文章编号：1006－544X（2008）02－0260－05

元胞自动机交通流混合模型的研究

刘海英[a]，邝 华[b]，孔令江[b]，刘慕仁[b]

（广西师范大学 a. 教育科学学院；b. 物理与信息工程学院，广西 桂林 541004）

摘 要：在一维元胞自动机交通流NS模型、FI模型和VDR模型的基础上，考虑不同车辆的驾驶员具有其个性的驾驶方式和习惯，具体表现在不同的驾驶员采用适合于自己行车规则的交通流模型在道路上驾车行驶，从而分别对道路上不同车辆的驾驶员按NS模型和FI模型、NS模型和VDR模型、FI模型和VDR模型的混合驾驶进行了研究和讨论。结果表明，FI－VDR的混合模型更能反映道路畅通、车流增大及描述交通流的复杂非线性现象。

关键词：交通流；元胞自动机；混合模型；计算机模拟

中图分类号：TP391.9；U491.112 **文献标志码**：A

0 引 言

交通流是一个复杂巨系统，它存在自组织临界性和从自由运动相到阻塞相的相变行为。元胞自动机模型可以很好地反映这些特性，又易于在计算机上作数值模拟操作，并能灵活地修改以考虑真实交通条件的各种效应，因此它已成为近年来交通流研究的热点[1－13]。

目前，最有影响的两个一维元胞自动机交通流模型是由Nagel和Schreckenberg提出的NS模型[1]和由Fukui和Ishibashi提出的FI模型[2]。NS模型的建模思想是：将车道离散为等距的格点，每一格点最多仅能由一个车辆所占据，车辆总是想以最大的速度行驶，但不希望发生碰撞，同时，并非每辆车都以最理想的状态行驶，因此，引入随机延迟概率来描述车辆的随机行为。用$V_i(t)$表示第i辆车在t时刻的速度，$V_{\max}$表示最大速度，且$V_i(t)$允许在$\{0,1,2,\cdots,V_{\max}\}$的$V_{\max}+1$个取值范围内取其中一值，$x_i(t)$表示第$i$辆车在$t$时刻的位置，$\mathrm{gap}_i(t)=x_{i+1}(t)-x_i(t)-1$表示第$i$辆车$t$时刻与前方紧邻车辆之间的间距，在每个时步$t\to t+1$，车辆的运动状态根据以下演化规则并行更新

① 加速过程：$V_i(t+1)\to\min(V_i(t)+1,V_{\max})$；

② 减速进程：$V_i(t+1)\to\min(V_i(t),\mathrm{gap}_i(t))$；

③ 以概率p随机减速过程：$V_i(t+1)\to\max(V_i(t)-1,0)$；

④ 位置更新：$x_i(t+1)\to x_i(t)+V_i(t+1)$。

NS模型的研究结果给出，车辆在运动过程中，会出现启止波(start-stop wave)，且随着车辆密度的增加，系统会发生由运动到阻塞的临界“相变”过程，因此，引起了国际学术界的广泛注意，由于它采用随机慢化，$V_i(t+1)$不能由车间距$\mathrm{gap}_i(t)$唯一确定，这给解析研究工作带来了复杂性。

FI模型在NS模型的基础上作了简化，其车辆运动的演化规则为

① 速度更新：$V_i(t+1)\to\min(\mathrm{gap}_i(t),V_{\max})$，若$V_i(t+1)=V_{\max}$，则$V_i(i+1)\to V_i(t+1)-1$以概率$p$发生；

② 位置更新：$x_i(t+1)\to x_i(t)+V_i(t+1)$。

FI模型不能描述真实交通中出现的时停时走现象，但是它可以得到精确解[3]。以上两个模型都还存在一定的缺陷，例如，它们都不能发现临界点附近存在的亚稳态现象，于是人们先后提出了与速度相关的随机延迟刹车模型(VDR模型)[4]、

收稿日期：2007－07－03

基金项目：国家自然科学基金资助项目（10562001，70371067，10762005）；广西自然科学基金资助项目（0447030）

作者简介：刘海英（1962－），女，讲师，研究方向：计算物理，E-mail：xizaoyuwen@163.com。

T^2 模型[5]、BJH 模型[6]、相对速度模型[8]等各种各样的改进模型，使这些模型能够较好的描述交通中的非线性现象。特别是在 VDR 模型中，利用延迟概率与车辆速度有关，来确定车辆的慢启动过程，其延迟概率定义如下：

$$p(V) = \begin{cases} p_0, & V = 0, \\ p_1, & V > 0, \end{cases} \quad (\text{其中 } p_0 \gg p_1)。$$

这完全不同于 NS 模型和 FI 模型中延迟概率 p 是常数的情况。其车辆运动的演化规则为：先确定延迟概率 $p(V)$，然后再按 NS 模型的演化规则进行速度和位置的并行更新。VDR 模型的研究表明随机延迟刹车概率对交通流的状态变化起很大的作用，而且还揭示了亚稳态及相分离等交通非线性现象。

本文在 NS 模型、FI 模型和 VDR 模型的基础上，考虑不同车辆的驾驶员具有其个性的驾驶方式和习惯，具体表现在不同的驾驶员采用适合于自己行车规则的交通流模型在道路上驾车行驶，从而分别对道路上不同车辆的驾驶员按 NS 模型和 FI 模型、NS 模型和 VDR 模型、FI 模型和 VDR 模型的混合驾驶进行了研究和讨论。数值模拟表明：各模型之间的混合行驶，其混合比例系数的取值对交通流的影响较大，道路上只要具有按 FI 模型行驶的车辆时，道路交通流量和平均速度都有较大的提高；只要具有按 VDR 模型行驶的车辆时，系统就会展现出亚稳态、相分离等复杂的实际交通行为现象。

1　数值模拟结果和讨论

用长度为 L 的一维离散的格点链来表示一条单向车道，车辆总数为 N，总密度 $\rho = N/L$；t 时刻的平均速度为 $\overline{V}_t = (1/N_t)\sum_{i=1}^{N_t} V_i(t)$；平均车流量 $J = \overline{V}_t\rho$。本文模拟单车道由 1 000 个格点组成，车辆的最大速度为 $V_{\max}$，采用周期性边界条件，初始时刻，按不同模型行驶的车辆随机混合分布在车道上，其初速度都为 0，演化时步为 50 000 步，记录后面运行的 2000 步中每一时步内的速度 V_t，然后将得到的 2 000 个速度值再作时间平均，得到一次运行的平均速度 $\overline{V}_t = (1/T)\sum_{t=t_0}^{t_0+T-1} V(t)$，为了消除初始位形的随机性对结果的影响，再对 20 个样本取平均。

1.1　NS 模型与 FI 模型的混合研究

为了考虑道路上按不同模型行驶的车辆在车流中所占的比例，引入混合比例系数 f，假设按 NS 模型行驶的车辆密度为 ρ_N，按 FI 模型行驶的车辆密度为 ρ_F，则 f 满足：$\rho_N = \rho(1-f)$，$\rho_F = \rho f$，$0 \leqslant f \leqslant 1$。当 $f < 0.5$ 时，表示按 NS 模型行驶的车辆数多于按 FI 模型行驶的车辆数；当 $f > 0.5$ 时，表示按 FI 模型行驶的车辆数多于按 NS 模型行驶的车辆数；当 $f = 0.5$ 时，表示按 NS 模型和 FI 模型行驶的车辆数相等。

图 1 给出了随机减速概率 $p = 0$ 和 $p = 0.5$，混合比例系数 $f = 0.0, 0.2, \cdots, 1.0$ 时的基本图。当 $f = 0$ 时，模型为 NS 模型；当 $f = 1.0$ 时，模型为 FI 模型；当 $0 < f < 1$ 时，为两种模型的车辆混合行驶的情况。从图 1 可发现：当 $p = 0$ 时，无论 f 取任何值，混合车辆的流量 - 密度图、速度 - 密度图都完全重合。该现象与决定性的 FI 模型情况完全一致，其精确解析结果[5]为

$$\overline{V} = \begin{cases} V_{\max}, & \rho \leqslant 1/(V_{\max}+1); \\ 1/\rho - 1, & \rho > 1/(V_{\max}+1)。 \end{cases}$$

$p = 0.5$，ρ 大于 NS 模型的临界密度 ρ_C 时，随着 f 的增大，系统的流量、平均速度、临界密度都逐渐增大。这是因为 NS 模型与 FI 模型在加速方式和随机减速方式上有很大不同，FI 模型允许突然加速，即车辆可以由任意初速度在一个时步内加速到最高车速 $V_{\max}$ 或前方空格数所允许的最大速度，而 NS 模型只允许车辆在一个时步内最多增加一个速度单位。在随机减速方式上，FI 模型只允许已达最大速度的车辆可以发生慢化，即当车辆有可能前进 $V_{\max}$ 格点时，以一定的概率只前进 $V_{\max}-1$ 格点，而 NS 模型则允许任何运动的车辆发生慢化，所以 f 越大，按 FI 模型行驶的车辆就越多，于是系统的流量、平均速度也就越大。

1.2　NS 模型与 VDR 模型的混合研究

假设按 NS 模型行驶的车辆密度为 ρ_N，按 VDR 模型行驶的车辆密度为 ρ_V，引入混合比例系数 f_1，其中 f_1 满足：$\rho_N = \rho(1-f_1)$，$\rho_V = \rho f_1$，$0 \leqslant f_1 \leqslant 1$。

图 2 给出了随机减速概率 $p = 0.5$，$p_0 = 0.5$，$p_1 = 0.01$，混合比例系数 $f_1 = 0, 0.2, \cdots, 1.0$ 时的基本图。从图中可看出：当 $f_1 = 1.0$ 时，系统最大平均速度约为 5，当 $0 \leqslant f_1 < 1$ 时，系统的最大平均速度都

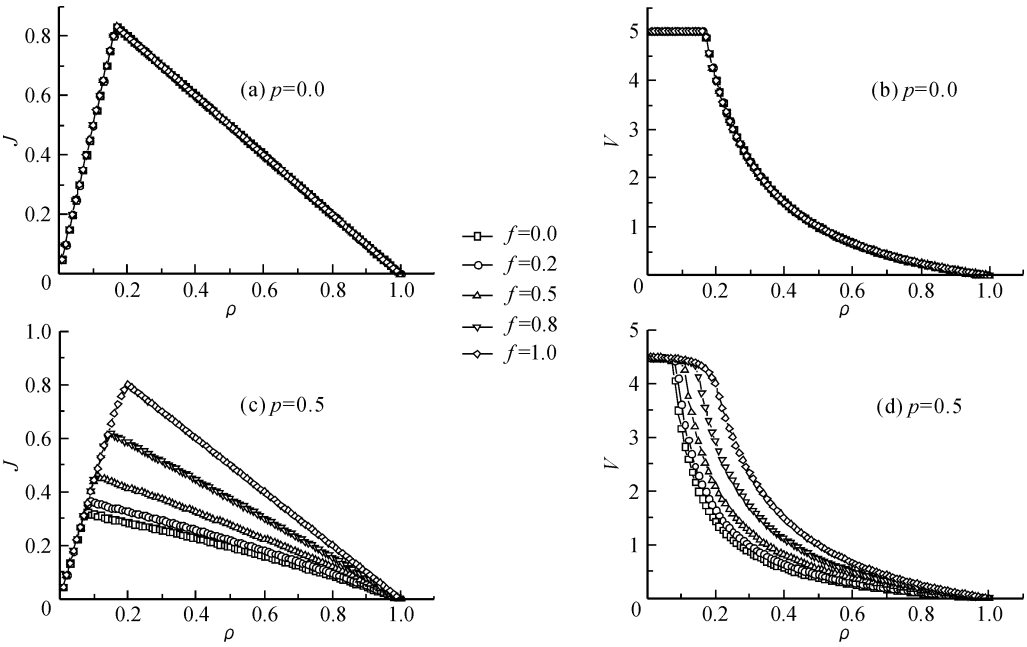


图 1 NS 模型和 FI 模型混合随参数 f 变化的基本图

Fig. 1 Fundamental diagram of parameter f in the mixed model of NS and FI

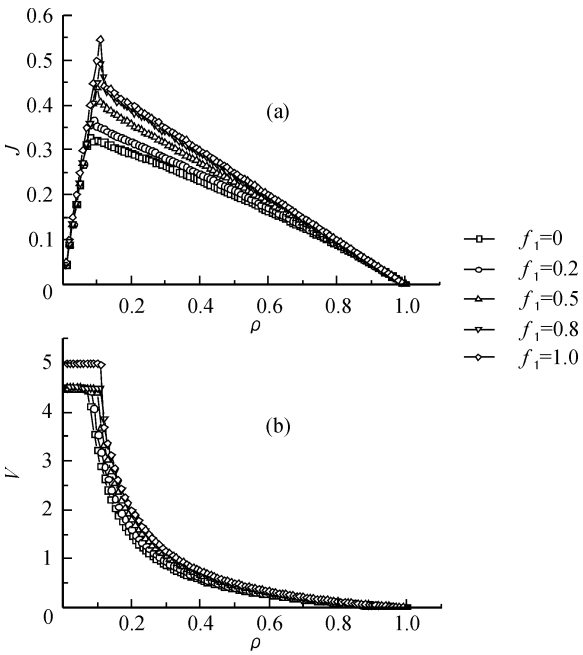


图 2 NS 模型和 VDR 模型混合随参数 f 变化的基本图

Fig. 2 Fundamental diagram of parameter f in the mixed model of NS and VDR

$p=0.5$, $p_0=0.5$, $p_1=0.01$

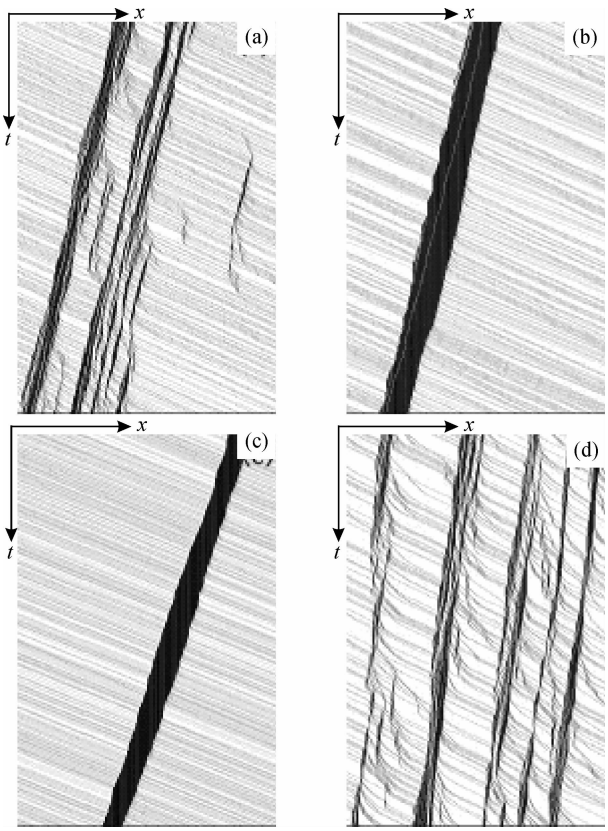


图 3 时空演化图

Fig. 3 Relationship of space-time

(a) $\rho_0=0.2$, $p=0.5$, $p_0=0.5$, $p_1=0.01$, $f_1=0.2$;

(b) $\rho_0=0.2$, $p=0.5$, $p_0=0.5$, $p_1=0.01$, $f_1=0.8$;

(c) $\rho_0=0.2$, $p=0.01$, $p_0=0.5$, $p_1=0.01$, $f_1=0.5$;

(d) $\rho_0=0.2$, $p=0.8$, $p_0=0.5$, $p_1=0.01$, $f_1=0.5$

相等,约为4.5;随着f_1的增大，系统的最大流量值和临界密度都逐渐增大，但流量的最大值小于NS模型与FI模型的混合情况，且$f_1>0$时,在某些较小的密度区域内，流量都出现了两个分支，这表明存在着亚稳态,这是由于道路中具有按VDR模

型行驶的车辆，发生了慢启动过程，从而对交通流产生了重要的影响，这会导致相分离现象的出现，而这种现象在 NS 模型（$f_1 = 0$）中是不会出现的。这可以由图 3 的时空演化斑图看出。

图 3 模拟的是 1 000 个格点从 49 520 到 50 000 时步的演化过程。横轴表示车辆位置，纵轴表示时间，车辆从左至右运动，以黑点表示车辆的位置，白点表示空格点。图 3 中明显的黑色区域表示停止前进的车辆聚集在一起形成的交通阻塞相，且向上游传播；灰色区域表示车辆畅通，即自由相。由图 3a、3b 对比可看出，在相同的密度和随机延迟概率下，f_1 较小时，不会出现相分离现象；f_1 较大时，会出现相分离现象。从图 3c、3d 对比可知，在相同的密度和混合比例系数下，p 越小，越容易出现相分离现象，因此延迟概率 p 也是影响交通流的重要参数。

1.3　FI 模型与 VDR 模型的混合研究

假设按 FI 模型行驶的车辆密度为 ρ_F，按 VDR 模型行驶的车辆密度为 ρ_V，引入混合比例系数 f_2，其中 f_2 满足：$\rho_F = \rho(1 - f_2)$，$\rho_V = \rho f_2$，$0 \leqslant f_2 \leqslant 1$。

图 4 给出了随机减速概率 $p = 0.5$，$p_0 = 0.5$，$p_2 = 0.01$，混合比例系数 $f_2 = 0.0, 0.2, \cdots, 1.0$ 时的基本图。从图中可看出：当 $f_2 = 0$ 时，系统的流量最大值达到 0.8，与 NS、FI 混合模型相当；当 $0 \leqslant f_2 < 1$ 时，系统的最大平均速度都相等约为 4.5，随着 f_2 的增大，系统的最大流量值、平均速度和临界密度都逐渐减小；当 $f_2 = 1.0$ 时，系统具有最大平均速度约为 5，且 $f_2 > 0$ 时，在某些较小的密度区域内，流量也都出现了两个分支，这也是道路中具有按 VDR 模型行驶的车辆，发生了慢启动过程所导致的必然结果，这表明亚稳态的存在，也会出现相分离现象。但在相同条件下，FI 模型与 VDR 模型的混合比 NS 模型与 VDR 模型的混合更容易发生车辆从畅行相→宽幅运动阻塞相和宽幅运动阻塞相→畅行相的交通相变情况。这可从图 5 速度分布演化时空斑图明显看出。

图 6 为 $f_2 = 0.5$，$p_0 = 0.5$，$p_1 = 0.01$，$p = 0.01$，0.2，0.5，0.8 时的基本图，从图中可知：p 越大，系统的最大平均速度越小，密度较大时，平均速度完全重合且相等；不论 p 取任何值，系统的流量基本相等。这说明按FI模型行驶的车辆

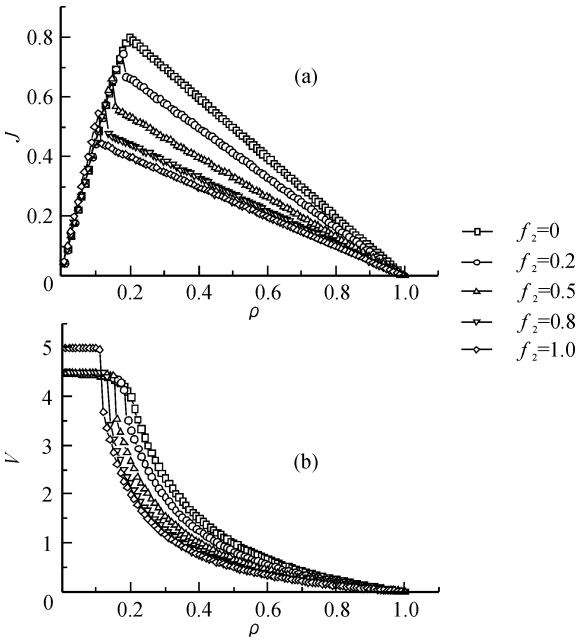


图 4　FI 模型和 VDR 模型混合随参数 f 变化的基本图

Fig. 4　Fundamental diagram of parameter f in the mixed model of FI and VDR

$p = 0.5$, $p_0 = 0.5$, $p_1 = 0.01$

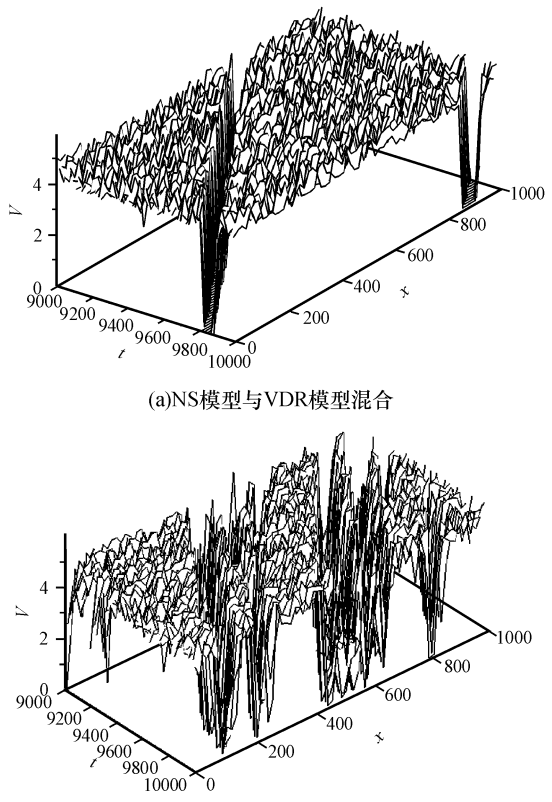


图 5　不同混合模型的速度分布演化图

Fig. 5　Velocity distribution diagrams of two mixed models

$\rho = 0.2$, $f = 0.5$, $p = 0.5$, $p_1 = 0.75$, $p_2 = 0.25$

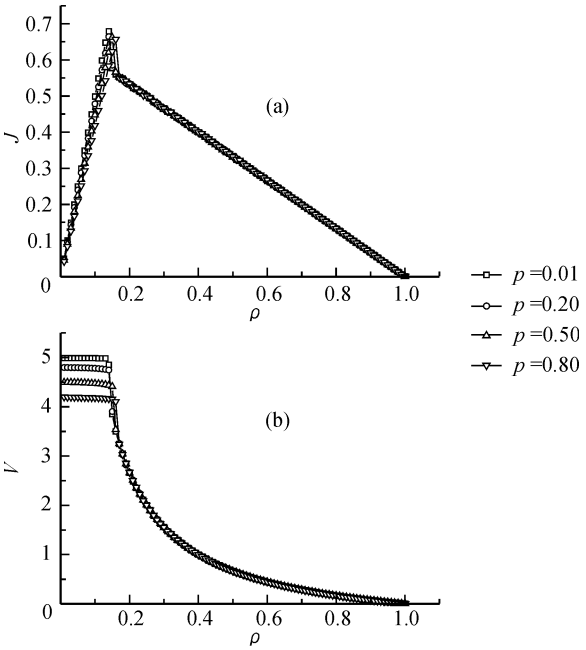


图 6 FI 模型和 VDR 模型混合随参数 p 变化的基本图

Fig. 6 Fundamental diagram of mixed parameter p in the mixed model of FI and VDR

$f_2 = 0.5$, $p_0 = 0.5$, $p_1 = 0$

其延迟概率 p 对交通流几乎不起影响作用，所以按 VDR 模型行驶的车辆对 FI 模型和 VDR 模型混合的交通流起主要作用。

2 结束语

本文在 NS 模型、FI 模型和 VDR 模型的基础上，考虑不同车辆的驾驶员具有其个性的驾驶方式和习惯，具体表现在不同的驾驶员采用适合于自己行车规则的交通流模型在道路上驾车行驶，从而对交通流模型之间的混合进行了研究和讨论。通过计算机模拟得到了不同混合模型在不同参数下的基本图，结果表明：道路上只要具有按 FI 模型行驶的车辆时，道路交通流量和平均速度都有较大的提高；只要具有按 VDR 模型行驶的车辆时，系统就会展现出亚稳态、相分离等复杂的实际交通行为现象。因此，FI 模型与 VDR 模型的混合模型既能反映道路畅通、车流量增大的实际情况，又能较好地描述交通流的复杂非线性现象。同时，混合比例系数 f f_1 f_2 对交通流也有较大的影响。总之，道路上不同车辆按不同模型混合行驶，是实际交通复杂、多变的真实反映，本文的结果为研究实际的交通流问题提供了有价值的参考。

参考文献：

[1] Nagel K, Schreckenberg M. A cellular automation model for free way traffic[J]. J. Phys. I (France), 1992, 2: 2221 – 2229.

[2] Fukui M, Ishibashi Y. Traffic flow in 1D cellular automaton model including cars moving with high speed[J]. J. Phys. Soc. Japan. 1996, 65: 1868 – 1870.

[3] 汪秉宏，邝乐琪，许伯铭. 高速公路交通流元胞自动机模型的一种统计平均解耦处理[J]. 物理学报, 1998, 47(6): 906 – 915.

[4] Barlovic R, Santen L, Schadscheider A, et al. Metastable states in cellular automata for traffic flow[J]. Eur. Phys. J. B. 1998, 5: 793 – 800.

[5] Takayasu M, Takayasu T. 1/f noise in a traffic model[J]. Fractals. 1993, 1: 860 – 866.

[6] Benjamin S C, Johnson N F, Hui P M. Cellular automata models of traffic flow along a highway containing a junction[J]. J. Phys. A: Math & Gen. 1996, 29(3): 3119 – 3127.

[7] 刘慕仁，薛郁，孔令江. 城市道路交通问题与交通流模型[J]. 力学与实践, 2005, 27(1): 1 – 6.

[8] 薛郁，董力耘，戴世强. 一种改进的一维元胞自动机交通流模型及减速概率的影响[J]. 物理学报, 2001, 50(3): 445 – 449.

Mixed Cellular Automaton Models of Traffic Flow

LIU Hai-ying[a], KUANG Hua[b], KONG Ling-jiang[b], LIU Mu-Ren[b]

(a. *College of Education Science*; b. *College of Physics and Information Technology*, *Guangxi Normal University*, *Guilin* 541004, *China*)

Abstract: Based on the NS model, FI model and VDR model for one-dimensional traffic flow, and with different kinds of rules adopted by drivers, the influences of various mixed rules are found for one system in the traffic. The mixed rules of the NS model and the FI model, the NS model and the VDR model, and the FI model and the VDR model are discussed and analyzed in this article. The FI-VDR mixed model shows that the road is clear and the vehicular flow increases, and describes the complex nonlinear phenomena of the traffic flow as well.

Key words: traffic flow; cellular automaton; mixed model; computer simulation