
城市道路干线协调控制方法综述

赵益¹

(1. 上海电科智能系统股份有限公司, 上海 200063)

摘要: 城市道路干线协调控制方法可以保障城市主要道路的畅通, 在城市道路交通控制中有着重要的意义。根据优化目标的不同, 城市道路干线协调控制方法可分为两类: 一是以绿/红波带最大为优化目标; 二是以优化干线的性能指标为优化目标。以绿/红波带最大为优化目标的干线控制方法包括图解法、数解法和模型法; 以优化干线的性能指标为优化目标的干线控制方法包括优化单一目标的控制方法和优化综合目标的控制方法。本文针对城市道路干线协调控制方法进行了综述, 分别论述了以上五种方法的控制原理、算法和优缺点, 并基于此展望了未来城市道路干线协调控制方法的研究方向。

关键字: 干线协调控制; 绿波带; 红波带; 干线性能指标

Review on Arterial Road Signal Coordination Control Strategies

Zhao Yi¹

(1.Shanghai SEARI Intelligent System Co. Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: Arterial road signal coordination control strategies can ensure the efficiency of the vehicles along main roads in an urban city, and play an important role in urban traffic control systems. According to the goals, arterial road signal coordination control strategies can be divided into two categories: one to maximize green/red wave band, and the other to improve the performance of the arterial road. There are three methods to maximize green/red wave band: graphic method, algebraic method, and modelling method. Different kinds of performance are used: single or combined performance indexes. This paper systematically reviews the methodology, advantages and disadvantages of arterial road signal coordination control strategies, and further prospects the future development.

Key words: arterial road signal coordination control strategies; green wave band; red wave band; performance indexes of arterial road

截至2017年年底, 上海市注册机动车保有量为390.5万辆, 与2016年相比增长了8.5%。然而, 截至2017年年底, 上海市城市道路长度5224公里, 道路面积115.9平方公里, 较上年仅增长1.9%和3.0%^[1]。上述数据表明上海市的城市道路建设速度远远比不上机动车保有量增长的速度, 也说明了上海市原本就存在的交通拥堵问题难以通过新建道路的手段得以缓解。

为缓解交通拥堵问题, 不同的交通控制方法被不断地提出和实施。最初的交通控制方法仅针对于单一交叉口, 旨在通过调节交叉口信号的周期时长、绿信比等控制参数以实现降低通过该交叉口的车辆的延误、停车次数、行程时间, 提高该交叉口通行能力等目的^[2]。随着交通控制方法的实施运行, 专家学者逐步意识到仅考虑提升单一交叉口运行效率的控制方法并不能得到期望的控制效果, 其主要原因在于: 单一交叉口的交通状态不仅仅和该交叉口的

作者简介: 赵益, 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 智能交通, E-mail: zhaoyi_0817@sina.com。

运行状态有关，也与其上下游的一个甚至多个交叉口的运行状态有关^[3]。

为了在交通控制方法中考虑相邻交叉口的运行状态，城市道路干线协调控制方法的理念应运而生。城市道路干线协调控制方法旨在保障城市一条或多条主要直行道路的畅通^[4]。与针对单一交叉口的控制方法不同，城市道路干线协调控制方法在制定时必须考虑上/下游交叉口间的协调控制。

根据优化目标的不同，城市道路干线协调控制方法可分为两类：一是以绿/红波带最大为优化目标；二是以优化干线的性能指标（如车均延误、停车次数、排队长度、通行能力等）为优化目标。本文将对城市道路干线协调控制方法的方法进行概要性的综述，讨论不同控制方法的优缺点及适用条件，并对其研究趋势进行预测。

1 以绿/红波带最大为优化目标

以绿波带最大为优化目标的城市道路干线协调控制方法的基本思路是以瓶颈交叉口为终点，建立上游流向的尽可能大的信号绿波带，使得尽可能多的从上游驶向瓶颈交叉口的车辆在途经的交叉口连续通行，增加驶出瓶颈交叉口的车辆数，缓解瓶颈交叉口及其上游交叉口的交通压力。与此相反，以红波带最大为优化目标的城市道路干线协调控制方法的基本思想则是迫使尽可能多的从上游驶向瓶颈交叉口的车辆在途经的交叉口连续停车，减少驶入瓶颈交叉口的车辆，降低瓶颈交叉口的交通量^[5]。尽管两种控制方法的思路不同，但在实际建模和计算上有相似性，因此在此处归类为一种方法。需注意的是，目前的主要研究方向仍以绿波带为主，红波带的相关文献较少。以绿/红波带最大为优化目标的城市道路干线协调控制方法的计算方法可分为三种：图解法、数解法及模型法。

1.1 图解法

图解法是指通过几何绘图的方式，调节干线上各交叉口的信号周期、相位差和车辆通过相邻交叉口的行驶车速，从而实现绿/红波带最大化的目标^[2]。图解法具有简单直观的优点。

林晓辉等运用图解法组合两个单向绿波实现以双向绿波带最大为目标的控制方法，并运用东莞市的实际数据证明该求解方法优于传统的数解法^[6]。张蕾等运用图解法计算了天津市主干道的绿波带带宽度，并论证了以绿波带最大为优化目标的控制方法可以提升主干道的通行效率^[7]。随着运用图解法求解以绿/红波带最大为优化目标的控制方法的进一步研究，专家学者发现传统的图解法着重计算整条干道上相邻交叉口的相位差，对单一交叉口的控制方法考虑不足。为解决这一问题，不少专家学者也进行了新的探索，如周君等先运用Webster法对各交叉口的各个进口道进行重新配时，再利用图解法求解各交叉口的信号相位差^[8]，卢顺达等先运用NEMA相位改变交叉口的相位相序以保障各交叉口的通行效率，再利用图解法协调各个交叉口的配时方案^[9]。

尽管图解法简单直观，易于理解，但根据上述研究可知，图解法存在以下两个问题：

- ① 图解法需遍历多种信号周期和相位差以便获取最大的绿/红波带，计算量大且费时。
- ② 图解法通过多个交叉口公用信号周期时长的方式求解计算，对各个交叉口自身的控制效果影响较大，尽管有研究试图在保证绿/红波带最大化的情况下进一步优化单一交叉口

的控制效率,但其有效性和适用性仍需进一步验证。

1.2 数解法

数解法是通过保障实际交叉口间距与理想交叉口间距最小的方式获取最优相位差的方法,其计算步骤可分为四步[10]:① 根据各交叉口单点控制方案确定初始公共信号周期 C ;② 计算理想交叉口间距 d_a 的取值范围 $[\frac{C \cdot v}{2} - M, \frac{C \cdot v}{2} + M]$,其中 v 为车辆通过相邻交叉口的行驶车速, M 为变化浮动范围;③ 计算求得最佳理想交叉口间距值 $d_{op} \in [\frac{C \cdot v}{2} - M, \frac{C \cdot v}{2} + M]$,以保证最佳理想交叉口间距与实际交叉口间距最为匹配;④ 根据 $C_{op} = \frac{2d_{op}}{v}$ 求解最佳公共信号周期 C_{op} ,并根据最佳公共信号周期 C_{op} 确定相位差。尽管计算方法简单,传统数解法存在以下两个问题:① 传统数解法适用于单一放行方式(对称或单独放行),且在进行双向通行计算时对通行条件要求较为苛刻[11];② 传统数解法对单一交叉口的控制效果考虑不周。

针对第一个问题,大多数研究试图通过改进数解法的求解方法实现。王殿海等通过修正绿波带带宽度、相位差及最佳理想交叉口间距与实际交叉口间距匹配的计算方法,使得改进的数解法适用于交叉口绿信比相差较大的情况[12]。卢凯等为提高数解法对不同通行条件的适用性,先后提出了适用于进口单独放行的数解法干道协调控制[13],和非对称通行条件下的数解法干道协调控制[14]。针对传统数解法假定全干线上车辆的行驶速度为固定值的限制,荆彬彬等提出了基于双向最大绿波带带宽的数解法干线协调控制,通过与传统数解法对比证明了其算法的优越性[15]。除了改进模型以逐步放宽数解法的限制条件外,不少专家学者尝试在保障绿/红波带最大的条件下进一步优化各个交叉口的通行效率。陈壺等为提高干线上各交叉口的通行效率,以保证绿信比小的交叉口偏移量小为目标,提出改进的数解法算法[16]。

相比于图解法,数解法的计算量有所增加,同时其有效程度受最佳理想交叉口间距与实际交叉口间距的差异影响较大,因此在实际应用中受限较大。

1.3 模型法

相比于上述两种方法的简单直接,模型法是通过建立绿/红波带带宽与相位差、信号周期、车辆行驶速度等参数之间的数学模型,通过求解模型获取最大绿/红波带带宽度的方法。其中最著名的就是MAXBAND和MULTIBAND模型。

MAXBAND模型,又称为最大绿波带法,其基础研究为Little教授于1966年建立的双向绿波带最大的混合整数线性规划[17]。随后, Little等人又对该模型进行了进一步的改进和完善[18]。Chang等基于Little等人的研究成果,提出了MAXBAND-86模型,从而解决了多条干线围成的闭合路网的协调问题[19]。 Pillai等根据MAXBAND-86,进一步提出MAXBAND 3.1版本,使之比MAXBAND-86更加高效省时[20]。尽管MAXBAND的研究不断深入,但其存在一个假设,即干道上所有路段的绿波带带宽都保持一致。然而,由于不同路段自身特性的差异,不同路段选用不同的绿波带带宽在一定程度上能增加干线的通行效果,于是MULTIBAND模型应运而生。MULTIBAND模型是在MAXBAND模型的基础上,加入了对上下游交叉口交通量差异的考

虑,使得干线的控制效果得到了提升[21]。随后,Stamatiadis等对MULTIBAND模型进行了完善,提出了MULTIBAND-96模型[22],并进一步优化MULTIBAND-96模型使其运行效率得到了进一步改善[23, 24]。

随着MAXBAND和MULTIBAND模型的发展,运用模型法计算获取绿/红波带最大化的方法也日益增加。Cesme等提出动态协调的感应式干线绿波协调控制方法,实现了动态绿波计算[25]。Gomes将车辆到达函数加入干线绿波协调控制的建模中,以期建立考虑车辆随机到达的绿波带模型法求解方法[26]。Yang等基于MAXBAND的思想,提出多路径最大绿波带模型,以期为一条干线不同选择路径提供相应的绿波带[26]。为解除MULTIBAND模型中绿波带中心线对称的限制,Zhang等提出了AM-BAND模型(绿波带中心非对称的绿波带模型)[27]。Arsava等引申Gomes的研究,建立了OD-NETBAND模型(考虑干线车辆OD路径的路网绿波带模型),以期根据OD数据优化绿波带带宽度[28]。Lin等提出INTEBAND模型(综合绿波带模型),该模型既能保证形成可变的绿波带,也能协调干线上社会车辆与公交车辆的运行[29]。

相比于图解法和数解法,模型法的计算难度最大。同时,为了所构建的模型可解性,会有简化条件或假设,降低了模型法的实际应用效果。

2 以优化干线的性能指标为优化目标

以绿/红波带最大为优化目标的城市道路干线协调控制方法旨在通过构建绿/红波带并使之最大化,实现对干线交通的疏导/阻碍作用。尽管该方法能在实际应用前便可直观的显现出协调控制的效果,然而在实际应用中,以绿/红波带最大为优化目标的干线协调控制方法的效果受到多种因素的影响,如车辆行驶速度、左转车流的协调、各个交叉口相位相序等。因此,部分专家学者企图直接将干线各交叉口的信号配时方案与该条干线的运行状态建立关系,以期获取更好的控制效果。早在1966年,Hillier首先尝试以路网的总延误时间最小为优化目标,计算求解干线各交叉口的相位差[30]。自此之后,以优化干线的性能指标为优化目标的城市道路干线协调控制方法得到了广泛的关注。根据优化指标的不同,可将此类控制方法分成两类:优化单一目标的控制方法和优化综合目标的控制方法。

2.1 优化单一性能指标的控制方法

常用的性能指标包括干道的通行能力、饱和度,车辆的停车次数、延误、排队长度等。同时,随着对环境的重视日益增加,噪音、空气污染等与环境相关的指标也被引入干线协调控制方法的制定中[31]。

由于延误是城市道路服务水平评价及交通状态判断的重要影响指标,因此以减少延误(如车均延误、平均信控延误等)为目标的干线协调控制方法收到了广泛的关注。Singh等以延误最小为目标构建双层优化模型以满足过饱和状态的干线协调控制方法[32]。Michalopoulos等以过饱和交叉口的延误最小作为控制目标,提出了基于两个相邻交叉口的干线协调控制方法[33]。Wong基于TRANSYT系统中的交通流模型构建以延误最小为目标的干线协调控制方法[34]。裴玉龙等假设干线车辆以脉冲形式驶入交叉口,提出平行四边形延误模型,以干线直行车辆延误最小为优化目标,建立干线协调控制方法[35]。

2.2 优化综合性能指标的控制方法

优化单一性能指标的干线控制方法通常能使得该模型企图优化的性能指标得到较大的提升,然而,部分专家则认为干线的运行状态不应仅通过单一性能指标(如延误)描述,而应考虑更多的性能指标。因此,优化综合性能指标的干线控制方法也得到了广泛的研究。

陈娟等运用启发式分层控制算法框架,以干线中的主线延误和次线延误作为多目标,建立了过饱和流条件下的干线协调控制方法[36]。Balaaji等以干线中车辆行程时间和延误最小作为多目标,构建了基于多智能体的干线协调控制方法[37]。

以优化综合性能指标为目标的干线协调控制方法主要通过加权法、理想点法、分层序列法等方法将多目标函数转化为单一函数进行求解。然而其优化结果可能存在某一目标偏差较大的现象,且参数的确定具有一定的主观性,在选取该方法时需谨慎。

3 干线协调控制方法展望

无论是以绿/红波带最大为优化目标的干线协调控制方法还是以优化干线的性能指标为优化目标的干线协调控制方法在实际应用和理论研究中都体现出了其缓解交通拥挤、减少环境污染等优点。然而到目前为止,尚无相关研究证明上述两种基于不同优化目标的控制方法的优劣性。在以绿/红波带最大为优化目标的干线协调控制方法中,针对算法的不同,研究方向也逐渐产生分歧。针对于图解法,目前主要的研究方向是通过结合其他算法(如神经网络等)遍历尽可能多的信号周期和相位差的组合,以期获取最大的绿/红波带带宽。针对于数解法,目前主要的研究方向是通过对计算方法的改进或模型的优化,使得数解法能适用于多种不同情景下,提高其实际应用效率。针对于模型法,目前主要的研究方向是:① 引入车辆行驶路径的影响,减小因其他流向车辆对直行车辆的影响而造成的绿波损失;② 考虑非直行道路的绿/红波协调;③ 促使干线协调的实时运算及实施。以优化干线的性能指标为优化目标的城市道路干线协调控制方法中,优化单一性能指标的控制方法的关注仍以延误为主,优化综合性能指标的控制方法的主要研究重点在于如何选取合适的指标并将其归一化。随着人工智能等技术的进一步发展,不同控制方法可以进一步提高自身的算法精度,同时向实时应用。

4 结论

城市道路干线协调控制方法对保障城市一条或多条主要道路的畅通有着至关重要的意义。本文简单地梳理了城市道路干线协调控制方法的优缺点,对其控制方法的计算原理进行了综述。并对其未来的研究方向进行了展望。

参考文献

- [1] 上海市交通港航发展研究中心. 上海市交通行业发展报告(2018)[R].2018.
- [2] 吴兵, 李晔. 交通管理与控制[M]. 第四版. 人民交通出版社, 2011.
- [3] 编辑部中国公路学报. 中国交通工程学术研究综述 2016[J]. 中国公路学报, 2016,29(06):1-161.
- [4] 赵益. 基于动态OD预测的区域交通信号控制方法[J]. 交通与运输(学术版), 2018(02):47-49.
- [5] 孙洪运. 干线局部拥挤条件下红波带信控策略设计与实施研究: 第七届中国智能交通年会, 中国北京, 2012[C]. 8.
- [6] 林晓辉, 徐建闽, 卢凯, 等. 各进口单独放行条件下的双向绿波设计方法研究[J]. 交通与计算机, 2007(05):8-12.
- [7] 张蕾, 宋晓磊, 田建坤. 城市主干道的交通流疏导与绿波带控制[J]. 天津城市建设学院学报, 2007(04):260-262.
- [8] 周君, 周凌云. 基于图解法的城市干道信号协调控制设计[J]. 中国安全科学学报, 2011,21(01):55-59.
- [9] 卢顺达, 程琳. 非对称相位相序方式下的双向绿波协调控制图解法的优化[J]. 公路交通科技, 2015,32(01):128-132.
- [10] 卢凯, 徐建闽, 叶瑞敏. 经典干道协调控制信号配时数解算法的改进[J]. 公路交通科技, 2009,26(01):120-124.
- [11] 李林, 徐建闽, 卢凯. 进口单独放行的改进绿波数解法[J]. 交通信息与安全, 2009,27(03):64-67.
- [12] 王殿海, 杨希锐, 宋现敏. 交通信号干线协调控制经典数值计算法的改进[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011,41(01):29-34.
- [13] 卢凯, 徐建闽, 李轶舜. 进口单独放行方式下的干道双向绿波协调控制数解算法[J]. 中国公路学报, 2010,23(03):95-101.
- [14] 卢凯, 刘永洋, 吴焕, 等. 非对称通行条件下的双向绿波协调控制数解算法[J]. 中国公路学报, 2015,28(06):95-103.
- [15] 荆彬彬, 鄢小文, 吴焕, 等. 基于双向最大绿波带宽的通用干道协调控制数解算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017,17(02):76-82.
- [16] 陈垚, 刘莎莎, 李玲利, 等. 基于Synchro的相位差优化方法研究——以长安街交叉口为例[J]. 交通信息与安全, 2012,30(06):115-117.
- [17] Little J. The Synchronization of Traffic Signals by Mixed-Integer Linear Programming[J]. OPER RES, 1966,14.
- [18] Little J, Kelson M, Gartner N. MAXBAND: A Program for Setting Signals on Arteries and Triangular Networks[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1981,795:40-46.
- [19] Chang E, Cohen S, Liu C, et al. MAXBAND-86. Program for optimizing left-turn phase sequence in multiarterial closed networks[J]. TRANSPORT RES REC, 1988:61-67.
- [20] Pillai R S, Rathi A K. MAXBAND Version 3.1: Heuristic and optimal approach for setting the left turn phase sequences in signalized networks[J]. 1995.
- [21] Gartner N H, Assman S F, Lasaga F, et al. A multi-band approach to arterial traffic signal optimization[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1991,25(1):55-74.
- [22] Stamatiadis C, Gartner N. MULTIBAND-96: A program for variable bandwidth progression optimization of multiarterial traffic networks[J]. TRANSPORT RES REC, 1996:9-17.

-
- [23] Gartner N H, Stamatiadis C. Progression Optimization Featuring Arterial- and Route-Based Priority Signal Networks[J]. J INTELL TRANSPORT S, 2004,8(2):77-86.
- [24] Gartner N H, Stamatiadis C. Arterial-based control of traffic flow in urban grid networks[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2002,35(5):657-671.
- [25] Cesme B, Furth P G. Self-organizing traffic signals using secondary extension and dynamic coordination[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014,48:1-15.
- [26] G. G. Bandwidth Maximization Using Vehicle Arrival Functions[J]. IEEE T INTELL TRANSP, 2015,16(4):1977-1988.
- [27] Zhang C, Xie Y, Gartner N H, et al. AM-Band: An Asymmetrical Multi-Band model for arterial traffic signal coordination[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015,58:515-531.
- [28] Arsava T, Xie Y, Gartner N. OD-NETBAND: An Approach for Origin - Destination Based Network Progression Band Optimization[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2018:863080060.
- [29] Lin Y, Yang X, Zou N. Passive transit signal priority for high transit demand: model formulation and strategy selection[J]. Transportation Letters, 2019,11(3):119-129.
- [30] Hillier J A. Appendix to Glasgow's Experiment in Area Traffic Control[J]. Traffic Engng. Control, 1966,7:569-571.
- [31] 王嘉熙. 北京机动车环境外部成本的实证研究[学位论文]. 北京交通大学, 2018.
- [32] SINGH M G, TAMURA H. Modelling and hierarchical optimization for oversaturated urban road traffic networks[J]. INT J CONTROL, 1974,20(6):913-934.
- [33] Michalopoulos P G, Stephanopoulos G, Pisharody V B. Modeling of Traffic Flow at Signalized Links[J]. TRANSPORT SCI, 1980,14(1):9-41.
- [34] Wong S C. Derivatives of the performance index for the traffic model from TRANSYT[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1995,29(5):303-327.
- [35] 裴玉龙. 城市干道相位差优化模型: 2007年中国智能化会议, 中国甘肃兰州, 2007[C]. 5.
- [36] 陈娟, 徐立鸿, 袁长亮. 分层控制算法在过饱和交通干线控制中的应用[J]. 系统仿真学报, 2008(15):4122-4127.
- [37] Balaji P G, German X, Srinivasan D. Urban traffic signal control using reinforcement learning agents[J]. IET INTELL TRANSP SY, 2010,4:177-188.