

高速谐波齿轮减速器的性能实验

赵明晶 张承嘉

一、前言

本文阐述的谐波齿轮减速器已应用于大型经纬仪的伺服传动系统之中。经过多年的工作实践表明,各项性能良好,传动精度、角加速度以及输出力矩等均已达到了指标要求,经实践考验,性能可靠。

该谐波减速器不足之处是柔轮的寿命偏低,对此是采用了备件的方法解决的。

该谐波减速器在传动系统中是通过滚轮来驱动转台旋转工作的。本文只讨论谐波传动部分的性能,阐述其传动精度、角加速度、转动惯量和传动效率的测试方法及其实验结果。文中所叙述的测试方法同样适用于一般的齿轮减速器。实验证明,采用这种实测法对工程使用来说是可靠的。

二、技术指标与电机参数

1. 谐波减速器的技术指标

- 最大角加速度: $\varepsilon_{\max} = 300^\circ/\text{s}^2$;
- 工作角加速度: $\varepsilon_p = 100^\circ/\text{s}^2$;
- 最大角速度: $\omega_{\max} = 300^\circ/\text{s}$;
- 工作角速度: $\omega_p = 100^\circ/\text{s}$;
- 总传动比: $i_T = 196$;
- 负载转动惯量: $J_u = 0.85 \text{ kg} \cdot \text{ms}^2$;
- 输出力矩: $M_u = 5 \text{ kgm}$;
- 传动精度: $\Delta F_s = 10'$;
- 传动效率: $\eta = 0.8$;
- 结构要求: 输入与输出轴同轴配置。

2. 伺服电机参数

- 型号: IISZ07;
- 功率: $P_H = 500 \text{ W}$;
- 额定转数: $n_H = 10000 \text{ rpm}$;
- 额定转矩: $M_H = 4860 \text{ gcm}$;
- 最大转矩: $M_m = 11000 \text{ gcm}$;
- 转动惯量: $J_m = 5 \text{ gcm}^2$ 。

3. 测速电机参数

型号: 70CZ01;
 额定转数: $n_s = 10000 \text{rpm}$;
 输出电压: $U_s = 110 \text{V}$;
 转动惯量: $J_s = 0.43 \text{gcm}^2$.

三、传动系统

该谐波减速器的传动系统如图 1 所示, 系采用齿轮与谐波齿轮组合的传动方式, 由伺服电机驱动, 通过两级直齿轮和谐波齿轮传动, 带动滚轮和转台旋转工作。其传动比按递减原则分配如下:

$$i_T = i_1 \cdot i_2 \cdot i_H = 1.4 \times 1.4 \times 100 = 196$$

$$i_1 = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{35}{25} = 1.4$$

$$i_2 = \frac{Z_4}{Z_3} = \frac{35}{25} = 1.4$$

$$i_H = \frac{Z_R}{Z_R - Z_g} = \frac{200}{200 - 202} = -100$$

式中 i_T ——谐波减速器总传动比;
 i_1 ——第一级齿轮传动的传动比;
 i_2 ——第二级齿轮传动的传动比;
 i_H ——谐波齿轮传动的传动比;
 Z_R ——柔轮齿数, $Z_R = 200$;
 Z_g ——刚轮齿数, $Z_g = 202$;
 Z_1, Z_3 ——主动齿轮齿数, $Z_1 = Z_3 = 25$;
 Z_2, Z_4 ——从动齿轮齿数, $Z_2 = Z_4 = 35$ 。

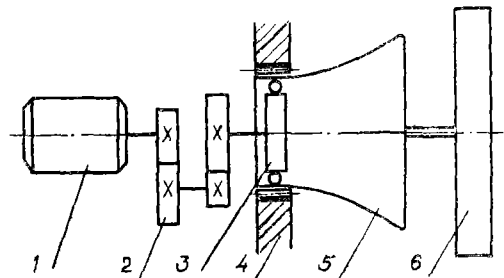


图 1 谐波减速器的传动系统图

1—伺服电机 2—直齿轮 3—发生器
 4—刚轮 5—柔轮 6—滚轮

四、传动精度的测定

传动精度系采用静态的光学度盘法测量的。测量方法如图 2 所示。为了消除度盘安装偏心的影响, 在输出轴度盘上采用两个成 180° 对置的读数显微镜进行读数, 取其平均值作为输出轴转角的测量值。根据传动比的数值, 在输出轴一转范围内取 49 个测量点测量了正反两个方向的传动精度。测量结果如图 3 所示。由图 3 曲线可知, 该谐波减速器的传动误差为:

顺时针方向 $\Delta F_{\Sigma CW} = 5' 48''$

逆时针方向 $\Delta F_{\Sigma CC} = 6' 12''$

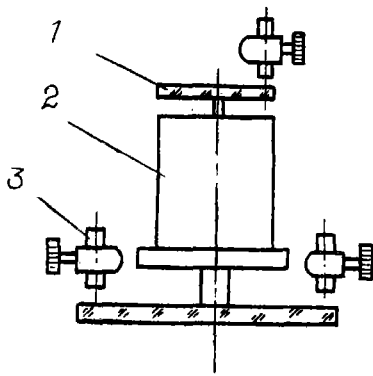


图2 传动精度的测量方法
1—光学度盘 2—减
速器 3—读数显微镜

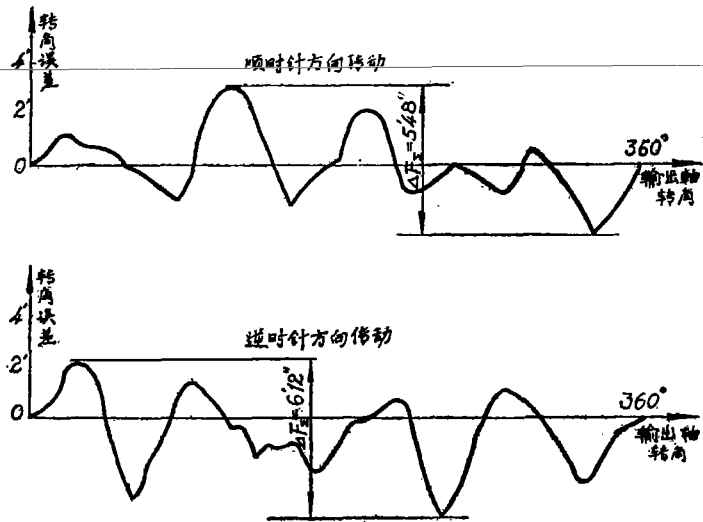


图3 传动误差曲线

由图3的传动误差曲线可以看出，传动误差中的运动误差（大周期误差成分）很不明显。这主要是由于谐波传动的啮合特点所致。因为两波的谐波传动是在相对 180° 的位置上啮合，对运动误差有明显的抵消作用。因此，两波传动的运动误差要比组成传动的谐波齿轮的运动误差的平均值小得多。

五、角加速度的测定

测定谐波减速器角加速度的方法如图4所示。这种方法是把负载的折算转动惯量 ($J'_L = 2.77 \text{gcm}^2$) 加到电机轴上进行的。首先给伺服电机加一阶跃电压（起动电流允许 15.4A ），然后用70CZ01测速电机将角速度的变化过程测出，借助SB-14慢扫描示波器进行观测，并用SC1八线示波器将角速度变化过程曲线拍照下来。拍照中，采用的振子为1号振子，自振频率为 5000Hz ；时标振子频率为 500Hz ；胶卷速度为 100mm/s ，拍照结果如图5所示。

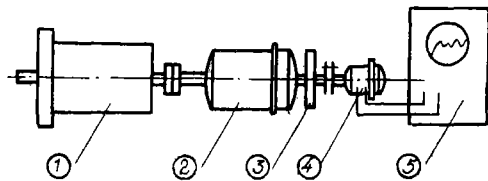


图4 角加速度的测定方法

1—减速器 2—伺服电机 3—折算的惯性负载
4—测速电机 5—示波器

当电机的输入量为电压信号，输出量为角速度时，则电机可视为惯性环节。对惯性环节可写出下述微分方程：

$$T \frac{d\omega}{dt} + \omega = KU \quad (1)$$

当输入电压 $U = U_0$ 为常量时，其通解为一指数方程：

$$\omega = KU_0(1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

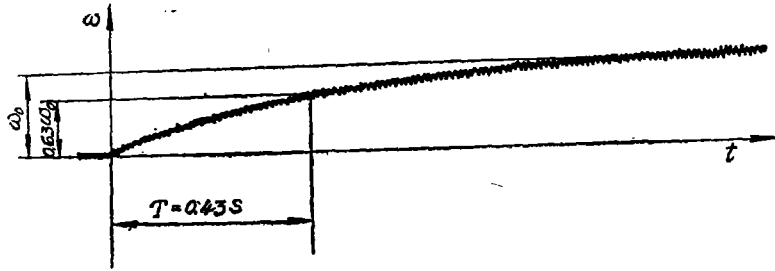


图5 电机轴角速度变化过程曲线

即
式中

$$\omega = \omega_0 (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (2)$$

- ω ——电机输出角速度；
- ω_0 ——电机输出的稳定角速度；
- T ——时间常数；
- t ——时间变量；
- K ——放大系数；
- U_0 ——输入的常值阶跃电压。

对(2)式进行微分可得角加速度：

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_0}{T} e^{-\frac{t}{T}} \quad (3)$$

显然，当 $t = 0$ 时 ε 即为电机起动时的角加速度，故(3)式可写成：

$$\varepsilon = \frac{\omega_0}{T} \quad (4)$$

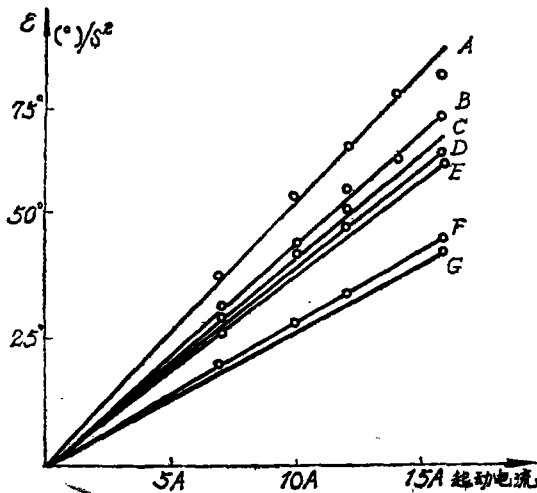


图6 各种组合装置的角加速度

- A—电机 B—电机+发生器 C—电机+谐波箱(双偏心盘发生器)
- D—电机+谐波箱(双滚子发生器) E—电机+齿轮箱 F—电机+谐波箱+负载
- G—电机+齿轮箱+负载

当 $t = T$ 时，由(2)式可得：

$$\omega = 0.63\omega_0 \quad (5)$$

由(5)式可知，时间常数 T 就是当输出角速度达到稳定角速度 ω_0 的0.63倍时所需的时间。因此，根据测得的稳定角速度 ω_0 借助图5曲线便可求出时间常数 T 。这样，由(4)式即可求出电机的角加速度，通过折算便可得到减速器输出轴的角加速度。

由图5的角速度过渡过程曲线得：

$$T = 0.43s$$

$$\omega_0 = 37800^\circ/s$$

由此可得谐波减速器输出轴的角加速度 ε_0 ：

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 &= \frac{\omega_0}{T i_r} = \frac{37800}{0.43 \times 196} \\ &= 448^\circ/s^2 \end{aligned}$$

为了进一步研究谐波减速器的加速度特性，用不同的起动电流分别地测定了电机、电机与发生器、电机与齿轮减速器、电机与

齿轮减速器及负载等各种不同组合装置的角加速度，测试结果如图 6 所示。图中被测齿轮减速器的传动比 $i_1 = 125.23$ ，输入轴转动惯量 $J_1 = 0.96 \text{gcm}^2$ （计算值）；被测谐波减速器的传动比 $i_H = 196$ ，输入轴转动惯量 $J_H = 0.87 \text{gcm}^2$ （计算值）。

六、转动惯量的测定

转动惯量是采用停车法测定的。这种方法（参看图 4）是借助测速电机测速，由伺服电机将谐波减速器加速到最大角速度，然后突然切断电源，使其靠摩擦力矩的作用自由停车。与此同时，用记录仪记下停车时间。此后，在减速器的输入轴上加一已知转动惯量的小轮仍重复上述之实验，则由刚体的转动定律可得：

$$M_1 = J_1 \varepsilon_1 \quad (6)$$

$$M_2 = (J_1 + \Delta J) \varepsilon_2 \quad (7)$$

由于减速器的摩擦力矩在相当宽的速度范围内是不变的，故可以认为在停车过程中其摩擦力矩是恒定不变的。这样，停车时的角加速度便可由平均角加速度来代替，故 (6)、(7) 两式可写成：

$$M_1 = - J_1 \frac{\omega_H}{t_1} \quad (8)$$

$$M_2 = - (J_1 + \Delta J) \frac{\omega_H}{t_2} \quad (9)$$

由于附加小轮的转动惯量小、重量轻，故由其引起的输入轴摩擦力矩的变化可以忽略，即可认为 $M_1 = M_2$ 。于是，由 (8)、(9) 两式可得：

$$J_1 = \frac{t_1}{t_2 - t_1} \Delta J \quad (10)$$

- 式中 M_1 ——减速器输入轴的摩擦力矩；
 M_2 ——减速器输入轴装有小轮时的摩擦力矩；
 ε_1 ——减速器输入轴停车的角加速度；
 ε_2 ——减速器输入轴装有小轮时停车的角加速度；
 ω_H ——减速器输入轴停车时的角速度， rad/s ；
 J_1 ——减速器输入轴上的转动惯量，
 ΔJ ——附加小轮的转动惯量， $\Delta J = 2.56 \text{gcm}^2$ ；
 t_1 ——减速器输入轴的停车时间， $t_1 = 2.7 \text{s}$ ；
 t_2 ——减速器输入轴装有小轮时的停车时间， $t_2 = 3.5 \text{s}$ 。

将测得的数据代入 (10) 式，则得谐波减速器输入轴上的转动惯量 J_1 ，从中减去伺服电机和测速电机的转动惯量则得谐波减速器自身的转动惯量 J_H ：

$$J_1 = \frac{t_1}{t_2 - t_1} \Delta J = \frac{2.7}{3.5 - 2.7} 2.56 = 7.68 \text{gcm}^2$$

$$J_H = J_1 - J_M - J_S = 7.68 - 5 - 0.43 = 2.25 \text{gcm}^2$$

测定结果表明， J_H 的测定值要比计算值大得多。

七、传动效率的测定

对传动效率可作如下定义：

$$\eta = \frac{N_u}{N_i} = \frac{M_u \omega_u}{M_i \omega_i} = \frac{M_u}{M_i i_T} \quad (11)$$

式中 η ——传动效率；
 N_u ——输出功率；
 N_i ——输入功率；
 M_u ——输出转矩；
 M_i ——输入转矩；
 ω_u ——输出角速度；
 ω_i ——输入角速度；
 i_T ——总传动比。

由 (11) 式可知，只要测得输入与输出转矩即可求出传动效率。图 7 所示是测定输入与输出转矩的测量装置。输入转矩是采用摇摆电机测定的，输出转矩是采用扭力计测定的。当输入轴 3000rpm 时测得的数据列于表 1。根据表 1 数据绘出的效率曲线如图 8 所示。由图 8 的效率

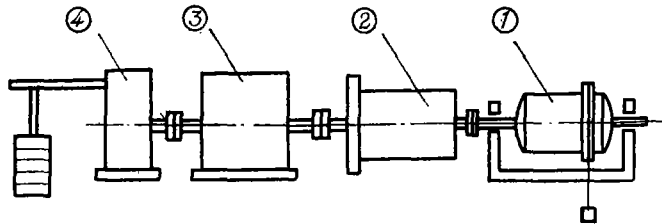


图 7 效率测定装置

1—摇摆电机 2—谐波减速器 3—扭力计 4—加载装置

曲线可知，该谐波减速器的传动效率在工作载荷下可以达到 $\eta = 0.8$ 。当输出轴转矩为 2kgm 时，改变输入转数时，测得的效率曲线如图 9 所示。由该图可知，谐波减速器的传动效率是随着转数的增高而下降。当输入转数达到 10000rpm 时，其效率为 $\eta = 0.6$ 。

表 1 谐波减速器的输入与输出转矩

输入转矩 M_i (kgm)	理论输出 $M_i \times i_T$	输出转矩 M_u (kgm)	传动效率 η
0.0033	0.64	0.25	0.39
0.0044	0.86	0.50	0.58
0.0060	1.18	0.75	0.64
0.0077	1.51	1.05	0.70
0.0093	1.82	1.36	0.75
0.0110	2.15	1.67	0.78
0.0126	2.46	1.98	0.80
0.0170	3.32	2.70	0.80

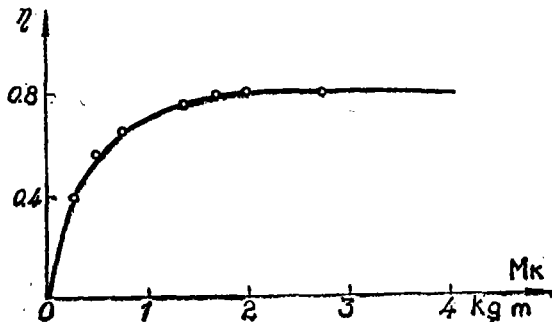


图 8 谐波减速器效率曲线

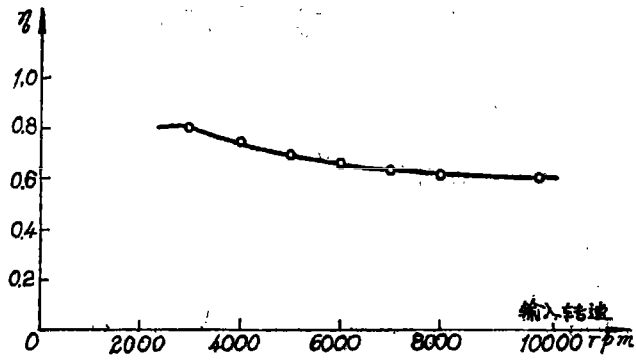


图9 不同转数下的谐波减速器效率曲线