

文章编号: 1001-0920(2009)12-1869-04

## 交通诱导预测控制仿真研究

周永华

(北京交通大学 电子与信息工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 将动态交通分配实施过程纳入预测控制框架下以满足实时交通诱导的目的, 提出一种交通诱导预测控制算法. 该算法是在滚动时域基础上进行的, 包括实时交通分配、交通流模拟运行及评价以及进化最佳路径 3 个重要环节. 仿真结果表明, 交通诱导预测控制是一种良好的计算机控制方法学, 其优化过程预先考虑了目前交通分配对未来路网的影响, 因而可有效地防范交通拥堵, 实现考虑反馈的路网交通流实时分配优化, 同时为出行者提供最佳路径.

**关键词:** 交通流; 诱导; 预测控制; 仿真

**中图分类号:** TP273

**文献标识码:** A

## Study on the simulation of traffic navigation predictive control

ZHOU Yong-hua

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China. E-mail: zhuyonghua@tsinghua.org.cn)

**Abstract:** This paper puts the implementation procedure of dynamic traffic assignment under the framework of predictive control so as to satisfy the requirements of real-time traffic navigation. The algorithm of traffic navigation predictive control is proposed, which is implemented on the rolling horizon including such three important parts as real-time traffic assignment, traffic-flow simulative operation and evaluation, and evolving best routes. The simulation results show that traffic navigation predictive control is a favorable computer control methodology. The optimization procedure proactively considers the effects of current traffic assignment on the links in the future, which can effectively prevent the congestion, realize the optimization of real-time traffic assignment of road network considering feedback, and at the same time provide the optimized routes for the travelers.

**Key words:** Traffic flow; Route guidance; Predictive control; Simulation

### 1 引言

如何根据交通流实时信息将车辆分配到最佳的线路上, 是建立先进的交通管理系统(ATMS)和先进的旅行者信息系统(ATIS)的一个重要理论问题. 其复杂性在于: 一方面, 交通流系统本身是一个时变巨系统; 另一方面, 当前时段动态交通分配(DTA)的决策行为依赖于对未来路网交通状况的预测, 而预测结果又与现行 DTA 的运作行为有关. 因此, DTA 的模型和算法需要综合考虑这两方面因素.

DTA 主要研究时变交通需求的分配问题, 以满足最优条件, 如用户平衡、随机用户平衡、系统最优等<sup>[1]</sup>. 其主要研究方法包括解析方法(数学规划、变分不等式等)<sup>[2,3]</sup> 和非解析方法(基于仿真的方法)<sup>[4,5]</sup>. 解析方法在解的存在性和唯一性以及稳定性方面有着理论上的保障; 而基于仿真的非解析方

法可以比较方便地描述交通流的时空特性, 在可实施性方面具有较好的前景. 两者各有优劣, 目前 DTA 的理论就是沿着这两种技术路线而发展的.

DTA 的一个重要应用是车辆导航<sup>[5,6]</sup>, 但目前 DTA 框架的一个主要缺点是没有显式地包含实时反馈机制. DTA 比较典型的算法是根据不同用户按不同的路径选择行为, “全有全无”地分配交通需求, 并反复迭代, 直到满足收敛条件<sup>[5,6]</sup>. 这种算法显式地依赖于基于固定 OD(Origin destination)对的 OD 矩阵, 它是一个 DTA 期间的交通需求统计预测. 在不同的分配时段, 并不是所有车辆都会到达那些 OD 对. 这种算法不便于实时车辆导航, 因为实时车辆导航要求能根据当前车辆的位置、实时交通流信息和预测信息给出车辆运行前方交叉口到终点的最佳路径.

收稿日期: 2009-01-22; 修回日期: 2009-04-07.

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2004036071).

作者简介: 周永华(1970—), 男, 湖北枝江人, 副教授, 博士后, 从事智能交通系统的研究.

目前,通过车辆定位收集交通流数据的技术已得到很大发展,这为建立城市路网的交通流数据库提供了极大的方便,无线通信技术的发展也为实时交通诱导提供了良好的通信手段.为此,基于交通流历史和实时数据,对路网进行有效的交通分配和控制管理,从全局优化和拥堵预防的角度对路网实现计算机化的控制与管理将是一种必然趋势.

预测控制在工业控制领域获得了广泛成功的应用<sup>[7]</sup>.预测控制在交通领域的应用目前主要局限于高速公路入口匝道控制(交通信号控制)<sup>[8,9]</sup>.本文提出一种基于预测控制的动态交通分配方法,以适用于实时车辆导航的目的.

基于预测控制的实时交通诱导技术具有六大好处:1)它提供了反馈校正机制,在交通流预测模型和仿真模型不够精确的情况下,通过滚动时域下的实时反馈可以减少控制性能的下降.2)通过交通流模拟运行及其评价,考虑了当前所有导航车辆的路径决策行为对未来路网的影响,从而及早防范可能发生的拥堵.3)不象通常的 DTA 技术显式地依赖于 OD 矩阵,而是在较小的仿真周期内逐个考虑快到达交叉口车辆的路径决策.4)它是一个开放的系统架构,蕴含先进的控制哲理,预测模型可以采用非解析模型,优化方法可以采用遗传算法、启发式算法等智能优化算法.5)基于模型的预测控制系统的鲁棒性取决于模型和控制策略的鲁棒性.在交通流预测

模型和仿真模型不精确的情况下,通过适当的控制策略可以确保系统的良好性能.采用遗传算法进行优化时,对于可能造成拥挤的交通分配方案,应赋予较低的适应度,在遗传进化过程中,被选择的机会较小;否则赋予较高的适应度,被选择的机会较大.通过这种方法可以使得控制策略具有较好的鲁棒性.6)有效地优化交通秩序,在使整个系统达到优化的同时,也可以使个体服务性能达到最优,即达到“共赢”的目的.

## 2 基于预测控制的动态交通分配

图 1 给出了交通诱导预测控制系统结构图.控制对象是路网交通流,控制系统的性能指标  $Y(t)$  包括交通流系统性能和用户性能两个方面.执行装置是交通诱导装置,包括无线发送、传输和接收 3 个部分.控制输入  $U_a(k)$  是导航车辆的行驶路径.交通流预测模型主要为交通流模拟运行(仿真)提供各个路段的非导航交通流量信息、交通流量(或密度)与速度的关系.根据交通流预测模型、控制输入  $U_a(k)$  及交通信号配时方案,对交通流进行模拟运行,再经过评价得到系统性能和用户性能,给出未来的预测性能指标  $Y_p(k)$ .根据当前路网交通流的性能  $Y(k)$  和给定值  $Y_s$ ,伪给定环节给出未来的性能指标  $Y_s(k)$ .优化器使预测性能指标  $Y_p(k)$  渐近逼近伪给定  $Y_s(k)$  所指定的性能指标,实现控制器的输出求解.

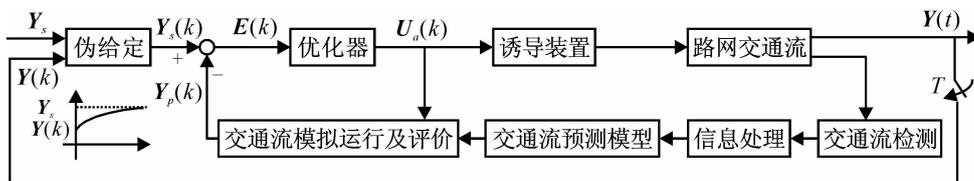


图 1 交通诱导预测控制系统

可以选取道路的饱和度作为交通流系统性能的度量参数. DTA 从总体上调整各条道路的饱和度,当道路的饱和度大于给定值  $y_s$  (例如 1) 时,应使其渐近下降趋近于  $y_s$ ; 而当道路的饱和度小于  $y_s$  时,可以调配车辆到该条道路,使其饱和度渐近上升趋近于  $y_s$ . 旅程时间尽可能短是广泛接受的用户性能的度量参数,可以选取预测旅程时间与理想最短旅程时间的比值来度量用户的实时满意度.

基于预测控制的 DTA 是寻找导航车辆  $n$  运行前方路口  $c$  到终点  $d$  的运行路径  $p_n(c)$ , 使得道路  $r$  的未来预测饱和度  $x_p(r, t+kT)$  渐近趋于未来理想饱和度  $x_s(r, t+kT)$ . 导航车辆  $n$  从起点  $o$  (或交叉口  $c$ ) 到终点  $d$  的运行时间  $t'_n(o, d, t)$  (或  $t'_n(c, d, t)$ ) 尽可能地接近理想最短旅程时间  $t'_{\min}(o, d, t)$  (或  $t'_{\min}(c, d, t)$ ). 其中:  $n = 1, \dots, n_{\max}$ ,  $n_{\max}$  为在时刻  $t$  的

导航车辆数;  $c = 1, \dots, c_{\max}$ ,  $c_{\max}$  为交叉口的数目;  $r = 1, \dots, r_{\max}$ ,  $r_{\max}$  为道路数;  $k = 1, \dots, P$ ,  $P$  为预测时域;  $T$  为采样周期.

系统的控制目标可以描述为

$$\min f = \sum_r \sum_k (x_s(r, t+kT) - x_p(r, t+kT))^2 + \lambda \sum_n t'_n(o, d, t) / t'_{\min}(o, d, t). \quad (1)$$

其中:  $x_s(r, t+kT) = x(r, t)e^{-\alpha kT} + y_s(r, t)(1 - e^{-\alpha kT})$ ;  $x(r, t)$  是道路  $r$  在时刻  $t$  的饱和度,它是道路  $r$  的到达交通流量  $q(r, t)$  与通行能力  $p(r)$  之比;  $\alpha$  是渐近变化率;  $y_s(r, t)$  是道路  $r$  在  $t$  时刻道路饱和度的给定值. 车辆  $n$  在  $t$  时刻的满意度  $\text{Sat}_n(o, d, t) = t'_n(o, d, t) / t'_{\min}(o, d, t)$ .

## 3 算 法

采用遗传算法求解式(1)的优化问题. 染色体

的基因表示导航车辆运行前方路口  $c$  到终点  $d$  的运行路径编号  $p_n(c)$ 。通过对交通流模拟运行和模拟运行评价,求得每代种群的目标函数值;通过选择、交叉和变异操作,进化出每个车辆的最佳运行路径。

### 3.1 主 流 程

1) 初始化. 读取路段连接数据、长度数据、非导航稳定和随机交通流数据、速度数据、交叉口至交叉口的最短行驶时间数据、可行路径数据等。

初始化仿真的起始时刻  $T_s$ , 终止时刻  $T_e$ , 仿真周期  $T$ , 预测时域  $P$ , 渐近变化率  $\alpha$  等相关参数。

初始化遗传算法相关参数, 如交叉概率  $P_c$ , 变异概率  $P_m$ , 种群规模  $Pop\_Size$ , 进化代数  $Num$  等。

2) 在每个仿真周期进行下列操作:

2.1) 在各个路段新产生车辆. 实际运行时, 这些新产生车辆的位置应是实际检测的结果。

2.2) 初始化种群. 为每个导航车辆分配与已行驶路径没有回路的可行路径。

2.3) 目标函数计算、染色体排序与适应度计算. 针对每条染色体, 调用目标函数计算类进行交通流模拟运行, 计算道路预测饱和度、用户满意度、总的目标函数值  $f$  和超过最大容许饱和度的道路数目  $f_{Num}$ . 根据  $f$  和  $f_{Num}$  对染色体从优到劣进行排序, 排在前面的染色体赋予较高的适应度, 被选择的机会较大. 应用基于序的评价函数, 计算各条染色体的适应度。

2.4) 选择操作. 根据适者生存的原则, 采用轮盘赌, 选择  $Pop\_Size$  个染色体。

2.5) 根据交叉概率  $P_c$  进行交叉操作。

2.6) 根据变异概率  $P_m$  进行变异操作。

2.7) 如果进化代数没超过指定值  $Num$ , 则返回步骤 2.3)。

2.8) 更新下一个仿真时刻车辆的位置. 实际运行时, 这些值应是实际检测的结果。

2.9) 更新下一个仿真时刻道路的饱和度. 实际运行时, 这些值应是实际检测的结果。

2.10) 判断是否有车辆到达终点, 更新下一个仿真时刻运行于路网的车辆。

3) 如果仿真时刻没有到达终止时刻, 则返回步骤 2); 否则, 停止仿真。

### 3.2 目标函数计算

1) 将非导航交通流作为交通流模拟运行的背景交通流。

2) 交通流模拟运行. 根据染色体所记录的导航车辆的路径、各条道路的长度及未来速度值, 计算车辆在未来每个仿真时刻所在的道路、运行方向及在道路的位置, 直至其模拟运行到终点。

3) 交通流模拟运行评价。

3.1) 计算被预测的用户满意度. 根据车辆到达终点的时刻计算出车辆在仿真时刻的预测旅行时间, 进而计算出用户满意度。

3.2) 计算被预测的道路饱和度. 根据导航车辆在预测时域在道路上的位置及非导航车辆数, 可以计算出各条道路的饱和度。

3.3) 根据式(1)计算目标函数值  $f$ , 判断各条道路的饱和度是否大于最大容许饱和度, 统计超过最大容许饱和度的数目  $f_{Num}$ , 将  $f$  和  $f_{Num}$  返回。

## 4 仿 真 研 究

仿真程序采用 Visual Studio .NET 2005 的 C#

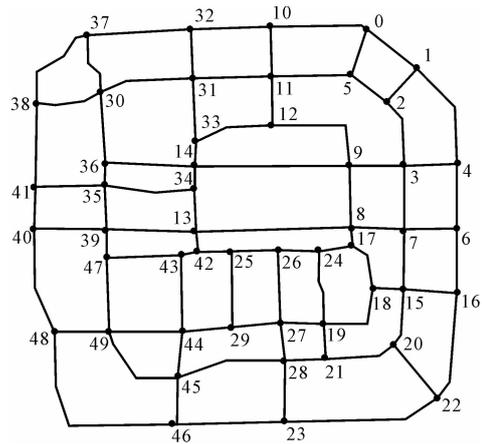
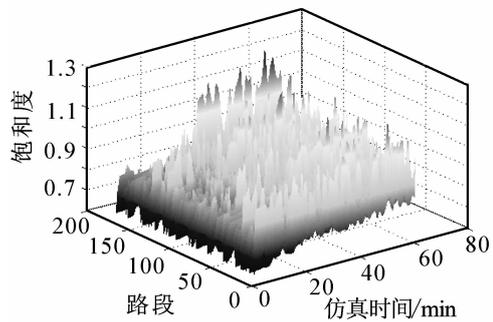
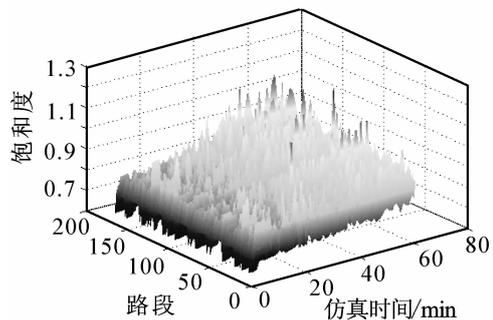


图 2 道路网络



(a) 沿自由流时间最短路径行驶



(b) 基于预测控制的动态交通分配

图 3 交通诱导预测控制的仿真结果

语言开发. 仿真的地图为北京市二环、三环和四环的主要道路, 如图 2 所示, 共有 50 个节点, 84 条道路. 假设在一个小时内导航车辆的规模为 10200 辆, 这些车辆是在交叉口随机产生的. 仿真主要参数为:  $T_i = 7\text{h}$ ,  $T_c = 8\text{h}$ ,  $T = 1\text{h}$ ,  $P = 60$ ,  $\alpha \rightarrow \infty$ ,  $P_c = 0.8$ ,  $P_m = 0.2$ ,  $\text{Pop\_Size} = 30$ ,  $\text{Num} = 30$ ,  $\lambda = 0$ .

图 3(a) 给出了路网有非导航交通流、所有导航车辆都沿自由流时间最短路径行驶的路网饱和度分布; 图 3(b) 给出了交通诱导预测控制的结果. 由图 3 可以看出, 交通诱导预测控制能够预见可能发生的拥堵, 将拥堵防患于未然, 使整个道路的交通流得以最佳配置, 并将道路的饱和度逐步配置成小于 1.

## 5 结 论

交通诱导预测控制的优化过程包括实时交通分配、交通流模拟运行及其评价、进化出最佳的实时交通分配结果 3 个环节. 由于每个导航车辆在其所分配路径的运行时间不一样, 交通诱导预测控制实质上是可变控制时域的多变量时变非线性系统预测控制. 本文建立了交通诱导预测算法, 并进行了仿真实验. 仿真结果表明, 交通诱导预测控制是一种全局性的交通流优化控制方法, 它考虑了目前动态交通分配对未来道路通行状况的影响, 能将拥堵防患于未然. 对于随机时变的交通流巨系统, 预测控制蕴含先进的控制哲理, 是一种良好的计算机控制方法学.

交通诱导预测控制还有很多问题有待进一步深入研究. 例如, 如果全面考虑驾驶员的随机决策行为及交通流传播的随机行为, 则可采用机会约束规划模型形成具有鲁棒性的诱导策略; 当导航车辆超过一定规模时, 应采用局域网格进行并行实时处理.

## 参考文献 (References)

[1] Peeta S, Ziliaskopoulos A K. Foundations of dynamic

traffic assignment: The past, the present and the future [J]. Networks and Spatial Economics, 2001, 1(3/4): 233-265.

[2] Jin W. A dynamical system model of the traffic assignment problem[J]. Transportation Research, Part B, 2007, 41(1): 32-48.

[3] Ran B, Lee D H, Shin M S. Dynamic traffic assignment with rolling horizon implementation [J]. J of Transportation Engineering, 2002, 128(4): 314-322.

[4] Florian M, Mahut M, Tremblay N. Application of a simulation-based dynamic traffic assignment model[J]. European J of Operational Research, 2008, 189(3): 1381-1392.

[5] Peeta S, Zhou C. A hybrid deployable dynamic traffic assignment framework for robust online route guidance [J]. Networks and Spatial Economics, 2002, 2(3): 269-294.

[6] Jang W, Ran B, Choi K. A discrete time dynamic flow model and a formulation and solution method for dynamic route choice[J]. Transportation Research, Part B, 2005, 39(7): 593-620.

[7] 丁宝苍. 预测控制的理论与方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.  
(Ding B C. The theory and methodology of predictive control[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.)

[8] Bellemans T, Schutter B D, Moor B D. Model predictive control for ramp metering of motorway traffic: A case study[J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(7): 757-767.

[9] Hegyi A, Schutter B D, Hellendoorn H. Model predictive control for optimal coordination of ramp metering and variable speed limits[J]. Transportation Research, Part C, 2005, 13(3): 185-209.

(上接第 1868 页)

[5] Cao Y Y, Lam J, Hu, L S. Delay-dependent stochastic stability and  $H_\infty$  analysis for time-delay systems with Markovian jumping parameters [J]. J of Franklin Institute, 2003, 340(6): 423-434.

[6] Wang Z D, Lam J, Liu X H. Nonlinear filtering for state delayed systems with Markovian switching [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2003, 51(9): 2321-2328.

[7] Zhang W H, Chen B S, Tseng C S. Robust  $H_\infty$  filtering for nonlinear stochastic systems [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2005, 53(2): 589-598.

[8] Moon Y S, Park P, Kwon W H, et al. Delay-dependent robust stabilization of uncertain state-delayed systems [J]. Int J of Control, 2001, 74(14): 1447-1455.

[9] Mehrdad S, Chen T W, Sirish L S. Optimal  $H_\infty$  filtering in networked control systems with multiple packet dropout[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2003, 52(8): 1508-1513.

[10] Yue D, Han Q L, Lam J. Networked-based robust  $H_\infty$  control of systems with uncertainty[J]. Automatica, 2005, 41(6): 999-1007.

[11] Suh Y S, Nguyen V H, Ro Y S. Modified Kalman filter for networked monitoring systems employing a send on delta method[J]. Automatica, 2007, 43(2): 332-338.

[12] Cao Y Y, Lam J. Robust  $H_\infty$  control of uncertain Markovian jump systems with time-delay [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45(1): 77-83.