

文章编号 1004-924X(2018)09-2150-09

精密减速器回差测量的现状与趋势

石照耀^{1*}, 徐 航¹, 韩方旭², 林家春¹, 王 辉¹

(1. 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;

2. 工业和信息化部计算机与微电子发展研究中心 中国软件测评中心, 北京 100124)

摘要:回差是表征精密减速器性能的关键指标,其定义貌似简单,但蕴含了复杂的测量及评价问题,本文从静态测量和动态测量两个方面论述了当前精密减速器的回差测量原理和方法,对比分析了各种测量方法的异同和优缺点,分析了当前工业领域常用的评价方法,指出评价方法的不同是造成评价结果差异的重要原因。最后指出,建立精密减速器综合性能动态测量系统是适应工业需求的必然趋势,同时当前亟需建立一套完整的精密减速器回差测试规范及评价标准。

关键词:精密减速器;回差;静态测量;动态测量;评价方法

中图分类号:TH132.46;TP242.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182609.2150

Current status and trends in precision reducer lost motion measurement

SHI Zhao-yao^{1*}, XU Hang¹, HAN Fang-xu², LIN Jia-chun¹, WANG Hui¹

(1. *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;*

2. *China Software Testing Center, Development Research Center of Computer and Microelectronics, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100124, China)*

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

Abstract: Lost motion is the key index for describing the performance of precision reducers. Although its definition appears simple, it involves complex measurement and evaluation problems. In this paper, the principle and method of precision reducer lost motion measurement were discussed from the aspects of static and dynamic measurements. The similarities and differences of different measurement methods, and their respective advantages and disadvantages were analyzed. In addition, the commonly used evaluation methods in the industrial field were studied, and it is emphasized that the differences in the evaluation methods are primarily responsible for the differences in the obtained results. Finally, it is noted that the establishment of a dynamic measurement system for the comprehensive performance of precision reducers is imperative for meeting the industrial demand. At the same time, it is also important to establish a complete set of specifications and evaluation criteria for precision reducer lost motion measurement.

收稿日期:2018-02-09;修订日期:2018-04-02.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2015AA043002)

Key words: precision reducer; lost motion; static measurement; dynamic measurement; evaluation method

1 引言

精密减速器是工业机器人的核心部件,其性能的好坏直接影响整机的性能。机器人领域应用的减速器主要有RV减速器和谐波减速器^[1]。相比之下,RV减速器具有更高的刚度和回转精度,因此多用在机座、大臂、肩部等重负载的位置;而谐波减速器多应用在小臂、腕部或手部。

回差是表征精密减速器性能的关键指标,它是指减速器运动方向改变时,输出端在转角上的滞后量。精密减速器的回差主要包括:由传动系统的纯间隙引起的几何回差 δ_g (又称为空程回差或间隙回差);由传动元件扭转变形引起的弹性回差 δ_e ;由温度变化引起的温度回差 δ_t ;在服役过程中由磨损引起的磨损回差 δ_w 。

回差的存在导致输入轴在运动方向改变时,输出轴会有转角上的滞后,两者会在短时间内失去联系,使输出突然中断,从而造成运动传递关系的非线性^[2]。而机器人中的精密减速器经常做往复运动,导致系统输入与输出的转角偏差频繁出现,整个系统的重复定位精度和动态性能必然受到严重影响。精密减速器的回差测量、评价和控制是提高精密减速器性能的重要手段。目前,高精度的精密减速器回差在 $30''$ 以内,低精度的也在 $9'$,因此回差测量时,要求测量设备应具有较高的测量精度及强抗噪能力。同时为了满足工业领域的测量需求,测量设备应具有较高的测量效率。拥有RV减速器国际市场垄断地位的日本Nabtesco公司,早已建立了完善的测试系统,保证在出厂前对其所有RV减速器产品进行全面的精度和性能测试,但是由于技术封锁,无法获取技术细节。国内对精密减速器的研究起步较晚,且多为理论研究^[3],在精密减速器回差测量方面,部分国内学者开展了回差的静态、动态测量和相关测量设备的研制,并采用不同方法对回差进行评价,取得了一定的成果。

2 精密减速器回差测量现状

目前,国内外对于精密减速器的回差测量尚未形成统一的标准,也没有成熟的商用设备。研究者提出了多种测量方法,根据测量原理的不同,可以分为静态测量和动态测量^[4]。

2.1 静态测量

静态测量是指在静止状态下,从精密减速器回差的定义入手,测量运动方向改变时输出端在转角上的滞后量,主要有多面体法和滞回曲线法。

2.1.1 多面体法

多面体法采用测角装置、自准平行光管、多面棱体等对精密减速器的回差进行测量,原理如图1所示。

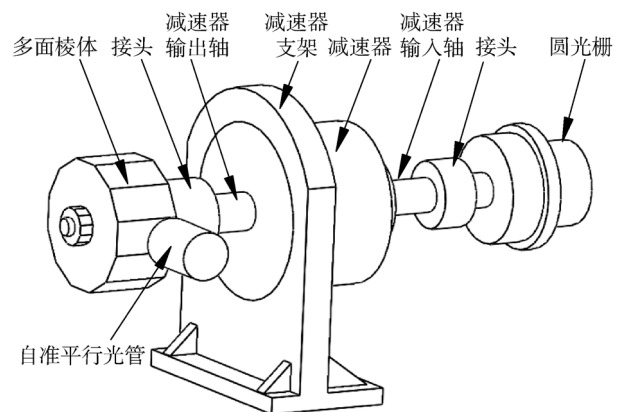


图1 多面体法测量原理

Fig. 1 Measuring principle of polyhedron method

测量时将测角装置安装在输入轴,并通过采集卡采集输入轴的转角,多面棱体固定在输出轴,调整自准平行光管垂直多面体的一个面,并对多面体进行观测和定位。当输入轴正转改为反转时,两极限转角之差除以传动比即为输出轴回差^[4-5],即:

$$\delta_{out} = \frac{\delta_{in}}{i}, \quad (1)$$

其中: δ_{out} 为减速器输出轴回差; δ_{in} 为减速器输入轴回差; i 为传动比。

目前,多面体测量法多采用12面棱体实现,可以测得输出端12个位置的回差^[4,6-7]。这种测

量方法理论上具有较高的精度,多面体的精度可达 $\pm(1''-2'')$,自准直光管的精度可达 $\pm 1''$ 。但由于多面体面数不能过多,因此这种方法可测传动比范围及测量点数受到一定的限制^[8]。

为了获得更多测量点的回差信息,部分学者将输出端的多面棱体用圆光栅代替,用伺服电机控制输入端的步进角和正反转,在空载下对减速器的回差进行了多点静态测量^[9-10]。这种方法的优点有:(1)采用伺服电机驱动,提高了测量的自动化程度;(2)采用高精度圆光栅采集输入输出端转角,在保证测量精度的同时,可以测量更大传动比的减速器。

2.1.2 滞回曲线法

由于内部间隙、弹性变形、摩擦等的耦合作用,滞回特性在精密减速器中普遍存在^[11-12],通常表现为系统在正反向行程上所对应输出的不一致现象,而减速器、齿轮副传动中表现出的间隙,可以看做是滞回现象的特例^[13]。目前,研究者主要从运动控制的角度,对精密减速器的滞回特性进行分析建模。常用的建模方法有:考虑加工误差和弹性变形的有限元建模法^[14-15];基于非线性扭矩和摩擦的建模法^[16-20];基于经典迟滞模型的建模法,如 Maxwell^[21-22]、Bouc-Wen-like^[12]、Preisach^[23-24]模型等。在模型验证方面,采用输出端锁紧,输入端驱动的方式,获得精密减速器的滞回曲线^[16-17,22]。

工业领域通常采用滞回曲线法测量精密减速器的回差,并将精密减速器的几何回差定义为:施加 $\pm 3\%$ 额定扭矩以克服内部摩擦和油膜阻力,并且各部件接触良好的情况下,由传动链中的齿侧间隙、轴承间隙等几何因素引起的输出轴转角值,又称为空程回差或间隙回差。测量时,将精密减速器的一端锁紧,另一端正向梯度加载至额定扭矩,然后梯度卸载;以同样的方法,做反向梯度加载、卸载,实时采集扭矩和扭转角信号,并绘制滞回曲线,如图 2 所示。

实现方式主要有两种:输入端锁紧,输出端加载,测输出端回差;输出端锁紧,输入端加载,测输入端回差。采用哪种方式,需要根据精密减速器的结构和测试条件而定。输入端加载方式加载量小,加载装置易于实现,适合大传动比的减速器测量,且输入端的扭转角相对较大,采用等精度的测角仪,可以实现更高精度的测量。输出端加载可

以实现输出端回差的直接测量,不存在折算关系,但加载装置庞大,并且对测角仪的精度要求更高^[8]。

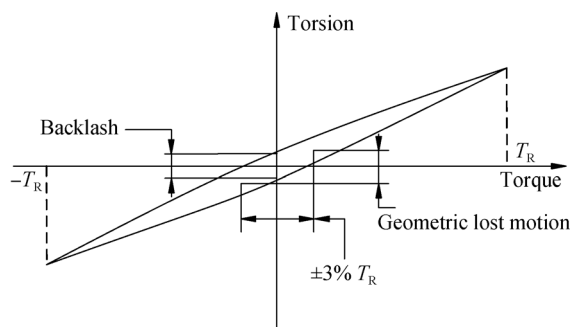


图 2 滞回曲线

Fig. 2 Hysteresis curves

扭矩的梯度加载和转角、扭矩的精密测量是滞回曲线法测量的关键,目前已有学者开展了多传感器信息融合技术的研究。加载方式从砝码盘、千斤顶等人工加载方式到磁粉制动器、伺服电机自动加载,自动化程度不断提高^[25-26]。目前,扭转角的测量多采用高精度圆光栅,为了消除安装偏心等的影响,采用双读数头式结构。

对于回差的静态测量,由于传动元件的几何偏心等因素的影响,几何回差的大小随齿轮副的啮合位置不同而变化,因此通常需要进行多点测量,例如谐波减速器要求测量点不少 72 个^[5],RV 减速器要求测量点数不少于针齿数^[25],因此整体测量效率并不高。

2.2 动态测量

动态测量是指在接近精密减速器的运行状态下对精密减速器回差进行的动态连续测量,主要测量方法为双向传动误差法。

双向传动误差法的测量原理如图 3 所示。这种方法是在稳定载荷下,首先测出精密减速器的正向传动误差曲线 $TE_L(\theta)$,然后将输入轴多转一定的角度再反向转到原来的位置(消除传动系统中侧隙的影响),以同样的方法测出减速器的反向传动误差曲线 $TE_R(\theta)$,则反向传动误差曲线与正向传动误差曲线之差为回差曲线,即:

$$\delta(\theta) = TE_R(\theta) - TE_L(\theta), \quad (2)$$

其中 $\delta(\theta)$ 为精密减速器的回差曲线。动态测量获取的回差曲线如图 4 所示。

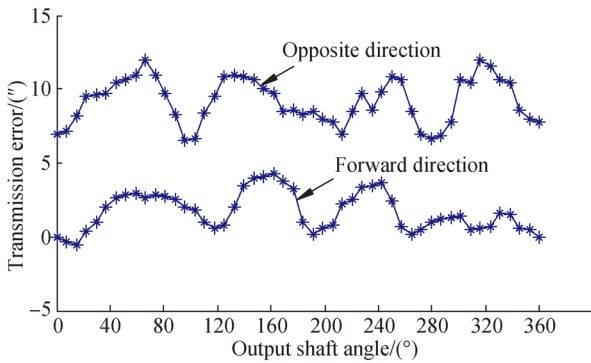


图 3 双向传动误差法测量原理

Fig. 3 Measuring principle of bidirectional transmission error

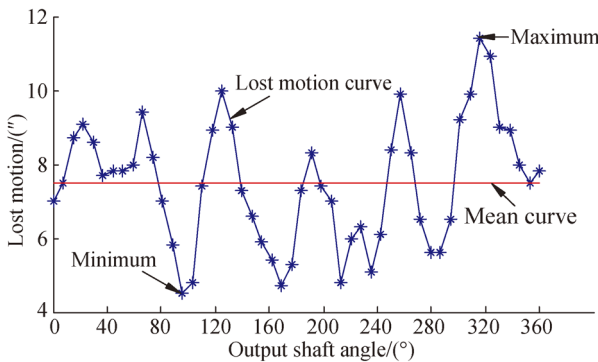


图 4 动态测量回差曲线

Fig. 4 Lost motion curve of dynamic measurement

文献[27]深入分析了齿轮单面啮合技术的发展, 指出该技术在齿隙测量中的重要应用, 为精密减速器回差的动态测量提供了理论依据[27]。文献[28]研制的谐波减速器传动精度测量仪便是基于此原理, 测量精度可以达到 $\pm 5''$ [28]。

双向传动误差法可以在传动链误差检查仪上实现, 有利于节省仪器开发成本, 同时配以高精度的角度测量元件和加载装置, 可以实现不同载荷下回差的高效精密测量。但在正反向测量时, 要确保测得同一位置的角度值, 因此对控制系统的定位精度要求较高。

2.3 各种测量方法对比

多面体法无需加载装置, 测量设备易于实现, 但在无载情况下测量, 由于减速器内部摩擦及油膜阻力的存在, 并不能保证内部充分啮合, 测得回差值将小于理论值; 同时测量过程中需要观测输出端角度的变化情况, 人为因素引入的随机误差增大, 降低了测量精度。

滞回曲线法可以获得精密减速器的齿隙、几何回差和扭转刚度等信息, 且测量装置具有结构

简单、易于实现等特点, 是目前精密减速器回差测量的主要手段。但单次循环加载、卸载过程中, 扭矩、扭转角的测量数据从 0 点记录, 获得的滞回曲线并不封闭, 需要对其进行分段拟合才可获得一条封闭的滞回曲线, 测量数据受随机误差的影响较大, 降低了其测量精度。

回差的静态测量, 通常要求进行多点测量, 因此其整体测量效率并不高。如果减小测量点数, 会导致测量数据并不能涵盖回差的全部极值点, 降低了测量数据的可信度。

动态测量法能够进行连续测量, 反映信息更全面, 效率更高, 其优越性主要表现在: (1) 在不同负载下实现回差的动态测量, 更符合减速器的实际工况; (2) 只需要正反向两个测量过程, 即可测得一定负载下的回差值, 测量效率更高, 适合工业现场的应用; (3) 测量过程是动态连续的, 方便进行信号的频谱分析, 以及误差溯源和定位; (4) 回差曲线涵盖了回差的全部极值点, 能够真实反映回差的动态变化规律, 同时也可以反映回差与负载的动态映射关系, 蕴含的信息更全面。

几种精密减速器回差测量方法的对比如表 1 所示。

表 1 精密减速器回差测量方法对比

Tab. 1 Comparison of measurement methods for lost motion of precision reducer

测量方法	关键技术		性能指标	
	角度测量	加载装置	测量精度	测量效率
多面体法	圆光栅、多面体	无载	●●	●
滞回曲线法	圆光栅	砝码盘、千斤顶、磁粉制动器、伺服电机	●●	●
双向传动误差法	高精度圆光栅	磁粉制动器、液压缸等	●●●	●●●

注: 优: ●●●, 良: ●●, 一般: ●。

3 精密减速器的回差评价

3.1 回差评价方法

在全生命周期内对精密减速器的回差进行测量时, 回差的测量数据 $\delta(\theta)$ 与测量位置、扭矩、服役时间有关, 可以表示为三者的函数形式, 如下:

$$\delta(\theta) = F(P, T, H), \quad (3)$$

其中: P 表示测量位置, $P = \{P_i | i \in [0, 2\pi]\}$;

T 表示扭矩, $T = \{T_j | j \in [0, T_R]\}$, T_R 为额定扭矩; H 表示服役时间, $H = \{H_k | k \in [0, L_h]\}$, L_h 为额定服役寿命。

用 $e_{i,j,k}$ 表示 $F(P_i, T_j, H_k)$ 点的回差值, 则基于离散化的测量数据, 精密减速器全生命周期的回差信息可以表示为^[29]:

$$\delta(\theta) = \left\{ \begin{array}{l} \{e_{0,0,0} \cdots e_{0,j,0} \cdots e_{0,T_R,0}\} \cdots \{e_{0,0,k} \cdots e_{0,j,k} \cdots e_{0,T_R,k}\} \cdots \{e_{0,0,L_h} \cdots e_{0,j,L_h} \cdots e_{0,T_R,L_h}\}; \\ \vdots \\ \{e_{i,0,0} \cdots e_{i,j,0} \cdots e_{i,T_R,0}\} \cdots \{e_{i,0,k} \cdots e_{i,j,k} \cdots e_{i,T_R,k}\} \cdots \{e_{i,0,L_h} \cdots e_{i,j,L_h} \cdots e_{i,T_R,L_h}\}; \\ \vdots \\ \{e_{2\pi,0,0} \cdots e_{2\pi,j,0} \cdots e_{2\pi,T_R,0}\} \cdots \{e_{2\pi,0,k} \cdots e_{2\pi,j,k} \cdots e_{2\pi,T_R,k}\} \cdots \{e_{2\pi,0,L_h} \cdots e_{2\pi,j,L_h} \cdots e_{2\pi,T_R,L_h}\}. \end{array} \right. \quad (4)$$

则全生命周期内回差的最大值 δ_{\max} 、最小值 δ_{\min} 、均值 $\bar{\delta}$ 分别为:

$$\delta_{\max} = \text{MAX}\{F(P_i, T_j, H_k)\}, \quad (5)$$

$$\delta_{\min} = \text{MIN}\{F(P_i, T_j, H_k)\}, \quad (6)$$

$$\bar{\delta} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{T_R} \cdot \frac{1}{L_h} \int_0^{2\pi} \int_0^{T_R} \int_0^{L_h} F(P, T, H) dPdTdH. \quad (7)$$

当对精密减速器回差进行测量评价时, 可将式(3)中的任意一个变量或两个变量固定, 讨论回差与其它变量的关系。如表 2 所示, $F(P, T_j, H_k)$ 表示固定变量服役时间 $H = H_k$ 、负载扭矩 $T = T_j$, 回差随测量位置 P 的变化曲线, 用于表征稳定载荷下动态测量的回差曲线。

当采用滞回曲线法测量精密减速器的回差时, 固定变量服役时间 $H = H_k$ 和测量位置 $P = P_i$, 在单次循环加载、卸载过程中, 可以获得测量位置的一条滞回曲线, 与 y 轴的截距为齿隙 δ_b , 其正、反向峰值点的差值即为回差。改变加载的最大扭矩量, 可以获得测量位置的一系列滞回曲线。把所有滞回曲线每次循环的峰值点(开始卸载点)连接起来, 能够得到测量位置的无滞回曲线, 如图 5 所示, 它反映了不同扭矩下峰值点的变化规律。将齿隙、不同扭矩下的回差值连接起来, 即可得到测量位置的回差曲线 $F(P_i, T, H_k)$, 如图 6 所示, 它反映了测量位置处回差随扭矩的变化规律。

表 2 精密减速器回差测量函数类型

Tab. 2 Function types of lost motion measurement for precision reducer

固定变量	自由变量	函数形式	图形类型	含义及作用
P, T, H	—	$F(P_i, T_j, H_k)$	一个点	表征全生命周期内测量数据的离散点
P, T	H	$F(P_i, T_j, H)$	一条曲线	静态单点测量, 表征测量位置一定扭矩下回差随服役时间的变化规律
P, H	T	$F(P_i, T, H_k)$	一条曲线	静态单点测量, 表征单点静态测量回差曲线
T, H	P	$F(P, T_j, H_k)$	一条曲线	动态测量, 表征稳定载荷下动态测量回差曲线
P	T, H	$F(P_i, T, H)$	一个曲面	静态单点测量, 表征测量位置处回差随扭矩、服役时间的变化规律
T	P, H	$F(P, T_j, H)$	一个曲面	动态测量, 表征动态测量回差曲线随服役时间的变化规律
H	P, T	$F(P, T, H_k)$	一个曲面	静态多点测量或动态测量, 表征回差随测量位置、扭矩的变化规律
—	P, T, H	$F(P, T, H)$	一组曲面	表征全生命周期内回差的全部信息

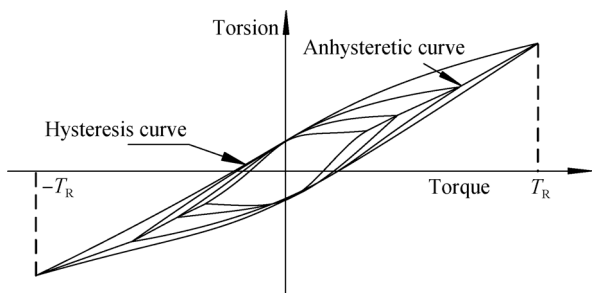


图 5 无滞回曲线

Fig. 5 Anhyseretic curves

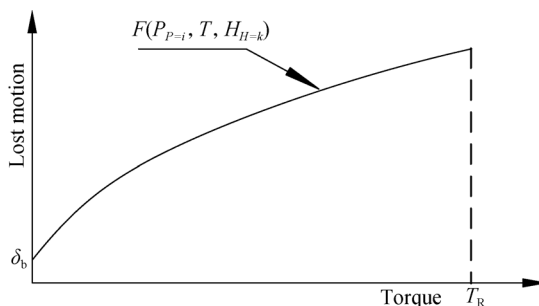


图 6 静态测量回差曲线

Fig. 6 Lost motion curve of static measurement

服役 k 小时后,当改变测量位置 P 时,测得一系列的回差曲线 $F(P, T, H_k)$ 。基于离散化的测量数据,将式(4)简化为式(8)的矩阵形式,其行向量为单点测量评价依据,列向量为多点测量评价依据。

$$\delta(\theta) = (F(P_0, T, H_k) \cdots F(P_i, T, H_k) \cdots F(P_{2\pi}, T, H_k))^T = \begin{pmatrix} e_{0,0,k} \cdots e_{0,j,k} \cdots e_{0,T_R,k} \\ \vdots \\ e_{i,0,k} \cdots e_{i,j,k} \cdots e_{i,T_R,k} \\ \vdots \\ e_{2\pi,0,k} \cdots e_{2\pi,j,k} \cdots e_{2\pi,T_R,k} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

目前,工业领域对出厂的精密减速器进行回差精度评定时,主要有两种方式:一是直接加载至 $3\% T_R$,并将正、反向峰值点的差值作为几何回差的评价依据,即取评价矩阵(8)中 $j=0.03 T_R, k=0$ 的列向量评价整机的几何回差;另一种是单次循环加载至额定扭矩 T_R ,取 $\pm 3\% T_R$ 处正、反向扭转角均值之差作为几何回差的评价依据。假定在输出轴一转范围内测量点数为 m ,则多点测量几何回差的最大值 $\delta_{g, \max}$ 、最小值 $\delta_{g, \min}$ 、均值 $\bar{\delta}_g$ 分别为:

$$\delta_{g, \max} = \text{MAX}\{F(P, T_{0.03 T_R}, H_0)\}, \quad (9)$$

$$\delta_{g, \min} = \text{MIN}\{F(P, T_{0.03 T_R}, H_0)\}, \quad (10)$$

$$\bar{\delta}_g = \text{MEAN}\{F(P, T_{0.03 T_R}, H_0)\} = \frac{1}{m} \sum_{n=0}^{m-1} e_{\frac{2\pi n}{m}, 0, 0.03 T_R, 0}. \quad (11)$$

当采用双向传动误差法测量时,固定变量服役时间 $H = H_k$ 和负载扭矩 $T = T_j$,将正、反向传动误差曲线记为 $TE_L(P, T_j, H_k)$ 、 $TE_R(P, T_j, H_k)$ 。对测量数据进行分析处理,可以获得服役 k 小时后, j 负载下的回差曲线,如式(12):

$$F(P, T_j, H_k) = TE_R(P, T_j, H_k) - TE_L(P, T_j, H_k). \quad (12)$$

服役 k 小时后,当改变负载扭矩 T 时,测得一系列的回差曲线 $F(P, T, H_k)$,可以将式(4)简化为式(13)的矩阵形式。

$$\delta(\theta) = (F(P, T_0, H_k) \cdots F(P, T_j, H_k) \cdots F(P, T_{T_R}, H_k))^T = \begin{pmatrix} e_{0,0,k} \cdots e_{i,0,k} \cdots e_{2\pi,0,k} \\ \vdots \\ e_{0,j,k} \cdots e_{i,j,k} \cdots e_{2\pi,j,k} \\ \vdots \\ e_{0,T_R,k} \cdots e_{i,T_R,k} \cdots e_{2\pi,T_R,k} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

采用双向传动误差法测量时,多采用 $j=0, k=0$ 的评价方式,即取评价矩阵 $j=0, k=0$ 的行向量,并将其最大值、最小值或均值作为整机的评价指标,如下:

$$\delta_{\max} = \text{MAX}\{F(P, T_0, H_0)\} = \text{MAX}(e_{0,0,0} \cdots e_{i,0,0} \cdots e_{2\pi,0,0}), \quad (14)$$

$$\delta_{\min} = \text{MIN}\{F(P, T_0, H_0)\} = \text{MIN}(e_{0,0,0} \cdots e_{i,0,0} \cdots e_{2\pi,0,0}), \quad (15)$$

$$\bar{\delta} = \text{MEAN}\{F(P, T_0, H_0)\} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(P, T_{T=0}, H_{H=0}) dP. \quad (16)$$

综上所述,目前工业领域采用的评价方式多基于式(3)固定一个或两个变量,讨论回差与其它变量的关系,采用式(4)的简化形式,仅选取几何回差的最大值或均值作为评价指标,无法反映全生命周期内弹性回差、磨损回差等信息,评价指标不完善,尚未建立一套完整的评价体系。同时,由于精密减速器回差测量没有统一的标准和规范,导致评价方法也不一致,各类评价方法及特点如表 3 所示。

表 3 回差评价方法

Tab. 3 Evaluation methods of lost motion

测量方法	评价方法	特点
静态测量	极值法、均值法	取 $\pm 3\%$ 额定扭矩下最大值或均值作为整机的回差值;数据可信度低
动态测量	极值法、均值法	数据可信度高,但回差评价时施加的载荷量,目前尚无统一的标准

3.2 回差评价结果的差异

测量方法不同,测量结果也不一致,即使采用同样的测量方法,评价方法的不同也会造成评价结果的差异。

多面体法由于没有施加载荷,并不能保证各部件紧密接触,实质测得的是齿隙,导致测量结果偏小。滞回曲线法需要对测量数据进行拟合,拟合方法不同,也会导致评价结果的差异。常用的拟合方法有一元线性回归法、多项式拟合法、BP 神经网络法等^[30]。评价结果的精度,严重依赖于数据的拟合算法。

滞回曲线多点测量评价法,实质是一种统计学评价方法,评价结果的可信度与测量精度、测量点数密切相关;而动态测量法是连续测量,其回差曲线可以有效反映回差的极值点,蕴含信息更丰富。式(11)和式(16)表明,施加载荷的不统一,也会造成静态测量与动态测量评价结果的差异。

4 精密减速器回差测量的发展趋势

4.1 精密减速器回差动态测量技术研究

基于双向传动误差法的回差动态测量具有效率高,蕴含信息丰富等优点,是未来的发展方向。但动态测量理论还不完善^[31],以下问题都是未来需要重点研究的内容:基于多传感器信息融合技术研究数据采集方法,保证单次、多次重复测量可以获得同一位置的回差值;双向传动误差法测量精密减速器的几何回差时,施加的负载扭矩目前尚无统一的标准,基于不同负载下回差曲线的变化规律,研究几何回差的获取方法;不同负载下的动态回差曲线,反映了弹性变形与负载扭矩的内在联系,研究扭转刚度的计算模型,对于扩展双向传动误差法的功能应用,提高精密减速器综合性能的测量效率具有重要意义。

4.2 综合性能测量设备的研制

精密减速器的主要性能参数包括传动误差、回差、扭转刚度等,目前的测量方式多为单一性能的测量,不同性能需要在多台设备上测量,效率低,因此开发精密减速器综合性能测量设备是未来发展的重要趋势。

基于此,本课题组研制了一台 RV 减速器综合性能测试仪,如图 7 所示。一次装夹可以实现传动误差、回差、扭转刚度等性能的精密测量。对于回差的测量,既可以采用输出端锁紧,输入端加载的静态测量,也可以实现不同载荷下回差的动态测量,具有较好的应用前景^[32-34]。

4.3 精密减速器回差测量与评价标准

建立一套精密减速器回差测量与评价标准,是当前机器人工业发展亟待解决的关键问题,也是提升精密减速器传动性能的重要保障。

精密减速器回差测量标准包括测量设备、测量步骤、测量方法、试验数据采集与处理等的基本要求。



图 7 RV 减速器综合性能测试仪

Fig. 7 RV reducer comprehensive performance tester

将精密减速器的回差测量与评价扩展至全生命周期内,即综合考虑测量位置、负载扭矩、服役时间与回差的内在联系,构建全生命周期的回差评价体系。基于回差的内蕴特性,构建评价指标系统,包括精度指标、精度保持指标;建立各性指标的评价模型及评价方法,实现全生命周期内精密减速器回差性能的综合评价。上述研究未来将为机器人关节误差修正及精度控制提供理论支持和数据支撑。

4.4 测量数据的分析与利用

测量的一个重要目的是对制造环节进行反馈。开发集精密测量与智能评价为一体的系统,确定高辨识精度和强抗噪能力的精密减速器误差溯源方法,进行误差的溯源与定位,有利于提高精密减速器的加工制造精度。因此,误差的溯源将为制造环节提供有价值的反馈信息。

5 结 论

滞回曲线法测量系统结构简单、易于实现,目前多为工业领域采用,但测量效率低,无法满足工业现场的测量需求。动态测量法具有效率高、反映信息全面等优点,应用前景广阔,但测量理论、评价方法还不完善,有待于深入研究。评价方法不统一,尚未建立面向功能应用的精密减速器回差评价体系,是导致评价结果差异的主要原因。目前,亟需建立一套完整的精密减速回差测试规范及评价标准。精密减速器参数众多,研制综合性能测量设备是未来发展的重要趋势,同时测量数据的分析与利用也越来越为学者们所重视。

参考文献:

- [1] 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. (in Chinese)
- [2] 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. (in Chinese)
- [3] 何卫东,单丽君. RV减速器研究现状与展望[J]. 大连交通大学学报,2016,37(5):13-18.
HE W D, SHAN L J. Status and development of RV reduce [J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2016,37(5):13-18. (in Chinese)
- [4] 李瑰贤,吴俊飞. RV30-A II型变厚齿轮减速器试验研究[J]. 机械传动,2005,29(4):4-5,8.
LI G X, WU J F. Test research of RV30-A II bevo-loid gear reducer [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2005,29(4):4-5,8. (in Chinese)
- [5] GB/T 30819-2014, 机器人用谐波齿轮减速器[S]. GB/T 30819-2014, Harmonic drive gear reducers for robots [S]. (in Chinese)
- [6] 何卫东,李力行,王秀琦,等. RV减速器样机研制及试验研究[J]. 大连铁道学院学报,1999(2):59-64.
HE W D, LI L X, WANG X Q, et al.. Development of sample machine and test study of RV reducer [J]. *Journal of Dalian Railway Institute*, 1999(2):59-64. (in Chinese)
- [7] 吴俊飞. 新型可调间隙RV减速器回差分析与实验研究[J]. 广州大学学报:自然科学版,2002(5):8-12.
WU J F. Backlash analysis and test research on the new adjustable clearance RV reducer [J]. *Journal of Guangzhou University: Natural Science Edition*, 2002(5):8-12. (in Chinese)
- [8] 齿轮手册编委会. 齿轮手册(上)[M]. 第二版. 北京:机械工业出版社,2006.
Gear Brochure Committee. *Gear Manual (Part 1)* [M]. Second Edition. Beijing: China Machine Press,2006. (in Chinese)
- [9] 王光建,蒋汉军. 新型双曲柄变齿厚渐开线行星传动装置的研制及试验[J]. 机械设计,2011,28(5):62-65.
WANG G J, JIANG H J. Development and test of new double-crank conical involute planetary gears [J]. *Journal of Machine Design*, 2011,28(5):62-65. (in Chinese)
- [10] 刘中华. 新型精密行星传动精度实验测试与分析研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
LIU ZH H. *Research on New Precision Planetary Transmission Accuracy of Experimental Tests and Analysis* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)
- [11] RUDERMAN M, BERTRAM T. Modeling and observation of hysteresis lost motion in elastic robot joints [C]. *The 10th IFAC Symposium on Robot Control, Dubrovnik*, 2012:13-8.
- [12] MICHAEL R, TORSTEN B, MAKOTO I. Modeling, observation, and control of hysteresis torsion in elastic robot joints [J]. *Mechatronics*, 2014, 24(5): 407-415.
- [13] 黑沫. 精密谐波齿轮传动系统建模与控制方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2015.
HEIM. *Research on the Modeling and Control of Precision Harmonic Drive System* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] SEYFFERTH W, MAGHZAL A J, ANGELES J. Nonlinear modeling and parameter identification of harmonic drive robot transmissions [C]. *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nagoya, 1995: 3027-3032.
- [17] DHAOUADI R, GHORBEL F H, GANDHI P S. A new dynamic model of hysteresis in harmonic drives [J]. *Transactions on Industrial Electronics*, 2003, 50(6):1165-1171.
- [18] DHAOUADI R, GHORBEL F H, GANDHI P S. Modeling and analysis of hysteresis in harmonic drive gears [C]. *Proc. 16th IMACS World Congr.*, Lausanne, Switzerland, 2000, CD-ROM, File 611-2.
- [19] 黑沫,范世琦,廖洪波,等. 精密谐波传动系统建模[J]. 光学精密工程,2014,22(7):1842-1849.
HEI M, FAN SH X, LIAO H B, et al.. Modeling of precision harmonic drive system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014,22(7):1842-1849. (in Chinese)
- [20] 韩邦成,马纪军,李海涛. 谐波减速器的非线性摩擦建模及补偿[J]. 光学精密工程,2011,19(5):

- 1095-1103.
HAN B CH, MA J J, LI H T. Modeling and compensation of nonlinear friction in harmonic driver [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1095-1103. (in Chinese)
- [21] TJAHJOWIDODO T, AI B F, VAN B H. Non-linear modelling and identification of torsional behaviour in harmonic drives[C]. *Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration Engineering*, Leuven, Belgium, 2006:2785-2796.
- [22] TJAHJOWIDODO T, AI B F, VAN B H. Theoretical modelling and experimental identification of nonlinear torsional behaviour in harmonic drives [J]. *Mechatronics*, 2013, 23(5): 497-504.
- [23] PREISSNER C, ROYSTON T J, SHU D. A high-fidelity harmonic drive model [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 2012, 134(1): 011002.
- [24] 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)
- [25] 朱临宇. RV 减速器综合性能实验与仿真[D]. 天津: 天津大学, 2014.
ZHU L Y. *Experiment and Simulation on the Integrated Performance of RV Reducer* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [26] 吕勇, 陈青山, 刘力双, 等. 精密谐波齿轮输入轴扭转刚度和迟滞测试[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2013, 36(5): 523-526.
LÜ Y, CHEN Q SH, LIU L H, *et al.*. Test for torsional stiffness and hysteresis of input shaft of precision harmonica gear [J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 36(5): 523-526. (in Chinese)
- [27] 石照耀, 张旭. 齿轮单面啮合测量技术的发展及其应用[J]. *工具技术*, 2008(3): 10-15.
SHI ZH Y, ZHANG X. Development and application of gear single-flank testing technology [J]. *Tool Engineering*, 2008(3): 10-15. (in Chinese)
- [28] 张彦君. 一种新型谐波减速器传动精度测试仪器[J]. *装备制造技术*, 2011(6): 102-104.
ZHANG Y J. A new type of harmonic gearbox drive precision testing instruments [J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2011(6): 102-104. (in Chinese)
- [29] 王笑一, 石照耀. 基于全信息的齿轮精度评价体系[J]. *中国科学: 技术科学*, 2017, 47(1): 46-59.
WANG X Y, SHI ZH Y. Evaluation system of gear accuracy based on full information [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2017, 47(1): 46-59. (in Chinese)
- [30] 黄润青, 杨汝清, 陈亮, 等. BP 神经网络在减速器回差数据拟合中的应用[J]. *机械与电子*, 2002(5): 9-11.
HUANG R Q, YANG R Q, CHEN L, *et al.*. Applying of BP neural network in a reducer's backlash data fitting [J]. *Machinery & Electronics*, 2002(5): 9-11. (in Chinese)
- [31] 费业泰. 精度理论若干问题研究进展与未来[J]. *中国机械工程*, 2000(3): 255-256, 274.
FEI Y T. The development and tendency of some research problems on accuracy theory [J]. *China Mechanical Engineering*, 2000(3): 255-256, 274. (in Chinese)
- [32] 石照耀, 王晓玲, 齐浩然. 一种 RV 减速器综合性能测试仪中的新型结构; 中国, CN104880314A [P]. 2015-09-02.
SHI ZH Y, WANG X L, QI H R. A new type of structure of RV retarder comprehensive performance tester; China, CN104880314A [P]. 2015-09-02. (in Chinese)
- [33] 石照耀, 王晓玲, 林家春. RV 减速器综合性能测量仪; 中国, CN104568428A [P]. 2015-04-29.
SHI ZH Y, WANG X L, LIN J CH. RV reducer performance tester; China, CN104568428A [P]. 2015-04-29. (in Chinese)
- [34] 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)

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, 1988年于陕西机械学院获得硕士学位, 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



徐航(1984—), 男, 河南郑州人, 博士研究生, 2007年、2010年于郑州大学分别获得学士、硕士学位, 主要从事精密测试技术与仪器的研究。E-mail: xuhangzzti@126.com