

第一届中国·上海
---- 韩国·汉城
都市交通研讨会
1993.7

城市或区域道路网交通服务水平的划分标准

杨佩昆 朱旭东

第一届中国·上海
 ---- 韩国·汉城
 都市交通研讨会
 1993.7

城市或区域道路网交通服务水平的划分标准

杨佩昆* 朱旭东**

摘 要

本文提出了一种与交通服务状态相联系的城市道路交通服务水平的划分方法,归纳出了城市交通的五种服务状态,即自由流、交叉口无溢流、溢流稳定、溢流延误低于可接受极限及交通严重阻塞,还确认决定交通服务状态切换的因素是交叉口进口道的饱和度。在此基础上,根据有关数据给出了区分交通服务状态的饱和度阈值,从而建立了划分城市或区域道路网交通服务水平的标准。

1、引言

整个城市或城市某一地区的道路网络对交通需求的适应程度如何,缺乏一种简单明了的类似于服务水平的评价方法。

服务水平是美国HCM提出的对道路设施的交通服务优劣的一种评价方法。1985HCM根据个别道路设施服务于交通的不同特点,用最能描述其交通运行质量的运行参数来确定服务水平。对连续交通的道路设施,如高速公路、多车道公路等采用车道上的交通密度作为划分服务水平的交通参数;而对于间断交通的道路设施,如城市干道,交叉口等,则分别采用平均行程时间与车均停车延误作为确定服务水平的交通参数。这种方法,对于划分个别道路交通设施的服务水平确有其特点。但难于据以鉴别整条道路包括道路路段及交叉口的综合服务水平;另外,用不同参数划分同一条道路上路段与交叉口的服务水平,还会出现路段服务水平与交叉口服务水平不一致不协调的情况。当然,这种方法更难于用来描述某一地区、甚至整个城市道路网的交通服务水平。

本文旨在建立一种可用来评价大范围内道路系统的综合服务水平,籍以恒量一个城市道路系统适应交通需求的程度;在城市交通规划时,可用来简明地评价道路网规划对预测交通的适应程度;在特定的道路网络中,还可通过对比应该达到的服务水平与实测服务水平来评价交通管理的水平。

* 同济大学道路与交通工程系 教授

** 同济大学道路与交通工程系 博士研究生

在一条道路上，交通服务状态随路上交通量增长而变差，在道路网络中当然不例外。用来描述道路与交通供求关系的最简明的相对性参数是饱和度。饱和度是交通量与通行能力之比。通行能力是一个十分复杂的交通指标，在具有交通信号控制的道路上，它不仅决定于道路的空间条件，还决定于交通信号控制的时间条件；它同其它交通指标如延误、停车率等没有一一的对应关系。因此用饱和度作为服务水平的评价指标，具有不能完全概括其它交通运行质量的缺点。但作为一种划分服务水平的评价指标，我们可以指定某种信号控制条件下的服务水平，譬如单点优化信号配时条件下的服务水平，或信号协调控制条件下的服务水平等等，”这样，不但可以根据需要评价的对象，确定评价服务水平的宏观程度，而且可以对比同一道路网在各种不同条件下的服务水平，也便于用来对比交通管理的水平。

同时，在交通运行质量同饱和度之间建立一定的关系是方便可行的，即便于用饱和度来定量描述特定道路上的交通运行质量，这样就可使交通运行质量有了定量描述的方法。当交通量很小时，交通可呈自由流状态，相应的可用饱和度来描述；交通量超过一定程度时，自由流状态消失，但交叉口还不会产生溢流——即另一种服务状态；当交通量继续增加到某一程度时，有溢流出现但还可保持稳定；随着交通量进一步增加，递次出现溢流失稳、阻塞、严重阻塞等服务状态。交通量是交通问题的根源，交叉口是城市交通系统的关键，因此，我们用交叉口进口道上的饱和度作为划分服务水平的参数。

2、界定自由流的条件

2.1、定义

从严格的意义上来说，城市道路上并不存在自由流。因为交叉口处的冲突点对车辆运行的干扰和阻碍作用是固有的，而且无法避免。所以我们对自由流的定义适当放宽使之符合城市道路的特点。

城市道路自由流是指在统计平均的意义上，通过交叉口的相冲突的车流，能够直接利用对方车流中出现的可利用间隙通过，而无须停车等候的行驶状态。

2.2、模型及其标定

车流通过交叉口的过程如图1.1所示。

q 是横向道路上的流量，以辆/秒计； q' 是纵向道路上的流量。两者存在以下关系：

$$q' = r q \quad (2.1)$$

这里 r 是纵横道路上的流量比，假定横向为主流量方向，有 $r < 1$ 。

由于自由流只可能出现在行人及车辆稀少的地方，所以在研究时不记入非机动车及行人的影响；为了使问题适当简化，把同一道路上不同方向的流量一并考虑，并假定车辆到达服从Poisson分布。

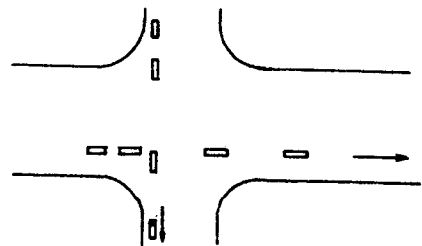


图1.1 通过交叉口示意图

根据交通流的有关理论, 不难推出横向道路上出现可利用间隙的平均间隔为:

$$E(h) = (1/q)(\text{EXP}(qh) - qh - 1) \quad (2.2)$$

式中: $E(h)$ ——出现可利用间隙的平均间隔

h ——可利用间隙, $h=8$ 秒

又有Poisson分布的假设可知, 纵向道路上车辆到达的平均间隔为:

$$E(t) = 1/q' = 1/(rq) \quad (2.3)$$

从图2.2所示的车辆穿越可利用间隙的时间关系可以看出, 纵向车流能直接利用可利用间隙通过的条件是:

$$E(t) > E(h) + h \quad (2.4)$$

把式(2.1)~(2.3)代入(2.4)并作整理, 可得:

$$q < (1/h) \ln(r+1)/r \quad (2.5)$$

式(2.5)即为界定自由流的流量条件。

纵横道路上的流量比应根据交叉口进口道的性质取不同的值。依交叉口进口道上的流量强弱组合, 交叉口可分为三种: 强—强相交、强—弱相交及弱—弱相交。为了叙述上的方便, 把强—弱相交称为第I类交叉口, 把强—强相交称为第II类交叉口。

城市道路交叉口纵横进口道上的流量比的变化范围一般为: 第I类交叉口 r_I [0.15, 0.35], 第II类交叉口 r_{II} [0.75, 0.85], 取区间平均值 $r_I = 0.25$, $r_{II} = 0.80$ 。

把参数代入式(2.5), 得:

$$q_I < 0.2 \text{ 及 } q_{II} < 0.1 \text{ 辆/秒}$$

再把上述结果用单向进口道上的饱和度来表达。考虑方向不均匀系数0.55/0.45, 取通行能力为0.4辆/秒, 则所得界定自由流的饱和度条件:

$$(V/C)_I < 0.25$$

$$(V/C)_{II} < 0.10$$

(2.6)

该条件可作为交通服务水平分级的阈值之一。同时, 该条件亦可视为城市道路交叉口设置信号灯的依据。

3、交叉口无溢流的条件

3.1 定义及模型

严格地说, 只有绿灯期无穷长时才能绝对地无溢流, 有必要将无溢流的定义适度放宽。本文定义无溢流是指在一个信号周期内, 到达交叉口的车辆数不超过平均到达数时, 交叉口不出现溢流。

放宽。本文所说的无溢流是指在一个信号周期内到达交叉口的车辆数不超过平均到达数时, 交叉口不出现溢流。

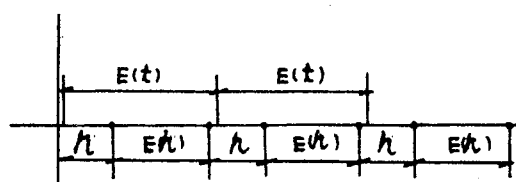


图2.2 车辆穿越可利用间隙的时间关系示意图

假定车辆的到达服从Poisson分布, 并设进口道的饱和流率为 S , 信号周期长度为 C_s , 绿信比为 λ , 则进口道的通行能力:

$$C = \lambda S \quad (3.1)$$

在一个信号周期内平均到达的车辆数为:

$$N_c = (V/3600) \cdot C_s \quad (3.2)$$

式中: N_c ——信号周期内到达车辆数期望值

V ——进口道上的流量 辆/小时

在一个信号周期内进口道上所能通过的最大车辆数为:

$$N_m = S \cdot (\lambda C_s - L) \quad (3.3)$$

式中: N_m ——可通过的最大车辆数

L ——绿损, 考虑行人、自行车及左转车干扰的损失时间

交叉口无溢流的条件为:

$$N_c < N_m \quad (3.4)$$

将式(3.1)~(3.3)代入(3.4), 可得

$$V/C < 1 - (L/(\lambda C_s)) \quad (3.5)$$

式(3.5)即为交叉口无溢流的饱和度条件。

3.2、式(3.5)中诸参数的研究

3.3.1、绿信比 λ 及信号周期 C_s

城市道路信号配时在高峰与平峰时有区别, 干道与非干道有区别。在制订交通服务水平划分标准时要超越时间与空间的限制, 取一个等效绿信比和一个等效信号周期长度来表达车辆所受到的交叉口固有因素的阻抗。取值如下:

$$\lambda^* = 0.5/0.4 \text{ (主干道/次干道)}, \quad C_s^* = 140^s/70^s \text{ (高峰/平峰)}.$$

3.2.2、绿损 L

绿损是考虑行人、自行车及左转车等因素引起的绿灯损失时间。用绿损来表达上述各因素的阻抗作用使研究工作变得可行。总的绿损是上述各因素引起的绿损之和即:

$$L = L_E + L_B + L_D \quad (3.6)$$

式中 L_E ——行人及自行车干扰的绿损

L_B ——本向左转车引起的绿损

L_D ——对向左转车引起的绿损, 在对向无专用左转车道的情况下, 一般是本向直行车先通过冲突点, 故可取 $L_D = 0$

一般情况下, 行人的干扰被自行车的干扰所包含。据观测, 红灯期到达交叉口的左转自行车数量 K 与 L_E 有以下关系:

$$L_E = 0.819 \times K + 0.25 \quad (3.7)$$

自行车流量在时间与空间上的分布是不均匀的, 所以需要在空间与时间加权平均的

基础上确定一个等效左转自行车流量，来代表它对机动车行驶的平均阻抗。根据统计资料测算，左转自行车的等效流量在500~700辆/小时之间，故可以 $q_E=0.176$ 辆/秒。将其代入式(3.7)，得：

$$L_E=0.144(1-\lambda)Cs+0.25 \quad (3.8)$$

L_B 的取值分析如下。本向左转车的通行要等待对向直行车流出现可穿越空档，当左转车等待空档时，将阻碍随后的车辆，这种干扰作用可用等效绿损来表达。

对向直行车流出现可穿越空档的平均间隔可参照式(2.2)：

$$E(t)=(1/q_D)(\text{EXP}(q_D h)-q_D h-1)$$

式中： q_D ——对向流率
 h ——可利用空档， $h=8$ 秒

可用等效面积法来分析本向左转车所引起的绿灯损失时间。假定左转车的影响不超过整个绿灯期(否则便应该设置左转专用车道)，则左转车对本向车流的影响可用图3.1表示。

图3.1中， LL 为左转车的通行时间，有：

$$LL=E(t) \cdot R \cdot q \cdot Cs$$

式中：

R ——进口车辆的左转车比例，
 可取 $R=0.08$ 。

q ——进口流率，有 $q/q_D=0.55/0.45$

图3.1中， LL 与 L_B 的关系为：

$$\because S \cdot (LL-L_B)=(S/2) \cdot LL$$

$$\therefore L_B=(1/2)LL=(1/2)E(t) \cdot R \cdot q \cdot Cs$$

将有关参数代入，可得

$$L_B=(Cs/20.5)(\text{EXP}(0.82qh)-0.82qh-1) \quad (3.9)$$

3.3、综合标定

交叉口的交通问题是非常复杂的，影响它的因素非常之多，而且这些因素因时因地而异。所以我们在进行综合标定时较多地应用等效阻抗的概念，以使研究结果兼顾严密性与普适性。

将式(3.7)~(3.9)代入式(2.6)，并同时除以 λCs ，得：

$$\frac{L}{\lambda Cs} = \frac{0.25}{\lambda Cs} + 0.144 \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right) + \frac{1}{\lambda \cdot 20.5} (\text{EXP}(0.82qh) - 0.82qh - 1)$$

上式中， λCs 系绿灯时间，变化范围是40~65S，综合称定时右端取平均值，即52

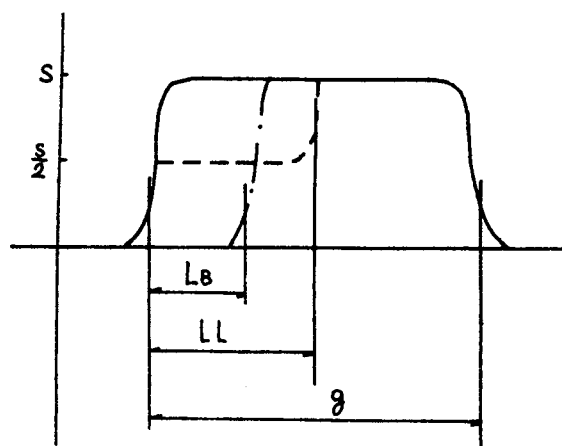


图3.1 本向左转车对车流的影响

秒。所以有：

$$\frac{L}{\lambda C_s} = 0.123 + \frac{1}{11.27} (\text{EXP}(0.82qh) - 0.82qh - 1) \quad (3.10)$$

式(3.10)中, $f(q) = \text{EXP}(0.82qh) - 0.82qh - 1$ 实际上是本项左转车的阻抗函数。仍用等效概念来确定一个等效流量来标定 $f(q)$ 的值。这个流量应是路网上的时间及空间均衡流量, 它代表出行车辆受到左转车的平均阻抗。根据调查资料测算, 可取该流量为 $q^* = 0.22$ 辆/秒。

将其代入式(3.10), 可得

$$L/(\lambda C_s) \approx 0.30 \quad (3.11)$$

3.4、交叉口无溢流的饱和度条件

把式(3.11)代入式(3.5)立即可得：

$$(V/C) < 0.70 \quad (3.12)$$

这就是交叉口无溢流的饱和度条件。它说明, 在进口道的饱和度不超过0.70进, 那么在我们所定义的意义下, 可以认为交叉口将不会出现溢流。

交叉口无溢流是一种良好的服务状态。当饱和度超过0.7以后, 交通服务状态就会发生质的变化。由于式(3.12)可以区分这两种服务状态, 所以把它作为交通服务水平分级的阈值之二。

4、界定溢流稳定的条件

如果进口道上的饱和度超过0.7, 则开始出现溢流, 交通系统进入了另一种服务状态。在高峰时段中, 若存在部分周期内的饱和度超过溢流临界值, 则必有部分周期的饱和度低于溢流临界值, 以消散溢流。如果在整个高峰时段中饱和度均超过溢流临界值, 那么每个周期均有新的溢流产生, 则溢流排队长度将失去稳定性, 导致交通瘫痪。

下面我们将基于车流的到达特性来分析部分信号周期内饱和度超过溢流临界时的交通服务状态, 并确定溢流稳定的条件。

4.1、车流到达特性

在城市道路上, 由于上游交叉口对车流的拦蓄作用, 使车流以车队的形式到达下游交叉口。饱和度越高, 车流到达的规律性愈强, 随机性愈弱, 从而使得交叉口的车流到达呈明显的脉动性, 这就是高峰时段车流到达的一般规律。鉴于脉动的这种性质, 可以正弦曲线的正半周来模拟车流的到达特性:

$$V = Q_{\min} + (Q_{\max} - Q_{\min}) \times \text{Sin}(t \times \pi / t_p) \quad (4.1)$$

图4.2是上海市某交叉口的车流到达时序图(自15:30~17:00)。该图体现了车流到达的一般规律, 从图上可以辩认出很强的脉动性。

图4.2中的有关数据统计如下：
 波峰均值： $Q_{max}=1330\text{Pcu/h}$
 波谷均值： $Q_{min}=890\text{Pcu/h}$
 波幅均值： $\Delta Q=440\text{Pcu/h}$
 波动周期均值： $t_p=3.5$ 计时单位
 =7信号周期。

流量均值： $V_m=1120\text{Pcu/h}$

用式(4.1)算出的平均流量为：

$$V'_m=1170\text{Pcu/h}$$

该值于实测流量值误差为4.5%，

因此可以认为模型(4.1)是有效的。

将式(4.1)表达为饱和度形式：

$$X=X_{min}+\Delta x \sin(t \times \pi / 7) \quad (4.2)$$

式中： X ——到达车流的实时饱和度

X_{min} ——高峰饱和度的低限， $X_{min}=0$ 。

ΔX ——变化幅度

4.2、溢流稳定的条件

溢流稳定的条件是：式(4.2)中 ΔX 的变化必限于这样一个范围内，使得 X 的最大值

$$X_{max} < 1 \quad \text{即} \quad \Delta X < 0.45$$

既然 $X_{max}=1$ (即 $\Delta X=0.45$)是可通行的极限状态，那么对式(4.2)在时间上求平均：

$$X^*=X_{min}+\Delta X \cdot (2/\pi)$$

$$=0.55+0.45 \times (2/\pi) \approx 0.85$$

因此保持溢流稳定的条件是高峰时段的平均饱和度不超过0.85。该值也是划分交通服务水平等级的第三个阈值。

5、关于交通服务水平分级的进一步研究

如果交叉口进口道上的饱和度超过0.85，交通服务水平将随着饱和度的进一步增加而急剧恶化。由于饱和度超过0.85的路段在城市道路中大时存在，为了能进一步明确城市道路交通问题的结症所在，就由必要对这种较为恶化的交通服务状态作进一步划分。

5.1、交通服务水平恶化的可接受极限

交通服务水平恶化的可接受极限属社会范畴，它与公众的承受能力、时间价值观及行为习性等因素有关。本文所定义的交通服务水平恶化的可接受极限是指：到达溢流车队尾部的车辆可以在三次信号周期以内通过交叉口。

交叉口超饱和时的交通服务状态与车流到达特性密切相关。据观测，车流到达超饱和的平均累积长度约合4个信号周期长度。所以关于交通恶化可接受极限的定义可以表

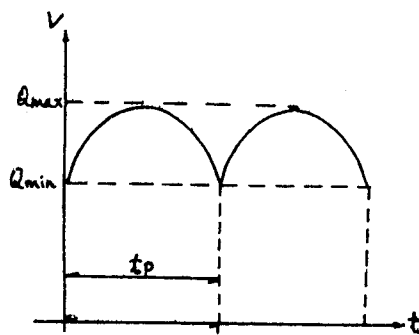


图4.1 到达特性模型示意图

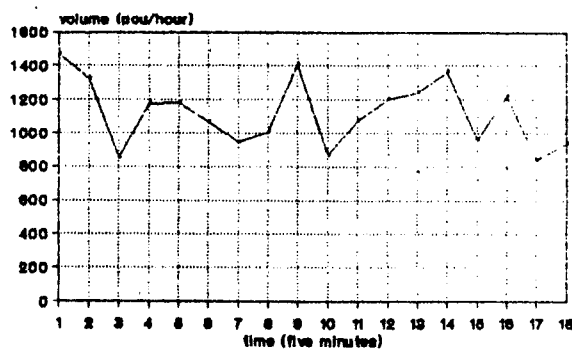


图4.2 高峰小时段车流到达时序图

达为：在累积三个(即4-1)信号周期溢流的情况下，到达车队的最后一辆车能在3个周期内通过。见图5.1:

图中， $E(Q)$ 为信号周期内溢流长度期望值， $E(P)$ 为无溢流通过能力， $E(L)$ 为车队到达期望长度， $E(C)$ 为溢流累积期望长度。

每个信号同期的溢流期望长度用Miller模型来估计：

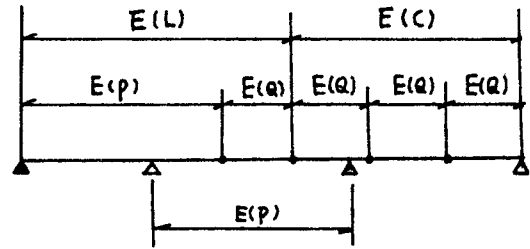


图5.1 模型示意图

$$E(Q) = \frac{EXP(-1.33(\lambda CsS)^{1/2} \cdot (1-x)/x)}{\lambda Sx(1-x)} \quad (5.1)$$

从图5.1可以看出，交通服务状态处于可接受极限以内必须有下式成立：

$$4 \times E(Q) + E(P) < 3 \times E(P)$$

$$\text{即 } 2E(Q) < E(P) \quad (5.2)$$

将(5.1)代入(5.2)，并代入有关参数，可得：

$$X < 0.95 \quad (5.3)$$

由以上分析可以得出结论， $X=0.95$ 可以区分这样两种服务状态：当 $X < 0.95$ 时，交通服务状态在可接受极限范围内；而当 $X > 0.95$ 时，车辆在三个信号周期内还不能通过交叉口，从用户的角度看，这实际上意味着交通严重阻塞。所以我们把0.95作为划分交通服务水平等级的第四个阈值。

5.2、交通严重阻塞

饱和度超过0.95以后，将会出现交通严重阻塞，交通服务水平恶化到了难以接受的程度。在这种服务状态下，社会公众的财富与时间均遭受巨大损失。这种服务状态下的路段与交叉口，应该列入现代化改造计划的第一优先序列。

6、结论与应用

综合2、3、4、5节的研究结果，得出以下的交通服务水平等级的划分标准：

| 服务水平等级 | 饱和度(变量) | 所对应的服务状态 |
|--------|---------------|-------------|
| I | $< 0.25/0.10$ | 自由流 |
| II | $\sim < 0.70$ | 交叉口无溢流 |
| III | $\sim < 0.85$ | 溢流稳定 |
| IV | $\sim < 0.95$ | 溢流延迟低于可接受极限 |
| V | > 0.95 | 交通严重阻塞 |

至此，基于个别道路交通服务设施(融合路段与交叉口)的交通服务水平划分标准已经确立。在对路网进行整体评价或对整条路线进行评价时，首先应计算整体饱和度：

$$x = \sum_{i=1}^n (L_i/L) \cdot x_i$$

式中：x——整体饱和度
 n——被评价的路段总数
 L_i ——第i路段的车道里程
 L——评价的总车道里程
 x_i ——第i路段的交通饱和度

路段的交通饱和度要按式(3.1)所规定的通行能力计算。交通饱和度的这种定义方式，使其与通常意义上的路段饱和度的概念有所不同。在算出整体饱和度以后，即可根据上表确定总体交通服务水平。

参 考 文 献

- [1]、鳩洛夫：《交通流理论》 人民交通出版社，1979年
- [2]、TRB: Highway Capacity Manual, 1985年
- [3]、同济大学：上海市交通调查与分析， 内部资料