

精密谐波传动在三坐标测量机上的应用

张景和

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 重点对精密谐波传动在三坐标测量机上的应用做了介绍, 结合实例, 介绍了各传动部件的选取, 描述了影响传动精度的几项因素。通过误差分析, 明确了部件选择的精度范围及该结构实现精密传动的可能性。最后讨论了在实际工作中遇到的一些问题。

关键词 精密谐波传动 位移精度 误差

1 引言

谐波传动是利用柔性齿轮的变形与刚轮相啮合而实现的传动。谐波传动的传动比大、结构简单、体积小、重量轻。由于同时啮合的齿数多, 所以它的承载能力大, 传动精度高。目前, 精密谐波传动被广泛地应用于机器人、数控机床、航空航天技术、大规模集成电路制造技术、以及精密测试设备中。

三坐标测量机上的精密传动, 一般都是由直流伺服电机加滚珠丝杠而组成。它的特点是传动速度快、转矩波动小、机械特性硬度大, 但电子控制较复杂, 整体造价高。最近我们把精密谐波传动技术应用到国家“八、五”攻关课题“多功能光学探头及数据处理系统”项目中, 把手动三坐标测量机改造成自动扫描的测量形式, 并获得了成功。三坐标测量机中自动扫描工作台的精密传动, 采用了步进电机、谐波齿轮加滚珠丝杠的结构形式。其特点是位移分辨率高、步距均匀、输出转矩大、易于控制、整体造价低。改造后的扫描工作台位移定位精度为 $1\mu\text{m}$ 。

2 结构

精密谐波传动结构示意图如图1所示。步进电机1和谐波传动装置2组成了精密角传动装置, 通过联轴节3与滚珠丝杠6联接。一对角接触球轴承5和向心球轴承9分别安装在支承架4和8上, 支承架固定在三坐标测量机的机身10上。步进电机的转动经谐波传动装置细分后, 由滚珠丝杠螺母7转变为精密直线位移, 从而带动三坐标测量机的X轴扫描台11做精密

位移测量。我们是在北京303所生产的手动三坐标测量机的 X 轴上安装精密谐波传动的。 X 轴的行程为500mm, 位置精度由光栅传感器提供, 光栅传感器的最小示值为 $1\mu\text{m}$ 。

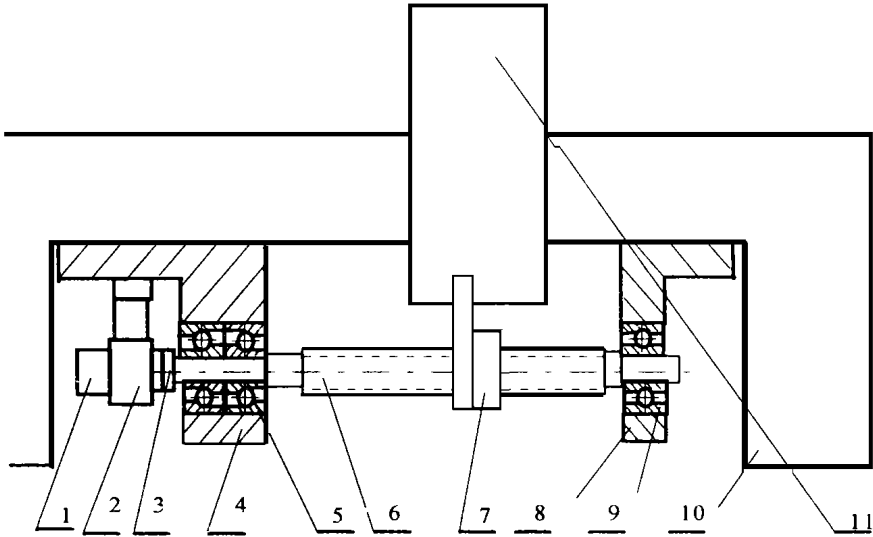


Fig. 1 The structure of precision harmonic gear drive

3 部件选取

按课题要求, 工作台的最小位移为 $1\mu\text{m}$, 工作台运动部件的重量为70kg, 工作台最大移动速度为50mm/s, 最大速度加速时间为1s。按此我们选取下面的部件。

3.1 谐波传动装置

如果步进电机的步距角为 θ (单位度), 谐波传动装置的传动比为 n , 丝杠的导程为 h (mm), 工作台沿丝杠的轴线位移为 S (mm), 那么它们之间的关系式为:

$$n = \frac{\theta \times h}{360 \times s}$$

在这项工作中, 我们选步距角为 $\theta = 1.5^\circ$ 的步进电机, 丝杠的导程 $h = 5\text{mm}$ 。我们设步进电机每走一步, 工作台的最小位移为 $\Delta S = 0.3\mu\text{m}$ 。那么步进电机走三步, 工作台大致位移 $1\mu\text{m}$ 。谐波传动装置的传动比按下式计算:

$$n = \frac{\theta \times h}{360 \times \Delta s} = 69.44$$

为此, 我们选用32机型、传动比为70的谐波传动器装置, 其输出力矩为0.2kgm。该装置结构紧凑, 体积小, 便于装配。

3.2 丝杠

为了避免低速爬行现象, 我们选用了滚珠丝杠, 中径为 $\varnothing 32$, 导程5mm。钢珠直径 $\varnothing 4\text{mm}$, 丝杠刚度 $1170\text{N}/\mu\text{m}$, 支承跨距为800mm。丝杠选取中我们主要考虑到在轴向载荷力 F 作用下的最大弹性位移 δ 和丝杠的系统刚度 K

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_s} + \frac{1}{K_c} + \frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_h}$$

式中 K_s ——丝杠本身的拉压刚度

K_c ——丝杠副内滚珠与滚道的接触刚度

K_b ——承受轴向载荷轴承的接触刚度

K_h ——螺母座、轴承座的刚度

由于运动部件为气浮导轨,承受的载荷很小,运动速度也低,在这里我们只计算丝杠在轴向载荷作用下的弹性位移 δ_s 和丝杠本身的拉压刚度 K_s 。

被驱动工作台的重量大致是 $m = 100\text{kg}$,要求在 0.1s 内速度达到 10mm/s ,那么工作台的加速度为 $a = \frac{\Delta V}{\Delta t} = 0.1\text{m/s}^2$ 如果不考虑其它摩擦力和惯性力的影响,在工作台产生此加速度下所需的推力为:

$$F = ma = 10\text{N}$$

此力即为作用在丝杠上的轴向载荷力 F

在轴向载荷力作用下的丝杠弹性位移为:

$$\delta_s = \frac{Fa}{AE}$$

式中: F ——作用在丝杠上的轴向载荷力(N); a ——丝杠螺母到丝杠固定支承端的距离(m); A ——丝杠轴最小截面积

$$A = \frac{\pi}{4}d_2^2(\text{m}^2)$$

$$d_2 = d_0 - 1.2D_w$$

d_0 ——丝杠公称直径; D ——滚珠直径; E ——材料弹性模量; 我们选取的丝杠参数: $d_0 = 32$, $D_w = 4$, 那么 $A = 5.81 \times 10^{-4}\text{m}^2$

在工作台运动过程中,弹性位移随工作台的位置而变。它的极限值是工作台运动的最远距离,即 $a = 0.8\text{m}$ 处。这时丝杠的最大弹性位移为:

$$\delta_s = \frac{Fa}{AE} = 0.0656(\mu\text{m})$$

丝杠的刚度为:

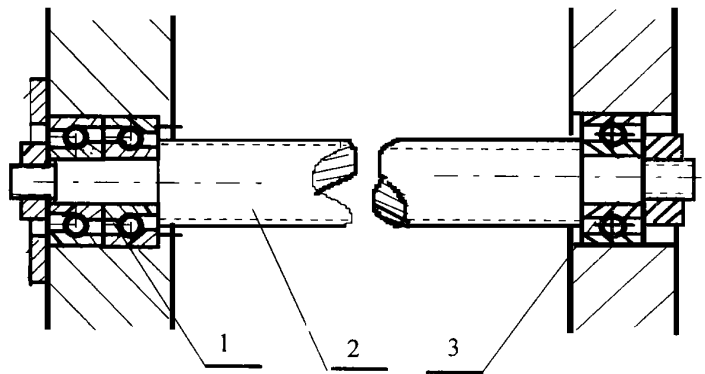
$$K_s = \frac{F}{\delta_s} = \frac{AE}{a} = 152.5(\text{N}/\mu\text{m})$$

此值小于所选丝杠的刚度值 $1170\text{N}/\mu\text{m}$

3.3 滚珠丝杠副的支承

滚珠丝杠副的支承为一端固定一端自由,如图2所示。

固定端选一对1036904 C级精度的角接触球轴承,自由端选一只104 C级精度的向心球轴承,其成套轴承内圈的径向跳动为 $K_{ia} = 3\mu\text{m}$,内圈端面对滚道的



1 both horn contact ball bearing 2 ball guide screw
3 a centripetal bearing

Fig. 2 The structure of ball guide screw

跳动 $S_{ia} = 4\mu\text{m}$ 。

4 精度分析

工作台最小位移的偏差,是由谐波传动的步距误差、支承处轴承的端面跳动及滚珠丝杠在 2π 弧度内允许行程的变动量等因素组合成的。现分别分析如下:

4.1 谐波传动的步距误差 $\Delta\theta$ 对传动精度的影响

当步进电机转一个最小步距角时,经谐波传动后在输出轴端产生一个角位移。输出轴端,理论角位移和实际角位移之差称为步进误差。本谐波传动装置的最大步距误差 $\Delta\theta_b = 13\text{s}$ 。当丝杠导程为 $h = 5\text{mm}$ 时,最大步距误差 $\Delta\theta_b$ 对工作台位移造成的误差为:

$$\Delta_b = \frac{h \times \Delta\theta_b}{60 \times 60 \times 360} = \frac{5 \times 13}{60 \times 60 \times 360} = 0.05(\mu\text{m})$$

4.2 丝杠支承轴承对传动精度的影响

在传动时,支承轴承的端面跳动直接影响到工作台的位置精度。我们选的 C 级角接触球轴承,其内圈端面对滚道的跳动量 $S_{ia} = 4\mu\text{m}$,该跳动量为轴承旋转一圈的累积跳动量。当丝杠导程为 5mm ,工作台位移 $1\mu\text{m}$ 时,对应的丝杠转角为:

$$\Delta\varphi = \frac{360 \times 0.001}{5} = 0.072(\text{ }^\circ)$$

相应转角下,角接触球轴承的跳动对位移的影响为:

$$\Delta S_{ia} = \frac{S_{ia} \times \Delta\varphi}{360} = 0.0008(\mu\text{m})$$

上面的计算是假想轴承的端面跳动是随轴承的转角变化而呈线性变化,实际情况可能有所不同。

4.3 滚珠丝杠精度对传动精度的影响

滚珠丝杠副的两项精度指标对传动精度会产生影响,它们是任意 300p 行程内引起行程变动量 $V_{300\text{p}}$ 和 2π 弧度内允许行程变动量 $V_{2\pi\text{p}}$ 。因为全行程的位置精度有光栅尺定位,当形成闭环控制时,前一项的误差 $V_{300\text{p}}$ 不影响闭环的位置控制精度。我们选的滚珠丝杠在 2π 弧度内允许行程的变动量 $V_{2\pi\text{p}} = 6\mu\text{m}$ 。在丝杠导程为 5mm ,工作台位移 $1\mu\text{m}$ 时,滚珠丝杠的对应转角为 0.072° ;这时 $V_{2\pi\text{p}}$ 对工作台位移精度的影响为:

$$\Delta V_{2\pi\text{p}} = \frac{0.072 \times 6}{360} = 0.0012(\mu\text{m})$$

由上述分析可知,工作台的位移受到三种误差的影响。当工作台位移 $1\mu\text{m}$ 时,三种误差对位移精度的综合影响为:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_b^2 + \Delta S_{ia}^2 + \Delta V_{2\pi\text{p}}^2} = 0.05(\mu\text{m})$$

从理论上讲,步进电机走3步,工作台位移大致 $1\mu\text{m}$ 。但实际工作中,步进电机平均走5步,工作台才位移 $1\mu\text{m}$ 。这是因为各种误差、联轴节的精度及轴承的摩擦力等因素吃掉了一些精度。

5 结 束 语

我们首次把精密谐波传动用于三坐标测量机上,并取得了成功。工作台的位置精度达到了 $1\mu\text{m}$,在工作过程中,传动精度稳定可靠。这主要是因为谐波传动具有较高的位移分辨率,传动刚度大,结构小重量轻,易于控制,适合在改造设备中应用。但在工作中也发现一些不足之处,如谐波的传动比大,在工作台空回时,其速度很慢,影响了工作效率。另外,谐波传动的步距误差 $\Delta\theta_0$,限制了工作台最小位移的精度。其次,在轴向力的作用下,丝杠的最大弹性位移 δ 对位置精度影响也很大。但当位置控制形成闭环控制时,这一影响就不显得重要了。再次,由于装调误差、轴承的摩擦力、联轴节摩擦力及丝杠螺母的摩擦力等,都会吃掉一些传动精度。

从结果来看,当形成闭环控制时,传动系统对丝杠副及支承都降低了精度要求,只对它们的短周期误差有较高精度要求,以达到工作台最小位移精度。

参 考 文 献

- 1 谢金瑞,何惠阳. 精密步进谐波传动的研究. 光学机械, 1982(1): 50 ~ 58
- 2 戴曙光. 机床滚动轴承应用手册. 北京: 机械工业出版社, 1993

Application of Harmonic Gear Drive to 3-axes Measuring Machine

ZHANG Jing-He

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

This paper describes the application of a harmonic gear drive to the 3-axes measuring machine. By the use of some examples, how to select the structure of the transmission part of the machine is introduced and some factors to influence the transmission accuracy of the machine are also analyzed. Combined some actual structure, the range of accuracy of the transmission part is calculated. At the last, some problems occurred in the actual situation are discussed.

Key words: Harmonic precision drive, Displacement accuracy, Error

张景和 男, 1955年7月生。中国科学院长春光学精密机械研究所, 副研究员, 1982年获长春光学精密机械学院学士学位。毕业后一直从事光学精密机械的科研工作, 先后参加过三项国家攻关项目, 获国家科技进步二等奖1项和中科院科技进步二等奖1项。