

# 立体料仓预设防撞点后的 6R 机器人运动分析

刘杰<sup>1</sup>, 卞新宇<sup>2</sup>(1. 南京工业职业技术大学 机械工程学院, 江苏 南京 210023;  
2. 桂林电子科技大学 海洋工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:**针对 6R 关节型机器人在上/下料过程中与矩阵式立体料仓存在的偶发性碰撞问题,对 6R 关节型机器人与矩阵式料仓交互运动过程进行建模,在立体料仓前添设矩阵式防撞点,分析 6R 关节型机器人的姿态及运动。基于标准 D-H 法和 Robot Toolbox 平台对研究模型做正逆运动学仿真来验证正确性;基于拉格朗日方程建立动力学模型,验证机器人末端操作器在矩阵式立体料仓的随机坐标点处连续运动的位姿正确性,求解连续过程中有/无防撞点的力矩随时间变化的动态性能,对比分析仿真结果。仿真结果表明:采用本文方法可使机器人运动精度达到 0.039 mm,运行平稳。

**关键词:**6R 关节型机器人;矩阵式立体料仓;防撞点;正逆运动学;拉格朗日方程;动力学模型  
**中图分类号:**TP242.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)03-0178-05

## Motion Analysis of 6R Robot Based on Preset Anti-collision Point of Stereo Silo

LIU Jie<sup>1</sup>, BIAN Xinyu<sup>2</sup>(1. College of Mechanical Engineering, Nanjing Vocational University of Industry Technology, Nanjing 210023, China;  
2. Ocean Engineering Institut, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** To resolve the problem of occasional collision between 6R articulated robot and matrix silo in loading/unloading process, the interactive motion process of 6R articulated robot and matrix silo was modeled. Matrix anti-collision points were installed in front of the stereo silo, and the posture and motion of the 6R articulated robot were analyzed. The forward and inverse kinematics simulation of the research model was carried out based on the standard D-H method and Robot Toolbox platform to verify its correctness. A dynamic model was established based on the Lagrange equation to verify the correctness of the position and pose of the end-manipulator in continuous motion at the random coordinate points of the matrix bin. The dynamic performance of the torque with or without the anti-collision point changing with time in the continuous process was solved, and comparison and analysis were made on the simulation results, which show that the motion precision of the robot can reach 0.039 mm with smooth running.

**Keywords:** 6R articulated robot; matrix three-D bin; anti-collision point; forward and inverse kinematics; Lagrangian equation; dynamic model

## 0 引言

在智能化大环境下,服务于机械领域的工业机器人迅速崛起,并且对工业机器人自动化程度和精准度的要求也越来越高<sup>[1]</sup>。目前在工厂车间应用广泛的是 6R 关节型机器人,可与矩阵式立体料仓配合进行上、下料作业。在实际运行过程中,机器人的末端操作器与矩阵式立体料仓的框架存在偶发性碰撞,会导致所夹持的产品掉落或夹具自身受损甚至脱离机器人本体。目前对此现象研究甚少<sup>[2]</sup>,同时在机器人技术实训过程中未做分析。

为避免这一现象的发生,本项目在 6R 关节型机器人的搬运路径中加入防撞点作为中间过渡点,建立机器人与矩阵式料仓交互运动模型。基于 Robot Toolbox 插件分别采用 D-H 参数法<sup>[3]</sup>和拉格朗日方程<sup>[4]</sup>,对该 6 自由度机器人做运动及动力学仿真并验证其正确性。然后基于已

设定的路径点对机器人进行动力学仿真,得到有、无添加防撞点的力矩随时间变化的动态性能,并进行对比分析。

## 1 运动学仿真分析

分别对研究模型做正、逆运动学仿真,如图 1 所示。机器人连杆主要参数见表 1。



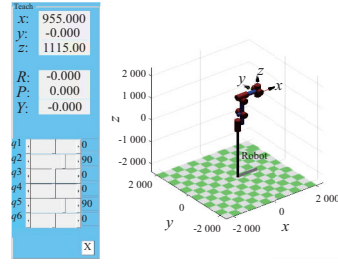
图 1 机器人本体模型

**基金项目:**广西科技基地和人才专项(2018AD19078);南京工业职业技术大学科研基金项目(YK20-01-02)

**第一作者简介:**刘杰(1988—),男,讲师,博士,研究方向为机械设计与智能制造。

表 1 机器人连杆参数

$\theta_i$	$d_i/\text{mm}$	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	$a_{i-1}/\text{mm}$	运动范围/ $(^{\circ})$
$\theta_1$	230	90	200	$[-170, 170]$
$\theta_2$	0	0	630	$[-165, 80]$
$\theta_3$	0	90	150	$[-85, 140]$
$\theta_4$	755	-90	0	$[-180, 180]$
$\theta_5$	0	90	0	$[-120, 120]$
$\theta_6$	30	0	0	$[-360, 360]$



(b) 机器人初始状态仿真结果

图 3 验证结果

### 1.1 连杆坐标系建立

在进行运动学研究前先对研究本体的各关节建立 D-H 参数坐标系,如图 2 所示。

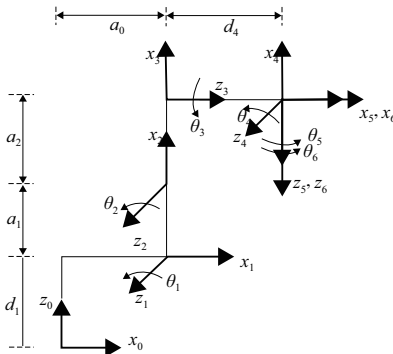


图 2 HSR-JR612 机器人连杆坐标系

由标准 D-H 参数法定义变换矩阵  $A_i$  的特征参数,通过齐次变换得到相邻杆的相对关系:

$$A_i = \begin{bmatrix} c_i & -s_i c \alpha_{i-1} & s_i s \alpha_{i-1} & a_{i-1} c_i \\ s_i & c_i c \alpha_{i-1} & -c_i s \alpha_{i-1} & a_{i-1} s_i \\ 0 & s \alpha_{i-1} & c \alpha_{i-1} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $c_i = \cos \theta_i$ ;  $s_i = \sin \theta_i$ ;  $c \alpha_{i-1} = \cos \alpha_{i-1}$ ;  $s \alpha_{i-1} = \sin \alpha_{i-1}$ 。

### 1.2 正运动学

#### 1) 运动学正解

基于表 1 中的各连杆参数和式(1),该机械臂的总位姿可表述为

$$T_6^0 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 \quad (2)$$

#### 2) 验证运动正确性

为保证研究结果的正确性,需对上述结果进行验证。将机器人初始状态下的各参数值代入式(1)与式(2),借助 Robotics Toolbox 进行仿真,可得到初始位姿以及末端操作器的空间位置坐标,如图 3 所示。

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 955 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1115 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(a) 总变换矩阵计算结果

由图 3 可知,仿真结果与矩阵计算结果相符,说明运动学正解结果准确无误,可用于后续计算。

### 1.3 逆运动学

#### 1) 运动学逆解

已知矢量  $n$ 、 $o$ 、 $a$  和  $p$ ,通过一系列逆变换可求出各关节变量:

$$\theta_1 = \text{atan2}[\pm(d_6 a_y - p_y, d_6 a_x - p_x)] \quad (3)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(eh - fg, eg - fh) \quad (4)$$

$$\theta_3 = \varphi - \arctan \left( \frac{\frac{h^2 + g^2 - a_1^2 - a_2^2 - d_4^2}{2a_1 \sqrt{a_2^2 + d_4^2}}}{\pm \sqrt{1 - \left( \frac{h^2 + g^2 - a_1^2 - a_2^2 - d_4^2}{2a_1 \sqrt{a_2^2 + d_4^2}} \right)^2}} \right) \quad (5)$$

$$\theta_4 = \arctan \left( \frac{a_2 c_2 - a_x c_1 s_2 - a_y s_1 s_2}{a_2 s_2 + a_x c_1 c_2 + a_y s_1 c_2} \right) \quad (6)$$

$$\theta_5 = \arccos(a_y c_1 - a_x s_2) \quad (7)$$

$$\theta_6 = \text{asin2}(o_x s_1 - o_y c_1, -s_2) \quad (8)$$

式中:  $e = a_2 c_3 + d_4 s_3 + a_1$ ;  $f = a_2 s_3 - d_4 c_3$ ;  $\varphi = \text{atan2}(a_2, d_4)$ ;  $h = p_z - d_6 a_z - d_1$ ;  $g = c_1 + p_x s_1 - d_6 a_x c_1 - d_6 a_y s_1$ 。

#### 2) 验证位姿正确性

基于交互模型上、下料的工作任务,机器人与矩阵式立体料仓间的空间位置关系如图 4 所示。矩阵式立体料仓的仓位点呈  $4 \times 4$  矩阵分布,可放置毛坯料、合格产品、不合格产品等加工前后的物料。为便于分析计算,对矩阵式立体料仓的仓位点进行编号,用  $A_{ij}(i, j \in \{1, 2, 3, 4\})$  表示。随机选取 3 个仓位点进行计算,用实心圆表示,未参与计算的仓位点用空心圆表示,如图 5 所示,将选取仓位点的位置坐标列于表 2。

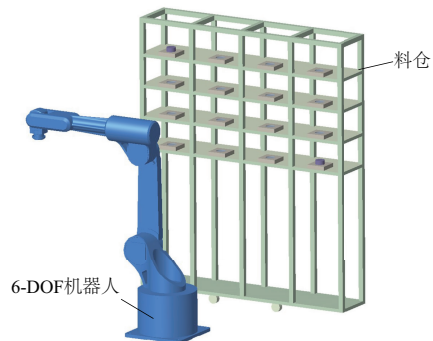


图 4 机器人与料仓相对位置

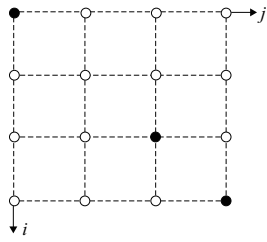


图 5 目标位置网格示意图

表 2 物料点位置坐标 单位: mm

目标点	x	y	z
A <sub>11</sub>	532.5	-1 045.0	1 127.5
A <sub>33</sub>	-177.5	-1 045.0	727.5
A <sub>44</sub>	-532.5	-1 045.0	527.5

通过表 1 中的关节参数值对模型中的关节运动进行约束,将终点依次定义为图 5 所示的目标位置,即可得到 A<sub>11</sub>、A<sub>33</sub>、A<sub>44</sub> 的位姿矩阵:

$$A_{11} = \begin{bmatrix} -0.295\ 0 & -0.955\ 5 & 0 & 532.500\ 0 \\ 0.955\ 5 & -0.295\ 0 & 0 & -1\ 045.000\ 0 \\ 0 & 0 & 1.000\ 0 & 1\ 127.500\ 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000\ 0 \end{bmatrix};$$

$$A_{33} = \begin{bmatrix} -0.977\ 6 & -0.210\ 6 & 0 & -177.500\ 0 \\ 0.210\ 6 & -0.977\ 6 & 0 & -1\ 045.000\ 0 \\ 0 & 0 & 1.000\ 0 & 727.500\ 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000\ 0 \end{bmatrix};$$

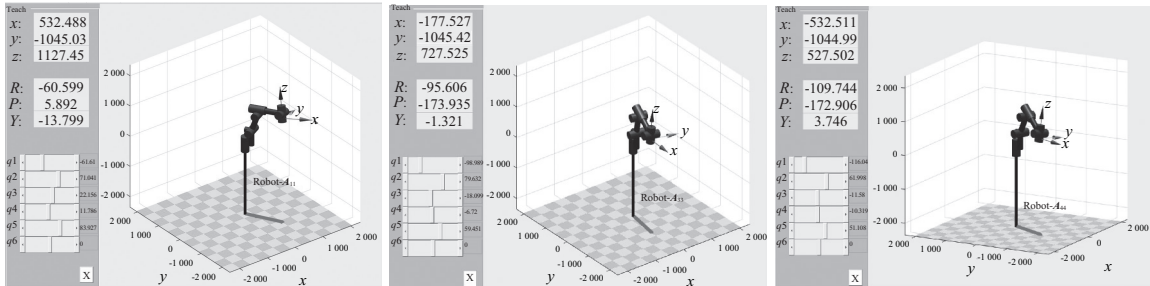
$$A_{44} = \begin{bmatrix} -0.296\ 0 & 0.955\ 2 & 0 & -532.500\ 0 \\ 0.955\ 2 & -0.296\ 0 & 0 & -1\ 045.000\ 0 \\ 0 & 0 & 1.000\ 0 & 527.500\ 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000\ 0 \end{bmatrix}。$$

将上述位姿矩阵代入至式(3)~式(8)中,求解出不同目标位置下各关节角度值,从多个解中选取满足关节角度范围中的一组(若要得到最优解,需添加时间、能耗等约束),如表 3 所示,并基于 Matlab 平台得到以下仿真位姿,以验证运动学逆解的正确性,如图 6 所示。

将图 6 中显示的 x、y、z 的数值与表 2 的数据进行对比分析,精准度在 ±0.039 mm 之间,说明运动学逆解结果可靠准确,同时反映出交互运动模型建立的合理性。

表 3 选取的关节角度值 单位:(°)

关节角度	A <sub>11</sub>	A <sub>33</sub>	A <sub>44</sub>
θ <sub>1</sub>	-62.997	-99.637	-117.004
θ <sub>2</sub>	70.989	73.808	55.222
θ <sub>3</sub>	12.009	-22.300	-13.613
θ <sub>4</sub>	0	0	0
θ <sub>5</sub>	82.998	51.508	41.609
θ <sub>6</sub>	90	90	90



(a) 取料点 A<sub>11</sub> 的位姿

(b) 取料点 A<sub>33</sub> 的位姿

(c) 取料点 A<sub>44</sub> 的位姿

图 6 机器人运动与姿态

## 2 动力学求解

### 2.1 拉格朗日方程

拉格朗日力学方程<sup>[5]</sup>如下:

$$L = K - P \quad (9)$$

式中:L 为拉格朗日函数;K 为系统总动能;P 为系统总位能。

其中,任一连杆 i 上某个选定点的动能与位能表示为:

$$K_i = \int_i dK_i = \frac{1}{2} T_{\text{race}} \left[ \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \frac{\partial T_i}{\partial \theta_j} \mathbf{I}_i \left( \frac{\partial T_i}{\partial \theta_k} \right)^T \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k \right] \quad (10)$$

$$P_i = \int_i dP_i = -\mathbf{g}^T T_i \int_i dm = -m_i \mathbf{g}^T T_i^i \mathbf{r}_i \quad (11)$$

式中: $\mathbf{I}_i$  表示伪惯量矩阵,与转动惯量( $I_{xx}$ 、 $I_{yy}$ 、 $I_{zz}$ )、矢量积( $I_{xy}$ 、 $I_{xz}$ 、 $I_{yz}$ )、连杆 i 的质量( $m_i$ )以及质心坐标( $\bar{x}_i$ 、 $\bar{y}_i$ 、 $\bar{z}_i$ )有关;连杆 i 相对前关节的质心位置矢量 ${}^i \mathbf{r}_i = (\bar{x}_i$ ,

$\bar{y}_i, \bar{z}_i)$ ;重力加速度矢量可表示为  $\mathbf{g}^T = [g_x, g_y, g_z, 1]$ 。

### 2.2 求解动力学方程

联立式(9)~式(11)可得拉格朗日函数变形表达式,对其关节速度求导后,可得动力学方程,经化简表示为

$$\tau_i = \sum_{j=1}^6 D_{ij} \dot{\theta}_j + \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^6 D_{ijk} \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k + D_i \quad (12)$$

式中惯量矩阵  $D_{ij}$ 、向心力矩阵  $D_{ijk}$  以及重力项矩阵  $D_i$  的表达式分别为:

$$\begin{cases} D_{ij} = \sum_{p=\max(i,j)}^6 T_{\text{race}} \left( \frac{\partial \mathbf{T}_p}{\partial \theta_j} \mathbf{I}_p \frac{\partial \mathbf{T}_p^T}{\partial \theta_i} \right) \\ D_{ijk} = \sum_{p=\max(i,j,k)}^6 T_{\text{race}} \left( \frac{\partial^2 \mathbf{T}_p}{\partial \theta_j \partial \theta_k} \mathbf{I}_p \frac{\partial \mathbf{T}_p^T}{\partial \theta_i} \right) \\ D_i = \sum_{p=i}^6 -m_p \mathbf{g}^T \frac{\partial \mathbf{T}_p}{\partial \theta_i} {}^p \mathbf{r}_p \end{cases} \quad (13)$$

### 2.3 验证正确性

利用反对称矩阵<sup>[6-7]</sup>的性质,来验证动力学方程计算结果的正确性。现将反对称矩阵  $N$  定义如下:

$$N = \dot{D}_{ij} - 2D_{ijk} = \begin{bmatrix} n_{11} & \cdots & n_{1j} \\ \vdots & & \vdots \\ n_{i1} & \cdots & n_{ij} \end{bmatrix} \quad (14)$$

根据反对称矩阵的性质可知,  $n_{ij} = -n_{ji} (i, j = 1, 2, \dots)$ , 即  $N(1,2) + N(2,1) = 0$ 。通过 Matlab 平台先将惯量矩阵  $D_{ij}$  对关节速度进行求导,再将计算后的矩阵  $\dot{D}_{ij}$  代入式(14)中进行计算。根据计算结果可知

$$N(1,2) + N(2,1) = 0 \quad (15)$$

由此可验证所求的动力学方程正确无误。

## 3 交互运动过程仿真分析

### 3.1 防撞点的添加

基于智能制造生产线的研究背景,6R 关节型机器人需到达矩阵式立体料仓执行上、下料的任务。由于空间结构的约束,机器人在运动至物料点时末端操作器可能会触碰到料仓,导致机器人产生震动,从而对整个运行过程产生恶劣影响。为避免此现象的发生,在各仓位的位置添加防撞碰撞的路径点。此时各防撞点与料仓的位置关系如图 7 所示。

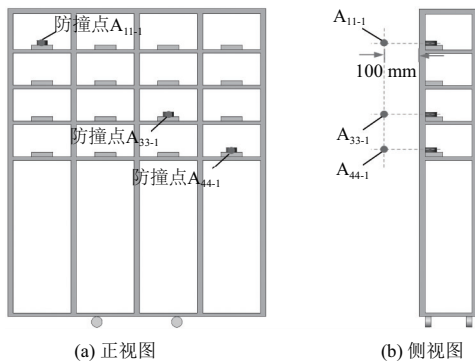


图 7 防撞点与料仓相对位置示意图

整个工艺流程大致分为取生料、放置生料、生料加工、取出加工后的物料以及将物料置于料仓,具体流程如图 8 所示。

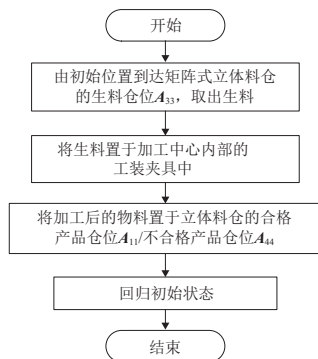


图 8 工艺流程图

将 6R 关节型机器人的上、下料过程分段做动力学分析:初始位置至料仓的生料仓位  $A_{33}$  取料、由  $A_{33}$  至加工中心、加工中心分别至料仓的合格产品仓位  $A_{11}$  和不合格产品仓位  $A_{44}$ 、由合格产品仓位  $A_{11}$  和不合格产品仓位  $A_{44}$  回归至初始位置。根据具体应用场景的实际数据和求解的关节表达式,可得出不同目标和防撞点 ( $A_{11-1}$ 、 $A_{33-1}$ 、 $A_{44-1}$ ) 对应的末端操作器的位置坐标以及各关节角度值,如表 4 和表 5 所示。

表 4 末端操作器的位置坐标 单位:mm

名称	位置坐标		
	x	y	z
初始位置	955.0	0	1 115.0
加工中心	1 450.0	0	842.0
$A_{11-1}$	532.5	-945.0	727.5
$A_{33-1}$	-177.5	-945.0	1 127.5
$A_{44-1}$	-532.5	-945.0	527.5

表 5 各个关节角度值 单位:(°)

关节 i	初始位置	加工中心	回归初始位置	防撞点		
				$A_{11-1}$	$A_{33-1}$	$A_{44-1}$
1	0	0	0	-60.602	-100.640	-119.399
2	90	-7.465	90	79.423	82.036	61.513
3	0	121.902	0	1.816	-32.120	-23.377
4	0	0	0	0	0	0
5	90	114.437	90	81.239	49.916	38.136
6	0	90.000	0	90.000	90.000	90.000

则计算出初始位置、加工中心、 $A_{11-1}$ 、 $A_{33-1}$  和  $A_{44-1}$  的位置矩阵  $T_0$ 、 $T_1$ 、 $T_{A_{11-1}}$ 、 $T_{A_{33-1}}$ 、 $T_{A_{44-1}}$  为:

$$T_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 955 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 115 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} -0.448 1 & -0.894 0 & 0 & 1 450.000 0 \\ 0.894 0 & -0.448 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.000 0 & 842.000 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000 0 \end{bmatrix},$$

$$T_{A_{11-1}} = \begin{bmatrix} -0.432 4 & -0.901 7 & 0 & 532.500 0 \\ -0.901 7 & -0.432 4 & 0 & -945.000 0 \\ 0 & 0 & 1.000 0 & 1 127.500 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000 0 \end{bmatrix},$$

$$T_{A_{33-1}} = \begin{bmatrix} -0.341 8 & -0.937 4 & 0 & -177.500 0 \\ 0.937 4 & -0.341 8 & 0 & -945.000 0 \\ 0 & 0 & 1.000 0 & 727.500 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000 0 \end{bmatrix},$$

$$T_{A_{44-1}} = \begin{bmatrix} -0.431 5 & -0.902 1 & 0 & -532.500 0 \\ -0.902 1 & -0.431 5 & 0 & -945.000 0 \\ 0 & 0 & 1.000 0 & 527.500 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000 0 \end{bmatrix}.$$

通过 Matlab 平台导出 6R 关节型机器人在各路径点

的姿态,仓位  $A_{33}$ 、 $A_{11}$  和  $A_{44}$  的机器人姿态已在图 6 中给出,另外两个工艺流程必经路径点的姿态如图 9 所示。

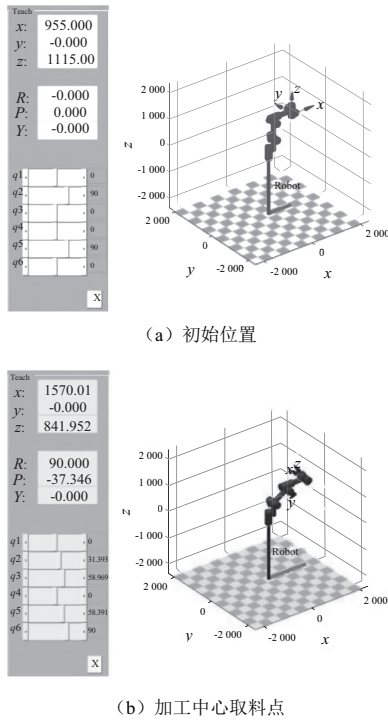


图 9 机器人位姿

由图 6 和图 9 的机器人位姿以及末端操作器的位置坐标  $(x, y, z)$  可知,6R 关节型机器人的各关节角度值以及位置矩阵的计算结果是符合实际要求的。

### 3.2 求解关节力矩

此时可利用表中参数计算出不同时间下的各关节力矩,基于 Matlab 平台绘制出各关节在不同运动阶段的力矩时间曲线图。由于篇幅原因,仅展示工艺流程中的个别路径。未添加防撞点的力矩曲线图如图 10 所示,添加防撞点的力矩曲线图如图 11 所示。

由图 10 可知:在不同的运动阶段,关节 1 与关节 2 的力矩变化曲线较为顺滑,运行过程中未发生突变现象,但前后力矩值波动较大;关节 3 在整个运行过程的力矩变化趋势较为顺滑,力矩值波动较小,无明显突变;关节 4、关节 5 和关节 6 的力矩值在整个作业过程均接近于 0,无明显波动,且无突变现象。

由图 11 可得:添加防撞点后,关节 1 与关节 2 对应的力矩曲线较为顺滑,且前后波动值较小;关节 3 的力矩值前后波动值几乎为 0,整体曲线仍无突变;关节 4、关节 5 和关节 6 的力矩值仍近似于 0。

上述结果说明,添加防撞点后,6R 关节型机器人各关节力矩的动态变化趋势更为稳定,可有效地避免机械碰撞的发生,符合实际要求。

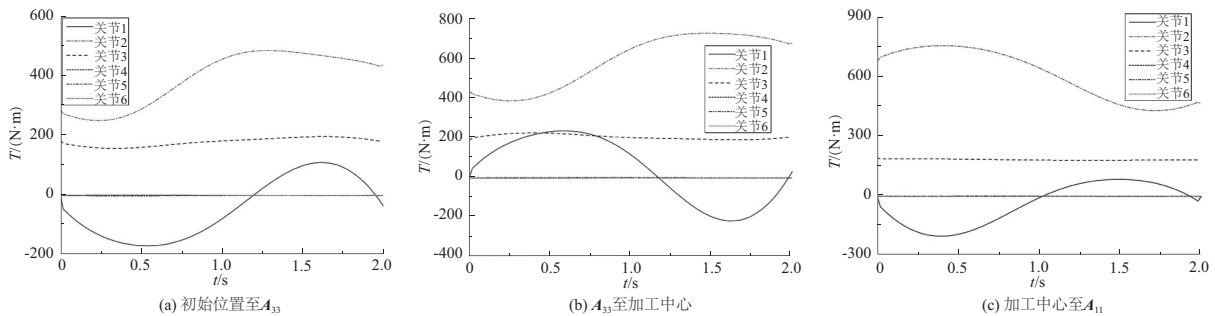


图 10 未添加防撞点的关节力矩

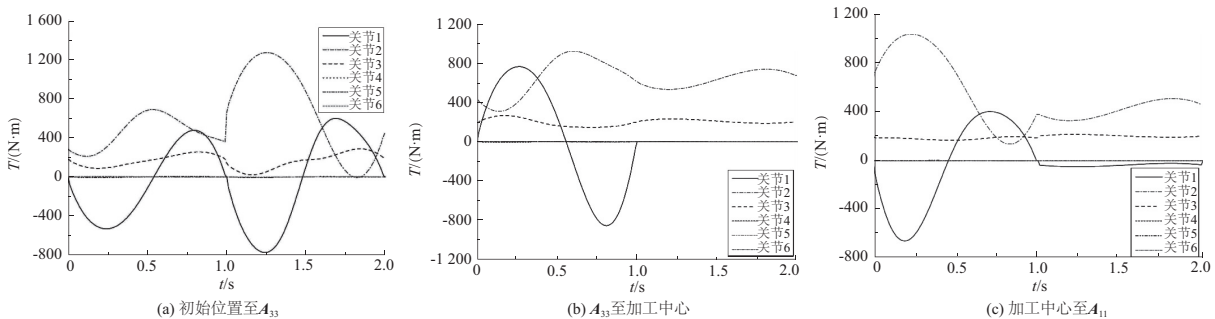


图 11 添加防撞点的关节力矩

## 4 结语

1) 基于标准 D-H 参数法建立 6R 关节型机器人的连杆坐标系,对研究模型进行运动学建模,计算结果的精度

为  $\pm 0.039$  mm,满足高精度的要求。

2) 建立 6R 关节型机器人与矩阵式料仓交互运动模型,实验结果表明,添加的防撞点有效地避免了机器人末端操作器与矩阵式立体料仓之间碰撞的发生,达到了预期的效果。

(下转第 212 页)

燃油的蒸发率以  $\lambda_{eva}$  表示,则其与气相燃油的  $C_F$  有以下关系:

$$C_F \propto \lambda_{eva} \quad (6)$$

将上式代入式(2)中,则有

$$\omega \propto A' P' \lambda_{eva} e^{\frac{E_a}{RT}} \quad (7)$$

根据式(7)可知,在相同进口温度、油气比条件下时,随进口压力  $P$  减小,  $A'$ 、 $E_a$  保持不变。  $\lambda_{eva}$  减小,化学反应速率降低,燃烧室内单位体积的放热量减小<sup>[17]</sup>,化学反应时间增加,进而导致所需的点火油气比增加,燃烧室的点火性能变差。

## 4 结语

本文结合试验与数值模拟完成了不同进口压力条件下折流燃烧室的点火性能研究,详细分析了造成进口压力与点火性能之间的关系,得到如下结论。

1) 随压力的降低,折流燃烧室的点火油气比逐渐增加,点火性能变差。

2) 在相同进口马赫数以及温度的情况下,不同进口压力下折流燃烧室内部流场结构以及速度大小变化较小,二者不是造成点火性能变差的原因。燃烧的化学反应速率减慢、燃油在燃烧室内雾化性能变差以及蒸发率降低,需要更高的油气比提供更多的点火能量来实现点火,这是造成点火性能变差的主要原因。

### 参考文献:

- [1] 胡正义. 航空发动机设计手册第九分册:主燃烧室. [D]. 北京:航空工业出版社,2000.
- [2] CHEN J, LI J Z, YUAN L. Effects of inlet pressure on ignition of spray combustion [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2018, 2018; 1-13.
- [3] JIANG P, HE X M. Ignition characteristics of a novel mixed-flow trapped vortex combustor for turboshaft engine [J]. Fuel, 2020,

261:116430.

- [4] 董康,何小明,韩启祥,等. 催化点火器高空点火性能的实验研究[J]. 航空动力学报,1997,12:35-37,107.
- [5] 吴泽俊,何小民,洪亮,等. 采用离心喷嘴的单凹腔驻涡燃烧室点火与贫熄特性[J]. 推进技术,2015,36(4):601-607.
- [6] 宫冠吉. 低压亚超混合层燃油雾化特性数值研究[J]. 机械制造与自动化,2020,49(3):67-70.
- [7] 肖新鹰,王东明,王洪卓. 预燃式火焰稳定器高空低压试验研究[J]. 航空发动机,1999,25(4):22-30.
- [8] 李凡玉,李军,江勇,等. 改善发动机高原地面起动性能的实验研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2012,13(5):25-29.
- [9] 杨谦,林宇震,代威,等. 主燃孔轴向位置对低压点火性能的影响[J]. 航空动力学报,2015,30(5):1057-1066.
- [10] LEFEBVRE A H, WHITE LAW J H. Gas turbine combustion [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1984, 5(4):228.
- [11] 黄亚坤,何小民,朱焕宇,等. 进口速度分布对钝体稳定器贫油点熄火性能的影响研究[J]. 推进技术,2020,41(8):1814-1822.
- [12] 肖保国,杨顺华,赵慧勇,等. RP-3 航空煤油燃烧的详细和简化化学动力学模型[J]. 航空动力学报,2010,25(9):1948-1955.
- [13] CHEN B H, LIU J Z, YAO F, et al. Ignition delay characteristics of RP-3 under ultra-low pressure (0.01 ~ 0.1 MPa) [J]. Combustion and Flame, 2019, 210:126-133.
- [14] 徐薇,陈华. 不同海拔高度大气压和氧含压的变化与对比探讨[J]. 西藏科技,2018(3):59-61.
- [15] 甘晓华. 航空燃气轮机燃油喷嘴技术[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [16] 徐圃青,王家骅,徐圃青. 低压下直流式喷嘴雾化特性试验研究[J]. 航空动力学报,1996,11:51-54.
- [17] 李庆. 基于凹腔火焰稳定器的亚燃冲压发动机燃烧室点火过程研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2010.

收稿日期:2021-03-01

(上接第 182 页)

### 参考文献:

- [1] 孙恺廷,朱隽垚,于存贵,等. 工业机器人三维虚拟监控系统的设计与实现[J]. 机械制造与自动化,2020,49(5):154-156,210.
- [2] 孙晓军,宋代平,王薪宇. 机器人碰撞观测器设计与实现[J]. 机械科学与技术,2020,39(10):1483-1488.
- [3] ZHAO R F, ZHANG Z, CUI J Q. The kinematics modeling and simulation of a mechanical arm in nuclear industry with postpositional drive[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 496/497/498/499/500:754-759.
- [4] 魏丽君,吴海波,刘海龙,等. 基于 D-H 算法的移动机械臂正

运动学研究[J]. 计量与测试技术,2020,47(10):1-5.

- [5] RUN X. The dynamics of torque and force on hammer with six freedoms by lagrange equation in robotic arm [J]. Social Science Learning Education Journal, 2020, 5(8):301-309.
- [6] KHODAEI H, RASSIAS T M. Set-valued dynamics related to generalized Euler-Lagrange functional equations [J]. Journal of Fixed Point Theory and Applications, 2018, 20(1):1-8.
- [7] 袁荣. 反对称实矩阵的性质定理及推广[J]. 吉林教育, 2017(42):16.

收稿日期:2021-02-01