

北京市智能交通系统 (ITS)
规划与示范研究 (I 期)

分课题三

交通流特征参数研究

结 题 报 告

(二)

项目承担单位：北京交通发展研究中心

课题承担单位：北京工业大学交通研究中心

二〇〇四年十一月

项目领导小组组长： 吉 林 范伯元

项目总体组组长： 全永荣

项目总体组成员： 于春全 刘小明 李建国

王笑京 郭继孚 荣 建

李少明 温慧敏 陈金川

项目承担单位： 北京交通发展研究中心

课题承担单位： 北京工业大学交通研究中心

课题负责人： 刘小明

主要参加人员： 杨孝宽 荣 建 陈艳艳

任福田 邵长桥 张智勇

梁 颖 钟连德 李秀文

马国旗 李春艳

子课题 3:

信号交叉口交通流特征参数研究

结题报告

北京工业大学交通研究中心

二〇〇四年十一月

目 录

1. 绪论.....	1
1.1 问题的提出.....	1
1.2 背景知识.....	1
1.2.1 交通流间断特性.....	2
1.2.2 延误的定义.....	2
1.2.3 控制延误和停车延误.....	4
1.2.4 常用的几个概念.....	4
1.2.5 延误的影响因素.....	6
1.3 课题研究意义.....	7
2. 国内外研究现状综述.....	8
2.1 国外研究现状.....	8
2.1.1 均匀延误部分.....	8
2.1.2 增量延误部分.....	10
2.2 我国研究状况.....	16
2.3 现状、发展趋势及存在的问题.....	17
2.4 已有分析方法及其评价.....	18
2.4.1 流体力学方法.....	19
2.4.2 排队论方法.....	19
2.4.3 理论与模拟结合方法.....	19
2.4.4 HCM 方法（协调变换方法）.....	19
2.5 研究思路和采用的方法.....	21
2.5.1 排队论方法.....	21
2.5.2 随机点过程理论.....	22
2.5.3 理论分析和计算机模拟结合方法.....	23

2.5.4 回归分析法	23
3. 信号交叉口车辆运行特性分析.....	24
3.1 信号交叉口交通流运行特性分析.....	24
3.1.1 信号交叉口交通流运行分析.....	24
3.2 信号交叉口车辆受阻过程分析.....	32
3.2.1 信号控制对交通流的阻滞作用.....	32
3.2.2 减-加速过程与减-加速延误.....	33
3.2.3 控制延误	34
3.3 车辆到达特征分析.....	36
3.3.1 规则分布(均匀到达)	36
3.3.2 负指数分布	36
3.3.3 带位移的负指数分布.....	37
3.3.4 M3 分布	37
3.4 排队离散车头时距分析.....	38
3.4.1 排队离散车头时距的分布.....	38
3.4.2 排队离散车头时距均值和方差分析.....	39
4. 平面定时信号交叉口延误分析.....	42
4.1 均匀延误部分	42
4.1.1 均匀延误	42
4.2 增量延误分析.....	44
4.2.1 不饱和条件下增量延误.....	44
4.2.2 过饱和条件下的增量延误.....	49
4.3 控制延误模型.....	52
4.3.1 控制延误模型	52
4.3.2 参数标定	53
4.4 模型验证.....	55
4.5 模型的比较.....	57

4.5.1 与已有的稳态平衡延误模型比较.....	58
4.5.2 与 HCM 模型比较	58
4.5.3 和定数延误模型比较.....	59
4.6 延误影响因素分析.....	59
4.6.1 车头时距、车辆到达分布对延误影响.....	59
4.6.2 通行能力、服务过程对延误的影响.....	60
4.6.3 控制参数对延误的影响分析.....	61
4.6.4 初始排队对控制延误影响.....	62
4.7 左转车均匀延误计算.....	64
4.7.1 专用左转车道和保护左转相位下的左转.....	64
4.7.2 许可左转相位条件下, 均匀延误模型.....	64
4.7.3 行人和自行车干扰下的均匀延误.....	69
5. 延误分布特征分析与应用.....	71
5.1 延误分布特征与服务水平划分.....	71
5.2 延误时间方差分析.....	73
5.2.1 均匀延误方差	74
5.2.2 增量延误方差	75
5.3 应用展望.....	77
5.3.1 排队长度分位数估计和车道长度的计算.....	78
5.3.2 服务水平的评价.....	79
5.3.3 信号方案优化	80
6. 停车延误、引道延误和控制延误关系研究	81
6.1 停车延误、引道延误和控制延误定义.....	81
6.2 停车延误、引道延误和控制延误关系分析.....	82
6.2.1 引道延误和停车延误的回归分析.....	82
6.2.2 控制延误和停车延误的回归分析.....	83
6.2.3 控制延误和引道延误的回归分析.....	84

6.3 停车延误和控制延误的进一步分析.....	85
6.3.1 受阻车辆的减-加速延误和停车延误	85
6.3.2 控制延误和停车延误之间的转换系数.....	86
6.3.3 数据验证	87
7. 结语	91
7.1 研究的主要成果.....	91
7.2 未来的研究和工作.....	91
7.3 研究的创新点.....	91
参考文献.....	93

1. 绪论

1.1 问题的提出

信号交叉口是城市道路系统中最常见的交通设施之一。一方面,它通过信号灯的控制作用,在时间上使相互冲突的交通流分离,提高了车辆运行安全性和效率;另一方面,造成引道上的车辆周期性停驶,引起了车辆延误。为了描述和评价信号交叉口的运行特性,交通研究人员提出了许多指标,包括控制延误、停车延误、引道延误、停车百分比和排队长度等。然而,用于评价信号交叉口运行效率和服务水平的重要度量是车辆在交叉口的延误,它不仅反映了司机不舒适性、受阻、油耗和行驶时间损失,还反映了信号控制规划、设计的合理性^[1]。许多国家如美国、加拿大等把延误作为评价交叉口运行效率的度量。因此,延误分析对评价信号交叉口的服务水平、信号控制方案和信号设计有着很大的意义。寻求精确的延误估计和评价方法是上述问题的关键。

自五、六十年代以来,交叉口延误分析一直是交通研究人员关注的一个话题,他们给出了许多延误分析模型和评价方法。但是,从已有的评价和估计方法来看,存在许多问题。首先,关于延误的定义比较模糊,特别是控制延误,延误的定义有好几种,许多的文献往往混淆了它们之间的关系;其次,很多的文献指出,利用已有方法估算的延误值和现场实测数据存在显著的差异^{[5]-[7]},更值得注意的是,延误公式是基于韦伯斯特给出的“车辆通过交叉口的运行特征^[8]”,在干扰较小,交通强度不大的情况得到的;从模型适用条件来看,这些研究成果都是针对国外的交通条件取得的,不一定适合我国的道路和交通条件;国外的车流以小汽车为主,车流较单一,我国车流为混合车流,非机动车流和行人对机动车辆干扰较大^{[9][10]};现有的延误模型一般是假设到达车辆服从泊松过程(车头时距服从负指数分布),在交通量较小或相邻交叉口距离较远时比较适用,但对城市道路而言,交叉口距离较近,交通量较大的情况下,已有的模型很难适用;还有,目前采用的停车延误和控制延误之间的换算关系,受到了很多研究人员的质疑^[5]。

本研究基于上述考虑,在分析车辆在信号交叉口运行特性的基础上,针对车辆运行特性采用理论分析和模拟结合的方法,提出了车辆到达及离散分布模型,建立了车辆延误模型。

1.2 背景知识

根据所采用的控制装置不同,交通控制类型一般分为:定时信号控制、半感

应式信号和全感应式信号三种。由于北京城市道路路口大多数为平面交叉,并采用定时信号控制,因此,本研究主要针对平面定时信号控制交叉口展开讨论。下面为相关的背景知识和有关概念。

1.2.1 交通流间断特性

由于信号灯的控制作用,信号交叉口交通流呈现间断特性^[2]。常用的信号灯由红、绿、黄三色组成。绿灯时间内,到达交叉口的车辆可以进入交叉口直行、右转和左转(除非另有交通标志禁止某一流向),但当黄灯开始时,车辆禁止进入交叉口,(已越过停车线的车辆可以继续前进),在其后的红灯时间内,到达的车辆只能在交叉口排队等候,车流出现间断,直至绿灯再次启亮。由于信号灯周期性地放行或中断某一个方向交通流,在一定车道上的车辆只能利用部分时间通过交叉口,在其它时间内车辆要等候绿灯信号或前面的车辆放行,这样交通流呈现出间断流的特点。每次信号灯转变为绿灯显示时,原先等候在停车线后面的排队车流便开始启动、加速,然后鱼贯地越过停车线,此后,越过停车线的后续车流流量将保持不变,直到停车线后面原先积存的车辆全部放行完毕(或者虽未放完,但绿灯时间已经截止),其后,车流以到达流率驶离交叉口。在绿灯信号开始出现的最初几秒,流率变化很快,这是由于车流正处于起步和加速阶段,车辆从原来静止状态逐步加速到正常行驶状态,速度由零变为正常行驶速度;当绿灯转换为黄灯时,到达车辆要减速、停车。交通流呈现出周期性特点。因此,绿灯显示最初的一段时间和黄灯部分时间未被车辆充分地利用,造成了运行时间的损失。交叉口延误分析就是建立在交通流这种间断性和周期性基础上的。

1.2.2 延误的定义

延误是由于交通干扰、交通管理和控制设施等因素引起的车辆运行时间损失。根据延误发生的原因可分为固定延误、运行延误、停车延误、行程时间延误、排队延误、引道延误和控制延误等^[3]。

固定延误:由交通控制、交通标志、交通管理等引起的延误,与交通量大小及交通干扰无关。交通信号、停车标志、让路标志、铁路道口都会引起固定延误。

运行延误:由各种交通组成部分之间的相互干扰引起的延误。包括其它交通组成部分对车辆干扰引起的延误,如行人、受阻车辆、路侧停车以及横穿交通等因素引起的延误;还有交通流之间的干扰引起的延误,如交通拥挤、汇流、超车与交织运行等因素引起的延误。

停车延误:车辆由于某种原因而处于静止状态所产生的延误,等于停车时间,包括车辆由停止到车辆再次启动时驾驶员的反应时间。

行程时间延误:实际行驶时间与完全排除干扰后以畅行速度通过调查路段的

时间之差。对交叉口而言,包括停车延误和加减速产生的加速延误和减速延误。

排队延误:车辆排队时间与不拥挤条件下的车辆以畅行车速通过排队路段的时间差。排队时间计算从车辆第一次停车排队的断面到越过停车线的时间。

引道延误:为车辆在引道上实际消耗时间与车辆在引道上正常行驶时间之差。引道实际消耗时间为车辆通过延误段实际所用时间;引道延误段是指引起全部或大部分引道延误的引道路段,实际选用时常常将可能出现的最大排队长度作为引道延误段。

控制延误:美国 1997 年出版的通行能力手册引入了控制延误的概念,其定义和引道延误相似,其对控制延误的界定为:控制延误为停车延误与加减速损失时间之和。因此,控制延误可定义如下:控制设施引起的延误;对交叉口而言是由于信号交叉口的控制作用使得车辆通过交叉口的实际行程时间多于车辆以畅行速度通过交叉口那部分时间。因此,正确的理解“畅行速度”是理解控制延误的关键。由定义可知,控制延误包含车辆的停车时间和车辆对交叉口信号控制做出的减速和加速反应造成的时间损失。因此,定义中的“畅行速度”是指在当前的条件下,车辆在做出减速反应之前的正常运行的平均速度。

关于延误的度量,由于考察对象和指标不同采用的术语可能不一致,并且其内涵也可能有着很大的差别。通常定义的控制延误则有着不同的内涵,它是车辆通过交叉口的实际时间之差和车辆对交叉口设施反应减速前,以畅行速度通过交叉口的时间之差。从控制延误的定义不难看出,该定义只考虑了车辆对交叉口信号控制所作的反应(减速、停车和加速)所造成的时间损失;而总延误则还包含了由交通流量引起的延误时间,而这部分损失时间不单是交叉口信号控制引起的。即使同为评价信号交叉口的服务水平采用的指标也不同,如上所述美国 1997 年的通行能力手册(HCM)引入了控制延误概念^[4]来评价信号交叉口的服务水平;而在此以前,则用停车延误来评价服务水平;有的文献也采用引道延误来评价服务质量。应当指出的是,控制延误虽然和引道延误概念相似,但其区别是明显的:引道延误往往不包括车辆越过停车线以后的加速损失时间,因此,控制延误总是不小于引道延误。但是,从已有的文献来看,在没有引入控制延误之前,往往很难区别引道延误和控制延误。特别是,当绿灯时间较长时,控制延误和引道延误的差别较小,几乎没有什么区别。

对于信号交叉口来说,车辆经历的延误主要是上述几种。用于评价信号交叉口服务水平的延误却只有平均停车延误和平均控制延误。平均停车延误是在规定的时间段内,每一条引道(或一组车道)上所有车辆总的停车时间,除以同一时间段内引道上通过的交通量,以秒/辆表示。平均停车延误概念清楚,实际应用中易于测定,被研究人员广泛接受,因此,仍然有许多研究用平均停车延误方法来评价信号交叉口的服务水平;但是,进入交叉口的部分车辆还要经历减速延误

和加速延误，这是由于交叉口的实际交通流是周期性中断的，每次交通流被迫减速、停止，然后再次起动、加速；这些都引起车辆运行时间的损失。为了全面评价信号交叉口的运行效率，1997 年美国的通行能力手册引入了平均控制延误：平均停车延误和加减速引起的损失时间和^[4]。

1.2.3 控制延误和停车延误

从前文关于控制延误和停车延误定义来看，两者产生的原因虽然不同，但是存在着一定的关系：停车延误是控制延误的一部分。一般而言，控制延误往往易于用数学模型来描述；而停车延误易于观测和度量。因此，研究人员往往从分析控制延误出发，建立合适的数学模型，然后通过控制延误和停车延误的关系，导出信号交叉口停车延误^[5]。从已有研究结果来看，两者之间存在着一定的换算关系：平均控制延误约为停车延误的1.3倍。但是，也有的研究人员对此提出了质疑。尽管如此，用数学建模的方法分析控制延误，从而确定停车延误或用测量的停车延误来估计控制延误，仍然是研究延误常用方法。在后文中所谈到的延误均指控制延误（除非特别说明）。

1.2.4 常用的几个概念

1.2.4.1 交通信号

周期：信号显示的完整过程；

周期长度：信号完成一个周期所需要的总时间，用 C 表示；

相位：在一个或几个间隔周期，分配给任何获得通行权方向上车流的通行时间；

绿灯时间：绿灯相位持续显示时间；

有效绿灯时间：指定的相位中，获得通行权的车辆能够有效利用的时间，等于绿灯时间加上转换间隔再减去损失时间，用 g 表示；

绿信比：有效绿灯时间与周期长度之比： $u = g / C$ ；

有效红灯时间：有效禁止车辆行驶持续的时间，等于周期长减去给定相位的有效绿灯时间， r ；

1.2.4.2 饱和流率、饱和车头时距和损失时间

饱和流率：绿灯时间内稳定行驶的队列中，车辆通过信号交叉口每条车道的流率。定义为在整个小时都是有效绿灯信号，并且车流不间断的条件下，每小时每条车道通过交叉口的车辆数，其单位用每车道有效绿灯小时通过车辆数表示

(辆/绿灯小时/车道)，以 S 表示。

饱和车头时距：绿灯时间内，同向稳定行驶的队列中，同一车道上连续通过停车线的两辆车之间的时间间隔，以 h 表示，单位秒。饱和流率和饱和车头时距的关系为：

$$S = 3600/h$$

损失时间：车辆不能充分利用的时间，包括：车辆的起动损失时间与清尾损失时间。每次车辆起动都要经历反应过程和加速过程，因此，排在队列前面的车头时距比饱和车头时距相比要大，增量部分就是起动损失时间，这些车辆起动损失时间之和就是总的起动损失时间；当一个车流停止时，安全上要求在冲突车流进入交叉口之前，要有一些清尾时间，这段时间内，没有车辆使用该交叉口，这段时间称为清尾损失时间。

1.2.4.3 通行能力、服务流率

通行能力、服务流率和服务水平是描述信号交叉口运行效率的重要参数，三者之间相互关联。因此，评价、分析信号交叉口的总体运行，通行能力、服务流率和服务水平必须同时考虑。

交叉口的通行能力 (c) 是对每一条引道规定的，它是在现行的交通、信号配时与车行道几何条件下，某一指定引道所能通过交叉口的最大流率。指定引道的通行能力表示如下：

$$c = S \times (g/C)$$

服务流率是单位时间内实际能通过交叉口的车辆数。其定义为在通常的道路条件、交通条件和管制条件下，给定的时间内保持一定的服务水平，合理地期望车辆或人通过一条车道或道路的一点或均匀断面，所能达到的最大小时流量。

1.2.4.4 服务水平、排队长度和停车率

信号交叉口服务水平是用延误确定的，服务水平标准采用 15 分钟内到达交叉口的每辆车经历平均延误。根据 2000 年美国出版的 HCM 方法，信号交叉口的服务水平分为 A~F 共 6 级；服务水平 A 表示运行时控制延误不大于 10 秒/辆；服务水平 B 表示运行时每辆车控制延误为 10~20 秒；服务水平 C 表示运行时每车延误为 20~35 秒的范围内；服务水平 D 表示每辆车延误在 35~55 秒的范围内；服务水平 E 表示每辆车延误为 55~80 秒范围内，认为是可以接受的延误极限；服务水平 F 表示运行时每辆车延误大于 80 秒，大多数司机认为是不可接受的，该种状况经常随着交通过饱和而产生。

在有的文献中，用于度量交叉口服务水平的指标还有排队长度和停车率，它

们也是评价交叉口交通设施或优化改善交通措施的重要指标。排队长度包括红灯时间末排队长度和绿灯时间末排队长度。停车率是每个周期停驶车辆所占整个周期到达车辆的比例。

不同的服务水平反映了车辆在交叉口不同运行状态。一般而言,服务水平较好的交叉口,车辆停车率较低,信号周期较短。但是,由于延误是个复杂的指标,它与许多的变量有关,包括信号周期长短,绿信比和通行能力,因此,服务水平的高低,也取决于这些因素。当试图改善交叉口的服务水平时,必须同时考虑这些因素。

1.2.5 延误的影响因素

如前所述,信号交叉口延误是个复杂的度量,影响因素很多,但从根本上说可分为:物理因素、交通因素、交通控制因素。

物理因素:如车道数目、坡度、入口控制方式、转向候车道、公交停靠站等。

交通因素:如各个入口的交通量、驾驶员特性、转向比例、行人、停驻车辆、引道车速、车辆到达等。

交通控制因素:信号机的类型和配时、联动系统的操纵情况、停车管制等。

但是,这些条件中一些条件通过作用于交叉口的通行能力来影响延误,分析时,可考虑对饱和流率校正;有些条件则影响车辆的运行特征,从而影响了延误。因此,在分析延误时,可按对延误影响原因加以分析如:影响通行能力因素,影响损失时间因素和交通特性因素。在本研究的分析中,上述影响因素一般包含在通行能力和有效的绿灯时间和红灯时间中考虑。

1.2.5.1 影响通行能力的因素

在进行延误分析时发现,影响延误的往往不单是车辆的到达率 q 和通行能力 c ,还包括其和通行能力 c 的比率 q/c 。因此,必须综合考虑它们的影响因素。

这些因素包括:

交通设施的类型及其所处的环境;

车道宽度;

路肩宽度和(或)侧向净空;

设计速度;

平面和纵面线性。

在本研究的讨论中,假设交通设施的类型和设施的几何条件是给定的。因此,没有更多的涉及设施本身的影响,而是着眼于该条件下,交通运行特性对延

误的影响。

1.2.5.2 影响损失时间的因素

由平均延误的定义知，为了精确的估计延误，要考虑车辆充分利用的时间和不能利用的时间。由前面的讨论可知，损失时间包括：车辆的起动损失时间和清尾损失时间；起动损失时间表现在前面最初几辆车的车头时距大于饱和车头时距，因此，起动损失时间可由排队最前面几辆车的车头时距和饱和车头时距确定。车道宽度、停车、公共交通干扰、非机动车辆的干扰、转弯运行车辆组成和其它因素都会对饱和车头时距和起动损失时间有所影响，在确定损失时间时，应对上述因素加以考虑。对于我国而言，车种类型较多，特别是存在大量的非机动车辆和行人，为混合交通流，各种交通相互干扰，影响因素更加复杂。

1.2.5.3 车辆到达类型

车辆到达类型为交通重要特性之一。研究发现车辆到达类型对延误的影响较大，甚至超过了车辆排队对延误的影响。因此，作为影响延误的交通特性，应予以单独考虑。

由平均延误的定义知，车辆等待的总时间越少，其平均延误就越小。因此，车辆在不同的信号灯阶段到达，其对延误影响是不一样的。当相邻交叉口距离不大或信号联动时，车辆的到达随机性降低，车辆在一定的信号阶段成车队到达。根据美国的 HCM 方法^[2]，按车辆到达的特征划分了六种到达类型。在本文的研究中，则侧重于考虑到达车头时距分布对延误的影响。

1.3 课题研究意义

通过对信号交叉口特征参数的研究，有助于以下几个问题的解决^[3]：

- 合理评价信号交叉口运行效率和服务水平，评价道路服务质量；
- 分析影响延误因素及其与延误的关系，为信号控制的合理规划、设计和管理提供基础；
 - 合理评价现有灯控方案，或评价交通设施改善措施的成效；
 - 改建道路或交叉口的依据，也可作为交通规划的基础；
 - 有助于标定车辆在信号交叉口的阻抗，为相关研究打下基础。

2. 国内外研究现状综述

2.1 国外研究现状

自上个世纪五、六十年代以来, 交通工程研究人员就一直致力于寻求更好的度量和评价信号交叉口服务质量的方法和模型。经过几十年的努力形成了相对独立的理论^[11]。该理论系统的定义和描述了信号交叉口各种车辆运行特征和交通需求之间的关系。在此基础上, 引入了延误、排队长度、停车率等指标描述信号交叉口的运行效率, 但最常用和最根本的是用延误评价信号交叉口运行效率。研究人员围绕着以上指标给出了许多模型和估计方法, 特别是延误分析模型和方法。

根据交通流运行特性和延误产生的原因, 信号交叉口延误又可细分为三种: 均匀延误、随机延误和过饱和延误^[12]。均匀延误是假设车辆均匀到达时产生延误; 随机延误是由于信号周期内, 车辆到达的随机波动性造成的; 过饱和延误是车辆到达超过了信号交叉口的通行能力时, 滞留车辆额外经受的延误。研究人员在分析延误时习惯上把后两种延误定义为增量延误, 因此, 常用的延误公式往往有两项构成: 均匀延误 d_1 和增量延误 d_2 。另一方面, 从引起延误的原因来分析, 均匀延误往往是由于信号灯的作用引起的, 其为车辆必然经受的延误, 随机性因素较少; 增量延误是由于个别周期车辆不能释放完, 或过饱和引起的延误。当饱和度小于 1 时, 增量延误往往是由于个别周期车辆不能释放完引起的, 具有随机性, 也有的文献用随机延误来描述, 早期的研究主要是针对该情形。均匀延误反映了交通流流体的特性, 可更好的由流体理论来描述; 增量延误部分则代表了交通流的随机性, 可用排队模型刻画。

2.1.1 均匀延误部分

最初, 均匀延误部分是建立在交通流体力学理论的基础上的。其估计模型是根据以下假设^{[8][11]}:

绿灯相位结束后, 排队长度为 0;

所研究的进口断面, 车辆平均到达率和通行能力在相应的时段内为常数;

绿灯时间内, 当有排队时车辆以饱和流率驶出交叉口; 车队消散后, 车辆以到达率离开交叉口;

车辆到达不超过信号交叉口的通行能力。

均匀延误就是在上述假设条件下得到的。当饱和度不大时, 车辆经历的延误

主要是均匀延误。不同的研究人员曾采用不同的方法^{[11][13][14]}，可是其最终的结论却往往差别很小，也反映了该模型的一致性。结论是：

$$d_1 = \frac{C(1-g/C)^2}{2(1-q/S)} \quad (2-1)$$

应该指出的是，所有均匀延误模型基本假设差别不是很大，模型的结论也只是一般化的结论，当交通条件和道路条件改变时，应当对上述的模型适当修改。还有一个值的注意的问题是，上述结论是针对韦伯斯特给出的“信号交叉口车辆运行模式”给出的，该模式是建立在传统的平面路口上车流运行特性之上的，已与现代拓宽路口的车流运行模式有所不同^[8]。由于均匀延误提出时间较早，并已被广大研究人员所接受，在后面的讨论中不再过多论述。

均匀延误模型给出的结果包含两部分：平均停车延误和减-加速延误，因此，该值理论上要比平均停车延误大。为了估计平均停车延误，常用的方法（美国 HCM 方法）是乘以系数 0.77，即：

$$d_{st} = \frac{0.385C(1-g/C)^2}{(1-q/S)} \quad (2-2)$$

式中：

d_{st} —平均停车延误。

近年来，Akcelik（1980）、Teply 和 Olszewski 等人对此提出了质疑。Olszewski^{[5][15]}提出用以下公式估计平均延误：

$$d_{st} = \frac{(r-d_h)^2}{2(C-gx)} \quad (2-3)$$

式中：

d_h —车辆平均减-加速延误。

Frambro 和 Messer 考虑了绿波的影响，建议用以下模型估计平均停车延误：

$$d_{st} = \frac{0.38rC(1-p)}{C-gx} \quad (2-4)$$

式中：

p —绿灯时间内到达的车辆所占比例。

2.1.2 增量延误部分

均匀延误模型是在较理想条件下给出的,它忽略了交通流的随机性特别是车辆到达的随机性,与实际不符。为了弥补其不足,研究人员引入了增量延误,并根据车辆到达和离开过程是否能达到平衡,分别采用不同的方法,当车辆平均到达率不超过交叉口的通行能力时,状态最终可能达到平衡,常用排队论的知识估计排队长度和延误^{[11][16]~[18]};当车辆到达率接近或超过通行能力时,则平衡状态的假设不成立。由于这部分研究主要是针对延误的随机部分讨论的,因此又称为随机延误模型。根据能否到达稳态平衡状态和采用的估计方法不同,把延误模型分为:稳态平衡延误模型、定数模型和时依延误模型。从时间上,稳态平衡延误模型研究的历史较早,由于交通需求较小,车辆到达很少超过通行能力,延误主要是由均匀延误和随机延误两部分组成,这一时期的研究主要是估计绿灯结束时排队车辆长度和到达分布对延误影响;定数模型和时依延误模型则提出的历史较晚,这一时期的研究主要是针对过饱和引起的延误。

2.1.2.1 稳态平衡延误模型

稳态平衡延误模型试图从车辆到达和离开的统计分布特点方面,刻画交通延误。其根本假设是:车辆平均到达率不超过交叉口的通行能力。

上述假定只有在饱和度相对低的情况下才是接近实际情况的。根据平衡满足条件,不同的研究人员,对车辆的到达-离开过程又给出了不同的假设,得到了相应延误模型。按模型假设条件和建模方法,稳态平衡延误模型又可分为精确模型和近似模型^[11]。

2.1.2.1.1 精确模型

这类模型的特点是假设车辆到达和离开服从一定的分布,运用排队论或概率论知识,求出平均延误和排队长度。但是,实际情况远比假设条件复杂。因此,该类模型的理论性较强,要求的条件较高,大大降低了其实用性。

Beckman^[11]假设车辆到达服从二项分布,服务时间为定时服务,得到了平均延误模型:

$$d = \frac{C-g}{C(1-q/s)} \left[\frac{Q_0}{q} + \frac{C-g+1}{2} \right] \quad (2-5)$$

后来,许多研究人员如 Little (1961)、Darroch (1964a)^[11]等在此基础上作了改进,但是,他们给出的模型往往过于复杂。McNeil (1968)^[11]假设车辆到达分布为一般分布,车辆离开率为常数得到了如下模型: