

协调控制子区快速动态划分方法研究

卢凯^{1,2} 徐建闽^{1,2} 郑淑鉴¹ 王世明¹

摘要 通过建立基于交叉口关联度的协调控制子区划分模型,设计最佳控制子区划分方案获取流程,实现了交通信号控制子区的动态划分;针对最佳控制子区划分方案求解过程中可能面临的维数灾难问题,提出利用降维处理与遗传算法两种方法进行子区划分方案的快速寻优,并给出了一套协调控制子区快速动态划分流程.通过算例分析说明,在一定规模路网之下本文提出的控制子区快速动态划分方法将以一个较大概率搜索到次优子区划分方案,且因其计算时间可以被有效控制,因此完全能够满足控制子区划分的实时性要求,可推广应用于城市区域交通信号实时控制系统中.

关键词 交通信号控制,控制子区,快速划分,降维处理,遗传算法

DOI 10.3724/SP.J.1004.2012.00279

Research on Fast Dynamic Division Method of Coordinated Control Subarea

LU Kai^{1,2} XU Jian-Min^{1,2} ZHENG Shu-Jian¹ WANG Shi-Ming¹

Abstract In this paper, dynamic division of coordinated control subarea is realized by establishing the division model of control subarea with correlation degree theory and designing the process of searching for optimal subarea division scheme. Aiming at the problem of dimension disaster probably existing in searching for optimal subarea division scheme, we present dimension-reduced processing and genetic algorithm to realize the fast optimization of subarea division. A fast dynamic division process of coordinated control subarea is proposed in detail. The example demonstrates that the fast dynamic division method of control subarea can search a sub-optimal solution with high probability under a certain scale network, and finish the optimization process in designated time. Therefore, this fast dynamic division method can satisfy the real-time request of control subarea division effectively, and can be applied to the real-time urban traffic signal control system.

Key words Traffic signal control, control subarea, fast division, dimension-reduced processing, genetic algorithm (GA)

交通信号控制子区是城市交通信号控制系统中的协调控制功能单元,其划分方式将直接决定区域信号协调控制策略的选取与控制效果的优劣.交通控制子区划分应根据控制区域内信号交叉口与相连路段的空间几何特征和动态交通流特性,运用关联性分析方法、最优化理论以及计算机技术,将整个控制区域合理划分为若干个控制子区,通过子区内与子区间的协调控制设计实现区域信号最佳协调控制效果.与此同时,随着路网交通状况的实时变化,控制区域内的子区划分方式与协调控制策略需要作出相应调整,以适应路网交通流量的快速变化.因此,

实现交通信号控制子区的快速动态划分是进行区域交通信号自适应协调控制的基本前提.

国外学者 Walinchus^[1] 最先提出交通控制子区的概念,并认为应将控制子区分界线划在流量特性或道路特性发生显著变化的地段以及行政边界之上; Yagoda 等^[2] 提出当相邻交叉口之间的耦合度大于 0.5 时,应对其进行信号协调控制; Pinnell 等^[3] 认为当相邻交叉口间距小于 610 米时,应对其实施信号协调控制; 美国联邦公路局 (Federal Highway Administration, FHWA)^[4] 建议当主干道相邻交叉口间距小于 800 米时,应将其划在同一子区进行协调控制; Chang^[5] 综合考虑路段交通流状态与车队行驶离散性影响,给出了相邻交叉口关联指数的计算表达式,并设定相邻交叉口分离合并的关联指数阈值为 0.35,通过对关联指数的分析比较,实现了相邻交叉口的自动分合; Lin 等^[6-7] 提出了交通控制子区划分的量化指标与方法体系,研究了基于搜索算法的控制子区划分技术,通过建立基于行驶车队完整率与起始车队车辆数的相邻交叉口协调控制间距模型,实现了不同交通需求下的相邻交叉口动态分离与合并; Trafficware Inc.^[8] 研制的信号配时设计软件包 Synchro 5.0 则可以根据交叉口间距、路段行驶时间以及交通流量等参数,利用经验计算

收稿日期 2011-03-20 录用日期 2011-07-30
Manuscript received March 20, 2011; accepted July 30, 2011
国家自然科学基金 (50878088), 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2011ZM0117), 教育部博士点基金项目 (200805610005) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (50878088), Fundamental Research Funds for the Central Universities (2011ZM0117), and Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (200805610005)

本文责任编辑 席裕庚
Recommended by Associate Editor XI Yu-Geng
1. 华南理工大学土木与交通学院 广州 510640 2. 华南理工大学自主系统与网络控制教育部重点实验室 广州 510640
1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640 2. Key Laboratory of Autonomous System and Networked Control (Ministry of Education), South China University of Technology, Guangzhou 510640

公式求取相邻交叉口之间的协调因子, 并建议设计者当协调因子数值大于 80 时相邻交叉口之间必须进行信号协调控制以免发生拥堵, 而当协调因子数值小于 20 时相邻交叉口之间则无需进行信号协调控制. 而对于几种得到国际普遍认可且在我国已有较广应用的城市交通信号控制系统, TRANSYT 与 SCOOT 系统均采用静态分区控制策略, 需要设计者根据控制区域的历史流量数据、路网道路特性、地理位置关系以及协调控制需求, 事先将控制子区划分方案完全固定下来, 而不能根据交通状态与路网特性的变化动态划分控制子区; SCATS 系统则采用半动态分区控制策略, 需要设计者根据控制区域的历史流量数据、路网道路特性、地理位置关系以及协调控制需求, 事先确定最小控制子区单元以作为组成区域协调控制系统的基本单元, 并根据控制子区间信号周期的差异性大小, 利用投票计数法实现最小控制子区间的动态分离与合并.

国内学者莫汉康等^[9] 针对交通诱导条件下的控制子区自动划分问题, 利用诱导系统提供的共享数据, 结合周期原则、流量原则与距离原则, 详细设计了周期子区与流量子区的自动划分过程, 实现了诱导条件下的控制子区自动划分; 杨庆芳等^[10] 提出了周期子区和相位差/绿信比子区的概念, 通过对比子区间的信号周期实现周期子区动态分合, 利用车流流向原则与相位差调整量最小原则进行相位差/绿信比子区动态调整, 给出了一种基于周期子区与相位差/绿信比子区的控制子区动态划分方法; 李瑞敏等^[11] 综合考虑交叉口间距、交通流离散性、主干道交通流量、主干道交通构成以及信号周期等因素对交叉口间协调控制需求大小的影响, 运用模糊控制理论确定了协调系数的模糊推理方法, 提出了一种基于协调系数的控制子区模糊动态划分方法; 段后利等^[12] 建立了基于可协调度的城市路网超图划分模型, 并采用超图划分算法 HMETIS 实现了交通控制子区的动态划分, 能为解决大规模城市路网的控制子区快速动态划分问题所借鉴; 马万经等^[13] 建立了综合考虑交叉口信号相位、路径流量不均匀性、交叉口间距与交叉口排队的路径关联度模型, 并分析了交叉口间距、排队车辆数以及信号相位设置对交叉口路径关联度的影响; 马莹莹等^[14] 利用谱方法以相邻交叉口的关联性作为划分依据, 提出了平分法、按均值划分以及按距离划分等三种控制子区划分方法; 高自友等^[15] 则提出根据路网节点之间不同强度的相互作用, 可将城市交通路网抽象成为一个复杂加权网络, 通过综合利用道路交通流状态、网络交通模型与复杂网络理论以展开对路网分区协调控制理论的深入研究.

然而, 现有控制子区划分方法多仅以相邻交叉

口之间的关联性大小作为子区划分依据, 尚未考虑多交叉口之间总关联性大小对于控制子区划分的作用影响; 未将影响控制子区划分的各种因素进行有效综合, 未能制定出系统明晰的控制子区划分准则与评价体系; 对于控制子区动态划分的实时性需求考虑不够, 在处理城市复杂路网时可能难以得到预期效果.

因此本文将通过建立基于关联度分析的协调控制子区划分模型与划分流程, 设计一套能快速动态划分交通控制子区的智能优化方法, 以满足城市交通区域信号协调控制的实时性要求.

1 协调控制子区划分模型

对于一个由 n 个信号交叉口 $I_1, I_2, \dots, I_{n-1}, I_n$ 与 m 条相连路段 $R_1, R_2, \dots, R_{m-1}, R_m$ 组成的连通性控制区域, 综合控制子区划分方案的解集空间、约束条件与评价指标, 可以建立相应的协调控制子区划分模型^[16], 如下式所示.

$$\left\{ \begin{array}{l} I_x, I_y \in \{I_1, I_2, \dots, I_n\} \\ R_{(I_x, I_y)} \in \{R_1, R_2, \dots, R_m\} \\ R_{(I_x, I_y)} = 0 \mid_{D_{(I_x, I_y)} \leq D_{\text{TNS}}} \\ R_{(I_x, I_y)} = 1 \mid_{D_{(I_x, I_y)} \geq D_{\text{TNC}}} \\ D_{A_i} > D_{\text{TMS}} \\ N_{\text{TS}} = F_{\text{NS}}(R_1 R_2 \cdots R_m) \\ D_{\text{TA}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{TS}}} D_{A_i} \\ PI = -N_{\text{TS}}^{K_P} + D_{\text{TA}} \\ \max \{PI\} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中, $R_{(I_x, I_y)} = 0$ 表示交叉口 I_x 与交叉口 I_y 之间的相连路段取为非关联, $R_{(I_x, I_y)} = 1$ 表示交叉口 I_x 与交叉口 I_y 之间的相连路段取为关联, $D_{(I_x, I_y)}$ 为交叉口 I_x 与交叉口 I_y 之间的关联度大小, D_{TNS} 为相邻交叉口分离阈值, D_{TNC} 为相邻交叉口合并阈值, D_{TMS} 为多交叉口分离阈值, D_{A_i} 为第 i 个控制子区所含交叉口集合 A_i 的组合关联度大小, N_{TS} 为控制子区划分方案的子区总数, F_{NS} 为子区总数的计算函数, D_{TA} 为所有控制子区多交叉口组合关联度 D_{A_i} 之和, PI 为子区划分方案评价指标, K_P 为控制子区数量权重系数, $R_1 R_2 \cdots R_m$ 为子区划分方案所对应的二进制字符串, 即模型的优化变量.

相邻交叉口关联度^[16] 是一个对相邻交叉口之间关联性进行定量化描述的交通参量, 其综合反映了相邻交叉口之间的路段交通运行状况与信号控制需求差异对相邻交叉口关联性的客观影响. 对于从上游交叉口 I_x 到下游交叉口 I_y 方向, 交叉口 I_x 与

交叉口 I_x 之间的关联度 $D_{(I_x \rightarrow I_y)}$ 可按式(2)进行计算。

$$D_{(I_x \rightarrow I_y)} = D_{S(I_x \rightarrow I_y)} + D_{C(I_x, I_y)} = \frac{(N_{E(I_x \rightarrow I_y)} + N_{A(I_x \rightarrow I_y)}) \times L_V}{N_{L(I_x \rightarrow I_y)} \times L_{L(I_x \rightarrow I_y)}} \times K_{L_{L(I_x \rightarrow I_y)}} \times K_N - \min \left\{ \frac{C_{MAX}}{C_{MIN}}, \text{int} \left(\frac{C_{MAX}}{C_{MIN}} \right) - 1, \frac{\text{int} \left(\frac{C_{MAX}}{C_{MIN}} + 1 \right) \times C_{MIN}}{C_{MAX}} - 1 \right\} \times K_C \quad (2)$$

式中, $D_{S(I_x \rightarrow I_y)}$ 为 $I_x \rightarrow I_y$ 方向的路段交通量关联度; $D_{C(I_x, I_y)}$ 为交叉口 I_x 与交叉口 I_y 之间的周期关联度; $N_{E(I_x \rightarrow I_y)}$ 为 $I_x \rightarrow I_y$ 方向路段上存在的关联车流车辆数; $N_{A(I_x \rightarrow I_y)}$ 为 $I_x \rightarrow I_y$ 方向路段上下一个信号周期内可能出现的最大关联车流车辆增量; L_V 为平均车辆长度; $N_{L(I_x \rightarrow I_y)}$ 为 $I_x \rightarrow I_y$ 方向路段上的关联车流占用车道数; $L_{L(I_x \rightarrow I_y)}$ 为 $I_x \rightarrow I_y$ 方向路段车道总长度; $K_{L_{L(I_x \rightarrow I_y)}}$ 为 $I_x \rightarrow I_y$ 方向路段车道总长度所对应的路段交通量关联补偿系数; K_N 为比例放大系数, 经验取值为 2; C_{MAX} , C_{MIN} 分别为交叉口 I_x 和交叉口 I_y 的独立设计信号周期中的最大与最小值; K_C 为交叉口信号周期关联权重系数, 经验取值为 0.5。

对于相邻交叉口 I_x 与交叉口 I_y 之间的关联度 $D_{(I_x, I_y)}$, 定义为相邻交叉口 I_x 与交叉口 I_y 之间的双向组合关联度 $D_{(I_x \leftrightarrow I_y)}$, 即 $D_{(I_x \rightarrow I_y)}$ 与 $D_{(I_y \rightarrow I_x)}$ 之中取大, 如下式所示。

$$D_{(I_x, I_y)} = D_{(I_x \leftrightarrow I_y)} = \max \{ D_{(I_x \rightarrow I_y)}, D_{(I_y \rightarrow I_x)} \} = \max \{ D_{S(I_x \rightarrow I_y)}, D_{S(I_y \rightarrow I_x)} \} + D_{C(I_x, I_y)} = D_{S(I_x, I_y)} + D_{C(I_x, I_y)} \quad (3)$$

式中, $D_{S(I_x, I_y)}$ 为交叉口 I_x 与交叉口 I_y 之间的路段交通量关联度。

多交叉口组合关联度^[16] 是一个对一组关联交叉口之间总关联性进行定量化描述的交通参数, 其综合反映了多个相连交叉口之间的路段交通运行状况与信号控制需求差异对多交叉口总关联性的客观影响。对于一组关联交叉口 I_1, \dots, I_z 与之间的组合关联度 $D_{(I_1, \dots, I_z)}$ 可按式(4)进行定义计算。

$$D_{(I_1, \dots, I_z)} = D_{S(I_1, \dots, I_z)} + D_{C(I_1, \dots, I_z)} = \prod_{k=1}^m F(D_{S_k}) + \min \{ D_{C(I_x, I_y)} \mid I_x, I_y \in \{I_1, \dots, I_z\} \} \quad (4)$$

式中, $D_{S(I_1, \dots, I_z)}$ 为关联交叉口 I_1, \dots, I_z 之间总的路段交通量关联度; $D_{C(I_1, \dots, I_z)}$ 为关联交叉口 I_1, \dots, I_z 之间总的交叉口周期关联度; m 为关联交叉口对数; D_{S_k} 为第 k 对关联交叉口之间的路段交通量关联度, 由式(5)确定; $F(D_{S_k})$ 为路段交通量关联度组合函数, 可取 $F(D_{S_k}) = (\min \{ D_{S_k}, \text{sgn}(D_{S_k}) \})^{\frac{1}{k}}$ 。

$$\{ D_{S_1}, D_{S_2}, \dots, D_{S_m} \} = \text{sort} \{ D_{S(I_1, I_2)}, \dots, D_{S(I_{z-1}, I_z)} \} \quad (5)$$

式中, sort 为升序排序函数, 表示将 m 对关联交叉口之间的路段交通量关联度按从小到大的顺序重新排列, 再依次赋给 $D_{S_1}, D_{S_2}, \dots, D_{S_m}$ 。

在模型(1)中, 要求任意一种合理的控制子区划分方案均需满足约束条件: 1) 当相邻交叉口 I_x 与交叉口 I_y 之间的关联度 $D_{(I_x, I_y)}$ 小于等于相邻交叉口分离阈值 D_{TNS} 时, 交叉口 I_x 与交叉口 I_y 将无条件分离在不同控制子区; 2) 当相邻交叉口 I_x 与交叉口 I_y 之间的关联度 $D_{(I_x, I_y)}$ 大于等于相邻交叉口合并阈值 D_{TNC} 时, 交叉口 I_x 与交叉口 I_y 将无条件合并在同一控制子区; 3) 控制子区组合关联度 D_A 应大于多交叉口分离阈值 D_{TMS} 。

模型(1)对于子区划分方案优劣的评价原则取为: 1) 在满足子区划分约束条件的情况下, 控制子区的划分以子区总数 N_{TS} 少为优; 2) 在控制子区总数相等的情况下, 控制子区的划分以区域总关联度 D_{TA} 大为优。因此, 可定义子区划分方案评价指标 PI 的计算公式为 $PI = -N_{TS}^{K_P} + D_{TA}$ ($K_P \geq 1$)。

根据协调控制子区划分模型(1), 可以设计相应的控制子区划分流程如图1所示。该流程将遍历所有控制子区划分方案, 通过对各个子区划分方案进行可行性分析与优劣评判, 从中得到一种最优的子区划分方案^[17]。

图1中, 分区子关联矩阵是一个描述子区划分方案的特征参数, 将综合反映各种子区划分方案下两两交叉口之间的关联性大小; 基本约束条件特指关联度小于等于分离阈值 D_{TNS} 的相邻交叉口必须无条件分离在不同控制子区, 关联度大于等于合并阈值 D_{TNC} 的相邻交叉口必须无条件合并在同一控制子区; A 表示子区所含交叉口集合, 其下标表示子区序号, 上标表示子区扩散层序号, A_S 表示子区可选交叉口集合, 例如 A_1 为第1个子区所含交叉口集合, A_1^0 为第1个子区的第0层(初始扩散层)以内

所含交叉口集合, A_{S1} 则为第 1 个子区的可选交叉口集合; $D_{A_1^0}$ 为第 1 个子区的初始关联度, 是单交叉口控制子区的子区组合关联度取值, 其大小应取为一正纯小数; ΔA 表示子区所含交叉口集合增量, 其中 ΔA_1^0 又为第 1 个子区的第 0 层所含交叉口集合; 在此不失一般性地选取交叉口 I_1 作为第 1 个子区的初选起始交叉口; 子区划分层扩散算法是一种对子区划分方案进行分析评价的计算方法, 可以推算出子区划分方案的相关评价指标。

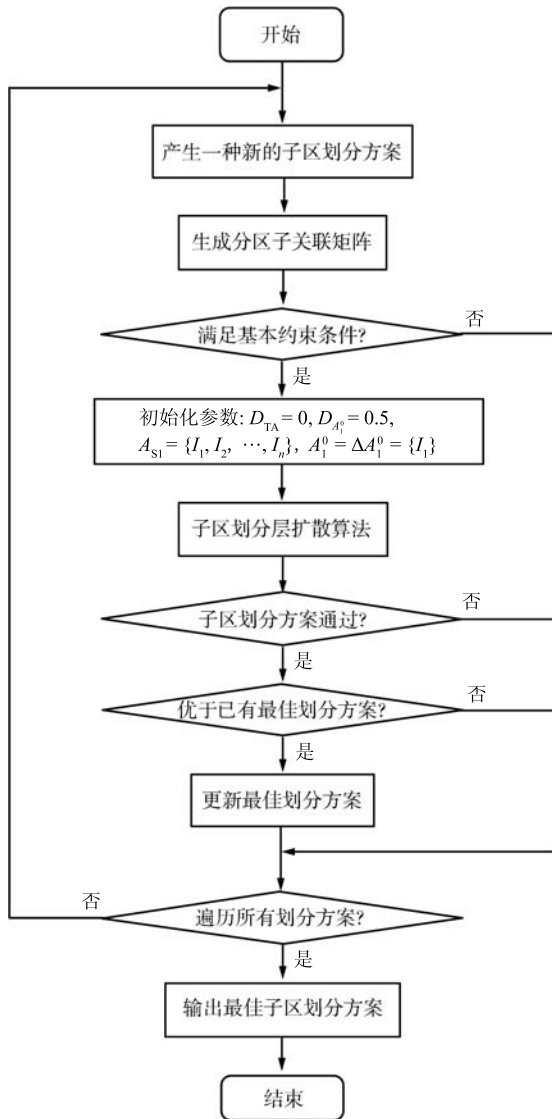


图 1 控制子区划分流程

Fig. 1 Process of coordinated control subarea division

子区划分层扩散算法将通过逐层扩散的方法, 对每一种子区划分方案进行有效性判断, 并计算出相应的子区总数 N_{TS} 与区域总关联度 D_{TA} , 具体算法过程如图 2 所示。

图 2 中, i 为子区序号 ($i = 1, 2, \dots$), j 为子区

扩散层序号 ($j = 0, 1, 2, \dots$), 虚线框表示流程转入开始第 i 个子区的第 $j + 1$ 层扩散。

2 协调控制子区快速动态划分

对于一个由 n 个信号交叉口与 m 条相连路段组成的连通性控制区域, 最多可包含 2^m 种不同控制子区划分方案, 可见子区划分方案数将随相连路段数指数增长, 最佳子区划分方案的求解问题可能面临维数灾难. 因此, 当路网规模较大时, 必须寻找一种能快速动态划分交通控制子区的智能优化方法。

2.1 降维处理方法

降维处理^[16]可以有效减少需要进行分析评价的控制子区划分方案数, 是实现控制子区快速动态划分的第一方法。

首先, 由于可选控制子区划分方案必须满足相邻交叉口分离或合并的基本约束条件, 因此可以预先根据相邻交叉口之间的关联度大小, 确定满足约束条件的解集空间, 以缩小最佳控制子区划分方案的搜索范围. 其次, 当控制区域内存在固定的非关联相连路段时, 可以通过将可选字符解中所有解元素置 1, 对整个控制区域进行分块化处理, 之后再利用子区划分方法分别求取各控制区域的最佳子区划分方案, 分解完成整个控制区域最佳子区划分方案的搜索过程。

例如, 已知某一控制区域由 16 个信号交叉口 I_1, I_2, \dots, I_{16} 与 24 条相连路段 R_1, R_2, \dots, R_{24} 组成, 区域路网结构与相邻交叉口之间的关联度大小如图 3(a) 所示, 假定 $D_{TNS} = 0.2, D_{TNC} = 0.8$. 首先, 根据相邻交叉口分离或合并的基本约束条件可知, 相连路段 $R_{11}, R_{12}, R_{13}, R_{17}, R_{21}$ 应取为非关联, 相连路段 R_2 应取为关联, 可选解集空间中的解个数 (2^{18}) 将立即减少为原始解集空间的 $1/2^6$. 其次, 将路段 $R_{11}, R_{12}, R_{13}, R_{17}, R_{21}$ 取为非关联, 将路段 $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8, R_9, R_{10}, R_{14}, R_{15}, R_{16}, R_{18}, R_{19}, R_{20}, R_{22}, R_{23}, R_{24}$ 取为关联, 对子区划分方案 $(11111111100011101110111)_2$ 进行子区个数的分析计算, 继而将整个控制区域划分为控制区域 1 与控制区域 2 两部分, 如图 3(b) 所示, 之后再利用子区划分方法对控制区域 1 与控制区域 2 分别求取相应的最佳子区划分方案 $(R_1 R_3 R_4 R_5 R_6 R_7 R_8 R_9 R_{10} R_{14})_2^*$ 与 $(R_{15} R_{16} R_{18} R_{19} R_{20} R_{22} R_{23} R_{24})_2^*$, 将两者合并即为整个控制区域的最佳子区划分方案 $(R_1 R_3 R_4 R_5 R_6 R_7 R_8 R_9 R_{10} R_{14} R_{15} R_{16} R_{18} R_{19} R_{20} R_{22} R_{23} R_{24})_2^*$, 可以看到, 此时共需要针对 $2^{10} + 2^8$ 种控制子区划分方案进行计算评价, 远少于整个可选解集空间中的解个数 (2^{18}), 且每一种子区划分方案的计算过程也相对简短, 从而大大提高了整

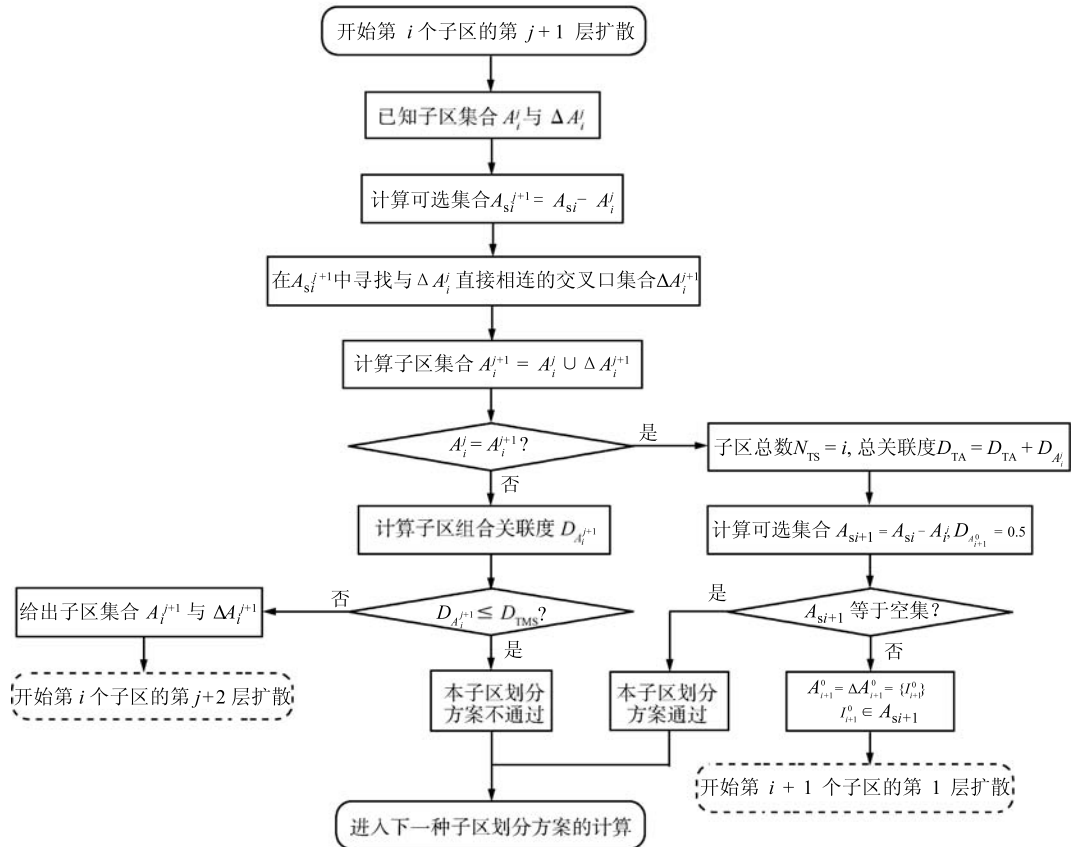
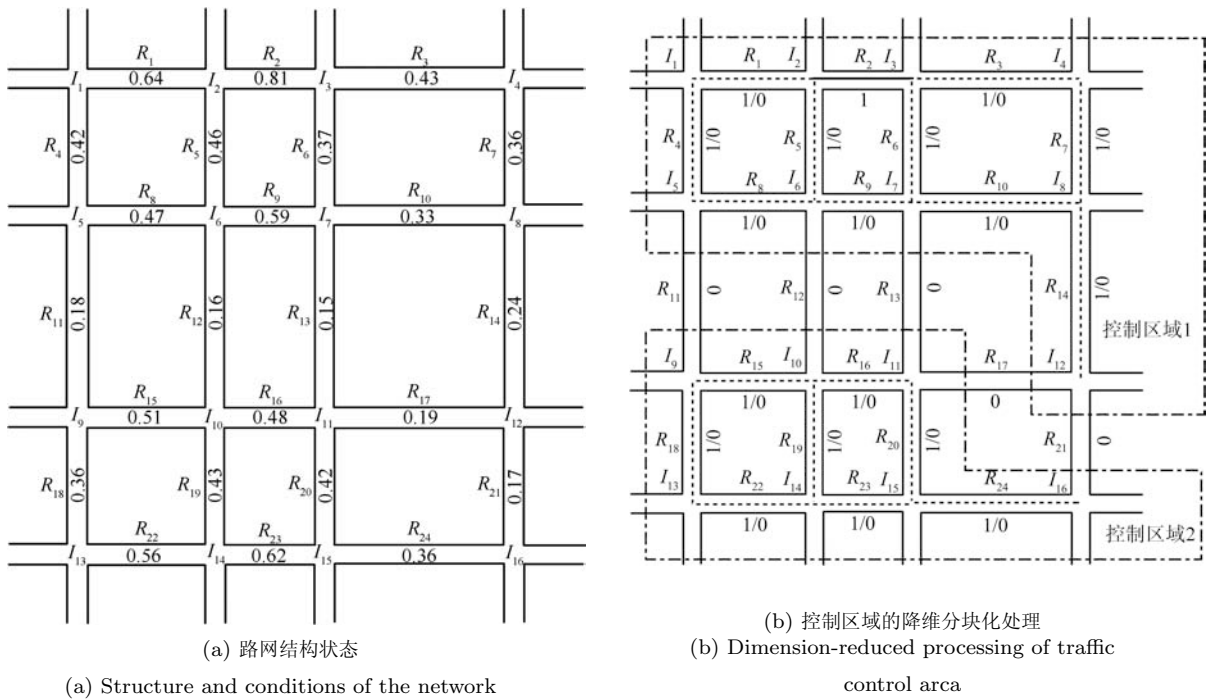


图 2 子区划分层扩散算法

Fig. 2 Layer diffusion algorithm of subarea division



(a) 路网结构状态
(a) Structure and conditions of the network

(b) 控制区域的降维分块化处理
(b) Dimension-reduced processing of traffic control area

图 3 整个控制区域的降维分块化处理

Fig. 3 Dimension-reduced processing of the whole control area

个控制区域的控制子区划分效率。

图 3 中, 实线段表示该路段必须取为关联, 虚线段表示该路段可以且暂时取为关联, 点划线框为控制区域的分界线。

2.2 遗传算法

当控制子区划分方案的可选解集空间很大且无法进行降维分块化处理时, 使用智能优化算法在整个解集空间中寻找优选子区划分方案, 是实现控制子区快速动态划分的第二方法。

遗传算法作为一种自适应全局优化概率搜索方法, 具有应用范围广、鲁棒性强、执行效率高、学习能力好、隐并行性显著等特点, 可适用于对控制子区划分方案的快速优化求解。根据控制子区划分模型与划分方法的特点, 通过将相连路段关联属性定义为基因、控制子区划分方案定义为染色体、方案评价指标函数映射变换为适应度函数, 运用子区划分扩散算法并参照遗传算法处理流程, 可以设计出一类基于遗传算法的控制子区快速动态划分算法。其中特别需要说明以下几点:

1) 基于交通流运行的连续性原理, 可以选取当前周期、上一周期以及上上周期的历史子区划分方案作为下一周期子区划分的一组初始方案, 即为初始种群中的部分个体; 基于交通流运行的周期相似性原理, 可以选取昨天此时、上周此时以及去年此时的历史子区划分方案作为此时此刻子区划分的另一组初始方案, 亦为初始种群中的部分个体。

2) 增大种群规模与进化代数可以降低遗传算法陷入早熟、收敛于局部最优的概率, 但同时也会增长算法的计算时间与收敛过程, 考虑到交通信号控制系统对控制子区动态划分的实时性要求及其软硬件配置所能提供的计算速度, 需要对种群规模与进化代数的大小进行合理设置。

3) 由于遗传算法要求适应度取值非负而本文建立的子区划分方案评价指标取值非正, 因此需要将方案评价指标函数 PI 映射变换为适应度函数 F_F , 其变换关系可取为 $F_F = 1/(\alpha - PI)$ (α 可设为一个较小正数, 如 0.01)。

4) 当使用子区划分扩散算法对某个子区划分方案进行分析评价时, 假若出现控制子区组合关联度小于等于多交叉口分离阈值, 则该方案应为不可选方案, 需被淘汰。但是为了降低遗传算法陷入早熟、收敛于局部最优的概率, 可以考虑去除子区划分扩散算法中的约束条件 $D_{A_i} > D_{TMS}$, 为组合关联度小于等于多交叉口分离阈值的子区划分方案同样计算一个对应的评价指标与选择概率, 以增加下一代种群中个体的多样性, 确保能尽快找到子区总数最少的可选控制子区划分方案。

5) 在遗传进化初期, 当种群中存在少数适应度很高的非凡个体时, 若以个体适应度与总体适应度之比来决定上一代种群中个体的选择概率, 则这些非凡个体将会被大量复制, 大大减少了下一代种群中个体的多样性, 从而可能丢失一些有意义的搜索点或最优点, 导致出现过早收敛, 易于陷入局部最优。由于在模型 (1) 中方案评价指标 PI 是子区总数 N_{TS} 的 K_P 次幂函数的平移, 因此为了克服比例适应度计算的尺度问题, 本文建议采用排序法, 即根据每个个体在种群中的序位确定其选择概率。

6) 在遗传算法中, 其收敛性主要取决于选择算子, 而搜索性则主要由交叉算子与变异算子来实现。其中, 选择算子采用了最优保留策略, 即每次将上一代种群中一定数量的最佳个体直接遗传至下一代; 交叉算子因其全局搜索能力而作为主要算子, 其交叉概率通常在 0.5~0.95 之间取值; 变异算子因其局部搜索能力而作为辅助算子, 其变异概率通常在 0.01~0.1 之间取值。

2.3 子区快速动态划分流程

将降维处理方法与遗传算法相结合, 可以设计控制子区快速动态划分流程如图 4 所示。图 4 中, N_{TCS} 为控制区域可选关联路段数阈值, $2^{N_{TCS}}$ 对应为控制区域子区划分方案数阈值, 当控制区域可选关联路段数大于 N_{TCS} , 为满足子区动态划分的实时性要求, 可采用遗传优化算法寻找优选子区划分方案; 而当控制区域可选关联路段数小于等于 N_{TCS} , 则可直接选取遍历搜索算法求取最佳子区划分方案。 N_{TCS} 的取值大小同样将由控制系统对控制子区动态划分的实时性要求及其软硬件配置共同决定。

3 算例分析

已知某一控制区域由 20 个信号交叉口 I_1, I_2, \dots, I_{20} 与 31 条相连路段 R_1, R_2, \dots, R_{31} 组成, 控制区域路网结构与各路段交通量关联度大小如图 5(a) 所示。假定 $D_{TNS} = 0.2$, $D_{TNC} = 0.8$, $D_{TMS} = 0.15$, $K_P = 2$, $C_{I_x} = C_{I_y} |_{I_x, I_y \in \{I_1, I_2, \dots, I_{20}\}}$, 即 $D_{C(I_x, I_y)} = 0 |_{I_x, I_y \in \{I_1, I_2, \dots, I_{20}\}}$ 。采用遍历搜索算法计算 (单核计算机, CPU 主频 2.2 GHz, 内存 3.25 GB) 得到满足约束条件的最佳子区划分方案字符解为 $(1100100111100000111100001111100)_2$, 对应子区划分方案如图 5(b) 所示, 其子区总数 $N_{TS} = 4$, 最佳性能指标 $PI = -15.0897$ 。各子区中需要进行协调控制设计的关键路段, 如图 5(b) 中灰色线段所示。

根据多次试算, 确定遗传算法中的各控制参数设置如下: 种群规模 $N = 100$, 最佳个体保留个数 $n_r = 5$, 交叉概率 $p_c = 0.9$, 变异概率 $p_m = 0.1$, 最

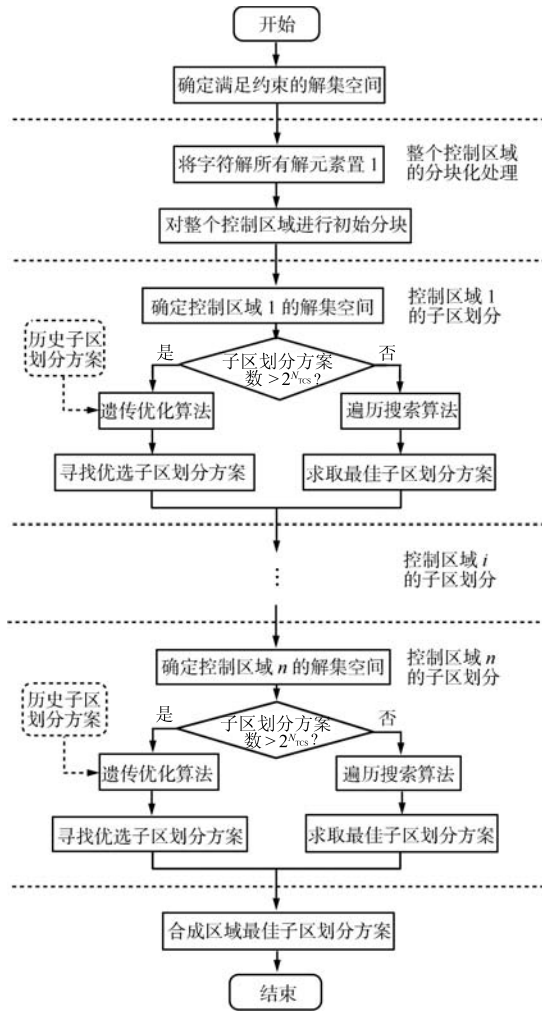


图 4 控制子区快速动态划分流程

Fig. 4 Fast dynamic division process of control subarea

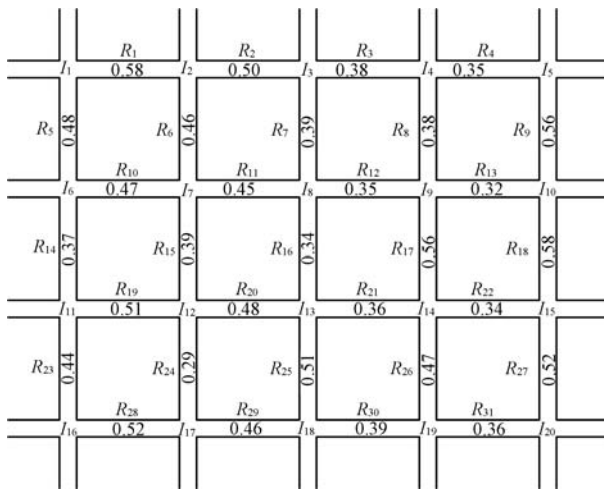
大进化代数 $N_0 = 250$. 在此利用遗传算法对上述算例进行了 10 次模拟计算, 对比遍历搜索算法与遗传算法的计算结果, 如表 1 所示.

从表 1 可以看到, 遍历搜索算法虽然能够确保最终找到最佳子区划分方案, 但在一定规模路网之下, 其搜索空间与计算时间将面临维数灾难, 已无法满足交通信号控制的实时性要求; 而遗传优化算法虽然不一定能够找到最佳子区划分方案, 但可以以一个较大概率搜索到次优子区划分方案, 完全能够满足子区划分的功能需求, 且其计算时间可以被有效控制, 非常适用于交通信号实时控制系统.

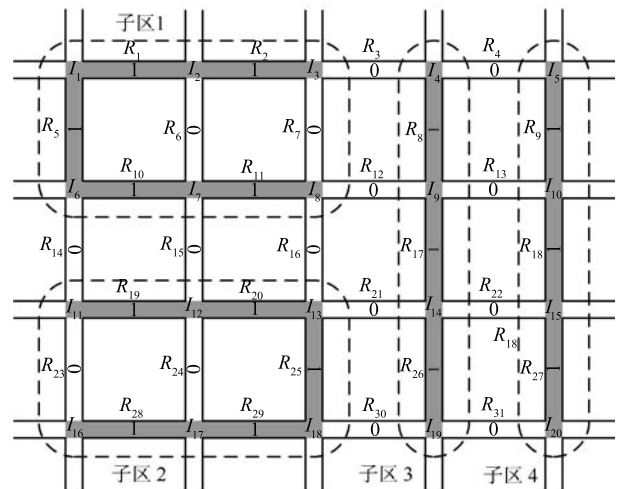
表 1 遍历搜索算法与遗传算法的计算结果对比

Table 1 Comparison of calculation results between traversal search algorithm and genetic algorithm

算法	子区个数	性能指标	计算时间
遍历搜索算法	4	-15.0897	18 h 48 min
GA 第 1 次计算	4	-15.3454	32 s
GA 第 2 次计算	4	-15.3279	32 s
GA 第 3 次计算	4	-15.3651	33 s
GA 第 4 次计算	5	-23.7454	32 s
GA 第 5 次计算	4	-15.1719	31 s
GA 第 6 次计算	5	-23.6101	32 s
GA 第 7 次计算	4	-15.1339	32 s
GA 第 8 次计算	4	-15.1038	33 s
GA 第 9 次计算	4	-15.3279	32 s
GA 第 10 次计算	5	-23.6286	32 s



(a) Structure and conditions of the network

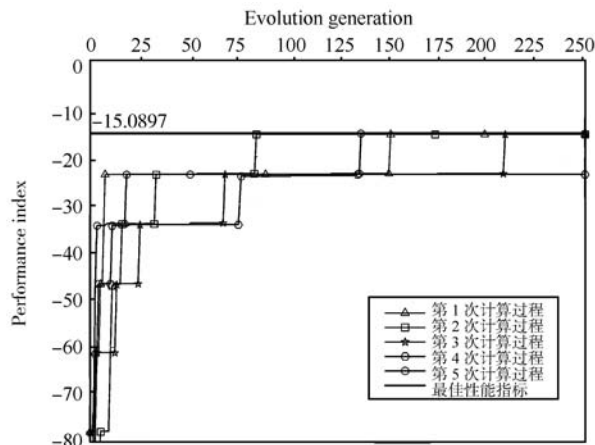


(b) Optimal scheme of subareas division

图 5 路网子区划分方案分析

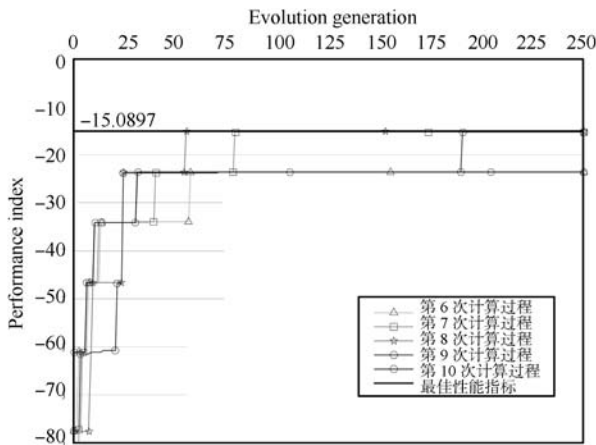
Fig. 5 Analysis of subarea division scheme for the network

使用遗传算法进行控制子区划分的 10 次运算过程如图 6 所示, 其中横坐标表示进化代数, 纵坐标表示各代种群中最优个体对应方案的评价指标。



(a) 第 1~5 次模拟计算过程

(a) The first five simulations of the algorithm



(b) 第 6~10 次模拟计算过程

(b) The second five simulations of the algorithm

图 6 遗传算法进化速度曲线

Fig. 6 Evolution speed curves of genetic algorithm

4 结论

本文通过建立基于关联度分析的协调控制子区划分模型与划分流程, 实现了交通信号控制子区的动态划分; 提出利用降维处理与遗传算法两种方法进行子区划分方案的快速搜索, 解决了控制子区划分方案寻优过程中可能面临的维数灾难问题, 为满足交通信号控制子区动态划分的实时性要求提供了一套新方法。

通过实验分析可以发现, 当路网规模较小时, 宜直接选取遍历搜索算法求取最佳子区划分方案; 当路网规模较大时, 则需要采用协调控制子区快速动态划分方法寻找次优子区划分方案。而对于如何进

一步提高遗传算法的搜索效率与寻优能力, 确保控制子区划分算法能更快更准地搜索到最优或次优子区划分方案, 是本文方法有待改进之处。

References

- 1 Walinchus R J. Real-time network decomposition and sub-network interfacing. *Highway Research Record*, 1971, (366): 20-28
- 2 Yagoda H N, Principle E H, Vick C E, Leonard B. Subdivision of signal systems into control areas. *Traffic Engineering*, 1973, **43**(12): 42-45
- 3 Pinnell C, DeShazo J J, Wilshire R L. Areawide traffic control systems. *Traffic Engineering*, 1975, **45**(4): 16-21
- 4 Federal Highway Administration. *Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways*. Washington D.C.: Federal Highway Administration, 1978
- 5 Chang E C P. Evaluation of interconnected arterial traffic signals. *Transportation Planning Journal*, 1986, **15**(1): 137-156
- 6 Lin L T, Tsao S M. A system approach on signal grouping for areawide control of computerized traffic system. In: *Proceedings of the 79th Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington D. C., USA: TRB, 2000. 1-21
- 7 Lin L T, Huang H J. A linear model for determining coordination of two adjacent signalized intersections. *Journal of Modelling in Management*, 2009, **4**(2): 162-173
- 8 Husch D, Albeck J. *Synchro 5.0 User Guide*. California: Trafficware Inc., 2002
- 9 Mo Han-Kang, Peng Guo-Xiong, Yun Mei-Ping. Automatic division of traffic control sub-area under condition of route guidance. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2002, **2**(2): 67-72
(莫汉康, 彭国雄, 云美萍. 诱导条件下交通控制子区自动划分. *交通运输工程学报*, 2002, **2**(2): 67-72)
- 10 Yang Qing-Fang, Chen Lin. Division approach of traffic control work zone. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology)*, 2006, **36**(S2): 139-142
(杨庆芳, 陈林. 交通控制子区动态划分方法. *吉林大学学报(工学版)*, 2006, **36**(S2): 139-142)
- 11 Li Rui-Min, Lu Hua-Pu, Shi Qi-Xin. Research on traffic signal control sub-area fuzzy automatic division method. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*, 2008, **32**(3): 381-384
(李瑞敏, 陆化普, 史其信. 交通信号控制子区模糊动态划分方法研究. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2008, **32**(3): 381-384)
- 12 Duan Hou-Li, Li Zhi-Heng, Zhang Yi, Hu Jian-Ming. Dynamic subdivision of road network into coordinated control regions. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology)*, 2009, **39**(S2): 13-18
(段后利, 李志恒, 张毅, 胡坚明. 交通控制子区动态划分模型. *吉林大学学报(工学版)*, 2009, **39**(S2): 13-18)
- 13 Ma Wan-Jing, Li Xiao-Dan, Yang Xiao-Guang. Incidence degree model of signalized intersection group based on routes. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2009, **37**(11): 1462-1466
(马万经, 李晓丹, 杨晓光. 基于路径的信号控制交叉口关联度计算模型. *同济大学学报(自然科学版)*, 2009, **37**(11): 1462-1466)

- 14 Ma Ying-Ying, Yang Xiao-Guang, Zeng Ying. Urban traffic signal control network partitioning using spectral method. *Systems Engineering — Theory and Practice*, 2010, **30**(12): 2290–2296

(马莹莹, 杨晓光, 曾莹. 基于谱方法的都市交通信号控制网络小区划分方法. 系统工程理论与实践, 2010, **30**(12): 2290–2296)

- 15 Gao Zi-You, Zhao Xiao-Mei, Huang Hai-Jun, Mao Bao-Hua. Research on problems related to complex networks and urban traffic systems. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2006, **6**(3): 41–47

(高自友, 赵小梅, 黄海军, 毛保华. 复杂网络理论与城市交通系统复杂性问题的相关研究. 交通运输系统工程与信息, 2006, **6**(3): 41–47)

- 16 Lu Kai. Research on the Foundational Theory and Key Techniques of Coordinate Signal Control in Urban Traffic Network [Ph. D. dissertation], South China University of Technology, China, 2010

(卢凯. 交通信号协调控制基础理论与关键技术研究 [博士学位论文], 华南理工大学, 中国, 2010)

- 17 Lu Kai, Xu Jian-Min, Li Yi-Shun. Division method of coordinated control subareas based on correlation degree analysis. *Journal of South China University of Technology (Natural Science)*, 2009, **37**(7): 6–9

(卢凯, 徐建闽, 李轶舜. 基于关联度分析的协调控制子区划分方法. 华南理工大学学报(自然科学版), 2009, **37**(7): 6–9)



卢 凯 华南理工大学土木与交通学院讲师. 主要研究方向为交通信号控制, 智能优化与应用和智能交通系统. 本文通信作者. E-mail: kailu@scut.edu.cn

(**LU Kai** Lecturer at the School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology.

His research interest covers traffic signal control, intelligent optimization and application, and intelligent transportation systems. Corresponding author of this paper.)



徐建闽 华南理工大学土木与交通学院教授. 主要研究方向为控制理论与控制工程, 智能优化与应用和智能交通系统.

E-mail: aujmxu@scut.edu.cn

(**XU Jian-Min** Professor at the School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology. His research interest covers control theory and control engineering, intelligent optimization and application, and intelligent transportation systems.)



郑淑鉴 华南理工大学土木与交通学院硕士研究生. 主要研究方向为交通信号控制, 交通组织与优化和交通仿真.

E-mail: zheng.shj@qq.com

(**ZHENG Shu-Jian** Master student at the School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology. His research interest covers traffic signal control, traffic organization and optimization, and traffic simulation.)



王世明 华南理工大学土木与交通学院博士研究生. 主要研究方向为交通信号控制和交通组织与优化.

E-mail: mathemtics@263.net

(**WANG Shi-Ming** Ph.D. candidate at the School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology. His research interest covers traffic signal control, and traffic organization and optimization.)