

DOI: 10.7652/xjtuxb201710005

采用激光传感器的同轴度检测技术研究

颜敏炜, 张英杰, 代博超, 李云龙

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对车桥减速器桥壳轴承孔的同轴度检测问题,设计了一种基于二维激光位移传感器的同轴度检测装置。该装置通过二维激光位移传感器在孔内旋转一周进行测量数据采集,并利用编码器实现了采集过程的闭环控制,采用该装置可提高数据采集效率。为了进行同轴度计算,提出一种针对三维点云数据的最小二乘迭代法。首先,将采集到的角度、径向距离转换成三维坐标的点云数据形式。接着,以残差最小为优化目标,利用高斯-牛顿迭代方法确定出最优轴线。该方法利用了整个圆柱孔测量数据,并通过基于残差最小的优化方法计算得到两端孔的轴线和它们的公共轴线,然后,以公共轴线为基准计算出同轴度误差。与传统的通过计算多个横截面中心来确定轴线的方法相比,该方法提高了计算精度。同时,针对影响同轴度测量精度的一些因素,如测量装置的安装精度、转轴的径向跳动等进行了分析,并给出误差补偿方案。最后,将该装置的测量结果与三坐标测量结果进行对比,验证了该方法的正确性。

关键词: 同轴度;激光位移传感器;最小二乘迭代法;误差补偿

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)10-0027-06

Research on Coaxiality Detection Technology Based on Laser Sensor

YAN Minwei, ZHANG Yingjie, DAI Bochao, LI Yunlong

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at the coaxiality detection of axle housing of reducer, a coaxial measuring device is designed by using two-dimensional laser displacement sensor. The measuring data are obtained by rotating the sensor in the hole with one round, and the measuring process is controlled by the encoder to realize the closed loop control. Compared with the traditional contact measurement method, the data acquisition efficiency is improved greatly. In order to determine the coaxiality error, a new method for three-dimensional (3D) point cloud data processing is proposed by using least squares iterative algorithm. First, the acquired data represented with angle and radial distance are transformed into 3D point cloud. Then, the minimum residual error is defined as the optimization target, and the optimal axis is calculated by using the Gauss Newton iterative method, in which the data from the whole cylindrical hole surface is utilized. The axis of two holes and their common axis are determined with the minimum residual. Then, the coaxiality error can be calculated by the common axis. Compared with the traditional methods that calculate the axis by using several cross-section centers, the measuring accuracy is improved by using proposed method. In addition, some factors, such as the installation accuracy of the

收稿日期: 2017-04-21。 作者简介: 颜敏炜(1993—),男,硕士生;张英杰(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375377);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2017ZDJC-21)。

网络出版时间: 2017-08-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170819.1125.006.html>

measuring device and the radial runout of the shaft, are considered and analyzed for improving measuring accuracy. Finally, experimental result is compared with that of three coordinate measurement machine.

Keywords: coaxiality; laser displacement sensor; least squares iterative algorithm; error compensation

近年来,重型货车及大型客车的发展对车桥的承载能力、输出转矩等能够满足严重超载的性能提出了更高的要求^[1]。减速器是驱动车桥的核心部件。减速器壳总成中,对动齿轮轴承孔之间的同轴度精度要求是汽车稳定运行和齿轮正确啮合的关键,因此对车桥减速器两端轴承孔同轴度的研究有重要的意义。

同轴度是机械产品检测中常见的一种形位公差。对于规则轴类零件,一般可采用 V 型支架、钢球加杠杆百分表或偏摆仪等专用检具及组合辅具来检测同轴度;对于箱体类孔零件,一般可采用芯轴加杠杆百分表或利用圆度仪来检测同轴度,但对于一些大型零部件(如机床主轴等)、不规则轴类零件以及箱体零件的不规则内孔,采用常规方法测量同轴度则很难实现或非常麻烦^[2]。此时常用的方法有激光准直法、三坐标测量机(CMM)与激光位移传感器法。激光准直法通过选用多个内孔截面来测量同轴度误差^[3],该方法并不能全面地反映孔内信息,不适合于高精度孔内同轴度测量。用 CMM 来测量同轴度是一种不错的选择,但当采样点数庞大时,CMM 测量费时。当被测孔表面到传感器的距离,以及被测孔的高度在传感器测量范围内时,二维激光位移传感器法适合此类孔的同轴度测量。二维激光位移传感器采用线扫描,具有采集数据点快的优点,但用激光位移传感器时需要专用的器具固定,需转动工件或传感器进行孔表面数据采集。

本文的实验对象是车桥减速器,其两端轴承孔的直径为 180 mm,上偏差为 0.026 mm,下偏差为 0.014 mm,左边孔为基准孔,右边孔相对于左边孔的同轴度要求为 $\Phi 0.05$ mm。

本文提出一种基于激光位移传感器检测减速器同轴度的方法,设计了一种实验装置,对采集到的实验数据进行解析,对数据处理算法进行详细说明,利用高斯-牛顿最小二乘迭代法求出两端轴承孔轴线以及公共轴线,进而实现同轴度的计算,为减速器同轴度的检测提供一种思路。本实验具有测量速度快、检测精度高、测量方便快捷等优点。

1 同轴度的测量原理

1.1 同轴度定义

在国家标准中,同轴度公差带是指直径为公差值,且与基准轴线同轴的圆柱面内的区域。如图 1 所示, a 为基准轴线, A 为被测圆柱,其实际轴线 b 为一条空间曲线。 c 为按最小二乘法计算所得的理想轴线。以理想轴线 c 两端点 C_1 、 C_2 到基准轴线 a 的距离的最大值为半径,以基准轴线为轴心线,形成最小包容圆柱 B 。最小包容圆柱体 B 的直径 d 即为同轴度误差^[4]。

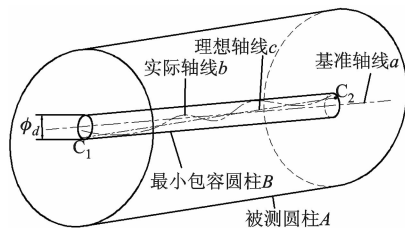


图 1 同轴度误差

当测量减速器两端轴承孔的同轴度时,需分别求出两端轴承孔的理想轴线,以一端孔的理想轴线为基准轴,求另一端孔的理想轴线的两端点 C_1 、 C_2 到基准轴的距离,两者距离的最大值的 2 倍为减速器两端轴承孔的同轴度。

1.2 测量误差的放大

当以一端孔轴线为基准来求同轴度时,此时对于测量装置的测量精度要求非常高,因为当孔间距大时,同轴度误差受测量误差的影响很大。如图 2 所示,在左侧基准圆柱上测量两个截面圆,构造一条直线。假设基准圆柱上两测量截面间的距离较小,距离为 10 mm,而基准圆柱第一截面与被测圆柱第一截面间的距离较大,距离为 100 mm,即该检测方案的同轴度对采样点的敏感系数很大。如果基准圆柱第二截面圆的圆心有 $5 \mu\text{m}$ 的测量误差,则测量轴线到达被检截面时已偏离了 $5 \mu\text{m} \times 100/10 = 50 \mu\text{m}$ 。此时即使被检轴线与基准轴线完全同轴,同轴度误差的测量结果也会有接近 $2 \mu\text{m} \times 50 = 100 \mu\text{m}$ 的误差^[2]。

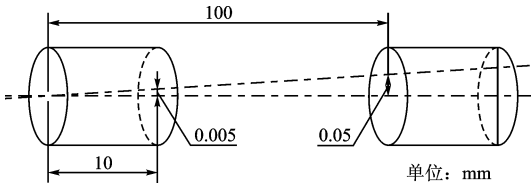


图 2 测量误差放大

所以,对于减速器轴承孔这种“短基准、长距离”的同轴度检测问题来说,测量误差容易被放大。实际中,应以两轴承孔的公共轴线作为基准,然后分别求得两端轴线的两端点到基准轴线的距离,四者距离中的最大值的 2 倍作为减速器两端轴承孔的同轴度。该测量方法类似于传统的芯轴检测方式,也类似于零件的装配过程,同时也避免了测量误差放大的现象产生。

1.3 二维激光位移传感器检测机理

二维激光位移传感器是一种用于测量物件位移大小及对动态物件位移量进行实时测量的光、机、电一体化系统^[5]。高精度的二维激光传感器采用的是激光三角反射式原理,采集不同材质表面的二维轮廓信息,通过特殊的透镜组,激光束被放大形成一条静态激光线投射到被测物体表面上。激光线在被测物体表面形成漫反射,反射光透过高质量光学系统,被投射到敏感感光矩阵上。除了传感器到被测表面的距离信息(Z 轴),控制器还可以通过图像信息计算出沿着激光线的位置信息(X 轴)。二维激光位移传感器测量输出一组二维坐标值,可通过转动被测物体或轮廓仪探头得到一组三维测量值。

本文的目标是利用二维激光位移传感器,通过传感器绕转轴的旋转,线扫描圆柱孔内表面来实现圆柱孔内表面信息的测量,进而求得同轴度。如图 3 所示,二维激光位移传感器有 X 轴最小、最大量程,以及 Z 轴最小、最大量程。用传感器测量减速器两端轴承孔内表面信息时,需保证传感器到孔内表面的距离在传感器的 Z 轴测量范围内,并且对应

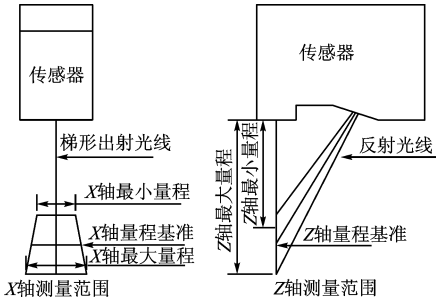


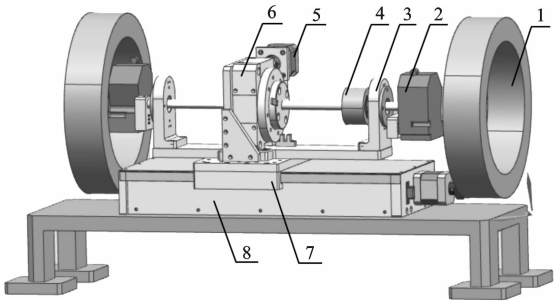
图 3 二维激光位移传感器测量范围示意图

着该 Z 轴测量量程的 X 轴测量范围应大于孔的高度,即激光线旋转一周应能包含轴承孔内表面。

2 装置示意图与测量原理

2.1 实验装置示意图

实验装置示意图如图 4 所示,在减速器两端轴承孔中间,有一个电动平移台,平移台上的台面固定着中空的电动转台,电动转台连着一根转轴,转轴两侧通过转接板各安装一个传感器。利用电机控制台面左右移动,使传感器进入轴承孔内,当一端测量完后,控制电机反转,使另一侧的传感器进入另一端的轴承孔内,进行轴承孔内表面信息采集。编码器安装在转轴一端,用来反馈转轴实际转过的角度。两端的传感器进行孔内信息采集之前,要先将转轴回到机械零点。



1:轴承孔;2:传感器;3:轴承座;4:编码器;5:电机;
6:电动转台;7:平移台面;8:电动平移台

图 4 实验装置示意图

2.2 测量原理

上述实验装置的核心是转台通过转轴带动二维激光传感器旋转一周,采集轴承孔内表面信息。以下仅以一边为例说明,另一边类同。单边的测量数据模型如图 5 所示,轴 OZ 为转轴的轴心线,平面 XOY 为线激光旋转一周扫描成的截面之一。截面一般形状如图 5 的右侧,整体是类似椭圆的形状。设置好传感器采样频率和转台匀速转动时的速率,电机带动转台启动,当转台转速稳定后,传感器开始连续轮廓采样。传感器转一圈,即采集了圆柱孔内表面信息。根据采样频率与转台匀速转动时的速率,易知采样间隔所转过的角度 θ 和传感器测得的高度信息 h 。已知高度信息 h 和对应的角度 θ ,可求出数据点在平面 XOY 的二维坐标,而数据点投影在 Z 轴上的坐标,可通过传感器 X 轴测量范围的信息,以及平移台移动的距离得出,这样即可知道数据点的三维坐标信息。轴 O_1Z_1 是待求的理想轴线。

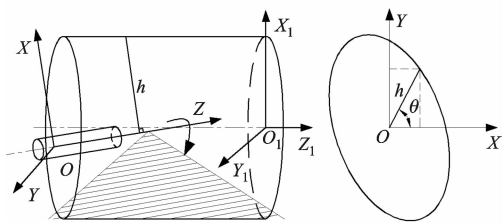


图5 轴承孔单边的测量数据模型

3 实验原理与算法实现

3.1 实验原理

实验前先调整实验装置,使转轴轴心线与平移台行进方向平行,每次采集数据前将转轴回到编码器设置的机械原点,再进行轴承孔内表面信息的采集,然后求出两端轴承孔理想轴心线相对于转轴轴心的位置即可。图6给出轴承孔与转轴轴心线的简图形式。圆柱代表圆柱孔内表面, OZ 代表转轴轴心线, XOY 为转轴旋转一周数据点所在的横截面,沿着轴 OZ ,二维激光传感器 X 轴测量范围内有多少个采样点就有多少个垂直于轴 OZ 的平面。 O_1Z_1 代表圆柱孔理想轴心线。易知,当传感器绕着转轴 OZ 旋转,激光在圆柱孔截面 XOY 将会是类椭圆的形状。所求的目标是在坐标系 XYZ 中,理想轴心线 O_1Z_1 所在的直线方程。一种方法是用椭圆公式,对在截面 XOY 上的数据点利用最小二乘法拟合出截面中心,然后通过各截面的中心点,再利用最小二乘法拟合出理想轴心线 O_1Z_1 ,进而计算出同轴度。另一种方法直接对全部点用最小二乘法拟合出理想轴心线。本文采用后一种思路,因为后一种只采用了一次最小二乘法,且最小二乘法用的公式是圆函数方程,能更加精确地求出圆柱的理想轴心线。

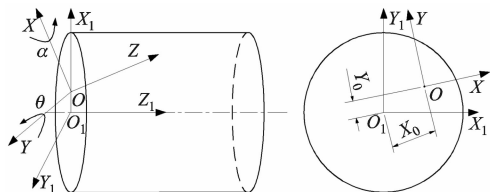


图6 理想轴线与转轴空间位置关系

当圆柱表面的点到圆柱轴线的距离平方和最小,该圆柱轴线即为圆柱的理想轴线。记传感器旋转一周,激光点都在待测圆柱孔内表面上,而形成的截面为有效截面,有效截面上的点为有效点。对所有的有效点进行最小二乘拟合,即可得出理想轴线 O_1Z_1 相对于转轴坐标系 XYZ 的直线方程。该问题因变量与自变量之间的关系是二阶函数关系,是一

个非线性最小二乘问题,对于二阶非线性最小二乘问题,可用高斯-牛顿迭代法进行求解。高斯-牛顿迭代法是牛顿法的变形,与牛顿法相比,高斯-牛顿法只能用于最小平方和估算,但高斯-牛顿法的优势在于不用计算二阶导数,大大简化了计算过程,且迭代收敛速度快^[6]。高斯-牛顿法需要迭代初值,可设轴 OZ 为迭代初值,理想轴线 O_1Z_1 是要求的迭代终值。

3.2 算法实现

通过上述分析,可以有这样的思路:在转轴轴心线 OZ 所在的坐标系 XYZ 中,分别求得两端轴承孔的理想轴线 O_1Z_1 。轴 O_1Z_1 需从迭代初值 OZ 多次迭代得到,而每次迭代的过程,其实是三维旋转变换和三维平移变换的叠加。转轴 OZ 每次迭代后,在 XOY 平面内平移一小段距离,然后再以坐标原点 O 为中心,将坐标系分别绕 X 、 Y 轴旋转一定角度。如图6所示,迭代结束后,转轴 OZ 沿 OY 方向移动了 $-Y_0$,沿 OX 方向移动了 $-X_0$,绕 X 、 Y 轴分别旋转了 α 和 θ ,将转轴 OZ 旋转到与理想轴心线 O_1Z_1 重合。对于数据点来说,此变换过程是一个逆过程,是沿 OY 方向移动了 Y_0 ,沿 OX 方向移动了 X_0 ,绕 X 、 Y 轴分别旋转了 $-\alpha$ 和 $-\theta$,将理想轴心线 O_1Z_1 旋转到与转轴轴心线 OZ 重合。

本文采用变换数据点的形式,规定在右手坐标系中,物体旋转的正方向是右手螺旋方向,即从该轴正半轴向原点看是逆时针方向。假设数据点以 $O(X_0=0, Y_0=0, Z_0=0)$ 为旋转中心点,绕 OX 和 OY 分别旋转 α 和 θ ,沿 OX 和 OY 方向平移 X_0 和 Y_0 ,对数据点进行空间变换。设 $\beta_1=X_0, \beta_2=Y_0, \beta_3=\alpha, \beta_4=\theta, \beta_5=R, \beta=(\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5)^T$ 。 X_i, Y_i, Z_i 为采集得到的数据点坐标,有效截面上的数据点总数为 n 个,此时数据点的坐标为

$$\begin{bmatrix} X_{1i} \\ Y_{1i} \\ Z_{1i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix} \mathbf{R}_Y(\theta) \mathbf{R}_X(\alpha), i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$\text{式中: } \mathbf{R}_X(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}_Y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}$$

而此问题的隐式函数原型为

$$(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 = R^2 \quad (2)$$

故可以得到残差公式

$$r_i = f(\boldsymbol{\beta}) = (X_{li}^2 + Y_{li}^2)^{1/2} - R \quad (3)$$

目的是要找到最优解 $\boldsymbol{\beta}$, 使残差平方和最小。残差平方和定义如下

$$S = \sum_{i=1}^n r_i^2 \quad (4)$$

要求残差平方和 S 最小, 即 S 对 $\boldsymbol{\beta}$ 的偏导数等于 0

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_j} = 2 \sum_{i=1}^n r_i \frac{\partial r_i}{\partial \beta_j} = 0 \quad (5)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n$ 。

在非线性系统中, $\frac{\partial r_i}{\partial \beta_j}$ 是变量和参数的函数, 没有封闭解, 因此给定一个初始值, 用迭代法逼近解, 高斯-牛顿迭代公式为

$$\boldsymbol{\beta}^{(s+1)} = \boldsymbol{\beta}^{(s)} + (\mathbf{J}_r^T \mathbf{J}_r)^{-1} \mathbf{J}_r^T r_i(\boldsymbol{\beta}^{(s)}) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{J}_r$ 是残差 r_i 对 $\boldsymbol{\beta}$ 的雅克比矩阵。 $\mathbf{J}_r$ 表达式为

$$\mathbf{J}_r = \frac{\partial r_i(\boldsymbol{\beta}^{(s)})}{\partial \beta_j} \quad (7)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n$ 。

当 $f(\boldsymbol{\beta}^{(s+1)}) - f(\boldsymbol{\beta}^{(s)})$ 小于给定的允许误差 ϵ 时, 迭代结束。此时 $\boldsymbol{\beta}^{(s+1)}$ 即是迭代终值, $(-\beta_1, -\beta_2, Z_0)$ 为理想轴线上的一点, $(\tan\beta_1, \tan\beta_2, 1)$ 为理想轴线的方向向量, 此时就求出了一端轴承孔的理想轴线的直线方程。同样道理, 可以求出另一端轴承孔的理想轴线的直线方程。而当使用公共轴线为基准时, 只需把左右两端孔有效数据点合在一起, 再计算一次理想轴线, 此理想轴线就为基准轴。然后求两端轴线两端点到基准轴的距离的 2 倍的最大值, 该最大值即是以左右轴承孔的公共轴线为基准的同轴度值。

4 数据采集与分析

根据图 4 介绍的装置示意图搭建装置, 编码器选用增量式 2048 脉冲编码器, 传感器选用基恩士 LJ-G080。装置安装、调整后, 上位机控制电机转动, 平移台平移传感器到一端孔内, 转台转动回到机械零点, 然后转台转动, 每隔 5.626° 采样一次, 采集轴承孔内表面信息。采集结束后, 平移台反向平移, 使另一端传感器到另一端孔内, 采集另一端孔的内表面信息, 左右轴承孔的采样点如图 7 所示。

左端孔高度为 24 mm, 右端孔高度为 30 mm。传感器 X 轴上每隔 0.1 mm 取一个点。对两端轴承孔的数据点分别按 3.2 节所介绍的残差公式进行迭代计算。设左端轴承孔理想轴线的迭代初值 $Z_0 = 12, \boldsymbol{\beta} = (0, 0, 0^\circ, 0^\circ, 10)^\top$ 。设右端轴承孔理想

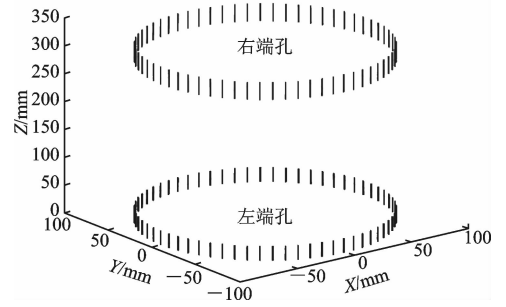


图 7 轴承孔采样点

轴线的迭代初值 $Z_0 = 297, \boldsymbol{\beta} = (0, 0, 0^\circ, 0^\circ, 10)^\top$ 。设公共基准轴线迭代初值 $Z_0 = 168.75, \boldsymbol{\beta} = (0, 0, 0^\circ, 0^\circ, 10)^\top$ 。迭代后, 得到理想轴线上点 $(-\beta_1, -\beta_2, Z_0)$ 。各理想轴线方向向量为 $(\tan\beta_1, \tan\beta_2, 1)$, 左端轴承孔理想轴线的迭代终值 $Z_0 = 12.000, \boldsymbol{\beta} = (0.000\ 016, -0.004\ 7, 0.023\ 06^\circ, -0.005\ 032^\circ, 90.015\ 5)^\top$; 右端轴承孔理想轴线的迭代终值 $Z_0 = 297.000, \boldsymbol{\beta} = (0.046\ 8, -0.089\ 4, 0.020\ 46^\circ, -0.001\ 495^\circ, 90.016\ 0)^\top$; 公共基准轴线迭代终值 $Z_0 = 168.750, \boldsymbol{\beta} = (0.021\ 1, -0.042\ 8, 0.000\ 051\ 92^\circ, 0.000\ 028\ 57^\circ, 90.015\ 7)^\top$ 。求左右两端轴承孔理想轴线两端点到公共轴线的距离的 2 倍的最大值, 该最大值即为该轴承孔同轴度值。

当以公共轴线为基准轴线时, 根据上述信息计算得右端孔理想轴线两端点到基准轴线的距离的 2 倍的最大值为 0.077 1。左端孔理想轴线两端点到基准轴线的距离的 2 倍的最大值为 0.004 8。取最大值, 所以同轴度为 0.077 1。对于两端轴承孔, 采用三坐标测量机测量, 测得其同轴度为 0.079 5, 与本文方法测得的同轴度近似, 说明该方法可行。

5 误差分析与改进措施

本实验误差来源主要有装置的装配误差、编码器的测量角度误差、二维激光位移传感器的测量误差、转轴的径向跳动误差等。为了提高测量精度, 装置装配好后要进行相关标定、调整。编码器的选取要结合成本考虑, 编码器分辨率越高, 测量精度越高, 价格也越贵。二维激光位移传感器的选取一方面要考虑传感器自身的大小, 不与孔表面接触, 以及 X, Z 轴测量范围, 要保证 X, Z 轴测量行程够用; 另一方面要保证传感器有足够的精度, 传感器 Z 轴测量精度起码高于待测同轴度误差的 $1/3$ 。转台转轴跳动误差检测成本高, 应尽量降低。选用转轴要考虑转轴的材质、长度、直径, 当转轴比较长时, 在转轴

两端应设置轴承座,避免使转轴成为悬臂梁。

6 结 论

针对车桥减速器轴承孔同轴度的检测问题,提出一种基于二维激光位移传感器的同轴度检测方法,并设计了一种快速检测轴承孔表面信息的装置。将采集到的数据转换成孔的三维点云坐标。以最小残差为优化目标,用两端孔的整体三维点云坐标,通过高斯-牛顿迭代法,拟合出各自的理想轴线以及它们的公共轴线相对电动转台轴心线的位置,进而求出同轴度。此外,还分析了误差来源,并提出相应的改进措施。该检测方法快速便捷、检测精度高,为企业同轴度测量问题提供了指导。

参考文献:

- [1] 魏正业, 罗礼培, 龚改民, 等. 重卡车桥现状及新技术发展趋势 [J]. 汽车与配件, 2014(25): 54-58.
WEI Zhengye, LUO Lipai, GONG Gaimin, et al. Present situation of heavy truck axle and development trend of new technology [J]. Automobile & Parts Technology, 2014(25): 54-58.
- [2] 叶宗茂. 用三坐标测量机正确测量同轴度误差 [J]. 工具技术, 2007, 41(3): 77-80.
YE Zongmao. Correctly measure coaxial error with a coordinate measuring machine [J]. Tool Engineering, 2007, 41(3): 77-80.
- [3] 赵士磊, 曲兴华, 邢书剑, 等. 激光非接触式大尺寸内径自动测量系统 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2185-2191.
ZHAO Shilei, QU Xinghua, XING Shujian, et al. Large scale diameter automatic measuring system based on laser non contact measuring principle [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2185-2191.
- [4] 田树耀, 黄富贵, 侯学峰. 一种新的同轴度误差评定方法及其误差分析 [J]. 工具技术, 2008, 42(5): 82-85.
TIAN Shuyao, HUANG Fugui, HOU Xuefeng. New coaxial error assessment methods and error analysis [J]. Tool Engineering, 2008, 42(5): 82-85.
- [5] 张瑛玮, 朱万彬, 张歆东, 等. 基于二维激光位移传感器同轴度测量方法研究 [J]. 激光与红外, 2014(12): 1335-1338.
ZHANG Yingwei, ZHU Wanbin, ZHANG Xindong, et al. Research on coaxiality measuring method based on the two dimensional laser displacement sensor [J].

Laser & Infrared, 2014(12): 1335-1338.

- [6] 罗长林, 张正禄, 邓勇, 等. 基于改进的高斯-牛顿法的非线性三维直角坐标转换方法研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(1): 50-54.
LUO Changlin, ZHANG Zhenglu, DENG Yong, et al. On nonlinear 3D rectangular coordinate transformation method based on improved Gauss-Newton method [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, 27(1): 50-54.

[本刊相关文献链接]

- 于东, 李小虎, 张进华, 等. RV 减速器主轴承拟静力学模型快速计算迭代方法. 2016, 50(4): 100-107. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201604016]
- 高羨明, 洪军, 甄宜超, 等. 机床多体系统空间刚度场约束下的加工误差预测. 2016, 50(6): 90-96. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201606014]
- 丁正龙, 徐月同, 傅建中, 等. 深孔内径的在线精密测量原理及系统. 2015, 49(1): 65-71. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201501011]
- 孙忱, 奚宏生, 高荣, 等. 领域线性最小二乘拟合的推荐支持度模型. 2015, 49(6): 77-83. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201506013]
- 许建, 张政, 李翔, 等. 独立驱动电动汽车横摆力矩的模糊控制算法. 2014, 48(7): 83-89. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201407015]
- 位文明, 吕盾, 张俊, 等. 转台轴承静刚度建模及其影响因素分析. 2014, 48(12): 8-14. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201412002]
- 郭军军, 元向辉, 韩崇昭, 等. 采用熵函数法的多传感器空间配准算法的研究. 2014, 48(11): 128-134. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201411022]
- 吕程, 艾彦迪, 余治民, 等. 蒙特卡罗与响应面法相结合的圆柱度公差模型求解. 2014, 48(7): 53-59. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201407010]
- 杨晓君, 赵万华, 刘辉, 等. 直线电机进给系统机械系统动态特性研究. 2013, 47(4): 44-50. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201304009]
- 曹建安, 张乐平, 吴昊, 等. 采用倾角传感器实现空间旋转角度测量的解析方法研究. 2013, 47(10): 109-114. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201310019]
- 杨隽楠, 史忠科, 舒甜, 等. 车辆行驶转向角的图像检测方法. 2013, 47(6): 73-78. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201306013]
- 张维光, 赵宏. 线结构光多传感器三维测量系统误差校正方法. 2011, 45(6): 75-80. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201106014]
- 梁新合, 梁晋, 郭成, 等. 散乱点云的补偿滤波. 2011, 45(11): 91-94. [doi: 10. 7652/ xjtuxb20111017]
- 周玉清, 陶涛, 梅雪松, 等. 旋转轴与平移轴联动误差的快速测量及溯源. 2010, 44(5): 80-84. [doi: 10. 7652/ xjtuxb201005017]

(编辑 武红江 杜秀杰)