

最相邻后车综合信息对交通流不稳定性的影响分析*

曾友志[†] 张宁

(北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100191)

(2014年5月26日收到; 2014年6月15日收到修改稿)

基于抑制交通流不稳定性所需的条件, 分析司机后视获得的最相邻后车综合信息对交通流不稳定性的影响. 在司机关注前车信息概率大于关注后车信息概率与司机敏感系数大于0的现实条件下, 解析分析以及仿真分析得到了以下结论: 1) 最相邻后车车头距信息减小了交通流的不稳定性, 且关注概率越大, 减小作用越大; 跟驰车与最相邻后车的速度差信息增加了交通流的不稳定性, 且关注概率越大, 增加作用越大. 2) 最相邻后车综合信息对交通流的不稳定性的减小作用大于增加作用, 即最相邻后车综合信息减小了交通流的不稳定性. 3) 司机距离差敏感系数越大, 最相邻后车综合信息对交通流的不稳定性减小作用越大. 4) 司机速度差敏感系数越大, 最相邻后车综合信息对交通流的不稳定性增加作用越大.

关键词: 交通堵塞, 交通流不稳定性, 最相邻后车综合信息, 跟驰模型

PACS: 89.40.-a, 45.70.Vn, 05.45.-a

DOI: 10.7498/aps.63.218901

1 引言

在现代社会, 交通堵塞已经成了一种亟待解决的极为严重的社会问题. 交通堵塞可看成是交通流不稳定性的一种表现, 抑制与缓解交通堵塞即是减小交通流的不稳定性. 加强交通流不稳定性的研究是解决交通堵塞的一个有效措施, 与之相应的理论即是交通流理论. 其中微观交通流理论主要包括跟驰模型和元胞自动机模型, 跟驰模型将交通流处理为分散的粒子组成, 通过研究单个车辆的前后作用, 了解交通流的特性. 这种特征使得跟驰模型能较好的反映现实, 具有较强的实际意义, 从而成为了当今交通流研究的核心内容之一. 许多学者提出了自己的跟驰模型, 得到了许多具有理论与现实意义的结论^[1-24]. 其中, 1995年Bando等^[3]提出了优化速度(OV)模型, 考虑了由跟驰车车头距所决定的最优速度、跟驰车速度

以及隐含的考虑了司机反应时间. 国内外学者基于OV模型提出了许多扩展模型^[4-24]. Helbing和Tilch^[4]认为当前车速度小于后车时, 需要考虑跟驰车与最相邻前车速度差的影响, 提出了广义力(GF)模型. 姜锐等^[6,7]基于GF模型, 认为当前车速度大于后车时, 也需要考虑跟驰车与最相邻前车速度差信息, 提出了全速度差(FVD)模型. 薛郁等^[8,9]也提出了类似模型. FVD模型比较全面的考虑了车辆运动规律的常见影响因素, 可以比较好地解释交通堵塞、疏导、幽灵塞车、时走时停等车流现象, 许多学者基于FVD模型, 开展了相关研究. 基于跟驰模型研究后车信息对交通流不稳定性的影响, 少数学者进行了探讨^[11-15]: Hayakawa和Nakanishi^[11], Nakayama等^[12], Hasebe等^[13], Ge等^[14]等基于OV模型, 孙棣华等^[15]基于FVD模型, 考虑了后车车头距信息, 提出了扩展模型, 研究表明后车信息能够减小交通流的不稳定性. 实际驾驶中, 司机不仅瞻前(一般前三车^[16-19])而且顾后

* 国家自然科学基金(批准号: 70971003)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: simon.zen@163.com

(一般后一车^[25], 即最相邻后车), 每隔5—10 s会通过后视镜关注最相邻后车的信息, 且关注时间不超过2 s. 司机受到最相邻后车信息的影响^[26], 进而会影响交通流的不稳定性. 然而文献[11—15]没有考虑跟驰车与最相邻后车速度差信息对交通流不稳定性的影响, 即对最相邻后车信息考虑不全面. 为此, 本文提出模型, 基于抑制交通流不稳定性所需的条件, 更为全面分析最相邻后车信息对交通流不稳定性的影响. 本文的工作是考虑跟驰车与最相邻后车速度差与距离差信息对交通流不稳定性的综合影响; 分别考虑两者各自对交通流不稳定性的影响; 研究司机敏感系数如何影响最相邻后车综合信息对交通流不稳定性的综合影响. 本文中最相邻后车综合信息指的是最相邻后车与跟驰车的速度差与距离差信息, 下同.

2 模型

少数学者提出了考虑最相邻后车或更多相邻后车车头距信息的扩展跟驰模型, 并基于这些模型对后车信息对交通流不稳定性的影响进行了相关研究^[11—15].

1998年Hayaka和Nakanishi^[11]基于OV模型首先提出了考虑最相邻后车车头距信息的扩展模型, 研究了后车信息对交通流不稳定性的影响. 模型控制方程为

$$a_n(t) = a[u(x_{n+1}(t) - x_n(t))v(x_n(t) - x_{n-1}(t)) - v_n(t)], \quad (1)$$

其中 $a_n(t)$ 为跟驰车在 t 时刻的加速度, a 为司机距离差敏感系数, $x_{n+1}(t)$, $x_n(t)$, $x_{n-1}(t)$ 分别为最相邻前车 $n+1$ 、跟驰车 n 、最相邻后车 $n-1$ 在 t 时刻的位置, $v_n(t)$ 为跟驰车在 t 时刻的速度, $u(\cdot)$ 为单调递增的优化速度函数, $v(\cdot)$ 为单调递减的优化速度函数, 具体为

$$\begin{aligned} u(\Delta x_n(t)) &= \tanh(\Delta x_n(t) - 2) + \tanh(2), \\ v(\Delta x_{n-1}(t)) &= 1 + f_0(1 - \tanh(\Delta x_{n-1}(t) - 2)), \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $\Delta x_n(t) = x_{n+1}(t) - x_n(t)$, $\Delta x_{n-1}(t) = x_n(t) - x_{n-1}(t)$ 分别为跟驰车与最相邻后车的车头距, f_0 为一非负常数. 模型中优化函数的不同单调性反应了前后车信息对于跟驰车的不同影响, 当

$f_0 = 0$ 时, 模型不考虑后车信息对交通流不稳定性的影响.

2001年Nakayama等^[12]基于OV模型提出考虑最相邻后车车头距信息的扩展模型: 后视化优化速度模型即BL-OV模型, 研究了后车信息对交通流不稳定性的影响. 模型控制方程为

$$a_n(t) = a[V_F(\Delta x_n(t)) + V_B(\Delta x_{n-1}(t)) - v_n(t)], \quad (3)$$

其中, 优化函数表达式为

$$\begin{aligned} V_F(\Delta x_n(t)) &= a'[\tanh(\Delta x_n(t) - \beta) + \gamma], \\ V_B(\Delta x_{n-1}(t)) &= -a''[\tanh(\Delta x_{n-1}(t) - \beta) + \gamma], \end{aligned} \quad (4)$$

其中 a' , β , γ , a'' 都是正常数.

2003年Hasebe等^[13]考虑了任意相邻前车及后车车头距信息对交通流不稳定性的影响, 对OV模型进行了较为彻底的扩展, 研究了后车信息对交通流不稳定性的影响. 模型控制方程为

$$a_n(t) = a[V(\Delta x_{n+k_+}(t), \dots, \Delta x_{n+1}(t), \Delta x_n(t), \Delta x_{n-1}(t), \dots, \Delta x_{n-k_-}(t)) - v_n(t)], \quad (5)$$

其中 $V(\cdot)$ 为优化速度函数, 单调递增有上界, $\Delta x_{n+k}(t) = x_{n+k+1}(t) - x_{n+k}(t)$, $k = k_+, k_+ - 1, \dots, -k_-$ 表示跟驰车 n 前或后的第 k 辆车, 当 $k_- = 0$ 时模型不考虑后车信息对交通流不稳定性的影响.

2012年孙棣华等^[15]基于FVD模型, 提出了考虑最相邻后车车头距信息的扩展模型, 研究了最相邻后车信息对交通流不稳定性的影响. 模型控制方程为

$$a_n(t) = a[pV_F(\Delta x_n(t)) + (1-p)V_B(\Delta x_{n-1}(t)) - v_n(t)] + r\Delta v_n(t), \quad (6)$$

其中 p 表示最相邻前车对跟驰车的影响程度, r 为司机速度差敏感系数, $V_F(\Delta x_n(t))$, $V_B(\Delta x_{n-1}(t))$ 同BL-OV模型.

文献[11—15]的研究说明了后车信息有利于减小交通流的不稳定性, 但仅考虑了最相邻后车车头距信息, 而忽略了最相邻后车与跟驰车相对速度信息, 即对最相邻后车信息的考虑是不全面的, 所得结论有待进一步确认. 为此, 本文考虑最相邻后车与跟驰车相对速度与距离差信息, 研究最相邻后车综合信息对交通流不稳定性的影响.

假设司机关注与最相邻后车距离差的概率为 p^x , 关注与最相邻前车距离差的概率为 $1 - p^x$; 关注与最相邻后车速度差的概率为 p^v , 关注与最相邻前车速度差的概率为 $1 - p^v$, 模型控制方程为:

$$\begin{aligned} a_n(t) = & a[(1 - p^x)V(\Delta x_n(t)) + p^x(-V(\Delta x_{n-1}(t))) \\ & - v_n(t)] + r(1 - p^v)\Delta v_n(t) \\ & + rp^v(-\Delta v_{n-1}(t)), \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $0 \leq p^x < \frac{1}{2}$, $0 \leq p^v < \frac{1}{2}$, 即司机观察最近前邻车信息的概率大于观察最近后邻车信息的概率; 另现实交通中一般司机距离差敏感系数 $a > 0$, 这些显然是成立的, 下文如无说明, 则按此假设. $p^x = p^v = 0$ 时, 不关注最相邻后车任何信息, 模型为 FVD 模型, 此时最相邻后车综合信息对交通流不稳定性的综合影响为 0.

3 交通流不稳定性影响解析分析

本节对最相邻后车综合信息对交通流不稳定性的影响进行解析分析. 假定初始时刻交通流在环形道路上行驶, 为均匀流状态, 各车车头距都为 b , 速度都为 $V(b)$, t 时刻各车的初始位置为

$$x_n^0(t) = bn + V(b)t. \quad (8)$$

车辆受到扰动后, 车辆位置变为

$$x_n(t) = x_n^0(t) + y_n(t) = bn + V(b)t + y_n(t), \quad (9)$$

则

$$\begin{aligned} \Delta x_n(t) &= x_{n+1}(t) - x_n(t) \\ &= b + y_{n+1}(t) - y_n(t) \\ &= b + \Delta y_n(t), \end{aligned} \quad (10a)$$

$$\begin{aligned} v_n(t) &= dx_n(t)/dt \\ &= dy_n(t)/dt + dx_n^0(t)/dt \\ &= dy_n(t)/dt + V(b), \end{aligned} \quad (10b)$$

$$\begin{aligned} a_n(t) &= d^2x_n(t)/dt^2 \\ &= d^2y_n(t)/dt^2. \end{aligned} \quad (10c)$$

将 (10a)—(10c) 代入 (7) 式且一阶泰勒展开可得

$$\begin{aligned} & d^2y_n(t)/dt^2 \\ &= a(1 - p^x)[V'(b)\Delta y_n(t) - dy_n(t)/dt] \\ &+ ap^x[-V'(b)\Delta y_{n-1}(t) - dy_n(t)/dt] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + r(1 - p^v)d\Delta y_n(t)/dt \\ & - rp^vd\Delta y_{n-1}(t)/dt. \end{aligned} \quad (11)$$

令

$$y_n(t) = e^{jn\alpha_k + zt}, \quad (12)$$

则

$$\begin{aligned} \Delta y_n(t) &= (e^{j\alpha_k} - 1)e^{jn\alpha_k + zt}, \\ \Delta y_{n-1}(t) &= (e^{j\alpha_k} - 1)e^{j(n-1)\alpha_k + zt}, \end{aligned} \quad (13a)$$

$$\begin{aligned} d\Delta y_n(t)/dt &= ze^{jn\alpha_k + zt}(e^{j\alpha_k} - 1), \\ d\Delta y_{n-1}(t)/dt &= ze^{j(n-1)\alpha_k + zt}(e^{j\alpha_k} - 1), \end{aligned} \quad (13b)$$

$$dy_n(t)/dt = ze^{jn\alpha_k + zt} \quad (13c)$$

$$d^2y_n(t)/dt^2 = z^2e^{jn\alpha_k + zt}. \quad (13d)$$

(13a)—(13d) 式代入 (11) 式化简可得

$$\begin{aligned} z^2 &= a(1 - p^x)[V'(b)(e^{j\alpha_k} - 1) - z] \\ &+ ap^x[-V'(b)(1 - e^{-j\alpha_k}) - z] \\ &+ r(1 - p^v)z(e^{j\alpha_k} - 1) \\ &- rp^vz(1 - e^{-j\alpha_k}). \end{aligned} \quad (14)$$

令 $z = \lambda + jw$, 由欧拉公式有 $e^{j\alpha_k} = \cos \alpha_k + j \sin \alpha_k$, 代入 (14) 式化简得

$$\begin{aligned} & \lambda^2 + 2\lambda wj - w^2 + a\lambda + awj - a(1 - p^x)V'(b) \\ & \times (\cos \alpha_k + j \sin \alpha_k - 1) \\ & + ap^xV'(b)(1 - \cos \alpha_k + j \sin \alpha_k) \\ & - r(1 - p^v)(\lambda + jw)(\cos \alpha_k + j \sin \alpha_k - 1) \\ & + rp^v(\lambda + jw)(1 - \cos \alpha_k + j \sin \alpha_k) = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

令 $\lambda = 0$ 及虚部系数为 0, 可得

$$\begin{aligned} & w[a - r(1 - p^v)(\cos \alpha_k - 1) + rp^v(1 - \cos \alpha_k)] \\ & = a(1 - p^x)V'(b) \sin \alpha_k - ap^xV'(b) \sin \alpha_k, \end{aligned} \quad (16)$$

得

$$w = \frac{a(1 - 2p^x)V'(b) \sin \alpha_k}{a - r(\cos \alpha_k - 1)}. \quad (17)$$

又实部系数为 0,

$$\begin{aligned} & -w^2 - a(1 - p^x)V'(b)(\cos \alpha_k - 1) \\ & + ap^xV'(b)(1 - \cos \alpha_k) + 2r(1 - p^v)w \sin \alpha_k \\ & - rw \sin \alpha_k = 0, \end{aligned} \quad (18)$$

(17) 式代入 (18) 式化简得

$$\begin{aligned} & \frac{aV'(b)\sin \alpha_k(1 - 2p^x)}{a - r(\cos \alpha_k - 1)} \sin \alpha_k(r - 2rp^v) \\ & - aV'(b)(\cos \alpha_k - 1) \end{aligned}$$

$$= \frac{[aV'(b)\sin\alpha_k(1-2p^x)]^2}{[a-r(\cos\alpha_k-1)]^2}. \quad (19)$$

令 $\alpha_k \rightarrow 0$, 推导可得扩展模型临界稳定曲线方程

$$V'(b) = \frac{r(1-2p^x)(1-2p^v) + \frac{1}{2}a}{(1-2p^x)^2}. \quad (20)$$

对应的扩展模型的交通流不稳定条件为

$$V'(b) > \frac{r(1-2p^v)}{(1-2p^x)} + \frac{1}{2}a \frac{1}{(1-2p^x)^2}. \quad (21)$$

由文献 [6] 知, FVD 模型的交通流不稳定条件为

$$V'(b) > \frac{1}{2}a + r. \quad (22)$$

对 (21) 各种可能情况进行讨论与分析, 对应模型下文简称扩展模型 1), 2), 3), 4), 5), 同时对比分析 (21) 与 (22):

1) 当 $p^x = p^v = 0$ 时, 此时司机不关注最相邻后车任何信息. (21) 式化为

$$V'(b) > \frac{1}{2}a + r,$$

与 (22) 相同, 扩展模型 1) 的交通流不稳定性同 FVD 模型的交通流不稳定性.

2) 当 $p^x = p^v \neq 0$ 时, 司机关注跟驰车与最相邻后车的距离差信息与两者速度差信息的概率相等, (21) 式化为

$$V'(b) > r + \frac{1}{2}a \frac{1}{(1-2p^x)^2},$$

$$0 < p^x < \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{1}{(1-2p^x)^2} > 1.$$

扩展模型 2) 的交通流不稳定性比 FVD 模型的交通流不稳定性弱, 交通流不稳定性减小.

3) 当 $p^x \neq p^v$, $p^x \neq 0$, $p^v \neq 0$. 由于司机关注跟驰车与最相邻后车速度差信息与两者距离差信息是同一过程的两个方面, 且

$$0 < p^x < \frac{1}{2},$$

$$0 < p^v < \frac{1}{2},$$

因而近似认为 $p^x \approx p^v$, 下同. 则扩展模型 3) 的交通流不稳定性同扩展模型 2) 的交通流不稳定性.

4) 当 $p^x = 0$, $0 < p^v < 1/2$ 时, 司机仅关注跟驰车与最相邻后车的速度差信息, (21) 式化为

$$V'(b) > \frac{1}{2}a + r(1-2p^v),$$

$$0 < p^v < \frac{1}{2},$$

即扩展模型 4) 的交通流不稳定性强于 FVD 模型的交通流不稳定性, 跟驰车与最相邻后车的速度差信息增加了交通流的不稳定性.

5) 当 $p^v = 0$, $0 < p^x < 1/2$ 时, 司机仅关注跟驰车与最相邻后车的距离差信息, (21) 式化为

$$V'(b) > \frac{r}{(1-2p^x)} + \frac{1}{2}a \frac{1}{(1-2p^x)^2},$$

$$0 < p^x < \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{1}{(1-2p^x)} > 1,$$

$$\frac{1}{(1-2p^x)^2} > 1,$$

即扩展模型 5) 的交通流不稳定性弱于 FVD 模型的交通流不稳定性, 跟驰车与最相邻后车的距离差信息减小了交通流的不稳定性.

结合 (21) 式, 考虑在给定 $V'(b)$ 与 r 值时, p^x 或 p^v 的变化对交通流不稳定性的影响. 由 (21) 式令

$$f(p^x, p^v) = \frac{r(1-2p^v)}{(1-2p^x)} + \frac{1}{2}a \frac{1}{(1-2p^x)^2}, \quad (23)$$

求偏导得

$$\partial f(p^x, p^v) / \partial p^v = \frac{-2r}{1-2p^x} < 0,$$

$$0 \leq p^x < \frac{1}{2}, \quad 0 \leq p^v < \frac{1}{2}, \quad (24)$$

$$\partial f(p^x, p^v) / \partial p^x = \frac{2r(1-2p^v)(1-2p^x) + 2a}{(1-2p^x)^3} > 0,$$

$$0 \leq p^x < \frac{1}{2}, \quad 0 \leq p^v < \frac{1}{2}. \quad (25)$$

(24) 式说明对于给定 $V'(b)$, r 与 p^x 值, p^v 增加时, 为了抑制交通流的不稳定性, 需要 a 增加, 即抑制交通流不稳定性更困难, 需要提高司机距离差敏感系数, 增加了交通流不稳定性; (25) 式说明对于给定 $V'(b)$, r 与 p^v 值, p^x 的增加不会导致交通流不稳定, 相反此时 a 可以保持不变甚至减小, 即更容易抑制交通流不稳定, 交通流不稳定性减小. 表明在关注前车信息概率大于关注后车信息概率的现实条件下, 关注跟驰车与最相邻后车距离差信息的概率增加, 提高了司机的反应灵敏度, 减小了交通流不稳定性, 有利于抑制交通堵塞. 而增加关注两者速度差信息的概率, 抑制交通流不稳定性更困难, 即增大了交通流的不稳定性. 这是解析结论 1.

最相邻后车综合信息对交通流不稳定性综合影响表现为同时关注跟驰车与最相邻后车距离差与速度差信息的扩展模型 3) 的交通流不稳定性,

设该模型抑制交通流不稳定性所需司机距离差敏感系数临界值为 a_3 ；不关注最相邻后车任何信息对交通流不稳定性综合影响为0，具体表现为FVD模型即扩展模型1)的交通流不稳定性，设该模型抑制交通流不稳定性所需司机距离差敏感系数临界值为 a_{FVD} 。由以上分析可知，扩展模型3)的临界稳定曲线方程为

$$\begin{aligned} V'(b) &= r + \frac{1}{2}a \frac{1}{(1-2p^x)^2} \Rightarrow a_3 \\ &= 2[V'(b) - r] \cdot (1-2p^x)^2, \\ p^x &\approx p^v, \quad 0 < p^x < \frac{1}{2}. \end{aligned} \quad (26)$$

扩展模型1)即FVD模型的临界稳定曲线方程为

$$V'(b) = \frac{1}{2}a + r \Rightarrow a_{\text{FVD}} = 2[V'(b) - r]. \quad (27)$$

对比分析(26)，(27)式可知，在 $0 < p^x < 1/2$ ， $0 < p^v < 1/2$ 的现实条件下， $a > 0$ 时， $a_{\text{FVD}} > a_3$ 即扩展模型3)抑制交通流不稳定性所需 a 值小于FVD模型抑制交通流不稳定性所需 a 值，即最相邻后车综合信息使得抑制交通流不稳定性更容易，此时最相邻后车综合信息对交通流不稳定性减小作用大于增加作用，即减小了交通流不稳定性； $a = 0$ 时， $a_{\text{FVD}} = a_3$ ，此时最相邻后车信息对交通流不稳定性的减小作用等于增加作用，即对交通流不稳定性无影响； $a < 0$ 时， $a_{\text{FVD}} < a_3$ ，此时最相邻后车综合信息对交通流不稳定性的增加作用大于减小作用，即增加了交通流的不稳定性。现实交通中，一般 $a > 0$ ，说明最相邻后车综合信息减小了交通流的不稳定性。这是解析结论2。

由(26)，(27)式知

$$\begin{aligned} a_{\text{FVD}} - a_3 &= 2[V'(b) - r][1 - (1-2p^x)^2] \\ &= a_{\text{FVD}}[1 - (1-2p^x)^2], \\ p^x &\approx p^v, \quad 0 < p^x < 1/2, \end{aligned} \quad (28)$$

则

$$\begin{aligned} \frac{\partial(a_{\text{FVD}} - a_3)}{\partial a_{\text{FVD}}} &= [1 - (1-2p^x)^2] > 0, \\ p^x &\approx p^v, \quad 0 < p^x < 1/2, \end{aligned} \quad (29)$$

则知对于给定关注最相邻后车信息概率，司机距离差敏感系数 $a = a_{\text{FVD}}$ 越大， $a_{\text{FVD}} - a_3$ 越大即扩展模型3)抑制交通流不稳定性所需 a 值越小于FVD

模型抑制交通流不稳定性所需 a 值，最相邻后车综合信息对交通流不稳定性的减小作用越大。即司机距离差敏感系数 a 越大，最相邻后车综合信息对交通流不稳定性的减小作用越大，反之则反。这是解析结论3。

由(28)式可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial(a_{\text{FVD}} - a_3)}{\partial r} &= -2 \cdot [1 - (1-2p^x)^2] < 0, \\ p^x &\approx p^v, \quad 0 < p^x < 1/2, \end{aligned} \quad (30)$$

则知对于给定关注最相邻后车信息概率，司机速度差敏感系数 r 越大， $a_{\text{FVD}} - a_3$ 越小即扩展模型3)抑制交通流不稳定性所需 a 值越接近于FVD模型所需的 a 值，最相邻后车综合信息对交通流不稳定性的增大作用越大。即司机速度差敏感系数 r 越大，最相邻后车综合信息对交通流不稳定性的增大作用越大，反之则反。这是解析结论4。

由以上解析分析可知，在关注前车信息概率大于关注后车信息概率及司机敏感系数大于0的现实条件下，关注最相邻后车的车头距信息概率越大越减小交通流的不稳定性，而关注其与跟驰车的速度差信息概率越大越增加交通流的不稳定性；最相邻后车综合信息对交通流不稳定性的减小作用大于增加作用，即最相邻后车综合信息减小了交通流不稳定性。另外，司机距离差敏感系数 a 越大，最相邻后车综合信息对交通流不稳定性的减小作用越大；司机速度差敏感系数 r 越大，最相邻后车综合信息对交通流的不稳定性增加作用越大。

4 交通流不稳定性影响仿真分析

本节对最相邻后车综合信息对交通流不稳定性的影响进行仿真分析。优化函数取 Helbing 和 Tilch^[4] 使用实测交通数据对 OV 模型进行参数辨识所得到的优化函数：

$$V(\Delta x) = V_1 + V_2 \tanh[C_1(\Delta x - l_c) - C_2], \quad (31)$$

$l_c = 5 \text{ m}$, $V_1 = 6.75 \text{ m/s}$, $V_2 = 7.9 \text{ m/s}$, $C_1 = 0.13 \text{ m}^{-1}$, $C_2 = 1.57$ 。据交通调查，本文 p^x 或 p^v 的取值范围为 $[0, 0.3]$ 。

取 $r = 0.2 \text{ s}^{-1}$ ，结合 OV 模型^[3]以及扩展模型1)，2)，3)，4)，5) 临界曲线解析式及优化函数以及各参数赋值，可得 OV 模型以及扩展模型1)，2)，3)，4)，5) 相图。

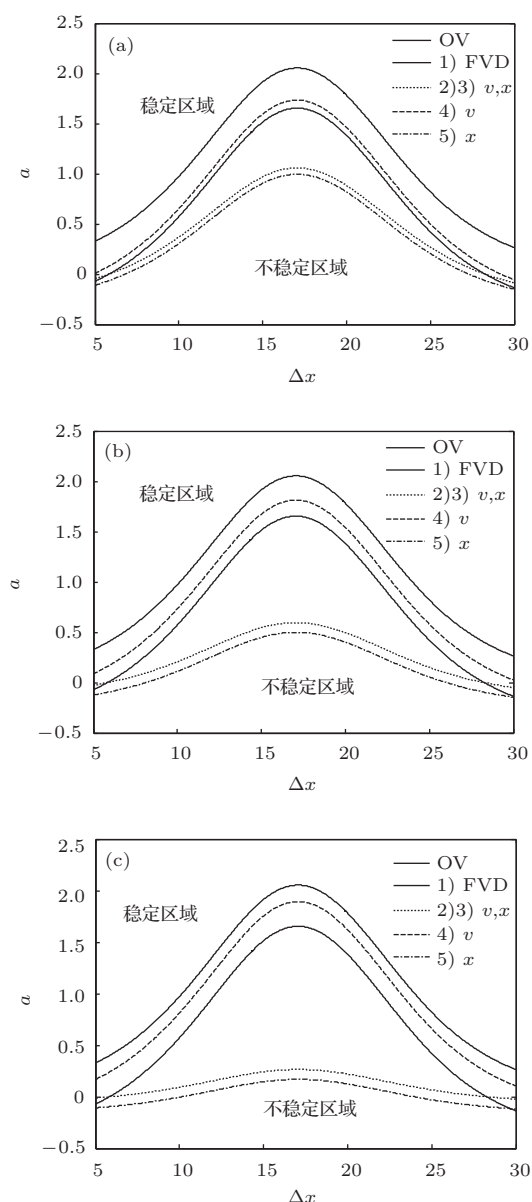


图1 速度差敏感系数取定值0.2时, OV模型以及扩展模型1), 2), 3), 4), 5)各种关注最相邻后车信息概率相图(从图中可知各曲线从上往下依次代表OV模型, 扩展模型4), 1)即FVD模型, 2), 3)及5)的临界稳定曲线)(a) $p^x = 0.1$, $p^v = 0.1$; (b) $p^x = 0.2$, $p^v = 0.2$; (c) $p^x = 0.3$, $p^v = 0.3$

如图1所示, $a > 0$ 时, 在扩展模型5种情景中, 扩展模型5)的交通流不稳定性最弱, 且当 p^x 增加到0.3时, 扩展模型5)的交通流不稳定性已经非常弱, 交通流不稳定区域几乎为0; 与此相反, 扩展模型4)的交通流不稳定性最强, 最不利于抑制交通流的不稳定性, 且当 p^v 增加到0.3时, 此时扩展模型4)的交通流不稳定性几乎与不考虑跟驰车与最相邻前车速度差信息以及后车任何信息的OV模型的交通流不稳定性相同. 且从图1可以看到, 在司机距离差敏感系数 $a > 0$ 的现实条件下, 在一定关注

最相邻后车信息概率下, 扩展模型2), 3), 5)的临界稳定曲线一直处于FVD模型的临界曲线以下. 即仅关注最相邻后车车头距信息的扩展模型5)交通流不稳定性及关注最相邻后车综合信息的扩展模型2), 3)交通流不稳定性一直小于不关注后车任何信息FVD模型的交通流不稳定性, 即最相邻后车头距信息及最相邻后车综合信息都减小了交通流不稳定性. 且在合理关注概率内, 交通流不稳定性随关注最相邻后车信息概率的增加而减小. 与此相反, 仅关注跟驰车与最相邻后车速度差信息的扩展模型4)的临界稳定曲线一直处于FVD模型临界曲线之上, 表明最相邻后车与跟驰车速度差信息增加了交通流的不稳定性, 且随着关注概率的增加, 增加作用越强. 以上即是仿真结论1及结论2.

现取关注最相邻后车信息概率为0.2, 仿真司机速度差敏感系数 r 对最相邻后车综合信息对交通流不稳定性综合作用的影响. 如图2.

令 h_c 为临界点对应车头距, 则由优化函数 $V(\cdot)$ 的性质及图1、图2知:OV模型及所有扩展模型的临界稳定曲线在敏感系数 (a) -车头距 (Δx) 坐标系中都是以 $\Delta x = h_c$ 为对称轴的钟形图(如图1, 图2所示), 在 $0 < \Delta x < h_c$ 时单调递增, 在 $\Delta x > h_c$ 时单调递减; 扩展模型1)、3)的临界稳定曲线相交时, $a = 0$, 令此时对应的车头距为 $\Delta x = b_L$ 与 $\Delta x = b_R$, 可得 $b_L \leq h_c \leq b_R$. 由图2知, $\Delta x \in (b_L, b_R)$ 时, $a > 0$, 此时扩展模型3)的临界稳定曲线在FVD模型临界稳定曲线以下, 即最相邻后车综合信息减小了交通流的不稳定性, 有利于抑制交通堵塞; $\Delta x \in (0, b_L)$ 或 $\Delta x \in (b_R, +\infty)$ 时, $a < 0$, 此时扩展模型3)的临界稳定曲线在FVD模型临界稳定曲线之上, 即最相邻后车综合信息增加了交通流的不稳定性, 不利于抑制交通堵塞. 当司机速度敏感系数 r 增大时, 如图2所示, (b_L, b_R) 即 $a > 0$ 区域减小, 即最相邻后车综合信息减小交通流不稳定性的车头距范围减小, 扩展模型3)的临界稳定曲线与FVD模型临界稳定曲线相互靠拢, 最相邻后车综合信息对交通流不稳定性的增加作用增大; 当司机速度敏感系数 r 越小, (b_L, b_R) 即 $a > 0$ 区域越大, 即最相邻后车综合信息减小交通流不稳定性的车头距范围增大, 扩展模型3)的临界稳定曲线越趋于FVD模型临界稳定曲线下方, 最相邻后车综合信息对交通流不稳定性的减小作用增强. 综上所述, r 越大, 最相邻后车

综合信息对交通流不稳定性的增加作用越大; r 越小, 最相邻后车综合信息对交通流不稳定性的减小作用越大. 这即是仿真分析结论 3.

从图 1 及图 2 都可看出, 在 $a > 0$, $0 \leq p^x < \frac{1}{2}$, $0 \leq p^v < \frac{1}{2}$ 的现实条件下, 司机距离差敏感系数 a 越大, FVD 模型临界曲线越趋于扩展模型 3) 临界曲线上方, 即 FVD 模型的交通流不稳定性越强于扩展模型 3) 的交通流不稳定性, 此时最相邻后车信息的对交通流不稳定性的减小作用越强, 反之则反. 这即是仿真分析结论 4.

仿真分析结论与解析分析结论是一致的. 解析分析与仿真分析结论与实际交通行为也是相符

合的, 司机每隔一段时间通过后视镜关注最相邻后车信息的时间是较短的, 适合司机关注的应是很直观的距离差信息, 而不是需要关注相对较长时间的速度差信息. 因为较长时间看后视镜是极易发生交通事故的, 显然会增加交通流的不稳定性. 相应的, 司机的距离差敏感系数增加, 会使得最相邻后车与跟驰车距离差信息对交通流不稳定性的减小作用进一步增大, 从而使最相邻后车信息对交通流不稳定性的减小作用增大; 司机的速度差敏感系数增加, 会使得最相邻后车与跟驰车速度差信息对交通流不稳定性的增加作用增大, 从而使最相邻后车信息对交通流不稳定性的增加作用增大.

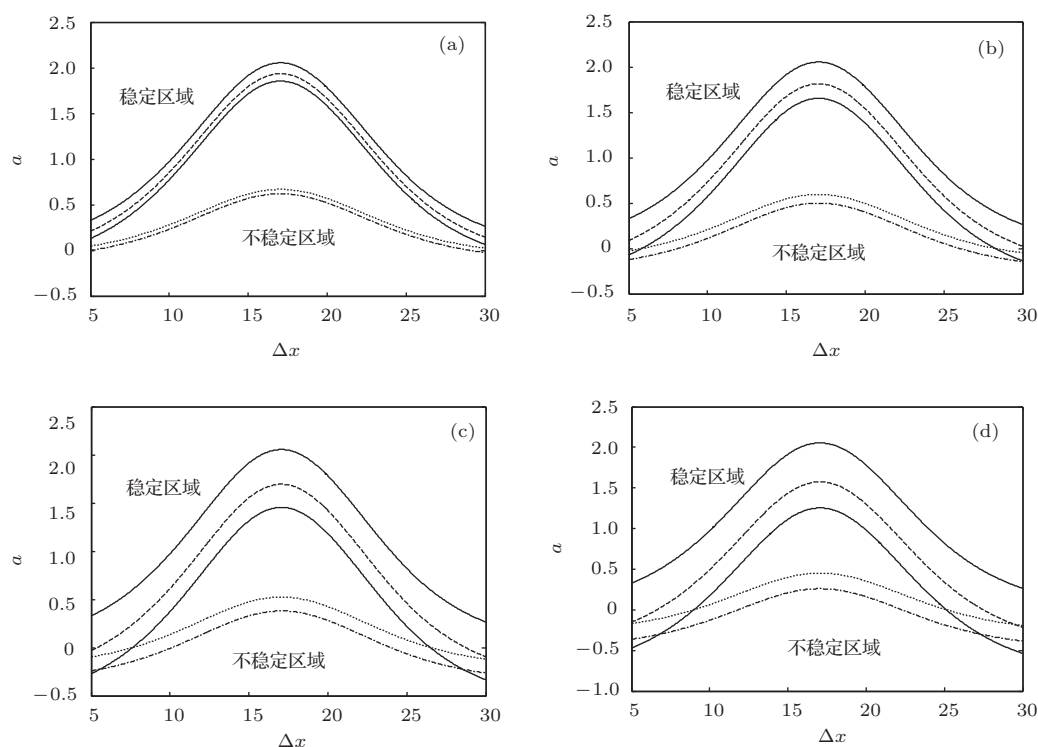


图 2 关注最相邻后车信息概率取定值 0.2, 司机速度敏感系数 r 取某一值时, OV 模型以及扩展模型 1), 2), 3), 4), 5) 各种情景相图 (从图中可知各曲线从上往下依次代表 OV 模型, 扩展模型 4), 1) 即 FVD 模型, 2), 3) 及 5) 的临界稳定曲线) (a) $r = 0.1$; (b) $r = 0.2$; (c) $r = 0.3$; (d) $r = 0.4$

5 结 论

本文对最相邻后车综合信息对交通流不稳定性的影响进行了分析. 据实际交通调查, 司机在瞻前的同时, 还顾后, 瞻前的概率大于顾后的概率. 最相邻后车信息会影响到司机^[26], 从而影响到交通流的不稳定性. 文献[11—15]的研究表明最相邻后车信息减小了交通流不稳定性, 但这些研究没有

考虑跟驰车与最相邻后车的速度差信息对交通流不稳定性的影响, 即考虑最相邻后车信息对交通流不稳定性的影响不全面, 所得结论也有待于进一步确认. 本文更为全面考虑最相邻后车信息, 提出对应的模型. 通过最相邻后车综合信息对交通流不稳定性影响的解析分析与仿真分析, 在关注前车概率大于关注后车概率与司机敏感系数大于 0 的现实条件下, 研究得到了以下结论: 最相邻后车车头距信息减小了交通流的不稳定性, 且关注概率越大,

减小作用越大; 跟驰车与最相邻后车的速度差信息增加了交通流的不稳定性, 且关注概率越大, 增加作用越大; 最相邻后车综合信息对交通流不稳定性的减小作用大于增加作用; 司机距离差敏感系数越大, 最相邻后车综合信息对交通流不稳定性的减小作用越大; 司机速度差敏感系数越大, 最相邻后车综合信息对交通流不稳定性的增加作用越大. 这为交通规划与管理中如何更好的利用最相邻后车信息减小交通流的不稳定性提供了一个思路与理论基础.

参考文献

- [1] Pipes L A 1953 *J. Appl. Phys.* **24** 274
- [2] Newell G F 1961 *Oper. Res.* **9** 209
- [3] Bando M, Hasebe K, Nakayama A, Shibata A, Sugiyama Y 1995 *Phys. Rev. E* **51** 1035
- [4] Helbing D, Tilch B 1998 *Phys. Rev. E* **58** 133
- [5] Nagatani T 1999 *Phys. Rev. E* **60** 6395
- [6] Jiang R, Wu Q S, Zhu Z J 2001 *Phys. Rev. E* **64** 017101
- [7] Jiang R, Wu Q S, Zhu Z J 2000 *Chin. Sci. Bull.* **45** 1895 (in Chinese) [姜锐, 吴清松, 朱祚金 2000 科学通报 **45** 1895]
- [8] Xue Y, Dong LY, Yuan Y W, Dai S Q 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 492 (in Chinese) [薛郁, 董力耘, 袁以武, 戴世强 2002 物理学报 **51** 492]
- [9] Xue Y, Dong L Y, Yuan Y W, Dai S Q 2002 *Chin. Phys. B* **11** 1128
- [10] Zhao X M, Gao Z Y 2005 *Eur. Phys. J. B* **43** 565
- [11] Hayakawa H, Nakanishi K 1998 *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **130** 57
- [12] Nakayama A, Sugiyama Y, Hasebe K 2001 *Phys. Rev. E* **65** 016112
- [13] Hasebe K, Nakayama A, Sugiyama Y 2003 *Phys. Rev. E* **68** 026102
- [14] Ge H X, Zhu H B, Dai S Q 2006 *Eur. Phys. J. B* **54** 503
- [15] Sun D H, Zhang J C, Zhao M 2012 *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)* **49** 115 (in Chinese) [孙棣华, 张建厂, 赵敏, 田川 2012 四川大学学报 (自然科学版) **49** 115]
- [16] Peng G H 2010 *Chin. Phys. B* **19** 056401
- [17] Peng G H, Sun D H 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5420
- [18] Peng G H 2011 *Systems Engineering-Theory & Practice* **31** 569 (in Chinese) [彭广含 2011 系统工程理论与实践 **31** 569]
- [19] Sun D H, Li Y F, Tian C 2010 *Systems Engineering-Theory & Practice* **30** 1326 (in Chinese) [孙棣华, 李永福, 田川 2010 系统工程理论与实践 **30** 1326]
- [20] Zhao X M, Gao Z Y 2005 *Eur. Phys. J. B* **47** 145
- [21] Xie D F, Gao Z Y, Zhao X M 2008 *Commun. Comput. Phys.* **3** 899
- [22] Ge H X, Cui Y, Cheng R J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 110504 (in Chinese) [葛红霞, 崔煜, 程荣军 2014 物理学报 **63** 110504]
- [23] Ye J J, Li K P, Jin X M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 070202 (in Chinese) [叶晶晶, 李克平, 金新民 2014 物理学报 **63** 070202]
- [24] Zhou T, Sun D H, Li H M, Liu W M 2014 *Chin. Phys. B* **23** 050203
- [25] 016112<http://blog.163.com/pedou@126/blog/static/17109272120110443311271/>
- [26] Zhang H M 2003 *Tran. Res. Part B* **37** 561

Effects of comprehensive information of the nearest following vehicle on traffic flow instability^{*}

Zeng You-Zhi[†] Zhang Ning

(School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China)

(Received 26 May 2014; revised manuscript received 15 June 2014)

Abstract

Based on the condition of inhibiting traffic flow instability, this paper studies the effects of comprehensive information of the nearest following vehicle obtained by drivers' rear view behavior on traffic flow instability. Research shows that in the real practice the probability of paying attention to the information of the preceding vehicle is greater than that of paying attention to the information of the following vehicle, and the drivers' sensitive coefficient is assumed to be greater than 0, many conclusions such as the following can be obtained: 1) the information of the nearest following vehicle headway may reduce traffic flow instability, and the larger the attention probability, the smaller the traffic flow instability; on the contrary, the information of the velocity difference between the vehicle and the nearest following vehicle may increase the traffic flow instability, so the larger the attention probability, the bigger the traffic flow instability; 2) the instability reduction effect due to the comprehensive information from the nearest following vehicle is greater than the increasing effect on the traffic flow instability; 3) the bigger the driver's sensitive coefficient of the distance difference, the bigger the reducing effect of the information of the nearest following vehicle on traffic flow instability; 4) the bigger the driver's sensitive coefficient of the velocity difference, the bigger the increasing effect of the information of the nearest following vehicle on traffic flow instability.

Keywords: traffic congestion, traffic flow instability, the comprehensive information of the nearest following vehicle, the car-following model

PACS: 89.40.-a, 45.70.Vn, 05.45.-a

DOI: 10.7498/aps.63.218901

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 70971003).

[†] Corresponding author. E-mail: simon.zen@163.com