

基于线性混合效应模型的道面使用性能预测

袁捷¹, 苏尔好², 杜先照³, 滕力鹏⁴

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海华东民航机场建设监理有限公司, 上海 200335;
3. 武汉地铁集团有限公司, 湖北 武汉 430030; 4. 民航专业工程质量监督总站华东地区监督站, 上海 200335)

摘要: 针对道面状况指数(PCI)历史资料的面板数据特征, 以多项式作为预测函数, 将部分参数视为随机变量, 建立二类线性混合效应模型。结果表明: 线性混合效应模型能够有效分解变量之间的异方差, 弥补传统回归模型的不足, 为多区域道面使用性能数据分析提供新的技术方法; 混合效应模型能够综合利用多区域信息, 改进道面个体的参数估计, 不仅解决部位道面个体因数据不足而无法获得模型参数的问题, 而且显著提高了道面个体的预测精度。

关键词: 机场道面; 混合效应模型; 使用性能预测; 道面状况指数

中图分类号: TU279.71

文献标志码: A

Linear Mixed Effect Model for Airport Pavement Performance Prediction

YUAN Jie¹, SU Erhao², DU Xianzhao³, TENG Lipeng⁴

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai East China Civil Aviation Airport Construction Project Management Company Limited, Shanghai 202335, China; 3. Wuhan Metro Group Company Limited, Wuhan 430030, China; 4. The East China Civil Aviation Professional Engineering Quality Supervision Station, Shanghai 200335, China)

Abstract: According to the characteristics of the panel data of the pavement condition index (PCI) field data collected from different sections, a two-linear mixed effect model was established with an extension of a three-order polynomial by employing the fixed effect and random effect as random parameters to predict the airport pavement performance. The parameters were estimated by the mixed-effects approach. Results indicate pavement sections' heterogeneity may be captured not only through mixed effect but through random effect as well, which makes up traditional regression model's deficiency and provides a more appropriate method for analyzing multi-sections pavement performance data. At the

same time, the effect model can use multi-sections pavement information and improve individual's estimation, therefore, it can estimate individual pavement condition which has little time series with a significant higher accuracy in predicting specific pavement conditions in comparison with ordinary least-squares (OLS).

Key words: airport pavement; mixed effect model; pavement performance prediction; pavement condition index (PCI)

机场道面使用性能预测模型是制定道面维护策略基础, 在道面管理系统中发挥重要作用。近几十年来, 国内外学者采用足尺试验和现场测试等技术手段, 建立了诸多公路路面使用性能预测模型, 包括力学模型、力学-经验模型和经验回归模型等。但由于机场道面荷载形式的特殊性, 相关研究开展较少, 以现场调查历史数据为基础的经验统计模型仍是主流。虽然现场数据能够较好地反映机场道面在荷载、环境、养护活动等多方面综合因素影响下的道面性能实际状况, 但现场数据往往精度较低, 跨区域数据多, 时间序列短且不连续, 给经验模型的建模和参数估计带来诸多困难。

事实上, 道面使用性能数据是一类典型的面板数据^[1], 同时包含时间和截面两个维度: 描述道面之间不同属性的交叉区域信息(如结构、交通量、区域位置等), 以及道面使用性能衰减的时间序列数据。但由于数据存在不平衡现象, 即交叉区域信息多, 而时间序列数据少; 因此降低面板数据的异质性, 充分利用跨区域信息, 延长时间序列, 成为建模的关键。传统的一元回归可以对时间序列进行分析, 但国内大多数机场的道面性能数据只有 2~3 次观测值, 难以获得稳定的参数估计; 而多元回归则面临多重共线性的困扰, 如果忽略截面信息, 不加区别地对待,

收稿日期: 2012-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(U1233123, 51308412)

第一作者: 袁捷(1971—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为机场设施管理。E-mail: yuanjie@tongji.edu.cn

通讯作者: 苏尔好(1965—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为机场建设监理工作。E-mail: suerhao888@126.com

必然会夸大变量间的相关性,甚至导致错误结果.针对该问题,Shahin^[2]提出“道面族”方法将属性基本类似的道面使用性能数据划分为一族进行总体回归分析,通过平行推移法获得单个道面的性能曲线. Cook 等^[3]在族曲线的基础上采用比例增加法得到单个道面的性能预测值.然而,道面即使具有相似的特征,但由于存在随机因素的影响其性能仍存在较大差异. Yu 等^[4]针对道面族方法的不足,采用线性混合效应模型建立沥青路面使用性能预测方法. Arzu 等^[5]应用混合效应模型分析和预测沥青路面车辙加速加载试验结果. Prozzi 等^[6]采用非线性混合效应模型预估路面使用性能,并传统最小二乘法进行比较. 刘玉海等^[7]应用混合效应模型构建马尔可夫状态转移概率矩阵. 混合效应模型作为前沿统计技术,通过固定效应和随机效应对残差成分进行有效分析,减低样本数据之间的异方差,从而合理分析面板数据,但目前在铺面使用性能预测中的应用较少.

本文在国内外研究基础上,针对国内机场道面使用性能时间序列数据少、区域数据多等特点,应用线性混合效应统计技术,以多区域道面状况指数(PCI)观测数据为数据源,建立机场道面使用性能经验预测模型,估计模型参数,并实现单个机场道面使用性能的预测.

1 模型的建立

1.1 线性混合效应模型原理

在统计学的应用领域中普遍存在复杂的多水平、分层嵌套数据结构,传统的统计模型不能对涉及两层或多层数据的问题进行综合分析,否则会带来很大误差. 线性混合效应模型是普通线性模型的推广,最早由 Laird 等提出^[8]. 模型中包括固定效应和随机效应,它允许数据间相关性或异方差存在,为面板数据分析提供了灵活性. 因此,模型的基本形式、参数估计方法以及检验方法与传统模型有所区别. 线性混合效应模型^[9]基本形式如下:

$$Y_i = \mathbf{X}_i \boldsymbol{\beta} + \mathbf{Z}_i \mathbf{b}_i + \boldsymbol{\varepsilon}_i \quad (1)$$

$$\mathbf{b}_i \sim N(0, \mathbf{G}), \boldsymbol{\varepsilon}_i \sim N(0, \sigma^2 \mathbf{I}) \quad (2)$$

式中: \mathbf{X}_i 和 \mathbf{Z}_i 分别是固定效应和随机效应矩阵; $\boldsymbol{\beta}$ 是固定效应系数向量; \mathbf{b}_i 是随机效应系数向量; \mathbf{G} 是随机效应 \mathbf{b}_i 的方差协方差矩阵,假设 \mathbf{b}_i 与 $\boldsymbol{\varepsilon}_i$ 相互独立; \mathbf{I} 为单位矩阵.

为便于理解和分析,可将式(1)分解如下:

$$\left. \begin{aligned} Y_{ij} &= \beta_{0j} + \beta_{1j} X_{ij} + \varepsilon_{ij} \\ \beta_{0j} &= \gamma_{00} + \gamma_{01} W_{1j} + b_{0j} \\ \beta_{1j} &= \gamma_{10} + \gamma_{11} W_{1j} + b_{1j} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: Y_{ij} 是因变量; X_{ij} 是自变量; W_{1j} 是固定效应; $\boldsymbol{\gamma}$ 是系数向量; b_{0j} 和 b_{1j} 是随机效应.

与普通线性模型不同,线性混合效应模型采用的参数估计方法是收缩估计. 收缩估计通过各部分估计精度进行加权处理. 其结果是某个个体回归方程的优良估计将有助于改进其他精度较差的估计. 只要数据组中某些个体的观测次数多于模型中自变量个数,其他个体即使不符合这一条件也可以用到分析中来,通过综合时间序列和道面特征两层次信息,采用收缩估计方法获得任意个体的参数估计^[9]. 同时该方法使个体层面的系数向平均系数靠拢,避免出现极端情况.

1.2 模型函数的确定

道面使用性能采用 PCI 指标表征,该指标是美国陆军建筑工程研究所(CERL)开展机场道面管理技术研究得到的最重要的成果之一,现在已经成为评价道面损坏状况标准程序,并被许多国家和机构接受和采纳^[10].

道面使用性能受多因素影响,其衰减轨迹曲线存在多样性和随机性特征. 研究人员试图寻求一个既可反映道面性能衰减机理,又能描述衰变轨迹的回归方程,由此提出了各种曲线模型. 但从实际应用情况来看,Shahin 等提出的约束多项式模型应用最广泛,作为 Micro PAVER 道面管理系统的预测模型^[11],接受实际工程检验. Shahin 等^[12]对该模型评估表明,在 PCI 高于 50~65 时该预测精度很高. 事实上由于机场安全管理的特殊要求,国内机场道面 PCI 值极少出现低于 65 的情况. 因此,道面使用性能预测模型可采用如下多项式函数:

$$\left. \begin{aligned} y(x) &= a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \\ &\quad a_3 x^3 + \cdots + a_n x^n \\ \frac{\partial y(x_i)}{\partial x_i} &\leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

理论上,只要时间序列足够长,多项式可以拟合任意历时曲线. 根据历史数据特征,采用 3 阶多项式模型较合适. 不同道面性能衰减曲线形状的差异主要由回归系数决定,而系数的变异受道面属性特征的影响. 这些属性特征中部分因素可直接观测得到,而一些潜在因素不可观测. 因此,可以建立两类道面使用性能预测模型.

如果道面属性特征因素均不可观测时,可简单

假设个体模型的回归系数为无条件随机变异,建立线性混合效应模型,称为模型1

$$\left. \begin{aligned} y_{it} &= \beta_{0i} + \beta_{1i}t + \beta_{2i}t^2 + \beta_{3i}t^3 + \epsilon_{it} \\ \beta_{0i} &= \beta_{00} + b_{0i} \\ \beta_{1i} &= \beta_{10} + b_{1i} \\ \beta_{2i} &= \beta_{20} + b_{2i} \\ \beta_{3i} &= \beta_{30} + b_{3i} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $\beta_{00}, \beta_{10}, \beta_{20}, \beta_{30}$ 分别为 $\beta_{0i}, \beta_{1i}, \beta_{2i}, \beta_{3i}$ 的均值; $b_{0i}, b_{1i}, b_{2i}, b_{3i}$ 分别为 $\beta_{0i}, \beta_{1i}, \beta_{2i}, \beta_{3i}$ 的随机成分; t 为时间。

如果道面结构厚度、交通量、区域位置等信息可以观测,用于解释系数的变异,而其他因素信息无法获取,被视为随机效应,则可建立线性混合效应模型,称为模型2

$$\left. \begin{aligned} y_{it} &= \beta_{0i} + \beta_{1i}t + \beta_{2i}t^2 + \beta_{3i}t^3 + \epsilon_{it} \\ \beta_i &= \beta_{0i} + b_{0i} + \sum W_j \beta_{ji} + b_{ji} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由于 β_{00} 表示曲线在起始点的截距,如果起始点选择 $t=0$ 时, $\beta_{0i}=100$ 。因此模型中可以忽略截距变异。同时,根据显著性和多元共线性对变量进行初步的筛选分析,最终确定两类模型如下:

模型1

$$\left. \begin{aligned} y_{it} &= \beta_{0i} + \beta_{1i}t + \beta_{2i}t^2 + \beta_{3i}t^3 + \epsilon_{it} \\ \beta_{0i} &= \beta_{00} \\ \beta_{1i} &= \beta_{10} + b_{1i} \\ \beta_{2i} &= \beta_{20} \\ \beta_{3i} &= \beta_{30} + b_{3i} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

模型2

$$\left. \begin{aligned} y_{it} &= \beta_{0i} + \beta_{1i}t + \beta_{2i}t^2 + \beta_{3i}t^3 + \epsilon_{it} \\ \beta_{0i} &= \beta_{00} \\ \beta_{1i} &= \beta_{10} + \beta_{11} \lg N + \beta_{12} H + b_{1i} \\ \beta_{2i} &= \beta_{20} + \beta_{21} z + \beta_{22} \lg N \\ \beta_{3i} &= \beta_{30} + \beta_{31} z + \beta_{32} H + b_{3i} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: H 为道面面层厚度; $\lg N$ 为道面上飞机起降架次的对数; z 为环境指示变量,按照《公路自然区划标准》^[13]一级标准划分地区,取值“0”代表Ⅱ类东部湿润季冻区机场,“1”代表Ⅳ类东南湿热区机场。

2 模型参数估计

2.1 数据来源

本文使用的数据资料来自东北、河北、山东、江苏、浙江、广东、湖北、福建等地区60多个机场的PCI数据。数据资料覆盖支线机场、干线机场以及枢纽机场,飞行区技术等级从3C到4F,分布于不同气

候区域,其测试年份从1995年至2009年。通过筛选和整理,最终形成16组道面的PCI数据源,如表1所示。

表1 PCI数据源

Tab.1 PCI data

组编号	观测时间/年	PCI	组编号	观测时间/年	PCI
1	1	99	9	1	99
	10	90		10	87
	11	87		17	70
	17	69		18	66
	19	59	10	4	98
2	1	99		12	93
	10	88		13	91
	17	68		14	86
	19	58		18	76
3	1	99	11	1	99
	8	92		2	98
	14	82		10	91
	18	68		12	87
4	13	84		18	71
	19	60	12	14	88
5	1	99		24	57
	7	91	13	2	98
	15	69		10	96
	17	59		19	81
6	4	98		23	67
	9	95	14	2	98
	15	81		14	84
	16	79		17	79
7	19	65		24	58
	1	99	15	1	99
	14	83		2	98
	15	80		10	88
	16	77		17	70
8	17	73	16	1	99
	1	99		8	89
	10	90		10	85
	12	86		15	69
	16	75			
	17	71			

2.2 参数估计及分析

线性混合效应模型和采用SAS和HLM等统计软件进行估计,得到模型的参数估计结果如表2和表3所示。固定效应反映了数据组中道面个体使用性能的平均衰变趋势。由表1中固定效应估计结果可见,模型1中各参数显著性检验结果为: $P < 0.01$ 拒绝 $\beta_i = 0$ 的原假设,模型系数均有显著的统计学意义。随机效应估计结果表明:模型1中随机系数 b_{1i} 和 b_{3i} 标准差分别为0.274 2和0.001 1,满足方差大于0的条件,而假设检验结果为 $P < 0.01$ 。由此说明数据组中,道面个体使用性能衰减曲线在2个系数上存在显著差异,因此也证实道面PCI数据之

间存在异方差,进一步提示对道面使用性能进行分析时应考虑数据的非独立性问题。

表 2 模型 1 参数估计结果

Tab.2 Parameters estimates for Model 1

固定效应					随机效应				
参数	估计值	标准差	比率	P 值	参数	标准差	方差成分	χ^2 值	P 值
β_{00}	99.987	0.034 7	2 873.470	0	b_{1i}	0.274 2	0.075 2	228.125 3	0
β_{10}	-0.986	0.084 1	-11.724	0	b_{3i}	0.001 1	0.000 001 21	107.145 1	0
β_{20}	0.052	0.007 0	7.370	0	ϵ_{it}	0.479 5	0.229 9		
β_{30}	-0.005	0.000 3	-13.406	0	方差 矩阵		$G=\begin{bmatrix} 0.075\ 2 & 2\times 10^{-5} \\ 2\times 10^{-5} & 1.21\times 10^{-6} \end{bmatrix}$		

表 3 模型 2 参数估计结果

Tab.3 Parameters estimates for Model 2

固定效应					随机效应				
参数	估计值	标准差	比率	P 值	参数	标准差	方差成分	χ^2 值	P 值
β_{00}	99.955	0.035 1	2 845.920	0	b_{1i}	0.113 48	0.012 88	34.499	0
β_{10}	-0.902	0.1965	-4.590	0	b_{3i}	0.000 59	0	91.979	0
β_{11}	-0.421	0.065 4	-6.429	0	ϵ_{it}	0.464 61	0.215 87		
β_{12}	0.054	0.008 1	6.606	0	方差 矩阵		$G=\begin{bmatrix} 0.012\ 88 & -0.000\ 05 \\ -0.000\ 05 & 0 \end{bmatrix}$		
β_{20}	0.161	0.026 3	6.124	0					
β_{21}	-0.050	0.009 4	-5.284	0					
β_{22}	-0.024	0.006 4	-3.745	0.001					
β_{30}	-0.008 7	0.000 3	-8.261	0					
β_{31}	0.002 7	0.000 5	5.136	0.001					
β_{32}	0.000 08	0.000 03	2.509	0.026					

模型 2 中固定效应系数均有显著统计学意义,说明固定效应变量与多项式模型的随机系数具有良好的相关性.其中 $\lg N$ 与 β_{1i} 和 β_{2i} 呈负相关,即随着交通量的增长,初始负向的增长斜率以及增长加速度越大,道面性能衰减越快.相反道面厚度 H 与 β_{1i} 和 β_{3i} 呈正相关,道面厚度越大负向增长速度越小,道面性能衰减越慢.指示变量 z 系数体现了不同环境下道面状况衰变的差异,当 z 分别取 1 和 0 时, β_{2i} 和 β_{3i} 在截距上的差值分别为 -0.05 和 0.002 7.可见区域差异对 β_{2i} 和 β_{3i} 的影响呈负相关性.由此可见,Ⅳ类地区机场道面状况指数(PCI)衰减初始加速度比Ⅱ类地区机场更大一些,但其整体趋势更平缓.分析其原因为:道面前期损坏主要与交通量有关,随着时间推移,道面使用性能衰减逐渐表现为多因素的综合效应,虽然所调查的Ⅳ类地区机场比Ⅱ类地区机场交通量大(表现出更显著的衰减趋势),但养护力度明显高于Ⅱ类地区机场,加之Ⅱ类地区受气候条件影响,综合导致其道面性能衰减相对更平缓.

模型 2 中随机效应估计结果表明: β_{1i} 和 β_{3i} 残差方差 b_{1i} 和 b_{3i} 在量级上已经非常小,但假设检验结果为 $P<0.001$,于是拒绝零假设.认为在控制 $\lg N, H$ 和 z 变量后,个体模型系数 β_{1i} 和 β_{3i} 还有部分变异未得到分解,个体系数之间仍有显著性差异.

对比表 1 和表 2 中随机效应估计结果不难发

现,系数模型中加入控制变量后,系数方差显著下降.具体而言, β_{1i} 残差方差 b_{1i} 由随机模型中的 0.075 2 下降为 0.012 88.这就意味着该系数中 83% 的变异能够用变量 $\lg N$ 和 H 解释.以此类似, β_{3i} 和 ϵ_{it} 的残差方差也有不同程度的消减.很明显,在随机系数模型中加入解释变量后,使得个体间的异质性能够得到更充分的分解,虽仍有部分变异存在,但模型拟合效果将有明显提高.

2.3 拟合效果分析

对数据组的拟合效果可以通过对预测值和残差情况进行分析,并采用图形直观地描述.图 1 和图 2 为观测值和拟合值对比图,从图中可以看出,数据点基本落在对角线上,说明拟合值与观测值之间的偏差很小,拟合效果均较好.

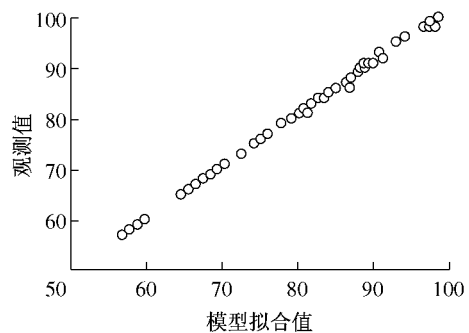


图 1 模型 1 拟合效果图

Fig.1 Model 1 fitting results

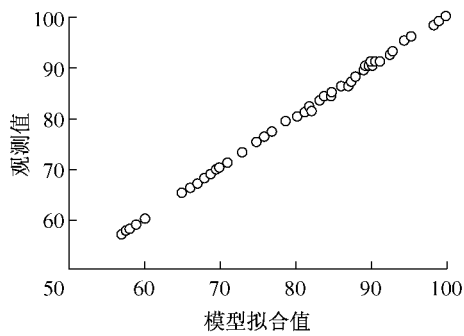


图2 模型2拟合效果图

Fig.2 Model 2 fitting results

图3和4为拟合残差分布图,该图反映了残差的大小与PCI拟合值的相关性.从图中可以看出,在PCI值较大时,拟合残差离散性相对较大,但模型1和2的拟合残差都分布在区间 $[-1.0, 1.0]$ 内.

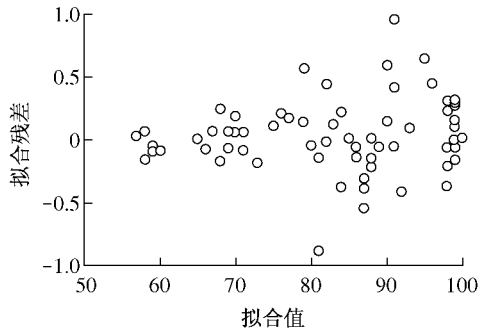


图3 模型1拟合残差分布图

Fig.3 Standardized residuals versus predicted PCI (Model 1)

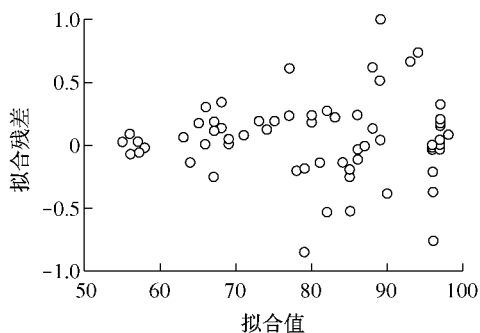


图4 模型2拟合残差分布图

Fig.4 Standardized residuals versus predicted PCI (Model 2)

图5和图6所示单个道面个体采用经典最小二乘法拟合的结果,如图所示经典最小二乘法的拟合残差分布在 $[-4, 4]$ 区间内.因此对比图1~4不难发现,混合效应模型的拟合精度相对更高.

2.4 残差正态性检验

应用线性混合模型的一个关键性前提假设是残差项的正态假定,因此,需要对模型残差进行正态性

检验.图7和图8为模型的残差检验图,如果残差项

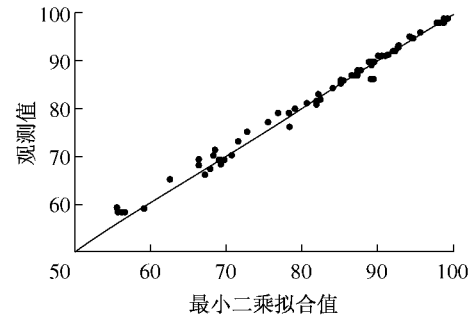


图5 最小二乘拟合效果图

Fig.5 Actual PCI versus predicted PCI (OLS)

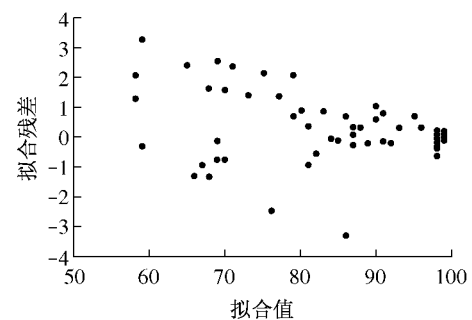


图6 最小二乘拟合残差分布图

Fig.6 Standardized residuals versus predicted PCI (OLS)

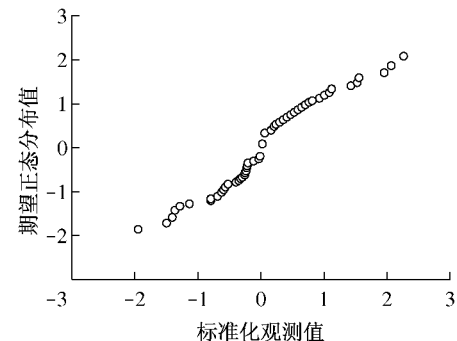


图7 模型1残差检验图

Fig.7 Quantile-quantile plots of standardized residuals (Model 1)

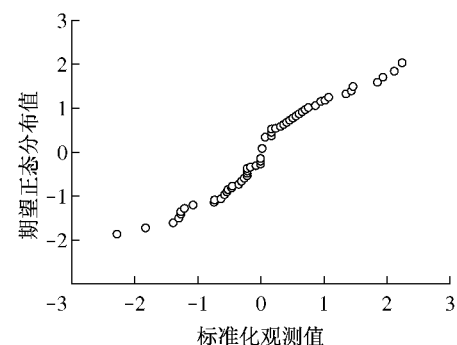


图8 模型2残差检验图

Fig.8 Quantile-quantile plots of standardized residuals (Model 2)

服从正态分布,则标准化残差点应落在图中对角线附近.由图可见残差项大致服从正态分布.

3 个体道面预测分析

相比普通回归模型而言,混合效应模型不仅能够分析固定效应影响,估计一个总体平均趋势模型,

而且能够整合有效信息,分析随机效应作用,提高道面个体模型参数估计的稳健性,并为道面个体估计模型参数.尤其当所研究的道面个体观测数据非常少的情况下,该模型可弥补传统回归模型对个体道面历史数据量高要求的不足.表 4 是采用不同统计技术得到的数据组中部分个体道面预测模型的参数估计案例.

表 4 个体案例估计结果对比

Tab.4 Comparison of parameter estimates for the individual pavement section

案例	最小二乘估计		模型 1 估计		模型 2 估计		模型 2 预测值	
	$\hat{\beta}_{1i}$	$\hat{\beta}_{3i}$	$\hat{\beta}_{1i}^*$	$\hat{\beta}_{3i}^*$	$\hat{\beta}_{1i}^*$	$\hat{\beta}_{3i}^*$	β_{1i}	β_{3i}
1	-0.863	-0.006	-0.975	-0.006	-0.976	-0.006	-0.099	-0.006
3	-1.424	-0.007	-1.030	-0.005	-1.142	-0.006	-1.016	-0.007
4	—	—	-0.893	-0.006	-0.844	-0.006	-0.899	-0.006
6	-0.443	-0.006	-0.589	-0.006	-0.573	-0.006	-0.708	-0.006
10	-0.486	-0.005	-0.523	-0.005	-0.487	-0.005	-0.632	-0.004
11	-0.907	-0.005	-0.971	-0.005	-0.918	-0.005	-0.967	-0.004
16	-1.196	-0.005	-1.359	-0.006	-1.128	-0.005	-1.150	-0.004
13	—	—	-0.830	-0.004	-0.599	-0.003	-0.595	-0.003

由表 4 可见,混合效应模型所采用的收缩估计方法获得的参数估计介于个体层面的最小二乘估计和预测值(均值)之间.当最小二乘估计较稳健时,混合效应模型估计结果向最小二乘估计靠拢;但如果无法获得个体最小二乘估计时,如案例 4 和案例 13 (仅有两次观测值),则向群体预测(平均值)靠拢.因此,混合效应模型所利用的信息更充分,估计结果更稳健.此外,相比常规最小二乘估计,混合效应模型的另一个显著优点是能够一次获得所有个体的参数估计,当样本规模非常大时,将大大减少数据分析的工作量.

由于混合效应模型对个体参数的估计取决于两个层面的信息,采用混合效应模型得到的道面个体预测曲线,将比基于平均趋势曲线的平行推移法获得的个体曲线更合理、预测精度更高.图 9 和 10 分别给出了模型 1 和模型 2 对个体道面使用性能的预

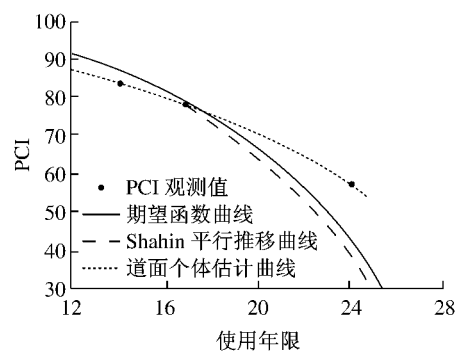


图 10 模型 2 个体曲线对比图

Fig.10 Example of individual pavement PCI prediction (Model 2)

测与平行推移法预测结果的对比情况,图中道面个体估计曲线为采用混合效应模型技术得到的某道面个体使用性能衰减的曲线.期望函数曲线为所有道面的总体平均结果.由图可见,混合效应模型对个体的预测精度明显高于平行推移法.

分析其原因为,一方面混合效应模型利用单个道面 PCI 时间序列的特点,考虑随机效应作用,修正了系数预测值与个体系数的估计值之间的误差;另一方面借助于道面属性特征变量的控制,降低了普通最小二乘法估计出现极端值的可能.

4 结论

(1)线性混合效应模型能够有效分解道面使用性能观测数据间存在的异方差,使残差满足正态假设并获得满意的拟合效果,弥补了传统经验回归模

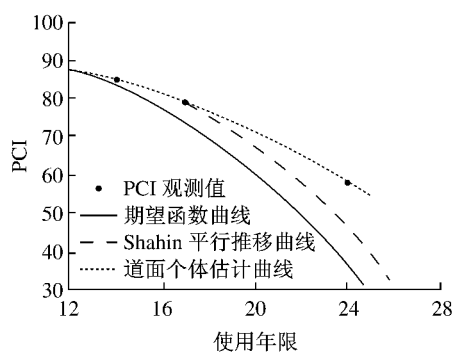


图 9 模型 1 个体曲线对比图

Fig.9 Example of individual pavement PCI prediction (Model 1)

型无法分析面板数据的不足,为道面使用性能预测分析提供了新的技术途径。

(2)随机效应能有效捕获 PCI 数据间不可观测的随机变异,但相比之下,模型中包含了道面属性特征变量等固定效应后,数据间异质性得到显著降低,模型拟合精度更高。

(3)部分道面由于观测数据不足,无法采用普通最小二乘进行估计,而线性混合效应模型可使个体估计值向平均值靠拢,实现对个体模型参数估计的改进,一方面解决部分个体观测数据不足的问题,另一方面提高参数估计的稳定性和精度。

(4)线性混合效应模型既能够分析道面使用性能的总体衰减趋势,亦可获得道面个体性能变化曲线。通过案例分析表明,混合效应模型方法比平行推移法及最小二乘法获得的道面个体预测值精度更高、更合理。

参考文献:

- [1] Chu C Y, Durango-Cohen L P. Estimation of infrastructure performance models using state-space specifications of time series models [J]. *Transportation Research Part C*, 2007, 15 (1): 17.
- [2] Shahin M Y. *Pavement management for airports, roads, and parking lots* [M]. New York: Springer, 2005.
- [3] Cook W D, Kazakov A. Pavement performance prediction and risk modeling in rehabilitation budget planning: a Markovian approach [C]// 2nd North American Conference on Managing Pavements. Toronto: [s. n.], 1987: 63-75.
- [4] Yu J X, Chou E Y J, Luo Z R. Development of linear mixed effects models for predicting individual pavement conditions [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2007, 133 (6): 347.
- [5] Arzu O, Fridtjof T, Bouzid C, et al. Statistical mixed effects models for evaluation and prediction of accelerated pavement testing results [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2006, 132(10): 771.
- [6] Prozzi A J, Madanat M S. Incremental nonlinear model for predicting pavement serviceability [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2003, 129(6): 635.
- [7] 刘玉海,凌建明,杜浩.道面状态转移概率估计的混合效应模型[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2012, 40(8): 1169.
LIU Yuhai, LING Jianming, DU Hao. Linear mixed effects model for estimating pavement condition Markov transition probabilities [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2012, 40(8): 1169.
- [8] Laird N M, Ware H. Random-effects models for longitudinal data[J]. *Biometrics*, 1992, 38: 963.
- [9] Morris C. Parametric empirical Bayes inference: theory and applications [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1983, 78(381): 47.
- [10] ASTM International. ASTM D 5340-03 Standard test method for airport pavement condition index surveys [S]. Pennsylvania: ASTM International, 2003.
- [11] Shahin M Y, Walther J A. Pavement maintenance management for roads and streets using the PAVER system[R]. [S. l.]: Army Construction Engineering Research Laboratory, 1990.
- [12] Shahin M Y, Becker J M. Development of performance prediction models for airfield pavements[J]. *Transportation Research Record*, 1984, 985: 25.
- [13] 中国交通运输部. JTJ 003—86 公路自然区划标准 [S]. 北京: 人民交通出版社, 1987.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTJ 003—86 Standard of climatic zoning for highway [S]. Beijing: China Communications Press, 1987.