



服务机器人小型关节综合性能测试机

石照耀, 程慧明, 朱逸文, 张攀, 张临涛, 丁宏钰

引用本文:

石照耀, 程慧明, 朱逸文, 等. 服务机器人小型关节综合性能测试机[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(8): 1707–1714.

SHI Zhao-yao, CHENG Hui-ming, ZHU Yi-wen, et al. Testing machine for small-size electro-mechanical actuator used in robots[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(8): 1707–1714.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202808.1707>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

板上芯片集成封装发光二极管的光色检测系统

Photoelectric parameter measurement system for chip-on-board wafer level packaging LEDs

光学精密工程. 2016, 24(1): 39–44 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162401.0039>

基于双目立体视觉的工业机器人在线温度补偿

In-line thermal compensation of industrial robots based on binocular stereo vision

光学精密工程. 2018, 26(9): 2139–2149 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182609.2139>

运动副间隙引起的并联机器人误差及其补偿

Error and compensation of parallel robot with joint clearances

光学精密工程. 2015, 23(5): 1331–1339 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152305.1331>

新型四足步行机器人串并混联腿的运动学分析

Kinematics analysis on the serial-parallel leg of a novel quadruped walking robot

光学精密工程. 2015, 23(11): 3147–3160 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152311.3147>

自驱动关节臂坐标测量机模块化关节设计

Design of modular articulation in self-driven AACMM

光学精密工程. 2018, 26(8): 2021–2029 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182608.2021>

文章编号 1004-924X(2020)08-1707-08

服务机器人小型关节综合性能测试机

石照耀*,程慧明,朱逸文,张攀,张临涛,丁宏钰
(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院,北京 100124)

摘要:为了解决服务机器人小型关节整机性能测量手段缺乏以及测量项目单一的问题,根据小型关节的特点研制了服务机器人小型关节综合性能测试机,实现了对小型关节传动精度、电参数和机械特性的测量。测试机由精密机械系统、测控硬件系统和测控软件系统组成。测试机主机采用卧式结构,设计了专用夹具,在保证测量精度的同时满足了不同型号关节的测量要求;开发的测试软件不仅能满足小型关节多个性能指标的综合测量,还能对测量进行分析。实际测试结果表明,测试机运行稳定,精度符合设计要求,重复性测量偏差小于 3%,覆盖小型关节型号范围广,能实现自动化精密测量。测试机的研制为建立面向服务机器人小型关节的全局质量评价体系提供了手段。

关键词:机器人;小型关节;传动精度;电力参数;反启动转矩;动态测试机

中图分类号:TH71 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20202808.1707

Testing machine for small-size electro-mechanical actuator used in robots

SHI Zhao-yao*, CHENG Hui-ming, ZHU Yi-wen, ZHANG Pan,
ZHANG Lin-tao, DING Hong-yu

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

* Corresponding author, E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn

Abstract: An electromechanical actuator (EMA) is the main component for the attitude control of robotic systems. This study focuses on solving the problems of a robot's incapability in measuring small-size EMAs, inability to reflect the machine performance comprehensively, and single measurement item. According to the characteristics of small-size EMAs, a testing machine for the comprehensive performance test was developed to measure the transmission accuracy, electric parameters, and mechanical characteristic of small-size EMAs. The testing machine mainly comprises a precision mechanical system, control hardware system, and measurement and testing software. The testing machine adopts a horizontal structure. A special fixture is designed to satisfy the measurement requirements of different types of EMAs while ensuring the accuracy of the measurement system. The developed test software not only satisfies the comprehensive measurement of multiple performance indicators of small-size EMAs, but can also analyze the measured results. Test results show that the measuring

收稿日期:2020-01-08;修订日期:2020-02-25.

基金项目:北京市教委-北京市基金联合资助项目(No. KZ201910005005)

machine operated stably, with a repeatable measurement deviation of less than 3%, thereby encompassing a wide range of small-size EMAs. The precision conforms to the design requirements, and the testing machine can yield automatic precision measurements. The development of the testing machine facilitates the establishment of an overall quality evaluation system for small-size EMAs.

Key words: robot; small-size electro-mechanical actuator; transmission accuracy; electric power parameter; reverse pull-in torque; dynamic testing machine

1 引言

关节是服务机器人执行姿态变换的关键部件,其性能对服务机器人的整机性能和可靠性起决定性作用。关节主要由传动、控制和传感部分组成^[1-2]。其中,传动部分由电机、减速器和结构件组成,控制部分由驱动模块及控制通信模块组成,传感器部分使用了关节位置传感器和电机位置传感器。

随着服务机器人市场规模的快速增长,关节的种类不断增加,性能也不断优化。与此同时,对关节性能表征、测试和评价也成为了当前的研究热点。全面考察机器人关节测试技术的现状,发现整体上呈现出三个方面的特点:首先,国内外研发的大量测试设备主要针对大中型关节的性能测试^[3],此类设备多面向直径大于 100 mm 的关节,并且此类关节的输出力矩仅可以达到 120 N·m 以上,而小型关节尺寸为 33 mm×15 mm×18.5 mm,最大输出力矩为 0.02 N·m,考虑到测量精度,实用性及设计成本等因素,小型关节和大型关节不宜用相同设备进行测试,而针对小型或微型关节的测试技术和设备几乎是空白;第二,对关节的测试主要集中在对减速器的测试上,而不是将关节作为一个整体进行测试^[4-9];第三,测试参数集中于关节精度和机械性能上,缺少电参数测试及其与机械参数的融合分析^[10]。

针对上述现状,为解决服务机器人小型关节的测试难题,本文研发了服务机器人小型关节成套测试技术与仪器。该测试机将构成小型关节的传动、控制和传感作为一个整体,能实现对其传动精度、机械特性和电参数的综合测量,进而分析性能参数间的关系。

2 小型关节介绍

典型的小型关节如图 1 所示,它由直流无刷电机、平行轴直齿圆柱轮减速器、磁编码位置传感器、控制器和塑料箱体等 5 大部分组成。待测小型关节参数如表 1 所示,该类型小型关节尺寸在 33 mm×15 mm×18.5 mm~63 mm×34 mm×63.9 mm 之间,输出扭矩为 0.2~6 N·m,堵转电流在 0.3~3.5 A,最大转速不超过 70 r/min。

表 1 小型关节参数

Tab. 1 Main technical indexes of small-size EMA

型号	外形尺寸 /mm	质量 /g	工作 电压 /V	最大 力矩 /(N·m)	堵转 电流 /A	空载 转速 /(r·min ⁻¹)
1	33×15×18.5	12	7.4	0.2	0.3	33
2	26.5×25.1×19	20	7.4	0.3	0.4	50
3	36.5×27×26	46	11.1	0.8	0.7	37
4	44.1×22.5×29	47	7.4	1.2	0.6	56
5	44.1×22.5×29	49	11.1	2.0	2.5	66
6	45×26×49	68	24	2.5	2.0	50
7	63×34×63.9	220	24	6.0	3.5	68

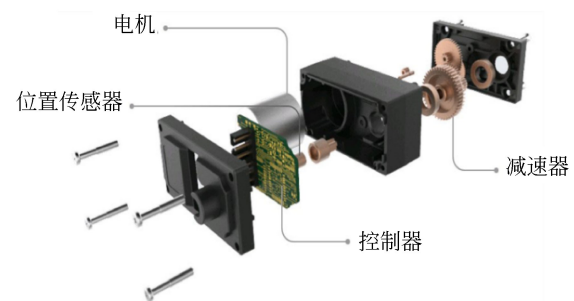


图 1 小型关节

Fig. 1 Small-size EMA

3 测量原理

3.1 传动精度测量

传动误差和回差是评价关节运动输出精度的主要指标。传动误差既反映了传动机构制造误差和安装误差,又反映了其抵抗外界环境(如温度、负载等)的能力。回差则反映了关节传动系统中的间隙,主要由空程回差、弹性回差和温度回差等组成。传动误差和回差的存在会造成机器人关节运动传递关系的非线性,影响机器人系统的重复定位精度和动态性能。

3.1.1 传动误差测量

根据国标 GB/T 35089-2018 对精密减速器传动误差的定义^[11],传动误差的计算公式为:

$$TE = \theta_{out} - \frac{\theta_{in}}{R}, \quad (1)$$

其中: θ_{out} 为输出端的实际转角, θ_{in} 为输入端转角, R 为减速器的速比值。

小型关节的传动误差指:对应伺服电机任意转角,关节的实际输出转角与理论转角之间的差值。测试机使用高精度圆光栅采集关节输出端的实际转角 θ_{out} 。使用小型关节的电机位置传感器采集电机转角 θ_{in} 。在测量过程中,测控软件控制关节做正反向的回转运动,待转速载荷平稳后,等时间采集转角数值,绘制正反向的传动误差曲线,并计算一周内传动误差的最小值、最大值、极差和均方根值。

3.1.2 回差测量

小型关节的回差测量采用动态测量法和静态测量法^[12]。

动态测量法实为双向传动误差法,如图 2 所示。首先测出关节正向传动误差曲线 $TE_z(\theta)$,然后在相同条件下测出关节反向传动误差曲线 $TE_f(\theta)$,二者之差即为动态回差曲线^[13]:

$$\delta(\theta) = TE_f(\theta) - TE_z(\theta). \quad (2)$$

静态测量法即滞回曲线法^[14],如图 3 所示。

3.2 电参数测量

电参数反映了小型关节在工作状态下电流、转速、功率、效率与转矩之间的关系。电参数测量分为空载测量与负载测量。空载测量是指小型关节输出端不施加负载的情况下,测量关节的电流及转速;负载测量是指小型关节输出端加载的情

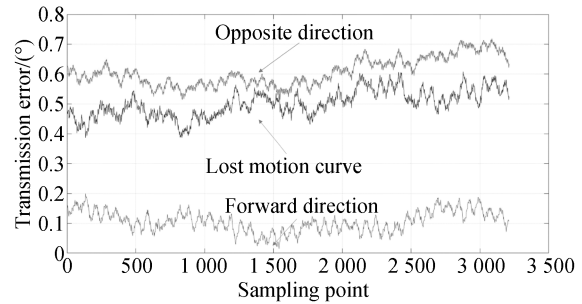


图 2 双向传动误差法测量原理

Fig. 2 Measuring principle of bidirectional transmission error

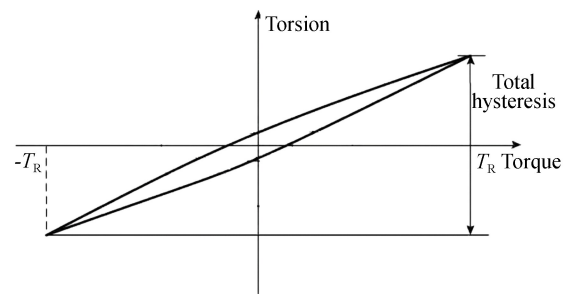


图 3 滞回曲线

Fig. 3 Hysteresis curves

况下,测试关节转矩与电流、转速、效率和输出功率之间的关系。

测量时首先让关节以最高转速空载运行一定时间,功率分析仪及光栅定时进行采样,将该时间内小型关节的电流及转速的平均值作为关节空载电流和空载转速。接着,通过测控软件控制负载电机梯度加载,直到小型关节堵转为止,功率分析仪、光栅以及力矩传感器同时进行采样,记录关节从最高速转动至堵转过程中电流、输入功率、转速和力矩的数值,绘制转矩-转速曲线、转矩-电流曲线、转矩-效率曲线以及转矩-功率曲线。小型关节效率的计算公式为:

$$\eta = \frac{p_{out}}{p_{in}} \times 100\%, \quad (3)$$

其中: p_{out} 为输出端功率,它是机械功率,根据输出端的转矩和转速的乘积求得;输入端功率 p_{in} 为电功率,可以由功率分析仪直接测得。

3.3 反启动转矩测量

反启动转矩作为服务机器人小型关节的整机特性,指的是输出端反向施加载荷使输入端转动

时需要的力矩值,反映了小型关节负驱动状态下启动时需要克服的最大静摩擦力。测试反向启动转矩可以判定小型关节的自锁力矩范围,检测减速齿轮装配情况,对特殊工况下研究小型关节反向转动时需要的力矩及电力参数具有重要意义。

试验在小型关节断电情况下进行,通过测控软件控制加载电机等时间缓慢梯度增加输出轴力矩,直到关节克服最大静摩擦力转动。上位机通过数据采集卡实时采集该过程中输出端的转矩和转角,绘制出力矩-转角曲线,输出端的峰值扭矩即为关节的反启动转矩。

4 工作原理

测试机的主要技术指标如表 2 所示,工作原理如图 4 所示。小型关节被安装在夹具组件上,测量时由工控机通过 CAN 通信模块向关节发送指令,控制其按照设定的方式运动。负载电机由工控机通过控制卡控制驱动器进行驱动,以实现精准的力矩控制。小型关节输入端和输出端的实际转角分别由小型关节内部的编码器和圆光栅采集,它们采集的角度数据分别通过 CAN 通信模块和数据采集卡传送到工控机。被测小型关节的力矩变化依托力矩传感器进行高精度测量,高精度的功率分析仪用于监测测量过程中被测关节电流、电压及功率信号的变化。

表 2 小型关节测试机的主要技术指标

Tab. 2 Main technical indexes of small-size EMA testing machine

项 目	参 数
测量对象	服务机器人小型关节
测量项目	传动精度、机械特性、电参数
关节尺寸	$\geq 33 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 18.5 \text{ mm}$
力矩范围	$0 \sim 10 \text{ N} \cdot \text{m}$
力矩测量精度	$\pm 0.1\% \text{ F.S}$
圆光栅分辨率	$1.44''$
工作环境	电压: $220\text{V} \pm 10\% \text{ V}$, 50 Hz 湿度: $20\% \sim 70\%$

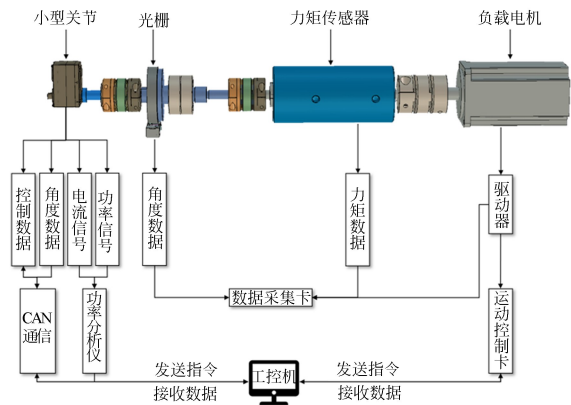


图 4 小型关节测试机的工作原理

Fig. 4 Principle for small-size EMA testing machine

5 测试机的组成

5.1 精密机械系统

如图 5 所示,小型关节测试主机由基座、夹具组件及安装组件组成。它采用卧式结构,以大理石平台为基座,夹具组件通过精密导轨与基座相连,充分保证更换被测件后测试结果良好的重复性及精度。安装组件包括用于圆光栅安装的精密轴承和力矩传感器及负载电机支架,负载电机支架采用立式安装的方式安装在基座单元末端。为了满足圆光栅的安装精度,测试机选用了高精密度轴承,圆光栅通过主轴固定在轴承一端,主轴另一端选用双膜片式联轴节与力矩传感器相连,减少由于不同心导致的振动对测试精度的影响。

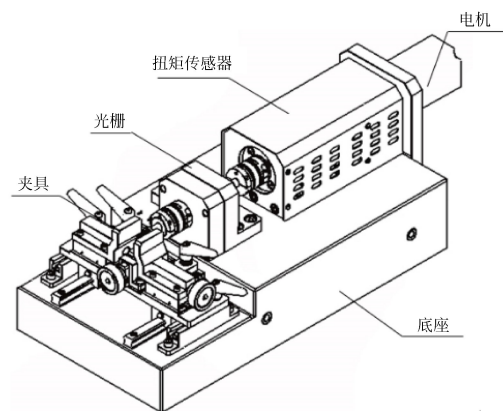


图 5 小型关节测试机主机结构

Fig. 5 Mainframe structure of small-size EMA testing machine

5.1.1 夹具组件设计

考虑到不同型号关节的尺寸和形状以及箱体的材质和厚度,这里设计了专用的小型关节装夹组件,如图 6 所示,采用"锁紧器-手轮-移动滑板"的方式进行定位控制,用于保证小型关节的安装精度。为满足不同尺寸小型关节的测试需求,设计了方便灵活的左右固定夹板及上下可调机构。当小型关节水平夹紧后,通过转动手轮以调整小型关节底部支撑组件高度,以达到测量要求。

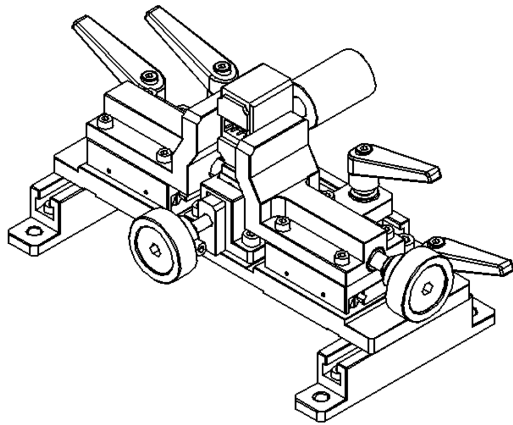


图 6 小型关节夹具结构

Fig. 6 Fixture for small-size EMA

5.1.2 光栅轴系设计

光栅主轴前端与小型关节输出轴通过双膜片式联轴器相连,主轴上设有均匀分布的圆光栅安装定位孔,保证了光栅与主轴的同步性。轴承内圈与主轴配合,外圈和轴套配合,两端设有端压板,一侧设有支座螺母将轴承并紧,使轴承、主轴以及安装支座组成一个整体,减小主轴跳动,提高光栅的安装精度。末端与力矩传感器相连,通过双膜片式联轴器传递力矩。

5.2 测控系统硬件设计

测试机的运动控制系统及信号采集系统集成在工控机中,运动控制系统主要包括小型关节控制系统以及负载电机控制系统,测控软件通过 CAN 通信模块对小型关节进行直接控制,负载电机控制由配套的伺服驱动器实现。信号采集系统使用圆光栅、力矩传感器、功率分析仪以及数据采集卡,对角度数据、力矩数据及电参数进行采集。测控系统的硬件设计框图如图 7 所示。

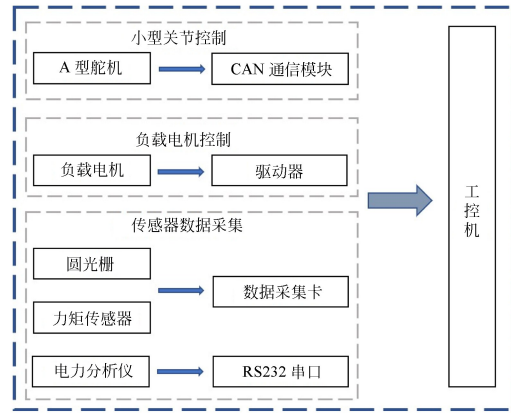


图 7 小型关节测控系统硬件

Fig. 7 System hardware for small-size EMA

测试过程中,工控机通过数据采集卡实时读取圆光栅采集到的转角信号,同时被测关节以 1 毫秒/次的采样频率不断向工控机发送转角信号。工控机同时对输入端与输出端的角度进行处理。同时,力矩传感器采集力矩信号,功率分析仪采集关节电参数,实时同步发送到工控机进行数据处理。

5.3 测控软件系统

测试系统软件框架如图 8 所示,测试软件系统由上位机软件系统与下位机软件系统组成。上位机软件提供人机交互界面、测量参数的输入、测量曲线显示、测量数据和显示测量结果显示。下

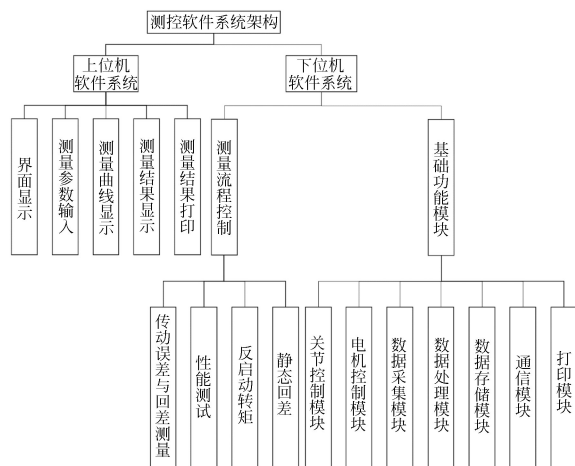


图 8 小型关节测试机的软件结构

Fig. 8 Testing software architecture for small-size EMA

位机软件系统由测量流程控制模块和功能模块组成。测控软件系统具有数据保存,测量结果保存再现以及打印等功能。

6 测量试验与结果

所研制的服务机器人小型关节综合性能测试机如图 9 所示,在生产现场每天承担了大量的检测任务,经受了检测实践考验。以回差动态测量的重复性、电参数及反启动转矩测量为例,说明测试机的性能。

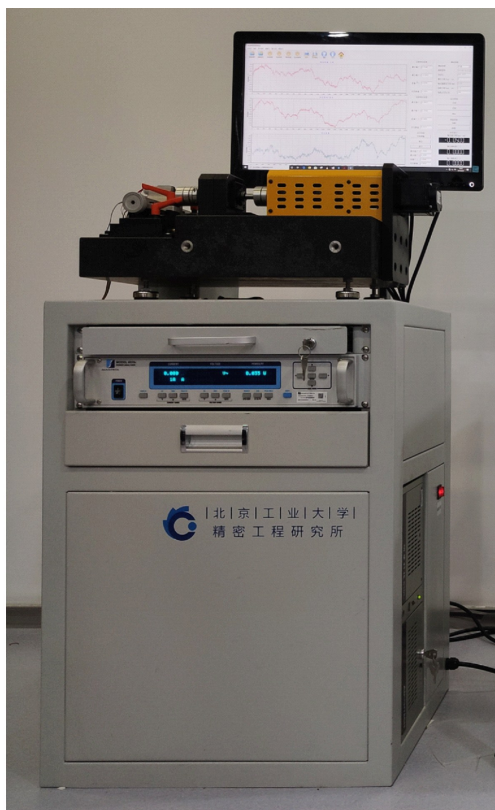


图 9 小型关节测试机

Fig. 9 Photo of small-size EMA testing machine

6.1 重复性试验

回差动态测量的重复性测试是指,同一关节一次装夹在相同速度和负载情况下进行 10 次测量,评定测试结果的分散性。小型关节在 3 r/min 的条件下,分别进行空载测试和模拟实际工况 0.8 N·m 负载下的测试,测试结果分别如表 3 和表 4 所示。

表 3 空载重复性测试结果

Tab. 3 Results of no-load repeatability test (°)

测试	最大值	最小值	差值	均值
1	0.612 3	0.412 2	0.200 1	0.512 1
2	0.591 4	0.421 3	0.170 1	0.513 2
3	0.601 2	0.416 5	0.184 7	0.511 9
4	0.614 7	0.421 1	0.193 6	0.522 1
5	0.623 1	0.421 7	0.201 4	0.518 2
6	0.619 8	0.413 2	0.206 6	0.516 9
7	0.612 9	0.411 9	0.201 0	0.519 2
8	0.617 2	0.423 9	0.193 3	0.526 4
9	0.614 4	0.412 2	0.202 2	0.514 3
10	0.613 7	0.412 4	0.201 3	0.514 4
极差	0.031 7	0.012 0	0.019 7	0.014 5
均值	0.608 54	0.418 56	0.189 98	0.515 5

表 4 负载重复性测试结果

Tab. 4 Results of load repeatability test (°)

测试	最大值	最小值	差值	均值
1	1.568 6	1.323 6	0.245 0	1.396 9
2	1.515 4	1.314 6	0.200 8	1.412 3
3	1.531 4	1.334 3	0.197 1	1.422 3
4	1.541 2	1.312 2	0.229 0	1.411 3
5	1.499 4	1.371 2	0.128 2	1.399 1
6	1.512 3	1.365 2	0.147 1	1.432 7
7	1.565 1	1.348 2	0.216 9	1.423 4
8	1.512 6	1.312 7	0.199 9	1.391 7
9	1.553 1	1.314 7	0.238 4	1.432 6
10	1.523 4	1.352 8	0.170 6	1.422 1
极差	0.069 2	0.059 0	0.110 2	0.041 0
均值	1.531 2	1.331 18	0.200 02	1.408 38

对上述结果进行分析,在空载情况下,10 次测量的小型关节回差动态测量结果偏差为 2.812 8%。在 0.8 N·m 负载情况下,结果偏差为 2.911 1%,测试结果达到了用户的要求。

6.2 电参数测量试验

对某型号额定力矩为 2.5 N·m 的小型关节进行电参数测量,分别进行空载性能测量和负载测量,测得空载电流、空载转速、堵转力矩、堵转电流、最大效率和最大功率等性能指标,获得转矩-

电流曲线、转矩-转速曲线、转矩-功率曲线及转矩-效率曲线,性能指标如表 5 所示,测量所得曲线如图 10 所示。将测量结果与小型关节的设计数据进行对比,结果表明所测数据符合预期,验证了测试机电参数测量功能的有效性。

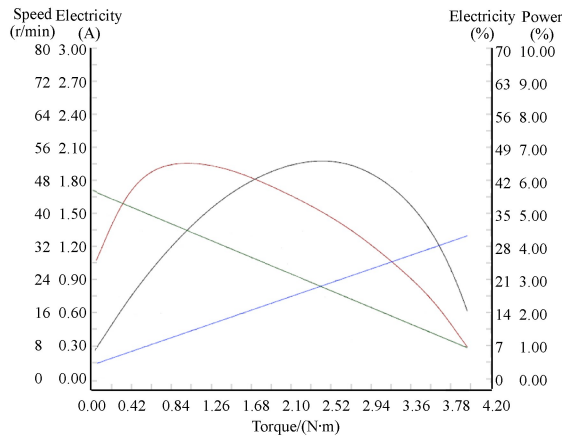


图 10 电参数测量曲线

Fig. 10 Measurement curves of electrical parameters

表 5 电参数测量试验结果

Tab. 5 Results of electrical parameter measurement

测量项	测量结果
空载电流/A	0.164
空载转速/(r·min ⁻¹)	45.958
堵转电流/A	1.307
堵转力矩/(N·m)	3.990
最大效率/%	45.261
最大功率/W	6.401

6.3 反启动转矩测量试验

对小型关节进行反启动转矩试验,试验结果如图 11 所示。从反启动转矩曲线中可以看出,输出端力矩从 0 N·m 增加至 0.125 N·m 时,输出端转角为 0.2°;当负载力矩继续增大至 0.03 N·m 时,克服最大静摩擦力,输出端转角迅速增大,关节反向转动,最大静摩擦力变为滑动摩

擦,力矩小幅度下降,测得小型关节反向启动转矩为 0.17 N·m。

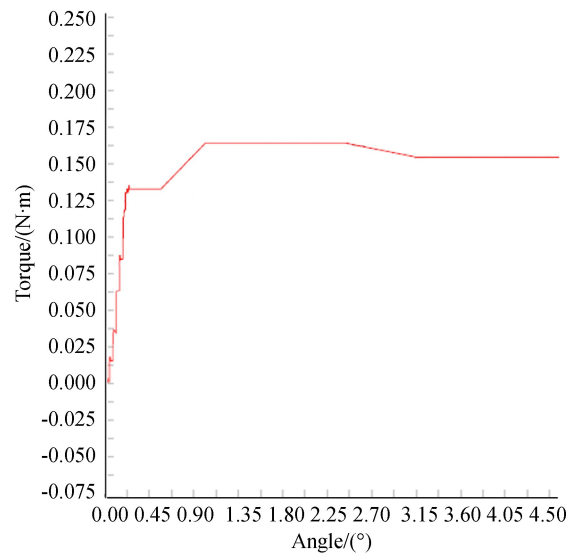


图 11 反启动转矩

Fig. 11 Reverse starting torque

7 结 论

本文针对服务机器人小型关节测试技术和仪器缺失的现实,研发了小型关节的成套测试技术与仪器。该仪器解决了小型关节测量手段缺乏的问题,实现了不同形状、不同尺寸及不同类型的小型关节测量;解决了小型关节整体性能测量的难题。它不以小型关节的某一部件为测量对象,如减速器或电机,而是以小型关节整机为测量对象,对整机进行综合性能测量,解决了关节测量项目单一的问题;实现了小型关节传动精度、机械特性和电参数的综合测量,进而为探究各参数之间的关系提供了基础。

本服务机器人小型关节综合性能测试机能够满足多种型号小型关节综合性能测量的需求。长时间测试表明,该测试机运行稳定,测量结果准确可靠,从而为建立面向服务机器人小型关节的全局质量评价体系奠定了基础。

The University of Texas at Austin, 2008.

参考文献:

[1] STEWART ANDREW VACULIK. *A framework for electromechanical actuator design*[D]. Austin:

[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, Changchun: Jinlin Science and Technology Co. Ltd., 2018: 174-178. (in Chinese)
- [3] 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, 2012. (in Chinese)
- [4] 李充宁, 蔡胜, 杨保占. 2 kV 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 2 kV cycloidal-pin gear speed reducer[J]. *Journal of Machine Design*, 2014, 31(1): 33-36. (in Chinese)
- [5] 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. (in Chinese)
- [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. (in Chinese)
- [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. (in Chinese)
- [8] 房建成, 陈萌, 李海涛. 磁悬浮控制力矩陀螺框架系统谐波减速器的迟滞建模[J]. 光学精密工程, 2014, 22(11): 2950-2958.
FANG J CH, CHEN M, LI H T. Hysteresis modeling for harmonic drive in DGMSCMG gimbal system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 2950-2958. (in Chinese)
- [9] 党选举, 王凯利, 姜辉, 等. 工业机器人谐波减速器迟滞特性的神经网络建模[J]. 光学精密工程, 2019, 27(3): 694-701.
DANG X J, WANG K L, JIANG K, *et al.*. Neural network modeling of hysteresis for harmonic drive in industrial robots [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(3): 694-701. (in Chinese)
- [10] 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. (in Chinese)
- [11] GB/T 35089-2018. 机器人用精密齿轮传动装置试验方法[S].
GB-T 35089-2018. Precision transmission for robot-Test method[S]. (in Chinese)
- [12] 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 C, *et al.*. Research on measurement and evaluation system of precision reducer lost motion[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(6): 56-63. (in Chinese)
- [13] 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 F X, *et al.*. Current status and trends in precision reducer lost motion measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(9): 2150-2158. (in Chinese)

作者简介:



石照耀(1964—),男,湖南岳阳人,博士,教育部长江学者特聘教授,博士生导师,1984年、2001年于合肥工业大学分别获得学士、博士学位,主要从事齿轮工程及精密测试技术与仪器的研究。
E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn



程慧明(1994—),男,安徽安庆人,硕士研究生,2016年于华东交通大学获得学士学位,主要从事精密测试技术与仪器的研究。
E-mail: chenghuiming295@126.com