

引文格式:程晶明,夏锟,秦华林,等.直升机传动系统轴系偏转角动态测量方法[J].航空制造技术,2026,69(9):25020271.

CHENG Jingming, XIA Kun, QIN Hualin, et al. Dynamic measurement method for shaft deflection angles in helicopter drive systems[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(9): 25020271.

直升机传动系统轴系偏转角动态测量方法

程晶明¹,夏 锟²,秦华林²,余厚云¹,项朋昆¹

(1. 南京航空航天大学,南京 210016;

2. 中国航发湖南动力机械研究所,株洲 412002)

[摘要] 针对高速运转状态下的直升机传动轴系偏转角无法动态测量的难题,本文提出一种基于激光准直与光电检测的高精度测量方法。以准直激光束作为测量基准,通过光电探测模块获取激光束的光斑坐标,从而确定测头的相对位置与姿态。在传动轴系高速旋转过程中,布置多测头同步测量轴的多个截面,并利用三点法误差分离算法获得截面轴心轨迹,在此基础上拟合计算出两段轴之间的动态偏转角,完成了不同初始安装角度及不同转速下的测量试验。结果表明,本系统的测头同步精度优于 100 ns,偏转角测量频率大于 2000 Hz,测量不确定度优于 10",能够满足直升机传动轴系偏转角的动态测量要求。

关键词: 传动轴系偏转角; 轴心轨迹; 动态测量; 激光准直; 误差分离

中图分类号: V24; TH161

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25020271

Dynamic Measurement Method for Shaft Deflection Angles in Helicopter Drive Systems

CHENG Jingming¹, XIA Kun², QIN Hualin², YU Houyun¹, XIANG Pengkun¹

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

[ABSTRACT] A high-precision measurement method based on laser collimation and photoelectric detection is proposed to address the challenge of dynamically measuring the deflection angle of helicopter transmission shaft systems under high-speed operation. A collimated laser beam serves as the measurement datum. Spot coordinates of the laser beam are acquired by photoelectric detection modules to determine the relative position and attitude of the probes. During high-speed rotation of the transmission shaft system, multiple probes are arranged to synchronously measure several cross-sections of the shaft. The shaft center trajectory of each cross-section is obtained using a three-point error separation algorithm. Based on this, the dynamic deflection angle between two shaft segments is fitted and calculated. Experiments were conducted under different initial installation angles and rotational speeds. Results show that the synchronization accuracy of the probes is better than 100 ns, the measurement frequency of the deflection angle exceeds 2000 Hz, and the measurement uncertainty is better than 10". The system meets the requirements for dynamic deflection angle measurement in helicopter transmission shaft systems.

Keywords: Shaft deflection angles; Axis orbit; Dynamic measurement; Laser collimation; Error separation

收稿日期: 2025-08-29; 退修日期: 2025-11-17; 录用日期: 2025-11-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(62503223); 南京航空航天大学“实验技术研究与开发”项目(SYJS202405Z)

通信作者: 余厚云, 副教授, 博士, 研究方向为机械工程测量、光电检测技术等。

尾传动轴系作为直升机传动系统的核心组件,采用多跨水平轴系结构连接主减速器尾输出端与中、尾减速器输入端,为尾旋翼系统提供动力^[1]。受制造误差、安装偏差及承载变形等因素影响,轴系间不可避免地存在轴向、径向和角度偏差^[2],需借助膜片联轴器的弹性变形来补偿此类偏差。然而,当偏转角超出允许范围时,尤其是直升机尾传动轴的实际工作转速通常高达4000 r/min以上^[3],高速旋转易引发传动系统振动、过热及联轴器损伤等问题,严重时甚至导致轴端断裂^[4]。因此,需要动态测量轴系在高速运转状态下的偏转角参数,并根据测量结果调整轴的安装位姿,从而保障传动系统的可靠性和使用寿命。

在静态测量方面,王猛等^[5]采用打表法测量直升机尾传动轴系的偏转角,通过人工记录百分表读数变化计算偏转角,该方法操作简便,但测量精度不高,仅能达到 $\pm 0.01^\circ$,且属于静态测量,无法反映传动轴系在运动状态下的偏转角信息。Mendoza等^[6]研制出基于电感传感器的轴对中测量系统,避免了传感器与轴直接接触,但同样测量精度有限,仅适用于静态工况。Piotrowski^[7]提出了基于激光对中原理的测量方法,依据轴在旋转过程中接收模块感知到的光斑位移来计算两轴之间的偏转角,该方法数字化程度高,减少了人为读数误差,测量精度可达到 $\pm 0.003^\circ$,但仍属于准静态测量范畴。在动态测量方面,蔡晓斌等^[8]设计了一种车辆传动轴偏转角测量装置,可在传动轴旋转状态下测量其夹角,但该方法仅能间接测量相连两轴之间的一维偏角。齐凯等^[9]提出了一种直升机传动系统减速器回转轴线视觉测量方法,基于标定结果与视觉测量结果计算两轴之间的位置偏差与角度偏差,为多维测量提供了可行方案,然而受限于视场范围与像素精度的矛盾,相机空间布置的约束,以及采样频率不高等因素,该方法难以满足高精度动态测量要求。

综上所述,目前对于高速旋转状态下的传动轴系偏转角测量一直缺少有效的测量手段。为此,本文提出一种基于激光准直的大跨度传动轴系偏转角动态测量方法。通过非接触式位移传感器获取轴的轮廓点距离,进而得到当前截面的轴心轨迹;再借助准直激光束实现多个截面轴心轨迹的坐标统一;最后计算出两段传动轴之间的动态偏转角。该方法解决了传动系统轴系偏转角无法动态测量的难题。

1 基于激光准直的测量坐标系构建

如图1所示,测量系统由激光准直模块、轴心测量模块、光电探测模块和激光补偿模块构成。多个轴心测量模块分别布置于需要测量偏转角的两段传动轴一侧,

其测头上按照特定角度各安装了3个位移传感器,用于实时获取所在截面的传动轴轮廓点距离值,并通过三点法误差分离得到当前截面的动态轴心轨迹。

激光准直模块固定在被测轴系的一端并发出准直激光束,光电探测模块则依次安装到各测头上,采用光电探测模块上的位置敏感探测器(Position sensitive detector, PSD)测量激光束投射在其光敏面上的光斑坐标,据此调整测头的位姿,从而使各截面的轴心轨迹能统一在同一个坐标系内。最后,根据多个截面的同步轴心轨迹,拟合计算出两段轴的动态偏转角。激光补偿模块与光电探测模块协同测量激光束光斑坐标,实现对激光束漂移误差的实时补偿。

从图1可以看出,需要将多个截面上测得的轴心轨迹统一到由准直激光束建立的全局坐标系当中,随后进一步计算两段轴的偏转角。为此,建立了图2所示的坐标系,其中PSD坐标系 oxy 是PSD传感器自带的平面坐标系,其原点 o 位于光敏面中心。世界坐标系 $O_wX_wY_wZ_w$ 以准直激光束作为 O_wZ_w 轴,激光束出射点为原点, O_wX_w 轴处于水平方向,最后利用右手法则确定 O_wY_w 轴。测头上安装的3个位移传感器其测量方向交于一点 O ,以最下方水平安装的传感器的测量方向作为 OX 轴,测头平面内与之垂直的方向作为 OY 轴,构建出测头坐标系 $OXYZ$ 。

测量前通过位移台粗调每个测头的位置,使测头坐标系的原点尽可能与传动轴的截面中心重合;然后将光电探测模块依次装到各测头上,根据准直激光束投射在PSD传感器上的光斑坐标细调测头的俯仰角和偏摆角,使测头坐标系的 OZ 轴与世界坐标系的 O_wZ_w 轴平行;接下来调整测头的滚动角,使测头坐标系的 OX 轴和 OY 轴分别与世界坐标系的 O_wX_w 和 O_wY_w 轴平行。测头姿态调整好以后,记录当前测头上PSD传感器的光斑坐标 (e, f) ,即每个测头相对于准直激光束的偏移量,减去该偏移量后,可将各测量截面的轴心轨迹统一到同

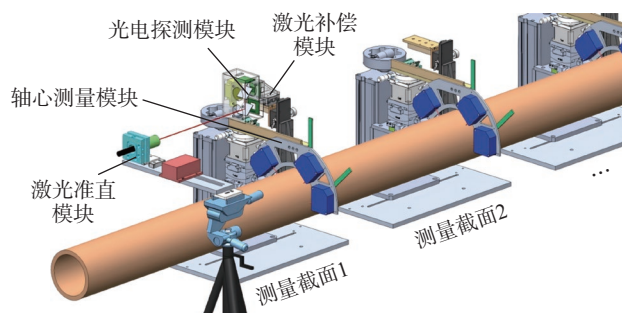


图1 轴系偏转角测量系统组成图

Fig.1 Schematic diagram of shafting deflection angle measurement system

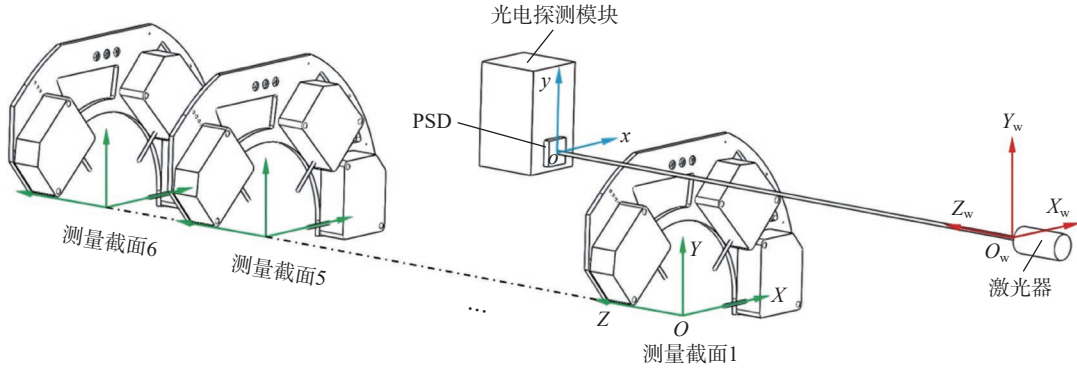


图2 轴系偏转角测量系统的坐标系示意图

Fig.2 Schematic diagram of coordinate systems for shafting deflection angle measurement system

—世界坐标系当中。

2 轴系偏转角动态测量

2.1 基于误差分离的轴心轨迹测量

三点法误差分离是将3个位移传感器沿径向按特定角度布置于测量截面,通过同步采集3个传感器的数据进行加权组合来消除回转轴的圆度误差,从而得到轴心轨迹^[10]。如图3所示,以传感器A的测量方向为OX轴,传感器B、C与传感器A的安装夹角分别为 α 、 β 。被测轴顺时针旋转一周,设轴心轨迹为 $\delta(\theta)$,其中 θ 为轴的当前角度。令轴截面的最小二乘圆心 O' 的坐标为 (a, b) ,圆度误差为 $r(\theta)$,则被测截面的轮廓 $V(\theta)$ 表示为

$$V(\theta) = a\cos(\theta) + b\sin(\theta) + r(\theta) \quad (1)$$

因此,测头坐标系原点 O 到各轮廓点的距离 $D_0(\theta)$ 、 $D_1(\theta)$ 、 $D_2(\theta)$ 分别为

$$\begin{cases} D_0(\theta) = V(\theta) + \delta_x(\theta) \\ D_1(\theta) = V(\theta + \alpha) + \delta_x(\theta)\cos(\alpha) + \delta_y(\theta)\sin(\alpha) \\ D_2(\theta) = V(\theta + \beta) + \delta_x(\theta)\cos(\beta) + \delta_y(\theta)\sin(\beta) \end{cases} \quad (2)$$

用 i 表示采样点序号, N 表示等间隔采样点总数, p 、 q 为整数,且 $p = \alpha N / 2\pi$, $q = \beta N / 2\pi$,则式(2)的离散化矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} D_0(i) \\ D_1(i) \\ D_2(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cos(2\pi p/N) & \sin(2\pi p/N) \\ 0 & 0 & 0 & \cos(2\pi q/N) & \sin(2\pi q/N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(i) \\ V(i+p) \\ V(i+q) \\ \delta_x(i) \\ \delta_y(i) \end{bmatrix} \quad (3)$$

将权系数行向量 $C = (1, \lambda, \mu)$ 左乘式(3)矩阵方程进行不等权组合,得到组合信号:

$$D_n(i) = r(i) + \lambda r(i+p) + \mu r(i+q) \quad (4)$$

其中,

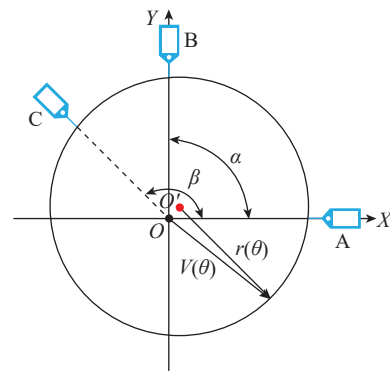


图3 三点法圆度误差分离原理图

Fig.3 Schematic diagram of three-point method for roundness error separation

$$\begin{cases} \lambda = \frac{-\sin(2\pi q/N)}{\sin[2\pi(q-p)/N]} \\ \mu = \frac{\sin(2\pi p/N)}{\sin[2\pi(q-p)/N]} \end{cases} \quad (5)$$

由于 $r(i)$ 为圆度误差的离散化形式,且具有周期性 $r(i+N) = r(i)$,因此式(4)中 $r(i+p)$ 、 $r(i+q)$ 表示圆度误差函数时延 p 、 q 后的离散化形式,设 $r(i)$ 用离散序列表示为

$$r(i) = [g_0 \ g_0 \ \dots \ g_p \ g_{p+1} \ \dots \ g_q \ g_{q+1} \ \dots \ g_{N-2} \ g_{N-1}]^T \quad (6)$$

将式(4)写成矩阵形式为

$$D_n(i)_{N \times 1} = H_{N \times N} r(i)_{N \times 1} \quad (7)$$

式中, $H_{N \times N}$ 为 $N \times N$ 维Toplize矩阵,其秩为 $N-1$,所以式(7)存在唯一解,即

$$r(i)_{N \times 1} = H_{N \times N}^{-1} D_n(i)_{N \times 1} \quad (8)$$

将分离出来的 $r(i)$ 代入离散化矩阵方程式(3)可以得到:

$$\delta_x(i) + a\sin(2\pi i/N) + b\cos(2\pi i/N) = D_0(i) - r(i) \quad (9)$$

$$\delta_y(i) - a\sin(2\pi i/N) + b\cos(2\pi i/N) = \{[D_1(i) - r(i+p)] - [D_0(i) - r(i)]\cos(2\pi p/N)\} / \sin(2\pi p/N) \quad (10)$$

式(9)和(10)中,等式右边的 $D_0(i)$ 、 $D_1(i)$ 为传感器的输出信号; $r(i)$ 、 $r(i+p)$ 是三点法分离出的圆度误差离散序列,为已知的离散序列,分别用 $k_1(i)$ 、 $k_2(i)$ 表示。将式(9)乘 $\sin(2\pi i/N)$,再减去式(10)乘 $\cos(2\pi i/N)$,得:

$$k_1(i)\sin(2\pi i/N) - k_2(i)\cos(2\pi i/N) = a\sin(4\pi i/N) - b\cos(4\pi i/N) \quad (11)$$

根据式(11),可求得最小二乘圆心在测量坐标系下的坐标 (a, b) 为

$$\begin{cases} a = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \{ [k_1(i)\sin(2\pi i/N) - k_2(i)\cos(2\pi i/N)] \sin(4\pi i/N) \} \\ b = -\frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \{ [k_1(i)\sin(2\pi i/N) - k_2(i)\cos(2\pi i/N)] \cos(4\pi i/N) \} \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)代入式(9)和(10)中,可得转轴的轴心轨迹在测量坐标系下的横纵坐标为

$$\begin{cases} \delta_x(i) = k_1(i) - a\sin(2\pi i/N) - b\cos(2\pi i/N) \\ \delta_y(i) = k_2(i) + a\sin(2\pi i/N) - b\cos(2\pi i/N) \end{cases} \quad (13)$$

2.2 轴系偏转角计算

被测轴系的轴线是在三维坐标系中的,对于空间直线,其点向式标准方程如下。

$$\frac{x-x_0}{m} = \frac{y-y_0}{n} = \frac{z-z_0}{p} = t \quad (14)$$

式中, t 为辅助参数。令 $P(x_0, y_0, z_0)$ 表示拟合直线 L 上的一点,向量 $Q(m, n, p)$ 则为拟合直线的方向向量,一般令拟合直线的方向向量的模为1,即有 $m^2+n^2+p^2=1$ 。为便于对直线进行整体最小二乘拟合,将式(14)转换为参数方程形式:

$$\begin{cases} x = x_0 + mt \\ y = y_0 + nt \\ z = z_0 + pt \end{cases} \quad (15)$$

对于 n 个待拟合测量截面轴心坐标 $B_i'(x_i', y_i', z_i')$,若依据最小二乘法拟合直线 L ,则需要建立各点 B_i' 到拟合直线 L 的距离平方和为目标函数。当该目标函数取最小值时,对应的拟合直线结果为最优解,最终可以得到轴线的最小二乘法拟合结果^[11]。

在得到两根轴的轴线方程后,其空间相对位置关系可通过方向向量的几何特性进行表征。如图4所示,两根轴之间的夹角可通过向量运算直接求解。

记轴线1的方向向量为 $F_1=[m_1 \ n_1 \ p_1]^T$,轴线2的方向向量为 $F_2=[m_2 \ n_2 \ p_2]^T$,则两根轴线的夹角可表示为

$$\theta = \arccos \frac{F_1 \cdot F_2}{|F_1| \cdot |F_2|} \quad (16)$$

3 测头参数优化与标定

3.1 位移传感器安装角度优化

为了验证误差分离算法的可行性,预先设定圆轮廓函数与轴心轨迹函数,然后代入各参数进行仿真分析^[12]。传动轴的半径取57 mm,根据圆轮廓的傅里叶变换形式设定圆轮廓函数为

$$V(\theta) = 57 + 1.2\cos(\theta) - 0.8\sin(\theta) + 0.2\sin(2\theta) + 0.5\cos(3\theta) - 0.6\cos(8\theta) + 0.3\sin(13\theta) + 0.4\cos(20\theta) \quad (17)$$

轴心轨迹函数设定为

$$\delta(\theta) = 2 + 0.1\cos(\theta + \pi/4) + 0.6\sin(2\theta + \pi/12) + 0.4\cos(7\theta) + 0.5\cos(12\theta + \pi/10) \quad (18)$$

取测量点数 $N=256$,建立以误差传递系数为基础的测点位置优化函数,利用差分进化算法^[13]获取3个传感器的最佳周向角度值。设第1个传感器的安装角度为 0° ,则另外两个传感器与 OX 轴正半轴的夹角 α 与 β 分别为 45° 和 132.18° ,同时设置了对照组的安装角度 90° 和 180° 作为对比。图5(a)和(b)分别为安装角 90° 与 180° 下仿真得到的轴心轨迹及圆度误差分离结果;图5(c)和(d)为做相应优化后的仿真结果。当 $\alpha=45^\circ$ 、 $\beta=132.18^\circ$ 时,分离得到的轴心轨迹和圆度误差曲线与理论曲线更加吻合,取得了很好的误差分离效果。

3.2 测头坐标系标定

PSD感知到的光斑坐标,用于表征各测头坐标系之间的相对位置关系。然而,受加工与安装误差等因素影响,各测头坐标系与PSD坐标系之间存在位置偏差,即图6中的参数 l_1 、 l_2 ,该位置偏差直接影响坐标转换的准确性与精度。因此,需通过标定补偿此系统误差。

鉴于二者的绝对位置关系难以直接测量,因此仅对同一测头位姿下各测头坐标系中心的相对位置关系进

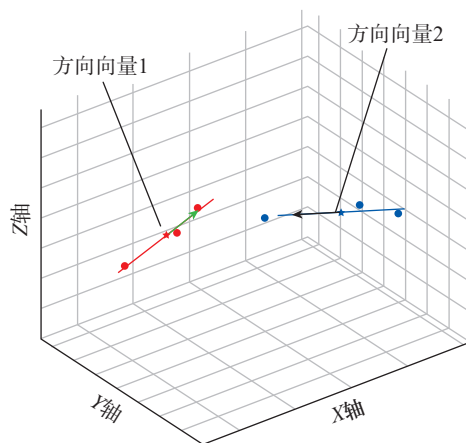
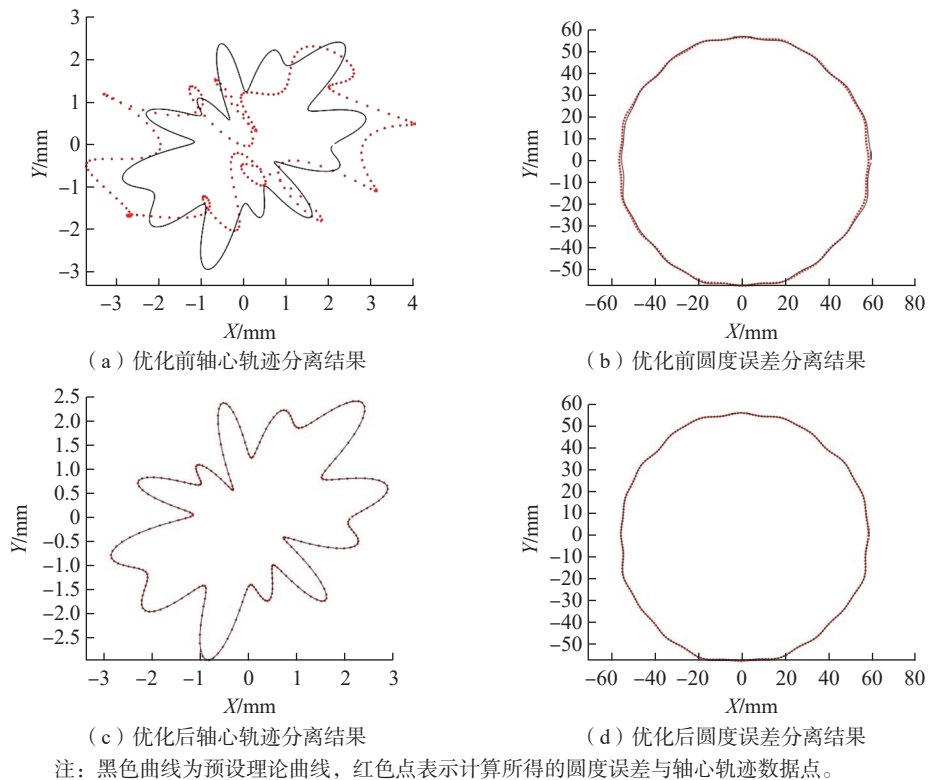


图4 传动轴空间夹角计算示意图

Fig.4 Schematic diagram for spatial angle calculation of drive shaft



注：黑色曲线为预设理论曲线，红色点表示计算所得的圆度误差与轴心轨迹数据点。

图5 测头传感器安装角度优化前后的误差分离结果对比图

Fig.5 Comparison of error separation results before and after optimization of probe sensor installation angle

行标定。利用固定激光束与高精度标准轴构建测头标定基准,依次将6个测头安装于标定工位,如图7所示。调整测头坐标系原点使其与高精度标准轴的轴线重合,并记录PSD的读数分别为 (s_i, t_i) ,其中, $i=1,2, \dots, 6$,表示测量截面的编号。此时,各轴心测量模块的测头坐标系与PSD坐标系之间的相对位置关系可表示为

$$\begin{cases} \Delta x = s_i - s_1 \\ \Delta y = t_i - t_1 \end{cases} \quad (19)$$

测头坐标系与PSD坐标系相对位置标定试验结果如表1所示。

4 试验结果与不确定度分析

4.1 系统同步精度验证试验

本测量系统共利用18个位移传感器获取传动轴系的轮廓信息,然后拟合计算动态偏转角,因此需要保证所有传感器信号的同步采样。同步的目的在于为各设备建立统一的时间基准,这要求所有采集通道具备一致的工作时钟与触发信号。

如图8所示,系统选用阿尔泰USB-2888A型数据采集卡,支持外部时钟同步触发功能。为了进一步验证多传感器信号的同步精度,采用信号发生器输出已知参数的正弦信号并接入采集卡,并通过外部触发进行多通

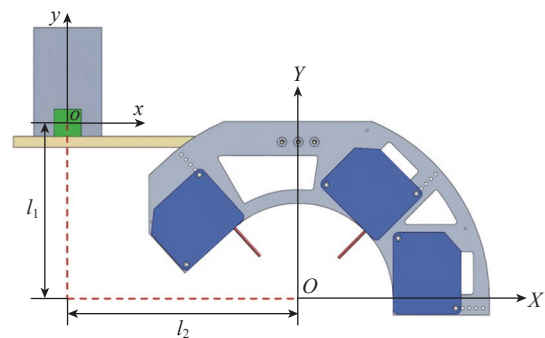


图6 测头坐标系与PSD坐标系的相对位置关系图

Fig.6 Schematic diagram of relative position between probe and PSD coordinate systems

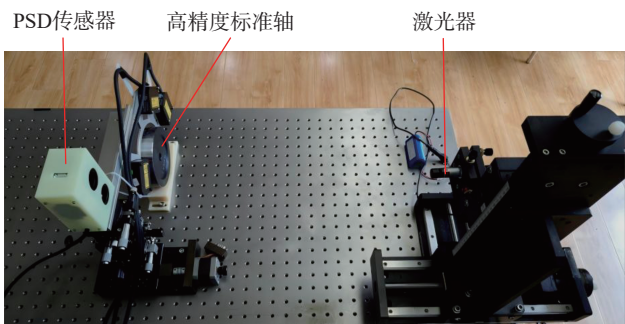


图7 测头坐标系标定试验现场图

Fig.7 Experimental scene of probe coordinate system calibration

道信号同步采集。试验中信号发生器发出的正弦信号频率为 4 kHz,幅值为 5 V,初相位为 0°,对采集卡 18 个通道的信号分别进行了 8 次采集试验,各通道采集的信号电压值如表 2 所示。通过各通道间的信号电压差可计算其相位差及时间差,从而得到本系统的同步精度优于 100 ns。

表 1 测头坐标系与 PSD 坐标系相对位置标定试验结果
Table 1 Experimental results of relative position calibration between probe and PSD coordinate systems mm

测头编号	PSD 读数		相对位置关系	
	横坐标 x	纵坐标 y	Δx	Δy
1	0.9104	-0.1194	—	—
2	0.9738	-0.1676	0.0634	-0.0482
3	1.1364	-0.0589	0.2260	0.0605
4	0.5716	0.2258	-0.3388	0.3452
5	0.9308	-0.2590	0.0204	-0.1396
6	0.9796	-0.1281	0.0692	-0.0087

表 2 本系统多通道采集到的信号电压

Table 2 Signal voltages acquired by multi-channel system

通道	试验1	试验2	试验3	试验4	试验5	试验6	试验7	试验8
通道1/V	3.3742	-2.9062	-0.3266	-4.4171	-0.9066	3.7245	-2.6021	4.7976
通道2/V	3.3736	-2.9062	-0.3264	-4.4172	-0.9071	3.7250	-2.6028	4.7979
通道3/V	3.3741	-2.9068	-0.3270	-4.4175	-0.9067	3.7248	-2.6027	4.7974
通道4/V	3.3738	-2.9069	-0.3273	-4.4172	-0.9061	3.7253	-2.6021	4.7973
通道5/V	3.3737	-2.9062	-0.3262	-4.4176	-0.9070	3.7245	-2.6028	4.7974
通道6/V	3.3737	-2.9058	-0.3259	-4.4182	-0.9068	3.7247	-2.6028	4.7975
通道7/V	3.3745	-2.9063	-0.3271	-4.4171	-0.9058	3.7251	-2.6018	4.7974
通道8/V	3.3736	-2.9060	-0.3262	-4.4172	-0.9066	3.7241	-2.6028	4.7968
通道9/V	3.3742	-2.9064	-0.3272	-4.4168	-0.9057	3.7251	-2.6023	4.7971
通道10/V	3.3734	-2.9058	-0.3261	-4.4172	-0.9073	3.7243	-2.6027	4.7973
通道11/V	3.3738	-2.9061	-0.3264	-4.4175	-0.9065	3.7253	-2.6029	4.7972
通道12/V	3.3743	-2.9064	-0.3266	-4.4172	-0.9065	3.7253	-2.6027	4.7980
通道13/V	3.3738	-2.9059	-0.3265	-4.4176	-0.9069	3.7246	-2.6024	4.7975
通道14/V	3.3738	-2.9062	-0.3261	-4.4174	-0.9070	3.7246	-2.6031	4.7973
通道15/V	3.3736	-2.9067	-0.3267	-4.4174	-0.9064	3.7249	-2.6028	4.7975
通道16/V	3.3741	-2.9066	-0.3270	-4.4169	-0.9063	3.7248	-2.6020	4.7978
通道17/V	3.3744	-2.9068	-0.3274	-4.4171	-0.9061	3.7253	-2.6017	4.7974
通道18/V	3.3744	-2.9072	-0.3278	-4.4165	-0.9055	3.7254	-2.6017	4.7976
同步精度/ns	11.9	13.7	15.2	28.9	14.6	15.5	13.0	33.9

4.2 轴心轨迹动态测量试验

在传动轴测量截面不变的情况下,截面轮廓的圆度误差是一个固定值。尽管受传感器本身精度及安装角度的影响会产生一定误差,但通过误差分离得到的截面圆度总体上保持不变。本文利用截面圆度误差不变性,通过“自律验证法”^[14]来验证误差分离方法测量轴心轨迹的正确性。

试验系统如图 9 所示,激光位移传感器为 LTM2-030WEA,测量范围 ± 5 mm,频率响应 5 kHz,非线性误



图 8 多测头同步精度测量试验现场图

Fig.8 Experimental scene of multi-probe synchronization accuracy measurement

差 <0.05%F.S.。被测件为外径 90 mm,圆度误差 0.002 mm 的标准圆柱。

当电机转速为 1200 r/min 时,测得的轴心轨迹如图 10 所示,不同颜色用于区分各旋转圈次,可以看出,轴心轨迹的重复性高。表 3 给出了不同转速下的标准轴截面圆度误差分离结果,圆度误差重复性小于 0.001 mm,与公称值的最大偏差不超过 0.006 mm,表明三点法误差分离能够将被测轴的截面圆度误差有效分离,为实现轴心轨迹的动态高精度测量提供了保证。

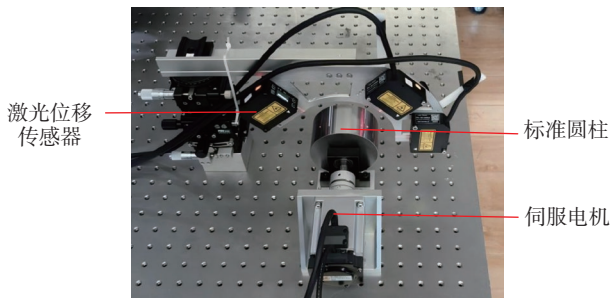


图 9 轴心轨迹动态测量精度验证试验现场图

Fig.9 Experimental scene of dynamic measurement accuracy verification for axis trajectory

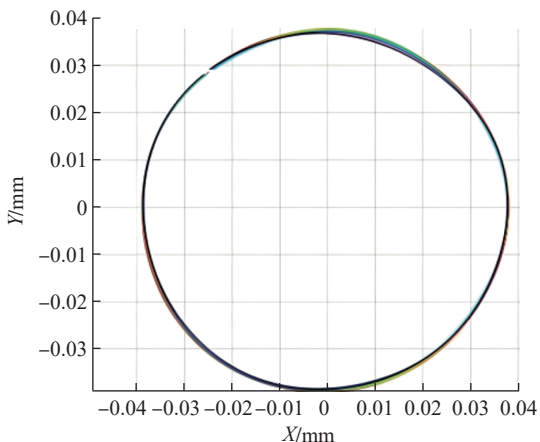


图 10 电机转速 1200 r/min 时测得的轴心轨迹图

Fig.10 Shaft orbit measured at a motor speed of 1200 r/min

4.3 传动轴系偏转角动态测量试验

使用本系统在图 11 所示的传动试验台上进行了轴系偏转角动态测量试验,6 个轴心测量模块按一定间距分别布置于膜片联轴器所连接的两段传动轴上。通过对传动轴系设置不同的初始安装角及转速,进行了多组试验,试验过程中,根据每圈采样点数和转速设置采样频率,保证偏转角的动态测量频率不低于 2000 Hz。图 12 为初始安装角 0.2536°、转速 2500 r/min 工况下的各截面轴心轨迹。

根据同步获取的轴心坐标数据,拟合得到的传动轴轴线如图 13 所示,不同试验条件下两段轴之间的偏转角动态测量结果见表 4,动态偏转角测量重复性误差均小于 8.3”。

4.4 不确定度分析

根据上文确定的传动轴系偏转角测量模型,影响偏转角动态测量结果的因素如下^[15]。

(1)位移传感器的测量误差:源于传感器本身精度,根据技术手册(无锡泓川科技《LTM 系列激光位移传感器手册》),该误差值为 ± 0.0025 mm,且服从均匀分布,则传感器测量值 D_i 的分布区间为 $[D_i-0.0025$ mm, $D_i+0.0025$ mm]。

(2)位移传感器安装角度误差:由传感器安装偏差导致,根据试验结果,角度误差可控制在 $\pm 0.1^\circ$ 范围内,

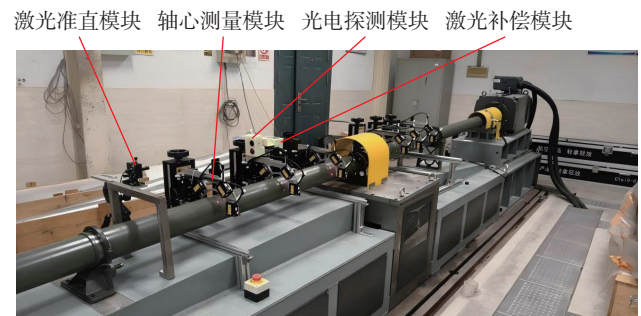


图 11 传动试验台轴系偏转角动态测量试验现场图

Fig.11 Experimental scene of dynamic shafting deflection angle measurement on the drive train test rig

表 3 圆度误差测量结果

Table 3 Measurement results of roundness error

mm

转速	试验1	试验2	试验3	试验4	试验5	试验6	试验7	试验8	极差	平均值	平均偏差
60 r/min	0.0068	0.0076	0.0074	0.0068	0.007	0.0071	0.0071	0.0073	0.0006	0.0071	0.0051
300 r/min	0.0076	0.0078	0.0077	0.0078	0.0078	0.0076	0.0075	0.0076	0.0002	0.0077	0.0057
600 r/min	0.0078	0.0079	0.008	0.0076	0.0079	0.0077	0.0072	0.0073	0.0007	0.0077	0.0057
900 r/min	0.0065	0.0067	0.0066	0.0069	0.0069	0.0072	0.0071	0.0073	0.0008	0.0069	0.0049
1200 r/min	0.0057	0.0058	0.0061	0.0058	0.0061	0.0063	0.0067	0.0067	0.001	0.0062	0.0042

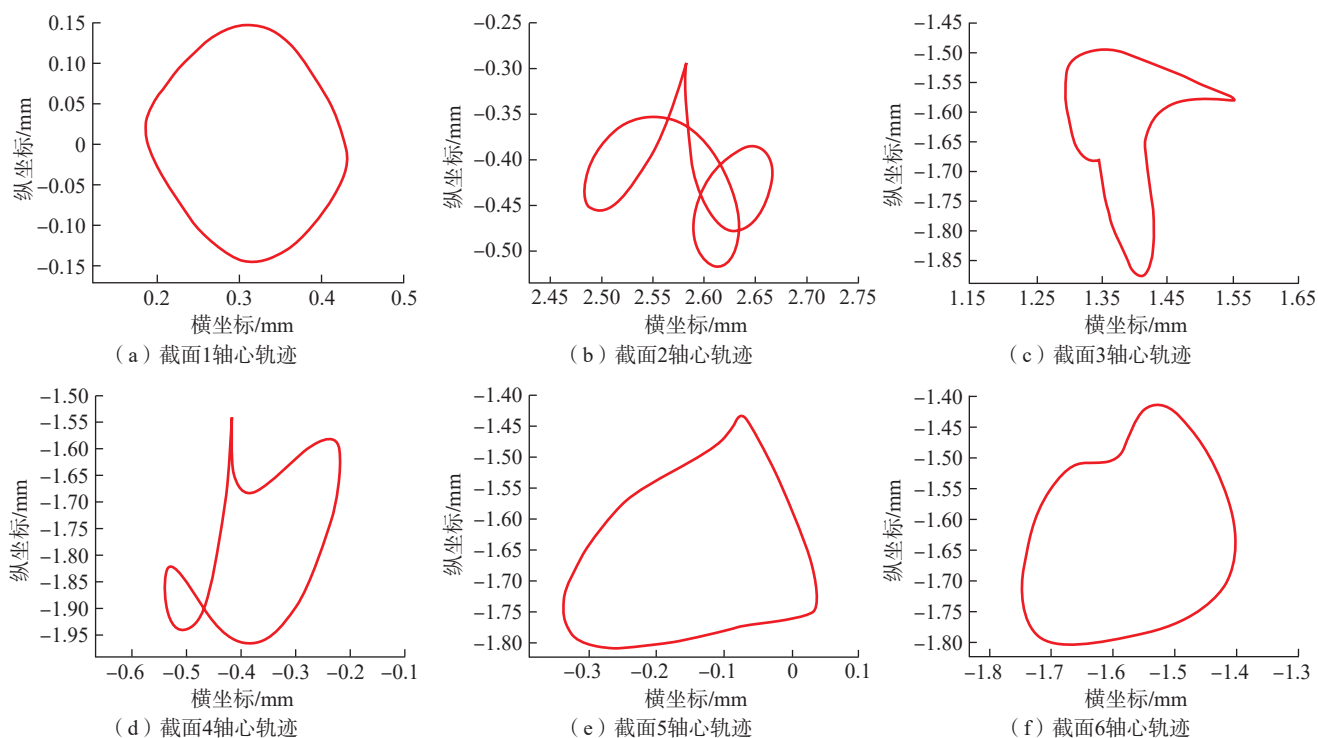


图 12 传动轴系各测量截面上的轴心轨迹图

Fig.12 Shaft orbits at each measurement section of drive shaft system

表 4 动态偏转角测量结果

Table 4 Results of dynamic deflection angle measurement

初始偏转角/(°)	转速/(r/min)	试验1	试验2	试验3	试验4	试验5	试验6	试验7	试验8	试验9	试验10	极差/(")
0.2536	1000	0.2559	0.2558	0.2563	0.257	0.2572	0.2565	0.2567	0.2555	0.2552	0.2555	7.2
0.2536	2500	0.2351	0.2371	0.2373	0.2365	0.2366	0.2364	0.2355	0.2368	0.2374	0.2354	8.3
0.2536	4680	0.2395	0.2382	0.2402	0.2381	0.2389	0.2382	0.2396	0.24	0.2383	0.2398	7.6
0.1722	1000	0.2082	0.2094	0.2084	0.2095	0.2084	0.2085	0.2079	0.2088	0.21	0.2088	7.6
0.1722	2500	0.1903	0.1903	0.1909	0.1896	0.1894	0.1889	0.1895	0.1889	0.1893	0.1895	7.2
0.1722	4680	0.1833	0.1833	0.1827	0.1838	0.1846	0.1843	0.1838	0.1849	0.1838	0.1844	7.9
0.0835	1000	0.1345	0.1352	0.1349	0.1344	0.1339	0.1347	0.1347	0.1344	0.1349	0.1344	4.7
0.0835	2500	0.1204	0.1203	0.1198	0.1197	0.1193	0.1194	0.1201	0.12	0.1203	0.1198	4
0.0835	4680	0.1162	0.1172	0.1171	0.1176	0.1176	0.1166	0.117	0.116	0.1176	0.1178	6.5

假定该误差服从均匀分布,则3个位移传感器之间的夹角 α 、 β 的分布区间分别为 $[44.9^\circ, 45.1^\circ]$ 和 $[132.08^\circ, 132.28^\circ]$ 。

(3) 激光测距传感器的测量误差: 源于传感器本身精度, 根据技术手册(上海协堡电子有限公司《SLDS-A30P说明书》), 其误差值为 ± 0.5 mm, 假定其服从均匀分布, 则测得的距离值 d 的分布区间为 $[d-0.5$ mm, $d+0.5$ mm]。

(4) 倾角传感器误差: 源于传感器本身精度, 根据

技术手册, 其精度为 $\pm 0.001^\circ$, 且服从均匀分布, 则测头滚动角 ω 的分布区间为 $[\omega-0.001^\circ, \omega+0.001^\circ]$ 。

(5) PSD传感器测量误差: 源于传感器本身精度, 根据技术手册(上海欧光电子科技有限公司《S2-0003-2L10_SU24产品手册》), 其测量误差为 ± 0.005 mm, 则光斑坐标 (e, f) 的分布区间为 $(e \pm 0.005$ mm, $f \pm 0.005$ mm)。

基于传动轴系偏转角测量模型及各误差因素的分布, 采用蒙特卡洛法评定测量不确定度, 评定过程基于

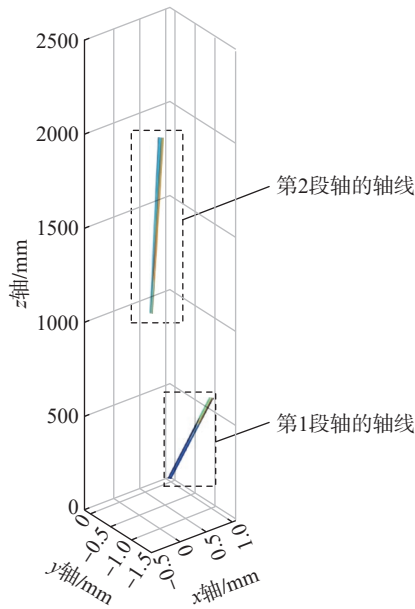


图 13 两段传动轴轴线的 10 次重复测量结果

Fig.13 Results of 10 repeated measurements for the axes of two drive shafts

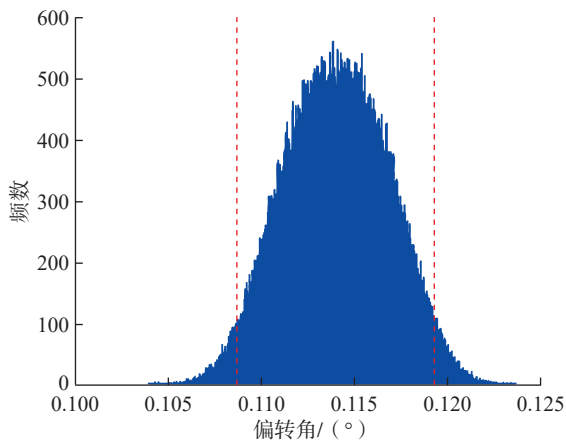


图 14 动态偏转角概率密度直方图

Fig.14 Probability density histogram of dynamic deflection angle

Matlab 平台, 试验次数为 10 万次。由于初始安装角仅影响测头初始位姿的调整, 不决定其动态测量精度, 而转速则直接关联传感器的动态性能, 是影响精度的关键, 因此对最高转速 4680 r/min, 以及代表性初始安装角 0.0835° 下的数据进行测量不确定度计算, 得到的概率密度分布如图 14 所示。仿真结果显示, 偏转角的平均值为 0.1140°, 标准不确定度为 0.0029° (约为 10"), 包含概率 95% 的置信区间为 [0.1089°, 0.1185°], 证明本文提出的传动轴系偏转角动态测量方法达到了较高的精度水平。

5 结论

(1) 本文提出了一种基于激光准直与光电检测的

传动系统轴系偏转角动态测量方法, 并研制了成套测量装置, 实现了直升机尾传动轴系在高速运转状态下的偏转角动态测量。首先, 通过高精度标准件对系统参数进行标定, 有效提升了系统测量精度; 其次, 在以传动轴系为对象的多种试验条件下进行的多组偏转角测量试验中, 系统测量结果的重复性误差小于 8.3", 表明该系统具有较高的重复性测量精度; 最后通过蒙特卡洛法对系统的测量结果进行了不确定度的分析, 其标准不确定度为 10"。相较于打表法和激光对中法等传统测量方法, 本文提出的方法不仅达到了更高的测量精度, 而且突破了传统方法只能静态测量的局限, 实现对轴系偏转角的动态测量。

(2) 本文设计的传动系统轴系偏转角动态测量系统采用分布式架构, 各测量单元相互独立, 测量平台可独立移动与重组, 测头结构灵活可调, 能够适应于不同长度、直径和姿态等结构参数的传动轴系偏转角测量, 同时满足实验室与现场环境下的测量需求。

参考文献

- [1] 李永超. 基于ANSYS的直升机尾传动系统动力学特性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
LI Yongchao. Research on dynamics characteristics of helicopter tail drive system based on ANSYS[D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.
- [2] 黄国远. 转子系统不平衡-不对中-碰摩多故障数值仿真与实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
HUANG Guoyuan. Numerical simulation and experimental research on rotor system with unbalance-misalignment-rubbing multi-faults[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [3] 宋兴武. 直升机尾传动轴系设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007: 43-66.
SONG Xingwu. Designing of tail transmission shafting for the copter[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007: 43-66.
- [4] WANG N F, JIANG D X. Vibration response characteristics of a dual-rotor with unbalance-misalignment coupling faults: Theoretical analysis and experimental study[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 125: 207-219.
- [5] 王猛, 吴由录, 唐春华, 等. 直八型直升机尾传动轴偏摆量和跳动量的检测与调整[C]//第二十八届全国直升机年会. 南京: 南京航空航天大学, 2012: 1252-1257.
WANG Meng, WU Youlu, TANG Chunhua, et al. Measurement and adjustment of runout and wobble for the Z-8 helicopter tail drive shaft[C]// The 28th National Helicopter Annual Forum. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012: 1252-1257.
- [6] MENDOZA I, ZURITA G. Shaft alignment measurement system developed for industrial applications[J]. Investigacion & Desarrollo, 2018, 18(1): 91-102.
- [7] PIOTROWSKI J. Shaft alignment Handbook[M]. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [8] 蔡晓斌, 石永金, 徐伟华. 一种用于动态测量车辆传动轴夹角的装置: CN201020260846.6[P]. 2011-01-19.

CAI Xiaobin, SHI Yongjin, XU Weihua. A device for dynamically measuring the drive shaft angle of vehicles: CN20102026846.6[P]. 2011-01-19.

[9] 齐凯, 李沈杲, 黄翔, 等. 基于机器视觉的直升机传动系统回转轴线标定方法[J]. 航空制造技术, 2024, 67(22): 110-117.

QI Kai, LI Shuanggao, HUANG Xiang, et al. Calibration method for rotary axis of helicopter transmission system based on machine vision[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(22): 110-117.

[10] 魏许杰, 王红军, 王泽. 基于新的时域三点法的机床主轴回转误差研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(11): 83-85, 91.

WEI Xujie, WANG Hongjun, WANG Ze. Research on rotational error of machine tool spindle based on new time domain three-point method[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019(11): 83-85, 91.

[11] 李静. 基于矩阵奇异值分解的空间直线拟合[J]. 大学数学, 2019, 35(2): 5-8.

LI Jing. Spatial linear fitting based on singular value decomposition of the matrix[J]. College Mathematics, 2019, 35(2): 5-8.

[12] 李阔, 吴怀超, 令狐克均, 等. 数控轧辊磨床三点非接触式

测量原理及误差分析与仿真[J]. 机械设计与制造, 2022(9): 43-48.

LI Kuo, WU Huaichao, LINGHU Kejun, et al. Principle and simulation analysis of three-point non-contact measurement for roller grinder[J]. Machinery Design & Manufacture, 2022(9): 43-48.

[13] 万道文. 数控机床主轴回转误差测量与故障诊断方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.

WAN Daowen. Research on the rotational error measurement and fault diagnosis of CNC machine tool spindle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.

[14] 雷贤卿. 基于误差分离的圆柱度精密测量技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.

LEI Xianqing. Study of the cylindricity precision measurement technique based on the error separation method[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.

[15] WIDMAIER T, HEMMING B, JUHANKO J, et al. Application of Monte Carlo simulation for estimation of uncertainty of four-point roundness measurements of rolls[J]. Precision Engineering, 2017, 48: 181-190.

(责编 七七)