

文章编号:1671-1637(2014)01-0097-06

非确定因素影响下离散时段公路施工区用户费用模型

杨琦¹, 杨云峰², 武大勇³, 赵现伟¹

(1. 长安大学 经济与管理学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西交通职业技术学院, 陕西 西安 710018;
3. 德克萨斯理工大学 土木与环境工程系, 德克萨斯 卢伯克 79409)

摘要:分析了离散时段下高速公路施工区的交通状况,通过离散施工时段,比较了各时间段内施工区容量和交通需求的关系,建立了各个时间段相应的用户费用计算模型。分析了高速公路施工区用户费用的非确定因素,根据非确定因素的概率分布值,通过蒙特卡罗模拟对用户费用的波动区间进行预测,并以清连高速公路为例进行实例验证。计算结果表明:应用提出的模型,白天施工时段的用户费用均值为193 148 021元,最大值与最小值分别为466 820 060、117 342 849元,夜晚施工时段的用户费用均值为1 795 047元,最大值与最小值分别为3 443 468、1 417 274元。提出的模型能更好地体现非确定因素的影响。

关键词:交通运输经济;施工区;用户费用;蒙特卡罗方法;非确定因素;离散时段
中图分类号:F812 **文献标志码:**A

User cost model of highway work zone during discrete periods under influence of uncertain factors

YANG Qi¹, YANG Yun-feng², WU Da-yong³, ZHAO Xian-wei¹

(1. School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
2. Shaanxi College of Communications Technology, Xi'an 710018, Shaanxi, China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, Texas Tech University, Lubbock 79409, Texas, USA)

Abstract: The traffic situation of highway work zone during discrete periods was analyzed. By dispersing the work periods, the relationships between the capacities of work zones and user costs during different discrete periods were compared, and the calculation models of user costs during corresponding periods were set up. The uncertain factors of user cost for highway work zone were analyzed. Based on the probability distributions of uncertain factors, the fluctuation scope of user cost was predicted by using Monte Carlo simulation and verified by the example of Qinglian Highway. Calculation result indicates by using the proposed model, the average user cost under the day-time work scheme is 193 148 021 yuan, and the maximum and minimum costs are 466 820 060, 117 342 849 yuan respectively. The average user cost under the night-time work scheme is 1 795 047 yuan, and the maximum and minimum costs are 3 443 468, 1 417 274 yuan respectively. It is found that the application of proposed model can show the influences of uncertain factors well. 3 tabs, 5 figs, 18 refs.

收稿日期:2013-08-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51278057);交通运输部西部交通科技建设项目(2011 318 820 1420);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G1221025, 2013G1221026)

作者简介:杨琦(1963-),男,陕西白水人,长安大学教授,工学博士,从事道路运输经济研究。

Key words: transportation economy; work zone; user cost; Monte Carlo method; uncertain factor; discrete period

Author resume: YANG Qi(1963-), male, professor, PhD, +86-29-82334384, yangqi@chd.edu.cn.

0 引言

20世纪90年代以来,中国公路尤其是高速公路进入大规模建设时期,截止2012年底,全国公路通车里程达到 423.75×10^4 km,高速公路通车里程已达到 9.62×10^4 km,在国民经济增长与社会发展中发挥了重要的作用。随着公路使用年限的增长,在自然环境和在使用过程中超载等因素的综合作用下,公路路面病害损毁日趋严重。据统计,1998年前建成的高速公路目前开始全面进入大修期,1998年后建成的公路也普遍进入维修养护期。在养护与改扩建施工中,施工区的设置必然会对交通产生一系列的影响,包括道路通行能力下降、事故率上升、燃料额外消耗、交通拥挤、车辆延误等,导致使用者的用户费用急剧增加,在某些情况下甚至超出养护费用,因此,在高速公路养护的规划决策中,需充分考虑施工区用户费用,并通过合理的施工区设置来降低用户费用,优化高速公路养护施工方案。

施工区用户费用是道路使用者在道路受到施工区限制时所支出的费用,主要包括车辆运营费、延误费、事故费等,近年来,施工区用户费用得到越来越广泛的关注。据Hallin等2009年的调查统计,美国共有25个州在制定养护方案中考虑用户费用,占所调查35个州的71%^[1];Bennett等提出了计算道路施工对交通和用户费用影响的方法,其中将用户费用界定为用户延时费用、车辆延时运行费用、油料费用等^[2];Benekohal等研究了施工区设置时交通容量、拥堵队列长度与拥堵延时的确定方法^[3];Walls等分析了施工区设置状况与事故发生率、用户费用的关系^[4]。此外,随着施工区用户费用计算方法的日趋复杂化,用户费用计算软件也陆续出现,代表性的包括美国得克萨斯州开发的MicroBEN-COST、世界银行开发的HDM4、佛罗里达大学开发的QuickZone等;张丰焰等通过构造公路养护方案的效用函数与项目价值函数,对养护方案进行比选排序^[5];喻东晓等提出了道路维修养护施工对用户费用影响的计算方法^[6];章静敏等探讨了道路养护施工中用户费用的组成与计算方法^[7];徐海成分析了道路全寿命成本中的用户费用^[8];王子浜等针对道路施工区车辆延误提出了分析施工区车辆延误的

方法,引入交通仿真技术分析计算施工区影响范围内的运行延误、排队延误、加减速延误与绕行延误,确保了施工区车辆延误分析的全面性和准确性^[9];朱坚和等从路网交通调查、交通控制、通行能力、施工区特征等方面针对网级道路施工区用户成本进行了分析,根据所计算的车辆运营费用、延误费用、事故费用提出了在不同路网、不同交通措施情况下包含不同费用类型的用户成本计算方法^[10];王忠仁通过对施工区基本交通分析技术入手,深入阐述了美国施工区交通管理的量化指标与管理程序以及公众信息、旅行者信息、事件管理、施工策略和需求管理等5大基本管理策略^[11]。

上述研究大多没有考虑施工区在不同时段内的交通容量和实际交通量的变化,因而也无法反映不同施工时段设置对用户费用的影响,由此也就无法解决施工区本身或道路养护全生命周期中非确定因素的影响。基于此,本文建立非确定因素影响下的离散时段用户费用决策模型,通过离散施工时段,比较各时间段内施工区容量和交通需求的关系,建立相应时段的用户费用计算模型,根据模型中不确定因素概率分布值,通过蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟,对用户费用的波动区间进行预测,为决策者提供更为科学的养护决策依据。

1 离散时段下施工区用户费用计算模型

在离散时段下,典型的施工区交通容量、道路交通量与拥堵队列见图1。在起始时段内,道路交通量小于施工段交通容量,不产生拥堵,因而用户费用仅考虑用户减速通过施工区的延时费用。随着交通量的增大,在接下来的时间段内,开始产生拥堵,用

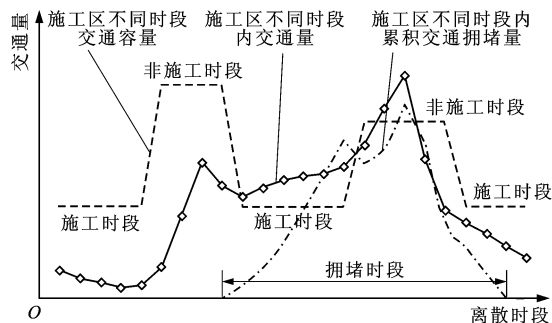


图1 离散时段下施工区交通状况

Fig. 1 Traffic situation for work zone during discrete periods

户费用需要考虑因拥堵和施工区同时产生的延时费用。在其他时段内,如畅行情况无施工区情况下,用户拥堵费用或为 0,同时在某些时间段,即使没有施工区,也会因拥堵产生部分用户拥堵费用。综上,在离散时段下,令 Z_{i1} 为畅行时段 i 施工区用户延时费用; Z_{i2} 为畅行时段 i 施工区机动车运行费用; Z_{i3} 为畅行时段 i 施工区事故费用; Z_{i4} 为拥堵时段 i 施工区延时费用; Z_{i5} 为拥堵时段 i 施工区机动车运行费用; Z_{i6} 为拥堵时段 i 施工区事故费用; Z_{i7} 为拥堵时段 i 非施工区用户延时费用; Z_{i8} 为拥堵时段 i 非施工区机动车运行费用。本文假设拥堵条件下的交通量是均匀的,施工区畅行条件下,非施工时段用户费用为

$$C_1 = 0 \quad (1)$$

施工区畅行条件下,施工时段用户费用为

$$C_2 = Z_{i1} + Z_{i2} + Z_{i3} \quad (2)$$

施工区拥堵条件下,施工时段用户费用为

$$C_3 = Z_{i4} + Z_{i5} + Z_{i6} \quad (3)$$

施工区拥堵条件下,非施工时段用户费用为

$$C_4 = Z_{i7} + Z_{i8} \quad (4)$$

在畅行时段,式(2)中相应的计算参数 Z_{i1} 、 Z_{i2} 、 Z_{i3} 分别为

$$Z_{i1} = \left(\frac{1}{V_{wz}} - \frac{1}{V_n} \right) L_{wz} D_i N C_v \quad (5)$$

$$Z_{i2} = \left(\frac{1}{V_{wz}} - \frac{1}{V_n} \right) L_{wz} D_i N C_u \quad (6)$$

$$Z_{i3} = L_{wz} D_i N (A_{wz} - A_n) C_a \quad (7)$$

式中: L_{wz} 为施工区长度; V_{wz} 为施工区车辆限速; V_n 为车辆畅行速度; D_i 为时段 i 日平均交通量; N 为施工天数; C_u 为用户时间费用; C_v 为车辆运行费用; A_{wz} 为施工区每百万车公里事故率; A_n 为正常道路每百万车公里事故率; C_a 为一次事故费用。

在拥堵时段,式(3)中相应的计算参数 Z_{i4} 、 Z_{i5} 、 Z_{i6} 分别为

$$Z_{i4} = \left[\left(\frac{1}{V_{wz}} - \frac{1}{V_n} \right) L_{wz} D_i + \left(\frac{1}{V_q} - \frac{1}{V_n} \right) L_q T_{qi} \right] N C_u \quad (8)$$

$$Z_{i5} = \left[\left(\frac{1}{V_{wz}} - \frac{1}{V_n} \right) L_{wz} D_i + \left(\frac{1}{V_q} - \frac{1}{V_n} \right) L_q T_{qi} \right] N C_v \quad (9)$$

$$Z_{i6} = (L_{wz} + L_q) D_i N (A_{wz} - A_n) C_a \quad (10)$$

式中: L_q 为车辆拥堵长度; T_{qi} 为时段 i 内拥堵交通量; V_q 为车辆拥堵时速。

在拥堵时段,非施工区用户延时费用 Z_{i7} 为

$$Z_{i7} = \left(\frac{1}{V_q} - \frac{1}{V_n} \right) L_q T_{qi} N C_u \quad (11)$$

在拥堵时段,非施工区机动车运行费用 Z_{i8} 为

$$Z_{i8} = \left(\frac{1}{V_q} - \frac{1}{V_n} \right) L_q T_{qi} N C_v \quad (12)$$

$$L_q = T_{qi} L_v \quad (13)$$

$$T_{qi} = \begin{cases} 0 & D_i \leq D_{0i} \\ \sum (D_i - D) & D_i > D_{0i} \end{cases} \quad (14)$$

式中: L_v 为车辆平均长度; D_{0i} 为时段 i 的施工区交通容量。

根据式(5)~(14),通过比较各个离散时段内交通流量需求和施工区交通容量,确定该时段内用户费用,代入式(1)~(4)中,即可计算出该时段内施工区产生的用户费用。

2 施工区用户费用非确定因素分析

在上述用户费用时,可发现由施工区引起的用户费用受很多非确定性因素的影响,如年平均交通量的变化、施工区交通容量的改变、施工区长度的设定、折现利率的波动等。这些非确定因素会使施工区用户费用也发生很大的波动,因此,在养护方案决策中必须加以考虑。

在非确定因素的分析中,蒙特卡罗方法是一种较为有效的方法。蒙特卡罗方法又称统计模拟法,是一种以概率和统计理论方法为基础的随机模拟方法,其基本思路是将所求解的问题同一定的概率模型相联系,用 MATLAB 计算实现统计模拟或抽样,以获得问题的近似解。在本文对施工区用户费用非确定因素的分析中,尝试引入蒙特卡罗分析法来预测不确定条件下道路全生命周期中产生的施工区用户费用。假定函数为一未知的函数式,往往用解析法不能求得变量的概率分布,其相关参数如期望值、方差等也无法获得。在上述情况下,蒙特卡罗方法就是通过直接或间接抽样求出每一随机变量,然后代入求出函数值,如此反复独立模拟特定的次数,便得到函数的一批模拟数据。当独立模拟的次数达到一定规模时,就可以由此来确定函数的概率特征^[12],3个步骤如下。

Step 1:构造或描述概率过程,对所描述的风险变量进行描述(包括概率分布域值等)。

Step 2:实现从已知概率分布抽样。

Step 3:输出模拟试验结果与概率曲线。

在考虑非确定因素下的施工区用户费用模型中,自变量为影响用户费用的非确定因素,因变量为用户费用。在输入非确定分析的参数并赋予其适当的概率分布之后,本模型将运用蒙特卡罗方法确定全生命周期中累积的施工区用户费用的范围,计算

结果包括均值、正负方差值、最大值、最小值。

在施工区用户费用的具体计算中,通常考虑以下非确定因素:折现率、年均交通增长率、道路畅行交通量、施工区交通量、拥堵消散交通量、用户延时费用、车辆运行费用、施工区事故率与施工区长度。其中折现率、年均交通增长率及施工区事故率通过历史数据回归得到;道路畅行交通量、施工区交通量及拥堵消散交通量来源于观测值;用户延时费用与车辆运行费用可以根据文献假设得到。当逐一确定上述非确定因素相应概率分布及参数以后,代入式(1)~(14)中,然后通过 MATLAB 软件进行蒙特卡罗模拟,对每个参数设定特定输入次数,如 2 000 次循环,从而得到施工区用户费用的取值范围(本文中主要是全寿命周期中累积用户费用值,包括均值、正负方差值、最大值和最小值)。上述施工区用户费用模型计算流程见图 2。

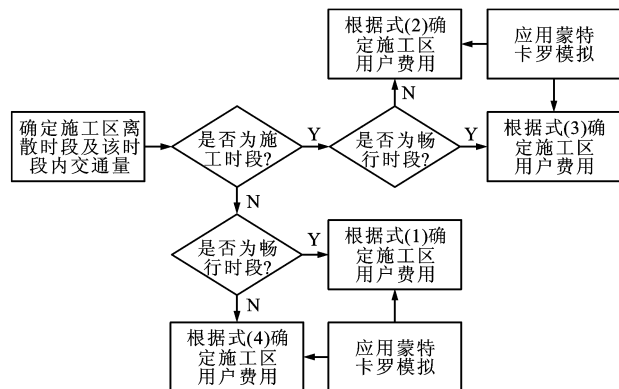


图 2 计算流程
Fig. 2 Calculation flow

3 计算结果分析

为验证上述施工区用户费用模型的可行性,本文选取清连高速公路的养护施工方案进行实例验证。清连高速公路起点为广东省清远市,终点为广东省连州市,全长为 215 km,全线采用双向 4 车道高速公路标准建设,设计速度为 80~100 km·h⁻¹,全线于 2011 年 9 月全线通车。清连高速在 25 年全寿命周期中有 3 次中修维护,相对中修而言,路面日常维护措施对交通产生的干扰较小,产生的用户费用也较低,因此,本文中仅考虑中修时施工区产生的用户费用。

根据本文中按离散时间段分析的施工区用户费用模型,用户费和施工区时间设置密切相关。图 3 为清连高速 2012 年日平均交通量的 24 h 分布情况,从中可以看出,早高峰在 11:00 左右形成,晚高峰

在 17:00 左右形成。根据此种交通量分布,中修方案考虑 2 种施工区设置,即白天施工方案和夜晚施工方案,施工工期为 80 d,施工费用为 49 268 1125 元,见表 1^[13-18]。

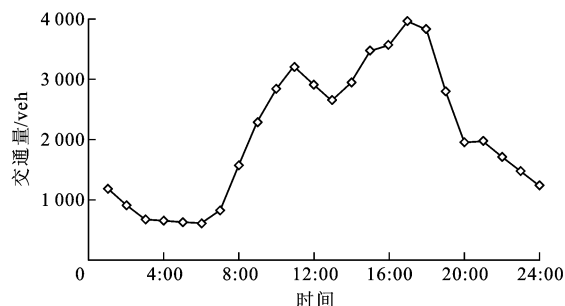


图 3 日平均交通量分布

Fig. 3 Distribution of average daily traffic volumes

表 1 施工方案

Tab. 1 Work scheme

施工方案	年份	施工时间
白天	2022	8:00~16:00
	2029	
	2036	
夜晚	2022	0:00~8:00
	2029	
	2036	

根据上文所述,在本文的施工区用户费用计算中需要考虑很多非确定性参数,其概率分布参数见表 2。折现率分布来源于 1991~2012 年折现率历史数据的回归;年均交通增长率概率分布来自于清连高速自 2009 年运营以来 3 年交通量历史数据回

表 2 施工区非确定性参数

Tab. 2 Uncertain parameters for work zone

影响因素	分布类型	分布参数
折现率/%	正态分布	(2.17, 8.75)
年均交通增长率/%	三角分布	(6.44, 12.64, 17.24)
道路畅行交通量/pcu	正态分布	(2 180, 218)
施工区交通量/pcu	正态分布	(1 490, 149)
拥堵消散交通量/pcu	正态分布	(1 818, 144)
用户延时费用/元	正态分布	2 类车 (10.3, 1.03)
		3 类车 (17.1, 1.71)
		5 类车 (50.2, 5.02)
车辆运行费用/元	正态分布	2 类车 (21.4, 2.14)
		3 类车 (44.4, 4.44)
		5 类车 (102.3, 10.23)
施工区事故率	正态分布	正常 (1.9, 0.19)
		施工区 (2.2, 0.22)

归;道路畅行交通量、施工区交通量、拥堵消散交通量的概率分布来源于美国国家公路管理局的调查统计;用户延时费用、车辆运行费用概率分布来源于文献[10]的施工区用户成本数据。

在上述参数概率分布确定以后,将各参数代入本文施工区用户计算模型,通过 MATLAB 软件进行蒙特卡罗模拟非确定因素的影响。本文中,对每个参数设定输入 2 000 次,共计 20 000 次模拟循环,从而得到清连高速在 25 年全寿命周期中,2 种不同作业时段非确定因素影响下施工区用户费用累积值范围,见图 4、5,具体费用范围值见表 3。

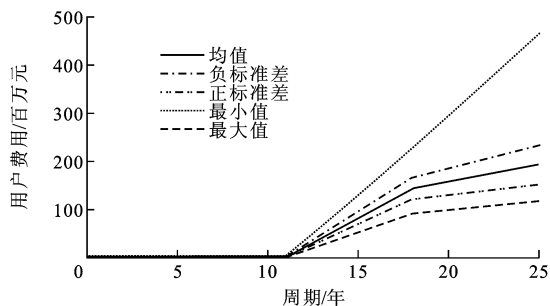


图 4 白天施工方案下累积用户费用

Fig. 4 Cumulative user costs under day-time work scheme

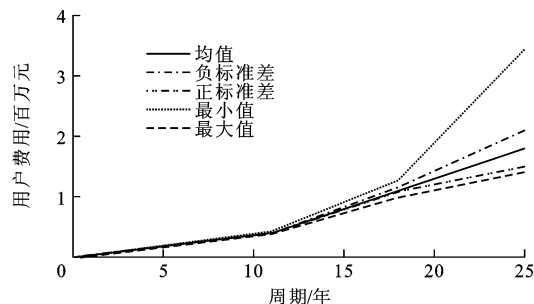


图 5 夜晚施工方案下累积用户费用

Fig. 5 Cumulative user costs under night-time work scheme

表 3 用户费用范围

Tab. 3 User cost ranges

元

施工方案	年份	2022	2029	2036
白天	均值	1 670 790	144 549 138	193 148 021
	负标准值	1 632 177	121 662 792	152 401 424
	正标准值	1 709 403	167 435 484	233 894 618
	最小值	1 560 136	92 303 980	117 342 849
	最大值	2 199 416	227 126 837	466 820 060
夜晚	均值	404 735	1 127 463	1 795 047
	负标准值	397 476	1 083 665	1 486 936
	正标准值	411 994	1 171 261	2 103 158
	最小值	378 200	985 150	1 417 274
	最大值	433 893	1 266 055	3 443 468

在 25 年全寿命周期中,白天施工区的用户费用

均值为 193 148 021 元,夜晚施工区的用户费用均值为 1 795 047 元,仅为白天施工区费用的百分之一,两者相差巨大。通过关注用户费用从而可以得出如果合理地安排施工时段,可以大大降低用户费用,提高社会效益。

此外,本文提出的用户费用模型也能更全面地考虑用户费用中非确定因素的具体影响。在本文中,25 年全寿命周期中夜晚施工区的用户费用均值为 1 795 047 元,最大值为 3 443 468 元,最小值为 1 417 274 元(±100%范围内),正方差范围内值为 2 103 158 元,负方差范围内值为 1 486 936 元(±68.4%范围内)。这些数值可为公路管理决策者在指定养护方案时提供比静态分析更为可靠的支持。

4 结 语

施工区用户费用随着中国高速公路从大规模建设期转入保养维护期而日益成为道路管理机构关心的问题。如何有效地预测用户费用并合理地安排施工活动,进而降低用户费用,节约社会资源,已成为道路管理机构在制定养护规划时的重要决策因素。本文提出了一种以离散时段实际交通流量需求和施工区容量为基础,并考虑非确定因素影响下的施工区用户费用计算模型。通过离散施工时段,比较各时段内施工区容量和交通需求的相互关系,建立起相应时段的用户费用计算模型。而对于模型中的不确定因素,通过蒙特卡罗模拟概率分布,预测用户费用的波动区间,为决策者提供更为科学的养护决策依据。通过分析不同时段内交通需求和施工区容量的关系,可以预测不同时段施工区设置产生的用户费用,同时通过按不同概率分布输入未确定因素的蒙特卡罗模型,可以预测全寿命周期内施工区产生的用户费用的范围。在清连高速 25 年全寿命周期中,施工时段在白天的用户费用均值为 193 148 021 元,施工时段在夜晚的用户费用均值为 1 795 047 元。而考虑非确定因素的概率分布,25 年全寿命周期中夜晚施工区的用户费用均值为 1 795 047 元,最大值为 3 443 468 元,最小值为 1 417 274 元(正负 100%范围内),正方差范围内值为 2 103 158 元,负方差范围内值为 1 486 936 元(正负 68.4%范围内)。本文施工区非确定因素概率分布值的确立主要来自国外文献或笔者根据经验的假设,为了更好地反映不同高速公路的施工区特点,可以在后续的研究中进行具体的实地测算来确定。

参 考 文 献 :

References :

- [1] HALLIN J P, SADASIVAM S, MALLELA J, et al. Guide for pavement-type selection[R]. Washington DC: TRB, 2011.
- [2] BENNETT C R, GREENWOOD I D. Modeling road user and environmental effects in HDM-4[R]. Washington DC: FHWA, 1995.
- [3] BENEKOHAL R F, KAJA-MOHIDEEN A, CHITTURI M V. Evaluation of construction work zone operational issues: capacity, queue, and delay[R]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2003.
- [4] WALLS J, SMITH M R. Life-cycle cost analysis in pavement design[R]. Washington DC: FHWA, 1998.
- [5] 张丰焰, 史 强, 王元庆. 公路养护工程分类方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(4): 39-42.
ZHANG Feng-yan, SHI Qiang, WANG Yuan-qing. Classification of highway maintenance works[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(4): 39-42. (in Chinese)
- [6] 喻东晓, 刘黎萍, 孙立军. 道路维修养护施工期间的用户费用增量的计算方法[J]. 城市道桥与防洪, 2009, 9(9): 88-91.
YU Dong-xiao, LIU Li-ping, SUN Li-jun. Calculation method of incremental road user cost during road maintenance and construction[J]. Urban Roads Bridges and Flood Control, 2009, 9(9): 88-91. (in Chinese)
- [7] 章静敏, 薛 文, 陈立文. 费用效益模型在公路养护经济决策中的应用[J]. 河北工业大学学报, 2009, 38(3): 77-80.
ZHANG Jing-min, XUE Wen, CHEN Li-wen. The research of benefit model in highway maintenance economical decision-making[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2009, 38(3): 77-80. (in Chinese)
- [8] 徐海成. 中国收费公路养护运行机制改革[J]. 长安大学学报: 社会科学版, 2007, 9(4): 20-24.
XU Hai-cheng. Reform for maintenance mechanism of toll road in China[J]. Journal of Chang'an University: Social Science Edition, 2007, 9(4): 20-24. (in Chinese)
- [9] 王子滨, 李 嘉, 蔡晓萌, 等. 道路施工区车辆延误分析与交通仿真研究[J]. 公路, 2009(7): 253-257.
WANG Zi-bang, LI Jia, CAI Xiao-meng, et al. Delay analysis of road work zone by traffic simulation technology[J]. Highway, 2009(7): 253-257. (in Chinese)
- [10] 朱坚和, 许国初. 网级道路施工区用户成本分析与仿真研究[J]. 中外公路, 2009, 29(5): 297-301.
- ZHU Jian-he, XU Guo-chu. User cost analysis and simulation research of work zone for network-level roads[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2009, 29(5): 297-301. (in Chinese)
- [11] 王忠仁. 美国施工区交通管理的关键技术和策略[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2012, 31(3): 425-431, 464.
WANG Zhong-ren. Critical techniques and strategies for US work zone transportation management[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2012, 31(3): 425-431, 464. (in Chinese)
- [12] 周 浩, 康建伟, 陈建华, 等. 蒙特卡罗方法在电力市场短期金融风险评估中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 74-77.
ZHOU Hao, KANG Jian-wei, CHEN Jian-hua, et al. Evaluating short-term financial risk in the electricity market by applying Monte Carlo method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 74-77. (in Chinese)
- [13] 高 昌. 基于全寿命周期的清连高速公路养护规划研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
GAO Chang. Maintenance planning of Qinglian Expressway based on its life cycle[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010. (in Chinese)
- [14] 万礼锋, 黄加富, 蒋慧杰, 等. 公路项目中全生命周期成本方法应用研究[J]. 天津理工大学学报, 2006, 22(5): 63-65.
WAN Li-feng, HUANG Jia-fu, JIANG Hui-jie, et al. Study on the application of LCCA method in pavement project[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2006, 22(5): 63-65. (in Chinese)
- [15] 董 菲. 全生命周期公路工程造价管理研究[J]. 交通标准化, 2013(5): 51-53.
DONG Fei. Full lifecycle cost management of highway project[J]. Communications Standardization, 2013(5): 51-53. (in Chinese)
- [16] JAWAD D, OZBAY K. Probabilistic life-cycle cost optimization for pavement management at the project-level [J]. Transportation Research Record, 2005(1912): 36-43.
- [17] LI Zhong-zhi, MADANU S. Highway project level life-cycle benefit/cost analysis under certainty, risk, and uncertainty: methodology with case study[J]. Journal of Transportation Engineering, 2009, 135(8): 516-526.
- [18] GUO Tong, LIU Tie, LI Ai-qun. Pavement rehabilitation strategy selection for steel suspension bridges based on probabilistic life-cycle cost analysis[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2012, 26(1): 76-83.