

# 电加工机床专用数控转台精度分析技术的研究

## Study of Accuracy Analysis Technology for NC Rotary Table on EDM

北京市电加工研究所 张海峰 杨大勇 任连生 伏金娟

**[摘要]** 本文针对多轴联动电加工机床数控转台加工过程中的精度保持技术,从零件制造误差、表面误差、热变形、受力变形等方面进行分析和计算,利用结果指导转台零件设计、加工、装配,从而保证转台的精度要求。同时利用分析和计算结果建立数学模型,对转台的动态精度进行综合补偿。

**关键词:** 电加工机床 数控转台 精度保持技术

**[ABSTRACT]** The accuracy maintaining technology in the NC rotary table process of multi-axis EDM is analyzed and calculated through these methods including the parts manufacturing error, the surface error, thermal deformation and stress deformation. The results are used to guide the part design, process and assembly of rotary table for ensuring rotary table precision. At the same time a mathematical model is established to compensate comprehensively the dynamic accuracy of rotary table through the results of both analysis and calculations.

**Keywords:** EDM NC rotary table Accuracy maintaining technology

电加工机床专用数控回转工作台是精密数控电火花加工机床实现多轴联动的必备关键功能附件,是目前国际电加工领域衡量高端产品性能的核心功能部件之一,它的研制和工程实用化过程具有极大的挑战性和难度。随着我国经济的不断发展,航空航天部门对其需求不断增加,尤其是一些关键部件的加工都需要数控转台的精度不断提高,因此数控转台精度保持技术的研究不但能完善我国多轴联动精密数控电火花加工机床的整体性能,也成为我国国防与工业建设的急需。

下面将从转台关键零件的制造误差、表面误差、热变形、受力变形等方面进行分析计算,并利用结果建立数学模型,对转台的动态精度进行综合补偿。

### 1 转台主轴端面误差的分析研究

从以下几方面对转台主轴端面误差进行分析,进而

进行设计优化来保证精度。

#### 1.1 端面偏转类型的分析

在理想情况下,轴的端面应与  $x$  轴相垂直,即端面法线方向与  $x$  轴完全重合。然而,由于重力、加工条件等多方面因素的影响,实际端面法线并不与  $x$  轴相重合,而是在三维空间中与  $x$  轴成一定角度。具体反映为法线在  $xy$  和  $xz$  平面内的投影分别在这 2 个面内与  $x$  轴成一定角度<sup>[1]</sup>。

端面的偏转使得端面上各点的坐标与其在  $yz$  平面内的投影有所区别。例如,当端面法线在  $xz$  平面内且与  $x$  轴不重合时,沿  $x$  方向观测,原有端面上的圆形即会显示为椭圆形,如图 1 所示。

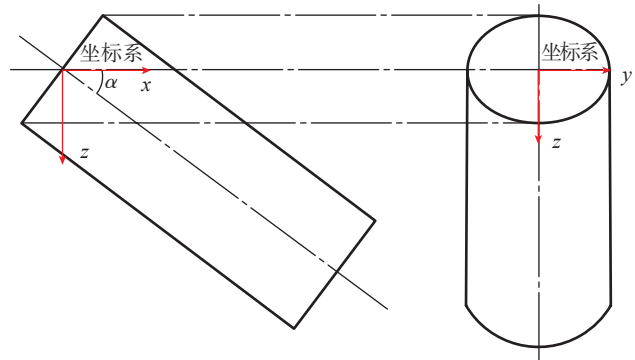


图1 轴端面 $z$ 方向偏转示意图

Fig.1  $z$ -deflection diagram of shaft surface

对于仅向  $z$  方向偏转的情况,端面法线位于  $xz$  平面内,且与  $x$  轴成角度  $\alpha$ 。沿  $x$  方向观测时,原有  $yz$  坐标系被投影为  $y'z'$  坐标系,各坐标点有如下转换关系:

$$y' = y ; z' = z \cos \alpha \quad (1)$$

同理,对于仅向  $y$  方向偏转的情况,端面法线位于  $xy$  平面内,且与  $x$  轴成角度  $\beta$ 。沿  $x$  方向观测时,原有  $yz$  坐标系被投影为  $y'z'$  坐标系,各坐标点转换关系为:

$$y' = y \cos \beta ; z' = z \quad (2)$$

更普遍的情况是端面法线向  $z$ 、 $y$  方向都有偏转,此时原有  $yz$  坐标系经过 2 次投影,得到  $y'z'$  坐标系,各坐标点有如下转换关系:

$$y' = y \cos \beta ; z' = z \cos \alpha \quad (3)$$

利用坐标转换,可以计算端面上的各几何元素长

\* 863 计划重点项目 2009AA044201; 科技重大专项课题 2009ZX04003-022; 北京市自然科学基金项目 3092011。

度、角度在端面偏转后形成投影元素的变化。例如,研究某点与原点及  $y$  轴所成的角,如图 2 所示。

在理想状态下,端面不发生偏转,则:

$$\tan \theta = \frac{z}{y}; \quad (4)$$

在端面发生偏转后,角  $\theta$  变为  $\theta'$ , 此时:

$$\tan \theta' = \frac{z'}{y'} = \frac{z \cos \alpha}{y \cos \beta} = \tan \theta \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}。 \quad (5)$$

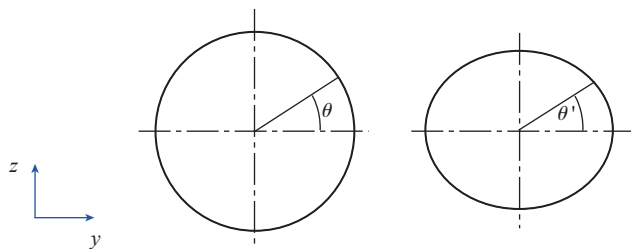


图2 端面偏转导致角度变化示意图  
Fig.2 Angle change resulted from end deflection

### 1.2 重力对端面偏转的影响

由于受到重力作用,端面法线在  $xz$  平面内与  $x$  轴有一个不为零的夹角,记为  $\alpha_{重}$ 。重力作用的特点是无论轴转动与否,摆放角度如何,都给端面法线增加一个竖直向下的分量值。如果只考虑重力作用,则端面各点的坐标转换关系为:

$$y' = y; z' = z \cos \alpha_{重}。 \quad (6)$$

例如,研究某点与原点及  $y$  轴所成的角  $\theta$ ,在端面受重力作用发生偏转后,角  $\theta$  变为  $\theta'$ ,得出:

$$\tan \theta' = \frac{z'}{y'} = \frac{z \cos \alpha_{重}}{y} = \tan \theta \cos \alpha_{重}。 \quad (7)$$

### 1.3 面加工误差对端面偏转的影响

由于轴的加工具有误差,所以端面不可能理想地与  $x$  轴垂直,端面法线与  $x$  轴间会有一个固有的夹角  $\gamma$ 。 $\gamma$  的数值固定,但随着轴的旋转,  $\gamma$  在  $z$ 、 $y$  方向的偏转分量时刻在变化。

仅考虑端面加工误差对端面偏转的影响,暂时忽略重力作用等其他因素,则在轴的旋转过程中,端面法线扫掠过的轨迹为一个顶角为  $\gamma$ 、轴线为  $x$  轴的圆锥面,如图 3 所示。

对此圆锥的底圆进行具体分析,可知  $\gamma$  角代表的端面偏转可被分解为以角度  $\alpha_{加}$  向  $z$  方向的偏转和以角度  $\beta_{加}$  向  $y$  方向的偏转,如图 4 所示。

底圆上弦长的一半与圆锥高的比值正是其所代表偏转角度的正切值。由图中几何关系可知:

$$\tan^2 \gamma = \tan^2 \alpha_{加} + \tan^2 \beta_{加}, \quad (8)$$

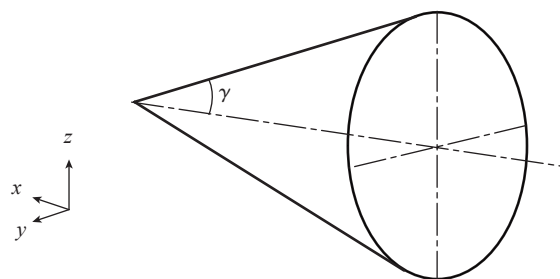


图3 端面法线扫掠轨迹图  
Fig.3 Swept locus of end normal

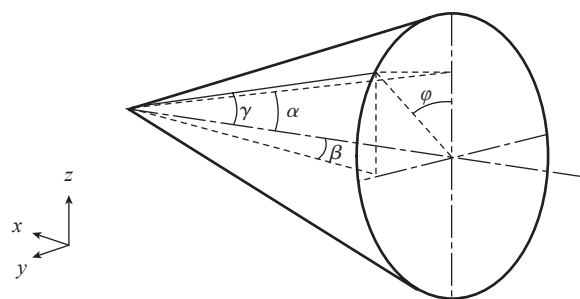


图4 端面法线偏转角度分解图  
Fig.4 Exploded diagram of deflection angle of end normal

由此式可见  $\alpha_{加}$  与其分量  $\beta_{加}$  的相互关系。

若在底圆上取一直径作为基准线(如图 4 中与  $z$  轴方向平行的直径),则可用一个角度  $\varphi$  来表示端面法线与底圆交点在底圆上所处的位置。随着轴的转动,  $\varphi$  在 0 到  $2\pi$  之间周期性变化<sup>[2]</sup>,且有:

$$\tan \varphi = \frac{\tan \beta_{加}}{\tan \alpha_{加}}, \quad (9)$$

进而得出:

$$\begin{aligned} \tan \alpha_{加} &= \tan \gamma \cos \varphi; \\ \tan \beta_{加} &= \tan \gamma \sin \varphi, \end{aligned} \quad (10)$$

从而完成角度  $\gamma$  的分解。

角度  $\varphi$  表示了分量  $\alpha_{加}$  和  $\beta_{加}$  随着轴转动的相互变化关系,可用作进一步计算和分析的参考。

### 1.4 各因素引起的端面偏转的叠加

将重力引起的端面偏转  $\alpha_{重}$  和端面加工误差引起的端面偏转  $\alpha_{加}$  及  $\beta_{加}$  按分量相叠加,可以得到总端面偏转量  $\gamma_{总}$  2 个方向上的分量,如下式:

$$\begin{aligned} \alpha_{总} &= \alpha_{重} + \alpha_{加}; \\ \beta_{总} &= \beta_{加}。 \end{aligned} \quad (11)$$

分别按照坐标变换方程计算,即可得知各几何元素变换后的值。

例如研究某点与原点及  $y$  轴所成的角  $\theta$ ,在端面同时受重力作用和加工误差因素发生偏转后变为  $\theta'$ ,得出:

$$\tan \theta' = \frac{z'_{总}}{y'_{总}} = \frac{z \cos \alpha_{总}}{y \cos \beta_{总}} = \tan \theta \frac{\cos(\alpha_{重} + \alpha_{加})}{\cos \beta_{加}}, \quad (12)$$

其中  $\alpha_{加}$  和  $\beta_{加}$  的值如前所述分解得出。

### 1.5 径向跳动的分析

由于加工条件的限制,实际应用中的轴都存在着一一定的径向跳动。为保证机床精度,应对径向跳动量进行分析。

如图 5 所示,轴的实际旋转中心并非圆心,因此在转动过程中,轴上各点具有额外的运动量,这与旋转中心与圆心的距离  $r$  以及旋转角度  $\varphi$  有关,各点的  $y$ 、 $z$  坐标修正方法为:

$$\begin{aligned} y' &= y + r \cos \varphi; \\ z' &= z + r \sin \varphi. \end{aligned} \quad (13)$$

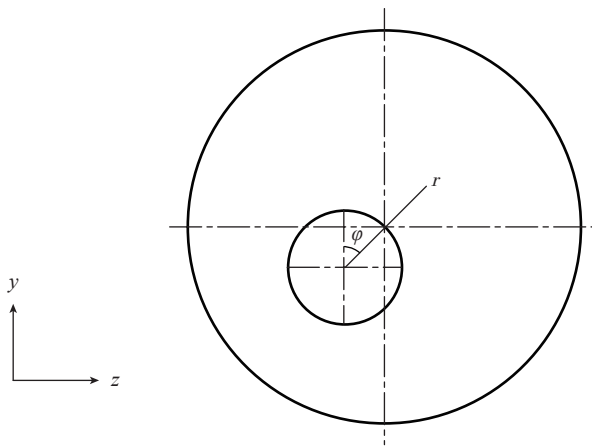


图5 径向跳动示意图  
Fig.5 Diagram of radial run-out

## 2 转台变形热影响分析的研究

在内外热源的影响下,数控转台各部件将发生不同程度的热变形,直接降低了定位精度。因此,分析热变形的成因并研究相应的防范措施具有十分重要的意义。使用谐波齿轮传动时,对精度产生重要影响的是主轴和主轴座的热变形。主轴上的滚动轴承内部存在着运动副,由于摩擦力的作用而形成热源。另外,电机散发的热量也会通过空气对流、辐射等途径传递到主轴座,主轴座的热变形会使其支撑的主轴产生相应的定位偏差。

图 6、图 7 为谐波齿轮方案下主轴、轴承及底座部分的整体热分布图,图 6 为初期工作的情况,图 7 为中期工作的情况。由图可见轴承工作时产生的热量对主轴座及主轴的温度都产生了一定的影响。

图 8、图 9 为使用力矩电机传动时的热分布图,对精度产生重要影响的是电机动转子和转子支撑座的热变形。图 8 为初期工作状态,图 9 为中期工作状态。电机

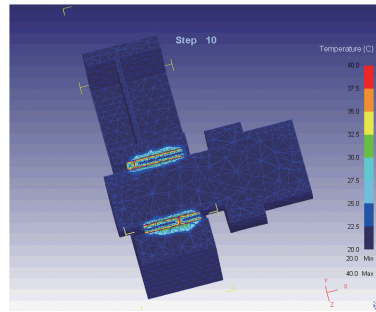


图6 谐波齿轮方案初期工作热分布  
Fig.6 Thermal distribution of the initial-term work on harmonic gear

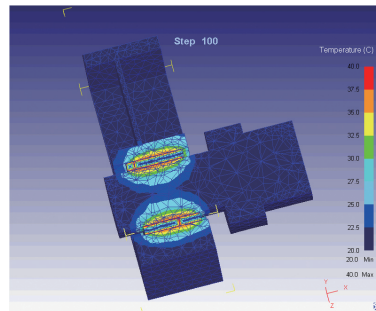


图7 谐波齿轮方案中期工作热分布  
Fig.7 Thermal distribution of the medium-term work on harmonic gear

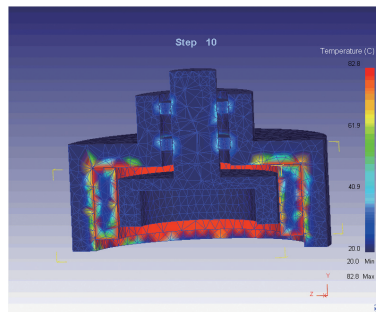


图8 力矩电机方案初期工作热分布  
Fig.8 Thermal distribution of the initial-term work on torque motor

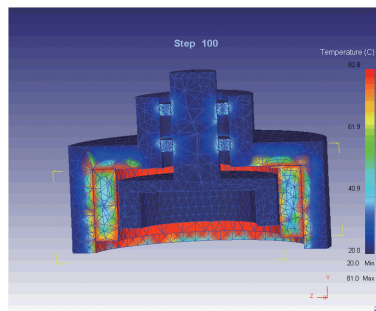


图9 力矩电机方案中期工作热分布  
Fig.9 Thermal distribution of the medium-term work on torque motor

动转子通过轴承与静止部件相连接,轴承内部摩擦产生的热量,使得动转子温度升高而发生变形。另外,力矩电机定子上缠绕的励磁线圈是整台电机最主要的热源,线圈通电后产生的热量传递到转子支撑座上,使支撑座发生变形,从而影响转子的定位精度。

通过热影响分析,我们得出的结论是转台在电机的驱动下发生转动,在摩擦力以及电磁力的作用下,主轴、主轴座、轴承以及电机定转子都会发生相应的受热变形,特别是当电机转速加快、温度升高时,这种变形趋势就更加地明显。

### 3 转台零件应力变形的有限元分析研究

数控转台主轴上施加的负载将使主轴产生一定变形,从而影响定位精度。应用有限元分析方法对传动和支撑部件进行力学分析,研究其中各点的应力应变,可以定量分析负载情况对主轴变形的影响,为零部件的设计选取和机器使用规范的制订提供依据。在轴端受到向下的负荷时,轴的内部各点分别表现出压应力和拉应力等不同状态<sup>[3-4]</sup>。使用有限元软件可对各点的应力应变状态进行分析,从而分析整轴的强度与变形情况。

图10为谐波齿轮方案下主轴头部的有限元力学分析图。当主轴上施加工作台及其他负载后,轴的内部应力状态发生了相应的变化,上部表现为拉力,下部表现为压力。通过使用上面的分析方法,研究负载对各零件的应力变形影响,找出关键部位并优化设计,从而提高数控转台精度及寿命。

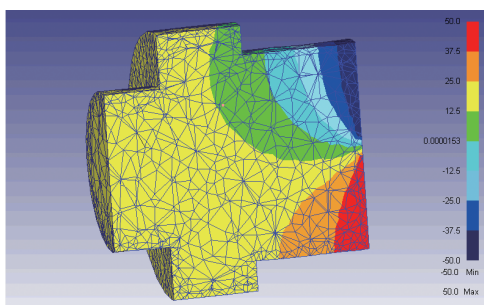


图10 旋转主轴头部有限元力学分析

Fig.10 Finite element analysis of rotating spindle head

### 4 结论

(1)通过平面投影法,分析主轴端面在加工过程中发生的偏转,采用坐标变换方式,给出偏转角度的三角函数表示形式,从而定量的分析偏转类型,同时利用坐标变换方程求出重力等因素对于加工偏转的影响。

(2)通过有限元分析方法,对转台的传动和支撑部件进行力学分析,研究其中各点在受热情况下的应力和

应变,定量给出负载情况对主轴变形的影响,为零部件的设计选取和机器使用规范的制订提供依据。通过以上的分析方法,研究负载对各零件的应力变形影响,找出关键部位并对其进行优化设计,提高转台精度。

(3)通过有限元分析方法,设计合理的负载试验过程,选取合理的负载试验点,用以检测正载和各种偏载对数控转台精度及寿命的影响。计算数控转台负载的安全余量,确定数控转台的工作边界条件与使用范围。

### 参考文献

- [1] 周永良. 数控车床精度分析及提高精度保持性措施. 中国制造业信息化, 2009, 9(35): 78-80.
- [2] 王惠卿. 一种新型分度轴精度分析. 机械设计与制造, 2007, 8: 96-97.
- [3] 张强, 吴耀华. 面向并行工程的数控机床可靠性控制模型. 机械工程学报, 2001, 7(37): 26-29.
- [4] 乐光学. 数控机床工艺可靠性的控制及可靠性研究. 组合机床与自动化加工技术, 2001, 3: 17-18.

(责编 泰山)

(上接第 87 页)

### 5 结束语

ARJ21 环控功能自动化试验系统的测量与控制方法有别于国内传统的飞机环控功能试验沿用的技术方法,有助于提高试验测试的精度和自动化程度。通过研制开发 ARJ21 飞机环控功能自动化试验系统,实现了对环控功能试验参数的自动测量与控制,将有效提升 ARJ21 飞机批生产总装制造阶段环控功能试验的效率与质量。对于提高我国大型客机的总装制造水平、降低制造成本、提升我国飞机制造业的自主创新能力和市场竞争能力具有十分重要的意义。

### 参考文献

- [1] 林更元. 航空制造工程手册. 北京: 航空工业出版社, 1993.
- [2] 苏向辉, 许锋, 昂海松. 飞机环境控制系统的现状与未来. 航空制造技术, 2002(10): 40-42.
- [3] 赵俊茹, 史忠科. 飞机环境控制系统的仿真研究. 计算机测量与控制, 2005, 13(6): 542-544.
- [4] 姚洪伟, 王浚. 飞机环控系统建模与换热器参数优化研究. 系统仿真学报, 2005, 17(12): 3040-3042.
- [5] 许晴雪. V 型锥流量计的原理及应用. 自动化与仪器仪表, 2008(5): 55-57.
- [6] 武艳, 张大林. 数字电子气动式座舱压力控制系统模型机性能分析. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(3): 324-328.
- [7] 王立新. 模糊系统与模糊控制教程. 北京: 清华大学出版社, 2003.

(责编 泰山)