

# 高速公路多匝道远程协同控制技术研究

李凯伦, 王建军

(长安大学 公路学院, 西安 710064)

**摘要:** 传统高速公路多匝道控制方法大多是使用线圈进行参数采集, 使交通调节率计算不精准, 导致技术控制精度较低, 针对该问题, 提出了多匝道远程协同控制技术研究; 结合高速公路协同环境, 限制主线交通, 计算车辆进入路网后周期性路径距离和预测时间的通行成本, 根据实际路况对系数进行调整, 当参数系数为 0 时, 通行成本最低即为最优规划路径, 并触发路径诱导执行; 充分考虑匝道总流量约束条件, 执行诱导方案, 获取最短控制周期, 使用模糊逻辑算法计算控制周期内的控制率, 从而实现多匝道控制目的; 通过实验对比结果可知, 该技术控制精度较高, 为保障高速公路安全运行奠定基础。

**关键词:** 高速公路; 多匝道; 远程协同; 控制; 规划路径; 模糊逻辑算法

## Research on Multi Ramp Remote Cooperative Control Technology for Expressway

Li Kailun, Wang Jianjun

(College of Road, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Traditional freeway multi-ramp control methods mostly use coil to collect parameters, which makes the calculation of traffic regulation rate inaccurate and leads to low precision of technical control. To solve this problem, a multi-ramp remote cooperative control technology is proposed. Combining with the cooperative environment of expressway, the paper restricts the main line traffic, calculates the traffic cost of periodic route distance and prediction time after vehicles enter the road network, adjusts the coefficient according to the actual road condition, and when the parameter coefficient is 0, the lowest traffic cost is the optimal planning path, and triggers the route guidance and execution. Taking full account of the ramp total flow constraints, the induction scheme is implemented to obtain the shortest control cycle, and the fuzzy logic algorithm is used to calculate the control rate in the control cycle, so as to achieve the purpose of multi-ramp control. The experimental results show that the control precision of the technology is high, which lays a foundation for the safe operation of expressway.

**Keywords:** freeway; multi ramp; remote collaboration; control; planning path; fuzzy logic algorithm

## 0 引言

高速公路是交通运输主要道路, 与其他道路相比, 具有快捷、高效运输优势。我国高速公路运营管理水平与建设水平暂不相符, 其运营管理应当保证道路能够进行基础通行服务功能, 提高道路运行安全, 减少道路交通拥堵问题出现次数, 做好突发性事件救援准备工作<sup>[1]</sup>。一旦高速公路上发生交通事故, 那么整个交通就会被阻塞, 其负荷越大, 道路产生拥堵影响所造成后果就会越严重。由于高速公路行车环境较为特殊, 与一般公路相比, 如果发生交通事故, 救援难度较大, 容易引发二次交通事故, 影响极为恶劣<sup>[2]</sup>。交通管理部门一直都在高度关注高速公路交通安全问题, 并致力于研究提高高速公路交通运行效率, 构建快速安全救援机制, 减少事故给社会和人们造成的影响。多匝道控制是一种缓解高速公路拥堵的重要方式, 随着运输业持续发展, 人们意识到高速公路给人们生活带来的便

利, 但同时高速公路逐渐跟不上人们需求增长速度, 因此利用多匝道控制方法能够将需求限制在高速公路通行能力范围内, 有效提高通行效率<sup>[3]</sup>。

传统多匝道控制方法大多是使用线圈进行参数采集, 以此为基础计算交通调节率, 根据调节率控制车辆通行数量。然而受到线圈自身限制, 难以对实际高速公路交通情况准确认识, 有可能出现错误放行, 造成合流区冲突, 影响通行效率。而协同控制计数的提出为多匝道控制提供了全新视角, 将协同技术应用到多匝道控制中, 可准确计算交通调节率, 实时掌握影响区域内的交通状况, 以全面视角对多匝道区域内的车辆进行优化控制。

## 1 高速公路协同环境组成

高速公路协同环境是由车载单元、路侧单元和通信网络组成的, 对车辆间通信网络进行划分, 可分为 3 个网络区域, 分别是车内域、自组网域和基础设施域。其中车内域负责连接车辆内部各个设备控制单元之间通信, 现代车辆控制方式已经从传统机械信号传递转变为电子信号传递方式, 车辆内部集成各种控制系统, 其中包括防抱死系统、动力分配系统和电子稳定系统, 这些电控系统都是由传感器、控制单元和执行器组成的, 保证人们能够有效控制车辆, 为驾驶者提供舒适驾驶环境, 提高行车安全性; 自组

收稿日期: 2018-10-27; 修回日期: 2018-11-20。

**作者简介:** 李凯伦(1994-), 女, 山东烟台人, 在读硕士生, 主要从事交通安全方向的研究。

王建军(1970-), 男, 陕西西安人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事交通安全方向的研究。

网域指的是车载单元与与路侧单元之间的通信,随着移动通信技术不断发展,移动网络被直接应用到车路协同环境之中;基础设施域负责对路侧单元进行通信,借助网络或热点直接访问互联网。

为了更好应对电信号在各个内部控制单元的传递,应当在车辆内部构建相应本地通信网络,而现有网络通信协议可包括 3 种,分别是基于时间触发、基于事件触发、混合触发通信协议,为了保证多匝道远程协同控制技术研究可靠性,应遵循上述协议进行详细分析<sup>[4]</sup>。

## 2 多匝道远程协同控制技术研究

高速公路多匝道远程协同控制技术研究的是管理系统性。信息交流交互性和服务广泛性,随着高速公路车辆拥有量不断增加,尤其是在各种复杂天气下,一天内车流量高峰时段拥有一个良好交通流量控制方案,不仅有效提供道路利用效率,还可保证各个路段车辆平均延误时间缩短<sup>[5]</sup>。该技术一般是对系统车辆监测器、交通指示信号灯和相关指标线进行研究,匝道控制如图 1 所示。

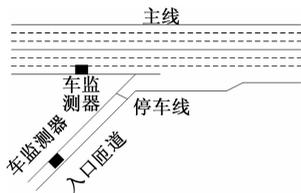


图 1 匝道控制示意图

图 1 中:车辆监测器可接收来自感应线圈、超声波、红外线、雷达传来的信息,是获取交通流信息最直接设备;交通指示信号灯可为匝道入口车辆通行提供标识,信号灯位置和高速选取要适当,匝道处信号灯位置应与主线保持一定距离,保证车辆入主线时匝道空间是空闲的;相关指标线的设立了引导车辆有序通过交通信息监测各个路段交通情况,提高警示能力<sup>[6]</sup>。

### 2.1 多匝道远程协同控制原理

根据上述匝道控制结构,对其控制原理进行分析。多匝道是高速公路交通控制主要部分,在入口匝道处设置交通信号,可调节交通流,减少基本消除高速公路主干道的交通堵塞。多匝道控制基本原理是利用匝道信号灯调节车辆进入公路主线车流率,保证高速公路自身交通需求不超过最大容量,使高速公路依据某一性能指标处于最佳运输状态<sup>[7]</sup>。在高速公路上运行的车辆可在匝道处等待,减少高速公路拥塞情形,增进匝道车辆并入主线的安全。依据控制单位,可将多匝道控制可分为两种,分别是单点控制和协调控制,依据对实时信息响应不同,可将其分为静态控制和动态控制。

高速公路控制入口匝道目的在于限制主线交通,使其不超过主线车辆交通通行能力,维持高速公路主线交通秩序,多匝道控制是以限制主线交通流量为目的,保证高速公路交通处于良好运行状态,优先保证高速公路主线运行,减少车辆延误转移到匝道现象发生<sup>[8]</sup>。

### 2.2 车路远程协同环境下路径规划和诱导

根据上述控制原理,对高速公路路径规划和诱导进行分析。协同环境下对高速公路路径进行规划和诱导是控制技术研究的核心,对于路径规划可用于计算周期性各个起点之间通行成本,选出最优路径主循环<sup>[9]</sup>。车辆进入路网后,符合诱导条件,此时触发诱导子循环,各个路径通行成本指的是各个路径距离和预测时间成本函数,某条路径通行成本公式可记为:

$$X = nT + mS + \sum i_n P_n \quad (1)$$

公式(1)中: $n$ 表示通行时间成本系数; $m$ 表示通行距离成本系数; $i_n$ 表示第 $n$ 项参数系数; $P_n$ 表示第 $n$ 项参数,按照一定规则将通行时间转换。其中设置 $n$ 值为1,而 $m$ 值要根据实际路况进行微调,获取最优值。当 $i_n$ 为0时,通行成本最低路径为最优路径,此时为多匝道控制最优路径规划结果。

1) 主循环执行流程:以交通自由流状态下通行时间为标准,对每个需要执行路径预设几条相对较短路径;读取高速公路路网交通参数,预测各个线路通行成本,并从每个网点中选择出当前成本最低路径;根据计时器判断可否进入下一个周期。

2) 诱导执行流程:当车辆驶入匝道符合诱导条件时,触发路径诱导;通过诱导可读取当前路径信息;开始执行诱导,更新参数,并返回到主循环。

具体路径规划和诱导流程如图 2 所示。

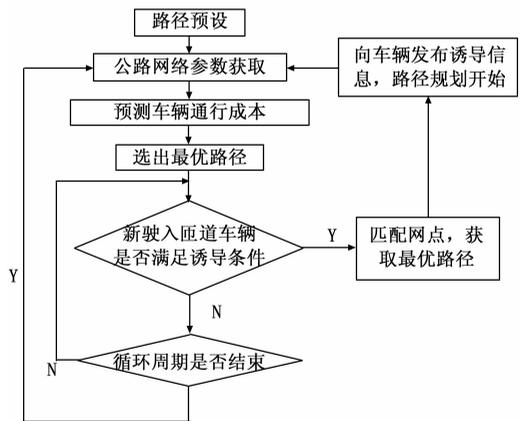


图 2 具体路径规划和诱导流程

由图 2 可看出,采用的控制模式是具有周期性的网络模式,根据网络节点信息获取最优路径,一旦车辆驶入匝道信息与执行诱导信息相匹配,那么需根据当前控制周期开始寻优。充分考虑车辆驶入匝道的不确定性,控制某个特定周期内的全部车辆,如果等待一个控制周期结束时,该周期内的所有驶入匝道车辆同时进行最优路径诱导,可有效缩短控制周期。

### 2.3 控制技术的实现

根据车路远程协同环境下路径规划和诱导分析,充分考虑车辆总通行时间、总通过数量和入口匝道总流量约束条件,通过最优化目标求解各个匝道调节率,根据该调节率,使用模糊逻辑算法计算控制周期内的控制率,从而实

现多匝道控制目的。

### 2.3.1 调节率计算

对匝道控制调节率进行计算,可消除高速公路上的阻塞,改变汇流安全性,提高高速公路利用效率。为了消除高速公路阻塞,必须使需求小于通行能力,因此在匝道上计算调节率。根据交通需求和通行能力,在匝道上计算高速公路交通量,具体调节率计算公式如下所示:

$$\text{调节率} = \text{交通下游通行能力} - \text{上游交通需求} \quad (2)$$

为了防止交通阻塞,应计算交通上游需求和匝道需求总和,保障高速公路安全,避免追尾事故发生,使匝道与高速公路车流间隙车辆都能进入车群,防止车道变换相撞。

### 2.3.2 模糊逻辑算法

采用模糊逻辑算法是多匝道控制算法成为高速公路车流控制的重要手段,充分考虑驾驶员对匝道控制响应,及时分配多匝道需求时间和空间,在现有单匝道控制条件基础上,研究多匝道控制交通状态。在匝道控制过程中,不断结合其它交通控制手段,使各种控制手段有机结合在一起,更好控制交通流。

模糊逻辑算法主要目标是使车辆总行程距离变得最大化,减小车辆延误最小化,需在单个匝道上的调节率和汇流调节率之间进行选择。

该算法应用如图3所示。

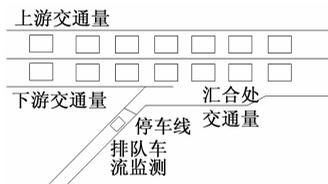


图3 模糊逻辑算法在控制技术中的应用

由图3可知:具体应用中需要输入3个变量,分别是上游交通量、下游交通量和汇合处交通量。将这3个变量分为3个不同值:小、中、大,通过公式(2)确定调节率。

将高速公路流量看作控制常量,使匝道控制率为控制变量,通过反馈思路控制匝道进入高速公路主线交通流量,保证主线下游交通流量不超过汇合处车辆通行效率,避免高速公路出现交通堵塞问题。将时间离散成固定周期时间段,在每个时间段内,计算匝道控制率:

$$p(h) = g(h-1) + h_a(A_c - A_{out}(h)) \quad (3)$$

公式(3)中, $p(h)$ 表示在 $h$ 周期内匝道控制率; $h_a$ 表示大于零的校正系数; $A_{out}(h)$ 表示在 $h$ 周期内匝道车辆通行情况; $A_c$ 表示交通流量需求值。

通过监测每个周期内交通流量,获取精准数据,将此数据与匝道限定流量差进行比较,可得到一个大于零的变量,并在此变量基础上加上调整量,可得到当前在固定控制周期内的控制率,进而实现多匝道远程协同控制目的。

## 3 实验分析

为了检验高速公路多匝道远程协同控制技术的效果,使用高速公路 Paramics 仿真软件,通过对加载控制方法进行计算机模拟获取分析结果。

### 3.1 远程协同环境下交通数据采集

传统交通数据采集仅仅是对路侧和被动监测道路进行数据采集;而远程协同环境下数据采集可转变为路侧设施需求、车载设备单元相应提供的自身数据情况。在这种情况下,远程协同环境下的交通数据采集无论是数据精准性还是数据丰富性,都比磁感线圈为核心技术的传统数据采集精准度要高。

由于数据是通过车载单元提供,因此为了保证数据可靠性,需从海量数据条件下,为交通管理人员搜集如下信息:车型、车身长度、尺寸数据、车辆通过GPS定位获取的绝对位置、以道路为基准相对位置、车辆驶入匝道瞬时速度、路段流量、平均车速。丰富交通信息可使交通管理者能够更好掌握高速公路路况,为实验分析提供有效信息。

### 3.2 实验结果与分析

传统匝道控制方法主要是通过匝道口信号灯对公路入口匝道车辆放行进行控制,以此实现缓解高速公路主线交通压力,达到提高高速公路通行目的。但该方法仅仅针对交通量小的情况下,一旦高速公路上车辆增多时,需采用多匝道远程协同控制技术,该技术能够保证匝道上下游调节率具有准确计算结果,有效提高高速公路运行效率。

根据上述内容,分析车辆驶入匝道等待时间和频数关系,如图4所示。

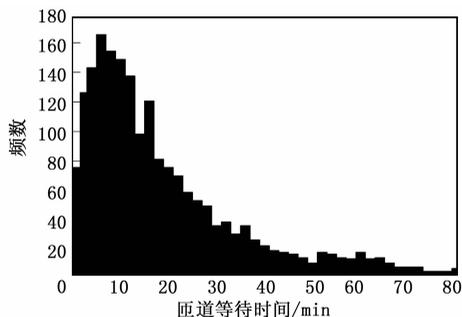


图4 匝道等待时间和频数关系

由图4可知:当匝道等待时间为0~10 min时,频数最高为170;当匝道等待时间为10~20 min时,频数最高为155;当匝道等待时间为20~30 min时,频数最高为75;当匝道等待时间为30~40 min时,频数最高为40;当匝道等待时间为40~50 min时,频数最高为30;当匝道等待时间为50~60 min时,频数最高为25;当匝道等待时间为60~70 min时,频数最高为26;当匝道等待时间为70~80 min时,频数最高为10。采用多匝道远程协同控制技术,随着匝道等待时间的流逝,出现高速公路交通拥塞频率大幅度下降。

在该条件下,检验数据样本是否与某一概率分布符合,如果符合,则说明样本数据基本分布在理论分布对角线上。根据变量累计概率对应所指令理论分布概率绘制散点图,分别将传统技术与多匝道远程协同控制技术进行对比分析,结果如图5所示。

由图5可知:当匝道等待时间为10 min时,传统技术理论分布概率在0~0.008范围内,而多匝道远程协同控制技术理论分布概率在0~0.007范围内,标准值为0.0025;

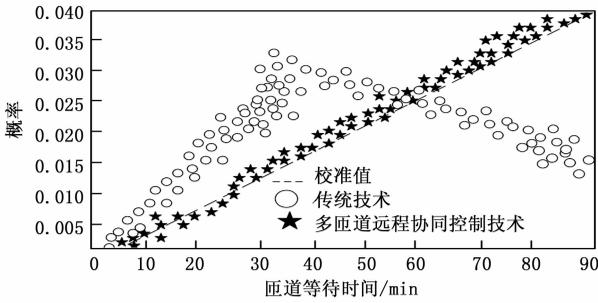


图 5 两种技术匝道等待时间散点图

当匝道等待时间为 30 min 时, 传统技术理论分布概率在 0.019~0.032 范围内, 而多匝道远程协同控制技术理论分布概率在 0.013~0.015 范围内, 标准值为 0.014; 当匝道等待时间为 50 min 时, 传统技术理论分布概率在 0.027~0.028 范围内, 而多匝道远程协同控制技术理论分布概率在 0.0225~0.023 范围内, 标准值为 0.0225; 当匝道等待时间为 70 min 时, 传统技术理论分布概率在 0.020~0.024 范围内, 而多匝道远程协同控制技术理论分布概率在 0.032~0.037 范围内, 标准值为 0.032; 当匝道等待时间为 90 min 时, 传统技术理论分布概率在 0.015~0.019 范围内, 而多匝道远程协同控制技术理论分布概率在 0.039~0.040 范围内, 标准值为 0.040。因此, 采用多匝道远程协同控制技术对理论分布概率分析结果较为精准。

为了进一步验证该结果的精准性, 采用分布的分位数进行实验研究, 与等待时间散点分析结果大体相似, 如果数据点基本分布在图中对角线附近, 则说明结果较为精准, 分别将两种技术正态分布情况进行对比分析, 结果如图 6 所示。

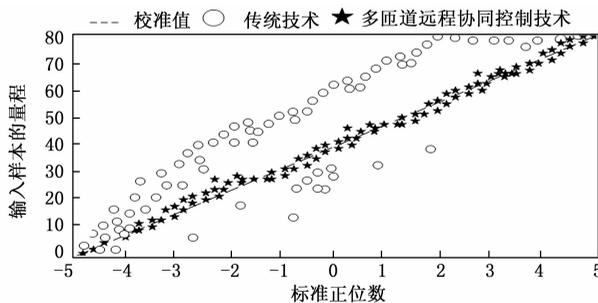


图 6 两种技术正态分布情况

根据图 6 所示对比结果可知, 当标准正位数为 -4 时, 传统技术输入样本量程在 10~18 范围内, 而多匝道远程协同控制技术输入样本量程为 9, 与标准值一致; 当标准正位数为 -3 时, 传统技术输入样本量程在 26~35 范围内, 而多匝道远程协同控制技术输入样本量程在 16~19 范围内, 标准值为 18; 当标准正位数为 -2 时, 传统技术输入样本量程在 42~49 范围内, 而多匝道远程协同控制技术输入样本量程在 22~28 范围内, 标准值为 23; 当标准正位数为 3 时, 传统技术输入样本量程为 78, 而多匝道远程协同控制技术输入样本量程为 65, 与标准值一致; 当标准正位数为 4 时, 传统技术输入样本量程为 78, 而多匝道远程协同控制技术输入样本量程在 69~73 范围内, 标准值为 71。因此, 采用多匝道远程协

同控制技术对输入样本量程分析结果较为精准。

### 3.3 实验结论

综上所述: 采用多匝道远程协同控制技术对理论分布概率分析结果与输入样本量程分析结果都比传统技术分析结果精准度要高。随着匝道等待时间流逝, 理论分布概率与标准值大体相似, 最高吻合度可达到 98%; 而在标准正位数下, 输入样本量程基本与标准值一致, 且最高吻合度可达到 99%。

由此可知, 高速公路多匝道远程协同控制技术是具有合理性的。

## 4 结束语

以高速公路多匝道为研究对象对其远程协同控制技术展开研究, 分析协同环境, 应用模糊逻辑算法实现匝道控制, 为以后实施该技术提供支持。综合整个研究过程, 可得到如下结论:

- 1) 详细分析多匝道控制原理, 通过分析高速公路协同环境设计控制方案;
  - 2) 根据高速公路车辆运行情况以及交通流特征, 选择合适高速公路路径规划和诱导渠道, 为匝道控制提供最优解决方案;
  - 3) 采用匝道等待时间散点图和正态分布情况对传统技术与该技术的控制精准度进行对比分析, 由对比结果可知, 该技术控制精准度较高。
- 虽然设计的远程协同多匝道控制方案具有较高控制精准度, 但是在技术稳定性和安全性方面研究仍然不足, 因此, 需进一步调查研究实际效果, 为高速公路高效运行提供支持。

### 参考文献:

[1] 张存保, 李劲松, 黄传明, 等. 基于车路协同的高速公路入口匝道车辆汇入引导方法 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2017, 41 (4): 537-542.

[2] 周浩, 胡望明, 张毅, 等. 快速路可变限速与匝道控制协同优化策略 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17 (2): 68-75.

[3] 翟运开. 远程医疗系统协同管理模式与策略研究 [J]. 中华医院管理杂志, 2016, 32 (8): 604-607.

[4] 张森均, 唐晓平, 朱智谋. 拖拉机数字化设计服务器智能远程协同技术研究——基于多媒体武术教学系统原理 [J]. 农机化研究, 2018, 21 (9): 32-35.

[5] 何胜学. 整合快速路网匝道控制和路径诱导的进化粒子群算法 [J]. 计算机应用研究, 2017, 34 (10): 2968-2972.

[6] 马磊, 隋龔, 强一, 等. 基于 MTS 加载系统及 Open-Fresco 网络平台的远程协同子结构拟动力试验方法研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2018, 18 (2): 115-120.

[7] 曹如月, 李世超, 魏爽, 等. 基于 Web-GIS 的多机协同作业远程监控平台设计 [J]. 农业机械学报, 2017, 16 (s1): 31-42.

[8] 杨立永, 谢晓峰, 刘硕. 基于新型无差拍电流控制的高速 PMSM 控制技术研究 [J]. 电气传动, 2017, 47 (4): 16-21.

[9] 王璐. 基于 BPMN 的高速公路建设项目管理系统设计与实现 [J]. 电子设计工程, 2018, 26 (13): 57-60.