



02 跟驰模型

- 2.1 Newell 跟驰模型
- 2.2 最优速度模型 (OVM)
- 2.3 全速度差模型 (FVDM)
- 2.4 Gipps 模型
- 2.5 智能驾驶模型 (IDM)

模型类别	定义	核心思想	关键要素	适用场景	优缺点
2.1 Newell 跟驰模型	离散时间跟驰模型, 车辆的速度是在 $t + T$ 时刻取期望速度和间距 s 除以反应时间 T 的最小值。	时间平移轨迹。 ①后车的轨迹是前车轨迹在空间和时间上的平移。 ②车辆在时刻 $t+T$ 的速度完全由时刻 t 的间距决定。	①时间延迟 T ②车辆间距 S	①宏观交通流理论推导 ②拥堵交通流的简化分析	优点: 解析解容易求得; 与宏观LWR模型有直接联系。 缺点: 行为过于简单僵化, 加速度不连续。

计算公式:

$$v(t + T) = v_{opt}(s(t))$$

$$v_{opt}(s) = \min(v_0, \frac{s}{T})$$

参数含义:

$v(t + T)$: 车辆在 $t + T$ 时刻的速度, 即车辆在反应时间 T 后调整的速度;

$v_{opt}(s(t))$: 基于间距 s 的最优速度函数, 用于计算在给定间距 s 下车辆应采用的速度;

$s(t)$: 是指在在 t 时刻的车辆间距;

v_0 : 期望速度, 即车辆在无约束 (自由流) 条件下希望达到的最大速度。

情景分析: ①当 $v_0 < \frac{s}{T}$, 此时间距 s 较**大**, 车辆以 v_0 的速度自由行驶;
②当 $v_0 > \frac{s}{T}$, 此时间距 s 较**小**, 车辆以 $\frac{s}{T}$ 的速度向前行驶。

模型类别	定义	核心思想	关键要素	适用场景	优缺点
2.2 最优速度模型 (OVM)	时间连续的跟驰模型, 其中加速度正比于当前速度与依赖于车辆间距的最优速度之间的差值, 描述车辆向最优速度的适应过程。	速度调整机制。 驾驶员总是试图以一定的弛豫时间 (反应延迟) 将当前速度调整到由当前车头间距决定的“优化速度”。	①车头间距 s ②最优速度函数 $v_{opt}(s)$ ③弛豫时间 τ	①交通流稳定性分析 ②解释幽灵堵车	优点: 数学形式简单, 能重现走走停停的交通波。 缺点: 加速度可能不切实际; 缺乏避免碰撞机制; 对前车速度差无反应。

计算公式:

$$\dot{v} = \frac{v_{opt}(s) - v}{\tau}$$

$$\text{st.} \begin{cases} v'_{opt}(s) \geq 0, \\ v_{opt}(0) = 0, \\ \lim_{s \rightarrow \infty} v_{opt}(s) = v_0 \end{cases}$$

参数含义:

\dot{v} : 车辆的加速度;

$v_{opt}(s(t))$: 最优速度函数;

v : 车辆此时的瞬时速度;

τ : 时间常数, 代表速度向最优值调整的时间尺度。通常对应驾驶员的反应时间或者车头时距, 一般取 $1 \sim 2 \text{ s}$ 。较小的 τ 意味着更快的响应, 代表更激进的驾驶; 相反的, 代表更保守的驾驶。

情景分析: ①当 $v_{opt}(s) > v$, 此时间距 s 较大, 加速度为正值, 车辆会加速以接近最优速度;
②当 $v_{opt}(s) < v$, 此时间距 s 较小, 加速度为负值, 车辆会减速以避免碰撞。

$v_{\text{opt}}(s)$ 函数的表现形式

①双曲正切表现形式:

$$v_{\text{opt}}(s) = v_0 \frac{\tanh\left(\frac{s}{\Delta s} - \beta\right) + \tanh \beta}{1 + \tanh \beta}$$

参数含义:

s : 车辆间距;

Δs : 过渡宽度, 表示最优速度从低值 (接近0) 向高值 (接近 v_0) 过渡的间距尺度。它控制函数的“敏感区”宽度, 即速度随间距变化的过渡范围;

β : 形式因子, 一个无量纲参数, 用于调整双曲正切 (\tanh) 函数的形状。它影响曲线的陡峭度和对称性, 较大的 β 会使过渡更陡峭。

②比较表现形式:

$$v_{\text{opt}}(s) = \max\left[0, \min\left(v_0, \frac{s - s_0}{T}\right)\right]$$

参数含义:

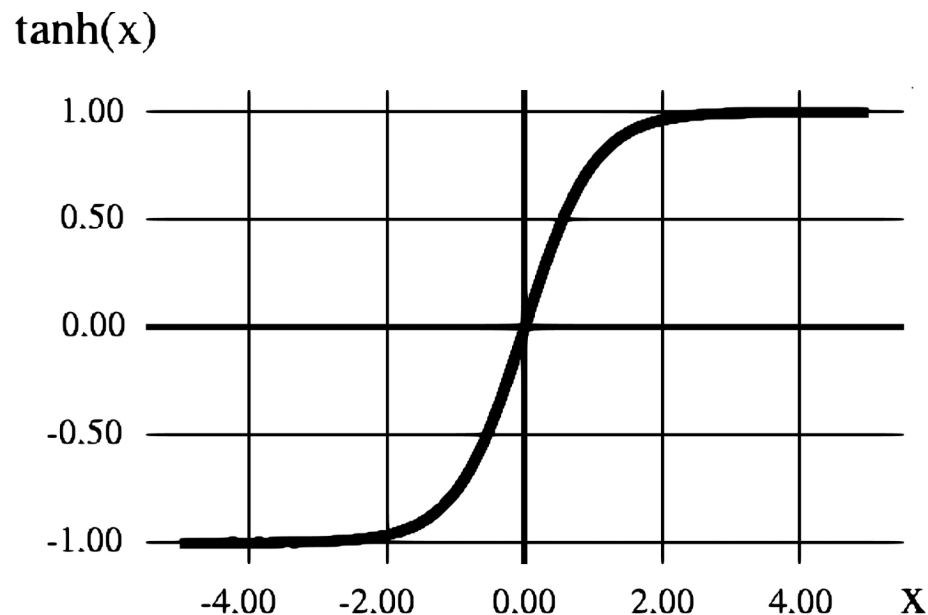
s_0 : 最小静止间距, 代表车辆完全停止时必须保持的最小距离 (包含车长), 以免碰撞;

T : 时间间隙, 也称为期望时间间隙, 表示驾驶员希望保持的安全车头时距。它控制速度随间距线性增加的斜率, 单位为秒。

双曲正切函数

双曲正切函数：

$$\tanh(x) = \frac{\sinh(x)}{\cosh(x)} = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$



函数图像

- 函数性质：**
- ①定义域与值域，定义域在 $(-\infty, +\infty)$ ，值域在 $(-1, 1)$ 之间；
 - ②奇函数；
 - ③渐近线，当 $x \rightarrow +\infty$ ， $\tanh(x) \rightarrow 1$ ；当 $x \rightarrow -\infty$ ， $\tanh(x) \rightarrow -1$ ；
 - ④平滑性，是一个连续可导的“s”形曲线。

模型类别	定义	核心思想	关键要素	适用场景	优缺点
2.3 全速度差模型 (FVDM)	时间连续的跟驰模型, 扩展OVM, 通过添加加速度差项来改善对领车速度变化的响应。	OVM + 相对速度刺激。 在OVM的基础上, 增加了对本车与前车速度差的反应, 认为驾驶员不仅看距离, 也看相对速度。	①车辆间距 s ②速度差 Δv ③敏感系数 γ	需要比最优速度模型 (OVM) 更高稳定性的场景	优点: 比OVM更稳定, 解决了OVM在某些情况下的不切实际行为。 缺点: 在远距离时对速度差的反应仍然存在, 不符合实际。

计算公式:

$$\dot{v} = \frac{v_{\text{opt}}(s) - v}{\tau} - \gamma \Delta v$$

参数含义:

\dot{v} : 车辆的加速度;

$v_{\text{opt}}(s(t))$: 最优速度函数;

v : 车辆此时的瞬时速度;

τ : 时间常数;

γ : 速度差敏感度参数, 单位: s^{-1} , 用来控制速度差 Δv 的响应强度, 通常取**正值**。即增强模型对前车车速变化的敏感度, γ 越大, 代表驾驶员刹车刹的越早、越猛;

Δv : 速度差, 是指**本车车速与前车车速的差值**。

情景分析: ①前半部分 $\frac{v_{\text{opt}}(s) - v}{\tau}$, 与OVM相同;

②后半部分 $-\gamma \Delta v$, 是扩展项, 对速度差的线性刺激。

I. 若 $\Delta v > 0$, 即本车车速比前车车速**快**, 两车正在**接近**, 扩展项为**负**, 车辆**减速**, 避免碰撞;

II. 若 $\Delta v < 0$, 即本车车速比前车车速**慢**, 两车正在**拉开**, 扩展项为**正**, 车辆**加速**, 跟进前车。

改进后的FVDM

计算公式:

$$\dot{v} = \frac{v_{opt}(s) - v}{\tau} - \frac{\gamma \Delta v}{\max[1, s/(v_0 T)]}$$

参数含义:

 s : 车辆间距; v_0 : 期望速度; T : 车辆之间的最小安全时距, 车辆保持安全的时间间距, 以防追尾碰撞; $v_0 T$: 代表了在没有任何交通干扰的情况下, 车辆应保持的最小车距, 即理想的安全车距;

情景分析: $s/(v_0 T)$ 相当于一个“比值常数”, 即实际间距与理想安全间距的比值。

①当 $s > v_0 T$, 车辆间距**足够大**, 此时处于自由流或弱跟车状态, 取 $s/(v_0 T)$;

②当 $s < v_0 T$, 车辆间距**较小**, 此时处于拥堵状态, 取 1。

模型类别	定义	核心思想	关键要素	适用场景	优缺点
2.4 Gipps 模型	离散时间跟驰模型，基于避免碰撞的安全速度计算，假设恒定减速以确保在最坏情况下停止。	安全避撞策略。 分析在最坏情况（前车急刹）下也能避免碰撞的最大安全速度。	①反应时间 Δt ②最大制动能力 b ③安全速度 v_{safe}	①商业交通仿真软件 ②复杂的城市与高速路网仿真	优点： 严格无碰撞；参数物理意义明确；计算效率高。 缺点： 加减速切换突兀，缺乏舒适性，加速度曲线不平滑。

计算公式：

$$v(t + \Delta t) = \min[v + a\Delta t, v_0, v_{safe}(s, v_l)]$$

$$v_{safe}(s, v_l) = -b\Delta t + \sqrt{b^2\Delta t^2 + v_l^2 + 2b(s - s_0)}$$

参数含义：

$v(t + \Delta t)$ ：经过 Δt 时间后的车速，表示更新后的速度；

v ：车辆此时的瞬时速度；

a ：自由流加速度，代表车辆在无约束条件下的最大加速度，常取 2 m/s^2 ；

Δt ：是指反应时间或者时间步长、时间间隔；

v_0 ：期望车速；

$v_{safe}(s, v_l)$ ：安全速度函数，依赖于净间距 s 和前车车速 v_l 的速度函数。

b ：最大减速度，常取 3 m/s^2 ，代表车辆能够施加的最大刹车力度，反映车辆的制动性能。

s_0 ：最小静止间距，代表车辆完全停止时必须保持的最小距离（包含车长），以免碰撞。

情景分析：车速由三个条件中的最小值决定。

①当驾驶员试图加速，车速无法超过期望车速 v_0 ，受到安全约束限制；

②当净间距 s 变大时，前车车速 v_l 值变大，进而安全速度 v_{safe} 值变大，此时车速由 $v + a\Delta t$ 和 v_0 这两项来决定；

③当净间距 s 变小时，前车车速 v_l 值变小，进而安全速度 v_{safe} 值变小，此时车速由 v_{safe} 决定，车辆减速或保持车速防止发生事故。

模型类别	定义	核心思想	关键要素	适用场景	优缺点
2.5 智能驾驶模型 (IDM)	时间连续的跟驰模型, 使用加速度函数结合自由加速度和基于动态期望安全距离的交互项, 模拟智能制动和舒适驾驶。	期望与安全的平衡。 驾驶员在追求期望速度 (自由流) 和保持期望净间距 (跟驰) 之间进行连续平滑的平衡。	①期望车头时距 T ②自由流加速度 a ③舒适制动减速度 b ④期望速度 v_0	①高精度的微观仿真 ②ACC (自适应巡航) 控制算法开发 ③交通状态估计	优点: 加速度变化连续且平滑; 参数直观且易于标定; 能复现各种交通拥堵模式。 缺点: 在极个别变道切入场景下可能反应过度。

计算公式:

$$\dot{v} = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right]$$

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + \max \left(0, vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \right)$$

参数含义:

\dot{v} : 车辆加速度; a : 自由流加速度; v : 车辆此时的瞬时速度; v_0 : 期望车速;

δ : 加速指数, 常取4, 控制加速度随速度 v 接近 v_0 时减小的陡峭程度, δ 值较小时, 代表更平缓的加速。

$s^*(v, \Delta v)$: 动态“期望安全距离”, 即希望保持的理想间距; s : 净间距; s_0 : 最小静止间距;

Δv : 本车车速与前车车速的差值; T : 期望车头间距, (bumper to bumper);

b : 舒适制动减速度参数, 用于体现动态刹车的量纲或强度, 单位 m/s^2 。

情景分析: ①**自由加速项** $a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^\delta \right]$, 当与前车无交互作用, 即 $s \rightarrow \infty$, $\lim_{s \rightarrow \infty} \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 = 0$, 车辆就会向 v_0 加速, 指数 δ 控制车速接近 v_0 时的快慢;

②**交互项** $-a \left[\left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right]$, 当实际车距 s 小于期望安全车距 s^* 时, $\left(\frac{s^*}{s} \right)$ 变大, 产生负加速度, 即车辆减速制动, 以恢复安全车距。并且, 距离越小, 制动越强。