

文章编号 1004-924X(2023)16-2372-11

精密减速器回差试验台的精度特性

俞志勇, 石照耀*, 程慧明, 于 渤, 张临涛

(北京工业大学材料与制造学部

北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心, 北京 100124)

摘要:精密减速器回差试验台是非标设备,迄今对其精度特性缺乏系统性研究以至于还没有检定规程去评定该类测试设备的计量性能。为了评估精密减速器回差试验台的精度特性,提出了试验台精度的评定方法。首先,分析了精密减速器回差试验台的结构,确定了转矩传感器测量误差、角度传感器测量误差、转矩测量链摩擦转矩以及角度测量链弹性扭转角这四个因素是影响试验台精度的主要误差源。接着,研究了误差源的作用机理,提出了通过滞回曲线将转矩类误差转换为角度类误差的方法,统一了误差的类型。然后,提出了滞回曲线局部线性化的概念,实现了转矩类误差转换为角度类误差的简便计算。最后,根据回差的表达式给出了试验台精度的评定方法,并进行了测试实践。结果表明:几何回差的测试误差为 $\pm 0.04'$;弹性回差的测试误差为 $\pm 0.06'$;总回差的测试误差为 $\pm 0.04'$,回差试验台精度满足要求,本文提出的方法对评定

types of error are unified as an angle error. Then, the concept of local linearization of the hysteresis curve is proposed to realize the simple calculation of torque error mapped to angle error. Finally, a method of evaluating the accuracy of the test bench is given according to the mathematical expression of lost motion. Testing was conducted, and the experimental results indicate that the test error of geometric lost motion is $\pm 0.04'$, test error of elastic lost motion is $\pm 0.06'$, and test error of total lost motion is $\pm 0.04'$. Consequently, the accuracy of the test bench of lost motion meets the test requirements, and the method proposed is effective for evaluating the accuracy of the test bench. In addition, the test accuracy can be improved by testing several places within one rotation of the output terminal of the precision reducer.

Key words: precision reducer; test bench; lost motion; accuracy characteristic; hysteresis curve

1 引 言

精密减速器传动比大、定位精度和重复定位精度高、转矩密度大、动态性能好,被广泛应用在工业机械臂、人形机器人、高性能数控机床、航空航天设备等领域^[1-3]。回差是表征精密减速器性能的关键指标,其定义为输入端运动方向改变后到输出端运动方向跟随改变时,输出端在转角上的滞后量。回差的存在,严重影响应用系统的运动精度和动态性能。因此,需要对精密减速器的回差进行测试以提升产品性能。

精密减速器的回差测试主要有多面体法、滞回曲线法和双向传动误差法^[4-6]。多面体法由于多面棱体面数不能过多制约了可测传动

成转矩测量链(Torque measurement chain)。

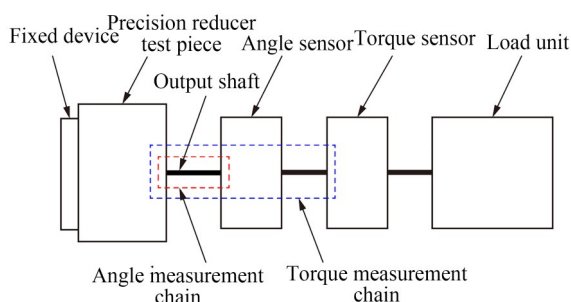
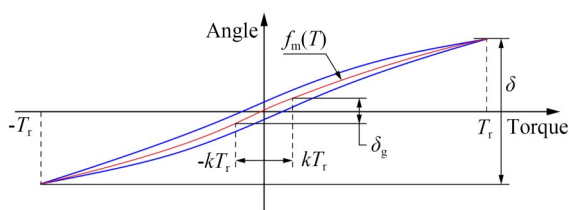


图1 回差试验台结构

Fig. 1 Structure of test bench of lost motion

滞回曲线上,回差的取值如图2所示^[15]。图中: $f_m(T)$ 为均值曲线; δ_g 为几何回差(Geometric lost motion); δ 为总回差(Total lost motion); k 为相关系数,通常取3%; T_r 为额定转矩(Rated torque)。



4 试验台误差计算方法

4.1 转矩误差转换为角度误差的方法

滞回曲线揭示了转矩和转角之间的关系。虽然滞回曲线是非线性的,但是采样点将每个步骤对应的滞回曲线分割成很多短曲线,这些短曲线可以用直线来近似,如图4所示。设每个步骤的采样点数为 N , N 越大,这种近似引起的误差越小。

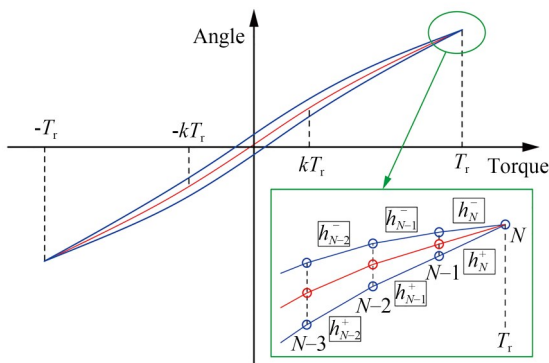


图4 滞回曲线的局部线性化

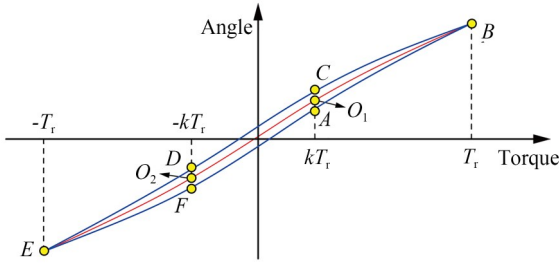
Fig. 4 Local linearization of hysteresis curve

够测量精密减速器试验件输出端的转角值。在加载转矩的作用下,输出轴将会发生不可避免的扭转变形,产生弹性扭转角,耦合到转角测量结果中,使回差测试结果偏离真实值。

输出轴的几何形状多样,有些设计比较复杂,通过理论计算获取输出轴弹性扭转角的难度大,借助有限元软件进行分析,可以得到不同转矩下输出轴的弹性扭转角,进而可以通过补偿以消除角度测量链弹性扭转角 θ_i 对回差测试结果的影响。

4.5 回差测试误差的表达式

滞回曲线上关键数据点如图 6 所示。



合性能试验台,如图8所示,一次装夹就可以实现对回差、扭转刚度、传动误差等在内的12个测试项的快速测量^[19]。试验台采用卧式结构,参与回差测试的组件从左至右依次为伺服电机(Servo motor)、转矩传感器(Torque sensor)、圆光栅传感器(Circular grating sensor)、精密减速器试验件(Precision reducer test piece)和固定装置(Fixed device)。

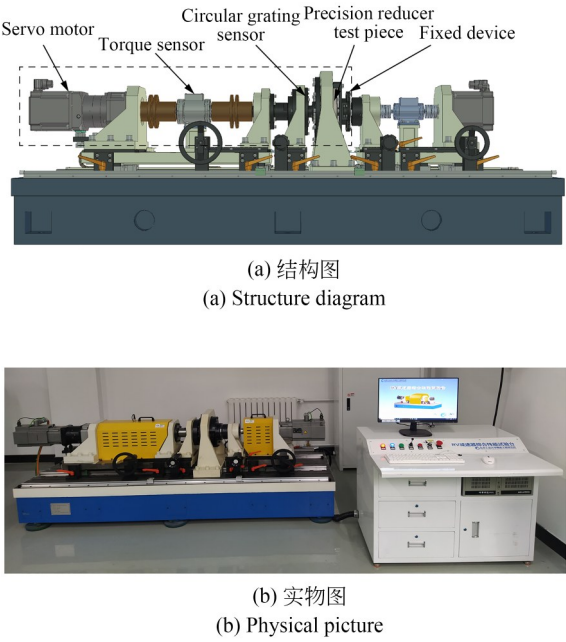


图8 精密减速器综合性能试验台
Fig.8 Comprehensive performance test bench for precision reducer

选用精密行星摆线减速器作为试验件,其规格参数如表2所示。

表 2 试验件的规格参数

Tab. 2 Specification parameters of test piece

Rated torque $T_r/(\text{N}\cdot\text{m})$	Maximum value of geometric lost motion $\theta_g/(')$
392	1

精密减速器试验件的装夹要求与实际装夹精度如表3所示。由于试验件的实际装夹精度高于装夹要求,可以保证试验台的测试结果

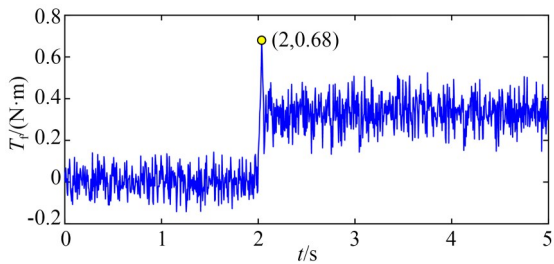


图9 转矩测量链摩擦转矩的测试结果

Fig. 9 Test result of friction torque of torque measuring chain

表 5 摩擦转矩 6 次重复测试结果

Tab. 5 Results of 6 repeated test of friction torque

Serial number	1	2	3	4	5	6
$T_f/(N \cdot m)$	0.68	0.63	0.46	0.54	0.51	0.57

转矩传感器测量误差 $\Delta(T_s)$ 为 $\pm$

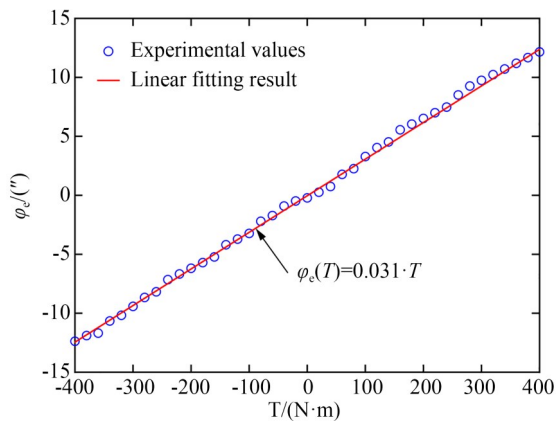


图 12 弹性扭转角实验值 φ_e 与转矩 T 间的关系
Fig. 12 Relationship between experimental value of elastic torsion angle φ_e and torque T

$$\Delta' = \frac{|\varphi_e(T_r) - 0.45 - \varphi_i(T_r)|}{\varphi_i(T_r)} \times 100\% = 0.51\%.$$

(15)

实验值和有限元仿真值高度一致,比对实验证明了有限元分析结果的正确性,0.51%的微小偏差主要由传感器测量误差、转矩测量链摩擦转矩等因素引起。使用有限元分析得到的输出轴

弹性扭转角与转矩之间的关系式,即式(13)对输出轴的扭转变形进行补偿,能保证补偿精度,角度测量链弹性扭转角测量误差 $u(\theta_1)$ 可忽略。

将表 6 中的数据代入式(7)~式(9),可以得到 40E 减速器回差测试结果与测试误差,如表 7 所示。

表 7 回差测试结果与测试误差

Tab. 7 Test result and test error of lost motion (′)

Geometric lost motion δ_g	Elastic lost motion δ_e	Total lost motion δ
0.27 ± 0.04	2.55 ± 0.06	2.75 ± 0.04

试验件规格参数给出的几何回差最大值为 $1'$,试验件几何回差的测试误差为 $\pm 0.04'$,相对误差为 4%,满足精密仪器的 1/10 原则,回差试验台的精度满足要求。

5.6 试验件回差的分布情况

在试验件输出端任意转角位置,都可以测得一个回差值。每隔 15° 测量一次回差,测试结果如图 14 所示。

6 结 论

本文根据精密减速器回差测试的特点,分析了影响精密减速器回差试验台精度的因素及其作用机理,提出了通过滞回曲线将转矩类误差转换为角度类误差的方法,从而将所有类型的误差都统一为角度类误差。然后根据回差的表达式

给出了试验台精度的评定方法。最后以课题组研制的试验台为例,对40E减速器的回差进行了测试及误差分析。实验结果表明:几何回差的测试误差为 $\pm 0.04'$;弹性回差的测试误差为 $\pm 0.06'$;总回差的测试误差为 $\pm 0.04'$,回差试验台精度满足要求,本文提出的方法对评定试验台精度是有效的。

参考文献:

- [1] QIU Z, XUE J. Review of performance testing of high precision reducers for industrial robots [J]. *Measurement*, 2021, 183: 109794.
- [2] XU L, YANG Y. Dynamic modeling and contact analysis of a cycloid-pin gear mechanism with a turning arm cylindrical roller bearing [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, 104: 327-349.
- [3] PHAM A D, AHN H J. High precision reducers for industrial robots driving 4th industrial revolution: state of arts, analysis, design, performance evaluation and perspective

- centric encoder with double read-heads installed non-diametrically opposite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(5): 1103-1114. (in Chinese)
- [15] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 精密减速器回差测试与评价方法: GB/T 40731-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Method of test and evaluation for lost motion of precision reducer: GB/T 40731-2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [16] CRAIG D, WALRATH, . Adaptive bearing friction compensation based on recent knowledge of dynamic friction [J]. *Automatica*, 1984, 20 (6) : 717-727.
- [17] LIU L, ZHANG C C, GUO Y Q, *et al.* Friction torque analysis and verification of planetary thread roller bearing[J]. *Actuators*, 2022, 11(8): 238.
- [18] XU H, SHI Z Y, YU B, *et al.* Dynamic measurement of the lost motion of precision reducers in robots and the determination of optimal measurement speed [J]. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2019, 13(3): JAMDSM0044.
- [19] YUE H, WU X, SHI Z, *et al.* A comprehensive cycloid pin-wheel precision reducer test platform integrated with a new dynamic measurement method of lost motion [J]. *Metrology and Measurement Systems*, 2022, 29(1).

作者简介:

