Apollo 中的控制算法

目录

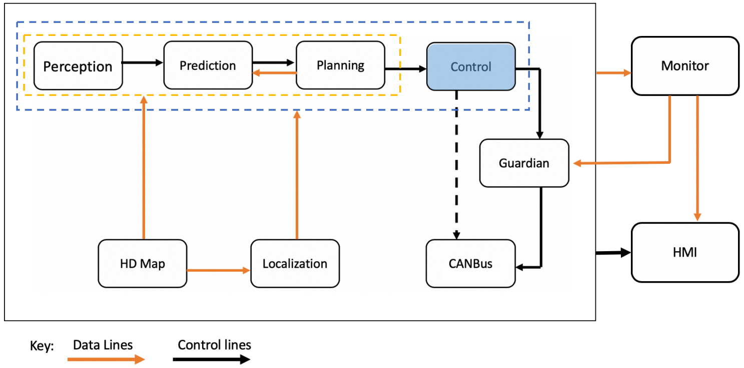
综述

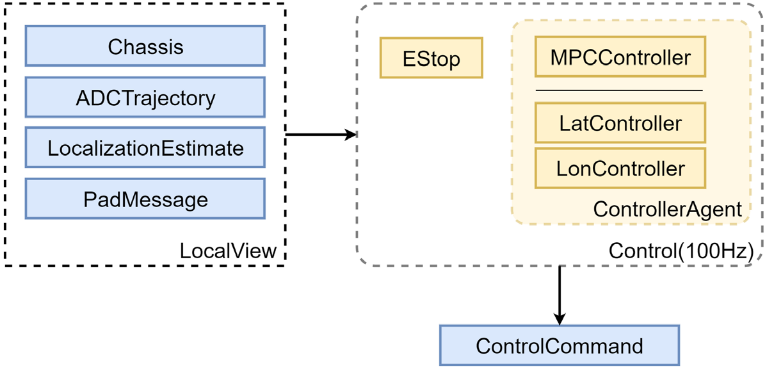
系统框图

输入
- Chassis(车辆状态)
- LocalizationEstimate(定位模块输出的位置)
- ADCTrajectory(规划模块输出的目标轨迹)

输出
- ControlCommand(方向盘，油门，刹车)

要求
- Accuracy
- Feasible
- Smoothness



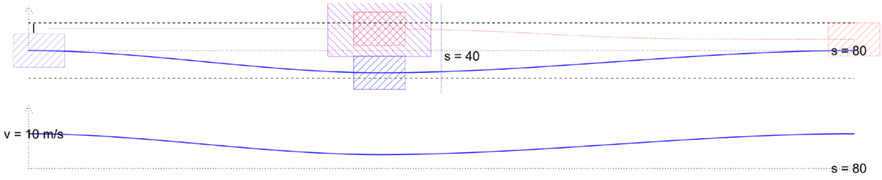


综述

横纵向控制

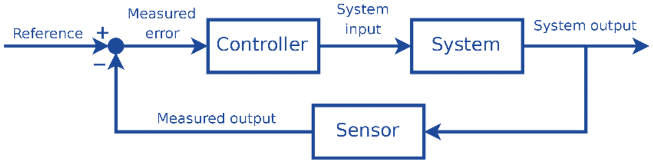
考虑如下场景：

- 油门固定，只控制方向盘 → **横向控制**
- 只控制油门和刹车 → **纵向控制**

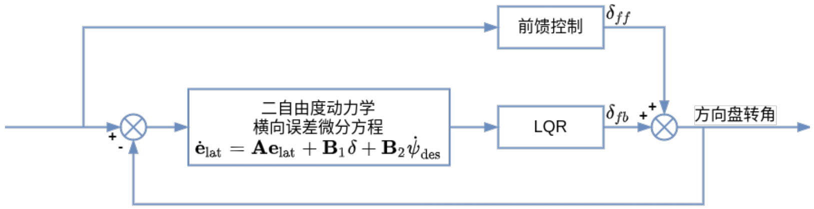


控制系统

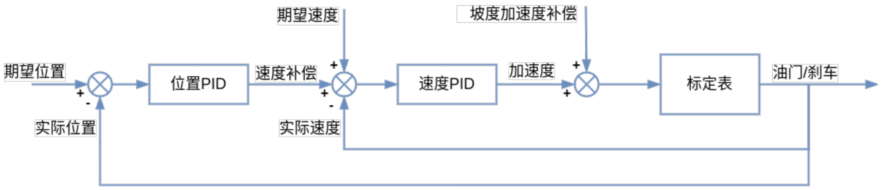
1. 计算横向/纵向误差
2. 基于模型的控制：构建误差微分方程，计算控制量
3. 基于无模型的控制：计算控制量



横纵向控制流程图



横向控制

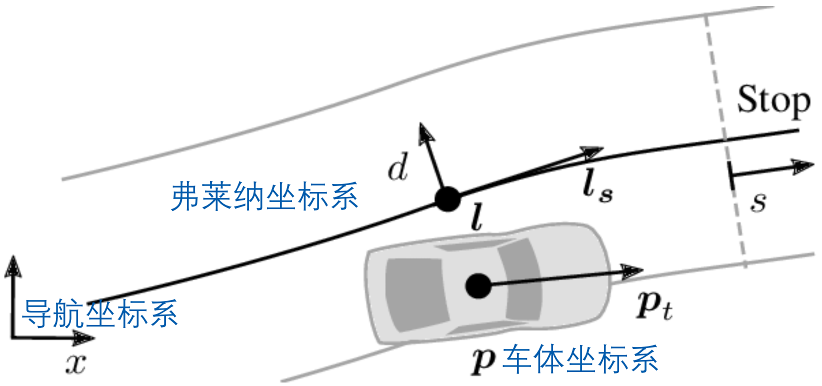


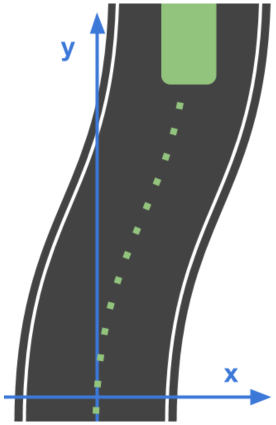
纵向控制

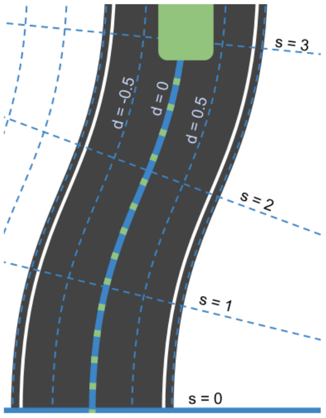
车辆模型

坐标系

导航坐标系： 东北天坐标系，x 轴指向东边
车体坐标系： 原点固连在车体上，车体纵轴线为 x 轴
弗莱纳坐标系：以参考轨迹建立的坐标系，可以将车辆在某一时刻的位置投影到弗莱纳坐标系上，并分解为横向和纵向运动，简化规划控制的工作







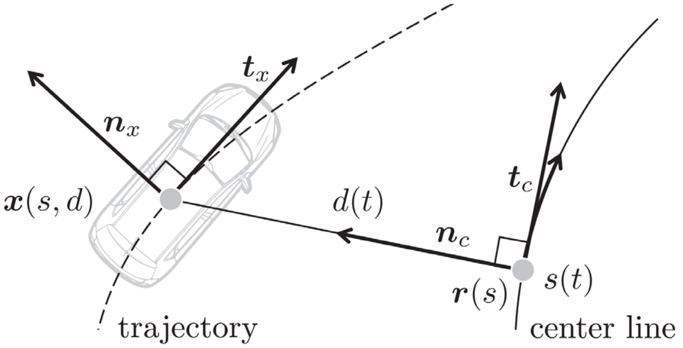
车辆模型

弗莱纳坐标系

曲线弧长

$$\mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} = [x(t), y(t)]^T$$

$$s(t) = \int_0^t \left\| \frac{d\mathbf{r}(t)}{dt} \right\| dt$$



由弧长参数定义的曲线

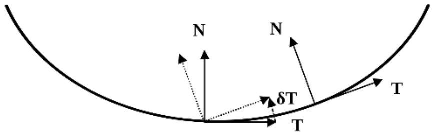
$\mathbf{r}(s)$

$\mathbf{T}$： 单位切向量 $$\mathbf{T} = \frac{d\mathbf{r}/dt}{\|d\mathbf{r}/dt\|} = \frac{d\mathbf{r}/dt}{ds/dt} = \frac{d\mathbf{r}}{ds}$$

$\mathbf{N}$： 单位法向量 $$\mathbf{N} = \frac{d\mathbf{T}/ds}{\|d\mathbf{T}/ds\|}$$

在弗莱纳座标系中，有

$$\frac{d\mathbf{T}}{ds} = \kappa\mathbf{N}, \quad \frac{d\mathbf{N}}{ds} = -\kappa\mathbf{T}$$



2.3: Curvature and Normal Vectors of a Curve - Mathematics LibreTexts

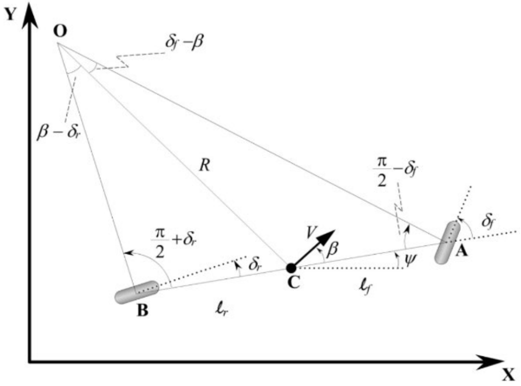
车辆模型

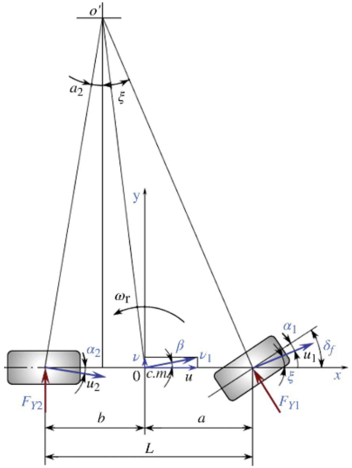
车辆模型

系统建模是系统控制的前提和基础。自动驾驶场景下，车辆大多按照规划轨迹行驶，控制模块的作用就是控制车辆尽可能精准的按照规划轨迹行驶。这就要求规划轨迹尽可能贴近实际情况，也就是说，轨迹规划过程中应尽可能考虑车辆运动学及动力学约束，使得运动跟踪控制的性能更好。除了真实反映车辆特性外，建立的模型也应该尽可能的简单易用。

车辆模型，即描述车辆运动状态的模型，一般可分为两类：

- 运动学模型
- 动力学模型



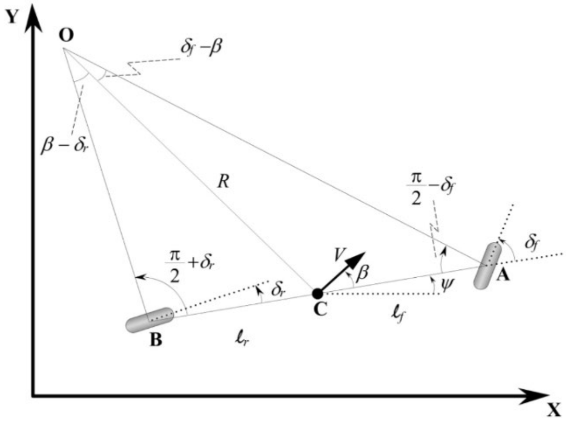


车辆模型

运动学模型

在低速情况下可以采用自行车模型，其建立基于如下假设：

1. 假设车辆的运动是一个二维平面上的运动。
2. 假设车辆左右侧轮胎在任意时刻都拥有相同的转向角度和转速
3. 假设车辆行驶速度变化缓慢，忽略前后轴载荷的转移。
4. 假设车身和悬架系统都是刚性系统。
5. 假设车辆的运动和转向是由前轮驱动的。



以后轴中心为基准的运动学模型

$$\dot{x} = v\cos(\theta)$$

$$\dot{y} = v\sin(\theta)$$

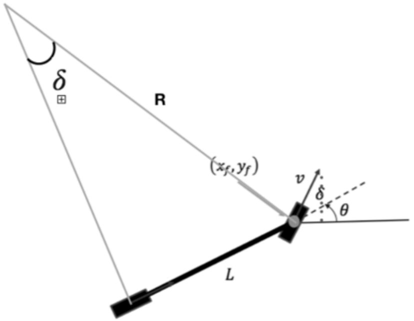
$$\dot{\theta} = \frac{v\tan\delta}{L}$$

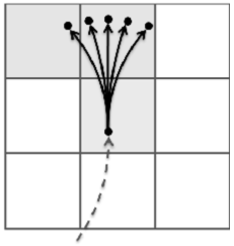
$$\beta = 0$$

其中 $\tan\delta = L/R$

当前轮转角固定时，路径为圆弧

适用于泊车的路径规划



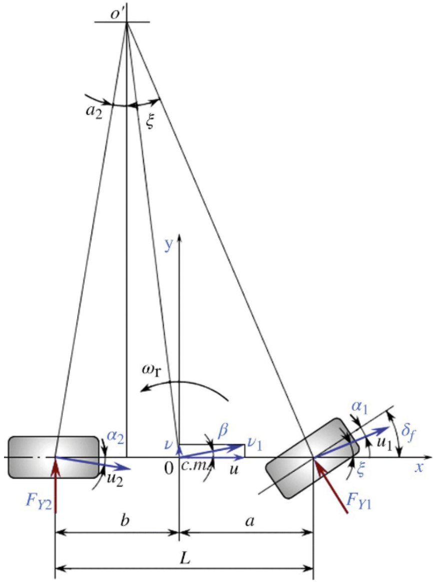


车辆模型

动力学模型

车辆高速行驶时，使用简单的自行车模型通常无法满足横向控制的精确性和稳定性，这时就需要用到车辆的动力学模型。

汽车实际的动力学特性非常复杂。在横向控制中，通常采用简单的二自由度横向动力学模型。假设车身的纵向速度保持不变，其横向动力学模型的两个自由度为：**横向运动** (沿y轴) 和**横摆运动** (绕z轴)。



其建立基于如下假设：

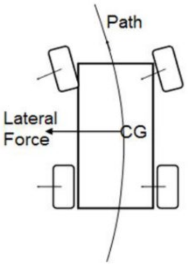
1. 略转向系统的影响，以前轮转角为输入。
2. 忽略悬架作用，认为车辆只做平行于地面的平面运动。
3. 汽车前进的速度视为恒值。
4. 侧向加速度限定在 0.4g 以下，确保轮胎侧偏特性处于线性范围内。
5. 驱动力不大，不考虑地面切向力对轮胎侧偏特性的影响。忽略横纵向空气动力学。

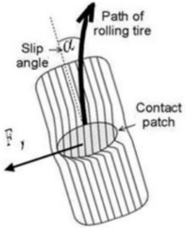
车辆模型

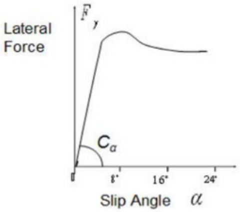
动力学模型 —— 轮胎侧偏特性

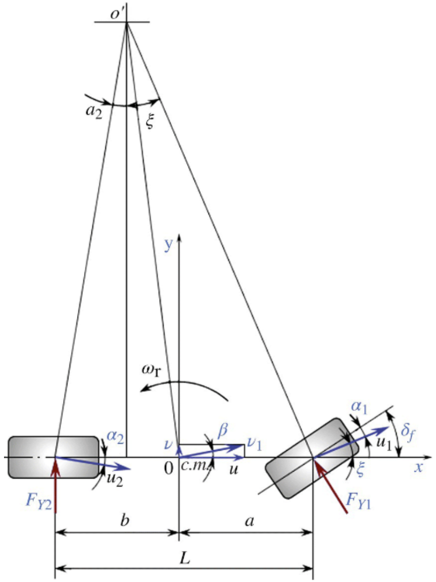
汽车在行驶过程中，由于路面的倾斜、侧向风或曲线行驶时的离心力等的作用，车轮中心沿 y 轴方向将作用有侧向力，相应地在地面上产生地面侧向反作用力，也称为侧偏力。

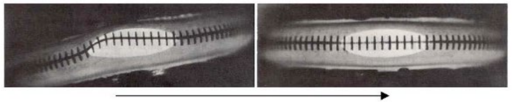
侧向力（Side Force）：一种虚拟力，它使旋转的物体远离它的旋转中心
侧偏力（Cornering Force, Lateral Force）：是地面作用于轮胎的力
侧偏角（Slip Angle）：轮胎轴线方向和轮胎行进方向之间的夹角











侧偏力和侧偏角的关系为：

$$F = C\alpha$$

其中 C 为侧偏刚度（Cornering Stiffness）。侧偏刚度取决于许多因素——轮胎尺寸和类型、层数、轮胎宽度和胎面等。对于给定的轮胎，负载和胎压是影响侧偏刚度的主要因素。

车辆模型

动力学模型

二自由度模型是建立在车体坐标系下的（注意该坐标系是非惯性系），运用牛顿第二定律和刚体的定轴转动定律：

合外力=质量*加速度

$$\sum F_Y = m a_y$$

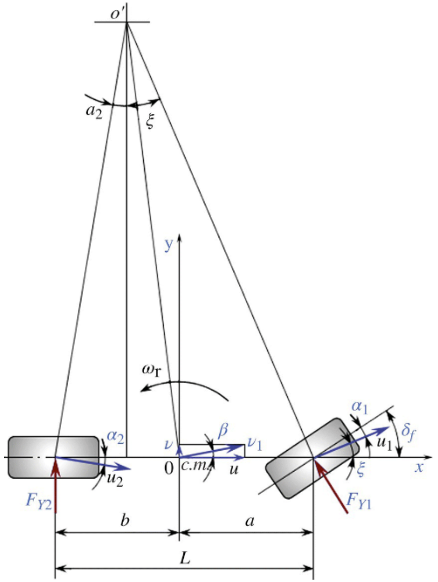
车辆沿车身 y 轴横向运动产生的加速度

$$a_y = \ddot{y} + v_x \dot{\psi}$$

车身横摆运动产生的向心加速度

$$\sum M = I \ddot{\psi}$$

合外力矩=转动惯量*角加速度



ψ	横摆角（车体纵轴线与 X 轴的夹角）	Vehicle orientation
β	质心侧偏角（质心速度与车体纵轴线夹角）	Vehicle slip angle
θ	航向角（横摆角+质心侧偏角）	Vehicle course angle
δ	前轮转角（相对于车体纵轴线）	Front wheel steering angle
α_f	前轮侧偏角（轮胎轴线和行进方向的夹角）	Front wheel slip angle
α_r	后轮侧偏角（轮胎轴线和行进方向的夹角）	Rear wheel slip angle

车辆模型

动力学模型

二自由度模型是建立在车体坐标系下的（注意该坐标系是非惯性系），运用牛顿第二定律和刚体的定轴转动定律：

合外力=质量*加速度

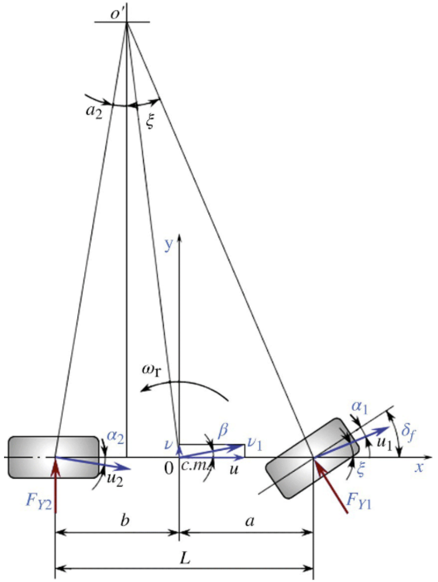
$$\sum F_Y = ma_y \qquad a_y = \ddot{y} + v_x\dot{\psi}$$

车辆沿车身 y 轴横向运动产生的加速度

车身横摆运动产生的向心加速度

$$\sum M = I\ddot{\psi}$$

合外力矩=转动惯量*角加速度



$$F_{Y_f}\cos\delta + F_{Y_r} = m\ddot{y} + v_x\dot{\psi}$$

$$aF_{Y_f}\cos\delta - bF_{Y_r} = I\ddot{\psi}$$

$$\delta \approx 0$$

$$\alpha_r = -\frac{v_y - \dot{\psi}b}{v_x}$$

$$\alpha_f = -\frac{v_y + \dot{\psi}a}{v_x} + \delta$$

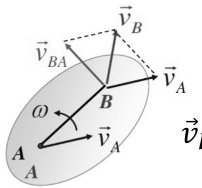
$$\Leftarrow$$

$$\tan\alpha_r = -(v_y - \dot{\psi}b)/v_x$$

$$\tan\xi = (v_y + \dot{\psi}a)/v_x$$

$$\alpha_f = \delta - \xi$$

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \ddot{y} \\ \dot{\psi} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2C_{\alpha_f}+2C_{\alpha_r}}{mv_x} & 0 & -\frac{2C_{\alpha_f}a-2C_{\alpha_r}b}{mv_x} - v_x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{2C_{\alpha_f}a-2C_{\alpha_r}b}{Iv_x} & 0 & -\frac{2C_{\alpha_f}a^2+2C_{\alpha_r}b^2}{Iv_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2C_{\alpha_f}}{m} \\ 0 \\ \frac{2C_{\alpha_f}a}{I} \end{bmatrix} \delta$$



速度合成定理

$$\vec{v}_b = \vec{v}_a + \omega \cdot AB$$

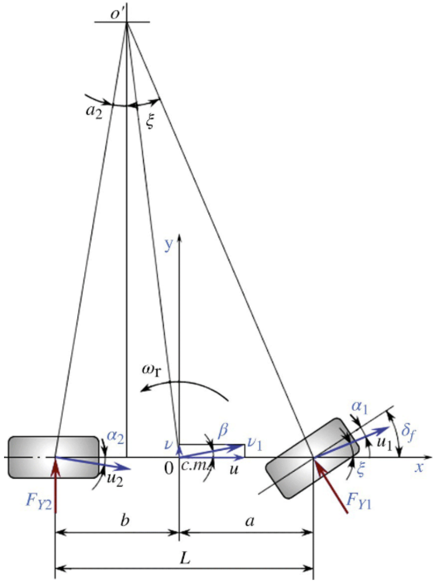
车辆模型

动力学模型

$$
\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \ddot{y} \\ \dot{\psi} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2C_{\alpha_f}+2C_{\alpha_r}}{mv_x} & 0 & -\frac{2C_{\alpha_f}a-2C_{\alpha_r}b}{mv_x}-v_x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{2C_{\alpha_f}a-2C_{\alpha_r}b}{Iv_x} & 0 & -\frac{2C_{\alpha_f}a^2+2C_{\alpha_r}b^2}{Iv_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2C_{\alpha_f}}{m} \\ 0 \\ \frac{2C_{\alpha_f}a}{I} \end{bmatrix} \delta
$$

$$
\dot{\mathbf{X}}_{\text{lat}} = \mathbf{A}_{\text{lat}}\mathbf{X}_{\text{lat}} + \mathbf{B}_{\text{lat}}\delta
$$

- 通过控制输入量 δ（前轮转角），来控制车辆的横向运动和横摆运动。
- 若纵向速度保持恒定，则系统动力学矩阵 $\mathbf{A}_{\text{lat}}$ 和 $\mathbf{B}_{\text{lat}}$ 不变。

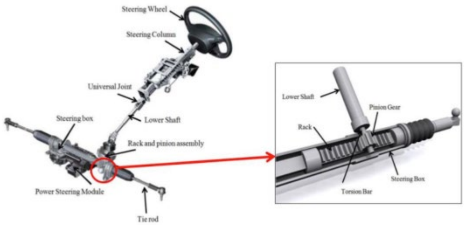


横向控制

横向控制简介

横向控制主要通过调节方向盘转角来实现对航向的控制。根据横向控制使用车辆模型的不同，可以将其分为两种类型。

- 无模型的横向控制方法：PID
- 基于模型的横向控制方法：
  - 基于车辆运动学的方法：Pure Pursuit， Rear wheel feedback control
  - 基于车辆动力学的方法：LQR， MPC



横向控制

方向盘→前轮转向→侧偏力→横向位移，横摆角

二自由度动力学模型

$$\dot{\mathbf{X}}_{\mathrm{lat}} = \mathbf{A}_{\mathrm{lat}}\mathbf{X}_{\mathrm{lat}} + \mathbf{B}_{\mathrm{lat}}\delta$$

横向控制的目的是为了减小跟踪偏差，需要的状态方程是能够分析在给定的前轮转角下车辆跟踪误差的响应。

假定期望状态为 $x_{\mathrm{lat\_des}}$， 则误差为 $e_{\mathrm{lat}} = x_{\mathrm{lat}} - x_{\mathrm{lat\_des}}$

$$\dot{\mathbf{e}}_{\mathrm{lat}} = \mathbf{A}\mathbf{e}_{\mathrm{lat}} + \mathbf{B}\delta \quad ?$$

LQR 问题

$$\min J = \int \left(\mathbf{e}^T\mathbf{Q}\mathbf{e} + \mathbf{u}^T\mathbf{R}\mathbf{u}\right) dt$$

$$s.t.\ \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{B}\mathbf{u}$$

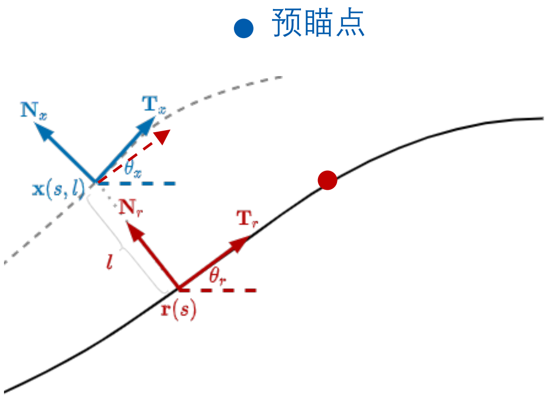
横向控制

横向误差微分方程

引入误差状态量

e_y： 横向误差

e_ψ： 横摆角误差



考虑车辆以恒定的纵向车速 v_x 行驶在半径为 R 的道路上，则期望的横摆角速度为：

$$\dot{\psi}_{\text{des}} = \frac{v_x}{R}$$

期望的横向加速度为：

$$\frac{v_x^2}{R} = v_x \dot{\psi}_{\text{des}}$$

则

$$\ddot{e}_y = (\ddot{y} + v_x \dot{\psi}) - \frac{v_x^2}{R} = \ddot{y} + v_x(\dot{\psi} - \dot{\psi}_{\text{des}})$$

$$\dot{e}_y = \dot{y} + v_x(\psi - \psi_{\text{des}})$$

$$e_\psi = \psi - \psi_{\text{des}}$$

$$\dot{e}_\psi = \dot{\psi} - \dot{\psi}_{\text{des}}$$

$$\ddot{e}_\psi = \ddot{\psi}$$

横向误差微分方程

引入误差状态量

e_y： 横向误差

e_ψ： 横摆角误差

带入二自由度动力学模型中：

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_y \\ \ddot{e}_y \\ \dot{e}_\psi \\ \ddot{e}_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2C_{\alpha_f}+2C_{\alpha_r}}{mv_x} & \frac{2C_{\alpha_f}+2C_{\alpha_r}}{m} & \frac{-2C_{\alpha_f}a+2C_{\alpha_r}b}{mv_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{2C_{\alpha_f}a-2C_{\alpha_r}b}{Iv_x} & \frac{2C_{\alpha_f}a-2C_{\alpha_r}b}{I} & -\frac{2C_{\alpha_f}a^2+2C_{\alpha_r}b^2}{Iv_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_y \\ \dot{e}_y \\ e_\psi \\ \dot{e}_\psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2C_{\alpha_f}}{m} \\ 0 \\ \frac{2C_{\alpha_f}a}{I} \end{bmatrix} \delta$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{2C_{\alpha_f}a-2C_{\alpha_r}b}{mv_x} - v_x \\ 0 \\ -\frac{2C_{\alpha_f}a^2+2C_{\alpha_r}b^2}{Iv_x} \end{bmatrix} \dot{\psi}_{\text{des}}$$

$$\dot{\mathbf{e}}_{\text{lat}} = \mathbf{A}\mathbf{e}_{\text{lat}} + \mathbf{B}_1\delta + \mathbf{B}_2\dot{\psi}_{\text{des}}$$

横向控制

反馈控制 LQR

$$\dot{\mathbf{e}}_{\text{lat}} = \mathbf{A}\mathbf{e}_{\text{lat}} + \mathbf{B}_1\delta + \mathbf{B}_2\dot{\psi}_{\text{des}}$$

首先考虑 $\dot{\mathbf{e}}_{\text{lat}} = \mathbf{A}\mathbf{e}_{\text{lat}} + \mathbf{B}_1\delta$

离散化：$\mathbf{e}_{k+1} = \mathbf{A}_d\mathbf{e}_k + \mathbf{B}_d\delta_k$

$$\mathbf{A}_d = \text{Exp}(\mathbf{A}\Delta t) \approx (\mathbf{I} - \frac{\mathbf{A}\Delta t}{2})^{-1}(\mathbf{I} + \frac{\mathbf{A}\Delta t}{2})$$

$$\mathbf{B}_d = \mathbf{B}\Delta t$$

无限时域，离散时间LQR

$$J = \sum_{k=0}^{\infty}(\mathbf{x}_k^T\mathbf{Q}\mathbf{x}_k + \mathbf{u}_k^T\mathbf{R}\mathbf{u}_k)$$

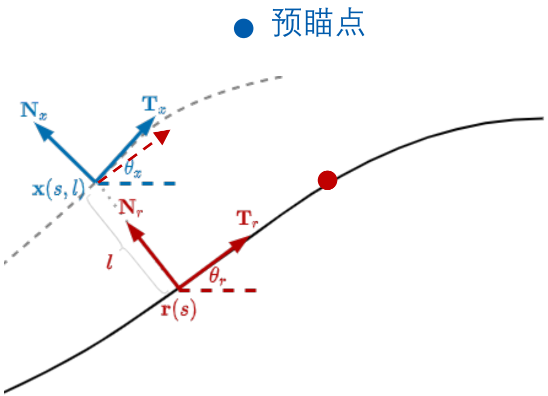
$$\boxed{\mathbf{u}_k = -\mathbf{K}\mathbf{x}_k}$$

$$\mathbf{K} = \left(\mathbf{R} + \mathbf{B}^T\mathbf{P}\mathbf{B}\right)^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}\mathbf{A}$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q} + \mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A} - \mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{B}\left(\mathbf{R} + \mathbf{B}^T\mathbf{P}\mathbf{B}\right)^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}\mathbf{A}$$

反馈控制：$\delta_{fb} = -\mathbf{K}\mathbf{e}_{\text{lat}}$

误差计算



$$e_y = \overrightarrow{rx} \cdot \mathbf{N}_r = \cos(\theta_r)dy - \sin(\theta_r)dx$$

$$\dot{e}_y = v_x\sin(\theta_x - \theta_r)$$

$$e_\psi = \theta_x - \theta_r$$

$$\dot{e}_\psi = \dot{\theta}_x - \dot{\theta}_r = \dot{\theta}_x - v_r\kappa_r$$

横向控制

前馈控制

$\dot{\mathbf{e}}_{\text{lat}} = \mathbf{A}\mathbf{e}_{\text{lat}} + \mathbf{B}_1\delta + \mathbf{B}_2\dot{\psi}_{\text{des}}$

若只采用LQR: $\dot{\mathbf{e}}_{\text{lat}} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}_1\mathbf{K})\mathbf{e}_{\text{lat}} + \mathbf{B}_2\dot{\psi}_{\text{des}}$

由于道路曲率的存在，$\dot{\mathbf{e}}_{\text{lat}}$ 和 $\mathbf{e}_{\text{lat}}$ 不能同时为零

系统存在稳态误差，需要加入前馈控制 $\delta = \delta_{fb} + \delta_{ff}$

$$\begin{aligned}
\dot{\mathbf{e}}_{\text{lat}} &= \mathbf{A}\mathbf{e}_{\text{lat}} + \mathbf{B}_1\delta + \mathbf{B}_2\dot{\psi}_{\text{des}} \\
&= \mathbf{A}\mathbf{e}_{\text{lat}} + \mathbf{B}_1\delta_{fb} + \mathbf{B}_1\delta_{ff} + \mathbf{B}_2\dot{\psi}_{\text{des}} \\
&= (\mathbf{A} - \mathbf{B}_1\mathbf{K})\mathbf{e}_{\text{lat}} + (\mathbf{B}_1\delta_{ff} + \mathbf{B}_2\dot{\psi}_{\text{des}})
\end{aligned}$$

加入前馈控制后，系统的稳态误差为:

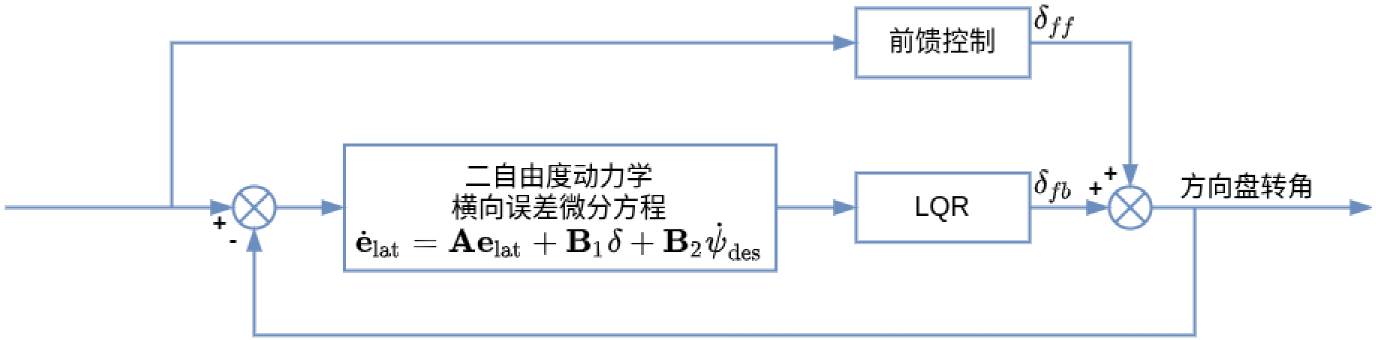
$$\mathbf{e}_{ss} = -(\mathbf{A} - \mathbf{B}_1\mathbf{K})^{-1}(\mathbf{B}_1\delta_{ff} + \mathbf{B}_2\frac{v_x}{R})$$

$$e_{ss\_1} = \frac{\delta_{ff}}{k_1} - \frac{1}{k_1}\frac{mv_x^2}{R(a+b)}\left[\frac{b}{2C_{\alpha_f}} - \frac{a}{2C_{\alpha_r}} + \frac{a}{2C_{\alpha_r}}k_3\right] - \frac{1}{k_1 R}\left[a + b - bk_3\right]$$

$$\begin{aligned}
\delta_{ff} &= \frac{mv_x^2}{RL}\left[\frac{b}{2C_{\alpha_f}} - \frac{a}{2C_{\alpha_r}} + \frac{a}{2C_{\alpha_r}}k_3\right] + \frac{L}{R} - \frac{b}{R}k_3 \\
&= L\kappa + \left[\frac{mb}{2C_{\alpha_f}L} - \frac{ma}{2C_{\alpha_r}L}\right]v_x^2\kappa - k_3\left[\frac{b}{R} - \frac{a}{2C_{\alpha_r}}\frac{mv_x^2\kappa}{L}\right]
\end{aligned}$$

横向控制

横向控制框图



1. 计算横向误差微分方程中的 $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}_1$
2. LQR 模块，求得离散化后的 $\mathbf{A}_d$，$\mathbf{B}_d$，计算 **K**
3. 计算横向误差 $\mathbf{e}_{\text{lat}}$，以及反馈控制量
4. 计算前馈控制量
5. 计算方向盘转角

纵向控制

纵向控制简介

纵向控制主要为速度控制，通过控制刹车、油门等实现对车速的控制，对于自动挡车辆来说，控制对象其实就是刹车和油门。

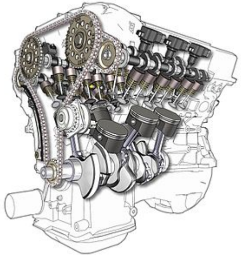
纵向控制

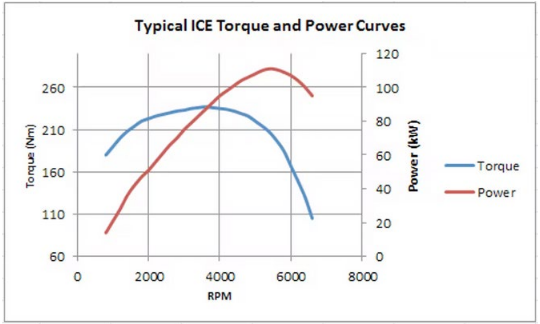
油门/刹车→功率→力→加速度
→速度→位置

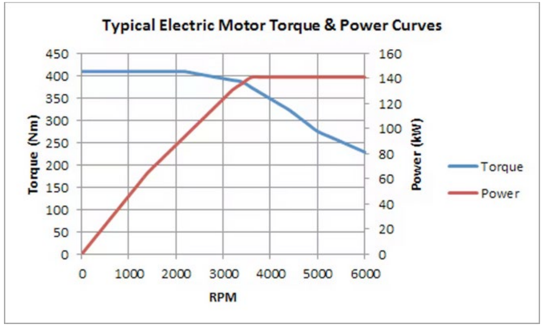
控制机构

内燃机：将燃料的化学能转化动能。一般的实现方式为，燃料与空气混合燃烧，产生热能，气体受热膨胀，透过机械装置转化为机械能对外做功。

电机：是一种将电能转化成机械能的机器，并可再使用机械能产生动能，用来驱动其他装置的电气设备。







纵向控制

纵向动力学

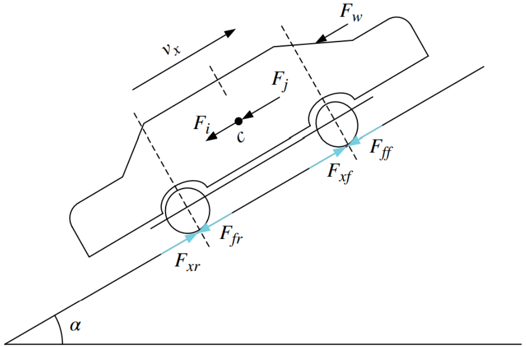
驱动力： 汽车发动机产生的转矩经传动系统传至驱动轮，驱动轮便产生一个作用于地面的圆周力，地面则对驱动轮产生一个反作用力 F_t

滚动阻力： 当车轮在路面上滚动时产生的力 $F_f = fF_z$

空气阻力： 汽车相对于空气运动时，空气作用力在行驶方向上的分力称为空气阻力 F_w

坡度阻力： 当汽车上坡行驶时，重力沿坡道的分力表现为汽车坡度阻力 $F_i = mg\sin\alpha$

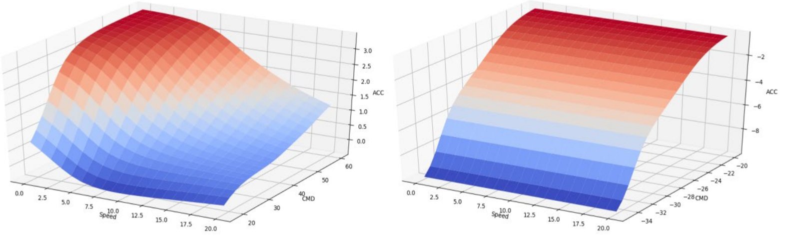
加速阻力： 汽车加速行驶时，需要克服其质量加速运动时的惯性力就是加速阻力



$$ma_x = F_t - F_f - F_w - F_i$$

标定表

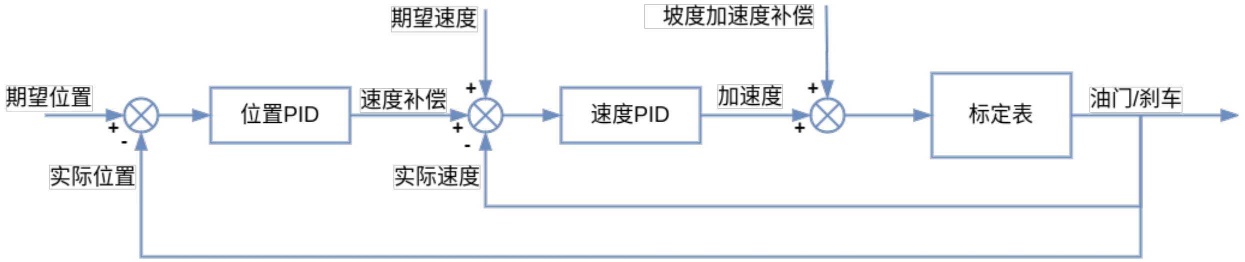
通过采集车辆底盘油门踏板量、刹车踏板量、车辆速度、加速度，生成 速度-加速度-油门/刹车标定表。



(a) Throttle (b) Brake

纵向控制

纵向控制框图

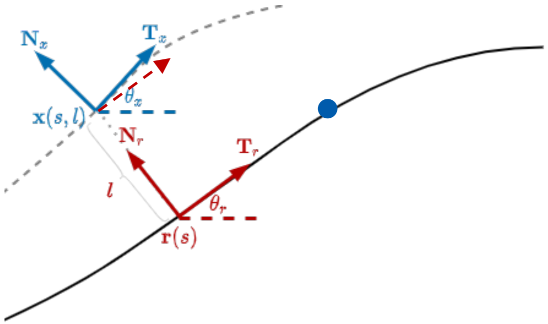


1. 计算位置误差和速度误差
2. 位置 PID 计算速度补偿量
3. 速度 PID 计算闭环加速度
4. 通过标定表获得油门/刹车的大小

纵向误差

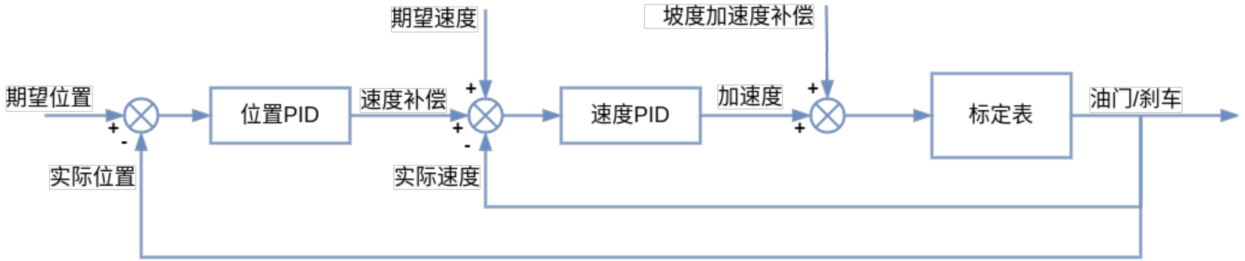
$$e_s = s_{\mathrm{des}} - s_{\mathrm{r}}$$

$$\dot{e}_s = v_{\mathrm{des}} - \dot{s}_{\mathrm{r}} = v_{\mathrm{des}} - v_x \cos(\Delta\theta)/(1 - \kappa_r l)$$



纵向控制

纵向控制框图



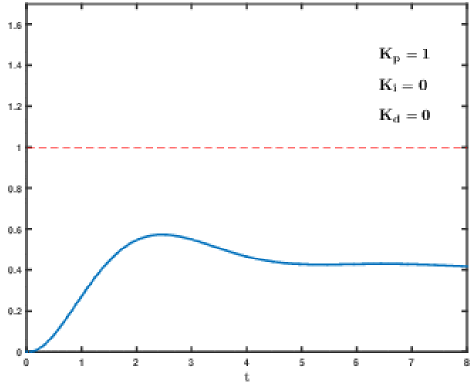
PID

$$u(k) = K_{\mathrm{P}} e(k) + K_{\mathrm{I}} \sum_{i=1}^{k} e(i) + K_{\mathrm{D}}[e(k) - e(k-1)]$$

比例控制：输出与输入误差信号成比例关系。

积分控制：输出与输入误差信号的积分成正比关系。加入积分控制，可以消除系统的稳态误差。

微分控制：输出与输入误差信号的微分（即误差的变化率）成正比关系。引入积分控制，能够提前使抑制误差的控制作用等于零，从而减小系统的超调。



参考

1. 《汽车理论》第3版，张文春，机械工业出版社
2. Rajamani, Rajesh. *Vehicle dynamics and control*. Springer Science & Business Media, 2011.
3. Chen, Wuwei, et al. *Integrated vehicle dynamics and control*. John Wiley & Sons, 2016.
4. Werling, Moritz, et al. "Optimal trajectory generation for dynamic street scenarios in a frenet frame." *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2010.
5. 美团技术解析：无人车横向控制概述
6. Apollo代码学习(一)—控制模块概述_follow轻尘的博客-CSDN博客_apollo 控制
7. Apollo control模块纵向控制原理及核心代码逐行解析_wujiangzhu_xjtu的博客-CSDN博客
8. Apollo control模块横向控制原理及核心代码逐行解析_wujiangzhu_xjtu的博客-CSDN博客

深蓝学院
shenlanxueyuan.com

感谢聆听

Thanks for Listening!