

Study on the Influence of the Driving Behavior When Vehicle Collision Avoidance

Huang Jiang, Li Hong

Hunan University, ChangSha, China, 410082

Email: huangjiang7903@126.com

Abstract: Vehicle active collision avoidance is a research hit in automotive active safety area, while most other researches mainly restrict the vehicle trajectory by steering control, and braking or accelerating in this procedure is rarely considered. This paper proposes an offset distance within a certain station to define the ability of the vehicle's emergency obstacle avoidance. It reveals the relationship between the vehicle handling behavior and obstacle avoidance ability by the dynamical analysis on vehicle particle and 2DOF vehicle model respectively. The research shows that it benefits the vehicle's obstacle avoidance ability with a suitable brake when the vehicle takes a steering maneuver simultaneously. The cause and its influence factors are further studied. This study affords a theoretical foundation for vehicle handling control when the vehicle takes an active obstacle collision avoidance maneuver.

Keywords: Vehicle active safety; active collision avoidance; driving behavior; obstacle avoidance ability

车辆紧急避障时的操纵行为研究

黄江, 李红

湖南大学, 长沙, 中国, 410082

Email: huangjiang7903@126.com

摘 要: 车辆主动避障是车辆主动安全领域的一个研究热点, 多数研究在实现车辆避障时, 都是利用转向控制来约束车辆轨迹, 极少涉及制动或加速的控制。本文采用一定行程内的车辆偏移距离来定义车辆避障能力, 通过车辆质点和二自由度车辆模型的动力学分析, 揭示了紧急避障时车辆操纵行为与避障能力之间的关系, 证明了车辆在转向的同时进行一定强度的制动, 对提高车辆的避障能力是有利的, 并对其原因和影响因素进行了进一步的说明, 为完善主动避障时车辆的操纵控制研究提供基础和依据。

关键字: 汽车主动安全, 主动避障, 操纵行为, 避障能力

1 引言

车辆主动避障和智能辅助避障是智能汽车研究的一个关键问题, 也是车辆主动安全领域的一个研究热点, 其关键问题主要是两个: 一是车辆避障路径规划; 二是车辆避障行为的控制实现。目前, 车辆避障的研究主要都集中在这两个问题上, 或通过各种算法规划合适的路径, 使车辆跟随道路、躲避障碍^{[1][2]}; 或利用转向控制实现车辆轨迹约束, 使车辆避开障碍^{[3][4][5]}。在进行这些研究时, 对象车辆一般车速都不太高, 车辆的附着条件使车辆有能力进行障碍规避; 在进行车辆轨迹控制时, 一般也只进行转向控制, 极少涉及制动或加速的控制。

基金项目:

国家自然科学基金青年基金项目 (51105136), 湖南省科技支撑计划项目 (2012GK3154)

当高速车辆遇到突发状况而进行紧急避障时，通常进行的操纵行为就是转向和制动。由于附着条件的限制，车辆有可能不易完成规避动作，这时就需要对操纵行为与车辆避障能力的关系进行分析。一般认为，车辆在纯转向情况下的避障能力是最强的，即轮胎没有受到纵向力的情况下所能提供的侧向附着力是最大的。但另一方面，如果转向的同时进行制动，制动可以降低车速，从而减小车辆转向所需的向心力。可见，转向和制动都会影响车辆的规避动作，从而对车辆的避障能力产生影响。

本文就是通过对操纵行为与车辆避障能力的关系进行研究，进一步探讨提高车辆避障能力的方法。

2 车辆避障过程中的操纵行为分析

车辆紧急避障过程中，车辆通常需要进行比较激烈的转向动作，产生较大的轮胎侧偏角，从而使轮胎受到较大的侧偏力。对于高速车辆，车辆在紧急避障过程中，很容易产生以下两种危险情况：

(1) 由于车辆转向系统和轮胎附着力的限制，无法产生足够的侧向力使车辆完成小半径转向，导致车辆无法完成避障。

(2) 车辆在转向过程中，轮胎附着力超过其附着极限，使车轮产生较大的滑移，而导致车辆失稳。

对于第二种状况，通过对轮胎纵向滑移率和侧偏角的控制，可以最大程度的避免危险发生；对于第一种状况，由于转向机构和轮胎附着力的限制，主要是后者的限制，当障碍物足够近，足够宽时，车辆是无法完全避开的。因此，在一定车速下，一定距离内，车辆转向时所能达到的最大侧向位移，比较直观的反映了车辆的避障能力。

车辆的避障能力是与驾驶者对车辆的操纵行为密切相关的。第一，在轮胎附着力允许的前提下，转向角越大，转弯半径越小，车辆的避障能力越强；第二，制动力越大，车辆减速度越大，车速的降低可以减小转向时所需的侧向力，但由于轮胎附着力的限制，制动力增加又会减小轮胎的侧向附着能力，使车辆容易发生侧滑。

由此可见，转向和制动都会对车辆的避障能力产生影响，而转向和制动同时进行时，又会对车辆的避障能力参数什么样的影响？接下来文章就通过避障车辆的动力学分析，对这个问题进行深入的探讨。

2.1 质点运动方程

为了简化分析，可以将汽车看作一个质点，不考虑车辆的横摆运动和质心侧偏角，此时，车辆受到的纵向力方向和车辆速度方向一致，侧向力方向与车辆速度方向垂直，如图 1。

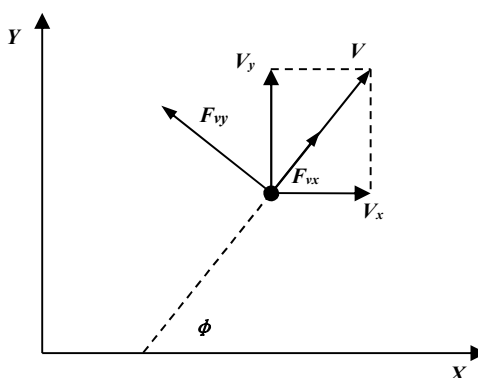


Figure1.the motion model of vehicle centroid

图 1. 车辆质点运动模型

2.1.1 模型建立

令车辆速度 V 与大地坐标系 x 轴的夹角为 Φ ，车辆沿 x 轴受力为 F_x ，沿 y 轴受力为 F_y ，则有：

$$F_x = F_{vx} \cos \phi - F_{vy} \sin \phi \quad (1)$$

$$F_y = F_{vx} \sin \phi + F_{vy} \cos \phi \quad (2)$$

其中，

$$\cos \phi = \frac{v_x}{v}, \quad \sin \phi = \frac{v_y}{v} \quad (3)$$

于是有：

$$\begin{cases} \dot{v}_x = \frac{F_{vx}}{m} \cdot \frac{v_x}{v} - \frac{F_{vy}}{m} \cdot \frac{v_y}{v} \\ \dot{v}_y = \frac{F_{vx}}{m} \cdot \frac{v_y}{v} + \frac{F_{vy}}{m} \cdot \frac{v_x}{v} \\ \dot{v} = \frac{F_{vx}}{m} \end{cases} \quad (4)$$

考虑到轮胎附着力的限制，附着极限可用摩擦椭圆近似表示，于是有：

$$\frac{F_{vx}^2}{F_{x\max}^2} + \frac{F_{vy}^2}{F_{y\max}^2} = 1 \quad (5)$$

令地面附着系数为 μ ，轮胎各向异性系数为 ζ ，车辆的纵向加速度为 a_{vx} ，侧向加速度为 a_{vy} ，则有：

$$\frac{a_{vx}^2}{(\mu g)^2} + \frac{a_{vy}^2}{(\zeta \mu g)^2} = 1 \quad (6)$$

式中， g 为重力加速度。

假设车辆沿大地坐标系 x 轴、 y 轴的位移分别为 l_x 、 l_y 。

令 $x_1 = v_x$ ， $x_2 = v_y$ ， $x_3 = v$ ， $x_4 = l_x$ ， $x_5 = l_y$ ，则质点运动状态方程可表示为：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{x_3}(x_1 a_{vx} - x_2 a_{vy}) \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{x_3}(x_1 a_{vy} + x_2 a_{vx}) \\ \dot{x}_3 = a_{vx} \\ \dot{x}_4 = x_1 \\ \dot{x}_5 = x_2 \end{cases} \quad (7)$$

令 $X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T$ ，当 $X|_{t=0}$ 和 a_{vx} 已知时，根据式 (6) (7) 可以求出车辆的运动轨迹。

2.1.2 实例计算

设汽车初速度为 100km/h，障碍物在车辆前方 40m 处，地面附着系数为 0.8，轮胎各向异性系数为 0.85。

当汽车以确定的减速度进行制动，并同时转向，利用式 (6) (7) 可得车辆的运动轨迹。

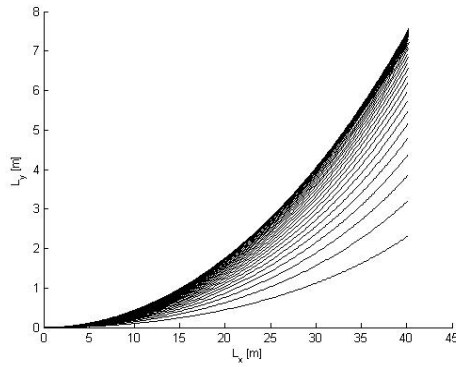


Figure2.vehicle collision avoidance Trajectory of centroid in Different braking intensity

图 2. 不同制动强度下车辆质点避障轨迹

由图 2 可知，在保证车辆稳定性的前提下，制动强度不同，车辆的避障能力不同。

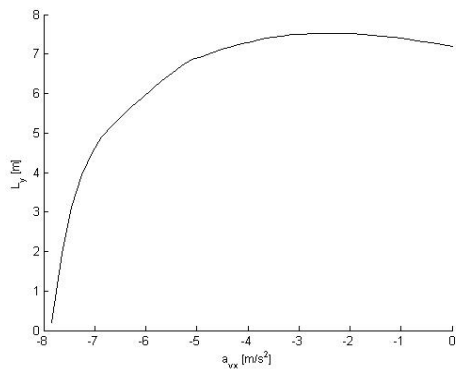


Figure3.the funtion of the vehicle centroid-velocity decrease in braking

图 3. 车辆质点侧向位移与制动减速度的关系

由图 3 可以看到，随着制动强度的增加，车辆质点的侧向位移先增加后减少，当 $a_{vx} = -2.352 m/s^2$ 时，质点侧向位移最大，即车辆的避障能力最强。

为了分析车辆的避障能力，定义车辆的避障效率为 η_b ：

$$\eta_b = l_y / l_x \quad (8)$$

设车速分别为 100km/h、110km/h、120km/h，可以得到不同车速下的最大避障效率。

$$\eta_{\max} = \begin{cases} 0.165 & v=100km/h, a_{vx}=-2.35m/s^2 \\ 0.133 & v=110km/h, a_{vx}=-1.86m/s^2 \\ 0.11 & v=120km/h, a_{vx}=-1.76m/s^2 \end{cases} \quad (9)$$

不同车速下，车辆避障效率和制动减速度的关系如图 4 所示。可以看到，车速越高，制动强度对避障效率的影响越小，利用合理的制动提高避障效率的效果越不明显。

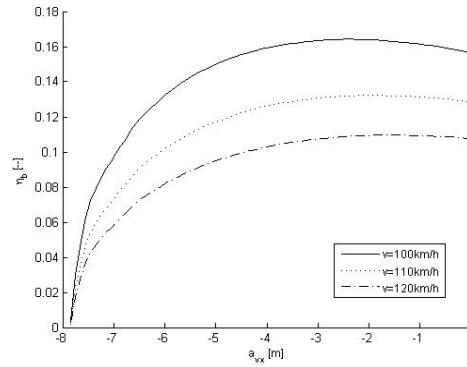


Figure4.the funtion of efficiency of vehicle collision avoidance -vehicle centroid-braking velocity

图 4. 车辆质点避障效率与制动减速度的关系

由式 (6) 可得:

$$\frac{da_{vy}}{da_{vx}} = -\zeta^2 \cdot \frac{a_{vx}}{a_{vy}} = -\zeta^2 \cdot \frac{a_{vx}R}{v^2} \quad (10)$$

式中, R 为转弯半径, 于是有:

$$|R| = \left| \frac{da_{vy}}{da_{vx}} \right| \cdot \frac{\zeta^2 v^2}{|a_{vx}|} \quad (11)$$

由式 (11) 可知, 当 $|a_{vx}|$ 较小时, $\left| \frac{da_{vy}}{da_{vx}} \right|$ 接近于 0, 同时 $|a_{vx}|$ 的存在又可有效降低 v , 因而车辆的转弯半径

较小, 避障能力增加; 随着 $|a_{vx}|$ 增加, $\left| \frac{da_{vy}}{da_{vx}} \right|$ 迅速增大, 而 v 降低较慢, 导致转弯半径迅速增加, 避障能力明显

下降。另一方面, 车速越高, v^2 影响越大, 导致 $|R|$ 明显增加, 同时避障时间减小, 会使利用 $|a_{vx}|$ 减小转弯半径的效果下降。

2.2 二自由度车辆动力学模型

通过对质点运动方程的分析, 可以说明制动和转向对车辆避障能力的影响, 并对产生影响的原因作出较合理的解释。但质点运动模型没有考虑车辆的横摆和侧偏, 与车辆实际运动状况差异较大, 因此, 有必要建立更精确的模型来对避障运动进行分析。

为了考虑车辆横摆与侧偏的影响, 同时又不至于使求解过于复杂, 本文建立二自由度车辆动力学模型来分析避障过程。

2.2.1 模型建立

文献[6]给出了线性二自由度车辆的转向特性。如图 5 所示, 汽车质量为 m , 前进速度为 V , 质心侧偏角为 β , 前轮转角为 δ , 质心到前、后轴的距离分别为 a 、 b , 汽车横摆角速度为 $\omega = \dot{\psi}$, 前、后轴等效侧偏刚度为 K_f 、 K_r , 汽车绕 z 轴的转动惯量为 I_z 。

根据几何关系有:

$$\alpha_1 = \beta + \frac{a}{V_x} \cdot r - \delta, \quad \alpha_2 = \beta - \frac{b}{V_x} \cdot r \quad (12)$$

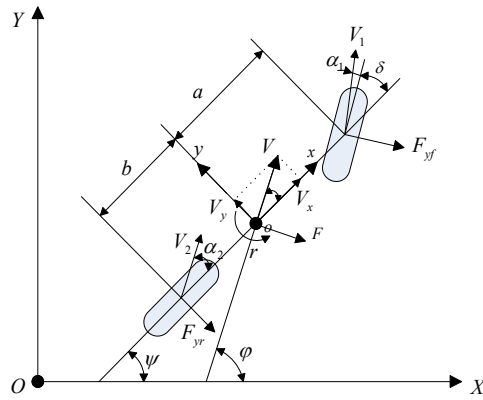


Figure5.two free degree vehicle model
图 5. 二自由度车辆模型

不考虑空气动力影响，可得车辆模型的平衡方程：

$$\begin{cases} m(\dot{V}_y + V_x \omega) = -(K_f \alpha_1 + K_r \alpha_2) \\ I_z \dot{\omega} = a K_f \alpha_1 + b K_r \alpha_2 \end{cases} \quad (13)$$

将式 (12) 代入式 (13) 可得：

$$\begin{cases} \dot{V}_y = \frac{K_f + K_r}{m V_x} V_y + \left(\frac{a K_f - b K_r}{m V_x} - V_x \right) \omega - \frac{K_f}{m} \delta \\ \dot{\omega} = \frac{a^2 K_f + b^2 K_r}{I_z V_x} \cdot \omega + (a K_f - b K_r) \frac{V_y}{V_x} - \frac{a K_f}{I_z} \delta \end{cases} \quad (14)$$

行令 $x_1 = V_x$ 、 $x_2 = V_y$ 、 $x_3 = \omega$ 、 $x_4 = \psi$ 、 $x_5 = l_x$ 、 $x_6 = l_y$ ，当汽车以加速度 a_x 进制动时，有：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_x \\ \dot{x}_2 = \frac{K_f + K_r}{m x_1} x_2 + \left(\frac{a K_f - b K_r}{m x_1} - x_1 \right) x_3 - \frac{K_f}{m} \delta \\ \dot{x}_3 = (a K_f - b K_r) \frac{x_2}{x_1} + \frac{a^2 K_f + b^2 K_r}{I_z x_1} \cdot x_3 - \frac{a K_f}{I_z} \delta \\ \dot{x}_4 = x_3 \\ \dot{x}_5 = \sqrt{x_1^2 + x_2^2} \cdot \cos \left(x_4 + \frac{x_2}{x_1} \right) \\ \dot{x}_6 = \sqrt{x_1^2 + x_2^2} \cdot \sin \left(x_4 + \frac{x_2}{x_1} \right) \end{cases} \quad (15)$$

当车辆以 a_x 制动减速时，前轮受到的纵向力为：

$$\begin{cases} F_{xf} = mg \cdot \frac{b + a_x h_g / g}{a + b} \\ F_{xr} = mg \cdot \frac{a - a_x h_g / g}{a + b} \end{cases} \quad (16)$$

式中， h_g 为质心高度。

为了在避障过程中保持车辆的稳定性，需要对车轮的侧偏角进行判断。前轮的侧偏角大于后轮侧偏角时，前轮轮胎力先达到附着极限；前轮的侧偏角小于后轮侧偏角时，后轮轮胎力先达到附着极限。因此，控制侧偏角较大的车辆的纵滑和侧偏，使其轮胎力不超过附着极限，则能保证前、后轮轮胎力都处于其稳定区间。

当 $\alpha_1 \geq \alpha_2$ 时：

$$\alpha_1 = F_{fy} / K_f \quad (17)$$

当 $\alpha_1 < \alpha_2$ 时：

$$\alpha_2 = F_{ry} / K_r \quad (18)$$

$$\alpha_1 = \frac{x_3}{x_1} (a + b) - \delta^* - \alpha_2 \quad (19)$$

式中 δ^* 为前一时刻的前轮转角，当前时刻的前轮转角则由下式计算：

$$\delta = \frac{x_2}{x_1} + a \cdot \frac{x_3}{x_1} - \alpha_1 \quad (20)$$

某轮胎侧偏角为 5° ，地面附着系数为 1.0，垂直载荷为 4500N 时，轮胎侧向力和纵向力关系如图 6 所示。

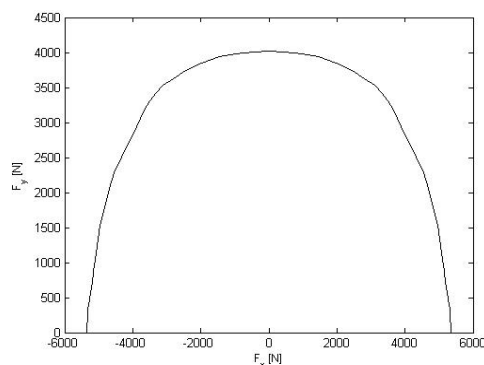


Figure6.the funtion of lateral force-longitudinal force
图 6. 轮胎侧向力与纵向力的关系

图 6 近似表达了轮胎的附着极限。若考虑充分利用轮胎附着力，根据式 (16) 计算出轮胎纵向力后，再按照实验得到的纵向力和侧向力的关系，求得轮胎的侧向力，从而利用式 (17) - (20) 计算前轮转角。

2.2.2 实例计算

某车参数如表 1 所示。

Table1.vehicle parameters of a vehicle

表 1. 某车的车辆参数

参数	数据	单位	参数	数据	单位
m	1529.98	kg	I _z	607.67	kg·m ²
a	1.139	m	b	1.637	m
K _f	-72230	N/rad	K _r	-76815	N/rad
h _g	0.606	m			

汽车初速度为 100km/h，障碍物在车辆前方 40m 处，地面附着系数为 0.8。

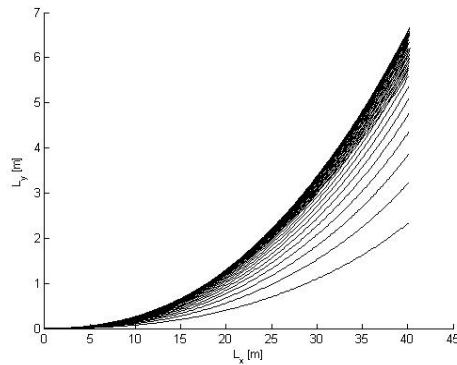


Fig7.vehicle collision avoidance Trajectory in different braking intensity

图 7. 不同制动强度下车辆避障轨迹

当汽车以确定的减速度进行制动，并同时转向，利用式（15）可得车辆的运动轨迹。

由图 7 可见，考虑车辆的横摆和侧偏，制动强度同样会影响车辆的避障能力，但为了保证车辆运动状态的稳定，当一个车轮达到附着极限时，另一个车轮的附着力未被完全利用，车辆的避障能力相对于质点模型有所下降。

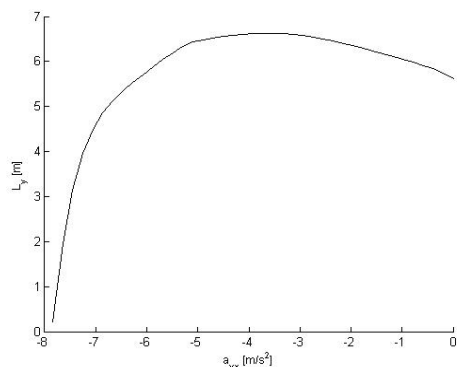


Figure8.the lateral displacement-braking velocity funtion

图 8. 车辆侧向位移与制动减速度的关系

如图 8 所示，随着制动强度的增加，车辆质点的侧向位移先增加后减少，当 $a_{vx} = -3.724m/s^2$ 时，车辆的避障能力最强。相对于质点模型，制动减速度提高车辆避障能力的作用更加明显，这是由于一般车辆都具有不足转向特性，进行制动时，车辆载荷前移，车辆的不足转向度会逐渐减小，从而进一步提高了车辆的避障能力。

当初始车速不同时，不同车速下的最大避障效率为：

$$\eta_{\max} = \begin{cases} 0.166 & v=100km/h, a_{vx}=-3.72m/s^2 \\ 0.131 & v=110km/h, a_{vx}=-3.43m/s^2 \\ 0.107 & v=120km/h, a_{vx}=-2.94m/s^2 \end{cases} \quad (18)$$

不同车速下，车辆避障效率和制动减速度的关系如图 9 所示。可以看到，紧急避障时，制动操作能够显著地提高车辆的避障效率；随着车速的提高，特别是车速达到 120km/h 后，利用制动提高避障效率的效果会明显下降。

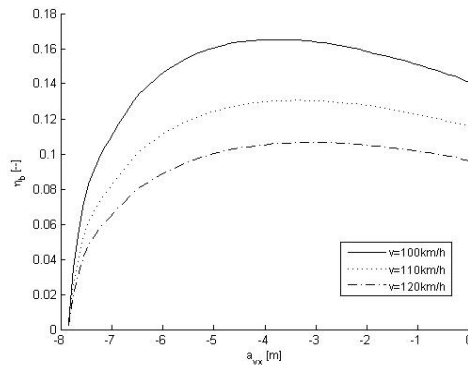


Fig9.the efficiency of vehicle collision avoidance-braking velocity funtion
图 9. 车辆避障效率与制动减速度的关系

3 结论与展望

3.1 结论

论文通过对车辆质点模型和二自由度车辆模型的分析, 阐明了制动和转向对车辆避障运动的影响。

(1) 低强度的制动在降低车速的同时, 并不会过多的降低车辆的侧向附着能力, 还可以在保证车辆稳定性的前提下减小不足转向, 因此, 低强度的制动对提高车辆的避障能力是有利的。车速较低时, 制动对提高车辆避障效率的作用尤为明显。

(2) 当车速较高时, 制动对提高车辆避障能力的作用有所下降, 但低强度的制动在稍稍提高车辆避障能力的同时, 还能降低车辆的速度, 总体来说, 对车辆应对紧急状况是有利的。

(3) 为了保证紧急避障时车辆的稳定性, 在制动的同时, 还需要根据轮胎的附着情况实时调整转向, 其转向控制方法对避障时的方向控制策略有一定的借鉴意义。

3.2 展望

在论文涉及的研究过程中, 也发现了一些问题与不足, 希望在后续的研究中进一步解决。

(1) 论文所采用的分析模型进行了大量的简化, 与实车结果会有一定出入。为了得到更精确的分析结果, 需要建立更复杂的四轮车辆模型, 考虑载荷变化、轮胎特性变化和悬架特性的影响。

(2) 论文在计算避障路径时, 为了使避障能力最大化, 未对车辆的方位角进行限制。考虑到环境因素和车辆避障后的姿态调整, 在车辆避障路径末端进行一定的方位控制是有必要的, 需要在后续研究中予以解决。

参考文献

- [1] Keonyup Chu, Minchae Lee, Myoungho Sunwoo. *Local Path Planning for Off-Road Autonomous Driving With Avoidance of Static Obstacles*. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, December 2012, Vol.13, No.4:1599-1616.
- [2] Junsoo Kim, Kichun Jo, Keonyup Chu, et al. *Road-model -based and graph-structure-based hierarchical path-planning approach for autonomous vehicles*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 2014; 228: 909-928.
- [3] David Fernández Llorca, Vicente Milanés, Ignacio Parra Alonso, et al. *Autonomous Pedestrian Collision Avoidance Using a Fuzzy Steering Controller*. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, June 2011, Vol.12, No.2:390-401.
- [4] Yongsoon Yoon, Jongho Shin, H. Jin Ki m, et al. *Model-predictive active steering and obstacle avoidance for autonomous round vehicles*. *Control Engineering Practice* 2009; Vol.17:741-750.
- [5] Tachyun Shim, Ganesh Adireddy and Hongliang Yuan. *Autonomous vehicle collision voidance system using path planning and*

model-predictive-control-based active front steering and wheel torque control. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 2012; 226(6) 767-778.

- [6] Guo Konghui. *Vehicle handling dynamics*. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 1991
- [7] 郭孔辉. *汽车操纵动力学*. 长春: 吉林科学技术出版社, 1991