

# 基于MPC的可变限速METANET模型改进

梁振羽

哈尔滨科学技术职业学院

**[摘要]**为解决我国目前城市快速路普遍存在的拥堵及污染日益严重的问题,在充分利用MPC算法的基础上,结合现有快速路控制系统存在的缺陷,本文改进了可变限速传统的METANET模型,建立了更为准确的宏观交通流预测模型。

**[关键词]**MPC; 可变限速; METANET 模型

**[DOI]** 10.12252/j.issn.2096-6261.2021.08.757

## 一、前言

众所周知,城市交通行为是极其复杂的,非线性明显<sup>[1-2]</sup>,所以在进行建模求解时比较困难,而MPC作为一种新的控制算法,认为只要能预测系统未来行为,就可以作为系统预测模型,这恰好避免了非线性问题。对于快速路主干道来说,METANET模型可以较好地表示交通流的宏观和微观特性,但目前国内外研究普遍无法达到可变限速真正意义上的预测控制。这使得现有成果普遍智能性不佳,控制效果单一。本文就是在此基础之上,建立了基于MPC的可变限速改进METANET模型。

## 二、MPC框架介绍

MPC(Model Predictive Control),即模型预测控制<sup>[3]</sup>,是一种比较新的控制算法。该算法主要有三个步骤,即多步预测、反馈校正以及滚动优化。整体的算法流程为:系统在预测采样的每个时段,都对控制对象进行相应的预测分析,这种预测分析主要是基于事先建立好的预测模型,在此模型的基础上,进行相应指标的优化,从而得到控制变量的最优序列,并将下一步就是将这个序列输入系统,对模型进行控制,然后再对下一个时段的模型状态进行预测,以此进程不断进行,从而可以得到一系列的最优控制序列。

### (一) 预测

根据快速路交通流特点,可知整个控制的输入变量有三类,即基础参数(密度,流量,速度),干扰参数(匝道排队)以及控制参数(匝道调节率,可变限速值)。设MPC采样周期为T,次序为k,控制周期为Tc(T的整数倍),次序为kc,则可得出:

$$q(k+1)=f(\varphi(k), \mu(k), \lambda(k)), \text{ 其中 } kcT_c/T \leq k \leq (kc+1)T_c/T$$

式中 $\varphi(k)$ 、 $\mu(k)$ 、 $\lambda(k)$ 分别为第k个采样周期的基础参数、干扰参数和控制参数。通过此方法可迭代出下一时刻的交通流状态,达到预测的目的。

### (二) 优化

该步需要选择合适的目标函数,以匝道调节率和限速调节率作为输入量,并确定相应约束条件,使用合理的算法迭代计算。找到对应控制周期的最优解。

### (三) 控制

通过多步预测,迭代解出设定预测步长 $N_p$ 的最优解,

以此作为控制步长 $N_c$ 的控制参数。通过反复滚动优化,实现对快速路交通流的不断实时预测和控制。

## 三、METANET模型介绍

METANET模型主要思想是交通波模型,通过泰勒公式以及差分方程对交通波进行离散化,得到交通流三参数之间的二阶关系模型。离散化的过程主要是将快速路中的交通流划分出若干节段,不同节段的交通参数可以不同。如下图所示:

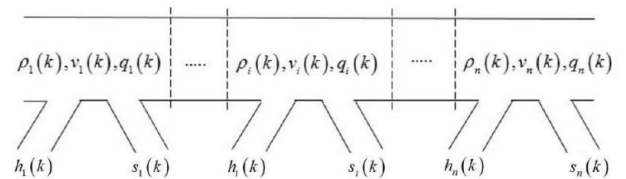


图1 METANET宏观模型简图

图中 $\rho_i(k)$ 、 $v_i(k)$ 、 $q_i(k)$ 分别表示k时刻第i节段的密度(veh/km/lane)、速度(km/h)及流量(veh/h); $h_i(k)$ 表示k时刻第i节段的入口匝道汇入量(veh/h),且入口匝道位置处于节段的前端; $s_i(k)$ 表示k时刻第i节段的出口匝道分流量(veh/h),且出口匝道位置处于节段的末端。

然而,原始的METANET模型虽然为交通流提供了离散化的分析方式,但状态过于理想,忽略了司机行为,以及主路及可变限速之间的相互影响。所以本文引入以上影响因素,并结合MPC算法的特点,对METANET模型进行了改进。

## 四、基于MPC的可变限速METANET模型改进

### (一) 车辆守恒方程

对于节段i来说,在其内部的交通流是连续的,即遵循流体运动守恒方程,又知,对于一段快速路来说,交通流三参数都是时空变量,故三参数都是时间和位置的函数,以此可以建立主干道车辆守恒方程:

$$\rho_i(k+1) = \rho_i(k) + \frac{T}{L_i \cdot \lambda_i} [q_{i-1}(k) - q_i(k) + h_i(k) - s_i(k)]$$

### (二) 流量密度方程

设 $\mu_i$ 为所引入的上下游流量影响权重系数,且考虑到在分段的时候入口匝道及出口匝道的位置,对原始的METANET模型进行改进后可得:

$$q_i(k) = \mu_i [\lambda_i \rho_i(k) v_i(k) - s_i(k)] + (1 - \mu_i) [\lambda_{i+1} \rho_{i+1}(k) v_{i+1}(k) - h_{i+1}(k)]$$

由此可见参数 $\mu_i$ 是一个需事先标定的参数,在对该参数的精确度要求不高的时候为了计算简便可以直接对其进行设

置, 整个路段需选取n个权重系数。当交通状况不良, 下游对上游的影响较大, 且权重系数受下游影响较大的时候, 直接选取固定的  $\mu_i$  往往不能很准确的表达交通状态, 此式需要根据交通状况不断的对权重系数进行调整, 以达到最佳状态, 则需要建立  $\mu_i$  的变化表达式。

由于下游对上游交通量影响与下游密度有关, 则若考虑下游对权重系数  $\mu_i$  的影响, 可得到下式流量密度方程:

$$q_i(k) = \mu[\rho_{i+1}(k)][\lambda_i \rho_i(k) v_i(k) - s_i(k)] + \{1 - \mu[\rho_{i+1}(k)]\}[\lambda_{i+1} \rho_{i+1}(k) v_{i+1}(k) - h_{i+1}(k)]$$

(三) 动态速度密度方程

在快速路上的车辆的速度受到很多因素的影响, 如交通流密度, 道路环境, 驾驶员行为等。将众多因素进行概括可知, 车辆某时刻在快速路上的运行速度主要受到三个方面的影响, 即车辆过去时间的历史车速、该时刻所处位置的交通流状况以及下游交通流状况。

由于车辆的速度变化以及驾驶员的反应都存在一定时间的延迟, 故当车辆在路段上行驶时, 若想将速度变为驾驶员的稳态速度, 需考虑一定的滞后时间的存在。即受下游交通状况的影响, 车辆若想达到前方距现在在其所处位置  $\Delta x$  处的稳态速度, 需经过一定时间的调整, 设驾驶员调整反应时间为  $\Delta t$ , 则可建立下式来对这个过程进行描述:

$$v(x, t + \Delta t) = U[\rho(x + \Delta x, t)]$$

左右两端分别对  $\Delta t$  和  $\Delta x$  进行泰勒展开并离散化, 得到下式:

$$v_i(k+1) = v_i(k) + \frac{T}{\tau_i(k)}(U[\rho_i(k)] - v_i(k)) + \frac{T}{L_i} v_i(k)[v_{i-1}(k) - v_i(k)] - \frac{\gamma_i(k)T}{\tau_i(k)L_i} \frac{\rho_{i+1}(k) - \rho_i(k)}{\rho_i(k) + \sigma}$$

式中,  $\gamma_i(k)$ —i 节段在k时刻的速密敏感系数, 下文会进行详细讨论;  $\tau_i(k)$ —驾驶员反应延迟系数, 下文会进行详细讨论;  $\sigma$ —模型补偿系数, 避免  $\rho_i(k)$  过小带来的误差, 为一个常数;  $U[\rho_i(k)]$ —稳态速度。

五、仿真实验

前文提出了改进的宏观交通流METANET模型作为控制策略的预测模型, 但是所建立的模型是否能够有效地对交通流进行预测是需要进行验证的, 所以需要对该模型的有效性进行探讨。

检验模型有效性的思路是将模型的预测值与实测值进行对比, 但是受到数据采集条件有限的制约, 缺乏对于所选路段当天的实测数据, 所以本文选用其他被证明有效的交通流模型与本文改进的METANET模型进行对比分析, 从而定性的检验改进的METANET模型的有效性。

由于GreenShields模型是交通流理论中最经典的模型,

用来描述交通流运行状态也是十分有效的, 所以本文选取GreenShields模型作为对比模型。

由于交通流量等于速度与密度的乘积, 而速度和密度的关系是不确定的, 所以一般的交通流模型都把研究焦点聚集在速度和密度的关系上, 所以本文的对比对象为交通量相同的情况下的交通流速度和密度。

(一) 实验初始数据

将主干道划分为三个区段。假设在0时刻路段的流量是均匀恒定的, 取为3000辆/h, 速度取为90km/h, 则0时刻各节段的密度为:

$$\rho_1(0) = \rho_2(0) = \rho_3(0) = 11 \text{ 辆/km/lane}$$

$$0 \text{ 节段各时刻的速度: } v_0(k) = 90 \text{ km/h.}$$

(二) 实验结果

根据上文中的初始条件以及选择的参数可以由METANET模型推算出各个节段的交通三参数在每个时段内的值。另外根据上式可知, 当给定交通量Q后, 速度和密度都是可以算出的, 本文将METANET模型推算出的值与GreenShields模型算出的值进行对比, 并将METANET模型推算出的值与GreenShields模型计算出的值的差用图像表示出来, 如图所示:

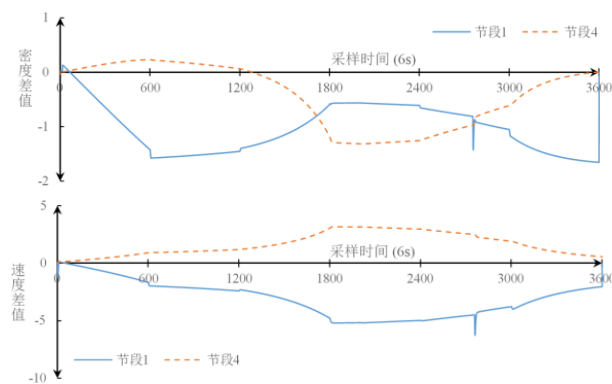


图2 密度及速度差值对比图

六、结论

根据实验结果可以看出, 无论是对于密度还是速度, 两个模型的计算值差距并不大, 最大的差距大约不到MetaNet模型计算结果的10%, 所以本文改进后的MetaNet模型的有效性可以得到一定程度的保证。

参考文献:

[1]Mariano A. Risso, Neila Bhourri, Aldo J. Rubiales, et al. A constrained filtering algorithm for freeway traffic state estimation[J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2020, 16 (2): 316-336.  
 [2]周海赞, 闫冬梅. 基于SSARX-NARX 模型的短时交通流预测[J]. 交通信息与安全, 2019, 37 (4): 89-95.  
 [3]陈虹. 模型预测控制[M]. 科学出版社, 2013.