

文章编号:1671-4229(2023)06-0093-08

基于汽车纵向动力学的防追尾控制方法设计

王浩远, 唐睿智*, 刘嘉睿, 张苑晴, 周晓阳

(广州大学 机械与电气工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 为避免汽车发生追尾事故,设计了一种基于汽车纵向动力学模型的防追尾控制方法。①通过分析汽车的制动过程,建立安全距离的数学模型,得到动态的预警距离和危险距离;②为使汽车保持安全距离,基于汽车纵向动力学建立了系统的整体模型,利用李雅普诺夫稳定性理论,结合动态的预警距离和危险距离,使用反步法设计控制方法,使得系统渐进稳定;③通过实验验证得出结论,所设计的控制方法可使汽车较好地跟踪期望速度以及期望位移,并且自车在制动过程中与前车的相对距离始终大于危险距离,保证了两车的安全,从而实现汽车防追尾的设计目标。

关键词: 汽车防追尾控制; 安全距离; 汽车纵向动力学; 反步设计法

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Design of a rear collision prevention control method based on vehicle longitudinal dynamics

WANG Hao-yuan, TANG Rui-zhi*, LIU Jia-rui, ZHANG Yuan-qing, ZHOU Xiao-yang

(School of Mechanical and Electric Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to avoid rear-end accidents of cars, an anti-rear-end control method based on the longitudinal dynamics model of cars is designed. Firstly, by analyzing the braking process of a vehicle, a mathematical model of safety distance is established to obtain a dynamic warning distance and danger distance. Secondly, in order to maintain a safe distance for vehicles, an overall model of the system is established based on vehicle longitudinal dynamics. Using Lyapunov stability theory, combined with dynamic warning distance and danger distance, a control method is designed using the Back-stepping method to make the system gradually stable. Finally, through simulation, the following conclusions were drawn: The designed control method can enable the vehicle to better track the expected speed and expected displacement, and the relative distance between the vehicle and the vehicle in front is always greater than the dangerous distance during braking, ensuring the safety of the two vehicles, and achieving the design goal of vehicle rear-end collision prevention.

Key words: vehicle rear collision prevention control; safety distance; vehicle longitudinal dynamics; back-stepping design method

随着汽车大量进入人们的日常生活,汽车行驶安全越来越受到关注和重视。由于车辆数量的

增多,道路交通事故的发生次数也逐年上升,而其中大部分交通事故是车辆追尾事故引起的^[1-2]。

收稿日期: 2023-04-07; 修回日期: 2023-09-07

作者简介: 王浩远(2000—),男,硕士研究生. E-mail: wanghystu@163.com

* 通信作者. E-mail: meetanguizhi@gzhu.edu.cn

引文格式: 王浩远, 唐睿智, 刘嘉睿, 等. 基于汽车纵向动力学的防追尾控制方法设计[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2023, 22(6): 93-100.

造成公路交通事故的主要原因之一是驾驶员不能对车辆之间的安全距离做出准确判断^[3-4],当驾驶员发现危险时,车辆之间的距离已不足以让后车进行安全制动,从而导致追尾事故。

国内外许多学者和研究机构都对汽车碰撞预警算法进行了研究。文献[5]提出一种安全时间算法,通过比较安全时间与碰撞时间的大小进行车辆的预警。考虑到这种算法对驾驶员的适应性不足。文献[6]提出了一种适应驾驶员特性的追尾报警算法,能在一定程度上适应不同的驾驶员类型。文献[7]对高速公路车辆防碰撞预警进行了研究,基于 ZigBee 通信技术设计了车辆防碰撞预警系统。文献[8]设计了一种防追尾预警系统,利用最小安全距离模型实现车辆防追尾的预警。文献[9]将安全距离分为提醒报警距离和危险报警距离,以此设计了根据不同的危险级别实行分级预警的预警系统。文献[10]基于 AT89S52,通过对前方车辆状态进行实时检测,从而在自车即将危险时提醒驾驶员采取制动措施。

然而,以上的预警防追尾方法都有一定的局限性:若系统的预警警报已发出,而驾驶员没有采取相应的制动措施来避免事故,或者驾驶员做出误操作,如将油门踏板当作制动踏板,这不仅不能防止追尾事故的发生,还有可能引起更严重的交通事故。美国国家高速公路安全委员会有研究表明,因驾驶员过失造成的交通事故占比约为 90%,而因汽车故障导致的交通事故占比不足 4%^[11]。由此可见,汽车防追尾不能完全依靠驾驶员进行操作。

为改进上述方案中的不足,有学者提出在汽车上安装自动制动系统。此方案通常是系统将检测到的车间距与安全距离进行比较,当车间距小于安全距离时自车自动减速,无需驾驶员参与。针对安全距离的计算,许多学者提出了相应的方法。文献[12-13]介绍了一种报警算法,通过统计道路上汽车的实际距离,从中提取出最具代表性的距离作为汽车实际行驶时的安全距离,即固定距离保持法。但是此方法对于不同的汽车工况不能完全适用。

针对不同的汽车行驶工况,文献[14]通过引入人工神经网络对车辆实时工况进行识别与预测,以此建立安全距离模型。文献[15]在固定距离保持法的基础上,改进了安全距离的数学模型,

提出了一种多级安全报警机制,根据道路的不同采取不同的安全距离。这种方法相对于固定距离保持法的适用性更广^[16]。文献[17]提出一种车间时距算法,通过采取不同的车头时距,计算出不同的安全距离,但是这种方法不适用于前方有静止障碍物的情况。文献[18]通过信息传输延时、GPS 误差、路面摩擦系数 3 个方面推导出两车最小安全距离,以此为基础设计了车辆防追尾预警刹车系统。文献[19]考虑了不同驾驶员反应时间的差异性,建立考虑驾驶员差异的安全距离模型。但是上述各方法计算得到的安全距离都是静态的值,存在一定的局限性,因为安全距离随前车与后车的初始速度及路面附着系数的变化而变化,前车行驶情况的不同,安全距离也不同。

在评价防追尾的效果上,传统的防追尾预警方案是将设定的安全距离与两车相对距离进行比较,由于安全距离的变化,导致此评价方案在准确性、可靠性方面略显不足。

本文设计的防追尾控制方法基于动态的预警距离与危险距离,使得自车与前车的相对距离始终大于危险距离,且系统能够适应不同的驾驶环境,无需完全依靠驾驶员操作,保证了两车的安全。

1 数学模型的建立

通过上述分析,本文设计的防追尾系统原理如下:①由自车的车载传感器测得自车与前车的相对距离以及两车的速度;②通过危险距离和预警距离计算模块计算出动态的危险距离和预警距离;③将以上各参数值输入自车的动力学模型,通过所设计的控制方法控制自车车速,从而使得两车的相对距离大于危险距离。系统的原理框图如图 1 所示。

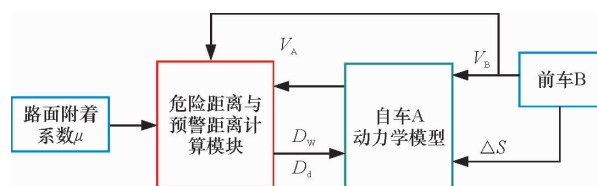


图 1 系统原理框图

Fig. 1 System principle block diagram

基于上述原理,本文所设计的控制方法思路如下:①通过车载传感器测得所需参数,进行系统参数的初始化;②计算两车的相对距离以及预警

距离,比较两者大小,若相对距离大于预警距离则安全,反之则需要进一步计算危险距离,将危险距离与相对距离进行比较,若相对距离大于危险距离则为安全,反之,系统进行制动;③构建误差系统,选取适宜的李雅普诺夫函数对系统的输出进行约束,从而得到虚拟控制律,进一步得到汽车的轮胎纵向力;④通过控制轮胎纵向力控制制动系统,从而控制自车车速,保持与前车的相对距离,实现汽车自动制动,从而达到防追尾的设计目标。系统方法流程图如图 2 所示。

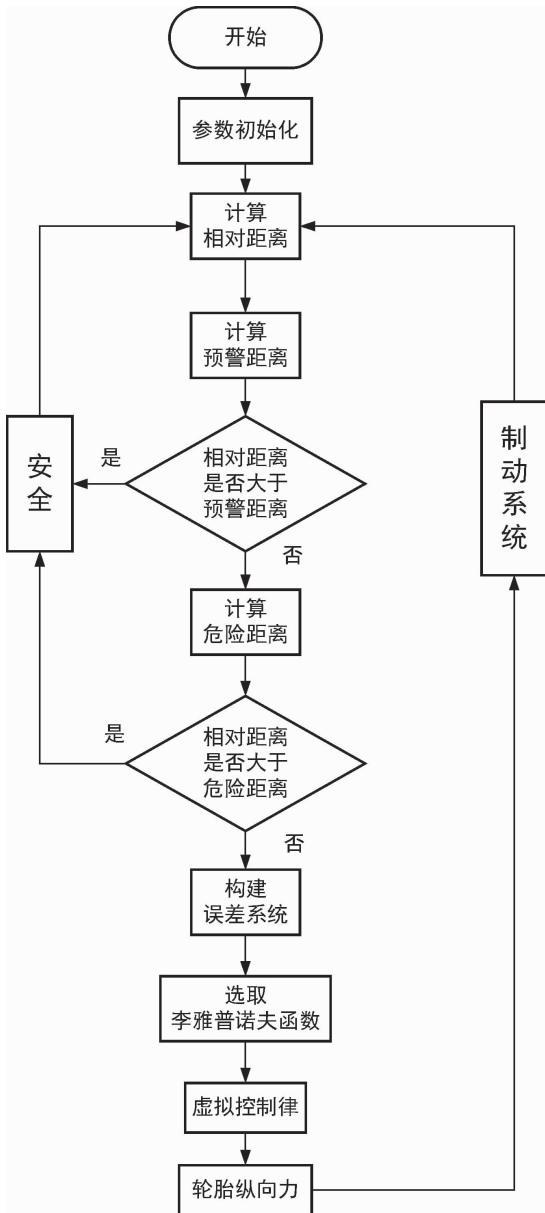


图 2 系统方法流程图

Fig. 2 System method flowchart

根据上述的分析方法,本节分为以下 3 个部

分:汽车制动过程分析、安全距离的数学模型和预警距离和危险距离。通过分析汽车的制动过程,得到各个制动阶段汽车的制动距离;将前车的状态分为 4 种不同情况进行讨论,由此推导出安全距离的数学模型;基于上述分析与推导,得到危险距离与预警距离的数学模型。

1.1 汽车制动过程分析

在推导安全距离的数学模型之前,要先对汽车的制动过程进行分析^[20]。在汽车制动过程中,汽车制动加速度 a 、速度 v 、制动距离 S 与时间 t 之间的关系如图 3 ~ 图 5 所示:

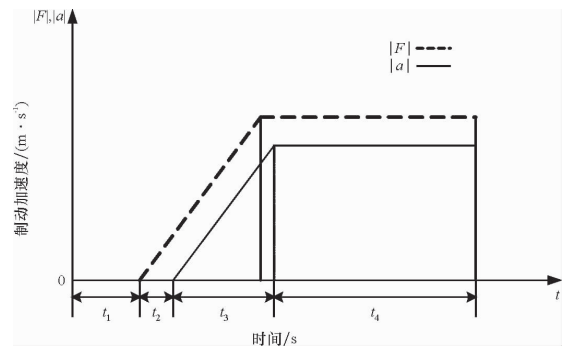


图 3 汽车制动加速度

Fig. 3 Automobile braking acceleration

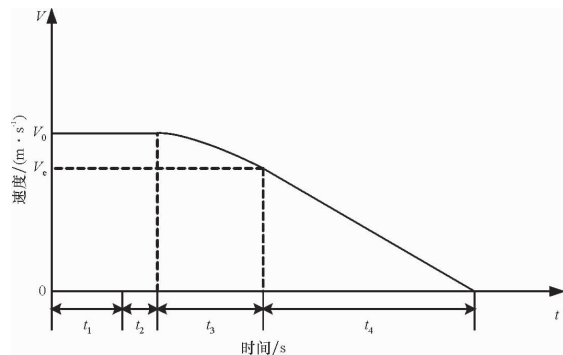


图 4 汽车速度

Fig. 4 Automobile velocity

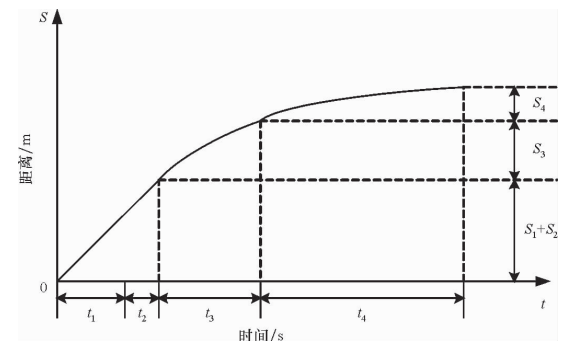


图 5 制动距离

Fig. 5 Braking distance

在上述图中,时间 t 被分为 4 段^[21],分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 。其中, t_1 表示驾驶员的反应时间,即从驾驶员发现前方有危险到驾驶员踩下制动踏板之间的时间; t_2 表示制动系统调节时间,即从驾驶员的脚踩下制动踏板到制动器在严格意义上开始工作之间的时间; t_3 表示制动加速度增长时间,即汽车制动加速度从零增长至最大制动加速度之间的时间; t_4 表示持续制动时间,即汽车以最大制动加速度进行匀减速运动至停下所用时间。

在整个制动过程中,每段时间分别对应于一段制动距离,分别由 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 表示。因此,驾驶员察觉到危险至停车,行驶过的最小距离为

$$S_{\min} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4。 \quad (1)$$

若要避免汽车发生追尾事故,可改变车道和及时制动^[22-24]。由于本文研究的是汽车纵向行驶的情况,因此只考虑汽车制动。在理想情况下,忽略相邻车道的的影响,汽车制动前后的位置关系如图 6 所示。

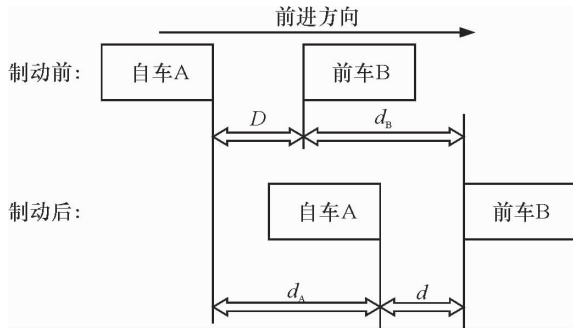


图 6 汽车制动后两车位置关系示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the position relationship between two vehicles after braking

根据图 6 可知,安全距离为

$$D = d + d_A - d_B, \quad (2)$$

其中, d_A 与 d_B 分别是自车 A 与前车 B 行驶的距离, d 为制动后两车的相对距离, D 为安全距离。

基于以上对汽车制动过程的分析,设汽车初速度为 v_0 ,最大制动加速度为 a_{\max} ,经过推导可以得到汽车在各个制动阶段的行驶距离。

则有

$$S_1 + S_2 = v_0 t_1 + v_0 t_2, \quad (3)$$

$$S_3 = v_0 t_3 - \frac{1}{6} a_{\max} t_3^2, \quad (4)$$

$$S_4 = \frac{v_2^2 - v_1^2}{-2a_{\max}} = \frac{v_0^2}{2a_{\max}} - \frac{1}{2} v_0 t_3 + \frac{1}{8} a_{\max} t_3^2 - \frac{v_2^2}{2a_{\max}}。 \quad (5)$$

由式(1),汽车制动过程所行驶的总路程为

$$S_{\min} = v_0 (t_1 + t_2 + \frac{t_3}{2}) + \frac{v_0^2}{2a_{\max}} - \frac{1}{24} a_{\max} t_3^2 - \frac{v_2^2}{2a_{\max}}。 \quad (6)$$

1.2 安全距离的数学模型

根据式(2)设 a_A 、 a_B 分别为自车 A 与前车 B 的最大制动加速度。 v_0 、 v_0' 分别为自车 A 与前车 B 的初始速度。由于前车情况不同,导致安全距离也不同。一般可以把前车的状态分为 4 种情况,即静止、匀速、加速、减速^[25]。但是当前车减速时,两车的安全距离将会是 3 种里面最小的。因此,不妨将安全距离设为最小,即前车处于减速状态,这样不管前方的车辆是什么运行状态,系统都能避免追尾事故的发生^[26]。

当前车减速时,可以分为两种情况讨论:

假设前车与自车一起减速,若自车 A 的速度先减少至零,由于前车 B 仍在行驶,故此情形不会发生追尾事故;

若前车 B 的速度先减少至零,则此情形有可能发生追尾。如果当自车 A 的速度也减少至零时,两车仍然没有碰撞,那么就不会发生追尾事故。

根据上述分析,则自车 A 的制动距离为

$$d_A = v_0 (t_1 + t_2 + \frac{t_3}{2}) + \frac{v_0^2}{2a_A} - \frac{1}{24} a_A t_3^2。$$

由于 A、B 两车的减速过程会存在差异,为了简化模型以及简便计算,本文不考虑前车 B 的反应时间 t_1 与制动系统调节时间 t_2 ,那么前车的制动距离为

$$d_B = \frac{v_0' t_3}{2} + \frac{v_0'^2}{2a_B} - \frac{1}{24} a_B t_3^2。 \quad (8)$$

由式(2)可得,安全距离为

$$D = d + v_0 (t_1 + t_2) + \frac{(v_0 - v_0') t_3}{2} + \frac{v_0^2}{2a_A} - \frac{v_0'^2}{2a_B} - \frac{(a_A - a_B) t_3^2}{24}。 \quad (9)$$

1.3 预警距离和危险距离

预警距离是用于判断预警模块是否发出警报以提醒驾驶员进行制动的距离,用 D_w 表示;危险距离是用于判断自动制动系统是否制动的距离,用 D_d 表示。

由上文分析可知,汽车的整个制动减速过程可分为 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 4 个阶段,而预警距离与危险距离的计算则由这几个阶段来决定。预警距离考虑

了驾驶员反应时间 t_1 , 而危险距离则不考虑 t_1 , 因此, 危险距离与预警距离的表达式为

$$D_d = d + v_0 t_2 + \frac{(v_0 - v_0') t_3}{2} + \frac{v_0^2}{2a_A} - \frac{v_0'^2}{2a_B} - \frac{(a_A - a_B) t_3^2}{24}, \quad (10)$$

$$D_w = D_d + v_0 t_1. \quad (11)$$

2 防追尾控制方法的设计

为设计汽车防追尾控制方法, 本节分为两个部分: 汽车纵向动力学建模和控制方法的设计与稳定性分析。

2.1 汽车纵向动力学建模

根据牛顿第二定律, 汽车的纵向动力学模型可以表示为如下形式^[27]:

$$m\ddot{x} = F_x - F_f - F_w - F_\theta, \quad (12)$$

其中, x 为汽车的位移; m 为汽车的质量; F_x 为汽车轮胎的纵向力; $F_f = \mu mg \cos \theta$ 为汽车受到的地面摩擦力, μ 为地面纵向附着系数, θ 为地面坡度角 (取上坡为正, 下坡为负), g 为重力加速度; $F_{wind} = 0.5\rho C_d A (V_x + V_{wind})^2$ 为汽车受到的空气阻力, ρ 为空气密度, C_d 为汽车空气阻力系数, A 代表汽车在运动方向上的投影面积, 由车辆的高度和宽度计算得出, V_x 为汽车的纵向速度, V_{wind} 为风速, 一般可忽略不计; $F_\theta = mg \sin \theta$ 为汽车受到的坡道阻力。

可以得到

$$m\ddot{x} = F_x - \frac{1}{2}\rho C_d A \dot{x}^2 - \mu mg \cos \theta - mg \sin \theta. \quad (13)$$

2.2 控制方法的设计与稳定性分析

取状态变量为 $x_1 = x, x_2 = \dot{x}$, 系统输入 $u = F_x$, 根据式(13)可以得到系统的状态空间表达式如下:

$$\dot{X} = \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{m}u - \frac{\rho C_d A}{2m}x_1^2 - (\mu g \cos \theta + g \sin \theta). \end{cases} \quad (14)$$

为简便起见, 不妨设 $C = -\rho C_d A / 2m, D = \mu g \cos \theta + g \sin \theta$, 于是有

$$\dot{X} = \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{m}u + Cx_1^2 - D. \end{cases} \quad (15)$$

步骤1: 设 x_d 为汽车期望位移, 则汽车位移误差为

$$e = x_1 - x_d. \quad (16)$$

定义虚拟控制律 \bar{u} , 表示实际控制与虚拟控制之差, 设 x_2 为虚拟控制变量, δ 为误差变量, 则

$$\delta = x_2 - \bar{u}. \quad (17)$$

于是, 构建系统的误差系统如下:

$$\begin{cases} \dot{e} = x_1 - \dot{x}_d, \\ \dot{\delta} = x_2 - \dot{\bar{u}}. \end{cases} \quad (18)$$

不妨选取正定的李雅普诺夫函数

$$V_1(e) = \frac{1}{2}e^2, \quad (19)$$

则

$$\dot{V}_1(e) = e(x_2 - \dot{x}_d) = e(\delta + \bar{u} - \dot{x}_d). \quad (20)$$

为了使得系统稳定, 不妨选取如下的虚拟控制律 \bar{u} :

$$\bar{u} = \dot{x}_d - k_1 e, \quad (21)$$

$$\dot{\bar{u}} = \ddot{x}_d - k_1(x_2 - \dot{x}_d), \quad (22)$$

其中, $k_1 > 0$ 。

于是有

$$\dot{V}_1 = -k_1 e^2 - e\delta. \quad (23)$$

显然, 若 $\delta = 0$, 则 $\dot{V}_1 = -k_1 e^2$, e 将渐进收敛于 0。下一步的目标即为使 e 收敛于 0。

步骤2: 推导 δ 的动态特性。根据式(15)和式(18)可得

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \dot{x}_2 - \dot{\bar{u}}, \\ Cx_2^2 - D + \frac{1}{m}u - \ddot{x}_d - k_1 \dot{e}. \end{aligned} \quad (24)$$

上式出现了实际的控制输入 u 。我们的设计目标是使得 e, δ 收敛至 0, 因此, 可以选取李雅普诺夫函数为

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}\delta^2, \quad (25)$$

则

$$\dot{V}_2 = -k_1 e^2 + \delta(\delta - e). \quad (26)$$

为使 V_2 是负定的, 设计控制输入如下:

$$u = me + m\ddot{x}_d + mk_1(x_2 - \dot{x}_d) - mCx_2^2 + mD + mk_2\delta, \quad (27)$$

其中, $k_1 > 0, k_2 > 0$, 其余量均为已知,

则

$$\dot{V}_2 = -k_1 e^2 - k_2 \delta^2. \quad (28)$$

由于 $k_1 > 0, k_2 > 0$, 因此, V_2 是负定的, 根据李雅普诺夫稳定性理论, 系统是渐进稳定的。

至此, 控制律 u 的设计已完成。通过控制律

u , 可以控制自车轮胎的纵向力, 从而控制自车的速度, 使得自车与前车的相对距离大于危险距离, 实现汽车的纵向防追尾的设计目标。

3 实验验证与结果分析

本节即将通过以下两个实验以验证上述分析与设计: 汽车纵向位移与速度跟踪实验和汽车纵向防追尾实验。

3.1 汽车纵向位移与速度跟踪实验

设置初始参数: 自车速度为 5 m/s, 期望的汽车速度符合幅值为 20, 周期为 8 s 的正弦函数。取空气密度 $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$, 汽车空气阻力系数 $C_d = 0.28$, 汽车运动方向的投影面积 $A = 2 \text{ m}^2$, 汽车质量 $m = 1500 \text{ kg}$, 地面纵向附着系数 $\mu = 0.8$, 地面坡度角 $\theta = 5^\circ$, 设计参数 $k_1 = k_2 = 1$ 。

使用 MATLAB/Simulink 搭建系统模型进行实验, 结果如图 7 ~ 图 9 所示。

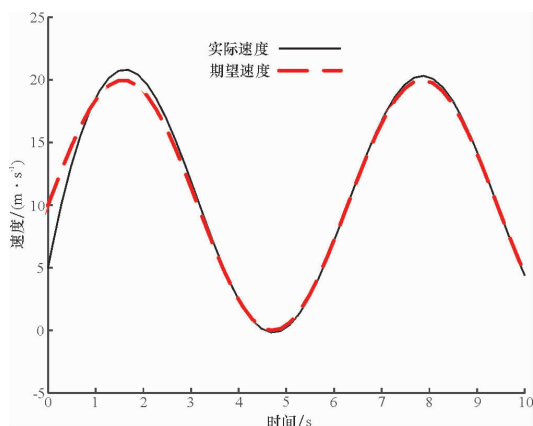


图 7 期望速度跟踪曲线

Fig. 7 Expected velocity tracking curve

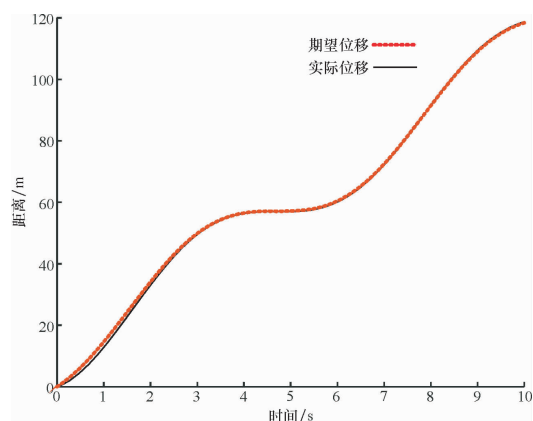


图 8 期望位移跟踪曲线

Fig. 8 Expected displacement tracking curve

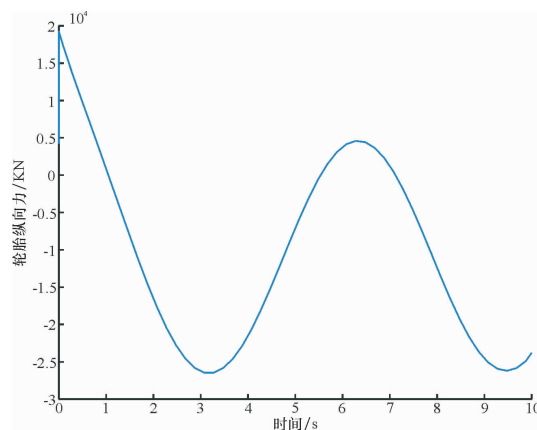


图 9 控制输入曲线

Fig. 9 Control input curve

由图 7 可见, 自车对期望速度有较好的跟踪效果; 由图 8 可见, 自车对期望位移也实现了较好的跟踪效果; 图 9 展示了此过程中汽车纵向力的变化。综上所述, 本文设计的控制方法可以使自车跟踪期望速度与期望位移。

3.2 汽车纵向防追尾实验

设前车与自车速度都为 30 m/s, 两车初始间距为 100 m, 在某时刻, 前车突然减速至停止。

其中, 参数设置: $t_1 = 1 \text{ s}$, $t_2 = 1 \text{ s}$, $t_3 = 0.7 \text{ s}$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 最小车间距 $d = 5 \text{ m}$, 空气密度 $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$, 汽车空气阻力系数 $C_d = 0.28$, 汽车运动方向的投影面积 $A = 2 \text{ m}^2$, 汽车质量 $m = 1500 \text{ kg}$, 地面纵向附着系数 $\mu = 0.8$, 地面坡度角 $\theta = 5^\circ$, 设计参数 $k_1 = 0.5$, $k_2 = 0.4$ 。

使用 MATLAB/Simulink 搭建系统模型进行实验, 结果如图 10 ~ 图 12 所示。

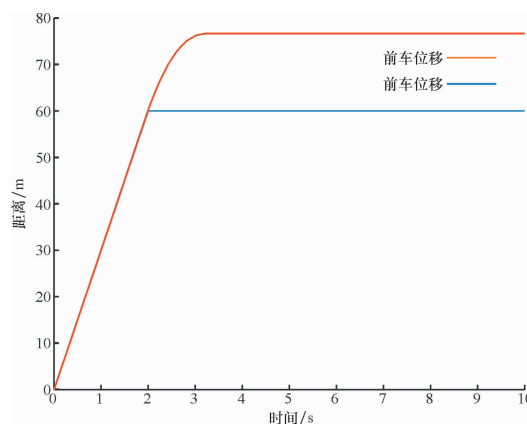


图 10 自车与前车位移曲线

Fig. 10 Displacement curve between self-driving and front-driving

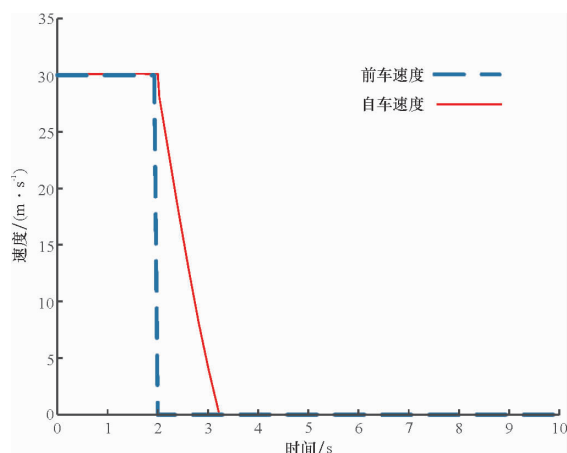


图 11 自车与前车速度曲线

Fig. 11 Velocity curve of self-driving and front-driving

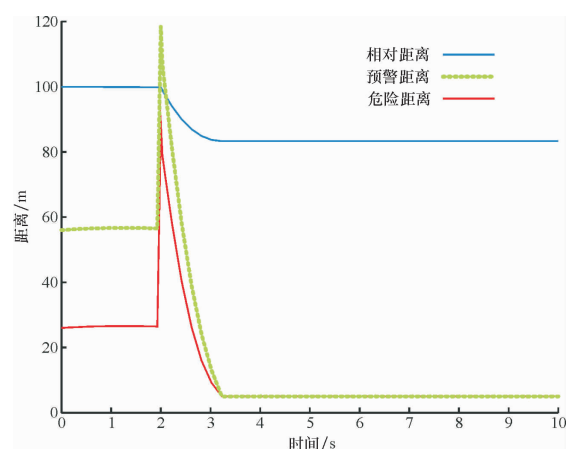


图 12 危险距离与预警距离曲线

Fig. 12 Hazard distance and warning distance

由图 10 可见,自车于 3 s 左右停止行驶,最大

位移约为 78 m;由图 11 可知,自车在前车制动后约 1 s 停止;由图 12 可见,当前车停止时,预警距离与危险距离会突然增至最大值。在这一时刻,由于预警距离大于相对距离,相对距离大于危险距离,预警器发出警报,但车辆仍处于安全状态。又由于两车的相对距离始终都大于危险距离,因此,即使前车突然停止,自车也不会追尾。综上所述,本文所设计的控制方法可以较好地实现汽车防追尾这一功能。

4 结 论

为避免汽车发生追尾事故,设计了一种基于汽车纵向动力学模型的防追尾控制方法。本文的创新之处在于:所设计的防追尾控制方法基于动态的预警距离与危险距离,使自车与前车的相对距离始终大于危险距离,且系统能够适应不同的驾驶环境,无需完全依靠驾驶员操作,保证了两车的安全。本文的控制方法思路如下:①建立安全距离的数学模型,得到动态的预警距离和危险距离;②基于汽车纵向动力学建立了系统的整体模型,利用李雅普诺夫稳定性理论,使用反步法设计控制方法,使得系统渐进稳定;③通过实验验证,得出所设计的控制方法可以使汽车较好地跟踪期望速度以及期望位移,并且自车在制动过程中与前车的相对距离始终大于危险距离,保证了两车的安全,可以实现汽车防追尾的设计目标。

参考文献:

- [1] 陈龙,邹凯,蔡英凤,等. 基于 NMPC 的智能汽车纵横向综合轨迹跟踪控制[J]. 汽车工程,2021,43(2):153-161.
- [2] 和志勇,李健颖. 智能网联汽车(ICV)技术的发展现状及趋势[J]. 农机使用与维修,2022(9):63-65.
- [3] 张弛,顾平林. 汽车防追尾超声波探测模拟装置设计[J]. 公路与汽运,2022(4):7-10.
- [4] 潘妍睿,刘秀,李若琳,等. 基于多传感器的高速公路防碰撞预警系统[J]. 山西建筑,2020,46(7):122-123.
- [5] Paden B, Cap M, Yong S Z, et al. A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2016, 1(1):33-55.
- [6] 薛晴婉. 基于驾驶仿真的驾驶员追尾避让行为特性及不同预警方式功效研究[D]. 北京:北京交通大学,2019.
- [7] Patnayak S, Swain A, Das M. Advance anti-collision device for vehicles using GPS and Zigbee. [J]. Innovations in Soft Computing and Information Technology, 2019, 32(7):25-31.
- [8] 周磊,王春娥,吕启文,等. 一种基于 ZigBee 的防追尾预警系统[J]. 盐城工学院学报(自然科学版),2020,33(4):67-71.
- [9] 张弛,高权. 汽车防追尾报警装置的设计与仿真[J]. 南京工程学院学报(自然科学版),2021,19(4):24-30.
- [10] 李帆. 新能源汽车防追尾预警刹车系统的设计与实现[J]. 微型电脑应用,2020,36(12):167-170.
- [11] Zhang L, Ding H, Shi J, et al. An adaptive backstepping sliding mode controller to improve vehicle maneuverability and stability via torque vectoring control[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(3):2598-2612.

- [12] Guo J, Luo Y, Li K. Adaptive neural-network sliding mode cascade architecture of longitudinal tracking control for unmanned vehicles[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2017,87(4):2497-2510.
- [13] Boulkroune B, Aalst S V, Lehaen K. 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) June 11-14, 2017[C]. Piscataway: IEEE, 2017.
- [14] 刘庄,朱茂桃,徐晓明,等. 基于工况识别的安全距离模型[J]. *科学技术与工程*,2020,20(32):13431-13438.
- [15] 田哲文,刘峰宇,邓亚东,等. 汽车防追尾预警系统安全距离数学模型[J]. *武汉理工大学学报(信息与管理工程版)*, 2009, 31(4): 590-593.
- [16] 王道意,宇仁德,闫兴奎,等. 车辆跟驰模型的发展综述[J]. *山东理工大学学报(自然科版)*,2022,36(5):75-80.
- [17] 刘刚,侯德藻,李克强,等. 汽车主动避撞系统安全报警算法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004(5): 697-700.
- [18] 鲍伟亮,张晓壮,吴轲,等. 车辆防追尾预警刹车系统的设计探讨[J]. *农机使用与维修*,2019,271(3):1-3.
- [19] 李胜琴,杜鹏. 考虑驾驶员差异性的安全距离模型优化[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*,2023,44(3):249-253,261.
- [20] 林亨,方华建,吴冬雁. 基于动态安全距离的 CACC 车辆混合交通流模型[J]. *北京交通大学学报*,2022,46(6):36-42,51.
- [21] 余志生. 汽车理论[M]. 3 版. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [22] 盘朝奉,丁亚强,江浩斌. 基于车辆前方目标运动模型的主动避撞系统的研究[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2018, 32(7): 25-31.
- [23] Ji X W, He X K, Chen L, et al. A vehicle stability control strategy with adaptive neural network sliding mode theory based on system uncertainty approximation[J]. *Vehicle System Dynamics International Journal of Vehicle Mechanics & Mobility*, 2018,56(6):923-946.
- [24] 陈龙,邹凯,蔡英凤,等. 基于 NMPC 的智能汽车纵横向综合轨迹跟踪控制[J]. *汽车工程*,2021,43(2):153-161.
- [25] 牛磊,鲍婷婷,雷绍东. 基于多因素安全距离模型的汽车防撞保护系统设计[J]. *科技创新与应用*,2022,12(34):118-121.
- [26] 周坚卫. 汽车防追尾预警系统的研究与开发[D]. 重庆:重庆交通大学,2018.
- [27] 赵健,杜金朋,朱冰,等. 基于自适应动态滑模控制的智能汽车纵向巡航控制[J]. *汽车工程*, 2022, 44(1): 8-16.

【责任编辑:陈 钢】