

文章编号: 0253-374X(2009)06-0761-05

信号控制交叉口周期时长多目标优化模型及求解

马莹莹, 杨晓光, 曾 滢

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要:从城市交通控制目标多样性的本质出发, 考虑机动车时间效益、行人时间效益及环境效益, 建立以机动车、行人流量为输入, 机动车延误最小、行人延误最小及机动车停车率最小为目标的信号控制交叉口周期时长多目标优化模型, 简称 MOCLO 模型, 并应用多目标连续蚁群优化算法求解. 算例的求解结果显示, 连续蚁群优化算法能够均匀地逼近 MOCLO 模型的 Pareto 最优前沿的各部分; 与 F-B 方法、ARRB 方法相比, MOCLO 模型对周期时长的优化结果在机动车时间效益、行人时间效益及环境效益三方面的综合性指标较好; MOCLO 模型可提供多个不同特性周期时长以满足不同交通状态的需求.

关键词: 信号控制; 周期时长; 多目标优化; 蚁群优化算法
中图分类号: U 491 **文献标识码:** A

Multi-objective Cycle Length Optimization Model and Solution

MA Yingying, YANG Xiaoguang, ZENG Ying
(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In view of the multi-objective property of urban traffic signal control, the paper presents a multi-objective cycle length optimization (MOCLO) model with the vehicle volume and the pedestrian number as the inputs and minimum vehicle, pedestrian delay and stops as the optimization objectives. Ant colony optimization algorithms are resorted to solving the MOCLO model and can approximate every part of Pareto-optimal front uniformly. A case study show that MOCLO model can give better cycle length than F-B method and ARRB method on the trade-off among various objectives and the alternative solutions for all potential situations.

Key words: signal control; cycle length; multi-objective optimization; ant colony optimization algorithms

交通信号控制是城市交通管理的基本手段之一, 其目的是将不同的交通流在时间上进行分离, 以提高交通运行的安全性及效率. 交通信号控制中, 单个交叉口点控制(简称单点控制)是一种基本控制方式, 同时也是其它控制方式的基础^[1]. 在单点控制中, 控制参数主要包括周期时长和绿信比. 其中周期时长属于战略控制参数, 而绿信比属于战术控制参数^[2]. 因此, 周期时长的优化在单点控制具有重要的地位. 在一定的道路条件下, 信号控制交叉口的通行能力受信号周期时长的影响. 在正常的周期时长范围内, 周期时长越长, 通行能力越大, 但车辆延误及油耗等也随之增大. 而当饱和度相当小时, 周期时长的延长对通车状况并无多大好处, 却无谓地增加车辆的延误和油耗^[1]. 因此在进行周期时长的优化时, 应权衡多个交通运行指标, 以使交通运行的综合效益最优.

本文将考虑多个交通运行指标, 建立信号控制交叉口周期时长的多目标优化模型, 并应用蚁群算法求解.

1 周期时长的优化目标选取

20 世纪 90 年代初, 相关学者认为城市交通控制的主要目标是使各类交通流、各流向交通流有秩序、高效率地通行. 这一思想在解决平面路网中交叉口通行能力瓶颈问题起到了积极的作用. 但另一方面, 信号控制的合理设置将增强交叉口的安全性. 随着城市交通控制的发展, 其控制目标已经逐渐由单一目标向效率、安全、环保等多元目标发展. 1997 年, Jessica Anderson 等人专门针对交通信号控制系统的目标进行了系统研究, 研究表明交通控制系统的控制策略需要有弹性, 能够适应于各种交通情况. 控

收稿日期: 2008-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70631002)

作者简介: 马莹莹(1983-), 女, 博士生, 主要研究方向为城市交通控制. E-mail: mayingying@tongji.edu.cn
杨晓光(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通系统工程. E-mail: yangxg@tongji.edu.cn

制目标的选择应该多样化,且应随交通状态变化而对各目标的重要程度做相应的调整^[3].

根据调查分析,在不考虑自行车交通的前提下,信号控制交叉口周期时长将会影响到以下交通效益指标:机动车延误、行人延误、机动车排队长度、机动车通行能力、机动车停车率、燃油消耗、污染物排放、噪声污染.将以上效益指标进行分类,可以归为机动车效益、行人效益和环境效益三大类.

2000 年,杨锦冬等对信号控制交叉口周期时长的灰关联影响因素分析表明,与周期时长关联度较大(关联度超过 0.5)的交通效益指标是排队长度、延误与停车率,且停车率与排队长度直接相关^[4].因此同时考虑到机动车、行人与环境三方面效益的权衡,可以选取机动车延误最小、行人延误最小和停车率最小作为周期时长的优化目标.

2 多目标周期时长优化模型

从机动车效益、行人效益和环境效益三方面出发,选取机动车延误最小、行人延误最小和停车率最小为目标,以最小绿灯时间为约束条件,建立信号控制交叉口周期时长的多目标优化模型(MOCLO 模型),即

min F(C) = [f₁(C), f₂(C), f₃(C)]
s.t. Cλ_i ≥ g_{imin} i = 1, 2, ..., n

其中:C 为信号控制交叉口周期时长;f₁(C)为优化目标 1 机动车平均信号控制延误;f₂(C)为优化目标 2 行人平均信号控制延误;f₃(C)为优化目标 3 机动车交叉口停车次数;λ_i 为第 i 相位的绿信比;g_{imin} 为相位 i 的最小绿灯时间.

机动车平均信号控制延误模型以美国交通研究委员会的《道路通行能力手册》中的延误计算方法为基础,模型的具体形式为

f₁(C) = (∑_{i=1}ⁿ d_i Q_i) / (∑_{i=1}ⁿ Q_i)
d_i = C(1 - λ_i)² / (2(1 - min[1, x_i] λ_i)) + 900 T · [(x_i - 1) + √((x_i - 1)² + (8klx_i) / (Cap · T))]
λ_i = (q_i^k / S_i^k) · (C - L) / (∑_{j=1}^m q_j^k / S_j^k - C)

x_i = q_i / Cap_i = q_i / (S_i λ_i)

其中:d_i 为第 i 股交通流平均信号控制延误(s · pcu⁻¹);Q_i 为第 i 股交通流流量(pcu · h⁻¹);T 为分析时段的持续时长(h);x_i 为第 i 股交通流平均饱和度;k, l 为校正系数;Cap 为第 i 股交通流所在车道的通行能力;q_i^k / S_i^k 为第 i 股交通流所在相位的关键流量比;n 为交叉口交通流股数;m 为交叉口相位数;L 为每周损失时间(s);q_i 为第 i 股交通流平均每车道流量(pcu · h⁻¹).

建立行人延误模型基于以下假设①行人在红灯时间均匀到达;②排队等候过街的行人一旦获得绿灯信号,即同时开始过街,无先后次序;③每次绿灯均能放完一个周期内到达的全部行人,不存在跨周期滞留现象.行人延误模型即为

f₂(C) = ∑_{i=1}^m ((C - g_i^p)² / 2C)

其中:g_i^p 为第 i 行人相位绿灯时间(s).

停车率模型按照 Webster 的计算方法建模,即至少有一次停车(指完全停车)的车辆占通过交叉口车辆总数的比率,不考虑不完全停车的情况^[5].停车率模型如下,其中各参数意义与上述参数意义相同,即

f₃(C) = (∑_{i=1}ⁿ [(1 - λ_i) Q_i / (1 - q_i / S_i)]) / (∑_{i=1}ⁿ Q_i)

3 模型求解

3.1 Pareto 支配关系

若 x₁, x₂ ∈ S, S 为搜索空间,若有 ∀ k ∈ {1, ..., m}, f_k(x₁) ≤ f_k(x₂) 且 ∃ k ∈ {1, ..., m}, f_k(x₁) < f_k(x₂), 则称 x₁ Pareto 支配 x₂.这种个体间的支配关系反映了多目标解的优劣.设 x ∈ S, 当且仅当不存在 x' ∈ S, 使 x' Pareto 支配 x, 则称 x 为 Pareto 最优点.它们的集合称为 Pareto 最优解集.这些最优点所对应的多目标值的集合称为 Pareto 最优前沿(POF)^[6].

3.2 蚂蚁行进策略

经典的蚁群算法是解决离散空间优化问题的,蚂蚁的行进是通过在离散解空间点集上的跳变实

现的,即从解空间中的一个点直接转移到另一个节点.然而,MOCCLO 模型的解空间为连续解空间,为求解该模型,定义蚂蚁的局部活动范围的和吸引范围 r ,即当蚂蚁进行局部搜索时,其活动半径为以其所在点为中心,半径为 r 的范围内;而在进行成群募集和海量募集时,被引领的蚂蚁将在引领蚂蚁周围半径为 r 的范围内随机选择它的下一个位置.蚂蚁根据新旧位置间的 Pareto 支配关系释放相应的信息素.

3.3 算法步骤

求解 MOCCLO 模型的蚁群算法步骤如下:

- (1) 设定各参数,包括蚂蚁个数(num)、当前最差蚂蚁个数(GR_num)、优解库的最大容量(OS_max)、信息素挥发系数(Rho)、信息素增强因子(Q1)、信息素减弱因子(Q2)、活动半径 r 、最大迭代次数 NC_max、最小周期(C_min)、最大周期(C_max)等;
- (2) 令迭代次数变量 NC=1,初始化种群,并建立优解库;
- (3) 每只蚂蚁进行局部搜索;
- (4) 头蚁引领一群蚂蚁进行成群募集;
- (5) 尚未被头蚁以成群募集操作引领的个体执行海量募集操作;
- (6) 更新优解库;
- (7) 对所有蚂蚁当前位置执行信息素挥发操作;
- (8) 令 NC=NC+1,检查是否达到终止条件,若否,转步骤 3 继续. 否则输出优解库中的非劣解,并结束运行.

4 用户决策方法

决策者可根据实际需求、决策者偏好及各目标之间的关系在最优解集选择合适的解应用,该选择过程为多属性决策过程.关于建模与偏好结构的分析,现在已经形成了一门科学领域,即多属性决策分析,主要研究如何从一组小规模 of 有限候选方案中选择最佳方案.本文将介绍一种简单实用的用户决策方法.

4.1 目标归一化处理

由于各个目标的量纲不同,故在进行目标权重的衡量过程中,应对各目标进行归一化处理.即将各个目标值分别映射到 $[0,1]$ 范围内.首先,通过专家或用户调查,分别针对三个目标进行等级划分,一般

的,可以分为“非常好,好,一般,差和非常差”5 个等级.同时将 $[0,1]$ 按照从小到大的顺序均匀地分成相应的等级.为了实现目标的准确映射,建议在每个分级内部进行线性映射,即

M' = K_{min}^i + \frac{M - M_{min}^i}{M_{max}^i - M_{min}^i} \frac{1}{n}

其中: M' 为归一化映射后数值; M 为原数值; K_{min}^i 为归一化映射后第 i 级的最小值; M_{min}^i 为映射前第 i 级的最小值; M_{max}^i 为映射前第 i 级的最大值; n 为等级个数.

4.2 用户决策方法

用户选择可以选用评分法进行目标权重地确定.具体方法为邀请熟悉情况的专家或用户对各个目标的重要性评分.评分可采用 100 分制;0 分表示非常不重要,100 分表示非常重要.根据评分即可确定各目标重要程度的关系.在评分同时,给出各目标值的可接受范围.例如,在图 1 中, x, y 分别代表归一化映射后的两个目标,曲线 $Y_2 X_1 Y_1 X_2$ 为归一化处理后两个目标的关系曲线,其中, $[x_1, x_2]$ 与 $[y_1, y_2]$ 分别为两个目标 x, y 归一化映射后的取值范围, a 与 b 分别为两个目标值的权重.该例子中,用户的选择目标为使得 $m = ax + by$ 值最小的解,即为图 1 中 M 点所对应的解.

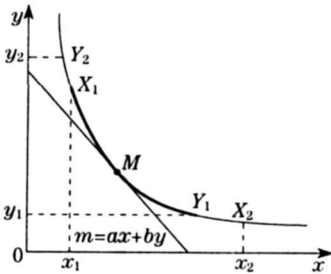


图 1 用户决策示例

Fig.1 Example of user decision-making method

5 实例分析

以张家港市人民路-长安路交叉口为背景进行实例分析.该交叉口各方向的流量见表 1.应用 MOCCLO 模型及以上算法对模型进行求解.

利用模型求解的方法进行求解,图 2~4 为优解库中各解对应目标值的分布情况,图 5 为解的分布情况.从图 2、3 可以看出在约束范围内,机动车停车率与机动车平均延误呈相反的变化趋势;机动车停

车率与行人平均延误呈相反的变化趋势;机动车平均延误与行人平均延误的变化趋势相同.对于周期时长地优化,停车率与机动车平均延误、行人平均延误属冲突目标,而机动车平均延误与行人平均延误属非冲突目标.

表 1 长安路-人民中路交叉口高峰小时流量
Tab.1 Peak hour flow of Chang'an road-mid people road intersection

进口	东			西			南			北		
流向	左	直	右	左	直	右	左	直	右	左	直	右
机动车流量(pcu·h ⁻¹)	149	452	87	129	324	296	273	362	158	102	312	255
行人流量(ped·h ⁻¹)	487	487	487	210	210	210	252	252	252	361	361	361

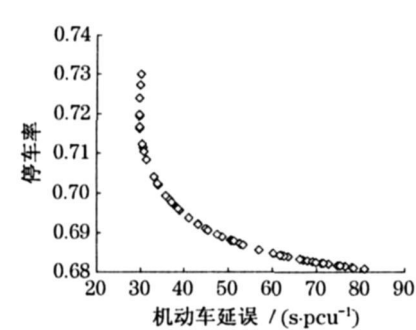


图 2 机动车延误与停车率示意图
Fig.2 Vehicle delay and stop rate

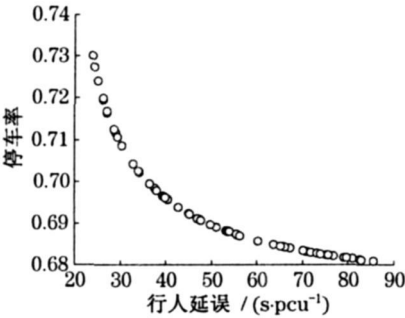


图 3 行人延误与停车率示意图
Fig.3 Pedestrian delay and stop rate

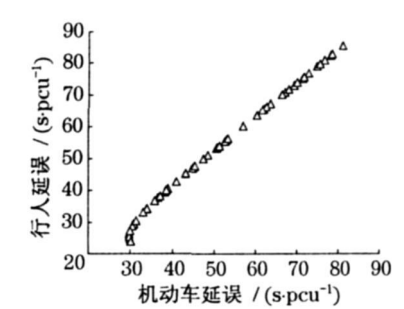


图 4 机动车延误与行人延误示意图
Fig.4 Vehicle delay and pedestrian delay

根据对用户地调查,将目标划分为 5 个等级,如 表 2 所示,进行归一化映射.

表 2 目标等级划分
Tab.2 Grades of objectives

等级	很小	较小	一般	较大	很大
机动车平均延误(s·pcu ⁻¹)	0~10	10~20	20~35	35~55	55~80
行人平均延误(s·ped ⁻¹)	0~10	10~20	20~30	30~50	50~70
机动车停车率	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0

用户指定的各目标重要程度如表 3 所示.根据表 3 指标可知,用户的选取目标为

$$\text{Min } m = 85D_v + 60D_p + 50S_t$$

优解库中使得 m 值最小的解则为符合用户要求的解.经计算,周期长度为 59 s 时, m 值最小.此时,机动车平均延误为 30 s,行人平均延误为 26 s,机动车平均停车率为 0.72.

表 3 目标重要程度
Tab.3 Importance of objectives

优化目标	机动车平均延误/ (s·pcu ⁻¹)	行人平均延误/ (s·ped ⁻¹)	机动车停车率
重要程度	85	60	50

利用本实例数据,分别用 F-B 方法和 ARRB 方法计算周期时长及相应的交通效益指标值如表 4 所示.

表 4 F-B 方法与 ARRB 方法的计算结果
Tab.4 Calculation results of F-B and ARRB method

计算方法	周期时 长/s	机动车平均延 误/(s·pcu ⁻¹)	停车率	行人平均延 误/(s·ped ⁻¹)
F-B 方法	35	36	0.75	22
ARRB 方法	42	32	0.74	23
MOCLO 模型	59	30	0.72	26

由于 F-B 方法与 ARRB 方法计算的周期时长均小于最小周期时长的约束,故利用该两种方法计算,均应取最小周期时长 48 s 作为结果应用.其对应的机动车平均延误为 30 s·pcu⁻¹,停车率为 0.73,行

人平均延误为 $24\text{ s}\cdot\text{ped}^{-1}$. 由图 5 可知,在约束范围内,这两种方法的计算结果都在优解库中,但在反应用户需求方面,这两种方法不如 MOCLO 模型灵活,其优化结果与 MOCLO 模型中按照用户偏好选择的结果相差 10 s 多.

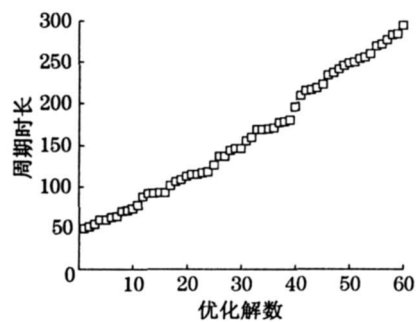


图 5 优化解分布图

Fig.5 Distribution of optimization solution

6 结论

本文详细分析交叉口周期时长的优化目标,并从机动车效益、行人效益和环境效益三个方面出发,建立了信号控制交叉口周期时长的多目标优化模型.将改进的蚁群优化算法进行适当改进,以提高其求解 MOCLO 模型的适应性和效率.实例分析证明,多目标优化在周期时长的优化中可行,且改进的蚁群优化算法能够较好地逼近 MOCLO 模型的 Pareto 最优前沿.通过对优解库中各解对应的目标值分析得出约束范围内停车率和机动车平均延误与行人平均延误均属冲突目标,而机动车平均延误与行人平均延误属非冲突目标,并获得各目标之间的权衡关

系.F-B 方法、ARRB 方法的计算结果均包含于最优解集中,但与 MOCLO 模型中按照用户偏好选取的最优解相差 10 s 多.

本文提出的多目标周期时长优化模型可以从多个角度满足用户需求,弥补了以往的以单一效益指标最佳为优化目标的不足.同时,本文的优化方法对城市交通控制系统中其他部分地优化也同样适用.

参考文献:

[1] 杨佩昆,吴兵. 交通管理与控制 [M]. 北京:人民交通出版社,2004.
YANG Peikun, WU Bing. Traffic management and control [M]. 2nd ed. Beijing, China Communications Press, 2003.

[2] 杭明升. 城市道路交叉口群实时自适应控制若干理论与方法研究 [D]. 上海:同济大学交通运输工程学院,2002.
HANG Mingsheng. Several theories and methods on real-time self-adaptive urban traffic control for grouped nodes [D]. Shanghai: Tongji University. School of Transportation Engineering, 2002.

[3] Jessica Anderson, Tessa sayers and michael bell, the objectives of traffic signal control [J]. Traffic Engineering + Control, 1998 (3): 167.

[4] 杨锦冬,彭国雄,郁朝鸣,等. 信号控制交叉口信号周期时长的灰关联因素分析 [J]. 城市轨道交通研究, 2000(3): 27.
YANG Jindong, PENG Guoxiong, YU Chaoming, et al. Analyzing gray-correlated factors of cycle time of signalized intersections [J]. Urban Rail Transport Study, 2000(3): 27.

[5] 全永桑. 城市交通控制 [M]. 北京:人民交通出版社,1989.
QANG Yongsan. Urban traffic control [M]. Beijing: China Communications Press, 1989.

[6] 贺益君,陈德钊. 用于多目标优化的蚁群算法的构建及其应用 [J]. 高技术通讯, 2006, 16(12): 1241.
HE Yijun, CHEN Dezhaoh. Ant colony optimization approach to the solution of multi-objective optimization problems [J]. High Technology Letters, 2006, 16(12): 1241.

• 下期文章摘要预报 •

镁合金在座椅骨架轻量化设计中的应用

高云凯,林典,余海燕,邵力行

对某国产车型的后座椅骨架进行了镁合金替代设计,提出采用镁合金挤压型材和冲压板件结合的一件式结构,使座椅骨架的质量减轻 41.3%,实现了轻量化的目标.利用有限元软件对原结构和新设计方案分别进行数值计算,保证新设计座椅骨架结构的模态、强度和刚度等性能指标均达到相关法规要求.