

四自由度混联机器人运动学分析与仿真*

余顺年 陈扼西 马履中

【摘要】 根据串联机构和并联机构的特点,以两平移—转动并联机构为主体,设计了一种四自由度混联机器人,该机器人动平台自由度为三平移和一转动,同时,在并联机构动平台和虚拟固定平台间增加一辅助支链,该辅助支链具有独立的转动自由度。与具有同样运动特性的并联机构相比,该机器人的工作空间大,转动灵活。分析了该机器人的运动学特征,求出其位置正反解,利用运动影响系数对其速度和加速度进行了系统研究,并进行了动态仿真验证。

关键词: 混联机器人 位置分析 运动学分析 仿真

中图分类号: TP242; TH113.2⁺2 **文献标识码:** A

Kinematics Analysis and Dynamic Simulation of a Novel Mixed-connection Manipulator

Yu Shunnian¹ Chen Exi¹ Ma Lüzhong²

(1. Jimei University 2. Jiangsu University)

Abstract

According to the characteristics of series and parallel mechanism, a novel mixed—connection manipulator was designed. Its moving platform had three translational and one rotational degree of freedom. There was a subsidiary chain between the virtual fixing platform and the moving platform, which had an independent rotational degree of freedom. Compared with the parallel mechanism of the same kinematic characteristics, the workspace of the manipulator was large and its rotational degree of freedom was flexible. The manipulator was investigated and the closed-formed solutions of both the inverse and direct kinematics were developed. The velocities and accelerations were studied by using the method of kinematic influencing coefficients. The dynamic simulation was conducted, which verified the correctness of the theoretical inference.

Key words Mixed-connection manipulator, Position analysis, Kinematics analysis, Simulation

引言

根据串联机构和并联机构的特点,设计一种混联机器人新机型,并求出其运动学正反解,利用运动影响系数对该机器人的速度和加速度进行系统分析,通过软件 ADAMS 的运动学仿真结果,验证理论推导的正确性。

1 并联机构及混联机器人机构概念设计

1.1 并联机构

设计并联机构如图 1^[1~2],该机构由虚拟固定平台、等腰三角形的动平台及连接两平台的 3 条支链所组成,其中 2 条支链 $AA''A'$ 和 $BB''B'$ 运动副相同,均为 $P \perp R // R \perp R$ 。而另一条支链 $CC''C'$ 为 PUU ,该支链的虎克铰 C' 和 C'' 的 2 个内转动副及 2 个外

收稿日期:2006-08-14

* 国家自然科学基金资助项目(项目编号:50375067)、福建省教育厅科技资助项目(项目编号:AJ004231)和集美大学科研基金资助项目(项目编号:ZQ2007020)

余顺年 集美大学机械工程学院 副教授 博士,361021 厦门市

陈扼西 集美大学机械工程学院 副教授

马履中 江苏大学机械工程学院 教授 博士生导师,212013 镇江市

转动副的轴线相互平行且虎克铰 C'' 的外转动副轴线与移动副 C 的移动方向平行。移动副 A, B 与移动副 C 的移动方向平行。建立如图所示的坐标系, 动坐标系 $O''X''Y''Z''$ 设在动平台上, 坐标原点 O'' 取在转动副 A' 和 B' 的中点, Y'' 轴指向 C' , X'' 轴在转动副 G' 的转动轴线上并指向 B' , Z'' 轴按右手定则确定且垂直于动平台; 另一坐标系 $O'X'Y'Z'$ 设在虚拟固定平台上, 坐标原点 O' 为点 D 在移动副 A 和 B 移动导轨线的垂足点, Y' 轴正向指向 D , X' 轴指向移动副 B , Z' 轴按右手定则确定且垂直虚拟固定平台; 运动开始时 Z'' 轴与 Z' 轴方向重合。

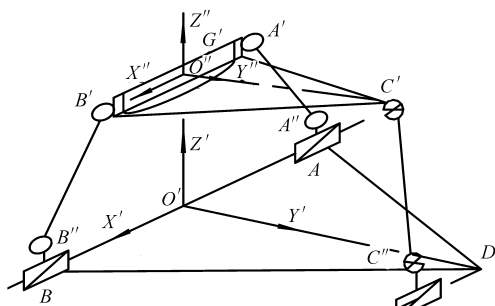


图 1 三自由度并联机构简图

Fig. 1 Parallel mechanism sketch with 3-DOF

通过分析各支链的运动特征, 动平台的输出矩阵 M_{Pa} 为 3 条支链输出矩阵的交集^[2], 即

$$M_{Pa} = \left[\begin{matrix} t^2(x', z') \\ r^2(\alpha, \beta) \end{matrix} \right] \cap \left[\begin{matrix} t^2(x', z') \\ r^2(\alpha, \beta) \end{matrix} \right] \cap \left[\begin{matrix} t^3 \\ r^2(\gamma, R, R^*) \end{matrix} \right] = \left[\begin{matrix} t^2(x', z') \\ r(\alpha) \end{matrix} \right]$$

其中矩阵中元素 x', y', z' 为沿 X', Y', Z' 轴方向的移动量, α, β 和 γ 为绕 X', Y', Z' 轴的转动量, (R, R^*) 为虎克铰的十字轴平面。由于十字轴外转动副的轴线与移动副 C 的移动方向平行, 因此, 该并联机构具有两平移—转动 3 个自由度, 分别为 $O'X'Z'$ 平面的移动和绕 X'' 轴的转动。选并联机构虚拟固定平台的移动副 A, B, C 为主动副。

1.2 混联机器人概念设计

为了扩大两平移—转动并联机构的工作空间, 利用移动副 E 将三自由度并联机构的虚拟固定平台联接到机架, 使并联机构的动平台具有沿 Y 轴方向的移动自由度, 这样, 混联机器人动平台具有三平移—转动 4 个自由度。在虚拟固定平台与动平台间增加一辅助支链 $FF_1F_2F_3F'$, 该辅助支链通过转动副 F, F' 垂直两平台转动, 中间通过两个虎克铰和可伸缩的轴来传递(即 RUPUR), 且两个虎克铰 F_1 和 F_3 的 2 个内转动副及 2 个外转动副的轴线相互平行。其机构运动简图如图 2, 虚拟样机^[3]如图 3 所示。

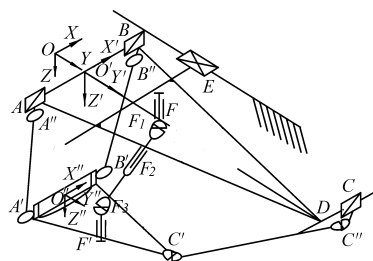


图 2 混联机器人机构简图

Fig. 2 Mixed-connection manipulator sketch

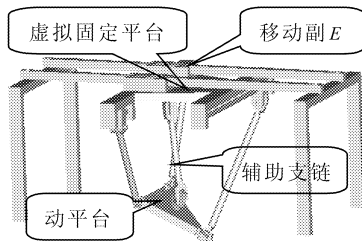


图 3 混联机器人虚拟样机

Fig. 3 Virtual prototype of mixed-connection manipulator

2 混联机器人位置分析

对混联机器人建立如图 2 所示坐标系。坐标系 $O''X''Y''Z''$ 和坐标系 $O'X'Y'Z'$ 的建立同图 1, 固定坐标系 $OXYZ$ 建在机架上, 初始与坐标系 $O'X'Y'Z'$ 重合。

已知定长连杆 $A'A''=L_1, B'B''=L_2, C'C''=L_3$; 移动副 A 和移动副 B 原始位置为: $O'A=b_1, O'B=b_2$; 移动副 C 的原始位置为: $CD=c, O'D=d$; 转动副 A' 和 B' 的位置为: $O'A'=O'B'=a$; 虎克铰 C'' 的位置为: $O'C''=e$ 。令转动副 A'', B'' 的转动轴线分别与移动副 A, B 移动中心相交, 而虎克铰 C'' 外转动副的转动轴线与移动副 C 的移动中心重合。辅助支链位置参数为: $O'F=ee, O''F'=ee'$ 。令驱动副 A, E, B, C 的移动位移分别为 s_1, s_2, s_3, s_4 。

2.1 混联机器人位置正解

根据建立的坐标系可知, 固定坐标系 $OXYZ$ 与动坐标系 $O'X'Y'Z'$ 的关系为: $x_p = x_p^*, y_p = y_p^* + s_2, z_p = z_p^*, \beta = \beta^*$ 。

由于初始状态固定坐标系 $OXYZ$ 与动坐标系 $O'X'Y'Z'$ 重合, 而整个混联机器人机构动平台沿 Y 轴方向的移动只取决于移动副 E , 所以

$$y_p = s_2 \tag{1}$$

通过对并联机构的运动特征分析可得

$$z_p^2 + (x_p - a + b_1 - s_1)^2 = L_1^2 \tag{2}$$

$$z_p^2 + (x_p + a - b_2 - s_3)^2 = L_2^2 \tag{3}$$

求解式(2)~(3)得

$$x_p = 0.5 \left(\frac{L_2^2 - L_1^2}{2a - b_1 - b_2 - s_3 + s_1} - b_1 + b_2 + s_1 + s_3 \right) \tag{4}$$

$$z_p =$$

$$\pm \sqrt{L_1^2 - \left[0.5 \left(\frac{L_2^2 - L_1^2}{2a - b_1 - b_2 - s_3 + s_1} + b_1 + b_2 - s_1 + s_3 \right) - a \right]^2} \quad (5)$$

以 P^* 和 R^* 分别表示动坐标系 $O'X''Y''Z''$ 相对另一动坐标系 $O'X'Y'Z'$ 的位置和姿态, 则本机构的 P^* 及 R^* 可表示为^[4]

$$P^* = (x_p, 0, z_p)^T \quad (6)$$

$$R^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

而 C' 点在动坐标系 $O'X'Y'Z'$ 的坐标可表示为

$$C'_{O'} = R^* C'_{O'} + P^* \quad (8)$$

$C'_{O'} = (0, e, 0)^T$ 和 R^*, P^* 代入式(8)得 $C'_{O'} = (x_p, e\cos\beta, z_p + e\sin\beta)^T$ 。另根据 $C'_{O'} C'_{O'} = L_3$ 得 $(x_p - c - s_4)^2 + (e\cos\beta - d)^2 + (z_p + e\sin\beta)^2 = L_3^2$ (9)

将式(9)展开并求解得

$$2ed\cos\beta - 2ez_p\sin\beta = d^2 + (x_p - c - s_4)^2 + z_p^2 + e^2 - L_3^2$$

$$\text{即 } \beta = \arcsin\left[\frac{\omega_1}{\sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2}}\right] - \arcsin\left[\frac{\omega_3}{\sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2}}\right] \quad (10)$$

其中 $\omega_1 = 2ed$ $\omega_2 = 2ez_p$

$$\omega_3 = d^2 + (x_p - c - s_4)^2 + z_p^2 + e^2 - L_3^2$$

由式(1)、(4)、(5)及(10), 已知驱动副 A, E, B, C 的位移 s_1, s_2, s_3, s_4 , 可求动平台的位姿 x_p, y_p, z_p, β 。

2.2 混联机器人位置反解

由式(1)得

$$s_2 = y_p \quad (11)$$

由式(2)得

$$s_1 = \pm \sqrt{L_1^2 - z_p^2} + b_1 + x_p - a \quad (12)$$

由式(3)得

$$s_3 = \pm \sqrt{L_2^2 - z_p^2} - b_2 + x_p + a \quad (13)$$

由式(9)得

$$s_4 = \pm \sqrt{L_3^2 - (e\cos\beta - d)^2 - (z_p + e\sin\beta)^2} + x_p - c \quad (14)$$

由式(11)~(14), 已知动平台的位姿 x_p, y_p, z_p, β , 可求驱动副 A, E, B, C 的位移 s_1, s_2, s_3, s_4 。

3 混联机器人运动学分析

3.1 速度分析

对式(11)~(14)求导数得

$$s'_2 = y'_p \quad (15)$$

$$s'_1 = x'_p + \frac{z_p}{n_1} z'_p \quad (16)$$

$$s'_3 = x'_p + \frac{z_p}{n_2} z'_p \quad (17)$$

$$s'_4 = x'_p + m_1 z'_p + m_2 \beta' \quad (18)$$

其中 $n_1 = -a + x_p + b_1 - s_1$ $n_2 = x_p + a - b_2 - s_3$

$$m_1 = \frac{e\sin\beta + z_p}{x_p - c - s_4} \quad m_2 = \frac{e(z_p\cos\beta + d\sin\beta)}{x_p - c - s_4}$$

写成矩阵形式得机器人机构速度反解为

$$\begin{bmatrix} s'_1 \\ s'_2 \\ s'_3 \\ s'_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{z_p}{n_1} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \frac{z_p}{n_2} & 0 \\ 1 & 0 & m_1 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_p \\ y'_p \\ z'_p \\ \beta' \end{bmatrix} = G_H^q V_H \quad (19)$$

其中 G_H^q 为机器人机构的一阶运动影响系数的逆矩阵。

机器人机构的一阶运动影响系数为

$$G_q^H = \begin{bmatrix} \frac{n_1}{n_1 - n_2} & 0 & -\frac{n_2}{n_1 - n_2} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{n_1 n_2}{z_p(n_1 - n_2)} & 0 & \frac{n_1 n_2}{z_p(n_1 - n_2)} & 0 \\ \frac{n_1}{m_2(n_1 - n_2)} \left(\frac{m_1 n_2}{z_p} - 1 \right) & 0 & \frac{n_2}{m_2(n_1 - n_2)} \left(1 - \frac{m_1 n_1}{z_p} \right) & \frac{1}{m_2} \end{bmatrix}$$

机器人机构的速度为

$$V_H = [x'_p \quad y'_p \quad z'_p \quad \beta']^T = G_q^H q' = G_q^H [s'_1 \quad s'_2 \quad s'_3 \quad s'_4]^T \quad (20)$$

3.2 加速度分析

对式(11)~(14)求二阶导数并写成矩阵形式得

$$s''_2 = y''_p \quad (21)$$

$$s''_1 = V_H^T \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L_1^2}{n_1^3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} V_H + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \frac{z_p}{n_1} \\ 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x''_p \\ y''_p \\ z''_p \\ \beta'' \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$s''_3 = V_H^T \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L_2^2}{n_2^3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} V_H + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \frac{z_p}{n_2} \\ 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x''_p \\ y''_p \\ z''_p \\ \beta'' \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$s''_4 = \frac{1}{x_p - c - s_4} V_H^T \cdot$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_1^2 + 1 & m_1 m_2 + e\cos\beta \\ 0 & 0 & m_1 m_2 + e\cos\beta & m_2^2 + e(d\cos\beta - z_p\sin\beta) \end{bmatrix} \cdot$$

$$\mathbf{V}_H + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ m_1 \\ m_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x_p'' \\ y_p'' \\ z_p'' \\ \beta'' \end{bmatrix} \quad (24)$$

综合式(21)~(24)得机器人机构加速度反解的矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} s_1'' \\ s_2'' \\ s_3'' \\ s_4'' \end{bmatrix} = \mathbf{V}_H^T \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11} & \mathbf{H}_{12} & \mathbf{H}_{13} & \mathbf{H}_{14} \\ \mathbf{H}_{21} & \mathbf{H}_{22} & \mathbf{H}_{23} & \mathbf{H}_{24} \\ \mathbf{H}_{31} & \mathbf{H}_{32} & \mathbf{H}_{33} & \mathbf{H}_{34} \\ \mathbf{H}_{41} & \mathbf{H}_{42} & \mathbf{H}_{43} & \mathbf{H}_{44} \end{bmatrix} \mathbf{V}_H + \mathbf{G}_H^q \begin{bmatrix} x_p'' \\ y_p'' \\ z_p'' \\ \beta'' \end{bmatrix} \quad (25)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{11} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \mathbf{H}_{12} = \mathbf{H}_{21} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \mathbf{H}_{13} = \mathbf{H}_{31} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{H}_{14} = \mathbf{H}_{41} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \mathbf{H}_{22} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \mathbf{H}_{23} = \mathbf{H}_{32} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{H}_{24} = \mathbf{H}_{42} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \mathbf{H}_{33} &= \begin{bmatrix} \frac{L_1^2}{n_1^3} \\ 0 \\ \frac{L_2^2}{n_2^3} \\ \frac{m_1^2 + 1}{x_p - c - s_4} \end{bmatrix} & \mathbf{H}_{34} = \mathbf{H}_{43} &= \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{m_2 m_1 + e \cos \beta}{x_p - c - s_4} \end{bmatrix} & \mathbf{H}_{44} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{m_2^2 + e(d \cos \beta - z_p \sin \beta)}{x_p - c - s_4} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

对式(25)两边同乘 \mathbf{G}_H^q 得机器人机构加速度正解

$$\begin{bmatrix} x_p'' \\ y_p'' \\ z_p'' \\ \beta'' \end{bmatrix} = -[s_1' \quad s_2' \quad s_3' \quad s_4'] \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11} & \mathbf{H}_{12} & \mathbf{H}_{13} & \mathbf{H}_{14} \\ \mathbf{H}_{21} & \mathbf{H}_{22} & \mathbf{H}_{23} & \mathbf{H}_{24} \\ \mathbf{H}_{31} & \mathbf{H}_{32} & \mathbf{H}_{33} & \mathbf{H}_{34} \\ \mathbf{H}_{41} & \mathbf{H}_{42} & \mathbf{H}_{43} & \mathbf{H}_{44} \end{bmatrix} \mathbf{G}_q^H \begin{bmatrix} s_1' \\ s_2' \\ s_3' \\ s_4' \end{bmatrix} + \mathbf{G}_q^H \begin{bmatrix} s_1'' \\ s_2'' \\ s_3'' \\ s_4'' \end{bmatrix} \quad (26)$$

其中 $\mathbf{H}_q^H = - \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11} & \mathbf{H}_{12} & \mathbf{H}_{13} & \mathbf{H}_{14} \\ \mathbf{H}_{21} & \mathbf{H}_{22} & \mathbf{H}_{23} & \mathbf{H}_{24} \\ \mathbf{H}_{31} & \mathbf{H}_{32} & \mathbf{H}_{33} & \mathbf{H}_{34} \\ \mathbf{H}_{41} & \mathbf{H}_{42} & \mathbf{H}_{43} & \mathbf{H}_{44} \end{bmatrix} \mathbf{G}_q^H$

4 辅助支链运动学分析

辅助支链 $FF_1F_2F_3F'$ 由运动副 RUPUR 组成。即辅助支链与虚拟固定平台和动平台均由转动副相连,中间轴为两虎克铰与一伸缩轴。当中间轴(伸缩轴)两端的叉面共面时,根据文献[5],该辅助支链的输入轴转角 θ 与输出轴转角 γ 之间的关系为

$$\tan \gamma \cos \varphi_1 = \tan \theta \cos \varphi_2 \quad (27)$$

式中 φ_1, φ_2 分别为轴 FF_1 与中间轴 $F_1F_2F_3$, 中间轴 $F_1F_2F_3$ 与轴 F_3F' 之间的夹角,其值为

$$\begin{aligned} \cos \varphi_1 &= \frac{z_p + ee' \sin \beta}{\sqrt{x_p^2 + (ee' \cos \beta - ee)^2 + (z_p + ee' \sin \beta)^2}} \\ \cos \varphi_2 &= \frac{z_p \cos \beta + ee' \sin \beta}{\sqrt{x_p^2 + (ee' \cos \beta - ee)^2 + (z_p + ee' \sin \beta)^2}} \end{aligned}$$

将式(27)两边对时间求一阶及二阶导数得输入轴角速度 θ' 与输出轴角速度 γ' 、输入轴角加速度 θ'' 与输出轴角加速度 γ'' 之间的关系。

需要特殊说明的是:当动平台平行于虚拟固定平台时,输入轴、中间轴(伸缩轴)及输出轴在同一平面内,同时,输入轴与中间轴的夹角 φ_1 等于中间轴与输出轴转角 φ_2 ,此时,输出轴的角速度和角加速度等于输入轴的角速度和角加速度。

5 混联机器人动态仿真

若机器人的结构参数为: $a = 100 \text{ mm}, b_1 = 150.25 \text{ mm}, b_2 = 150.25 \text{ mm}, c = 103.08 \text{ mm}, d = 200 \text{ mm}, e = 150 \text{ mm}, ee = 100 \text{ mm}, ee' = 80 \text{ mm}$,各杆件尺寸为: $L_1 = 255 \text{ mm}, L_2 = 255 \text{ mm}, L_3 = 275 \text{ mm}$ 。

选择动平台的运动规律为: $x_p = -10t, y_p = 10t, z_p = 250 + 2 \sin \pi t, \beta = 5 \sin \pi t$,辅助支链的输入轴运动规律为: $\gamma = 120 \sin 2t$ 。利用 ADAMS 软件经过 5 s 运动学仿真[6]得到图 4 所示驱动副 A、B、C、E 运动曲线及图 5 所示辅助支链输出轴的角速度和角加速度曲线。其与用本文公式计算结果一致。

6 结束语

综合串联机构和并联机构的优点,设计了一种新型混联机器人机构。该机器人动平台自由度有三平移一转动,同时,在并联机构动平台和虚拟固定平台间增加一辅助支链。该辅助支链具有一个独立转动的自由度。分析了该机器人的运动学特征,求出该机器人位置正反解析解,利用运动影响系数对该机器人速度和加速度进行了系统研究,并利用 ADAMS 软件进行了动态仿真,仿真结果验证了理

为机器人机构的二阶运动影响系数。

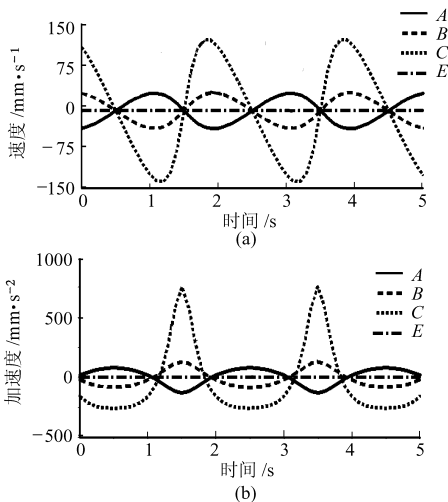


图4 驱动副 A、B、C、E 运动学曲线

Fig. 4 Kinematics diagrams of driving pairs A, B, C and E
(a) 速度 (b) 加速度

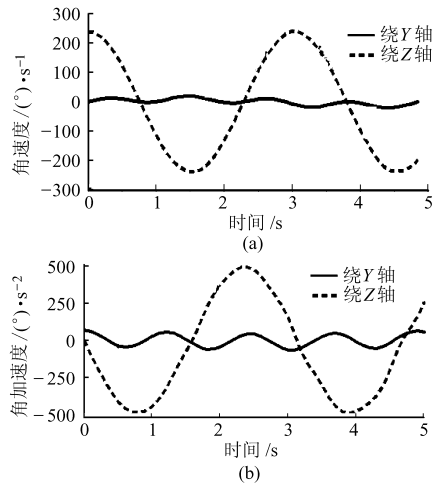


图5 辅助支链运动学曲线

Fig. 5 Kinematics diagrams of subsidiary chain
(a) 角速度 (b) 角加速度

论推导的正确性。与具有同样运动特性的并联机构相比,该机器人的运动学正反解求解容易,且具有显

形形式,便于实现实时控制,工作空间大,转动灵活,动平台动力性能好。

参 考 文 献

- 1 刘辛军,汪劲松,李剑锋,等. 一种新型空间3自由度并联机构的正反解及工作空间分析[J]. 机械工程学报,2001,37(10):36~39.
- 2 杨廷力. 机器人机构拓扑结构学[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- 3 林清安. Pro/ENGINEER wildfire2.0 零件设计基础篇[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- 4 沈守范,张纪元,王金保. 机构学的数学工具[M]. 上海:上海交通大学出版社,1999.
- 5 刘天祥,张云文,魏文军. 中间轴两端叉面夹角对万向铰链传动比的影响[J]. 农机化研究,2004(6):83~85.
- 6 王国强,张进平,马若丁. 虚拟样机技术及其在ADAMS上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,2002.

(上接第98页)

控系统的指令下自动地实时完成水果的高速分级卸料,且整个卸料过程对水果没有明显的碰撞和冲击。

(2) 将水果分级卸料装置与水果输送装置合为一体,可简化水果机器视觉自动分选机的整体结构。

参 考 文 献

- 1 果树栽培材料公司. 适于按预定标准分选并输送特别是水果物品的装置: 中国,95103294.1[P]. 1996-04-17.
- 2 应义斌,饶秀勤,黄永林,等. 水果高速实时分级机构控制系统[J]. 农业机械学报,2004,35(5):117~121.
- 3 Tao Yang. Defective object inspection and removal systems and methods for identifying and removing defective objects: United States Patent, 5960098[P]. 1999.
- 4 籍保平,孟超英,李琼飞,等. 双行蜂腰形滚子式水果输送装置: 中国,200310117253.9[P]. 2005-06-15.
- 5 籍保平,庆兆■,李琼飞,等. 带有气动分级机构的水果输送装置: 中国,200310115382.4[P]. 2005-05-25.
- 6 Leemans V, Destain M F. A real-time grading method of apples based on features extracted from defects[J]. Journal of Food Engineering,2004,61(1):83~89.