

基于 ADAMS 七自由度飞机装配机器人的运动学分析与仿真研究

Research on Kinematics Analysis and Simulation of 7-DOF Aircraft Assembly Robot Based on ADAMS

中航工业北京航空制造工程研究所 王健 邹方 张书生

[摘要] 以 D-H 矩阵为基础对机器人建立起机器人运动学模型及机器人运动学方程;基于 ADAMS 对机器人构建虚拟样机模型并进行仿真,得出了机器人末端位移、速度、加速度随时间的数据变化曲线并进行分析和研究。仿真结果表明:机器人可按预期轨迹平稳运动,无突变、干涉现象,验证了机构设计和轨迹规划的合理性,为物理样机制造提供依据并奠定了运动控制的基础。

关键词: 机器人 运动学 ADAMS 仿真

[ABSTRACT] The robot mode of kinematics and the equation of kinematics are built based on the D-H matrix. The model of virtual prototype is constructed based on ADAMS and the simulation is done, the displacement, velocity and acceleration of robot end data curves changed with time are given out, analyses and study are done. The simulation results show that the robot can move smoothly according to prospective track without impact and intervene, which confirms the reasonableness of structural design and track plan, and provides the basis for the manufacture of physical prototype and motion control.

Keywords: Robot Kinematics ADAMS Simulation

由于近年来机器人技术的迅猛发展,加之投资降低,自动化程度高,工作性能稳定,可达性好等优势,在航空制造过程中正得到越来越多的应用^[1]。但由于传统机器人受到本身特点的影响,使得传统的机器人在飞机装配上的应用水平低^[2]。为提高飞机装配效率和装配质量,本研究开发了一种新型多自由度机器人用于飞机大尺寸薄壁件的装配,由于机器人由多个连杆和关节组成,具有多个输入和输出,存在着错综复杂的耦合关系和严重的非线性^[3-5]。因此借助虚拟样机技术建立虚拟样机模型,对机器人进行运动学分析十分必要,借助目前应用比较广泛的虚拟样机技术软件 ADAMS 对机

器人进行分析,可大大简化工作^[6],机器人各个运动学和动力学可通过仿真动画和数据图直观地体现。

1 机器人运动学模型

1.1 机器人机械结构

机器人机械结构包含移动底座、翻转立柱、移动滑枕、及摆动框架等部分组成,包含 3 个移动关节和 4 个转动关节共 7 个关节,通过驱动各个运动组件实现末端产品的空间姿态调整,实现产品的定位装配功能。机器人机械结构图如图 1 所示。

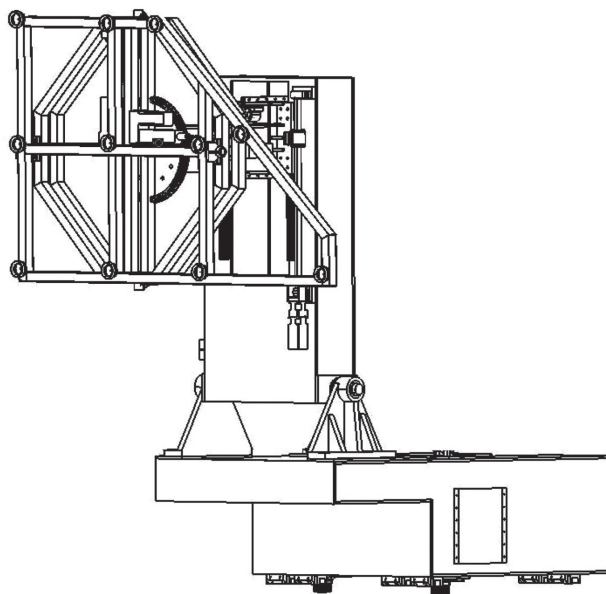


图1 机器人机械机构图

Fig.1 Mechanical diagram of robot

1.2 机器人运动学模型

根据机器人的机械结构进行机构简化,获得了机器人的运动机构简图,该简图主要由一系列连接在一起的连杆表示,每个连杆上固连有一个笛卡尔坐标系,相邻两个杆件之间可以用 4 个参数来描述,即连杆长度 a_i ,

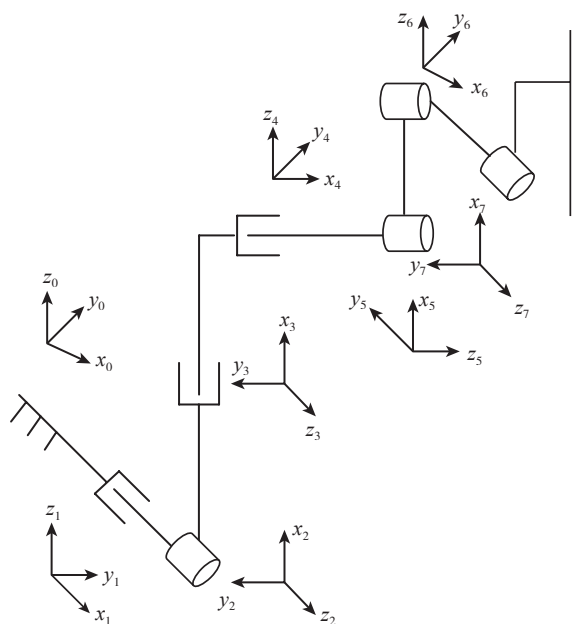


图2 机器人笛卡尔坐标系

Fig.2 Cartesian coordinate system of robot

连杆扭转角 δ_i , 连杆偏移量 d_i , 关节转角 θ_i , 并对简化后的模型建立笛卡尔坐标系, 如图 2 所示。各杆件参数如表 1 所示。

表1 机器人各杆件参数

i	a_{i-1}/mm	$\delta_{i-1}/(^{\circ})$	d_i/mm	$\theta_i/(^{\circ})$
1	0	0	d_1	0
2	0	90	0	$\theta_1(180)$
3	0	0	d_2	0
4	0	90	d_3	180
5	0	90	0	$\theta_2(180)$
6	100	90	0	$\theta_3(180)$
7	100	90	0	$\theta_4(180)$

1.3 机器人运动学正解

机器人运动学研究的是机器人各关节与末端执行器的坐标关系, 机器人运动学正解研究的是运动方程的建立及末端位姿的求解问题^[7-8]。通过机器人运动学正解可以把机器人末端的空间位姿解析地表示为时间的函数, 从而求解出末端薄壁件相对于参考坐标系的位姿。

机器人各杆件的连杆变换矩阵为:

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\delta_{i-1} & c\theta_i c\delta_{i-1} & -s\delta_{i-1} & -d_i s\delta_{i-1} \\ s\theta_i s\delta_{i-1} & c\theta_i s\delta_{i-1} & c\delta_{i-1} & d_i c\delta_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

末端的相对于参考坐标系位姿矩阵为:

$$T_n^0 = T_1^0 T_2^1 \cdots T_n^{n-1} \quad (2)$$

将(1)式代入到(2)式求得末端薄壁件相对于参考坐标系的位姿矩阵, 如(3)式所示, 将表 1 中的机器人各个杆件参数代入到(3)式中, 可求得机器人末端位姿的运动学方程:

$$T_7^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 T_7^6 = \begin{bmatrix} n_{x1} & o_{x1} & a_{x1} & p_{x1} \\ n_{y1} & o_{y1} & a_{y1} & p_{y1} \\ n_{z1} & o_{z1} & a_{z1} & p_{z1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $[p_{x1}, p_{y1}, p_{z1}]$ 为位置矩阵, $\begin{bmatrix} n_{x1} & o_{x1} & a_{x1} \\ n_{y1} & o_{y1} & a_{y1} \\ n_{z1} & o_{z1} & a_{z1} \end{bmatrix}$ 为姿态

矩阵, $n_{x1} = -c_{12}c_3c_4 - s_{12}s_4$, $o_{x1} = c_{12}c_3s_4 - s_{12}c_4$, $a_{x1} = -c_{12}s_3$, $n_{y1} = -s_3c_4$, $o_{y1} = s_3s_4$, $a_{y1} = c_3$, $n_{z1} = -s_{12}c_3c_4 + c_{12}s_4$, $o_{z1} = s_{12}c_3s_4 + c_{12}c_4$, $a_{z1} = -s_{12}s_3$, $p_{x1} = -100c_{12} + s_1d_3$, $p_{y1} = -d_2$, $p_{z1} = -100s_{12} - c_1d_3 + d_1$, s_i 表示 $\sin(\theta_i + \theta_j)$, c_i 表示 $\cos(\theta_i + \theta_j)$ 。

由(3)式可知, 当机器人各杆件的几何尺寸参数给定后, 根据已知各个关节的变量可求出机器人末端的位姿, 即薄壁件的位置和姿态, 且解是唯一的。

1.4 机器人运动学逆解

机器人运动学逆解, 指的是在机器人末端位姿确定时, 求出各驱动关节的变化量, 这是机器人运动控制的关键环节之一。通常运动学逆解可以分为 2 类: 封闭解和数值解。本课题中的机器人, 由于存在 7 个自由度, 相对于空间六自由度的状态, 存在一个冗余自由度。但由于本机器人在实际应用的过程中, θ_1 会处于 2 种状态, 即 $\theta_1 = 0^{\circ}$ 的水平状态和 $\theta_2 = 90^{\circ}$ 的竖直状态, 而机器人的调姿过程是在竖直状态时进行, 故本文在进行逆向求解时以 $\theta_1 = 90^{\circ}$ 时的条件进行, 这样就避免了冗余自由度的问题。

对于本机器人求运动学逆解可采用 T_7^{-1} 左乘矩阵 T_7^0 解耦, 求解后可得:

$$\begin{cases} \theta_2 = -\arctan \frac{a_{x1}}{a_{z1}} \\ \theta_3 = \pm \arctan \frac{\sqrt{n_{x1}^2 + o_{x1}^2}}{a_{y1}} \\ \theta_4 = -\arctan \frac{o_{x1}}{n_{y1}} \\ d_1 = p_{z1} \pm \frac{100a_{z1}}{\sqrt{n_{x1}^2 + o_{x1}^2}} \\ d_2 = -p_{y1} \\ d_3 = p_{x1} \pm \frac{100a_{x1}}{\sqrt{n_{x1}^2 + o_{x1}^2}} \end{cases} \quad (4)$$

在推导公式(4)的过程中, θ_3 出现了多组表达式,

故会存在多组解,说明当给定位姿处于工作空间内,且有多组关节移动(或转角)对应于末端执行器的同一个位置映射,但在实际应用的过程中,机器人受到关节活动范围及奇异姿态的限制,给出的解不一定是可行且最优的,具体取哪一组解还要根据实际情况而定。对于求逆解,可能无解、有一个解或多个解,这与末端执行器给定位置有关。

2 机器人运动学仿真

2.1 仿真模型的建立

由于本课题用机器人包含构件较多,自由度多,结构复杂,ADAMS 提供了建模模块,还提供了一些 CAD 软件接口,方便模型的导入,由于本机器人已在 CATIA 中建立好了机器人的机械本体,为更方便、更快捷地进行仿真,因此本课题联合了 CATIA 与 ADAMS 联合建立仿真模型。

从 CATIA 到 ADAMS 的模型导入可以通过 CATIA 将模型转化为 PARASOLID 格式,然后导入到 ADAMS 中来^[9];也可以通过无缝软件 SIMDESIGNER 导入。通过 PARASOLID 格式导入时模型的各个零件质量和约束的情况都会丢失,需要在 ADAMS 中重新添加,而通过 SIMDESIGNER 则不会出现这种情况,零件的质量和所添加的约束都会被继承过来。建好的模型可以从 CATIA 直接进入 SIMDESIGNER 中,并在 SIMDESIGNER 添加约束,再导入到 ADAMS 中来。导入到 ADAMS 中的仿真模型如图 3 所示。

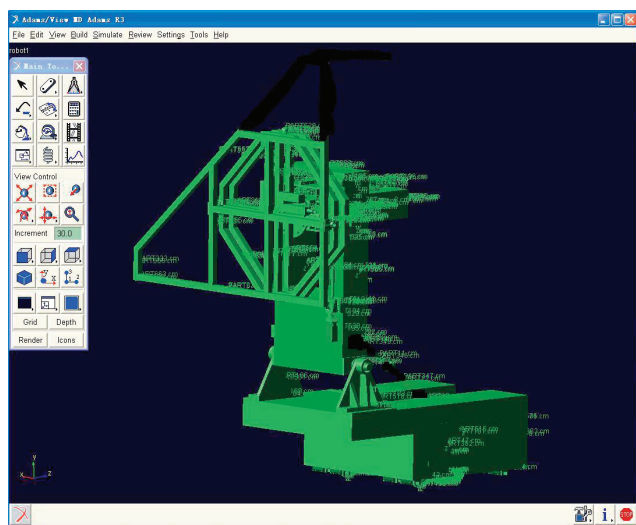


图3 导入到ADAMS中的机器人模型
Fig.3 Model diagram of robot imported into ADANS

2.2 运动学仿真与分析

为使机器人运动,需要在关节施加驱动,为实现平

稳运动,需在关节添加运动控制,为减少运动冲击,本文选用 ADAMS 中的 STEP 函数作为驱动函数,根据具体的运动在移动关节和转动关节分别添加。添加完驱动函数之后,进行运动仿真,通过仿真发现,机器人能按照预期规划的轨迹运动,且运动过程中各部件运动平稳、无干涉现象。其中系统仿真出了机器人末端的运动轨迹,末端能平稳到达预期位姿,满足轨迹要求,通过测量可得机器人末端位移随时间的变化曲线如图 4 所示,速度随时间的变化曲线如图 5 所示,加速度随时间的变化曲线图 6 所示。

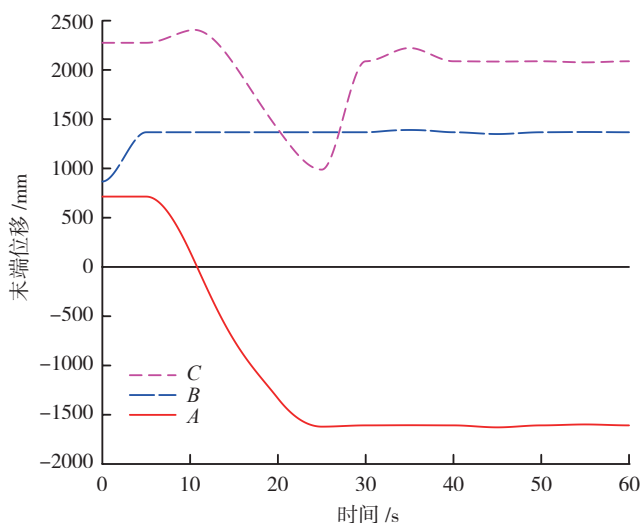


图4 末端位移随时间的变化曲线图
Fig.4 End displacement diagram changed with time

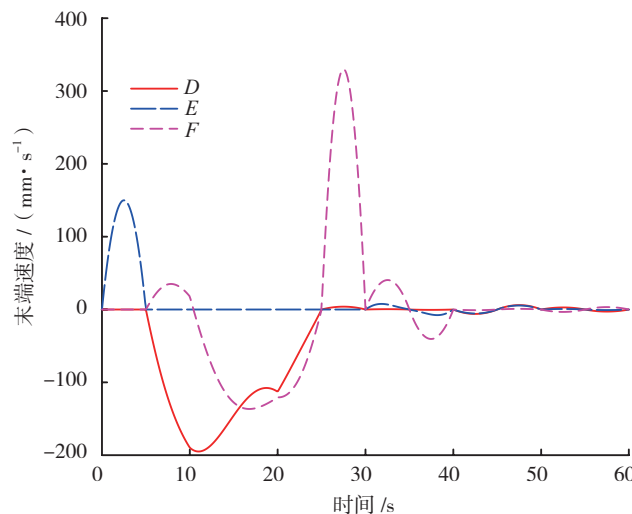


图5 末端速度随时间的变化曲线图
Fig.5 End velocity diagram changed with time

图 4 中曲线 A、B、C 分别代表机器人末端 x、y、z 3 个方向的位移,从图 4 曲线可以看出,在 0~5s 的范围

内,机器人只沿 y 运动了 500mm 的位移,5~40s 机器人 y 方向的位移不再变化,这也验证了机器人轨迹的规划,机器人沿 y 运动 500mm 后到达指定位置,与驱动函数底座移动关节方程一致;通过曲线 A 、 C 可知,在 5~25s 的范围内,机器人经历了一个位姿的转换,沿 y 向进行了一个 90° 的翻转,故曲线 A 和曲线 C 都有一个下降,曲线 A 出现负值的原因是目标位置位于坐标系 x 的反方向,在 25~30s 范围内,曲线 C 有一个上升,说明末端沿 z 向上升,通过曲线可以看出,末端最终上升到与初始位置的高度,说明末端在高度方向上的变化不大,采用先下降后上升的原因为避免运动过程中各部件的干涉。

图 5 中曲线 D 、 E 、 F 分别代表机器人末端 x 、 y 、 z 3 个方向的速度,从图 5 曲线可以看出,在 0~5s 的范围内,仅有 y 方向的速度变化,这也与预期规划一致,其中最大速度为 150mm/s;在 5~25s 的范围内,由于翻转变换,离回转中心越远,速度放大越大,从本机构看,位于距离回转中心最远的末端,在 x 和 z 向速度变化平稳,且 x 最大速度在 200mm/s 以内, z 最大速度在 150mm/s 以内,无速度突变现象;在 25~30s 内, z 向速度有一个相对较大,其中最大速度约 330mm/s,在设计要求范围内。

图 6 中曲线 G 、 H 、 I 分别代表机器人末端 x 、 y 、 z 3 个方向的加速度,从图 6 曲线可以看出,在 0~5s 的范围内,机器人完成 y 向 500mm 的移动,采用了先加速后减速的方式,其中 y 向最大、最小加速度分别约 114mm/s^2 、 -116mm/s^2 ;在 5~25s 的范围内,在翻转过程中, x 和 z 向减速度变化缓慢,其中 x 向最大、最小加速度分别为 25mm/s^2 、 -58mm/s^2 ;而在 25~30s 内,有一个 z 向相

对较大加减速过程,其中 z 向最大、最小加速度分别约 255mm/s^2 、 -251mm/s^2 ,均在要求范围内。

从以上位移、速度、加速度随时间变化的曲线可以看出, y 向移动和 z 向移动均用了 5s,而翻转过程却用了 20s,这是因为翻转过程是一个相对安全系数较低的过程,故要降低移动速度以保证安全,移动过程是相对安全系数较高的过程,可增大速度以提高效率,这也验证了轨迹规划的原则,在保证安全的同时注重效率的提高;随着机器人运动的进行,各方向的曲线变化连续缓和,没有出现突变现象,说明机器人在进行工作时,各关节、各活动部件运行平稳无任何冲击,从而验证了设计的合理性;将各曲线离散化后以数据的形式导出可为机器人运动控制奠定基础。

3 结束语

(1) 以机器人的 D-H 矩阵为基础,对机器人结构进行简化,建立起了笛卡尔坐标系,确立了机器人各杆件参数,建立了机器人运动学模型。

(2) 对机器人进行运动学分析,求解出了机器人末端位姿矩阵方程。

(3) 在 ADAMS 软件中实现了模型的建立,并根据轨迹规划编写了驱动函数方程,对机器人进行运动仿真,测量出了机器人末端位移、速度、加速度随时间的变化曲线。仿真结果表明:机器人可按预期轨迹运动,且运动平稳,无干涉现象,末端位移、速度和加速度都在要求范围内,验证了机构设计和轨迹规划的合理性。

(4) 仿真为物理样机的研制提供了理论依据,为以后的轨迹规划和运动控制,以及控制系统的优化设计奠定了基础。

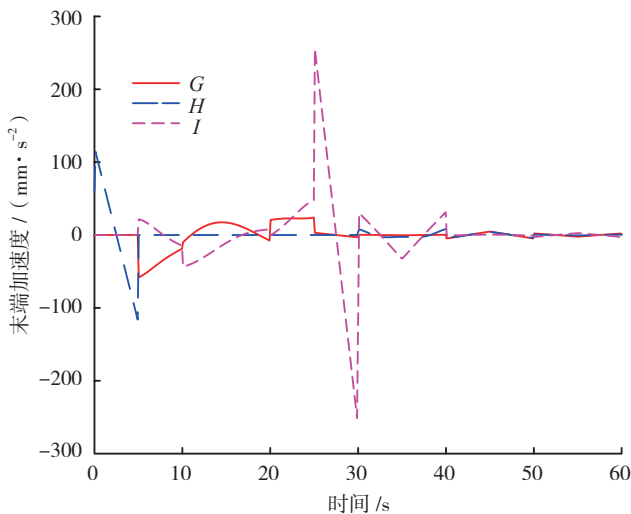


图6 末端加速度随时间的变化曲线图

Fig.6 End acceleration diagram changed with time

参考文献

- [1] 邹方. 飞机装配迎来机器人时代. 航空制造技术, 2009(24): 34-37.
- [2] 王崑, 刘浩, 田威, 等. 面向飞机自动化装配的机器人工作姿态规划. 中国制造业信息化, 2012, 41(13): 50-54.
- [3] 霍伟. 机器人动力学与控制. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [4] 蔡自兴. 机器人学. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [5] 宋伟刚. 机器人学—运动学、动力学与控制. 北京: 科学出版社, 2007.
- [6] 王国强, 张进平, 马若丁. 虚拟样机技术及其在 ADAMS 上的实践. 西安: 西北工业大学出版社, 2002.
- [7] 吴振彪. 工业机器人. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006.
- [8] (美)理查德·莫雷, (中)李泽湘, (美)夏恩卡·萨斯特里. 机器人操作的数学导论. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [9] 王健, 孙志峻. 双足仿人机器人的设计与步态分析. 机械与电子, 2009(11): 56-59.

(责编 小城)