

基于驾驶行为的智能网联车辆与可变限速技术安全分析

蒲 翔

北京 2022 年冬奥会和冬残奥会组织委员会, 北京 102022

[摘要]已有部分研究分析了智能网联车辆与可变限速控制技术结合的安全效果,但缺乏基于驾驶行为特效的对比分析。文章研究了驾驶行为中的三个重要特性指标,即最小限速变化值、反应距离以及不遵章比例,通过建立的微观仿真平台进行了大量仿真分析,生成了微观车辆轨迹数据,并基于轨迹数据分析了智能网联车辆如何改进三种驾驶特性从而提高可变限速控制技术对高速公路安全改善的影响。文章的研究结果为高速公路在智能网联车辆环境下的安全改善提供了参考意义。

[关键词]可变限速;智能网联车辆;安全性;驾驶特性

DOI: 10.33142/sca.v5i5.7362

中图分类号: TP311.13

文献标识码: A

Safety Analysis of Intelligent Network Connected Vehicle and Variable Speed Limit Technology Based on Driving Behavior

PU Xiang

Beijing Organising Committee for the 2022 Olympic and Paralympic Winter Games, Beijing, 102022, China

Abstract: Some studies have analyzed the safety effect of the combination of intelligent networked vehicles and variable speed limit control technology, but there is a lack of comparative analysis based on the special effects of driving behavior. This paper studies three important characteristic indexes in driving behavior, that is, minimum speed limit change value, reaction distance and non-compliance ratio. Through the micro simulation platform established, a large number of simulation analyses are carried out, and micro vehicle trajectory data are generated. Based on the trajectory data, it analyzes how intelligent networked vehicles improve three driving characteristics to improve the impact of variable speed limit control technology on highway safety improvement. The research results of this paper provide a reference for the safety improvement of expressway in the intelligent network connected vehicle environment.

Keywords: variable speed limit; intelligent network connected vehicle; safety; driving characteristics

引言

可变限速控制是改善高速公路安全的重要方法之一,但其有效性受到人类驾驶员驾驶特性的影响。驾驶员在认识到有限速,决定是否服从并做出反应的整个过程中,受三个关键特性指标的影响,即最小限速变化值、反应距离和不遵章比例。最小限速变化值指相邻限速牌显示的限速差的最小值,反应距离指驾驶员观测到限速牌并做出反应的距离,不遵章比例指驾驶员中不遵守可变限速的比例值。这三种驾驶特性是人类的自然特征,本质上几乎无法改变,但它们对高速公路安全改善带了了负面影响。近些年来,智能网联车辆逐步成为研究热点。智能网联车辆能够实现车辆与路侧限速单元进行信息交换,并自动做出反应决策,因此能够有效解决上述三个人工驾驶特性带来的负面影响。因此,本文采用人工驾驶和智能网联车辆模型、可变限速控制算法以及替代安全指标进行了微观仿真分析,对智能网联车辆与可变限速控制改善高速公路安全效果进行了分析。

1 仿真平台

仿真平台包括车辆动力学模型、可变限速控制算法和替代安全指标三个部分。车辆动力学模型用于模拟并生成人工驾驶和智能网联车辆的车辆轨迹。微观车辆轨迹提供

了包括位置、速度和加速度在内的丰富的驾驶信息。替代性安全指标用于衡量车辆轨迹和碰撞风险之间的关系。

1.1 车辆动力学模型

1.1.1 人类驾驶员模型

智能驾驶模型是一种经典的跟驰模型,在以往研究中被广泛用于模拟人类驾驶员^[1-2]。Treiber 等人^[3]提出了这个模型,如下所示:

$$a = \alpha_m [1 - (\frac{v}{v_0})^4 - (\frac{s^*}{s})^2] \quad (1)$$

$$s^* = s_0 + \max[0, vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{\alpha_m\beta}}] \quad (2)$$

其中 a 表示目标车辆的加速度; α_m 代表最大加速度; v 和 v_0 分别是目标车辆的速度和期望速度; s 是目标和前车之间的距离; s_0 代表静止时的最小间距; T 是安全时间间隔; Δv 表示目标车辆和前车之间的速度差; β 是期望的最大减速度。

使用公式 (1) 中的动态加速度,可以计算车辆的速度和位置如下:

$$v = v_{prev} + a\Delta t \quad (3)$$

$$x = x_{prev} + v\Delta t + a(\Delta t)^2/2 \quad (4)$$

其中 x_{prev} 和 v_{prev} 表示目标车辆在前一时间步长中的位置和速度; Δt 为仿真时间步长。

智能驾驶员模型中共包含六个参数, 其中, 期望速度 v_0 设置为 33.3 米/秒, 最小间距 s_0 为 0 米, α_m 和 β 分别设置为 1.0 m/s^2 和 2.0 m/s^2 , 车头时距 T 为 1.5 s, 时间步长 Δt 设置为 0.1 s。

1.1.2 智能网联车辆模型

本文采用了美国加州研究所 PATH 提出的智能网联车辆模型^[4-5], 考虑两种类型的智能网联车辆, 一种是智能网联车队的头车, 另一种是车队中的跟驰车辆。车队头车的模型如下:

$$a_i = k_1(x_{i-1} - x_i - t_{hw}v_i - L_{i-1}) + k_2(v_{i-1} - v_i) \quad (5)$$

其中 a_i 表示目标车辆的加速度; x_{i-1} 和 v_{i-1} 分别表示前车的位置和速度; x_i 和 v_i 分别表示目标车辆的位置和速度; t_{hw} 表示车头时距; L_{i-1} 表示前面的车辆长度; k_1, k_2 代表模型系数。其中, 车头时距 t_{hw} 被设置为 1.1 s, $k_1 = 0.23 \text{ s}^{-2}$, $k_2 = 0.07 \text{ s}^{-1}$, 车辆长度都设置为 5 m。

对于车队中的跟驰车辆, 智能网联车辆模型可以表达如下:

$$e_i = x_{i-1} - x_i - t_{hw}v_i - L_{i-1} \quad (6)$$

$$v_i = v_{i, prev} + k_p e_i + k_d \dot{e}_i \quad (7)$$

其中 e_i 表示第 i -th 车辆的间距误差; $v_{i, prev}$ 表示上一次迭代中目标车辆的速度; k_p, k_d 代表模型系数; \dot{e}_i 表示间距误差的导数。 t_{hw} 设置为 0.6 秒, $k_p=0.45, k_d=0.25$ 。

1.2 可变限速控制

根据已有研究^[6], 可变限速控制算法的关键步骤是根据避免发生追尾的条件确定上游限速, 其计算限速值可以确定如下:

$$V_{SL}(x_i, t + \Delta T) = \text{Round}\left\{V(x_{i-1}, t) - \beta t_a + \sqrt{\beta^2 t_a^2 + 2\beta \bar{L} \left[\frac{1 - O(x_i, t)}{O(x_i, t)} \right]} \right\} \quad (8)$$

其中 $V_{SL}(x_i, t + \Delta T)$ 表示计算出的避免在 $t + \Delta T$ 时间 x_i 地点发生追尾碰撞的速度; $V(x_{i-1}, t)$ 表示在时间 t 从 x_{i-1} 处采集的速度; t_a 是感知反应时间, 对于人类驾驶员和智能网联车辆分别设置为 1.0 s 和 0.5s; ΔT 表示环路检测器采集数据的时间间隔, 本研究中使用 30 秒; \bar{L} 是平均车辆长度, 设置为 5m; $O(x_i, t)$ 代表在时间 t 从 x_i 处采集的占用率。Round 函数代表 V_{SL} 为最小限速变化的倍数, 在本研究中测试了 10、5 和 0.1 km/h。

计算限速值无法直接应用, 因为它可能会导致交通流的骤变。因此, 采用速度变化率 ΔV_{SL} 限制时间间隔 ΔT 内的最大速度变化。实际限速值 V'_{SL} 可以确定如下:

$$V'_{SL}(x_i, t + \Delta T) = V_{SL}(x_i, t) - \Delta V_{SL}, \text{ if } V_{SL}(x_i, t + \Delta T) < V_{SL}(x_i, t) - \Delta V_{SL} \quad (9)$$

$$V'_{SL}(x_i, t + \Delta T) = V_{SL}(x_i, t) + \Delta V_{SL}, \text{ if } V_{SL}(x_i, t + \Delta T) > V_{SL}(x_i, t) + \Delta V_{SL} \quad (10)$$

$$V'_{SL}(x_i, t + \Delta T) = V_{SL}(x_i, t + \Delta T), \text{ if } V_{SL}(x_i, t) - \Delta V_{SL} \leq V_{SL}(x_i, t + \Delta T) \leq V_{SL}(x_i, t) + \Delta V_{SL} \quad (11)$$

1.3 替代安全指标

TTC (Time to collision, 距离碰撞时间), 是最常用的替代性安全指标之一。TTC 描述了如果后车不改变驾驶条件(改变速度或车道), 它与前车相撞的时间。在时间步长 t , 相对于前一车辆 $i-1$, 后一车辆 i 的 TTC 可以如下确定:

$$TTC_i(t) = \begin{cases} \frac{x_{i-1}(t) - x_i(t) - \bar{L}}{v_i(t) - v_{i-1}(t)}, & \text{if } v_i(t) > v_{i-1}(t) \\ \infty, & \text{if } v_i(t) \leq v_{i-1}(t) \end{cases} \quad (12)$$

在 TTC 的基础上, 采用了两个扩展的指标, 即 TIT 和 TET, 用于估碰撞风险的集计结果:

$$TIT(t) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{TTC_i(t)} - \frac{1}{TTC^*} \right] \Delta t, \quad \forall 0 < TTC_i(t) \leq TTC^* \quad (13)$$

$$TIT = \sum_{t=1}^T TIT(t) \quad (14)$$

$$TET(t) = \sum_{i=1}^N \delta_t \Delta t, \quad \delta_t = \begin{cases} 1, & \forall 0 < TTC_i(t) \leq TTC^* \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (15)$$

$$TET = \sum_{t=1}^T TET(t) \quad (16)$$

其中, N 是车辆数量; TI 是总模拟时间间隔; TTC^* 为区分不安全跟车情况和安全跟车情况的阈值, 等于 2 秒^[7]。

1.4 仿真实验设计

本文对一段长为 10 公里高速公路路段进行仿真, 交通量为 1600 车辆/小时, 所有车辆最初以 30 米/秒的速度行驶。第一辆车运行到 8 公里处出现降速, 速度降低到 5 米/秒, 随后的跟驰车辆将持续做出反应。设置了 9 个间隔 1 公里的可变限速牌, 用于可变限速控制。每次实验仿真时长为 1.5 小时。采用没有任何可变限速控制的人类驾驶员驾驶场景作为对比的参考基线。针对三种不同驾驶特性, 分析智能网联车辆对可变限速控制的改善效果。

2 仿真结果与讨论

2.1 人工驾驶结果

表 1 显示了人工驾驶下不同反应距离和最小限速差值变化对安全造成的影响。以没有可变限速控制的场景结果作为参考基线, 计算 TIT 和 TET 两种安全评价指标的变化比例, 若变化比例为负, 则表示与无可变限速控制场景相比, 安全性有所提高, 反之亦然。表 1 显示了五种不同的反应距离, 从 50 米到 500 米, 并分析了三种最小限速差值的变化, 即 10 公里/小时、5 公里/小时和 0.1 公里/小时。

结果表明, TIT 和 TET 值的减小比例随着最小限速差值变化的减小而增大。例如, 如果反应距离为 100 米, 最小限速差值分别为 10 公里/小时、5 公里/小时和 0.1 公里/小时的情况下, TIT 从降低 5.82% 变化为降低 6.09% 和 9.81%。这一结果表明, 可变限速控制的较小限速差值可以提高高速公路的安全。其原因是较小的限速变化可以带来更精确的可变限速控制, 这有利于提高安全性。但是, 0.1 公里/小时的最小限速差值变化无法被人类驾驶员识

别和反应，因此需要智能网联车辆发挥其巨大作用。

表 1 不同反应距离与最小限速差值对安全的影响结果 (%)

TIT		反应距离 (米)					
		50	100	200	300	400	500
最小限速差值 (公里/小时)	10	0.36	-5.82	-6.04	-2.94	-6.47	-2.40
	5	-4.37	-6.09	-6.93	-6.12	-6.33	-7.03
	0.1	-6.31	-9.81	-8.80	-8.13	-9.13	-7.69
TET		反应距离 (米)					
		50	100	200	300	400	500
最小限速差值 (公里/小时)	10	-3.90	-8.83	-8.93	-5.15	-7.95	-5.68
	5	-8.15	-8.39	-9.16	-6.49	-9.34	-8.68
	0.1	-8.40	-12.51	-11.60	-10.01	-11.02	-11.71

另一个重要的结果是，人类驾驶员的反应距离并非越大越好。例如，如果最小限速差值为 10 公里/小时，在反应距离为 500m 时，TET 值降低 5.68%，而在反应距离为 100m 和 200m 时，降低率分别为 8.83% 和 8.93%。若将数据做出曲面分析图，可以得到 100m 和 200m 为最佳反应距离。这一结果表明对可变限速控制的过早反应可能不利于安全性的提高。其原因可能在于，对可变限速控制的过早反应会导致不必要的车辆减速，并增加碰撞风险。

此外，图 1 显示了遵章和不遵章对安全的影响结果。其中最小限速差值为 10 公里/小时，不遵章比例设置为 5%。显然，对于 100 m 和 200 m 的反应距离，遵章场景下的 TIT 和 TET 值的降低比例大于不遵章的情况。然而，对于 50 m 的反应距离，遵章场景下指标减少比例小于不遵章的场景。该结果表明，不遵章影响与反应距离有关。如上所述，100m 和 200m 是仿真中的最佳反应距离，因此遵守限速可以带来更好的安全性能。而 50 m 对于可变限速控制不是一个好的反应距离，在这种情况下，安全效果并不佳。同时，对于 100m 和 200m 的反应距离，仅 5% 的不遵章比例就会对安全性产生显著的影响。

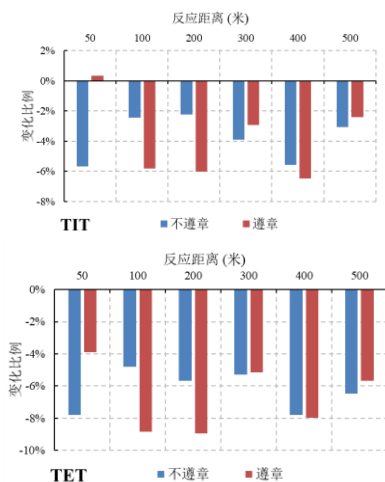


图 1 遵章与不遵章对安全的影响

2.2 智能网联车辆

为了进一步研究智能网联车辆的影响，仿真中测试了三种不同智能网联车辆占比的场景，即 5%、10% 和 15%。完全人工驾驶的场景被视为智能网联车辆占比 0%。表 2 和表 3 显示了不同反应距离和最小限速差值影响下的安全结果。对于人类驾驶员来说，最小限速差值变化不能太小，因为驾驶员几乎无法识别过于微小的变化并做出反应。因此，在模拟人工驾驶时，其最小限速差值设置为 5 公里/小时和 10 公里/小时。然而，对于智能网联车辆来说，无线通信和自动化技术有助于进行精确的检测和反应，因此 0.1 公里/小时的小速度变化也能实现。如表 2 所示，当交通流中的智能网联车辆占比逐渐增多时，即使智能网联车辆比例不高，TIT 和 TET 值的降低比例也明显随之增加。例如，当反应距离为 50 m 时，TIT 下降比例从 7.86% 增加到 17.02% 和 27.98%，分别对应于 5%、10% 和 15% 的智能网联车辆比例。相比之下，完全人工驾驶场景仅减少了 4.37% 的指标，表明了智能网联车辆的显著安全效果。表 3 中的结果显示了类似趋势。

对于最小限速差值为 5 公里/小时的人工驾驶场景，在距离为 300 米和 400 米的情况下获得最佳的安全效果。当该差值变化为 10 公里/小时时，200 米的反应距离具有降低碰撞风险的最佳性能。这一结果表明，在混合交通流中，在可变限速控制下，最小限速变化和反应距离可能对安全产生共同影响。如果最小限速变化值较大，过早反应不利于安全改进，而当最小限速变化值较小时，反应可能在较大的上游距离处触发。

此外，仿真还测试了 5% 的人工驾驶员被随机选择违反限速，所有智能网联车辆都遵守限速的场景。TIT 和 TET 值的减少比例随着较大的智能网联车辆占比而增加，这与上述结果一致。这一结果表明，虽然不遵章比例为 5%，包含智能网联车辆的混合交通流在安全改善方面仍表现较好。

表 2. 不同反应距离和智能网联车辆比例安全效果 (%，人工驾驶最小限速差值为 5 公里/小时)

TIT		反应距离 (米)					
		50	100	200	300	400	500
智能网联 车辆比例	0%	-4.37	-6.09	-6.93	-6.12	-6.33	-7.03
	5%	-7.86	-15.02	-9.55	-7.06	-15.54	-8.45
	10%	-17.02	-20.03	-17.78	-15.94	-20.31	-14.76
	15%	-27.98	-26.10	-24.69	-31.43	-27.47	-26.54
TET		反应距离 (米)					
		50	100	200	300	400	500
智能网联 车辆比例	0%	-8.15	-8.39	-9.16	-6.49	-9.34	-8.68
	5%	-8.21	-15.86	-11.32	-8.04	-16.72	-9.96
	10%	-15.29	-18.49	-15.87	-13.84	-17.71	-12.48
	15%	-22.75	-21.17	-19.75	-25.94	-23.23	-22.09

表 3 不同反应距离和智能网联车辆比例安全效果 (%)，人工驾驶最小限速差值为 10 公里/小时)

TIT		Reaction distance (m)					
		50	100	200	300	400	500
智能网联车辆比例	0%	0.36	-5.82	-6.04	-2.94	-6.47	-2.40
	5%	-7.92	-10.42	-10.57	-8.99	-7.53	-8.51
	10%	-16.40	-17.63	-21.59	-18.09	-16.53	-20.90
	15%	-23.87	-25.62	-29.92	-24.56	-24.86	-27.86
TET		Reaction distance (m)					
		50	100	200	300	400	500
智能网联车辆比例	0%	-3.90	-8.83	-8.93	-5.15	-7.95	-5.68
	5%	-8.84	-11.65	-11.33	-9.74	-8.97	-10.06
	10%	-13.90	-17.22	-18.60	-15.75	-15.09	-18.75
	15%	-20.01	-22.03	-25.54	-19.41	-20.65	-23.48

3 结论

本研究从三种不同的驾驶特性出发，探讨了在可变限速控制下智能网联车辆对提高高速公路安全性的影响。通过建立的微观仿真平台，包括人工驾驶和智能网联车辆的车辆动力学模型、可变限速控制算法以及替代安全指标，进行了大量的仿真实验，并对三种特性进行了深入分析，结果表明了智能网联车辆在针对不同驾驶特性提高可变限速控制方面的显著安全效果。

[参考文献]

- [1]Kesting, A., Treiber, M., Schnhof, M., & Helbing, D. Adaptive cruise control design for active congestion avoidance[J]. Transportation research. Part C, Emerging technologies, 2008, 16(6): 668-683.
- [2]Kesting, A., Treiber, M., & Helbing, D. Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity[J].

Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2010, 368(1928): 4585-4605.

[3]Treiber, M., Hennecke, A., & Helbing, D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations[J]. Physical review E, 2000, 62(2): 1805.

[4]Milanés, V., Shladover, S. E., Spring, J., Nowakowski, C., Kawazoe, H., & Nakamura, M. Cooperative adaptive cruise control in real traffic situations[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 15(1): 296-305.

[5]Milanés, V., & Shladover, S. E. (2014). Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014(48): 285-300.

[6]Li, Y., Xu, C., Xing, L., & Wang, W. (2017). Integrated cooperative adaptive cruise and variable speed limit controls for reducing rear-end collision risks near freeway bottlenecks based on micro-simulations[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2017, 18(11): 3157-3167.

[7]Meng, Q., & Qu, X. Estimation of rear-end vehicle crash frequencies in urban road tunnels[J]. Accident Analysis & Prevention, 2012(48): 254-263.

作者简介：蒲翔（1990.6-），毕业院校：东南大学；所学专业：交通运输规划与管理，当前就职单位：北京 2022 年冬奥会和冬残奥会组织委员会，当前就职单位职务：抵离中心项目工程师，职称级别：中级工程师。