

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.02.004

多点并联驱动精密压力机几何误差建模与灵敏度分析

王 勇¹, 杨江帆¹, 寿康力¹, 詹 晨¹, 胡火根², 黄明玖²

(1. 合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽耐科装备科技股份有限公司, 安徽 铜陵 244061)

摘 要:为提高芯片塑封精度,文章以一种多点并联驱动精密压力机为研究对象,提出一种精度分析和误差分配方法。介绍了多点并联驱动压力机的拓扑结构,采用低序列阵列法描述了压力机传动系统各零部件之间的并联关系,并基于多体系统理论和齐次变换法构建了多点并联驱动精密压力机的位置误差传递模型和角度误差传递模型;以一阶敏感度函数为理论基础,建立多点并联驱动精密压力机的误差灵敏度分析模型,对求出的误差传递模型中各项误差进行灵敏度分析,找到了位置误差和角度误差的主要误差源并计算出各项几何误差的灵敏度系数,以此为依据为整机的精度分配提供了方法。

关键词:多点并联驱动精密压力机;多体系统理论;误差传递模型;灵敏度分析

中图分类号:TH161.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)02-0162-08

Geometric error modeling and sensitivity analysis of multi-point parallel drive precision press

WANG Yong¹, YANG Jiangfan¹, SHOU Kangli¹, ZHAN Chen¹, HU Huogen², HUANG Mingjiu²

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Nextool Equipment Technology Co., Ltd., Tongling 244061, China)

Abstract: To improve the precision of chip packaging, this paper takes a multi-point parallel drive precision press as the research object and proposes a method for accuracy analysis and error allocation. The paper describes the topological structure of the multi-point parallel drive press, and uses the low sequence array method to describe the parallel relationship between various components of the press transmission system. Based on the multi-body system theory and the homogeneous transformation method, the position error transfer model and angle error transfer model of the multi-point parallel drive precision press were constructed. Based on the theory of the first-order sensitivity function, the error sensitivity analysis model of the multi-point parallel drive precision press was established. The sensitivity analysis of each error in the error transfer model was carried out, the main error sources of position error and angle error were found, and the sensitivity coefficient of each geometric error was calculated, which provides a method for the accuracy allocation of the whole machine.

Key words: multi-point parallel drive precision press; multi-body system theory; error transfer model; sensitivity analysis

多点并联驱动精密压力机采用多丝杠并联的驱动方式使工作台重心移动,通过上下模具的挤压对晶圆级芯片进行合膜封装。为保证工作精度,需要找出误差源,建立其误差的数学模型,分析各误差源的影响程度,为误差分配提供依据^[1]。国内外学者基于多体系统理论在机床误差建模领域展开广泛的研究^[2]。文献[3]基于多体系统理

论的建模方法,全面分析机床的拓扑结构、机床误差元和坐标变换矩阵,建立特定机床的综合误差模型;文献[4]基于多体系统理论,建立相机光机平台的空间几何误差模型以及光轴指向误差与光机平台几何误差的映射关系。在晶圆测试平台的设计中,为提高晶圆测试平台的定位精度,采用多体系统理论对晶圆测试平台的空间定位误差进行

收稿日期:2023-02-17;修回日期:2023-04-26

基金项目:安徽省科技重大专项资助项目(202003a05020041)

作者简介:王 勇(1969—),男,安徽芜湖人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师。

建模,分析影响空间定位精度的因素^[5]。文献[6]根据夹具系统的机械结构和连接方式,提出基于多体系统运动学理论和齐次平移的方法。针对并联机构的误差建模,文献[7-8]基于冗余驱动方式对新型并联驱动压力机的构型进行研究;文献[9]根据 6-UPS 并联机构的逆运动学模型,通过微分变换建立移动平台姿态误差模型。在机构的精度分析方面,文献[10]针对一种含闭环支链的平面结构冗余并联机构进行误差敏感度分析;文献[11]提出识别关键性几何误差源的新方法;文献[12]提出精度保持度的概念,建立基于多体理论的机床空间位置精度保持性评价模型;文献[13-14]采用矩阵微分法建立敏感度分析模型,并识别主要几何误差来源。

本文以多点并联驱动精密压力机为研究对象,构建位置误差传递模型和角度偏差传递模型,并从多点并联驱动精密压力机工作台的位置精度和台面高度差精度 2 个方面入手,为整机精度分配提供研究方法。

1 多点并联驱动精密压力机误差模型

1.1 多重冗余约束和间隙误差空间

多点并联驱动精密压力机的传动机构本质上是一种冗余驱动机构,采用这种驱动方式会引入各滚珠丝杠轴之间复杂的耦合关系,增加系统的复杂程度。多点并联驱动精密压力机传动机构结构简图如图 1 所示。

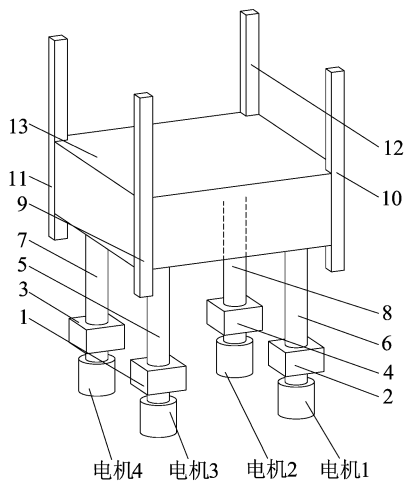


图 1 多点并联驱动精密压力机传动机构结构简图

图 1 中:1~4 为滚动轴承;5~8 为滚珠丝杠;9~12 为直线导轨;13 为工作台。

将多点并联驱动精密压力机误差源分为间隙误差和常规误差。常规误差包括零部件的制造误

差、调整误差、安装误差等;间隙误差指两零部件连接不紧密出现间隙而导致的误差,间隙误差空间是机构在确定位姿、确定常规误差、不确定间隙误差的情况下,误差矢量的可能取值范围。

1.2 广义坐标系的设置与压力机的特征矩阵

1.2.1 多体系统及其低序体阵列

多点并联驱动精密压力机的拓扑结构如图 2 所示。其中 0 代表多点并联驱动精密压力机机架。

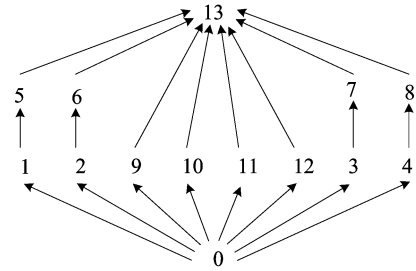


图 2 多点并联驱动精密压力机拓扑结构

任选体 j 作为多体系统中的任意典型体,体 j 的 n 阶低序体定义公式为:

$$L^n(j) = i \tag{1}$$

其中: L 为低序体算子;体 j 为体 i 的 n 阶高序体,两者之间满足

$$L^n(j) = L(L^{(n-1)}(j)) \tag{2}$$

定义:

$$L^0(j) = j \tag{3}$$

$$L^n(0) = 0 \tag{4}$$

当体 j 是体 i 的相邻高序体时,有:

$$L(j) = i \tag{5}$$

低序体阵列可由式(1)~(5)计算得出。根据以上定义,对于体 13, $L^0(13) = 13, L^1(13) = 9, L^2(13) = 0$;同理可以计算出其他体的各阶低序体,从而计算出完整的多点并联驱动精密压力机的低序体阵列,见表 1 所列。

表 1 多点并联驱动精密压力机的低序体阵列

典型体 j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$L^0(j)$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$L^1(j)$	0	0	0	0	1	2	3	4	0	0	0	0	9
$L^2(j)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

1.2.2 考虑误差因素的相邻体特征变换矩阵

含误差相邻体间的几何特征如图 3 所示。图 3 中: O_0 为基准坐标系; O_i 为固定在体 i 上的体坐标系; O_j^i 为体 j 在体 i 参考坐标系下的理想

静止位姿; O_j^a 为体 j 在体 i 参考坐标系下的实际静止位姿; C_j^i 为体 j 在 O_j^a 基础上的理想运动位姿; C_j^a 为体 j 在 O_j^a 基础上的实际运动位姿。

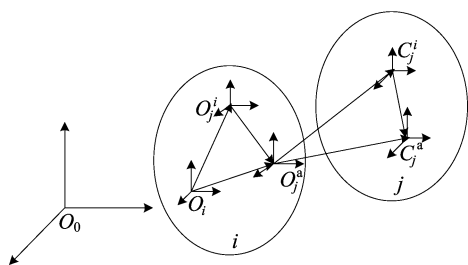


图 3 含误差相邻体间的几何特征

由图 3 可知,体 i 的体坐标系 O_i 到体 j 实际运动位姿 C_j^a 的齐次变换矩阵为:

$$S_{ij} = (S_{ij})_p (S_{ij})_{pe} (S_{ij})_s (S_{ij})_{se} \quad (6)$$

其中: S_{ij} 为 O_i 到 C_j^a 的相邻体位姿变换矩阵; $(S_{ij})_p$ 、 $(S_{ij})_{pe}$ 、 $(S_{ij})_s$ 、 $(S_{ij})_{se}$ 分别为 O_i 到 C_j^a 过程中的理想静止位姿变换矩阵、实际静止位姿变换矩阵、理想运动位姿变换矩阵和实际运动位姿变换矩阵,为了简化模型,使 O_i 和 O_j^i 重合, $(S_{ij})_p$ 等于单位矩阵 $I_{4 \times 4}$ 。由多体系统的位姿变换矩阵理论, O_j^i 变换到 O_j^a 时,误差经历了 6 种基本运动及沿坐标轴的平移和旋转。 δ_{px} 、 δ_{py} 、 δ_{pz} 为沿 X 轴、

Y 轴、 Z 轴的线误差; ϵ_{px} 、 ϵ_{py} 、 ϵ_{pz} 为绕 X 轴、 Y 轴、 Z 轴的角误差。

$$(S_{ij})_{pe} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_{px} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \delta_{py} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \epsilon_{px} & -\sin \epsilon_{px} & 0 \\ 0 & \sin \epsilon_{px} & \cos \epsilon_{px} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \epsilon_{py} & 0 & \sin \epsilon_{py} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \epsilon_{py} & 0 & \cos \epsilon_{py} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \epsilon_{pz} & -\sin \epsilon_{pz} & 0 & 0 \\ \sin \epsilon_{pz} & \cos \epsilon_{pz} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ϵ_{px} 、 ϵ_{py} 、 ϵ_{pz} 作为误差来说是极小的角度,因此认为 $\sin \epsilon_{px} \approx \epsilon_{px}$, $\sin \epsilon_{py} \approx \epsilon_{py}$, $\sin \epsilon_{pz} \approx \epsilon_{pz}$, $\cos \epsilon_{px} \approx 1$, $\cos \epsilon_{py} \approx 1$, $\cos \epsilon_{pz} \approx 1$, 得:

$$(S_{ij})_{pe} = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_{pz} & \epsilon_{py} & \delta_{px} \\ \epsilon_{pz} & 1 & -\epsilon_{px} & \delta_{py} \\ -\epsilon_{py} & \epsilon_{px} & 1 & \delta_{pz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

同理,理想运动位姿变换矩阵 $(S_{ij})_s$ 为:

$$(S_{ij})_s = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\cos \beta \sin \gamma & \sin \beta & x \\ \cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma & \cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \cos \beta & y \\ \cos \alpha \sin \gamma - \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma & \sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \alpha \cos \beta & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

实际运动位姿变换矩阵 $(S_{ij})_{se}$ 为:

$$(S_{ij})_{se} = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_{sz} & \epsilon_{sy} & \delta_{sx} \\ \epsilon_{sz} & 1 & -\epsilon_{sx} & \delta_{sy} \\ -\epsilon_{sy} & \epsilon_{sx} & 1 & \delta_{sz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

1.3 多点并联驱动精密压力机几何误差模型

1.3.1 串联多体系统运动误差模型

图 3 中,取体 j 中任意一点,该点在体 i 的体坐标系中的实际位置矢量为 P_i 则有:

$$\begin{bmatrix} P_i \\ 1 \end{bmatrix} = S_{ij} \begin{bmatrix} P_j \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

该点在基本坐标系中的实际位置矢量为 P_o , 有:

$$\begin{bmatrix} P_o \\ 1 \end{bmatrix} = S_{oj} \begin{bmatrix} P_j \\ 1 \end{bmatrix} = \prod_{j=0}^J (S_{ij}) \begin{bmatrix} P_j \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中: J 为体 j 到基准坐标系的运动体个数; S_{ij} 为各相邻体间位姿变换矩阵。多体系统运动误差模型表达式为:

$$\begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_o \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_o' \\ 1 \end{bmatrix} = \prod_{j=0}^J (S_{ij})_{pe} (S_{ij})_s (S_{ij})_{se} \begin{bmatrix} P_j \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_o' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中: E 为体 j 实际位置与理想位置的误差矢量; P_j 为体 j 上任意点在体 j 坐标系中的理想位置矢量; P_o 为体 j 上任意点在基准坐标系中的实际位置矢量; P_o' 为体 j 上任意点在基准坐标系中的理想位置矢量。

1.3.2 压力坐标系定义

多点并联驱动精密压力机坐标系如图 4 所示, O_o 为基准坐标系,固定在 4 组滚动轴承与机架的安装面中心处,为方便建立多点并联驱动精密压力机的误差模型,各体的理想运动参考坐标系与相邻低序体的体坐标系重合。在理想状态下,各零部件的坐标系原点在参考坐标系 O_o 中的坐标以及坐标轴方向均如图 4 所示。

各支路机构名称由数字符号代替。由机架 0、滚动轴承 1、滚珠丝杠 5、工作台 13 组成的机构称为“机构 0-1-5-13”;由机架 0,滚动轴承 1、2、3、4,滚珠丝杠 5、6、7、8,工作台 13 组成的含“冗余约束机构 (0-1-5-13-6-2-0)-13-(0-3-7-13-8-4-0)”;同理可定义“冗余机构(0-9-13-10-0)-13-(0-11-13-12-0)”。

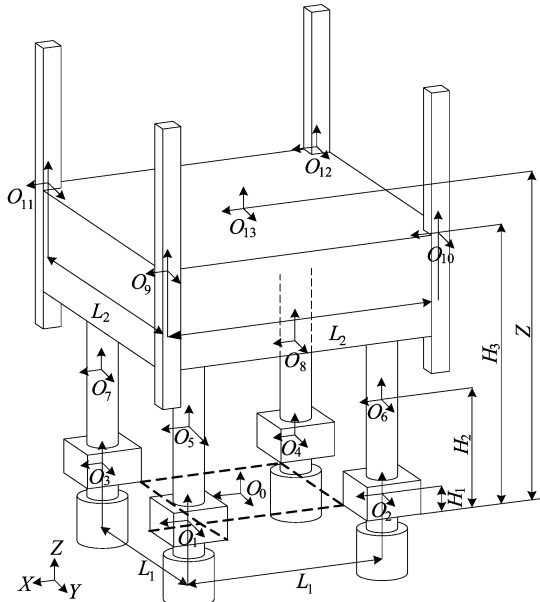


图 4 多点并联驱动精密压力机坐标系

1.3.3 压力机误差传递模型构建

设滚动轴承与机架接触面为理想安装面。任意滚动轴承 $a(a=1,2,3,4)$ 的几何误差有:安装位置误差 $(\delta_{pax}, \delta_{pay})$,安装角度误差 (ϵ_{pax}) ,轴孔中心位置制造误差 $(\delta_{ax}, \delta_{ay}, \delta_{az})$,轴孔轴线角度制造误差 $(\epsilon_{ax}, \epsilon_{ay})$ 。

任意滚珠丝杠 $b(b=5,6,7,8)$ 的几何误差有:滚珠丝杠长度误差 (δ_{bx}) ,圆柱度误差 $(\delta_{bx}, \delta_{by})$,轴线角度制造误差 $(\epsilon_{bx}, \epsilon_{by})$ 。

任意直线导轨 $c(c=9,10,11,12)$ 的几何误差有:安装位置误差 (δ_{pcy}) ,安装角度误差 (ϵ_{pcx}) ,工作台连接面高度尺寸制造误差 (δ_{cx}) ,两侧制造误差 (δ_{cy}) ,工作台连接面平行度误差和平面度误差 $(\epsilon_{cx}, \epsilon_{cy}, \epsilon_{cy})$;工作台的几何误差有 $\delta_{13x}, \delta_{13y}, \delta_{13z}, \epsilon_{13x}, \epsilon_{13y}, \epsilon_{13y}$ 。

压机的间隙误差有: $(\Delta c_{1x}, \Delta c_{1y}, \Delta c_{1z}) \in S_{1-5}$, $(\Delta c_{2x}, \Delta c_{2y}, \Delta c_{2z}) \in S_{2-6}$, $(\Delta c_{3x}, \Delta c_{3y}, \Delta c_{3z}) \in S_{3-6}$, $(\Delta c_{4x}, \Delta c_{4y}, \Delta c_{4z}) \in S_{4-8}$, $(\Delta c_{5x}, \Delta c_{5y}, \Delta c_{5z}) \in S_{5-13}$, $(\Delta c_{6x}, \Delta c_{6y}, \Delta c_{6z}) \in S_{6-13}$, $(\Delta c_{7x}, \Delta c_{7y}, \Delta c_{7z}) \in S_{7-13}$, $(\Delta c_{8x}, \Delta c_{8y}, \Delta c_{8z}) \in S_{8-13}$, $\Delta c_{9y} \in I_{9-13}$, $\Delta c_{10y} \in I_{10-13}$, $\Delta c_{11y} \in I_{11-13}$, $\Delta c_{12y} \in I_{12-13}$ 。

其中: $\Delta c_{1x}, \Delta c_{1y}, \Delta c_{1z}$ 分别为滚动轴承 1 与滚珠丝杠 5 在 X、Y、Z 方向的间隙误差; S_{1-5} 为其间隙误差空间。同理可定义其他零部件之间的间隙误差以及间隙误差空间。

以工作台上表面中心点 M 作参考点,构建“机构 0-1-5-13”的误差传递模型,在理想状态下, M 点在参考坐标系 O_0 上的坐标为 $(0,0,Z)$,位置矢量为 $\mathbf{P}_0' = [0 \ 0 \ Z]^T$; M 点在体坐标系 O_{13} 上的坐标为 $(0,0,0)$,位置矢量为 $\mathbf{P}_j = [0 \ 0 \ 0]^T$ 。令 $\mathbf{E}_{0-1-5-13} = [e_{1x} \ e_{1y} \ e_{1z}]^T$,表示参考点 M 的实际位置与理论位置之间的误差矢量,由式(13)可得:

$$\begin{bmatrix} e_{1x} \\ e_{1y} \\ e_{1z} \\ 0 \end{bmatrix} = \prod_{j=0}^3 (\mathbf{S}_{ij})_{pe} (\mathbf{S}_{ij})_s (\mathbf{S}_{ij})_{sc} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_j \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{P}_0' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

将各误差项和位置矢量代入式(14),忽略计算结果中的二阶及高阶误差项可以得到:

$$\begin{cases} e_{1x} = \delta_{p1x} + \delta_{1x} + \delta_{5x} + \delta_{13x} + \\ (Z - H_1)\epsilon_{1y} + (Z - H_2)\epsilon_{5y} + \Delta c_{1x} + \Delta c_{5x}, \\ e_{1y} = \delta_{p1y} + \delta_{1y} + \delta_{5y} + \delta_{13y} + \\ (H_1 - Z)\epsilon_{1x} + (H_2 - Z)\epsilon_{5x} + \Delta c_{1y} + \Delta c_{5y}, \\ e_{1z} = \delta_{1z} + \delta_{5z} + \delta_{13z} + \\ \frac{L_1}{2}(-\epsilon_{1x} - \epsilon_{5x} + \epsilon_{1y} + \epsilon_{5y}) + \Delta c_{1z} + \Delta c_{5z} \end{cases} \quad (15)$$

上述过程求出了“机构 0-1-5-13”的误差传递模型和间隙误差空间,同理可求得其余 3 条支路的的误差传递模型。

“冗余机构 (0-1-5-13-6-2-0)-13-(0-3-7-13-8-4-0)”误差传递模型与任意支路的误差传递模型相同,可由支路“机构 0-1-5-13”的位置误差传递模型表示。

同理,可以求得“冗余机构(0-9-13-10-0)-13-(0-11-13-12-0)”的误差传递模型。其误差传递模型式(16)所示,由支路“机构 0-9-13”的位置误差传递模型表示为:

$$\begin{cases} e_{9x} = \delta_{9x} + \delta_{13x} + (H_3 - Z)\epsilon_{9y} + L_2/2\epsilon_{9z}, \\ e_{9y} = -Z\epsilon_{p9x} + \delta_{9y} + \delta_{13y} + (H_3 - Z)\epsilon_{9x} - \\ L_2/2\epsilon_{9z} + \Delta c_{9y}, \\ e_{9z} = \delta_{p9y} + \delta_{13z} - L_2/2\epsilon_{9x} + L_2/2\epsilon_{9y} \end{cases} \quad (16)$$

“冗余机构(0-1-5-13-6-2-0)-13-(0-3-7-13-8-4-0)”间隙误差空间如图 5 所示,参考点 M

的实际位置由 4 条支路共同决定,图 5 中矢量(A,B,C)为各支路常规误差矢量, S_{5-13}' 、 S_{6-13}' 、 S_{7-13}' 、 S_{8-13}' 分别由 S_{1-5} 、 S_{2-6} 、 S_{3-7} 、 S_{4-8} 通过矩阵变换得到,因此 M 点的实际位置在 S_{5-13}' 、 S_{6-13}' 、 S_{7-13}' 和 S_{8-13}' 的交叉区域,表示为 $S_{5-13}' \cap S_{6-13}' \cap S_{7-13}' \cap S_{8-13}'$ 。这一交叉区域即“冗余机构(0-1-5-13-6-2-0)-13-(0-3-7-13-8-4-0)”M 点的间隙误差空间。

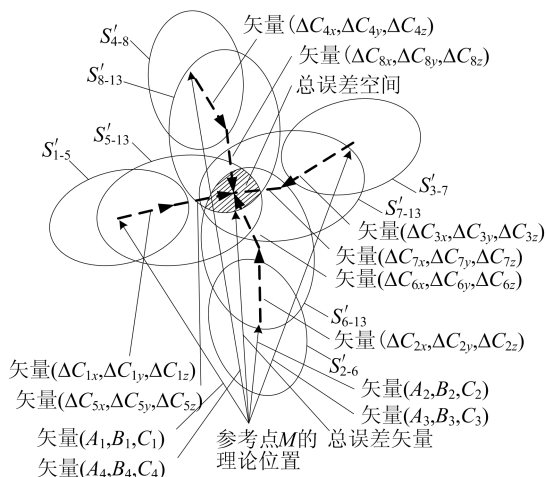


图 5 “(0-1-5-13-6-2-0)-13-(0-3-7-13-8-4-0)”间隙误差

“冗余机构(0-9-13-10-0)-13-(0-11-13-12-0)”间隙误差空间如图 6 所示,可以表示为 $I_{9-13}' \cap I_{10-13}' \cap I_{11-13}' \cap I_{12-13}'$ 。

压力机传动系统在 Z 方向上的定位误差完全由“四丝杠并联支路”决定,在 X、Y 方向上的定位误差完全由“四导轨并联支路”决定。因此多点并联驱动精密压力机传动系统位置的误差模型为:

$$\begin{cases} E_x = \delta_{9x} + \delta_{13x} + (H_3 - Z)\epsilon_{9y} + \frac{L_2}{2}\epsilon_{9z}, \\ E_y = -Z\epsilon_{p0x} + \delta_{9y} + \delta_{13y} + (H_3 - Z)\epsilon_{9x} - \frac{L_2}{2}\epsilon_{9z} + \Delta C_{9y}, \\ E_z = \delta_{1z} + \delta_{5x} + \delta_{13z} + \frac{L_1}{2}(-\epsilon_{1x} - \epsilon_{5x} + \epsilon_{1y} + \epsilon_{5y}) + \Delta C_{1z} + \Delta C_{5z} \end{cases} \quad (17)$$

多点并联驱动精密压力机传动系统的总间隙误差空间在 Z 方向投影为图 1 中间隙误差空间在 Z 方向的投影,总间隙误差空间在 X、Y 方向投影为图 2 中间隙误差空间在 X、Y 方向的投影。

在理想状态下,工作台坐标系 O_{13} 与参考坐标系 O_0 的方向相同, O_{13} 与 O_0 坐标系的坐标轴夹角为 0,由于滚动轴承等零部件存在制造、安装等误差,最终导致工作台产生角度误差,即 O_{13} 出

现角度误差。

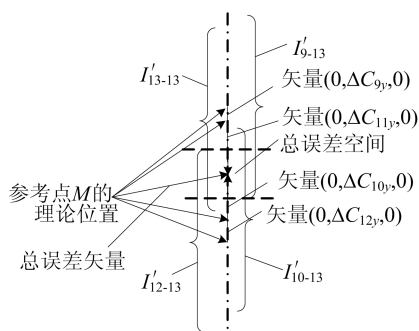


图 6 “(0-9-13-10-0)-13-(0-11-13-12-0)”间隙误差

取工作台坐标系 O_{13} 中的 4 个点,分别为 $a_0 = (0, 0, 0)$ 、 $a_i = (i, 0, 0)$ 、 $a_j = (0, j, 0)$ 、 $a_k = (0, 0, k)$,其中 $i, j, k \rightarrow 0^+$ 。由支路“机构 0-9-13”的误差传递矩阵可以求得 4 个点在参考坐标系 O_0 中的 x 坐标值和 y 坐标值,计算方法如下:

$$\begin{bmatrix} a_n' \\ 1 \end{bmatrix} = \prod_{j=0}^2 (S_{ij})_p (S_{ij})_{pc} (S_{ij})_s (S_{ij})_{sc} \begin{bmatrix} a_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

由支路“机构 0-1-5-13”的误差传递矩阵可以求得 4 个点在参考坐标系 O_0 中的 z 坐标值,计算方法如下:

$$\begin{bmatrix} a_n' \\ 1 \end{bmatrix} = \prod_{j=0}^3 (S_{ij})_p (S_{ij})_{pc} (S_{ij})_s (S_{ij})_{sc} \begin{bmatrix} a_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中, $n=0, i, j, k$ 。

舍去结果中的高阶误差项,得到 a_0, a_i, a_j, a_k 和这 4 个点在参考坐标系 O_0 中的坐标 a_0', a_i', a_j', a_k' ,进一步 a_i', a_j', a_k' 分别与 a_0' 坐标相减可以得到工作台坐标系 O_{13} 中 3 个坐标轴方向向量在参考坐标系 O_0 中的坐标,即

$$\begin{aligned} a_i' &= (i, i(\epsilon_{9z} + \epsilon_{13z}), -i(\epsilon_{1y} + \epsilon_{5y} + \epsilon_{13y})), \\ a_j' &= (-j(\epsilon_{9z} + \epsilon_{13z}), j, j(\epsilon_{1x} + \epsilon_{5x} + \epsilon_{13x})), \\ a_k' &= (k(\epsilon_{9y} + \epsilon_{13y}), -k(\epsilon_{p0x} + \epsilon_{9x} + \epsilon_{13x}), k). \end{aligned}$$

理想状态下,工作台坐标系 O_{13} 的 x、y、z 坐标轴方向向量在参考坐标系 O_0 中分别表示为 $a_i = (i, 0, 0)$ 、 $a_j = (0, j, 0)$ 和 $a_k = (0, 0, k)$,工作台坐标系的角度误差为:

$$\begin{cases} \langle a_i, a_i' \rangle = \arccos[1 + (\epsilon_{9z} + \epsilon_{13z})^2 + (\epsilon_{1y} + \epsilon_{5y} + \epsilon_{13y})^2]^{-\frac{1}{2}}, \\ \langle a_j', a_j \rangle = \arccos[1 + (\epsilon_{9z} + \epsilon_{13z})^2 + (\epsilon_{1x} + \epsilon_{5x} + \epsilon_{13x})^2]^{-\frac{1}{2}}, \\ \langle a_k', a_k \rangle = \arccos[1 + (\epsilon_{9y} + \epsilon_{13y})^2 + (\epsilon_{p0x} + \epsilon_{9x} + \epsilon_{13x})^2]^{-\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (20)$$

根据工作台尺寸以及角度误差可得工作台台

面最大高度差 h' 为:

$$h' = 520 \tan \langle \mathbf{a}'_i, \mathbf{a}_i \rangle \quad (21)$$

其中: h' 为工作台台面最大高度差; $\langle \mathbf{a}'_i, \mathbf{a}_i \rangle$ 为工作台沿 X 轴方向的角度误差。联立式(20)、式(21)可得:

$$h' = 520 [(\epsilon_{9z} + \epsilon_{13z})^2 + (\epsilon_{1y} + \epsilon_{5y} + \epsilon_{13y})^2]^{-1/2} \quad (22)$$

2 多点并联驱动精密压力机精度分配

2.1 误差灵敏度分析模型

设函数 $F(x)$ 可导, 以变量 $\mathbf{m} = [m_1 \ m_2 \ \dots \ m_t]^T$ 表示一般系统的性能参数, 变量 $\mathbf{n} = [n_1 \ n_2 \ \dots \ n_r]^T$ 表示一般系统的结构参数, 性能参数与结构参数之间的关系为:

$$m_i = f_i(\mathbf{n}) = f_i(n_1, n_2, \dots, n_r) \quad (23)$$

其中, $i=1, 2, \dots, t$ 。

设结构参数的理想值为 n_0 , 则性能参数的理想值为 m_0 , 当系统的结构参数实际值的变化范围在理想值周围时, 系统的性能参数相应改变, 即

$$m_i = f_i(n_{01} + \Delta n_1, n_{02} + \Delta n_2, \dots, n_{0r} + \Delta n_r) = f_i(n_0 + \Delta \mathbf{n}) \quad (24)$$

由于结构参数的变化而导致的系统性能参数误差为:

$$\Delta y_i = f_i(x_0 + \Delta x) - f_i(x_0) \quad (25)$$

引入泰勒展开式求解系统性能参数误差, 省略最后一项泰勒展开式余项, 得:

$$\Delta m_i(n) \approx \Delta^k y_i(n) = \sum_{j=1}^k \frac{1}{j!} d^{(j)} m_i(n) \Big|_{n=n_0} \quad (26)$$

k 值取 1 时, 设系统一阶灵敏度函数可表示为:

$$S_{n_j}^{m_i} = \frac{\partial m_i}{\partial n_j} \Big|_{n_0} \quad (27)$$

其中: $i=1, 2, \dots, t; j=1, 2, \dots, r$ 。

对于多点并联驱动精密压力机来说, 其各项几何误差的变化值均会导致多点并联驱动精密压力机整机空间误差的变化。单项误差的变化值与整机误差的变化值之间的关系可以直观地反映出单项误差对精密压力机精度的影响权重。

多点驱动精密压力机的整机误差 E 对应各项几何误差 e_j 的一阶灵敏度函数为:

$$S_{e_j}^{E_i} = \frac{\partial E_i}{\partial e_j} \Big|_{e_0} \quad (28)$$

其中: $i=1, 2, \dots, t; j=1, 2, \dots, r; e_j$ 为第 j 项几何误差。

多点驱动精密压力机的误差传递模型, 可以

表示为:

$$E = F(\mathbf{G}, L) \quad (29)$$

其中: \mathbf{G} 为多点驱动精密压力机零部件几何误差所组成的误差, $\mathbf{G} = (\Delta e_1, \Delta e_2, \dots, \Delta e_n)$, Δe_n 为零部件的几何误差; L 为各个滚珠丝杠、直线导轨等的理想位置。在实际情况中 L 为事先确定好的定值。

一阶敏感度函数计算多点并联驱动精密压力机的灵敏度的矩阵表达式为:

$$\mathbf{S} = \frac{\partial F}{\partial \mathbf{G}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial g_1} & \frac{\partial f_1}{\partial g_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial g_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial g_1} & \frac{\partial f_2}{\partial g_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial g_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial g_1} & \frac{\partial f_n}{\partial g_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial g_n} \end{bmatrix} \quad (30)$$

2.2 误差灵敏度分析结果

多点驱动精密压力机的几何误差相互耦合影响整机空间误差, 建立各项误差与整机误差的关系, 可以得到每项几何误差对整机空间误差的影响程度^[15-17]。多点驱动精密压力机的误差灵敏度定义为整机空间误差 E 对几何误差 Δe_n 偏导数的绝对值, 其数学表达式为:

$$S_i = \left| \frac{\partial E}{\partial \Delta e_i} \right|, \quad i = 1, 2, \dots \quad (31)$$

以图 1 所示的多点并联驱动精密压力机为研究对象, 对前文所列所有几何误差项进行灵敏度分析。设线性误差项为 0.001 mm, $L_1 = 500$ mm, $L_2 = 500$ mm, $H_1 = 45$ mm, $H_2 = 400$ mm, $H_3 = 450$ mm, 取 $Z = 100$ mm。将以上参数代入压力机位置误差传递模型并对各误差项求偏导数, 可以求出每一项误差项的灵敏度表达式, 取表达式中各误差项的系数作为该误差项的灵敏度, 则多点并联驱动精密压力机的位置误差传递模型在 X, Y, Z 这 3 个方向的误差项及其对应的灵敏度系数见表 2 所列。

表 2 E_x, E_y, E_z 的误差项及其灵敏度系数

E_x 的几何 误差项	灵敏度 系数	E_y 的几何 误差项	灵敏度 系数	E_z 的几何 误差项	灵敏度 系数
δ_{9x}	0.002	ϵ_{9x}	0.142	δ_{1z}	0.001
δ_{13x}	0.002	δ_{9y}	0.001	δ_{5z}	0.001
ϵ_{9y}	0.581	δ_{13y}	0.001	δ_{13z}	0.001
ϵ_{9z}	0.415	ϵ_{9x}	0.498	ϵ_{1x}	0.249
		ϵ_{9z}	0.356	ϵ_{1y}	0.249
		ΔC_{9y}	0.001	ϵ_{5x}	0.249
				ϵ_{5y}	0.249
				ΔC_{1z}	0.001
				ΔC_{5z}	0.001

多点并联驱动精密压力机在 X、Y 轴方向上的位置误差主要由至直线导轨决定,在 Z 轴方向上的位置误差主要由滚动轴承和滚珠丝杠决定。且应该重点控制直线导轨与工作台接触面的制造误差、直线导轨与工作台接触面的平行度以及平面度误差、滚动轴承轴孔轴线角度制造误差与滚珠丝杠轴线角度制造误差。

同理,对于工作台台面高度差 h' 而言,5 项几何误差 ϵ_{1y} 、 ϵ_{5y} 、 ϵ_{13y} 、 ϵ_{9z} 、 ϵ_{13z} 对于 h' 的影响程度一致,灵敏度系数均为 0.2,且各项几何误差对 h' 均有显著影响。

2.3 精度分配权重

上述求得的所有几何误差的灵敏度系数为精度分配提供了理论依据^[18]。经过归一化处理,灵敏度系数之和为 1,将灵敏度系数作为压力机几何误差项的精度分配权重。对于多点并联驱动精密压力机而言,主要考究其 Z 方向上的定位精度和工作台台面的高度差精度。影响 E_z 和 h' 误差项的精度分配权重见表 3、表 4 所列。

表 3 影响 E_z 误差项精度分配权重

几何误差项	精度权重
ϵ_{1x}	0.248
ϵ_{1y}	0.248
ϵ_{5x}	0.248
ϵ_{5y}	0.248
其他误差	0.005

表 4 影响 h' 误差项精度分配权重

几何误差项	精度权重
ϵ_{1y}	0.2
ϵ_{5y}	0.2
ϵ_{13y}	0.2
ϵ_{9z}	0.2
ϵ_{13z}	0.2

参考上述计算出的精度分配权重,对多点并联驱动精密压力机的误差项进行精度分配:提高滚动轴承的轴孔轴线角度精度 ϵ_{1y} ,同时考虑到制造成本以及 δ_{5z} 对 E_z 影响极小,适当降低滚珠丝杠的长度精度 δ_{5z} 和角度制造精度 ϵ_{5y} 。

3 样机实验

为验证误差模型可靠性和精度分配的合理性,进行样机实验,样机实验平台模型如图 7 所示。采用分辨率为 $0.5 \mu\text{m}$ 光栅尺测量精度分配前后工作台在 Z 方向的传动误差,使用千分表测

量精度分配前后的工作台表面的最大高度误差。

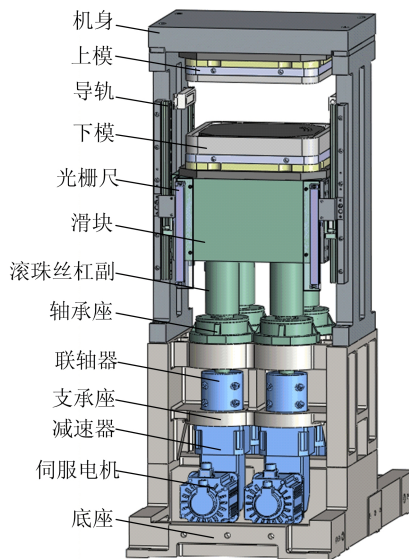


图 7 样机实验平台模型

设定伺服电机每步转动使工作台在 Z 方向上的理想位移为 0.2 mm,测量分配精度前、后伺服电机每转动一步工作台在 Z 方向的实际位移,精度分配前、后 Z 方向位移误差见表 5 所列。

表 5 精度分配前、后 Z 方向位移及其误差 单位:mm

理想位移	分配前位移		分配后位移	
	实际值	误差	实际值	误差
0.2	0.194 0	0.006 0	0.196 5	0.003 5
0.2	0.194 5	0.005 5	0.197 0	0.003 0
0.2	0.195 0	0.005 0	0.197 5	0.002 5
0.2	0.195 5	0.004 5	0.197 0	0.003 0
0.2	0.195 0	0.005 0	0.197 0	0.003 0
0.2	0.194 5	0.005 5	0.197 5	0.002 5

精度分配前、后工作台表面的高度误差见表 6 所列。

表 6 精度分配前、后高度差 单位: μm

理想高度差	分配前高度差	分配后高度差
0	13	14
0	15	15
0	15	16
0	13	13
0	14	15
0	16	15

由实验结果可以得出,精度分配后随着滚动轴承的轴孔轴线角度精度 ϵ_{1y} 的提高,工作台在 Z 方向上的传动精度得到明显改善,同时由于 ϵ_{1y}

和 ε_{5y} 对 h' 的影响程度一致,精度分配前、后高度差没有明显变化,符合灵敏度分析结果,证明了误差模型的可靠性和精度分配的合理性。

4 结 论

1) 分析多点并联驱动精密压力机传动机构的几何误差元素,其中包括常规误差和间隙误差,基于多体系统理论和齐次变换法,构建了压力机传动系统的位置误差传递模型和角度误差传递模型。

2) 应用一阶灵敏度函数对压力机传动机构各项几何误差进行灵敏度分析,用几何误差溯源法识别出影响压力机工作精度的关键误差源为滚动轴承和滚珠丝杠的制造误差、工作台和直线导轨的制造误差等。

3) 以各项几何误差的敏感度系数为精度分配权重,通过提高滚动轴承的轴孔轴线角度精度,降低滚珠丝杠的长度精度和角度精度的分配方法,在成本范围内提高了压力机的工作精度。

[参 考 文 献]

- [1] 叶佩青,翟栋,赵彤,等. 卧式加工中心空间误差对制造误差敏感度分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51(5): 587-591, 596.
- [2] 王勇,王奇,陈胜,等. 基于多体系统理论的闸式剪板机误差分析[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(4): 291-297.
- [3] 柏衡,沈建新. 基于多体系统理论的数控机床综合误差建模技术[J]. 航空制造技术, 2017(1): 117-121, 124.
- [4] WANG D X, LI Z G, LIN J Q, et al. Error modeling and analysis of optomechanical platform based on multi-system theory[J]. AIP Advances, 2020, 10(3): 035319.
- [5] WANG J Y, SU Z, LIU H. Error modeling of wafer test platform based on multi-body system theory[J]. Computer Simulation, 2019, 36(1): 279-283.
- [6] LIU Z F, ZHAO L Z, LI Y, et al. Precision modeling and analysis of fixture system of tenon machining center based on theory of multi-body system[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2016(7): 122-126.
- [7] HE J, GAO F, MENG X D, et al. Type synthesis for 4-DOF parallel press mechanism using GF set theory[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(4): 851-859.
- [8] HUANG X, MA C X, WU S X, et al. Design and research of a novel type of mechanical presses driven by three servo motors in parallel[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2013, 227(3): 580-591.
- [9] CUI X L, LI W. Error analysis of 6-UPS parallel mechanisms based on monte carlo simulation[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(6): 89-92.
- [10] 李官明,曲海波,郭盛. 平面结构冗余并联机构的误差敏感度分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(23): 45-57.
- [11] 程强,刘广博,刘志峰,等. 基于敏感度分析的机床关键性几何误差源识别方法[J]. 机械工程学报, 2012, 48(7): 171-179.
- [12] 王永青,吴嘉锐,刘阔,等. 数控机床精度保持性的定量评价与误差敏感度分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(5): 130-136.
- [13] YAN Y, WANG G, ZHANG F P, et al. Precision assembly geometric error sensitivity analysis based on the error transformation model for precision assembly[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(7): 682-686.
- [14] KANG Y R, FU Y Y, LIU P J, et al. Identification of key error sources from three-axis turntable based on sensitivity analysis[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019(4): 49-52.
- [15] FAN J W, LV Q. Geometric error modeling and sensitivity analysis of compound CNC machine tools[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2017(3): 69-73.
- [16] LIU T S, QIAN L F, XU Y D, et al. Kinematic error modeling and analysis of the loading device based on multi-body theory and stream of variation theory[C]//IEEE International Conference on Information & Automation. [S. l.]: IEEE, 2016: 431-437.
- [17] QIAN H, TAO J, YU S R. Error modeling and tolerance allocation optimization of double-knuckle press[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2018, 44(4): 513-519.
- [18] LI P Z, ZHAO R H, LUO L. A geometric accuracy error analysis method for turn-milling combined NC machine tool[J]. Symmetry, 2020, 12(10): 1622.

(责任编辑 吴亮)