

城市道路交通信号控制中的绿灯间隔时间问题

Green Interval Design at Urban Signalized Intersections

李克平

(同济大学交通运输工程学院交通工程系, 上海 201804)

LI Ke-ping

(Department of Traffic Engineering, School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

摘要: 绿灯间隔时间是保障信号控制交叉口交通流运行中,上一相位清空交通流与下一相位进入交叉口的交通流不发生冲突的安全间隔时间,包括黄灯时间和全红时间(部分国家和地区采用红灯+黄灯时间),是影响信号控制交叉口安全和效率的关键参数。然而,目前国内还没有绿灯间隔时间计算方法的国家标准。首先介绍了绿灯间隔时间的基本概念及国内研究概况,然后分析比较了各国绿灯间隔时间的计算方法,并探讨了其影响因素(包括清空距离、进入距离、清空速度、进入速度、坡度、车辆长度、通过时间)。最后提出了我国绿灯间隔时间的计算准则、具体计算思路、分层分析方法及相关参数取值应考虑的问题。

Abstract: The objective of green interval is to separate conflicting traffic flows at signalized intersection. The duration of green interval, along with amber and red intervals, is a key design variable in providing efficient and safe operation at intersections. However, there is no formal specification on how to design signal timing in China. This paper first reviews the basic definition and research on green interval in China. Through comparing various signal timing design methods from other countries, the paper discusses the influencing factors in designing green intervals such as clearance/entering distance, speeds, approach slopes, the length of vehicles, and crossing time. Finally, the paper proposes the calculation principles, detailed calculation steps, analysis method, and value of relevant key parameters.

关键词: 交通管理; 信号控制; 绿灯间隔时间; 混合交通

Keywords: traffic management; signal control; green interval; mixed traffic

中图分类号: U491.5*4

文献标识码: A

收稿日期: 2010-08-01

作者简介: 李克平(1960—), 男, 上海人, 博士, 教授, 博士生导师, 同济大学中德交通研究中心主任, 主要研究方向: 交通信号控制、交叉口规划设计、微观交通仿真分析。

E-mail: keping_li@vip.163.com

0 引言

中国大部分城市车辆和行人通过交叉口时的秩序比较混乱,需“一停二慢三通过”,要“眼观六路、耳听八方”,各方交通参与者都必须随时准备避让其他车辆或行人(特别是在信号过渡期间),导致交叉口通行效率低下。为实现交叉口安全、畅通的目标,最根本的就是要保证车辆和行人安全、快速、高效地通过交叉口。但是,在目前的交通运行条件下,盲目追求快速通过交叉口,必将暴露由于绿灯间隔时间设置不合理而产生的交通冲突,会带来远比现在高的交通事故率。例如,行人绿灯期间尚未完全走过人行横道,机动车即已到达并与行人抢道的现象屡见不鲜。

为此,必须做好技术上的准备,解答一些关键问题:在保证交通安全的前提下,如何合理设置绿灯间隔时间,实现通行效率最高?如何考虑不同交通流的绿灯间隔时间需求?如何根据不同的绿灯间隔时间要求优化相位相序,使损失时间最小?本文拟探讨绿灯间隔时间的定义、理论计算方法、确定原则以及工程实践中应考虑的因素,以期加深相关专业人员对绿灯间隔时间问题的认识、精细化计算绿灯间隔时间矩阵。

1 绿灯间隔时间概述

1.1 绿灯间隔时间缘起

交叉口任意两股交通流的运行轨迹存在交点时(分流情况除外),认为这两股交通流之间存在交通冲突,交点称为冲突点。对某一股交通流而言,与其产生冲突的交通流通常有若干股,因此形成一对多的冲突点组,典型交叉口冲突点及冲突点组如图1所示。一个冲突点组中,对于可以通过让行规则消除的冲突,可不考虑其绿灯间隔时间;必须通过信号控制分离的冲突,则须考虑通行权切换必需的绿灯间隔时间。

1.2 定义及组成

绿灯间隔时间是指在信号控制交叉口中,相互冲突的两股交通流从失去通行权的上一股交通流绿灯结束时刻,到得到通行权的下一股交通流绿灯开始之间的时间间隔^[1],以保证上一相位黄灯末期进入交叉口的车辆不与下一相位绿灯启亮时进入交叉口的车辆相撞。绿灯间隔时间主要由黄灯时间和全红时间组成,有些国家和地区采用红灯+黄灯时间。

黄灯时间是为了避免“进退两难区”(dilemma zone)而设置的一种过渡信号,是绿灯间

隔时间的主要组成部分,其作用是提醒驾驶人信号灯即将变成红灯,驾驶人要根据车辆离停止线的距离、车速以及行驶条件来判断是停在停止线前还是通过停止线。黄灯时间确定方法见文献[2]。

全红时间,即所有相位的信号灯均显示红灯,其作用是保证在本相位黄灯结束前最后一刻通过停止线的车辆,在下一相位绿灯启亮时的头车到达之前通过它们之间的冲突点,简言之即清空交叉口。

有些地方在绿灯信号前采用红灯+黄灯时间,即某一相位红灯与黄灯同时启亮,理论上应该当作红灯对待,其作用是减少绿灯启动损失时间,让头车驾驶人提前做好准备,及时反应操作车辆,绿灯一亮即可通过停止线。

2 国内绿灯间隔时间研究概况

目前国内相关工程规范中还没有就绿灯间隔时间计算方法给出统一、明确的规定。在各种计算方法中,应用较为广泛的是文献[3]给出的计算公式

$$I = \frac{z}{u_a} + t_s, \quad (1)$$

式中: I 为计算绿灯间隔时间/s; z 为停止线到冲

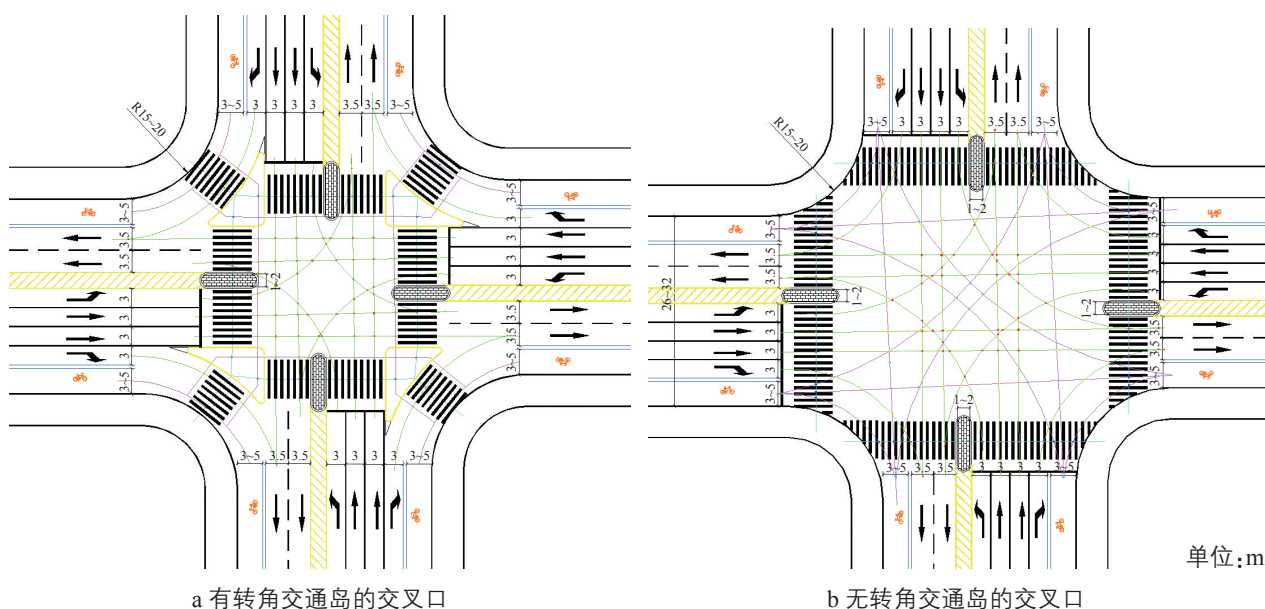


图1 交叉口冲突点及冲突点组示意图

Fig.1 Conflict points (groups) at intersections

突点的距离/m； u_a 为车辆在进口道上的行驶速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)； t_s 为车辆制动时间/s。当计算绿灯间隔时间 $I < 3\text{ s}$ 时，配以黄灯时间3 s；当 $I > 3\text{ s}$ 时，其中3 s配以黄灯，其余时间配以红灯。

文献[4]给出了较为精细的绿灯间隔时间计算思路，分析了清空车辆(行人)与进入车辆(行人)安全通过冲突点的临界条件，考虑了反应时间、制动时间、停止线位置等因素，并得出结论：若仅考虑机动车间的冲突，国内现行的两相位机动车控制信号的绿灯间隔时间一般可取5 s左右；若考虑行人与机动车的冲突，绿灯间隔时间应大于8 s。

文献[5]给出绿灯间隔时间的取值范围为5~12 s，并指出在符合安全的前提下，应取最小值，且绿灯间隔时间的大小同交叉口的几何尺寸有关。但未给出具体计算方法，也未对不同值的适用情形作出规定。

文献[6]提出类似英国做法的绿灯间隔时间计算方法：绿灯间隔时间由最短绿灯间隔时间(一般为4 s)和附加清空时间组成；根据两股冲突车流进入交叉口时从停止线到冲突点的距离差，可确定附加清空时间，若冲突车流速度存在明显差异，还需考虑速度差的影响。

综上所述，国内对绿灯间隔时间的理论算法尚未统一，且现有算法简单、考虑因素较少、相关参数取值缺乏有说服力的依据；给出的绿灯间隔时间取值范围过于笼统，指导性不强；在应用时大多采用经验值，难以考虑不同的实际情况，导致取值不合理。

3 国外绿灯间隔时间计算方法

3.1 综述

国外大部分国家对绿灯间隔时间的计算，通常也分为黄灯时间与全红时间。现有绿灯间隔时间确定方法主要对应两种极限情况：1)前一相位清空车辆刚过冲突点即允许下一相位车辆到达冲突点的最高效率极限情况(如德国和英国的算法)；2)前一相位清空车辆已完全离开交叉口后才允许下一相位进入车辆驶出停止线的最大安全极限情况(如美国和日本的算法)。各国绿灯间隔时间具体计算方法见表1，计算示意图见图2。

表1各计算式中， t_u 为通过时间/s； S_c 为清空车辆从停止线到冲突点的距离/m； S_e 为进入车辆从停止线到冲突点的距离/m； L 为车辆长度/m； V_c 为清空速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)； V_e 为进入速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)； τ 为驾驶人反应时间/s； a 为车辆减速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)； G 为重力加速度，取 $9.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ； g 为交叉口坡度； W 为交叉口宽度/m，即对向进口道停止线之间的距离； V_D 为车辆在交叉口的行驶速度/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)，通常取设计车速。

3.2 比较

比较美、澳、日三国的计算公式：均考虑了驾驶人反应时间、车辆速度(行驶速度、清空速度或进入速度)以及交叉口几何尺寸对绿灯间隔时间的影响。各国除对驾驶人反应时长规定不同外，在如何确定清空距离、是否考虑交叉口坡度和车

表1 各国绿灯间隔时间计算方法
Tab.1 Green interval calculation from other countries

国家	计算公式	备注
德国	$t_u + \frac{S_c + L}{V_c} - \frac{S_e}{V_e}$	黄灯时间 $Y = 3\text{ s}, 4\text{ s}$ 或 5 s ; 红 + 黄时间 $Y + R = 1\text{ s}$
美国	$\tau + \frac{V_c}{2(a + Gg)} + \frac{W + L}{V_c}$	$\tau = 1\text{ s}, a = 3.05\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, 黄灯时间不小于3 s
澳大利亚	$\tau + \frac{(V_D/3.6)}{2(a + Gg)} + 3.6 \frac{S_c}{V_D}$	$\tau = 1.0\text{ s}$ 或 1.5 s , $a = 3.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
日本	$\tau + \frac{V_c}{2a} + \frac{W}{V_c}$	$\tau = 0.7\text{ s}, a = 3.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
英国	根据 $S_c - S_e$ 取推荐值, 5~12 s	黄灯时间 $Y = 3\text{ s}$; 红 + 黄时间 $Y + R = 2\text{ s}$

辆长度、采用哪种车速等方面也存在差异。本节从这几个方面入手,从交叉口安全和效益层面逐层分析各因素对交叉口绿灯间隔时间的影响。

1) 清空距离的确定。

确定清空距离时,一种是将交叉口宽度作为清空距离,如美国、日本算法;一种是将停止线到冲突点的距离作为清空距离,如德国、英国算法。前者计算出的绿灯间隔时间更加安全,但由此造成的交叉口延误也有所增加。

2) 对车辆长度的考虑。

表1所列的算法中,仅美国、德国考虑了车辆长度,计算出的绿灯间隔时间更加安全。

3) 清空速度的确定。

在各国规范中,美国、日本规定车辆的清空速度通常取85%位车速,而澳大利亚则规定按设计车速计算。究竟采用哪一车速,仍然存在争论:部分工程师倾向于使用85%位车速,部分倾向于使用交叉口限速,还有些研究人员使用道路设计车速。

4) 交叉口坡度的影响。

与日本相比,美国和澳大利亚均在计算公式中考虑了交叉口坡度。《德国交通信号控制指南》虽无强制要求,但也建议交通工程师在进行计算时酌情考虑交叉口坡度的影响。仅从美国的公式看,考虑交叉口坡度会增加绿灯间隔时间,随着

坡度的增大,绿灯间隔时间也随之增大。文献[7]也强调了交叉口坡度对绿灯间隔时间的重要性。

5) 是否考虑车辆进入过程。

仅德国和英国在绿灯间隔时间计算中,对应最高效率极限情况,考虑了冲突车辆的进入过程。其他国家的计算方法则是从增加安全余量(即以极限情况为基础增加一定的绿灯间隔时间)的角度来考虑。

6) 通过时间与黄灯时间的关系。

只有德国单独定义了通过时间,对应美国、澳大利亚、日本算法中的驾驶人反应时间与减速时间之和。德国算法中通过时间取固定值,并根据直行车流和转向车流的不同特征,分别取3 s, 2 s;上述其他国家则根据计算值确定,未明确区分直行车流和转向车流。

4 我国须研究的绿灯间隔时间相关问题

4.1 计算原则

绿灯间隔时间的计算原则是研究的核心问题,在其指导下才能确定各具体参数的计算方法,须综合权衡安全与效率的要求,慎之又慎。

安全第一是必须确立的基本原则,但是如何把握其分寸是一个难点。要充分考虑科学性、合理性,即提出的原则与参数计算方法必须具备理论上的正确性,必须在逻辑上站得住脚,同时也必须考虑我国城市交通运行的现实条件,满足科学性要求。

按照德国的做法,以最高效率极限为准则,在计算参数时,不出任何差错,保证足够精细,才能满足安全要求;稍有不慎,就会产生事故。根据我国城市道路交叉口的实际运行状况,这种做法并不适合,但可作为未来交通秩序改善后的一个目标。美国、日本等国家在满足基本安全要求条件下留有一定余量的做法,更值得国内城市参考。这些国家的做法看似不够精确,但把各种考虑因素归结为一定的安全余量,具有一定的灵活性,不仅在理论上、逻辑上站得住脚,实际上也比较可行,且符合我国城市道路交叉口目前的运行状况。问题是留多少安全余量才合适?按照美国和日本的做法,该安全余量与交叉口的空

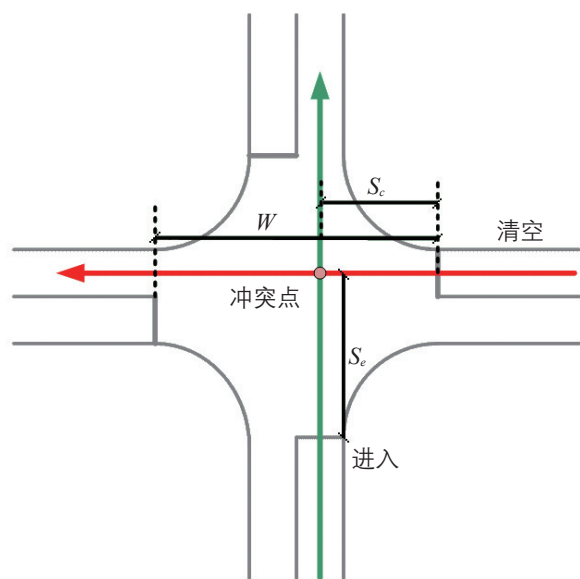


图2 绿灯间隔时间计算示意图

Fig.2 Demonstration of green interval calculation

间大小线性相关，但这与交通流安全运行的特征并不相符。因此，应该寻求一种与交通流安全运行直接相关，而非与交叉口空间大小相关的余量算法。

4.2 绿灯间隔时间的具体化

现有大部分关于绿灯间隔时间计算的教科书和文献中的论述，一般都比较笼统，大都示范性地给出两个直行车流之间的关系，难以直接指导工程实践。实际所需的绿灯间隔时间不仅要考虑直行车流，还要考虑直行车流与转向车流，更须考虑自行车流与机动车流之间特别是机动车流、自行车流与行人之间的绿灯间隔问题。具体分析时还必须深入到车道层面，如对于直行车流，其第1车道和第2车道车流与冲突交通流之间要求的最小绿灯间隔时间是不同的。作为一项完整的研究，须给出任何冲突情况下的最小绿灯间隔时间的计算方法，才能把问题阐述清楚，才能探究交叉口内各交通流间的冲突关系及安全要求。

4.3 绿灯间隔时间的分析层次

如图1所示，任何相交交通流之间都存在一个冲突点，都有一个可能的绿灯间隔时间。因此，绿灯间隔时间的最细粒度应该是每有一个冲突点就有一个对应的绿灯间隔时间。常说的绿灯间隔时间是指两个信号灯之间的间隔时间，而两个信号灯控制的交通流可能有很多，如图3中，

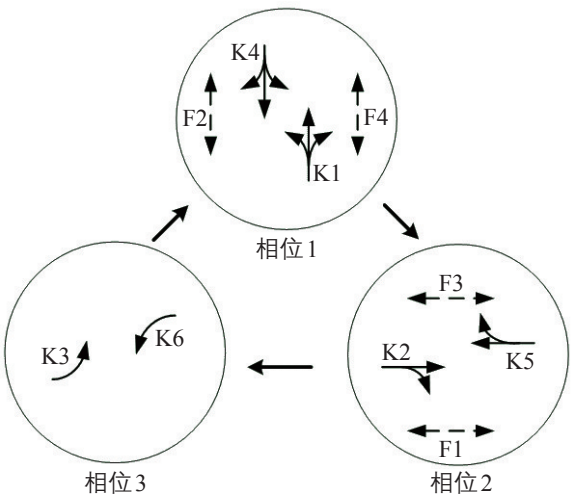


图3 交叉口相位相序图
Fig.3 Phase design diagram

K1控制南进口的左转、直行、右转车流，K5控制东进口的直行和右转车流，K1和K5控制的所有冲突车流绿灯间隔时间构成一个集合，取该集合中的最大值作为两个信号灯之间的绿灯间隔时间，从而构成一个绿灯间隔时间矩阵表，见图4。在交叉口信号控制中，一个相位可能由几个信号灯组成，相位之间的绿灯间隔时间其实是上一相位最早关断的绿灯与下一相位最后启亮的绿灯之间的间隔时间，如图5所示相位1和相位2、相位2和相位3之间的绿灯间隔时间。因此，绿灯间隔时间是一个多层次的问题，必须分层计算，正确取值。

4.4 参数取值计算方法

绿灯间隔时间计算须确定几个基本参数，主要包括：

- 1) 通过时间。考虑清空时间与黄灯时间的关系，是否根据道路条件、时段(白天/夜间)、交通流组成(机动车、公共汽(电)车、非机动车及行人)、流向等的不同而分别取值。
- 2) 清空距离与进入距离。是否计入车辆长度，是否分车型对车辆长度取值，行驶轨迹要按照车道中心线或车道边缘线计算，确定行人清空距离等。
- 3) 清空速度与进入速度。可根据调查车速平

		进入交通									
		K1	K2	K3	K4	K5	K6	F1	F2	F3	F4
冲突点	K1		4	6		5	5	4	7	7	
	K2	5			4		4		4		7
	K3	3			5	4			4	7	
	K4		5	5		4	5	4	7	7	6
	K5	4		5	5				7		4
	K6	5	5		3			8			4
	F1	15			12		12				
	F2	10	12	12	10	10					
	F3	8		9	11						
	F4		8		9	11	11				

图4 绿灯间隔时间矩阵
Fig.4 Green interval matrix

均值或车速分布确定，或根据不同道路等级、道路交通条件、车辆行驶方向等给出经验值，讨论是否或在什么条件下才可以假定进入车辆由零速启动。

表2是德国的关键参数取值，可供参考，而适合我国国情的计算参数取值应作进一步调查研究。

5 结语

虽然绿灯间隔时间在信号时长中所占比例很小，但却是保障信号控制交叉口交通安全运行的核心要素。绿灯间隔时间的计算，需满足安全与

效率的要求，应按照“车道交通流－方向交通流－信号灯组－相位”分层计算；相关参数的取值需根据调查、分析以规范形式确定。其中，寻求一种与交通流安全运行直接相关而非与交叉口空间大小相关的余量算法，具有重要的探索价值，应作为交通控制领域的一个基本问题来研究、讨论，并制定相应的计算标准。

参考文献：

References:

[1] 德国道路与交通工程研究学会. 交通信号控制指南：德国现行规范[M]. 李克平，译. 北京：中国建筑工业出版社，2006.

[2] 李克平，杨佩昆，倪颖. 城市道路交叉口信号控制中的黄灯问题[J]. 城市交通，2010，8(4)：67－72.

LI Ke-ping, YANG Pei-kun, NI Ying. Amber Interval Design at Urban Signalized Intersections [J]. Urban Transport of China, 2010, 8(4): 67－72.

[3] 杨佩昆，吴兵. 交通管理与控制(第三版)[M]. 北京：人民交通出版社，2002.

[4] 杨晓光，等. 城市道路交通设计指南[M]. 北京：人民交通出版社，2003.

[5] 徐吉谦. 交通工程总论[M]. 北京：人民交通出版社，2002.

[6] 全永荣. 城市交通控制[M]. 北京：人民交通出版社，1989.

[7] Axel Wolfermann. Influence of Intergreen Times on the Capacity of Signalized Intersections[D]. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2009.

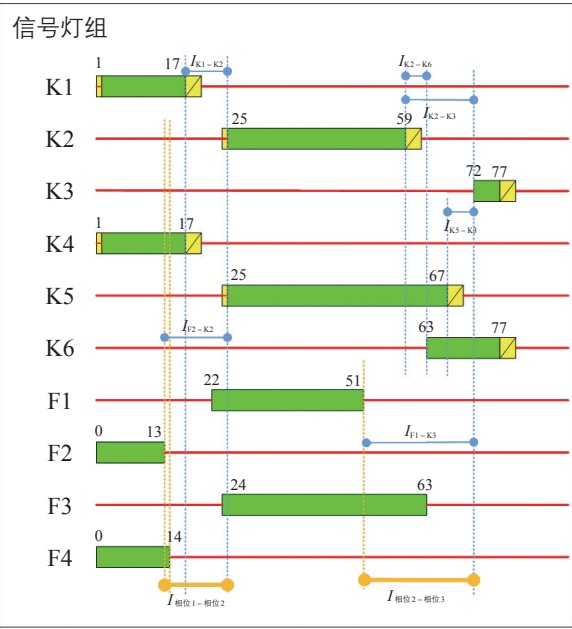


图5 信号配时图
Fig.5 Signal timing diagram

表2 绿灯间隔时间计算关键参数取值
Tab.2 Values of key parameters in green interval calculation

交通流组成及流向	通过时间 t_0/s	清空速度 $V_c/(m \cdot s^{-1})$	进入速度 $V_e/(m \cdot s^{-1})$
机动车	左	2	5~7
	直	3	10
	右	2	5~7
非机动车	1	≤4	5
行人	0	1.2~1.5	1.5