

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514722

精密减速器反向传动性能表征与测试*

石照耀, 左广祥

(北京工业大学机器人智能关节北京市重点实验室 北京 100124)

摘要:反向传动性能反映了机器人与环境交互过程中关节减速器被动接收外界功率的难易程度,是影响机器人力反馈精度的重要因素。通常采用反向启动转矩来表征减速器的反向传动性能,研究发现反向启动转矩仅作为反向传动性能的一种特殊情况,仅对应减速器由静止到运动的特殊边界工况,在工程应用中无法为机器人关节反馈控制提供准确的扭矩信息。全面考察机器人关节减速器反向传动性能的研究与应用现状,发现主要考虑转动惯量和摩擦两类因素的简单影响,而忽略了传动比和运行转速的影响;集中于静态的反向启动转矩测试与评价,而忽略了减速器运动过程中的反向传动性能。为此,深入探究了减速器双向传动机理,定义了表征反向传动性能的反向驱动扭矩,基于对反向传动性能的解构分析,建立了包含传动比、转动惯量、摩擦、转速的反向驱动扭矩模型,提出了基于能量传递的减速器反向传动性能动态表征及测试方法,实现对不同转速、不同工况下反向传动性能的定量评估。从理论上分析了 4 种参数对减速器反向传动性能的影响,并通过试验研究验证了减速器反向传动性能的动态性,指出了单一反向启动转矩指标用于评价减速器反向传动性能的不足。最后,指明了减速器反向传动性能在理论和应用方面的价值。

关键词:反向传动性能;减速器;关节;机器人;性能指标;表征方法

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

Characterization and testing of backdrivability of precision reducers

Shi Zhaoyao, Zuo Guangxiang

(Beijing Key Laboratory of Intelligent Joints, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Backdrivability describes the ability of a robot joint reducer to passively transmit external power during interaction with the environment, and is an important factor affecting the accuracy of robot force feedback. The reverse starting torque is commonly used to characterize a reducer's backdrivability. However, studies have shown that reverse starting torque represents only a special case of backdrivability, corresponding merely to the specific boundary condition in which the reducer transitions from rest to motion. Therefore, it cannot provide accurate torque information for robot joint feedback control in engineering applications. A comprehensive review of the research and application status of backdrivability in robot joint reducers indicates that most existing studies consider only the simple influences of —moment of inertia and friction, while neglecting the effects of gear ratio and operating speed. Moreover, prior work has focused on static testing and evaluation of reverse starting torque, without addressing the backdrivability of the reducer during motion. To overcome these limitations, this paper conducts an in-depth investigation of the reducer's bidirectional transmission mechanism and defines the backdrive torque as a parameter to characterize backdrivability. Based on a deconstruction analysis of backdrivability, a backdrive torque model is established that incorporates gear ratio, moment of inertia, friction, and speed. Furthermore, a dynamic characterization and testing method for reducer backdrivability is proposed based on energy transmission, enabling quantitative evaluation of backdrivability under different speeds and operating conditions. The effects of these four parameters on reducer backdrivability are analyzed theoretically, and experimental studies verify the dynamic nature of reducer backdrivability, revealing the inadequacy of using a single reverse starting torque index to evaluate reducer backdrivability. Finally, the theoretical and practical value of reducer backdrivability are highlighted.

Keywords: backdrivability; reducer; joint; robot; performance metrics; characterization method

收稿日期: 2025-11-25 Received Date: 2025-11-25

* 基金项目: 国家重点研发计划(2024YFB3410400)项目资助

0 引言

近年来,市场需求、技术迭代和政策支持三股力量汇聚,强力推动了机器人行业大发展。机器人应用场景不再局限于传统的无人干预任务,更多的需要与环境交互,从确定性的工业制造环境扩展到以人为中心的不确定性环境,从工业机器人向以人为中心的机器人转变^[1]。因此,人机交互安全性及面对未知环境的抗冲击能力对机器人减速器提出了新的要求——反向传动性能。

1975年Paul等^[2]在一篇关于机械臂性能测试的文章中首次提到了反向传动性能。事实上,反向传动在一定条件下可理解为增速传动,正向传动为传统意义上的减速传动。反向传动性能表现为关节减速器对外界扭矩的响应能力,反映了机器人与环境交互过程中关节减速器接收外界功率的难易程度,这种“机械顺应性”具有自我保护特征。反向传动性能体现了传动系统输出和输入之间的功率关系。

传统的反向传动性能评价方法集中于静态或准静态测试,多采用3类参数^[3],即:

1) 反向启动转矩^[4,6]。反向启动转矩是使传动系统输出端转动所需的最小外部扭矩,反映系统在静止状态下的机械阻力。其数值受摩擦、齿侧间隙和传动比影响,但在动态工况下因惯性效应产生显著偏差。

2) 反向启动转矩-最大输出扭矩比^[7-9]。该比值通常用于比对不同传动系统的反向传动性能,用于平衡无关因素的影响。

3) 传动系统阻抗^[9]。通过建立传动系统固有参数建立反向传动性能表征模型,利用惯性和摩擦间接评价反向传动性能。

全面考察减速器反向传动性能的研究与应用现状,发现存在两个基本现象:一方面在反向传动性能的评价中,主要集中于静态条件或准静态条件下反向启动转矩数值的高低,依赖于平衡状态下的参数提取,忽略了在瞬态启停、变负载扰动或闭环控制介入时的非线性响应特性,不重视减速器的动态变化对反向传动性能的影响;另一方面现有反向传动性能研究只考虑惯量和摩擦两类因素的简单影响^[10-14],而忽略了传动比和运行转速对反向传动性能的隐性影响。

为此,围绕减速器反向传动性能展开研究,探究双向传动机理,研究考虑传动比、转动惯量、摩擦和转速的反向驱动扭矩模型,并分析减速器反向传动性能的影响因素,以期对机器人减速器设计、测试与应用提供指导。

1 反向传动

1.1 双向传动

将机器人关节简化为3部分:电机、齿轮传动系统和负载,简化图如图1所示。正向传动表示为电机到齿轮传动系统再到负载端的主动功率传递过程,反向传动表示为外界功率从齿轮传动系统被动传递至电机端的过程。

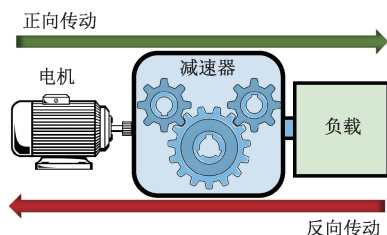


图1 双向传动

Fig. 1 Bidirectional drive

机器人减速器正向传动研究已成熟,这里不做赘述。减速器反向传动可分为静态(准静态)与动态两种类型,即:

1) 关节减速器处于静止状态时缓慢接收外界功率, $\dot{\theta}_o = 0$;

2) 关节减速器在运行过程中接收外界功率, $\dot{\theta}_o \neq 0$ 。

以上两种类型下传动系统的机械顺应性不同,进而反向传动性能的表现也不相同,对应的测试评价方法也不同。研究实践中常采用减速器的反向启动转矩表征反向传动性能,但反向启动转矩仅是反向传动中 $\dot{\theta}_o = 0$ 的一种特殊情况,是静态的。机器人实际运行过程中反向驱动扭矩不等于反向启动转矩。因此仅采用反向启动转矩表征反向传动性能的方式是不全面的,无法为机器人反馈控制提供准确的扭矩信息。

1.2 反向传动动态模型

反向传动的过程中反向传动性能表现为关节减速器对外界扭矩的响应能力,反映了机器人与环境交互过程中关节减速器接收外界功率的难易程度。实际上反向传动性能的本质特征是传动系统反向的机械阻抗,将这种机械阻抗定义为反向驱动扭矩 T_{bck} 。所建立的反向驱动扭矩的数学模型如式(1)所示,对应的反向传动模型示意图如图2所示。

$$J_{bck} \ddot{\theta}_o + D_{bck} \dot{\theta}_o + T_{of} + T_m = T_{bck} \quad (1)$$

式中: J_{bck} 为反向等效转动惯量; D_{bck} 为反向阻尼系数; T_{of} 输出端摩擦扭矩; T_m 为电机提供的扭矩; θ_o 为传动系统输出端角位移。

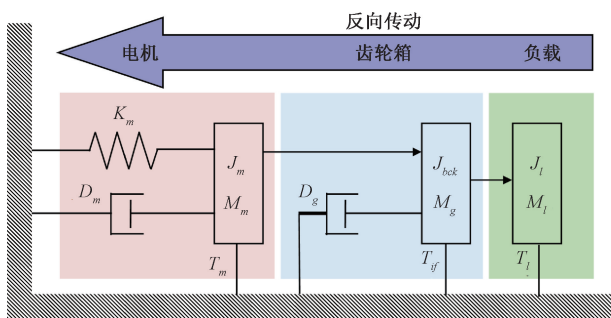


图2 反向传动模型

Fig. 2 Backdrive model

相应的建立正向驱动扭矩 T_{fwd} 的动力学方程如式(2)所示,对应的正向传动模型如图3所示。

$$J_{fwd}\ddot{\theta}_i + D_{fwd}\dot{\theta}_i + T_{if} + T_l = T_i \quad (2)$$

式中: J_{fwd} 为正向等效转动惯量; D_{fwd} 为正向粘性摩擦系数; T_{if} 为输入端摩擦扭矩; T_l 为负载扭矩; θ_i 为传动系统输入端角位移。

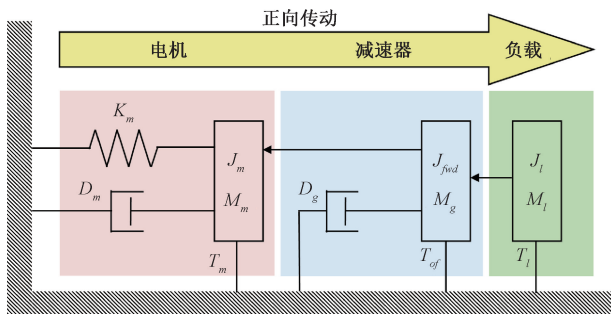


图3 正向传动模型

Fig. 3 Forward drive model

2 反向传动性能测试及评价方法

通过上述分析,反向启动扭矩的测试无法全面表征关节减速器的反向传动性能。机器人与环境交互过程中关节减速器处运行状态,反向传动性能体现了传动系统输出和输入之间的功率关系,因此设计了反向传动过程中梯度加载测试及评价方法,以此全面表征减速器动态反向传动性能。

2.1 测试设备

作者研发的反向传动性能测试台如图4所示^[15-18],测试台由精密机械系统、硬件系统、测试软件这3部分组成。测试台精密机械系统两端由加载电机组成,可对减速器输入输出两端驱动,实现双向传动的过程。测试台输入端与输出端各包含角度传感器与扭矩传感器,输入端角度传感器采用分辨率为1.1"的圆光栅,输出端角度传感器采用分辨率为0.55"的圆光栅,输入端扭矩传感器的量程

为20 N·m,输出端扭矩传感器的量程为2 000 N·m,以实现同时对减速器两端的旋转角度、扭矩精准测量。



图4 双向传动性能测试台

Fig. 4 Bidirectional drive performance testing platform

根据测试台结构及工作原理,测试台的主要误差源可分为机械系统误差和传感器误差。由于机械部件加工误差、装配误差的存在,会引起相邻单元轴的同轴度误差。为保证测试结果的准确性,测试台在设计加工与装配过程中,严格控制测试台被测减速器两端轴类单元的同轴度维持在3 μm 以内,且在装配减速器过程中保持减速器输出端连接轴的圆跳动在5 μm 以内;同时所选用的圆光栅角度传感器配置双读数头以消除光栅盘的偏心误差。

2.2 测试方法

对被测减速器进行安装,控制试验设备处于标准室温(23℃±2℃)以下,减少环境温度对精密减速器测试结果的影响。减速器两端由测试台两端伺服电机驱动,控制电机工作为速度模式,驱动被测减速器达到额定转速。减速器输出端由测试台输出端伺服电机驱动,控制电机工作为转矩模式,给减速器输出端进行循环方波加载、卸载,转矩的变化示意如图5所示,测试台输出端方波循环扭矩如式(3)所示。

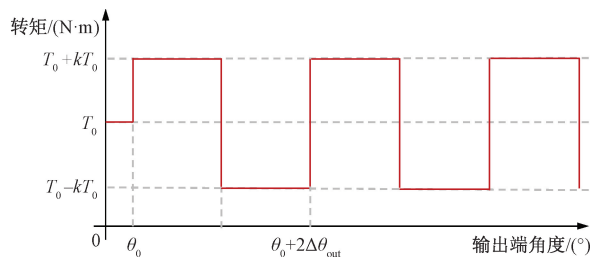


图5 输出端转矩循环示意图

Fig. 5 Output torque cycle diagram

$$T(\theta)_{out} = T_0 + kT_0 \cdot \text{sgn}\left(\sin\left(\frac{2\pi\theta}{T_c}\right)\right) \quad (3)$$

式中: $T(\theta)_{out}$ 为测试台输出端伺服电机扭矩; T_0 为测试过程中设定的初始扭矩; k 为反向驱动测试系数; T_c 为循环周期。

测试台输入端角度传感器和扭矩传感器实时采集数据,得到减速器输入端的扭矩变化图如图 6 所示。

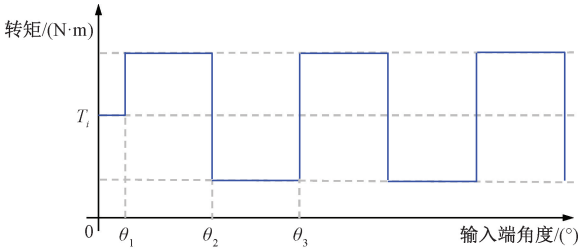


图 6 减速器输入端扭矩变化

Fig. 6 Input torque variation at the reducer

将扭矩曲线 $T(\theta)$ 包围的面积定义为 W ,其反映了减速器接收到的能量。在图 5 中, $T(\theta)_{out}$ 包围的面积 W_{out} 如式(4)所示。

$$W_{out} = \int_{\theta_0}^{\theta_0 + \Delta\theta_{out}} T(\theta)_{out} d\theta - \int_{\theta_0 + \Delta\theta_{out}}^{\theta_0 + 2\Delta\theta_{out}} T(\theta)_{out} d\theta \quad (4)$$

在图 6 中, $T(\theta)_{in}$ 包围的面积 W_{in} 如式(5)所示。

$$W_{in} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} T(\theta)_{in} d\theta - \int_{\theta_2}^{\theta_3} T(\theta)_{in} d\theta \quad (5)$$

由转动惯量和摩擦引起的反向传动的能量损耗如式(6)所示,能量损耗反映了减速器的反向传动性能,能量损耗越小代表反向传动性能越好。

$$\Delta W = W_{out} - W_{in} \quad (6)$$

总体而言, ΔW 越大,反向传动过程中能量损耗越大,减速器输入端越难接收到的从外界进入减速器输出端的能量,反向传动性能越差; ΔW 越小,反向传动过程中能量损耗越小,减速器输入端越容易接收到的从外界进入减速器输出端的能量,反向传动性能越好。采用能量损耗的评价方法可以有效的表征减速器反向传动运动过程中的反向传动性能。

2.3 评价方法

基于上述分析,减速器反向传动性能的评价应分为静态评价和动态评价。静态评价指对减速器的反向启动扭矩进行评价,动态评价指对反向传动运行过程中的能量损耗进行评价。

1) 静态反向传动性能评价

反向启动扭矩曲线如图 7 所示,针对不同规格减速器,反向启动扭矩有所不同,因此采用归一化的处理方法来统一不同规格减速器的反向启动扭矩指标,原理如式(7)所示。

$$\tau_{bck} = \frac{T_{bck}}{T_r} \quad (7)$$

式中: τ_{bck} 为归一化的反向启动扭矩; T_r 为减速器的额定扭矩。

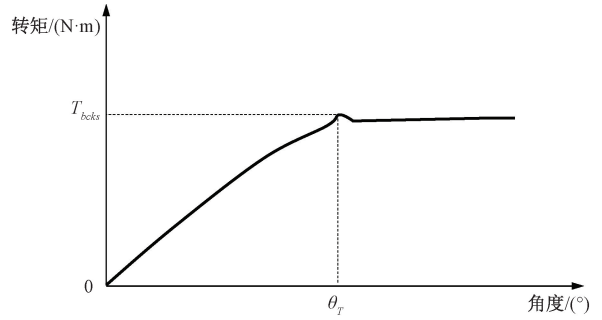


图 7 反向启动扭矩曲线

Fig. 7 Reverse starting torque curve

2) 动态反向传动性能评价

针对不同规格减速器,反向传动过程中能量损耗有所不同,因此本研究提出了动态反向传动性能评价方法,采用归一化处理来统一不同规格减速器的反向传动能量损耗,原理如式(8)所示。

$$w_{bck} = \frac{\Delta W}{T_0 \cdot \Delta\theta_{out}} \quad (8)$$

式中: w_{bck} 为归一化的反向启动扭矩。

总体而言, τ_{bck} 和 w_{bck} 越大,减速器的反向传动性能越差; τ_{bck} 和 w_{bck} 越小,减速器的反向传动性能越好。

3 反向传动性能的影响因素

从双向传动模型中可以得知,驱动扭矩与传动系统的转动惯量、阻尼、摩擦有关。反向启动扭矩本质上是克服减速器输出端的最大静摩擦力矩,因此仅能用于表征 1.1 节中提到的类型 1; 类型 2 中反向驱动扭矩需要克服减速器内部粘性动摩擦力矩及转动惯量引起的损失。此外,传动比与运行转速作为隐性因素融入驱动扭矩的模型中,对系统的动态响应产生潜在影响。如图 8 所示,本章以两级 NGW 行星传动系统为例,分析反向传动性能的影响因素。

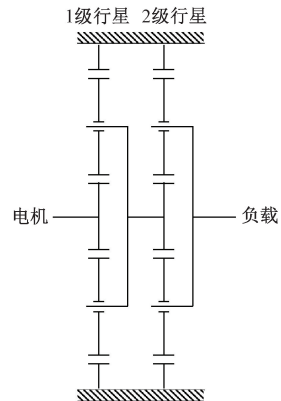


图 8 两级 NGW 行星传动系统

Fig. 8 Two-stage NGW planetary transmission system

3.1 转动惯量及传动比

转动惯量是传动系统绕轴转动时的惯性,阻碍运动状态的改变。机器人关节传动系统中的转动惯量包含电机、减速器、编码器等旋转部件。由于编码器质量相对于电机质量较小,故仅对电机和减速器做分析。在不考虑摩擦损耗及刚度损耗的情况下,减速器正、反向驱动惯量的关系如式(9)所示。

$$J_{bck} = i^2 J_{fwd} \quad (9)$$

式中: i 为减速器的传动比。

两级 NGW 行星传动系统的反向传动等效转动惯量如式(10)所示。

$$J_{bck} = J_L + J_{bck2} + \frac{i^2}{i_1^2} J_{bck1} + i^2 J_m \quad (10)$$

正向传动等效转动惯量如式(11)所示。

$$J_{fwd} = J_m + \frac{1}{i_1^2} J_{bck1} + \frac{1}{i} J_{bck2} + \frac{1}{i} J_L \quad (11)$$

式中: J_{bck1} 为第1级行星传动中折算到其输出行星架的转动惯量; J_{bck2} 为第2级行星传动中折算到其输出行星架的转动惯量; J_L 为负载端转动惯量; J_m 为电机转动惯量; i_i 为第 i 级行星传动比; i 为总传动比。

行星传动中行星轮既有公转又有自转,因此需要将公转惯量和自转惯量分离,单级行星传动折算到输出行星架的转动惯量如式(12)、(13)所示。

$$J_{bck1} = i_s^2 J_{si} + n \left(\frac{Z_{pi}}{Z_{si}} \right)^2 J_{pi} + J'_{ci} \quad (12)$$

$$J'_{ci} = J_{ci} + nm_{pi} r_{pi}^2 \quad (13)$$

式中:下标 i 表示第 i 级行星传动; J_s 为太阳轮转动惯量; J'_c 为将行星轮和行星架视为刚性连接的转动惯量; J_c 为行星架的转动惯量; Z_s 为太阳轮齿数; Z_p 为行星轮齿数。

通过式(9)~(13)可得到两级 NGW 行星传动系统中正、反向等效转动惯量表达式。从表达式中可以看出反向驱动等效转动惯量以传动比的平方放大输入端惯量,因此靠近输入端的部件转动惯量对反向驱动等效转动惯量具有较大的影响。将齿轮近似为圆柱体,齿轮的转动惯量近似表达式如式(14)所示,以半径的四次方放大。

$$J_g = \frac{1}{2} m_g r_g^2 = \frac{\pi}{2} \rho b r_g^4 \quad (14)$$

式中: m_g 为齿轮质量; r_g 为齿轮分度圆半径; b 为齿宽; ρ 为材料密度。

对输入端太阳轮进行分析,传动比随太阳轮直径增大而减小,但转动惯量却以太阳轮直径的四次方增大。因此在减速器设计过程中,合理的分配单级传动中齿数,适当的减小齿轮直径,增加靠近输入端传动级的传动比,可以有效改善反向驱动转动惯量,进而改善反向传动性能。

3.2 摩擦及转速

减速器的内部摩擦阻碍结构之间的相互运动或相对

运动,其摩擦力矩分为静摩擦和动摩擦,动摩擦力矩随转速的变化而变化。减速器在转速由零到准备启动时摩擦力矩为最大静摩擦力,在低速阶段摩擦力矩随转速的增加而减小,当大于一定转速时,摩擦力矩随转速的增加而增加。究其原因,减速器随转速增大经历了4个阶段:静摩擦阶段—边界润滑阶段—部分流体润滑阶段—全流体润滑阶段。因减速器的边界润滑阶段及部分流体润滑阶段的转速很小,考虑到减速器的实际应用场景,仅考虑全流体润滑阶段。

减速器反向传动的摩擦力矩模型如式(15)所示。

$$T_{bckf} = \begin{cases} [T_{bcke} + (T_{bcks} - T_{bcke}) \cdot e^{-\left(\frac{\dot{\theta}_o}{\dot{\theta}_s}\right)^\zeta}] \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_o) + D\dot{\theta}_o, & \dot{\theta}_o \neq 0 \\ T_{bcks}, & \dot{\theta}_o = 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中: T_{bcks} 为反向驱动静摩擦力矩即反向启动扭矩; $\dot{\theta}_s$ 为测试最小摩擦转矩转速; D 为粘性摩擦系数; ζ 为经验参数, ζ 取1。

如式(15),对传动比为 i 的一对啮合的齿轮分析可知,反向传动摩擦力矩与正向传动摩擦力矩的比值为传动比,相应的将减速器的正、反向驱动摩擦力矩近似为此关系,因此减速器正向驱动摩擦力矩可通过式(16)简化为式(17)。

$$\frac{T_{bckf}}{T_{fwdf}} = \frac{f \cdot r_2 \cdot \sin \alpha}{f \cdot r_1 \cdot \sin \alpha} = i \quad (16)$$

$$T_{bckf} = i \cdot T_{fwdf} \quad (17)$$

综合式(15)和(17),减速器的动态过程中摩擦力矩与施加给减速器的转速有关,因此反向传动性能同转速相关,且在减速器设计过程中以减小靠近输入端的摩擦为优化目标。

4 试验研究

4.1 测试对象

分别对行星摆线减速器、NGW 行星减速器及 NW 行星减速器这3款减速器进行试验研究,实物如图9所示,相关参数如表1所示。

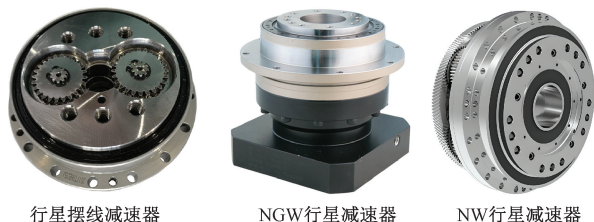


图9 减速器实物图

Fig. 9 Physical image of the reducer

表 1 相关参数
Table 1 Related parameters

类型	传动比	额定转矩/(N·m)	最大转速/(r·min ⁻¹)
行星摆线减速器	121	412	70
NGW 行星减速器	35	500	170
NW 行星减速器	20	300	300

4.2 静态反向传动性能测试过程与分析

根据反向启动转矩的测试方法,对 3 款减速器分别进行测试。行星摆线减速器的反向启动转矩图如图 10 所示,NGW 行星减速器的反向启动转矩图如图 11 所示,NW 行星减速器的反向启动转矩图如图 12 所示,评价结果如表 2 所示。

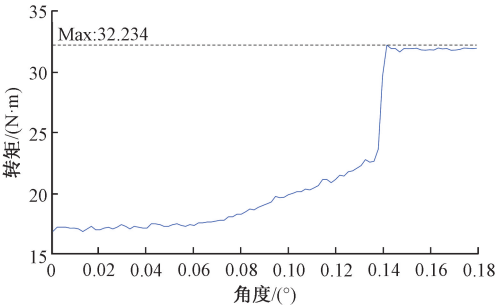


图 10 行星摆线减速器反向启动转矩

Fig. 10 Reverse starting torque of planetary cycloidal reducer

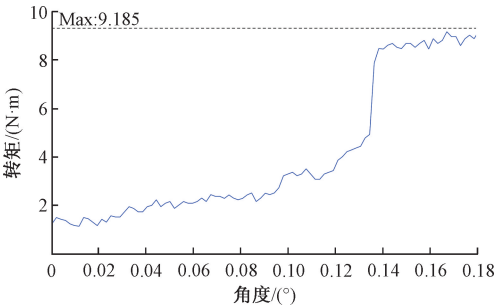


图 11 NGW 行星减速器反向启动转矩

Fig. 11 Reverse starting torque of NGW planetary reducer

表 2 静态评价结果

Table 2 Static evaluation results

类型	评价
行星摆线减速器	0.078 2
NGW 行星减速器	0.017 0
NW 行星减速器	0.027 6

根据测试结果可知行星摆线减速器相对较差,NW 行星减速器的反向启动转矩数值较低。但根据静态评价

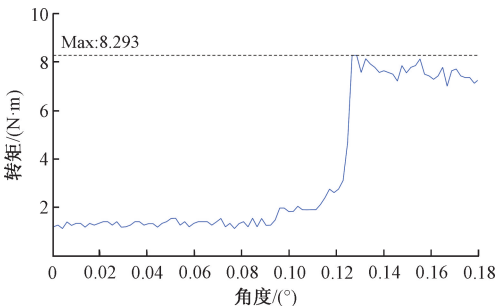


图 12 NW 行星减速器反向启动转矩

Fig. 12 Reverse starting torque of NW planetary reducer

结果来看 NW 行星减速器相较于 NGW 行星减速器的反向传动性能略差。减速器的实际使用过程中 NW 行星减速器更容易进行反向传动,由此可见静态评价存在一定局限性。

4.3 动态反向传动性能测试过程与分析

根据上述动态测试方法,对 3 款减速器分别取 $T_0 = 200 \text{ N} \cdot \text{m}$, $k = 1/4$, $T_c = \pi/3$ 在输入转速为 200 rpm 下进行测试。每个周期为 1 个测试点,共 3 个测试点。行星摆线减速器输出端及输入端实时转矩-角度图如图 13 所示,NGW 行星减速器输出端及输入端实时转矩-角度图如图 14 所示,NW 行星减速器输出端及输入端实时转矩-角度图如图 15 所示,能量损耗测试结果如表 3 所示。

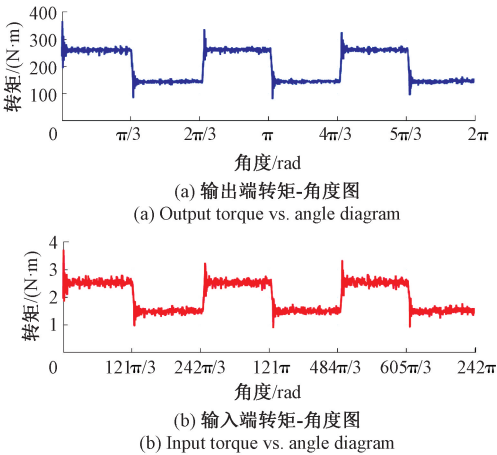
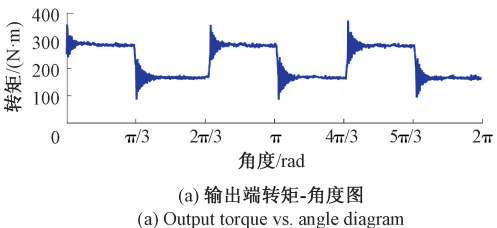


图 13 行星摆线减速器扭矩-角度图

Fig. 13 Torque vs. angle diagram for planetary cycloidal reducer



(a) 输出端转矩-角度图
(a) Output torque vs. angle diagram

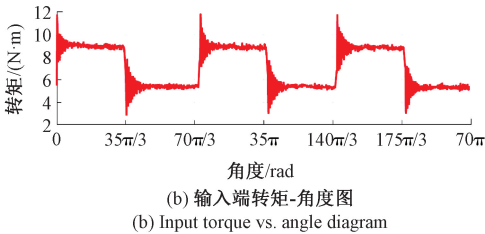


图 14 NGW 行星减速器扭矩-角度图

Fig. 14 Torque vs. angle diagram for NGW planetary reducer

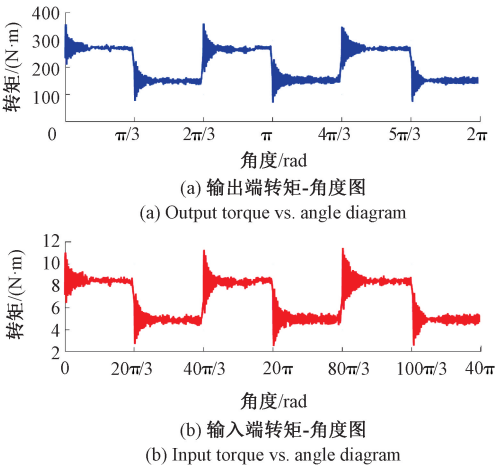


图 15 NW 行星减速器扭矩-角度图

Fig. 15 Torque vs. angle diagram for NW planetary reducer

表 3 能量损耗测试结果

Table 3 Energy loss test results (J)

类型	测试点 1	测试点 2	测试点 3	均值
行星摆线减速器	26. 873 8	30. 730 6	30. 104 6	29. 236 3
NGW 行星减速器	10. 833 6	11. 036 4	10. 985 4	10. 951 8
NW 行星减速器	6. 898 5	7. 128 5	8. 012 4	7. 346 5

对上述测试点取平均值,根据评价方法对两类减速器的反向传动性能进行评价,评价结果如表 4 所示。

表 4 动态评价结果

Table 4 Dynamic evaluation results

类型	评价
行星摆线减速器	0. 139 6
NGW 行星减速器	0. 052 3
NW 行星减速器	0. 035 1

4. 4 不同转速下的动态反向传动性能

对行星摆线减速器、NGW 行星减速器和 NW 行星减速器分别取 $T_0=200\text{ N}\cdot\text{m}$, $k=1/4$, $T_c=\pi/3$ 在不同输入

转速下进行测试。每个周期为 1 个测试点,共 3 个测试点。能量损耗测试结果如图 16~18 所示。

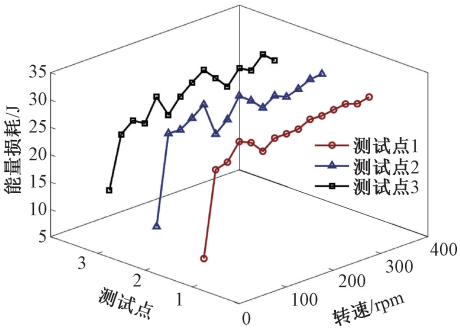


图 16 行星摆线减速器不同转速下能量损耗

Fig. 16 Energy loss of planetary cycloidal reducer at different speeds

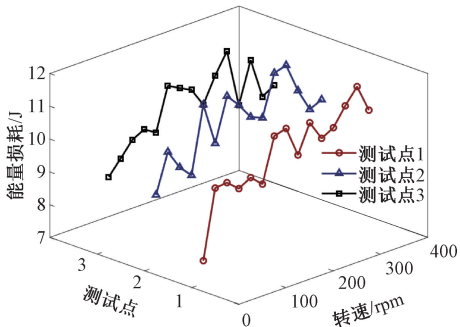


图 17 NGW 行星减速器不同转速下能量损耗

Fig. 17 Energy loss of NGW planetary reducer at different speeds

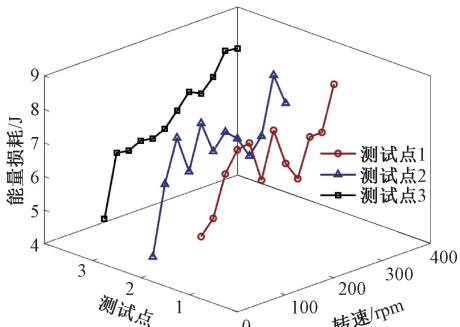


图 18 NW 行星减速器不同转速下能量损耗

Fig. 18 Energy loss of NW planetary reducer at different speeds

减速器的能量损失会随转速的变化而变化,即反向传动性能会随转速的变化而变化,大体呈现随转速增大,反向传动性能逐渐变差;减速器在低速时能量损失不明显,其原因在于低速时摩擦较小,且转动惯量影响较小,易改变运动状态。

通过上述分析发现:1) 转速对减速器反向传动性能

有影响;2)减速器反向传动性能具有动态性;3)不同类型的减速器反向传动性能差异大。

5 价值与应用

在减速器设计中,目前对提升减速器的反向传动性能尚缺乏有效的设计手段。通过研究可以发现,减速器的反向传动性能与零部件的转动惯量有关,尤其是靠近输入端的零部件,其影响最为明显,合理优化零部件的转动惯量可以有效提升减速器的反向传动性能;同时反向传动性能与减速器的传动比及内部摩擦有关,通过合理的分配每一级传动中齿数分配及多级之间传动比分配以及改善内部润滑可以有效改善反向传动性能。

在减速器测试评价中,了解反向传动性能的动态性具有更重要的意义。反向启动转矩仅是反向传动过程中的一种特殊情况,对反向传动性能动态性的认识不全面导致测试及使用过程中无法准确对扭矩进行估计。基于能量法,可以有效的用于表征减速器的反向传动性能,为减速器的反向传动性能分析提供了一个新方向。

6 结 论

1) 分析了减速器正反向传动过程,论证了反向传动性能具有动态性。

2) 给出了考虑传动比、转动惯量、摩擦、转速的反向驱动扭矩模型。

3) 提出了基于能量传递的反向传动性能测试及评价方法,能量损失越大,反向传动性能越差。

4) 通过试验,验证了减速器反向传动性能的动态性,厘清了不同减速器在不同转速情况下的反向传动性能变化。

这些结论对引导减速器的反向传动性能设计、制订反向传动性能测试方案、正确评价减速器的反向传动性能,都有理论与工程应用价值。

参考文献

[1] 陶永, 万嘉昊, 王田苗, 等. 构建具身智能新范式: 人形机器人技术现状及发展趋势综述[J]. 机械工程学报, 2025, 61(15): 121-147.

TAO Y, WAN J H, WANG T M, et al. Establishing a new paradigm of embodied intelligence: A review of the current status and development trends in humanoid robot technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(15): 121-147.

[2] PAUL R L. Performance measurement and evaluation of general purpose manipulators[C]. Performance Evaluation of Programmable Robots and Manipulators, 1976,

459: 69-81.

- [3] DU Q H, ZHANG T P, YANG G L, et al. A review of powered backdrivability of robot actuators for human-robot interaction[C]. 2021 IEEE 16th Conference on Industrial Electronics and Applications, 2021: 1115-1120.
- [4] KIUCHI M, FUJIMOTO Y, TSUJI T. Axial torque estimation based on backlash detection for reduction gear using encoder information [J]. Advanced Robotics, 2025, 39(10): 566-577.
- [5] BERGMANN L, LÜCK O, VOSS D, et al. Lower limb exoskeleton with compliant actuators: Design, modeling, and human torque estimation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2023, 28(2): 758-769.
- [6] 肖瑞鑫. 穿戴式外骨骼机器人双向驱动关节减速器设计方法研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2023.
- XIAO R X. Research of bidirectional drive joint reducer design method for wearable exoskeleton robot [D]. Ningbo: Ningbo University, 2023.
- [7] SHAN Z X, ENDO M, TSUTSUI Y, et al. Improving back-drivability of robot joint by reducing reflected inertia using multi-motor system[C]. 2025 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2025: 414-421.
- [8] 李凯, 袁峰, 胡英辉. 电动舵机减速器扭矩测量误差分析与补偿[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(10): 2271-2278.
- LI K, YUAN F, HU Y H. Torque measurement error analysis and compensation of electrical steering engine decelerator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(10): 2271-2278.
- [9] HEO U, KIM S J, KIM J. Backdrivable and fully-portable pneumatic back support exoskeleton for lifting assistance[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(2): 2047-2053.
- [10] WENSING P M, WANG A, SEOK S, et al. Proprioceptive actuator design in the MIT Cheetah: Impact mitigation and high-bandwidth physical interaction for dynamic legged robots[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(3): 509-522.
- [11] FU G X, ZHU J Y, WANG Z L, et al. Mechatronic design and implementation of a low-noise powered knee prosthesis with high backdrivability [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2023, 28(6): 3180-3190.
- [12] LASCHOWSKI B, MCPHEE J. Energy-efficient actuator

- design principles for robotic leg prostheses and exoskeletons: A review of series elasticity and backdrivability[J]. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2023, 18(6): 060801.
- [13] YAMADA T, OKUMATSU Y, KAIMORI H, et al. Design and analysis of service robot motor with high torque and high back drivability focusing on the torque/inertia ratio[C]. 2024 27th International Conference on Electrical Machines and Systems, 2024: 413-418.
- [14] 朱杰, 吴立仁. 具有高反向驱动性的工业机械臂扰动补偿方法[J/OL]. *机械设计与制造*, 1-5 [2025-12-27].
- ZHU J, WU L R. Disturbance compensation method for industrial robot manipulator with high backdrivability[J/OL]. *Machinery Design & Manufacture*, 1-5 [2025-12-27].
- [15] 俞志勇, 石照耀, 程慧明, 等. 精密减速器回差试验台的精度特性[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(16): 2372-2382.
- YU ZH Y, SHI ZH Y, CHENG H M, et al. Accuracy characteristic of test bench of lost motion of precision reducer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(16): 2372-2382.
- [16] 俞志勇. 精密减速器测试台的精度特性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2024.
- YU ZH Y. Research on accuracy characteristic of testing machine for precision reducer [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2024.
- [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. Research on measurement and evaluation system of precision reducer lost motion[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(6): 56-63.
- [18] 程慧明, 石照耀, 于渤, 等. 服务机器人小型关节回差测量的实验研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(5): 48-57.
- CHENG H M, SHI ZH Y, YU B, et al. Experiment research on hysteresis measurement of the small-size joint of service robot [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(5): 48-57.

作者简介



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, 主要研究方向为精密测试技术和仪器、齿轮工程和精密减速器。

E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn

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



左广祥, 2020年于青岛理工大学获得学士学位, 现为北京工业大学博士研究生, 主要研究方向为精密传动及测试技术。

E-mail: zuo_guangxiang@163.com

Zuo Guangxiang received his B. Sc. degree from Qingdao University of Technology in 2020. He is currently a Ph. D. candidate at Beijing University of Technology. His main research interests include precision transmission and testing technology.