

# 一种数控分度头的结构精度分析

宋洪涛 杨明 宾鸿赞

(华中理工大学机械学院, 武汉430074)

**摘要** 本文提出了一种高精度数控分度头, 论述了它在结构实现上的关键技术。通过精度分析与计算, 找到了提高主轴装配精度的有效方法。

**关键词:** 数控分度头; 圆感应同步器; 误差分配; 选配法

## 1 引言

分度头是机械加工中的重要装备, 应用十分广泛。在传统的机械工业中, 采用的多是手工分度头, 它分度精度低, 分度柔性差, 操作人员劳动强度大, 难以实现自动化生产。随着技术的进步与工业的发展, 对机械设备的自动化程度要求越来越高, 加工精度要求也越来越高。数控分度头的开发与研制, 就是为了适应自动化、高精度的要求而发展的。

与手工分度头相比, 数控分度头自动化程度高, 分度柔性大, 降低了操作者的劳动强度。而且, 它还能达到很高的分度精度, 可以达到许多手工分度头无法达到的性能指标, 因此, 应用更加广泛。

我们所研制的数控分度头, 其结构简图如图1所示。它采用交流伺服电机驱动, 经谐波齿轮减速器减速, 由圆感应同步器进行角度测量以获得闭环反馈信号, 由计算机实现闭环反馈控制, 交流伺服电机驱动主轴实现精确分度, 分度后由电磁制动器夹紧主轴以防止主轴转动而破坏分度精度。它结构紧凑, 交流伺服电机与主轴同轴线安装, 分度精度主要由圆感应同步器的精度决定, 抗干扰能力强, 适合在车间生产条件下使用。它用于和

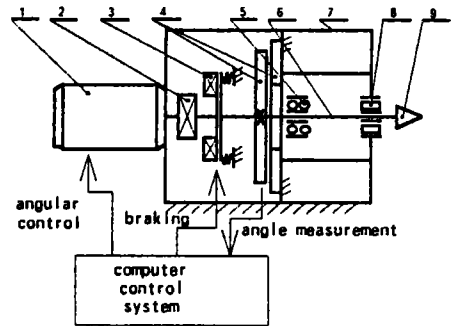


图1 结构简图

- 1. 电机 2. 谐波减速器 3. 电磁制动器
- 4. 圆感应同步器(动片、定片) 5. 后支承
- 6. 主轴 7. 箱体 8. 前支承 9. 顶尖

Fig. 1 System configuration

- 1. AC Servomotor 2. Harmonic drive reducer
- 3. Electromagnetic clutch
- 4. Rotary inductive synchronous transducer (rotor, stator)
- 5. Rear bearing 6. Spindle 7. Housing
- 8. Front bearing 9. Centre

M8612A 花键拉刀磨床配合使用,要求分度精度为 $2''$ ,以满足高等级花键拉刀的磨削。它的研制成功,将大大提高花键拉刀的磨削精度与自动化程度。而且,它还可以应用于许多别的圆分度场合,如精密分度板的磨削加工中等,因此,具有重要的经济效益和社会效益。

## 2 保证结构精度的关键技术

### 2.1 主轴的旋转精度

主轴旋转精度的高低,直接影响着圆感应同步器的测量精度和分度头最终的分度精度,是首先应该考虑的问题。现行国家标准中还没有此类分度头的主轴回转精度要求,参考光栅分度头标准,又考虑到圆感应同步器的安装要求,最后确定在轴端100mm 处的最大径向跳动允差为 $2\mu\text{m}$ 。为了提高主轴的装配精度,主轴部件做成整体套装结构。主轴轴承选用 B 级精度,以提高主轴回转精度。为了保证主轴装配孔的同轴度,采用专用研磨工具进行研磨。

### 2.2 圆感应同步器的安装与调整

圆感应同步器的安装与调整,是数控分度头中的一个关键技术,它直接影响着分度头的分度精度。为保证其测量精度,圆感应同步器一般宜安装在前支承处。但由于本分度头结构及其加工与装配调整的限制,我们是把圆感应同步器安装在后支承处,通过提高轴承及主轴的加工和装配精度,以及对圆感应同步器的调整来保证它的测量精度。实践证明,这种方法还是比较有效的,因为机械加工精度只要控制在能够进行补偿的范围内,就能通过误差补偿来达到最终的精度要求。

圆感应同步器的安装如图2所示。

圆感应同步器测量精度的高低,除本身制造精度的高低、电路系统的性能、机械部分的几何精度外,还取决于安装调整的好坏。

调整分机械调整和电气调整。机械调整是利用千分表以基板外圆面为基准调同心度,以轴向端面为基准调垂直度。调整同心度时,可转动微调螺钉4来调节转子与转轴同心。垂直度的调整,可刮研基座安装面,或刮研调整垫圈。机械调整之后,往往还需要再进行电气调整,以达到最终的精度要求。

转、定子基板面之间的间隙调整也是很重要的一个环节。转子正、余弦绕组与定子绕组间的互感系数的最大值为:

$$M_{\max} = |H_0| J_0 K_0 \frac{\mu l p}{2\pi} e^{-2\mu h/D_0}$$

式中, $h$  为定、转子平面绕组间相对表面的距离, $H_0$ 、 $J_0$ 、 $K_0$ 、 $l$ 、 $p$ 、 $D_0$ 均为与圆感应同步器的结构有关的常数, $\mu$  为空气的磁导率。可以看出, $h$  变小, $M_{\max}$ 变大,互感加强, $h$  变大, $M_{\max}$ 变小,互感减弱。但间隙过小时,定子表面的不平整将会引起磁场不均匀,使磁场中心偏离原来位置

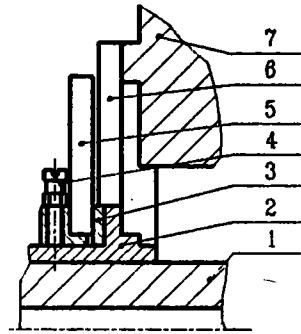


图2 圆感应同步器的安装

1. 主轴 2. 套筒 3. 垫圈 4. 微调螺钉
5. 转子 6. 定子 7. 箱体

Fig. 2 Installation of rotary inductive synchronous transducer

1. Spindle 2. Sleeve 3. Washer
4. Fine-adjusting screw
5. Rotor 6. Stator 7. Housing

而造成较大的零位误差；间隙较大时，定子表面的不平整对磁场中心的偏移影响较小，因而对零位误差影响不大，但间隙过大会使灵敏度降低，影响检测设备的正常工作。间隙一般调整在 $0.25 \pm 0.05\text{mm}$ 的范围内，这可通过磨垫圈3的厚度来保证。

### 2.3 圆感应同步器零位的检测

由于所采用的圆感应同步器为相对测量方式，圆感应同步器上没有绝对零点，而进行误差补偿时又需要确定一个基准位置，所以必须要有一套零位检测装置，如图3所示。

发信杆1固定在转轴上，随转轴一起转动，光电开关2固定在箱体盖上。这样，就可以把发信杆1通过光电开关时的位置作为圆感应同步器的零位。

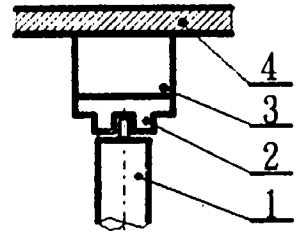


图3 零位检测

1. 发信杆 2. 光电开关

3. 固定板 4. 箱体盖

Fig. 3 Zero point detector

1. Signal generation rod

2. Photoswitch

3. Fixed block 4. Cover

## 3 主轴部件的误差分配

影响主轴径向跳动的主要因素有3项：

- (1)前支承处的径向跳动  $\Delta_1$ ；
- (2)后支承处的径向跳动  $\Delta_2$ ；
- (3)主轴锥孔中心线的径向跳动  $\Delta_3$ ；

首先，确定各个误差的分布规律。在这里，假定它们均符合正态分布。

如图4所示，由于前支承处有误差  $\delta_a$ ，在近轴端和100mm 处将造成误差  $\delta_{a1}$  和  $\delta_{a2}$ 。由于后支承处有误差  $\delta_b$ ，将造成误差和  $\delta_{b1}$  和  $\delta_{b2}$ 。由于主轴本身的锥孔中心线与主轴中心线不重合，将造成误差  $\delta_{c1}$  和  $\delta_{c2}$ 。

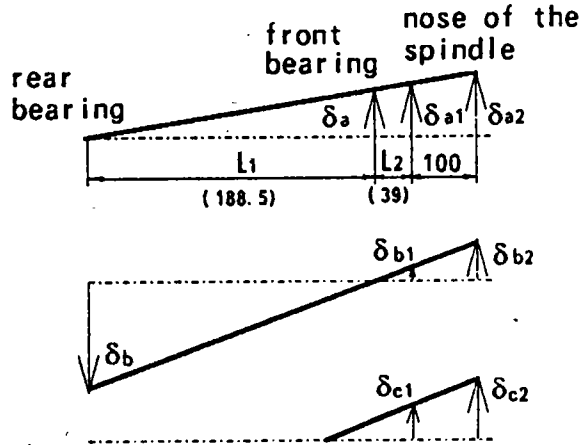


图4 主轴计算简图

Fig. 4 Error analysis diagram of the spindle

$$\delta_{a1} = \frac{L_1 + L_2}{L_1} \delta_a, \delta_{a2} = \frac{L_1 + L_2 + 100}{L_1} \delta_a$$

$$\delta_{b1} = \frac{L_2}{L_1} \delta_b, \delta_{b2} = \frac{L_2 + 100}{L_1} \delta_b$$

已知在轴端100mm 处的径向跳动不

大于 $0.002\text{mm}$ ，即  $\delta_2 = \frac{0.002}{2} = 0.001\text{mm}$ 。

下面按不等作用原则来对  $\delta_2$  进行分配。

设  $P_i (i = a_2, b_2, c_2)$  为各项误差的传递系数，则有：

$$\delta_{a2} : \delta_{b2} : \delta_{c2} = P_{a2} : P_{b2} : P_{c2}$$

故  $\frac{\delta_{a2}}{P_{a2}} = \frac{\delta_{b2}}{P_{b2}} = \frac{\delta_{c2}}{P_{c2}} = C$  式中， $C$  为某一常数

$$\text{而 } \sqrt{\sum_{i=a2}^{c2} \delta_i^2} = \sqrt{\sum_{i=a2}^{c2} (P_i \cdot C)^2} = C \sqrt{\sum_{i=a2}^{c2} P_i^2} \leq \delta_2$$

$$\text{即 } C \leq \frac{\delta_2}{\sqrt{\sum_{i=a_2}^{c_2} P_i^2}}$$

$$\text{得 } \delta_i \cdot P_i \cdot C \leq \frac{P_i}{\sqrt{\sum_{i=a_2}^{c_2} P_i^2}} \delta_2$$

设  $P_{a_2}=0.3, P_{b_2}=0.2, P_{c_2}=0.5$ , 则:

$$\delta_{a_2}=0.0005\text{mm}$$

$$\delta_{b_2}=0.0003\text{mm}$$

$$\delta_{c_2}=0.0008\text{mm}$$

$$\text{所以 } \delta_a = \frac{L_1}{L_1 + L_2 + 100} \delta_{a_2} = 0.0003\text{mm}$$

$$\delta_b = \frac{L_1}{L_2 + 100} \delta_{b_2} = 0.0004\text{mm}$$

最后可得:  $\Delta_1 = 2\delta_a = 0.0006\text{mm}$

$$\Delta_2 = 2\delta_b = 0.0008\text{mm}$$

$$\Delta_3 = 2\delta_{c_2} = 0.0016\text{mm}$$

可见,要保证在轴端100mm处的径向跳动不大于 $2\mu\text{m}$ ,则前支承处的径向跳动要保持在 $0.6\mu\text{m}$ 以内。引起前支承处径向跳动的因素有很多,而其中最主要的因素,通过对图5主轴结构简图的分析,可归纳为如下8点:

(1) 主轴内孔与外圆的同轴度;

(2) 主轴外圆与轴线的同心度;

(3) 轴承内圈的径向跳动;

(4) 轴承外圈的径向跳动;

(5) 轴承套内孔与外圆的同轴度;

(6) 轴承套外圆与轴线的同心度;

(7) 轴承孔与轴线的同心度;

(8) 前后轴承的同心度。

按上述的不等作用原则来分配各个误差值,将得到如下结论:即使前支承处的径向跳动公差为 $2\mu\text{m}$ ,若各项误差的传递系数均相等,它们中的任一项误差值也仅有 $0.7\mu\text{m}$ 。这么高的精度要求,在一般的加工条件下是很难达到的。而对于轴承的内、外径径向跳动误差,即使采用B级轴承,也分别有 $2.5\mu\text{m}$ 和 $5\mu\text{m}$ 的径向跳动,已经大大超过了所允许的总误差值,所以仅靠保证各部件的加工精度要求来满足最终的装配要求在这里是无法实现的。

对于后支承,可得到同样的结论。

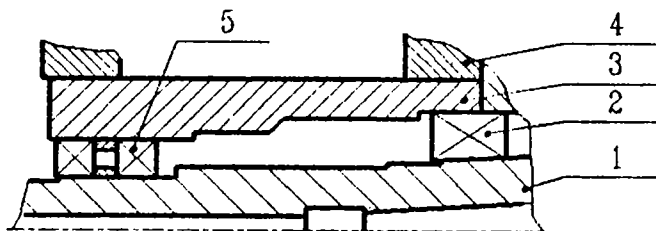


图5 主轴结构简图

1. 主轴 2. 前轴承 3. 轴承套 4. 箱体 5. 后轴承

Fig. 5 Structural diagram of the spindle

1. Spindle 2. Front bearing 3. Bearing sleeve  
4. Housing 5. Rear bearing

为解决这个问题,我们可以以经济精度来对各个零部件进行加工,然后采用选配法进行装配,以达到较高的装配精度。

由前述可知,主轴端100mm处的径向跳动,等于由前支承产生的误差 $\delta_{a2}$ 、由后支承产生的误差 $\delta_{b2}$ 和主轴锥孔的加工误差 $\delta_{c2}$ 三者向量和的2倍。 $\delta_{a2}$ 、 $\delta_{b2}$ 和 $\delta_{c2}$ 都是有一定方向的,因此,这三项误差如果按一定的方向布置,就可以使误差互相抵消。

假设前、后支承处的径向跳动误差主要是由前、后轴承内圈的径向跳动误差引起的。首先,测出前、后轴承内圈的径向跳动量 $\Delta_1$ 和 $\Delta_2$ 及其方向,就可计算出 $\delta_{a2}$ 和 $\delta_{b2}$ ,其方向分别由 $\Delta_1$ 和 $\Delta_2$ 的方向决定。把主轴(不装轴承)放在V形铁上,测出 $\delta_{c2}$ 的大小和方向。调整前、后轴承内圈与主轴的位置(把内圈相对于主轴转动一个角度),把这三个误差调到一条直线上,如图6(a)所示,使其中较小的两个朝一个方向,最大的一个朝另一方向,这样误差可缩小为 $\delta_2$ ,但不能完全抵消。如果如图6(b)所示进行角度选配,则可以完全抵消。 $\alpha$ 和 $\beta$ 的角度可用作图法求得,或由正弦定理 $\frac{\|\delta_{b2}\|}{\sin\alpha} = \frac{\|\delta_{c2}\|}{\sin\beta} = \frac{\|\delta_{a2}\|}{\sin(180^\circ - \alpha - \beta)}$ 求得。

设 $\delta_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为误差源,它们的大小和方向均已事先测出, $\delta_j$ 为其中的最大值。下面,分两种情况进行讨论。

(1)若 $\sum \|\delta_i\| (i=1, \dots, j-1, j+1, \dots, n) \leq \|\delta_j\|$ ,则按图6(c)所示进行装配,即把它们调到一条直线上,使误差部分或全部抵消。

(2)若 $\sum \|\delta_i\| (i=1, \dots, j-1, j+1, \dots, n) > \|\delta_j\|$ ,为使各项误差互相抵消,可如图6(d)所示进行角度选配,即把除 $\delta_j$ 外的其它所有各项误差的综合作用结果调到与 $\delta_j$ 相反的方向上,这样即可使各项误差互相抵消。 $\alpha_1 \sim \alpha_n$ 的角度可用作图法求得,或如图6(d)所示在各个三角形内由正弦定理求得。

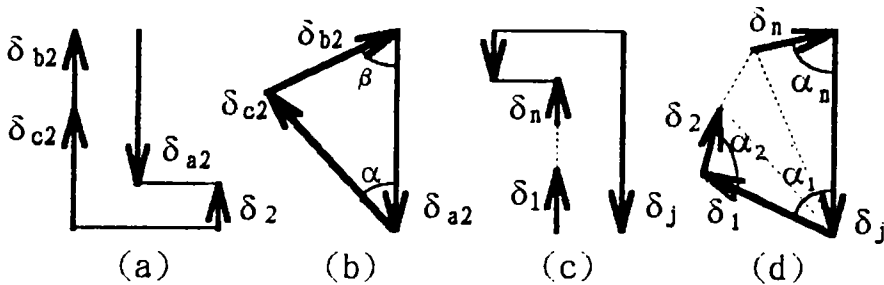


图6 选配法示意图

Fig. 6 Diagram of error compensation assembly method

## 4 结 论

本数控分度头已经装配调试,在实验室条件下,能达到2''精度。试验证明,该数控分度头的结构与零部件选择能够满足所需的性能要求。通过对精度的分析与计算,找到了一种既能满足经济性要求,又能达到所要求的装配精度指标的方法。在零部件的加工精度达不到超精密

级要求的条件下,通过选配法,可以有效地减少综合误差,达到提高装配精度的目的。

### 参 考 文 献

- [1] 史习敏,黎永明主编,精密机械设计.上海:上海科学技术出版社,1987
- [2] 戴 曙主编,金属切削机床设计.北京:机械工业出版社,1985
- [3] 陆永平,岑文远等编著,感应同步器及其系统.北京:国防工业出版社,1985
- [4] T. Tyeib, Error Budgeting— Applied to the Calculation and Optimization of the Volumetric Error Field of Multiaxis Systems. *Annals of the CIRP*, 1987, **36**(1):365—368

## Construction and Accuracy Analysis of a CNC Dividing Head

Song Hongtao, Yang Ming and Bin Hongzan

(*Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074*)

### Abstract

This paper presents a high-accuracy CNC dividing head developed by authors and some key technologies improving the construction accuracy. An effective method was found to improve the assembly accuracy of the spindle unit through the accuracy analysis and calculation.

**Key words:** CNC dividing head, Rotary inductive synchronous transducer, Error distribution, Error compensation assembly method

**宋洪涛** 男,1969年4月生,华中理工大学机械学院CAM室博士生。