

液压驱动式 3T1R 重载搬运机械装置的设计研究

张晓洋, 李然, 王宸, 赵国华, 王生怀
(湖北汽车工业学院 机械工程学院, 湖北 十堰 442002)

摘要: **目的** 基于十字滑台原理, 文中设计可以实现 3T1R 四自由度的重载搬运机械装置, 达到对货物准确定位、牢固夹紧以及多自由度搬运的目的。**方法** 利用解析法和有限元法对承重螺栓进行结构设计和强度分析, 根据分析结果提出螺栓根部圆角滚压的结构改进方案; 根据不同滚压圆角对应的应力值, 采用 Hermite (埃尔米特) 方法得到滚压圆角半径-应力 ($r-\sigma$) 曲线和多项式, 求导确定结构改进方案。**结果** 根据滚压圆角半径-应力 ($r-\sigma$) 曲线, 确定最佳滚压半径 $r=4$ mm; 以 PLC 控制技术为基础, 设计了搬运机械液压驱动控制系统。装置搬运载荷达到 55 kN, 螺栓根部强度提高了 59.54%, 屈服极限安全系数达到 2.4。**结论** 通过结构设计, 该装置实现了 3T1R 4 个自由度的运动及控制; 通过结构改进达到了多自由度搬运的效果。

关键词: 3T1R; 有限元法; Hermite 方法; 结构改进; 液压驱动控制

中图分类号: TH131.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)13-0172-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.13.022

Design of Hydraulically Driven 3T1R Heavy-duty Handling Mechanical Device

ZHANG Xiao-yang, LI Ran, WANG Chen, ZHAO Guo-hua, WANG Sheng-huai

(School of Mechanical Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Hubei Shiyan 442002, China)

ABSTRACT: The work aims to design a heavy-duty handling mechanical device that can realize 3T1R four degrees of freedom based on cross slide principle, so as to achieve the purpose of accurate positioning, firm clamping and handling of goods through multiple degrees of freedom. The structural design and strength analysis was carried out to load-bearing bolt by analytical method and finite element method. According to analysis results, the structural improvement scheme of bolt root fillet rolling was proposed. According to the stress values corresponding to different rolling fillets, the radius-stress ($r-\sigma$) curve and polynomial of rolling fillets were obtained by Hermite method, and the structural improvement scheme was determined by derivation. Based on the radius-stress ($r-\sigma$) curve of rolling fillets, the optimal rolling radius was determined as $r=4$ mm. Based on PLC control technology, the hydraulically driven control system of handling mechanical device was designed. The device realized a handling load of 55 kN, the strength of bolt root increased by 59.54% and the yield limit safety factor was up to 2.4. Through structural design, the device realizes the 3T1R four degrees of freedom. Through the structural improvement, the effect of multi-degree-of-freedom handling is achieved.

KEY WORDS: 3T1R; finite element method; Hermite method; structural improvement; hydraulically driven control

现有的货物搬运机械装置分为轻载货物搬运和重载货物搬运 2 种。轻载货物搬运装置如搬运机械

手, 搬运货物的质量较小、直径范围较小, 机械手固定不动或沿着直线导轨运动, 自由度 3~6 个不等。

收稿日期: 2021-09-07

基金项目: 国家自然科学基金 (51675167); 湖北省教育厅科研项目 (Q20201806); 教育部人文社会科学基金项目 (20YJCZH150)

作者简介: 张晓洋 (1998—), 男, 湖北汽车工业学院硕士生, 主攻机液电一体化。

通信作者: 李然 (1987—), 男, 硕士, 湖北汽车工业学院讲师, 主要研究方向为机液电一体化。

吴存存等^[1]提出了一种 2PPP_aR 并联机构, 该机构可以实现 3 个移动和 1 个转动共 4 个自由度。刘慧等^[2]基于 S7-200PLC 和维纶 TK6050ip 触摸屏, 设计了一种四自由度全自动包装搬运气动机械手控制系统, 并对系统硬件结构进行了设计。为了实现一机多用的并联机构, 石志新等^[3]提出了一种四自由度两模式并联机构, 可应用于抓取、加工、定位装配等多种场合。王宗平等^[4]提出了一种 2UPS-RPS-UPU 构型的四自由度并联机构, 该机构构型对称, 具有良好的运动解耦, 该类装置自由度柔性好, 适用于生产线货物的搬运或码垛等。重载货物搬运装置工作原理类似于叉车, 搬运货物的质量从几百千克到十几吨不等, 货物搬运的直径范围很大, 甚至可以跨车间或厂区搬运, 但自由度只有 1 个, 无法实现货物的准确定位和牢固夹紧, 需要通过驾驶员精准操作才能实现货物的准确摆放, 且需要使用托盘, 使用不安全^[5-7]。根据以上研究现状, 文中基于十字滑台原理, 设计一种可以实现 3T1R 4 个自由度的搬运机械装置, 解决现有搬运机械自由度柔性差、搬运货物质量小、移动范围有限等问题。

见图 1, 3T 是笛卡尔坐标系中的 3 个移动自由度, 1R 是竖直平面内的转动自由度, 夹持机构的运动由 4 个自由度准确控制, 该装置主要技术指标: 自由度为 4, 旋转角度为 0~90°, 额定载荷为 25~55 kN, 提升高度为 3~4 m, 前伸距离为 2~3 m, 为防止发生侧翻的单边最大移动距离为 0.15 m。

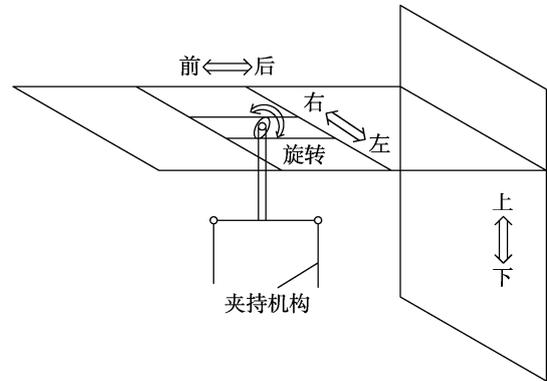


图 1 机械装置工作原理
Fig.1 Working principle of mechanical device

1 四自由度搬运机械结构设计

1.1 工作原理

液压驱动式 3T1R 重载搬运机械装置的工作原理

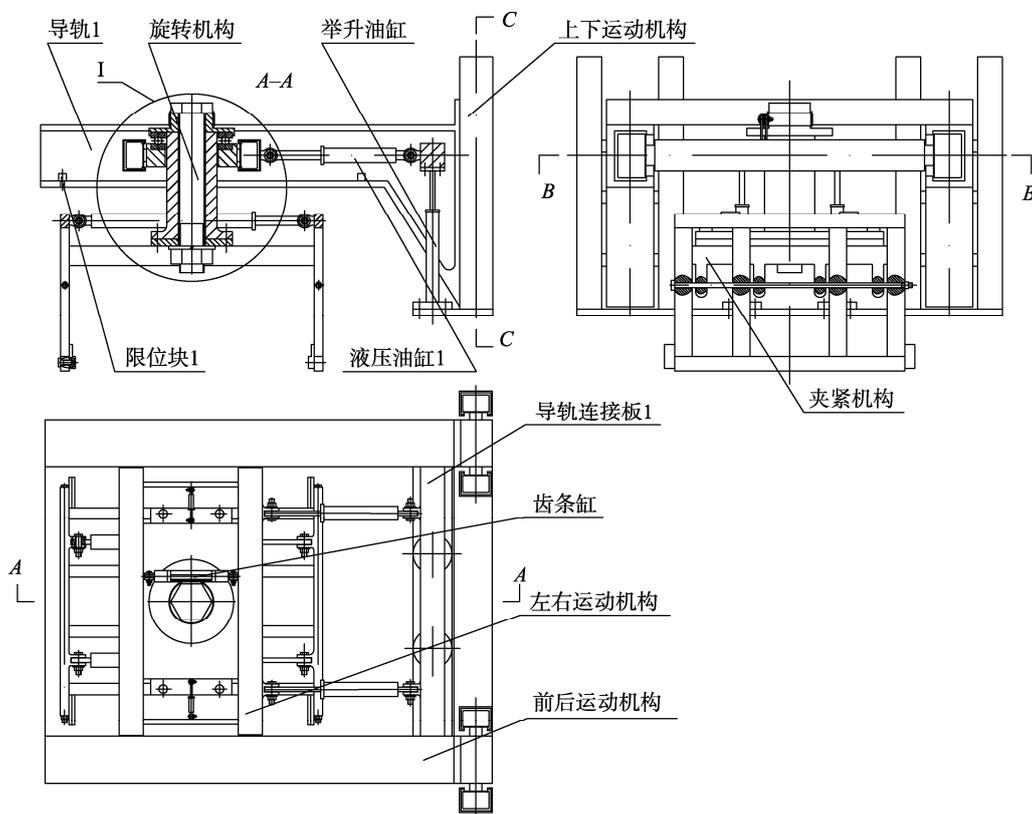


图 2 机械装置整体结构
Fig.2 Overall structure of mechanical device

1.2 结构设计

根据工作原理及要求的自由度, 整个装置的结构包含直线运动机构、旋转机构和夹持机构等, 装置整体结构见图 2, 图 2 中沿 B-B 的剖视图见图 3。

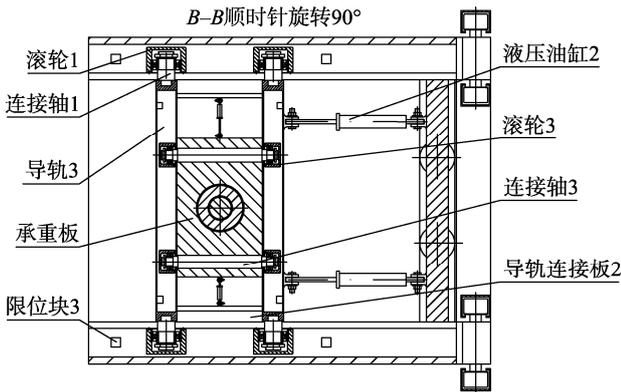


图3 B-B剖视图
Fig.3 Section B-B

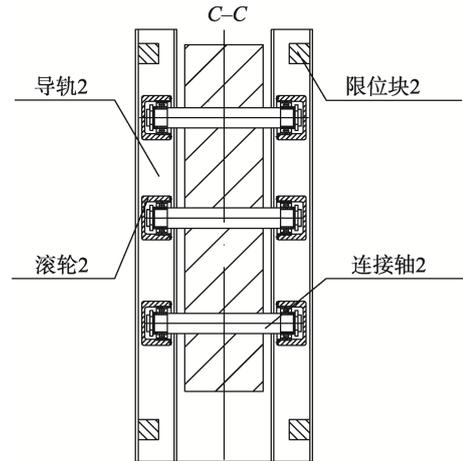


图4 C-C剖视图
Fig.4 Section C-C

1.2.1 直线运动机构

直线运动机构主要包括上下、前后和左右运动三大机构，见图2—3。前后运动机构主要包括导轨1、限位块1、导轨连接板1、液压油缸1、滚轮1、连接轴1等。连接轴1插入导轨3中且与滚轮1通过轴承配合，滚轮1在导轨1中滚动，夹持机构的前后运动由2个液压油缸1驱动，运动的极限位置由限位块1限制。图2中沿C-C的剖视图见图4，如图2、图4所示，上下运动机构主要包括举升油缸、导轨2、限位块2、连接轴2、滚轮2等。连接轴2沿着导轨连接板1垂直方向均匀分布且与导轨连接板1过盈配合，滚轮2与连接轴2通过轴承配合，滚轮2在导轨2内滚动，夹持机构的上下运动由2个举升油缸驱动，运动的极限位置由限位块2限制。如图3所示，左右运动机构主要包括导轨3、限位块3、导轨连接板2、连接轴3、滚轮3、液压油缸2等。连接轴3插入承重板中且与滚轮3通过轴承配合，滚轮3在导轨3中滚动，夹持机构的左右运动由2个液压油缸2驱动，运动的极限位置由限位块3限制。

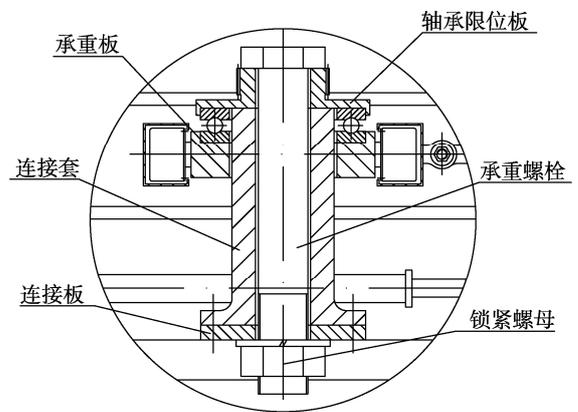


图5 局部放大图
Fig.5 Partial enlarged view

1.2.2 旋转机构

图2中局部放大I见图5，旋转机构主要包含承重螺栓、轴承限位板、连接套、锁紧螺母、承重板、齿条缸、连接板、滚针轴承等。如图2、3、5所示，承重螺栓通过锁紧螺母将轴承限位板、连接套和连接板固定连接在一起，承重板由2个连接轴3支撑，轴承限位板通过内六角螺栓与连接套固定连接，连接套由滚针轴承径向定位，轴承限位板上加工有直齿轮，可以与齿条缸形成齿轮齿条传动，将齿条缸的直线运动转换为夹持机构的旋转运动，连接板用于连接夹持机构。

1.2.3 夹持机构

夹持机构的结构见图6，夹持机构主要包括夹紧缸、横梁、夹爪、夹板等。夹板固定在夹爪上，它可以快速更换，夹爪通过螺栓及螺母与横梁铰接，夹持机构的夹紧动作由夹紧缸驱动。

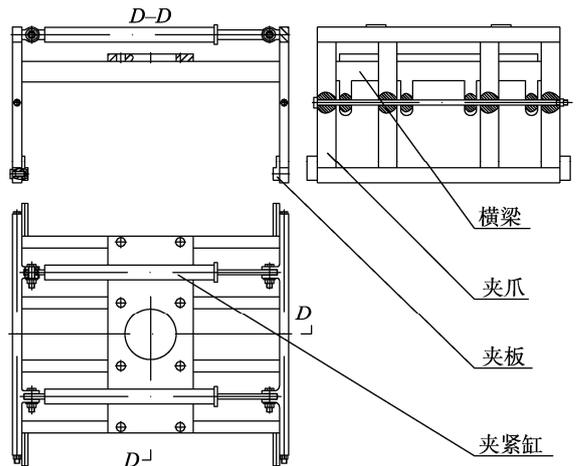


图6 夹持机构
Fig.6 Clamping mechanism

2 承重螺栓理论分析与计算

整个装置在工作过程中，承重螺栓作为重要的载荷件持续承受着很大的轴向载荷，因此要对承重螺栓

进行强度设计与分析。

2.1 承重螺栓强度设计

螺栓承受轴向载荷时的拉伸强度条件为:

$$\sigma = \frac{F}{\frac{\pi}{4}d^2} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_s}{S} \quad (1)$$

整理得到:

$$d \geq \sqrt{\frac{4FS}{\pi\sigma_s}} \quad (2)$$

式中: d 为螺栓危险截面直径, mm; S 为松螺栓连接安全系数; σ_s 为螺栓材料的屈服应力, MPa; F 为轴向最大载荷, N。

承重螺栓材料为 DG20Mn, 安全系数 $S=5^{[8-11]}$, 该材料主要性能指标: 屈服极限为 333 MPa、弹性模量为 210 GPa、泊松比为 0.3、密度 $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、抗拉强度为 608 MPa。承重螺栓结构见图 7。

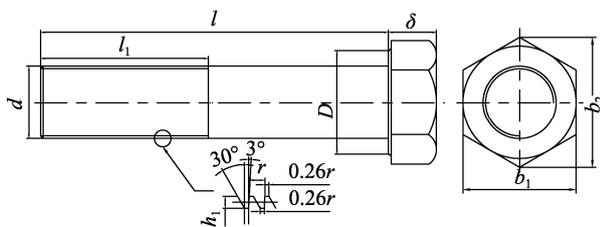


图 7 承重螺栓结构
Fig.7 Structure of load-bearing bolt

图 7 中螺栓各参数: 螺纹大径 d 为 2 mm, 螺栓长度 l 为 200 mm, 螺纹长度 l_1 为 96 mm, 六角头对边宽度 b_1 为 65 mm, 六角头对角宽度 b_2 为 71.3 mm, 六角头部厚度 δ 为 26 mm, 螺栓承载面直径 D 为 59.9 mm, 螺距 r 为 3 mm, 螺纹牙型高度 h_1 为 2.25 mm。根据解析法计算结果, 螺栓承受的最大轴向载荷 $F=55 \text{ kN}$ 。

将上述参数带入式 (1) 可得:

$$\sigma = \frac{F}{\frac{\pi}{4} \times d^2} = 39.69 \text{ MPa} < [\sigma] = \frac{\sigma_s}{S} = 66.67 \text{ MPa}$$

故解析法设计的承重螺栓符合使用要求。

2.2 承重螺栓强度分析

根据螺栓参数建立承重螺栓三维模型, 见图 8。



图 8 承重螺栓三维模型
Fig.8 Three dimensional model of load-bearing bolt

承重螺栓采取三面体自由网格(网格单元尺寸为 1 mm)进行网格划分, 网格划分结果见图 9。约束为螺栓根部约束, 限制所有自由度, 载荷沿着 y 轴正方向, 仿真得到的应力云图见图 10。

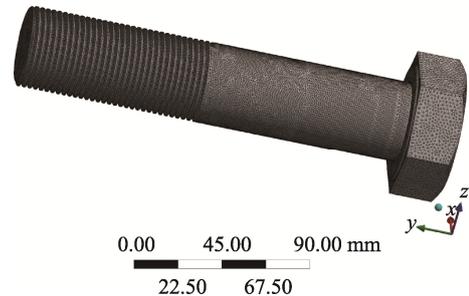


图 9 网格划分
Fig.9 Meshing

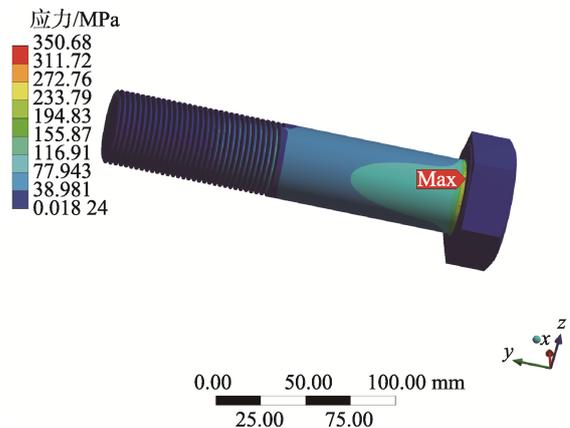


图 10 结构改进前螺栓根部应力云图
Fig.10 Stress nephogram of bolt root before structural improvement

由仿真结果可知, 承重螺栓在承受最大载荷时, 根部出现了应力集中现象, 最大应力为 350.68 MPa, 超过材料的屈服极限, 因此要对螺栓进行结构改进。

为了减小根部应力集中, 提升根部强度, 需要在螺栓根部进行圆角滚压^[12-14], 螺栓根部不同滚压圆角半径对应的应力见表 1。

根据表 1 结果, 采用 Hermite(埃尔米特)方法^[15-17]拟合得到螺栓根部 $r-\sigma$ 曲线见图 11。

对应的插值多项式为:

$$\sigma = f(r) = 0.16r^4 - 3.8r^3 + 36r^2 - 150r + 370 \quad (3)$$

对式 (3) 求导可得:

$$\sigma' = f'(r) = 0.64r^3 - 11.4r^2 + 72r - 150 \quad (4)$$

令 $\sigma'=0$ 可得 $r=4.332 \text{ mm}$ 。

在相同约束和载荷条件下, 螺栓根部结构改进(滚压圆角半径 $r=4 \text{ mm}$) 后的仿真结果见图 12。

表 1 螺栓根部滚压圆角半径-应力值
Tab.1 Radius-stress of bolt root rolling fillet

滚压圆角半径 r/mm	应力值 σ/MPa
0	350.68
0.5	338.92
1	251.21
1.5	199.50
2	177.26
2.5	169.26
3	162.54
3.5	153.72
4	140.49
4.5	142.24
5	154.33
5.5	161.50
6	164.41
6.5	168.40
7	172.28
7.5	182.97
8	212.54

由仿真结果可知, 结构改进后承重螺栓在最大轴向载荷作用下, 根部最大应力为 140.49 MPa, 强度提高了 59.54%, 屈服极限安全系数达到 2.4。

2.3 螺纹联结强度分析

锁紧螺母处的螺纹联结强度会对旋转机构工作及承载安全性有一定的影响, 故需对螺纹的联结强度进行分析, 螺纹联结承受轴向载荷时的挤压应力^[18]为:

$$\sigma_{jy} = \frac{F/n}{\pi d_2 h_1} \quad (5)$$

式中: F 为螺纹联结轴向最大载荷, N; n 为螺纹联结圈数; d_2 为螺纹中径, mm; h_1 为螺纹牙高度, mm。

此处螺纹联结圈数 $n=6$, 螺纹中径 $d_2 = d - 0.75p$, 将螺栓参数带入式 (5) 可得。

$$\sigma_{jy} = 32.62 \text{ MPa} < [\sigma] = \frac{\sigma_s}{S} = 66.67 \text{ MPa}$$

由此可知, 螺纹联结强度符合要求。

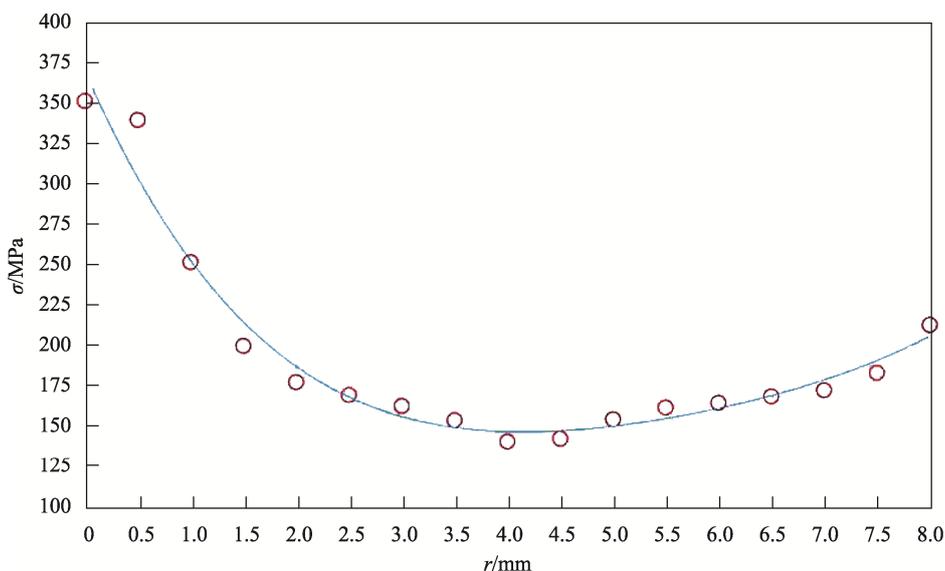


图 11 螺栓根部 $r-\sigma$ 曲线
Fig.11 $r-\sigma$ curve of bolt root

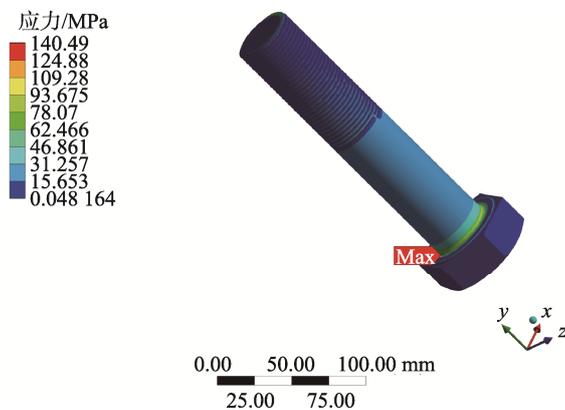
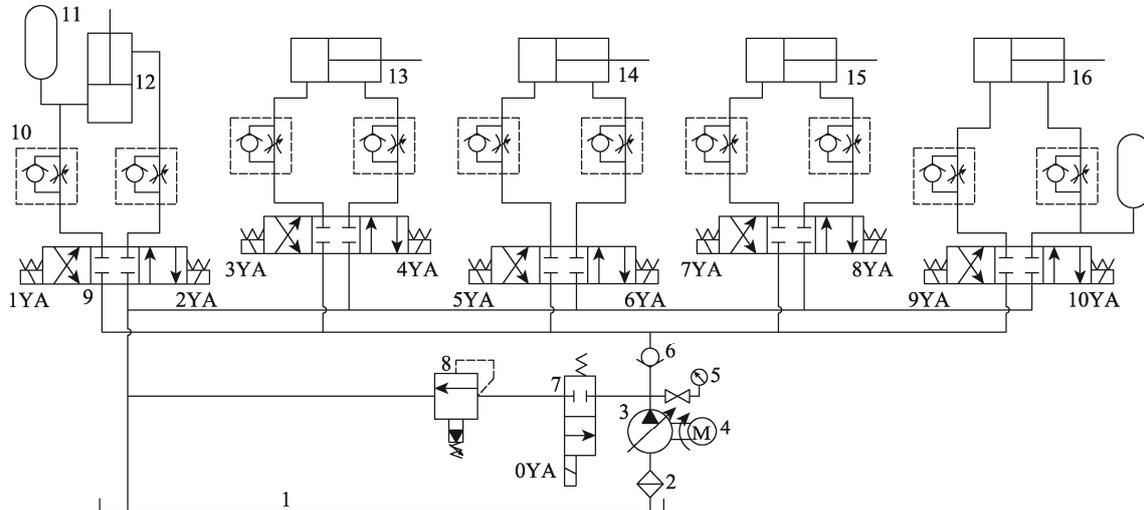


图 12 结构改进后螺栓根部应力云图
Fig.12 Stress nephogram of bolt root after structural improvement

3 液压驱动控制系统设计

液压控制系统主要控制搬运机械 3T1R 4 个自由度和夹紧动作, 每个自由度和夹紧动作由液压油缸驱

动完成, 并且各自由度与夹紧动作之间相互独立, 液压控制系统原理见图 13。液压控制系统采用西门子公司 S7-300PLC 做主控制器^[19], 主控制器梯形图见图 14, 梯形图中对应的输入、输出信号见表 2。



1.邮箱; 2.过滤器; 3.变量泵; 4.电机; 5.油压表; 6.单向阀; 7.两位两通换向阀; 8.溢流阀;
9.三位四通换向阀 (5 个); 10.单向节流阀 (10 个); 11.储能器 (2 个); 12.举升油缸;
13.液压油缸 1 (前后运动); 14.液压油缸 2 (左右运动); 15.齿条缸; 16.夹紧缸。

图 13 液压控制系统原理

Fig.13 Principle of hydraulic control system

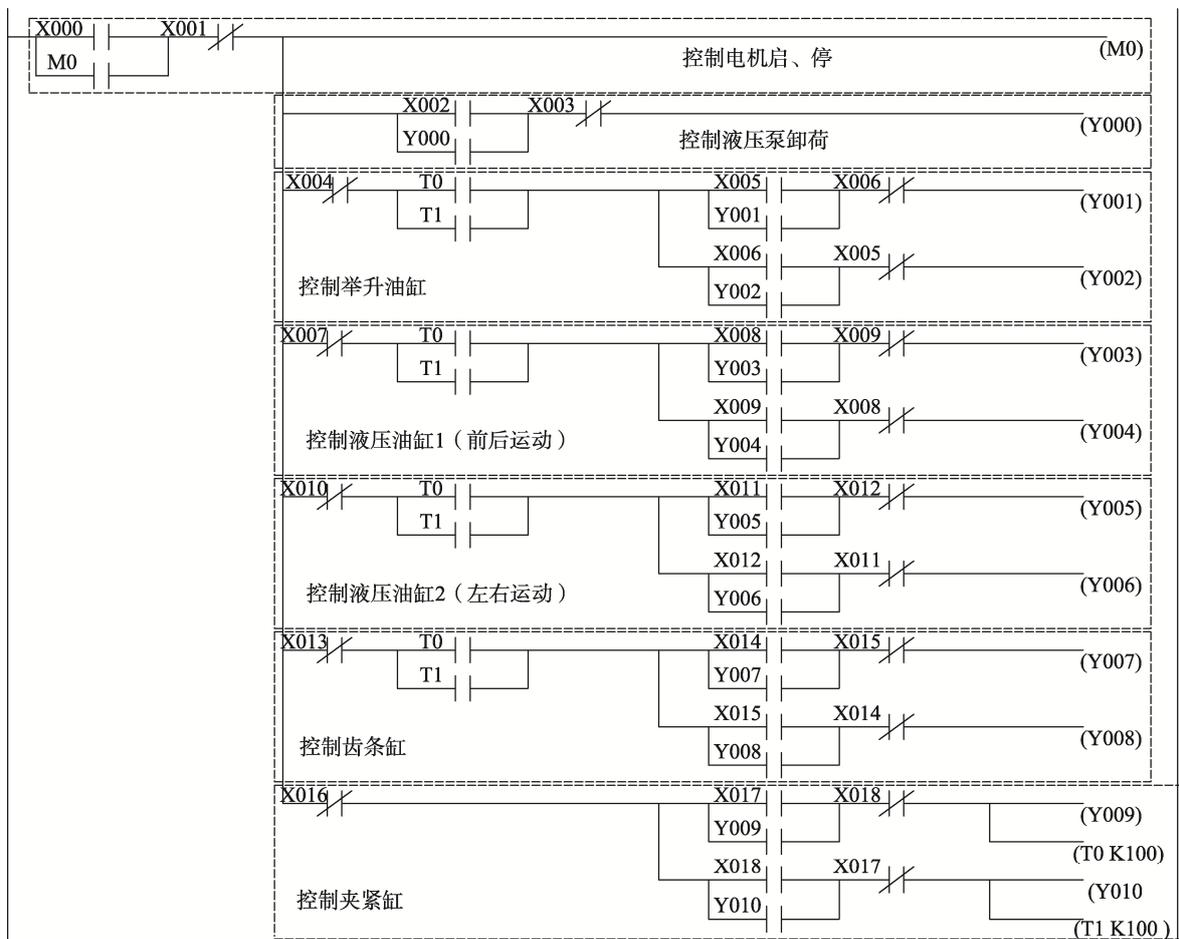


图 14 主控制器梯形图

Fig.14 Ladder diagram of main controller

表2 主控制器输入、输出信号
Tab.2 Input and output signals of main controller

机械部件	机械部件动作	控制信号		对应电磁铁得失电状况
		输入信号(开关信号)	输出信号	
电机	启动	X000	M0	
	停止	$\overline{X001}$	$\overline{M0}$	
液压泵	卸荷	X002	Y000	0YA 得电
	停止卸荷	$\overline{X003}$	$\overline{Y000}$	0YA 失电
举升油缸	向上	X005	Y001	1YA 得电、2YA 失电
	锁停	$\overline{X004}$	$\overline{Y001} \cdot \overline{Y002}$	1YA 失电、2YA 失电
	向下	X006	Y002	1YA 失电、2YA 得电
液压油缸 1	向前	X008	Y003	3YA 得电、4YA 失电
	锁停	$\overline{X007}$	$\overline{Y003} \cdot \overline{Y004}$	3YA 失电、4YA 失电
	向后	X009	Y004	3YA 失电、4YA 得电
液压油缸 2	向左	X011	Y005	5YA 得电、6YA 失电
	锁停	$\overline{X010}$	$\overline{Y005} \cdot \overline{Y006}$	5YA 失电、6YA 失电
	向右	X012	Y006	5YA 失电、6YA 得电
齿条缸	正转	X014	Y007	7YA 得电、8YA 失电
	锁停	$\overline{X013}$	$\overline{Y007} \cdot \overline{Y008}$	7YA 失电、8YA 失电
	反转	X015	Y008	7YA 失电、8YA 得电
夹紧缸	夹紧	X017	Y009	9YA 得电、10YA 失电
	锁停	$\overline{X016}$	$\overline{Y009} \cdot \overline{Y010}$	9YA 失电、10YA 失电
	松开	X018	Y010	9YA 失电、10YA 得电

注：输入信号“X000”表示开关闭合、“ $\overline{X001}$ ”表示开关断开；输出信号“Y000”表示线圈通电、“ $\overline{Y000}$ ”表示线圈断电；“ \cdot ”表示逻辑控制中“与”的意思。

4 结语

文中基于十字滑台原理，设计了一种可以实现3T1R四自由度的重载搬运机械装置。针对机械装置中的承重螺栓，首先，利用解析法对承重螺栓结构进行了设计；其次，利用有限元法对承重螺栓强度进行了分析，提出了螺栓根部圆角滚压的结构改进方案；然后，根据不同滚压半径对应的应力值，采用Hermite（埃尔米特）方法，得到滚压半径-应力值（即 $r-\sigma$ ）曲线和多项式，依次确定结构改进方案，结构改进后，机械装置搬运载荷达到55 kN，螺栓根部强度提高了59.54%，屈服极限安全系数达到2.4；最后，基于PLC设计了搬运机械液压驱动控制系统。该装置运动自由度柔性好、搬运载荷大、驱动方式可靠性高，可适用于多种重载搬运场合，以上研究为3T1R四自由度重载搬运机械装置的设计研究提供了一定的理论依据。

参考文献：

- [1] 吴存存, 杨桂林, 陈庆盈, 等. 四自由度2PPPaR并联机构运动学及性能分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(3): 36-45.
WU Cun-cun, YANG Gui-lin, CHEN Qing-ying, et al. Kinematic and Performance Analysis of a 4-DOF 2PPPaR Parallel Manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(3): 36-45.
- [2] 刘慧, 杨炎坤. 四自由度包装搬运机械手控制系统设计[J]. 包装工程, 2017, 38(5): 30-33.
LIU Hui, YANG Zhi-kun. Design of Control System for Four-DOF (Degree of Freedom) Packaging Handling Manipulator[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(5): 30-33.
- [3] 石志新, 叶梅燕, 罗玉峰, 等. 四自由度两模式并联机构结构综合与位置分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 383-389.
SHI Zhi-xin, YE Mei-yan, LUO Yu-feng, et al. Type Synthesis and Position Analysis of 4-DOF Parallel Mechanisms with Two Operation Modes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 383-389.
- [4] 王宗平, 赵登峰, 李宽, 等. 新型四自由度并联机构运动性能分析与动力学求解研究[J]. 机械传动, 2018, 42(5): 18-25.
WANG Zong-ping, ZHAO Deng-feng, LI Kuan, et al. Analysis of Kinematic Performance and Research of Dynamics Solution of New Type 4-DOF Parallel Mechanism[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2018, 42(5): 18-25.
- [5] 陈明, 肖本贤. 基于模糊控制的三轮全转向叉车转向研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017,

- 40(8): 1064-1069.
CHEN Ming, XIAO Ben-xian. Research on the Steering of Three-Wheel Steering Forklift Based on Fuzzy Control[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2017, 40(8): 1064-1069.
- [6] 夏光, 李嘉诚, 唐希雯, 等. 平衡重式叉车防侧翻模型预测控制研究[J]. 中国机械工程, 2021, 32(8): 987-996.
XIA Guang, LI Jia-cheng, TANG Xi-wen, et al. Research on Anti-Rollover Model Predictive Control of Counterbalanced Forklift Trucks[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(8): 987-996.
- [7] 叶国云, 张根社, 吴宁康, 等. 基于主动万向轮的全向移动叉车设计[J]. 煤矿机械, 2019, 40(1): 15-16.
YE Guo-yun, ZHANG Gen-she, WU Ning-kang, et al. Design of Omnidirectional Mobile Forklift Based on Powered Caster Wheel[J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(1): 15-16.
- [8] 刘榕, 才振山, 沈锐利, 等. 螺栓临时铰在单向力作用下受力模式分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(6): 1462-1470.
LIU Rong, CAI Zhen-shan, SHEN Rui-li, et al. Analysis of Force Mode of Bolt Temporary Hinge under Unidirectional Force[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(6): 1462-1470.
- [9] 吴东平, 李伟, 商晨, 等. 钢管混凝土柱-钢梁外加强环螺栓连接节点受力性能研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(3): 219-224.
WU Dong-ping, LI Wei, SHANG Chen, et al. Study on Mechanical Properties of Bolted Joint between Steel Beam and Concrete Filled Steel Tubular Column with Exterior Diaphragm[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(3): 219-224.
- [10] 郭宏超, 肖枫, 吴梦溪, 等. Q460 高强度螺栓接头受力性能分析与评价[J]. 实验力学, 2019, 34(2): 341-350.
GUO Hong-chao, XIAO Feng, WU Meng-xi, et al. Analysis and Evaluation on Mechanical Performance of Q460 High-Strength Steel Bolt Joint[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(2): 341-350.
- [11] 辛永木. DG20Mn 钢吊钩热处理工艺探讨[J]. 金属热处理, 2011, 36(4): 41-42.
XIN Yong-mu. Heat-Treatment of Hook Made of DG20Mn Steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(4): 41-42.
- [12] 王虎军, 陈建彬, 陈卫林, 等. 螺母表面滚压强化有限元分析[J]. 热加工工艺, 2021, 50(6): 79-82.
WANG Hu-jun, CHEN Jian-bin, CHEN Wei-lin, et al. Finite Element Analysis of Rolling Strengthening of Nut Surface[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(6): 79-82.
- [13] 韩少军, 刘川, 祝蕴龙, 等. 曲轴圆角滚压工艺参数的多目标优化设计[J]. 热加工工艺, 2016, 45(11): 125-127.
HAN Shao-jun, LIU Chuan, ZHU Yun-long, et al. Multi-Objective Optimization Design of Process Parameters of Crankshaft Fillet Rolling[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(11): 125-127.
- [14] 杨秀芝, 张锐, 王健, 等. 基于 ANSYS 的曲轴圆角滚压特性分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2015, 38(9): 1180-1183.
YANG Xiu-zhi, ZHANG Rui, WANG Jian, et al. Analysis of Features of Fillet Rolling Processing for Crankshaft with ANSYS[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2015, 38(9): 1180-1183.
- [15] 李春祥, 裴杨从琪, 殷潇. 基于 Hermite 组合核 EMD-WT-LSSVM 的非平稳非高斯风压预测[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(10): 1249-1258.
LI Chun-xiang, PEI Yang-cong-qi, YIN Xiao. Nonstationary Non-Gaussian Wind Pressure Prediction Using Hermite Combination Kernel Based EMD-WT-LSSVM[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019, 53(10): 1249-1258.
- [16] 普亚松, 史耀耀, 蔺小军, 等. 基于对数四元数的工业机器人 Hermite 样条曲线姿态插值[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(6): 1165-1173.
PU Ya-song, SHI Yao-yao, LIN Xiao-jun, et al. Interpolating Industrial Robot Orientation with Hermite Spline Curve Based on Logarithmic Quaternion[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(6): 1165-1173.
- [17] 沈国政, 赵宏华, 赵凯, 等. 深基坑开挖引起隧道纵向位移的 Hermite 差分法[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(S2): 841-848.
SHEN Guo-zheng, ZHAO Hong-hua, ZHAO Kai, et al. Hermite Difference Method for Tunnel Longitudinal Displacement Caused by Deep Foundation Pit Excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S2): 841-848.
- [18] 李俊岩, 包婷萍, 侯鹏飞, 等. 基于有限元分析的螺纹连接强度设计技术研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2020(2): 78-82.
LI Jun-yan, BAO Ting-ping, HOU Peng-fei, et al. The Research on Design Technology of Thread Connection Strength Based on Finite Element Analysis[J]. Missiles and Space Vehicles, 2020(2): 78-82.
- [19] 刘永, 李捷, 杨立学. 发动机缸体堵盖自动压装机的设计[J]. 制造技术与机床, 2020(7): 141-144.
LIU Yong, LI Jie, YANG Li-xue. Design on the Automatic Pressing Machine of the Engine Block Plugging Cover[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2020(7): 141-144.