

张 阳,刘 佳,梁 攀,等.基于熵权可拓物元模型的桥梁检测指标综合评定[J].长安大学学报(自然科学版),2022,42(6):42-52.
ZHANG Yang,LIU Jia,LIANG Pan,et al.Comprehensive evaluation of bridge inspection indexes based on entropy weight extension matter-element model[J].Journal of Chang'an University(Natural Science Edition),2022,42(6):42-52.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2022.06.005

基于熵权可拓物元模型的桥梁检测指标综合评定

张 阳¹,刘 佳¹,梁 攀¹,夏子立²,梁 鹏¹

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 港珠澳大桥管理局,广东 珠海 519000)

摘 要:针对现行桥梁技术状况检测指标的划分过于宽泛,分级评定标准不直观等问题,提出细分检测指标,将病害图例引入分级评定标准,并重点提出一种针对细分后桥梁检测指标的综合评定方法。首先,在总结国内外相关标准的基础上,将桥梁检测指标细分为若干二级检测指标,并建立基于定性描述、定量描述和病害图例的分级评定标准;其次,为评定细分后的检测指标,提出了基于熵权可拓物元模型的桥梁检测指标综合评定方法,对各项二级检测指标进行经典域的划分和关联度函数的构建,引入熵权法确定各二级检测指标权重,计算检测指标关于各等级的综合关联度值,进而得到桥梁构件以及部件的检测指标等级;最后,将该方法应用到某跨海斜拉桥的钢主梁锈蚀指标评定案例中,将锈蚀细分为点锈、一般锈、针尖锈 3 个二级检测指标,建立相应的分级评定标准,构建了钢主梁锈蚀检测指标熵权可拓评定模型,并通过计算得到各构件和部件的锈蚀指标等级。结果表明:所提出的基于熵权可拓物元模型的桥梁检测指标综合评定方法,能依据检测指标的实测值客观地计算二级检测指标的权重,可准确评定桥梁构件及部件的检测指标标度,评定结果与桥梁实际采用的养护对策更相符,可作为桥梁技术状况评定的输入数据和有益补充。

关键词:桥梁工程;评定方法;熵权可拓;物元模型;桥梁检测指标;病害图例;综合关联度

中图分类号:U443.35 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-8879(2022)06-0042-11

Comprehensive evaluation of bridge inspection indexes based on entropy weight extension matter-element model

ZHANG Yang¹, LIU Jia¹, LIANG Pan¹, XIA Zi-li², LIANG Peng¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge Authority, Zhuhai 519000, Guangdong, China)

Abstract: In view of the problems that current bridge technical condition inspection index was divided too broad and the grading evaluation standard was not intuitive, a subdivision method of inspection index was proposed, the defect legend was introduced into the classification evaluation standard, and a comprehensive evaluation method for the subdivided bridge inspection index was proposed. Firstly, on the basis of summarizing relevant standards at home and abroad, the bridge inspection indexes were subdivided into several secondary inspection indexes, and a grading

收稿日期:2022-06-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFB1600702);国家自然科学基金项目(51878059)

作者简介:张 阳(1993-),男,河南信阳人,工学博士研究生,E-mail:zhangyangjob@chd.edu.cn.

通讯作者:梁 鹏(1977-),男,江西高安人,教授,博士研究生导师,E-mail:lpchdlp@163.com.

evaluation standard based on qualitative description, quantitative description and defect legend was established. Secondly, in order to evaluate the subdivided inspection indexes, a comprehensive evaluation method of bridge inspection indexes based on entropy-weight extension matter-element model was proposed. The classical domain was divided and the correlation function was constructed for each secondary inspection index. The entropy weight method was introduced to determine the weight of each secondary inspection index. Then, the comprehensive correlation value of the inspection index about each level was calculated, and the inspection index grades of bridge components and elements were obtained. Finally, this method was applied to the index evaluation case of steel girder corrosion of a cross-sea cable-stayed bridge, and the corrosion was subdivided into three secondary inspection indexes, such as spot rust, general rust and pinpoint rust. Corresponding grading evaluation standards were established, and the entropy-weight extension evaluation model of the corrosion on steel main girder was constructed, and the corrosion index grade of each component and element was obtained through calculation. The results show that the proposed comprehensive evaluation method of bridge inspection indexes based on entropy-weight extension matter-element model can objectively calculate the weight of secondary inspection index, according to the measured value of the inspection index, and can accurately evaluate the inspection index scale of bridge components and elements. The evaluation results are more consistent with the maintenance strategies adopted by the actual bridges, and can be used as input data and useful supplements for the evaluation of bridge technical condition. 9 tabs, 2 figs, 29 refs.

Key words: bridge engineering; evaluation method; entropy weight extension method; matter-element model; bridge detection index; defect legend; comprehensive correlation

0 引言

公路桥梁技术状况评定结果是桥梁养护工作开展的重要依据,目前中国公路桥梁技术状况评定主要按《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)(下文简称《桥梁评定标准》)执行^[1]。《桥梁评定标准》根据不同桥梁结构类型、部件和材料,给出了不同检测指标及相应的分级评定标准,但其中部分检测指标划分仍较为宽泛,有时不能明确病害类型、成因及处治对策等。检测指标的分级评定标准仅包括定性和定量的文字描述,缺乏病害图例,不够形象直观,不利于一线巡检人员直观地评判检测指标的类别及其标度,评定过程很大程度上依赖于巡检人员对桥梁病害的认知水平,容易造成评定结果不够准确^[2]。

为解决检测指标划分过于宽泛和分级评定标准不形象的问题,不少学者提出了一些改进措施。马新颖在开发的桥梁巡检养护管理系统中内置了少量病害标准图库,并设计了自定义病害的功能来实现检测指标的细分^[3]。王可尧在桥梁巡检养护系统的研发中,提出对混凝土梁式桥按主梁结构形式来细

分裂缝,并配以病害示例图片^[4]。以上研究侧重于在系统研发过程中实现检测指标的细分和标准病害图库的功能,并没有进一步地建立细分后的桥梁检测指标体系。国外相关标准按分布类型将锈蚀分为点锈、一般锈和针尖锈^[5-7]。Hadjigeorgiou 等进一步阐明了锈蚀的3种类型(点锈、一般锈和针尖锈)在成因和特点上的不同之处^[8-9]。Son 等参考相关标准,研究了如何根据锈蚀分布类型和所占面积百分比来决定下一步的钢桥维修策略^[5,7,10]。这些文献的研究成果对于桥梁检测指标的细分具有重要参考价值。

本文将进一步把《桥梁评定标准》中的部分检测指标(即一级检测指标)细分为若干二级检测指标,并为二级检测指标建立包括病害图例在内的分级评定标准。但现行桥梁技术状况评定需要得到的是桥梁构件的一级检测指标等级,为了与《桥梁评定标准》无缝衔接,需综合考虑构件的二级检测指标来计算构件的一级检测指标等级。此外,《桥梁评定标准》中的桥梁部件技术状况评分反映的是部件存在多种病害时的综合得分,管理养护人员难以从部件得分判断每种病害对部件状况的影响程度,不利于

在养护决策时确定待处治病害的优先顺序。针对该问题,需要进一步计算桥梁部件的一级检测指标等级,作为现行桥梁技术状况评定结果的有益补充。总之,针对细分后的桥梁检测指标,仍需深入研究桥梁构件和部件检测指标综合评定方法。

在指标综合评定方面,国家标准《色漆和清漆涂层老化的评级方法》(GB/T 1766—2008)考虑涂层病害成因及危害,将涂层劣化细分为11个单项指标,但其规定的方法没有充分考虑每个指标量值对评定等级的贡献,各等级规定的单项指标值的确定过程也不明确,只能初步反映涂层的劣化程度^[11]。以此标准为参考,为了让每个二级检测指标都对评定有所贡献,指标依照权重进行分配,本文考虑引入可拓学的概念。由于在确定构件的二级检测指标等级时,虽然有相应的分级评定标准,但是二级检测指标包括定性指标和定量指标,而且分级评定标准同时存在定性描述和定量描述,不能很好地反映事物的量变规律^[12]。而可拓学是解决定性定量共存问题的一种有效方法,它以物元为基础,以物元可拓性为依据,在可拓集合中通过建立关联函数对事物的量变和质变过程进行定量描述,能够充分反映事物的量变规律^[12-13]。目前,可拓学在质量评价、风险评估等领域已经得到了广泛的应用^[12-15]。本文应用可拓学的综合评定方法,用二级检测指标关于各等级经典域的关联度,代替二级检测指标具体标度值,从而得到更加准确的构件检测指标等级。

此外,在确定构件和部件的一级检测指标等级的过程中,需要确定二级检测指标的权重。权重的确定多采用层次分析法(AHP)以及一些改进的层次分析法,如模糊层次分析法、变权层次分析法、群组层次分析法、可拓层次分析法等^[14,16-20]。杨永清等运用群组决策思想、引入相对优势度分析法,建立了基于不确定型AHP法的模糊综合评价模型对桥梁加固方案进行评价^[21]。许翔等以层次分析法为基础,引入局部变权原理和云理论对大跨径悬索桥综合技术状况进行评估^[19]。文献研究发现层次分析法在确定权重的过程中存在着以下几点问题:依赖专家经验确定权重的主观性大,判断矩阵没有弹性,调整判断矩阵的过程存在盲目性,需要多次调整才能通过一致性检验^[16,22]。因此需要考虑采用更加客观准确的数学模型来确定二级检测指标的权重。

熵权法是根据评价指标变异程度的大小,不依赖于专家经验,能够有效减少权重确定的主观性,也

能避免采用判断矩阵所带来的一系列问题^[23]。近年来,熵权法已被成功运用在公路或桥隧的评估领域,并取得良好效果^[24-25]。董治等基于熵权物元模型,构建了公路社会稳定风险评估指标体系,以熵作为客观评价项目风险评估指标的权重,保证了公路项目社会稳定风险评估的客观性^[15]。裴兴旺等构建了桥梁检测作业危险性评价模型,应用熵权法确定指标权重,得出危险性评价等级,研究指出该评价结果准确率高、客观性强。因此,本文将采用熵权法来确定桥梁二级检测指标的权重^[26]。

综上所述,为解决桥梁检测指标细分后综合评定的问题,本文提出了基于熵权可拓物元模型的桥梁检测指标综合评定方法。本文以钢主梁锈蚀指标综合评定为例,首先,将其细分为点锈、一般锈和针尖锈3个二级检测指标;其次,引入病害图例,建立二级检测指标的分级评定标准(包含定性描述、定量描述和病害图例);最后,将熵权法与可拓理论相结合,用二级检测指标关于各等级的关联度代替其具体标度值,用熵权法求解二级检测指标权重,从而求解一级检测指标关于各等级的综合关联度,遵循最大关联度原则确定钢主梁构件和部件的锈蚀指标等级。最后,将该方法应用到某跨海斜拉桥的钢箱梁锈蚀指标评定案例中,验证所提方法的可行性。

1 桥梁检测指标的精细化

1.1 桥梁检测指标细分

本文在《桥梁评定标准》的检测指标体系(以下简称“现行指标体系”)下,综合考虑病害的成因、形态、危害和养护措施,对检测指标进行细分。参考相关文献资料和各国规范,桥梁部分部件的部分检测指标的细分结果如表1所示。表1中并没有囊括所有类型桥梁的所有部件的病害细分结果,后续研究中将继续对其他部件的指标进行细分完善。以表1中的锈蚀指标为例,本文参考国外标准,按照锈蚀分布类型,将钢主梁锈蚀检测指标进一步细分为点锈、一般锈、针尖锈3种二级检测指标^[5-7]。按照锈蚀的分布类型来细分病害具有判断便捷、技术要求低、量化指标明确等优势^[10]。这3种锈蚀指标的成因和特点、对结构的危害以及相应的养护措施均是不同的^[8-10,27-28]。而且,某斜拉桥定期检查报告也是按点锈、一般锈和针尖锈来记录锈蚀指标的。因此,这3种锈蚀指标能被方便地应用到桥梁技术状况检查和评定工作。

表 1 桥梁检测指标细分结果

Tab. 1 Subdivided results of bridge inspection indexes

部位	部件	子部件	一级检测指标	二级检测指标	
上部结构	主梁	混凝土主梁	裂缝	结构性裂缝、非结构性裂缝	
		钢主梁	涂层缺陷	变色、起泡、开裂、剥落、生锈、粉化	
			锈蚀	点锈、一般锈、针尖锈	
			焊缝开裂	纵肋顶板焊缝裂纹、纵肋横隔板交叉焊缝裂纹、顶板与竖向加劲肋焊缝裂纹、纵肋纵向对接焊缝裂纹、顶板与横肋焊缝裂纹、纵肋与端部隔板焊缝裂纹、横隔板过焊孔裂纹	
			螺栓损失	锈蚀、松动、脱落、断裂	
	支座	板式橡胶支座	支座缺陷	外鼓、钢板外露、支座偏位、滑动功能缺失、支座垫石等附属构件缺陷	
			位置串动脱空或剪切超限	串动、脱空、剪切变形	
		盆式橡胶支座	支座缺陷	竖向压缩超限、局部偏压、安装缺陷、滑动支座缺陷、支座垫石等附属构件缺陷	
	钢支座	组件或功能缺陷	锚栓剪断、组件锈蚀、牙板损坏、底板与垫石缝隙		
	斜拉索系统	斜拉索	拉索锈蚀断丝	锈蚀、断丝	
		拉索护套	漆膜损坏	沾污、变色、开裂、剥落	
			护套裂缝	横向裂缝、纵向裂缝、环向开裂、龟裂	
			防护层破损	刮痕、刮伤、孔洞、挤压变形、特殊损坏	
	下部结构	桥墩、桥台、基础	/	混凝土裂缝	结构性裂缝、非结构性裂缝
			/	混凝土涂层劣化	起皮、脱落、开裂、锈蚀
/			混凝土外观缺陷	蜂窝麻面、剥落掉角或露筋、空洞孔洞	
桥面系	桥面铺装	沥青混凝土桥面铺装	变形	车辙、波浪拥包、高低不平、鼓包、推移、沉陷	
			泛油	泛油、抗滑损失	
		破损	松散露骨、坑槽		
		裂缝	龟裂、块裂、纵向裂缝、横向裂缝		
	水泥混凝土桥面铺装	磨光脱皮露骨	磨光、脱皮、露骨		
裂缝		纵向裂缝或斜裂缝、板角断裂、破碎板			
标志	/	损坏	标志板变形、损坏、立柱变形、金属构件损坏、基础移位		

注:为了与“部件”层有所区分,将不同材料类型或部件构成的部件归为“子部件”层;“/”表示相应的部件没被细分为若干子部件。

1.2 基于病害图例的分级评定标准

为解决桥梁检测指标的分级评定标准中文字描

述不够直观的问题,引入病害图例,建立了基于病害图例的分级评定标准^[1]。桥梁病害图例可被用于辅助巡检人员判断病害类型和等级,可有效提升分级评定标准的直观性和可操作性。以钢主梁锈蚀为例,在锈蚀指标细分的基础上,参考国内外相关规范,为每种二级检测指标的不同标度制定了相应的定性描述和定量描述,并配备了相应的病害图例,形成“定性描述+定量描述+病害图例”的分级评定标准^[1,5-7,29],由此建立各二级检测指标的分级评定标准见表 2~表 4 所示。

表 2 点锈^[1,5-7,29]

Tab. 2 Spot rusting^[1,5-7,29]

标度	评定标准			
	定性描述	定量描述	病害图例	
			图片	照片
1	良好,构件表面出现很轻微锈蚀现象	锈蚀累计面积 ≤ 构件面积的 0.1%,锈蚀深度 ≤ 0.4 mm		
2	构件表面发生轻微锈蚀,部分涂层出现剥落	构件面积的 0.1% < 锈蚀累计面积 ≤ 构件面积的 3%, 0.4 mm < 锈蚀深度 ≤ 0.8 mm		
3	构件表面发生锈蚀,较大面积涂层剥落	构件面积的 3% < 锈蚀累计面积 ≤ 构件面积的 5%, 0.8 mm < 锈蚀深度 ≤ 1.6 mm		
4	构件表面有较多点蚀现象,涂层因锈蚀而部分剥落或可以刮除,重要部位有锈蚀成洞现象	构件面积的 5% < 锈蚀累计面积 ≤ 构件面积的 15%, 1.6 mm < 锈蚀深度 ≤ 3.2 mm		
5	构件表面有大量点蚀现象,涂层因锈蚀而全面剥离,重要部位被锈蚀成洞	锈蚀累计面积 > 构件面积的 15%, 3.2 mm < 锈蚀深度 ≤ 6.4 mm		

2 桥梁检测指标的综合评定

《桥梁评定标准》中的桥梁技术状况评定底层指标是构件技术状况,而构件技术状况是由该构件的

表3 一般锈^[1,5-7,29]
Tab.3 General rusting^[1,5-7,29]

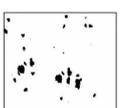
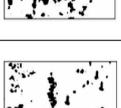
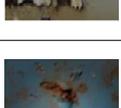
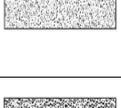
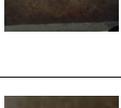
标度	评定标准			
	定性描述	定量描述	病害图例	
			图片	照片
1	良好, 构件表面出现很轻微锈蚀现象, 少量区域出现轻微锈点	锈蚀累计面积 ≤ 构件面积的 0.1%		
2	构件表面发生轻微锈蚀, 部分涂层因锈蚀而出现剥落	构件面积的 0.1% < 锈蚀累计面积 ≤ 构件面积的 3%		
3	构件表面发生锈蚀, 较大面积涂层剥落, 部分锈斑连接成片	构件面积的 3% < 锈蚀累计面积 ≤ 构件面积的 5%		
4	构件表面锈蚀较严重, 涂层因锈蚀而部分剥落或可以刮除, 大部分锈斑连接成片	构件面积的 5% < 锈蚀累计面积 ≤ 构件面积的 15%		
5	构件表面发生严重锈蚀现象, 大量涂层因锈蚀而全面剥离	锈蚀累计面积 > 构件面积的 15%		

表4 针尖锈^[1,5-7,29]

Tab.4 Pinpoint rusting^[1,5-7,29]

标度	评定标准			
	定性描述	定量描述	病害图例	
			图片	照片
1	良好, 构件表面出现很轻微锈蚀现象	锈蚀累计面积 ≤ 构件面积的 0.1%		
2	构件表面发生轻微锈蚀, 出现少量微小的针尖状斑点	构件面积的 0.1% < 锈蚀累计面积 ≤ 构件面积的 3%		
3	构件表面发生较多锈蚀, 较大面积出现针尖状斑点, 斑点较密	构件面积的 3% < 锈蚀累计面积 ≤ 构件面积的 5%		
4	构件表面锈蚀较严重, 锈点多而密, 锈点一般较小, 涂层因锈蚀而部分剥落或可以刮除	构件面积的 5% < 锈蚀累计面积 ≤ 构件面积的 15%		
5	构件表面发生严重锈蚀现象, 锈点较大, 涂层因锈蚀而全面剥离	锈蚀累计面积 > 构件面积的 15%		

一级检测指标等级确定。本文在此评定体系下, 聚焦在构件和部件的一级检测指标的综合评定。以钢主梁锈蚀指标为例, 根据检测指标的层次关系, 建立了桥梁钢主梁锈蚀检测指标体系。该指标体系分为3层: 目标层即桥梁钢主梁锈蚀检测指标等级; 准则层包含组成钢主梁部件的 y 个构件的锈蚀指标等级; 指标层每个构件包含 3 个指标, 为锈蚀检测指标的 3 个二级检测指标, 对应的二级检测指标的编号分别为 1、2、3, 具体如表 5 所示。桥梁检测指标综合评定过程如图 1 所示。

表5 桥梁钢主梁锈蚀检测指标体系

Tab.5 Evaluation system for corrosion inspection indexes of bridge steel girder

目标层	准则层	指标层	
钢主梁锈蚀指标等级	1号构件锈蚀指标等级	点锈 u_1	
		一般锈 u_2	
		针尖锈 u_3	
	\vdots	\vdots	点锈 u_1
			一般锈 u_2
			针尖锈 u_3
y号构件锈蚀指标等级	\vdots	点锈 u_1	
		一般锈 u_2	
		针尖锈 u_3	

2.1 桥梁检测指标可拓物元评定模型构建

可拓学是解决定性与定量共存问题的一种有效方法, 它以物元为基础, 常用物元将事物的质和量有机地集成在一起。物元由事物、特征及量值 3 个要素组成, 通常用 1 个有序三元组来表示, 是描述事物的基本元^[15]。桥梁检测中的可拓物元综合评定是首先确定待评物元, 其次对检测指标等级进行划分、形成经典域和节域, 再将待评价的各个构件二级检测指标值代入, 求解各构件二级检测指标关于各等级的关联函数, 二级检测指标与某个等级的关联度值越大, 其与该级的关联度就越大。具体步骤如下:

(1) 确定桥梁检测指标可拓物元评定模型的待评物元

桥梁检测指标物元模型的待评物元 R_k 表示为

$$R_k = T_k, u_i, x_i = \begin{bmatrix} u_1 & x_1 \\ \vdots & \vdots \\ T_k & u_i & x_i \\ \vdots & \vdots \\ u_n & x_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: 事物 T_k 为第 k ($k=1, 2, \dots, y$) 个待评对象, 即桥梁构件检测指标等级, 设共 y 个待评对象; 设该桥梁构件检测指标共细分为 n 个二级检测指标, 特征 u_i 为第 i ($i=1, 2, \dots, n$) 个二级检测指标; x_i 为

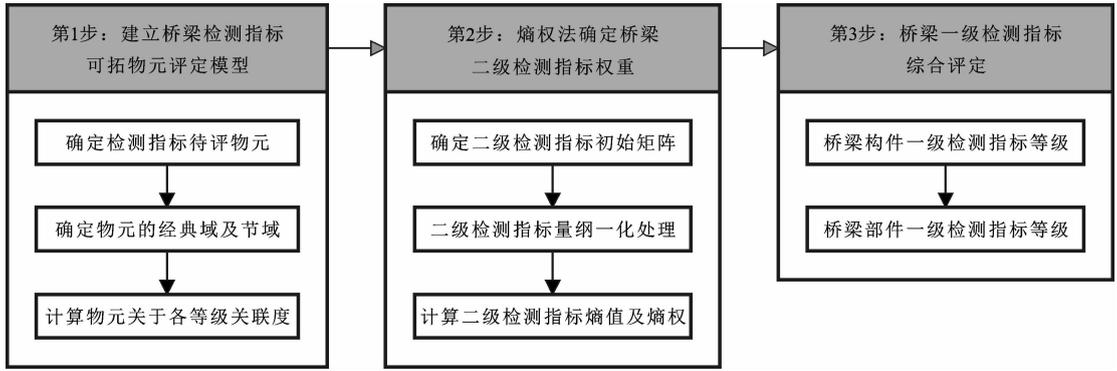


图 1 基于熵权可拓物元模型的桥梁检测指标综合评定流程

Fig.1 Comprehensive evaluation process of bridge inspection index based on entropy-weight extension method

T_k 关于二级检测指标 u_i 的量值,即待评价构件检测所得到的实际二级检测指标值。

(2)确定桥梁检测指标可拓物元评定模型中的经典域物元及节域物元

经典域是二级检测指标 U 各评价等级 V 所对应的量值的范围,经典域物元 R_j 表示为

$$R_j = [V_j, u_i, N_{ij}] = \begin{bmatrix} u_1 & N_{1j} \\ \vdots & \vdots \\ u_i & N_{ij} \\ \vdots & \vdots \\ u_n & x_{nj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 & a_{1j}, b_{1j} \\ \vdots & \vdots \\ V_j & u_i & a_{ij}, b_{ij} \\ \vdots & \vdots \\ u_n & a_{nj}, b_{nj} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: V_j 为桥梁构件二级检测指标评定的第 j ($j = 1, 2, \dots, m$) 个等级,设该二级检测指标共分为 m 个等级; $N_{ij} = (a_{ij}, b_{ij})$ 为二级检测指标 u_i 属于第 j 个等级时的取值范围,即经典域。

节域物元 R_p 表示为

$$R_p = [P, u_i, x_{iq}] = \begin{bmatrix} u_1 & N_{1iq} \\ \vdots & \vdots \\ u_i & N_{iq} \\ \vdots & \vdots \\ u_n & N_{niq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 & a_{1iq}, b_{1iq} \\ \vdots & \vdots \\ P & u_i & a_{iq}, b_{iq} \\ \vdots & \vdots \\ u_n & a_{niq}, b_{niq} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: P 为桥梁构件二级检测指标评定等级的全体;

x_{iq} 为所有二级检测指标的所有取值范围; $N_{iq} = (a_{iq}, b_{iq})$ 为二级检测指标 u_i 的所有取值范围,即节域。

对于定量指标,其经典域和节域参照分级评定标准中的定量描述的数值范围来确定;而对于定性指标,其经典域和节域参照分级评定标准中的标度值确定。以表 4 针尖锈为例,假设其是不存在定量描述的定性指标,那么其对应的二级检测指标量值即为指标标度而不是病害面积百分比,由此确定的针尖锈指标的经典域和节域见表 6。

表 6 针尖锈指标经典域和节域

Tab.6 Classical domain and joint domain of pinpoint rusting indexes

二级检测指标	经典域					节域
	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	
针尖锈	1	(1,2]	(2,3]	(3,4]	(4,5]	[1,5]

(3)确定桥梁检测指标物元模型中二级检测指标对不同等级的关联度

各构件一级检测指标对应的二级检测指标关于各等级的关联度 $K_j(x_i)$ 为

$$K_j(x_i) = \begin{cases} \frac{-\rho(x_i, N_{ij})}{|N_{ij}|} & x_i \in N_{ij} \\ \frac{\rho(x_i, N_{ij})}{[\rho(x_i, N_{iq}) - \rho(x_i, N_{ij})]} & x_i \notin N_{ij} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\rho(x_i, N_{ij}) = \left| x_i - \frac{a_{ij} + b_{ij}}{2} \right| - \frac{b_{ij} - a_{ij}}{2}$, $\rho(x_i, N_{iq}) = \left| x_i - \frac{a_{iq} + b_{iq}}{2} \right| - \frac{b_{iq} - a_{iq}}{2}$,表示桥梁二级检测指标关于经典域 N_{ij} 及节域 N_{iq} 的距。

最终所求得的关联度值越大,代表二级检测指标与该等级联系越紧密。

2.2 桥梁二级检测指标权重计算

熵权法是由美国学者 Shannon 在熵的基础上进行量纲一化处理的结果。传统的 AHP 法等确定评价指标权重的方法往往比较主观。而熵是系统无序程度的度量,熵权反映了各指标所携带和

传输的有用信息量,携带和传输的有用信息量越多,其熵权越大,反之越小,因此该方法可以有效减少权重确定的主观性^[23-24]。基于熵权法的权重计算步骤如下:

(1) 确定桥梁检测指标初始矩阵

初始矩阵即为要评价桥梁部件对应的 y 个构件中的 n 个二级检测指标的量值 c_{ik} ($k=1, 2, \dots, y$) 构成的矩阵,用 C 表示

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1y} \\ \vdots & & & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{ny} \end{bmatrix} \quad (5)$$

(2) 量纲一化处理桥梁二级检测指标

为防止各指标量纲不统一、量级不一致,需要将初始矩阵量纲一化处理

$$d_{ik} = \frac{c_{ik} - \min c_i}{\max c_i - \min c_i} \quad (6)$$

式中: d_{ik} 为经过量纲一化处理的第 k 个构件的第 i 个二级检测指标的量值; c_i 为第 i 个二级检测指标的量值。

由此得到量纲一化矩阵 D

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1y} \\ \vdots & & & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{ny} \end{bmatrix} \quad (7)$$

(3) 计算第 i 个桥梁二级检测指标的熵值 H_i

$$H_i = \frac{1}{\ln y} \sum_{k=1}^y p_{ik} \ln p_{ik} \quad (8)$$

$$p_{ik} = \frac{d_{ik} + 1}{\sum_{k=1}^y (d_{ik} + 1)} \quad (9)$$

式中: p_{ik} 为过程参数。

(4) 计算桥梁二级检测指标的熵权 ω_i

$$\omega_i = \frac{1 - H_i}{n - \sum_{i=1}^n H_i} \quad \sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (10)$$

2.3 桥梁一级检测指标综合评定

(1) 确定桥梁构件一级检测指标等级

$$E_k = \sum_{i=1}^n \omega_i K_j(x_{ki}) = (e_{k1}, e_{k2}, \dots, e_{kj}, \dots, e_{km}) \quad (11)$$

式中: E_k 为准则层中第 k 个构件的关联度综合评价结果向量; x_{ki} 为第 k 个构件关于第 i 个二级检测指标的量值; $K_j(x_{ki})$ 为该量值对应的第 j 个等级的关联度; e_{kj} 为第 k 个构件一级检测指标关于第 j 个等级的综合关联度,若第 k 个构件一级检测指标关于第 s 个等级的综合关联度最大,令即 $e_{ks} = \max_{j=(1,2,3,4,5)} e_{kj}$,则

第 k 个构件一级检测指标等级为 s 。

(2) 确定桥梁部件一级检测指标等级

$$F = WE = (f_1, f_2, \dots, f_j, \dots, f_m) \sum_{k=1}^y W_k = 1 \quad (12)$$

式中: F 为目标层(即包含 y 个构件的部件一级检测指标)的综合评价关联度结果向量; f_j 即为桥梁部件一级检测指标关于第 j 个等级的综合关联度; W 为准则层各构件的权重组成的矩阵; E 为准则层各桥梁构件一级检测指标关于各等级的关联度组成的矩阵,若桥梁部件一级检测指标关于第 S 个等级的综合关联度最大,即 $f_S = \max_{j=(1,2,\dots,m)} f_j$,则该部件一级检测指标等级为 S 。

3 钢主梁锈蚀指标评定

3.1 桥梁钢主梁锈蚀检测结果

本文以某斜拉桥的钢主梁的锈蚀指标评定过程为例,进行实证分析。该斜拉桥主梁为整体式钢箱梁,每个施工节段划分为 1 个构件,其中,某跨钢箱梁包含 11 个构件,在某年定期检查中发现各构件均存在锈蚀病害,本文计算由该跨的 11 个构件所组成的钢主梁部件的锈蚀指标等级。根据本文对锈蚀指标的细分结果和所建立的病害图例,发现钢箱梁上存在点锈和一般锈 2 种锈蚀病害,可将其确定为锈蚀指标的 2 类二级检测指标。这 2 种锈蚀病害面积占各构件面积的百分比如图 2 所示。

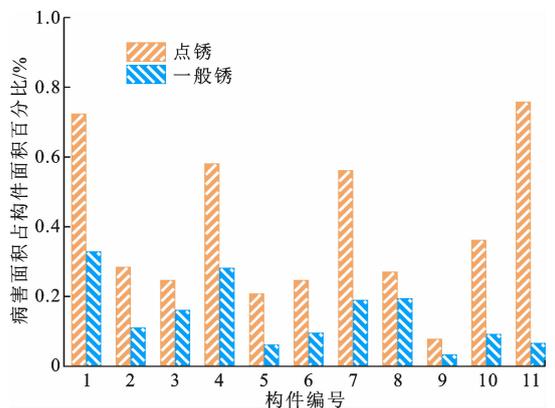


图 2 各构件的锈蚀病害面积占比

Fig. 2 Percentages of corrosion defect area for each element

3.2 钢主梁锈蚀指标评定

(1) 确定钢主梁锈蚀二级检测指标待评物元、经典域和节域

本案例待评物元即为该跨钢主梁 11 个构件对应锈蚀指标,参照本文第 1.2 节所建立的分级评定标准(表 2、表 3)中的定量描述,用二级检测指标对应病害占构件面积百分比来确定桥梁各构件锈蚀检

测指标的经典域和节域,且将锈蚀检测指标等级划分为 5 个标度: $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\} = \{1, 2, 3, 4, 5\}$,具体各二级检测指标所对应的经典域和节域见表 7。

表 7 二级检测指标经典域和节域

Tab. 7 Classical domain and joint domain of secondary inspection indexes

指标	细化指标	经典域					节域
		V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	
锈蚀	点锈	[0,0.1]	(0.1,3]	(3,5]	(5,15]	(15,100]	[0,100]
	一般锈	[0,0.1]	(0.1,3]	(3,5]	(5,15]	(15,100]	[0,100]

(2) 确定构件锈蚀二级检测指标关联度和权重

根据构件锈蚀面积占比及表 7 中确定的经典域和节域,代入式(4)计算钢主梁锈蚀各二级检测指标关于各标度的关联度,关联度值越大,代表二级检测指标与该标度联系越紧密,最大关联度值所对应的标度即为二级检测指标的等级。关联度计算结果、各构件对应锈蚀二级检测指标标度以及按《桥梁评定标准》方法(以下简称“规范方法”)计算的指标标度见表 8。可见,采用本文方法和规范方法确定的结果是一致的,证明了采取可拓物元模型对二级

检测指标进行评定是可行的。同时,该关联度计算结果为确定一级指标等级奠定基础。

另外,将二级检测指标实测值(即锈蚀二级检测指标对应锈蚀面积占构件面积的百分比)代入式(7)~式(10),可得到点锈和一般锈 2 个二级检测指标的权重依次分别为 0.496 7 和 0.503 3。

(3) 钢主梁构件及部件锈蚀一级指标等级综合评定

将表 8 中所得到的构件二级检测指标关于各等级的关联度,第(2)步所确定的二级检测指标权重按照式(11)进行加权计算,可得 11 个构件的锈蚀标度。表 9 给出了使用本文方法与规范方法的计算结果。表 9 中每个构件的锈蚀面积占构件面积百分比是对每个构件的点锈和一般锈 2 种二级检测指标的面积累加。

由图 2 和表 9 可发现,各构件之间的锈蚀病害面积存在较大差异,最大差异接近 10 倍之多。采用规范方法对该跨钢主梁的 11 个构件锈蚀指标等级进行评定时,所有构件锈蚀指标标度均为 2,所有构件的技术状况评分均为 75。该结果无法反映构件之间病害面积的差异性,不利于确定各构件病害

表 8 二级检测指标关联度及标度

Tab. 8 Correlation and scaling of secondary inspection indexes

构件编号	二级检测指标	病害面积与构件面积之比/%	关联度数值					指标标度	
			V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	本文方法	规范方法
1	点锈	0.723 7	-0.462 9	0.215 1	-0.758 8	-0.855 3	-0.951 8	2	2
	一般锈	0.328 5	-0.410 2	0.078 8	-0.890 5	-0.934 3	-0.978 1	2	2
2	点锈	0.285 1	-0.393 7	0.063 8	-0.905 0	-0.943 0	-0.981 0	2	2
	一般锈	0.110 1	-0.084 2	0.003 5	-0.963 3	-0.978 0	-0.992 7	2	2
3	点锈	0.246 4	-0.372 7	0.050 5	-0.917 9	-0.950 7	-0.983 6	2	2
	一般锈	0.160 6	-0.273 9	0.020 9	-0.946 5	-0.967 9	-0.989 3	2	2
4	点锈	0.580 7	-0.452 9	0.165 8	-0.806 4	-0.883 9	-0.961 3	2	2
	一般锈	0.281 5	-0.392 0	0.062 6	-0.906 2	-0.943 7	-0.981 2	2	2
5	点锈	0.207 7	-0.341 5	0.037 1	-0.930 8	-0.958 5	-0.986 2	2	2
	一般锈	0.062 4	0.376 1	-0.376 1	-0.979 2	-0.987 5	-0.995 8	1	1
6	点锈	0.247 0	-0.373 1	0.050 7	-0.917 7	-0.950 6	-0.983 5	2	2
	一般锈	0.095 8	0.041 8	-0.041 8	-0.968 1	-0.980 8	-0.993 6	1	1
7	点锈	0.561 7	-0.451 1	0.159 2	-0.812 8	-0.887 7	-0.962 6	2	2
	一般锈	0.190 1	-0.321 5	0.031 1	-0.936 6	-0.962 0	-0.987 3	2	2
8	点锈	0.270 4	-0.386 6	0.058 8	-0.909 9	-0.945 9	-0.982 0	2	2
	一般锈	0.193 9	-0.326 2	0.032 4	-0.935 4	-0.961 2	-0.987 1	2	2
9	点锈	0.077 5	0.224 9	-0.224 9	-0.974 2	-0.984 5	-0.994 8	1	1
	一般锈	0.033 1	0.330 9	-0.669 1	-0.989 0	-0.993 4	-0.997 8	1	1
10	点锈	0.361 8	-0.419 8	0.090 3	-0.879 4	-0.927 6	-0.975 9	2	2
	一般锈	0.092 0	0.079 9	-0.079 9	-0.969 3	-0.981 6	-0.993 9	1	1
11	点锈	0.757 6	-0.464 7	0.226 8	-0.747 5	-0.848 5	-0.949 5	2	2
	一般锈	0.066 4	0.336 0	-0.336 0	-0.977 9	-0.986 7	-0.995 6	1	1

表9 各构件锈蚀指标关联度及标度

Tab.9 Correlation and scaling of corrosion index for each element

构件编号	锈蚀面积与构件面积之比/%	关联度数值					指标标度	
		V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	本文方法	规范方法
1	1.052 2	-0.436 4	0.146 5	-0.825 1	-0.895 0	-0.965 0	2	2
2	0.395 2	-0.237 9	0.033 5	-0.934 3	-0.960 6	-0.986 9	2	2
3	0.407 0	-0.323 0	0.035 6	-0.932 3	-0.959 4	-0.986 5	2	2
4	0.862 2	-0.422 3	0.113 8	-0.856 6	-0.914 0	-0.971 3	2	2
5	0.270 1	0.019 7	-0.170 9	-0.955 1	-0.973 1	-0.991 0	1	2
6	0.342 8	-0.164 2	0.004 1	-0.943 0	-0.965 8	-0.988 6	2	2
7	0.751 8	-0.385 9	0.094 7	-0.875 1	-0.925 1	-0.975 0	2	2
8	0.464 3	-0.356 2	0.045 5	-0.922 7	-0.953 6	-0.984 5	2	2
9	0.110 6	0.278 3	-0.448 4	-0.981 6	-0.989 0	-0.996 3	1	2
10	0.453 8	-0.168 3	0.004 6	-0.924 7	-0.954 8	-0.984 9	2	2
11	0.824 0	-0.061 7	-0.056 5	-0.863 4	-0.918 1	-0.972 7	2	2

处治的优先级。采用本文方法所得的各构件锈蚀指标标度是不相同的,该结果能很好地反映构件之间病害面积的差异性。

此外,当2个构件之间的病害面积相近时,难以从图2和表9中直观判断其检测指标标度是否有差异。而通过本文方法可以得到2个构件的检测指标标度,还可以得到关联度。如病害面积相近的第5个和第6个构件,使用本文方法计算得到的第5个和第6个构件关于锈蚀各标度的关联度依次为(0.020 6, -0.171 4, -0.955 2, -0.973 1, -0.991 0)和(-0.163 8, 0.004 0, -0.943 1, -0.965 9, -0.988 6),所对应的锈蚀标度分别为1和2。因此,使用本文方法既可以区分病害面积相近构件的病害标度,还能通过关联度刻画检测指标对不同等级的偏向程度。

最后,本文方法将《桥梁评定标准》中的检测评定指标(即本文所称的一级检测指标)细分为若干二级检测指标,并能分别确定各二级检测指标和一级检测指标的标度,更有利于辅助桥梁养护工程师对桥梁进行精准施策。如对于第6、10和11个构件,无论是采用本文方法还是规范方法,这3个构件的锈蚀标度都是2。然而,本文方法还能进一步地确定这3个构件的点锈标度均为2,而一般锈蚀标度均为1。分析可知,若要对该3个构件进行维护处治,应优先处治点锈。

至此,本文解决了将检测指标细分为若干二级检测指标所带来的构件检测指标综合评定问题。后续可按《桥梁评定标准》中构件、部件和桥梁等技术状况评分计算公式来计算各自的技术状况得分。本文为进一步探明病害对部件状况的影响程度,为养

护决策提供支持,还计算了钢主梁部件的锈蚀等级。

将表9中数据代入式(12),可得桥梁该跨钢主梁锈蚀一级指标等级关联度为

$$F = (-0.204 0, -0.019 1, -0.910 5, -0.946 3, -0.982 1)$$

由于 $\max_{j=1,2,3,4,5} f_j = f_2 = -0.019 1$,可知该跨桥梁钢主梁锈蚀评定等级为2。而在仅考虑锈蚀病害的条件下,按《桥梁评定标准》计算,该跨钢主梁技术状况得分为71.835 4,技术状况等级为3类。类比《公路桥涵养护规范》(JTJ 5120—2021)的养护对策可知,技术状况等级为2类或3类的钢主梁所对应的养护对策依次为“修复养护、预防养护”和“修复养护、加固或更换较大缺陷构件;必要时可进行交通管制”。桥梁的修复养护是指桥梁出现明显病害或部分丧失服务功能,为恢复技术状况而进行的功能性、结构性修复或定期更换。桥梁的预防养护是指桥梁整体性能良好但有轻微病害,为延缓性能过快衰减、延长使用寿命而预先采取的主动防护工程。从表8可知,该钢主梁的实际病害面积十分微小,并没有削弱构件截面,为防止锈蚀面积的扩展,只需要预防养护即可。这与本文方法计算的技术状况等级所对应的养护对策是一致的。因此,本文方法相比于规范方法,在确定病害的养护对策时能得到更准确的养护策略。

4 结 语

(1)在现行指标体系下,细分后的二级检测指标能够有效解决桥梁检测指标划分过于宽泛的问题。提出的基于定性描述、定量描述和病害图例的分级评定标准,可提高分级评定标准的直观性,有利于桥

梁检测工程师依据病害图例确定病害类型和标度。

(2)提出的基于熵权可拓物元模型的桥梁检测指标综合评定方法能够依据检测指标的实测值客观地分配二级指标的权重,有效减少权重确定的主观性;还能被用于准确计算构件和部件的检测指标标度。

(3)相比于现行桥梁技术状况评定方法,所提方法计算得到的构件检测指标标度可直接为桥梁技术状况评定过程的输入,所计算得到的部件层级的检测指标等级可作为桥梁技术状况评定的有益补充,所提方法的评定结果与实际维修对策更相符。但由于桥梁检测指标的细分还存在一定的主观性,后续还有待进一步研究和完善桥梁二级检测指标。

参考文献:

References:

[1] JTG/T H21—2011,公路桥梁技术状况评定标准[S].
JTG/T H21—2011,Standards for technical condition evaluation of highway bridges[S].

[2] 贺拴海,赵祥模,马建,等.公路桥梁检测及评价技术综述[J].中国公路学报,2017,30(11):63-80.
HE Shuan-hai,ZHAO Xiang-mo,MA Jian,et al. Review of highway bridge inspection and condition assessment[J].China Journal of Highway and Transport,2017,30(11):63-80.

[3] 马新颖.桥梁技术状况评定方法、退化模型及巡检养护管理系统的集成与开发[D].西安:长安大学,2016.
MA Xin-yin. The exploitation and integration on evaluation method of bridge technique condition,degradation model and inspection maintenance system[D]. Xi'an:Chang'an University,2016.

[4] 王可尧.路网级与项目级相结合的桥梁巡检养护系统研究与开发[D].西安:长安大学,2015.
WANG Ke-yao. The research and development of bridge inspection and maintenance system of the combination of project level and network level[D]. Xi'an: Chang'an University,2015.

[5] ASTM D610-08(R2019),Standard practice for evaluating degree of rusting on painted steel surfaces[S].

[6] ISO 4628-3:2016,Paints and varnishes-evaluation of degradation of paint coatings-designation of quantity and size of defects,and of intensity of uniform changes in appearance—Part 3:Assessment of degree of rusting[S].

[7] SSPC-VIS 2:2000,Standard method of evaluating de-

gree of rusting on painted steel surfaces[S].

[8] HADJIGEORGIOU J,SAVGUIRA Y,THORPE S J. Comparative susceptibility to corrosion of coated expandable bolts[J].Rock Mechanics and Rock Engineering,2019,52(8):2665-2680.

[9] TAM C K,STIEMER S F. Development of bridge corrosion cost model for coating maintenance[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,1996,10(2):47-56.

[10] SON H,HWANG N,KIM C,et al. Rapid and automated determination of rusted surface areas of a steel bridge for robotic maintenance systems[J]. Automation in Construction,2014,42:13-24.

[11] GB/T 1766—2008,色漆和清漆 涂层老化的评级方法:[S].
GB/T 1766—2008,Paints and varnishes-rating schemes of degradation of coats[S].

[12] 郑怡,贾金青,沈小俊,等.基于可拓学的桥梁板式橡胶支座安全性评价方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2012,40(9):160-164.
ZHENG Yi,JIA Jin-qing,SHEN Xiao-jun,et al. Safety evaluation method for laminated rubber bearings of bridge based on extension theory[J].Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition),2012,40(9):160-164.

[13] 孔祥兴,夏才初,仇玉良,等.基于可拓学理论的盾构隧道结构健康诊断方法[J].同济大学学报(自然科学版),2011,39(11):1610-1615,1698.
KONG Xiang-xing,XIA Cai-chu,QIU Yu-liang,et al. Health diagnosing method for shield tunnel based on extension theory[J].Journal of Tongji University (Natural Science),2011,39(11):1610-1615,1698.

[14] 王新民,康虔,秦健春,等.层次分析法-可拓学模型在岩质边坡稳定性安全评价中的应用[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(6):2455-2462.
WANG Xin-min,KANG Qian,QIN Jian-chun,et al. Application of AHP-extenics model to safety evaluation of rock slope stability[J].Journal of Central South University (Science and Technology),2013,44(6):2455-2462.

[15] 董治,王欢,董小林,等.基于熵权可拓物元模型的公路项目社会稳定风险评估方法[J].中国公路学报,2018,31(9):191-198.
DONG Zhi,WANG Huan,DONG Xiao-lin,et al. Evaluation method for highway project social stability risk based on entropy weight extension matter-element model[J].China Journal of Highway and Transport,2018,31(9):191-198.

- [16] CONTRERAS-NIETO C, SHAN Y W, LEWIS P, et al. Bridge maintenance prioritization using analytic hierarchy process and fusion tables[J]. *Automation in Construction*, 2019, 101: 99-110.
- [17] LIU Y, ECKERT C M, EARL C. A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements[J]. *Expert Systems with Applications*, 2020, 161: 113738.
- [18] 孙博, 肖汝诚. 基于层次分析-模糊综合评价法的桥梁火灾风险评估体系[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(11): 1619-1625.
SUN Bo, XIAO Ru-cheng. Bridge fire risk assessment system based on analytic hierarchy process-fuzzy comprehensive evaluation method [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2015, 43 (11): 1619-1625.
- [19] 许翔, 黄侨, 任远. 局部变权和云理论在悬索桥综合评估中的应用[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2017, 51(8): 1544-1550.
XU Xiang, HUANG Qiao, REN Yuan. Local variable weight and cloud theory applied in suspension bridge comprehensive assessment [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2017, 51(8): 1544-1550.
- [20] 许翔, 黄侨, 任远, 等. 基于群组 AHP 的悬索桥状态评估指标权重确定[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(3): 122-128.
XU Xiang, HUANG Qiao, REN Yuan, et al. Determination of index weights in suspension bridge condition assessment based on group-AHP[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45(3): 122-128.
- [21] 杨永清, 杨灯, 余取. 基于不确定 AHP 的桥梁加固方案模糊综合评价[J]. *西南交通大学学报*, 2019, 54(2): 219-226, 216.
YANG Yong-qing, YANG Deng, YU Qu. Fuzzy comprehensive evaluation of bridge reinforcement scheme based on uncertain AHP [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(2): 219-226, 216.
- [22] 李涛, 黄亚娥, 向敬, 等. 基于模糊可拓集的跨海系杆拱桥耐久性评估[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(7): 2470-2479.
LI Tao, HUANG Ya-e, XIANG Jing, et al. Durability evaluations of sea-spanning tied-arch bridges based on fuzzy extensive sets[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52 (7): 2470-2479.
- [23] 艾长发, 黄恒伟, RAHMAN A, 等. 基于熵权的 TOPSIS 钢桥面防水黏结材料组合体系优选分析[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(3): 53-63.
AI Chang-fa, HUANG Heng-wei, RAHMAN A, et al. Optimum selection analysis of waterproof bonding materials for steel bridge deck based using entropy weight-TOPSIS[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(3): 53-63.
- [24] XUE Y G, LIU H T, BAI C H, et al. Extension prediction model of soft rock tunnel deformation grade based on entropy weight method and rough set[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 81(1): 1-13.
- [25] LI Q F, YU Y Q. Durability evaluation of concrete bridges based on the theory of matter element extension-entropy weight method-unascertained measure [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 52: 1-13.
- [26] 裴兴旺, 李慧民, 李文龙, 等. 基于熵权物元可拓的桥梁检测作业危险性评价[J]. *中国安全科学学报*, 2019, 29(8): 42-48.
PEI Xing-wang, LI Hui-min, LI Wen-long, et al. Risk assessment of bridge detection operation based on entropy weight and matter-element extension theory [J]. *China Safety Science Journal*, 2019, 29(8): 42-48.
- [27] KIM H S, JEONG Y S, DAO D K, et al. An approach for evaluating tensile strength of painted steel plates from the surface rusting grade[J]. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 2018, 53 (7): 510-516.
- [28] CHEN P H, YANG Y C, CHANG L M. Box-and-ellipse-based ANFIS for bridge coating assessment[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2010, 24 (5): 389-398.
- [29] GB/T 8923.4—2013, 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定[S].
GB/T 8923.4—2013, Surface preparation of steel before application of paints-visual assessment of surface cleanliness[S].