时间停机时 (≥ 30 天)，如需启动润滑油则需 30 分钟内启动顶轴油系统，停润滑油后，顶轴油系统持续投入 5 ~ 10 分钟，并且每间隔 8 小时启动顶轴油系统 5 ~ 10 分钟，释放转子与轴承之间的摩擦力直至瓦温降至一定水平 (室温 +15K)。

调整转子轴承顶起高度期间，顶轴油分配器开度尽可能均匀，推荐转子顶起高度 $0.05\text{~}0.15\text{mm}$ ，分配器开度： 1.25 ± 0.125 圈 (根据转子顶起高度确定开度)，压力仅做记录。

结论

通过现场操作验证、轴承解体数据变化，对轴承温度高及温度偏差大进行了原因分析，提出了改变运行操作、修改轴承顶轴油分配器调整原则等改善了轴承温度高、温度偏差大问题，说明应对措施是有效的。

参考文献：

[1] 张巍；楼听皓；张献峰；王继承；王琇峰；殷东升；某核电汽轮机组高中压缸轴瓦两侧温差大原因分析 [J]; 东方汽轮机; 2024 年 02 期。

[2] 许洪川；范磊；大型核电机组汽轮机轴瓦故障及原因探究 [J]; 设备管理与维修； 2017 年 10 月。

[3] 钱涛 . 汽轮机轴瓦温度偏高的原因与故障排除 [J]. 设备管理与维修 ,2021 年 1 月。

作者简介: 王志松(1985-11),男,汉族,山东省龙口市,本科,工程师,汽轮机检修。