

实验三：智能无人车建模与分析

1. 实验目的

智能无人车建模是对整个车辆结构的抽象概括，能充分描述车辆的运行原理，模型建立的准确性直接影响到最终的实际控制效果，搭建车辆模型是为了更好地进行规划与控制。为了准确平稳地对车辆进行控制，需要考虑车辆的运动学和动力学约束，充分发挥车辆模型特性。

2. 实验内容

(1) 车辆运动学模型建立

运动学是在不考虑运动主体外部的物理性质、内部的作用机理、外界环境等因素影响的情况下，将其当作刚体模型，在几何意义上描述运动主体在二维平面上位置、速度等状态参数关于时间的数学关系。在车辆运动学模型的基础上，需要深入研究车辆以垂直方向为轴的转动过程、角速度以及角加速度的变化规律等影响车辆控制稳定性的更复杂的运动特性。

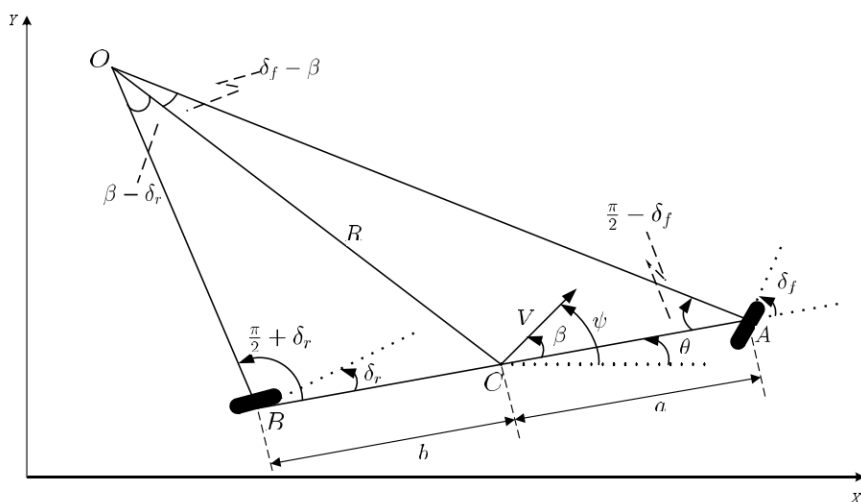


图 1 单车模型几何关系

在惯性坐标系 XY 下，可得车辆运动学模型：

$$\begin{cases} \dot{X} = V \cos \psi \\ \dot{Y} = V \sin \psi \\ \dot{\psi} = \frac{V}{a+b} \tan(\delta_f) \end{cases}$$

(2) 车辆动力学模型建立

车辆运动学模型只是在几何意义上描述了车辆的理想行驶情况而没有考虑影响运动的力，车辆在进行横向运动时，会受到侧向带来的风力、沿着曲线行驶时的离心力等作用力，在进行纵向运动时，车辆可能会受到上下坡的抑制力、驱动时的摩擦力等影响。车辆动力学主要研究车辆的运动与所受力的关系，由于车辆轮胎与地面直接接触，因此需要针对车辆轮胎及其相关部件的受力情况进行分析（如图 2 所示），主要从以下三个自由度上进行剖析：

- 沿着车辆中心的纵轴，其中包括油门驱动力与刹车阻力，以及与地面之间产生的滚动阻力等，车辆绕纵轴运动产生横滚角。
- 与车辆中心垂直方向上的横轴，其中包括入弯时的离心力、转向力以及可能受到的侧面风向阻力等，车辆绕横轴运动产生俯仰角。
- 与车辆平面垂直的竖轴，其中包括行驶时路面不平坦导致的上下振荡力等，车辆绕竖轴运动产生偏航角。

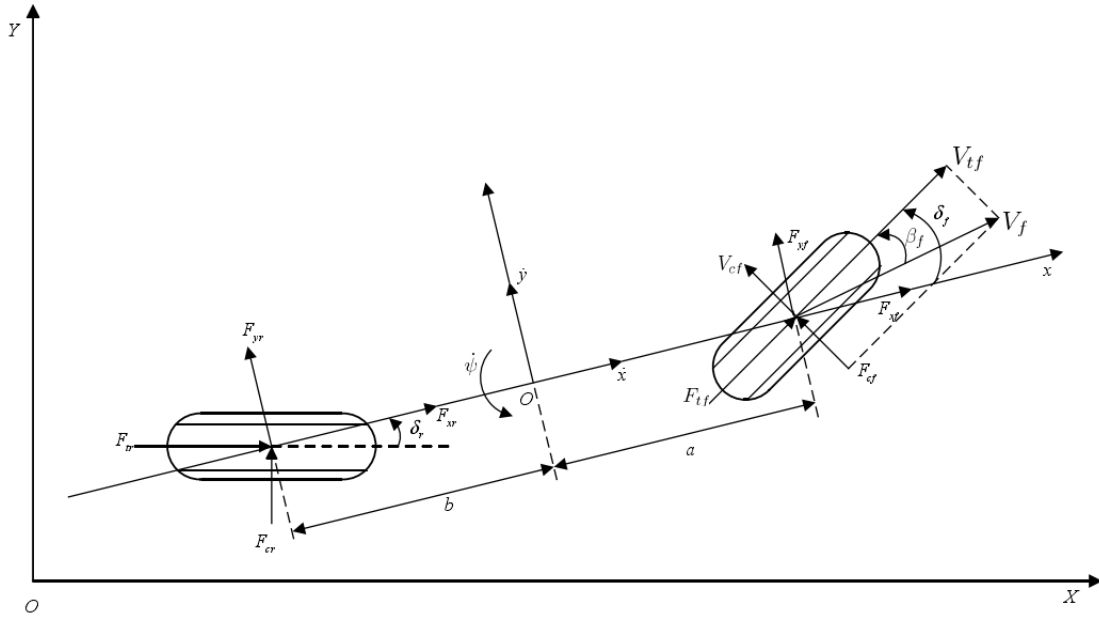


图 2 单车模型受力分析

车辆动力学模型：

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} y \\ \dot{y} \\ \psi \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{C_f + C_r}{mV_x} & 0 & -V_x - \frac{aC_f - bC_r}{mV_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{aC_f - bC_r}{I_z V_x} & 0 & -\frac{a^2 C_f + b^2 C_r}{I_z V_x} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ \dot{y} \\ \psi \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{C_f}{m} \\ 0 \\ \frac{aC_f}{I_z} \end{pmatrix} \delta_f$$

3. 实验设计要求:

- ① 利用 Matlab m 文件、Simulink slx 文件分别搭建智能无人车车辆运动学模型、动力学模型;
- ② 将状态空间模型转化为传递函数模型; 并对该模型进行时域响应分析, 采用瞬态响应(如阶跃响应、脉冲响应和斜坡响应)。从分析系统的性能指标出发, 给出了在 MATLAB 环境下获取系统时域响应和分析系统的动态性能和稳态性能的方法;
- ③ 对该模型进行频率响应分析(如 Nicoles 图、Bode 图等), 求解开环系统幅值裕度、相角裕度等性能指标, 检验线性稳定性的储备能力;
- ④ 作出“相位滞后 180° 处的频率-平均相位速率”关系图。

定义平均相位速率为:

$$APR = \frac{\phi_{fc} - \phi_{2fc}}{f_c} = \frac{-180 - \phi_{2fc}}{f_c}$$

其中, f_c 为相角为 $\phi_{fc} = 180^\circ$ 时的穿越频率, ϕ_{2fc} 为 2 倍穿越频率处的相角;

- ⑤ 制作 GUI 界面, 对实验结果进行展示。

附录 1

表 1. 车辆参数对照表

| 符号 | 定义 | 符号 | 定义 | 符号 | 定义 |
|------------|---------|------------|----------|----------|----------|
| V | 质心处的速度 | R | 转向半径 | I_z | 质心处的转动惯量 |
| a | 前轴距 | b | 后轴距 | F_{yf} | 前轮轮胎侧向力 |
| m | 车辆的总质量 | β | 侧偏角 | F_{yr} | 后轮轮胎侧向力 |
| ψ | 航向角 | a_y | 质心处横向加速度 | C_f | 前轮的侧偏刚度 |
| V_x | 质心处纵向速度 | V_y | 质心处横向速度 | C_r | 后轮的侧偏刚度 |
| δ_f | 前轮转角 | δ_r | 后轮转角 | | |