

# 基于正弦函数的自动驾驶电动汽车换道控制系统设计

赵红妮

(西安思源学院, 西安 710038)

**摘要:** 由于交通道路环境具有不确定性, 为实现对换道行为的有效控制, 对基于正弦函数的自动驾驶电动汽车换道控制系统进行了研究; 利用正弦型三相逆变控制电源输入的电力信号, 驱动换道模拟平台与换道信息通信编码器, 完成自动驾驶电动汽车换道控制系统的各级应用部件设计; 筛选出关键的换道片段, 在此基础上, 提取始末换道位置, 构建车道中心线势场, 定义具体的换道轨迹簇, 生成控制所需的电动汽车换道轨迹簇; 根据安全换道车距的正弦函数计算结果, 搭建反馈控制器闭环, 并利用该模型实施对换道轨迹的控制与规划, 实现基于正弦函数的汽车换道行为控制, 联合各级应用结构, 完成自动驾驶电动汽车换道控制系统的设计; 实验结果表明, 上述系统不会因不及时换道导致自动驾驶电动汽车的行车碰撞问题, 且能够准确识别道路中的障碍物, 提升行车安全; 该系统的设计和实现为自动驾驶电动汽车的发展和应用提供了有益的参考和启示。

**关键词:** 正弦函数; 自动驾驶; 电动汽车换道; 三相逆变电源; 模拟平台; 始末位置; 轨迹簇; 反馈控制器

## Design of Lane Change Control System for Autonomous Electric Vehicle Based on Sine Function

ZHAO Hongni

(Xi'an Siyuan University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** Due to the uncertainty of traffic road environments, in order to effectively control lane changing behaviors, a lane changing control system for autonomous electric vehicles based on a sine function is studied. The power signal input from the sinusoidal three-phase inverter control power supply is used to drive the simulation platform and information communication encoder of the lane changes, and design the application components of the lane changing control system for an autonomous driving electric vehicle at all levels. The key lane changing segments are selected to extract the starting and ending lane changing positions, construct the potential field of the lane centerline, define the specific lane changing trajectory clusters, and generate the electric vehicle lane changing trajectory clusters required by the control. According to the calculation results of safety lane changing distance based on the sine function, the feedback controller closed-loop is constructed, and the model is used to control and plan the lane changing trajectories, achieve the vehicle lane changing behavior control based on the sine function. The various application structures are combined to complete the design of the autonomous driving electric vehicle lane changing control system. The experimental results show that the above system does not cause collisions in autonomous electric vehicles due to delayed lane changing, and can accurately identify the obstacles on the road, improving driving safety. The design and implementation of this system provide useful reference and inspiration for the development and application of autonomous electric vehicles.

**Keywords:** sine function; autonomous driving; electric vehicles changing lanes; three-phase inverter power supply; simulation platform; starting and ending positions; locus cluster; feedback controller

## 0 引言

随着自动驾驶技术的快速发展和电动汽车的普及, 人们对交通安全和驾驶舒适性的需求日益增强。换道是日常行驶中必不可少的操作, 而一个高效、精确且安全的换道控制系统可以减少交通事故的发生<sup>[1]</sup>。因此, 研究自动驾驶

电动汽车换道控制系统将有助于实现自动驾驶汽车更安全、更智能地行驶, 同时为未来智能交通系统和城市规划提供有力支持, 推动交通领域的技术创新和进步。

为实现自动驾驶电动汽车的及时、安全换道, 原志路等人<sup>[2]</sup>设计了基于路由选择的车辆转向换道控制系统, 利用 VISSIM 仿真软件构建车辆换道场景, 在汇总车辆行驶

收稿日期: 2023-12-12; 修回日期: 2024-01-31。

作者简介: 赵红妮(1987-), 女, 硕士, 讲师。

引用格式: 赵红妮. 基于正弦函数的自动驾驶电动汽车换道控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(8): 181-187.

数据的同时,联合 Matlab 机制对数据进行拟合处理,根据求解所得的速度、流量与转向比例条件,确定最佳换道区域,以便于主机元件实施对自动驾驶电动汽车的换道控制。但是该方法没有考虑到电动汽车行驶过程中车辆瞬时速率不可能为零,且忽视了车辆自身长度,不能够实现安全换道。廖鹏等人<sup>[3]</sup>设计了基于车辆动力传动和转向信息的控制系统,首先根据 NGSIM (Next Generation Simulation) 数据定义自动驾驶电动汽车在换道过程中的主要行驶任务,然后利用 highD 数据,对车辆行驶任务进行验证处理,接着基于二自由度车辆模型分析行驶车辆的换道运动特性,提取大量的动力学传动参数,以供控制系统主机的调取与利用,实现车辆换道行为的有效控制。但是就实际应用情况来看,该系统的应用并不足以驱动自动驾驶电动汽车及时换道,有一定几率会造成行车碰撞。石振新等人<sup>[4]</sup>设计了基于 ANFIS 及 MPC 的车辆转向换道控制系统,基于 MPC 算法构建最小车距安全模型,利用 ANFIS 系统输出附加横摆力矩,修正车身姿态,提高车辆转向换道的稳定性。但是对于未知或复杂的交通环境无法有效适应和处理,可能导致换道过程中的不准确操作或无法及时作出响应。孙志伟等人<sup>[5]</sup>基于横纵向 MPC 展开智能车换道控制研究,构建基于车辆动力学模型的横向误差动力学模型和车辆纵向控制模型,结合 MPC 控制器实现换道控制,该方法存在不能有效躲避障碍物的问题。

为避免上述情况的发生,设计一种基于正弦函数的新型自动驾驶电动汽车换道控制系统。正弦函数是三角函数中的一种,可以理解为股与弦的比值,在直角三角形中,任意一个锐角对边与斜边的长度比,就是该角度的正弦值。正弦函数的值既可以通过数学公式来计算,也可以在计算器或三角函数表中来查找。如果已知直角三角形其中一个锐角的数值水平,那么可以根据对边/斜边的公式对其正弦值进行计算,其中“对边”是与给定锐角相对应的边,“斜边”是直角三角形中最长的边。利用正弦函数应用特点设计汽车换道控制系统,能够准确计算转角位置处各条行车轨迹的长度值,避免行车碰撞问题的出现。

## 1 自动驾驶电动汽车换道控制系统各级应用部件设计

自动驾驶电动汽车换道控制系统的应用部件主要由正弦型三相逆变控制电源、换道模拟平台、换道信息通信编码器三部分组成,本章节针对各级应用部件的具体设计方法展开研究。

### 1.1 正弦型三相逆变控制电源

正弦型电动汽车三相逆变控制电源以 STM 电动汽车主控部件作为核心单元,其标准时钟倍频达到 168 MHz,可以高速驱动三相逆变电流,在保障变频压缩机稳定运行状态的同时,协调主机元件,使其对汽车换道行为进行有效控制。逆变电流在三相滤波装置中的传输行为符合正弦波

曲线,1/4 逆变周期时电流输出量取得正向最大值、1/2 逆变周期时电流输出量为零、3/4 逆变周期时电流输出量取得负向最大值,在后续逆变周期中,三相滤波装置所输出电流的传输行为依然保持上述特征。MOS 管逆变设备的运行稳定性较强,在三相逆变电流的作用下,其对于 STM 电动汽车主控部件的驱动行为也并不会表现出明显的周期性特征,只不过在逆变时间经过 1/2 时长时,电流信号的传输方向会发生改变,对于系统主机而言,其对于自动驾驶电动汽车换道行为的控制也集中于这一时间节点之处。此外,还对整个正弦型电动汽车三相逆变控制电源的结构进行了优化设计。综合考虑了电源的效率、体积、重量和可靠性等方面的要求,对电源的结构布局进行了合理安排。采用了模块化设计理念,将电源划分为多个功能模块,便于维护和升级。同时,还对电源的接口进行了标准化设计,以确保与其他部件的兼容性和互操作性。完整的正弦型电动汽车三相逆变控制电源结构如图 1 所示。

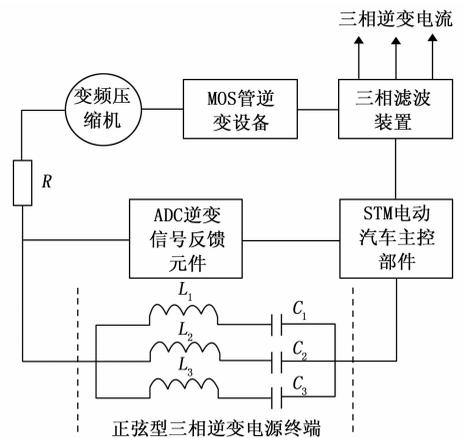


图 1 正弦型电动汽车三相逆变控制电源结构示意图

正弦型三相逆变电源终端提供了电源结构所需的全部电力信号,在 ADC 逆变信号反馈元件保持连续开放状态的情况下,每一个电力信号经过反馈元件的聚合处理后,按需分配至汽车主控部件和变频压缩机之中<sup>[6]</sup>。由于 MOS 管逆变设备可以同时接收正向、负向状态的电力信号,所以系统主机在控制自动驾驶电动汽车换道行为的过程中,不需对三相逆变电流的传输方向进行统一处理。

### 1.2 换道模拟平台

电动汽车自动驾驶换道模拟平台的组成结构包括 Carla 模块、AirSim 模块两部分。其中,Carla 模块是仿真型框架单元,在自动驾驶电动汽车换道控制系统中,该模块接受正弦型三相逆变控制电源输出的电力信号,并可以对系统主机所定义的自动驾驶仿真规则与标准进行按需调整,避免车辆行驶过程中出现碰撞问题。在设计 Carla 模块时,特别关注碰撞避免机制的实现。通过精确的电力信号控制和仿真规则调整,可以有效地防止车辆在模拟行驶过程中发生碰撞,确保模拟的安全性和可靠性。AirSim 模块具有较

强的仿真模拟能力，支持多种不同的传感模式，当外界环境发生改变时，该模块定义障碍物节点所处具体位置，并按照正弦函数原则，计算定义节点与汽车当前所处位置的间隔，以此为基础，实施对换道行为的控制<sup>[7]</sup>。在 AirSim 模块中，定义了障碍物节点并精确计算其与汽车当前位置的间隔。这一设计使得模块能够根据正弦函数原则，实施对换道行为的精确控制，确保车辆在模拟和实际行驶中都能够安全、有效地进行换道。详细的电动汽车自动驾驶换道模拟平台模块结构如图 2 所示。

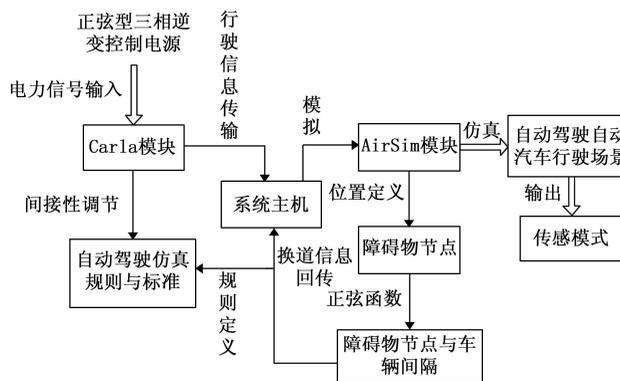


图 2 换道模拟平台的模块结构

在电动汽车自动驾驶换道模拟平台中，Carla 模块、AirSim 模块之间数据信息的反馈必须借助系统主机元件，Carla 模块完成向系统主机的车辆行驶信息输入处理后，AirSim 模块通过持续性模拟的方式，从已存储信息参量中提取可被利用的数据样本，并通过仿真处理的方式，形成满足自动驾驶电动汽车行驶需求的场景界面，对于换道控制系统而言，这些场景界面隶属于不同的信息传感模式类别之中<sup>[8]</sup>。完成上述处理后，AirSim 模块继续执行位置定义与正弦函数运算指令，直至确定障碍物节点与行驶车辆的间隔水平。对于系统主机而言，间隔信息有助于主机元件对汽车换道行为进行控制与判断，因此所有间隔信息必须再次回传至系统主机之中。

### 1.3 换道信息通信编码器

在自动驾驶电动汽车换道控制系统中，换道信息通信编码器是对行车数据进行转换处理的设备，可以将数值信息参量转换成通讯信号，以便主机元件实现对电动汽车换道行为的有效协调与控制。从模块组成的角度来看，换道信息通信编码器包含编码芯片、脉冲感应装置及多个端口组织<sup>[9]</sup>。为满足正弦函数所提出的换道信息编码需求，通信编码器采用 HEDS-9000 型号的编码芯片，当换道模拟平台向外输出自动驾驶电动汽车行驶场景信息时，编码芯片开始对场景数据进行分类处理，并将其分别存储于不同的数据库主机之中，以便于主机元件可以对编码所需的信息参量进行自由调取与利用。在对脉冲感应装置进行设计时，为了配合主机元件对自动驾驶电动汽车换道行为的控

制需求，通信编码器的脉冲感应装置采用了脉冲旋转设备。一旦脉冲旋转设备感应到危险信息，它会立即将此信息转化为电信号，并通过系统快速传输给主机元件。为配合主机元件对自动驾驶电动汽车换道行为的控制需求，通信编码器的脉冲感应装置为脉冲旋转设备，在感应到外界环境中的危险信息后，该设备元件开始转动，并以此为基础，促进换道控制指令向着系统主机的快速传输<sup>[10]</sup>。端口组织特指 I/O 端口、增量型编码端口与 GND 通信端口，分别与换道控制系统的不同部件结构相连，为执行指令提供较为稳定的系统传输环境。具体的换道信息通信编码器连接结构如图 3 所示。

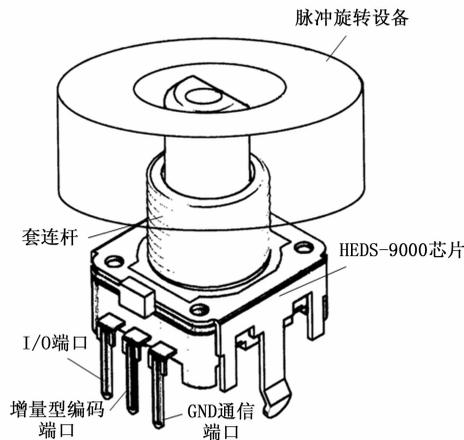


图 3 通信编码器结构简图

套连杆起到承上启下的连接作用，将上部脉冲旋转设备与下部 HEDS-9000 芯片单元套接在一起，以便于通信编码器对于换道信息的编码与处理能力能够得到充分发挥。

## 2 电动汽车换道轨迹簇生成

轨迹簇是指电动汽车换道轨迹的聚类分布曲线，系统主机对于轨迹簇的分析有助于其对车辆换道行为进行有效控制，本章节通过对换道片段筛选，提取自动驾驶电动汽车的始末位置，并按照车道中心线势场建模标准，定义完整的换道轨迹簇。

### 2.1 换道片段筛选

对于自动驾驶电动汽车换道片段的筛选应同时考虑行驶车辆的横向位移识别区与纵向位移识别区。

1) 横向位移识别区的定义影响电动汽车从一条行驶轨迹转换至另一条行驶轨迹的能力，在无限接近理想条件的情况下，控制系统所定义的汽车换道就是将车辆由一条行驶轨迹平移至另一条行驶轨迹，该行为过程以避免车辆与障碍物发生碰撞为目标，横向位移的发生时间必须早于控制系统所定义的标准碰撞时间<sup>[11]</sup>。

对于横向位移识别区的定义参考公式 (1)：

$$L_1 = \frac{H}{V \cdot \sqrt{2\delta}} \quad (1)$$

其中： $H$  为原始行驶轨迹与换道后行驶轨迹的横向间

隔,  $V$  表示自动驾驶电动汽车在换道节点处的实时行驶速度,  $\delta$  为系统主机对横向换道区域的识别参数。

2) 纵向位移识别区的定义影响控制系统所规定的标准碰撞时间, 纵向位移识别区面积越大, 障碍物节点与车辆换道节点的实时间隔距离也就越远, 在此情况下, 控制系统所规定的标准碰撞时间也就相对较长<sup>[12]</sup>。

对于纵向位移识别区的定义参考公式 (2):

$$L_2 = \exp - \frac{(k' - k_0)^2}{2V} \quad (2)$$

其中:  $k_0$  为障碍物节点的纵向位移坐标,  $k'$  为车辆换道节点的纵向位移坐标。

联立公式 (1) ~ (2), 可将控制系统所定义的换道片段筛选条件表示为:

$$G = \frac{\chi}{2} \left[ \ln(2L_1) + \ln\left(\frac{L_2}{\beta}\right) + \alpha \vec{l} \right] \quad (3)$$

其中:  $\chi$  为标准筛选系数,  $\beta$  为时间表达系数,  $\alpha$  为自动驾驶电动汽车行驶轨迹变更参数,  $\vec{l}$  为换道节点处的车辆轨迹片段取样向量。对于控制系统而言, 筛选换道片段属于一种瞬时行为, 所以在取样计算参数时, 只以单一换道节点作为参考标准。

## 2.2 始末换道位置提取

由于电动汽车行驶过程中, 车辆瞬时速率不可能为零, 且车辆自身长度不可以忽略不计, 所以完成汽车换道需要一定的轨迹区域。从数值角度来看, 始末换道位置的间隔距离决定了换道所需轨迹区域的具体长度, 受到换道片段筛选值、车辆长度、速度差三项物理量的影响。

初始换道位置就是汽车换道行为在轨迹区域内所处的起始节点, 控制系统生成电动汽车换道轨迹簇时, 遵循正弦函数表达式, 且在无需连续避障的情况下, 车辆并不需要持续换道, 因此在筛选换道片段时, 所定义换道节点的位移坐标不能小于初始换道位置的坐标数值。末尾换道位置是换道轨迹区域的终止节点, 该节点必然存在于初始换道位置后端<sup>[13-14]</sup>。如果控制系统所筛选出的换道片段超过了换道区域的覆盖范围, 那么汽车轨迹簇就会发生明显偏移, 所以换道节点坐标不仅要大于始位置, 还要小于末位置。

设  $s$  为汽车换道轨迹计量值,  $j$  为车辆长度,  $\gamma$  为满足正弦函数表达式的车辆避障参数,  $\dot{v}$  为汽车换道速度差,  $f$  为间隔距离定义项,  $\varphi$  为位置坐标限定系数。在上述物理量的支持下, 联立公式 (3), 可将始换道位置  $g_0$ 、末换道位置  $g'$  分别表示为:

$$\begin{cases} g_0 = G \cdot (L_1^2 + L_2^2)^{(-1/\gamma)j/s^2} \\ g' = \min\left(\frac{L_1^2 + L_2^2}{G}\right) + \bar{\omega} \sum f\dot{v} \end{cases} \quad (4)$$

提取始末换道位置只能定义一部分的汽车行驶轨迹区域, 该表达式不具有普遍性。因此, 为实现对自动驾驶电动汽车换道行为的有效控制, 应在同一行驶轨迹中进行多次提取, 以保证车辆换道节点与轨迹曲线的适应性关系。

## 2.3 车道中心线势场构建

换道控制系统以车道线为标准, 划分具体的汽车行驶车道, 生成电动汽车换道轨迹簇的过程中, 车辆必须在车道内行驶, 才能保证换道行为的安全性。依照车道线理解汽车换道, 就是指自动驾驶电动汽车超越初始车道线, 进入其他车道线的变换行为<sup>[15]</sup>。在单一车道内, 中心线是指中心节点所在直线, 如果换道行为发生在两个相邻车道中, 那么换道就是指由一条车道中心线到另一条车道中心线的过程; 如果换道行为发生在多个连续的行驶车道中, 那么中心线就是中间车道中心节点所在直线。从势能转换的角度来看, 车道中心线所对应的势场值最高, 向两侧车道呈现逐渐递减的变化状态。

设定  $\hat{d}$  为单一车道内的势场场强标准值,  $G'$  为换道过程中汽车行驶轨迹所涉及的车道数量,  $\vec{F}$  为初始车道中心线、换道后车道中心线间的势场牵制向量,  $\epsilon$  为始末换道位置间的车道势场收敛系数, 联立公式 (4), 推导自动驾驶电动汽车的车道中心线势场表达式如下:

$$D = \sum_{g=1}^{+\infty} \left(\frac{g_0}{g'}\right) \exp\left(\frac{G'|\hat{d}|}{2\epsilon F^2}\right) \quad (5)$$

在行驶车道中, 车辆不是一个质点, 即使在已知始末换道位置的情况下, 依然有可能发生不成功换道的问题。但对于基于正弦函数的控制系统而言, 保证车辆在行驶过程中不发生碰撞是主要目的, 所以在构建车道中心线势场时, 无论横向位移识别区还是纵向位移识别区, 都必须留有安全距离<sup>[16]</sup>。特别是在车辆行驶速度较快的情况下, 留有足够的安全距离, 主机元件根据中心线势场构建条件所定义的换道轨迹簇, 才能够将所有行车轨迹都收录在内。

## 2.4 换道轨迹簇定义

定义自动驾驶电动汽车换道轨迹簇需要满足以下要求:

- 1) 为保证车辆的稳定行驶, 控制系统要求换道轨迹应保持连续性。
- 2) 换道轨迹的连续性意味着汽车的速度与加速度也保持连续变化状态, 因此系统主机在控制车辆换道行为时, 需要保证轨迹一阶导数与二阶导数均呈现出连续有界的数值形式<sup>[17-18]</sup>。
- 3) 对于控制系统而言, 车辆换道轨迹极易产生, 并且完全符合正弦函数所规定的车辆动力学约束作用。

基于车道中心线势场所定义的换道轨迹如图 4 所示。

以电动汽车的中心点作为坐标原点建立平面直角坐标系, 其中,  $X$  轴方向与车辆行驶方向相同,  $Y$  轴所在方向与  $X$  轴垂直。( $X_0, Y_0$ ) 为车辆初始换道位置, ( $X_1, Y_1$ ) 为结束换道时车辆在轨迹内的位置。定义自动驾驶电动汽车换道轨迹簇的具体任务就是在满足安全行车标准的情况下, 规划出所有满足动力学约束条件的实时换道轨迹。

联立初始换道位置坐标、结束换道时的位置坐标与公式 (5), 可将自动驾驶电动汽车换道轨迹簇定义式表示为:

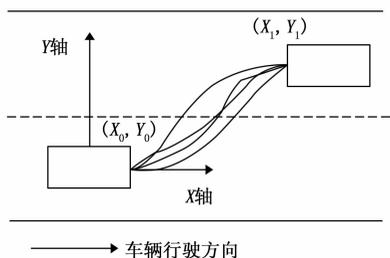


图 4 自动驾驶电动汽车换道轨迹

$$S = \begin{cases} s_x = \frac{\sin\lambda}{\varphi} \cdot D |X_1 - X_0| \\ s_y = \kappa \cdot D |Y_1 - Y_0| \end{cases} \quad (6)$$

其中： $s_x$  为 X 轴方向上的换道轨迹分量， $\lambda$  为换道前、后汽车中心点连线与 X 轴所在方向的夹角， $\varphi$  为横向轨迹位移， $s_y$  为 Y 轴方向上的换道轨迹分量， $\kappa$  为纵向轨迹位移。系统对于汽车换道行为的控制并不是定义距离最短的换道轨迹，而是为了避免行车碰撞问题的出现。

### 3 基于正弦函数的汽车换道行为控制

为实现对自动驾驶电动汽车换道行为的有效控制，根据正弦函数，计算安全换道车距，再借助反馈控制器闭环，完成对换道轨迹曲线的控制与规划。

#### 3.1 安全换道车距的正弦函数计算

计算安全换道车距的正弦函数是与车辆行驶和道路安全相关的问题，控制系统为了简化计算问题，假设自动驾驶电动汽车在一条直道上行驶，并且会在固定时刻进行换道。根据换道前、后车辆所处位置，控制系统可以准确测得水平向与竖直向距离，但由于换道过程中，车辆行驶轨迹会发生明显的空间向偏转，而利用正弦函数，则可以在已知水平、竖直距离的情况下，根据直角三角形内的锐角数值，确定空间向换道偏转行为的具体数值水平<sup>[19-20]</sup>。设定  $\sigma$  表示由横轴换道轨迹、纵轴换道轨迹、实际换道位移所组成直角三角形中用来描述换道行为的锐角参量，联立公式 (6)，可将安全换道车距的正弦函数表达式定义为：

$$\sin\sigma = \frac{\mu S}{|A|} \quad (7)$$

其中： $A$  为安全换道车距的测量值， $\mu$  为正弦期望系数。当控制系统感知到自动驾驶电动汽车目标行驶方向上存在其他慢车时，车辆并不会直接进行换道，如果要进行换道需要满足 3 个条件：1) 目标车辆实时车速必须大于占道慢车的行驶车速；2) 实施换道时，目标车辆与占道慢车的间距远大于安全车距；3) 描述换道行为的锐角度数不等于零。

#### 3.2 反馈控制器搭建

在自动驾驶电动汽车换道控制系统中，反馈控制器负责提取主机元件中生成的轨迹簇信息，并按照正弦函数原则，对其进行处理，使得系统主机能够对汽车换道行为进行有效控制。反馈控制器的核心闭环结构包括脉冲输出信

号、模拟控制信号与换道信息<sup>[21]</sup>。其中，脉冲输出信号、模拟控制信号是系统换道模拟平台与通信编码器的主要处理对象，在上机位组织保持开放状态的情况下，轨迹簇信息经过变换处理后，成为可供系统控制主机直接调取的信号参量<sup>[22]</sup>。已生成换道信息的定义参考正弦函数表达式，对于系统主机而言，这些数据信息有助于汽车换道行为控制指令的执行。完整的汽车换道反馈控制器如图 5 所示。

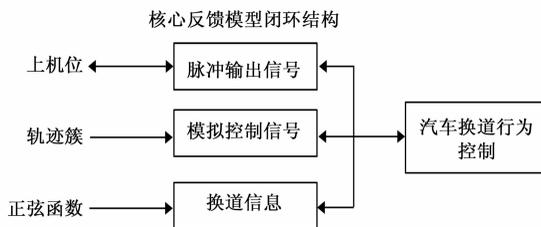


图 5 基于正弦函数的汽车换道反馈控制器

设  $\hat{q}$  为汽车换道轨迹簇传输特征， $\vartheta$  为换道信息调取系数， $\dot{w}$  为基于正弦函数所定义的汽车换道信息反馈向量， $\nu$  为上机位开放参数。在上述物理量的支持下，联立公式 (7)，推导基于正弦函数的换道控制系统反馈控制器闭环定义式如下：

$$E = - \left( \sin\sigma \frac{\hat{q}}{\vartheta} + \nu \dot{w} \right) \quad (8)$$

对于自动驾驶电动汽车换道控制系统的运行，反馈控制器起到了重要的调节作用，可以完成由轨迹簇信息到控制执行指令的转化，使得系统主机对于汽车换道行为的精准化控制能力得到有效保障。

#### 3.3 汽车换道轨迹控制与规划

基于正弦函数所定义的汽车换道轨迹是指相对于换道前车辆，完成换道后电动汽车的行驶加速度为零。对于系统控制主机而言，相对加速度为零可以避免在换道过程中汽车的行驶轨迹发生突然偏转，使得换道时间提前于碰撞时间。结合反馈控制器闭环对于电动汽车换道轨迹的连续控制行为来看，车辆在换道开始与结束时的行驶状态都平行于车道线<sup>[23]</sup>。设  $\Delta T$  为换道指令的单位执行周期， $\theta$  为车道线连续性定义参数， $\vec{j}$  为换道过程中的车道轨迹偏转向量， $\vec{I}$  为基于正弦函数的车辆换道行为控制项，联立公式 (8)，可将汽车换道轨迹的控制与规划表达式定义为：

$$R = \frac{\theta \cdot E^2}{2} \cdot \frac{\sqrt{|\vec{j}|}}{|\Delta T|^2} \quad (9)$$

至此，实现对相关参数指标的计算与处理，联合各级硬件应用模块，完成基于正弦函数的自动驾驶电动汽车换道控制系统的设计。

### 4 实验分析与研究

本次实验以验证基于正弦函数的自动驾驶电动汽车换道控制系统的应用效果作为研究目标，分析在不同控制系统作用下，汽车换道过程中是否会发生碰撞行为。选择基

于正弦函数的自动驾驶电动汽车换道控制系统、基于路由选择的车辆转向换道控制系统、基于车辆动力传动和转向信息的控制系统 3 种不同方法进行实验。

#### 4.1 实验方案设计

车辆碰撞是一种非安全性行车行为，包括车辆与车辆碰撞、车辆与障碍物碰撞两种表现形式。从可行性角度来看，汽车换道并不是将车辆由一条行车轨迹平移至另一条不相关的轨迹之中，而是要求原行车轨迹与换道后的行车轨迹之间必须保留有相互重叠的部分，在行车过程中，利用控制系统主机协调车辆行驶行为，完成对行车轨迹的转换，如图 6 所示。

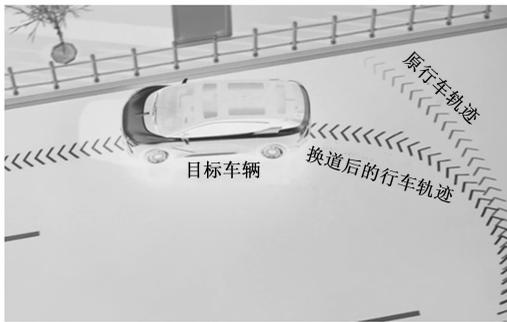


图 6 车辆换道场景图

本次实验以车辆与障碍物之间的碰撞作为研究对象，首先利用基于正弦函数的自动驾驶电动汽车换道控制系统协调车辆转向行为，记录该系统作用下，换道行为的发生时间，所得结果为实验组变量；然后利用基于路由选择的车辆转向换道控制系统协调车辆转向行为，记录换道行为发生时间为 A 对照组变量；接着利用基于车辆动力传动和转向信息的控制系统协调车辆转向行为，记录换道行为发生时间为 B 对照组变量；最后将换道行为发生时间与原轨迹内的标准碰撞时间进行对比，总结实验规律。

#### 4.2 标准碰撞时间

实验过程中，每隔 100 m 放置一个障碍物，整条行车轨迹内共放置 6 个障碍物，在不进行换道的情况下，车辆行驶至障碍物位置时必然发生碰撞，而碰撞行为的发生时间即为标准碰撞时间，如图 7 所示。

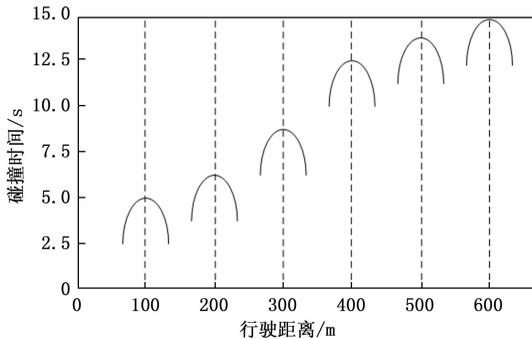


图 7 标准碰撞时间

分析图 7 可知，第 3 次、第 4 次碰撞行为之间的时间间隔较长，表示实验车辆在 300~400 m 区段内的行车速度较慢；第 5 次、第 6 次碰撞行为之间的时间间隔较短，表示实验车辆在 500~600 m 区段内的行车速度较快；第 1 次与第 2 次、第 4 次与第 5 次碰撞行为之间的时间间隔相等，表示实验车辆在 100~200 m、400~500 m 区段内的行车速度相等。

#### 4.3 结果分析

表 1 反映了实验组、A 对照组、B 对照组换道时间与标准碰撞时间之间的数值对比情况。

表 1 换道时间与标准碰撞时间对比

行驶距离/m	实验组/s	A 对照组/s	B 对照组/s	标准碰撞时间/s
100	2.50	4.98	5.03	5.00
200	4.05	6.20	6.30	6.25
300	6.04	8.80	8.60	8.75
400	10.01	12.52	12.35	12.50
500	10.80	13.63	13.00	13.75
600	12.63	14.40	14.53	14.81

系统对于汽车换道行为的控制有效率计算公式如下：

$$\eta = \frac{t_0}{t'} \times 100\% \quad (10)$$

其中： $t_0$  为标准碰撞时间， $t'$  为换道时间。公式 (10) 的成立要求换道时间数值必须小于标准碰撞时间，即只有在  $t_0 - t' > 0$  的情况下，才能求得系统对于汽车换道行为的控制有效率。

分析表 1 可知，行车距离为 300、400 m 时，A 对照组换道时间数值大于当前情况下的标准碰撞时间，行车距离为 100、200 m 时，B 对照组换道时间数值也大于当前情况下的标准碰撞时间，根据公式 (10) 的成立条件可知，上述 4 组实验结果不可以用于对控制有效率的计算。去除上述 4 组实验结果可知，600 m 时，实验组换道时间与标准碰撞时间之间的差值最小，为 2.18 s；100 m 时，A 对照组换道时间与标准碰撞时间之间的差值最小，仅为 0.02；300、400 m 时，B 对照组换道时间与标准碰撞时间之间的差值同时取得最小值，为 0.15 s。

综上所述，应用基于路由选择的车辆转向换道控制系统、基于车辆动力传动和转向信息的控制系统，有可能出现无法有效控制车辆换道行为的问题，且换道时间与标准碰撞时间的数值差相对较小，在保障行车安全方面存在较大的可上升空间。应用基于正弦函数的自动驾驶电动汽车换道控制系统，不会出现无法有效控制车辆换道行为的问题，相较于上述两种方法，换道时间与标准碰撞时间的数值差相对较大，能够有效解决行车碰撞问题，从而提高自动驾驶电动汽车的行车安全性。

为了进一步验证所设计系统的优势性，选择一个具有多个道路交叉的路口作为实验场景。确保路口拥有不同的车道、交通信号灯和交通标志，以增加复杂性。同时，在

适当的位置放置障碍物，如障碍物锥、人造交通标志等，模拟真实道路中可能存在的障碍物。在上述环境下，对 3 个系统的环境感知能力进行验证，结果如图 8 所示。

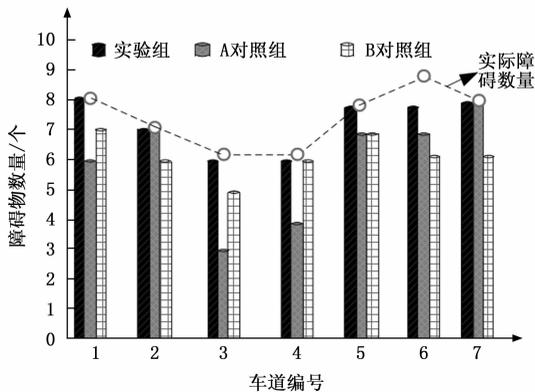


图 8 不同系统的避障效果

由图 8 可知，实验组仅在 6 号车道中没有准确识别出障碍物，其余车道的障碍物识别结果均与实际障碍物数量一致，而相比之下，A 对照组和 B 对照组在障碍物识别上与实际障碍物存在较大偏差，说明所设计系统对周围环境的感知能力较强，能够准确识别障碍物，避免在换道中发生碰撞。

## 5 结束语

在基于正弦函数的自动驾驶电动汽车换道控制系统的设计过程中，通过正弦函数模型，实现了对车辆换道行为的有效控制。该系统的应用能够在发生碰撞前实施换道，符合自动驾驶电动汽车的安全行车标准。该系统的应用优势在于利用正弦函数模型简化了控制系统复杂的执行模式，且在保证控制精度的同时，使得行驶车辆实现了由一条轨迹到另一条轨迹的平滑性转换，在自动驾驶汽车发展方面，提供了可参考意见。

### 参考文献：

- [1] 舒红, 王志洋, 李石, 等. 无信号灯十字路口自动驾驶汽车直行关键场景构建 [J]. 中国公路学报, 2022, 35 (7): 328-338.
- [2] 原志路, 张宜坤, 贾洪飞, 等. 基于路由选择的道路车辆转向换道区域设置 [J]. 江苏大学学报 (自然科学版), 2021, 42 (1): 77-84.
- [3] 廖鹏, 唐铁桥. 基于车辆动力传动和转向系统的换道轨迹优化策略 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22 (1): 98-105.
- [4] 石振新, 冯剑波, 王衍学. 基于 ANFIS 及 MPC 的车辆转向换道控制系统设计 [J]. 现代制造工程, 2022 (2): 70-78.
- [5] 孙志伟, 李聪. 基于横纵向 MPC 的智能车换道控制算法 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (4): 461-468.
- [6] 葛兴来, 林春旭, 邓清丽. NPC 型八开关三相逆变器输出电流不平衡的调制补偿算法 [J]. 电机与控制学报, 2022, 26 (4):

28-37.

- [7] 陈洁娜, 张铭苗, 杜德慧, 等. 基于贝叶斯网络构建 RoboSim 模型的自动驾驶行为决策 [J]. 软件学报, 2023, 34 (8): 3836-3852.
- [8] 金彦亮, 刘千红, 季泽宇. 具有优先级的深度确定性策略梯度算法在自动驾驶中的应用 [J]. 上海大学学报 (自然科学版), 2023, 29 (1): 105-117.
- [9] 夏杉, 王旭东, 吴楠, 等. 一种适用多种空时编码方案的 MIMO 自编码器通信系统 [J]. 电讯技术, 2022, 62 (1): 81-88.
- [10] 段运德, 黎勇. 基于 GPU 的高吞吐量 QC-LDPC 码编码器实现 [J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2021, 33 (1): 73-80.
- [11] 张军, 张闲, 张雪莹, 等. 四轮独立转向无人车辆斜向行驶轨迹跟踪控制方法 [J]. 北京理工大学学报, 2023, 43 (2): 161-169.
- [12] 石磊, 徐吉存, 李仰印, 等. 基于无监督聚类的车辆换道过程提取及换道模式研究 [J]. 济南大学学报 (自然科学版), 2023, 37 (5): 573-581.
- [13] 赵树恩, 王金祥, 李玉玲. 基于多目标优化的智能车辆换道轨迹规划 [J]. 交通运输工程学报, 2021, 21 (2): 232-242.
- [14] 高凯, 李勋豪, 胡林, 等. 基于多头注意力的 CNN-LSTM 的换道意图预测 [J]. 机械工程学报, 2022, 58 (22): 369-378.
- [15] 王宁, 代冀阳, 应进, 等. 基于自适应扩展势场的多无人机航迹规划仿真 [J]. 系统仿真学报, 2021, 33 (9): 2147-2156.
- [16] 单肖年, 万长新, 李志斌, 等. 智能网联环境下多车道异质交通流建模与仿真 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22 (6): 74-84.
- [17] 李振龙, 董爱华, 赵晓华, 等. 事故接管场景下 L3 自动驾驶换道轨迹的评价和分类 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (20): 8930-8937.
- [18] 孟宪伟, 唐进君, 王喆. 考虑换道意图的 LSTM-AdaBoost 车辆轨迹预测模型 [J]. 计算机工程与应用, 2022, 58 (13): 280-287.
- [19] 张宗楠, 吴凤英, 张冰娇. 球形电动机正弦函数平方曲线加减速算法研究 [J]. 电测与仪表, 2021, 58 (12): 76-80.
- [20] 摆玉龙, 潘星宇, 段济开, 等. 基于双曲正弦函数的四翼混沌系统及其 FPGA 实现 [J]. 计算机工程与科学, 2021, 43 (10): 1744-1749.
- [21] 周天豪, 祝长生. 基于特征结构配置的电磁轴承高速电机刚性转子系统鲁棒输出反馈控制器的设计 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (10): 3775-3786.
- [22] 吕铨坤, 常军涛, 于达仁. 基于多人多出平衡流形展开模型的涡扇发动机反馈线性化滑模控制 [J]. 推进技术, 2021, 42 (8): 1681-1689.
- [23] 赵建东, 焦岚馨, 赵志敏, 等. 考虑侧向车换道影响的理论和数据组合驱动的车辆跟驰模型 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2023, 51 (6): 10-19.