

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.008

基于激光测距的复合齿轮轴同轴度测量方法研究

方媛媛, 陆永华, 刘恒, 张添一

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:针对内花键-伞齿轮类零件的同轴度测量,提出一种基于激光测距的无接触测量方法。使用激光位移传感器和光谱共焦传感器获得被测零件不同截面的数据点信息,根据最小二乘法计算每个测量截面的中心点坐标,拟合得到基准轴线,最后结合内花键的基准轴线方程和伞齿轮的中心点坐标,计算得到伞齿轮相对于内花键的同轴度误差。添加系统精度验证试验,对同一个内花键-伞齿轮零件进行 10 组测量,测量系统的不确定度为 0.028 mm,重复测量误差不超过 0.085 mm。

关键词:激光位移传感器;光谱共焦传感器;内孔-外轴类零件;最小二乘法;同轴度误差

中图分类号:TN249 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)05-0040-06

Research on Coaxiality Measurement System of Compound Gear Shaft Based on Laser Ranging

FANG Yuanyuan, LU Yonghua, LIU Heng, ZHANG Tianyi

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A non-contact measurement method based on laser ranging is proposed for the coaxiality measurement of internal spline-bevel gear. Laser displacement sensor and spectral confocal sensor are applied to obtain the data points of different sections of the measured parts, the center point coordinates of each measured section are calculated according to the least square method, and fitted to gain reference axis, and the reference axis equation of the internal spline and the center point coordinates of the bevel gear are combined for calculation obtaining the coaxial error of the bevel gear relative to the internal spline. In the system accuracy verification experiment, 10 groups of measurement are conducted for the same internal spline-bevel gear part, with the uncertainty of the measurement system as 0.028 mm and the repeated measurement error less than 0.085 mm.

Keywords: laser displacement sensor; spectral confocal sensor; inner hole-outer shaft parts; least square circle method; coaxiality error

0 引言

内花键-伞齿轮复合齿轮轴是一种复杂的内孔-外轴类零件,该零件的同轴度误差会影响到传动系统的稳定性和可靠性。本文的目的是为了高效测量类似于内花键-伞齿轮这种内孔外轴类零件的同轴度误差。

同轴度误差属于位置误差,本来就难以测量,并且内花键-伞齿轮复合齿轮轴的形状比较复杂,目前该类零件没有有效的测量方法。传统的接触式测量法是使用三坐标测量机(CMM)和激光位移传感器进行测量^[1-2]。同轴度测量仪和 CMM 是通过采集零件表面的大量数据点来计算零件的同轴度,但是仪器价格昂贵,并且测量一个零件花费的时间较长^[3],激光准直法只能测量孔与孔之间的同轴度误差,具有测量的局限性^[4]。

目前,基于光学测量原理的激光位移传感器以及机器视觉测量等方法被广泛应用于复杂零件表面测量、形状公差测量、机械零件尺寸公差测量等领域^[5-6]。在非接触测量方面,张瑛玮^[7]设计了一种基于二维激光位移传感器的同轴度检测装置,用于检测车桥减速器桥壳轴承孔的同轴度误差。为了能够快速测量齿轮的齿距偏差、齿廓偏差、径向跳动偏差,邱林^[8]搭建了一套非接触式齿轮测量装置,并研发了配套的测量分析软件。LI 等^[9]提出了一种基于线结构光视觉的阶梯轴同轴度测量方法。WANG 等^[10]为了解决针对小直径孔系零件同轴度的快速测量问题,设计了基于激光位移传感器的同轴度测量杆,方便了不同尺寸和孔数的系列孔的同轴度测量,并能在工业现场快速测量。GAO 等^[11]以激光位移传感器为核心,建立了一种基于激光准直的非接触式同轴度测量

第一作者简介:方媛媛(1999—),女,江西九江人,硕士研究生,研究方向为计算机辅助测控,1992567226@qq.com。

系统;根据数学模型,利用位置敏感探测器(PSD)和多个自由度的运动平台建立了零件在任何位置的参考轴;设计了相应的截面圆拟合和同轴度评估算法,解决了测量问题。窦亚萍等^[12]针对曲轴轴颈同轴度快速检测的需求,提出了一种基于三维点云的同轴度误差视觉测量的方法。应用激光扫描仪获取待测件的三维点云模型,计算获取等间距的轴颈点云切片,根据各切片圆心以最小二乘法获取公共基准轴线,最终实现同轴度误差的测量。朱磊等^[13]设计了一种基于机器视觉在线高精度同轴度检测与微调系统,实现了对零件同轴度实时测量调整。虽然以上学者都对孔或轴的同轴度测量提出了有效的检测方法,但这些方法并不适用于内孔外轴类复合零件。

本文采用非接触式测量的方式,测量内花键-伞齿轮复合齿轮轴的伞齿轮部分相对于内花键部分的同轴度误差。以光谱共焦传感器和激光位移传感器为核心,通过测量系统硬件平台和测量软件,采集内花键-伞齿轮零件不同截面的点位信息,计算得到内花键-伞齿轮的同轴度误差。测量系统重复测量误差仅 0.085 mm,并可在 5 min 内获得被测件的同轴度误差。

1 测量系统原理与设计

待测零件为内花键-伞齿轮复合齿轮轴,该零件由内花键、伞齿轮、中间圆柱 3 部分组成,要求伞齿轮相对于花键部分同轴度误差在 0.20 mm 以内。实物如图 1 所示。

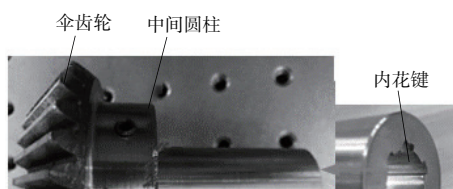


图 1 内花键-伞齿轮复合齿轮轴实物图

我们需要获得伞齿轮轴部分与内花键孔部分的同轴度误差,由于该零件的表面轮廓复杂,不易采用接触式方法测量其同轴度误差。

1.1 测量系统原理

1) 同轴度评定流程

本文的目的是测量复合齿轮轴中的伞齿轮相对于内花键的同轴度误差。经过分析,将内花键部分的理想轴线作为基准轴线,评定伞齿轮相对于内花键的同轴度。

首先获取被测零件截面的轮廓信息,然后对测量截面的数据点进行数据筛选和圆心拟合等处理,得到测量截面的中心点坐标,再根据基准要素的多个截面圆心使用轴线拟合算法得到基准轴线,最后根据同轴度最小包容区域准则计算得到同轴度误差。

2) 建立测量系统坐标系

为了将激光位移传感器获得的距离值转化为三维坐标信息,需要建立测量系统的坐标系。以内花键部分的第一个测量截面所在平面作为 xOy 平面,旋转中心点为坐标圆心 $O(0,0)$,垂直于 xOy 平面且向伞齿轮方向为 z 轴正方向,根据笛卡尔坐标系的右手定则建立该测量系统的三维坐标系。

1.2 测量系统设计

本文设计的硬件平台保持激光传感器固定,驱动被测零件旋转,通过传感器测量得到的距离值和测量点相对于起始点的角度计算得到被测截面的轮廓信息。最终设计的测量系统如图 2 所示。复合齿轮轴以恒定角速度 w 旋转,激光位移传感器和光谱共焦传感器可沿导轨左右移动。

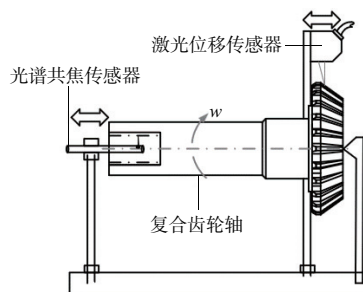


图 2 同轴度测量系统示意图

1.3 测量平台搭建

根据测量方案的原理,选择合适的测量设备,最终搭建的测量平台^[14-15]如图 3 所示。

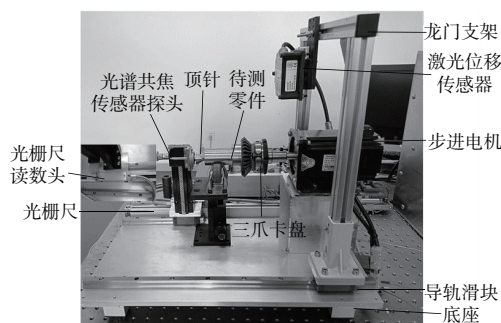


图 3 测量系统试验平台

测量人员通过测量软件控制传感器采集数据,并控制步进电机驱动待测零件旋转。传感器测量得到的数据经过处理后转换为测量点的三维坐标并以图形化的形式显示在测量软件的界面中。在软件中对原始数据进行多步数据处理,最终在软件中计算出被测零件的同轴度误差。

2 测量系统标定

理想情况下,激光位移传感器应该安装在待测零件的正上方,其发射的激光打在待测截面的最高点并且与旋转中心轴垂直。同样的,光谱共焦传感器的安装位置位于待测内花键的中心轴位置。但是考虑到试验平台的装配误差,传感器的安装位置必然会存在一定的偏差。我们通过高精度的标准件对测量系统进行标定,计算出传感器安装的位置偏差,并且对后续的计算进行补偿。通过标定实验^[16],可以求得激光位移传感器激光射出点与齿轮轴旋转中心的水平偏移 ΔX 和竖直距离 D_0 ,以及光谱共焦传感器激光射出点与齿轮轴旋转中心的水平偏移 ΔX 和竖直偏移 ΔY 。标定示意图如图 4 所示。

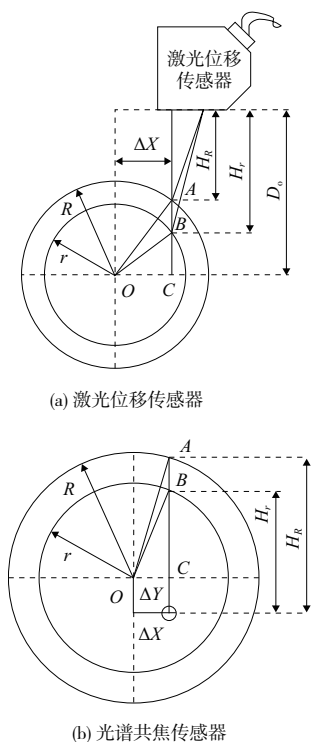


图 4 标定示意图

3 同轴度评定流程

3.1 截面信息获取

截面计算原理如图 5 所示。获得截面上各测

量点相对于旋转中心轴的距离后,还需要得到各测量点相对于测量起点的角位移量才能得到每一个测量点的坐标值,求得各个测量点 (x_i, y_i) 相对于测量起点的角位移量 θ_i ,最后每一个测量点的坐标值即可通过式(1)获得:

$$\begin{cases} x_i = r_i \times \cos \theta_i \\ y_i = r_i \times \sin \theta_i \end{cases} \quad (1)$$

设激光位移传感器出射光到伞齿轮待测截面上某一测量点 A 的距离为 d_i ,则在 $\triangle OAB$ 中,根据勾股定理, r_i 值可根据式(2)计算。

$$r_i = \sqrt{(\Delta X)^2 + (D_0 - d_i)^2} \quad (2)$$

同样的,设光谱共焦传感器探头的出射光到内花键待测截面上某一测量点 C 的距离为 d_i ,则在 $\triangle OCD$ 中, r_i 值可根据式(3)计算。

$$r_i = \sqrt{(\Delta X)^2 + (d_i - \Delta Y)^2} \quad (3)$$

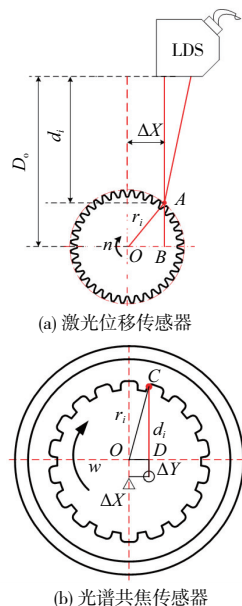


图 5 截面计算原理图

通过上文的数据转换方法将传感器得到的一系列距离值转换为所有测量点的坐标值,最终得到的轮廓截面图形如图 6 所示。

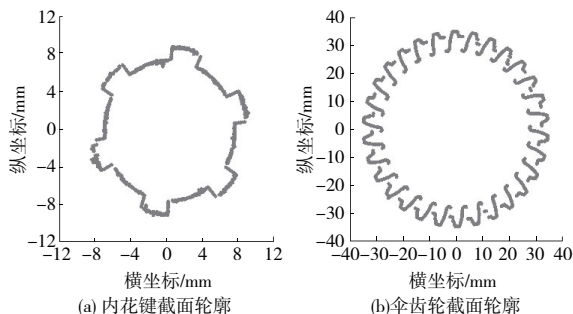


图 6 截面轮廓

3.2 测量截面数据处理

本文提取表面质量好的伞齿轮齿顶和内花键小径的数据点来进行截面轮廓中心的拟合。首先通过合适的数据筛选方法得到伞齿轮齿顶数据和内花键小径数据,然后对筛选后的数据点使用中心点拟合算法得到待测截面的中心点坐标。

1) 测量数据筛选

首先找到齿顶或者小径与齿廓相交时的半径值,以伞齿轮的齿顶或者内花键的小径为起点,分别向内外两个方向扩展。对于伞齿轮来说,往内扩展会增加,对于内花键则刚好相反。当扩展到齿侧部分后,一次性增加的数据点很少,此时结束扩展。根据以上思路,最终的实现效果如图7所示。

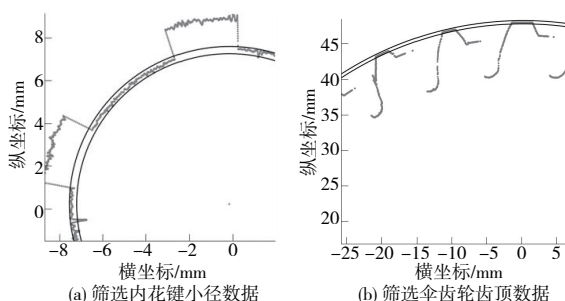


图7 数据筛选

对筛选过后的数据点使用 3σ 准则进行二次处理,最终的结果如图8所示。

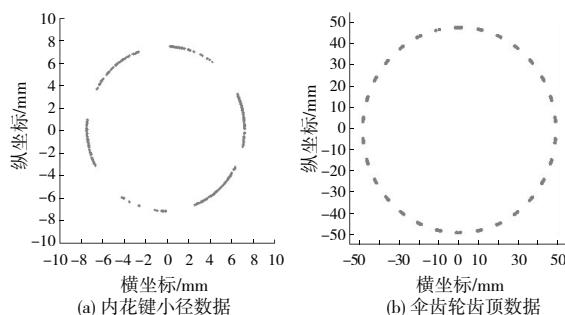


图8 数据点筛选

2) 圆心拟合算法

最小二乘圆定义为截面轮廓上所有点到最小二乘圆圆心的距离与半径之差的平方和最小。求解最小二乘圆的目标函数如式(4)所示。

$$f(x_0, y_0, R_0) = \min \sum (D_i^2 - R_0^2)^2 = \min \sum [(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - R_0^2]^2 \quad (4)$$

对内花键部分和伞齿轮部分筛选后截面数据

使用最小二乘法进行中心点拟合。

3.3 基准轴线拟合

最小二乘中线是由所有内花键正截面中心点根据最小二乘法拟合得到的一条基准轴线。根据所有参与拟合的中心点距离这条基准轴线的距离平方和最小计算得到的。设最小二乘中线经过测量坐标系内的一点 $O_0(x_0, y_0, 0)$, 其特征参数为 (x_0, y_0, p, q) , 则最小二乘法的参数方程如式(5)所示。

$$\begin{cases} x = x_0 + pz \\ y = y_0 + qz \end{cases} \quad (5)$$

最小二乘中线的系数 (x_0, y_0, p, q) 可以通过式(6)计算出。

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n z_i^2 \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n x_i z_i \sum_{i=1}^n z_i}{n \sum_{i=1}^n z_i^2 - (\sum_{i=1}^n z_i)^2} \\ y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n z_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n y_i z_i \sum_{i=1}^n z_i}{n \sum_{i=1}^n z_i^2 - (\sum_{i=1}^n z_i)^2} \\ p = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i z_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n z_i}{n \sum_{i=1}^n z_i^2 - (\sum_{i=1}^n z_i)^2} \\ q = \frac{n \sum_{i=1}^n y_i z_i - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n z_i}{n \sum_{i=1}^n z_i^2 - (\sum_{i=1}^n z_i)^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: n 为内花键部分测量截面中心点的个数;第 i 个测量截面中心的空间坐标为 (x_i, y_i, z_i) 。得到直线方程参数 (x_0, y_0, p, q) 的具体数值后,代入式(5)即可得到最小二乘中心线的参数方程。

3.4 计算同轴度误差

在获得内花键部分的基准轴线和伞齿轮多个截面中心点后,即可根据同轴度最小包容区域准则计算伞齿轮相对于内花键的同轴度误差。

4 测量系统试验与分析

4.1 同轴度测量试验

以图1所示的复合齿轮轴为待测零件。对内花键和伞齿轮的截面进行测量,每部分选取6个测量截面。使用上文中的截面数据处理方法计算每个截面的中心坐标,根据得到的内花键6个测

量截面中心点,使用最小二乘法对轴线进行拟合得到基准轴线。再根据同轴度最小区域判定准则,将伞齿轮部分的6个测量截面中心到基准轴线最大距离的2倍作为该零件的同轴度误差。对该零件进行10组测量试验,得到的10组同轴度误差测量结果如表1所示。

表1 复合齿轮轴10组同轴度误差测量结果

组号	基准轴线方程参数				同轴度 误差/mm
	x_0	y_0	p	q	
1	0.064	0.054	-0.002 0	-0.001 3	0.356
2	0.071	0.058	-0.001 9	-0.001 2	0.334
3	0.081	0.042	-0.001 6	-0.001 4	0.327
4	0.043	0.082	-0.001 8	-0.001 2	0.338
5	0.055	0.071	-0.001 4	-0.001 1	0.298
6	0.081	0.045	-0.001 2	-0.000 9	0.271
7	0.086	0.052	-0.001 5	-0.001 3	0.290
8	0.051	0.040	-0.001 4	-0.001 0	0.285
9	0.043	0.053	-0.002 1	-0.001 0	0.315
10	0.090	0.069	-0.001 8	-0.001 5	0.341

10组试验的同轴度误差的极差为0.085 mm,波动在0.1 mm之内。

4.2 测量系统精度验证试验

由于待测零件是由伞齿轮和内花键两个零件装配而成,我们无法知道它的实际同轴度误差,为此分别使用高精度的Hexagon绝对式测量臂和本测量系统测量如图9所示的内孔-外轴零件中间轴段和较大内孔的同轴度误差。Hexagon绝对式测量臂接触式测量精度为 ± 0.051 mm。

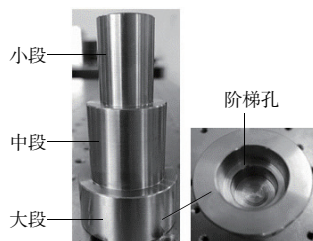


图9 阶梯孔轴零件

进行10组测量,每次测量将阶梯孔、轴零件重新安装并进行了安装位置的标定。两种方式测量得到的同轴度误差结果如表2所示。

表2 同轴度误差测量结果对比

组号	同轴度误差/mm		相对误差
	本测量系统	三坐标测量臂	
1	0.060	0.055	0.08
2	0.049	0.051	0.04
3	0.054	0.050	0.07
4	0.053	0.055	0.04
5	0.059	0.056	0.05
6	0.052	0.054	0.04
7	0.060	0.056	0.06
8	0.054	0.057	0.05
9	0.064	0.060	0.06
10	0.059	0.056	0.03

对于该零件的测量,本测量系统10组测量值的极差为0.015 mm,三坐标测量臂10组测量值的极差为0.010 mm。本测量系统的测量结果与三坐标测量臂的测量结果的相对误差在5%左右,最大一组的相对误差只有8%,效果较好^[17-19]。

4.3 试验误差分析

1) 测量设备带来的误差

激光位移传感器本身的测量值存在10 μm 的测量误差,光谱共焦传感器的最大绝对误差为13 μm ,这由传感器的制造精度决定。

2) 数据处理方法带来的误差

齿顶数据筛选,使用最小二乘法拟合圆心数据,使用最小二乘法对基准轴线拟合时,每组试验数据都不相同,最后的同轴度误差测量结果也不同。这些数据处理的方法都会引起一定的误差。

3) 测量方案带来的误差

试验平台零件的加工和装配精度都较低,无法达到理论的设计精度。由于加工和装配产生的系统误差没法消除,在试验前,只能通过标定试验得到传感器的安装误差,再在后续的测量试验进行补偿。

4.4 测量系统性能评估

基于表1的10组同轴度误差测量结果,对测量系统进行不确定度评估与分析^[20]。计算测量结果的平均值 $\bar{f}$ 为0.315 5 mm。将表1的10组同轴度误差带入式(7),可以得到10组测量结果的标准偏差 S 为0.028 mm。所以测量系统的A类不确定度 $u_A = tS = 0.028$ mm。

$$u_A = tS = t \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2}{n-1}} \quad (7)$$

5 结语

本文设计并搭建了一套基于激光测距的内孔-外轴类零件同轴度误差的非接触式测量系统,并开发了相应的上位机测量软件,通过上位机软件测量零件内孔部分与外轴部分的空间坐标信息,再利用一系列数据处理方法获得基准轴线。试验结果表明该测量系统具有较高的测量精度和测量效率。测量系统的不确定度为 0.028 mm,对同一个齿轮轴零件进行 10 组测量,重复测量误差不超过 0.085 mm。单个零件同轴度的测量时间在 5 min 之内,能够实现内孔-外轴类零件同轴度的快速、准确测量。

参考文献:

- [1] 雷建波,王双不. 高精度多孔大跨距同轴度测量关键技术综述[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(5): 136-139.
- [2] 易亚星,安郁虹,李忠科,等. 同轴度测量的原理与方法[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(增刊1): 39-41.
- [3] 华庆元. 大距离分布孔系同轴度测量系统软件设计[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.
- [4] 颜敏伟,张英杰,代博超,等. 采用激光传感器的同轴度检测技术研究[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(10): 27-32.
- [5] 糜兆强. 缸体平衡轴孔同轴度偏差问题分析及解决[J]. 制造技术与机床, 2024(3): 156-160.
- [6] 张智钦. 摆线齿轮泵转子组件同轴度误差分析与工艺改进[D]. 西安:西安工业大学, 2024.
- [7] 张瑛玮. 二维激光位移传感器的信息采集系统研究[D]. 长春:吉林大学, 2015.
- [8] 邱林. 齿轮激光精密测量装置与软件系统的研发[D]. 扬州:扬州大学, 2017.
- [9] LI C F, XU X P, SUN H Q, et al. Coaxiality of stepped shaft measurement using the structured light vision[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021: 5575152.
- [10] WANG L, YANG T Y, WANG Z, et al. Simple measuring rod method for the coaxiality of serial holes[J]. The Review of Scientific Instruments, 2017, 88(11): 113110.
- [11] GAO C, LU Y H, LU Z W, et al. Research on coaxiality measurement system of large-span small-hole system based on laser collimation[J]. Measurement, 2022, 191: 110765.
- [12] 窦亚萍,郑述,杨治飞,等. 基于三维点云的曲轴同轴度误差测量方法研究[J]. 制造技术与机床, 2024(1): 185-190.
- [13] 朱磊,张俊然,佃松宜. 基于机器视觉的同轴度检测与微调系统设计[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(6): 94-98, 102.
- [14] 陈强华,吴健,殷纯永. 双频激光远程直线度/同轴度测量系统[J]. 中国激光, 2002, 29(7): 625-630.
- [15] CHEN Q H, LIN D J, WU J, et al. Straightness/coaxiality measurement system with transverse Zeeman dual-frequency laser[J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16(10): 2030-2037.
- [16] CHAI Z, LU Y H, LI X Y, et al. Non-contact measurement method of coaxiality for the compound gear shaft composed of bevel gear and spline[J]. Measurement, 2021, 168: 108453.
- [17] DOU Y P, ZHENG S, REN H R, et al. Research on the measurement method of crankshaft coaxiality error based on three-dimensional point cloud[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(3): 035202.
- [18] LIU Y M, LI R R, SUN C Z, et al. A coaxiality measurement model based on multi-systematic errors separation for turbine shaft[J]. Measurement, 2021, 186: 109975.
- [19] ZHANG M W, LIU Y M, WANG D W, et al. A coaxiality measurement method for the aero-engine rotor based on common datum axis[J]. Measurement, 2022, 191: 110696.
- [20] 许家赫,陈岳坪. 布谷鸟算法在同轴度误差评定中的应用[J]. 机械设计与制造, 2022(3): 219-222.

收稿日期: 2023-11-06