

谐波齿轮传动装置的动态传动误差分析

裴欣¹, 张立华², 周广武^{1*}, 张振华¹, 胡如康¹

(1.四川大学 空天科学与工程学院, 四川 成都 610065; 2.陕西长空齿轮有限责任公司, 陕西 汉中 723102)

摘要:动态传动误差是谐波齿轮传动装置质量的一个重要指标,也可以为进一步改善谐波减速器的设计和加工提供依据,因此对传动误差的研究具有重要的理论意义与工程价值。为了确定影响谐波齿轮传动精度的因素,通过传动实验平台对谐波齿轮传动的运动精度进行分析研究。从谐波齿轮传动的误差源入手,首先分析了误差产生的原因,然后测试了减速器在不同负载与转速下的传动误差曲线,对测量的数据进行插值滤波消除“噪声尖峰”后,通过离散傅里叶变换以及希尔伯特黄变换对误差信号进行处理。对比时频域下的表现,研究了转速、载荷对谐波减速器传动误差的影响,分析了传动误差以及传动误差各频率分量随着转速、载荷的变化规律。对日本 SHF-25/120-2UH 减速器的实验结果表明:在额定负载下,谐波减速器的传动精度稳定性比空载以及轻载时高。谐波减速器的传动误差曲线会随着负载的改变而改变,但是由于不同误差分量的耦合作用,总的传动误差变化并不明显。同时传动误差在不同转速下的表现几乎相同,说明转速对传动误差的影响较小。该款谐波传动装置动态传动误差主要来源为 2 倍频的单次啮合误差,1/3 倍频的多次啮合累积误差,以及刚轮旋转 1 周产生的累积误差,其中 1/3 倍频处的多次啮合累积误差对传动精度的影响最大。

关键词:谐波减速器; 齿轮; 传动误差; 传动精度; 频谱分析

中图分类号:TH132.43

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2019)04-0163-08

Dynamic Analysis of Transmission Error of Harmonic Gear Drive

PEI Xin¹, ZHANG Lihua², ZHOU Guangwu^{1*}, ZHANG Zhenhua¹, HU Rukang¹

(1.School of Aeronautics and Astronautics, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China; 2.Shaanxi Changkong Gear Co. Ltd., Hanzhong 723102, China)

Abstract: Dynamic transmission error is an important indicator of the quality of harmonic gear transmission. It can also provide a basis for further improving the design and processing of harmonic reducer. Therefore, the research on transmission error has important theoretical significance and engineering value. In order to verify the factors affecting the accuracy of harmonic gear transmission, the motion accuracy of the harmonic gear transmission was analyzed and studied through experimental methods. Starting from the error source of harmonic gear transmission, the cause of the error was analyzed firstly, then the transmission error curve of the reducer under different loads and speeds was tested. The measured data was interpolated and filtered to eliminate the “noise spike” and then discrete. The Fourier transform and the Hilbert transform was used to deal with the error signal. Comparing with the performance in the time-frequency domain, the effects of speed and load on the transmission error of the harmonic reducer were studied. The variation of transmission error and frequency component of transmission error with speed and load was analyzed. The experimental results of the Japanese SHF-25/120-2UH reducer showed that the transmission accuracy of the harmonic reducer under rated load is better than that of the no-load or light load. The transmission error curve of the harmonic reducer changes with the change of the load, but due to the coupling effect of different error components, the total transmission error does not change significantly. At the same time, the transmission error is almost the same at different speeds. The main errors of the dynamic transmission error of the harmonic drive are the double frequency, the multiple meshing accumulative errors of the 1/3 frequency, and the accumulative errors generated by the rotation of the circular spline. The cumulative error of 1/3 frequency make the biggest influence to the transmission error.

Key words: harmonic reducer; gear; transmission error; transmission accuracy; spectrum analysis

收稿日期:2017-05-10

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2015AA043001)

作者简介:裴欣(1991—),男,博士生.研究方向:高性能机电传动与运载装备. E-mail: yangxuziwenxuan@163.com

* 通信联系人 E-mail: gwzhou@scu.edu.cn

网络出版时间:2019-06-20 10:18:11

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.tb.20190618.1053.006.html>

谐波齿轮传动具有减速比大且范围宽、传动精度高、同时啮合的齿对数多,可以通过密封壁传递运动、真空条件下工作性能好、回差小等特点,使得其在航空航天、机器人、原子反应堆等领域得到了广泛的应用。然而谐波齿轮传动的精度制约着航空航天,工业机器人中相关构件姿态的精确控制,制约着航空航天机械的发展。因此对于谐波减速器的运动误差进行分析显得十分有必要。

对于谐波齿轮传动的精度,国内外学者已经做了大量的研究, Malton^[1]在发明谐波齿轮传动装置的同时就对其误差源及各种误差源对其传动精度的影响进行了实验分析,初步揭示了由于同时啮合齿数较多,谐波齿轮传动可以实现高精度,小回差传动的特性。伊万诺夫^[2]在普通齿轮传动误差公式的基础上提出了谐波齿轮传动误差的估算公式,但是由于该公式计算出来的结果与实际测量相差较大,在实际的使用中往往采用它的各种修正公式。Nye等^[3]通过大量的实验观测与总结把谐波传动的运动误差分为两类:规则的低频误差和不规则的高频误差。Tuttle等^[4]根据谐波传动原理和实验数据认为误差主要来源于柔轮与刚轮的齿形啮合,并且通过大量的实验分析了误差周期和谐波传动周期的关系。在国内,辛洪兵等^[5]采用静态传动误差理论解析公式建立了考虑非线性因素的谐波齿轮传动系统微分方程,通过大量的实验和仿真,研究了不同频率误差分量对系统动态响应的影响。李俊阳等^[6]从磨损的角度对谐波减速器的传动精度失效进行了分析,指出对于空间谐波减速器,柔轮内壁与柔轮轴承外圈之间的磨损过程是决定其失效的关键因素。张建国等^[7]在考虑谐波减速器静态与动力学因素的前提下,建立了传动误差非线性动力学模型,利用了多项式混沌法对参数进行灵敏度与不确定性分析。王朝兵等^[8]研究了误差的随机性对行星齿轮系传动精度的影响。由于谐波齿轮传动的复杂性,目前对其动力学运动机理的研究不够深入,无法建立精确的模型等原因,导致理论模型与实际相差较大。目前依然主要通过实验的方法对其动力学机理进行研究^[9-11]。作者首先搭建谐波齿轮传动实验平台,通过实验得到谐波传动的误差随时间变化的数据,绘制了传动误差的时域图,并且对传动误差分别进行了离散傅立叶与希尔伯特黄变换,提取出有效数据,对其在时域与频域曲线进行了分析。这对进一步认识谐波齿轮传动运动误差的产生和提高谐波齿轮传动的运动精度,拓宽谐波齿轮传动的应用范围,特别是在工业机器人中的应

用具有重要的现实意义。

1 谐波齿轮传动的工作原理

谐波减速器主要由3大件组成:刚轮、柔轮、波发生器,如图1所示。刚轮是1个刚性的环状内齿轮,它和柔轮具有相同的模数。柔轮是外齿轮,外形为薄壁杯状。柔轮一般与输出轴相连,内径比波发生器长轴稍小。波发生器通常与输入轴相连,是1个安装在椭圆凸轮上的柔性轴承。椭圆凸轮转动带动柔性轴承变形。其基本传动原理为:当凸轮旋转时,凸轮与柔轮间的接触会使柔轮发生波动变形,由于柔轮比刚轮少2个齿,使得椭圆凸轮波发生器旋转1周,柔轮向相反方向转过2个齿(或者柔轮固定,刚轮同方向旋转2个齿),达到大速比减速的目的^[12]。使用礼帽型谐波减速器,传动方式为柔轮固定,刚轮旋转输出。



图1 礼帽型谐波减速器组成

Fig. 1 Structure of top hat type harmonic reducer

2 谐波齿轮传动误差分析

由于加工误差不可避免,柔轮与刚轮通常存在几何偏心与运动偏心。同时在安装的过程中,可能存在的配合间隙、径向跳动等问题,也会对谐波齿轮传动带来一定的影响。对于谐波齿轮传动而言,误差主要表现在瞬时传动比不稳定^[13]。

动态传动误差为在工作状态下,当输入轴单向旋转时,理论上旋转输出的旋转角度与实际旋转输出的旋转角度之间的差值,即角度传递误差。其中理论转角等于实际测量的输入轴转角除以传动比(文中选用减速器传动比为 $i=121$)如式(1)所示:

$$\bar{\theta} = \frac{\theta_m}{i} - \theta \quad (1)$$

式中, θ_m 为输入转角, θ 为输出转角, i 为传动比。

谐波齿轮传动装置的动态误差频率主要和输入频率有关。其中输入频率的变化是由于输入转速的

改变引起的。

$$f = n/60 \quad (2)$$

式中: n 为输入轴转速, r/min ; f 为输入频率, Hz 。

由于谐波传动多轮齿对的均化作用, 谐波齿轮传动的传动误差主要表现为偏心引起的传动误差。将传动误差分为5大类:

1) 刚轮加工误差引起的传动误差。

刚轮在加工过程中会产生偏心, 分为几何偏心与运动偏心, 由于偏心作用会引起刚轮的基圆和分度圆中心与其回转中心不重合, 从而产生综合误差偏心向量。本文采用波发生器输入, 柔轮固定, 刚轮输出的方式, 刚轮加工误差引起的误差频率是输入频率的 $2 \times (1-1/i)$ 倍频, 其中 i 为传动比。

2) 柔轮加工误差引起的传动误差。

由于波发生器为双波传动, 波发生器旋转1周, 柔轮与刚轮发生两次啮合。柔轮在加工过程中产生的几何偏心与运动偏心与刚轮的偏心原理类似, 造成柔轮的基圆和分度圆中心与其回转中心不重合。

3) 波发生器偏心误差。

分为不随波发生器旋转和随波发生器旋转的偏心向量误差, 其频率分别为输入频率的2倍频和1倍频。此部分的误差主要为加工误差。

4) 啮合传动误差。

分为单齿啮合传动误差和多齿啮合的平均效应, 频率为输入频率的2倍频。该啮合误差具有累计效果, 即该误差随着啮合次数不断累积-释放循环。由于谐波柔轮是变形之后与刚轮发生啮合, 啮合区域的啮合程度是变化的。啮合程度较大的啮合区决定了传动误差, 同时啮合程度较小的啮合区会对传动误差进行部分抵消, 同时柔轮的弹性变形也会对传动误差进行补偿^[7]。对于啮合传动误差, 设计合理的齿形可以改善谐波减速器的啮合性能。

5) 安装偏心引起的传动误差。

输入轴的安装偏心对传动精度的影响最大, 引起的误差频率与输入频率相同。同时刚轮与柔轮的安装偏心也会引起传动误差, 刚轮与柔轮的安装偏心引起的误差频率分别与刚轮与柔轮加工误差引起的误差频率相同。

3 离散傅里叶变换与希尔伯特黄变换原理

3.1 离散傅里叶变换

离散傅里叶变换, 是将时域上离散的采样点变换为频域上离散的点。虽然说样本点是有限长的, 但人们通常认为频域与时域上的采样都是离散周期信

号的主值序列。通过周期延拓, 可以将有限长的时域信号转换为周期信号。在实际应用中快速傅里叶变换已经得到了广泛的应用。

对于有限长序列 $x(n)$ (长度为 M), 其 n 点离散傅里叶变换为:

$$X(k) = \text{DFT}[x(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{kn} \quad (3)$$

式中, $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$, N 为变换区间长度。

3.2 希尔伯特黄变换

希尔伯特黄变换(HHT)的主要内容包含两部分, 第1部分是经验模态分解, 第2部分为Hilbert谱分析。首先使用经验模态分解的方法将给定的信号转化为若干固有模态函数(IMF), 每一个分量的Hilbert谱可以通过对满足特定频率条件的IMF信号进行Hilbert变换得到。原始信号的Hilbert谱由所有经验模态函数相加组成。

与传统的数据与信号处理方法相比, HHT具有不受Heisenberg测不准原理制约, 完全自适应等特点。HHT的基是自适应产生的, 因此可以反映被分析数据或者信号的特征。

4 实验

实验选用日本SHF-25/120-2UH型谐波减速器, 采用柔轮固定, 刚轮输出的方式, 刚轮齿数为242, 柔轮齿数为240, 传动比为121。该型号减速器采用润滑脂润滑, 额定转速2 000 r/min , 额定转矩67 $N \cdot m$ 。

4.1 实验平台

采用SCUAA-STCP1200空间活动零部件综合性能实验台, 如图2所示。

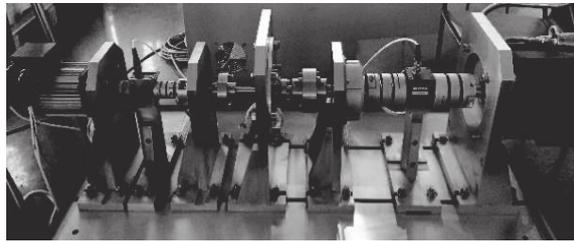


图2 SCUAA-STCP1200空间活动零部件综合性能实验台
Fig. 2 SCUAA-STCP1200 comprehensive performance test platform of space active parts

实验平台转速误差控制为 $\pm 0.08\%$ 。实验中当设定转速为600 r/min 时, 实际输入速度波动在0.2 r/min 以内, 保证了实验数据的准确性。

4.2 设计实验

F_m 指需要分析的最高频率, 也是经过抗混滤波后的信号最高频率。根据奈奎斯特定理, F_m 与采样频

率 F_s 有以下关系： $F_s=2.56F_m$ ；而最高分析频率的选取决定于谐波传动转速和预期所要判定的误差性质。

由于采样点 N 与谱线数 M 有如下的关系， $N=2.56M$ 其中谱线数 M 与频率分辨率 ΔF 及最高分辨率 F_m 有如下的关系： $\Delta F=F_m/M$ ，即： $M=F_m/\Delta F$ 。

在本实验中采用点随动（即以刚轮旋转1周为1个采样周期），为了使测量频率在有效测量范围内，并保证精度分辨率，采用改变输入转速的方式，在中低速下使用100 Hz的采样频率，在高速下采样频率为200 Hz。但是由于谐波齿轮传动减速比较大，频率分布范围广，既有偏心引起的周期传动误差，也有轮齿啮合非线性引起的周期误差。在转速一定的情况下，不能对所有频率的传动误差进行足够频率分辨率的频谱分析。因此通过改变输入转速分别对不同频率范围的传动误差进行分析。测量了SHF-25/120-2UH型谐波减速器6、60、726 r/min及额定2 000 r/min下分别负载0、5、34、67 N·m的传动精度时域数据。实验数据均在转速及负载稳定后测量，减少因转速和加载引起的数据波动。

同时在数据采集的过程中，存在间歇性的“噪声尖峰”，该噪声会对测量数据产生较大的影响^[14-15]。因此采用线性内插替代噪声尖峰数据点。即在尖峰之后的第1个值和尖峰之前的最后1个值之间内插1个这两点的平均值，替代所消除的每个尖峰值。

5 实验结果分析

5.1 低转速下动态传动误差分析

在同一转速下，传动误差的时域图表现出很高的相似性。图3为输入转速为6 r/min时刚轮旋转1周，传动精度的时域图。图4为0~60 s传动精度的局部放

大图以及频谱图。根据图3可知，每10 s凸轮旋转1周，该谐波减速器为双波传动，故每过5 s，柔轮与刚轮啮合1次。

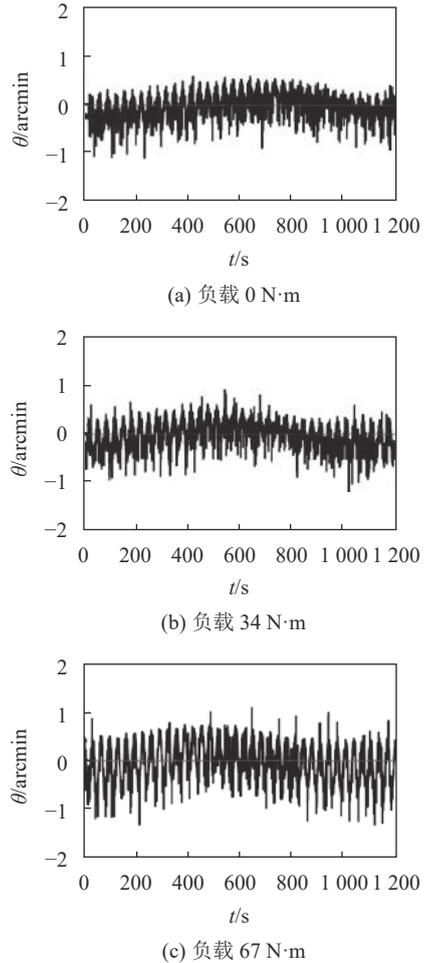


图3 刚轮旋转1周传动误差时域图

Fig. 3 Time-domain diagram of transmission error of circular spline rotation

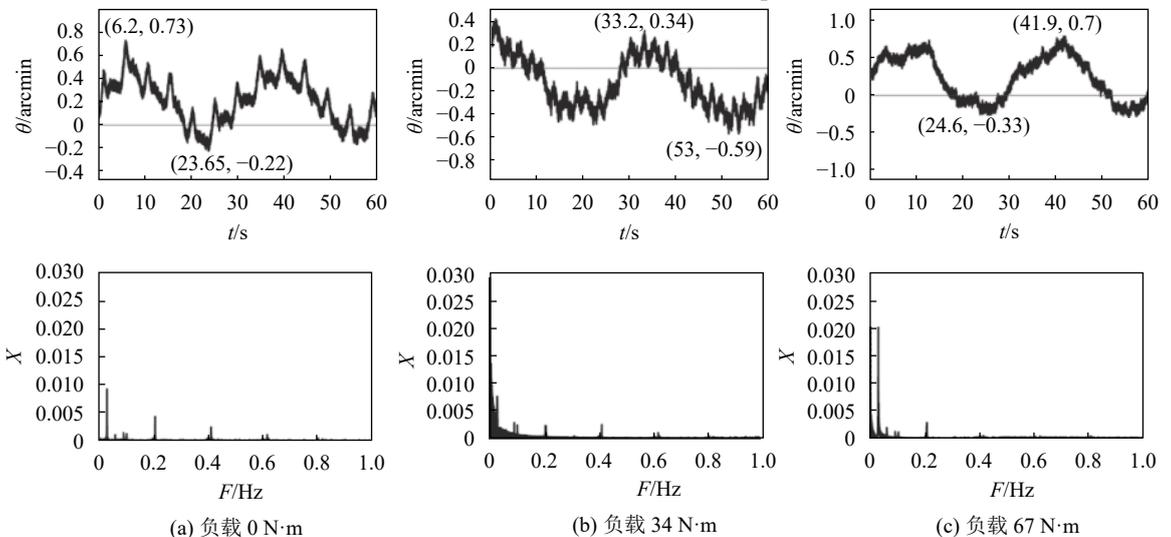


图4 输入转速6 r/min的传动误差时频域图

Fig. 4 Time and frequency domain diagram of error transmission at input speed 6 r/min

由图4可知,柔轮与刚轮啮合产生的传动误差受负载作用较小,但是负载对于传动稳定性影响较大。在空载时,谐波传动误差是波动的且幅值相对较大。在额定转矩下,谐波齿轮单齿啮合传动误差在采样频率固定的情况,虽然仍然呈现非线性但是误差波动趋于稳定。同时从频谱图可以看出在不同负载下,0.2 Hz处有明显峰值,此频率与柔轮和刚轮的啮合频率相同;输入频率的4倍频与6倍频处(0.4、0.6 Hz)仅在空载与轻载下有峰值出现,而传动误差相对平稳

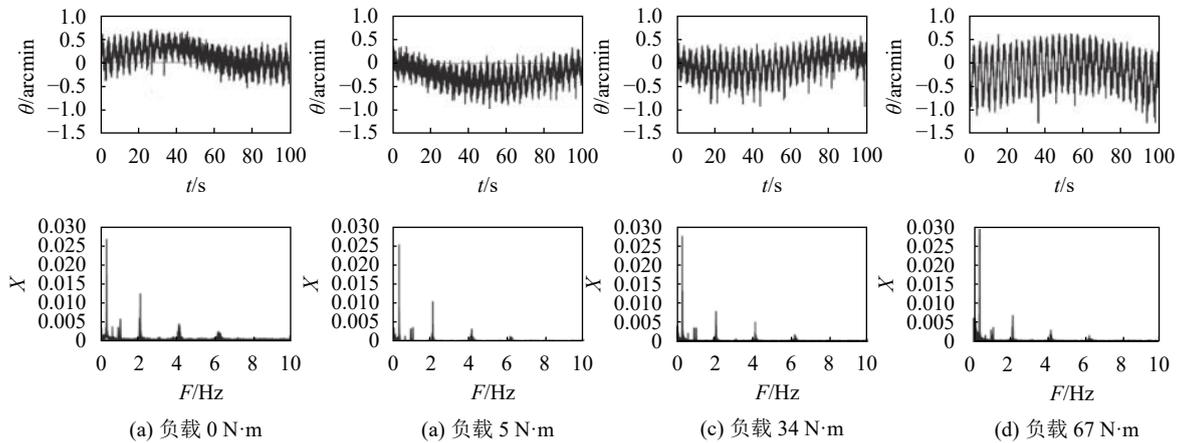


图5 输入转速60 r/min的传动误差时频域图

Fig. 5 Time and frequency domain diagram of error transmission at input speed 60 r/min

由图5可以看出,在1/3、1、2 Hz处均有波峰出现。转速为60 r/min,则输入转速频率为1 Hz。随波发生器一起旋转的偏心矢量的误差频率为1 Hz,而谐波传动中凸轮每转过180°,柔轮与刚轮啮合1次,因此固定不动的综合偏心矢量传动误差产生的频率为2 Hz。分析数据可知在本款减速器中,谐波减速器随波发生器旋转的偏心矢量制造安装精度高,造成的误差影响较小,误差的主要来源之一为2倍频的固定不动的综合偏心矢量和低频部分的累积误差。且2倍频部分对传动误差的影响随着载荷的增大而减小。从图5可以看出1/3 Hz的累积误差对传动精度的影响最大。

输入转速60 r/min,额定负载下0~6 s传动误差时域图如图6所示。

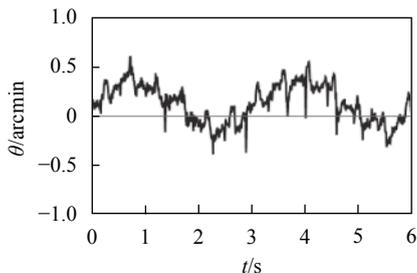


图6 局部时域图

Fig. 6 Local time domain diagram

的额定负载下,该频率处并没有峰值出现,说明该峰值是由轻载下的不稳定引起的。查阅此减速器设计说明书,传动误差为1 arcmin以内,实际测量低速下刚轮旋转1周时传动误差为1.21 arcmin。图4中额定转矩下单次齿轮啮合(0~5 s)误差达到了0.37 arcmin,因此柔轮与刚轮啮合的非线性是谐波齿轮传动的主要误差来源之一。

对不同负载下的传动误差进行频谱分析,输入转速60 r/min时传动误差时频域图如图5所示。

从图6可以看出,传动误差呈现出每3 s 1次的周期变换,动态误差呈现出随着输入频率:累计—释放—释放—再次累计不断循环。0~1 s时,波发生器旋转1周,产生2次啮合,误差累计增加;1~3 s之间,波发生器旋转2次,产生4次啮合,且这4次啮合产生的误差总体呈现先下降再上升,下降幅值比0~1 s时增加的数值大。以3 s为1个周期,此时波发生器旋转3周,产生6次啮合,这6次啮合对于传动误差的累积表现为:上升—上升—下降—下降—下降—上升。在这1个周期内传动误差波动为0.97 arcmin。

输入转速为60 r/min时,输入频率为1 Hz,柔轮与刚轮的啮合频率为2 Hz,利用希尔伯特黄变换分离出频率为2 Hz的误差源时域图如图7所示。对比变换后的时域图可以看出误差频率为2 Hz的误差源,波动幅值在0.2 arcmin左右。

5.2 中等转速下动态传动误差分析

在中等转速下对谐波减速器不同负载下的传动误差进行时域与频域上的分析。提高转速后“噪声尖峰”造成的测量误差明显增加,实测可达传动误差的几十倍,对时域和频域影响巨大。726 r/min以及额定2 000 r/min转速下的误差数据均已使用插值滤波处理如图8~10所示。

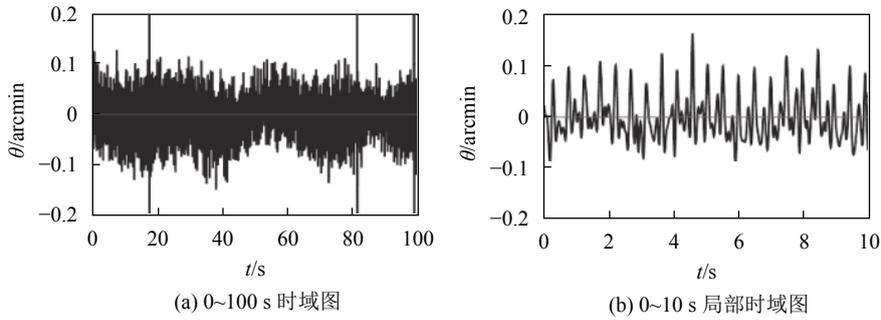


图 7 加载 $67 \text{ N}\cdot\text{m}$, 转速 60 r/min , 分离频率 2 Hz 的传动误差时域图

Fig. 7 Time domain diagram of transmission error under load $67 \text{ N}\cdot\text{m}$, input speed 60 r/min , frequency 2 Hz

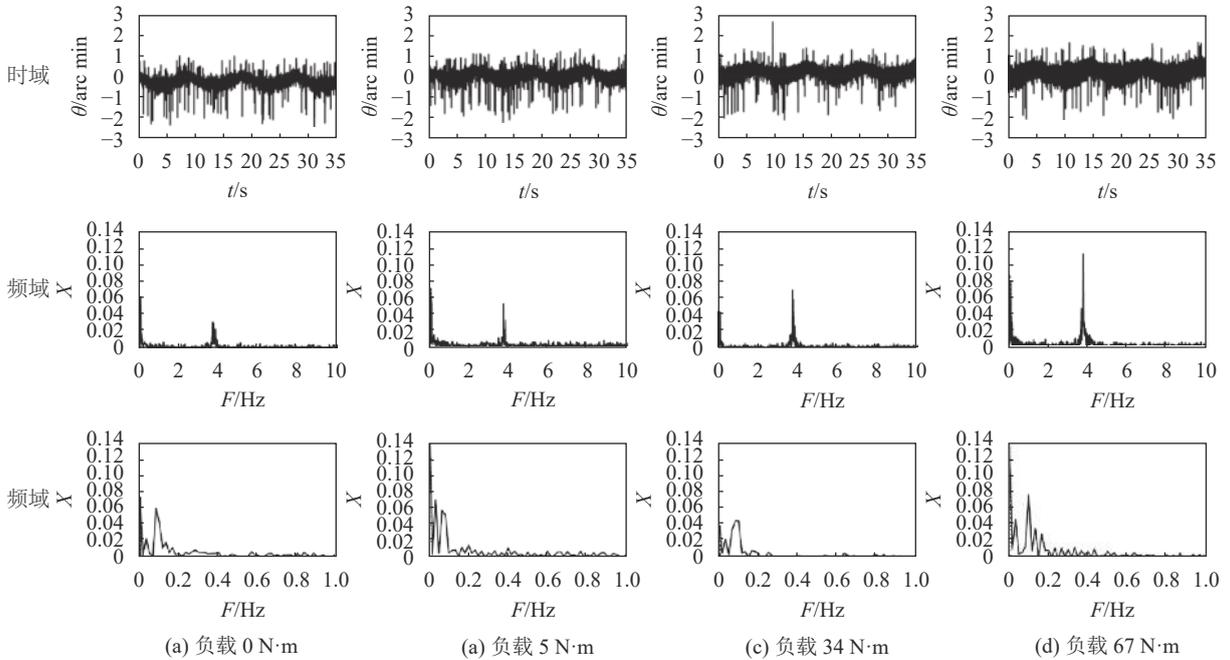


图 8 输入转速 726 r/min 的不同负载下传动误差

Fig. 8 Transmission error with different load at input speed 726 r/min

从图8可以看出,在 726 r/min 的转速下,载荷对传动误差有一定的影响,同时频域上的两个波峰出现在 0.1 和 4 Hz 左右。 0.1 Hz 为刚轮旋转一周的频率。 4 Hz 左右出现波峰与在低速下观测到的规律“传动误差以柔轮与刚轮的6次啮合为1个小周期”相符合。在该转速下减速器平均每秒旋转 12.1 转,平均啮合 24.2 次,因此理论上 4 Hz 处会观测到波峰,证明了对于低速下假设的正确性。随着负载的增大, 4 Hz 处的传动误差逐渐增大,时域图上表现为传动误差的波动幅值增加,在频域图上表现为 $1/3$ 倍频处的峰值增加。

从图9可以看出,此时传动误差在时域上以 10 s 为周期波动。此频率正好为减速器输出轴旋转一周的频率。说明减速器刚轮每旋转一周,传动累积误差数值上是1个循环。对其使用最小二乘法进行曲线拟合,可以看出 0.1 Hz 的频率影响下,刚轮旋转一周,传动误差的波动约为 0.236 arc min 。

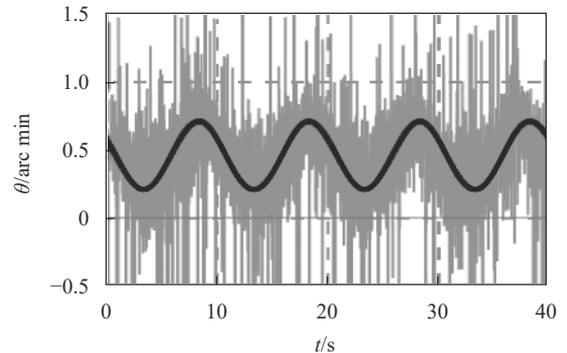


图 9 输入转速 726 r/min 的传动误差时域图

Fig. 9 Time domain diagram of transmission error at input speed 726 r/min

5.3 额定转速下动态传动误差分析

在额定转速下以输出轴旋转一周的时间长度绘制传动误差曲线,并且对传动误差数据进行时频域上的变换。

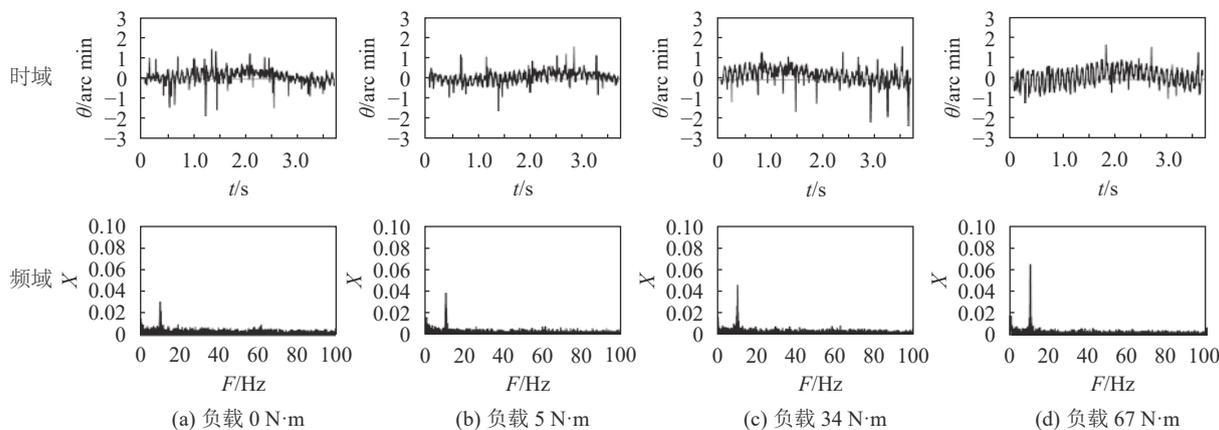


图10 2 000 r/min额定转速下的传动误差时域图

Fig. 10 Time domain diagram of transmission error at input speed 2 000 r/min

提高转速至2 000 r/min,传动误差依然与中低速下观测到的规律一致,说明转速对传动误差的影响较小。此时输入频率为33.3 Hz,在11.1 Hz处观测到明显波峰,该频率的波动幅值随着负载转矩的增加而增加。同时在时域图中,随着载荷的增加,曲线更加平滑,这与在低速观测到的现象:“加载力的增加会使传动误差的波动更加稳定”一致。同时2倍频(66.6 Hz)在空载以及轻载下可以观测到小波峰,而额定负载下几乎没有波峰。说明随着负载转矩的增加,单次啮合误差会减小。虽然随着载荷的增加,多次啮合的累积传动误差上升,但是单次啮合误差会减小,造成总的传动误差随着转矩的变化并不明显。

6 结论

通过对实验数据的对比分析可以得出以下结论:

1) 负载对动态传动误差的数值影响较小,但是对于传动精度稳定性影响较大,负载的增加可以减少谐波减速器的“颤振”。随着负载转矩的增加,单次啮合误差会减小,多次啮合累积误差会增加,总的传动误差变化不明显。

2) 谐波减速器的动态传动误差主要为输入频率2倍频,以及1/3倍频处的累积传动误差。输入频率的1倍频也有影响。其中,2倍频的误差来源主要是由于谐波齿轮啮合的非线性,1/3倍频的累积传动误差对于传动精度的影响最大。

3) 谐波齿轮传动的总传动误差以刚轮旋转1周为1个周期循环,刚轮累积误差对总误差的影响较大。

4) 谐波减速器的动态传动误差受转速的影响较小,在不同转速下的规律具有一致性。

由于实验平台本身的结构比较复杂,实验环境的干扰等原因,最终的数据结果可能不够精确,使得

某些可能对传动误差产生影响的因素被忽略。后续将进一步考虑实验台以及环境因素对实验结果的干扰,为谐波减速器传动性能优化奠定基础。

参考文献:

- [1] Walton M C. Strain wave gearing:US2906143[P]. 1959-09-29.
- [2] 伊万诺夫 M H. 谐波齿轮传动[M]. 北京:国防工业出版社,1987.
- [3] Nye T W, Kraml R P. Harmonic drive gear error: Characterization and compensation for precision pointing and tracking[C]//Aerospace Mechanisms Symposium. 25th Aerospace Mechanisms Symposium. Washington D C: NASA, 1991: 237.
- [4] Tuttle T, Seering W. Kinematic error, compliance, and friction in a harmonic drive gear transmission[J]. *Asme Advances in Design Automation*, 1993, 65(1): 319-324.
- [5] Xin Hongbing, Zhao Fu, Qin Yuhui, et al. Nonlinear torsional vibration analysis of harmonic drive system[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2005, 24(9): 1040-1044. [辛洪兵, 赵昊, 秦宇辉, 等. 谐波齿轮传动系统非线性扭转振动分析[J]. *机械科学与技术*, 2005, 24(9): 1040-1044.]
- [6] Li Junyang, Wang JiaXu, Zhou Guangwu, et al. Study on failure mechanism of space lubrication harmonic reducer[J]. *Tribology Journal*, 2013, 33(1): 44-48. [李俊阳, 王家序, 周广武, 等. 空间润滑谐波减速器失效机理研究[J]. *摩擦学报*, 2013, 33(1): 44-48.]
- [7] Zhang Jinyang, Zhang Jianguo, Peng Wensheng, et al. Uncertainty analysis of dynamic precision of harmonic reducer based on PCE[J]. *Journal of Beihang University*, 2018, 16(3): 1-9. [张金洋, 张建国, 彭文胜, 等. 基于PCE的谐波减速器动态精度不确定性分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2018, 16(3): 1-9.]
- [8] Wang Chaobing, Chen Xiaolan, Chen Hong, et al. Influence of random error on transmission accuracy of planetary gear

- trains[J].*Journal of Chongqing University*,2012,35(9): 41–47.[王朝兵,陈小安,陈宏,等.误差随机性对行星齿轮系传动精度的影响特性[J].*重庆大学学报*,2012,35(9): 41–47.]
- [9] Preissner C,Shu D,Royston T J.Experimental investigation and model development for a harmonic drive transmission[C]// *New Developments in Optomechanics*.*International Society for Optics and Photonics*,2007,6665:66650P.
- [10] Peng W,Zhang J,Zhu D.ABCLS method for high-reliability aerospace mechanism with truncated random uncertainties[J].*Chinese Journal of Aeronautics (English Edition)*, 2015,28(4):1066–1075.
- [11] Gravagno F,Mucino V H,Pennestri E.Influence of wave generator profile on the pure kinematic error and centrodes of harmonic drive[J].*Mechanism & Machine Theory*,2016, 104:100–117.
- [12] Ostapski W.Analysis of the stress state in the harmonic drive generator-flexspline system in relation to selected structural parameters and manufacturing deviations[J].*Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 2010,58(4):683–698.
- [13] Sha Xiaochen,Fan Yuanxun.Study on drive error of harmonic reducer[J].*Machinery Manufacturing and Automation*, 2015(5):50–54.[沙晓晨,范元勋.谐波减速器传动误差的研究[J].*机械制造与自动化*,2015(5):50–54.]
- [14] 姜同敏.可靠性与寿命试验[M].北京:国防工业出版社,2012.
- [15] Zhu B,Qin W,Liu J,et al.Simulation and analysis of dynamical transmission precision of 2K–V cycloid pin gear reducer based on multi-body system dynamics[J].*Advanced Materials Research*,2011,308/309/310:2205–2210.

(编辑 黄小川)

引用格式: Pei Xin,Zhang Lihua,Zhou Guangwu,et al.Dynamic analysis of transmission error of harmonic gear drive[J].*Advanced Engineering Sciences*,2019,51(4):163–170.[裴欣,张立华,周广武,等.谐波齿轮传动装置的动态传动误差分析[J].*工程科学与技术*,2019,51(4):163–170.]