

文章编号:1671-8879(2015)06-0056-07

# 机场复合道面性能预估的非线性混合效应模型

张 宏<sup>1</sup>,袁 捷<sup>2</sup>,杜 浩<sup>3</sup>

(1. 内蒙古大学 交通学院, 内蒙古 呼和浩特 010070; 2. 同济大学 道路与交通工程教育部  
重点实验室, 上海 200092; 3. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘 要:**针对中国机场复合道面使用性能数据少、刚性道面数据较多的实际情况,采用非线性混合效应模型,并且联合 2 个数据源进行参数估计,建立了机场复合道面使用性能预测模型;通过对中国 60 多个机场的数据计算分析,估计了该模型参数,并分析了拟合效果。研究表明:非线性混合效应模型能够有效分解道面使用性能面板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;非线性混合效应模型和联合估计方法一方面能解决部分个体观测数据不足的问题,另一方面提高了参数估计的稳定性和精度;非线性混合效应模型既可获得数据样本的总体趋势,也可得到个体的性能曲线,而且比传统方法的预估精度更高,为分析道面使用性能面板数据提供了新的技术手段。

**关键词:**道路工程;混合效应;模型;机场道面;性能预测

**中图分类号:**U412.6 **文献标志码:**A

## Nonlinear mixed effect model for airport composite pavement performance prediction

ZHANG Hong<sup>1</sup>, YUAN Jie<sup>2</sup>, DU Hao<sup>3</sup>

(1. School of Transportation, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, Inner Mongolia, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** With regard to the fact that there are few data about airport composite pavement use performance while more data about rigid pavement in China, the nonlinear mixed effect model was adopted and two data sources were combined for parameter estimation, which led to the building of airport composite pavement use performance prediction model. The model's parameters were estimated and its imitative effect was analyzed based on the data set of the over 60 airports in China. The results show that the heterogeneity originated from panned observation data of pavement use performance can be decomposed effectively, making residual error normal distributed as is assumed achieving the satisfactory imitative result. Nonlinear mixed effect model and jointed estimation method can be reasonable solutions to the problem of partial observation data deficiency, and can also improve the stability and precision of the parameter estimation. The total trend of data sample is got by nonlinear mixed effect model; the performance curve is also

收稿日期:2015-08-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51468047,51308412);内蒙古教育厅科学研究项目(NJZY13018,NJZY13016)

作者简介:张 宏(1978-),男,内蒙古乌兰察布人,副教授,工学博士,E-mail:zhanghong3537@126.com。

achieved. Moreover, compared with the traditional nonlinear regression, nonlinear mixed effects model provides a more realistic prediction. 4 tabs, 15 figs, 14 refs.

**Key words:** road engineering; mixed effect; model; airfield pavement; performance prediction

## 0 引言

道面使用性能预防模型是道面维护管理决策的核心和依据。近十几年,随着中国航空运输业快速发展,机场“白+黑”复合道面数量不断增加。相比水泥混凝土道面,复合道面虽然舒适性好,维护方便,但服务寿命相对较短,并且维护量大。因此,研究复合道面使用性能衰减规律,构建性能预估模型是机场道面管理的重要内容。目前,国内外机场道面管理研究中对道面使用性能的预估仍以经验回归方法为主,即采用统计技术建立道面使用性能指标与使用时间或轴载作用次数之间的关系,其预测精度一方面取决于模型对道面使用性能衰减形式的描述,另一方面是历史数据的有效积累。近年来,国内外学者采用室内外试验和现场测试等技术手段建立的诸多回归模型可供借鉴<sup>[1-2]</sup>,但对机场复合道面使用性能预估的研究开展较少,历史数据的积累也非常有限。因此,建立机场复合道面使用性能预估模型,需要选取合适的模型函数,并利用多机场、跨区域、多数据源信息进行参数估计,以获得较稳定的估计结果。然而,道面使用性能数据是一类典型的面板数据<sup>[3]</sup>,同时包含截面和时间2个维度:描述道面之间不同属性的交叉区域信息,如结构类型、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。为充分融合多个道面实体、不同类型道面的历史数据,必须考虑面板数据组内随机误差和组间异质性。针对面板数据特征,统计学应用领域常采用混合效应模型进行分析和处理。混合效应模型作为前沿的统计技术,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,目前在铺面使用性能预测中已有一些应用实例。

Yu等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<sup>[4]</sup>;Onar等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<sup>[5]</sup>;Prozzi等采用非线性混合效应模型预估路面使用性能,并与传统最小二乘法进行比较<sup>[6]</sup>;Archilla采用随机截距方法估计非线性增量车辙预估模型参数,获得了较好的拟合效果<sup>[7]</sup>;刘玉

海等应用混合效应模型,构建马尔可夫状态转移概率矩阵<sup>[8]</sup>。本文在国内外研究基础上,针对中国机场复合道面使用性能数据少、刚性道面数据较多的实际情况,应用混合效应模型统计技术,联合2个数据源进行参数估计,建立机场复合道面使用性能预测模型,估计模型参数,并通过实例分析实现对单个复合道面使用性能预测。

## 1 模型的建立

### 1.1 模型函数的确定

道面使用性能的变化具有复杂性、多样性和随机性特征。研究人员试图寻求一个既反映道面性能衰减机理,又能描述衰变轨迹的回归方程,由此提出了各种线性和非线性模型。目前机场道面管理系统中应用最多的是Shahin提出的线性多项式模型<sup>[9]</sup>。从形式上看,多项式模型不受道面使用性能衰变模式的影响,能够有效地拟合各种时间序列观测数据。但就模型本身而言,不具备对观测数据变化规律及成因的认知和判别能力,模型参数没有明确的物理意义,是为了获得较好拟合效果而选择的一种近最优逼近方法。

非线性模型一般针对特定的数据规律而建立,因此模型本身具有合理的物理解释,能够对观测数据的外延趋势提供稳定的预测。同时非线性模型中参数数量一般较少,在观测数据量较少的情况下能够估计模型参数。本文采用孙立军等提出的路面性能方程作为复合道面使用性能预估模型<sup>[10]</sup>,其基本形式为

$$y(t) = y_0(1 - e^{-(\alpha/t)^\beta}) \quad (1)$$

式中: $y_0$ 为初始道面性能状况指数值; $t$ 为使用年限; $\alpha$ 、 $\beta$ 为回归系数。

该方程当 $\alpha$ 、 $\beta \geq 0$ 时,单调递减;当 $t \rightarrow 0$ 时, $y \rightarrow y_0$ ;当 $t \rightarrow \infty$ 时, $y \rightarrow 0$ ; $\alpha$ 、 $\beta$ 具有明确的数学和物理意义,当 $\alpha$ 、 $\beta$ 取不同数值时,能够拟合4种典型道面性能衰变模式。

### 1.2 非线性混合效应模型

统计学的应用领域中普遍存在更复杂的、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。非线性混合效应模型是一类建立在普通

非线性模型基础上的混合效应模型,它允许固定效应和随机效应进入模型的非线性部分,不仅能识别个体间与个体内的变异,而且也考虑模型变量间的非线性关系。近年来非线性混合效应模型在医学、环境以及工农业领域引起研究者的广泛关注。用于分析面板数据的非线性混合效应模型最早由 Lindstrom 和 Bates 提出<sup>[11]</sup>,具有正态误差的个体观测分析模型基本形式为

$$y_{ij} = f(\mathbf{X}_{ij}\boldsymbol{\varphi}_i) + \boldsymbol{\varepsilon}_{ij} \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{ij} \sim N(0, \boldsymbol{\Omega}_i) \quad (2)$$

式中: $y_{ij}$ 为第*i*个个体的*j*次观测值; $\mathbf{X}_{ij}$ 为回归设计矩阵; $\boldsymbol{\varphi}_i$ 为参数向量; $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}$ 为正态随机误差向量; $\boldsymbol{\Omega}_i$ 为变量的方差-协方差矩阵。

式(2)描述了观测对象个体内部(组内)的变异。观测个体之间(组间)的变异通过个体回归参数模型描述,基本形式为

$$\boldsymbol{\varphi}_i = \mathbf{A}_i\mathbf{a} + \mathbf{B}_i\mathbf{b}_i \quad \mathbf{b}_i \sim N(0, \mathbf{G}) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{a}$ 为固定效应参数向量; $\mathbf{A}_i$ 、 $\mathbf{B}_i$ 分别为已知设计矩阵; $\mathbf{b}_i$ 为随机效应向量; $\mathbf{G}$ 为方差-协方差矩阵。

### 1.3 复合道面性能预估模型

道面使用性能采用道面状况指数(PCI)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的标准程序,并被世界许多国家和机构接受和采纳。道面使用性能衰变趋势与道面结构类型、结构厚度、航空交通量、气候环境等因素有关,其中部分因素可直接观测得到,可作为固定效应纳入模型;而其他潜在因素不可观测或无观测数据因素变量作为随机效应处理。由此,建立复合道面使用性能预估模型为

$$\left. \begin{aligned} y_i(t) &= 100(1 - e^{-(a_i/t)^{b_i}}) + \boldsymbol{\varepsilon}_{ij} \\ \alpha_i &= a_0 + a_1 \lg(N) + a_2 \lg(H) + \gamma_{0i} \\ \beta_i &= b_0 + b_1 \lg(N) + b_2 \lg(H) + \gamma_{1i} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $a_i$ 、 $b_i$ 为固定效应参数, $i = 1, 2, 3$ ;  $\gamma_{0i}$ 、 $\gamma_{1i}$ 为随机效应; $N$ 为飞机起降架次; $H$ 为道面结构等效厚度(cm),按照《民用机场道面评价管理技术规范》(MH/T 5024—2009)中推荐的方法计算。

## 2 模型参数估计

### 2.1 混合效应模型估计

非线性混合效应模型在形式上具有明显分层特征,估计总体参数时的想法是采用两阶段估计。但两阶段估计法要求每个个体观测数量*j*足够大,而且2次回归过程彼此独立,无法考虑第1次回归结果的稳健性对第2次回归的影响。事实上,非线性

混合效应模型通过随机效应线性化的方法来处理个体内观测点少的数据,即通过泰勒级数展开将随机效应从非线性函数中分离出来,形成边际非线性混合效应模型,再构建极大似然函数,通过给定随机效应或固定效应参数进行反复迭代计算,从而一次性获得模型参数的稳定估计值,不仅提高了效率,而且能处理组内观测数据少的问题。

### 2.2 联合估计技术

应用统计技术建模时,常会由于单一数据源的精度或信息量不足而无法获得某些模型参数的可靠估计。因此,需要借助其他相容的数据源对参数进行联合估计或修正。近年来该方法逐渐被用于交通运输工程领域,如 Ben-Akiva 最早将联合估计方法用于交通规划中旅客出行需求模型<sup>[12]</sup>; Shyr 联合室内试验数据和现场测试数据建立钢轨的疲劳模型<sup>[13]</sup>; Prozzi 采用 AASHO 试验数据和现场数据建立基于 PSI 的路面使用性能衰减模型<sup>[6]</sup>; Archilla 利用 LTPP 数据库中土的种类信息,弥补夏威夷土样类别的不足,结合夏威夷土样丰富的物理力学状态数据,建立土组回弹模量预估模型<sup>[14]</sup>。

联合估计作为一种基于多数据源的统计学参数估计方法,其主要优点是能够将具有相容性特征的多个数据源进行组合分析,充分利用信息资源,实现对参数估计的偏差纠正,并提高参数估计的效率(减小方差)。基本原理为:假设有2个数据源A和B,则联合估计方程可记为

$$\left. \begin{aligned} E(y^A | x^A, \omega) &= g^A(\beta^A, x^A, \alpha, \omega) \\ E(y^B | x^B, z) &= g^B(\beta^B, x^B, \gamma, z) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $E(y | \cdot)$ 为*y*的条件期望函数;函数形式为 $g(\cdot)$ ;  $y^A$ 、 $y^B$ 分别为数据源A和B的因变量观测值;  $x^A$ 、 $x^B$ 分别为模型A、B共有的自变量; $\omega$ 为模型A的自变量; $z$ 为模型B的自变量; $\beta^A$ 、 $\beta^B$ 分别为与变量 $x^A$ 、 $x^B$ 有关的模型参数; $\alpha$ 、 $\gamma$ 分别为与 $\omega$ 、 $z$ 有关的模型参数。

式(5)中的变量参数关系存在3种可能:

(1) 如果模型A和B中的变量和参数相同,这是一种最理想的状况,如果数据源A和B确实能够解释相同的规律现象,通过联合A和B将获得更稳健的估计结果;

(2) 一种较为极端的情况是模型A和B中的变量和参数完全不同,(即 $x^A$ 、 $x^B$ 、 $\beta^A$ 、 $\beta^B$ 不存在),这种情况下联合估计将无法获得可利用的共享信息;

(3) 如果模型A和B中既有相同的自变量*x*,也有各自独有的自变量 $\omega$ 、 $z$ ,这种情况下联合估计法

将可获得更多信息,估计出各自变量的相关参数,同时可获得共享参数的稳定估计及偏离程度。

为了估计“白+黑”复合道面性能衰变模型参数,可以联合刚性道面观测数据和复合道面观测数据。从模型形式上2类数据源满足第1种情况,但由于材料特性及力学特征的差异(实际不可观测),刚性道面和复合道面使用性能衰变速率不同,即 $\beta^A \neq \beta^B$ ,则存在某偏差变量 $\mu$ 或 $\delta$ ,使关系式 $\beta^A = \mu\beta^B$ 或 $\beta^A = \beta^B + \delta$ 成立。通过对偏差参数估计,可分别获得2类模型中的参数。

### 2.3 数据源

本文使用的数据资料来自中国华东、西南和三北(华北、西北和东北)等地区的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1995~2009年。通过筛选和整理,最终形成16组水泥道面的PCI数据源和4组复合道面的PCI数据源,见表1。

表1 数据源机场分布

Tab. 1 Data source distribution of airports

区域	等级	机场数量/个
华东地区	4C/4D/4E/4F	5/6/8/1
三北地区	3C/4C/4D/4E/4F	2/7/6/7/1
西南地区	4C/4D/4E	1/3/2/4
中南地区	4C/4D/4E	2/4/6

表2 模型参数估计结果

Tab. 2 Estimate results of model parameters

固定效应参数	估计值	标准误 SE	t 比率	P 值
$a_0$	1.062 70	0.070 26	15.12	< 0.000 1
$a_1$	-0.092 80	0.007 85	-11.82	< 0.000 1
$a_2$	0.412 70	0.057 93	7.12	< 0.000 1
$\mu_0$	-1.304 60	0.209 00	-6.24	< 0.000 1
$\mu_1$	0.090 80	0.021 42	4.80	0.000 1
$\mu_2$	0.353 20	0.127 90	2.76	0.012 8
$b_0$	-1.013 00	0.320 70	-3.16	0.005 4
$b_1$	-0.087 10	0.027 26	-3.19	0.005 0
$b_2$	0.996 50	0.268 30	3.71	0.001 6
$\lambda$	0.012 70	0.006 28	2.02	0.038 2
随机效应参数	标准差	95% 下限	95% 上限	P 值
$\gamma_{0i}$	0.010 60	0.001 89	0.019 30	0.019 7
$\gamma_{1i}$	0.025 40	-0.005 10	0.055 93	0.097 3
$\sigma$	1.719 70	1.401 700	2.037 60	< 0.000 1

参数的影响更为显著。这已被大量的道面测试和评价实践所证实。但由于 $\lg(N)$ 的系数估计主要利用刚性道面的交通量信息,复合道面数据多来自大型

## 3 计算分析

### 3.1 参数估计分析

由混合效应模型和联合估计方法,经参数显著性筛选分析和计算,确定模型参数形式为

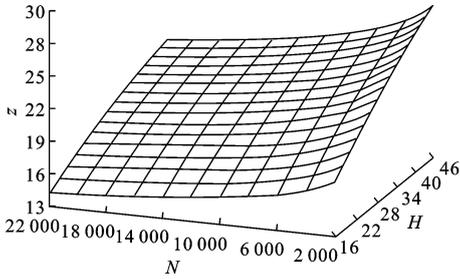
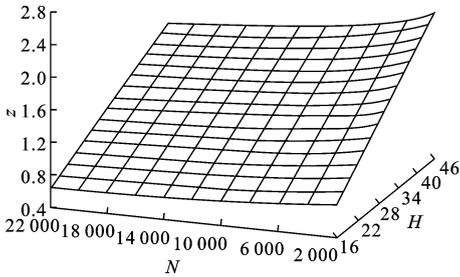
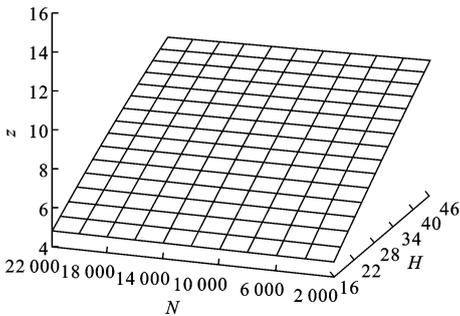
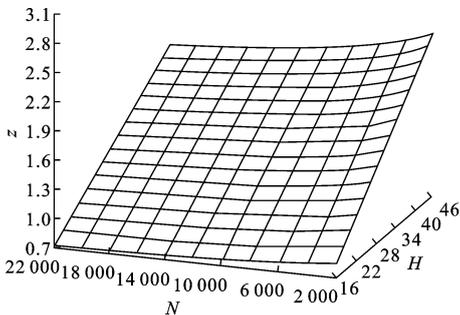
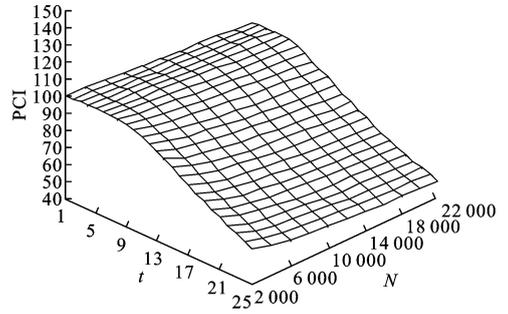
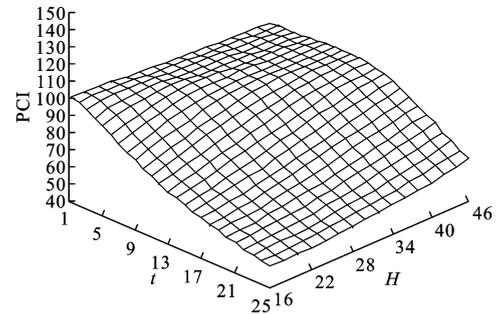
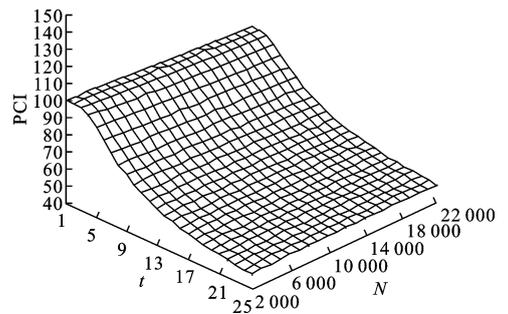
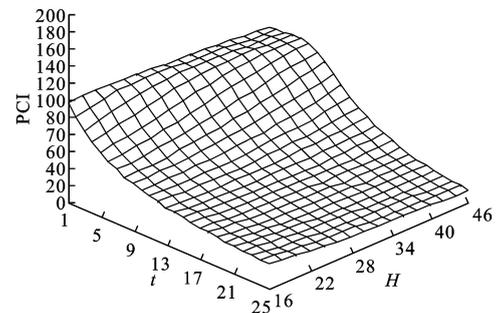
$$\left. \begin{aligned} \alpha_i &= a_0 + \mu_0 M + (a_1 + \mu_1 M) \lg(N) + \\ &\quad (a_2 + \mu_2 M) \lg(H) + \gamma_{0i} \\ \beta_i &= b_0 + (b_1 + \lambda M) \lg(N) + b_2 \lg(H) + \gamma_{1i} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $\mu$ 、 $\lambda$ 为偏差参数; $M$ 为指示变量,取值0,1分别表示水泥混凝土道面数据源和复合道面数据源。

应用统计学软件 SAS 中 PROC NL MIXED 模块,编写用户子程序,设定参数估计初始值进行迭代计算,获得非线性混合效应模型参数估计值。参数估计结果如表2所示。由表2可看出,模型参数有显著统计学意义。固定效应中除 $\mu_2$ 和 $\lambda$ 外,其他参数显著性水平均小于1%。

从随机效应估计结果看,道面个体变异较显著,标准差为1.72,个体间的随机效应标准差虽然较小,但仍无法拒绝方差为0的原假设,说明个体间差异仍需更多的自变量进一步分解。由参数估计结果,得到变量 $N$ 和 $H$ 对个体模型参数的影响,如下页图1~图4所示。由图可见,个体模型参数 $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ 的期望随交通量 $N$ 增大而减小,随结构厚度 $H$ 增大而增大,而且道面结构厚度比交通量对个体模型

枢纽机场,实际承受的交通量要大得多,从而导致复合道面个体模型参数受交通量 $N$ 的影响非常微弱,这也是应用联合估计法需要注意的一点。

图1 刚性道面模型参数  $\alpha_i$  趋势Fig. 1  $\alpha_i$  for rigid pavement图2 刚性道面模型参数  $\beta_i$  趋势Fig. 2  $\beta_i$  for rigid pavement图3 复合道面模型参数  $\alpha_i$  趋势Fig. 3  $\alpha_i$  for composite pavement图4 复合道面模型参数  $\beta_i$  趋势Fig. 4  $\beta_i$  for composite pavement图5 刚性道面个体模型曲线( $H=30$  cm)Fig. 5 Individual of rigid pavement at  $H=30$  cm图6 刚性道面个体模型曲线( $N=5000$ )Fig. 6 Individual of rigid pavement at  $N=5000$ 图7 复合道面个体模型曲线( $H=30$  cm)Fig. 7 Individual of composite pavement at  $H=30$  cm图8 复合道面个体模型曲线( $N=5000$ )Fig. 8 Individual of composite pavement at  $N=5000$ 

由表2中参数估计值,绘制道面个体性能衰减曲线,如图5~图8所示。由图可知,相同条件下,复合道面的衰减速度要明显快于刚性道面。分析其原因主要由于面层材料的强度及耐久性存在明显差异,同时损坏特征及PCI调查扣分方法不同。

### 3.2 拟合效果分析

非线性混合效应模型的反应变量可以是服从正态分布(normal)、二项分布(binomial)或泊松分布

(poisson)等多种分布形式的连续或离散变量。因此,残差分布形式的检验是对混合效应模型应用假设的验证。应用统计模型的一个关键性前提假设是残差项的分布假定,本文假设误差项服从正态分布,因此需要对模型残差进行正态检验。图 9 为数据源中 PCI 拟合残差正态检验,如果残差项服从正态分布,则标准化残差点应落在图中对角线附近。由图 9 可见,复合道面 PCI 预估模型拟合残差基本服从正态分布。图 10 为模型拟合残差项散点图,图 11 为观测值与模型拟合值对比。由图可见,数据点多分布于对角线两侧,预测值与观测值之间存在一定偏差,残差值随机分布在  $[-3, 3]$  范围内。总体而言,复合道面预估模型最大拟合误差约为 3,满足工程应用要求。

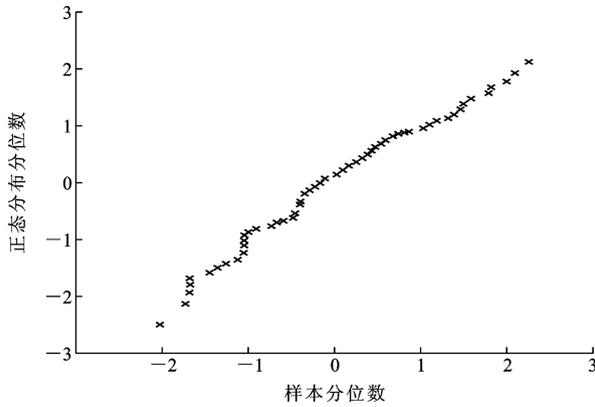


图 9 PCI 残差正态检验

Fig. 9 Normality tests of PCI residual

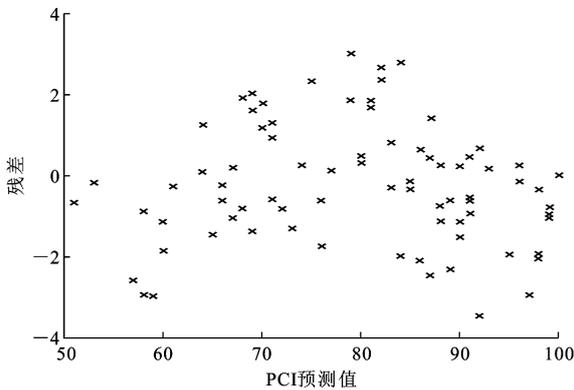


图 10 PCI 残差散点

Fig. 10 Residual scatter of PCI

图 12、图 13 分别为模型随机效应  $\gamma_{0i}$ 、 $\gamma_{1i}$  的正态分布检验。下页图 14 为参数模型残差分布散点图。由图可见,参数模型的残差同样满足正态假设,且参数随机效应分别分布于  $[-0.015, 0.015]$  和  $[-0.03, 0.03]$  区域内。

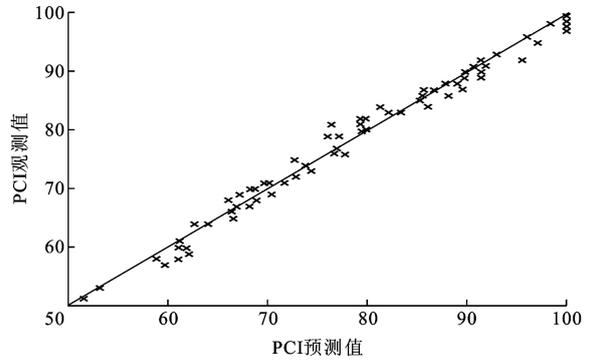


图 11 观测值与拟合值的对比

Fig. 11 Comparison between measurement and prediction

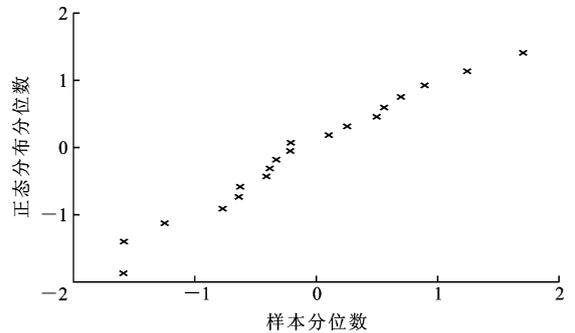


图 12  $\gamma_{0i}$  正态检验

Fig. 12 Normality tests of  $\gamma_{0i}$

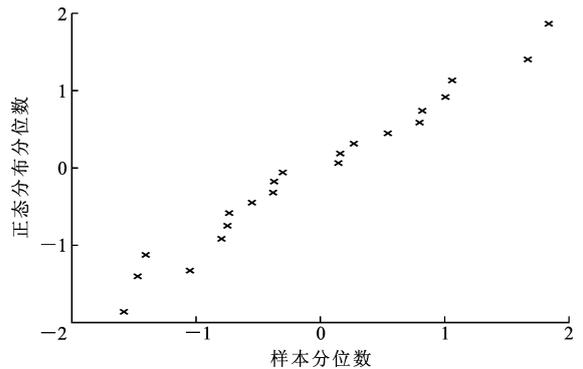


图 13  $\gamma_{1i}$  正态检验

Fig. 13 Normality tests of  $\gamma_{1i}$

### 4 个体道面预估分析

采用非线性混合效应模型不仅能够整合有效的道面使用性能历史数据,分析机场复合道面性能总体衰减趋势,为缺乏历史数据的道面个体提供参考,还可针对特定的道面个体进行分析,特别是在道面加铺初期数量少的情况下,能够利用其他道面区域的历史数据分析道面平均衰减趋势,为单个道面性能预估提供更符合实际的结果。例如:华东某 4E 机场 2005 年实施加铺,2006~2008 年进行了 3 次连续测试,2011 年再次加铺时 PCI 值为 91,得到的 PCI 数据如下页表 3 所示。

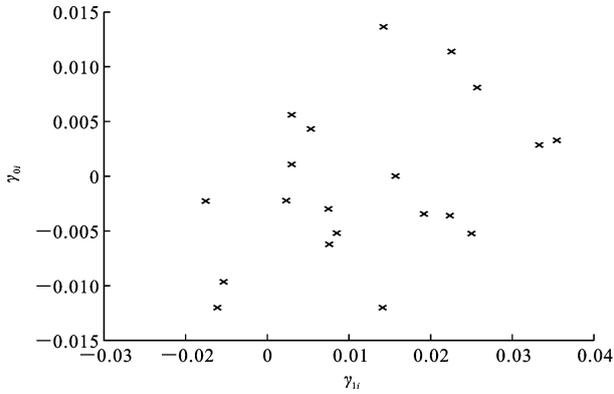
图 14  $\gamma_{0i}$  和  $\gamma_{1i}$  的残差散点Fig. 14 Residual scatter of  $\gamma_{0i}$  and  $\gamma_{1i}$ 

表 3 道面 PCI 观测值

Tab. 3 PCI monitoring data

观测时间	PCI 值	lg(N)	等效厚度/cm
2006 年	100	5.252	40
2007 年	100	5.252	40
2008 年	99	5.252	40
2011 年	91		

采用本文提出的非线性混合效应模型方法和普通非线性回归方法,得到模型估计参数如表 4 所示。

表 4 参数估计结果

Tab. 4 Estimation results of parameters

估计方法	$\gamma_0$	$\gamma_1$	$\alpha$	$\beta$
普通回归			5.449	2.559
混合模型	-0.000 093	-0.009 24	10.800	1.250

将表中的参数数据绘制为道面性能衰减曲线,如图 15 所示。从图 15 可以看出,普通非线性回归得到的预估曲线在道面使用 5 年后 PCI 衰减至 70 以下,10 年后接近 20。相对而言,采用混合模型预估结果更符合实际。分析认为,普通回归仅是对历史数据的最优拟合,而且对样本数据量非常敏感,必须有足够长的时间序列才能获得较可靠的预估结果。由于其忽略外部因素对道面性能的影响,因此参数估计随机性很大,特别是历史数据少、精度较低时容易出现不合理的预估结果。而非线性混合效应模型能够充分利用其他道面区域的数据信息,增大了样本量,并通过固定效应和随机效应对误差项进行分解,使个体道面模型参数估计向总体期望值靠拢,从而能得到更符合实际的结果。

## 5 结 语

(1)传统预测模型只能对单一时间序列进行分析,而混合效应模型将道面属性特征变量作为固定效应,将不可观测因素作为随机效应,能够有效分解

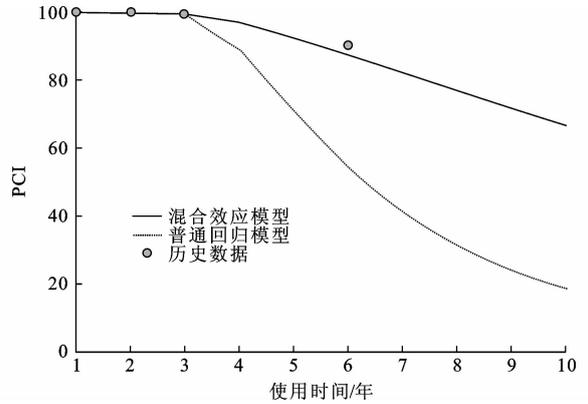


图 15 预估曲线

Fig. 15 Comparison between two models

道面使用性能面板数据中存在的异方差,分析多源分层数据,为道面使用性能预测分析提供了新的技术途径。

(2)针对复合道面使用性能数据少而刚性道面数据较多,传统回归分析难以获得稳定估计的问题,本文采用联合估计技术实现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,另一方面提高了参数估计的稳定性和精度。

(3)计算分析表明,该模型的道面个体变异较显著,个体模型参数  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  的期望随交通量  $N$  的增大而减小,随结构厚度  $H$  的增大而增大,道面结构厚度比交通量对个体模型参数的影响更为显著,复合道面性能的衰减速度要明显快于刚性道面。

(4)非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,非线性混合效应模型方法比普通非线性回归方法获得的道面个体预测值更符合实际。

## 参考文献:

### References:

- [1] Chu C Y, Durango-Cohen P L. Estimation of infrastructure performance models using state-space specifications of time series models[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2007, 15(1): 17-32.
- [2] Cook W D, Kazakov A. Pavement performance prediction and risk modeling in rehabilitation budget planning: a markovian approach. Proc. [J]. North American Conf. on Managing Pavements Toronto, 1987 (2): 63-75.
- [3] 杜 浩. 机场道面使用性能预测的混合效应模型 [D]. 上海: 同济大学, 2009.