

# IRS-300 六轴机器人运动学建模与参数仿真分析

陈博,杨健,闫恒,赵琳

(兰州理工大学 机电工程学院,甘肃 兰州 730000)

**摘要:**为了研究机器人正逆运动学的差异性和各关节在运动过程中的变化情况,对 IRS-300 六自由度关节式机器人运用经典 D-H 法进行运动学分析,得出正逆运动学解析式,借助 MATLAB 软件进行仿真计算,通过计算结果证明该差异的存在。结合机器人三维仿真模型,按照末端执行器位姿要求对机器人进行仿真,得出该机器人的路径信息和各个关节的角度、角速度和角加速度的变化曲线。结果表明:该机器人结构参数可以高效地表达期望位姿,对机器人轨迹规划具有实际指导意义。

**关键词:**机器人;运动学;计算机仿真

**中图分类号:**TP242;TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)05-0088-03

## Kinematics Modeling and Parameter Simulation Analysis of IRS-300 Six Axis Robot

CHEN Bo, YANG Jian, YAN Heng, ZHAO Lin

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** To study the difference of forward and inverse kinematics of the robot and the change of each joint in the motion process, the kinematics analysis of IRS-300 6-DOF articulated robot was carried out by classical D-H method, and the forward and inverse kinematics analytical formula was obtained. The simulation calculation was carried out with MATLAB software, and the existence of the difference was proved by the calculation results. Combined with the three-dimensional simulation model of the robot, the robot was simulated according to the pose requirements of the end effector, and the path information of the robot and the change curves of the angle, angular velocity and angular acceleration of each joint were obtained. The results show that the structural parameters of the robot can express the desired position and pose efficiently, which has practical guiding significance for robot trajectory planning.

**Keywords:** robot; kinematics; computer simulation

## 0 引言

伴随着现代工业自动化水平的不断提高,机器人在批量化生产中逐步发挥着不可替代的作用<sup>[1]</sup>。工业机器人主要由机身主体、驱动系统和控制系统 3 部分组成<sup>[2]</sup>。机器人的运动学分析是机器人学的一个重要组成部分,可为机器人的动力学仿真分析、轨迹规划和运动控制提供重要依据<sup>[3]</sup>。运动学分析主要包括机器人的正逆运动学。当已知所有的关节变量时,可以用正运动学来确定机器人末端执行器的位姿。如果要使机器人末端执行器放在特定点上并且具有特定的姿态,可用逆运动学来计算出每一关节的关节变量<sup>[4]</sup>。国内机器人的研发相对于国外起步较晚,总体相对落后。近些年来,国内涌现出一批优秀的机器人研发公司,例如沈阳新松、南京埃斯顿、广州数控、埃夫特和深圳汇川等等。2013 年以来,中国连续六年成为全球最大的机器人市场,并且前五年的市场增速一直位居全球第一<sup>[5]</sup>。IRS-300 是一款应用于装配领域的垂直多关节串联结构六自由度工业机器人,该机器人本体质量 35 kg,末端最大负载 3 kg,最大运动半径 638 mm,重复定

位精度 $\pm 0.02$  mm。

## 1 IRS-300 的运动学分析

机器人是由一系列连杆通过关节连接起来的链式运动机构<sup>[6]</sup>。机器人运动学仅研究各杆件之间的运动关系,不考虑杆件之间相互作用力的影响。根据相邻关节和杆件之间的关节角 $\theta_i$ 、横距 $d_i$ 、杆件长度 $a_i$ 和扭转角 $\alpha_i$ 确定齐次矩阵,并最终得到末端执行器的坐标系相对于基坐标系的齐次变换矩阵,从而确定末端执行器相对于基座处于何种姿态,以便完成作业。

### 1.1 机器人坐标系的建立

图 1 是 IRS-300 六轴机器人的三维模型,观察机器人各杆件与关节之间的联系,运用经典 D-H 法对机器人进行建模,可以更加直观地观察各个杆件之间的位姿关系。6 个关节的坐标系如图 2 所示。

图 2 中,‘●’表示 z 轴垂直于纸面,方向向外。各个坐标系的建立均要符合右手定则。

根据图 2 中各个关节之间关系,结合机器人实际结构

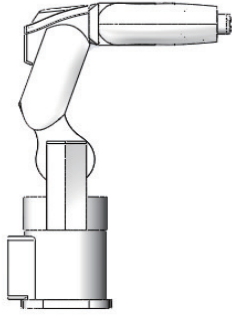


图1 IRS-300 六轴机器人

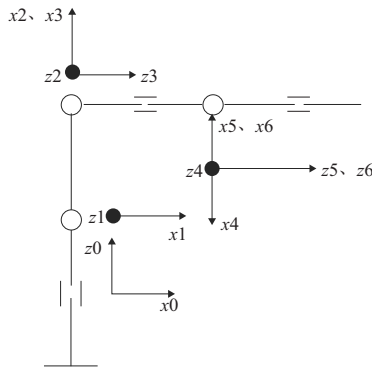


图2 六轴机器人坐标系

尺寸,可以得到表1中 IRS-300 六轴机器人的 D-H 参数,由于该机器人的6个关节均为转动关节,故其关节角 $\theta_i$ 为变量,杆件长度 $a_i$ 、扭转角 $\alpha_i$ 和横距 $d_i$ 均为固定值。

表1 IRS-300 六轴机器人 D-H 参数

关节	关节角 $\theta_i / (^\circ)$	扭转角 $\alpha_i / (^\circ)$	杆件长度 $a_i / \text{mm}$	横距 $d_i / \text{mm}$	关节范围/ $(^\circ)$
1	$\theta_1$	90	0	178.68	-170~170
2	$\theta_2$	0	296.92	0	-145~78
3	$\theta_3$	90	44.77	0	-71~173
4	$\theta_4$	-90	0	297.00	-200~200
5	$\theta_5$	-90	0	0	-120~120
6	$\theta_6$	0	0	0	-360~360

## 1.2 运动学正解

根据相邻杆件之间的坐标变换矩阵,可以得到末端坐标系相对于基坐标系的变换矩阵:

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

结合表1中机器人 D-H 参数求解可得 IRS-300 机器人的正运动学方程为:

$$\begin{aligned} n_x &= [c_5(s_1s_4+c_1c_4c_{23})-s_5c_1s_{23}] \\ o_x &= -c_6(c_4s_1-s_4c_1c_{23})-s_6[c_5(s_1s_4+c_1c_4c_{23})-s_5c_1s_{23}] \\ a_x &= -s_5(s_1s_4+c_1c_4c_{23})-c_5c_1s_{23} \\ n_y &= s_6(c_1c_3+s_4s_1c_{23})-c_6[c_5(c_1s_4-c_4s_1c_{23})]+s_5s_1s_{23} \\ o_y &= c_6(c_1c_4+s_4s_1c_{23})+s_6[c_5(c_1s_4-c_4s_1c_{23})+s_5s_1s_{23}] \\ a_y &= s_5(s_1s_4-c_4s_1c_{23})-c_5s_1s_{23} \\ n_z &= c_6[c_{23}s_5+s_{23}c_4c_5]+s_{23}s_4s_6 \\ o_z &= s_{23}c_6s_4-s_6(c_{23}s_5+s_{23}c_4c_5) \\ a_z &= c_{23}c_5-s_{23}c_4s_5 \\ p_x &= c_1(a_3c_{23}+d_4s_{23}+a_2c_2) \\ p_y &= s_1(a_3c_{23}+d_4s_{23}+a_2c_2) \\ p_z &= d_1-d_4c_{23}+a_3s_{23}+a_2s_2 \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $s_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$ ;  $c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$ ;  $s_i = \sin \theta_i$ ;  $c_i = \cos \theta_i$ 。

## 1.3 运动学逆解

在已知末端执行器中心点的位姿矩阵的基础上计算各关节需要转动的角度 $\theta_i$  ( $i = 1 \sim 6$ ), 解决运动学逆问题<sup>[7]</sup>, 简称逆运动学。采用双变量正切函数来表示关节变量, 可以避免出现解丢失的现象, 得到的各个关节角如下:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \arctan2(p_y, p_x) \\ \theta_2 &= \arctan2(\pm C, \sqrt{1-C^2}) - \arctan2(B, A) \\ A &= \rho \sin \varphi, B = \rho \cos \varphi, C = \rho \sin(\varphi + \theta_2) \\ \theta_3 &= \arctan2\left(\pm \sqrt{1 - \frac{(a_2 + a_3)^2}{\rho^2}}, \frac{a_2 + a_3}{\rho}\right) - \\ &\arctan2(p_z - d_1, p_x c_1 - p_y s_1) - \theta_2 \\ \rho &= \pm \sqrt{(p_z - d_1)^2 + (p_x c_1 - p_y s_1)^2} \\ \theta_4 &= \arctan2(a_x s_1 - z_y c_1, a_z c_1 + a_x c_1 c_{23} + z_y s_1 c_{23}) \\ \theta_5 &= \arctan2(\pm \sqrt{1 - (a_2 c_{23} - a_x c_1 c_{23} - z_y s_1 s_{23})^2}, \\ &a_2 c_{23} - a_x c_1 s_{23} - z_y s_1 s_{23}) \\ \theta_6 &= \arctan2(-o_z c_{23} + o_x c_1 s_{23} + o_y s_1 s_{23}, \\ &n_z c_{23} - n_x s_{23} - n_y s_1 s_{23}) \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)可以看出 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 和 $\theta_5$ 各存在两个值, 故一共有8组解。由于机器人存在工作空间的限制, 某些解可能处于机器人无法到达的工作空间。所以, 要根据实际工作情况来确定运动学的逆解。

## 2 IRS-300 运动学仿真

运动学仿真是运用数值模拟的方法计算运动学方程, 仿真内容包含位置、位移、速度和加速度等, 该过程可以更加直观地观察机器人各关节的变化情况。借助 MATLAB 中的 Robotic Toolbox 插件, 结合 link 函数建立各个杆件参数, 利用 robot 函数将各个杆件连接起来, 组成机器人对象。根据表1中的 D-H 系数, 建立的机器人模型如图3所示。

### 2.1 正运动学仿真

已知该机器人各关节的初始角度 $T_s$ 和终止角度 $T_f$ :

$$T_s = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0],$$

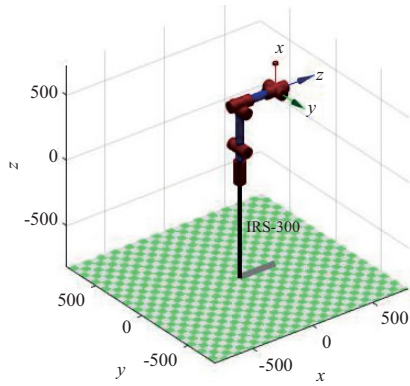


图3 IRS-300 六轴机器人三维模型

$$T_F = \begin{bmatrix} \frac{p_i}{2} & -\frac{p_i}{2} & \frac{p_i}{2} & p_i & \frac{p_i}{2} & \frac{p_i}{3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

利用 Robotics Toolbox 中的的 fkine() 函数和 plot() 函数得到机器人末端初始和终止位置位姿的奇次变换矩阵, 用 plot3() 函数画出机器人末端执行器的轨迹, 如图 4 所示。

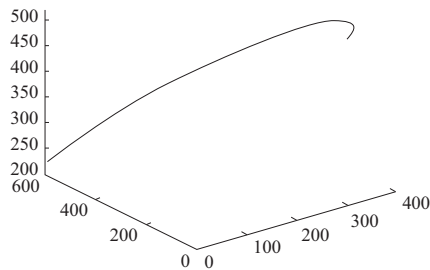


图4 机器人末端移动轨迹

## 2.2 逆运动学仿真

根据 2.1 中初始角度  $T_S$  和终止角度  $T_F$ , 可分别得到机器人末端位姿  $T_S$  和  $T_F$ :

$$T_S = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & -341.7 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 475.7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_F = \begin{bmatrix} -0.866 & -0.500 & 0 & 0 \\ 0.500 & -0.866 & 0 & 593.9 \\ 0 & 0 & 1 & 223.4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

得到的执行器末端移动轨迹如图 5 所示。

对比图 4 和图 5 可以看出, 两次仿真结果虽然起始点和终止点相同, 但中间的运动过程却是不同的, 说明了在求解机器人运动学逆解问题时的解是不唯一的, 验证了 1.3 结论中的逆解不唯一性。

## 2.3 各关节运动情况

利用 plot() 函数画出机器人末端自初始角度  $T_S$  至终止角度  $T_F$  过程中各关节角度、速度和角加速度的变化情况, 如图 6-图 8 所示。

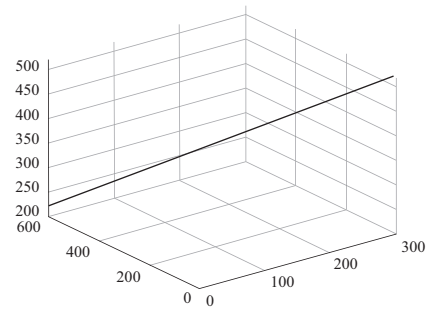


图5 机器人末端移动轨迹

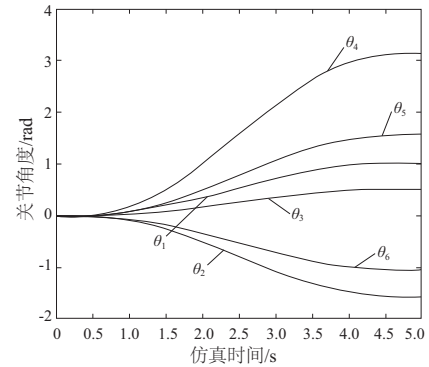


图6 各关节角度变化

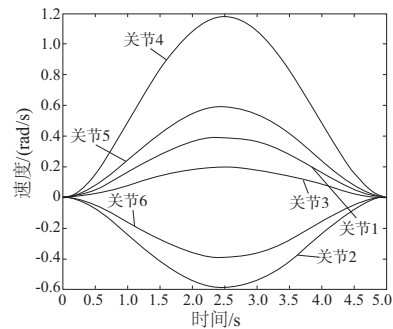


图7 各关节速度变化

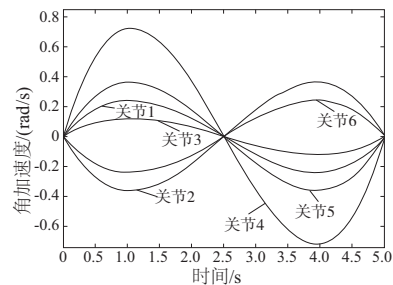


图8 各关节角加速度变化

从图 6-图 8 中可以看出, 在机器人末端执行器自起始位置至终止位置这一过程中, 各个关节随时间的变化都是光滑的曲线, 没有突变区域, 表明该机器人的各个关节均可以正常地运行, 能够安全稳定地达到所期望的位姿, 表明该机器人的结构参数设计合理。

(下转第 112 页)

图5为转速4000 r/min,不同轴向间隙时,摆线转子泵瞬时流量脉动曲线。可以明显看到,摆线转子泵的瞬时流量呈周期性波动变化,这是因为内外转子周期性重复转动且相互啮合产生的,流量保持稳定性和重复性表明了数值

模拟的准确性,能够真实模拟摆线转子泵的实际工作情况。轴向间隙从0.03 mm到0.07 mm,摆线转子泵流量脉动幅度分别为4.87%、4.98%和5.04%,都在时均流量的5%左右,表明轴向间隙对于流量脉动的影响不大。

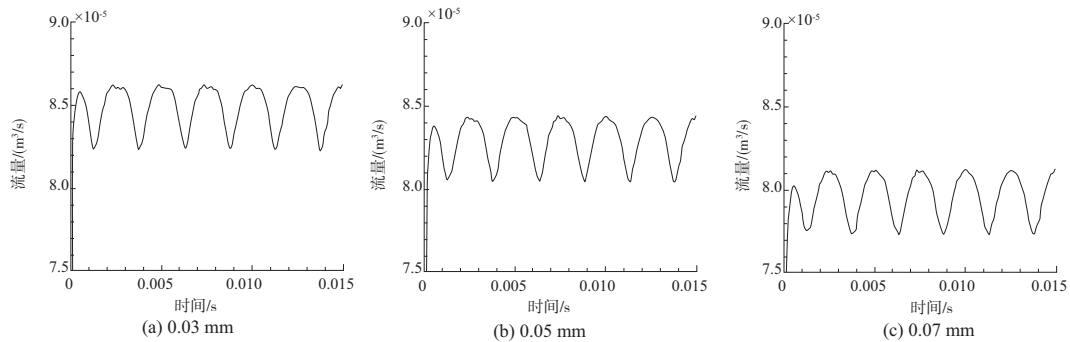


图5 不同轴向间隙瞬时流量脉动曲线

## 4 结语

利用数值分析软件 Pumplinx 计算分析了不同轴向间隙对摆线转子性能的影响,得出的主要结论如下:

- 1) 转速不变,摆线转子泵体积流量和容积效率随轴向间隙的增大而减小;轴向间隙不变,摆线转子泵体积流量和容积效率随转速的增加而变大。
- 2) 随着转速增加,轴向间隙对泄漏的影响加强,对容积效率的影响减弱。轴向间隙对流量脉动没有显著影响。
- 3) 轴向间隙油膜上的油液在压力作用下发生内泄,表明进出口压差是导致轴向间隙泄漏的主要原因。

### 参考文献:

[1] MANCÒ S,NERVEGNA N,RUNDO M,等.用于内燃机的转子

机油泵[J].国外内燃机,2001,33(4):41-55.

- [2] 葛泽华.微小型高转速摆线内啮合齿轮泵的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [3] 叶宪枝.圆弧—摆线转子泵结构设计及流场特性仿真分析[D].重庆:重庆大学,2012.
- [4] 徐学忠.内啮合摆线齿轮泵的理论研究与仿真[D].南京:东南大学,2005.
- [5] 刘杰,李华聪.基于UG的摆线齿轮泵转子参数化建模方法研究[J].科学技术与工程,2012,12(25):6327-6330.
- [6] 徐学忠.转子泵的设计理论[M].苏州:苏州大学出版社,2015.
- [7] 何存兴.液压元件[M].北京:机械工业出版社,1982.

收稿日期:2020-09-14

(上接第90页)

## 3 结语

针对推导工业机器人运动学过程时涉及复杂数学运算、计算繁琐这一问题,本文以 IRS-300 六自由度工业机器人为算例,运用 MATLAB 及其 Robotics Toolbox 作为分析工具,进行了机器人的三维建模和运动学仿真。仿真结果表明:1)可大大提高进行运动学分析时的工作效率,生成的仿真图形便于直观地了解机器人的运动形态和工作空间,有良好的应用前景。2)验证了求解正逆问题中逆解不唯一的结论,得到了各个关节在机器人运动过程中角度、角速度、角加速度的变化曲线,通过观察变化曲线表明该机器人各关节可以平稳地运行,验证了机器人结构设计合理,可以达到期望的位姿,对机器人轨迹规划具有实际指导意义。

### 参考文献:

- [1] 陈珂,冯卓群,杨俊,等.一种六自由度机械手的结构设计[J].机械制造与自动化,2020,49(1):138-140.
- [2] 黄晓辰,张明路,张小俊,等.机器人坐标系建立的改进 D-H 方法[J].农业机械学报,2014,45(10):313-318,325
- [3] 张新敏,朱学军,赵晨晨,等.基于 MATLAB 的 HP20 机器人运动学分析与仿真[J].制造业自动化,2014,36(13):12-15.
- [4] SAEED B, NIKU. 机器人学导论——分析、系统及应用[M].北京:电子工业出版社,2004.
- [5] 曲道奎.中国机器人产业发展深度思考——机遇与挑战[J].机器人产业,2019(5):67-71.
- [6] 徐有胜.一种六自由度串联机器人的运动学与动力学仿真分析[D].深圳:深圳大学,2017.
- [7] 云双.基于特征点的水果空间位姿视觉测量方法及应用研究[D].无锡:江南大学,2012.

收稿日期:2020-10-15