高速公路沥青路面技术状况评价指标分析

曹明明[1]，陈金蓉[2]，张洲洋[2]，陈阳[2]，黄晚清[1]
(1.四川省交通勘察设计研究院有限公司，四川 成都 610041;2.四川成渝高速公路股份有限公司成雅分公司，四川 成都 610021)

摘要：通过对 JTG 5210－2018 和 JTG H20－2007《公路技术状况评定标准》在高速公路沥青路面技术状况评价方面的对比分析，探讨路面技术状况指数 *PQI* 计算指标的变化、路面结构强度指数 *PSSI* 和路面车辙深度指数 *RDI* 计算公式修正的合理性、设置路面跳车指数 *PBI* 和路面磨耗指数 *PWI* 的必要性、路面抗滑性能评价指标 *SRI* 和 *PWI* 二选一的欠缺之处，并分析路面损坏状况评价体系的修正方向，建议增加修补率和裂缝率等辅助指标，以更准确地评价路面技术状况，有效指导路面维修养护决策。

关键词：工程管理；公路；沥青路面；技术状况评价指标；裂缝率；修补率

中图分类号：U415.12 **文献标志码**：A **文章编号**：1671－2668(2021)02－0155－06

JTG 5210－2018《公路技术状况评定标准》于 2019 年 5 月 1 日正式实施，相较于 JTG H20－2007《公路技术状况评定标准》，针对高速公路沥青路面技术状况评价，该规范在指标分级方法、评价指标体系和分项指标测试方法等方面进行了修正或完善，对具有争议的计算方法进行了调整(如车辙计算公式)，以使沥青路面技术状况评价结果更符合现场实际工况，更有助于指导沥青路面养护维修决策。但对于该规范新引入的一些评价指标和理念应用于高速公路沥青路面技术状况评价存在一定争议，如文献[3]认为 JTG H20－2007 在计算高速公路路面损坏指数 *PCI* 时不再重复计入车辙损坏面积并不合理；文献[4]认为路面跳车指数和修正的路面车辙指标均更符合沥青路面养护工作需求，但应采用裂缝率、修补率等指标补充评价路面破损状况。鉴于此，该文基于对 JTG 5210－2018 中高速公路沥青路面技术状况评价体系的分析，逐个分析修正后各分项指标应用于高速公路沥青路面技术状况评价的合理性和值得商榷之处，提出相应建议，并对裂缝率和修补率计算方法进行探讨。

1 高速公路沥青路面技术状况评价体系

JTG 5210－2018《公路技术状况评定标准》采用综合指标路面技术状况指数 *PQI* 及相应分项指标(主要包括路面结构强度指数 *PSSI*、路面损坏指数 *PCI*、路面车辙深度指数 *RDI*、路面行驶质量指数 *RQI*、路面抗滑性能指数 *SRI*、路面跳车指数 *PBI* 和路面磨耗指数 *PWI*)进行沥青路面技术状况评定(见图 1)，等级划分标准见表 1，其中高速公路沥青路面 *PCI* 评定优良等级分界线由 JTG H20－2007 的 92 调整为 90，其余划分标准未发生变化。

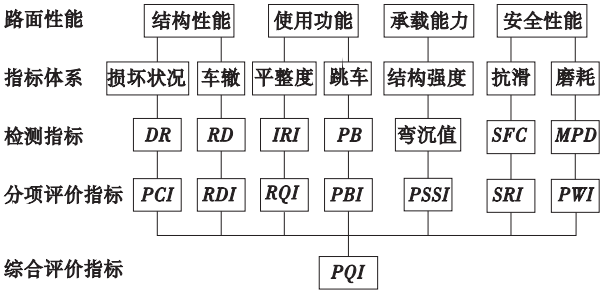

图 1 JTG 5210－2018 中沥青路面技术状况评价指标体系

表 1 高速公路沥青路面各指标等级划分标准

等级	*PQI*	*PCI*	*RQI*、*RDI*、*PBI*、*PWI*、*SRI*、*PSSI*
优	≥90	≥92	≥90
良	≥80，<90	≥80，<92	≥80，<90
中	≥70，<80	≥70，<80	≥70，<80
次	≥60，<70	≥60，<70	≥60，<70
差	<60	<60	<60

JTG H20－2007 沥青路面技术状况评定分项指数中并无路面跳车指数 *PBI* 和路面磨耗指数 *PWI*。此外，JTG 5210－2018 对路面车辙深度指数 *RDI* 和路面结构强度指数 *PSSI*(采用路面弯沉标准值)计算公式进行了修正，其余原有各分项指标计算公式未作调整。

由于新增了 *PBI* 和 *PWI*，JTG 5210－2018 对 *PQI* 计算公式中各分项指标权重进行了调整，其中路面抗滑性能指数 *SRI* 和 *PWI* 在沥青路面技术状况评价中为二选一，两指标分项权重仍采用 0.1。JTG 5210－2018 评价高速公路路面舒适性采用 *PBI*（新增）和 *RQI* 两个指标，将 JTG H20－2007 中 *RQI* 分项权重 0.4 拆分为 *PBI* 分项权重 0.1 和 *RQI* 分项权重 0.3，其余各指标权重未发生变化（见表 2）。

表 2 高速公路沥青路面 *PQI* 计算中各分项指标权重对照

PQI 计算指标	权重	
	JTG H20－2007	JTG 5210－2018
PCI	0.35	0.35
RQI	0.40	0.30
RDI	0.15	0.15
PBI	—	0.10
PWI	—	0.10
SRI	0.10	0.10
PSSI	0.00	0.00

2 沥青路面单项评价指标

2.1 沥青路面破损状况评价指标

PCI 指标计算公式在新旧规范中一致，差别在于 JTG 5210－2018 对部分路面病害损坏程度的判断标准进行了调整，如块状裂缝病害轻重分界线的裂缝宽度由 JTG H20－2007 的 3 mm 调整为 2 mm；坑槽病害判断标准增加了坑槽深度标准，轻重程度的坑槽深度标准分界线为 25 mm；路面修补损坏统计中不再计入长度大于 5 m 的整车道修复部分面积。

PCI 指标计算权重系数中增加了自动化检测换算系数，对各病害不再区分轻重等损坏程度，统一按病害类型采用同一换算系数，主要用于机器自动识别各类病害的统计分析。自动化检测换算系数与人工调查权重系数的对照见表 3。由表 3 可知：自动化检测换算系数大于等于病害损坏程度重对应的人工调查权重系数，且纵横向裂缝自动化检测换算系数是人工调查权重系数的 2 倍。自动化检测基于对图像自动识别的平面图像和激光位移检测的相对变形采用自动化或人工交互方式对破损数量等进行统计，其识别准确性受道路状况影响较大，并不容易识别宽度较小的未修补裂缝病害，与裂缝相似的非裂缝阴影和太阳光对裂缝病害统计干扰较大，且成像所得裂缝不明显，难以准确确定裂缝长度，对具有三维立体特征的坑槽、松散、沉陷、波浪拥包等病害基本无法准确识别。因此，JTG 5210－2018 采用相对较大的自动化检测换算系数以减小识别率低导致的路面破损率和实际路况差别较大的问题。

表 3 沥青路面损坏权重及换算系数

损坏类型	人工调查权重（损坏程度：重）	自动化检测换算系数
龟裂	1.0	1.0
块状裂缝	0.8	1.0
纵横向裂缝	1.0	2.0
沉陷、波浪拥包	1.0	1.0
车辙	1.0	—
坑槽、松散	1.0	1.0
泛油	0.2	0.2
条状修补	0.1	0.2
块状修补	0.1	0.1

另外，JTG 5210－2018 中指出，路面车辙损坏采用自动化设备检测时，*PCI* 计算中不计入车辙病害，单独采用 *RDI* 予以评定；而采用人工调查时，*PCI* 计算中计入车辙病害。可理解为后者不再考虑 *RDI*，将至少存在以下 3 个问题：1）沥青路面无其他病害时，高速公路和一级公路采用自动化设备检测，*PCI* 计算中不计入车辙病害，*PCI* 评定等级为优。而二、三、四级公路（后称低等级公路）采用人工调查，*PCI* 计算中计入车辙病害，以 20 m 为评定单元（车道宽为 3.75 m），假设该路段存在 20 m 轻度车辙（车辙深度为 10～15 mm），*PCI* 为 67.8，若为 20 m 重度车辙，*PCI* 为 60.2，*PCI* 评定等级均为次，将导致低等级公路 *PCI* 评价等级更低。而 *PCI* 是现阶段沥青路面状况评定和养护决策重点参考指标之一，显然存在值得商榷之处。2）低等级公路 *PQI* 计算中仅考虑 *PCI* 和 *RQI* 两个指标，采用自动化检测后，车辙病害该如何考虑，规范并没有明确说明，且低等级公路 *PCI* 权重系数为 0.6，车辙的计入方法对 *PQI* 计算影响较大。3）同一路段，仅有车辙病害的条件下，仅考虑 *PCI* 和 *RDI* 两项指标，其余各指标均为 100，人工调查时 *PQI* 计算中不计入 *RDI* 且车辙深度仅在 *PCI* 计算中考虑，自动化设备检测时 *PCI* 计算中不计入车辙，且车辙深度仅在 *RDI* 计算中考虑，并考虑在 *PCI* 和 *RDI* 中均考虑车辙因素的影响，*PQI* 计算结果见表 4。由表 4 可知：车辙仅在 *RDI* 中考虑并不计入 *PCI* 中时，严

重低估了车辙对 *PQI* 结果的影响，而车辙深度在 20 mm 以内时，*PQI* 计算中不计入 *RDI* 且车辙深度仅在 *PCI* 计算中考虑的工况与 *PCI* 和 *RDI* 均计入车辙因素计算的 *PQI* 值基本接近，但车辙深度较大时，后者评定的 *PQI* 更低，其值与低等级公路 *PQI* 计算公式计算结果更接近。

综上，从车辙病害对路用性能、行车安全和行车舒适性的影响及车辙深度和 *PQI* 评价的协调角度，建议高等级沥青路面无论采用何种方式测试车辙病害，*PCI* 均应计入车辙病害。

表 4　*PQI* 计算结果对比

车辙深度/mm	车辙深度调查方法	*PCI*	*RDI*	高速公路 *PQI*	低等级公路 *PQI*
	人工调查	100.0	100	100.00	100.00
5	自动化检测	100.0	95	99.25	—
	PCI 和 *RDI* 均计入车辙	100.0	95	99.25	—
	人工调查	67.8	100	88.73	80.68
10	自动化检测	100.0	90	98.50	—
	PCI 和 *RDI* 均计入车辙	67.8	90	87.23	—
	人工调查	67.8	100	88.73	80.68
15	自动化检测	100.0	75	96.25	—
	PCI 和 *RDI* 均计入车辙	67.8	75	84.98	—
	人工调查	60.2	100	86.07	76.12
20	自动化检测	100.0	60	94.00	—
	PCI 和 *RDI* 均计入车辙	60.2	60	80.07	—
	人工调查	60.2	100	86.07	76.12
25	自动化检测	100.0	45	91.75	—
	PCI 和 *RDI* 均计入车辙	60.2	45	77.82	—

注：对于高速公路，$PQI=0.35PCI+0.15RDI+0.5\times100$；对于低等级公路，$PQI=0.6PCI+0.4\times100$。

JTG 5210－2018 采用的 *PCI* 不失为一项综合指标，但其并没有对病害提出对应的细分指标体系，应用于养护后评估和养护维修方案优选时仍易出现相应路段 *PCI* 评定结果为良或优，而路面实际存在严重修补不良或裂缝集中等病害。因此，需补充一些辅助分项指标（如裂缝率、修补率等），使评定结果符合实际路况的同时更具有指导价值。

修补率：修补不良对路面平整度影响较大，小面积修补受施工条件和材料质量的限制，施工质量往往较差，且修补处与旧路面结合处往往黏结较差，水分易通过此处渗入路面结构内部，同时此处荷载传递作用较差，易造成修补混合料单独受力，导致路面服役寿命缩短。JTG 5210－2018 中指出，长度大于 5 m 的整车道修复不计为路面修补损坏，以此为依据，统计非整车道修复面积或长度≤5 m 的整车道修复面积及块状和条状修补个数，其中条状修补个数可作为裂缝类统计，形成修补率和块状修补个数两个统计指标。修补率＝（非整车道修复面积＋长度≤5 m 的整车道修复面积）/路面检测或调查面积×100。

裂缝率：沥青路面裂缝主要包括横向裂缝、纵向裂缝、龟裂和块裂，半刚性沥青路面横向反射裂缝往往较普遍，但其对路面服役寿命和路用性能的影响相对龟裂和块裂较小，尤其在裂缝边未出现沉陷或支缝前往往病害程度较轻，可通过灌缝等方式予以简单处治。因此，根据是否出现沉陷或支缝将裂缝率指标分为轻度裂缝率（裂缝未伴随明显沉陷和支缝）和重度裂缝率（裂缝伴随沉陷和支缝），裂缝率为纵向裂缝、横向裂缝的面积（裂缝长度×0.2 m）与龟裂和块裂面积之和占所调查路面面积的百分比。

2.2　沥青路面车辙状况评价指标

沥青路面车辙深度指数 *RDI* 计算公式的修订是 JTG 5210－2018 最显著的变化之一，修订对照见表 5。由表 5 可知：在采用临时表征符号 *X* 后，*RDI* 新旧规范计算形式基本一致，差别在于各参数的取值，导致新旧规范体系下采用同一个车辙深度计算的 *RDI* 存在差异（见图 2）。

由图 2 可知：除车辙深度 *RD*＝20 mm 时新旧规范 *RDI* 计算结果均等于 60 外，其余在同一车辙深度下，JTG 5210－2018 计算 *RDI* 值均大于 JTG H20－2007 计算 *RDI* 值，即同一车辙深度下，JTG H 20－2007评定的路面车辙状况更恶劣。*RD*≥35

表 5 车辙深度指数 *RDI* 计算公式的修订对照

项目	JTG 5210－2018	JTG H20－2007
计算公式	$RDI=\begin{cases}100-a_0RD & (RD\leqslant RD_a)\\ X-a_1(RD-RD_a) & (RD_a<RD\leqslant RD_b)\\ 0 & (RD>RD_b)\end{cases}$	
X	90	60
RD_a/mm	10	20
RD_b/mm	40	35
a_0	1	2
a_1	3	4

注：计算公式中 X 为临时表征符号。

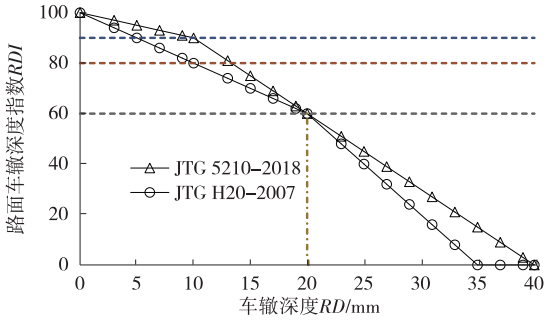

图 2 *RDI* 新旧规范计算结果对照

mm 时，按 JTG H20－2007 计算，$RDI=0$；而按 JTG 5210－2018 计算，$RD\geqslant 40$ mm 时，$RDI=0$。一般而言，$RD\geqslant 10$ mm 时才认为沥青路面出现了车辙，此时按 JTG H20－2007 计算，$RDI=80$（已为评定等级良和中的分界线）；按 JTG 5210－2018 计算，$RDI=90$。而新建路面现场测试车辙值多为 1～3 mm，运营一段时间后，在车轮的冲击和磨耗作用下，RD 接近 10 mm 的情况比比皆是。如某高速公路下行方向，即使在车流量较小的工况下，在通车不到 2 年后测试沥青路面车辙，$RD\geqslant 8$ mm 的路段共 9.51 km，其最大值为 19.19 mm。同时，从安全角度，7.6～10 mm 为路面容许车辙深度，具体值根据车辆轴重适当调整。综合行车安全、车辙病害发展历程及维修养护频次和费用，JTG H20－2007 对车辙的评价过于严格，并不合理。

2.3 沥青路面舒适性评价指标

JTG 5210－2018 采用路面跳车指数 *PBI* 和路面行驶质量指数 *RQI* 评价沥青路面舒适性，前者主要评价路面局部异常凹凸状况，后者反映行车方向上整体凹凸偏差情况。路面跳车主要为由路面坑槽、推移拥包和沉陷等损坏引起的车辆突然颠簸，严重影响行车舒适性，对行车安全带来隐患，颠簸引起的车辆动荷载对路面的破坏作用更大，同时会增加车辆磨耗和油耗。但坑槽、推移拥包和沉陷等病害已在 *PCI* 中统计，故规范主要关注路面与桥隧等构造物间异常连接引起的路面跳车，而该类跳车指标主要用于指导局部病害维修养护，对路面维修养护后评估研究并无参考价值。

新旧规范中 *RQI* 计算方法一致，JTG 5210－2018 新增的 *PBI* 基于路面纵断面高差的变化 Δh（通过 10 m 范围内行车方向上 100 个高程数据中最大高程与最小高程之差，每 10 m 统计 1 处）划分跳车程度，通过评定路段内各跳车程度与单位扣分进行计算，且计算路面高差变化前需消除路面纵坡的影响，剔除桥梁伸缩缝等可能存在的异常值。由于跳车程度为轻度时，*PBI* 计算中该处并不扣分，所以 *PBI* 计算结果受制于中度（5 mm≤路面纵断面高差＜8 mm）和重度跳车程度（路面纵断面高差≥8 mm）。但 JTG 5210－2018 并没有明确 *PBI* 从 10 m 结果汇总至 1 km 时应如何计算，若根据 1 km 内所有跳车处数统计扣分计算 *PBI*，假定 1 km 内存在 2 处重度跳车和 1 处中度跳车，计算得 *PBI*＝－25，显然不合理。若采用 Δh 平均值或 *PBI* 平均值等重新评定，易导致以 1 km 为评定单元统计结果多为优，并不能体现该区域内路面跳车状况。因此，以 1 km 为评定单元的 *PBI* 并无意义。

基于以上原因，在路面综合评定指标 *PQI* 计算中建议不引入 *PBI*，仍按 JTG H20－2007 的计算方法计算 *PQI*，单独列出 1 km 内重度、中度跳车处数作为补充指标。

2.4 沥青路面结构强度评价指标

新旧规范关于路面技术状况指数 *PQI* 的计算中均不考虑路面结构强度 *PSSI*，且路面结构强度检测多以抽样检测为主，抽样测试比例应不低于其列养里程的 20%。

PSSI 计算所用路面弯沉标准值的计算方法与 JTG H20－2007 路面设计弯沉的计算方法基本一致（仅车型分类存在差异），实质性差别在于计算中交通量数据（设计车道上的当量设计轴载累计作用次数）选取的计算周期不同，JTG H20－2007 以沥青路面结构设计年限为准，JTG 5210－2018 以新改建沥青路面结构设计使用年限或沥青路面结构性修复设计年限为准，后者要求在沥青路面发生结构性修复时根据结构性修复设计年限来计算。往往结构性修复后，衰减的路面结构强度得到补强，设计强度与原新改建时存在差别，采用结构性修复设计对应

的路面弯沉标准值更合理。

2.5　沥青路面抗滑性能评价指标

JTG 5210－2018 采用路面抗滑性能指数 *SRI* 和路面磨耗指数 *PWI* 评价沥青路面抗滑性能，前者计算公式与 JTG H20－2007 一致，后者为 JTG 5210－2018 新增指标。由于路面横向力系数 *SFC* 和路面构造深度 *MPD* 为二选一指标，且 *MPD* 采用断面类检测设备进行检测，可采用多功能检测车综合信息采集系统与路面损坏、平整度、车辙和跳车等一并检测，不需要额外投入设备。而 *SFC* 需采用专门的横向力系数检测车，该设备价格昂贵，可能导致在委托方对路面抗滑性能无特定检测方法要求的情况下，检测单位优先选择 *MPD*。

PWI 以无磨耗车道中线、同质路基或交工验收时路面构造深度检测值为基准，以其与车道左轮迹带和右轮迹带中路面构造深度小值的差值函数来表征路面表面的磨损状况。自动化构造深度 *MPD* 测量主要通过将测量断面划分为多个测量位置的光切面（常选用 10 cm×10 cm），在每个光切面轮廓线中选取基准线和其 Z 坐标值的均值 h_0，并将基准线对称分为 2 段，确定各段上的 Z 坐标值的最大值 h_1 和 h_2，根据式(1)确定该断面的 *MPD* 值，所有测量断面光切面 *MPD* 的均值则为该测量路面断面的 *MPD* 值，进而根据 *MPD* 和路面构造深度 *MTD* 间良好的线性关系估算 *MTD* 值。*PWI* 计算值实质上为路面表观构造的磨耗值，其准确性受测试设备水平、测试环境、路面沥青混合料类型、路面纹理状况和污染状况及无磨耗基准面选取等影响较大。

$$MPD=\frac{(h_1+h_2)}{2}-h_0 \tag{1}$$

图 3 为成雅（成都—雅安）高速公路 2018 年测试路面抗滑性能指数 *SRI* 和 2019 年测试路面磨耗指数 *PWI* 对比。该路段在该年度内未经过罩面或养护处治，但明显 2018 年测试的上行方向 *SRI*（均值为 81.48）评定路况抗滑等级低于 2019 年 *PWI*（均值为 95.61）评定等级，而下行方向 2019 年测试 *PWI* 呈现较大波动，*PWI* 均值为 85.38，略高于 *SRI* 均值 84.16。结合现场情况，同一路段，*SRI* 和 *PWI* 测试结果相关关系的规律性并不强，受路况特征和测试环境等条件的影响较大，且相对而言前者测试结果对路况的评价更严格。

JTG D50－2017《公路沥青路面设计规范》规定，路面构造深度 *MTD* 与横向力系数 *SFC* 为沥青路面抗滑性能需同时满足的指标。评价沥青路面抗滑性能不同国家采用不同的指标体系，如英国采用横向力系数，澳大利亚采用构造深度和横向力系数，美国大多数地区采用构造深度、车速和动态摩擦系数的复合指标法，但鲜有采用单一指标构造深度来独立评价沥青路面的抗滑性能。*MTD* 为沥青路面的宏观构造，其值主要受制于矿料级配，其大小与路面排水特性密切相关，及时排除路表水可有效防止车辆出现滑水现象，该指标表征路表的粗糙特征，并不能表征路表的微观构造；而 *SFC* 反映加载车以 60 km/h 速度行驶在潮湿路面上时纵向和侧向的摩擦特性，体现轮胎与路面间的连续滑动摩阻力，两指标反映的物理意义并不相同。因此，建议高速公路沥青路面抗滑性能评价中对 *MTD* 与 *SFC* 均进行测试，以两者中最不利值计算 *PQI*。

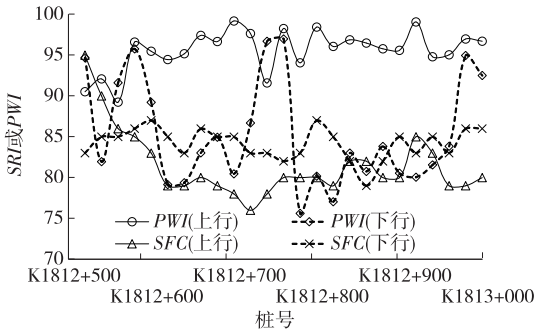

图 3　路面抗滑性能指数 *SRI* 和路面磨耗指数 *PWI* 测试结果对照

3　结论

（1）JTG 5210－2018 沥青路面技术状况评价体系中增加了路面跳车指数 *PBI* 和路面磨耗指数 *PWI*，*PBI* 主要反映沥青路面与构造物间连接处的局部凹凸状况，以 1 km 为评定单位时该指标并不实用，建议 *PQI* 计算体系中不纳入该指标，单独按 1 km 跳车程度处数度量。

（2）沥青路面技术状况评价体系触发指标除采用综合指标 *PQI* 和分项指标 *PSSI*、*PCI*、*RDI*、*RQI*、*SRI* 外，建议增加修补率、裂缝率等描述病害状况的辅助指标，并在高速公路沥青路面 *PCI* 计算中加入车辙因素的影响。

（3）JTG 5210－2018 修正后的 *RDI* 计算公式和路面结构强度 *PSSI* 计算方法更合理，能更好地评价沥青路面技术状况，有效指导沥青路面养护维修决策。

(4) 路面构造深度 *MTD* 与横向力系数 *SFC* 表征沥青路面抗滑性能的不同诱因，两者的相关关系并不强，单一采用路面磨耗指数 *PWI* 评价沥青路面抗滑性能值得商榷，建议采用路面抗滑性能指数 *SRI* 和 *PWI* 中最不利值计算 *PQI* 进行评价。

参考文献：

[1] 交通运输部公路科学研究院.公路技术状况评定标准：JTG 5210－2018[S].北京：人民交通出版社股份有限公司，2018.

[2] 交通运输部公路科学研究院.公路技术状况评定标准：JTG H20－2007[S].北京：人民交通出版社，2008.

[3] 李保红，朱毅军，张婕，等.高速公路沥青路面技术状况评定新老规范对比研究[J].中外公路，2009，29(1)：74－78.

[4] 袁明园，龙丽琴.新旧公路技术状况评定标准对比[J].公路交通技术，2019，35(6)：1－35.

[5] 陈少文，展宏图，吴传海.高速公路沥青路面损坏状况评价标准及养护评价指标研究[J].公路与汽运，2017(1)：129－132.

[6] 马建，赵祥模，贺拴海，等.路面检测技术综述[J].交通运输工程学报，2017(5)：121－137.

[7] 周岚.高速公路沥青路面使用性能评价及预测研究[D].南京：东南大学，2015.

[8] 文静.数字化技术评价沥青路面构造深度研究[D].西安：长安大学，2009.

[9] 周兴林，蒋难得，肖旺新，等.基于激光视觉的沥青路面构造深度测量方法[J].中国公路学报，2014，27(3)：11－16.

[10] 中交路桥技术有限公司.公路沥青路面设计规范：JTG D50－2017[S].北京：人民交通出版社股份有限公司，2017.

[11] 林爱萍.高速公路沥青路面抗滑性能研究[J].福建交通科技，2019(6)：69－72，112.

[12] CUI X，ZHOU X，LOU J，et al.Measurement method of asphalt pavement mean texture depth based on multi-line laser and binocular vision[J].International Journal of Pavement Engineering，2015，18(5)：1－13.

[13] 唐利民，肖约，谢佳伟.沥青混合料抗压回弹模量测量不确定度的评定[J].长沙理工大学学报(自然科学版)，2020，17(3)：7－14.

[14] 查旭东，罗涛，刘安辉，等.基于 SPT 试验的 RIOH-Track 上面层沥青混合料高温性能评价[J].长沙理工大学学报(自然科学版)，2020，17(2)：18－25.

[15] 李友云，付登博，张军，等.AC－13C 沥青混合料劈裂疲劳损伤试验二维数值模拟[J].长沙理工大学学报(自然科学版)，2019，16(3)：1－8.

[16] 周志刚，贺文莉，李浩嘉，等.基于失效温度动态方程的沥青抗老化性能评价[J].交通科学与工程，2019，35(4)：1－8.

[17] 荣建国，王浩仰.路网级沥青路面使用性能衰变模型的标定[J].交通科学与工程，2019，35(4)：22－27.

[18] 林利聪.渝湛高速公路路面使用性能预测及预防性养护时机研究[J].公路与汽运，2020(4)：160－163.

[19] 朱辉，曲恒辉，樊亮，等.基于乳化沥青残留物胶浆路用性能的填料性质评价[J].公路与汽运，2019(6)：73－77＋80.

收稿日期：2020－11－20

****

(上接第 154 页)

[6] 郝德亮，安永林，李佳豪，等.融合 AHP 法－PC 法－可拓法的两阶段隧道风险评估[J].矿业工程研究，2019，34(3)：38－45.

[7] 李恒，周洪文，周本涛，等.基于模糊层次分析的钢箱梁桥质量综合评价方法研究[C]//中冶建筑研究总院有限公司.2020 年工业建筑学术交流会论文集(中册).北京：中冶建筑研究总院有限公司，2020：8.

[8] 马光金.基于灰色关联故障树的盾构隧道施工风险研究[J].铁道建筑技术，2020(4)：60－63＋81.

[9] 陈晶，鲍学英，赵延龙.基于模糊可拓层次分析法的在役混凝土桥梁耐久性评估[J].安全与环境学报，2015，15(4)：16－20.

[10] 邱礼球.基于物元可拓模型的改扩建隧道施工安全风险评估[J].隧道建设(中英文)，2018，38(增刊 2)：25－30.

[11] 赵轩.基于模糊层次综合分析法对隧道施工常见风险的分析[J].工程质量，2019，37(11)：27－30.

[12] 余凡.基于可拓学的隧道施工稳定性评价研究[D].北京：北京交通大学，2015.

[13] SAATY T L.Decision making with dependence and feedback：The analytic network process[M].Pittsburgh：RWS Publications，1996.

[14] 杨春燕，蔡文.可拓学[M].北京：科学出版社，2014.

[15] 交通运输部工程质量监督局.公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估制度及指南解析[M].北京：人民交通出版社，2011.

收稿日期：2020－11－10