

## 基于势场理论的网联自主车辆行为风险分析

魏传宝, 张 智, 宋 慧, 曲大义\*

(青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 青岛 266525)

**摘要:** 为保证网联自主车辆的行驶安全, 揭示多维要素对行车安全的影响规律, 基于势场理论, 建立行车风险场模型。系统分析车辆运动状态与驾驶主体心理动态变化的映射关系, 定量表征驾驶主体间行为博弈的交互作用关系, 深入剖析驾驶主体对行车安全的影响规律, 构建车辆驾驶权动态切换的基本逻辑框架。建立虚拟交通场景分析验证交互行为模型的稳定性, 结果表明: 风险场模型能够有效反映车辆在交通场景中的风险状况, 不同的驾驶行为策略会导致车辆所面临的风险强度存在差异。在车辆行驶过程中可根据车辆所面临的风险强度大小, 遵循“趋利避害”特性, 采取相应的驾驶策略调整其运动状态, 尽量使车辆沿最低风险轨迹行驶, 保证行车安全。

**关键词:** 网联自主车辆; 风险分析; 势场理论; 行车风险场; 驾驶主体

**中图分类号:** U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)05-0127-09

## Risk analysis of connected autonomous vehicles based on potential field theory

WEI Chuanbao, ZHANG Zhi, SONG Hui, QU Dayi\*

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

**Abstract:** In order to ensure the driving safety of connected autonomous vehicles and reveal the influence rule of multidimensional factors on driving safety, a driving risk field model is established based on the potential field theory. Then this study systematically analyze the mapping relationship between the vehicle motion state and the psychological dynamics of the driving subject, quantitatively characterize the interaction relationship of the driving subject's behavioral game, deeply analyze the driving subject's influence on driving safety, and construct the basic logical framework for the dynamic switching of the driving right of the vehicle. The virtual traffic scene is established to analyze and verify the stability of the interaction behavior model, and the results show that the risk field model can effectively reflect the risk status of the vehicle in the traffic scene, and different driving behavior strategies will lead to differences in the intensity of the risk faced by the vehicle. In the process of vehicle driving, according to the intensity of the risk faced by the vehicle and following the principle of "seeking benefits and avoiding harm", the driver could adopt corresponding driv-

收稿日期: 2024-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(52272311)

作者简介: 魏传宝(1997—), 男, 山东济南人。硕士, 研究方向为智能车辆安全与控制。E-mail: w617898@163.com。

\* 通信作者: 曲大义(1973—), 男, 山东青岛人。博士, 教授, 主要从事车路协同及安全控制等方面的研究。

E-mail: dayiqu@qut.edu.cn.

ing strategy to adjust its state of motion, trying to make the vehicle travel along the lowest risk trajectory and ensure the safety of driving.

**Key words:** connected autonomous vehicles; risk analysis; potential field theory; driving risk field; driving entity

智能网联环境下网联自主车辆(Connected Autonomous Vehicles, CAV)通过车车通讯与车路通讯技术实现交通信息全面共享,从而构建良好的车路协同环境。在车路协同环境中,CAV 可以与周围环境进行实时信息交互,获取相关属性和运动状态信息,为车辆获取驾驶环境信息提供了基础。因此,针对 CAV 考虑多维因素对行车风险进行量化分析。

行车风险场指在 CAV 获取周围环境信息的基础上,用类似于“物理场”的人工势场模型,将车辆与周围环境的相互作用关系量化。人工势场的研究最早应用于机器人研究领域,KATHIB 基于人工势场法的概念提出一种机械手和移动机器人的实时避障方法<sup>[1]</sup>。此后,势场理论在机器人控制与决策领域被广泛应用<sup>[2-4]</sup>。随着交通智能化发展,更多的研究人员将场理论应用到交通领域之中,SATTEL 等以场域理论为基础,将弹性带概念应用于汽车领域,预测周围交通运动<sup>[5]</sup>;GAO 等采用条件人工势场的方法,以机器学习为基础提出一种变道意图预测和实时自动驾驶汽车控制器<sup>[6]</sup>;曲大义等分析了车辆交互的分子动力学特性,通过相互作用势函数建立分子跟驰模型,并验证了模型具有较高的精确度<sup>[7]</sup>;贾彦峰等借鉴分子间相互作用关系建立统一的车辆相互作用势场函数,并将加速度参数引入到车辆势场中,建立了 CAV 跟驰模型<sup>[8]</sup>;LI 等用安全势场模型描述传统车辆和自动驾驶车辆的微观驾驶行为,并建立了自动化环境下的异质交通流宏观模型<sup>[9]</sup>;谢楚安等针对无人驾驶车辆行车安全问题,考虑人工智能系统特性,基于胡克定律,建立无人驾驶车辆安全势场模型<sup>[10]</sup>;KO 等将模型预测控制与势场相结合实现无人驾驶汽车的路径规划和跟踪控制<sup>[11]</sup>。

网联自主车辆由驾驶人和驾驶系统协同驾驶,车辆驾驶主体可在驾驶人与驾驶系统之间进行切换,从上述可知,目前大多数势场模型仅考虑了驾驶人或驾驶系统因素,忽略了两者之间相辅相成的协作关系。因此,综合考虑驾驶人与驾驶系统及外部环境因素,基于势场理论构建行车风险场,并根据驾驶行为与驾驶主体心理的映射关系分析驾驶主体对行车安全性的影响。

## 1 行车风险势场建模

车辆行驶过程中与其他运动物体及道路设施之间不存在实质性的接触,但运动状态及位置变化却受运动物体及道路的影响,可以认为车辆与其他运动物体、道路设施之间存在一个虚拟的外力使其改变自身的运动状态,因此,可以将各影响因素看作是场源,而行车风险势场则是各个场源的集合。具体而言,行车风险势场由移动物体形成的“车辆”势场,道路影响因素构成的道路势场组成,其表达式为

$$E_D = E_v + E_r \quad (1)$$

式中:  $E_D$  为行车风险势场;  $E_v$  为“车辆”势场;  $E_r$  为道路势场。

### 1.1 “车辆”势场

“车辆”势场由道路上车辆、行人等运动物体产生,势场强度与物体间距离和运动状态有关,场强随距离的减小而增强,在目标位置处达到最大值,如图 1 所示。

移动物体的自身属性和运动状态影响其自身所产生风险势场范围的大小。WANG 等<sup>[12]</sup>提出虚拟质量的概念,用虚拟质量定义物体的自身属性,虚拟质

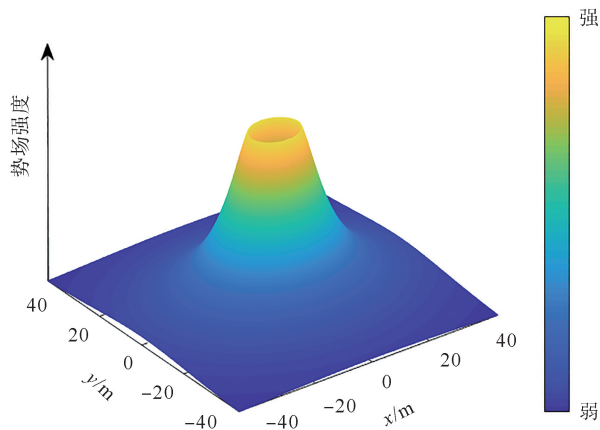


图1 “车辆”势场分布示意

量表达式为

$$M_j = m_j \cdot T_j \cdot (1.566 \times 10^{-10} \cdot v^{6.687} + 0.3345) \quad (2)$$

式中:  $M_j$  为物体  $j$  的虚拟质量;  $m_j$  为物体  $j$  的实际质量;  $T_j$  为物体种类参数;  $v$  为物体  $j$  的当前行驶速度。

实际交通场景中,移动物体各个方向的风险强度不同,移动过程中前后方的风险大于其他方向,为更好地描述物体不同方向的势场分布情况,需对距离进行修正,取  $x$  轴方向为物体移动方向,  $y$  轴为速度垂直方向,则修正后的距离公式为

$$|r'| = \begin{cases} \sqrt{\left[\frac{q_1 \cdot (x_0 - x)}{e^{g \cdot v - p}}\right]^2 + [q_2 \cdot (y_0 - y)]^2} & x - x_0 < 0 \\ \sqrt{\left[\frac{q_1 \cdot (x_0 - x)}{e^{g \cdot v}}\right]^2 + [q_2 \cdot (y_0 - y)]^2} & x - x_0 \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $|r'|$  为修正后的距离;  $q_1$ 、 $q_2$  为移动物体长和宽的相关系数;  $p$  为与加速度相关的系数;  $g$  为与速度相关的系数;  $v$  为移动物体的速度。

当移动物体间的距离处于一定范围内时,彼此之间会产生相互作用力,对彼此的运动造成影响,构建“车辆”势场的目的是将移动物体间的相互作用力量化,让物体根据所受势场的影响调整移动策略,保证安全性。构建考虑运动物体自身属性及运动状态的“车辆”势场模型:

$$E_v = \frac{M \cdot c \cdot \exp[\tau \cdot \Delta v \cdot \cos\theta]}{|r'|^k} \quad (4)$$

式中:  $c$ 、 $\tau$ 、 $k$  均为不为 0 的待定系数;  $\theta$  为物体相对于速度方向的偏移角度;  $|r'|$  为空间中某点到运动物体的修正距离;  $M$  为虚拟质量;  $\Delta v$  为运动物体间的速度差。

### 1.2 道路势场

道路势场由车道标线和道路上的静止物体组成:

$$E_r = U_m + U_q \quad (5)$$

式中:  $U_m$  为车道线风险场;  $U_q$  为障碍物风险场。

#### 1.2.1 车道线势场

在交通环境中车道线如图 2 所示,分为虚线、双黄线、道路边界线。虚线为同向车道分线,对同向行驶的车辆进行约束;双黄线为车道区分线,对方向相反的车道进行划分;实线表示道路边界线,行车风险随着车辆的不断接近趋向于无穷大,目的在于约束车辆在道路上行驶,避免车辆过度靠近,减少碰撞冲出道路的风险。车辆行驶在车道中心位置时所面临的风险最小,越接近车道线所面临的风险强度越大,车道内风险分布情况如图 3 所示。

建立如图 2 所示坐标系,将下侧车道边界线定义为  $x$  轴,用指数函数表示车道线的势场分布情况:

$$U_m = \lambda \cdot \exp\left(\frac{-b^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) \cdot \frac{b}{|b|} \quad (6)$$

式中:  $\lambda$  为不同车道标线的场强系数,道路边界线的  $\lambda$  值最大,双黄线的  $\lambda$  值次之,虚线的  $\lambda$  值最小;  $b$  为车辆与相邻道路标线之间的

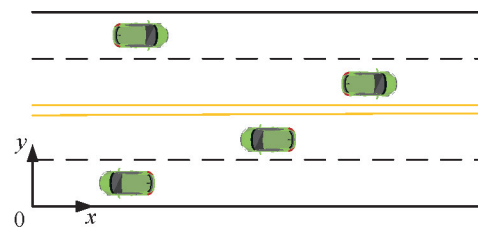


图 2 车辆行驶场景

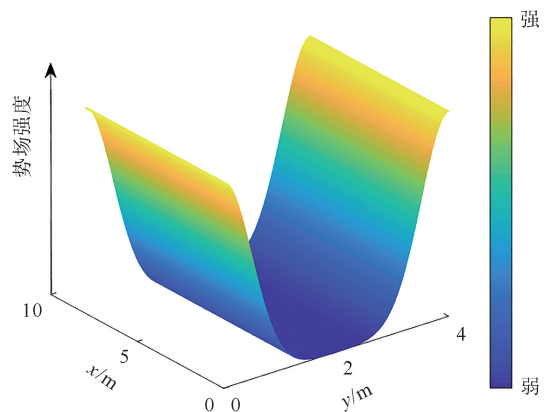


图 3 单车道势场分布情况

距离;  $\sigma$  为场强增幅系数,受车道宽度影响。

### 1.2.2 障碍物势场

障碍物指道路上对车辆运动造成影响的静止物体,如路障、故障车辆等,产生的风险场的大小由障碍物自身属性决定,对车辆造成的风险受两者相对距离的影响。可用速度与加速度皆为 0 时的“车辆”势场表示障碍物势场,无论从障碍物的哪个角度接近,所面临的风险强度相同。

## 2 驾驶主体对行车安全的影响分析

驾驶主体驾驶车辆的过程中受到自身特性和客体因素的影响,采取相应的驾驶策略,改变车辆的运动状态,从而出现车辆之间相互影响的现象。车辆的运动状态只是驾驶主体意识的一种外在体现,车辆间相互影响的现象可以看作是驾驶主体之间的博弈行为。CAV 由驾驶人和驾驶系统共同驾驶,所以,以“车辆”势场为基础,综合考虑行车环境及驾驶主体特性,从驾驶人和驾驶系统两个角度分析驾驶主体对行车安全的影响。

### 2.1 驾驶行为场的构建

车辆行驶时,驾驶人的驾驶行为决策受到个人因素和当前行驶环境的共同约束,驾驶行为是驾驶人心理在实际交通场景中的映射,在驾驶车辆的过程中驾驶人由于驾驶需求等因素对车辆产生驱动力场,场强的大小受驾驶人的心理因素、驾驶技能熟练度等自身特性的影响。

车辆所处的驾驶环境则会对驾驶人造成心理压力,心理压力的大小与驾驶环境复杂程度及道路状况有关,驾驶环境与道路状况越复杂对驾驶人造成的心理压力越大;心理压力的大小同时也受驾驶人自身特性的影响,驾驶人心理影响因素如图 4 所示。

驾驶行为场由驾驶人驱动力场和压力场两部分构成,其表达式为

$$E_{p_1} = \xi_1 \cdot U_d - (1 - \xi_1) \cdot U_s \tag{7}$$

式中:  $E_{p_1}$  为驾驶行为场;  $U_d$  为驱动力场;  $U_s$  为心理压力场;  $\xi_1$  为驾驶人的激进程度。

$\xi_1$  的取值范围为 0 ~ 1,其大小受驾驶风格因素的影响,黑凯先将驾驶风格分为激进型、标准型、平静型三类<sup>[13]</sup>,激进型驾驶人驾驶车辆时较为激进,对车辆的驱动力较强,驾驶风格越激进,  $\xi_1$  的值越大,心理压力场在心理场中的占比越小;相反,驾驶风格越保守,  $\xi_1$  的值越小,心理压力所占比重越大。

#### 2.1.1 驾驶人驱动力场

实际交通环境中,驾驶人心理状态无法直接对其他客体车辆产生作用,而是以自身所驾驶的车辆为媒介,通过车车之间的相互作用势对客体车辆造成影响。驾驶人对行车安全性的影响是通过驾驶车辆的运动状态来表现的,因此可以在“车辆”势场的基础上对驾驶人驱动力场进行建模:

$$U_d = \beta \cdot (E_{ev} - E_v) \tag{8}$$

式中:  $\beta$  为驾驶人特性系数;  $E_{ev}$  为车辆以驾驶人期望速度行驶时所形成的风险场强度;  $E_v$  为车辆当前运动状态产生的“车辆”势场强度。

#### 2.1.2 心理压力场

驾驶人驾驶车辆时的心理动态变化不仅与自身特性有关,同时也受到客体因素的影响。当驾驶环境较为复杂、行车过程中所面临的风险较大时,驾驶人便会产生一定的心理压力,这种心理压力的大小主要与驾驶环境的复杂程度、对车辆当前行驶轨迹造成影响的周围车辆、车道线等客体因素有关,其表达式为

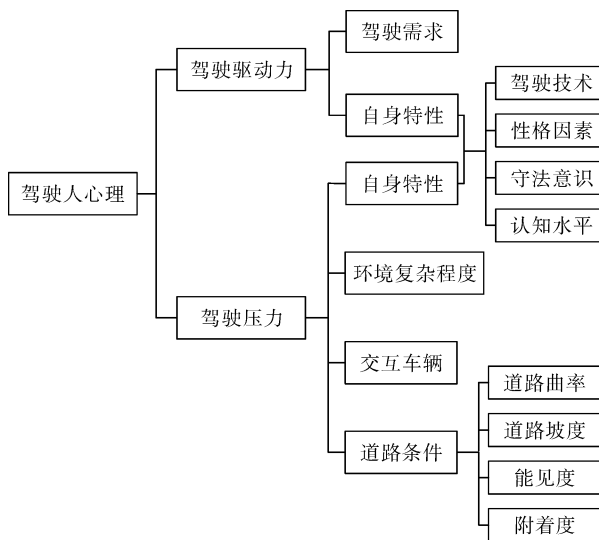


图 4 驾驶人心理影响因素

$$U_s = \frac{R \cdot \lambda \cdot \left( \sum_{i=1}^n E_{vi} + \sum_{s=1}^m E_{rs} \right)}{\beta} \quad (9)$$

式中:  $R$  为道路条件影响因子;  $\lambda$  为当前驾驶环境的复杂性系数;  $n$  为对车辆造成风险的客体车辆的数量;  $E_{vi}$  为第  $i$  车对主车形成的势场强度;  $m$  为车道标线的数量;  $E_{rs}$  为第  $s$  条车道线对主车形成的势场强度。

1) 环境复杂度系数。车辆和道路是组成驾驶环境的主要因素,一定区域内的车辆数与道路数越多,驾驶环境越复杂,而驾驶人驾驶过程中,心理压力主要来源于本车道和相邻车道上对车辆行驶安全直接造成影响的其余车辆,所以可以将本车辆作为中心,用一定范围内的车辆数与车道数表示驾驶环境的复杂性系数:

$$\lambda = \frac{k + 2}{A} \quad (10)$$

式中:  $k$  为对本车辆安全造成直接影响的车辆数;  $A$  为以本车辆为中心的一定范围的面积。

2) 道路条件影响因子。实际交通环境中道路条件对行驶车辆产生的风险主要受坡度、曲率、能见度及附着系数的影响<sup>[14]</sup>。所以道路条件影响因子  $R$  可表示为

$$R = R(\alpha, \mu, \epsilon, \eta) = f_1(\alpha) \cdot f_2(\mu) \cdot f_3(\epsilon) \cdot f_4(\eta) \quad (11)$$

式中:  $\alpha$  为道路坡度影响因子;  $\mu$  为道路弯曲程度影响因子;  $\epsilon$  为道路能见度影响因子;  $\eta$  为路面附着度影响因子;  $f_1(\alpha)$ 、 $f_2(\mu)$ 、 $f_3(\epsilon)$ 、 $f_4(\eta)$  分别为各影响因子的评价函数。

道路坡度指道路的陡缓程度,车辆在进入高架桥等特殊交通场景时便需要在倾斜的道路上行驶。坡度通常用斜坡的高度与水平宽度的比值来表示,如图 5(a)所示,将斜坡高度定义为  $h$ ,水平宽度定义为  $d$ ,则其坡度表达式为

$$f_1(\alpha) = \frac{h}{d} \cdot 100\% \quad (12)$$

车辆行驶的道路并不全是平直的,存在直道、弯道等各种状况,平直道路对驾驶人造成的心理压力较小,道路的弯曲程度越大,对驾驶人造成的心理压力越大,所以用曲率的大小评价道路的弯曲程度,如图 5(b)所示。将单向双车道的中心线定义为  $f(x, y)$ ,曲率公式为

$$K = \frac{|y''|}{(1 - y'^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (13)$$

得到图 5(b)所示道路弯曲程度的评价函数为

$$f_2(\mu) = \frac{|f''(x, y)|}{(1 - f'^2(x, y))^{\frac{3}{2}}} \quad (14)$$

式中:  $f'(x, y)$  为  $f(x, y)$  的一阶导数;  $f''(x, y)$  为  $f(x, y)$  的二阶导数。

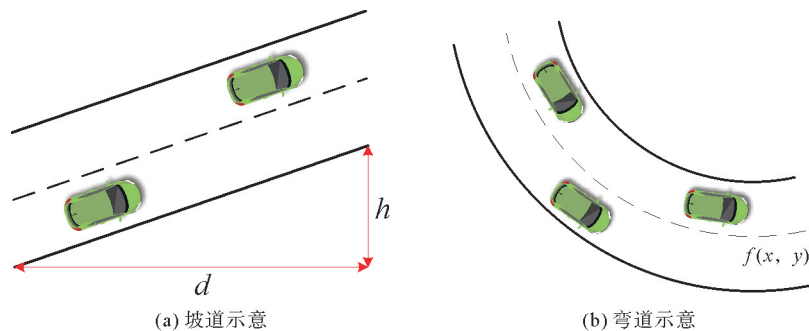


图 5 道路状况示意

道路可见度指可以将目标物体从背景中识别出来的最大距离, 主要与空气的透明程度有关, 空气越浑浊, 空气透明度越小, 道路可见度越低, 对驾驶员造成的心理压力越大。通常将道路可见度划分为若干等级区间, 通过统计各可见度区间事故交通发生率占事故总量的比例构建道路可见度风险评价函数:

$$f_3(\epsilon) = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \tag{15}$$

式中:  $N_i$  为第  $i$  个道路可见度区间内交通事故发生的数量。

车辆与路面的附着程度可以用附着系数表示, 即附着力与车辆对路面压力的比值, 附着系数越大, 则附着程度越高。通常车辆的质量完全由道路承载, 可将附着系数近似地看作是车轮与道路的摩擦系数。路面附着程度的评价函数为

$$f_4(\eta) = \frac{f}{P} \tag{16}$$

式中:  $f$  为车辆与路面之间的摩擦力;  $P$  为车辆对路面造成的压力。

综上, 驾驶行为场表达式为

$$E_{p_1} = \xi_1 \cdot \beta \cdot (E_{ev} - E_v) - (1 - \xi_1) \cdot \frac{R \cdot \lambda \cdot (\sum_{i=1}^n E_{vi} + \sum_{s=1}^m E_{rs})}{\beta} \tag{17}$$

## 2.2 驾驶控制权切换对行车安全的影响

### 2.2.1 驾驶控制权切换基本逻辑框架

驾驶人驾驶车辆时, 车载系统和路测单元采集交通状况信息, 并将其传送至云端, 分析车辆目前面临的风险程度。当车辆所面临的风险程度较低时, 驾驶人的驾驶能力可以完成当前驾驶任务, 驾驶系统只需对驾驶人进行辅助, 不需要完全接管车辆驾驶权; 当风险程度超出驾驶人的能力范围, 驾驶人无法安全稳定地完成驾驶任务时, 驾驶系统介入, 接管车辆的控制权对车辆进行驾驶。驾驶控制权切换逻辑如图 6 所示。驾驶系统对驾驶控制权的接管程度为

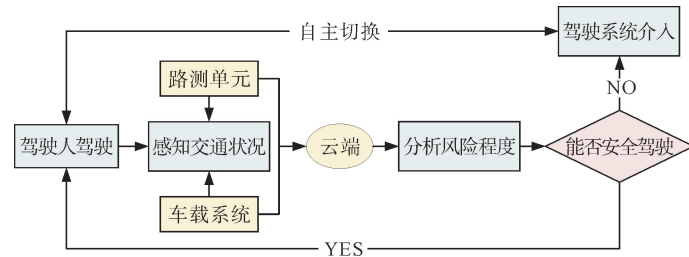


图 6 驾驶控制权切换逻辑框架

$$w = \begin{cases} \exp(E_t - E_p) & E_t < E_p \\ 1 & E_t \geq E_p \end{cases} \tag{18}$$

式中:  $E_p$  为驾驶人能够安全稳定驾驶的风险强度界限;  $E_t$  为周围车辆、车道标线、障碍物对主车造成的风险强度,  $E_t = \sum_{i=1}^n E_{vi} + \sum_{s=1}^m E_{rs}$ 。

### 2.2.2 驾驶控制权对行车安全的影响分析

驾驶系统接管车辆驾驶控制权驾驶车辆的过程中, 经过交通数据信息处理和大量运算使车辆按照安全的行驶轨迹运行, 不存在自我意识和复杂情感, 不会由于外部交通环境对车辆造成风险强度的变化而产生心理压力。因此驾驶系统对行车安全的影响可表示为

$$E_{S_2} = \psi \cdot E_v \tag{19}$$

式中:  $E_{S_2}$  为驾驶系统对车辆形成的风险场强度;  $\psi$  为驾驶系统风险因子。

驾驶系统对行车安全的影响主要由感知、决策、控制三部分组成, 不同驾驶系统的侧重面不同, 导致感知、决策、控制对行车安全的影响程度存在差异, 在驾驶系统对行车安全的影响中所占权重值的大小也不同。所以驾驶系统风险因子为

$$\psi = \rho_1 \cdot \psi_1 + \rho_2 \cdot \psi_2 + \rho_3 \cdot \psi_3 \tag{20}$$

式中:  $\psi_1$  为感知因子;  $\psi_2$  为决策因子;  $\psi_3$  为控制因子;  $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 、 $\rho_3$  为各因子在驾驶系统中的权重系数,  $\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 = 1$ 。

综上,驾驶主体对车辆造成的风险程度表达式为

$$E_s = \begin{cases} [1 - \exp(E_t - E_p)] \cdot E_{p_1} + \exp(E_t - E_p) \cdot E_{s_2} & E_t < E_p \\ E_{s_2} & E_t \geq E_p \end{cases} \tag{21}$$

### 3 虚拟场景验证分析

根据建立的行车风险场,车辆不同的运动状态会影响其风险场的分布情况,将车辆不同运动状态参数代入建立的“车辆”势场模型,相关参数如表 1 所示,得到不同状态下的“车辆”势场的分布情况,如图 7 所示。

表 1 “车辆”势场相关参数取值

参数	$g$	$q_1$	$q_2$	$\tau$	$c$	$k$	$\theta$
参数取值	0.5	1.5	1	-0.2	0.05	1.5	0

当车辆的速度与加速度全为 0 时,“车辆”势场的分布状况如图 7(a)所示,势场分布类似于圆形,无论从哪个角度接近车辆所面临的风险强度相同。

当车辆加速度为 0,进行匀速行驶时,“车辆”势场分布情况如图 7(b)所示,“车辆”势场的分布近似于椭圆形,车辆纵向的风险强度明显高于车辆两侧方向。

当车辆以一定速度行驶且加速度不为 0 时,车辆处于加速或者减速状态。当车辆加速行驶时,“车辆”势场分布呈现前倾状态,如图 7(c)所示;当车辆减速行驶时,“车辆”势场分布呈现后倾状态,如图 7(d)所示。

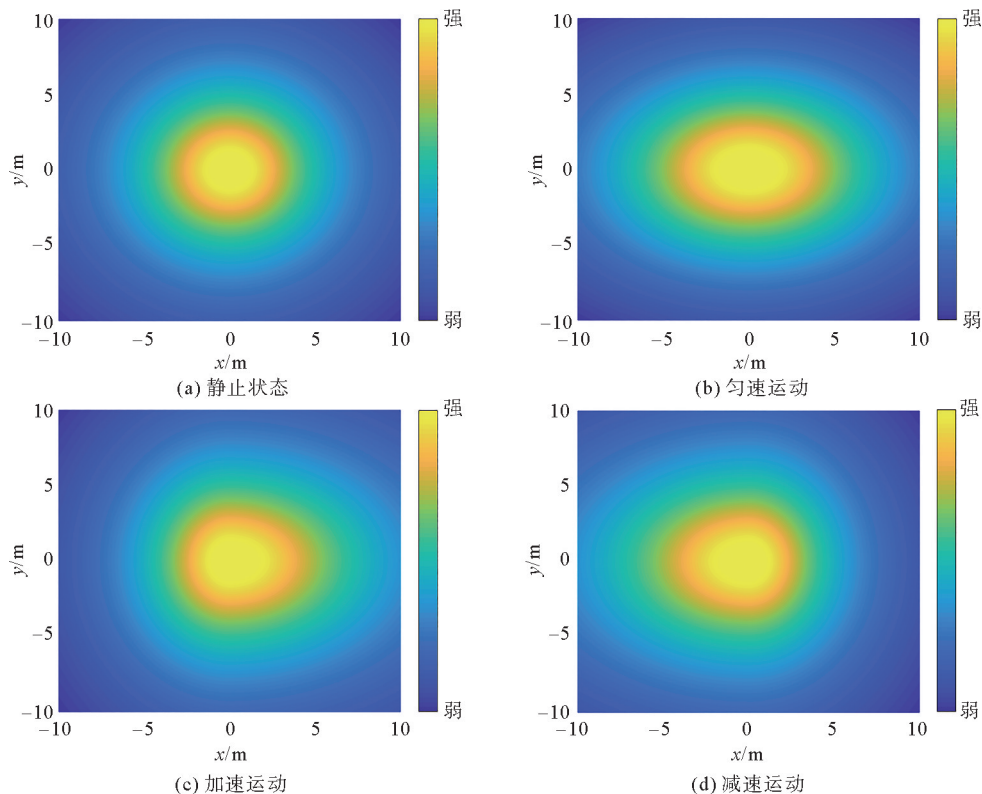


图 7 不同运动状态的“车辆”势场分布情况

将道路势场的验证场景设置为双向四车道,单车道的宽度为4 m,不同方向的车道之间用双黄线隔离,不同车道线的场强系数取值情况如表1所示,根据建立的车道线风险场模型得到验证场景的车道线风险场分布如图8所示。

道路势场分布情况如图8所示,道路边界线势场的强度趋向于无穷大,方向相反车道的分界线即双黄线势场强度次之,同向车道分界线风险最小,与实际道路状况相符。

构建虚拟驾驶场景如图9所示,车辆A和车辆B在车道中心处跟驰行驶,两车受到的道路势场强度为0,车辆A的速度为 $v_1$ ,车辆B的速度为 $v_2$ ,跟驰距离为 $r$ 。

根据建立的行车风险场,得到车辆B对车辆A造成的风险场强度如图10所示。随着跟驰距离的减小,车辆A与车辆B速度差的增大,车辆B对车辆A的势场强度不断增强,且跟驰距离越小,其增强幅度越大。

根据驾驶主体对行车安全的影响分析,驾驶人的驱动心理使车辆A所面临的势场强度逐渐增大,心理压力也随之增大,当心理压力的大小超过一定范围时,驾驶人便会在驾驶系统的辅助下调整车辆A的运动状态,降低行车风险。而当交通场景太过复杂,车辆所受到的总风险强度超出驾驶人能力范围时,驾驶人的驾驶能力不足以保证行车安全,驾驶系统便可以接管驾驶控制权进行驾驶。

## 4 结论

1) 引入势场理论,考虑多维要素构建行车风险场模型量化行车风险,通过场强表示各因素对CAV行车安全的影响程度,为CAV面对不同状况做出正确驾驶行为决策奠定基础。

2) 以行车风险场为基础,根据车辆运动状态与驾驶主体之间的映射关系,综合考虑主客观因素,从驾驶人与驾驶系统两方面剖析驾驶主体对行车安全的影响,分析驾驶系统与驾驶人之间的协作关系,构建CAV驾驶控制权切换的基本逻辑框架,并建立驾驶主体对车辆造成风险程度的表达式,为CAV路径规划及驾驶权分配提供一种新的思路。

3) 构建简单交通场景对建立的模型进行分析验证,结果显示模型可以较好地反映CAV行驶过程中的风险状况,而驾驶策略的不同会导致风险强度存在差异,行车过程中可根据风险场强度的大小调整驾驶行为策略以保证行车安全。

表2 道路势场参数取值

系数	道路边界线	车道中心线	双黄线
环境复杂性系数 $\lambda$	80	10	30
场强增幅系数 $\sigma$	0.5	0.5	0.5

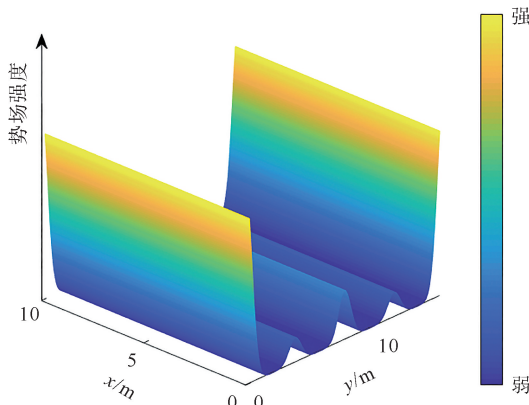


图8 道路势场示意

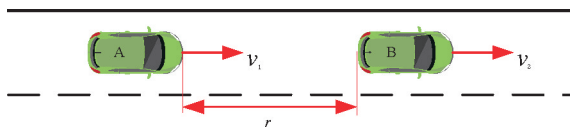


图9 虚拟驾驶场景示意

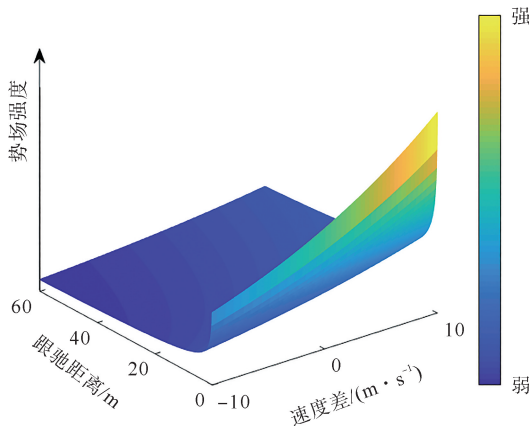


图10 势场强度变化示意

## 参考文献(References):

- [1] KATHIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. Springer New York,1986,2:500-505.
- [2] KUMAR P B,RAWAT H,PARHI D R. Path planning of humanoids based on artificial potential field method in unknown environments[J]. Expert Systems,2019,36(2):1-12.
- [3] SZCZEPANSKI R,BEREIT A,TARCZEWSKI T. Efficient local path planning algorithm using artificial potential field supported by augmented reality[J]. Energies,2021,14(20):6642.
- [4] 方文凯,廖志高. 基于改进 A\* 算法的机器人全局路径优化研究[J]. 广西科技大学学报,2023,34(1):73-78.  
FANG Wenkai,LIAO Zhigao. Research on global path optimization of mobile robot based on improved A\* algorithm[J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology,2023,34(1):73-78.
- [5] SATTEL T,BRANDT T. From robotics to automotive: Lane-keeping and collision avoidance based on elastic bands[J]. Vehicle System Dynamics,2008,46(7):597-619.
- [6] GAO K,YAN D,YANG F, et al. Conditional artificial potential field-based autonomous vehicle safety control with interference of lane changing in mixed traffic scenario[J]. Sensors,2019,19(19):4199-4212.
- [7] 曲大义,李娟,刘聪,等. 基于分子动力学的车流运行态特性及其模型[J]. 交通运输系统工程与信息,2017,17(4):188-194.  
QU Dayi,LI Juan,LIU Cong, et al. Dynamic characteristics model of traffic flow based on molecular dynamics[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2017,17(4):188-194.
- [8] 贾彦峰,曲大义,赵梓旭,等. 基于安全势场的网联自主车辆跟驰行为决策及模型[J]. 交通运输系统工程与信息,2022,22(1):85-97.  
JIA Yanfeng,QU Dayi,ZHAO Zixu, et al. Car-following decision-making and model for connected and autonomous vehicles based on safety potential field[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2022,22(1):85-97.
- [9] LI L H,JI X K,GAO J, et al. A macroscopic model of heterogeneous traffic flow based on the safety potential field theory[J]. IEEE Access,2021,9(99):7460-7470.
- [10] 谢楚安,任羿,杨德真,等. 面向无人驾驶车辆的行车安全场模型构建方法[J]. 北京航空航天大学学报,2024,50(4):1375-1383.  
XIE Chu'an,REN Yi,YANG Dezhen, et al. Construction method of driving safety field model for unmanned vehicles[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2024,50(4):1375-1383.
- [11] KO C,HAN S,CHOI M, et al. Integrated path planning and tracking control of autonomous vehicle for collision avoidance based on model predictive control and potential field[C]//2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). IEEE,2020:356-961.
- [12] WANG J Q,WU J,ZHENG X J, et al. Driving safety field theory modeling and its application in pre-collision warning system[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies,2016,72:306-324.
- [13] 黑凯先. 基于驾驶风格的车辆交互行为特性及其模型研究[D]. 青岛: 青岛理工大学,2021.  
HEI Kaixian. Research on vehicle interactive behavior characteristics and models based on driving style[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology,2021.
- [14] 王建强,吴剑,李洋. 基于人-车-路协同的行车风险场概念、原理及建模[J]. 中国公路学报,2016,29(1):105-114.  
WANG Jianqiang,WU Jian,LI Yang. Concept, principle and modeling of driving risk field based on driver-vehicle-road interaction[J]. China Journal of Highway and Transport,2016,29(1):105-114.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)

## (上接第 118 页)

- [13] 赵乙凡,李威,姜昌伟. 基于群体热感觉和区域占用率的多区域变风量空调系统优化控制方法[J]. 暖通空调,2024,54(2):98-106.  
ZHAO Yifan,LI Wei,JIANG Changwei. Optimal control method for multi-area VAV air-conditioning systems based on group thermal sensation and area occupancy rate[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning,2024,54(2):98-106.
- [14] GB/T 25127.1—2020,低环境温度空气源热泵(冷水)机组 第1部分:工业或商业用及类似用途的热泵(冷水)机组[S].  
GB/T 25127.1—2020,Low ambient temperature air source heat pump (water chilling) packages Part 1: Heat pump (water chilling) packages for industrial & commercial and similar application[S].
- [15] GB/T 18430.2—2016,蒸汽压缩循环冷水(热泵)机组 第2部分:户用及类似用途的冷水(热泵)机组[S].  
GB/T 18430.2—2016,Water chilling (heat pump) packages using the vapor compression cycle Part 2: Water chilling (heat pump) packages for household and similar application[S].

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)