****

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](#_Toc514260734)

[Abstract II](#_Toc514260735)

[目 录 III](#_Toc514260736)

[第一章 绪论 1](#_Toc514260737)

[1.1 引言 1](#_Toc514260738)

[1.2 研究背景 1](#_Toc514260739)

[1.3 研究现状 2](#_Toc514260740)

[1.3.1 拥堵事件管控方法 2](#_Toc514260741)

[1.3.2 拥堵事件建模与仿真 4](#_Toc514260742)

[1.4 论文结构与内容 5](#_Toc514260743)

[第二章 高速公路管控措施 6](#_Toc514260744)

[2.1 高速公路管控措施的特点与目的 6](#_Toc514260745)

[2.2 匝道控制 6](#_Toc514260746)

[2.3 可变限速 6](#_Toc514260747)

[2.4 提前疏导 6](#_Toc514260748)

[2.5 本章小结 6](#_Toc514260749)

[第三章 管控措施协调控制算法 7](#_Toc514260750)

[3.1 模型预测控制 7](#_Toc514260751)

[3.2 预测模型 8](#_Toc514260752)

[3.2.1 链路模型 9](#_Toc514260753)

[3.2.2 上匝道排队模型 10](#_Toc514260754)

[3.2.3 节点模型 10](#_Toc514260755)

[3.3 对管控措施的考虑 11](#_Toc514260756)

[3.3.1 模拟交通事件的发生 11](#_Toc514260757)

[3.3.2 可变限速对速度的影响 12](#_Toc514260758)

[3.3.3 对提前疏导的考虑 12](#_Toc514260759)

[3.4 目标函数 13](#_Toc514260760)

[3.5 总体控制逻辑 15](#_Toc514260761)

[3.6 本章小结 16](#_Toc514260762)

[第四章 高速公路仿真平台 17](#_Toc514260763)

[4.1 路网建模 17](#_Toc514260764)

[4.2 模型参数与数据处理 17](#_Toc514260765)

[4.3 二次开发架构 17](#_Toc514260766)

[4.4 仿真实验方案 17](#_Toc514260767)

[4.5 本章小结 17](#_Toc514260768)

[第五章 仿真结果与讨论 18](#_Toc514260769)

[第六章 总结 19](#_Toc514260770)

[参考文献 1](#_Toc514260771)

[致谢 3](#_Toc514260772)

# 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目的与设置原则

在讨论高速公路管控措施的目的与特点之前，有必要先回顾高速公路本身的特点。

顾名思义，高速公路的最明显也是最首要的特点就是高速。和有大量平面交叉口、交通灯等设施的一般地方道路相比，高速公路的平均车速要远高于地方道路，尤其是位于大城市的近郊地区的地方公路。高速公路的高车速运行，是由高速公路本身全封闭、控制出入、杜绝平面交叉的特点支撑起来的。高速公路全封闭控制出入的设计方式，最大限度简化了高速公路的路况，减少平面交叉和行人与非机动车等对驾驶员的干扰因素，同时通过线型设计保证了车辆能够持续高速运行。

车速的上升带来的另外一个特征就是高速公路的快捷性。由于平均行驶速度高，使用高速公路往往能比使用地方一般道路更快到达相同的目的地，节省大量的宝贵时间。这种快捷性在进行长距离移动时体现得更加明显。如果高速公路的路况能够保持相对稳定，使用高速公路可以很好地预估和控制出行时间，最大限度压缩延误。因此，高速公路是很多长距离出行者或对于到达时间的变化非常敏感的出行者进行出行路径决策时的首选。

然而，随着近年来我国车辆保有量的快速增长，以及经济活动的发达，部分高速公路也开始发生拥堵现象。这些拥堵时间发生的原因基本上可分作两类，其一是高速公路的通行需求日渐增长，超过了高速公路所能提供的通行能力，其二是由于事故、车辆故障、施工、执法等交通事件发生占用了路面，导致高速公路事发路段附近的通行能力大幅下滑，无法应付日常的通行需求。

和地方公路和城市道路上发生的拥堵相比，高速公路上发生的拥堵事件有两个突出的不同点，也是高速公路拥堵事件处理的难点。第一个特点是高速公路拥堵难以疏导的特性。为了保持车速在一定水平上，高速公路相邻出入口的距离一般都比较远，少则2~3km左右，长的可以在10km以上。由于高速公路拥有全封闭控制出入的设计特性，一旦拥堵事件发生，排队的车辆除了一直在队列中等待，直到来到远在天边的出口再下高速或者通过互通立交进入其他高速公路绕行以外，没有其他任何途径可以绕行，一般情况下高速公路也不允许调头，使得车辆很容易在遇到拥堵事件时进退两难；另外一个特点是拥堵事件蔓延速度快、范围广。由于高速公路是速度高、容量大、流量负担重的公路，拥堵造成的排队增长速度快，甚至通过互通立交和出入口蔓延到其他高速公路或地方道路，造成拥堵事件范围的扩大。在高速公路发生较大范围的拥堵事件时，高速公路原来的大幅减少延误的功能被抵消，失去了提供方便快捷的出行的功能。

为了控制拥堵事件的发展，最大限度消解拥堵，保持高速公路方便快捷的特性，需要对高速公路进行管控。管控的手段和方式可以是多种多样的，但是其根本的目的都是为了控制和消解拥堵，尽力降低出行延误，保证出行者能方便快捷地完成出行。

高速公路是一个复杂系统。对一个复杂系统进行控制，不能任意妄为，必须遵循一些特定的规律和原则。

其一是要保证管控的实时性。高速公路流量大，拥堵事件一旦发生，每时每刻都在发展。在这种情况下，如果使用一些只适用于拥堵事件初期的管控方式和方案来控制已经发展到了一定程度的拥堵事件，无疑是不能解决问题的。这就要求管控方案的生成必须是实时的，随着控制对象的状态变化不断在线更新；同时也要注意管控方案生成算法的复杂性，不能使用过于复杂或问题规模过于庞大的算法，拉长管控方案的计算时间，导致管控方案生成的瞬间就已经老化，损害管控的实时性。

其二是要保证管控方案的有效性。具体来说，管控方案必须要被证实可以有效抑制拥堵事件的扩大，以及部分或全部地消解拥堵事件，不能在无用的方案上虚耗资源；另一方面，管控方案必须要具有可操作性，能够通过一些技术手段有效实施，同时方便驾驶员配合，不能出现高速公路管理部门难以落实、驾驶员无所适从的不合理方案，更不能进一步破坏高速公路的交通安全和秩序。

其三是要注意管控方案的负面影响最小化。任何事物都有两面性，由算法自动生成的控制方案也不例外。一些管控方案可能会对高速公路的交通安全造成潜在的伤害，或大幅劣化驾驶人的出行体验。对于可能造成负面影响的管控方案，要注意扬长避短，控制器对高速公路系统造成的不良影响；实在难以消除负面影响的，要作为后手，非常谨慎地决策，然后再应用。

本章将着重介绍本文的研究中所涉及的匝道控制、可变限速和提前疏导3种管控方法，并讨论他们的工作机理和设置原则。

## 匝道控制

匝道控制，顾名思义是在匝道上实施的控制。实际中匝道控制的具体形式是，在上匝道设置停止线和信号灯，车辆在进入高速公路主线前必须经过信号灯。一般来说，这种信号灯的周期比较短，绿灯时间大概刚好足够让1~3辆车通过停止线加速进入主线。这种控制方式最直观的作用就是降低了上匝道的通行能力，减少了上匝道进入主线的车辆数。

开启匝道控制后，上匝道合流点下游的高速公路主线的流入流量下降，避免该路段流量过大，超过其通行能力，发生交通流失效，造成拥堵；同时，下游主线路段的密度降低，平均速度上升，对于压缩在主线上长距离行驶的车辆的出行时间有着积极影响；然而，如果匝道控制开启，上匝道会形成排队，从该匝道上进入高速公路主线的车辆需要在停车线前排队等候，变相增加了这些车辆的出行时间，也会促使一部分短途出行者为了避开匝道控制引起的排队而放弃使用高速公路，降低高速公路的通行需求，这同样也会降低主线的车流压力。从最后的控制效果，以及匝道控制的得失方来看，匝道控制是以少数经过高速公路中途的上匝道进入高速公路的车辆的快捷出行为代价，换取在主线上长距离行驶的大部分车辆的总出行时间下降，是一种牺牲部分利益来换取系统整体性能提高的控制方法。

正是因为匝道控制是一种牺牲局部的控制方法，为了获得最大的“投入产出比”，设计控制逻辑时应当用最小的牺牲去换取最合理的整体系统性能的提高，换言之就是要把匝道控制引起的排队控制在最小规模，当制造更长的排队也无益于控制对象高速公路的总出行时间下降时，就不可以再降低匝道控制率了，不能无节制地向在中途上匝道进入高速公路的出行者索取，甚至压榨出行时间。

任何在匝道上引起的排队，都能引起对回堵（Spillback）现象的合理担忧，具体来说就是排队长度太长，其队尾已经延伸到了匝道的上游道路，引起上游道路的拥堵。为了防止这种拥堵范围扩大的局面出现，在设计控制逻辑时需要考虑各匝道或互通立交的几何特性所能接受的，足以使匝道控制引起的排队队尾留在匝道内而不蔓延至上游道路的最大排队长度约束。即使是面临不可避免要超过最大排队长度的情况，也要在设计控制逻辑时给予考虑，尽可能不突破这一约束。

## 可变限速

实施可变限速控制的主要目的有两个。其一是安全性方面的考虑，包括减少高速公路主线车流的车辆间的速度差，促进速度均衡化，从而减少追尾等事故的发生，尤其是在高速公路发生拥堵时，在高速行驶的车辆到达排队队尾之前，通过可变限速把车辆的行驶速度强行减低，防止队尾追尾事故，以及在雨雪雾等恶劣天气下，限制车辆的最高行驶速度，以适应恶劣天气下道路湿滑、能见度差的恶劣通行条件，避免动辄封路。另外一个目的是减慢车辆到达排队队尾的速度，减慢排队长度的增长，从而抑制拥堵事件的发展。另外，通过降低限速提高密度，可以出现瓶颈效应时，最大限度提高剩余道路资源的通行能力。

可变限速在设置和实施上需要注意几个问题。首先，根据我国以及世界各国进行限速的习惯，限速值一般设置为5的整倍数，如果设置为非5的整倍数，不符合大多数汽车的仪表盘速度刻度的设置方式，不便于驾驶员对照查看，在交通部门执法问题上也可能会因为刻度读数以及测量仪器误差等产生不必要的纠纷；另外，根据《中华人民共和国道路交通安全法》第五节第六十七条的规定，高速公路的限速不得超过120km/h，而按照我国高速公路设置最低限速的习惯，一般设置最低限速为60km/h。综合以上两点，实际上可变限速所能选择的限速值是离散的有限个值，即只能在

这一个集合内取值。

另外，考虑到驾驶员在接收到一个新的限速禁令标志信息后，需要一定的时间和空间对新的限速值进行适应，为了减轻驾驶员适应新限速值的压力，应当在设计控制逻辑时，尽量使得相邻路段的可变限速值之差尽量小；另外，在相邻的可变限速值变化周期内，可变限速值之差也应当控制在最小范围内，避免速度变化过于剧烈，引起追尾等交通安全问题。

## 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、预测模型和反馈校正。

滚动优化是模型预测控制最为明显的特征之一。具体来说，优化性能指标只涉及从当前采样时刻开始到未来一段时间内，这一时间段称为预测时域。随着时间的推进，预测时域的长度不变，但是其起始时刻随着当前离散采样时刻随时间的移动而移动，相当于整个预测时域沿着时间流动的方向，以采样时刻间距为步长整体向前移动。每一个优化目标都是建基于当前时刻，随着时间向前移动的，而不是采用一个不变的优化目标函数，这样的优化过程会随着时间的推进循环往复进行。采用这种滚动优化的机制进行优化不可能得到全局最优解，在理想情况下只能得到基于当前采样时刻的局部最优解。然而，当模型有时变、非线性或其他干扰因素时，这种机制可以照顾到这种不确定性，减少偏差。

预测模型是模型预测控制对系统未来状态进行预测所必须的，是一个描述系统动态行为的基础模型。这一模型可以有各种各样不同的具体数学形式，包括状态方程、传递函数、阶跃响应模型、脉冲响应模型和移动平均自回归模型等，但是其本质都是在定量地描述过程输出对输入变化的响应特性，其功能是根据系统的历史信息和未来的输入预测其未来的输出。

反馈校正是模型预测控制的一个重要组成部分，其功能在于对模型误差和过程干扰进行补偿。具体的做法是，比较当前时刻对输出的估计值和当前时刻的实际输出值，得到预测误差，这可能是由于模型失配或外部的扰动造成的。预测控制器假设下一时刻这些造成误差的因素不变，即认为系统输出的无偏估计应当是和预测模型给出的估计值和这一误差叠加后的值相等的。

一般来说，转移状态方程形式的预测模型有如下一般形式：

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

其中为状态向量，为过程控制开始时刻系统的初始状态；为控制向量，为扰动向量，在表达式中加入这一项是模型预测控制中反馈校正环节的体现；是抽象的状态转移方程数学表达式，代表了不同的离散时刻 [14]。

模型预测控制的性能除了和预测模型有关外，也和预测步长、控制步长、权重等参数有关。预测步长的意义是预测时域长度所包含的采样间隔个数，通过预测步长可以计算出预测时域长度。为了使滚动优化机制的优化过程有实际意义，需要使得预测时域长度完全覆盖被控制对象的过渡过程时间，即满足，其中为控制器采样时刻间距（采样周期）。

控制步长是预测控制器的重要参数，增大控制步长可以提高系统的跟踪性能，对系统对象的变化更加敏感，但是系统的稳定性和鲁棒性会随之下降。对对象特性变化较大的情况，应当选择较小的控制步长，一般取1~2。

权重的作用在于限制控制增量的剧烈变化，使控制变量平稳变化，防止对系统造成过大冲击。

## 预测模型

本节建立3.1节中所述预测模型，具体来说是具有式（三‑1）的抽象形式的高速公路系统状态转移方程。本文采用由Kotsialos和Papageorgiou等人建立的METANET模型作为预测模型，并对该模型进行一些改动，以适应本文的研究需求，包括车道数的变化以及考虑驾驶员对分流指示的遵从率的节点转向比率变化两个方面。

METANET本身是一个用C语言编写的宏观和微观两用交通仿真工具，预留了用户编程接口，允许用户利用该程序对各种不同的交通管理措施进行测试和评价。其模型的核心部分包括链路模型和节点模型，另外还提供了动态交通分配等额外功能模块。[15]

模型预测控制用到的变量主要分为系统状态变量、系统扰动变量和控制变量3个类别。系统状态变量包括各高速公路主线路段和上下匝道的流量、密度和平均速度，以及上匝道在匝道控制停止线前的排队长度；系统扰动主要包括各上匝道的通行需求和各节点的交通流转向率，当进行交通事件的仿真时，各路段的车道数也成为系统扰动的一部分；控制变量包括可变限速的限速值以及各上匝道的匝道控制率等。

表 三‑1列出了所有预测模型中会用到的参数的符号，以及他们的物理意义、单位和类别，以供参考。从符号的形式可知，有一些参数是关于预测时域内的离散时刻的。

表 三‑1 预测模型完整参数和变量表

| 参数/变量符号 | 物理意义或解释 | 单位 | 类别 |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 链路（Link）编号 | 1 | 参数 |
|  | 路段（Segment）编号 | 1 | 参数 |
|  | 节点（Node）编号 | 1 | 参数 |
|  | 离散时刻（采样时刻） | 1 | 参数 |
|  | 模型预测控制器的采样周期 | s | 参数 |
|  | 链路*m*的长度 | km | 参数 |
|  | 链路*m*路段*i*的车道数 | 1 | 系统扰动 |
|  | 链路*m*路段*i*在*k*时刻的流量 | veh/h | 状态变量 |
|  | 链路*m*路段*i*在*k*时刻的平均速度 | km/h | 状态变量 |
|  | 链路*m*路段*i*在*k*时刻的密度 | veh/km/lane | 状态变量 |
|  | 链路*m*关键密度 | veh/km/lane | 参数 |
|  | 最大密度 | veh/km/lane | 参数 |
|  | 时间常数 | s | 参数 |
|  | 预测常数 | km2/h | 参数 |
|  | 常数 | veh/km/lane | 参数 |
|  | 交通流基本图常数 | 1 | 参数 |
|  | 链路*m*自由流速度 | km/h | 参数 |
|  | 上匝道排队长度 | veh | 状态变量 |
|  | 上匝道流量 | veh/h | 状态变量 |
|  | 上匝道通行需求 | veh/h | 系统扰动 |
|  | 上匝道*o*通行能力 | veh/h | 参数 |
|  | 节点*n*在*k*时刻的流入交通流总量 | veh/h | 状态变量 |
|  | 节点*n*在*k*时刻的转向链路*m*的转向率 | 1 | 状态变量 |
|  | 上匝道*o*的匝道控制率 | 1 | 控制变量 |
|  | 链路*m*路段*i*在*k*时刻的可变限速控制率 | 1 | 控制变量 |
|  | 最小匝道控制率 | 1 | 参数 |
|  | 最小可变限速控制率 | 1 | 参数 |
|  | 链路*m*的下游虚拟密度 | veh/km/lane | 状态变量 |
|  | 链路*m*的上游虚拟速度 | km/h | 状态变量 |
|  | 与可变限速控制有关的参数 | 1 | 参数 |
|  | 与可变限速控制有关的参数 | 1 | 参数 |

### 链路模型

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。

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

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。

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

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。

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

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：

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

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。式（三‑5）所表示的是交通流基本图对应的的速度——密度关系。

### 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：

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

其中，为时刻上匝道的排队长度（veh）。

如果匝道控制实施，令为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

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

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：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （三‑8） |

其中，

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （三‑9） |
|  |  | （三‑10） |
|  |  | （三‑11） |

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，包括上下匝道。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式计算。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （三‑12） |
|  |  | （三‑13） |

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，对于预测链路最下游路段密度的情况，由于本来该路段已经是最下游的路段，不存在属于该链路的下游路段。为了与式（三‑3）的形式匹配，构造称为虚拟下游密度的量，把所有节点流出链路的密度纳入考虑。

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

其中是节点*n*全体流出路段的集合。

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

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

其中是节点*n*全体流入链路的集合。

## 管控措施

### 模拟交通事件的发生

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，可以大致认为限制在某个路段范围内的车道关闭这一做法，可以在仿真平台中模拟交通事件发生占用路面的情景，也可以反映到预测模型中。

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，认为是模型预测控制框架中系统扰动的一部分，停止在原版METANET模型中作为常数存在。

### 可变限速的影响

可变限速值理论上是连续的，事实上为了在现实世界中可变限速得以清晰、有效、方便地得以实施，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：

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

其中，

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

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。

METANET模型认为可变限速会对速度——密度曲线产生影响。为了体现这种影响，特别引入和两个参数，通过式（三‑18）、（三‑19）和（三‑20）这一组仿射函数，对式（三‑5）中用到的、和，使这3个参数成为和有关的函数。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （三‑18） |
|  |  | （三‑19） |
|  |  | （三‑20） |

其中、和是未考虑可变限速时、和的原来的值，和是根据实际的数据进行标定的常数参数。由式（三‑18）、（三‑19）和（三‑20）可知，当关闭可变限速控制，即时，上述3式自动退化为未考虑可变限速时的原值。[15]

### 对提前分流的考虑

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在控制对象范围内的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。

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

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （三‑21） |

其中是通过节点*n*可以前往的目的地中需要进行分流的目的地的集合，是节点*n*主线流入链路中原本继续留在高速公路主线上前往目的地*j*的流量占节点流入流量的比例。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（三‑21）退化为。

## 目标函数

目标函数由下列几个部分组成：

1. 高速公路主线车辆总出行时间
2. 上匝道车辆排队时间
3. 抑制可变限速值剧烈波动的罚函数
4. 抑制匝道控制控制率剧烈波动的罚函数
5. 抑制上匝道排队过度增长的罚函数

目标函数的具体数学表达形式如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （三‑22） |

车辆从进入高速公路到离开全过程，一定会先经过上匝道、高速公路主线和下匝道共3个部分。对于下匝道，假设匝道下游没有发生可以回堵（Spillback）到高速公路主线的拥堵，在下匝道上所花费的时间可以忽略不计。要计算车辆在高速公路上的行程时间，就要分开主线和上匝道两个方面考虑。对于高速公路主线，可以先计算每个路段内的车辆数，求和后得到时段在高速公路主线上的全部车辆数，那么在这一时段内，所有存在于主线上的车辆所消耗的行程时间就是，由此可以得到在预测时段内所有在主线上出现过的车辆所消耗的行程时间；对于上匝道，由于匝道控制的存在，上匝道可能会在信号灯停止线前出现排队，对时段所有上匝道排队车辆数目进行计算后，可以得出这一时段内所有车辆耗费在排队上的时间，由此可以得出在预测时段内所有车辆消耗在上匝道排队上的时间。这两个部分行程时间的计算构成了目标函数中的前两项。

匝道控制和可变限速的控制变量中不能发生太过剧烈的变化，造成驾驶员在现实世界中无法适应。为了抑制这两种控制方法的控制变量可能发生的剧烈波动，把相邻时段的控制变量进行差分平方后求和构造罚函数，防止在对目标函数进行优化的过程中采用极端波动的控制参数组合达到一个非常低的总出行时间，达到控制参数平缓变化的目的。

另外，对于上匝道排队，为了防止系统为了达到自身总行程时间降低的目的，把过多的通行需求全部积压在上匝道上，需要设置一个最大排队长度，其设置的标准是，匝道上的排队不会蔓延到匝道上游的道路，即发生回堵现象（Spillback）。当然，在主线已经拥挤或上匝道通行需求太大，已经超过系统自身调节极限的情况下，强行把最大排队长度作为硬约束来处理是不合适的，这样很可能会导致模型得不到可行解。把排队长度超出最大排队长度的比率平方后相加构造罚函数加入目标函数，既能抑制排队长度的增长抑制回堵现象，也能照顾到刚才提到的超过系统自身控制能力的极端情况。

目标函数中的后3项都是人为构造的罚函数。为了使量纲统一，乘以一个时间单位的量，代表控制变量的变化量或者排队回堵对控制变量实施的时段的影响。

进行一次优化所需要解的优化问题有如下的形式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | s. t. （三‑1），（三‑6），（三‑16） | （三‑23） |

需要注意的是，式（三‑20）所表示的优化过程只是对匝道控制和可变限速进行协调控制而已，并没有把车辆在节点处的转向纳入考虑，具体原因在3.5节中解释。

## 总体控制逻辑

在建立总体控制逻辑之前，为了方便模型的建立和简化计算过程，先建立如下几个假设，其中假设3已经在3.3.3小结中提到过：

1. 除了控制对象高速公路以外，其他的高速公路路段和地方路作为绕行所使用的路段，无论其流量输入为何，其路况保持畅通；
2. 车辆经过非控制对象路段的交叉口、收费站等设施时不发生延误；
3. 车辆经过非控制对象路段的平均速度保持一定。

在实际情况中，绕行路段由非控制对象高速公路路段和地方一般公路（如国省县道等）组成，车辆会经过收费站、交叉口、信号灯等各种容易引起延误的交通设施。用一个平均速度来大致把以上提到的这些容易引起延误的因素囊括进去，然后在计算过程中严格遵守假设2和假设3进行估算，即可以做到在考虑非控制对象路段路况的前提下大幅简化建模和计算。目标函数（三‑19）中并没有包括对非控制对象以外路段路况的计算，不考虑分流控制的情况下交通流在节点处的转向率随着控制参数的变化而发生的变化，这也是和上述几个假设有关的。

根据提前分流控制的触发条件，要做出是否进行提前分流的决策，必须先估算当前采样时刻开始的未来一段时间内，每一个OD对之间所有路径的出行时间，比较通过控制对象高速公路和绕行其他路段的可能路径的出行时间，进行这一估算的前提是获得预测时域内控制对象各路段的交通流状态的预测值，而这一预测值正好可以由一次形如式（三‑20）的优化过程获得。为了决策是否进行提前分流，可以以不进行分流为前提进行一次优化，并获得上述的预测值，如果根据优化过程所得的控制方案，分流控制被触发，则在进行分流控制的条件下重新使用式（三‑18）计算新的各节点的交通流转向率，再进行一次形如式（三‑20）的优化过程，得到考虑分流对控制对象高速公路路段的交通流的影响的情况下新的可变限速和匝道控制方案。

令*n*代表节点，*j*代表某个从节点*n*可以到达的目的地（不论是否经由控制对象高速公路路段），则对于每个对之间的全体可能路径集合*M*，估算某个路径的出行时间的算法如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （三‑24） |

其中是路径在采样时刻的估计出行时间，是集合中属于控制对象高速公路的路段集合，是按照路径经过的路段顺序计算所得的进入路段的时刻，和分别是路径经过的非控制对象路径总长度和假定的平均速度。是第一次进行滚动优化之后所得的，基于当前采样时刻的未来的各路段平均速度预测值。

综上所述，基于每个采样时刻*k*进行一次完整计算的过程框图如图 三‑1所示。

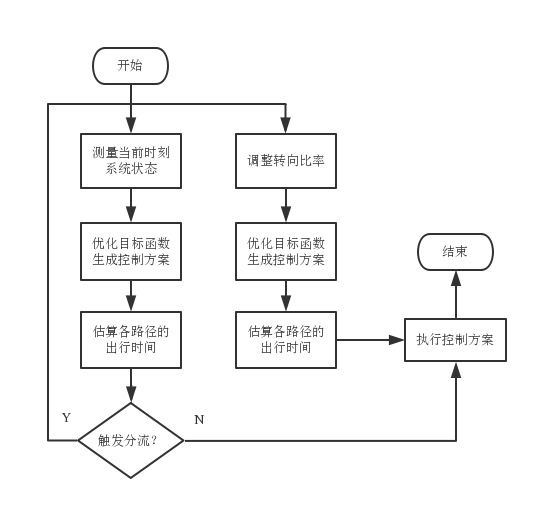


图 三‑1 基于每个采样时刻*k*进行一次完整计算的过程

## 本章小结

本章首先介绍了模型预测控制的概念、控制思想和组成部分，论证了采用模型预测控制框架对于解决本文提出的问题的适用性和优越性。接下来本章还确定了系统状态、控制变量和系统扰动在高速公路系统中的具体体现的变量，然后使用METANET模型建立了模型预测控制所需的预测模型，建立了目标函数，最后确立了基于每个采样时刻的优化计算过程。

在建立预测模型的过程中，本章对原有的METANET模型进行了一些修改，以适应本文所研究的问题，其一是把各路段的车道数这一本来属于常量参数的几何特性划归为扰动的一部分，来模拟交通事件所引起的车道关闭现象；其二是根据本文研究问题的数据条件，在考虑驾驶员对分流引导信息的遵从率的前提下，提出了分流控制生效时各节点交通流转向率的计算模型。另外，本章还提出了对各可能绕行路径的出行时间进行估计的算法，为提前分流的决策提供依据。

需要注意的是，根据本章所建立的优化计算的流程，在每个采样时刻，滚动优化可能需要视情况执行1~2次，这取决于第1次执行之后各可能路径的预测出行时间的大小。用模型预测控制的观点来看，控制步长为1或2，随着系统状态等因素动态变化。

# 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

0. 控制仿真进程

4. 控制方案实施

3. 返回控制方案

1. 检测器测量值

Excel VBA

控制逻辑

VISSIM v4.30

仿真平台

MATLAB

优化算法

2. 进行滚动优化

VISSIM API

Spreadsheet

Link Ex

## 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.

[15] Papageorgiou M, Papamichail I, Messmer A, et al. Traffic Simulation with METANET[M]. Springer New York, 2010: 399-430.