

doi: 10.7690/bgzdh.2023.12.017

基于 DH 法的数控伺服平台定位误差补偿策略

何 坤¹, 高元楼¹, 葛吉喆¹, 李 铎², 兰治国², 韩 伟²

(1. 北京航空航天大学, 北京 100083; 2. 山西北方兴安化学工业有限公司, 太原 030000)

摘要: 针对某型号固体材料推进剂生产过程中出现的加工误差和安装误差问题, 提出一种定位位置误差补偿策略。利用机器人领域常用的 DH 法对其进行运动学建模, 将建模参数误差看作随着驱动指令变化的变量, 以三坐标测量仪为测量工具, 对直线轴和旋转轴实际的轴线方程进行辨识, 重新建立各杆件实际坐标系的状态矩阵, 拟合出实际齐次坐标变换矩阵各元素误差与给定驱动指令的关系曲线, 并对理想齐次坐标变换矩阵进行补偿。仿真结果表明: 补偿后定位位置误差能下降约 40%, 验证了方法的有效性。

关键词: DH 法; 运动轨迹检测; 定位误差; 误差补偿

中图分类号: TJ55 **文献标志码:** A

Positioning Error Compensation Strategy of CNC Servo Platform Based on DH Method

He Kun¹, Gao Yuanlou¹, Ge Jizhe¹, Li Duo², Lan Zhiguo², Han Wei²

(1. Beihang University, Beijing 100083, China; 2. Shanxi North Xing'an Chemical Industry Co., Ltd., Taiyuan 030000, China)

Abstract: Aiming at the problems of machining errors and installation errors in the production process of a certain type of solid material propellant, a compensation strategy for positioning position errors was proposed. By Using the DH method which is commonly used in the field of robotics, the kinematics modeling is carried out, the modeling parameter error is regarded as a variable that changes with the drive command, and the coordinate measuring machine is used as a measuring tool to identify the actual axis equation of the linear axis and the rotary axis, and then the state matrix of the actual coordinate system of each link is re-established. The relationship curve between the errors of the elements of the actual homogeneous coordinate transformation matrix and the given driving instructions is fitted, and the ideal homogeneous coordinate transformation matrix is compensated. Simulation results show that the position error is reduced by about 40% after compensation, which verifies the effectiveness of the method.

Keywords: DH method; motion trajectory detection; positioning error; error compensation

0 引言

在某型号固体材料推进剂的生产过程中, 现有生产设备十分落后, 而固体推进剂易燃易爆的特点导致了其生产设备升级迟迟未能实施。生产过程中的固药环节需要将 69 根圆柱形固体推进剂插入蜂窝形容器的装配孔中, 依赖于精确的运动学模型。

为补偿加工误差和安装误差对定位带来的影响, 传统上将主要的制造、装配误差归结为机械臂各关节的连杆参数误差和运动变量误差, 即 D-H 参数误差^[1], 从而获得精确的运动学模型, 标定方法主要有以下 2 类:

1) 基于误差模型的方法, 即推导出机械臂末端位姿误差与 D-H 参数误差之间的微分关系, 将微分方程线性化得到线性方程组, 通过解方程组得到 D-H 参数误差。张毅^[2]通过描述在不同结构的机床

中从刀具坐标系到工件坐标系的运动链传递关系, 分析机床主要部件在运动过程中可能引入的误差元素, 根据刚体运动理论和小角度误差假设, 将其代入到通用运动学模型中, 从而得到五轴机床通用综合误差模型。优点是测量数据少、实时性好, 缺点是公式复杂、存在收敛性问题, 且依赖于关节角的准确性。

2) 基于几何分析的方法, 黄献等^[3]提出了一种基于多体系统理论和激光步进对角线矢量测量法的数控机床几何误差识别方法, 从 D-H 参数的几何意义出发, 测量并拟合关节旋转轴, 进而构建 D-H 坐标系, 最后解析 D-H 参数。张竹青等^[4]针对五轴数控机床的通用形式, 结合空间坐标变换计算, 基于空间标准球及接触式探针测量法, 提出一种空间标准球球心自动测量方法。这种方法的优点是测量数据具有完备性、无收敛性问题, 缺点是测量工作量

收稿日期: 2023-08-15; 修回日期: 2023-09-23

基金项目: 国防科研专项(010300-YZKZ380100012020)

第一作者: 何 坤(1998—), 男, 贵州人, 硕士。

大。笔者利用机器人领域常用的 DH 法对数控伺服平台进行运动学建模，采用几何分析标定伺服平台 D-H 参数的基础上，通过数据拟合的方法拟合出实际轴线。然后利用三次样条曲线拟合驱动指令区间内任意驱动指令与齐次变换矩阵元素误差的关系曲线，并根据拟合结果对给定指令做了补偿，利用补偿策略提高伺服平台定位误差。

1 二轴定位伺服平台的 DH 建模

笔者采用 Khalil 提出的改进 DH 模型对数控伺服平台进行运动学建模。与标准 DH 法的不同点为：对于连杆 i ，标准 DH 法的驱动轴位于连杆 i 的远端，而 Khalil 提出的改进 DH 模型中驱动轴位于连杆 i 的近端^[2]。如图 1 所示，其中 θ 为驱动参数。该 DH 建模方法需要的参数包括 Z_{i-1} 轴和 Z_i 轴夹角 α ， Z_{i-1} 轴与 Z_i 轴之间距离 a ， X_{i-1} 轴和 X_i 间夹角 θ ，以及 X_{i-1} 轴与 X_i 轴之间的距离 d 。

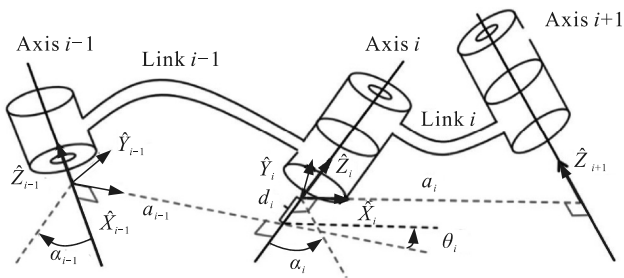


图 1 Khalil 提出的改进 DH 建模方法

如图 2 所示，在连杆 i 前端建立坐标系 $\{i-1\}$ ，后端建立坐标系 $\{i\}$ 。则 $\{i\}$ 可以看成体坐标系 (body frame)， $\{i-1\}$ 看作世界坐标系。按照前文所述的规则， $\{i\}$ 可以看作由 $\{i-1\}$ 经过平移和旋转得到，设以 ${}^w_b T$ 表达上文描述的变化过程。由 $\{i-1\}$ 经过 4 步得到：1) 从 Z_{i-1} 绕 X_{i-1} 旋转角度 α_{i-1} ；2) 沿当下坐标系下 X_{i-1} 方向移动 a_{i-1} ；3) 绕当下坐标系下 Z_{i-1} 旋转角度 θ_i ；4) 沿当下坐标系下 Z_{i-1} 移动 d_i 。

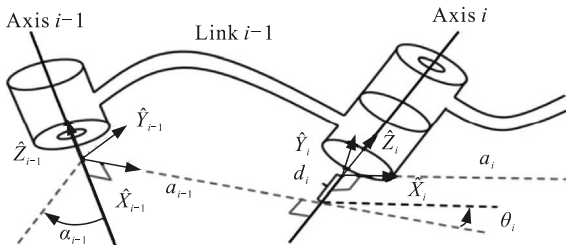


图 2 Khalil_DH 模型坐标系的建立

由于所有转动操作均以当前坐标系坐标轴进行旋转，所以采用的是欧拉角旋转方式。按照每次的移动顺序，可以推得 ${}^{i-1}_i T$ 如式(1)所示，矩阵表达式

如式(2)所示。

$${}^{i-1}_i T = T_{RX_{i-1}}(\alpha_{i-1})T_{PX_{i-1}}(a_{i-1})T_{RZ_i}(\theta_i)T_{PZ_i}(d_i) \quad (1)$$

式中： $T_{RX_{i-1}}$ 为绕 X_{i-1} 旋转齐次变换坐标矩阵； $T_{PX_{i-1}}$ 为 X_{i-1} 沿齐次坐标变换矩阵； T_{RZ_i} 为绕 Z_i 齐次坐标变换矩阵； T_{PZ_i} 为沿 Z_i 平移齐次坐标变换矩阵。

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 c 和 s 分别为余弦函数和正弦函数的缩写。

2 建模误差分析及位置误差补偿策略

2.1 定位伺服平台的建模

如图 3 所示，伺服定位平台由直线运动模组和中空旋转平台 2 部分组成。中空旋转平台串连在直线运动模组上。伺服定位平台有 2 个运动轴，一个为直线模组的直线轴，另一个为中空旋转平台的旋转轴。将需要定位的零件安装在中空旋转平台上，则零件可以绕中空旋转平台中心旋转。DH 建模法适应于杆件串联装置，对于本文中所述伺服定位平台，杆件 1 为直线模组加中空旋转平台定子部分，杆件 2 为中空旋转平台的转子部分。

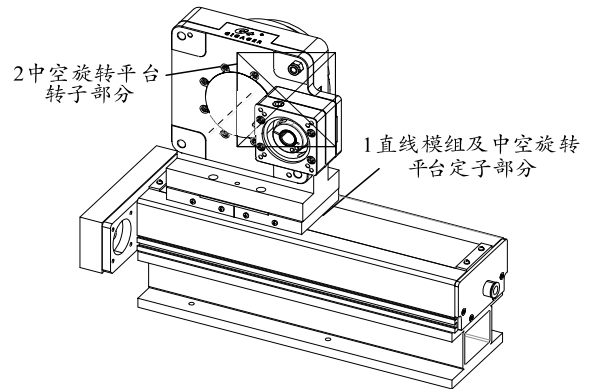


图 3 伺服定位平台的构成

根据 Khalil_DH 建模法对笔者所述数控伺服平台进行建模。各杆件坐标系的建立如图 4 所示，坐标系 $\{W\}$ 为参数标定参考坐标系，是所有测量和误差补偿的基坐标系。为测量与标定方便，地杆坐标系 $\{0\}$ 并非与杆 1 坐标系 $\{1\}$ 完全重合，而是设地杆坐标系 $\{0\}$ 与世界坐标系 $\{W\}$ 完全重合。杆 1 坐标系原点位于旋转减速器中心， X_1 轴指向与 Z_1 和 Z_2 垂直的地方；杆 2 坐标系 $\{2\}$ 的原点与杆 1 坐标系 $\{1\}$ 的原点重合， X_2 轴与 X_1 轴重合。

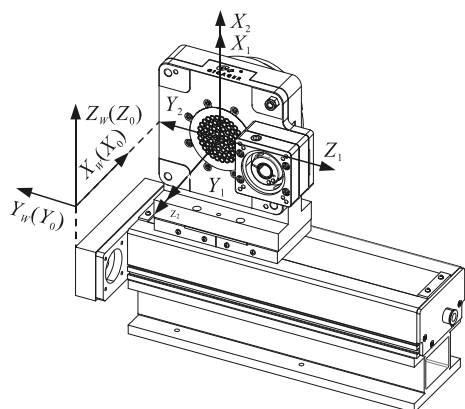


图 4 定位伺服平台坐标系的建立

根据定位伺服平台的各理想尺寸建立 DH 参数表, 如表 1 所示。

表 1 定位伺服平台名义 DH 参数

| i | α_{i-1}/mm | a_{i-1}/mm | d_{i-1}/mm | θ_i/rad |
|-----|--------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| 1 | $\pi/2$ | 107 | d_1 | $\pi/2$ |
| 2 | $\pi/2$ | 0 | 0 | θ_1 |

伺服定位平台平移组件的状态可以用 0A 表示, 旋转组件的状态用 1A 来表示, 坐标系 $\{0\}$ 对于世界坐标系 $\{W\}$ 的状态可以用 ${}^W A$ 表示。对应各坐标系的齐次坐标变换矩阵分别为 1_2T 、 0_1T 、 W_0T 。

2.2 轴线法误差辨识

笔者通过采集伺服定位平台实际运动过程经过的坐标点, 对伺服平台实际的直线轴和旋转轴进行拟合, 利用拟合得到的轴线进行实际坐标系的建立, 从而得到实际的状态矩阵和齐次坐标变换矩阵。

笔者将理想条件下各杆件坐标系的状态矩阵表示为 A^n , 各坐标系间的齐次坐标变换矩阵表示为 T^n ; 各杆件坐标系真实的状态矩阵表示为 A^a , 各坐标系间的齐次坐标变换矩阵表示为 T^a 。则 T^a 、 A^a 的数学表达分别如式(3)、(4)所示。

$${}^{i-1}T^a = T_{RX_{i-1}}(\alpha_{i-1} + \Delta\alpha_{i-1})T_{PX_{i-1}}(a_{i-1} + \Delta\alpha_{i-1}) \cdot T_{RZ_i}(\theta_i + \Delta\theta_i)T_{PZ_i}(d_i + \Delta d_i) \quad (3)$$

式中 $\Delta\alpha_{i-1}$ 、 Δa_{i-1} 、 $\Delta\theta_i$ 、 Δd_i 为名义参数与实际参数误差量。

$${}^{i-1}A^a = \begin{bmatrix} {}^{i-1}R_{3 \times 3}^a & {}^{i-1}P_{i \text{ org}}^a \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 ${}^{i-1}R_{3 \times 3}^a$ 、 ${}^{i-1}P_{i \text{ org}}^a$ 为实际坐标系 $\{i\}$ 向实际坐标系 $\{i-1\}$ 的坐标系投影和坐标系 $\{i\}$ 的原点基于坐标系 $\{i-1\}$ 下的坐标。

${}^{i-1}T$ 、 ${}^{i-1}A$ 满足如式(5)所示运算规律, 由上文可

知 ${}^{i-1}T = {}^{i-1}A$, 可以推得式(6):

$${}^W T = {}^W_0 T_1 {}^{i-2} T_{i-1} \cdots {}^{i-1} T; \quad (5)$$

$${}^W A = {}^W_0 A_1 A_{i-1}^{i-2} \cdots A_{i-1} {}^{i-1} T. \quad (6)$$

根据矩阵的运算法则, 如果 ${}^W_0 A_1 A_{i-1}^{i-2} A$ 的逆矩阵存在, 可以推得:

$$({}^W_0 A_1 A_{i-1}^{i-2} A)^{-1} {}^W A = {}^{i-1} T = {}^{i-1} A. \quad (7)$$

笔者首先对直线轴轴线进行辨识, 锁定旋转轴, 给定驱动参数 $d_1^1, d_1^2, \dots, d_1^n$, 通过三坐标测量仪追踪定位伺服平台任意一点运动轨迹, 将采集到的坐标点记录为 $P_i = (P_{ix} \ P_{iy} \ P_{iz})$ 。利用采集到的数据点, 拟合出一条空间直线, 以加权最小二乘准则为拟合准则, 并将特征分解运用到直线拟合过程中。在加权整体最小二乘准则下, 空间直线必然过采集坐标点集的重心 $P_g = [P_{gx} \ P_{gy} \ P_{gz}]^T$, 矩阵 A 的最大特征值 λ_{\max} 对应的特征向量 \hat{v} 即为空间直线方程的方向向量。其中 P_g 和矩阵 A 的表达式分别为:

$$P_g = \begin{bmatrix} \frac{\sum_i^n P_i P_{ix}}{\sum_i^n P_i} & \frac{\sum_i^n P_i P_{iy}}{\sum_i^n P_i} & \frac{\sum_i^n P_i P_{iz}}{\sum_i^n P_i} \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$A = X_G^T P X_G. \quad (9)$$

$$\text{式中: } X_G = \begin{bmatrix} P_{ix} - P_{gx} & P_{iy} - P_{gy} & P_{iz} - P_{gz} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{nx} - P_{gx} & P_{ny} - P_{gy} & P_{nz} - P_{gz} \end{bmatrix}, \quad P =$$

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_i \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix}.$$

通过以上方法可得到一条拟合直线的空间方程。

然后进行旋转轴轴线方向的辨识。确定好直线模组的一个位置后, 就要锁定直线轴, 驱动旋转轴运动, 利用三坐标测量机追踪模座上的某一点运动轨迹, 并将采集到的坐标点保存下来。利用空间坐标点首先拟合出一个平面, 进而确定旋转轴轴线方向。再利用空间坐标点拟合成一个空间圆, 确定空间圆圆心, 从而确定当前位置旋转轴轴线的空间直线方程。

设采集到的坐标点为 ${}^W P_i = (P_{ix}, P_{iy}, P_{iz})$, $i=1, 2, \dots, n$ 。则可根据最小二乘准则求得空间平面的方向向量 $n=(a, b, c)$ 。方向向量 n 的求解方法为:

$$n = (N^T N)^{-1} N^T b. \quad (10)$$

式中 $N = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix}$, $b = [1, \dots, 1]$ 。

接下来拟合空间圆方程，设空间圆圆心为 ${}^w C = (C_{ix}, C_{iy}, C_{iz})$, ${}^w P_i$ 、 ${}^w P_j$ 为任意 2 个不重合的数据点。则向量 $\overline{{}^w P_i P_j} = [P_{jx} - P_{ix} \ P_{jy} - P_{iy} \ P_{jz} - P_{iz}]$ ，设 ${}^w P_i$ 、 ${}^w P_j$ 连线中点为 ${}^w M_{ij} = \left[\frac{P_{jx} + P_{ix}}{2} \ \frac{P_{jy} + P_{iy}}{2} \ \frac{P_{jz} + P_{iz}}{2} \right]$ ，则向量 $\overline{{}^w C M_{ij}} = [M_{ijx} - C_{ix} \ M_{ijy} - C_{iy} \ M_{ijz} - C_{iz}]$ 。由于 $\overline{{}^w P_i P_j} \perp \overline{{}^w C M_{ij}}$ ，所以有：

$$\Delta x_{ij} C_x + \Delta y_{ij} C_y + \Delta z_{ij} C_z - l = 0. \quad (11)$$

式中： $l_{ij} = [(P_{jx}^2 - P_{ix}^2) + (P_{jy}^2 - P_{iy}^2) + (P_{jz}^2 - P_{iz}^2)] / 2$ ，
 $\Delta x_{ij} = P_{jx} - P_{ix}$, $\Delta y_{ij} = P_{jy} - P_{iy}$, $\Delta z_{ij} = P_{jz} - P_{iz}$ 。

利用最小二乘准则进行空间圆圆心拟合，求解方式为：

$$\hat{C} = (W^T W)^{-1} W^T L. \quad (12)$$

式中： $W = \begin{bmatrix} \Delta x_{12} & \Delta y_{12} & \Delta z_{12} \\ \Delta x_{1j} & \Delta y_{1j} & \Delta z_{1j} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta x_{n-1,n} & \Delta y_{n-1,n} & \Delta z_{n-1,n} \end{bmatrix}$, $L =$

$$[l_{12} \ l_{1j} \ \dots \ l_{n-1,n}]。$$

拟合旋转轴轴线时也先给定直线轴驱动参数分别为 $d_1^1, d_1^2, \dots, d_1^n$ ，待直线轴运动到位之后锁定直线轴，同时给定旋转轴驱动参数为 $\theta_2^{11}, \theta_2^{12}, \dots, \theta_2^{1n}; \theta_2^{21}, \dots, \theta_2^{2n}; \theta_2^{n1}, \dots, \theta_2^{nm}$ 。设直线轴运动到不同位置得到的拟合圆的轴线单位方向向量为 $\widehat{Z}_2^1, \widehat{Z}_2^2, \dots, \widehat{Z}_2^n$ ，圆心坐标为 C_1, C_2, \dots, C_n 。通过这种方法可以得到 n 条空间直线方程，其对应的方向向量分别为 $\widehat{Z}_2^1, \widehat{Z}_2^2, \dots, \widehat{Z}_2^n$ 。

经过直线轴轴线辨识和旋转轴轴线辨识，可得到 1 条关于直线轴的拟合直线，若干条关于旋转轴的拟合直线。以此为基础进行坐标系的重建。

根据 Khalil_DH 建模方法的规则进行重建，由 Z_1 轴方向向量 \widehat{Z}_1 和 Z_2 轴方向向量 \widehat{Z}_2^i 进行叉乘得到向量 \widehat{X}_1^i ，由向量 \widehat{Z}_1 和 \widehat{X}_1^i 进行叉乘可得到 Y_1 轴的方向

向量 \widehat{Y}_1^i 。坐标系 {1} 原点 O_1 的确立如图 5 所示，由 \widehat{X}_2^i 、 \widehat{Z}_2^i 、 C_i 可以确定一个平面 π_1 ，坐标系 {1} 的原点则为该平面与直线轴拟合直线的交点。

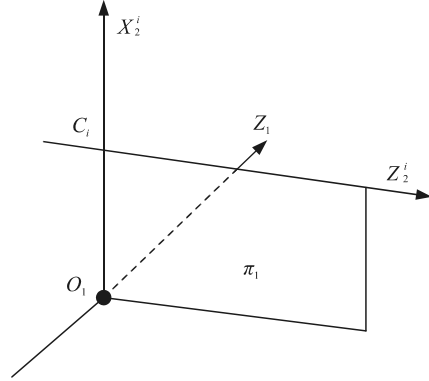


图 5 坐标系 {1} 重建确定原点

坐标系 {2} 的原点 O_2 的确立如图 6 所示，由旋转轴轴线方程的方向向量和采集的一个坐标点可以确定一个平面 π_{2j} ，旋转轴轴线方程与平面 π_{2j} 的交点即为当前指令下坐标系 {2} 的原点 O_2 。 X_2 轴由当前驱动指令下求取的 O_2 指向当前指令下采集到的坐标点 $P_{i,j}$ 。 Y_2 轴由 Z_2 轴和 X_2 轴叉乘得到。

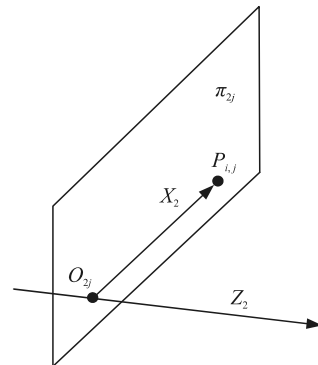


图 6 坐标系 {2} 重建确定原点

通过三次样条曲线对实际齐次坐标变换矩阵中误差元素进行拟合，从而获得任意驱动指令下实际齐次坐标变换矩阵元素误差的值，实现对建模参数导致的定位位置误差进行补偿。

设得到的 $({}^w_0 A_1^0 \dots A_{i-1}^{i-2} A)^{-1} {}^w_i A^a$ 表达式如式(13)所示，同时，有式(14)成立。设理想条件下从测量坐标系到末端坐标系的齐次坐标变换矩阵 T^n 如式(15)所示，则齐次坐标矩阵元素误差矩阵如式(16)所示：

$${}^w_i A = \begin{bmatrix} n_{ix} & o_{ix} & k_{ix} & P_{ix} \\ n_{iy} & o_{iy} & k_{iy} & P_{iy} \\ n_{iz} & o_{iz} & k_{iz} & P_{iz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (13)$$

$${}^w_i T^a = {}^w_i A^a = \begin{bmatrix} n_{ix}^a & o_{ix}^a & k_{ix}^a & P_{ix}^a \\ n_{iy}^a & o_{iy}^a & k_{iy}^a & P_{iy}^a \\ n_{iz}^a & o_{iz}^a & k_{iz}^a & P_{iz}^a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (14)$$

$${}^w_i T^n = {}^w_i A^n = \begin{bmatrix} n_{ix}^n & o_{ix}^n & k_{ix}^n & P_{ix}^n \\ n_{iy}^n & o_{iy}^n & k_{iy}^n & P_{iy}^n \\ n_{iz}^n & o_{iz}^n & k_{iz}^n & P_{iz}^n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (15)$$

$${}^w_i \Delta = \begin{bmatrix} n_{ix}^a - n_{ix}^n & o_{ix}^a - o_{ix}^n & k_{ix}^a - k_{ix}^n & P_{ix}^a - P_{ix}^n \\ n_{iy}^a - n_{iy}^n & o_{iy}^a - o_{iy}^n & k_{iy}^a - k_{iy}^n & P_{iy}^a - P_{iy}^n \\ n_{iz}^a - n_{iz}^n & o_{iz}^a - o_{iz}^n & k_{iz}^a - k_{iz}^n & P_{iz}^a - P_{iz}^n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

由式(16)可知，从世界坐标系到末端坐标系的齐次坐标变换矩阵中需要进行拟合的元素误差一共有 12 个^[5]，由上文可知决定这 12 个元素误差的是建模参数误差，可以得到式(17)。实际上定位伺服平台定位位置误差在不同驱动指令下是不同的，所以将建模参数视为给定驱动指令的函数，如式(18)所示。

$$\Delta x_{i,j} = f_c(\alpha_0, \dots, \alpha_{n-1}, a_1, \dots, a_{n-1}, d_1, \dots, d_n, \theta_1, \dots, \theta_n). \quad (17)$$

式中 ${}^w_n \Delta x_{i,j}$ 为末端坐标系到世界坐标系齐次坐标变换矩阵元素误差。

$$x_i = f_d(D_1, \dots, D_n). \quad (18)$$

式中： x_i 为建模参数； D_i 为各杆件驱动指令。

把变换矩阵元素误差看作驱动参数的函数，如式(19)所示。

$${}^w_n \Delta x_{i,j} = f_D(D_1, \dots, D_n). \quad (19)$$

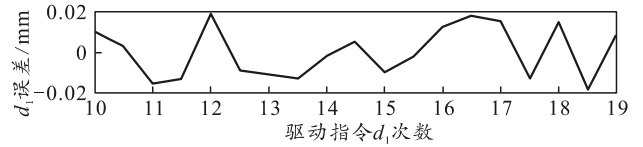
用二元三次样条函数的方法进行曲线拟合。设拟合出来的其次坐标变换矩阵的元素误差为 ${}^w_n \Delta x_{i,j}^c$ ，构成的矩阵为 ${}^w_n \Delta^c$ 将其代入补偿到理想条件下、给定驱动参数的齐次坐标变换矩阵之中，实现对定位位置误差的补偿，如式(20)所示。

$${}^w_n T^c = {}^w_n T^n + {}^w_n \Delta^c. \quad (20)$$

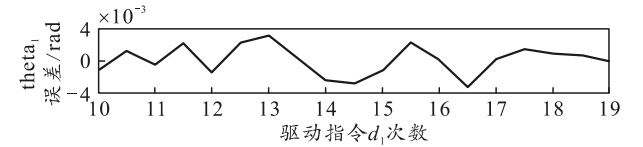
3 误差补偿算法的仿真及实验验证

假设各建模参数误差与驱动指令的关系如图 7 和 8 所示，首先给定一组驱动指令驱动伺服平台运动。根据上文叙述方法拟合出实际轴线。同时，可得到驱动指令与齐次坐标变换矩阵的元素误差的关系。在所给驱动指令区间上，利用三次样条曲线可

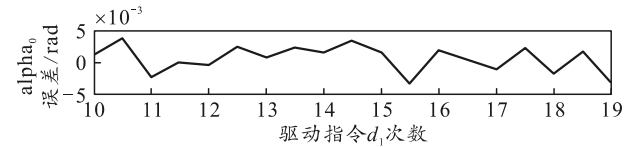
以得到任意驱动指令与元素误差的关系。



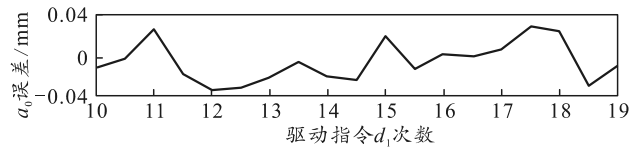
(a) d_1 误差分布



(b) θ_{11} 误差分布

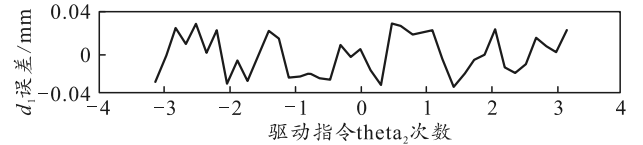


(c) α_{00} 误差分布

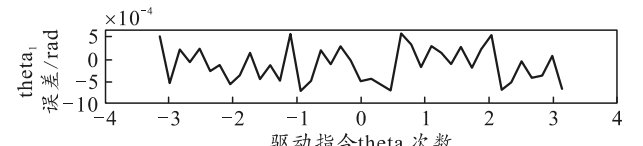


(d) a_0 误差分布

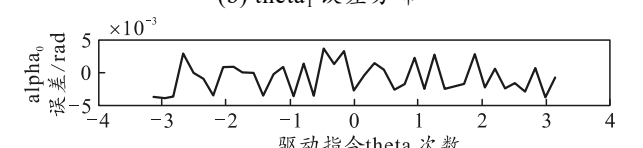
图 7 杆件 1 在给定指令区间建模参数误差分布



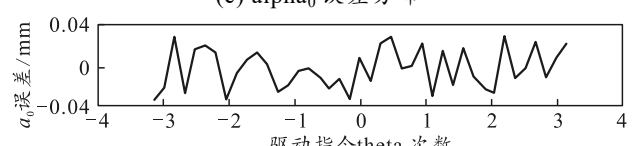
(a) d_1 误差分布



(b) θ_{11} 误差分布



(c) α_{00} 误差分布



(d) a_0 误差分布

图 8 杆件 2 在给定指令区间建模参数误差分布

给定测试驱动参数：直线轴驱动参数 d_1 为 [16:0.05:17]；给定旋转轴驱动参数 θ_2 为 [0:2 π /80: π /2]。在给定的测试参数和范围内随机生成各个建模参数误差，执行仿真程序 4 次，未经过补偿的位置误差分布和经过补偿后的位置误差分

布对比如图 9 所示。

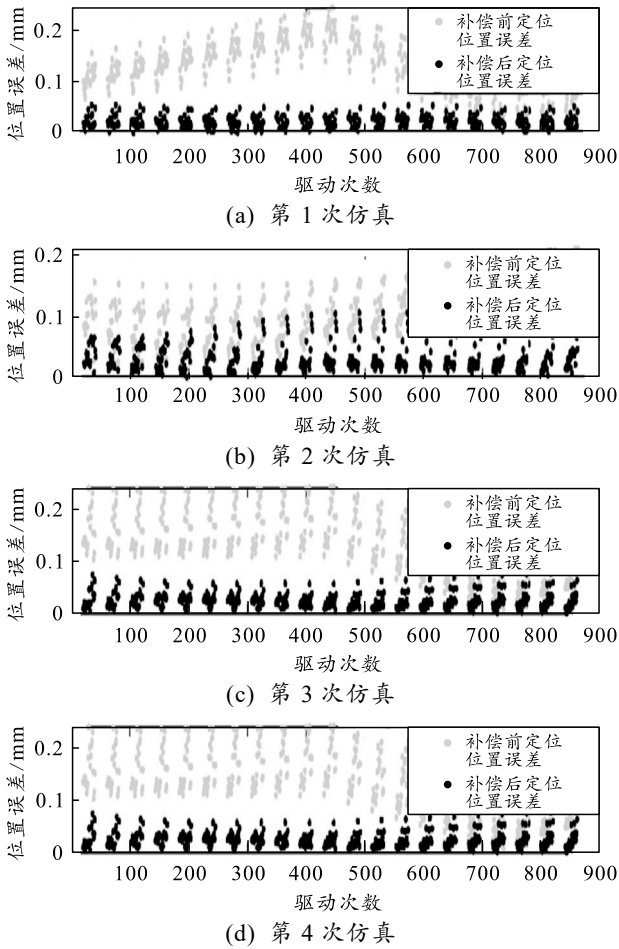


图 9 杆件 2 在给定指令区间建模参数误差分布

从 4 次仿真程序的运行结果可以看出, 4 次仿真程序的运行结果均将定位位置误差控制在 0.05 mm 以下。

为分析双轴的拟合精度对三次样条曲线拟合矩阵元素误差方法补偿效果的影响, 首先进行直线轴拟合精度对位置误差顺向补偿效果的影响仿真试验, 直线轴轴线拟合精度通过采样点间距和采样点范围 2 项指标共同决定, 保证旋转轴拟合精度不变, 直线轴轴线拟合精度需要从低到高重新设定, 保证 $\theta_2 = [0:2\pi/40:2\pi]$, 在直线轴拟合过程中分别给定 $d_1 = [10:10:50]$, $d_1 = [10:2:50]$, 对于每组参数执行 4 次, 其补偿效果分别如图 10、11 所示。可以看出, 在旋转轴拟合精度保证的情况下, 该算法补偿具有一定的补偿效果, 4 次的执行效果均保证补偿后定位位置误差基本在 0.05 mm 以下; 同时, 当建模参数误差导致的定位位置误差超过 0.1 后, 算法仍然有效, 说明该算法的有效性对误差分布敏感性降低。

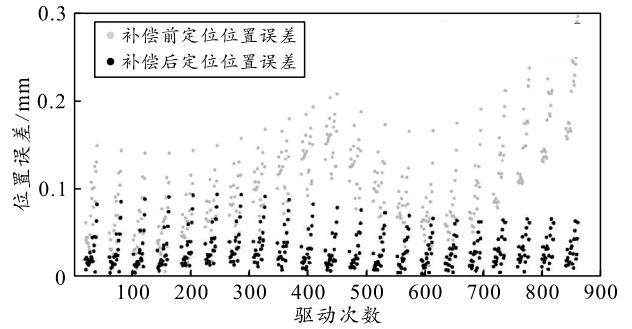


图 10 拟合过程驱动参数=[10:10:50]拟合直线轴补偿效果

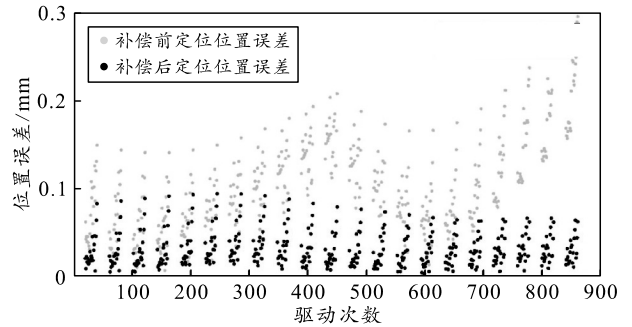


图 11 拟合过程驱动参数=[10:2:50]拟合直线轴补偿效果

其次, 进行旋转轴拟合精度对位置误差顺向补偿效果的影响仿真试验, 旋转轴拟合的精度可以通过拟合过程成给定驱动指令 θ_2 的间隔和范围来决定, 在轴线拟合过程中给定驱动指令 $d_1 = [10:0.5:19]$ 不变的前提下, 分别给定 $\theta_2 = [-\pi:2\pi/10:\pi]$, $\theta_2 = [-\pi:2\pi/20:\pi]$ 。执行 4 次仿真程序的结果分别如图 12、13 所示。

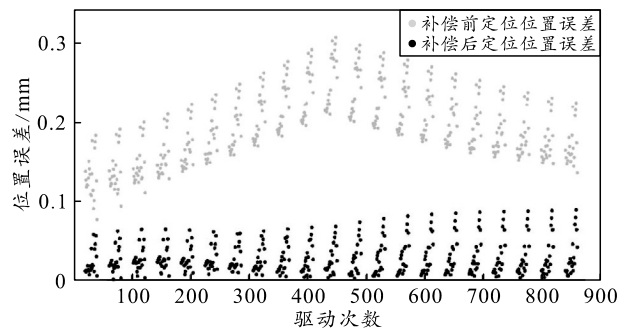


图 12 $\theta_2 = [-\pi:2\pi/10:\pi]$ 拟合旋转轴补偿效果

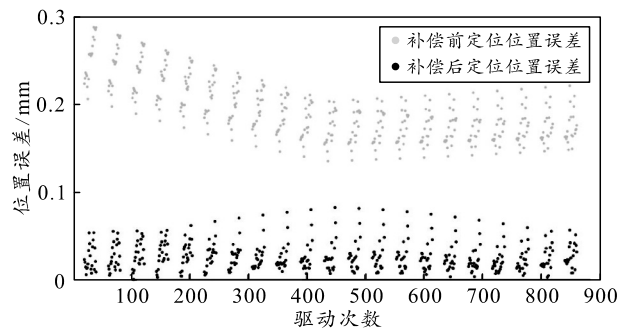


图 13 $\theta_2 = [-\pi:2\pi/20:\pi]$ 拟合旋转轴补偿效果

从直观结果来看，旋转轴拟合精度似乎并未有效增加三次样条拟合矩阵元素误差的补偿效果；因此，三次样条曲线拟合矩阵元素误差算法对旋转轴拟合点数敏感度不高，具有一定的稳定性。

在实际项目中，采用三坐标测量仪对运动到的每一个实际位置进行了测量，根据上述的补偿方法对旋转轴最外圈的 5 个点做了位置补偿，将补偿值换算到位置坐标设定后，这 4 个点位置设定与理想位置设定的大小偏差如图 14 所示。

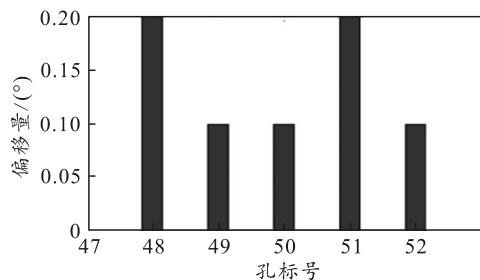


图 14 补偿前后旋转轴设定位置补偿偏移量

搭建数控伺服平台硬件设备，如图 15 所示。

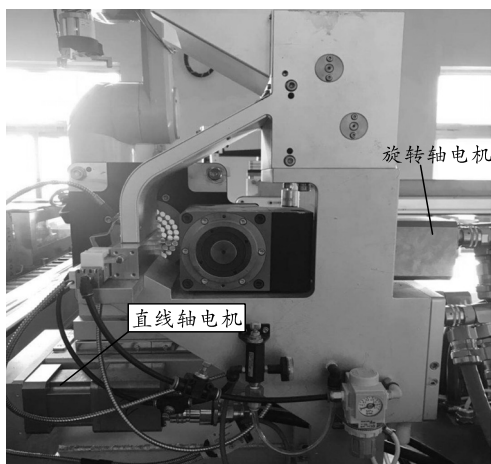


图 15 数控伺服平台硬件搭建

利用上述伺服平台进行双轴定位实验。由于是

密集装配的场合，双轴定位的时间要求在 0.3 s 内。两轴是同步运行且通过实验数据得知旋转轴运动时间要大于直线轴运动时间，因此通过分析旋转轴定位时间即可。定位完成的指标通过给定位置与实际反馈位置误差来判断，当位置误差为 0 时判断到位。

参数调整完成后，双轴定位时间可以通过旋转轴转角曲线和误差输出曲线观测。给定最大位置指令 60°，转角输出曲线如图 16 所示。通过放大部分可以看出，在 0.3 s 处已经达到指定位置，稳态误差几乎可以忽略。图 17 为实际反馈位置与给定位置的误差曲线变化，也验证了旋转轴到达指定位置的时间小于 0.3 s。

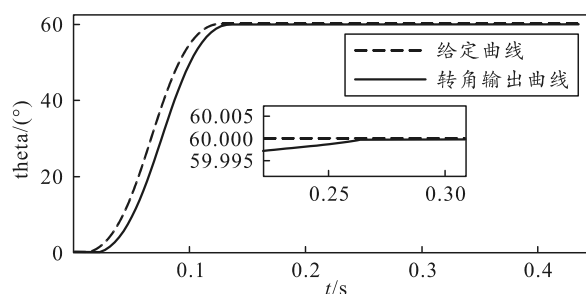


图 16 旋转轴参数调整完成转角输出曲线

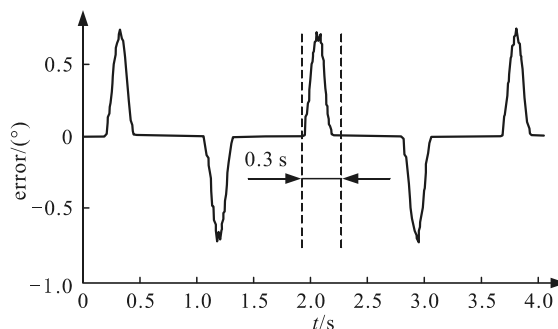


图 17 旋转轴误差变化曲线

在此基础上，进行伺服平台加工试验 3 维检测，实验结果满足加工精度要求，如表 2 所示。

表 2 伺服平台加工试验 3 维检测结果

mm

| 参数 | 孔标号 | | | | |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 |
| 圆柱度 | 0.020 00 | 0.017 00 | 0.018 00 | 0.020 00 | 0.023 00 |
| 方向向量 <i>I</i> | -0.000 25 | -0.002 00 | -0.001 19 | 0.000 28 | -0.002 08 |
| 方向向量 <i>J</i> | 0.001 58 | 0.001 15 | -0.001 68 | -0.001 26 | -0.000 37 |
| 方向向量 <i>K</i> | -1.000 00 | -1.000 00 | -1.000 00 | -1.000 00 | -1.000 00 |

综上所述，利用三次样条曲线拟合的方法对齐次坐标变换矩阵的元素进行补偿产生了有益作用，即能够将定位位置误差稳定在一定范围以下，设计方案在“十三五”国防科研某项目中完成了插固药技术研究项目机器人自动装配的演示验证，表面数控伺服平台定位误差达到了自动装配精度要求。

4 结束语

笔者利用 DH 模型对二轴伺服平台机械结构部分进行了建模，通过轴线法辨识出实际的运动轴线，利用三次样条曲线完成了对齐次坐标变换矩阵的建模误差补偿，给出了一种定位位置误差补偿策略，验证了方案的有效性。

参考文献:

[1] 黄晓辰, 张明路, 张小俊, 等. 机器人坐标系建立的改进 DH 方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 313-318, 325.

[2] 张毅. 数控机床误差测量、建模及网络群控实时补偿系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.

[3] 黄献, 何峰. 数控机床误差补偿技术研究[J]. 内燃机

(上接第 70 页)

2) 转膛衬套与身管衬套膛线不等高显著影响弹带挤进过程产生的应力、变形和温度, 对于笔者研究的转膛自动机, 采用全高膛线, 转膛衬套最大应力、最大变形和最大温度较半高膛线分别增大了 8.67%、15.38%、33.12%, 但身管衬套最大应力、最大变形和最大温度却减小了 4.09%、86.15%、77.14%。

3) 采用半高膛线能使弹带挤入转膛衬套更平稳, 但弹带在二次挤进身管衬套时会产生更强的冲击; 采用全高膛线在弹带挤入转膛衬套时更困难, 但在二次挤进身管衬套时较为平稳。

参考文献:

[1] WU B, FANG L H, ZHENG J, et al. Strain hardening and strain-rate effect in friction between projectile and barrel during engraving process[J]. Tribology Letters, 2019, 67: 39.

[2] WU B, ZHENG J, TIAN Q T, et al. Tribology of rotating band and gun barrel during engraving process under quasi-static and dynamic loading[J]. Friction, 2014, 2(4): 330-342.

[3] WU B, ZHENG J, TIAN Q T, et al. Friction and wear between rotating band and gun barrel during engraving process[J]. Wear, 2014, 318: 106-113.

[4] GUO J H, YAO X F, QIAO J M, et al. An investigation on

与配件, 2021(8): 90-91.

[4] 张竹青, 邢康林. 五轴数控机床三维空间标准球测量研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(10): 61-64, 68.

[5] GAO F, HEI C, LIU J, et al. Synthetic positioning error modelling of a feed axis for a precision CNC machine tool[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114(5): 1385-1394.

plastic deformation of rotating band of large caliber gun projectile during engraving process[C]//Journal of Physics: Conference Series. 2020, 1507: 082006.

[5] LIU H S, XU C. Finite element modeling of bullet-barrel interaction and mechanism analysis of swing phenomenon of bullet[C]//Journal of Physics: Conference Series. 2020, 1507: 082029.

[6] 孙全兆, 杨国来, 王鹏, 等. 某大口径榴弹炮弹带挤进过程数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(2): 206-213.

[7] 戴涌, 张国平, 王茂林. 某转膛自动机异常发射故障分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2013(3): 67-71.

[8] 戴劲松, 开亚俊, 王茂森, 等. 某高速自动机冷却系统分析[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(2): 88-90, 118.

[9] DING C J, LIU N, ZHANG X Y. A mesh generation method for worn gun barrel and its application in projectile-barrel interaction analysis[J]. Finite Element in Analysis and Design, 2017, 124: 22-32.

[10] 丁传俊, 张相炎. 基于热力耦合有限元模型的弹带挤进过程及内弹道过程的仿真研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(12): 2254-2261.

[11] 丁传俊, 张相炎, 刘宁. 身管内膛参数化模型及其磨损有限元模型的生成方法[J]. 兵工学报, 2016, 37(12): 2212-2219.

[12] SHEN C, ZHOU K D, LU Y, et al. Modeling and simulation of bullet-barrel interaction process for the damaged gun barrel[J]. Defence Technology, 2019, 15: 972-986.