

# 基于毫米波雷达的无人驾驶电动汽车 换道动态避障控制方法

张雪敏

(西安思源学院 基础部, 西安 710038)

**摘要:** 无人驾驶电动汽车在换道行驶中, 难以细致地衡量道路中障碍物的移动状态, 从而导致规划后的避障路线不够准确, 可能会发生交通事故; 对此, 提出基于毫米波雷达的无人驾驶电动汽车换道动态避障控制方法; 利用电动汽车内置的传感器设备, 检测无人驾驶电动汽车的行驶状态和道路环境, 判断电动汽车是否满足换道条件; 综合考虑电动汽车和动态障碍物的移动状态, 对无人驾驶电动汽车换道行为进行决策; 采用毫米波雷达技术, 设计动态避障控制器, 根据决策结果规划换道避障路线, 生成控制指令, 实现无人驾驶电动汽车换道动态避障控制; 通过效果测试实验得出结论: 毫米波雷达技术的测量误差能够控制在 0.1 以内, 位置控制误差和碰撞风险明显降低, 具有更优的控制效果。

**关键词:** 毫米波雷达; 无人驾驶; 电动汽车; 汽车换道; 动态避障; 避障控制;

## Dynamic Obstacle Avoidance Control Method for Lane Changing in Unmanned Electric Vehicles Based on Millimeter Wave Radar

ZHANG Xuemin

(Department of Basic, Xi'an Siyuan University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** When autonomous electric vehicles are changing lanes, it is challenging to accurately assess the dynamic state of obstacles on roads, resulting in imprecise obstacle avoidance routes and the possibility of traffic accidents. To address this issue, a dynamic obstacle avoidance control method for lane-changing in autonomous electric vehicles based on millimeter-wave radar is proposed. The built-in sensors of the electric vehicle are used to detect the driving status of the autonomous electric vehicle and the road environment, and determine whether the vehicle meets the conditions for lane-changing. The method comprehensively considers the movement states of both the electric vehicle and the dynamic obstacles to make decisions on the lane-changing behavior for the autonomous electric vehicle. Millimeter-wave radar is used to design a dynamic obstacle avoidance controller to plan avoidance routes for lane-changing obstacle according to decision results, generating control commands to achieve dynamic obstacle avoidance control during lane-changing for autonomous electric vehicles. Experimental results from effectiveness testing demonstrate that the measurement error of millimeter-wave radar can be controlled within 0.1 mm, significantly reducing position control errors and collision risks, thereby achieving a superior control performance.

**Keywords:** millimeter-wave radar; unmanned driving; electric vehicles; lane-changing; dynamic obstacle avoidance; avoidance control

### 0 引言

无人驾驶电动汽车将人工智能、传感器技术、自动控制等多个领域的技术融为一体, 实现了汽车的自动驾驶与智能化[1]。在无人驾驶电动汽车中换道避障是实现自主导航的基础, 可以有效提升行驶效率和乘坐舒适性的关键, 衡量无人驾驶技术成熟度和可靠性[2]。然而在复杂交通环境下, 无人驾驶电动汽车的换道行为难度较大, 容易出现与目标换道行驶车辆以及当前车道行驶车辆碰撞的问题。

文献[3]提出了一个融合椭圆体势场和高斯速度场的三维势场模型, 用于自动驾驶车辆的局部路径规划, 以克服传统势场方法在处理密集和动态障碍物场景时的局限性,

并在多个典型场景中验证了其有效性和性能。然而非参数GVF在捕捉多车辆交互时可能存在复杂性高、计算量大或鲁棒性不足的问题。可能导致路径规划算法的计算效率降低, 或者在某些情况下无法正确响应多车辆的交互, 进而影响路径规划的结果。文献[4]提出中上层控制器应用非线性模型预测控制方法, 精准计算所需的动力参数与前轮转角, 而下层控制器则采用电机能耗数值最优的设计思路, 根据电机实时状态灵活调整无级变速器, 确保车辆动力需求得到精准满足。但该方法无法综合考虑无人驾驶车辆的实际行驶环境, 因此存在较大的换道碰撞风险。文献[5]运用双目视觉技术, 识别紧急变道过程中出现的动态与静

收稿日期: 2024-05-10; 修回日期: 2024-06-24。

作者简介: 张雪敏(1981-), 女, 硕士, 副教授。

引用格式: 张雪敏. 基于毫米波雷达的无人驾驶电动汽车换道动态避障控制方法[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(9): 193-199.

态障碍物,通过分析贝塞尔曲线的最大曲率与最小曲率之间的差异,精确确定该曲线上的关键控制点,获得最佳的变道防撞轨迹。但该方法中的贝塞尔曲线的绘制可能受到计算精度的限制,导致曲线形状出现细微偏差,最终影响汽车的避障控制效果。文献[6]基于车辆二自由度模型,开发出一种预瞄距离自适应方法,能够根据车辆的动力学状态和路面附着情况,灵活调整预瞄距离,有效实现了方法参数的优化搜索。但该方法生成速度较慢,影响车辆的避障控制效果。

为解决上述问题,本文提出一种基于毫米波雷达的无人驾驶电动汽车换道动态避障控制方法。利用无人驾驶电动汽车内置的传感器设备,对当前电动汽车的行驶位置、速度等状态进行检测,在毫米波雷达技术的支持下,检测目标物体的状态,测量动态障碍物距离与速度。

根据测量结果,决策无人驾驶电动汽车换道行为,通过毫米波雷达预测行驶环境中动态障碍物的实时位置,规划汽车的换道避障路线,完成无人驾驶电动汽车的安全换道。该方法确保了无人驾驶电动汽车在换道过程中不会与环境中的其他车辆、障碍物发生碰撞,提升了汽车的动态避障控制效果,有效帮助无人驾驶系统更准确地评估换道的可行性和安全性。

## 1 无人驾驶电动汽车换道动态避障控制方法设计

无人驾驶电动汽车换道动态避障需要考虑汽车的行驶环境、行驶状态、当前车道前后车辆的距离与状态以及更换目标车道前后车辆的距离与状态<sup>[7]</sup>。但是由于交通环境复杂多变,道路上的障碍物(尤其是其他车辆和行人)可能是动态移动的。无人驾驶电动汽车需要能够实时跟踪这些动态障碍物的运动轨迹,并预测它们的行为,安全地完成换道。本文采用毫米波雷达,对无人驾驶汽车的动态避障控制方法进行设计。该雷达可以通过发射器将毫米波信号以特定频率和功率发射出去,当信号遇到目标物体时,一部分信号会被物体反射、散射或衰减,雷达接收器会接收到这些反射信号,并经过放大、滤波等处理,转化为可以进行分析和测量的电信号。通过对接收到的信号进行处理和分析,可以获得目标物体的特征信息,如距离、速度和方向等。为无人驾驶电动汽车提供高精度的感知能力,准确地检测周围环境的物体、障碍物和道路状况等,帮助驾驶员提高行车安全性,减少事故发生的可能性。

### 1.1 检测无人驾驶电动汽车的行驶状态和道路环境

无人驾驶电动汽车在换道过程中,为避免潜在的危险,需实时检测汽车的行驶状态和道路环境<sup>[8]</sup>。通过图像传感器捕捉周围环境的图像,并对图像进行处理,实现道路类型的准确识别。在此基础上,利用毫米波雷达,车辆能够实时检测道路类型和动态障碍物的距离与速度,为避障和路径规划提供重要依据,保证换道的安全性和可靠性。

本文方法利用汽车内部的速度传感器,确定无人驾驶电动汽车的行驶速度为 $v(t)$ ,当被测物体运动时,光源会照射到光电传感器上,它会根据光源的变化来输出相应的

信号,因此可以检测出汽车的转向角度 $\theta(t)$ 。那么无人驾驶电动汽车行驶位置的检测结果可以表示为:

$$\begin{cases} x_0 = \sqrt{g_1^2 v(t)^2} + x_R \\ y_0 = \sqrt{g_2^2 \theta(t)^2} + y_R \end{cases} \quad (1)$$

其中: $g_1$ 和 $g_2$ 分别表示的是两个GPS定位传感器采集到的距离数据, $(x_R, y_R)$ 为无人驾驶电动汽车内部传感信号接收器的位置坐标, $(x_0, y_0)$ 为无人驾驶电动汽车行驶位置<sup>[9]</sup>。根据当前电动汽车位置检测结果及其行驶环境道路的基本参数特征,确定当前电动汽车的行驶状态。

无人驾驶电动汽车在换道中,会遇到不同的道路类型,从而制定更合适的换道策略和速度控制<sup>[10]</sup>。本文通过毫米波雷达发射的信号,检测障碍物的状态,从而判断道路类型。

汽车行驶道路类型包括直道、弯道等,直道通常呈现为宽阔且笔直的路段,而弯道包括内倾斜、外倾斜和平弯道等。内倾斜弯道是指弯道内侧低于外侧的设计,而外倾斜弯道则是弯道内侧高于外侧<sup>[11]</sup>。利用检测出的汽车行驶速度和转向角度,可以确定目标物体的位置,计算过程为:

$$I(x, y) = \begin{cases} \cos\theta(t) \times \sin v(t) \times X \\ \sin\theta(t) \times \sin v(t) \times Y \end{cases} \quad (2)$$

$X, Y$ 为道路环境的实际值。

确定好目标物体位置后,采用无人驾驶电动汽车内置图像传感器生成采集图像<sup>[12]</sup>。将汽车视角下,直道和弯道两种道路类型的标准特征设定为 $\tau_{\text{straight}}$ 和 $\tau_{\text{bend}}$ 。在此基础上,建立公式:

$$\kappa_{\text{Sensing}} = \begin{cases} \tau_{\text{straight}} \times I(x, y) \varphi \\ \tau_{\text{bend}} \times I(x, y) \varphi \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\varphi$ 为图像传感的俯视角,根据图像传感器在电动汽车中的安装位置高度,确定 $\varphi$ 的具体取值。为保证传感器输出图像质量,需要对初始采集图像进行预处理,由于汽车的动态行驶,因此需要根据汽车行驶速度 $v(t)$ 对图像进行运动模糊补偿,补偿处理过程如下:

$$I_b(t) = \kappa_{\text{Sensing}} \times \frac{1}{v(t)} \times \beta \quad (4)$$

其中: $\beta$ 为图像运动补偿系数,也就是汽车行驶速度变化规律。除运动补偿之外,还需要对初始采集图像进行滤波去噪以及归一化处理<sup>[13]</sup>。以采集并处理完成的道路图像作为处理对象,提取道路边缘特征,即:

$$\tau = \frac{\xi^2 I_b(t)}{\xi x^2} + \frac{\xi^2 I_b(t)}{\xi y^2}, (x, y) \in I_b(t) \quad (5)$$

式中, $\xi$ 表示的是拉普拉斯算子,将满足质量要求的道路图像代入到公式(5)中,即可得出图像边缘特征的提取结果,并将其与设置的道路类型标准特征进行匹配,根据匹配度计算结果与设定阈值条件之间的关系,得出无人驾驶电动汽车行驶道路类型的识别结果。

无人驾驶电动汽车在换道过程中,必须确保与周围动态障碍物(如其他车辆、行人、自行车等)保持安全距离。本文利用毫米波雷达技术测量动态障碍物距离与速度,该

雷达技术能够通过释放特定频率的电磁波来探测环境中微小至零点几毫米的移动物体的障碍物，准确判断与障碍物之间的相对位置和相对速度，从而作出正确的避让或减速决策，避免碰撞事故的发生。当电磁波在行进途中遇到阻挡物时，会发生反射现象。此时，雷达系统会精准捕捉这些反射回来的电磁波信号。借助毫米波雷达的精确计算，能够准确地获取阻挡物体的距离、速度信息。毫米波雷达设备的内部组成结构如图 1 所示。

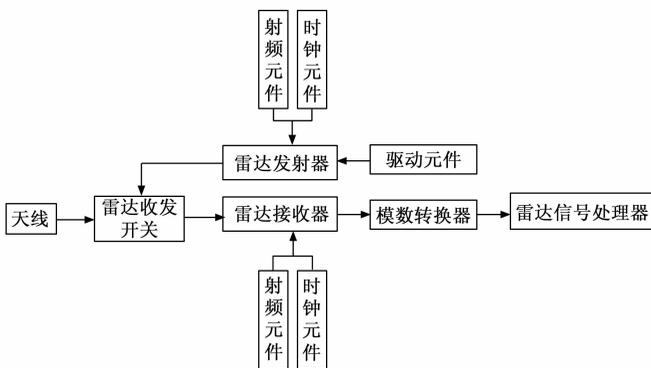


图 1 毫米波雷达设备内部结构图

设计无人驾驶电动汽车换道动态避障控制方法中使用的毫米波雷达设备由雷达信号发射端、雷达信号接收端、射频元件、时钟元件、模数转换器、信号处理器等部分组成，在图 1 表示毫米波雷达设备支持下，执行雷达测量操作，得出控制对象行驶环境中动态障碍物的移动信息，毫米波雷达技术原理如图 2 所示。

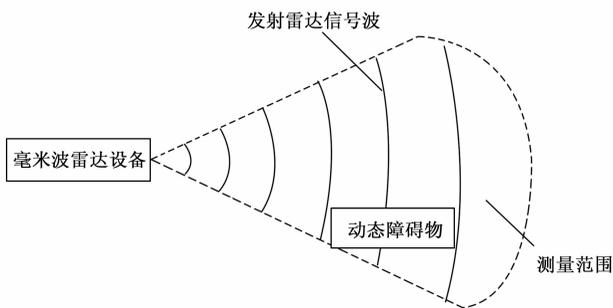


图 2 毫米波雷达技术原理图

在毫米波雷达技术的支持下<sup>[14]</sup>，需要测量的动态障碍物为控制对象所在车道的前后车辆以及切换目标车道上的车辆，测量的障碍物运动参数包括速度与距离两个部分，根据公式 (5) 的道路类型识别结果，若识别为直道环境中的无人驾驶电动汽车，控制对象与其纵向和侧向车辆之间的距离测量结果为：

$$\begin{cases} d_{\text{portrait-w}} = \tau(v_{\text{radar}} - v(t)) \times t_{\text{portrait}} \\ d_{\text{Lateral-w}} = \tau(v_{\text{radar}} - v(t) + v_{\text{Lateral}}) \times t_{\text{Lateral}} \end{cases} \quad (6)$$

式中， $v_{\text{radar}}$  和  $v_{\text{Lateral}}$  分别表示的是雷达信号的传输速度以及侧向车辆的行驶速度， $t_{\text{portrait}}$  和  $t_{\text{Lateral}}$  分别为纵向和侧向毫米级雷达信号的传输时间，最终得出结果  $d_{\text{portrait}}$  和  $d_{\text{Lateral}}$  即为控制对

象与其纵向和侧向车辆之间的距离测量结果。若无人驾驶电动汽车行驶道路类型识别结果为弯道，则距离测量结果为：

$$\begin{cases} d_{\text{portrait-w}} = \tau(v_{\text{radar}} - v(t)) \times t_{\text{portrait}} \times \tan\varphi \\ d_{\text{Lateral-w}} = \tau(v_{\text{radar}} - v(t) + v_{\text{Lateral}}) \times t_{\text{Lateral}} \times \sin\varphi \end{cases} \quad (7)$$

其中： $\varphi$  为弯道圆心角。另外，任意动态障碍物的行驶速度测量结果为：

$$v_{\text{obstacle}}(t) = \frac{v_{\text{radar}}}{2f_{\text{launch}}(t)} \times \frac{(f_{\text{rise}} - f_{\text{decline}})}{2} \quad (8)$$

公式 (7) 中  $f_{\text{launch}}(t)$  为  $t$  时刻毫米波雷达信号的初始发射频率， $f_{\text{rise}}$  和  $f_{\text{decline}}$  对应的是动态目标反射信号与发射信息上升沿、下降沿的频率差值。综合考虑车道的直、弯特征，得出不同行驶车道环境下，无人驾驶电动汽车纵向和侧向速度的测量结果。

### 1.2 决策无人驾驶电动汽车换道行为

在检测无人驾驶电动汽车的行驶状态和道路环境的过程中，若系统检测到当前车道存在潜在危险，如前方有障碍物、交通拥堵或即将进入施工区域时，系统会立即进行换道决策<sup>[15]</sup>，寻找更安全的行驶路径，确保乘客和其他道路使用者的安全。

在决策过程中，需要考虑当前汽车与前方纵向车辆之间的距离是否满足转向条件，汽车与侧向车辆之间是否满足横向和纵向距离要求，以避免汽车转向发生碰撞，有效帮助无人驾驶系统更准确地评估换道的可行性和安全性，从而作出更合理的换道决策。若检测到同车道后方以及侧后方均存在车辆，则自身会执行制动行为，制动过程分为 3 个时间段，如图 3 所示。

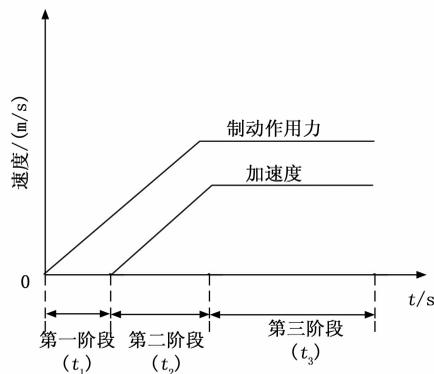


图 3 汽车制动过程时序图

汽车行驶环境中后方与侧后方车辆观察到控制目标的换道请求后开始制动，涵盖制动传递延迟阶段与制动力增长阶段。每个阶段的耗时情况，主要由驾驶员踩制动踏板的快慢与力度，以及制动器本身的构造来决定。在这一过程中，汽车的运动状态会从匀速逐渐转变为减速运动。第二阶段，制动器产生的制动力逐渐从零提升至最大值，相应地，制动减速度也逐渐从零增大到最大值，使汽车实现变减速运动。最后，汽车保持匀减速行驶直至停止，结合公式 (8) 的任意动态障碍物的行驶速度测量结果，可以得出车辆的安全制动距离为<sup>[16]</sup>：

$$d_{\text{security-h}} = \frac{v_{\text{obstacle}}(t)}{3.6}(t_1 + t_2 + t_3) - \frac{1}{6}a_{\text{braking}}t_3^2 + \frac{\left(v_{\text{obstacle}}(t) - \frac{u_{\text{braking}}}{2}t_3\right)^2}{2a_{\text{braking}} \times 3.6^2} \quad (9)$$

其中： $t_1$ 、 $t_2$  和  $t_3$  表示的是 3 个制动阶段的执行时间， $a_{\text{braking}}$  为汽车制动加速度，公式 (9) 的计算结果即为车辆换道的横向安全距离。另外，车辆换道的纵向安全距离设置为<sup>[17]</sup>：

$$d_{\text{security}} = L_{\text{car}} \times \vartheta \times [v(t) - v_{\text{obstacle}}(t)] \quad (10)$$

式中， $L_{\text{car}}$  为无人驾驶电动汽车的总长度， $\vartheta$  为车辆的换道转向角。在汽车换道行为决策过程中，比对毫米波雷达技术下动态障碍物距离的测量结果与设定安全距离之间的大小关系，若当前距离大于安全距离，则认为当前无人驾驶电动汽车可以执行换道行为，否则认为不满足换道条件，决策结果为不执行换道行为。

### 1.3 实现无人驾驶电动汽车换道动态避障控制

当决策结果为执行换道时，为了避免无人驾驶电动汽车在换道中与周围车辆、行人或其他障碍物发生碰撞，需要对换道路线进行规划。为了规划更安全的换道路线，本文采用毫米波雷达技术，设计动态避障控制器，该控制器可以根据汽车的换道决策结果规划出一条避开障碍物的最优路径，如果感知到新的障碍物或交通状况发生变化，控制器能够实时调整路径，确保换道过程的安全性和顺畅性。一旦路径规划完成，动态避障控制器会向车辆的执行机构（如转向系统、油门和刹车系统）发送控制指令，指导车辆按照规划的路径进行换道操作，实现无人驾驶电动汽车换道动态避障控制。

本文采用毫米波雷达技术设计动态避障控制器的内部组成结构如图 4 所示。

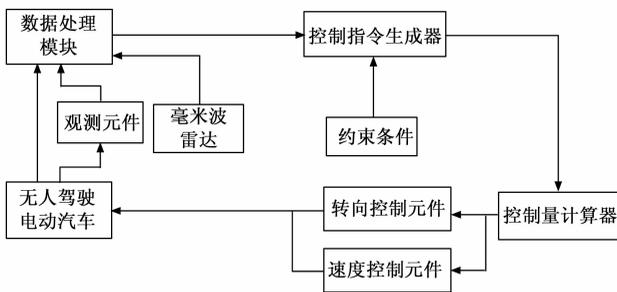


图 4 汽车换道动态避障控制器内部结构图

设计的汽车换道动态避障控制器包括电机控制、方向控制两个部分，其中方向控制可以进一步分为横向和纵向两个维度，由此保证控制器能够实现对无人驾驶电动汽车速度和姿态角度的控制。除控制元件之外，避障控制器内部还包含信号放大、信号转换、信号滤波等数据处理元件，在保证数据处理元件工作频率的同时，扩大控制器运算元件的内部存储空间，最大程度地保证控制器生成控制指令的更新速度以及控制指令的执行效率。另外，还需要对动

态避障控制器中加设多个通信接口，保证检测到的无人驾驶电动汽车状态数据能够直接输入到避障控制器中。

通过实时感知周围环境，识别并预测障碍物的运动轨迹，无人驾驶系统可以规划出一条能够避开这些障碍物的最佳路径，避免在换道过程中与周围车辆、行人或其他障碍物发生碰撞。确保换道过程的安全进行。当决策结果为可以执行换道行为时，毫米波雷达态避障控制器会对行驶环境中动态障碍物的实时位置进行预测，综合考虑障碍物位置预测结果，规划汽车的换道避障路线。根据侧向车道的障碍物状态<sup>[18]</sup>，将无人驾驶电动汽车的动态换道场景分为无障碍场景和有障碍场景两种，在两种换道场景下规划的避障路线如图 5 所示。

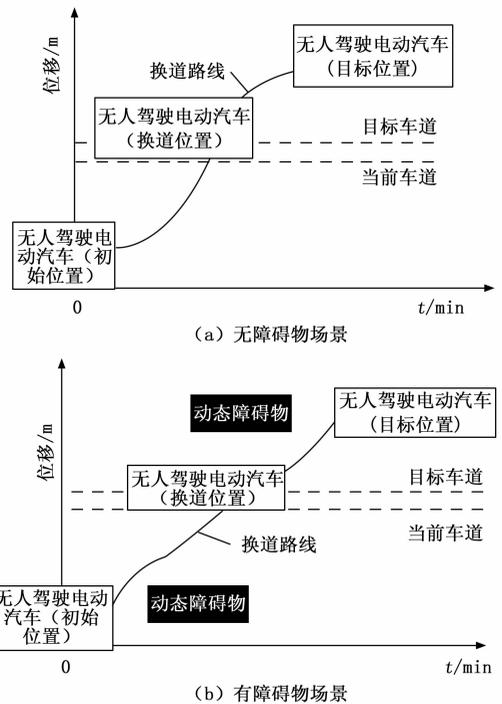


图 5 换道避障规划路线示意图

根据图 5 表示的换道避障规划路线规划目标<sup>[19]</sup>，在无障碍物场景下，规划的换道轨迹函数为：

$$\begin{cases} x_L(t) = \sum_{i=0}^5 a_i \times t^i \\ y_L(t) = \sum_{i=0}^5 b_i \times t^i \end{cases} \quad (11)$$

式中， $a_i$  和  $b_i$  分别表示车辆在  $i$  状态下的工作系数， $t$  为车辆的行驶时间。其中  $a_i$  和  $b_i$  的计算公式如下：

$$\begin{cases} a = R^{-1} \cdot q_x \\ b = R^{-1} \cdot q_y \end{cases} \quad (12)$$

其中： $R$  为无人驾驶电动汽车的换道目标， $q_x$  和  $q_y$  对应的是电动汽车在纵向和横向的行驶状态的参数检测结果。通过公式 (11) 和公式 (12) 的联立，可以得出无障碍物场景下无人驾驶电动汽车换道路线的规划结果。在无障碍物场景换道路线规划结果基础上，联立公式 (6) 预测控制

目标在换道过程中，动态障碍物的实时位置，预测结果为：

$$\begin{cases} x_{\text{obstacle}}(t) = (x_0(t) - d_{\text{portrait}}) + v_{\text{obstacle}}(t) \times \Delta t \\ y_{\text{obstacle}}(t) = (y_0(t) - d_{\text{lateral}}) + v_{\text{obstacle}}(t) \times \Delta \end{cases} \quad (13)$$

式中， $\Delta t$  为预测目标时间与当前时间的差值，根据动态障碍物位置的预测结果，以无障碍物场景下的换道路线规划结果为基础，对部分路线节点进行调整，由此完成对有动态障碍物场景下无人驾驶电动汽车动态换道避障路线的规划。

在完成了以上所有操作后，汽车已满足换道要求，此时，汽车从速度和角度两个方面生成控制指令<sup>[20]</sup>，进行汽车换道。其计算公式如下：

$$\begin{cases} K_v = \left( \frac{d_{\text{portrait}}}{t_h} \right) - v(t) \\ K_\theta = \left( \frac{d_{\text{lateral}}}{d_{\text{lateral}}} \right) - \theta(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中， $t_h$  为无人驾驶电动汽车的预期换道时间， $\frac{d_{\text{portrait}}}{t_h}$  和  $\frac{d_{\text{lateral}}}{d_{\text{lateral}}}$  为速度和角度的控制目标，根据换道避障路线的规划结果，确定控制目标的具体取值。

根据无人机驾驶电动汽车转矩与转向角度之间的关系、电机与行驶速度之间的关系，将控制指令与控制对象进行融合，由此得出换道避障控制律，即：

$$J = \{E, \gamma(K_v + K_\theta)\} \quad (15)$$

式中， $E$  和  $\gamma()$  分别为避障控制对象和控制增益系数。根据汽车状态和障碍物状态的实时检测结果，对控制量以及控制指令进行更新，并在控制器作用下执行，实现无人驾驶电动汽车换道动态避障控制任务。

## 2 实验分析

为了测试本文方法在多个不同行驶环境下的控制效果，采用白盒测试与对比测试相结合的方式，设计控制效果测试实验。白盒测试就是设定汽车换道控制目标，在优化设计控制方法支持下，得出汽车的实际控制结果，并记录控制过程中汽车的实际行驶数据，通过控制目标与行驶数据的对比，得出反映控制效果的测试结果。而对比测试则是设置多个传统控制方法作为对比项，在对比方法作用下实现对汽车的控制，完成汽车的换道行为，并记录相应的行驶数据，通过不同方法控制下行驶数据的比对，反映出优化设计方法在控制效果方面的优势。

### 2.1 选择无人驾驶电动汽车控制对象

此次实验选择某国产品牌的无人驾驶电动汽车作为控制对象。车长 4 620 mm，车宽 1 847 mm，轴距 2 715 mm。续航 620 km，零百加速时间 7.9 秒，电机最大输出扭矩 225 N·m，电机最大输出功率 160 kW；高清环视摄像头 4 个；高清前视摄像头 2 个；毫米波雷达 5 个；超声波雷达 12 个；驾驶行为检测摄像头 1 个。

在组成结构方面，该电动汽车主要由车身、底盘、动力系统、电池系统、传感器系统以及无人驾驶控制系统等构成。车身设计注重轻量化和安全性，采用高强度材料打造，确保车辆结构的稳定性和乘客的安全性。底盘部分集

成了悬挂系统、制动系统以及转向系统等，为车辆提供稳定的操控性能。动力电机选择的是高效能、低噪音的永磁同步电机，其自动驾驶系统总体由驾驶控制系统和环境感知系统两部分组成。该环境感知模块运作于两台单板机上，其核心组件为道路标志线识别与前方车辆识别。用于信息捕获的传感器涵盖了左右轮里程仪、节气门开度传感器、刹车压力传感器、轮摆角传感器以及两台高级摄像头。在电动汽车的控制方法上，为确保其实时性和稳定性，选用嵌入式实时操作系统 vxWorks 作为运行环境。

### 2.2 毫米波雷达设备安装与调试

为支持优化设计无人驾驶电动汽车换道动态避障控制方法中毫米波雷达技术的运行，安装 MRR4 型号的雷达设备，并设置其工作参数，完成设备调试工作。毫米波雷达设备的具体安装情况如图 6 所示。



图 6 毫米波雷达设备安装实景

图 6 表示毫米波雷达设备的工作参数设定情况如表 1 所示。

表 1 毫米波雷达设备工作参数设定表

毫米波雷达设备工作参数名称	近距离工作参数	远距离工作参数
最大传输距离	70 m	250 m
雷达信号频段	76 GHz	80 GHz
方位角	±9°	±60°
俯仰角	15°	20°
测速范围	±200 km/h	±300 km/h
同步检测对象数量	50 个	80 个
电源型号	12VDC/24VDC	12VDC/24VDC
功耗	CAN500kbit/s	CAN500kbit/s

根据无人驾驶电动汽车的行驶场景，实现近/远距离雷达工作模式的自动切换。为保证毫米波雷达设备能够支持对应技术的运行，需要从速度、角度、距离等方面对设备进行标定，以距离标定为例，通过在已知距离下放置参考物体，并测量雷达与物体之间的距离，以确定雷达系统的距离测量误差，根据测量误差计算结果向相反方向进行调整，完成毫米波雷达测量距离的标定，同理完成对设备速度以及角度的标定。

### 2.3 布设无人驾驶电动汽车行驶环境

为了全面考虑无人驾驶电动汽车的行驶场景，选择直线和弯道两种行驶环境作为测试环境，两种行驶环境均为三车道场景，且布设行驶环境中无明显坑洼、凸起以及其他静态障碍物。部分无人驾驶电动汽车行驶环境的布设情

况如图 7 所示。

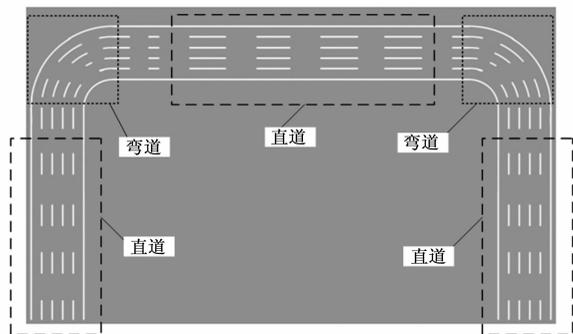


图 7 部分无人驾驶电动汽车行驶环境布设图

图 7 表示的汽车行驶环境中每条车道宽度均为 8.0 m。在白天行车环境下，布设多个不同型号的车辆作为动态障碍物，规划并执行行驶环境中其他车辆的行车路线，保证动态障碍物行动轨迹的可控性。

### 2.4 描述汽车换道动态避障控制效果测试实验过程

设定控制对象的初始行驶参数作为初始值，根据无人驾驶电动汽车行驶环境的布设结果，生成无人驾驶电动汽车的换道动态避障控制任务，并将其以位置坐标、姿态角、速度参数的方式进行表示，将生成的控制目标作为判定控制效果的比对标准。优化设计的换道动态避障控制方法采用 CarSim 和 Simulink 作为开发工具，CarSim 是一个汽车仿真软件，能够实现对无人驾驶电动汽车实时工作数据的监测与可视化输出，Simulink 主要用来执行避障控制任务，根据控制器和毫米波雷达设备的选择情况进行 I/O 配置，设定软硬件中断优先级，根据 I/O 配置进行对应硬件连线，保证控制器的执行结果以及毫米波雷达设备的输出结果能够协同作用到换道动态避障控制方法中。在实际的测试过程中，将无人驾驶电动汽车控制对象以及行驶场景中动态障碍物切换至启动状态，并安装设定路线和工作状态执行行驶任务，同时将优化设计的避障控制方法转换为计算机能够直接读取、运行的程序代码状态，通过毫米波雷达技术以及无人驾驶电动汽车换道动态避障控制程序的运行，输出运行结果。任意时刻无人驾驶电动汽车换道动态避障控制方法的输出结果如图 8 所示。

根据电动汽车和动态障碍物的移动状态，对控制指令进行实时更新，得出电动汽车换道全过程的避障控制结果，并记录电动汽车控制对象的实时行驶数据，直至换道行为执行完成为止。实验中设置的对比项为：基于改进 DDPG 的避障控制方法和基于能量最优的汽车控制方法，利用相同开发工具完成对比方法的开发，将其作用在无人驾驶电动汽车控制对象上，得出对比方法作用下的控制结果数据。

### 2.5 设置汽车换道动态避障控制效果测试指标

根据优化设计无人驾驶电动汽车换道动态避障控制方法的运行原理，可以看出毫米波雷达技术的执行精度将直接影响优化设计方法的避障控制效果，因此需要对控制方法中的毫米波雷达测量精度进行测试，测试指标为距离测



(a) 毫米波雷达技术



(b) 动态避障控制程序

图 8 无人驾驶电动汽车换道动态避障控制方法运行结果

试误差和速度测试误差，上述指标的测试结果为：

$$\begin{cases} \epsilon_d = |d_{\text{radar}} - d_{\text{actual}}| \\ \epsilon_v = |v_{\text{radar}} - v_{\text{actual}}| \end{cases} \quad (16)$$

其中： $d_{\text{radar}}$ 、 $d_{\text{actual}}$ 、 $v_{\text{radar}}$ 和 $v_{\text{actual}}$ 内部表示的是距离和速度的雷达测量值和实际值，误差测试结果越小，证明毫米波雷达技术的测量精度越优。另外汽车换道动态避障控制效果的测试指标设置为位置控制误差和换道碰撞概率，其中位置控制误差反映的是优化设计方法在达到预定位置时的精准度与稳定性，而换道碰撞概率综合考虑控制对象在纵向和横向两个方向上的碰撞概率，上述指标的测试结果如下：

$$\begin{cases} \epsilon_K = |x_K - x_m| + |y_K - y_m| \\ p_{\text{collision}} = p_x + p_y \end{cases} \quad (17)$$

式中， $(x_K, y_K)$ 和 $(x_m, y_m)$ 分别为控制方法作用下电动汽车的实际位置坐标以及控制目标数据， $p_x$ 和 $p_y$ 分别为横向碰撞误差和纵向碰撞误差。最终计算得出控制误差取值越小、碰撞风险越低，证明对应方法的控制效果越优。

### 2.6 汽车换道动态避障控制效果测试实验结果与分析

通过相关数据的统计，得出毫米波雷达测量精度的测试结果，如表 2 所示。

将表 2 中的数据代入到公式 (16) 中，计算得出毫米波雷达的平均距离和速度测量误差分别为 0.1 mm 和 0.1 mm/s，满足运行要求。在此基础上，采用本文方法，文献 [3] 方法和文献 [4] 方法对汽车换道动态避障控制下无人驾驶电动汽车的实际行驶数据进行统计，通过公式 (16) 的计算，得出位置控制误差和换道碰撞概率的测试对比结果，如图 9 所示。

表2 毫米波雷达测量精度测试数据表

测试时间/min	实际数据		毫米波雷达测量数据	
	无人驾驶电动汽车与动态障碍物之间的实际距离/mm	动态障碍物的实际行驶速度/(mm/s)	无人驾驶电动汽车与动态障碍物之间的测量距离/mm	动态障碍物测量行驶速度/(mm/s)
1	3 025	38	3 025	38
2	2 178	40	2 178	40
3	3 237	42	3 237	41
4	1 649	28	1 649	28
5	2 911	35	2 910	35
6	1 852	39	1 852	39
7	826	47	826	47
8	1 088	29	1 088	29

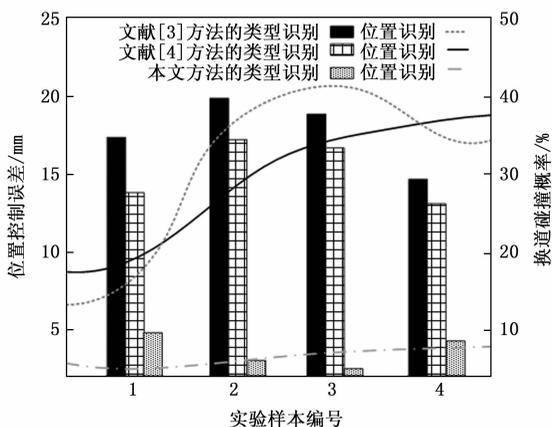


图9 无人驾驶电动汽车换道动态避障控制效果测试结果

从图9中可以直观看出,采用本文方法的无人驾驶电动汽车的位置控制误差在5%以下,换道碰撞概率在10%以下,明显低于文献[3]方法和文献[4]方法的测试结果,说明本文方法具有更好的控制效果,可以更有效地进行动态避障。

### 3 结束语

无人驾驶电动汽车是智能交通领域的重要产物,在此次研究中,利用毫米波雷达的精准感知能力结合先进的控制算法,使得无人驾驶电动汽车在复杂多变的道路环境中能够灵活应对,实现安全、高效地换道避障,从而保证无人驾驶电动汽车的行驶安全。实验结果表明,应用本文方法的无人驾驶电动汽车的位置控制误差在5%以下,换道碰撞概率在10%以下,具有更好的动态避障控制效果,有助于推动无人驾驶技术的发展。

#### 参考文献:

[1] 李新凯, 虎晓诚, 马萍, 等. 基于改进DDPG的无人驾驶避障跟踪控制[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2023, 51(11): 44-55.

[2] 吴小龙, 夏甫根, 陈静, 等. 基于能量最优的无人驾驶汽车路径跟踪控制[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(1): 163-169.

[3] YUXIONG JI, LANTAO NI, CONG ZHAO, et al. TriPField: A 3D potential field model and its applications to local path planning of autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(3): 3541-3554.

[4] 魏凌霄, 王翔宇, 邱彬, 等. 基于自适应预瞄路径的自动驾驶车辆寻迹和避障控制[J]. 机械工程学报, 2022, 58(6): 184-193.

[5] 袁朝春, 王俊娟, 何友国, 等. 基于路面坑洞检测的智能汽车主动避障控制[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2022, 43(5): 504-511.

[6] 宋洁, 张小俊, 张云龙. 智能汽车换道避障路径规划与跟踪控制[J]. 现代制造工程, 2022(10): 43-50.

[7] 李军, 周伟, 唐爽. 基于自适应拟合的智能车换道避障轨迹规划[J]. 汽车工程, 2023, 45(7): 1174-1183.

[8] 余世明, 舒晓翔, 陈伟轩, 等. 基于风险评估的自主车辆主动避障预测控制[J]. 浙江工业大学学报, 2022, 50(1): 1-8.

[9] 阳鑫, 唐小林, 杨凯, 等. 极限工况下无人驾驶车辆运动规划策略研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(22): 349-359.

[10] 陈鹏宇, 孔令安, 彭忆强. 基于五阶Bezier曲线的无人车避障轨迹规划[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(31): 13933-13941.

[11] 王志文, 辛鹏, 孙洪涛, 等. 基于收缩约束模型预测控制的无人车辆路径跟踪[J]. 控制与决策, 2022, 37(3): 625-634.

[12] 王茂森, 鲍久圣, 谢厚抗, 等. 隧道环境内无人驾驶车辆目标-决策两级信息融合感知策略[J]. 中国机械工程, 2024, 35(3): 427-437.

[13] 程越, 李川, 李鑫, 等. 无人驾驶拖拉机实时避障路径规划算法[J]. 重庆大学学报, 2022, 45(8): 66-77.

[14] 邓云红, 赵治国, 杨一飞, 等. ADAS系统视觉与毫米波雷达分布式抗差卡尔曼滤波融合算法[J]. 汽车工程, 2024, 46(5): 805-815.

[15] 刘平, 刘自斌, 杨明亮, 等. 考虑道路曲率的多约束高速无人驾驶汽车横向跟踪控制方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(2): 120-134.

[16] 何永明, 冯佳, 权聪, 等. 基于联合仿真的超高速公路车辆制动避障系统[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2022, 50(10): 19-28.

[17] 孙曼曼, 陈珍萍, 李海峰, 等. 基于博弈论的网联自动驾驶车辆协同换道研究[J]. 计算机仿真, 2023, 40(1): 161-166, 207.

[18] 聂枝根, 沈澳, 王万琼, 等. 考虑参数摄动的智能汽车动态侧向避障鲁棒控制策略[J]. 重庆大学学报, 2023, 46(3): 103-117.

[19] 周俊宇, 李克强, 任啥嘛, 等. 基于场景划分的智能网联汽车协同换道避障方法[J]. 汽车工程, 2024, 46(5): 745-753.

[20] 杜国栋, 邹渊, 张旭东, 等. 基于双估计强化学习结合前向预测控制的自动驾驶运动控制研究[J]. 汽车工程, 2024, 46(4): 564-576.