

基于摩擦驱动与海尔贝克阵列的轻量化辅助泊车设备结构设计与仿真分析

王柯¹ 丁欣² 施牧含¹ 黄承妍¹ 林少聪¹ 田永军^{1*}

1.天津职业技术师范大学, 天津 300222

2.山东化工职业学院, 山东 潍坊 261108

[摘要]针对存量社区停车场车位空间受限、驾驶员窄位泊车操作难度大,以及传统自动化泊车方案对场地改造和设备投入要求较高等问题,设计免土建、模块化、车位端部署的轻量化辅助泊车设备。以STM32F4为控制核心,集成压力、红外、角度及振动传感器实现多源信号采集,并采用摩擦驱动机构配合磁吸夹紧机构完成自动旋转对位,通过海尔贝克阵列磁吸机构与自锁限位器实现模块化快拆与快速维护。模态与静力学分析表明,承载转盘的一阶固有频率高于外部激励频率、主体承载区应力范围为100~150MPa,初步满足安全性与静强度设计要求。

[关键词]辅助泊车;模块化设计;摩擦驱动;模态分析;轻量化

DOI: 10.33142/sca.v9i7.20019

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

Structural Design and Simulation Analysis of a Lightweight Assisted Parking Device Based on Friction Drive and Halbach Array

WANG Ke¹, DING Xin², SHI Muhan¹, HUANG Chengyan¹, LIN Shaocong¹, TIAN Yongjun^{1*}

1. Tianjin University of Technology and Education, Tianjin, 300222, China

2. Shandong Chemical Engineering & Vocational College, Weifang, Shandong, 261108, China

Abstract: To address the challenges of limited parking space in existing community parking lots, the difficulty of narrow-space parking maneuvers for drivers, and the high site renovation and equipment costs associated with traditional automated parking solutions, this paper presents a lightweight assisted parking device featuring foundation-free construction, modular architecture, and bay-side deployment. The device employs an STM32F4 microcontroller as the control core, integrating pressure, infrared, angle, and vibration sensors for multi-source signal acquisition. A friction drive mechanism combined with a magnetic clamping unit enables automatic rotational alignment, while the Halbach array magnetic clamping mechanism and the self-locking stopper facilitate modular quick-release and rapid maintenance. Modal and static analyses indicate that the first-order natural frequency of the load-carrying turntable exceeds the external excitation frequencies, and the equivalent stress in the main load-bearing region ranges from 100 to 150 MPa, preliminarily satisfying the safety and static strength design requirements.

Keywords: assisted parking; modular design; friction driven; modal analysis; lightweight

引言

近年来,我国汽车保有量持续增长,城市居住区停车供需矛盾进一步加剧。公安部数据显示,2025年全国汽车保有量已达3.66亿辆^[1]。然而,大量早期建成的社区停车场中,车位宽度、转弯空间、柱网布置和通行尺度多按建设时期的车辆尺寸与管理方式确定,难以完全适应当前车辆尺寸增大和驾驶便利性提升的需求。

现有智能泊车技术大体可分为车载自动泊车、自动代客泊车、AGV搬运式泊车以及机械式停车设备等方向^[2-4]。上述方案各有优势,但面向存量社区场景时均存在不同程

度的适用性局限。其中,车载自动泊车依赖车辆自身传感器、控制器和执行系统,难以覆盖未配置相关功能的存量车辆;自动代客泊车通常需要车端与场端协同,涉及感知、定位、通信和场地标识等系统建设;AGV搬运式方案自动化水平较高,但设备成本、场地平整度、调度系统和后期维护要求较高;传统机械式停车设备则往往涉及专用结构、基础施工及较严格的安全防护要求^[5,6]。因此,面向存量社区停车场的低成本、免土建、非破坏性改装的辅助泊车设备,仍缺少成熟的工程解决方案。

为此,提出一种车位端部署的轻量化辅助泊车设备。

当车辆驶入轻量化辅助泊车设备转盘后,通过摩擦驱动带动车辆随转盘缓慢旋转,将车辆姿态调整至与车位方向基本一致,随后仅需直线倒车即可完成入位。本文重点分析设备总体设计、关键机构设计、传感控制方案,以及承载转盘和驱动模块的仿真结果,同时对方案的适用性进行讨论。

1 设备总体设计

1.1 设计目标

(1) 免土建改造。避免开挖、浇筑和车库主体结构改造,仅通过地面找平、定位固定和电气接入完成部署,减少施工过程对居民日常停车影响。

(2) 存量车型适配。设备不改动车辆底盘、转向、制动和电气系统,主要面向紧凑型轿车、普通三厢轿车和中型 SUV 等常见家用车型。

(3) 低成本与低维护。设备采用单车位模块化结构,减少复杂导航、举升和搬运机构,将制造成本控制在搬运式 AGV 和整体式机械改造方案以下,降低维护成本。

(4) 模块化运维。摩擦驱动、磁吸夹紧、传感器和控制单元均采用独立模块设计。发生故障时,可通过快拆接口更换故障模块,快速完成现场恢复,减少停机时间。

1.2 总体结构

设备采用转盘式总体构型,由承载转台、摩擦驱动机构、磁吸夹紧机构、自锁限位器、传感器系统及控制单元等六部分组成。整体结构实施低矮化布置,最大结构厚度控制在 150mm 以内。考虑到设备不可避免存在地面高度差,车辆驶入区域设置低坡度过渡边缘,使车辆能够以低速、短行程方式驶上承载转台(图 1),而非依赖大坡度爬升。

车辆驶入承载转台的指定区域后,由多传感器系统确认车辆状态与转盘姿态。控制系统确认启动条件满足后,摩擦驱动机构带动转台及车辆同步缓慢旋转。当车辆纵向中心线与目标车位方向接近一致时,控制器停止电机输出,自锁限位器执行位置保持,随后可直线倒车入位。

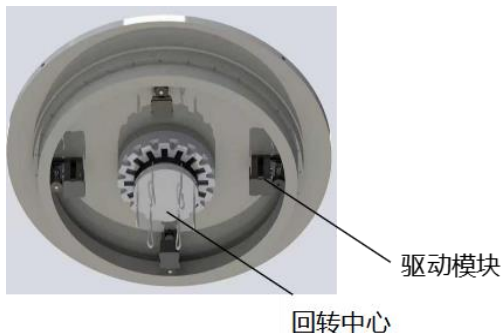


图 1 承载转台示意图

1.3 硬件架构与控制逻辑

设备硬件系统以 STM32F4 微控制器为核心,构建感知、决策、执行三层控制架构^[7,8]。感知层包括四类传感器,压力传感器检测车辆就位状态;红外传感器用于识别车辆驶入方向和入口遮挡状态;角度传感器用于采集转盘实时角位移;振动传感器用于监测驱动模块运行状态。传感器信号经调理和模数转换后输入 STM32F4 主控单元,由主控单元完成阈值判断、状态机切换和执行指令输出。

决策层采用状态机控制逻辑,状态序列包括待机、车辆检测、就位确认、旋转对位、减速定位、锁止保持和异常处理。为避免误触发,设备不依赖单一传感器信号作为启动依据,而是采用压力稳定、红外遮挡时序和角度初值共同确认的方式判断车辆是否满足启动条件。执行层由步进电机、减速器、摩擦驱动盘、磁吸夹紧机构及自锁限位器组成。控制器根据目标角度与当前角度的偏差调整电机运行方向和速度,并在接近目标角度时降低转速,以减小惯性冲击和定位误差。

振动传感器持续采集驱动模块壳体振动信号。当振动速度超过预设阈值或出现明显冲击特征时,系统进入异常处理流程,降低转速并记录故障信息;若异常持续存在,则停止驱动并向管理端发送维护提示。该策略有助于在轴承磨损、摩擦盘打滑、夹紧力不足或异物卡滞等故障早期阶段实现识别。

2 关键机构设计

2.1 摩擦驱动机构

摩擦驱动机构是设备的动力核心,由步进电机、减速器、驱动摩擦盘、预紧结构和标准化快拆接口组成。驱动摩擦盘与转台底部摩擦面贴合,通过摩擦力传递转矩,驱动转台在低速工况下平稳旋转。与齿轮传动方案相比,摩擦驱动结构具有传动平顺、无明显齿隙、布置高度低和过载荷滑移保护等特点,适合用于大承载、短行程的姿态调整场景。

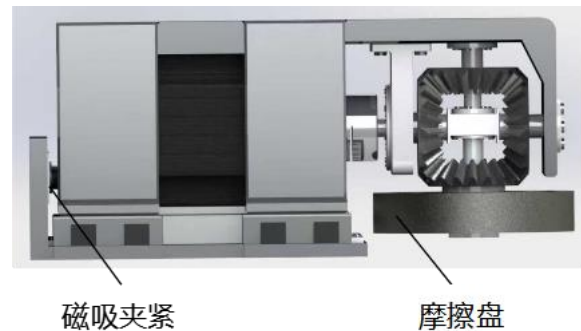


图 2 驱动模块

2.2 磁吸夹紧机构

磁吸夹紧机构由海尔贝克阵列永磁体与电磁调节单元组合构成（图3）。海尔贝克阵列能够将磁场集中于工作面一侧，从而提高有效吸附力并降低非工作侧漏磁^[9]，永磁体按5列阵列排布，磁化方向依次为 $\uparrow$ 、 $\rightarrow$ 、 $\downarrow$ 、 $\leftarrow$ 、 $\uparrow$ 。电磁铁线圈用于小范围调节夹紧力，使驱动模块在运行时保持稳定接触，在维护时能降低吸附力以便拆卸。

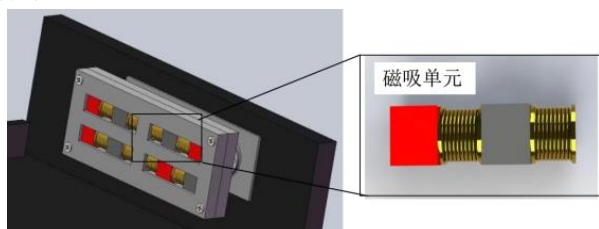


图3 磁吸夹紧机构

在维护操作中，更换驱动模块时，电磁线圈通入反向电流以削弱局部磁场，降低拆卸阻力；装入新模块后，通入正向电流以增强吸附力，使摩擦盘与转台底部摩擦面重新形成稳定接触。与螺栓连接和液压夹紧等方案相比，磁吸夹紧机构具有结构紧凑、响应快、拆装方便和无液压泄漏风险等优点。

2.3 自锁限位器

自锁限位器采用橡胶基体与内嵌矩形硬板组合结构。当驱动模块底板压覆于自锁限位器上方时，矩形硬板在压力作用下使周围橡胶产生挤压变形，形成局部摩擦自锁，从而限制驱动模块在水平方向微动和滑移。

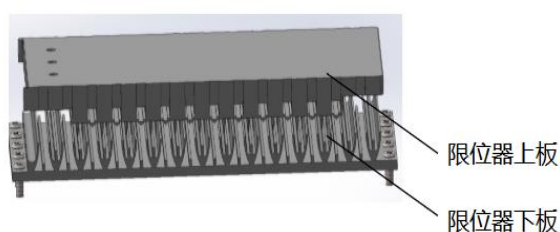


图4 自锁限位器结构示意图

该机构主要承担两个功能。一方面，利用橡胶材料较高的摩擦系数和弹性变形能力，在一定安装误差范围内实现自锁固定，避免完全依赖高精度定位孔或锁销。另一方面，橡胶基体可吸收局部冲击能量，降低刚性接触造成的瞬态应力峰值。由于橡胶属于典型粘弹性材料，其力学性能受硬度、温度、压缩率和加载频率影响明显，后续精细化仿真中宜采用 Mooney-Rivlin 或其他超弹性本构模型，

并通过压缩试验确定模型参数^[10]。

3 传感器系统

3.1 整体方案

传感器系统围绕车辆检测、动作触发、角度反馈和异常监测等任务进行布置。系统选用压力传感器、红外传感器、角度传感器和振动传感器，分别承担车辆就位检测、驶入方向判定、转台姿态反馈以及运行状态监测功能。

压力传感器布置于设备前后两端（图5）。当两端压力传感器均检测到稳定载荷，且载荷变化率低于预设阈值时，系统判定车辆已基本停稳。红外传感器布置在入口侧，通过遮挡顺序和持续时间判断车辆驶入方向，并辅助识别行人、异物或车辆未完全驶入等异常情况。角度传感器安装于转台旋转轴或等效角度测量位置，实时反馈转台当前角度，用于闭环定位控制。振动传感器贴装于驱动模块壳体表面，采集运行过程中的振动速度或加速度信号，用于识别异常摩擦、松动、冲击和早期机械故障。

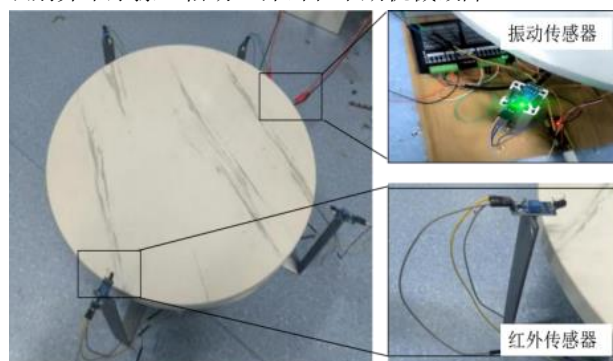


图5 装置整体实物模型

3.2 多传感器协同控制原理

控制过程由 STM32F4 主控芯片统一调度。系统上电后进入待机状态，持续采集压力、红外和角度信号。当车辆驶入转台时，入口侧红外传感器首先产生遮挡信号；随后压力传感器检测到前后端载荷变化。当两端压力值均超过阈值且保持稳定时，系统确认车辆已就位。若角度传感器反馈当前转台角度处于允许启动范围，控制器进入旋转对位状态。

旋转过程中，控制器根据目标角度与当前角度差值生成速度指令。初始阶段采用低加速度启动，以避免车辆产生明显晃动；中间阶段保持稳定转速；接近目标角度时进入减速定位阶段。达到目标角度后，电机停止输出，自锁限位器承担位置保持功能。若运行过程中检测到压力突变、红外异常遮挡、角度反馈丢失或振动超限，系统立即进入异常处理状态，停止驱动并输出告警信息。这种多传感器

协同方式能够降低单一传感器误判带来的误启动风险,也使设备在复杂车库环境中具有更好的鲁棒性。

4 仿真分析

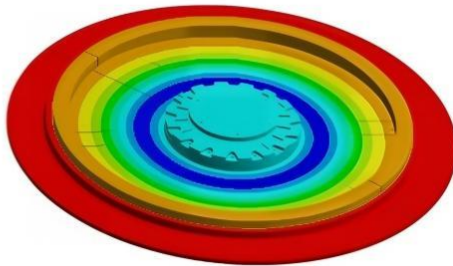
4.1 车载转盘自由模态仿真

为验证承载转盘在车辆低速驶入、转盘旋转和长期使用过程中的动态特性,采用有限元法对转盘结构进行自由模态仿真分析。转盘材料选用 Q235B 碳素结构钢。本阶段求解过程中采用自由模态设置。图 6 所示,排除前 6

阶刚体模态后,提取第 7~10 阶弹性模态的固有频率和振型。可见,转盘第一阶固有频率为 46.306Hz。低速泊车 and 车辆驶入过程中,主要外部扰动通常集中在低频范围内;步进电机经减速机构折算后的等效驱动频率约为 15Hz。以 30Hz 作为主要低频扰动上限进行初步校核时,第一阶固有频率与其比值约为 1.54;与电机等效驱动频率的比值约为 3.09。可以发现,两者保持足够的安全裕度,可有效避开共振区。

A: 模态
总变形 7
类型: 总变形
频率: 46.306 Hz
单位: mm
2026/4/8 12:01

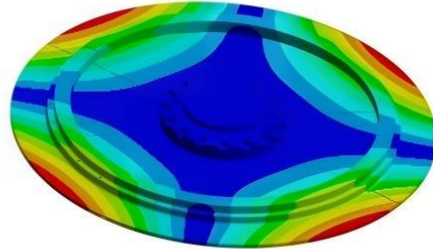
1.3161 最大
1.1701
1.0241
0.87814
0.73214
0.58615
0.44015
0.29416
0.14816
0.0021659 最小



(a) 7 阶模态图

A: 模态
总变形 8
类型: 总变形
频率: 77.921 Hz
单位: mm
2026/4/8 12:02

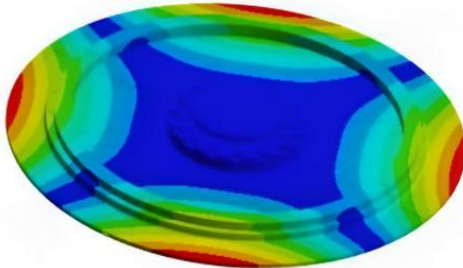
2.9831 最大
2.6516
2.3202
1.9887
1.6573
1.3258
0.99436
0.66291
0.33146
1.2112e-6 最小



(b) 8 阶模态图

A: 模态
总变形 9
类型: 总变形
频率: 77.96 Hz
单位: mm
2026/4/8 12:02

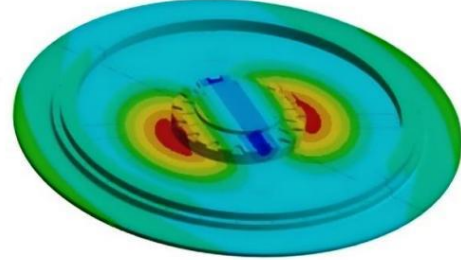
2.9783 最大
2.6474
2.3165
1.9855
1.6546
1.3237
0.99277
0.66185
0.33093
2.587e-6 最小



(c) 9 阶模态图

A: 模态
总变形 10
类型: 总变形
频率: 96.923 Hz
单位: mm
2026/4/8 12:02

2.5076 最大
2.2296
1.9515
1.6735
1.3955
1.1175
0.83949
0.56148
0.28347
0.0054551 最小



(d) 10 阶模态图

图 6 车载转盘 7-10 阶模态振型云图

4.2 驱动模块静力学仿真

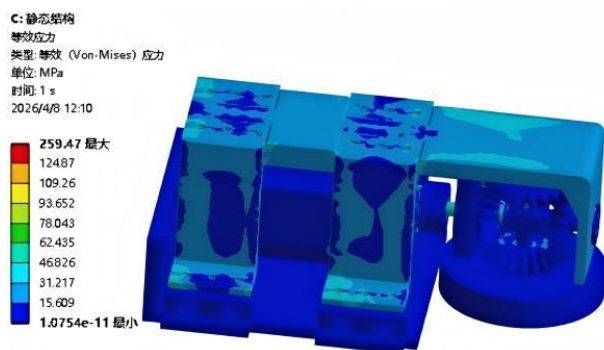
驱动模块结构强度和刚度影响转台旋转稳定性、摩擦接触状态和长期可靠性。静力学仿真中,设计轴载按 2500kg 估算,对应垂向载荷约 24.5kN;考虑 1.5 的设计安全系数后, Q235B 材料对应的名义许用应力约为 156.67MPa。结果显示,最大等效应力为 259.47MPa,主要集中于驱动摩擦盘与输出轴连接处的键槽根部,这是因为该位置存在几何不连续,容易产生局部应力集中。针对该问题,将键槽根部圆角半径由 0.5mm 增至 2.0mm,并

开展圆角敏感性分析。优化后,键槽根部局部应力降至约 180MPa,驱动模块主体承载区域等效应力主要分布在 100~150MPa 范围内。

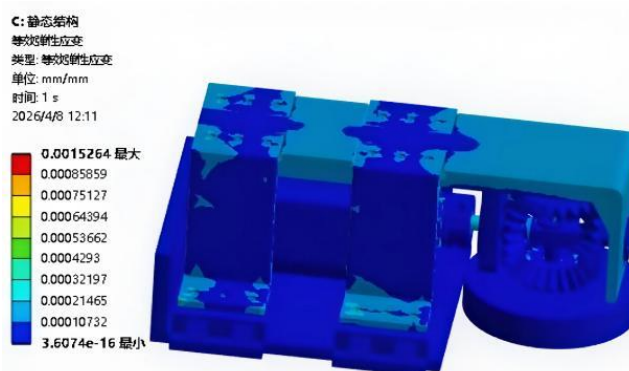
从结果看,主体承载区域应力低于 156.67 MPa 的名义许用应力,可满足初步静强度设计要求。键槽根部优化后的局部应力仍略高于按 Q235B 整体屈服强度折算得到的名义许用值。工程应用时,可进一步采用增大圆角半径、优化键连接形式、局部采用更高强度材料或增加表面强化工艺等方式降低局部应力集中。此外,最大等效弹性应变

为 0.15%，整体变形较小，说明驱动模块在设定载荷下具备较好的刚性，有利于维持摩擦盘与转台底部摩擦面的接

触稳定性，从而减小打滑、偏磨和定位误差。



(a) 驱动模块等效应力云图



(b) 驱动模块等效弹性应变云图

图 7 静力学分析

5 结论

(1) 设计了免土建、模块化、车位端部署的轻量化辅助泊车设备。采用摩擦驱动转台旋转、磁吸夹紧维持接触压力、橡胶自锁限位器实现位置保持与快护。设备不改变车体与车库结构，适用于存量社区改造。

(2) 建立以 STM32F4 为核心的多传感器协同架构，压力、红外、角度、振动传感器分别完成就位检测、方向判定、角度反馈与状态监测。

(3) 承载转盘第一阶弹性固有频率（46.306Hz）高于低速泊车低频扰动及电机等效驱动频率，可有效避开共振区。驱动模块静力学仿真表明，优化后主体承载区域等效应力满足初步静强度要求；键槽根部局部最高应力为 180MPa，需作为后续优化与试验验证重点。

基金项目：国家级大学生创新创业训练计划项目资助（编号：202610066001）；天津市普通高等学校本科教学质量与教学改革研究计划项目“职业技能竞赛引领下的工程实践教学改革创新与实践”（编号：A251006603）。

[参考文献]

- [1] 庄会宁. 全国机动车保有量达 4.69 亿辆[N]. 人民公安报 交通安全周刊, 2026-01-27(001).
- [2] Diaz Ogas M G, Fabregat R, Aciar S. Survey of Smart Parking Systems[J]. Applied Sciences, 2020, 10(11): 3872.
- [3] Olmos Medina JS, Maradey Lázaro JG, Rassálkin A, González Acuña H. An Overview of Autonomous Parking

Systems: Strategies, Challenges, and Future Directions[J]. Sensors, 2025, 25(14): 4328.

[4] Piao C, Zhang J, Chang K, Li Y, Liu M. Multi-Sensor Information Ensemble-Based Automatic Parking System for Vehicle Parallel/Nonparallel Initial State[J]. Sensors, 2021, 21(7): 2261.

[5] 陈怡冰, 刘志建. 机械式停车设备维护运行监测探讨[J]. 时代汽车, 2026(13): 145-147.

[6] 黄正球, 唐娇燕, 印松, 等. 机械式停车设备用 AGV 定位精度检测[J]. 起重运输机械, 2026(1): 76-80.

[7] 邓晓燕, 郑陆楠, 廖鸿鹏, 等. 基于 STM32F4 的电磁寻迹平衡车设计[J]. 信息技术, 2018(4): 18-22.

[8] 胡海洋, 王淑成, 杨旭, 等. 基于 STM32F427 四旋翼无人机控制系统设计[J]. 仪器仪表与分析监测, 2024(2): 24-27.

[9] Halbach K. Design of Permanent Multipole Magnets with Oriented Rare Earth Cobalt Material[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1980, 169(1): 1-10.

[10] Yan J, Zhang Z, Man J, Sun J, Zhen R, Liu X A. Parameter Identification of the Mooney-Rivlin Model for Rubber Mounts Subject to Multiaxial Load[J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2025(13): 42.

作者简介：王柯（2004—），研究方向为机械设计制造及其自动化；结构设计与优化，天津职业技术师范大学在读学生；*通信作者：田永军（1988—），研究方向为机械设计优化理论，就职于天津职业技术师范大学。