

扭轮摩擦驱动系统研究*

戴一帆 李圣怡 罗兵 彭莉

(国防科技大学机械电子工程与仪器系 长沙 410073)

摘要 扭轮摩擦驱动是集摩擦传动和螺旋传动为一体的传动系统,它既具有摩擦传动动态特性好,同时又有螺旋传动导程小的特点。本文介绍一种扭轮摩擦驱动系统,它的导程小于0.2mm,行程为250mm,运动分辨率可达纳米级水平。它由扭轮摩擦传动机构、气体静压导轨及相关部件组成,是一种大行程高分辨率的新型驱动系统。

关键词 扭轮摩擦传动,摩擦传动,螺旋传动,超精密加工

分类号 TH132

Research on Twist-roller Friction Drive System

Dai Yifan Li Shengyi Luo Bing Peng Li

(Department of Mechatronics Engineering and Instrumentation, NU DT, Changsha, 410073)

Abstract Twist-roller friction drive system combining friction drive with screw drive, has many features such as good dynamic characteristic of friction drive and small lead of screw drive. This paper presents a kind of twist-roller friction drive system. Its lead is less than 0.2mm, the stroke is about 250mm, and the resolution is several nanometer. It is composed of twist-roller friction drive mechanism, static air bearing guideway and relative parts. It is a new kind of drive system with large stroke and very high resolution.

Key words twist-roller friction drive, friction drive, screw drive, ultraprecision machining

这里所说的传动系统是指将电机的旋转运动转换成平台的直线运动的那一种。如常见的滚珠丝杠、滑动丝杠、正交摩擦传动等。在精密工程领域一般要求有较高的运动分辨率和平稳的运动,所以经常使用滚珠丝杠和正交摩擦机构传动。但是这些传统的传动机构随着人们对精度的要求越来越高日渐显露出它们的缺点。精密滚珠丝杠定位系统的行程可达几百毫米,但由于结构上的原因,导程不可能做得太小,同时还有反向运动间隙,复杂的弹性变形和微小振动等因素影响着它的传动特性,另外加工制造困难也是它使用受到制约的重要因素(目前市场上很难买到C0级丝杠)。正交摩擦传动被广泛应用于超精密加工的传动系统中,它的动态特性比较适合精密驱动,但其运动分辨率难以提高,对驱动电机的低速性能要求也很高。扭轮摩擦传动^[1](twist-roller friction drive)是摩擦传动与螺旋传动相结合的产物,它具有上述两种传动系统的优点,能够很好地解决大行程和高分辨率问题,是一种有前途的新型传动系统。

作为一种全新的传动方式,它正越来越多地受到人们的关注。但是人们对这种传动机构的认识也有一个过程,文献[2]报导了一台柴油机转速遥控装置采用的摩擦螺旋传动机构,文献[3]报导了一扩散炉上的轴推拉机构,文献[4]报导了一冰箱发泡线上的光轴螺旋传动机构。他们认为与滑动丝杠和滚珠丝杠相比,摩擦螺旋传动机构传动螺距精度不高,不能用于精密传动场合。直到意大利DEA公司新推出的GAMA型三坐标测量机^[5],成功地运用了这种摩擦螺旋传动机构之后,人们才改变了对它的看法。但具有纳米级定位分辨率的扭轮摩擦传动最早还是由日本的Mizumoto Hiroshi^[1]教授提出来的,并且实现了50mm范围内10nm精度的定位。

* 国家自然科学基金资助

1998年12月8日收稿

第一作者:戴一帆,男,1965年生,副教授

1 扭轮摩擦传动的结构与传动原理

扭轮摩擦传动机构实际上由一个摩擦光杠和扭轮螺母组成。图1是采用滚珠球轴承的扭轮摩擦传动结构简图。有三个圆柱体的轮子压在驱动轴(光杠)上,驱动轴与每个轮子都有一个扭角,因此我们把轮子叫扭轮,可以看到扭轮和光杠之间是通过摩擦传递运动的,因而这种机构称为扭轮摩擦传动机构。

扭轮摩擦传动的过程如图2,当驱动轴旋转时,摩擦力驱动扭轮运动,由于扭轮和驱动轴之间有一个交角,所以扭轮除了旋转外,轴向的摩擦力还推动它沿轴向运动,这就实现了螺旋传动。可以想见,当扭轮和光杠之间的交角很小,轴向近乎平行时,这种螺旋运动的导程是非常小的。

由上述的分析可知,扭轮摩擦传动的导程

$$L = \pi \times D \times \tan\theta$$

其中, D 为驱动轴的直径; θ 为扭角。

当 θ 很小时 $L = \pi \times D \times \theta$ 。可以看到,扭角在旋转运动变成平动时和正交摩擦传动相比起了减速作用。设置 $\theta = 10^{-3}$ 弧度,导程可以很容易小于 0.1mm , 减速比 $R = 1000$ 。如此大的减速比和如此小的导程是任何其它传统进给系统如丝杠或正交型摩擦传动所无法实现的。在正交型摩擦传动中, $L = \pi \times D$ 。对于常规尺寸的驱动装置而言,这种导程在几十毫米左右;滚珠丝杠的导程比正交型摩擦传动小一个数量级,能够达到 2mm 左右;而扭轮摩擦传动的导程很容易实现 0.2mm 。配以分辨率为 $(1/655360)_r$ 的电机,系统的名义运动分辨率为 0.3nm 。

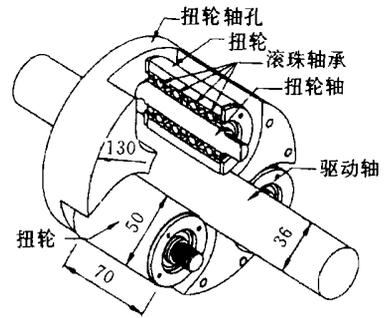


图1 扭轮摩擦传动机构
Fig. 1 Mechanism of twist-roller friction drive

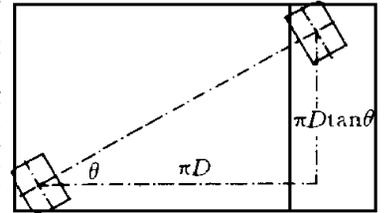


图2 运动轨迹展开图
Fig. 2 Diagram of motion locus

2 扭轮摩擦传动特性

扭轮摩擦传动的摩擦阻力小,传动效率高;运动平稳,无爬行;无反向间隙,可以达到很高的定位精度;螺母的结构较复杂,但制造不困难。

对于导程而言,负载的波动会引起导程的波动,实验结果表明^[1],导程 L 与负载 F 满足一种线性关系:

$$L = L_0 + k F$$

其中:基本导程 $L_0 = \pi \times D \times \tan\theta$, k 为一比例系数。

在精密及超精密定位系统中,需要进行位置闭环反馈控制才能够达到高精度。

在刚度方面,扭轮摩擦传动螺母的轴向刚度相对于滚动丝杠螺母要低一个数量级。这主要是由于扭轮与驱动轴之间存在一种“弹性滑动”现象。弹性滑动是摩擦传动特有的现象。当一个物体在另一个物体表面上滑动时,文献[6]给出了“预位移与摩擦力变化关系曲线”。它指出,“两个相互接触的物体,在切向外力作用下开始相对滑动之前,要发生一定的切向平移,叫预位移。这个量甚小,一般不超过几微米。当预位移达到一个极限值时,两个相互作用的大小相等、方向相反的摩擦力 F 便发生一个突变,物体就进入一个稳定滑动阶段”。“实验表明,在预位移的前一大段,摩擦力与预位移成正比”。这种正比关系实际上表现为刚度。影响这种刚度的因素主要是相互之间的正压力。文献[5]指出,正压力大,滑动率减小,反之则增大。滑动率减小实际上是刚度增大了。因此增大正压力,可以提高刚度。实验表明^[7],这种刚度可以达到 $3\text{kg}/\mu\text{m}$ 。对于超精密加工而言,切削力一般为几十克,静态弹性变形为 $0.01\mu\text{m}$,可以满足要求。

3 采用扭轮摩擦传动的超精密定位系统

本文中的超精密定位系统如图3所示, 这套系统采用了导程为0.2mm的扭轮摩擦传动机构, 螺母的刚度为 $3\text{kg}/\mu\text{m}$ 。

为满足高分辨率运动, 应尽量减小导轨的运动摩擦力, 否则系统会出现爬行现象。为此我们采用了气体静压导轨。工作台由气浮导轨支撑, 整个基座及导轨采用了花岗岩, 其中花岗岩导向导轨条全长630mm, 直线度经过精研之后达到 $0.8\mu\text{m}$ 。两根花岗岩导向导轨条的平行度是靠两块定位板保证的。工作台装有气浮承载模块——气饼。工作台共装有八个气饼, 其中四个用来承载, 四个(分别安装在两边)用来导向, 形成了左右是闭式, 上下是开式的导轨结构, 其有效行程可达300mm。

驱动轴的旋转角度由交流伺服电机控制, 在位置方式下驱动电机的分辨率是 $(1/655360)_r$ 。电机与丝杠的连接采用了一种滑块联轴器。它属于可移式刚性联轴器, 为了减小摩擦力, 利用了滚动摩擦代替滑动摩擦, 这使得联轴器的高刚度与低摩擦特性同时得到满足, 并且还降低了丝杠与电机轴的不同轴度要求。

希望工作台的运动完全是由导轨约束的, 但由于光杠和导轨的不平行, 光杠本身不直等因素的影响, 平台在运动过程中会产生偏移, 为消除这些影响, 希望传动系统只将轴向力传给平台。在传动螺母和平台间安装一连接装置, 它有四个自由度: X 、 Y 、 ω_x 、 ω_y , 同时在 Z 方向还应满足一定的刚度要求, 这种装置称为浮动单元。安装浮动单元之后系统既可降低对装配精度的要求, 又可提高平台的运动平稳性, 可见浮动单元在传动链中起着非常重要的作用。



图3 采用扭轮摩擦传动的超精密定位系统

Fig. 3 The ultraprecision Location system of twist roller friction drive

4 系统性能测试

测量系统采用了从德国进口的最高分辨率为10nm的电感测量仪, 其最大量程为2mm, 最高精度可达 $\pm 20\text{nm}$ 。

4.1 平均分辨率测试

由于我们使用的传感器最高分辨率为10nm, 实际系统的运动分辨率远高于此值, 在此我们以求平均的方式计算系统的名义分辨率。具体方法如下:

交流伺服电机工作于位置方式, 工作台处于任意一个位置, 由计算机给电机驱动器发出脉冲指令。每发出655360(即一转)个脉冲后停止, 记录下位移。总共重复发送14次, 利用测试结果 N (脉冲数), S (运动距离)求平均分辨率 $\delta = S/N$ 。给出一组测试数据, 见图4, 由此数据可以计算导程和平均分辨率。其平均分辨率 δ 为:

$$\delta_x = 155 / 655360 = 0.000236\mu\text{m}$$

$$\delta_{f_x} = 165 / 655360 = 0.000298\mu\text{m}$$

其中 δ_x 为正向分辨率, δ_{f_x} 为反向分辨率。

4.2 10nm分辨率测试

由于传感器的最高测量分辨率为10nm, 因此只能够在10nm水平上测试溜板运动分辨率。表1显示的是每隔10nm所需的脉冲数。

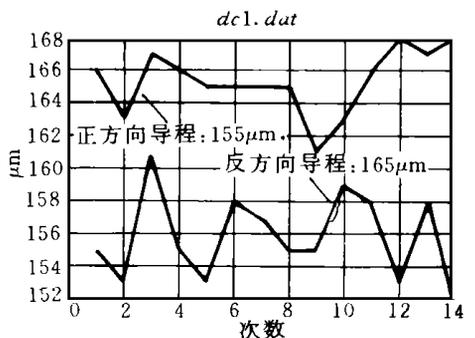


图4 平均导程的测量

Fig. 4 Measure of average lead

表1 分辨率测试

Tab. 1 Resolving power test

位移(10nm)	1	2	3	4	5	6	7
脉冲数	20	23	30	28	26	23	27

走10nm的脉冲数在20到30之间波动,这可能是由复杂的微观弹性变形引起的。可以认为,溜板运动分辨率优于10nm。但是对于更高分辨率的测量,必须要有更高分辨率的传感器,暂时我们还无法进行此类测量。

4.3 步进定位精度测度

该系统的控制方框图如图5,其中 $G(S)$ 为被控对象,包括电机及工作台; $U(S)$ 为控制器; $H(S)$ 为传感器的反馈环节; n 为传感器的测量噪声。

以50nm 为一步,进行定位控制,步进定位控制结果如图6所示。

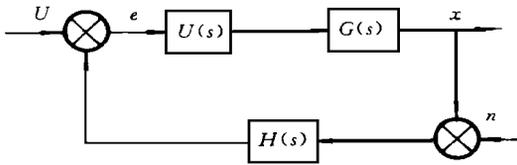


图5 系统控制方框图

Fig. 5 Block diagram of system control

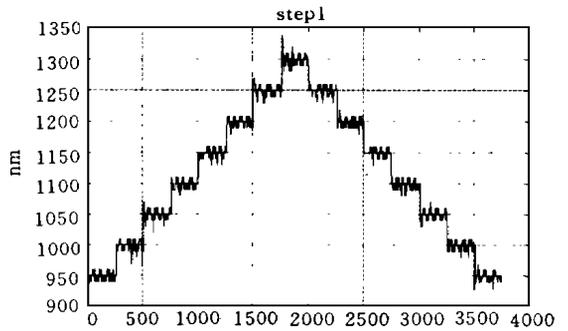


图6 50nm 步进定位实验

Fig. 6 Experimental results of 50nm stepper location

5 结论

通过对系统的实际测试,扭轮摩擦系统的名义运动分辨率小于0.2nm。受传感器限制,实际测试分辨率小于10nm,系统可以精确地进行50nm 精度的定位运动,如果用更高精度的传感器进行闭环控制,定位精度会更高。扭轮摩擦传动为实现大行程、高精度的定位提供了新的思路。扭轮摩擦传动机构综合体现了摩擦传动无反向间隙以及螺旋传动可实现超小导程的特点,因而非常适合于一些切削力比较小的超精密机床,精密测量平台机构中。

参考文献

- Mizumoto Hiroshi, Nomura, K. Matsubara, T and Shimizu T. An ultraprecision positioning system using a twist-roller friction drive. Journal of the American Society for Precision Engineering, 1993, 15: 180 ~ 184
- 袁传大. 光轴滚动螺旋传动. 机械设计, 1991, 5
- 郑耀阳. 光轴滚动螺旋传动装置. 微细加工技术, 1993, 2
- 陈粤. 斜轮—光轴摩擦传动的设计. 机械设计, 1994, 6
- 濮良贵. 机械设计. 北京: 高等教育出版社(第五版), 1989
- Mizumoto H, Arie S, Yoshimoto A, Shimizu T, Ikawa N. (1). twist-roller friction drive for nanometer positioning: a simplified design using ball bearings. Annals of the CIRP, 1996, 45(1): 501