

基于 Markov 转移矩阵预测机场道面使用状态

袁 捷¹, 杨俊羽¹, 苏 新², 刘玉海³

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 中国民航机场建设集团公司 机场工程科研基地, 北京 100101;
3. 厦门国际航空港股份有限公司, 福建 厦门 361006)

摘要: 应用 Logistic 回归方程建立了连续变量(道面厚度、交通量、道面使用时间)和分类变量(道面养护等级、道面所处的自然区域以及道面结构类型)与 Markov 转移概率的回归关系. 选取我国多个机场实测道面状况指数数据作为基础数据, 进行了模型的参数估计及显著性检验, 并举例分析模型预测效果. 改进了 Markov 概率预测模型中的参数标定方法, 提高了预测精度, 并在一定程度上解决了因为机场道面观测数据少, 传统预测模型无法获得稳定参数估计的问题, 拓展了模型的适用范围.

关键词: Markov 过程; 道面使用性能; Logistic 模型; 预测; 转移概率矩阵

中图分类号: U416, V235 **文献标识码:** A

Airport Pavement Performance Estimation Based on Transition Probabilities in Markov Chain

YUAN Jie¹, YANG Junyu¹, SU Xin², LIU Yuhai³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Research and Developed Center, China Airport Construction Group Corporation of CAAC, Beijing 100101, China; 3. Xiamen International Airport Co. Ltd., Xiamen 361006, China)

Abstract: The logistic regression equation was used to establish regression relationship among continuous variables such as thickness, traffic level, pavement age, categorical variables such as maintenance grade, climate sector, pavement structure types and the Markov probability prediction. Some airports' actual measurement pavement condition index (PCI) data were used as data source in the parameter estimation and significance test of the model. The parameter calibration method of Markov probability prediction model, and the accuracy of the predictions were improved. The scope of the application of model was expanded and the problems of insufficient observation data and unstable parameter estimation using the traditional forecasting model

were resolved.

Key words: Markov process; pavement performance; Logistic model; prediction; transition probabilities matrices

建立可靠的道面使用性能预测模型是实现道面养护科学决策的关键. 通过对道面使用性能衰减趋势的科学预估, 不但可以明确道面性能状况到达最低可接受水平的时间, 确定中长期养护的对策和实施时机, 而且能够评估道面设计方案、道面养护措施的预期效果以及道面全寿命周期费用.

道面使用性能预测模型主要有确定型和概率型两大类. 确定型模型以经验回归分析为主, 而概率型模型中 Markov 过程应用最为广泛, 但其状态转移概率矩阵仍以经验统计或回归分析为基础, 通过回归得到某时刻的指标值, 再按照正态分布特征将确定值离散到每个状态区间^[1].

机场道面使用性能受道面结构、使用时间、气候环境、交通量水平以及养护水平等因素的影响, 具有复杂多变的特征. 为了获得较满意的预测效果, 通常建模中只对单个道面区段进行分析, 以连续观测获得的道面性能时间序列数据为样本建立指标与使用时间或轴载作用次数的回归关系. 但该方法对样本数量要求较高, 针对于改(扩)建或大修道面, 大多难以建模. 针对这一情况, Shahin^[2]提出道面族方法, 即将影响因素特征相同或类似的多个道面区段划分为一个道面族建立道面族回归方程, 单个道面的性能曲线则是在族曲线的基础上采用平行推移或比例增加法获得. 但对道面族划分方法没有统一的标准, 而由此得到的预测误差较大. 另一种方法是采用多元回归技术, 将各类影响因素变量引入回归方程中, 综合利用多个道面观测数据, 建立多元回归模型. 该方法虽在一定程度上降低了样本数据之间的异质

性,但普通多元回归只能分析连续变量,对无法量化的因素直接进入误差项,从而导致回归残差过大。

针对传统建模方法的不足,国外许多学者提出采用广义回归技术建模。这类模型不仅能分析连续变量,同时能够将分类变量纳入到模型中,更重要的是可以通过特定的变换建立连续变量与概率函数的相关关系,弥补了传统方法确定状态概率的不足,极大地发挥了概率预测模型的优势。Madanat 将计量经济学中 Probit 模型^[3]和 Poisson 回归模型^[4]引入设施管理技术中,建立设施性能影响变量与转移概率之间的回归关系,得到动态转移概率矩阵。Jidong Yang^[5]采用二分类 Logitsic 回归模型,该模型可以将分类变量引入模型,分析更多因素对道面使用性能的影响,同时能够综合利用多个道面观测数据,建立道面使用性能状态与因素变量之间的回归关系。Zheng Li^[6]利用 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials)试验数据,采用二分类 Probit 模型建立路面使用性能动态概率预测模型。

本文针对我国机场道面性能观测数据覆盖面广、观测序列短、连续性差等特点,将 Logitsic 回归确定 Markov 概率矩阵的方法引入机场工程,通过合理选择模型中量化变量和分类变量,采用二分类 Logistic 回归模型对多道面数据进行拟合,构建动态 Markov 状态转移概率矩阵,实现对机场道面使用性能预测。

1 预测模型的建立

1.1 Markov 过程

Markov 预测是指根据某些变量的现在状态及其变化趋向,预测其在未来某一特定期间内可能出现的状态。假设任意时刻 t ,系统处于各种状态的概率分布记为 $X(t)$,有

$$X(t) = (a_1, a_2, \dots, a_n) \quad \sum_{i=1}^n a_i = 1 \tag{1}$$

由于 Markov 假设状态概率不会随着时间改变,所以从状态 i 到状态 j , $P(X_{t+1}=j | X_t=i)$ 是不受 t 影响的,表示为

$$P(X_{t+1}=j | X_t=i) = P_{ij} \tag{2}$$

式中: P_{ij} 为状态转移概率,即道面在 t 时刻处在 i 状态,到 $t+1$ 时刻处于 j 的概率。

状态转移概率一般表示成 m 阶矩阵,称作状态转移矩阵 P ,表示为^[7]

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{m1} & P_{m2} & \cdots & P_{mm} \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\sum_{j=1}^m P_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, m$$

基于 Chapman-Kolmogorov 等式,在 n 个周期后从状态 i 到状态 j 的系统转移概率可表示为

$$P^{(n)} = P \cdot P \cdots P = P^n \tag{4}$$

因此,事物 t 时刻的状态概率向量 $X(t)$ 可由初始状态的概率向量 $X(0)$ 表示,则 Markov 预测模型可写为

$$X(t) = X(0)P^{(t)} \tag{5}$$

本文以道面损坏状况指数 PCI(Pavement Condition Index)等级作为描述机场道面使用性能的指标。PCI 是道面使用性能经验预测中最常用的指标,世界各国在建立机场道面评价与管理技术要求时,也都将道面损坏状况调查与评价列为主要的工作内容。PCI 值可按表 1 的评价标准评定损坏等级。

表 1 机场道面损坏等级评定标准
Tab.1 Evaluation standard of airport pavement damage classification

道面损坏等级	优	良	中	次	差
PCI 值范围	[85,100]	[70,85]	[55,70]	[40,55]	[0,40)

根据表 1,PCI 分为 5 个等级:“优,良,中,次,差”,分别对应编号“1,2,3,4,5”。

式(1)可改写为

$$X(t) = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) \quad \sum_{i=1}^5 a_i = 1$$

上式表示在 t 年,道面处于 PCI 等级为优的比例为 a_1 ,为良的比例为 a_2 ,为中的比例为 a_3 ,为次的比例为 a_4 ,为差的比例为 a_5 。

根据道面实际衰变情况,假设如下:

(1)在预测期内,对道面不进行任何养护维修等处治措施。

(2)在道面正常运行养护的情况下,道面 PCI 等级不会由低级向高级演变。即当 $i < j$ 时, $P_{ij} = 0$ 。

机场管理部门通常以年为单位制定养护策略,因此本文使用“年”作为预测时间单位。在经过 1 年衰变之后(即 $t=1$),道面 PCI 等级不会发生急速下降,只能衰变一个等级。即 $j-1 \geq 2$ 时, $P_{ij} = 0$

Markov 状态转移概率矩阵表示成 5 阶矩阵,如下:

$$\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_{22} & P_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{33} & P_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{44} & P_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

1.2 Logistic 回归模型

假设存在一个理论上的连续反应变量 U_{in} ($-\infty, +\infty$), 该连续反应变量与外界影响的关系是线性的、确定的, 满足线性模型^[3]

$$U_{in} = \boldsymbol{\beta}_i \boldsymbol{X}_{in} + \epsilon_{in} \tag{6}$$

式中: U_{in} 为道面区域 n 在状态 i 时的分类变量(不能被直接观测或测量), 它反映观测对象状态变化的内在趋势; i 为道面状态, 本文使用 PCI 等级作为评价指标, i 取值为 1, 2, 3, 4, 5; $\boldsymbol{\beta}_i$ 为处于道面状态 i 时, 回归方程的系数向量; \boldsymbol{X}_{in} 为处于道面状态 i 的道面区域 n 的外界影响因素向量, 为自变量; ϵ_{in} 为误差项。

Logistic 模型函数如下:

$$f(\epsilon_{in}) = \frac{1}{1 + e^{-\epsilon_{in}}} \tag{7}$$

在预测道面使用性能时, 根据之前假设, 道面单元在经过一年衰变后会出现两种状态, 一种为维持原状态不变, 即 $j=i$; 一种为道面衰变到较低一个等级, 即 $j=i+1$ ^[4]。

由此, 假设一个理论上的连续变量 y_{in} , 此变量代表事情发生的可能性。所预测的道面状态只会出现两种可能性: ①事件未发生, 即道面性能状态未发生转移, $y_{in}=0$; ②事件发生, 即道面性能状态发生转移, $y_{in}=1$ 。由此构成了二分类问题, 同时定义 $y_{in}=j-1$ 。

可得到事件发生的概率为

$$P_{i,i+1} = P(y_{in} = 1 | X_{in}, 1) = P[(\boldsymbol{\beta}_i \boldsymbol{X}_{in} + \epsilon_{in}) > 0] = P(\epsilon_{in} > -\boldsymbol{\beta}_i \boldsymbol{X}_{in})$$

由公式(7)描述的 Logistic 函数, 上式可写为

$$P_{i,i+1} = P(y_{in} = 1 | X_{in}, 1) = \frac{1}{1 + \exp\{-\boldsymbol{\beta}_i \boldsymbol{X}_{in}\}} \tag{8}$$

那么, 事件不发生的概率为

$$P_{i,i} = 1 - P_{i,i+1} = 1 - P(y_{in} = 1 | X_{in}, 1) = \frac{1}{1 + \exp\{\boldsymbol{\beta}_i \boldsymbol{X}_{in}\}} \tag{9}$$

2 模型应用分析

2.1 模型函数确定

根据影响道面使用性能的因素确定模型中的变

量。影响道面使用性能的因素很多, 主要有道面特征、交通、气候、养护水平等因素。道面特征主要包括道面结构类型和道面厚度, 根据我国机场道面特点, 道面结构类型主要分为水泥混凝土道面和既有水泥混凝土加铺沥青混凝土道面(白+黑道面)。交通荷载和气候条件是主要的外界因素, 交通荷载可导致道面材料疲劳损伤; 气候因素影响机理十分复杂, 可以根据气候特点对土质的影响分为多年冻土区、季节冻土区、全年不冻土区。道面使用过程中的工程因素主要体现在道面养护管理水平, 根据机场定位不同, 机场对养护管理要求也不同。此外, 使用时间是影响道面使用性能衰退的直接因素, 道面使用性能会随着使用时间的增加而下降。通过以上分析, 确定模型中参数见表 2。指示变量是一种人为定义的变量, 用于表示观测变量的分类类别, 取值为 0 或 1。

表 2 模型中参数定义表

Tab.2 Description of variables used in analysis	
变量	变量描述
t	道面使用时间(年)
H	道面厚度(cm)
$\lg N$	N 为年起降架次
M_{G1}	道面养护等级 1: 高等级养护(指示变量)
M_{G2}	道面养护等级 2: 中等级养护(指示变量)
M_{G3}	道面养护等级 3: 低等级养护(指示变量)
C_{S1}	气候区 1: 多年冻土区(指示变量)
C_{S2}	气候区 2: 季节性冻土区(指示变量)
C_{S3}	气候区 3: 全年不冻土区(指示变量)
P_{S1}	道面结构类型 1: 水泥混凝土道面(指示变量)
P_{S2}	道面结构类型 2: 白+黑道面(指示变量)

根据 Logistic 模型函数特点, 以观测数据组中道面个体特征变量作为解释变量, 建立线性预测函数为

$$\left\{ \begin{aligned} f(x) &= P_{i,i} = P(y_{in} = 1 | X_{in}, 1) = \frac{1}{1 + e^z} \\ f(x) &= P_{i,i+1} = P(y_{in} = 0 | X_{in}, i) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \\ z &= \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 H + \beta_3 \lg N + \\ &\quad (\beta_4 M_{G1} + \beta_5 M_{G2} + \beta_6 M_{G3}) + \\ &\quad (\beta_7 C_{S1} + \beta_8 C_{S2} + \beta_9 C_{S3}) + \\ &\quad (\beta_{10} P_{S1} + \beta_{11} P_{S2}) \end{aligned} \right. \tag{10}$$

式中: $z = -\boldsymbol{\beta}_i \boldsymbol{X}_{in}$, 表示道面性能变化的潜在趋势, 无法通过观测得到, 通过 Logit 变换可建立线性趋势与性能状况变量观测值出现概率 $P(y_{in}) \in (0, 1)$ 之间的关系。

2.2 参数估计结果

本文使用的数据资料来自全国不同地区的 22

座机场的 4 362 组 PCI 数据. 数据资料取自 1999 年至 2008 年,覆盖全国支线机场、干线机场以及枢纽机场,飞行区技术等级从 3C 到 4F,包括白+黑和水泥两种道面结构,分布于全国 3 个不同气候区域.

为反映道面使用性能状况等级转移趋势,以道面损坏调查分区中的“区域”为单位,记录和观测道面性能变化情况. 这样不但可以增加数据信息,而且

能更真实地反映道面性能状况变化的概率特征. 参数估计以 $\alpha=0.05$ 为置信水平,采用 Wald 检验的后退法筛选模型变量,最终得到的参数估计结果及精度检验结果如表 3 所示. 表中 S_e 表示均值标准误差, S_{ig} 表示显著性水平.

由表 3 可知,模型自变量的显著性均在 0.05 水平,可见各变量均有显著统计学意义.

表 3 参数估计结果
Tab.3 Parameter estimation results

变量	道面使用状态 1			道面使用状态 2			道面使用状态 3			道面使用状态 4		
	估计值	S_e	S_{ig}	估计值	S_e	S_{ig}	估计值	S_e	S_{ig}	估计值	S_e	S_{ig}
t	0.057	0.021	0.008	0.199	0.057	0	0.358	0.158	0	0.527	0.667	0
H	-0.360	0.031	0	-0.141	0.069	0.042	-0.084	0.093	0.007	-0.025	0.522	0
$\lg N$	0.951	0.479	0.047	2.526	0.608	0	6.447	2.038	0	9.744	0.519	0
M_{G1}	3.696	0.989	0	-2.628	1.121	0.019	1.099	3.058	0	0.115	1.748	0
M_{G2}	2.358	0.744	0.002	-1.648	0.793	0.038	-11.655	2.085	0	-16.867	963.000	0
M_{G3}	1.338	0.744	0.002	-0.980	1.121	0.019	-4.444	3.058	0	-21.747	13.963	0.003
C_{S1}	1.912	0.447	0	-1.945	0.857	0.023	7.064	1.693	0	-7.595	0.158	0
C_{S2}	-0.625	0.283	0.027	-2.274	0.522	0	-3.880	0.884	0	-5.637	0.730	0
C_{S3}	2.537	0.283	0.027	0.328	0.857	0.023	7.064	0.857	0.027	19.866	4.158	0.002
P_{S1}	1.499	0.298	0	-0.945	0.471	0.045	-5.148	1.296	0	-8.716	0.729	0.031
P_{S2}	-1.499	0.298	0	0.945	0.471	0.045	5.148	1.296	0	8.716	11.519	0.037
β_0	3.823	1.911	0.045	-7.177	3.157	0.023	-21.466	6.940	0	-33.538	0.811	0

2.3 参数敏感性分析

2.3.1 使用时间敏感性分析

如图 1 所示,道面性能转移概率呈现相似趋势:道面性能衰变的概率($P_{12}, P_{23}, P_{34}, P_{45}$)随使用时间

增加而增大;性能维持的概率($P_{11}, P_{22}, P_{33}, P_{44}$)随使用时间增加而减小. 主要原因是随着使用时间的增长,道面在累计交通荷载作用以及气候因素作用下出现一定程度的损坏.

P_{12} 在 30 年内始终维持在 8%~32%的较低水平,而且衰变速率平稳. 每增加一年,衰变概率增长幅度为 0.46%~1.24%不等,增加幅度较小. 说明优等级道面的衰变概率对使用时间不敏感,能够较好地保持优良状态. P_{23} 较 P_{12} 的变化明显,衰变概率增长幅度在 10 年之后明显增大,最大值在 30 年时达到 84%,每增加一年,等级良的道面衰变概率增长 0.36%~4.91%不等. P_{34} 和 P_{45} 变化趋势相似,在前 10 年几乎为 0;但在 10 年之后,道面衰变概率急剧增大,在道面使用 20 年后接近极值 100%. 说明当状态处于中、次时,道面加速损坏,已有损坏加速扩展,道面性能更易向低状态转移.

2.3.2 航空量敏感性分析

如图 2 所示,道面性能衰变的概率($P_{12}, P_{23}, P_{34}, P_{45}$)随航空交通量增加而增大;性能维持的概率($P_{11}, P_{22}, P_{33}, P_{44}$)随航空交通量增加而减小. 在年起降架次小于 100 架次($\lg N<2$)的情况下,衰变概率维持在 0 水平,说明当航空量小于 100 架次,对航空量作用不敏感,道面不容易发生破坏.

P_{12} 在航班量继续增大时也维持较低水平,衰变

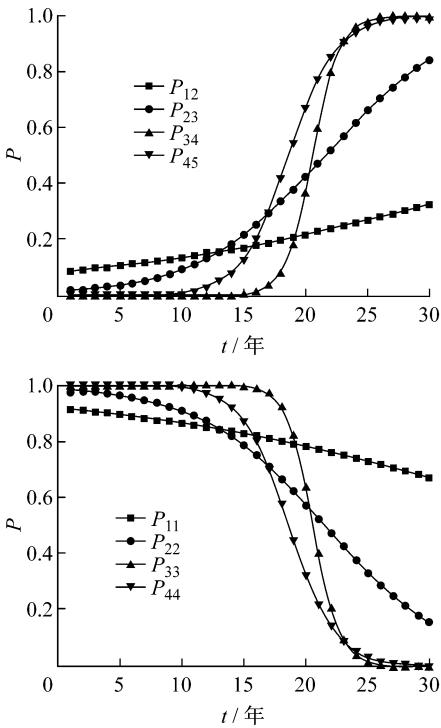


图 1 转移概率与使用时间的关系

Fig.1 Transition probabilities for time consumed

概率较小,变量每增加 0.1,等级优的道面衰变概率增加 0.03%~2.07%不等,增加幅度较小. P_{23} , P_{34} , P_{45} 的趋势表明,在道面状态处于非优等级时,随着航空交通量继续增加,道面衰变速率明显增大. P_{34} , P_{45} 在航空量增大到 2.9~3.3 时,衰变概率增长最大,航空量每增加 0.1,衰变概率增加 9%~23%不等;航空量增大到 5 之后,接近极值 100%. 说明当航空量大于 2 时,非优等级的道面,对航空量增大敏感,损坏容易发生,已有损坏扩展迅速;当航空量大于 5 时,对于低等级的道面,损坏是必然的. 可见航空交通增加是道面加速损坏的主要原因.

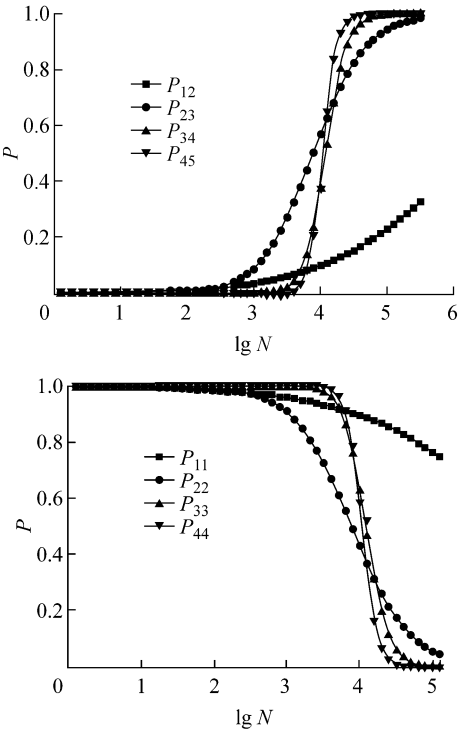


图 2 转移概率与航空交通量的关系
Fig.2 Transition probabilities for traffic

2.3.3 道面厚度敏感性分析

如图 3 所示,道面性能衰变概率(P_{12} , P_{23} , P_{34} , P_{45})随道面厚度增加而减小;性能维持的概率(P_{11} , P_{22} , P_{33} , P_{44})随道面厚度增加而增大. P_{12} 对道面厚度的变化最为敏感,曲线整体呈现反“S”型. 道面厚度每增加 1 cm,等级优的道面衰变概率减小 0.2%~9.1%;等级良的道面衰变概率减小 1.4%~3.5%;等级中的道面衰变概率减小 1.6%~2.1%;等级次的道面衰变概率减小 0.6%左右.

道面性能越好,道面性能衰变概率对道面厚度越敏感. 当道面处于良好状态时,增加道面厚度能有效地使道面保持优良状态;但是当道面处于差等级

时,单纯增加道面厚度对提高道面性能效果不明显,说明在道面使用后期,维修难度越来越大,应注重早期的预防性养护.

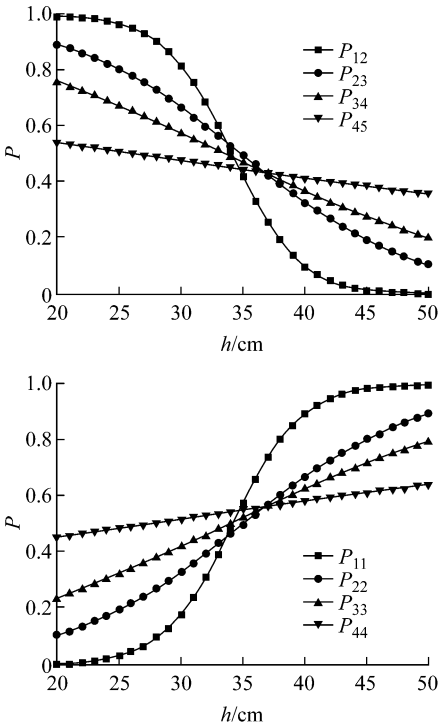


图 3 转移概率与道面厚度的关系
Fig.3 Transition probabilities for pavement thickness

3 实例分析

以华东某国际机场跑道道面 PCI 检测数据为例,采用本文模型预测道面使用性能对预测效果进行分析.

3.1 道面概况

跑道道面结构为白+黑结构;道面结构当量厚度为 37 cm(计算方法见《民用机场道面评价管理技术规范》MH/T 5024—2009);所处气候区为季节性冻土区;养护等级为高级养护;年起降架次对数表见表 4.

表 4 年起降架次			
Tab.4 Plane sortie for each year			
t/年	1	2	3
lg N	5.230	5.178	5.039

本文收集了该机场连续 3 年道面使用性能状况 PCI 数据(见表 5),三年内道面没有实施大型维修活动.

3.2 预测过程和结果

根据第 2 节中所述模型,计算得到第 2 年 Markov 转移概率矩阵为

表 5 道面使用性能状况观测值

Tab.5 Observations of pavement performance condition

<i>t</i> /年	状态 1	状态 2	状态 3	状态 4	状态 5
1	0.908	0.092	0	0	0
2	0.874	0.126	0	0	0
3	0.846	0.145	0.007	0.002	0

$$P = \begin{bmatrix} 0.957 & 0.043 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.971 & 0.029 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

计算得到第 3 年 Markov 转移概率矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} 0.952 & 0.048 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.959 & 0.041 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

预测连续两年道面使用状况见表 6.

表 6 道面性能状态预测结果

Tab.6 Prediction results of pavement performance

<i>t</i> /年	状态 1	状态 2	状态 3	状态 4	状态 5
1	0.908	0.092	0	0	0
2	0.869	0.128	0.003	0	0
3	0.865	0.132	0.004	0	0

通过表 5,6 可以看出,实际值与预测值差值较小,两年内预测值与观测值非常接近,预测效果较理想.

4 结论

本文应用 Logistic 回归模型,建立道面厚度 *h*、航空交通量 lg *N*、使用时间 *t*、道面养护等级、气候区、道面结构类型等因素变量与道面使用性能状态分布概率的回归关系.由此确定了道面使用性能各状态概率,建立了动态 Markov 状态转移概率矩阵,实现了道面使用性能概率预测.通过以上分析,主要得到以下几点结论:

(1)采用 4 362 组 PCI 数据对 Logistic 回归模型进行参数估计,结果表明各参数均有显著统计学意义.说明 Logistic 模型能够较好地拟合不同地区、不同特征的道面的性能观测数据,适合多区段道面的

性能数据分析.

(2)由参数敏感性分析可见,道面状态处于优良等级时,其使用性能衰减较慢,后期则出现加速损坏特征.各影响因素中,航空交通量等级对道面性能衰减速率的影响较为显著,而增加结构厚度仅在早期能起到较好的延缓衰减效果.因此,应注重前期的预防性养护措施.

(3)各类因素变量对道面使用性能影响的规律与工程实际状况相符,进一步说明 Logistic 回归模型可有效降低多个观测样本数据之间的异质性,客观反映了各因素变量的实际效应.将其用于预测多因素影响下道面性能状态分布概率是可行的,改进了状态转移概率计算方法.

(4)应用 Logistic 回归建立动态 Markov 状态转移概率矩阵,并对机场道面使用性能进行预测分析.将预测结果与实际观测状况进行对比,结果表明预测值与实测值接近,预测效果较好.

(5)本模型假设在预测期内,对道面不进行任何养护维修等处治措施,因此适用于道面短期预测.对于养护维修对道面性能衰变的干扰有待进一步研究.

参考文献:

[1] Haas R C G, W R Hudson. Pavement management systems[M]. New York: McGraw-Hill, 1978.

[2] Shahin M Y, Walther J A. Pavement maintenance management for roads and streets using the PAVER system[R]. [S.l.]: U.S Army Construction Engineering Research Laboratory,1990.

[3] Madanat S, Mishalani R, Ibrahim W H W. Estimation of infrastructure transition probabilities from condition rating data [J]. Journal of Infrastructure Systems, 1995, 1(2):120.

[4] Madanat S, Wan Ibrahim W H. Poisson regression models of infrastructure transition probabilities [J]. Journal of Transportation Engineering, 1995,121(3):267.

[5] Yang Jidong, Gunaratne Manjriker, Lu Jian John. Use of recurrent markov chains for modeling the crack performance of flexible pavements[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(11):861.

[6] ZHENG Li. A probabilistic and adaptive approach to modeling performance of pavement infrastructure [D]. Austin, The University of Texas,2005.

[7] José J Ortiz-García, Seósamh B Costello, Martin S Snaith. Derivation of transition probability matrices for pavement deterioration modeling [J]. Journal of Transportation Engineering,2006,132(2):144.