

基于机电一体化技术的机械臂拣选系统设计与实现

赵瑞

珠海威润玛工业设备制造有限公司，珠海市金湾区，519090；

摘要：机械臂拣选系统作为现代自动化生产与智能物流中的关键设备，其性能水平直接影响整个系统的作业效率与智能化水平。本文基于机电一体化技术，围绕机械臂拣选系统的功能需求与工程实现路径，展开系统性分析与设计研究。文章首先梳理了机电一体化技术的构成原理，并结合机械臂的结构与控制特点，明确了拣选任务的技术要求。在此基础上，设计了一种集控制系统、执行机构与信息处理模块于一体的综合性方案，并结合传感器识别、路径规划与故障响应机制，完成对拣选系统的运行分析。研究表明，通过机电系统高度集成与功能协同，可有效提升拣选系统的动作精度与响应效率，为工业生产线与仓储物流的智能升级提供了技术支撑。

关键词：机电一体化；机械臂；拣选系统；系统集成；智能控制

DOI：10.69979/3060-8767.25.07.071

引言

在智能制造与自动化物流快速发展的背景下，机械臂作为典型的执行终端，正逐步承担起更多复杂、精细的作业任务，尤其在拣选环节中表现出显著优势。机械臂拣选系统不仅要求设备具有较高的定位精度和操作灵活性，还需要系统具备良好的环境适应能力与动态响应性能。传统机械臂多依赖单一控制模式或固定任务模板，难以满足多场景、多物体、多目标的拣选需求，限制了其实用推广。

机电一体化技术以多学科融合为基础，将机械结构、电子技术、自动控制与计算机信息系统高度集成，为拣选系统的智能升级提供了可行路径。其核心在于通过系统协调与信息反馈，实现高效、稳定的设备协同控制，从而优化操作精度、降低能耗、提高系统鲁棒性。近年来，随着传感器识别、图像处理和嵌入式系统的不断演进，基于机电一体化的机械臂设计在工业现场得到日益广泛的应用，但在工程实践中仍面临结构优化、系统响应与环境适配等多方面挑战。

本文聚焦于机械臂在智能拣选任务中的设计实现问题，从系统架构设计、控制策略配置到运行效率分析，构建起完整的研究框架，旨在为相关设备的设计开发与工程落地提供理论基础与技术借鉴。

1 机电一体化技术概述

1.1 机电一体化技术的构成与原理

机电一体化技术是机械工程、电子技术、自动控制与计算机信息处理技术融合发展的产物，其核心在于实现系统内部多技术模块之间的高效协同与智能化运行。在典型应用中，机电系统包括执行单元（如电动机、液压缸）、检测单元（如传感器、编码器）、控制单元（如

PLC、嵌入式控制器）与信息反馈单元（如人机交互界面或网络通讯模块），通过控制逻辑实现输入输出之间的闭环响应机制^[1]。

机电一体化系统强调系统内部的反馈调节机制与任务自适应能力，特别是在非结构化或动态环境下，能够通过传感器获取实时数据，借助控制算法对机械行为进行精准调整。这种高度集成的特性，使得机械臂等执行系统能够快速响应任务变化，提高操作的精准度与作业效率。对于拣选系统而言，物体种类、摆放位置和搬运路径常处于变动状态，传统机械结构很难胜任，而基于机电一体化的方案则能提供更高的灵活性与可编程能力。

1.2 机械臂系统的功能组成与分类

机械臂作为机电一体化系统的重要应用载体，其基本功能包括抓取、移动、定位与释放等操作过程。结构上通常由基座、关节、连杆、末端执行器与传动系统组成，借助电动、气动或液压驱动方式，实现多自由度动作控制。为了完成复杂的拣选动作，还需配合图像识别系统与环境感知模块，使机械臂具备一定的“认知”能力，从而实现基于目标属性的选择性抓取。

根据使用场景与性能指标不同，机械臂可分为工业型、协作型与柔性型三类。工业型机械臂以重复性高、负载大为特点，适合流水线作业；协作型则在结构与控制上更为轻巧，适合人机协同场景；柔性机械臂则强调结构适应性与多任务兼容性，常用于物流与服务型机器人中^[2]。在拣选系统中，通常结合多种功能模块，如视觉引导系统、位置反馈传感器与柔性夹具，以完成对不同种类、不同规格目标物体的精准识别与搬运。

1.3 拣选任务对系统集成技术要求

拣选任务的复杂性体现在目标多样、空间布局不确定与操作节奏紧凑等多方面因素上。系统设计不仅要关注机械臂的动态性能，还需保障控制系统的信息处理速度、执行精度与容错能力。特别是在柔性生产与智能仓储环境中，任务变化频繁，对系统的自适应控制提出更高要求。

具体技术要求包括：第一，系统必须具备高响应速度，能够在传感器输入后快速完成数据处理与动作决策；第二，机械结构需具备多自由度与良好的关节协调性，以适应多角度抓取路径；第三，执行单元与感知单元需实现信息闭环，对环境变化与任务误差具备一定的鲁棒性；第四，控制系统需支持任务自定义与模块扩展，确保在不同场景下的快速部署与高效切换。

拣选系统对机电一体化提出的是一种“系统级集成+任务级适应”的协同优化要求。通过软硬件联动、传感控制耦合、算法与结构协同，才能真正实现拣选操作的智能化与高效化。

2 拣选机械臂系统的设计架构

2.1 控制系统与传感器配置方案

机械臂在执行拣选任务时，控制系统承担着指令接收、路径规划、姿态调整与反馈处理等多项关键功能。为满足高效率、高精度与高鲁棒性的运行要求，系统需采用模块化分布式控制架构，以提升数据处理速率与动作同步水平^[3]。具体配置中，常选用嵌入式微处理器或工业级 PLC 作为主控单元，并通过 CAN、Modbus 或 EtherCAT 等工业总线连接执行机构与传感模块，实现系统内部的高速通信与逻辑协调。

传感器作为系统感知外部环境与自身状态的核心组件，直接影响拣选动作的准确性与安全性。典型应用包括：视觉识别系统，用于检测物体种类、尺寸、位置与朝向；力反馈传感器，用于动态调整夹爪力度与识别抓取成功与否；位置编码器与角度传感器，用于实时监测各关节运动状态，保障动作精度。通过传感器与控制器之间的闭环交互，系统可实现对外部变化的快速响应与自我调节。

控制软件方面，需支持运动轨迹规划、碰撞检测与多任务并行管理等功能，常结合机器人操作系统（如 ROS）或自主开发平台，以提升系统灵活性。整个控制系统需具备高度稳定性与可扩展性，为后续功能拓展与系统升级预留空间。

2.2 执行机构与机械结构优化设计

执行机构作为机械臂的运动载体，其结构设计直接决定拣选系统的操作灵活性与空间适应能力。结构方面需合理布局自由度分布，常见设计包括六轴串联结构与关节型模块组合形式，以实现多维操作空间与高位姿可

达性。各关节部位应选用精密伺服电机或谐波减速器，保障动作的平稳性与反应速度。

末端执行器（即抓取器）的设计需充分考虑拣选对象的特征，包括形状、材质与重量等。常见类型包括真空吸附型、柔性夹持型与磁吸式等，其中柔性夹持器适用于多类目标物，能够兼顾力度控制与抓取稳定性。末端模块需具备快速更换与模块组合能力，以应对多场景任务需求。

机械臂本体应采用轻质高强度材料制造，常见如铝合金、碳纤维或工程塑料，通过结构优化减少系统重量、提升运行速度并降低能耗^[4]。运动路径的设计应规避干涉区域，并结合冗余自由度实现避障动作，以提升整体的操作安全性与现场适应性。

2.3 通信与信息处理系统集成

在信息处理层面，拣选系统需具备高速、稳定且低延迟的数据传输能力，以实现实时控制与精准响应。系统内部采用统一的通信协议与节点编码机制，有利于不同模块间的快速对接与信息互通。典型系统配置中，传感器数据通过数据采集模块汇总至主控单元，再由主控处理后输出控制指令至执行模块，形成高效闭环控制链。

图像识别模块是实现目标识别与定位的关键部分，常通过摄像头获取视觉图像，借助图像处理算法（如边缘检测、模板匹配或深度学习模型）对物体进行快速识别与特征提取。配合 3D 视觉技术或深度传感器，可显著提升对空间信息的感知能力，从而优化拣选路径与抓取姿态。

信息系统还需提供任务管理与系统监控接口，支持用户对任务参数进行配置、对系统运行状态进行实时查询，并提供远程控制与维护支持。随着智能制造技术的发展，信息处理模块正逐步朝向边缘计算与云服务融合方向演进，使得拣选系统在数据交互与协同运作中具备更强的扩展能力与生态适配性。

3 拣选系统的实现与运行分析

3.1 拣选路径规划与动态控制算法

路径规划作为拣选任务中的先导环节，其合理性直接关系到系统的整体效率与动作安全性。在实际作业中，机械臂不仅要避让障碍物，还需应对动态目标位置的变化，这对路径生成的实时性与柔性提出更高要求^[5]。常用的路径规划方法包括基于运动学建模的解析路径法和基于空间搜索的启发式算法，其中后者适用于非结构化环境，能动态调整路线。

为提升规划精度，系统常将视觉识别获取的目标位置与场景建图结果进行融合，通过 SLAM 算法实现任务环境的空间建模，再结合目标位姿生成最优作业路径。同时，路径插值与轨迹平滑技术在控制层也发挥着重要

作用,能显著减少机械臂动作过程中的震动与速度突变,有助于延长设备寿命。

控制策略方面,为兼顾操作稳定性与响应灵敏性,常采用基于模型的前馈控制与基于误差的反馈控制相结合的方式。针对典型拣选动作,可构建末端执行器的动态模型,并将期望轨迹与反馈位姿进行比较,实时修正控制指令。在某些多自由度系统中,还会引入力位混合控制,使机械臂在与外部环境发生接触时具备柔性响应能力,提升操作的安全性与自适应水平。

3.2 多目标环境下的识别与执行效率

多目标拣选场景中,系统需要面对多个类别、尺寸、材质各异的物体,有些甚至存在重叠、遮挡等复杂情况。在视觉识别模块中,为增强对混合堆叠目标的处理能力,通常采用深度卷积神经网络进行特征提取与目标检测。在此基础上结合点云重建或 TOF 深度测距技术,可还原物体的三维空间信息,提升抓取姿态规划的准确度。

实际应用中,为避免不同目标属性干扰抓取动作,系统会对识别出的目标进行排序与筛选,优先处理空间无遮挡、形状规则、重量适中的物体。在执行阶段,通过抓取姿态的仿真与优化,提前判断可能失败的操作动作,并选择更稳定的路径与角度进行尝试。同时,系统需动态监测抓取状态,当夹持失败或目标滑脱时,立即触发重试机制,确保操作的闭环控制。

执行效率的提升还依赖于系统任务管理的智能化。常见做法是采用基于规则的任务调度器或学习型调度网络,根据实时系统负载与物体分布状态动态调整作业节奏。例如,在高频率任务下,机械臂可预加载下一个目标的路径信息,实现抓取与规划并行,从而压缩动作间隔时间。部分先进系统还引入图神经网络结构,在多目标分布图中进行全局优化,提高拣选顺序的整体效率。

3.3 系统稳定性与故障响应机制分析

拣选系统的可靠性不仅体现在单次任务执行的准确性上,更应关注其在长时间连续运行中的稳定表现与故障防范能力。为提高系统的健康运行能力,需建立多层次的稳定性保障机制,包括物理结构层、电气控制层与逻辑软件层的完整防护。

在硬件层面,机械臂需配备运行状态监控单元,实时获取电机温度、电流波动、关节负载等关键指标,当系统接近负载极限时自动调整运行参数或触发减载保护。在电气系统中,通信线路与供电模块应设有冗余设计,避免因局部故障导致整机瘫痪。控制系统中引入看

门狗定时器与状态自检模块,可定期检测信号流完整性与数据异常,确保关键指令不被中断或误处理。

在逻辑层面,系统故障处理机制需具备精细化响应策略。例如,当目标识别失败时,系统应首先检查图像源状态、光照干扰与算法处理是否异常,再根据故障类型选择重启识别、调整参数或换用备用模型等应对方式。对于夹持失败或掉落情况,应结合末端力传感器与图像反馈信息,确认是否发生滑脱,并在可控范围内进行补救操作,而非简单中断任务。

信息系统层面还应部署日志记录与历史分析模块,对系统运行中的微小异常进行数据积累与趋势预判,为设备维护与算法改进提供参考。在云边协同架构支持下,还可将部分计算与分析任务转移至边缘服务器,提升实时性并减轻本地处理负担。

整体而言,系统稳定性与故障处理机制不应是被动响应过程,而应作为拣选系统运行策略的重要组成部分,贯穿设计、部署与维护全过程。通过多维保障与精细管控,拣选系统可在复杂任务场景中保持长期可靠运行,为智能制造与智慧物流等领域提供坚实技术支撑。

4 结语

基于机电一体化技术的机械臂拣选系统,融合了机械结构优化、智能控制算法与多维信息感知技术,展现出较强的柔性适应能力与运行效率。本文围绕系统的整体架构、关键模块设计与运行机制展开系统论述,明确了拣选任务在现代智能制造场景中的实现路径与技术支撑。实践证明,通过软硬件深度协同与控制系统优化,可显著提升拣选系统的精度与稳定性。未来,随着人工智能与边缘计算技术的进一步发展,该类系统在复杂环境下的智能化水平有望进一步提升,应用范围也将不断拓展。

参考文献

- [1] 梁华. 工业机器人中机电一体化技术的应用研究[J]. 模具制造, 2023, 23(09): 205-207+210.
- [2] 李学良, 李伟伟. 探究汽车工业机器人中的机电一体化技术[J]. 时代汽车, 2024, (17): 25-27.
- [3] 李源, 乔龙图. 采摘机器人机械手臂机电一体化设计[J]. 装备制造技术, 2021, (09): 50-52.
- [4] 吕晓军. 空间机械臂机电一体化关节的设计及控制[J]. 现代制造技术与装备, 2016, (11): 29+31.
- [5] 罗俊. 浅谈机电一体化关节在空间机械臂中的设计和控制[J]. 山东工业技术, 2014, (13): 156.