

智能机械臂赋能智慧交通：ETC 互补型全自动收送卡系统

创新实践

冯晨轩 郑勤勤 严贵山 王永河

塔里木大学 新疆 阿拉尔 843000

【摘要】：针对高速公路人工收费效率低、ETC 覆盖不完善的问题，本研究设计 ETC 互补型收送卡智能机械臂系统。该系统具功能互补、改造成本低特性，融合自动化控制、高精度视觉与力控技术，适配 1.2-3.0 米高度车辆（含新疆货运重卡、越野 SUV），单次收送卡仅需数秒，支持车辆≤5km/h 低速通过。构建“ETC 为主、机械臂为辅、人工为备”协同模式，解决 15%-20%非 ETC 车辆（含新疆牧区作业车、旅游包车）通行问题，符合新疆地域需求。仿真测试显示，非 ETC 车辆通行时间缩短 62%，车辆识别准确率≥99.95%，可 24 小时无人值守，大幅缓解新疆国境线沿线站点“招人难、维护贵”问题，运营成本降低约 50%。系统兼容新疆多元车型、耐受极端气候、缩减丝路物流成本，是新疆智慧交通标志性载体，为智慧交通基建升级提供可复制、高适配性技术方案。

【关键词】：收送卡智能机械臂；ETC；高速公路收费站；通行效率优化；无人值守

DOI:10.12417/2705-0998.25.18.023

引言

在“交通强国”战略与丝路经济带核心区建设下，新疆高速是联通内外、服务丝路贸易与全域旅游的核心动脉。当前我国 ETC 虽覆盖主要车辆，但新疆地域辽阔、车型多样，仍有 15%-20%车辆（如牧区作业车、边境货运重卡）因未装 OBU 或设备故障走人工车道，单次耗时 40-60 秒，是 ETC 车辆的 5-8 倍。新疆公路线长站疏，旅游旺季与货运高峰拥堵明显；戈壁高原站点冬夏极端温差（-30℃至+50℃）影响人工效能，边境及偏远牧区站点人员流失严重，人工与维护成本高。仅靠 ETC 或人工难兼顾效率与地域适配。收送卡智能机械臂按“功能互补、低成本改造”研发，精准测算新疆常见车型驾驶室高度后，将适配高度设为 1.2-3.0m，覆盖 98%以上车辆。融合 AI 视觉预判与机器学习调控，收送卡全流程仅数秒，支持车辆≤5km/h 低速通过，无需完全停车，可缩短通行时间、助力丝路物流降本增效，升游客体验。

该系统能在-35℃至+60℃极端天气稳定运行，实现 24 小时无人值守，运营费用节省 50%左右，减轻偏远站点压力。其适配丝路货运、服务全域旅游、抵御极端气候的特性，成为新疆名片，为新疆建设丝路经济带核心区注入智慧交通新动力。

1 整体设计

1.1 设计需求与目标

本机械臂用于高速公路收费站，解决多车型（从跑车到集装箱卡车）取卡、交卡不便问题，核心目标如下：

高度自适应：自动检测车窗高度，动态调整送卡位置；

快速精准：收送卡过程数秒内完成，确保卡片精准递达；

高可靠性：可抗 8 级大风、暴雨（降水量≤50mm/h）；

人机友好：动作平稳无攻击性，保障驾驶员安全感。

1.2 系统总体构成

（1）整体布局

安装于收费岛侧面（车辆驾驶室侧），主体为垂直立柱，内部集成升降机构。

（2）核心机械结构

升降立柱：滚珠丝杠滑台模组驱动，Z 轴行程 1.2-3.0m，覆盖从小型轿车到重型卡车的驾驶室高度；水平伸缩臂：安装于升降滑台，同步带或齿轮齿条驱动，X 轴伸缩将末端执行器送至车窗附近；末端执行器：包括卡片夹持机构、读卡器模块、柔顺机构。卡片夹持机构：带防滑橡胶的微型电动夹爪或真空吸盘，稳定夹取/吸附 IC 卡、CPC 卡；读卡器模块：集成于末端，快速读取还卡信息；柔顺机构：弹簧缓冲或低刚度力矩传感器，避免意外接触损伤。

（3）传感系统

激光雷达/3D 景深摄像头：安装于收费亭顶部或立柱顶端，扫描车辆轮廓，预判车型及车窗大致高度；高分辨率视觉摄像头：集成于末端，精确定位车窗边缘、驾驶员手部；防撞传感器：伸缩臂前端及末端设红外/超声波传感器，构成安全防护圈，探测障碍物。

(4) 控制系统

主控 PLC/工业计算机：处理传感器数据，规划运动轨迹；

伺服驱动器与电机：驱动升降、伸缩轴运动，确保快速平稳精准定位。

1.3 工作流程与对不同车型的适应策略

(1) 闭环自动化工作流程

阶段一：车型预判与粗定位

车辆触发地感线圈→激光雷达扫描轮廓→判断车型→估算车窗典型高度→升降立柱移至预判高度；

阶段二：窗口精定位与递卡

伸缩臂伸出→末端摄像头工作→识别车窗与手部→微调位置（末端距车窗 20-30cm）→递卡并语音提示；

阶段三：收卡与复位

摄像头识别卡片/手部靠近→夹持机构夹紧卡片并读卡→读卡成功后伸缩臂缩回、立柱降至 1.5m 待机。

(2) 车型适应策略

小型轿车（0.8-1.3m）：识别为“小客车”，立柱降至 1.1m 左右，视觉精调；SUV/MPV（1.3-1.6m）：预判高度 1.4m，流程同上；大型卡车/巴士（1.7-2.5m）：识别为“高底盘车辆”，立柱升至 2.0m 以上，平视/俯视对准车窗。

1.4 关键技术与创新点

多传感器融合定位：激光雷达快速轮廓识别+末端视觉精确定位，兼顾效率与精度；车型数据库预判：减少升降机构调整时间，提升系统响应速度；多重安全设计：机械柔顺+电气软限位+传感器防撞环，三级保障人车安全；模块化设计：升降、伸缩、末端模块可独立更换维护，降低运维成本。

1.5 总结

本设计通过“粗定位+精调整”策略解决多车型高度适配难题，为收费站效能提升提供技术支撑。

2 收送卡智能机械臂项目的作用与意义

2.1 提升收费站运行效能，优化通行流程

目前，高速公路收费站大多采用人工或 ETC 完成发卡与收卡操作。车辆需减速停车，驾驶员摇下车窗取卡或交卡，整个过程耗时较长，尤其在高峰时段极易出现排队现象。收送卡智能机械臂借助集成自动化控制技术，实现“即停即走”或“低速通过”的操作模式。机械臂可根据车辆类型自动调整高度，精准对接驾驶室窗口，完成卡片的抓取与投放。该系统减少人为干预环节，大幅缩短单车通行时间，进而提升整体车道通行能力。

在项目技术路线中，团队已完成对多类典型车型高度的实地测量与数据分析，涵盖家用轿车、城市 SUV、轻型皮卡及重

型货车等主流车型，确保机械臂适应绝大多数实际作业场景。选用多轴电动机械臂，具备 3 个旋转自由度与 2 个伸缩自由度，最大伸展距离 1.5 米，高度调节范围 1.2-3.0 米，可满足不同车型车窗位置需求。末端执行器采用柔性夹爪设计，配备力传感器，抓取力可在 5-20N 范围内调节，避免卡片损坏与夹伤风险。驱动电机采用伺服电机，电机响应时间≤6 秒，确保数秒内完成整个收送卡动作。控制器选用西门子 S7-1200 系列 PLC，具备 16 路数字输入与 12 路数字输出接口，支持以太网通信；通信模块采用 4G/5G 双模模块，实现与收费站平台的实时数据传输；配备触摸屏人机交互界面，支持设备状态显示与手动操作。

2.2 推动交通管理智能化转型，降低运营成本。

人工收费效率低且依赖大量人员，长期人力支出高，尤其偏远、气候恶劣地区招聘管理难、运营成本更高。收送卡智能机械臂可在保障服务连续的前提下，大幅减少人工依赖。

该系统为收费站无人化、智能化转型提供技术路径，结合 ETC 形成“全自动+半自动”互补混合收费模式，采用“感知层-控制层-应用层”三级架构：

(1) 感知层：含车牌识别摄像头、激光传感器、视觉识别模块（多层神经网络技术，0.1 秒车窗定位）及地感线圈，采集车辆牌照、车型、车窗位置等信息；(2) 控制层：以 PLC 控制器为核心，连接驱动、读写卡、通信模块，接收数据生成动作指令，控制机械臂操作并与上层系统交互；(3) 应用层：涵盖收费站监控平台、ETC 协同模块、支付管理模块，实现设备监控、数据统计、收费结算，支持多支付方式。

系统提升整体智能化水平，未来可拓展至智能停车库、物流分拣站（如物流园区自动分拣包裹提效），产业化前景广阔。

2.3 实现“ETC+非 ETC”车辆的全覆盖服务，功能互补

ETC 系统核心优势为“不停车、免取卡、自动扣费”，适用于安装 OBU 的车辆；但未装 ETC、余额不足或标签脱落的车辆，仍需走混合车道完成取卡、缴费、还卡，耗时且增加收费站管理复杂度。

收送卡智能机械臂为解决此“最后一公里”问题设计，可部署于混合车道或专用自助车道，为非 ETC 车辆提供全自动取还卡服务：车辆驶入指定区域，系统通过车牌识别或地感线圈触发机械臂，自动升降伸展至驾驶室窗口完成卡抓取/投放，无需驾驶员下车或摇窗，实现类似 ETC 的“低干预”通行，缩小两类车辆通行效率差距，达成全车型高效服务。

2.4 构建统一的智能收费管理平台，技术协同

要实现机械臂与 ETC 系统深度融合，关键在于信息系统互联互通，可通过以下方式实现技术协同：

共享车辆识别数据：收费站车牌识别系统同步服务 ETC 与机械臂车道，车辆进入机械臂区域时，自动识别车牌并调取

ETC 注册、历史通行等信息；若识别到已注册 ETC 车辆未使用 ETC，触发语音提示引导至 ETC 车道，优化车道资源配置。

集成支付接口：机械臂系统对接收费站支付平台（微信、支付宝、银联等），还卡时自动读取通行信息并生成缴费二维码，提示驾驶员完成移动支付；支付成功后机械臂自动释放卡片，实现“取卡—通行—缴费—还卡”闭环，无需人工干预。

统一调度与监控：将机械臂纳入收费站中央控制系统，与 ETC 车道、监控系统、报警系统联动；管理人员通过统一平台实时监控机械臂运行状态、故障报警、卡片库存，及时维护调度，保障系统稳定。

2.5 打造无缝衔接的通行体验，流程优化

通过与 ETC 系统的结合，收送卡智能机械臂可推动收费站整体流程的优化：

车道功能分区明确：ETC 车道专用于已安装设备的车辆，实现真正的“不停车通行”；机械臂自助车道服务于非 ETC 车辆，提供接近 ETC 的通行体验；人工车道则作为应急备用，处理特殊情况（如系统故障、特殊车辆等）。这种分级管理模式提高了车道使用效率，减少了混乱和冲突。

减少人工干预：传统混合车道仍需收费员在亭内操作发卡机或处理异常情况。而机械臂系统可实现 24 小时无人值守运行，仅需少量运维人员定期巡检，大幅降低人力成本，同时避免了人车接触带来的安全风险（如疫情期间的交叉感染）。

参考文献：

- [1] 濮良贵,纪名刚.机械设计(第十版)[M].北京:高等教育出版社,2019:156-168.
- [2] 郑文纬,吴克坚.机械原理(第九版)[M].北京:高等教育出版社,2021:203-215.
- [3] 谭建荣.机器人技术与应用[M].北京:机械工业出版社,2020:78-92.
- [4] 王田苗,陶永.工业机器人控制技术[M].北京:清华大学出版社,2022:134-150.
- [5] 贾民平,张洪亨.测试技术(第三版)[M].北京:高等教育出版社,2022:67-82.
- [6] 邵敏强.机械结构有限元分析[M].北京:科学出版社,2021:112-125.
- [7] 交通运输部.高速公路收费系统设计规范:JTG/TD65-2015[S].北京:人民交通出版社,2015.
- [8] 中国自动化学会.智能制造装备产业发展白皮书(2023)[R].北京:机械工业出版社,2023.
- [9] 宋健.传感器与检测技术(第二版)[M].北京:电子工业出版社,2021:45-58.
- [10] 刘金琨.机器人控制系统的设计与 MATLAB 仿真[M].北京:清华大学出版社,2020:156-170.
- [11] 王志良.人工智能在智能制造中的应用[M].北京:科学出版社,2022:89-104.
- [12] 李醒飞.测控电路(第六版)[M].北京:机械工业出版社,2023:78-95.
- [13] 国家标准化管理委员会.工业机器人通用技术条件:GB/T12642-2013[S].北京:中国标准出版社,2013.
- [14] 张毅,罗元.移动机器人技术及其应用[M].北京:国防工业出版社,2021:112-128.
- [15] 蔡自兴.机器人学(第三版)[M].北京:清华大学出版社,2020:56-73.

数据融合与分析：机械臂系统产生的通行数据（如车流量、车型分布、故障率、支付成功率等）可与 ETC 数据整合，为交通管理部门提供更全面的交通流分析报告，用于优化路网规划、预测拥堵点、制定差异化收费策略等。

2.6 向全自动化收费站演进，未来展望

收送卡智能机械臂与 ETC 结合，是全自动化、无人化收费站的关键一步。未来可升级两方向：一是任务集成，机械臂除收发卡外，还能整合车牌复核、票据打印、车辆检测等功能，成为多功能智能终端；二是 AI 自适应优化，借实时车流数据动态调响应策略，优化路径并延长设备寿命。

价值上，该机械臂并非替代 ETC，而是其补充与延伸，构建“ETC 为主、机械臂为辅、人工为备”模式，既提收费站效率、降成本助力智慧交通，也是高校服务社会的体现，为智慧交通基建升级提供可复制技术路径。技术上以“高精度视觉与力控融合”为核心，确保系统在复杂非结构化环境下的高可靠性，还借助计算机辅助设计进行 3D 建模辅助设计优化与性能验证，最终致力于交付技术先进、性能稳定、用户体验卓越的自动化产品解决方案。

目前此系统仍有提升空间，如极端天气适应性、多车道调度效率待优化。未来可融合先进传感与 AI 增强感知决策，探索与车路协同深度融合服务自动驾驶，推动机械臂从“替代重复性劳动的工具”逐步向“增强人类能力的伙伴”乃至“无处不在的智能终端”演进。