

# 基于改进灰色聚类法的高速公路沥青路面使用性能评价

祝飞<sup>1</sup>, 张萌<sup>2</sup>

(1.陕西高速公路工程试验检测有限公司, 陕西 西安 710086; 2.陕西交通职业技术学院, 陕西 西安 710018)

**摘要:** 分析了传统灰色聚类法的弊端, 引入分段指数白化函数建立了改进灰色聚类法评价模型; 利用陕西省某高速公路路段路面损坏状况指标、行驶质量指数、路面车辙深度指数和抗滑性能指数检测结果, 分别运用传统和改进灰色聚类评价方法对其路面使用性能进行评价, 结果显示改进灰色聚类法评价模型的评价结果与规范评价结果完全一致, 能客观评价沥青路面的使用性能。

**关键词:** 工程管理; 公路; 沥青路面; 使用性能; 灰色聚类; 分段指数白化函数

**中图分类号:** U415.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2017)05-0192-05

灰色聚类评价方法是对已知信息的提取、定性和定量分析、拓展, 其以线性分段白化函数为基础, 根据路面使用性能各指标观测值的分散信息, 依据各自灰类进行归纳, 判断聚类对象所属的灰类, 实现对高速公路路面使用性能的评估。目前灰色聚类评价方法已广泛应用于交通领域, 但其灰聚类权值相差不大, 评价结果精度有限。该文通过引入分段指数白化函数对该评价方法进行改进并应用于高速公路沥青路面使用性能评价, 为运营道路科学管理和提高养护水平提供技术依据。

## 1 沥青路面使用性能评价指标

依据 JTG H20—2007《公路技术状况评定标准》, 公路技术状况评定以每公里路段长度为基本评定单元, 以路面使用性能指数  $PQI$  为评价指标。路面使用性能评价包含路面损坏、平整度、车辙、抗滑

性能和结构强度等指标, 其中路面结构强度为抽样评定指标, 单独计算与评定。公路路面技术状况分为优、良、中、次、差 5 个等级, 评定标准见表 1。

表 1 公路技术状况评定标准

评价等级	$PQI$ 及各级分项指标	评价等级	$PQI$ 及各级分项指标
优	$\geq 90$	次	60~70
良	80~90	差	$< 60$
中	70~80		

路面损坏状况采用路面损坏状况指数  $PCI$  评价, 路面平整度采用路面行驶质量指数  $RQI$  评价, 路面车辙采用路面车辙深度指数  $RDI$  评价, 路面抗滑性能采用路面抗滑性能指数  $SRI$  评价, 路面使用性能指数  $PQI$  由  $PCI$ 、 $RQI$ 、 $RDI$  和  $SRI$  加权计算得出。检测项目及测试方法见表 2。

表 2 沥青路面使用性能检测项目及测试方法

评价指标	检测项目	设备名称	规格型号	测试方法	测试要求
$RQI$	路面平整度	路面质量综合检测系统	COPPRES-13g	JTG E60—2008 T0934—2008	行车道连续检测, 每 100 m 为一计算区间
$RDI$	路面车辙	路面质量综合检测系统	COPPRES-13g	JTG E60—2008 T0965—2008	行车道连续检测, 每 100 m 为一计算区间
$SRI$	路面横向力系数	横向力系数测试仪	MK6	JTG E60—2008 T0973—2008	行车道连续检测, 每 100 m 为一计算区间
$PCI$	路面损坏	路面破损采集分析系统	—	JTG H20—2007	由人工采集病害, 软件服务器进行路面破损分析

各指标计算公式如下:

$$PQI = 0.35PCI + 0.4RQI + 0.15RDI + 0.1SRI$$

$$PCI = 100 - 15DR^{0.412}$$

$$RQI = 100 / (1 + 0.026e^{0.65IRI})$$

$$RDI = \begin{cases} 100 - 2.0RD, RD \leq 20 \text{ mm} \\ 60 - 4.0(RD - 20), 20 \text{ mm} < RD \leq 35 \text{ mm} \\ 0, RD > 35 \text{ mm} \end{cases}$$

$$SRI = (100 - 35) / (1 + 28.6e^{-0.105SFC}) + 35$$

式中:  $DR$  为路面综合破损率,为各种损坏的折合面积与调查面积之比(%);  $IRI$  为国际平整度指数(m/km);  $RD$  为路面车辙深度(mm);  $SFC$  为横向力系数。

## 2 传统灰色聚类法

1982 年,邓聚龙教授提出灰色系统理论。2002 年,资建民等采用灰色理论方法,选择水泥砼路面损坏状况指数( $R_{PCI}$ )、路面平整度( $P_{BI}$ )和路面抗滑性能( $F$ )作为灰色聚类指标并进行无量纲化处理,灰类表示不同等级,同时分别写出 3 个指标灰数属于某一类的分段白化权函数,根据不同评价指标的不同等级标准确定各自相应的白化权函数的起点、终点和阈值,最后根据计算得出的各路面性能评价指标关于每种灰类的聚类系数求得评价对象属于某一灰类的聚类值,提出了灰色聚类评价指标,并结合武汉市城区若干条道路实测数据对各路段路面使用性能进行了综合评价。2003 年,李清富等应用灰色聚类法评价沥青路面使用性能,取得了较好效果,对路面使用性能评价具有很好的借鉴作用。

灰色聚类评价方法受个别因素影响小,能较为全面地评价各要素的影响,同时灰色聚类矩阵能全面反映被评价路段对于各分级标准的隶属情况。评价步骤如下:

(1) 建立评价矩阵。设聚类评价对象为  $i, i = 1, 2, 3, \dots, n$ ; 聚类评价指标为  $j, j = 1, 2, 3, \dots, m$ ;  $d_{ij}$  为第  $i$  个评价对象(路段)对应第  $j$  个评价指标的值;样本矩阵  $D$  以  $d_{ij}$  为元素,记为:

$$D = (d_{ij})_{n \times m} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2m} \\ d_{31} & d_{32} & \cdots & d_{3m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nm} \end{bmatrix}$$

(2) 确定灰类及白化函数。线性白化函数有 3 种基本形式,其中  $f_A(x)$  为下限测度白化权函数,

$f_B(x)$  为适中测度白化权函数,  $f_C(x)$  为上限测度白化权函数(见图 1),其表达式见式(1)~(3)。线性白化函数在灰色聚类评价中具体是指  $f_{jk}$  函数,意思是第  $j$  个聚类评价指标属于  $k$  灰类的白化函数,根据沥青路面使用性能各评价指标的分级标准,将沥青路面使用性能分为 5 个灰类( $k = 1 \sim 5$ ),利用表 1 中各指标分级值确定各灰类白化函数的阈值  $\lambda_{jk}$ ,并建立各指标的白化函数。

$$f_A(x) = \begin{cases} 1, x < A_1 \\ (A_2 - x) / (A_2 - A_1), A_1 \leq x \leq A_2 \\ 0, x > A_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$f_B(x) = \begin{cases} 0, x < A_1 \\ (x - A_1) / (A_2 - A_1), A_1 \leq x \leq A_2 \\ (A_3 - x) / (A_3 - A_2), A_2 < x \leq A_3 \\ 0, x > A_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$f_C(x) = \begin{cases} 0, x < A_2 \\ (x - A_2) / (A_3 - A_2), A_2 \leq x \leq A_3 \\ 1, x > A_3 \end{cases} \quad (3)$$

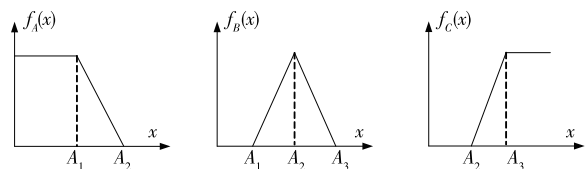


图 1 3 种基本白化权函数示意图

(3) 计算各灰类的权值。 $\eta_{jk}$  为灰色聚类权值,表示第  $j$  种指标属于第  $k$  灰类的权重,当聚类指标的量纲相同时, $\eta_{jk}$  按式(4)计算。该文所选聚类指标  $PCI$ 、 $SRI$ 、 $RQI$  及  $RDI$  的量纲相同,且不同指标的样本值数量接近,故不作无量纲化处理,直接将  $\lambda_{jk}$  代入式(4)计算  $\eta_{jk}$ 。

$$\eta_{jk} = \lambda_{jk} / \sum_{i=1}^m \lambda_{ik} \quad (4)$$

(4) 求灰色聚类系数及灰色聚类矩阵  $\sum$ 。按式(5)计算灰色聚类系数  $\sigma_{ik}$ ,建立灰色聚类决策矩阵[见式(6)]。若满足  $\sigma_{ij} = \max\{\sigma_{ik}\} = \max\{\sigma_{i1}, \sigma_{i2}, \dots, \sigma_{il}\} (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, l)$ ,则称聚类对象  $i$  属于  $k$  灰类,即在聚类行向量  $\sigma_i = (\sigma_{i1}, \sigma_{i2}, \dots, \sigma_{il})$  中找出最大聚类系数  $\sigma_{ik}$ ,它所对应的灰类  $k$  即为该聚类对象  $i$  所属的灰类。

$$\sigma_{ik} = \sum_{j=1}^m f_{jk}(d_{ij}) \cdot \eta_{jk} \quad (5)$$

式中:  $f_{jk}(d_{ij})$  为由样本值  $d_{ij}$  求得的白化函数。

$$\Sigma = (\sigma_{ik})_{n \times k} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1k} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \cdots & \sigma_{2k} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \cdots & \sigma_{nk} \end{bmatrix} \quad (6)$$

依据 JTG H20—2007《公路技术状况评定标准》,路面使用性能划分为优、良、中、次、差 5 个等级(灰类),传统的灰色聚类评价模型的白化函数(见图 2)为:

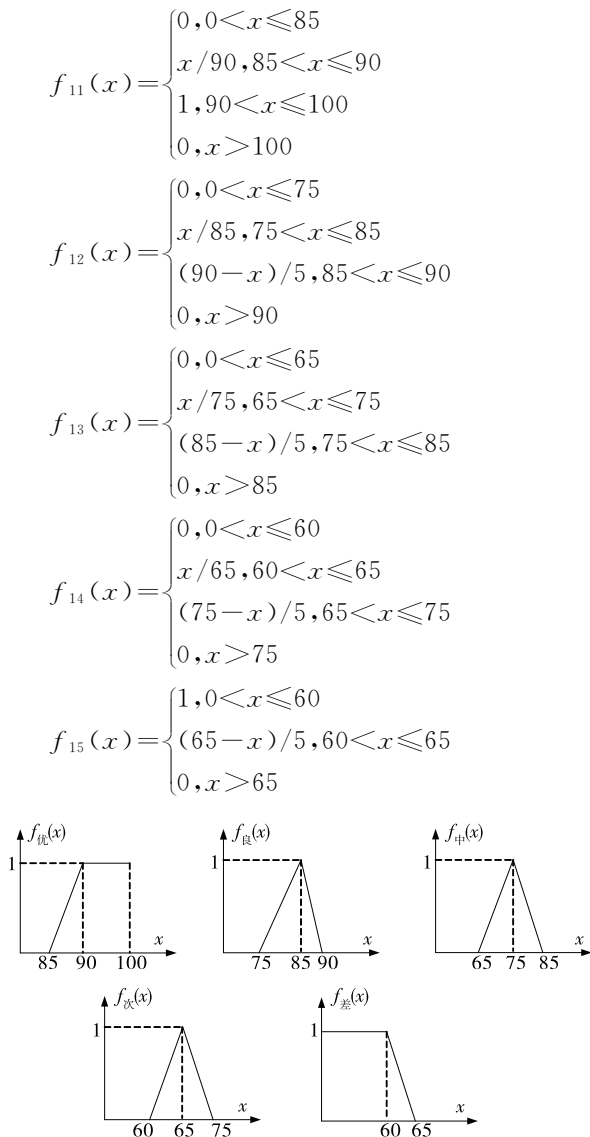


图 2 各指标的传统灰色聚类法白化权函数示意图

研究表明,利用传统灰色聚评价法对沥青路面使用性能进行综合评价,评价结果与 JTG H20—2007《公路工程技术状况评价标准》评定结果的一致

性较好,但个别评定对象与规范评定结果不一致,且不如规范评定严格。传统灰色聚类评价模型中经典白化函数的值变化不明显,聚类效果不好,灰聚类权值的离散程度不高,有必要对其进行改进。

### 3 改进灰色聚类评价法

从理论上讲,对于  $k$  灰类,当  $|x - \lambda_k|$  值递增时,  $f(x)$  值会急剧递减,说明样本值与某一灰类特征值的差别越大,经过白化后样本值变化剧烈。但经典白化函数的值变化不明显,不能获得最佳聚类效果。为此,引入分段指数白化函数进行改进。

依据 JTG H20—2007《公路技术状况评定标准》,路面使用性能划分为优、良、中、次、差 5 个等级(灰类),改进灰色聚类评价模型的白化函数(见图 3)为:

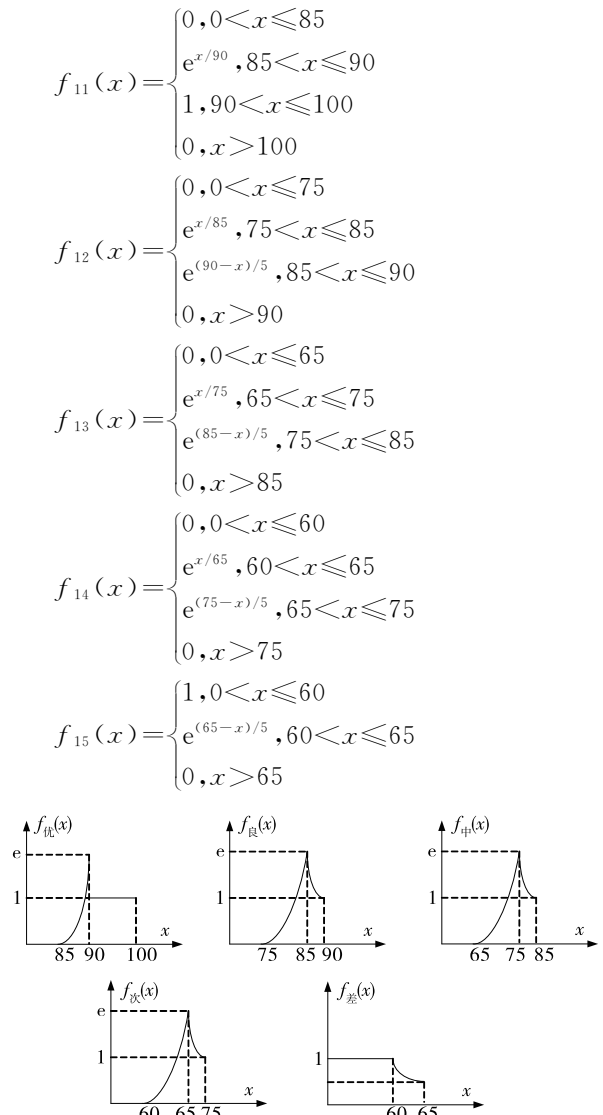


图 3 各指标的改进灰色聚类法白化权函数示意图

改进后的指数型白化函数具有区间单调性和特性极限的优点,其函数图像为分段的指数函数形式,更适合作为白化函数。相对于线性白化函数,指数白化函数计算的灰聚类权值的离散程度更高,更有利于评价对象的分类。

4 改进灰色聚类评价模型的应用

选取陕西省 2003 年通车运营的某高速公路 K1412—K1416 段 2016 年 *IRI*、*SFC*、车辙深度及

路面破损率指标的检测数据(见表 3~7)作为原始数据建立路面使用性能评价模型。

分别取旧路中 5 个路段的 *PCI*、*RQI*、*RDI* 及 *SRI* 形成  $5 \times 4$  的矩阵:

$$D=(d_{ij})_{5 \times 4}=\begin{bmatrix} 84.5 & 84.3 & 86.8 & 88.4 \\ 87.4 & 83.5 & 81.2 & 86.7 \\ 77.4 & 73.6 & 75.8 & 81.9 \\ 84.5 & 90.4 & 89.6 & 85.4 \\ 79.3 & 78.0 & 80.2 & 84.1 \end{bmatrix}$$

表 3 平整度检测数据及 *RQI* 评价结果

桩号	RQI 评价		IRI 检测结果/(m·km <sup>-1</sup> )										平均值
	RQI 值	评价结果	各测点检测值										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
K1412	84.3	良	3.11	2.76	2.95	3.21	2.89	2.46	3.56	3.24	2.82	3.25	3.03
K1413	83.5	良	3.19	2.87	3.06	3.35	2.99	2.67	3.63	3.27	2.88	3.32	3.12
K1414	73.6	中	4.01	3.83	3.04	4.65	4.97	4.02	4.01	3.26	4.08	4.52	4.04
K1415	90.4	优	1.63	1.52	1.52	2.90	2.22	2.93	2.25	2.11	2.40	2.09	2.16
K1416	78.0	中	3.62	3.27	3.45	4.15	3.53	3.97	3.87	3.54	3.22	4.10	3.67

表 4 *SFC* 检测数据及 *SRI* 评价结果

桩号	SRI 评价		SFC 检测结果												
	SRI 值	评价结果	各测点检测值										代表值	平均值	标准差
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
K1412	88.4	良	48	48	48	47	44	48	47	46	49	52	46.5	47.7	2.06
K1413	86.7	良	47	45	45	42	47	48	46	47	46	46	44.9	45.9	1.66
K1414	81.9	良	48	48	49	47	52	47	41	41	38	33	41.0	44.4	5.89
K1415	85.4	良	46	44	43	46	41	43	46	47	50	46	43.7	45.2	2.53
K1416	84.1	良	48	44	48	46	44	47	40	45	39	44	42.7	44.5	3.06

表 5 车辙检测数据及 *RDI* 评价结果

桩号	RDI 评价		车辙检测结果/mm										
	RDI 值	评价结果	各测点检测值										平均值
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
K1412	86.8	良	—	4.98	4.95	6.03	6.24	5.59	6.24	7.22	8.43	9.67	6.6
K1413	81.2	良	8.49	11.37	12.12	8.75	7.92	8.27	7.56	8.92	9.82	11.11	9.4
K1414	75.8	中	12.47	13.91	12.89	10.67	10.51	12.28	11.59	10.27	12.89	13.26	12.1
K1415	89.6	良	7.37	5.11	5.03	4.59	4.29	5.20	5.17	5.27	5.03	4.51	5.2
K1416	80.2	良	9.95	9.44	10.12	10.58	10.12	9.75	10.10	9.68	10.20	9.52	9.9

表 6 破损状况及 *PCI* 评价结果

桩号	车道	综合破损率 <i>DR</i> /%	<i>PCI</i> 评价		桩号	车道	综合破损率 <i>DR</i> /%	<i>PCI</i> 评价	
			<i>PCI</i> 值	评价结果				<i>PCI</i> 值	评价结果
K1412	行车道	1.08	84.5	良	K1415	行车道	1.08	84.5	良
K1413	行车道	0.65	87.4	良	K1416	行车道	2.19	79.3	中
K1414	行车道	2.69	77.4	中					

表 7 路面使用性能指数PQI评价结果

桩号	路面使用性能指数		路况指数		行驶质量指数		车辙深度指数		抗滑性能指数	
	PQI 值	等级	PCI 值	等级	RQI 值	等级	RDI 值	等级	SRI 值	等级
K1412	85.2	良	84.5	良	84.3	良	86.8	良	88.4	良
K1413	84.8	良	87.4	良	83.5	良	81.2	良	86.7	良
K1414	76.1	中	77.4	中	73.6	中	75.8	中	81.9	良
K1415	87.7	良	84.5	良	90.4	优	89.6	良	85.4	良
K1416	79.4	中	79.3	中	78.0	中	80.2	良	84.1	良

计算各灰类的权值,确定  $\lambda_{jk}$ ,得:

$$\Lambda = (\lambda_{jk})_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} 90 & 85 & 75 & 65 & 60 \\ 90 & 85 & 75 & 65 & 60 \\ 90 & 85 & 75 & 65 & 60 \\ 90 & 85 & 75 & 65 & 60 \\ 90 & 85 & 75 & 65 & 60 \end{bmatrix}$$

从以上矩阵中可见各聚类指标的量纲相同,且不同指标的样本值数量相差不大,不需要进行无量纲化处理。直接将  $\lambda_{jk}$  代入式(4)计算灰色聚类权值  $\eta_{jk}$ ,得:

$$H = (\eta_{jk})_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \end{bmatrix}$$

分别计算传统灰色聚类系数和灰色聚类矩阵  $\sum_1$ 、改进灰色聚类系数及灰色聚类矩阵  $\sum_2$ 。先将  $\eta_{jk}$  代入式(5)计算灰色聚类系数  $\sigma_{ik}$ ,再按式(6)建立灰色聚类矩阵,得:

$$\sum_1 = (\sigma_{ik})_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} 0.398\ 3 & 0.589\ 2 & 0.048\ 0 & 0 & 0 \\ 0.386\ 9 & 0.623\ 5 & 0.212\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.553\ 2 & 0.992\ 3 & 0.056\ 0 & 0 \\ 0.588\ 9 & 0.398\ 8 & 0.020\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.756\ 7 & 0.736\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\sum_2 = (\sigma_{ik})_{5 \times 5} =$$

$$\begin{bmatrix} 1.058\ 7 & 1.734\ 4 & 0.451\ 1 & 0 & 0 \\ 1.052\ 3 & 1.777\ 4 & 0.697\ 6 & 0 & 0 \\ 0 & 1.509\ 2 & 3.079\ 1 & 0.264\ 6 & 0 \\ 1.257\ 8 & 1.259\ 0 & 0.221\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.060\ 8 & 2.198\ 2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

采用传统灰色聚类法,各路段路面使用性能指数等级分别为:  $\sigma_1 = \max_{k=1}^5(\sigma_{1k}) = 0.589\ 2, k=2$ (良);

$\sigma_2 = \max_{k=1}^5(\sigma_{2k}) = 0.623\ 5, k=2$ (良);  $\sigma_3 = \max_{k=1}^5(\sigma_{3k}) = 0.992\ 3, k=3$ (中);  $\sigma_4 = \max_{k=1}^5(\sigma_{4k}) = 0.588\ 9, k=1$ (优);  $\sigma_5 = \max_{k=1}^5(\sigma_{5k}) = 0.756\ 7, k=2$ (良)。

采用改进灰色聚类法,各路段路面使用性能指数等级分别为:  $\sigma_1 = \max_{k=1}^5(\sigma_{1k}) = 1.734\ 4, k=2$ (良);  $\sigma_2 = \max_{k=1}^5(\sigma_{2k}) = 1.777\ 4, k=2$ (良);  $\sigma_3 = \max_{k=1}^5(\sigma_{3k}) = 3.079\ 1, k=3$ (中);  $\sigma_4 = \max_{k=1}^5(\sigma_{4k}) = 1.259\ 0, k=2$ (良);  $\sigma_5 = \max_{k=1}^5(\sigma_{5k}) = 2.198\ 2, k=3$ (中)。

将两种方法的评价结果与 JTG H20—2007《公路技术状况评定标准》评价结果对比,结果见表 8。

## 5 结论

(1) 传统灰色聚类评价模型中经典白化函数的

表 8 灰色聚类法与规范法评价结果对比

桩号	规范评价		传统灰色聚类法评价		改进灰色聚类法评价	
	PQI 值	评价结果	评价结果	与规范法对比	评价结果	与规范法对比
K1412	85.2	良	良	一致	良	一致
K1413	84.8	良	良	一致	良	一致
K1414	76.1	中	中	一致	中	一致
K1415	87.7	良	优	不一致	良	一致
K1416	79.4	中	良	不一致	中	一致

(下转第 201 页)

### 3.2 集中监控模式产生的效益

#### 3.2.1 建设效益

遵照中国高速公路机电系统机房建设标准,怀化分公司建设监控信息中心代替传统的监控分中心和站级监控室,去掉沿线 5 个收费站监控室,扩大监控信息中心建筑面积。相比分站监控,集中监控模式的总建筑面积大大缩减,进而节约了建设成本,从建设方面体现了集中监控的应用效果。

#### 3.2.2 管理效益

相比分站监控模式,集中监控模式只需在监控信息中心安排监控人员,减少了站级监控室的监控人员,通过减少人员,节约了管理成本。通过选用新的管理模式,实现监控信息中心与收费站分工明确、职责清晰,帮助公司加强各项工作的监督管理、提高公司服务质量、办事效率,并使基层工作简单化、具体化。采取集中监控模式 2 年多以来,通过不断探索和研究,取得了良好管理效益。

#### 3.2.3 社会效益

集中监控模式的有效推广,使高速公路运营管理监控实现全面信息化,促使所有收费管理和指挥调度更规范、统一。同时强调文明服务的主题,加强了服务质量监督,提高了社会效益。

## 4 结语

伴随通信网络技术的不断发展,现代企业的运

营管理逐步走向信息化、集约化。高速公路运营集中监控模式紧贴国家倡导的“集约型企业”和“绿色办企”要求,符合高速公路运营管理提高管理效益、提升企业服务形象的潜在要求。客观分析集中监控模式的优劣,抓住机遇,发挥优势,克服劣势,回避威胁,力求取得良好的经济效益和社会效益。

### 参考文献:

- [1] 关明,上官明灿.浅谈广西高速公路数字化集中监控系统改造工程[J].公路交通科技:应用技术版,2009(7).
- [2] 易哲熙.高速公路机电系统运营管理与维护模式的探讨[J].湖南交通科技,2011,37(1).
- [3] 彭文.高速公路集中监控模式讨论[J].中国交通信息化,2014(1).
- [4] 赵忠杰,许世燕.高速公路监控系统[M].北京:人民交通出版社,2014.
- [5] 郭夕芳.集中监控管理模式在高速公路征工作中的应用:以通启高速公路为例[J].中国集体经济,2013(30).
- [6] 谢海明.高速公路集中式管理模式探析:以广东省为例[A].中国高速公路管理学术论文(2010 卷)[C].2010.
- [7] 徐良.论洛阳西南环城高速公路收费系统集中管理模式[A].第九届中国高速公路信息化管理及技术研讨会[C].2007.

收稿日期:2017-04-21

\*\*\*\*\*  
(上接第 196 页)

值变化不明显,聚类效果不好。改进灰色聚类评价模型中指数型函数具有区间单调性和特性极限的优点,其函数图像为分段的指数函数形式,更适合作为白化函数。

(2) 相对线性白化函数,指数白化函数计算灰聚类权值的离散程度更高,利于评价对象的分类。

(3) 改进灰色聚类法评价结果与规范评价结果完全一致,更能客观地反映沥青路面使用性能。

(4) K1415 和 K1416 两个对象的传统灰色聚类法评价结果与规范评价结果不一致,原因在于线性白化函数的阈值大小,改进后的指数白化函数避免了这一问题的产生。

### 参考文献:

- [1] 李申惠,吴瑞麟,王家强.灰色聚类评估在高速公路原

有路况评价中的应用[J].华中科技大学学报:城市科学版,2005,22(增刊).

- [2] 资建民.水泥混凝土路面状况综合评价的灰色方法[J].武汉城市建设学院学报,1999,16(2).
- [3] 资建民,江滔.路面状况综合评价的灰色方法[J].华中科技大学学报:自然科学版,2002,30(3).
- [4] 李清富,胡群芳,刘文,等.基于灰色聚类决策的沥青路面使用性能评价[J].郑州大学学报:工学版,2003,24(2).
- [5] 周育名,李金明,马旺宇.灰色聚类法在沥青路面性能评价中的应用研究[J].华东公路,2011(4).
- [6] 徐卫国,张清宇,郭慧,等.灰色聚类模型的改进及应用研究[J].数学的实践与认识,2006,36(6).
- [7] 于艳红,于艳春.基于 AHP 法的沥青路面破损状况灰色聚类综合评价模型[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2012,33(2).

收稿日期:2017-03-10