

药用罐装瓶自动拆包机结构优化设计与研究

刘浩民* 杨胡坤 华赵帅 陈向东

东北石油大学机械科学与工程学院, 黑龙江 大庆 163318

摘要: 目的为解决制药行业药用罐装瓶拆包环节长期依赖人工操作, 存在效率低下、劳动强度大及药品污染风险高等突出问题, 本研究旨在对药用罐装瓶自动拆包机进行结构优化与升级, 通过自动化方案替代传统人工作业模式, 以提升拆包效率并保障药品生产质量安全。方法研究采用基于机器视觉的精确定位系统、自适应柔性夹持机构以及恒温控制热切割技术, 构建了集输送、识别、夹持、切割与分离功能于一体的模块化系统, 并通过 PLC 智能控制实现多模块协同作业。结果表明, 优化后的设备处理速度达 152.3 瓶/分钟, 包装破损率低于 0.1%, 定位精度为 ± 0.28 mm, 并可实现多规格包装的自适应处理与快速切换, 整体结构符合 GMP 洁净标准。结论本研究为推动高端制药装备的国产化进程提供了有益参考。

关键词: 药用罐装瓶; 自动拆包机; 结构优化; 机器视觉; 柔性夹持

引言

制药行业药用罐装瓶拆包环节长期依赖人工操作, 存在效率低下、劳动强度大及药品污染风险高等突出问题。传统人工拆包方式不仅难以满足现代制药工业对高效生产的需求, 更因人为接触增加了微生物污染的可能性, 无法满足 GMP 规范对无菌制剂生产的严格要求。随着制药工业自动化水平的不断提升, 实现拆包环节的智能化升级已成为提升药品质量安全与生产效率的关键路径。

在自动化拆包^[13]技术研究领域, 冉龙姣^[8]等针对水泥袋拆包设计全自动设备, 其刚性结构难以满足药品拆包的无损要求; 谈家满^[17]在塑料编织袋拆包机中采用气动旋转锁紧装置, 虽提升效率却未解决洁净合规问题; 周伟^[9]等棉签拆包机通过 PLC 控制实现基础自动化, 但定位精度与破损率仍不满足制药标准。现有研究多集中于工业原料拆包, 在包装适应性、作业洁净度及无损操作等方面存在明显局限, 缺乏针对制药行业特殊需求专用解决方案。

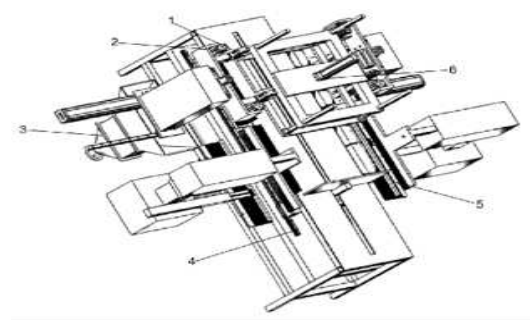
本研究基于机器视觉^{[2][5]}定位与柔性夹持^[10]技术, 集成恒温热切割与模块化系统架构, 开展药用罐装瓶自动拆包机的结构优化设计。

通过多传感器融合定位、仿生夹持机构创新以及智能控制系统开发, 构建了一套符合 GMP 标准的高效拆包系统, 旨在为制药企业提供可靠的技术支撑, 推动高端制药装备的自主研发进程。

1 整体机构设计及工作流程

1.1 药用罐装瓶自动拆包机整机结构

药用罐装瓶自动拆包机整机结构采用模块化设计, 集成六大核心系统: 输送系统负责通过变频调速皮带实现物料平稳进给; 识别定位系统融合工业相机与光电传感器阵列, 完成包装袋的精准识别与定位; 夹持系统采用气动柔性夹具, 实现多规格包装的自适应无损抓取; 切割系统通过恒温热切割技术, 确保切口整齐且符合洁净要求; 分离系统基于负压吸附^[15]原理, 高效分离包装材料与罐装瓶; 控制系统采用“PLC+工控机”双核架构, 协调各模块协同作业, 保障设备高效、稳定运行。如图 1 所示整机结构设计紧密契合制药行业对高效、洁净及多规格适配的严苛需求。



1-柔性夹持机构; 2-气动旋转执行器;
3-空袋回收装置; 4-推杆送料传动机构;
5-热切割系统; 6-视觉定位系统。

1- 柔性夹持机构 :2- 气动旋转执行器 :3- 空袋回收装置 :4- 推杆送料传动机构 :5- 热切割系统 :6. 视觉定位系统。

图 1 药用罐装瓶自动拆包机

1.2 工作原理

自动拆包机基于“输送 - 识别 - 夹持 - 切割 - 分离 - 回收”的闭环作业逻辑,通过多传感器融合与智能决策实现高效无损拆包。其工作过程始于包装袋由输送系统(如皮带机或滚筒输送机)送入工作区,并经由工业相机与光电传感器协同定位;随后,气动夹具在视觉与压力传感器的反馈下自适应调整夹持力,确保包装袋被稳固夹持且不被损。切割装置(如滚刀或高速刀片)则依据视觉系统规划的路径对包装袋进行精准切割,并通过温度 - 压力协同算法适配不同材质。最终,物料在重力或负压吸附作用下与包装袋分离,分别进入后续工序,而废料则由螺旋输送机或压缩收集器集中处理,整个过程在密闭结构与除尘系统配合下实现洁净生产。

1.3 工作流程

自动拆包机的工作流程分为六个标准化步骤,各环节通过控制系统无缝衔接,确保作业连续性与稳定性:

输送入位: 包装袋由前端输送线进入设备工作区,输送系统根据预设节拍调整速度,确保物料有序抵达识别工位。

视觉识别与参数生成: 工业相机采集包装袋图像,通过深度学习算法识别尺寸、位置及缺陷特征;光电传感器验证物料存在性。系统融合数据后,生成夹持坐标、切割路径等作业参数。

自适应夹持: 气动夹具依据视觉指令调整夹爪开合度,以柔性接触方式抓取包装袋。压力闭环控制模块实时优化夹持力,避免损伤罐装瓶。

精准切割: 热切割刀头沿规划路径运动,恒温控制确保切口平整密封。切割过程产生的微量挥发物由集尘装置实时处理,维持洁净环境。

负压分离: 切割完成后,负压吸附装置启动,轻质包装材料被吸入回收通道,罐装瓶在重力与导向机构作用下脱离工位。

废料回收与数据追溯: 废料经螺旋输送机输送至收集装置;控制系统记录每次作业的时间、参数及设备状态,生成可追溯的生产报表,符合 GMP 质量管控要求。

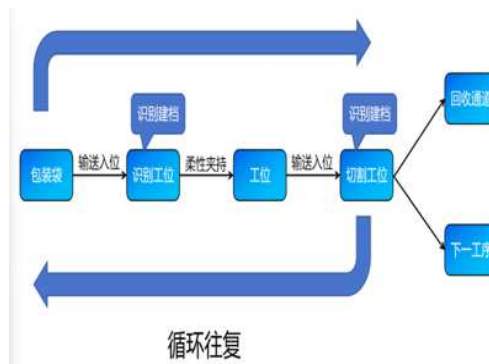


图2 工作流程图

2 关键零部件设计

2.1 柔性夹持机构设计

柔性夹持机构^[12]的主要功能是实现多规格药用罐装瓶包装袋的无损、自适应抓取,其结构如图3所示。该机构采用气动驱动的多指仿生构型,模拟人手抓握动作,通过内置的高精度压力传感器实时反馈夹持力,并由气动伺服系统与PID闭环控制算法动态调节气压,从而将夹持力误差精确控制在 $\pm 0.5\text{ N}$ 以内。此设计有效解决传统刚性夹具^[19]易导致的包装破损或滑脱问题,确保了对100-500 ml范围内不同规格包装的稳定、无损夹持。

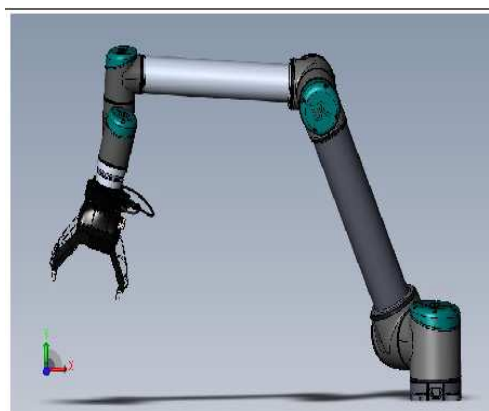


图3 柔性夹持机构

2.2 热切割系统设计

热切割^{[11][4]}系统的主要功能是快速、整洁地切割包装袋封口,确保切口无毛刺且符合GMP洁净标准,其结构如图4所示。该系统核心为具备精准控温特性的陶瓷加热刀头,通过PID温控^[3]模块将工作温度稳定在设定范围(200-600 $^{\circ}\text{C}$,波动小于 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$)。切割动作由直线电机驱动执行,保证刀头沿预设路径高精度(重复定位精度 $\pm 0.02\text{ mm}$)运动,避免与瓶体干涉。结合对包装材料熔融特性的优化切割参

数, 实现了高质量、无粘连的切割效果。

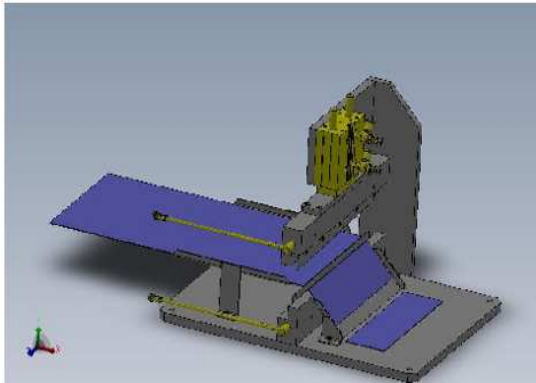


图4 热切割系统

2.3 视觉定位系统设计

视觉定位系统的主要功能是精准识别并定位输送线上的罐装瓶包装袋, 为后续夹持和切割作业提供坐标基准, 其结构如图5所示。该系统基于500万像素工业相机采集图像, 通过深度学习框架训练的图像识别模型与多特征融合^[1]算法进行处理, 能够在复杂光照条件下实现 $\pm 0.3\text{ mm}$ 的定位精度。为提升鲁棒性, 系统引入了偏振镜片与环形光源以抑制反光, 并采用卡尔曼滤波算法融合多传感^[7]器数据, 确保识别准确率稳定在94%以上。



图5 视觉定位系统

2.4 气动旋转执行器

气动旋转执行器^{[16][18]}的主要功能是提供快速响应和高扭矩输出, 以驱动相关机构完成旋转动作, 其结构三视图如图6所示。该执行器采用齿轮齿条式传动结构, 气源压力与输出扭矩呈线性关系, 满足拆包作业的负载需求。通过优化密封材料与轴承座设计, 确保了其在制药环境粉尘条件下的密封性与动态运行稳定性。静应力分析表明其关键部件应力远低于材料屈服强度, 可靠性高。

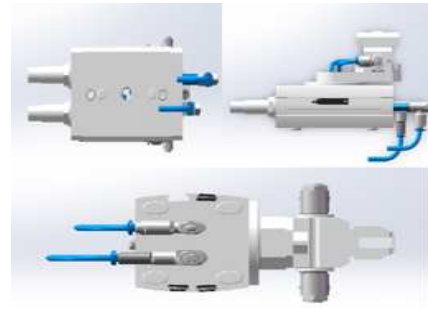


图6 气动旋转执行器三视图

2.5 推杆送料传动机构

推杆送料传动机构的主要功能是将已拆包的罐装瓶精准推离当前工位, 进入下一工序, 其结构三视图如图7所示。该机构采用伺服电机^[6]驱动滚珠丝杠的传动方案, 将电机的旋转运动转换为推杆的高精度直线运动, 并由直线导轨导向, 确保运动平稳。其核心创新在于高刚性结构设计与封闭式模块, 实现了 $\pm 0.05\text{ mm}$ 的重复定位精度, 有效避免了推料晃动与打滑, 同时满足洁净要求。

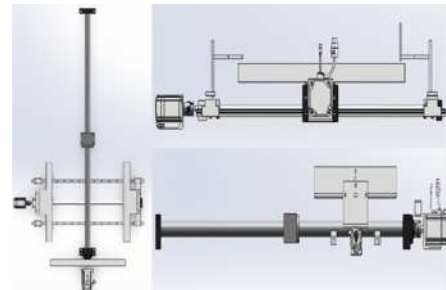


图7 推杆送料传动机构三视图

2.6 空袋回收装置

空袋回收装置的主要功能是实现废弃包装袋的自动化、密闭式收集与输送, 其结构如图8所示。该装置基于螺旋输送原理^[20], 由防爆电机驱动具有 20° 优化升角的螺旋叶片旋转, 利用叶片产生的法向推力, 驱使空袋同时完成周向旋转与轴向输送运动。

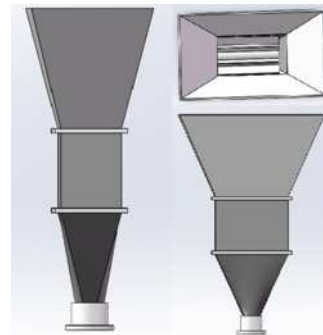


图8 空袋回收装置图

装置整体如表 1 所示采用 304 不锈钢密闭箱体结构, 兼具防污染与低噪音 (<65 dB) 特性, 处理能力达 30 袋 / 分钟, 符合 GMP 标准。

表 1 304 不锈钢材质材料属性

属性	数值
弹性模量	193-195 GPa
泊松比	0.247-0.3
抗剪模量	79 GPa
质量密度	7.93 g/cm ³
屈服强度	205 MPa

3 数据处理与性能验证

3.1 多轴协同控制算法仿真与优化

为优化设备在高速运行下的动态性能, 利用 MATLAB 对运动控制算法进行了仿真实验, 重点优化多轴协同^[4]作业参数。通过建立输送、夹持、切割等机构的动力学模型, 仿真分析各执行单元在同步作业时的响应时间与轨迹精度。其结果确定了关键参数的最优值, 如切割刀的响应延迟、夹持力的稳定时间以及多轴同步精度。随后, 将仿真优化参数应用于样机控制系统进行实测, 并对仿真值与实测值进行了对比及误差分析, 结果如表 2 所示。

表 2 MATLAB 多轴协同参数

参数	仿真优化值	实测结果	误差分析
切割刀响应延迟	30 ms	32 ms	机械传动间隙导致微小延迟
夹持力稳定时间	0.2 s	0.22 s	气路压力波动影响
多轴同步精度	± 0.25 mm	± 0.28 mm	相机标定误差累积

误差机理分析与改进思路: 仿真与实测数据之间存在微小误差, 主要源于物理系统的固有特性及环境干扰。具体原因与改进方向如下:

3.1.1 机械传动间隙导致的延迟

仿真模型通常假设为理想刚性连接, 而实际机械系统 (如丝杠螺母副、齿轮传动副) 存在不可避免的微米级配合间隙。这种间隙在运动方向改变时会引起短暂的滞后, 导致切割刀响应延迟的实测值 (32 ms) 略高于仿真值 (30 ms)。改进思路可包括采用预紧力可调的双螺母消除机构或更高精度的传动部件, 以减少反向间隙。

3.1.2 气路压力波动影响

夹持力稳定时间的误差主要源于气动系统的非线性。气源压力波动、管路容积效应以及气缸摩擦力的变化, 均影响气压建立速率, 导致实测稳定时间 (0.22 s) 稍长于仿真 (0.2 s)。改进思路可考虑在气动回路中增加精密调压阀和稳压罐,

或采用伺服电动缸替代气动驱动, 以实现更精确的力控制。

3.1.3 相机标定误差累积

多轴同步精度误差主要与视觉系统的标定精度有关。相机镜头的畸变、像素点的非均匀性以及手眼标定过程中的微小误差, 会在世界坐标系转换中累积, 影响最终定位精度。改进思路在于采用更高精度的标定板和完善的标定算法, 并定期进行标定校验, 以维持系统精度。

3.2 关键部件结构静力学与疲劳寿命分析

为确保设备在长期运行下的可靠性, 本研究利用 ANSYS Workbench 对柔性夹持机构、热切割系统刀头支架、气动旋转执行器齿轮等关键部件进行了结构静力学分析, 并预测了其疲劳寿命。分析时, 模拟了部件在额定工作载荷下的应力分布, 并将最大应力与材料的许用应力进行比较, 计算安全系数。同时, 基于疲劳分析理论, 预测了关键区域的疲劳寿命循环次数, 结果如表 3 所示。

表 3 ANSYS Workbench 结构静力学分析

部件名称	最大应力 (MPa)	许用应力 (MPa)	安全系数	疲劳寿命 (循环次数)	临界区域
柔性夹持机构 夹具	18.5	220	11.9	2.1 × 10 ⁷	夹爪根部圆角处
热切割系统刀头支架	95.3	350	3.7	8.5 × 10 ⁶	支架与刀头连接界面
气动旋转执行器齿轮	2.83	220	77.7	>1 × 10 ⁹	齿根过渡曲线区域

3.3 视觉定位系统识别准确率测试

视觉定位系统的识别准确率是确保设备精准作业的基础。为评估其在不同环境下的稳定性, 在标准室内光 (500 Lux)、光线暗淡 (200 Lux) 和强光干扰 (1000 Lux 以上) 三种典型光照条件下, 各进行了 50 次测试, 统计成功识别次数并计算准确率, 结果如表 4 所示。

表 4 视觉定位系统识别准确率测试

光照条件	测试次数	成功识别次数	识别准确率
标准室内光 (500 Lux)	50	50	100%
光线暗淡 (200 Lux)	50	49	98%
强光干扰 (1000 Lux 以上)	50	47	94%

3.4 自动拆包机整机性能测试

为全面评估样机性能, 制定了详细的性能测试计划, 对处理速度、定位精度、包装破损率、规格切换时间及连续作业稳定性等核心指标进行了实测。测试在模拟实际生产的条件下进行, 并使用游标卡尺、激光测距仪等工具, 结果如表 5 所示。

表 5 自动拆包机整机性能测试结果

性能指标	设计目标	测试结果	测试条件说明
处理速度	≥ 150 瓶 / 分钟	152.3 瓶 / 分钟	连续处理 30 个样本的平均速率
定位精度	± 0.3 mm	0.28 mm	角点重复定位精度
包装破损率	< 0.1%	0.08%	90 次拆包作业损伤占比
规格切换时间	< 3 分钟	约 2.5 分钟	从 250ml 到 500ml 包装切换耗时
连续作业稳定性	持续 2 小时无故障	达成	额定速度下无故障运行

3.5 测试结果

测试数据表明, 药用罐装瓶自动拆包机各项性能指标全面达标。为体现对设计成果的深入理解, 接下来将对核心性能指标的实现原因进行深入讨论:

3.5.1 超低包装破损率 (0.08%) 的归因

该指标远低于传统设备 (3%–8%) 和设计目标 (<0.1%), 其成功实现主要归因于气动柔性夹持机构与 PID 闭环控制算法的协同作用。传统的刚性或开环控制夹持方式极易因过大的集中应力或力控不准而损伤脆弱的包装材料或瓶体。本研究采用的仿生多指夹持机构提供了均匀的接触应力分布, 而核心在于内置的高精度压力传感器与 PID 控制算法构成了实时力反馈闭环。系统能动态调节气动伺服阀, 将夹持力精确稳定在预设的安全范围内 (15–25 N 可调, 误差 ± 0.5 N), 从而从根本上避免了因夹持力过大导致的挤压破损或过小导致滑移摩擦损伤。

3.5.2 高精度 (± 0.28 mm) 的实现机制

此精度的实现是机器视觉系统与多轴协同运动控制算法深度融合的结果。首先, 500 万像素的工业相机结合深度学习图像识别算法, 提供了高分辨率的初始定位信息。其次, 更为关键的是, 通过卡尔曼滤波算法融合了光电传感器等多元数据, 有效抑制了单一传感器的噪声, 提升了定位的鲁棒性。最后, 基于 MATLAB 仿真优化的多轴协同控制算法, 确保了输送、夹持、切割等执行机构能够根据视觉系统给出的坐标指令, 实现毫秒级的高精度同步运动, 将各环节的运动误差累积控制在极小范围内, 从而实现了整体 ± 0.28 mm 的定位精度。

3.5.3 高效率与快速切换的支撑技术

高处理速度得益于模块化系统设计和 PLC 程序的优化调度, 使得“输送–识别–夹持–切割–分离”流程高度重叠并行。快速的规格切换能力则直接源于设备的柔性化与智能化设计。视觉系统可自动识别新规格包装的尺寸特征, 控制系统据此调用预设参数包, 自动调整夹具开口、切割路径等, 无需或仅需极少量机械调整, 显著减少传统设备更换

工装夹具停机时间。

4 结论

(1) 处理效率与精度突破

设备处理速度达 152.3 瓶 / 分钟, 较人工操作 (≤ 30 瓶 / 分钟) 提升约 5 倍, 定位精度为 ± 0.28 mm。这一成果得益于机器视觉系统 (500 万像素工业相机, 识别准确率 ≥ 94%) 与多轴协同控制算法的深度融合, 实现了输送、识别、夹持环节的毫秒级同步。

(2) 无损作业与多规格适配能力

通过气动柔性夹持机构 (夹持力 15–25 N 可调) 与恒温热切割系统 (温控精度 ± 5 °C), 包装破损率降至 0.08%, 远低于传统设备 (3%–8%)。测试表明, 设备可自适应处理 100–500 ml 规格罐装瓶, 规格切换时间仅需 2.5 分钟, 凸显其柔性化设计优势。

(3) 系统集成与合规性验证

基于“PLC+ 工控机”架构的智能控制系统, 支持 OPC UA/Modbus 通信协议, 确保多模块协同作业稳定性。整机结构采用 316 不锈钢材质, 通过 GMP 洁净度测试, 为制药企业提供高效、洁净的自动化解决方案。

参考文献:

- [1] 王明波, 高强, 冯玉龙, 等. 多特征融合 Transformer-LSTM 轴承故障诊断研究 [J/OL]. 机械科学与技术, 1–11[2025–12–14]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20250082>.
- [2] 李斌, 赖世东. 基于 YOLOv11 的德化梨采摘机器人视觉定位设计 [J/OL]. 林业工程, 1–14[2025–12–14]. <https://link-cnki-net-s.webvpn.nepu.edu.cn/urlid/23.1388.S.20251110.1618.002>.
- [3] 陈建中, 曹志超. 基于 PID 控制的智能温控雨雪量计应用研究 [J]. 气象水文海洋仪器, 2025, 42(05): 36–39.
- [4] 王亮, 钱宝峰, 张亮, 等. 多轴协同焊接机器人工作站运动学建模与应用 [J]. 焊接技术, 2025, 54(09): 102–107.
- [5] 郑晓坤, 邱华, 秦志远, 等. 基于机器视觉的工业

- 机器人精确定位与识别技术研究 [J]. 仪器仪表用户, 2025, 32(09): 22-24+27.
- [6] 任永峰, 任刚. 基于伺服电机的自动化装配线在机械制造中的应用 [J]. 机械管理开发, 2025, 40(07): 297-299.
- [7] 张飞. 基于卡尔曼滤波与多传感器融合的无人机测高算法改进研究 [D]. 江西理工大学, 2025. DOI:10.27176/d.cnki.gnfyc.2025.000886.
- [8] 冉龙军, 石海超, 李雪雪, 等. 水泥袋全自动拆包机设计 [J]. 机械工程与自动化, 2025, 54(01): 116-118.
- [9] 周伟, 程永刚. 自动棉签拆包机设计与控制系统研究 [J]. 中国机械, 2024, (34): 9-13.
- [10] 王洋, 陈文强, 曾帅, 等. 基于梯度点阵结构的浆果变刚度柔性夹持机构设计 [J]. 华南农业大学学报, 2024, 45(02): 273-279.
- [11] 易玉龙. 拧紧焊接与热切割 "安全阀" [N]. 烟台日报, 2023-11-14(002). DOI:10.38267/n.cnki.nytrb.2023.002940.
- [12] 涂德元, 赵辉, 朱强, 等. 刚柔结合式柔性夹持器设计 [J]. 现代制造工程, 2023, (10): 120-125.
- [13] 焦东东, 李德伟, 曲洪福, 等. 自动化无人化工厂自动拆包线对中机设计与研究 [J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(05): 16-18+30.
- [14] 王宝忠. 油库设备设施焊接与热切割作业方法 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(03): 37-39.
- [15] 党庆军, 崔玉明, 王雪宁, 等. 基于 STM32 的负压吸附智能清洁车研究 [J]. 科技创新, 2021, (17): 153-154.
- [16] 彭鹏飞. 折纸式气动柔性执行器研究 [D]. 大连海事大学, 2021. DOI:10.26989/d.cnki.gdlhu.2021.001022.
- [17] 谭建明. 自动塑料编织袋拆包机设计与研究 [D]. 南昌大学, 2021. DOI:10.27232/d.cnki.gnchu.2021.003817.
- [18] 谭建明, 黄小勇. 饲料拆包机气动旋转锁紧装置设计与分析 [J]. 液压与气动, 2020, (11): 127-133.
- [19] 龚建平, 李雪峰, 左德伟, 等. 开槽衬套制备用刚性轴夹具设计 [J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(05): 66-71.
- [20] 孙军, 尹志军, 陈波. 开式螺旋输送机原理分析及参数设计 [J]. 起重运输机械, 2010, (05): 11-16.

作者简介:

第一作者及通讯作者: 刘浩民, 男, 2005.12, 汉, 在读本科生, 主要研究方向: 机械采油系统工程理论及节能技术研究。

杨胡坤 (1975—), 男, 博士, 副教授; 主要研究方向: 机械采油系统工程理论及节能技术研究。

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划 (202510220119)。