

# 高速公路实时交通流模糊逻辑 优化控制系统设计

张琳琳

(青海省高速公路运营管理有限公司, 西宁 810002)

**摘要:** 针对高速公路交通流特征复杂多变, 并受到天气、道路状况和车辆类型等多种因素影响的问题, 设计了一种新的高速公路实时交通流模糊逻辑优化控制系统, 包括硬件和软件两部分; 在硬件方面, 设计了车流控制模块、无线传输车载终端、实时交通流逻辑调度模块和模糊控制器模块, 并确定了它们之间的实时连接关系; 在软件方面, 求解了交通流逻辑控制条件, 联合了高速公路实时通行相位条件, 调节了模糊控制器, 并根据高速公路交通路网模型推导了交通流优化控制条件的求解表达式; 实验结果表明, 该系统可以解决逻辑协调错误的问题, 并有效控制高速公路车流量。

**关键词:** 高速公路; 实时交通流; 模糊逻辑控制; 通行相位; 模糊控制器; 路网模型; 逻辑协调

## Design of Fuzzy Logic Optimization Control System for Expressway Real-Time Traffic Flow

ZHANG Linlin

(Qinghai Expressway Operation Management Co., Ltd., Xining 810002, China)

**Abstract:** To address the complex and variable characteristics of highway traffic flow on highways, it is influenced by various factors such as weather, road conditions, and vehicle types, a new real-time traffic flow fuzzy logic optimization control system on highways is designed. The system is composed of hardware and software components. The hardware of the system includes the vehicle flow control module, wireless transmission vehicle terminal, real-time traffic flow logic scheduling module, and fuzzy controller module, and the real-time connection relationships between modules is determined. In the software of the system, it solves the traffic flow logic control conditions, combines with the real-time traffic phase conditions of the expressway, adjusts the fuzzy controller, and derives the expression for the traffic flow optimization control conditions based on the expressway traffic network model. The experimental results show that the system can solve the problem of logical coordination errors and effectively control the traffic flow on highways.

**Keywords:** expressway; real-time traffic flow; fuzzy logic control; traffic phase; fuzzy controller; road network model; logical coordination

## 0 引言

智能化交通系统是集交通运输、信息技术于一体的新型交通管理系统, 在保证公路安全、提供运输能力等方面具有明显的作用。逻辑协调是智能化交通运输系统在信息化基础上发展起来的新方法, 也是现阶段现代公路工程的主要发展方向。随着技术化手段的快速发展, 在智能化交通系统中也出现了很多研究的热点。例如: 交通控制领域中发展先进的控制技术, 诱导交通系统的快速成型, 这是解决车辆协调不及时的必要条件<sup>[1]</sup>。智能化交通系统的主要目标是利用主动式通信设备, 实现车辆与车辆、车辆到路间的通信, 一方面为行驶车辆提供多媒体业务保证, 另一方面也可以实现对车辆所处位置的实时标记。

在高速公路交通路网中, 如何协调行驶车辆, 从而在保证交通流畅的情况下, 解决错误调度的问题, 成为一项亟待解决的难题。文献 [2] 提出的基于模糊层次分析法的智慧交通系统选取多个路侧感知设备, 记录车辆行驶状态, 将所得感知数据作为二级评价指标, 以供逻辑主机元件的直接调取与利用, 再联合模糊层次分析原则, 定义具体的高速公路交通流实时控制方案。但是, 模糊层次分析法需要进行大量的数据收集和分析, 并对多个因素进行权重评估和构建模型。这涉及对交通流量的多个方面进行综合考虑, 但也使得模型建立的过程相对复杂, 容易引入主观性和不确定性。文献 [3] 提出的基于系统机能曲线的公共交通系统提出了一种量化韧性控制思想, 分别从适应性、

收稿日期: 2023-11-14; 修回日期: 2023-12-22。

作者简介: 张琳琳(1980-), 女, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 张琳琳. 高速公路实时交通流模糊逻辑优化控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(6): 152-159.

恢复性两方面对高速公路中的交通流量水平进行实时评价, 在逻辑性主机元件的作用下, 交通流数据并不会出现大量累积的情况, 因此系统运行过程中, 每一类交通信息只能对应一项控制执行指令, 不会导致车辆信息错误读取或识别的问题。但是, 交通流量控制是一个动态的过程, 随着交通状况的变化, 控制策略也需要实时调整和优化。然而, 系统机能曲线在适应性和迭代性方面可能存在一定的限制, 无法及时捕捉到交通流量的动态变化, 导致控制策略不够灵活和精准。文献 [4] 提出基于数据驱动建模方法的交通流优化控制设计, 通过整合数据驱动和基于模型的预测方法, 实现了对整个时间范围的准确预测。同时, 通过优化设计, 计算控制入口道上的流量, 以达到最大化交通网络的出流量的目标。该方法依赖于大量的历史交通数据进行建模和预测, 需要实时获取最新的数据并进行处理。如果系统响应速度不及时, 会导致控制结果不佳。文献 [5] 提出了基于排队长度或经历的延迟来分配有门信号路口流量的方法, 即根据排队长度或车辆经历延迟的情况来管理和调控交通流。通过在周边交通流控制中使用这种方法, 可以优化流量分配, 改善交通网络性能, 并减少排队波及到上游交叉口的可能性。该方法依赖于合适的控制策略来根据排队长度或经历延迟分配有门信号路口的流量。如果控制策略选择不当或者无法适应实时交通变化, 可能会影响到流量分配的效果。

模糊控制是以模糊数学思想为基础提出的控制方法。在数学控制思维中, 行为动态模式的精确化程度影响控制程序的执行能力, 一般来说动态化流程的步骤越完善, 系统运行所能达到的控制效果就越明显。然而, 在变量信息相对较多的情况下, 单纯依靠精确化思想有可能无法得到较为理想的控制效果, 因此大多数主机元件开始执行非精确的控制程序, 这也是模糊控制原则出现的最主要原因<sup>[6]</sup>。简单来说, 就是以不明确的指令代替明确的程序文本, 从而达到一种较为模糊的执行效果, 在面对复杂的处理环境时, 应用模糊控制原则, 能够避免在单位时间内处理大量的数据信息参量, 从而使得主机元件的稳定运行能力得到保障。以模糊控制原则为基础, 设计一种新型的高速公路实时交通流模糊逻辑优化控制系统, 并通过对比实验的方式, 突出该系统在解决高速公路实时交通逻辑协调错误问题方面的应用能力。

## 1 硬件设计

为了实现基于 RFID 的车流控制系统, 设计了以下模块: RFID 车流控制模块、无线传输车载终端模块、实时交通流逻辑调度模块和交通流模糊控制器模块。这些模块间相互连接, 以实现整体功能。基于 RFID 的车流控制硬件设计总体结构如图 1 所示。

在总体结构中, 单片机通过串口、I2C 或其他通信接口与 RFID 车流控制模块和无线传输车载终端模块相连, 负责

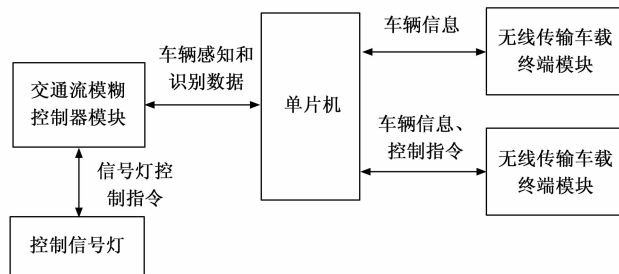


图 1 基于 RFID 的车流控制硬件设计总体结构

接收和处理车辆感知和识别数据, 并与无线传输车载终端模块进行通信。它对接收到的数据进行处理、分析和决策, 确定适当的车流控制策略, 并通过与交通流模糊控制器模块的连接, 将指令传输给模糊控制器。单片机根据指令控制信号灯状态, 实现对车流的精确控制。这样, 单片机作为中间控制器, 协调各个模块的功能, 实现车流的智能控制和调度。在总体结构中, RFID 车流控制模块用于感知和识别车辆, 并将相关数据传输给实时交通流逻辑调度模块。无线传输车载终端模块负责接收和发送车辆信息, 与 RFID 模块进行通信。实时交通流逻辑调度模块使用收集到的数据进行分析 and 决策, 确定适当的车流控制策略, 并将指令传输给交通流模糊控制器模块。交通流模糊控制器模块根据指令控制信号灯的状态, 以实现对流车的精确控制。

通过以上模块的协同工作, 整个系统能够实现车流的智能控制和调度。这样的总体设计能够提高交通流的效率和流动性, 并最大程度地减少拥堵和交通延误。

### 1.1 RFID 车流控制模块

RFID 车流控制模块可以在处理交通流数据的同时, 生成系统主机所需执行的模糊控制程序, 并能够在此基础上, 完成对逻辑程序的默认化读写。系统运行过程中, RFID 控制部件负责编写逻辑程序指令, 由于天线线圈、检测部件等结构化组织结构之间存在明显的双向反馈关系, 所以交通流信息、控制执行指令程序可以双向转化, 一方面避免了数据信息文本非及时处理情况的出现, 另一方面也实现了对程序指令所处传输位置的实时定义, 以便于系统主机可以更好地掌握模糊逻辑控制指令的执行状态<sup>[7]</sup>。调制解调电路提供了 RFID 车流控制模块所需的电量信号, 系统主机元件在电量信号的支持下, 直接处理交通流数据信息, 并可以按照模糊逻辑算法需求, 更改数据包文件的存储格式, 以便于天线线圈能够在单位时间内获得大量的程序指令文本。对于 RFID 车流控制模块而言, 逻辑控制就是指满足理论传输原则的程序性控制流程, 在高速公路路网组织中, 交通流信息的传输具有明显的多变性特征, 所以在定义逻辑控制指令时, 要求天线线圈必须对车辆行驶情况进行实时监测<sup>[8]</sup>。具体的 RFID 车流控制模块连接结构如图 2 所示。

系统运行过程中, RFID 检测部件会不断向外输出逻辑

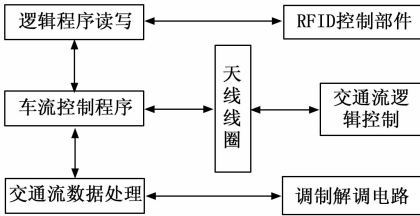


图 2 RFID 车流控制模块结构

程序指令，实现主机元件对实时交通流信息的准确控制，为数据参量的传输提供较为稳定的网络环境。RFID 检测部件通过读取车辆上的 RFID 标签或感应 RFID 标签，采集车辆的信息，并将数据传输给主机元件。主机元件接收到车辆信息后，进行实时监测并利用预设算法和规则生成相应的控制指令。最后，主机元件将控制指令发送回 RFID 检测部件，实现对交通信息流的精确控制。这个过程通过不断地数据采集、传输、实时监测和控制指令的生成与发送，有效实现了对实时交通流信息的准确控制。

### 1.2 无线传输车载终端模块

无线传输车载终端完成高速公路实时交通流信息的采集并将其上传到 RFID 车流检测模块之中，具体结构模型如图 3 所示。

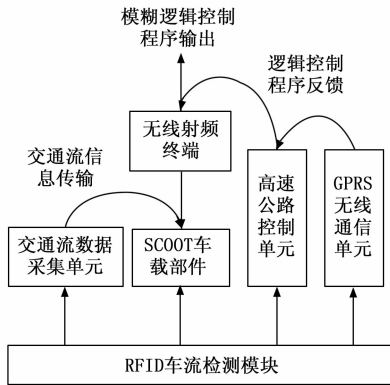


图 3 无线传输车载终端的结构模型

从功能性角度来看，无线传输车载终端需采集以下几种类型的数据对象：

1) 高速公路中的车流转向率：根据车辆转向灯信号的采集情况预测交通流在未来一段时间内的运动趋势，经过无线传输车载终端的汇总处理后，数据信息参量可以直接上传至 RFID 车流检测模块之中。

2) 与实时交通流相关的车辆队列信息：实时交通流车辆队列信息包括车辆类型、车辆状态、排队车辆数目、排队长度等，无线传输车载终端根据实时交通信号强度的变化情况，确定车辆所属的当前行驶路段<sup>[9]</sup>。对于系统主机而言，无线传输车载终端所提供车辆队列信息的种类较为复杂，且单位时间内，数据信息的单位累积量并不固定，所以终端组织传输交通流信息时，需要 SCOOT 部件、无线

射频终端等多个单元组织的共同配合。

3) 当前公路路段中的净流入、流出车辆：净流入、流出车辆信息属于无线传输车载终端可以直接采集的交通流数据，因此所得数据对象只有在经过采集单元的集中处理后，才能被传输至 SCOOT 部件结构之中<sup>[10]</sup>。

4) 高速公路中的交通车辆平均速度：无线传输车载终端具有一定的数据寄存能力，因此在采集交通车辆平均速度时，可以根据过往记录数据进行统一求解。

### 1.3 实时交通流逻辑调度模块

实时交通流逻辑调度模块作为无线传输车载终端的下级负载结构，在单位运行周期内，同时面对车流转向率、车辆队列、车辆净流入与流出、交通车辆平均速度四类信息，且为避免系统主机出现逻辑化混乱的运行状态，每一类信息参量必须存储于不同的层级单元之中。对于实时交通流逻辑调度模块功能的统计如表 1 所示。

表 1 实时交通流逻辑调度模块的功能

信息类型	所属层级单元	作用能力
车流转向率信息	执行层	执行层主要负责检测高速公路的基础路况，可以深入分析车流转向率信息，并能够根据分析结果，推送出实时控制指令。
车辆队列信息	模糊控制层	模糊控制层接收执行层输出的车流转向率信息，可以联合无线传输车载终端，判定实时交通流的行为表现。
车辆净流入、流出信息	逻辑流程控制层	逻辑流程控制层主要根据车辆净流入、流出信息，定义系统主机所遵循的模糊逻辑控制原则，从而达到条件控制主机运行能力的目的。
交通车辆平均速度信息	决策层	决策层作为实时交通流量预测模块最底层执行单元，负责整合交通车辆平均速度信息，具有一定的自主辨别能力，可以分析出交通流信息的后续传输需求。

在高速公路实时交通流模糊逻辑优化控制系统中，实时交通流逻辑调度模块起到承上启下的连接作用，既接收无线传输车载终端输出的各类数据信息，也可以在加工处理后，将模糊逻辑控制指令的初步执行程序，传输至交通流模糊控制器模块之中<sup>[11-12]</sup>。

### 1.4 交通流模糊控制器模块

交通流模糊控制器模块是高速公路实时交通流模糊逻辑优化控制系统的重要组成部分。该模块的主要功能是将高速公路实时交通流输入信息转换为程序输出指令，并通过模糊化处理和逻辑关系推理来控制交通流。

在硬件构成上，交通流模糊控制器模块通常由高性能的微处理器、数字信号处理器 (DSP)、存储器、接口和其他必要的硬件组成。这些硬件设备通过相互协作，实现了对高速公路实时交通流信息的采集、处理和输出控制指令的功能。具体来说，交通流模糊控制器模块的工作流程如下：首先，通过无线传输车载终端采集高速公路实时交通

流信息，然后将这些信息进行运算和转换处理，输出符合模糊化原则的数据样本；最后，根据逻辑关系推理条件，确定实时监测信息与真实信息之间的偏差水平。在整个处理过程中，高速公路实时交通流输入信息经过多次平级转化，且每个行为过程中，模糊化指令程序、逻辑化指令程序的定义标准都不会发生变化<sup>[13]</sup>。由于交通流模糊控制器模块对于数据信息参数的采集是分阶段进行的，所以模块结构内的指令执行过程也是分阶段进行的。系统主机对于高速公路实时交通流输入信息的处理遵循严格的分级化标准，所以只有在完成上一指令周期内的所有执行程序之后，才可以开展下一指令周期<sup>[14]</sup>。完整的交通流模糊控制器模块结构布局形式如图 4 所示。

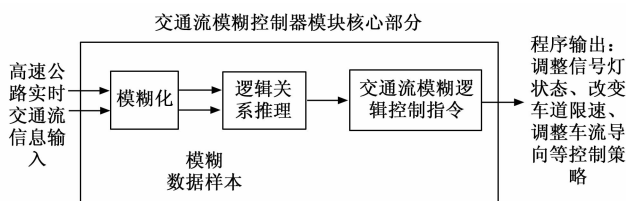


图 4 交通流模糊控制器模块基本结构

模糊逻辑优化控制程序在控制器模块中的传输方向始终由交通流信息输入端指向执行程序输出端，所以在模块单元核心部分中，所有数据信息参量全部保持单向性传输特征。

## 2 软件设计

基于硬件各个模块，定义具体的交通流逻辑控制评价指标，再联合实时通行相位计算结果，设置模糊控制器，从而在选择路由控制参数的同时，完成对交通流优化控制条件的求解，实现高速公路实时交通流模糊逻辑优化控制系统的设计。

软件设计过程：

- 1) 确定系统需求、目标和限制条件，如最大车流量、最小延误等。
- 2) 建立高速公路交通路网模型，包括车道、路段、交叉口等元素，并定义相关参数。
- 3) 设计并编写交通流优化控制条件的数学表达式，结合路网模型和实时通行相位条件进行联合求解。
- 4) 设计并编写模糊化处理模块，将实时交通流输入信息经过模糊化处理转化为符合模糊逻辑原则的数据样本。
- 5) 设计并编写逻辑推理模块，基于模糊化处理后的数据进行逻辑关系推理，判断控制评价指标与交通流通行相位指标之间的数值匹配关系。
- 6) 设计并编写控制指令生成模块，根据逻辑推理结果生成具体的控制指令。

实现步骤：

- 1) 开发数据采集模块，获取实时交通流信息并进行预处理。

- 2) 实现模糊化处理模块，将交通流数据转化为符合模糊逻辑原则的样本。

- 3) 开发逻辑推理模块，基于模糊化数据进行关系推理，判断控制指标与交通流相位指标之间的匹配关系。

- 4) 实现控制指令生成模块，将逻辑推理结果转化为具体的控制指令或策略。

- 5) 进行系统集成与测试，整合、调试和验证各模块的功能。

- 6) 对软件系统进行优化和改进，添加异常处理和性能优化等功能。

### 2.1 高速公路交通路网模型搭建

路网模型可以理解为逻辑优化控制系统监测节点的布置模型，其具体布局形式受到车辆行驶状态的直接影响。高速公路交通路网模型包括横向、纵向两种表现形式。其中，横向交通路网模型就是指各个逻辑节点保持完全水平的连接状态，前一个节点组织可将所录入高速公路实时交通流信息全部反馈至后一个节点组织，且整个传输过程中，系统主机所定义的交通流路由控制参数取值条件始终保持不变<sup>[15]</sup>。具体的横向交通路网模型结构如图 5 所示。

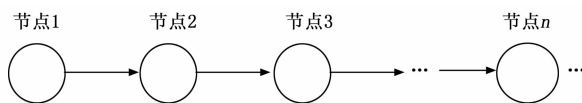


图 5 横向交通路网模型

纵向交通路网模型是指各个逻辑节点保持完全竖直的连接状态，对于模糊逻辑优化控制系统而言，数据样本的纵向传输行为不符合系统内信息参量的实时传输行为，所以前一个节点组织所录入高速公路实时交通流信息并不能全部反馈至后一个节点组织之中<sup>[16]</sup>。具体的纵向交通路网模型如图 6 所示。

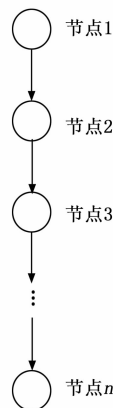


图 6 纵向交通路网模型

如果高速公路实时交通流组成情况较为复杂，那么横向交通路网模型、纵向交通路网模型可能同时存在，当前情况下，为保证系统主机对交通流信息的有效控制能力，可以对不同路网模型中的数据样本进行分别定义，再联合

模糊逻辑性判定条件, 定义具体的控制指令执行程序。

### 2.2 高速公路实时通行相位计算

由于高速公路实时交通情况较为复杂, 且右转和直行车辆的行驶行为不会相互干扰, 所以大多数情况下, 直行与右转车辆共用一个车道。大多数高速公路的实时通行相位包含图 7 所示的 4 种类型。

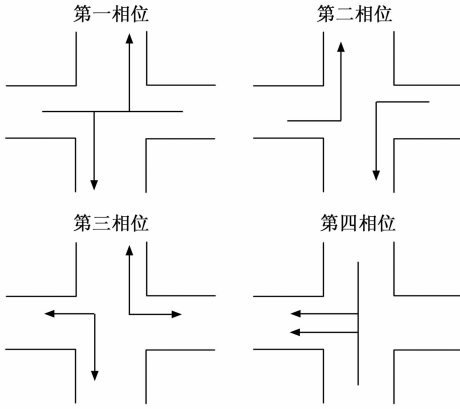


图 7 高速公路实时通行相位分类

第一相位: 第一通行相位中, 车辆保持东西向的初始行驶状态, 上、下两辆车在经过高速公路的固定路口时, 同时向右转弯, 实时交通流的规范性较强。第二相位: 第二相位中, 车辆从东、西两侧对向行驶, 当车辆经过高速公路的固定路口时, 同时向左转弯, 实时交通流的规范性也相对较强。第三相位: 在第三相位中, 行驶车辆的转弯方向并不固定, 所以实时交通流的规范性相对较弱。第四相位: 在第四相位中, 车辆保持南北向的初始行驶状态, 上、下两辆车在经过高速公路的固定路口时, 一个向右转弯、一个向左转弯, 实时交通流的规范性也相对较弱<sup>[17-18]</sup>。

如果高速公路中不存在明确的相位划分, 只要确保车辆间具有对向行驶关系, 也可以依照通行相位标准, 对实时交通流情况进行统计。

$\epsilon$  表示高速公路实时交通流数据集合, 其定义式如下:

$$\epsilon = \{E_1, E_2, E_3, E_4\} \quad (1)$$

$E_1$  表示第一相位中的交通流数据,  $E_2$  表示第二相位中的交通流数据,  $E_3$  表示第三相位中的交通流数据,  $E_4$  表示第四相位中的交通流数据。

高速公路实时通行相位计算式为:

$$R = \frac{1}{\gamma E'} \times (q^2 - 1), E' \in \epsilon \quad (2)$$

$E'$  表示数据集合  $\epsilon$  中的随机物理量,  $\gamma$  表示高速公路固定路口处的车辆转弯参数。车辆行驶过程中, 高速公路实时交通流始终保持变化状态, 所以在定义模糊逻辑优化控制条件时, 有可能出现多个通行相位同时存在的情况。

### 2.3 交通流路由控制参数选择

为了降低实时交通流信息之间的相互干扰, 模糊逻辑优化控制系统对于数据样本的处理遵循路由协调性判别条

件。所谓路由协调就是指系统主机在处理高速公路实时交通流信息时, 不会同时占用过多的数据传输信道组织, 单位传输周期内, 必须有一个或几个路由组织保持空闲状态, 以便于主机元件可对模糊控制器闭环输出的信息参量进行逻辑化筛选<sup>[19]</sup>。从功能性角度来看, 依照路由协调性判别条件处理高速公路实时交通流信息, 既可以遵循模糊逻辑性原则, 将必要传输对象、非必要传输对象区分开来, 也能够保证系统主机对实时通行相位信息的精准取样。此外, 在空闲路由组织中, 只要保证控制参数与通行相位信息的数值对应关系, 就能够得到较为理想的控制指令执行效果<sup>[20]</sup>。

对于交通流路由控制参数选择表达式的定义参考式(3):

$$P = (\kappa^2 - 1) / R \cdot \sqrt{\frac{Y^2 - \lambda I}{O}} \quad (3)$$

其中:  $\kappa$  为路由组织空闲程度判定参数,  $O$  为路由组织中高速公路实时交通流信息的单位传输均值,  $I$  为实时交通流信息的连接路由定义项,  $\lambda$  为模糊逻辑控制指令的执行等级定义参数。为保证系统主机对高速公路实时交通流的精准控制能力, 在选择路由控制参数时, 要求  $\kappa > 1$  的不等式取值条件恒成立。

### 2.4 交通流模糊控制器的调节

基于交通流路由控制参数选择结果, 在交通流模糊控制器模块中, 调节模糊控制器必须以高速公路实时通行相位信息作为输入数据。对于高速公路实时交通流模糊逻辑优化控制系统而言, 模糊控制器闭环并不是一个真实存在的结构部件, 而是以虚拟状态连接于无线传输车载终端与实时交通流量预测模块之间的逻辑性装置模型, 既可以根据交通流控制评价指标定义具体的优化控制条件, 也能够对通行相位信息进行整合处理, 从而在保障数据信息稳定传输的同时, 为系统主机的运行提供可参考控制信息参量<sup>[21]</sup>。

对于模糊控制器闭环的设置, 要求输入数据信息幅值的取值必须属于  $[1, +\infty)$  的数值区间。输入数据信息幅值可以表示为  $\hat{e}$ ,  $\hat{e} = 1$  成立时, 表示高速公路实时通行相位信息的实时输入数据取值相对较小, 但在实值区间内, 其赋值水平又不完全为零。对于输入数据信息幅值的计算参考如下表达式:

$$\hat{e} = rP - \varphi \left( \frac{1}{\bar{i}^2} \right) \quad (4)$$

$r$  为高速公路实时通行相位信息的实值标记参数,  $\varphi$  表示已输入数据信息的逻辑性编码系数,  $\bar{i}$  为数据样本的阈值记录项。

利用公式(4), 推导模糊控制器设置标准条件为:

$$Y = \frac{\epsilon}{y^3} - 2\hat{e}(u_{\max} - u_{\min}) \quad (5)$$

$\epsilon$  为高速公路实时交通流信息的模糊预测系数,  $y$  表示

已输入通行相位信息的逻辑划分参量,  $u_{\max}$  为模糊行为向量的最大取值结果,  $u_{\min}$  为模糊行为向量的最小取值结果。如果  $\varepsilon > 0$  与  $\varepsilon < 0$  与  $y < 0$  的不等式条件同时成立, 则表示模糊控制器闭环中不存在传输方向不一致的数据信息参量。

### 2.5 交通流逻辑控制条件设置与求解

交通流<sup>[22]</sup>优化控制条件是指控制系统运行所遵循的指令条件, 在实施高速公路实时交通流模糊逻辑优化控制的过程中, 该项表达式的求解参考实时交通路网模型, 其取值直接影响主机元件对相关数据信息参量的处理能力。所谓优化控制就是指并不局限于一种形式的控制原则, 系统主机的核心运行目的是保证控制指令执行效果, 因此在取样交通流信息时, 只要保证数据样本符合模糊逻辑定义标准, 就可以将该物理量作为系统运行过程中一个满足实际控制条件的变量指标。

高速公路的实时交通流会随着时间的变化而不断变化, 且交通流极易在天气、环境、突发性行为等外界因素的干扰下, 表现出分明的不确定性和随机性状态, 所以在设计模糊逻辑优化控制系统的过程中, 应着重考虑这种不确定性与随机性问题。所谓不确定性, 是指高速公路的交通流量数值水平并不能保持固定状态, 无论是时间还是车辆对象的改变, 都有可能导导致交通流与预设情况出现较大出入<sup>[23]</sup>。随机性则是指车流量在下一时刻所表现出的行驶状态与所选择行驶路径都是不确定的, 且每一路口处的交通流都可能表现出一定的随机状态。

规定  $\delta$  表示交通流信息的不确定性取样参数,  $\chi$  表示交通流信息的随机性取样参数,  $n$  表示随机性参数的最大取值结果,  $\alpha$  表示高速公路网络中的行驶车辆标记系数,  $\tilde{W}$  表示交通流信息的实时取样特征,  $\Delta T$  表示所选定车辆通过高速公路网络所需的行驶时长,  $\beta$  表示高速公路网络中实时交通流的逻辑性评价向量<sup>[24]</sup>, 联立上述物理量, 可将交通流逻辑控制评价指标定义式表示为:

$$q = Y \sum_{\delta=1}^{+\infty} \sum_{\chi=1}^n \sum_{\alpha=-\infty}^{+\infty} \beta \tilde{W} |\Delta T| \quad (6)$$

高速公路交通流网络相互交错, 各个路口将核心道路连接成一个巨大的环状结构, 且主要道路还会向旁边衍生出不同的支干道路, 支路与支路之间也保持连通关系。对于交通流模糊逻辑优化控制系统来说, 在选取控制评价指标时, 必须要考虑道路与道路之间的连通关系<sup>[25]</sup>。

设  $a$  表示高速公路实时交通流信息的模糊性配比参数,  $\tilde{A}$  表示满足逻辑定义标准的交通流信息赋值向量,  $f$  表示系统主机对高速公路实时交通流信息的实时处理阈值,  $\hat{S}$  表示高速公路实时交通流信息的非局限性取样特征,  $\hat{d}$  表示数据样本信息控制向量,  $\mu$  表示系统主机对于高速公路实时交通流信息的优化处理权限。在上述物理量的支持下, 交通流优化控制条件求解结果表示为:

$$D = \sqrt{\frac{\sum_{\alpha=-\infty}^{+\infty} f \tilde{A}}{\prod_{\alpha=-\infty}^{+\infty} \hat{S}^2 - \mu \hat{d}}} \times q \quad (7)$$

模糊逻辑优化控制系统是一个独立的执行个体, 在系统中, 每一类高速公路实时交通流信息都对应不同的数据参量, 且为保证控制指令的实时执行效果, 单位运行周期内, 系统主机只处理一种类型的交通流信息对象。通过以上步骤, 完成高速公路交通流的模糊控制。

## 3 实例分析

本次实验选择高速公路实时交通流模糊逻辑优化控制系统、基于模糊层次分析法的智慧交通系统、基于系统机能曲线的公共交通系统 3 组不同方法进行测试, 根据实验结果分析这 3 类系统在解决车辆逻辑协调错误问题方面的应用能力。

### 3.1 实验原理

选择如图 8 所示的环形高速公路路段作为实验环境, 以小汽车 (规格: 1.2~1.4 t, 4.8×1.8×1.48) 作为实验对象, 令车辆在实验路段内自由行驶, 分别在中控主机中输入不同的控制指令执行程序, 记录在不同方法作用下, 车辆进行行为的变化情况。



图 8 高速公路实验路段

本次实验过程中, 车辆共需行驶 200 km, 每隔 40 km 设置一个如图 9 所示的测试装置, 以用于记录车辆在高速公路中的实时位置, 行驶距离达到 20 km 时, 车辆进入第 2 标记区域中, 整条行驶路径中共包含 5 个标记区域。

设置于 100 km 高速公路行驶路段中的测试装置型号完全一致, 且所有测试装置保持串联关系, 只要闭环控制开关, 所有测试装置全部进入连接状态, 这就表示监控主机能够实时监测高速公路中的交通流情况。

为了实现实验, 设计了如下硬件设备和条件:

- 1) 数据采集器: 使用无线传输车载终端获取实时交通流信息, 并将其转化为数字信号。
- 2) 模糊化处理器: 对采集到的交通流信息执行模糊化运算和转换处理, 生成符合模糊逻辑原则的数据样本。
- 3) 控制器单元: 包含逻辑推理装置, 根据模糊化后的



图 9 车辆位置标记装置

数据进行逻辑关系推理,判断控制评价指标与交通流通行相位指标之间的数值匹配关系。

4) 输出设备: 将逻辑推理结果转化为具体的控制指令,并通过特定的接口发送到车辆控制系统。

在实验中,设置了以下条件:

1) 高速公路路段: 选择一个环形高速公路路段作为测试场景。

2) 小汽车对象: 以小汽车为实验对象,在测试装置设置范围内自由行驶。

3) 控制指令输入: 通过中控主机输入不同的控制指令执行程序,用于控制车辆的行为。

4) 测试装置: 设置在每隔 40 km 处的测试装置,用于记录车辆在高速公路上的实时位置。

5) 标记装置: 在 100 km 的高速公路路段中安装了一组标记装置,记录车辆通过每个 20 km 标记区域的行驶情况。

### 3.2 实验做法

通过以上硬件设备和实验条件的设计,实现了对车辆行为的检测和控制:

1) 数据采集器获取实时交通流信息,并将其转化为数字信号。

2) 模糊化处理器对采集到的交通流信息执行模糊化运算和转换处理,生成符合模糊逻辑原则的数据样本。

3) 控制器单元基于模糊化后的数据进行逻辑关系推理,判断控制评价指标与交通流通行相位指标之间的数值匹配关系。

4) 输出设备将逻辑推理结果转化为具体的控制指令,并通过特定的接口发送到车辆控制系统。

5) 测试装置记录车辆在高速公路上的实时位置。

6) 标记装置记录车辆通过每个 20 km 标记区域的行驶情况。

通过以上的实验条件和硬件设备设计,可以对不同方法在解决车辆逻辑协调错误问题方面的应用能力进行测试和分析。

### 3.3 流程与数据处理

在复杂行驶环境下,逻辑协调错误是导致高速公路车流量无法得到有效控制的主要原因,而这也会造成交通流混乱的问题。规定: 实心点表示当前监测位置处不存在逻辑协调错误问题,即不存在交通流混乱的情况;空心点表示当前监测位置处存在逻辑协调错误问题,即存在交通流混乱的情况。

将 100 km 的实验高速公路等分为 5 段,即将实验路段分为 5 个区域,将高速公路实时交通流模糊逻辑优化控制系统(实验组)、基于模糊层次分析法的智慧交通系统(第一对照组)、基于系统机能曲线的公共交通系统(第二对照组)执行程序输入监测主机,记录不同控制系统作用下,实时车流量的具体变化情况,详情如图 10 所示。

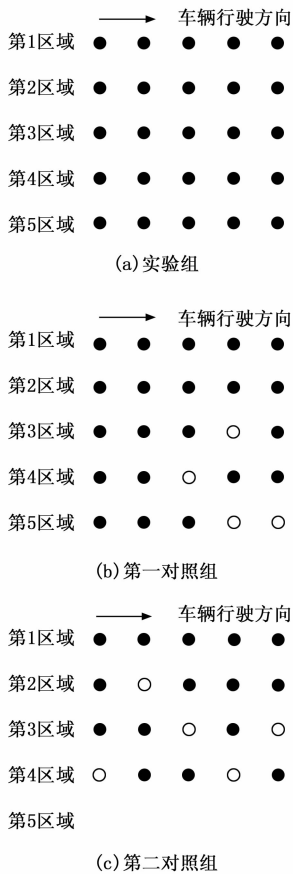


图 10 车辆行驶路线

分析图 10 可知,实验组控制系统作用下,车辆在第 1、第 2、第 3、第 4、第 5 区域中都不会出现交通流混乱的情况。第一对照组控制系统作用下,第 1、第 2 区域中不存在交通流混乱的情况,第 3、第 4 区域中,只有 1 个监测节点处存在交通流混乱的情况,第 5 区域中有 2 个监测节点处存在交通流混乱的情况。第二对照组控制系统作用下,第 1 区域中不存在交通流混乱的情况,第 2 区域中,只有 1 个监测节点处存在交通流混乱的情况,第 3、第 4 区域中,有 2

个监测节点处存在交通流混乱的情况,第 5 区域中,有 3 个监测节点处存在交通流混乱的情况。

综上所述本次实验结论为:1) 基于模糊层次分析法的智慧交通系统、基于系统机能曲线的公共交通系统的应用,并不能有效解决车辆逻辑协调错误问题,故而也就不能避免出现交通流混乱的情况;2) 高速公路实时交通流模糊逻辑优化控制系统的应用,能够避免高速公路中出现车辆逻辑协调错误的问题,符合有效控制高速公路车流量的实际应用需求。

#### 4 结束语

以解决逻辑协调错误问题为目标,联合设计 RFID 车流检测模块、无线传输车载终端等应用部件,在定义交通流逻辑控制评价指标的同时,求解具体的交通流优化控制条件。这种新型控制系统的应用可以解决行驶车辆无法得到准确协调的问题,能够在维持交通流畅的同时,实现对行驶车辆的按需调度,即便在复杂行驶环境下,也可以缓解实时交通流混乱的情况,与实际应用需求相符合。未来相关组织机构可以在此方法基础上,进行更加细致的研究,一方面确保高速公路的完全畅通状态,另一方面使行驶车辆能够得到监测主机的实时监控与调度。

#### 参考文献:

[1] 曹丹妮,吴建军,屈云超,等.考虑自动车队强度的高速公路非常规瓶颈交通流控制策略研究[J].中国公路学报,2022,35(3):78-88.

[2] 金雷,王银银,傅惠,等.基于模糊层次分析法的机场陆侧智慧交通系统感知水平评价[J].科学技术与工程,2022,22(8):3365-3372.

[3] 陈长坤,何凡,赵冬月,等.基于系统机能曲线的城市道路公共交通系统韧性评估方法[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(6):1016-1022.

[4] NMETH B, F NYES D, BEDE Z, et al. Optimal control design for traffic flow maximization based on data-driven modeling method[J]. Energies, 2022, 15(1): 187-193.

[5] KEYVAN E M, CARLSON R C, KNOOP V L, et al. Optimizing distribution of metered traffic flow in perimeter control: queue and delay balancing approaches[J]. Control Engineering Practice, 2021, 110(8): 104762.

[6] 邹国建,赖子良,李晔.基于时空注意力网络的动态高速公路网交通速度预测[J].计算机工程,2023,49(2):303-313.

[7] 张莉涓,范明秋,雷磊,等.捕获效应下基于比特检测的多分支 RFID 标签识别协议[J].通信学报,2021,42(11):205-216.

[8] 李放,曹健,李普,等.基于 ARM+FPGA 异构平台的目标检测加速模块设计与实现[J].北京大学学报(自然科学版),2022,58(6):1035-1041.

[9] 陈璇,苏志恒.全自动运行线路车载无线通信设备的唤醒自检项方案[J].城市轨道交通研究,2021,24(4):122-124.

[10] 王兴涛,赵训威,孙孝波,等.230 MHz 电力无线专网通信终端设计与应用[J].电讯技术,2021,61(8):999-1004.

[11] 黄先进,杜田倩,王凤川,等.基于列车运行图的 CRH3 牵引变流器 IGBT 模块寿命预测[J].电工技术学报,2022,37(s1):172-180.

[12] 程志江,田峰,杨涵棣,等.模块化多电平复合变换器电池储能系统模型预测优化控制策略[J].太阳能学报,2023,44(5):59-66.

[13] 赵希梅,王浩林,朱文彬.基于自适应模糊控制器和非线性扰动观测器的永磁直线同步电机反馈线性化控制[J].控制理论与应用,2021,38(5):595-602.

[14] 高子茵,杜明刚,李慎龙,等.基于遗传算法优化和模糊控制动态优化的自动变速器换挡规律设计[J].兵工学报,2021,42(4):684-696.

[15] 王峰,刘波峰,柴淑颖,等.基于 MCD-AHP 的预装式变电站城市化属性指标评价[J].西南交通大学学报,2021,56(5):1020-1028.

[16] 卢凯,吴瑶婷,邓兴栋,等.适于多空间尺度的道路交通运行指标逐级计算模型[J].东南大学学报(自然科学版),2022,52(6):1178-1188.

[17] 李冰,王正辉,马铭炜,等.信号交叉口行人二次过街下右转弯车通行能力与延误估计模型[J].交通运输系统工程与信息,2022,22(2):257-267.

[18] 童蔚苹,袁诗琳,刘菲菲,等.基于通行能力的借对向车道左转交叉口信号控制模型优化[J].公路交通科技,2021,38(3):87-95.

[19] 赵希梅,王浩林,朱文彬.基于自适应模糊控制器和非线性扰动观测器的永磁直线同步电机反馈线性化控制[J].控制理论与应用,2021,38(5):595-602.

[20] 段晓,张厚明,贾玉文,等. Sugeno 型二维模糊控制器设计及其优化研究[J].原子能科学技术,2021,55(5):909-916.

[19] 王波,耿海鹏,杜廷琛.磁悬浮永磁同步电机转子系统的参数辨识与控制[J].西安交通大学学报,2023,57(3):106-116.

[21] 郑子璇,丁雅雯,陈泽宇,等.城轨柔性直流牵引供电系统控制特性影响下回流安全参数分析[J].铁道标准设计,2022,66(8):143-151.

[22] 张英贵,陆强,高全,等.基于关键站点识别的区域轨道交通路网抗干扰性研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(7):1845-1853.

[23] 鲁工圆,赵华铭,雷元争,等.基于利用率的城市轨道交通路网有效输送能力计算方法[J].铁道运输与经济,2021,43(6):111-118.

[24] 徐艺,李世武,王玉琼,等.基于瞳孔直径的交通冲突量化方法[J].江苏大学学报(自然科学版),2020,41(2):154-159.

[25] 李巧茹,王少航,陈亮.高速公路合流区可变限速和换道协同控制研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2022,41(2):35-43.