

优化双向“绿波带”关键路口控制参数算法的研究

彭渠栩^{1,2}

¹上海市七宝中学, 上海

²上海荟宸信息科技有限公司, 上海

收稿日期: 2023年1月26日; 录用日期: 2023年2月21日; 发布日期: 2023年2月28日

摘要

城市交通拥堵已成为影响民生的重大问题, 为此, 交通工程师们进行了许多有益的探索, 达到了较好的效果。城市交通信号控制系统, 通过自动检测路面交通流量, 给予交叉路口的红绿灯最优控制方案, 也一直是研究热点。交通“绿波带”在一些城市的实践, 给市民很好的参与感, 但是目前“单向交通绿波带”仍然难以满足干线交通双向协调控制, 并且过分强调特定方向绿波控制, 也会带来逆向交通受阻或“红波带”现象, 有时也会严重影响交叉路口关联相位的通行效率。能否利用时空图, 优化绿波控制信号周期及绿信比的算法来进一步提高通行效率, 实现“双向绿波带”是本文重点。通过对闵行区新镇路关联路口的研究, 优化交通信号控制策略。

关键词

交通信号控制, 绿波带, 周期, 绿信比, 协调控制, 交通仿真

Research on the Algorithm for Optimizing the Key Intersection Control Parameters of Two-Way “Green Wave Belt”

Quxu Peng^{1,2}

¹Shanghai Qibao High School, Shanghai

²Shanghai Huichen Information Technology Co., Ltd., Shanghai

Received: Jan. 26th, 2023; accepted: Feb. 21st, 2023; published: Feb. 28th, 2023

Abstract

Urban traffic congestion has become a major problem affecting people's livelihood. Thus, traffic engineers have carried out many useful explorations and achieved good results. Urban traffic sig-

nal control system, which automatically detects the traffic flow on the road and gives the optimal control scheme of traffic lights at intersections, has also been a research hotspot. The practice of traffic “green wave belt” in some cities gives citizens a good sense of participation. At present, however, the “one-way traffic green wave belt” is still difficult to meet the two-way coordinated control of trunk traffic, and too much emphasis on the green wave control in specific directions will also bring reverse traffic obstruction or “red wave belt” phenomenon, sometimes seriously affecting the traffic efficiency of the intersection correlation phase. Whether we can use the spatio-temporal graph to optimize the algorithm of green wave control signal period and green signal ratio to further improve the traffic efficiency and realize the “bidirectional green wave band” is the focus of this paper. Through the study of Minhang District Xinzhen Road intersection, the traffic signal control strategy is optimized.

Keywords

Traffic Signal Control, Green Wave Band, Period, Green Signal Ratio, Coordination Control, Traffic Simulation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 背景

近年来，交通绿波带屡屡成为社会热点；曾被国内专家称之为“中国交通绿波建设样板”的浙江舟山海天大道绿波带，广东省湛江市的海滨大道完成全长约 5.4 公里的绿波带，昆明 53 条道路 300 多个路口实施“绿波带”等新闻事件频繁出现；与此同时，驾驶员群体普遍对实行绿波带的路段感到舒心满意。交通绿波带如此深入我们的生活，但是我们也听到市民大量的心声，例如“能否在所有的道路均实行绿波带”、“交通绿波带能不能两个方向同时实现？”、“交通绿波带能否将关联路口其它受控相位的通行影响降到最少”。为此，校企协作参与上海荟宸信息科技有限公司课题研究，依托课题研究成果完成本文的撰写。

1.2. 名词术语

绿波带到底是什么？绿波带是指计算车辆通过某一路段的时间，再对各个路口的红绿灯信号进行协调，车辆在通过时能连续获得一路绿灯的技术。其中存在三个重要的参数：周期、相位、绿信比。周期是指信号灯色按设定的相位顺序显示一周所需的时间。相位是指在一个信号周期内，同时获得通行权的一个或多个交通流的信号显示状态。绿信比是指交通灯一个周期内可用于车辆通行的比例时间，即某相位有效绿灯时间和周期时长的比值。

1.3. 国内外研究现状

在国内，早期的研究都大多聚焦于单向绿波带，沈国江等人划分控制系统，进行信息交互和信息调整，来实现绿波带的优化[1]；栗红强等人使用多信号信息配时技术[2]使得信号配时更加合理，进一步拓宽了绿波带的应用方式。实际上多信号信息配时技术即是本文所认为的准双向绿波带技术，其可以在不同时段内对于不同方向的路径进行绿波设计。近年来，越来越多的学者注意到准双向绿波带局限之处，有关双向绿波带的技术想法也不断出现，吴中等人提到可以通过调控不同路段的车速进行双向绿波带的

设计, 并以此提出“恒速通过交叉口模型”与“橡皮筋模型”的比较[3]; 李祥尘等人提到通过优化干线上交口的信号相位组成和相位顺序来实现双向绿波带[4]; 国外学者也通过流体力学等数学方法进行模型研究[5]。但无论是国内还是国外, 双向绿波带成熟控制算法至今没有形成定论。

1.4. 问题与思考

在现有情况下, 绿波带通过调正基准时间, 设置一致、确定的周期, 建立绝对相位差, 从而保证选定车流方向上的绿波。因此, 单向绿波带会导致在某一个车流方向上实现一路畅通无阻。但是, 单向绿波带的设计却可能会牺牲在另一方向上的车行效率; 准双向绿波带在一定程度上可以弥补这一情况, 譬如在不同的高峰时段进行不同的方案配时。但是准双向绿波带的适用范围仍然受到了限制: 准双向绿波带是分时段进行调配, 但是在不同方向的车流同时需要得到满足时, 准双向绿波带无法解决这一问题。因此双向绿波带对改善交通通行一直以来都是行业渴望。

由于现在国内外对于双向绿波带如何设计的研究处于百家争鸣状态, 尚无成熟定论, 本文试图通过对各路口周期和绿信比的算法优化进行双向绿波带设计。

2. 单向绿波带周期 T 与绿信比 λ 的算法

2.1. 参数定义

在本文研究中, 为结合全文, 对相关交通参数术语进行统一表述, 如下: 第 i 相黄灯间隔时间为 A_i , 传统最佳信号周期为 C , 有效绿灯时长为 g , 第 i 相绿灯间隔时间为 l_i , 第 i 相汽车启动损失时间 I_i , 车身长度为 L , 车身通过路口所花时间为 K , 周期总损耗时间为 L , 逆向绿波初始出发时刻为 t_0 , 绿波带周期为 T , 第 i 个路段所有车通行总时长为 $t_{总}$, 汽车通行速度为 v , 绿信比为 λ , 第 i 段路段距离的长度为 x_i , 延误时长为 m_1 , 等待红灯时长为 m_2 , 各车辆的行驶时长 m_3 , 相位数为 n , 第 i 个路段之间相位偏移(也称相位差)为 ϕ_i , 组成周期全部相位的最大饱和度之和为 Y , 第 i 相最大饱和度为 y_i , AR 为全红时间。

2.2. 时空图概述

本实验将主要采取时空图进行研究:

时空图(如图 1 所示)以距离作为横坐标, 时间作为纵坐标, $\tan\theta$ 代表车行速度, 形象展现了各种相位

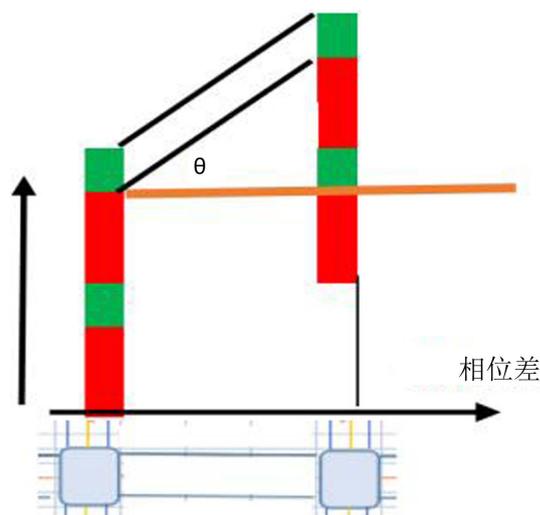


Figure 1. Space-time map
图 1. 时空图

的变化规律，在交通分析当中同时存在图解法、数解法等方法，但图解法简洁直观，可以展示出车流的运行规律，具有较强的可操作性。

2.3. 单向绿波带的问题

在交通控制系统中，首先需要找到关键路口。关键路口是指在道路网络中对路网效率起着关键作用、能够影响整个路网交通流状态的路口，其往往是几个重要的交通交叉口或者交通枢纽，在传统单向绿波带当中，由 $C = (1.5L + 5)/(1 - Y)$ 其中： $L = \sum_{i=1}^n (l_i + I_i - A_i)$ ， $Y = \sum_{i=1}^n \max(y_1, \dots, y_n)$ 。

在实际路口当中，由于流量比可以确定下来，对路口的全红时长进行设定，确定最佳信号周期因而绿信比也可以完全确定下来。但是，我们可以明显的感觉到，某些单向绿波带的通行实际上是以其他方向上的“交通牺牲”作为代价。

若选取路口五作为关键路口，以路口一到路口九所代表的方向作为绿波带的车流方向，我们会发现，当蓝色线段所代表的车流以恒定的速度反向驾驶时，车流仅在路口八便被迫停车等待下一个绿灯相位；车流继续通行，在路口七再次受阻，等待下一个绿灯相位后通行至路口三受阻，再次等待绿灯相位，最后在路口一再次受阻，仍需等待下一个绿灯相位。我们会发现为通过九个路口，该车停留了 4 次，见图 2 绿波带示意图所示，这无疑大大降低了交通效率，增加了司机的不满。

除此之外，如果我们考虑其他相位的车流，我们会发现垂直方向上的车流也必然会被影响，因而单向绿波带“牺牲”了多个相位的通行。

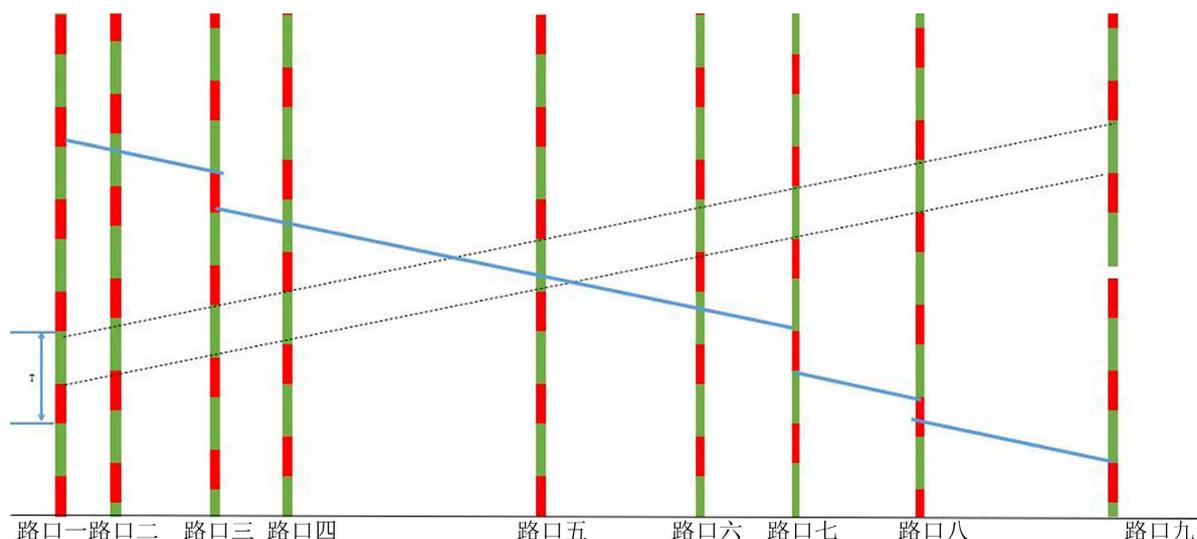


Figure 2. Schematic diagram of green wave zone

图 2. 绿波带示意图

为什么单向绿波带会导致这样的问题呢？原因自然有很多：路段距离参差不齐、路口混乱、饱和度过大、路口信号周期与绿信比周期调配不合适等等诸多因素。然而：路口混乱程度更多由天气、地面状况等因素决定、饱和度则有不确定性，因而为改进单向绿波带，笔者试图通过对周期和绿信比进行调整，来最大限度地缓解单向绿波带导致的问题。

3. 优化绿波带信号周期和绿信比算法研究提升双向绿波带通行效率(以新镇路为例)

3.1. 闵行区新镇路现状

参照《闵行区综合交通“十四五”规划》，闵行区常住人口为 265.35 万人，为满足交通等设施需要，

考虑到在常住人口基础上预留 20%以上的弹性,闵行区实际需要服务人口在 300 万左右,预测 2025 年居民总出行量为 715 万人次/日左右,因而交通效率对于市民而言就十分重要了。

闵行区内部出行整体以南北向联系为主,对外出行以中心城方向为主,新镇路(漕宝路~吴中路),道路交通呈南北走向,这就给新镇路交通绿波带设计有了用武之地。新镇路南起漕宝路,北到吴中路,实施长度 1033.55 m。漕宝路~规划虹泉路规划红线宽 35 m;虹泉路~吴中路规划红线宽 40 m。道路等级规划为城市次干路 I 级,为双向 4 车道,设计车速 40 km/h。

新镇路沿线及周边人流量大(3 公里半径内 101 万人群,1 公里半径内 10 万+人群),沿线聚集了许多地区级别的目的地交通流量导入:包括诸多学校、育馆、体育公园等公共设施。同时,新镇路沿线因为缺少东西向通道,导致了早晚高峰非常容易拥堵缓行,尤其是新镇路顾戴路路口、新镇路农南路路口、新镇路漕宝路路口等,例如新镇路向顾戴路自北向南的左转车道高峰时段经常需要等候 3、4 次红灯才能到达顾戴路路口。

本文选取自新镇路/顾戴路路口起至新镇路/漕宝路路口止,共 9 个路口作为研究对象,见图 3 新镇路交通绿波带交叉口示意图所示。

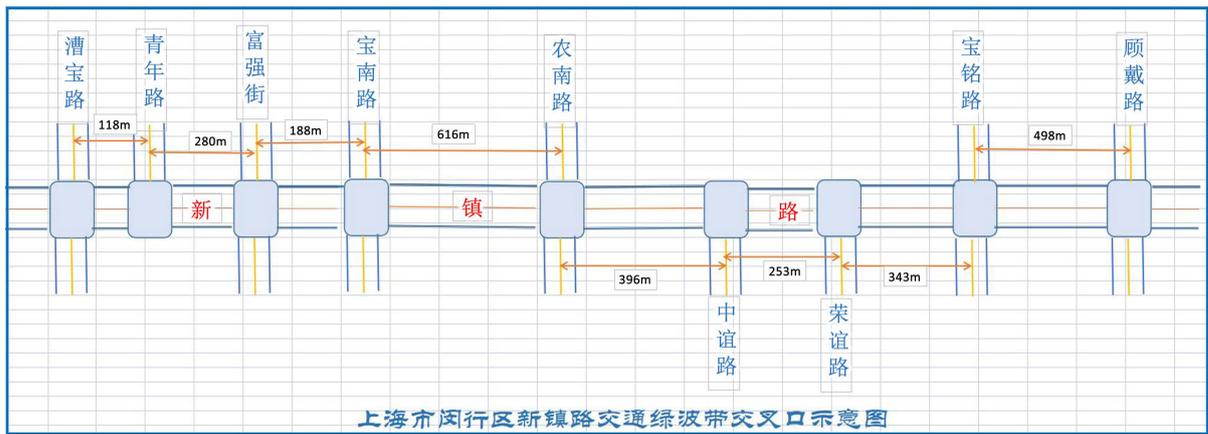


Figure 3. Schematic Diagram of Xinzhen Road Traffic Green Wave Belt Intersection
图 3. 新镇路交通绿波带交叉口示意图

3.2. 优化双向绿波带控制策略的数据及方法基础

3.2.1. 各路口交通流现状

上海市闵行区新镇路各交叉口交通流量调查表,见表 1,根据各路口渠化实际情况,经过路口交通流量调查,获得现有交通流量现状。并以此为基础,对所有路口的交通信号周期、绿信比、相位差、饱和和流量、排队长度等交通参数进行计算,获得相关参数的初始值。

Table 1. Traffic flow questionnaire at each intersection of Xinzhen Road
表 1. 新镇路各交叉口交通流量调查表

进口道及流向		交叉口编号/路口名								
进口道	流向	1/新镇路 漕宝路 路口	2/新镇路 青年路 路口	3/新镇路 富强街 路口	4/新镇路 宝南路 路口	5/新镇路 农南路 路口	6/新镇路 中谊路 路口	7/新镇路 荣谊路 路口	8/新镇路 宝铭路 路口	9/新镇路 顾戴路 路口
东	左	780	380			602			422	560
	直	1208		368		1308			677	1200
	右		650							

Continued

西	左	620					608	501	402	417	630	
	直	1008					430	896	622	604	623	1108
	右											
南	左											
	直	820	760	748	752	785	721	645	555	880		
	右											
北	左	280	206	198	188	207	156	113	87	320		
	直	780	569	558	597	632	622	677	686	900		
	右											

3.2.2. 关键路口的选择

在交通控制系统中，关键路口的选择是必要的。关键路口是指在道路网络中对路网效率起着关键作用、能够影响整个路网交通流状态的路口。它往往是几个重要的交通交叉口或者是交通枢纽。

根据现场交通流调查及各路口在区域交通组织中的关联度，再结合现有各路口最优信号周期，本例中，选择新镇路顾戴路路口作为关键路口进行分析。

3.2.3. 现有绿波周期

最长周期、最短周期与最优周期；

由韦伯斯特配时法可知，最佳信号周期时长 $C_0 = (1.5L + 5)/(1 - Y)$ ，而在实际应用当中为了保证延误最小，周期可以在 $0.75 \sim 1.5 C_0$ 之间变动。

- 1) 根据 $L = \sum_1^i (i + l - A)$ ， $Y = \sum_1^i y_i$ ，可以计算得到最佳周期；
- 2) 再根据 $0.75 \sim 1.5 C_0$ 得到最长周期和最短周期；
- 3) 最后对各路口最佳期取最小公倍数得到绿波带周期。

3.2.4. 现有绿波绿信比

由绿信比公式： $\lambda = g/C$ ，其中 $g + I = C$ ； g ，为绿灯时长， I 为黄灯时长与红灯时长之和(根据交通工程，一般黄灯时长取 4s、5s)，由最佳信号周期时长与绿信比公式可以唯一确定绿信比。

3.3. 优化双向绿波带控制算法的设计及计算机软件流程图设计

3.3.1. 算法优化研究基础

本文算法优化基于上海荟宸信息科技有限公司中标及承建项目“北蔡镇‘城市大脑’综合管理系统”、“浦东新区公路管养平台系统”。项目中包含了上海市浦东新区全域道路等级信息、道路交通故障信息、道路交通流分布、现有交通信号控制策略，并且具有海量视频数据，为算法研究提供了模拟与训练的便利。

3.3.2. 周期与绿信比算法优化设计

根据以上 3.2.2、3.2.3 及 3.2.4 的分析，优化的目标分别是：关键路口的周期、关键路口的绿信比。

选取某个绿灯时长内的车流作为目标车流(图 4 新镇路交通绿波带图)，在此过程中，

排队车辆数为 $N_{\text{排队}}$ (初始值取值：10 辆)；

设计绿波通行 $V_{\text{绿波}}$ (初始值取值：30 km/h)；

$T_{\text{关键路口}}$ (初始值取值：60s)；

$\lambda_{\text{关键路口}}$ (初始值绿信比取值：50%)；

当量车长为 L ，即标准轿车的长度，(取常值为 5 m)；

则根据公式($K_{\text{车头距}} = L/V_{\text{绿波}}$)可知： $K_{\text{车头距}} = (5 * 3.6)/30 = 0.6 \text{ s}$ 。

同时，定义每当量车的启动延误为 $t_{\text{延误}}$ (取值 2 s)；

设各个路段距离的长度分别为 x_1, x_2, \dots, x_8 (具体取值见图 3)；

由于要满足指定方向上的单向绿波带所以每一个路段相位之间存在一个必要的相位差 ϕ 。

$$\phi_i = x_i/V_{\text{绿波}}$$

逆向绿波初始出发时刻为 t_0 。

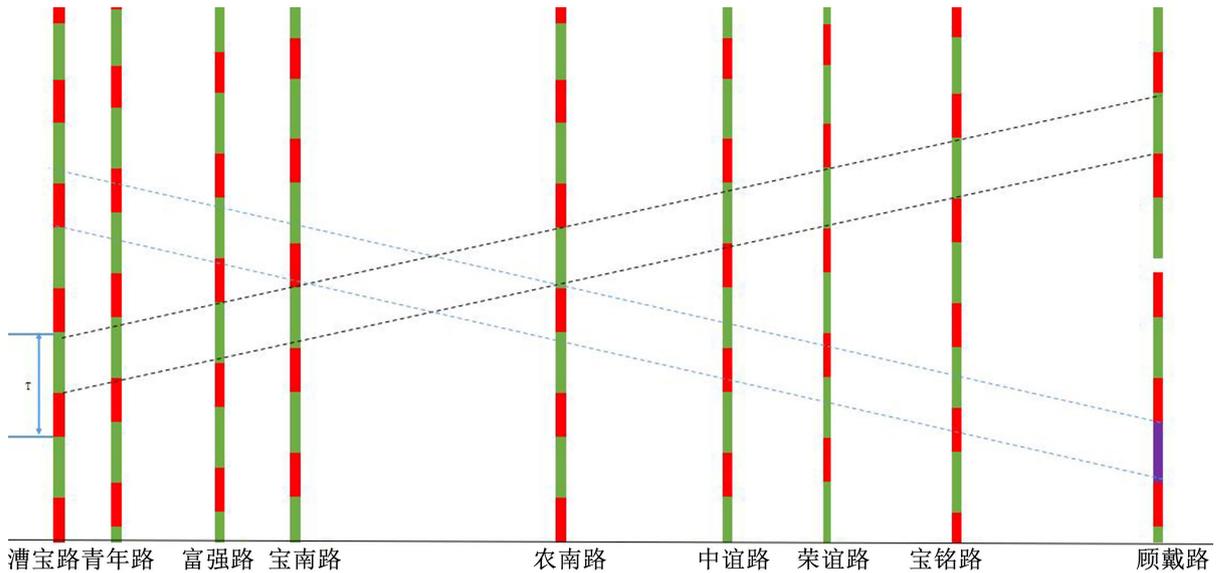


Figure 4. Green Wave Map of Xinzhen Road Traffic
图 4. 新镇路交通绿波带图

排队车辆通过任意路口，存在两种通行情况：一是在该路口绿灯时长内通过该路口；二是路口遇红灯，要等待至下一个绿灯周期；且在路口等待红绿灯周期次数与排队长度 $N_{\text{排队}}$ 有关。同时 $N_{\text{排队}}$ 取决于城市路口交通流与道路组织、车头距 $K_{\text{车头距}}$ 。优化策略的最终目标：排队车辆逆向通行无限接近“绿波通行”，即排队车辆逆向通过所有路口所耗费的累计时间最小。

算法优化设计步骤如下：

1) 计算通过第一个路口车队总时间长度；

在第 1 个路口能畅通无阻通过的车辆数为 n_1 ，则不能通过的车辆数为 $(N_{\text{排队}} - n_1)$ 。 n_1 辆车每辆车通过所花的时间为 x_1/v ；

其总时间 $t_1 = n_1 * (x_1/V_{\text{绿波}})$ ；(在新镇路实例中， $x_1 = 498\text{m}$ ， $V_{\text{绿波}} = 30 \text{ km/h}$)。

2) 计算排队车辆数在第一个路口遇红灯等候时间长度；

在第 1 个路口不能畅通无阻通过的车辆数为 $(N_{\text{排队}} - n_1)$ ，这些车辆在第一个路口的延误包括两部分：各车量的延误时间 $t_{\text{延误}}$ ，各车辆等待红灯时长 $t_{\text{红灯}}$ 。

$$t_{\text{累计延误}} = \sum_1^{N_{\text{排队}} - n_1} t_{\text{延误}} \quad t_{\text{累计红灯}} = \sum_1^{N_{\text{排队}} - n_1} t_{\text{红灯}}$$

对以上两项求和，就是路口等待总时长，即： $t_{\text{累计延误}} + t_{\text{累计红灯}}$ 。

3) 计算 $N_{\text{排队}} - n_1$ 通过第一个路口车队总时间长度

同上 1) 分析，其总时间 $t_1 = (N_{\text{排队}} - n_1) * (x_1/V_{\text{绿波}})$ ；(在新镇路实例中， $x_1 = 498 \text{ m}$ ， $V_{\text{绿波}} = 30 \text{ km/h}$)。

4) 计算排队车辆逆向通过所有路口所耗费的累计时间

首先, 计算排队车辆通过第一个路口所耗费累计时间, 可分两种情况:

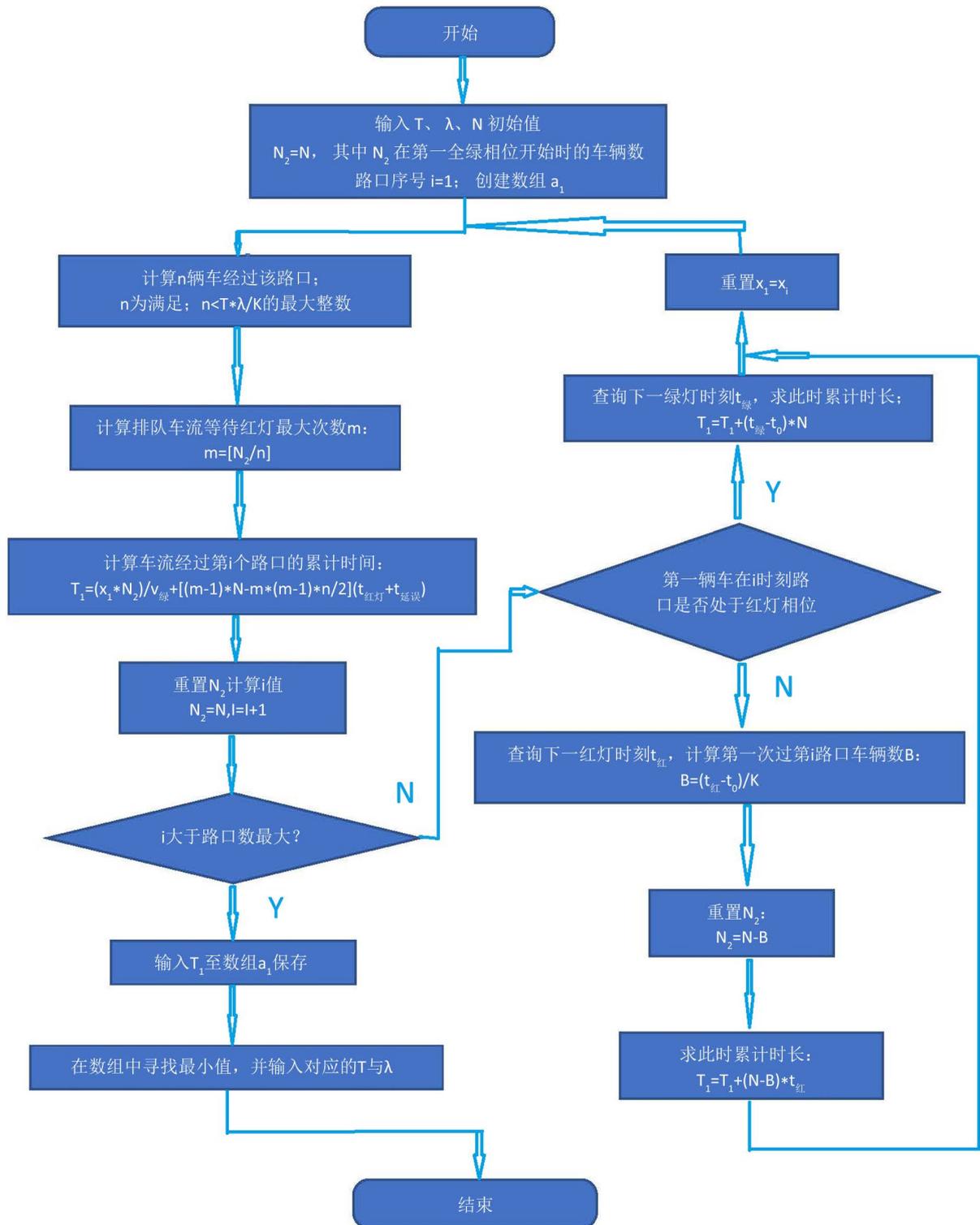


Figure 5. Flow chart
图 5. 流程图

I) 最简情况：在排队车流等候仅等候一个红绿灯周期时，通过第一个路口的总时间

$$t_{1总} = N_{排队} * (x_1 / V_{绿波}) + t_{累计延误} + t_{累计红灯}$$

其中 $t_{累计红灯}$ 与绿信比的关系： $t_{红灯} = T_{关键路口} * (1 - \lambda_{关键路口})$;

II) 其他情况：在排队车流等候不止等候一个红绿灯周期时，通过第一个路口的总时间；我们可以循环采用以上 1)~3) 的方式进行。类似循环状态的计算在计算机语言里面很容易实现。在后续流程图中已采用车辆排队长度与红灯相位进行碰撞，从而产生分段连续函数。

其次，在优化设计的运算中，我们对所有路口排队车流通行总时间求和：

$$t_{总} = t_{1总} + t_{2总} + \dots + t_{n总}; \text{ 其中, } t_{n总} = N_{排队} * (x_1 / V_{绿波}) + t_{累计延误} + t_{累计红灯}$$

$t_{总}$ 在路段绿波速度、路段间距、车启动延误 $t_{延误}$ 为确定值的情况下，变量只与绿信比及绿波周期有关。故此，在以下约束条件下，求最小值，即可得到周期、绿信比的最优方案。

约束条件 1：路口最佳周期在 $0.75 \sim 1.5 C_0$ ，变化；

约束条件 2：路口交通流饱和度低于 100% (根据交通信号控制策略，当饱和度超过 100% 时，已进入拥堵状态，此时协调控制效果较差)

3.3.3. 算法的计算机软件流程图设计实现

在算法优化设计思路的总体框架下，以新镇路九个交叉路口为对象，将调查交通流参数为初始值，依靠算法优化，并将优化参数植入交通时空图进行数据碰撞，来获得特定的排队长度通过所有路口的时间，在设计流程图时，将流体状特性的交通流在通过路口时，呈现非连续状，但非离散性的特征提取出来，从而得到了多段“呈连续状”交通流通过路口。在计算时依靠计算机来和交通时空图中的“红灯时间”进行碰撞，记录碰撞时间。最终获得最佳周期与绿信比方案，见图 5 流程图。

4. 结论

本文通过比较分析单向绿波带、准双向绿波带、双向绿波带之间的效果差异，论述了双向绿波带的重要现实作用。通过对于原有周期公式的优化推导，从理论上计算得出实现双向绿波带的周期与绿信比取值，使得双向车流达到一个通行效率的最大化，从而有效减少了停车次数。在此过程中借助计算机，对路口数目与车流量进行循环计算，得出最优结果。最后设计普适性算法，供给实际使用过程中对于双向绿波带周期设定的固定流程。

不足之处在于，双向绿波带对于垂直方向上的相位会产生重大影响，那么周期的调节对于垂直方向上的通行效率有何影响，这一影响又是怎样影响区域交通流的？在实际情况当中，车流饱和度会影响车头距、排队长度，从而也会导致算法产生变化，这是否又会带来新的问题？

本文可以继续思考的切入点有：有无必要让所有相位的总效率最大化、如何让通行总效率达到最大化，其函数分布又是怎样的，是否可以与“国内外研究现状”中“调整时速”等方法进一步有机结合，产生更有效的方法？还有是否可以将算法应用到交通控制工程领域将关键路口的长周期，在非关键路口非等比例拆分，来改善交通通行。

致 谢

本文在撰写过程中得到了上海市七宝中学老师、上海荟宸信息科技有限公司指导导师的大力帮助，将数学应用到智能交通系统中，优化算法模型提高现有道路通行效率，展现了应用数学的魅力，期间也有很多专家学者及交通工程师的研究成果给予本文有益参考，深表感谢！

参考文献

- [1] 沈国江, 许卫明. 交通干线动态双向绿波带控制技术研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008(9): 1625-1630.
- [2] 栗红强. 城市交通控制信号配时参数优化方法研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2004.
- [3] 吴中, 李垣君, 李婧. 城市中心区干道变速双向绿波带[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2018, 35(2): 106-111.
<https://doi.org/10.15958/j.cnki.gdxbzrb.2018.02.21>
- [4] 李祥尘, 李进龙, 何梦辰, 等. 基于相位优化的干线双向绿波协调控制方法[J]. 交通运输工程与信息学报, 2018, 16(1): 7.
- [5] 刘光柱. 双向绿波优化控制研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.