

doi:10.16104/j.issn.1673-1891.2022.01.014

重型半挂汽车避撞控制的研究

王 鑫,汪选要

(安徽理工大学机械工程学院,安徽 淮南 232001)

摘 要:近年来,半挂汽车正逐渐向智能化进程迈进,避撞控制是半挂汽车实现智能化的重要组成部分。针对重型半挂汽车避撞控制,提出了一种综合驾驶员因素和环境因素的安全距离模型,依据模糊控制理论,确定了驾驶员反应时间参数;基于安全距离模型,采用指数趋近律的控制方法,设计了上层滑模控制器,并与下层 PSO-PID 控制器结合构成分层控制系统;在 Trucksim 软件中建立了前车静止和前车匀速的测试场景。结果表明:所提出的安全距离模型满足车辆避撞要求,车辆能够在安全距离下实现安全停车或跟车行驶。

关键词:半挂汽车;安全距离;避撞控制;分层控制

中图分类号:U469.5+3 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2022)01-0076-05

Research on Collision Avoidance Control of Heavy-Duty Semi-Trailer

WANG Xin, WANG Xuanyao

(School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: In recent years, semi-trailer vehicles are gradually moving towards intelligence, and collision avoidance control is an important part of the realization of intelligent semi-trailer vehicles. Aiming at the collision avoidance control of heavy-duty semi-trailer vehicles, a safety distance model that integrates driver factors and environmental factors is proposed; based on the fuzzy control theory, the parameters of driver reaction time are determined; based on the safety distance model, the exponential convergence law control is adopted, the upper-level sliding mode controller is designed and combined with the lower-level PSO-PID controller to form a hierarchical control system. In Trucksim, testing scenarios where the vehicle ahead is stationary and the vehicle ahead is at a constant speed are established. The results show that the proposed safe distance model meets the requirements of vehicle collision avoidance, and the vehicle can park or follow vehicles ahead safely at a safe distance.

Keywords: semi-trailer; safe distance; collision avoidance control; hierarchical control

0 引言

根据中国国家统计局的数据,截至 2021 年 6 月,全国共发生约 23.8 万起交通事故,约 6.7 万人死亡,造成了巨大的生命财产损失^[1]。未保持合理的安全距离、路面情况和驾驶员主观行为等因素是造成交通事故的重要成因。其中,驾驶员因素被认为是事故的主要原因。同时,车间安全距离也是交通安全最重要的指标之一^[2]。

为了提高避撞系统的安全性与准确性,国内外众多学者开展了相关研究。Li 等^[3]采用集成 ACC(自适应巡航控制)、RSC(后轮转向控制)和 RBC(侧倾制动控制)的主动安全协同系统,以智能汽车

在紧急情况下主动避撞控制问题。Chen 等^[4]提出了一种计算前后两车之间安全制动距离的新算法,但未考虑了周围环境的影响;Wang 等^[5]使用单因素方差分析方法对比分析了实际跟车工况下影响期望安全距离的主要影响因素;Jansson 等^[6]提出以 ACC 实现汽车主动避撞,并建立了行车风险场模型;章军辉等^[7]针对碰撞预警系统存在的漏警虚警问题,以跟车车距、自车与前车相关信息和路面附着系数为输入,提出了基于 BP 神经网络的自学习纵向避撞安全辅助算法;袁伟等^[8]为了解决现有汽车避撞控制策略及碰撞风险指标单一的问题,基于避撞距离模型划分安全行驶区域,提出了制动和转向协同的主动避撞控制系统。

收稿日期:2021-11-23

基金项目:安徽省自然科学基金项目(1908085ME159)。

作者简介:王鑫(1997—),男,安徽蚌埠人,硕士研究生,研究方向:智能辅助驾驶。

安全距离是驾驶员判断车间距离是否安全的重要依据,上述文献对系统安全距离的设计具有一定的局限性,造成了避撞系统使用率降低。针对上述问题,本文围绕重型半挂汽车主动避撞系统中的安全距离,提出了一种综合考虑驾驶员主观行为和环境因素的安全距离模型,制定了避撞系统分层控制策略,通过 Trucksim 和 Simulink 软件联合对典型避撞工况进行仿真分析,验证所提出控制策略的避撞控制效果。

1 车辆逆动力学模型搭建

1.1 节气门控制模块

根据文献[9]忽略空气密度的变化,车辆在水平路面加速行驶时,可得到车辆行驶方程为

$$m a_d = F_t - F_b - \left(\frac{C_d A \rho v^2}{2.115} - mgf \right) \quad (1)$$

式中: m 为汽车总质量,kg; a_d 为期望加速度, m/s^2 ; F_t 为车辆的驱动力,N; F_b 为制动器制动力,N; C_d 为空气阻力系数; A 为车辆迎风面积, m^2 ; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; v 为自车车速, km/h ; g 为重力加速度, m/s^2 ; f 为滚阻系数。

忽略传动部件连接处的弹性变形。根据当前档位速比,可得发动机输出转矩 T_d 为

$$T_d = \left(m a_d + \frac{C_d A \rho v^2 + mgf}{2.115} \right) / K_d \quad (2)$$

式中: K_d 为制动力与制动主缸压力比值。

根据式(2)结合发动机特性图,在 Simulink 软件中通过二维查表获得期望节气门开度 α_d 为

$$\alpha_d = f(T_d, \omega_e) \quad (3)$$

式中: ω_e 为发动机转速, r/min 。

1.2 制动器控制模块

在制动时发动机力矩输出为 0,即 $F_t = 0$,将式(1)改写为

$$m a_d = -F_b - \frac{C_d A \rho v^2}{2.115} - mgf \quad (4)$$

期望制动主缸压力 P_d 为

$$P_d = \frac{|-m a_d - C_d A \rho v^2 - mgf|}{K_b} \quad (5)$$

式中: K_b 为制动力与制动压力的线性系数。

1.3 驱动与制动模式切换策略

在车辆正常行驶过程当中,是不允许驾驶员既操纵制动踏板又踩踏加速踏板的情况,避免对车辆造成损伤。本文依据上述原则制定了切换逻辑,为提高在操作过程中车辆的平稳性,设置了缓冲区域

Δh ,本文取 $\Delta h = 0.1$,根据期望加速度 α_d 和实际加速度 α_f 定义切换逻辑:

- 1) 当 $a_d - a_f > \Delta h$ 时,加速踏板控制。
- 2) 当 $-\Delta h < a_d - a_f < \Delta h$ 时,不动作控制。
- 3) 当 $a_d - a_f < -\Delta h$ 时,制动踏板控制。

2 安全距离模型建立

实现整车避撞功能的基础是确定准确可信的行车安全距离,固定安全距离模型(CTH)和可变安全距离模型(VTH)是当前主流的安全距离模型划分出的 2 大类^[10],其他行车安全距离模型可认为在此基础上的优化与发散。

不同的路面附着系数会影响汽车的制动过程,同时,驾驶员因素也会影响行车安全距离,本文参考文献[11]改进并提出了一种综合路面附着系数和驾驶风格的安全距离模型。当前车静止时,自车匀速行驶接近前车,车距不断减小,此时安全距离 S_1 模型为

$$S_1 = \frac{1}{2g\mu} v^2 + \frac{1}{2} t_1 + i d_0 \quad (6)$$

式中: t_1 为制动持续时间; e 为驾驶风格选择系数。

当前车匀速行驶时,自车车速仍大于前车车速,为避免两车发生碰撞,此时安全距离模型 S_2 为

$$S_2 = \frac{1}{2g\mu} v^2 + \frac{1}{2} t_1 - \frac{v_1^2}{25.9a} - v_1 \left(t + \frac{v - v_1}{a} \right) + i d_0 \quad (7)$$

式中: μ 为路面附着系数; a 为制动减速度, m/s^2 ; v_1 为前车车速, km/h 。其中,最小安全保持间距 d_0 可表示为

$$d_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{c}{\mu + b} + 0.85v + 1.61 \right) \quad (8)$$

式中: c 为驾驶员意图参数; b 为模型参数。

驾驶风格选择系数 i 定义如下:

$$i = \begin{cases} 1, & \text{激进型} \\ 1.25, & \text{成熟型} \\ 1.5, & \text{保守型} \end{cases} \quad (9)$$

2.1 驾驶员反应时间确定

对于驾驶员反应时间 t ,现有安全距离基本采用固定值计算,通常取 $0.2 \sim 1.2$ s,根据文献[12-13]表明驾驶员反应时间 t 与驾驶员驾龄、心理状况等因素有关,针对上述问题,本文采用模糊控制理论来确定,以驾驶员综合指标值和车速作为模糊控制器输入,驾驶员反应时间作为输出,表 1 为不同驾龄对应的综合指标值 Q 。

表 1 不同驾龄对应的综合指标值

驾龄/a	1	2	3	4	5	6	7
综合指标值	49.0	50.1	51.3	61.4	69.8	80.5	90.0

根据表 1 数值将论域设置为 [40,100], 车速论域设置为 [40,80], 驾驶员反应时间论域设置为 [0.2,1.2], 表 2 为本文制定的模糊规则表, 隶属度函数三维关系如图 1 所示。

表 2 模糊规则表

		<i>v</i>		
	<i>t</i>	PS	PM	PB
<i>Q</i>	PS	PM	PB	PB
	PM	PS	PB	PM
	PB	PS	PM	PB

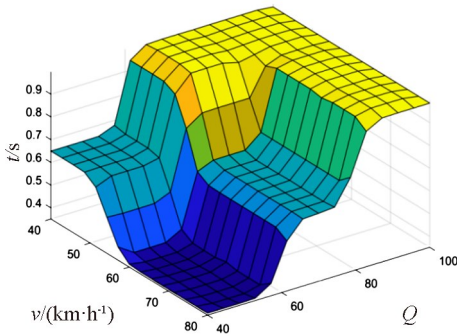


图 1 模糊控制隶属度函数三维关系

2.2 安全距离模型仿真

Trucksim 软件广泛应用于商用车动力学仿真领域, 其外部有众多拓展接口可供连接, 本文选择调用 Matlab/Simulink 实现二者的联合仿真, 仿真参数如表 3 所列。

表 3 仿真参数

参数	参数值
牵引车质量/kg	5 760
半挂车质量/kg	6 665
驾驶员反应时间/s	0.8
路面附着系数	0.85
模型参数 <i>c</i>	16.7
模型参数 <i>b</i>	0.3
主减速器速比	4.4
变速器挡位速比	1
发动机功率/kW	225
空气密度/(kg·m ⁻³)	1.206
轮胎滚动半径/mm	510
空气阻力系数	0.39

为验证所提出安全距离模型的准确性, 现分别采用 CTH 模型、VTH 模型与提出的改进安全距离模型 (Proposed model) 进行仿真对比。3 种安全距离模型仿真结果如图 2 所示。

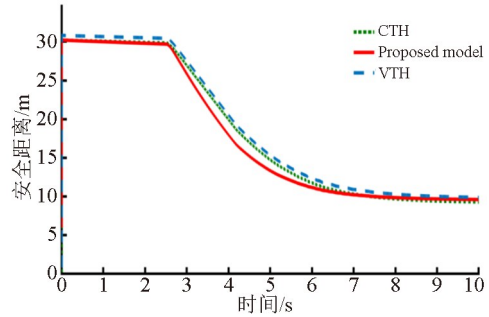


图 2 3 种安全距离模型仿真曲线

由图 2 可知, 自车匀速、前车静止状态下, 各模型表现均比较稳定, 其中, VTH 模型相对比较保守, 所预留的安全距离较大, 道路利用率较低, 本文所设计的安全距离模型对比 CTH 模型较为一致, 总体而言, 在前车静止状态下, 上述模型的仿真结果相差不大, 较为符合逻辑。

3 分层避撞控制器设计

3.1 上层控制器

滑模控制是变结构控制系统的一种非线性控制方法, 因其结构简单、响应快和鲁棒性高等优点被而广泛应用。上层控制器主要根据相对距离、相对速度和实际加速度, 确定当前所需的加速度。本文选取相对距离误差和相对速度误差作为评价控制系统的指标, 并以此进行滑模跟踪控制。

定义跟踪误差为

$$e(t) = D_r - D_s \tag{10}$$

$$e(t)' = v_1 - v \tag{11}$$

式 (10) (11) 中: $e(t)$ 为跟踪误差; D_r 为两车相对距离, m; D_s 为两车安全距离, m; $e(t)'$ 为 $e(t)$ 的微分。

设计滑模面 S 为

$$S = e(t)' + pe(t) \tag{12}$$

式中: p 为滑模面系数, $p > 0$ 。为减小系统抖振, 设计滑模趋近率为

$$S' = -j\text{sgn}(S) - kS (j > 0, k > 0) \tag{13}$$

式中: S' 为 S 的微分; k 为指数趋近率; 常数 j 表示移动点向滑动面移动的速率。如果常数 j 很小, 则接近速度很慢; 如果常数 j 较大, 系统因不稳定而出现抖动。结合式 (12) 和 (13) 可求得控制量

$$a_1 = a_2 + p e'(t) + kS + j\text{sgn}(S) \tag{14}$$

式中: a_1 为求解的控制量, m/s²; a_2 为自车实际加速度, m/s²。对 Lyapunov 函数 $V = \frac{1}{2}S^2$ 进行微分后可得 $V' = S S' = -S\beta\text{sgn}(S) = -|S|\beta$, 根据 Lyapunov 稳定性判据, 对于判断函数 $\beta > 0$, 任意的 $t \in (0, \infty)$, $V < 0$, 控制系统稳定。

3.2 下层控制器

传统 PID 控制器参数需要根据专家经验多次试凑以获得最优控制参数,试凑过程烦琐、不确定性高、效率低。而粒子群算法(PSO)作为一种群体优化智能算法,通过设计无质量的粒子模拟鸟群个体,以获得目标最优解,本文选择以上层控制器求解出的期望减速度与实际减速度的差值作为 PID 控制器的输入,采用 ITAE 准则作为评价适应度值的标准,通过 PSO 算法整定 K_p 、 K_i 、 K_d 参数,以获得最优 PID 控制。设置最大迭代次数为 100,种群规模为 30,适应因子为 2,粒子速度上下限分别为 1 和 -1,其中 K_p 范围为 $[0, 10]$, K_i 范围为 $[0, 120]$, K_d 范围为 $[0, 10]$ 。经 PSO 迭代寻优后的 K_p 、 K_i 、 K_d 值分别为 5.47、100、0,此时适应度值为 122.39,仿真结果如图 3 所示。

4 仿真与分析

根据前文搭建的安全距离模型和控制器,验证上述避撞系统的有效性,选用前车静止和前车匀速的仿真工况,采用 Truksim 和 Matlab/Simulink 进行联合仿真。

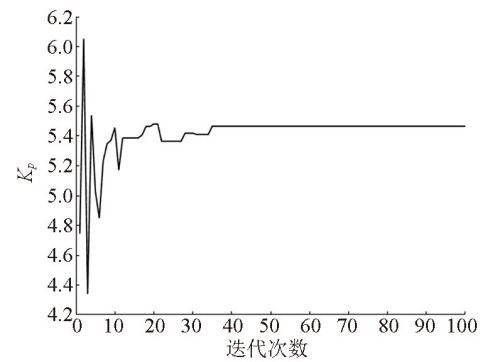
4.1 前车静止仿真工况

设定自车以 50 km/h 的速度匀速驶向静止的前车,仿真时间设定为 10 s,两车初始距离为 60 m,当自车(Host car)与前车(Front car)距离较大时,自车保持匀速行驶,避撞系统控制器采取措施,当两车间距离小于安全距离,有碰撞风险时,后车开始制动,仿真结果如图 4~5 所示。

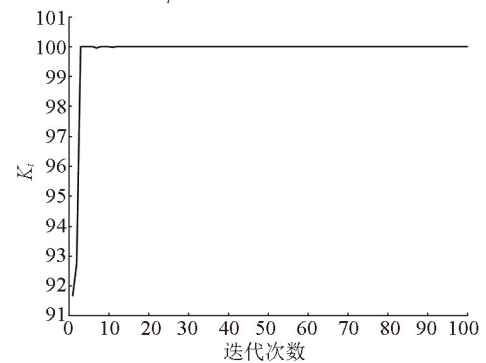
由图 5 可知,仿真初始阶段,自车与前车的间距较大,两车无碰撞风险,自车匀速行驶,在 1.5 s 时,两车相对距离约为 40 m,两车相对距离小于安全距离,自车紧急制动;自车车速由 50 km/h 迅速减小,在 5.1 s 时,自车停止运动,车速为 0,期望最小安全保持间距为 6 m,此时激进型驾驶员将两车间距保持在 6.5 m 附近,对于成熟型驾驶员会将两车间距保持在 8.1 m 附近,而保守型驾驶员会增大两车间距达到 9.75 m,符合现实情况,同时也验证了避撞控制系统能够在前车静止的工况下实现避撞功能,证明了所提出的安全距离模型的准确性。

4.2 前车匀速行驶仿真工况

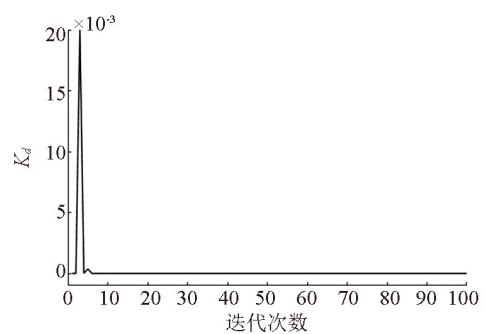
在前车匀速行驶的工况下,设置前车车速为 18 km/h,前车减速度为 0,自车初始车速为 60 km/h,两车初始距离为 60 m,仿真时间设定为 10 s,仿真结果如图 6~7 所示,仿真时自车和前车同时起步,前 2.5 s 时刻内,两车车距较大,满足安全距离的条



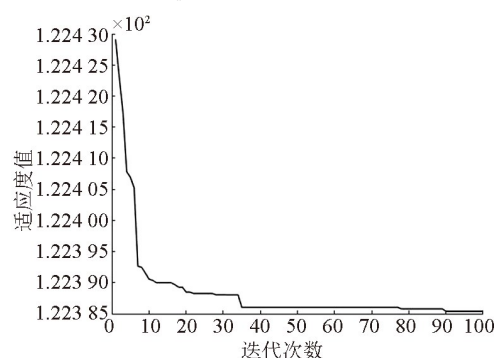
a. K_p 参数迭代寻优曲线



b. K_i 参数迭代寻优曲线



c. K_d 参数迭代寻优曲线



d. 粒子群算法适应度值变化曲线

图 3 PSO-PID 整定参数及迭代图

件,两车相距约为 30 m,在 2.8 s 时两车车距低于安全距离,制动器工作,自车开始减速,在 8.1 s 时,自车车速减小到 18 km/h 并与前车一同匀速行驶,此时激进型驾驶员会将安全车距保持在 9.6 m 左右,保守型驾驶员安全车距达 14.4 m,驾驶风格越激进,

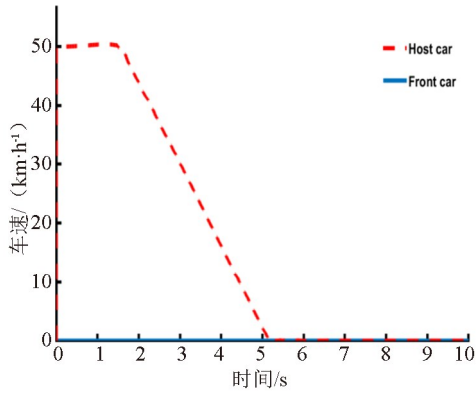


图 4 前车静止时两车车速仿真曲线

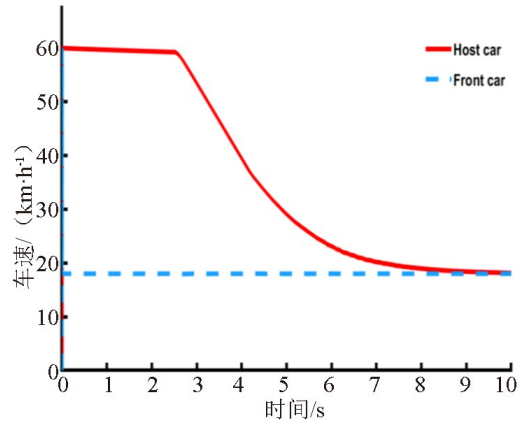


图 6 前车匀速时两车车速仿真曲线

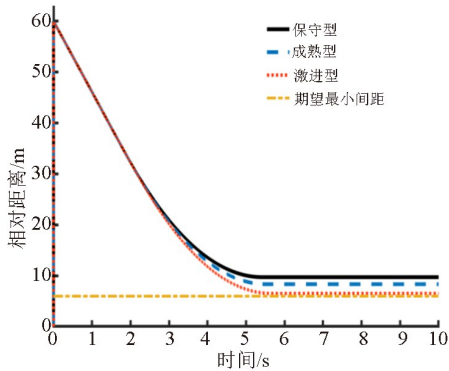


图 5 前车静止时两车相对距离仿真曲线

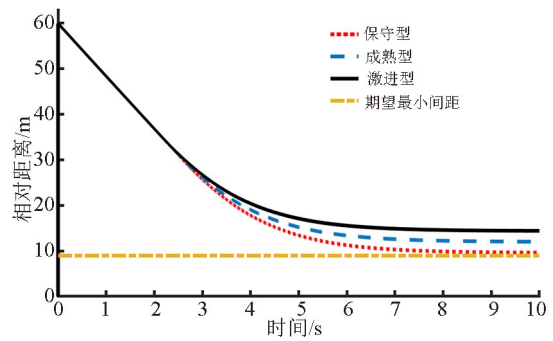


图 7 前车匀速时两车相对距离仿真曲线

安全车距值越小,符合实际驾驶习惯,可以证明在前车匀速行驶的工况下,防撞控制系统能够及时触发,以达到防撞效果。

仿真结果表明,本文所提出的安全距离模型和速度、距离跟踪误差滑模控制器能够实现重型半挂汽车防撞功能,验证了防撞控制系统的合理性和正确性。

5 结语

本文提出了一种考虑驾驶员和环境因素安全

距离模型,建立了重型半挂汽车纵向防撞控制系统,通过驾驶员参数确定模型参数的取值,采用上层滑模控制和下层 PSO-PID 控制的分层控制策略,设置了前车静止和前车匀速的仿真工况,通过 Truksim 与 Matlab/Simulink 软件联合对控制系统进行了验证。结果表明,防撞控制系统能够在预知前车危险的情况下,实现自车紧急防撞,验证了不同驾驶风格下驾驶员对安全距离的把控,并且能够保证在安全距离下实现安全停车或跟车行驶,避免与前车相撞,提高了行车安全性。

参考文献:

[1] 国家统计局. 各类道路交通事故受伤、死亡人数数据 [EB/OL]. (2021-05-10) [2021-11-15]. http://www.stats.gov.cn/tjfw/tjzx/zxgk/202105/t20210510_1817142.html.

[2] CHEN R B, LI N, XIAO H F, et al. Research on safety vehicle distance recognition based on stereo vision and DSP [C] // Applied Mechanics and Materials. Switzerland; Trans Tech Publications Ltd, 2013: 805-810.

[3] LI H, LI J, SU Z, et al. Research on active obstacle avoidance control strategy for intelligent vehicle based on active safety collaborative control [J]. IEEE Access, 2020, 8: 183736-183748.

[4] CHEN Y L, WANG C A. Vehicle safety distance warning system; a novel algorithm for vehicle safety distance calculating between moving cars [C] // 2017 IEEE 65th Vehicular Technology Conference-VTC2017-Spring. IEEE, 2017: 2570-2574.

[5] WANG B, HUI H W, LI Y J. Car-following behavior analysis and simulation based on expectation safety distance [J]. Chinese Journal of Safety Sciences, 2015, 25(9): 91-95.

- [50] DOUWES J, THORNE P, PEARCE N, et al. Bioaerosol health effects and exposure assessment: progress and prospects [J]. *Annals of Occupational Hygiene*, 2003, 47(3): 187-200.
- [51] SRIKANTH P, SUDHARSANAM S, STEUNBERG R. Bio-aerosol in indoor environment: composition, health effects and analysis [J]. *Indian Journal of Microbiology*, 2008, 26(4): 302-312.
- [52] 薛林贵, 姜金融, ERHUNMWUNSEE F. 城市空气微生物的监测及研究进展 [J]. *环境工程*, 2017, 35(3): 152-155.
- [53] DENG X B, ZHANG F, WANG L J, et al. Airborne fine particulate matter induces multiple cell death pathways in human lung epithelial cells [J]. *Apoptosis*, 2014, 19(7): 1099-1112.
- [54] 陈锺, 万东, 褚可成, 等. 空气微生物污染的监测及研究进展 [J]. *中国环境监测*, 2014, 30(4): 171-176.
- [55] ZHENG S, POZZER A, CAO C X, et al. Long-term (2001-2012) concentrations of fine particulate matter (PM_{2.5}) and the impact on human health in Beijing, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15: 5715-5725.

(上接第 80 页)

- [6] JANSSON J, JOHANSSON J, GUSTAFSSON F. Decision making for collision avoidance systems [J]. *SAE Transactions*, 2002, 111: 197-204.
- [7] 章军辉, 李庆, 陈大鹏. 基于 BP 神经网络的纵向避撞安全辅助算法 [J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(7): 140-147.
- [8] 袁伟, 蒋拯民, 郭应时. 制动与转向协调动作的车辆避撞控制研究 [J]. *中国公路学报*, 2019, 32(1): 173-181.
- [9] 孙彦军. 智能车主动避撞控制策略研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
- [10] 初建圳. 考虑驾驶员风格的自适应巡航控制策略研究 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [11] 王润琪, 蒋科军. ABS 汽车制动距离分析与计算 [J]. *中南林学院学报*, 2005, 25(2): 70-73.
- [12] 张雪峰. 汽车主动避撞控制系统控制方法研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [13] 单永刚. 汽车主动避撞控制系统的建模与仿真研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2017.