

# 基于主成分分析法的沥青路面使用性能评价

李 波<sup>1,2</sup>, 韩 森<sup>2</sup>, 徐鸥明<sup>2</sup>, 滕旭秋<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**针对现有沥青路面使用性能综合评价中存在主观影响因素过多、权重确定复杂的问题,采用主成分分析法对河南省 4 条高速公路沥青路面使用性能的实测数据进行了评价,并与《公路养护技术规范》方法和灰色理论方法的评价结果进行了比较。结果表明:主成分分析法采用适当的主成分综合分析原始指标的信息,以各主成分的方差贡献率为权重,可以客观地确定各评价指标的权重,反映各指标对总体评价结果的影响;经线性加权求和得到的综合评价指标能够克服主观因素的影响,使沥青路面使用性能评价结果更加客观、可靠。

**关键词:**道路工程; 沥青路面; 路面使用性能; 主成分分析; 综合评价

**中图分类号:** U418.6

**文献标志码:** A

## Evaluation of asphalt pavement performance based on principal component analysis

LI Bo<sup>1,2</sup>, HAN Sen<sup>2</sup>, XU Ou-ming<sup>2</sup>, TENG Xu-qiu<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** For the excess of subjective factors and the difficulty of index weight decision in current synthetic evaluation for the performance of asphalt pavement, the principal component analysis (PCA) method was applied to analyze the performance of asphalt pavement as a new thought. The experimental data of four freeways in Henan Province were analyzed with the principal component analysis method. The calculating results were compared with results based on the method of *Technical Specifications for Maintenance of Highway Asphalt Pavement* and Grey Theory. The results show that the principal component analysis method can combine the information of original indexes by proper principal component and regards the variance contribution as weight. The method can calculate the weights of evaluation index objectively and can reflect the effect of every index on synthetic evaluation result. Then, synthetic evaluation index by summing result of linear power weight for the asphalt pavement performance can eliminate the influence of subjective factors and can make the appraisal more objective and dependable. 4 tabs, 9 refs.

**Key words:** road engineering; asphalt pavement; pavement performance; principal component analysis(PCA); synthetic evaluation

## 0 引言

路面使用性能评价是路面养护管理、道路经济分析的重要组成部分。中国在“七五”攻关期间曾组织了路面管理系统(PMS)的科研工作,其中包含了对路面使用性能的综合评价方法,提出了综合评价指标(PQI),并将该指标引入了《公路养护技术规范》<sup>[1]</sup>。该方法是一种确定性的评价方法,其优点是评价模型简单,路面综合评定指标的各分项指标清楚、直接,数据易于采集,对指导中国沥青路面养护管理发挥了重大作用。但该方法有以下不足<sup>[2-3]</sup>:①评价模型一般都是对路面调查数据进行回归分析得到,数据偶然性大且存在误差,回归分析无法解决这个问题;②评价模型中的综合评价指标对权重用的是平均概念,没有依据。近年来,也曾有专家利用灰色理论对路面使用性能进行过评估<sup>[4-7]</sup>,但该方法在计算关联度时需对各样本采用平权处理,客观性较差,也会导致部分评价结果在一定程度上存在偏差,很难符合实际情况。为此,本文采用主成分分析法对沥青路面的使用性能进行评价,以期形成一种能客观、可靠地反映沥青路面使用性能的评价方法。

## 1 主成分分析的基本思路

主成分分析法是通过恰当的数学变换,使新变量主成分成为原变量的线性组合,并选取少数几个在变差总信息量中比例较大的主成分来分析事物的一种方法。主成分分析法对原指标变量进行变换后形成了彼此相互独立的主成分,可消除评价指标之间的相互影响,克服了以往多指标评价中指标之间的相关性以及指标反映信息在一定程度上的重叠性等缺点,使评价结果更科学、可靠<sup>[8-9]</sup>。

应用主成分分析法对沥青路面性能进行综合评价,做了2个层次的线性合成:第一层次将原始指标通过恰当的线性组合成为主成分,按累计方差贡献率不低于某个值(比如90%)的原则确定前几个主成分,反映原始指标的信息;第二层次是各主成分以各自的方差贡献率为权重,通过线性加权求和得到综合评价指标以分析路面使用性能,这反映了各主成分的信息。

## 2 模型及算法

### 2.1 主成分方法

设随机向量  $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_p)^T$ ,  $\boldsymbol{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p)^T$  为  $p$  维空间  $R_p$  中的单位向量,并记所有

单位向量的集合为

$$\mathbf{R}_0 = \{\boldsymbol{\alpha} \mid \boldsymbol{\alpha}^T \boldsymbol{\alpha} = 1\} \quad (1)$$

$D(X_i)$  是随机向量元素  $X_i$  的方差; $Z_i = \alpha_i^T \mathbf{X}$ ,  $\alpha_i \in \mathbf{R}_0, i = 1, 2, \dots, p$ 。

若  $D(Z_1) = \max\{D(\alpha_i^T \mathbf{X})\}$ ,  $\alpha_i \in \mathbf{R}_0$ , 称  $Z_1$  为  $\mathbf{X}$  的第一主成分,记为

$$Z_1 = \alpha_1^T \mathbf{X}, \alpha_1 \in \mathbf{R}_0 \quad (2)$$

一切形如  $Z = \alpha^T \mathbf{X}$  且与  $Z_1$  不相关,使方差达到极大者称为  $\mathbf{X}$  的第二主成分,记为

$$Z_2 = \alpha_2^T \mathbf{X}, \alpha_2 \in \mathbf{R}_0 \quad (3)$$

类似的,若前  $k-1$  个主成分已得到,一切形如  $Z = \alpha^T \mathbf{X}$  且与  $Z_1, Z_2, \dots, Z_{k-1}$  不相关,使方差达到极大者称为  $\mathbf{X}$  的第  $k$  主成分,记为  $Z_k = \alpha_k^T \mathbf{X}, \alpha_k \in \mathbf{R}_0, k = 3, 4, \dots, p$ 。

### 2.2 样本的主成分

设  $\mathbf{X}$  的样本数据矩阵  $\bar{\mathbf{X}}$  为

$$\bar{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{p1} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{1n} & \cdots & x_{pn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $x_{ij}$  为  $\bar{\mathbf{X}}$  的元素,  $i = 1, 2, \dots, p, j = 1, 2, \dots, n$ 。

由于各评价指标属于不同的数量级,没有统一的度量标准,所以在进行主成分分析前,要对原始数据按照 Z-Score 法进行标准化变换,即

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \bar{x}_i}{\sqrt{S_{ij}}} \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, p, j = 1, 2, \dots, n$$

式中: $\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}$ ;  $S_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j)$ ,  $j = 1, 2, \dots, p$ 。

经过标准化变化,得标准化矩阵  $\bar{\mathbf{X}}^*$  为

$$\bar{\mathbf{X}}^* = \begin{bmatrix} x_{11}^* & \cdots & x_{p1}^* \\ \vdots & & \vdots \\ x_{1n}^* & \cdots & x_{pn}^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 2.3 选择主成分

设  $\mathbf{X}$  经数据预处理后的样本相关矩阵  $\mathbf{R}$  为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & r_{1p} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{p1} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由特征方程  $(\mathbf{R} - \lambda \mathbf{I})\mathbf{L}_i = 0$ , 求出  $p$  个非负实根,并按值从大到小排列(其中  $\mathbf{I}$  为单位矩阵),有

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_p \geq 0$$

将特征值  $\lambda$  的非负实根  $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, p)$  代入下列方程组,求出特征向量  $\mathbf{L}_i = (l_{i1}, l_{i2}, \dots, l_{ip})$ , 有

$$(\mathbf{R}-\lambda \mathbf{I}) \mathbf{L}_i=0 \quad i=1,2, \cdots, p$$

(8)

2.4 综合评价

设前  $m$  个主成分  $Z_1, Z_2, \cdots, Z_m$  的信息量分别为  $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_m$ , 且累计贡献率很大(超过 90%),  $\bar{X}_1^*、\bar{X}_2^*、\cdots、\bar{X}_m^*$  分别为  $X_1、X_2、\cdots、X_m$  的标准化变换,则主成分  $Z_k$  的计算式为

$$Z_k=l_{i 1} \bar{X}_1^*+l_{i 2} \bar{X}_2^*+\cdots+l_{i m} \bar{X}_m^*$$

$$i=1,2, \cdots, m$$

(9)

主成分  $Z_k$  的贡献率  $W_k$  ( $\lambda_k$  为  $Z_k$  的信息量) 为

$$W_k=\lambda_k / \sum_{i=1}^m \lambda_i$$

(10)

所以可构造综合评价函数  $Y$  为

$$Y=Y\left(Z_1, Z_2, \cdots, Z_m\right)=\sum_{k=1}^m W_k Z_k$$

(11)

$Y$  值越高,说明该沥青路面的使用性能越好,反之越差。

$$\bar{\mathbf{X}}^*=\left[\begin{array}{cccc} 0.51837 & -0.73108 & -0.38974 & -0.60938 \\ 0.23473 & -1.27807 & -0.88578 & -1.38495 \\ -1.06608 & -0.39447 & -0.95665 & -0.68119 \\ -1.08564 & -0.83627 & -0.88578 & -0.58476 \\ -0.34232 & 0.88886 & 0.81492 & 0.66375 \\ -0.68464 & -0.12097 & -0.31888 & -0.03283 \\ 0.56727 & 1.47793 & 1.59441 & 1.37058 \\ 1.85831 & 0.99405 & 1.02751 & 1.25876 \end{array}\right]$$

(12)

$\bar{\mathbf{X}}^*$  的相关系数矩阵  $\mathbf{R}$  为

$$\mathbf{R}=\left[\begin{array}{cccc} 1 & 0.4448 & 0.6178 & 0.5189 \\ 0.4448 & 1 & 0.9537 & 0.9777 \\ 0.6178 & 0.9357 & 1 & 0.9520 \\ 0.5189 & 0.9777 & 0.9520 & 1 \end{array}\right]$$

(13)

求解  $\mathbf{R}$  的特征值,并按式(10) 计算各主成分的贡献率和累计贡献率,如表 2 所示。

表 2 特征值及对应的贡献率

主成分	特征值	贡献率 $W_k/\%$	累计贡献率 $W/\%$
$Z_1$	3.287	82.181	82.181
$Z_2$	0.658	16.458	98.639
$Z_3$	0.040	1.007	99.645
$Z_4$	0.014	0.355	100.000

根据表 2,取累计贡献率  $W=98.639\%$ ,则需要引入 2 个主成分  $Z_1、Z_2$ ,即  $m=2$ 。第一个主成分对应的特征向量  $\mathbf{L}_1=(0.3712,0.5282,0.5437,0.5363)$ ,第二个主成分对应的特征向量  $\mathbf{L}_2=(-0.9108,0.3360,0.0688,0.2298)$ 。

3.3 综合评价

构造主成分  $Z_1、Z_2$  和各指标之间的线性关系

3 应用实例

3.1 采集样本数据

选取郑州—开封、郑州—洛阳、安阳—新乡、许昌—漯河 4 条高速公路 1999 年、2000 年的路况检测数据<sup>[9]</sup>:路面强度指数 (SSI)、路面平整度指数 (RQI)、横向力系数 (SFC) 和路面状况指数 (PCI),作为路面使用性能评价初始值,如表 1 所示。

表 1 高速公路路面使用性能评价指标值

路段	郑州—开封		郑州—洛阳		安阳—新乡		许昌—漯河	
年份	1999	2000	1999	2000	1999	2000	1999	2000
SSI	3.10	2.81	1.48	1.46	2.22	1.87	3.15	4.47
RQI	8.76	8.50	8.92	8.71	9.53	9.05	9.81	9.58
SFC	0.63	0.56	0.55	0.56	0.80	0.64	0.91	0.83
PCI	80.70	73.14	80.00	80.94	93.11	86.32	100.0	98.91

3.2 评价指标值标准化处理及特征值求解

按式(5),利用 Z-Score 法,对表 1 中各路段评价指标值进行标准化处理,得到其标准化矩阵  $\bar{\mathbf{X}}^*$  为

式,并结合 2 个主成分方差的贡献率得到最终评价函数  $Z$  与  $Z_1、Z_2$  的线性关系式。将原始数据标准化矩阵  $\bar{\mathbf{X}}^*$  中的数值代入式(16),得到最终分析评价结果,如表 3 所示。

$$Z_1=0.3712 I_{\text{SSI}}+0.5282 I_{\text{RQI}}+0.5437 I_{\text{SFC}}+0.5363 I_{\text{PCI}}$$

(14)

$$Z_2=-0.9108 I_{\text{SSI}}+0.336 I_{\text{RQI}}+0.0688 I_{\text{SFC}}+0.2298 I_{\text{PCI}}$$

(15)

$$Z=0.82181 Z_1+0.16458 Z_2$$

(16)

式中: $I_{\text{SSI}}、I_{\text{RQI}}、I_{\text{SFC}}、I_{\text{PCI}}$  分别为路面强度指数 (SSI)、路面平整度指数 (RQI)、横向力系数 (SFC) 和路面状况指数 (PCI) 的值。

表 3 高速公路路面使用性能主成分分析结果

路段	郑州—开封		郑州—洛阳		安阳—新乡		许昌—漯河	
年份	1999	2000	1999	2000	1999	2000	1999	2000
$Z_1$	-0.559	-4.222	-2.729	2.736	1.810	-0.710	4.463	4.682
$Z_2$	0.095	-0.685	0.539	0.546	0.379	0.413	-0.118	-1.170
$Z$	-0.444	-3.582	-2.154	-2.159	1.550	-0.515	3.648	3.655

3.4 对比分析

将表 3 中主成分分析结果与文献[1] 的方法和

文献[6]的灰色评价结果进行对比分析,结果如表4所示。

表4 3种评价方法结果的综合对比分析

路段	郑州—开封		郑州—洛阳		安阳—新乡		许昌—漯河	
	1999	2000	1999	2000	1999	2000	1999	2000
文献[1]方法	86.50	83.50	86.50	86.50	90.00	90.00	90.00	90.00
灰色评价法	0.882	0.861	0.945	0.874	0.833	0.871	0.719	0.803
主成分分析法	-0.444	-3.582	-2.154	-2.159	1.550	-0.515	3.648	3.655

对照表1和表4可以看出,主成分分析法更能准确地反映沥青路面的综合使用性能,其主要原因如下所述。

(1)文献[1]方法采用分项评价、赋权综合方法,其中权重取值主观因素较大;同时,对于各项分级指标采用主观换算法进行处理,与实际有较大差别,得到的评价结果偏高。

(2)灰色评价方法以各因素的样本数据为依据,用灰色关联度来描述因素间关系的强弱、大小和次序,其核心是计算关联度;而关联度计算公式对各样本采用平权处理,客观性较差,这就导致部分分析结果不符合实际情况。

(3)主成分分析法将各主成分的方差贡献率作为权重,以各主成分的线性加权求和所得结果作为沥青路面使用性能的综合评价价值,从而有效避免了前两种评价方法的缺陷,能很好地反映调查结果,使评价结果更接近实际。

4 结 语

(1)主成分分析法评价沥青路面使用性能既可在确定权重时尽可能避免主观性,提高评价结果的客观性和科学性,又可降低分析难度,为不同地区沥青路面使用性能的综合评价提供了一条新途径。

(2)沥青路面使用性能评价体系只选用了路面强度指数(SSI)、路面平整度指数(RQI)、横向力系数(SFC)和路面状况指数(PCI)4个指标,在实际使用中若增加评价指标,该方法仍然可用。

(3)主成分分析法是一种面向数据的方法,适用于不同地区的沥青路面使用性能的综合评价,为路面养护评价及路面养护对策提供了重要依据。

参考文献:

References:

[1] JTJ 073—96,公路养护技术规范[S].

[2] 李志刚,邓学钧,顾 峰.高速公路沥青路面性能综合评价模型的探讨[J].东南大学学报:自然科学版,2000,30(4):129-131.  
LI Zhi-gang, DENG Xue-jun, GU Feng. Synthetic evaluation models for the performance of the freeway asphalt pavements[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2000, 30(4): 129-131.

[3] 胡霞光,王秉纲.两种基于遗传算法的路面性能综合评价方法[J].长安大学学报:自然科学版,2002,22(2):6-9.  
HU Xia-guang, WANG Bing-gang. Application of two genetic algorithms based method in pavement performance synthetic evaluation[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(2): 6-9.

[4] 姚玉玲,李学红,张毕超.沥青路面预防性养护时机综合评价指标体系[J].交通运输工程学报,2007,7(5):48-53.  
YAO Yu-ling, LI Xue-hong, ZHANG Bi-chao. Integrative evaluation index system for preventive maintenance timing of asphalt pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(5): 48-53.

[5] 张永清,贾双盈.高等级公路沥青路面性能评价方法[J].长安大学学报:自然科学版,2005,25(2):11-15.  
ZHANG Yong-qing, JIA Shuang-ying. Evaluation method for asphalt pavement performance of freeway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(2): 11-15.

[6] 胡群芳,刘 文,李清富.公路沥青路面使用性能灰色综合评估[J].公路交通科技,2006,23(1):12-15,31.  
HU Qun-fang, LIU Wen, LI Qing-fu. Synthetical gray evaluation of asphalt pavement performance [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(1): 12-15, 31.

[7] 张绍阳,马玉兰,王选仓.基于关联分析的路面病害成因确定方法[J].中国公路学报,2008,21(2):98-103.  
ZHANG Shao-yang, MA Yu-lan, WANG Xuan-cang. Genesis judgement method of pavement disease by association analysis[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(2): 98-103.

[8] 任若恩,王惠文.多元统计数据分析:理论、方法、实例[M].北京:国防工业出版社,1998.

[9] 王劲松,王秉纲.河南省高等级公路路面长期性能研究报告[R].郑州:河南省交通基本建设质量检测监督站,2001.