

基于路径关联性的交叉口群动态划分方法

胡 华¹, 高云峰², 邱薇华¹

(1. 上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620; 2. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 交叉口群是路网交通流协调控制的基本单元, 其动态范围划分与路网协调控制效益直接相关。在对经典 Whitson 路段关联性模型进行改进的基础上, 考虑局部路网上交通流 OD 的空间分布特征建立了相邻交叉口之间的路径关联性模型; 基于路径关联性模型计算结果, 应用层次聚类方法对信号控制交叉口群进行动态划分。最后对路段关联性和路径关联性的交叉口群动态划分方法进行了算例验证和对比分析。研究表明, 考虑路径关联性动态划分交叉口群可以减少对局部路网中主要 OD 路径的分割, 从而降低主干道交通流的总停车次数和停车延误。
关键词: 交叉口群; 动态划分; 路径关联性; 路段关联性; 主要 OD 路径

中图分类号: U 491

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2010)05-0758-05

Dynamic Division Method of Intersection-Group Based on Path Relevance

HU Hua¹, GAO Yun-feng², QIU Wei-hua¹

(1. School of Urban Railway & Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

2. School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract Intersection group is the basic unit of traffic coordinated control in the urban road network and its scope is directly related with the coordination and control benefits of the road network. Firstly, based on the improved Whitson model of link relevance, the model of path relevance of adjacent intersections is put forward which takes the space distribution of origin-destination (OD) flow in the local traffic network into consideration. Secondly, hierarchical clustering method is applied to intersection group dynamic division based on calculated results from the model of path relevance. Finally, an example is given out to verify the mentioned two methods and two division schemes are comparatively analyzed. The research results demonstrate that dynamic division of intersection group based on the path relevance could reduce the division times for main OD path, and thus could decrease the total numbers of vehicle stops and stop delay in the local road network.

Key words intersection group; dynamic division; path relevance; link relevance; main OD path

我国大城市中心区路网结构普遍存在交叉口间距短且交通关联性强的情况, 这些彼此相邻的交叉口往往需要进行协调控制, 称这类交叉口集合为“交叉口群”^[1]。它是路网协调控制的基本单元或范围, 其范围划分与路网协调控制效益直接相关。已有研究表明^[2], 相邻交叉口之间的关联性是 2 个交叉口是否需要协调控制、以及在多大程度上进行协调控制的判据, 因此相邻交叉口之间的关联性是交叉口群划分的主要依据。并且, 在实际中道路交叉口间的关联性随着交通的供需条件, 以及交通管理条件的不同而动态变化, 因此交叉口群的范围也应随着路网宏观交通流的变化而动态划分。然而, 已获得广泛应用的城市交通控制系统 SCOOT、SCATS 等的交叉口群划分缺乏考虑局部路网交通

流 OD 的动态变化, 且划分结果相对固定, 这是导致系统在缓解交通拥堵方面的控制效果不理想的原因之一。

国内外关于交叉口群划分的研究成果主要集中在相邻交叉口路段关联性的研究方面。Yagoda 等^[3]认为交叉口之间的关联性主要与路段上的流量 Q 和路段长度 L 有关, 并采用耦合指标 I 来表示两个交叉口之间的关联性。Pinneil^[4]认为影响相邻交叉口关联性的因素包括路段长度、上游交叉口车流量及其到达规律。Edmond Chin-Ping Chang^[5]认为只要可以通过有效的信号控制方案使到达下游交叉口的车流呈现高密度的车队特征就应该协调 2 个相邻交叉口的信号控制方案。Moore 等^[6]首次考虑了交通流的空间变化, 以流量比为特征应用聚类方

收稿日期: 2010-07-12 修订日期: 2010-07-30

基金项目: 上海市教育委员会重点学科建设项目 (J51401); 中国博士后科学基金面上项目 (20090460653); 上海市博士后科研资助计划面上项目 (10R21416500)

作者简介: 胡 华 (1979-), 女, 四川遂宁人, 讲师, 博士, 主要从事智能交通系统方面的研究。E-mail: huhua1979@126.com

法建立了一种交叉口群划分方法, 其划分结果与实际交通状况更加吻合。国内莫汉康等^[7] (2002)提出了影响交叉口群划分的主要因素有周期时长、流量、距离。高云峰^[8]对此进行了完善和拓展, 进一步考虑了上下游交叉口的车辆转弯比例和下游交叉口进口车辆排队长度等影响因素研究交叉口群划分方法。

综上所述, 已有关于相邻交叉口之间关联性的研究成果中多数考虑了交叉口间距、上游交叉口各流入流向流量、车流在路段上的平均速度等影响因素, 缺乏考虑局部路网上交通流 OD 的动态变化, 而考虑交通量的空间变化将使交叉口群划分结果更符合实际。因此, 本文在对经典 Wh itson 路段关联性模型进行改进的基础上, 进一步考虑局部路网上交通流 OD 的动态变化建立相邻交叉口之间的路径关联性模型, 并基于路径关联性模型计算结果应用层次聚类方法对交叉口群进行动态划分。

1 相邻交叉口的路段关联性改进 Wh itson模型

交通控制条件下, 从上游交叉口出发的车流具有车队特征, 但是车流在路段上行驶过程中伴随着离散现象。因此, 从上游交叉口出发的高密度、紧凑型车流最后以低密度、松散型车流到达下游交叉口进口。对于城市路网交通流协调控制而言, 相邻交叉口之间的路段关联性可以用路段上车队的离散程度表示。现在常用的计算相邻交叉口之间路段关联性计算模型是 Wh itson^[9]在 1973年提出、1987年版美国交通控制系统手册^[10]推荐的 Wh itson模型, 见式 (1):

$$I = \frac{0.5}{1+t} [\ln b - 1], \text{ 其中 } \ln b = \frac{Q_{\max}}{Q} \quad (1)$$

式中: I 为两个交叉口之间的关联性; $\ln b$ 为流量不均衡系数; Q_{\max} 为上游交叉口流入流向的最大流量; Q 为上游交叉口流入流向的平均流量; t 为车辆在路段上的平均行驶时间。

可见, Wh itson 路段关联性模型仅考虑了上游交叉口各流入流向流量和车流在路段上的平均速度, 而没有考虑下游交叉口进口排队长度这一重要影响因素, 从而增大了计算结果的偏差。笔者考虑, 下游交叉口进口排队长度这一影响因素对模型参数 t 进行修正, 提出计算相邻交叉口之间路段关联性的改进 Wh itson模型, 见式 (2):

$$I = \frac{1}{n-1} \left(\frac{n \cdot \max_{i=1}^n (Q_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i} - 1 \right) \frac{1}{1+t} \quad (2)$$

式中: n 为上游交叉口的流入流向数; Q_i 为上游交叉口第 i 流入流向流量; t 为车流从上游交叉口进口停车线至下游交叉口进口车辆排队尾 (进口有车辆排队时)或进口停车线 (进口无车辆排队时)之间的平均行驶时间, 其计算公式见式 (3):

$$t = \frac{L-l}{\bar{V}} \quad (3)$$

式中: L 为相邻交叉口之间路段长度; l 为下游交叉口进口平均排队长度; \bar{V} 为车流在路段上的平均行驶速度。

对于图 1 中 2个相邻交叉口之间的双向通行路段, 可以将其作为 2个单向通行连线的并联, 而整个并联系统的路段关联性取 2个子系统的路段关联性的较大值。2个相邻交叉口见式 (4):

$$I_{ij}^s = I_{ji}^s = \max(I_{ij}^s, I_{ji}^s) \quad (4)$$

式中: I_{ij}^s (I_{ji}^s)为相邻交叉口 i (j)与 j (i)的路段关联性; I_{ij}^s (I_{ji}^s)为相邻交叉口 i (j)至 j (i)之间连线的关联性。



图 1 2个相邻交叉口之间的双向通行路段

Fig 1 Bilateral link between two adjacent intersections

2 相邻交叉口的路径相关性模型

相邻交叉口之间一条连线的所有流入流向和流出流向之间可以形成多条流向组合, 其所有流向组合关系见图 2。

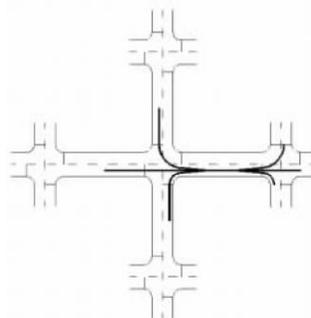


图 2 相邻交叉口之间连线的流向组合关系

Fig 2 Combination relationship of link traffic flow between two adjacent intersections

城市道路网络交通流中的一条动态 OD 路径经过 2个相邻交叉口时必然选择图 2中的某一个流向组合。一般情况下, 连线上各条流入流向的流量占连线流量的比例不同, 所以与连线上游交叉口与下游交叉口在各个 OD 路径上的关联性也各不相同。基于此, 本文提出相邻交叉口主协调路径的概念, 主协调路径就是相邻交叉口之间各条 OD 路径中流量占连线流量最大的路径。Wh itson模型计算相邻交叉口之间的路段关联性仅以路段流量为基础, 没有

考虑局部路网交通流 OD 的路径分布情况, 从而导致主协调路径可能被划分在 2 个以上的交叉口群内, 造成干道上交通流在交叉口群边界的停车次数和控制延误额外增加。例如, 对于图 3 所示局部路网内的 4 条动态 OD 路径。图 4(a) 所示的动态交叉口群划分方案明显优于图 4(b) 所示的动态交叉口群划分方案, 因为前者 OD 路径被交叉口群边界分割的次数更少。

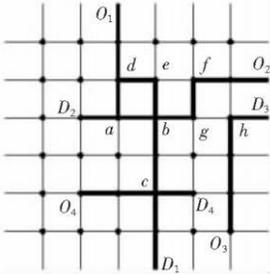


图 3 城市道路网络交通流 OD 路径分布

Fig 3 OD distribution in urban road network

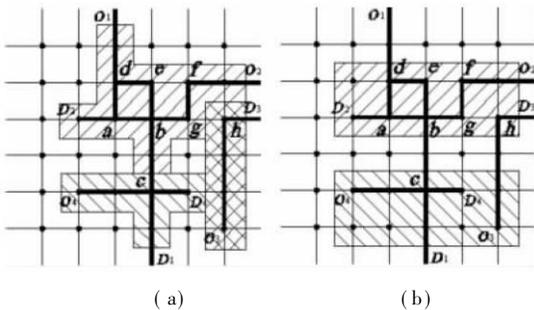


图 4 城市道路网络交叉口群划分方案比较

Fig 4 Contrast between two intersection-group division schemes

因此, 为了尽可能减少交叉口群划分方案对路网主协调路径的分割, 笔者提出考虑局部路网交通流动态 OD 的相邻交叉口路径关联性模型, 见图 5。

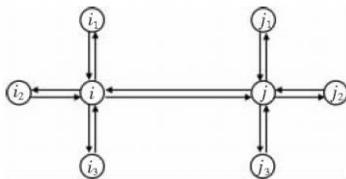


图 5 相邻交叉口之间的路径关联性模型

Fig 5 Path relevance model of adjacent intersections

本文定义相邻交叉口之间的路径关联性为经过相邻交叉口之间连线的的所有 OD 路径中流量最大的那条路径在该连线上的协调关联性。假定某一时段局部路网上的交通生成点集合为 O , 维度为 m , 交通吸引点集合为 D , 维度为 n , 任一 OD 对之间的流量为 Q_{od} , 则局部路网交通流动态 OD 矩阵为 $OD = (Q_{od})_{m \times n}$, P 为局部路网某一 OD 对之间的所有 OD 路径的集合, L 为局部路网的所有连线集合。设定 0-1 变量 δ_p^{od} 表示如下含义:

$$\delta_p^{od} = \begin{cases} 1 & \text{当连线 } l \text{ 在 } od \text{ 对的路径 } p \text{ 上, } l \in L, p \in P \\ 0 & \text{当连线 } l \text{ 不在 } od \text{ 对的路径 } p \text{ 上, } l \in L, p \in P \end{cases} \quad (5)$$

则每条连线上的交通量是由经过该连线的的所有 OD 路径的交通量总和, 连线流量 Q_l 和路径流量 Q_p 的关系为:

$$Q_l = \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P_{od}} \delta_{lp}^{od} Q_p \quad (6)$$

路径流量 Q_p 和 OD 流量 Q_{od} 之间的关系为:

$$Q_{od} = \sum_{p \in P_{od}} Q_p \quad (7)$$

设图 5 中交叉口 i 至交叉口 j 的路径关联性为 $I_{i \rightarrow j}$, 交叉口 j 至交叉口 i 的路径关联性为 $I_{j \rightarrow i}$, 则 $I_{i \rightarrow j}$ 与 $I_{j \rightarrow i}$ 的计算公式如下:

$$I_{i \rightarrow j} = \frac{1}{\left(\sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P_{od}} \delta_{ijp}^{od} \right) - 1} \times \left[\frac{\left(\sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P_{od}} \delta_{ijp}^{od} \times \max_{o \in O, d \in D, p \in P_{od}} (\delta_{ijp}^{od} \times Q_p) \right)}{Q_l} - 1 \right] \times \frac{1}{1+t} \quad (8)$$

$$I_{j \rightarrow i} = \frac{1}{\left(\sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P_{od}} \delta_{jip}^{od} \right) - 1} \times \left[\frac{\left(\sum_{o \in O} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P_{od}} \delta_{jip}^{od} \times \max_{o \in O, d \in D, p \in P_{od}} (\delta_{jip}^{od} \times Q_p) \right)}{Q_l} - 1 \right] \times \frac{1}{1+t} \quad (9)$$

式中各参数意义同前。则 2 个相邻交叉口 i 与 j 的路径关联性 I_{ij} 或 I_{ji} 为:

$$I_{ij} = I_{ji} = \max(I_{i \rightarrow j}, I_{j \rightarrow i}) \quad (10)$$

3 基于层次聚类法的交叉口群动态划分

聚类分析是数据挖掘的一个重要研究分支, 是人们认识和研究对象的一种方法。所谓聚类就是按照事物的某些属性, 把事物聚集成类, 使类间的相似度尽可能小, 类内的相似度尽可能大。迄今为止, 人们已经提出了很多聚类算法, 主要有划分方法 (又称动态聚类方法)、层次方法 (又称系统聚类方法)、基于密度的方法、基于网格的方法等, 其中层次方法由于算法简单、快速和能够有效地处理大数据集等优点已成为实际聚类分析的支柱^[11], 因此论文采用层次聚类方法进行交叉口群动态划分。

应用基于层次聚类法动态划分交叉口群时, 需要已知某一区域的地面道路网上各个时段的 OD 路径和各个交叉口各个时段的进口流量。其聚类指标是相邻交叉口的路径 (路段) 关联性, 并要事先设定关联性阈值。基于层次聚类法动态划分交叉口群的具体步骤如下:

Step 1 建立局部路网中的交叉口和路段集合, 动态加载不同时段的 OD 矩阵;

Step 2 遍历路段集合, 根据式 (10) 计算局部路网内所有相邻交叉口的路径 (路段) 关联性;

Step 3 确定相邻交叉口的路径 (路段) 关联性阈值, 若路径 (路段) 关联性计算值小于该阈值, 则上下游交叉口可聚类到不同的交叉口群中;

Step 4 遍历路段集合, 将路径 (路段) 关联性最高的连线连接的两个交叉口归入一个交叉口群, 并从路段集合删除对应的路段、从交叉口集合删除对应的交叉口。进一步判断路段集合是否为空, 若为真, 转向 Step 6 否则转向 Step 5;

Step 5 遍历交叉口集合, 根据路径 (路段) 关联性阈值判断与最新生成的交叉口群相邻的交叉口能否归入该交叉口群: 若为真, 从路段集合删除对应的路段、从交叉口集合删除对应的交叉口, 并将对应交叉口并入该交叉口群。进一步判断路段集合是否为空, 若为真, 转向 Step 6 否则转向 Step 4

Step 6 遍历交叉口集合, 把每个交叉口作为单独的交叉口群, 转向 Step 7;

Step 7 算法结束, 形成基于路径 (路段) 关联性的交叉口群划分方案。

4 算例验证

某局部路网如图 6。该路网包含 15 个交叉口, 分别以编号 1~15 表示, 每个交叉口各个进口的流向流量均在相应位置上标示。该区域内 22 条内部路段的长度由表 1 给出。车流在路段上的平均行驶速度为 25 km/h。

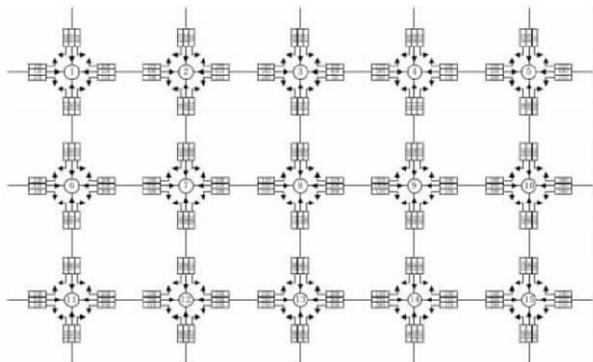


图 6 局部路网上交叉口的进口流量

Fig 6 Entrance inflows of intersections in local road network

通过交通调查已知该局部路网中有 4 条主要 OD 路径, 分别表示为 O_1D_1 、 O_2D_2 、 O_2D_3 , 以及 O_4D_4 , 见图 7。图中的三角箭头表示 OD 路径的方向。从图 7 可发现, 交叉口 7 与交叉口 8 之间存在两条 OD 路径 O_1D_1 和 O_2D_2 , 根据图 6 计算得到交叉口 7 和交叉口 8 之间这两条路径的流量和为

1 350 pcu/h。

表 1 局部路网的 22 条内部路段长度

Tab 1 Lengths of 22 internal links in local road network /m

路段	长度	路段	长度
1~2	426	14~15	331
2~3	648	1~6	649
3~4	410	2~7	512
4~5	520	3~8	664
6~7	367	4~9	524
7~8	689	5~10	432
8~9	481	6~11	521
9~10	453	7~12	636
11~12	426	8~13	420
12~13	343	9~14	476
13~14	255	10~15	283

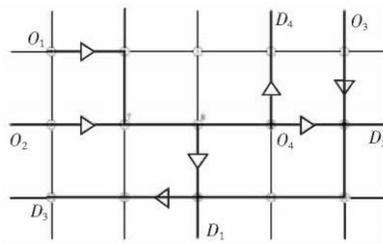


图 7 局部路网中主要 OD 路径分布

Fig 7 Main OD path distribution in local road network

根据式 (4) 和式 (10) 分别计算得到局部路网内所有相邻交叉口之间的路段关联性和路径关联性, 计算结果见表 2。

表 2 局部路网内各路段的关联性

Tab 2 Link relevance in local road network

相邻交叉口	路段关联性	路径关联性	相邻交叉口	路段关联性	路径关联性
1, 2	0.282 5	0.714 3	14, 15	0.196 0	0.567 8
2, 3	0.113 3	0	1, 6	0.106 6	0
3, 4	0.255 7	0	2, 7	0.158 7	0.469 1
4, 5	0.111 2	0	3, 8	0.196 4	0
6, 7	0.334 0	0.752 1	4, 9	0.094 9	0.392 2
7, 8	0.142 9	1.172 4	5, 10	0.206 1	0.477 9
8, 9	0.183 7	0.597 1	6, 11	0.067 4	0
9, 10	0.479 1	0.666 7	7, 12	0.226 2	0
11, 12	0.204 2	0.583 3	8, 13	0.152 6	0.459 4
12, 13	0.108 1	0.608 7	9, 14	0.135 1	0
13, 14	0.307 2	0.663 6	10, 15	0.217 6	0.503 2

分别以路段关联性和路径关联性为聚类指标, 参照 1987 年版美国交通控制系统手册^[10] 给出的推荐值, 设定关联性阈值为 0.15 和 0.5 利用第 3 节提出的层次聚类法根据表 2 中的关联性计算结果进行路网交叉口群划分, 其划分方案分别见图 8 图 9。

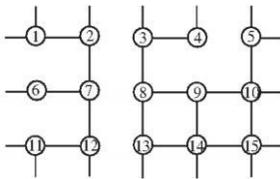


图 8 以路段关联性为依据的交叉口群划分方案

Fig 8 Intersection-group division scheme based on link relevance

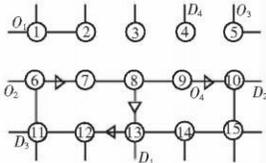


图 9 以路径关联性为依据的交叉口群划分方案

Fig 9 Intersection-group division scheme based on path relevance

对比可见,图 8 根据路段关联性得到的交叉口群划分方案分割了交叉口 7 与交叉口 8 之间的路段,使两条主要 OD 路径 O_1D_1 和 O_2D_2 上的较大交通流量在群边界路段上产生较大的停车次数和控制延误。而图 9 根据路径关联性得到的交叉口群划分方案由于考虑了局部路网交通流 OD 的空间分布情况,从而有效地保持了局部路网上主要 OD 路径的连续性,有利于降低局部路网上车流的总停车次数和控制延误。

5 结论

局部路网上主要的 OD 路径分布是合理划分交叉口群的重要依据之一。经典的 Whiston 模型考虑了连线上游交叉口各个进入流向的流量大小,其关联性实质描述了主协调方向的协调相关性大小,但是没有考虑主要 OD 路径在下游交叉口的流向。提出的相邻交叉口路径关联性模型考虑了主要 OD^[4] 路径在上下游交叉口上的流向,从而弥补了 Whiston

模型的不足,按照路径关联性动态划分交叉口群可以有效减少车辆在 2 个交叉口群边界路段上的停车次数和控制延误。

参考文献:

- [1] 高云峰, 胡华, 杨晓光. 交叉口群交通控制实时评价模型仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(24): 5607-5612.
- [2] John A F. Computer Control of Traffic: Combining Subareas [C]. Columbus, OH, USA: Control in Transportation System 3rd International Symposium, 1976: 363-374.
- [3] Yagoda H N, Principe E H, Vick C E, et al. Subdivision of signal systems into control areas [J]. Traffic Engineering, 1973, 43(12): 42-45.
- [4] Pinnell C, DeShazo Jr J J, Wilshire R L. A real world traffic control systems [J]. Traffic Engineering & Control, 1975, 45(4): 16-21.
- [5] Edmond Chin-Ping Chang. How to Decide the Interconnection of Isolated Traffic Signals [C] // Proceedings of the 1985 Winter Simulation Conference New York: Association for Computing Machinery, 1985: 334-339.
- [6] James E M, Paul P J. Statistical designation of traffic control subareas [J]. Journal of Transportation Engineering, 1985, 111(3): 208-223.
- [7] 莫汉康, 彭国雄, 云美萍. 诱导条件下交通控制子区自动划分 [J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(2): 67-72.
- [8] 高云峰. 动态交叉口群协调控制基础问题研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007: 22-25.
- [9] Whiston R H, White R M, Messer C J. A Study of System vs Isolated Control as Developed on the Mockingbird Pilot Study [R]. Texas: Texas Transportation Institute, College Station and Dallas, 1973.
- [10] 美国运输部联邦公路局. 交通控制系统手册 [M]. 李海渊, 秦吉玛, 王彦卿, 译. 北京: 人民交通出版社, 1987.
- [11] 张红云, 刘向东, 段晓东, 等. 数据挖掘中聚类算法比较研究 [J]. 计算机应用与软件, 2003(2): 5-6.

(上接第 717 页)

参考文献:

- [1] 王选仓, 侯国荣. 长寿命路面结构设计 [J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(6): 46-49.
- [2] 崔鹏, 孙立军, 胡晓. 高等级公路长寿命路面研究综述 [J]. 公路交通科技, 2006, 23(10): 10-23.
- [3] 侯荣国, 赵晓晴, 王选仓, 等. 长寿命路面结构与寿命预估 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(2): 22-25.
- [4] 张占军, 王虎, 胡长顺, 等. 水泥混凝土桥面沥青铺装及防水层

- 荷载弯曲应力分析 [J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 37-41.
- [5] 曹东伟, 胡长顺. 旧水泥混凝土路面沥青加铺层力学分析 [J]. 西安公路交通大学学报, 2001, 21(1): 125-130.
- [6] 胡小弟, 孙立军. 实测重型货车轮载作用下沥青路面力学响应 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(1): 64-69.
- [7] 何美艳. 旧水泥混凝土路面加铺沥青罩面层的抗反射裂缝分析及处治措施 [J]. 中南公路工程, 2007, 32(3): 130-132.
- [8] 崔鹏, 邵敬华, 胡晓, 等. 长寿命沥青路面结构组合的有限元分析 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(10): 1388-1394.