doi:10.16018/j.cnki.cn32 - 1650/n.201702011

基于车流自由度的交通子区划分问题研究

李康

(天津滨海快速交通发展有限公司,天津 300450)

摘要:为避免传统的交通子区划分方法中改进关联程度公式、周期原则、流量原则、距离原则、绿 信比、相位差原则等方法的不足,引入车流自由度的概念描述协调系统内车流的离散程度,并从 微观角度探究以端点交叉口的车流自由度为基准、车流自由度的变化为指标的交通控制子区的 划分;同时在相对理想条件下,借助车流自由度表示在协调相位的有效绿灯时间内不停车通过 的车队长度,与以端点交叉口与下游交叉口不停车通过的车队排队长度比值,从中观角度进行 交通控制子区的划分;最后选取8个交叉口的实例,进行划分前后仿真,验证方法的合理性。

关键词:城市交通;交通控制;车流自由度;车队长度;交通子区划分

中图分类号:U491.4 文献标识码:A 文章编号:1671-5322(2017)02-0051-07

随着机动车保有量持续增加,道路单点信号 控制方式对交叉口的拥堵现象缓解有限。有研究 证明,实施干线协调控制能有效缓解交叉口的拥 堵现象^[1]。然而在干线协调控制系统内交叉口 数量过多时,很难取得有效通行带宽,需采用交通 子区划分技术,将其划分为若干个小的控制子区。

Guo 等^[2]考虑交叉口间距、路段主要流量、路 段通行能力、信号周期4个因素,利用模糊均值聚 类分析方法进行交通子区划分,解决划分方法的 准确性及鲁棒性的均衡性问题; Ma 等^[3]在交叉 口间关联程度系数基础上构建拉普拉斯方程,进 行光谱分解变换,达到交通子区划分的目的;Li 等^[4]建立自组织映射网络方法,将饱和度与路段 行驶时间作为主要输入变量,将众多交叉口分成 多个交通控制子区;马万经等^[5]将路径流量不均 匀性、信号相位、相邻信号停车线距离、排队长度 等嵌入美国道路通行能力手册给出的路段关联程 度公式,建立路径关联程度公式进行交通控制子 区划分:保丽霞^[6]针对信号交叉口间车队离散特 性,搭建信号交叉口间协调程度计算指标,进行交 通控制子区划分研究;杨洁等^[7]分析路网结构、 信号控制方案及车流离散性对交通控制子区划分 的影响,构造路径关联指标,实现交通控制子区划 分;别一鸣等^[8]探究相邻交叉口周期差异对相互 间关联程度的影响,提高关联程度计算精度,为交 通控制子区划分提供条件;胡亚琦等^[9]借助群决 策理论和模糊控制理论,调整控制子区内相邻交 叉口上下游之间的交通流和集散程度;郭海峰 等^[10]提出了一种短时预测交叉口交通状态的方 法预测交叉口的交通状态,结合距离原则构建相 邻交叉口相似度计算指标,实现交通控制子区动 态划分。

通过梳理文献,前人模型大部分是对美国道 路通行能力手册给出的关联程度公式进行改进, 或从相对宏观角度分析流量、周期、距离、绿信比、 相位差等因素进行子区划分。针对以上研究的不 足,本文从微观角度分析相邻信号交叉口间车流的 离散特性,并引入车流自由度概念,探究依据车流 自由度及不停车通过交叉口的通过率进行交通子 区划分问题,最后用实例验证本文方法的正确性。

1 模型建立

1.1 车流自由度指标

单点交叉口作为城市道路网的节点,其有效 绿灯时间内通过的交通量呈现脉冲式表现形式。 在绿灯时间内,车流量的振幅最大,经过路段的离

收稿日期:2016-11-10

基金项目:教育部博士点基金项目(20136204120007);甘肃省自然科学基金项目(1308RJZA128) 作者简介:李康(1989—),男,河北保定人,助理工程师,硕士,主要研究方向为城市交通管理与控制。 散作用,车流量的振幅逐渐减小。交通流振幅减 小的直接表现形式为车队离散特性,车队的离散 特性微观上表现为车辆间的车头间距加大,造成 车队长度加大。各车辆间的车头间距用车头时距 来描述,车头时距加大,车辆行驶的自由程度加 大,即整个车流自由度加大。

车流自由度的表达式为:

$$R = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} f(h_i)$$
 (1)

式中,R是车流自由度;n为车流中车辆总数 量; $f(h_i)$ 是车流中车辆间相互干扰系数。计算 公式为:

$$f(h) = \frac{h_{\text{max}} - h}{h_{\text{max}} - h_{\text{min}}}$$
(2)

式中, h_{max} 为车辆间毫无干扰时的车头时距 阀值, $s;h_{\min}$ 为车辆间保持安全行驶时的车头时距 最小阈值, s_o 若 $h \ge h_{\max}$, 设f(h) = 0,即车辆间无 任何干扰;若 $h \le h_{\min}$, 设f(h) = 1,即车辆间干扰 十分强烈。

车头时距反应车流自由度,用 M3 分布来描述。M3 分布的分布函数为:

 $P(h) = 1 - \alpha \times e^{-\frac{\alpha \times q}{1 - \Delta \times q}(h - \Delta)}$, $(h \ge \Delta)$ P(h) = 0, $(h < \Delta)$ (3) $\exists \mathbf{r}, P(h)$ 是车头时距的分布函数; h 是车

头时距,s;△是指定的最小车头时距,s;q是测定 的车流率,pcu/s;α是系数常量。

依据车头时距概率分布函数,计算车头时距 大于 h_{max}的车辆概率:

$$p_{1} = P(t \ge h_{\max}) = \alpha \times e^{-\frac{\alpha \times q}{1 - \Delta \times q}(h_{\max} - \Delta)}$$
(4)
同理,计算车头时距大于 h_{\min} 的车辆概率:

$$p_2 = P(t \ge h_{\min}) = \alpha \times e^{-\frac{\alpha \times q}{1 - \Delta \times q}(h_{\min} - \Delta)}$$
(5)

因车流运行过程中总受到随机因素的干扰, 车流到达交叉口停车线处,总存在一部分车辆的 车头时距小于最小安全行驶的车头时距阈值,这 部分车辆的概率为:

$$p_3 = 1 - p_2 = 1 - \alpha \times e^{-\frac{\alpha \times q}{1 - \Delta \times q}(h_{\min} - \Delta)}$$
 (6)

当车流中各个车辆的车头时距 $h \in [h_{\min}, h_{\max}]$ 时,车流中车辆平均干扰函数期望为:

$$E[f(h)] = \int_{h_{\min}}^{h_{\max}} \frac{h_{\max} - h}{h_{\min}} d[1 - P(t \ge h)]$$

$$\Re \mathfrak{K}(3) \mathfrak{K} \land \mathfrak{P}:$$

$$\frac{1}{h_{\max} - h_{\min}} \int_{h_{\min}}^{h_{\max}} (h_{\max} - h) \times \frac{\alpha^2 q}{1 - \Delta \times q} e^{-\frac{\alpha \times q}{1 - \Delta \times q}(h - \Delta)} dh$$

将式(4)、式(5)代入,求得车流中车辆平均 干扰函数期望为:

$$p_2 - \frac{1 - \triangle \times q}{(h_{\max} - h_{\min})q} (p_2 - p_1)$$
(7)

干线协调系统中协调相位的车流运行状况与 单点控制的车流运行状况略有不同。干线协调控 制时,只要干线协调系统中各交叉口间的相位差 设置合理,进入协调系统的端点交叉口停车线的 车流,在端点交叉口驶向协调系统内部交叉口路 段上的车流,在公共周期内衰减。因路段上随机 因素影响,造成部分车流滞留在系统内交叉口停 车线处,其震荡的振幅要远远小于进入协调系统 端点交叉口处产生的震荡振幅。

进入协调系统端点交叉口停车线处的车流释 放与单点控制时是相同的:绿灯初期,车流以饱和 流率驶离停车线,持续一段时间后,排队车流消 散;若仍有绿灯时间,车流以其到达率驶离停车 线。因此协调系统端点交叉口控制着周期内进入 系统的流量,是交通子区划分的关键节点。车辆 间相互干扰函数用车流离散稳定状态下的车辆间 相互干扰函数计算,计算公式如下:设交叉口处车 流饱和流率*s*,周期时长*C*,交通子区端点交叉口 主线协调相位红灯时间*r*,上游交叉口到达本交 叉口的平均车流率*q*,求得协调相位内以饱和流 率释放车队的时间*t*_s。

$$t_s = \frac{qr}{s-q} \tag{8}$$

求得协调相位绿灯时间内以饱和流率释放的 车辆数量 N_s:

$$N_s = q(r + t_s) = st_s \tag{9}$$

求得每个周期内到达交叉口停车线处的车流

量 Q:

$$Q = qC \tag{10}$$

求得在协调相位绿灯时间内以车流到达率释放的车流量 N_a:

$$N_q = Q - N_s \tag{11}$$

依据以上量值,求得在进入干线协调控制系 统中端点交叉口停车线处车流中车辆干扰函数的 平均值 *f*(*h*):

$$\bar{f}(h) = \frac{N_s + N_q E[f(h)]}{Q}$$
(12)

求得车流自由度 R:

$$R = 1 - f(h)$$
 (13)

得到进入干线协调系统端点交叉口停车线下 游路段某一断面处的车流自由度 *R*(*x*):

$$R(x) = R_1 e^{-\lambda_1 x} + R_2 (1 - e^{-\lambda_2 x})$$
(14)

式中, R_1 是 x 为 0 处的自由度,即进入干线 协调系统端点交叉口停车线处的车流自由度,趋 近于 0; R_2 是 x 无穷远处的自由度,即距进入干线 协调系统端点交叉口停车线下游路段无穷远处某 一个断面的车流自由度。若未遇到信号灯控制, 车辆间的车头时距最终超过 h_{max} ,自由度恒为 1; λ_1 , λ_2 分别是观测得到的常数。建议 λ_1 , λ_2 分别 取值 2,4,得到:

 $R(x) = R_1 e^{-2x} + R_2 (1 - e^{-4x})$

建立车流自由度与车队离散程度的概念关系 模型 D(R),其具体函数关系需要反复实验给定。 根据趋势分析,车队离散程度与车流自由度成正 相关关系。

对 $R(x) = R_1 e^{-2x} + R_2 (1 - e^{-4x})$ 进行求导,得 到 $R(x) = 4R_2 e^{-4x} - 2R_1 e^{-2x}$,因 $R_1 \rightarrow 0, R_2 \rightarrow 1$,易 证 $R'(x) > 0, x \in (0, \infty)$ 。推得车队离散程度与 路段距离呈正相关的关系,其大致趋势见图 1。

由图1分析,车流自由度随距离干线协调系 统端点交叉口停车线处下游路段某断面的长度增 大而增加。当车流自由度大于阀值α时,将干线 协调系统终止,即让车流在下一个交叉口遇到红 灯,车流得到积累后进入下一个交通子区进行新 的干线协调控制。

1.2 车流一车队指标

以车队长度反映车流在有效绿灯时间内不停 车驶经交叉口的通过率。假设车队中车辆间车头 时距相同,即车流密度均匀,不存在团聚现象,进 入干线协调系统端点交叉口停车线时车队释放长 度 L₁,车队到达干线协调系统下游第 *i* 个交叉口



图 1 车流自由度与路段距离关系趋势图 Fig. 1 Traffic freedom and road distance relationship trend chart

停车线处车队长度为
$$L_i$$
,其计算公式为:

$$L_1 = \sum_{j=1}^n l_j + \sum_{j=1}^{n-1} v_{1,j+1} h_{1,j+1} = n\bar{l} + \sum_{j=1}^{n-1} \bar{v_1} \bar{h}_{\min}$$
(15)

$$L_i = \sum_{j=1}^n l_j + \sum_{j=1}^{n-1} v_{i,j+1} h_{i,j+1} = n\bar{l} + \sum_{j=1}^{n-1} \bar{v_i} \bar{h}_i$$

(16)

式中, \bar{l} 为端点交叉口统计周期协调相位绿 灯时间内通过车队中所有车辆的平均长度,m;n为端点交叉口统计周期协调相位绿灯时间内通过 车队中车辆的数量; \bar{v}_i 为协调系统内交叉口i下游 路段车流平均速度,m/s; \bar{h}_i 协调系统内交叉口i下游路段车流内平均车头时距,s;

车流密度均匀时,第 *i* 个交叉口有效绿灯时 间内不停车通过的车辆数,与到达 2 个交叉口停 车线处车队长度比值及 2 个交叉口的有效绿灯时 长比值成正比关系,得到第 *i* 个交叉口有效绿灯 时间内不停车通过的车辆数量 q_i。

$$q_i = \delta q_1 \frac{L_1}{L_i} \frac{g_1}{g_i} \tag{17}$$

式中, q_i 是协调系统中第i个交叉口有效绿 灯时间内不停车通过的车辆数量(i=2,3,...,n); q_1 是进入协调系统中端点交叉口有效绿灯时间 内释放的车辆数量; g_i 是协调系统中第i 个交叉 口有效绿灯时长, $s;g_1$ 是进入协调系统中端点交 叉口有效绿灯时长, $s;\delta$ 是折减系数,实测获得。

公式(15)、(16)、(17)表明,在干线协调系统 中,协调相位方向的直行车流进入系统的端点交 叉口后,沿下游方向在交叉口的各自有效绿灯时 间内,不停车通过交叉口的车辆数量逐渐减少。 测定端点交叉口有效绿灯时间内通过车辆数、车 辆间的车头时距及速度,求取h_{min},v₁;测定下游交 叉口车辆间的车头时距及速度,求取 h_i, v_i ,计算比 对 $\frac{q_i}{q_1}$ 与 $\beta(\beta$ 为依据车流量反复仿真后人为给定 的阈值)的大小,结合交通子区驶出干线协调系 统交叉口的位置,实现交通子区划分的目的。

1.3 划分流程

依据车流自由度、车队长度比2个衡量指标, 控制子区划分合并流程如下:

(1)将所有适合干线协调控制的连续交叉口 编号,选取最大周期作为系统周期,依次求取各自 的绿灯时间,进行干线协调控制。

(2)双向选取端点交叉口为基准交叉口,分 别测定基准交叉口的车流自由度和协调相位绿灯 时长内通过的车流数量、车头时距、车流速度。

(3)在协调系统内部端点交叉口下游的交叉 口,依次测定车流的自由度、车流平均速度、平均 车头时距,计算相关指标。

(4)将2个指标分别与与各自阀值比对,进 行交通控制子区划分合并:当 $R_i \le \alpha$ and $\frac{q_i}{q_1} \ge \beta$ 时, 将交叉口 *i* 并入端点交叉口的控制子区;当 $R_i \leq \alpha$ or $\frac{q_i}{q_1} < \beta$ 或 $R_i > \alpha$ or $\frac{q_i}{q_1} \geq \beta$ 或 $R_i > \alpha$ and $\frac{q_i}{q_1} < \beta$ 时,将交叉口 *i* 与端点交叉口划分到不同的交通 控制子区。

(5)划分后将剩余交叉口更新编号,重新选 择公共周期,计算协调相位绿灯时间,进行干线协 调,重复步骤(1)、(2)、(3)、(4),直至所有交叉 口划分完毕。

(6)重叠交叉口处理:在协调系统内部交叉 口在并入2个方向的端点交叉口构成的交通控制 子区条件均满足时,选择 R_i小且^{q_i}大的子区并入。

2 实例仿真

选取某交通干线进行分区仿真,整个干线系 统共包含8个交叉口。8个交叉口位置及编号如 图2所示,干线路网各个交叉口转向流量如表1 所示。



图 2 干线路网示意图(m)

Fig. 2 Schematic diagram of network main road

表1 干线系统各交叉口流量

	Table 1 Volume of network main road						续左表						
		这句					伯日	流向					
编号		++++	加円	++++	扣合	- 周期时长/s	姍丂	方向	左转	直行	右转	相位	「
		上 行	且仃	白牧	相亚			W	64	1 176	68	1	
	W	/8	1 441	83	1		5	S	23	425	52	2	56
1	S	26	422	48	2	72		Ν	18	441	44	2	
1	Ν	23	427	56	2	12		Е	54	1 040	59	1	
	Е	47	918	51	1			W 7		1.100	(0)	1	
2	W	76	1 363	77	1			W	57	1 126	69	1	53
	S	21	415	62	2		6	s	29	404	56	2	
	Ň	27	426	47	2	66		Ν	33	421	55	2	
	E	55	941	48	1			E	61	1 081	73	1	
	Ц	55	711	10	1			W	57	1 062	47	1	
	W	73	1 297	69	1		7	S	25	416	63	2	53
3	\mathbf{S}	24	428	49	2	62		Ň	24	444	37	2	
	Ν	29	437	46	2			E	59	1 126	63	1	
	Е	52	979	49	1			Ц	57	1 120	05	1	
	W	63	1 232	71	1			W	58	1 047	55	1	56
	s	33	414	47	2		8	\mathbf{S}	23	423	47	2	
4	N	26	478	51	2	59		Ν	36	405	67	2	
	TN E	20 57	1 003	55	1			Е	74	1 176	66	1	
	Ľ	51	1 003	55	1								

8 个交叉口采用协调控制方式,系统周期时长 C 取 72 s,各交叉口协调相位绿灯时长 C 如表 2。

表2 各交叉口协调相位绿灯時	łК
----------------	----

Table 2 Green time of Coordination phase in network s

C		G									
L	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8			
72	37	40	41	41	42	42	42	42			

取定阀值 $\alpha = 0.9$ 、 $\beta = 0.3$ 、 $\delta = 0.85$,依照交通 子区划分方法,最终将整个干线系统划分为 2 个交 通子区,周期时长分别为 72 s、56 s,如图 3 所示。

根据分区结果,计算各交叉口的相位差,并与 分区前各交叉口的相位差对比,如表3所示。各 交通子区最佳带速为13.9 m/s,结合各交叉口实 际状况,子区间进行红波控制,依据各值变化进行 仿真,寻求最佳方案。



图 3 干线路网划分后 Fig. 3 Sketch map of controlwork zone division

利用 Vissim 仿真软件对分区前后仿真 3 600 s,选取车均延误时间、车均停车次数作为评价指标,对 3 000 ~ 3 600 s 间的稳定后车流,对比评价 各交叉口的控制效果及整个干线路网的控制效 果。仿真结果如图 4、图 5 所示。

	after and before the partition
Table 3	Difference of each intersection offset
表 3	分区前后各交叉口的相位差对比

而日。	编号										
坝日	1	2	3	4	5	6	7	8			
分区前/s	54	16	52	15	51	15	51	15			
分区后/s	53	15	51	15	52	41	15	41			



从图4可以看出,控制子区1中的交叉口1、 5分区后平均延误时间增长,其中交叉口5的平均延误时间增长最多,达到5.8%,其余交叉口分 区后平均延误时间均下降;控制子区2除了交叉 口6分区后平均延误时间增长38.8%,其余交叉 口分区后平均延误时间下降均较为显著。整个干 线系统分区后的车均延误时间下降2.4%。从图 5 可以看出,控制子区1 中仅交叉口2 分区后车 均停车次数略有下降外,其余交叉口分区后基本 保持不变;控制子区2 除了交叉口6 分区后车均 停车次数增长幅度巨大,达 80%,其余交叉口分 区后基本保持不变。整个干线系统分区后车均停 车次数增加7.1%。主要原因是原来的一个协调 系统划分为2 个控制子区,子区间红波控制,在边



界交叉口处出现停车排队现象,但未造成排队上 溢,导致交通子区间的边界交叉口控制效果下降, 尤其表现为车均停车次数增加显著,但整体控制 效果有所改善。

3 结论

本文给出了一套完整的交通子区划分方法。 通过分析干线协调控制时的车流运行特征,引入 车流自由度概念,从微观角度探究端点交叉口协 调相位释放车流的自由度,随交叉口距离的变化 规律;同时从中观角度,量化关键交叉口协调相位 有效绿灯时间内释放车流的车队长度与下游交叉 口协调相位有效绿灯时长内不停车通过的车队长 度比值,并将车流自由度与车队长度比2个衡量 指标结合进行交通控制子区划分;最后选取实例, 依照本文方法,进行子区划分。仿真结果表明,采 用本文方法进行交通子区划分后的控制效果明显 优于单纯的干线协调控制效果。

参考文献:

- [1] 马楠,邵春福,赵熠.干道信号交叉口群协调控制系统中的影响因素[J].哈尔滨工业大学学报,2011,43(6):112-117.
- [2] GUO J J, XIONG Q P, CHEN S. Division approach of traffic signal control sub-area [C] //2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science, IEEE, 2009:1-4.
- [3] MA Y Y, CHIU Y C, YANG X G. Urban traffic signal control network automatic partitioning using laplacian eigenvectors
 [C]. 2009 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, IEEE, 2009:1-5.
- [4] LI Y, YANG J, GUO X C, et al. Urban traffic signal control network partitioning using self-organizing maps[C] // Transportation Research Board 90th Annual Meeting. 2011:4 211-4 259.
- [5] 马万经,李晓丹,杨晓光.基于路径的信号控制交叉口关联度计算模型[J].同济大学学报(自然科学版),2009,37 (11):1462-1466.
- [6] 保丽霞. 基于车队离散模型的交叉口关联度量化方法研究与试验[J]. 公路交通科技,2011,28(S1):14.
- [7] 杨洁,过秀成,李岩,等. 城市信号控制交叉口群路径关联度模型[J]. 交通运输系统工程与信息,2012,12(1):55-62.
- [8] 别一鸣, 卢凯, 王琳虹. 相邻交叉口周期时长差异对关联度指标的影响[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(11):1630-1637.
- [9] 胡亚琦,胡翔宇,朱强化,等. 基于模糊控制算法的城市交通区域协调控制[J]. 计算机工程与应用,2015,51(7):266-270.
- [10] 郭海锋,程君,周悦,等.短时交通状态预测下交通控制子区自动划分方法[J].系统科学与数学,2015,35(8):904-918.
- [11] 李康. 干线协调控制系统子区划分问题研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2016.

A Study on Traffic Sub-area Division Based on Traffic Freedom

LI Kang

(Tianjin Binhai Rapid Transit Development Co., Ltd., TianJin 300450, China)

Abstract: In order to avoid the shortage of the traditional traffic zone division method-improved connection degree formula, cycle principle, flow principle, distance principle, green ratio principle, the phase difference principle, this study introduces the conception of traffic freedom and describes the discrete degree of traffic. Treating the traffic freedom on the key intersection as a benchmark and using the change of the traffic freedom as an index, this study investigate the the problem of the traffic flow to sub-area division in microscopic perspective. Meanwhile under relatively ideal conditions, taking the freedom of the traffic flow to show team length in the coordination phase effective green time without stopping, and taking queue length ratio under the condition of non stop through the fleet key intersections and downstream intersection, traffic control sub-area is divided in the intermediate perspective. Finally, this study sets the eight continuous intersections as examples and compares the effect of different divisions to test the the theorical validity of this paper's method.

Keywords: urban traffic; traffic control; traffic freedom; team length; traffic control sub-area division

(责任编辑:张英健)

(上接第50页)

Experimental Research on Pneumatic Conveying System of Economizer Ash in 300MW Unit of a Thermal Power Plant

QIU Xiaofen

(Fujian Longking Envronmental Protection Co., Ltd, Longyan Fujian 364000, China)

Abstract: In view of the poor operation of the pneumatic conveying system of economizer ash in 300MW unit of a thermal power plant, problems such as vibration and blockage occur frequently, the technical characteristics of negative pressure transportation, dilute phase positive pressure transportation and dense phase positive pressure transportation are analyzed. A pneumatic conveying experiment system is designed. The material analysis and pneumatic conveying test of the fly ash in the thermal power plant are carried out, and the stability of the pneumatic conveying of the fly ash in the power plant is discussed. The experimental results show that the stability of the conveying system can be improved by the use of dilute positive pressure conveying of the coal ash with coarse particle size, wide distribution and heavier economizer ash.

Keywords: dilute phase; pneumatic conveying; stability; experimental research

(责任编辑:李华云)