

第七讲:车辆运动学、动力学、横纵向控制



蔡盼盼 副教授 上海交通大学清源研究院

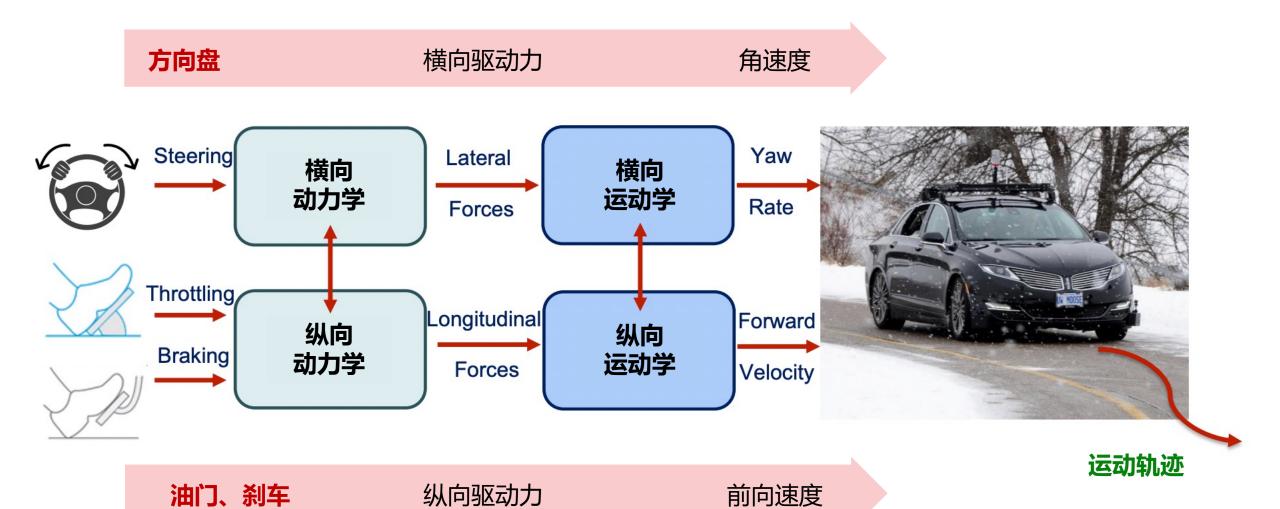
研究领域: 机器人规划、机器人学习、自动驾驶

邮箱: Cai_panpan@sjtu.edu.cn

网站: https://cindycia.github.io/



车辆控制

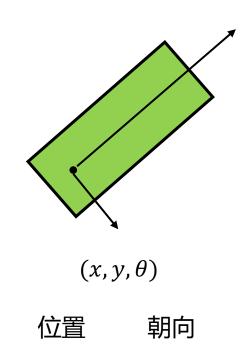


车辆运动学

- ◉ 运动学模型 (kinematics model)
 - 描述物体运动的数学模型(等式、运动学限制)
 - 它关注的是物体的运动学量(位置、速度、角速度等)之间的关系
 - 它不涉及物体运动状态改变的原因(力、力矩、质量等)
- 车辆运动学模型(vehicle kinematics model)
 - 低速驾驶时适用
 - 通常是2D平面内的模型(3D地形也可以张成2D面)
- 背景要求:
 - 一点点中学几何

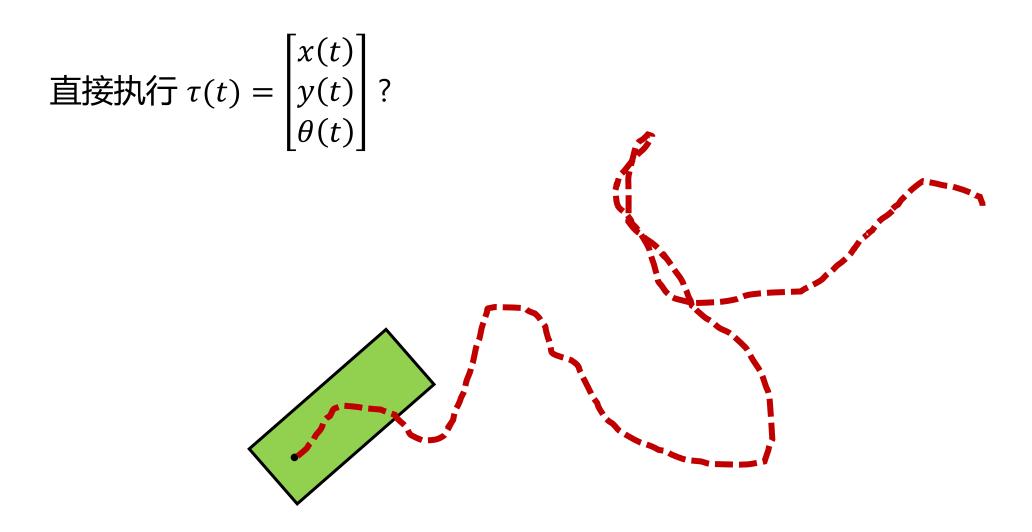
车辆状态 (Vehicle State)

● 车辆状态是能完全描述车辆在某一特定时刻的几何状态的一组变量



能否直接控制状态变量?

直接控制状态变量?



非完整约束 (nonholonomic constraint)

●非完整约束是指对状态的**导数的不可积分**约束

• 实例:轮胎抓牢地面形成对车辆前后轮速度的约束

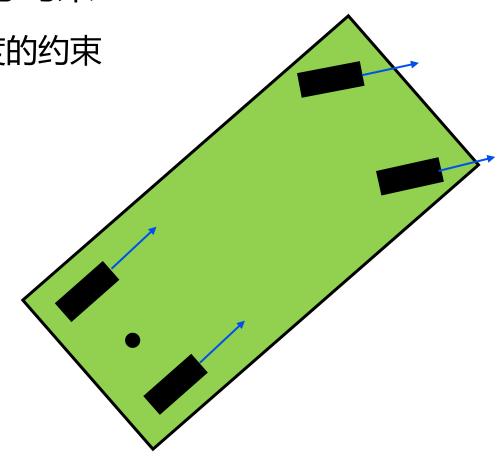
• (*x*, *y*)只能朝前:

$$\dot{x}(t) = g_1(\theta(t), t)$$
$$\dot{y}(t) = g_2(\theta(t), t)$$

• $\dot{\theta}$ 由前轮转向角 ϕ 决定:

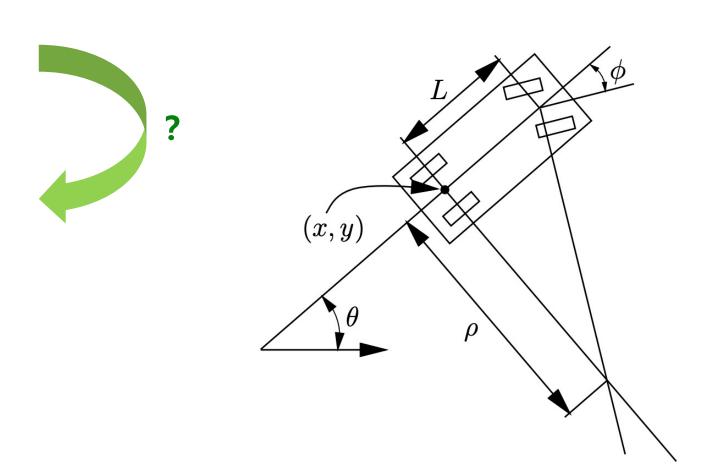
$$\dot{\theta}(t) = g_3(\phi(t))$$

• 效果:车辆无法原地旋转



车辆运动学结构 (vehicle kinematic structure)

- - φ: 转向角
 - v: 纵向速度
- 状态变量 (q)
 - (*x*, *y*, θ): 位置、朝向
- 其他应变量与常量
 - ρ: 转弯半径
 - L:前后轴的距离



车辆运动学模型 (vehicle kinematic model)

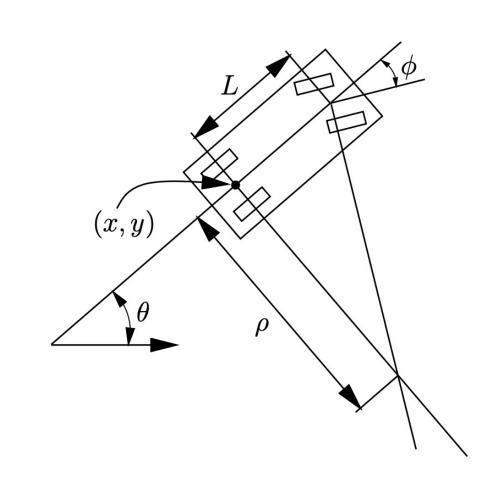
◉ 通用形式:

$$\dot{q} = f(q, u)$$

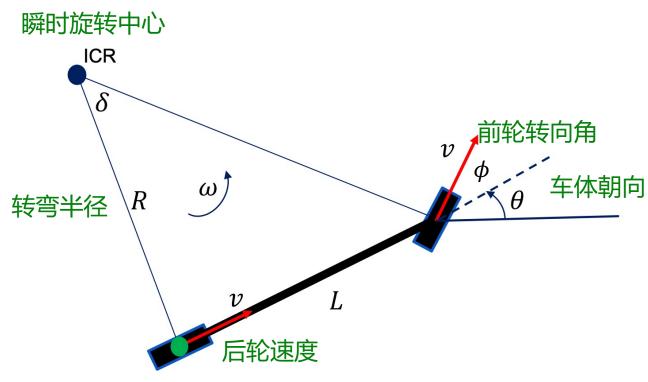
● 对于车辆:

$$\dot{x} = f_1(x, y, \theta, \phi, v)$$

 $\dot{y} = f_2(x, y, \theta, \phi, v)$
 $\dot{\theta} = f_3(x, y, \theta, \phi, v)$
角速度



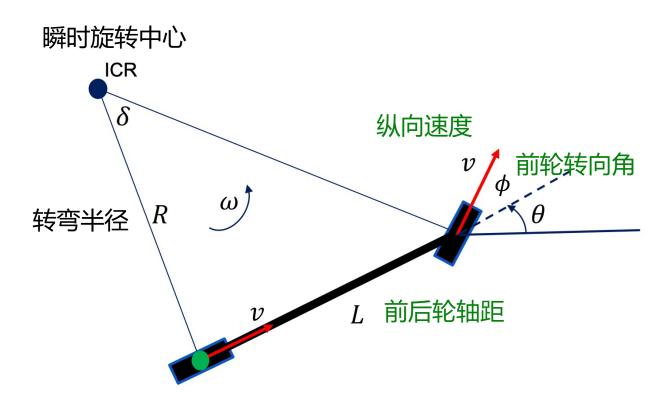
自行车模型 (bicycle model)



后轮为参考点: (x_r, y_r)

终速度(velocity):
 $\dot{x} = v \cos \theta$
 $\dot{y} = v \sin \theta$

自行车模型 (bicycle model)



参考点: (x_r, y_r)

角速度(yaw rate):

$$\dot{\theta} = \omega = \frac{v}{R}$$
 (1) \hbar π

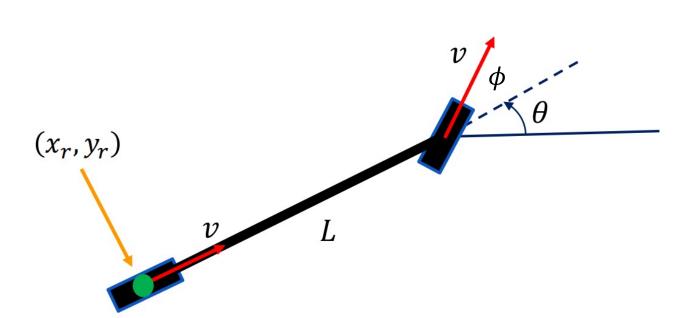
同时:

$$\tan \phi = \tan \delta = \frac{L}{R}$$
 (2) $A = \frac{L}{R}$

将(2)带入(1)消除 R,得到:

$$\dot{m{ heta}} = rac{m{v} an m{\phi}}{m{L}}$$
 $m{eta}$
 $m{eta}$
 $m{eta}$
 $m{eta}$
 $m{eta}$
 $m{eta}$
 $m{eta}$
 $m{eta}$
 $m{eta}$

完整的自行车模型 (bicycle model)



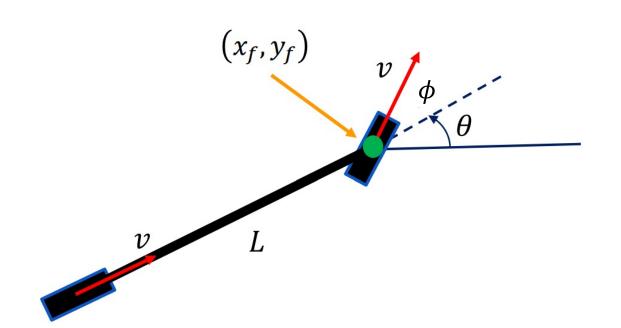
● 当以后轮为参考点时:

$$\dot{x_r} = v \cos \theta$$

$$\dot{y_r} = v \sin \theta$$

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

自行车模型 (bicycle model)



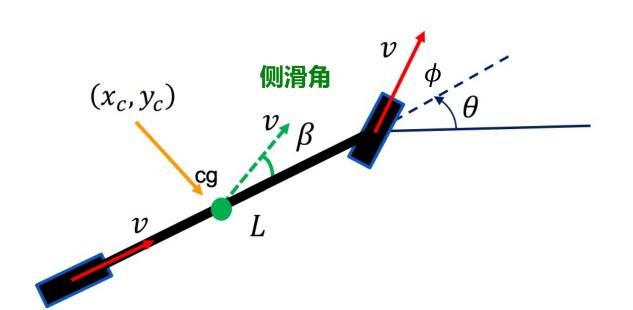
● 当以前轮为参考点时:

$$\dot{x_f} = v \cos(\theta + \phi)$$

$$\dot{y_f} = v \sin(\theta + \phi)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v \sin \phi}{L}$$

自行车模型 (bicycle model)



● 当以重心为参考点时:

$$\dot{x}_{c} = v \cos(\theta + \beta)$$

$$\dot{y}_{c} = v \sin(\theta + \beta)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v \cos \beta \tan \phi}{L}$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{l_{r} \tan \phi}{L}\right)$$

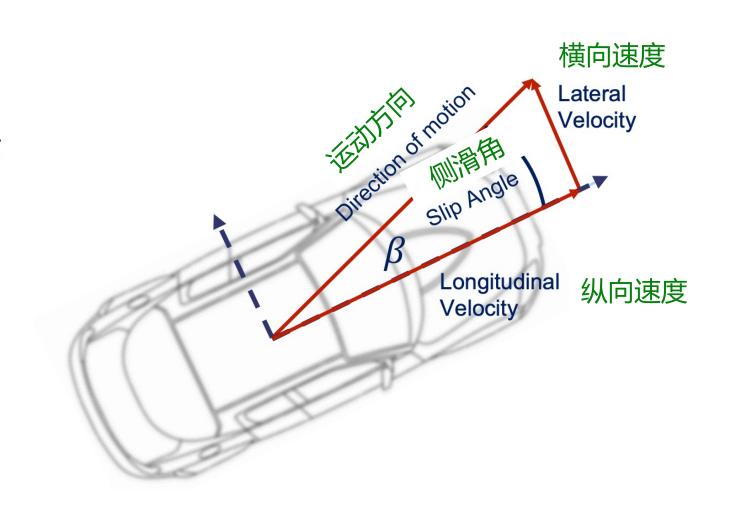
车体侧滑角

◉ 车体侧滑角定义:

$$\beta = \tan^{-1} \frac{V_y}{V_x} = \tan^{-1} \frac{\dot{y}}{\dot{x}}$$

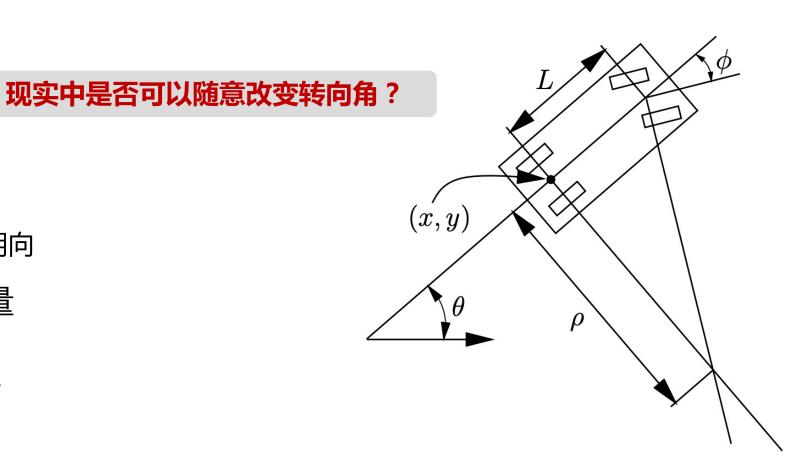
● 当角度较小时:

$$\beta \approx \frac{\dot{y}}{\dot{x}}$$



(Revisit)车辆运动学结构 (vehicle kinematics)

- - φ: 转向角
 - v: 纵向速度
- - (*x*, *y*, *θ*): 位置、朝向
- 其他应变量与常量
 - ρ: 转弯半径
 - L:前后轴的距离



更真实的自行车模型 (bicycle model)

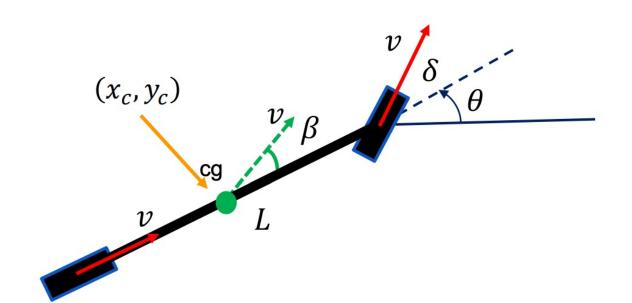
- - φ: 转向角変化率
 - v: 纵向速度
- - (x, y, θ, δ): 位置、朝向、**转向角**
- ◉ 运动学限制:

$$\dot{x_c} = v \cos(\theta + \beta)$$

$$\dot{y_c} = v \sin(\theta + \beta)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v \cos \beta \tan \delta}{L}, \beta = \tan^{-1} \left(\frac{l_r \tan \delta}{L}\right)$$

$$\dot{\delta} = \phi$$



(Revisit) 非完整约束 (nonholonomic constraint)

●非完整约束是指对状态**导数的不可积分**约束

• 实例:轮胎抓牢地面形成对车辆前后轮速度的约束

• (*x*, *y*)只能朝前:

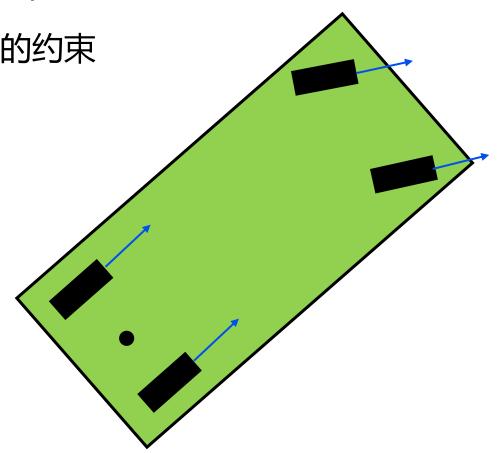
$$\dot{x}(t) = g_1(\theta(t))$$

$$y(t) = g_2(\theta(t))$$

• $\dot{\theta}$ 由前轮转向角 ϕ 决定:

$$\dot{\theta}(t) = g_2(\phi(t))$$

现实中是否总是满足该约束?



轮胎打滑







转向角控制变得复杂

上下坡



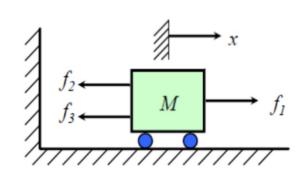
纵向速度控制变得复杂

车辆动力学

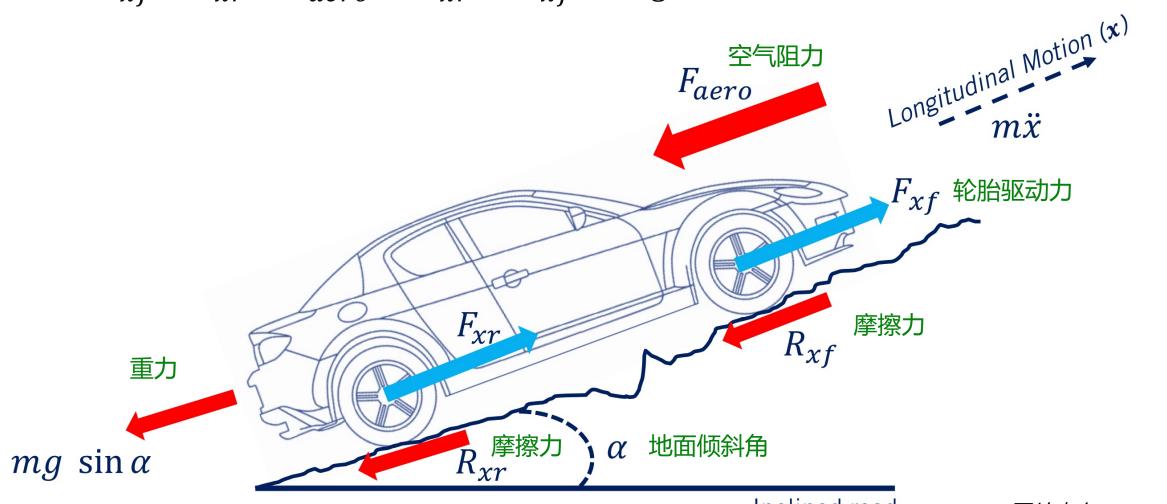
- ◉ 动力学模型 (dynamics model)
 - 描述力与物体运动关系的数学模型
 - 它关注的是力、力矩等对物体的位置、速度、加速度等的影响
- ◉ 通用形式:

$$\ddot{q} = f(\dot{q}, q, u)$$

- 例如: $\ddot{x} = (f_1 f_2 f_3)/M$
- 背景要求:
 - 一点点中学物理



受力分析



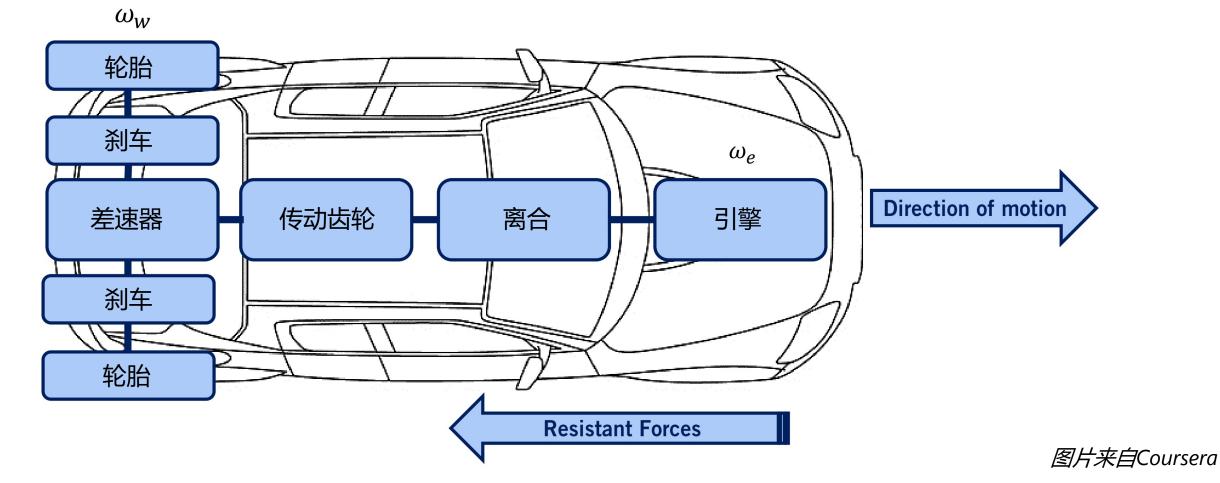
受力分析 - 总阻力

$$-F_{load}$$

$$m\ddot{x} = F_{xf} + F_{xr} - F_{aero} - R_{xr} - R_{xf} - mg \sin \alpha$$

- 空气阻力: $F_{aero} = c_a |\dot{x}|^2$
- 摩擦阻力: $R_x = R_{xr} + R_{xf} \approx c_r |\dot{x}|$
- 重力: $mg \sin \alpha \approx mg\alpha$

受力分析 - 牵引力



牵引力(未知)

传动流程

轮胎转速

齿轮转速



 $I_e \dot{\omega}_e = T_{Engine} - (I_t + I_w GR^2) \dot{\omega}_e - GRr_{eff} F_x$

Twheel 轮胎扭矩

 $I_w \dot{\omega}_w = T_{wheel} - r_{eff} F_x$



 $I_t \dot{\omega}_t = T_t - (GR)T_{wheel}$ GR=齿比(由档位控制)

图 Reactor Turbine Torque Converter

 $I_e \dot{\omega}_e = T_{Engine} - T_t$

引擎转速 ω_e



T_{Engine} 引擎扭矩

齿轮扭矩

 $\omega_w = GR\omega_t = GR\omega_e$

受力分析 – 牵引力 F_x

◉ 总受力公式:

$$F_x = m\ddot{x} + F_{load}$$

● 带入车辆速度与各部件转速的关系:

$$\dot{x} = r_{eff}\omega_w \qquad \omega_w = GR\omega_t = GR\omega_e \qquad \rightarrow \qquad \ddot{x} = r_{eff}GR\dot{\omega}_e$$

● 得到总受力公式:

$$F_x = m\ddot{x} + F_{load} = mr_{eff}GR\dot{\omega}_e + F_{load}$$

● 带入引擎转速公式(消除F_x):

$$I_e \dot{\omega}_e = T_{Engine} - (I_t + I_w GR^2) \dot{\omega}_e - GRr_{eff} F_x$$

●得到...

车辆纵向动力学公式

- $oldsymbol{\omega}_{e} = T_{Engine} T_{Load}$ (角加速度版)
 - $J_e = I_e + I_t + I_w GR^2 + m(GR^2)r_{eff}^2$
 - $T_{Load} = (GR)(r_{eff}F_{Load}) = r_{eff}GR(c_a|\dot{x}|^2 + c_r|\dot{x}| + mg\alpha)$

- $\frac{J_e}{(r_{eff})(GR)}\ddot{x} = T_{Engine} T_{Load}$ (线加速度版)
 - 利用关系: $\ddot{x} = r_{eff} GR \dot{\omega}_e$

车辆纵向动力学公式

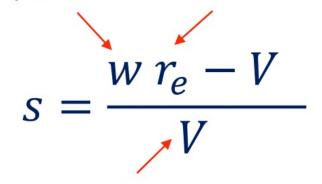
- $oldsymbol{\omega}_{e} = T_{Engine} T_{Load}$ (角加速度版)
 - $J_e = I_e + I_t + I_w G R^2 + m (G R^2) r_{eff}^2$
 - $T_{Load} = (GR)(r_{eff}F_{Load}) = r_{eff}GR(c_a|\dot{x}|^2 + c_r|\dot{x}| + mg\alpha)$

◉ 特点:

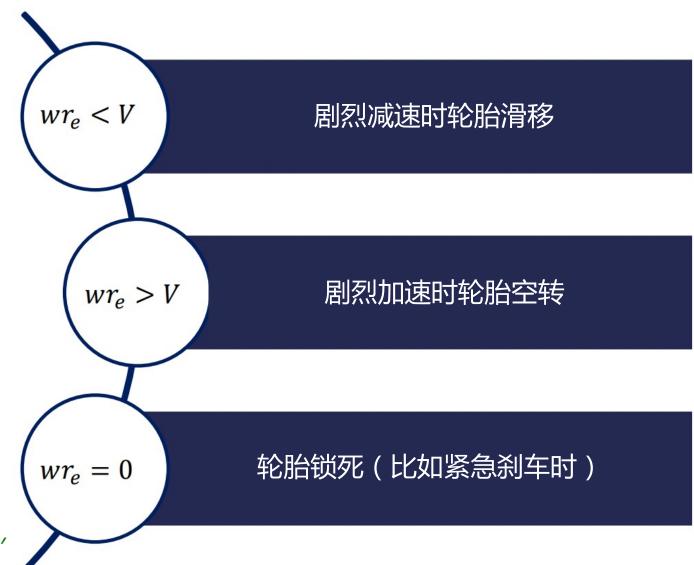
- 引擎扭矩超过一定量才会加速(对抗 T_{Load})
- 引擎扭矩越大,加速越快
- 车辆越重、地面坡度越大、齿比(GR)越高、速度越高,加速越慢

纵向轮胎打滑率(进阶)

轮胎转速 轮胎半径

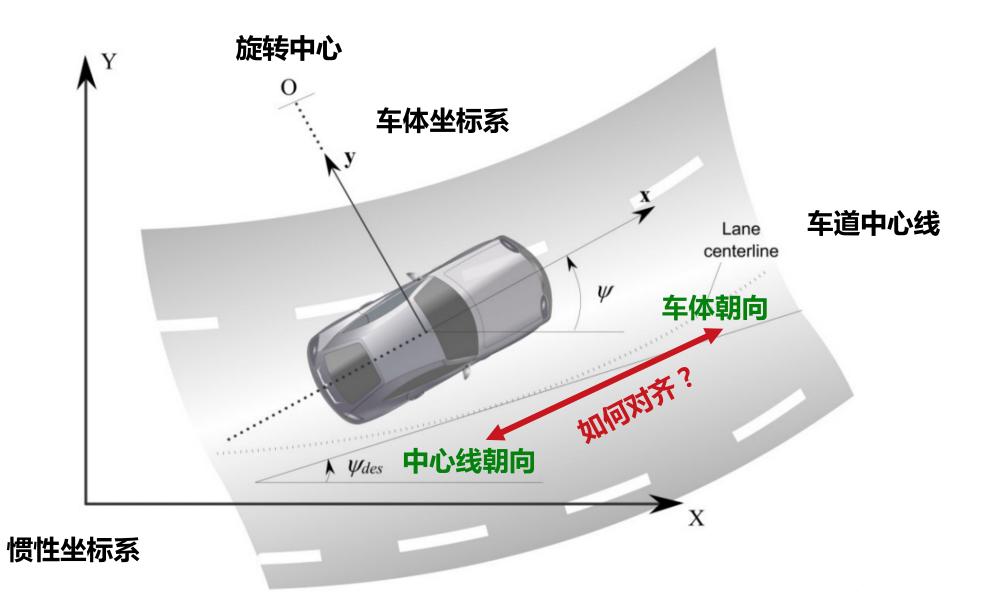


前向速度

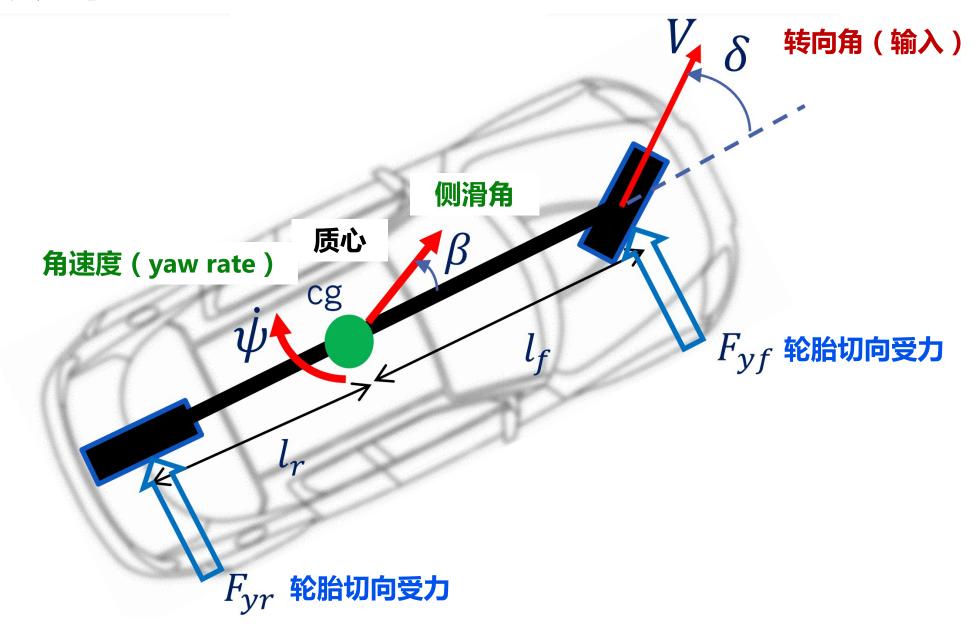


注:纵向打滑率由许多轮胎与地面的物理性质决定,具体计算通常需要经验模型。

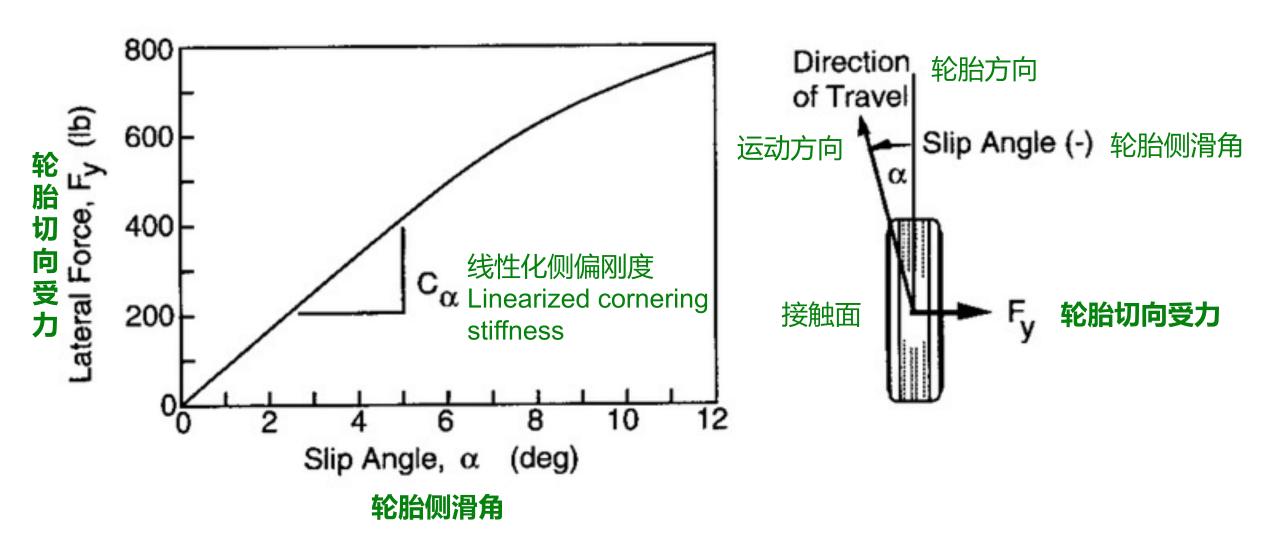
车辆横向动力学



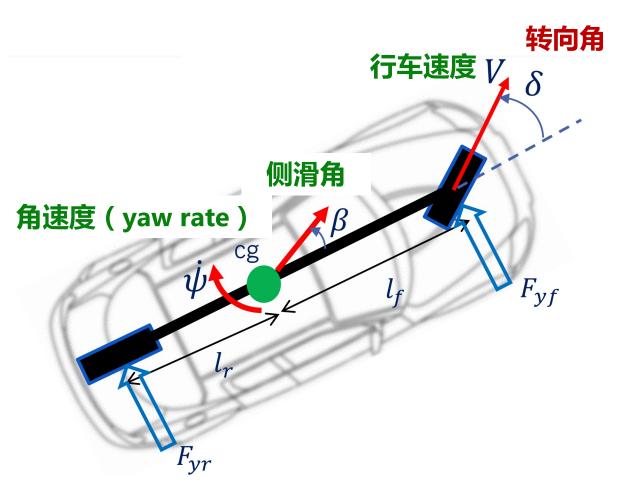
车辆横向动力学



轮胎切向受力 (Tire Forces)



轮胎切向受力 (Tire Forces)



● 前轮切向受力:

$$F_{yf} = C_f \alpha_f = C_f \left(\delta - \beta - \frac{l_f \dot{\psi}}{V} \right)$$
 切向受力 轮胎侧滑角

● 后轮切向受力:

$$F_{yr} = C_r \alpha_r = C_r \left(-\beta + \frac{l_r \dot{\psi}}{V} \right)$$

注:线性轮胎模型只是近似模型,但高度适用于城市自动驾驶汽车的运行条件。当打滑程度过高时,应当使用Pacejka模型。

车辆横向受力分析

横向加速度:
 $a_y = \ddot{y} + \omega^2 R$
 $= V \dot{\beta} + V \dot{\psi}$

 \ddot{y} :切向加速度; $\omega^2 R$: 向心加速度

带入关系: $\beta \approx \dot{y}/V$; $V = \omega R$

 $\dot{\beta}$:侧滑角改变速度; $\dot{\psi}$:车身角速度

受力分析: $mV(\dot{\beta}+\dot{\psi})=F_{yf}+F_{yr}$ F_{yf} :前轮切向受力; $F_{\mathrm{r}f}$:后轮切向受力

ullet 力矩分析: $I_Z\ddot{\psi}=l_fF_{yf}-l_rF_{yr}$ l_{yf} :前轮与质心距离; l_{rf} :后轮与质心距离

o 以上两项分析中带入 F_{yf} 与 F_{rf} 的表达式,得到...

车辆横向动力学公式

线性系统!

$$\dot{\beta} = \frac{-(C_r + C_f)}{mV} \beta + \left(\frac{C_r l_r - C_f l_f}{mV^2} - 1\right) \dot{\psi} + \frac{C_f}{mV} \delta$$

$$\ddot{\psi} = \frac{C_r l_r - C_f l_f}{I_z} \beta - \frac{C_r l_r^2 + C_f l_f^2}{I_z V} \dot{\psi} + \frac{C_f l_f}{I_z} \delta$$

◉ 状态向量:

$$X_{lat} = \begin{bmatrix} y & \beta & \psi & \dot{\psi} \end{bmatrix}^T$$

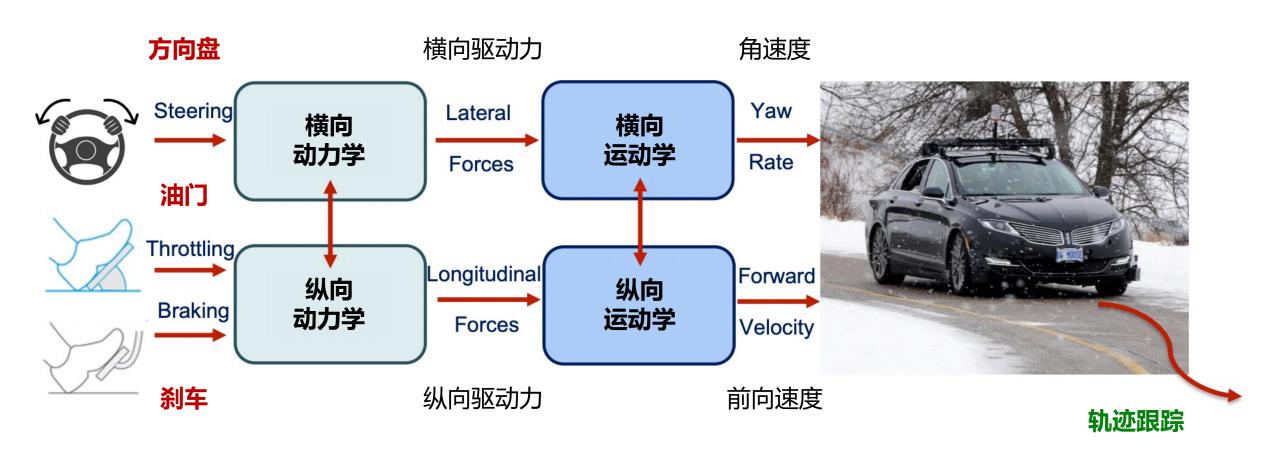
横向位置 侧滑角 偏航角 车体角速度 yaw angle yaw rate

● 矩阵形式:

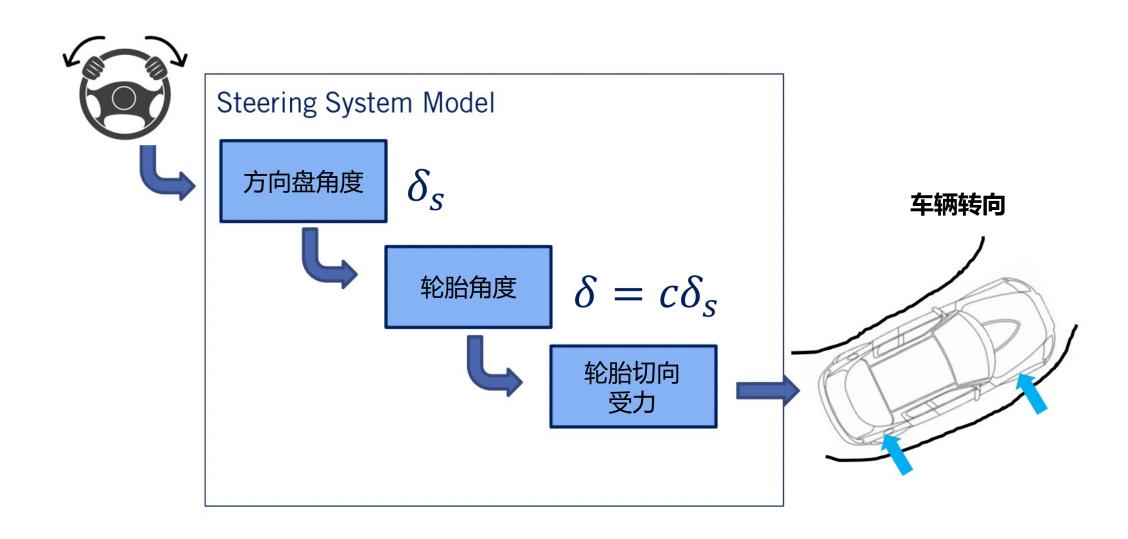
$$\dot{X}_{lat} = A_{lat}X_{lat} + B_{lat}\delta$$

$$A_{lat} = \begin{bmatrix} 0 & V & V & 0 \\ 0 & -\frac{C_r + C_f}{mV} & 0 & \frac{C_r l_r - C_f \ l_f}{mV^2} - 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{C_r l_r - C_f \ l_f}{I_z} & 0 & -\frac{C_r l_r^2 + C_f \ l_f^2}{I_z V} \end{bmatrix} \quad B_{lat} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{C_f}{mV} \\ 0 \\ \frac{C_f l_f}{I_z} \end{bmatrix}$$

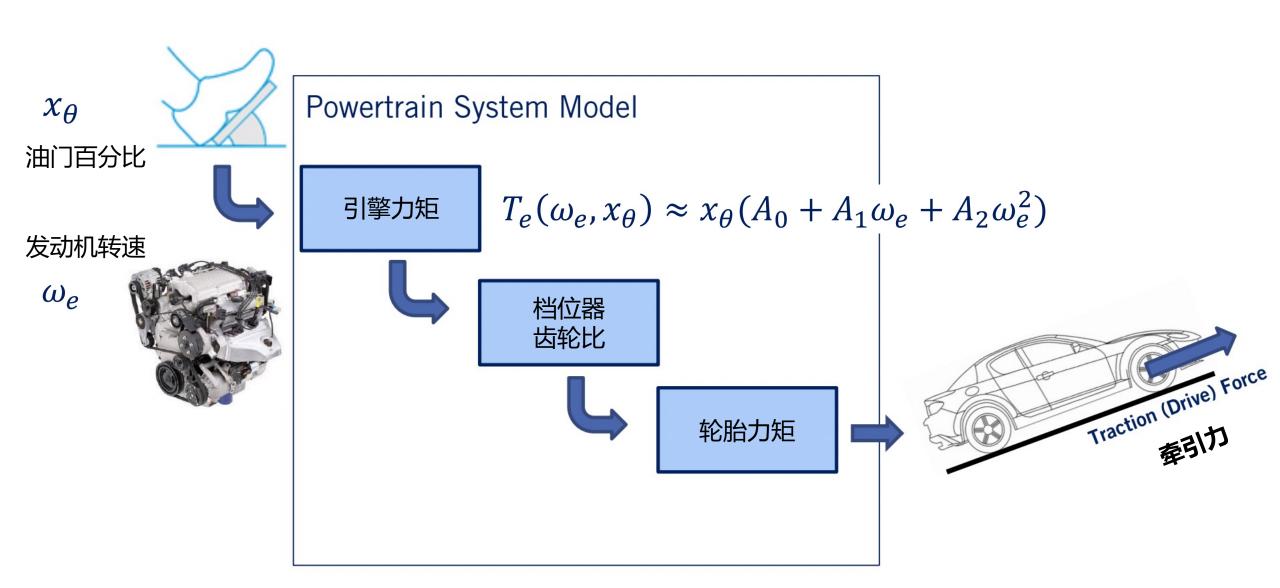
车辆制动 (Actuation)



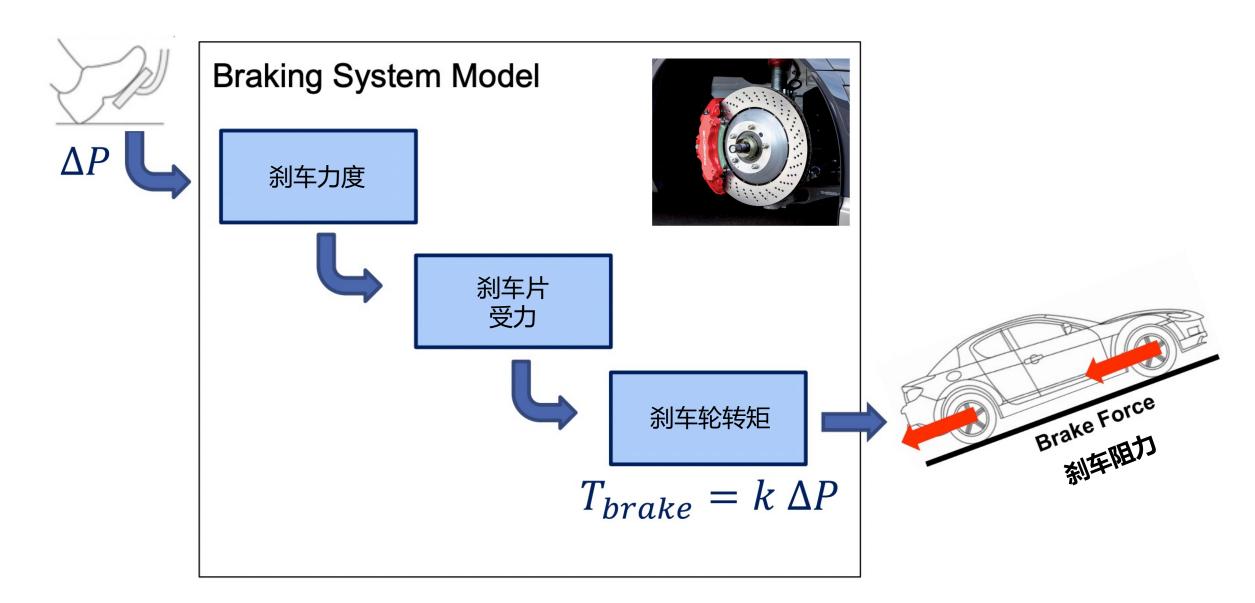
转向 (Steering)



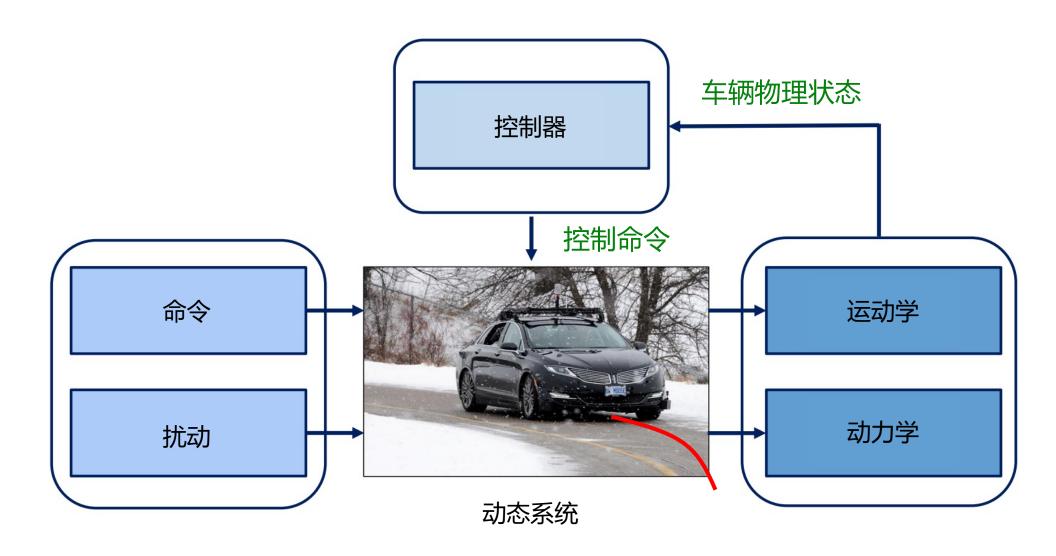
油门 (Throttling)



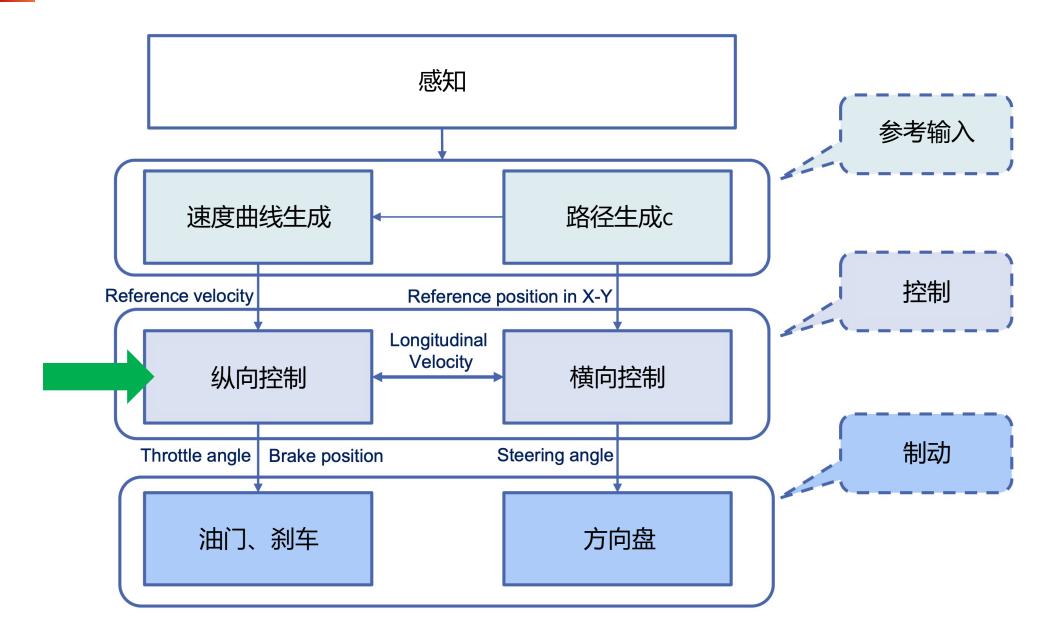
刹车 (Braking)



车辆控制

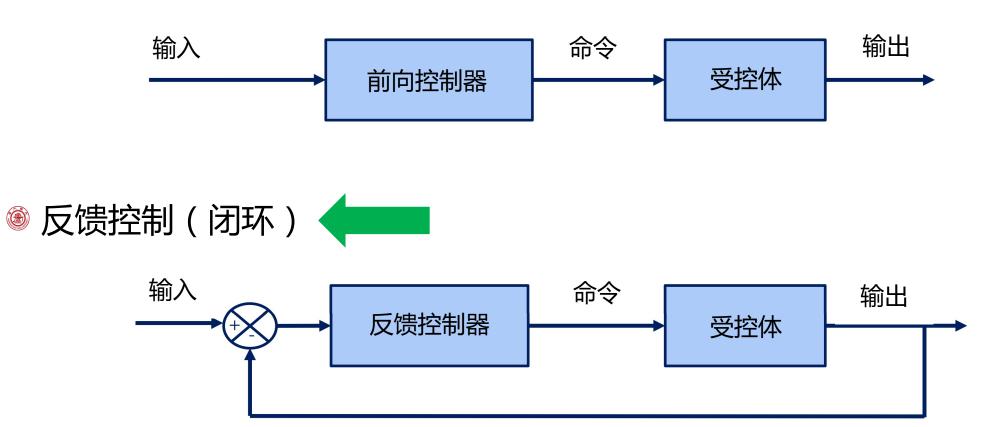


车辆运动控制总体流程

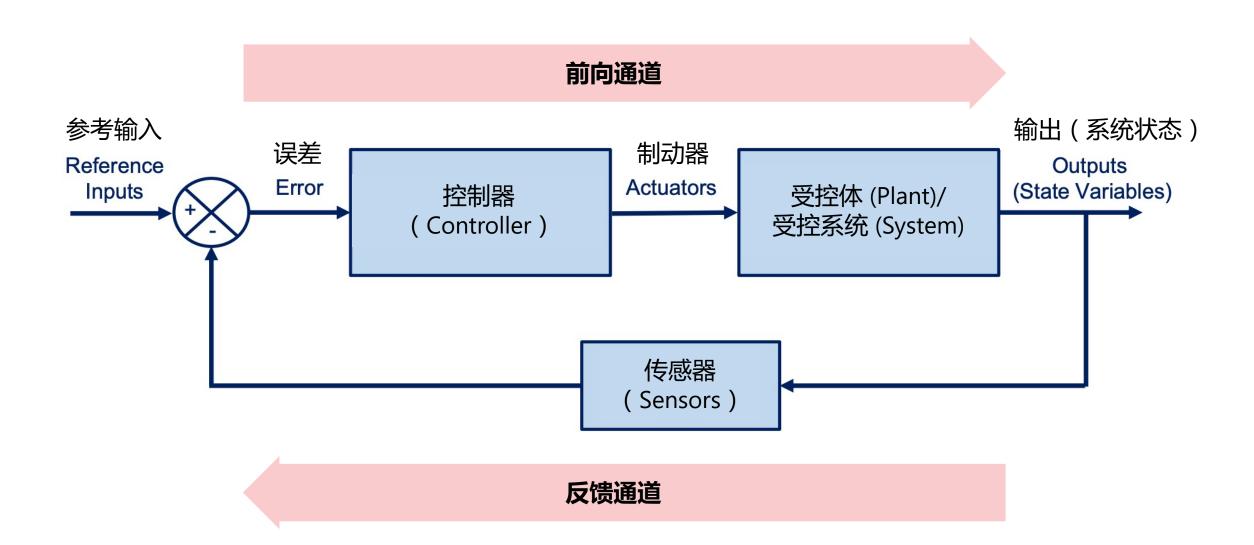


前向控制、反馈控制

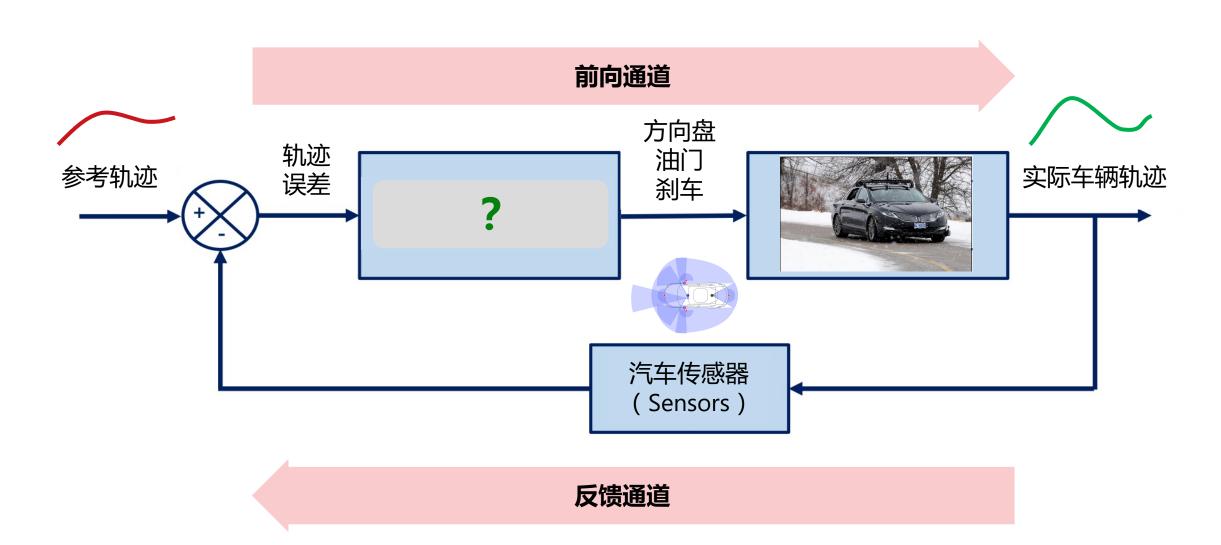
◉ 前向控制 (开环)



反馈控制闭环(Feedback Control Loop)

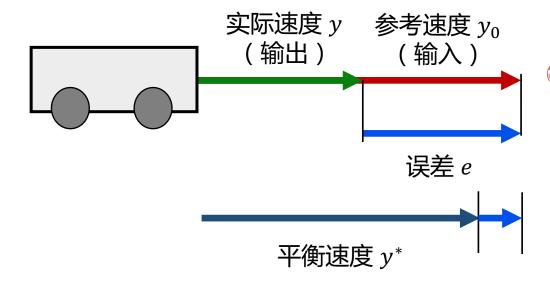


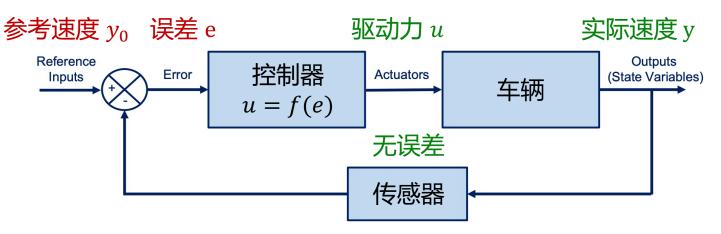
反馈控制闭环(Feedback Control Loop)-- 车辆



例:一维速度控制器

🖲 控制闭环:





● 比例控制器(Proportional Controller):

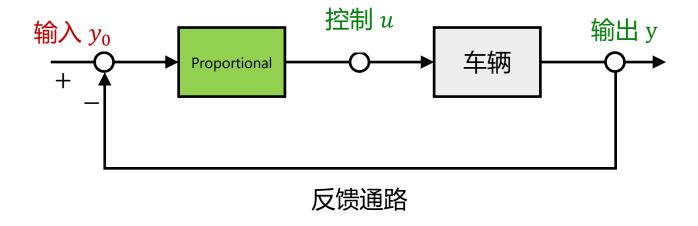
$$u = ke = k(y_0 - y)$$

- *k*是增益
- 当 $y < y_0$ 时,u > 0 ; 加速,减小误差 何时停止加速?
- 当 $u = F_{load}$, $e = \frac{F_{load}}{k}$ 时,停止加速 系统将平衡在错误的速度!

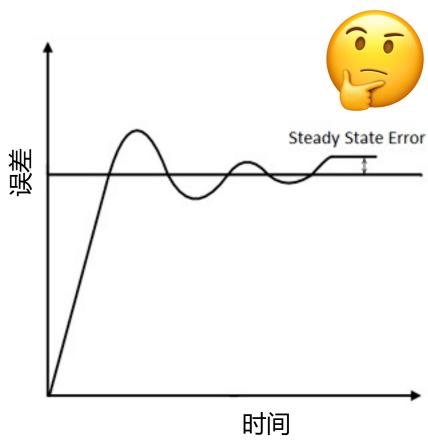
比例控制器 (P Controller)

当前误差

$$u(t) = K_P e(t)$$



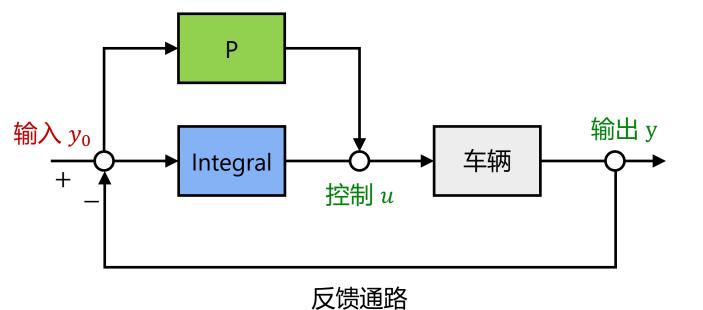




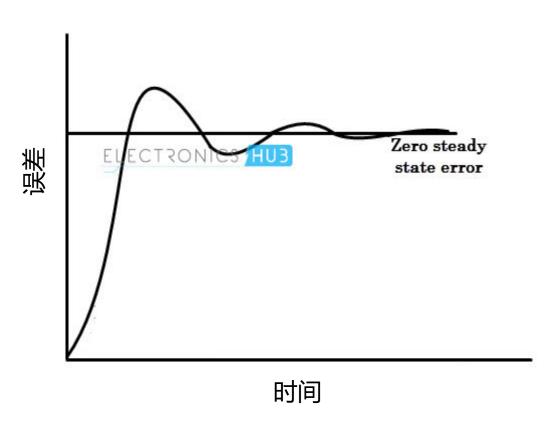
比例-积分控制器 (PI Controller)

当前误差 过去的累积误差

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t)dt$$



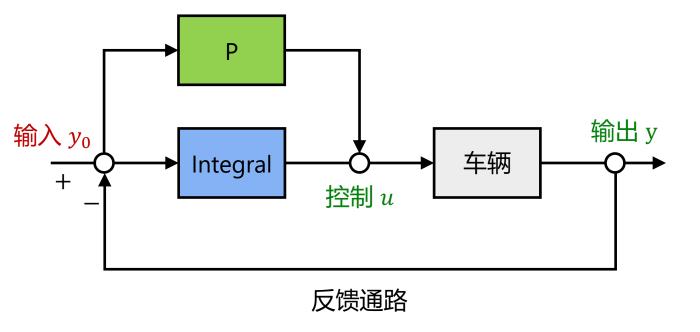
响应图

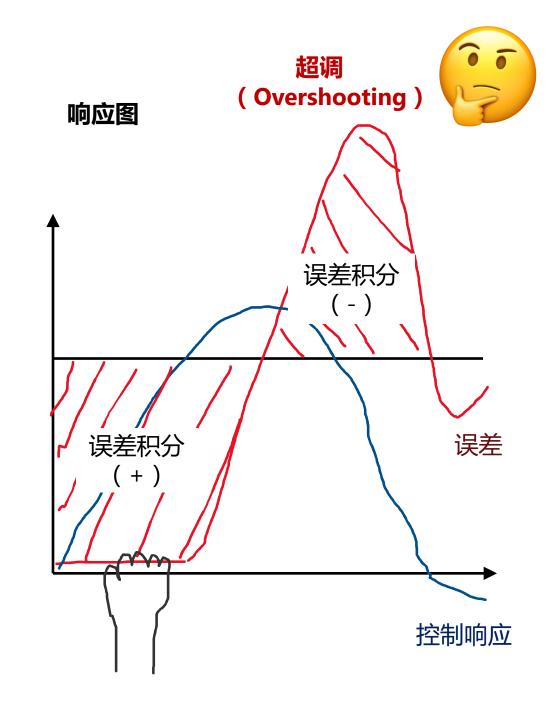


比例-积分控制器 (PI Controller)

当前误差 过去的累积误差

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t)dt$$

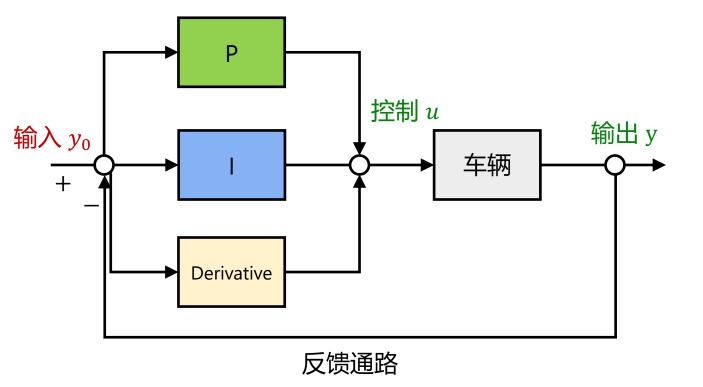


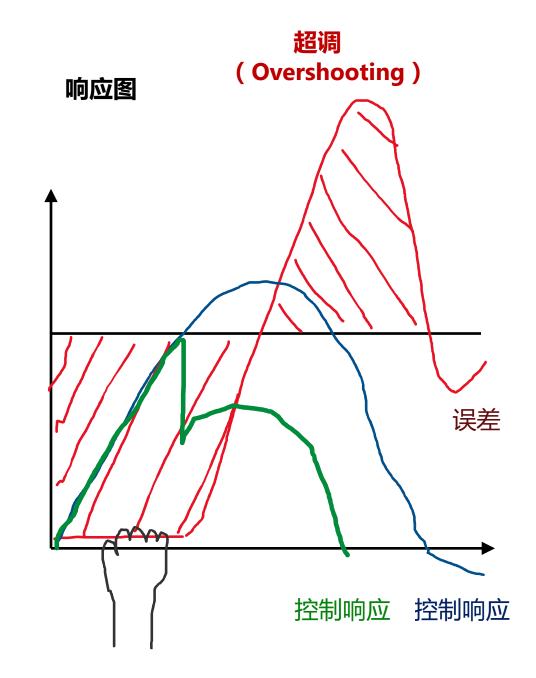


PID控制器 (PID Controller)

当前误差 过去的累积误差 未来误差

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t)dt + K_D \dot{e}(t)$$

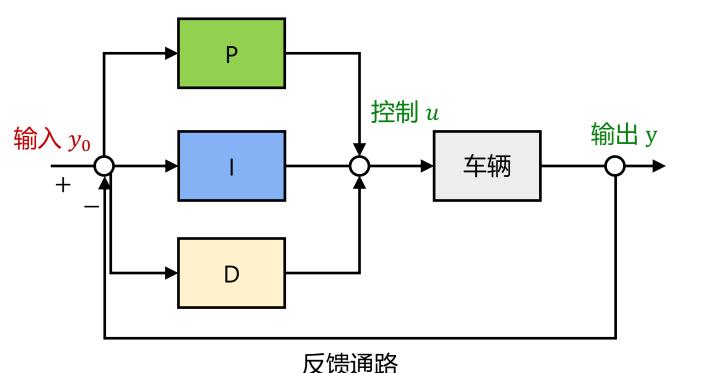




PID控制器 (PID Controller)

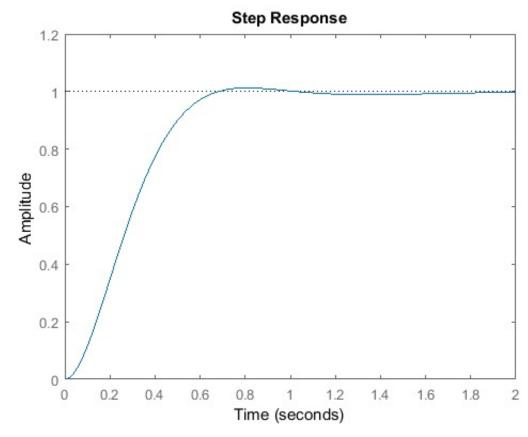
当前误差 过去的累积误差 未来误差

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \dot{e}(t)$$

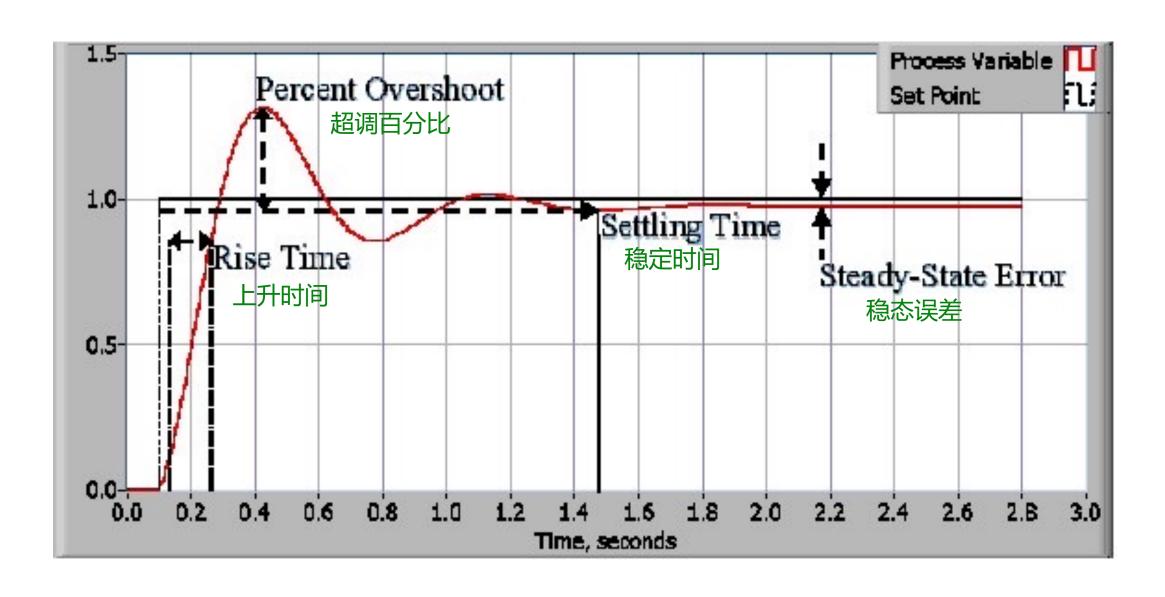


当增益参数合理时





PID响应曲线特征量



PID手动调参

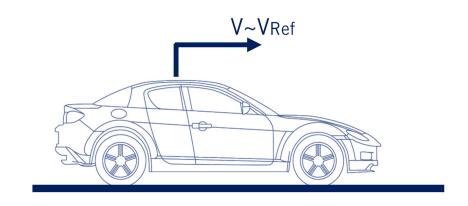
| PID增益 (PID gains) | 上升时间 (Rise time) | 超调 (Overshooting) | 稳定时间 (Settling time) | 稳态误差 (Steady state error) |
|----------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|------------------------------|
| 增加 K _P | 降低 | 升高 | 微小改变 | 降低 |
| 增加 K _I | 降低 | 升高 | 升高 | 消除 |
| 增加 K _D | 微小改变 | 降低 | 降低 | 微小改变 |

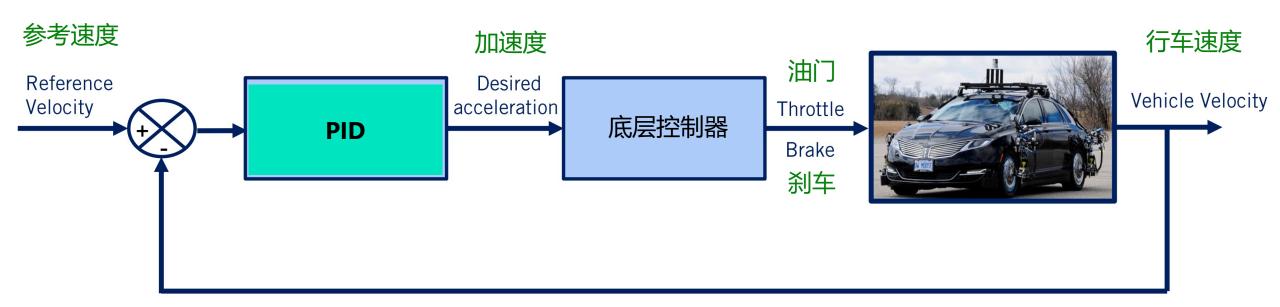
◉ 调参流程(例):

- 将所有增益设置为0(开环系统)
- 增加 K_P , 直至上升时间 (rise time) 降低到合理范围
- 增加 K_D , 直至超调百分比 (overshooting) 降低到合理范围
- 增加 K_I , 直至稳态误差 (steady state error) 降低到合理范围
- 按照以上表格反复微调三项增益

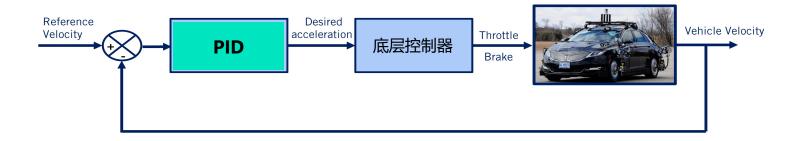
车辆纵向控制实例

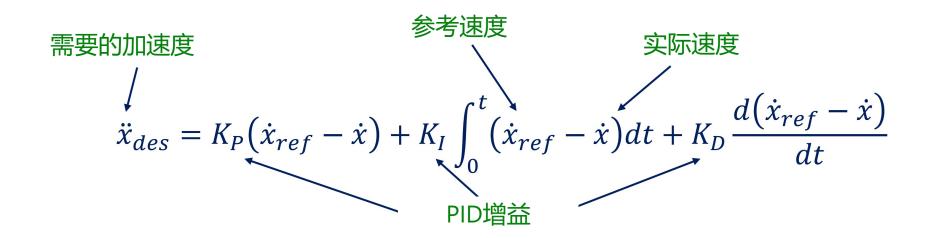
巡航控制:保持用户设定的参考速度



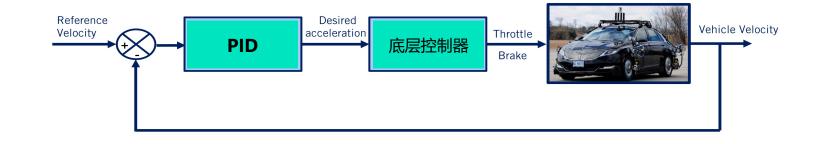


车辆纵向控制实例





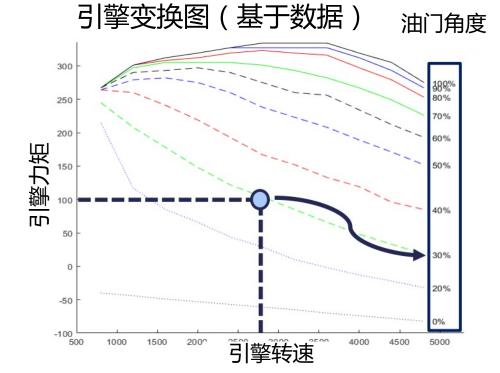
底层控制器



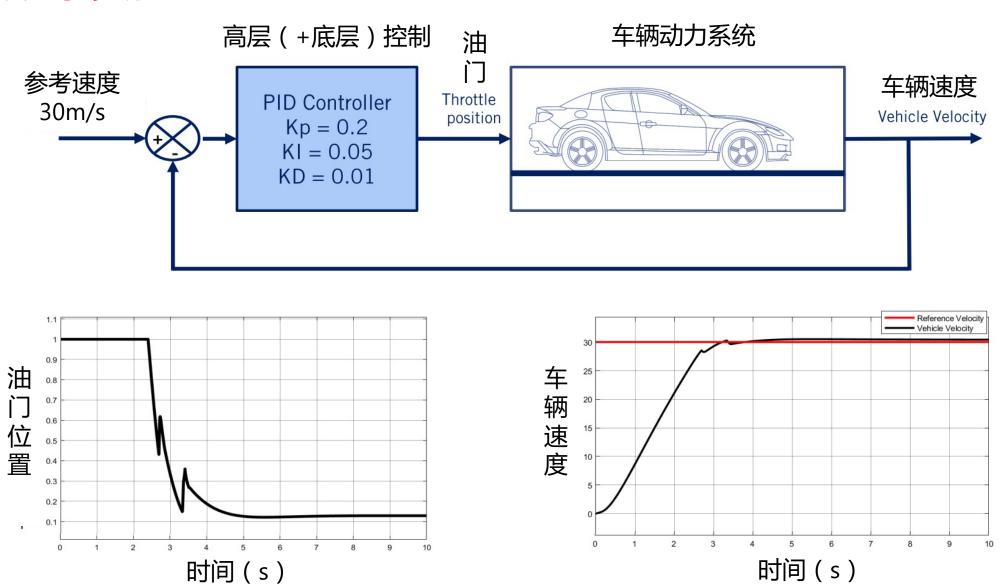


车辆动力学模型

$$T_{Engine} = \frac{J_e}{(r_{eff})(GR)} \ddot{x}_{des} + T_{Load}$$

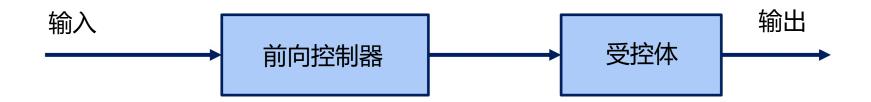


控制效果实例

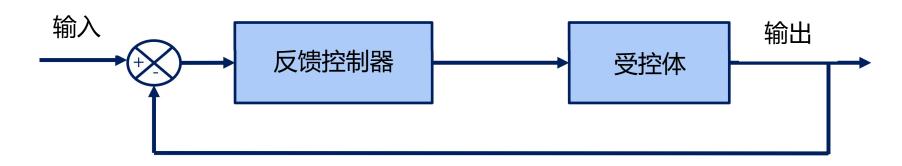


前向控制、反馈控制

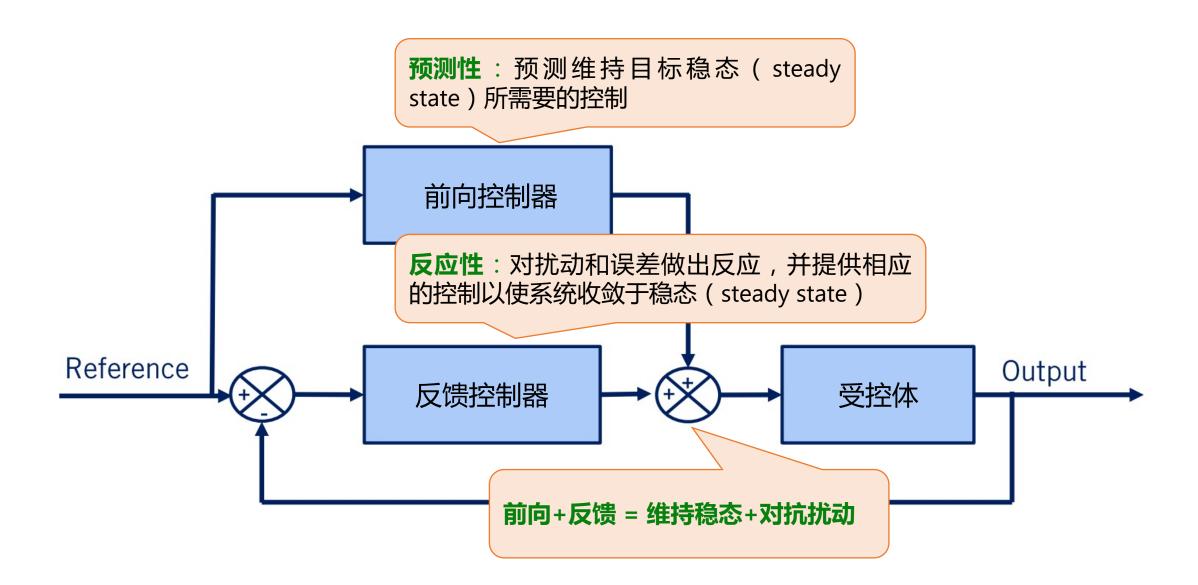
● 前向控制(开环)



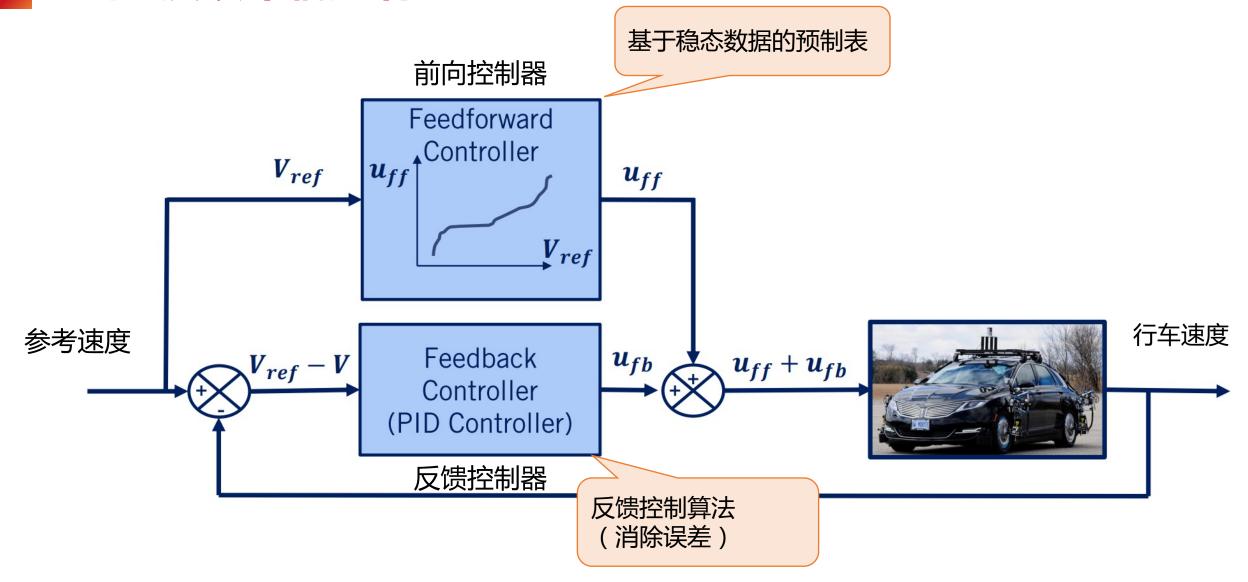
◉ 反馈控制(闭环)



前向与反馈控制的结合



前向+反馈车辆控制



前向控制表

● 参考速度 -> 轮胎转速

$$V_{ref} = r_{eff} \omega_w \longrightarrow \omega_w = \frac{V_{ref}}{r_{eff}}$$

● 轮胎转速 -> 引擎转速

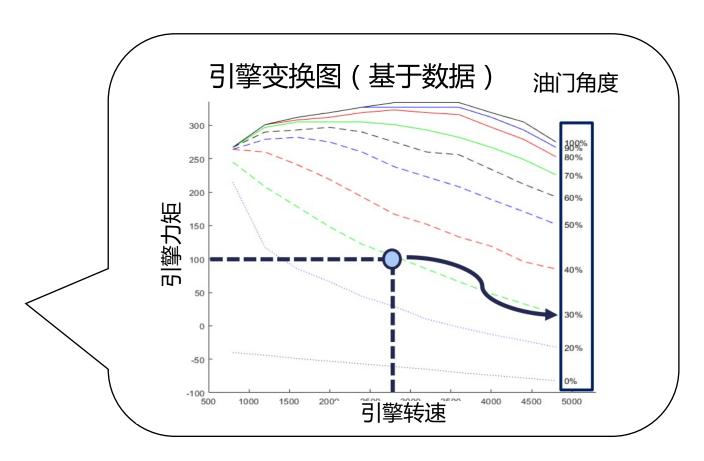
$$\omega_w = GR \ \omega_e \qquad \longrightarrow \qquad \omega_e = \frac{\omega_w}{GR}$$

◎ (维持稳态需要的)引擎力矩

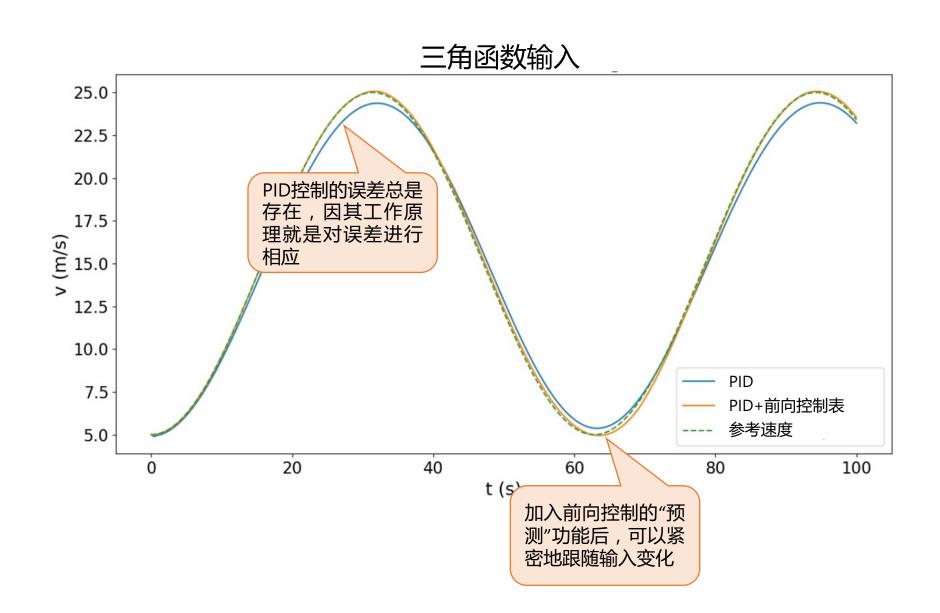
$$T_{Engine} = T_{Load}$$

◉引擎转速、力矩 -> 油门位置

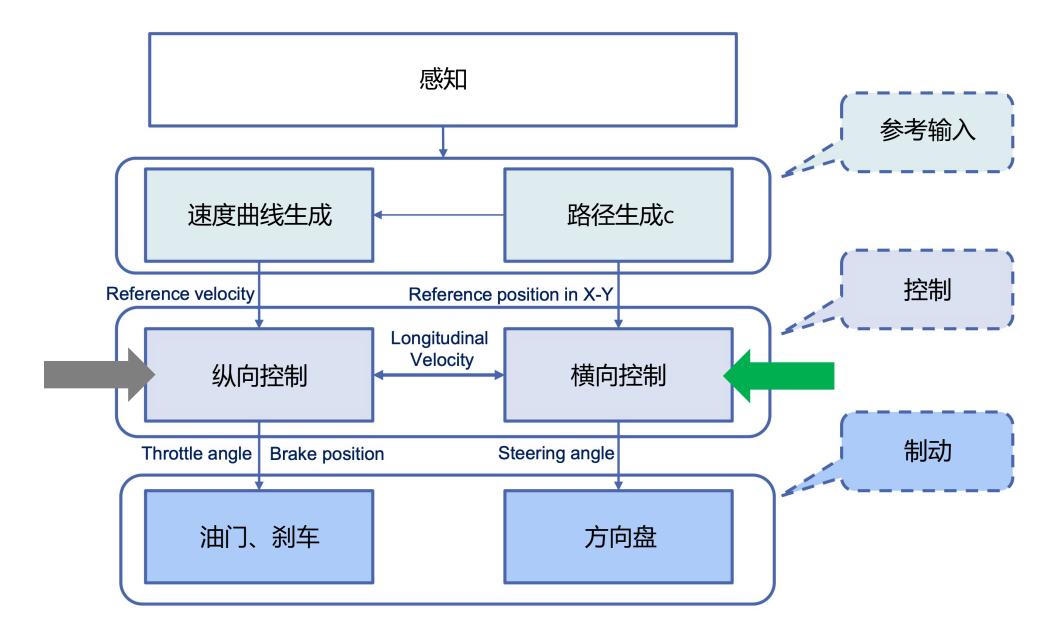
$$\left.\begin{array}{c} \omega_e \\ T_{Eng} \end{array}\right] \longrightarrow \Theta_{throttle}$$



前向控制效果

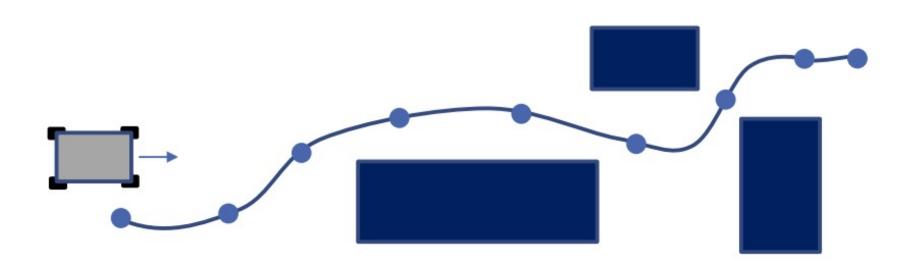


车辆运动控制总体流程



横向控制问题

- 给定一条参考轨迹
- 计算相对于参考轨迹的误差
- 设计控制器,在满足方向盘角度限制的条件下,将轨迹追踪误差维持在零
- ◎ 加入对动力学限制(如最大加速度等)的考量



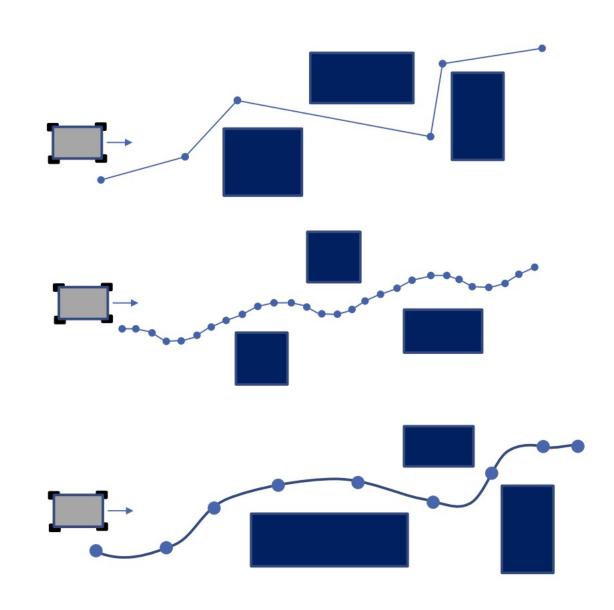
参考轨迹

◉ 常见类别:

- 直线段 (straight-line segments)
- 航路点 (waypoints)
- 参数曲线 (parameterized curves)

● 轨迹追踪目标:

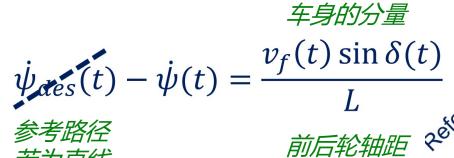
- 消除相对于路径的位置偏移
- 对齐航向角与路径方向



横向控制器误差

- 朝向误差(Heading Error)
 - ψ =车辆朝向-路径朝向
 - 依据以前轮为参考点的自行 车模型,朝向误差的变化率 前轮速度垂直于

为:



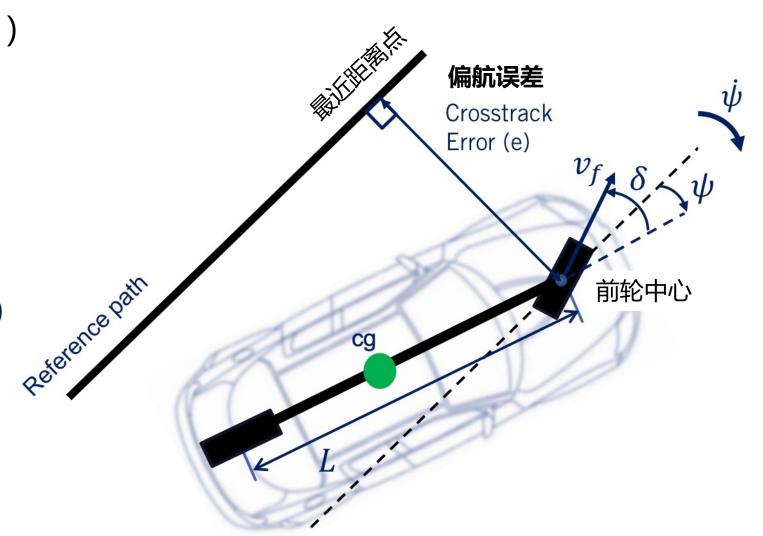
参考路径 若为直线

朝向误差 cg

横向控制器误差

- ◉ 偏航误差(Crosstrack Error)
 - 前轮中心到路径上最近点的距离
 - 偏航误差的变化率为:

 $\dot{e}(t) = v_f(t) \sin(\psi(t) - \delta(t))$ 前轮速度垂直于 路径的分量



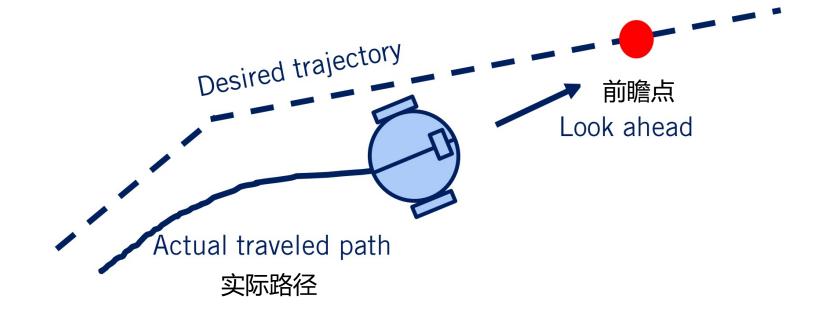
横向控制器分类

- 几何控制器:只考虑几何与运动学,不考虑动力学
 - 纯追踪算法 (Pure pursuit)
 - Stanley

- ◉ 动力学控制器:考虑动力学
 - 模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC)

纯追踪算法

- ⑩ 机器人学与自动驾驶中最经典的几何路径追踪算法之一
- 利用前方路径上的参考点计算误差
- 非常简单的反馈控制逻辑

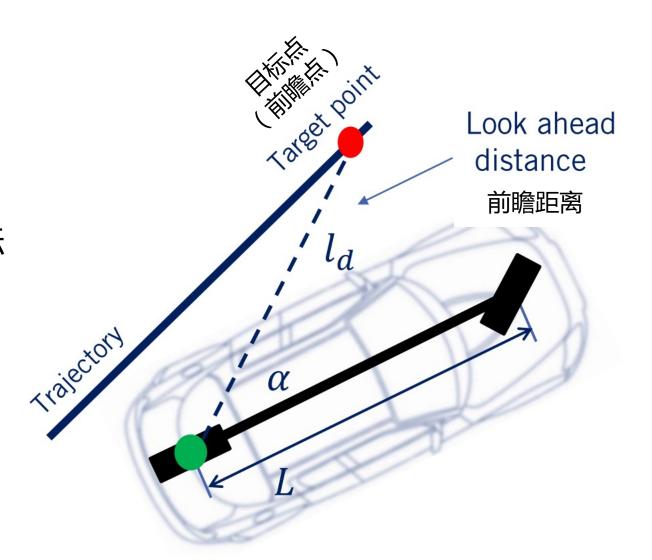


纯追踪算法

輸入:车辆与参考路径的几何信息

輸出:行车路径的曲率

前瞻点:位于参考路径上的、离车辆后轮中心具有固定前瞻距离的目标点



纯追踪算法详解

α: 前瞻方向角(輸入)

◎ l_d: 前瞻距离(输入)

● R:转弯半径(输出)

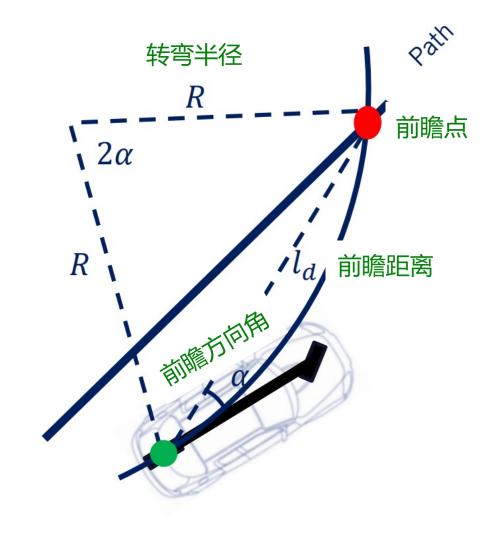
$$\frac{l_d}{\sin 2\alpha} = \frac{R}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)} \quad \Rightarrow \quad \frac{l_d}{\sin \alpha} = 2R \qquad \exists \text{ and } \text{ in } \text{$$

曲率定义

 $\Rightarrow \quad \kappa = \frac{1}{R} = \frac{2\sin\alpha}{l_d}$

 Θ $\delta = \tan^{-1} \kappa L$ 车辆运动学

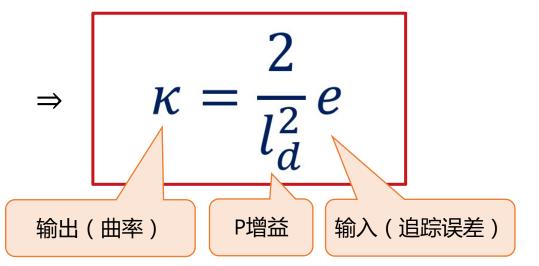
$$\Rightarrow \delta = \tan^{-1} \left(\frac{2L \sin \alpha}{l_d} \right)$$

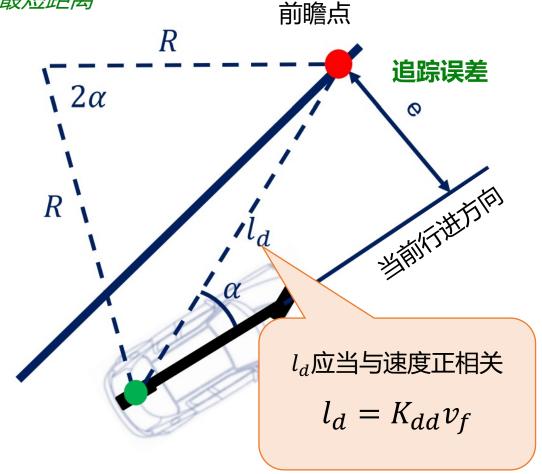


纯追踪算法 vs. P-Controller?

纯追踪公式(曲率)

$$\kappa = \frac{2\sin\alpha}{l_d} \quad \oplus \quad \sin\alpha = \frac{e}{l_d}$$

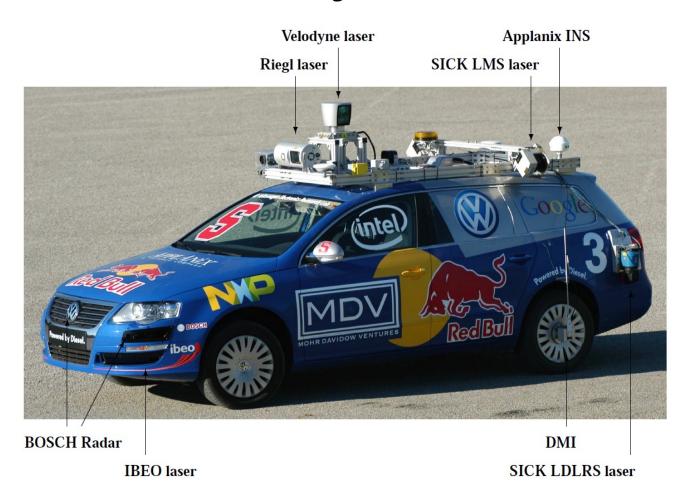




Stanley控制器

- 以前轮中心为车辆参考点
- 同时考虑朝向误差和偏航位置误差
- 考虑最大转向角限制
- 不需要前瞻点

2005 DARPA Grand Challenge 赢家:



Stanley控制器详解

◎ 对齐朝向:

• 使前轮方向=路径方向

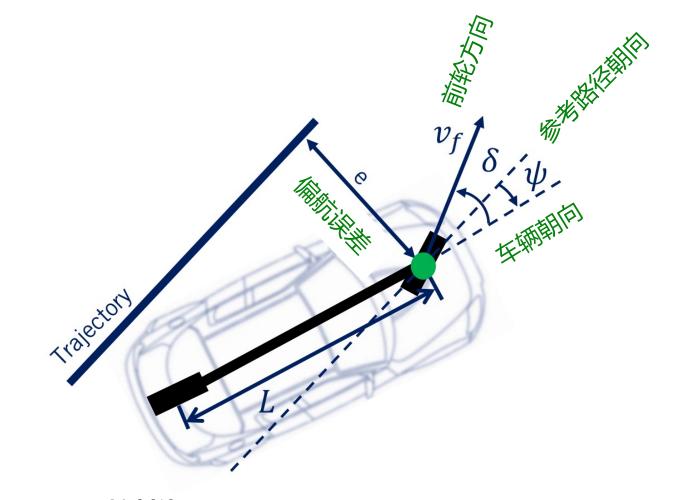
$$\delta(t) = \psi(t)$$

- 消除偏航误差:
 - 曲率正比于偏航误差
 - 曲率反比于前轮速度

$$\delta(t) = \tan^{-1} \left(\frac{ke(t)}{v_f(t)} \right)$$

◉ 转向角限制:

$$\delta(t) \in [\delta_{min}, \delta_{max}]$$



Stanley控制律:

$$\delta(t) = \psi(t) + \tan^{-1}\left(\frac{ke(t)}{v_f(t)}\right), \quad \delta(t) \in [\delta_{min}, \delta_{max}]$$

Stanley控制器—收敛性质分析

- 分析偏航位置误差的变化率
 - 误差变化 ė 与转向角 δ 的关系:

$$\dot{e}(t) = -v_f(t)\sin(\psi(t) - \delta(t))$$

• 带入Stanley控制律:

$$\dot{e}(t) = -v_f(t) \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{ke(t)}{v_f(t)}\right)\right)$$

利用三角函数性质简化:

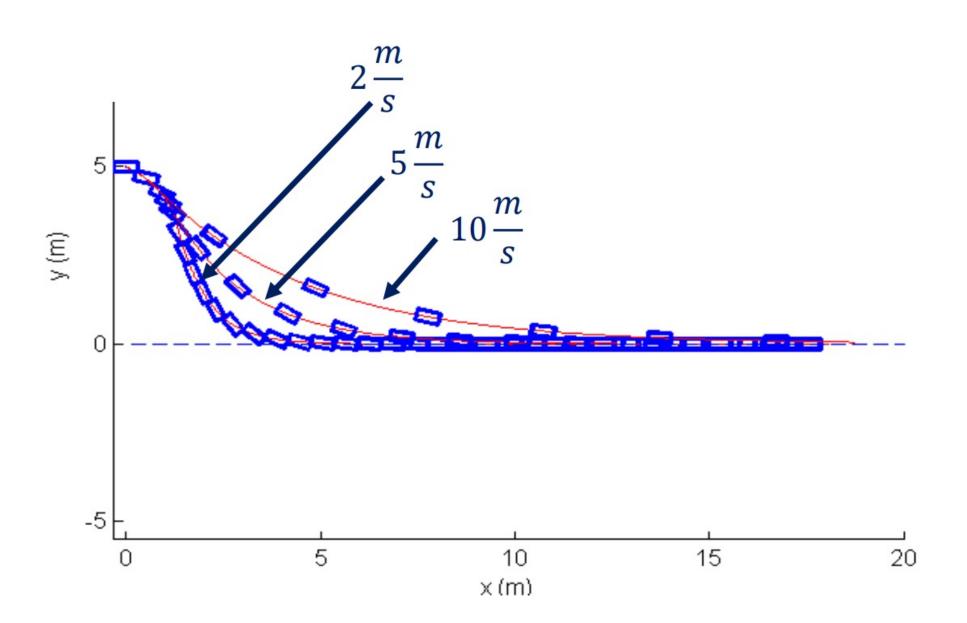
$$\dot{e}(t) = \frac{-ke(t)}{\sqrt{1 + \left(\frac{ke(t)}{v_f}\right)^2}}$$

● 当误差较小时:

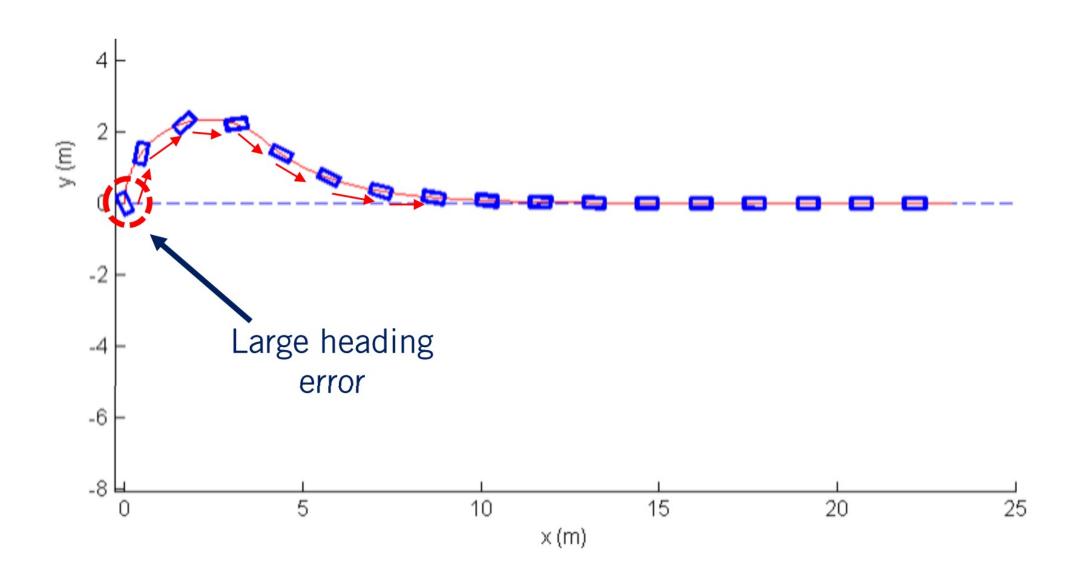
$$\dot{e}(t) \approx -ke(t)$$

- 该微分方程的解为指数函数
- 这表明误差将指数级收敛

收敛测试—仅有偏航误差



收敛测试—仅有朝向误差



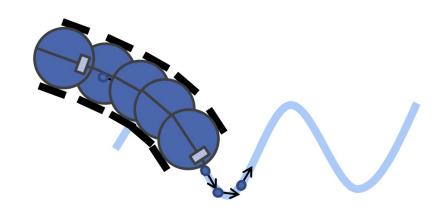
模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)

在控制中充分考虑车辆动力学

- 构建一个关于最优控制的约束优化问题
- 以最小化轨迹追踪误差、最小化控制输入为目标
- 以动力学模型、动力学限制等为约束



劣势: 计算复杂性较高



MPC 优化问题

$$\min_{U \triangleq \{u_{t|t}, u_{t+1|t}, \dots\}} J(x(t), U) = \sum_{j=t}^{t+T} C(x_{j|t}, u_{j|t})$$
 (二次)目标函数(轨迹追踪误差+控制成本)
 \mathcal{K} 化变量: t 到 T 时间的控制序列
$$s. \, t. \qquad x_{j+1|t} = f\left(x_{j|t}, u_{j|t}\right), \qquad t \leq j \leq t+T-1 \qquad \textit{车辆动力学公式}$$

$$x_{min} \leq x_{j+1|t} \leq x_{max} \,, \qquad t \leq j \leq t+T-1 \qquad \textit{可行状态限制}$$

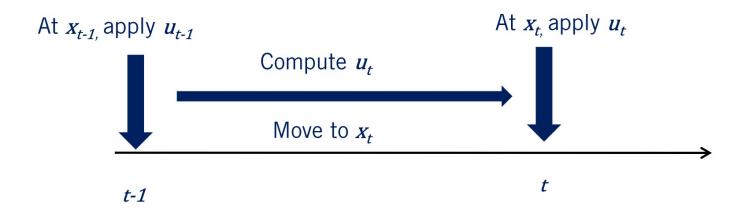
$$u_{min} \leq u_{j|t} \leq u_{max} \,, \qquad t \leq j \leq t+T-1 \qquad \textit{可行控制限制}$$

$$g\left(x_{j|t}, u_{j|t}\right) \leq 0, \qquad t \leq j \leq t+T-1 \qquad \textit{更多底层动力学限制(与打滑、倾 }$$
 $h\left(x_{j|t}, u_{j|t}\right) = 0, \qquad t \leq j \leq t+T-1 \qquad \textit{倒、引擎动力等相关)}$

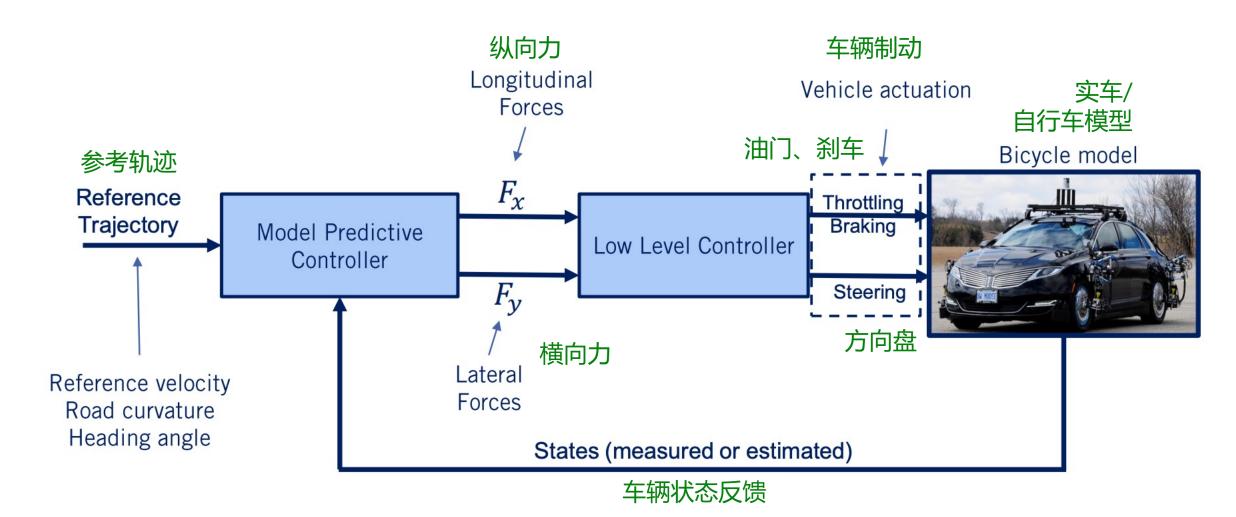
- ◎ 上述约束优化问题通常为非线性问题,需要数值方法求解
 - 二次规划(线性约束)、序列二次规划(非线性约束)
 - 梯度下降、共轭梯度下降(局部最优)
 - 对偶法(约束优化)、内点法(大规模问题)

滚动时域控制算法(Receding Horizon Control)

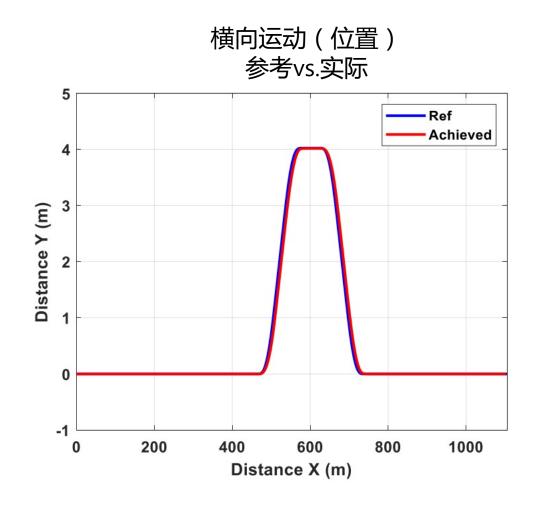
- 选择时域长度(Horizon,记作T)
- 对于当前时间步 t − 1 :
 - \circ 利用 u_{t-1} , x_{t-1} 与车辆动力学模型 , 预测一个时间步之后状态 x_t
 - 。 同时进行:
 - \circ (Move to x_t) 执行 u_{t-1} , 使车辆从状态 x_{t-1} 运动到状态 x_t
 - \circ (Compute u_t) 优化从时间 t 到 T 期间的控制序列 $u_t, ..., u_T$, 输出第一个 u_t

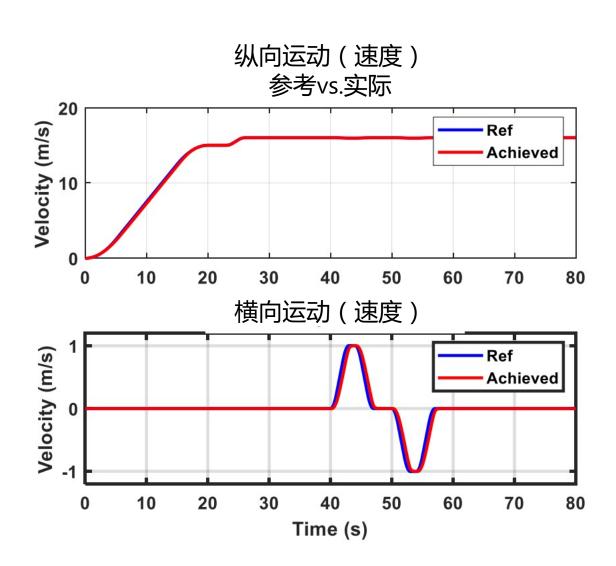


基于MPC的车辆横纵向控制

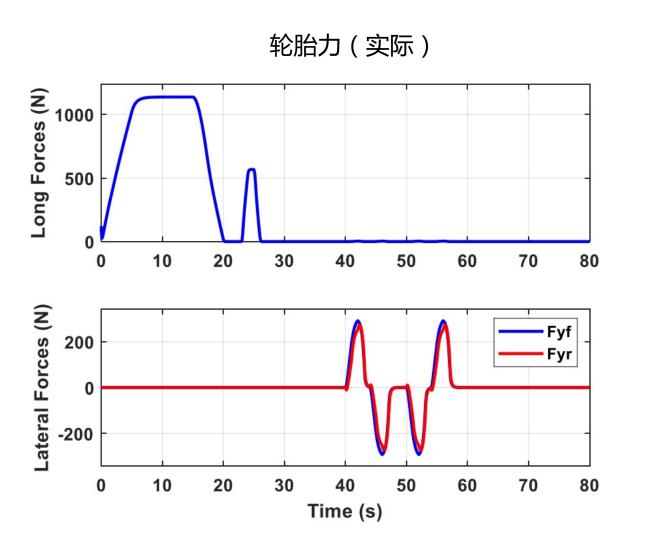


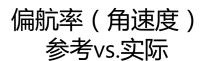
MPC控制效果—来回变道

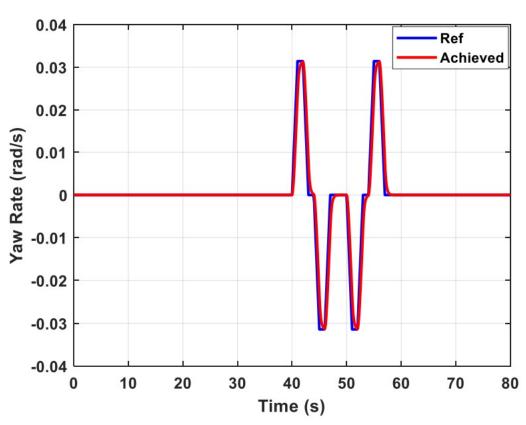




MPC控制效果—来回变道







总结

- 车辆运动学
 - 自行车模型(可以前轮、后轮、质心为参考点)
- 车辆动力学
 - 纵向动力学公式:引擎力矩->纵向加速度
 - 横向动力学公式:前轮转向角->横向速度、角速度、角加速度
- 车辆控制:
 - 开环控制、闭环控制流程
 - 纵向:PID
 - 横向: Pure Pursuit、Stanley
 - 高阶: MPC

扩展阅读

- 自行车模型: "Chapter 2, Lateral Vehicle Dynamics", R. Rajamani, Vehicle Dynamics and Control, Mechanical Engineering Series, https://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9781461414322-c1.pdf?SGWID=0-0-45-1265143-p174267791. (2012)
- PID纵向控制: R. Rajamani, "Introduction to Longitudinal Control" In: Vehicle Dynamics and Control, Mechanical Engineering Series, https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F0-387-28823-6_5 (2006).
- Pure Pursuit控制: Snider, J. M., "Automatic Steering Methods for Autonomous Automobile Path Tracking", Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburg (February 2009).
 https://www.ri.cmu.edu/pub_files/2009/2/Automatic_Steering_Methods_for_Autonomous_Automobile_Path_Tracking.pgdf
- Stanley控制: Hoffmann, G. et al., "Autonomous Automobile Trajectory Tracking for Off-Road Driving: Controller Design, Experimental Validation and Racing", Stanford University, (2007).
 http://ai.stanford.edu/~gabeh/papers/hoffmann_stanley_control07.pdf
- MPC控制: Falcone, P. et al., "Predictive Active Steering Control for Autonomous Vehicle Systems", IEEE (2007).
 https://ieeexplore.ieee.org/document/4162483

第八讲:运动规划!



蔡盼盼 副教授 上海交通大学清源研究院

研究领域:机器人规划、机器人学习、自动驾驶

邮箱: Cai_panpan@sjtu.edu.cn

网站: https://cindycia.github.io/

