

# 铣削机器人动力学建模及仿真研究

张永贵<sup>1</sup>,牛蓉<sup>1</sup>,周明<sup>2</sup>,夏恩帅<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学 机电工程学院,甘肃 兰州 730050;

2. 兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室,甘肃 兰州 730000)

**摘要:**铣削机器人在铣削过程中的动力学状况对机器人在铣削过程中的运动及其稳定性具有较大影响。以6-DOF铣削机器人为研究对象,利用Creo三维软件建立机器人三维模型,获得建立机器人动力学模型的惯性参数;采用Newton-Euler递推法建立该机器人的动力学方程,并在MATLAB环境下对所建立的动力学方程进行编程,对机器人运动过程进行计算分析;利用ADAMS软件对建立的三维模型进行动力学仿真分析,通过比较MATLAB计算结果与ADAMS仿真分析结果,以验证动力学方程的准确性,为铣削过程中铣削机器人动力学状况研究提供理论基础。

**关键词:**机器人;铣削加工;动力学方程;Newton-Euler递推法

**中图分类号:**TP242.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)03-0098-04

## Research on the Dynamic Modeling and Simulation of Milling Robot

ZHANG Yonggui<sup>1</sup>, NIU Rong<sup>1</sup>, ZHOU Ming<sup>2</sup>, XIA Enshuai<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory,  
Lanzhou Institute of Space Technology Physics, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The dynamic conditions of milling robot in milling process have great influence on the movement and stability of the mechanism. This paper takes the 6-dof milling machining robot as research object. The three-dimensional model of the robot is established using the three-dimensional modeling software Creo, which is used to obtain the inertial parameters of the robot dynamic modeling. The dynamic analysis of the industrial milling robot is performed by using Newton-Euler recursive method. And in the MATLAB environment, the established dynamic equations are programmed, then, the robot movement process is calculated and analysed. And then, ADAMS software is used to conduct the dynamic simulation analysis of the established three-dimensional model, and the results of MATLAB calculation and ADAMS simulation analysis show that the established dynamic equation is correct. The certain theoretical basis is provided for researching on the dynamic condition of milling robot in the milling process.

**Keywords:** robot; milling; kinetic equation; Newton-Euler recursive method

## 0 引言

铣削机器人动力学建模和分析,对于其运动学分析具有重要意义。其主要有Lagrange法<sup>[1]</sup>、Newton-Euler递推法、达朗贝尔-虚功原理<sup>[2]</sup>等。Lagrange法不易求解复杂结构拉格朗日因子;Newton-Euler涉及到微分方程,推导过程复杂<sup>[3]</sup>;而达朗贝尔-虚功原理,对于较复杂机构较为抽象<sup>[4]</sup>。

动力学仿真分析在机器人研究中起着至关重要的作用,也因此吸引了众多学者的研究。李辉等人<sup>[5]</sup>基于MATLAB对工业机器人在复杂工作路径下的动力学仿真进行研究。王战中等人<sup>[6]</sup>基于ADAMS和MATLAB对6臂机器人进行联合仿真,找出控制系统的不足之处并进行优化。马如奇等人<sup>[7]</sup>使用MATLAB/Simulink模块搭建其

控制系统,基于ADAMS和MATLAB进行了联合仿真。文献[6-7]都是基于机器人三维模型导入ADAMS环境进行仿真分析,然后利用MATLAB/Simulink模块进行控制系统仿真,并不是对机器人动力学方程进行编程计算,没有验证动力学建模正确性的环节。

本文基于机器人在铣削过程中动力学状况对铣削加工质量的影响研究需要,以MOTOMAN UP50机器人(以下简称机器人)为对象,首先基于Creo软件对机器人三维虚拟实体模型进行建模,获得动力学建模所需的惯性参数;然后基于Newton-Euler递推法对该机器人建立动力学方程,并采用MATLAB软件对该方程进行编程,得到机器人末端执行器位移以及关节驱动力矩随时间的变化曲线;最后基于ADAMS对建立的三维模型进行虚拟样机动力学仿真分析,同样得到上述的变化曲线,通过对比验证了所建机器人动力学模型和所编制计算程序的正确性,为

**基金项目:**兰州市科技局科技计划项目(20180429)

**第一作者简介:**张永贵(1966—),男,甘肃兰州人,研究员,硕士研究生,研究方向为工业机器人及其应用等。

后续研究奠定了基础。

# 1 动力学模型的建立

## 1.1 三维模型的建立

图1为基于Creo软件建立的机器人虚拟样机。在Creo“质量属性”工具中测得机器人各关节的质量 $m_i$ ,质心位置 $r_{ci}$ 及惯性矩阵 $J_i$ ,如表1所示,为后续基于MATLAB对机器人的动力学编程提供数据。

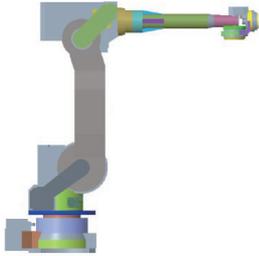


图1 MOTOMAN UP50 机器人三维模型

表1 机器人各关节惯性参数

连杆	质量 $m_i/\text{kg}$	质心 $r_{ci}/\text{m}$	惯性矩阵 $J_i/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$
1	55.471	$\begin{bmatrix} 17.663 \\ 0.915 \\ -91.84 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1\ 418\ 266.174 & 107\ 136.893 & 131\ 457.151 \\ 107\ 136.893 & 1\ 333\ 825.943 & 119\ 411.377 \\ 131\ 457.151 & 119\ 411.377 & 1\ 180\ 818.039 \end{bmatrix}$ $\times 2.74 \times 10^{-6}$
2	71.035	$\begin{bmatrix} 422.594 \\ 42.057 \\ -216.48 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1\ 424\ 497.523 & 444\ 280.084 & -2\ 413\ 254.405 \\ 444\ 280.084 & 7\ 898\ 292.171 & -239\ 409.120 \\ -2\ 413\ 254.405 & -239\ 409.120 & 6\ 806\ 731.234 \end{bmatrix}$ $\times 2.74 \times 10^{-6}$
3	16.631	$\begin{bmatrix} 78.172 \\ 6.926 \\ 11.218 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2\ 280\ 686.576 & 33\ 463.888 & 30\ 352.221 \\ 33\ 463.888 & 1\ 981\ 849.916 & -237\ 838.241 \\ 30\ 352.221 & -237\ 838.241 & 2\ 145\ 765.243 \end{bmatrix}$ $\times 2.74 \times 10^{-6}$
4	63.068	$\begin{bmatrix} 0 \\ -3.195 \\ -378.584 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 452\ 239.180 & 0 & 0 \\ 0 & 452\ 297.956 & -1 \\ 0 & -1 & 5\ 961.111 \end{bmatrix}$ $\times 2.74 \times 10^{-6}$
5	9.651	$\begin{bmatrix} -0.011 \\ 45.533 \\ 25.884 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 38\ 304.333 & -6.166 & -2.623 \\ -6.166 & 22\ 509.858 & -293.560 \\ -2.623 & -293.560 & 25\ 413.983 \end{bmatrix}$ $\times 2.74 \times 10^{-6}$
6	25.433	$\begin{bmatrix} -16.434 \\ 0.958 \\ 267.993 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 164\ 293.814 & -33.765 & -10\ 148.481 \\ -33.765 & 171\ 063.632 & 578.155 \\ -10\ 148.481 & 578.155 & 10\ 135.994 \end{bmatrix}$ $\times 2.74 \times 10^{-6}$

为方便对该机器人进行动力学研究,对图1所示的机器人建立如图2所示的坐标系,该坐标系采用改进D-H法<sup>[8]</sup>建立,然后依据此图可建立动力学方程。

## 1.2 动力学建模

本文采用Newton-Euler法建立其刚体动力学模型。由于重力对杆件运动过程中的作用,如果 $\dot{v}_0 = [0\ 0\ -g]^T$ , $w_0$ 作为其他初始值, $w_0$ 都是 $[0\ 0\ 0]^T$ 。求解构件中各个角速度、加速度、惯性力和惯性力矩的递推公式如下:

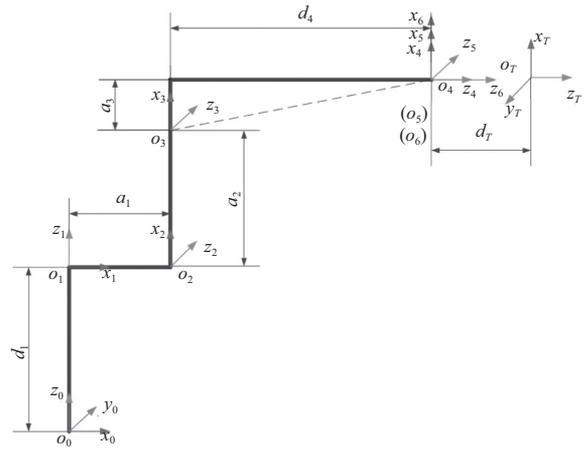


图2 铣削机器人连杆坐标系

$$\begin{cases} \dot{w}_{i+1} = R_i^{i+1} \dot{w}_i + \dot{\theta}_{i+1} Z_i \\ \dot{w}_{i+1} = R_i^{i+1} \dot{w}_i + R_i^{i+1} \dot{w}_i \times \theta_{i+1} Z_{i+1} + \dot{\theta}_{i+1} Z_{i+1} \\ \dot{v}_{i+1} = R_i^{i+1} [w_i \times P_{i+1}^i + w_i \times (w_i \times P_{i+1}^i) + v_i] \\ \dot{v}_{i+1} = w_{i+1} \times P_{i+1} + w_{i+1} \times (w_{i+1} \times P_{i+1}) + v_{i+1} \\ F_{i+1} = m_{i+1} v_{i+1} \\ N_{i+1} = I_{i+1} \dot{w}_{i+1} + w_{i+1} \times I_{i+1} w_{i+1} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $i=0,1,2,3,4,5$ 。

公式(2)解决了各关节的相互作用力、力矩、关节驱动:

$$\begin{cases} f_i = R^{i+1} f_{i+1} + {}^i F_i \\ n_i = {}^i N_i + R_{i+1}^i n_{i+1} + P_{i+1} \times F_i + P_{i+1}^i \times R_{i+1}^i f_{i+1} \\ \tau_i = n_i^T Z_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i=6,5,4,3,2,1$ ;

- $\dot{w}_i, w_i$  分别表示 $i$ 杆件的角加速度以及角速度;
- $\dot{v}_{i+1}, v_{i+1}$  分别表示 $i$ 杆件的质心线加速度以及原点;
- $Z_i$  表示指定杆件坐标系的每个 $Z_i$ 轴向单位向量;
- $Z_{i+1}$  表示指定杆件坐标系的每个 $Z_{i+1}$ 轴向单位向量;
- $i+1$ 表示第 $i+1$ 根杆件;
- $R_i^{i+1}$  表示从杆系 $\{i\}$ 到杆系 $\{i+1\}$ 转换的旋转矩阵;
- $R_{i+1}^i$  表示杆系 $\{i+1\}$ 的旋转矩阵;
- $R_{i+1}^i$  表示从杆系 $\{i+1\}$ 到杆系 $\{i\}$ 的旋转矩阵;
- $P_{i+1}$  表示坐标系统中的位置矢量 $\{i+1\}$ ;
- $P_{i+1}^i$  表示从坐标系 $\{i\}$ 到坐标系 $\{i+1\}$ 的位置向量;
- $I_{i+1}$  表示 $i+1$ 杆相对于质心的惯性张量;
- $N_{i+1}, F_{i+1}$  分别表示 $i+1$ 杆件惯性力矩以及质心处惯性力;
- $n_i, f_i$  分别表示 $i$ 关节上的平衡力矩以及平衡力;
- $\tau_i$  表示 $i$ 关节中的驱动力矩。

## 1.3 求解关节力矩

当机器人工作时,已知其工作路径,而且在各关节变

量均为固定值的条件下,依据式(1)-式(2),可按顺序推出各关节添加的驱动力。在已知各连杆速度、加速度和惯性张量的情况下,通过 Newton-Euler 方程,可以反推机器人铣削过程中末端的铣削力,得到各关节的作用力,为实现 ADAMS 动力学仿真提供理论依据。

基于表 1 利用连杆坐标系计算每个臂杆的姿态矩阵和位置矢量,然后基于第 1 节 Newton-Euler 法在 MATLAB 中编写逆动力学算法程序,设置铣削加工所需要的轨迹,按照其轨迹编写驱动函数,对 1.2 节动力学模型进行理论计算,得到角位移和各关节驱动力矩。

该机器人的初始位置为  $q_0 = [0 \ -90 \ 0 \ 0 \ 0]^\top$ 。根据铣削加工机器人工作需要,可规划该机器人在 MATLAB 的末端轨迹,其运动路径如图 3 所示。图 4 显示了在该路径下,通过程序计算出的 6 个关节驱动力矩随时间变化的曲线。

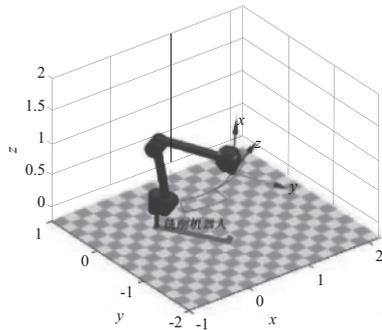


图 3 MATLAB 中铣削加工运动轨迹

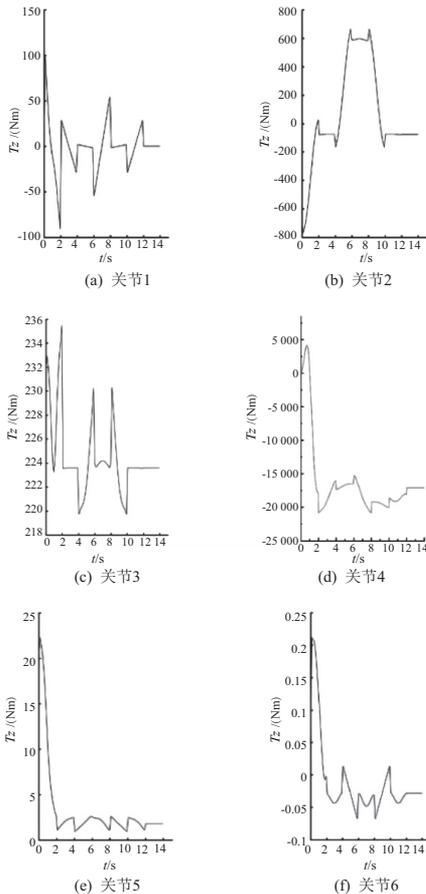


图 4 MATLAB 中计算的各关节力矩曲线

## 2 ADAMS 动力学仿真验证

使用 Creo 来简化机器人的三维模型,接着导入 ADAMS 以建立虚拟样机模型,设置对应的材料特性、约束、驱动函数和外力等动态参数,最后进行动力学仿真。

### 2.1 添加驱动函数

将 MATLAB 中的驱动,运用“save q.txt -ascii a”指令将其导出并保存为 txt 格式,然后将其导入到 ADAMS 中生成样条曲线,最后在各个驱动上添加相应的驱动函数。腰关节、肩关节、肘关节、手腕旋转关节、手腕摆动关节、手腕回转关节的驱动函数都表示为:

$$\text{CUBSPL}(\text{time}, 0, \text{SPLINE}_1, 0)。$$

### 2.2 添加末端铣削力

当铣削条件、铣削用量以及铣削材料等各要素条件都选定时,即根据铣削加工要求选择工件材料为可锻铸铁,刀具材料为铝合金,直径为 6 mm 的圆柱铣刀,且电主轴转速为 3000 r/min。根据刀具材料和铣削工件材料选择铣削公式进行计算主切削力,计算公式如下:

$$F_z = C_{F_z} a_e^{0.86} a_f^{0.72} d_0^{-0.86} a_p^{1.0} Z K_{F_z} \quad (3)$$

其中:  $F_z$  为铣削力, N;  $C_{F_z}$  为铣削力系数, 铝合金的  $C_{F_z}$  可取钢的 1/4 (钢的  $C_{F_z}$  为 641);  $a_e$  为铣削宽度, mm (圆柱铣的  $a_e = 0.05d_0$ );  $a_f$  为每齿进给量, mm (圆柱铣的  $a_f$  为 0.1~0.2);  $z$  为铣刀的齿数;  $d_0$  为铣刀直径;  $K_{F_z}$  为铣刀铣削力修正系数, 当刀具的前角系数为 0 时,  $K_{F_z} = 0.89$ 。

$$\text{铣削速度为: } V_f = \frac{\pi d_0 n_s}{60 \times 1000} \quad (\text{m/s}),$$

其中  $n_s$  为主轴转速。一般铣削进给速度的计算公式为:  $V_f = f \times n_s = a_f \times z \times n_s$  (mm/min)。

当圆柱铣刀的每齿进给量取 0.1 mm, 铣削深度取 0.2 mm 时, 可以计算出末端铣削力  $F_z$  为 388 N。

添加铣削力后, 将模拟结束时间设定为 14 s, 将其模拟步数设定为 500, 并使用 ADAMS/PostProcessor 后处理模块分析机器人, 可得到该机器人在 ADAMS 中的运动轨迹如图 5 所示, 可输出该铣削机器人末端执行器位移和各关节驱动力矩。

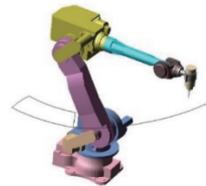


图 5 ADAMS 中铣削加工运动轨迹

## 3 动力学曲线拟合分析

通过 MATLAB 计算和 ADAMS 仿真分析得到该机器人末端执行器位移和各关节驱动力矩。机器人末端执行

器位移变化情况对比结果如图 6 所示(因本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。

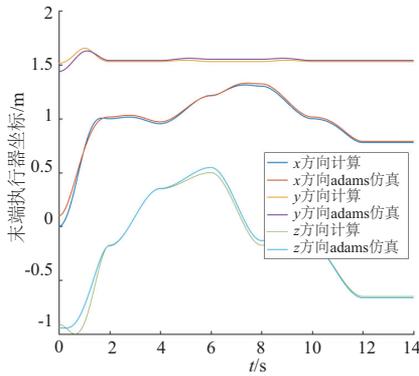


图 6 末端执行器位移对比曲线

由图 6 可知,机器人结束时产生的运动轨迹基本上与期望的运动轨迹相同,只有在 1.8 s 之前有轻微的偏差,因此 z 方向的误差最大值是 0.80%,而 x 方向和 y 方向的误差值最大值分别是 0.92% 和 0.86%。通过图 6 可以看到,机器人末端执行器位移在 MATLAB 和 ADAMS 环境下的曲线基本吻合,充分证明机器人系统运动相对稳定,可以验证所建立的机器人动力学模型的有效性。

图 7 为机器人各关节驱动力矩随时间变化情况的对比分析,其中计算结果指在 MATLAB 中进行编程计算得到的数据,仿真结果指在 ADAMS 中进行仿真分析得到的数据。

比较图 7 可以看出,各个关节力矩的仿真和计算曲线的趋势基本一致,且较大误差均出现在曲线的波峰、波谷处,关节力矩曲线对比图的最大误差分别为 0.250 Nm、0.001 Nm、0.200 Nm、0.001 Nm、0.010 Nm、0.120 Nm,两者都在所允许的误差范围之内。误差产生的主要原因

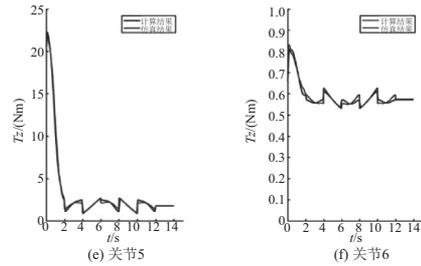
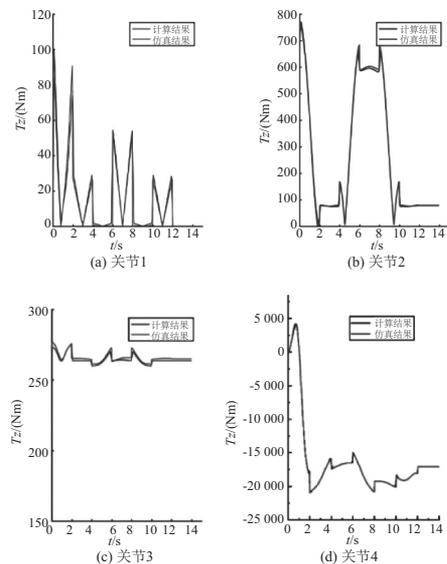


图 7 各关节 MATLAB 计算和 ADAMS 仿真力矩拟合曲线

是 ADAMS 环境中的动力学仿真更加接近工程环境,在仿真时如出现较大波动,ADAMS 能够更好地处理机械构件惯性影响,较编程计算更加准确,从而可验证所建立的机器人动力学模型的合理性。

### 4 结语

1) 基于 Creo 三维软件建立机器人三维虚拟实体模型,获得动力学建模所需的惯性参数;基于 Newton-Euler 方程建立机器人的动力学模型并在 MATLAB 环境下编程计算,可以对 6 自由度铣削机器人进行动力学研究分析。

2) 对于同一机器人,在设置了同样的铣削加工路径的情况下,基于 Newton-Euler 方程进行 MATLAB 编程计算的结果与基于 ADAMS 仿真分析的结果基本一致,可以验证基于 Newton-Euler 递推法所建立的铣削机器人在铣削规定路径时动力学模型的正确性。

#### 参考文献:

- [1] 申浩宇,刘艳梨,吴洪涛,等. 一种串联机器人约束力的计算方法[J]. 机械制造与自动化,2019,48(5):136-139.
- [2] 吴超宇,钱小吾,余伟,等. 直线驱动型并联机器人反向动力学分析与验证[J]. 农业机械学报,2017,48(12):412-420.
- [3] ENFERADI J, AKBARZADEH Tootoonchi A. Inverse dynamics analysis of a general spherical star-triangle parallel manipulator using principle of virtual work[J]. Nonlinear Dynamics, 2010, 61(3):419-434.
- [4] NABAT V, DE La O RODRIGUEZM, COMPANY O, et al. Part 4: very highspeed, parallel robot for pick-and-place[C]// IEEE. International, Conference on Intelligent, Robot and Systems, 2005:553-588.
- [5] 李辉,黄文权,李开世,等. 基于复杂路径下的六自由度机器人动力学仿真[J]. 机械设计与制造,2015(9):208-211,214.
- [6] 王战中,杨长健,刘超颖,等. 基于 MATLAB 和 ADAMS 的六自由度机器人联合仿真[J]. 制造业自动化,2013(18):30-33.
- [7] 马如奇,郝双晖,郑伟峰,等. 基于 MATLAB 与 ADAMS 的机械臂联合仿真研究[J]. 机械设计与制造,2010(4):93-95.
- [8] 谭民. 先进机器人控制[M]. 北京:高等教育出版社,2007:39-46.

收稿日期:2020-02-21