

# 精密步进谐波传动的研究

谢金瑞 何惠阳

**摘要** 本文介绍了一种可用于精密数控系统中的高分辨率的新型传动装置——精密步进谐波传动装置。文中着重对提高步进传动分辨率的技术途径、获得最佳传动方案和性能指标的措施以及对步进传动主要性能指标的测试方法和结果进行了讨论。因此本文对步进传动装置的进一步发展和在数控系统中的广泛应用将会起到一定的作用。

## 前 言

随着脉冲技术的迅速发展,步进机在计算机、数控机、机械人、遥控操作机……的数字分度,数字定位以及跟踪系统中得到了广泛的应用。特别近年来,由于宇航、智能机、遥感、大规模集成线路,海洋工程等新兴科学技术的发展,对步进机的体积、结构、重量及其主要性能指标都提出了更高的要求,结果导致现有的步进机远不能适应这些新技术发展的需要。为此目前不少国家都在利用各学科已有的技术成果,研制新型的步进传动装置。到目前为止,较有成效的是美国USM公司和瑞典斯德哥尔摩皇家理工学院,利用谐波传动的原理分别研制成的高分辨率的“RESPONYN”步进马达和“ROTELL”步进马达。这不仅为步进机进一步的发展提供了新的技术途径,而且也为相应的数控系统进一步提高性能,简化结构创造了条件<sup>[1, 2]</sup>。

为了适应我国新兴科学技术的发展和吸取国外的先进经验,近年来我们也利用谐波传动的原理和已有的研究成果,开展了这方面的研究。现仅就研制成功的步距角 $\theta_s = 1'7.5''$ 、步进传动误差 $\Delta\varphi_s < 3'$ 、步距误差 $\Delta\theta_s \leq 13''$ 、输出扭矩 $M = 1.5 \sim 2$ 公斤·米、外径75毫米、长162毫米的精密步进谐波传动装置的一些有关问题分述如下。

## 一、提高分辨率的技术途径

由步进电机的原理可知,分辨率高,也就是步距角小。对反应式的步进电机,其步距角(即给定一个脉冲信号后输出轴相应的转角) $\theta_s$ 可用下式表示<sup>[3]</sup>:

$$\theta_s = \frac{360^\circ}{m_1 Z_r} \quad (1)$$

式中:  $Z_r$ ——步进电机转子的齿数;

$m_1$ ——驱动电源的运行拍数。

由(1)式可以看出,要想获得高分辨率,需增加转子的齿数 $Z_r$ 和驱动电源的运行拍数 $m_1$ ,这是当前国内提高步进电机分辨率的主要技术途径。使用证实,当分辨率要求不太高时,这种方法还是可行的;反之这种方法将存在很大问题。如靠增加转子齿数 $Z_r$ 的方法

来获得高分辨率，则步进电机的结构复杂、体积和重量显著增加。就以五相十拍的驱动电源为例，要想获得 $1'$ 的步距角，则电机转子的齿数 $Z$ ，将要增到2160，这样一方面难于加工，另一方面因体积重量所限在实际中也不便应用。同样若采用具有细分线路的驱动电源，用增加 $m_1$ 的方式来获得高分辨率，则不只线路复杂庞大，同时对步进机的静态精度和动态精度也将有较大的影响。

鉴于上述情况，我们利用谐波传动的特点<sup>[4]</sup>。采用配置谐波减速器的方法，将步距角进行机械细分来获得高分辨率。这样（1）式显然可改写为：

$$\theta_b = \frac{360^\circ}{m_1 Z_r i} \quad (2)$$

式中： $i$ ——谐波传动装置的减速比。

由（2）式可以看出，这种方法比较方便和经济。另外由于谐波齿轮传动固有的动态特性，能较快的吸收掉由于制动惯性负荷而产生的附加振动，和在减速状态下力矩的放大功能。因此它的承载能力，尤其是对外负荷的抗干扰能力将大大增强、步进精度和运转平稳性也显著提高。

## 二、传动装置的结构和特点

图1所示，为具有高分辨率的精密步进谐波传动装置。该传动装置由步距角 $1.5^\circ$ 的BF 159075—C型步进电机1、刚轮2、椭圆凸轮波发生器3、柔轮4和输出轴5等几个

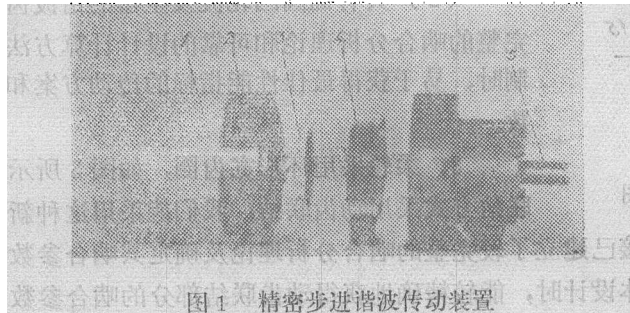


图1 精密步进谐波传动装置

主要部分组成。其中具有齿数 $Z_r = 160$ 的柔轮、齿数 $Z_o = 162$ 的刚轮与椭圆凸轮波发生器构成了减速比 $i = 80$ 的精密谐波齿轮传动。它将步进电机每一个脉冲相应的步距角（ $1.5^\circ$ ）细分80之后，由输出轴将角位移依次均匀输出，从而实现分辨率可达 $1'7.5''$ 的精密步进传动。另外，该传动装置由于零件数量少、传动链短、刚度高、结构简单紧凑，再加上谐波齿轮传动部分和输出轴动齿联结部分轮齿的啮合参数，都是根据谐波齿轮传动啮合分析的理论，运用电子计算机经过最佳啮合分析计算后，经严格控制关键零件的加工来实现的。这样就保证在啮合过程中，轮齿能按着预定的运动规律以最小的齿侧间隙而又无轮齿干涉的情况下运行。

## 三、传动装置结构参数的选择

实验分析证实，上面介绍的传动装置，能否对现有的步进电机进行细分来获得高分辨率和最佳传动性能，关键在于对谐波齿轮传动能否选用合理的传动结构，正确的啮合参数，精

密可行的工艺方法。下面针对这些问题分别进行讨论。

### (一) 传动装置结构的选择

为了使传动装置重量轻、体积小、结构简单紧凑、精度高，我们分析了多种类型的谐波齿轮传动的结构并经计算之后确定：

1. 总体方案采用谐波马达减速器的结构形式，如图 1 所示。这样就可把刚轮与步进电机的端盖做为一体，并把椭圆凸轮波发生器直接装在步进电机的轴上。结果不仅省去了大量的零件，而且还大幅度地提高了步进电机轴、波发生器、刚轮、柔轮相互之间的同心度和安装精度，同时也为整个传动装置提高精度打下了较好的基础。

2. 采用椭圆凸轮波发生器，其廓形如图 2 所示。廓形的具体变化规律可用下面的极坐标方程式表示<sup>[5]</sup>：

$$\rho = \sqrt{(r + \Delta_1 m)^2 - 4r \Delta_1 m \sin^2 \varphi} \quad (3)$$

式中  $r$  —— 为椭圆凸轮的等效圆半径；

$\Delta_1$  —— 柔轮的径向变形量系数；

$m$  —— 柔轮的模数；

$\varphi$  —— 以椭圆凸轮波发生器长轴为起始点的波发生器的转角。

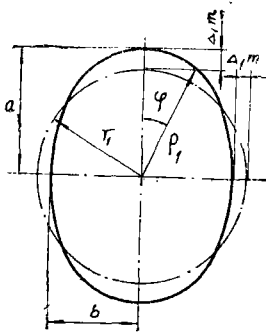


图 2 椭圆凸轮波发生器的廓形图

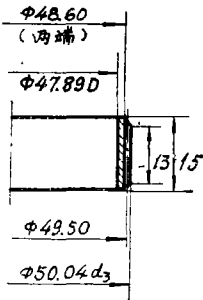


图 3 柔轮的结构图

多年的实践证明，这种类型的波发生器的特点是：

(1) 具有良好的工艺性，加工中易于实现高精度；

(2) 具有椭圆凸轮波发生器的谐波齿轮传动，已具备较完整的啮合分析理论和可靠的设计计算方法<sup>[5]</sup>，因而在具体研制时，易于获得最佳性能指标的传动方案和较准确的设计参数。

3. 柔轮采用环形宽齿圈，如图 3 所示。柔轮与输出轴的联结方式采用动齿联结，我们能采用这种新结构，主要因为：

(1) 对动齿联接已建立了较完整的啮合分析理论及确定其啮合参数的具体设计计算方法<sup>[5]</sup>，因此在进行具体设计时，能较精确地获得动齿联结部分的啮合参数和结构参数。另外对有关零件还分别建立了特殊的加工、检测方法，对影响齿测间隙和啮合规律的主要尺寸能严加控制，因而能较方便地获得既无齿侧间隙又无轮齿干涉的动齿联结机构。

(2) 环形柔轮的长度没有严格限制，轴向尺寸一般可以做的较小。因而柔轮的扭转刚度尽管很大，但却易于产生径向变形，这对谐波传动获得较好的传动性能指标是非常有利的。另外这种结构的柔轮轴向尺寸较短，对步进谐波齿轮装置实现小型化也有好处。

### (二) 传动装置啮合参数和结构参数的选择

根据对步进电机步距角的细分要求和传动装置的承载能力、外型尺寸以及满足强度刚度的需要。我们取谐波齿轮传动的传动比  $i = 80$ ；刚轮和柔轮的基本参数：模数  $m = 0.3$  毫米、压力角  $\alpha_{fR} = \alpha_{fG} = 20^\circ$ 、刚轮的齿数  $Z_G = 162$ 、柔轮的齿数  $Z_R = 160$ ，波发生器为椭圆凸轮波发生器、内配置。之后，再按资料<sup>[5]</sup>介绍的啮合分析理论和应用电子计算机进行啮合分析计算的方法，将大量的传动方案经过优选分析计算之后，求得当柔轮和刚轮具有表 1 所列出的主要参数的情况下，可获得谐波齿轮传动最佳的啮合传动方案，并根据电子计算机算出的计算结果分别作出柔轮齿廓相对刚轮齿廓的运动关系如图 4 所示。柔轮齿廓与刚轮齿廓之间

表 1 柔轮和刚轮的主要参数

序 号	参 数 名 称	柔 轮	刚 轮
1	齿数 $Z_R, Z_G$	$Z_R = 160$	$Z_G = 162$
2	模数 $m$ (毫米)	0.3	0.3
3	压力角 $\alpha_{fR}, \alpha_{fG}$ (度)	$\alpha_{fR} = 20^\circ$	$\alpha_{fG} = 20^\circ$
4	移距系数 $\xi_R, \xi_G$	$\xi = 2.5$	$\xi_G = 2.4$
5	齿顶圆直径 $D_{eR}, D_{eG}$ (毫米)	$D_{eR} = 50.04$	$D_{eG} = 49.9$
6	齿根圆直径 $D_{iR}, D_{iG}$ (毫米)	$D_{iR} = 48.69$	$D_{iG} = 50.85$
7	齿宽 (毫米)	$B = 13$	$B = 7$
8	柔轮的长度 $L$ (毫米)	$L = 15$	
9	柔轮齿圈中性层的半径 $r$ (毫米)	$r = 24.145$	
10	柔轮的齿圈厚度 (毫米)	$h = 0.4$	
11	柔轮的径向变形量系数 $\Delta_1$	$\Delta_1 = 0.9$	

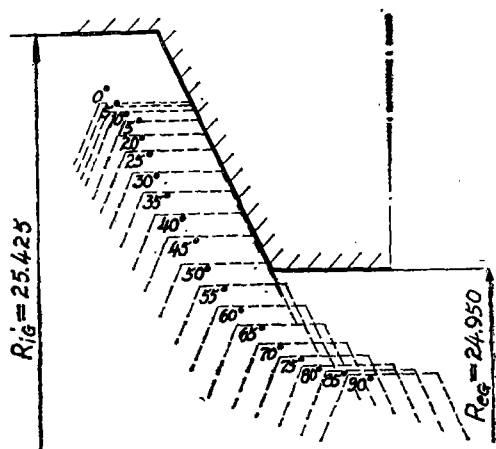


图 4 柔轮齿廓相对刚轮齿廓的运动关系

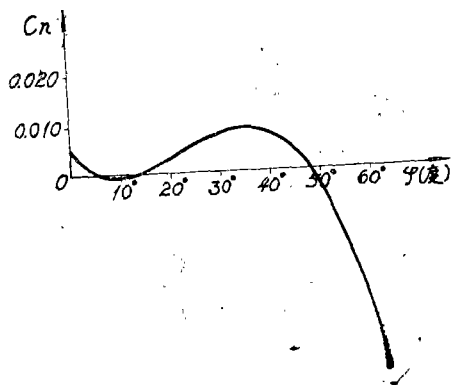


图 5 啮合侧隙的变化规律

的法向侧隙  $C_n$  随波发生器转角  $\varphi$  的变化规律如图 5 所示。由图 4 图 5 可以看出，在精密步进谐波传动装置中的刚轮、柔轮选取上述一些主要结构参数的情况下，柔轮齿廓将近似沿着一条直线以极小的齿侧间隙相对刚轮的齿廓移动。而且两轮齿相互啮合的过程，在波发生器转角  $90^\circ$  的范围内，可达  $45^\circ \sim 50^\circ$ 。这一方面证实了只要传动方案、啮合参数选择适当，谐波齿轮传动就有实现近 50% 的轮齿同时啮合的可能性；更主要地是使该传动装置在高精度的条件下，能获得高分辨率有了较可靠的保证。

另外，对该传动装置的动齿联结机构，用动齿联结的啮合分析理论和运用电子计算机分析计算的方法，同样经过优选分析计算之后，求得当输出轴内齿轮具有表 2 所列出的各主要

表 2 输出轴内齿轮的主要参数

序 号	主 要 参 数	序 号	主 要 参 数
1	齿数 $Z = 160$	4	移距系数 $\xi = +3.3$
2	模数 $m = 0.3$ 毫米	5	齿顶圆直径 $D_e = 49.44$ 毫米
3	压力角 $\alpha_f = 20^\circ$	6	齿根圆直径 $D_i = 48.09$ 毫米

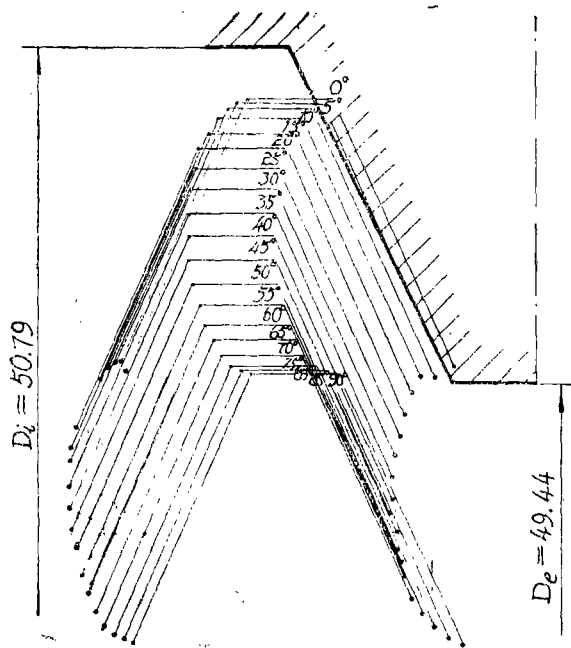


图6 动齿联结两轮齿廓的相对运动关系

参数，而柔轮的主要参数和变形规律和上述情况同样的条件下，可获得输出轴动齿联结的最佳传动方案。该传动方案两轮齿廓的相对运动关系如图6所示。由图中两轮齿廓的相对运动关系可以看出，在该传动装置中，动齿联结可以获得无齿侧间隙的传动。

#### 四、传动装置主要性能指标的测试方法和结果

##### (一) 精度

步进传动装置的精度，是指传动装置空载运行时，输出轴实际转角与理论转角的差值。在用静态精度测试的情况下，常用步距误差  $\Delta\theta_s$  和步距累积误差  $\Delta\theta_c$  两个精度指标来表示。而在用动态精度测试的情况下，则用步距误差和步进传动误差  $\Delta\varphi_s$  两个精度指标来表示。由传动误差的分析理论<sup>[6, 7]</sup>可知，步距误差只是步进传动误差中的一种高频误差分量。因此对具有高分辨率的步进传动装置，误差  $\Delta\theta_s$  在步进传动误差中，将是一个频率极高的误差分量，目前即使在用较先进的动测仪器测得的  $\Delta\varphi_s$  曲线中也难以分辨和确定。故为了对图1所示的精密步进谐波传动装置方便准确地进行精度鉴定，我们分别用静测和动测的方法对步距误差和步进传动误差进行了测试，下面分别介绍如下：

##### 1. 步距误差 $\Delta\theta_s$ 的测定：

为了快速准确地测定精密步进谐波传动装置的步距误差，我们用 PAD05 型光电测角仪、LY-4 型数字打字机、MFS-2A 型双脉冲信号发生器、BQDI-004 型反应式步进电机驱动电源等通用设备，构成一套数字化的步距误差的高精度测量装置。该测量装置的原理示意图如图7所示。测试时，由脉冲信号发生器发出的单次脉冲信号，经处于外接状态的步进电机驱动电源分配放大后，送入步进电机使其转过一个相应的角度。该转角再经谐波齿轮减速器细分之后，由输出轴传出，就是精密步进谐波传动装置的实际步距角。其具体角度值，可通过精密弹性联轴节，由光电测角仪的高精度光栅式角位移传感器测得，并在光电测角仪的

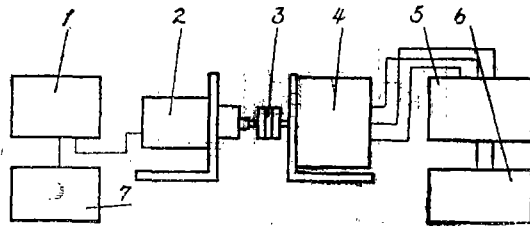


图7 步距误差测量装置原理图

1. 驱动电源 2. 步进谐波传动装置 3. 弹性联轴节 4. 传感器
5. 数显装置 6. 数字打印机 7. 脉冲发生器

数字显示装置上显示和在数字打印机上同时打出。这样将大量测得的每个实际步距角与理论步距角分别比较求其差值，取其最大的绝对值，即为该传动装置的步距误差。对于图1所示的精密步进谐波传动装置，由于它的分辨率较高，如在输出轴一转的范围内，将每一个步距角都给测出，则需要测19200个点。因此为了既便于实验又能较真实的测出传动装置的步距误差值，在输出轴一转的范围内，取 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$ 四个区域分别连续测量240个点。测试结果如图8所示。由图8中的曲线可以看出，在这四个区域内测得的全部步距误差值中，绝对值最大的小于13弧秒。

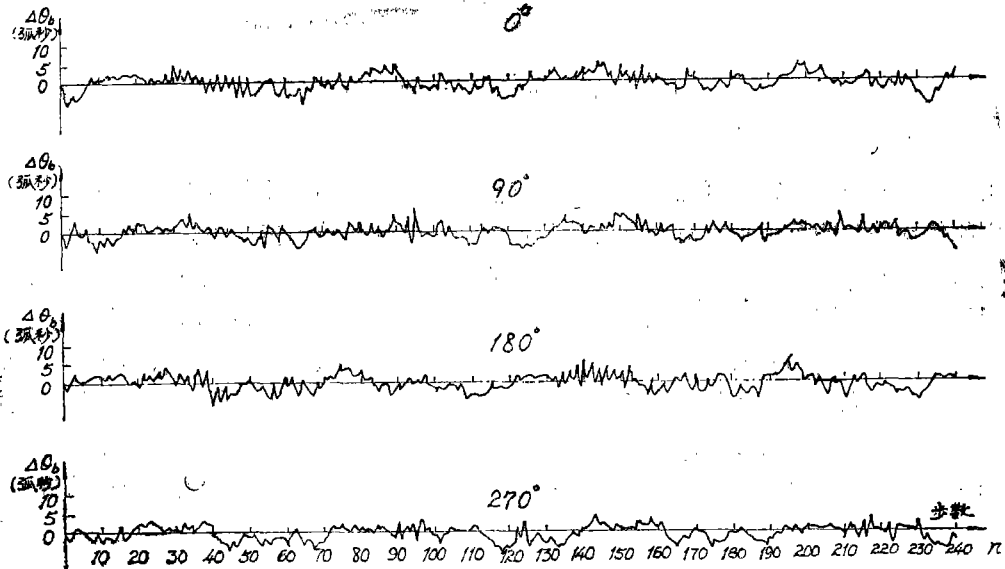


图8 传动装置步距误差测量结果

## 2. 步进传动误差 $\Delta\varphi_s$ 的测定:

由GPG05型传动测试仪的测量原理和实验证实，精密步进谐波传动装置，当驱动电源连续供给脉冲信号，经步进电机使其均匀转动后，其步进传动误差就可由该传动测试仪准确地测出，测试装置的原理示意图如图9所示。光栅式角位移传感器1通过高精度弹性联轴节2与精密步进谐波传动装置3的输出轴联接，光栅式角位移传感器5通过另一个高精度弹性联轴节4与传动装置的高速轴（即步进电机轴的另一端）相联。测试时，当由驱动电源

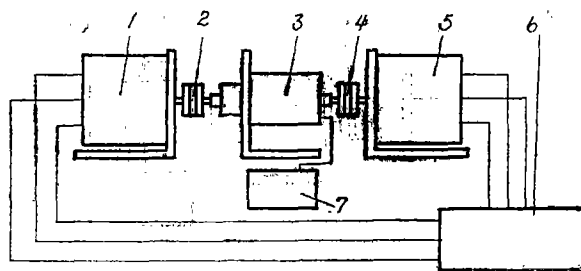


图9 步进传动误差测量装置原理图

7连续发出脉冲信号使步进传动装置均匀转动后，两个光栅式角位移传感器就可把传动装置高速轴、低速轴的转角分别转换成相应的正弦信号同时送入电子分析仪6，经脉冲变换、分频、比相、记录，即可得到如图10所示的精密步进谐波传动装置的步进传动误差曲线。由定标值（每1毫米代表16弧秒）经换算之后，求得传动装置的步进传动误差  $\Delta\varphi\% < 3$  弧分。

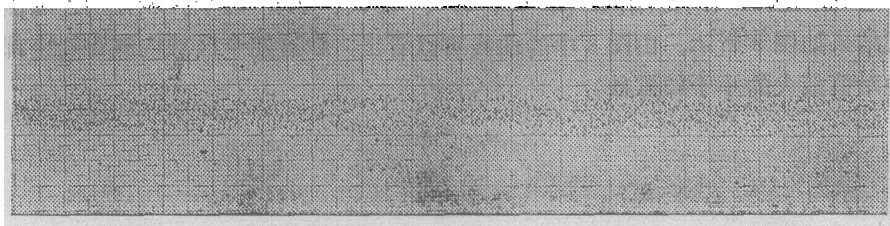


图10 传动装置的步进传动误差曲线图

## （二）虚动量

由步进电机的动态特性可知，电机转轴每前进一步，在到达稳定值之前，总处于振荡状态。因此传动装置的虚动量，对步进传动装置的动态特性和传动精度将会产生较大的影响。为此，对用于精密数控系统中的步进传动装置的实际虚动量，如能建立可靠的测试方法和装置进行较准确的测定，则对于提高精密数控系统的动态特性和精度指标将具有较大的意义。

另外由传动误差的分析理论可知<sup>[7]</sup>，传动系统中的虚动量，主要由各传动元件间的间隙、摩擦以及它们在外力作用下产生的弹性扭转角所形成的三种不同性质的虚动量组成。由于在外力的作用下产生的这三种不同类型的虚动量总是交织在一起的，一般难于将三者分开。因此为了准确地测出传动装置的总虚动量，并从总虚动量中分解出纯间隙虚动量、摩擦

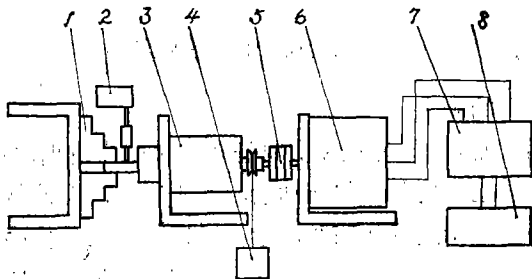


图11 虚动量测试装置的原理图

虚动量和弹性虚动量，我们用 PAD05 型光电测角仪、DGS—20C 电感比较仪、LY—4 型数字打印机和输出轴固紧机构、高速轴加载装置，组成了一套数字化的虚动量测试装置。该测试装置的原理示意图如图 11 所示。测试时用固紧机构 1 将传动装置 3 的输出轴固定，并用电感比较仪 2 进行监视。之后，先在输入轴的顺时针旋转方向用加载装置 4 从零开始逐次均匀增加负载，对输入轴施加力矩，相应产生的扭转角经精密弹性联轴节 5 由光电测角仪的光栅式角位移传感器 6 测量，并用数字显示器 7 显示或用数字打印机 8 直接打印出来。待扭矩达到额定值（相当于输出轴扭矩约为 1.5 公斤·米时）后在输入轴反时针旋转方向加载到额定值后，再卸载到零；最后再在输入轴正时针旋转方向加载到额定值。如此，重复实验多次，并将各次测得的数据作相应地处理后，最后用获得的测试数据以纵坐标表示传动装置输出轴的转角（以弧秒计），以横坐标表示对传动装置输出轴施加的外力矩（单位以公斤·米计算），作出在加载、卸载的情况下，输出轴顺逆时针旋转方向的转角与外力矩之间的关系曲线，即可获得精密步进谐波传动装置各种虚动量用的滞后回线，如图 12 所示。

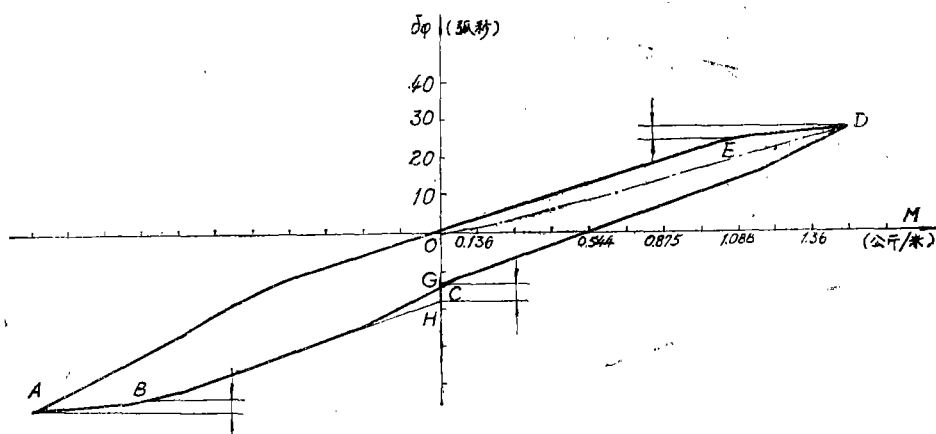


图 12 虚动量滞后回线图

分析图中的回线，可以看出，传动装置的总虚动量  $\delta_{\varphi_{\text{总}}} = 74.4$  弧秒。又回线 ABCDEFA 反映了在输出轴顺、逆时针旋转方向加载、卸载时，两个对称过程（即曲线 ABCD 和曲线 DEFA 两个过程）力矩与转角之间的关系。在每个过程中都含有相同的线性过程（由弹性变形引起）和非线性（由纯间隙、摩擦和材料的变形滞后引起）过程。以曲线 ABCD 为例，AB 段为摩擦和材料的弹性滞后造成的，AB 段在  $\delta_{\varphi}$  轴上的投影，即为摩擦和材料的变形滞后的虚动量（小于 3 弧秒）。BC 段为卸载过程，将此过程的弹性变形段延长交  $\delta_{\varphi}$  轴于 H 点，CD 段为加载过程，将此过程的弹性变形段延长交  $\delta_{\varphi}$  轴于 G 点，则 GH 即代表传动装置的纯间隙虚动量（ $\delta_{\varphi_{\text{纯}}} < 5$  弧秒）。之后再由总虚动量中将这两种虚动量扣除，最后得传动装置的弹性虚动量为  $\delta_{\varphi_{\text{弹}}} < 74.4 - 3 - 5 = 66.4$  弧秒。

## 五、结 束 语

（一）本文介绍的精密步进谐波传动装置，是一种可用于精密数控系统中的高分辨率的新型传动装置。它在步进传动误差  $\Delta\varphi_s < 3$  弧分、步距误差  $\Delta\theta_s < 13$  弧秒的情况下，分辨率可达 19200 步数/输出轴每转。

(二) 本文对步进电机的现状、对提高分辨率及其他主要性能指标的技术途径,进行了较详细地讨论。在此基础上,考虑到谐波传动的优点和目前技术上的可能性,提出了一种提高步进机分辨率的技术途径。从而为进一步提高步进传动装置的性能指标和扩大其在数控系统中的应用,将会有一定地作用。

(三) 本文对步进传动误差和步距误差等性能指标,还提出了一套数字化的精密测试方法和装置。使用证实这种设备和方法有较高的精度和可靠性,因此它将有助于深入地研究步进传动装置的有关动、静态特性。

(四) 该传动装置由于使用中的需要,步距角为1弧分7.5弧秒。为便于推广应用,今后步距角将改为60进制的标准值。

#### 参 考 文 献

- [1] Step motor for precise regulation, "Progress in Swedish Research and Technology", 1977, 7, 5.
- [2] Responsyn fine angle stepping motors and digital drive systems, Harmonic Drive Division, USM.
- [3] 王宗培 李楚武; 机床, 1980, 1.
- [4] 谢金瑞; 光学机械, 1979, 4, 22.
- [5] 谢金瑞; 光学机械, 1979, 4, 1980, 3.
- [6] 谢金瑞; 齿轮, 1978, 8.
- [7] George. W. Michalec; Precision Gearing Theory and practice, 1966.