

文章编号: 2095-2163(2021)03-0154-05

中图分类号: TP391

文献标志码: A

基于多目标优化算法的交叉路口信号灯配时模型研究

郝林倩

(福建船政交通职业学院, 福州 350007)

摘要:当前国内道路交通管制仍然主要依靠交通信号灯, 依然是传统的三色灯固定配时模式, 这种模式最大的弊端在于不能针对交通流的实时变化进行动态配时调整, 从而造成道路资源的浪费。对多目标算法进行优化, 并提出一种交叉路口信号灯智能配时模型。又利用实际数据对模型进行了测试分析。实验证明, 该模型能有效减少机动车的平均延迟时间和停车次数, 从而提升道路的通行效率。

关键词: 交叉口; 交通流预测; 动态配时; 多目标优化算法

Research on intersection signal timing model based on multi objective optimization algorithm

HAO Linqian

(Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou 350007, China)

【Abstract】 At present, road traffic control in China still mainly relies on traffic signal lights, which is still the traditional three-color light fixed timing mode. The biggest drawback of this mode is that it cannot adjust the dynamic timing according to the real-time changes of traffic flow, resulting in waste of road resources. Based on the optimization of multi-objective algorithm, a dynamic timing model of intersection signal is proposed. And the model is tested and analyzed by using the actual data. The results show that the model can not only effectively reduce the average delay time and parking times, but also improve the maximum flow capacity of the road.

【Key words】 intersection; traffic flow prediction; dynamic timing; multi-objective optimization algorithm

0 引言

当前, 堵车现象已成为城市道路交通中令人困扰的问题之一, 究其成因, 既有生活水平提高带来的家庭用车数量增加和城市道路交通容量迹近饱和的缘故, 但也有交通管制与引导不科学所致。国内的道路交通管制目前主要依靠交通信号灯的控制, 依然是传统的三色灯固定配时模式, 这种模式的弊端就在于不能针对交通流的实时变化进行动态配时调整, 从而造成道路资源的浪费。本文在对多目标算法进行优化的基础上, 提出了一种交叉路口信号灯动态配时模型。并利用实际数据对模型进行了测试分析。实验证明, 该模型能有效减少机动车的平均延迟时间和停车次数, 从而提升道路的通行效率。

1 多目标优化理论

1.1 多目标优化的数学描述

现实中, 很多事务都存在有多个指标需要同时

满足的情况, 即同一问题模型中存在多个非线性目标, 这些目标函数都需要优化, 但函数之间往往相互冲突。类似这样的问题, 又称为多目标优化问题^[1] (Multi-Objective Optimization Problem, MOP), 其数学描述如下。

设有 M 个目标函数, n 维决策变量和 K 种约束条件组成, 最优化目标如下:

$$\begin{aligned} \max y &= f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x)) \\ \text{subject to. } &g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, p, \\ &h_j(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, q, \\ &x \in D. \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $x \in D \subset R^n$ 为 n 维决策变量; $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, x_i 表示第 i 个决策变量; D 表示 n 维决策空间; $y \in S \subset R^m$ 为 m 维目标变量, S 为 m 维解空间; $F(x)$ 定义了 m 个由决策空间向解空间映射的目标分量函数, $f_i(x)$ 是目标函数 $F(x)$ 的第 i 个目标分量; $g_i(x) \leq 0, (i = 1, 2, \dots, p)$ 定义了 p 个不等式约束条件; $h_i(x) \leq 0, (i = 1, 2, \dots, q)$ 定义了 q 个等式约束条件。

基金项目: 福建省教育厅中青年教育科研项目 (JAT191195)。

作者简介: 郝林倩 (1983-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 计算机应用技术、大数据应用技术。

通讯作者: 郝林倩 Email: 378802718@qq.com

收稿日期: 2020-12-16

件; min 或 max 表示多目标问题的优化模式, 一般情况下优化问题是转化成最小优化模式^[2], 即 min。

1.2 多目标算法的优化

在多目标优化问题中, 每个指标必须各有权重, 不可能都同时达到最优。其中, 某些指标是相互依存的, 而另一些则是矛盾的^[3]。在实际应用中, 有必要综合考虑矛盾的子目标, 即权衡每个子目标。根据生物进化论发展起来的多目标进化算法 (multi-Objective evolutionary algorithm, MOEA), 由于其在解决高度复杂的非线性问题方面的优势, 已被广泛使用。

多目标进化算法是指在各目标之间进行协调权衡和折衷处理操作, 最终得到一组各个目标值所折衷的最优解, 称为 Pareto 最优解^[4]。Pareto 最优解只是一个可接受的解, 并且大多数进化算法的 Pareto 最优解的个数是无穷多的, 而进化算法的最优解就是包含所有这些 Pareto 最优解的一个集合。在实际应用中, 最优解集合的选择通常取决于决策者对事务本身的了解程度, 或个人意愿倾向^[5]。在此, 经常会用到如下几个基本概念^[6]:

(1) Pareto 支配 (Pareto Dominance)。解 x^0 支配: $x^1(x^0 > x^1)$, 当且仅当:

$$\begin{aligned} f_i(x^0) &\geq f_i(x^1), \quad i = 1, 2, \dots, M, \\ f_i(x^0) &\geq f_i(x^1), \quad \exists i \in \{1, 2, \dots, M\}, \end{aligned} \quad (2)$$

(2) Pareto 最优解 (Pareto Optimal Solution)。如果解 x^0 是 Pareto 最优的, 当且仅当: $\neg \exists x^1: x^1 > x^0$ 。

(3) Pareto 集 (Pareto Set)。所有 Pareto 最优解的集合 $P_s = \{x^0 \mid (\neg \exists x^1 > x^0)\}$ 。

(4) Pareto 前沿 (Pareto Front)。所有 Pareto 最优解对应的目标函数值所形成的区域 P :

$$P_F = \{f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x)) \mid x \in P_s\}. \quad (3)$$

如果某个解不受其所在的解集内的任何一个解支配, 则该解关于解集非劣, 称为非劣解。后期的多目标算法的计算过程如下: 对于每一个集群, 首先找到其当前的最优解, 即非控制解或非劣解, 并且所有非劣解的集合构成非劣解集, 然后, 通过各种遗传运算以及非劣解集的更新和升级, 非劣解集不断接近问题的 Pareto 前沿, 算法最终的输出即为非劣解集^[6]。

与传统的 Pareto 支配关系相比, ε -支配关系较弱化, 具有多种概念形式, 这里采用加的 ε 形式, 且 $\varepsilon_i > 0$, 对 $\forall i \in \{1, \dots, M\}$, 数学定义如下:

(1) ε -支配: 设 $x^1, x^2 \in D$, 称 $x^1 \varepsilon$ -支配 x^2

($x^1 > \varepsilon x^2$), 当且仅当 $f(x^1) - \varepsilon_i \leq f(x^2)$, $\forall i \in \{1, \dots, M\}$, 且 $\exists i, f(x^1) - \varepsilon_i \leq f(x^2)$ 。

(2) ε -近似 Pareto 集: 集合 F_ε 称为 F 的 ε -近似 Pareto 集, 当且仅当对任意 $x \in F$ 都存在 $x' \in F_\varepsilon$, 使得 $x' > \varepsilon x$ 。

(3) ε -Pareto 解集: 集合 F^ε 为集合 F 的 ε -近似 Pareto 集且 $F^\varepsilon \subseteq P_s$ 。

这里, 需要说明的是, F^ε 和 F^a 分别作为集合 F 的 ε -Pareto 解集和 ε -Pareto 近似最优解集, 都不是唯一的。而一些靠近 Pareto 前端不是 Pareto 最优解但满足 ε -支配关系的个体却都有可能包含在 F^a 中^[7]。

2 基于多目标优化的信号灯配时模型

理论上, 研究拟控制交叉路口的信号灯变化, 从而优化城市道路的各项参数, 但实际上, 道路参数却并非臻至完善, 因为不同指标之间可能存在一些冲突, 因此必须做出相应的调整, 为十字路口的交通状况选择合适的控制方案。如果交通流量较小, 应尽可能减少在十字路口停车的车辆数量, 以减少机动车辆的停车位; 如果交通流量大, 则应提高交叉路口的交通速度^[8]。交叉路口交通信号控制的目的在于: 根据交通网络中的交通流量, 有效调整信号定时方案, 以优化交通, 提高交通效率。一般交叉路口的评价指标分为 3 种, 即: 出行时间效率、道路利用率、环境效益。其中, 车辆通行效率和等待时间对信号灯的配时方案影响最大。因此, 本次研究选择交通效率、停留时间和停车次数作为优化指标, 并且优化目标是争取交叉路口的最高交通效率、最短停留时间和最少停车时间。约束条件选取周期长度、有效绿灯时间和机动车等待的最大数量 3 种, 对交叉路口非饱和和交通流的信号配时方案进行了优化^[9]。

2.1 机动车停留时间

目前主流的交通停留模型有: Webster 模型、HCM 模型和 Akcelik 模型。Akcelik 模型适用于计算过饱和情况下的机动车停留时间。本文中采用 Akcelik 模型, 见公式 (4):

$$d_{ij}^r = \frac{C(1 - \lambda_k)}{2(1 - \gamma_{ij}^r)} + \frac{N_{ij}^r x_{ij}^r}{q_{ij}^r}, \quad (4)$$

其中, N_{ij}^r 为滞留机动车数, 可用公式 (5) 得出:

$$N_{ij}^r = \begin{cases} \frac{c_{ij}}{4} \left[(x_{ij}^r - 1) + \sqrt{(x_{ij}^r - 1)^2 + \frac{12(x_{ij}^r - x_{ij0})}{c_{ij}}} \right], & x_{ij}^r > x_{ij0}, \\ 0, & x_{ij}^r < x_{ij0}. \end{cases} \quad (5)$$

$$x_{ij0} = 0.67 + \frac{S_{ij}g_{ij}}{600}, \quad (6)$$

在时段 T 上,所有机动车的平均停留为:

$$\bar{d}_{ij}^r = \frac{\sum_{r=1}^w d^r q^r / \sum_{r=1}^w q^r. \quad (7)$$

其中, \bar{d}_{ij}^r 表示第 r 间隔由 i 向到 j 向每辆车的平均停留(s); C 表示周期时长(s); $\lambda_k = \frac{g_k}{C}$, 表示第 k 相位绿信比的值; g_{ij} 表示相位 i 到相位 j 的有效绿灯时间(s); q_{ij}^r 表示相位 i 到相位 j 的车流量(pcu/s); $x_{ij}^r = \frac{q_{ij}^r}{c_{ij}}$ 表示从相位 i 到相位 j 的饱和度; c_{ij} 表示车道通行效率(pcu/s); $y_{ij}^r = \frac{q_{ij}^r}{s_{ij}}$ 表示流量比率; s_{ij} 表示从相位 i 到相位 j 的饱和流率(pcu/h)。

2.2 通行效率

单个交叉路口通行效率见公式(8):

$$c = S_{ij} \times \lambda_k = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=1}^n c_{ij}. \quad (8)$$

2.3 停车次数

在交叉路口排队等待通过的机动车的平均停车次数简称为“停车次数”。Webster 停车模型主要针对完全停车的情况^[10]。而 Akcelik 模型则同时考虑完全停车和不完全停车的情况,见公式(9):

$$h_{ij}^r = f \left(\frac{1 - \lambda_k}{1 - y_{ij}^r} + \frac{N_{ij}^r}{q_{ij}^r C} \right), \quad (9)$$

其中,考虑不完全停车的情况, f 为停车次数修正系数,取值为 0.9。

机动车在 r 时间段上,平均停车次数见公式(10):

$$\bar{h} = \frac{\sum_{r=1}^w h^r q^r / \sum_{r=1}^w q^r, \quad (10)$$

其中, h_{ij}^r 为在 r 时间段上由相位 i 到相位 j 每辆车的平均停车次数,单位为次。

这里,对研究时需用到的各种约束条件做阐释说明如下。

(1)总时长约束。具体公式如下:

$$\sum_{k=1}^m (g_k + l_k) = C, \quad (11)$$

其中, l_k 表示 k 相位损失时间,取各相位绿灯间隔时间。

(2)有效绿灯时间约束。具体公式如下:

$$g_k > g_{kmin}, \quad (12)$$

其中, g_{kmin} 表示 k 相位最短绿灯时间,此处取 4 s。

(3)周期约束。具体公式如下:

$$C_{min} \leq C < C_{max}, \quad (13)$$

其中, C_{max} 表示最大信号周期,一般取值为 $C_{max} = 200$ s。 C_{min} 表示最短信号周期,即在一个周期内,无滞留机动车。研究可推得数学公式为:

$$C_{min} = \frac{\sum_k l_k}{1 - \sum_k y_k}, \quad (14)$$

(4)排队长度约束。具体公式如下:

$$N_{ij}^r > N_{ijmax}^r. \quad (15)$$

其中, $N_{ijmax}^r = \frac{D_{ij}}{C \cdot L}$ 表示车道内最大滞留机动车数;此处的 D_{ij} 表示相邻交叉口距离; \bar{L} 为机动车队列的平均长度。

在综合考虑通行效率、停车次数和停车时间 3 项优化指标和 3 种约束条件的情况下,创建交叉路口信号灯状态控制函数为:

$$\min f_1 = \bar{d} \cdot \bar{d}/c,$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{k=1}^m (g_k + l_k) = k; \\ g_k > g_{kmin}; \\ C_{min} \leq C < C_{max}; \\ N_{ij}^r > N_{ijmax}^r. \end{cases} \quad (16)$$

3 实验与分析

在测试分析阶段,选择罗文慧的改进蜻蜓算法^[5](下文用 HDA 表示),结合真实的城市道路情况对模型进行测试。测试分析结果详见如下。

(1)场景选择。本文选取古田路和五一路的交叉口作为测试场景,交叉口的地理位置如图 1 所示。



图 1 实验场景图

Fig. 1 The diagram of experiment scene

由图 1 可看出,交叉路口由东西方向和南北方向的 2 条城市主干路的交叉点组成。东入口有一个右转弯车道和一条左转弯直行车道;西入口有一个右转弯车道和一条左转弯直行车道;南入口处有一个右转弯车道和一条左转弯直行车道;北入口处有一个右转弯车道和一条左转弯直行车道。

(2)信号灯配时参数。信号灯的变化除了可以控制交叉路口的机动车通行,对非机动车和行人也具有同样的管控作用,设置信号灯的相位为 2 相位, $C = 100$,相位设置图及相位配时图如图 2、图 3 所示。

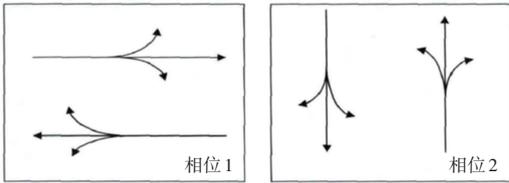


图 2 交叉路口相位设置图

Fig. 2 Phase setting diagram of intersection

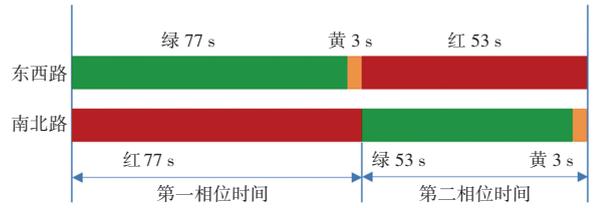


图 3 相位配时图

Fig. 3 Phrase timing diagram

(3)存在的问题。无论高峰时段,还是非高峰时段,此路口的拥堵现象都较为明显,路口等待通行的机动车较多,且在等候中停车次数较多,导致路口通行效率不高。

(4)结果分析。交叉路口通行基本参数见表 1。由表 1 可见,文中选择的古田路与五一中路交叉路口四个不同方向进口的车流方向、校正后的饱和流量、高峰时段每小时的交通量和流量比值。

同时,研究得到的实验结果见表 2。

表 1 交叉路口通行基本参数表

Tab. 1 Basic parameters of intersection

进口	车流方向	校正后的饱和流量 $/(pcu \cdot h^{-1})$	高峰小时内 15 min 交通量 $/(pcu \cdot h^{-1})$	流量比
东进口	直行左转	1 606	411	0.255 9
	右转	960	150	0.156 2
西进口	直行左转	1 606	676	0.420 9
	右转	960	209	0.217 7
南进口	直行左转	1 432	230	0.160 6
	右转	860	312	0.362 7
北进口	直行左转	1 432	199	0.138 9
	右转	860	147	0.170 9

表 2 HDA 与 Webster 模型性能指标值对比表

Tab. 2 Comparison of index values between HDA model and Webster model

交通条件	计算方法	周期	有效绿灯时间	车辆平均延迟	车辆停车次数	道路最大通行能力
高峰时段	HDA 模型	86	55	20	0.765	3 710
	Webster 模型	133	65	25	0.965	3 733
非高峰时段	HDA 模型	89	42	28	0.810	3 856
	Webster 模型	96	45	35	0.932	3 723

4 结束语

分析可知,在表 2 中,通过对比可以看出,当车流量处于非高峰时段时,HAD 模型的优势并不明显。但在车流量较大的高峰时段,优化后的 HAD 模型的优良性能将逐渐体现出来,即使得通过交叉路口的机动车停留时间更短,停车次数更少,显著提高

了城市交叉路口的通行效率。

参考文献

[1] 郑夏,马良. 一种多目标非线性优化的 NSGA-II 改进算法[J]. 微电子学与计算机,2020,37(7):47-53.
 [2] 马晓幸,杨华. 基于 NSGA-II 的多目标控制算法的温室监测控制系统[J]. 农村实用技术,2019(1):28-31.