

H 题 车载平衡滚球运动控制系统

摘 要

设计一辆双层四轮差速平衡滚球小车。下层以 LP-MSPM0G3507、六路红外阵列和 TB6612 实现加权线位误差、离散 PD、分段调速、丢线恢复、A 点识别与任务计时；OLED 计时显示屏安装在上层。MaixCAM2 检测钢球，上层主控采用球位外环和 QEI 位置内环，经 D36A 驱动 MS42C 调节纵向 PPR 摆杆。任务 3 固定 O 点并加入位置前馈和预测制动，任务 6 锁定启动球位；两层以双线脉宽协议同步六项任务。六项实物验收均通过，已记录一圈 16.8 秒、停车偏差小于 1 厘米。报告给出方案论证、模型、电路接口、程序流程、测试方法和结果分析。

关键词：红外循迹；四轮差速；机器视觉；串级控制；滚球摆杆

一、 总体方案与方案论证

赛题要求小车仅以红外光电模块获取赛道信息，以摄像头检测钢球；车辆须在 35 cm × 25 cm 尺寸内完成循迹、停车和滚球任务。设计的核心矛盾是：底盘需要较高速度和转向响应，而摆杆需要低冲击、连续球位反馈和足够制动裕量。因此采用“下层循迹、上层滚球”的双主控结构，使两个不同时间尺度的闭环独立运行，再由任务协议同步。

表 1 关键方案比较与选择

环节	对比方案	采用方案	选择依据
赛道检测	少量对管开关控制	六路红外阵列加权	阵列可构造横向误差并识别 A 横线，且满足题目传感限制
底盘控制	固定差速/开环转向	离散 PD 加分段速度	同时兼顾直线速度、半圆弯道和丢线恢复
速度规划	全赛道固定较高基速	直线、弯道和终点分段调速	弯道降低侧滑风险，终点降速为短刹留出停车裕量

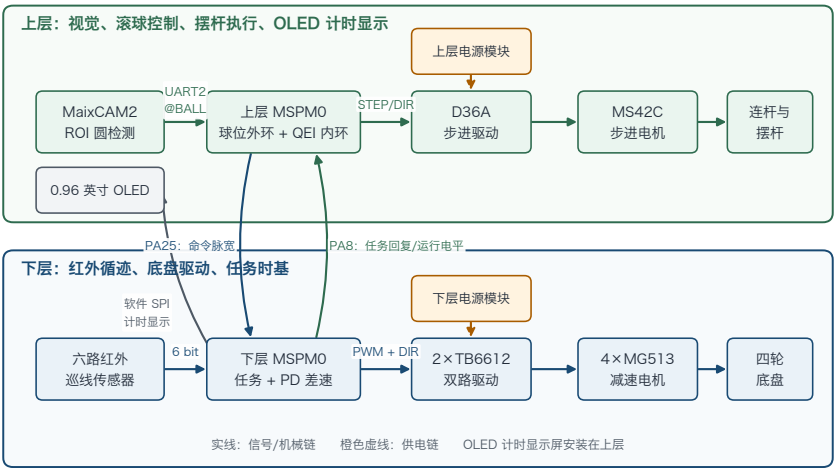


图 1 双层控制接口、执行链与供电关系

下层由六路巡线板、LP-MSPM0G3507、两块 TB6612 和四台 MG513 构成四轮差速链；上层由 MaixCAM2、另一块 LP-MSPM0G3507、D36A、MS42C、连杆和纵向水管摆杆构成滚球链。两层各用一组标称 12 V 电池供电，避免底盘大电流脉动直接进入视觉与摆杆支路。OLED 计时显示屏安装在上层，用于显示任务号、运行状态和总时间；任务计时值由下层程序生成，经跨层软件 SPI 信号刷新上层显示屏。

二、 小车循迹控制理论与实现

将同侧前、后轮视为一组，设左右轮组线速度为 v_L, v_R ，轮距为 B ，则

$$v = \frac{v_L + v_R}{2}, \quad \omega = \frac{v_R - v_L}{B}. \quad (1)$$

底盘没有轮速编码器，程序实际控制量为 PWM 占空比，式 (1) 用于说明差速转向方向，不把占空比直接等同于线速度。

六路探头黑线状态记为 $b_i[k] \in \{0, 1\}$ ，源码按 bit0 至 bit5 赋权 $\mathbf{w} = [-5, -3, -1, 1, 3, 5]$ 。有效通道数 $N[k]$ 与离散线位误差为

$$N[k] = \sum_{i=1}^6 b_i[k], \quad e[k] = \frac{\sum_{i=1}^6 w_i b_i[k]}{N[k]}, \quad N[k] > 0. \quad (2)$$

程序采用整数运算； $N = 0$ 由独立丢线状态处理，不解释为“位于中心”。差速校正为

$$\Delta u[k] = 5e[k] + 3(e[k] - e[k-1]), \quad u_L = \text{sat}(u_b + \Delta u), \quad u_R = \text{sat}(u_b - \Delta u). \quad (3)$$

差分项使用相邻控制帧之差； $K_P = 5, K_D = 3$ 为固件配置，其等效微分强度会随实际循环间隔变化。

表 2 底盘控制的主要程序参数

项目	配置	作用与边界
PWM 与限幅	20 kHz, 最大 55%	减小可闻噪声；无轮速闭环
任务 2 直线/弯道	40%/31%	终点阶段降至 25%/22%
任务 4-6 直线/弯道	25%/20%	叠加 2.2 s 软启动以减小车体扰动
弯道时间窗	6.5 s、19.3 s	提前 1.6 s 降速、0.9 s 保持、1.2 s 恢复
A 横线识别	至少 3 路有效, 1 帧确认	离开起点 5 帧且运行 300 ms 后使能；圈终点最早 10 s
丢线与通信	3 帧保持, 24 帧停机；按末次误差方向搜索；异常时关闭电机 通信失败 3 次进入 ERROR	

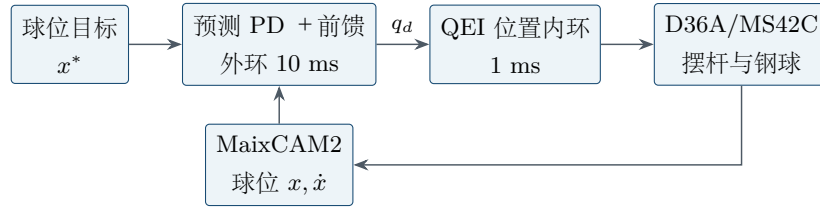
任务 2 再次识别 A 后执行约 120 ms 短刹并停机；任务 5、6 以“通过 A”时刻结束计时，再以 1.8 s 斜坡减速。任务 4 使用 6.6 s 开环时刻估计通过 B 并进入 1.5 s 停车斜坡，因而对电池电压、路面和负载变化敏感。

三、 摆杆系统建模与串级控制

设钢球沿水管纵向坐标为 x ，摆杆相对水平角为 θ ，钢球质量、半径和转动惯量分别为 m, r_b, J 。在纯滚动、无滑动、小角度且忽略摩擦的条件下，均匀实心球满足

$$\ddot{x} = \frac{g \sin \theta}{1 + J/(mr_b^2)} = \frac{5}{7}g \sin \theta \approx \frac{5}{7}g\theta, \quad \frac{X(s)}{\Theta(s)} = \frac{5g}{7s^2}. \quad (4)$$

式 (4) 的 $5/7$ 仅为理想参考；PPR 凹槽接触、摩擦和车体加速度以 $\ddot{x} = \kappa g\theta + d(t)$ 修正。对象含两个积分环节，故采用球位外环与 QEI 位置内环串级控制。



令 $e = x^* - x$ ，相机与滤波固定补偿为 80 ms，再按运动方向加入 50 或 140 ms 制动预瞄，得到 $e_p = e - \dot{x}T_p$ 。近中心 11 px（约 0.92 cm）范围内连续降低位置增益，区间外使用全增益。忽略整数舍入， $|e_p| \geq 11$ 时 $g(e_p) = e_p$ ；否则 $g(e_p) = e_p[0.45 + 0.55(|e_p|/11)^2]$ ，且 $g(0) = 0$ 。忽略定点取整时，外环可写为

$$q_d = \text{sat}_{[-220, 220]} \{5.60g(e_p) - 0.340\dot{x} + b + q_{ff}(x^*)\}, \quad (5)$$

$$q_{ff}(x^*) = \text{clip}[0.4(x^* - 103), 0, 48] \text{ QEI}, \quad |b| \leq 2 \text{ QEI}. \quad (6)$$

式 (6) 把 103、163、223 px 分别映射为 0、24、48 QEI，用于补偿机构在不同球位的静态偏置；系数是程序配置，不能替代独立标定曲线。

内环目标误差不超过 3 QEI 时停止脉冲，误差区间选择 400/750/1100 Hz，任务 3 制动可用 1500 Hz；回水平使用 250/500/700 Hz。目标命令限幅为 ± 220 QEI。物理偏移达到 ± 230 QEI 时以 250 Hz 向 ± 170 QEI 回收；连续 300 次名义 1 ms 内环检查中 QEI 未变化时，转为以不高于 250 Hz 回水平。该策略是软件回收与持续重试，不等同于机械硬限位；控制器直接工作在 QEI 坐标，理想角度模型只用于解释对象阶次。

四、机械结构、电路与接口设计

整车采用双层车架。下层布置四轮驱动、巡线与任务时基；上层布置纵向 PPR 水管摆杆、钢球、步进连杆、相机、控制板和 OLED 计时显示屏。相机覆盖水管全貌；水管沿车头-车尾方向布置，铰接端与驱动端分置两侧。

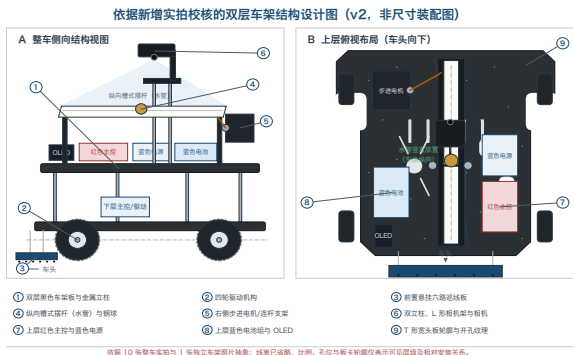


图 2 依据实拍校核的双层车架二维结构设计图（非尺寸装配图）

表 3 主要硬件与接口归属

模块	组成	连接与用途
下层感知与主控	六路红外、LP-MSPM0G3507	PB2/PB3 软件 I ² C；任务管理、PD 与计时
四轮驱动	2×TB6612、4×MG513	两块双路桥分别驱动四台减速电机，同侧前后轮同指令
上层视觉与主控	MaixCAM2、LP-MSPM0G3507	PB15/PB16 UART2，115200 bit/s；接收球位文本帧
摆杆执行	D36A、MS42C、连杆	PB8/PB9/PB12 对应 EN2/DIR2/ST2，QEI 与绝对 PWM 反馈
显示与通信	0.96 英寸 OLED、OLED 计时显示屏位于上层；双线同步任务 PA25/PA8	
供电	2×12 V 18650 电池组	上、下层分别经电源模块供电

TB6612 前桥控制：PWMA–PB12、AIN2–PB20、AIN1–PB13、STBY–PA13、BIN1–PB6、BIN2–PB7、PWMB–PA17；后桥依次为 PB1、PB15、PB8、PA12、PB17、PB19、PB4。

上层 OLED 计时显示屏的软件 SPI 信号为 PA31、PA28、PB16、PB18，四线从下层任务控制器跨层引至显示屏；层间 PA25 承载任务选择、执行、查询脉宽，PA8 在任务空闲且收到选择或查询后以脉冲数回复任务号，任务活动时保持高电平。现有资料未给出稳压输出、电池容量和峰值电流，故不计算电源裕量。电机与逻辑回流分开汇聚，并在驱动板和主控近端退耦，以抑制 MG513 换向和步进脉冲干扰。

五、 六任务程序流程与协同控制

任务未运行且层间命令与回复解码均空闲时，上层 S1 请求下层轮换任务 1-6；S2 在未运行时排队或执行当前任务，在运行时请求停止。任务 3-6 还须等待滚球控制进入 READY，任务 1、2 不受滚球准备状态限制。PA25 用脉宽编码 NEXT、EXECUTE、QUERY；下层 PA8 先给低电平保护间隔，再以 40 ms 高/低脉冲数回复任务号，运行期间保持高电平。执行前查询与脉冲回读用于降低任务号失配风险；回复超时 1.5 s 时不启动尚未确认的任务。

表 4 六项任务的上下层响应

任务	下层底盘	上层滚球
1	HOLD，底盘静止，显示任务状态	不启用摆杆闭环；外部图传链完成接收、录像与回放
2	快速巡线一圈，再见 A 后短刹停车	不启用滚球闭环
3	HOLD，等待上层完成后同步停止	固定 O 点，执行 $O \rightarrow +5\text{ cm} \rightarrow -5\text{ cm}$
4	软启动巡线，6.6 s 时进入停车斜坡	固定 O 点持续平衡
5	软启动巡线，再次通过 A 后减速	固定 O 点持续平衡
6	与任务 5 共用底盘流程	S2 前捕获任意位置并作为全程目标

最终烧录程序的任务 3 统一采用 12 px/cm：O、+5 cm、-5 cm 依次为 163、223、103 px。

目标与动作状态为

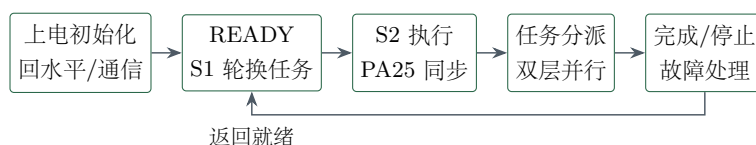


图 3 六任务主程序总体流程

端点制动用 $x_p = x + \dot{x} \times 0.35\text{ s}$ 预测剩余行程；负端制动后从当前实际球位无扰切换到末段目标。程序稳定判据为 $|x - x^*| \leq 9\text{ px}$ (0.75 cm)、 $|\dot{x}| \leq 15\text{ px/s}$ 连续 150 ms。进入负端保持状态后，若任务时钟已达到 4.25 s 也推进到完成；4.25 s 不是覆盖全部状态的全局截止，程序 DONE 不能代替端点误差测量。回水平 30 s 或 4096 步达到阈值后清零计数继续尝试；源码中进入锁存故障的显式路径位于开始回水平时绝对 PWM 未就绪或无效的分支。

六、 机器视觉与观测链

MaixCAM2 以 320×240 图像工作，在 (11, 115, 304, 16) 的水管内壁 ROI 中执行圆检测。最终程序目录不存在其约定的 `models/model_303965.mud`，故实际进入 CIRCLE 路径；阈值为 950，半径范围为 2-28 px。圆候选评分同时考虑圆强度、相对预测位置、水管中心线距离和半径连续性，用于降低螺钉、反光边缘等固定干扰被选中的概率。

程序标定端点为 13 px 与 313 px，中点为 163 px，对应 25 cm 有效长度，故观测标定为

$$x_{cm} = \frac{x_{px} - 163}{12}, \quad \Delta x_{\text{quant}} \leq \frac{0.5}{12} = 0.0417 \text{ cm}. \quad (7)$$

式 (7) 的第二项仅为半像素量化下限，不包含镜头畸变、圆心拟合、相机倾斜和水管反光。

检测到钢球时，新位置权重为 0.72，帧间速度新值权重为 0.35，并把用于速度更新的相邻测量差截断到 ± 18 px；这不是对圆心或输出位置本身的逐帧限幅。漏检后前 12 帧按速度乘 0.82 递减预测，随后保持预测末值并把速度置零。每帧经 UART2 输出

@BALL,F= 帧号,X= 球位,S=TRACK/PREDICT/HOLD,M=0/1

上层拒绝单帧跳变超过 18 px 的报文，再作三点中值和一阶滤波。速度估计按帧差乘以名义 60 帧/秒，而非按每帧真实时间戳归一化；帧率变化会直接引入速度比例误差。连续 1500 ms 未收到有效报文时，上层保留最后位置、清零速度并把链路标为失效；该状态不会自动联动底盘停车或摆杆失能，因此失联工况需在整机测试中单独检查。

表 5 观测链验证量与计算口径

项目	验证方法	输出量
静态标定	钢球置于 O、 ± 5 cm 刻度，保存画面与 UART 帧	圆心偏差、拟合残差、重复性
动态跟踪	匀速移动钢球并保留逐帧报文	漏检率、跳变率、端到端延迟
最大绝对误差	统一目标后对每个有效视频帧换算厘米	$E_{\max} = \max_k x_k - x^* /12$
图传录像	外部接收端完整记录一次任务并回放	连续性、文件时长、起止帧

相机本机预览与 UART 文本不能代替 H-R1 所需的外部图传、完整录像和回放；任务 1 须以接收端文件验证。

七、 测试方案与实物结果

测试采用最终烧录程序，并保持赛道、初始位置与电池状态一致。底盘时间由外部视频统一取帧：任务 2 从 S2 动作帧至车辆在 A 点完全停稳；任务 4 以小车规定测试位置通过 B 的帧为终点；任务 5、6 以该位置再次通过 A 的帧为终点。停车偏差沿赛道中心线测量。滚球误差按式（7）逐帧换算并报告全程最大绝对值，均值或单帧截图不能替代官方判据。

最终整机的六项实物验收均满足题目判据。表 6 按评分要求列出各项测试工况、判据和实物验收结果。

表 6 六项任务的实物验收汇总

要求	测试工况与数据口径	题目判据	实物验收结果
H-R1	接收端实时显示；每次完整录像并现场回放	画面稳定、覆盖完整、可存储回放	通过
H-R2	A 点启动，顺时针一圈，停稳后读时并测停车绝对偏差	$t \leq 20\text{ s}$, $ d_A \leq 2\text{ cm}$	16.8 s, < 1 cm
H-R3	底盘静止，O→ +5 cm→ -5 cm；逐帧取两端最大绝对误差	$t \leq 5\text{ s}$, 两端 $E_{\max} \leq 1\text{ cm}$	通过
H-R4	A 点启动并通过 B；全程逐帧计算相对 O 的误差	$t_{AB} \leq 8\text{ s}$, $E_{\max} \leq 1\text{ cm}$	通过
H-R5	A 点启动，顺时针一圈通过 A；全程统计 O 点误差	$t \leq 30\text{ s}$, $E_{\max} \leq 1\text{ cm}$	通过
H-R6	启动前选定本次指定球位，顺时针一圈通过 A；全程相对指定值统计	$t \leq 30\text{ s}$, $E_{\max} \leq 1\text{ cm}$	通过

赛道中心线由两段 1.5 m 直线和两段半径 0.5 m 半圆组成，其标称长度为

$$L = 2 \times 1.5 + 2\pi \times 0.5 = 3 + \pi = 6.142\text{ m}.$$

(8)

因此由实物计时与题面标称几何可得任务 2 参考平均速度 $6.142/16.8 = 0.366\text{ m/s}$ 。该速度为派生量而非轮速读数；时间余量为 3.2 s，任务 2 停车偏差余量大于 1 cm。

八、 误差分析与结论

8.1 主要误差来源

1. **循迹与终点**：六路离散采样、轮胎滑移和传感器高度改变 $e[k]$ ；A 横线单帧确认可能误触发，任务 4 的 6.6 s 开环终点还会随速度漂移。
2. **视觉与标定**：0.0417 cm 只是量化下限，圆心拟合、透视、安装角和反光会增加误差；80 ms 延迟在球速 v_b 下形成 $0.08v_b$ 的位置滞后。
3. **执行机构**：步进共振、连杆间隙、凹槽摩擦及未知 QEI-摆角比例使理想模型失配；0/24/48 QEI 三点前馈仍需用独立标定复核。
4. **供电与耦合**：电机换向、驱动压降和电池内阻改变底盘速度，车体加速度又扰动滚球；分层供电、软启动和弯道降速只能减小影响。

8.2 结论

系统实现六路加权循迹、离散 PD 四轮差速、A 点识别、MaixCAM2 圆检测、预测球位外环、QEI 内环和双线任务同步。最终任务 3 固定 163 px 为 O 点，以 103/223 px 为两端目标，加入位置前馈、双端预测制动、负端无扰释放和软件限位回收，统一了像素标定与任务目标。

最终整机六项实物验收均通过。量化记录中，任务 2 一圈停车时间为 16.8 s、停车偏差小于 1 cm，分别具有 3.2 s 和大于 1 cm 的判据余量；任务 4 的 A-B 时间与球位误差判据均通过实物验收。为保证结果可复核，测试视频、接收端录像、球位逐帧序列和异常记录应与作品一并归档。

参考资料

- [1] 2026 年全国大学生电子设计竞赛赛区赛 (TI 杯), H 题《车载平衡滚球运动控制系统》.
- [2] Texas Instruments, *MSPM0G3507 Mixed-Signal Microcontroller Data Sheet*.
- [3] Toshiba Electronic Devices & Storage, *TB6612FNG Dual DC Motor Driver Data Sheet*.
- [4] Sipeed, *MaixCAM2 Documentation and MaixPy API Reference*.