2026 年全国大学生电子设计竞赛

车载平衡滚球运动控制系统

（H 题）

摘　要

本系统以 STM32H745ZI6 为车载主控，以 CanMV K230 完成钢球识别和无线图传，采用八路红外阵列循迹，并由 LSM6DSV16X 测量管道姿态。底盘采用循迹偏差 PD 与双轮速度 PID，滚球机构采用钢球位置外环和管道姿态内环的串级控制。单连杆模型给出 70.72 mm 连杆设计值；仿真中钢球 $0 \rightarrow +5\,\mathrm{cm} \rightarrow -5\,\mathrm{cm}$ 的末端到达时间为 2.38 s，5 s 误差约 1.44 mm。当前系统已完成主机侧单元测试、图传软件和部分实物验证，动态行驶平衡仍需统一机械基准、执行器映射并完成整车联调。

关键词：智能小车；滚球平衡；机器视觉；红外循迹；串级控制；姿态融合

目　录

1　方案设计与论证 **3**

1.1　任务要求与设计指标 3

1.2　系统总体方案 3

1.3　方案选择与论证 4

2　理论分析与计算 **4**

2.1　循迹误差与车轮闭环 4

2.2　钢球与摆杆模型 5

2.2.1　钢球动力学 5

2.2.2　单连杆机构 5

2.3　姿态解算与串级控制 5

3　硬件设计 **5**

3.1　硬件组成与接口 5

3.2　机械、电源与抗干扰 6

4　软件设计 **6**

4.1　软件总体流程 6

4.2　视觉通信与状态机 7

4.3　安全保护与参数管理 7

5　测试结果与分析 **7**

5.1　测试方案 7

5.2　测试结果 8

5.3　结果分析与改进措施 8

1 方案设计与论证

1.1 任务要求与设计指标

赛题要求小车在规定跑道上循迹行驶，同时控制直径约 10 mm 的钢球在长 25 cm、外径 20 mm 的 PPR 管内稳定运动；车载摄像头同时承担钢球检测、无线实时图传、录像和回放。PPR 管铰链中心距车体安装面高度不小于 5 cm，车体外形不大于 35 cm×25 cm，循迹方式限定为红外光电模块。

据此，20 s 和 30 s 完成一圈所需平均速度约为 0.307 m/s、0.205 m/s。现有基础速度设为 0.40 m/s，通过弯道降速、终点宽线确认和滚球稳定裕量满足时间要求。

表 1　主要设计目标与当前状态

项目	设计目标	当前状态
无线视频	K230 建立热点并输出 MJPEG，可录像回放	软件框架已实现，待整车验证时延
单圈循迹	平均车速不低于 0.31 m/s，终点误差不大于 2 cm	循迹与终点判定逻辑已实现
静态移球	$0 \rightarrow +5$ cm $\rightarrow -5$ cm，5 s 内稳定，误差不大于 1 cm	仿真通过，实物待联调
动态平衡	直线和全圈行驶中钢球误差不大于 1 cm	仿真未完全达标，是后续重点

1.2 系统总体方案

系统由视觉感知、循迹与里程、姿态测量、运动执行、滚球机构和人机交互组成。K230 负责钢球检测、标尺映射和 MJPEG 图传，通过 UART 输出位置、质量和序号；STM32H745ZI6 的 Cortex-M7 核负责循迹、速度闭环、姿态解算、滚球闭环和安全保护。两条控制链可并行运行：其一为红外观测、差速目标、编码器测速、双轮 PID 到电机 PWM/DIR 的底盘链路；其二为 K230 钢球位置、滚球外环、LSM6DSV16X 姿态内环到位置舵机的平衡链路。

1.3 方案选择与论证

表 2　关键方案选择

方案项	采用方案	主要依据
车载主控	STM32H745ZI6（CM7）	定时器、UART、I²C 和 PWM 资源充足，适合多闭环实时控制
钢球检测	K230 端 YOLO 加标尺插值	减少主控图像处理负担，对反光和背景变化适应性更好
循迹方式	八路红外阵列加权质心	符合赛题限制，可得到连续横向偏差
滚球机构	单刚性连杆摆杆	单自由度便于建模，质量和体积小于直线滑台

传统阈值或圆检测计算量小，但易受金属反光和管壁高光影响；主控直接处理图像会挤占实时控制资源。因此视觉任务集中在 K230，主控只接收结构化位置数据。滚球机构优先采用固定 C、F 两点的单刚性连杆，单自由度明确，便于建立解析模型和标定。

2　理论分析与计算

2.1 循迹误差与车轮闭环

八路红外传感器从左至右建立位置坐标 p_i。当第 i 路检测到黑线时记 $b_i = 1$，否则记 $b_i = 0$；横向偏差采用加权质心计算：

$$e_{\text{line}} = \frac{\sum_{i=0}^{7} b_i p_i}{\sum_{i=0}^{7} b_i} \tag{1}$$

依据该偏差生成左右轮差速目标。转向修正量采用 PD 计算并限幅：

$$\Delta v = K_p e_{\text{line}} + K_d \frac{e_{\text{line}}(k) - e_{\text{line}}(k-1)}{T_s} \tag{2}$$

当前 $K_p = 3.0$、$K_d = 1.8$，转向修正速度限幅为 10 cm/s，单周期变化量限制为 2.5 cm/s。左右轮速度由编码器闭环跟踪，单轮 PID 的输出限幅为 0.50；速度闭环固定周期为 20 ms。

2.2 钢球与摆杆模型

2.2.1 钢球动力学

定义管道中心向右为钢球位置正方向 x，右端抬高为俯仰角正方向 θ。钢球在管内近似纯滚动，在小角度范围内，其沿管道方向的重力分量可用 $mg\sin\theta \approx mg\theta$ 近似。模型同时考虑小车纵向加速度、管道转动与黏性阻尼，以钢球位置误差为外环输入、管道期望角为外环输出，再由姿态内环跟踪期望角。

2.2.2 单连杆机构

单连杆模型采用 $AB = 90\,\mathrm{mm}$、$BD = 250\,\mathrm{mm}$、$CD = 25\,\mathrm{mm}$、$GF = 19\,\mathrm{mm}$，计算得到连杆孔距 $L_f \approx 70.72\,\mathrm{mm}$。现有 H55 铰链高度和 SG90 小角度固件与 270° 舵机模型并不完全一致，因此最终加工前需统一机械基准并重新标定执行器映射。

2.3 姿态解算与串级控制

姿态估计以陀螺仪 X 轴角速度与加速度计 Y/Z 轴构成互补滤波，滤波时间常数取 $\tau = 0.5\,\mathrm{s}$。位置外环当前参数为 $K_p = 0.040$、$K_i = 0$、$K_d = 0.012$；位置和速度滤波时间常数分别为 0.050 s、0.080 s，期望角限幅为 ±3°，参考角变化率限幅为 12°/s。内环驱动舵机跟踪管道俯仰角，执行器指令限制在 $85° \sim 95°$，变化率不超过 30°/s。

3 硬件设计

3.1 硬件组成与接口

表 3　硬件模块与接口

模块	器件 / 接口	功能
主控	STM32H745ZI6（CM7）	实时控制、通信与保护
视觉 / 图传	CanMV K230 加摄像头	YOLO 检球、标尺映射、MJPEG 视频
循迹	八路红外阵列，I^2C4	获取黑线分布和横向偏差
姿态	LSM6DSV16X，I^2C2	管道俯仰角与角速度
驱动	TIM2 PWM、TIM1 / TIM8 编码器	差速底盘速度闭环
执行器	TIM4_CH4，50 Hz	控制管道俯仰
显示	不大于 2 英寸 OLED	计时、模式、位置与故障码

图1 所示为系统实物。底盘采用双轮差速结构；上层支架承载摄像头、滚球管道及其传动结构；主控、电机驱动、显示和连接线束布置于底盘内部。分层布局将视觉观测与底盘运动机构隔开，便于布线、标定和维护。

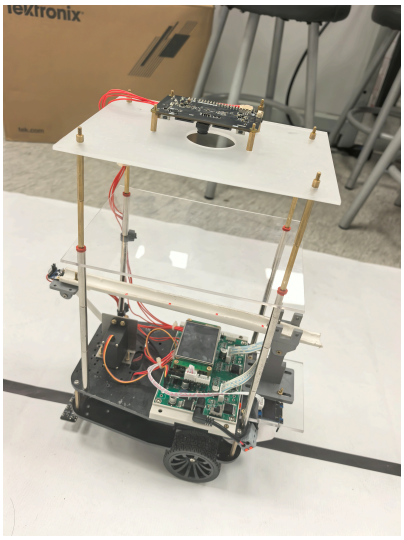


图 1　车载平衡滚球运动控制系统实物图

3.2 机械、电源与抗干扰

编码器以硬件正交方式计数，避免高速时丢脉冲。红外阵列安装在车体前部并统一位序，使 bit0 对应最左侧传感器。PPR 管左端由 H55 打印铰链支撑，转轴中心距安装面 55 mm，满足 $h \geq 50\,\mathrm{mm}$；管夹按外径 20 mm 设计，紧固件不得穿透管壁。IMU 刚性固定在管道上，并尽量靠近转轴和中心线，以减小结构振动对姿态测量的影响。

电机、执行器和数字系统采用分路供电并共地，电机驱动和执行器附近布置电解电容及陶瓷去耦电容。IMU 与摄像头线束远离电机线。上电后，主控先完成执行器回中、传感器检查和姿态零偏标定，再允许电机运行。TJC 串口屏仅用于实验室调试，正式比赛使用不大于 2 英寸的 OLED。

4 软件设计

4.1 软件总体流程

软件按“驱动层—估计层—控制层—任务层—安全层”组织：`Bsp` 层提供电机、编码器、UART、时间、舵机和 IMU 平台适配；`Control` 层实现红外巡线、轮速 PID、姿态融合和滚球级联控制；`Protocol` 层解析 TJC 与 K230 协议；`App` 层完成控制编排。

UART 中断只接收字节，协议解析、PID 和巡线计算均在主循环执行。

主循环周期为 20 ms（50 Hz），K230 以约 25 Hz 发送位置帧，IMU 约 60 Hz 输出。主循环依次采集 IMU、红外、编码器和 K230 数据，更新姿态、轮速、里程与钢球位置，随后执行滚球外环 / 内环、循迹外环、轮速内环和显示通信。

4.2 视觉通信与状态机

K230 视觉程序初始化 DISPLAY、CV 和 AI 三通道，使用 640×360 图像采集、320×180 或 320×320 输入推理，并叠加位置、质量和帧率信息。控制帧格式为：

```
B,<valid>,<position_d10_mm>,<quality>,<sequence>
```

主控仅在 `valid=1`、质量不低于阈值且序号更新时使用位置值；短时丢帧时保持执行器缓慢变化，超过 200 ms 则退出闭环并回中。

表 4　运行状态机

工作阶段	主要动作	退出 / 完成条件
上电自检	初始化红外、编码器、IMU、K230 UART、舵机和显示	通信和传感器状态正常
标定回中	完成 IMU 零偏、执行器回中和管道角采样	姿态稳定且执行器无越界
任务运行	按评分项目切换目标位置、车速和完成条件	达到终点、超时或故障触发
故障保护	电机 PWM 置零，摆杆受限速度回中	人工确认并重新满足稳定条件

4.3 安全保护与参数管理

系统设置紧急停止、视觉无效、IMU 无效、传感器离线、执行器标定失败、钢球越界、管道角越界和电机堵转等故障码。严重故障发生时，立即将电机 PWM 置零，并以受限速度将摆杆回中。所有可调参数集中保存，比赛版本应同步记录提交号和参数版本。

5 测试结果与分析

5.1 测试方案

测试按“部件—闭环—静态整机—动态整机—正式评分”逐级进行，记录软件提交号、机械版本、控制参数、电池电压、目标位置、实际位置、车速、管道角、执行器指令、视觉质量、完成时间和故障码。

表 5　分级测试方案

测试阶段	重点检查项	记录数据
部件测试	红外位序、编码器方向、IMU 零偏、舵机方向、K230 帧格式	原始传感器值、通信帧、故障码
静态闭环	钢球位置阶跃、回中误差、管道角跟踪	目标 / 实际位置、角度、执行器指令
动态整车	直线加减速、弯道减速、终点识别和滚球扰动	车速、里程、钢球误差、完成时间

5.2 测试结果

表 6　阶段性实测结果

项目	结果	判断
无线视频	能稳定运行并开启录屏功能	已实测
单圈循迹	可稳定运行，停车误差仍需量化	已实测
静态 $0 \rightarrow +5 \rightarrow -5\,\mathrm{cm}$	可较稳定运行，可通过串口屏调试	已实测
动态中心平衡	已实测但稳定度不足	未完全达标
故障保护	故障时电机停止，摆杆安全回中	已实测

5.3 结果分析与改进措施

表 7　滚球闭环仿真结果

工况	关键结果	判断
$0 \rightarrow +50 \rightarrow -50\,\mathrm{mm}$	$+50\,\mathrm{mm}$ 到达 1.014 s，$-50\,\mathrm{mm}$ 到达 2.380 s	满足 5 s 静态目标
静态保持	5 s 误差约 $-1.437\,\mathrm{mm}$，5–10 s 最大保持误差 $1.456\,\mathrm{mm}$	小于 $10\,\mathrm{mm}$
动态扰动	有前馈最大误差 $31.510\,\mathrm{mm}$，无前馈约 $125\,\mathrm{mm}$	动态项未达 $\pm 10\,\mathrm{mm}$

仿真说明动态增益切换和纵向加速度前馈方向正确，但在较强车辆加减速下，前馈后的最大误差仍约 31.51 mm，不能据此宣称完成动态评分项目。后续需降低底盘加速度和转向突变，实测车辆纵向加速度，提高姿态内环带宽，并在真实场地联合整定。

表 8　问题分析与后续改进

问题	影响	改进措施
机械基准不统一	连杆孔距和角度映射失效	实测坐标后重建模型
执行器模型不一致	行程不足或控制方向错误	确定最终执行器并重新标定
姿态内环频率偏低	动态扰动抑制不足	内环提升至约 200 Hz
动态误差超标	T4–T6 难以满足 $\pm 1\,\mathrm{cm}$	限制底盘加速度并加入实测前馈