

For citation: Yang Wen-Xuan. Structural Design and Simulation of a Manipulator for Automatic Loading and Unloading of Small Bagged Medicines // Grand Altai Research & Education — Issue 2 (25)'2025 (DOI: 10.25712/ASTU.2410-485X.2025.02) — EDN: <https://elibrary.ru/FSJGES>

UDK 628.931

STRUCTURAL DESIGN AND SIMULATION OF A MANIPULATOR FOR AUTOMATIC LOADING AND UNLOADING OF SMALL BAGGED MEDICINES

Yang Wen-Xuan¹

¹ Hubei Digital Textile Equipment Key Laboratory, School of Mechanical Engineering and Automation,
Wuhan Textile University, Wuhan, 430073, China
E-mail: 2086302052@qq.com

Abstract. Replacing traditional gantry manipulators with truss-cantilever manipulators can not only simplify the mechanical structure and facilitate lightweight design but also reduce the space occupied by the mechanism. This paper analyzes the structure and working principle of the manipulator and its application in loading and unloading processes. Mechanisms such as gear racks, guide rail sliders, and negative pressure suction cups are employed in the scheme design and simulation of the manipulator structure. The manipulator is designed with an array of suction cups as the end effector, which helps minimize damage to pharmaceutical packaging and improves grasping stability.

Keywords: Cartesian coordinate robotic arm; Structural design; Sports Simulation; air suction

小袋药品自动上下料机械手的结构设计及仿真

杨文轩¹

¹ 武汉纺织大学, 湖北省数字化纺织装备重点实验室, 机械工程与自动化学院, 武汉 430073
E-mail: 2086302052@qq.com

摘要: 以桁架悬臂机械手代替传统龙门架机械手, 不仅能简化机械结构, 进行轻量化设计, 还能减少机构对空间的占用率. 本文分析了机械手的结构和工作原理及其在上下料中的应用, 并采用齿轮齿条, 导轨滑块, 负压吸盘等机构进行机械手结构的方案设计及仿真. 此机械手设计以阵列吸盘作为末端拾取器, 能够减轻对药品包装的破坏, 提高抓取稳定性.

关键词: 直角坐标机械手; 结构设计; 运动仿真; 气吸式

0 引言

近年来, 工业机器人广泛应用于制造业, 但针对制药行业小袋药品的专用设备仍存缺口. 此类药品包装轻软, 规格多样, 对抓取精度, 柔性控制和卫生标准要求严苛, 通用机械手难以直接适用. 刚性机械手负载能力强, 却难以适应不同形状及易碎物品的抓取; 柔性机械手虽具适应性且不易损伤物品, 但负载有限. 因此, 亟需兼具抓取适应性与负载能力的机械手解决方案. 通过仿真技术优化结构与轨迹, 可有效缩短研发周期, 是当前工业设备设计的重要趋势.

1 机械手的整体方案设计

本文的三轴机械手设计是为了实现小袋药品的自动上下料, 考虑到制药设备的标准布局以及小袋药品自身重量较低, 对机械手负载能力的要求较低, 因此

机械手整体应进行轻量化设计, 在能够实现动作流程的要求下, 尽量简化机构, 减少机构对空间的占用. 通过对小袋药品上下料的动作流程及自由度分析, 来完成对机械手的整体方案设计.

机械手运动流程 [1] 如图 1 所示: X/Y 轴定位: 机械手 X,Y 轴联动移动到药品正上方; Z 轴下降: 机械手垂直下降至预设拾取高度; 拾取物料: 启动真空器, 负压吸盘吸附药品; Z 轴提升: 垂直提升至安全高度; X/Y 轴移动: 将药品运送至目标位置; Z 轴下降: 降至放置高度; 释放物料: 解除真空, 释放药品.

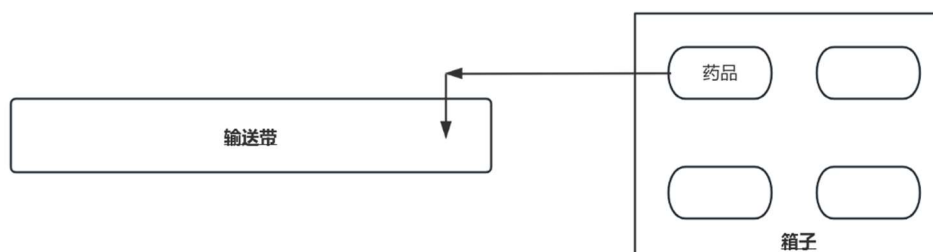


图 1 动作示意俯视图
Figure 1. Schematic
Top View

根据动作流程进行自由度分析可知, 机械手的上升, 下降以及拾取放料动作需要一个自由度, 及 Z 轴方向运动, 一个周期内, 机械手需要移动到箱体上方和输送带上方, 由于箱体中小袋药品位置不同, 机械手需要进行平面移动, 需要两个自由度, 及 X 轴和 Y 轴的运动. 综上分析可知机械手至少需要 3 个自由度 [2].

本文的桁架悬臂机械手综合考量到机械手的负载要求, 动作流程, 结构强度, 运动精度及占用空间等要求. 机械手建模如图 2 所示.

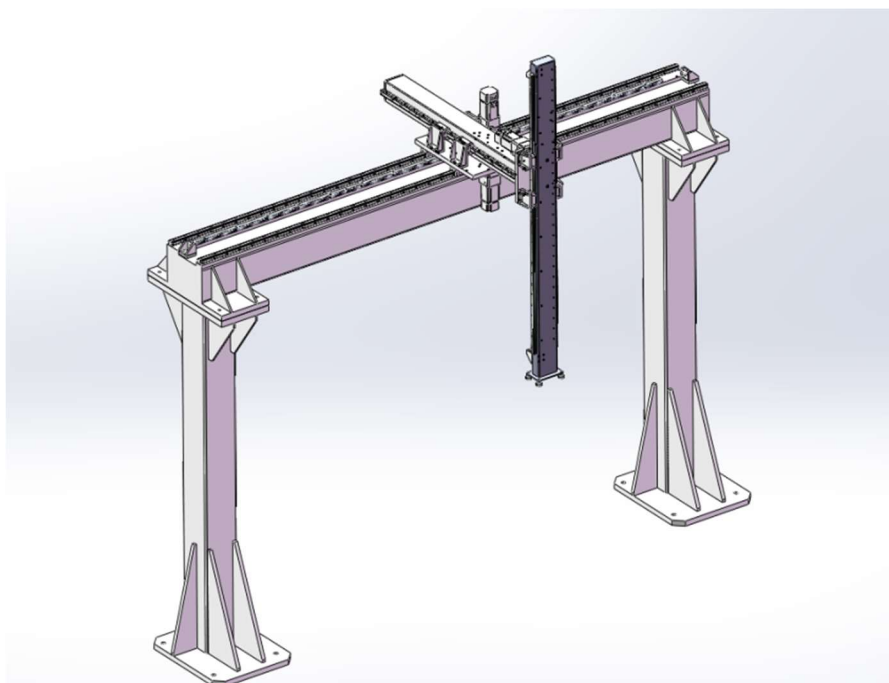


图 2 机械手的结构建模
Figure 2. Structural Modeling
of the Manipulator

2 机械手的传动机构及执行机构

2.1 传动机构

本文中 X,Y,Z 三轴均采用齿轮齿条传动, 主要考虑到作为支撑的桁架结构, Z 轴及 Y 轴悬臂传动不能采用重量太高的机构, 且本身对精度要求不需太高, 再由于自重变形运动速度考量, 因此采用齿轮齿条传动。

齿轮齿条模数选用国家标准 GB/T 1357-2008 所规定的标准模数系列, 选用模数时优先选用第一序列。由国家标准 GB/T 1356-2001 规定, 压力角, 顶隙系数, 齿顶高系数均为标准值。在初步选定齿轮齿条的参数后, 需对齿轮齿条进行连续传动条件验算及轮齿受力分析计算。齿轮齿条啮合传动需要满足正确啮合条件; 标准安装条件; 连续传动条件。对连续传动条件进行校核, 即齿轮齿条需满足重合度 $\varepsilon \geq 1$ 。轮齿受力分析需要计算齿根弯曲疲劳强度, 若计算得弯曲疲劳强度小于材料的许用应力, 则该设计安全可靠。

导轨选择与 HG30 方形滑块适配的 HGH30HA 导轨, 滑轨为 4.47Kg/m, 导轨滑块在 X 轴桁架与 Y 轴悬臂上采用水平布局, Z 轴升降臂上采用垂直布局, 一个轴上为两根导轨, 一个导轨上配置两个滑块。为了防止机械臂运动到最大行程后发生脱轨, 需要对机械臂的运动范围进行限位, 因此可以在机械臂最大行程的起点和终点增添限位器, 如图 3 所示。

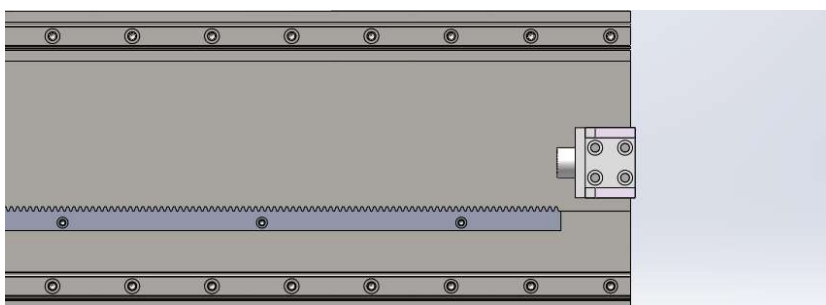


图 3 传动机构及限位器布局
Figure 3. Layout
of the Transmission
Mechanism and Limit
Switches

2.2 执行机构

机械手的末端负压吸盘需结合工况进行选型分析, 结合小袋药品的自身重量, 由于小袋药品包装为软包装, 需分析所需吸盘个数, 防止吸取失效 [3]。负压吸盘需进行吸附力计算与校核。吸附力应适当进行冗余设计, 当一个吸盘失效时, 末端执行器仍能满足需求吸附力, 确保有效吸附 [4], 负压吸盘如图 4 所示。

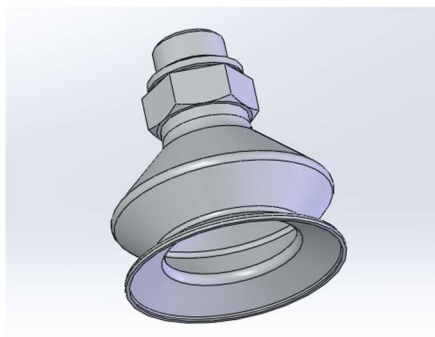


图 4 负压吸盘结构建模
Figure 4. Structural
Modeling of the Negative
Pressure Suction Cup

3 有限元分析

有限元分析采用 solidworks 中的 simulation 插件进行, 使用 simulation 进行有限元分析 的具体操作如下: 导入模型后, 编辑零件材料, 进入 simulation 建立新算例, 点击夹具选择固定几何体, 在模型中选择几何体被固定的面或者支撑面, 再点击载荷, 输入几何体受力或力矩的大小并在几何体中选择受力面[5].

3.1 桁架有限元分析

如图 5 所示, 由于桁架为固定支撑, 对轻量化要求低, 需优先考虑桁架材料的力学性能, 本设计桁架材料采用 Q235 碳钢. 由 simulation 有限元分析步骤可知, 需要计算出桁架受力大小, 需初步对桁架受力进行估算, 桁架承载悬臂, 升降臂, 末端执行器, 传动机构, 导向机构的重量总和.

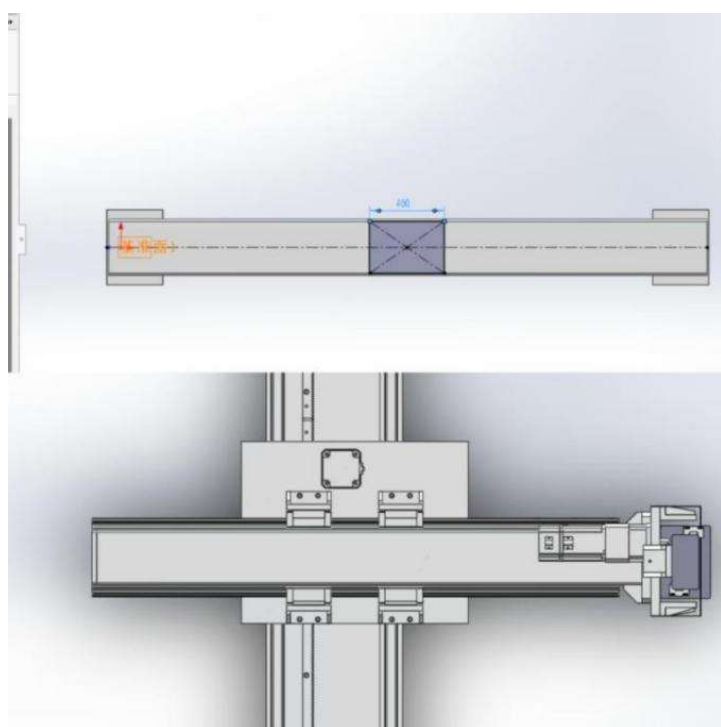


图 5 桁架受力面俯视图
Figure 5. Top View of Truss Load-Bearing Surface

对桁架使用 simulation 有限元分析得到结果如图 6 和图 7 所示. 由图示结果可知, 在外部载荷为 516N 的作用下, 桁架承受最大应力为 2.93MPa, 远低于 Q235 碳钢的屈服强度 220MPa, 故该结构强度十分稳定.

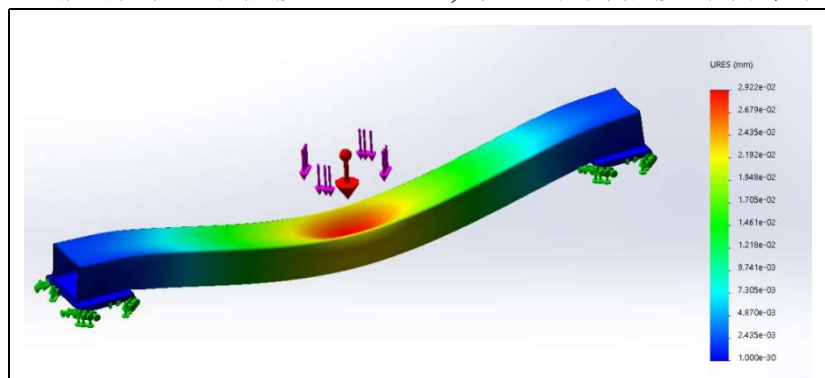


图 6 桁架静应力图
Figure 6. Static Stress Diagram of the Truss

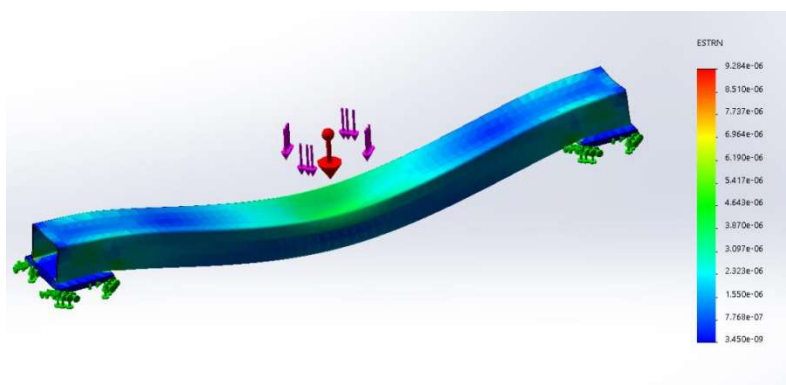


图 7 桁架应变图
Figure 7. Truss Strain Diagram

3.2 悬臂有限元分析

在机械手的结构设计中, 悬臂结构的刚度和强度直接影响其运动精度和稳定性, 使用 solidworks 的 simulation 进行有限元分析可以优化悬臂结构, 避免过度设计和强度不足的问题, 考虑到轻量化设计, 悬臂结构材料可选择 6061-T6 铝合金.

Y 轴悬臂需承受 Z 轴升降臂的自重, 末端执行机构重量以及传动机构和导轨重量之和. 有限元分析验证悬臂刚度, 确保负载下变形量 (挠度) 不影响机械手定位精度, 对强度进行评估, 检查应力是否超过材料屈服强度, 避免疲劳断裂并通过分析结果调整材料及结构优化设计.

由有限元分析结果可知, 在外部载荷 400N 作用下, 桁架承受最大应力为 0.32MPa, 远低于 6061-T6 铝合金的屈服强度 275MPa, 故该结构强度十分稳定. 如图所示悬臂的主要形变发生在末端与 Z 轴升降臂的连接处, 此处需承受 Z 轴升降臂的自重与执行机构自重及物料重量.

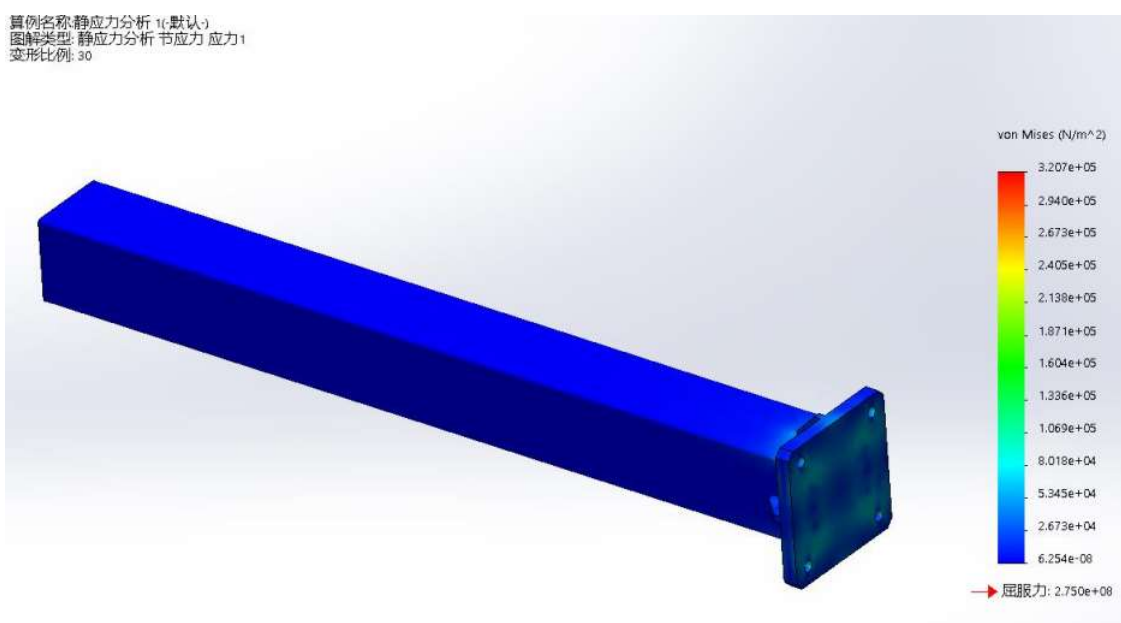


图 8 悬臂静应力图
Figure 8. Static Stress Diagram of a Cantilever

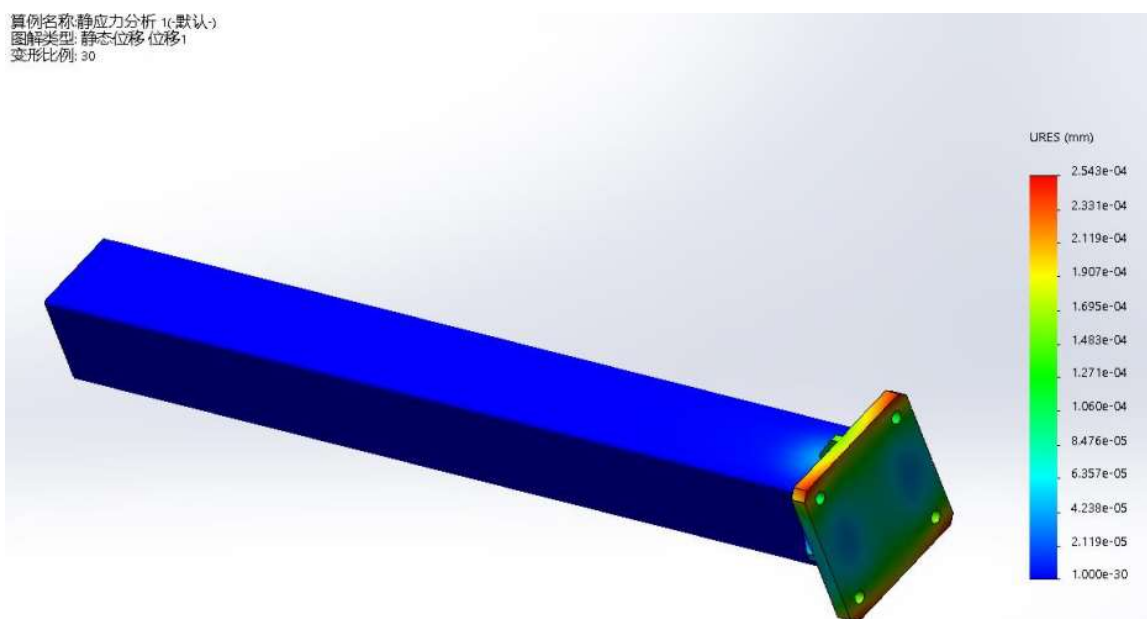


图 9 悬臂位移图

Figure 9. Cantilever Displacement Diagram

4 运动仿真

机械手的运动仿真能提前发现各轴的运动范围与部件之间的物理干涉, 通过轨迹模拟确认工作空间是否覆盖目标点位, 可以计算各轴运动所需扭矩进行驱动参数的校核, 便于对所设计的机械手进行性能的量化评估, 例如运动精度分析, 速度和加速度的规划。

机械手三个轴的运动分别由三个伺服电机驱动, 故在进行运动仿真 motion 分析时需添加三个马达。为了提高小袋药品自动上下料机械手的上下料效率, 用于平面定位的 X 轴与 Y 轴可同时移动, 在到达指定目标点后 Z 轴移动, 进行取料放料等动作, 当 Z 轴上升到安全高度时, X 轴与 Y 轴才能再次进行定位运动, 具体设置如图 10 所示。

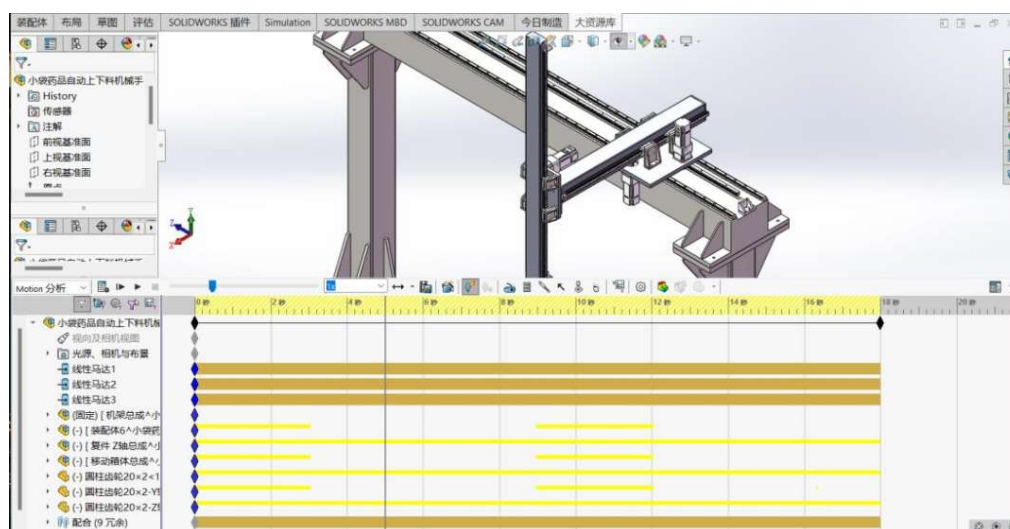


图 10 运动算例设置

Figure 10. Setup of a Motion Analysis

由小袋药品自动上下料机械手的运动仿真动画结果可得到机械手的三个轴运动并不会产生运动干涉,且 X,Y 轴可以并行联动.

5 结束语

本文设计了一种直角坐标型三轴桁架悬臂机械手,角坐标结构可垂直堆叠或水平延伸,节省厂房空间,相比于关节机器人,直角坐标机器人结构简单,运动控制稳定,故障点少,具有灵活性和兼容性.通过 X,Y,Z 三轴直线运动,定位精度高,负压吸盘柔性吸附,无机械夹持造成的挤压风险,尤其对易损包装更安全,具备高精度和稳定性.使用 solidworks 完成整体结构建模,并通过 simulation 进行结构的有限元分析,保证各结构满足工作的力学性能要求,最后使用 motion 分析来模拟工作流程,排除机构各部分运动干扰.

参考文献

- [1] 刘浩杰. 基于 LMC078 的桁架双机械手控制系统设计 [J]. 仪器仪表与分析监测, 2025, (01):12-16. DOI: CNKI:SUN:YQYB.0.2025-01-003.
- [2] Mahmoud Elsamanty, Ehab M. Faidallah, Yehia H. Hossameldin, Saber Abd Rabbo, Shady A. Maged, Hongbo Yang, and Kai Guo. Workspace Analysis and Path Planning of a Novel Robot Configuration with a 9-DOF Serial-Parallel Hybrid Manipulator (SPHM) [J]. Applied Sciences,2023,13(4):2088-2088. DOI: 10.3390/APP13042088.
- [3] Lim J., Yang P., Yuanda P., Bakkara R.V., Sinaga M., Siagian H., Suryanto E. D. and Perangin-angin D. Automated pneumatic vacuum suction robotic arm with computer vision [J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2020, 801(1):012134. DOI: 10.1088/1757-899x/801/1/012134.
- [4] 司震鹏, 曹西京, 姜小放. 真空吸附式机械手系统设计 [J]. 包装与食品机械, 2009, 27(06):26-30. DOI: CNKI:SUN:BZSJ.0.2009-06-009.
- [5] 陈永当, 鲍志强, 任慧娟, 等. 基于 SolidWorks Simulation 的产品设计有限元分析 [J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(09):177-180. DOI: CNKI:SUN:WJFZ.0.2012-09-046.

References

- [1] Liu haojie. Design of Double Truss Manipulator Control System Based on LMC078 [J]. Instrumentation Analysis Monitoring, 2025,(01):12-16. DOI: CNKI:SUN:YQYB.0.2025-01-003.
- [2] Mahmoud Elsamanty, Ehab M. Faidallah, Yehia H. Hossameldin, Saber Abd Rabbo, Shady A. Maged, Hongbo Yang, and Kai Guo. Workspace Analysis and Path Planning of a Novel Robot Configuration with a 9-DOF Serial-Parallel Hybrid Manipulator (SPHM) [J]. Applied Sciences,2023,13(4):2088-2088. DOI: 10.3390/APP13042088.
- [3] Lim J., Yang P., Yuanda P., Bakkara R.V., Sinaga M., Siagian H., Suryanto E.D. and Perangin-angin D. Automated pneumatic vacuum suction robotic arm with computer vision [J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2020, 801(1):012134. DOI: 10.1088/1757-899x/801/1/012134.
- [4] Si Zhenpeng, Cao Xijing, Jiang Xiaofang. Robot Vacuum Adsorption System Design [J]. Packaging and Food Machinery, 2009, 27(06):26-30. DOI: CNKI:SUN:BZSJ.0.2009-06-009.
- [5] Chen Yongdang, Bao Zhiqiang, Ren Huijuan, et al. Finite Element Analysis for Product Design Based on SolidWorks Simulation [J]. Computer Technology and Development, 2012, 22(09):177-180. DOI: CNKI:SUN:WJFZ.0.2012-09-046.