

# 一种基于旋量理论的自动钻铆机调姿反解算法

周平, 翟建军, 潘国威, 杨燕勇

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

**[摘要]** 运动学反解是实现机床运动控制的技术基础,也是提高运动精度的技术保证。根据飞机装配自动化钻铆的需求分析,以龙门式自动钻铆机为研究对象,基于旋量理论建立其运动学模型。采用 Paden-Kalan 子问题模型和自动钻铆机上下末端执行器的几何关系相结合的方法,提出了一种基于旋量理论的自动钻铆机运动学反解算法,并在 CATIA 中的 DMU 模块下对算法进行算例验证。结果表明:基于旋量理论的运动学反解算法正确,为自动钻铆机的运动控制提供了理论基础。

**关键词:** 运动学反解; 自动钻铆机; 旋量理论; Paden-Kalan 子问题; DMU

## An Adjustable Position Inverse Solution Algorithm of Automatic Drilling and Riveting Machine Based on Screw Theory

ZHOU Ping, ZHAI Jianjun, PAN Guowei, YANG Yanyong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**[ABSTRACT]** Inverse kinematics was the technical foundation for machine tool motion control and the technical assurance to improve the accuracy of movement. According to the demand of automated drilling and riveting aircraft assembly, the gantry automatic drilling and riveting machine was taken as a research object, and its kinematics model was established based on screw theory. A new algorithm was proposed for the inverse kinematics calculation of the automatic drilling and riveting machine based on the screw theory by using the combined method of Paden-Kahan sub-problem method and the geometry of the upper and lower end effector of automated drilling and riveting machine. Furthermore, the proposed inverse kinematics algorithm was validated by using the DMU. The results showed that the inverse kinematics algorithm based on screw theory was efficiently, and it provided the theoretical basis for the motion control of automatic drilling and riveting machine.

**Keywords:** Inverse kinematics; Automatic drilling and riveting machine; Screw theory; Paden-Kahan sub-problem; DMU

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2017.14.062

航空领域为了满足高性能飞机的制造要求,自动化装配技术被广泛应用于飞机制造装配<sup>[1-2]</sup>。其中,自动钻铆技术作为飞机自动化装配技术中关键技术之一越来越受到重视,其钻铆质量是保证飞机装配质量的关键因素<sup>[3]</sup>。而在自动钻铆中法向调姿是其技术基础并且是提高制孔质量的技术保证<sup>[4]</sup>。在钻铆前,根据飞机零部件上钻铆点位置及矢量信息通过反解算法获得自动钻铆机各轴驱动量,再通过自动钻铆机的控制系统使刀具轴线和钻铆点法向重合<sup>[5-6]</sup>,实现法向调姿。因而,自动钻铆机位置反解精度直接决定了法向调姿的准确性。

在求解运动学位置正反解的过程中,Denavit-Hartenberg(D-H)参数法<sup>[7]</sup>作为一种较为广泛的建模方法,其正反解算法已经相当成熟。虽然机器人和机床的

位置正反解通常采用它,但是其在建模过程中需要对每个运动关节建立局部坐标系,并计算获取相邻运动关节之间的位置变换矩阵,建模过程较为复杂,且其几何意义较不明显。而旋量法<sup>[8]</sup>采用全局坐标系来描述刚体的运动情况,在反解过程中目标点位置及矢量信息均是相对于基础坐标系的,减少了局部坐标系的建立以及坐标系间的变换矩阵计算,在机器人运动学正反解中应用较为常见。李盛前等<sup>[9]</sup>基于旋量理论建立了多自由度串联机器人的矩阵指数积运动学模型,并推导了其反解算法。于常娟等<sup>[10]</sup>等利用旋量理论和指数积方法建立六足仿生机器人的正运动学模型,并通过消元方法求得反解。与D-H法相比,其建模简单且几何意义明显,同时可避免D-H法局部坐标系描述带来的奇异性问

题<sup>[11]</sup>。同时与机器人运动相比,在求解自动钻铆机的位置反解中旋量理论的应用较少。

本文以南航自主研制的龙门式自动钻铆机床为研究对象,对其进行运动学分析,采用旋量理论法建立运动学模型。并利用 Paden-Kahan 子问题与几何关系法相结合的方法获得运动学反解的解析式。为了进一步验证自动钻铆机床反解算法的有效性,在 CATIA 中通过一个反解算例进行仿真验证其正确性。

## 1 自动钻铆系统介绍

本文中的自动钻铆系统包括了上、下末端执行器、龙门定位系统、托架调姿系统等组成,如图 1 所示。龙门定位系统和托架调姿系统协同定位调姿,以保证末端执行器的加工动力头轴线始终在壁板钻铆点的外法线上,并带动末端执行器在整个飞机壁板组件的装配范围内完成装配动作。其中龙门定位系统由龙门、底座、滑枕、旋转机构、导轨、丝杠、带轮电机等组成,可实现  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  向移动和  $A$  角摆动。托架调姿系统由 4 个 POGO 柱单元和托架组成,实现托架  $Z$  向移动和  $A$ 、 $B$  角的摆动。在龙门定位系统和托架调姿系统的共同作用下实现自动钻铆系统的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $A$ 、 $B$  五坐标定位,满足自动钻铆的工艺要求。

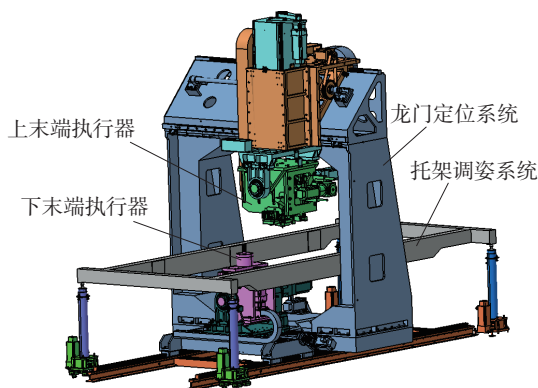


图1 自动钻铆机模型  
Fig.1 Model of automatic drilling and riveting machine

## 2 自动钻铆机运动学反解

根据该自动钻铆机的工作原理,可以得到自动钻铆机的结构简图,如图 2 所示。并在运动结构简图中建立基坐标系  $O_b-X_bY_bZ_b$ 、托架工作台坐标系  $O_w-X_wY_wZ_w$  和工具坐标系  $O_t-X_tY_tZ_t$ 。并记图 2 中所标注点在基坐标系下的坐标值为  $O_w(x_w, y_w, z_w)$ 、 $O_t(x_t, y_t, z_t)$ 、 $P_{A1}(x_{A1}, y_{A1}, z_{A1})$  和  $P_{A2}(x_{A2}, y_{A2}, z_{A2})$ 。

同时由于自动钻铆机托架工作台与上下末端执行器的相关运动关节相互独立,可将自动钻铆机的运动

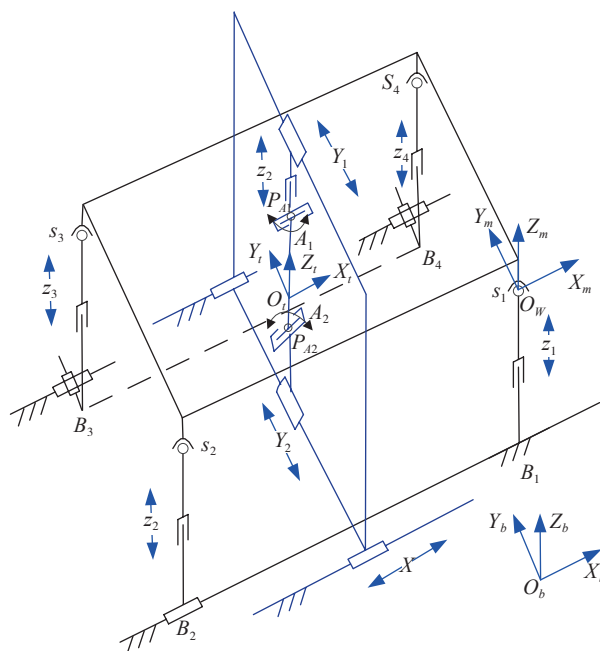


图2 自动钻铆机结构简图  
Fig.2 Automatic drilling and riveting machine kinematic diagram

分成 3 条。开式运动链分别是上末端执行器运动链、下末端执行器运动链和托架工作台运动链。其中在上末端执行器运动链中实现了上末端执行器沿  $X$ 、 $Y_1$  和  $Z_3$  轴向的移动及绕  $X$  轴的转动  $A_1$ ；在下末端执行器运动链中实现了下末端执行器沿  $X$  和  $Y_2$  轴向的移动及绕  $X$  轴的转动  $A_2$ ；在托架工作台运动链中通过 POGO 柱  $Z_1 \sim Z_4$  轴的高度  $z_1, z_2, z_3, z_4$  的调整实现托架  $Z$  向调整和绕  $Y$  轴旋转的  $B$  角调节,如图 2 所示。上末端执行器运动链与托架工作台运动链、下末端执行器运动链与托架工作台运动链可以分别构成上、下末端闭式运动链。

为了便于自动钻铆机位置反解算法的推导,本文将自动钻铆机的反解分成两部分:(1)先采用旋量法求解下末端闭式运动链中相关的位置反解;(2)在确定下末端闭式运动链中各个运动单元运动位置的前提下,利用上、下末端执行器的位置几何关系分析推导上末端执行器的位置反解。

### 2.1 下末端闭式运动链反解

#### 2.1.1 下末端闭式运动链运动学模型建立

本文采用旋量理论建立机床的运动学模型。其中旋量将刚体的运动描述为绕某一条直线转动和沿该直线平移的复合运动<sup>[12]</sup>。

在旋量运动表示刚体的运动中,对于转动关节,  $\xi = \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix}$ ,  $v = -\omega \times q$ ,其中  $\omega \in R^3$  为旋转方向上的单位矢量,  $q \in R^3$  为轴线上的任意一点。对于移动关节,

$\xi = \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ 0_{3 \times 1} \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{v} \in R^3$  是指移动方向上的单位矢量。

根据以李群、李代数为基础的旋量理论可知,刚体变换可以用运动旋量的指数来表示<sup>[8]</sup>,即:

$$e^{\hat{\xi}\theta} = \begin{cases} \begin{pmatrix} e^{\hat{\omega}\theta} & (I - e^{\hat{\omega}\theta})(\omega \times \mathbf{v}) + \omega\omega^T \mathbf{v}\theta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \omega \neq 0 \\ \begin{pmatrix} I_{3 \times 3} & \mathbf{v}\theta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \omega = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $e^{\hat{\omega}\theta} = I_{3 \times 3} + \hat{\omega} \sin \theta + \hat{\omega}^2 (1 - \cos \theta)$ ,  $\theta$  为运动关节的驱动量。

同时由旋量理论可知,机床中工具坐标系相对于基坐标系的位姿变换表达式为:

$$\mathbf{g}_{bm}(\theta) = e^{\hat{\xi}_1\theta_1} e^{\hat{\xi}_2\theta_2} \dots e^{\hat{\xi}_n\theta_n} \mathbf{g}_{bm}(0) \quad (2)$$

对于下末端执行器运动链,由公式(2)得其下末端执行器工具坐标系相对于基坐标系的变换矩阵表达式为:

$$\mathbf{g}_{br}(\theta_{xt}, \theta_{yt}, \theta_{zt}) = e^{\hat{\xi}_{xt}\theta_{xt}} e^{\hat{\xi}_{yt}\theta_{yt}} e^{\hat{\xi}_{zt}\theta_{zt}} (\mathbf{g}_{br}(0)) \quad (3)$$

对于托架工作台运动链,由公式(2)得其托架工作台坐标系相对于基础坐标系的变换矩阵表达式为:

$$\mathbf{g}_{bw}(\theta_{zw}, \theta_{Bw}) = e^{\hat{\xi}_{zw}\theta_{zw}} e^{\hat{\xi}_{Bw}\theta_{Bw}} (\mathbf{g}_{bw}(0)) \quad (4)$$

由公式(3)、(4),可得下末端执行器坐标系相对于托架工作台坐标系的变换矩阵表达式为:

$$\mathbf{g}_{wr}(\theta_{zw}, \theta_{Bw}, \theta_{xt}, \theta_{yt}, \theta_{zt}) = (\mathbf{g}_{bw}(0))^{-1} e^{-\hat{\xi}_{zw}\theta_{zw}} e^{-\hat{\xi}_{Bw}\theta_{Bw}} e^{\hat{\xi}_{xt}\theta_{xt}} e^{\hat{\xi}_{yt}\theta_{yt}} e^{\hat{\xi}_{zt}\theta_{zt}} (\mathbf{g}_{br}(0)) \quad (5)$$

即下末端执行器墩头点相对于托架工作台坐标系的位置和方向向量为:

$$\begin{pmatrix} P & O \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = \mathbf{g}_{wr}(\theta_{zw}, \theta_{Bw}, \theta_{xt}, \theta_{yt}, \theta_{zt}) \begin{pmatrix} r_{pt} & r_{ot} \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中,  $P = (x_p, y_p, z_p)^T$ ,  $O = (d_x, d_y, d_z)^T$ ,  $r_{pt} = (0, 0, 0)^T$ ,  $r_{ot} = (0, 0, 1)^T$

### 2.1.2 下末端闭式运动链位置反解

#### (1) 旋转角求解。

由于在整个运动链中移动关节对方向向量不起到作用<sup>[15]</sup>,可以由公式(6)得到:

$$\begin{pmatrix} O \\ 0 \end{pmatrix} = \mathbf{g}_{wr}(\theta_{zw}, \theta_{Bw}, \theta_{xt}, \theta_{yt}, \theta_{zt}) \begin{pmatrix} r_{ot} \\ 0 \end{pmatrix} = e^{-\hat{\xi}_{zw}\theta_{zw}} e^{\hat{\xi}_{xt}\theta_{xt}} \begin{pmatrix} r_{ot} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

根据 Paden\_Kahan 子问题 2<sup>[8]</sup> 中求解 2 个旋转角的方法,公式(7)可以改写成:

$$\begin{cases} e^{\hat{\omega}_A\theta_A} \mathbf{u} = z = e^{\hat{\omega}_B\theta_B} \mathbf{v} \\ z = \alpha\omega_B + \beta\omega_A + \gamma(\omega_B \times \omega_A) \\ \alpha = \frac{(\omega_B^T \omega_A)\omega_A^T \mathbf{u} - \omega_B^T \mathbf{v}}{(\omega_B^T \omega_A)^2 - 1} \\ \beta = \frac{(\omega_B^T \omega_A)\omega_B^T \mathbf{v} - \omega_A^T \mathbf{u}}{(\omega_B^T \omega_A)^2 - 1} \\ \gamma^2 = \frac{\|\mathbf{u}\|^2 - \alpha^2 - \beta^2 - 2\alpha\beta\omega_B^T \omega_A}{\|\omega_B \times \omega_A\|^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\mathbf{u}$  表示工具相对于刀具坐标系的方向向量,  $\mathbf{v}$  为钻铆点法矢,  $\omega_A$  表示 A 旋转轴的轴向,  $\omega_B$  表示 B 旋转轴的轴向。

再根据 Paden\_Kahan 子问题 1<sup>[8]</sup> 的方法求解  $e^{\hat{\omega}_A\theta_A} \mathbf{u} = z$  和  $e^{\hat{\omega}_B\theta_B} \mathbf{v} = z$  可以求得  $\theta_{At}$  和  $\theta_{Bw}$ 。

$$\theta_{Bw} = \text{atan2}(\omega_B^T(\mathbf{v}'_B \times z'_B), \omega_B^T z'_B)$$

式中,

$$z'_B = z - \omega_B(\omega_B^T z), \mathbf{v}'_B = \mathbf{v} - \omega_B(\omega_B^T \mathbf{v}) \quad (9)$$

$$\theta_{At} = \text{atan2}(\omega_A^T(\mathbf{u}'_A \times z'_A), \omega_A^T z'_A)$$

式中,

$$z'_A = z - \omega_A(\omega_A^T z) \mathbf{u}'_A = \mathbf{u} - \omega_A(\omega_A^T \mathbf{u}) \quad (10)$$

将  $\mathbf{u} = (0, 0, 1)^T$ ,  $\omega_A = (0, 0, 1)^T$ ,  $\omega_B = (0, 1, 0)^T$  和  $\mathbf{v} = (d_x, d_y, d_z)^T$  代入(8)、(9)、(10)公式,可以化简求得  $\theta_{At}$  和  $\theta_{Bw}$  如下:

$$\begin{aligned} \theta_{Bw} &= \text{atan2}(dx, dz) \\ \theta_{At} &= \text{atan2}(dy, \pm \sqrt{1 - dy^2}) \end{aligned} \quad (11)$$

#### (2) 平移位置求解。

根据  $O_w(x_w, y_w, z_w)$ ,  $O_t(x_t, y_t, z_t)$  在基坐标系中的初始位置可知下末端执行器坐标系与托架坐标系的初始位形为:

$$\mathbf{g}_{bw}(0) = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & w_0 \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_w \\ 0 & 1 & 0 & y_w \\ 0 & 0 & 1 & z_w \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{g}_{br}(0) = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & t_0 \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_t \\ 0 & 1 & 0 & y_t \\ 0 & 0 & 1 & z_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

根据设定各点坐标值和指数积公式(1),同时取 A、B 旋转轴上的点分别为  $P_{A2}$ 、 $P_W$ ,得各个运动关节的运动指数积的表达形式如下:

$$e^{\hat{\xi}_{xt}\theta_{xt}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$e^{\hat{\xi}_{yt}\theta_{yt}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$e^{\hat{\xi}_{zw}\theta_{zw}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$e^{\hat{\xi}_{A2}\theta_{A2}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(A_2) & -\sin(A_2) & z_{A2} \sin(A_2) - y_{A2}(\cos(A_2) - 1) \\ 0 & \sin(A_2) & \cos(A_2) & -y_{A2} \sin(A_2) - z_{A2}(\cos(A_2) - 1) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$e^{\hat{e}_{Bw}\theta_{Bw}} = \begin{pmatrix} \cos(B) & 0 & \sin(B) & -z_w \sin(B) - x_w(\cos(B) - 1) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(B) & 0 & \cos(B) & x_w \sin(B) - z_w(\cos(B) - 1) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

式中,  $x$ 、 $y_2$ 、 $z_1$  分别表示沿  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的运动量;  $A_2 = \theta_{A_1}$ 、 $B = \omega_B$  表示下末端执行器绕  $X$ 、 $Y$  轴的转动角度。

由于整个闭式运动链中, 两个移动轴间不存在旋转轴, 则机床平移运动的运动学正解可以表示为:

$$\begin{pmatrix} P \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{g}_{wt}(\theta_{zw}, \theta_{Bw}, \theta_{xt}, \theta_{yt}, \theta_{zt}, \theta_{At}) \begin{pmatrix} r_{pt} \\ 1 \end{pmatrix} \\ = (\mathbf{g}_{bw}(0))^{-1} e^{-\hat{e}_{Bw}\theta_{Bw}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y_2 \\ 0 & 0 & 1 & z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} e^{\hat{e}_{A_1}\theta_{A_1}} (\mathbf{g}_{bt}(0)) \begin{pmatrix} r_{pt} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

公式(12)可转换为:

$$\begin{pmatrix} x \\ y_2 \\ -z_1 \\ 1 \end{pmatrix} = e^{\hat{e}_{Bw}\theta_{Bw}} (\mathbf{g}_{bw}(0)) \begin{pmatrix} P \\ 1 \end{pmatrix} - e^{\hat{e}_{A_1}\theta_{A_1}} (\mathbf{g}_{bt}(0)) \begin{pmatrix} r_{pt} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

由于  $B$  角是由  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$  与  $Z_4$  的差动实现, 将  $A_2$ 、 $B$  旋转轴运动指数积、下末端执行器坐标系与托架坐标系的初始位形、钻铆点坐标代入公式(13)化简, 并综上所述可得下末端执行器运动链与托架工作台运动链构成的闭式运动链中相关位置反解如下:

$$\begin{cases} A_2 = \text{atan2}(dy, \pm \sqrt{1 - dy^2}) \\ B = \text{atan2}(dx, dz) \\ x = x_p \cos(B) + z_p \sin(B) + x_w - x_t \\ y_2 = y_p + y_w - y_{A_2} - (y_t - y_{A_2}) \cos(A_2) \\ \quad - (z_{A_2} - z_t) \sin(A_2) \\ z_1 = -z_B + z_{A_2} - z_p \cos(A_2) + x_p \sin(A_2) \\ \quad + (z_t - z_{A_2}) \cos(A_2) + (y_t - y_{A_2}) \sin(A_2) \\ z_2 = z_1 + l_{12} \sin(B) \quad (l_{12} \text{ 指 } z_2 \text{ 与 } z_1 \text{ 间距离}) \\ z_3 = z_2 \\ z_4 = z_1 \end{cases} \quad (14)$$

## 2.2 上末端闭式运动链位置反解

根据自动钻铆机运动特点及下末端闭式运动链的分析结果, 对于上末端闭式运动链而言, 其未确定的驱动变量有旋转角  $A_1$ 、 $Y$  方向上驱动量  $Y_1$  和  $Z$  方向上驱动量  $Z_5$ 。同时根据机床工作时, 刀具点、钻铆点和镗头点三点一线的原理, 上、下末端执行器的几何关系如图3。假设此时上末执行器旋转中点位置为  $P'_{A_1}$  ( $x'_{A_1}$ ,  $y'_{A_1}$ ,  $z'_{A_1}$ )<sup>T</sup>, 下末端执行器旋转中点位置为  $P'_{A_2}$  ( $x'_{A_2}$ ,  $y'_{A_2}$ ,  $z'_{A_2}$ )<sup>T</sup>, 上下末端执行器旋转角度为  $A_1$  和  $A_2$  以及上下末端执行器端点距各自转轴中心距离为  $l_{T1}$  和  $l_{T2}$ 。由于下末端执行器的旋转中点初始位置为  $P_{A_2}$  ( $x_{A_2}$ ,  $y_{A_2}$ ,  $z_{A_2}$ )<sup>T</sup>, 根据以上旋量法求解位置反解的结果可以求得此时下末端执行器旋转中点位置为  $P_{A_2}$  ( $x_{A_2} + y_{A_2} + z_{A_2}$ )<sup>T</sup>。

再由  $P'_{A_1}$  和  $P'_{A_2}$  点位置的几何关系可以得到  $P'_{A_1}$  的坐标位置为:

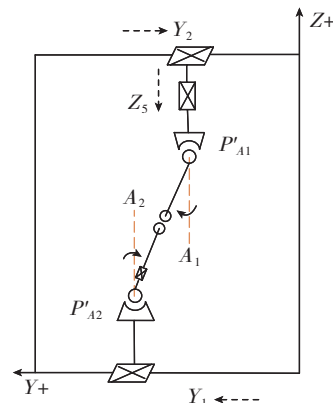


图3 上下末端执行器的几何关系  
Fig.3 Upper and lower end effector geometry diagram

$$\begin{cases} x'_{A_1} = x'_{A_2} = x_{A_2} + x \\ y'_{A_1} = y'_{A_2} - (l_{T1} + l_{T2}) \sin(A_1) \\ z'_{A_1} = z'_{A_2} - (l_{T1} + l_{T2}) \cos(A_1) \end{cases} \quad (15)$$

同时由于上末端执行器的旋转中点初始位置为  $P_{A_1}$  ( $x_{A_1}$ ,  $y_{A_1}$ ,  $z_{A_1}$ )<sup>T</sup>, 则上末端闭式运动链的其余位置反解为:

$$\begin{cases} A_1 = A_2 \\ y_1 = y'_{A_1} - y_{A_1} = y_{A_1} + y_2 - (l_{T1} + l_{T2}) \sin(A_2) - y_{A_1} \\ z_5 = z'_{A_1} - z_{A_1} = z_{A_2} - (l_{T1} + l_{T2}) \cos(A_2) - z_{A_1} \end{cases} \quad (16)$$

综上所述, 公式(14)、(16)是五轴自动钻铆机运动学反解的解析式。

## 3 基于 CATIA 的位置反解仿真实验

CATIA V5 的 DMU 数字样机功能由专门的模块完成, 能够完成与物理样机同样的分析、模拟功能, 从而减少制造物理样机的费用及时间, 并能进行更多的设计方案的验证。

为了验证所自动钻铆机反解算法的正确性, 在 CATIA 的 DMU 仿真功能模块进行相关仿真验证, 其流程如图4所示。

在 CATIA 仿真环境以仿真世界坐标系为基坐标系, 测得相关参数值如下: 托架  $S_1$  到  $S_2$  距离  $l_{12} = 4420\text{mm}$ , 托架  $S_2$  到  $S_3$  距离  $l_{23} = 1400\text{mm}$ ; 上末端执行器转轴中心的初始位置坐标为  $P_{A_1}$  ( $630.35, 106.23, 2524.891$ )<sup>T</sup>, 且刀具点距转轴中心距离为  $l_{T1} = 478.5\text{mm}$ ; 下末端执行器的镗头点初始位置坐标为  $O_1$  ( $-600.35, 637.486, 1838.823$ )<sup>T</sup>, 转轴中心的初始位置坐标为  $P_{A_2}$  ( $-600.35, 637.486, 1271.823$ )<sup>T</sup>, 则镗头点距转轴中心距离为  $l_{T2} = 567\text{mm}$ ; 托架工作台坐标系原点坐标为  $O_w$  ( $2205, -481.27, 1502.977$ )<sup>T</sup>。托架工作台坐标系  $O_w - X_w Y_w Z_w$  中钻铆点  $P = (-3009.117, 533.120, 522.966)$ <sup>T</sup> 和其方向向量  $O = (-0.0077771, -0.310949, 0.950395)$ <sup>T</sup>。计算得出

钻铆机各轴调整量如表 1 所示。

根据以上调整量,在 CATIA 中进行了仿真验证,驱动自动钻铆机模型的运动机构仿真机制,如图 5 所示。

测得在仿真世界坐标系下钻铆点、刀尖点和墩头点的坐标值如表 2 所示。

从以上数据分析对比可以得到:刀尖点、墩头点与

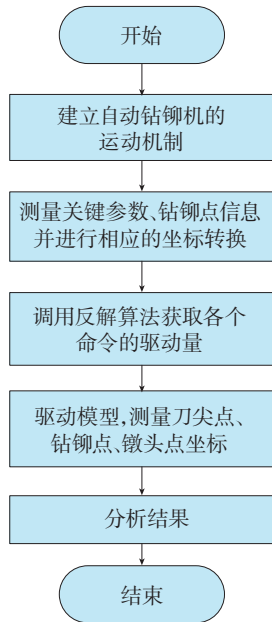


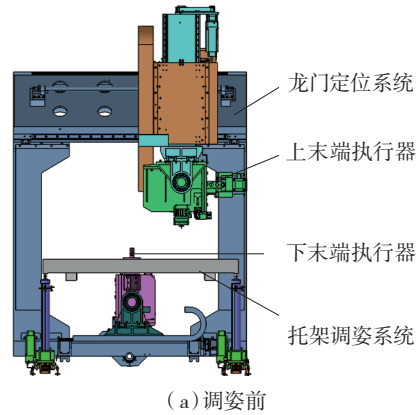
图4 仿真实验流程图  
Fig.4 Simulation flow chart

表1 各轴调整量

运动轴	调整量
X/mm	-199.387
Y <sub>1</sub> /mm	-203.169
Y <sub>2</sub> /mm	-409.328
Z <sub>1</sub> /mm	-239.833
Z <sub>2</sub> /mm	-239.833
Z <sub>3</sub> /mm	-203.666
Z <sub>4</sub> /mm	-203.666
Z <sub>5</sub> /mm	-259.397
A <sub>1</sub> / (°)	18.1164
A <sub>2</sub> / (°)	18.1164

表2 各点坐标值 mm

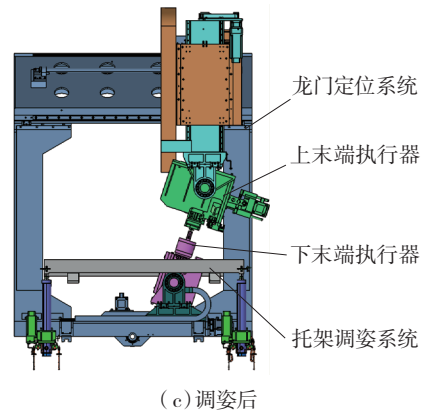
名称	X	Y	Z
刀尖点	-799.422	51.851	1810.715
钻铆点	-799.746	51.857	1810.715
墩头点	-799.922	51.851	1810.715



(a) 调姿前



(b) CATIA 下界面



(c) 调姿后

图5 仿真结果

Fig.5 Simulation results

钻铆点基本重合,从而验证了自动钻铆机反解算法的正确性。

#### 4 结论

(1) 基于旋量理论,搭建了自动钻铆机的运动学模型。将 Paden-Kalan 子问题模型引入到运动学反解过程中,同时结合机床几何关系,获得了自动钻铆机所需调整量的运动学反解算法。

(2) 通过算例验证表明,运动学反解算法正确,为后续进一步的钻铆机运动控制奠定了一定的技术基础。

## 参 考 文 献

- [1] SARH B. Assembly techniques for space vehicles[R]. SAE Technical Paper, 2000.
- [2] 许国康. 大型飞机自动化装配技术[J]. 中国学术期刊文摘, 2008, 14(20):13.
- XU Guokang. Automatic assembly technology for large aircraft[J]. Chinese Science Abstracts, 2008, 14(20):13.
- [3] 陈修强, 田卫军, 薛红前. 飞机数字化装配自动钻铆技术及其发展[J]. 航空制造技术, 2016(5):52-56.
- CHEN Xiuqiang, TIAN Weijun, XUE Hongqian. Automatic drilling and riveting technology of aircraft digital assembly and its development[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(5):52-56.
- [4] 韩锋. 基于并联机构的轻型自主爬行钻铆系统法向调姿算法[J]. 航空学报, 2015, 36(6):2083-2090.
- HAN Feng. Normal posture adjustment algorithm for lightweight autocrawling drilling and riveting system based on parallel mechanism[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(6):2083-2090.
- [5] 杜兆才. 数字化钻铆的曲面法向测量方法[J]. 航空制造技术, 2011(22):108-111.
- DU Zhaocai. Measurement method for evaluating normal direction of surface for digital drilling and riveting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(22):108-111.
- [6] 应高明. 飞机壁板自动钻铆法向量测量方法研究[J]. 机床与液压, 2010, 38(23):1-4.
- YING Gaoming. Study on normal vector measurement method in auto drilling and riveting of aircraft panel[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(23):1-4.
- [7] 熊有伦. 机器人操作[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2002.
- XIONG Youlun. Robot manipulation[M]. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 2002.
- [8] MURRAY R M, SASTRY S S, ZEXIANG L. A mathematical introduction to robotic manipulation[J]. A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, 1994, 39(9):292.
- [9] 李盛前, 谢小鹏. 基于旋量理论和结式法的自由度机器人逆运动学求解分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20):48-54.
- LI Shengqian, XIE Xiaopeng. Analysis of inverse kinematic solution for 6R robot based on screw theory and sylvester resultant[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(20):48-54.
- [10] 于常娟, 张明路, 张建华, 等. 六足仿生机器人并联运动学分析[J]. 制造业自动化, 2015, 37(11):56-58.
- YU Changjuan, ZHANG Minglu, ZHANG Jianhua, et al. Parallel kinematical analysis of hexapod robot[J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(11):56-58.
- [11] ROCHA CR, TONETTO CP, DIAS A. A comparison between the Denavit-hartenberg and the screw-based methods used in kinematic modeling of robot manipulators[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2011, 27(4):723-728.
- [12] 钱东海, 王新峰, 赵伟, 等. 基于旋量理论和 Pand-Kahan 子问题的自由度机器人逆解算法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(9):72-76.
- QIAN Donghai, WANG Xinfeng, ZHAO Wei, et al. Algorithm for the inverse kinematics calculation of 6-DOF robots based on screw theory and Pand-Kahan sub-problems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009,

45(9):72-76.

通讯作者: 翟建军, 博士、教授, 研究方向为塑性成形的计算机仿真技术、模具 CAD/CAE/CAM 技术、网络化高效数控加工技术, E-mail: zhajie@nuaa.edu.cn. (责编 大漠)

(上接第56页)

- mutilayers mechanical response[D]. Tianjin: Tianjin University, 2003.
- [3] BORAWSKI B, ATODD J, SINGH J, et al. The influence of ductile interlayer material on the particle erosion resistance of multilayered TiN based coatings[J]. Wear, 2011, 271(11-12): 2890-2898.
- [4] DU J, ZHU X Y, ZHANG P, et al. Microstructure and erosion resistance performance of ZrAlN/Cu coating[J]. Physics Procedia, 2012, 32: 757-765.
- [5] YANG Q, SEO D Y, ZHAO L R. Multilayered coatings with alternate pure Ti and TiN/CrN superlattice[J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 177-178: 204-208.
- [6] YANG Q, SEO D Y, ZHAO L R, et al. Erosion resistance performance of magnetron sputtering deposited TiAlN coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 188-189: 168-173.
- [7] MAKINO Y, MORI M, MIYAKE S, et al. Characterization of Zr-Al-N films synthesized by a magnetron sputtering method[J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 193(1/2/3): 219-222.
- [8] DOBRANSKI L A, POLOK M, ADAMIK M. Structure and properties of wear resistance PVD coatings deposited onto X37CrMoV5-1 type hot work steel[J]. Journal of Material Processing Technology, 2005, 164-165(20): 843-849.
- [9] 金杰, 黄晓林, 孟祥宇, 等. Cr-Ti-N 系多层膜成分及周期对抗冲性能的影响[J]. 中国表面工程, 2015, 8(4):105-112.
- JIN Jie, HUANG Xiaolin, MENG Xiangyu, et al. Influence of Cr-Ti-N multilayers with different periods and constituents on erosion resistance performance[J]. China Surface Engineering, 2015, 8(4): 105-112.
- [10] WAIY Y, MATSUBARA T, HIRAI Y, et al. Development of a new type micro slurry-jet erosion (MSE) tester for evaluation of wear properties of hard thin coatings[J]. Lubrication Science, 2009, 21(6): 213-226.
- [11] PANG X, GAO K, YANG H, et al. Interfacial microstructure of chromium oxide coatings[J]. Advanced Engineering Materials, 2007, 9(7): 594-599.

通讯作者: 温培刚, 硕士、工程师, 研究方向为航空复合材料、物理气相沉积、透明导电膜、表面防护、腐蚀防护, E-mail: wpgwpg@126.com.

(责编 古京)

(上接第61页)

- Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [28] 杨伟俊, 李东升, 李小强. 铝合金板橡皮成形简化数值分析模型研究[J]. 中国机械工程, 2009(19): 2382-2386.
- YANG Weijun, LI Dongsheng, LI Xiaoqiang. A simplified numerical analysis model for rubber forming of aluminum alloy sheet [J]. China Mechanical Engineering, 2009(19): 2382-2386.

通讯作者: 李小强, 博士、副教授, 研究方向为高性能薄壁结构柔性精密成形, E-mail: littlestrongen@163.com. (责编 海山)