

一种包装堆垛机械手的结构优化

张碧涛, 何卫锋

(广东工业大学, 广州 510006)

摘要: **目的** 应用 Ansys Workbench 软件对一种包装堆垛机械手的结构进行优化, 减少结构质量, 提高机械手的工作效率和定位精度。 **方法** 对机械手进行建模及使用应力分析软件对其进行静力分析、模态分析, 并利用拓扑优化方法的变密度法, 对机械手结构的关键部位进行拓扑优化。 **结果** 机械手在满足整体强度的条件下, 改变其质量分布, 选择合理的驱动电机, 达到减弱振动和轻量化的成效。 **结论** 拓扑优化方法的变密度法为机械手的结构优化和提高执行工作频率提供了一种高效可行的途径。

关键词: 包装堆垛; 机械手; 拓扑优化; 轻量化

中图分类号: TB486; TP241 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)07-0142-04

Structural Optimization of a Stack-manipulator for Packaging

ZHANG Bi-tao, HE Wei-feng

(Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

ABSTRACT: The work aims to optimize the structure of a stack-manipulator for packaging with Ansys Workbench, so as to reduce the structure weight and improve working efficiency and positioning accuracy of the manipulator. Modeling of the manipulator was done and the static and modal analyses were carried out with stress analysis software. The key structural parts of the manipulator were topologically optimized through the variable density method of topology optimization. Under the condition of satisfying the overall strength of the manipulator, its qualitative distribution was changed and a reasonable driving motor was selected in order to realize less vibration and light weight of the manipulator. In conclusion, the variable density method of topology optimization is an effective and feasible way for structural optimization of the manipulator and improving its work efficiency.

KEY WORDS: stacking for packaging; manipulator; topology optimization; light weight

包装堆垛机械手是专门为包装生产线设计开发的自动化生产设备, 广泛应用于各种包装生产线。只需要简单地设置操作步骤就可以适应新的包装规格, 其设备的灵活性可以允许处理很多不同形状和大小产品和包装盒。ABB 公司 Flex Picker 系列机器人可以实现抓取传送带上的产品, 然后堆垛至纸托盘中, 最后进行装箱的过程, 主要用于巧克力、药品、小型电子元器件、零部件等产品^[1-2]。文中针对堆垛规格复杂的包装, 设计了一种 5 自由度的包装堆垛机械手对不同规格的产品进行快速抓取, 快速放置到堆垛规格不一的各类包装盒。它可以减轻工人频繁的体力劳动、改善劳动条件、保证安全生产, 降低能源消

耗和提高生产效率, 在增强企业的市场竞争力等方面起到极其重要的作用^[3]。

拓扑优化技术在满足产品约束条件的前提下能确定较合理的结构布局, 结构优化分为尺寸优化、形状优化和拓扑优化 3 个不同层次的问题^[4-5]。变厚度法、均匀化理论和变密度法等方法能够很好的解决复杂的工程问题^[6-7]。变密度方法通过人为地建立材料特性与材料密度之间的关系, 在拓扑优化处理后在给定的初始优化区域上能以 0 至 1 的单元密度进行分布, 然后通过控制单元的密度向 0 或者 1 两端收敛, 可以使得拓扑优化结果便于抽象成可以加工的结构, 因此变密度法有着明显优势, 并广泛应用于工程

收稿日期: 2016-09-21

基金项目: 广东省数控一代机械产品创新应用示范工程专项资金 (2013B011301023)

作者简介: 张碧涛 (1990—), 男, 广东工业大学硕士生, 主攻结构设计与机构运动仿真分析。

通讯作者: 何卫锋 (1961—), 男, 广东工业大学副教授, 主要研究方向为自动机构和包装设备。

设计中^[8]。Ansys Workbench 软件的 Shape Optimization 提供了一种尽可能地寻找对整体结构强度不产生负面影响的去除材料的拓扑优化方法, 文中使用该软件对结构复杂的机械手进行有限元分析并运用了变密度法的拓扑优化设计, 在满足机械手的约束条件下, 确定较合理的结构布局, 从而减少机械手质量, 提高刚度, 减小机械手转动惯量和提高整体稳定性。

1 机械手的结构和模型简化

文中所研究的是一种隔轴机械手, 该机械手的电机安装于中心轴附近, 采用同步带传动和齿轮传动的方式来驱动各关节的运动, 相对于传统的机械手, 该机械手能大大地降低整机的转动惯量。如图 1 所示, 机械手主要由大臂、小臂、手方轴、转轴、拾取器、3 组电机、拉伸式电磁铁、转臂架等组成, 电机 III 通过一对减速齿轮带动大臂旋转, 电机 II 通过一级同步带带动小臂旋转, 电机 I 通过一级同步带带动转轴, 再通过二级同步带带动手方轴旋转, 拉伸式电磁铁带动手方轴上下运动, 拾取器通过气动或电动驱动上下摆动 (具体结构文中未表示)。在该机械手样品试制中发现由于同步带包裹在机械臂内部导致同步带安装困难, 文中在后续中对机械手臂进行优化的挖空能够很好的解决这一问题。

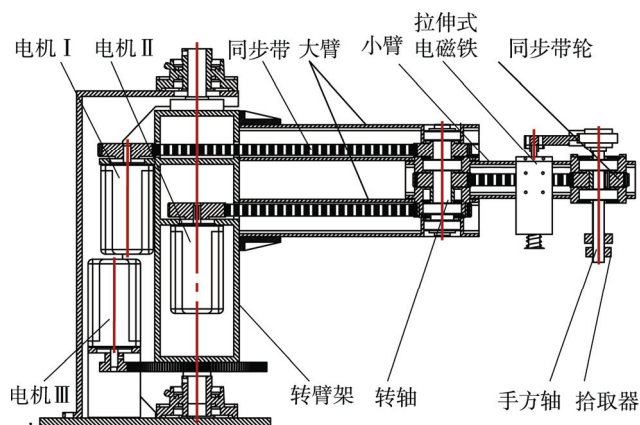


图 1 机械手的结构

Fig.1 Structure diagram of manipulator

为了便于机械手的有限元分析, 需简化机械手的三维模型。根据机械手的结构设计形式与受力特点, 可忽略掉对机械手整体刚度影响不大的非关键零部件和不重要的特征^[9-10]。对于忽略掉的部件, 仅将其质量折算到相应位置即可^[11], 见图 2。

2 有限元分析

2.1 静态分析

文中研究的机械手见图 1, 转臂架、大臂和小臂的材料选用铝合金 (1060), 其他部件选用普通碳素

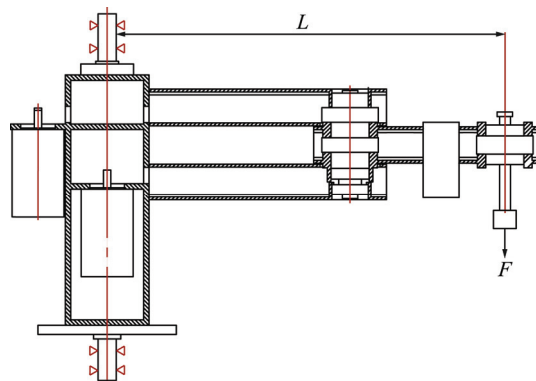


图 2 机械手的简化模型及受力

Fig.2 The simplified model and structural stress of manipulator

钢 (Q235)。将实体转化为有限元模型, 通过自由划分网格后, 对模型进行有限元静力分析, 其中机械手结构的受力见图 3。如图 3 所示, 当 $L=435\text{ mm}$, $F=10\text{ N}$ 并考虑整机重力时, 可知小臂最前端节点有最大位移为 0.032 mm , 大臂螺栓孔处节点有最大应力为 3.65 MPa , 故机械手位移和应力都较小, 满足工作要求。

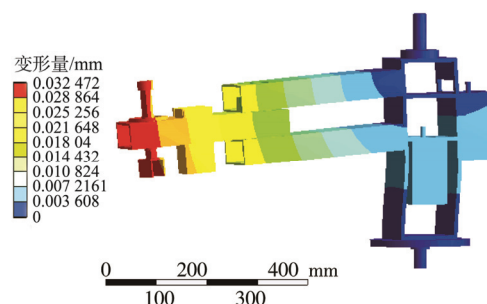


图 3 机械手的总变形

Fig.3 The total deformation of manipulator

2.2 模态分析

对文中研究的机械手进行振动模态分析, 已成为机械手结构设计中不可缺少的一个环节^[12-13]。由于低阶模态才对机械手的振动分析有实际的参考价值, 利用 Ansys Workbench 软件求得的机械手 1—6 阶模态分别为 $109.3, 126.3, 473.5, 643.7, 733.4, 755.1\text{ Hz}$ 。低阶固有振型要比高阶振型对机械手的振动影响大, 故考虑的是低阶模态。对于 1 阶固有频率应尽可能地高于或避开工作频率以免发生共振。电机在 $150 \sim 600\text{ r/min}$ 转速下运行时, 激励频率为 $3.3 \sim 21.7\text{ Hz}$ ^[14], 由模态分析可知, 机械手的 1 阶固有频率为 109.3 Hz , 该值大于电机的激励频率, 故较高的 1 阶固有频率可以避免共振影响和提高机械手的稳定性, 从而提高机械手的定位精度。

3 机械手的拓扑优化

不同于传统优化设计, Ansys Workbench 中拓扑

优化不需要给出参数和优化变量的定义, 目标函数、状态变量和设计变量都是预定义好的, 只需要给出结构的参数(材料特性、模型、载荷等)和优化百分比。优化百分比可以通过经验选取, 针对此机械手模型(见图 2), 设定优化目标为质量减少 50%, 得到机械手主要部件拓扑优化结果的密度云图, 见图 4, 显示为深色的部分表示密度值接近于 0, 在结构设计中可去掉该部分; 浅色部分则表示要保留的部分。结合实际加工, 对大小臂和转臂架作相应的处理, 并验证能否用 2 个更小型号的电机替换。

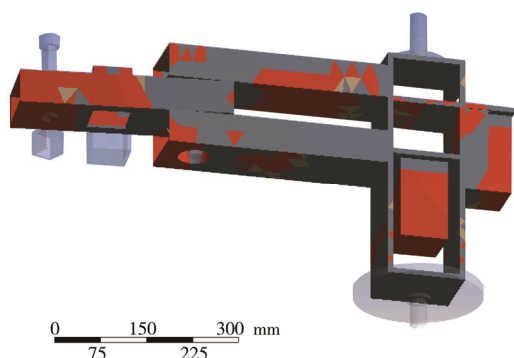


图 4 机械手的拓扑优化结果

Fig.4 Topology optimization results of manipulator

利用 SolidWorks 软件的质量属性可知:

$$J'_1 = J_1 \times i_1^{-2} \quad (1)$$

式中: J_1 为电机 I 带动的机械手部件的转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{cm}^2$); i_1 为同步带轮减速比; J'_1 为换算到电机轴上的等效转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{cm}^2$)。当电机的转子惯量为 J_M 时, 当 $J_M/J'_1 > 1/10$ 时, 满足惯量匹配^[15]。有:

$$T_{a1} = [(J_M + J'_1)N_0] / (9.55 \times 10^4 t_{psa}) < T_M \quad (2)$$

式中: N_0 为电机转速 (r/min); t_{psa} 为电机加速时间 (s); T_M 为电机在 N_0 转速下的转矩 (N); T_{a1} 为电机的加速转矩 (N)。当式 (2) 满足时, 可以选择改小一号型号的电机, 以便优化系统。对电机 II, 电机 III 可以用同一方法进行对结构与功率的优化。材料去除尺寸的优化只对由转臂架、大臂和小臂组成的机械手进行优化。根据拓扑云图, 为了便于加工和

装配, 对机械手做如图 5 所示材料去除。

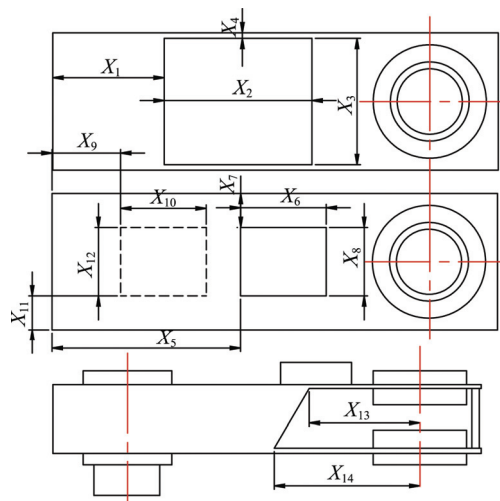


图 5 机械手去除尺寸参数

Fig.5 The parameter of cut material of manipulator dimension

优化数学模型可表示为:

$$\text{设计变量: } X = [X_1, X_2, \dots, X_{14}]^T \quad (3)$$

$$\text{目标函数: } \max f(X_1, X_2, \dots, X_{14}) \quad (4)$$

$$\min M(X_1, X_2, \dots, X_{14}) \quad (5)$$

与底座方形座轴承相连的 2 根轴的约束定义为:

$$\begin{cases} \text{Radial (径向)} = \text{Fixed} \\ \text{Axial (轴向)} = \text{Fixed} \\ \text{Tangential (切向)} = \text{Free} \end{cases} \quad (6)$$

机械手的应力应变都非常小, 足以满足工作要求, 故尺寸优化目标不以机械手最小变形量和最小应力为目标, 而以机械手质量最轻 $\min M$ 和固有频率最高 $\max f$ 为目标。先对机械手进行模态分析, 求出机械手的固有频率, 并将机械手的一阶固有频率和质量设为输出变量。则机械手有 14 个输入变量, 2 个输出变量, 文中采用 Ansys Workbench 中的 Design Explorer 模块进行快速优化, 这种优化方法是采用直接优化, 当 $L=435 \text{ mm}$, $F=10 \text{ N}$ 时, 优化完成后获得 3 个候选最优设计点见表 1。拓扑设计优化后得到机械手结构见图 6。

表 1 优化后得到 3 组最优解

Tab.1 The three groups optimal value of optimization

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	$f_{\max}$	$M_{\min}$
候选点 1	71.76	81.50	69.39	6.250	115.3	50.97	5.706	61.76	58.54	69.73	14.55	47.95	83.32	92.12	124.3	3.351
候选点 2	64.70	70.25	68.43	3.670	93.92	86.92	20.97	54.70	52.22	63.21	12.48	44.08	80.48	89.56	123.9	3.351
候选点 3	76.47	89.00	67.48	3.842	80.65	60.06	8.783	66.47	62.75	74.07	15.93	50.53	85.21	93.83	123.3	3.336

对已优化的机械手进行了静力和模态分析, 同样当 $L=435 \text{ mm}$, $F=10 \text{ N}$ 并考虑整机重力时, 小臂前端有最大位移为 0.039 mm , 手方轴有最大应力为 2.96 MPa , 变化不大, 仍满足要求。机械手的质量减少了

0.6 kg 。求得机械手前 6 阶固有频率, 其中 1 阶固有频率为 108.2 Hz , 较优化前减少了 1 Hz , 但如果不对电机 I 进行替换, 其 1 阶固有频率达 117.3 Hz , 较优化前提高了 8 Hz , 因此, 之前选用偏大的电机 I 主要

是考虑到其对整个机械手的平衡,从而提高机械手整体的稳态特性,但 108.2 Hz 的 1 阶固有频率已经足够大于电机的激励频率,综合机械手整体结构的柔顺度、质量和工作效率的考虑,改用 573HBM10-1000 型号电机,保证了机械手的轻量化。

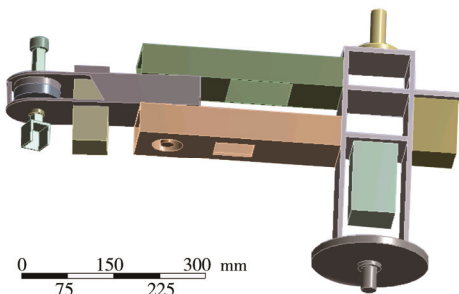


图6 机械手主要部件优化后的结构

Fig.6 The structure of main components of manipulator after optimization

4 结语

应用 Ansys Workbench 软件,通过对包装堆垛机械手结构的主要部件的拓扑优化来优化机械手的整体结构,在尽可能不对整体结构的柔顺度产生负面影响的情况下,改用小一号型号的电机,对机械手臂进行优化的挖空方便了机械手同步带的安装并减轻了质量和改善了机械手的质量分布,提高了机械手的低阶固有频率,从而改进机械手的振动模态特性,减小了机械手的振动,提高了机械手的稳定性和定位精度。更低的转动惯量使电机更容易避免过冲和丢步,从而提高了机械手的定位精度,除此,还可以适当地减小电机的时间常数和提高电机的转速来提高机械手的工作效率。

参考文献:

- [1] 李晓刚,刘晋浩.码垛机器人的研究与应用现状、问题及对策[J].包装工程,2011,32(3):96—102.
LI Xiao-gang, LIU Jin-hao. Research and Present Situation of Application, Problems and Countermeasures of Palletizing Robot[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(3): 96—102.
- [2] BRANTMARK H, HEMMINGSON E. Flex Picker with Pick Master Revolutionizes Picking Operations [J]. Industrial Robot: An International Journal, 2001, 28(5): 414—419.
- [3] 朱建萍,王鹤.包装机械设计方法研究[J].包装工程,2007,28(7):89—91.
ZHU Jian-ping, WANG He. Packaging Machinery Design Method Research[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(7): 89—91.
- [4] 李兵,陆建辉.注塑机械手结构拓扑优化设计[J].机械,2009,36(2):12—14.
LI Bing, LU Jian-hui. Structure Topology Optimization Design of Injected Manipulator[J]. Mechanism, 2009, 36(2): 12—14.
- [5] 张东旭.连续体结构拓扑优化及形状优化若干问题[D].大连:大连理工大学,1992.
ZHANG Dong-xu. Continuum Structure Topology Optimization And Shape Optimization Problems[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 1992.
- [6] GEA H C. Topology Optimization: A New Microstructure-based Design Domain Method[J]. Computers & Structures, 1996, 61(5): 781—788.
- [7] 王健.应力约束下连续体结构拓扑优化设计研究[D].大连:大连理工大学,1997.
WANG Jian. Continuum Structure Topology Optimization Design Research Under Stress Constraints[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 1997.
- [8] 赵永辉.大客车车身骨架结构拓扑优化设计[J].武汉理工大学,2008,3(1):22—23.
ZHAO Yong-hui. Frame Structure Topology Optimization Design of Bus Body[J]. Wuhan University of Technology, 2008, 3(1): 22—23.
- [9] 吴兆东,马星国,尤小梅,等.基于ANSYS的某履带式装甲车悬挂装置的模态分析与改进设计[J].沈阳理工大学学报,2008,27(4):80—83.
WU Zhao-dong, MA Xing-guo, YOU Xiao-mei. A Caterpillar Vehicles Suspension System Based on ANSYS Modal Analysis And Improvement of The Design[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2008, 27(4): 80—83.
- [10] TOKHI M O, MOHAMED Z. Modeling of a Flexible Robot Manipulator Using Finite Methods: a Symbolic Approach[J]. Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control, 1999, 18(2): 63—76.
- [11] 赵增奎,陆建辉,刘玲.某型号注塑机械手的有限元数值分析[J].机械强度,2005,27(6):803—807.
ZHAO Zeng-kui, LU Jian-hui, LIU lin. Finite Element Numerical Analysis of A Injected Manipulator[J]. Mechanical Strength, 2005, 27(6): 803—807.
- [12] 石广丰,倪坤.基于ANSYS Workbench的激光打孔机模态分析[J].长春理工大学学报,2010,12(4):95—97.
SHI Guang-feng, NI Kun. Model Analysis of Laser Drilling Tools Based On ANSYS Workbench[J]. Journal of Changchun University of Science And Technology, 2010, 12(4): 95—97.
- [13] 吕端,曾东建,于晓洋,等.基于ANSYS Workbench的V8发动机曲轴有限元模态分析[J].机械设计与制造,2012,8(8):11—13.
LYU Duan, ZENG Dong-jian, YU Xiao-yang, et al. Finite Element Modal Analysis of V8 Engine Crankshaft Based On The ANSYS Workbench[J]. Mechanical Design And Manufacturing, 2012, 8(8): 11—13.
- [14] 谢志江,孙玉,李诚,等.基于ANSYS Workbench的搬运机械手结构优化设计[J].机械与电子,2009,7(1):65—67.
XIE Zhi-jiang, SUN Yu, LI Cheng, et al. Structure Optimization Design of Carrying Manipulator Based On ANSYS Workbench[J]. Machinery & Electronics, 2009, 7(1): 65—67.
- [15] 颜嘉男.伺服电机应用技术[M].北京:科学出版社,2010.
YAN Jia-nan. Application Technology of Servo Motor [M]. Beijing: Science Press, 2010.