

本书依托国家重点基础研究发展计划（973计划）“城市交通行为过程的基础理论研究”  
“十一五”国家科技支撑计划“城市道路通行能力与交通实验系统研究”项目



# 城市道路信号交叉口 通行能力研究

邵长桥◎著

Capacity Analysis for  
Urban Street Signalized Intersections



人民交通出版社  
China Communications Press

本书依据国家重点基础研究发展计划(973 计划)“城市交通行为过程的基础理论研究”、“十一五”国家科技支撑计划“城市道路通行能力与交通实验系统研究”项目

# 城市道路信号交叉口 通行能力研究

邵长桥 著

人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书研究城市道路信号交叉口通行能力分析方法。主要内容包括:车辆离开信号交叉口的排队车头时距统计特性、饱和车头时距估计方法、饱和流率估计方法、通行能力及其影响因素、信号交叉口延误模型。

本书可以作为交通运输工程专业领域教学、科研和管理人员的参考用书,也可供城市规划、交通运输、公共交通和交通管理部门技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

城市道路信号交叉口通行能力研究/邵长桥著.--  
北京:人民交通出版社,2013.5  
ISBN 978-7-114-10489-3

I. ①城… II. ①邵… III. ①城市道路—公路交叉—  
交叉点—交通信号—研究②城市道路—公路交叉—交叉点  
—交通流量—研究 IV. ①U412.37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 057886 号

书 名: 城市道路信号交叉口通行能力研究  
著 者: 邵长桥  
责任编辑: 任雪莲  
出版发行: 人民交通出版社  
地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号  
网 址: <http://www.ccpres.com.cn>  
销售电话: (010) 59757973  
总 经 销: 人民交通出版社发行部  
经 销: 各地新华书店  
印 刷: 北京市密东印刷有限公司  
开 本: 720×960 1/16  
印 张: 8.25  
字 数: 192 千  
版 次: 2013 年 5 月 第 1 版  
印 次: 2013 年 5 月 第 1 次印刷  
书 号: ISBN 978-7-114-10489-3  
定 价: 42.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

# 前 言

城市道路信号交叉口作为城市道路交通运行瓶颈,影响着整个路网运行的质量。信号交叉口改造和交通治理已成为缓解城市道路交通拥堵的重要措施。而通行能力分析是信号交叉口规划、设计和运营管理的主要依据。对信号交叉口通行能力分析方法进行研究不仅可以指导交通工程实践,还可以促进交通工程基础理论的发展。

本书作者经过多年的探索,在信号交叉口运行特性、通行能力分析方法和服务水平评价方面作了一些研究工作。本书是作者多年研究的一个总结,希望能够通过本书的出版和同行进行交流和沟通,共享一些问题的研究方法。

本书主要研究了城市道路信号交叉口通行能力分析方法,包括车辆离开信号交叉口的排队车头时距统计特性、信号交叉口的饱和车头时距、饱和流率、通行能力及其影响因素、信号交叉口的延误模型。上述问题是信号交叉口通行能力分析的理论基础。

本书在整理过程中参阅了大量国内外著作、学位论文和有关文章,有的文献可能由于疏忽遗漏未能在参考文献中列出,在此谨向本书直接或间接引用的研究成果的作者表示深切的谢意!感谢国家重点基础研究发展计划(973计划)“城市交通行为过程的基础理论研究”、“十一五”国家科技支撑计划“城市道路通行能力与交通实验系统研究”等项目的资助。

除作者外,参加研究和撰写工作的还有赵林、周洁、宗二凯、陈雅。在本书的整理过程中,还得到了北京工业大学任福田先生以及北京工业大学交通研究中心师生们的鼓励和支持,在此表示衷心的感谢!

由于作者水平和能力所限,书中难免存在不足之处,有些结论还有待实践的检验,恳请读者批评指正。

邵长桥  
2013年元旦

# 目 录

第1章 绪论 .....	1
1.1 信号交叉口 .....	1
1.2 通行能力 .....	1
1.3 服务水平 .....	3
1.4 饱和流率、通行能力、饱和车头时距和损失时间 .....	4
1.5 车辆折算系数 .....	6
参考文献 .....	7
第2章 信号交叉口交通运行特性分析 .....	9
2.1 信号交叉口交通数据调查 .....	9
2.2 信号交叉口交通流运行特性分析 .....	12
2.3 信号交叉口车辆到达特性分析 .....	20
2.4 信号交叉口车辆受阻过程分析 .....	23
2.5 起动损失时间和清尾损失时间 .....	26
参考文献 .....	27
第3章 信号交叉口车头时距与饱和流率 .....	29
3.1 排队车头时距统计特性研究 .....	29
3.2 饱和流率计算方法研究 .....	44
3.3 多左转排队离开车头时距统计特性 .....	45
3.4 本章小结 .....	47
参考文献 .....	48
第4章 信号交叉口通行能力 .....	49
4.1 信号交叉口通行能力计算方法 .....	49
4.2 基本饱和流率的确定 .....	50
4.3 信号交叉口通行能力主要影响因素 .....	52
4.4 本章小结 .....	60
参考文献 .....	60

<b>第 5 章 左转车道通行能力研究</b>	62
5.1 无拓宽条件下左转车道通行能力	62
5.2 拓宽条件下左转车道通行能力	66
5.3 左转待行区对左转车道通行能力影响	73
5.4 左转掉头对左转车道通行能力影响	77
5.5 本章小结	80
参考文献	81
<b>第 6 章 信号交叉口延误分析</b>	82
6.1 信号交叉口延误模型	82
6.2 均匀延误	83
6.3 增量延误分析	84
6.4 控制延误模型	91
6.5 模型验证	94
6.6 模型的比较	97
6.7 延误影响因素分析	99
6.8 左转均匀延误计算	102
6.9 本章小结	107
参考文献	108
<b>附录 1 延误分析模型</b>	111
<b>附录 2 协调变换方法</b>	122

# 第1章 绪 论

## 1.1 信号交叉口

信号交叉口是城市道路常见的交通设施之一。常用的信号灯由红、绿、黄三色灯组成。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行驶),但当黄灯开始时,车辆禁止进入交叉口,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,在给定车道上的车辆只能利用部分时间通过交叉口,在其他时间内车辆要等候绿灯信号或前面的车辆放行。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辆便开始起动、加速,然后鱼贯越过停车线。

通过信号灯的控制作用,使得信号交叉口相互冲突的交通流在时间上分离,提高了车辆运行的安全性;但另一方面,造成同一流向的车辆按照一定的周期性行进和停止,引起车辆延误。信号交叉口通行能力理论就是针对交叉口的上述交通流运行特性,研究交叉口运行效率和服务水平的理论和方法。

## 1.2 通行能力

### 1.2.1 通行能力定义

美国《通行能力手册》(HCM2000)<sup>[1]</sup>将交通设施的通行能力定义为:在通常的道路、交通和管制条件下,在一定时间段内能合理地期望人或车辆通过车道、道路中某一点或均匀断面的最大小时流率。

对于信号交叉口(车辆)而言,由于信号灯的作用,不同相位控制下的交通流向的通行时间不同。为了便于计算和分析其通行能力,往往以车道(组)作为通行能力分析“单元”。信号交叉口通行能力可以理解为:在通常的道路、交通和交通

信号条件下,某个车道(组)的通行能力。在车道(组)通行能力基础上,进而可计算单个进口和整个信号交叉口的通行能力。

根据道路、交通和管制条件以及作用性质,通行能力可分为三种:基本通行能力、实际通行能力和设计通行能力。

### (1) 基本通行能力

基本通行能力是在给定的基本条件(相对理想的道路、交通和管制条件)下的通行能力。当通常条件与给定的基本条件不符时,可对基本通行能力进行修正,从而得到通常条件下的通行能力。

信号交叉口的基本通行能力是由基本饱和流率来定义的:在给定的相对理想的道路、交通和管制条件下,有效绿灯信号时间内停驻的小客车能通过停车线的最大小时流率,用“小客车/(h·车道)”表示。

### (2) 实际通行能力

实际通行能力是指在一定时段,在具体的道路、交通、控制及环境条件下,某个车道(组)的通行能力。

由于实际条件往往与基本条件不符,实际通行能力值要低于基本通行能力。

### (3) 设计通行能力

设计通行能力是指在设计中,根据设计服务水平确定的单位时间内通过道路设施的最大车辆数。

本书主要涉及的是信号交叉口基本通行能力和实际通行能力,不包含设计通行能力方面的内容。

## 1.2.2 通行能力影响因素

道路通行能力影响因素可分为:道路条件、交通条件、交通管制条件和环境条件。这些条件也是通行能力交通调查的内容。

### (1) 道路条件

道路条件包括几何线形和其他要素,即:车道数、车道宽度、坡度、专用转向车道、拓宽段长度等。

### (2) 交通条件

影响信号交叉口通行能力和服务水平的交通条件包括交通组成、交通流向分布(含共用车道中转向分布、掉头分布)以及驾驶人群众体驾驶技术熟练程度和对道路熟悉程度。

### (3) 管制条件

交通管制条件主要是信号周期、绿灯时间、红灯时间、许可掉头、停让控制等。



#### (4) 交通环境

交通环境主要是指道路横向干扰程度以及交通秩序等。对于城市道路信号交叉口,可按商业区、居住区和娱乐区等区域类型考虑环境影响。此外,也可以用行人和自行车干扰程度刻画交通环境对信号交叉口机动车通行能力和服务水平的影响。

### 1.3 服务水平

#### 1.3.1 服务水平定义

服务水平是衡量交通设施提供的运行质量指标,通常与行车速度、行驶时间、驾驶自由度、交通受阻程度以及舒适性等因素有关。服务水平反映了道路设施在某种交通条件下所提供运行服务的质量水平。

服务水平和通行能力是道路设施的两个属性,前者度量了道路设施的服务质量,后者度量了服务效率。两者相辅相成,没有服务水平也就谈不上服务效率。

#### 1.3.2 信号交叉口服务水平度量指标

用于评价信号交叉口服务水平的重要度量是延误和排队长度。它们不仅反映了驾驶人不舒适性、受阻情况、油耗和行程时间损失,还反映了信号控制规划、设计的合理性。信号交叉口延误还常用于评价信号交叉口的信号控制方案、信号设计和交叉口交通组织。

##### (1) 延误定义

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、行程时间延误、排队延误、停车延误和控制延误等<sup>[2]</sup>。

##### (2) 控制延误

美国交通研究委员会在1997年修订版的《通行能力手册》中引入了控制延误的概念<sup>[3]</sup>:控制延误为停车延误与加减速损失时间之和,可理解为车辆通过交叉口的实际行程时间多于车辆以路段速度通过交叉口的部分时间。

##### (3) 排队长度

如果信号交叉口进口的交通需求超过通行能力,就会形成排队。因此,信号交叉口的排队长度与交通需求和通行能力有关。排队长度不仅可以用于度量车辆在交叉口受阻程度,其还是计算交叉口延误的基础。此外,在交叉口渠化时,需要平

衡排队长度和拓宽长度之间的关系。

## 1.4 饱和流率、通行能力、饱和车头时距和损失时间

### 1.4.1 饱和车头时距

为了便于下文叙述,对车头时距、排队离开车头时距和饱和车头时距加以定义。

车头时距(Time Headway)是指同一方向、同一车道上两连续到达车辆的车轴或保险杠通过某一断面的时间间隔。

排队离开车头时距(Queue Discharge Headway)定义为同一方向、同一车道上按队列行驶的车流中两连续到达车辆的车轴或保险杠通过某一断面的时间间隔。对信号交叉口而言,排队离开车头时距是指在信号绿灯启亮后,车辆以排队状态通过停车线的车头时距。

饱和车头时距(Saturation Headway)则是为定义饱和流率引入的概念。美国《通行能力手册》<sup>[1]</sup>定义饱和车头时距为:车辆在排队状态下(图 1-1),通过信号交叉口时的车头时距的稳定值(在信号绿灯启亮后,在第四辆车以后排队离开车头时距趋于常数  $h$ ),并用(绿灯时间内)车队中的第四辆车以后排队离开车头时距平均值来估计。

$$\hat{h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \quad (1-1)$$

式中: $\hat{h}$ ——饱和车头时距  $H$  的估计值, s;

$h_i$ ——排队车头时距  $H$  的样本观测值( $i = 1, 2 \cdots n$ ), s。

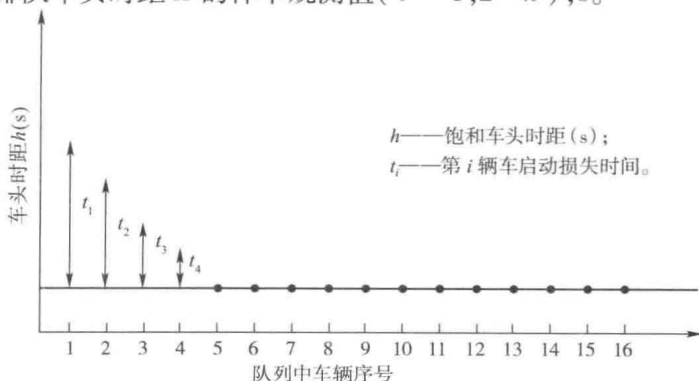


图 1-1 饱和车头时距概念图(HCM2000)

从上述定义可知,排队车头时距是车辆在以队列行驶时的车头时距,是可以观测到的。而饱和车头时距可看作信号交叉口排队车头时距的稳定值(排队车头时距的某个特征值,是未知的)。并且排队车头时距和车头时距一样是随机变量,而饱和车头时距则可看作是未知的常量。

根据美国《通行能力手册》<sup>[1]</sup>定义可以推断:某个排队位置之后(美国《通行能力手册》定义为第四辆车)的排队车头时距可看作是饱和车头时距的观测值。这为估计或计算信号交叉口饱和流率提供了理论基础。由于受到驾驶人行为以及其他因素的影响,排队车头时距具有随机特性。因此,本研究把排队车头时距、饱和车头时距当作随机变量处理,并且在混淆的情况下,把饱和状态下排队离开车头时距视为饱和车头时距观测值。

### 1.4.2 饱和流率

饱和流率定义为车辆以队列形式稳定通过信号交叉口(停车线)的流率。根据定义,计算公式见式(1-2)。

$$S = \frac{3600}{h} \quad (1-2)$$

式中: $S$ ——饱和流率,辆/h;

$h$ ——饱和车头时距,s。

### 1.4.3 饱和流率和通行能力的关系

信号交叉口通行能力是针对车道(组)定义的。信号交叉口一个车道(组)的通行能力为:

$$c = S \times \frac{g}{C} \quad (1-3)$$

式中: $S$ ——饱和流率,辆/h;

$g$ ——有效绿灯时间,s;

$C$ ——信号周期,s。

对于给定的信号交叉口,在一定的分析时段内,信号配时是相对固定的,绿信比( $\frac{g}{C}$ )可以看作常数。因此,由公式(1-3)可以发现,对于信号交叉口而言,通行能力和饱和流率的意义是一致的。

### 1.4.4 损失时间

车流每次被迫停止,就必须再次起动,前几辆车要经历如图 1-1 所示的起动反

应和加速的车头时距。在图 1-1 中,队列中前几辆车的车头时距比饱和车头时距  $h$  大。增量  $t_i$  称为起动损失时间。总起动损失时间是这些增量之和。

$$l_1 = \sum_{i=1}^N t_i \quad (1-4)$$

式中:  $l_1$  ——总起动损失时间, s;

$t_i$  ——队列中第  $i$  辆车的起动损失时间, s;

$N$  ——起动损失时间  $t_i$  大于 0 的排队车辆数, 一般取 4 ~ 6。

此外, 在绿灯转换为黄灯后, 已经越过停车线的车辆仍然可以通过交叉口。因此, 部分黄灯时间实际上是被利用了。黄灯时间内被利用的时间计入有效时间, 没有被利用的时间计入损失时间, 称为清尾损失时间, 如图 1-2 所示<sup>[4]</sup>。

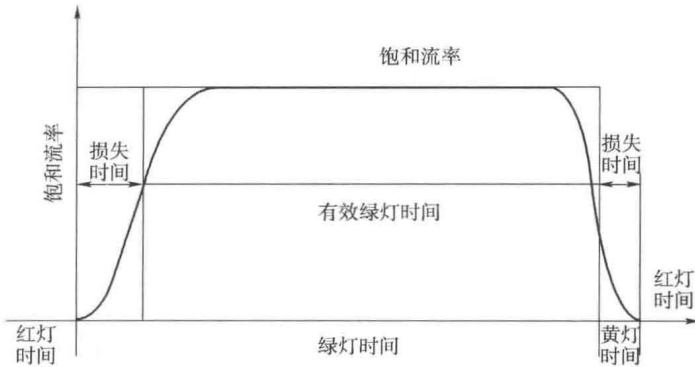


图 1-2 损失时间、饱和流率关系图 (HCM2000)

## 1.5 车辆折算系数

### 1.5.1 车型分类

车辆物理尺寸和动力性能是控制道路几何设计的关键因素, 在道路设计中需考虑车辆分类, 并选择具有代表性的车辆用于设计。同样, 在道路通行能力影响分析中, 不同类型的车辆由于其物理尺寸和动力性能差异导致运输效率和通行能力不同, 特别是大型车的混入, 降低了道路设施服务效率。不同车辆类型对通行能力主要有两个方面的影响:

(1) 不同类型车辆, 其物理尺寸不同, 占用了不同的道路空间资源(车头间距、横向宽度)和时间资源(车头时距)。

(2) 不同类型车辆运行性能不同, 尤其是加速、减速的能力(小型车运行性能优于

大型车)。

在通行能力分析中,有必要对车辆进行分类,分析各类车辆对通行能力的影响。表 1-1 为《城市道路设计规范》(CJJ 37—2012)<sup>[5]</sup>给出的车辆类型分类标准,本书中参照了该分类标准,分析不同类型车辆对通行能力的影响。

机动车设计车辆及其外廓尺寸(单位:m) 表 1-1

车辆类型	总长	总宽	总高	前悬	轴距	后悬
小型车	5	1.8	1.6	1.0	2.7	1.3
中型车	6	2.3	3.0	1.0	3.7	1.3
大型车	12	2.5	4	1.5	6.5	4.0
铰接车	18	2.5		1.7	5.8+6.7	3.8

### 1.5.2 车辆折算系数

为了将混合交通流量换算成单一交通流量,研究人员引入了车辆折算系数(Passenger Car Equivalent,简称 PCE)的概念<sup>[6,7]</sup>,其本质是将混合交通流量换算为 100% 标准车流量。

作为通行能力研究的基础参数,车辆折算系数一直受到交通工程研究人员的重视,并成为交通流研究的一个重要课题。国内外研究学者在分析不同车辆类型对交通流影响的基础上,提出了以速度、流量、密度、车头时距等多种交通流参数为“等价标准”的车辆折算系数计算方法<sup>[7-10]</sup>。

### 参 考 文 献

- [1] Transportation Research Board. Highway Capacity Manual. Washington DC, U. S. A: National Research Council, 2000.
- [2] 任福田. 交通工程导论新编[M]. 北京:人民交通出版社,2012.
- [3] Yoassry M. Elzohariy, Rahim F. Benekohal. Comparison of the 1994 and the 1997 HCM delay models for pre-timed undersaturated intersections. 79th TRB Annual Meeting, 1999.
- [4] Turner J and G. Harahap, 1993. Simplified saturation flow data collection method. PA 1292/93. Transport Research Laboratory, Crowthorne, 1993.
- [5] 中华人民共和国行业标准. CJJ 37—2012 城市道路工程设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [6] Highway Research Board. Highway Capacity Manual. National Research Council,

Department of Traffic and Operations, Special Report 87. Committee on Highway Capacity, Washington, D. C. , U. S. A. ,1965.

- [7] R. M. Kimber, M. McDonald, N. Housell. Passenger car units in saturation flows: concept, definition, derivation. Transportation research Part B, Vol. 19 (1), 39-61, 1985.
- [8] Greenshields, B. D. , Shaspior, D. and Erickson, E. L. Traffic performances at urban intersections, Bureau of Highway Traffic, Technical Report No. 1, Yale University, New Haven, Conn, 1947.
- [9] Justin Geistefeldt. Estimation of passenger car equivalents based on capacity variability. Transportation Research Record 2130, 1-6, 2010.
- [10] Chang-qiao Shao and Xiao-ming Liu. Estimation of saturation flow rates at signalized intersections. Discrete Dynamics in Nature and Society, Volume 2012, 1-9, 2012.

## 第2章 信号交叉口交通运行特性分析

信号交叉口交通调查和交通运行特性分析是通行能力研究的基础。本章主要介绍了信号交叉口通行能力影响因素和数据调查内容以及信号交叉口交通流运行特性,包括车辆离开交叉口特性(服务过程)和车辆到达特性。

### 2.1 信号交叉口交通数据调查

#### 2.1.1 调查内容

交通数据调查和分析是通行能力研究的基础,道路通行能力的研究离不开交通调查。通过数据调查和分析,建立通行能力分析模型是通行能力研究的常用手段。影响信号交叉口通行能力的因素较多,概括起来分为道路几何条件、交通条件、信号控制条件和环境条件。上述条件影响了交通运行,使得不同条件的设施具有不同的通行能力和服务水平。例如,道路几何条件影响交通流中车辆的运行速度和跟驰特性(车头时距或间距),最终影响了通行能力和运行效率;车道功能划分决定了不同流向的车流使用不同的车道,减少了不同流向交通相互影响。交通条件对交通运行影响也是不可忽视的,如交通流中大型车和转向(或掉头)对其他车辆的影响,每个进口的每一流向的交通量和交通组成将直接决定交叉口的信号控制条件;信号交叉口每个进口中大型车数量则分别会对左、右转车流产生影响,从而影响了饱和和流率。信号周期长度、信号配时方案和道路条件的协调影响了各流向交通流的通行时间和交通时空特性,决定了交叉口交通运行的效率。

因此,对信号交叉口的通行能力的研究必须考虑上述因素,并进行相关数据调查。表2-1给出了信号交叉口通行能力研究数据调查内容。

表2-1的内容是针对整个信号交叉口通行能力研究和分析给出的。在实际工

作中,由于直行交通流和转向交通流运行特性和影响因素不同,也可分别按流向(车道组)展开调查。

调查内容

表 2-1

影响因素	调查内容	备注
几何参数	交叉口类型 车道数 车道宽度 车道功能 进口坡度 转弯半径(角度) 转向等候区 拓宽车道长度	
交通参数	交通组成 交通量 转向比例 掉头比例 车头时距 运行速度	考虑行人和自行车干扰时,需要 相关交通量数据和交通冲突数据; 车头时距包括各个流向数据、不 同车辆类型车头时距; 车速调查用于车辆延误分析
交通控制	信号周期 绿灯时间 红灯时间 黄灯时间 有无掉头	
环境参数	区域、天气、路侧干扰	

直行交通数据调查主要包括:

(1)几何参数:车道数、车道宽度、进口车道坡度等。

(2)交通参数:车辆类型、车型比例、交通量、车头时距、车辆速度、车辆加减速速度、行人和自行车冲突。

(3)控制参数:信号周期、绿灯时间、黄灯时间、红灯时间。

(4)环境参数:交叉口周边环境。

转向交通数据调查主要包括:

(1)几何参数:车道数、车道宽度、拓宽车道长度、进口车道坡度、转弯半径。

(2)交通参数:车辆类型、车型比例、交通量、转向比例、掉头车辆比例、饱和车头时距、起动时间、车辆速度、加减速速度、行人和自行车冲突。



(3) 控制参数:信号周期、绿灯时间、黄灯时间、红灯时间。

(4) 环境参数:交叉口周边环境。

有共用车道的交通调查,则还应包括共用车道上各种类型车辆比例、转向比例等内容。

### 2.1.2 调查方法

信号交叉口通行能力交通数据调查采用人工调查和自动调查相结合的方法。根据研究目的,选择合适的调查地点和调查时间<sup>[1]</sup>,通过现场摄像和人工记录的方式进行调查。

(1) 录像:在利于拍摄的信号交叉口入口引道处架设摄像机,用于记录信号交叉口入口引道道路条件、交通量、交通组成。

(2) 雷达测速:采用雷达测速仪记录车辆通过信号交叉口的车速。

(3) 秒表:用于记录车辆通过信号交叉口的时间。

(4) 卷尺:用于测量交叉口车道的车道宽度。

(5) 坡度尺:测量交叉口进口坡度。

(6) 照相机:拍摄信号交叉口入口引道条件、交通条件和仪器布设等各方面的现场照片。

对于不宜架设摄像机的交叉口,则采用人工现场采集的方法。通过秒表和手工计数器进行交通量和车头时距数据采集。

### 2.1.3 数据处理

参照《交通工程手册》<sup>[2]</sup>和《城市道路设计规范》(CJJ 37—2012)<sup>[3]</sup>车辆类型划分标准,将车辆分为小型车、中型车和大型车三类,通过计算机程序,将通过视频摄像方法采集到的每一车辆通过停车线的时间逐一记录下来,形成电子文件,分别计算绿灯放行期间内车辆的车头时距,并记录相应的车辆类型。与常用的研究方法不同,本研究车头时距的计算是以车辆后保险杠通过停车线作为基准,以充分考虑车身长度对通行能力的影响。

实际观测表明,信号交叉口排队车辆往往会出现由于极少数驾驶人精力不集中,或由于冲突交通影响,导致部分车头时距数据“异常”。为了保证计算研究结论的可靠性,应用“截尾法”对数据进行处理。

(1) 在计算起动损失时间与确定饱和车头时距时,对车头时距观测值采用“截尾”处理。将同一排队位置的车头时距观测值  $h_1, h_2, \dots, h_n$ , 按从小到大排序为  $h'_1, h'_2, \dots, h'_n$  ( $n$  为观测样本量), 去掉最大和最小的  $l/2$  个观测值,  $l = [n \cdot \alpha/2]$ ,  $\alpha$