

砌体墙砌筑机器人结构稳定性分析及优化

张珂¹,赵金宝¹,陆峰¹,李志国²

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 廊坊凯博建设机械科技有限公司,河北 廊坊 065001)

摘要 目的 研究砌体墙砌筑机器人的机械结构稳定性及关键砌筑部件的动力学特性、静刚度特性、模态参数,通过相关特性、参数的分析来优化结构设计并检验设计结果是否满足工程实际需求。**方法** 应用3D建模软件建立机器人的三维模型,结合其关键技术参数运用拉格朗日函数建立砌筑机械臂的动力学模型;运用ADAMS的View/Post Processor模块进行仿真,通过ANSYS Workbench软件对砌块夹具进行6阶自由振动分析;针对移动底盘进行线性静态结构分析。**结果** 小臂、大臂关节电机最大驱动力矩分别为57.55 N·m和20 N·m;分析得出夹具主要振型为弯曲和扭曲变形,频率为341.78 Hz时最大振幅为55.83 mm;底盘最大应力为82.112 MPa,安全系数为2.86。**结论** 通过大臂、小臂最大驱动力矩可以对工程中的关节电机进行正确选型;经计算安全系数可知底盘结构静刚度特性、结构强度满足工程要求;笔者的分析结果为机器人部件结构强化提供了优化设计思路,有助于提高整机结构稳定性及作业精度。

关键词 砌筑机器人;ADAMS动力学分析;ANSYS Workbench模态分析;结构优化

中图分类号 TU689

文献标志码 A

Stability Analysis and Optimization of Masonry Robot

ZHANG Ke¹, ZHAO Jinbao¹, LU Feng¹, LI Zhiguo²

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. CABR Construction Machinery Technology Co. Ltd., Langfang, China, 065001)

Abstract: The structural stability, dynamic characteristics, modal parameters and static stiffness characteristics of the masonry robot are studied to optimize the structural design and test whether the design can meet the actual engineering requirements. The model of the robot is established through 3D modeling software. Combined with the key technical parameters, the dynamic model of the masonry manipulator was established by using Lagrange function, and the simulation results of

收稿日期:2020-12-25

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0703903);河北省省级科技计划资助项目(19211904D);住房和城乡建设部科技计划项目(2019-K-080);辽宁省教育厅基金项目(lnqn202009)

作者简介:张珂(1969—),男,教授,博士,主要从事机电一体化技术、高空作业机械技术等方面研究。

kinematics parameters were carried out by ADMS/ Vie, Post Processor module. The modal analysis of the block fixture and linear static structure analysis of the moving chassis was carried out by Workbench. The results show that the maximum driving torque of the forearm and forearm joint motors is $55\text{ N}\cdot\text{m}$ and $20\text{ N}\cdot\text{m}$. The analysis shows that the main modes of the fixture are bending and twisting deformation, and the maximum amplitude is 55.83 mm under the frequency of 341.78 Hz . The maximum stress of chassis is 82.112 MPa and the safety factor is 2.86 . According to the analysis results of the maximum driving moment of the forearm and forearm, the joint motor in engineering can be selected correctly. By referring to the safety factor, the static stiffness characteristics and structural strength of the chassis structure meet the engineering requirements. The analysis in this paper can be used to strengthen the structure of the robot parts, and provide an optimal design idea, which is helpful to improve the structural stability and operation accuracy of the masonry robot.

Key words: masonry robot; Adms dynamics analysis; ANSYS workbench modal analysis; structural optimization

在传统各类建筑施工中,砌体墙占据相当大的工程量,其施工效率与作业质量对整个建筑工期和质量至关重要。现阶段我国建筑砌体墙的施工主要为人工砌筑,砌筑效率较低^[1]。当砌筑高度较大时,建筑工人需通过其他辅助工具在高空作业,存在安全隐患,据统计我国近五年发生建筑施工伤亡事故2 000余起,累计死亡人数7 500余人^[2]。同时砌体墙质量完全由人为控制,因为建筑工人素质参差不齐,从而砌筑质量不稳定。近年一系列国家规划文件如《智能制造发展规划》、《机器人产业发展规划(2016—2020年)》中指出我国到2025年完成智能制造“两步走”战略,鼓励建筑产业的智能转型,投入大量资金支持研发各类建筑施工机器人^[3]。因此,研发适合我国国情、具有自主知识产权的砌体墙自动砌筑机器人,已成为我国工业化建筑施工现代化发展的迫切需求。

国际上西方发达国家已经开始研制并应用砌墙机器人,自动化砌墙施工装备在美国、德国、澳大利亚等发达国家发展较早,在砌墙装备领域处于领先水平。如SAMXITONG系统砌墙机器人“半自动石工”,该机器人由美国纽约Construction Robotics公司研制,其施工效率是人工的六倍,但是价格较高,只有

发达国家少量应用^[4]。再如HadrianX砌墙机器人可将不同砌筑尺寸的砌块按照预先设定的顺序进行抹浆,按要求砌筑砌块,每小时1 000块,但设备体积庞大,造价十分昂贵,要求施工场地具有一定的空旷性,难以在高层建筑物砌体墙砌筑施工领域推广^[5]。

近几年,随着机器人技术的快速发展,砌墙机器人迎来了发展的契机。国内一些科研院所如济南大学、洛阳海特智能科技有限公司、渤海船舶职业学院等也在该方向进行研究,取得一些标志性专利技术如《砌墙机器人》、《一种多自由度自动砌墙机器人》等专利。由于我国在此方面研究起步较晚,装备智能化水平不高,只能实现一些单一功能,半自动化操作。笔者研究的砌体墙砌筑机器人能够从建筑墙体砌筑施工现场路径自动规划、机器人位置、姿态实时监控、就位位置监控,装备运行安全、偏移量实时监测预警等方面有效解决工业化建筑施工时,存在的效率与自动化程度低、劳动强度高、安全保障难度大等问题。该砌筑机器人的研发弥补了我国砌体墙砌筑装备领域的高水平、智能砌筑作业技术的短板。

基于上述分析,为了保证砌体墙砌筑机器人系统服役作业的安全性和运行可靠性,笔者着重对砌块砌筑系统的砌筑机械臂开展

动力学分析并通过 ADMS 进行仿真;对行走底盘、砌块夹具等关键部件静刚度特性分析和模态分析;再依据砌筑机器人的静刚度特性、动力学和模态分析数据指导砌筑机器人部分结构的强化和优化。研究表明:笔者的研究成果为机器人部件结构强化提供了优化设计思路,有助于提高整机结构稳定性及作业精度。

1 砌筑机器人组成及动力学分析

1.1 砌筑机器人结构组成及技术参数

现今市场上的砌墙机器人大多是用工业机械手改装而成。笔者根据《工业环境用机器人安全要求》(GB11291.1—2011)研发一种高效、智能的砌体墙砌筑机器人,砌体墙砌筑机器人结构图如图 1 所示。其结构主要包括机器人行走机构、砌块供给机构、砌筑机械臂、砂浆供给抹浆机构、砂浆收集槽、砌筑定位装置和智能控制系统等^[6-8]。

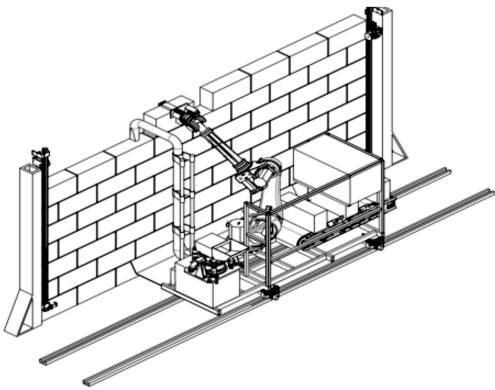


图 1 砌体墙砌筑机器人结构图

Fig. 1 Structure diagram of the masonry robot

笔者所研究的砌体墙砌筑机器人通过砌块自动取放系统按照设计规定路线从既定位置抓取待砌砌块,通过调整砂浆供给系统,保证出浆口砂浆的流量、速度和黏结力完成抹浆。智能控制系统实时获取机械手的目标状态,采集位置、状态等相关信息并传输给控制系统,实时比对调整运动轨迹,确保机械手快速抓取砌块后,及时运送至出浆口并精准放

置在待砌筑墙体上,保证砌筑工作的连续性。底盘行走系统可实现砌筑机器人的短距离整体往复移动,利用定位装置将底盘可靠锁止,保证砌筑过程的位置精度,提高了施工效率和墙体的强度及平整度。

国内外现有设备的技术基础上结合砌体墙砌筑施工的具体要求开发机器人相关技术参数:砌筑机器人所用砌块外廓的长×宽×高为 40 cm×20 cm×20 cm;砌块质量 5 kg;机器人质量为 1 t;平台升降范围为 0~50 m;同步驱动角度±3°;砌筑速度为 5 块/min;砌筑精度≤3%;行走定位≤2%。

1.2 砌筑机器人机械臂动力学分析

动力学研究的方法众多,拉格朗日方法应用比较广泛。该方法相对于牛顿-欧拉法、高斯法以及凯恩法具有结构紧凑、简单、物理意义清晰的特点,在求解复杂系统动力学方程具有明显优势^[9-11]。笔者通过该方法对砌筑机器人的砌筑机械臂进行动力学方程求解,并运用 ADMS 进行仿真。笔者所研究的砌筑机械臂为六轴机械臂,其动力学模型如图 2 所示。

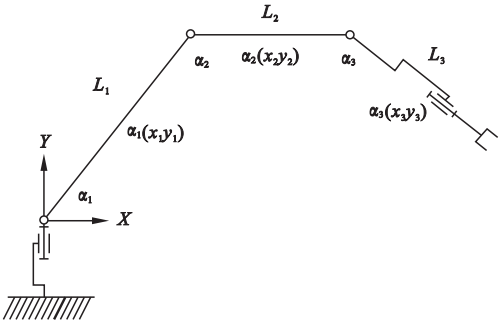


图 2 砌筑机械臂的动力学模型

Fig. 2 The dynamics model of robot arm

砌筑机器人的动力学分析主要是在考虑惯性因素和阻尼影响下分析机器人在施工中相对确定的载荷对不同系统机构的影响。在明确机械臂在砌筑过程中的受力情况和运动规律的前提下对砌筑机械臂开展动力学分析,通过分析可以获得机械臂在砌筑工作时其不同空间位置的位移、速度、力矩等参数

的变化规律。由于砌筑过程中大臂和小臂为主要驱动臂,因此笔者着重研究大臂、小臂的关节驱动力矩。砌块砌筑系统的机械臂动力学分析结果有助于设计阶段各个关节驱动电机的正确选型。

通过计算砌筑机械臂的动力学模型获得各关节间连杆的动能和势能。并且对砌筑机械臂系统的动能和势能做差,得到砌筑机器人的拉格朗日函数^[12]。通过求解得到砌筑机械臂各关节电机的驱动力矩(扭矩)。根据上述原理获得系统拉格朗日函数如下:

$$L = K - P. \quad (1)$$

式中: K 为系统的动能; P 为系统的势能。

整理得:

$$T_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}_i} - \frac{\partial L}{\partial \alpha_i}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

式中: T 为各个关节电机的驱动力矩; α 为相应的关节角速度; n 为连杆的数量。

根据式(2)展开得到三个关节力矩的动力学方程,在求解砌筑机械臂各关节连杆的驱动力、向心力时只需将对应的参数代入动力学方程(3)~(5)即可。

$$\begin{aligned} T_1 = & D_{11}\ddot{\alpha}_1 + D_{12}\ddot{\alpha}_2 + D_{13}\ddot{\alpha}_3 + D_{111}\dot{\alpha}_1^2 + \\ & D_{122}\dot{\alpha}_2^2 + D_{133}\dot{\alpha}_3^2 + D_{112}\dot{\alpha}_1\dot{\alpha}_2 + D_{113}\dot{\alpha}_1\dot{\alpha}_3 + \\ & D_{123}\dot{\alpha}_2\dot{\alpha}_3 + D_2. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} T_2 = & D_{21}\ddot{\alpha}_1 + D_{22}\ddot{\alpha}_2 + D_{23}\ddot{\alpha}_3 + D_{211}\dot{\alpha}_1^2 + \\ & D_{222}\dot{\alpha}_2^2 + D_{233}\dot{\alpha}_3^2 + D_{212}\dot{\alpha}_1\dot{\alpha}_2 + D_{213}\dot{\alpha}_1\dot{\alpha}_3 + \\ & D_{223}\dot{\alpha}_2\dot{\alpha}_3 + D_2. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} T_3 = & D_{31}\ddot{\alpha}_1 + D_{32}\ddot{\alpha}_2 + D_{33}\ddot{\alpha}_3 + D_{311}\dot{\alpha}_1^2 + \\ & D_{322}\dot{\alpha}_2^2 + D_{333}\dot{\alpha}_3^2 + D_{312}\dot{\alpha}_1\dot{\alpha}_2 + D_{313}\dot{\alpha}_1\dot{\alpha}_3 + \\ & D_{323}\dot{\alpha}_2\dot{\alpha}_3 + D_3. \end{aligned} \quad (5)$$

式中: D_{ii} 为关节 i 的等效惯量; D_{ij} 为关节 i 和关节 j 之间的耦合惯量; D_{ijj} 为关节 j 的速度引起 i 上的向心力; D_{ijk} 为关节 j,k 的速度引起 i 上的哥氏力; D_i 为关节 i 上的重力。

在明确动力学方程后通过 ADMS 中的 Vie 和 PostProcessor 模块就可完成砌筑机械臂的动力学仿真,其流程如图3所示。

根据砌筑机械臂的工作流程设置驱动函

数,明确运动的方向、速度、角度以及始末位置后设置仿真时间及步数。

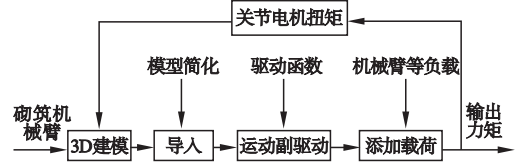


图3 砌筑机械臂的动力学仿真流程图

Fig. 3 The dynamic simulation flow chart

通过仿真即可获得砌筑机械臂各关节电机扭矩仿真结果如图4所示。在砌筑机械臂的运动过程中,小臂的电机扭矩曲线图与大臂电机扭矩曲线趋势相类似。小臂电机最大扭矩约为 $20 \text{ N}\cdot\text{m}$,大臂旋转关节的电机扭矩变化较大,最大扭矩约为 $57.5 \text{ N}\cdot\text{m}$,根据计算可知能够完全满足大臂、小臂扭矩的要求,与实际机械臂选型计算结果相符,因此大臂、小臂电机选型正确。

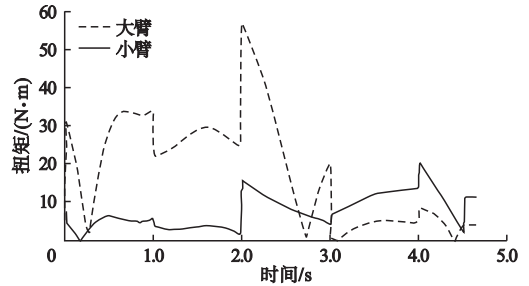


图4 砌筑机械臂关节电机扭矩仿真结果

Fig. 4 Torque simulation results of joint motor

2 砌筑机器人关键部件分析

砌筑机器人作业空间跨度大、动力学各向异性、负载变化大,为了保证砌筑机器人作业的安全性和平稳性,笔者应用 ANSYS Workbench 针对关键部件的静刚度特性、自由振动进行分析。利用 Workbench 具有自适应网格划分,智能网格划分的优势,解决研发过程中的 CAE 软件的异构问题^[13],对砌筑机器人平稳作业及砌筑精度意义重大。

2.1 砌筑机器人砌块夹具模态分析

砌筑机器人砌块夹具模态分析主要是将砌块夹具振动微分方程组中的物理坐标变换

为模态坐标。该方法是研究结构动力特性的一种近代方法,在工程振动领域应用广泛^[14-16]。其中振动频率 ω_i 和模态 φ_i 主要通过以下方程进行求解:

$$(K-\omega_i^2M)\varphi_i=0.$$

(6)

砌块夹具作为砌筑末端执行器在执行砌筑作业时,其固有振动特性对砌块的砌筑误差累计关联较大,对多层砌筑精度具有重要的影响。因此利用 ANSYS Workbench 对砌筑机器人底盘结构进行模态分析,其主要分析流程如图 5 所示。

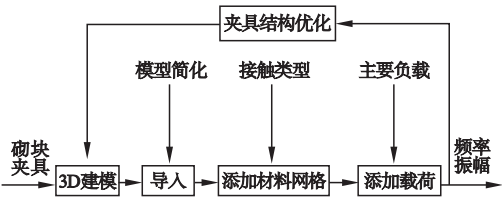


图 5 砌块夹具模态分析流程图

Fig. 5 The modal analysis flow chart

通过砌块夹具的模态分析,获得砌块夹具 1~6 阶下的固有频率以及模态振型等参数,为砌块夹具的振动特性分析、结构动力特性的分析提供数据基础^[17],笔者砌块夹具模

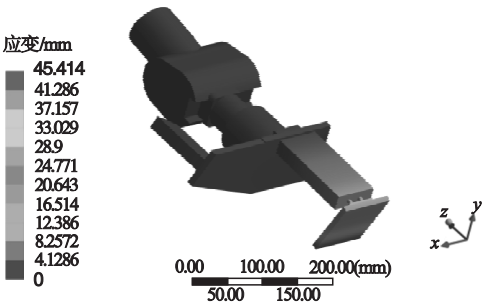
态分析结果表 1 所示。

表 1 砌块夹具模态分析结果

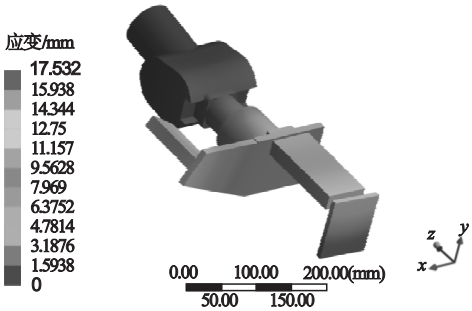
Table 1 Modal analysis results

阶数	频率/Hz	位移/mm
1 阶	139.73	45.41
2 阶	164.51	17.53
3 阶	174.10	41.93
4 阶	191.24	34.03
5 阶	280.78	35.04
6 阶	341.78	55.83

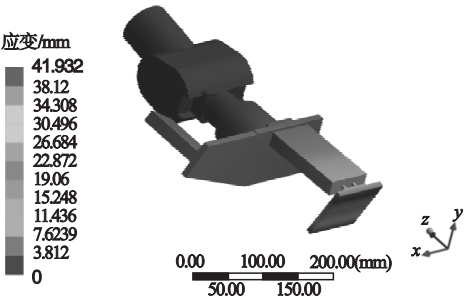
由表 1 可知,砌块夹具在不同频率下的位移,砌块夹具前 6 阶振型如下:1 阶振型主要是夹具外侧夹板在 z 轴方向的摆动,最大位移为 45.41 mm;2 阶振型主要是夹具外侧夹板与顶板在垂直于 oxy 面的弯曲,最大位移为 17.53 mm;3 阶振型与第一阶振型类似,最大位移为 41.93 mm;4 阶振型主要是夹具内侧夹板在垂直于 oxy 面 z 轴正方向的摆动,最大位移为 34.03 mm;5 阶振型主要与第四阶振型类似,最大位移为 35.04 mm;6 阶振型主要是夹具外侧夹板绕机械臂手腕轴心转动,最大振幅为 55.83 mm。砌块夹具 1~6 阶模态分析结果云图如图 6 所示。



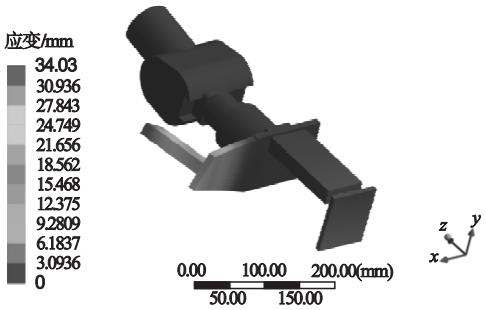
(a)夹具1阶模态分析云图



(b)夹具2阶模态分析云图



(c)夹具3阶模态分析云图



(d)夹具4阶模态分析云图

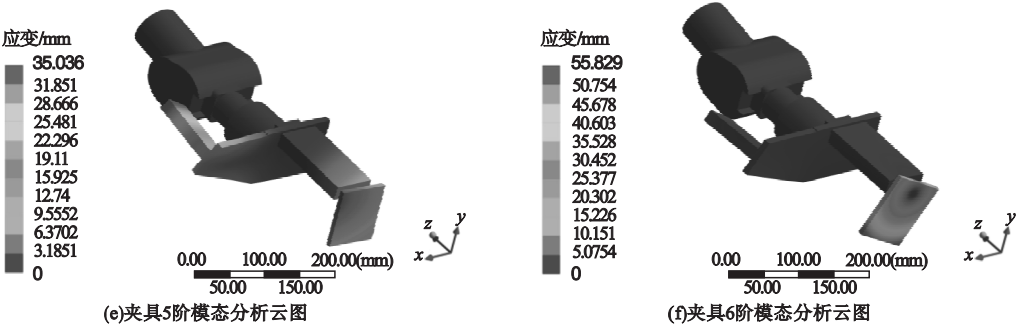


图6 砌块夹具1~6阶模态分析云图

Fig. 6 The 1~6 order modal analysis cloud map of clamp

2.2 砌筑机器人底盘静刚度特性分析

砌筑机器人的底盘作为砌筑机械臂、砌块供给系统、砂浆供给系统的承载部件,其结构在砌筑过程中的静刚度特性,对墙体的砌筑误差以及砌筑机器人行走底盘止停、定位精度具有直接的影响。线性静态结构分析(Lines Static Structural Analysis, LSSA)是指在不考虑运动惯性、阻尼以及及时变载荷的情况分析固定载荷对结构的效应。砌筑机器人的底盘的静刚度特性分析可获得重力和离心力等惯性载荷对底盘结构产生的影响^[18]。根据力学知识,物体的动力学通用方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t).$$
 (7)

式中: M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度系数矩阵; x 为位移矢量; F 为力矢量。

静刚度特性分析中力为非时间变量,设定底盘结构材料满足线弹性、小变形等理论,可以由下面的矩阵方程解出:

$$Lx = F.$$
 (8)

式中: L 为一常量矩阵且必须是连续的; F 为静态加载到底盘上的力。

砌筑机器人的底盘静刚度特性分析假定载荷和响应是固定不变的,响应随时间的变化趋于无穷小^[19]。砌筑机器人在砌筑作业时的载荷主要有机器人的自身质量约为2 000 kg,标准工况下砌块供给机构供应5块砌块约为25 kg,砂浆存储量约为100 kg (0.04 m³)。笔者利用Workbench对底盘进行线性静态结构分析时,流程图如图7所示。

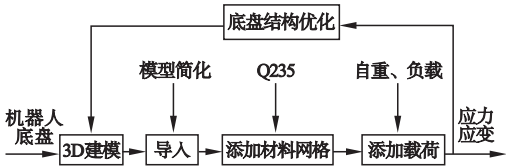


图7 底盘结构线性静态分析流程图

Fig. 7 Linear static analysis of chart structures

按要求施加负载,载荷分布在底盘范围内。底盘线性静态分析结果如图8所示。

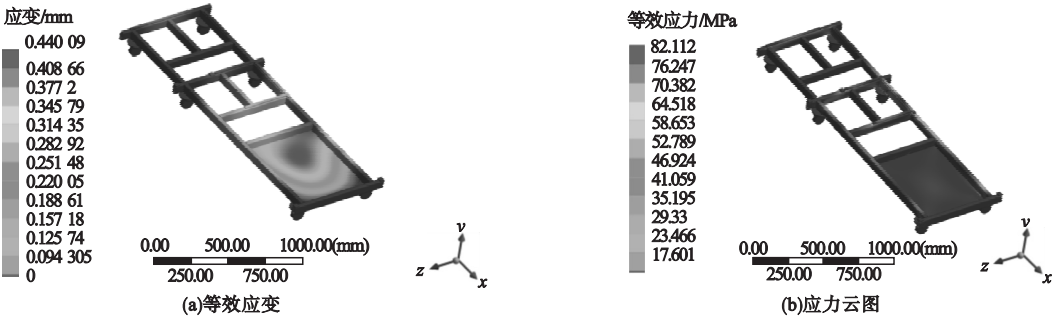


图8 底盘线性静态分析结果

Fig. 8 Linear static analysis results of chassis

由图8可知,在传送带侧位移最大,沿y轴负方向,最大应力为82.112 MPa。由于砌筑机器人底盘结构材料选用Q235,其许用应力 σ 为235 MPa,安全系数 $V=235/82.112=2.86>1.5$,静刚度、强度满足工程标准要求。结构在所施加载荷作用下,最大应变为0.44 mm,如需优化可在对应突变位置优化。

2.3 砌筑机器人结构优化思路

优化就是指在多种设计方案中选取一种既能实现结构功能的最大化又可以降低结构成本的设计方案^[20]。在砌筑机器人研发过程中要同时满足最优的功能设计和结构设计可能会发生一些矛盾,在此时要在能满足结构工程要求的基本功能的前提下开展结构优化设计。笔者在砌体墙砌筑机器人可实现其基本砌筑功能的基础上对整机结构进行优化。目的在于降低制造成本,改善产品外形,提高产品品质,根据上节对砌体墙砌筑机器人的分析结果,在满足机器人工作时结构所需的基本强度和刚度的前提下,确保初始设计的各部件选型及材料不发生变化,考虑到砌筑机器人自重的惯性力对整机的移动定位精度影响较大,应尽量减小机器人自重为重要优化指标,而机械臂和砂浆供给机构均已模块化,部分结构已经采取了优化处理,所以在此时对底盘进行结构优化,合理分布各杆件位置在减轻自身质量的同时提高砌筑机器人整机性能。

3 结 论

(1)结合砌筑机器人的技术参数,根据拉格朗日方程建立了砌块砌筑系统机械臂的动力学模型,并且运用ADAMS进行动力学仿真,分析得到大臂、小臂关节电机最大驱动力矩分别为57.5 N·m和20 N·m,能够完全满足驱动力矩的要求,与实际机械臂选型计算结果相符。

(2)通过ANSYS Workbench对砌体墙砌筑机器人的砌块夹具进行了模态仿真,得

出6阶模态下,在341.787 Hz时最大振幅为55.83 mm。不同模态下的变形及频率为机器人各工况下施工稳定性的保证提供了理论依据;对砌筑机器人移动底盘进行线性静态结构分析得出最大位移出现在传送带侧,最大变形沿y轴负方向为0.44 mm,最大应力为82.112 MPa,安全系数为2.86,静刚度特性、结构强度满足要求。

(3)砌筑机器人结构优化目标:将底盘砌块供给传送带侧横向加强杆的数量减少,在1 m范围内均布2个,减小底盘的质量,同时优化加强杆的分布型式,改善其受力状况,降低变形程度和应力集中的状态;在机械臂和砂浆供给泵固连位置内外两侧各增加加强板,有效地减小应力集中,防止底盘连接部位的变形。

参考文献

- [1] 郭兆松,刘静.基于有限元分析技术的支撑结构可靠性分析[J].舰船科学技术,2020,42(22):217-219.
(GUO Zhaosong, LIU Jing. Reliability analysis of supporting structure based on finite element analysis technology [J]. Ship science and technology, 2020, 42(22): 217-219.)
- [2] 何霁耀.建筑施工安全管理问题分析[J].居业,2020(9):142-144.
(HE Jiyao. Analysis of construction safety management problems [J]. Journal of residential industry, 2020(9): 142-144.)
- [3] 韩正伟.高强混凝土暖砖配筋墙体静力性能分析[D].青岛:青岛理工大学,2019.
(HAN Zhengwei. Static performance analysis of high-strength concrete insulation brick reinforced wall [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2019.)
- [4] WANG Huaibin, HAO Xie. Research on application of heavy compressed air foam truck applied in high-rise building fires[J]. Procedia engineering, 2014, 71: 276-281.
- [5] 马岸奇.全自动砌墙机器人的研发与应用[J].砖瓦,2019(2):79.
(MA Anqi. Research, development and application of automatic wall-laying robot [J]. Brick & tile, 2019(2): 79.)
- [6] 王福兴.砌墙机器人结构设计与分析[D].青岛:山东科技大学,2018.
(WANG Fuxing. Design and analysis of masonry robot structural [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018.)
- [7] 陈晓诗,王晟儒.墙体砌筑施工技术在建工程中的应用分析[J].民营科技,2018

- (1):76.
(CHEN Xiaoshi,WANG Shengru. Analysis on the application of wall masonry construction technology in construction engineering [J]. Private science and technology,2018(1):76.)
- [8] 徐德飞,张伟,吕凌泉,等. 基于模态分析的旋转电机机械耦合优化分析[J]. 中国设备工程,2017(10):36-37.
(XU Defei,ZHANG Wei,Lü Lingxiao,et al. Mechanical coupling optimization analysis of rotary motors based on modal analysis [J]. China equipment engineering, 2017 (10): 36-37.)
- [9] HIGGINS E,TAYLOR M,FRANCIS H,et al. The evolution of geographical information systems for fire prevention support [J]. Fire safety journal,2014,69:117-125.
- [10] MEHEDI I M,RAO K P. Surgical robotic arm control for tissue ablation [J]. Journal of robotic surgery,2020,14(6):881-887.
- [11] 邓贤远,黄国健,江爱华,等. 门座起重机振动模态分析研究[J]. 自动化与信息工程,2016,37(4):40-43.
(DENG Xianyuan,HUANG Guojian,JIANG Aihua,et al. Research of portal crane vibration modal analysis [J]. Automation and information engineering,2016,37(4):40-43.)
- [12] 张文. 梨质地的激光多普勒测振无损检测方法[D]. 杭州:浙江大学,2016.
(ZHANG Wen. Nondestructive evaluation of pear texture based on laser doppler vibration [D]. Hangzhou:Zhejiang University,2016.)
- [13] 王爱国,朱刚. 解读“绿皮书”之机器人标准制定[J]. 机器人产业,2015(5):53-59.
(WANG Aiguo,ZHU Gang. Interpretation of the robot standard formulation of the "green paper" [J]. Robotics industry, 2015 (5): 53-59.)
- [14] 李津. ANSYS 15.0 有限元分析自学手册[M]. 北京:人民邮电出版社,2015.
(LI Jin. ANSYS 15.0 manual of finite element analysis [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press,2015.)
- [15] 张珂,张天笑,王子男. 基于轴承动刚度的电主轴动态特性影响因素分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(6):1089-1098.
(ZHANG Ke,ZHANG Tianxiao,WANG Zinan. Analysis of factors affecting the dynamic characteristics of motorized spindle based on the dynamic stiffness of bearing[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2018,34(6):1089-1098.)
- [16] ARORA R, DHAMI S S. Finite element analysis and multibody dynamics of 6-DOF industrial robot [J]. International journal of mechanical and production engineering research and development,2017,7(5):1-12.
- [17] HE Wangyong,LI Haogui,WANG Yuanjiang, et al. Suppression the disturbance of robotic manipulators based on nonlinear disturbance observer and fuzzy logic system[J]. Journal of advanced computational intelligence and intelligent informatics, 2020, 24 (7): 846-854.
- [18] XU Peng, LI Bing, CHEUNG Chifai, et al. Stiffness modeling and optimization of a 3-DOF parallel robot in a serial-parallel polishing machine[J]. International journal of precision engineering & manufacturing, 2017, 18(4):497-507.
- [19] 李新乐,刘维平,武涛,等. 工业机器人机构性能研究方法分析[J]. 山东工业技术,2020(1):17-21.
(LI Xinle,LIU Weiping,WU Tao,et al. Analysis of research methods for the mechanism performance of industrial robots [J]. Shandong industrial technology, 2020 (1):17-21.)
- [20] 宋中越. 6轴工业机器人结构设计及优化分析[J]. 机械设计,2020,37(11):115-119.
(SONG Zhongyue. Structural design and optimization analysis of 6-axis industrial robots [J]. Mechanical design, 2020, 37 (11): 115-119.)
- [21] 叶长龙,张思阳,于苏洋,等. 基于神经网络的全方位移动机器人运动稳定性研究[J]. 机器人,2019,41(4):443-451.
(YE Changlong,ZHANG Siyang,YU Suyang,et al. Research on movement stability of omnidirectional mobile robot based on neural network[J]. Robot,2019, 41(4):443-451.)
- [22] 张广川. 可实现自动砌墙的建筑机器人设计[J]. 机械,2011,38(8):79-80.
(ZHANG Guangchuan. Design of building robot that can realize automatic wall-built[J]. Machinery,2011,38(8):79-80.)
- (责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)