doi: 10.3969/j.issn.1002－0268.2013.07.023

基于灵活相位的双向绿波协调控制

朱 和，常玉林
（江苏大学 汽车与交通学院，江苏 镇江 212013）

摘要： 先进的交通信号控制系统的核心是控制策略及参数模型，而信号相位设计是交通信号设计中最具有创造性的部分，也是控制策略实现前提条件。针对目前城市干线交通拥挤现状，提出了一种基于NEMA相位的灵活相位相序协调控制优化方案，并给出了相应的设计原则，再在MAXBAND核心数学模型上给出了基于灵活相位的双向绿波带宽最大化模型。最后通过实例验证分析表明，相对于传统相位相序策略，灵活相位策略具有一定的优越性，而且该策略能够有效提高干线的通行效率，减轻城市交通堵塞。

关键词： 交通工程；灵活相位；NEMA相位；双向绿波；微观仿真
中图分类号： U491.5⁺1 **文献标识码：** A **文章编号：** 1002－0268（2013）07－0140－04

Bidirectional Green Wave Coordinative Control Based on Flexible Phase

ZHU He，CHANG Yu-lin
（School of Automobile &Traffic Engineering，Jiangsu University，Zhenjiang Jiangsu 212013，China）

Abstract: The control strategy and the parameter model is the core of advanced traffic signal control system，while the phase design of traffic signal is the most creative part and also the prerequisite of control strategy to realize. In view of the present urban traffic congestion situation on the trunk road，this article proposed a kind of flexible phase sequence coordination control optimization scheme based on the NEMA phase，and gave the corresponding design principles. Then，the paper gave bidirectional green wave bandwidth maximization model based on flexible phase referring to MAXBAND core mathematical model. Finally，the example verification shows that comparing with traditional phase sequence strategy，flexible phase strategy has a certain superiority，and can effectively improve the trunk road traffic efficiency and alleviate urban traffic jam.

Key words: traffic engineering; flexible phase; NEMA phase; bidirectional green wave; micro-simulation

0 引言

伴随着经济的快速增长，城市交通堵塞越来越严重。城市主干线承担着巨大的交通负荷，提高主干线的通行能力，减少车辆的停车率和交通延误，对改善整个城市交通状况具有重大的意义。目前，国内外对交通干线信号控制策略和算法研究相当普遍，为控制系统设计人员提供了丰富的策略和准则。文献[1－2]分别提出了基于绿波带最大化干线定时控制方法与延误最小的干线定时协调控制；文献[3－4]分别提出了信号交叉口的分布式与合作模糊控制器方法以实现信号灯的协调控制。国内学者也分别对现有干线协调算法进行了改进或采用智能算法提出干线协调优化算法[5-8]，并且取得了一定的控制效果。

但是，国内外学者注重控制算法本身的设计和模型的建立，缺乏对相位相序优化设计的考虑。相位相序设计是指合理安排各向交通流通行权规则和

收稿日期：2013－01－04
基金项目：常州市科学技术局科技支撑计划项目（CE20115008）
作者简介：朱和（1986－），男，安徽安庆人，硕士.（jiklerand@gmail.com）

先后顺序。先进成熟的交通信号控制策略，如定时控制、感应控制和自适应控制，都可描述为在合适的时间选择合适的交通流，并赋予通行权。《美国道路通行能力手册 2000》[9] 提出："信号设计中最为关键的问题是选择 1 个适当的信号相位方案，信号相位设计是交通信号设计中最具有创造性的部分"。在传统定时相位相序策略中，为了保证向交通流同时放行与停止，很可能出现绿时浪费，造成不必要的延误，从而造成交通拥挤，所以需要一种更灵活实用的相序控制策略。因此，首先需要对相位相序进行优化，其次才能对信号配时参数进行优化。

本文从相位相序优化的角度对干线信号控制交叉口进行研究。首先依据灵活相位相序设计的原则，适当调整传统信号相位相序，使主线协调相位与非协调相位相互交迭。然后采用定时双向绿波协调控制策略，即在现有的 MAXBAND 核心模型的基础上，以双向绿波带宽和最大为目标，建立新模型，利用 LINGO 数学软件求得相关参数。最后利用 CAD 绘制传统相位与灵活相位方案时距图并加以对比。实例分析表明，该控制策略能使主干线车流能够更加顺畅连续地通过该干线交叉口，减少停车次数。这对改善交叉口通行状况，提高区域网通行效率和交通安全水平，缓解城市交通拥堵和环境污染，降低车油消耗和噪声污染具有实际意义。

1　灵活相位相序设计

1.1　灵活相位相序设计描述

目前，国内现有的信号交叉口配时方案设计大都建立在全永燊[10] 提出的混合交通条件下基于 Webster 通行能力计算方法和杨佩昆等[11] 提出的冲突点法的基础上。这 2 种方案的基本思路是依据交叉口流量特点设置信号配时方案，而且信号相序方案则主要根据各方向的左转流量进行配置。针对国内混合交通流的情况，采用传统的相位相序方式，在配时方案中有时至少有 2 个方向的车流共用同 1 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，使该相位的绿灯信号时间利用效率降低。基于以上原因，本文在传统相位相序关系的基础上，针对双环结构的 NEMA (National Electrical Manufacturers Association) 相位的相序优化方法，提出新的灵活相位相序设计。

NEMA 相位[12] 是美国国家电器制造商协会针对信号交叉口软、硬件设备开发制订的 TS－2 标准中关于相位设置的内容。它的结构由双环、双段的 8 个相位构成，如图 1 所示。

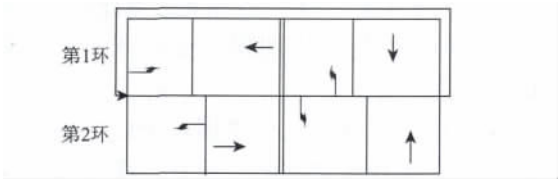

图 1　双环结构 NEMA 相位示意图

Fig. 1　Schematic diagram of dual-ring NEMA phase

从 NEMA 相位中可以看出，任意调整位于同环、同段的 2 个相位的顺序或时长，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。从 NEMA 相位的这种特性可以发现，相对于传统相位的配时方案，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，通过合理调整相序保证主路绿波带宽的优化。依照这一思想，根据左转相位的提前与滞后，灵活变化以下 4 种情况，如图 2 所示。针对干线交通流的具体情况，依据下文相位设计原则，合理安排相位相序，保证在不影响支路通行的情况下，实现主路绿波带宽度更优。

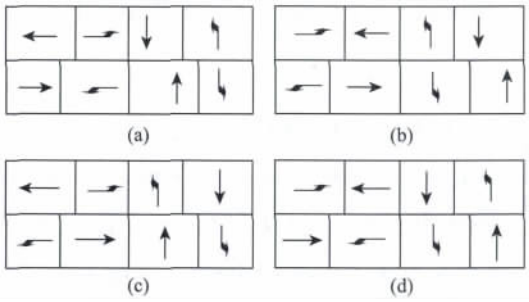

图 2　灵活相位相序示意图

Fig. 2　Schematic diagram of flexible phase sequence

另外，NEMA TS－2 中定义相位为：1 个周期内分配给任意 1 个独立交通流的绿灯时间、红灯时间以及清空时间的组合。而本文的相位是指在交叉口某方向的交通流或几个方向交通流的组合同时得到的通行权或被分配得到这些通行权的时间带。

1.2　灵活相序设计原则

相位相序设计方案应保证相位转换期各交通流的安全交叉通行，并减少绿灯损失时间，提高以人或以车为单位的通过量，从而能有效地降低车辆在交叉口停车等待时间，提高车辆在交叉口处的通行效率。在优化相位相序方案时，将不冲突的流向配置在 1 个相位，相互冲突的流向配置在不同相位。

一般相位相序设计应遵循以下原则[13]：

(1) 车道流量均衡原则：相位内部各流向的流量比相差不大；

(2) 安全原则：相位内部交通流冲突尽可能少；

(3) 效率原则：周期损失尽可能小，交叉口通行能力最优。

(4) 相位绿时最大化原则：用以保证主干线通行效率，减轻城市交通拥堵现状。执行该原则首先需考虑以下因素：① 交叉口是否需要专用左转相位；②专用左转相位与直行相位的先后次序。

2 基于灵活相位的双向绿波优化设计

2.1 双向绿波概念

双向绿波指车流在沿某条干线行驶过程中，干线的上、下行方向的车流依次连续获得的绿灯放行信号使得 2 个方向的车流均能畅通地通过沿途所有的交叉口。

2.2 基于灵活相位的双向绿波优化模型

本文优化模型的建立基于 MAXBAND 核心数学模型，它是由 Little 等人研究的混合整数线性规划算法，是以双向绿波带宽和最大为目标，能得到各个交叉口信号相位差、绿信比、周期和最佳左转行车信号。根据灵活相位相序设计的特点，修改模型如下：

$$\text{Max}\sum_{q=1}^{Q}\left(b_q+kb'_q\right),$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}(1-k)\,b'_q\geqslant(1-k)\,kb_q\\ t_i+t'_i+(w_i+w'_i)-(w_{i+1}+w'_{i+1})+\varphi_i-\varphi_{i+1}\\ \quad=-0.5(r_i+r'_i)+0.5(r_{i+1}+r'_{i+1})+m_i\\ w_1+b_1\leqslant 1-r_1,w'_1+b'_1\leqslant 1-r'_1,\cdots\\ w_n+b_Q\leqslant 1-r_n,w'_n+b'_Q\leqslant 1-r'_n\\ m_i\in z^*,\ i=1,\cdots,n\\ b_q,b'_q,w_i,w'_i,r_i,r'_i,t_i,t'_i\geqslant 0\end{cases}\quad(1)$$

式中，$b_q(b'_q)$ 为交叉口与交叉口间 2 方向的绿波带宽度；Q 为系统分区的个数；r_i (r'_i) 为路口 I_i 的上、下行红灯时间；t_i 为从交叉口 I_i 到交叉口 I_{i+1} 的行程时间，$t_i=t'_i$；w_i (w'_i) 为交叉口 I_i 的上行（下行）方向绿波带边缘和相邻的左（右）侧相近红灯的右（左）侧边缘之间的时间值；φ_i 为同路口上、下行相位时差；系数 k 为上下行方向通过带的需求比例；n 为干线系统中有绿灯控制交叉口的个数；m_i 为整数变量。模型中交叉口之间的参数几何关系如图 3 所示。

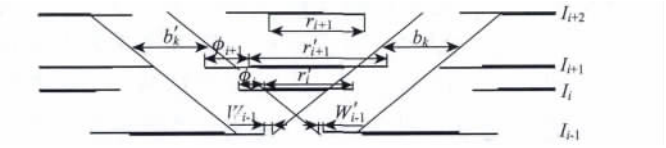

图 3 交叉口之间的几何关系

Fig. 3 Geometric relation between intersections

3 实例验证与分析

常武路是常州市武进区南北向的主干线，它的交通畅通对于缓解市区交通拥堵和改善武进区形象具有举足轻重的作用。该交通干线南北方向为主方向，现状道路规模为机动车双向 6 车道，道路两侧还设有 2 条公交专用车道。常武路从与聚湖路至滆湖路共有 13 个信号交叉口，常武路沿线交叉口间距在 250 ~ 650 m 之间，交叉口间距相差不明显。常武路的交通状况非常适合采用双向绿波带协调控制。

本文针对常武路平峰期间 (9:00—16:30) 选用灵活相位思想进行方案设计，设计思路如图 4 所示。

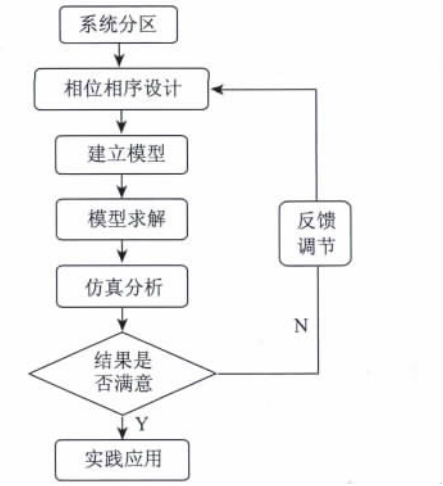

图 4 方案设计流程图

Fig. 4 Flowchart of scheme design

常武路平峰时段的南北双方向车流分布较均衡，但流量较大。考虑到车队的离散和绿波带宽的可达度(绿波带宽与绿灯时长之比) 将干线大系统合理划分为几个子系统进行研究。所以根据路口间距、相交道路性质及交通状况将常武路从北至南 13 个交路口分为 4 个区间。第 1 区间：聚湖路、东方路交叉口；第 2 区间：人民路、古方路、定安路交叉口；第 3 区间：广电路、长安路交叉口；第 4 区间：虹北路、长虹路、府西路、延政路、永胜路，滆湖路交叉口。

根据灵活相位的思想，在不影响支路交通流通行的情况下，保证主路绿波带最大化目标，调整常

武路部分复杂路口传统相位。例如，常武－延政路交叉口，相位转换如图 5 所示。

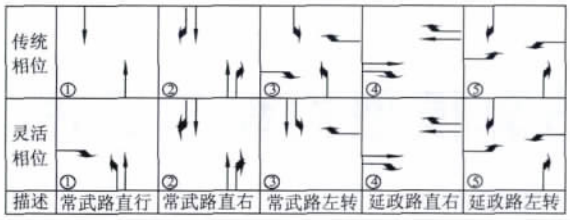

图 5　常武－延政路交叉口相位变化图

Fig. 5　Phase change diagram of Changwu-Yanzheng road intersection

再利用 LINGO 数学软件求得传统相位与灵活相位模型最优的双向绿波带宽与相关参数，然后绘制成时距图，干线相位差可从图上直接量取。本文将传统相位与灵活相位的时距图对比如图 6、图 7 所示。

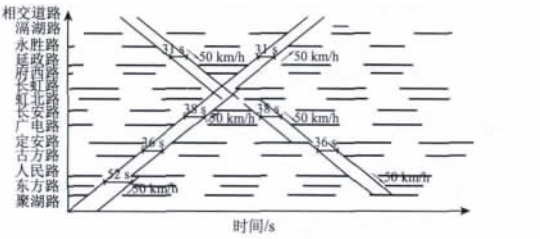

图 6　传统相位方案时距图

Fig. 6　Time-distance diagram of traditional phase scheme

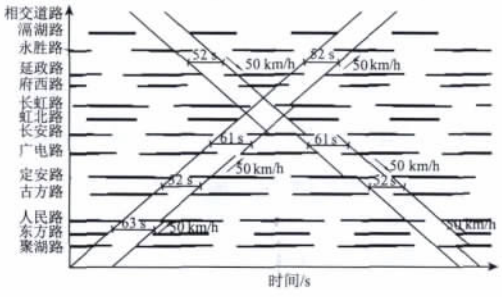

图 7　灵活相位方案时距图

Fig. 7　Time-distance diagram of flexible phase scheme

从图 6 和图 7 中可以看出，交通平峰期间灵活相位绿波方案的绿波带宽范围是 52 ~ 63 s，绿波带宽可达度的范围是 85% ~ 100%。传统相位绿波方案的绿波带宽最窄段为 31 s，而灵活相位绿波带的最窄段为 52 s，增加了 67.8%。

4　系统设计仿真评价

为了验证实例相位相序优化前后的方案效果，采用德国 PTV 公司的微观交通仿真软件 VISSIM 进行仿真，首先建立与实际相符的路网模型，然后输入交通流量、周期、相位配时和相位差等相关参数，选取合适的位置设置相应的评价参数检测器，对传统相位和灵活相位方案进行仿真对比实验，比较了绿波带优化对单程平均停车次数、平均延误、平均行驶时间的影响。效果对比如表 1 所示，测试数据结果表明相位优化后双向绿波带控制策略比传统相位方案更有效地改善了干线交通阻塞状况。

表 1　仿真效果对比表

Tab. 1　Comparison of simulation effects

	平均停车次数/（次·pcu^{-1}）	平均延误/（s·pcu^{-1}）	平均行驶时间/min
传统相位	2.8	42.4	10.5
灵活相位	1.6	26.7	8.6
改进率/%	42.9	37.0	18

5　结论

为了提高干线的通行效率、改善城市交通拥挤，本文基于以往的干线协调控制优化策略，提出了一种基于灵活相位优化设计的双向绿波协调控制策略。该灵活相位设计思想参照 NEMA 相位优化的方法，并在此基础上阐述了相应的相序优化原则，然后在 MAXBAND 核心数学模型基础上给出了相应的优化模型。最后进行实例验证分析。结果表明，灵活相位方案相对于传统相位的方案具有优越性。所以该策略能够有效地改善城市干线的运行状态，减少停车延误、停车次数和行驶时间。但交通流处在不断变化之中，基于灵活相位相序优化的双向绿波协调控制策略还需要进一步实践改善。

参考文献：

References:

[1] LITTLE J D C. The Synchronization of Traffic Signals by Mixed-integer Linear Programming [J]. Operations Research, 1996, 14 (4): 568 - 594.

[2] GARTNER N H, STAMATIADIS C. Arterial-Based Control of Traffic Flow in Urban Grid Networks [J]. Mathematical and Computer Modeling, 2002, 35 (5 - 6): 657 - 671.

[3] SHEN G J. Urban traffic trunk two—direction green wave intelligent control strategy and its application [C] // Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian: Dalian University of Technology, 2006: 8563 - 8567.

[4] LEE J H, LEE K H. Distributed and Cooperative Fuzzy Controllers for Traffic Intersections Group [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part C Applications and Bedews, 1999, 29 (2): 263 - 271.

（下转第 158 页）

动问题 [J]. 宇航学报，1986，7 (4)：40－55.
WANG Yun，WANG Zhao-lin. Low-gravity Sloshing Liquid for Cylindrical Tank in Horizongtal State [J]. Journal of Astronautics，1986，7 (4)：40－55.

[11] 宗长富，麦莉，李雅娟. 重型半挂车的动力学建模及侧倾稳定性分析 [J]. 辽宁工业大学学报，2008，28 (1)：52－56.
ZONG Chang-fu，MAI Li，LI Ya-juan. Dynamic Modeling and Roll Stability Analysis of Heavy Tractor Semi-trailers [J]. Journal of Liaoning University of Technology，2008，28 (1)：52－56.

[12] 宗长富，朱天军，麦莉，等. 基于全局增益调度控制的重型半挂车主动侧倾控制算法 [J]. 机械工程学报，2008，44 (10)：138－144.
ZONG Chang-fu，ZHU Tian-jun，MAI Li，et al. Active Roll Control Algorithm of Heavy Tractor Semi-trailer Based on Global Gain Scheduling Control [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering，2008，44 (10)：138－144.

[13] 朱天军. 基于改进TTR重型车辆侧翻预警及多目标稳定性控制算法研究 [D]. 长春：吉林大学，2010.
ZHU Tian-jun. Research on Rollover Warning and Multi-objective Stability Control Algorithm of Heavy Duty Vehicle Based on Improved TTR [D]. Changchun：Jilin University，2010.

(上接第143页)

[5] 王俊刚. 变带速干线协调控制模型研究 [J]. 公路交通科技，2005，22 (4)：108－111.
WANG Jun-gang. Variable Band Speed Arterial Coordination Control Model Research [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2005，22 (4)：108－111.

[6] 靳文舟. 基于粒子群理论的干道协调控制优化研究 [J]，交通与计算机，2008，26 (1)：31－34.
JIN Wen-zhou. Coordinate Control Optimization of Urban Arterial Road Based on Particle Swarm Theory [J]. Computer and Communications，2008，26 (1)：31－34.

[7] 魏武. 基于遗传再励和博弈论的多Agent交通控制系统优化和协调 [J]. 长沙理工大学学报：自然科学版，2007，4 (1)：24－28.
WEI Wu. Optimized and Coordinated Multi-agent Traffic Control System Based on Genetic Reinforcement and Game Theory [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology：Natural Science Edition，2007，(1)：24－28.

[8] 仇东华. 干线协调控制的研究与设计 [D]. 合肥：中国科技大学，2009.
QIU Dong-hua. Research and Design of Trunk Coordination Control [D]. Hefei：University of Science and Technology of China，2009.

[9] Transportation Research Board. Highway Capacity Manual (HCM) 2000 [M]. Washington，D. C.，Transportation Research Board，2000.

[10] 全永燊. 城市交通控制 [M]. 北京：人民交通出版社，1989.
QUAN Yong-shen. Urban Traffic Control [M]. Beijing：China Communications Press，1989.

[11] 杨佩昆，张树升. 交通管理与控制 [M]. 北京：人民交通出版社，1995.
YANG Pei-kun，ZHANG Shu-sheng. Traffic Management and Control [M]. Beijing：China Communications Press，1995.

[12] NEMA TS 2－2003，Traffic Controller Assemblies with NTCIP Requirements [S].

[13] 高云峰，陈红洁. 信号控制交叉口相位相序优化研究 [C]//2007第三届中国智能交通年会论文集. 上海：中国智能交通协会，2007：929－933.
GAO Yun-feng，CHEN Hong-jie. Study of Design for Traffic Signal Phasing-sequence of Signal Control Intersection [C]//Proceedings of the 3rd China Intelligent Transport Annual Conference 2007. Shanghai：China Intelligent Transport Systems Association，2007：929－933.