

基于五次多项式模型的自主车辆换道轨迹规划^{*}

闫尧¹,李春书¹,唐风敏²

(1.河北工业大学 机械工程学院,天津 300130;

2.中国汽车技术研究中心,天津 300300)

摘要:针对自主车辆换道时对换道轨迹平稳性和效率性的要求,设计了一种基于五次多项式模型的换道轨迹规划方法。建立车辆的五次多项式换道轨迹模型,并为其增加调节参数。以换道轨迹的平均曲率最小和长度最短为目标设计目标函数,同时考虑换道过程中的舒适性和平稳性,以车辆的横向速度、横向加速度和横摆角速度为约束条件,最后采用序列二次规划算法对参数进行优化求解。对换道轨迹进行跟踪仿真试验,仿真结果证明,轨迹规划的结果满足实际状况下的车辆换道要求,验证了换道轨迹的合理性。

关键词:自主车辆;换道轨迹;五次多项式;序列二次规划

中图分类号:U491 文献标识码:A 文章编号:1001-2354(2019)08-0042-06

DOI:10.13841/j.cnki.jxsj.2019.08.007

Lane-changing trajectory planning of the autonomous vehicle based on the quintic polynomial model

YAN Yao¹, LI Chun-shu¹, TANG Feng-min²

(1.School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130;

2.China Automotive Technology & Research Center, Tianjin 300300)

Abstract: In this article, the lane-changing trajectory planning method is worked out based on the quintic polynomial model, in order to ensure that the lane-changing trajectory is stable and efficient when the autonomous vehicle is changing its lane. The quintic polynomial model of the lane-changing trajectory is set up, and the adjustment parameter is added. The target function is identified with the minimum average curvature and the shortest length of the trajectory. With the comfort and stability in the lane-changing process taken into account, the lateral velocity, lateral acceleration and yaw rate of the vehicle serve as the constraints. Then, the optimization algorithm of Sequential Quadratic Programming (SQP) is adopted to optimize and solve the parameters. The lane-changing trajectory is tracked and simulated. The results show that the trajectory planning meets the requirements of the vehicle's lane changing under the actual working conditions, which proves that the lane-changing trajectory is the reasonable.

Key words: autonomous vehicle; lane-changing trajectory; quintic polynomial; sequential quadratic programming

自主车辆技术是一个集通信、检测、控制和计算机等技术为一体的综合技术,通过对自主车辆技术的研究和开发,可以提升道路的安全性,对构建安全交通系统具有重要的科学理论意义和实际应用价值。车道变换行为是日常行车中最常见的驾驶行为之一^[1],车辆换道轨迹的规划是自主车辆能否安全而又高效地完成换道任务的关键,因此对换道轨迹规划的研究逐渐成为自主车辆技术研究的重点。

目前车辆换道轨迹的规划方法主要分为基于搜索

的方法和基于几何的方法^[2]。基于搜索的轨迹规划方法源自机器人学,这种方法首先需要对周围环境进行描述,建立自主车辆的工作空间,之后根据约束条件及需要完成的目标,对轨迹进行搜索获得符合要求的轨迹簇,并选出最优轨迹^[3]。孙浩等^[4]提出了一种同时满足行驶安全与全局性能最优的动态轨迹规划方法,首先在识别周围交通环境的基础上,以简单车辆动力学模型为轨迹发生器建立了车辆行驶的安全搜索空间,之后根据任务目标得出最优轨迹。但是基于搜索的轨

^{*} 收稿日期 2018-06-20,修订日期 2019-02-20

基金项目 国家重点研发计划新能源汽车重点专项资助项目(2017YFB0102500)

迹规划方法大多实时性较差,在自主车辆这种实时性要求较高的场合优势并不明显。

基于几何的轨迹规划通常采用参数化的曲线来描述轨迹,这种方法较为直观、精确,且运算量较小,因此是目前采用的较为广泛的轨迹规划方法。Choi等^[5]利用Bezier曲线对自主车辆路径进行轨迹规划,得到的换道轨迹平滑,过渡平稳且曲率连续,但是并未对Bezier曲线控制点的选取进行分析,也没有考虑车辆的横向加速度限制。李玮等^[6]以四段式车道变换理论为基础,引入B样条理论对传统换道轨迹进行二次规划,给定了车辆换道轨迹的性能评价函数,可以较好地克服传统换道轨迹模型的缺陷,但是仅从轨迹特性上出发,并未考虑横摆角速度等车辆动力学特性。杨志刚等^[7]通过分析传统换道模型的缺陷,提出了一种正弦函数结合等速偏移函数的换道模型,该模型具有平滑性较好的特点,但是该模型以固定车速进行分析,并未考虑不同车速对换道轨迹的影响。Shim等^[8]提出了一种基于六次多项式的轨迹规划方法,但是阶次过高,未知系数较多,计算繁琐,收敛速度较慢。

为了克服上述缺点,文中根据换道过程中对换道轨迹平稳性和效率性的要求,提出了一种基于五次多项式的换道轨迹规划方法,以换道过程中的平均曲率最小和长度最短作为目标函数,以车辆的横向速度、横向加速度和横摆角速度为约束条件,采用SQP法对不同初始车速下的换道轨迹进行求解,最后在ADAMS/Car中对换道轨迹进行跟踪仿真,验证轨迹的合理性。

1 车辆换道轨迹规划

1.1 运动学模型

在研究车辆的运动轨迹时,由于需要考虑周围的交通环境,通常在惯性坐标系 $O-XY$ 中建立车辆的全局运动学模型。而研究车辆个体时,一般采用车身坐标系。车辆的运动学模型如图1所示,车辆的后轮为驱动轮,提供动力,前轮为转向轮,前轮的转向决定了车辆的运动轨迹。

具体的运动关系为:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = v(t) \cos \theta(t) = \dot{x} \cos \varphi(t) - \dot{y} \sin \varphi(t) \\ \dot{Y}(t) = v(t) \sin \theta(t) = \dot{y} \cos \varphi(t) + \dot{x} \sin \varphi(t) \\ \dot{\varphi}(t) = \dot{x} \tan \delta(t) / l \end{cases} \quad (1)$$

式中: l ——车辆轴距;

$(X(t), Y(t))$ ——车辆质心的坐标;

\dot{x}, \dot{y} ——车身坐标系下的纵向速度和横向速度;

θ ——车身的航向角;

φ ——车身的横摆角;

δ ——前轮转向角。

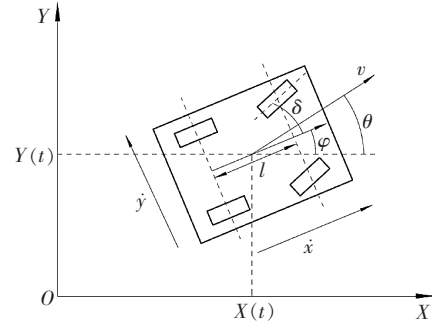


图1 运动学模型

1.2 参数求解

基于多项式的换道轨迹模型只需获取车辆的初始状态及目标状态,即可通过计算获得换道轨迹。文中采用函数 $f(X, Y, u)$ 来描述车辆的换道轨迹,该函数可以清楚地显示车辆从初始位置运动到目标位置的运动学特性,换道轨迹函数为:

$$\begin{cases} X(u) = \sum_{i=0}^5 a_i u^i = a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3 + a_4 u^4 + a_5 u^5 \\ Y(u) = \sum_{i=0}^5 b_i u^i = b_0 + b_1 u + b_2 u^2 + b_3 u^3 + b_4 u^4 + b_5 u^5 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $u=t/t_m$;

t_m ——换道持续时间;

$(X(u), Y(u))$ ——车辆在惯性坐标系下的坐标。

如图2所示,根据车道变换要求设置车辆换道初始位置和目标位置的坐标分别为 (X_A, Y_A) 和 (X_B, Y_B) ,航向角为 θ_A 和 θ_B ,曲率为 k_A 和 k_B 。则有,车辆的换道初始状态为 $(X_A, Y_A, \theta_A, k_A)$,目标状态为 $(X_B, Y_B, \theta_B, k_B)$,所对应的边界条件为:

$$\begin{cases} X(0)=X_A, & X(1)=X_B \\ Y(0)=Y_A, & Y(1)=Y_B \\ \left[\begin{array}{c} \dot{X}(0) \\ \dot{Y}(0) \end{array} \right] / \sqrt{\dot{X}^2(0)+\dot{Y}^2(0)} = \begin{bmatrix} \cos \theta_A \\ \sin \theta_A \end{bmatrix} \\ \left[\begin{array}{c} \dot{X}(1) \\ \dot{Y}(1) \end{array} \right] / \sqrt{\dot{X}^2(1)+\dot{Y}^2(1)} = \begin{bmatrix} \cos \theta_B \\ \sin \theta_B \end{bmatrix} \\ k(0)=k_A, & k(1)=k_B \end{cases} \quad (3)$$

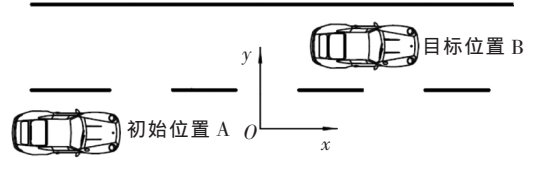


图2 换道示意图

车辆的换道轨迹规划实际上是求解式(2)中的 a_i 和 b_i 的值,因为约束的个数小于求解量的个数,所以该方程组为不定方程组。为了求解此不定方程组,增加 4 个调节参数,即 $[\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4]$,将原方程组转化为系数对调节参数的显性方程组,并对其优化求解确定行驶曲线^[9]。

令 η_1 为车辆在初始位置时的速度 $v(0)$, η_2 为车辆在目标位置时的速度 $v(1)$, η_3 为车辆在初始位置时的加速度, $\eta_4 = 2a_2 \cos \theta_A + 2b_2 \sin \theta_A$, η_4 为车辆在目标位置时的加速度, $\eta_4 = (2a_2 + 6a_3 + 12a_4 + 20a_5) \cos \theta_B + (2b_2 + 6b_3 + 12b_4 + 20b_5) \sin \theta_B$, 对 a_i 和 b_i 进行求解,有:

$$\begin{aligned} a_0 &= X_A \\ a_1 &= \eta_1 \cos \theta_A \\ a_2 &= \frac{1}{2} (\eta_3 \cos \theta_A - \eta_1^2 k_A \sin \theta_A) \\ a_3 &= 10(X_B - X_A) - (6\eta_1 + \frac{3}{2}\eta_3) \cos \theta_A - \\ &\quad (4\eta_2 - \frac{1}{2}\eta_4) \cos \theta_B + \frac{3}{2}\eta_1^2 k_A \sin \theta_A - \frac{1}{2}\eta_2^2 k_B \sin \theta_B \\ a_4 &= -15(X_B - X_A) + (8\eta_1 + \frac{3}{2}\eta_3) \cos \theta_A + \\ &\quad (7\eta_2 - \eta_4) \cos \theta_B - \frac{3}{2}\eta_1^2 k_A \sin \theta_A + \eta_2^2 k_B \sin \theta_B \\ a_5 &= 6(X_B - X_A) - (3\eta_1 + \frac{1}{2}\eta_3) \cos \theta_A - \\ &\quad (3\eta_2 - \frac{1}{2}\eta_4) \cos \theta_B + \frac{1}{2}\eta_1^2 k_A \sin \theta_A - \frac{1}{2}\eta_2^2 k_B \sin \theta_B \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} b_0 &= Y_A \\ b_1 &= \eta_1 \sin \theta_A \\ b_2 &= \frac{1}{2} (\eta_3 \sin \theta_A + \eta_1^2 k_A \cos \theta_A) \\ b_3 &= 10(Y_B - Y_A) - (6\eta_1 + \frac{3}{2}\eta_3) \sin \theta_A - \\ &\quad (4\eta_2 - \frac{1}{2}\eta_4) \sin \theta_B + \frac{3}{2}\eta_1^2 k_A \cos \theta_A + \frac{1}{2}\eta_2^2 k_B \cos \theta_B \\ b_4 &= -15(Y_B - Y_A) + (8\eta_1 + \frac{3}{2}\eta_3) \sin \theta_A + \\ &\quad (7\eta_2 - \eta_4) \sin \theta_B + \frac{3}{2}\eta_1^2 k_A \cos \theta_A - \eta_2^2 k_B \cos \theta_B \\ b_5 &= 6(Y_B - Y_A) - (3\eta_1 + \frac{1}{2}\eta_3) \sin \theta_A - \\ &\quad (3\eta_2 - \frac{1}{2}\eta_4) \sin \theta_B - \frac{1}{2}\eta_1^2 k_A \cos \theta_A + \frac{1}{2}\eta_2^2 k_B \cos \theta_B \end{aligned} \quad (5)$$

1.3 目标函数及约束条件

对换道轨迹模型有影响的参数分别为 $(X_A, Y_A, \theta_A, k_A)$, $(X_B, Y_B, \theta_B, k_B)$ 和 $[\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4]$ 。根据换道任务的要求,可以获得以下参数:

(1) 换道初始位置的航向角 $\theta_A=0$, 换道目标位置的航向角 $\theta_B=0$ 。

(2) 换道初始位置的曲率 $k_A=0$, 换道目标位置的曲率 $k_B=0$ 。

(3) 换道轨迹的起点取 $X_A=0, Y_A=0$ 。

(4) 按照我国的公路建设的行业标准,取横向行驶距离 $k_B=3.75$ m。

由上述公式推导和约束条件,可以得出换道轨迹模型中的未知量为 $[\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, X_B, t_m]$, 参数 η 、纵向距离 X_B 和换道时间 t_m 的选取直接决定着换道轨迹的平稳性、舒适性和换道效率。为了取得更为良好的换道轨迹性能,需要对参数 η 、纵向距离 X_B 和换道总时间 t_m 进行优化求解,下面对轨迹规划的目标函数进行说明。

由于轨迹曲率决定了自主车辆在换道过程中的平稳性,为了保证换道行驶的平稳性,应使换道轨迹的平均曲率 \bar{k} 尽可能小。同时为了提高换道效率,车辆在换道时总是希望以最短的换道轨迹完成换道过程,因此换道轨迹的长度 s 也应尽可能小^[10]。综上所述,为参数优化所设计的目标函数为:

$$J[\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, X_B, t_m] = \min(w_1 \cdot \bar{k} + w_2 \cdot s) \quad (6)$$

式中: s ——换道轨迹长度, $s = \int_0^u \sqrt{(\dot{X}(u))^2 + (\dot{Y}(u))^2} du$;

w_1, w_2 ——权重,由于曲率的变化很小,故取 $w_1=1\ 000, w_2=1$ 。

$$\text{曲率 } k(u) = \left| \frac{\dot{X}(u)\ddot{Y}(u) - \ddot{X}(u)\dot{Y}(u)}{(\dot{X}(u)^2 + \dot{Y}(u)^2)^{3/2}} \right|$$

车辆在执行换道动作时除了受到自身驱动性能的限制,车体也会受到地面摩擦力和轮胎等多方面的影响,同时为了保证换道过程中的乘客舒适性,需要对横向速度 $\dot{Y}(t)$ 和横向加速度 $\ddot{Y}(t)$ 进行约束,具体条件为:

$$\begin{cases} \dot{Y}(0)=0, & \dot{Y}(t_m)=0 \\ \ddot{Y}(0)=0, & \ddot{Y}(t_m)=0 \\ -3\text{ m/s} < \dot{Y}(t) < 3\text{ m/s} \\ -1\text{ m/s}^2 < \ddot{Y}(t) < 1\text{ m/s}^2 \end{cases} \quad (7)$$

车辆在执行行驶任务时,需要同时考虑自身的稳定性。车辆的横摆角速度是车辆绕车身坐标系的垂向轴转动的角速度,是反映车辆横向稳定性的主要指标^[11]。由于车辆在执行换道任务时的横向速度 \dot{y} 一般远小于纵向速度 \dot{x} , 车辆的质心侧偏角近似等于零,因此车辆的横摆角可以近似地表示为:

$$\varphi(t) = \arctan(\dot{Y}(t)/\dot{X}(t)) \quad (8)$$

对横摆角求导可以求得车辆的横摆角速度,对车辆执行换道任务时的横摆角速度 $\dot{\varphi}$ 约束条件为:

$$-0.15\text{ rad/s} < \dot{\varphi}(t) < 0.15\text{ rad/s} \quad (9)$$

2 仿真分析

2.1 SQP 算法原理

上述目标函数是典型的非线性规划求解问题,可以通过序列二次规划算法(SQP)进行求解。SQP 算法将一个复杂的非线性最优化问题转变为在迭代点处用二次规划近似,前者称为原问题,后者称为子问题,通过求解二次规划子问题获取一个新的解点,然后再将原问题在获得的解点上同样利用二次规划近似并求解^[2]。具体过程如下:

对于一个含有约束的非线性规划问题,有如下形式:

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{x}) \\ g_i(\mathbf{x})=0 & (i=1,2,\dots,m_e) \\ g_i(\mathbf{x})\leq 0 & (i=m_e+1,\dots,m) \end{cases} \quad (10)$$

式中: \mathbf{x} ——待优化向量, $\mathbf{x}=[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]$ 。

当 $i=1,2,\dots,m_e$ 时, $g_i(\mathbf{x})$ 为等式约束,当 $i=m_e+1,\dots,m$ 时, $g_i(\mathbf{x})$ 为不等式约束。

该算法通过以下 Lagrange 函数的二次近似求解子问题:

$$L(\mathbf{x},\lambda)=f(\mathbf{x})+\sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(\mathbf{x}) \quad (11)$$

式中: λ_i ——Lagrange 因子。

通过线性化非线性约束条件后可以得到 QP 子问题,其目标函数为:

$$\min_{\mathbf{d} \in \mathbf{R}^n} \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{H}_k \mathbf{d} + (\nabla f(\mathbf{x}_k))^T \mathbf{d} \quad (12)$$

约束为:

$$\begin{cases} (\nabla g_i(\mathbf{x}_k))^T \mathbf{d} + g_i(\mathbf{x}_k) = 0 & (i=1,2,\dots,m_e) \\ (\nabla g_i(\mathbf{x}_k))^T \mathbf{d} + g_i(\mathbf{x}_k) \leq 0 & (i=m_e+1,\dots,m) \end{cases} \quad (13)$$

式中: \mathbf{d} ——全局搜索变量;

∇ ——梯度;

\mathbf{H}_k ——Lagrange 函数的 Hessian 矩阵的正定拟牛顿近似值。

通过稠密半正定牛顿近似法进行计算,式(12)可以通过任何 QP 算法求解,得到的解在新的迭代方程中:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + a_k \mathbf{d}_k \quad (14)$$

式中: \mathbf{d}_k —— \mathbf{x}_k 指向 \mathbf{x}_{k+1} 的一个向量;

a_k ——标量步长,通过合适的线性搜索过程来确定,从而使得某一指标函数得到足够的减小量。

SQP 算法是目前公认的求解约束非线性优化问题的最有效方法之一,与其他算法相比,SQP 算法的收敛性好、计算效率高、边界搜索能力强,因此文中选择 SQP 算法对参数进行优化。

2.2 换道轨迹求解

轨迹规划采用的微机环境:CPU 为 3.70 GHz/Core i3-4170,操作系统为 Windows 7,软件环境为 MATLAB 2017a。为缩短轨迹规划计算的时间,同时使换道轨迹具有对称性,且初始和终止时刻的加速度为零,编写目标函数时,令 $\eta_1=\eta_2, \eta_3=\eta_4=0$,这样原有的 6 个参数简化为 3 个参数。《中华人民共和国道路交通安全法实施条例》中规定城市环境中同方向划有 2 条以上机动车道的道路最高限速为 70 km/h,参考此规定,令车辆分别以 10,15,20 m/s 的纵向初始车速执行换道,优化求解结果如表 1 所示。

表 1 求解结果

初始纵向车速 v_0 /(m/s)	η_1	η_2	η_3	η_4	X_B /m	t_m /s	曲率平均值/ k	轨迹长度/m	迭代时间/s
10	51.342	51.342	0	0	46.824	5.134	0.005 5	47.051	5.63
15	73.423	73.424	0	0	69.809	4.895	0.003 1	69.957	5.21
20	93.051	93.051	0	0	87.486	4.652	0.001 9	87.605	5.29

由表 1 可得,采用 SQP 算法的平均耗时为 5.38 s,在同样的硬件环境下,使用实数编码的遗传算法计算文中目标函数时,优化时间在数小时以上,可见 SQP 算法与遗传算法相比在计算速度和计算效率上有着很大的优势。

将上述参数代入五次多项式曲线中,最终得到的换道轨迹为:

$v_0=10$ m/s 时:

$$\begin{cases} X(t)=10.0t-0.333 \ 9t^3+0.097 \ 5t^4-0.007 \ 6t^5 \\ Y(t)=0.277 \ 1t^3-0.081 \ 0t^4+0.006 \ 3t^5 \end{cases}$$

$v_0=15$ m/s 时:

$$\begin{cases} X(t)=15.0t-0.308 \ 1t^3+0.094 \ 4t^4-0.007 \ 7t^5 \\ Y(t)=0.319 \ 7t^3-0.098 \ 0t^4+0.008 \ 0t^5 \end{cases}$$

$v_0=20$ m/s 时:

$$\begin{cases} X(t)=20.0t-0.552 \ 8t^3+0.178 \ 2t^4-0.015 \ 3t^5 \\ Y(t)=0.372 \ 5t^3-0.120 \ 1t^4+0.010 \ 3t^5 \end{cases}$$

2.3 轨迹跟踪仿真

以某型电动车为例,在 ADAMS/Car 中建立整车多体动力学模型,前后悬架均为独立悬架,转向系统为齿轮齿条式转向机构,轮胎模型采用魔术公式轮胎模型。整车主要参数如表 2 所示。各子系统的其他参数,例如车身的空气阻力系数、前后悬架螺旋弹簧及衬套等元件的刚度参数等均采用 ADAMS/Car 中的默认参数。

ADAMS/Car 中的 SmartDriver 模块以路径预瞄(course-following)的方式控制整车,可以较为真实地模

拟整车的驾驶控制。将规划好的轨迹曲线以二进制文件的形式编写进 ADAMS/SmartDriver 的路线文件中,道路模型为 2D 平坦道路模型,其中道路模型的摩擦因数参考正常干燥沥青路面的摩擦因数,取为 0.6。为了更好地分析出车辆跟踪轨迹时的实际情况,在车辆执行换道动作之前先在直线道路上行驶一段距离(30 m),同时在换道结束时在目标车道上保持直线行驶状态,从而模拟真实的换道情况,换道轨迹如图 3 所示,轨迹跟踪的仿真环境如图 4 所示。

表 2 整车主要参数

轴距 l/m	质心与前轴 距离 a/m	质心与后轴 距离 b/m	整车 质量/kg	绕 z 轴转动惯 量 $I_z/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	轮胎 型号
2.56	1.24	1.32	1 500	6 025	215/70R15

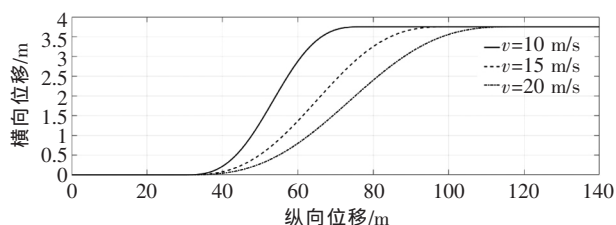


图 3 轨迹规划结果图

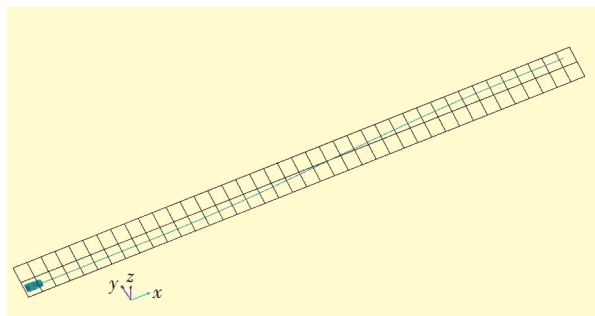
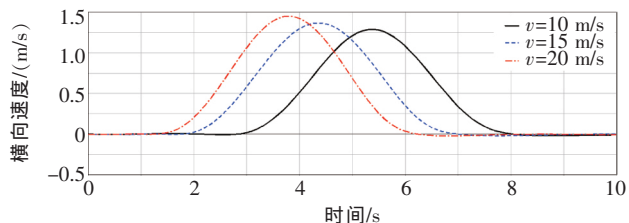
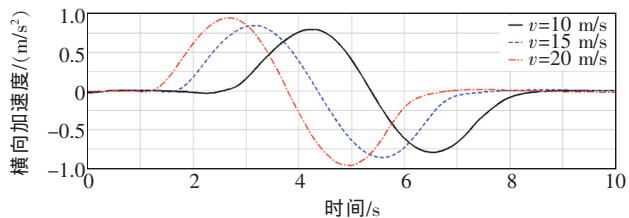


图 4 轨迹跟踪仿真环境

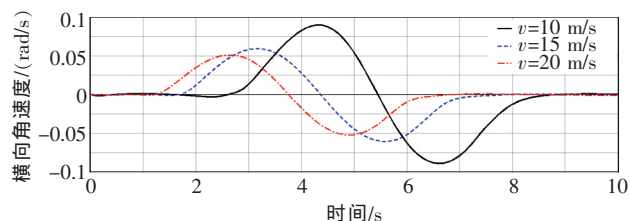
在仿真中,分别令车辆以不同的初始纵向速度跟踪对应的换道轨迹,并对车辆的相关参数进行观测,结果如图 5 所示。



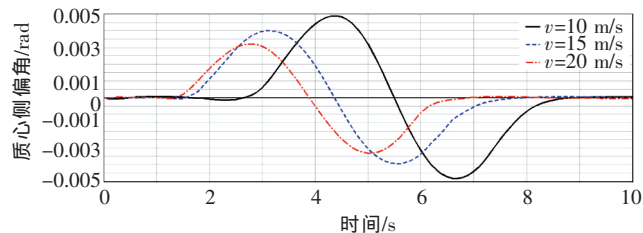
(a) 横向速度



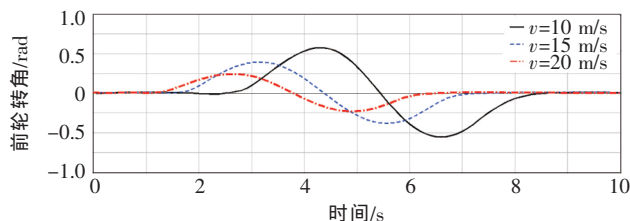
(b) 横向加速度



(c) 横摆角速度



(d) 质心侧偏角



(e) 前轮转角

图 5 轨迹跟踪仿真结果

对应参数的具体数值如表 3 所示。

表 3 仿真结果

车速/ (m/s)	横向速度 峰值/(m/s)	横向加速度 峰值/(m/s ²)	横摆角速度 峰值/(rad/s)	质心侧偏角 峰值/rad	前轮转角 峰值/rad
10	1.293	0.799	0.089 6	0.004 9	0.577 1
15	1.373	0.848	0.059 3	0.004 0	0.395 7
20	1.453	0.949	0.049 7	0.003 2	0.245 2

由图 5 及表 3 可以看出,车辆分别在不同车速条件下跟踪对应轨迹时,横向速度、横向加速度和横摆角速度变化平稳,无尖点,峰值大小符合前述要求,满足车辆执行换道动作时的要求。在不同初始速度的仿真条件下,初始速度越低,车辆的横摆角速度的峰值越大,与车辆实际的换道动作要求相符。在不同的车速条件下,车辆均可以在较短的时间内调整好自身状态,且前轮转角过渡平稳,质心侧偏角始终保持在一个较小的范围内,证明车辆在执行文中所规划换道轨迹时的操纵稳定性良好。

3 结论

文中根据换道过程中对换道轨迹平稳性和效率性的要求,提出了一种基于五次多项式的换道轨迹规划方法。选用基于五次多项式的换道轨迹模型,以换道过程中的平均曲率最小和长度最短作为目标函数,以车

辆的横向速度、横向加速度和横摆角速度为约束条件,采用 SQP 法对不同初始车速下的换道轨迹进行求解。以某型电动汽车为例,在 ADAMS/Car 中建立了车辆的整车动力学模型,分别根据轨迹规划结果和实际道路条件设定了整车的仿真环境,并在不同的车速条件下对换道轨迹进行了跟踪仿真。结果表明,轨迹规划的结果满足实际状况下的车辆换道要求,操纵稳定性良好,验证了换道轨迹的合理性。在下一步的工作中,需要搭建具体的试验环境,构建自主车辆的控制系统,在实际交通环境中对文中提出轨迹规划方法进行验证和不断的完善,使其具有更高的适应性。

参考文献

- [1] 张海伦,汪选要. 智能车自动换道横向控制策略的研究[J]. 机械设计,2018,35(4):78-83.
- [2] 李玮,王晶,段建民. 基于多项式的智能车辆换道轨迹规划[J]. 计算机工程与应用,2012,48(3):242-245.
- [3] Bis Rachael, Peng Huei, Ulsoy A Galip. Vehicle occupancy space for unmanned ground vehicles with actuation error[J]. International Journal of Vehicle Autonomous Systems, 2012, 12(2):180-200.
- [4] 孙浩,邓伟文,张素民,等. 考虑全局最优性的汽车微观动态轨迹规划[J]. 吉林大学学报:工学版,2014,44(4):918-924.
- [5] Choi Ji-Wung, Curry R E, Elkaim G H. Continuous curvature path generation based on bezier curves for autonomous vehicles[J]. IAENG International Journal of Applied Mathematics, 2010, 40(2):179-185.
- [6] 李玮,高德芝,段建民. 智能车辆自由换道模型研究[J]. 公路交通科技,2010,27(2):119-123.
- [7] 杨志刚,戚志锦,黄燕. 智能车辆自由换道轨迹规划研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2013,32(3):520-524.
- [8] Shim T, Adireddy G, Yuan H. Autonomous vehicle collision avoidance system using path planning and model-predictive-control-based active front steering and wheel torque control [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2012, 226(6):767-778.
- [9] Broggi A, Bertozzi M, Fascioli A, et al. The Argo autonomous vehicle's vision and control systems[J]. International Journal of Intelligent Control & Systems, 1999, 4(3):409-441.
- [10] 姜岩,赵熙俊,龚建伟,等. 简单城市环境下地面无人驾驶系统的设计研究[J]. 机械工程学报,2012,48(20):103-112.
- [11] 张晨晨,夏群生,何乐. 质心侧偏角对车辆稳定性影响的研究[J]. 汽车工程,2011,33(4):277-282.
- [12] 张刚,祝明波,陈瑜,等. 基于 SQP 算法的 SAR 成像导引头三维弹道优化[J]. 计算机工程与科学,2012,34(4):145-150.

作者简介 闫尧(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向:机器人技术。
E-mail:791706506@qq.com
李春书(通信作者)(1962—),女,教授,博士,主要研究方向:机器人技术及机械系统动力学。
E-mail:zhunshuli@126.com