

一种基于多传感器的单车运动控制方法及系统

王琪霖¹, 闵哲²,

I. 摘要

基于动量轮的智能单车系统, 在复杂工况下的平衡与运动控制方面与自动控制原理息息相关。智能单车通过各类传感器实时监测车体的姿态、速度等信息, 这些信息如同反馈信号被传输至控制系统。控制系统依据自动控制原理中的算法, 对反馈信号进行分析处理, 进而精准地调整动量轮的转速与转向, 维持单车系统稳定。

本项目在传统控制策略基础上加以改进, 实现了多种地形自动循迹, 并能在极限转弯测试中最大压弯角度达到 45° 以上。本项目的自控建模部分开源在<https://github.com/qilin-world/Simulation-Experiment-of-Automatic-Control-Principles-in-the-School-of-Control-Shandong-University>, 项目视频发布在 https://www.bilibili.com/video/BV1vw411M7ie/?spm_id_from=337.search-card.all.click&vd_source=9f367c147cc129cfce5d9e3a2da1258c

II. 单车建模与部件介绍

如图 1所示, 其中, 单车基础组件包括车身 101、前车轮 102、后车轮 103 和动量轮 104; 传感器组件和控制组件通过与基础组件中的车身 101 紧固连接, 而动量轮组件 104 与车身 101

也是紧固连接的。其中, 传感器组件包括 IMU 六轴传感器 201、第一编码器 202 和第二编码器 203 和 GPS 定位系统; 控制组件包括微控制单元 301、无刷电机 302、有刷驱动电机 303 和舵机 304;

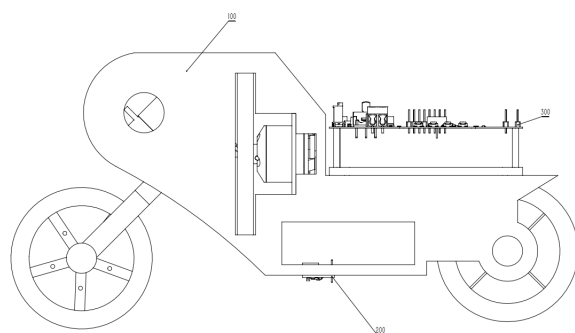


Fig. 1. 单车整体结构图

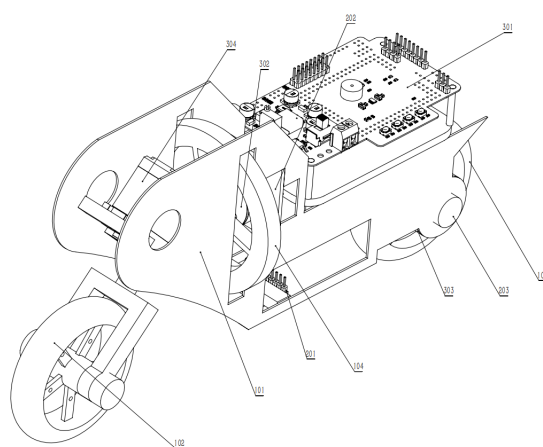


Fig. 2. 单车侧视图

¹王琪霖, 202222171170, 山东大学控制科学与工程学院 2022 级机器人工程 2 班本科生

²闵哲, 山东大学控制科学与工程学院教授, 国家级海外高层次青年人才, 本研究项目指导教师

参阅图 2, 动量轮 104 与无刷电机 302 良

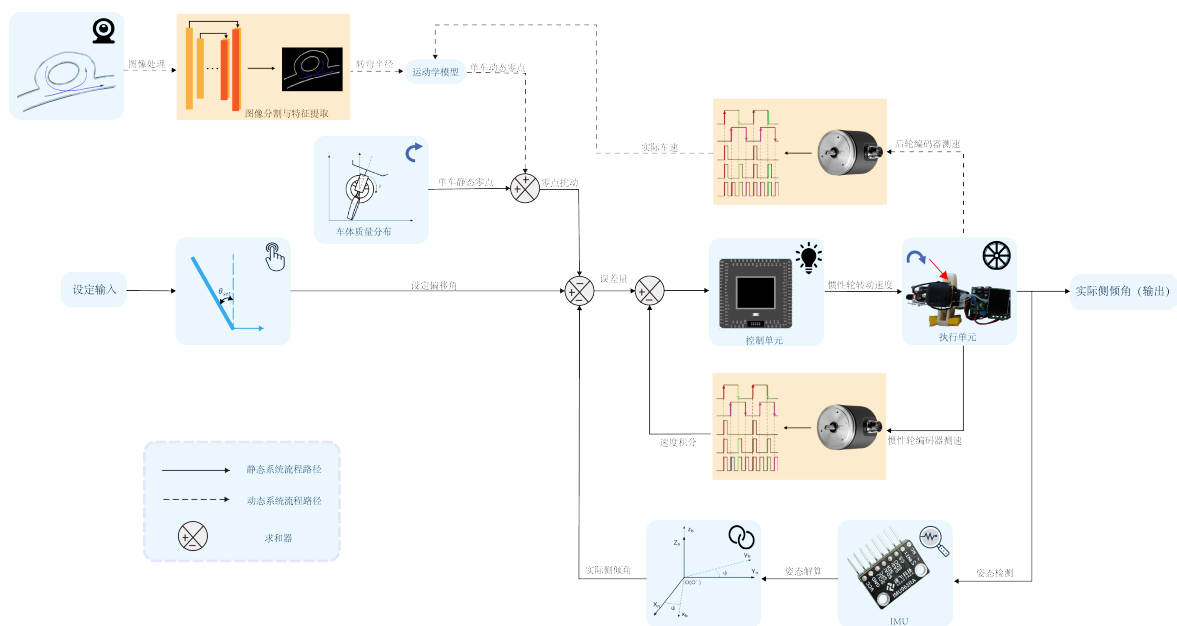


Fig. 3. 单车总控制流程图

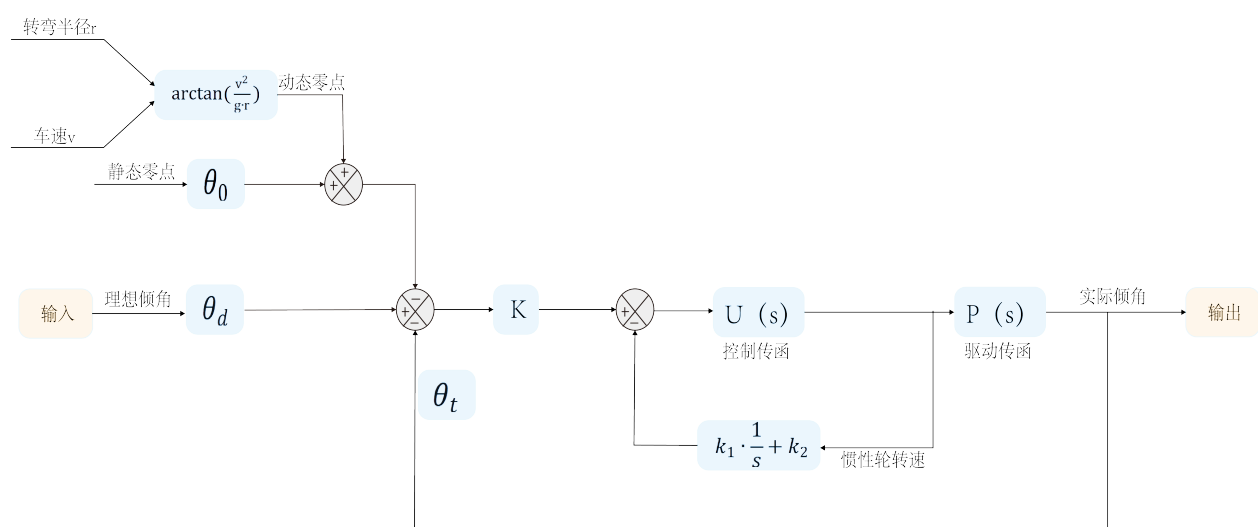


Fig. 4. 系统数学模型图

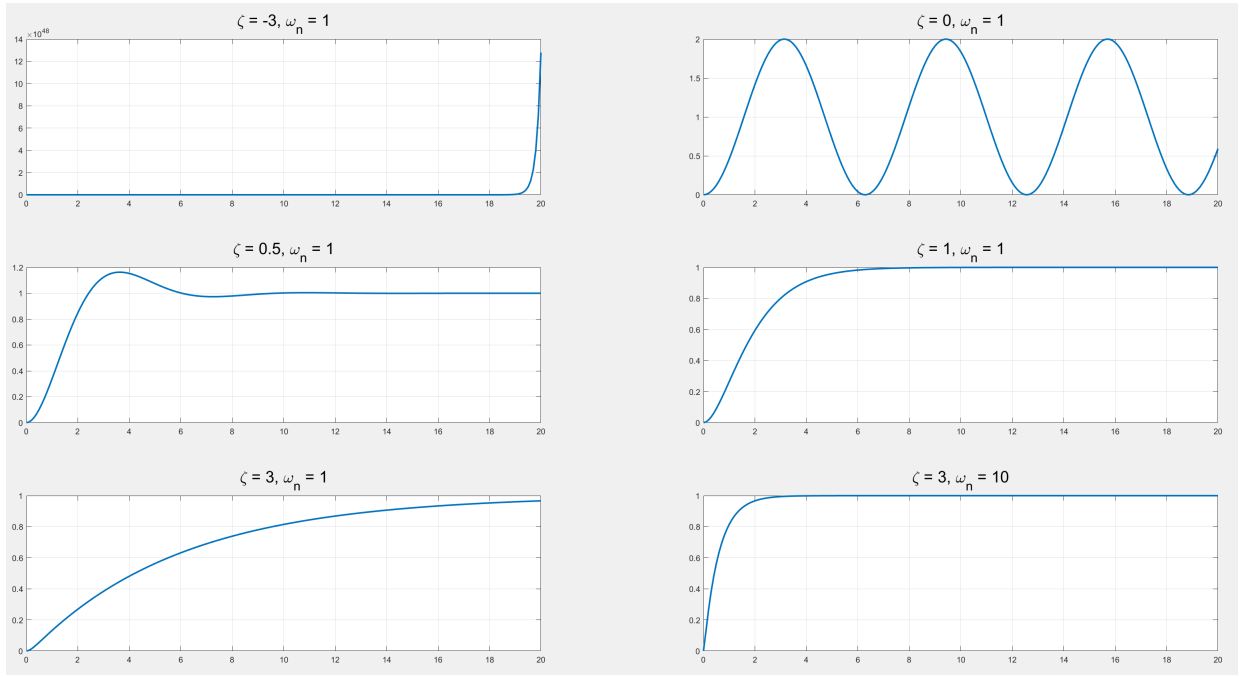


Fig. 5. 二阶振荡系统响应图

好啮合，轮轴线与车身方向一致，并位于车架中部，第一编码器 202 内置于无刷电机 302 中，用于测量动量轮的实际转速。后车轮 103 与有刷驱动电机 303 良好啮合，由该驱动电机提供动力以驱动单车运动，第二编码器 203 内置于有刷驱动电机 303 中，用于测量后轮的实际转速；舵机 304 安装在单车车体前部，用于控制单车转向。在后续描述中，为了确保明晰的坐标系定义，引入了车身坐标系的概念。在该坐标系中，车身的 x 轴方向被定义为单车的左右侧倾方向， y 轴方向与车身方向平行，指向车头和车尾，而 z 轴方向则垂直于车身平面。通过这样的坐标系定义，可以更准确地描述单车在运动过程中的各项物理参数和状态变量，为后续的力学建模提供清晰的框架。

IMU 六轴传感器 201 沿车身前后方向安装于车身中间的底部，并沿 y 轴方向对齐车身，同时 x 轴与车身的左右方向平行。此布局的设计旨在使传感器更加接近车辆的转轴，从而在数据采集过程中实现更为稳定和可靠的性能。通

过将传感器安装于车身中间位置，可最大程度地减小与车辆运动相关的误差，并有效提高传感器对加速度和角速度运动参数的准确度。

III. 实验原理

图 3 给出了系统总控制框图，对模型使用数学模型转换后可表示为图 4，下面将分 6 个小节对系统进行拆分介绍。

A. 驱动传函建模与分析

1) 系统传函建模：以二阶振荡系统对驱动传函进行建模，可得驱动开环传函为：

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s} \quad (1)$$

此时单位负反馈下驱动闭环传函为：

$$\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

2) 系统时域分析：图 5 展示了不同阻尼比 ξ 和固有频率 ω_n 对系统响应的影响。可以观察到以下规律：

- 当阻尼比 $\xi < 0$ 时，系统表现出不稳定的特性，响应整体发散。这表明系统在该阻尼比下无法达到稳定状态。
- 当阻尼比 $0 < \xi < 1$ 时，系统处于欠阻尼状态，表现出震荡行为。随着阻尼比 ξ 的增加，系统的震荡幅度减小，响应速度加快，系统逐渐趋于稳定。
- 当阻尼比 $\xi = 1$ 时，系统达到临界阻尼状态，此时系统不再震荡，响应速度最快且没有超调。
- 当阻尼比 $\xi > 1$ 时，系统表现为过阻尼状态，响应速度减慢，没有震荡，系统稳定但响应较为迟钝。
- 固有频率 ω_n 的增加会提高系统的响应速度，但对系统的稳定性影响不大，主要影响系统的动态性能。

3) 系统频域分析：图 6 给出了阻尼比 $\zeta = 0.5$ 和固有频率 $\omega_n = 1$ 下的二阶振荡环节的奈奎斯特图和伯德图。图中奈奎斯特图显示了系统在复频域中的频率响应轨迹，可以看到系统在低频段具有较大的增益，随着频率的增加，增益逐渐减小，且在某个频率点出现相位滞后。伯德图则清晰地展示了系统的幅频特性和相频特性，幅频特性曲线在低频段较为平坦，随着频率的增加逐渐下降，相频特性曲线则从 0 度开始，随着频率的增加逐渐向负方向增大，最终趋于 -180 度。通过这两个图可以直观地了解系统在不同频率下的动态特性。

4) 系统动态指标：在控制系统中，我们通常关注以下几个动态性能指标：

- **上升时间 (t_r)**: 系统响应从 10% 上升到 90% 稳态值所需的时间。
- **峰值时间 (t_p)**: 系统响应达到第一个峰值所需的时间。
- **调节时间 (t_s)**: 系统响应进入并保持在稳态值的某个百分比范围内（通常为 2% 或 5%，这里取 5%）所需的时间。

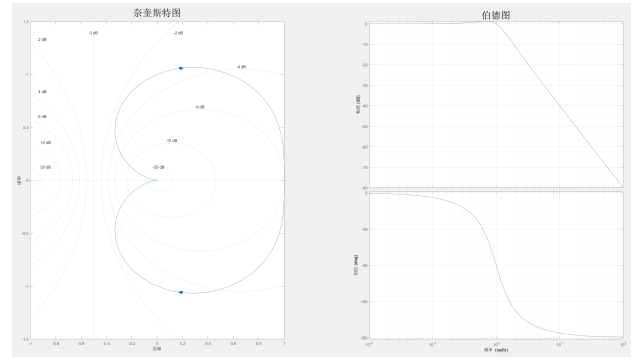


Fig. 6. 二阶振荡系统频域图

- **超调量 ($\sigma_p\%$)**: 系统响应超过稳态值的最大百分比。

$$t_r = \frac{\pi - \arccos \zeta}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} = \frac{\pi - \beta}{\omega_d} \quad (3)$$

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} = \frac{\pi}{\omega_d} \quad (4)$$

$$t_s = \frac{3}{\zeta \omega_n} \quad (5)$$

$$\sigma_p\% = e^{\frac{-\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\pi} \times 100\% \quad (6)$$

给定阻尼比 $\zeta = 0.5$ 和固有频率 $\omega_n = 1$ ，计算得到的四个指标结果为：调节时间 t_r 约为 2.366 秒，峰值时间 t_p 约为 3.549 秒，超调量 $\sigma_p\%$ 约为 16.3%，上升时间 t_s 为 6 秒，调整时间 t_a 为 8 秒。

B. 控制传函设计与优化

与上一小节不同，本节驱动模型使用“水桶漏水模型”进行建模，用来模拟带扰动的实际系统，驱动系统的 simulink 建模如图 7 所示

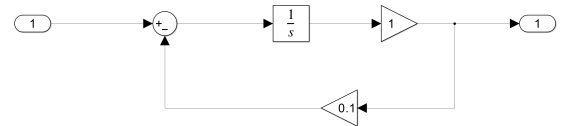


Fig. 7. 驱动系统 simulink 建模图

1) 纯比例控制: 如图 8所示, 首先对理想倾角与反馈得到的实际倾角进行差值计算, 该差值反映了系统输出与期望值之间的偏差。随后, 将该偏差值乘以比例系数 3, 得到经过比例调节后的输出。然而, 由于比例调节的局限性, 所得的实际倾角输出相比于理想值仍存在一定稳态误差。这表明在比例调节作用下, 系统无法完全消除稳态偏差, 使实际输出达到理想值, 仍有一定的误差残留, 影响了系统的控制精度。

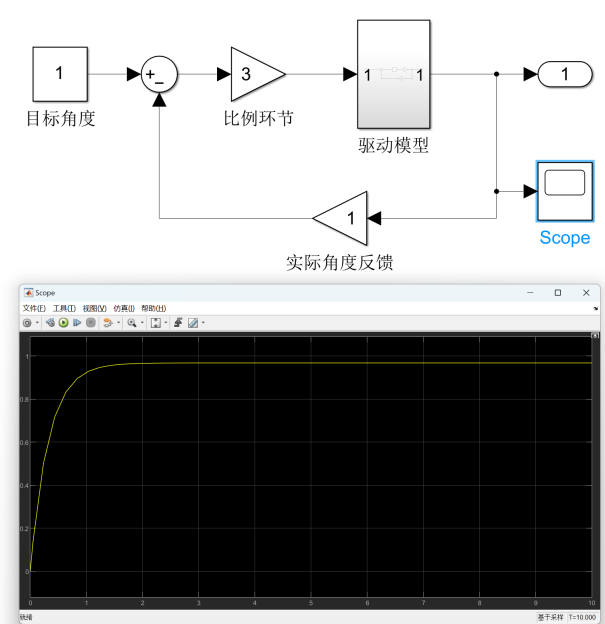


Fig. 8. 纯比例控制

2) 比例-积分控制: 为了有效减小系统的稳态误差, 通常有以下两种方法: 一种是增大系统的增益, 通过提高增益可以使系统对输入信号的响应更加敏感, 从而在一定程度上减小稳态误差。然而, 单纯增大增益可能会导致系统稳定性变差, 甚至出现振荡等不稳定现象。

另一种方法是增加积分项, 通过引入积分环节可以对系统误差进行累积, 使系统对稳态误差具有更强的调节能力, 从而有效提升控制系统的性能。积分项能够对误差进行持续的补偿, 直到误差为零, 这样可以从根本上消除稳态误差, 提高系统的控制精度。

综合考虑系统的稳定性和控制精度, 在本案例中选择加入积分项, 采用比例-积分 (PI) 控制方法。如图 9所示, PI 控制器由比例环节和积分环节组成, 比例环节对误差进行即时调节, 快速响应误差变化; 积分环节则对误差进行累积, 持续补偿稳态误差。通过合理设计 PI 控制器的参数, 可以在保证系统稳定性的前提下, 显著减小系统的稳态误差, 使实际输出更加接近期望值, 从而实现对系统的精确控制。

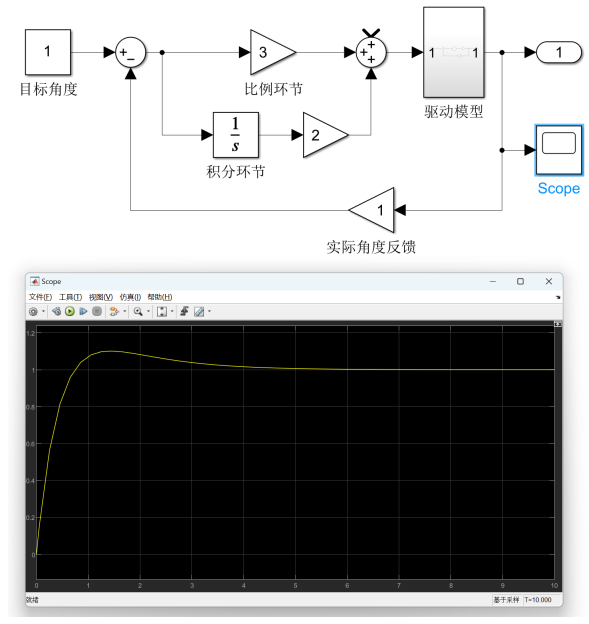


Fig. 9. 比例-积分控制

C. 基于偏移零点的扰动补偿

在已知具体扰动的前提下, 可以采用按扰动控制的方法来提高系统的抗干扰能力和控制精度。这种方法的核心思想是直接对扰动进行测量或估计, 并将其作为控制信号的一部分, 以抵消扰动对系统输出的影响。

如图 10所示, 假设系统受到一个已知的扰动信号 $d(t)$ 。首先, 通过适当的传感器或测量装置对扰动信号进行实时监测, 获取其准确的数值。然后, 根据扰动信号的特性, 设计一个扰动补偿器。该补偿器可以根据扰动的大小和变化趋势, 产生一个与扰动相反的补偿信号 $u_d(t)$ 。

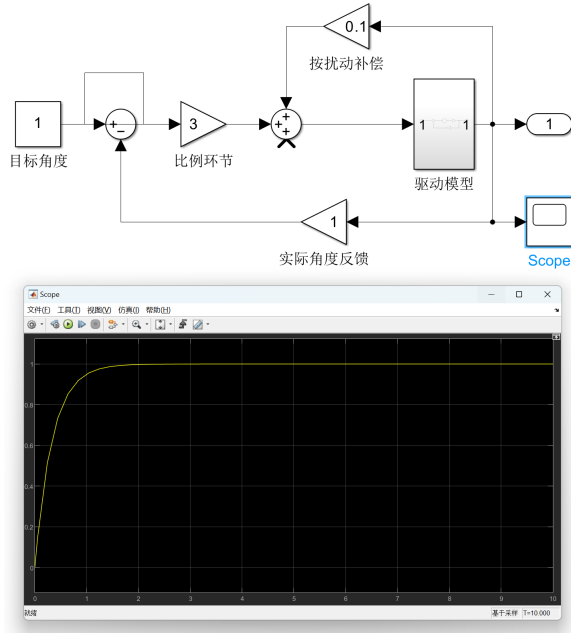


Fig. 10. 按扰动控制

补偿信号 $u_d(t)$ 与系统的主控制信号 $u(t)$ 相结合，形成总的控制输入 $u_{total}(t) = u(t) + u_d(t)$ 。这样，总的控制输入不仅包含了对期望输出的控制，还包含了对扰动的补偿，从而能够有效抵消扰动对系统输出的影响。

1) 静态零点扰动：静态零点扰动也即考虑单车自身重心偏移的情况。在这种情况下，单车的重心可能由于载重分布不均或者设计问题而偏离理想位置，从而影响单车的稳定性。

2) 动态零点扰动：在单车转弯过程中还需考虑动态零点扰动。动态零点扰动主要涉及到转弯时的倾斜角度和速度、转弯半径之间的关系，其公式如下：

$$mg \tan \theta = m \cdot \frac{v^2}{R} \quad (7)$$

其中：

- g 表示重力加速度，
- R 表示转弯半径，
- v 表示速度，
- m 表示质量，
- θ 表示倾斜角度。

通过上述公式，我们可得动态零点 θ ：

$$\theta = \arctan \left(\frac{v^2}{gR} \right) \quad (8)$$

这个公式描述了在转弯过程中，单车为了保持稳定，需要达到的倾斜角度。这个角度取决于转弯速度 v 和转弯半径 R 。

D. 单车速度闭环控制

在单车运动控制中，速度闭环控制是确保单车稳定运行的关键技术之一。通过实时监测后轮的实际转速，并与理想转速进行比较，利用二阶微分闭环控制方法对有刷驱动电机的输出占空比进行调整，从而实现速度的平滑过渡和精确控制。图 11给出了速度闭环控制流程图。

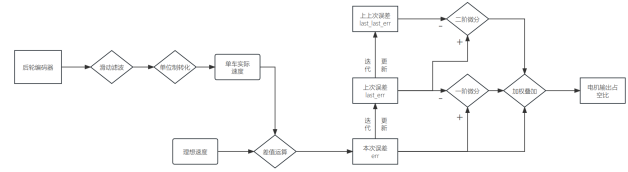


Fig. 11. 速度闭环控制流程图

具体实现步骤如下：

1. 获取后轮的实际转速 n_{actual} 和理想转速 n_{ideal} 。
2. 计算转速差值 $e(t) = n_{ideal} - n_{actual}$ 。
3. 在每次数据更新后，将前两次误差 $e(t-1)$ 和 $e(t-2)$ 同时更新。
4. 对误差的微分进行二次迭代，得到有刷驱动电机实际输出占空比 $u(t)$ ：

$$u(t) = k_p e(t) + k_d \frac{de(t)}{dt} + k_{d1} \frac{d^2 e(t)}{dt^2} \quad (9)$$

其中， k_p 、 k_d 和 k_{d1} 是控制器的调节参数，用于确定对当前误差、误差的一阶导数和误差的二阶导数的加权影响。

通过上述控制方法，可以有效应对单车在速度突变和离散变化中容易失去平衡的问题，

实现速度的平滑过渡，避免速度跃变导致单车失去平衡，为单车提供了更可靠的运行保障。

E. 三环并级 PID 控制

为了实现单车的动态平衡，本项目采用了一种多层次级并行 PID 控制方法，包括内环（角速度环）、中间环（角度环）和外环（速度环）。通过三个层级输出量的并行叠加计算无刷电机控制量，来实现对动量轮的精准控制。图 12 给出了多层次级并行 PID 控制系统图。

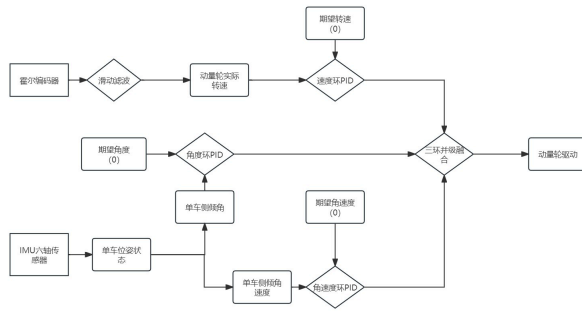


Fig. 12. 多层次级并行 PID 控制系统图

1) 内环（角速度环）：利用 IMU 测得的单车侧倾角速度信息，计算理想侧倾角速度与实际角速度之间的差值，通过位置式 PID 控制器进行运算，得到一个修正值，该修正值将作为角速度环的输出。这一环路的目标是确保动量轮在理想状态下，单车的 x 轴方向相对于地面保持相对静止状态。

$$\Delta\omega = \omega_{ideal} - \omega_{actual} \quad (10)$$

$$u_{gyro} = k_{p1}\Delta\omega + k_{i1}\int \Delta\omega dt + k_{d1}\frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (11)$$

2) 中间环（角度环）：利用 IMU 测得的单车实际侧倾角度（roll）与理想侧倾角进行比较，通过计算理想侧倾角度与实际侧倾角度之间的差值，同样利用位置式 PID 控制器进行运算，得到一个修正值，作为角度环的输出。这一环

路的目标是调整单车的侧倾角度，以确保单车保持在理想侧倾状态。

$$\Delta\theta = \theta_{ideal} - \theta_{actual} \quad (12)$$

$$u_{angle} = k_{p2}\Delta\theta + k_{i2}\int \Delta\theta dt + k_{d2}\frac{d\Delta\theta}{dt} \quad (13)$$

3) 外环（速度环）：通过编码器测得动量轮的实际转速，计算动量轮理想转速与实际转速之间的差值，利用位置式 PID 控制器进行运算，得到一个修正值，作为速度环的输出。这一环路的目标是限制动量轮的转速，以防止动量轮满转饱和，并避免潜在的系统不稳定性和运动过程中的过度震荡。

$$\Delta n = n_{ideal} - n_{actual} \quad (14)$$

$$u_{speed} = k_{p3}\Delta n + k_{i3}\int \Delta n dt + k_{d3}\frac{d\Delta n}{dt} \quad (15)$$

4) 综合控制指令：综合上述三个环路的输出结果，对角速度环、角度环、速度环的输出结果加权叠加，得到最终的控制指令，并将其应用于无刷电机。通过驱动动量轮的转动，可以实现对单车平衡的维持。

$$u_{total} = w_1 u_{gyro} + w_2 u_{angle} + w_3 u_{speed} \quad (16)$$

其中， w_1 、 w_2 和 w_3 是加权系数，用于调整各环路输出对最终控制指令的影响。

通过上述三环并级 PID 控制方法，可以有效降低单车在动量轮平衡过程中的抖动现象，并有效防范动量轮转速过快引起的饱和现象，确保单车在不同运动场景下表现出优越的性能和稳定性。

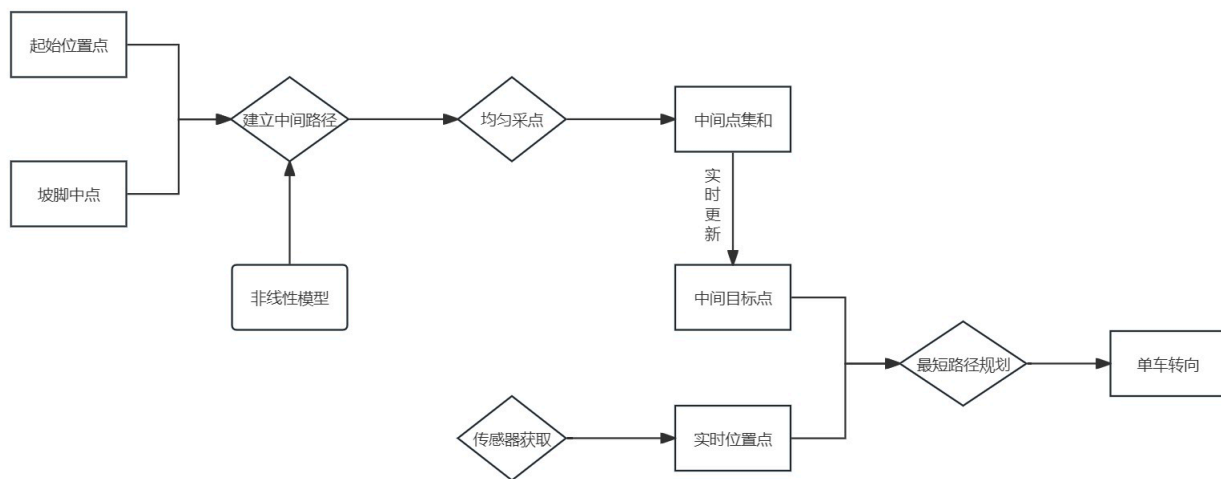


Fig. 13. 单车非线性路径规划流程图

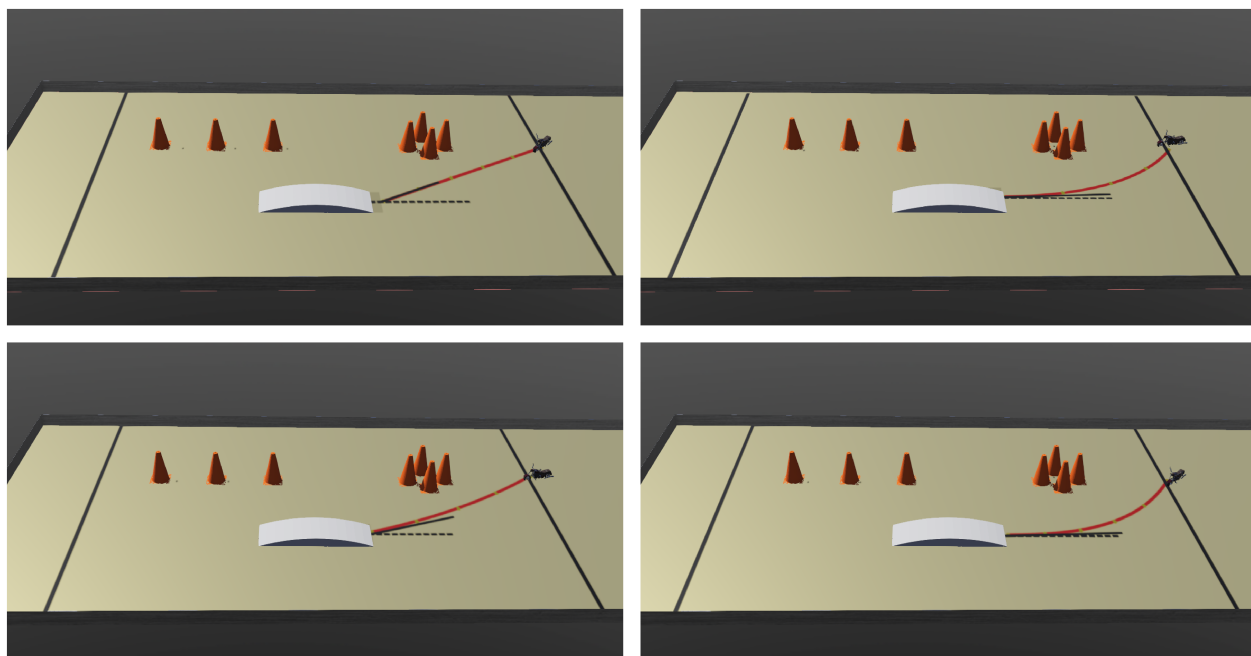


Fig. 14. 非线性路径规划仿真,左上: 无规划办法, 右上: 二次曲线规划,左下: 三次曲线规划, 右下: 指数曲线规划

F. 单车运动规划

单车运动规划是确保单车在复杂路况下稳定行驶的关键技术。本项目使用了一种基于多传感器的单车运动规划方法，通过预先设定的非线性路径规划，有效规避单车在坡道行驶过程中易发生倾覆的问题，提高单车在起伏路段

的通过能力。图 13给出了单车非线性路径规划流程图。

1) 路径规划方法： 获取当前位置和目标位置：通过 GPS 定位系统获取单车当前位置点 $P_{current}$ 和坡脚线的中心 P_{target} 。

建立中间路径： 基于单车当前位置点

$P_{current}$ 和坡脚线的中心 P_{target} 建立中间路径。中间路径的建立过程包括：基于非线性方法选取曲线函数，选取曲线时的标准为：减小曲线在坡道中轴线的切线与坡道中轴线的夹角。这可以通过选择具有特定参数的曲线函数来实现，例如二次函数、三次函数或指数函数。

均匀采样：基于建立的中间路径均匀采样，得到中间目标点集合 $\{P_{intermediate}\}$ 。

生成舵机打角信号：将中间目标点作为路径规划的节点，记为过渡点 $P_{transition}$ 。确定与单车当前的位置点最近的前方的过渡点，并在两坐标点之间采用最短路径寻迹法，在单车当前的位置点和最近的前方的过渡点之间建立一条直线，作为最短路径的线段模型，单车沿着该最短路径向过渡点前进。

2) 具体实施步骤：初始化路径规划：通过 GPS 获取单车当前位置坐标 $P_{current}$ 和坡脚线中心坐标 P_{target} 。

建立中间路径：选择合适的非线性曲线函数 $f(x)$ ，确保曲线在坡道中轴线的切线与坡道中轴线的夹角最小，同时保证整个运动的连贯性。

均匀采样：在中间路径上均匀采样，得到中间目标点集合 $\{P_{intermediate}\}$ 。采样间隔可以根据实际需求进行调整，例如每隔 1 米或 2 米采样一个点。

生成舵机打角信号：对于每个中间目标点 $P_{intermediate}$ ，确定与单车当前的位置点 $P_{current}$ 最近的前方的过渡点 $P_{transition}$ 。在 $P_{current}$ 和 $P_{transition}$ 之间采用最短路径寻迹法，生成舵机打角信号，使单车沿着该最短路径向过渡点前进。

3) 路径规划仿真：如图 14 所示，我们选用无规划办法（一次曲线）、二次曲线规划、三次曲线规划、指数曲线规划进行单车路径规划，其中指数规划办法误差角最小。

IV. 附录

A. 项目介绍

本项目系第 18 届全国大学生智能汽车竞赛参赛项目，参赛组别：单车越野组，队伍名称：山东大学 H.F.W 汪汪队，团队成员：王琪霖、胡昊、方士豪，指导教师：陈桂友、吴皓，获奖等级：国家级一等奖（全国第五名）。

B. 参考资料

1. 一种基于多传感器的单车运动控制方法及系统 王琪霖；柴锦；陈桂友；吴皓；李永健；方士豪 中国国家专利局

2. 自动控制原理第 3 版 王划一、杨西侠 国防工业出版社

C. 致谢

通过本次学习，我不仅学习到了 matlab、Adobe Illustrator、AURIX-studio 等软件的基础用法，同时学到了一点论文写作、图像绘制的方法和技巧，在大一参加完单车越野组竞赛后有幸通过本学期自动控制原理的学习更进一步了解自动系统的控制原理。

由衷感谢周风余、张国腾老师的教诲与课程指导，两位老师治学严谨，对待学生认真负责，实属吾辈之幸。

我还要感谢闵哲老师对我科研上的指导与帮助，感谢陈桂友教授、吴皓教授与柴锦老师对我智能车参赛、发明专利撰写的大力支持。

此外，我还要感谢我智能车参赛的两位队友：胡昊学长与方士豪学长对我的支持与帮助，感谢同专业好友陈俊友、机械学院李永健在路径规划仿真、单车建模上给予我的帮助。

未来，我将以更饱满的热情投入到科研科创工作中，为国家、学校奉献一份力量。