

# 考虑诱导一致性的交通流协同管理模型研究<sup>1</sup>

卢守峰<sup>1</sup>, 杨兆升<sup>1</sup>, 刘喜敏<sup>1</sup>

<sup>1</sup>吉林大学交通学院, 中国 长春 (130022)

**摘要:** 诱导信息生成与信号控制策略间有强烈的耦合关系, 研究两者的协同至关重要。本文首先总结了诱导信息生成方法, 从工程应用的角度出发, 强调诱导信息的生成必须满足诱导一致性。在此基础上, 提出了运行交通流诱导系统的逻辑流程, 建立了考虑诱导一致性的VMS诱导系统与线控系统协同模型和求解算法。

**关键词:** 智能交通系统, 诱导一致性, 交通流协同管理, 诱导信息生成

## 1. 引言

交通信号控制系统一直是交通工程师管理交通、提高路网使用效率的有力工具, 该系统是从时间上对冲突车流进行分离。交通流诱导系统的引入, 给交通管理方式带来了显著变化, 由原来的被动式管理发展为主动式管理, 该系统是从空间上对车流分布进行调整, 将交通流从拥挤区域诱导到不拥挤区域。利用信息技术研究交通运输问题是当前研究的热点<sup>[1]</sup>。目前, 可变诱导屏 (VMS, Variable Message Signs) 已成为城市的基本交通工程设施, 如北京、上海、长春, 因此基于可变诱导屏发布诱导信息已成为现实, 对诱导信息响应的驾驶员将改变路径选择, 因此改变了交通流量在路网中的分布。最常用的诱导信息是路线行程时间, 路线由路段和交叉口两部分组成, 车辆在交叉口的运行时间由信号控制策略决定, 因此在计算路线行程时间时, 一定要考虑控制系统的信号配时策略; 同时信号控制策略的生成基于到达交通量, 服从诱导的车辆改变路径选择后也就改变了到达交通量, 因此信号控制策略的生成要考虑诱导服从情况。两者之间具有强烈的耦合关系, 研究其协同至关重要。

## 2. 诱导信息生成方法

### 2.1 基于全信息动态交通分配模型的诱导信息生成方法

Wardrop 用户平衡 (User Equilibrium, UE) 原理自 20 世纪 50 年代提出以来一直是交通分配所依据的重要原则, 其定义为<sup>[2]</sup>: 在平衡点, 连接每个 O-D 对子的所有被使用的路径有相同的阻抗, 且小于或等于任何未被使用的路径阻抗。交通分配模型 (Traffic Assignment, TA) 经历了由静态模型阶段到动态模型阶段, 动态交通分配模型 (Dynamic Traffic Assignment, DTA) 与静态交通分配模型 (Static Traffic Assignment, STA) 的区别在于, 模型中的变量都是时间的函数, 具有时变性。这两类模型建模时都假设出行者在出行前能够获得完美的交通信息, 驾驶员只在起点进行路径选择, 沿着这条路径驶向终点, 中途不改变路径, 即全信息模型。全信息动态交通分配模型是按照 Wardrop 用户平衡原理计算出最优分配交通流量, 其

<sup>1</sup>资助项目: 国家自然科学基金项目 (60474068), 吉林大学研究生创新中心资助项目 (404036)

局限性在于没有考虑人的因素，也就是没有考虑驾驶员对诱导信息的响应行为，这类模型假设驾驶员完全服从诱导信息，因此是理想情况。如 VM Tom, M Nashikkar<sup>[3]</sup>所做的组合交通分配与信号设计。

## 2.2 面向交通事故或紧急事件的诱导信息生成方法

大多情况下，城市路网由快速路、主干道、次干道、支路组成，道路基础设施在它的整个生命周期内，除了建设费用外还有运营维护费用，对于一些次干道或支路，当交通需求很小时，交通管理部门投入的运营维护费用相对来说很小。随着车流量的增加和智能交通系统（ITS, Intelligent Transportation Systems）的出现，次干道或支路的利用率逐渐增加。因此，就需要权衡维护替换路径所花的费用与带来的效益。魏恒<sup>[4]</sup>从面向工程应用的角度，对交通流诱导系统实施后，替换路径能够减少交通拥挤的程度进行了定量分析。这种方法主要针对主路发生交通事故或紧急事件时，主路通行能力显著下降，这时利用诱导系统将主路交通流诱导到替换路径。

## 2.3 基于交通状态识别的诱导信息生成方法

该方法的核心是建立交通状态识别算法，实时检测当前交通状态，并按照一定的指标将交通状态分为堵塞、拥挤、畅通等，以文本或图形方式发布到交通诱导屏。这类方法的局限性在于不能保证驾驶员实际经历状态与诱导信息显示状态相一致，属于开环控制，如上海高架路诱导系统<sup>[5]</sup>。

## 2.4 考虑诱导一致性的诱导信息生成方法

交通流诱导系统为驾驶员提供的是建议性信息，与交通信号控制相比属于软控制，诱导系统的性能高度依赖驾驶员对诱导信息的响应，因此对交通流诱导系统的建模必须考虑人的因素。诱导信息的可靠性是增加驾驶员响应诱导系统的关键因素，这就涉及一致性的概念，Jon Alan Bottom<sup>[6]</sup>对考虑诱导一致性的路径诱导生成模型和算法进行了系统研究，通过模拟分析了MSA算法、Polyak算法的效率，以及交通模拟模型产生随机性的原因。一致性要求驾驶员实际经历状态与诱导信息显示状态相一致，举个例子来说，一个OD（Origin-Destination）对间有两条可选路线，当前时刻  $a$  路径交通状态相对  $b$  路径来说更拥挤，诱导信息根据当前交通状态显示选择路径  $b$ ，对该诱导信息响应的驾驶员将选择路径  $b$ ，路径  $b$  的流率增加必然导致该路径的行程时间增加，使得路径  $b$  的交通状态比路径  $a$  更拥挤，因此选择路径  $b$  的驾驶员实际经历的状态与诱导信息显示的状态不一致，也就是说诱导信息变成了误导信息，产生了拥挤转移现象。

为避免拥挤转移现象产生，就要预测出驾驶员对诱导信息响应的流率增加量。这涉及到人对信息的响应行为，也就是涉及人的因素，这是 ITS 环境下研究交通管理系统与传统的交通管理系统的显著区别。文献[6]给出了一个路径选择模型

$$P_i = \frac{e^{\beta r_i c_i / c^*}}{\sum_{j \in F} e^{\beta r_j c_j / c^*}}, \text{ 其中 } P_i \text{ 是从可}$$

选路径集  $F$  中选择路径  $i$  的概率;  $\beta$  是效用函数比例系数;  $\gamma_j$  是路径转换惩罚因子, 如果  $j=i$ ,  $\gamma_j=1$ , 如果  $j \neq i$ ,  $\gamma_j > 1$ 。  $c_j$  是路径  $j$  的行程时间;  $c^*$  是路径集中的最短路径, 同时该文也指出还没有形成成熟的模型。人因工程学<sup>[7]</sup> (Human Factors Engineering) 是专门处理人、机、环境相互作用的学科, 旨在使人机系统发挥最大功效。在交通流诱导系统中, 影响驾驶员诱导信息响应行为的因素有人的出行特性、诱导信息的有效性、人机的信息界面。对人机系统效能而言, 信息性界面最为重要<sup>[8]</sup>, 美国运输部对交通管理中心设计中人的因素进行了研究, 并形成了指南<sup>[9]</sup>; 文献[10]以上海高架路 VMS 诱导信息系统为例, 研究了图形式 VMS 的设计。文献[11]对停车诱导信息的发布进行了设计。为了获得一个准确的驾驶员信息响应模型, 应以人因工程学为理论, 采用人因工程学中的研究方法<sup>[8]</sup> (观察法、实测法、实验法、模拟和模型试验法、计算机数值仿真法、分析法、调查研究法), 根据具体路网出行者的出行特性进行研究。

### 3. 考虑诱导一致性的 VMS 诱导系统与线控系统协同模型

信号灯线控协调后对车流的连续性有很大改善, 因此已广泛应用于交通工程实践中。从本文第 2 部分分析可以看出, 为实现 VMS 诱导系统功效, 一定要考虑两个基本问题: (1) 诱导一致性; (2) 驾驶员信息响应行为。本文建立的协同模型就是基于这两点, 研究线控路网中如何发布诱导信息使得交通流量分布趋于平衡, 其本质上是满足诱导一致性原则, 寻找使总延误最小的最优信号配时方案。

大多数出行者都具有选择主干道的出行惯性, 只有当选择次干道节省的行程时间超过某一阈值  $\delta$  时, 才会改变路径选择。因此首先考虑的是从信号配时上减少主干道行程时间, 如果交通需求超出信号配时调节的范围, 则考虑使用诱导信息。逻辑流程图如图 1 所示。

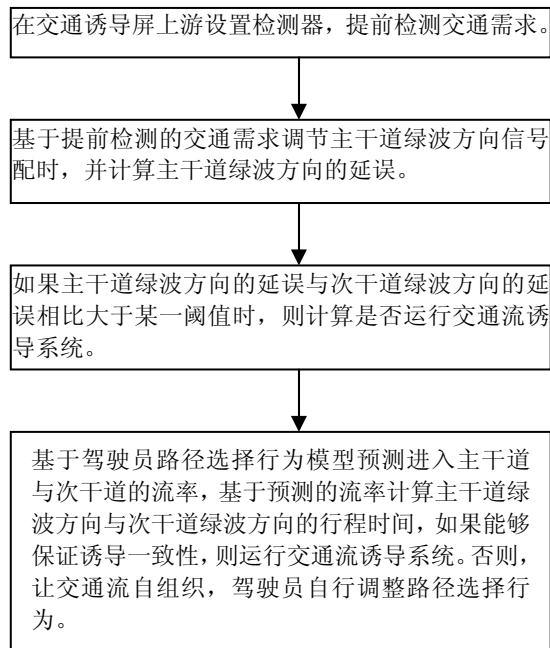


图 1 运行交通流诱导系统的逻辑流程图

本文以 OD 对间有两条可选路径的情况进行建模，路网示意图如图 2 所示，路径  $a$  为主干道，路径  $b$  为次干道， $a$  路径有三个信号控制交叉口， $b$  路径有两个信号控制交叉口。1 号检测器用于提前检测交通需求，设诱导信息为路径  $b$  时，路径  $b$  流率为  $\beta q$ ，记流率为  $\beta q$  时路线  $b$  的行程时间为  $T_b(\beta q)$ ；路径  $a$  流率为  $(1-\beta)q$ ，记流率为  $(1-\beta)q$  时路线  $a$  的行程时间为  $T_a[(1-\beta)q]$ ，通过调整路线  $a$  和路线  $b$  的信号配时，寻找使各交叉口总延误最小且满足  $T_b(\beta q) \leq T_a[(1-\beta)q]$  的最优信号配时方案。

构建协同模型的目标函数是各交叉口总延误最小，约束条件是路口  $b$  的行程时间小于等于路径  $a$  的行程时间，路径  $a$  和路口  $b$  的绿波带宽度分别取值在各自的最大最小绿波带之间。模型的数学描述如下：

目标函数

$$\text{Min}(D_a + D_b + D'_a + D'_b) \quad (1)$$

约束条件：

$$\begin{cases} T_b \leq T_a & (2) \\ g_{a小} \leq g_a \leq g_{a大} & (3) \\ g_{b小} \leq g_b \leq g_{b大} & (4) \end{cases}$$

进入各条路径的流率由路径选择行为模型确定，本文考虑的是两条可选路径，因此进入各条路径的流率是总流率的某个百分比。需要求解的变量是主干道与次干道的绿波带宽度，如果该模型有解，表明发布诱导信息后能够保证诱导一致性，则运行 VMS 诱导系统；否则，不运行 VMS 诱导系统。

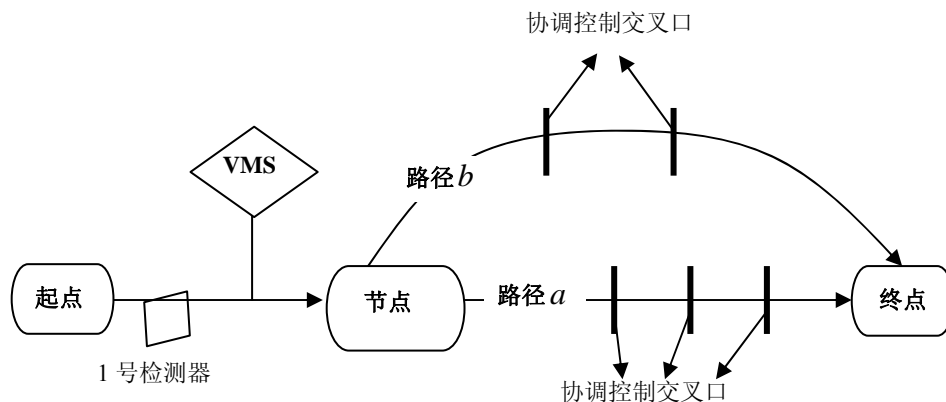


图 2 实施 VMS 诱导系统的路网拓扑关系

(1) 目标函数中延误的计算

$D_a$ ， $D_b$  分别表示路径  $a$  绿波方向与路径  $b$  绿波方向的延误。车辆在线控协调交叉口的阻滞包括三部分<sup>[12]</sup>，恒定阻滞、随机阻滞、过饱和阻滞。恒定阻滞是指车辆到达率小于通行能力的情况下，车辆通过交叉口受到的阻滞。车辆到达率不是一个常数，而是一个确定的函数式，根据上游交叉口放行车辆驶出率图式进行推算，同时要考虑车辆在行驶过程中的高

散影响，本文采用被广泛应用的基于几何分布假定建立的车流离散公式：

$q_d(i+t) = Fq_0(i) + (1-F)q_d(i+t-1)$  式中  $q_d(i+t)$  为第  $(i+t)$  个时段，下游某断面上预计的车辆到达率 (pcu/h)； $q_0(i)$  为第  $i$  时段上游停车线断面的车辆通过率 (pcu/h)； $t$  为上述两个断面之间，车辆平均自由流行驶时间的 0.8 倍； $F$  表示车流在运动过程中离散程度大小的一个系数，称作车流离散系数， $F = \frac{1}{1+0.35t}$ 。

根据车辆到达离去曲线，可推导出恒定延误<sup>[13]</sup>：绿灯期间内排队车辆能完全消散，即  $3600 \frac{N}{S} \leq g_e$ ，则  $D_1 = \sum_{i=1}^n N_i \Delta t - (n\Delta t - \frac{1800N}{S} - r)N$ ，式中  $D_1$  为相位总的均匀到达延误

$$(秒)，N_i 为第 i 时段累积车辆到达数 (pcu/h)，\begin{cases} N_i = N_{i-1} + q_d(i) & i = 2,3,\dots \\ N_1 = q_d(1) \end{cases}$$

$\Delta t$  为流量数据的统计间隔时间 (秒)， $N$  为一个周期累计车辆到达数 (pcu/h)， $S$  为饱和流率 (pcu/h)， $n$  为车队释放完毕统计间隔数， $n = \text{int}(\frac{3600N/S+r}{\Delta t})$ ， $r$  为红灯时长 (秒)。

随机与过饱和延误  $D_2$  采用下面的公式<sup>[12]</sup>计算

$$D_2 = \frac{N_0 x}{q}, N_0 = \begin{cases} \frac{QT}{4} [(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{6(x-x_0)}{QT}}] & x > x_0 \\ 0 & x \leq x_0 \end{cases} \quad x > x_0, \quad x_0 = 0.67 + \frac{S \cdot g}{600}, \quad x \text{ 为饱和度}$$

$D'_a, D'_b$  分别表示与路径  $a$  和路口  $b$  相交的道路上的延误之和，每一相位的延误利用过渡函数曲线计算，公式为  $D = D_u + D_0$

$$N_0 = \begin{cases} \frac{Qt}{4} (Z + \sqrt{Z^2 + \frac{12(x-x_0)}{QT}}) & x > x_0 \\ 0 & x \leq x_0 \end{cases} \quad x > x_0, \quad D_0 = N_0 \cdot x$$

$$D_u = \begin{cases} \frac{qC(1-u)^2}{2(1-y)} & x < 1 \\ \frac{qr}{2} & x \geq 1 \end{cases}$$

### (2) 约束条件中最大最小绿波带宽度计算

①在负荷最高的关键交叉口计算出最佳周期长度。

②共同的周期长度确定之后，便可安排各相位的绿信比。首先，根据关键交叉口的各进口通道负荷大小，即各进口  $y$  值与总的  $Y$  值比例大小，计算出每一相位应该分配的有效绿灯时间。然后，根据信号阶段的划分情况和绿灯损失时间，再求出各信号阶段的实际绿灯时间。

③关键交叉口沿绿波方向所必需的绿灯长度是最低限绿灯长度，公式为

$B = g_1 = \frac{y_1}{Y}(C-L)$ 。对于次要交叉口，沿绿波方向的最低限绿灯长度  $g_{j1} = B$ ，最高限绿灯长度  $g_{大}$  的确定，只需把支路（与绿波方向相交的道路）上所需要的最低限度绿灯长度值

扣除掉，扣除绿灯间隔时间，余下的都分给主路方向。沿主路方向“最大限度绿灯长度”

$G_{\text{大}} = C - \sum_1^N G_{\text{支小}} - \sum l$ ，式中  $G_{\text{大}}$  为某次要路口沿主路方向最大限度绿灯长度； $C$  为信号

周期长度； $n$  为该交叉口支路（即与绿波控制路线相交的道路）上车辆方向所安排的信号阶段数，即总信号阶段数减去放行主路车辆安排的信号阶段数； $G_{\text{支小}}$  为每一个支路专用信号阶段的最低限绿灯长度； $\sum l$  为全部信号阶段的绿灯间隔时间总和。

#### 4. 模型求解方法

本文第 3 部分构建的协同模型中目标函数是主干道与次干道的总延误，是各条路径流率和绿灯时间的函数。流率由路径选择行为模型确定，绿波带宽度是待求的变量。

该模型是含有约束的非线性规划，采用惩罚函数法<sup>[14]</sup>将该模型转换为无约束的非线性规划。其思想是利用问题中的约束函数作适当的惩罚函数，由此构造出带参数的辅助目标函数，把问题转换为求解一系列无约束非线性规划问题，一般地对如下非线性规划问题：

$$\begin{aligned} \min & f(x) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} h_j(x) = 0 (j = 1, 2, \dots, m) \\ g_i(x) \leq 0 (i = 1, 2, \dots, l) \end{cases} \end{aligned}$$

构造惩罚函数

$$\alpha(x) = \sum_{i=1}^m \max\{0, g_i(x)\}^p + \sum_{j=1}^l |h_j(x)|^p$$

，则原规划问题转换为无约束非线性规划问题

$$\min_{x \in E^n} f(x) + \mu \alpha(x)$$

， $\mu$  为罚参数。

由于遗传算法具有全局优化的优点，因此采用遗传算法对转换后的非线性规划进行求解。

以上提出了考虑诱导一致性的 VMS 诱导系统与线控系统协同模型及求解算法，该模型的效果分析需要通过计算机模拟的方法进行研究，限于篇幅关系将在其他文章中介绍。

#### 5. 总结

诱导一致性是保证驾驶员继续使用诱导系统的必要条件，反之，如果诱导信息不能保证诱导一致性，那么驾驶员实际经历状态与诱导信息显示状态不一致，驾驶员对诱导系统的信赖度将逐渐降低，使用率逐渐降低，诱导系统也就失去了意义，诱导系统的性能很大程度上取决于驾驶员的信息响应行为。本文总结了诱导信息生成的方法，提出了运行诱导系统的逻辑流程，建立了考虑诱导一致性的 VMS 诱导系统与线控系统协同模型及求解算法。

#### 参考文献

- [1] 李文顺, 刘伟. 信息技术的应用与运输关系的研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2005, 29(5): 807-809
- [2] 黄海军. 城市交通网络平衡分析理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994. 15~16
- [3] VM Tom. Combined traffic assignment and signal control[A]. In: Proceedings of the international conference on Transportation systems planning and operation[C]. Chennai: 2004. 631~640.
- [4] 魏恒. 最大化道路运输系统效率问题研究[R]. 吉林大学交通学院学术报告, 2005 年 9 月 5 日.
- [5] 冯奇, 杜豫川, 孙立军等. 上海市延安路高架道路监控系统运行效果评价[J]. 中国市政工程, 2004,

- 112(6): 56-61
- [6] Jon Alan Bottom. Consistent Anticipatory Route Guidance: [D]. Massachusetts : Massachusetts Institute of Technology, September 2000
- [7] 郭伏, 杨学涵. 人因工程学[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2005: 1-2
- [8] 丁玉兰. 人因工程学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004: 122-138
- [9] Turner Fairbank Highway Research Center. Preliminary Human Factors Guidelines for Traffic Management Centers[R]. FHWA-JPO-99-042
- [10] 干宏程, 孙立军. 一种新的可变信息标志技术的设计和应用. 交通与计算机, 2004, 22(6): 93-96
- [11] 齐功远, 彭国雄, 杨晓光. 停车诱导信息的发布[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2005, 29(4): 514-517
- [12] 全永燊. 城市交通控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 1989: 75-78
- [13] 栗红强. 城市交通控制信号配时参数优化方法研究: [D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2004: 92-96
- [14] 李军, 徐玖平. 运筹学—非线性系统优化[M]. 北京: 科学出版社, 2003

## The Study on Consistent and Integrated Traffic Management Model

ShouFeng LU ZhaoSheng YANG XiMin LIU  
Traffic College, JiLin University, ChangChun, PRC, 130022

### Abstract

*Guidance Information Generation and Signal Control Strategy has the coupling relationship, the study of Integration is important. The paper summarizes the methods of guidance information generation. From the viewpoint of engineering application, the paper stresses the significance of Guidance Consistency. Lastly, the paper puts forward the logistic step of implementing VMS traffic flow guidance system, and the integrated model of guidance information generation and its solution algorithm, this model has considered Guidance Consistency.*

**Keywords:** *Intelligent Transportation Systems, Guidance Consistency, Integrated Traffic Flow Management, Guidance Information Generation*

卢守峰: 男。1978 年生。博士研究生。主要研究方向是智能交通系统, 交通流协同管理。曾获国家科技进步二等奖(排名第五)、吉林省科技进步一等奖(排名十二), 参与国家科技攻关项目“车载信息装置开发”、国家自然科学基金项目(60474068)等研究, 主持吉林大学研究生创新中心资助项目(404036)。