基于最小化车辆比功率分布误差标定的车辆跟驰模型排放仿真*

马志磊[1,2]　何超[1]　李加强[1,2]

（1.西南林业大学机械与交通学院，昆明 650224；2.云南省高校高原山区机动车环保与安全重点实验室，昆明 650224）

【摘要】为了获得良好的跟驰车辆排放仿真效果，提出一种基于最小化跟驰车辆比功率（VSP）分布与实测头车误差的标定优化方法。利用VSP分布误差最小化目标函数标定跟驰模型参数，优化跟驰模型真实性；结合实测头车的排放数据，拟合多种跟驰模型的排放情况。试验结果表明：Gipps、IDM、OVM、GFM、FVDM模型均表现出良好的VSP分布和跟驰车辆排放拟合效果；Gipps模型在VSP分布拟合精度（均方根误差均值为0.003 7）和CO_2、NO_x、CO、颗粒物数量（PN）排放因子拟合效果（与头车的相对误差均值为0.93%）上表现最优；多车辆跟驰车队排放仿真中，Gipps模型的排放波动最小，CO_2、NO_x、CO、PN排放因子相对误差均值分别为0.48%、0.52%、0.87%、1.89%，各跟驰车辆拟合排放的一致性最优。

主题词：跟驰模型　交通仿真　排放　机动车比功率分布　模型优化

中图分类号：U467.1　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20250207

Emission Simulation of Car-Following Models Based on Vehicle Specific Power Distribution Error Minimization Calibration

Ma Zhilei[1,2], He Chao[1], Li Jiaqiang[1,2]

（1. School of Machinery and Transportation, Southwest Forestry University, Kunming 650224; 2. Key Laboratory of Motor Vehicle Environmental Protection and Safety in Plateau Mountainous Areas of Yunnan Province, Kunming 650224）

【Abstract】To achieve accurate emission simulation for car-following vehicles, this paper proposes a calibration and optimization method based on minimizing the error between the Vehicle Specific Power (VSP) distribution of car-following models and the measured lead vehicle. By constructing an objective function to minimize VSP distribution error, the parameters of the car-following models are calibrated to enhance the model's realism. Using measured emission data of the lead vehicle, the emission characteristics of various car-following models are fitted and compared. The results show that Gipps, IDM, OVM, GFM, and FVDM models all demonstrate favourable VSP distributions and effective fitting of following vehicle emission; The Gipps model demonstrated optimal performance in VSP distribution fitting accuracy (mean Root Mean Square Error (RMSE) of 0.003 7) and emission factor fitting for CO_2, NO_x, CO, and Partical Number (PN) emission factors (mean relative error to the reference vehicle of 0.93%). In multi-vehicle platooning emission simulations, the Gipps model exhibits the smallest emission fluctuations. The mean relative errors for CO_2, NO_x, CO, and PN emission factors are 0.48%, 0.52%, 0.87%, and 1.89% respectively. The model demonstrates optimal consistency in fitting emissions across all platooning vehicles.

Key words: Car-following model, Traffic simulation, Emission, VSP distribution, Model optimization

【引用格式】马志磊，何超，李加强．基于最小化车辆比功率分布误差标定的车辆跟驰模型排放仿真[J]. 汽车技术，2026(3): 28-37.

MA Z L, HE C, LI J Q. Emission Simulation of Car-Following Models Based on Vehicle Specific Power Distribution Error Minimization Calibration[J]. Automobile Technology, 2026(3): 28-37.

*基金项目：云南省教育厅科学研究基金项目（2024J0683）；国家自然科学基金项目（51968065）。

通信作者：何超（1980—），教授，主要研究方向为道路交通排放，hcsmile@163.com。

1 前言

在微观交通流层面的汽车排放研究中,跟驰车队中各车辆的排放数据采集成本过高。根据头车运动状态,利用跟驰模型获得车辆的运动状态[1-3],对于探究微观交通流中的排放问题具有重要意义。

跟驰车辆的拟合排放效果与跟驰模型、跟驰参数相关[4-6],为了保证跟驰车辆与头车具有相似的运动特征,在标定跟驰模型参数时,常根据仿真需求将跟驰车辆与头车的车速、加速度等仿真数据均方根误差(Root Mean Square Error,RMSE)作为目标函数[7-11]。在基于实测车辆数据的跟驰车辆排放拟合中,使用车辆比功率(Vehicle Specific Power,VSP)作为联系头车实测排放与跟驰车辆排放的中间变量[12-14]。数据量足够大的情况下,跟驰车队中各车辆的运动状态差异较小,车辆的能耗一致[15]。随着车辆运行时间与数据量增加,相同道路类型上行驶的车辆在各平均车速期间内的VSP分布将呈现一致性[16]。但当跟驰模型输出的参数与头车参数不一致,导致跟驰车辆的VSP分布与前车产生偏差时,排放仿真效果并不理想[17]。使用VSP作为中间变量拟合跟驰车辆排放的方法,在Fritzsche[18]、Newell[19]等模型中效果较好,但主要分析头车后的首辆跟驰车辆的运动特征与排放情况。

为此,本文采集真实车辆的城市道路运行参数与排放数据作为头车数据,以各车速区间的仿真与实测VSP分布的均方根误差为目标函数,采用遗传算法对模型参数进行标定,使跟驰车辆的VSP分布与头车保持一致性,并以实测头车排放数据为基线,将跟驰车辆的VSP分布匹配头车实测CO_2、NO_x、CO和颗粒物数量(Particle Number,PN)排放,获得跟驰车辆、多车辆跟驰车队的拟合排放。

2 跟驰模型与道路试验数据采集

2.1 跟驰模型

本文主要选用以下跟驰模型:

a. Gipps模型。该模型是经典安全距离模型,根据理想最高车速与车头间距判断跟驰车辆的加速、减速行为[20]:

$$u_n(t+T)=\min(u_n^a(t+T),u_n^b(t+T)) \tag{1}$$

$$u_n^a(t+T)=u_n(t)+2.5a_{\max}\tau\left[1-\frac{u_n(t)}{u_{\max}}\right]\times[0.025+u_n(t)/u_{\max}]^{1/2} \tag{2}$$

$$u_n^b(t+T)=d_{\max}\tau+\{(d_{\max}\tau)^2-d_{\max}[2(S_n(t)-S_{n-1})-u_n\tau-(\frac{u_{n-1}^2(t)}{\hat{d}_{\max}})]\}^{1/2} \tag{3}$$

式中:$u_n^a(t+T)$为自由流状态下跟驰车辆为达到理想速度而加速的车速,$u_n^b(t+T)$为跟驰状态下跟驰车辆为保持足够安全车头间距减速的车速,$u_n(t)$、$u_{n-1}(t)$分别为跟驰车辆和前车的车速,$S_n(t)$为车头间距,$u_{\max}$、$a_{\max}$为最大车速和加速度,τ为反应时间,$d_{\max}$、$\hat{d}_{\max}$分别为跟驰车辆、车头的最大减速度,S_{n-1}为头车有效长度。

b. 智能驾驶人模型(Intelligent Driver Model,IDM)。该模型为经典的刺激-反应模型,综合考虑了最大加速度、期望车速与车头间距,计算达到期望车速的跟驰车辆加速度[21]:

$$\begin{cases}a_n(t)=a_{\max}\left\{1-\left[\frac{u_n(t)}{u_{\max}}\right]^{\delta}-\left[\frac{S_{n,\mathrm{des}}(t)}{S_n(t)-l}\right]^2\right\}\\ S_{n,\mathrm{des}}(t)=S_0+u_n(t)\tau-\frac{0.5u_n(t)[u_{n-1}(t)-u_n(t)]}{\sqrt{(a_{\max}b)}}\end{cases} \tag{4}$$

式中:l为头车的车身长度,δ为加速度指数,S_0为临界安全间距,b为期望加速度,$S_{n,\mathrm{des}}(t)$为跟驰车辆与前车距离的期望值函数。

c. 优化速度模型(Optimal Velocity Model,OVM)。根据车头间距获得跟驰车辆采取的加速度,以期望跟驰车辆达到基于车头间距的理想车速[22]:

$$\begin{cases}a_n(t)=\kappa[V(S_n(t))-u_n(t)]\\ V(S_n(t))=u_{\max}\dfrac{\tanh(S_n(t)-l)+\tanh(l)}{2}\end{cases} \tag{5}$$

式中:κ为敏感度系数,$V(S_n(t))$为最优速度函数。

d. 广义力模型(Generalized Force Model,GFM)。在OVM的基础上,考虑了前车与后车速度差对跟驰车辆的影响,当速度差为负时对模型进行修正,使驾驶员对前车减速的反应比对前车加速的反应更敏感[23]:

$$\begin{cases}a_n(t)=\kappa[V(S_n(t))-u_n(t)]+\lambda\Delta u_n(t)\cdot H(-\Delta u_n(t))\\ V(S_n(t))=u_1'+u_2'\tanh[c_1(S_n(t)-l)-c_2]\\ H(-\Delta u_n(t))=\begin{cases}1,\Delta u_n(t)\leqslant 0\\0,\Delta u_n(t)>0\end{cases}\\ \lambda=\begin{cases}\lambda,S_n(t)\leqslant x_c\\0,S_n(t)>x_c\end{cases}\end{cases} \tag{6}$$

式中:$\Delta u_n(t)$为前车与后车的速度差;λ为速度差敏感系

数;u_1'、u_2'、c_1、c_2为最佳车速定义因子;$H()$为不对称敏感函数;$x_c \in (100\ \text{m}, 150\ \text{m})$为判断跟驰或自由流状态的两车距离,若超过限值,则进入自由流状态,不再依据前车与后车的速度差对模型进行调整。

e. 全速度差模型(Full Velocity Difference Model, FVDM)。进一步考虑了前车与后车的速度差$\Delta u_n(t)$对跟驰状态的影响[24],取消了GFM模型的不对称敏感函数,利用速度差对模型进行调整:

$$\begin{cases} a_n(t) = \kappa[V(S_n(t)) - u_n(t)] + \lambda \Delta u_n(t) \\ V(S_n(t)) = u_1' + u_2' \tanh[c_1(S_n(t) - l) - c_2] \\ \lambda = \begin{cases} \lambda, S_n(t) \leqslant x_c \\ 0, S_n(t) > x_c \end{cases} \end{cases} \tag{7}$$

f. Wiedemann模型。该模型将跟驰车辆的运行状态分为跟驰状态、自由驾驶状态、接近状态和紧急状态。通过阈值判断跟驰车辆状态,再计算各状态下跟驰车辆的运行参数[25]。其中,跟驰状态下车辆的加速度为:

$$b_{\text{null}} = B_{\text{null,mult}}(N_{\text{RND4}} + N_{\text{NRND}}) \tag{8}$$

式中:N_{RND4}为驾驶员控制加速的能力,N_{NRND}为驾驶员变化参数,$B_{\text{null,mult}}$为b_{null}的乘法系数。

自由驾驶状态下跟驰车辆的最大加速度为:

$$b_{\max} = B_{\max,\text{mult}}(u_{\max} - u_n(t) N_{\text{FAKTORV}}) \tag{9}$$

式中:$B_{\max,\text{mult}}$为$b_{\max}$的乘法系数,N_{FAKTORV}为标定参数。

接近状态下跟驰车辆的加速度为:

$$b_n = \frac{(\Delta u_n'(t))^2}{2[\Delta_{\text{ABX}} - (S_n(t) - l)]} + b_{n-1} \tag{10}$$

式中:$\Delta u_n'(t)$为后车与前车的速度差,Δ_{ABX}为前后车速度差较小时的最小车距阈值,b_{n-1}为前车的加速度。

紧急状态下跟驰车辆的加速度为:

$$\begin{cases} b_n' = b_n + b_{\min} \dfrac{\Delta_{\text{ABX}} - (S_n(t) - l)}{B_{\text{X}}} \\ b_{\min} = B_{\min,\text{add}} - B_{\text{null,mult}} N_{\text{RND3}} + B_{\min,\text{mult}} u_n(t) \end{cases} \tag{11}$$

式中:$b_{\min}$为最大减速度,B_{X}为计算Δ_{ABX}的过程参数,$B_{\min,\text{add}}$、$B_{\min,\text{mult}}$分别为$b_{\min}$的加法系数和乘法系数,N_{RND3}为速度感知误差。

依据车距阈值(Δ_{ABX}、Δ_{SDX})、速度差阈值(Δ_{SDV}、Δ_{CLDV}和Δ_{OPDV})判断跟驰车辆的运行状态。当车距小于最小车距阈值Δ_{ABX}时,跟驰车辆进入紧急状态:

$$\begin{cases} A_{\text{X}} = l + A_{\text{X,add}} + N_{\text{RND1}} A_{\text{X,mult}} \\ B_{\text{X}} = (B_{\text{X,add}} + B_{\text{X,mult}} N_{\text{RND1}}) \sqrt{u_{\min}} \\ u_{\min} = \min(u_n(t), u_{n-1}(t)) \\ \Delta_{\text{ABX}} = A_{\text{X}} + B_{\text{X}} \end{cases} \tag{12}$$

式中:A_{X}为车辆静止时的期望车距,$A_{\text{X,add}}$、$A_{\text{X,mult}}$、$B_{\text{X,add}}$、$B_{\text{X,mult}}$分别为A_{X}和B_{X}的加法系数、乘法系数,N_{RND1}为驾驶员安全需求参数。

当后车与前车的速度差大于速度差阈值Δ_{SDV}或Δ_{CLDV},且车距大于最小车距阈值Δ_{ABX}时,跟驰车辆进入接近状态:

$$\begin{cases} \Delta_{\text{SDV}} = \left[\dfrac{(S_n(t) - l - A_{\text{X}})}{C_{\text{X}}}\right]^2 \\ \Delta_{\text{CLDV}} = \Delta_{\text{SDV}} E_{\text{X}}^2 \\ E_{\text{X}} = E_{\text{X,add}} + E_{\text{X,mult}}(N_{\text{NRND}} - N_{\text{RND2}}) \end{cases} \tag{13}$$

式中:Δ_{SDV}、Δ_{CLDV}分别为车距较大和较小时驾驶员意识到接近前车的速度差阈值,C_{X}为感知间距的定义参数,$E_{\text{X,add}}$、$E_{\text{X,mult}}$为E_{X}的加法系数和乘法系数,N_{RND2}为速度差的感知能力。

当速度差在(Δ_{OPDV},Δ_{SDV})或(Δ_{OPDV},Δ_{CLDV})范围内,且车距在(Δ_{ABX},Δ_{SDX})时,车辆进入跟驰状态:

$$\begin{cases} \Delta_{\text{SDX}} = A_{\text{X}} + E_{\text{X}} B_{\text{X}} \\ \Delta_{\text{OPDV}} = \Delta_{\text{CLDV}}(-O_{\text{PDV,add}} - O_{\text{PDV,mult}} N_{\text{NRND}}) \end{cases} \tag{14}$$

式中:Δ_{SDX}为驾驶员意识到与前车距离过大时的车距阈值,Δ_{OPDV}为驾驶员意识到脱离前车的速度差阈值,$O_{\text{PDV,add}}$、$O_{\text{PDV,mult}}$分别为Δ_{OPDV}的加法系数和乘法系数。

当车距大于Δ_{SDX}且速度差小于Δ_{SDV},或车距大于Δ_{ABX}且速度差小于Δ_{OPDV}时,车辆进入自由驾驶状态。

2.2 试验数据采集与预处理

2.2.1 数据采集

在10辆轻型车上安装全球定位系统(Global Positioning System, GPS)与便携式排放测试系统(Portable Emission Measurement System, PEMS),采集城市道路中行驶车辆的运动参数与排放数据,并作为跟驰模型的头车数据[8,14],共计29 754 s。其中,运动参数主要为车速,排放数据包含CO_2、NO_x、CO和PN排放速率。

使用排放因子作为排放评价指标,为消除停车排放对基于里程的排放因子的高估影响,剔除车速低于1 km/h的停车工况数据。由于车辆起动时,发动机进行开环控制,NO_x、CO和PN在冷起动阶段大幅提升高,无法反映真实排放特征,故剔除冷起动运行数据,最终得到21 302 s数据。

2.2.2 数据预处理

根据跟驰车辆的运动参数(车速、加速度),计算头车与跟驰车辆的VSP[14]:

$$P_{\text{VSP}} = v(1.1a + 0.132) + 0.000\,302 v^3 \tag{15}$$

式中:v为车速,a为加速度。

将头车和跟驰车辆的车速按序排列,以60个数据为1组计算组内平均车速,利用平均车速、VSP划分区间。实测数据集中的最高车速为58.1 km/h,因此,以2 km/h为间隔,将(0 km/h, 60 km/h)划分30个平均车速区间;以0.5 W/kg为间隔,将[−20.25 W/kg, 20.25 W/kg)划分为81个VSP区间,统计得到各平均车速区间内头车和跟驰车辆的VSP分布。

3 模型标定与标定后运行结果

3.1 模型标定

由于跟驰模型中待标定参数较多,需根据模型用途设定合适的目标函数来标定模型参数。随着车队行驶时间增加,各车辆在平均车速区间内的VSP分布呈现一致性[16]。以跟驰车辆与头车的VSP分布均方根误差最小为目标设计目标函数:

$$\min O_{\text{obj}} = \frac{1}{N_{\text{v}}}\sum_{i=1}^{N_{\text{v}}} E_i \tag{16}$$

$$E_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N_{\text{VSP}}}\left(P_{\text{Real}(i,j)} - P_{\text{Sim}(i,j)}\right)^2}{N_{\text{VSP}}}} \tag{17}$$

式中:E_i为第i个车速区间中跟驰车辆与头车VSP分布的均方根误差,N_{VSP} = 81、N_{v} = 30分别为VSP区间和车速区间的数量,$P_{\text{Real}(i,j)}$、$P_{\text{Sim}(i,j)}$分别为头车、跟驰车辆在车速区间的VSP分布。

将跟驰模型中待标定的参数作为目标函数的决策变量,使用遗传算法对目标函数进行优化[26]。该算法的参数设置为:种群大小为100个,最大迭代次数为500次,变异率为0.01,目标函数收敛容差为10^{-6}。为了提高优化过程的计算效率,标定参数的参考范围如表1所示[27-29]。

3.2 模型与头车的VSP分布对比

使用式(17)计算平均车速区间的VSP均方根误差,以反映模型参数优化标定后的跟驰模型与头车VSP分布的误差。对比3个平均车速区间[18 km/h,20 km/h)、[28 km/h,30 km/h)、[38 km/h,40 km/h)中,头车与各模型输出跟驰车辆的VSP分布结果,如图1所示。

由图1可知:Gipps模型的均方根误差均最小,与头车VSP分布具有最好的一致性;其余模型在低速区间[18 km/h, 20 km/h)的分布误差稍大,但在[28 km/h, 30 km/h)、[38 km/h, 40 km/h)区间中,模型分布误差降低;IDM、OVM、FVDM模型在[28 km/h, 30 km/h)区间的分布偏向高VSP方向,使拟合排放升高。

Wiedemann模型基于运行状态输出跟驰车辆的加速度:在脱离前车的自由驾驶状态下,为了获得较高的车速,加速度较大;在靠近前车的紧急状态下,为了避免碰撞,减速度较大。令模型的VSP分布偏离头车VSP分布并向两侧延伸,且高VSP区间分布较多。在不依据实测头车排放的跟驰车辆排放拟合方法中,高VSP表示

表1 模型参数取值范围与标定结果

模型	参数	范围	标定结果	模型	参数	范围	标定结果
Gipps	τ/s	[0.3,2]	1.08	Wiedemann	$A_{\text{X,add}}$	[0.5,5]	2.60
	$a_{\max}$/m·s^{-2}	[0.5,4]	3.64		$B_{\text{X,add}}$	[0,8]	1.95
	$d_{\max}$/m·s^{-2}	[−5,−2]	−3.83		$E_{\text{X,add}}$	[0,6]	2.79
	$\hat{d}_{\max}$/m·s^{-2}	[−6,−3]	−3.01		$A_{\text{X,mult}}$	[0,10]	3.85
	S_{n-1}/s	[5,10]	6.21		$B_{\text{X,mult}}$	[0,5]	1.23
IDM	$a_{\max}$/m·s^{-2}	[0.5,3]	2.99		$E_{\text{X,mult}}$	[0,3]	2.87
	b/m·s^{-2}	[0.5,6]	0.75		$O_{\text{PDV,add}}$	[0,6]	4.38
	S_0/m	[0.5,6]	2.35		$O_{\text{PDV,mult}}$	[0,6]	4.20
	δ	[1,6]	1.16		C_{X}	[25,75]	44.83
	τ/s	[0.1,4]	3.94		$B_{\text{null,mult}}$	[0,0.5]	0.00
OVM	κ/s^{-1}	[0.01,1.5]	0.12		$B_{\text{min,add}}$	[−15,−2]	−9.75
GFM	κ/s^{-1}	[0.01,1.5]	0.33		$B_{\text{min,mult}}$	[0,1]	0.17
	u_1'	[0.5,30]	8.42		$B_{\text{max,mult}}$	[0,2]	0.05
	u_2'	[0.5,50]	7.38		N_{FAKTORV}	[0,4]	0.03
	λ/s^{-1}	[0,2]	0.08		N_{NRND}		N(0.5,0.15)
	c_1/m^{-1}	[0,0.5]	0.02		N_{RND1}		N(0.5,0.15)
	c_2	[0,8]	3.96		N_{RND2}		N(0.5,0.15)
FVDM	κ/s^{-1}	[0.01,1.5]	1.32		N_{RND3}		N(0.5,0.15)
	u_1'	[0.5,30]	8.22		N_{RND4}		N(0.5,0.15)
	u_2'	[0.5,50]	5.27				
	λ/s^{-1}	[0,2]	0.36				
	c_1/m^{-1}	[0,0.5]	0.02				
	c_2	[0,8]	2.71				

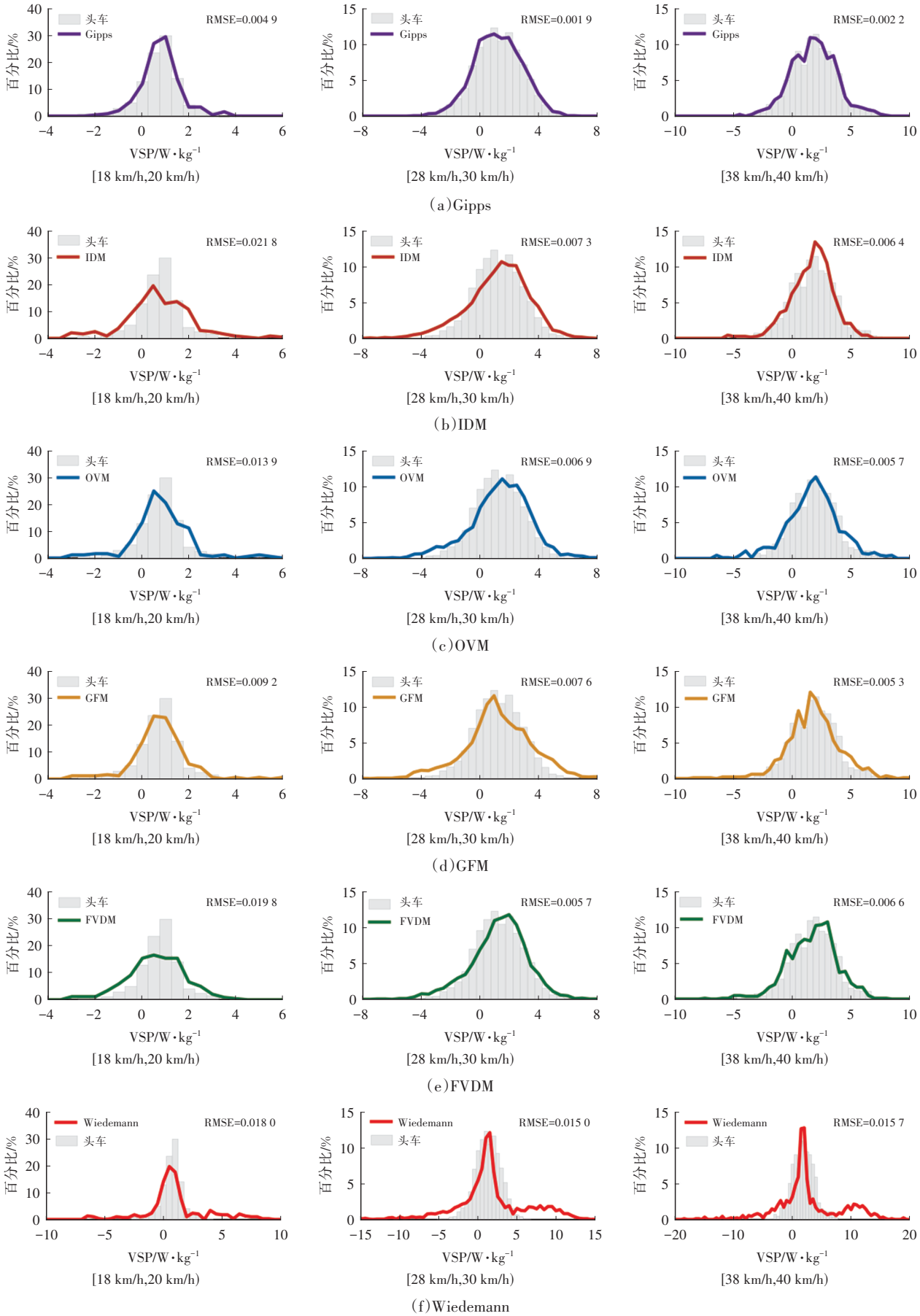


图1　头车与各模型跟驰车辆VSP分布对比

跟驰车辆的功率需求更高,拟合排放将高于头车;反之,在以实测头车排放为依据的跟驰车辆排放拟合方法中,偏离头车VSP分布的区域没有与之匹配的头车排放数据,使累计排放量减少,拟合排放将低于头车。

各车速区间的VSP均方根误差如图2所示。其中,Gipps模型输出的各车速区间VSP分布均方根误差最小,各平均车速区间的误差均值为0.003 7。IDM、OVM、GFM、FVDM模型输出的各车速区间VSP分布均方根误差也较小,各平均车速区间的误差均值分别为0.010 3、0.008 5、0.008 7、0.009 0。

由图2可知,Wiedemann模型输出的各车速区间VSP分布均方根误差高于其他模型。模型在计算加、减速度与确定驾驶状态的阈值时,均使用服从正态分布的随机变量模拟驾驶的随机性,受随机变量的影响,误差难以有效降低,均方根误差的均值为0.017 1。

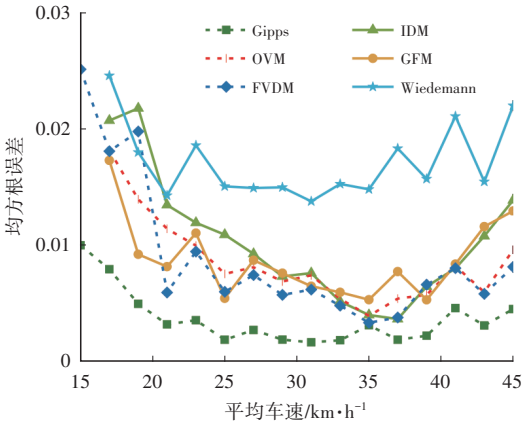


图2 各模型VSP分布的均方根误差

3.3 模型与头车的车速、加速度对比

为了观察跟驰模型输出的跟驰车辆车速、加速度分布情况,将头车与各模型输出的车速、加速度按从小到大的顺序进行展示,如图3所示。

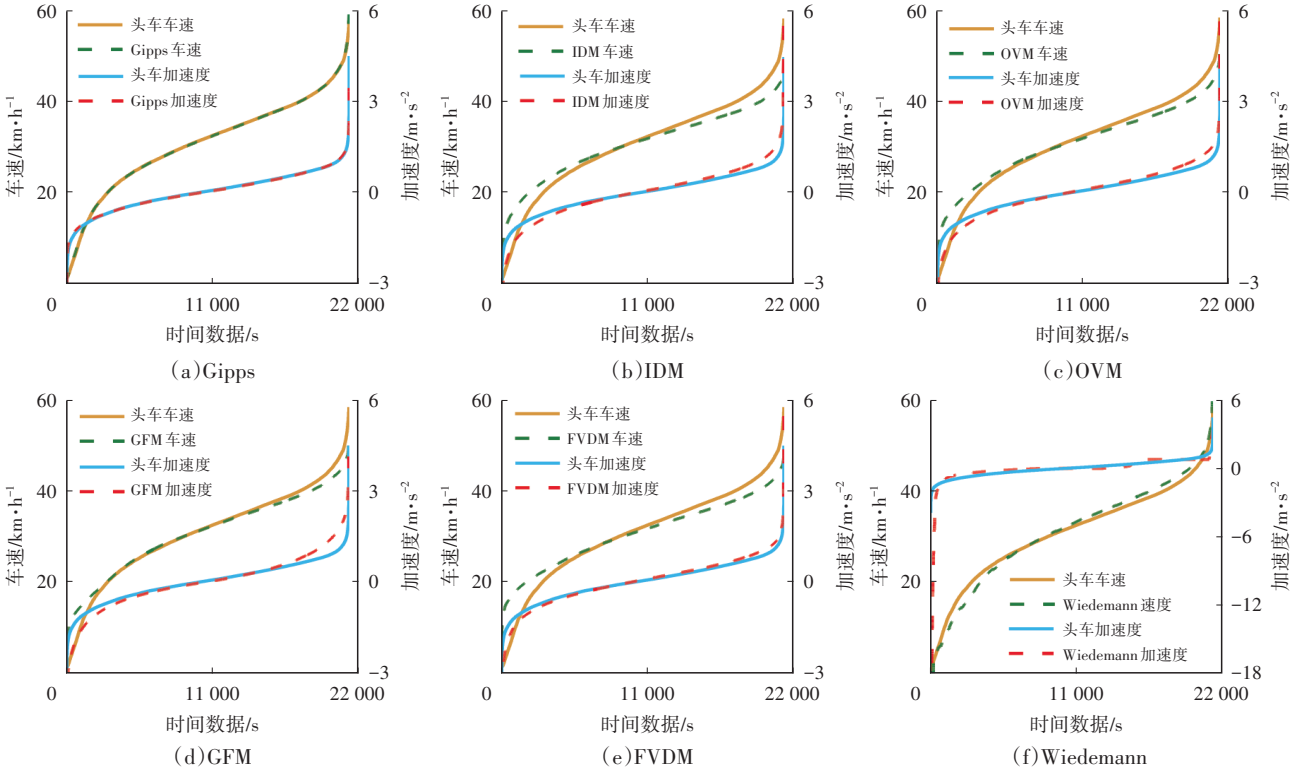


图3 头车与跟驰车辆车速、加速度对比

由图3可知,Gipps模型的车速、加速度分布与头车高度吻合。IDM、OVM、GFM、FVDM模型的跟驰车辆最小车速区间的仿真车速高于头车,最小加速度区间的仿真加速度低于头车;最高车速区间的仿真车速低于头车,最大加速度区间的仿真加速度高于头车。车速与加速度对VSP的影响在一定程度上可相互抵消,使跟驰车辆的VSP分布能够与头车接近。

Wiedemann模型的结果中,部分车速与加速度偏小,使车辆VSP减小;跟驰车辆的VSP分布偏离头车的VSP分布向两侧延伸。该模型以阈值确定跟驰车辆的4种运行状态,再根据状态赋予不同的加速度,跟驰车辆的状态切换时加速度瞬变,而非平滑过渡。由于VSP对加速度具有高度敏感性[30],因而使Wiedemann模型的VSP分布出现较大偏差。

4 跟驰车辆的排放仿真

4.1 计算方法

通过PEMS设备采集头车排放速率,计算头车在车

速、VSP区间的平均排放速率$M_{(i,j)}$，作为跟驰车辆的排放拟合依据：

$$M_{(i,j)}=\frac{\sum_{y=1}^{N_{(ij)}} m_{(i,j),y}}{N_{(i,j)}} \tag{18}$$

式中：$m_{(i,j),y}$为(i,j)区间的头车排放速率，$N_{(i,j)}$为(i,j)区间的数据量。

使用头车各区间的平均排放速率与跟驰车辆各车速区间的VSP分布，计算跟驰车辆各车速区间的排放因子e_i，包括CO_2排放因子、NO_x与CO排放因子和PN排放因子：

$$e_i=3\,600\times\frac{\sum_{j=1}^{N_{VSP}} P_{\mathrm{Sim}(i,j)}M_{(i,j)}}{\bar{V}_i} \tag{19}$$

式中：$\bar{V}_i$为跟驰车辆在车速区间i内的平均车速。

因此，跟驰车辆总里程的排放因子为：

$$e_{\mathrm{total}}=\frac{\sum_{i=1}^{N_v} e_i\bar{V}_i(N_i/3\,600)}{S_{\mathrm{total}}} \tag{20}$$

式中：N_i为跟驰车辆在车速区间i内数据量，S_{total}为跟驰车辆总行驶里程。

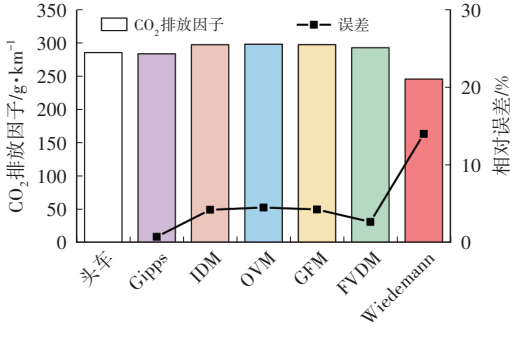
使用相对误差评价拟合的后车排放因子与前车排放因子的差异，后车与前车的排放因子相对误差为：

$$E'=\frac{|e_{\mathrm{total}}-e'_{\mathrm{total}}|}{e'_{\mathrm{total}}} \tag{21}$$

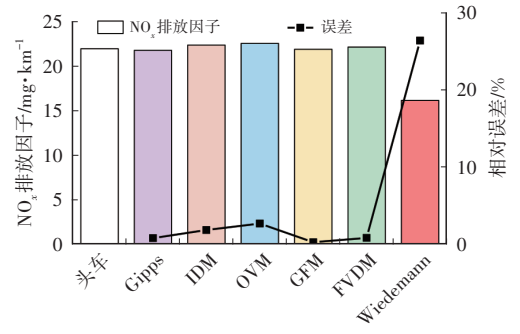
式中：e_{total}、e'_{total}分别为后车和前车的拟合排放因子。

4.2 跟驰车辆的排放拟合

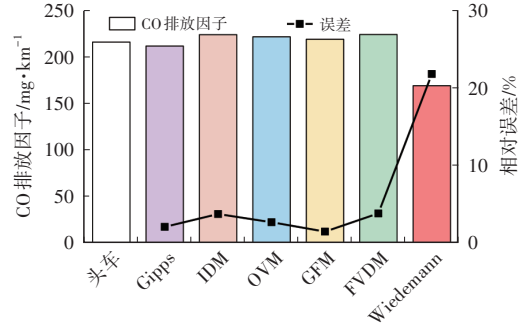
各模型拟合的排放因子及其与头车的相对误差如图4所示：Gipps模型拟合的跟驰车辆排放因子（CO_2、NO_x、CO、PN）与头车相对误差最小，所有排放物的相对误差均值为0.93%，与实测头车排放一致性最好；IDM、OVM、GFM、FVDM模型拟合的跟驰车辆与头车也有较好的一致性。各模型获得的跟驰车辆拟合排放与头车排放的相对误差均值别为2.79%、3.54%、3.88%、1.82%，各模型在排放因子拟合方面均展现出良好的性能，其中，Gipps模型效果最佳。



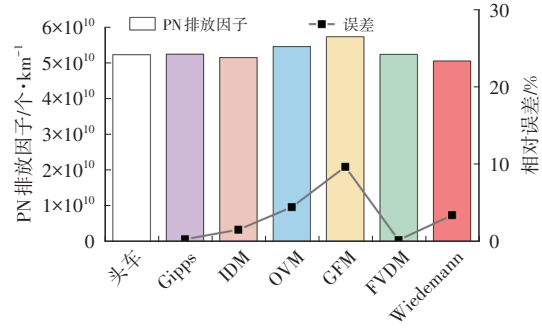
(a)CO_2



(b)NO_x



(c)CO



(d)PN

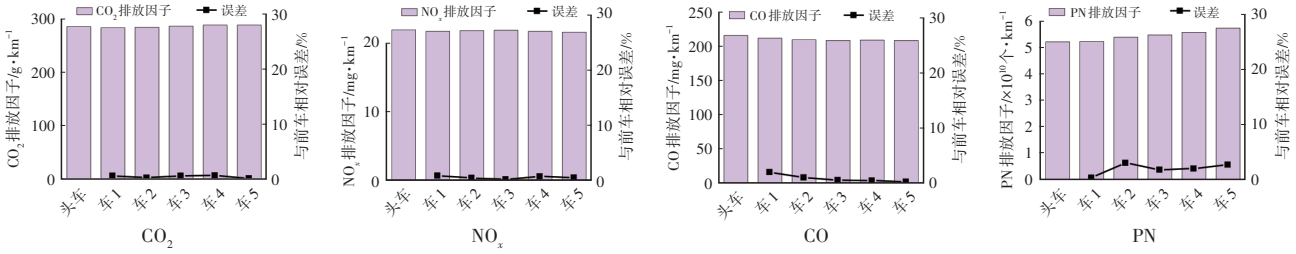
图4 各模型拟合跟驰车辆排放情况对比

Wiedemann模型中，仅PN排放因子拟合情况较好，其余拟合排放误差均较大，所有排放物的相对误差均值为16.40%，且拟合排放明显低于头车排放。主要原因是模型的部分VSP分布落在头车VSP分布范围外，使该部分VSP分布无法获得与之匹配的实测排放数据，导致排放累计值降低。

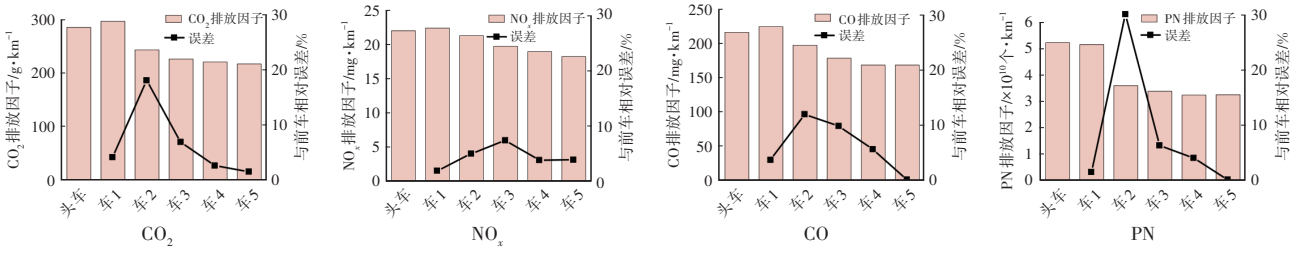
4.3 跟驰车队的排放拟合

在多车辆跟驰车队的排放仿真中，依次将前车的运动状态作为后车模型的输入，获得相应的VSP分布，再与实测数据匹配，得到后续5辆跟驰车辆的排放拟合结果，如图5所示，并将跟驰车辆编号为车1~车5。

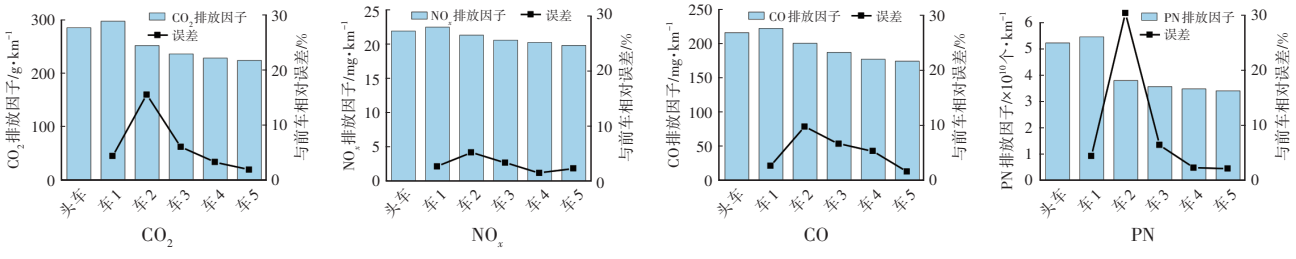
由图5可知，Gipps模型在仿真试验中稳定性最佳：在车2~车5的仿真中，以前车运动状态为模型输入，替代头车的运动状态作为模型输入数据，输出结果波动较小，后车与前车的排放因子（CO_2、NO_x、CO、PN）的相对误差均值依次为0.48%、0.52%、0.87%和1.89%，具有较



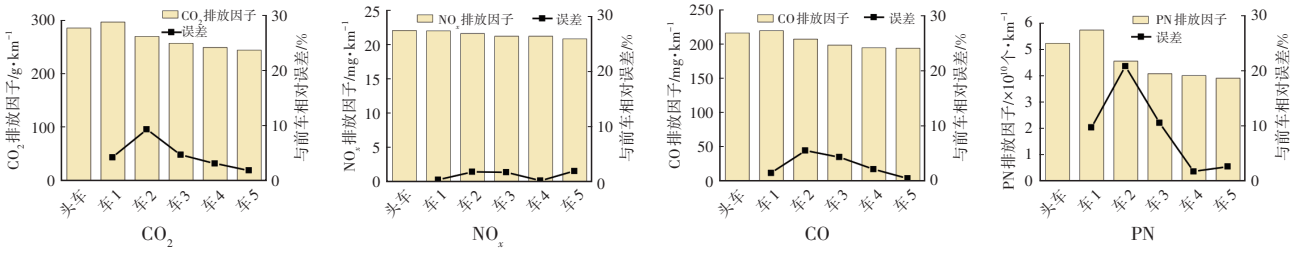
(a)Gipps



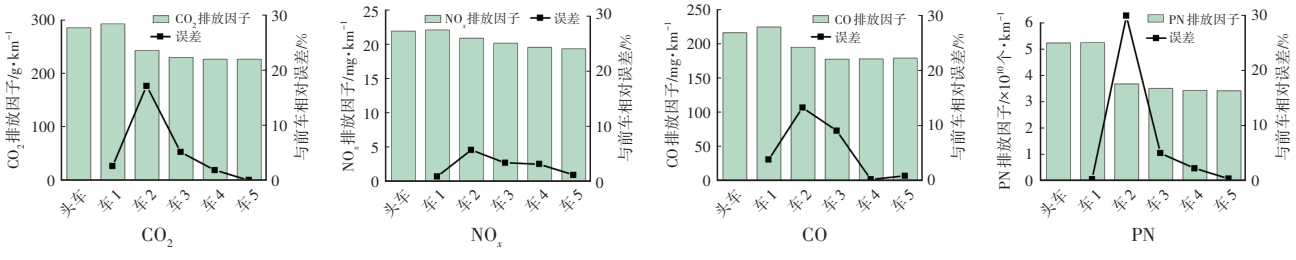
(b)IDM



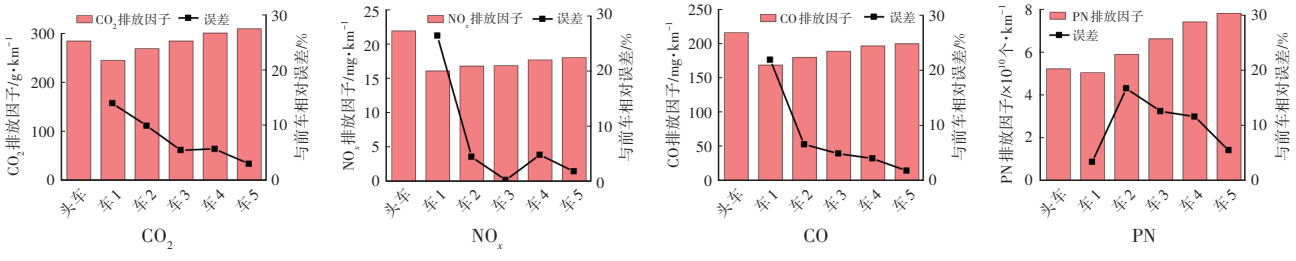
(c)OVM



(d)GFM



(e)FVDM



(f)Wiedemann

图5　各模型拟合的跟驰车队排放情况对比

高的鲁棒性。

IDM、OVM、GFM、FVDM模型中,后车的排放因子逐渐降低,主要原因为跟驰状态的延迟性影响,随着前车运动状态的传递,后车行驶逐渐平缓,车辆VSP减小,使排放降低。其中,车2的部分排放与前车相比,出现了明显的波动,IDM、OVM、FVDM模型的PN排放波动甚至达到30%。

在标定工作中,以头车实测VSP分布与紧随头车的跟驰车辆VSP分布误差最小为目标函数,对车1模型参数进行标定优化。而车2~车5的前车数据均由模型仿真获得,无法使用前车仿真结果对模型参数进行标定,因此,同列跟驰车队中所有跟驰车辆均采用相同的模型参数。目标函数优化后,车1显示出较好的排放拟合效果,在多车辆跟驰车队排放仿真时,Gipps模型各跟驰车辆均表现出了较好的排放拟合效果,而其他跟驰模型车2~车5的排放拟合结果波动较明显。

Wiedemann模型中,跟驰车队中各车辆的排放因子逐渐升高,受跟驰状态的延迟性影响,与前车相比,后车自由驾驶状态下的最大加速度与紧急状态下的最大减速度更加平缓,表现出更平滑的驾驶行为,后车的VSP分布重新落入头车VSP分布范围内,使跟驰车辆运行数据能够匹配头车排放,致使累计排放量增加。

5 结束语

本文使用跟驰车辆与头车VSP分布误差最小化的标定方法,对跟驰模型参数进行合理标定,降低了跟驰车辆与头车的VSP分布误差。使Gipps、IDM、OVM、GFM、FVDM跟驰模型能够较好地拟合紧随头车跟驰车辆的CO_2、NO_x、CO、PN排放因子,其中,Gipps模型拟合效果最优。

在拟合多车辆跟驰车队排放中,仅对紧随头车的跟驰车辆进行了模型参数标定,其余跟驰车辆均采用该参数。Gipps模型中各跟驰车辆的排放拟合结果表现出良好的一致性,为量化微观交通流中跟驰车队排放提供了可行方法,进一步为制定环境可持续的交通控制策略提供理论依据。

参 考 文 献

[1] 单肖年, 陈小鸿. 交通仿真模型融合微观车辆排放模型研究综述[J]. 交通运输工程与信息学报, 2021, 19(2): 11-24.
SHAN X N, CHEN X H. Review of Studies that Integrate Traffic-Simulation Models with Microscopic Vehicle-Emissions Models[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2021, 19(2): 11-24.

[2] CHEN K, YU L. Microscopic Traffic-Emission Simulation and Case Study for Evaluation of Traffic Control Strategies[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2007, 7(1): 93-99.

[3] MISRA A, ROORDA M J, MACLEAN H L. An Integrated Modelling Approach to Estimate Urban Traffic Emissions[J]. Atmospheric Environment, 2013, 73: 81-91.

[4] CIUFFO B, MAKRIDIS M, TOLEDO T, et al. Capability of Current Car-Following Models to Reproduce Vehicle Free-Flow Acceleration Dynamics[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(11): 3594-3603.

[5] FONTES T, PEREIRA S R, FERNANDES P, et al. How to Combine Different Microsimulation Tools to Assess the Environmental Impacts of Road Traffic? Lessons and Directions[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015, 34: 293-306.

[6] SONG G H, YU L, XU L. Comparative Analysis of Car-Following Models for Emissions Estimation[J]. Transportation Research Record: Journal the Transportation Research Board, 2013, 2341(1): 12-22.

[7] 王雪松, 孙平, 张晓春, 等. 基于自然驾驶数据的高速公路跟驰模型参数标定[J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 132-142.
WANG X S, SUN P, ZHANG X C, et al. Calibrating Car-Following Models on Freeway Based on Naturalistic Driving Data[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(5): 132-142.

[8] 黄岩, 闫学东, 李晓梦, 等. 基于多用户驾驶模拟平台的雾天高速公路跟驰模型参数标定及验证[J]. 中国公路学报, 2022, 35(8): 320-330.
HUANG Y, YAN X D, LI X M, et al. Parameter Calibration and Validation for Car-Following Models on Freeway under Foggy Conditions Based on Multi-User Driving Simulator System[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(8): 320-330.

[9] 吴淑博, 邹亚杰, 钟心志, 等. 考虑分布不确定性和相关性的跟驰行为建模及仿真验证[J]. 中国公路学报, 2024, 37(10): 184-195.
WU S B, ZOU Y J, ZHONG X Z, et al. Car-Following Behavior Modeling and Simulation Verification Considering Distribution Uncertainty and Correlation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(10): 184-195.

[10] MENG D L, SONG G H, LU H Y, et al. Impact of Stochasticity on Platoon Stability of Car-Following Models for Emissions Estimation[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(8): 2772-2789.

[11] 郭海锋, 袁鑫良, 徐东伟. 车辆跟驰模型参数标定中的性能指标选择[J]. 中国公路学报, 2017, 30(1): 103-110.

GUO H F, YUAN X L, XU D W. Selection of Measures of Performance on Calibrating Parameters in Car Following Models[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(1): 103-110.

[12] 高云峰, 胡华. 基于比功率法的信号控制交叉口排队车辆尾气排放估计[J]. 中国公路学报, 2015, 28(4): 101-108.
GAO Y F, HU H. Estimation of Queued Vehicle Emissions at Signalized Intersections Based on Vehicle Specific Power Approach[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(4): 101-108.

[13] LV J P, ZHANG Y L, ZIETSMAN J. Investigating Emission Reduction Benefit from Intersection Signal Optimization[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2013, 17(3): 200-209.

[14] 费文鹏, 宋国华, 于雷. 车辆跟驰模型的VSP和加速度分布对比分析[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(11): 2757-2764.
FEI W P, SONG G H, YU L. Comparative Analysis of VSP and Acceleration Distribution of Car-Following Models. Journal of System Simulation, 2014, 26(11): 2757-2764.

[15] ZHANG L Q, ZHU Z J, SONG G H, et al. An Improved Method for Evaluating Eco-Driving Behavior Based on Speed-Specific Vehicle-Specific Power Distributions[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2022, 113.

[16] ZHANG Z Y, SONG G H, ZHAI Z Q, et al. How Many Trajectories are Needed to Develop Facility and Speed-Specific Vehicle-Specific Power Distributions for Emission Estimation? Case Study in Beijing[J]. Transportation Research Record, 2019, 2673(11): 779-790.

[17] LU H Y, SONG G H, YU L. The "Acceleration Cliff": An Investigation of the Possible Error Source of the VSP Distributions Generated by Wiedemann Car-Following Model[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, 65: 161-177.

[18] SONG G H, YU L, GENG Z B. Optimization of Wiedemann and Fritzsche Car-Following Models for Emission Estimation[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015, 34: 318-329.

[19] MENG D L, SONG G H, WU Y Z, et al. Modification of Newell's Car-Following Model Incorporating Multidimensional Stochastic Parameters for Emission Estimation[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2021, 91.

[20] GIPPS P G. A Behavioural Car-Following Model for Computer Simulation[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1981, 15(2): 105-111.

[21] TREIBER M, HENNECKE A, HELBING D. Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations[J]. Physical Review E, 2000, 62(2): 1805-1824.

[22] BANDO M, HASEBE K, NAKAYAMA A, et al. Dynamical Model of Traffic Congestion and Numerical Simulation[J]. Physical Review E, 1995, 51(2): 1035-1042.

[23] HELBING D, TILCH B. Generalized Force Model of Traffic Dynamics[J]. Physical Review E, 1998, 58(1): 133-138.

[24] JIANG R, WU Q S, ZHU Z J. Full Velocity Difference Model for a Car-Following Theory[J]. Physical Review E, 2001, 64(1): 1-4.

[25] TOLEDO T, KOUTSOPOULOS H, AKIVA M B, et al. Microscopic Traffic Simulation: The Simulation System Mission, Background and Actual State[M]. Boston, MA: Springer, 2005.

[26] BOUADI M, JIA B, JIANG R, et al. Stochastic Factors and String Stability of Traffic Flow: Analytical Investigation and Numerical Study Based on Car-Following Models[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2022, 165.

[27] PUNZO V, ZHENG Z D, MONTANINO M. About Calibration of Car-Following Dynamics of Automated and Human-Driven Vehicles: Methodology, Guidelines, and Codes[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 128.

[28] 吴兵, 王文璇, 李林波, 等. 多前车影响的智能网联车辆纵向控制模型[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(2): 184-194.
WU B, WANG W X, LI L B, et al. Longitudinal Control Model for Connected Autonomous Vehicles Influenced by Multiple Preceding Vehicles[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(2): 184-194.

[29] ZHU M X, WANG X S, TARKO A, et al. Modeling Car-Following Behavior on Urban Expressways in Shanghai: A Naturalistic Driving Study[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 93: 425-445.

[30] 江婕, 宋国华, 孟冬利, 等. 面向交通排放测算的跟驰模型优化方法[J]. 交通运输研究, 2022, 8(6): 53-62.
JIANG J, SONG G H, MENG D L, et al. Optimization of Car-Following Model for Traffic Emissions Measurement[J]. Transport Research, 2022, 8(6): 53-62.

(责任编辑　瑞　秋)

修改稿收到日期为2025年6月3日。