

文章编号: 2095-2163(2021)11-0185-04

中图分类号: U491

文献标志码: A

考虑辅路干扰的干线协调多目标优化控制

戚钧杰¹, 马晓旦¹, 付晶燕²

(1 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2 中国城市规划设计研究院, 北京 100044)

摘要: 随着国内道路等级不断提升,城市主干路加设辅路设施越来越普遍,周围建筑物出入口普遍与辅路连接。本文考虑了辅路出口设置对主干路车辆的行驶影响,通过研究对辅路车辆的速度引导控制以及换道机制,结合常规的并基于常规的干线协调控制理论,在多目标优化模型基础上建立了针对辅路干扰的改进模型。使用 VISSIM 仿真软件,利用案例验证该模型并与现状的对比,结果表明在提高道路通行能力和减少车辆平均停车次数方面都有所优化。

关键词: 干线协调控制; 速度引导控制; 多目标优化

Coordinated multi-objective optimization control of arterial line considering auxiliary road interference

QI Junjie¹, MA Xiaodan¹, FU Jingyan²

(1 School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2 China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100044, China)

【Abstract】 With the continuous improvement of domestic road levels, it is more and more common to install auxiliary road facilities on urban main roads, and the entrances and exits of surrounding buildings are generally connected with auxiliary roads. This paper considers the influence of auxiliary road exit settings on main road vehicles. By studying the speed guidance control and lane-changing mechanism of auxiliary road vehicles, and based on the conventional main line coordinated control theory, an improvement against auxiliary road interference is established on the basis of a multi-objective optimization model. Model. Combined with the use of VISSIM simulation software to verify the comparison between the model and the status quo, the results show that it has been optimized in terms of improving road capacity and reducing the average number of vehicles parked.

【Key words】 Coordinated control of arterial lines; Speed guided control; Multi-objective optimization

0 引言

随着现有城市交通规模的不断发展,城市主要道路的日均通行流量也在不断提升,城市主干路交通负荷严重。为了缓解这一社会问题,在不大幅度改动道路的基本几何架构前提下,城市干线协调控制成为解决该类问题的首选,通过将主干线数个相邻交叉口相互协调联系,从而有效保证车辆在道路上的行驶畅通。

目前,有关交通干线协调控制的研究已经有成熟的体系,传统的干线信号协调有数解法和图解法,都是通过交叉口现状数据,通过协调相位差和公共周期等,重新调配交叉口的信号配时。有着显著应用效果的研究以 Little 的 MAXBAND 模型和 Gartner 的 MULTIBAND 模型为主,二者都使用了混合整数线性规划算法,同时两种模型都通过单一信号调配,来达到上行和下行双向绿波带宽最大化的

目标^[1-2];Parr 等以降低交叉口延误、交叉口通行能力最大化等为目标,在原来干线协调控制的基础上,利用多目标数学函数优化,定向提升道路的重要指标^[3];唐克双等提出改进的 MULTIBAND 干线协调控制模型,利用加设绿波带约束,使得每次计算得出的带宽都能处于相邻交叉口绿灯时间差的中间值,从而扩大模型在多个连续交叉口的适用性^[4];Lu 等考虑了交通流的离散特性,将 Robertson 模型引入到 Maxband 模型,应用于复杂的交通情况和混合交通流道路^[5]。另外,为了进一步提高干线通行效率,各种非常规的协调设计也逐步得到应用,赵靖等考虑出口左转、预信号排阵式交叉口等非常规设计方案,应用在更复杂多元的交通布局情况上^[6-7]。

上述干线协调控制研究都基于对传统理论研究的改进和模型的扩充,没有更多地考虑到干线周围的其他交通因素对系统本身的影响,而连接道路周边出入口的辅路干扰就是其中一个重要影响因素。本文

基金项目: 上海市自然科学基金(20ZR1439300);上海市软科学重点项目(21692105100)。

作者简介: 戚钧杰(1998-),男,硕士研究生,主要研究方向:交通控制。

收稿日期: 2021-10-09

从现实社会问题和道路具体架构情况出发,考虑连接出入口的辅路设施对干线行驶车辆的影响,并通过参考匝道与城市道路的连接控制方法,以及多目标优化基本理论模型,提出了对车辆引导控制下的干线协调信号控制,以达到道路通行效率的提升。

1 辅路车辆控制引导

辅路对主线道路的干扰概括为对外侧车道车辆合流影响及换道影响,如图1所示。车辆引导控制的范围应该保证车辆在规定的距离能够实现最大变限的速度调整,在交叉口一个信号周期内保证车辆能最大程度通过,控制范围的确定利用式(1)来表示:

$$L \subset \left[-\frac{v_{\max}^2 - v_{\min}^2}{2d} + \frac{v_{\max}^2 - v_{\min}^2}{2a}, v_{\min} \cdot C \right] \quad (1)$$

式中: L 为控制区长度; v_{\min} 为最小允许车速(m/s); v_{\max} 为最大允许车速(m/s); d 为最大允许减速度(m/s^2); a 为最大允许加速度(m/s^2); C 是交叉口的信号周期(s)。

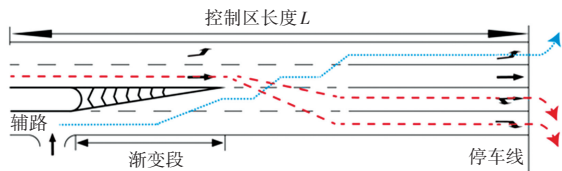


图1 辅路干扰图示

Fig. 1 Auxiliary road interference diagram

1.1 辅路车辆速度控制

根据辅路车辆进入控制的时机,对应不同的信号相位显示情况,将速度控制方法分为红灯与绿灯两种情景设置。

(1) 当车辆从辅路进入控制区时,下游交叉口信号灯显示红色并且停车线前有车辆排队, i 表示时间节点, j 表示车辆编号,此时第 k 周期对应第 p 相位车辆引导速度为 $v_{ij}^{k,p}$, 式(2)

$$v_{ij}^{k,p} = \frac{L - L^m}{t_r^k + L_j^m / v_s - t_{0j}^k} \quad (2)$$

式中, L 为控制区长度(m); L^m 为交叉口进口道停车线前最外侧车道车辆排队长度(m); t_r^k 为第 k 周期红灯结束的时间节点; t_{0j}^k 为第 k 周期辅路车辆进入控制区的时间节点,相当于车辆开始受控的时刻; v_s 为排队车辆消散波速(m/s)。

(2) 当车辆进入控制范围时,下游交叉口信号灯显示绿色,此时通过车辆初始速度以及主线密度来判断此时的两种场景:

① 车辆通过加速控制通过交叉口;

② 车辆通过非加速控制进入排队等待环节,下个周期内再通过。其第一阶段速度引导,式(3):

$$v_{ij}^{k,p} = \frac{L}{t_{ij}^k - t_{0j}^k} \cdot \theta_k^p + \frac{L^m}{v_{ij}^{k,p}} \cdot \theta_{k+1}^p \quad (3)$$

式中, θ 为二元变量,且 $\theta_k^p + \theta_{k+1}^p = 1$,若车辆能够加速控制通过交叉口,则 $\theta_k^p = 1$;反之车辆无法通过交叉口,则 $\theta_{k+1}^p = 1$, $v_{ij}^{k,p}$ 为修正控制速度。

满足场景①时,引导速度更改为式(4)

$$v_{ij,g}^{k,p} = v_{i0j}^{k,p} + a_{\max} t_{ij}^{k,p} + \sqrt{2a v_{i0j}^{k,p} t_{ij}^{k,p} + 2a(L - L^m)} \quad (4)$$

满足场景②时,引导速度更改为式(5)

$$v_{ij,g}^{k,p} = v_{i0j}^{k,p} - d_{\max} t_{ij}^{k,p} + \sqrt{2d v_{i0j}^{k,p} t_{ij}^{k,p} + 2d(L - L^m)} \quad (5)$$

1.2 辅路车辆换道机制

车辆进入控制区渐变路段时,判断车辆的换道要求,需要确定安全的换道条件是否满足。换道过程中主路上后车与目标车辆之间的距离大于安全可穿插间隙,式(6):

$$x_A(t) + l + w \leq x_i(t), t \in (t_0, t_i) \quad (6)$$

式中, $x_A(t)$ 代表安全距离(m); l 为车辆长度(m); w 为变道的纵向宽度; $x_i(t)$ 为主路后车与辅路意图换道车辆在 t 时间段内的间距(m)。

在不满足安全换道条件的情况下,车辆只有强制采取最大减速操作,寻求安全满足的时间节点。

2 干线协调多目标优化

多个流量较大的交叉路口相互信号联系协调称为干线协调信号控制,根据平峰时期道路交通流量,有效调整信号方案,一般协调信号控制的评价指标分为3种:道路延误、通行能力和平均停车次数。本文按照对以往案例分析的指标权重,将优化的目标定为道路通行能力和平均停车次数。

2.1 通行能力模型

通行能力代表的是某一条车道或者复合道路,在单位时间内某断面通过的最大车辆允许值,用 Q 表示,式(7):

$$Q = S \cdot \lambda = \frac{3600}{h_t} \cdot \frac{g_c}{C} \quad (7)$$

式中, S 代表对应道路的饱和流量(pcu/h); λ 代表绿信比; h_t 表示车头时距(s); g_c 表示有效绿灯时间(s),通过显示绿灯时间换算; C 表示信号周期时长(s)。

2.2 停车次数模型

停车次数是指车辆在通过数个交叉口时,因为

受到信号灯限制而导致的停车次数, 本文停车次数计算公式如式(8)所示, 利用 h 表示:

$$h = f \cdot \left(\frac{1 - \lambda}{1 - y} + \frac{N_s}{q} \right) \quad (8)$$

式中, f 表示停车次数的修正系数; q 为车辆到达率 (pcu/s); y 为流量比; λ 代表绿信比; N_s 表示平均滞留排队长度, 式(9):

$$N_s = \frac{e^{-1.33\sqrt{y \cdot q} \cdot (1 - y/Q)}}{2(1 - y/Q)} \quad (9)$$

2.3 多目标模型建立

本文思路是将辅路干扰可控制化, 作为可变速度控制加入约束条件范畴内, 将周期、绿灯时间和相位差作为决策变量, 选取通行能力最大和平均停车次数最小作为优化目标, 构建考虑辅路车辆干扰的多目标优化干线协调控制模型, 式(10)和式(11):

$$P(\varphi) \begin{cases} \max \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N Q_{ij} \\ \min \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N \frac{h_{ij}}{N} \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \\ g_{\min} \leq g_s \leq g_{\max} \\ v_{\min} \leq v_{ij}^{k,p} \leq v_{\max} \\ N_i^m < N_{\max}^m \end{cases} \quad (11)$$

式中, C_{\min}, C_{\max} 分别是最小周期和最大周期限制 (s); g_{\min}, g_{\max} 为公共周期交叉口协调情况下, 显示绿灯的最小和最大值; N_{\max}^m 表示交叉口进口允许的最大滞留车辆排队长度 (m), 式(12):

$$N_{\max}^m = \frac{d_{m,n}}{C \cdot L^m} \quad (12)$$

其中, $d_{m,n}$ 表示 m, n 相邻交叉口之间的间距。

3 案例分析

3.1 案例

多目标优化模型需要利用相关案例分析验证, 选取某市主干路连续相邻的 3 个交叉口 (民安路-惊驾路-姚隘路) 组成干线系统, 交叉口之间的距离分别为 350 m 和 440 m, 如图 2 所示; 在工作日的平峰时间段调查交叉口的各方向流量与配时数据, 见表 1、表 2, 3 个交叉口的相位为常规四相位设置。

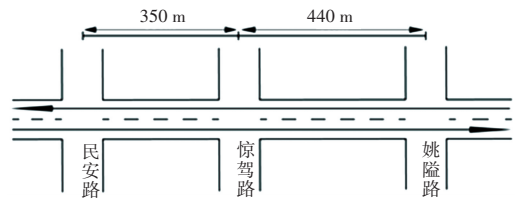


图 2 案例相邻交叉口示意图

Fig. 2 Diagram of adjacent intersections of the case

表 1 现状信号相位及配时情况

Tab. 1 Current signal phase and timing

相位配时交叉口	第一相位南北进口 (直/右)/s	第二相位南北 进口(左转)/s	第三相位东西 进口(直/右)/s	第四相位东西 进口(左转)/s	黄灯 时间/s	全红 时间/s	周期/s
民安路	37	24	47	22	3	2	150
惊驾路	54	25	31	24	3	1	155
姚隘路	38	20	36	16	3	2	130

表 2 现状调查流量

Tab. 2 Current status survey traffic

流量/pcu		北进口	南进口	东进口	西进口
民安路	左	216	230	120	112
	直	812	860	680	674
	右	120	114	96	98
惊驾路	左	264	206	184	88
	直	764	792	456	468
	右	156	168	78	74
姚隘路	左	84	70	108	116
	直	680	656	540	598
	右	168	157	48	36

3.2 仿真验证

利用 VISSIM 对比仿真, 分别输入现状交叉口几何概况、流量配时等数据以及多目标模型优化后得到的配时数据进行对照实验。优化求解过程中, 根据主干路车流情况和交叉口周围道路等级重要性程度, 设置通行能力目标函数权重 α , 平均停车次数目标函数权重 $\beta = 3:2$, 即 $\alpha = 0.6, \beta = 0.4$, 相关输入量参数 $C_{\min} = 120, C_{\max} = 180, g_{\min} = 36, g_{\max} = 60, v_{\min} = 0, v_{\max} = 15$, 相位差 $0 \leq \text{offset} \leq C$, 仿真效果如图 3 所示。

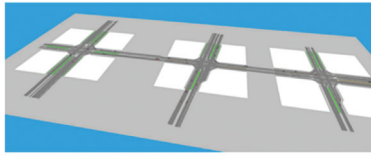


图3 VISSIM 仿真效果

Fig. 3 Simulation effect of VISSIM

表3 优化信号相位及配时情况

Tab. 3 Optimize signal phase and timing

交叉口相位 配时	第一相位南北 进口(直/右)/s	第二相位南北 进口(左转)/s	第三相位东西 进口(直/右)/s	第四相位东西 进口(左转)/s	黄灯 时间/s	全红 时间/s	周期/s
民安路	42	42	34	12	3	2	150
惊驾路	42	24	51	13	3	2	150
姚隘路	42	25	42	21	3	2	150

表4 重要指标对比评价

Tab. 4 Comparative evaluation of important indicators

方案	干线通行能力/干线平均停车		变化率/%	
	pcu/h	次数/pcu	通行能力	平均停车次数
现状	1 436	4.23	7.4	28.6
优化	1 542	3.02		

从表4结果分析可知,本文建立的考虑辅路干扰的多目标干线协调控制较原方案有所提升和优化,干线的通行能力提升了7.4%,而干线上行驶车辆的平均停车次数也减少了28.6%,道路的运行效率得到一定的提升。

4 结束语

本文参照以往干线信号控制理论,考虑了部分具有辅路分支道路主干线的特殊情况,将交叉口上游的辅路车辆汇入干扰纳入控制范畴,与多目标优化模型相结合,提出了控制辅路车辆的多目标优化模型,模型考虑了道路通行能力和停车次数这些重要道路评价等级指标。通过案例验证分析得出本文

3.3 结果分析

模型求解,得到优化后的最佳信号配时方案见表3,每个交叉口的各相位全红时间为3 s,黄灯时间为2 s。通过仿真后得到的优化前后各目标值对比结果见表4。

建立的模型体系的有效性,未来还需要对模型的适用范围以及输入条件进行深入探究分析。

参考文献

- [1] LITTLE J D C. The synchronization of traffic signals by mixed-integer linear programming[J]. Operations Research, 1966, 14(4): 568-594.
- [2] GARTNER N H, ASSMANN S F, LASAGA F, et al. MULTIBAND—a variable-bandwidth arterial progression scheme[J]. Journal of the Transportation Research Board, 1990, 1287: 212-222.
- [3] PARR Scott A, KAISAR Evangelos. Critical intersection signal optimization during urban evacuation utilizing dynamic programming[J]. Journal of Transportation Safety & Security, 2011, 3(1): 59-76.
- [4] 唐克双, 孔涛, 王奋, 等. 一种改进的多带宽干线协调控制模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(7): 1002-1008.
- [5] LU S F, LIU X M, DAI S Q. Revised MAXBAND model for bandwidth optimization of traffic flow dispersion [C]// 2008 ISECS Inter-national Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management. New York: IEEE, 2008: 85-89.
- [6] 赵靖, 陈凯佳, 周溪召. 出口道左转交叉口信号控制鲁棒优化方法[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7): 145-155.
- [7] 赵靖, 郑喆, 韩印. 排阵式交叉口延误及最佳周期模型[J]. 中国公路学报, 2019, 32(3): 135-144.