

# 内球面的镗削装置及其误差分析

黄通农 谢礼忠

(精密机械工程系)

**摘要** 本文介绍一种设计新颖的镗削内球面的靠模装置,采用滚动轴承为靠模,即简化结构又提高加工精度,建立了误差计算公式并用计算机程序进行计算。

**关键词** 内球面,靠模,误差

## 0 前言

内球面的加工方法很多。镗削较大的内球面,可用专用刀具进行加工,镗刀与工件除作相对旋转运动外,还得作圆弧进给运动,必须设计一套传动系统来实现,其结构复杂;镗削直径较小的内球面,可用成形车刀加工,虽然结构简单,因车刀和工件接触面大,容易振动,只能采用较低的切削速度和较小的进给量,生产率很低,同时精度很难保证。在综合分析常规的加工方法基础上,我们设计出镗削内球面的靠模装置,并通过计算机进行误差分析计算,选择较合理的结构参数。本装置特别适应于小型工厂及乡镇企业,已在生产中取得效益。

## 1 结构设计

### 1.1 工作原理

结构见图1,工作时,工件安装在卡盘上,镗刀装在刀架上。内球面由两种运动形成,即主轴的回转切削运动和刀杆由靠模轴承作圆弧进给运动。安装时,把车床上横拖板的丝杠抽掉,把顶杆装在原丝杆处,在横拖板上装靠模触销。靠模轴承用单列向心球轴承,由芯轴固定在支承板上。弹簧的作用力使靠模触销与靠模轴承接触,因轴承外圈转动,使之与靠模触销作相对滚动。粗镗时,靠弹簧的作用力先使顶杆上螺栓与固定档销接触,在第一刀完成粗镗内圆柱孔后,靠模触销才与靠模轴承接触。当拖板作纵向进给移动时,第二刀就可以镗出内球面。

### 1.2 装置的调整

加工时,为了使内球面宽度中心线对称,在加工第一个零件时必须调刀。在垂直导轨方

本文1990-05-25收到。

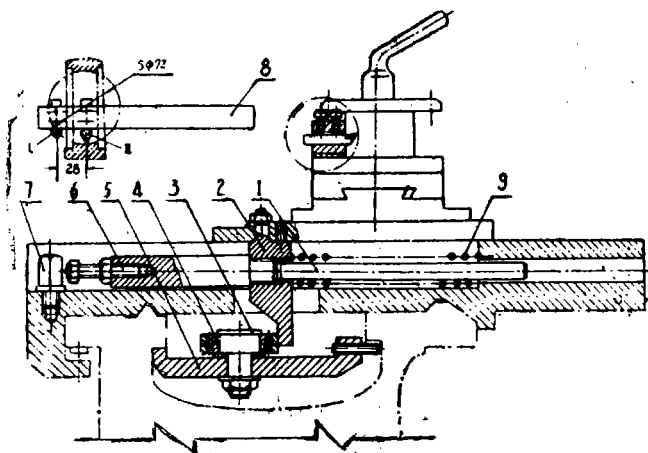


图 1 镗削靠模装置

1——顶杆；2——靠模触销；3——芯轴；4——靠模轴承；  
5——支承板；6——螺栓；7——固定档销；8——刀杆；9——弹簧

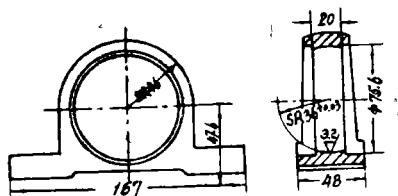


图 2 工件图

向上，靠模触销处在靠模轴承的中心线时，镗刀必须处于内球面的中心线，可用调整支承板纵向位置来实现。调整顶杆上螺栓，可控制粗加工余量和保证螺栓与固定档销接触。小刀架搬转 $30^\circ$ 角，与纵向导轨方向垂直，便于调节车刀径向进给。本装置加工不同尺寸的内球面时，只需更换单列向心球轴承。

## 2 装置的误差分析

### 2.1 满足最大升角

本装置是加工轴承座内球面，见图 2。

为保证工件 IT 7 级精度要求，和表面粗糙度 $\sqrt{3.2}$ 的要求，靠模在正常工作时升角不能太大。当靠模触销与轴承滚动时的摩擦力略去不计时，靠模作用在触销上的作用力 $N$ ，可分解成两个力，见图 3。则

$$P = N \sin \alpha, F = N \cos \alpha.$$

作用力 $F$ 使刀具移动，作用力 $P$ 使刀架承受偏载，妨碍刀架滑板的运动，一般最大压力角不大于 $45^\circ$ <sup>[1]</sup>。当工件内球面半径 $R$ 为 36 mm，内球面宽度 $B$ 为 20 mm 时，其升角 $\alpha$ 为

$$\alpha = \arctan \frac{B}{2R} = \arctan \frac{10}{36} = 15.5^\circ.$$

说明此装置可以正常工作，满足最大升角要求。

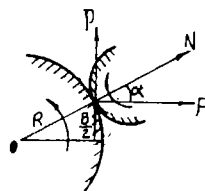


图 3 升角简图

### 2.2 误差公式的建立

除满足最大升角外，靠模加工装置，还必须符合一个要求，即工作时，靠模触销圆弧中心，和刀尖圆弧中心的运动轨迹相同，而加工表面是刀具圆弧周边的包络线。为了简化结构，本装置把靠模形状和工件的形状做成一样，这样，必须要引起加工误差。应该设法把

模装置引起的误差控制在较小的范围内。

为了确立计算公式,首先建立靠模装置的坐标系。设 $x$ 轴是垂直于纵向导轨, $y$ 轴是平行于纵向导轨,见图4。其中, $x_1, y_1$ 为刀尖圆弧与工件接触点 $m_1$ 的坐标; $x_2, y_2$ 为靠模触销与靠模接触点 $m_2$ 的坐标; $r_1, r_2$ 为刀尖圆弧半径及靠模触销圆弧半径; $a_1, a_2$ 为刀尖圆弧中心至靠模触销圆弧中心在 $x, y$ 轴方向上的距离; $k_1, k_2$ 为刀尖圆弧中心和靠模触销圆弧中心到 $y$ 轴的距离; $h_1, h_2$ 为刀尖圆弧中心和靠模触销圆弧中心到 $x$ 轴的距离; $\alpha, \beta$ 为刀尖圆弧和靠模触销工作时的升角。

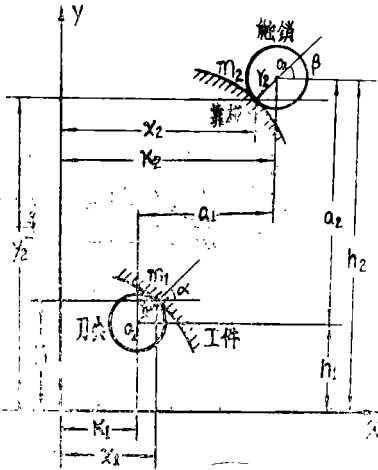


图4 靠模坐标系

由图4可见

$$x_2 = k_1 + a_1 - r_2 \cdot \cos \beta, \quad k_1 = x_1 - r_1 \cdot \cos \alpha$$

$$y_2 = h_2 - r_2 \cdot \sin \beta,$$

$$h_2 = a_2 + h_1, \quad h_1 = y_1 - r_1 \sin \alpha,$$

根据靠模工作原理可知 $\alpha = \beta^{[2]}$ 。

整理以上各式可得

$$x_2 = x_1 + a_1 - (r_1 + r_2) \cdot \cos \alpha, \quad (1)$$

$$y_2 = y_1 + a_2 - (r_1 + r_2) \cdot \sin \alpha, \quad (2)$$

因为

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (dy_1/dx_1)^2}}$$

$$\sin \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \cot^2 \alpha}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (dx_1/dy_1)^2}}$$

可把式(1), (2)写成

$$x_2 = x_1 + a_1 - \frac{r_1 + r_2}{\sqrt{1 + (dy_1/dx_1)^2}}, \quad (3)$$

$$y_2 = y_1 + a_2 - \frac{r_1 + r_2}{\sqrt{1 + (dx_1/dy_1)^2}}, \quad (4)$$

用 $\Phi$ 表示各种变量的参数,可把式(3), (4)写成

$$F(\Phi) = x_1 - x_2 + a_1 - \frac{r_1 + r_2}{\sqrt{1 + (ay_1/ax_1)^2}}, \quad (5)$$

$$f(\Phi) = y_1 - y_2 + a_2 - \frac{r_1 + r_2}{\sqrt{1 + (dx_1/dy_1)^2}}. \quad (6)$$

存在包络线的条件是上面两式存在偏微分<sup>[2]</sup>, 对式(5), (6)进行偏微分, 可得

$$dx_1 = \frac{(\partial F/\partial x_2)dx_2 + (\partial F/\partial a_1)da_1 + (\partial F/\partial r_1)dr_1 + (\partial F/\partial r_2)dr_2}{-(\partial F/\partial x_1)} \quad (7)$$

$$dy_1 = \frac{(\partial f/\partial y_2)dy_2 + (\partial f/\partial a_2)da_2 + (\partial f/\partial r_1)dr_1 + (\partial f/\partial r_2)dr_2}{-(\partial f/\partial y_1)} \quad (8)$$

从公式(5), (6)可得

$$(\partial F/\partial x_2)dx_2 = -dx_2, \quad (\partial F/\partial a_1)da_1 = da_1,$$

$$(\partial F/\partial r_1)dr_1 = -\frac{dr_1}{\sqrt{1 + (dy_1/dx_1)^2}}, \quad (\partial F/\partial r_2)dr_2 = -\frac{dr_2}{\sqrt{1 + (dy_1/dx_1)^2}},$$

$$(\partial F/\partial x_1) = 1 + (r_1 + r_2)[1 + (\partial y_1/\partial x_1)^2]^{-\frac{3}{2}} (\partial y_1/\partial x_1) \frac{\partial (dy_1/dx_1)}{\partial x_1},$$

$$(\partial f/\partial y_2) dy_2 = -dy_2, \quad (\partial f/\partial a_2) da_2 = da_2,$$

$$(\partial f/\partial r_1) dr_1 = -\frac{dr_1}{\sqrt{1+(dx_1/dy_1)^2}}, \quad (\partial f/\partial r_2) dr_2 = -\frac{dr_2}{\sqrt{1+(dx_1/dy_1)^2}},$$

$$(\partial f/\partial y_1) = 1 + (r_1 + r_2)[1 + (dx_1/dy_1)^2]^{-\frac{3}{2}} (dx_1/dy_1) \frac{\partial (dx_1/dy_1)}{\partial y_1},$$

把上面公式代入式 (7) — (8), 并把微分式写成误差式可得

$$\Delta x_1 = \frac{-\Delta a_1 + \Delta x_2 + \frac{\Delta r_1 + \Delta r_2}{\sqrt{1+(dy_1/dx_1)^2}}}{1 + (r_1 + r_2)[1 + (dy_1/dx_1)^2]^{-\frac{3}{2}} (dy_1/dx_1) \frac{\partial (dy_1/dx_1)}{\partial x_1}} \quad (9)$$

$$\Delta y_1 = \frac{-\Delta a_2 + \Delta y_2 + \frac{\Delta r_1 + \Delta r_2}{\sqrt{1+(dx_1/dy_1)^2}}}{1 + (r_1 + r_2)[1 + (dx_1/dy_1)^2]^{-\frac{3}{2}} (dx_1/dy_1) \frac{\partial (dx_1/dy_1)}{\partial y_1}} \quad (10)$$

因为所要加工是内球面, 靠模形状是圆, 若令  $R$  为工件半径时, 可得出

$$x_1^2 + y_1^2 = R^2,$$

$$y_1 = \sqrt{R^2 - x_1^2}, \quad (dy_1/dx_1) = -\frac{x_1}{\sqrt{R^2 - y_1^2}} = -(x_1/y_1),$$

$$x_1 = \sqrt{R^2 - y_1^2}, \quad (dx_1/dy_1) = -\frac{y_1}{\sqrt{R^2 - x_1^2}} = -(y_1/x_1),$$

$$[\partial(dy_1/dx_1)]/\partial x_1 = -(1/y_1), \quad [\partial(dx_1/dy_1)]/\partial y_1 = -(1/x_1).$$

把以上式子代入式 (9), (10) 可得

$$\Delta x_1 = \frac{-\Delta a_1 + \Delta x_2 + (\Delta r_1 + \Delta r_2)[1 + (x_1/y_1)^2]^{-\frac{1}{2}}}{1 + (r_1 + r_2)[1 + (x_1/y_1)^2]^{-\frac{3}{2}} (x_1/y_1^2)}, \quad (11)$$

$$\Delta y_1 = \frac{-\Delta a_2 + \Delta y_2 + (\Delta r_1 + \Delta r_2)[1 + (y_1/x_1)^2]^{-\frac{1}{2}}}{1 + (r_1 + r_2)[1 + (y_1/x_1)^2]^{-\frac{3}{2}} (y_1/x_1^2)}, \quad (12)$$

$$R = \sqrt{(x_1 + \Delta x_1)^2 + (y_1 + \Delta y_1)^2}. \quad (13)$$

在公式 (11), (12) 中,  $\Delta x_2$  和  $\Delta y_2$  为靠模轴承径向跳动,  $\Delta r_1$  为刀尖圆弧半径的误差,  $\Delta r_2$  为靠模触销圆弧半径的误差,  $\Delta a_1$ ,  $\Delta a_2$  为靠模触销与刀尖之间距离的误差。上述误差都影响工件的误差。根据式 (13) 可求出内球面半径值。

误差值的大小, 可据式 (11) — (13) 在计算机计算, 程序流程图见图 5。

### 2.3 误差计算实例

选用 D 级单列向心球轴承时, 径向跳动量  $\Delta x_2 = \Delta y_2 = 0.006 \text{ mm}$ , 触销圆弧半径取  $r = 1.5$

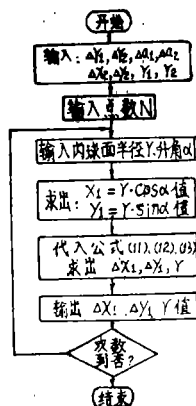


图 5 程序框图

mm, 刀尖圆弧半径取 $r_2 = 1.5\text{mm}$ , 触销圆弧半径误差 $\Delta r_1 = 0.01\text{mm}$ , 刀尖圆弧半径误差 $\Delta r_2 = 0.01\text{mm}$ , 刀尖圆弧中心与触销圆弧中心距离的误差, 当采用刚体连接时, 取 $\Delta a_1 = \Delta a_2 = 0$ , 有振动或间隙时, 取 $\Delta a_1 = \Delta a_2 = 0.02\text{mm}$ . 把以上误差数据输入计算机程序进行计算, 可以得出不同的误差值, 见表1.

表1 加工内球面半径 $r$ 为36mm的误差数据表

升角 $\alpha$	靠模装置各参数误差 (mm)								工件误差 (mm)		工件内球面半径 $r$ (mm)
	$\Delta r_1$	$\Delta r_2$	$\Delta a_1$	$\Delta a_2$	$\Delta x_2$	$\Delta y_2$	$r_1$	$r_2$	$\Delta x_1$	$\Delta y_1$	
5°	0.01	0.01	0	0	0.006	0.006	1.5	1.5	0.00714958	0.0257369	36.00938
	0.01	0.01	0	0	0.006	0.006	1	1.5	0.0072421	0.025769	36.00947
	0.01	0.01	0.02	0.02	0.006	0.006	1.5	1.5	-0.0113173	0.005881	35.98924
10°	0.01	0.01	0	0	0.006	0.006	1.5	1.5	0.0087547	0.0253296	36.1303
	0.01	0.01	0	0	0.006	0.006	1	1.5	0.0088665	0.025389	36.01315
	0.01	0.01	0.02	0.02	0.006	0.006	1.5	1.5	-0.0097286	0.0056149	35.9914
15°	0.01	0.01	0	0	0.006	0.006	1.5	1.5	0.0103437	0.0247839	36.01641
	0.01	0.01	0	0	0.006	0.006	1	1.5	0.0104738	0.024871	36.01656
	0.01	0.01	0.02	0.02	0.006	0.006	1.5	1.5	-0.0081662	0.0052062	35.99346
20°	0.01	0.01	0	0	0.006	0.006	1.5	1.5	0.0119079	0.024106	36.01944
	0.01	0.01	0	0	0.006	0.006	1	1.5	0.0120538	0.024218	36.01962
	0.01	0.01	0.02	0.02	0.006	0.006	1.5	1.5	-0.0066396	0.0046609	35.99535
25°	0.01	0.01	0	0	0.006	0.006	1.5	1.5	0.0134375	0.0233053	36.02203
	0.01	0.01	0	0	0.006	0.006	1	1.5	0.013596	0.023438	36.02223
	0.01	0.01	0.02	0.02	0.006	0.006	1.5	1.5	-0.005158	0.0039857	35.99701
30°	0.01	0.01	0	0	0.006	0.006	1.5	1.5	0.0149230	0.0223876	36.02412
	0.01	0.01	0	0	0.006	0.006	1	1.5	0.0150923	0.022537	36.02435
	0.01	0.01	0.02	0.02	0.006	0.006	1.5	1.5	-0.00377307	0.0031876	35.99837

### 3 结论

1) 在其它条件不变情况下, 当刀尖圆弧半径与靠模触销圆弧半径相等时, 其工件的误差较小.

2) 当靠模触销圆弧与刀尖圆弧中心距误差忽略不计时, 升角越大, 工件误差越大. 加工直径大的内球面, 靠模装置引起的工件误差较小.

3) 当考虑靠模触销圆弧与刀尖圆弧中心距误差及其它参数的误差时, 上述误差可以互相抵销一部分. 只要误差选择合理, 即所有误差均为正误差或负误差时, 可以减少工件的误差. 但若误差选择不合理, 如靠模触销圆弧与刀尖圆弧中心距的误差为负误差, 其它参数的误差为正误差, 会增加工件的误差.

4) 上述式(9), (10)误差理论公式, 也适用于非圆靠模加工时的误差分析。

本文得到陈希达教授的指导, 在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 华中工学院机械制造工艺学教研室, 机器制造工艺学(上册), 中国工业出版社, (1964)。
- [2] Яхня, А. Б. Ц Иру., Технология Точного Приборостроения, Оборонгиз, (1949), 139—147.
- [3] 谭浩强、田淑清, FORTRAN语言程序设计, 高等教育出版社, (1988)。

## A Device for Boring Inner Sphere and Its Error Analysis

Huang Tongrong Xie Lizhong

(*Department of precision Mechanical Engineering*)

**Abstract** A profiling device with rolling bearing as profile modeling is recommended in this paper for boring inner spherical surface. It simplifies the component parts and improves the machining accuracy. For its error analysis, a formula and corresponding computer program are worked out.

**Key words** inner sphere, profile, error