

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.06.026

# 复合浇注式沥青钢桥面铺装长期性能观测 与路用性能演变规律研究

朱文白<sup>1</sup>, 曹健<sup>2,3\*</sup>, 李金桥<sup>1</sup>

(1.南京长江第四大桥有限责任公司,江苏南京 210008; 2.苏交科集团股份有限公司; 3.新型道路材料国家工程实验室)

**摘要:**通过激光断面仪、摩擦系数检测车等现代化检测设备对南京四桥钢桥面铺装长期性能进行了检测与分析。结果表明:铺装层整体使用状况良好,未出现明显病害。同时,基于历年检测数据开展了复合浇注式沥青钢桥面铺装方案路用性能演变规律研究,并基于此初步提出了设计寿命周期内的养护规划,为确保南京四桥钢桥面铺装长期处于良好服役状态奠定了基础。

**关键词:**钢桥面铺装;复合浇注式;性能观测;演变规律;养护规划

南京长江第四大桥(以下简称“南京四桥”)创新性地采用了“40 mm GA(压入碎石)浇注式沥青混凝土铺装下层+35 mm AC-13高弹性沥青混凝土铺装上层”的复合浇注式铺装方案。该铺装方案具有密水性好、低温柔韧性好、维修养护方便、造价经济等优势。然而,作为中国首次应用的铺装方案,其长期性能广受关注,并且钢桥面的长期性能一直是钢桥面铺装领域关注的重点。因此,对其开展长期性能跟踪观测及路

用性能演变规律研究,对于该铺装方案的养护规划制定、铺装方案优化与改进以及进一步推广应用具有重要意义。

## 1 铺装层服役环境

### 1.1 交通环境

2019年南京四桥各月标准当量轴次如表1所示。

表1 2019年南京四桥各月标准当量轴次

月份/ 月	当量轴次/次							合计
	车型1	车型2	车型3	车型4	车型5	车型6	车型7	
1	67 981	10 824	37 979	74 550	106 262	61 337	292 603	651 537
2	38 380	6 160	38 339	52 512	85 214	50 750	253 743	525 096
3	27 686	6 899	27 316	83 455	150 860	83 776	325 495	705 488
4	27 575	4 800	29 842	91 462	168 880	83 249	286 446	692 254
5	20 529	4 817	27 867	100 415	192 522	85 215	317 838	749 203
6	16 658	4 751	26 150	101 931	204 584	86 709	315 365	756 148
7	18 029	5 153	27 701	113 127	212 170	92 193	308 403	776 776
8	21 942	5 361	28 489	101 690	204 192	97 921	331 100	790 696
9	29 883	6 928	28 939	103 984	190 702	111 306	359 579	831 321
10	40 739	5 770	36 020	98 101	177 108	104 194	313 310	775 241
11	52 390	6 779	39 178	99 498	169 583	109 423	337 902	814 752
12	75 327	8 491	43 595	99 586	155 901	115 263	370 999	869 162

收稿日期:2021-02-04(修改稿)

基金项目:江苏省交通运输科技项目(编号:2019Y40)

作者简介:朱文白,男,硕士,高级工程师。E-mail:81129178@qq.com

\* 通信作者:曹健,男,硕士,工程师。E-mail:cj363@jsti.com

## 1.2 气候环境

南京四桥钢桥面铺装建设期间,在主桥 G04 截面布置温度场监测单元及桥面铺装温度场监测单元,随

时监测铺装层使用温度,2015—2019 年南京四桥钢桥面铺装层与钢箱梁内部温度数据见表 2。

表 2 铺装层与钢箱梁内部温度

年份/ 年	铺装层			钢箱梁顶板		
	最高温度/℃	出现日期/(月.日)	出现时间	最高温度/℃	出现日期/(月.日)	出现时间
2015	59.1	07.30	12:00	56.5	08.04	15:00
2016	58.4	08.01	14:30	57.4	07.28	15:00
2017	59.4	07.24	15:00	59.2	07.25	15:00
2018	55.9	07.19	15:00	55.4	08.01	15:00
2019	55.8	07.31	14:10	54.9	07.31	14:50

由表 2 可知:铺装层内部最高使用温度均超过 55℃,部分时间段最高使用温度接近 60℃,钢箱梁内最高温度超过 55℃,铺装在高温及重载使用环境下,发生车辙病害的几率大幅提高。

## 2 长期性能观测

### 2.1 铺装层行驶质量指数 RQI

随着服役时间的延长,铺装层平整度将缓慢下降,行驶质量指数降低,当铺装层局部出现明显不平整时,车辆通过时会出现颠簸、跳车等情况,行驶质量指数的高低将直接影响驾乘人员的行驶舒适性、安全性及道路通行能力。自南京四桥建成通车至今,每年采用激光断面仪对主桥双向六车道进行国际平整度指数检测,行驶速度为 70 km/h,每 20 m 检测一组数据,按车道取平均值,检测结果见图 1,为节省图表空间,图标中将“左幅第一车道”简称为“左一”,以此类推,下同。

检测年份内,双向对应车道平整度相当,无明显差异。

### 2.2 铺装层抗滑性能

铺装层的抗滑性能直接影响高速行驶的安全性,南京四桥钢桥面铺装上层高弹改性沥青混合料表面结构细致、密实,具有良好的密水性。但密实的铺装表层降低了路表的宏观构造,对路表抗滑性能会有一些影响。为保证检测数据的精度及降低对交通的干扰,采用摩擦系数测试车对南京四桥双向六车道进行了路面摩擦系数 SFC 检测,行驶速度为 50 km/h,每 20 m 检测一组数据,按车道取平均值,检测结果见表 3。

表 3 抗滑性能检测结果

时间/ (年.月)	SFC 检测结果					
	左三	左二	左一	右一	右二	右三
2013.09	64	69	71	71	67	65
2013.12	63	67	70	69	66	63
2014.05	61	65	68	68	64	62
2014.10	59	61	63	67	63	59
2019.10	—	67	—	—	65	—

由表 3 可以看出:随着服役年限的增加,南京四桥复合浇注式沥青钢桥面铺装表层的抗滑性能略有降低,但整体而言,其抗滑性能仍然保持在较高水平,经过 7 年的运营后,其摩擦系数 SFC 仍然满足设计文件中不小于 54 的技术要求。

### 2.3 铺装层损坏状况

采用多功能检测车对南京四桥钢桥面铺装可能出现的龟裂、块状裂缝、纵向裂缝、横向裂缝、坑槽、松散、波浪拥包、泛油及修补等进行检测,检测结果见图 2。

截至 2019 年,南京四桥钢桥面铺装层基本无破损,仅个别部位存在“硬伤”破坏,双向各车道 PCI(路面状况指数)值维持在 95 以上。此外,从历年检测结

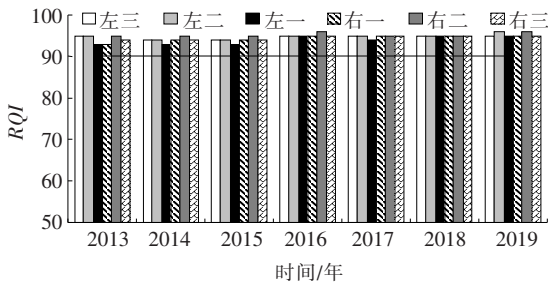


图 1 RQI 检测结果

由图 1 可以看出:自 2012 年建成通车至 2019 年,经历 7 年的运营后,南京四桥钢桥面铺装平整度依然良好,国际平整度指数满足不大于 2.5 m/km 的设计要求,行驶质量指数均大于 90,等级为优。此外,7 年运营期内,整体平整度走向平稳,无明显下降趋势,并且在各

果看,左幅车道损坏状况略优于右幅车道。

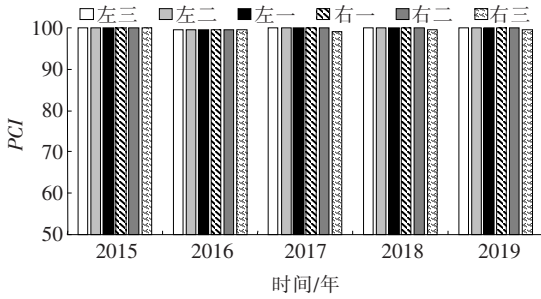


图2 2015—2019年铺装层损坏状况指数

## 2.4 铺装层车辙深度

车辙是沥青混凝土路面永久变形的累计,气候条件、交通条件、材料特性、配合比设计等均对车辙的形成有所影响。作为中国首次应用的“下层GA+上层高弹性改性沥青”的铺装结构,其高温稳定性能一直是钢桥面铺装领域科研人员与桥梁运营管理部门关注的重点,尤其是高温重载的使用环境下,将加速车辙病害的发展。因此对于车辙病害的检测要求更高,采用激光断面仪对南京四桥双向六车道进行了车辙深度检测,行驶速度为70 km/h,每10 m检测一组数据,按车道取平均值,检测结果见图3。

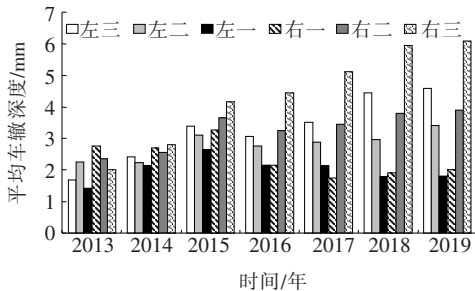


图3 各车道车辙深度检测结果

从图3可以看出:至2019年8月,经历近7年的通行后,双向各车道车辙深度均未超过6 mm,表现出了良好的抗车辙能力。然而,随着通车时间的延长,各车道车辙深度均有不同程度的增长,尤其以双向第三车道增长最为明显,自2015年开始几乎呈线性增长。与铺装层平整度、损坏状况及抗滑性能的平稳变化相比,车辙病害成为南京四桥复合浇筑沥青钢桥面铺装最为突出的问题。在后续服役过程中,需在夏季高温阶段重点关注车辙发展情况,及时制定有效的养护措施,防止车辙病害加剧发展,延长铺装层使用寿命。

## 3 路用性能演变规律

上述检测结果表明,车辙病害是复合浇筑式沥青

钢桥面铺装现阶段的首要问题,且其增长较快,随着服役年限的增加,该问题将日益突出。因此,有必要针对复合浇筑式沥青钢桥面铺装车辙病害开展相关研究,明确其性能演变规律,为制定科学合理的养护规划奠定基础。

### 3.1 已有车辙模型验证

南京长江第四大桥新建时期基于沥青混合料动态模量和车辙试验,建立了区域温度分布、汽车行车速度、车道荷载特点与桥面车辙的关系,得出车辙预估模型如下:

$$D = C \times C_t \times C_v \times C_w \times \sum_{i=1}^n \left( 365 \times \frac{N_i}{DS} \right) \quad (1)$$

式中: $D$ 为车辙深度; $C$ 为基于室内车辙试验条件和现场车辙深度的差异修正系数; $C_t$ 为温度修正系数; $C_v$ 为行驶速度修正系数; $C_w$ 为车道及轮载修正系数; $N_i$ 为第 $i$ 年的日均当量轮次(次/d); $DS$ 为动稳定度(次/mm)。

根据上述车辙预估模型计算南京四桥桥面铺装方案车辙深度,结果见表4。设计寿命10年内车辙深度能够满足要求,安全系数为1.05。

2013—2018年预测车辙深度与实测车辙深度比较见图4。

由图4可以看出:除初始的第一年二者较为接近外,后续的实测车辙深度均小于预测结果。此外,对比不同车道车辙数据可以看出,右幅第三车道实测结果与预测结果最为接近。总体而言,已有模型预测结果与现有检测结果间存在一定的差异,尤其是第一、第二车道。因此,需要基于现有检测数据对原模型进行修正与优化。

### 3.2 车辙模型修正方法

由原始车辙模型可知,影响每年车辙深度的唯一变量是当年的交通量。历年预测交通量与实际交通量数据见表5。

从表5可以看出:除2013年实际交通量与预测交通量间存在较大出入外,其余年份的实际交通量均与预测交通量较为接近。表明前期所建立的交通量预测模型具有较高的精度,后续车辙发展情况可基于此交通量进行相对精确的预测。

将2014—2017年预测交通量与实际交通量绘制成图并做线性回归,结果如图5所示。

从图5可知:预测交通量和实际交通量均有着良好的线性关系,预测交通量比实际量略大,但实际交通量的增长趋势要大于预测交通量。

表4 不同限载条件下的车辙深度估算

年份/ 年	不限载/mm		超载 50%以上禁行/mm		超载 30%以上禁行/mm		超载全部禁行/mm	
	当年	累计	当年	累计	当年	累计	当年	累计
2013	1.1	1.1	0.9	0.9	0.8	0.8	0.5	0.5
2014	1.2	2.3	1.0	2.0	0.9	1.7	0.6	1.1
2015	1.3	3.6	1.1	3.0	0.9	2.6	0.6	1.6
2016	1.3	4.9	1.1	4.2	1.0	3.6	0.6	2.3
2017	1.4	6.3	1.2	5.4	1.0	4.6	0.6	2.9
2018	1.5	7.7	1.3	6.6	1.1	5.7	0.7	3.6
2019	1.6	9.3	1.4	8.0	1.2	6.9	0.7	4.3
2020	1.6	10.9	1.4	9.4	1.2	8.0	0.7	5.1
2021	1.7	12.6	1.4	10.8	1.2	9.3	0.8	5.8
2022	1.7	14.3	1.5	12.3	1.3	10.6	0.8	6.6

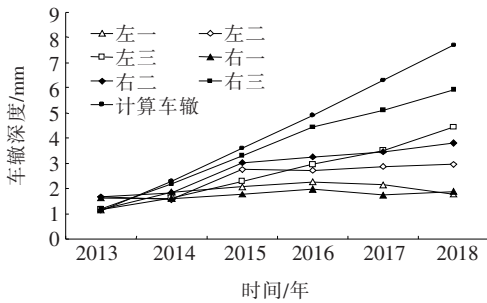


图4 预测车辙深度与实际平均车辙深度

表5 2013—2017年预测交通量与实际交通量

时间/年	交通量/(pcu · d <sup>-1</sup> )	
	预测	实际
2013	20 502.00	9 685.74
2014	22 412.00	18 263.16
2015	23 567.00	21 300.50
2016	24 631.00	25 854.00
2017	23 134.59	23 123.88

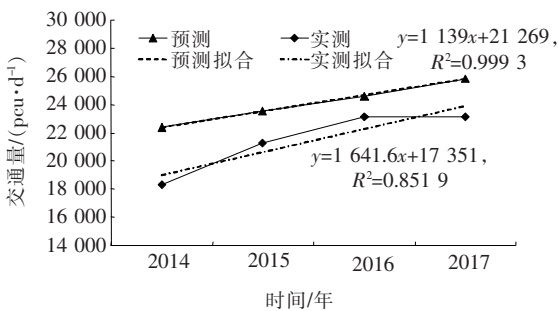


图5 2014—2017年预测交通量与实际交通量

由于原始车辙预测模型只受交通量单一因素影响,且目前的可得数据仅有预测和实际交通量,结合上述分析中二者良好的线性关系,可采用一次线性修正

方法对原预测模型进行修正。基于前述检测结果,双向第三车道车辙深度最大、增长速度最快,故选择车辙深度最大的第三车道进行修正。

(1) 平均车辙深度修正

由右幅第三车道实际车辙深度与预测累计车辙深度的趋势线(图6)可以发现,两者的决定系数 $R^2$ 分别为0.999 2和0.992 8,说明无论是预测还是实际累计车辙深度都和时间有着很好的线性关系。因此,利用线性回归对原预测车辙模型进行修正具有可行性。

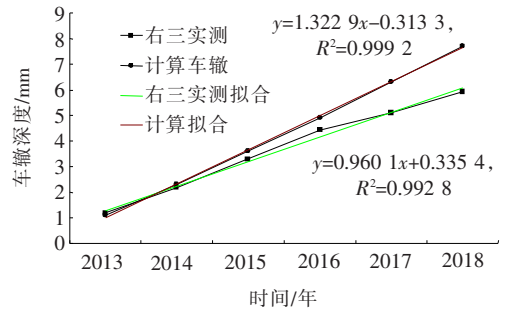


图6 右幅第三车道实际车辙深度与预测车辙深度

拟在原预测模型基础上,增加二次线性修正系数 $R_1$ 、 $R_2$ ,修正后的模型见式(2):

$$D = R_2 + R_1 CC_i C_v C_w \sum_{i=1}^n \left( 365 \times \frac{N_i}{DS} \right) \quad (2)$$

经线性回归后,可以得出 $R_1 = 0.723 8$ , $R_2 = 0.571 5$ ,统计结果见表6。

从上述回归统计结果可以看出,一次线性拟合的结果较为理想。修正后的右幅第三车道预测模型为:

$$D = 0.723 8 CC_i C_v C_w \sum_{i=1}^n \left( 365 \times \frac{N_i}{DS} \right) + 0.571 5 \quad (3)$$

表 6 右幅第三车道均值回归统计结果

线性回归系数 $R$		$R^2$	修正的 $R^2$	标准误差
0.994 0		0.988 1	0.985 1	0.220 3
项目	系数	标准误差	$t$ 值	$P$ 值
截距	0.571 472 471	0.193 912 776	2.947 059 405	0.042 092 293
X	0.723 755 061	0.039 797 045	18.186 150 92	$5.376 31 \times 10^{-5}$

### (2) 单点车辙深度修正

以右幅第三车道各测点的设计车辙深度结合实际交通量代入原预测模型进行计算,结果见图 7。

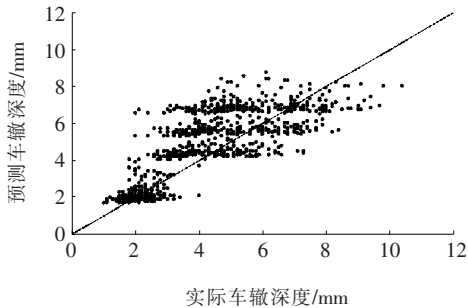


图 7 右幅第三车道实际交通量预测车辙与实际车辙散点图

将实际车辙深度与按实际交通量预测的车辙深度进行回归分析,得出  $R_1=0.76, R_2=1.564$ ,统计结果如表 7 所示。

以各测点实际车辙深度和实际交通量修正的右幅第三车道预测模型为:

$$D = 0.76CC_i C_v C_w \sum_{i=1}^n \left( 365 \times \frac{N_i}{DS} \right) + 1.564 \quad (4)$$

对比采用平均车辙深度与单点车辙深度进行修正后的回归统计结果可以看出,采用年平均车辙深度对原车辙预估模型进行线性修正结果更好。因此,本文将采用回归结果相关性更好的年平均车辙深度对原模型进行修正。

表 7 右幅第三车道散点回归统计结果

线性回归系数 $R$		$R^2$	修正的 $R^2$	标准误差
0.756 3		0.572 0	0.571 5	1.239 7
项目	系数	标准误差	$t$ 值	$P$ 值
截距	1.564 035 695	0.106 543 04	14.679 848 57	$8.585 59E-44$
X	0.760 074 027	0.022 188 93	34.254 653 44	$5.711 3E-164$

基于上述修正方法,可得以年平均车辙深度和实际交通量修正后的左幅第三车道预测模型为:

$$D = 0.490 5CC_i C_v C_w \sum_{i=1}^n \left( 365 \times \frac{N_i}{DS} \right) + 0.544 6 \quad (5)$$

### 3.3 车辙模型修正结果

基于上述修正方法,对左幅车辙深度进行模型修正,双向第三车道的车辙深度模型修正系数见表 8。

表 8 双向第三车道车辙深度模型修正系数

车道	$R_1$	$R_2$	$R^2$
左三	0.490 5	0.544 6	0.99
右三	0.723 8	0.571 5	0.99

各车道修正后车辙预测结果与实测结果见表 9。

由表 9 可知:相比于原预测模型,优化后的预测模型结果与两车道实际车辙发展情况更为吻合,且可以独立预测两车道的车辙发展规律,可为运营管理部门

表 9 第三车道车辙预测结果与实测结果

年份/ 年	实测车辙/mm		原预 测值/ mm	修正后预测 结果/mm	
	左幅	右幅		左幅	右幅
2013	1.51	2.48	1.1	1.08	1.38
2014	3.03	3.89	2.3	1.67	2.27
2015	3.40	4.15	3.6	2.31	3.18
2016	2.96	4.44	4.9	2.95	4.12
2017	3.51	5.12	6.3	3.64	5.13
2018	4.43	5.93	7.7	4.32	6.14

有针对性地制定养护规划提供更加可靠的数据支撑。

## 4 养护规划建议

基于式(3)及式(5)可得南京四桥双向第三车道在后续各运营年份内的车辙深度预测结果(表 10)。

根据上述预测结果可知,在 10 年运营期内(至



表 10 双向第三车道车辙深度预测结果

运营年份/年	左幅			右幅		
	RD/mm	RDI	评价等级	RD/mm	RDI	评价等级
2020	5.75	94	优	8.01	92	优
2021	6.53	93	优	8.95	91	优
2022	7.31	93	优	9.89	90	优
2023	8.09	92	优	10.83	88	良
2024	8.94	91	优	11.80	85	良
2025	9.78	90	优	12.78	82	良
2026	10.63	88	良	13.75	79	中
2027	11.47	86	良	14.72	76	中

2022年),南京四桥全桥铺装层各车道平均车辙深度指数RDI全部为“优”;在15年设计寿命周期内(至

表 11 南京四桥钢桥面铺装养护规划建议

运营年份/年	运营时间/年	养护规划	规模等级	养护方案
2020	8	预防性养护	小	根据车辙发展情况以及10mm以上车辙深度占比情况具体分析,可采用罩面类方案
2021	9		小	
2022	10		中	
2023	11	预防性养护+小修保养	小	重点针对10~16.7mm车辙深度占比情况,可采用超固封层类方案进行养护
2024	12		中	
2025	13	预防性养护+中修	中	可能会出现车辙深度16.7mm以上的连续段落,建议挖除后以原铺装方案进行修补
2026	14		中	
2027	15		中	

(2)在所检测项目中,车辙是南京四桥复合浇注式沥青钢桥面铺装面临的首要问题,尤其是双向第三车道,车辙深度增长速度较快,建议在后续运营过程中加大车辙深度检测频率,及时关注车辙深度变化。

(3)基于原有车辙深度预测模型,结合历年实测车辙深度与实际交通量优化后,得到针对双向第三车道的独立预测模型,模型预测精度较原模型有了较大提升,为南京四桥钢桥面铺装路用性能发展规律研究及养护规划制定奠定了基础。

(4)基于优化后的车辙预测模型,预测了南京四桥在15年设计寿命周期内的车辙深度发展规律,并提出了相应的养护规划。

#### 参考文献:

[1] 崔娟. 钢桥面沥青铺装车辙预估研究[D]. 东南大学硕士学位论文,2007.  
 [2] 李国芬,王宏畅,王勇,等. 基于修正 Burgers 模型的钢桥面铺装车辙有限元分析[J]. 林业工程学报,2016(5).

2027年),除右幅第三车道外,其余车道RDI均处于“良”及以上水平,右幅第三车道RDI等级接近“良”。考虑到该预测结果为整车到平均车辙深度,在10年运营期内局部段落车辙深度可能大于10mm,在15年设计寿命内,局部段落车辙深度可能超过16.7mm,RDI可能处于“次”及以下等级。

基于上述预测结果及分析,建议在15年设计寿命周期内的养护规划见表11。

## 5 结论

(1)检测结果表明,截至2019年,南京四桥复合浇注式沥青钢桥面铺装行驶质量指数、损坏状况指数、抗滑性能指数及车辙深度指数均处于“优”级,整体使用状况良好,尚未出现明显病害。

[3] 谢发祥,高翔,章登精,等. 考虑钢桥面板铺装层黏弹性特性的车辙计算[J]. 林业工程学报,2019(2).  
 [4] 黄海涛. 钢桥面铺装层使用性能评价及养护决策研究[D]. 东南大学硕士学位论文,2008.  
 [5] 王勇. 大跨度复合浇注式沥青混凝土钢桥面铺装车辙预估研究[D]. 南京林业大学硕士学位论文,2014  
 [6] 南京重大路桥建设指挥部,江苏省交通科学研究院. 南京长江第四大桥复合浇筑式钢桥面铺装试验报告[R],2010.  
 [7] 吴钊,朱雷,熊文涛. 大跨径悬索桥复合浇注式沥青钢桥面铺装性能跟踪观测[J]. 公路,2017(1).  
 [8] 章登精. 大跨度钢箱梁复合浇注式沥青钢桥面铺装设计[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2015(5).  
 [9] 潘友强. 复合浇注式钢桥面沥青铺装的路用性能[J]. 筑路机械与施工机械化,2019(4).  
 [10] 赵阳,周启伟,胡德勇. 安徽省钢桥面铺装技术状况评价研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2018(3).  
 [11] JTG 5210—2018 公路技术状况评定标准[S].  
 [12] 吴海涛. 钢桥面沥青混凝土铺装层性能评价与预测研究[D]. 东南大学硕士学位论文,2014.