DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2020.01.038

一种六自由度机械手的结构设计

陈珂[1,2],冯卓群[1,2],杨俊[1,2],胡亮[1,2],王一波[1,2],傅宇文[3]

(1. 上海航天控制技术研究所,上海 201101; 2. 中国航天科技集团公司 红外探测技术研发中心,上海 201101;
3. 南京航空航天大学,江苏 南京 210016)

摘　要:在 MATLAB 中构建机械手的 DH 模型,计算并验证了机械手的正解。在 CATIA 三维模块中建立了六自由度机械手的模型,设置好材料,计算出各关节负载,利用 ANSYS 静力学仿真,验证了机械手壳体自身的强度。将模型导入 ADAMS 中,进行动力学仿真,通过五次多项式插值算法规划机械手的末端运动轨迹,计算出每个关节相应的力矩和转速,为电机选型提供了依据。

关键词:六自由度机械手;结构设计;ADAMS;动力学仿真;静力学仿真

中图分类号:TP241　　**文献标志码**:B　　**文章编号**:1671-5276(2020)01-0138-03

Structural Design of Six-degree-of-freedom Manipulator

CHEN Ke[1,2], FENG Zhuoqun[1,2], YANG Jun[1,2], HU Liang[1,2], WANG Yibo[1,2], FU Yuwen[3]

(1. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201101, China;
2. Research and Development Center of Infrared Detection Technology, China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai 201101, China; 3. Nanjing University of Aeronautics And Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The DH model of the manipulator is constructed in MATLAB, and its positive solution is calculated and verified. The model of the six-degree-of-freedom manipulator is established in the CATIA 3D module, the materials are set up, the joint loads are calculated, and the ANSYS static simulation is used to verify the strength of the manipulator shell itself. Then the model is imported into ADAMS, and the dynamic simulation is carried out. The fifth-order polynomial interpolation algorithm is used to plan its end motion trajectory, and the corresponding torque and rotation speed of each joint are calculated. The basis is provided for the motor selection.

Keywords: six-degree-of-freedom manipulafor; structural design; ADAMS; dynamic simulation; static simulation

0　引言

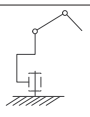
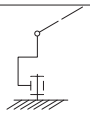
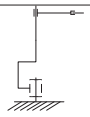
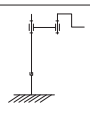
伴随着现代工业自动化水平的不断提高,机械手在批量化生产中逐步发挥着不可替代的作用。当武器装备还处在预研阶段时,生产制造的目的只是去验证理论设计的合理性,所以此阶段对产量的要求并不高,但是当产品进入批产阶段,产品的需求量则会在短时间内成百倍甚至千倍的暴增。产量的增加会带来一些问题:第一,当产品还处于研制阶段的时候,装调人员十分有限,但是这部分装调人员往往具有不可替代的特点,且在短期内培养出类似的人才可能性较小。如果在产品没有正式批产前储备相应人才,又需要付出相应的人力物力,这其中不可控因素太多,风险太大。第二,同一批次的产品,由不同的装调人员装配出来,其各方面性能可能会有所差异,难以把控。第三,某型号的装调人员往往只是对本型号的产品熟悉,若是调换到其他型号生产线上,往往需要较长的适应期。基于以上 3 点原因,着手设计一款机械手,以便于在装备批产这一重复性要求较大的生产过程中完成抓取、运输、装配等一系列动作[1]。

1　六自由度机械手的理论基础及模型设计

1.1　六自由度机械手设计

首先从工作范围、占据空间等因素对几种典型机械手的构型进行了比较,其中 R 表示转动关节,P 表示移动关节,如表 1 所示。在综合考虑了机械手的工作空间大小、定位精度、自身所占用空间以及实际工况等因素,决定选用关节配置为 RRR 型机械手构型。

表 1　经典机械手结构

类别	关节坐标	极坐标	圆柱坐标	SCARA 型	直角坐标
结构简图					
关节搭配	RRR	RRP	RPP	PRR	PPP
工作范围	大	大	较大	较大	小
占地面积	小	小	较小	较小	大
定位精度	中等	低	较高	较高	高

第一作者简介:陈珂(1993—),男,安徽六安人,硕士,研究方向为结构设计。

一般情况下,六自由度串联机械手的运动学逆解都没有封闭解,若想存在封闭解,则需要满足 Pieper 准则[1-2]:

1) 3 个相邻关节中心线相互平行;

2) 3 个相邻关节中心线交于一点。

六自由度机械手主要是由关节、连杆、基座等部分组成。为保证足够的装配精度,机械手各关节采用超声电机驱动,共配置 6 台电机。各关节部分采用模块化关节设计,将电机、减速器、传感器合为一体,方便后续的更换和维修,按照关节的负载大小,将机械手的关节分为两部分,即大负载关节和小负载关节。

在 CATIA 中绘制出机械手的三维模型,如图 1 所示。

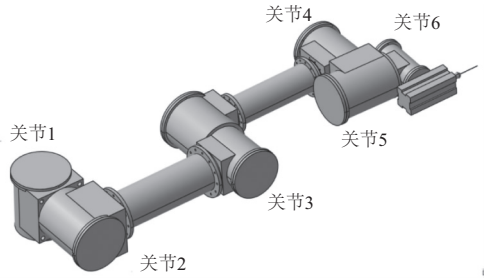


图 1　六自由度机械手的三维模型

六自由度机械手在进行装配时,其底座固定于平台上,以保证其作业的稳定性。6 个关节的理论转角均为 360°,关节与关节之间利用连杆以及法兰盘进行连接,其中关节 1、关节 2、关节 3 采用加装谐波减速器的方式来增大电机的输出力矩,而后面的 3 个关节,则采用电机直接驱动的方式保证其精度。

1.2　六自由度机械手的正运动学模型

机械手的正运动学模型[3]主要由下面 4 个参数来描述。

对照图 1,可以得出机械手的 DH 参数表[4],如表 2 所示。

表 2　六自由度机械手的 DH 参数表

变换	θ/rad	d/mm	a/mm	α/mm
b-1	$\theta_0=0$	$d_0=60$	$a_0=0$	$\alpha_0=0$
1-2	θ_1	$d_1=0$	$a_1=0$	$\alpha_1=\pi/2$
2-3	θ_2	$d_2=0$	$a_2=318$	$\alpha_2=0$
3-4	θ_3	$d_3=0$	$a_3=286$	$\alpha_3=0$
4-5	θ_4	$d_4=80$	$a_4=0$	$\alpha_4=\pi/2$
5-6	θ_5	$d_5=80$	$a_5=0$	$\alpha_5=-\pi/2$
6-c	θ_6	$d_6=100$	$a_6=50$	$\alpha_6=0$

利用 MATLAB 中的 Robotics Toolboxs 工具箱,绘制出机械手的连杆坐标系模型,如图 2 所示,其中各圆柱的中心是连杆坐标系的原点,图 2 和图 1 所示的连杆模型位姿一致,从而验证了 DH 参数表的正确性,并建立起了机械手的正运动学模型[5]。

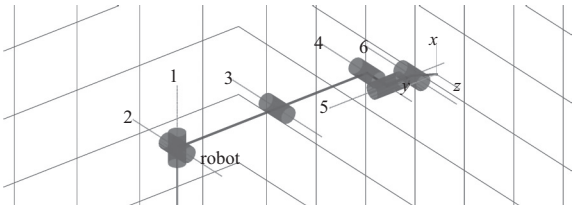


图 2　MATLAB 连杆模型

1.3　六自由度机械手的结构强度分析

在 CATIA 中为机械手的各个部件定义好材料,软件自动计算出了各个关节的负载数据,如表 3 所示。

表 3　机械手关节负载

关节	负载/kg	负载惯量矩/(kg·m^2)	静态阻力矩/(N·m)
1	11.39	1.760	32.19
2	9.29	1.620	32.20
3	6.39	0.430	15.38
4	3.62	0.029	2.25
5	2.28	0.009	0.75
6	1.19	0.001	0.06

由于机械手在实际运动过程中存在惯性力,各关节实际承受的力要比静态时大,这里乘上一个系数 1.1,得到了各关节的实际工作阻力。为使机械手壳体有足够的强度,又希望壳体的质量能尽可能地轻便,故选择 7075 铝合金,其对应的拉伸强度为 575 MPa,屈服强度为 504 MPa。将模型导入 ANSYS 中,定义好材料属性,划分网格,添加对应的载荷,这里取关节 1 和连杆 1 这 2 个受力最大的零件,仿真结果如图 3、图 4 所示。

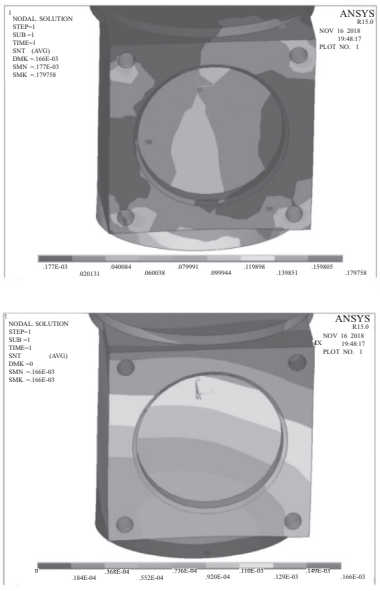


图 3　关节 1 应力分布图

从图中可以看出,关节和连杆的最大形变不超过 0.01 mm,最大应力不超过 20 MPa,本文所使用 7075 铝合

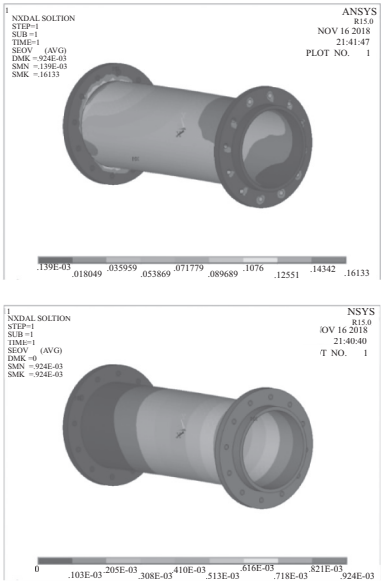


图 4　连杆 1 应力分布图

金的屈服强度为 504 MPa,取安全系数为 1.5,安全应力为 33.6 MPa,大于 20 MPa,显然符合强度要求。

2　六自由度机械手的动力学分析[6]

要进行机械手的动力学仿真,首先要对机械手的末端轨迹进行轨迹规划,采用关节空间轨迹规划法[7]。这种方法是针对空间已知曲线中一组相应的关节角值,利用五次多项式插值,得到可求导的关节驱动函数的方法[8]。这里选用验证机械手性能最常见的方圆轨迹。

将 CATIA 中建立好的模型导入 ADAMS 中,然后在机械手的底座、关节连接处等部位设置好约束(即对 6 个旋转关节添加旋转副,对底座添加固定副),并定义好六自由度机械手的材料、密度、弹性模量、泊松比。此外,考虑到实际工况还需要对各关节添加一定的阻尼以贴合真实情况。设置仿真时间为 33.4 s,末端运动速度为 280 mm/s,机械手在 ADAMS 中绘制的仿真轨迹如图 5 所示。

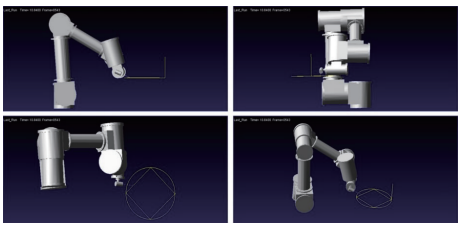


图 5　方圆轨迹

通过仿真测量,ADAMS 计算出各关节运动的角速度-时间曲线,角位移-时间曲线,力矩-时间曲线等。此处仅罗列出关节 1、关节 2 的角速度-时间曲线,如图 6、图 7 所示。

结合 ADAMS 计算出的角速度-时间曲线以及力矩-时间曲线,可以对电机进行选型。1、2 关节选用 GTUSM-60-N-A型电机,为双定子型;3、4、5 关节采用 GTUSM-60-N-A 型电机,为单定子型;第 6 关节使用 GTUSM-30-N-A 电机。

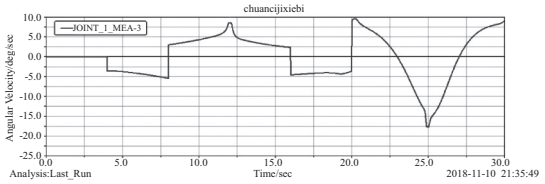


图 6　关节 1 角速度-时间曲线

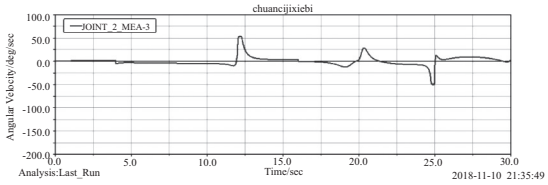


图 7　关节 2 角速度-时间曲线

这里 GTUSM 表示电机为旋转型行波型,30 和 60 表示的是电机定子尺寸,N 表示电机为非磁性材料制成。至此已经完成机械手的构型设计、强度分析以及电机的选型。

3　结语

为了解决武器型号从预研阶段到批产阶段中存在的装配人员不足的问题,设计了一款六自由度机械手。首先,选择了机械手的机械构型为 RRR 型,结合 Pieper 准则,确定了机械手的构型。然后在 CATIA 中绘制出了机械手的三维模型,设置相应的材料,计算出各关节负载,在 ANSYS 中进行仿真,验证了各个壳体的强度。在空间中对机械手末端的轨迹进行规划,并将机械手的三维模型导入 ADAMS 中,沿轨迹进行运动,得到了机械手各关节的角速度-时间曲线等,作为电机选型的依据[9-10],为后续的精度补偿、控制等工作打下了基础。

参考文献:

[1] 林自旺,顾凯杰,王经纬,等. 电动弹跳轮式复合机器人结构设计[J]. 机械制造与自动化,2018,47(1):163-165.
[2] 刘松国. 六自由度串联机器人运动优化与轨迹跟踪控制研究[D]. 杭州:浙江大学,2009.
[3] 肖振楠,申燚,倪辰旖. 六自由度机械手的运动轨迹规划与仿真[J]. 机床与液压,2018,46(15):58-63.
[4] 顾以进. 钣金冲压自动上下料机械手的研究与开发[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
[5] 刘鹏,王强,张伟,等. 模块化机器人手臂运动学及仿真研究[J]. 自动化技术与应用,2017,36(7):47-51.
[6] 蔡汉明,夏金芳. 基于 ADAMS 六自由度机械手的动力学分析与仿真[J]. 机械研究与应用,2013,26(2):42-44.
[7] 乐英,任书娴. 六自由度机器人 NURBS 轨迹规划研究[J]. 现代制造技术与装备,2018(11):25-27.
[8] 樊旭,杨冬,张改萍,等. 一种新型板材安装机器人的空间直线轨迹规划[J]. 现代制造工程,2017(6):62-68.
[9] 冯浩,詹勇军. 双臂喷釉机械手运动特性分析[J]. 制造业自动化,2016,38(3):20-24.
[10] 李朋. 喷嘴环叶片磨床及其上下料机械手设计与研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2017.

收稿日期:2019-09-30