

破损路面对城市道路路段通行能力的影响

Effect of Poor Pavement Surface Condition on Capacity of Urban Roadway

程国柱¹, 刘博通¹, 马亚峰²

(1.哈尔滨工业大学交通科学与工程学院,黑龙江 哈尔滨 150090;2.西南交通大学交通运输与物流学院,四川 成都 610031)

Cheng Guozhu¹, Liu Botong¹, Ma Yafeng²

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150090, China;

2. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

摘要: 为了准确评价路面破损条件下的道路通行能力,有必要探讨破损路面对道路通行能力的影响。选取路面车辙深度、裂缝率、坑槽宽度和修补率作为破损路面状况的评价指标,给出了基于灰色聚类分析方法的破损路面状况评价方法。应用该方法对调查路段的破损路面状况进行等级划分,并基于不同破损路面状况等级路段调查的交通流参数,分析破损路面对饱和车头时距和平均行程车速的影响。引入破损路面修正系数的概念,得到不同破损路面状况等级对应的路段通行能力修正系数,并给出不同破损路面状况等级对应的城市道路路段通行能力推荐值。

Abstract: In order to accurately estimate capacity of urban roadway with poor pavement surface conditions, it is necessary to investigate the effect of poor surface condition on roadway capacity. Using rut depth, cracking ratio, width of crack, and repairing ratio as evaluation indicators, this paper proposes a pavement surface condition evaluation methodology based on Grey Cluster Analysis. By classifying surveyed roadway segments with poor pavement surface condition, the paper analyzes the effect of poor pavement surface condition on saturated headway and average operating speed based on traffic flow parameters under different pavement surface conditions. Finally, using the adjusted coefficient of roadway capacity under different levels of pavement surface conditions, the paper presents the corresponding roadway capacity values.

关键词: 城市道路; 破损路面; 通行能力; 交通流; 修正系数

Keywords: urban roadway; poor pavement surface; capacity; traffic flow; adjusted coefficient

中图分类号: U491.1⁺14

文献标识码: A

收稿日期: 2011-10-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目“基于不完全信息的驾驶员与过街行人非合作动态博弈研究”(HIT.NSRIF.2012062)

作者简介: 程国柱(1977—), 男, 吉林长春人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 道路交通安全、道路通行能力。E-mail: guozhucheng@126.com

0 引言

近年来, 中国城市机动车拥有量和交通量急剧增长, 许多城市机动车客运量的年增长率超过了20%, 再加上大量货运交通, 使得城市道路在高峰时段经常超负荷运营。随着道路使用年限的增长以及交通荷载的日益增加, 道路路面破损越来越普遍, 并且由于修缮不及时以及受外界条件不断变化等因素的影响, 道路路面破损趋于严重。

由于特殊的气候条件, 寒区城市每年春天会有超过30%的城市道路出现不同程度的冻胀和翻浆, 继而引发不同形式的路面破损。由于受经济和技术因素的限制, 破损道路得不到及时修缮或者在修缮时没有充分考虑交通荷载, 导致修补完成后路面承载功能低且使用期限较短。在破损路面条件下, 交通运行环境恶劣, 拥堵严重、事故频发、环境污染加剧, 道路原有通行能力得不到充分发挥, 车辆运行速度缓慢, 交通运行效率降低。

国外对破损路面的研究源自美国。货运行业的飞速发展使美国面

临道路破损问题，由此产生对破损路面的检测和等级划分^[1]，随后产生对破损条件下高速公路的交通分析^[2]。现阶段将破损路面与道路通行能力相结合的研究主要见于高速公路^[2]和城市快速路^[3]，通过采集破损条件下城市道路的交通流参数，比较其与正常道路条件下交通流参数^[4]的变化情况，分析其通行能力。

国内现阶段主要为各高校对道路破损情况检测技术的研究，大多停留在理论研究方面，应用还不广泛^[5]。在城市道路方面，鉴于城市路网交叉口多、路段短的特点，文献[5]提出等效通行能力的概念并进行了相关研究和分析，文献[6]对城市道路路段的通行能力进行了理论上的探讨和研究。

综上所述，开展破损路面对城市道路路段通行能力影响的研究，在理论研究方面，可以丰富中国交通流理论和道路通行能力研究领域研究成果；在实际应用方面，可以为城市道路的规划、设计和管理提供理论依据和决策指导，完善城市路网的功能，提高城市道路的利用效率和服务水平。

1 破损路面状况评价

不同破损程度的路面对城市交通运行的影响存在显著差异，路面破损越严重，城市道路通行能力下降得越大。因此，开展破损路面对城市道路通行能力影响的研究必须先对破损路面的状况进行评价，并对其等级进行合理划分。

1.1 评价指标

车辆的外部特征决定了路面受力主要产生于车辆轮胎与道路的接触面。在道路使用中，道路路面一般首先在车辆荷载的作用下形成压密型车辙，然后在车辆荷载的累积作用下(主要是轮胎与

路面的摩擦)，路面面层内集料颗粒逐渐脱落，形成磨耗型车辙。在车辙形成的同时，由于路面受力不均匀，会产生不同程度的横向或纵向裂缝，在雨雪的作用下，水分逐渐深入路面面层内部，加上水的物态变化和路面外部荷载的动态变化，路面车辙和裂缝逐渐向深、向大发展，直至产生结构失稳型车辙以至发展为路面坑槽。为了保证路面的正常使用，需对破损路面进行修补，修补前后的差异会对路面的正常使用产生不利影响。因此，本文选取路面车辙深度、裂缝率、坑槽宽度和修补率作为破损路面状况的评价指标。

1.2 评价方法

单因素评价标准只能反映路面某一方面的特征和使用情况，为了更准确地对路面当前使用状况进行评价，本文以灰色聚类分析方法为基础，探讨破损路面状况的评价方法。

破损路面状况等级可分为优、良、中、次、差五级。基于三角白化权函数的灰色聚类评价方法可用白化权函数描述任何一个灰数对其取值范围内不同数值的“偏爱”程度，从而达到检查观测对象是否属于事先设定的不同类别的目的。具体方法为：设有 n 个对象， m 个聚类指标， s 个不同的灰类，对象 i 关于指标 j 的样本观测值为 $x_{ij}(i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ 。根据 x_{ij} 的值对相应的对象 i 进行归类，步骤如下：

第一步：根据所需划分的灰类数 s ，将各个指标的取值范围也相应地划分为 s 个灰类，例如，将指标 j 的取值范围 $[a_1, a_{s+1}]$ 划分为： $[a_1, a_2), \dots, [a_{k-1}, a_k), \dots, [a_s, a_{s+1}]$ ，其中 $a_k(k=1, 2, \dots, s)$ 的值一般根据实际问题的要求或定性研究结果确定。

第二步：给出对象 i 的指标 j 关于灰类 k 的三角白化权函数(隶属度) $f_j^k(x_{ij})(j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, s)$ ，

$$f_j^1(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [a_0, a_3], \\ 1, & x \in [a_0, \lambda_1], \quad \lambda_1 = \frac{1}{2}(a_1 + a_2), \\ (a_3 - x)/(a_3 - \lambda_1), & x \in [\lambda_1, a_3], \end{cases} \quad (1)$$

$$f_j^k(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [a_{k-1}, a_{k+2}], \\ (x - a_{k-1})/(\lambda_k - a_{k-1}), & x \in [a_{k-1}, \lambda_k], \quad \lambda_k = \frac{1}{2}(a_k + a_{k+1}), \\ (a_{k+2} - x)/(a_{k+2} - \lambda_k), & x \in [\lambda_k, a_{k+2}], \end{cases} \quad (2)$$

$$f_j^s(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [a_{s-1}, a_{s+2}], \\ (x - a_{s-1})/(\lambda_s - a_{s-1}), & x \in [a_{s-1}, \lambda_s], \\ (a_{s+2} - x)/(a_{s+2} - \lambda_s), & x \in [\lambda_s, a_{s+2}]. \end{cases} \quad \lambda_s = \frac{1}{2}(a_s + a_{s+1}), \quad (3)$$

第三步：计算对象 i 关于灰类 k 的综合聚类系数

$$\delta_i^k = \sum_{j=1}^m f_j^k(x_{ij})\eta, \quad (4)$$

式中： η 为指标 j 在灰色聚类中的权重，可参照表1选取。

第四步：由 $\max_{1 \leq k \leq s} \{\delta_j^k\} = \delta_j^{k^*}$ 判断对象 i 属于灰类 k^* 。当有多个对象同属于灰类 k^* 时，可根据各对象综合聚类系数大小确定同属于灰类 k^* 的优劣位次。

通过以上分析，得到破损路面状况等级划分结果，见表2。

2 破损路面与交通流参数调查

为了确定不同等级破损路面条件下的道路通行能力，需要对不同等级破损路面当前的运行状况进行调查，掌握在破损条件下城市道路路段的交通流参数，通过与正常条件下(设计规范推荐值)各种参数进行比较分析，探讨破损路面对交通流的影响。

2.1 调查概况

本文选定哈尔滨市区13个路段进行破损路面状况调查和路段交通流参数调查。

1) 调查时间。

根据哈尔滨市气候条件，在春季城市道路会发生不同程度的翻浆和冻胀，此时的道路使用条件可以满足调查需要。确定调查时间为2011年3月下旬至5月上旬，在每天的早晚高峰时段调查选定路段的交通运行状况。

2) 调查对象。

选定的各等级城市道路路段包括：快速路(哈尔滨二环)：南直路；主干路：中山路、红旗大街；次干路：黄河路、革新街；支路：宣庆街、平公街。

3) 调查内容。

破损路面状况调查包括所选路段的路面车辙深度、裂缝率、坑槽宽度和修补率；交通流参数调查包括对选定横断面及其前后50 m的横断面进行交通流数据采集，统计所选路段的饱和车头时距和平均行程车速。

2.2 调查结果

根据观测结果，调查路段的路面车辙深度、裂缝率、坑槽宽度和修补率范围分别为7~17 mm、3.7%~44.2%、0.2~0.7 m和1%~10%。基于调查数据并结合实践经验，确定各评价指标的取值范围，并将各评价指标分为优、良、中、次、差5个等级；计算各路段的4种评价指标关于其

表1 各个指标在灰色聚类中的权重

Tab.1 The weight of indicators in grey cluster analysis

指标	车辙深度	裂缝率	坑槽宽度	修补率
权重	0.35	0.15	0.25	0.25

表2 破损路面状况等级划分结果

Tab.2 Classification of poor pavement surface conditions

破损路面状况等级	优	良	中	次	差
$\max_{1 \leq k \leq 5} \{\delta_j^k\} = \delta_j^{k^*}$	$\max_{1 \leq k \leq 5} \{\delta_j^k\} = \delta_j^{1^*}$	$\max_{1 \leq k \leq 5} \{\delta_j^k\} = \delta_j^{2^*}$	$\max_{1 \leq k \leq 5} \{\delta_j^k\} = \delta_j^{3^*}$	$\max_{1 \leq k \leq 5} \{\delta_j^k\} = \delta_j^{4^*}$	$\max_{1 \leq k \leq 5} \{\delta_j^k\} = \delta_j^{5^*}$

应等级的三角白化权函数以及各路段关于破损路面状况等级的综合聚类系数，根据结果判断各路段破损路面状况等级。

应用综合评价方法对所选路段进行破损路面状况等级划分，见表3。本次调查路段的破损路面状况涵盖了各个等级，其中：等级为优的有3个路段，等级为良的有4个路段，等级为中的有2个路段，等级为次的有2个路段，等级为差的有2个路段。

3 破损路面对交通流的影响

3.1 对饱和车头时距的影响

饱和车头时距是指稳定行驶的连续流的车头时距，常用于对道路通行能力的分析和研究。调查路段最小的饱和车头时距为2.20 s，位于红旗大街黄河路至长江路路段，该路段的道路等级为主干路，路面状况等级为优；最大的饱和车头时距为3.64 s，位于平公街华山北路至海滨街路段，该路段的道路等级为支路，路面状况等级为差，见表3。

对比破损路面状况等级相同时不同道路等级的路段饱和车头时距可以发现，道路等级高的路段饱和车头时距低于道路等级低的路段，见图1。对比道路等级相同时不同破损路面状况等级的路段饱和车头时距可以发现，

在道路等级相同的条件下，破损路面状况等级高的路段饱和车头时距低于破损路面状况等级低的路段，见图2。

3.2 对平均行程车速的影响

本文采取抽样调查法，在调查路段随机抽取100辆车，分别统计各个车辆的瞬时速度，然后计算每辆车在路段的行程时间，从而得到车辆的平均行程车速，见表3。最高平均行程车速为49.0 km·h⁻¹，位于中山路文昌街至革新街路段，其饱和车头时距很小(2.27 s)，接近最小饱和车头时距(2.20 s)；最低平均行程车速为16.5 km·h⁻¹，位于宣庆街平公街至宣威街路段，其饱和车头时距较大(2.98 s)，高于宣庆街其他路段。

对比破损路面状况等级相同时不同道路等级的路段平均行程车速可以发现，道路等级高的路段平均行程车速高于道路等级低的路段，见图3。对比道路等级相同时不同破损路

表3 各调查路段详情
Tab.3 Details of surveyed roadway segments

路段所在道路	路段所在道路等级	路段界定端点		路面状况等级	饱和车头时距/s	平均行程车速/(km·h ⁻¹)
		起点	终点			
南直路	快速路	淮河东路	黄河路	次	2.61	38.0
中山路	主干路	文昌街	革新街	优	2.27	49.0
红旗大街	主干路	宏图街	卫星街	良	2.32	43.7
	主干路	先锋路	辽河路	良	2.40	41.9
	主干路	黄河路	长江路	优	2.20	47.6
	主干路	闽江路	汉水路	良	2.30	42.2
	主干路	珠江路	公滨路	中	2.45	40.8
黄河路	次干路	红旗大街	嵩山路	优	2.58	28.9
革新街	次干路	士课街	光芒街	差	3.10	21.9
宣庆街	支路	马端街	大成街	良	2.72	20.1
	支路	大成街	平公街	中	2.82	18.3
	支路	平公街	宣威街	次	2.98	16.5
平公街	支路	华山北路	海滨街	差	3.64	22.0

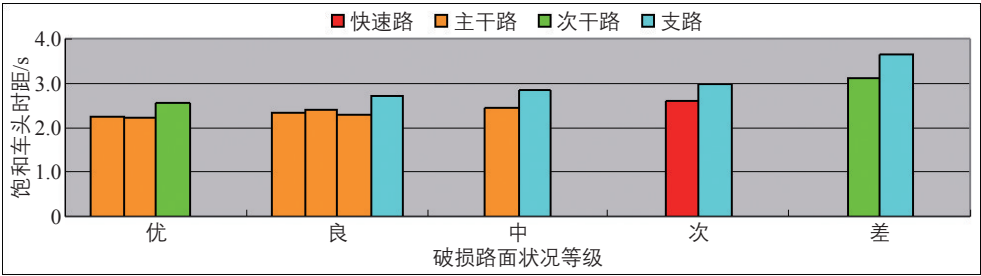


图1 破损路面状况等级相同时路段饱和车头时距比较

Fig.1 Comparison of saturated headway with the same level of pavement surface condition

面状况等级的路段平均行程车速可以发现, 破损路面状况等级高的路段平均行程车速高于破损路面状况等级低的路段, 见图4。

4 破损路面对通行能力的影响

4.1 破损路面修正系数

路面破损会影响道路的实际通行能力, 故应对该状况下的路段通行能力进行修正。本文引入破损路面修正系数 f_p , 依据图5所示流程, 对各

路段的破损路面修正系数进行标定。具体方法如下:

1) 假设破损路面修正系数 f_p 的起始值为1, C_b 为不考虑破损路面状况影响的路段通行能力, C_b 值经过 f_p 修正后, 得到考虑破损路面状况影响的通行能力 C_{p0} 。

2) 将破损路面状况下测得的实际通行能力 C_p 与 C_{p0} 比较, 计算两者之间的相对误差。若相对误差 δ 未超出误差容许范围 ξ (本文设定为5%), 则认为得到的 f_p 为可用结果; 若相对误差 δ 超出

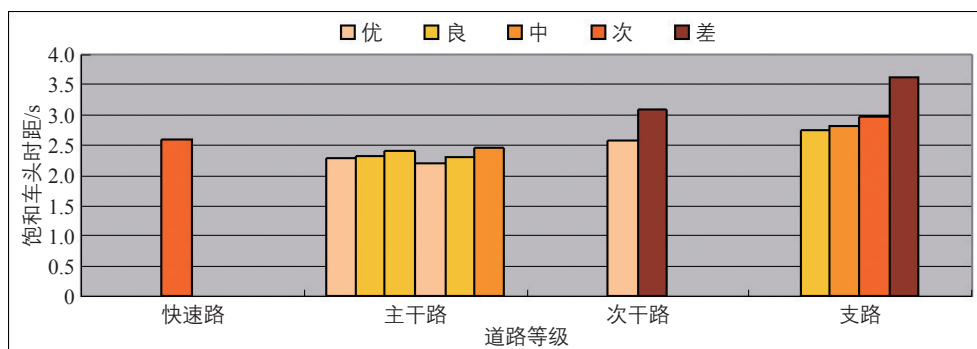


图2 道路等级相同时路段饱和车头时距比较

Fig.2 Comparison of saturated headway with the same roadway classification

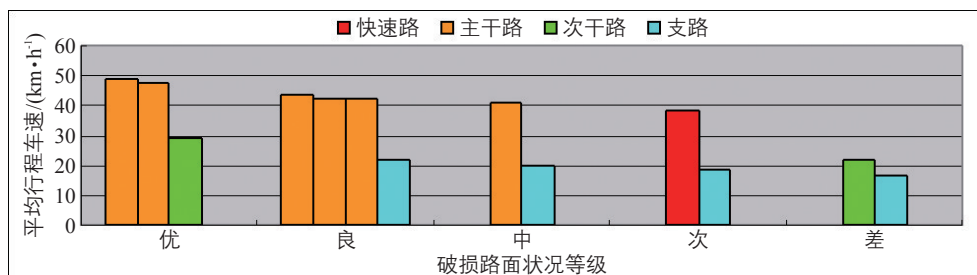


图3 破损路面状况等级相同时路段平均行程车速比较

Fig.3 Comparison of average operating speed with the same level of pavement surface condition

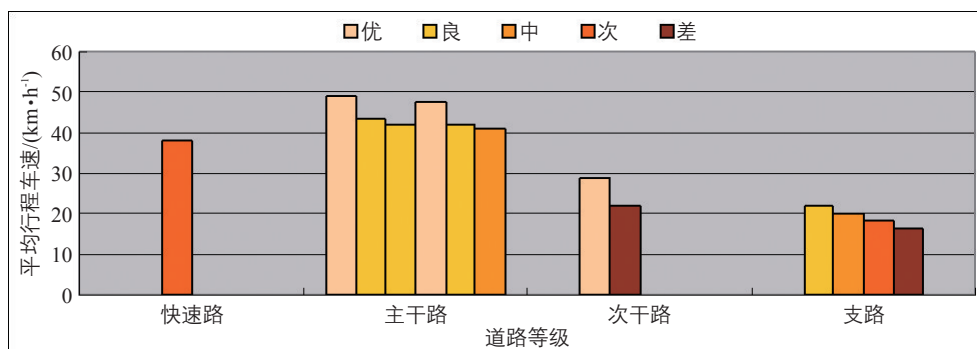


图4 道路等级相同时路段平均行程车速比较

Fig.4 Comparison of average operating speed with the same roadway classification

误差容许范围 ξ ，则对 f_p 进行调整。

3) 调整时，若 $\delta > 0$ ，说明 C_{p0} 偏低，应提高 f_p 的值；若 $\delta < 0$ ，说明 C_{p0} 偏高，应降低 f_p 的值。本文均以 0.01 为步长进行循环运算。

4) 返回新生成的 f_p 值，重复步骤 2) 和 3)，直至得到的相对误差 δ 在误差容许范围 ξ 内，结束修正。此时认为得到的 f_p 值是可用结果。

应用以上方法得出各调查路段的破损路面修正系数 f_p ，见表 4。

将各调查路段破损路面修正系数和破损路面状况等级相结合，应用数理统计分析的方法，可以求出各破损路面状况等级下路段通行能力的破损路面修正系数取值区间。

首先，进行归类分析，将破损路面状况等级相同的破损路面修正系数归为一类，按大小排序，初步求出其取值的极限范围；其次，将各类破损路面修正系数进行综合分析，去掉相交部分，确定相邻等级之间修正系数的界限；最后，给出各破损路面状况等级下路段通行能力的破损路面修正系数的取值区间，见表 5。

4.2 破损路面通行能力推荐值

城市道路路面破损条件下道路通行能力的修正公式为

$$C_{p0} = C_b f_p, \tag{5}$$

式中： C_{p0} 为破损路面条件下城市道路路段的通行能力/(pcu·h⁻¹·车道⁻¹)； C_b 为路面状况良好段的

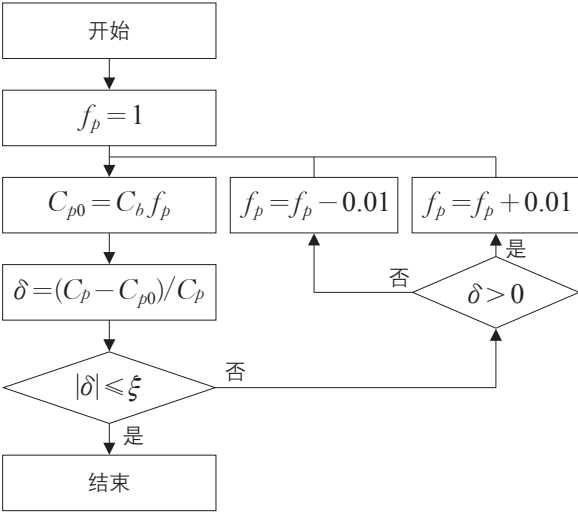


图 5 破损路面修正系数标定流程
Fig.5 Calibration of adjusted coefficient of poor pavement surface condition

表 4 破损路面修正系数统计
Tab.4 Statistics on adjusted coefficient of poor pavement surface conditions

路段编号	f_p	路段编号	f_p
1	0.80	8	0.83
2	0.94	9	0.71
3	0.92	10	0.88
4	0.89	11	0.85
5	0.97	12	0.82
6	0.93	13	0.78
7	0.87		

表 5 不同破损路面状况等级对应的城市道路路段通行能力修正系数
Tab.5 Adjusted coefficients of urban roadway capacity with poor pavement surface conditions

破损路面状况等级	优	良	中	次	差
f_p	(0.95, 1]	(0.90, 0.95]	(0.85, 0.90]	(0.80, 0.85]	(0.70, 0.80]

表 6 不同破损路面状况等级对应的城市道路路段通行能力推荐值
Tab.6 Recommended capacity of urban roadway with different levels of pavement surface conditions pcu·h⁻¹·车道⁻¹

破损路面状况等级	设计速度/(km·h ⁻¹)			
	60	50	40	30
优	(1 645, 1 730 ¹⁾]	(1 605, 1 690]	(1 560, 1 640]	(1 470, 1 550]
良	(1 560, 1 645]	(1 520, 1 605]	(1 475, 1 560]	(1 395, 1 470]
中	(1 470, 1 560]	(1 435, 1 520]	(1 395, 1 475]	(1 315, 1 395]
次	(1 385, 1 470]	(1 350, 1 435]	(1 310, 1 395]	(1 240, 1 315]
差	(1 210, 1 385]	(1 180, 1 350]	(1 150, 1 310]	(1 085, 1 240]

1) 参考《道路通行能力分析》^[7]中推荐值。

通行能力/(pcu·h⁻¹·车道⁻¹)。

根据《城市道路设计规范》(CJJ37—90)中提出的不同设计速度下路段通行能力值,结合公式(5)和表5,计算得到不同破损路面状况等级对应的城市道路路段的通行能力推荐值,见表6。

5 结语

破损路面对城市道路路段通行能力的影响是一个新的研究方向,本文提出了初步的分析思路、计算方法和推荐指标。为更好地指导实践、提高方法的适用性,需要深入研究的问题还有很多,例如,除本文给出的4种典型的破损路面评价指标外,是否还需加入其他指标,尚待后续研究;文中给出的观测数据受调查地域的限制,依据其得到的分析结论是否适用于其他城市有待进一步验证。

参考文献:

References:

- [1] 王泽民. 混凝土路面破损评价与维修对策研究[D]. 西安: 长安大学, 2007: 46-80.
Wang Zemin. Studies on the Distress Evaluation and Repair Strategies for Concrete Pavements[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007: 46-80.
- [2] 程国柱, 裴玉龙. 高速公路破损路面的最高车速限制[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(6): 714-717.
Cheng Guozhu, Pei Yulong. Maximum Speed Limit on Freeway with Damaged Pavement[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(6): 714-717.
- [3] 诸葛敬敏. 城市快速道路交通流特性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2000: 26-54.
Zhuge Jingmin. A Study of Traffic Behaviors on Urban Expressway[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2000: 26-54.
- [4] 张亚平, 裴玉龙. 交通流数据采集、处理及其在通行能力分析中的应用研究[J]. 东北公路, 2003, 26(1): 82-85.
Zhang Yaping, Pei Yulong. Traffic Flow Data Collecting and Processing System and Its Application in Highway Capacity Analysis[J]. Northeastern Highway, 2003, 26(1): 82-85.
- [5] 茹红蕾, 邵敏华, 孙立军. 城市道路等效通行能力的交通流模型选择[J]. 交通与计算机, 2007, 25(2): 35-38.
Ru Honglei, Shao Minhua, Sun Lijun. Traffic Flow Model Choice of Urban Road Equivalent Capacity [J]. Computer and Communications, 2007, 25(2): 35-38.
- [6] 周伟, 王秉刚. 路段通行能力的理论探讨[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(2): 92-98.
Zhou Wei, Wang Binggang. Theoretical Study about Road Section Capacity[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(2): 92-98.
- [7] 陈宽民, 严宝杰. 道路通行能力分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
Statement of Operations [R]. New York: MTA, 2010.
- [8] Cudahy B J. Under the Sidewalks of New York: The Story of the Greatest Subway in the World [M]. New York: Fordham University Press, 1995.
- [9] NYCTA. New York City Transit Authority, Consolidated Financial Statements [R]. New York: NYCTA, 2008.
- [10] MTA. Metropolitan Transportation Authority Financial
- [11] Pushkarev B S, Zupan J M, Cumella R S. Urban Rail in America [M]. Bloomington: Indiana University Press, 1983.
- [12] Attoe W, Henderson P. Transit, Land Use and Urban Form [R]. Austin: School of Architecture, the University of Texas, 1988.

(上接第39页)