

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2020.04.015

超大尺寸超精密数控磨床构型分析

刘文志

(机械科学研究总院海西(福建)分院有限公司,福建 沙县,365500)

摘要:为确定用于超大口径($\geq 1\,500\text{ mm}$)光学非球面成形加工的超精密数控磨床的构型设计方案,对 2 种不同构型龙门机床的空间运动误差建模及比较。基于多体系统理论,通过建立 2 种构型龙门机床的拓扑结构图,推导二者的空间运动误差模型;并基于该模型,采用仿真手段比较了二者用于超大尺寸光学非球面加工过程的砂轮中心点误差变化规律。仿真结果表明,在加工大口径非球面元件时,工作台移动式的机床构型具有相对较小的空间运动误差,但两种构型龙门机床的误差十分接近。在综合考虑二者在大口径非球面元件加工过程中的其他特点后,确定了该超精密磨削机床构型为工作台固定的桥式龙门结构。

关键词:超精密数控磨床;多体系统理论;误差建模;构型分析

中图分类号: TG584

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2020)04-0387-06

Configuration analysis of super-size ultra-precision CNC grinding machines

LIU Wenzhi

(Haixi(Fujian) Institute, China Academy of Machinery Science & Technology Co., Ltd., Shaxian 365500, China)

Abstract: In order to determine the configuration design scheme of the ultra-precision CNC grinding machine tool for forming and processing super-large diameter ($\geq 1\,500\text{ mm}$) optical aspheric surfaces, modeling and comparison of the spatial motion errors of two different configuration options for the gantry machine tools were carried out. Firstly, based on the theory of multi-body system, space motion error models of the two kinds of gantry machine tools were derived by establishing the topology diagrams of the two configurations. Based on the model, simulation was used to compare the error variation curves of the grinding wheel centers of the two kinds of machine tools during the machining process of super-size optical aspheric surfaces. Simulation results show that when machining large-diameter aspheric parts, the machine tool with a movable table has a relatively small space motion error, but the errors of two kinds of gantry machine tools are very close. After considering the other characteristics of the two in the processing of large-diameter aspheric parts, the configuration of the ultra-precision grinding machine tool is determined to be a bridge gantry structure with a fixed worktable.

Keywords: ultra-precision CNC grinding machines; multi-body system theory; error modeling; configuration analysis

大型数控超精密磨床是加工大型光学零件的重要设备。美国自 20 世纪 60 年代便开始研制,推出了 DTM、LODTM 等经典超精密机床,其中 DTM-3 最大加工尺寸为 $2\,100\text{ mm}$,面型精度 $<30\text{ nm}$,LODTM 最大加工直径为 $1\,625\text{ mm}$,机床精度

约 50 nm ,其超精密加工技术处于世界顶尖水平。英国 Cranfield 研究所研究的 OAGM2500 机床最大加工尺寸为 $2\,500\text{ mm}\times 2\,500\text{ mm}\times 610\text{ mm}$,面型精度 $<1\text{ }\mu\text{m}$,与 LLNL 研制的 DTM-3 和 LODTM 是当时世界公认的最高加工精度水平的大型超精

密机床。近年来,国内重大工程对米级以上口径光学元件的需求日益增大,但在这方面的相关研究、报道仍较少,与西方发达国家存在一定差距^[1-2],本文以 2 m 口径光学元件超精密磨削成形加工机床的研制需求为牵引,通过开展不同构型龙门机床的结构特点及空间运动误差的比较研究,为确定超大口径精密加工机床的结构设计方案及研制开发提供理论基础。

1 不同构型龙门机床的特点分析

根据大口径光学元件类型及元件轮廓方程,尤其是非球面元件类型,可以发现三直线轴联动加工的大型超精密平面磨削机床即可满足轴对称和非轴对称非球面加工基本要求^[3]。平面磨床的结构形式选型确定主要取决于被加工工件的大小及加工精度。工件宽度超过 1 000 mm 情况下,适宜选择龙门式结构的平面磨床,而从大口径非球面元件的超精密磨削所要求的高效高精度指标来看,可选的构型方案包括:工作台固定龙门桥式结构和工作台移动龙门定梁式结构两种。

工作台固定龙门桥式结构,即工作台固定,横梁在两个高架桥上移动。根据 X/Y/Z 直线轴加工行程 2 000 mm×2 000 mm×800 mm 的需求,设计此构型的机床结构如图 1 所示。工作台固定,砂轮磨削主轴在横梁上做横向移动和垂直移动,而横梁在高架桥上作前后移动。整机由桥柱、工作台、横梁滑枕、砂轮主轴箱、电气及数控系统、砂轮修整系统、光栅反馈系统、气动系统、冷却系统、过滤系统、润滑系统、外围防护罩等组成。该龙门桥式是动柱式龙门结构的变型,把动柱式龙门平面磨床的导轨部分升高成高架桥,高效率要求磨削加工运动相对高速,取消动柱的两根立柱后,运动部分只剩下一个横梁,重量大大降低,可实现高速进给。运动部分的轻量化也能降低进给机构驱动负荷,精度能相应提高。此外,高架桥结构也增加了机床承重部分的刚性,可以避免横梁快速运动和砂轮主轴高速运转时容易发生的颤振现象。

工作台移动龙门定梁式结构,即龙门和床身为整体结构,采用定梁结构。根据项目需求,设计此构型的机床如图 2 所示。工作合作前后移动,主轴箱在横梁上做横向移动和垂直移动。整机由床身工作台、立柱与横梁部件、中溜板滑枕部件、主轴箱部件等组成。此种构型的机床在生产和加

工中只极少移动质量,机床稳定性可最大限度得到保证,同时由于直线导轨驱动技术十分成熟,工作台移动定位精度和精度保持性高。

通过上述分析可知,以上设计的两种构型磨床设计各有特点,因而需要从其他方面进行分析比较。本文设计研制的超精密成形磨削机床采用金刚石砂轮超精密磨削技术,即基于“运动复印”原理,机床运动精度对于加工质量具有决定性影响。因此,上述两种机床结构的空间运动误差可作为设计过程中两种方案比较的重要依据。

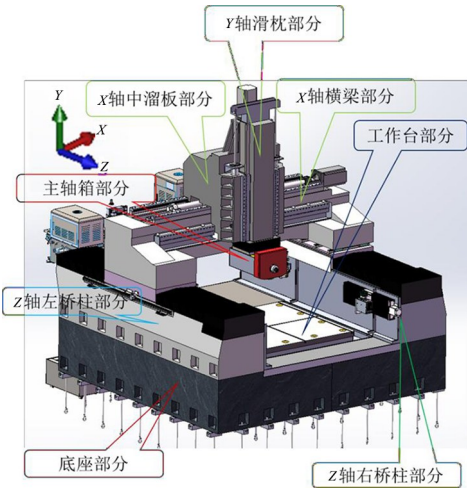


图 1 工作台固定龙门桥式构型

Fig.1 Bridge gantry structure with a fixed worktable

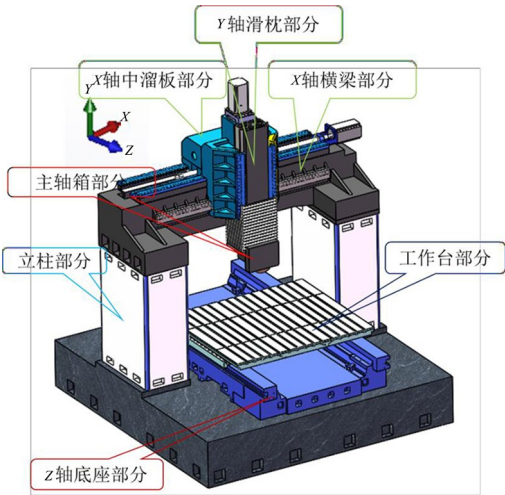


图 2 工作台移动龙门定梁式构型

Fig.2 Fixed-beam gantry structure with a movable worktable

2 不同构型龙门机床的空间运动误差建模及分析

对于任意机床,由于制造、装配等原因,机床运动时通常都存在误差。如图 3 所示,以任意机床的沿线性轴 X 轴的运动为例,存在如下几何误差: $\delta_x(x)$ 为 X 轴在 X 方向的定位误差; $\delta_y(x)$ 为 X 轴在 Y 方向的直线度误差; $\delta_z(x)$ 为 X 轴在 Z 方向的直线度误差; $\varepsilon_x(x)$ 为 X 轴绕 X 轴的滚角误差; $\varepsilon_y(x)$ 为 X 轴绕 Y 轴的滚角误差; $\varepsilon_z(x)$ 为 X 轴绕 Z 轴的滚角误差。

对上述两种构型龙门机床的几何结构进行抽象分析可知,两机床均由 3 个相互垂直的直线运动轴组成,则共有 18 项几何误差,加上 3 项轴与

轴之间的垂直度误差,共计 21 项几何误差^[4],如表 1 所示。

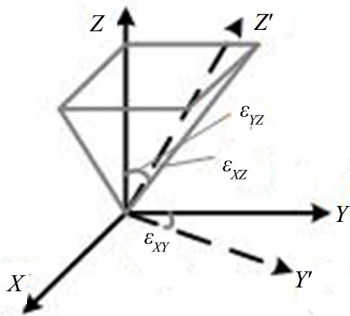


图 3 X 轴的各项误差
Fig.3 Errors of the X axis

表 1 龙门机床的 21 项几何误差
Tab.1 21 geometric errors of the gantry machine tool

运动轴	线位移误差			角位移误差		
	沿 X	沿 Y	沿 Z	沿 X	沿 Y	沿 Z
X 轴平动	$\delta_x(x)$	$\delta_y(x)$	$\delta_z(x)$	$\varepsilon_x(x)$	$\varepsilon_y(x)$	$\varepsilon_z(x)$
Y 轴平动	$\delta_x(y)$	$\delta_y(y)$	$\delta_z(y)$	$\varepsilon_x(y)$	$\varepsilon_y(y)$	$\varepsilon_z(y)$
Z 轴平动	$\delta_x(z)$	$\delta_y(z)$	$\delta_z(z)$	$\varepsilon_x(z)$	$\varepsilon_y(z)$	$\varepsilon_z(z)$
垂直度	$\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{xz}, \varepsilon_{yz}$					

有了上述各直线轴运动产生的几何误差后,还需要构建机床各零部件间的相对位置和运动关系,结合二者即可建立机床的空间运动误差模型。

多体系统理论^[5-6]是目前开展多轴机床误差建模的重要方法。该理论主要是利用低序矩阵列方法描述多体系统拓扑结构关联关系,应用齐次变换矩阵描述系统中各刚体间相对位置变化。

以下以图 1 中的工作台固定龙门桥式机床为例,进行机床空间运动误差建模过程的说明。

(1) 选取机床底座为参考刚体(0 体)并建立参考坐标系(即:基坐标系, $O_0 - O_x O_y O_z$),同理在其他各刚体(1 - Z 轴导轨;2 - X 轴导轨;3 - Y 轴导轨;4 - 砂轮;5 - 工件)中心建立坐标系 $O_i - O_x O_y O_z (i = 1, 2, \cdots, 5)$ 。依据多体系统理论,建立包含从机床底座到砂轮中心的刀具链分支和从机床底座到工件中心的工件链分支磨床的拓扑结构图,如图 4 左边部分所示。图 4 右边所示的 $q_{jx}, q_{jy}, q_{jz} (j = 1, 2, \cdots, 5)$ 为坐标系 $O_j - O_x O_y O_z$ 在前

一坐标系中的位置坐标。

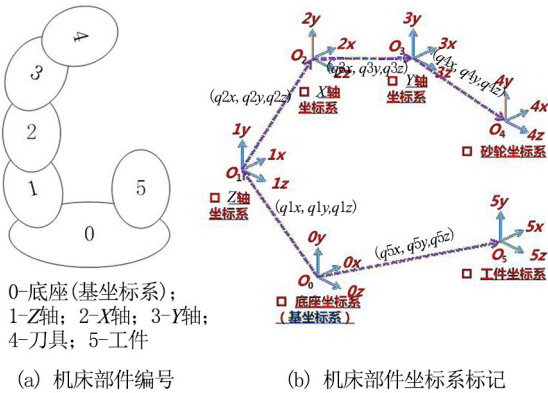


图 4 工作台固定龙门桥式机床拓扑结构
Fig.4 Topology of bridge gantry machine tool with a fixed worktable

(2) 根据拓扑结构图,建立工件链分支(0-5)和刀具链分支(0-1-2-3-4)中各刚体间的位置及运动的齐次变换矩阵:

	位置矩阵[SIJ] p	位置误差矩阵[SIJ] pe	运动矩阵[SIJ] s	运动误差矩阵[SIJ] se
0-5	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & q_{5x} \\ 0 & 1 & 0 & q_{5y} \\ 0 & 0 & 1 & q_{5z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$E_{4 \times 4}$	$E_{4 \times 4}$	$E_{4 \times 4}$
0-1	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & q_{1x} \\ 0 & 1 & 0 & q_{1y} \\ 0 & 0 & 1 & q_{1z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$E_{4 \times 4}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(z) & \varepsilon_y(z) & \delta_x(z) \\ \varepsilon_z(z) & 1 & -\varepsilon_x(z) & \delta_y(z) \\ -\varepsilon_y(z) & \varepsilon_x(z) & 1 & \delta_z(z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
1-2	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & q_{2x} \\ 0 & 1 & 0 & q_{2y} \\ 0 & 0 & 1 & q_{2z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \varepsilon_{xz} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\varepsilon_{xz} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(x) & \varepsilon_y(x) & \delta_x(x) \\ \varepsilon_z(x) & 1 & -\varepsilon_x(x) & \delta_y(x) \\ -\varepsilon_y(x) & \varepsilon_x(x) & 1 & \delta_z(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
2-3	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & q_{3x} \\ 0 & 1 & 0 & q_{3y} \\ 0 & 0 & 1 & q_{3z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{xy} & 0 & 0 \\ \varepsilon_{xy} & 1 & -\varepsilon_{yz} & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yz} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(y) & \varepsilon_y(y) & \delta_x(y) \\ \varepsilon_z(y) & 1 & -\varepsilon_x(y) & \delta_y(y) \\ -\varepsilon_y(y) & \varepsilon_x(y) & 1 & \delta_z(y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
3-4	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & q_{4x} \\ 0 & 1 & 0 & q_{4y} \\ 0 & 0 & 1 & q_{4z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$E_{4 \times 4}$	$E_{4 \times 4}$	$E_{4 \times 4}$

(3) 加工工件上任意点时,机床的空间运动误差计算:

假定工件上的磨削点 P 在工件坐标系中的位置矩阵 r_w 为:

$$r_w = [x_w \quad y_w \quad z_w \quad 1]^T \quad (1)$$

另一方面,砂轮上的磨削点在砂轮坐标系中的位置矩阵 r_t 为:

$$r_t = [0 \quad -R \quad 0 \quad 1]^T \quad (2)$$

式中, R 为砂轮半径。

根据上一步骤中的工件链分支齐次变换矩阵,可推导出在考虑位置误差和运动误差的情况下工件磨削点 P 在基坐标系中的位置矩阵应为:

$$p_w = p05 \times pe05 \times s05 \times se05 \times \{r_w\} \quad (3)$$

同理,通过刀具链分支的齐次矩阵变换,得到砂轮上磨削点在基坐标系中的位置矩阵应为:

$$p_t = p01 \times pe01 \times s01 \times se01 \times p12 \times pe12 \times s12 \times se12 \times p23 \times pe23 \times s23 \times se23 \times p34 \times pe34 \times s34 \times se34 \times \{r_t\} \quad (4)$$

在实际加工过程的任意时刻,砂轮上磨削点位置与工件上磨削点位置应当重合,即 $p_w = p_t$ 。

联立二者,可以得到考虑几何误差的情况下,工件磨削点 P 在工件坐标系里的实际坐标为:

$$p_{\text{actual}} = r_w = [p05 \times pe05 \times s05 \times se05]^{-1} \times p_t \quad (5)$$

对于式(5),当式中涉及误差项为 0 时,则 $pe05, se05, pe01, se01, pe12, se12, pe23, se23, pe34, se34$ 全部为 1,则可以得到工件磨削点 P 在工件坐标系里的理想坐标为:

$$p_{\text{ideal}} = [p05 \times s05] - 1 \times p01 \times s01 \times p12 \times s12 \times p23 \times s23 \times p34 \times s34 \times \{r_t\} \quad (6)$$

综合二式,可得到磨削任意点 P 时机床的空间误差为:

$$e = p_{\text{actual}} - p_{\text{ideal}} \quad (7)$$

同理可求得图 2 所示的工作台移动龙门定梁式机床在加工任意点时的空间误差。对于表 1 对应的误差参数,通过实际测得的同类型机床的 3 轴运动误差(如图 5 所示),可以代替相关几何误差项带入模型进行计算。

基于所求得的 2 种构型机床的空间运动误差表达式,利用 Matlab 软件分别绘制不同口径元件

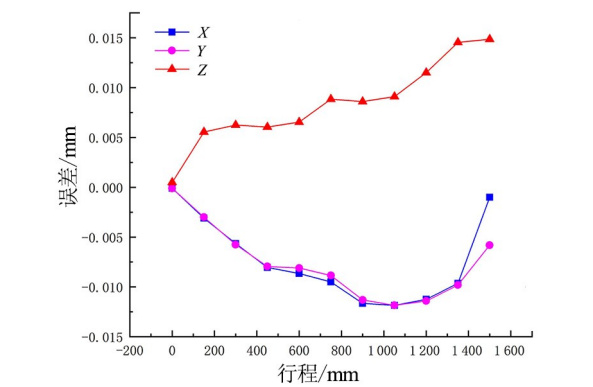


图 5 实际测得同类型机床 3 轴的运动直线度误差

Fig.5 Measured errors of the motion straightness errors of the 3 axes of the same type of machine tools

下的机床加工误差图进行对比分析,规划 400、800、1 000、1 500、2 000、2 500 mm 共 6 个口径非球面,仿真过程中,两台机床的各误差项数值、位置参数完全相等。最终得到的比较结果如图 6、7、8。

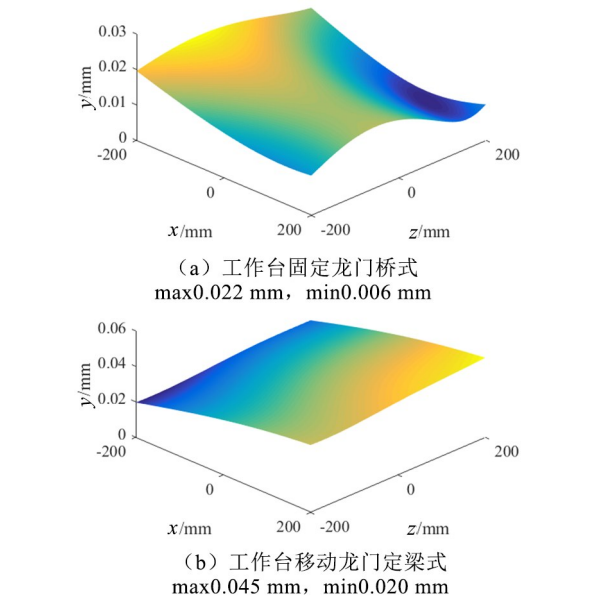


图 6 400 mm 口径下加工误差三维面形

Fig.6 3D shapes of the machining errors for a part with a diameter of 400 mm

从图 9 可看出,随着加工元件的尺寸增大,运动误差最大值也逐渐增大,最大误差值与加工原件口径呈近似线性的关系,而最小误差值基本保持不变。并且从图 6~8 加工误差三维面形分布可知,运动误差造成的加工误差最大值均分布在

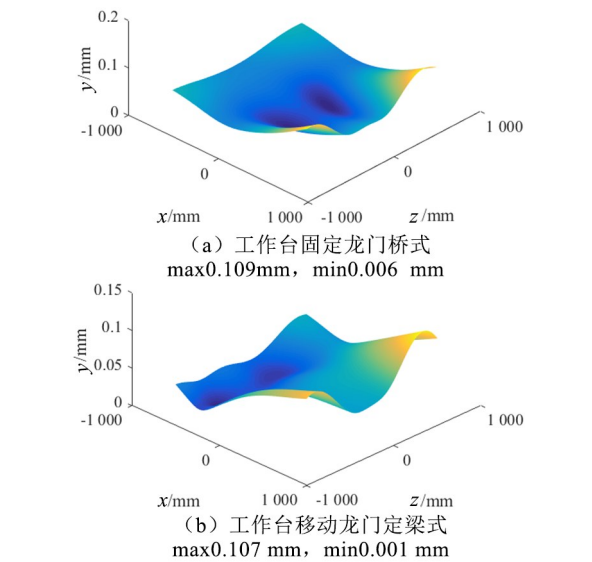


图 7 1 500 mm 口径下加工误差三维面形

Fig.7 3D shapes of the machining errors for a part with a diameter of 1 500 mm

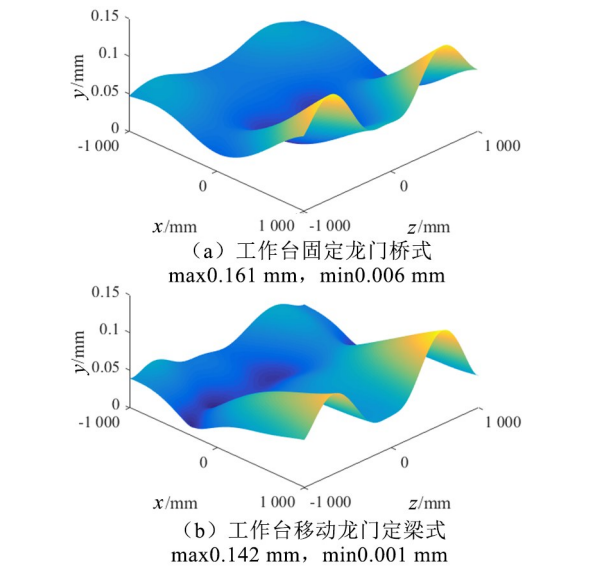


图 8 2 000 mm 口径下加工误差三维面形

Fig.8 3D shapes of the machining errors for a part with a diameter of 2000 mm

元件边缘部分。这是由于随元件口径增大,加工行程也会相应增大,则由垂直度误差带来的阿贝误差项也会随行程线性增长,而最小误差由初始误差项决定,在模型计算中假设初始误差一致的情况下不同尺寸元件的最小误差值相差不大,对比两种结构机床的运动误差曲线可知,在加工大口径($\geq 1\,500$ mm)非球面元件时,工作台移动龙门定梁式的机床构型具有相对较小的运动误差,

其最大误差为 0.14 mm,但两种构型机床的误差十分接近。

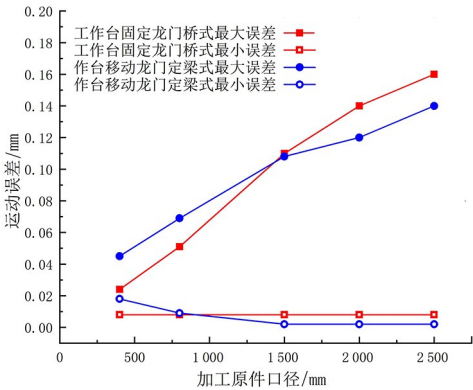


图 9 不同元件口径下,两种机床构型运动误差对比
Fig.9 Comparison of the motion errors of two machine tool configurations with different component diameters

根据 2 m 口径光学元件超精密磨削成形加工机床的研制需求,通过上述理论计算的对比,针对大尺寸元件(1 500 mm 以上)的磨削,工作台移动龙门定梁式的机床构型由其运动误差带来的加工误差相对更小。此外,在相同的情形下,工作台固定龙门桥式机床构型还必须考虑龙门桥左右两端的移动横梁同步性误差,以及横梁热膨胀引发的

形变导致与桥柱导轨抱死等问题,在研制技术上相对投入更大,引入的机床构型造成的误差因素更多。因此,鉴于精度和制造因素,工作台移动龙门定梁式机床的构型在大尺寸元件磨削加工中更为适用。

3 结论

工作台固定龙门桥式与工作台移动龙门定梁式龙门机床相比具有如下优点:

- 1)工作台固定,承载能力极大且刚性好、精度高;
- 2)加工时移动加工工具系统的运动部件质量不变,由此可避免高惯性的运动影响,有利于保证工件的加工精度和质量稳定性;
- 3)由于横梁自身重量相对常规龙门的横梁和龙门框一体结构偏轻,横梁的抗弯能力、抗扭刚度偏弱,加工进给切深不能太大,与超精密加工极小切深特点相匹配。考虑到本项目最大可加工元件尺寸 2 000 mm×2 000 mm×500 mm,两种构型机床的误差比较接近,综合结构特点选择工作台固定的桥式龙门结构作为大口径非球面超精密成型机床的构型。

参考文献:

[1] 魏立峰. 光学零件超精密铣削加工表面形貌预测与仿真[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
[2] 梁迎春, 陈国达, 孙雅洲, 等. 超精密机床研究现状与展望[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014(5): 35-46.
[3] 王振忠. 大口径楔形非球面超精密加工装备及关键技术研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2009.
[4] 唐宇航, 范晋伟, 陈东菊, 等. 基于蒙特卡洛模拟的机床关键几何误差溯源方法[J]. 北京工业大学学报, 2017(11): 16-25.
[5] 王晓峰. 复合数控机床几何误差补偿及误差影响溯源分析[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
[6] 范晋伟. 基于多体系统运动学的数控机床运动建模及软件误差补偿技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 1996.

(责任编辑: 陈 雯)