

城市道路交通流特性分析——以株洲市为例

周南金 朱敏 卿焱景

【摘要】首先对株洲市现状道路网发展进行介绍，以城市道路的交通流实测数据为依据，绘制快速路速度-密度散点图，建立城市干道交通流模型，分析了株洲市城市道路交通流特性，最后得到城市道路的推荐通行能力。结果表明，城市道路交通流特性分析能为交通管理者提供相关决策依据。

【关键词】城市道路；交通流；特性；模型

目前，城市道路交通拥堵、交通效率低下、交通事故频发等问题日益严峻。仅从道路基础设施建设来解决交通问题效果将不明显，对交通系统进行合理的规划和科学化的管理才是解决交通问题的有效途径，因此，本文以株洲市为例，对城市道路的交通流特性进行系统分析，为交通管理者提供决策依据。

1、株洲市城市道路发展概况

1.1 道路网络格局

株洲市位于湖南省东部，长株潭城市群的东南部。株洲市受到地形条件、“板块式”用地布局、城市建设发展时序等因素影响，道路网呈现河东、河西明显的差异性，河东整体表现为“干枝状”路网、河西初步构建成“方格网”道路格局。

① 城市整体主、次、支道路级配为1:0.5:1.7的“纺锤形”结构，与“金字塔”形结构相比，存在级配失衡的缺陷；

② 河东核心区主次干路网较为完善，但支路网密度尚需提高；河西核心区内主干路网密度达到较高水平，但次干路网密度较低；

③ 河东沿江地区基本完善，但外围地区以新华路、建设北路、铜霞路等骨干道路为依托，呈现“枝状”形态，且骨干道路上道路错位现象较为普遍。

④ 初步形成“环形+放射”的快速道路网框架，但快速路开放性和系统性尚需强化。

表1 现状河东、河西核心区道路系统密度

现状总体道路网密度 (KM/KM ²)		河西核心区道路网密度 (KM/KM ²)		河东核心区道路网密度 (KM/KM ²)		国标 (KM/KM ²)	
快速路	0.28					快速路	0.3-0.4
主干路	1.02	主干路	3.53	主干路	2.35	主干路	0.8-1.2
次干路	0.51	次干路	0.88	次干路	3.29	次干路	1.2-1.4
支路	1.73	支路	4.66	支路	2.01	支路	3-4

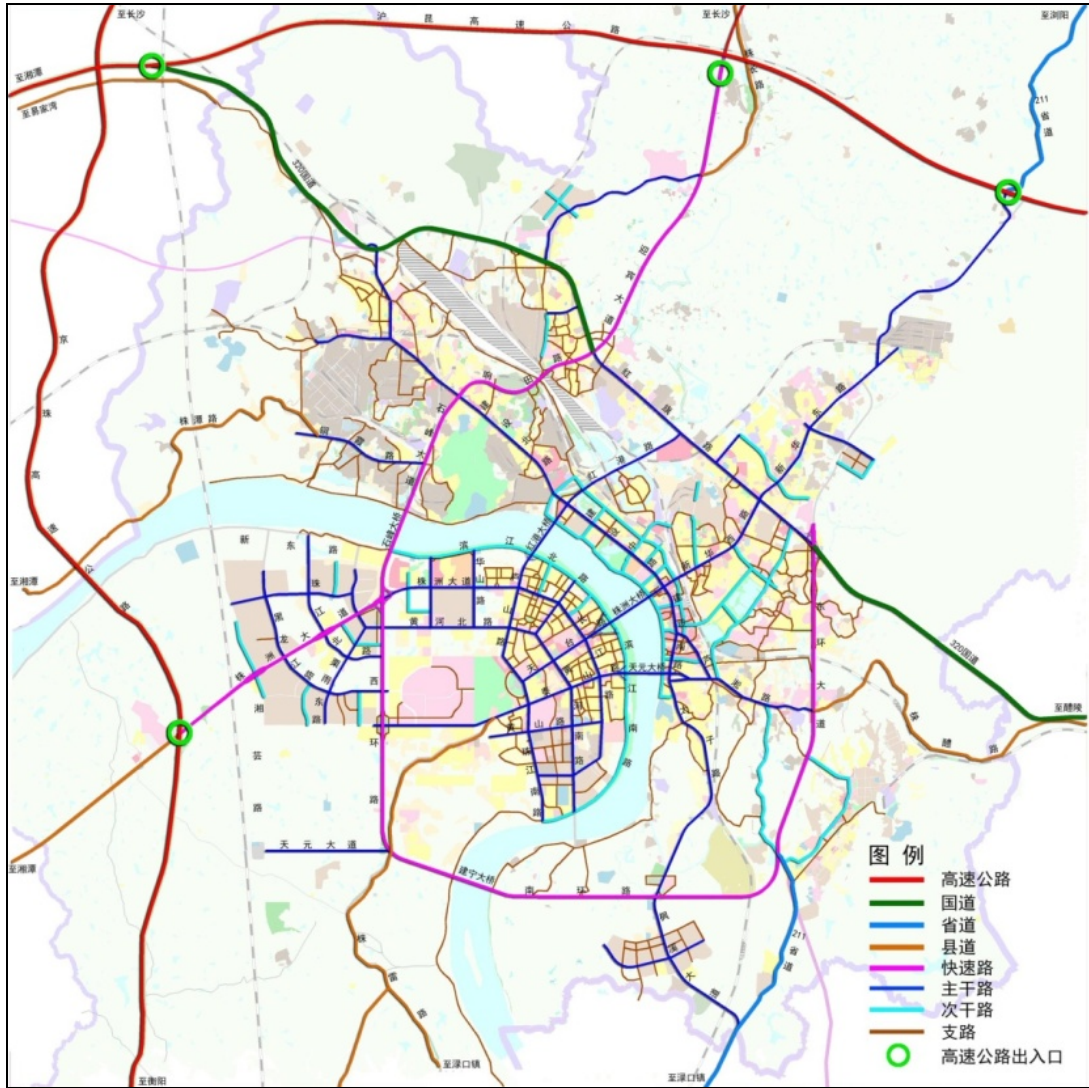


图1 株洲市中心城区现状道路系统图

1.2 道路设施

1.2.1 城市桥隧分布

现状株洲中心城区跨湘江桥梁有5座，分别是株洲大桥、石峰大桥、建宁大桥、天元大桥和芦淞大桥。

表2 现状桥梁一览表

编号	桥梁名称	桥长(m)	桥面净宽(m)
1	株洲大桥	1192	24
2	石峰大桥	1884	28
3	建宁大桥	1721	30
4	天元大桥	1265	28
5	芦淞大桥	1822	28

现状中心城区内跨京广铁路和沪昆铁路主线的主要通道有10处，包括清石支路、响田路、红港路、公园路、新华路、合泰路、龙泉路、芦淞路、南环路、太子路。

表 3 主城区跨铁路通道一览表

编号	名称	车道数	建设形式
1	清石支路	2 车道	上跨
2	响田路	4 车道	上跨
3	红港路	6 车道	下穿
4	公园路	4 车道	上跨
5	新华路	6 车道	上跨
6	合泰涵洞	4 车道	下穿
7	龙泉路涵洞	4 车道	下穿
8	芦淞路涵洞	4 车道	下穿
9	南环路	6 车道	上跨
10	太子路	6 车道	上跨

1.2.2 道路红线及断面

株洲城区内主、次干路以一块板为主，主干路建设水平较为超前，但次干路建设等级普遍不高。河东地区由“九纵九横”组成干道系统，纵向九条主干道为建设路、枫溪路、铁东路、红旗路、向阳路、铜霞路、株渌路、金山路、新田路；横向九条主干道为株醴路、芦淞路、新华路、新塘路、红港路、清霞路、江渌路、磨子冲路、航空大道；河西城区由长江路、黄河路、珠江路、泰山路、庐山路、天元大道、昆仑山路、栗雨路、新东路等十七条主干道组成“环形+放射”布局。

表 4 现状主要道路红线及断面

编号	道路名称	道路性质	红线宽度（米）	断面形式
1	建设路	主干路	34	一块板
2	新华西路	主干路	36	一块板
3	红旗中路	主干路	34	一块板
4	枫溪大道	主干路	30	一块板
5	长江北路	主干路	60	一块板
6	天台路	主干路	60	三块板
7	炎帝大道	主干路	60	四块板
8	黄河北路	主干路	48	三块板
9	合泰路	次干路	26	一块板
10	石宋路	次干路	20	一块板
11	人民路	次干路	20	一块板
12	公园路	次干路	20	一块板
13	青石路	次干路	25	一块板
14	滨江路	次干路	24	一块板

1.2.3 快速路

形成“一环七射”的路网结构，“一环”即城市快速环道，“七射”为株洲大道、时代大道、迎宾大道、东环北路、省道 S211 株渌段、国道 320 东线。

2、株洲市城市道路交通流特性分析

2.1 数据采集

2.1.1 路段

路段数据采集包括快速路和地面道路，影响路段通行的因素较多，大体上分为以下三个方面：道路设施几何数据、道路设施环境数据和道路运行交通流特性数据。本文基于这三点，

确定调查的采集内容，包括：

- (1) 道路设施几何数据。包括横断面构成（车道宽度、数量）、平纵线形、视距等。
- (2) 道路设施环境数据。包括道路设计等级、交通管理与控制措施等。
- (3) 道路交通流运行特性数据。宏观的交通流数据包括流量、车速、密度、车头时距、交通组成、饱和度、车队延误、排队长度等。

2.1.2 交叉口

影响信号交叉口通行能力的因素较多，大致包括道路几何条件、交通条件和信号控制条件三类。本文正是从这三大类影响因素出发，确定了数据采集的内容，包括：

- (1) 几何条件现场调查因素：交叉口类型、车道功能、车道数、车道宽度、进口车道坡度、转向车道转弯半径；
- (2) 交通条件现场调查因素：车型比例、交通量、转向比例、饱和车头时距；
- (3) 信号控制条件现场调查因素：信号周期、信号相位绿灯时间、黄灯时间、红灯时间。

本次研究选取了 8 个断面，12 个交叉口进行流量调查，同时选取 10 个断面和 7 个交叉口做其他交通流特性调查。

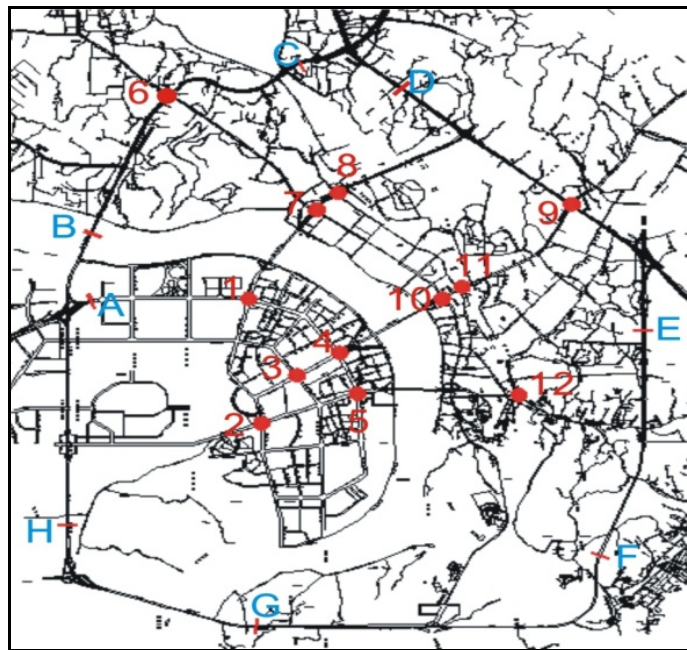


图 2 现状调查点分布示意图

2.2 数据处理与分析

2.2.1 快速路

2.2.1.1 流量

株洲市城市快速路现仅有二环线一条，环线断面形式以双向 6 车道为主，在桥梁段车道缩减，环线北段未接通，改为红旗南路承担北环的功能，从实测流量数据来看，环线整体流量不大，其中东环线和南环线流量较小，高峰小时双向 6 车道流量在 1500pcu/h 左右，基

本处于自由流状态，车速较快，密度较小；在西环线石峰大桥断面至田心立交，流量适中，高峰小时双向 6 车道流量在 2800pcu/h 左右，速度较东环、南环有所下降。

表 5 快速路高峰小时分车道流量统计表

断面位置	车道 1 (pcu/h)	车道 2 (pcu/h)	车道 3 (pcu/h)
西环线石峰大桥断面 (北—南)	455	521	262
西环线石峰大桥断面 (南—北)	460	697	403
西环线石峰区政府断面 (北—南)	351	668	329
西环线石峰区政府断面 (南—北)	226	360	151
东环线 E 断面 (北—南)	236	316	157
东环线 E 断面 (南—北)	250	429	254
东环线 F 断面 (北—南)	177	285	112
东环线 F 断面 (南—北)	145	309	124
南环线 G 断面 (东—西)	155	242	142
南环线 G 断面 (西—东)	121	306	121

注：车道编号原则，从中央分隔带开始编号，编号为 1，依次向外。

2.2.1.2 方向分布系数

一条道路往返两个方向的交通量，在很长时间内可能是平衡的，但在某一短时间内，两个方向的交通量会有较大的不同。这种方向不平衡常采用方向分布系数来表示。下表为株洲市 5 个快速路基本路段的方向分布系数进行分析得到的结果。

表 6 株洲市快速路方向分布系数

断面位置	正向	反向
西环线石峰大桥 B 断面	0.44	0.56
西环线石峰区政府 C 断面	0.65	0.35
东环线 E 断面	0.43	0.57
东环线 F 断面	0.50	0.50
南环线 G 断面	0.50	0.50

从表中数值可以看出，环线上各个路段上方向分布规律有所不同，但大部分路段的方向分布系数都在 0.5 上下浮动。B、C 断面由于受响石广场和田心立交影响，导致该路段方向分布系数差别较大，其余路段受地面道路影响较小，方向分布系数比较均匀。

2.2.1.3 车道分布特性

在同一道路断面，驾驶员所趋向行驶的车道是不同的，但在总体上中间车道的流量最大，表明中间车道行驶的车辆动力性能最好，速度较快，交通量最大；最内侧车道受中央分隔带和中间车道影响，且车辆组成的单一性不如第一车道强，速度较第一车道小，所以交通量较第一车道小；最外侧车道受车辆出入快速路和换车道的影响，受车辆交织影响较大，速度低，为慢车道^[1]。

2.2.1.4 交通组成

目前，绝大多数的交通流统计模型研究的都是单一客车流，而不是某种交通组成的混合交通流。而实际的交通流总是存在不同比例的非小客车，且其组成不断变化。在城市快速道路上，小客车流占主导，道路的交通组成比较单一，所以用小客车流理论来研究城市快速道路的交通流是合理的。据调查统计株洲市城市快速路车辆组成如表 7 所示：

表 7 株洲市快速路车辆组成

序号	车型	流量 (pcu)	百分率 (%)
1	非机动车	5136	35.77
2	小型车	7125	49.62
3	中型车	1214	8.45
4	大型车	884	6.16

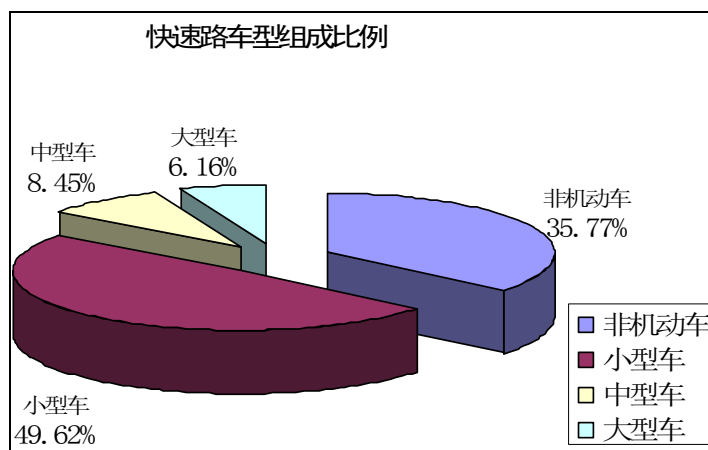


图 3 快速路基本路段车辆组成分析

由以上数据可以看出，株洲市快速路交通流组成以小汽车和非机动车为主，两者占了 85.39%，其中小汽车占 49.62%，小汽车仍占主导地位；非机动车占 35.77%，占了较大的比例，这与株洲市大力倡导非机动出行息息相关。

2.2.2 城市干道

城市干道是城市道路网的骨架，是连接城市各主要分区的交通干路，以交通功能为主，它与快速路共同分担城市的主要客、货车流，形成重要的交通走廊^[2]。

2.2.2.1 车速分布

经实测数据调查，得出高峰时段河西和河东主要道路的平均车速，从下表中的数据可以看出：河西大区路网的平均速度为 30.43km/h，较河东 25.38km/h 要高，反应了河西路网的通达性要高于河东。

2.2.2.2 交通分布

① 整体道路交通运行状况良好，高峰时段部分节点拥堵明显。跨江、跨铁路通道有限，主要干道交通分布集中根据中心城区关键断面机动车流量调查，跨江交通主要分布在株洲大桥和天元大桥上；跨铁路交通主要集中在新华路、合泰路和芦淞路上，株洲大桥、新华桥、芦淞铁桥涵洞高峰小时通行能力已接近饱和。

② 部分路段、交叉口及桥涵通行能力较低造成拥堵。沿江路、人民路、响石广场、响石路铁路桥、公园路铁路桥、合泰路涵洞通行能力较低，高峰拥堵明显。

③ 过境交通加剧道路拥堵。红旗路、新华东路、建设北路等进出城区干道交通、过境交通和城市交通混杂，加剧交通拥堵。

表 8 株洲市城区主要路段平均速度表

河西大区		河东大区	
路段名称	平均车速 (km/h)	路段名称	平均车速 (km/h)
珠江路 (庐山路-天台路)	31.66	人民路 (响田路-红港路)	33.33
珠江南路 (天台路-泰山路)	26.09	人民路 (红港路-新华路)	21.02
珠江南路 (泰山路-长江南路)	31.20	新华西路 (建设路-人民路)	15.12
长江北路 (庐山路-嵩山路)	32.31	新华路 (红旗路-人民路)	23.67
长江北路 (嵩山路-韶山路)	32.69	红港路 (建设路-人民路)	36.63
长江南路 (韶山路-天台路)	30.14	红港路 (人民路-红旗路)	26.32
长江南路 (天台路-泰山路)	33.32	芦淞路 (铁路桥东侧)	22.91
天台路 (珠江南路-黄河南路)	33.17	红旗路 (新华路-东环路)	24.07
天台路 (黄河南路-长江南路)	28.69	平均车速	25.38
天台路 (长江南路-滨江南路)	35.37		
黄河路 (南环路-昆仑山路)	28.16	过江大桥	
黄河路 (昆仑山路-庐山路)	28.94	路段名称	平均车速 (km/h)
泰山路 (黄河南路-珠江南路)	29.59	芦淞大桥	40.17
泰山路 (黄河南路-长江南路)	28.35	株洲大桥	47.05
泰山路 (长江南路-滨江南路)	26.71	天元大桥	52.80
平均车速	30.43	平均车速	46.67

2.2.2.3 交通组成

小客车成为道路机动车的主体，占道路机动车比例的 42.8%，其次是出租车，占 17.9%。摩托车在道路交通中的比重下降的趋势已经显现，仅占 12.3%。城市干道基本路段车辆组成表如下所示：

表 9 株洲市基本路段车辆组成

车辆类型序号	车型	流量 (pcu)	百分率 (%)
1	非机动车	2032	27.92
2	小型车	3799	52.21
3	中型车	1011	13.89
4	大型车	435	5.98

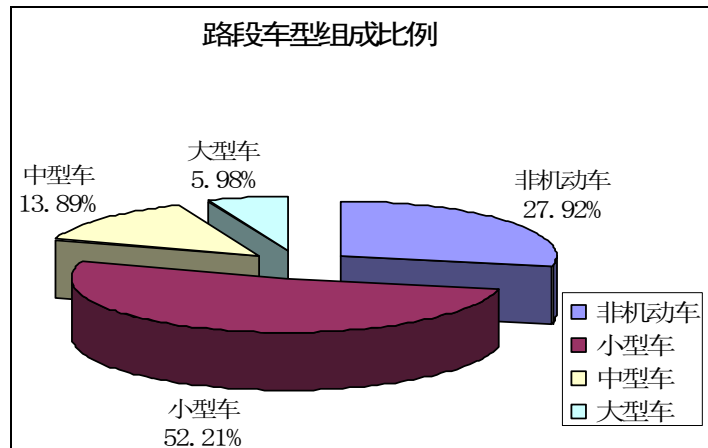


图 4 基本路段车辆组成分析

2.3 交通流模型建立

2.3.1 快速路交通流建模

2.3.1.1 速度—密度散点图

随着流量的增长，车辆行驶时受到相互制约，跟随在慢车后面的车辆增加，以致平均速

度降低密度增大，直到车辆近乎停止状态（最大密度）^[3]。下图为快速路不同断面的速度—密度散点图：

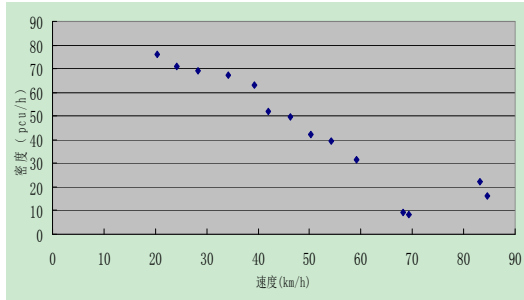


图 5 石峰大桥断面速度-密度散点图

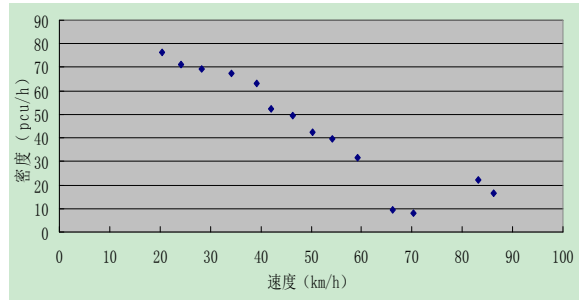


图 6 田心立交断面速度—密度散点图

由上图可知，速度—密度关系基本上都可分为三个阶段：

①当密度较低时，速度不同密度却基本相同，这是由于此时交通流接近自由流状态，驾驶自由度比较大。

②当密度处于中间状态时，此时交通流为均匀流，处于畅通状态，速度和密度呈明显的线性关系。

③当密度较高时，交通流处于拥挤状态，此时驾驶员走走停停，因此随着速度的变化，密度变化比畅通状态时更大。

下面以西环线石峰大桥断面和田心立交断面中间车道作为标准车道进行通行能力分析：

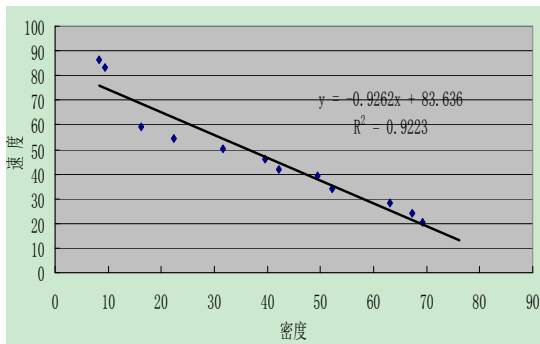


图 7 石峰大桥断面速度-密度回归分析模型

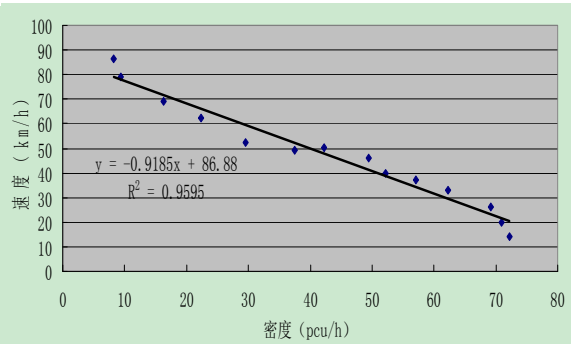


图 8 田心立交断面速度—密度回归分析模型

2.3.1.2 速度—密度关系

由上图可知，石峰大桥断面车道的速度—密度关系在密度范围内都呈明显的线性关系，对数据可用 Greenshields 线性回归模型来分析。由 $v = v_f(1 - k/k_j)$ 可得到 v_f 、 k_j ，则通行能力 $C = v_f \times k_j/4$ ，具体结果如下表所示：

表 10 速度、密度与通行能力计算表

断面 \ 属性	速度 v_f (km/h)	密度 k_j (pcu/km)	通行能力 C (pcu/h)
石峰大桥断面	84	90.3	1896.3
田心立交断面	86	92.5	1988.7

因此，可得到株洲市快速路单车道通行能力的理论取值在 1900pcu/h 左右。

2.3.2 城市干道交通流建模

2.3.2.1 建立模型方法

由跟车理论可知，反应=灵敏度×刺激^[4]。反应= $\ddot{\chi}_{i+1}(t + T)$ ，刺激= $\dot{\chi}_i(t) - \dot{\chi}_{i+1}(t)$

其中： $\ddot{\chi}_{i+1}(t + T)$ ——第 $i + 1$ 辆车载时刻 $t + T$ 的加速度； $\dot{\chi}_i(t)$ ， $\dot{\chi}_{i+1}(t)$ ——分别表示第 i 辆，第 $i + 1$ 辆车载时刻 t 的速度。

灵敏度是一个十分复杂的参数，研究城市道路上的情况，可以认为：灵敏度= $a/[\chi_i(t) - \chi_{i+1}(t)]^m$ (a, m 待定参数)，因此：

$$\ddot{\chi}_{i+1}(t + T) = \left\{ a/[\chi_i(t) - \chi_{i+1}(t)]^m \right\} (\dot{\chi}_i(t) - \dot{\chi}_{i+1}(t)) \quad (1)$$

其中： $\chi_i(t)$ ， $\chi_{i+1}(t)$ ——表示第 i 辆，第 $i + 1$ 辆车在时刻 t 的位置。

两边取积分：

$$\text{当 } m = 1 \text{ 时， } \dot{\chi}_i(t + T) = a \ln[\chi_{i-1}(t) - \chi_i(t)] + c_1 \quad (2)$$

$$\text{当 } m > 1 \text{ 时， } \dot{\chi}_i(t + T) = (1 - m)^{-1} a \ln[\chi_{i-1}(t) - \chi_i(t)]^{1-m} + c_2 \quad (3)$$

$$\text{考虑初试条件后，得到 } c_1 = -a \ln L_0, c_2 = -(1 - m)^{-1} a \ln L_0^{1-m} \quad (4)$$

其中： L_0 = 停车时的车头时距。

综合所得：

$$\text{当 } m = 1 \text{ 时， } \chi_{i-1}(t) - \chi_i(t) = L_0 \exp[\dot{\chi}_i(t + T)/a]; \quad (5)$$

$$\text{当 } m > 1 \text{ 时， } \chi_{i-1}(t) - \chi_i(t) = L_0^{1-m} + (1 - m)[\dot{\chi}_i(t + T)/a]^{1/(1-m)} \quad (6)$$

为方便起见，令车头间距 $h_0 = \chi_{i-1}(t) - \chi_i(t)$ ， $v = \dot{\chi}_i(t + T)$

因待定参数 a 、 m 同车型有关，因此，分别对不同的车型标定 a 、 m ：

以小型车为例，小型车的动态车头间距与车速（低车速）关系的模型标定如下：

令 $m = 1$ ，则 $a = 9$ ， $v = 9 \ln h_s / 7$ ，精度 $R=0.642$ ；

令 $m = 2$ ，则 $a = 84$ ， $v = 98(1/7 - 1/h_s)$ ，精度 $R=0.911$ ；

令 $m = 3$ ，则 $a = 730$ ， $v = 360(1/7^2 - 1/h_s^2)$ ，精度 $R=0.859$ ；

令 $m = 4$ ，则 $a = 570$ ， $v = 1920(1/7^3 - 1/h_s^3)$ ，精度 $R=0.727$ ；

为此，取上述精度最高者所对应的式子作为小型车车头间距—车速的关系模型：

$$v = 98(1/7 - 1/h_s) \quad (7)$$

即：

$$h_s = \frac{1}{\frac{1}{7} - \frac{v}{98}}, \quad v \leq 9m/s \quad (8)$$

由于 $h_s = vh_t$

亦即：

$$h_t = \frac{1}{v\left(\frac{1}{7} - \frac{v}{98}\right)} \quad (9)$$

2.3.2.2 道路通行能力计算

考察小汽车通行能力，按式 $v = 98(1/7 - 1/h_s)$ 计算。

因 $h_s = vh_t$ ，故 $v = 14 - \frac{98}{h_s v}$ ，可得 $h_t = \frac{98}{v(14-v)}$

于是城市道路路段小汽车理论通行能力：

$$C_{ap} = \max \frac{1}{h_t} = \max \frac{v(14-v)}{98} \quad (10)$$

按上式，随 v 变化的车头时距 h_t 及每车道的通行能力 C_{ap} 列于下表：

表 11 随车速而变的饱和车头时距和通行能力

$v(m/s)$	h_t (s)	C_{ap} (pcu/h)
9	2.18	1650
8	2.04	1760
7	2	1800
6	2.04	1760
5	2.18	1650

城市道路路段小汽车理论通行能力可取每车道 1800pcu/h。考虑实际情况下城市道路中不可能完全都是由小汽车组成，因此，建议单车道通行能力取 1500pcu/h 较为适宜。

2.3.2.3 路段服务水平

通行能力和服务水平从不同的角度反映了道路的性质和功能，通行能力主要反映道路的服务数量或服务能力，服务水平主要反映道路的服务质量或服务的满意程度。因此，研究道路的通行能力时，一方面要研究它的极限值，另一方面，也是更重要的是要研究在一定的运行质量要求（速度的高低，运行的自由程度、乘客的舒适性等）下的服务通行能力，即在一定客观条件和主观要求下的通行能力。

服务水平的划分标准很多，通常可划分为 4-6 级，由于目前株洲市交通量较大，服务等级划分过细并不利于在工程中应用，建议以饱和度 (v/c) 将服务水平划分为 4 级。

表 12 株洲市道路服务水平的划分

服务水平	饱和度	说明
A	<0.4	汽车在畅通条件下行驶，车辆间基本上不存在相互干扰
B	0.4-0.7	部分汽车成队行驶，但还是有部分汽车可以超车行驶
C	0.7-1.0	多数汽车成队行驶，且超车行驶很困难，可能会出现短暂交通阻塞
D	-	道路交通需求大于通行能力，可能出现长时间交通阻塞

3、结果分析

3.1 快速路推荐通行能力

结合不同因素对通行能力的影响，确定株洲市城市快速路推荐通行能力计算公式为：

$$C_D = C_p \times f_w \times f_{HV} \times \alpha \times \omega \times \gamma \quad (11)$$

其中： C_p 为相应于某种设计车速下的理论通行能力； f_w 为车道宽度修正系数； f_{HV} 为大型车修正系数； α 为车道位置修正系数； ω 为车道数修正系数； γ 为道路线形修正系数。

对于株洲市西环线典型的单向 3 车道的推荐通行能力可以由下式得出：

$$C_p = (1900 \times 0.95 + 1900 \times 1 + 1900 \times 0.88) \times 0.97 \times 0.92 = 4798 \text{pcu/h}$$

因此，株洲市快速路单条车道平均通行能力为 1599pcu/h。

3.2 城市干道推荐通行能力

结合不同因素对通行能力的影响，确定株洲市城市道路推荐通行能力 C_D 为：

$$C_D = C_{ap} \times \alpha \times \omega \times \gamma \times \mu \quad (12)$$

式中： C_{ap} ——相应于某种设计车速下的理论通行能力；

α ——路旁干扰修正系数；

ω ——路宽修正系数；

γ ——侧向净宽修正系数；

μ ——交叉口间距修正系数^[5]。

根据服务水平划分标准，可以得出在不同服务等级下各种道路的适应交通量。

例：长江北路（嵩山路—韶山路），道路断面形式为 3 块板，双向 6 车道，路幅宽度为 3.25 米，长江北路与天台路交叉口绿信比为 0.4，交叉口间距为 800m，其通行能力为：

$$C_D = 1500 \times 2.64 \times 0.875 \times 0.71 = 2542 \text{pcu/h}$$

其每条车道的平均通行能力为 847pcu/h。

表 13 株洲市分板块路段通行能力推荐值及适应交通量

板块数	车道数	单车道推荐通行能力	各服务等级下的适应交通量			
			A	B	C	D
1 板块	2 车道	590	960	1620	2400	-
	3 车道	770	1300	2200	3100	-
	4 车道	750	2000	3500	5010	-
2 板块	2 车道	600	1000	1700	2400	-
	3 车道	820	2000	3500	5000	-
	4 车道	780	2520	4400	6300	-
3 板块	2 车道	800	1280	2240	3200	-
	3 车道	880	2100	3700	5280	-

注：上表的交叉口绿信比取值为 0.4

4、结论

尽管我国道路交通基础设施建设的步伐不断加大，城市间和城市内部的道路网络已经初具规模，但在目前交通管理水平下，交通供需矛盾依然十分突出。因此，对交通系统城市道路交通流特性研究来提高道路通行能力是必要的，这也是解决我国交通问题的有效途径。

【参考文献】

- [1]徐吉谦.交通工程总论[M].北京,人民交通出版社,1996
- [2]中国公路学会.交通工程手册.人民交通出版社.1998.5
- [3]马国旗.城市道路交通流特性参数研究[D].北京工业大学硕士论文, 2004.5
- [4]陈永恒,葛兴,王殿海.城市干线典型路段速度—流量特性分析[J].吉林大学学报, 2006.7
- [5]李冬梅,李文权.道路通行能力计算方法[J].河南大学学报(自然科学版),2002.6

【作者简介】

周南金，男，硕士，株洲市规划信息中心，工程师。电子信箱：185674107@qq.com
 朱敏，女，硕士，株洲市规划信息中心，工程师。电子信箱：278934060@qq.com
 卿焱景，男，硕士，株洲市规划设计院，工程师。电子信箱：383437876@qq.com