

文章编号:1000-8055(2017)09-2219-11

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2017.09.021

一种转子空间弯曲轴线的测试方法及试验验证

宋培培¹, 陈果¹, 董超², 屈美娇¹

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016;

2. 中国航空发动机集团有限公司 沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘要: 提出了一种转子空间弯曲轴线的测试技术。针对某实际弯曲转子, 首先, 利用电涡流位移传感器测量转子不同截面的弯曲向量, 得到了在同一绝对坐标下的各截面形心相对于旋转中心的弯曲向量; 然后, 应用三次样条函数拟合了转子的空间几何中心线, 再利用 Visual C++ 编程调用 OPENGL 图形函数, 对弯曲转子进行了三维实体显示; 最后利用百分表测量法和所提方法进行了对比试验。结果表明: 所提方法测得的弯曲转子各截面轴心轨迹与百分表测得的各截面轴心轨迹基本一致, 拟合圆结果也基本重合, 其中截面 1、截面 6 的拟合圆结果虽有轻微误差, 但误差在可允许范围以内, 由此验证了该方法的准确性和可行性。

关键词: 转子弯曲; 样条函数; 电涡流位移传感器; 百分表; 计算机图形学

中图分类号: V231.96

文献标志码: A

A test method of rotor space bending axis and its test verification

SONG Peipei¹, CHEN Guo¹, DONG Chao², QU Meijiao¹

(1. College of Civil Aviation,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016;

2. Shenyang Engine Research Institute,

Aero Engine (Group) Corporation of China, Shenyang 110015)

Abstract: A test method of rotor space bending axis was put forward. Firstly, for a practical bended rotor, the bending of each section centroid relative to the rotation center can be obtained by using the eddy current displacement sensors, and the bending degree of different sections of the rotor can be obtained in the same absolute coordinate system. Secondly, the cubic spline function was applied to fit the space geometry center line of rotor, and the three-dimensional solid models of the bended rotor were shown by using the OPENGL graphics function, which was called by the Visual C++. Finally, the traditional means of measurement based on the dial indicator were employed to verify the proposed method. The results indicated that, the shaft orbit of each section except for section 1 and section 6 measured by the proposed method were consistent with the shaft orbit of the dial indicator, and circle fitting results were also basically coincident. What's more, the error range of the circle fitting of section 1 and section 6 were in reasonable agreement. Thus the method is available to investigate the migration.

Key words: rotor bend; spine function; eddy current displacement sensor; dial indicator; computer graphics

收稿日期: 2016-01-07

基金项目: 国家基础研究项目(613139); 国家自然科学基金(61179057)

作者简介: 宋培培(1990—), 女, 硕士生, 主要从事航空发动机整机振动与转子动力学研究。

引用格式: 宋培培, 陈果, 董超, 等. 一种转子空间弯曲轴线的测试方法及试验验证[J]. 航空动力学报, 2017, 32(9): 2219-2229.

SONG Peipei, CHEN Guo, DONG Chao, et al. A test method of rotor space bending axis and its test verification[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(9): 2219-2229.

工程实际中,转子系统由于材质的不均匀、制造和安装误差,不可避免地存在着初始弯曲现象,同时工作过程中还可能产生转子的热变形以及磨损和介质的黏附等现象,这些因素都可能使转子产生一定的轴弯曲。转子初始弯曲将导致转子运转过程中动挠度增加,机组的振动加剧^[1-5]。

目前有关转子弯曲测量的方案有机械测量和光学测量两种主要技术。机械测量技术是采用百分表或千分表进行测量,奚军民等^[6]采用千分表法和目测法相结合的方式,实现了转轴的弯曲测量。光学测量技术主要有激光扫描测量方法^[7]、涡流传感法^[8]和微电子技术检测法^[9]。张先鹤等^[10-11]分析了传统转轴的测量方法,提出了光电扫描方法测量转轴弯曲量,并在此基础上,提出了一种定常放大率调焦光电测量方法,实现了转轴弯曲量的精密测量。蒋钢等^[12]提出了一种激光扫描的测量方法,通过实时检测扫描速度进行误差补偿,实现了转轴弯曲量的精密测量。关荣锋等^[13]将激光扫描技术改进后用于测量汽轮机的大轴弯曲量,并提出了非接触自动测量的新方法,同时开发研制了测量装置,实现了远距离非接触测量大轴弯曲。杨莉等^[14]针对大型轴类零件热处理后出现轴线弯曲、余量分布不均等问题,提出应用线结构光非接触测量技术的方法对轴类零件实际轴线进行在线检测。

百分表测量法和千分表测量法都属于接触式测量,由于某些机械的特殊结构,百分表的架设和对准非常麻烦,容易受人为因素影响,很难保证测量的准确性,测量精度较低。激光扫描测量方法虽然解决了非接触测量问题,提高了测量精度,但目前,国内尚无成熟的产品,产品均处于研制阶段,主要依靠于进口^[15-16],同时缺乏对轴弯曲测试数据的三维图形重建。

电涡流位移传感器被普遍应用于转轴的振动位移的非接触测量,其测量精度取决传感器的精度,目前,高精度电涡流位移传感器的测量分辨率能够达到 $0.1 \mu\text{m}$ 。在转轴的振动位移测试方法中,激光位移传感器具有精度高,起始距离和量程大,适用于较远距离测量的优点^[17]。而电涡流位移传感器,适用于精密测量,具有适用于恶劣环境、技术更加成熟、应用更为广泛、价格更为低廉等优点^[18]。

有鉴于此,本文提出了一种利用电涡流位移传感器测量转子弯曲量的方法,并利用计算机图形学方法,对转轴的三维弯曲数据进行了三维重

建和显示,并对方法进行了试验验证。本文研究工作对于我国自主研发转轴的弯曲测试系统提供了方法和思路。

1 基于低转速下电涡流位移传感器的转子弯曲度测量方法

1.1 转子弯曲故障振动机理

单盘转子模型如图 1 所示。图中 m 为圆盘的质量, M 为圆盘质心, O_1 为圆盘几何中心, O_0 为由于初始弯曲导致偏离旋转中心 O 后的几何中心。 ε 为圆盘质心偏离其几何中心的位移,它与相位参考点水平方向夹角为 φ_m , k 为转子轴的刚度,轴的质量忽略不计, c 为阻尼系数, r_s 为圆盘处的轴初始弯曲量,它与相位参考点水平方向夹角为 φ_s , p 为圆盘质心位移向量, r 为总的位移幅值向量,它与相位参考点水平方向夹角 φ_r , r_d 为动力响应幅值向量, ω 为单盘转子模型的旋转角速度。

显然,由系统的惯性力、阻尼力和弹性力的动平衡,可以得到系统的运动微分方程,即

$$m\ddot{p} + c\dot{r} + kr_d = 0 \quad (1)$$

由几何关系可得 $p = r + \varepsilon$, $r_d = r - r_s$, 代入式(1)得

$$m\ddot{r} + c\dot{r} + kr = kr_s - m\ddot{\varepsilon} \quad (2)$$

设

$$\begin{aligned} r &= r \exp[i(\omega t + \varphi_r)] = \\ r \cos(\omega t + \varphi_r) + jr \sin(\omega t + \varphi_r) &= x_r + jy_r \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} r_s &= r_s \exp[i(\omega t + \varphi_s)] = \\ r_s \cos(\omega t + \varphi_s) + jr_s \sin(\omega t + \varphi_s) &= x_s + jy_s \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon \exp[i(\omega t + \varphi_m)] = \\ \varepsilon \cos(\omega t + \varphi_m) + j\varepsilon \sin(\omega t + \varphi_m) &= x_\varepsilon + jy_\varepsilon \end{aligned} \quad (5)$$

将式(3)~式(5)代入式(2),可以得到

$$\begin{cases} m\ddot{x}_r + c\dot{x}_r + kx_r = kx_s + m\omega^2 x_\varepsilon \\ m\ddot{y}_r + c\dot{y}_r + ky_r = ky_s + m\omega^2 y_\varepsilon \end{cases} \quad (6)$$

从式(6)中可以看出,初始弯曲和质量偏心为两个独立的激励力,若不考虑式(6)中由于质量偏心引起的不平衡激励力,则式(6)变为

$$\begin{cases} m\ddot{x}_r + c\dot{x}_r + kx_r = kx_s \\ m\ddot{y}_r + c\dot{y}_r + ky_r = ky_s \end{cases} \quad (7)$$

显然,该运动微分方程对应于图 2(a)、图 2(b)的基础激励下的振动微分方程。由此可见,转子弯曲故障实质上是一种基础激励下的振动。

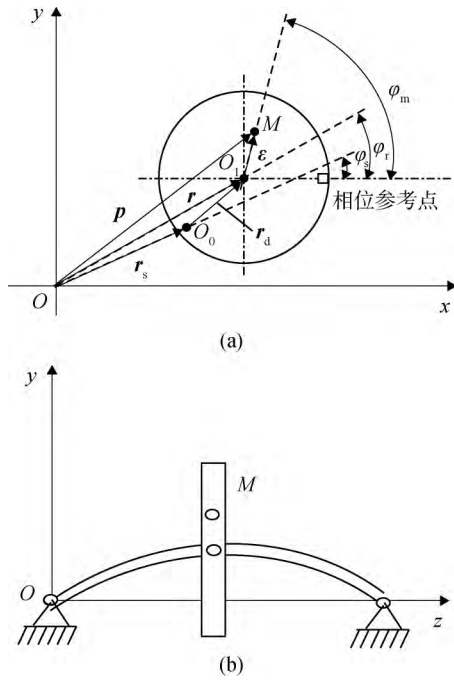


图 1 初始弯曲单盘转子模型示意图

Fig. 1 Sketch map of single-disk rotor with initial bending

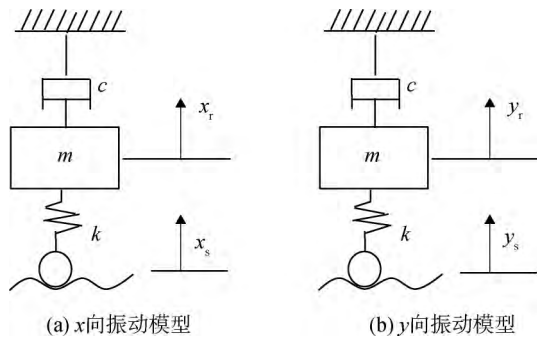


图 2 单自由度系统在基础激励下的振动模型

Fig. 2 Vibration model of single freedom degree system under base excitation

1.2 测量原理

如图 3 所示,从初始弯曲故障的振动机理可知,当质量偏心距和初始弯曲同时存在时,在高转速下, $r = r_d + r_s$, 即,用电涡流位移传感器测取的是两个旋转向量的矢量和,当然无法分离出初始弯曲向量 r_s 。

由于初始弯曲和质量偏心引起的振动微分方程为

$$m\ddot{r} + c\dot{r} + kr = kr_s - m\ddot{\varepsilon} \quad (8)$$

因为 $r = r \exp[i(\omega t + \varphi_r)]$, $\varepsilon = \varepsilon \exp[i(\omega t + \varphi_e)]$, 所以,将其代入式(8)可得

$$-m\omega^2 r \exp[i(\omega t + \varphi_r)] + i\omega c r \exp[i(\omega t + \varphi_r)] + kr = kr_s + m\omega^2 \varepsilon \exp[i(\omega t + \varphi_e)] \quad (9)$$

显然,当 $\omega=0$, $r=r_s$, 即转速很低时,电涡流移

流传感器测得的转子响应可以近似为转子弯曲量。

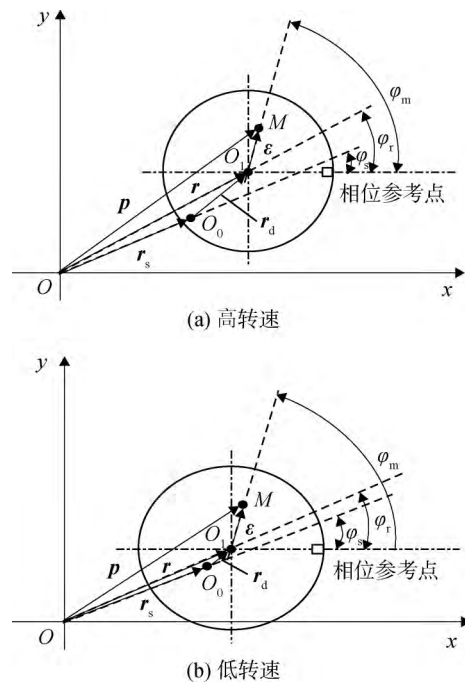


图 3 不同转速下初始弯曲单盘转子模型示意图

Fig. 3 Sketch map of single-disk rotor with initial bending at different speeds

1.3 测量方法

转子弯曲量测试原理流程图如图 4 所示。测试原理示意图如图 5 所示。测试的步骤如下:

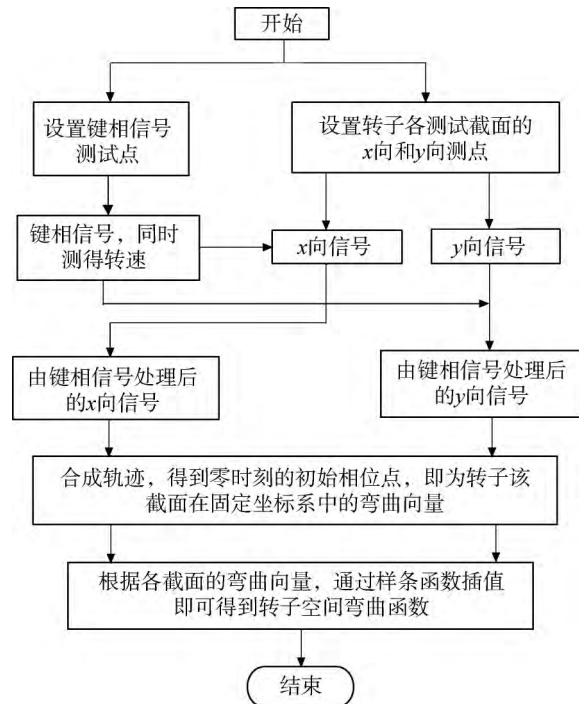


图 4 转子弯曲测试原理流程图

Fig. 4 Flow chart of rotor bending test

1) 首先需要在转子上设置键相信号点, 键相信号提供统一的相位参考点, 通常可以用光电传感器或电涡流位移传感器实现, 当传感器对准键槽时, 则产生一个脉冲, 转子旋转一周产生一个脉冲, 通过对一定时间内的脉冲数目统计, 可以得到当前转速。借助键相信号将各个测试面振动信号的起始时刻统一到键相传感器对准键相槽的时刻, 剔除键相脉冲之前的数据点, 不足部分补零。如图5所示, 以键槽水平方向为 x 轴方向, 垂直于轴为 y 轴方向, 建立截面的坐标系。从 x 轴正方向按逆时针方向旋转到 y 轴方向, 因此定义旋转角速度 ω 以逆时针方向旋转为正方向。

2) 在转子的各个重要测试截面布置两个相互

垂直的电涡流位移传感器, 测试转子截面的水平 x 向和垂直 y 向的振动位移。分别经过键相信号处理后得到具有统一起始时刻的信号。

3) 对经过键相处理后的转子各截面响应信号, 合成轴心轨迹, 根据测试原理可知, 此时, 零时刻(即起始时刻)时的初始相位点对应的振动位移向量即为在坐标系 xOy 中, 转子截面几何中心相对于旋转中心的初始弯曲向量。

4) 如图5所示, 定义 x 轴方向为转轴的轴向, 各个截面的旋转中心分别为 O_1, O_2, \dots, O_n 。根据各个截面得到的转子弯曲向量, 利用样条函数拟合出转子在空间坐标系 $Oxyz$ 中的空间弯曲函数。

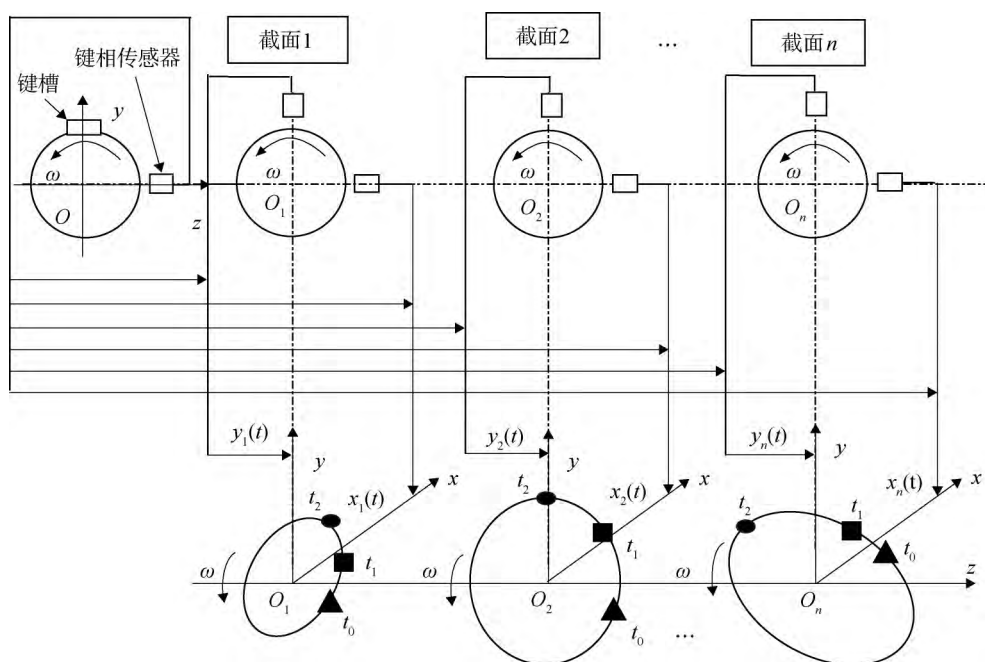


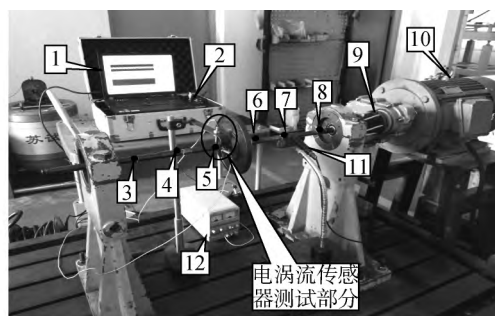
图5 转子弯曲测试原理示意图

Fig. 5 Principle sketch of rotor bending test

2 试验结果与分析

2.1 基于电涡流位移传感器的测量试验

本文针对一实际弯曲转子进行了转子弯曲度的测量, 图6为依据本文方法构建测转子弯曲度测量系统实物图, 主要仪器设备包括: 美国NI (National Instrument) 公司的NI9234 动态信号采集模块、光电转速传感器、电涡流位移传感器、前置放大器、信号分析软件等组成。图7为电涡流位移传感器测试部位放大图。图8为测试坐标定义示意图。试验共选取了6个测试面, 由于传感器的限制, 本文采用的各测试面分别进行测试的方法, 如果传感器数量充足, 可以选取更多的测



1 计算机; 2 NI数据采集器; 3~8 测点1~测点6; 9 电动机; 10 尼龙绳联轴器; 11 光电转速传感器; 12 直流电源。

图6 转子弯曲度测量系统实物图

Fig. 6 Physical map of rotor bending degree measuring system

试面同时进行一次性测试,即可得到转子各截面的弯曲向量。

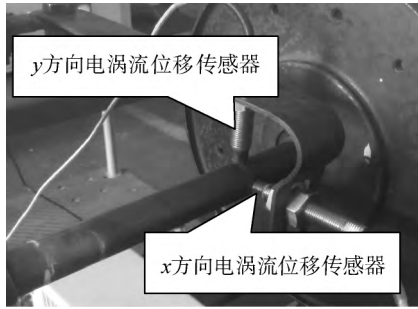


图 7 电涡流位移传感器测试部位局部放大图
Fig. 7 Partial enlargement of test site by eddy current displacement sensor

图 9 为在采样频率为 2.5 kHz, 旋转转速为 72 r/min 下, 电涡流位移传感器测得的各个截面的轴心轨迹及其初始相位点(initial phase point, IPP, 记为 P_i), 图中箭头所指圆圈即为 P_i 。 P_i 表

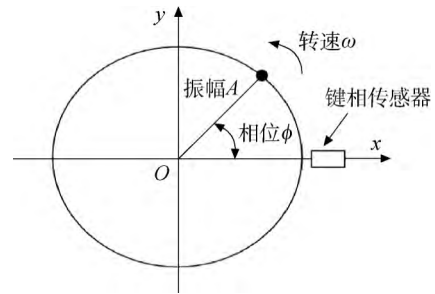
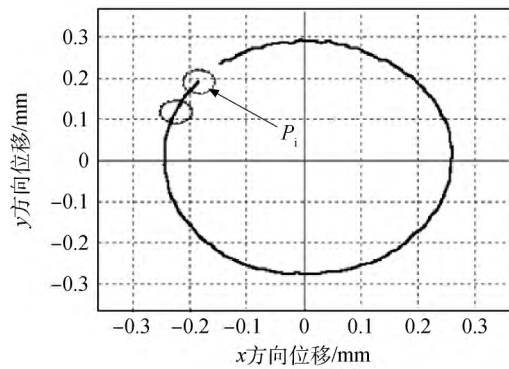
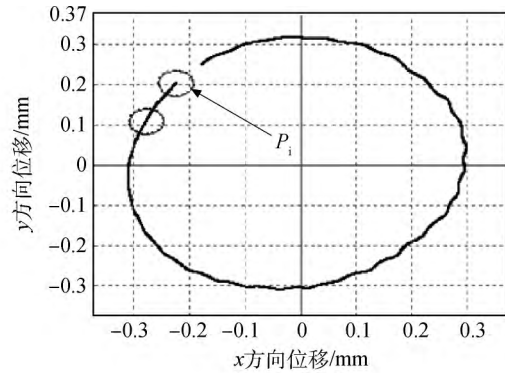


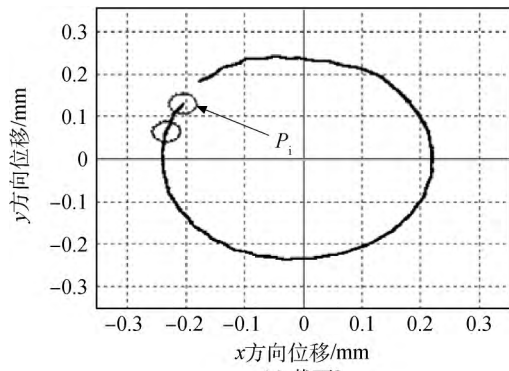
图 8 测试坐标定义示意图
Fig. 8 Measuring coordinate definition diagram



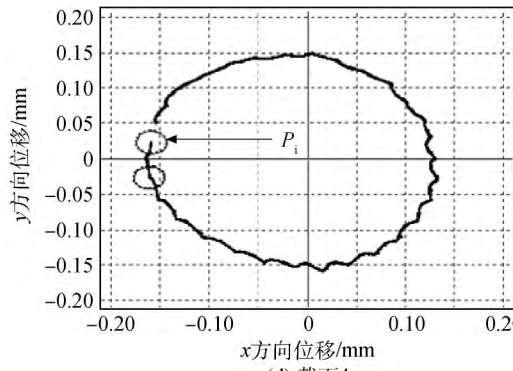
(a) 截面1



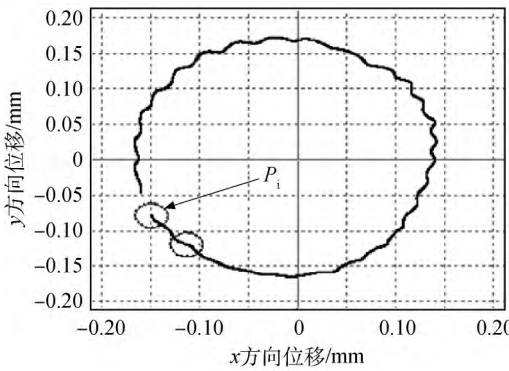
(b) 截面2



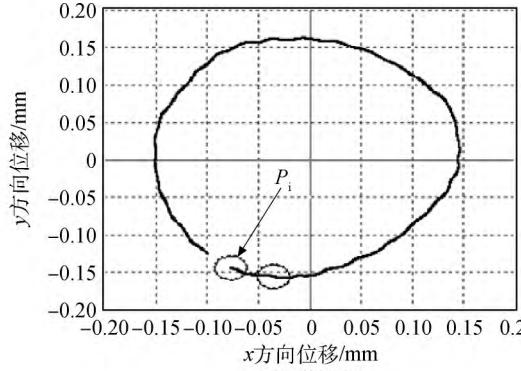
(c) 截面3



(d) 截面4



(e) 截面5



(f) 截面6

图 9 各个截面轴心轨迹和初始相位点

Fig. 9 Axis orbit of each section and its initial phase point

示转子上贴感光片的位置在旋转中第 1 次对准反光片时,转子被测截面轴心的初始位置,由于感光片的位置固定,所以对每个截面测试得到的初始相位点反映了相对于某个固定位置下的各截面转子轴心的位置。

读取 6 个测试面的初相位点的数据,整理得到测试结果如表 1 所示。根据表 1 中的测试数据,建立以轴向位移为横坐标,弯曲量为纵坐标的坐标系,分别得到实测转子 x, y 向弯曲曲线,根据各个截面的弯曲向量,通过样条函数插值即可拟合得到转子在其他截面处的弯曲向量。 x, y 向实测曲线与拟合曲线对比结果如图 10 和图 11 所示。

本文将该转子平均划分为 37 段,得到 38 个截面,设定转轴两支承点的弯曲量为零,由拟合得到的各截面弯曲向量,利用 Visual C++ 编制程序调用 OpenGL 绘图函数,实现了弯曲转子的空间显示,图 12 为拟合得到的弯曲转子的三维实体图。

表 1 转子各测试面测量数据

Table 1 Measurement data of cross section of rotor

轴向坐标/m	测试面编号	x 向位移/mm	y 向位移/mm
0.209	1	-0.1995	0.1898
0.328	2	-0.2300	0.2000
0.435	3	-0.2039	0.1288
0.523	4	-0.1590	0.0224
0.643	5	-0.1491	-0.0794
0.762	6	-0.0769	-0.1451

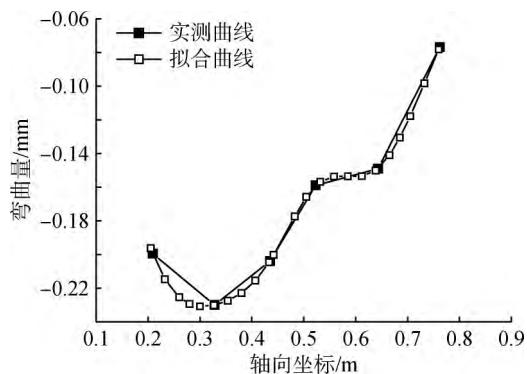


图 10 x 向转子弯曲曲线

Fig. 10 Rotor bending curve of rotor in x direction

2.2 基于百分表测量试验验证

百分表是测定转子径向跳动的常用方法,本

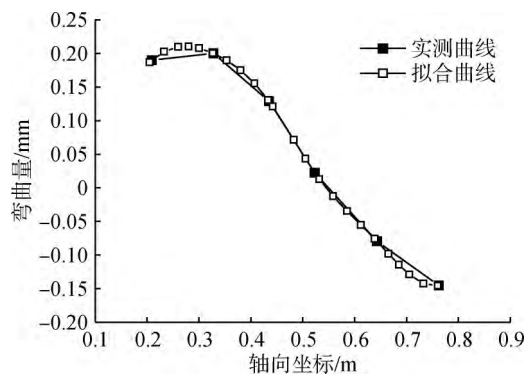


图 11 y 向转子弯曲曲线

Fig. 11 Rotor bending curve of rotor in y direction

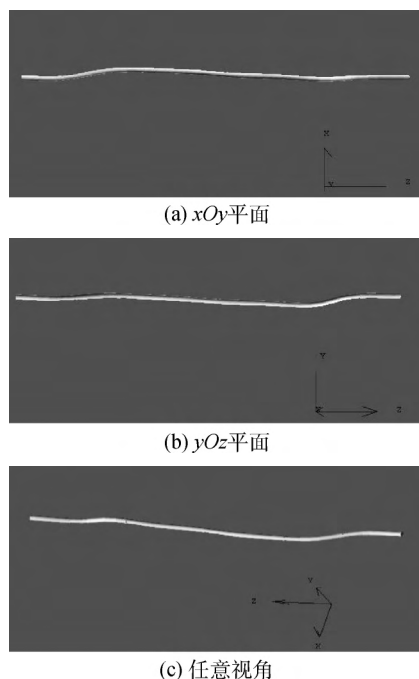


图 12 弯曲转子的三维实体显示

Fig. 12 Three-dimensional solid display of bended rotor

文采用百分表测量法对所提方法进行验证。本文使用的仪器为 TXY-III 型同心度测量仪,该测量仪由轴向和径向两块双面百分表组成,百分表测量转子弯曲的实物图如图 13 所示。图 14 为百分表测量转子弯曲局部放大图。在试验器转轴上选取 6 个测试面,该 6 个测试面与电涡流测量试验中的 6 个测试面一致,将转子的截面分为 8 等份,按逆时针顺序编号,如图 15 所示。将编号 1 处径向和轴向两个百分表调零,沿着转子的旋转方向,转动转子,每转一等份,记录一次轴向和径向百分表的度数,当转动一圈后,检查百分表的度数,应仍回到零刻度。

根据记录的测量数据,画出不规则圆形。然



图 13 百分表测量转子弯曲实物图
Fig. 13 Physical map of bended rotor by dial indicator measuring

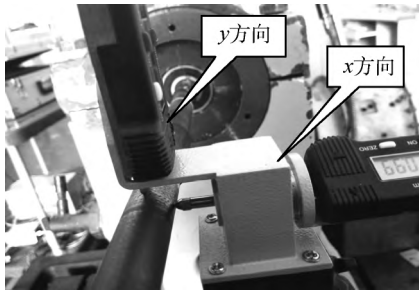


图 14 百分表测量转子弯曲局部放大图
Fig. 14 Partial enlargement of bended rotor by dial indicator measuring

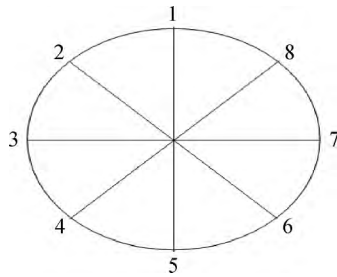


图 15 测点位置分布图
Fig. 15 Distribution of measurement points

后运用最小二乘法分别对电涡流位移传感器测得的不规则圆形和百分表测得的不规则圆形进行拟合。最小二乘法拟合圆方程的基本原理为:用最简的方法求得一些绝对不可知的真值,而令误差平方之和为最小,如图 16 所示。

设离散点 $(X_i, Y_i) i \in (1, 2, 3, \dots, N)$ 到圆心 (X_a, Y_a) 的距离为 d_i , 即

$$d_i^2 = (X_i - X_a)^2 + (Y_i - Y_a)^2 \quad (10)$$

点 (X_i, Y_i) 到圆边缘距离为

$$\delta_i = d_i^2 - R^2 = (X_i - X_a)^2 + (Y_i - Y_a)^2 - R^2 = X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c \quad (11)$$

令 $Q(a, b, c)$ 为 d_i 的平方和

$$Q(a, b, c) = \sum \delta_i^2 = \sum [(X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c)]^2 \quad (12)$$

将 $Q(a, b, c)$ 对 a, b, c 求偏导, 令偏导等于 0,

得到极值点, 比较所有极值点函数值即可得到最小值。

$$\frac{\partial Q(a, b, c)}{\partial a} = \sum 2(X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c)X_i = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial Q(a, b, c)}{\partial b} = \sum 2(X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c)Y_i = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial Q(a, b, c)}{\partial c} = \sum 2(X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c) = 0 \quad (15)$$

令

$$C = N \sum X_i^2 - \sum X_i \sum X_i,$$

$$D = N \sum (X_i Y_i) - \sum X_i \sum Y_i$$

$$E = N \sum X_i^3 + N \sum (X_i Y_i^2) - \sum (X_i^2 + Y_i^2) \sum X_i$$

$$G = N \sum Y_i^2 - \sum X_i \sum Y_i$$

$$H = N \sum (X_i^2 Y_i) + N \sum Y_i^3 - \sum (X_i^2 + Y_i^2) \sum Y_i$$

通过求极小值可以得到

$$Ca + Db + E = 0, \quad Da + Gb + H = 0$$

求解 a, b, c 的值, 而圆的方程

$$R^2 = x^2 - 2X_a x + X_a^2 + y^2 - 2Y_a y + Y_a^2 \quad (16)$$

$$\text{令 } a = -2X_a, b = -2Y_a, c = X_a^2 + Y_a^2 - R^2$$

由式(10)~式(16)拟合得出圆心坐标和半径 X_a, Y_a, R 的拟合值

$$X_a = -\frac{a}{2}, Y_a = -\frac{b}{2}, R = \frac{1}{2} \sqrt{a^2 + b^2 - 4c} \quad (17)$$

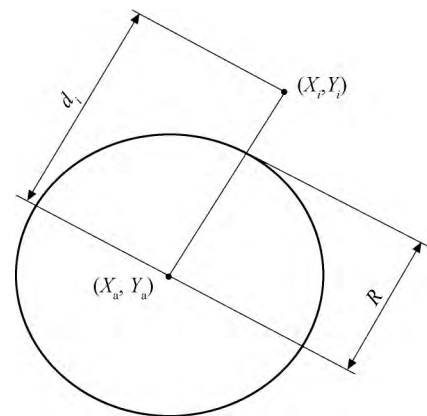


图 16 最小二乘法拟合圆心
Fig. 16 Least squares fitting circle

由上述圆心及半径的拟合值, 得到各个截面的拟合结果如图 17~图 22 所示, 从图中可以看

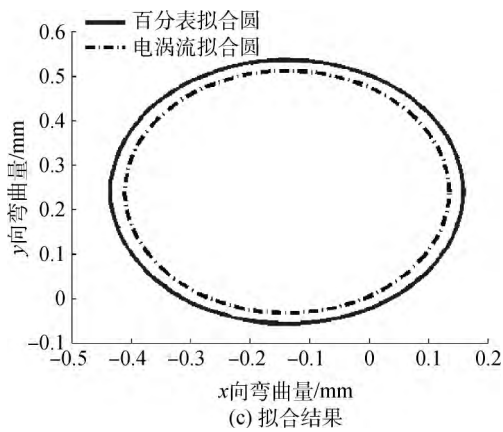
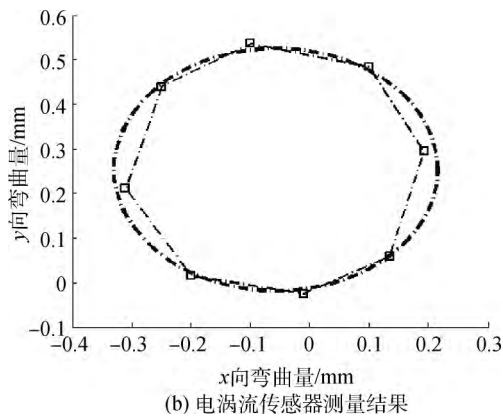
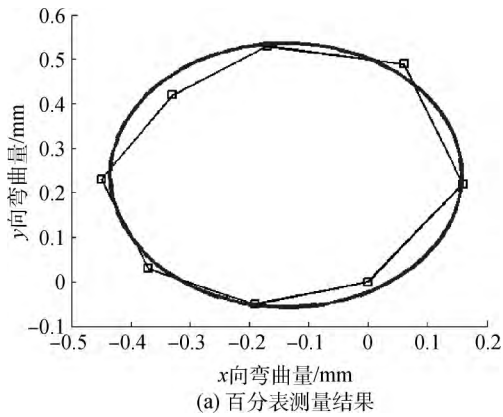


图 17 截面 1 结果

Fig. 17 Results of section 1

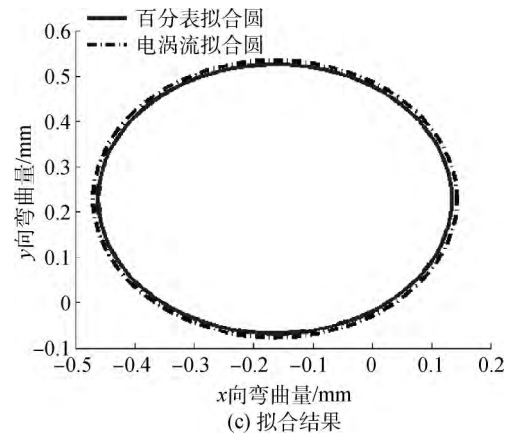
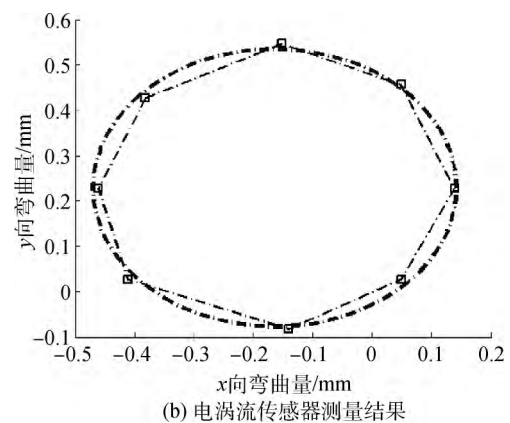
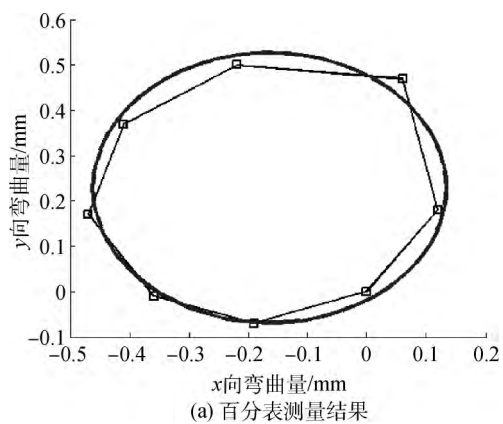
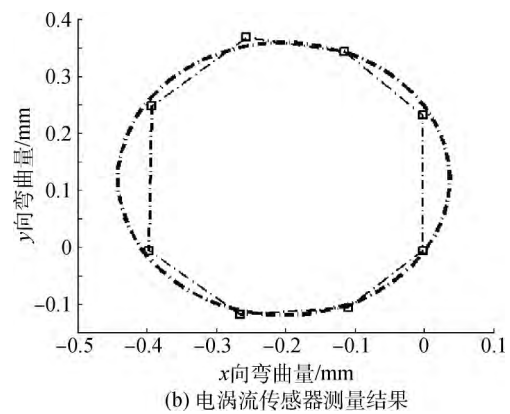
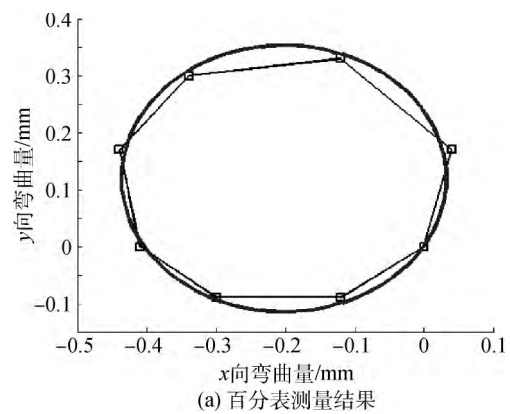


图 18 截面 2 结果

Fig. 18 Results of section 2



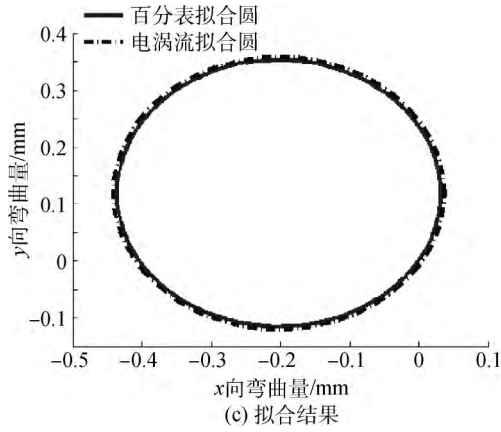
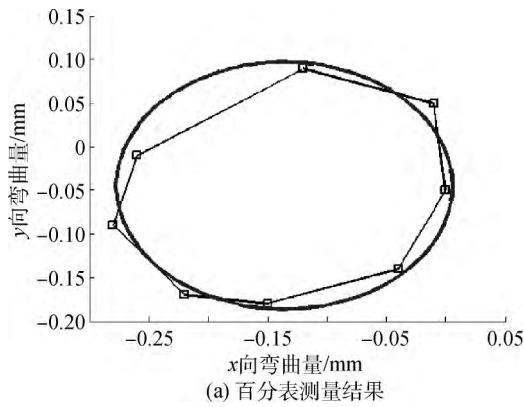
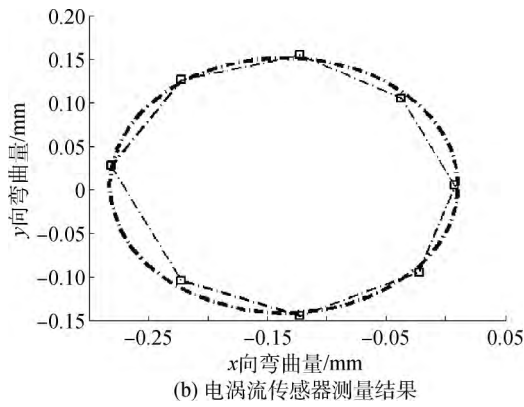


图 19 截面 3 结果

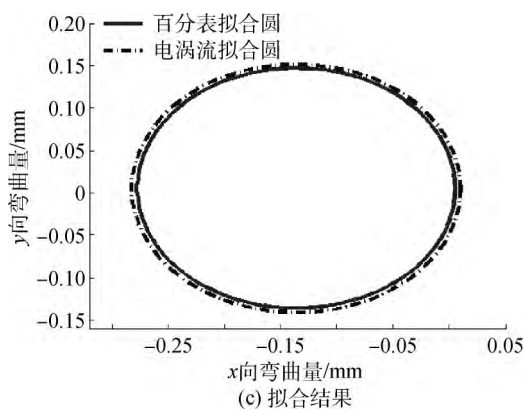
Fig. 19 Results of section 3



(a) 百分表测量结果



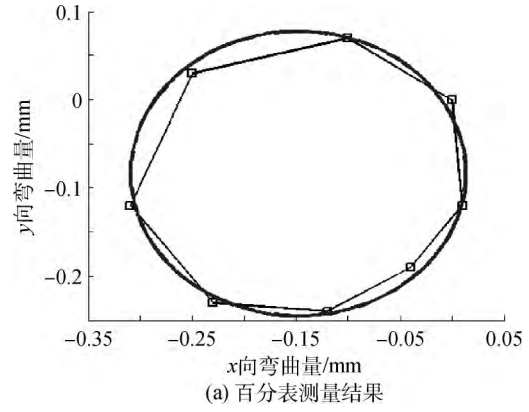
(b) 电涡流传感器测量结果



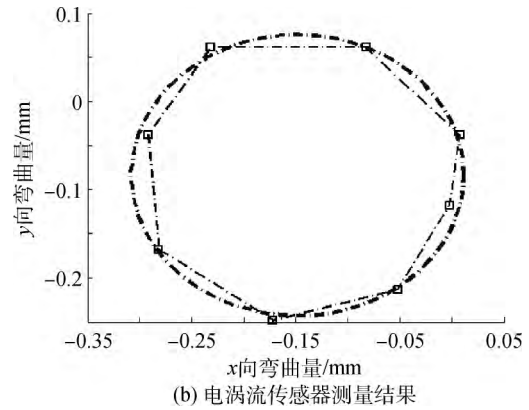
(c) 拟合结果

图 20 截面 4 结果

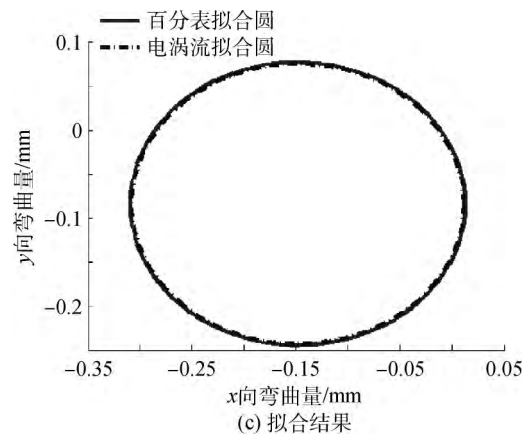
Fig. 20 Results of section 4



(a) 百分表测量结果



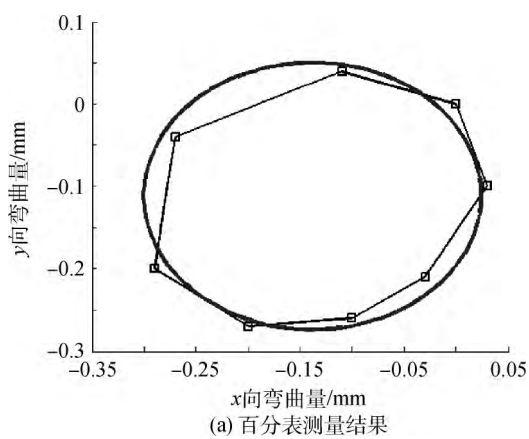
(b) 电涡流传感器测量结果



(c) 拟合结果

图 21 截面 5 结果

Fig. 21 Results of section 5



(a) 百分表测量结果

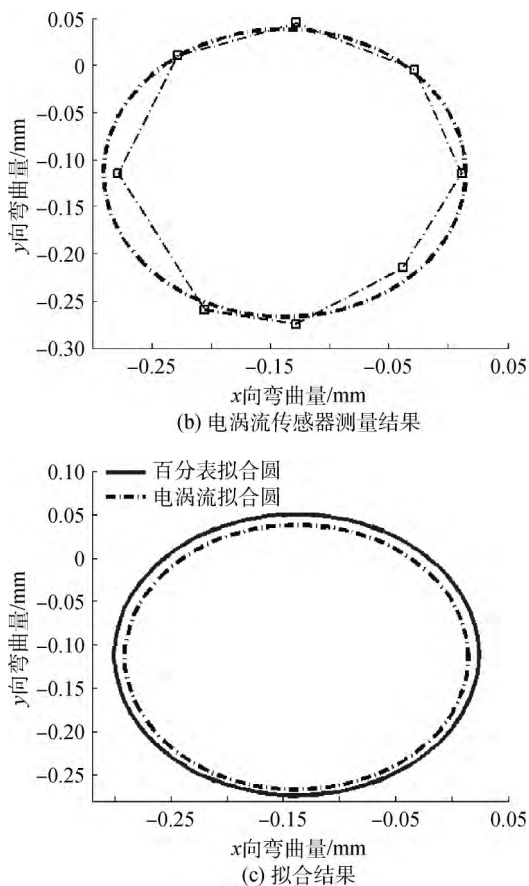


图 22 截面 6 结果

Fig. 22 Results of section 6

出,电涡流位移传感器测量的结果与百分表测量的结果基本一致,两种测量方法的拟合圆结果基本重合。这表明电涡流位移传感器在低转速下能有效地识别出转子的弯曲程度。

3 结 论

1) 分析了转子弯曲故障振动机理,认为转子弯曲故障实质上是一种基础激励下的振动,当转速很低时,用电涡流位移传感器测得的转子响应可以近似为转子的弯曲量,进而提出了一种利用电涡流位移传感器测量转子弯曲的简易方法。

2) 为验证上述方法的可行性,针对某实际弯曲转子,本文百分表测量法对其弯曲度进行了测试,通过对比分析,两种测量方法的拟合圆结果基本重合,这充分表明了本文提出的利用电涡流位移传感器测量转子弯曲的方法的正确性。

3) 本文方法是一种非接触式转子弯曲测量方法,解决了百分表测量时表架设的不方便,减少了人为因素的影响,提高了测量的精度,且操作简单、方便,为弯曲转子的测量提供了一种非常有效的手段。

参考文献:

- [1] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册: 第19册 转子动力学及整机振动[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000: 8-17.
- [2] 邹剑, 董广明, 陈进. 含初始弯曲裂纹转子的振动分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(3): 153-156.
ZOU Jian, DONG Guangming, CHEN Jin. Vibration analysis of cracked rotor with initial deflection[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(3): 153-156. (in Chinese)
- [3] 沈小要, 贾九红, 赵枚. 具有初始弯曲的不平衡转子碰摩条件的研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(9): 11-13.
SHEN Xiaoyao, JIA Jiuhong, ZHAO Mei. Rubbing condition analysis of an unbalanced rotor system with initial permanent deflection[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(9): 11-13. (in Chinese)
- [4] 冯国全, 朱梓根. 具有初始弯曲的转子系统的振动特性[J]. 航空发动机, 2003, 29(1): 20-22.
FENG Guoquan, ZHU Zigen. Vibration characteristics of the rotor system with original deformation[J]. Aeroengine, 2003, 29(1): 20-22. (in Chinese)
- [5] 罗挺. 具有初始弯曲转子系统的动平衡方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
LUO Ting. Dynamic balance method studies of the rotor system with original deformation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)
- [6] 窦军民, 马广庆. 浅谈轴弯曲的测量与矫正[J]. 林业机械与木工设备, 2002, 30(4): 30-31.
DOU Junmin, MA Guangqing. Discuss the measurement and correction of shaft bending[J]. Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2002, 30(4): 30-31. (in Chinese)
- [7] 黄声华, 叶嘉雄, 余永林. 测量汽轮机主轴弯曲的新方法[J]. 汽轮机技术, 1998, 40(3): 176-179.
HUANG Shenghua, YE Jiaxiong, YU Yonglin. A new method for measuring the bending of turbine main shaft[J]. Turbine Technology, 1998, 40(3): 176-179. (in Chinese)
- [8] 杨为民. 旋转机械转子振动分析和测试技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2008.
YANG Weimin. Research on vibration analysis and testing technology of rotating machinery rotor[D]. Nanjing: Southeast University, 2008. (in Chinese)
- [9] 刘树琪, 李强, 吴健华. 大直径数显测量装置系统的研究[J]. 现代计量技术, 1994(4): 9-14.
LIU Shuqi, LI Qiang, WU Jianhua. Study of major diameter numerical display measurement device system[J]. Advanced Measurement, 1994(4): 9-14. (in Chinese)
- [10] 张先鹤, 郑卫. 转轴弯曲光电测量系统[J]. 测控测试技术, 1997, 16(6): 32-33.
ZHANG Xianhe, ZHENG Wei. The shaft's bending measuring system by the laser scanning method[J]. Measurement and Control Technology, 1997, 16(6): 32-33. (in Chinese)

- [11] 张先鹤. 转轴弯曲光电测量系统的研究[J]. 微计算机信息, 1998, 14(5): 83-84.
ZHANG Xianhe. The light-electronic system of measuring the curve of revolving shafts[J]. Microcomputer Information, 1998, 14(5): 83-84. (in Chinese)
- [12] 蒋钢, 叶嘉雄. 激光扫描测量转轴弯曲的 8098 单片机控制系统[J]. 光电工程, 1997, 24(2): 45-50.
JIANG Gang, YE Jiexiong. A 8098 single-chip microcomputer control system for measuring the shaft bending by the laser scanning method[J]. Opto-Electronic Engineering, 1997, 24(2): 45-50. (in Chinese)
- [13] 关荣锋, 赵军良. 大轴弯曲激光精密自动测量系统[J]. 光学精密工程, 2003, 11(5): 487-491.
GUAN Rongfeng, ZHAO Junliang. Automatic measurement of turbine rotor bend using laser scanning technology[J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(5): 487-491. (in Chinese)
- [14] 杨莉, 祝恒阳. 应用线结构光技术在线检测轴类零件轴线[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2004(9): 41-42.
YANG Li, ZHU Hengyang. On-line measurement of axis of part based oil technology of linear structured light[J]. Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique, 2004(9): 41-42. (in Chinese)
- [15] 郭铁成. 激光对中仪产品化研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
GUO Tiecheng. The research of laser instrument products [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [16] 王金娜. 激光位移传感器的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
WANG Jinna. Research on laser displacement sensor[D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)
- [17] 马自军, 杨双莲. 激光位移传感器测量原理及应用研究展望[J]. 甘肃科技, 2012, 28(2): 77-78.
MA Zijun, YANG Shuanglian. Measurement principle and application of laser displacement sensor[J]. Gansu Science and Technology, 2012, 28(2): 77-78. (in Chinese)
- [18] 张勇, 梁平, 张玉珍, 等. 电涡流位移传感器动态特性自动测量系统研制[J]. 计量学报, 2012, 33(增刊 1): 6-9.
ZHANG Yong, LIANG Ping, ZHANG Yuzhen, et al. Development of auto measurement system for dynamic characteristic of eddy current sensor[J]. Acta Metrologica Sinica, 2012, 33(Suppl. 1): 6-9. (in Chinese)

(编辑: 陈越)