

控制与决策

Control and Decision

车辆跟随控制策略的状态可达集建模及验证方法

刘秉政, 高松, 曹凯, 马晓钟, 徐艺, 王鹏伟

引用本文:

刘秉政, 高松, 曹凯, 等. 车辆跟随控制策略的状态可达集建模及验证方法[J]. *控制与决策*, 2021, 36(7): 1679–1685.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1562>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

结冰飞机的包线保护与控制裕度研究

Envelope protection and control margin of icing aircraft

控制与决策. 2021, 36(6): 1415–1424 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1221>

基于MCPDDPG的智能车辆路径规划方法及应用

The method and application of intelligent vehicle path planning based on MCPDDPG

控制与决策. 2021, 36(4): 835–846 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0460>

通信中断时的网联车辆协作自适应巡航控制

Cooperative adaptive cruise control of connected vehicles under communication interruption

控制与决策. 2021, 36(4): 933–939 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0837>

通信中断时的网联车辆协作自适应巡航控制

Cooperative adaptive cruise control of connected vehicles under communication interruption

控制与决策. 2021, 36(4): 933–939 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0837>

自适应事件触发的马尔科夫跳变多智能体系统一致性

Adaptive event-triggered consensus for Markovian jumping multi-agent systems

控制与决策. 2020, 35(11): 2780–2786 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1507>

车辆跟随控制策略的状态可达集建模及验证方法

刘秉政, 高松[†], 曹凯, 马晓钟, 徐艺, 王鹏伟

(山东理工大学交通与车辆工程学院, 山东淄博 255000)

摘要: 车辆动态行为的不确定性会造成跟随车辆控制的不确定性. 传统的车辆跟随控制方法只是针对车辆的单一行为动态的不确定性进行建模, 无法遍历车辆所有可能的控制输入, 因而, 既无法一次性提供跟随策略下完整的可行控制方案, 也不足以在理论上保证对策略安全检测的可信性. 为此, 提出车辆跟随控制策略的状态可达集建模及验证方法. 该方法将控制策略转换为能用可达集计算和表征的多级安全判定事件, 利用随机可达集的状态遍历特征描述车辆控制输入的不确定性, 通过对可达集交集的判断, 辨识所有初始条件对应的危险与安全控制行为, 为驾驶员提供完整的可选择控制方案; 然后利用马尔科夫链逼近可达集, 近似表达车辆行为的不确定性, 依据驾驶员行为习惯统计验证策略的安全性, 实现对控制策略的有效建模分析. 实验结果表明, 所提出的建模及验证方法不仅可以完备地表征车辆不确定行为, 提供交通情形中跟随策略相应的完整控制方案, 也可实现对策略安全性的精确验证.

关键词: 车辆跟随; 控制策略; 状态可达集; 马尔可夫链; 不确定行为; 安全检测

中图分类号: TP273

文献标志码: A



DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1562

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

引用格式: 刘秉政, 高松, 曹凯, 等. 车辆跟随控制策略的状态可达集建模及验证方法[J]. 控制与决策, 2021, 36(7): 1679-1685.

A modeling and verification method of state reachable set for vehicle following control strategy

LIU Bing-zheng, GAO Song[†], CAO Kai, MA Xiao-zhong, XU Yi, WANG Peng-wei

(School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: The uncertainty of the following vehicle control is caused by the uncertainty of vehicle dynamic behavior. However, traditional vehicle following control methods can only formulate the uncertainty of specific dynamic of vehicles and be impossible to traverse all the possible system inputs with finite operations. These methods are insufficient to provide all the viable control decision according to the following strategy at once, and unable to ensure the reliability of safety detection of strategy in theory. Therefore, a modeling and verification method of the state reachable set for the vehicle following control strategy is proposed in this work. Based on the transformation of the control strategy into the corresponding multi-level safety judgment events that can be calculated and represented by the reachable set, the stochastic reachable set is applied to characterize the uncertain control input of vehicles given its ergodicity in this method. According to the judgment of the intersection of state reachable sets for related vehicles, both dangerous behaviors and safety behaviors can be detected referring to the control strategy. The whole alternative control schemes are provided to the drivers of following vehicles. The stochastic reachable sets of vehicles are abstracted to Markov chains that can be used to express the states change of systems, and verify the safety of the following control strategy statistically based on the drivers behavior habits. Thus, an effective modeling and analysis of the control strategy is realized. The experiment results show that the proposed modeling and verification method not only characterizes the uncertain behavior process of vehicles completely, provides the integrated control decision schemes according to the following strategy under the traffic situation, but also verifies the safety of the control strategy accurately.

Keywords: vehicle following; control strategy; state reachable set; Markov chains; uncertain behavior; safety detection

收稿日期: 2019-11-11; 修回日期: 2020-03-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61573009); 山东省自然科学基金项目(ZR2018LF009, ZR2018PEE016).

责任编辑: 陈虹.

[†]通讯作者. E-mail: gs6510@163.com.

0 引言

智能驾驶辅助系统可为车辆安全行驶提供驾驶控制策略的支持,而理想的辅助控制策略首先应为驾驶员提供灵活的建议方案,不仅体现在控制策略对不同驾驶员行为习惯的适应性,也体现在对同一驾驶员所建议控制方案的多样性;其次,应适应于多变或不确定的环境信息,如其他车辆的行为未知或观测信息不确定时,仍能为驾驶员提供可靠的控制建议.这些运用特点对控制策略的建模分析与安全性检验提出了新的要求.

以车辆跟随为例,驾驶员可通过多种控制策略保证行驶安全,这些策略均应遵循一定的安全准则,如与前车保持一定的安全间距,或将车速控制在前车速度以下等.诸多已有跟随模型的构建体现了这些基本观点^[1],但这些跟随建模仅能输出一种控制决策^[2-4].尽管有研究考虑到了驾驶行为习惯对跟随行为的影响^[5],但这一类型的跟随建模方式旨在维持交通流稳定,缓解交通拥堵及降低尾气排放^[6].而理想的跟随控制策略除考虑驾驶行为习惯外,还应考虑该策略对不确定交通环境的适应性以及对可行控制方案建模表达的完备性.显然,已有的建模方法只在输出某种确定控制策略方面体现了优势,而对于不确定环境下车辆所有可行的动态控制策略表现不足,也未涵盖车辆所有可能的不确定行为动态变化.对于安全性检验而言,仅对单一行为动态的不确定性进行建模,无法遍历车辆所有可能的输入与行为动态的不确定性,因而无法在理论上保证对控制策略安全性检验的完备性和准确性.

本文提出一种车辆跟随控制策略的状态可达集建模与验证方法,通过对车辆状态分布的可达性分析,实现对控制策略下车辆行为动态的完整表述.可达集的建模可保证对不确定运动状态轨迹的完整表述,在航空领域已得到了广泛的应用^[7-8],而车辆运动系统的输入、输出也始终存在着不确定性,且车辆跟随控制所受引导车辆不确定行为扰动的影响不可忽略^[9],加之车辆是一个具有随机离散控制与连续行为模式混合叠加特性的复杂系统,可达集建模方式不仅能清晰地描述车辆动态的系统特征,而且能够遍历系统行为的完整状态空间,从而保障了对不确定环境中车辆跟随控制策略表征的完备性和验证的可信性.

这一方法的实现除了需将控制策略转化为可度量的阈值事件外,关键在于可达集的建模与有效计算.现有可达集的建模手段主要是将系统状态域过近似(over-approximation)为诸如凸多面体^[10]或椭圆

体^[11]等空间形态,从系统当前状态域起始,通过迭代后继形态来实现对状态可达集的近似计算.在基于凸多面体表达的建模条件下,现有可达集多作为线性混合自动机基本状态域的数值表现形式^[12-13],在车辆状态可达性分析领域最具代表性的是 Althoff 等^[14-17]的研究. Althoff 等在早期研究中提出利用随机可达集表征车辆行为状态^[14],但此研究针对的是确定控制决策下的车辆行为分析.近期的研究则通过对交互影响的车辆的状态可达集进行危险部分切割,以探索车辆的安全可达区域^[15].其他研究则更加侧重于降低安全决策问题中的可达集计算量,如搜寻一个避障过程中的最小可达计算空间^[16],或从最晚安全避障控制时刻点起始进行可达集计算^[17].以上研究虽突出了可达集分析在车辆安全行驶领域中的有效应用,但未能涉及对车辆控制策略的建模与验证.

针对上述问题,本文将控制策略转化为可度量的可达集阈值事件后,通过对车辆状态可达集的交集判断,确认不同状态条件下控制决策的安全性,由此获得该跟随控制策略对应于不同车辆状态的可行控制决策集合,并通过仿真检验控制策略的安全性.

1 方法描述

车辆跟随控制策略可能包含多个准则,考虑到车辆控制输入的不确定性,将这些准则转换为可由可达集计算表征的阈值事件,通过分析车辆控制输入对不同阈值事件触发后跟随车辆的安全性,将控制策略构建为不同状态条件对应的可行控制选择方案集合.此外,这些阈值事件之间存在一定逻辑关系,为此,本文构建基于状态可达集的多层事件判定模型来解析跟随控制策略的行为标准.

借鉴文献[18]对离线数据与在线应用相结合的方法论证,本文对控制策略进行离线建模解析,旨在已知车辆状态空间(即车辆速度范围与车辆行进方向上可观测范围)的基础上,分析并确认跟随情形中车辆不同初始条件所对应的可行安全控制方案,以便实际应用时根据车辆当前状态条件选择出既符合驾驶员行为习惯又满足既定策略的控制方案.离线建模分析时可先行假设跟随情形中前车与后车辆之间的行为相互独立,分别对跟随控制时段内两车在不同初始状态及控制输入条件下的可达集建模计算,通过判断前后车辆状态可达集的相对关系归结出策略定义下相应的危险及可行控制方案集合.为验证所设定控制策略的安全性,按照统计学原理模拟跟随车辆所有可能的在线跟随控制选择,即按照一定的驾驶员

行为习惯的统计概率选择所有可行安全控制输入,而非某一确定的控制输入来分析控制策略的应用效果。

为论证本文方法对控制策略建模验证的有效性,给定如下一个简单的跟随控制策略:

首先,确保跟随控制中车辆不会与前车发生碰撞;其次,将车速控制在前车速度限制以内,或者与前方车辆保留一定的车头间距;在满足上述条件基础上,需额外保证车辆控制结果的极限安全条件,即在突发情况下,前方车辆与跟随车辆同时紧急制动,可以实现安全停车。

2 系统建模

2.1 车辆状态可达集表征

给定车辆运动学模型 $\dot{x} = f(x(t), u(t))$. 其中: x 表示车辆的运动状态, $u \in U$ 表示车辆的控制输入. 当 $t = r$ 时,精确的车辆状态可达集 $R^e(r)$ 计算如下:

$$R^e(r) = \left\{ x(r) \mid x(r) = x(0) + \int_0^r f(x(\tau), u(\tau))d\tau \right\}, \quad (1)$$

其中 $x(0) \in X(0)$ 为初始状态空间. 本文采用车辆沿道路行进的纵向(相对于车辆侧向运动方向)位移区间 $S = [\underline{s}, \bar{s}]$ 与车速 $V = [\underline{v}, \bar{v}]$ 构建系统连续状态空间 $X = [S, V]$, 相应的连续控制输入空间为 $U = [\underline{u}, \bar{u}]$, 因此式(1)中 $x(0) \in X(0) = [S(0), V(0)]$. 此时,初始状态下车辆的状态可达集 $R^e(r)$ 可由车辆沿道路纵向位移与速度的二维状态空间 $X(r) = [\underline{x}(r), \bar{x}(r)]$ 近似表示,即

$$\begin{cases} \bar{x}(r) = \bar{x}(0) + \int_0^r f(x(\tau), u(\tau))d\tau, u(\tau) = \bar{u}; \\ \underline{x}(r) = \underline{x}(0) + \int_0^r f(x(\tau), u(\tau))d\tau, u(\tau) = \underline{u}. \end{cases} \quad (2)$$

本文采用超近似计算方法^[12]求得 $R^e(r)$ 的近似值 $R(r)$, 使得 $R(r) \supseteq R^e(r)$, 相应地,某一时间范围内车辆的状态可达集可近似为 $R[0, r] = \bigcup_{t \in [0, r]} R(t)$.

2.2 跟随控制策略多级事件表述

将跟随控制策略中的限制条件设定为相应的可达集阈值事件,具体包括以下4个事件.

事件1: 跟随车辆与引导车辆之间的车头间距达到预警值. 体现为 t 时刻,两车位置状态可达集之间的关系为 $(R_s^F(t) \oplus SH) \cap R_s^L(t) \neq \emptyset, \forall \varepsilon > 0, (R_s^F(t - \varepsilon) \oplus SH) \cap R_s^L(t - \varepsilon) = \emptyset$. 其中: F 和 L 分别为跟随车辆与前方引导车辆标识, SH 为车头间距预警值, “ \oplus ” 为加和运算, $R_s^F(t) \oplus SH$ 表示将跟随车辆的位置可达集向前延伸距离 SH .

事件2: 跟随车辆停止行驶. 体现为当前时刻 t , 跟

随车辆速度 $v^F(t) = 0$.

事件3: 跟随车速等于引导车速. 体现为 t 时刻, $v^F(t) = v^L(t), v(t) = \text{center}(R_v(t))$, “center()” 为集合中心, $R_v(t)$ 表示状态可达集中速度信息. 若 $v^L(t) - v^F(t)$ 的值由负增加为零,触发事件3,则称之为正向触发;否则为负向触发. 显然,正向触发为安全控制,负向触发需进一步确认,本文仅考虑负向触发.

事件4: 跟随车辆与引导车辆发生碰撞. 体现为当前时刻 t , 两车位置可达集相交,即 $R_s^F(t) \cap R_s^L(t) \neq \emptyset, \forall \varepsilon > 0, R_s^F(t - \varepsilon) \cap R_s^L(t - \varepsilon) = \emptyset$.

在离线建模中,依据控制策略应用环境的需要,确定车辆沿道路纵向位移范围 S 与车速范围 V . 将系统连续状态空间和输入空间离散化后,得到车辆系统离散空间 $X_{i,j} = [S_i, V_j] (i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m)$ 与 $U^\alpha (\alpha = 1, 2, \dots, g)$, 为建模中的跟随车辆和引导车辆随机分配作为初始条件的状态区间与控制输入区间 $S^F(0), S^L(0), V^F(0), V^L(0), U^F(0), U^L(0)$. 在预设预测时间或速度控制时间 T 内,分析两车之间状态可达集的关系,从而辨识出不同初始条件下,跟随车辆的可选择控制输入,其计算分析过程如表1所示.

表1 跟随控制策略建模流程

1) 系统输入	
2) $t = 0$	
触发事件1	$P = 0$;
无事件触发	进入下一检验步骤
3) $t = t^* \in [0, T]$	
触发事件1	若 $u^F(0) > u^L(0)$, 则 $P = 0$; 若 $u^F(0) < u^L(0)$ $t^* = T$ 且 $v^F(t^*) > v^L(t^*)$, 则 $P = 0$; $t^* = T$ 且 $v^F(t^*) < v^L(t^*)$, 则 $P = 1$; $t^* < T, t' \in [t^*, T]$ 触发事件1或事件2或事件3, 则 $P = 1$; 触发事件4或无事件触发, 则 $P = 0$
触发事件2	$P = 1$
触发事件3	若 $t^* = T$, 则 $P = 1$; 若 $t^* < T, t' \in [t^*, T]$ 触发事件2或无事件触发, 则 $P = 1$; 触发事件1或事件4, 则 $P = 0$
触发事件4	$P = 0$
无事件触发	令 $S^F(0) = R_S^F(T), S^L(0) = R_S^L(T)$ $V^F(0) = R_V^F(T), V^L(0) = R_V^L(T)$ $u^L(0) = u^F(0) = -1$ $T' = 100 \times T, t \in [T, T']$ 触发事件4, $P = 0$; 否则, $P = 1$

注: $u(0) = \text{center}(U(0))$; $P = 0$ 表示危险控制, $P = 1$ 表示可行控制.

若定义关联事件中跟随车辆与引导车辆的初始状态及控制输入分别为 $A = (z^F = (i, j), y^F = \alpha)$, $B = (z^L = (i', j'), y^L = \beta)$, 则建模所得控制策略与确定初始条件下跟随车辆的安全行驶概率为

$$P(S|\underbrace{z^F = (i, j), y^F = \alpha, z^L = (i', j'), y^L = \beta}_C) = \sum_T P(S|C, T) \cdot P(T), \quad (3)$$

其中 $P(T)$ 表示控制输入持续时间为 T 的事件概率, 其值不必通过检测获得, 可依据驾驶员的平均分布情况设定其数值.

依据前文行为独立性假设, 可得未知引导车辆速度控制决策时跟随车辆安全行驶的概率为

$$P(S, A) = \sum_{(i', j')\beta} P(S|A, B_{(i', j')}^\beta) \cdot P(A, B_{(i', j')}^\beta) \approx \sum_{(i', j')\beta} P(S|A, B_{(i', j')}^\beta) \cdot P(A) \cdot P(B_{(i', j')}^\beta). \quad (4)$$

由此可确定该跟随控制策略中, 跟随车辆当前条件下选择某一离散控制输入区段 α 的概率为

$$\rho_{(i, j)}^\alpha = P(S|A) = \frac{P(S, A)}{P(A)} = \sum_{(i', j')\beta} P(S|A, B_{(i', j')}^\beta) \cdot P(B_{(i', j')}^\beta). \quad (5)$$

3 跟随控制策略验证

为检验跟随控制策略的安全性, 用可预测的马尔科夫链^[14]进行行为分析. 马尔科夫链的更新取决于两个转移矩阵: 时刻状态转移矩阵 $\Phi(\tau)$ 和时间段状态转移矩阵 $\Phi(0, \tau)$, 其中 τ 为马尔科夫链的时间步长. 为此, 通过下式估算出车辆在下一时刻与时段的马尔科夫链:

$$p(t_{k+1}) = \Gamma(t_k)\Phi(\tau)p(t_k), \\ p(t_k, t_{k+1}) = \Phi(0, \tau)p(t_k). \quad (6)$$

其中: p 为车辆的位置概率分布; $\Gamma(t_k)$ 为可行的时变控制输入转移矩阵, 反映安全跟随策略中控制输入的选择统计概率, $\Gamma(t_k)$ 由两部分生成, 其计算公式如下:

$$\Gamma_{(i, j)}^{\alpha\beta} = \text{norm}(\hat{\Gamma}_{(i, j)}^{\alpha\beta}), \\ \hat{\Gamma}_{(i, j)}^{\alpha\beta} = \lambda_{(i, j)}^\alpha \Psi^{\alpha\beta}, \\ \forall i, j: \sum_\alpha \lambda_{(i, j)}^\alpha = 1, 0 \leq \lambda_{(i, j)}^\alpha \leq 1, \\ \Psi^{\alpha\beta}(\gamma) = \text{norm}(\hat{\Psi}^{\alpha\beta}(\gamma)), \\ \hat{\Psi}^{\alpha\beta}(\gamma) = \frac{1}{(\alpha - \beta)^2 + \gamma}. \quad (7)$$

其中: Ψ 为固有转变矩阵, 即车辆固有行为中的控制输入变化律, 表现为车辆控制输入在离散区段之间的随机跳变, 跳转控制输入之间差值(或控制输入区段序列数值之差)越大, 其跳变可能越小; 参数 γ 取值越大, 车辆控制输入调整越频繁^[14]; λ 为优先级变量, 反映车辆速度受到交通环境制约被动地采取变速措施时, 车辆对控制输入离散区段的优先选择概率. 就驾驶习惯而言, 车辆控制输入优先选择在一个固有区段内(习惯区段), 只有极端驾驶状态选择在固有区段外, 将此控制输入优先选择区段 α 的概率记为 μ^α , 即处在自由行驶状态的车辆控制输入选择概率为 $\lambda_{(i, j)}^\alpha = \mu^\alpha$. 最终跟随控制策略下车辆优先选择控制输入区段 α 的概率 $\lambda_{(i, j)}^\alpha$ 以固有概率 μ^α 为基础, 条件概率 $\rho_{(i, j)}^\alpha$ 为上限, 根据如下变换而确定:

$$\lambda_{(i, j)}^\alpha = \begin{cases} \mu_{(i, j)}^\alpha, & \mu_{(i, j)}^\alpha \leq \rho_{(i, j)}^\alpha; \\ \rho_{(i, j)}^\alpha, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (8)$$

其中 $\mu_{(i, j)}^\alpha = \mu^\alpha$, 为了满足条件 $\sum_\alpha \lambda_{(i, j)}^\alpha = 1$, 另有 $\mu_{(i, j)}^{\alpha-1} = \mu_{(i, j)}^{\alpha-1} + \mu_{(i, j)}^\alpha - \rho_{(i, j)}^\alpha$.

若初始状态为 (i, j) 时应选择控制输入 α 的条件概率为 $q_{(i, j)}^\alpha = P(y = \alpha|z = (i, j))$, 则车辆状态为 (i, j) 且控制输出为 α 的联合概率为

$$p_{(i, j)}^\alpha = P(y = \alpha, z = (i, j)) = P(y = \alpha|z = (i, j)) \cdot P(z = (i, j)) = q_{(i, j)}^\alpha \hat{p}_{(i, j)}, \quad (9)$$

其中 $\hat{p}_{(i, j)} = \sum_\alpha p_{(i, j)}^\alpha$ 是车辆状态为 (i, j) 的总概率. 因此, 若确认控制策略下跟随车辆状态为 $X = (i, j)$, 车辆控制输入由 β 区段到 α 区段的转移概率为 $\Gamma_{(i, j)}^{\alpha\beta}$, 即 $q_{(i, j)}^\alpha = \sum_\beta \Gamma_{(i, j)}^{\alpha\beta} q_{(i, j)}^\beta$, 则可预测出 t_k 时刻跟随车辆状态为 (i, j) 且选择控制输入转移到 α 区段的概率为

$$p_{(i, j)}^\alpha(t_k)' = \sum_\beta \Gamma_{(i, j)}^{\alpha\beta}(t_k) p_{(i, j)}^\beta(t_k). \quad (10)$$

4 仿真实验

4.1 车辆模型

仿真将车辆行为限定在指定的参考轨道上, 即在假设横向轨迹偏离与纵向运动相互独立前提下, 对车辆纵向(沿轨道方向)与横向行为独立建模. 纵向运动用简化运动学模型进行描述, 运动轨迹由踪迹分布概率 $\varphi(s)$ 表示, 横向轨道偏离则用分段概率分布函数 $\varphi(\delta)$ 近似表达, 车辆未来的踪迹分布概率则可表示为 $\varphi(s, \delta) = \varphi(s) \cdot \varphi(\delta)$. 此外, 鉴于踪迹分布可视

化的目的,参照车辆实体宽度构建了车辆形体分布. 车辆纵向运动的表达式^[19]如下:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= v, \\ \dot{v} &= \begin{cases} a^{\max}u, & 0 < v \leq v^* \vee u \leq 0; \\ a^{\max}\frac{v^*}{v}u, & v > v^* \wedge u > 0; \\ 0, & v \leq 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

运动模型(11)的主要参数有车辆沿轨道的位置 s 、速度 v 以及一个标准化加速度输入控制参数 u . 参数 u 的变化区间为 $[-1, 1]$, -1 表示车辆全力制动, 1 表示全力加速. 受轮胎摩擦力所限制的绝对极限加速度 a^{\max} 与常量 v^* 由不同交通参与者的特有性能所确定,本文暂不考虑弯道行驶环境. 为了更加清晰地展示车道中的车辆踪迹分布情形,在下文示例中将同一车道中多车跟随时的踪迹分布独立地显示在不同的车道中.

4.2 参数标定

本文的仿真验证包括控制策略建模与安全检验仿真,主要的参数取值见表2.

表2 控制策略建模中主要参数

参数	S/m	$V/(m/s)$	U	SH/m
赋值	[0, 200]	[0, 20]	$[-1, 1]$	[5, 10]
参数	$a^{\max}/(m/s^2)$	$v^*/(m/s)$	T/s	τ/s
赋值	7	7.3	[1, 4, 8]	0.5
参数	n	m	g	γ
赋值	40	10	6	0.2
参数	μ		$q_{(i,j)}(0)$	
赋值	[0.01, 0.04, 0.1, 0.4, 0.4, 0.05]		[0, 0, 0, 1, 0, 0]	

建模部分所需基本参数包括车辆的沿道路纵向位移 S 、速度 V 以及加速度控制输入命令 U 等,及其离散区段划分数目 n 、 m 、 g . 此类参数可依据预测方

法应用交通环境进行标定,如 S 取值可为车辆在行进方向可观测最大范围, V 取值为车辆停止到道路允许最大速度范围,离散化区段数目依据期望准确程度而定.

其他参数及在线计算所需基本参数包括满足 Lipschitz 连续条件的参数 γ 、驾驶员行为特性 μ 、车辆运动特性 a^{\max} 和 v^* 、控制时间相关参数 τ 和 T 以及自由行驶时的初始控制输入分布 $q_{(i,j)}(0)$ (假设为匀速行进). 除依据参考文献确认的参数 γ 外, a^{\max} 和 v^* 依据模型和实车实验而定,而其他参数 μ 、 τ 及 T 则可依据实际情况分析而定,本文仅给出示例以演示数据.

4.3 参数标定

为验证跟随策略的有效性,假设直行车道中 A、B、C 三车前后依次排列同向行驶, A 车位于行进方向最前方,三车的初始速度按照行进方向的位置先后依次递增,即 A 车速度最低,恒定为 3 m/s, C 车速度最大,且三车车型相同,均为宽 2 m、长 5 m,车辆初始状态属性见表3.

表3 车辆初始状态属性

车辆	参数	赋值
A	$S^A(0)/m$	[100, 106]
	$V^A(0)/(m/s)$	[2, 4]
B	$S^B(0)/m$	[50, 62]
	$V^B(0)/(m/s)$	[8, 10]
C	$S^C(0)/m$	[5, 17]
	$V^C(0)/(m/s)$	[12, 14]

对该交通情形中三辆车在 8 s 内的行驶情况进行模拟. 以 D 取值 5 m 为例, 2 ~ 2.5 s 时间区段内跟随车辆在安全控制策略下的可行加速控制输入选择以及相应的速度与位置变化见图1; 三车踪迹的可视化结果按时段划分见图2, 图2中分别对各车的分布颜色进行归一化处理,区域颜色的深浅表示概率分布的高低;对比 SH 不同取值时三车之间的碰撞概率见图3.

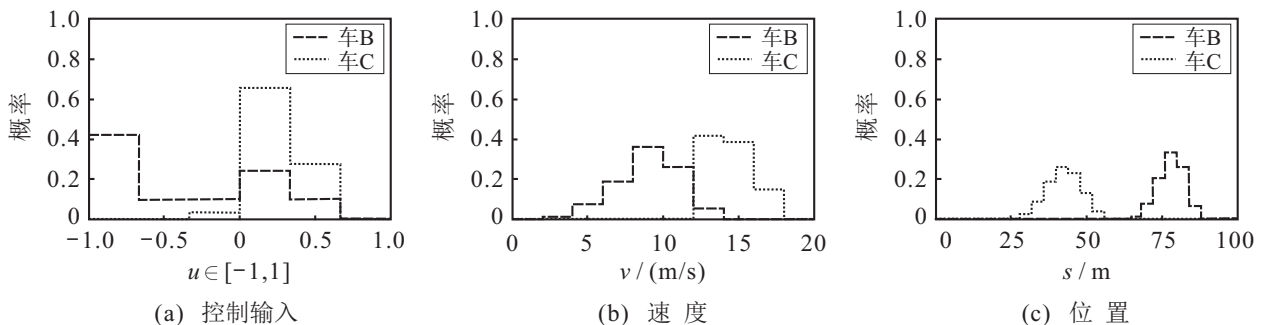


图1 $t \in [2 - 2.5]$ s 跟随车辆控制输入、速度及位置直方图

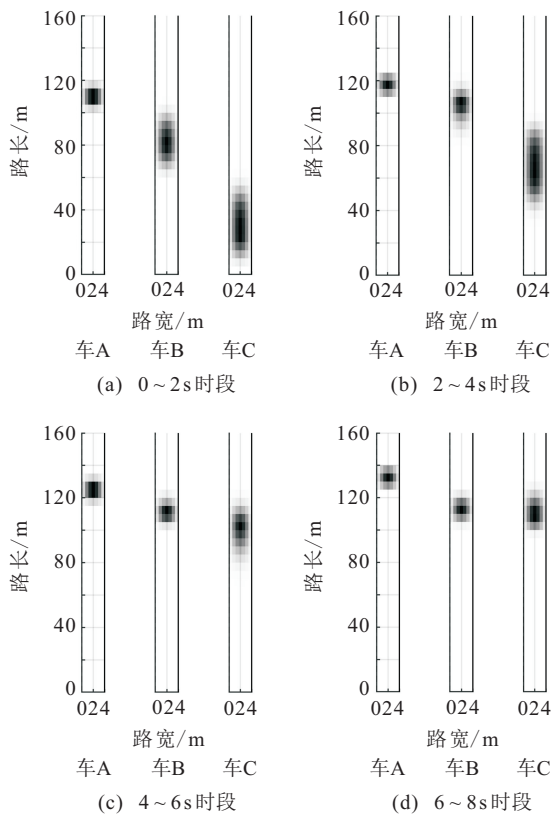


图2 不同时间区段的车辆踪迹分布

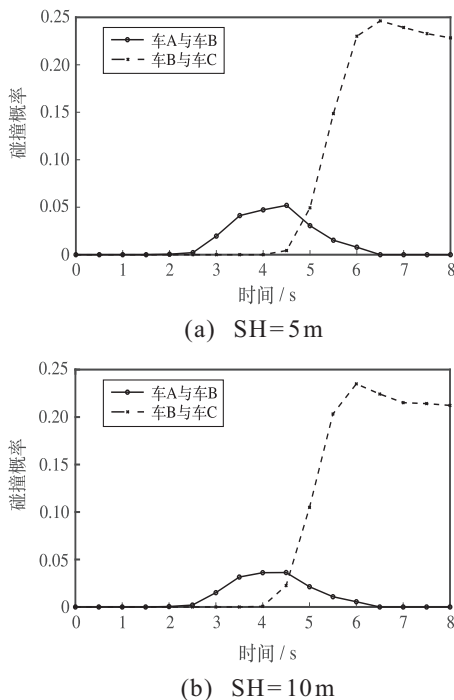


图3 不同警戒距离下车辆之间的碰撞概率

由图1可以看出,控制策略可为跟随车辆B、C提供多种方案选择,车辆相应的速度与到达位置也分布在不同的离散状态区间内.通过对图2中三车之间踪迹分布相交概率的计算便可获得本文设定跟随控制策略的安全性统计.如图3所示,由于车A运动状态稳定,车B在行驶过程中与车A碰撞概率较小,而车C

状态则随车B运动状态的波动而变化,因此,两车在双重不确定影响下的碰撞风险远高于车A与车B.由此可见车辆行为的不确定性对安全跟随有着极大的影响,同时也印证了跟随控制策略可达集建模验证方法的有效性与必要性.

对比图3(a)和图3(b),随着警戒距离的增大,跟随情形中相关车辆之间的碰撞概率峰值有所降低,且随着跟随车辆较早进入预警状态,车辆之间的碰撞概率也较早达到其峰值,如图3(a)中车B与车C的碰撞概率最大值在6.5s处,而图3(b)中则出现在6s时刻,这一结果与常识吻合,可见本文的可达集建模验证方法适用于对跟随控制策略的效果检验.

5 结论

传统跟随建模分析方法只给出车辆的单一控制决策及其安全结论,当控制策略包含多个准则时,这些方法既无法对车辆不确定行为特性进行完整表征,也不能给出所有可行决策,不足以保证对控制策略表达与检验的完整性,为此,本文提出了车辆跟随控制策略的状态可达集建模验证方法.

研究表明:所提出的方法能够遍历车辆跟随决策的完整系统状态空间,克服了对不确定性行为表现的局限;可表现引导车辆未知控制决策而导致的不确定跟随行为状态,因而能为驾驶员控制提供灵活的建议方案,并能对控制策略实现精确的安全性检验.

本文仅在示例控制策略中引入警戒车头间距,其对变速过程中的安全描述存在一定的不足,而设定车头时距则更加贴近实际操作,这一设定的分析将在未来的研究中得到体现.此外,依据本文建模分析思想,可对更加复杂的车辆跟随或其他运动控制策略进行合理性模拟分析,以完善和模式化车辆运动控制的策略使用.

参考文献(References)

- [1] 王殿海,金盛.车辆跟驰行为建模的回顾与展望[J].中国公路学报,2012,25(1):115-127.
(Wang D H, Jin S. Review and outlook of modeling of car following behavior[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(1): 115-127.)
- [2] Gazis D C, Herman R, Rothery R W. Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow[J]. Operations Research, 1961, 9(4): 545-567.
- [3] 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.
- [4] Jiang R, Wu Q S, Zhu Z J. Full velocity difference model

- for a car-following theory[J]. *Physical Review E*, 2001, 64(1): 7101-7104.
- [5] Wang Y P, Zhang J J, Lu G Q. Influence of driving behaviors on the stability in car following[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(3): 1081-1098.
- [6] Li X H, Yang T, Liu J, et al. Effects of vehicle gap changes on fuel economy and emission performance of the traffic flow in the ACC strategy[J]. *PLoS One*, 2018, 13(7): e0200110.
- [7] 刘瑛, 杜光勋, 全权, 等. 基于Hamilton-Jacobi方程的飞行器机动动作可达集分析[J]. *自动化学报*, 2016, 42(3): 347-357.
(Liu Y, Du G X, Quan Q, et al. Reachability calculation for aircraft maneuver using Hamilton-Jacobi function[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(3): 347-357.)
- [8] Xu Z P, Chen X Q, Huang Y Y, et al. Collision prediction and avoidance for satellite ultra-close relative motion with zonotope-based reachable sets[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2019, 233(11): 3920-3937.
- [9] Yu S W, Huang M X, Ren J, et al. An improved car-following model considering velocity fluctuation of the immediately ahead car[J]. *Physica A*, 2016, 449: 1-17.
- [10] 程奇峰, 马奥运. 基于多面体可达集的时间最优模型预测控制[J]. *控制与决策*, 2016, 31(10): 1884-1888.
(Cheng Q F, Ma A Y. Time optimal model predictive control based on polyhedral reachable set[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(10): 1884-1888.)
- [11] Botchkarev O, Tripakis S. Verification of hybrid systems with linear differential inclusions using ellipsoidal approximations[C]. *International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control*. Berlin: Springer-Verlag, 2000: 73-88.
- [12] Stursberg O, Krogh B H. Efficient representation and computation of reachable sets for hybrid systems[C]. *International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control*. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 482-497.
- [13] 邵立珍, 赵方园, 胡广大. 一种求解线性控制系统可达集的数值方法[J]. *控制与决策*, 2017, 32(3): 541-546.
(Shao L Z, Zhao F Y, Hu G D. A numerical method for reachable sets of linear control systems[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(3): 541-546.)
- [14] Althoff M, Stursberg O, Buss M. Model-based probabilistic collision detection in autonomous driving[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2009, 10(2): 299-310.
- [15] Koschi M, Althoff M. SPOT: A tool for set-based prediction of traffic participants[C]. *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. Los Angeles, 2017: 1686-1693.
- [16] Althoff M, Lutz S. Automatic generation of safety-critical test scenarios for collision avoidance of road vehicles[C]. *Proceedings of the 29th IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. Changshu, Suzhou, 2018: 1326-1333.
- [17] Sontges S, Koschi M, Althoff M. Worst-case analysis of the time-to-react using reachable sets[C]. *Proceedings of the 29th IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. Changshu, Suzhou, 2018: 1891-1897.
- [18] Zhang J, Hu C, Gupta Chadha R, et al. Maximum likelihood path planning for fast aerial maneuvers and collision avoidance[C]. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Macau, 2019: 2805-2812.
- [19] Eidehall A, Petersson L. Statistical threat assessment for general road scenes using Monte Carlo sampling[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2008, 9(1): 137-147.

作者简介

刘秉政(1987—), 男, 讲师, 博士后, 从事智能车辆行为预测与决策等研究, E-mail: lbzheng528@126.com;

高松(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能车辆与智能交通系统等研究, E-mail: gs6510@163.com;

曹凯(1959—), 男, 教授, 博士, 从事车辆自主行为决策建模等研究, E-mail: caokailiu@sdut.edu.cn;

马晓钟(1965—), 男, 教授, 从事燃气内燃机及其发电机组等研究, E-mail: sdjtmxz@126.com;

徐艺(1989—), 男, 讲师, 博士, 从事智能车环境感知的研究, E-mail: xuyisdut@163.com;

王鹏伟(1989—), 男, 博士生, 从事智能车辆动态决策与规划的研究, E-mail: wpwk16@163.com.

(责任编辑: 李君玲)