第 55 卷 第 5 期 2006 年 5 月
1000-3290/2006/55(05)/2306-07

物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA

Vol.55,No.5,May,2006
©2006 Chin.Phys.Soc.

气体分子动力学交通流模型弛豫时间的改进

赵建玉[1)2)] 孙喜明[3)] 贾 磊[1)]

1)(山东大学控制科学与工程学院,济南 250061)

2)(济南大学控制科学与工程学院,济南 250022)

3)(清华大学核研院,北京 100084)

(2005 年 4 月 27 日收到;2005 年 7 月 14 日收到修改稿)

对气体分子动力学交通流模型的弛豫时间进行了改进,使之与密度及速度相关.通过算例证明改进后的气体分子动力学交通流模型对于抑制高密度车流状况下的扰动更为有效,具有更强的稳定性.

关键词:交通流,气体分子动力学,Navier-Stokes 方程

PACC:5110,0260

1.引 言

十几年来,交通流的建模和数值模拟受到越来越多的重视[1—6],这是因为 1)交通流蕴含了丰富的物理信息,这些物理信息与其他许多研究领域有诸多关联,例如,近年来的研究表明,交通流与颗粒流有许多相似的物理特性;2)交通流从微观和宏观两个角度有多种建立模型的形式,这些模型有多种数值求解方法,例如基于交通流元胞自动机模型[7],基于流体力学宏观控制方程的模型,以及基于气体分子动力学的模型(gas kinetic-based traffic model)[8—15].本文的研究是基于气体分子动力学的交通流模型.由气体分子动力学交通流模型方程取零阶近似,可以推导出 Euler 型交通流控制方程,取一阶近似可以推导出 Navier-Stokes 型交通流控制方程.迄今为止,大多数基于宏观控制方程的数值模拟都是针对 Euler 型交通流控制方程,这主要是因为 Navier-Stokes 型交通流控制方程更加复杂且有更多的非线性特性,因此在数值模拟过程中更容易导致不稳定.本文的研究侧重于 Navier-Stokes 型的交通流控制方程,通过对气体分子动力学交通流模型的弛豫时间进行建模,使之与密度及速度相关,从而增强 Navier-Stokes 型交通流控制方程抑制扰动的能力.在经典的气体分子动力学理论中,弛豫时间 τ 通常被认为是常数.Helbing 将弛豫时间 τ 与车辆密度 ρ 关联起来[13],本文对这一理论进行了改进和补充.

2.气体分子动力学交通流模型

交通流的气体分子动力学模型方程为[9]

$$\frac{\partial\tilde{\rho}}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\tilde{\rho}\ v)+\frac{\partial}{\partial v}\left(\tilde{\rho}\ \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\right)=\left(\frac{\partial\tilde{\rho}}{\partial t}\right)_{ss},\quad(1)$$

其中 $\tilde{\rho}(x,v,t)$ 表示时刻 t 位于 x 处且以速度 v 行驶的车辆的相密度.对于交通流来说,加速度公式为 $\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\frac{V_0-v}{\tau}$,其中 V_0 表示车辆的最大期望速度,一般为道路的最大设计时速;τ 表示车辆的加速时间,也称弛豫时间;$\left(\frac{\partial\tilde{\rho}}{\partial t}\right)_{ss}$ 是源(汇)项,它是由车辆加速或者减速引起的.$\left(\frac{\partial\tilde{\rho}}{\partial t}\right)_{ss}$ 可拆成碰撞项和"欠佳驾驶项",$\left(\frac{\partial\tilde{\rho}}{\partial t}\right)_{ss}=\left(\frac{\partial\tilde{\rho}}{\partial t}\right)_{\mathrm{int}}+\frac{\partial^2}{\partial t^2}(\tilde{\rho}\ D)$,其中 D 表示由于"欠佳驾驶"引起的扩散效应,$D=AV^2/\tau$;碰撞项可表示为 $\left(\frac{\partial\tilde{\rho}}{\partial t}\right)_{\mathrm{int}}=(1-p)\chi(x+l,t)B(v)$,其中 p 表示超车概率 $(1-p)$,即"无法超车"的概率,$\chi(x+l,t)$ 是车辆间的相关函数,$(1-p)\chi$ 表示车辆之间因为无法超车而发生刹车或者碰撞的概率,l 表示每辆车所需的最小空间长度,$l=\frac{1}{\rho_{\max}}$;$B(v)$ 是类似 Boltzmann 方程中的碰撞项函数[10,11]

$$B(v)=\int_{w>v}\mathrm{d}w(w-v)\tilde{\rho}(x,w,t)\tilde{\rho}(x+s,v,t)$$

$$-\int_{v>w} \mathrm{d}w(v-w)\tilde{\rho}(x,v,t)\tilde{\rho}(x+s,w,t), \quad (2)$$

其中 s 表示车辆之间的安全距离，(2)式右侧第一项表示由于位于 x 处车辆速度 w 比位于 $x+s$ 处车辆速度 v 快，因此位于 x 处的车辆因无法超车而由速度 w 减速到速度 v，导致速度为 v 的车辆相密度增加；公式右侧第二项表示由于位于 x 处车辆速度 v 比位于 $x+s$ 处车辆速度 w 快，因此位于 x 处的车辆因无法超车而由速度 v 减速到 w，导致速度为 v 的车辆相密度减少.

相密度 $\tilde{\rho}(x,v,t)$ 与宏观物理量之间的关系为

$$\rho(x,t)=\int \mathrm{d}v\tilde{\rho}(x,v,t), \quad (3)$$

$$\rho(x,t)V(x,t)=\int \mathrm{d}v v\tilde{\rho}(x,v,t), \quad (4)$$

$$P(x,t)=\rho(x,t)\theta(x,t)=\int \mathrm{d}v[v-V(x,t)]^2\tilde{\rho}(x,v,t), \quad (5)$$

$$\gamma(x,t)=\rho(x,t)\Gamma(x,t)=\int \mathrm{d}v[v-V(x,t)]^3\tilde{\rho}(x,v,t), \quad (6)$$

其中 $\rho(x,t)$，$V(x,t)$，$P(x,t)$ 和 $\gamma(x,t)$ 分别表示宏观的交通流密度、速度、压力和速度三次方差. 如果用 1，v，$(v-V)^2$，$(v-V)^3$ 分别乘(1)式，积分后就可以得到宏观控制方程组，我们称这组方程为“矩方程”. $\tilde{\rho}(x,v,t)$ 的平衡态解是 Gauss 分布的形式，$\tilde{\rho}_0(v)=\frac{\rho \mathrm{e}^{-(v-V)^2/2(\theta)}}{\sqrt{2\pi\theta}}$. 将 $\tilde{\rho}(x,v,t)$ 的非平衡态解以不同精度进行截断，取零阶近似时由“矩方程”经封闭后可以得到 Euler 型方程，取一阶近似时可以得到 Navier-Stokes 型方程.

3. Euler 型交通流控制方程

Euler 型交通流控制方程是气体分子动力学交通流模型的零阶近似，可以表述为[12]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho V)}{\partial x}=0. \quad (7)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+V\frac{\partial V}{\partial x}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{V_{\mathrm{e}}-V}{\tau}, \quad (8)$$

其中 τ 是弛豫时间，ρ 是车流密度；V 是车流速度；P 是车流压力，$P=\rho\theta$，θ 是车流速度方差，可由经验公式 $\theta=A(\rho)V^2$ 确定，其中 $A(\rho)=A_0+\Delta A\left[\tanh\left(\frac{\rho-\rho_{\mathrm{c}}}{\Delta\rho}\right)+1\right]$，$A_0$，$\Delta A$，$\rho_{\mathrm{c}}$ 和 $\Delta\rho$ 是常数；V_{e} 是车流的“平衡态速度”，定义为 $V_{\mathrm{e}}=V_0+\frac{\tau}{\rho}(1-p)\chi(x+l,t)\int \mathrm{d}vvB(v)$，其中 $\int \mathrm{d}vvB(v)$ 的表达式为[9]

$$\int \mathrm{d}vvB(v)=\rho\rho_+\left\{[(\theta+\theta_+)+(V-V_+)^2]\Phi\left(\frac{V-V_+}{\sqrt{\theta+\theta_+}}\right)+(V-V_+)(\theta+\theta_+)\frac{\mathrm{e}^{-(V-V_+)^2/[2(\theta+\theta_+)]}}{\sqrt{2\pi(\theta+\theta_+)}}\right\}, \quad (9)$$

其中

$$\Phi(z)=\int_{-\infty}^{z}\mathrm{d}y\frac{\mathrm{e}^{-y^2/2}}{\sqrt{2\pi}},$$
$$\rho_+(x,t)=\rho(x+s,t),$$
$$V_+(x,t)=V(x+s,t),$$
$$\theta_+(x,t)=\theta(x+s,t).$$

$s=\gamma(l+TV)$ 表示车辆行驶过程中的最小安全距离，γ 表示驾驶员对刹车有一定预先的反应，T 表示刹车所需的时间. 当 $V<V_+$ 时，表明前方车辆的速度比本车快，这时 $\int \mathrm{d}vvB(v)$ 增大，从而 V_{e} 增大；反之亦然. 这与实际观察到的情况是一致的.

4. Navier-Stokes 型交通流控制方程

Navier-Stokes 型交通流控制方程是气体分子动力学交通流模型的一阶近似，表述为[12]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+V\frac{\partial \rho}{\partial x}=-\rho\frac{\partial V}{\partial x}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+V\frac{\partial V}{\partial x}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{V_0-V}{\tau}+\frac{(1-p)\chi(x+l,t)}{\rho}\int \mathrm{d}vvB(v), \quad (11)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t}+V\frac{\partial \theta}{\partial x}=-\frac{2}{\rho}P\frac{\partial V}{\partial x}-\frac{1}{\rho}\frac{\partial(\rho\Gamma)}{\partial x}+\frac{2}{\tau}(C-\theta)+\frac{(1-p)\chi(x+l,t)}{\rho}\int \mathrm{d}v(v-V)^2B(v), \quad (12)$$

其中

$$\Gamma=-3\tau_a\theta\frac{\partial \theta}{\partial x}+\tau_a(1-p)\chi(x+l,t)\rho(x+s,t)\times\left\{\frac{3}{2}[\theta^2-\theta_+^2]\Phi\left(\frac{V-V_+}{\sqrt{\theta+\theta_+}}\right)-\frac{1}{2}(\theta+\theta_+)^2\right.$$

$$\times (V - V_+) \frac{e^{-(V-V_+)^2/[2(\theta+\theta_+)]}}{\sqrt{2\pi(\theta+\theta_+)}}\Big\}, \tag{13}$$

$$\frac{1}{\tau_a} = (1-p)\chi(x+l,t)\rho(x+s,t) \times \Big\{(V-V_+)\Phi\Big(\frac{V-V_+}{\sqrt{\theta+\theta_+}}\Big) + (\theta+\theta_+) \times \frac{e^{-(V-V_+)^2/[2(\theta+\theta_+)]}}{\sqrt{2\pi(\theta+\theta_+)}}\Big\}, \tag{14}$$

$C(x,t) = \langle (v-V)(v_0-V_0)\rangle \approx A(\rho)V^2$，是速度协方差.

$$\int \mathrm{d}vvB(v) = -\rho\rho_+\Big\{[(\theta+\theta_+)+(V-V_+)^2] \times \Phi\Big(\frac{V-V_+}{\sqrt{\theta+\theta_+}}\Big) + \Big[(V-V_+)(\theta+\theta_+) + \frac{1}{3}(\Gamma-\Gamma_+)\Big]\frac{e^{-(V-V_+)^2/[2(\theta+\theta_+)]}}{\sqrt{2\pi(\theta+\theta_+)}}\Big\}, \tag{15}$$

$$\int \mathrm{d}vv^2B(v) = -2\rho\rho_+\Big\{[(\theta-\theta_+)(\theta+\theta_+)\frac{e^{-(V-V_+)^2/[2(\theta+\theta_+)]}}{\sqrt{2\pi(\theta+\theta_+)}} + \Big[(\theta-\theta_+)\Big(V-V_+ + \frac{\Gamma-\Gamma_+}{\theta+\theta_+}\Big) + \frac{\Gamma\theta_+ + \Gamma_+\theta}{\theta+\theta_+}\Big] \times \Phi\Big(\frac{V-V_+}{\sqrt{\theta+\theta_+}}\Big)\Big\} + (V+V_+)\int \mathrm{d}vvB(v). \tag{16}$$

Navier-Stokes 型控制方程中的速度方差 θ 不是通过经验公式得到的，而是通过求解控制方程本身得到的，这与 Euler 型控制方程明显不同.

5. 弛豫时间 τ

在经典的气体分子动力学理论中，弛豫时间 τ 通常被认为是常数. Helbing 将弛豫时间 τ 与车辆密度 ρ 关联起来[13]，建立了如下关系式，$\tau(\rho) = \tau_0 \frac{1+e^{[\rho_c-\rho]/\Delta\rho}}{1-\alpha+e^{[\rho_c-\rho]/\Delta\rho}}$，意即当车辆密度增加时，车辆会减速，因此弛豫时间 τ 会增加，其中 τ_0，α，ρ_c 和 $\Delta\rho$ 是常数.

我们认为 Helbing 对弛豫时间 τ 的建模忽视了一个实际中经常观察到的现象：无论车流密度是否在增加，当位于 $x+l$ 处的车辆速度 $V(x+l)$ 大于位于 x 处的车辆速度 $V(x)$ 时，$V(x)$ 不会减速，相反，会加速. 因此弛豫时间 τ 不但与车流密度相关，而且与相邻车辆的速度差相关. 根据这一实际现象，我们对弛豫时间 τ 的建模补充如下：

$$\tau(\rho, V^+ - V) = \begin{cases} \tau_0 \dfrac{1+e^{[\rho_c-\rho]/\Delta\rho}}{1-\alpha+e^{[\rho_c-\rho]/\Delta\rho}}, & V_+ - V \leqslant 0, \\ \dfrac{\tau_0}{\beta}\Big(3-\tanh\Big(20\Big(\dfrac{V_+-V}{V}\Big)-1\Big)\Big), & V_+ - V > 0, \end{cases} \tag{17}$$

其中 $\beta = 3 - \tanh(-1)$. 当 $V_+ - V > 0$ 时，$V(x)$ 不会因密度增加而减速，相反会加速，因此弛豫时间 τ 会减小，但是其减小的幅度保持在一定的范围内，从上式可以看出当 $V_+ - V \propto \infty$ 时，$\tau(\rho, V^+ - V) \approx 0.53\tau_0$.

6. 数值方法

为了便于数值计算，将 Navier-Stokes 型控制方程(10)—(12)写成如下守恒形式：

$$\frac{\partial\rho}{\partial x} + V\frac{\partial\rho}{\partial x} = -\rho\frac{\partial V}{\partial x}, \tag{18}$$

$$\frac{\partial\rho V}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V^2+\rho\theta)}{\partial x} = -\frac{\rho}{\tau}(V_0 - V) + (1-p)\chi(x+l,t)\int \mathrm{d}vvB(v), \tag{19}$$

$$\frac{\partial[\rho(V^2+\theta)]}{\partial t} + \frac{\partial[\rho(V^3+3V\theta+\Gamma)]}{\partial x} = \frac{2\rho}{\tau}[V_0V + C - (V^2+\theta)] + (1-p)\chi(x+l,t)\int \mathrm{d}vv^2B(v). \tag{20}$$

如果定义

$$u = [\rho, \rho V, \rho(V^2+\theta)] = [\rho, Q, E], \tag{21}$$

$$f = [\rho V, \rho V^2 + \rho\theta, \rho V^3 + 3\rho V\theta + \rho\Gamma] = \Big[Q, \frac{Q^2}{\rho} + P, EV + 2\rho V\theta + \rho\Gamma\Big], \tag{22}$$

$$s = \Big[0, \frac{\rho V_e - \rho V}{\tau}, 2\frac{E_e - E}{\tau}\Big], \tag{23}$$

其中

$$Q = \rho V, \tag{24}$$

$$E = \rho V^2 + \rho\theta = \rho V^2 + P, \tag{25}$$

$$V_e = V_0 + \frac{\tau}{\rho}(1-p)\chi_a \int vB(v)\mathrm{d}v, \tag{26}$$

$$E_e = \rho(V_0 V + AV^2) + \frac{\tau}{2}(1-p)\chi_a \int \mathrm{d}v v^2 B(v), \tag{27}$$

则控制方程(19)—(20)可以写成如下形式：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial f(u)}{\partial x} = s(u). \tag{28}$$

考虑上下游有车流量的流入或者流出，我们给出如下公式：

$$s = \left[\pm\nu^{\pm}, \frac{\rho V_e - \rho V}{\tau} \pm \nu^{\pm} V^{\pm}, 2\frac{E_e - E}{\tau} \pm \nu^{\pm}(V^2 + \theta)\right], \tag{29}$$

其中 $\pm\nu^{\pm}$ 表示上下游流入或者流出的车辆密度. (29)式可以应用于十字路口或者丁字路口的交通流边界条件.

对(28)式用 MacCormack 格式进行数值求解，写成离散形式如下：

$$\tilde{u}_j^n = u_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x}(f_j^n - f_{j-1}^n) + \Delta t s_j^n, \tag{30}$$

$$u_j^{n+1} = \frac{1}{2}\left[\tilde{u}_j^n + u_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x}(\tilde{f}_{j+1}^n - \tilde{f}_j^n) + \Delta t \tilde{s}_j^n\right]. \tag{31}$$

7. 算　例

如图 1 所示，在一条 4km 长的路段上，$t < t_1$ 时有达到平衡态分布的均匀车流量，且下游处的车流量 100% 从上游流入，即上下游应用周期性边界条件；在 $t_1 < t < t_2$ 时，下游车流量的 2% 从路段中间 2km 处流入，其余 98% 从上游流入，这就是所谓“多岔口的周期性边界条件”，在保证车流量守恒的前提下，引入一段时间的流量扰动；在 $t > t_2$ 时，下游车流量的 100% 从上游流入，即仍应用与 $t < t_1$ 相同的周期性边界条件.

与其他文献中应用的周期性边界条件(下游边界与上游边界一一对应)不同，本算例应用了多岔口的周期性边界条件(两个上游边界，一个下游边界)，在保证车流量守恒的前提下用系统自身的部分流量产生干扰. 该算例设计有两个目的：1) 对比 Euler 型控制方程和 Navier-Stokes 型控制方程对于干扰传播的不同. Navier-Stokes 型控制方程的黏性项会对扰动起到“光滑或者抹平”的作用，同时 Helbing 指出，Navier-Stokes 型控制方程因其非线性项而存在更多不稳定性. 根据对实际物理现象的观察，我们期望在 $t > t_2$ 的一段时间之内，即 $t_1 < t < t_2$ 的扰动消失之后，车流恢复到 $t < t_1$ 的状态. 2) 考察弛豫时间 τ 建模的效果.

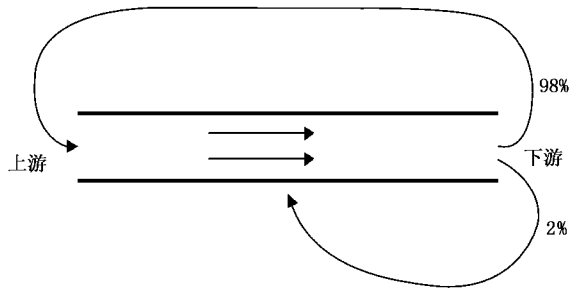

图 1　拓扑示意图

7.1. 算例 1

表 1　计算参数

ρ_{max}/km^{-1}	200	T/s	1.1
ρ/km^{-1}	40	V_0/(km/h)	65
V/(km/h)	40	A_0	0.008
τ_0/s	30	ΔA	0.01
α	0.9	γ	1.1
ρ_c	$0.27\rho_{max}$	$\Delta\rho$	$0.1\rho_{max}$
t_1/min	4	t_2/min	5

由图 2(a)可以看到，Euler 型控制方程由于缺少黏性项，因此在扰动消失后($t > t_2$)，形成一处“同步阻塞”(synchronize traffic)的高密度区，但是该高密度区并不是出现在路段中间 2km 处，而是出现在 3km 处；由图 2(b)和(c)可以看到，$t > t_2$ 后，到 $t = 30$min 时，车流已经恢复到 $t < t_1$ 的状态，这是 Navier-Stokes 型控制方程黏性项对于扰动的抑制作用. 在 $\rho = 40$ 辆/km 的车流密度下，对于 Navier-Stokes 型控制方程来说，弛豫时间 τ 的两种建模方式的区别不大.

7.2. 算例 2

算例 2 与算例 1 的条件参数唯一不同之处在于车流密度 ρ，算例 1 中 $\rho = 40$ 辆/km，算例 2 中 $\rho = 50$ 辆/km.

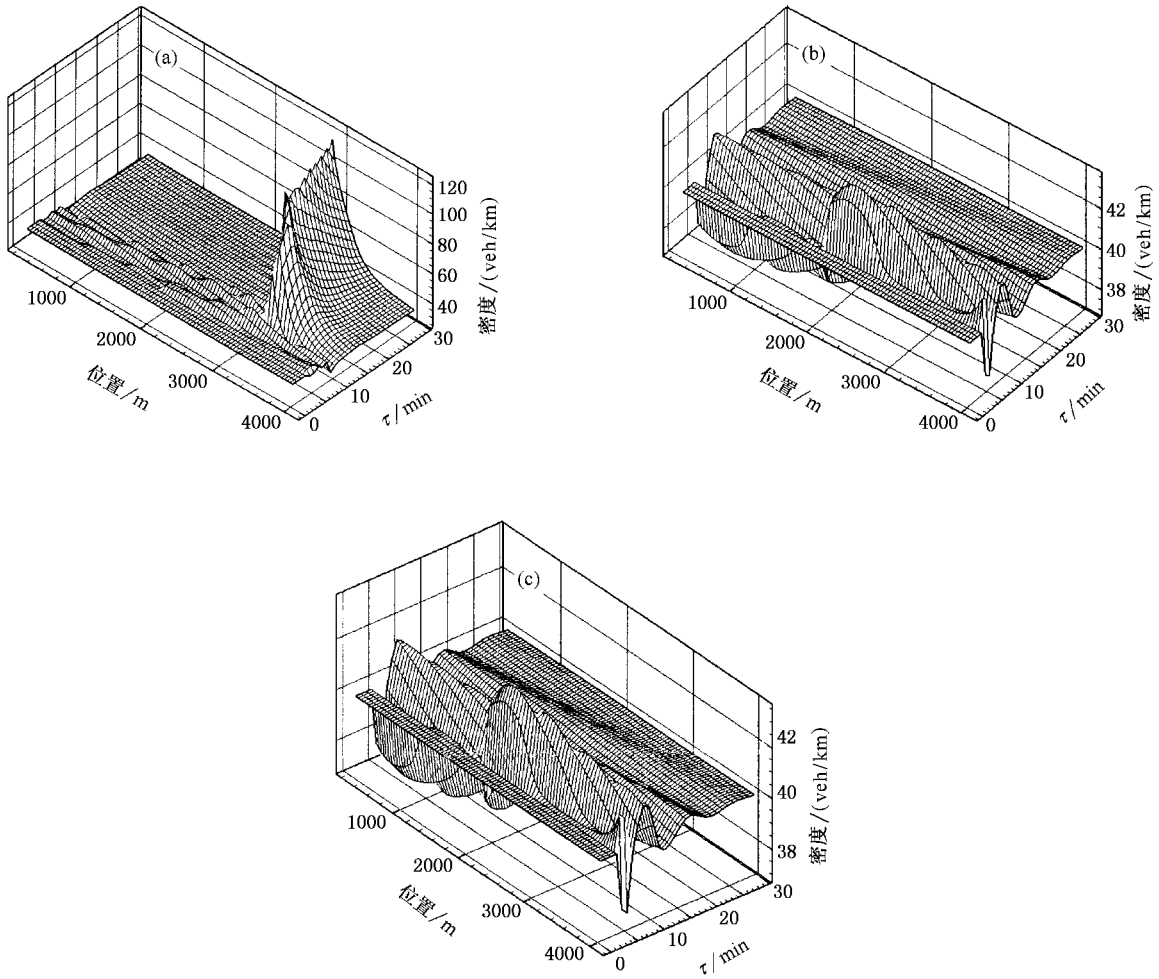

图 2(a) Euler 型控制方程的计算结果;(b) Navier-Stokes 型控制方程的计算结果,弛豫时间 τ 只与密度相关;(c) Navier-Stokes 型控制方程的计算结果,弛豫时间 τ 与密度及相邻车辆速度相关

表 2 计算参数

ρ_{max}/km^{-1}	200	T/s	1.1
ρ/km^{-1}	50	$V_0/(km/h)$	65
$V/(km/h)$	40	A_0	0.008
τ_0/s	30	ΔA	0.01
α	0.9	γ	1.1
ρ_c	$0.27\rho_{max}$	$\Delta\rho$	$0.1\rho_{max}$
t_1/min	4	t_2/min	5

由图 3(a)可以看到,Euler 型控制方程由于缺少黏性项,因此扰动消失后($t > t_2$),形成几处"同步阻塞"(synchronize traffic)的高密度区;由(b)可以看到,当弛豫时间 τ 只与密度相关时,Navier-Stokes 型控制方程的非线性不稳定的特性表现得很明显,在扰动消失后($t > t_2$),车流密度出现不规律的高密度区.值得注意的是,在扰动消失后($t > t_2$)图 3(b)与图 3(a)的车流密度波动有明显不同,图 3(b)反应出 Navier-Stokes 型控制方程的黏性项对波动起到了"光滑化"的作用,由图 3(c)可以看到,当弛豫时间 τ 与密度及相邻车辆速度相关时,Navier-Stokes 型控制方程表现出很好的抑制扰动的性质,在扰动消失后($t > t_2$),车流逐渐趋近于 $t < t_1$ 的状态,这是符合物理现象的.

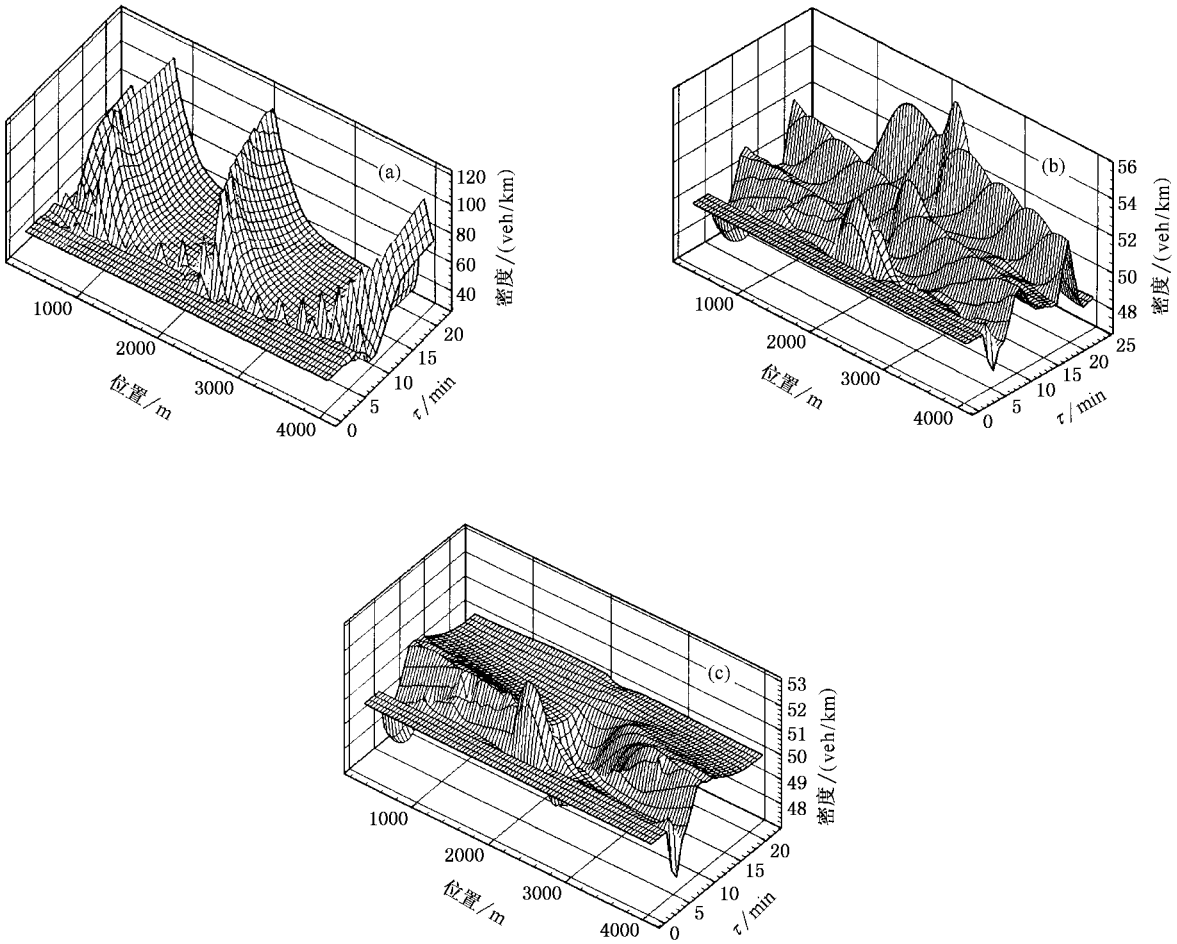

图 3(a) Euler 型控制方程计算结果；(b) Navier-Stokes 型控制方程计算结果，弛豫时间 τ 只与密度相关；(c) Navier-Stokes 型控制方程计算结果，弛豫时间 τ 与密度及相邻车辆速度相关

8. 结论与展望

气体分子动力学交通流模型针对‘碰撞项’在微观建模，推导出具有丰富物理内涵的 Navier-Stokes 型宏观控制方程. 本文在观察实际物理现象的基础上，对气体分子动力学交通流模型的弛豫时间 τ 进行改进，使之与密度和速度相关，通过算例表明，本文的改进能够增强 Navier-Stokes 型控制方程在高密度车流状况下的稳定性.

本文的算例应用了多岔口周期性边界条件（两个上游边界，一个下游边界），在保证车流量守恒的前提下用系统自身的部分流量产生干扰，这对于研究模型在有流量干扰时的守恒性很有意义.

本文的多岔口周期性边界条件可以应用于城市交通的十字路口或丁字路口的研究.

[1] Kerner B S, Rehborn H 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 4030

[2] Kerner B S, Konhauser P 1993 *Phys. Rev.* E **48** R2335

[3] Helbing D 1995 *Phys. Rev.* E **51** 3164

[4] Bai K Z, Tan H L 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2421 (in Chinese) [白克钊、谭惠丽 2003 物理学报 **52** 2421]

[5] Wang B H, Wang L 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1926 (in Chinese) [汪秉宏、王　雷 2000 物理学报 **49** 1926]

[6] Xue Y, Dong L Y 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 492 (in Chinese) [薛郁、董力耘 2002 物理学报 **51** 492]

[7] Lei L, Xue Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2121 (in Chinese) [雷丽、薛　郁 2003 物理学报 **52** 2121]

[8] Treiber M, Hennecke A 1998 *Phys. Rev.* E **59** 239

[9] Helbing D, Treiber M 1998 *Granular Matter* **1** 21

[10] Prigogine I, Herman R 1971 *Kinetic Theory of Vehicular Traffic*

(Elsevier, NewYork)
[11] Helbing D 1996 *Physica* A **233** 253
[12] Helbing D 1996 *Phys*. *Rev*. E **53** 2366
[13] Helbing D, Hennecke A 2001 *Transp*. *Res*. *Part B*: *Methodol*. **35**B 183
[14] Xue Y 2002 *Chin*. *Phys*. **11** 32
[15] Li L, Shi P F 2005 *Chin*. *Phys*. **14** 129

An improvement of relaxation time of gas-kinetic traffic model

Zhao Jian-Yu[1)2)] Sun Xi-Ming[3)] Jia Lei[1)]

1) (*School of Control Science and Engineering*, *Shandong University*, *Jinan* 250061, *China*)

2) (*School of Control Science and Engineering*, *Jinan University*, *Jinan* 250022, *China*)

3) (*Institute of Nuclear and New Energy Technology*, *Tsinghua University*, *Beijing* 100084, *China*)

(Received 27 April 2005; revised manuscript received 14 July 2005)

Abstract

An improvement is made on relaxation time of gas-kinetic traffic model, and the density and velocity are taken into account. A test case validates that the improved gas-kinetic traffic model is more effective on suppressing the perturbation, and more stable at high vehicle densities.

Keywords: traffic flow, gas-kinetic, Navier-Stokes equation

PACC: 5110, 0260