****

本科毕业设计（论文）

**面向高速公路拥堵事件的管控方法仿真与研究**

|  |  |
| --- | --- |
| **学 院**  **专 业**  **学生姓名**  **学生学号**  **指导教师**  **提交日期** | **土木与交通学院** |
| **交通工程** |
| **林启恒** |
| **201430150130** |
| **龚峻峰** |
| **2018年5月30日** |

# 摘 要

关键词：模型预测控制

# Abstract

**Keywords**: Model Predictive Control

# 目 录

[摘 要 I](#_Toc514174718)

[Abstract II](#_Toc514174719)

[目 录 III](#_Toc514174720)

[第一章 绪论 1](#_Toc514174721)

[1.1 引言 1](#_Toc514174722)

[1.2 研究背景 1](#_Toc514174723)

[1.3 研究现状 1](#_Toc514174724)

[1.3.1 拥堵事件管控方法 2](#_Toc514174725)

[1.3.2 拥堵事件建模与仿真 3](#_Toc514174726)

[1.4 论文结构与内容 4](#_Toc514174727)

[第二章 高速公路管控措施 5](#_Toc514174728)

[2.1 高速公路管控措施的特点与目的 5](#_Toc514174729)

[2.2 匝道控制 5](#_Toc514174730)

[2.3 可变限速 5](#_Toc514174731)

[2.4 提前疏导 5](#_Toc514174732)

[2.5 本章小结 5](#_Toc514174733)

[第三章 高速公路系统状态预测模型 6](#_Toc514174734)

[第四章 高速公路仿真平台 7](#_Toc514174735)

[4.1 路网建模 7](#_Toc514174736)

[4.2 模型参数与数据处理 7](#_Toc514174737)

[4.3 二次开发架构 7](#_Toc514174738)

[4.4 仿真实验方案 7](#_Toc514174739)

[4.5 本章小结 7](#_Toc514174740)

[第五章 仿真结果与讨论 8](#_Toc514174741)

[第六章 总结 9](#_Toc514174742)

[参考文献 1](#_Toc514174743)

[致谢 3](#_Toc514174744)

# 绪论

## 引言

根据我国《公路工程技术标准》（JTG B01-2014）的定义，高速公路是指“能适应年平均昼夜小客车交通量为25000辆以上、专供汽车分道高速行驶、并全部控制出入的公路。”自1988年我国大陆建成首条高速公路——沪嘉高速公路以来，我国高速公路网络得到了长足的发展，截至2017年7月，我国高速公路通车里程已经达到13.1万公里，居世界第一。

然而，随着我国经济发展水平的不断提高，高速公路的车流量不断增长，高速公路拥堵事件的发生也越趋频繁。与一般的城市道路相比，高速公路具有全封闭、控制出入、对向分隔行驶等特点，尤其是高速公路相邻出入口之间的距离和城市道路相比大幅增加，导致拥堵事件发生时车辆绕行困难，难以疏导。另外，拥堵事件的发生使车流速度在车辆排队队尾处发生突变，可能诱发追尾等次生事故。

另一方面，拥堵事件具有不断蔓延发展的特性。如果对于拥堵事件的发展不加以管控，任由其发展，拥堵区间会不断增长，甚至通过出入口和互通立交蔓延到其他高速公路和地方路，造成更大范围的拥堵事件。因此，对于高速公路拥堵事件的管控方法进行研究，对于确保高速公路畅通快捷、保证通行效率，具有重要的现实意义。

## 研究背景

现存的高速公路交通拥堵事件管控措施主要有匝道控制、可变限速和提前分流疏导等3种。匝道控制自上世纪60年代起便有实际应有的例子，目前在北美、欧洲和大洋洲等地区有广泛应用，对缓解高速公路拥堵有良好效果。其算法从初期的定时控制式演变到单点的闭环反馈控制，再发展到多匝道协调控制，经历了由点到面的发展过程；可变限速同样在上世纪60年代开始有实际应用，目前主要分布在英国、美国、新西兰和澳大利亚等国家和地区，在缓解瓶颈效应和预防追尾事故等方面有突出的作用。从公开资料来看，目前我国的合肥、西安等城市的高速公路也有可变限速的试点工程，但其出发点只要是保证交通安全，其主要目的是在秋冬雨雪天气导致路面湿滑和能见度下降的情况下，使机动车能以安全车速行驶，防止车速过快引发交通事故，同时避免动辄封路分流，给市民出行造成不便，而不是从控制交通拥堵规模、缓解瓶颈效应的角度出发的。

提前分流在我国多应用于高速公路发生大范围长距离拥堵，或者在恶劣天气下不具备安全通行条件时，由交通管理部门根据应急预案或临场进行决策，决定提前分流实施的方案，阻止或尽量减少车流进入问题路段。分流指令或者建议信息一般通过设置在高速公路上的可变情报板（VMS）告知驾驶员，同时告知驾驶员引起分流的原因（拥堵、交通事故、施工等）并提供简单的替代路线方案，由驾驶员根据各种不同选择所需的出行时间等因素决定是否绕行。对于不具备通行条件，必须全部分流的情况，一般由交通管理部门派员到现场封路，引导车辆下高速。如果是节假日等进行常态化分流的时间节点，一般会在该时间节点前提前公布分流方案和替代路线，方便驾驶员决策。

总的来说，匝道控制和可变限速的决策已经各自有自动化控制的算法，并大规模投入实际应用，取得了不俗的效果，然而提前分流目前依然在很大程度上依赖于人工决策或者事前决定的应急预案。

## 研究现状

高速公路系统是一个人—车—路相互作用的复杂系统，可以认为高速公路的流量、速度、密度等变量为系统的状态变量，而拥堵事件的发生可以视作高速公路系统的性能指标下降。对高速公路的拥堵事件进行管控，其实质是利用自动控制等技术，把高速公路系统作为一个可控的优化运行系统进行优化。[1]

### 拥堵事件管控方法

对高速公路进行管控的方法主要有匝道控制、可变限速和提前分流等3种。

匝道控制（Ramp metering）是指在匝道设置交通灯，根据主线的运行情况实时计算调节率，对匝道车辆进行间歇性放行，优化高速公路系统的性能指标的一种管控方法。匝道控制在英、美、法、德等国均有应用，在实际工程中能有效改善高速公路主线交通拥挤。

匝道控制可划分为静态匝道控制和动态匝道控制两类。前者一般可归结为一个线性规划模型，在算法复杂度上具有很好的实时性；但是这类控制方法只能使用历史数据，容易产生方案老化，对各种扰动也非常敏感，不能适应突发的拥堵事件。[2]

为了提高算法的实时性，动态匝道控制方案被提出。动态匝道控制分为本地匝道控制和多匝道协调控制两种。本地匝道控制的作用范围在单个匝道以及其上下游路段，实时检测上下游路段的交通流状态来计算匝道控制的控制率，可大致分为需求——容量策略、占有率策略和线性状态调节控制（ALINEA）3种。[2, 3]前两种依然是对扰动非常敏感的开环控制策略，而ALINEA是一种闭环控制策略，具有算法简单、高鲁棒性的特点[3, 4]。

本地协调控制没有考虑到各匝道之间需求不均等因素，忽略了高速公路不同匝道之间的内在联系。为了解决这一弊端，有学者又提出了各种多匝道协调控制算法，其主要思想是对不同匝道之间的通行需求进行平衡，增大排队较长的匝道的放行率，减少排队较少的匝道的放行率。典型的算法主要有明尼苏达算法（Zone）、华盛顿算法（Bottleneck）、系统感应匝道控制算法（SWARM）和模糊逻辑控制等4种。

总的来说，匝道控制算法经历了由点到面的发展过程，也对缓解高速公路拥挤比较有效。然而在实际应用中，为了避免匝道车辆排队溢出到上游的地方路或者其他高速公路，反而需要增大匝道控制的放行率，对高速公路系统造成更大的扰动，这是匝道控制的局限性所在。

可变限速（Variable Speed Limits，VSL）是指改变（通常是降低）高速公路主线路段的限速的管控方法，具体的限速值通过算法确定，实时变化以适应高速公路系统状态的变化。其核心思想是在发生拥堵事件的路段上游人为制造一个低速度、高密度的区间，使驶入发生拥堵事件路段的上游交通流能保持在拥堵路段的通行能力附近，最大限度提高拥堵路段的流量。[5, 6]另外，可变限速能实现高速公路主线上车辆速度的均衡化，减少追尾事故的发生，改善交通安全。[7]

可变限速有强制限速型和建议速度型两种，后者涉及驾驶员遵从可变限速率的问题。根据Lu等人的工作，遵从率为30%的建议可变限速所取得的限速效果和强制可变限速基本相同，由此可以论证他们所建立的线性模型的正确性。[6]

提前绕行疏导是指通过可变情报板（VMS）给出引导信息，把部分或者全部车辆引导到发生拥堵事件的路段上游的各个出口提前下高速，防止拥堵排队区间长度进一步增加，同时保证被分流的车辆不被拥堵事件滞留在拥堵路段。这种管控方法本质上是一个动态交通分配问题，需要确定网络模型和最优交通分配准则，还要考虑驾驶人服从率、引导信息更新频率以及网络流稳定性问题。[1]Weymann等人在考虑驾驶员遵从率的情况下，研究了遵从率对动态路径引导最优化的影响，认为驾驶员的人为因素在路径引导系统中是不能被忽略的重要因素[8]。

有学者尝试把匝道控制和可变限速组合起来对高速公路拥堵进行管控。对于这两种措施的决策顺序一共有3种选择，即同时计算两种措施的控制参数，或者先后计算两种管控措施的控制参数。[6]Lu等人先计算可变限速后计算匝道控制的放行率，并比较了单独执行一种管控措施和组合使用两种管控措施的管控效果，发现组合使用能显著提高系统的性能指标[6]；Carlson等人把两种管控措施同时组合到一个宏观交通流模型中，并通过解一个时间上离散的系统性能指标最优化问题，同时决定两种管控措施的控制参数[9]；张晨琛等人在研究高速公路主线收费站拥堵消散控制策略时，发现把可变限速和匝道控制措施组合起来，效果优于单独采用一种管控策略[10]。由此可见，组合使用不同管控策略的管控方案具有一定的前景。

### 拥堵事件建模与仿真

使用交通仿真技术可以低成本、高精度、可控地研究高速公路拥堵事件和相关的管控措施。陈昊等人使用VISSIM软件研究高速公路交通事故对有效通行能力的影响[11]；李志斌等人使用PARAMICS软件对可变限速控制策略的控制阈值、限速值更新周期和变化幅度以及相邻路段限速值等问题进行了研究[7]；陆克丽霞等使用VISSIM软件，将基于ALINEA算法的匝道控制方法应用于实际工程实践中[12]。

高速公路交通仿真过程要遵循问题描述、模型建立、程序编制与运行、仿真结果分析以及模型校验与标定等步骤，确保模型输出的有效性。[13]使用VISSIM软件提供的API，可以方便地编制程序控制整个仿真过程，并与VISSIM软件通信，实现对整个高速公路拥堵事件的仿真。

总的来说，对高速公路的拥堵事件管控有多种措施，且根据已有的研究表明，这些措施对管控高速公路拥堵事件具有良好效果。然而，对于多种管控措施的结合，目前的研究多集中于匝道控制和可变限速两种措施的结合，对于提前绕行疏导这一措施和其他措施进行结合进行高速公路拥堵事件管控着墨不多，这也是未来多种管控措施结合对高速公路拥堵事件进行管控的研究方向。而交通仿真作为一种低成本、高可控的研究手段，在研究高速公路拥堵事件以及综合管控措施的实施效果方面，将起到重要作用。

## 论文结构与内容

本文合共有六章。第一章简述了我国高速公路拥堵事件的蔓延趋势，并简要介绍了集中现有的集中高速公路拥堵事件管控方法以及目前的研究情况；第二章深入讨论各管控措施的定义、原理与实施方法，阐明进行管控的根本目的；第三章说明了对高速公路系统进行自动化控制的控制思想与框架，并建立了预测未来一段时间高速公路系统状态的完整数学模型；第四章介绍高速公路仿真平台的搭建，涉及模型参数、路网模型、仿真技术路线和实验方案的内容；第五章对仿真实验所得的结果进行总结和讨论；第六章概括了本文所作的所有工作，对创新点和不足之处进行总结，并展望未来研究的热点和工作的方向。

# 高速公路管控措施

## 高速公路管控措施的特点与目的

## 匝道控制

## 可变限速

## 提前疏导

## 本章小结

# 管控措施协调控制算法

## 模型预测控制

模型预测控制（Model Predictive Control，MPC）是一类优化控制算法的总称。从字面上理解，模型预测控制是基于模型的，同时具有预测未来系统状态的功能，和其他有优化控制算法相比，其优越性在于对模型要求不高、鲁棒性强以及综合控制质量较好，目前广泛应用于炼油、化工、电力等领域的工业生产中，受到技术人员的欢迎。

模型预测控制是一类算法的总称，其具体算法形式千差万别，比较有代表性的算法有Richalet等人提出的启发式模型预测控制（Model Predictive Heuristic Control，MPHC）、Cutler和Remaker提出的动态矩阵控制（Dynamic Matrix Control，DMC）、Garcia等人提出的带二次规划的动态矩阵控制（Quadratic Dynamic Matrix Control，QDMC）和Clarke等人提出的广义预测控制（Generalized Predictive Control，GPC）等。事实上模型预测控制这一名词更多地描述一种控制的思想，而非某一种或几种具体的算法。

尽管具体的算法形式花样繁多，就一般意义来说，无论其具体形式为何，模型预测控制具有以下几个基本特征：滚动优化、反馈校正和预测模型。

一般来说，预测模型有如下一般形式：

其中为状态向量，为控制向量，为扰动向量[14]。

## 预测模型

本文采用经过改造的METANET模型作为预测模型。首先介绍原版METANET模型，然后再根据研究的需要，对其进行改造。

### 链路模型

原版的METANET模型把路网作为一个有向图考虑。在这一模型中，“链路”（Link）指没有明显几何变化和上下匝道的路段，“路段”指对链路进行分割后的小段。由以上定义可知，高速公路的上下匝道处就是链路之间的分界点，这一分界点被称作“节点”（Node），通过对节点建立模型，考虑车辆上下匝道对系统状态的影响。

首先考虑流量—速度—密度关系。式中为时刻对应时间间隔的链路*m*路段*i*的驶出流量，为时刻该路段密度，为*k*时刻该路段的平均速度，为链路的可用车道数。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （三‑1） |

对于下一时刻的链路密度，认为该值与当前时刻的链路密度，以及在时间间隔内驶入和驶出的交通量有关。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （三‑2） |

上面两个式子都是对交通流本来的物理性质进行描述的。对于下一时刻的路段平均速度，由下式估算。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （三‑3） |

其中、和为待标定的参数，标定后对于所有的链路全部适用。为一个时间常数，是一个预测常数。上式中函数的定义如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （三‑4） |

其中是链路*m*的自由流速度，为待标定参数，为链路*m*的流量达到最大时的密度，也称为关键密度。

### 上匝道排队模型

根据上述对链路和节点的定义，上匝道接入的路段标记一定有形如的形式，其中是接入主线的链路编号，1是该链路中第一个路段，根据定义该编号只可能为1。

对于上匝道交通流的物理特性，有如下的基于排队的模型：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （三‑5） |

其中，为k时刻上匝道的排队长度（veh）。

如果匝道控制实施，令为*k*时刻离开上匝道的交通流中允许进入高速公路的部分的占比，也称作匝道控制率。对于上匝道*o*，有

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （三‑6） |

其中是允许的最小匝道控制率；当时，相当于匝道控制没有正在该匝道实施。根据匝道控制率的定义，有下式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （三‑7） |

其中，

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （三‑8） |
|  |  | （三‑9） |
|  |  | （三‑10） |

式中是匝道的通行能力（veh/h），是路网中最大密度（veh/km/lane）。从式（三‑8）~（三‑10）可知，在不受控制的状态下离开匝道进入高速公路主线的情况下，匝道的流出交通量受到两方面的制约，一是原本匝道已经积压的排队和下一个时间间隔内产生的上匝道需求，另外一方面是主线的交通流状态。如果，代表主线交通流还没有处于饱和状态，流出交通量取决于匝道的通行能力；如果，代表主线已经发生拥堵，流出交通量将减少。

### 节点模型

节点是交通流发生分流和合流的地方。节点模型提出的目的在于建立链路和链路之间的交通流的关系，使得模型可以连贯地覆盖整个路网。

设节点编号为*n*，假设交通流从若干流入链路进入，从若干流出链路流出（两者不必对等）。交通流在下游的链路的分布情况可以由下面两个式子计算。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （三‑11） |
|  |  | （三‑12） |

是流入链路的集合，是流出链路的集合，是时刻流入节点*n*的交通量的总和，是时刻通过链路*m*离开节点*n*的交通量，是中的占比，也就是通过链路*m*离开节点*n*的转向比例。

在通过式（三‑3）对未来的系统状态进行预测时，对于预测链路中最上游路段密度的情况，还需要考虑所有流入链路的影响。为了与式（三‑3）的形式匹配，构造称为虚拟上游密度的量，把所有节点流入链路的密度纳入考虑。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （三‑13） |

基于同样的理由，需要构造虚拟下游速度，以在通过式（三‑3）进行预测时把所有节点流出链路的速度对上游造成的影响纳入考虑，以各流出链路的交通流为权重进行加权计算。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （三‑14） |

## 加入对管控措施的考虑

### 对交通事件的模拟

无论是何种交通事件，其最终的效果都可以归结为若干条车道或者全部车道的关闭。反映在模型中，就是路段的可用车道数发生变化。在原版METANET模型中，可用车道数的概念使针对整个链路而言的，而对于在真实世界中发生的交通事件是点状分布的，不可能整个链路都发生车道关闭，为了在模型中体现这一小影响范围的特点，只能认为车道关闭的范围限制在某个路段内。

为了反映这种小范围的车道关闭，把原来的改为，把可用车道数的概念所描述的对象从整个链路缩小到单个路段上。由于可以发生突发式的变化，认为是MPC框架中扰动的一部分，停止在原版METANET中作为常数存在。

### 可变限速对速度的影响

可变限速值理论上是连续的，事实上为了在现实世界中实施的有效性，可变情报板给出的可变限速值一般来说是5的倍数。*k*时刻下链路*m*路段*i*的可变限速值由下式给出：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （三‑15） |

其中，

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （三‑16） |

对作出的限制保证了可变限速值在60km/h~120km/h范围内变化，且始终保持为5的倍数，符合我国对高速公路限速管理的有关规定。

### 对提前疏导的考虑

提前分流的形式是，由VMS给出分流建议或指令。建议和指令的区别在于，建议所给出的指引是非强制性的，驾驶员有权自己决定是否跟随VMS的建议；而指令是在道路中断等极端情况下使用的手段，此时VMS给出的分流指令，驾驶员必须服从，无权反抗。分流建议或指令可以在发生交通事件的上游附近的VMS中给出，不限于上游第1个VMS。

提前分流本质上是对车辆的路由控制。由于在现有条件下，只能由VMS简单给出分流建议，而不能精细地控制每一辆车的转向，由此也无法准确地得知分流建议给出后的分流率。同时，对于路网中存在的除了高速公路主线和匝道以外的其他道路，也缺乏流量资料，难以准确地计算各路径的成本进行交通分配。

由此，为了贴近驾驶员对于压缩出行时间的需求，设置如下的分流建议触发条件：估计从当前位置前往目的地各路径的出行时间，如果从当前位置离开高速公路对应的路径的出行时间小于留在高速公路主线上对应路径的出行时间，则触发分流建议。另外，为了照顾道路中断等极端情况，设置如下的分流指令触发条件：若某链路中断，则在该链路上游第1个节点处发出分流指令，上游的各节点发出分流建议。随着系统状态的变化，当系统不满足上述触发条件时，收回对应的分流建议或指令。

对于出行时间的估计，分成高速公路主线和地方道路两个方面。在高速公路方面，由于在计算目标函数*J*的过程中，通过改造的METANET模型已经获得了未来一段较长时间内高速公路各路段的平均速度的预测值，可以根据这些预测值方便地估计在高速公路上的路径的预计出行时间。而对于地方道路，由于现有数据只有其几何拓扑数据，并没有关于流量的统计数据，在本研究中假定这些道路的平均速度为某一个定值（如60km/h），再根据这一数据推算经过地方道路的路径的出行时间。

在分流建议或分流指令发出后，转向比例将发生变化。设在接收到VMS给出的分流建议后，驾驶员接受该建议的比例为。设变化后的转向比例为，VMS发出分流建议或指令后，原有的从节点*n*的下匝道（链路*m*）下高速的流量将变化为：

由此对式（三‑12）移项可得

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （三‑17） |

其中是节点*n*所有上匝道的集合（计算流入链路时排除高速公路主线流入链路）。给出信息的类别是分流指令时，；当信息类别为建议时，；当不给出分流信息时，，式（三‑15）退化为。

## 目标函数

首先，对于可变限速和匝道控制协调控制，先建立目标函数。关于提前分流的考虑和处理方法，在建立目标函数之后再讨论。

目标函数共有5项，第一项是在高速公路主线上的车辆数，第二项是所有上匝道排队车辆数的总和，后面3项分别是对可变限速值的变化、匝道控制率的变化以及上匝道排队超过最大排队长度的罚函数，以抑制可变限速值和匝道控制率的变化，同时抑制各上匝道的排队长度。、和是权重值，是全体可变限速标志的集合，是全体上匝道的集合，是针对每一条上匝道的具体情况而设定的最大排队长度。这一目标函数的形式，和本研究所确立的缓解高速公路主线上发生的拥堵的目标是对应的。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （三‑18） |

总的来说，进行一次优化所需要解的优化问题有如下的形式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | s. t. （三‑6），（三‑16） | （三‑19） |

由此，对每个进行性能指标优化的时刻*k*进行一次完整计算的过程框图如图 三‑1所示。

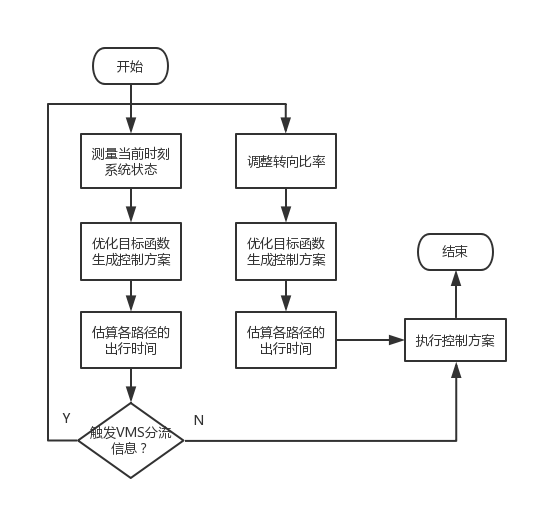


图 三‑1 对单个离散时刻计算控制变量的过程框图

# 高速公路仿真平台

## 路网建模

## 模型参数与数据处理

## 二次开发架构

## 仿真实验方案

## 本章小结

# 仿真结果与讨论

# 总结

# 参考文献

# 致谢

**参考文献**

[1] 王亦兵，贺国光. 城市高速公路交通控制综述[J]. 自动化学报. 1998, 24(4): 484-496.

[2] Papageorgiou M, Kotsialos A. Freeway ramp metering: an overview[J]. Intelligent Transportation Systems IEEE Transactions on. 2000, 3(4): 271-281.

[3] 陆海亭，张宁，钱振东. 高速道路入口匝道控制方法及应用探索[J]. 公路. 2008(8): 180-186.

[4] Papageorgiou M, Hadj-Salem H, Blosseville J. ALINEA: A local feedback control law for on-ramp metering[J]. Transportation Research Record. 1991, 1320(1): 58-67.

[5] 李志斌，金茂菁，刘攀，等. 提高高速公路通行效率的可变限速控制策略[J]. 吉林大学学报(工). 2013, 43(5): 1204-1209.

[6] Lu X Y, Varaiya P, Horowitz R, et al. Novel Freeway Traffic Control with Variable Speed Limit and Coordinated Ramp Metering[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board. 2011, 2229(2229): 55-65.

[7] 李志斌，刘攀，单肖年，等. 高速公路可变限速控制策略安全性效果仿真[J]. 西南交通大学学报. 2013, 48(5): 942-948.

[8] Weymann J, Farges J L, Henry J J. Optimization of traffic dynamic route guidance with drivers' reactions in a queue-based model[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics. 2002, 25(7): 1161-1165.

[9] Carlson R C, Papamichail I, Papageorgiou M, et al. Optimal Motorway Traffic Flow Control Involving Variable Speed Limits and Ramp Metering[J]. Transportation Science. 2010, 44(2): 238-253.

[10] 张晨琛，王艳辉，贾利民. 高速公路主线收费站拥堵消散控制策略[J]. 中国公路学报. 2013, 26(4): 139-145.

[11] 陈昊，陆建. 基于VISSIM仿真的高速公路事故交通影响[J]. 长安大学学报:自然科学版. 2015(S1): 226-229.

[12] 陆克丽霞，杜豫川，孙立军. 基于ALINEA算法的上海快速路入口匝道控制方法[J]. 同济大学学报(自然科学版). 2009, 37(2): 207-213.

[13] 徐建闽，李林，林培群，等. 高速公路交通管制策略仿真评价[J]. 公路. 2011(2): 83-87.

[14] Kotsialos A, Papageorgiou M, Diakaki C, et al. Traffic flow modelling of large-scale motorway networks using the macroscopic modelling tool METANET[C]. 1999.