

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107803

精密减速器角位移测量系统设计*

路遥环, 袁祖荣, 尤悦, 薛洁

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072)

摘要: 为了实现对精密减速器输入端和输出端角位移的精密测量, 建立精密减速器角位移测量系统。对该系统的机械结构、角度测量及标定方法、基于非线性最小二乘法的误差补偿模型进行研究。通过“立式筒状”结构和圆光栅角度传感器“前置”避免了传统检测仪的弱刚度结构和轴系形变对角度测量造成的影响。使用光电自准直仪与24面棱体结合的方式离散标定圆光栅角度传感器的角位移测量误差, 研究基于谐波分析的误差补偿方法, 对角坐标进行补偿, 进一步消除误差。实验结果显示, 通过优化检测仪的结构设计, 角位移测量精度达到 $\pm 7''$; 误差补偿后, 角位移最终测量精度达到 $\pm 2''$, 满足减速器角位移测量的高精度要求, 对类似测角系统也有参考价值。

关键词: 角位移测量; 结构设计; 圆光栅; 测量误差; 补偿模型

中图分类号: TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Design of angular displacement measuring system for precision reducer

Lu Yaohuan, Qiu Zurong, You Yue, Xue Jie

(School of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To realize precise measurement of input side and output side angular displacement of reducer, the angular displacement measurement system of precision reducer is established. The mechanical structure of the system, angle measurement method, calibration method and error compensation model based on nonlinear least square method are studied. Through the “vertical cylinder” structure and the principle that the circular grating angle sensor is installed as close as possible to the reducer, the influence of the poor structural stiffness and shaft deformation of the traditional tester on the angle measurement could be avoided. The angular displacement measurement error of circular grating angle sensor is discretely calibrated by the combination of a photoelectric autocollimator and a regular polyhedron with 24 facets. The error compensation method based on harmonic analysis is studied, and the angular coordinates are compensated to further eliminate the error. Experimental results show that the measurement accuracy of angular displacement reaches $\pm 7''$ by optimizing the structure design. After error compensation, the final measurement accuracy of the angular displacement reaches $\pm 2''$, which meets the high precision requirements of the angular displacement measurement of the reducer. It also provides a reference for other angle measurement systems.

Keywords: angular displacement measurement; structural design; circular grating; measurement error; compensation model

0 引言

精密减速器是机器人运动传递系统的关键部件^[1], 其性能直接影响机器人传动系统的运动精度和效率, 而机器人技术与机器人产业的发展与进步息息相关^[2]。精密减速器的关键性能指标包括扭转刚度、启动转矩、背

隙、传动误差等, 都与输入端和输出端的角位移有关^[3-5]。因此, 角位移作为一个基本待测量, 决定着检测仪的精度水平。圆光栅角度传感器是一种精密的测角器件, 但易受安装影响, 若安装偏心较大, 其测角精度将会大幅降低^[6]。

国内研发的精密减速器综合性能检测试验台大部分为卧式串联结构^[7-8], 即轴系的轴向为水平方向, 代表性

收稿日期: 2021-04-22 Received Date: 2021-04-22

* 基金项目: 国家重点研发计划重大科学仪器专项 (2017YFF0108102) 资助

产品有“ZRT 工业机器人减速器试验台”,该测试系统的角度传感器的测量精度为 $\pm 1''$,而整个系统的角度测量精度未知。受重力影响,卧式结构轴系同轴度难以保证,导致圆光栅相对于减速器输出轴偏心量较大;其次,测量仪器刚度不足,即轴系在加载时会发生严重形变,从被测减速器传递至角度传感器的过程中需经过扭矩传感器、联轴器等多个零部件组成的轴系,轴系随施加的扭矩发生的形变会引入角度测量误差;另外,由于固定支架以及轴系周向方向形变不一致,使得系统测量误差的分离和补偿成为难题。

国外的减速器综合性能检测仪器为保障产品技术领先地位,对外实行封闭保护的状态。纳博特斯克和SEGINIGB均研制了自用减速器检测设备,其角测量精度可达到 $\pm 5''$ 。

目前对减速器测角系统的研究分别在测量仪器结构及角度传感器安装引起的测量误差方面。王家序等^[9]设计了一种减速器性能测试竖直实验台,避免了重力引起的装配误差,但是由于角度编码器与输入、输出端通过联轴器连接,包含柔性和弱刚度环节,误差随负载变化;王晓玲^[10]将圆光栅安装在测量主轴的法兰端面上,使编码器和输出轴同轴设置,采用双读数输出信号平均值,减小测量误差,但由于实验台整体采用卧式串联结构,整体刚度不足,轴系形变将对角位移测量引入误差;史旭东等^[11]采用高精度角度编码器对扭转角变化量进行测量,而忽略了由于安装偏心问题对转角引入的误差;李凯等^[12]在测量减速器转角后,采用最小二乘法建立误差补偿模型,补偿由于机械偏心、传感器非线性、控制算法采样量化等产生的系统误差。

本文以精密减速器的测角系统作为研究对象,提出一种角位移测量方法,通过检测仪整体结构设计、传感器安装方式及位置设计、测量后的误差补偿三方面入手,以解决卧式减速器检测仪角位移测量数据不可靠、误差难以补偿的问题。根据项目任务指标,角度测量误差要求小于 $\pm 2''$ 。首先,本检测仪的“立式筒状”结构使负载扭矩成为组件内力,提高了整机刚度,且轴对称结构保证施加在轴承支座周向方向应力是均匀的,有利于后期的误差补偿;其次,采用“传感器前置”原则,将测量点选择在离被测减速器最近的位置,将圆光栅作为测角器件,通过结构设计减小安装偏心量,并采用双读数头对径安装的方式读取角度测量信息,减小传感器测量误差;最后,采用多面棱体与光电自准直仪相结合的方式对测角误差进行标定,通过傅里叶级数展开的方式获取误差补偿模型,对角位移测量数据进行补偿,进一步减小测量误差,提高测量精度。

1 系统结构设计

本减速器检测仪采用立式筒状力矩封闭台架的结构形式,系统整体结构如图1所示,该结构使负载扭矩成为组件内力,提高整体机构刚度,减小机械结构变形对角度测量的影响;并且,轴对称的结构相比于卧式的悬臂式支架变形规律简单,周向方向应力是均匀,易于精确建模和误差补偿;另外,由于重力方向与轴系共线,同轴度更容易保证,被测件安装更加方便。关于传感器布局,采用传感器前置原则,使角度测量位置与被测角度尽可能相近,选用刚性连接的方式,进一步减小轴系变形带来的角度测量误差。考虑转速和测试精度的综合要求,高低速端都选用雷尼绍绝对式圆光栅尺 RESA-30U-S-A3000-B 和 RESOLUTE 读数头。

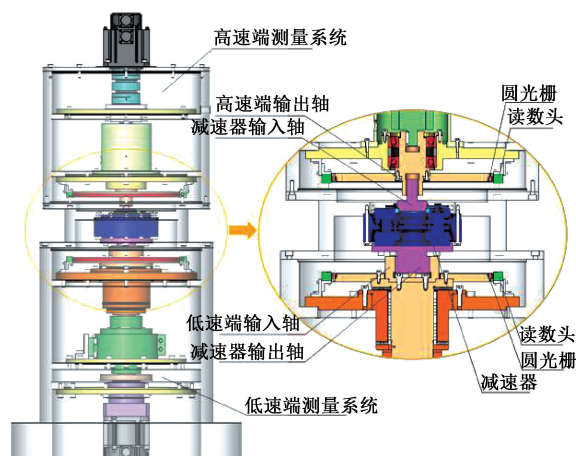


图1 测量系统结构

Fig. 1 Structure of the measurement system

1.1 角位移测量系统结构

在高速端测量系统中,通过电机驱动轴系旋转,通过高速端输出轴连接减速器输入轴,将转角传递至减速器,减速器输入轴和高速端输出轴通过渐开线花键进行连接,将圆光栅安装盘安装在高速端输出轴外圈下方,通过止口配合;通过两个L形板安装读数头,L形板安装在基准平面上,使用L形板上的长孔控制读数头4个自由度的调节,保证两个读数头可调节至对径安装。

在低速端测量系统中,为保证低速端整体结构在大扭矩状态能够平稳工作以及输出轴系的回转精度,选择密珠轴系进行支撑,其微过盈配合可消除间隙,提高轴系刚度和旋转精度。将密珠轴系的主轴与减速器输出轴通过花键传动方式连接;圆光栅安装盘通过止口,安装在密珠轴系主轴外圈上方。与高速端测量系统类似,将L形板安装在密珠轴系轴套上。在减速器性能检测过程中,

减速器输出角度从减速器输出轴,传递至密珠轴系输入轴,由密珠轴系旋转带动圆光栅同步转动。

将圆光栅与高速端输出轴和低速端输入轴外圈通过止口进行配合,安装位置靠近被测减速器输入轴和输出轴,减少装配环节,提高装配精度,同时保证测量轴系的同轴度。通过传感器布局及结构设计,降低由圆光栅安装带来的测量误差。

1.2 关键零部件仿真分析

由于角位移测量受仪器刚度影响,需要对减速器输入轴和输出轴与角度传感器之间连接的零件进行分析,包括高速端输出轴和低速端输入轴两个零件,对其进行仿真分析,通过 Ansys workbench 仿真软件,模拟零件使用工况,确定其刚度是否能够满足检测仪运行条件。

高速端输出轴与减速器输入轴连接,以被测对象 RV 减速器 27C 型号为例,其输入端额定扭矩为 $7.25 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。电机对减速器施加扭矩时,通过轴系将扭矩施加于高速端输出轴上端键槽一侧,通过下端渐开线花键传递至被测减速器。如图 2 所示,形变最大位置在输出轴外端面上,大小为 $4.31 \times 10^{-4} \text{ mm}$,轴径为 45 mm ,即相对零件下端面,由仪器运行过程中施加的扭矩所产生的最大角度变化为 $1.09 \times 10^{-3}^\circ$,轴向距离为 119 mm ,那么单位长度的扭转角为 $9.16 \times 10^{-3}^\circ/\text{m}$ 。

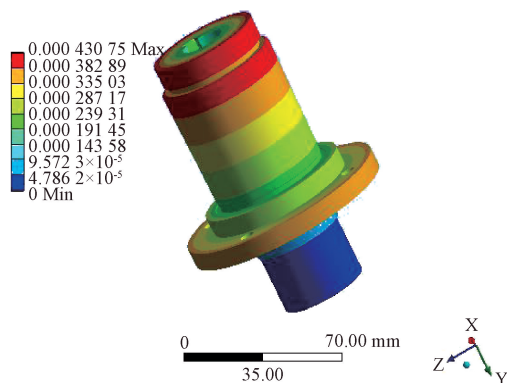


图2 高速端输出轴形变仿真图

Fig. 2 Output shaft deformation simulation diagram of input side

减速器输出轴与低速端输入轴连接,输出端额定扭矩为 $265 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。低速端输入轴扭矩通过上端渐开线花键传入,下端矩形花键传出至低速端测量系统轴系。如图 3 所示,形变最大位置在法兰盘的最外侧,大小为 $1.48 \times 10^{-2} \text{ mm}$,直径为 150 mm ,即相对零件下端面,由仪器运行过程中施加的扭矩所产生的最大角度变化为 $1.13 \times 10^{-2}^\circ$,轴向距离为 237 mm ,那么单位长度的扭转角为 $4.77 \times 10^{-2}^\circ/\text{m}$ 。

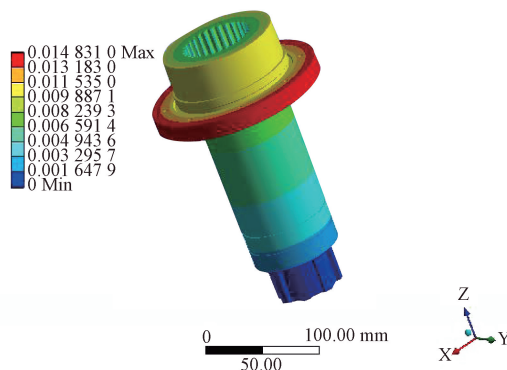


图3 低速端输入轴形变仿真图

Fig. 3 Input shaft deformation simulation diagram of output side

高速端输出轴和低速端输入轴在一端固定另一端加载额定扭矩的条件下,由形变造成的角度变化最大的位置仍然能够满足精密传动的扭转角条件,即小于单位长度许用扭转角 $0.5^\circ/\text{m}$,说明两零件的刚度能够满足仪器运行条件。

2 标定方法及误差补偿模型

2.1 标定方法

多面棱体是一种高精度标准量具,可作为角度标准件用于检定圆分度误差^[13]。不同棱体面数的多面棱体,其相邻工作面法线间夹角不同,即标准角度值不同。光电自准直仪可利用光学自准直原理将角度测量转换为位移测量,可用于微小角度测量。

本文采用光电自准直仪与多面棱体结合的方式标定角度传感器的测量误差,对高低速端两个测量系统分别进行标定。以低速端为例,角度标定原理如图 4 所示。将多面棱体安装在低速端输入轴上,多面棱体和圆光栅均与测量轴系同轴且同步转动。多面棱体两个工作面中心法线之间的夹角为标准角度,通过数控系统控制电机驱动测量轴系旋转标准角度、数据采集系统自动采集读数头及光电自准直仪数据。数据采集完成后,形成报表并利用上位机程序进行数据处理等过程得到角度误差。

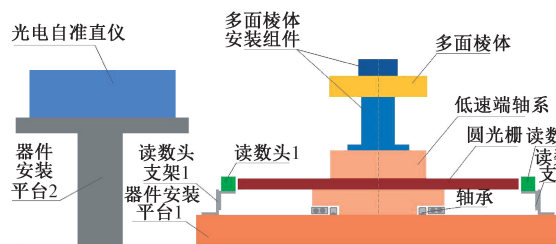


图4 角度标定原理

Fig. 4 Principle of angular calibration

使用棱体转过角度作为参考值 α 来标定圆光栅测量值 β , 得到圆光栅的测量误差 $\Delta\theta$, 即:

$$\Delta\theta = \alpha - \beta \quad (1)$$

其中, 参考值 α 由 3 部分组成, 分别是多面棱体第 i 个工作面角度、光电自准直仪测量角度值 γ 和计量院检定的多面棱体 (N 面) 每个工作面偏差值 ε , 即:

$$\alpha = i \times \frac{360^\circ}{N} + \gamma + \varepsilon \quad (2)$$

由于安装偏心量的存在, 使圆光栅对径两侧的测量误差数值大小相等、符号相反, 因此采用双读数头对径安装的方式消除安装偏心带来的测量误差, 此时圆光栅测量值 β 为两个读数头测量角位移的平均值。

本标定实验中采用的光电自准直仪在“范围内的测量精度为 $\pm 0.5''$, 多面棱体为 24 面棱体, 精度为 $1''$, 经过检定后的精度为 $0.1''$ 。

从第 1 个工作面起始开始标定, 同时记录双读数头测量值和光电自准直仪测量值。测量 24 组数据后, 将角度测量值与参考值一一对应比较, 可得出测量值的误差。

2.2 误差补偿模型

由于标定时只能得到有限个角位移的误差值, 因此需要通过离散点的角度误差进行拟合, 得到全周期的补偿模型。

虽然圆光栅的测量精度能达到 $\pm 0.95''$, 但受安装条件限制, 安装偏心和倾斜等因素将对圆光栅的测量引入误差^[14]。由于圆光栅安装盘安装在轴系中, 并且用螺钉拧紧固定, 圆光栅通过紧定螺钉固定在圆光栅盘上, 所以, 由安装导致的误差为系统误差, 不随时间变化。采用谐波误差补偿法找出测角误差中幅值和初相位基本不变的谐波分量, 即为系统误差, 建立误差补偿模型。

由 2.1 节可知, 离散测量点为 24 个, 圆光栅的测量误差为 $\Delta\theta$, 通过非线性最小二乘法拟合出曲线 $\varepsilon(\theta)$ 逼近测量误差 $\Delta\theta$ 为:

$$e = \min \left\{ \sum_{i=1}^{24} [\varepsilon(\theta_i) - \Delta\theta_i]^2 \right\} \quad (3)$$

其中, $\varepsilon(\theta_i)$ 可展开为傅里叶级数, 即:

$$\varepsilon(\theta_i) = \sum_{k=0}^{12} C_k \sin(k\theta_i + \varphi_k) \quad (4)$$

式中: k 为谐波阶次; C_k 为谐波幅值; φ_k 为谐波相位。误差模型可由幅值较大且相位基本不变的谐波分量表示, 设组成误差模型的阶次为 $t_0, t_1, \dots, t_s$, 则误差模型可表示为:

$$\varepsilon(\theta) = \sum_{j=0}^s C_{t_j} \sin(t_j\theta + \varphi_{t_j}) \quad (5)$$

由于本系统采用双读数头进行角位移测量, 采用标定后的参考值对两个读数头的测量值进行分别补偿, 得到对应读数头的误差补偿模性。由于采用绝对式圆光栅, 以圆光栅 0° 点作为基准, 尺上所有读数头可分辨出

的角度值记为此位置的角坐标值, 通过误差模型对角坐标进行误差补偿。误差补偿方式如下:

1) 初始时刻读数头 1 读取的角坐标为 x_0 , 读数头 2 读取的角坐标为 y_0 ;

2) 通过电机驱动测量轴系旋转某一角度, 然后记录转动结束时刻读数头 1 读取的角坐标为 x_1 , 读数头 2 读取的角坐标为 y_1 ;

3) 将初始和结束时刻测量出的 4 个角坐标分别代入读数头 1 和读数头 2 的误差补偿模型中, 取出每个角坐标相对应的误差补偿值, 分别叠加到 4 个角坐标上, 得到补偿后的 x'_0, x'_1, y'_0, y'_1 ;

4) 角位移最终输出值为两个读数头补偿后的角坐标初始与转动后的差值平均值:

$$\frac{(x'_1 - x'_0) + (y'_1 - y'_0)}{2} \quad (6)$$

3 试验及分析

3.1 实验平台搭建

本文以精密减速器检测仪低速端测角实验为例进行实验, 验证采用该角度测量系统和标定方法可达到仪器的测量精度要求。采用 NI 公司的 PXIe 测量平台, 通过 FPGA 模块编写下位机程序实现读数头信号采集并传输至上位机等待处理, 通过计算机控制伺服电机驱动器, 由驱动器为伺服电机发送指令, 实现驱动主轴旋转。测角系统采用型号为 RESA-30U-S-A3000-B 的雷尼绍绝对式圆光栅尺和两个 RESOLUTE 读数头。采用双轴自准直仪和一等 24 面棱体结合的方式对角位移进行标定。实验装置如图 5 所示, 实验装置模拟检测仪中低速端部分的工作方式。

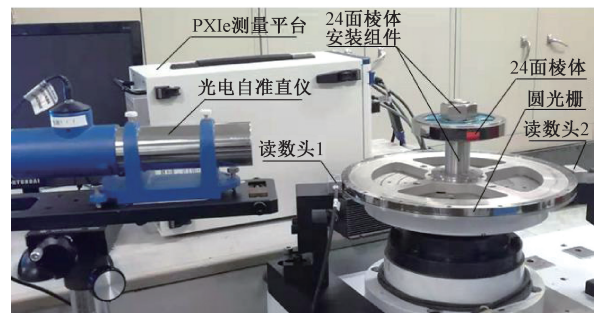


图5 角度标定实验装置

Fig. 5 Experimental device of angular calibration

3.2 测量误差获取

根据 2.1 节标定方法, 分别获取读数头 1 测量角度的误差、读数头 2 测量角度的误差以及双读数头测量角度的误差, 并绘制误差曲线如图 6 所示。

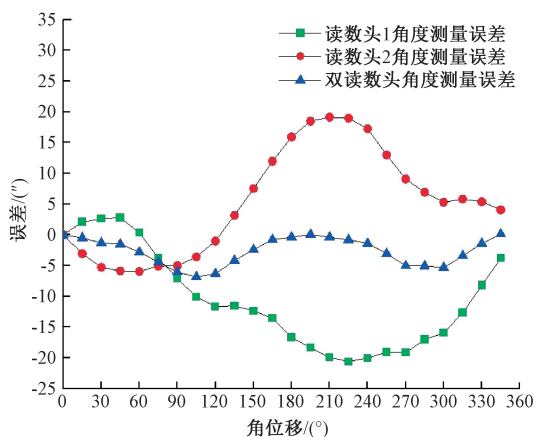


图6 圆光栅测量误差分布曲线

Fig. 6 Distribution curves of circular grating measurement error

通过标定可知,采用读数头1测量角位移的误差分布在 $(-20.6'', +2.8'')$ 内,采用读数头2测量角位移则误差分布在 $(-5.9'', +19.6'')$ 内,通过双读数头对径安装得双读数头测量误差分布为 $(-6.83'', +0.12'')$ 。与传统减速器检测仪相比,测角误差可从传统仪器上百角秒的误差减少1个数量级。该数据表明,通过机械结构设计提高结构刚度、减少装配环节等能够减小角位移测量误差。但由于读数头安装不完全对径,两读数头的光学中心线存在夹角,导致误差依然存在。因此,还需要配合软件补偿的方式,采用适当的模型对离散误差数据进行拟合,并将补偿函数写入到测角系统的软件中对输出角度值进行实时补偿,进一步消除误差^[15-16]。

3.3 补偿模型构建及数据分析

通过误差谐波法分别拟合两个读数头的误差曲线。通过最小二乘法得到全周期误差曲线,利用傅里叶级数展开的方式,计算出模型中各阶次的幅值和相位。在本文软件实现谐波法模型拟合中,将X轴设置为角位移值,将Y轴设为角度误差值,输入至MATLAB中,得到各阶次幅值和相位。在不同时间段测量多组角度误差,根据误差数据拟合出多组曲线,将曲线各阶次的幅值、相位分别进行比较,选取其中基本不变的部分做出最终的补偿模型。

在不同时间获取5组误差数据,以读数头1误差曲线为例,计算出各阶次幅值和相位。

分析各阶次数据可知,对于某些阶次所有幅值和相位数据基本保持不变,说明由这些阶次导致的误差为系统误差,若幅值和相位数据改变较大,则说明由这些阶次导致的误差为随机误差。需要将系统误差提取出来,即利用幅值较大且初相位基本不变的谐波分量拟合成误差补偿模型。通过数据得到第1、2和3阶次的幅值较大,幅值与相位基本不变。对各阶次的幅值和相位分别求平

均值,导入到误差补偿模型中,可得到补偿模型为:

$$y = -10.05 + 10.76 \times \sin(x + 45.82) + 2.73 \times \sin(2x + 56.83) + 1.33 \times \sin(3x + 2.16) \quad (7)$$

5组实验的角度误差及补偿曲线如图7所示。

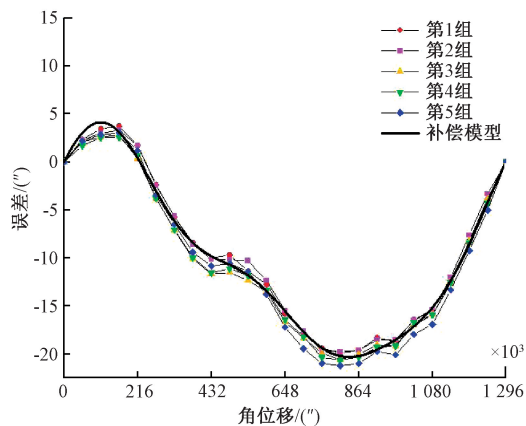


图7 误差曲线及补偿模型曲线

Fig. 7 Error curves and compensation model curve

谐波法模型建立完成后,进行精度评定实验。通过多面棱体结合光电自准直仪测量得到角度参考值;读数头测量角位置数据,代入到模型中取出补偿数据并对角位置进行补偿,分别计算出补偿前后的角度测量值,并与角度参考值比较得到补偿前后的角度误差。补偿前后的角位移测量误差对比曲线如图8所示。补偿前角位移误差分布在 $(-6.4'', +0.3'')$,补偿后角位移误差分布在 $(-0.6'', +0.4'')$,达到测量精度小于 $\pm 2''$ 的设计要求。

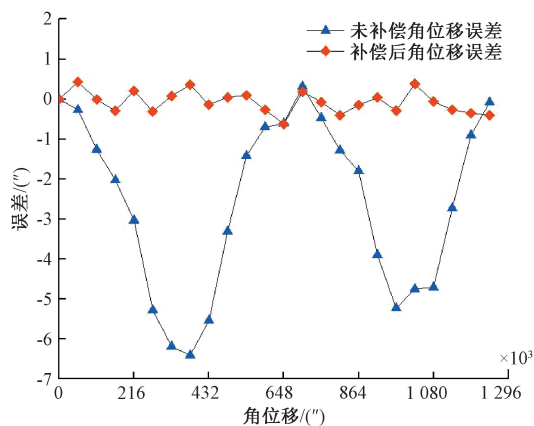


图8 利用谐波补偿模型补偿前后的误差对比曲线

Fig. 8 Comparison diagram of error curves before and after compensated with harmonic method

由于一组实验具有特殊性,补偿后的误差范围不能代表整个测量系统的精度。因此,在不同时刻重新安装标定装置,通过多组精度评定实验,评价角度测量系统的

测量精度。如图9所示,通过5组精度评定实验,得出角度测量系统的测量误差,可以看出所有组别的测量误差都在 $\pm 2''$ 内。因此,该系统满足检测仪对角度测量的高精度检测要求。

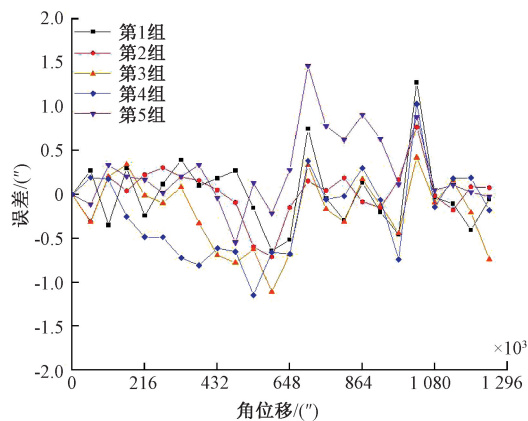


图9 5组测量数据补偿后的误差曲线

Fig. 9 Five groups of error curves after data compensation

4 结 论

本文对传统减速器检测仪的测角系统的机械结构进行改进,减少了测量轴系中角度传感器和被测减速器之间影响测量精度的中间环节,降低圆光栅及读数头的安装误差;提出一种标定方法,通过24面棱体和光电自准直仪结合对角位移测量系统进行标定,基于非线性最小二乘法建立各个读数头的误差补偿模型,利用补偿模型对测量的角坐标进行补偿,补偿后的双读数头的平均值即为最终角位移输出值。通过精度评定实验,证明本测角系统角度误差由 $(-6.4'', +0.3'')$ 降低至 $(-0.6'', +0.4'')$,能够满足精密减速器检测仪对于角度测量的 $\pm 2''$ 的精度要求。

参考文献

- [1] 郑伟峰. RV减速器性能检测平台的研究[J]. 质量技术监督研究, 2016(4): 26-29.
ZHENG W F. Research on RV reducer performance testing platform[J]. Quality and Technical Supervision Research, 2016(4): 26-29.
- [2] 王田苗, 陶永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 1-13.
WANG T M, TAO Y. Research status and industrialization development strategy of Chinese industrial robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(9): 1-13.
- [3] 黄兴, 何文杰, 符远翔. 工业机器人精密减速器综述[J]. 机床与液压, 2015, 43(13): 1-6.
HUANG X, HE W J, FU Y X. Summary of precision speed reducer of industrial robots[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(13): 1-6.
- [4] 仇喜洋, 谌志新, 徐志强. RV减速器综合参数测量方法研究[J]. 机械传动, 2018, 42(5): 59-62.
ZHANG X Y, SHEN ZH X, XU ZH Q. Research of comprehensive parameter measure method of RV reducer[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2018, 42(5): 59-62.
- [5] 李啸天. 基于VC的小型谐波减速器测试装置的研制[D]. 北京: 北京航天工业学院, 2018.
LI X T. Research on test device of small harmonic reducer based on VC[D]. Beijing: Beijing Institute of Aeronautical Technology, 2018.
- [6] CHEN X J, WANG Z H, WANG Z B, et al. Angle measurement error and compensation for pitched rotation of circular grating[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 18(3): 11-15.
- [7] 寇双勇, 刘陈. RV减速器力矩刚性测试装置: CN205580641U[P]. 2016-09-14.
KOU SH Y, LIU CH. RV reducer torque rigidity test device: CN205580641U[P]. 2016-09-14.
- [8] 汤乘龙. 机器人谐波减速器性能参数综合实验台: CN202393592U[P]. 2012-08-22.
TANG CH L. Comprehensive test bench for performance parameters of robot harmonic reducer: CN202393592U[P]. 2012-08-22.
- [9] 王家序, 黄超, 周青华, 等. 少齿差行星减速器性能精密测试垂直实验台: CN102607844A[P]. 2012-07-25.
WANG J X, HUANG CH, ZHOU Q H, et al. Vertical test bench for precision test of performance of planetary reducer with small tooth difference: CN102607844A[P]. 2012-07-25.
- [10] 王晓玲. RV减速器综合性能测试仪的设计[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
WANG X L. Development of RV reducer performance tester[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.
- [11] 史旭东, 崔玉明, 朱剑锋. 新型机器人用RV减速器测试平台的设计与试验分析[J]. 制造业自动化, 2016, 38(9): 141-145.
SHI X D, CUI Y M, ZHU J F. Design and experimental

analysis of new test platform for RV reducer used in robot[J]. *Manufacturing Automation*, 2016, 38(9): 141-145.

- [12] 李凯, 袁峰. 舵机减速器转角测量误差分析与补偿[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2017(1): 199-209.
LI K, YUAN F. Error analysis and compensation of steering gear reducer angle measurement[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2017(1): 199-209.
- [13] 卢荣胜, 李万红, 劳达宝, 等. 激光跟踪仪测角误差补偿[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(9): 2299-2305.
LU R SH, LI W H, LAO D B, et al. Angular error compensation for laser tracker[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(9): 2299-2305.
- [14] SU Z K, QIU Z R, WANG C L, et al. A new method for circular grating's eccentricity identification and error compensation [C]. *Fifth International Conference on Instrumentation & Measurement*, IEEE, 2016: 360-363.
- [15] WARNER M, KRABBENDAM V, SCHUMACHER G. Adaptive periodic error correction for Heidenhain tape encoders [C]. France: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2008.
- [16] LOPEZ J, ARTES M. A new methodology for vibration error compensation of optical encoders [J]. *Sensors*, 2012, 12(12): 4918-4933.

作者简介



路遥环, 2016 年于天津大学获得学士学位, 2019 年于天津大学获得硕士学位, 现天津大学博士在读, 主要研究方向为精密仪器设计与测量理论。

E-mail: luyaohuan@tju.edu.cn

Lu Yaohuan received her B.Sc. degree and M.Sc. degree both from Tianjin University in 2016 and 2019, respectively. She is currently a Ph.D. candidate at Tianjin University. Her main research interests include precision instrument design and measurement theory.



裘祖荣 (通信作者), 1982 年于太原理工大学获得学士学位, 1995 年于太原理工大学获得硕士学位, 1999 年于天津大学获得博士学位, 现任天津大学精密仪器与光电子学院教授、英国邓迪大学荣誉教授、博士生导师, 主要研究方向为精密仪器设计、机械测试、坐标测量、传感器技术等。

E-mail: qiuzr@tju.edu.cn

Qiu Zurong (Corresponding author) received his B.Sc. degree and M.Sc. degree both from Taiyuan University of Technology in 1982 and 1995, and received his Ph.D. degree from Tianjin University in 1999. He is currently a professor in the School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering at Tianjin University. He is an honorary professor at the University of Dundee, Scotland, U. K, and is also a doctoral supervisor. His main research interests include precision instrument design, mechanical test, coordinate measurement and sensor technology.



尤悦, 2016 年于湖南大学获得学士学位, 2020 年于天津大学获得硕士学位, 主要研究方向为角度测量与误差补偿理论。

E-mail: youyue24@163.com

You Yue received her B.Sc. degree from Hunan University in 2016, and received her M.Sc. degree from Tianjin University in 2020. Her main research interests include angle measurement and error compensation theory.



薛洁, 2016 年于天津大学获得学士学位, 现天津大学博士在读, 主要研究方向为仪器设计、机电一体化与测量理论。

E-mail: tjuxuejie@tju.edu.cn

Xue Jie received her B.Sc. degree from Tianjin University in 2016. She is currently a Ph.D. candidate at Tianjin University. Her main research interests include instrument design, mechatronics, and measurement theory.