

某循环海水泵振动故障诊断与趋势分析

舒相挺¹, 杨 璋^{1,2}, 徐逸哲¹, 蒋彦龙¹

(1. 南京航空航天大学飞行器环境控制与生命保障工业和信息化部重点实验室 南京, 210016)

(2. 福建宁德核电有限公司 宁德, 355200)

摘要 针对某 CPR1000 核电机组因循环海水泵的下部滚动轴承振动大、存在紧急降负荷运行或停运的风险, 开展了振动故障诊断与趋势分析。通过分析该 BCV 285 型循环海水泵运行中的振动尖峰能量信号和振动速度均方根信号, 发现该轴承外环滚道存在局部剥落且发生共振是海水泵振动大的主要原因。通过采取强化轴承的润滑和加强基础刚度等措施, 减小了海水泵的共振响应。实践表明, 实时监测振动速度均方根值的变化趋势可以指导该型循环海水泵的安全运行。

关键词 循环海水泵; 滚动轴承; 振动频谱; 振动尖峰能量; 共振; 故障诊断

中图分类号 TH113

引 言

核电厂各旋转设备中广泛应用滚动轴承, 而某些滚动轴承因核安全的原因无法及时更换。对滚动轴承开展状态监测与故障诊断, 及时预测轴承的剩余寿命, 对核电厂的安全生产具有重要的意义。

许多学者对滚动轴承的损伤与振动之间的关系进行了大量研究。刘静等^[1]建立了滚子与滚道接触有限元二维模型, 研究了故障宽度对滚子与滚道之间的接触区宽度、接触变形、接触应力分布及接触刚度的影响, 讨论了局部剥落故障对轴承振动特性的影响。Patil 等^[2]建立了含局部剥落故障的球轴承的动力学模型, 研究了故障尺寸对轴承振动特征的影响。王彬等^[3]建立了二维准动态球轴承有限元模型, 研究了故障位置与轴承振动特征分布的关系。樊莉等^[4]建立了含局部剥落故障的滚动轴承有限元模型, 分析了剥落故障与滚动体、滚道之间接触应力的关系。伍济钢等^[5]将滚动轴承滚道上的局部缺陷等效为作用在轴承内外圈和滚动体上的冲击力函数, 并进行了轴承振动的频谱分析。剡昌锋等^[6]考虑弹流润滑等影响, 仿真计算了滚动轴承局部缺陷导致的动力学响应。刘静等^[7]建立了含局部故障的圆柱滚子轴承-轴承座系统的有限元模型, 研究了轴承外圈滚道内不同尺寸的局部故障导致的该系统振动特征变化。

笔者以某核电机组 BCV 285 型立式循环海水

泵为研究对象, 从机械振动故障诊断角度分析了滚子轴承外环滚道的局部剥落对循环海水泵振动的影响。通过分析振动幅值变化趋势, 保障了循环海水泵组的安全运行。

1 循环海水泵的技术参数及振动激励

某压水堆核电站一期工程共有 4 台 CPR1000 机组, 设计额定功率为 1 089.075 MW, 配套 2 台各 50% 容量的 BCV 285 型循环海水泵。当一台循环海水泵因故障停运后, 凝汽器允许半侧运行, 但在该工况下容易诱发流体产生不稳定振动, 长期高负荷运行将导致钛管碰磨断裂^[8]。一旦钛管断裂, 海水进入二回路, 将导致机组停运甚至引发反应堆跳堆, 将对核安全造成不利的影晌^[9]。因此, 加强循环海水泵的状态监测和故障诊断尤为重要。

1.1 循环海水泵的主要技术参数

该型循环海水泵为 Flowserve 公司设计的单级立式混凝土蜗壳闭式叶轮离心混流泵, 泵组由电机、行星齿轮减速器及泵体等组成, 中间均由齿式联轴器连接^[10], 如图 1 所示。

泵轴上部安装 SKF 23984 CA 双列球面圆柱滚子轴承, 油脂润滑; 还安装了 SKF 29484 EM 球面圆锥滚子轴承, 稀油润滑。泵轴下部安装 SKF NU1088 MA 圆柱滚子轴承, 油脂润滑。其中, 上部

* 江苏高校优势学科建设工程资助项目

收稿日期: 2020-11-13; 修回日期: 2021-03-29

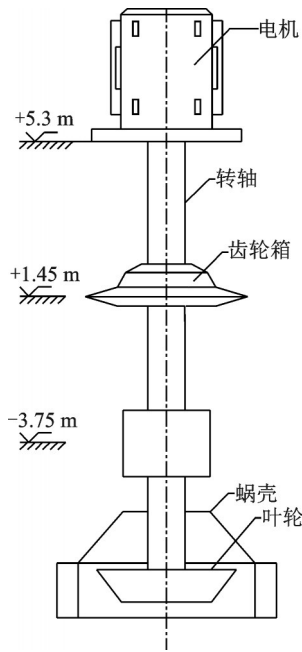


图1 循环海水泵结构简图

Fig.1 The diagram of seawater circulating pump

圆柱滚子轴承与下部圆柱滚子轴承相距 1 171 mm，下部圆柱滚子轴承与叶轮相距 1 968 mm。泵轴截面如图 2 所示。

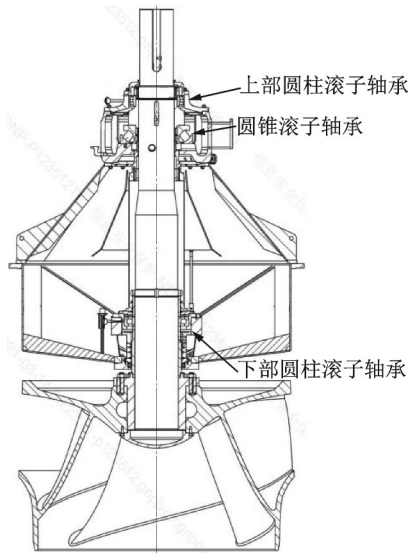


图2 泵轴截面图

Fig.2 Section of pump shaft

循环海水泵在最佳效率工况时，流量为 $9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ ，扬程为 22 m。主要技术参数如下：额定流量为 $97\,200 \text{ m}^3/\text{h}$ ；额定扬程为 19.0 m；额定转速为 169 r/min；轴功率（额定工况）为 5 868 kW；额定效率为 88.3%；叶轮叶片数为 4；质量为 $2.9 \times 10^4 \text{ kg}$ 。

该型循环海水泵具有轴系长、体积大、转速低、流量高和负荷重等特点，从机械振动故障诊断角度

对其开展状态监测更贴合工程实际。

1.2 循环海水泵的振动激励

循环海水泵运行时叶轮受到水流的作用，产生径向力 $F_r^{[11]}$ ，计算公式为

$$F_r = 9.81 \times 10^3 K_r H D_2 B_2 \quad (1)$$

其中： H 为扬程； D_2 为叶轮外径； B_2 为包括盖板的叶轮出口宽度； K_r 为实验系数，可查表或按 Steponoff 公式进行计算^[11]。

$$K_r = 0.36 Q/Q_{\text{bep}} \quad (2)$$

其中： Q 为实际流量； Q_{bep} 为最佳效率点的流量。

制造厂提供的径向力 F_r 与流量 Q 的关系如图 3 所示。

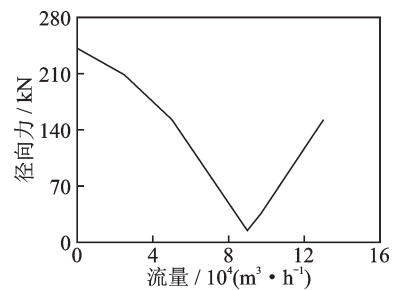


图3 流量和径向力关系曲线

Fig.3 Relation curve between flow rate and radial force

由图 3 可见，当实际流量为最佳效率点的流量 $9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，径向力最小 (14 665 N)。循环海水泵的压水室就是按这一最佳效率工况设计的。

在潮汐作用的影响下，循环海水泵入口水位会发生变化，导致实际流量与最佳效率点流量发生偏离。由式(1)和式(2)可见，实际流量 Q 的变化导致径向力 F_r 产生了变化。 F_r 是一种随机力，它将激起循环海水泵的随机振动。

循环海水泵的另一激振力是泵轴的离心力 F_i ，它在水平面内沿 x 轴、 y 轴方向的分量为

$$\begin{cases} F_{ix} = m\epsilon\omega_r^2 \cos(\omega_r t - \alpha) \\ F_{iy} = m\epsilon\omega_r^2 \sin(\omega_r t - \alpha) \end{cases} \quad (3)$$

其中： ϵ 为泵轴不平衡质量的偏心距； ω_r 为泵轴角速度； t 为时间； α 为不平衡离心力的初始相位角。

F_i 为周期性激振力，激振频率对应为叶轮的通过频率。设泵轴的回转频率为 f_0 ，则叶轮的通过频率为 $4f_0$ 。由于循环海水泵的叶轮和泵轴出厂前经过严格的动平衡，加上 ω_r 较低，因此 F_i 相对于 F_r 较小。循环海水泵的振动问题主要还是一个随机振动问题。

泵轴在额定转速下的回转频率 $f_0 = 2.82 \text{ Hz}$ ，叶片的通过频率为 11.3 Hz。下部圆柱滚子轴承各部

件的特征频率^[12]如下:保持架为1.3 Hz,滚动体为14.7 Hz,外环为34.6 Hz,内环为41.4 Hz。上部圆柱滚子轴承各部件的特征频率^[12]如下:保持架为1.3 Hz,滚动体为21.3 Hz,外环为52.7 Hz,内环为60.0 Hz。

2 循环海水泵的机械故障诊断

根据随机振动理论,笔者选择振动尖峰能量(gravity spike energy,简称gSE)来诊断滚动轴承的故障,这有助于突出轴承的故障基频及各谐波频率^[13]。选择振动速度均方根值(root mean square,

简称RMS)监测泵组运行时的振动状态,将有助于根据振动能量的变化开展趋势分析^[14]。

结合该型循环海水泵历史运行经验,制造厂提供的泵轴轴承座处振动报警值(采用RMS)为8 mm/s,停运值为12 mm/s。

2.1 案例介绍

2019年12月16日,巡检发现某核电机组2号循环海水泵下部圆柱滚子轴承处存在异音,振动测量值显示垂直方向(V)幅值为4.7 mm/s,水平方向(H)为2.0 mm/s,轴向(A)为3.9 mm/s,远高于历史测量值,如表1所示。

表1 2号循环海水泵振动数据列表

Tab.1 List of vibration data for No.2 circulating seawater pump

时间	下部轴承处 振动幅值/(mm·s ⁻¹)			上部轴承处 振动幅值/(mm·s ⁻¹)		
	H	V	A	H	V	A
2019-09-24	1.23	1.02	0.48	0.60	0.57	0.65
2019-11-19	0.93	0.70	0.66	0.65	0.80	0.65
2019-12-16	1.20	3.36	1.82	2.21	4.00	3.64

表1显示,2019年12月16日测得的振动幅值较11月19日或9月24日的历史数据有大幅增加(V向的变化量已超过报警值的25%),应进行诊断以查明变化的原因,并确定下一步措施^[15]。现场还发现该海水泵轴封回水管处有油脂流出,下部轴承的温度存在上涨趋势。

2.2 gSE振动信号采集与分析

2.2.1 gSE振动信号采集系统

由于存在异音,使用高分辨率振动测试系统采集循环海水泵下部轴承和上部轴承处的gSE振动信号进行故障诊断。振动探头选择Entek公司9000A型通用加速度传感器,灵敏度为100 mV/g,传感器共振频率为28 kHz,频率采集范围为0~10 kHz,谱线数为3 200,滤波器选择5 kHz gSE,4次线性平均,采集振动信号的加速度单峰值。

2.2.2 gSE时域信号分析

2019年12月16日,对该循环海水泵上部轴承和下部轴承处的gSE时域信号进行测量,发现均存在明显冲击现象。以下部轴承处V向信号最明显,如图4所示。

相比2019年11月19日相同位置处的gSE时域信号(见图5),图4中gSE振幅明显上涨,且冲击现象更明显。

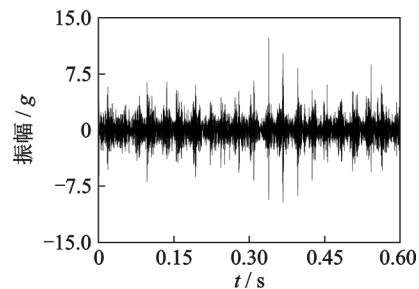


图4 V向振动时域图(2019-12-16)

Fig.4 Time domain diagram of vibration in V-direction (2019-12-16)

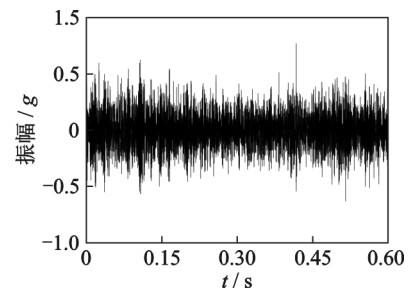


图5 V向振动时域图(2019-11-19)

Fig.5 Time domain diagram of vibration in V-direction (2019-11-19)

2.2.3 gSE频域信号分析

对图4中的振动时域信号进行频谱分析,如图6所示。

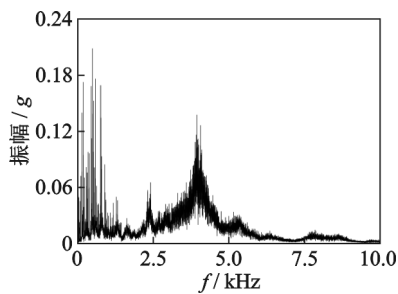


图6 V向振动频谱图(0~10 kHz)

Fig.6 Vibration spectrum in V-direction (0~10 kHz)

由图6可以看出,在2 500~5 000 Hz频域区间出现了明显的随机高频宽带的“噪声地平”,且低频分量丰富。由于该循环海水泵工作转速仅为169 r/min,进一步对0~1 000 Hz区间的中低频分量进行细化谱分析,如图7所示。

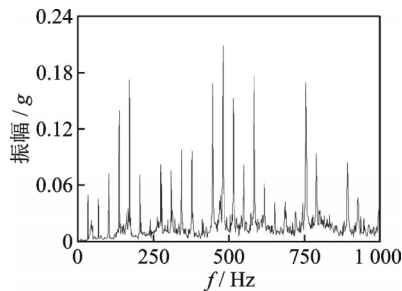


图7 V向振动细化图谱(0~1 000 Hz)

Fig.7 Vibration zoom spectrum in V-direction (0~1 000 Hz)

分析图7发现,中低频分量基本由下部轴承外环特征频率34.6 Hz及其倍频组成,谐波分量丰富。对比图5中振动时域信号对应的频谱图,发现振幅变化量主要是下部轴承外环特征频率及其谐波分量产生。

通过分析下部轴承的gSE振动信号,诊断该轴承外环已出现磨损或剥落缺陷。由于该轴承外环特征频率两侧已出现许多边带,判断缺陷已扩展到轴承其他区域^[13]。

同理分析上部轴承的gSE振动时域和频域信号。频谱基本为下部轴承外环特征频率34.6 Hz及其倍频分量所组成,诊断上部轴承完好,其振动主要为下部轴承处的振动传递所致。

2.3 RMS振动信号采集与分析

2.3.1 RMS振动信号采集系统

为监测下部轴承处振动能量变化趋势,现场布置了一套振动实时监测系统。采用Bently 9200速度传感器,灵敏度为4 mV/(mm·s⁻¹)。系统的模数

转换精度为24位,频率采集范围为0~1 000 Hz,谱线数为800,2次线性平均,采集振动信号的RMS。

2.3.2 RMS时域信号分析

从2019年12月16日起,连续监测循环海水泵下部轴承处的RMS,判断振动能量的变化趋势。

对循环海水泵下部轴承处的RMS时域信号进行趋势分析,发现振幅变化趋势与海水泵实际流量变化趋势呈对应关系。实际流量偏离最佳效率流量越远时,振动幅值越高,且脉冲冲击的振动现象越明显。

2.3.3 RMS频域信号分析

对循环海水泵下部轴承处的RMS时域信号进行频谱分析,发现振动分量基本以下部轴承外环特征频率34.6 Hz及倍频为主,导致振幅变化的主要原因是下部轴承外环特征频率及其谐波分量。

综合分析上述振动时域信号、频域信号及相关特征频率分量,还发现泵轴3倍的叶片通过频率(33.8 Hz)和下部轴承外环特征频率(34.6 Hz)仅偏差2.3%,一旦下部轴承存在外环剥落等缺陷,海水泵运行时必然诱发两者的共振响应。此外,当循环海水泵实际流量偏离最佳效率流量越远时,作用在叶轮上的径向力会越高,一方面将加剧叶片通过频率和外环特征频率下的振动幅度,另一方面也会进一步放大共振响应幅值。

2.4 油脂分析

2019年11月16日,同步从下部轴承加油孔处添加18 kg新油脂以置换旧油脂,对从溢流口处置换出的旧油脂进行化验。分析发现旧油脂颜色偏黑,油脂中存在油泥和少量金属颗粒物。颗粒物中金属元素Fe、Cu和Cr较高,分析为轴承滚道磨损的颗粒物。同时,还发现润滑脂中的水分含量偏高,存在乳化现象。

3 治理措施与振动趋势分析

结合第2节的诊断意见,分析该循环海水泵的振幅会随运行时间的延长而逐步升高,且潮汐发生大幅变化时,随实际流量和径向力的同步变化会加剧共振响应幅度。为了给泵组抢修和机组堆芯控制预留准备时间,在确保不超过振动报警值的前提下,制定了缓解振动的临时措施和实时监测下部轴承RMS指导海水泵安全运行的策略,重点关注满潮及天文大潮等潮汐变化明显的时间段,根据振动变化趋势及时响应和干预。

3.1 改善润滑

根据旧油脂分析结果,下部轴承滚道剥落的硬质颗粒容易加剧摩擦面的损伤,乳化现象会进一步恶化轴承润滑状态。自2019年11月16日起,结合弹性流体动力润滑理论在滚动轴承中的应用经验^[6,14],每天3次定期对下部轴承补充4~9 kg新油脂开展饱和润滑。通过置换旧油脂的方法将硬质颗粒物排出。在有效提高轴承润滑水平的同时,现场振动监测发现有效降低了振动信号中的随机噪声地平。

3.2 增强刚度

由于下部轴承外环存在不可逆的剥落缺陷,加上共振等不利因素影响,随着连续运行时间的延长,振动呈逐步上升趋势。2019年12月26日,该机组所在海域出现满潮叠加天文大潮,当海水泵实际流量大幅偏离最佳效率流量时,下部轴承处振幅明显上涨且共振冲击明显加剧,振动变化量仍以下部轴承外环特征频谱及倍频成分对应的分量为主。对于下部轴承处的共振放大因子 β ,有

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{(1 - \Omega^2/\omega_d^2)^2 + (2\gamma\Omega/\omega_d)^2}} \quad (4)$$

其中: Ω 为3倍的叶片通过频率的激振力频率; ω_d 为下部轴承外环特征频率; γ 为阻尼比。

当 Ω/ω_d 比值不变时, γ 越大,共振时 β 越小^[16]。因此,采取在下部轴承室外部V向增加枕木以加强刚度和阻尼比的临时措施。在激振力和频率比不变的情况下,振动冲击现象得到一定缓解。

3.3 振动趋势分析

通过改善润滑和增强刚度,该循环海水泵得以在不超振动报警值的前提下持续监测运行。

2020年1月9日,该海域又一次出现满潮叠加天文大潮工况,海水泵实际流量再次大幅偏离最佳效率流量,振动幅值出现明显上涨且共振冲击加剧(最大尖峰值为9.6 mm/s)。通过振动能量变化诊断振动有发散趋势,现场检查发现异音同步明显增大,及时决策停运该海水泵。

通过实时监测RMS的方式,指导该循环海水泵持续运行累计约24 d,为机组安全生产做出了重大贡献。该循环海水泵下部轴承处V向的振幅和实际流量趋势如图8所示。

再次分析该海水泵监测运行期间下部轴承处振动的变化趋势,发现存在如下特点:早期阶段,随着

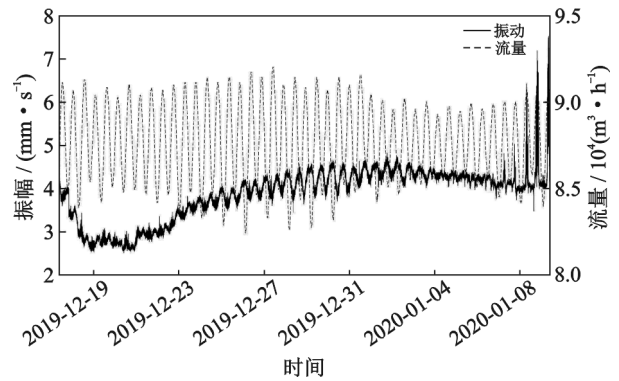


图8 循环海水泵振动和流量趋势图

Fig.8 The trends of vibration and flow for seawater circulating pump

定期添加新油脂,轴承润滑状况得以改善,振幅呈现先下降然后基本保持动态稳定的趋势,振幅波动幅度有所降低;中期阶段,随着连续运行时间延长,轴承外环缺陷进一步扩大,振幅逐步升高,实际流量大幅偏离最佳效率流量后振幅波动明显加剧,随后在增强刚度的临时措施作用下,共振响应幅度有所降低;后期阶段,振动幅值先是保持了一段时间的动态平稳,随后在潮汐大幅变化的影响下,振动变化的规律性降低且呈发散趋势,说明滚动轴承内部运行状态已急剧恶化,此时应及时停运。进一步分析图8中各时间点的频谱成分,均以下部轴承外环特征频率及其谐波分量为主,RMS实际变化趋势与诊断预测意见一致,有效提高了循环海水泵的运行灵活性和机组安全性。

4 解体验证

2020年1月11日,对该循环海水泵解体检查发现:下部轴承外圈内滚道面存在严重剥落,个别滚子表面存在剥落,轴承内圈外滚道面存在剥落和麻点等缺陷;上部轴承均完好。进一步验证了诊断意见的正确性。

5 结论

1) BCV 285型循环海水泵实际流量偏离最佳效率流量越远,叶轮所受径向力及对下部轴承的冲击力越大。

2) BCV 285型循环海水泵下部滚动轴承外环特征频率与叶片3倍的通过频率接近。当外环存在缺陷时容易诱发共振,会加剧滚动轴承缺陷的发展。通过增加支撑增强刚度和阻尼,有助于缓解共振响应。

3) 当滚动轴承外环存在剥落缺陷时,通过饱和

润滑和置换旧油脂将剥落颗粒排出等方法,有助于延缓缺陷发展速度。

4) BCV 285型循环海水泵运行期间,通过分析gSE振动信号进行故障诊断和监测RMS振动信号进行趋势分析,可正确指导海水泵安全运行。

参 考 文 献

- [1] 刘静,唐昌柯,师志峰,等.局部剥落故障对滚动轴承接触与振动特性的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(10):2417-2424.
LIU Jing, TANG Changke, SHI Zhifeng, et al. Influence of localized spalling defect in roller bearing on contact characteristics and vibrations [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50 (10): 2417-2424. (in Chinese)
- [2] PATIL M S, MATHEW J, RAJENDRAKUMAR P K, et al. A theoretical model to predict the effect of localized defect on vibrations associated with ball bearing [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2010, 52(9): 1193-1201.
- [3] 王彬,张建宇,高立新,等.滚动轴承测振点的动力学响应分析[J].振动与冲击,2012,31(19):165-168,173.
WANG Bin, ZHANG Jianyu, GAO Lixin, et al. Dynamic response analysis for rolling bearing vibration measuring points [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31 (19): 165-168, 173. (in Chinese)
- [4] 樊莉,谭南林,沈栋平.基于显式动力学的滚动轴承接触应力有限元分析[J].北京交通大学学报,2006,30(4):109-112.
FAN Li, TAN Nanlin, SHEN Dongping. FEA on stress field of rolling element bearing based on explicit dynamics [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2006, 30(4): 109-112. (in Chinese)
- [5] 伍济钢,杨曾增,蒋勉,等.滚动轴承表面损伤故障动力学建模方法研究[J].机械传动,2016,40(2):27-33.
WU Jigang, YANG Zengzeng, JIANG Mian, et al. Research of dynamics modeling method for rolling bearing with surface damage fault [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2016, 40(2): 27-33. (in Chinese)
- [6] 剡昌锋,康建雄,苑浩,等.考虑弹流润滑及滑动作用下滚动轴承系统局部缺陷位移激励动力学建模[J].振动与冲击,2018,37(5):56-64.
YAN Changfeng, KANG Jianxiong, YUAN Hao, et al. Dynamic modeling for local defect displacement excitation in rolling bearing systems under elasto-hydrodynamic lubrication and slip [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(5): 56-64. (in Chinese)
- [7] 刘静,徐子旦,唐昌柯,等.轴承-轴承座系统振动特征与局部故障尺寸的关联[J].振动、测试与诊断,2019,39(4):860-866.
LIU Jing, XU Zidan, TANG Changke, et al. Relationship between vibrations of bearing-housing system and localized fault sizes [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39 (4): 860-866. (in Chinese)
- [8] 陈自强,杨璋.某型核电汽轮机凝汽器半侧运行分析[J].热力发电,2018,47(10):142-146.
CHEN Ziqiang, YANG Zhang. Analysis of the half side operation of a nuclear power steam turbine condenser [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47 (10): 142-146. (in Chinese)
- [9] 杨璋,蒋彦龙.某型核电汽轮发电机组一次调频功能试验[J].热力发电,2020,49(1):109-114.
YANG Zhang, JIANG Yanlong. Primary frequency modulation function test for a nuclear power turbine generator unit [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49 (1): 109-114. (in Chinese)
- [11] 杨璋,徐雷,蒋彦龙,等.核电厂循环海水泵电机共振问题快速分析[J].大电机技术,2016(2):29-32.
YANG Zhang, XU Lei, JIANG Yanlong, et al. The rapid analysis method for resonance vibration of motor for sea-water circumstance pump [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2016 (2): 29-32. (in Chinese)
- [12] 关醒凡.现代泵技术手册[M].北京:宇航出版社,1995:527-530.
- [13] HARRIS T A, KOTZALAS M N.滚动轴承分析(第1卷):轴承技术的基本概念[M].罗继伟,马伟,译.北京:机械工业出版社,2010:315-316.
- [14] 梅宏彬.滚动轴承振动监测与诊断[M].北京:机械工业出版社,1995:1-40.
- [15] 邓四二,贾群义,薛进学.滚动轴承设计原理[M].北京:中国标准出版社,2014:133-143.
- [16] GB/T 6075.3—2017 机械振动[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [17] 陆颂元.汽轮发电机组振动[M].北京:中国电力出版社,1999:8-9.



第一作者简介:舒相挺,男,1975年9月生,博士、高级工程师。主要研究方向为结构动力学和热力设备可靠性运行。
E-mail:657001433@qq.com

通信作者简介:杨璋,男,1981年7月生,研究员级高级工程师。主要研究方向为大型旋转机械振动监测与故障诊断。
E-mail:yangzhang17230a@126.com