

基于网络演算的智能交通流量分配研究^{*}

彭雅丽^a, 章志明^a, 宋彦婷^b

(江西师范大学 a. 软件学院; b. 设备处, 南昌 330022)

摘要: 精确的交通流量分配计算模型, 能为实际的交通工程应用提供具体的流量出入速率或者信号灯控制时间方案, 具有重大价值。首次将动态交通流量分配拟化为网络负载均衡问题, 使用漏桶理论和网络演算方法, 将交通的流量分配与路径时延转换为一系列极值运算, 结合贪婪算法, 以均衡网络延时为优化目标, 得到交通配流。仿真结果表明, 本模型在化解拥堵的同时, 使分流后的道路平均延时普遍降低, 能提升整体路网的通行能力。

关键词: 智能交通; 流量分配; 网络演算; 漏桶

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)08-2891-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.08.023

Research of traffic flow assignment model on intelligent transportation based on network calculus

PENG Ya-li^a, ZHANG Zhi-ming^a, SONG Yan-ting^b

(a. School of Software, b. Machine-Software Partment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract: In the actual traffic control engineering, the traffic flow assignment needs a precise quantitative index so as to offer specific flow rate or signal lights control. However, little work has been done to give accurate calculation of flow distribution model. In order to lay an accurate flow assignment for intelligent transport management, this paper presented a new approach. It applied the network equilibrium theory into dynamic traffic flow assignment and used leaky bucket controller and network calculus. The traffic flow rate distribution and path delay was exchanged to be a series of mathematical operations. Finally the method used simple greedy algorithm to balance traffic delay and got traffic assignment. The simulation results manifest that the model can not only solve congestion, but also reduce average delay of every path, it can extremely improve the traffic capacity of road network.

Key words: intelligent transportation; traffic flow assignment; network calculus; leaky bucket controller

0 引言

城市动态交通配流(dynamic traffic assignment, DTA)模型及其算法是智能交通理论体系的核心, 以时时刻刻变动的交通需求为对象进行交通量的分配。由于道路交通系统的复杂性以及动态分配的实时性, 给交通均衡配流带来了一系列问题。1956年, Beckman提出了计算交通平衡状态的积分变换形式, 为城市交通平衡理论奠定了重要的基础, 其后出现了一系列相关研究, 但大多数是静态的交通分配模型^[1]。对于动态交通配流, 文献[2]基于介数来确定网络中的流量分布状态, 探讨了无标度网络上的流量分布特性以及节点度数与流量之间的标度关系。Dobson等人^[3]提出了基于概率流量的Cascade模型, 还分析出Cascade模型对失效规模影响存在的临界点, 进而在文献[4]中根据节点失效过程中边的效率发生变化的思想, 研究了复杂网络的动态分配流量的特性。Si等人^[5]提出利用路段费用信息以及网络拓扑排序方法判定有效路径的改进Dial算法, 以解决交通配流问题。李树彬等人^[6]分析复杂网络上的交通传播规律和网络拓扑结构对交通拥堵的影响, 提出了消除交通拥堵的控制策略。

可见, 目前大多数研究都在理想假设条件下, 分析各类交通参数对交通流量的影响或得出各类流量分布特性, 未见有精确的流量分配计算模型。而实际的交通控制工程中, 交通流量分配需要有精确的量化指标, 以提供具体的流量出入速率或者信号灯控制时间。因此, 研究具有精确计算模型的动态交通流量分配算法, 对实现交通控制工程具有重大意义。

本文首次将动态交通流量分配拟化为网络负载均衡问题, 运用漏桶管制和网络演算理论, 将复杂的交通元素归并于统一的数学模型: 时延—速率约束动态交通流量分配模型(T-S constrained model), 推导出满足有效时延约束的流量分配速率。本模型针对短时间内的非常态交通进行动态分析, 提出解决出现拥堵路段的交通配流计算模型, 并给出精确的流量分配算法。

1 交通流量分配问题模拟描述

1.1 问题模拟描述

城市道路交通网络中的动态交通流分配是为了保持道路交通的畅通, 当某个路段发生拥堵或处于临近拥堵状态, 势必影响整体交通网络的运行, 若不及时分散流量, 势必恶化导致

收稿日期: 2012-01-03; **修回日期:** 2012-02-20 **基金项目:** 国际合作重大专项资助项目(2010DFB90460); 江西省科技厅重点对外科技合作资助项目(20111BDH80030)

作者简介: 彭雅丽(1983-), 女, 江西高安人, 讲师, 硕士, 主要研究方向为无线传感器网络、智能交通(iampylily@hotmail.com); 章志明(1977-), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为无线传感器网络; 宋彦婷(1983-), 女, 讲师, 硕士, 主要研究方向为计算机网络。

严重拥堵。本文主要研究交通网络中拥堵路段的动态交通流分配问题,在有效时间内将拥堵路段的高负荷流进行分配,在解决当前拥堵状态的同时,平衡各分流路径的路段延时,以保证参与分流的车辆在一个有效时间内到达中心区域。

道路交通网络有着与计算机网络相似的传输过程。近几年来,复杂网络的各项理论为城市交通的研究提供了崭新的研究视角,国内外学者应用复杂网络理论在交通网络动力学行为分析、交通网络级联失效、交通阻塞传播以及交通网络演化建模等方面也取得了一定的研究成果,但主要成果都是分析网络结构对城市交通网络流量、费用以及阻塞的影响,少有精确的计算模型以供交通工程实践。

本文应用无线网络多媒体应用传输理论^[7],结合交通网络的传输特点,将动态交通流量分配拟化为网络负载均衡问题。使用网络演算理论分析道路的路径服务能力,将复杂的道路元素归并为统一的数学模型,推导出分流路径的时延上界,并得到满足有效时延约束的路径最大允许流入速率,提出时延—速率约束动态交通流量分配模型,给出精确的流量分配方案。

1.2 理论基础

漏桶理论是指各路段应对进入的通信流进行通信量的管制,以保证路段的通行能力和车辆的行驶速度,避免发生拥堵。如图1所示,路段通信量的管制如同漏桶一样,在容量为 σ 、流出速率为 ρ 的漏桶中,必须对通信流入量 $R(t)$ 进行管制,使得任意时刻通信存储量 $x(t)$ 不会溢出漏桶。如果到达通信量不会导致漏桶溢出,则称通信量 $R(t)$ 满足参数为 (σ, ρ) 的漏桶管制。

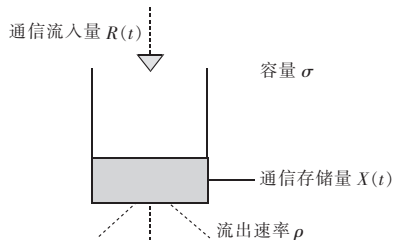


图1 漏桶理论

定理1 如果通信流 $R(t)$ 受参数为 (σ, ρ) 的漏桶管制,则 $R(t)$ 受到达曲线 $\alpha(t) = \sigma + \rho t$ 的约束。其中: σ 为路段可容纳最多车辆数, ρ 为车辆流出路段的速率。

定理2 假设一个通信流依次穿过服务曲线分别为 $\beta_1(t), \beta_2(t), \dots, \beta_n(t)$ 的 n 个分流节点,则这 n 个分流节点串联后提供的总服务曲线称为串联服务曲线 $\beta(t)$,且满足 $\beta = \beta_1 \otimes \beta_2 \otimes \dots \otimes \beta_n$ 。

网络演算是一套分析分组交换网络中排队系统的理论。与传统排队论不同,网络演算理论重点研究分组交换网络的性能保证边界,而不是稳定状态下的平均性能。该理论的核心思想是利用最小加代数和最大加代数将复杂的非线性网络系统转换成便于分析的线性系统,已广泛应用于网络性能评价和资源分配等领域中^[8]。确定网络演算主要用于分析网络在最坏情形下系统可以提供的确定服务保证。确定服务保证是指数据流的所有分组从源节点转发到目的节点(如主机、路由器等)时都能满足要求的性能指标,如吞吐量、时延和丢失率等。到达曲线与服务曲线是确定网络演算理论中的核心模型,分别用于描述数据流的流量特征和服务器的服务能力特征。

在此基础上,确定网络演算可以对网络中分组的延迟、服务器的输出流量特征以及网络元素的缓冲大小等性能指标进行分析。

对于网络数据延迟定义如下:给定一个流,进入系统时被到达曲线 $\alpha(t)$ 约束,通过系统时系统提供服务曲线 $\beta(t)$,那么通信流在任意时间 t 的时延 $d(t)$ 满足下式,其中 $h(\alpha, \beta)$ 也称做曲线 α 与 β 之间的水平偏差。

$$d(t) \leq \sup_{t \geq 0} \{ \inf_{d \geq 0; a(t) \leq \beta(t+d)} \} = h(\alpha, \beta)$$

2 路径服务能力分析

当路段占有率超过一定值时,认为发生拥堵,采取动态交通流分配,将当前拥堵路段的车流分配为 m 条细流。要使当前拥堵路段 s 车流量符合参数为 (σ, ρ) 的漏桶管制,则 $R(t) < \sigma - x(t_0) + \rho t$ 。其中: σ 为路段可容纳最多车辆数; $x(t_0)$ 为 t 时间内初始 t_0 时刻该路段已有的车辆数; ρ 为车辆流出路段的速率。本项目中各个时刻路段的占用概率可由传感器获取,为简化公式,将 $\sigma - x(t_0)$ 直接化解成当前路段剩余车辆容量 $\varphi(t_0)$,即路段到达车辆符合曲线 $R(t) < \varphi(t_0) + \rho t$,称 $\alpha(t) = \varphi(t_0) + \rho t$ 为车辆到达曲线。

当前路段 s 通过交通流分配,把车流 $R(t)$ 分成 m 条细流 $R_1(t), R_2(t), \dots, R_m(t)$,如图2所示。

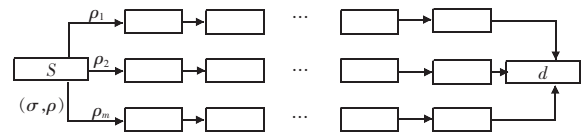


图2 交通流分配

各细流的车流流入速度为 ρ_i ,则有

$$\begin{cases} R(t) = R_1(t) + R_2(t) + \dots + R_m(t) \\ R_i(t) = \rho_i t + x(t_0)_i \\ \rho = \rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_m \end{cases} \quad (1)$$

对其中的任一路径 i ,假设路径上有 n 条路段,每个路段为车流提供一定的服务能力。各路段提供的服务曲线为 $\beta_i^1, \beta_i^2, \dots, \beta_i^n$ 。

根据定理2,路径 i 中 n 个中间路段提供的串联服务曲线为 $\beta_i = \beta_i^1 \otimes \beta_i^2 \otimes \dots \otimes \beta_i^n$ 。

对任一路段的通行,不管采用何种信号控制算法,都可以假定路段对车流提供速率—延迟服务曲线作为对车流的服务保证^[8]。由此可得各子路径中路段提供的服务曲线为

$$\beta_i^j(t) = V_i^j [t - T_i^j] \quad t > T_i^j \quad (2)$$

其中: V_i^j 为路段设计车速, T_i^j 为车辆在该路段上的时延。

根据速率—延迟函数的特点,可以计算出路径 i 的串联服务曲线 $\beta_i(t)$,如式(3)所示。

$$\begin{cases} \beta_i(t) = \beta_i^1 \otimes \beta_i^2 \otimes \dots \otimes \beta_i^n(t) = V_i [t - T_i]^+ \\ V_i = \min \{ V_i^1, V_i^2, \dots, V_i^n \} \\ T_i = T_i^1 + T_i^2 + \dots + T_i^n \end{cases} \quad (3)$$

车辆在路径 i 的延时包括两部分,一部分为车辆的行驶时间 R_i ,一部分为车辆排队等待的延误时间 W_i 。每个路径 i 都经过了 n 个路段,每个路段车辆的行驶时间 $R_i^j = \frac{L_i^j}{V_i^j}$ 。其中: L_i^j 为路段 j 的长度, V_i^j 为当前路段设计车速。则路径 i 的车辆行驶时间为

$$R_i = \sum_{j=1}^n R_i^j = \sum_{j=1}^n \frac{L_i^j}{V_i^j} \quad (4)$$

对于稳定的排队系统,排队时延上界为其最大繁忙间隔^[9,10]。因此,受到达曲线 $\alpha(t)_i = \varphi(t_0)_i + \rho_i t$ 约束的数据流,其排队时延上界可表示为

$$W_i^{\text{bound}} = \inf\{t \geq 0: \alpha(t)_i - v_i t \leq 0\} = \frac{\varphi(t_0)_i}{v_i - \rho_i}$$

因此,路径*i*的可变时延满足

$$W_i(t) \leq \frac{\varphi(t_0)_i}{v_i - \rho_i} \quad (5)$$

综合式(4)(5),可得路径*i*的时延上界为

$$T_i = \sum_{j=1}^n R_i^j + \frac{\varphi(t_0)_i}{v_i - \rho_i} = \sum_{j=1}^n \frac{L_i^j}{V_i^j} + \frac{\varphi(t_0)_i}{v_i - \rho_i} \quad (6)$$

3 动态交通流量分配算法

在固定路径的拥堵高峰时段,采取拥堵路段到高峰中心路段的动态流量分配。当在到达中心目的地的中间路段发生拥堵时,对该拥堵路段采取路径分流。要使各分流路径具有基本一致的通行能力,保证各个分流车辆的通行效率,流量分配算法的关键在于使各分流路径的车辆延迟时间相差不大,并且在一个合理的时间范围内。假设各分流车辆允许的最大时延为 Δ ,则

$$\sum_{j=1}^n R_i^j + \frac{\varphi(t_0)_i}{v_i - \rho_i} \leq \Delta \quad (7)$$

由式(7)可得

$$\rho_i \leq v_i - \frac{\varphi(t_0)_i}{\Delta - \sum_{j=1}^n R_i^j} \quad 1 \leq i \leq m; 1 \leq j \leq n \quad (8)$$

其中: ρ_i 为到达流受约束的平均速率,也即路径最大允许流入速率。从式中可见,当路径的服务速率越大,则满足时延要求的数据流入允许速率就越大。

由此可分析,在当前拥堵路段的总数据流为

$$\rho = \sum_{i=1}^m \rho_i \leq \sum_{i=1}^m v_i - \sum_{i=1}^m \frac{\varphi(t_0)_i}{\Delta - \sum_{j=1}^n R_i^j} \quad (9)$$

进入当前拥堵路段的总数据流受约束的速率不能超过某一阈值,否则将造成车辆积压在某个路段上,导致路径时延超过限定值 Δ 。由此可分析出,在当前拥堵路段,采用红灯时间控制进入的车流量来控制进入车流速度。

要使分配后各分流通行能力基本一致,在满足时延要求的前提下,要尽可能地降低各路径间的时延差,也即将路径流量分配问题归结为下述规划优化问题:

$$\begin{aligned} \min \quad & \max_{1 \leq k \leq m} \left(\frac{\varphi(t_0)_k}{v_k - \rho_k} \right) \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} \rho_i \leq v_i - \frac{\varphi(t_0)_i}{\Delta - \sum_{j=1}^n R_i^j} \\ \varphi(t_0)_1 + \varphi(t_0)_2 + \cdots + \varphi(t_0)_m = \varphi(t_0) \\ \rho_1 + \rho_2 + \cdots + \rho_m = \rho \end{cases} \end{aligned}$$

由于上述问题是 NP 难题,提出简单的贪婪算法进行求解。为了简化问题,本文取 $\varphi(t_0)_1 = \varphi(t_0)_2 = \cdots = \varphi(t_0)_m = \frac{\varphi(t_0)}{m}$ 。具体描述如下:

输入:路段长度 L ,路段设计速率 V ,路径时延上界 Δ ,信号周期 C ,占用概率 K 。

输出:流量分配后各路径的进入速率 ρ_i 。

a) 计算各路径的约束速率 ρ_i 的上限值 $v_i - \frac{\varphi(t_0)_i}{\Delta - \sum_{j=1}^n R_i^j}$ ($1 \leq i \leq m; 1 \leq j \leq n$)。其中: $\varphi(t)$ 在有 m 条路径参与时就取平均值 $\varphi(t)/m$; R_i^j 为当前路段的行驶时间,为各子路段长度除以子路段设计速率 L/V 。

b) 在拥堵路段,为保证在一个绿灯周期时间内将拥堵的车辆分流出去,以保持路段畅通,则 $VC\lambda - \rho C\lambda < L(1-K)$,其中 L, C, λ 为当前拥堵路段参数,计算出最大流出速率 $\rho < \frac{L(1-K)}{C\lambda} - V_0$ 。

c) 设定各路径的约束速率,按上限值进行比例取值,即

$$\rho_i = \frac{(v_i - \frac{\varphi(t_0)_i}{\Delta - \sum_{j=1}^n R_i^j})\rho}{\sum_{i=1}^m v_i - \frac{\varphi(t_0)_i}{\Delta - \sum_{j=1}^n R_i^j}}$$

d) 对分配方案 $(\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_m)$,根据式(6)计算各路径队列的时延上界:

$$T_i = \sum_{j=1}^n \frac{L_i^j}{V_i^j} + \frac{\varphi(t_0)_i}{v_i - \rho_i} = \sum_{j=1}^n \frac{L_i^j}{V_i^j} + \frac{L(1-k)_i}{(v_i - \rho_i)m}$$

其中: R_i^j 为步骤 a) 求出的值, L, k 为拥堵路段的参数。对 L/V , $V = V_0/(1 + \frac{\rho_i}{Q_i})$ 。

e) 对具有最大和最小队列时延上界的两条路径,调整各自的约束速率 ρ_i ,减少 $\rho_{i_{\max}}$ 增大 $\rho_{i_{\min}}$,但不超过各自的上限值,以减小路径间的时延差 $\max_{1 \leq k \leq m} (\frac{\varphi(t_0)_k}{v_k - \rho_k})$ 。

f) 反复执行步骤 e), 直至 $\max_{1 \leq k \leq m} (\frac{\varphi(t_0)_k}{v_k - \rho_k})$ 不能再减小为止。

4 仿真实验

采用具有 21 条路段转发的交通网络进行模拟,实验数据来源于文献[11],在中心地带的各个方向设置拥堵路段。由于路网具有多个可选路径,本文分别选取 3、5、8 条分流进行测试,不同分流类别下测试三种不同拥堵状态的流量分配,比较调整前后的时延变化。经仿真测试,使用分流后的道路平均时延普遍降低,在平衡道路车流量、化解拥堵的同时,提升了整体道路的通行能力。比较结果如图 3~6 所示。

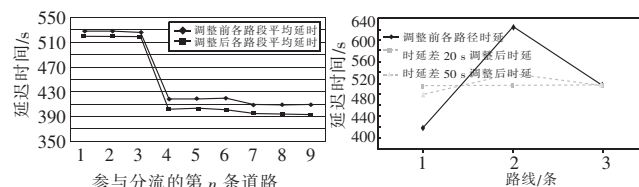


图 3 不同路径条数三种道路状态下平均时延比较

图 4 三条路线调整值比较

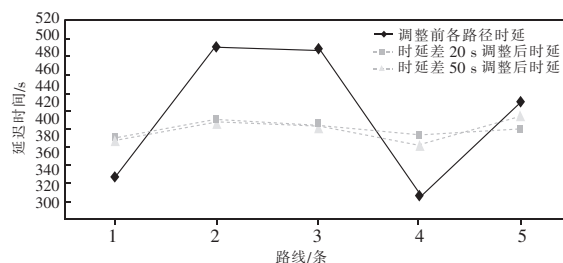


图 5 五条路线调整值比较

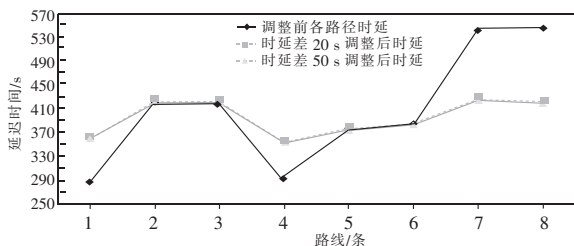


图 6 八条路线调整值比较

由图 4~6 可知,调整后的平均时延都朝着均衡的方向收敛,同时不难发现,参与分流的路径越多时(3、5、8 条),算法的收敛性越好,分流道路的平均延时越低。但对于多条分流路径,若道路行驶距离相差太大,各道路的时延差难以收敛到一个指定的值,会在一个值中停滞,但整体情况仍然处于较好的均衡状态。

5 结束语

本文针对交通网络中拥堵路段进行动态交通流分配,在一个周期时间内,完成拥堵路段高负荷流量的分流,同时平衡各分流路径的延时,以保证参与分流的车辆在一个有限时间内到达中心区域。首次提出应用无线网络中网络负载均衡理论,结合交通网络的传输特点,将动态交通流量分配拟化为网络负载均衡问题。使用网络演算理论分析道路的路径服务能力,将复杂的道路元素归并为统一的数学模型,推导出分流路径的时延上界,并得到满足有效时延约束的路径最大允许流入速率,提出时延—速率约束动态交通流量分配模型,给出精确的流量分配方案。仿真测试在不同分流路径数目、不同路网状态的时延情况下,调整后的时延均值普遍比调整前低,各分流路径的时延在本模型下都能较好地收敛到一个平衡值,拥堵路段能在具有一定数目的分流路径时达到最好的分流效果,而各分流路径都能在有限时间内到达中心区域。

参考文献:

[1] LIAN Ai-ping, GAO Zi-you. Research on combined dynamic traffic

assignment and signal control[J]. ACTA Automatica Sinica, 2005, 31(5): 727-736.

- [2] BARTHELEMY M. Betweenness centrality in large complex networks[J]. European Physical Journal B, 2004, 38(2): 163-168.
- [3] DOBSON I, CARRERAS B A, NEWMAN D E. A probabilistic loading-dependent model of cascading failure and possible implications for blackouts[C]//Proc of the 35th Hawaii International Conference on System Sciences. 2003: 1-8.
- [4] CRUCITTI P, LATORA V, MARCHIORI M. Model for cascading failures in complex networks[J]. Physical Review E, 2004, 69(4): 045104.
- [5] SI Bin-feng, ZHANG Hao-zhi, GAO Zi-you. Improved dial's algorithm for logit-based stochastic traffic network assignment problem[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(1): 78-83.
- [6] 李树彬, 吴建军, 高自友, 等. 基于复杂网络的交通拥堵与传播动力学分析[J]. 物理学报, 2011, 60(5): 140-148.
- [7] CHEN Zhi-gang, ZENG Feng, LI Qing-hua. Delay-constrained and jitter-optimized traffic allocation for multipath routing in wireless mesh networks[J]. Journal on Communications, 2011, 32(1): 1-8.
- [8] CRUZ R L. A calculus for network delay, part I and II[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1991, 37(1): 114-141.
- [9] MAO Shi-wen, PANWAR S S, HOU Y T. On minimizing end-to-end delay with optimal traffic partitioning[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2006, 55(2): 681-690.
- [10] CHANG Cheng-shang. Stability, queue length, and delay of deterministic and stochastic queueing networks[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1994, 39(5): 913-931.
- [11] WANG Tao, GAO Shu-ping, ZHANG Ling, et al. Overlap domain decomposition method for bioluminescence tomography (BLT) [J]. Communications in Numerical Method in Engineering, 2009, 26(5): 511-523.
- [12] 陈志刚, 曾锋, 李庆华. 无线 mesh 网中时延约束抖动优化的多路径流量分配算法[J]. 通信学报, 2011, 32(1): 1-8, 12.
- [13] 李庆华, 陈志刚, 赵明, 等. 基于网络演算的无线自组网端到端延迟上界研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(8): 2248-2251, 2284.