

# 基于双向绿波带宽最大化的交叉口 信号协调控制优化

马楠<sup>1</sup>, 邵春福<sup>1</sup>, 赵熠<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室, 北京 100044; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Nevada Reno, Reno, NV 89557, US)

**摘要:**为优化信号交叉口配时,减小交叉口延误和拥堵,通过改进现有的主干路协调控制相位相序优化算法,给出了基于双向绿波带宽最大化的相位相序优化模型。为验证优化模型的效果,采用 VISSIM 仿真软件对不同流量条件下的 15 组场景进行了仿真实验。仿真结果表明,交叉口延误减小了 2%~29%,起停车次数降低了 14%~28%,同时行驶时间缩短了 1%~9%,可以有效改善城市主干路的交通运行状态。

**关键词:**交通运输工程;信号控制;相位相序;绿波带宽;NEMA 相位;微观仿真

**中图分类号:**U491 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2009)Sup. 2-0019-06

## Optimized modeling of signalized intersections coordination based on two-way bandwidth maximization

MA Nan<sup>1</sup>, SHAO Chun-fu<sup>1</sup>, ZHAO Yi<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Transportation Complex System Theory and Technology, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Nevada Reno, Reno, NV 89557, US)

**Abstract:** To reduce traffic delays, relieve congestion, and improve the operation of urban traffic network, a phase sequence optimization model was presented based on the idea of maximization of two-way green wave bandwidth. Under 15 difference groups of scenarios, VISSIM was used for testifying the effectiveness of the optimization model. The simulation results show that the optimized scheme reduces the intersection delay by 2% ~ 29%, the number of stops by 14% ~ 28% and travel time by 1% ~ 9%, which greatly improves the operation condition of urban road network.

**Key words:** engineering of communication and transportation; signal control; phase sequence; green brand; NEMA phase; micro-simulation

信号交叉口作为城市交通网络中的关键点和瓶颈,其运行状态对城市交通顺畅、交通安全和减

少汽车尾气排放有着至关重要的影响。数据表明,在日常出行中交通延误占到总出行时间的

收稿日期:2007-03-24.

基金项目:“973”国家重点基础研究发展规划项目(2006CB705505).

作者简介:马楠(1981-),女,博士后.研究方向:城市交通规划与管理. E-mail:manan0613@gmail.com

通信作者:邵春福(1957-),男,教授,博士生导师.研究方向:城市交通规划与管理.

E-mail:cfshao@center.njtu.edu.cn

30%左右,其中交叉口延误又占到总延误的 50%以上<sup>[1]</sup>。在个别城市,交叉口延误甚至占到出行总延误的 80%以上<sup>[2]</sup>。可见,通过改善交叉口的信号配时,减小交叉口延误和拥堵,提高交叉口的通行能力,对提高城市路网的运行状况有着极为重要的意义。目前关于信号交叉口配时优化的研究主要集中于周期和相位时长优化方面;常健、吴大为<sup>[3]</sup>采用多目标双层规划模型描述了固定 OD 需求量的饱和路网上,考虑排队和拥挤时,预测平衡分配和优化信号参数的组合问题;杨锦冬、杨东援<sup>[4]</sup>以延误、排队车辆数为目标函数,提出了信号周期时长的双目标优化模型;在此基础上,葛艳新、张生瑞<sup>[5]</sup>研究了在平均延误,停车次数和通行能力约束下的 3 目标信号配时优化模型;此外,徐勋倩、黄卫<sup>[6]</sup>提出了基于蚁群算法的单路口多相位交通信号实时配时模型。上述研究成果都从优化交叉口延误的角度阐述了信号配时对交叉口通行能力的影响。作者从驾驶员的感知角度出发,通过调整信号相位相序从而优化双向绿波带宽,使得主路机动车流能够更加顺畅地通过交叉口。与减少交叉口延误的方法相比,从绿波带宽的角度对信号进行优化能够有效降低交叉口停车次数,特别是减小两个相邻交叉口连续停车的情况。相对交叉口延误,停车次数更容易被驾驶员所感知。因此,通过优化绿波带宽减少交叉口停车次数,对改善交叉口通行状况,提升驾驶员的驾驶感受,提高路网使用效率和交通安全水平,缓解城市交通拥堵和空气污染,降低车辆燃油消耗和噪声污染都具有现实意义。

### 1 NEMA 相位对相序优化的影响

我国现有的信号交叉口配时方法研究大都建立在杨佩昆等<sup>[7]</sup>提出的“冲突点”法和全永桑<sup>[8]</sup>提出的“混合交通条件下基于 Webster 通行能力计算方法”的基础上,这两种方案的基本思路是根据本地流量特点设置信号配时方案,而交叉口信号相序方案则主要根据各方向的左转流量进行配置。针对典型的十字交叉口,我国目前常用的相序方案大都是基于单环(Single Ring)结构的,通常有“两相位”、“三相位”和“四相位”三种情况,如图 1 所示。可以看出,图中任何一种配时方案中,至少会有两个方向的车流共用一个信号相位。但是由于城市道路交通流时空分布的不均衡性,共用相位中某一方向的车流必定不能有效使用该相

位的全部绿时间,降低了该相位的绿灯信号时间利用效率。基于以上原因,在图 1 所示相序关系的基础上,作者提出了针对双环(Dual Ring)结构的 NEMA 相位(National Electrical Manufacturers Association Phase)的相序优化方法。

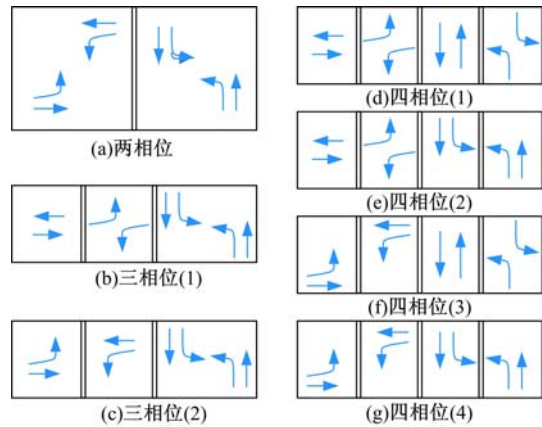


图 1 单环结构相位相序方案示意图

Fig. 1 Sketch map of single ring phase-phase sequence

NEMA 相位是美国国家电器制造商协会针对信号交叉口软、硬件设备开发制定的 TS-2 标准中关于相位设置的内容<sup>[9]</sup>。与目前大多数信号交叉口的单环相序设置不同,NEMA 双环相位结构由双环、双段(Stage)的 8 个相位构成,如图 2 所示。

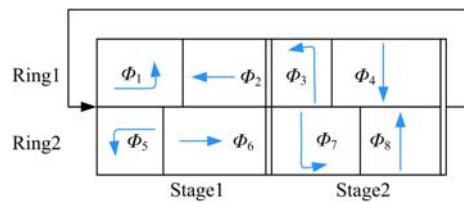


图 2 双环结构 NEMA 相位示意图

Fig. 2 Sketch map of dual ring NEMA phase

在图 2 所示 NEMA 相位中,任意调整位于同环、同段的两个相位的时长和顺序,完全不会对交叉口中其他相位的正常运行产生任何不良影响。例如交换相位  $\phi_1$ 、 $\phi_2$  的顺序,或改变相位  $\phi_1$ 、 $\phi_8$  的时长,也不会产生任何冲突相位。针对上述相位,假设东西方向的相位  $\phi_2$  和  $\phi_6$  为主干路协调控制相位,相位  $\phi_6$  为主要流向相位,那么主干路相位相序设置可分别为左转提前(Leading)(见图 3(a))、左转滞后(Lagging)(见图 3(b))和提前-滞后(Lead-Lag)三种情况,其中提前-滞后情况又可分为主向左转提前(Lead-Lag)和次向左转提前(Lag-Lead)两种(见图 3(c)、3(d))。

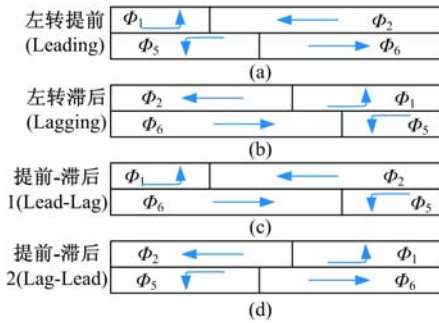


图 3 NEMA 双环结构中 4 种相位相序方案示意图  
Fig. 3 Sketch map of 4 types of phase-phase sequence in dual ring structure

从 NEMA 相位的上述特性可以发现,相对于传统单环结构的配时方案,NEMA 相位在处理相序和相位时长方面有着更高的灵活性。它能够根据相邻信号交叉口自身的特点,通过合理调整相序获取更优的主路绿波带宽。

## 2 基于相位相序调整的绿波带宽优化模型

美国 IBM 的 Brooks<sup>[10]</sup> 于上世纪 60 年代首次提出了针对两相位信号交叉口的绿波带宽优化模型。在此基础上,Morgan<sup>[11]</sup> 和 Little<sup>[12]</sup> 利用整数规划对仅考虑主路直行相位情况下的绿波优化问题建立了解析模型,确保主路双向同时能够获得相同的绿波带宽。随后,Messer<sup>[13]</sup> 在上述研究的基础上,提出了包含左转相位的绿波带宽优化算法。该算法被广泛使用在 PASSER II、MAXBAND 等众多带宽优化软件中<sup>[14]</sup>。

本文在上述优化算法的基础上,通过迭代遍历的方法,对不同信号相位相序下的最优带宽进行计算,最后得出整体最优的绿波带宽。该优化模型可表示为

$$B_{\max} = G_{o,\min} + G_{l,\min} - \min\{\min[\max(I_{U,j}) + \max(I_{L,k})]_l\} \quad (1)$$

$$\forall j \in 1 \sim m, l \in 1 \sim n$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} I_{U,j,p} = G_{i,x} - (-r_{x,p} + t_{x,j} + r_{j,q} + G_{i,j} + t_{j,x}) \\ I_{L,j,p} = -r_{x,p} + t_{x,j} + r_{j,q} + t_{j,x} - G_{o,j} + G_{o,x} \\ I_{U,j} \leq I_{U,k} \\ 0 \leq I_{U,j,n} < C \\ 0 \leq I_{L,j,n} < C \end{cases}$$

式中: $B_{\max}$ 为系统最优的绿波带宽; $G_{o,j}$ 、 $G_{i,j}$ 为  $j$  交叉口主、次要方向的绿灯时长; $I_{U,j,p}$ 、 $I_{L,j,p}$  为在  $p$  相位条件下, $j$  交叉口绿波带宽的上端、下端损失时间; $t_{x,j}$ 为交叉口  $x$  到  $j$  的行驶时间; $r_{j,q}$ 为

交叉口次要方向绿时长  $G_{i,j}$  相对主要方向绿时长  $G_{o,j}$  在相序方案  $q$  下的相对相位差; $x$  为次要方向绿信号时长最短的交叉口标号; $m$  为系统中信号交叉口数目; $n$  为相序组合方案,由于每个交叉口相序均有 4 种情况,故  $n = m^4$ 。

各参数具体的物理含义如图 4 所示。

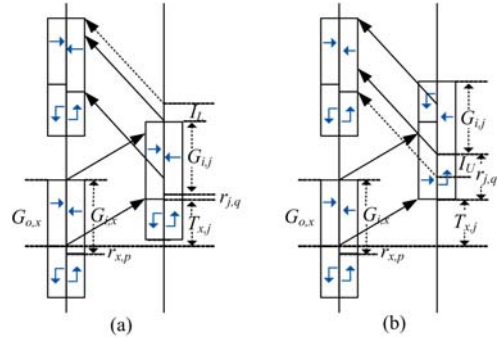


图 4 相位相序损失时间计算示意图

Fig. 4 Sketch map of lose time under phase-phase sequence framework

## 3 实例验证与分析

依照式(1)所示的优化模型,以北京市中关村东路 4 个连续交叉口为对象,进行了基于绿波带宽最大化的配时方案优化。

通过对调查数据进行分析发现,在现状条件下,知春路交叉口运行双倍周期配时方案,实验路网并未运行在协调控制的状态。为保证对比分析的合理性、公正性和公平性,首先在调查方案的基础上,等比例将各交叉口的信号配时方案调整为 120 s。并在假设车辆行驶速度为 45 km/h、南向北方向为主干路主向交通流的情况下,对各信号交叉口间的相位差进行了优化,给出了基于现状路网调查数据的初始协调控制方案。

在初始配时方案路网中,4 个交叉口全部均为“左转滞后”时,该方案无法提供双向绿波。其最优方案提供的 35 s 绿波仅能够提供单方向使用,如图 5(a)所示。

随后,利用优化模型对上述方案进行优化,通过将知春路交叉口和学院南路交叉口的配时方案改为“主向交通流左转提前”;将北三环交叉口的配时方案改进为“次向交通流左转提前”;将交大附中交叉口改进为“左转提前”,并重新优化各路口相位差,可以保证在各相位信号时长不发生变化的情况下,双向绿波带宽改进为 39.2 s,其中南北双向均有 19.6 s 的主路绿波带宽。图 5(b)为优化方案的交叉口时间-距离曲线,优化结果如表

1 所示。

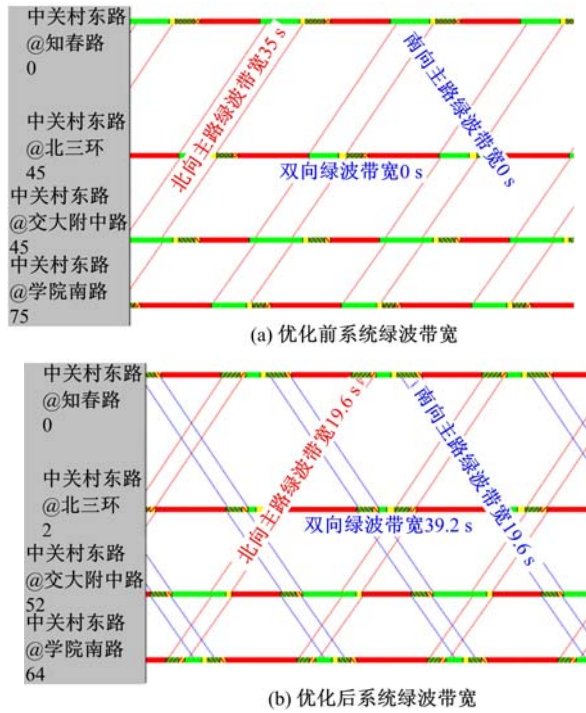


图 5 基于绿波带宽的相序优化方案对比图

Fig. 5 Comparison between phase sequence optimization schemas base on bandwidth

表 1 模型优化结果

Table 1 Results optimization model

交叉口	直行时长/s	左转时长/s	优化前		优化后	
			相位差/s	相序设置	相位差/s	相序设置
知春路	42	23	0	左转滞后	0	主向交通流左转提前
北三环	35	20	45	左转滞后	2	左转提前
交大附中	55	20	110	左转滞后	52	次向交通流左转提前
学院南路	38	17	75	左转滞后	64	主向交通流左转提前

表 2 优化后网络运行状态变化百分比

Table 2 Changing ratios of network's performance after optimization

主路流量 /(veh · h <sup>-1</sup> )	延误			起停车次数			行驶时间		
	主向/%	次向/%	双向合计/%	主向/%	次向/%	双向合计/%	主向次向/%	向/%	双向合计/%
100	-7	-31	-29	+2	-32	-28	+2	-13	-9
200	+16	-20	-23	+53	-27	-21	+2	-9	-8
300	+19	-25	-22	+12	-33	-28	+3	-11	-7
400	-60	-9	-12	-35	-31	-27	-11	-3	-4
500	-15	-17	-16	-5	-33	-28	-1	-7	-5
600	-11	-14	-12	-6	-29	-26	-3	-6	-4
700	-6	-11	-9	+15	-27	-21	-1	-5	-3
800	-20	-11	-16	-10	-27	-27	-5	-4	-5
900	-17	-5	-2	0	-23	-15	-4	-2	-1
1000	-22	-7	-9	-9	-28	-24	-5	-3	-3
1100	-8	-8	-6	+3	-20	-15	-2	-3	-2
1200	-4	-7	-8	+11	-23	-18	-1	-3	-3
1300	-4	-7	-5	+2	-23	-17	-2	-3	-2
1400	-25	-6	-9	-15	-23	-19	-7	-2	-3
1500	0	-4	-2	+10	-22	-14	0	-2	-1
合计	-11	-12	-12	+2	-27	-22	-2	-5	-4

注：“-”表示该指标减小，“+”表示该指标增加。

#### 4 基于 VISSIM 仿真平台的优化效果评价

为了验证优化方案的有效性,利用 VISSIM 交通仿真软件建立了实验网络(见图 6),并针对不同的流量条件,对优化前后的配时方案进行了对比仿真实验,比较了绿波带宽优化对延误、起停车次数和行驶时间的影响。



图 6 中关村东路连续 4 个交叉口的路网结构

Fig. 6 Road network structure of continuous 4 intersections on Zhongguan Cun South Road

在上述仿真网络的基础上,分别针对初始协调控制配时方案和本文模型求得的最优方案两种情况,对主向交通流量为 100~1500 veh/h 下 15 组不同的流量方案进行了仿真实验。实验结果如表 2 所示。

从上述 15 组不同流量场景的仿真结果可以看出,在该实验网络进行基于绿波带宽最大化的相位相序优化后,用于评价网络运行状态的三个指标延误、起停车次数和行驶时间分别减小了 12%、22% 和 4%。通过对数据进行分析能够得出如下结论:

(1)在对协调控制交叉口进行协调控制优化后,整个实验网络的运行状态得到了很好地改善。在不同的流量情况下,优化方案减小了 2%~29% 的交叉口延误,降低了 14%~28% 的起停车次数,缩短了 1%~9% 的行驶时间。

(2)在 15 组仿真场景下合计 45 个数据中,优化方案的所有结果均显示其能够对网络运行状态

进行改善。

(3)随着交通量的增加,路网运行状态的改善幅度逐渐降低(见图 7)。通过对仿真过程进行仔细观察能够发现:由于交通量的增加,车辆在交叉口转向时,会对相邻车道的车辆正常运行产生干扰,导致交叉口拥堵,从而降低整个路网的平均车速,影响到车辆正常进入绿波区间,使得优化幅度逐渐降低。这就要求在交通量过大时,重新调查相邻交叉口的行程时间,并在更新的行程时间基础上再次对路网的相序方案进行优化。但是从上述图表中的数据也可以看出,在拥堵情况下,该方法仍能小幅改善网络运行状态,不会对城市交通网络的正常运行产生任何负面作用。

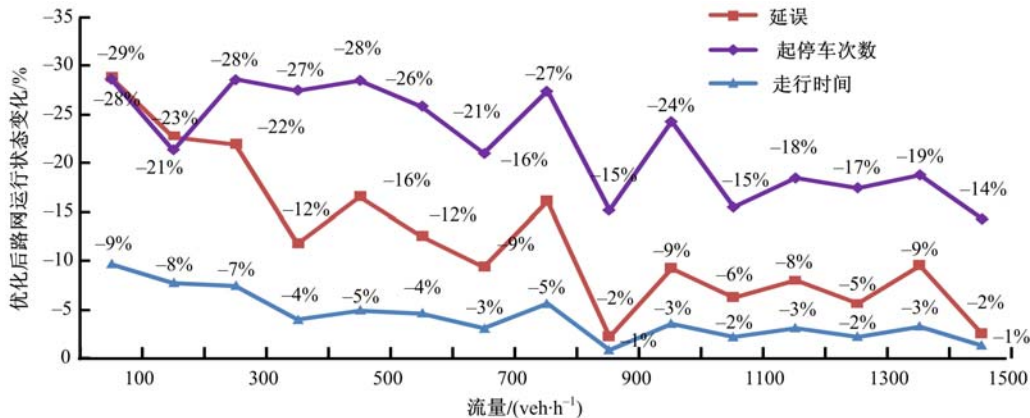


图 7 优化后路网运行状态变化示意图

Fig. 7 Sketch map of changing ratios of networks performance after optimization

(4)相对初始方案,部分优化后的评价指标在主干路主向交通流并未得到改善。这是由于原配时方案在主要方向提供了 35 s 的单向绿波,而优化后方案在主向的绿波带宽减小为 19 s,因此针对主要方向的三个指标在优化后均有部分结果劣于原方案。特别是停车次数,在 15 个场景中仅有 7 次优化结果好于原有结果。但考虑到双方向的优化结果,能够发现网络整体运行效率得到了改善。

## 5 结束语

针对协调控制下的城市道路交叉口相位相序优化问题进行了深入研究。首先阐述了在 NEMA 相位条件下基于绿波带宽最大化的相序优化原则,并给出了优化模型。随后在实地采集得到的信号配时数据基础上进行了实证分析,给出了优化的相位相序配时方案。最后,利用 VISSIM 仿真软件对比了优化前后的网络运行情

况。结果表明,本文方法能够有效改善城市路网的运行状态,减小机动车的交叉口拥堵、起停车次数和行驶时间。此外,随着网络交通量的增大,需要重新标定临近交叉口的行驶时间来计算优化的相序方案。

## 参考文献:

- [1] 长沙市城管局. 长沙市中心区道路交通整治方案[R]. 2008.
- [2] 苏州市规划局. 2007 苏州城市道路交通发展年度报告[R]. 2007.
- [3] 常健,吴大为. 多目标交叉口信号控制模型[J]. 大连理工大学学报,2000,40(6): 653-656.  
Chang Jian, Wu Da-wei. Multi-object traffic signals controlling model[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000, 40(6): 653-656.
- [4] 杨锦冬,杨东援. 城市信号控制交叉口信号周期时长优化模型[J]. 同济大学学报,2001,29(7): 789-794.

- Yang Jin-dong, Yang Dong-yuan. Optimization model of cycle length for urban traffic signals[J]. Journal of Tongji University, 2001, 29(7): 789-794.
- [5] 葛艳新, 张生瑞. 交叉口定时信号配时优化设计方法[C]//2007 第三届中国智能交通年会论文集, 2007.
- [6] 徐勋倩, 黄卫. 单路口交通信号多相位实时控制模型及其算法[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(3): 413-422.
- Xu Xun-Qian, Huang Wei. Real-time controlling model and algorithm of multi-phase on single traffic signal[J]. Control Theory and Application, 2005, 22(3): 413-422.
- [7] 杨佩昆, 张树升. 交通管理与控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 1995.
- [8] 全永燊. 城市交通控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 1989.
- [9] NEMA. NEMA standards publication TS-2[R]. 2003.
- [10] Brooks W D. Vehicular Traffic Control; Designing Traffic Progression Using A Digital Computer[M]. New York: IBM-Data Processing Division, 1965.
- [11] Morgan J T, Little J D. Synchronizing traffic signals for maximal bandwidth[J]. Operations Research, 1964, 12: 896-912.
- [12] Little J D. The synchronization of traffic signals by mixed-integer linear programming[J]. Operations Research, 1966, 14: 568-594.
- [13] Messer C J, Whitson R N, Dudek C L, et al. A variable-sequence multiphase progression optimization program[C]//Highway Research Record 445, National Research Council, Washington, D. C., 1973: 24-33.
- [14] Tian Z, Mangal V, Liu H. Effectiveness of lead-lag phasing on progression bandwidth[J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2008, 2080:22-27.