

基于 SimMechanics 的并联式机械臂设计与仿真

薛洁媛 史春景

沈阳理工大学机械工程学院 辽宁沈阳 110158

摘要：传统的并联式机械臂系统在结构设计上复杂，建模和仿真上的困难。本课题设计出了一种并联式机械臂系统，能在完成可控抓取的同时实现快速搬运。通过数学模型构建和分析，完成了装置结构设计。使用 SolidWorks 进行抓取系统和输送系统的建模和装配。通过 Matlab/SimMechanics 对所设计系统进行动态仿真。验证结构合理性和可行性。

关键词：并联式机械臂；结构设计；SimMechanics；运动仿真

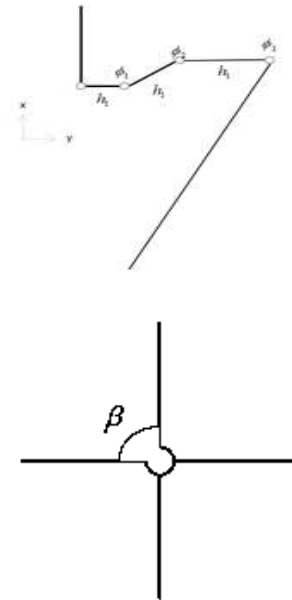
一、引言

机械臂的设计与仿真一直是国内外机械工业的研究热点。结构上可以划分为串联、并联式。传统机械臂多为串联式，并联机械臂发展时间相对较晚，与串联式机械臂相比拥有更高的工作精度，更快的反应速度^[1]。但并联式机械手臂系统因结构设计上较复杂，造成建模和仿真分析上的困难。为此，本文在Design of manipulator based on two-dimensional force feedback^[2]基础上，设计出一种并联式四指机械手系统，此系统可以完成抓取功能，并实现被抓物体能够实现快速搬运。首先对抓取系统和输送系统两部分结构进行分析，建立数学模型。后利用SolidWorks进行部件设计建模与整体装配。最后通过Matlab中Simmechanics模块对设计进行运动仿真和分析^[3]，以此来验证所设计结构的合理性和可靠性。

二、并联式机械臂结构设计

2.1 运动学建模

对于并联式机械结构设计，运动学建模能得出各部分尺寸与几何空间的关系。D-H法^{[4][5]}是常用的运动学建模方法如图1。通过定义各连杆部件坐标系，对相应参数进行推导，最终得到末端相对于初始坐标系的方向，后进行运动学方程求解。



	β	ϕ	s	h
1	0	ϕ_1	0	h_1
2	$\pi/2$	ϕ_2	0	h_2
3	π	ϕ_3	0	h_3
4	$3\pi/2$	ϕ_4	0	h_4

图1 运动学分析建模及参数 β 关节件扭角 ϕ 关节件转角 s 关节件间距离 h 关节件长度

由建模与各关节件间参数可以得出并联机器人手爪的变换矩阵：

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos \phi_2 & -\sin \phi_2 & 0 & h_2 \cos \phi_2 \\ \sin \phi_2 & \cos \phi_2 & 0 & h_2 \sin \phi_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} \cos \phi_3 & -\sin \phi_3 & 0 & h_3 \cos \phi_3 \\ \sin \phi_3 & \cos \phi_3 & 0 & h_3 \sin \phi_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_4 = \begin{bmatrix} \cos \phi_4 & -\sin \phi_4 & 0 & h_4 \cos \phi_4 \\ \sin \phi_4 & \cos \phi_4 & 0 & h_4 \sin \phi_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

联立求得末端坐标，得出运动学建模结果。

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_1 \cdot (h_4 \cos(\phi_2 + \phi_3 + \phi_4) + h_3 \cos(\phi_2 + \phi_3) + h_2 \cos \phi_2 + h_1) \\ \cos \phi_1 (h_4 \cos(\phi_2 + \phi_3 + \phi_4) + h_3 \cos(\phi_2 + \phi_3) + h_2 \cos \phi_2 + h_1) \\ -h_4 \cos(\phi_2 + \phi_3 + \phi_4) - h_3 \sin(\phi_2 + \phi_3) - h_2 \sin \phi_2 \end{bmatrix}$$

2.2 动力学建模

在机械手系统中，由于手爪结构对称，故简化为对单个手爪建立的动力学模型^{[6][7]}。在进行计算后能够知道爪子的质量，单爪受力简图以及在工作时被夹物体的受力如图 2。

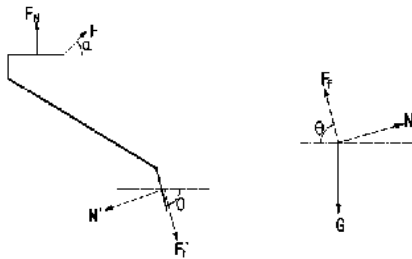


图 2 手爪与被夹物体受力分析图

由摩擦力公式可得手爪表面摩擦力为：

$$F_f = Nf$$

通过牛顿第二公式分析可得：

$$F_f \sin \theta + N \cos \theta = G$$

根据不同方向上受力平衡：

$$F \cos \alpha + F_f' \cos \theta - N' \sin \theta = 0$$

$$F \sin \alpha + F_N - N' \cos \theta - F_f' \sin \theta = 0$$

F 的 y 轴方向上分量大小为 P 表示为：

$$P_{TOTAL} = 4P \quad P = F \sin \alpha$$

$$P_{ACTUAL} \geq P_{TOTAL} * \frac{K_1 K_2}{\eta}$$

通过得到的整体力应该小于实际提供力^[8]：

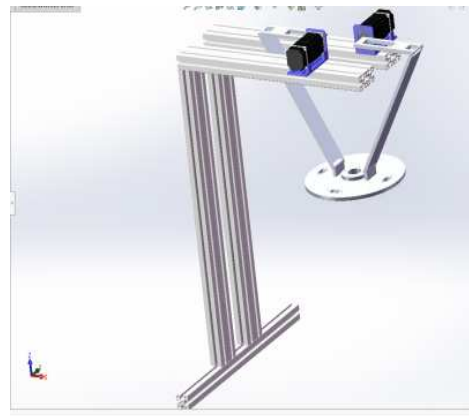
在这之中通过搜集相关资料得到 $\eta = 0.9$ 、 $K_1 = 1.2$ 、 $K_2 = 1 + a/g$ 。经过计算得出：

$$F_N = 0.201, \quad P_{ACTUAL} \geq 2.904N$$

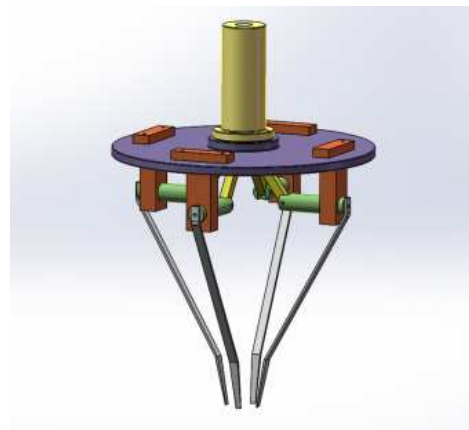
根据结果分析可得，所选动力元件提供力能够满足需求。

2.3 几何建模与装配

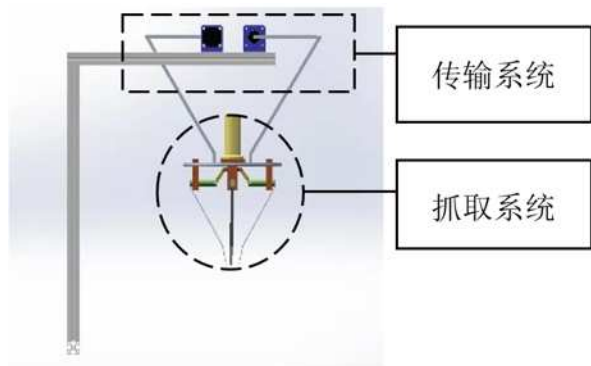
确定相关零件整体比例后，以 Solidworks 为建模装配软件^[9]，分抓取系统和输送系统两部分进行装配。最后进行整体组装。见图 3



(a) 传输系统



(b) 抓取系统



(c) 整体装配图

图3 各系统及整体装配图

三、SimMechanics仿真分析

将所构建模型导入至Matlab中，生成基本结构框图，添加运动所需模块：输入函数、初始位置、数模转换、旋转绞配置、示波器等，完成基本运动框架搭建^[10]。后定义各模块参数，初始位置、电机输出扭矩。在仿真时，将传输系统与抓取系统者运动相对独立，在仿真时可对彼此隐藏便于观察。

在进行完函数设计，相关转换显示模块组装后，需要对运动绞进行参数配置，在模块库中存在多种运动绞可以进行选择，在这里使用的是旋转绞，具体配置界面包括状态目标、内部力学设置、驱动设置、传感器、复合力/力矩传感等。在进行相关配置时主要考虑到由于存在往复运动的需求，在设置驱动时通过设置位置输入能简化步骤，选择力矩驱动则会需要庞大函数构造过程，添加后将力矩选项设置为自动解算，在传感器设置中勾选位置选项，连接到示波器后可以得到相关关节位置的位置移动情况。

在配置完输入函数、初始位置、数模转换、旋转绞配置、示波器并进行连结后整个模拟框图如图点击运行按钮，可以在主界面观察到建模装配模型的相关运动情况，电机驱动运动时的位置截图如图5所示，符合相关分析结果，过改变输出函数的幅值频率，可以加快运动的速度。但在此过程中会产生抖动，这与输入函数的选择有关，也是下一步调试改进的方向。

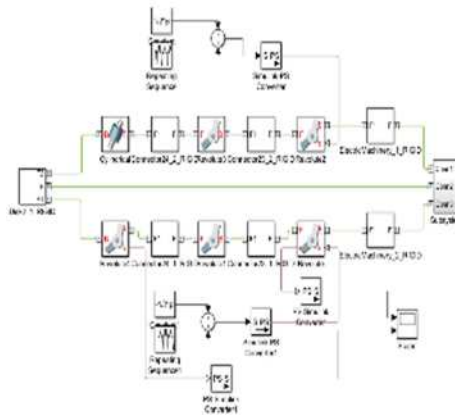
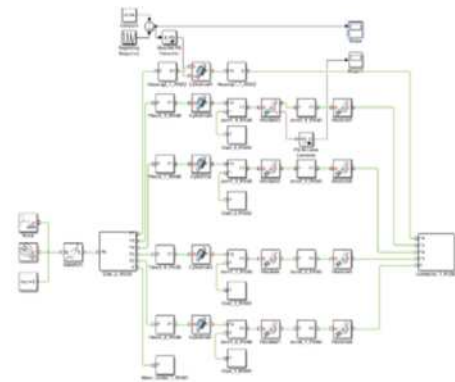


图4 抓取系统与传输系统仿真图



图5 抓取系统与传输系统动画

测试结果表明,系统的传输模块与抓取模块能够有效实现预设功能,在对两者装配后能在实机运行中取得较好

结果,结果表明该设计满足设计预期。未来将对控制函数进行线性优化,并降低运动周期,提高整体的工作效率。

结语

本文搜集了相关文献并对相关结构进行总结,对相对成熟的结构进行选择与分析。在进行设计分析时优先考虑整体结构的稳定性、以及相关设计的成本。在进行设计时选择了恰当的电机。设计材料铝合金在结构强度允许的情况下实现了轻量化,经济化。连接构件优先考虑标准件,有效降低了成本。之后对相应结构进行了力学分析,分析能够验证整体能否完成实际需求的最小输出。建立了运动学模型并得出了相关解。在机械臂尺寸、结构设计完成后,利用Solidworks进行了机械结构各部分的三维建模与装配。后将其在Matlab/SimMechanics中进行了仿真分析,验证了设计的可行性。

参考文献

- [1]崔宁.并联机器人机构的创新与应用研究进展[J].电子世界,2020(21):19-20.
- [2]Liu W, Li F, Y Wan, et al. Design of manipulator based on two-dimensional force feedback[J]. Intelligent Service Robotics, 2020.
- [3]周挺,程华,桑炜.基于SimMechanics的六自由度加载平台仿真研究[J].机械制造与自动化,2021,50(03):85-89+94.
- [4]郑跃鹏,郝成林.基于D-H参数法对矿用车载机械臂的运动学分析[J].煤矿机械,2023,44(07):77-79
- [5]薛忠健.基于D-H法的锻造机器人运动学分析[J].机电工程技术,2020,49(11):40-42+128.
- [6]孙伟行.新型4自由度并联机构的设计与机构学分析[D].河北科技师范学院,2023.
- [7]蔡自兴.机器人学.第3版[M].北京:北京清华大学出版社,2000.75.
- [8]师恒.六自由度机械臂系统设计及其关键技术研究[D].中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所),2019.
- [9]余志伟.基于SolidWorks的零件三维设计技巧[J].现代工业经济和信息化,2022,12(10):37-38.
- [10]覃金昌,王为庆.基于simulink的机电一体化系统案例仿真教学研究[J].技术与市场,2016,23(01):9-11.