

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006119

# 服务机器人小型关节回差测量的实验研究\*

程慧明, 石照耀, 于 渤, 朱逸文, 丁宏钰

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 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:**小型关节作为机器人姿态控制的核心部件,对机器人的性能有直接影响。回差是表征小型关节传动精度的关键指标,其测量和评价是提高小型关节性能的基础。迄今对小型关节回差的测量主要基于其主要组件减速器进行,而对小型关节的整体回差研究几乎为空白。为探究小型关节整体回差的产生机理及其基本规律,依托所研发的测试机对小型关节的整体回差进行了实验研究,在对小型关节的结构组成、整体回差的组成和测量模型分析的基础上对A、B、C 3款小型关节进行4项动态测量实验,发现几何回差和弹性回差是影响关节整体回差的主要因素;转速对其整体回差的影响小于弹性变形,在负载相同与不同转速下测量的结果相差在 $0.05^\circ$ ;并发现在一定条件下,关节的动态回差与负载近似呈线性关系;最后对关节整体回差进行了静态测量实验,并与动态测量实验进行了对比,发现静态测量结果小于动态测量,相差在 $0.1^\circ$ 左右。对小型关节整体回差测量的实验研究为建立面向小型关节的全局质量评价体系提供了坚实的基础。

**关键词:**小型关节;测试机;整体回差;动态测量

**中图分类号:** TH71      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Experiment research on hysteresis measurement of the small-size joint of service robot

Cheng Huiming, Shi Zhaoyao, Yu Bo, Zhu Yiwen, Ding Hongyu

(Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments, College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** As the core component for robot posture control, small-size joints have a direct influence on the robot performance. Hysteresis is a key index characterizing the transmission precision of small-size joint. Hysteresis measurement and evaluation are the foundation for improving the performance of small-size joint. Up to now, the hysteresis measurement of small-size joint is performed mainly based on its main component—reducer. Little research has been done on the overall hysteresis of the small-size joint. In order to investigate the generation mechanism of total hysteresis of small-size joint and its basic law, an experiment study on the overall hysteresis of the small-size joint was conducted based on the developed tester. Based on the analysis on the structural composition of small-size joint, the composition of total hysteresis and the measurement model, 4 dynamic measurement experiments on small-size joints A, B and C were conducted. It is found that the geometric hysteresis and elastic hysteresis are the main factors influencing the total hysteresis of the joint. The revolution speed has less influence on the total hysteresis than elastic deformation. Under the conditions of the same load and different revolution speeds, the difference of the measurement results is  $0.05^\circ$ . It is also found that under certain condition, the dynamic hysteresis and load of the joint show an approximate linear relationship. Finally, a static measurement experiment on the total hysteresis of the joint was conducted, and the result was compared with that for dynamic measurement experiment. It is found that the static measurement result is less than the dynamic measurement result, and the difference is about  $0.1^\circ$ . The experiment study on the total hysteresis measurement of small-size joint in this paper lays a solid foundation for establishing the overall quality evaluation system facing to small-size joints.

**Keywords:** small-size joint; tester; total hysteresis; dynamic measurement

# 0 引言

典型的小型关节主要由电机、减速器、传感器、控制器和箱体等组成<sup>[1-2]</sup>。回差是表征机器人关节传动精度的关键指标,是指输入轴运动方向改时,输出轴在转角上的滞后量。机器人关节需要频繁做往复运动,由于有回差的存在,会导致输入轴与输出轴在短时间内失去联系,造成输出的突然中断,进而造成运动传递关系的非线性,会对整个系统的重复定位精度、动态性能及寿命产生严重影响<sup>[3]</sup>,因此对关节回差的控制是提高服务机器人性能的基础。

全面考察机器人关节回差测量技术的现状,发现整体上呈现出两个方面的特点:1)国内外研发的测试设备主要针对大中型关节,而对小型或微型关节的测量技术和设备基本上是空白<sup>[4-5]</sup>;2)对关节回差的研究主要集中于对其减速器的回差进行测试,而不是将关节作为一个整体进行研究<sup>[6-11]</sup>。

针对上述现状,本文研发了服务机器人小型关节综合性能测试机,以此为依托,对小型关节的回差进行实验研究,以期弄清小型关节回差的产生机理及其基本规律,进而为小型关节设计提供指导。

## 1 小型关节整体回差分析

小型关节的整体回差指的是从驱动电机轴到关节

输出轴的整个传动链的回差,对其的研究要从关节结构的入手,进而对整体回差的产生机理和影响因素进行分析。

### 1.1 小型关节结构特点

本文所研究的小型关节如图1所示,主要由直流无刷电机、平行轴直齿圆柱轮减速器、磁编码位置传感器、控制器、塑料箱体等5大部分组成。该类型小型关节尺寸范围在33 mm×15 mm×18.5 mm~63 mm×34 mm×63.9 mm之间,输出扭矩范围为0.2~6 N·m,最大转速不超过60 r/min。其减速器使用的是模数在0.3~0.5 mm的小模数齿轮,该类型某款小型关节的减速器参数如表1所示。减速器结构如图2所示,包括电机轴齿轮,1~3级齿轮轴和齿轮组,关节输出轴和输出齿轮。其中1~3级齿轮轴相互平行设置,并与关节输出轴平行。3个齿轮组均包含大齿轮与小齿轮,其中大齿轮和小齿轮连接在一起,齿轮组通过间隙配合套在轴上,并逐次啮合在一起。

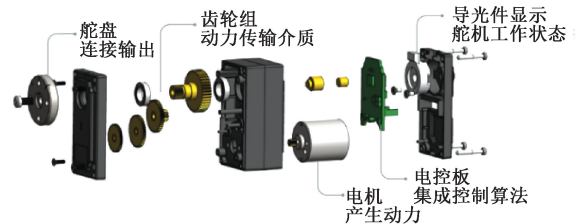


图1 小型关节

Fig.1 Small-size joint

表1 小型关节减速器各级齿轮副参数

Table 1 The parameters of various gear pairs of the reducer of the small-size joint

齿轮组	电机轴齿	一级齿轮组-齿轮1	一级齿轮组-齿轮2	二级齿轮组-齿轮1	二级齿轮组-齿轮2	三级齿轮组-齿轮1	三级齿轮组-齿轮2	输出齿轮
模数	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5
齿数	13	48	12	46	12	46	12	45
压力角	20	20	20	20	20	20	20	20
分度圆	3.9	14.4	4.8	18.4	4.8	18.4	6	22.5
侧隙最大	0.076	0.076	0.08	0.08	0.074	0.074	0.067	0.067
侧隙最小	0.019	0.019	0.015	0.015	0.007	0.007	-0.001	-0.001

### 1.2 小型关节整体回差的组成

对关节整体回差的研究,除了考虑减速器对整体回差的影响,电机对整体回差的影响也需要重点考察。关节的整体回差B主要包括:由传动系统纯间隙引起的空程回差B<sub>1</sub>;传动元件受到负载后产生弹性变形引起的弹性回差B<sub>2</sub>;由温度变化引起的温度回差B<sub>3</sub>;以及在使用过程中由磨损引起的磨损回差B<sub>4</sub>。即任意小型关节的

整体回差B可由式(1)表示:

$$B = F(B_1, B_2, B_3, B_4) \tag{1}$$

空程回差B<sub>1</sub>主要由加工、安装等误差产生的回差综合而来,如中心距偏差Δf<sub>a</sub>产生的回差B<sub>11</sub>、径向综合误差F''<sub>i</sub>产生的回差B<sub>12</sub>、电机轴承固定环的偏心产生的回差B<sub>13</sub>、减速器中齿轮安装偏心产生的回差B<sub>14</sub>等。B<sub>1</sub>可由式(2)进行表示:

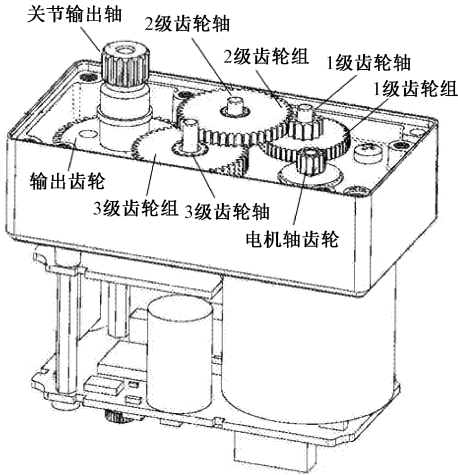


图2 小型关节减速器结构

Fig.2 Small-size joint reducer structure

$$B = G_2(P_2, S_2, N_2, T_2) \quad (5)$$

## 2 小型关节整体回差测量实验设计

### 2.1 实验目的

对小型关节整体回差进行测量实验的目的如下:1)探究各部分回差对整体回差  $B$  影响的比重;2)探究转速和负载对整体回差的影响,分析内在机理;3)对比静态测量结果和动态测量结果的差异性。

### 2.2 实验设备

考虑到目前国内在小型关节测试领域的空白,作者设计了服务机器人小型关节综合性能测试机<sup>[12-14]</sup>,如图3所示,测试机由精密机械系统、硬件系统和测量软件3部分组成。

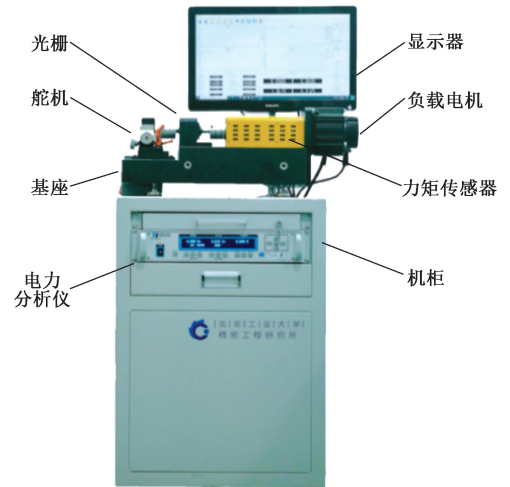


图3 服务机器人小型关节综合性能测试机

Fig.3 The comprehensive performance tester for the small-size joints of service robot

$$B_1 = F_1(B_{11}, B_{12}, B_{13}, B_{14}, \dots, B_{1n}) \quad (2)$$

弹性回差  $B_2$  是指关节在正常工作中,传动机构承载后产生弹性变形引起间隙增大。除了传动机构变形外,其关节的箱体在收到负载时产生弹性变形,同样会对其整体回差产生影响。弹性回差主要由弯曲变形产生的回差  $B_{21}$  和扭转变形产生的回差  $B_{22}$  综合得来,可由式(3)表示:

$$B_2 = F_2(B_{21}, B_{22}) \quad (3)$$

磨损回差  $B_3$  表征磨损随服役时间对回差的影响,是指在关节在使用过程中,内部的传动机构不可避免的会产生磨损,使几何间隙增大,同时零件的弹性变形量也会受到影响。温度回差  $B_4$  是指关节在进行高强度运转过程中,减速器、电机、箱体温度上升,导致其传动机构、箱体产生变形,导致间隙发生变化,小型关节各部件多由塑料制成,因此在较高温度下更易发生变形。

基于上述分析,可以发现小型关节的结构较为复杂,整体回差的来源众多,难以从理论上分析关节在实际工作中的整体回差情况和各部分回差对整体回差影响的比重,进而难以对整体回差的影响因素进行具体分析。因此本文从测量实验的角度出发,对小型关节的整体回差进行探究。

### 1.3 整体回差测量模型建立

按照测量原理的不同,对关节整体回差的测量可以分为静态测量和动态测量两种。若对整体回差采用滞回曲线法的静态测量,则整体回差与测量位置  $P_1$ 、负载  $N_1$ 、服役时间  $T_1$  有关,模型如式(4)所示<sup>[9]</sup>。

$$B = G_1(P_1, N_1, T_1) \quad (4)$$

若使用动态测量法对整体回差进行测量,则整体回差与测量位置  $P_2$ 、转速  $S_2$ 、负载  $N_2$ 、服役时间  $T_2$  有关,模型如式(5)所示。

测试机主机的输入端为小型关节,输出端通过负载电机进行加载,可以实现精准的力矩控制。输出端的转角测量采用高精度的圆光栅,分辨率为  $1.13''$ ,输入端采用关节自身的编码器。输出端的扭矩测量采用扭矩传感器,精度为  $\pm 0.1\%$  F.S。整个测量系统采用工控机控制,配合测量软件,实现关节回差的自动化测量。测试机可以实现对小型关节整体回差的动态测量和静态测量,测量方法如下:

1) 静态测量法:即滞回曲线法<sup>[15]</sup>,如图4所示。

2) 动态测量方法:实为双向传动误差法<sup>[15]</sup>,如图5所示,双向传动误差法指的是在稳定载荷的情况下,首先测出关节的正向传动误差曲线  $T_1E(\theta)$ ,然后测得反向传动误差曲线  $T_2E(\theta)$ ,则反向传动误差曲线和正向传动误差曲线之差即为回差曲线  $B$ ,动态测量获得的回差曲线如图6所示<sup>[16-19]</sup>。

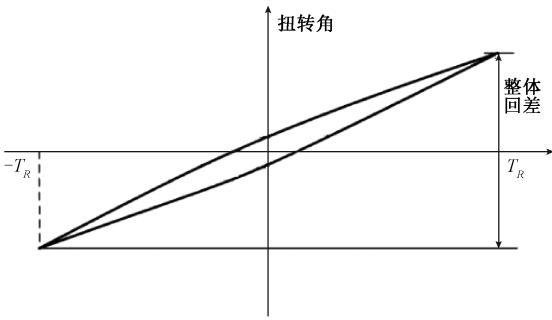


图 4 滞回曲线  
Fig.4 Hysteresis curve

静态回差曲线  $G_1(P_{1k}, N, T_{1k})$ 。

### 3 小型关节整体回差的动态测量实验

本文对该类型的 3 款不同型号的小型关节进行回差的测量实验研究。关节结构皆与图 2 所示类似,分别记为 A 型、B 型和 C 型,其参数见表 2。

表 2 A、B、C 型小型关节的技术参数

Table 2 Technical parameters of small sized joints A, B and C

型号	传动比	最大输出速度 /(r·min <sup>-1</sup> )	最大输出力矩 /(N·m)	回差允许值
A	387.027 7	40	0.03	0.6°
B	383.801 7	30	0.08	0.5°
C	203.461 5	60	6.00	0.5°

基于服务机器人小型关节综合性能测试机,以上述 A、B、C 3 款不同型号小型关节为测量对象,进行回差动态测量实验,实验过程、结果及分析如下。

#### 3.1 实验 1:空载、低速下小型关节整体回差动态测量实验

为研究空程回差对小型关节整体回差的影响,需要降低负载扭矩和关节传动链内部摩擦力引起的弹性变形以及齿轮脱啮等运动误差对实验结果的影响,本文以小型关节可以带动整个系统转动的最低速度为实验速度,在空载情况下进行测量。

对 A、B、C 3 款小型关节分别进行空载、低速下的回差动态测量实验,实验条件和结果如表 3 所示,动态回差曲线分别如图 7~9 所示。A 型小型关节测量的回差值在 0.480 2°~0.931 3°之间,平均值为 0.710 9°。B 型小型关节的回差值在 0.4°~0.659 9°之间,平均值为 0.490 9°。C 型小型关节回差值在 0.411 2°~0.599 8°之间,平均值为 0.512 4°。

表 3 实验条件与结果

Table 3 Experiment conditions and results

型号	电机速度 /(r·min <sup>-1</sup> )	输出速度 /(r·min <sup>-1</sup> )	负载 /(N·m)	回差平均值
A	1 161	3	0.0	0.652 9°
B	1 149	3	0.0	0.482 9°
C	609	3	0.0	0.501 9°

将测量结果与表 2 中回差允许值进行比较,A、B、C 3 型关节的回差允许值分别比测量结果小 0.110 9°、0.090 9°和 0.112 4°,考虑到在实际测量过程中小型关节

$$B = T_f(\theta) - T_z(\theta) \quad (6)$$

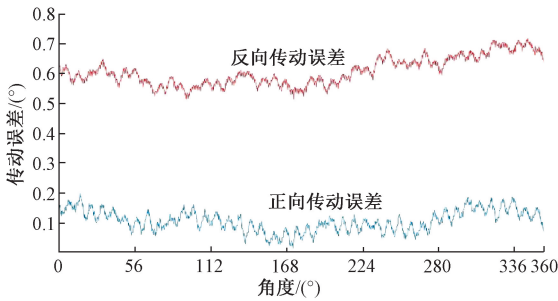


图 5 双向传动误差法测量原理

Fig.5 Measurement principle of bidirectional transmission error method

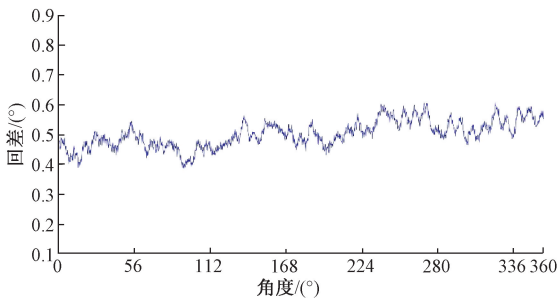


图 6 动态测量回差曲线

Fig. 6 Dynamic measurement hysteresis curve

#### 2.3 实验方法

小型关节整体回差的测量实验分为两个部分,即动态测量实验和静态测量实验。

在动态测量实验中,将服役时间  $T_2$  固定,分别改变转速  $S_{2i}$  和负载  $N_{2i}$  以获得在不同负载、相同速度下的动态回差曲线  $G_2(P_2, S_2, N_{2i}, T_2)$  和相同负载、不同速度下的动态回差曲线  $G_2(P, S_{2i}, N_2, T_2)$ ,进而研究整体回差的主要影响因素。当进行静态测量时,固定变量位置  $P_{1k}$  和服役时间  $T_{1k}$ ,通过滞回曲线法可以获得该点的静态回差曲线  $G_1(P_{1k}, N, T_{1k})$ ,再改变测量点可以获得其他位置的



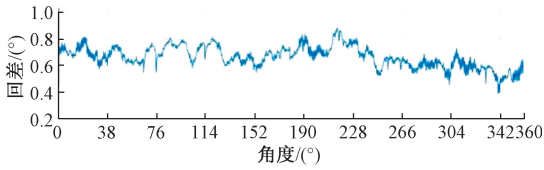


图7 A型小型关节动态回差曲线

Fig.7 Dynamic hysteresis curve of small-size joint A

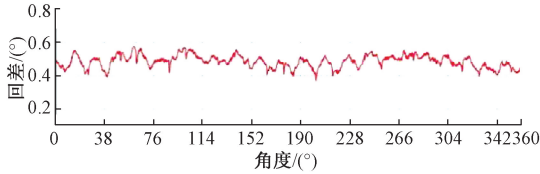


图8 B型小型关节动态回差曲线

Fig.8 Dynamic hysteresis curve of small-size joint B

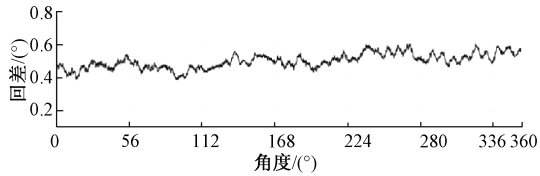


图9 C型小型关节动态回差曲线

Fig.9 Dynamic hysteresis curve of small-size joint C

的减速器、电机、箱体等弹性变形不可避免的会对整体回差产生影响。因此造成上述情况的原因是由弹性回差等因素对小型关节的整体回差产生了影响,同时可以发现,在降低弹性回差影响的情况下,A、B、C小型关节实验所得的整体回差主要由空程回差导致。因此加工安装误差对关节的整体回差有重要影响,在关节的设计过程中应予以重视。

### 3.2 实验2:不同负载、低速下小型关节整体回差动态测量实验

探究负载变化对关节整体回差的影响,对A、B、C3款小型关节开展低速、不同负载下的整体回差测量实验。实验条件和测量结果如表4所示。3款小型关节的不同负载下的测量曲线如图10~12所示。

从上述曲线可以发现,在保持速度不变的情况下随着负载等梯度增加,关节的动态回差值也随之增加。A型小关节的整体回差平均值从空载时的 $0.6529^\circ$ 递增到 $0.09\text{ N}\cdot\text{m}$ 时的 $1.5743^\circ$ ,B型小关节的整体回差平均值从空载时的 $0.4829^\circ$ 递增到 $0.09\text{ N}\cdot\text{m}$ 时的 $1.4214^\circ$ ,C型小关节的整体回差平均值从空载时的 $0.5019^\circ$ 递增到 $0.8\text{ N}\cdot\text{m}$ 时的 $1.4016^\circ$ 。主要原因是随着负载的增加,传动元件产生了较大的扭曲变形导致关节传动系统、箱体等的间隙增大。关节的整体回差主要是由空程回差和

表4 实验条件与结果

Table 4 Experiment conditions and results

型号	电机转速 $/(r\cdot\text{min}^{-1})$	输出速度 $/(r\cdot\text{min}^{-1})$	负载 $/(N\cdot\text{m})$	回差平均值
A	1 161	3	0.00	$0.6529^\circ$
		3	0.01	$0.7741^\circ$
		3	0.02	$0.8658^\circ$
		3	0.03	$0.9667^\circ$
		3	0.04	$1.0548^\circ$
		3	0.05	$1.1131^\circ$
		3	0.06	$1.2359^\circ$
		3	0.07	$1.3503^\circ$
		3	0.08	$1.4554^\circ$
B	1 149	3	0.0	$0.4829^\circ$
		3	0.01	$0.6047^\circ$
		3	0.02	$0.7151^\circ$
		3	0.03	$0.8055^\circ$
		3	0.04	$0.9235^\circ$
		3	0.05	$1.0297^\circ$
		3	0.06	$1.1141^\circ$
		3	0.07	$1.2398^\circ$
		3	0.08	$1.3244^\circ$
C	609	3	0.09	$1.4214^\circ$
		3	0.0	$0.5019^\circ$
		3	0.1	$0.5955^\circ$
		3	0.2	$0.6833^\circ$
		3	0.3	$0.7901^\circ$
		3	0.4	$0.9271^\circ$
3	0.5	$1.0624^\circ$		
3	0.6	$1.1959^\circ$		
3	0.7	$1.3080^\circ$		
3	0.8	$1.4016^\circ$		

弹性回差共同影响的,故随负载的增加,关节的整体回差值增大。进一步研究回差与负载之间的关系,对每条动态回差曲线取平均值,以其为 $y$ 值,负载力矩值为 $x$ 值,建立二者关系,如图13所示。

通过图13反映回差随力矩变化情况,可以看到关节的整体回差随负载的增加而增加,近似符合 $y=kx+b$ 的线性关系。对上述数据进行最小二乘拟合,其中A型拟合后为 $y=9.9202x+0.6598$ ,B型为 $y=10.3878x+0.4987$ ,C型为 $y=1.1723x+0.4717$ ,图9~11所示的

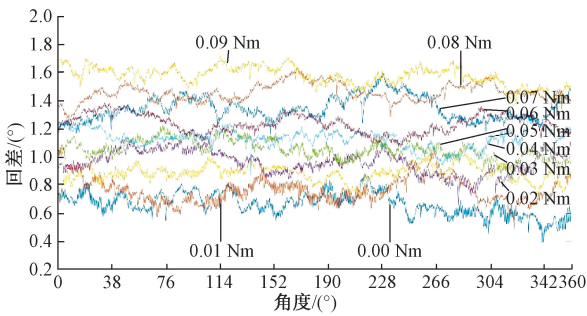


图 10 A 型小型关节不同负载下动态回差曲线  
Fig.10 Dynamic hysteresis curve of small-size joint A under different loads

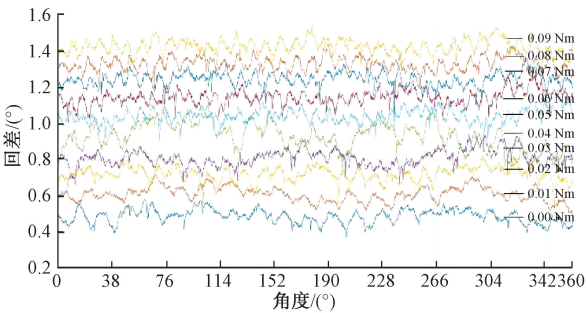


图 11 B 型小型关节不同负载下动态回差曲线  
Fig.11 Dynamic hysteresis curve of small joint B under different loads

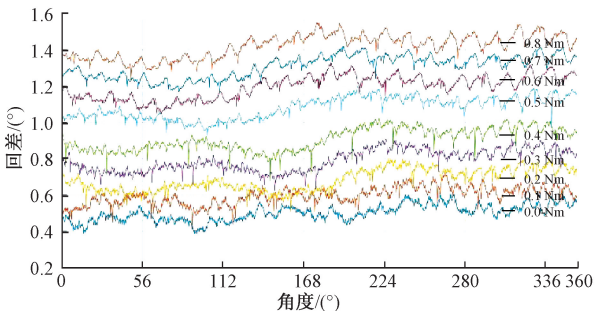


图 12 C 型小型关节不同负载下动态回差曲线  
Fig.12 Dynamic hysteresis curve of small joint C under different loads

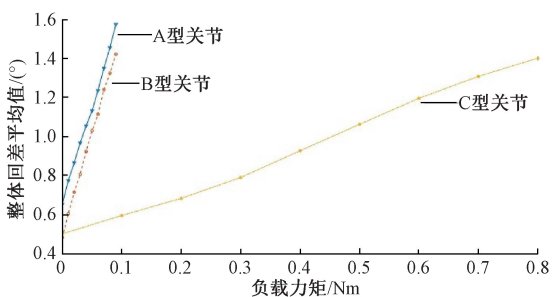


图 13 回差变化趋势  
Fig.13 Hysteresis variation tendency

曲线近似符合上述关系,可以推断在本次实验中,关节的回差值与负载近似呈线性关系。但值得注意的是,不能认为该型关节的回差值和负载之间的关系就一定符合上述模型。因为每个关节的材料制造,结构组装,运行环境等都是不近相同,不能以当前实验所得来以偏概全。

### 3.3 实验 3: 空载、不同转速下小型关节整体回差动态测量实验

研究不同速度下,小型关节整体回差的变化情况,对 A、B、C 3 款小型关节进行空载、不同转速下的整体回差动态测量实验,实验条件和实验结果如表 5 所示,测量结果如表所示,A、B、C 3 款小型关节的测量曲线如图 14~16 所示。

表 5 实验条件与结果  
Table 5 Experiment conditions and results

型号	电机转速 $/(r \cdot \text{min}^{-1})$	输出速度 $/(r \cdot \text{min}^{-1})$	负载 $/(N \cdot \text{m})$	回差平均值
A	1 161	3	0.0	0.588 8°
	1 548	4	0.0	0.637 6°
	1 935	5	0.0	0.608 8°
	2 322	6	0.0	0.614 4°
B	1 149	3	0.0	0.429 1
	1 532	4	0.0	0.456 7
	1 915	5	0.0	0.390 1
	2 298	6	0.0	0.439 0°
C	609	3	0.0	0.501 9°
	812	4	0.0	0.504 5°
	1 015	5	0.0	0.499 5°
	1 218	6	0.0	0.5°

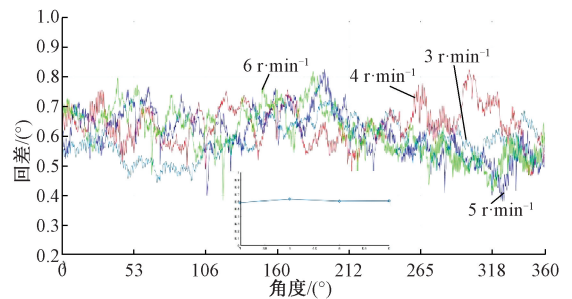


图 14 A 型小型关节不同速度动态回差曲线与平均值波动曲线  
Fig.14 Dynamic hysteresis curve of small-size joint A under different speeds and mean fluctuation diagram

可以从实验结果中看出,A、B、C 3 型关节在 3~6 r/min 的速度下,回差的平均值波动较小。从上述结果

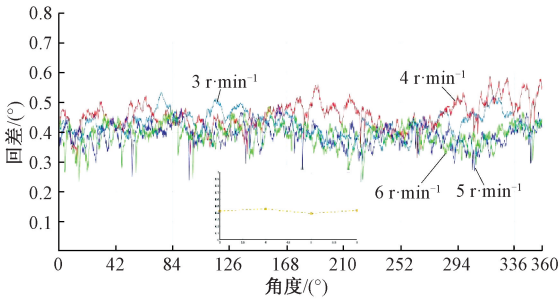


图 15 B 型小型关节不同速度动态回差曲线与平均值波动曲线

Fig.15 Dynamic hysteresis curve of small-size joint B under different speeds and mean fluctuation diagram

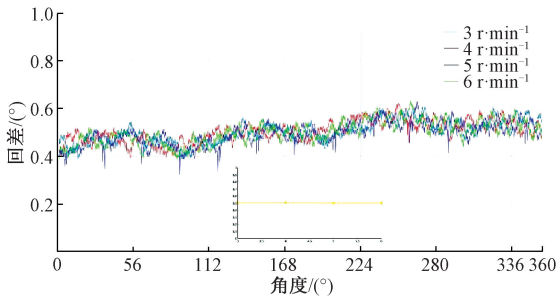


图 16 C 型小型关节不同速度动态回差曲线与平均值波动曲线

Fig.16 Dynamic hysteresis curve of small-size joint C under different speeds and mean fluctuation diagram

可以看出,小型关节整体回差随转速的变化不大。

### 3.4 实验 4: 相同负载、不同速度下小型关节整体回差动态测量实验

进一步研究整体回差与速度之间的关系,在有负载情况下,测量不同转速下关节的整体回差。对 A、B、C 3 款小型关节开展相同负载、不同速度下的整体回差测量实验。实验条件和测量结果如表 6 所示,测量得到的动态回差曲线分别如图 17~19 所示。

对是实验结果分析可以发现,3 型关节在相同负载下,关节的整体回差平均值随速度变化的波动也不大。与实验 3 综合考虑可以发现,在低速下,速度对关节的整体回差值影响较小。

再综合上述分析,有下述结果:

- 1) 小型关节传动系统的空程回差是其整体回差的主要组成部分,由传动系统的零件的加工和装配质量决定。
- 2) 关节的动态回差曲线的平均值,在一定条件下与负载近似存在线性关系。
- 3) 在实际测量过程和服役中,关节受到负载产生弹性变形对整体回差的影响大于转速对小型关节整体回差的影响。

表 6 实验条件与结果

Table 6 Experiment conditions and results

型号	电机转速 /(r·min <sup>-1</sup> )	输出速度 /(r·min <sup>-1</sup> )	负载 /(N·m)	回差平均值
A	1 161	3	0.04	1.060 4°
	1 548	4	0.04	1.065 2°
	1 935	5	0.04	1.035 2°
	2 322	6	0.04	1.158 6°
B	1 149	3	0.07	1.139 7°
	1 532	4	0.07	1.128 9°
	1 915	5	0.07	1.089 8°
	2 298	6	0.07	1.150 7°
C	609	3	0.6	1.217 6°
	812	4	0.6	1.200 9°
	1 015	5	0.6	1.209 2°
	1 218	6	0.6	1.194 6°

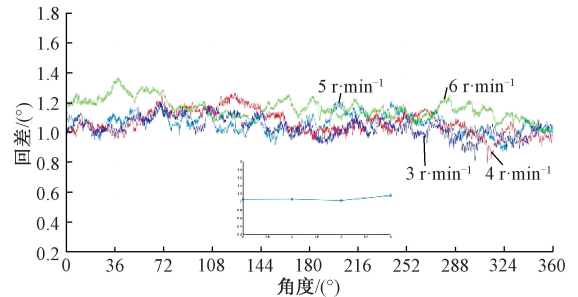


图 17 A 型小型关节在 0.04 Nm 负载不同转速动态回差曲线

Fig.17 Dynamic hysteresis curve of small-size joint A under the load of 0.04Nm and different revolution speeds

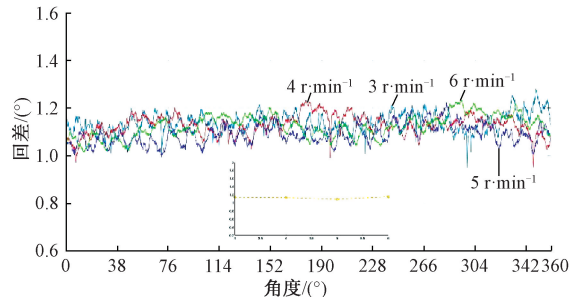


图 18 B 型小型关节在 0.07 Nm 负载不同转速动态回差曲线

Fig.18 Dynamic hysteresis curve of small-size joint B under the load of 0.07 Nm and different revolution speeds

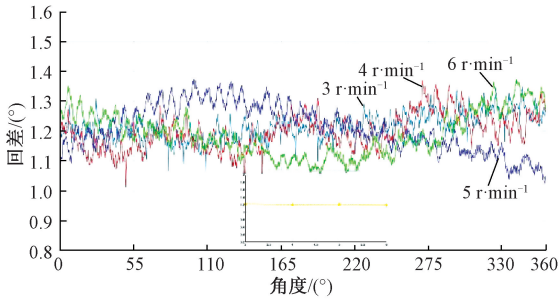


图 19 C 型小型关节在 0.6 Nm 负载不同转速动态回差曲线

Fig.19 Dynamic hysteresis curve of small-size joint C under the load of 0.6 Nm and different revolution speeds

## 4 小型关节整体回差的静态测量实验

对小型关节的整体回差进行静态测量实验,通过动态测量和静态测量两种方式对小型关节实际工况下的整体回差性能进行综合评定。

### 4.1 小型关节整体回差的静态测量评价实验

对 C 型号小型关节整体回差的静态测量是利用滞回曲线法,通过将小型关节的输入端机械抱死,选取不同位置,利用砝码加载法,实时采集角度数据。在该型号小型关节输出轴一圈上选取 10 个位置,每个位置分别进行 5 组测量,加载 0.7 N·m 负载测量的结果如表 7 所示,采用静态测量法测得的整体回差平均值为 1.32°。

表 7 实验条件与结果

Table 7 Experiment conditions and results

静态负载	36°	72°	108°	144°	180°	216°	252°	288°	324°	360°	均值
测试 1	1.24°	1.26°	1.22°	1.36°	1.39°	1.41°	1.35°	1.33°	1.27°	1.33°	1.316°
测试 2	1.23°	1.27°	1.23°	1.34°	1.41°	1.43°	1.33°	1.33°	1.28°	1.31°	1.316°
测试 3	1.24°	1.27°	1.21°	1.35°	1.38°	1.39°	1.34°	1.33°	1.28°	1.36°	1.315°
测试 4	1.22°	1.27°	1.24°	1.33°	1.39°	1.41°	1.34°	1.36°	1.26°	1.35°	1.317°
测试 5	1.23°	1.26°	1.22°	1.35°	1.42°	1.41°	1.33°	1.34°	1.26°	1.33°	1.315°
极差	0.02°	0.01°	0.02°	0.03°	0.04°	0.04°	0.02°	0.03°	0.02°	0.05°	0.02°
均值	1.23°	1.27°	1.22°	1.35°	1.40°	1.41°	1.34°	1.34°	1.27°	1.34°	1.32°

### 4.2 动态测量与静态测量的实验结果对比

对动态测量和静态测量的结果进行对比分析,其中动态测量的结果偏小于静态测量的结果,但也非常接近。主要原因是动态测量时,小型关节受到的是动摩擦力,静态测量时受到的是静摩擦力,从而使小型关节测量时,小型关节内部传动系统受力情况存在差异。同时两种方法的测量原理不同,测量过程中的影响因素不同也会造成测量结果的差异。综合来看,通过两种测量方法测得的小型关节整体回差结果大体一致,可以在一定程度上进行相互印证。

## 5 结 论

为研究负载与速度对关节回差的影响,以 A、B、C 3 款小型关节为研究对象,进行 4 项动态测量实验。同时对关节整体回差进行了静态测量实验,并与动态测量进行了对比。可以得出以下结论:

- 1) 由加工和安装误差产生的空程回差和承载变形产生的弹性回差,是影响小型关节整体回差的主要因素。
- 2) 小型关节的整体回差值随负载的增加而增加,在

一定条件下,近似呈线性关系。

3) 小型关节的转速对其整体回差的影响小于弹性变形对整体回差的影响。

4) 静态测量相比动态测量结果偏大,测量过程繁琐,不能完整反映关节的整体回差情况。

随着研究的深入,还发现了一些有研究价值的新问题,如从整体回差中如何分离出电机的回差等。

### 参考文献

[ 1 ] STEWART ANDREW VACULIK. A framework for electromechanical actuator design [ D ]. Austin: The University of Texas at Austin, 2008.

[ 2 ] 丁宏钰.服务机器人伺服舵机[M]. 中国齿轮工业年鉴 2018, 长春:吉林科技出版社, 2018: 174-178.  
DING H Y. Servo actuator of service robot[M]. China Gyears Industry Yearbook, 2018, Changchun: Jilin science and technology press, 2018: 174-178.

[ 3 ] 李充宁,蔡胜,杨保占. 2K-V 型摆线针轮减速机回差与刚度的试验研究[J].机械设计, 2014, 31(1): 33-36.  
LI CH N, CAI SH, YANG B ZH. Experimental research



- on lost motion and rigidity of type 2K-V cycloidal-pin gear speed reducer [J]. *Journal of Machine Design*, 2014, 31(1):33-36.
- [4] 周留栓. 机器人模块化关节控制算法及其综合性能测试平台研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2008.  
ZHOU L SH. Control algorithm and experimental platform of space robot modular joint [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008.
- [5] 张飞. 大型空间机械臂关节性能测试平台研制及参数辨识研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
ZHANG F Research on parameters identification and experimental platform of large-scale space manipulator joints[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [6] 陶孟仑, 陈阳鹏, 陈定方, 等. 谐波减速器测试技术研究现状及展望[J]. *机械传动*, 2018, 42(7):175-180.  
TAO M L, CHEN Y P, CHEN D F, et al. Research present status and outlook of harmonic reducer testing technology [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2018, 42(7):175-180.
- [7] 赵昆. 高低温真空环境谐波减速器性能测试系统的研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.  
ZHAO K. Development of performance testing system of harmonic drive reducer under thermal vacuum environment [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [8] 王辉, 石照耀, 林家春, 等. 机器人用RV减速器多齿啮合特性研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, 41(2):227-234.  
WANG H, SHI ZH Y, LIN J CH, et al. Multi-tooth meshing performance of RV reducer for robot arms[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, 41(2):227-234.
- [9] ANH D P, LINH T, AHN H J. Hysteresis curve analysis of a cycloid reducer using non-linear spring with a dead zone[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2017, 18(3):375-380.
- [10] LINH T, ANH D P, AHN H J. Lost motion analysis of one stage cycloid reducer considering tolerances [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2016, 17(8):1009-1016.
- [11] 杨之含, 王少红, 马超. 单级行星齿轮箱行星轮故障动力学分析[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(1):156-162.  
YANG ZH H, WANG SH H, MA CH. Characteristics of single-stage planetary gearbox under crack failure [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(1):156-162.
- [12] 石照耀, 董定雨, 叶勇, 等. 小尺寸轴类零件快速测量机的设计[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(4):10-17.  
SHI ZH Y, DONG D Y, YE Y, et al. Design of rapid measurement machine for small size shaft parts [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(4):10-17.
- [13] 舒赞辉, 石照耀, 王笑一. 齿轮测量仪器的动态设计方法及其应用[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(4):910-918.  
SHU Z H, SHI ZH Y, WANG X Y. Dynamic design method of gear measuring instrument and its application [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(4):910-918.
- [14] HAN SH Y, ZHANG ZH H, HE H. Research on Hybrid Scheduling Algorithm Based on CAN bus [J]. *Instrumentation*, 2017, 4(2):24-29.
- [15] 石照耀, 徐航, 韩方旭, 等. 精密减速器回差测量的现状与趋势[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(9):2150-2158.  
SHI ZH Y, XU H, HAN FANG X, et al. Current status and trends in precision reducer lost motion measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(9):2150-2158.
- [16] 石照耀, 任新丽, 于渤, 等. 塑料齿轮传动误差动态试验机的研制[J]. *机械传动*, 2019, 43(9):144-147.  
SHI ZH Y, REN X L, YU B, et al. Development of transmission error dynamic testing machine for plastic gear [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2019, 43(9):144-147.
- [17] 石照耀, 徐航, 林家春, 等. 精密减速器回差测量与评价体系研究[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(6):56-63.  
SHI ZH Y, XU H, LIN J CH, et al. Current status and trends in precision reducer lost motion measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(6):56-63.
- [18] 石照耀, 鹿晓宁, 陈昌鹤, 等. 面齿轮单面啮合测量仪的研制[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(12):2715-2721.  
SHI ZH Y, LU X N, CHANG CH H, et al. Development of single-flank rolling tester for face gears [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(12):2715-2721.

- [19] 石照耀,张万年,林家春.小模数齿轮测量:现状与趋势[J].北京工业大学学报,2008,34(2):113-119.  
SHI ZH Y, ZHANG W N, LIN J CH. Present status trends of measurement technology of fine-pitch gears[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(2):113-119.

### 作者简介



**程慧明**,2016年于华东交通大学获得学士学位,现为北京工业大学硕士研究生,主要研究方向为精密测试技术与仪器。

E-mail: chenghuiming295@126.com

**Cheng Huiming** received his B. Sc. degree from East China Jiaotong University in 2016. Now, he is a M. Sc. candidate at Beijing University of Technology. His main research interest includes precision measurement technology and instrument.



**石照耀**(通信作者),1984年于合肥工业大学获得学士学位,1988年于陕西机械学院获得硕士学位,2001年于合肥工业大学获得博士学位,现为北京工业大学教授、博士生导师、教育部长江学者特聘教授,主要研究方向为齿轮工程和精密测试技术及仪器。

E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn

**Shi Zhaoyao** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1984, M. Sc. degree from Shanxi Institute of Mechanical Engineering in 1988 and Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2001. Now, he is a professor and Ph. D. supervisor in Beijing University of Technology, and a “Yangtze River Scholar” distinguished professor awarded by the Ministry of Education. His main research interests include gear engineering and precision measurement technology and instrument.