

基于灰色理论的沥青路面性能衰变与薄层罩面预防性养护研究

植家斌

(佛山路桥养护有限公司, 广东 佛山 528000)

摘要: 沥青路面在使用过程中常受到多种因素的影响, 导致其性能衰变、病害频发, 进而影响了行车安全和舒适性。为了研究沥青路面性能衰变的规律以及薄层罩面预防性养护效果, 依托广州-高明高速公路沥青路面预防性养护项目, 在获取沥青路面质量检测数据的基础上, 借助灰色系统理论建立沥青路面性能衰变模型, 并对实施薄层罩面预防性养护前后的性能指标进行对比分析。结果表明: 薄层罩面预防性养护措施可有效控制沥青路面病害的进一步发展, 提高各项使用性能指标, 对延长路面寿命、提升行车安全具有重要作用。

关键词: 道路工程; 沥青路面; 薄层罩面; 预防性养护; 灰色理论模型; 使用性能

中图分类号: U416

文献标识码: A

Research on the Performance Decay of Asphalt Pavement and the Preventive Maintenance of Thin Mask Layer Based on Gray Theory

ZHI Jiabin

(Foshan Road and Bridge Maintenance Co., Ltd., Foshan 528000, Guangdong, China)

Abstract: Asphalt pavements are subject to performance deterioration and frequent distresses during service due to various influencing factors, compromising driving safety and comfort. To investigate the deterioration patterns of asphalt pavement performance and evaluate the effectiveness of thin overlay preventive maintenance, this study was conducted based on the preventive maintenance project of Guangming Expressway's asphalt pavement. Utilizing grey system theory, a performance deterioration model was established using quality inspection data, with a comparative analysis of performance indices before and after thin overlay maintenance. The results demonstrate that the thin overlay preventive maintenance technique can effectively control further development of pavement distresses, improve various service performance indicators, and plays a crucial role in extending pavement lifespan and enhancing traffic safety.

Key words: road engineering; asphalt pavement; thin overlay; preventive maintenance; gray theory model; performance

随着公路基础设施建设的日益推进, 沥青路面作为主要的道路建设材料, 广泛应用于高速公路、城市道路等交通设施。然而, 沥青路面在运营期间常受到多种因素影响, 导致其病害频发, 如裂缝、变形和表面损坏等。这不仅降低了沥青路面的使用性能, 也影响了行车安全和舒适性。因此, 需要对沥青路面的关键使用性能指标变化进行准确的预测, 并及时采取预防性养护措施, 以延缓使用性能衰退, 提升使用性能^[1]。目前已

有众多专家学者对沥青路面的预防性养护措施开展了研究^[2-4], 但多是从预防性养护方法本身出发, 通过多种养护技术方法比选、改性沥青等方式来提高路面使用性能。张丽美^[5]通过分析沥青路面损坏类型及其机理, 提出了一系列切实可行的养护与防治措施, 在此基础上确定提升各类路面性能指标对应的养护方式。刘锐生^[6]从改性沥青的角度, 研究了就地冷再生工艺在工程项目中的实际应用, 通过优化配合比设计来进一步提升

收稿日期: 2024-11-12

作者简介: 植家斌, 工程师, 本科, 研究方向为沥青路面预防性养护及成效

养护效果。在沥青路面预防性养护技术相对成熟的前提下,养护工程师开始探索最优的养护时机来提升沥青路面的使用性能。朱梅路^[7]通过室内磨耗试验研究长期交通荷载条件下沥青路面的可持续抗滑性能的衰减规律,确定了抗滑性方面预防性养护的最佳时机,并对不同养护方式下试件抗滑性能进行评估。随着智能化信息的发展,预测算法原理^[8-9]被广泛应用。许薛军^[10]通过统计回归的预测方法,建立了路面性能与荷载情况、路面类型之间的回归关系,确定了水泥路面和沥青路面的路况指标衰变规律,结合不同路段现场养护措施确定了实施预防性养护的最佳时机。然而,现有路面性能衰变规律和最佳养护时间确定的研究还存在一定局限性,包括室内试验研究和现场实际情况的差异性、路面性能评价指标选取单一、性能衰变预测算法精度不高等问题。这限制了在实际养护工程中的应用效果。

鉴于此,依托广州-高明(简称“广明”)高速公路沥青路面预防性养护项目,结合沥青路面检测的历史数据和灰色系统理论,提出一种基于灰色理论模型的沥青路面性能指标预测方法,在此基础上对原沥青路面使用性能进行预测评估,确定预防性养护时机;并对比采取薄层罩面预防性养护措施前后的沥青路面性能,分析预防性养护措施对沥青路面使用性能的影响,以期为类似高速公路的养护管理提供有价值的参考。

1 广明高速公路沥青路面工程概况

1.1 沥青路面工况

广明高速公路的建设与运营旨在缓解城市交通压力,提升区域连接性,它连接了广州市与明伦镇,整体线路呈东西方向。本文重点关注陈村至西樵段,该段交通繁忙,重载车辆较多,因此对路面结构的强度要求较高;此外,该区域降雨量较大,因此路面结构必须具备良好的抗滑性和抗水损害能力以及有效的排水设计;该段桥梁比例较高,为了提高路面的耐久性,桥面铺装须满足高温抗车辙能力、抗拉强度、疲劳耐久性、抗水能力等更高的标准。为充分考虑长期投资与长远效益的结合,选择了全寿命成本较低的路面结构方案。该道路自2014年底投入使用以来,交通量快速增长,尤其是大型货车占比较高,频繁出现重载超限情况。这导致沥青路面的使用性能逐年下滑,路面破坏日益严重,全线抗滑性能也已不再符合标准。对广明高速公路通车路段K52

+500~K54+200进行了沥青路面病害调查,结果表明,该路段主要的病害特征为横、纵向裂缝以及部分龟裂和网裂,同时还有少量的坑槽、车辙和泛油等问题。营运部门自2021年开始实施预防性养护,在制定旧路病害修复方案时,考虑到施工工期以及改造阶段后路面承载的交通压力将会翻倍等方面的原因,并根据《道路沥青薄层罩面施工技术规范》(T/GDJSKB 006—2021)、《公路沥青路面预防养护技术规范》(JTG/T 5142-01—2021)、工程设计资料以及现场实际情况,确定实施4 cm厚的SMA-13改性沥青薄层罩面预防性养护方式。

1.2 薄层罩面预防性养护

薄层罩面预防性养护方式凭借延长道路使用寿命、降低维修成本、改善行驶舒适性和安全性,以及施工快速等优势,成为道路维护的重要手段。改性沥青的铺设过程也可以实现快速施工,缩短交通干扰时间;在养护期间,改性沥青具有更优的黏结性和耐高温性能,可以更好地适应交通荷载和气候变化,来提升路面整体的耐久性和抗裂性。参照《公路沥青路面预防养护技术规范》、设计文件资料以及相关文献^[11]研究,SBS I-D改性沥青性能参数控制指标如表1所示。

表1 SBS I-D改性沥青性能参数控制指标

性能参数	控制指标
针入度(25℃, 5 s, 100 g)/mm	4.4~55
闪点/℃	≥230
软化点/℃	≥70
针入度指数PI	≥0.1
延度(5℃, 5 cm/min)/cm	≥25
运动黏度(135℃)/(Pa/s)	≤3
溶解度/%	≥99
弹性恢复(25℃下)/%	≥90

集料主要由粗集料、细集料和填料组成。考虑到该项目所处区域具有高温时段长、降雨较频繁、承载交通量过大等特点,5 mm以上粗集料的含量要适当,4.75 mm以上的粗集料颗粒应占70%~85%(质量分数,下同),细集料应采用石灰岩材质的机制砂,用量控制在10%左右。为了提高沥青混合料的水力稳定性,填料采用石灰岩中的强碱性岩石等憎水性石料磨细得到的矿粉,不得使用回收粉代替矿粉。基于NovaChip的级配指标以及国内类似工况的文献,并根据该项目所处区域的工况以及设计资料,确定SMA-13薄层罩面沥青混合料的合成级配,见表2。

表2 SMA-13 薄层罩面沥青混合料的合成级配

	单位: mm									
筛孔	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
级配上限	100	75	34	26	24	20	16	15	12	
级配下限	90	50	20	15	14	12	10	9	8	

2 基于灰色理论的路面使用性能预测模型

2.1 沥青路面性能衰变模型的建立

为了研究薄层罩面预防性养护的效果, 基于灰色预测模型 GM (1, 1) 建立了沥青路面养护前后性能衰变模型, 对比分析其使用性能的衰变规律。灰色理论预测模型的优势在于能够在样本数量较少的情况下, 提供相对高精度的预测结果, 该模型通过对原始数据进行叠加, 分析叠加后数据之间存在的关联性。叠加后的数列浮动特征减小, 可以更清晰地识别数据间的强规律, 从而建立数据之间的联系。GM (1, 1) 模型对沥青路面使用性能预测模型如下。

2.1.1 GM (1, 1) 模型算法流程

设原始数据 $X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)\}$, 以 $X^{(0)}$ 原始数据集为例建立 GM (1, 1) 模型, 步骤如下。

步骤1: $X^{(0)}$ 做一次累加, $X^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), x^{(1)}(3), \dots, x^{(1)}(n)\}$ 为 $X^{(0)}$ 的一次累加数据集, 其表达式为:

$$x^{(1)} = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

步骤2: $X^{(0)}$ 标准光滑性检验, 当 $\rho(k) < 0.5$ 时, 则满足准光滑条件, 其表达式为:

$$\rho(k) = \frac{x^{(0)}(k)}{x^{(1)}(k-1)}, k = 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

步骤3: 判定 $X^{(1)}$ 准指数规律, 其表达式为:

$$\sigma^{(1)}(k) = \frac{x^{(1)}(k)}{x^{(1)}(k-1)} \quad (3)$$

对 $\forall k, \sigma(k) \in [a, b], \delta = b - a, \delta < 0.5$ 时, 则判定 $X^{(1)}$ 符合准指数规律;

步骤4: $X^{(1)}$ 的紧邻均值计算, 其表达式为:

$$Z^{(1)} = \{z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n)\} \quad (4)$$

$$z^{(1)}(k) = 0.5[x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)], k = 2, 3, L, n \quad (5)$$

称 $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$ 为 GM (1, 1) 的原始形式, 其表达式为:

$$B = \begin{pmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{pmatrix}, Y = \begin{pmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{pmatrix} \quad (6)$$

设 $\hat{a} = (a, b)^T$ 为灰色参数序列, 利用最小二乘法进行计算, 其表达式为:

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (7)$$

步骤5: 构建 GM (1, 1) 预测算法模型

$$(dx^{(1)}/dt) + ax^{(1)} = b \quad (8)$$

称此方程为灰色微分方程 $x^{(1)}(t) + aZ^{(1)}(t) = b$ 。解此一阶微分方程, 其表达式为:

$$x^{(1)}(t) = \left\{x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right\}e^{-at} + \frac{b}{a} \quad (9)$$

所以灰色微分方程对应的时间函数, 其表达式为:

$$\hat{x}^{(1)}(t+1) = \left\{x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right\}e^{-at} + \frac{b}{a}, t = 1, 2, 3, \dots, n \quad (10)$$

则还原值的表达式为:

$$\hat{x}^{(0)}(t+1) = \hat{x}^{(1)}(t+1) - \hat{x}^{(1)}(t), t = 1, 2, 3, \dots, n \quad (11)$$

2.2.2 建立沥青路面性能衰变模型

将 $\hat{x}^{(1)}(t+1)$ 和 $\hat{x}^{(1)}(t)$ 的值分别代入式 (11) 可得还原值的函数方程, 其表达式为:

$$\hat{x}^{(1)}(t+1) = \left(x^{(0)}(0) - \frac{b}{a}\right)(1 - e^{-at}), t = 1, 2, 3, \dots, n \quad (12)$$

根据表达式 (12), 构建沥青路面性能衰变模型的表达式:

$$\hat{P}(t+1) = \alpha e^{\beta t}, t = 1, 2, 3, \dots, n \quad (13)$$

$$\text{其中: } \alpha = \left(P(1) - \frac{b}{a}\right)(1 - e^a), \beta = -a,$$

a, b 可由式 (7) 求得, 该模型的预测值从历史数列的第二组数据进行计算。

2.2 模型的精确度验证

关联度分析是一种用于评估两个或多个变量关系强度和方向的统计方法, 通常用于确定变量之间是否存在相关性, 以及这种相关性有多强。本文采用绝对关联度法对模型精度进行检验。

$$|s| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} x^{(0)}(k) - x^{(0)}(1) + 0.5(x^{(0)}(n) - x^{(0)}(1)) \right| \quad (14)$$

$$|\hat{s}| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} \hat{x}^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(1) + 0.5(\hat{x}^{(0)}(n) - \hat{x}^{(0)}(1)) \right| \quad (15)$$

灰色关联度见表达式 (16), 灰色理论预测值的关联度划分级别如表3所示。

$$\varepsilon = \frac{1 + |s| + |\hat{s}|}{1 + |s| + |\hat{s}| + |\hat{s} - s|} \quad (16)$$

表3 预测值的关联度划分级别

精度等级	好	合格	勉强	不合格
关联度	>0.95	>0.8	>0.7	≤0.7

3 实例应用

旧路与薄层罩面预防性养护后的路面检测与评价是改造工程中十分重要的基础工作。沥青路面的检测关键是在准确性检测的基础上进行科学合理的评价,以保证高速公路大修改造的经济和合理。现根据广明高速 K50+000~K55+000 利

用段(3~4 车道)的路面检测数据,选取路面损坏状况(PCI)、行驶质量(RQI)、车辙深度(RD)、结构强度(PSSI)、横向力系数(SFC)5 项指标对实施预防性养护前后的路面状况进行分析,并基于灰色理论预测模型构建有效的沥青路面使用性能衰减规律。为了根据衰减规律预测未来的指标变化,提前了解路面状况,根据《公路技术状况评定标准》(JTG H20—2007)得到路面各项使用性能的评价指标及控制、触发指标,如表4 所示。

表4 路面各项使用性能的评价指标及控制、触发指标

评定等级	优	良	中	次	差	控制指标	触发指标
PCI	≥90	≥80, <90	≥70, <80	≥60, <70	<60	>83	—
RQI	≥90	≥80, <90	≥70, <80	≥60, <70	<60	>85	—
RD/mm	≤5	≤10, >5	≤15, >10	≤20, >15	>20	—	>15
PSSI	≥90	≥80, <90	≥70, <80	≥60, <70	<60	≥85	—
SFC	≤48.17	<48.17, ≥39.66	<39.66, ≥33.41	<33.41, ≥27.66	<27.66	—	<43

3.1 未实施养护的沥青路面性能衰变趋势

以路面损坏状况为例,选取2015—2020 年该路段路面检测 PCI 平均值如表5 所示。

表5 未采取预防性养护 PCI 检测结果

路龄/年	1	2	3	4	5	6
PCI	98.69	96.32	93.45	89.05	86.44	81.23

步骤1:根据式(1),得 $PCI(1) = (98.69, 195.01, 288.46, 377.51)$ 。

步骤2:光滑性检验,依据式(2)、(3), $\rho(4) = 0.3087 < \rho(3) = 0.4792 < 0.5$, 满足光滑条件,且 $\sigma(k) \in [1.4792, 1.3087]$, $\delta =$

$0.1705 < 0.5$, 则 $PCI(1)$ 具有准指数规律。
步骤3:根据式(6)、(7)、(8) 计算得到 $a = 0.0390, b = 102.3202, PCI(1) = 98.69$ 。

步骤4:根据式(13),构建衰变模型为 $PCI(k+1) = 100.4167e^{-0.0390k}$ 。

为了验证小样本环境下指数模型预测的适用性,加入回归线性预测模型进行对比。根据沥青路面 PCI 性能衰变模型,未实施薄层罩面预防性养护措施的沥青路面 PCI 性能预测和线性回归模型预测结果如表6 所示,将上述数据绘制成曲线图,PCI 实际值与预测值对比如图1 所示。

表6 未采取预防性养护 PCI 预测值

路龄/年		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PCI	指数模型	98.69	96.58	92.88	89.33	85.91	82.33	79.47	76.43	73.50	70.69
	线性模型	99.15	95.97	92.79	89.61	86.43	83.25	80.07	76.89	73.71	70.54

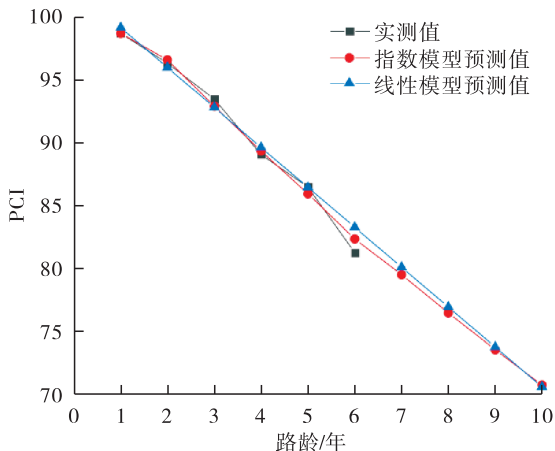


图1 未采取预防性养护 PCI 实测值与预测值对比图

基于灰色理论的指数预测模型和线性回归预测模型的绝对误差分别为2.04 和4.06, 相对误差分别为1.72% 和2.49%, 关联度分别为0.9997 和0.9987, 对比可知指数模型对于小样本数据的预测结果要优于线性回归预测模型, 因此下文选用灰色理论预测模型对路面性能指标的衰减规律进行分析。以此类推, 分别创建未采取预防性养护路段的使用性能(RQI、RD、PSSI、SFC)灰色理论衰变模型, 衰变模型参数及方程如表7 所示, 使用性能指标预测值与实际值对比结果如表8 所示。

通过对表5~表8 分析可知, 根据构建的沥

表 7 未采取预防性养护衰变模型参数及方程

性能指标	模型参数			衰变方程	关联度
	a	b	$X^{(0)}(1)$		
RQI	0.016 5	95.441 2	94.648 7	$RQI(k+1) = 94.648\ 7e - 0.016\ 5k$	0.998 0
RD/mm	-0.392 7	1.161 7	1.448 0	$RD(k+1) = 1.448\ 0e - 0.392\ 7k$	0.980 0
PSSI	0.005 6	99.487 0	99.204 3	$PSSI(k+1) = 99.204\ 3e - 0.005\ 6k$	0.993 0
SFC	0.153 1	83.830 5	79.834 2	$SFC(k+1) = 79.834\ 2e - 0.153\ 1k$	0.979 0

表 8 未采取预防性养护性能指标预测值与实测值结果对比

路龄/年		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RQI	实测值	95.12	93.06	91.65	90.03	88.69	86.96				
	预测值	95.12	93.10	91.57	90.07	88.59	87.14	85.71	84.30	82.92	81.56
RD/mm	实测值	1.50	2.60	3.10	4.10	5.30	6.90				
	预测值	1.50	2.52	3.18	4.03	5.09	6.43	8.14	10.29	13.00	16.44
PSSI	实测值	100	99.8	99.3	98.16	97.62	96.15				
	预测值	100.00	99.91	99.08	98.27	97.46	96.66	95.86	95.07	94.29	93.51
SFC	实测值	65.00	69.00	61.00	52.00	43.00	41.00				
	预测值	65.00	69.21	60.20	52.36	45.54	39.61	34.46	29.97	26.07	22.67

青路面 PCI 性能衰变预测模型，对比实测值与预测值的结果，可以得出基于灰色理论的性能衰变模型具有较优的关联性，关联度都在 0.97 以上，进一步说明性能衰变模型对于预测未来路面性能具有很好的适用性。

根据表 4 路面各项使用性能的控制、触发指标，结合各性能指标的衰变规律，可以更直观地看出发展趋势。从未采取预防性养护路段各指标预测值与实测值结果可以看出 PCI、SFC 和 RD 变化幅度较大，变化幅度分别为 28.37%、65.12% 和 9.96 倍，并且在路龄达 6 年时 PCI 值降低到 82.33，低于控制指标；SFC 在路龄达 6 年时降低到 39.61，低于触发指标；RQI 和 PSSI 相对来说变化比较平缓，变化幅度分别为 8.62% 和 3.85%。从未采取预防性养护路段各性能指标预测值可知，RD 的变化率呈增长型趋势，预计在路龄为 10 年时，车辙深度就会超过触发指标。综上所述，路龄达 6 年时 PCI 降低幅度过大，此时路面出现破损比较严重，同时可以发现 SFC 指标的变化幅度明显降低，结合现场具体观测和检测数据可以判定在预测期间内 SFC 相对于 PCI 先达到限定标准，即提前从第 6 年开始就应对该高速公路该路段沥青路面进行预防性养护，从而更好地提高沥青路面使用性能。

3.2 薄层罩面养护后的沥青路面性能衰变规律

为了更好地研究薄层罩面预防性养护措施对

提高沥青路面使用性能的适用性和有效性，借助灰色理论建立养护后的沥青路面衰变模型，并与未采取养护措施的衰变规律进行比较分析，路面性能检测结果如表 9、表 10 所示。

表 9 采取薄层罩面前路面性能检测结果

指标	PCI	RQI	RD/mm	PSSI	SFC
范围	82.33	86.96	6.43	96.66	41.00

表 10 薄层罩面处理后路面性能检测结果

预养护 路龄/年	PCI	RQI	RD/mm	PSSI	SFC
0.5	100	97.63	0.8	97.76	67
1	98.12	97.16	1.6	96.53	62
2	95.23	96.23	2.3	95.86	58
3	91.56	95.1	3.5	94.62	57
4	86.32	94.19	4.6	93.65	50

对比分析表 9、表 10 可知，薄层罩面的预防性养护措施对沥青路面的各性能指标都有不同程度的影响；影响较大的应为 RQI、PCI、SFC 和 RD，而对 PSSI 指标影响较小，可以初步判断出薄层罩面主要提高沥青路面的平整度、抗滑性能，并对车辙深度和路面损坏有一定的改善，但不能很好地增加路面结构强度。为了评估薄层罩面预防性养护的效果，同样需要构建各项性能指标的衰变模型，采取薄层罩面后各指标的衰变模型参数和方程如表 11 所示，使用性能指标预测值与实际值对比结果如表 12 所示。

表 11 采取薄层罩面后各个指标的衰变模型参数和方程

性能指标	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>P</i> (0)	衰变方程	关联度
PCI	0.048 7	102.630 5	100.269 5	$PCI(k+1) = 100.209\ 5e - 0.048\ 7k$	0.992 3
RQI	0.010 5	97.727 7	97.214 1	$RQI(k+1) = 97.214\ 1e - 0.010\ 5k$	1
RD (mm)	-0.327 1	1.492 8	1.719 6	$RD(k+1) = 1.719\ 6e - 0.327\ 1k$	0.997 5
PSSI	0.011 7	97.503 6	96.941 5	$PSSI(k+1) = 96.941\ 5e - 0.011\ 6k$	0.990 0
SFC	0.065 1	59.096 0	57.348 7	$SFC(k+1) = 57.348\ 7e - 0.065\ 1k$	0.923 0

表 12 采取薄层罩面后各个指标预测值与实测值结果对比

路龄/年		1	2	3	4	5	6	7	8
PCI	实测值	98.12	95.23	91.56	86.32				
	预测值	98.12	95.50	90.95	86.62	82.49	78.57	74.82	71.26
RQI	实测值	97.16	96.23	95.1	94.19				
	预测值	97.16	96.19	95.17	94.15	93.15	92.16	91.17	90.2
RD (mm)	实测值	1.60	2.30	3.50	4.60				
	预测值	1.60	2.39	3.31	4.59	6.36	8.83	12.24	16.98
PSSI	实测值	96.53	95.86	94.62	93.65				
	预测值	96.53	95.82	94.70	93.61	92.52	91.45	90.38	89.34
SFC	实测值	62	58	57	50				
	预测值	62	58.95	54.89	51.11	47.59	44.31	41.25	38.41

对表 12 采取薄层罩面后各个指标预测值与实测值结果进行对比分析,可以更加具体地了解路面性能在进行预防性养护后的各项指标现在所处情况以及未来发展趋势,发现对原有路面采取薄层罩面养护措施能有效提高路面使用年限。PCI 性能衰变在薄层罩面养护后的第 5 年降到了 82.49,低于控制指标值,所以初步判定对于提高 PCI 性能的二次养护措施应在第 5 年之前;RQI 性能指标变化相比其他指标变化较缓,在预测的 8 年内始终处于较优状态;RD 性能指标在薄层罩面养护后的第 8 年达到 16.98,超过了触发指标值;SFC 性能指标在薄层罩面养护后的第 7 年下降到了 41.25,低于触发指标值。综合各指标的性能衰变情况,可以判定薄层罩面对于该路段的预防性养护措施的有效年限为 5 年,预计 2026 年需要实施第二次养护措施。

4 结论

本文根据广明高速公路沥青路面预防性养护处治项目,结合多年的沥青路面检测数据,提出了一种基于灰色理论的沥青路面性能衰变预测模型,在证明预测模型有效性的基础上,对沥青路面采用薄层罩面预防性养护前后的性能指标进行对比分析。主要结论如下:

基于灰色理论的沥青路面性能衰变预测模型具有良好的关联性(关联度均在 0.97 以上),能

有效反映路面性能变化,特别是 SFC 在路龄达 6 年时低于触发指标,提示须及时实施预防性养护。建议在路龄达 5 年时对该高速公路沥青路面进行预防性养护,以延缓性能衰退,提升路面使用性能,保障行车安全。

对比薄层罩面处理后的各项性能指标预测值与实际值发现,PCI 在处理后的 5 年低于控制指标,而 RD 和 SFC 也分别在处理后 8 年和 7 年接近触发指标。因此,可推断薄层罩面的预防性养护措施有效期为 5 年。鉴于 5 年有效期后性能将趋近控制阈值,需建立定期评估机制,并依据评估结果实施针对性养护措施,保障路面性能持续达标。

本文只对薄层罩面预防性养护措施对沥青路面的性能衰变进行研究,后续可集中于建立长期性能监测系统,探索材料优化与综合养护策略的结合,进行经济性分析,并应用智能化技术探究其他预防性养护措施的有效性和科学性。

参考文献:

[1]刘东海,陈建民,刘浩志.基于 ARIMA 模型的沥青路面使用性能预测[J].湖南交通科技,2024,50(2):18-24.
[2]李洪林.公路养护中沥青路面预防性养护工艺探究[J].交通科技与管理,2024,5(16):67-69.
[3]李曙斌.基于重构优化 DEA 模型的路面养护决策研究[J].路基工程,2017(6):54-58.

99.995%，证明改进方案在实践中取得显著成效。

4.3 行业对比

在国内外同类研究中，不同城市地铁系统针对电容热失效问题采取了差异化改进策略：深圳地铁采用石墨烯涂层电容，通过热导率提升至 $1\,500\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 实现表面温度降低 15%，但存在成本增加 40% 且供应链依赖进口的局限性；北京地铁通过加装散热风扇强制风冷使故障率降低 40%，但额外能耗导致系统能效下降 8%；伦敦地铁采用冗余电容并联设计提升容错能力，却因 PCB 布局复杂化而使维护成本增加 25%；德国柏林地铁采用基于 AI 的预测性维护系统，故障率降低约 70%；贵阳地铁提出的改进方案通过选型高温电容（Vishay S 系列）与优化散热结构（星形铜箔 + 导热胶填充），在零额外能耗下实现故障率降低 95%，综合成本仅增加 5%，兼具高效性与经济性优势，为电容热失效问题提供了更具普适性的解决方案。

5 结论

通过多维度分析证实，贵阳地铁 2 号线 EP2002 阀故障主要源于电容 C27 散热设计缺陷及供应链变更引发的兼容性问题。通过电容选型优化、电源板改进（星形接地铜箔 + 导热胶填充）及智能监控系统升级（漏电流预警 + 寿命预测模型），系统可靠性显著提升。

参考文献：

- [1] 张王, 蒙恩, 任得鹏. 低温环境下制动系统电磁阀故障分析及优化[J]. 电力机车与城轨车辆, 2025, 48(2): 138-142.
- [2] 齐金平, 郭济鸣, 田世润. 基于多态故障树的多值决策图制动系统可靠性分析[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(2): 385-391.
- [3] 赵春媛, 陈立峰, 王昕. 新八轴机车制动系统可靠性的研究[J]. 机械管理开发, 2019, 196(8): 58-61.
- [4] 赵振乾. 基于 ST-CNN 的城轨车辆制动系统通信故障预测方法[J]. 微型电脑应用, 2024, 40(4): 55-58.
- [5] 章文川, 郎诚廉. 基于 EP2002 制动系统的地铁列车制动仿真控制系统[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(1): 254-259.
- [6] 田兴丽, 孙环阳, 张红光, 等. 城市轨道交通车辆制动系统的智能诊断与预警系统[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(11): 94-98, 103.
- [7] 赵振乾, 王鹏程. 基于 LSTM 循环神经网络的城轨车辆制动系统故障预测[J]. 信息与电脑(理论版), 2023, 35(16): 67-69.
- [8] 于洪桥, 王斌. 地铁列车制动系统故障原因及改进措施[J]. 科技资讯, 2023, 21(12): 59-62.
- [9] 张斌峰, 徐永能, 陶赟. 基于确信可靠度的城市轨道交通列车制动系统可靠性分配方法[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(9): 115-1202.
- [10] 张杨, 万坤, 安泊晨, 等. 城轨车辆车控制动系统和架控制动系统防滑控制对比分析[J]. 铁道技术监督, 2022, 50(1): 74-77.

（上接第 6 页）

- [4] 李恒楠. 基于层次分析理论的沥青路面预防性养护决策研究[J]. 北方交通, 2018(5): 89-91.
- [5] 张丽美. 沥青路面预防性养护技术在公路养护中的应用[J]. 价值工程, 2022, 41(26): 8-10.
- [6] 刘锐生. 就地冷再生技术在公路沥青路面养护大中修工程中的应用[J]. 中国公路, 2021(3): 104-105, 107.
- [7] 朱梅路. 沥青路面预防性养护技术的可持续抗滑性能评估[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2024, 23(3): 10-14.
- [8] 李海莲, 高雅丽, 江晶晶, 等. 基于 NAR - ARIMA 组合模型的高速公路沥青路面破损状况预测[J]. 大连理工大学学报, 2024, 64(3): 307-313.
- [9] 杨龙军. 高速公路沥青路面使用性能评价及预测研究[J]. 工程建设与设计, 2024(11): 70-72.
- [10] 许薛军, 王俊喆, 潘宗俊, 等. 广东省普通国省道典型路面结构衰变规律及养护技术[J]. 公路交通科技, 2017, 34(8): 16-22.
- [11] 党治仓. 沥青路面预防性养护薄层罩面施工分析[J]. 运输经理世界, 2024(10): 151-153.