

基于分布式模型预测控制的城市快速路多匝道协同控制

杨雪驰

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2023年4月20日; 录用日期: 2023年7月7日; 发布日期: 2023年7月13日

摘要

模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)是一种适用于多匝道协同控制的控制策略,但其因计算时间过长而难以在复杂路网中实时实施。为了减少MPC控制复杂路网的计算时间,采用分布式控制思想,考虑交通流的单向性,提出一种贯序分布式多匝道MPC控制方案,各控制器依次根据上游控制器传递的交通信息确定最优匝道控制率。最优控制模型采用METANET交通流模型作为过程模型,综合考虑通行效率、匝道队列和控制信号波动构建目标函数,通过求解目标函数在线优化问题得到最佳的入口匝道控制率。仿真结果表明,相较于集中式MPC控制和分散式MPC控制,所提出的贯序分布式多匝道MPC控制方案可以在提高路网表现和降低计算复杂度间达到平衡。

关键词

城市快速路, 匝道控制, 交通流模型, 模型预测控制, 交通仿真

Coordinated Ramp Metering for Urban Expressway Based on Distributed Model Predictive Control

Xuechi Yang

School of Optical-Electrical Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 20th, 2023; accepted: Jul. 7th, 2023; published: Jul. 13th, 2023

Abstract

Model Predictive Control (MPC) is a control strategy suitable for cooperative control of multiple ramps, but it is difficult to implement in real time in complex road networks due to the long com-

computational time. In order to reduce the computational time for MPC control of complex road networks, a sequential distributed multi-ramp MPC control scheme was proposed, taking into account the unidirectional nature of traffic flow, where each controller determined the optimal ramp metering rate in turn based on the traffic information transmitted by the upstream controller. METANET traffic flow model was adopted as the process model, and the objective function was constructed by considering traffic efficiency, ramp queue and control signal fluctuation. The simulation results showed that the proposed sequential distributed MPC ramp metering strategy offered a trade-off between computational complexity and system performance compared to the centralized MPC strategy and decentralized MPC strategy.

Keywords

Urban Expressway, Ramp Metering, Traffic Flow Model, Model Predictive Control, Traffic Simulation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市快速路是一种多车道、不设置红绿灯的特殊道路,其最初构想是为车辆提供近乎无限的机动性。然而随着居民机动车保有量的不断上升,在交通高峰期各地快速路交通拥堵时有发生,极大影响了居民的出行体验。为了最大程度发挥道路的通行能力,必须对城市快速路采取合适的控制措施。匝道控制是一种非常有效的交通控制策略,它通过调节匝道信号灯绿信比来控制由入口匝道驶入快速路的交通流量,以入口匝道车辆短时延迟的微小代价显著缩短快速路交通网络内车辆的通行时间,改善了快速路的交通状况[1]。

在匝道控制提出之后的几十年间,道路管理机构一般采用以 ALINEA [2]为代表的单匝道局部控制策略来控制入口匝道的车流。局部控制策略结构简单,但其只关注单个匝道及其附近区域的交通状况而忽略了其他匝道的影响,因此难以取得最佳的全局控制效果[3]。在此情况下,研究者们提出了 METALINEA [4]、HERO [5]等多匝道协同控制策略。多匝道协同控制策略将整个快速路网的交通数据整合起来进行处理,进而控制所有可控匝道的调节率,提高路网的整体通行效率。

在各种多匝道协同控制策略中,基于模型预测控制(Model Predictive Control, MPC) [6]的匝道协同控制算法具有良好的应用前景,并逐渐成为研究热点。模型预测控制通过预测系统在未来有限时域内的状态确定控制信号,它可以处理多目标优化问题,并且对快速路系统等非线性系统具有良好的控制效果[7]。Hegy [8]等人首先将 MPC 应用于匝道控制,以 METANET 宏观交通流模型[9]作为预测模型,将总消耗时间(Total Time Spent, TTS)和防止控制信号突变的惩罚项相结合构造目标函数。van de Weg [10]等人通过参数化策略优化可变限速控制和匝道控制的参数,大幅减少求解空间,提高了 MPC 应用于匝道控制时的求解速度。Han [11]等人提出一种将模型预测控制与分层控制相结合的多匝道控制算法,在上层使用模型预测控制确定使路网总通行时间达到最小的匝道总流入量。潘红光[12]等人将传统的宏观交通流模型改进为状态空间模型,并基于改进后的模型设计 MPC 交通流控制器,实现对具有多匝道的快速路段的有效控制。

虽然模型预测控制在多匝道协同控制问题上有很好的控制效果,但从计算的角度来看,对于一个涉及多变量的大规模系统, MPC 需要实时解决复杂的有限时域优化控制问题[13],因此难以直接将模型预测控制应用到城市快速路系统的实时控制中。尽管如此,模型预测控制还是一种在交通控制中具有一定

的潜力的控制策略，最大的问题在于寻找到合适的改进方法，使得模型预测控制可以投入实际的工程应用。分布式模型预测控制(Distributed Model Predictive Control, DMPC) [14]是解决 MPC 在多匝道控制中计算时间过长这一问题的有效方案。文献[15] [16]将分布式模型预测控制思想应用到具有多个入口匝道的快速路系统中，并通过仿真验证了采用分布式 MPC 控制思想的多匝道控制算法可以在不需要过多计算时间的情况下提高交通系统的性能。

本文在上述研究的基础上，对分布式 MPC 在多匝道协同控制中的应用展开了进一步研究。本文考虑交通流的单向性，提出一种贯序分布式模型预测控制方案，将快速路系统划分为多个具有可控入口匝道的路段，并在每个路段配置 MPC 控制器，各控制器依次根据上一路段控制器传递的交通信息计算最优匝道控制率。仿真结果表明，本文提出的贯序分布式多匝道模型预测控制方案求解时间较短，且能极大地提升路网的交通表现。

2. 快速路交通流模型

2.1. 宏观动态交通流模型

精确可靠的交通流模型是实现匝道模型预测控制的基础。本文采用二阶宏观交通流模型 METANET 作为匝道控制算法的交通流预测模型，该模型具有良好的精准度，并且可以准确描述匝道控制对道路交通流的影响。METANET 是一种在时间、空间上均离散的宏观交通流模型，它以有向图的形式，用有向路段和节点表示整个快速路网络。METANET 模型中的道路模型如图 1 所示。

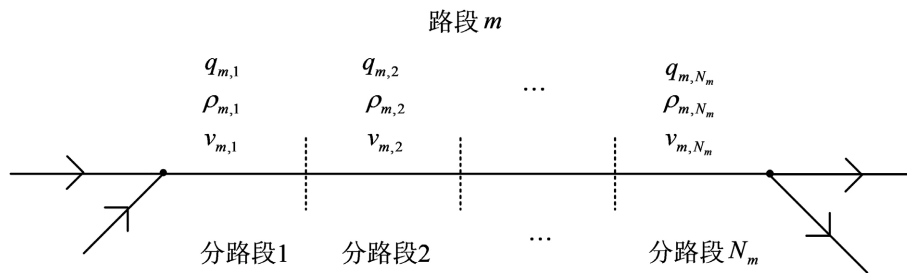


Figure 1. Schematic METANET expressway modeling
图 1. METANET 模型中的道路结构

在 METANET 模型中，各有向路段内部具有相同的几何特征，节点表示因入口匝道汇入、车道减少等原因导致道路特征发生变化的位置。每个路段 m 分为 N_m 个长为 L_m 、车道数为 λ_m 的分路段，路段 m 中分路段 i 在 k 时刻的交通流量、交通流密度、平均速度分别用符号 $q_{m,i}(k)$ 、 $\rho_{m,i}(k)$ 、 $v_{m,i}(k)$ 表示，预测时间步长即模型采样周期用 T 表示。路段 m 中分路段 i 的交通流动态演化规律为：

$$q_{m,i}(k) = \rho_{m,i}(k)v_{m,i}(k)\lambda_m \tag{1}$$

$$\rho_{m,i}(k+1) = \rho_{m,i}(k) + \frac{T}{L_m\lambda_m}(q_{m,i-1}(k) - q_{m,i}(k)) \tag{2}$$

$$v_{m,i}(k+1) = v_{m,i}(k) + \frac{T}{L_m}v_{m,i}(k)(v_{m,i-1}(k) - v_{m,i}(k)) + \frac{T}{\tau}[V(\rho_{m,i}(k)) - v_{m,i}(k)] - \frac{gT(\rho_{m,i+1}(k) - \rho_{m,i}(k))}{\tau L_m(\rho_{m,i}(k) + \kappa)} \tag{3}$$

$$V(\rho_{m,i}(k)) = v_{f,m} \exp \left[-\frac{1}{\alpha_m} \left(\frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{cr,m}} \right)^{\alpha_m} \right] \quad (4)$$

式中, τ 、 ϑ 、 κ 、 α_m 为由道路交通实际情况决定的模型参数; $v_{f,m}$ 为路段 m 的自由流速度; $\rho_{cr,m}$ 为路段 m 的临界密度。上述方程中, 式(1)描述流量、密度、速度三者间的关系, 式(2)是动态密度方程, 式(3)是平均速度方程, 式(4)是由密度决定的稳态速度方程。

此外, METANET 模型中假定路段 m 首个分路段的上游交通流速度与该路段当前速度相等, 并假定路段 m 最后一个分路段的下游交通流密度在自由流状态下与此路段密度相等, 在拥堵状态下为临界密度, 即:

$$v_{m,0}(k) = v_{m,1}(k) \quad (5)$$

$$\rho_{m,N_m+1}(k) = \begin{cases} \rho_{m,N_m}(k) & \text{if } \rho_{m,N_m}(k) < \rho_{cr,m} \\ \rho_{cr,m} & \text{if } \rho_{m,N_m}(k) \geq \rho_{cr,m} \end{cases} \quad (6)$$

2.2. 入口匝道控制对模型的影响

在上述基础路段模型的基础上, 还需进一步考虑入口匝道、出口匝道以及匝道控制对快速路交通流的影响。METANET 模型中用节点表示入口匝道、出口匝道与主线的交汇点, k 时刻驶入节点 n 的总流量 $Q_n(k)$ 和由节点 n 驶出至路段 m 的流量 $q_{m,0}(k)$ 分别为:

$$Q_n(k) = \sum_{\mu \in I_N} q_{\mu,N_\mu}(k) \quad (7)$$

$$Q_n(k) = \sum_{\mu \in I_N} q_{\mu,N_\mu}(k) \quad (8)$$

式中, I_N 是有交通流驶入节点 n 的所有路段的集合; $\beta_n^m(k)$ 是转向率, 即由节点 n 驶入路段 m 的车流比例。

当路网中存在可控的入口匝道时, 受匝道控制策略的影响, 入口匝道内会形成一条等待队列。入口匝道车辆队列长度的动态过程可表示为:

$$w_o(k+1) = w_o(k) + T(d_o(k) - q_o(k)) \quad (9)$$

其中, $w_o(k)$ 表示 k 时刻入口匝道车辆队列长度, $d_o(k)$ 表示入口匝道的交通需求, $q_o(k)$ 表示由受控入口匝道驶入主线路段的交通流量。

可控入口匝道在入口匝道控制策略作用下的交通流量为:

$$q_o(k) = r_o(k) \min \left[d_o(k) + \frac{w_o(k)}{T}, Q_o, Q_o \left(\frac{\rho_{\max,m} - \rho_{m,1}(k)}{\rho_{\max,m} - \rho_{cr,m}} \right) \right] \quad (10)$$

式中, $r_o(k) \in [0,1]$ 为匝道控制率, $r_o(k) = 0$ 表示实施入口匝道关闭控制, $r_o(k) = 1$ 表示不实施匝道控制; Q_o 表示自由流条件下入口匝道的通行能力; $\rho_{\max,m}$ 是路段 m 的密度最大值, 即阻塞密度。

入口匝道车辆在汇入主线时的速度一般和主线内正常行驶的车辆速度间存在一定差异, 主线车辆由于避让等原因会采取减速或换道措施以防发生交通事故。为描述因入口匝道车辆汇入而引起的主线路段车流速度下降, 当有入口匝道与路段 m 连接时, 在计算路段 m 平均速度的公式(3)后还需加入惩罚项:

$$-\frac{\delta T q_o(k) v_{m,1}(k)}{L_m \lambda_m (\rho_{m,1}(k) + \kappa)} \quad (11)$$

其中 δ 为模型参数。将式(7)~(11)带入基本的 METANET 模型即可描述存在入口匝道、出口匝道的城市快

速路交通流状态演化过程。

3. 城市快速路多匝道协同控制

3.1. 模型预测控制在匝道控制中的应用

模型预测控制是一种最初应用于工业过程控制领域的控制策略，它可以很好地处理输入输出信号中存在相互作用的多输入多输出系统的优化问题。在使用 MPC 控制含有入口匝道的快速路系统时，采用宏观交通流模型预测系统的未来状态，使用通行效率、尾气排放等优化指标构造优化问题的目标函数，通过求解优化问题确定匝道控制率，并在下一个控制步重复上述过程，实现滚动优化。使用 MPC 进行匝道控制的控制结构如图 2 所示。

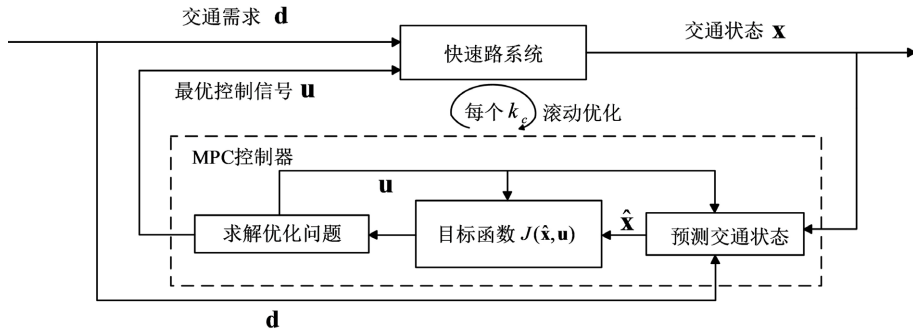


Figure 2. Operational structure of MPC ramp metering
图 2. 匝道 MPC 控制的运行结构

模型预测控制中，预测周期(交通流模型的采样周期)记为 T ，控制周期(匝道控制率的更新周期)记为 T_c ，控制周期为预测周期的整数倍，即 $T_c = MT$ ，两者的离散时间标分别为 k_c 和 k ，控制周期内匝道控制率保持不变。交通系统的动态过程可表示为：

$$x(k+1) = f(x(k), u(k), d(k)) \tag{12}$$

式中，向量 $x(k)$ 、 $u(k)$ 、 $d(k)$ 分别表示第 k 个采样周期时的系统状态、控制输入、干扰信号。在每个控制步 k_c 求解目标函数 $J(k_c)$ 的最优解，得到使快速路系统在未来 N_p 个控制周期内取得最佳状态的最优控制信号序列：

$$u(k_c) = [u(k_c|k_c), u(k_c+1|k_c), \dots, u(k_c+N_p-1|k_c)] \tag{13}$$

式中 N_p 为模型预测控制的预测时域。由于 MPC 的求解过程比较复杂，为降低计算复杂度，定义控制时域 N_c ，最优控制信号序列中所有离散时间标大于 N_c 的控制信号均保持为 $u(k_c+N_c-1|k_c)$ 。MPC 的控制原理如图 3 所示。需要注意的是，在模型预测控制中仅将最优控制信号序列中的第一个控制信号 $u(k_c|k_c)$ 施加到被控系统。

在使用模型预测控制确定匝道控制率时，需要设定适当的目标函数 $J(k_c)$ ，确保最终得到的匝道控制率可以在不违反实际条件限制的前提下取得最佳的控制效果。本文综合考虑路网的通行效率、匝道队列长度限制、控制信号波动三个主要因素，构建目标函数如下：

$$J(k_c) = \sum_{k=Mk_c}^{M(k_c+N_p)-1} T \left(\sum_{(m,i) \in I_{all}} \rho_{m,i}(k) L_m \lambda_m + \sum_{o \in I_r} w_o(k) \right) + \zeta_{que} \sum_{k=Mk_c}^{M(k_c+N_p)-1} \sum_{o \in I_r} [\max(w_o(k) - w_{max}, 0)]^2 + \zeta_{flu} \sum_{l=k_c}^{k_c+N_p-1} \sum_{o \in I_r} (r_o(l) - r_o(l-1))^2 \tag{14}$$

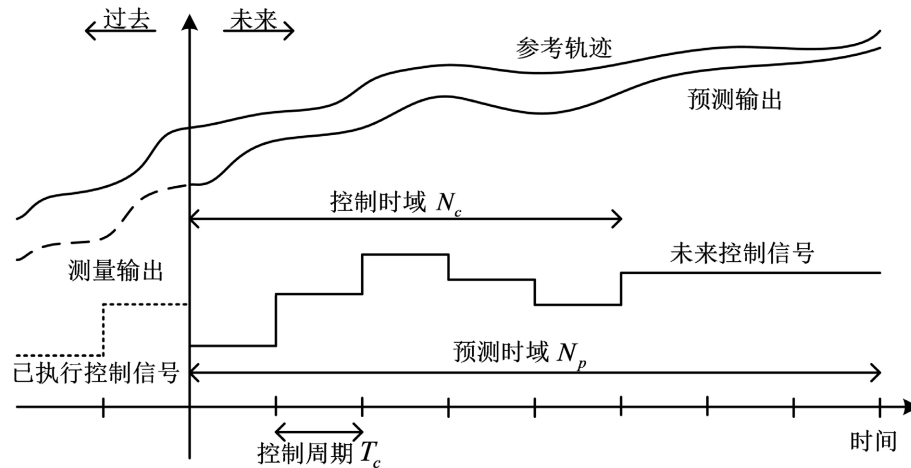


Figure 3. Control principle of MPC
图 3. MPC 的控制原理

式中， $\rho_{m,i}(k)$ 等变量的含义已在 METANET 交通流模型部分做出详细说明； I_{all} 表示路网内所有路段的集合； I_r 表示路网内所有包含可控入口匝道的路段的集合； w_{max} 为入口匝道最多可容纳的队列长度； ζ_{que} 、 ζ_{flw} 分别为描述队列长度限制和控制信号波动抑制在目标函数中所占比重的权重系数。

由式(14)可见，目标函数 $J(k_c)$ 分为三个部分，分别为路网车辆通行总消耗时间 TTS、对匝道队列长度的软约束，以及对匝道控制率波动的惩罚项。路网车辆通行总消耗时间 TTS 指车辆在路网内通行和等待的总时间，以 TTS 作为评价指标可以有效缓解路网内的车辆拥堵现象。为了避免匝道排队车辆过多引发的溢出现象，需对匝道队列长度进行限制。本文将匝道队列限制以软约束的形式加入到目标函数中，以达到简化优化问题、减少计算时间的目的。目标函数的最后一项为惩罚项，以此避免控制信号突变给驾驶员带来不佳的行驶体验。

3.2. 分布式控制方案

目前对匝道模型预测控制的研究大多集中于使用一个控制器对整个快速路网络进行控制，这种控制思想也称为集中式 MPC 控制，集中式 MPC 匝道控制的控制结构如图 4 所示。

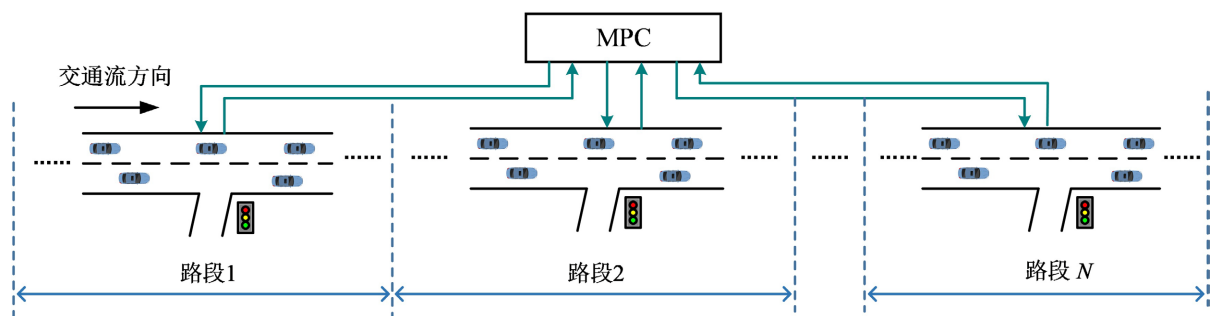


Figure 4. Centralized MPC control structure for coordinated ramp metering
图 4. 多匝道集中式 MPC 控制结构

集中式 MPC 控制器可以在给定预测时域和控制时域内优化快速路网络，其目标函数与式(14)一致。由于综合考虑了系统内所有路段的交通状态以及各路段间的相互作用，集中式 MPC 控制器通常可以得到最优的控制性能。对于具有 N 个可控入口匝道的快速路网络，集中式 MPC 控制器需要在每个控制周期内通过求解非线性优化问题得到一个包含 $N \times N_c$ 个决策变量的控制量：

$$\mathbf{u}(k_c) = \begin{bmatrix} r_1(k_c) & r_1(k_c+1) & \cdots & r_1(k_c+N_c-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_N(k_c) & r_N(k_c+1) & \cdots & r_N(k_c+N_c-1) \end{bmatrix} \quad (15)$$

显然,集中式 MPC 匝道控制策略的计算复杂度会随着路网规模及控制时域的增加而急剧增大。因此,集中式匝道模型预测控制只适用于路网规模较小的单匝道控制场景,无法在大规模路网的多匝道协同控制中实时实现。

解决集中式 MPC 无法在多匝道协同控制中实时实现这一问题的思路是采用去中心化控制思想,将大规模路网的集中式模型预测控制问题分解为多个由局部 MPC 控制器处理的小问题。具体的控制方法是,将包含多个入口匝道的快速路网分为 N_{sub} 个路段,每个路段均布置一个 MPC 控制器,并使用这些控制器分别控制路段内的可控入口匝道。各控制器的结构与集中式 MPC 控制器相同,但这些控制器仅通过优化局部目标函数来确定局部控制输入。将大规模路网分解为 N_{sub} 个路段后,第 j 个路段的 MPC 控制器的目标函数为:

$$\begin{aligned} J_{dec}^j(k_c) = & \sum_{k=Mk_c}^{M(k_c+N_p)-1} T \left(\sum_{(m,i) \in I_j} \rho_{m,i}(k) L_m \lambda_m + \sum_{o \in I_r^j} w_o(k) \right) \\ & + \zeta_{que} \sum_{k=Mk_c}^{M(k_c+N_p)-1} \sum_{o \in I_r^j} [\max(w_o(k) - w_{max}, 0)]^2 \\ & + \zeta_{flu} \sum_{l=k}^{k_c+N_p-1} \sum_{o \in I_r^j} (r_o(l) - r_o(l-1))^2 \end{aligned} \quad (16)$$

其中 I_j 、 I_r^j 分别表示路网第 j 个路段内所有分路段及包含可控入口匝道的分路段的集合。

针对将大系统分解为多个子系统后是否考虑各子系统间的相互影响,可将去中心化预测控制分为分散式 MPC 控制结构和分布式 MPC 控制结构。分散式 MPC 控制结构中各控制器相互独立,只考虑各自子系统的状态,不考虑子系统间的相互作用。分散式 MPC 匝道控制的控制结构见图 5。

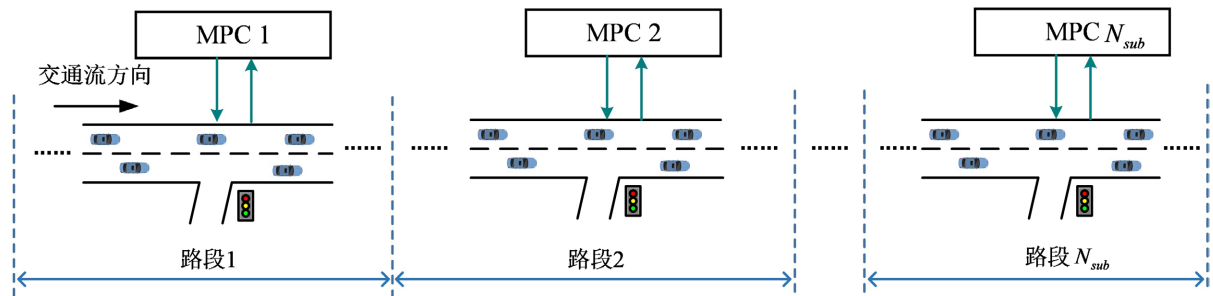


Figure 5. Decentralized MPC control structure for coordinated ramp metering
图 5. 多匝道分散式 MPC 控制结构

由于分散式 MPC 中各控制器只解决局部优化问题,结构简单,没有通信负担,因此其具有较低的计算复杂度。然而分散式多匝道 MPC 控制的各控制器间完全没有信息交流,采用这种控制方法无法使路网得到较高的通行性能。

分布式 MPC 与分散式 MPC 的不同之处在于,分布式 MPC 中各控制器不仅要考虑各自子系统的状态,还需将各子系统间的相互作用考虑在内。本文基于分布式模型预测控制思想,考虑到交通流的单向性,提出一种贯序分布式匝道 MPC 控制方法,其基本结构如图 6 所示。

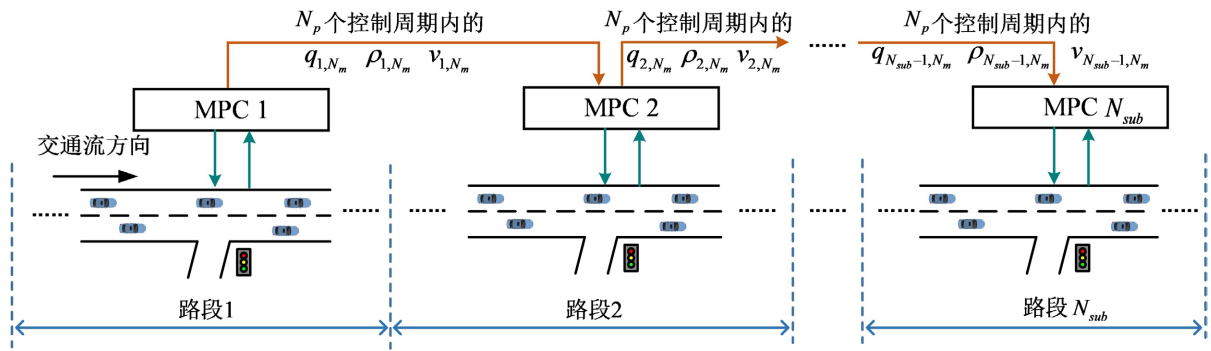


Figure 6. Sequential Distributed MPC control structure for coordinated ramp metering

图 6. 多匝道贯序分布式 MPC 控制结构

贯序分布式匝道 MPC 控制的执行过程为，首先由路段 1 的 MPC 控制器通过优化式(16)的目标函数得到最优的匝道控制率，并根据 METANET 交通流模型推演出在当前交通需求和控制作用的影响下路段 1 最后一个分路段即分路段(1, N_m)在未来 N_p 个控制周期内的交通状态 q_{1,N_m} 、 ρ_{1,N_m} 和 v_{1,N_m} ，并将这一信息传递给路段 2 的控制器。路段 2 的 MPC 控制器将接收到的信息作为路段 2 第一个分路段即分路段(2,1)的未来交通状态以预测前一路段控制器的控制动作对自身未来交通状态的影响，并结合匝道交通需求和局部目标函数求解路段 2 的匝道控制率，再将最后一个分路段的未来交通状态传递给下一路段。此后各路段依次结合上一路段 MPC 控制器所传递的信息计算最优匝道控制率，直到路段 1 下一控制周期来临。

采用贯序分布式多匝道 MPC 控制策略可以显著减少非线性最优化问题的规模，能够在获得较高交通性能的同时减少计算时间。此外，当网络中部分路段出现通信异常时，集中式 MPC 控制器会因为部分交通状态变量的缺失无法得到合适的控制量，而贯序分布式 MPC 可以在未出现通信异常的各子系统间维持正常工作，因此贯序分布式多匝道模型预测控制相比于集中式多匝道模型预测控制而言具有更强的鲁棒性。

4. 仿真与分析

4.1. 交通场景与参数设置

本文的仿真路段是一条长度为 18 km 的三车道均匀路段，图 7 为仿真路段的结构示意图。将仿真路段分为 3 个结构相同的路段，每个路段均含有一个可控入口匝道和一个出口匝道。在集中式 MPC 匝道控制情景中，只使用一个 MPC 控制器同时对 3 个可控入口匝道进行控制；在分散式 MPC 匝道控制和贯序分布式 MPC 匝道控制情景中，每个路段均布置有一个 MPC 控制器以实现对各自路段内入口匝道的控制。为了更细致地比较集中式 MPC 匝道控制、分散式 MPC 匝道控制以及贯序分布式 MPC 匝道控制对目标路段交通状态的控制影响，本节将仿真路段中每个路段进一步分为 6 个分路段，将整个仿真路段共分为 18 个分路段，并对这 18 个分路段的交通仿真数据进行考察。

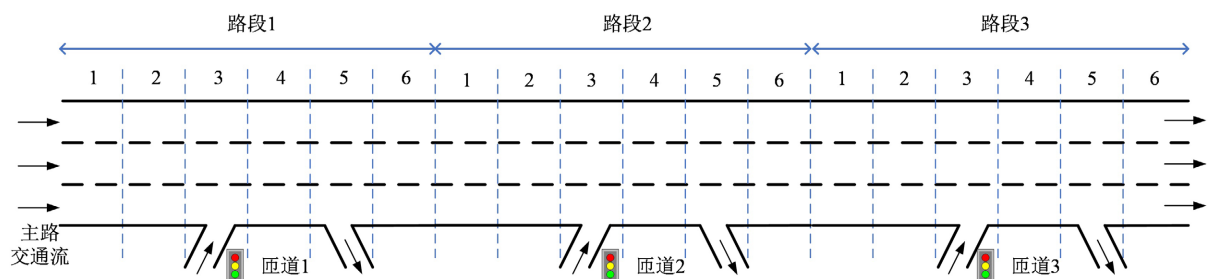


Figure 7. Structure of the simulated road section

图 7. 仿真路段结构

本节所要仿真的匝道模型预测控制算法均采用 METANET 宏观交通流模型作为控制算法的预测模型。参考文献[17]中给出的推荐值，本节中 METANET 模型的主要参数取值如表 1 所示。

Table 1. Parameters of METANET model
表 1. METANET 模型参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
τ	18 s	$\beta_{1,5}$	0.21
g	60km ² /h	$\beta_{2,5}$	0.26
κ	40 veh/km/lane	$\beta_{3,5}$	0.02
α	1.867	ρ_{\max}	133.3 veh/km/lane
v_f	80 km/h	δ	0.0122
ρ_{cr}	16.7 veh/km/lane	Q_o	133.3 veh/h

本文中 METANET 模型的采样周期 T 设置为 10 s，控制周期 T_c 设置为 120 s，仿真时长为 2 个小时，对应 720 个仿真步数。快速路主路及各匝道的交通需求如图 8 所示，该图表示仿真路段在 2 个小时内的交通需求。

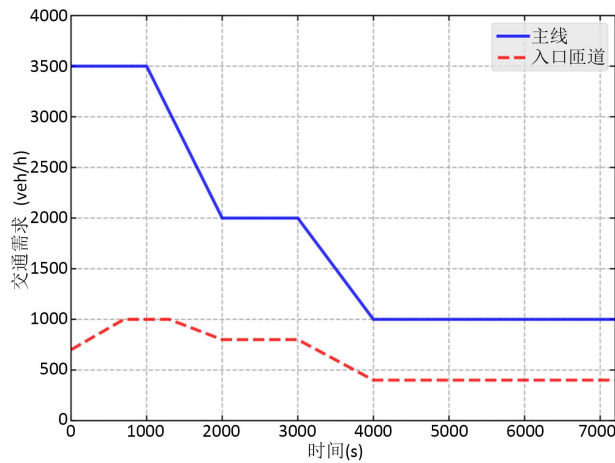


Figure 8. Demands at the mainstream and on-ramp
图 8. 主线和入口匝道的交通需求

MPC 的主要控制参数为预测时域 N_p 和控制时域 N_c ，适当增加预测时域和控制时域可以增强系统的表现，但同时也需要更多的计算时间。此外，考虑到快速路系统并不是一个趋向于平衡点的稳态系统，因此 N_p 与 N_c 间的差值不宜过大，否则将控制信号长时间保持为常值会导致系统的次优行为。为了使模型预测控制算法能够在增强系统表现和降低计算复杂度之间达到平衡，本节将预测时域和控制时域的值设置为 $N_p = N_c = 5$ 。

匝道控制会使部分车辆在匝道信号灯前短暂停留，并在交通高峰期形成匝道队列。为了尽可能避免因匝道控制产生的匝道队列溢出到相邻路段，本节将集中式 MPC、分散式 MPC 和分布式 MPC 目标函数中权重系数的值均设置为 $\zeta_{que} = 10$ 、 $\zeta_{flu} = 0$ ，将入口匝道的最大队列长度设置为 $w_{\max} = 150$ veh。

4.2. 仿真结果与对比评价

本文在 SUMO-1.15.0 中构建快速路多匝道控制仿真环境，使用 Python3.7 作为在线控制语言，将采

用贯序分布式 MPC 匝道控制后的仿真路段交通表现与集中式 MPC 匝道控制、分散式 MPC 匝道控制及无控制情形相对比, 从主线整体路段的交通流密度、各入口匝道的流量和队列长度、关键路段的交通流量和平均速度等维度对各控制策略的有效性进行考察。

首先分析集中式 MPC 匝道控制、分散式 MPC 匝道控制、贯序分布式 MPC 匝道控制对快速路主路交通流密度的影响。图 9 为四种不同控制情形下主线整体路段的交通流密度。由图可见, 在无控制情形下, 由于主路和入口匝道的交通需求过大, 快速路迅速进入拥堵状态, 并在时间和空间上不断蔓延。进一步观察还可发现, 由于对入口匝道的车流不加以控制, 入口匝道的车辆无序涌入主线, 首先在入口匝道和快速路主线的合流区域造成拥堵, 并且在交通需求显著下降后也无法消散。集中式 MPC 匝道控制、分散式 MPC 匝道控制、贯序分布式 MPC 匝道控制均取得了良好的控制效果, 可以将快速路主路各段的交通流密度维持在较低水平。具体而言, 集中式 MPC 匝道控制和贯序分布式 MPC 匝道控制的控制效果较分散式 MPC 匝道控制更优, 在这两种控制策略的作用下, 各路段的交通流密度变化平稳、分布均匀, 交通流的稳定性得到显著提高。分散式 MPC 匝道控制策略中由于各控制器只处理各自路段的交通信息, 无法通过有效协作全面考虑其他路段的影响, 因此在分散式 MPC 匝道控制作用下路段整体的交通流密度偏大, 难以对主路交通流密度取得理想的控制效果。

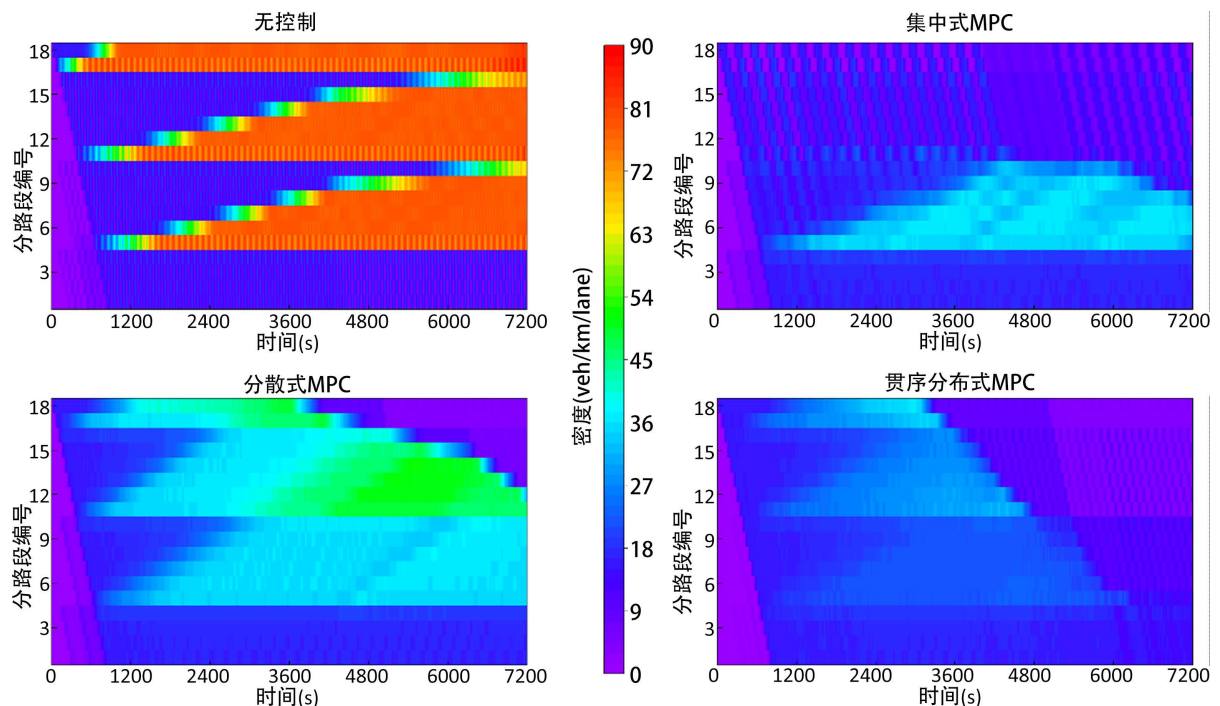


Figure 9. Traffic density of mainstream
图 9. 主路交通流密度

接下来分析四种控制情形下各入口匝道流量的变化情况。各入口匝道的流量变化如图 10 所示。在无控制情形下, 由于不对入口匝道交通流采取任何控制措施, 各入口匝道的流量变化趋势非常一致, 大致上均随着入口匝道交通需求的增加和减少而变化。集中式 MPC 综合处理整个路网的交通信息, 在快速路主路和入口匝道交通需求较大的情况下及时采取强力的控制措施, 但在集中式 MPC 匝道控制下各入口匝道流量的波动较大。分散式 MPC 中各控制器只针对各自路段进行控制, 匝道 1 和匝道 2 未能做到对流量进行有效控制以减少路段 3 的交通流密度, 这也是分散式 MPC 控制下路段 3 交通密度较大的主要原因。贯序分布式 MPC 中各控制器考虑上游控制器的影响来决定本路段内入口匝道的流量, 在主路和匝道的交

通需求降低至较小值后路段 2 和路段 3 观察到路段 1 仍对入口匝道流量进行严格控制, 因此决定增加本路段内入口匝道的流量以消散入口匝道内的过长等待队列。

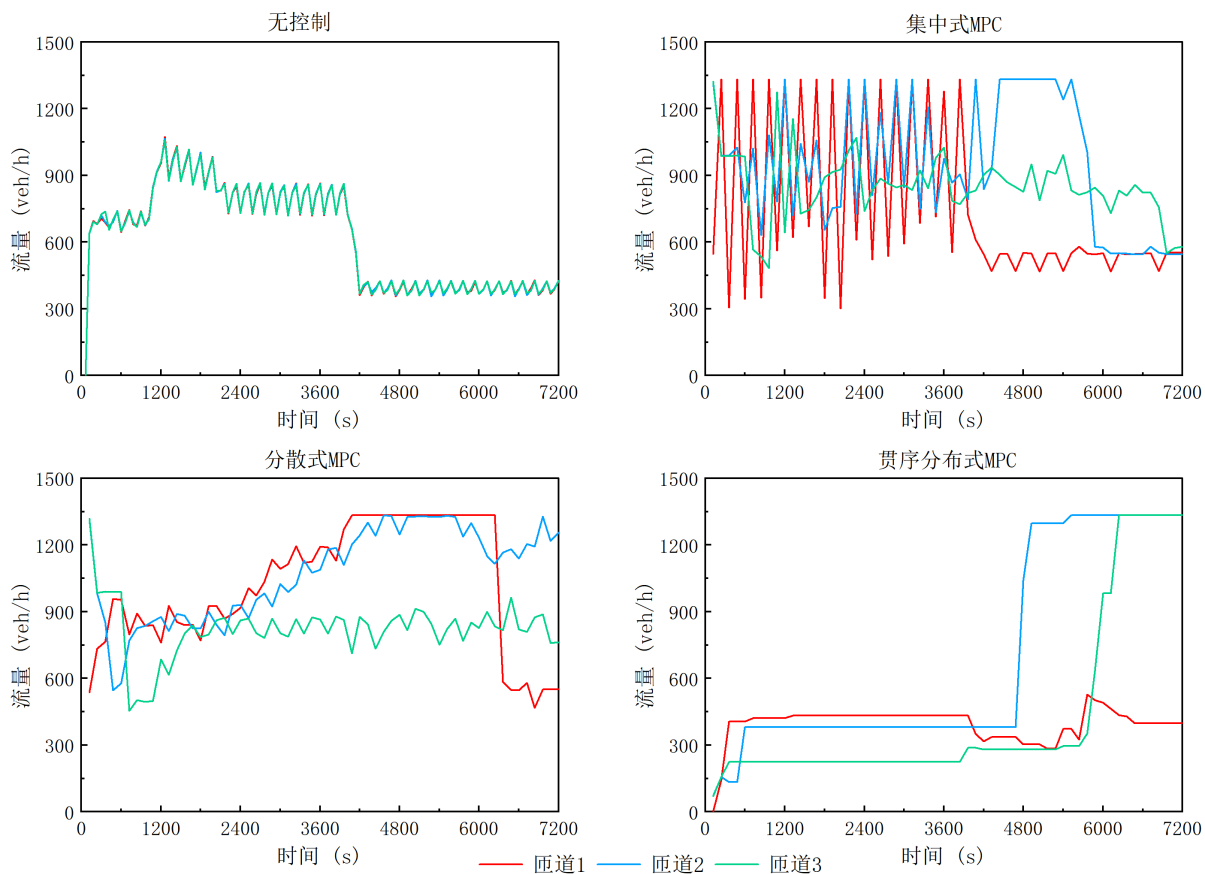


Figure 10. Traffic flow at each on-ramp
图 10. 各入口匝道的交通流量

对入口匝道交通流进行控制必然会在入口匝道内形成较长的排队等待队列。各控制情形下的入口匝道队列长度如图 11 所示。由图可见, 无控制情形下虽然没有对入口匝道的流量进行控制, 但由于交通高峰期快速路主线和入口匝道的交通需求超过了主线的通行能力, 快速路主路上发生拥堵, 因此无控制情形下也会在入口匝道内形成等待队列。观察集中式 MPC 匝道控制、分散式 MPC 匝道控制和贯序分布式 MPC 匝道控制下的队列长度可见, 三种匝道控制策略下入口匝道内均形成了较长的等待队列, 虽然目标函数中已经以软约束的形式对队列长度加以限制, 但由于交通高峰期的交通需求过高, 且三种 MPC 匝道控制策略均采用了主要面向通行效率的目标函数, MPC 控制器认为可以通过略微违反排队长度限制以得到更高的通行效率, 因此在部分时段内入口匝道的排队长度会略高于设定的最大队列长度 w_{max} 。若想进一步限制入口匝道的排队长度, 可以适当增加权重系数 ζ_{que} 的值。由图 11 还可发现, 集中式 MPC 匝道控制由于综合考虑全局的交通状态, 同时对三个入口匝道进行协同控制, 因此在匝道队列长度限制上也能取得最佳表现。

最后从快速路系统性能表现和计算时间两方面综合评价集中式 MPC、分散式 MPC 和贯序分布式 MPC 三种匝道控制策略的控制效果。其中以快速路网络内所有车辆的总时间消耗 TTS 作为衡量快速路系统性能表现的评价指标, TTS 的计算公式为:

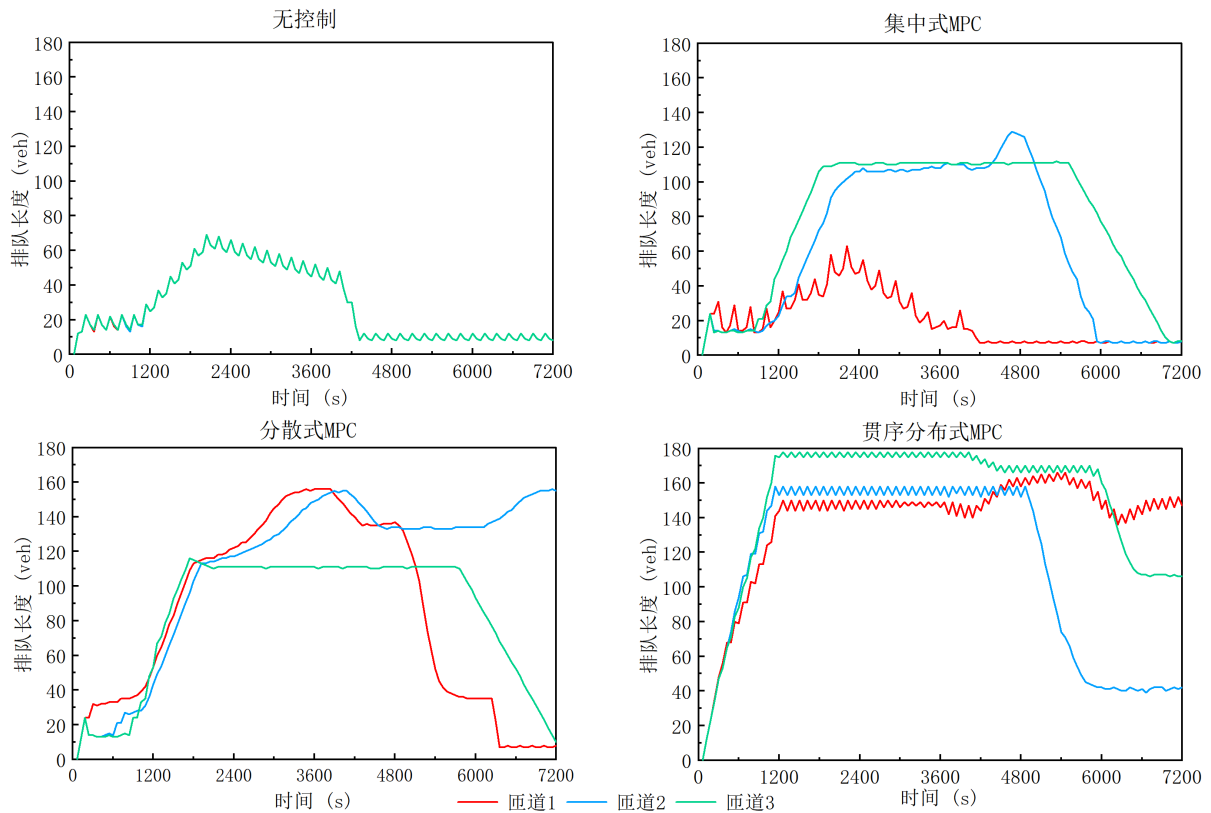


Figure 11. Queue length at each on-ramp
 图 11. 各入口匝道的队列长度

$$TTS = \sum_{k=1}^{N_{sim}} \left[T \left(\sum_{(m,i) \in I_{all}} \rho_{m,i}(k) L_m \lambda_m + \sum_{o \in I_r} w_o(k) \right) \right] \quad (17)$$

式中 N_{sim} 表示总仿真步数，即整个仿真时间内包含交通流模型采样周期的个数。各控制情形下仿真路段总时间消耗 TTS 的变化如图 12 所示。

为了更直观地表现出控制算法对路网通行效率的改善效果，将采取控制后快速路网总时间消耗的减少百分比定义为 TTS 减少率 TTS_{red} ，其计算公式为：

$$TTS_{red} = \frac{TTS_{nc} - TTS}{TTS_{nc}} \times 100\% \quad (18)$$

式中 TTS_{nc} 表示快速路网在无控制情形下的总时间消耗。

除了评价控制算法对快速路系统通行效率的提升效果，还需对匝道控制算法得出控制输入的计算时间进行考察。用 CT_{max} 表示各 MPC 控制策略在每一控制周期内得出下一控制输入所需计算时间的最大值，所需计算时间 CT_{max} 越小，算法的实际应用可行性越高。

综合分析图 12 和表 2 可见，集中式 MPC、分散式 MPC 和贯序分布式 MPC 三种匝道控制策略均能够在很大程度上缩短总时间消耗 TTS，提升路网的通行效率。具体而言，集中式 MPC 匝道控制可以使路网取得最佳的交通性能表现，在 2 小时的仿真时间中，集中式 MPC 匝道控制下目标路段的 TTS 为 2078.6 veh·h，相较于无控制情形下的 4701.8 veh·h 大幅减少了 55.8%。然而，由于只使用一个 MPC 控制器综合控制整个快速路路段的所有可控入口匝道，集中式 MPC 匝道控制策略的计算复杂度较高，具体表现为计算时间 CT_{max} 相较于分散式 MPC 和贯序分布式 MPC 匝道控制而言偏大。分散式 MPC 匝道控制策略

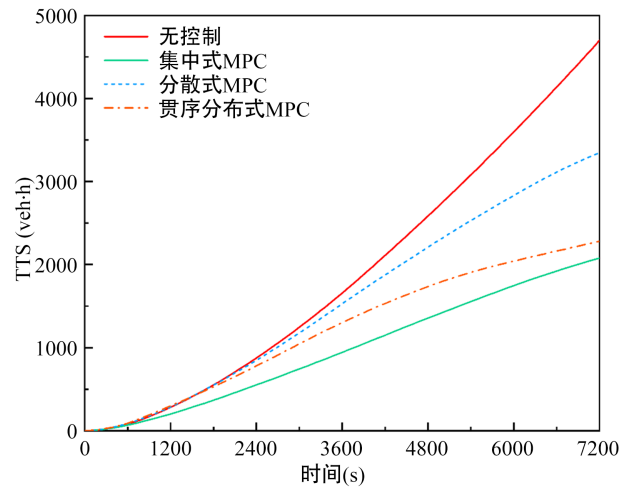


Figure 12. Comparison of TTS
图 12. TTS 比较

Table 2. Simulation results of each control situation
表 2. 各控制情形下的仿真结果

控制情形	TTS(veh·h)	TTS _{red} (%)	CT _{max} (ms)
无控制	4701.8	0	/
集中式 MPC	2078.6	55.8	76.3
分散式 MPC	3343.8	28.9	16.5
贯序分布式 MPC	2280.1	51.5	58.7

中各控制器间没有任何交流协作，只针对本路段的交通状态对本路段的入口匝道流量进行控制，因此分散式 MPC 匝道控制策略的计算时间 CT_{max} 最短，但其对快速路系统性能表现的提升效果也最差。贯序分布式 MPC 匝道控制策略可以在提升交通系统表现和减少计算时间之间达到平衡，贯序分布式 MPC 匝道控制下路网的交通性能表现与集中式 MPC 匝道控制相近，且该匝道控制策略的计算时间 CT_{max} 要显著低于集中式 MPC 匝道控制下的计算时间。

5. 结束语

本文采用分布式控制思想，基于交通流的单向性，提出一种贯序分布式多匝道 MPC 控制方案。仿真结果表明，本文所提出的贯序分布式 MPC 控制方案所需的计算时间明显少于集中式 MPC 控制方案。此外，在路网交通性能的提升效果方面，贯序分布式 MPC 控制方案可以取得与集中式 MPC 控制方案相接近的控制效果，明显优于分散式 MPC 控制方案。

除入口匝道控制外，可变限速控制也是一种应用广泛的交通控制方法。在未来的研究中可以通过在快速路主线实行可变限速控制，在入口匝道实行入口匝道控制，以模型预测控制为框架，探究将入口匝道控制与可变限速控制相结合的协调控制方案。

参考文献

- [1] Papageorgiou, M. and Kotsialos, A. (2002) Freeway Ramp Metering: An Overview. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 3, 271-281. <https://doi.org/10.1109/TITS.2002.806803>
- [2] Papageorgiou, M., Hadj-Salem, H. and Blosseville, J.M. (1991) ALINEA: A Local Feedback Control Law for on-Ramp

- Metering. In: *Transportation Research Record* 1320, National Research Council, Washington DC, 58-67.
- [3] Trubia, S., Curto, S., Barberi, S., *et al.* (2021) Analysis and Evaluation of Ramp Metering: From Historical Evolution to the Application of New Algorithms and Engineering Principles. *Sustainability*, **13**, Article No. 850. <https://doi.org/10.3390/su13020850>
- [4] Papageorgiou, M., Blosseville, J.M. and Hadj-Salem, H. (1990) Modelling and Real-Time Control of Traffic Flow on the Southern Part of Boulevard Peripherique in Paris: Part I: Modelling. *Transportation Research Part A: General*, **24**, 345-359. [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(90\)90047-A](https://doi.org/10.1016/0191-2607(90)90047-A)
- [5] Papamichail, I., Papageorgiou, M., Vong, V. and Gaffney, J. (2010) Heuristic Ramp-Metering Coordination Strategy Implemented at Monash Freeway, Australia. *Transportation Research Record*, **2178**, 10-20. <https://doi.org/10.3141/2178-02>
- [6] Raković, S.V. and Levine, W.S. (2019) Handbook of Model Predictive Control. Birkhäuser, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77489-3>
- [7] Zegeye, S.K., De Schutter, B., Hellendoorn, J., Breunese, E.A. and Hegyi, A. (2012) A Predictive Traffic Controller for Sustainable Mobility Using Parameterized Control Policies. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **13**, 1420-1429. <https://doi.org/10.1109/TITS.2012.2197202>
- [8] Hegyi, A., De Schutter, B. and Hellendoorn, H. (2005) Model Predictive Control for Optimal Coordination of Ramp Metering and Variable Speed Limits. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **13**, 185-209. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2004.08.001>
- [9] Papageorgiou, M., Papamichail, I., Messmer, A. and Wang, Y. (2010) Traffic Simulation with METANET. In: Barceló, J., Ed., *Fundamentals of Traffic Simulation. International Series in Operations Research & Management Science*, Vol. 145, Springer, New York, 399-430. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6142-6_11
- [10] van de Weg, G.S., Hegyi, A., Hoogendoorn, S.P. and De Schutter, B. (2018) Efficient Freeway MPC by Parameterization of ALINEA and a Speed-Limited Area. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **20**, 16-29. <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2790167>
- [11] Han, Y., Ramezani, M., Hegyi, A., Yuan, Y. and Hoogendoorn, S. (2020) Hierarchical Ramp Metering in Freeways: An Aggregated Modeling and Control Approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **110**, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.09.023>
- [12] 潘红光, 高磊, 米文毓. 基于改进宏观交通流模型的 MPC 算法设计[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(8): 1875-1881.
- [13] Siri, S., Pasquale, C., Sacone, S. and Ferrara, A. (2021) Freeway Traffic Control: A Survey. *Automatica*, **130**, Article ID: 109655. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2021.109655>
- [14] Negenborn, R.R. and Maestre, J.M. (2014) Distributed Model Predictive Control: An Overview and Roadmap of Future Research Opportunities. *IEEE Control Systems Magazine*, **34**, 87-97. <https://doi.org/10.1109/MCS.2014.2320397>
- [15] Ferrara, A., Oleari, A.N., Sacone, S. and Siri, S. (2014) Freeways as Systems of Systems: A Distributed Model Predictive Control Scheme. *IEEE Systems Journal*, **9**, 312-323. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2014.2317931>
- [16] Todorović, U., Frejo, J.R.D. and De Schutter, B. (2020) Distributed MPC for Large Freeway Networks Using Alternating Optimization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **23**, 1875-1884. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3028850>
- [17] Frejo, J.R.D. and Camacho, E.F. (2012) Global versus Local MPC Algorithms in Freeway Traffic Control with Ramp Metering and Variable Speed Limits. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **13**, 1556-1565. <https://doi.org/10.1109/TITS.2012.2195493>