

旋转机械不对中量定量化检测方法^{*}

张西宁, 牛东辉, 李 兵

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安, 710049)

摘要 在分析利用电涡流传感器检测不对中原理的基础上,提出了两种不对中定量化检测新方法。傅里叶级数法通过对幅值和相位的计算,得到平行不对中量和角度不对中量。两点测量法可仅利用在两个角度上的测量结果实现转轴间不对中量的快速检测。介绍了两种不对中定量化检测方法的原理和算法。通过对仿真数据和实验测试数据的分析,验证了提出的两种检测方法的性能和效果。实验分析结果表明,该检测方法可以实现旋转机械转轴不对中故障的定量化检测,在不对中量的快速检测中具有实际意义。

关键词 不对中故障; 定量化检测; 旋转机械; 电涡流传感器

中图分类号 TH17; TF307; TK268

引 言

转子不对中是旋转设备的常见故障,据统计^[1],60%的旋转机械故障与转子不对中有关。因此,开展转子不对中的定量化检测方法研究对设备现场维修调整具有重要意义。在旋转机械不对中识别和检测方面,国内外学者做了很多研究^[2-10],对存在不对中时的受力分析、相应的振动特征以及诊断方法等进行了研究,旨在解决不对中故障的定性识别或诊断问题,却很难为现场设备维修和调整提供定量化指导信息。在不对中的定量化检测方面,目前常用和具有代表性的检测方法有 Dodd 棒测法^[11]、激光对中法^[12-13]和单棒测量法^[14]。Dodd 棒测法主要用于机器的热态对中监视。该方法在测试过程中需要安装标准棒,对环境要求高。激光对中法既可用于热态检测,也可用冷态测量,其测量精度高、使用方便,但是测量装置昂贵。另外,该方法在测试中两轴始终处于连接状态,由于联轴节的作用,两轴之间必然存在移位和变形,使检测结果与实际不对中量之间存在差异。单棒测量法是国内学者提出的一种不对中在线检测方法,该方法降低了成本且在实验室条件下取得了良好的效果。

笔者从静态检测角度入手,提出了一种基于电涡流传感器两点测量的转子不对中定量检测方法——两点法,给出了该方法的原理、算法和公式。通过仿

真数据和实验测试数据分析验证了两点法检测转子不对中量的效果。

1 转子不对中静态法定量检测

1.1 传感器测量方法

转子不对中包括轴承不对中和轴系不对中两种形式。轴系不对中是指联轴器连接的各转子之间,驱动轴的轴心线与从动轴的轴心线不在同一条直线上,又分为平行不对中、角度不对中以及综合不对中 3 种^[15]。完整描述转子间的不对中需要用水平方向的平行不对中量、垂直方向上的平行不对中量、角度不对中量和角度不对中的方位角来描述。角度不对中的方位角定义为:存在角度不对中的两轴轴心线确定的平面与其中一根轴心线的垂直平面的交线,相对于该垂直平面上圆周方向零点的角度值(如图 1 所示)。为方便起见,仅以轴系在垂直平面内的角度不对中(方位角为 90°)为例论述不对中检测原理。

不对中的两轴分别为驱动轴和从动轴,如图 2 所示。电涡流传感器通过安装支架固定在从动轴上,可随从动轴旋转并测量传感器探头端面与驱动轴表面之间的距离,最终得到传感器探头端面到驱动轴轴心之间的距离。从动轴每转过一定角度,测量一次探头端面到驱动轴表面的距离,进而得到一

^{*} 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)资助项目(2009CB724405);国家自然科学基金资助项目(51275379)
收稿日期:2014-01-19;修回日期:2014-03-07

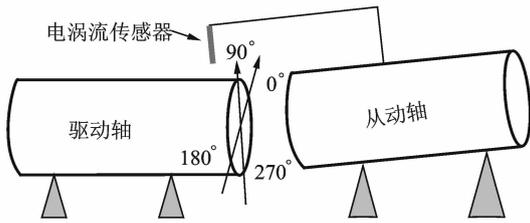


图 1 转子系统坐标系

Fig. 1 Coordinate system of rotor system

组测量数据。根据测量数据以及每个数据对应的角度,即可做出传感器的运动轨迹。

当两转轴间存在角度不对中时,传感器的运动轨迹在 AB 线所示平面内的投影为一椭圆。对于平行不对中和综合不对中,传感器运动轨迹的投影分别为偏心圆和偏心椭圆。投影圆或椭圆上各点到驱动轴轴心的距离随方位角的变化曲线如图 3 所示。

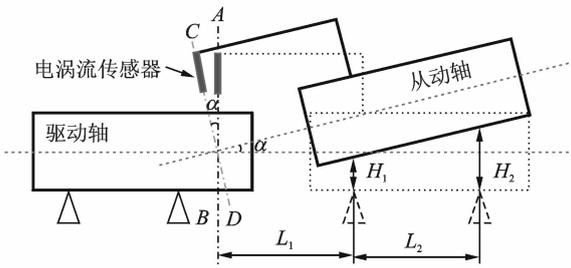


图 2 转子不对中检测原理示意图

Fig. 2 Diagram of detecting principle for rotor misalignment

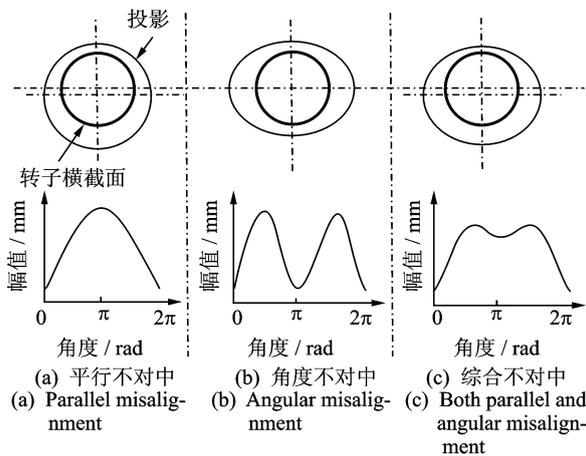


图 3 传感器的运动轨迹投影图以及到转子表面的距离曲线

Fig. 3 Projection of sensor's motion trail and the gap curve between sensor and shaft surface

平行不对中量为投影椭圆或圆的中心偏离原点的距离,通过对测试数据中直流分量的估计可求得平行不对中量。消除平行不对中量后,相当于将投

影椭圆或圆的中心平移到了原点。

角度不对中量 α 的计算原理如图 4 所示。图中: ON 表示投影椭圆的短半轴 b ; OM 表示投影椭圆的长半轴 a 。

$$\cos\alpha = ON/OM = b/a \quad (1)$$

可见,角度不对中量以及不对中方位角的值与投影椭圆的长、短半轴有关。

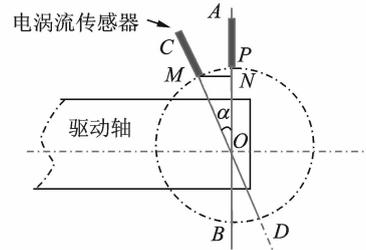


图 4 不对中夹角的几何计算

Fig. 4 Geometric calculation of misalignment angle

1.2 不对中量的简化级数计算方法

如图 5 所示,设 P 为传感器运动轨迹的投影椭圆上的一点,椭圆中心到 P 点的距离为 OP 。 P 点到椭圆中心的距离为

$$|OP|^2 = r^2 \cos^2\beta_1 + R^2 \sin^2\beta_1 = r^2 + (R^2 - r^2) \sin^2\beta_1 \quad (2)$$

其中: $|OP| = r \sqrt{1 + \frac{R^2 - r^2}{r^2} \sin^2\beta_1} = r \sqrt{1 + z}$; $z = \frac{R^2 - r^2}{r^2} \sin^2\beta_1$ 。

当不对中量很小时, R 和 r 非常接近,这时有 $R \approx r$, $z \approx 0$ 。按照泰勒级数 OP 在 O 点展开得到

$$|OP| = r \sqrt{1+z} = r \left\{ 1 + \frac{1}{2} z + \frac{1}{8} z^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} - 1 \right) \left(\frac{1}{2} - 2 \right) \frac{1}{3!} z^3 + \dots \right\}$$

取前两项作为 OP 的近似值,化简后得到

$$|OP| \approx r + \frac{R-r}{2} - \frac{R-r}{2} \cos 2\beta_1 \quad (3)$$

式(3)就是在 $R \approx r$ 时,拟合椭圆曲线上各点到中心点的距离 $|OP|$ 的近似计算公式。

式(3)右边的前两项是长、短半轴的均值,最后一项说明了投影椭圆到原点距离随两倍方位角以余弦函数变化。如图 6 所示,该曲线的最大值为椭圆的长半轴 a ,最小值为椭圆的短半轴 b ,幅值 $2A$ 为椭圆长短半轴之差。

图 7 为 $r = 40 \text{ mm}$, R 分别为 $40.5, 41, 45$ 和 50 mm 时以 $\beta_1 (0 \leq \beta_1 < 2\pi)$ 为自变量, $|OP|$ 的近似

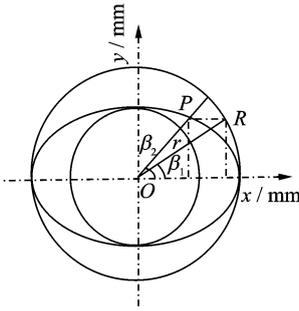


图5 各个角度上传感器测量的间隙

Fig. 5 Clearance value at each sensor position

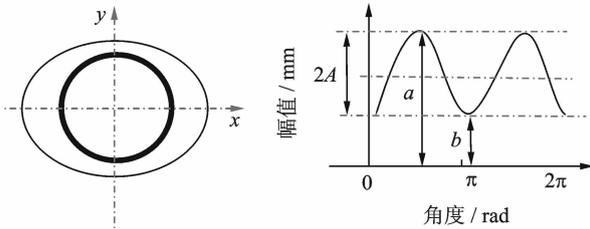


图6 投影与对应的三角函数曲线

Fig. 6 Curve of trigonometric function corresponding to the projection

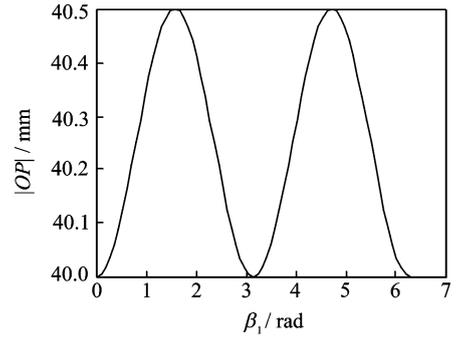
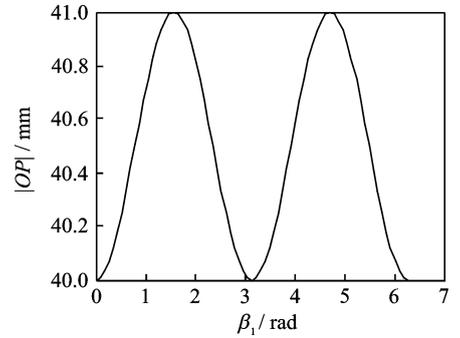
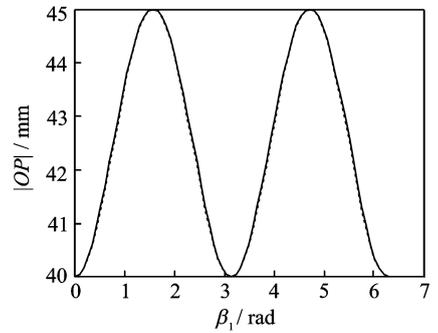
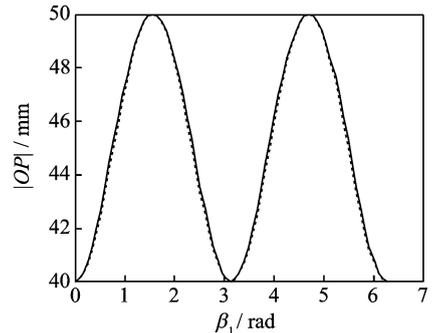
计算曲线与实际变化曲线的比较结果。为了避免混淆,将 β_1 用 β 代替。从图7看出,利用泰勒级数展开得到的近似计算公式在 $R \approx r$ 时具有足够的计算精度,完全可以利用该近似计算公式进行数据建模。通过对测量数据的处理,使驱动轴半径 r 为投影椭圆短半轴,后续的计算只需求得幅值 A 以及三角函数曲线的相位角 β 就可得到角度不对中量 α 及不对中方位角 θ 。下面是采用傅里叶级数计算 A 和 θ 的方法。

设测试数据中方位角 β_i 及对应的测量距离为 $\{\beta_i, y_i\}, i=1, 2, \dots, m, 0 \leq \beta_i < 2\pi$ 。为了不失普遍性,将式(3)改写为

$$|OP| = r + \frac{R-r}{2} - \frac{R-r}{2} \cos(2\beta + \theta) = |\overline{OP}| + A \cos(2\beta + \theta) \quad (4)$$

其中: $|\overline{OP}| = r + \frac{R-r}{2}$; $A = -\frac{R-r}{2}$; θ 为相位角,该相位角与不对中的方位角直接有关。

为了对测量数据进行建模,先对测量数据计算均值 $\bar{y} = \frac{1}{m} \sum y_i$,均值是对式(3)中的恒定部分 $|\overline{OP}| = r + \frac{R-r}{2}$ 的估计。用去均值后的测量数据 $\{\beta_i, y'_i = y_i - \bar{y}\}, i=1, 2, \dots, m, 0 \leq \beta_i < 2\pi$ 对式(4)中的波动部分进行估计。基于傅里叶级数的幅值和相位估计方法如下。

(a) $r=40$ mm, $R=40.5$ mm(b) $r=40$ mm, $R=41$ mm(c) $r=40$ mm, $R=45$ mm(d) $r=40$ mm, $R=50$ mm

..... 近似计算曲线; —— 真实曲线

图7 近似计算曲线与实际曲线比较

Fig. 7 The comparisons of approximate curve and actual curve

按照测量数据中 β_i 的取值,通过仿真方法产生一个标准的正弦信号 $\{\beta_i, s_i\}, i=1, 2, \dots, m, 0 \leq \beta_i < 2\pi$ 和一个标准的余弦信号 $\{\beta_i, c_i\}, i=1, 2, \dots, m,$

$0 \leq \beta_i < 2\pi$ 。按照傅里叶级数展开思想,对周期性的测量信号 $\{\beta_i, y'_i = y_i - \bar{y}\}, i = 1, 2, \dots, m, 0 \leq \beta_i < 2\pi$ 可在频率 2β 展开,展开系数 a 和 b 为

$$a = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m y'_i c_i, \quad b = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m y'_i s_i$$

根据展开系数 a 和 b 可计算出式(4)中波动部分的幅值 A 和相位 θ 。计算公式为 $A = \sqrt{a^2 + b^2}$, $\theta = -\arctan(b/a)$ 。

1.3 不对中量的两点法计算方法

简化级数法检测需要在多个角度上测量数据,而最终需要确定的参数只有 A 和 θ 。因此,完全可用在两个不同角度上的测量数据进行估计。假设测量数据为 $\{\beta_i, y'_i = y_i - \bar{y}, i = 1, 2, 0 \leq \beta_i \leq 2\pi\}$ 。对式(4)中的参数进行估计,使 y'_1 和 y'_2 分别为

$$y'_1 = A \cos(2\beta_1 + \theta) \quad (5)$$

$$y'_2 = A \cos(2\beta_2 + \theta) \quad (6)$$

两式相除后,有

$$\frac{y'_1}{y'_2} = \frac{\cos(2\beta_1 + \theta)}{\cos(2\beta_2 + \theta)} = \frac{\cos 2\beta_1 \cos \theta - \sin 2\beta_1 \sin \theta}{\cos 2\beta_2 \cos \theta - \sin 2\beta_2 \sin \theta}$$

整理后得

$$y'_1 \cos 2\beta_2 \cos \theta - y'_1 \sin 2\beta_2 \sin \theta = y'_2 \cos 2\beta_1 \cos \theta - y'_2 \sin 2\beta_1 \sin \theta, \text{ 或者 } (y'_1 \cos 2\beta_2 - y'_2 \cos 2\beta_1) \cos \theta = (y'_1 \sin 2\beta_2 - y'_2 \sin 2\beta_1) \sin \theta$$

则有

$$\theta = \arctan \frac{y'_1 \cos 2\beta_2 - y'_2 \cos 2\beta_1}{y'_1 \sin 2\beta_2 - y'_2 \sin 2\beta_1} \quad (7)$$

其中: y'_1, y'_2, β_1 和 β_2 均为已知,因此由式(7)可计算出 θ 。

由式(5)和式(6)可知

$$A = y'_1 / \cos(2\beta_1 + \theta) = y'_2 / \cos(2\beta_2 + \theta) \quad (8)$$

将 θ 代入式(8)中即可求出 A 。

若想利用 3 个角度处的测量值计算,则可用上述方法求解两次,求出两个 A 和 θ ,再做平均处理。

2 仿真验证

为了验证笔者提出的转子不对中量化检测方法的正确性,进行了仿真验证。仿真过程中采用 Pro-E 软件建立转子系统的三维模型。将三维模型导入 Adams 软件中,添加约束和驱动,在较低转速下模拟转子系统产生角度不对中故障时传感器探头的运动轨迹。产生仿真数据,数据长度 $N = 72$,即每 5° 产生一个数据点。在仿真过程中选择 5 组不同的仿真数据模拟角度不对中故障,角度不对中量分别为 $15^\circ, 10^\circ, 5^\circ, 1^\circ$ 和 0.5° 。分别用简化级数法和两点法处理仿真数据,结果如表 1,2 所示。

表 1 简化级数法处理仿真数据的计算结果

Tab. 1 Calculation results of the simulation data processed by simplified series method (°)

实验组	平行不对中量	角度不对中量
15	0	14.999
10	0	9.997
5	0	5.015
1	0	1.015
0.5	0	0.500

表 2 两点法处理仿真数据的计算结果

Tab. 2 Calculation results of the simulation data processed by two points method (°)

实验组	平行不对中量	角度不对中量
15	0	15.051
10	0	10.061
5	0	5.030
1	0	1.040
0.5	0	0.502

从表 1 可以看到,简化级数法虽然在理论推导过程中使用了一些近似计算,但是使用该方法处理仿真数据得出的各不对中量与预设值十分吻合,计算结果的精度并没有太明显的降低,因此认为该方法具有较好的实用性。相比而言,从表 2 的结果可知,由于两点法使用的数据太少,其计算精度有所下降,但是该方法的计算过程相比简化级数法更为简单,计算量更小且最终的误差在合理范围内,故认为该方法可以在精度要求不高的情况下适用于不对中量的快速估算。

3 实验研究及验证

不对中实验台如图 8 所示,由基座、支板、主动转子、从动转子、刻度盘和传感器及安装支架等组成。两个转子通过安装在底板上的 4 个“V”型支板支撑。4 个“V”型支板通过键和槽在基座上定位,保持两根转轴在水平方向上对中。实验时可通过在支板的 V 形槽上或者 V 形支撑板下边垫一定厚度的金属垫片、铜箔和透明胶带等来调节转子在垂直方向上的不对中量。采用百分表测量垫高量的大小,使用万用表测量电涡流传感器采集的电压值。

电涡流传感器通过螺帽安装在实验台从动轴上传感器架的孔内。测量过程中传感器随从动轴转动,实现对不同角度处间隙的测量。为了方便定位测量角度,采用与驱动轴支架固定的分度纸盘来进行角度的辅助定位,以提高角度定位精度。

转子不对中定量检测实验以垂直平面内的不对



图8 转子不对中检测实验台

Fig. 8 Test-bed for rotor misalignment detecting

中为例,分别对转子存在平行不对中、角度不对中以及综合不对中3种情况进行了实验验证。

分析发现,不对中角度的设定取决于传感器测量面到从动转子的前后支撑架的距离 L_1 和 L_2 ,如图2所示。根据图中的几何关系得出前后支板的垫高量计算式为

$$\begin{cases} H_1 = L_1 \tan\alpha \\ H_2 = (L_1 + L_2) \tan\alpha \end{cases} \quad (9)$$

依据式(9)的计算结果调整 H_1, H_2 便可实现转子的角度不对中,在角度不对中的基础之上从动转子的前、后支板处再垫高相同的高度可完成转子综合不对中的设定。

实验过程中,动轴从 0° 开始逐次旋转,每隔 5° 采集得到对应电压值,从动轴旋转 360° 采集到一组包含72个电压值的数据。实验中针对每一种不对中状态分别测量3个不同的不对中量,并且对每个不对中量测量3组数据,求平均值作为实际不对中量的测量值。使用笔者提出的两种方法处理实验数据,简化级数法实验结果如表3~5所示。两点法分析结果如表6~8所示。

表3 简化级数法-平行不对中实验结果

Tab. 3 Results of parallel misalignment experiment by simplified series method

组	实际值/mm	H_1 /mm	H_2 /mm	测量值/mm	相对误差/%
1	0.18	0.18	0.18	0.20	11.1
2	0.24	0.24	0.24	0.26	8.3
3	0.35	0.35	0.35	0.38	8.6

表4 简化级数法-角度不对中实验结果

Tab. 4 Results of angular misalignment experiment by simplified series method

组	实际值/mm	H_1 /mm	H_2 /mm	测量值/mm	相对误差/%
1	1.40	2.96	7.92	1.542	10.14
2	2.30	4.86	13.01	2.490	8.26
3	2.82	5.96	15.96	2.652	-5.96

表5 简化级数法-综合不对中实验结果

Tab. 5 Results of combined misalignment experiment by simplified series method

组	种类	实际值	H_1 /mm	H_2 /mm	测量值	相对误差/%
1	角度量/ $^\circ$	1.35	2.66	7.45	1.508	11.70
	平行量/mm	-0.19			-0.214	10.53
2	角度量/ $^\circ$	2.25	4.85	12.83	2.451	8.93
	平行量/mm	0.10			0.110	10.00
3	角度量/ $^\circ$	2.52	5.55	14.50	2.741	8.77
	平行量/mm	0.12			0.110	8.33

表6 两点法-平行不对中实验结果

Tab. 6 Results of parallel misalignment experiment by two points method

组	实际值/mm	H_1 /mm	H_2 /mm	测量值/mm	相对误差/%
1	0.18	0.18	0.18	0.20	11.1
2	0.24	0.24	0.24	0.26	8.3
3	0.35	0.35	0.35	0.38	8.6

表7 两点法-角度不对中实验结果

Tab. 7 Results of angular misalignment experiment by two points method

组	实际值/mm	H_1 /mm	H_2 /mm	测量值/mm	相对误差/%
1	1.40	2.96	7.92	1.564	11.71
2	2.30	4.86	13.01	2.174	-5.48
3	2.82	5.96	15.96	2.663	-5.58

表8 两点法-综合不对中实验结果

Tab. 8 Results of combined misalignment experiment by two points method

组	种类	实际值	H_1 /mm	H_2 /mm	测量值	相对误差/%
1	角度量/ $^\circ$	1.35	2.66	7.45	1.549	14.74
	平行量/mm	-0.19			-0.214	10.53
2	角度量/ $^\circ$	2.25	4.85	12.83	2.479	10.18
	平行量/mm	0.10			0.110	10.00
3	角度量/ $^\circ$	2.52	5.55	14.50	2.762	9.60
	平行量/mm	0.12			0.110	8.33

从表3~5可以看出,无论是哪一种不对中状态,使用简化级数法处理实验数据得到的结果与转子的实际不对中量相比,相对误差都约为10%,该误差满足工程实践的要求,能够实现转轴不对中的定量化检测。由表6~8可知,两点法处理数据的过程中只使用两个或者三个点,数据点的选取具有随机性,实验误差具有一定的不确定性,即选取不同的数据点,误差会有所波动。但总体看来,实验误差在要求范围内,表明两点法在进行精度要求不高的快

速估算时具有较高的实用意义。

4 结束语

深入分析了转子不对中故障,在分析现有不对中检测方法的基础上,提出了两种不对中定量检测方法,即简化级数法和两点检测法。研究了这两种方法的检测原理和不对中量值的计算方法。利用仿真数据验证了简化级数法和两点法检测不对中量的正确性。在此基础上搭建实验平台进行进一步验证,通过对实验数据的对比分析,验证了笔者提出的简化级数法、两点法定量化检测不对中的性能和效果。实验结果表明,提出的两种不对中故障定量检测方法均达到了工业实践要求,为旋转机械不对中故障的定量检测提供了新的方法和思路。

参 考 文 献

- [1] 李明. 转角不对中故障的转子系统非线性动力学特征[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(5): 552-556.
Li Ming. Nonlinear dynamics characteristics of rotor system with angular misalignment[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(5): 552-556. (in Chinese)
- [2] 刘雄. 齿轮联轴节对中不良振动信息研究[J]. 化工机械, 1994, 21(4): 229-231.
Liu Xiong. Research on vibration information of misaligned gear coupling[J]. Chemical Engineering & Machinery, 1994, 21(4): 229-231. (in Chinese)
- [3] 韩捷. 齿式联接不对中转子的故障物理特性研究[J]. 振动工程学报, 1996, 9(3): 297-301.
Han Jie. Study on fault properties of the rotor connected by the gear coupling[J]. Journal of Vibration Engineering, 1996, 9(3): 297-301. (in Chinese)
- [4] 李明, 张金玉, 虞烈. 不对中齿轮联轴器转子系统的振动特征研究[J]. 西安矿业学院学报, 1998, 18(3): 240-243.
Li Ming, Zhang Jinyu, Yu Lie. Research on the vibration properties of rotor system with misaligned gear coupling[J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1998, 18(3): 240-243. (in Chinese)
- [5] 王殿武, 张敬伟. 不对中故障的分析与诊断技巧[J]. 设备管理与维修, 2005(10): 29-31.
Wang Dianwu, Zhang Jingwei. Analysis and diagnosis skills of misalignment fault[J]. Plant Maintenance Engineer, 2005(10): 29-31. (in Chinese)
- [6] 张祖德, 王玉强. 旋转机械转子不对中的故障诊断[J]. 特钢技术, 2010, 16(4): 56-59.
Zhang Zude, Wang Yuqiang. Analysis on malfunction of misalignment in rotary machine rotor[J]. Special Steel Technology, 2010, 16(4): 56-59. (in Chinese)
- [7] 韩捷. 齿式联接转子系统的不对中故障机理与识别[J]. 振动、测试与诊断, 1997, 17(2): 20-24.
Han Jie. Misalignment fault mechanism and recognition of rotor system coupled by gear coupling[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 1997, 17(2): 20-24. (in Chinese)
- [8] 张新江, 焦映厚, 张五国, 等. 旋转机械不对中故障特征提取及诊断方法的研究[J]. 汽轮机技术, 1999, 41(2): 104-107.
Zhang Xinjiang, Jiao Yinghou, Zhang Wuguo, et al. Study of fault feature extraction method of rotate machinery with misalignment[J]. Turbine Technology, 1999, 41(2): 104-107. (in Chinese)
- [9] Kuropatwinski J J, Jesse S, Hines J W, et al. Prediction of motor misalignment using neural networks[C] // Proceedings of Maintenance and Reliability Conference. [S. l.]: Knoxville, 1997.
- [10] Wu T Y, Chung Y L. Misalignment diagnosis of rotating machinery through vibration analysis via the hybrid EEMD and EMD approach[J]. Smart Mater Struct, 2009, 18: 1-13.
- [11] Dodd V R. Shaft-alignment monitoring cuts costs[J]. Oil & Gas Journal, 1972, 9: 91-96.
- [12] Bloch H P. Laser-optic instruments improve machinery alignment[J]. Oil & Gas Journal, 1987, 10: 71-76.
- [13] 汪家铭. 旋转机械的激光对中[J]. 汽轮机技术, 1994, 36(2): 126-128.
Wang Jiaming. Laser alignment of rotating machinery[J]. Turbine Technology, 1994, 36(2): 126-128. (in Chinese)
- [14] 顾超华, 华永利, 李敏, 等. 旋转机器不对中的新型在线监视及其在线消除的探讨[J]. 动力工程, 1996, 16(1): 40-46.
Gu Chaohua, Hua Yongli, Li Min, et al. Exploring a way of on-line supervision and remedying misalignment in rotating machinery[J]. Power Engineering, 1996, 16(1): 40-46. (in Chinese)
- [15] 韩捷, 张瑞林. 旋转机械故障机理与诊断技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 185-193.



第一作者简介:张西宁,男,1965年11月生,教授、博士生导师。主要研究方向为机械设备智能化状态监测与故障诊断、机械振动测试与分析、机械设备维护、转子动平衡以及监测诊断仪器与系统等。曾发表《一种改进的随机减量信号提取方法》(《西安交通大学学报》2000年第1期)等论文。
E-mail: zhangxining@mail.xjtu.edu.cn

