

基于多智能体系统车辆跟驰模型的数值模拟

高晶英¹, 吴淑珍², 董彦彤³

¹呼和浩特民族学院数学与大数据学院, 内蒙古 呼和浩特

²内蒙古大学数学科学学院, 内蒙古 呼和浩特

³上海工程技术大学城市轨道交通学院, 上海

收稿日期: 2022年9月18日; 录用日期: 2022年10月8日; 发布日期: 2022年10月18日

摘要

近年来, 交通拥堵问题已经越来越严重并且受到国内外学者的广泛关注。本文主要研究基于多智能体系统的车辆跟驰模型, 首先阐述了多智能体系统与车辆跟驰模型, 主要考虑所有车辆单车道行驶且每辆车动力学方程可以表示为简单的二阶线性微分方程。其次, 根据多智能体系统协同控制思想, 为跟驰模型中每辆车设计新的控制输入, 最终使得所有车辆速度一致, 不发生碰撞且相邻车辆之间距离保持不变, 即所有车辆达到跟驰状态。最后, 当头车匀速和匀减速行驶时, 分别给出相应的数值模拟结果验证本文所提出的跟驰模型的有效性。

关键词

多智能体系统, 跟驰模型, 相互作用力, 安全距离, 初始距离

Numerical Simulation of Car Following Model Based on Multi-Agent System

Jingying Gao¹, Shuzhen Wu², Yantong Dong³

¹School of Mathematics and Big Data, Hohhot Minzu College, Hohhot Inner Mongolia

²School of Mathematical Sciences, Inner Mongolia University, Hohhot Inner Mongolia

³Institute of Urban Rail Transit, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: Sep. 18th, 2022; accepted: Oct. 8th, 2022; published: Oct. 18th, 2022

Abstract

In recent years, the traffic congestion problem has become more and more serious and has been widely concerned by scholars at home and abroad. Firstly, this paper describes the multi-agent system and the car following model which mainly considers that all vehicles travel on a single lane

and the dynamic equation of each vehicle can be expressed as a simple second-order linear differential equation. Secondly, based on the cooperative control idea of multi-agent system, a new control input is designed for each vehicle in the car following model, so that all vehicles have the same speed, no collision and the distance between adjacent vehicles remains unchanged, that is, all vehicles reach the car following state. Finally, when the leading vehicle moves at a constant speed and a uniform deceleration, the numerical simulation results are given respectively to verify the effectiveness of the car following model proposed in this paper.

Keywords

Multi-Agent System, Car Following Model, Interaction Force, Safety Distance, Initial Distance

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

车辆跟驰是道路交通中重要的现象，特别在交通拥堵时，车辆无法换道超车，车辆跟驰行为普遍存在。在不允许超车的基本假设下，车辆跟驰模型主要研究后车如何根据前车运动情况调节本车前进状态。最早由 Reuschel 和 Pipes 等人[1] [2]提出跟驰模型以后，越来越多的学者持续的改进和完善跟驰模型，如 Newell 模型[3]，OV 模型[4]，GF 模型[5]，FVD 模型[6]等经典模型以及它们的改进模型[7] [8] [9]。基于速度差的跟驰模型无法解释部分跟驰状况，因此，有学者从分子动力学的角度研究车辆跟驰模型。文献[10] [11]挖掘行驶车辆之间的跟驰关系与分子之间动力学相似的特征，进一步探索了车辆跟驰的需求安全距离及其应用模型构建。文献[12]定性分析车队中车辆的运动趋势对交通量 - 密集度的影响，建立基于分子动力学的车流密集度模型。文献[13]主要研究基于分子动力学构建车辆相互作用势和分子壁面势函数，并建立基于相互作用势函数的分子跟驰模型，给出跟驰车辆的加速度模型。文献[14]将车辆相对速度纳入模型结构中，结合分子相互作用势函数和壁面势函数构建改进分子动力学的车辆跟驰模型。

本文主要研究基于多智能体系统的车辆跟驰模型。多智能体系统(Multi-agent System, MAS)是由大量的智能体构成，它是将大而复杂的系统转化成多个、简单的并且彼此相互通信的系统，目前多智能体系统协同控制问题研究获得了丰富的研究成果[15] [16]。多智能体系统协同控制有很多应用意义，诸如水下潜航器系统控制，多个无人机、机器人协同控制等。如今，越来越多研究机构开展了地面无人驾驶车辆的研究，无人驾驶车辆相比于有人驾驶车辆，通过自适应巡航控制(ACC)系统[17]或协同自适应巡航控制(CACC)系统[18]可更及时、精确地检测到前车状态，很大限度地提升道路交通系统的安全、通畅与效率。因此在无人驾驶中的车辆跟驰模型研究显示出非常大的意义。虽然车辆跟驰模型研究成果很多，但是基于多智能体系统协同控制的研究结果尚未发现，因此本文主要在已有的多智能体系统协同控制研究基础上，提出新的车辆跟驰模型，再通过数值模拟验证跟驰模型的有效性。

2. 多智能体系统与车辆跟驰模型介绍

2.1. 多智能体系统阐述

考虑 n 个智能体在 m 维欧氏空间上移动。每个智能体的运动方程表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_i(t) \\ \dot{p}_i(t) \end{bmatrix} = (X \otimes I_m) \begin{bmatrix} q_i(t) \\ p_i(t) \end{bmatrix} + (Y \otimes I_m) u_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$X = \begin{bmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} \\ \xi_{21} & \xi_{22} \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \end{bmatrix}$$

其中 $q_i(t), p_i(t) \in R^m$ 分别是智能体 i 在 t 时刻的位置向量和速度向量, $u_i(t) \in R^m$ 为智能体 i 在 t 时刻的控制输入向量。矩阵 X 和 Y 是 2×2 矩阵, I_m 是 m 阶单位矩阵, \otimes 表示 Kronecker 积。此时, n 个多智能体整体上可视为多智能体系统, 它的控制问题可以转化为当 $u_i(t)$ 满足什么条件时该智能体系统达到预期状态, 如蜂拥状态、一致状态等[15]。

2.2. 车辆跟驰模型的介绍

假设所有车辆在单车道上行驶且不能超车, 如图 1 所示, 因此 $m=1$ 。图中空心圆表示头车, 实心圆表示跟驰车辆, 箭头表示车辆移动方向, 本文不考虑车辆的大小。根据多智能体系统阐述, 主要考虑 n 个车辆的运动方程表示为简单的二阶线性微分方程

$$\begin{cases} \dot{q}_i(t) = p_i(t) \\ \dot{p}_i(t) = u_i(t) \end{cases}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

方程(2)可由方程(1)中取 $X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 可得。此时, 车辆跟驰模型的主要目的为如何设计 $u_i(t)$, 使得 n 个车辆达到跟驰状态, 即随着时间的发展所有车辆速度一致, 不发生碰撞且相邻车辆之间距离保持不变。

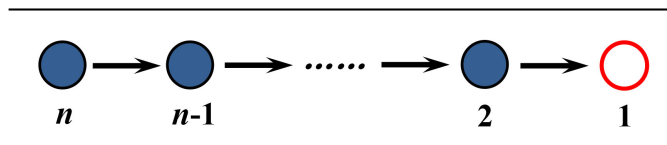


Figure 1. Schematic diagram of vehicle following on single lane
图 1. 单车道车辆跟驰示意图

3. 基于多智能体系统的车辆跟驰模型

在车辆行驶过程中, 前后车速度不一致或距离过小时, 后车需要改变自己的行驶速度。但后车运行状态的改变不是同步的, 第一辆车的运行状态制约着第二辆车的运行状态, 第二辆车又制约着第三辆车……第 $n-1$ 辆车制约着第 n 辆车。所以, 前后车之间必须保持一个安全距离, 在前车刹车后, 两车之间有足够的距离作出反应, 采取减速措施。

本文根据多智能体系统控制输入设计思想为跟驰模型中每辆车设计新的控制输入, 使得所有车辆能够达到跟驰状态, 因此每辆车控制输入定义如下

$$u_i(t) = u_1(t) + a_{i-1,i} \phi_\alpha(|q_{i-1}(t) - q_i(t)|) + c_1(p_{i-1}(t) - p_i(t)), i = 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

其中 $0 < a_{i-1,i} \leq 1, c_1 > 0$ 。本文主要考虑头车匀速和匀减速行驶两种情形, 因此, 头车的控制输入为 $u_1(t) = c, c$ 为任意常数。

令 d 和 r 分别为相邻两车之间的安全距离和初始距离, 且 $d \leq r$ 。设 $\phi_\alpha(z)$ 为车辆之间的作用力函数, 它的表达式为

$$\phi_\alpha(z) = \phi(z-d) \quad (4)$$

其中

$$\phi(z) = \frac{a+b}{2} \left(\frac{z+c}{\sqrt{1+(z+c)^2}} \right) + \frac{a-b}{2} \quad (5)$$

且 $0 < a \leq b, c = \frac{a-b}{\sqrt{4ab}}$ [15]。本文把作用力函数 $\phi_\alpha(z)$ 修改为一个分段函数, 使其满足: 当 $0 < |q_{i-1} - q_i| < d$ 时, $\phi_\alpha(z) < 0$; 当 $d \leq |q_{i-1} - q_i| \leq r$ 时, $\phi_\alpha(z) = 0$; 当 $r < |q_{i-1} - q_i|$ 时, $\phi_\alpha(z) > 0$, 如图 2 所示。

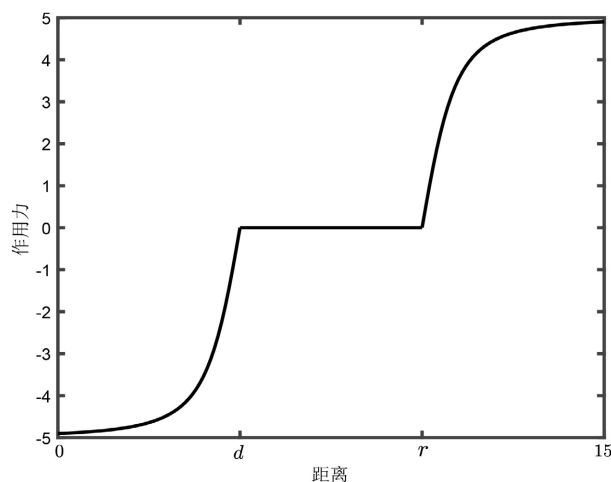


Figure 2. Force function between vehicles
图 2. 车辆之间作用力函数

从新定义的车辆之间作用力函数可知, 只有当相邻车辆之间的距离小于安全距离或大于初始距离时作用力函数发挥排斥或吸引的作用, 否则, 作用力函数大小为零。

4. 数值模拟

本文采取数值模拟的方式验证车辆跟驰模型的有效性。模型初始设置如下: 在一条单车道上, 均匀放置 10 辆完全相同的车, 相邻车辆之间的初始距离为 10 m, 10 辆车的初始速度在区间[10, 25]内随机生成且从头车开始升序排序, 即后车速度比前车速度大。下面分别取 $u_1(t) = 0$ 和 $u_1(t) = -0.2$ 两种情况做数值模拟, 主要观察当头车匀速行驶或匀减速行驶时所有车辆是否达到跟驰状态。

首先取 $u_1(t) = 0$, 即头车的速度是不变的。当头车匀速行驶, 而所有跟驰车辆速度都比前车速度大时, 最终后车会追上前车。此时后车会根据控制输入(3)调整自己的速度, 以便达到跟驰状态。头车匀速行驶时的数值模拟结果由图 3~6 所示, 图 3 表示 10 辆车的时空轨迹图, 从图上可以看出随着时间的发展, 所有相邻车辆的初始距离慢慢变小, 一段时间以后达到最小, 紧接着慢慢变大, 最终所有车辆的时空轨迹趋于平行, 出现了稳定交通流的状态。图 4 表示所有车辆的速度变化情况, 其中黑色实线表示头车速度, 它的大小是不变的, 从图上可以看出, 所有后车初始速度均大于前车, 随着时间的发展, 后车逐渐追上前车并开始减速, 因此所有车辆的速度慢慢减小, 最终与头车速度一致。图 5 表示所有车辆的加速度变化情况, 从图上可以看出所有车辆的加速度最终趋于零。图 4、图 5 再次表明 10 辆车出现了稳定交通流的状态。图 6 表示所有跟驰车辆与前车之间的距离变化情况, 可以看出当后车追上前车时, 相邻车辆之间始终保持大于安全距离, 而一部分车距小于安全距离时由于车辆之间的作用力, 后车慢慢加大车距, 最后所有车辆间距保持不变, 该图也证明了 10 辆车出现稳定交通流的状态, 并且明显看出在此

过程中 10 辆车没有发生碰撞。图 3~6 的模拟结果表明头车匀速行驶时本文提出的车辆跟驰模型可以使所有车辆达到跟驰状态。

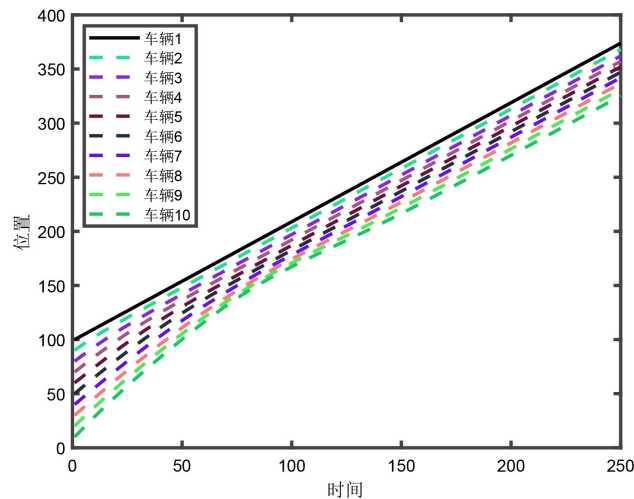


Figure 3. Space time trajectories of all vehicles

图 3. 所有车辆时空轨迹图

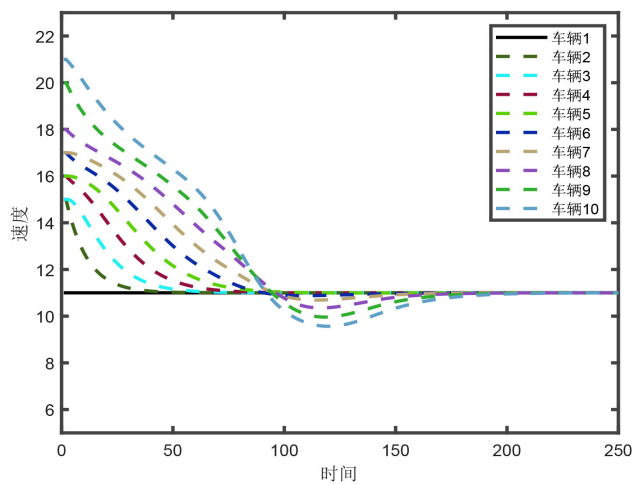


Figure 4. Velocity of all vehicles

图 4. 所有车辆速度

其次取 $u_1(t) = -0.2$ ，当头车匀减速行驶时，速度会越来越慢，所有跟驰车辆会更快的追上前车。此时的数值模拟结果由图 7~10 所示，图 7 表示 10 辆车的时空轨迹图，从图上可以看出随着时间的发展，最终所有车辆的时空轨迹趋于平行。图 8 表示所有车辆的速度变化情况，黑色实线表示头车速度，它在逐渐变小。随着时间的发展，后车慢慢的追上前车并开始减速，最终所有跟驰车辆速度与头车速度一致且逐渐减小。图 9 表示所有车辆的加速度变化情况，从图上可以看到所有跟驰车辆的加速度随着时间的发展趋于头车加速度。图 10 表示所有跟驰车辆与前车之间的距离变化情况，从图上同样看出所有相邻车辆距离保持不变，同时在此过程中没有发生碰撞。图 7~10 的模拟结果表明 10 辆车出现了稳定交通流的状态，即头车匀减速行驶时，本文车辆跟驰模型可以使所有车辆达到跟驰状态。总之，所有模拟结果表明本文提出的车辆跟驰模型是有效的。

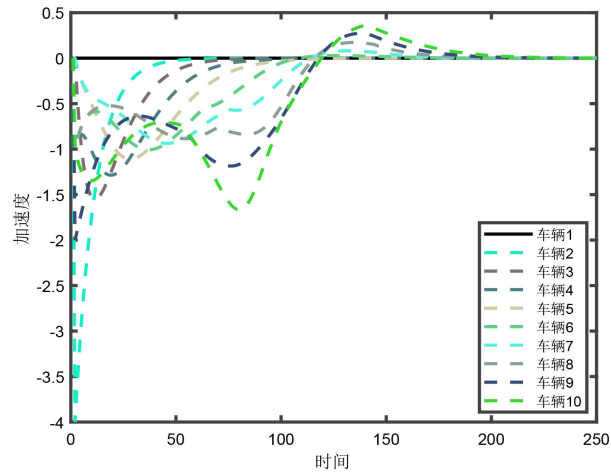


Figure 5. Acceleration of all vehicles

图 5. 所有车辆加速度

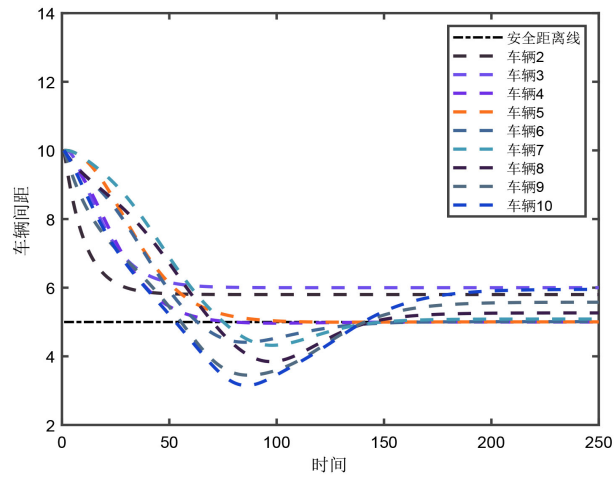


Figure 6. Distance between following vehicle and front vehicle

图 6. 跟驰车辆与前车距离

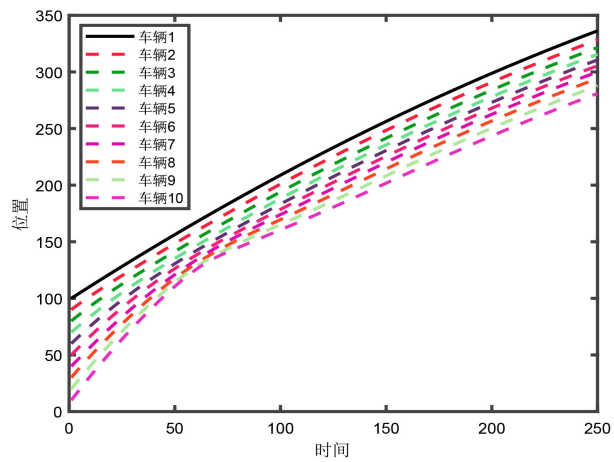


Figure 7. Space time trajectories of all vehicles

图 7. 所有车辆时空轨迹图

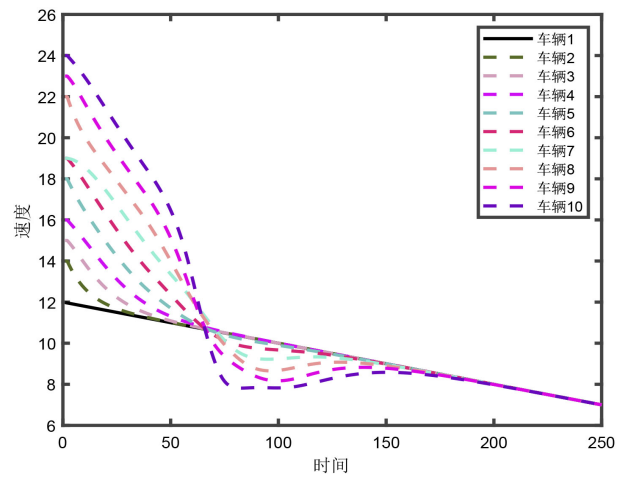


Figure 8. Velocity of all vehicles

图 8. 所有车辆速度

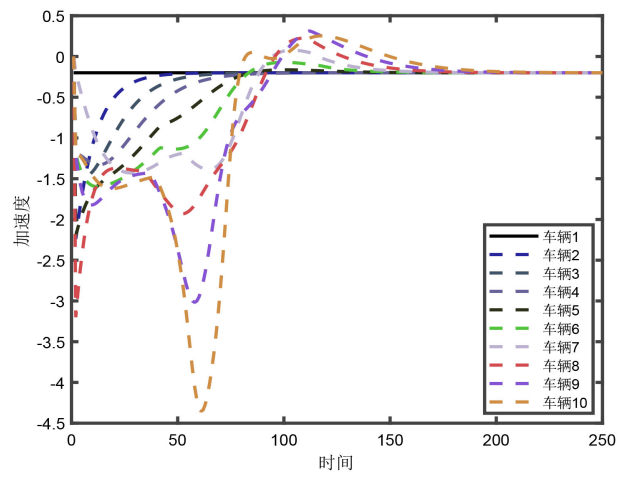


Figure 9. Acceleration of all vehicles

图 9. 所有车辆加速度

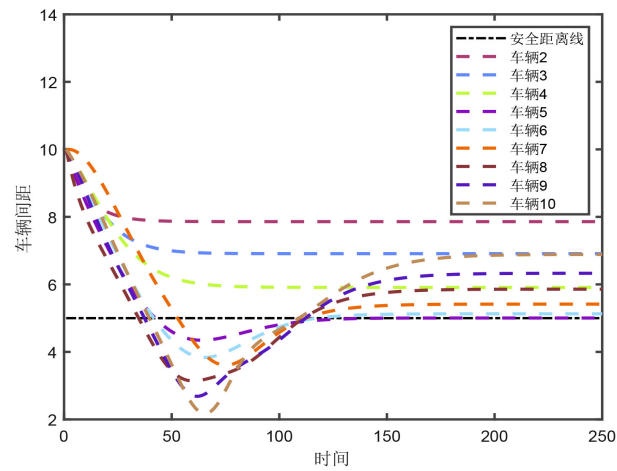


Figure 10. Distance between following vehicle and front vehicle

图 10. 跟驰车辆与前车距离

5. 小结

本文主要研究基于多智能体系统的车辆跟驰模型，首先介绍了多智能体系统和车辆跟驰模型。其次根据多智能体系统协同控制思想，建立了新的车辆跟驰模型，目的在于当头车匀速和匀减速行驶且跟驰车辆速度比前车速度大时，所有车辆能够达到跟驰状态。最后给出相应的数值模拟结果验证模型的有效性。

基金项目

呼和浩特民族学院博士基金(HMBS1903)。

参考文献

- [1] Reuschel, A. (1950) Vehicle Movements in the Column Uniformly Accelerated or Delayed. *Oesterreich IngrArch*, **4**, 193-215.
- [2] Pipes, L.A. (1953) An Operational Analysis of Traffic Dynamics. *Journal of Applied Physics*, **24**, 274-281. <https://doi.org/10.1063/1.1721265>
- [3] Newell, G.F. (1961) Nonlinear Effects in the Dynamics of Car Following. *Operations Research*, **9**, 209-229. <https://doi.org/10.1287/opre.9.2.209>
- [4] Bando, M., Hasebe, K., Nakayama, A., *et al.* (1995) Dynamical Model of Traffic Congestion and Numerical Simulation. *Physical Review E*, **51**, 1035-1042. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.51.1035>
- [5] Helbing, D. and Tilch, B. (1998) Generalized Force Model of Traffic Dynamics. *Physical Review E*, **58**, 133-138. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.58.133>
- [6] Jiang, R., Wu, Q. and Zhu, Z. (2001) Full Velocity Difference Model for a Car-Following Theory. *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, **64**, Article ID: 017101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.64.017101>
- [7] 杨达, 蒲云, 祝俐菱, 等. 改进的基于安全距离的车辆跟驰模型[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(9): 1335-1342.
- [8] 杨晓明. 基于改进最优速度的车辆跟驰模型及数值模拟[J]. 计算机应用与软件, 2015, 32(6): 117-119.
- [9] 申勇, 马天奕, 李祥尘. 考虑速度对反应强度影响的车辆跟驰模型[J]. 交通运输工程与信息学报, 2019, 17(2): 154-159.
- [10] 曲大义, 杨建, 陈秀锋, 等. 车辆跟驰的分子动力学特性及其模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(5): 1198-1202.
- [11] 陈文娇, 曲大义, 杨万三, 等. 基于分子动力学的车辆需求安全距离及模型[J]. 青岛理工大学学报, 2014, 35(1): 94-110.
- [12] 郝杰, 曲大义, 张金磊, 等. 基于分子动力学的交通流特性分析方法[J]. 青岛理工大学学报, 2013, 34(6): 6.
- [13] 李娟, 曲大义, 刘聪, 等. 基于分子动力学的跟驰特性及其模型[J]. 公路交通科技, 2018, 35(3): 126-131.
- [14] 杨龙海, 王晖, 李帅, 等. 改进分子动力学的车辆跟驰模型[J]. 重庆大学学报, 2021, 44(7): 26-33.
- [15] Gao, J., Xu, X., Ding, N., *et al.* (2017) Flocking Motion of Multi-Agent System by Dynamic Pinning Control. *IET Control Theory & Applications*, **11**, 714-722. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2016.1150>
- [16] 高晶英, 徐旭, 何斯日古楞. 具有伪领导者的多智能体系统动态牵制蜂拥控制算法[J]. 湖北民族大学学报(自然科学版), 2021, 39(4): 361-368.
- [17] 翟志强, 许进亮, 袁皓, 等. 自适应巡航系统车辆跟驰控制策略仿真[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(5): 885-891.
- [18] 宋成举. 协同自适应巡航控制车辆跟驰模型优化及仿真分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021, 45(6): 1029-1033.