

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4785.201301021

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20130929.1054.004.html>

# 自主车辆安全系数估计与 T 形路口避碰规划

黄维<sup>1</sup>, 田彦涛<sup>1,2</sup>, 樊泽华<sup>1</sup>, 王磊<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130025; 2. 吉林大学 教育部工程仿生重点实验室, 吉林 长春 130025)

**摘要:**针对自主车辆 T 形路口协作问题,通过测量车辆速度和预碰点距离,提出安全系数估计方法,结合人工势场基本思想,实现车辆路口避碰,提高路口协作效率.首先以计算得到的安全系数为依据,评价驶入 T 形路口两辆自主车各自的安全程度,并利用人工势场产生的推拉作用估计协作自主车辆的期望控制力和速度.然后将估计的期望车速与反馈的实际车速形成偏差,利用增量型数字 PI 控制器实现自主车纵向车速的准确控制.最后以一定的策略完成两辆自主车的并线协作.仿真结果验证了基于安全系数估计的自主车辆 T 形路口协作避碰的可行性与有效性.

**关键词:**自主车辆; T 形路口; 安全系数; 避碰规划; 人工势场; 增量型数字 PI 控制器

**中图分类号:** TP242.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2013)05-0408-07

中文引用格式:黄维,田彦涛,樊泽华,等.自主车辆安全系数估计与 T 形路口避碰规划[J].智能系统学报,2013,8(5):408-414.

英文引用格式:HUANG Wei, TIAN Yantao, FAN Zehua, et al. Estimation of the safety coefficient of autonomous vehicles and collision avoidance planning at the T-shape intersection [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2013, 8(5): 408-414.

## Estimation of the safety coefficient of autonomous vehicles and collision avoidance planning at the T-shape intersection

HUANG Wei<sup>1</sup>, TIAN Yantao<sup>1,2</sup>, FAN Zehua<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>

(1. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China; 2. Key Laboratory of Bionics Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** Focusing on the collaboration of autonomous vehicles at a T-shape intersection, by measuring the vehicle speed and the distance of the vehicle away from the preset collision point, a safety coefficient estimation method is proposed. In combination with the basic thoughts on the artificial potential field, the collision avoidance of vehicles at an intersection may be realized and the intersection collaboration efficiency may be improved. Firstly, based on the safety coefficient obtained by calculations, the safety degree of two autonomous vehicles driving into the T-shape intersection are evaluated respectively, the push-pull function is derived from the artificial potential field and is utilized to estimate the expected control force and speed of the autonomous vehicles; then, a deviation is formed between the estimated expected vehicle speed and the actual feedback speed, the increment-type digital PI controller is utilized to realize accurate control for the longitudinal speed of an autonomous vehicle; finally, proper tactics are applied to complete the parallel collaboration of the two vehicles. The simulation result verifies the feasibility and effectiveness of the cooperative collision avoidance of autonomous vehicles at a T-shape intersection estimated on the basis of the safety coefficient.

**Keywords:** autonomous vehicles; T-shape intersection; safety coefficient; collision avoidance planning; artificial potential field; increment-type digital PI controller

现代社会对交通安全、无阻塞、低污染的需求与交通的迅猛发展之间的矛盾越来越明显.传统的交通流的控制,由于在建立交通系统非线性模型上存在很大困难<sup>[1]</sup>,其发展受到限制.相比之下,智能体

车辆协作在解决交通安全问题和效率问题上显示出了巨大的潜力<sup>[2]</sup>,为交通流的底层控制提供了新的思路.智能体车辆可以通过全球定位系统(GPS)、雷达、视觉传感器、编码器等一种甚至几种传感器<sup>[3]</sup>获得的信息进行自我决策与控制,具有很强的灵活性,因此受到研究者的广泛关注.

依照设计移动多机器人的基本理念,针对多智

收稿日期:2013-01-14. 网络出版日期:2013-09-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60675057).

通信作者:田彦涛. E-mail: tianyt@jlu.edu.cn.

能体车辆的协作问题,很多车辆避碰的方法被提出来<sup>[4-5]</sup>.欧洲智能交通协会提出 eSafety 计划<sup>[6]</sup>,研究能更有效地评估潜在危险并优化车载安全系统的方法.美国 Crash Avoidance Metrics Partnership 也将研究重点放在车辆碰撞警告方面<sup>[7]</sup>.同样在美国,密歇根大学 D. Del Vecchio 等<sup>[8-10]</sup>研发了一个与实际车 1/13 缩放的多智能体车辆平台,研究车辆在合作式交互避碰系统中的控制策略.俄亥俄州立大学的研究人员,就交通系统上层决策和车辆势态感知问题搭建仿真平台,研究智能车辆的并行结构<sup>[11]</sup>.

本文借鉴潜在危险评估的基本思想,提出安全系数估计方法,研究自主车辆在 T 形交叉路口分布式协作过程中避碰效率的提高问题.文章结构安排如下:第 1 部分,对自主车纵向动力学和多自主车组成的系统进行建模,讨论系统的结构及协作模式;第 2 部分提出安全系数估计方法,给出安全系数的具体计算方法;第 3 部分在多车辆混合系统建模的基础上,给出自主车协作策略及控制方法,保证车辆在不停车的基础上实现协作避碰;第 4 部分给出了仿真数据和仿真曲线,并分析了曲线相应于自主车协作不同阶段的形成原因;最后是文章的结论部分.

## 1 多自主车辆系统建模

本节采用自主车辆作为原型,以实际公路作为其运行环境,给出实际环境中典型的 T 形交叉路况,如图 1 所示.矩形区域是可能发生碰撞的区域,即冲突域(冲突域同时也是目标域,车辆在协作过程中会先后经过这一区域);椭圆区域是自主车的当前位置.两辆自主车分别沿各自的路径向前行驶,若同时驶入冲突域,则发生碰撞.本文主要研究自主车在 T 型交叉路口协作安全前提下如何提高协作效率的问题.

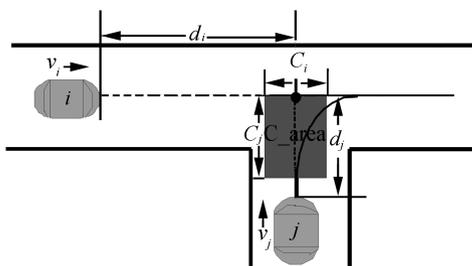


图 1 T 型交叉路口协作

Fig.1 T-shaped intersection collaboration sketch map

### 1.1 自主车纵向动力学模型

为确定自主车控制输入与加速度的关系,研究其运动特性,建立车辆纵向动力学模型.考虑路面交通状况较好的公路行驶环境,对模型进行简化,车辆的纵向动力学模型可以表述为式(1)所示的二阶模

型<sup>[8]</sup>:

$$\ddot{x} = \frac{r_w^2}{J_w + Mr_w^2} (F_d - F_b - C_{rr}Mg - \frac{\rho_a}{2}C_D A_f v^2 - Mg \sin \theta). \quad (1)$$

式中:  $J_w$  为轮胎转动惯量,  $M$  为自主车总质量,  $r_w$  为轮胎半径,  $F_d$  为驱动轴输出力,  $F_b$  为制动力,  $C_{rr}$  为滚动阻尼系数,  $g$  为重力加速度,  $\rho_a$  为空气密度,  $C_D$  为风阻系数,  $A_f$  为车辆正投影面积,  $v$  为车速,  $\theta$  为道路坡度角.

假设自主车在水平路面低速运动,即道路坡度角为零,则自主车横向、纵向运动规律是低耦合的,所受风阻可忽略不计,则动力学模型(1)可化简为

$$\ddot{x} = a(u + b). \quad (2)$$

式中:  $u = (F_d - F_b)$  为系统总的控制力输入值,  $a = r_w^2 / (J_w + Mr_w^2)$ ,  $b = -C_{rr}Mg$ ; 常值  $a$ 、 $b$  为车辆的固有特性,不同车辆有不同的  $a$ 、 $b$ ,其值可以通过实验测得.

### 1.2 多自主车混合系统模型

多自主车辆系统建模问题可以利用混合自动机模型来描述,即该系统是由自主车离散状态和连续状态组成的混合系统.混合自动机模型通过描述混合系统行为,计算系统连续变量和离散变量,实现系统的协作运行.

**定义 1**<sup>[10]</sup>  $H = (Q, X, U, Y, f, r)$  元组为带有离散和连续状态的混合自动机模型.其中,  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$  是离散状态的集合,也称模式;  $X = \mathbf{R}^n$  是连续状态的集合;  $U = U_D \times U_C$  是系统对应连续状态和离散状态的控制输入集合;  $Y$  为输出集合;  $f: Q \times X \times U_C \rightarrow X$  是连续状态更新映射;  $r: Q \times X \times U_D \rightarrow Q$  为离散状态重置映射.

针对自主车运行的特点,将以下 3 种状态作为自主车纵向速度调整的基本模式:

$$\begin{cases} q_1: v \leq v_m, & \ddot{x} = a(u + b) > 0; \\ q_2: v_m < v < v_M, & \ddot{x} = a(u + b) > 0 \text{ 或 } \ddot{x} = a(u + b) < 0; \\ q_3: v \geq v_M, & \ddot{x} = a(u + b) < 0. \end{cases} \quad (3)$$

自主车通过安全域判断所处位置的安全程度时,根据式(3)对自身模式转换与否作出决策.若判断为危险,则车辆减速,控制输入  $u < 0$ ,模式发生  $q_3 \rightarrow q_2$ ,或  $q_2 \rightarrow q_1$ ,或  $q_3 \rightarrow q_2 \rightarrow q_1$  的变换;若判断为安全程度适中,则车辆调整速度,进入  $q_2$  模式中速度的某一稳态,控制输入  $u = 0$ ;若判断为安全,则车辆加速,控制输入  $u > 0$ ,模式发生与判断危险相反的逆变换,即  $q_1 \rightarrow q_2$ ,或  $q_2 \rightarrow q_3$ ,或  $q_1 \rightarrow q_2 \rightarrow q_3$ .

做纵向速度调整的自主车  $i$  根据混合自动机模型,在以上 3 种模式下运动.其连续状态变量  $X_i$  (位

置  $x_i$ 、速度  $v_i$ ) 在控制输入  $u_i = (F_d^i - F_b^i)$  作用下, 做映射  $f_i: Q_i \times X_i \times U_i \rightarrow X_i$  的连续状态转换, 得到新的位置和速度. 对模式  $q_m (m = 1, 2, 3)$  有  $f_i(q_m, x_i, u_i) = (x_i, v_i)$ . 输出集合  $Y_i = (x_i, v_i) \in 2^{X_i}$  是状态变量  $X_i$  的子集.  $r_i: X_i \times U_i \rightarrow Q_i$  表示当前模式下由控制输入重置到一个新模式的变换.

定义 2<sup>[12]</sup> 由  $H_i = (Q_i, X_i, U_i, Y_i, f_i, r_i)$ ,  $i \in (1, 2, \dots, N)$  的  $N$  元组构成混合自动机集合, 其中,  $Q = Q_1 \times Q_2 \times \dots \times Q_N, X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_N, U = U_1 \times U_2 \times \dots \times U_N, f = f(f_1, f_2, \dots, f_N), r = r(r_1, r_2, \dots, r_N)$ . 混合自动机间的协作由并行结构  $H = H_1 \parallel H_2 \parallel \dots \parallel H_N$  刻画.

自主车利用以上混合自动机模型实现并行运行, 通过彼此间的信息交互和冲突域的判断对行驶状态作出决策. 本文提出一种新的虚拟冲突域用于车辆间协作规划, 以安全为前提, 利用混合自动机模型中 3 种模式的转换, 通过改进的增量型 PID 控制算法实现自主车快速、准确地跟随期望速度, 提高自主车协作效率.

## 2 安全系数估计

车辆在交叉路口直线行驶时, 驾驶员通过观察驶入路口车辆, 估计自身和驶入车辆速度以及与预碰点的距离, 调节其纵向车速, 从而安全驶出冲突域, 实现车辆的并线. 为实现这一过程, 自主车测量自身车速和距预碰点的距离, 并通过信息交互实时获取驶入路口其他车辆的速度及距预碰点的距离. 自主车通过计算获得的安全系数的大小估计自身安全程度, 实现其自身的决策和控制.

以 T 形路口协作车辆中的一辆自主车  $i$  为例,  $i$  首先通过接收另一辆自主车  $j$  发送的位置、行驶速度确定两辆车前进方向上的预碰点 (冲突域  $C\_area$  上的黑色实心点). 结合自身速度、与预碰点距离信息, 以如图 2 所示的矩形  $Secure\_Co$  来计算安全系数. 设矩形边  $AB$  长为  $l_1^i$ , 垂直于  $i$  速度方向,  $l_1^i$  大小由  $j$  距预碰点的距离和速度决定, 同理可得到垂直于  $j$  速度方向的矩形另一条边  $BC$  长为  $l_2^i$ . 以下给出矩形  $Secure\_Co$  的 2 条临边的计算方法:

$$l_1^i(k) = \alpha \times \sigma_j(k-1) M_j v_{jr}^j(k-1) + \beta \times \frac{1}{d_{jr}^j(k-1)},$$

$$l_2^i(k) = \alpha \times \sigma_i(k-1) M_i v_{ir}^i(k-1) + \beta \times \frac{1}{d_{ir}^i(k-1)}$$

式中:  $l_1^i$  和  $l_2^i$  为矩形的 2 条临边;  $k (k = 1, 2, \dots)$  为自主车第  $k$  时刻的采样;  $M_i$  和  $M_j$  为自主车  $i$  和  $j$  的质量;  $v_{ir}^i$  和  $v_{jr}^j$  为自主车  $i$  和  $j$  各自真实速度,  $d_{ir}^i$  和  $d_{jr}^j$  为距预碰点的距离,  $v_{ir}^i$ 、 $v_{jr}^j$  以及  $d_{ir}^i$ 、 $d_{jr}^j$  的计算方法将在 3.2 节给出;  $\alpha$  和  $\beta$  为经验比例常数;  $\sigma_i$  和  $\sigma_j$

分别为自主车  $i$  和  $j$  的安全系数.

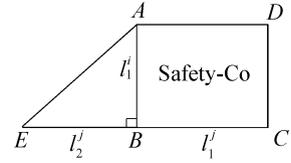


图 2 矩形  $Safety\_Co$  及安全系数计算

Fig.2 Rectangle  $Safety\_Co$  and safety coefficient calculation

自主车的安全协作策略和控制就是以安全系数为纽带, 通过安全系数大小判断自主车的受力性质与协作形式. 借鉴人工势场法的基本思想, 利用安全系数计算势场力大小, 实现自主车以避碰为前提的路口协作. 如图 2 所示, 以自主车  $i$  为例给出安全系数计算方法:

自主车  $i$  占优边  $EB$  长为

$$l_2^i(k) = \lambda_i l_1^i(k).$$

自主车  $i$  和  $j$  的安全系数分别为

$$\sigma_i(k) = \frac{l_2^i(k)}{l_1^i(k)} = \lambda_i \times$$

$$\frac{\alpha \times \sigma_i(k-1) M_i v_{ir}^i(k-1) + \beta \times \frac{1}{d_{ir}^i(k-1)}}{\alpha \times \sigma_j(k-1) M_j v_{jr}^j(k-1) + \beta \times \frac{1}{d_{jr}^j(k-1)}}$$

$$\sigma_j(k) = \frac{l_2^j(k)}{l_1^j(k)} = \lambda_j \times$$

$$\frac{\alpha \times \sigma_j(k-1) M_j v_{jr}^j(k-1) + \beta \times \frac{1}{d_{jr}^j(k-1)}}{\alpha \times \sigma_i(k-1) M_i v_{ir}^i(k-1) + \beta \times \frac{1}{d_{ir}^i(k-1)}}$$

式中:  $\lambda_i$  和  $\lambda_j$  分别为自主车  $i$  和  $j$  的占优调节因子,  $\lambda_i + \lambda_j = 2$ . 若  $1 < \lambda_i < 2$ , 说明自主车  $i$  拥有比自主车  $j$  更高的通过权; 反之, 若  $0 < \lambda_i < 1$ , 说明自主车  $j$  拥有比自主车  $i$  更高的通过权; 若  $\lambda_i = \lambda_j = 1$ , 说明两车的通过权相等. 安全系数一般在自主车进入冲突域之前的几十米到几百米范围内有一方提出协作要求时开始计算. 一般认为  $k$  时刻, 安全系数  $\sigma(k) = 10$  时, 自主车绝对安全;  $\sigma(k) = 0.1$  时自主车绝对危险. 且  $k+1$  时刻起安全系数保持  $k$  时刻的值不变.

## 3 T 形路口避碰规划

### 3.1 安全控制策略

虚拟冲突域  $C\_area$  将在自主车的协作过程中发挥作用, 冲突域的大小不仅与速度、距离有关, 还与自主车的车长有关, 如图 1 所示, 以自主车  $j$  的行驶方向为对称轴, 给出自主车  $i$  和自主车  $j$  所形成冲突域的长和宽:

$$C_i(k) = 2(\kappa_i \sigma_j(k) T_s + L_j),$$

$$C_j(k) = \kappa_j \sigma_i(k) T_s + L_i.$$

式中:  $C_i$  和  $C_j$  为矩形冲突域的长和宽,  $\sigma_i$  和  $\sigma_j$  为自主车  $i$  和自主车  $j$  的安全系数,  $L_i$  和  $L_j$  为自主车  $i$  和自主车  $j$  的车身长度,  $T_s$  为系统采样时间,  $\kappa_i$  和  $\kappa_j$  为比例常数.

自主车的路口协作分为 3 个阶段.第 1 阶段,自主车未驶入冲突域中,利用相对运动原理,将冲突域(目标域)视为移动机器人,安全系数较大的自主车视为目标点,安全系数较小的自主车视为障碍物,可以实现自主车之间在交叉路口的避碰行为.随着自主车向冲突域靠近,自主车会根据自身安全系数,判断产生力的性质和大小.若安全系数  $\sigma > 1$ ,则产生引力,将自主车拉向冲突域,安全系数越大,引力越大.若  $0 < \sigma < 1$ ,则产生斥力,冲突域对自主车产生排斥作用,安全系数越小,斥力越大.以两车预碰点作为中心,引入相应引力场和斥力场函数<sup>[13]</sup>:

1) 引力场函数:  $U_{att}(\sigma) = \frac{1}{2} \xi \sigma^2.$

2) 斥力场函数:

$$U_{rep}(\sigma) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left( \frac{1}{\sigma} - \frac{1}{\sigma_0} \right)^2, & \sigma < \sigma_0; \\ 0, & \sigma > \sigma_0. \end{cases}$$

式中:  $U_{att}$  和  $U_{rep}$  分别为引力场强和斥力场强;  $\sigma$  为安全系数;  $\sigma_0$  为正常数,表示冲突域对自主车产生排斥作用的最大安全系数;  $\xi$  和  $\eta$  为增益系数.

因为两自主车都做各自方向的一维运动,所以冲突域中大安全系数的引力函数和小安全系数的斥力函数对两辆自主车产生的引力和斥力分别为

$$F_{d_{ex1}} = F_{att}(\sigma) = -\text{grad}(U_{att}(\sigma)) = -\xi \sigma,$$

$$F_{b_{ex1}} = F_{rep}(\sigma) = -\text{grad}(U_{rep}(\sigma)) =$$

$$\begin{cases} \eta \left( \frac{1}{\sigma} - \frac{1}{\sigma_0} \right) \frac{1}{\sigma^2}, & \sigma \leq \sigma_0; \\ 0, & \sigma > \sigma_0. \end{cases}$$

式中:  $F_{d_{ex1}}$  和  $F_{b_{ex1}}$  分别为驶入冲突域前的期望驱动力和制动力,  $F_{att}$  和  $F_{rep}$  分别为冲突域对两自主车产生的引力和斥力,  $\xi = F_{d_{max}}/\sigma_{max}$ ,  $\eta = F_{b_{max}}/((1/\sigma_{min} - 1/\sigma_0)/\sigma_0^2)$ .

自主车利用引力场和斥力场的推拉作用实现自主车驶入冲突域前(第 1 阶段)的决策.安全系数较大的自主车利用引力产生加速度,快速进入冲突域.安全系数较小的自主车则利用斥力产生减速度,给安全系数较大的自主车让行.

安全系数较大的自主车进入冲突域,与进入前一时刻的速度一致,保持匀速运动.同时,安全系数较小的自主车也保持匀速运动,直至安全系数较大的自主车驶出冲突域,完成协作第 2 阶段,此后碰撞

将不可能发生.第 2 阶段的期望控制力大小为

$$F_{d_{ex2}} = C_r M g.$$

第 3 阶段,两自主车将各自恢复到协作前的速度,大安全系数的控制力和小安全系数的控制力输出分别为

$$F_{b_{ex3}} = \xi'(v_{ir} - v(0)),$$

$$F_{d_{ex3}} = -\eta'(v_{ir} - v(0)).$$

式中:  $F_{b_{ex3}}$  和  $F_{d_{ex3}}$  分别为较大安全系数的自主车驶出冲突域后,较大安全系数的自主车控制器输出的制动力和较小安全系数的自主车控制器输出的驱动力,  $\xi' = F_{b_{max}}/(v_{ir} - v(0))$ ,  $\eta' = F_{d_{max}}/(v_{ir} - v(0))$ .

两辆自主车 3 个阶段协作的决策如图 3 的虚线框内所示.图 1 中虽只标出 2 辆自主车间的协作,但车与车之间的 T 型路口协作本身是并行结构,即自主车  $i$  和自主车  $j$  的协作一旦完成前两阶段的协作,即一辆车安全通过路口后,若通过路口车道上还有另一辆自主车等待通过路口,则之前未通过路口的自主车将和新出现等待通过路口的自主车产生协作,直至其中一辆自主车顺利通过路口.如此往复,实现车与车之间的路口协作.

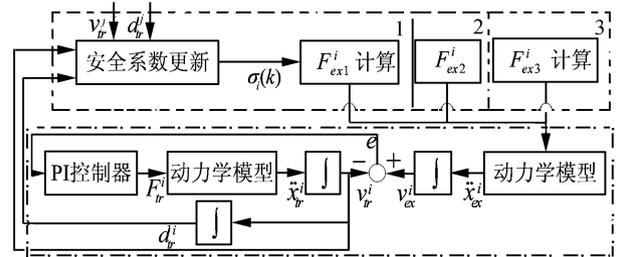


图 3 自主车  $i$  的决策与控制流

Fig.3 Decision-making and control flow graph of autonomous vehicle  $i$

### 3.2 增量型数字 PI 控制器

进入冲突域之前是协作自主车实现避碰的关键阶段,以自主车  $i$  的安全系数值大于 1 为例,给出第 1~3 阶段自主车  $i$  和  $j$  所受期望力.

1) 第 1 阶段:

$$F_{d_{ex1}}^i(k) = -\xi \sigma_i(k);$$

$$F_{b_{ex1}}^i(k) = \begin{cases} \eta \left( \frac{1}{\sigma_j(k)} - \frac{1}{\sigma_0} \right) \frac{1}{\sigma_j^2(k)}, & \sigma_j(k) < \sigma_0; \\ 0, & \sigma_j(k) > \sigma_0. \end{cases}$$

2) 第 2 阶段:

$$F_{d_{ex2}}^i(k) = C_r M_i g,$$

$$F_{d_{ex2}}^j(k) = C_r M_j g.$$

3) 第 3 阶段:

$$F_{b_{ex3}}^i(k) = \xi'(v_{ir}^i(k) - v_i(0)),$$

$$F_{d_{ex3}}^j(k) = -\eta'(v_{tr}^j(k) - v_j(0)).$$

由式(2)的自主车动力学模型,求3个阶段自主车*i*和*j*的期望加速度和速度:

$$\ddot{x}_{ex}^i(k) = a_i(F_{ex}^i(k) + b_i),$$

$$\ddot{x}_{ex}^j(k) = a_j(F_{ex}^j(k) + b_j),$$

$$v_{ex}^i(k) = v_{ex}^i(k-1) + \ddot{x}_{ex}^i(k-1)T_s,$$

$$v_{ex}^j(k) = v_{ex}^j(k-1) + \ddot{x}_{ex}^j(k-1)T_s.$$

设计增量型数字PI控制算式<sup>[14]</sup>如下:

$$e_i(k) = v_{ex}^i(k) - v_{tr}^i(k-1),$$

$$e_j(k) = v_{ex}^j(k) - v_{tr}^j(k-1),$$

$$K_p^i(k) = (F_{ex}^i(k) - F_{tr}^i(k-1))/(e_i(k) - e_i(k-1)),$$

$$K_p^j(k) = (F_{ex}^j(k) - F_{tr}^j(k-1))/(e_j(k) - e_j(k-1)),$$

$$F_{tr}^i(k) = K_p^i(k) \times (e_i(k) - e_i(k-1) + (T_s/T_I) \times e_i(k)) + F_{tr}^i(k-1),$$

$$F_{tr}^j(k) = K_p^j(k) \times (e_j(k) - e_j(k-1) + (T_s/T_I) \times e_j(k)) + F_{tr}^j(k-1).$$

式中: $e_i(k)$ 和 $e_j(k)$ 为*k*时刻自主车*i*和*j*的期望速度与前一时刻实际速度的偏差; $K_p^i(k)$ 和 $K_p^j(k)$ 为*k*时刻自主车*i*和*j*的比例放大倍数,设计该比例因子的目的是为了让速度能够快速跟随期望值的变化; $T_I$ 为积分时间常数; $F_{tr}^i(k)$ 和 $F_{tr}^j(k)$ 为*k*时刻自主车*i*和*j*的实际输出力。

自主车*i*和*j*在3个阶段的实际加速度、实际速度、实际位移分别为

$$\ddot{x}_{tr}^i(k) = a_i(F_{tr}^i(k) + b_i),$$

$$\ddot{x}_{tr}^j(k) = a_j(F_{tr}^j(k) + b_j).$$

$$v_{tr}^i(k) = v_{tr}^i(k-1) + \ddot{x}_{tr}^i(k-1)T_s,$$

$$v_{tr}^j(k) = v_{tr}^j(k-1) + \ddot{x}_{tr}^j(k-1)T_s,$$

$$x_{tr}^i(k) = x_{tr}^i(k-1) + v_{tr}^i(k-1)T_s,$$

$$x_{tr}^j(k) = x_{tr}^j(k-1) + v_{tr}^j(k-1)T_s.$$

其中第1阶段自主车距离预碰点的距离可以由式(4)得到。

$$d_{tr}^i(k) = d_{tr}^i(k-1) - v_{tr}^i(k-1)T_s,$$

$$d_{tr}^j(k) = d_{tr}^j(k-1) - v_{tr}^j(k-1)T_s. \quad (4)$$

两辆自主车在3个阶段协作的控制如图3点虚线框内所示。文中虽只给出自主车*i*安全系数值大于1的情况,但两自主车的协作机制相同,因此若自主车*j*的安全系数大于1,只需将右上角的序号对换即可。

#### 4 仿真结果与分析

表1列出了相关自主车的仿真参数以及给定的

初始条件。

表1 自主车实验参数与初始条件

Table 1 Parameters and initial conditions of autonomous vehicles

参数与条件	自主车 <i>i</i>	自主车 <i>j</i>
轮胎转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	1	1
自主车总质量/kg	1 200	1 200
轮胎半径/m	0.3	0.3
滚动阻尼系数	0.1	0.1
重力加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	9.8	9.8
最大牵引力/N	14 098	14 098
最大制动力/N	3 000	3 000
初始位移/m	-40	-50
初始速度/(m·s <sup>-1</sup> )	5	7
占优调节因子	1.5	0.5
经验系数α	1	1
经验系数β	10 000	10 000
最大期望速度/(m·s <sup>-1</sup> )	16	16
最小期望速度/(m·s <sup>-1</sup> )	2	2

根据表1所给出的汽车参数,以0.1 s为步长,对两自主车协作避碰进行仿真。根据式(2)给出的简化动力学模型,计算常数*a*和*b*。为简化仿真过程,假设2辆自主车直线行驶,在自主车转弯经过冲突域时,纵向速度大小不变,且能够瞬时右转向90°。

图4所示为2辆自主车的时间-位移空间曲线。自主车*i*一直行驶在*X*轴方向,因此,自主车*i*的时间-位移曲线一直在空间曲线的*t-X*方向位移平面上,如图中左上至右下曲线所示。自主车*j*首先行驶在*Y*轴方向,在两车完成避碰后,调整速度继续在*Y*轴方向行驶,最后进入并线车道(*X*轴方向)。因此,自主车*j*的时间位移曲线首先在*t-Y*方向位移平面上,如图中左下至右上曲线所示,9.7 s后自主车*j*进入*t-X*方向位移平面,这也是自主车*j*的曲线在最后0.3 s在*t-X*方向位移平面上的原因。

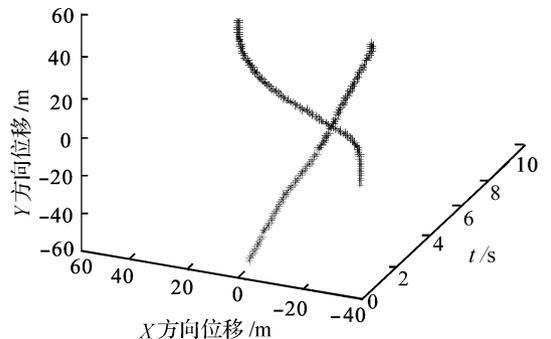


图4 自主车*i*和自主车*j*的时间-位移空间曲线

Fig.4 Time-displacement space curves of vehicle *i* and vehicle *j*

图 5 所示为 2 辆自主车的矢量合成位移,其中矩形区域为第 1~4 s 的虚拟冲突域.合成位移曲线先与 Y 轴相交,表明自主车  $i$  先经过冲突域,进入并线车道,此时两自主车不可能发生碰撞.接下来,2 辆自主车按照 3.2 节给出的控制方法,恢复到协作前各自的速度,待自主车  $j$  驶出冲突域,完成两车的并线.需要指出的是,先到达冲突域的自主车  $i$  在进入冲突域时期望速度会保持不变,自主车  $j$  的期望速度同样如此,因此,两车此时合成位移的斜率很小.待自主车  $i$  完全通过冲突域后,自主车  $i$  减速,自主车  $j$  加速,最终恢复协作前的速度.图 5 的合成位移曲线在 Y 轴左半平面时,合成位移曲线斜率先大后小的原因是,在到达冲突域之前,自主车  $i$  已经达到最大速度并在 PI 控制器作用下,维持在最大速度范围内小幅波动.

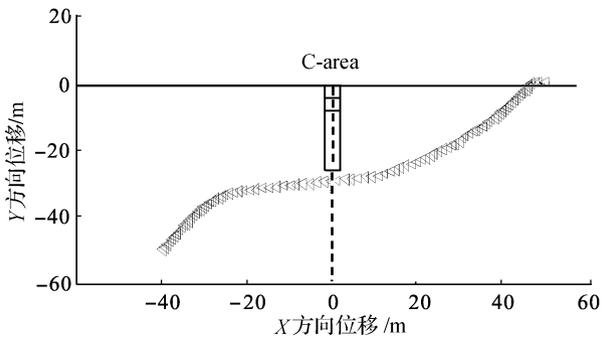


图 5 自主车  $i$  和自主车  $j$  的矢量合成位移  
Fig.5 Vector displacement of vehicle  $i$  and vehicle  $j$

图 6 为自主车  $i$  的期望速度曲线和真实速度曲线,在加速阶段, $i$  的真实速度能够很好地跟随期望速度的快速变化.随着期望速度的不断增加,由于限幅作用,期望速度不再变大,将保持在最大期望速度不变,直至自主车  $i$  驶离冲突域,再减速至原来协作前的速度.但真实速度会在期望速度不再增加时,由于期望输出力的突然变化,实际输出力与期望输出力的差值变大,会导致自主车  $i$  的实际速度出现小幅波动,随着时间推移,由于数字 PI 控制器的调节作用,波动会不断变小.自主车  $i$  驶离冲突域后,PI 控制器使  $i$  的真实速度较快跟随期望速度恢复至协作前速度.

图 7 为自主车  $j$  的期望速度曲线和实际速度曲线,可以看出两车的速度调节机制刚好相反.需要说明的是,在自主车  $i$  进入冲突域前,即 4.4 s 时,自主车  $j$  已经到达最大期望速度,而 4.6 s 时自主车  $i$  才到达最大期望速度,这也是自主车  $i$  和自主车  $j$  期望速度和真实速度的误差在 4.6 s 才开始同步的原因,如图 8 所示.

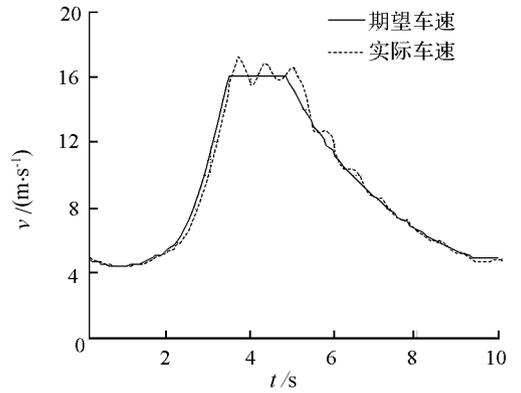


图 6 自主车  $i$  的期望速度和实际速度  
Fig.6 Desired speed and real speed of vehicle  $i$

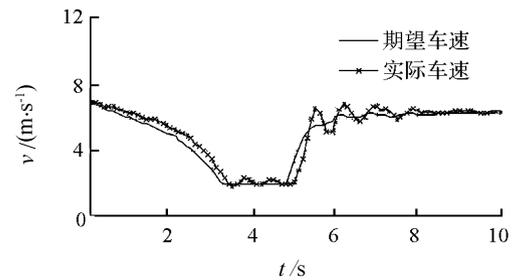


图 7 自主车  $j$  的期望速度和实际速度  
Fig.7 Desired speed and real speed of vehicle  $j$

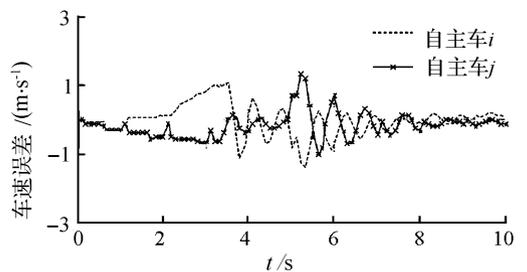


图 8 自主车  $i$  和自主车  $j$  的速度误差  
Fig.8 Speed errors of vehicle  $i$  and vehicle  $j$

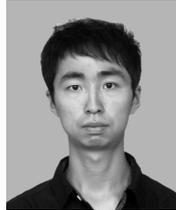
## 5 结束语

本文结合人工势场思想,以安全系数为依据,评价自主车的安全程度,估计自主车辆的期望控制力大小,并根据给出的车辆动力学模型,计算车辆加速度和速度,解决了自主车 T 形路口避碰问题.在多车辆混合系统建模的基础上,将估计的期望车速与反馈的实际车速形成偏差,利用改进的增量型数字 PI 控制器实现自主车纵向车速的准确控制,保证车辆在不停车的基础上实现协作避碰.但本文在克服人工势场法当自主车越靠近冲突域引力越小的不足时,可能会由于经验常数选取的不够合适导致安全系数的估计变化过快,未来考虑通过实验测得适合两车协作的  $\alpha$  和  $\beta$ ,将  $\alpha$  和  $\beta$  以知识库的形式存储,便于两辆自主车协作初始时刻调用.

## 参考文献:

- [1] STEPHANEDES Y J, KWON E, TZAFESTAS S G, et al. Optimal control of nonlinear dynamic transportation systems [C]//Proceedings of the 29th IEEE Conference on Decision and Control. Honolulu, USA, 1990: 1641-1645.
- [2] MICHAEL B, KAI N, BRYAN R. Large-scale multi-agent simulations for transportation applications[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2004, 8(4): 205-221.
- [3] SMAILI C, NAJJAR E, FRANCOIS M E. Multi-sensor fusion method using Bayesian network for precise multi-vehicle localization[C]//Proceedings of the 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Beijing, China, 2008: 906-911.
- [4] LI Li, SONG Jingyan, WANG Feiyue, et al. IVS 05: new developments and research trends for intelligent vehicles [J]. IEEE Intelligent Systems, 2005, 20(4): 10-14.
- [5] 高峰, 王江锋, 施绍友, 等. 基于模糊神经网络的车辆碰撞预警算法[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2006, 27(3): 211-215.  
GAO Feng, WANG Jiangfeng, SHI Shaoyou, et al. Vehicle intelligent collision warning algorithm based on fuzzy neural networks[J]. Journal of Jiangsu University: Nature Science Edition, 2006, 27(3): 211-215.
- [6] DAVID C. Count down to greater safety[J]. ITS International, 2005, 11(2): 1-3.
- [7] RAYMOND J K. Developing a forward collision warning system timing and interface approach by placing drivers in realistic rear-end crash situations [J]. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 2000, 44(20): 308-311.
- [8] VERMA R, VECCHIO D D, FATHY H K. Development of a scaled vehicle with longitudinal dynamics of an HMMWV for an ITS testbed[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2008, 13(1): 46-57.
- [9] VECCHIO D D. A partial order approach to discrete dynamic feedback in a class of hybrid systems [J]. Hybrid Systems; Computer and Control, 2007, 4416: 159-173.
- [10] DESARAJU V, RO H C, YANG M, et al. Partial order techniques for vehicle collision avoidance: application to an autonomous roundabout test-bed [C]//2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Kobe, Japan, 2009: 82-87.
- [11] SCOTT B, ARDA K, MICHAEL V, et al. An indoor intelligent transportation testbed for urban traffic scenarios [C]//Proceedings of the 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. St. Louis, USA, 2009: 721-726.
- [12] VECCHIO D D. Observer-based control of block triangular discrete time hybrid automata on a partial order [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2009, 19(14): 1581-1602.
- [13] MIN G P, MIN C L. Artificial potential field based planning for mobile robots using a virtual obstacle concept [C]//2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Kobe, Japan, 2003: 735-740.
- [14] 王灵艳, 杨挺, 梁海泉. 基于虚拟仪器的增量型 PID 控制系统设计 [J]. 今日电子, 2007(12): 90-92.  
WANG Lingyan, YANG Ting, LIANG Haiquan. The design of increment PID control system based on the virtual instrument [J]. Electronic Products, 2007(12): 90-92.

## 作者简介:



黄维,男,1986年生,硕士研究生,主要研究方向为复杂系统建模、优化与控制。



田彦涛,男,1958年生,教授,博士生导师,博士,中国自动化学会理事、机器人专业委员会常务委员,吉林省自动化学会理事长,吉林省通信学会副理事长,吉林省电机工程学会常务理事,中科院沈阳自动化研究所先进制造技术实验室学术委员会委员,《机器人》杂志编委。主要研究方向为复杂系统建模、优化与控制、机器视觉与模式识别等。近5年,完成国家“863”计划项目1项、国家自然科学基金项目1项、吉林省科技发展计划项目3项、国家“863”智能机器人网实验室基金项目1项;目前负责承担国家“863”计划和国家自然科学基金等国家级科研项目3项、吉林省科技发展计划重点项目3项。拔尖创新人才。发表学术论文70余篇。



樊泽华,男,1989年生,硕士研究生,主要研究方向为复杂系统建模、优化与控制。