

基于队列稳定性的混合车队碰撞风险演化机理研究

一、研究背景及意义

■ 自动驾驶让交通更安全？

- 自动驾驶车辆的加入，会使交通道路情况更加复杂，产生新的交通安全隐患
- 近年来，特斯拉的一些负面新闻使人们更加关注自动驾驶的安全性



■ 怎么评估交通的安全性？

- 在车辆行驶中，跟驰行为是最常见的驾驶行为，也蕴含了多种事故发生的隐患
- 可以用碰撞风险来描述安全性
- 但碰撞风险指标的获取往往是滞后的，不能起到对危险进行预告的作用



■ 怎样预先知道交通的安全性？

- 危险多是由车队中的扰动造成的，车队对扰动的放大/抑制作用由车队的稳定性描述
- 车队的稳定性与安全性是否有相关性？



建立车队稳定性与安全性的关系
以稳定性预测安全性



人工驾驶和自动驾驶混合车流
稳定性分析更加复杂
碰撞风险的演化机理更加复杂

二、跟驰模型的选择

■ 自动驾驶车辆：基于 PID 控制的车头时距控制算法

$$\dot{v}_n(t) = k_1 [h_n(t) - l - t_h v_n(t)] + k_2 [v_{n-1}(t) - v_n(t)]$$

其中，

符号	意义
$\dot{v}_n(t)$	第 n 辆车在 t 时刻的加速度
$v_n(t)$	第 n 辆车在 t 时刻的速度
t_h	车头时距
$h_n(t)$	第 n 辆车在 t 时刻与前车的距离
k_1, k_2	控制系数

该控制算法主要是控制车头时距 t_h 。如果当前车头时距小于给定的 t_h ，车辆会减速；反之，车辆会加速。

$$G_A(s) = \frac{k_2 s + k_1}{(\Delta t + k_2 t_h) s^2 + (k_2 + k_1 t_h) s + k_1}$$

■ 人工驾驶车辆：OVM

$$\begin{aligned} \dot{v}_n(t) &= \kappa \{V[h_n(t)] - v_n(t)\} \\ V[h_n(t)] &= v_0 \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{\alpha}{v_0} (h_n(t) - s_0) \right] \right\} \end{aligned}$$

其中，

符号	意义
$\dot{v}_n(t)$	第 n 辆车在 t 时刻的加速度
$v_n(t)$	第 n 辆车在 t 时刻的速度
$h_n(t)$	第 n 辆车在 t 时刻与前车的车头时距
$V(\cdot)$	优化速度函数
κ	敏感系数
v_0	自由流速度
α	敏感系数
s_0	最小安全间距

首先计算均衡速度和均衡距离，令 $\dot{v}_n(t) = 0$ ，有

$$1 - \exp \left[-\frac{\alpha}{v_0} (h_e(t) - s_0) \right] = \frac{v_e}{v_0}$$

得到均衡距离和均衡速度之间的关系

$$h_e = s_0 - \frac{v_0}{\alpha} \ln \left(1 - \frac{v_e}{v_0} \right)$$

可以看出，均衡距离与均衡速度呈现正相关的关系，这与直观感受一致。

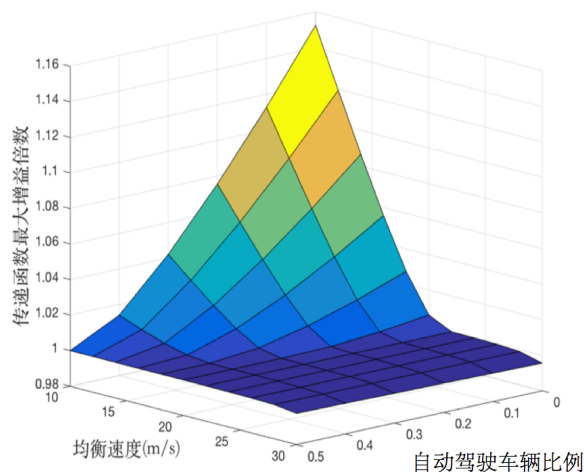
可以得到 OVM 的传递函数

$$G_H(s) = \frac{\kappa V'(h_e)}{s^2 + \kappa s + \kappa V'(h_e)}$$

三、稳定性判据

记人工驾驶车辆的传递函数为 $G_H(\omega)$ ，自动驾驶车辆的传递函数为 $G_A(\omega)$ ，车队中自动驾驶车辆的占比为 p 。若 $\|G_H(\omega)^{1-p} \cdot G_A(\omega)^p\|_{\infty} \leq 1$ ，则认为车队稳定，反之认为不稳定。

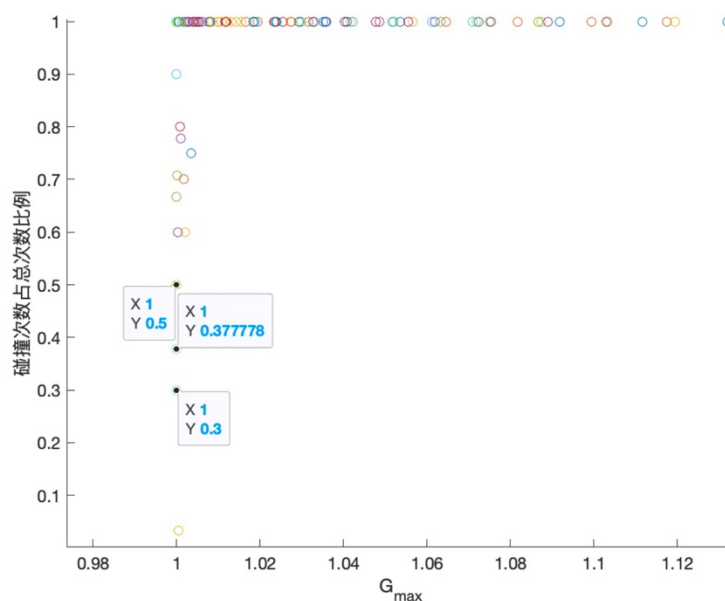
同时为了定量评估车队的稳定性，定义了稳定性指标 $G_{max} = \|G_H(\omega)^{1-p} \cdot G_A(\omega)^p\|_{\infty}$ ，在两种跟驰模型参数确定时，该指标只与自动驾驶车辆的占比 p 以及车流速度 V_e 相关，关系如下图所示。



四、目前结论

■ 追尾碰撞

在仿真中，改变自动驾驶车辆占比以及车流速度，观察车队的安全性。发现一些情况下，车辆会发生碰撞，而一些情况下不会。于是探究了“是否发生碰撞”和“车队的稳定性”的关系，如下图所示。



首先解释一下纵坐标“比例”的含义，相同的 G_{max} 意味着确定的自动驾驶车辆的占

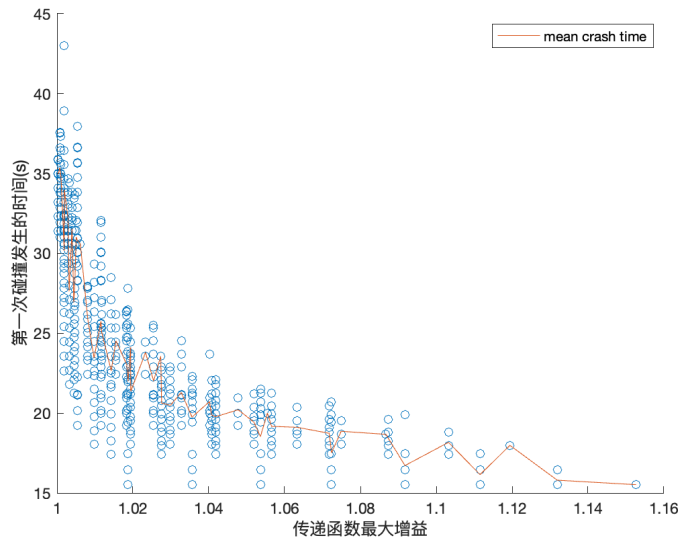
比 p 以及车流速度 V_e ，但可能对应着很多种车辆的排列方式，即改变车队中自动驾驶和人工驾驶车辆的排列顺序， G_{max} 是不变的。这里的“比例”就是在所有排列下，发生了碰撞的排列所占的比例。

上图就说明在不稳定的情况下（ $G_{max} > 1$ ），很有可能发生碰撞；不稳定的程度越高，发生碰撞的可能性也越高；在稳定的情况下，也有可能发生碰撞。

对于发生碰撞与不发生碰撞的情况，衡量安全性的指标也应该是不同的，感觉应该将两种情况分开进行讨论。

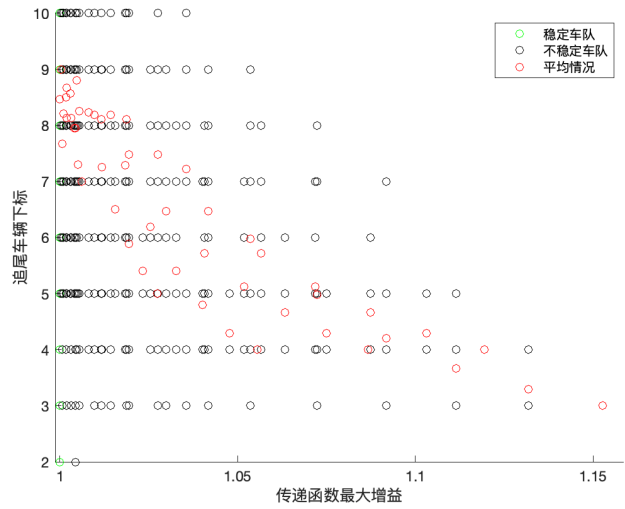
■ 碰撞情况分析

直观的感受是，车队越不稳定，碰撞发生的越快，于是对“车队稳定性”和“第一次碰撞发生的时间”的关系进行了探究，结果如下图所示。



可以看出二者是存在一定的相关性的，且呈现的规律与直观感受一致，稳定性越低，碰撞发生的越早。

在空间上也有一定的规律，如下图所示



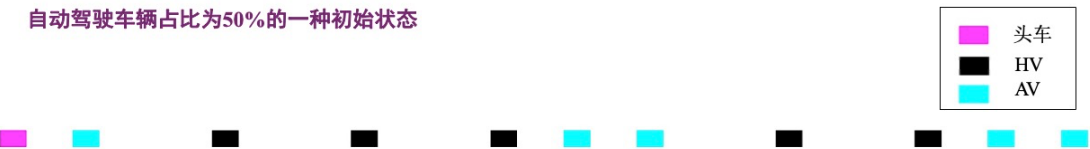
可以看出车队越不稳定，第一次追尾中追尾的车辆越靠前。当头车产生扰动后，扰

动沿着车队传播，车队越不稳定，扰动被放大得越快，碰撞就发生得越靠前。

再具体分别对稳定与不稳定两种情况下发生最为车辆的类型进行分析，如下图所示。

	车辆类型	数量	占比
稳定	AV	83	97.65%
	HV	2	2.35%
不稳定	AV	3077	54.14%
	HV	2606	45.86%

可以明显发现在稳定情况下，碰撞多是由自动驾驶车辆造成的，猜想这是因为自动驾驶车辆的策略不够安全。通过可视化的仿真过程也可以发现在均衡状态下，车队中自动驾驶车辆会离前车更近，在有扰动时容易来不及避让从而发生追尾。均衡状态下的一种车队情况如下图所示。

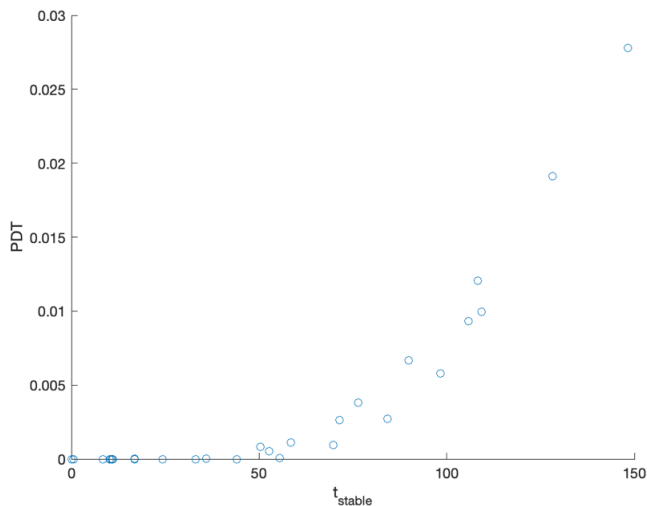


可以观察到自动驾驶车辆（AV）离前车更近，这可以通过增大自动驾驶车辆控制策略中的参数（理想车头时距）进行改善，但增大理想车头时距会降低通行效率，所以需要在安全与效率间进行取舍。

■ 非碰撞情况分析

在车队不发生碰撞的情况下， G_{max} 的差异不大，故使用 t_{stable} 作为稳定性指标，其定义是从加入扰动到尾车速度稳定在 5% 以内所需的时间。 t_{stable} 越大，说明车队的稳定性越差。

对 t_{stable} 和安全性指标潜在危险时间比例（PDT）之间的关系进行探究，结果如下图所示。



可以观察到在 t_{stable} 较小时（小于 50s），车队均相对安全；当 t_{stable} 大于 50s 后，PDT 与 t_{stable} 呈现出明显的相关性。 t_{stable} 越大，说明车队的稳定性越差，车队的潜在危险时间比例也越大。