

绿波协调控制的子区动态划分算法

冯远静^{1,2†}, 单敏^{1,2}, 乐浩成^{1,2}, 张贵军^{1,2}, 俞立¹

(1. 浙江工业大学信息工程学院信息处理与自动化研究所, 浙江杭州 310023; 2. 浙江省智能交通工程技术研究中心, 浙江杭州 310023)

摘要: 为了提高子区划分的效率, 本文提出了一种基于绿波协调控制的二次划分子区的模型. 首先, 根据距离、流量和周期³原则, 提出基于可协调度的粗划分指标对子区进行初次划分. 然后, 在最大绿波带优化模型的基础上, 引进绿波带带宽达到率为细划分指标, 对子区进行再次细划分, 同时引入调整指数对子区进行在线调整, 实现了子区划分及其信号配时参数优化的同步. 最后, 利用遗传模拟退火算法对子区划分方案快速寻优, 实现了绿波协调控制的子区实时动态划分. 通过算例分析表明, 该控制方案能提高路网的通行能力, 具有良好的稳定性和高效性.

关键词: 子区动态划分; 绿波协调控制; 最大绿波带优化模型; 绿波带带宽达到率; 遗传模拟退火算法

中图分类号: U491.5 + 4 文献标识码: A

Subarea dynamic division algorithm based on green wave coordinated control

FENG Yuan-jing^{1,2†}, SHAN Min^{1,2}, LE Hao-cheng^{1,2}, ZHANG Gui-jun^{1,2}, YU Li¹

(1. Institute of Information Processing and Automation, College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang 310023, China;

2. Zhejiang Intelligent Traffic Engineering Technology Research Center, Hangzhou Zhejiang 310023, China)

Abstract: To improve the efficiency of subarea division, we introduce the secondary division model based on the green wave coordinated control. Firstly, an evaluation criterion named coordination degree is employed in accomplishing the coarse division, which is based on distance, traffic volume and cycle time. Next, in accordance with the maximum bandwidth optimization model, we introduce the bandwidth attainability as the fine division index and implement the secondary division. Meanwhile, an adjustment index is employed to realize the online adjustment of the subarea, so it can realize the synchronization between the subarea division and the signal timing-parameter optimization. Moreover, using the genetic simulated annealing algorithm to develop the optimal subarea partition scheme, we obtain the green wave coordinated control of sub-zone real-time dynamic division. Finally, the analysis results of the example show that the proposed control scheme can improve the traffic capacity of road network with a good performance in stability and efficiency.

Key words: subarea dynamic division; green wave coordination control; the maximum bandwidth optimization model; the bandwidth attainability; genetic simulated annealing algorithm

1 引言(Introduction)

有效的交通控制子区的划分是进行高效区域协调控制的基础. 其基本思想是将一个复杂庞大的路网按照一定的原则指标划分成若干个独立的子区, 根据子区的特性分别执行合适的控制优化策略, 把控制权逐级下放, 使系统变得更加灵活可靠. 为此, 寻找合适的划分指标及其算法成为当前交通区域协调控制的研究热点.

1971年, 美国的Walinchus^[1]首次提出了交通控制子区的概念. 随后, 国外学者开始对影响控制子区划分的交通状态、路段长度、交叉口的配时方案等因

素进行了分析^[2-3]. Chang E. C. P., Lin L. T.和Tian Z.等^[4-6]运用数学建模等手段对子区动态划分的控制指标、阈值和算法进行了研究. 国内学者主要围绕距离、流量、周期等原则对控制子区的划分指标展开分析^[7]. 莫汉康等^[8]根据路线诱导系统提供的共享数据, 结合周期、流量和距离划分原则, 建立了诱导条件下的交通控制子区自动划分模型; 杨庆芳等^[9]给出了周期子区和相位差/绿信比子区的概念并提出相应的子区动态划分方法, 但都只实现半动态分区控制. 赵文涛等^[10]提出了基于关键路口的子区动态划分方法, 但由于划分的标准仅仅只有周期以及距离原则, 所以在

一定程度上不能更好地适应多变的城市路网. 段后利等^[11]提出可协调度的概念, 建立了基于超图划分算法的子区划分方法, 但优化算法比较复杂, 且最终结果受算法参数变化的影响程度比较大. 首艳芳等^[12]建立了一套基于相邻交叉口间距最大-最小原则和交叉口相聚度分析的控制子区划分模型, 设计了一种交叉口群聚类算法, 实现了对控制子区划分方案的综合分析评价, 但子区划分的阈值需要人工干涉, 操作复杂. 尹洪英等^[13]以谱图理论为基础结合谱聚类算法进行路网动态分区, 由于谱聚类算法在计算过程中涉及到稀疏矩阵特征值和特征向量的求解, 运算比较复杂, 当交叉口数目过于庞大的时候可能导致在线运算的效率较低. 卢凯等^[14]建立了基于关联度分析的子区动态划分模型, 由于遗传算法在搜索效率与寻优能力方面存在不足, 使得控制子区划分算法不能更快更准地搜索到最优或次优子区划分方案.

由于现有子区划分指标基本上都停留在周期、距离和流量等原则上, 不能很好地保证子区划分的合理性; 对子区内信号有效的协调控制和子区间的动态调整考虑不够, 即控制子区划分算法存在一定的局限和缺陷, 导致子区的动态划分和内部协调不能达到理想的效果. 因此, 如何建立一套综合有效的子区划分指标及其算法, 越来越成为控制子区划分理论方法研究的内在要求.

本文将提出一种基于绿波协调控制的二次划分子区的模型. 将绿波带带宽达到率同时作为子区细划分和动态调整的指标, 实现了子区划分和子区内信号配时参数优化调整的同步; 并结合遗传模拟退火算法对子区划分方案快速寻优, 增强了子区划分的实时性和高效性, 实现了子区的绿波协调控制.

2 子区划分模型(The subarea division model)

2.1 子区划分模型描述(The model description of sub-area division)

对于由 n 个信号交叉口 $I_1, I_2, \dots, I_{n-1}, I_n$ 与 m 条相连路段 $R_1, R_2, \dots, R_{m-1}, R_m$ 组成的连通性交通区域, 综合子区划分的两项指标和约束条件, 建立相应的子区划分模型, 如下式所示:

$$\begin{cases} I_x, I_y \in \{I_1, I_2, \dots, I_n\}, \\ R_{(I_x, I_y)} \in \{R_1, R_2, \dots, R_m\}, \\ R_{(I_x, I_y)} = 1 |_{CI_{(I_x, I_y)} \geq CI_{HB}}, \\ R_{(I_x, I_y)} = 0 |_{CI_{(I_x, I_y)} \leq CI_{FL}}, \\ A_{B_a} = \frac{B}{G_{\min}} \times 100\%, \\ A_{B_a} \geq A_{YZ}, \\ B_t = \sum_{a=1}^{N_{ZQ}} A_{B_a}, \\ \max PI = -N_{ZQ}^{K_z} + B_t, \end{cases} \quad (1)$$

其中: $R_{(I_x, I_y)} = 0$ 表示相连路段之间的交叉口 I_x 与交叉口 I_y 非协调, 不能划在同一个子区内; $R_{(I_x, I_y)} = 1$ 表示相连路段之间的交叉口 I_x 与交叉口 I_y 可协调, 必须划在同一个子区; $CI_{(I_x, I_y)}$ 表示相连路段之间交叉口 I_x 与交叉口 I_y 的可协调度大小, 为一数字量, CI_{HB} 为相邻交叉口之间合并阈值, CI_{FL} 为相邻交叉口之间的分离阈值, A_{B_a} 为第 a 个子区内绿波带带宽达到率大小, B 为最大绿波带优化模型求得的干线或环路带宽, G_{\min} 为子区中各交叉口协调相位的绿灯时间最小值, A_{YZ} 为子区绿波带带宽达到率分离阈值; N_{ZQ} 为子区的个数, B_t 为所有子区绿波带带宽达到率 A_{B_a} 之和; PI 为控制子区划分方案评价指标, K_z 为控制子区数量权重系数 ($K_z \geq 1$). 通常取 $K_z = 2$. $N_{ZQ} = F_{ZQ}(R_1 R_2 \dots R_m)$ 为子区总数的计算函数, 由粗划分判断条件和细划分判断条件确定, $R_1 R_2 \dots R_m$ 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.

相邻交叉口之间可协调度是一个对相邻交叉口之间可协调性定量化描述的综合参量, 综合反映了相邻交叉口之间的距离、路段交通的运行状况和信号控制需求差异对相邻交叉口之间可协调性的客观影响. 对于交叉口 I_x 和交叉口 I_y 之间的可协调度 $CI_{(I_x, I_y)}$, 即本文提到的粗划分指标, 可按下式进行计算:

$$CI_{(I_x, I_y)} = k_A \frac{q}{D^2} - k_B \frac{|C_x - C_y|}{3600}, \quad (2)$$

$$q = \frac{DS * G * V}{3600} = \frac{g * V}{3600}, \quad (3)$$

$$g = G - (T - th), \quad (4)$$

其中: q/D^2 借用牛顿的万有引力定律^[15], 使得两个交叉口间的可协调度正比于两交叉口间的综合流量, 反比于两交叉口间距离的平方; k_A 和 k_B 为比例放大系数, 为使 3 个原则在式中的地位相当, 通过比例系数调整使它们处在同一数量级, 在借鉴前人经验的基础上, 再根据自己反复实验的结果, 当取 $k_A = 360$, $k_B = 3600$ 时, 以此为基础获得的子区划分方案效果较佳; q 为综合流量, 即是一个与车辆种类(车身长度)无关的用来反映通过停止线混合车流数量的参量; D 为交叉口间的距离, 单位为 km , C_x 和 C_y 分别为上游交叉口和下游交叉口单点定时控制时所需的最佳信号周期; DS 为相位饱和度, 是指被车流有效利用的绿灯时间与绿灯显示时间之比; G 为可供车辆通行的绿灯时间总和, 单位为 s ; g 为被车辆有效利用的绿灯时间, 单位为 s ; V 为绿灯期间实际出现过的最大流率, 单位为 千辆/h ; T 为绿灯期间停止线上无车通过的时间, 单位为 s ; t 为车流正常通过停止线时车辆间的时距, 单位为 s ; h 为车辆间时距的个数.

特别指出, 由于公式(2)不适合双周期交叉口可协调度的计算, 此时需要做适当调整, 以满足双周期下

控制子区的划分. 令 C_{xy} 为双周期偏差度, C_{th} 为双周期偏差阈值, 计算公式如下:

$$C_{xy} = \frac{1}{2} \left| |C_x - C_y| - \min\{C_x, C_y\} \right|, \quad (5)$$

其中: 当 $C_{xy} \geq C_{th}$ 时, 直接调用式(2)计算其可协调度; 当 $C_{xy} < C_{th}$ 时, 说明其可能适合双周期交叉口信号控制, 并令 $C_{xy} = |C_x - C_y|$, 代入式(2)求解其可协调度, 进一步判断双周期交叉口是否适合划分在同一子区, 是否满足双周期交叉口绿波协调控制. C_{th} 的取值需根据当地实际交通状况, 并结合多次试验进行确定, 本文 C_{th} 采用经验值5s.

2.2 最大绿波带优化模型(The maximum bandwidth optimization model)

MAXBAND模型是Little教授建立的混合整数线性规划绿波带优化模型^[6], 其优化目标在于追求最大的绿波带宽度. Gartner等针对MAXBAND模型没有考虑不同行驶方向不同带宽需求的缺陷进行了改进并提出MULTIBAND模型, 包括根据交叉口上下行不同带宽需求分配其实际带宽; 本文在MULTIBAND模型的基础上, 进一步分析了红绿灯时间和流量的关系, 并考虑了交叉口进口道绿灯启亮时清空排队车辆所需的绿灯时间. 相同带宽干线绿波带最大化问题是

不同带宽干线绿波带最大化问题的特殊情况, 与不同带宽情况相同, 这里就讨论不同带宽干线绿波带最大化问题, 对于一条包含 n 个交叉口的干线, 其模型的几关系见图1. 根据图1, 可以直接得出下面的约束:

$$\begin{cases} \frac{b_{i(i+1)}}{2} \leq w_i \leq 1 - r_i^w - \frac{b_{i(i+1)}}{2}, \\ \frac{b_{(i+1)i}}{2} \leq v_i \leq 1 - r_i^v - \frac{b_{(i+1)i}}{2}, \\ \frac{b_{i(i+1)}}{2} \leq w_{i+1} \leq 1 - r_{i+1}^w - \frac{b_{i(i+1)}}{2}, \\ \frac{b_{(i+1)i}}{2} \leq v_{i+1} \leq 1 - r_{i+1}^v - \frac{b_{(i+1)i}}{2}, \end{cases} \quad (6)$$

其中: $b_{i(i+1)}$ ($b_{(i+1)i}$)为交叉口 i 和交叉口 $i+1$ 之间的上行(下行)绿波带带宽; 对于南北走向的道路, 由北向南定义为上行, 反之为下行; 对于东西走向的道路, 由西向东定义为上行, 反之为下行. r_i^w (r_i^v)为交叉口 i 协调相位上行(下行)的归一化有效红灯时间, 即 $r_i^w = r_i^{wa}z$, $r_i^v = r_i^{va}z$, 而 r_i^{wa} (r_i^{va})为上行(下行)实际有效红灯时间. w_i 是交叉口 i 协调相位的上行绿波带位置, 定义为上行绿波带中心到协调相位绿灯开始的时间距离, v_i 是交叉口 i 协调相位的下行绿波带位置, 定义为下行绿波带中心到协调相位绿灯结束的时间距离^[7], 所有的时间变量都归一化成相对周期时间的比.

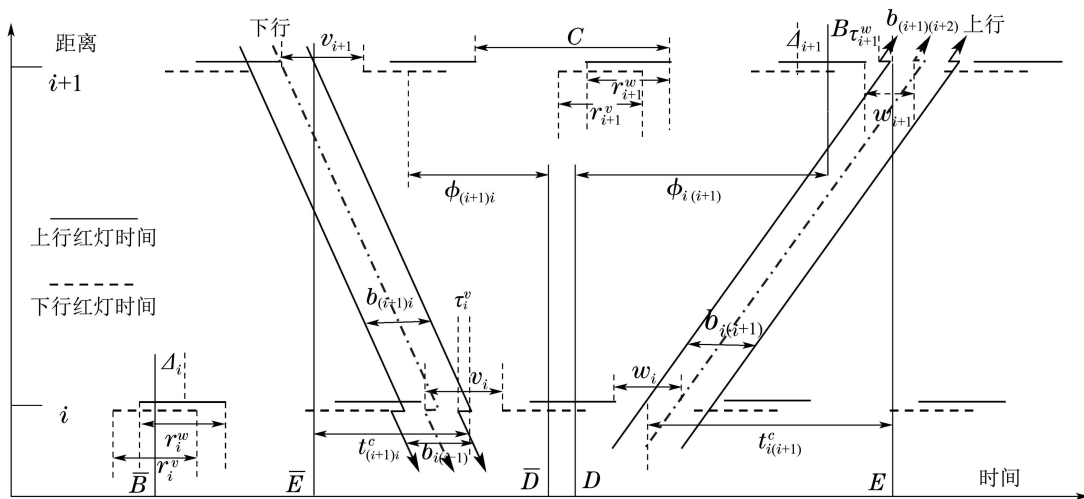


图1 不同带宽干线绿波带最大化问题的时空图

Fig. 1 Time-space diagram of main green wave band of different bandwidth maximization problem

交叉口 i 协调相位上行的归一化有效绿灯时间为

$$g_i^w = g_i^{wa}z = \gamma_i^w \left(\frac{1}{z} - L_i^w \right) z = \gamma_i^w - \gamma_i^w L_i^w z, \quad (7)$$

其中: g_i^{wa} 为交叉口 i 的协调相位上行的实际有效绿灯时间; γ_i^w 为交叉口 i 的协调相位上行的流率比, 即交叉口 i 的协调相位上行的流率与交叉口 i 的所有相位流率之和的比, 由历史数据统计得到; L_i^w (L_i^v)为交叉口 i 一个周期内所有相位上行(下行)的总损失

时间之和, 即 $L_i^w = n_i^{phase} t_L$. n_i^{phase} 为交叉口 i 的相位个数, t_L 为一个相位的损失时间, 等于启动损失时间 l_1 与清空损失时间 l_2 之和, 通常 l_1 取2s, l_2 取2s, 所以 $t_L = l_1 + l_2 = 4s$. 同理, 下行红绿灯时间情况与此类似, 这里只讨论上行红绿灯时间的情况, 又因为有效绿灯时间和有效红灯时间之和等于周期时间, 所以

$$r_i^w = 1 - g_i^w = 1 - \gamma_i^w + \gamma_i^w L_i^w z. \quad (8)$$

根据图1, $B(\bar{B})$ 和 $D(\bar{D})$ 位于上行(下行)红灯时

间的中点, $E(\bar{E})$ 为上行(下行)绿波带左测(右侧)的起点位置. 从 B 到 \bar{B} 可得出相邻交叉口之间协调相位上下行的相位差关系式

$$\phi_{i(i+1)} + \phi_{(i+1)i} + \Delta_i - \Delta_{i+1} = I_{i(i+1)}. \quad (9)$$

根据图 1, 可以得到从 D 到 E 的路段约束

$$\begin{aligned} \phi_{i(i+1)} + \frac{1}{2}r_{i+1}^w + w_{i+1} - \frac{1}{2}b_{i(i+1)} + \tau_{i+1}^w = \\ t_{i(i+1)}^C + \frac{1}{2}r_i^w + w_i - \frac{1}{2}b_{i(i+1)}. \end{aligned} \quad (10)$$

\bar{D} 到 \bar{E} 的路段约束为

$$\begin{aligned} \phi_{(i+1)i} + \frac{1}{2}r_{i+1}^v + v_{i+1} - \frac{1}{2}b_{(i+1)i} = \\ t_{(i+1)i}^C + \frac{1}{2}r_i^v + v_i - \frac{1}{2}b_{(i+1)i} - \tau_i^v. \end{aligned} \quad (11)$$

将式(10)和式(11)代入式(9), 整理可得

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}(r_i^w + r_i^v) - \frac{1}{2}(r_{i+1}^w + r_{i+1}^v) + \Delta_i - \Delta_{i+1} - \\ (w_{i+1} + v_{i+1}) - (\tau_i^v + \tau_{i+1}^w) + w_i + v_i + \\ t_{i(i+1)}^C + t_{(i+1)i}^C = I_{i(i+1)}, \end{aligned} \quad (12)$$

其中: z 为周期的倒数, $t_{i(i+1)}^C$ ($t_{(i+1)i}^C$) 表示从交叉口 $i(i+1)$ 到交叉口 $(i+1)i$ 的归一化旅行时间, $t_{i(i+1)}$ 和 $t_{(i+1)i}$ 为车辆真实旅行时间, 单位为 s , $\phi_{i(i+1)}$ ($\phi_{(i+1)i}$) 为交叉口 $i(i+1)$ 的协调相位到交叉口 $(i+1)i$ 的协调相位的相位差, 以各交叉口红灯时间中点为起点; Δ_i 为交叉口 i 下行方向红灯中点至其相近上行方向红灯中点的时间, τ_i^w (τ_i^v) 为交叉口 i 协调相位上行(下行)绿波协调时剩余排队车辆的清空时间, $I_{i(i+1)}$ 为大于等于零的整数.

因下游红灯剩余排队车辆的干扰, 处于绿波带中车辆的正常行驶受到一定的影响, 导致出现减速或停车的现象, 使得实际有效绿波带宽有一定的减小, 协调方向车辆平均延误相应的增加. 下游交叉口 i 红灯排队消散时间也就是协调控制前排队车辆的清空时间 τ_i , 由红灯排队车辆 $Q_{i,m+1}$ 、下游交叉口协调方向进口道饱和流量 S 和车辆启动损失时间 l_1 决定.

$$\tau_i = (Q_{i,m+1}/S + l_1)z, \quad (13)$$

$$Q_{i,m+1} = Q_{i,m} + (q_{i,m+1} - \lambda \times S)C, \quad (14)$$

其中: $Q_{i,m}$ 为交叉口 i 第 m 个周期的滞留排队车辆, $q_{i,m+1}$ 为交叉口 i 第 $m+1$ 个周期的车辆到达率, 当 $Q_{i,m} + q_{i,m+1}C - Sg \leq 0$ 时, $Q_{i,m+1} = 0$, 而其他情况排队长度的计算满足式(14).

上述模型中下游交叉口协调方向进口道饱和流量 S 和启动损失时间 l_1 可认为是相对稳定的常数, 红灯排队车辆数的获取成为红灯排队消散时间的关键, 初始条件应该是排队长度为零; 在实际交通流

中, 要求分析周期的前一周期为不饱和周期. 除了的高峰时期, 很少有交叉口总是保持在饱和状态. 可见, 该优化模型具有较好的稳定性, 能够从多数时刻启动, 开始准确的排队长度递推计算.

不同带宽干线绿波带协调控制是指: 干线上每个路段的绿波带带宽不相同. 参照图 1, 再结合式(6)(8)(12), 则一条含有 n 个交叉口的干线的不同带宽绿波带最大化问题(也适用于相同带宽绿波带最大化问题)就是求解 $b_{i(i+1)}$, $b_{(i+1)i}$, z , w_i , v_i , $\phi_{i(i+1)}$, $\phi_{(i+1)i}$ 和 $I_{i(i+1)}$, 使得

$$\begin{aligned} \max & \left(\sum_{i=1}^{n-1} (k_i^w b_{i(i+1)} + k_i^v b_{(i+1)i}) \right), \\ \text{s.t.} & \begin{cases} 0.5b_{12} - w_1 \leq 0, \\ \gamma_1^w L_1^w z + 0.5b_{12} + w_1 \leq \gamma_1^w, \\ 0.5b_{21} - v_1 \leq 0, \\ \gamma_1^v L_1^v z + 0.5b_{21} + v_1 \leq \gamma_1^v, \\ 0.5b_{(i-1)i} - w_i \leq 0, \quad i = 2, \dots, n-1, \\ \gamma_i^w L_i^w z + 0.5b_{(i-1)i} + w_i \leq \gamma_i^w, \quad i = 2, \dots, n-1, \\ 0.5b_{i(i+1)} - w_i \leq 0, \quad i = 2, \dots, n-1, \\ \gamma_i^w L_i^w z + 0.5b_{i(i+1)} + w_i \leq \gamma_i^w, \quad i = 2, \dots, n-1, \\ 0.5b_{i(i-1)} - v_i \leq 0, \quad i = 2, \dots, n-1, \\ \gamma_i^v L_i^v z + 0.5b_{i(i-1)} + v_i \leq \gamma_i^v, \quad i = 2, \dots, n-1, \\ 0.5b_{(i+1)i} - v_i \leq 0, \quad i = 2, \dots, n-1, \\ \gamma_i^v L_i^v z + 0.5b_{(i+1)i} + v_i \leq \gamma_i^v, \quad i = 2, \dots, n-1, \\ 0.5b_{(n-1)n} - w_n \leq 0, \\ \gamma_n^w L_n^w z + 0.5b_{(n-1)n} + w_n \leq \gamma_n^w, \\ 0.5b_{n(n-1)} - v_n \leq 0, \\ \gamma_n^v L_n^v z + 0.5b_{n(n-1)} + v_n \leq \gamma_n^v, \\ \frac{1}{2}(r_i^w + r_i^v) - \frac{1}{2}(r_{i+1}^w + r_{i+1}^v) + w_i + v_i - \\ (w_{i+1} + v_{i+1}) - (\tau_i^v + \tau_{i+1}^w) + \Delta_i - \Delta_{i+1} + \\ t_{i(i+1)}^C + t_{(i+1)i}^C = I_{i(i+1)}, \\ \frac{1}{C_{\max}} \leq z \leq \frac{1}{C_{\min}}, \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

其中: C 为周期, C_{\min} 为参与协调控制的最小周期, C_{\max} 为参与协调控制的最大周期, V_i^w (V_i^v) 为上行(下行)的交通流率, S_i^w (S_i^v) 为上行(下行)的饱和流率; k_i^w 和 k_i^v 为加权系数, 都大于零, k_i^w 和 k_i^v 选取通常根据路段的流量确定, 流量大的路段权重大, 且满足

$$\sum_{i=1}^{n-1} (k_i^w + k_i^v) = 1,$$

其表达式如下:

$$k_i^w = \left(\frac{V_i^w}{S_i^w}\right)^P, k_i^v = \left(\frac{V_i^v}{S_i^v}\right)^P. \quad (16)$$

在子区划分结束后,虽然不会存在大规模的环路(因为这样的子区绿波带带宽达到率是不会满足要求的),但还是有可能存在小型环路的情况(较多的是一个环路),最大绿波带最大化问题,相比干线绿波带最大化问题,只需要多增加环路约束.一个环路的示意图如图2所示.

根据图2可以得到

$$\begin{aligned} &\phi_{(a,Ai),(b,Bi)} + \phi_{(b,Bi),(b,Bn)} + \phi_{(b,Bn),(c,Cn)} + \\ &\phi_{(c,Cn),(c,Ci)} + \phi_{(c,Ci),(d,Di)} + \phi_{(d,Di),(d,Dn)} + \\ &\phi_{(d,Dn),(a,An)} + \phi_{(a,An),(a,Ai)} = I. \end{aligned} \quad (17)$$

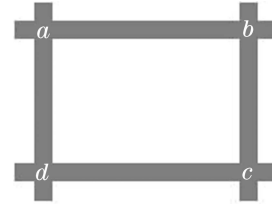


图 2 环路示意图

Fig. 2 The network loop diagram

对于干道方向采用进口对称放行方式的交叉口,其干道上行相位与干道下行相位合为同一信号相位,不同的相序设置也不会影响干道绿波协调控制效果.为了能更好地把环路约束的由来表述清楚,将环路的4个交叉口在空间上展开,得到的环路约束如图3所示.

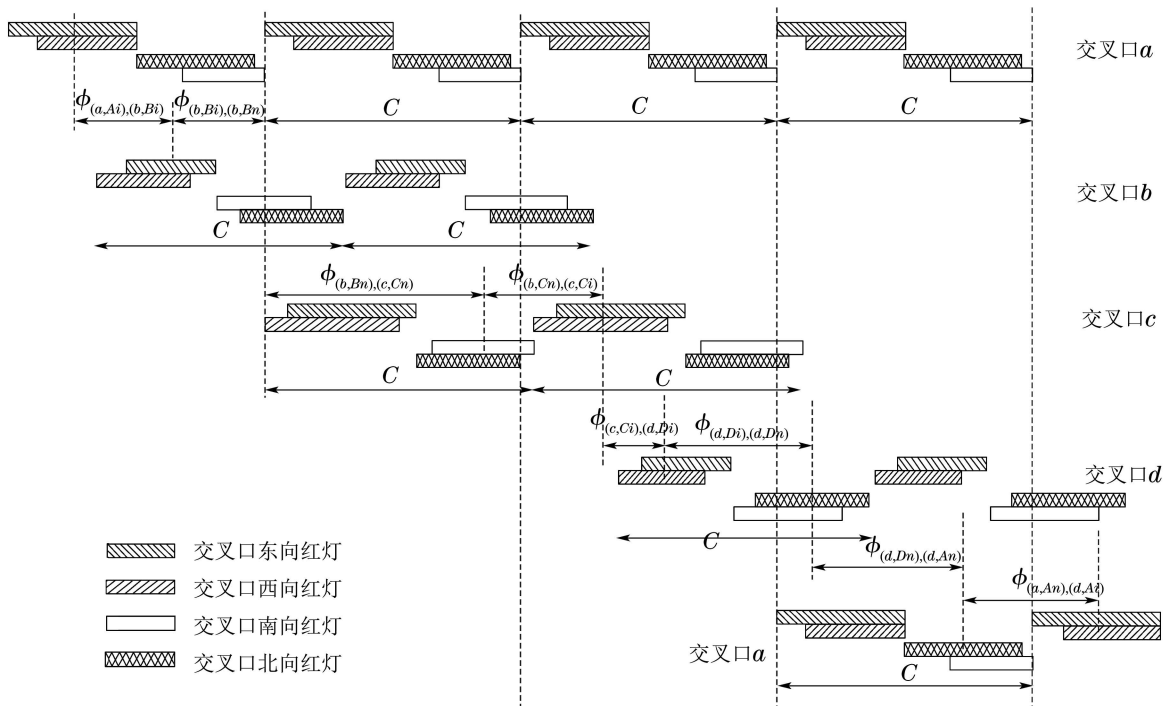


图 3 环路约束示意图

Fig. 3 The network loop constraints diagram

根据图2-3,再结合式(10)-(11)可以得到

$$\begin{aligned} \phi_{(a,Ai),(b,Bi)} = &\frac{1}{2}(\gamma_{b,Bi} - \gamma_{a,Ai}) + w_{a,Ai} - \\ &w_{b,Bi} + (t_{ab} + \frac{1}{2}\gamma_{a,Ai}L_a - \\ &\frac{1}{2}\gamma_{b,Bi}L_b)z - \tau_{ab}^w, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \phi_{(b,Bn),(c,Cn)} = &\frac{1}{2}(\gamma_{c,Cn} - \gamma_{b,Bn}) + w_{b,Bn} - \\ &w_{c,Cn} + (t_{bc} + \frac{1}{2}\gamma_{b,Bn}L_b - \\ &\frac{1}{2}\gamma_{c,Cn}L_c)z - \tau_{bc}^w, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \phi_{(c,Ci),(d,Di)} = &\frac{1}{2}(\gamma_{d,Di} - \gamma_{c,Ci}) + v_{d,Di} - \\ &v_{c,Ci} + (t_{cd} + \frac{1}{2}\gamma_{d,Di}L_d - \\ &\frac{1}{2}\gamma_{c,Ci}L_c)z - \tau_{cd}^v, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \phi_{(d,Dn),(a,An)} = &\frac{1}{2}(\gamma_{d,Dn} - \gamma_{a,An}) + v_{a,An} - \\ &v_{d,Dn} + (t_{da} + \frac{1}{2}\gamma_{a,An}L_a - \\ &\frac{1}{2}\gamma_{d,Dn}L_d)z - \tau_{da}^v. \end{aligned} \quad (21)$$

其中: $w_{i,j}(v_{i,j})$ 是交叉口*i*第*j*个协调相位的上行(下行)绿波带位置,定义为上行(下行)绿波带中心到

第 j 个协调相位绿灯开始的时间距离, $\gamma_{i,j}$ 为交叉口 i 的第 j 个相位的流率比, $g_{i,j}$ 为交叉口 i 的第 j 个相位的归一化有效绿灯时间, $\phi_{(a,Ai),(b,Bi)}$ 为交叉口 a 的协调相位 Ai 到交叉口 b 的协调相位 Bi 的相位差, $\tau_{i(i+1)}^w$ ($\tau_{i(i+1)}^v$) 为交叉口 i 和交叉口 $i+1$ 之间协调相位上行(下行)绿波协调时剩余排队车辆的清空时间。

在交叉口几何条件对称的情况下使用进口对称放行方式, 可最大限度地提高交叉口通行能力、降低交叉口饱和度、减少交叉口行车延误, 并有利于左转非机动车辆的通行, 进口单独放行方式或混合放行方式分析类似^[18]。图3为图2在空间上的展开; 例如, 交叉口 a 的协调相位分别为相位 Ai 和 An , 交叉口 b 的协调相位分别为 Bi 和 Bn ; 交叉口 a 内部相位 Ai 与相位 An 之间存在自相位差 $\phi_{(a,Ai),(a,An)}$, 以绿灯时间的中点为起点计算; AN 为交叉口 a 的最大

相位数, N 为相位个数; 同理可推广到其他交叉口。以交叉口 a 为例, 考虑到交叉口自身的自相位差, 由图4可得

$$\begin{aligned} \phi_{(a,An),(a,Ai)} = & 1 - t_L z - \frac{1}{2} g_{a,Ai} - \frac{1}{2} g_{a,An} - \\ & \left(\sum_{x=n+1}^N \beta + \sum_{x=1}^{i-1} \right) (g_{a,Ax} + t_L z) = \\ & 1 - t_L z - \frac{1}{2} (1 - L_a z) (\gamma_{a,Ai} + \gamma_{a,An}) - \\ & \left(\sum_{x=n+1}^N \beta + \sum_{x=1}^{i-1} \right) (\gamma_{a,Ax} - \gamma_{a,Ax} L_a z + t_L z), \end{aligned} \quad (22)$$

$$\text{其中 } \beta = \begin{cases} 0, & N < n + 1, \\ 1, & N \geq n + 1. \end{cases}$$

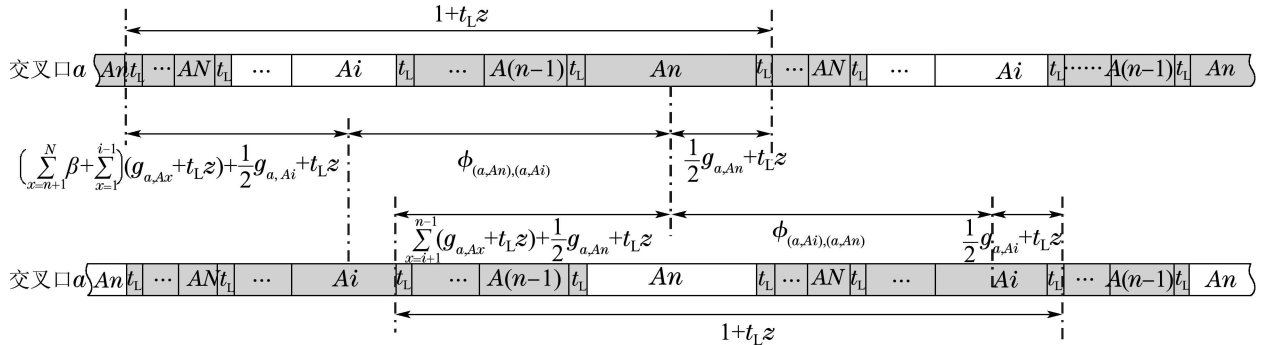


图 4 自相位差示意图

Fig. 4 The intranode offset diagram

同理, 其他3个交叉口的自相位差分别为

$$\begin{aligned} \phi_{(b,Bi),(b,Bn)} = & 1 - t_L z - \frac{1}{2} g_{b,Bi} - \\ & \frac{1}{2} g_{b,Bn} - \sum_{x=i+1}^{n-1} (g_{b,Bx} + t_L z) = \\ & 1 - \frac{1}{2} (1 - L_b z) (\gamma_{b,Bi} + \gamma_{b,Bn}) - \\ & t_L z - \sum_{x=i+1}^{n-1} (\gamma_{b,Bx} - \gamma_{b,Bx} L_b z + t_L z), \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \phi_{(c,Cn),(c,Ci)} = & 1 - t_L z - \frac{1}{2} g_{c,Ci} - \frac{1}{2} g_{c,Cn} - \\ & \left(\sum_{x=n+1}^N \beta + \sum_{x=1}^{i-1} \right) (g_{c,Cx} + t_L z) = \\ & 1 - t_L z - \frac{1}{2} (1 - L_c z) (\gamma_{c,Ci} + \gamma_{c,Cn}) - \\ & \left(\sum_{x=n+1}^N \beta + \sum_{x=1}^{i-1} \right) (\gamma_{c,Cx} - \gamma_{c,Cx} L_c z + t_L z), \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \phi_{(d,Di),(d,Dn)} = & 1 - t_L z - \frac{1}{2} g_{d,Di} - \frac{1}{2} g_{d,Dn} - \\ & \sum_{x=i+1}^{n-1} (g_{d,Dx} + t_L z) = \\ & 1 - \frac{1}{2} (1 - L_d z) (\gamma_{d,Di} + \gamma_{d,Dn}) - \\ & t_L z - \sum_{x=i+1}^{n-1} (\gamma_{d,Dx} - \gamma_{d,Dx} L_d z + t_L z). \end{aligned} \quad (25)$$

绿波带的带宽作为最大绿波带优化模型里十分重要的参数, 它的大小直接决定了优化协调效果的好坏。当然, 绿波带的带宽不可能无限制的增大, 而绿波带的宽度最大值不仅受到交叉口中绿灯时间最小的那个交叉口的限制, 还和交叉口之间的相位差、旅行时间等有关^[19]; 所以人们用绿波带带宽的实际值所达到最大值的比例来衡量优化模型的优化效果, 这个量就是绿波带带宽达到率。协调控制的一般步骤往往先是进行子区划分, 再对子区进行协调控制, 对于最大绿波带优化模型来说, 这就意味着只有在子区划分完成后才可以知道优化效果的好

坏,优化效果不好,又要进行再次划分.为解决这个问题,本文将子区划分和模型优化同时进行,这样的思路使子区的划分更加合理,子区内的协调控制效果更加有效.所以,这里把绿波带带宽达到率直接作为子区细划分的指标,以保证子区内达到足够大的绿波带带宽.

当模型(15)的约束集为凸集(非空)时,由于可行域有界、约束条件为等式约束且目标函数线性,此时模型在其可行域内必定存在最优解.模型变量 I 被限制为整数,属于混合整数线性规划模型,可采用经典的分支定界法求其最优解,同时结合VS2005编程实现.

在模型(1)中,要求任意一种合理的子区划分方案均需满足约束条件:

1) 当交叉口 I_x 与交叉口 I_y 之间的可协调度 $CI_{(I_x, I_y)}$ 大于等于 CI_{HB} 时,交叉口 I_x 与交叉口 I_y 将必须合并并在同一个子区;

2) 当相邻交叉口 I_x 与交叉口 I_y 之间的可协调度 $CI_{(I_x, I_y)}$ 小于等于 CI_{FL} 时,交叉口 I_x 与交叉口 I_y 将必须分离在不同的子区;

3) 子区内绿波带带宽达到率 A_{B_a} 应大于等于子区绿波带带宽达到率分离阈值 A_{Y_Z} ,根据细划分指标绿波带带宽达到率 A_{B_a} 的数学表达式,由于 $0 \leq B \leq G_{\min}$,所以 A_{B_a} 的取值范围为 $[0, 1]$,又因绿波带的宽度随着交叉口数量的增加而减少,所以 A_{B_a} 的阈值直接决定了子区划分的个数.阈值选取较大,则子区个数较多,过于零散,但子区内所能获得的绿波带带宽较大;相反,阈值选取较小,则子区个数较少,但子区内协调效果不理想,而当子区内交叉口的个数大于等于3小于等于6时,协调控制效果最佳; A_{Y_Z} 作为子区绿波带带宽达到率分离阈值,其大小由控制系统对子区动态划分的实时性要求及实际控制需求共同决定.

模型(1)对子区划分方案优劣的评价原则定为:

1) 在满足子区划分约束条件的基础上,子区的划分以子区总数 N_{zQ} 少为优;

2) 在子区总数相等的情况下,子区的划分以所有划分子区综合绿波带带宽 B_t 大为优.

3 子区的动态划分(Dynamic division of sub-area)

目前交通控制子区的划分方法主要有静态划分方法和动态划分方法两类,由于静态划分方法无法适应实时变化的交通流状况,效率较低,因此现在研究较多的是后者.子区动态划分方法的逻辑流程图如图5所示.

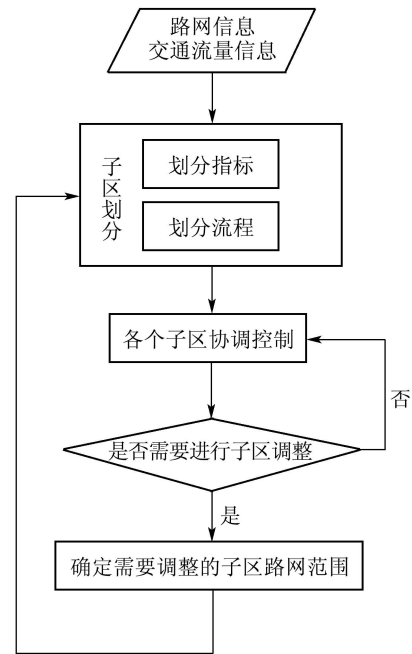


图5 子区动态划分方法的逻辑流程图

Fig. 5 Logic flow chart of subarea dynamic division method

3.1 子区划分流程(Subarea division process)

在子区划分过程中,较常用的方法有聚类分析法和路网遍历法两种.前者是根据路网中各交叉口的某种交通特性,将所有交叉口分为几类,属于同一类且相邻的交叉口划入同一子区;后者则是按照一定的遍历顺序,遍历路网中所有的交叉口,通过一定的准则来判断是否将交叉口划入子区及是否需要新建一个子区.本文采用的是路网遍历的方法,划分流程如图6所示.其划分步骤如下:

1) 计算所有路段的可协调度,即粗划分指标,并以此进行子区的初次划分.首先根据流量信息进行单点配时,得到单点控制时的最佳周期时长,再加之路网信息,计算相邻交叉口 I_x 与交叉口 I_y 之间的可协调度 $CI_{(I_x, I_y)}$,当 $CI_{(I_x, I_y)}$ 大于等于合并阈值 CI_{HB} 时,相邻交叉口 I_x 与交叉口 I_y 必须无条件合并并在同一个子区进行协调,当 $CI_{(I_x, I_y)}$ 小于等于分离阈值 CI_{FL} 时,相邻交叉口 I_x 与交叉口 I_y 必须分离在不同的子区. CI_{HB} 和 CI_{FL} 的阈值需结合大量的模拟仿真结论与工程实践经验进行综合.

2) 对初次划分剩余的路段,根据可协调度对它们进行降序排序并开始遍历.当相邻交叉口 I_x 与交叉口 I_y 之间的可协调度 $CI_{(I_x, I_y)}$ 大于等于 CI_{FL} 且小于等于 CI_{HB} ,需要进行细划分.首先对它们进行排序,为后面的细划分做准备.

3) 在未遍历的路段当中选取可协调度最大的路段.可协调度越大,说明两交叉口间的关联性越强,则优先考虑尝试划入同一子区.

4) 试着将路段两端的交叉口划入同一个子区. 其实不仅仅是路段两端的交叉口, 如果路段两端是两个子区, 则考虑将两个子区进行合并.

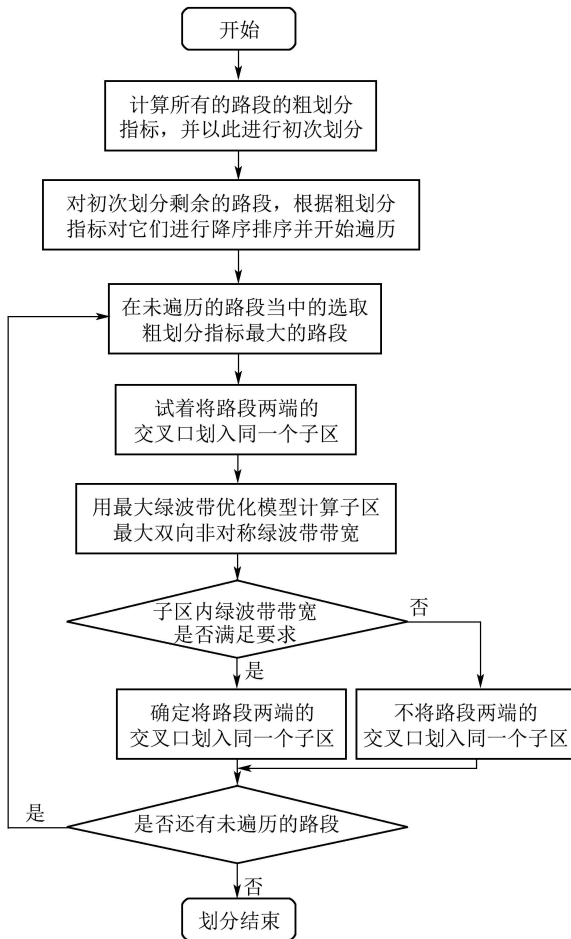


图 6 子区划分流程图

Fig. 6 Flow chart of subarea division

5) 用最大绿波带优化模型计算子区最大双向非对称绿波带带宽. 最大双向非对称绿波带带宽即为相同带宽的情况, 只是目标函数中的加权系数 k_w 和 k_v 不相等.

6) 子区内绿波带带宽是否满足要求. 用细分指标 A_{B_a} 来衡量绿波带带宽达到率是否满足要求, 由于是采用非对称的双向绿波带带宽, 所以达到率 A_{B_a} 的计算公式具体化为

$$A_{B_a} = \left[\frac{k_w B_w}{(k_w + k_v) G_{w \min}} + \frac{k_v B_v}{(k_w + k_v) G_{v \min}} \right] \times 100\%, \quad (26)$$

其中: B_w 和 B_v 分别为正向和反向的绿波带带宽, k_w 和 k_v 分别为它们在目标函数里的加权系数, $G_{w \min}$ 和 $G_{v \min}$ 分别为正向和反向各交叉口协调相位的绿灯时间最小值. 当 A_{B_a} 大于等于带宽达到率分离阈值 A_{YZ} 时, 确定将路段两端的交叉口划入同一个子

区, 否则不划入.

7) 是否还有未遍历的路段. 如果还有没遍历的路段, 则跳转到步骤3)继续执行, 否则说明所有路段已遍历完毕, 子区划分结束.

3.2 子区的动态调整(Dynamic adjustment of sub-area)

控制子区在划分完毕后并不是一成不变的, 因为路网的交通状况是在不断变化且具有很强的时段性, 这使得原本高效的子区变得不合理, 进而影响子区内协调控制的效果, 因此需对路网的实时交通状况进行反馈, 适时地调整子区.

从上面的子区划分的过程中可以看出, 划分虽基于距离、流量和周期3大原则, 但判断绿波带带宽的达到率是否满足要求是一个关键的步骤. 而且在运行过程中, 如果现有子区的划分已经不能很好地适应路网的交通状况, 协调效果变差, 在数据上很直观的反应就是绿波带带宽的达到率下降, 所以本文以绿波带带宽达到率是否达标为子区调整条件, 并提出“调整指数”的概念, 根据“调整指数”来决定是否需要子区进行调整, 以下是调整的方法:

a) 在每个信号周期内, 审查调整条件, 即计算绿波带带宽达到率 A_{B_a} 是否满足 A_{B_a} 大于等于带宽达到率分离阈值 A_{YZ} , 计算公式采用式(26);

b) 根据调整条件是否达标, 计算“调整指数”; 若未达标, 则“调整指数”累积值加1, 否则累积值减1;

c) 若“调整指数”累积值达到4, 则认为子区的划分已经“过时”, 需要对子区做出调整. 调整后, “调整指数”累积值清零. 注意: “调整指数”累积值取非负值, 即最小值为0. “调整指数”的引入可以消除交通状况的随机性所带来的扰动, 使子区的调整更加鲁棒和有效, 这也是本文提出的方法的优点之一.

知道了子区何时需要调整, 接下来的问题当然是子区调整的范围. 对整个路网重新进行子区划分显得不可行, 因为整个路网范围过大, 重新划分又需要一定的时间, 无法满足信号控制实时性的要求, 而且只是个别的子区需要调整, 其他的大部分子区“调整指数”累积值并未达到4, 说明它们的绿波带带宽仍符合要求, 无需进行调整, 所以子区的动态调整只需在小范围内进行. “调整指数”累积值达到4的子区说明该子区内运行效益较低, 已无法适应交通流的变化, 肯定需要调整; 考虑到交通流的连续性, 该子区的调整势必对相邻的子区造成一

定的影响,因此把与该子区相邻的子区也纳入调整的范围.调整的范围确定之后,应用本文所提出的子区划分方法,对子区重新作出划分,并结合混合遗传模拟退火算法快速搜索子区划分模型下的最佳子区划分方案.

4 子区划分模型的优化求解(Optimization solution of subarea division model)

当需要对大范围控制区域进行子区划分时,由于模型约束条件有限,使得控制子区的可选划分方案数目很大,使用智能优化算法可以从中找出最优或次优的子区划分方案,满足子区划分的实时性要求.遗传算法(GA)是一类基于自然选择机制和遗传变异机制的自适应全局优化概率搜索方法,但局部寻优能力不强,易早熟,不收敛;模拟退火算法(SA)求得全局最小点的概率接近1,能跳出全局最小点,但是寻优过程往往较长.本文采用一种基于遗传模拟退火的GASA混合优化策略,取长补短,增强全局和局部意义下的搜索能力和效率.

根据子区划分模型与划分方法的特点,将相连路段可协调度属性定义为基因、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;将可协调度大于等于合并阈值 CI_{HB} 的相连路段基因编码定为1,可协调度小于等于分离阈值 CI_{FL} 的相连路段基因编码定为0,优化过程中保持不变,因此在一定程度上可以减少可选方案数目,缩短寻优时间;遗传模拟退火算法相结合的具体方法是在遗传算法变异、交叉操作结束后,对新个体再一次模拟退火操作,主要操作步骤如下:

1) 确定遗传算法的交叉概率 P_c 、变异概率 P_m ,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,这样初始种群为 P_0 ,种群大小为 H ;确定模拟退火算法的总升温次数 L , δ 为降温系数,终止温度 T_e ,并令升温次数累计 $l = 0$,操作代数累计 $k = 0$;

2) 计算种群中个体的适应度值,并设定温度的初值 $T_b = T_0$;

3) 选择操作采用轮盘赌算法,即按照个体适应度值比例进行选择;对被选中的染色体个体进行交叉操作,计算交叉产生的子个体所对应的适应度值 $f(x^*)$,进行模拟退火操作,其中 $f(x)$ 为父代个体适应度值,若 $f(x^*) > f(x)$,则接收新解;否则以概率

$\exp((f(x^*) - f(x))/T_b) > \text{random}$ 接收新解; random 是(0,1)之间的随机数;

4) 对交叉后的染色体个体进行变异操作和模拟退火操作,同理,方法同步骤3);

5) 令 $k = k + 1$,并降低控制温度 $T_b = \delta \times T_b$; δ 是一个属于[0,1]之间的常数;

6) 判断是否达到终止温度 T_e ,若是,转步骤7),否则转步骤3);

7) 修正升温次数,令 $l = l + 1$;并判断升温次数是否达到限值 L ;若是,转步骤8),否则转步骤2);

8) 输出最优解,终止算法.

遗传算法中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_n ,其变换关系可取为 $F_n = 1/(\eta - PI)$ (η 为较小的一个正数,如0.01),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,选择算子采用了轮盘赌算法,每次可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.模拟退火算法中只要初始温度足够高,退火过程足够慢,终止温度足够低,算法就能收敛到全局最优解;初始温度这里取为100,降温系数通常30.1 ~ 0.99之间取值,终止温度应为一个很小的正数(如0.01).

5 算例分析(Example analysis)

5.1 基于不同控制方式的对比分析(Contrastive analysis based on the different control modes)

本文选取杭州市某一实际路网区域,如图7所示,该路网包括杭州市的文一路、文二路和文三路三条东西走向的主干道及其附属的支干道,是一个典型的方格式城市路网.附属的支干道包括:丰潭路、古翠路、学院路和教工路,都为南北走向.该区域集商业中心、休闲娱乐中心、高教园区及高新技术企业于一身,交通情况具有明显的时段性特点,尤其是早高峰与晚高峰特征突出.

本文分析的某一实际路网由12个交叉口 I_1, I_2, \dots, I_{12} 和17条相连路段 R_1, R_2, \dots, R_{17} 组成,建立的仿真路网模型如图8所示.东西方向的主干道和南北方向的附属支干道都是两车道路段,12个交叉口的物理拓扑结构完全一样,在距停车线100 m处,两车道变为4车道:直行车道两条、左转和右转车道各一条,各相邻交叉口之间路段距离描述见表1.



图 7 杭州某实际路网图

Fig. 7 An actual road-network diagram in Hangzhou

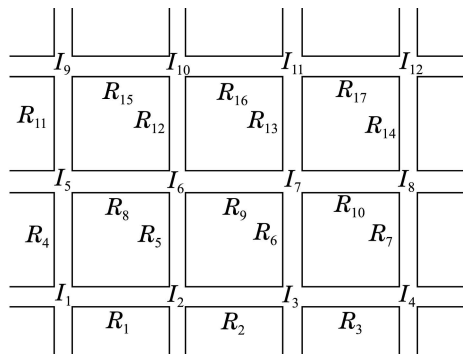


图 8 仿真路网示意图

Fig. 8 The simulation network diagram

表 1 路段长度

Table 1 Link length

路段	距离 / m	路段	距离 / m
R_1	844	R_{10}	562
R_2	1020	R_{11}	620
R_3	563	R_{12}	649
R_4	688	R_{13}	648
R_5	680	R_{14}	704
R_6	678	R_{15}	1020
R_7	677	R_{16}	958
R_8	936	R_{17}	560
R_9	560		

各交叉口进口道的交通流量设置如表2所示, 前后两个时段交通流量(单位为辆/h)输入明显高于中间两个时段, 分别用来模拟早晚高峰期和平峰期, 表2中表示各干线两端指定方向的输入车流量, 而不是干线之间交叉口指定方向的车流量; 每个交叉口的各个方向的左转率为0.1, 车辆的自由流速率为50 km/h.

表 2 交通需求设置

Table 2 The settings of traffic demand

时间段/s	1~1800	1801~3600	3601~5400	5401~7200
文一路西进口	2100	1200	1200	2100
文一路东进口	2100	1200	1200	2100
文二路西进口	1900	1100	1100	1900
文二路东进口	1900	1100	1100	1900
文三路西进口	1700	1100	1100	1700
文三路东进口	1700	1100	1100	1700
丰潭路北进口	1700	700	700	1700
丰潭路南进口	1700	700	700	1700
古翠路北进口	1500	600	600	1500
古翠路南进口	1500	600	600	1500
学院路北进口	1500	600	600	1500
学院路南进口	1500	600	600	1500
教工路北进口	1100	500	500	1100
教工路南进口	1100	500	500	1100

路网中主干道及其附属支干道所有车辆的平均延误时间 D_{ave} 及区域平均车速 V_{ave} 可以有效地反映整个路网的总体运行效率, 具有一定的可比性及说服力, 所以可用来评价在3种不同的控制优化策略下整个路网的总体控制效果.

$$d_f = \left(\frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda \min(1, s))} \right) + 900T_d(x-1 + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{4s}{cT_d}}), \quad (27)$$

$$D_{ave} = \sum_{f=1}^F d_f / F, \quad (28)$$

$$V_{ave} = \sum l_{xy} \cdot v_{xy} / \sum l_{xy}, \quad (29)$$

其中: d_f 为每辆车的平均延误时间, l_{xy} 为相邻交叉口 x 和 y 之间路段的长度, 单位为km; v_{xy} 为整个区域

内每相邻交叉口 x, y 之间路段上5 min内平均旅行速度预测值,其中每个路段的车速是通过布设在路段的检测器获得的; C 为周期, λ 为有效绿信比, s 为饱和度, c 为通行能力, T_d 为仿真持续的时间,这里取0.5 h, F 为路网中所有车辆的数量.

表3中,控制策略1为传统的单点定时控制,控制策略2对整体路网采用最大干线绿波带优化模型,控制策略3为本文提出的基于子区划分的绿波协调控制;可以看出平峰期与高峰期变化较大,尤其在控制策略1下车辆平均旅行速度(单位为km/h)相差很大.在3种控制策略中,无论在平峰期还是高峰期,控制优化策略1控制下的车辆平均旅行速度最小,这是因为控制策略1没考虑各个交叉口之间的联系,缺少整体协调而使整个路网延误增加,进而增加停车率.控制策略2和控制策略3考虑了交叉口之间的协调,尤其在高峰期时,车辆平均旅行速度与控制优化策略1相比减小幅度少许多;但不论在高峰期和平峰期,控制策略3都优于控制策略2,只是因为控制策略3在控制策略2的基础上,更多地考虑了相邻交叉口之间的关联性与非关联性,以便对整个控制区域进行子区划分后再协调控制;而在高峰期由于车辆数量众多,车辆平均延误相对较大,因此车速的降低还是比较大,但相比控制策略2,它们之间车速的变化比较接近.

表3 区域平均车速

Table 3 Regional average speed of vehicles

仿真时段	控制优化策略1	控制优化策略2	控制优化策略3
平峰期	40.64	46.17	48.32
高峰期	25.39	34.84	39.54

表4为整个路网分别在3种控制优化策略下,所有车辆的平均延误时间.可以看到,该表的数据变化与表3的数据变化趋势基本一致:平峰期与高峰期阶段化明显;控制优化策略1的车辆平均延误时间最大,控制优化策略3的车辆平均延误时间小于控制优化策略2,这是因为控制优化策略3中车辆的平均旅行速度稍大于控制优化策略2中车辆的平均旅行速度,因此路网的整体延误时间自然也就减小得多了.

表4 车辆平均延误时间

Table 4 Average delay time of vehicles

仿真时段	控制优化策略1	控制优化策略2	控制优化策略3
平峰期	41.45	35.07	32.78
高峰期	73.46	58.29	51.02

控制优化策略3基于距离、流量和周期3原则并加入绿波带带宽达到率指标的子区动态划分方法有效地保证了各个子区内的绿波带带宽,使车辆能顺利通过路网,减少了停车延误.而控制优化策略2未对整个路网进行子区划分而直接进行协调,且未考虑绿波带带宽达到率是否满足要求.利用VISSIM仿真软件对该路网进行仿真,控制优化策略3在平峰期及高峰期的子区划分效果分别如图9-10所示.在整个模拟仿真阶段,子区划分情况总共变化了两次,可见子区划分方法的稳定性及有效性.

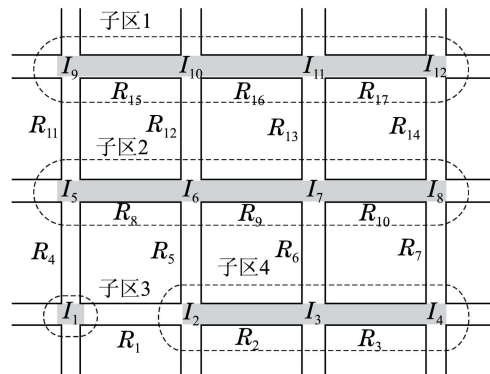


图9 平峰期子区划分情况

Fig. 9 Subarea division of flat peak

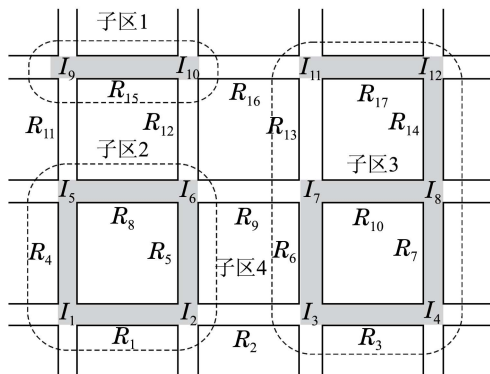


图10 高峰期子区划分情况

Fig. 10 Subarea division of peak

5.2 基于不同划分方法的对比分析(Comparative analysis based on different division method)

已知某一个控制区域由9个交叉口和12条相连路段组成,交叉口编号分别为 I_1, I_2, \dots, I_9 ,其中各路段编号分别为 R_1, R_2, \dots, R_{12} .交叉口之间的距离描述如表5所示.东西干线和南北干线分别用交叉口编号表示,各方向交通需求如表6所示.9个交叉口的物理拓扑结构完全一样,在距停车线100 m处,2车道变为4车道:直行车道两条、左转车道和右转车道各一条,东西方向的左、右转车辆各为1/9,南北方向的左、右转车辆为1/6;非协调相位包括东西方向和南北方向的左、右转相位等,根据实际车

流量及道路交通状况采用合适的信号控制方式, 采用绿波协调控制的直行方向为协调相位。

表 5 路段长度
Table 5 Link length

路段	距离 / m	路段	距离 / m
R_1	700	R_7	500
R_2	500	R_8	600
R_3	500	R_9	600
R_4	500	R_{10}	600
R_5	500	R_{11}	700
R_6	700	R_{12}	500

表 6 交通需求设置

Table 6 The settings of traffic demand

交通干线	交通生成量 / (veh · h ⁻¹)	交通干线	交通生成量 / (veh · h ⁻¹)
$I_1 I_2 I_3$	1500	$I_3 I_2 I_1$	1500
$I_4 I_5 I_6$	1800	$I_6 I_5 I_4$	1800
$I_7 I_8 I_9$	1200	$I_9 I_8 I_7$	1200
$I_1 I_4 I_7$	600	$I_7 I_4 I_1$	600
$I_2 I_5 I_8$	900	$I_8 I_5 I_2$	900
$I_3 I_6 I_9$	600	$I_9 I_6 I_3$	600

各车道的饱和流量为1800辆/h, 每个交叉口的周期可由韦伯斯特方法得到; 根据前人的经验, 并经过反复实验可得, 当 $CI_{HB} = 40$, $CI_{FL} = -8$, $A_{YZ} = 0.66$ 时, 此划分方案能取得较好的效果。根据多次试算, 确定混合遗传模拟退火算法中的各控制参数设置如下: 种群大小 H 为100, 交叉概率 P_c 为0.9, 变异概率 P_m 为0.1, 降温系数 δ 为0.1, 总升温次数 L 是100, 初始温度 T_0 是100, 终止温度 T_e 是0.01。利用VISSIM仿真软件对该路网区域分别进行基于本文提出的划分原则和基于关联度分析的子区划分过程^[20]仿真, 结果分别如图11-12所示。以子区平均排队长度和子区车辆平均延误时间为考核指标, 仿真结果如表7所示。

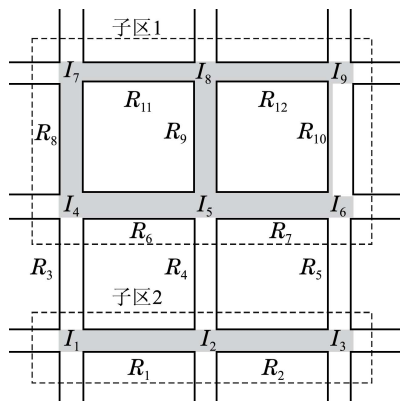


图 11 本文提出的子区划分示意图

Fig. 11 Subarea division diagram based on improved method

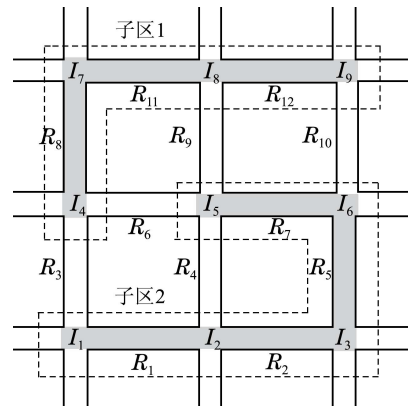


图 12 基于关联度分析的子区划分示意图

Fig. 12 Subarea division diagram based on the correlation analysis

表 7 仿真数据

Table 7 Simulation data

算法	平均排队长度 / m	车辆平均延误 / s
单点定时控制算法	42.4	40.5
基于关联度的协调控制算法	28.9	29.7
本文提出的子区划分算法	23.8	25.6

为了满足实时控制的要求, 本文运用混合遗传模拟退火算法和遗传算法分别对子区划分方案进行求解, 并与卢凯等^[14]的模型求解算法进行比较, 进化代数为100, 结果如表8所示。

表 8 优化结果

Table 8 Optimization results

控制方法	优化算法	子区个数	性能指标	计算时间 / s
基于关联度的协调控制	GA	4	-15.6549	15
本文提出的绿波控制	GA	4	-14.3145	14
本文提出的绿波控制	GASA	4	-14.2417	12

本文在子区划分过程中动态地考虑了交叉口之间绿波协调控制的影响, 以绿波带带宽达到率来衡量子区划分的合理性, 并将其应用到子区划分进程中; 从表8中可以看出, 在一定规模路网之下, 与基于关联度的协调控制相比, 本文利用遗传算法进行快速寻优时, 在搜索效率和搜索速度上都具有一定的优势; 并且在利用遗传模拟退火算法求解子区划分模型时, 搜索效率和搜索速度均优于遗传算法, 更满足子区划分的功能需求, 适合交通信号实时控制系统。

6 结论(Conclusions)

本文提出的多重指标、二次划分子区的模型为控制子区的划分提供了一种实时有效的绿波协调控

制方法,尤其是以绿波带带宽达到率指标对子区进行的再次细分,克服了现有划分方法无法事先保证子区内协调控制效果的缺点,在一定程度上保证了子区在各种交通状态下规模始终适中,进而使子区协调效果更加显著,最后以绿波带带宽达到率是否达标为子区调整条件,引入“调整指数”的概念来对子区进行在线调整,并利用混合遗传模拟退火算法对子区划分方案快速寻优,保证了动态划分子区的实时性和高效性。

本文提出的子区划分方法不适合过饱和状态下的交通状况,该方法有待改进;建立的最大绿波带优化模型只优化了子区内干线上所有路口的公共绿波带宽,并未考虑部分连续路口附加绿波带宽,即子区的绿波协调控制效果有待提高,这也是本文方法的不足之处。

参考文献(References):

- [1] WALINCHUS R J. Real-time network decomposition and subnetwork interfacing [R]. Washington, DC: Transportation Research Board, 1971: 20 – 28.
- [2] YAGODA H N, PRINCIPE E H, VICK C E, et al. Subdivision of signal systems into control areas [J]. *Traffic Engineering, Institute of Traffic Engineers*, 1973, 43(12): 42 – 47.
- [3] PLINE J L. *Traffic Control Devices Handbook* [M]. Washington, DC: Institute of Transportation Engineers, 2001: 321 – 354.
- [4] CHANG E C P. How to decide the interconnection of isolated traffic signals [C] // *Proceedings of the 17th Conference on Winter Simulation*. New York: Association for Computing Machinery, 1985: 445 – 453.
- [5] LIN L T, TSAO S M. A system approach on signal grouping for areawide control of computerized traffic system [C] // *Proceedings of the 79th Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington, DC, USA: TRB, 2000: 1 – 21.
- [6] LIN L T, HUANG H J. A linear model for determining coordination of two adjacent signalized intersections [J]. *Journal of Modelling in Management*, 2009, 4(2): 162 – 173.
- [7] 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 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2008, 32(3): 381 – 384.
(LI Ruimin, LU Huapu, SHI Qixin. Research on traffic signal control sub-area fuzzy automatic division method [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*, 2008, 32(3): 381 – 384.)
- [8] 莫汉康, 彭国雄, 云美萍. 诱导条件下交通控制子区自动划分 [J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(2): 67 – 72.
(MO Hankang, PENG Guoxiong, YUN Meiping. Automatic division of traffic control sub-area under condition of route guidance [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2002, 2(2): 67 – 72)
- [9] 杨庆芳, 陈林. 交通控制子区动态划分方法 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2006, 36(S2): 139 – 142.
(YANG Qingfang, CHEN Lin. Division approach of traffic control work zone [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology)*, 2006, 36(S2): 139 – 142.)
- [10] 赵文涛, 钱晓杰, 朱芸, 等. 基于关键路口的动态交通子区划分 [J]. 计算机与应用化学, 2012, 29(10): 1241 – 1244.
(ZHAO Wentao, QIAN Xiaojie, ZHU Yun, et al. Research on the dynamic traffic zoning based on the key junctions [J]. *Computers and Applied Chemistry*, 2012, 29(10): 1241 – 1244.)
- [11] 段后利, 李志恒, 张毅, 等. 交通控制子区动态划分模型 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(S2): 13 – 18.
(DUAN Houli, LI Zhiheng, ZHANG Yi, et al. Dynamic subdivision of road network into coordinated control regions [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology)*, 2009, 39(S2): 13 – 18.)
- [12] 首艳芳, 徐建闽. 基于群体动力学的协调控制子区划分 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 77 – 82.
(SHOU Yanfang, XU Jianmin. Division of coordinated control sub-areas based on group dynamics theory [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 41(4): 77 – 82.)
- [13] 尹洪英, 徐丽群, 曹永荣. 基于谱聚类算法的城市路网动态分区研究 [J]. 交通信息与安全, 2010, 28(1): 16 – 19.
(YIN Hongying, XU Liqun, CAO Yongrong. City transportation road network dynamic zoning based on spectral clustering algorithm [J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2010, 28(1): 16 – 19.)
- [14] 卢凯, 徐建闽, 郑淑鉴, 等. 协调控制子区快速动态划分方法研究 [J]. 自动化学报, 2012, 38(2): 279 – 287.
(LU Kai, XU Jianmin, ZHENG Shujian, et al. Research on fast dynamic division method of coordinated control subarea [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(2): 279 – 287.)
- [15] FAN W D, TIAN Z Z. Arterial signal timing and coordination: sensitivity analyses and partition techniques [C] // *Proceedings of the 7th International Conference on Traffic and Transportation Studies*. Kunming: American Society of Civil Engineers, 2010: 338 – 350.
- [16] LITTLE J D C, KELSON M D, GARTNER N H. MAXBAND: A versatile program for setting signals on arteries and triangular networks [J]. *Transportation Research Record*, 1981, 795(2): 40 – 46.
- [17] GARTNER N H, STAMATIADIS C. Progression optimization featuring arterial and route-based priority signal networks [J]. *Intelligent Transportation Systems*, 2004, 8(2): 77 – 86.
- [18] 卢凯, 徐建闽, 陈思溢, 等. 通用干道双向绿波协调控制模型及其优化求解 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(4): 551 – 555.
(LU Kai, XU Jianmin, CHEN Siyi, et al. A general model of bidirectional green wave for coordinate control of arterial road and its optimization solution [J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2011, 28(4): 551 – 555.)
- [19] TIAN Z, URBANIK T. System partition technique to improve signal coordination and traffic progression [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2007, 133(2): 119 – 128.
- [20] 卢凯, 徐建闽, 李铁舜. 基于关联度分析的协调控制子区划分方法 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2009, 37(7): 6 – 9.
(LU Kai, XU Jianmin, LI Yishun. Division method of coordinated control subareas based on correlation degree analysis [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science)*, 2009, 37(7): 6 – 9.)

作者简介:

冯远静 (1976–), 男, 教授, 博士, 研究方向为交通信号控制、智能优化, E-mail: fyjing@zjut.edu.cn;

单敏 (1988–), 男, 硕士研究生, 研究方向为交通信号控制、智能交通系统, E-mail: zgdsanmin@163.com;

乐浩成 (1987–), 男, 硕士研究生, 研究方向为交通信号控制、智能交通系统, E-mail: lhc7895123@sina.com;

张贵军 (1974–), 男, 教授, 博士, 研究方向为智能信息处理、智能交通系统, E-mail: zgi@zjut.edu.cn;

俞立 (1961–), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为先进控制理论、智能优化, E-mail: lyu@zjut.edu.cn.