

谐波齿轮传动运动误差理论与测试技术的研究

刘源萍

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 详细地分析了谐波齿轮传动的误差源, 误差源产生的运动误差及其频率, 运用随机误差理论运动误差进行了综合, 提出了运动误差的理论估算公式和对其频谱的分析方法。对运动误差的拍频现象产生的机理进行了详细的分析。建立了动态实时测试谐波齿轮传动运动误差及其频谱的测试系统, 并进行了实测, 验证了理论分析的正确性。

关键词: 谐波齿轮传动; 运动误差; 频谱; 拍频; 测试技术

1 引言

运动误差是衡量谐波齿轮传动的重要的性能指标之一, 随着精密谐波齿轮传动应用范围的日益广泛, 对高精度谐波齿轮传动的需求也越来越多。尤其是应用在伺服控制系统中的谐波齿轮传动装置, 由于运动误差的大小对系统是一种波动和干扰。为了消除这种不利的影 响, 在伺服系统进行综合时, 不仅要知道运动误差的最大极限幅值的大小, 而且还要知道运动误差的频谱。特别是近年来谐波齿轮传动被广泛地应用在卫星、宇航、遥控操机等要求高灵敏度的伺服系统中, 对谐波齿轮传动的运动误差分析和综合及动态特性提出了更高的要求。为此需对谐波齿轮传动的运动误差及其频率特性进行详细的理论分析, 找出各个误差源产生的运动误差及其频率, 以便在谐波齿轮传动装置设计阶段就能通过确定各原始误差的大小及传动装置的结构尺寸来最终控制谐波齿轮传动装置运动误差及其频谱, 以满足使用场合对谐波齿轮传动装置提出的具体运动误差及动态特性的要求。

2 谐波齿轮传动运动误差及其频率的分析

分析是以椭圆凸轮波发生器谐波齿轮传动为例来进行分析的, 所分析的传动装置波发生器为主动, 刚轮固定不动, 柔轮从动输出。传动装置的传动比为 i , 刚轮齿数为 z_2 , 柔轮齿数为 z_1 。

2.1 误差源分析

可以认为构成该传动装置的刚、柔轮及波发生器等零、部件的加工和装配误差是产生运动误差的主要误差源。这些误差源产生的偏心误差可以分成三大类：导致刚轮具有偏心误差向量的误差源；导致柔轮具有偏心误差向量的误差源和导致随波发生器一起回转的偏心误差向量的误差源。

2.2 误差源产生的运动误差及其频率的分析

产生刚轮偏心误差向量的误差源有：刚轮加工时的几何偏心和运动偏心产生的综和偏心误差、刚轮安装孔的径向跳动、刚轮安装孔与刚轮的配合间隙、输出轴与输出配合间隙、及波发生器部件中那些产生不随波发生器一起回转的偏心误差向量的误差源如：输入轴轴承孔的径向跳动、输入轴与壳体的配合间隙、输入轴轴承孔与轴承的配合间隙、柔性轴承的径向跳动和径向游隙等。这些误差源产生的偏心误差向量的实质是使刚轮的分度圆中心与其回转中心不重合，它将使传动装置产生运动误差。

设 e_{2i} 为这类偏心误差向量，由于刚轮固定不动，因此在啮合过程中 e_{2i} 将保持不变。如图 1 所示， θ 角为凸轮长轴与偏心误差向量 e_{2i} 的夹角。 e_{2i} 在啮合节点上沿啮合线的增量将产生运动误差。注意到由于偏心误差向量 e_{2i} 的存在已经使两啮合区域的轮齿啮合状态发生了改变，在刚轮下端的啮合区域，其轮齿的啮合程度总是大于另一端。由于刚轮固定不动，在波发生器转动的作用下总是柔轮齿主动地与刚轮齿发生啮合，并将刚轮齿由于偏心误差向量 e_{2i} 的存在而形成的运动误差反映在柔轮的转动上。在啮合时总是啮合程度大的一端先发生啮合，进而将刚轮的误差传递给柔轮；而啮合程度小的那端啮合总是滞后发生，且轮齿发生啮合时已基本上处于尖点接触状态。因此可以认为由于偏心误差的存在，使得谐波齿轮传动主要由一个啮合区的工作齿来完成，运动误差也主要由这部分齿啮合而产生，另一啮合区的啮合作用较弱，所产生的反向运动误差只能小部分与对应啮合区产生的运动误差相抵消。为使分析简明，在分析中认为运动误差主要由一个啮合区内具有最大啮合深度的轮齿啮合时产生。而其它同时参与啮合的齿对和径向对称啮合使运动误差均化、补偿作用另外考虑。这样由于 e_{2i} 的存在而导致传动装置产生的运动误差可由下式近似计算：

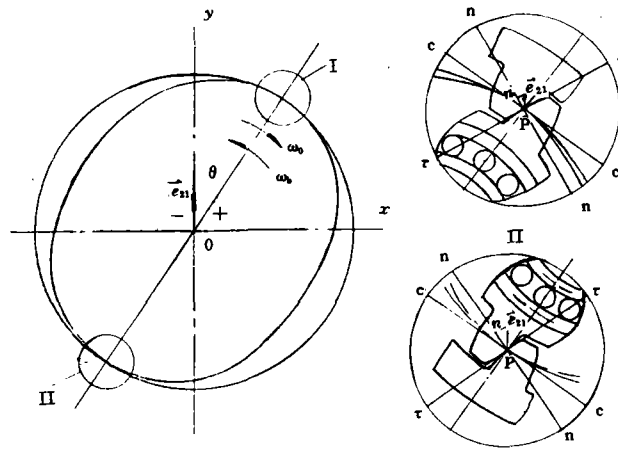


图 1

$$\Delta_{2i} = \frac{e_{2i} \sin(\theta + \alpha_n)}{\cos \alpha_n} \quad (1)$$

- 式中 Δ_{2i} —刚轮偏心误差产生的运动误差；
 e_{2i} —刚轮偏心误差；
 θ —刚轮偏心误差向量与凸轮长轴的夹角；
 α_n —齿轮压力角；

对于双波谐波齿轮传动,啮合是以波发生器转半转为周期重复进行的。故式(1)中的 θ 角将在 $-\pi/2 \sim \pi/2$ 之间变化。这时由式(1)做出的曲线如图 2 的实线所示。从中可以看出运动误差在 $\theta = \pm\pi/2$ 处将不连续,与事实不符。这是由于该图是在没有考虑到对称啮合区的影响情况先下得到的,考虑到在 $\theta = \pm\pi/2$ 时,此时刚轮的偏心误差向量 \vec{e}_{2i} 与凸轮长轴相垂直,这时刚轮的偏心误差向量 \vec{e}_{2i} 对两啮合区的影响很小,不能只考虑一个啮合区的影响,而应将两啮合区域的轮齿对运动误差的影响共同考虑。这时在两个啮合区上产生的运动误差的值大小相等、方向相反互相抵消而使该传动装置在 $\theta =$

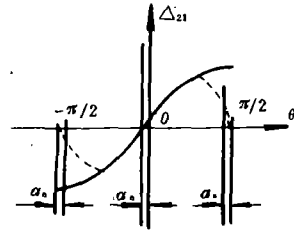


图 2

$\pm\pi/2$ 时的运动误差为零。同时在凸轮长轴与 \vec{e}_{2i} 夹角为 $\pm\pi/2$ 附近时,应考虑到两啮合区的共同影响,使这时的运动误差互相抵消一部分,这样就能够使谐波齿轮传动的运动误差曲线在波发生器回转的过程中变成连续的曲线,如图 2 中的虚线所示。其数学表达式可近似表示如下

$$\Delta_{2i} = \frac{e_{2i} \sin\{2(\theta + \alpha_n)\}}{\cos \alpha_n} \quad (2)$$

讨论一下该运动误差的频率,从式上述分析可知 θ 为波发生器凸轮长轴与刚轮偏心误差向量的夹角,当波发生器即输入轴以 ω_b 的角频率旋转时,传动装置的运动误差可以表示为:

$$\Delta_{2i} = \frac{e_{2i} \sin\{2(\omega_b t + \alpha_n)\}}{\cos \alpha_n} = \frac{e_{2i} \sin(2\omega_b t + 2\alpha_n)}{\cos \alpha_n}$$

从中可见刚轮的偏心误差产生的运动误差的频率为 $2\omega_b$,如以输出轴的旋转角频率 ω 来衡量则为 $2i_b \omega_b$,这里 i_b 为传动装置的传动比。

误差源产生的第二类偏心误差是导致柔轮具有偏心误差向量。能产生这类偏心误差向量的误差源有:柔轮加工时的几何偏心合运动偏心所形成的综合偏心误差,这个综合偏心误差可由柔轮的周节累积误差来表示、输出轴的径向跳动、输出轴与柔轮的配合间隙等。这些误差源产生随柔轮一起回转的偏心误差向量,其实质是使柔轮的回转中心与分度园中心产生偏离,它将使传动装置产生运动误差。

设 e_{1i} 为某一误差源产生的柔轮偏心误差向量,由于谐波齿轮传动的传动比较大,因此在波发生器转半转的过程中,可视 e_{1i} 为恒定。分析由该偏心误差向量 e_{1i} 产生的运动误差类似于刚轮的偏心误差向量产生的运动误差,不难得出:

$$\Delta_{1i} = \frac{e_{1i} \sin\{2(\theta + \alpha_n)\}}{\cos \alpha_n} \quad (3)$$

- 式中 Δ_{1i} —柔轮偏心误差向量产生的运动误差;
 e_{1i} —柔轮的偏心误差;
 θ —凸轮长轴与柔轮偏心误差向量的夹角;
 α_n —柔轮轮齿压力角;

讨论该偏心误差向量产生的运动误差的频率,由于柔轮在波发生器转半转的过程中要转过一个齿距角,即偏心误差向量实际上是运动的,若波发生器的转角频率为 ω_b ,则这时的 θ 可由下式一示:

$$\theta = \omega_b t + \frac{2}{z_1} \omega_b t = \frac{z_2}{z_1} \omega_b t$$

代入式(3)中有:

$$\Delta_{3i} = \frac{e_{1i} \sin(2z_2/z_1 \omega_b t + 2\alpha_n)}{\cos \alpha_n} \quad (4)$$

式中 z_1 、 z_2 分别是柔轮和刚轮的齿数。

从中可见柔轮偏心误差向量产生的运动误差的频率为 $2z_2/z_1 \omega_b$, 用输出轴转角频率度量则为 $2i_a z_2/z_1 \omega_o$ 。可见与刚轮偏心误差向量产生的运动误差的频率不同, 它们之间有一微小的差异。

误差源产生的第三类偏心误差是那些随波发生器一起回转的偏心误差向量, 能产生这类偏心误差向量的误差源有: 波发生器轴的跳动、波发生器凸轮的廓形误差、输入轴与凸轮的配合间隙等。这类偏心误差产生的运动误差由于波发生器旋转一转而变化一次, 因此其产生的运动误差的频率为 ω_b , 其产生的运动误差可用下式来近似计算:

$$\Delta_{3i} = \frac{e_{3i} \sin(\omega_b t + \psi_i)}{\cos \alpha_n} \quad (5)$$

式中 Δ_{3i} —随波发生器一起回转的偏心误差产生的运动误差;

e_{3i} —随波发生器一起回转的偏心误差;

ψ_i —偏心误差向量的相位角。

在刚轮与柔轮中还存在由于刀具与机床传动链周期误差而导致的以各自的切向相邻齿综合误差 $\Delta f'_{ii}$ 度量的小周期误差。由于波发生器每转半转每个刚轮齿与柔轮齿啮合一次, 因此它将产生频率为 $2\omega_b z_2$ 运动误差, 可用下式近似表示:

$$\Delta_{ii} = \Delta f'_{ii} \sin(2\omega_b z_2 t)$$

2.3 运动误差的综合

综合上述分析可知, 各误差源产生相应的偏心误差向量所导致传动装置的运动误差可合成为下式:

$$\Delta = \sum e_{1i} \sin(2\omega_b z_2/z_1 t + \psi_{1i}) / \cos \alpha_n + \sum e_{2i} \sin(2\omega_b t + \psi_{2i}) / \cos \alpha_n + \sum e_{3i} \sin(\omega_b t + \psi_{3i}) / \cos \alpha_n + \sum f'_{ii} \sin(2\omega_b z_2 t) / 2 \quad (6)$$

式中 Δ —总的运动误差;

e_{1i} —对应产生柔轮的偏心向量的值;

e_{2i} —对应产生刚轮的偏心向量的值;

e_{3i} —与波发生器一起回转的偏心向量的值;

f'_{ii} —刚、柔轮切向综合误差值;

ψ_i —分别为相应偏心误差向量的初相角;

ω_b —波发生器的转角频率;

z_2 、 z_1 —分别为刚轮、柔轮的齿数;

其中各个偏心误差是由刚轮、柔轮的加工误差及其各个零部件的跳动之间的配合间隙产生的。其值一般为相应跳动或配合间隙的一半。

从式(6)中可知构成谐波齿轮运动误差的公式中的每一项可以简化为用下式表示:

$$\Delta_i = \rho_i \sin(\omega_b t + \psi_i) / \cos \alpha_n$$

式中 ρ_i —相应的当量偏心, $\rho_i = e_i / \cos \alpha_n$;

ω_i —相应偏心误差产生的运动误差的频率;

ψ_i —相应的当量偏心的初相角, $\psi_i = 2(\Theta + \alpha_n)$, Θ 为 $-\pi/2 \sim \pi/2$ 之间的随机变量。

其中当量偏心是由周节累积误差, 各种轴、轴承等的跳动及各种配合间隙所形成的偏心导致的信心当量。在一批谐波齿轮传动装置中, 其值是一个随机变量, 其分布为瑞利分布。而各当量偏心向量的初相角 ψ_i 也是一个随机变量, 它服从均匀分布。由这两种随机变量构成运动误差的分布规律就是正态分布, 因此可得出各种偏心造成的运动误差的均值和方差为:

$$E(\Delta_i) = 0$$

$$D(\Delta_i) = (E_i/6)^2$$

其中: E_i —为各种偏心误差的公差, 即是各种跳动, 配合间隙公差, 那么根据上述分析就可以得出谐波齿轮传动运动误差的统计计算式。

$$\Delta = \sum E(\Delta_i) \pm 3 \sqrt{\sum D(\Delta_i)} = \pm 3 \sqrt{\sum D(\Delta_i)}$$

如以每个相应的公差值来代入则可写成下式:

$$\Delta = \pm \frac{1}{2} \sqrt{F_{p1}^2 + F_{p2}^2 + f_{i1}^2 + f_{i2}^2 + (\sum E_{i1}^2 + \sum E_{i2}^2 + \sum E_{i3}^2) / \cos^2 \alpha_n} \quad (7)$$

式中 F_{pi} 、 f_{ai} 分别是为刚、柔轮周节累积公差合切向相邻齿综合公差。 E_{ij} 等为产生相应偏心误差向量的各种跳动、配合间隙的公差值。

上式只是考虑谐波齿轮传动在一个啮合区中一对齿在啮合最深的情况下得到的, 而事实上在谐波齿轮传动中存在两个啮合区域, 尽管由于偏心误差的作用使两端啮合区域产生的运动误差不能完全抵消掉, 但仍然能抵消一部分, 使谐波齿轮传动的运动误差减少; 同时每个啮合区内总有若干对刚、柔轮齿同时参与啮合运动, 且柔轮为弹性元件, 所以也可以使传动误差得到补偿使运动误差得以均化, 使运动误差减小。由于这两个因素的存在使得谐波齿轮传动运动误差获得补偿和均化而减小, 减少量可通过采用平均效应系数 $1/\sqrt{N}$ 来衡量, 其中 N 为同时参与啮合的齿对数, 一般来讲 $N = 0.1(z_1 + z_2)$ 。则谐波齿轮传动运动误差的统计计算的幅值估算公式为:

$$\Delta\varphi'' = \frac{K_b}{\sqrt{N}} \Delta \frac{412.8}{d'} \quad (8)$$

式中 Δ —一对齿啮合时产生的运动误差;

$\Delta\varphi''$ —考虑多齿径向啮合后的角值运动误差;

d —从动齿轮的节圆直径(mm);

K_b —系数, 由实验确定, 一般取 0.8~1.0;

N —同时参与啮合齿对数;

412.8—线值运动误差转化为角值运动误差的系数;

根据由上述推导的椭圆凸轮波发生器谐波齿轮传动装置的运动误差估算公式, 对椭圆凸轮波发生器谐波齿轮传动装置的运动误差进行理论计算。计算时直接从该装置的设计图纸中选取公差值做为各种误差源的原始数据, 为谐波传动装置的技术参数, 计算时取 $K_b = 1.0$, $\alpha_n = 20^\circ$, $N = 0.1(z_1 + z_2)$, 按公式(8)计算得该谐波齿轮传动运动误差为 2.51'。

3 运动误差拍频现象的机理研究

在谐波齿轮传动运动误差曲线中常常呈现出一种特殊的“拍频”现象,对双波谐波齿轮传动而言,在传动装置输出轴一转的范围内通常出现二次拍频。一般拍频现象产生的原因是:若构成时域信号中两个简谐波的频率相差很小时,两者叠加后的合成波形即存在“拍频”现象。

由前面分析可知,谐波齿轮传动运动误差主要由以下三类不同频率的运动误差所构成,第一类是由刚轮偏心误差向量产生的运动误差,如刚轮本身加工时的几何偏心和运动偏心、刚轮的安装偏心及由波发生器部件中不随波发生器一起回转的偏心误差产生的偏心矢量。这些偏心误差矢量构成一综合偏心误差向量 e_2 ,其产生的运动误差的频率为 $2\omega_h$,如以输出轴转速度量则不 $2i_h\omega_o$ 。第二类是由柔轮偏心误差向量产生的运动误差向量,这些偏心矢量随柔轮一起回转,其合成的综合偏心矢量 e_1 将产生频率为 $2i_h\omega_o$ 的运动误差。第三类是由波发生器部件中各零、部件的误差而产生的随波发生器一起回转的偏心误差向量产生的运动误差,这些偏心误差向量形成综合偏心误差向量 e_3 ,它将产生频率为 $i_h\omega_o$ 的运动误差。此外还有一类具有更高频率的运动误差,即由刚、柔轮的小周期加工误差产生的更高频的运动误差,但因这些误差因素本身就很小,且由于谐波齿轮多齿对径啮合的特点使这部分误差的均化作用较强,故我们在分析谐波齿轮传动中运动误差的拍频现象时,将这部分运动误差乎略不计。这样由上述的分析可知谐波齿轮传动运动误差的合成可由下式来描述:

$$\Delta\Phi = \frac{K_b}{\sqrt{N}} [e_3 \sin(i_h \omega_o t) + e_2 \sin(2i_h \omega_o t + \psi_2) + e_1 \sin(2i_h \omega_o \frac{z_2}{z_1} t + \psi_1)] \frac{412.8}{d} \quad (9)$$

从该式中可见,在运动误差式中含有两个频率十分接近的误差分量 e_1 和 e_2 ,因为在谐波齿轮传动中,波发生器部件中由 e_3 构成的运动误差值较小,故在这里主要考查由 e_1 和 e_2 构成的运动误差的综合,将这两部分运动误差进行叠加,则有以下式成立:

$$\Delta\Phi = K \sin[(z_1 + z_2)\omega_o/2t + (\Phi + \theta)]$$

式中

$$K = \frac{412.8K_b}{d\sqrt{N}}$$

$$e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + 2e_1e_2\cos(2\omega_o t)}$$

从式中可见合成波的最大振幅为 $e_{max} = K(e_1 + e_2)$

最小振幅为 $e_{min} = K(e_1 - e_2)$

考虑输出轴转一转,则这时需用的时间为:

$$t = 2\pi/\omega_o$$

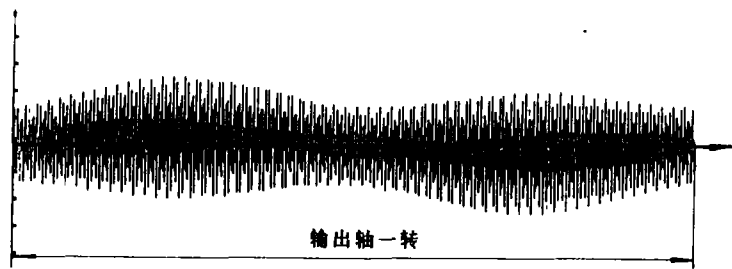


图 3

而运动误差中拍波的周期则为：

$$T = \frac{2\pi}{2\omega_0}$$

可见对于双波谐波齿轮传动而言，在每输出轴转一转的过程中将会产生两次拍频，形成两个波峰与波谷，这也就是为什么在双波谐波齿轮传动中的运动误差呈现两次拍频的产生机理。上面的分析是没有考虑到波发生器部件中产生的随波发生器一起回转的偏心向量的影响，但这项误差比刚轮和柔轮的偏心向量的误差相对小一些，对谐波齿轮的运动误差拍频现象并不会会有本质的改变，而只能是将具有拍频现象的运动误差曲线中的拍频形状上稍微改变一些，性质仍没有改变。图3是根据上述的分析利用计算机编程对谐波齿轮传动运动误差拍频现象的模拟。

4 运动误差及其频谱的测试及结果分析

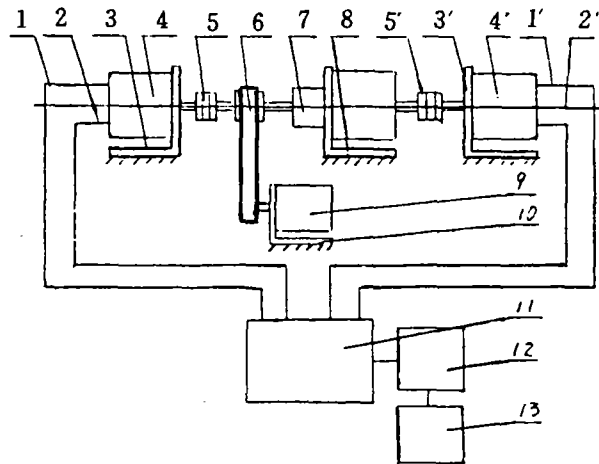
4.1 测试系统的建立

为了验证理论分析正确与否，同时为了建立一套实用、方便、准确的测度系统。结合谐波齿轮传动传动比较大、运动误差的频率较高的特点，对运动误差的测试采用光栅式动态测量的方法进行测量。运动误差频谱的测量采用专用的FFT信号分析仪来进行。所建立的运动误差及其频谱的测试系统的连接示意图如图4所示。

4.2 测试结果及分析

利用上述的测试系统对三台传动比 $i_n = 90$ ，刚轮齿数 $z_2 = 182$ ，柔轮齿数 $z_1 = 180$ ，编号分别为1、2、3号的椭圆凸轮波发生器谐波齿轮传动的运动差及其频谱进行了测试。测试时分辨率为 $80''/V$ ，输入轴的转速分别为 $184RPM$ 、 $184RPM$ 和 $198RPM$ 。采样时间分别为 $40S$ 、 $80S$ 和 $40S$ ，均包含输出轴一转以上的运动误差曲线。测得的结果见附录图1~图3。

三台谐波齿轮传动运动误差的幅值计算结果和测试结果列于表1中，从中可见计算结果与实测结果比较吻合，实测值与计算值之比 K_s 均在 $0.8 \sim 1.0$ 之间。



1-1'、电缆 2-2'、光导纤维 3-传感器支架 4-4'、高、低速光栅传感器
5-5'、精密联轴节 6-传动皮带 7-谐波齿轮传动装置 8-弯板 9-直流电机 10-电机支座 11-电子初试仪
12-FFT分析仪 13-绘图机

图4

表1 椭圆凸轮波发生器谐波齿轮传动装置运动误差计算与实测值比较

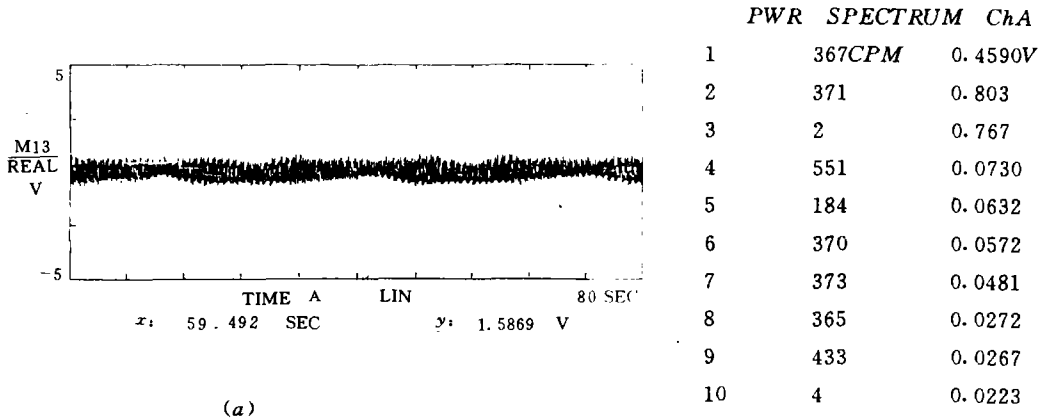
序号	理论计算值	实测值	实测值/理论值
1		2.12'	0.85
2	2.51'	2.39'	0.95
3		2.08'	0.82

对谐波齿轮传动运动误差的频率可分析如下：

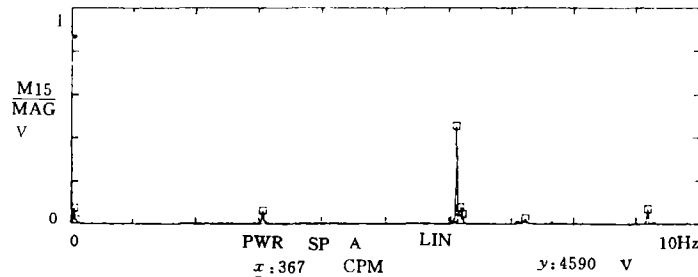
对于1号谐波齿轮传动由于在测试时的输入轴转速为184RPM,那么,根据前面的理论分析可知这时运动误差的频率如以转速计应分别对应 1. $i_h \omega_0 = 184RPM$,该频率的运动误差是由波发生器部件中那些随波发一起回转的误差向量产生的。2. $2i_h \omega_0 = 368RPM$,该频率的运动误差是由传动装置中刚轮的各种偏心误差向量产生的,根据前面的理论分析可知该运动误差的幅值在整个运动误差中占大的比例。3. $2i_h \omega_0 z_2/z_1 = 372RPM$,该频率的运动误差是由柔轮偏心误差向量产生的。4. 更高频率的运动误差因为其幅值很小故不考虑。从际录图1b的运动误差频谱中可以找到分别对应上面理论值的频率成分,它们分别为 $i_h \omega_0 = 184RPM$, $2i_h \omega_0 = 367RPM$,及 $2i_h \omega_0 z_2/z_1 = 371RPM$,且以 $2i_h \omega_0$ 频率的幅值为最大,即以影响刚轮使其具有偏心的误差向量的误差对运动误差的影响最大。可见实测的结果与理论分析的结果比较吻合。

从实际测试的几条谐波齿轮传动运动误差曲线知道,这几台谐波运动误差曲线都含有拍频现象,其中拍频现象在输出轴一转范围内呈现两个拍频。只是由于导致产生拍频现象的两个频率分量 $2i_h \omega_0$ 和 $2i_h \omega_0 z_2/z_1$ 的幅值相差较多,而使拍频的最大峰值和最小峰值相差不多,但仍然可以清楚地看到拍频现象的存在。将其与图5的拍频的模拟图相比,可见比较相象。

综观上述几种实验结果与前面的理论分析结果,可见理论分析与实验的测试结果相当的吻合,验证了谐波齿轮运动误差的幅值估算,运动误差的频谱分析及拍频现象的理论分析是正确的。

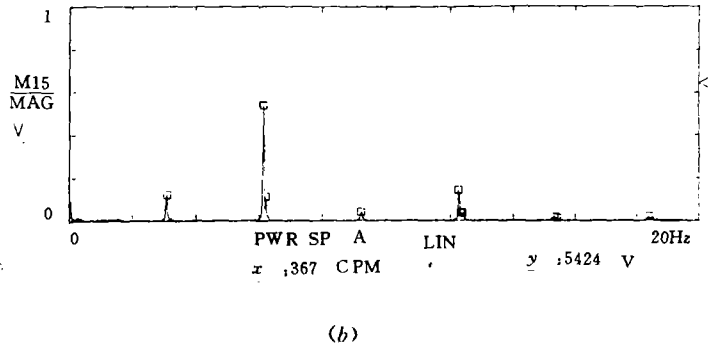
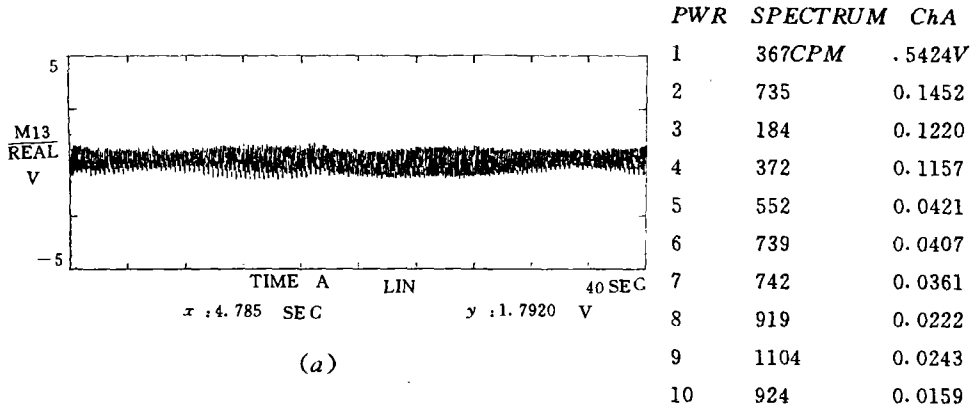


(a)

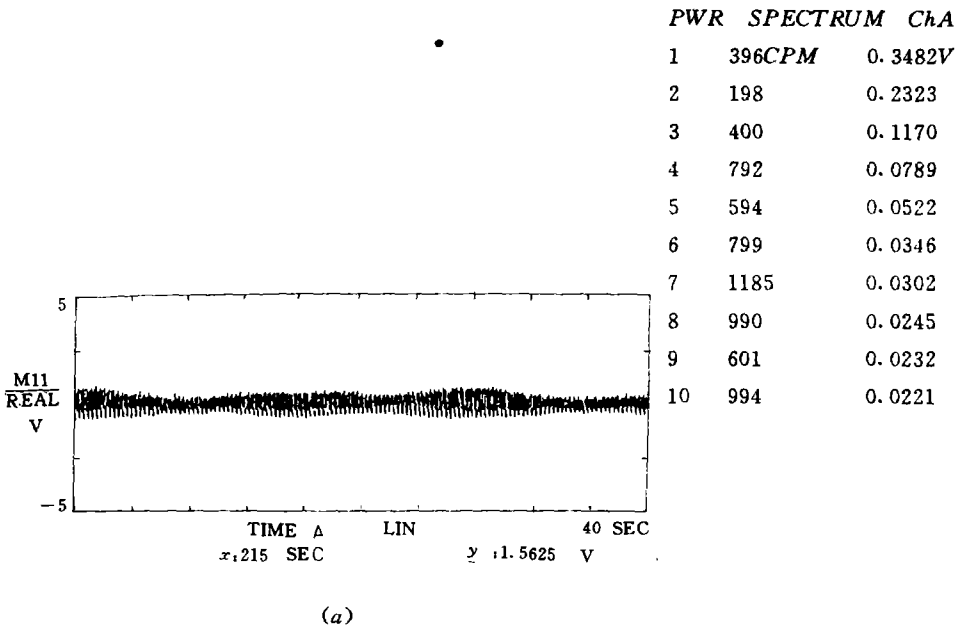


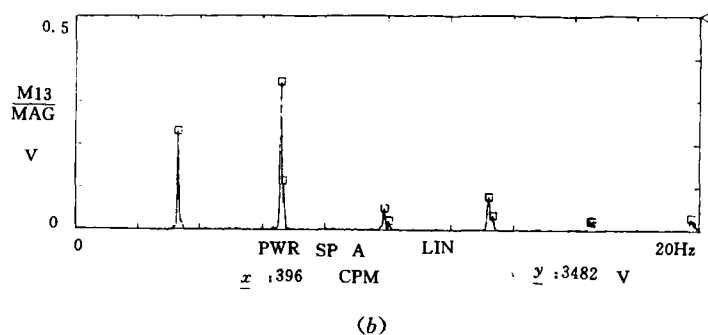
(b)

附图1 1号谐波齿轮传动运动误差及频谱的测试结果



附图 2 2号谐波齿轮传动运动误差及频谱测试结果





附图3 3号谐波齿轮传动运动误差及频谱测试结果

5 结 束 语

1. 谐波齿轮传动装置的刚轮、柔轮及波发生器部件的各种加工误差,装配误差是产生运动误差的主要因素。谐波齿轮传动由于存在同时参与啮合的齿对数较多,对谐波齿轮传动运动误差有补偿作用,使谐波齿轮传动的运动误差较同级的普通齿轮传动的运动误差小。

2. 谐波齿轮传动运动误差曲线不同于一般的齿轮传动的运动误差曲线而呈现高频化。其原因是由于刚轮、柔轮以及波发生器的加工、安装等低频误差高频化。对双波谐波齿轮传动而言其运动误差的频率主要由 $i_k \omega_0$ 、 $2i_k \omega_0$ 、 $2i_k \omega_0 z_2/z_1$ 等频率成分。

3. 在谐波齿轮传动运动误差曲线往往呈现“拍频”现象,一般来说对于双波谐波齿轮传动是在输出轴一转内产生两个拍。拍频的产生是由于谐波齿轮传动运动误差中存在两个频率相差很小的误差分量,即构成刚轮与柔轮的偏心误差向量产生的运动误差的频率相差很小而产生的。

4. 本文尽管以椭圆凸轮波发生器谐波齿轮传动装置为例来进行分析,但其基本理论和方法可适用于任何一种谐波齿轮传动装置。

参 考 文 献

- [1] 沈允文、叶庆泰,《谐波齿轮传动的理论和设计》. 机械工业出版社,1985
- [2] 谢金瑞,高精度谐波齿轮传动的精度分析,齿轮,1978,(3)
- [3] Деулин Е. А., Демидов С. Г., Вагин П. С., Явжанов. В. В., Расчет Точности герметичной полной зубчатой передачи методом имитационного моделирования на змью Изв. Вуз. Машиностроение, 1988,(8)
- [4] 孙麟治,许雪峰,谐波齿轮传动误差动态频率特性分析,光学机械, No. 2, 1992
- [5] 毛英泰编,《误差理论与精度分析》国防工业出版社,1982
- [6] 孙麟治等编,《小模数精密齿轮传动设计》. 机械工业出版社,1985
- [7] 秦树人等著,《齿轮传动系统现代测试方法与装置》. 四川科学技术出版社,1990
- [8] 日高照晃等,产业用ロボットの巡回駆動部における振動特性に関する研究,日本機械学会論文集 1987, 52(408)

A Study on the Theory and Measuring Technique of Transmission Error of Harmonic Gear Drive

Liu Yuanping

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun130022)*

Abstract

In this paper, error sources and the relation between error source and transmission error of harmonic gear drive is deeply analyzed based on its working principle and structure. Then synthesize these transmission errors by using stochastic error theory to write out estimative formula that calculate transmission error of harmonic gear drive. This paper also study the frequency spectrum of transmission error of harmonic gear drive.

In this paper, the theoretical analysis is carried out for the beat frequency phenomenon of transmission error of harmonic gear drive and the reason that the beat frequency occur has been found and simulated.

Finally, in this paper the measuring technique of transmission error and its Fourier spectrum of harmonic gear drive has been studied. The measuring system has been built up and several harmonic gear drives have been measured using this measuring system. Based on the measuring results, the theoretical analyses have been verified.

Key words: Harmonic gear drive, Transmission error, Frequency spectrum, Beat frequency phenomenon, Measuring technique