

# The Optimal Design and Simulation about a 3-DOF Redundant Actuation Hybrid Robot

Jizhuang Hui, Linlin Wu, Shunpeng Cheng, Bin Zhao

Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

Email: [huijz6363@chd.edu.cn](mailto:huijz6363@chd.edu.cn), [593382780@qq.com](mailto:593382780@qq.com)

Received: May 11<sup>th</sup>, 2017; accepted: May 28<sup>th</sup>, 2017; published: May 31<sup>st</sup>, 2017

---

## Abstract

In order to make the hybrid robot have the better structural performance and working performance, the optimization design of the robot is required. A 3-DOF redundant actuation hybrid robot is used as the research object in this paper. Firstly, the dimension parameters of the robot are non-dimensionalized and the work space of the robot is analyzed. Secondly, the optimal member size and position parameters are sought in the work space of the robot, and the corresponding performance atlas has been plotted. Finally, the pattern of 3-DOF redundant actuation hybrid robot was established by SOLIDWORKS which was imported to Adams to obtain its dynamic simulation analysis; the analysis results are consistent with the distribution rules of the performance atlas. Simulation results show that the correctness of each performance index analysis and the rationality of optimization method. The simulation results provide the reference for the optimization of similar robot mechanism.

## Keywords

Redundant Actuation Hybrid Robot, Parameter Optimization, Work Space, Performance Map

---

# 一种三自由度冗余驱动混联机器人的优化设计与仿真分析

惠记庄, 武琳琳, 程顺鹏, 赵斌

中国道路施工技术装备教育部重点实验室, 陕西 西安

Email: [huijz6363@chd.edu.cn](mailto:huijz6363@chd.edu.cn), [593382780@qq.com](mailto:593382780@qq.com)

收稿日期: 2017年5月11日; 录用日期: 2017年5月28日; 发布日期: 2017年5月31日

## 摘要

对机器人进行相应的优化设计可以使机器人具有更好的结构性能与工作性能。以一种三自由度冗余驱动混联机器人作为研究对象,对该机器人尺寸参数无量纲化并分析该机器人可达的工作空间,进而在混联机器人工作空间中找出最优杆件尺寸和位置参数,绘出该混联机器人在其工作空间中的性能图谱。采用 Solidworks 软件建立优化后的三自由度冗余驱动混联机器人的三维模型,并导入到 ADAMS 中对其进行动态仿真分析,其分析结果与性能图谱中各性能指标分布规律相一致,验证了机构各项性能指标分析的准确性以及优化方法的合理性,其仿真结果为类似机器人机构的优化提供参考。

## 关键词

冗余驱动混联机器人, 尺寸参数优化, 工作空间, 性能图谱

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

串联机器人能够适应工作空间大以及灵活性要求较高的工作场合,但关节之间累积误差大,精度较低。而并联机器人能够实现高速高精度的运动,但是工作空间比较小、各关节之间有较强的耦合性。混联机器人结合了两者的结构特点,简化了机械结构,载荷分布均匀,机构的结构刚度好、定位精度高,适用于高速运动的场合[1],拓宽了机器人机构的应用范围,同时冗余驱动改善了机器人机构的灵巧性并克服机器人机构的瞬时奇异性,在工业和医学领域得到了广泛的应用。

机器人各机构尺寸的取值与机构的性能指标如灵巧度、承载能力以及速度等关系紧密,为了对机构进行合理的设计和 optimization,需要深入研究两者之间的对应关系。Vincent [2]使杆件总长与工作空间直径的比达到最小值,约束其 Jacobi 矩阵奇异值和执行器速度,既保证了较大的工作空间,又具有较大的速度。刘欣 [3]以一种平面冗余并联机器人作为优化对象,对其尺寸参数进行优化,定义了运动精度、力传递性能和刚度性能指标,优化后的机构末端执行器不仅具有较大的工作空间,而且具有较好的运动学和动力学性能。张春风[4]以 3RRR 并联机器人作为研究对象,采用粒子群算法对其尺寸参数进行分析并取得最优值。在机器人尺寸优化研究领域,研究者多以研究并联机器人尺寸性能关系为主,对冗余混联机器人研究相对较少。

本文以一种三自由度冗余驱动混联机器人作为研究对象,针对该机器人的结构特点,对该机器人的尺寸参数进行优化设计,利用 MATLAB 算法绘出该机器人在工作空间内的各项性能图谱;分析该机器人的尺寸参数与其性能的关系,并通过对各项性能图谱与机器人建模仿真结果的讨论,验证了该尺寸优化方法对混联冗余机器人的适用性。

## 2. 三自由度冗余混联机器人简介

该三自由度冗余驱动混联机器人以固高科技的平面二自由度冗余驱动并联机器人为基础,在其末端执行器处增加了一个 Z 轴串联机构。该机器人具有三个方向的自由度,即机构的末端执行器在 X、Y、Z 方向的自由度,但它包含四个驱动器,故其属于冗余驱动混联机器人系列,该机器人的工作平台如图 1 所示。

Z 向的上下移动由独立伺服电机控制，移动方式为丝杠螺母副，移动距离由上下两个传感器控制，传感器的位置可调，使得该机器人能够根据加工工件的厚度来调整 Z 向的移动距离。X 与 Y 两个方向自由度由并联部分控制，串联部分实现 Z 方向的移动的自由度，串联部分与并联部分共同工作，即体现了并联部分的优势，又增加了机器人的整体工作的空间，从而使其可以实现空间三自由度运动。

### 3. 机器人工作空间分析

由于 Z 轴串联机构与平面并联机构之间没有耦合关系，分别由不同的电机单独控制，故在进行运动学分析时可以分开进行研究。对于串联机构，其 Z 轴移动距离由传感器的位置来控制，传感器的位置可控，进而改变混联机器人在 Z 轴方向上工作空间的大小。对于并联机构，其结构示意图如图 2 所示。

该并联机构结构对称，每条运动支链可以看做一个二杆机构，各杆件之间为转动副联接。C 点为末端执行器的位置。设主动杆  $A_i B_i$  ( $i=1,2,3$ ) 杆长为  $L_1$ ，从动杆  $B_i C_i$  的杆长为  $L_2$ ，正三角形的中心点到其各个角点的距离  $O'A_i$  为  $L_3$ 。

为更系统的研究该机器人的结构，需将机器人并联部分的各个杆件实际尺寸值无量纲化[5]，即令：

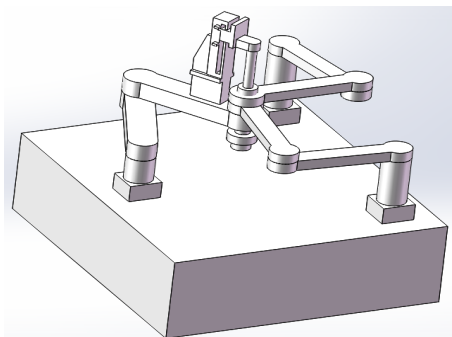


Figure 1. The working platform of the 3-DOF redundant actuation hybrid robot

图 1. 三自由度冗余混联机器人工作平台

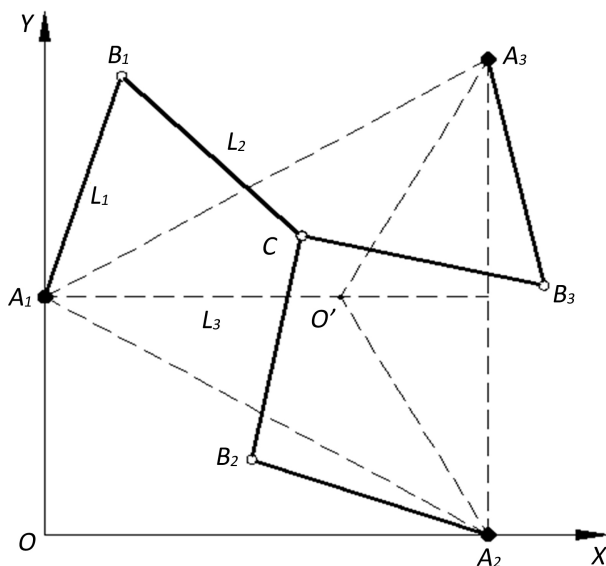


Figure 2. Structure sketch of parallel structure of the 3-DOF redundant actuation hybrid robot

图 2. 混联机器人并联机构部分的结构示意图

$$L = (L_1 + L_2 + L_3) / 3 \tag{1}$$

$$l_i = L_i / L \quad (i = 1, 2, 3) \tag{2}$$

其中， $L_i$  表示各个杆件的实际尺寸， $l_i$  为无量纲参数，表示各个杆件的相对长度。

由式(1)和式(2)得：

$$l_1 + l_2 + l_3 = 3 \tag{3}$$

机器人若能够正常的运行，各杆件尺寸的数值应达到以下标准：

$$0 < l_1 < 3, 0 < l_2 < 3, 0 \leq l_3 \leq 1.5 \tag{4}$$

为了便于设计空间的可读与可用，无量纲杆长  $l_1$ 、 $l_2$  与  $l_3$  中任意两个参数互相独立，将其放到平面的二维空间中，得到其并联机构的设计空间，如图 3 所示。

四边形 ABCD 中的任意一点(如点 a)与都三维坐标  $(l_1, l_2, l_3)$  一一对应，同时与并联机构的尺寸参数也唯一对应，因此所有由  $l_1$ 、 $l_2$  与  $l_3$  定义的无量纲并联机构均位于四边形内。这样就可以在所得到的设计空间中分析机构的尺寸值与性能指标间的关系。

## 4. 机器人尺寸参数的优化

### 4.1. 尺寸参数的选择

机器人的性能指标主要有：工作空间的形状和大小、灵巧度、刚度、承载能力等[6]。这些指标与机构各杆件的尺寸参数以及位置和形态息息相关，通过研究它们之间的相互关系，对机器人拓扑结构设计以及参数优化都有重要的参考意义。

文献[7]详细介绍了对于并联机构各性能指标的定义,通过其算法用 MATLAB 绘出对应的性能图谱,分析图谱得出以下结论: 在二自由度并联机构设计空间中所对应的  $0 \leq l_1 \leq 1$  和  $1 \leq l_3 \leq 1.5$  的范围内, 灵巧度指标值较大( $\eta_j \geq 0.5$ ), 机构的全条件指标值较好; 机构承载能力的极大值指标和极小值指标均较大 ( $\zeta_{F_{\max}} \geq 2.5$ ,  $\zeta_{F_{\min}} \geq 1.2$ ), 可承受较高的工作载荷; 机构刚度极大值指标和极小值指标均不高 ( $\zeta_{D_{\max}} \leq 1.0$ ,  $\zeta_{D_{\min}} \leq 0.3$ ), 机构刚度较大不容易变形。

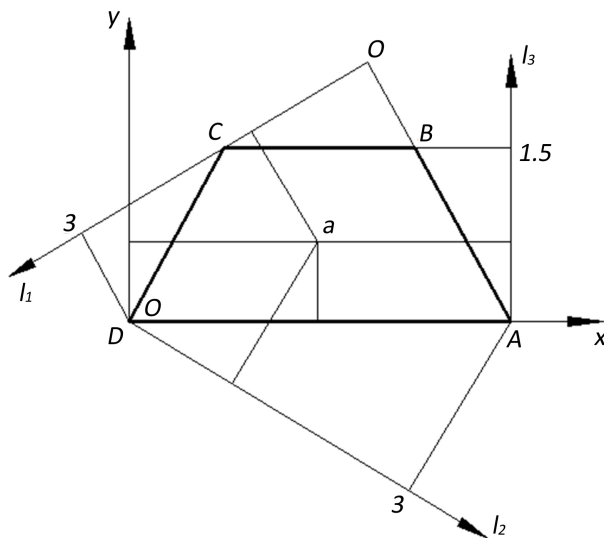


Figure 3. The design space of parallel structure of the 3-DOF redundant actuation hybrid robot

图 3. 混联机器人并联机构部分的设计空间

考虑到机构末端执行器工作空间的连贯性及实用性, 兼顾考虑机构性能各项同性较好的原则[7], 本文选择并联机构的尺寸参数范围为 $l_1 = l_2$ 、 $0 \leq l_1 \leq 1$ 和 $1 \leq l_3 \leq 1.5$ 。在此范围内, 机构末端执行器的工作空间具有连贯性, 没有内部边界奇异点[8], 理论工作空间面积较大, 灵巧度指标较高, 承载能力与刚度较好, 其他指标也适中。综上, 优化参数, 在此范围内选取合适的无量纲尺寸参数, 参数值见表 1。

## 4.2. 性能图谱的分析

当机构尺寸满足 $l_1 = l_2$ 时, 该机器人的理论工作空间为三条支链工作空间相交的区域, 由于 Z 轴为串联, 在 Z 向的任一高度, X-Y 平面上的工作空间是一致的, 因此, 只需分析 X-Y 平面工作空间内的运动性能。设定机器人 Z 轴的移动距离为 100 mm, 运用 MATLAB 软件, 绘制出三自由度混联机器人的三维工作空间点状云图, 如图 4(a)。并在此工作空间中利用 MATLAB 算法对其各项性能进行分析, 从而绘出在此工作空间中的各项性能图谱, 如图 4(b)~图 4(f)。

由其性能图谱得知:

(1) 各指标在其工作空间中的变化趋势均比较平稳, 因此优化后的尺寸参数具有合理性。

(2) 在接近工作空间中心的位置, 灵巧度指标较大( $\eta_j \geq 0.7$ ), 越靠近工作空间边界, 灵巧度逐渐降低。

(3) 承载指标与刚度指标均满足要求, 但越靠近工作空间边界, 承载力极小值 $\zeta_{F\min}$ 逐级递减, 刚度极大值 $\zeta_{D\max}$ 逐级递增, 承载能力与刚度逐渐降低。

由此得出结论: 在此工作空间中, 在接近中心点的位置, 各项性能指标均比较好, 越靠近工作空间边界, 各性能越不稳定。

若选取量纲化因子 $L = 300$  mm, 选取表 1 所得的参数值, 则机构的实际尺寸参数为 $L_1 = 270$  mm,  $L_2 = 270$  mm,  $L_3 = 360$  mm, 末端执行器的实际工作空间面积为 $S = 1.485$ ,  $L^2 = 133650$  mm<sup>2</sup>, 对应的各个电机坐标位置为 A1 (0, 312), A2 (540, 0), A3 (540, 624)。

## 5. 模型的建立与仿真

### 5.1. 仿真模型的建立

本文在 Solidworks 软件建立机构的三维空间模型, 在保证混联机器人仿真运动完整性的前提下三维模型应尽可能的简化。在进行装配时, 各个构件所在的位置即为 ADAMS 中仿真运动的初始位置, 因此, 在装配时需要将末端执行器的位置固定下来, 避免后续在 ADAMS 中进行调整比较麻烦。

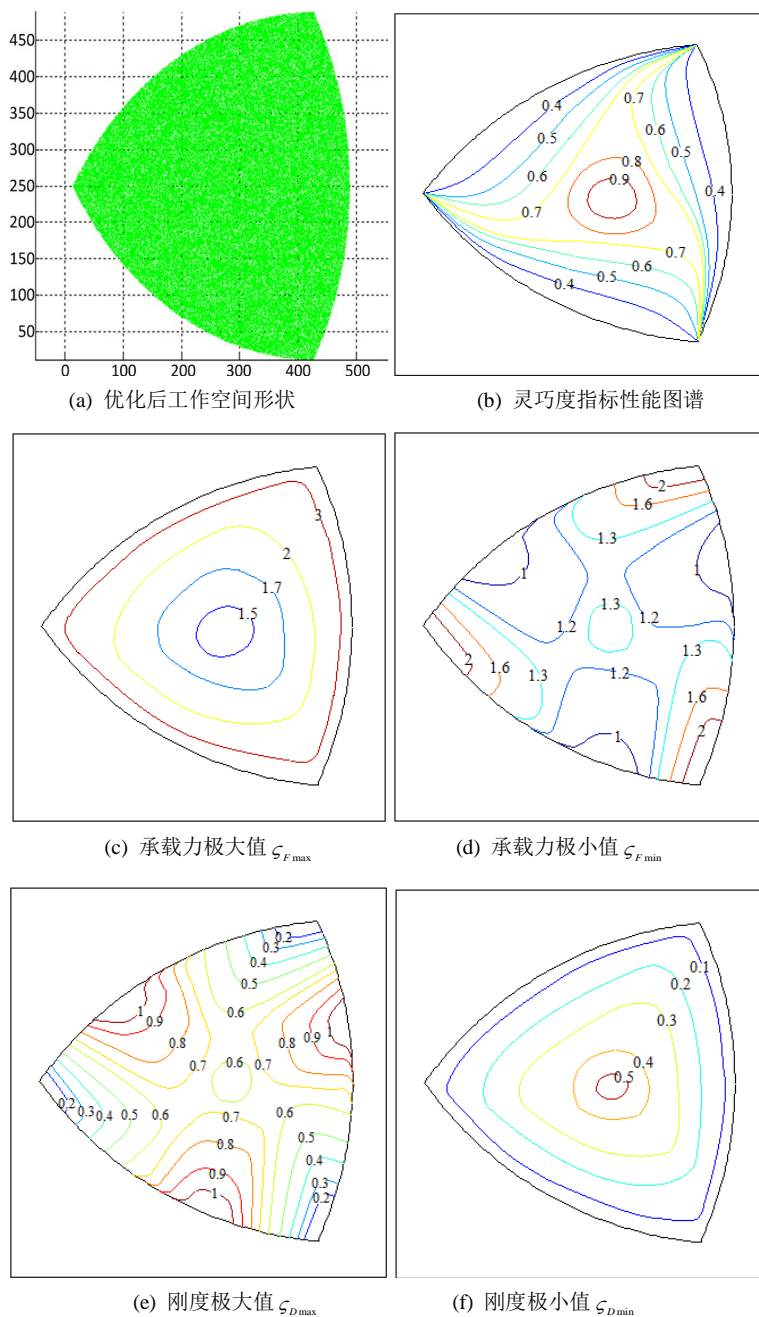
将建好的三维模型导进到 ADAMS 中, 并 ADAMS 中对机构各部件的属性、约束等重新设定[9]。在需要设置约束的位置以及参考点位置添加 marker 点, 接着根据各杆件之间的运动系, 在基座与地面之间添加固定副, 在三个主动杆与基座或从动杆中间增添转动副约束, 在三个从动杆之间添加三个转动副, 在串联 Z 轴上添加移动副。在 A1、A2、A3 处添加旋转驱动, 在串联 Z 轴处添加移动驱动。

因为该机构为冗余机构, 所以在所建模型自检过程中会产生冗余的约束, 从而导致仿真结果可能出现较大的偏差, 因此需要将 ADAMS 中的冗余约束去除, 通常采用的解决办法是将模型中的低副或者高

**Table 1.** The dimensionless parameters and performance index of mechanism

**表 1.** 机构的无量纲尺寸参数及部分性能指标值

无量纲杆件尺寸 ( $l_1, l_2, l_3$ )	工作空间面积	灵巧度指标	速度指标		承载指标		刚度指标	
			极大	极小	极大	极小	极大	极小
(0.9, 0.9, 1.2)	1.485	0.60	0.82	0.48	2.42	1.27	0.69	0.25



**Figure 4.** The design space and performance map after the structure optimization  
**图 4.** 优化后机构的工作空间与性能指标图谱

副用基本副或者是基本副的组合来代替[10]。在本模型中，将 B1 处的转动副更改为点点副，将 B2 处的转动副更改为点点副和平行副的组合，将 B3 处的转动副更改为点点副，将 C 处其中两个转动副分别更改为点面副、点线副，这样就可以消除机构的冗余约束[11]。并对模型进行自检得该仿真无冗余约束，其三维仿真模型如图 5 所示。

### 5.2. 仿真结果的分析

合理安排末端执行器的运动轨迹，使其始终保持在理论工作空间的范围内，并尽量接近工作空间的



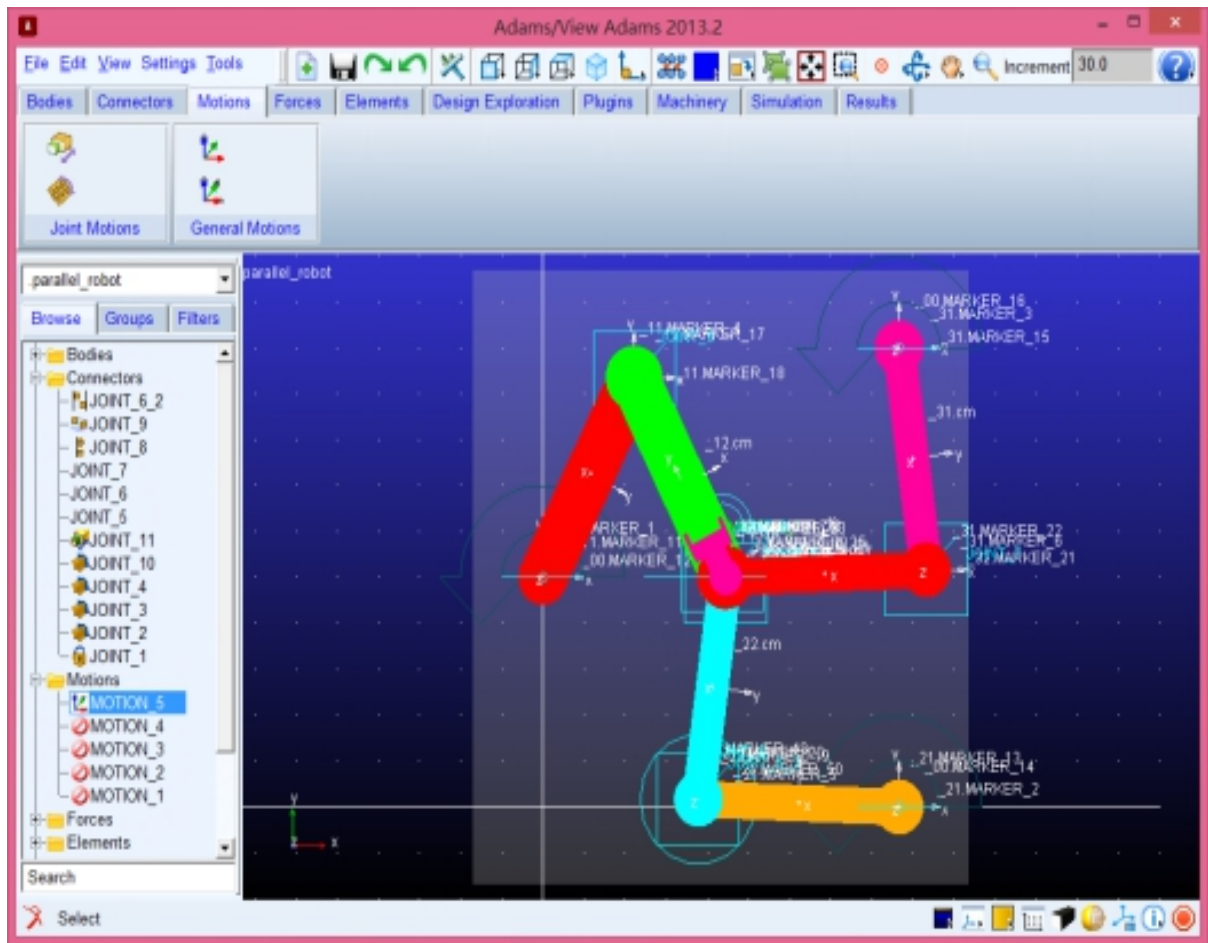


Figure 5. The model of simulation in ADAMS

图 5. ADAMS 仿真模型

边缘，以便更好地分析混联机器人在理论工作空间中的工作特性。给定机器人的运动轨迹曲线：

$$\begin{cases} x = (25 + 0.5t) \times \sin(0.05\pi t) + 270 \\ y = (25 + 0.5t) \times \cos(0.05\pi t) + 312 \\ z = -0.5t \end{cases} \quad (5)$$

机器人末端执行器的轨迹为一个半径随时间逐渐增加的空间螺旋线，其圆心为 (270, 312)。为了便于仿真分析，首先将之前添加的三个旋转驱动以及一个移动驱动设置为无效，然后在末端执行器处添加一个具有三个方向移动自由度的点驱动，根据运动轨迹方程设置点驱动的驱动方程，设置运动学仿真参数为 160 s，500 步，在 ADAMS 中的仿真后处理模块可以求出相应的仿真曲线，如图 6~图 7 所示。

由各主动关节的受力曲线和力矩曲线可知：

在末端执行器运动的前半部分，各主动关节受力平稳，其曲线波动幅度较小，而当末端执行器逐渐接近工作空间的边缘部分时，受力变化曲线与力矩变化曲线均存在很明显的波峰，波动较大。由此可知，在混联机器人的设计空间的中心部分，机构的受力较小，且不容易变形，容易实现高速高精度的加工，靠近边缘部分，机构的承载能力和刚度性能都会有所下降，从而导致这与理论工作空间范围内对机器人性能图谱的分析一致，验证了对性能参数分析的正确性。

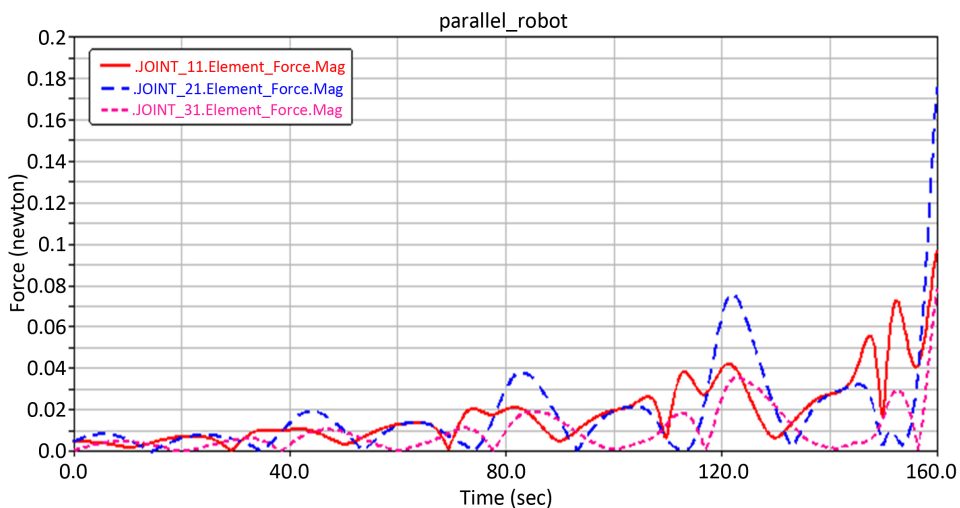


Figure 6. The force curve of each active joint in robot

图 6. 机器人各主动关节受力变化曲线

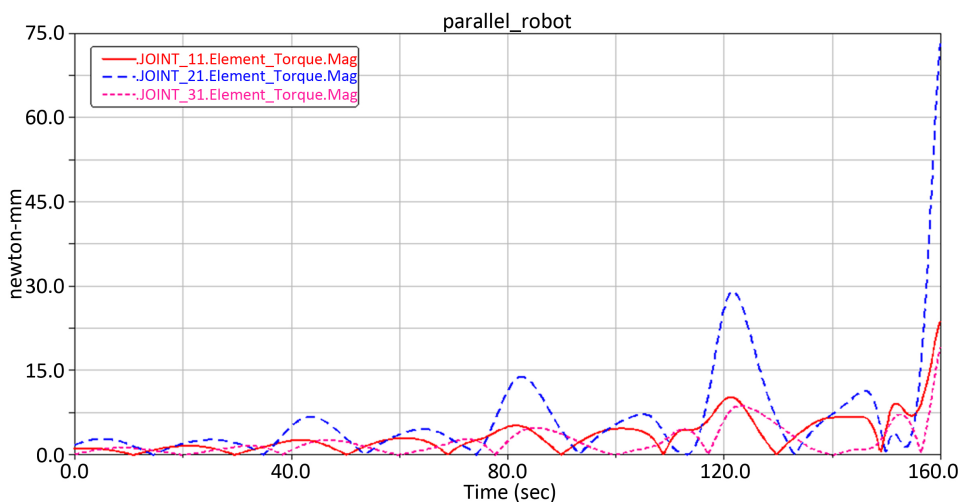


Figure 7. The torque curve of each active joint in robot

图 7. 机器人各主动关节力矩变化曲线

## 6. 结论

针对目前对少自由度混联机器人尺寸优化的研究较少的情况,本文对一种三自由度冗余驱动混联机器人进行结构分析,根据机器人不同结构的特点选取合理的尺寸优化参数,在 MATLAB 中绘出混联机器人优化后机构的各性能指标图谱,分析各指标在其理论工作空间中的分布规律和变化趋势。对该机器人进行建模与仿真,其结果与机构理论工作空间中性能图谱的分布规律相一致,即在该机器人工作空间中心位置各项性能较好,靠近边界各项性能逐渐降低。其尺寸优化的方法为相关混联机器人机构的性能分析和优化提供依据。

## 致谢

在此由衷的感谢我的导师惠记庄教授,在论文撰写过程中多次询问研究过程,并耐心的为我指点迷津,帮助我开拓研究思路,精心点拨、热忱鼓励;感谢实验室的师兄师姐在论文研究的过程中给予的帮助与支持;感谢我的伙伴们程顺鹏、赵斌等人在论文写作过程中提供的热心帮助!



## 基金项目

基于层级堆聚理论的并联机器人动力学建模与约束跟随控制方法研究 (51605038)。

## 参考文献 (References)

- [1] 薛子云. 一种三自由度混联机构运动控制技术[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [2] Nabat, V., Lorm, D., Pierrot, F., *et al.* (2005) Par4: Very High Speed Parallel Robot for Pick-and-Place. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Edmonton, 2-6 August 2005, 553-558. <https://doi.org/10.1109/iros.2005.1545143>
- [3] 刘欣, 仇原鹰, 盛英, 李俊华. 平面冗余并联机器人的综合性能优化设计[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(5): 626-632.
- [4] 张春风, 赵辉. 3RRR 并联机器人的优化设计研究[J]. 机械工程与自动化, 2006(4): 92-96.
- [5] Gosselin, C. and Angeles, J.A. (1991) Global Performance Index for the Kinematic Optimization of Robotic Manipulators. *Transaction of the ASME, Journal of Mechanical Design*, **113**, 220-226. <https://doi.org/10.1115/1.2912772>
- [6] Salisbury, J.K. and Craig, J. (1982) Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues. *International Journal of Robotics Research*, **1**, 4-17. <https://doi.org/10.1177/027836498200100102>
- [7] 张立杰, 刘颖, 黄真. 平面 2 自由度驱动冗余并联机器人的性能分析[J]. 机械工程学报, 2006, 42(7): 181-185.
- [8] 张立杰, 李永泉. 一种冗余驱动并联机器人机构工作空间及奇异的研究[J]. 中国机械工程, 2009(23): 2787-2790.
- [9] 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 79-81.
- [10] 惠记庄, 魏芳胜, 高凯, 丁香. 基于 ADAMS 的冗余驱动并联机器人动力学仿真研究[J]. 工程设计学报, 2012, 19(5): 362-365.
- [11] Liu, X.J., Jin, Z.L. and Gao, F. (2000) Optimum Design of 3-Dof Spherical Parallel Manipulators with Respect to the Conditioning and Stiffness Indices. *Mechanism and Machine Theory*, **35**, 1257-1267.

### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [airr@hanspub.org](mailto:airr@hanspub.org)