

并联装箱机器人静动态特性研究^①

孙文成^{②*} 陶 永^{③**} 高进芃^{**} 房增亮^{**}

(* 重庆文理学院机电工程学院 重庆 402160)

(** 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191)

摘 要 装箱机器人的静刚度、模态分析、瞬态动力学等是机器人的静动态特性主要指标。为使装箱机器人的静动态特性能够满足工作使用的要求,前期设计时必须对其进行预估。针对前期预估问题,提出了评价指标和约束条件,按设计流程求出最优参数值。以求解的结果为算例,用 Matlab 软件求出其全域静刚度预估值和全域模态预估值。建立了装箱机器人的动力学模型,并用 SINOvation 软件求出关节力矩曲线,商用软件仿真验证了仿真结果的正确性,为提高装箱机器人的静动态性能及装箱机器人伺服电机和减速机的预估奠定了基础。

关键词 装箱机器人, 静动态特性, 静刚度, 模态分析

0 引 言

20 世纪 80 年代初,瑞士洛桑联邦理工大学的 Clavel^[1]发明了 Delta 机构,安装在机架上的驱动部件,减少了运动部件惯性,之后并联机器人在装箱作业中得到广泛使用。装箱机器人静动态特性主要包括静刚度、模态和瞬态动力学,它们都对机器人的性能产生重大影响。为满足高速、高精、轻质和降低惯性负载的要求,装箱机器人大多采用高强度的碳纤维细长杆作为从动臂,这样虽然质量降低了,杆件柔度增大了,但杆件产生弹性变形必然影响整机的动态精度和响应。装箱机器人的静动态特性预估可有效提高机器人的精度和可靠性。

国内外很多学者对此都进行了研究。张宪民^[2]以整机质量优化为目的,加入频率约束对并联机器人进行优化。Gossehn^[3]提出了并联机构的刚度映射矩阵,分析了在不同参数条件下 3-RPR 机器人的刚度特性。Piras^[4]以一类平面并联机器人作为

例分析了整机低阶固有频率分布与位姿的映射关系。赵兴玉^[5]等人对 3-RHH 并联机床整机机构动力学建模方法进行了研究。Liua^[6]等人对并联机构刚度性能进行了研究,但没有考虑在外力作用下并联机构的变形对机构的刚度性能影响。王新华^[7]等采用实验模态方法对并联机床的动态特性进行研究。Miller^[8]提供了一种新的方法,把任务空间与可达空间之比作为一个参数,雅可比矩阵条件数在全域内求的均值作为一个参数,通过组合两个参数构成新的优化因子,所研究的尺度参数通过优化因子得到。Stock 和 Miller^[9]把任务空间与可达空间之比作为一个参数,而把雅可比矩阵条件数的倒数在全域内求的均值作为一个参数,构造组合两个参数的因子,优化得到一组新的尺度参数。但大都没有对装箱机器人进行全域静动态特性研究。

为使装箱机器人的静动态特性能够满足工作使用的要求,前期设计时必须对其进行预估,求出其大小。本文对设计的装箱机器人静动态特性进行评价和约束研究,并利用相关软件求出其静刚度和模

① 北京市科委课题(D151100001315002)资助项目。
② 男,1989 年生,硕士生;研究方向:工业机器人;E-mail: 814135955@qq.com
③ 通讯作者,E-mail: taoy@buaa.edu.cn
(收稿日期:2017-02-13)

态,为提高装箱机器人的静动态性能,及装箱机器人伺服电机和减速机的预估奠定了基础。

1 并联装箱机器人评价指标和约束条件

如图 1 所示,为装箱机器人任务空间与可达空间示意图。图中机器人主要结构包括:动平台、静平台(三个电机所在的平台)、连接动/静平台间的分支部分,以及中间的可伸缩杆支链。 l_1 和 l_2 分别表示主动臂和从动臂的长度, a 和 b 分别表示静平台和动平台的半径, H 为静动平台之间的距离。动平台中心点 P 的可达空间 W 描述为^[10]:当主动臂处于极限角度状态时,从动臂以主动臂末端为球心,以其自身长度为半径画球面,由若干个球面包络而成的公共相交部分构成的封闭几何体,记为 W_t 。

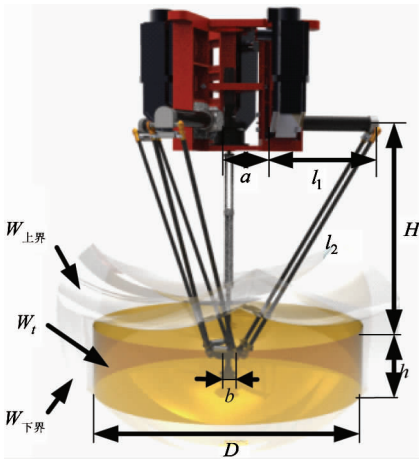


图 1 装箱机器人任务空间与可达空间示意图

1.1 评价指标

主要评价指标为:惯性项评价指标和速度项评价指标。通过在任务空间中离散采样,采用全域最大值最小为评价函数。相关基础理论在文献[10]中有详细论述,此处仅给出主要计算公式。

动力学惯性项评价指标为:

$$\sigma_{amax,i}(G_i) = \sqrt{G_i G_i^T} = \sqrt{\frac{\eta^2 \cos^2 \alpha_i}{\cos^2 \beta_i} + \frac{1}{\cos^2 \alpha_i} + 2\eta} \tag{1}$$

$$\tau_{aG} = \max_{r \in W_t} \max_{i=1,2,3} (\sigma_{imax}(G_i)) \rightarrow \min \tag{2}$$

动力学速度项评价指标为:

$$H_i = \frac{1}{\Delta_i} \left[\frac{(\mathbf{v}_i \times \mathbf{u}_i)^T (\mathbf{v}_i \times \mathbf{w}_i) \mathbf{w}_i \mathbf{w}_i^T}{\Delta_i^2} + \frac{l_1}{l_2} \left(\mathbf{E}_3 - \frac{(\mathbf{v}_i \times \mathbf{u}_i) \mathbf{w}_i^T}{\Delta_i} \right)^T \left(\mathbf{E}_3 - \frac{(\mathbf{v}_i \times \mathbf{u}_i) \mathbf{w}_i^T}{\Delta_i} \right) \right] \tag{3}$$

$$\tau_{vG} = \max_{r \in W_t} \max_{i=1,2,3} (\sigma_{vimax}(H_i)) \rightarrow \min \tag{4}$$

1.2 约束条件

尺度约束条件:为了在机器人的机架上有充足的位置安装电机所以要保证 $e \geq e_{\min}$ ($e_{\min}$ 为动平台与静平台的外接圆半径差的最小值)。相对需求的工作空间,装箱机器人整体的体积要设计紧凑,保证有足够的空间预留,按 $\delta = \frac{D}{2(e + l_1)} = 1$ 公式配置机器人工作的空间和结构尺度之间的关系。

几何条件约束为: $\sqrt{(H + h)^2 + (D/2 + e)^2} - l_2 - l_1 < 0$, $l_2 - l_1 - H < 0$ 。

运动学性能约束:链内角度约束 $\max_{r \in W_t} (\max_i \alpha_i) \leq [\alpha]$, $i = 1, 2, 3$, 链间角度约束 $\max_{r \in W_t} (\max_i \beta_i) \leq [\beta]$, $i = 1, 2, 3$ 。

1.3 设计流程和求解

采用多目标优化的加权法进行优化,如下:

$$\mathbf{w}_G^T \boldsymbol{\tau}_G \rightarrow \min \tag{5}$$

式中, $\boldsymbol{\tau}_G = (\tau_{aG} \ \tau_{vG})^T$, $\mathbf{w}_G = (w_{aG} \ w_{vG})^T$ 表示两种指标所占有的权重。

为了求解式(5),根据定向收敛法,可以列出如下所示的式子:

$$\gamma \rightarrow \min \tag{6}$$

其满足的约束条件为:

$$\boldsymbol{\tau}_G - \gamma \mathbf{w}_G \leq \boldsymbol{\tau}_G^*, \ \boldsymbol{\tau}_G^* = (\min \tau_{aG} \ \min \tau_{vG})^T,$$

$$\mathbf{w}_G = \boldsymbol{\tau}_G^*$$

$$\alpha_{\max} - [\alpha] \leq 0, \ \beta_{\max} - [\beta] \leq 0$$

$$\sqrt{(H + h)^2 + (D/2 + e)^2} - l_2 - l_1 < 0,$$

$$l_2 - l_1 - H < 0$$

$$\frac{D}{2} - (e + l_1) = 0, \ e_{\min} - e \leq 0$$

代入相关参数,利用 Matlab 求解,得出最优解如表 1 所示。

表 1 最优解结果(圆整后)

$e_{min}(mm)$	l_1	l_2	H
150	250	600	530
200	200	600	510
250	180	560	490

根据实际设计计算,采用第二组数据进行下面的分析。

2 全域静刚度预估和全域模态分析

2.1 全域静刚度预估

静刚度是在静载荷的作用下抵抗变形的能力,静态特性的重要影响因素之一就是静刚度。为了保证装箱机器人的定位精度不随外在力的影响下发生大的变化,设计之初要使装箱机器人预留足够大的刚度。在静刚度分析过程中,找到装箱机器人在哪些方向上的变形最大,对变形最大的部位进行有限元优化,增强其静刚度,使在此处的应力应变能够满足使用要求。

当机器人位于某一状态时,在动平台中心点 P 处,分别施加 x, y, z 三个方向的单位作用力,可求出装箱机器人在 x, y, z 方向上的刚度大小,结果如图 2 至图 4 所示。

从图 2 ~ 图 4 中可以看到,机器人的静刚度分布相对比较适中,在三个方向上都能满足要求。

2.2 全域模态特性预估

物体的固有频率与它的硬度、质量、外形尺寸有关,而固有频率是反映装箱机器人动态性能的重要

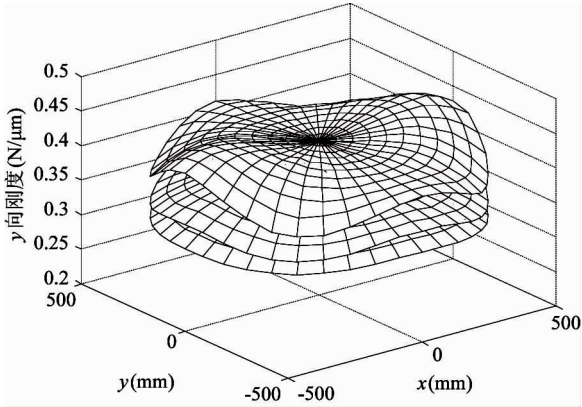


图 3 y 方向刚度分布

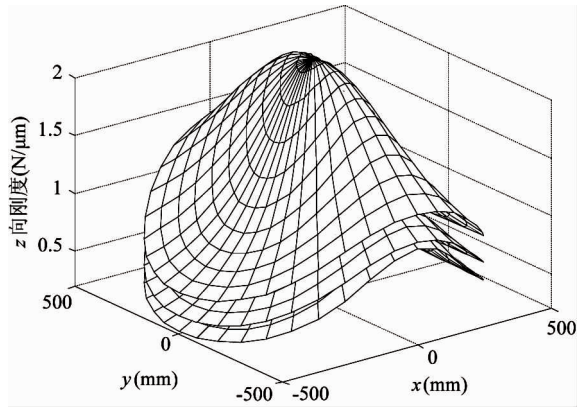


图 4 z 方向刚度分布

影响因素之一。为避免装箱机器人在运行过程中与外载发生共振,使装箱机器人在运行过程中具有优良的动态特性,设计之初要使装箱机器人低阶固有频率远离外载的激励频率。图 5 至图 7 所示为在模态分析时,装箱机器人在工作空间中几个不同状态的低阶固有频率。

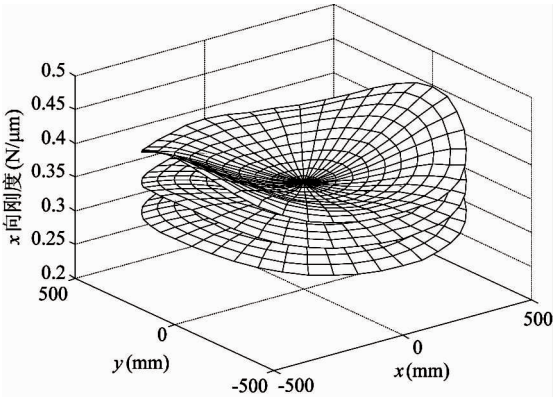


图 2 x 方向刚度分布

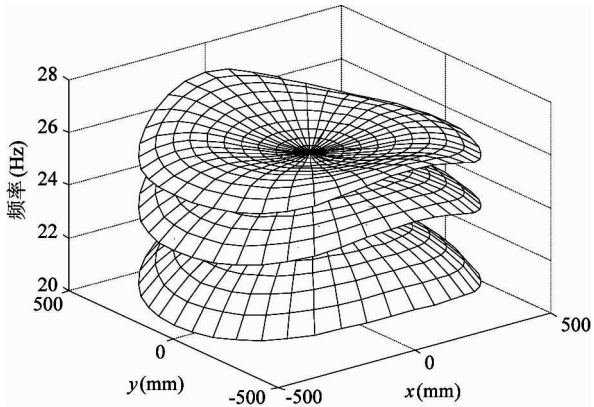


图 5 一阶频率分布

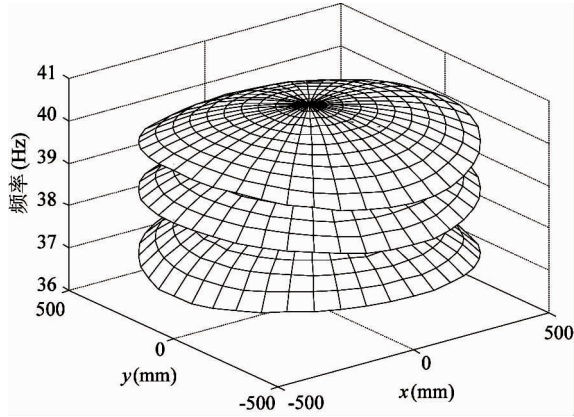


图 6 二阶频率分布

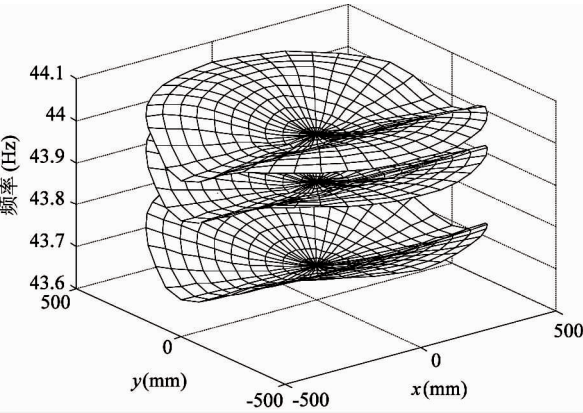


图 7 三阶频率分布

从图 5 ~ 图 7 中可以看到,机器人的频率性能分布相对比较均匀,表明计算出的参数值符合要求。

3 瞬态动力学分析

3.1 SINOvation 软件^[11]及工业机器人模块介绍

SINOvation 软件是三维 CAD/CAM 一体化的应用软件系统,该软件具有最先进的混合型建模、参数化设计、丰富的特征造型功能。提供了经过业界验证的具有国际先进水平的 CAM 加工、冲压模具、注塑模具等应用技术。

文献[12]介绍了 CAD/CAE 技术集成在国产软件 SINOvation 中的关键技术。基于 SINOvation 6.0 搭建机器人设计平台,为 SINOvation 的工业机器人模块,提供了灵活强大的建模功能、复杂曲面的创建能力、强大的装配功能、易于定制的制图标准

与快速的工程图出图能力,支持国际主流 CAD 数据的交换,集成运动学、动力学和静力学分析板块等,如图 8 所示。

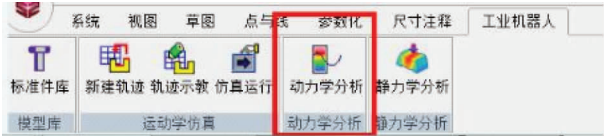


图 8 SINOvation 6.0 工业机器人模块

图 9 所示为装箱机器人在 SINOvation 6.0 工业机器人模块中的动力学分析实例。

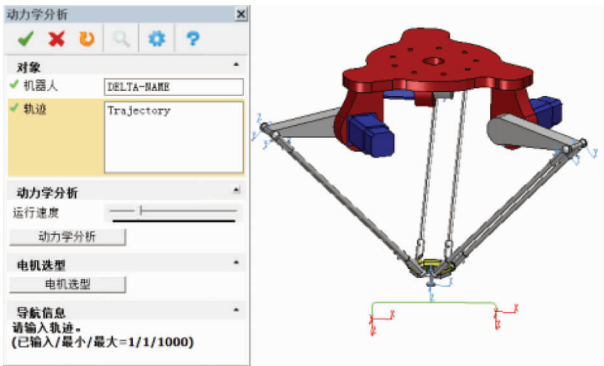


图 9 装箱机器人动力学分析实例

3.2 建模仿真

采用 Modelica 语言建模,装箱机器人动力学模型示意图如图 10 所示。其建模流程如下:首先在

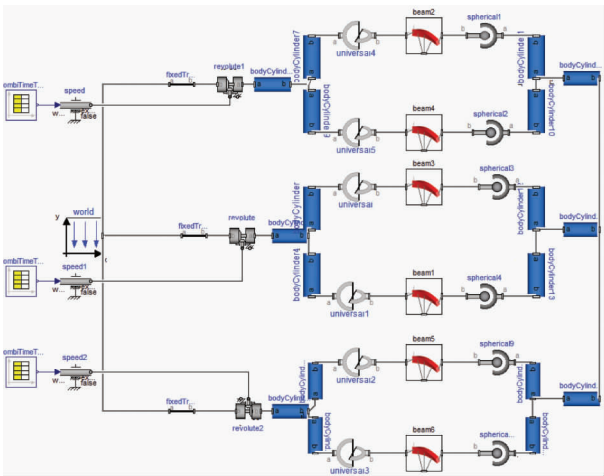


图 10 装箱机器人动力学模型

MultiBody 库选择相应组件并连接;其次调用 SINO-VATION 的 API 得到标架位姿参数、质量、惯量等参数,并按照得到的参数对组件进行设置;最后在模型中插入 CombiTimeTable 用于读取主动臂与静平台关节转角的时间曲线即可实现动力学仿真。

图 11 为在 SINOvation 软件中得出的关节驱动力曲线。并用商业软件 Recurdyn 进行对比分析。

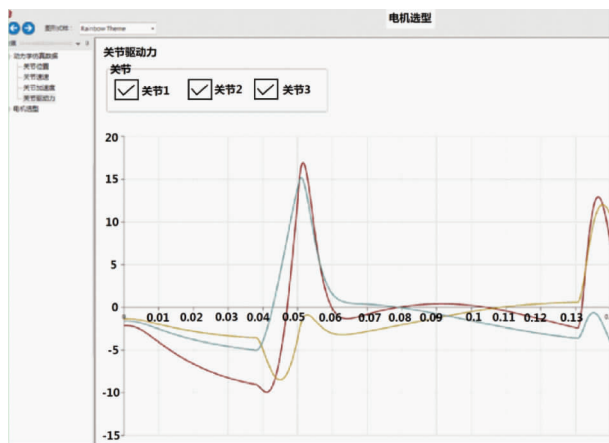


图 11 SINOvation 软件获得的力矩曲线示意图

仿真表明 SINOvation 采用的 Modelica 求解器所得仿真结果与商用 MBS 分析软件 Recurdyn 的仿真结果一致,只是在驱动力矩的峰值上存在较小差异,得出设计的装箱机器人的瞬态动力学能够满足机器人的使用要求。

4 结 论

为使装箱机器人的静动态特性能够满足工作使用的要求,本文对设计的装箱机器人静动态特性进行评价、约束和设计研究,在全域上预估了机器人的三个方向的静刚度,利用相关软件求出其前三阶模态,用自主设计的国产软件 SINOvation 分析了瞬态动力学,结果表明装箱机器人性能指标正常,本研究为提高装箱机器人的静动态性能及装箱机器人伺服电机和减速机的预估奠定了基础。

参考文献

- [1] Clavel R. Device for displacing and positioning an element in space[P]. Europe: EP0250470 B1[P]. 1991-07-17
- [2] Zhang X M, Shen Y W, Liu H Z, et al, Optimal design of flexible mechanisms with frequency constraints[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 1995,30(1):134-139
- [3] Gosselin C. Stiffness mapping for parallel manipulators[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1990,6(3):377-382
- [4] Piras G, Cleghorn W L, Mills J K. Dynamic finite-element analysis of a planar high-speed, high-precision parallel manipulator with flexible links[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2005,40(7):849-862
- [5] 赵兴玉,黄田,赵学满. 一种并联机床整机结构动力学建模方法研究[J]. *振动工程学报*,2003(9):295-301
- [6] Liua X J, Jin Z L, Gao F. Optimum design of 3-DOF spherical parallel manipulators with respect to the conditioning and stiffness indices[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2000,35(9):1257-1267
- [7] 王新华,马玉真,陶立英. 机床频率响应测试系统研究[J]. *济南大学学报*,2003(6):191-193
- [8] Miller K. Optimal design and modeling of spatial parallel manipulators[J]. *The International Journal of Robotic Research*, 2004, 23(2): 127-140
- [9] Stock M, Miller K. Optimal kinematic design of spatial parallel manipulators: Application to linear Delta robot[J]. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2003, 125(6): 292-301
- [10] 刘松涛. 一类 2_3_4 自由度高速并联机械手设计理论与方法研究:[硕士学位论文][D]. 天津:天津大学机械工程学院,2012. 46-48
- [11] SINOvation. <https://baike.baidu.com/item/sinovation>:山东山大华天软件有限公司,2016
- [12] 陶永. 北航——基于 CAD/CAE 的工业机器人设计开发平台. *机器人技术与应用*,2013(2):28

A study of static and dynamic characteristics of parallel packing robot

Sun Wencheng^{*}, Tao Yong^{**}, Gao Jinpeng^{**}, Fang Zengliang^{**}
(^{*} School of Mechanical and Electrical Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160)
(^{**} School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract

Static stiffness, modal analysis and transient dynamics are main static and dynamic characteristics of the packing robot. In order to make the static and dynamic characteristics of the packing robot meet work requirements, pre-estimation of these characteristics could be carried out in the initial design stage. In order to solve problems in initial pre-estimation, estimation indicators and constraint conditions are proposed in accordance with designing process to obtain optimal parameters, which is taken as computational examples to calculate the estimated values of global static stiffness and global modal through software Matlab. In addition, robot kinetic model is established. Software SINOVAION is used to obtain the joint torque curve. Commercial software is also used to verify correctness of simulation results, which lays a foundation for improving static and dynamic performance of the robot and pre-estimation of servo motor and reducer of the robot.

Key words: packing robot, static and dynamic characteristics, static stiffness, modal analysis