

城市交通过饱和状态下干线信号的多目标仿真优化研究

高光 赵新灿 王黎明

(郑州大学信息工程学院 郑州 450001)

摘要 针对城市交通过饱和状态下的干线信号优化问题,分析了交通控制目标对车辆排队的影响,提出以绿信比、相序、相位差和周期为优化参数,以车辆平均时延、系统平均排队-车道长度比和系统通行能力为优化目标的交通信号仿真优化模型。构建了优化模型的实施框架,该框架采用自主构建的微观交通仿真环境来获取信号方案评价指标,改进多目标优化算法 NSGAII 中的重复个体问题,完成对干线各交叉口信号配时方案的同时优化。最后,利用采集的交通数据对由3个交叉口组成的干线进行实例验证,验证结果表明,在过饱和状态下,所提出的信号优化方法不仅可以有效控制车辆排队长度,均衡车辆分布,同时在系统通行能力、车均时延方面表现更佳。

关键词 多目标优化,过饱和和干线,信号优化,微观交通仿真

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.10.038

Multi-objective Signal Simulation Optimization for Urban Oversaturated Arterial

GAO Guang ZHAO Xin-can WANG Li-ming

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract To resolve signal optimization problem of urban oversaturated arterial, a traffic signal simulation optimization model was put forward by analyzing the impact of traffic control objective on vehicle queue. This model takes green split, phase sequence, offset and cycle length as optimized parameters. Meanwhile, vehicle average delay, system average queue-lane length ratio and system capacity are selected as optimized goal. In order to implement the model, a framework was constructed, in which the microscopic traffic simulation environment established by ourselves is used to acquire the evaluation index of special signal scheme. And the repeated individual problem of multi-objective optimization algorithm (NSGA II) is improved, thereby the simultaneous optimization of signal timing scheme of arterial intersections is completed. Finally, the collected traffic data from arterial consisted of three intersections were used to verify the model. The experimental results indicate that the proposed model not only can effectively control the vehicle queue length and balance the vehicle distribution, but also has better performance on the system capacity and average delay.

Keywords Multi-objective optimization, Oversaturated arterial, Signal optimization, Microscopic traffic simulation

1 引言

随着城市的快速发展,交通拥堵问题日益突显,城市交通流量主要集中于干线,高峰时期实际车流量往往会超过通行能力而处于过饱和状态^[1],若不加以有效控制则会导致整个交通瘫痪,因此如何优化过饱和状态下的干线信号控制参数成为了提高交通路网通行效率的关键。目前信号的优化研究大致可分为3类:基于数学规划模型的优化^[2-3]、基于宏观模型的优化^[4-5]和基于微观仿真的优化^[6-9]。

基于数学规划的优化方法能满足交通实时控制的需求,但由于现代交通系统的复杂性,实时控制参数难以被准确测量^[2],而且现有数学模型大部分针对非饱和交通,在过饱和状态下其适用性有所降低^[1];基于宏观模型的优化方法能有效描述控制变量和交通状态演化之间的关系,但无法实现对共享车道中溢出队列对车辆消散和阻滞的影响进行建模^[5];基于微观仿真的优化方法能够适应各种复杂的信号控制类型,

并直观刻画车辆排队形成和消散,实现更合理的信号控制方案,因而受到越来越多的关注^[6]。Stevanovic 利用微观交通仿真器(Vissim)和遗传算法(Genetic Algorithm),以最小化系统时延与停车率的加权和为优化目标,对比了不同优化参数的控制效果,结果表明对多个信号的控制参数进行优化能取得更优的配时方案^[7]。Li 采用多目标优化方法调整信号配时参数,使主干道通过的车辆数量最多以及平均排队占比最小,但忽略了车辆延误和相序优化^[8]。高云峰将研究时段内各交叉口的总通过车流量,以平均排队长度、平均停车率和平均延误作为优化目标,结合多目标优化算法和元胞传输模型(CTM)优化配时参数,结果表明不同优化目标之间存在复杂的非线性关系,多目标优化取得了较好的实验效果^[9]。

本文针对过饱和状态下干线信号的协调控制优化问题,结合微观交通仿真建立了以绿信比、相序、相位差和周期为优化参数,以车辆平均时延、系统平均排队-车道长度比和系统通行能力为优化目标的 FTF 仿真优化模型,并构建了模型实

到稿日期:2016-09-02 返修日期:2016-11-26 本文受民航联合研究基金(U1433106)资助。

高光(1992-),男,硕士,主要研究方向为智能交通、软件工程;赵新灿(1972-),男,博士,副教授,主要研究方向为智能交通、虚拟现实;王黎明(1963-),男,博士,教授,主要研究方向为现代软件工程技术、分布式人工智能、数据挖掘,E-mail:ielmwang@zzu.edu.cn(通信作者)。

施框架。该框架自主构建了微观交通仿真环境,针对 NS-GAII 算法中的重复个体问题提出重复检测方法和预选策略,以进一步提升算法性能。

2 过饱和状态下干线信号 FTF 仿真优化模型

信号优化的最终目的是提高通行效率,最小化车辆延误是优化目标之一,但仅注重延误最小则会导致分配给关键相位的绿灯时间较长,在过饱和状态下将加重交叉口各车流排队长度的不均衡分布^[10],从而增大次要相位车辆排队溢出的可能性。由车道通行能力计算公式^[11]可知,饱和车流量和周期保持不变时,通行能力越大,则绿灯时间的利用率越高,增大实际通行能力有利于消散更多车辆和减少剩余队列长度以避免溢出。本文针对过饱和干线信号协调优化问题提出 FTF(signal optimization of Four variables, Three objectives and Four constraints)交通信号仿真优化模型,如式(1)和式(2)所示。

$$FTF(G, Ps, Offset, C) = \begin{cases} \min AD \\ \min AQ \\ \max TH \end{cases} \quad (1)$$

$$s. t. \begin{cases} C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \\ G_{\varphi}^i \min \leq G_{\varphi}^i \leq G_{\varphi}^i \max \\ \sum_{\varphi \in \Phi_i} G_{\varphi}^i = C \\ 0 \leq Offset_{ij} \leq C \end{cases} \quad (2)$$

FTF 模型描述了信号仿真优化时需要调整的控制参数、优化目标及参数约束关系。该模型包含:1)4个信号优化变量。 G 表示绿信比; Ps 表示相序,决定相位的实际执行顺序; $Offset$ 表示相位差; C 表示共享周期。2)3个优化目标:最小化车均时延,最小化系统平均排队-车道长度比,最大化系统通行能力。3)4个信号控制参数约束关系:周期时长约束,其中 C_{\min}, C_{\max} 为最短和最长周期;各相位绿灯时长约束, $G_{\varphi}^i, G_{\varphi}^i \min, G_{\varphi}^i \max$ 分别为交叉口 i 相位 φ 的实际绿灯时长、最短绿灯时长和最长绿灯时长;等周期约束, Φ_i 为交叉口 i 的相位集合;相对相位差约束, $Offset_{ij}$ 为交叉口 i 和 j 的相对相位差。

式(1)中 AD 为车辆平均时延(单位: s/veh),如式(3)所示,其中 TD 为系统总延误时间(见式(4)),由3部分构成:第一项为仿真结束时未驶出研究区域的车辆总行驶时间,第二项为已驶出研究区域的车辆总行驶时间,第三项为所有车辆以期望速度行驶相应路程的耗时总和。

$$AD = \frac{TD}{N} \quad (3)$$

$$TD = \sum_{k \in N_{tem}} (t_k^{tem} - t_k^{in}) + \sum_{k \in N_{out}} (t_k^{out} - t_k^{in}) - \sum_{k \in N} \frac{d_k}{v_{free}} \quad (4)$$

其中, N_{tem}, N_{out}, N 分别为仿真结束时未驶出和已驶出研究区域的车辆集合以及仿真期间进入路网的所有车辆集合; $t_k^{in}, t_k^{out}, t_k^{tem}$ 分别为车辆 k 进入和离开研究区域的时刻以及仿真结束的时刻; d_k 为车辆 k 的行驶路程; v_{free} 为车辆期望速度。

AQ 为所有交叉口平均排队-车道长度比的和,如式(5)所示,其值越小说明车道剩余容纳能力越强,越有利于控制溢出,其中 Q_i 为交叉口 i 各车道在每一相位末车辆排队长度与车道长度比的和,如式(6)所示。

$$AQ = \sum_{i \in I} (Q_i / \sum_{j=1}^{c_i} |\Phi_i|) \quad (5)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^{c_i} \sum_{\varphi \in \Phi} \sum_{s \in S_i^{\varphi}} \sum_{e \in E_s} \frac{q(e)}{L_s} \quad (6)$$

其中, $q(e)$ 为车道 e 的车辆排队长度; L_s 为路段 s 的长度; E_s 为路段 s 上的车道集合; S_i^{φ} 为交叉口 i 的上游路段集合; c_i 为交叉口 i 在仿真期间执行的总周期数; I 为交叉口集合。

TH 为系统通行能力(单位: veh/h),如式(7)所示,它是各交叉口每个车道实际通行能力的总和,其值越大表示研究区域通过的车辆数越多。

$$TH = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^{c_i} \sum_{i \in I} \sum_{s \in S_i^{\varphi}} \sum_{e \in E_s} NV(e) \quad (7)$$

其中, $NV(e)$ 为仿真期间车道 e 通过的车辆数; T 为仿真时间; S_i^{φ} 为交叉口 i 下游路段集合。

3 仿真优化模型实施框架

基于 FTF 模型构建了如图 1 所示的交通信号仿真优化框架,该框架主要包括信号方案优化器和微观交通仿真器。优化器采用多目标优化算法 NSGA II^[12] (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II) 根据优化目标选择较优种群,通过迭代进化求解最优解集;仿真器将信号配时方案与交通流量等参数作为输入,从微观角度模拟信号控制下交通流的演化过程,包括车辆间跟驰行为的相互影响、信号变化、排队形成和消散等。

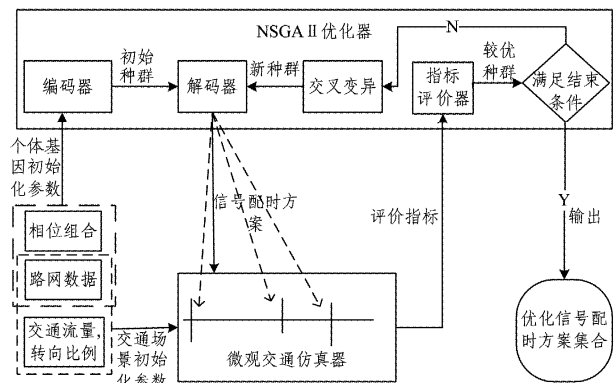


图1 交通信号仿真优化框架

信号优化开始时仿真器根据路网数据、交通流量及交叉口转向比例初始化交通场景;编码器根据路网拓扑结构和预设相位组合产生初始种群,种群中每个个体代表干线的一个信号配时方案,经解码即可得到各交叉口信号配时参数(相序、相位差、绿信比、周期);仿真器接收信号配时方案进行仿真,在仿真期间会记录每辆车在不同路段的时延、各车道排队长度、道路车辆输出等测量值,并在每个配时方案模拟结束后计算各个评价指标(FTF 模型中的3个优化目标),优化器依据这些指标确定较优种群,此时若达到结束条件则输出优化的配时方案集合,否则经过交叉变异产生新种群并进入下一代优化过程。

4 多目标信号优化算法的改进

FTF 信号仿真优化模型是典型的多目标优化问题,解决此类问题的方法可分为两类:1)基于权重分配;2)基于 Pareto 最优概念^[9]。基于权重分配的优化方法本质是多个目标的线性组合达到最小,但权重系数难以确定;基于 Pareto 最优概念的优化方法则利用 Pareto 最优解概念及支配关系,有效解

决了此类问题,其代表算法 NSGA II 不仅继承了 GA 所具有的较强的全局搜索能力和鲁棒性等优点,而且能解决非连续、不可微和具有多峰的非凸问题。

4.1 NSGA II 算法中重复个体影响分析

NSGA II 能够有效解决多目标优化问题,但由于遗传算法的随机特性,种群中常含有重复个体^[13],对重复个体进行仿真优化无异于做“无用功”,且它的存在降低了种群多样性,无益于种群进化。信号优化时间的长短主要取决于仿真次数,重复个体对优化问题的影响较大,本文提出重复个体检测方法和预选策略以进一步提升算法性能。

4.2 重复检测及预选

4.2.1 基于 Hash 映射的重复检测

设种群规模为 m ,最大代数数为 r ,基因序列总长度为 n 。若直接采用逐位比对基因的方法(见算法 1)判断种群是否存在重复个体,则需将种群中每个个体与其余个体依次比较,平均共比较 $m^2/2$ 次。在判断两个个体是否重复时,又需逐位比对两者的基因位,共比对 n 次,因此每一代重复检测共进行 $m^2 \times n/2$ 次基因位对比,则达到最大代数 r 时的时间复杂度为 $O(m^2 nr)$,这种检测方法对于二进制编码会产生大量时间开销。

本文提出基于 Hash 映射的链地址种群组织方式,利用分层比较思想进行快速重复检测,如图 2 所示。

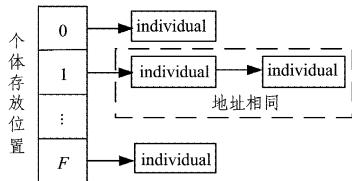


图 2 种群组织方式

通过对个体各基因位的值求和得到 Hash 地址,如式(8)所示:

$$address_j = F(gene_j) = \sum_{i=1}^n gene_j(i) \quad (8)$$

其中, $gene_j(i)$ 为个体 j 第 i 基因位的值。图 2 所示的结构中具有相同地址的个体形成一个链,当生成新个体时首先计算该个体的 Hash 地址以快速定位存放位置,若此位置为空则可断定该个体唯一并将其存入该位置中;否则再与此位置中已存在的个体逐位比对基因以最终判断。这种分层比较方法(见算法 2)在对个体进行判断时克服了在任何情况下均需与种群中其余个体比较的缺点,在最好情况下(个体 Hash 地址均不同)仅需对个体的 Hash 地址对应位置检查一次即可确定是否重复,即每代比较 m 次,达到最大代数 r 时的时间复杂度为 $O(mr)$;最坏情况下(个体 Hash 地址均相同)所有个体位于同一链,仍需将每个个体与其余个体进行两两基因位比对,因此与直接采用逐位比对基因方法的时间复杂度相同,为 $O(m^2 nr)$ 。

算法 1 直接采用逐位比对基因的方法

输入:种群规模 m ,最大代数 r ,基因序列总长度 n
 输出:个体重复标识
 for generation=1:r//每代进行一次重复检测
 flag[m]={0};//初始化重复标识
 for i=1:m//依次与种群中其余个体比较
 for j=1:m
 if i==j continue;

```

sum=0;
for k=1:n//逐位比对基因
  if gene[i][k]==gene[j][k]
    sum=sum+1;
  endif
endfor
if sum==n//基因完全相同,置标志位 1
  flag[i]=1;
  break;
endif
endfor
endfor
endfor

```

算法 2 基于 Hash 映射的重复检测方法

输入:种群规模 m ,最大代数 r ,基因序列总长度 n
 输出:个体重复标识
 init hashtable; // 初始化哈希表
 for generation=1:r//每代进行一次重复检测
 flag[m]={0};//初始化重复标识
 for i=1:m//检测每个个体是否重复
 index=Hash(gene[i]); //计算 Hash 地址
 if hashtable[index] != NULL
 individuals=hashtable[index]; //得到该位置已存个体
 for j=1:individuals
 sum=0;
 for k=1:n//逐位比对基因
 if gene[i][k]==gene[j][k]
 sum=sum+1;
 endif
 endfor
 if sum==n//个体重复,置标志位 1
 flag[i]=1;
 flag[j]=1;
 break;
 endif
 endfor
 endif
 append(i, hashtable[index]); //将个体链接至此位置
 clear(hashtable); //清空哈希表,以便下代使用
 endfor

4.2.2 种群预选

文献[13]在检测到重复个体后对其进行再变异修复,但由于变异的随机性,修复后的个体仍可能重复,并不能有效解决重复问题。本文在 NSGAI I 算法评价个体前增加预选操作,即在重复检测后仅保留相互重复个体中的一个,直接剔除其余个体,它们不再参与算法后续操作。若初始种群 P_0 中不存在重复个体,则执行预选后产生的合并种群 P 中也不会存在重复个体且种群规模 $|P| \geq |P_0|$,在保证不降低种群多样性的同时提高了优化效率。

5 多目标信号优化算法设计

5.1 编解码方式

5.1.1 信号方案编码

个体信息包含各交叉口绿信比、相序、共享周期以及相邻交叉口的相位差,可将各优化变量单独分段编码。对于两个

四相位交叉口, 编码结构为: $\{g_1^1, g_2^1, g_3^1, g_4^1, s_1^1, s_2^1, s_3^1, s_4^1; g_1^2, g_2^2, g_3^2, g_4^2, s_1^2, s_2^2, s_3^2, s_4^2; off_{12}, cycle\}$ 。其中, g_φ^i 决定第 i 交叉口相位 φ 的绿信比; s_φ^i 为第 i 交叉口相位 φ 的相序; off_{ij} 决定交叉口 i 和 j 的相位差; $cycle$ 决定共享周期时长。相序变量采用实值整数编码, 其他变量为二进制编码且编码位数 vm 由式(9)确定, 式(9)中 t^+, t^- 分别是相应变量的上、下限。

$$vm = \lfloor \log_2^{t^+ - t^-} \rfloor \tag{9}$$

5.1.2 信号方案解码

解码个体时需考虑各信号的控制参数约束, 周期时长、绿灯时长和相对相位差可分别按式(10)~式(12)解码:

$$C = C_{\min} + \text{INT}[(C_{\max} - C_{\min}) \times \frac{(cycle)_{10}}{2^{vm} - 1}] \tag{10}$$

$$G_\varphi^i = G_{\varphi \min}^i + \text{INT}[C - \sum_{\varphi \in \Phi} G_{\varphi \min}^i \times \frac{(g_\varphi^i)_{10}}{\sum_{\varphi \in \Phi} (g_\varphi^i)_{10}}] \tag{11}$$

$$Offset_{ij} = \text{INT}[C \times \frac{(off_{ij})_{10}}{2^{vm} - 1}] \tag{12}$$

其中, INT 表示取整; $(\cdot)_{10}$ 表示变量的十进制数。式(10)将周期限制在最大值和最小值之间; 式(11)保证分配给各相位的绿灯时长在合理范围之内且总和为周期时长; 式(12)保证相对相位差在 0 和周期时长之间。

5.2 个体交叉和相序纠正

为提高解集的收敛性, 本文采用文献[14]提出的“邻居最大距离”法挑选个体以进行交叉操作, 同时考虑到单周期内相位之间相互制约, 每一相位必须轮换一次, 对相序变量进行交叉后必须检测是否存在重复相位。如图 3 所示, 检测从前向后进行, 若存在重复相位, 则将其替换为此周期内未出现的相位。



图 3 相序纠正

相序纠正可视为基因的变异操作, 故不再对相序变量做单独变异既可保证优化结果的可用性, 又能提高优化效率。

6 信号优化框架中微观仿真环境的构建

常见的微观交通仿真器 (Vissim 等) 的路网编辑过程复杂, 不能独立统计多车道路段上每个车道的排队长度以及根据配时方案自适应决定数据测量时刻, 无法满足研究者对交通仿真数据的需求。本文构建了包括路网提取、跟驰模型、信号控制以及指标评价的微观交通仿真环境, 本节主要描述其中关键的道路自动提取及改进的 IDM 跟驰模型。

6.1 道路自动提取与路网构建

路网提取和构建是仿真的基础工作, 常见的微观交通仿真器采用手工操作建立路网, 过程繁琐易出错。本文基于栅格地图自动提取道路中心线并建立路网, 具体步骤如下。

(1) 利用设定的颜色阈值对栅格地图 (见图 4(a)) 进行图像二值化, 区分出道路和背景, 得到图 4(b);

(2) 对图 4(b) 实施连续腐蚀和膨胀操作以去除孤立点, 然后进行细化得到道路中心线 (像素点组成), 再经过交点检测获取各交叉口位置, 最后删除共线路点以减少路网存储空间, 得到图 4(c);

(3) 基于提取的道路中心线采用文献[15]提出的车道级基础路网模型构建逻辑路网, 经纹理映射后得到仿真交通路

网, 如图 4(d) 所示。图 4(e) 为路网局部放大截图。

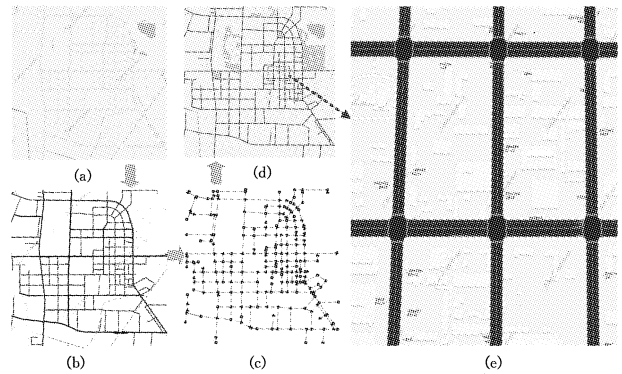


图 4 道路提取与路网构建

6.2 IDM 跟驰模型的改进

跟驰模型分为刺激-反应类模型、安全距离类模型、心理-生理类模型和智能驾驶人模型 (IDM) 等^[16], 其中 IDM 模型根据两车间距和速度动态调整跟车加速度, 方法简单有效, 但该模型在一些特定情况下将失效^[17]。本文依据心理-生理模型将车距阈值判断与 IDM 模型相结合以解决上述问题。

心理-生理模型认为跟车通常不会得知准确的前车速度, 而是根据车距 s 判断是否加减速, 因此可将跟驰过程分为 3 个阶段: 1) $s \geq \theta$: θ 为车距阈值, 取 125 (单位: 米)。此时两车相距较远, 由原 IDM 模型^[17] 可知期望车距与两车间距的比值 (记为 dt) 对加速度的影响较小且导致加速度反复微弱波动, 可忽略该项而仅考虑车速差, 使跟车更快地达到期望速度并保持匀速行驶。2) $s_0 \leq s < \theta$: s_0 为安全距离。此时两车间距引起跟车高度注意, 不宜忽略 dt 对加速度的影响, 仍采用原 IDM 加速度更新公式。3) $s < s_0$: 此时两车间距小于安全距离, 为保证车辆不碰撞, 可加入紧急制动策略, 即将加速度和速度归 0。综上分析, 跟驰模型可总结为式(13), 其中符号的含义参见文献[17]。

$$\dot{v}(t) = \begin{cases} a_0 \{1 - [\frac{v(t)}{v_0}]^4\}, & \theta \leq s \\ a_0 [1 - (\frac{v(t)}{v_0})^4 - (\frac{s^* (v(t), \Delta v(t))}{s})^2], & s_0 \leq s < \theta \\ 0 \text{ 且 } v(t) = 0, & s < s_0 \end{cases} \tag{13}$$

7 实例验证与分析

7.1 实验环境及数据

结合 Open Scene Graph 图形库与 MFC 框架实现了三维立体可视化微观交通仿真环境, 图 5 给出了信号控制下单交叉路口的车辆运行状态。



图 5 信号控制下单交叉路口的车辆运行状态

选取郑州市科学大道上相邻 3 个交叉口进行干线信号优

化,干线详细情况如图 6 所示,其中科学大道和瑞达路为双向四车道,其余为双向单车道,符号 1~3 为交叉口编号,其余为路段边界编号。

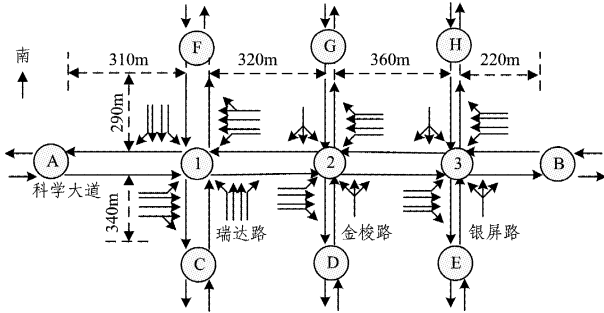


图 6 干线道路详细情况

图 7 给出各交叉口采用的默认相位和相序,其中东西双向相位为协调相位。表 1 列出交通高峰时期 17:00—21:00 的各交叉口车流量及车头时距数据,可计算交叉口 1,2,3 的饱和度^[10]分别为 1.36,1.28,1.35,干线交通处于过饱和状态。

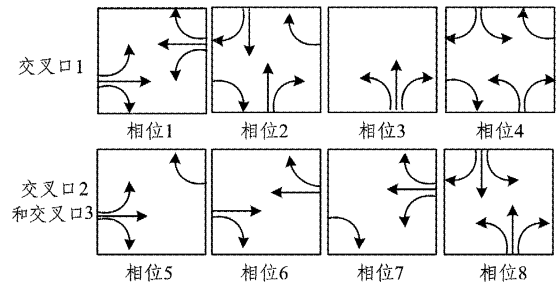


图 7 干线各交叉口的相位组合

表 1 干线各交叉口的车流量及车头时距

交叉口		东			西			南			北		
		左转	直行	右转	左转	直行	右转	左转	直行	右转	左转	直行	右转
1	流量/(veh/h)	412	1348	195	242	877	393	438	648	666	956	397	451
	车头时距/s	1.7	1.5	1.5	1.8	1.6	1.6	1.9	1.7	1.6	1.4	1.7	2.2
2	流量/(veh/h)	261	1607	140	153	1569	191	155	116	121	59	230	170
	车头时距/s	1.9	1.5	1.7	1.9	1.5	1.8	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
3	流量/(veh/h)	281	1592	93	98	1707	157	135	141	180	54	209	154
	车头时距/s	1.9	1.6	1.7	1.9	1.5	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	1.8

7.2 多目标优化改进算法对比实验

为验证改进算法的效果,实验分别采用标准 NSGA II 算法、文献[13]的 HEM-NSGA II 和本文改进算法 Improved-NSGA II 进行干线信号仿真优化。采用相同参数设置:周期范围为 40~150s,绿灯时长范围为 5~100s,相位黄灯和全红时间分别为 3s 和 2s,路段限速 60km/h,每次仿真 15min;种群规模为 16,进化代数 50,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.2。

图 8 给出了不同算法的解集分布,可以看出采用标准 NSGA II 所得个体大多集中于右上部,收敛性较差;HEM-NSGA II 由于采用“邻居最大距离”法挑选个体,在一定程度上避免了同等个体交叉,提高了收敛性,但解集分布仍不均匀;Improved-NSGA II 在优化过程中检测并剔除重复个体,进一步提升了种群多样性,其解集收敛性更优,个体分布较均匀。

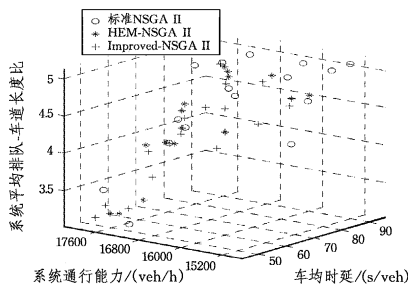


图 8 3 种算法在三维空间的解集分布

为定量分析上述 3 种算法解集的优劣,表 2 列出了不同解集的收敛度和分布度^[13],计算公式分别如式(14)和式(15)所示。

$$Con = \frac{1}{|P|} \sum_{i=1}^{|P|} \sqrt{\sum_{k=1}^M \left(\frac{f_k(i)}{f_k^+ - f_k^-} \right)^2} \quad (14)$$

$$SP = \sqrt{\frac{1}{|P|} \sum_{i=1}^{|P|} (\bar{d} - d_i)^2} \quad (15)$$

其中, P 表示种群; M 为优化目标个数; $f_k(i)$, f_k^+ , f_k^- 分别为个体 i 的第 k 个目标值,第 k 个目标上限和下限; d_i 为个体 i 与最近个体的距离; \bar{d} 为 d_i 的均值。收敛度越小表明表明解集越靠近理想解(图 8 左下角的坐标系原点),分布度越小解集分布越均匀。

表 2 不同改进算法的解集评价指标

评价指标	标准 NSGA II	HEM-NSGA II	Improved-NSGA II
Con	1.80882	1.70360	1.67741
SP	0.04088	0.02791	0.02428

由表 2 可知两种改进算法均优于标准算法,且 Improved-NSGA II 与 HEM-NSGA II 相比在收敛度和分布度方面分别提升了 1.5% 和 13%,这表明本文改进算法能取得质量更高的解集。

7.3 不同信号优化方法的对比实验

为对比过饱和状态下不同信号优化方法的交通控制效果,实验选用 4 个代表性方法进行信号仿真优化,各方法的特点如表 3 所列。

表 3 4 种信号优化方法的特点

优化方法	最小化车均延误	最小化系统排队-车道长度比	最大化系统通行能力	绿信比优化	相位差优化	相序优化	周期优化	满足参数约束
FTF	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
FOF	✓	—	—	✓	✓	✓	✓	✓
TTF	✓	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓
Field	—	—	—	—	—	—	—	✓

其中 Field 代表现场采集的配时方案,该方案未经优化,仅满足参数约束;FOF(signal optimization of Four variables, One objectives and Four constraints)方法仅以最小化车辆延误为目标来优化绿信比、相位差、相序和周期并满足各参数约束;TTF(signal optimization of Three variables, Three objectives and Four constraints)方法在优化目标和参数约束

方面与FTF相同,但仅对绿信比、相位差和周期进行优化,不包含相序。

表4列出了不同方法优化的信号配时方案,其中Field方案的相位差由路段长度除以路段限速求得。

表4 4种信号优化方法的配时方案

配时参数	Field			FOF			TTF			FTF					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
第一相位/s	相位1 55	相位5 25	相位5 25	相位1 60	相位5 30	相位8 16	相位1 21	相位5 14	相位5 10	相位1 37	相位5 20	相位7 20			
第二相位/s	相位2 65	相位6 75	相位6 75	相位3 21	相位6 73	相位7 29	相位2 11	相位6 39	相位6 36	相位2 16	相位6 40	相位6 41			
第三相位/s	相位3 95	相位7 25	相位7 25	相位4 36	相位7 17	相位5 21	相位3 21	相位7 14	相位7 21	相位4 30	相位8 24	相位5 15			
第四相位/s	相位4 25	相位8 25	相位8 25	相位2 14	相位8 11	相位6 65	相位4 34	相位8 20	相位8 20	相位3 15	相位7 14	相位8 22			
绝对相位差/s	0	19	40	0	27	61	0	18	57	0	23	55			
周期/s	240			150			131			87			98		

从表4可以看出,Field方案未使用共享周期,交叉口1的周期最长且其第三相位(相位3)的绿信比最大,结合表1和图7发现相位3将车流量相差较大的两个流向组合到一起并不合理;FOF为了最小化车均延误倾向于将较多的绿灯时间分配给流量最大的东西直行相位;TTF并未优化相序且周期最短;FTF周期适中,各相位绿灯时间分配较均衡,相位差高于Field,低于FOF,这主要是因为FTF控制了车辆排队长度并根据仿真情况调节相位差。

为对比4种信号配时方案的控制效果,对相同环境仿真运行1h,每个配时方案均重复5次并取平均值以降低随机性影响。表5给出了各方案的4个统计指标,其中Field方案的效果最差,各项指标均不及其他方法;FOF优先通行车流量大的方向,在一定程度上降低了时延;与FOF和TTF相比,FTF的系统通行能力分别提升6%和1.1%,车均时延分别降低31%和16%,总输出车辆分别提升7.1%和1.5%,系统平均排队-车道长度比分别降低33%和-10%,总体来说FTF的控制效果最好。

表5 4种信号配时方案的控制效果

配时方案	系统通行能力/(veh/h)	车均时延/(s/veh)	系统平均排队-车道长度比	总输出车辆数/veh
Field	16503.53	264.43	14.37	6871.82
FOF	18419.17	81.25	5.27	9661.37
TTF	19335.54	67.16	3.19	10191.31
FTF	19563.23	55.86	3.52	10347.50

为从不同角度更细致地分析4种信号配时方案的控制效果,测量了各路段的平均排队长度(仿真结束时某路段各车道车辆排队长度累加和除以该路段总测量次数与车道数目的乘积),如图9所示;每隔5min主路(东西方向)的车均时延(仅计算主路车辆时延)如图10所示;每隔5min的主路车辆累计输出(仅计入主路输出车辆)如图11所示。

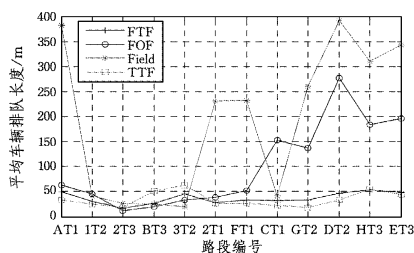


图9 4种信号配时方案的平均车辆排队长度

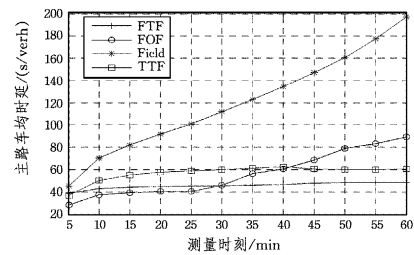


图10 4种信号配时方案的主路车均时延

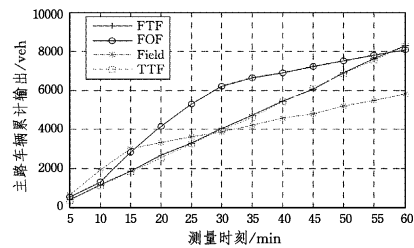


图11 4种信号配时方案的主路车辆累计输出量

图9中符号“AT1”表示从A到1方向的路段(见图6),其余符号类似。可以发现Field方案在路网边界处的车辆排队较长,这是因为该方案的周期过长,两次放行同一车流的间隔较长,造成过饱和状态下累积大量车辆以至于仿真过程中发生了严重溢出;FOF方案为了降低延误尽可能地放行车流量最大的东西直行相位,导致次路通行时间不足,排队较长;TTF方案由于未优化相序,各路段排队长度与FTF相比存在明显波动;与上述3种方案相比,本文FTF方案的各路段排队长度总体上更短且波动最为平缓,说明本方法能均衡车辆分布,有效控制排队长度。

由图10和图11可知,随着进入路网的车辆越来越多,主路平均时延和车辆累计输出均不断增加,其中Field方案的平均时延基本呈线性增长且累计输出增长率在15min后明显下降;FOF前期时延较低,累计输出较高,但在30min左右由于次路车辆排队溢出,性能开始下降;FTF和TTF在20min后时延增长较平缓,说明这两种方法可使交通状态基本维持稳定,尽管两者累计输出相差不大,但FTF通过优化相序进一步减小了车均时延。

结束语 本文针对城市交通饱和状态下干线各交叉口的信号配时优化问题,基于不同交通控制目标对车流影响进

行了分析,建立了 FTF 信号仿真优化模型,构建了多目标优化算法结合微观交通仿真的 FTF 模型实施框架。利用采集的交通数据对 3 个交叉口组成的干线进行实例验证,实验结果表明,在过饱和状态下以最小化车均时延为单一目标的信号优化会导致次路车辆排队长度过大;对相序进行优化能进一步减小时延;本文方法能有效控制车辆排队长度,均衡车辆分布,提升路网效率,所得信号配时方案可用于离线控制或在线优化的基础方案。目前本方案仿真优化耗时较长,为进一步提升信号优化方法的实用性,下一步将研究仿真环境的校准方法并实现并行优化。

参 考 文 献

- [1] YAN L Q, ZHAO Z H, LI P F, et al. Review of Traffic Signal Control Methods under Over-saturated Conditions[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(4): 116.
- [2] LERTWORAWANICH P. A Simple Adaptive Signal Control Algorithm For Isolated Intersections Using Time-space Diagrams[C]//2010 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Funchal, IEEE, 2010: 273-278.
- [3] YE B L, WU W M, HANG Y S. A Green Wave Band based Method for Urban Arterial Signal Control[C]//2014 IEEE 11th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). Miami, FL, 2014: 126-131.
- [4] LIU Y, CHANG G L. An arterial signal optimization model for intersections experiencing queue spillback and lane blockage[J]. Transportation Research Part C, 2011, 19(1): 130-144.
- [5] YE B L, WU W M, MAO W J. A Two-Way Arterial Signal Coordination Method With Queueing Process Considered[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(6): 3440-3451.
- [6] HAJBABAIE A, BENEKOHAL R B. A Program for Simultaneous Network Signal Timing Optimization and Traffic Assignment[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(5): 2573-2586.
- [7] STEVANOVIC A, MARTIN P T, STEVANOVIC J. VisSim-Based Genetic Algorithm Optimization of Signal Timings[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2007, 2035 (2035): 59-68.
- [8] LI Y, GUO X C, TAO S R, et al. NSGA II based traffic signal control optimization algorithm for over-saturated intersection group[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2013, 29(2): 211-216.
- [9] GAO Y F, HU H, HAN H, et al. Multi-objective Optimization and Simulation for Urban Road Intersection Group Traffic Signal Control[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(6): 129-135. (in Chinese)
高云峰, 胡华, 韩皓, 等. 城市道路交叉口群信号协调控制多目标优化与仿真[J]. 中国公路学报, 2012, 25(6): 129-135.
- [10] CHEN S Y. Real-time Traffic Signal Control for Over-saturated Networks[D]. Lubbock, Texas: Texas Tech University, 2007.
- [11] YANG X G, ZHAO J, MA W J, et al. Review on Calculation Method for Signalized Intersection Capacity[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(5): 148-157. (in Chinese)
杨晓光, 赵靖, 马万经, 等. 信号控制交叉口通行能力计算方法研究综述[J]. 中国公路学报, 2014, 27(5): 148-157.
- [12] KALYANMOY D, AGRAWAL S, PRATAB A, et al. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [13] HUANG C, HU D M, YU X. An Improved NSGA-II Algorithm Based on Vector Space Model[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2015, 36(2): 391-396. (in Chinese)
黄超, 胡德敏, 余星. 一种基于向量空间模型的 NSGA-II 改进算法[J]. 小型微型计算机系统, 2015, 36(2): 391-396.
- [14] SUN Y J, SHEN G Z. Improved NSGA-II Multi-objective Genetic Algorithm Based on Hybridization-encouraged Mechanism [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 21(6): 540-549.
- [15] HUANG M, RAO M L, LI M. Research of Lane-level Basic Road Network Model for Simulation and Its Application[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(3): 657-681. (in Chinese)
黄敏, 饶明雷, 李敏. 面向仿真的车道级基础路网模型及其应用[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(3): 657-681.
- [16] WANG D H, JIN S. Review and Outlook of Modeling of Car Following Behavior[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(1): 116-127. (in Chinese)
王殿海, 金盛. 车辆跟驰行为建模的回顾与展望[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 116-127.
- [17] YANG L H, ZHANG X Q, GONG J K, et al. The Research of Car-Following Model Based on Real-Time Maximum Deceleration[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015: 1-9.
- [18] LIU S L, YAN D Q. A new global embedding algorithm[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(7): 828-835. (in Chinese)
刘胜蓝, 闫德勤. 一种新的全局嵌入降维算法[J]. 自动化学报, 2011, 37(7): 828-835.
- [19] ZHANG S W, LEI Y K. Modified locally linear discriminant embedding for plant leaf recognition[J]. Neurocomputing, 2011, 74 (14/15): 2284-2290.
- [20] LI Y M, NI L P, FANG Q H, et al. Research of Text Data Streams Clustering Algorithm Based on Affinity Propagation [J]. Computer Science, 2016, 43(5): 223-229. (in Chinese)
李一鸣, 倪丽萍, 方清华, 等. 基于近邻传播的文本数据流聚类算法研究[J]. 计算机科学, 2016, 43(5): 223-229.

(上接第 192 页)

王雅琳, 陈斌, 王晓丽, 等. 基于密度调整的改进自适应谱聚类算法[J]. 控制与决策, 2014, 29(9): 1683-1687.

[17] SEUNG H S, LEE D D. The manifold ways of perception[J]. Science, 2000, 290(5500): 2263-2269.

[18] LIU S L, YAN D Q. A new global embedding algorithm[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(7): 828-835. (in Chinese)

刘胜蓝, 闫德勤. 一种新的全局嵌入降维算法[J]. 自动化学报, 2011, 37(7): 828-835.