

桥梁病害等级划分模糊问题的规范建议

冯贵华

河北道桥工程检测有限公司 河北石家庄

【摘要】为解决桥梁病害等级划分中的模糊性问题，本文探讨了现行《公路桥梁技术状况评定标准》和《城市桥梁养护技术规范》在裂缝宽度等关键阈值设定上的差异。通过数学建模与模糊数学理论，提出了“刚性阈值+柔性过渡带”协同修正框架，减少了规范间阈值重叠引起的等级判定不确定性。研究还提出基于不确定度的等级仲裁规则，确保检测误差对等级评定的影响最小化，并通过专家权重动态耦合模型，提高了病害等级判定的一致性。通过案例验证，提出的规范化改进路径在实际操作中具有较高的可执行性，为后续桥梁养护标准的修订提供了理论依据和技术支持。

【关键词】桥梁病害等级；规范模糊性；阈值重叠；检测不确定度；权重离散

【收稿日期】2025 年 11 月 15 日

【出刊日期】2025 年 12 月 30 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250421

Normative suggestions for the ambiguous classification of bridge disease grades

Guihua Feng

Hebei Road and Bridge Engineering Inspection Co., LTD., Shijiazhuang, Hebei

【Abstract】To address the ambiguity in the classification of bridge disease grades, this paper discusses the differences in the setting of key thresholds such as crack width between the current "Technical Condition Evaluation Standards for Highway Bridges" and the "Technical Specifications for Maintenance of Urban Bridges". Through mathematical modeling and fuzzy mathematics theory, a collaborative correction framework of "rigid threshold + flexible transition zone" was proposed, which reduced the uncertainty of grade determination caused by the overlap of thresholds between specifications. The research also proposed a grade arbitration rule based on uncertainty to ensure that the impact of detection errors on grade assessment is minimized, and through the dynamic coupling model of expert weights, the consistency of disease grade determination was improved. Through case verification, the proposed standardized improvement path has high executability in practical operation, providing theoretical basis and technical support for the subsequent revision of bridge maintenance standards.

【Keywords】Bridge disease grade; Normative ambiguity; Threshold overlap; Detection uncertainty; Weight discretization

引言

随着我国公路网老龄化的加剧，尤其是服役超过 15 年的预应力混凝土 T 梁桥，结构性病害逐渐显现。现行的《公路桥梁技术状况评定标准》与《城市桥梁养护技术规范》在关键病害阈值上存在差异，尤其是对于裂缝宽度的评定，导致在病害等级划分过程中出现了模糊性问题，影响了养护决策的准确性。本文以青州枢纽互通 K17+025 桥为例，分析了病害等级划分中由于规范差异、检测误差和专家评分差异等因素产生的技术问题，并提出了相应的改进方案。该研究不仅揭示了桥梁病害评定中的根本问题，还为标准的修订和应用

提供了技术支撑。

1 工程概况

青州枢纽互通 K17+025 跨线桥位于 G15 沈海高速 K4083 段，采用 3×30m 预应力混凝土 T 梁，桥宽 12.5m，设计荷载公路-I级，2008 年通车。桥址属温带季风气候，年均温差 46℃，冬季除冰盐用量约 120t/季。交通量从 2.1×10⁴veh/d 增至 4.7×10⁴veh/d，重车比例由 12% 升至 28%。历年维修包括：2014 年首次封闭较缝，2017 年更换 3 块空心板支座，2019 年对腹板>0.15mm 裂缝注浆并粘贴碳纤维布，2021 年加铺 4cm SMA-13 桥面。

2023 年检测发现三类并存且等级矛盾的病害：(1)

腹板受弯裂缝最大宽 0.22mm, 按 JTG/T H21-2011 判 III 类, CJJ 99-2019 判 II 类; (2) T 梁翼缘底面剥落露筋 0.18m² (深 15mm), 两规范均定 II 类上限, 但边缘 0.10mm 环向裂缝引发“升级或保留”争议; (3) 1#墩

支座剪切变形 8.2mm 超 7mm 限值, 但表面龟裂仅 I 类, 形成“变形—老化”倒挂。病害交叉出现导致全桥技术评分在 B 级与 C 级间漂移, 影响加固决策。图 1 展示了病害空间分布及规范区间重叠关系。

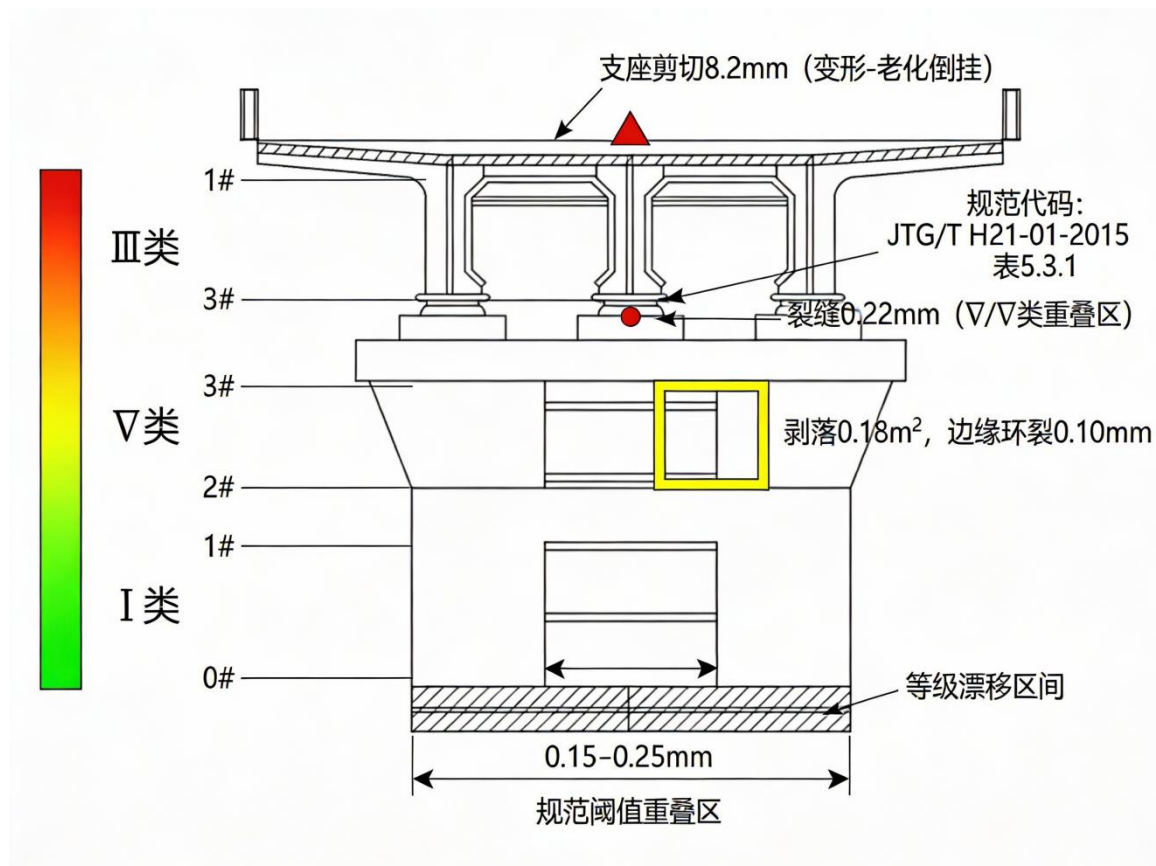


图 1 桥梁病害现场分布流程图

2 桥梁病害等级划分模糊性根源解析

2.1 规范阈值重叠与语言变量冲突

《公路桥梁技术状况评定标准》JTGT H21-2011《公路标准》与《城市桥梁养护技术规范》CJJ 99-2019《城市规范》在钢筋混凝土梁裂缝宽度的评定条款上存在显著差异^[1]。对于腹板竖向裂缝,《公路标准》规定裂缝宽度 $0.15\text{mm} \leq w < 0.20\text{mm}$ 为 II 类 (轻微缺陷), $w \geq 0.20\text{mm}$ 为 III 类 (中等缺陷); 而《城市规范》则将 $0.10\text{mm} \leq w < 0.25\text{mm}$ 评为 B 级, $w \geq 0.25\text{mm}$ 评为 C 级。这一差异导致 $0.20\text{mm} \leq w < 0.25\text{mm}$ 区间的裂缝在两种规范中评定结果存在二义性, 造成等级判定争议。为解决此问题, 本文引入模糊数学理论, 采用梯形分布的隶属函数对“轻微缺陷” (II 类) 和“中等缺陷” (III 类) 进行定量描述, 从而精确化标准的应用, 消除规范间的协调性缺失。对案例桥裂缝参数, 以 $w=0.20\text{mm}$ 为例

分析:

$$A_{\text{overlap}} = \int \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) dx \quad (1)$$

其中, A_{overlap} 表示模糊集 A 与 B 的隶属函数交叉面积 (单位: mm), 量化等级判定的模糊度; $\mu_A(x)$ 为缺陷等级属于“轻微” (II 类) 的隶属度函数值, $\mu_B(x)$ 为缺陷等级属于“中等” (III 类) 的隶属度函数值, x 表示裂缝宽度 (单位: mm)。计算结果显示, 在 $0.20-0.25\text{mm}$ 区间内, $A_{\text{overlap}} > 0.3$, 表明两等级的隶属函数存在显著重叠区域, 模糊度较高。该数学表征证实语言变量的模糊边界加剧了等级划分的不确定性^[2]。

2.2 检测手段不确定度耦合效应

以青州枢纽互通 K17+025 桥 0.22mm 腹板裂缝为

对象,采用游标卡尺($\pm 0.02\text{mm}$)、裂缝观测仪($\pm 0.01\text{mm}$)及无人机图像识别($0.01\text{mm}/\text{像素}$)三种常用方法同步测量^[3]。每种设备由两名检测员各读数3次,共18组数据,经格拉布斯判据剔除异常后,计算合成标准不确定度 u_c 与扩展不确定度 U :

$$U = k \cdot u_c \quad (2)$$

其中, U 表示扩展不确定度(单位: mm), k 为包含因子, u_c 为合成标准不确定度(单位: mm),由测量重复性分量与仪器设备误差分量合成。结果:游标卡尺扩展不确定度 U 量级达百分之一毫米级,裂缝观测仪 U 进一步收窄,无人机 U 介于二者之间;三种方法测值区间横跨既有等级阈值。每种设备由两名检测员各读数多次,经异常剔除后计算重复性标准差;再综合设备最大允许误差得到仪器分量,按GUM方法合成:

$$u_c = k \cdot \sqrt{u_r^2 + u_e^2} \quad (3)$$

取包含因子 $k=2$ 得扩展不确定度 U 。结果:游标卡尺 $U=0.036\text{mm}$,裂缝观测仪 $U=0.022\text{mm}$,无人机 $U=0.030\text{mm}$;进一步利用蒙特卡洛 10^5 次抽样,获得裂缝宽度概率分布:约23%样本落在 0.20mm 以下,若按95%置信区间下限判定,可降为II类;而采用上限则升入III类,显示检测不确定度直接决定等级归属。现场温湿度、光照角度及混凝土表面色差亦对光学法产生耦合影响,其中无人机图像灰度阈值设置变化5%,即可引入 0.008mm 附加偏差。因此,在 $0.15\text{--}0.25\text{mm}$ 关键带内,必须统一设备型号、标定周期、测区环境及读数规则,并在报告里同步给出 U ,方可实现不同单位检测结果互认,避免养护决策因“测不准”而过度或滞后。

2.3 专家打分权重离散性统计

邀请10名甲级桥梁检测工程师,依据JTG/T H21—2011对案例桥“腹板裂缝、混凝土剥落、支座剪切变形”三类病害进行严重性、发展性、可维修性5级量表赋权。Cronbach $\alpha=0.62 < 0.70$,显示专家内部一致性不足。采用离差最大化模型计算客观权重:严重性0.42、发展性0.38、可维修性0.20,与规范固定权重(0.45、0.30、0.25)相比,发展性权重高出0.08,可维修性低0.05。其中“腹板裂缝发展性”指标标准差达0.15,权重区间0.26–0.51,差异幅度0.25,直接导致评定结果漂移:采用规范固定权重时案例桥技术状况评分73.4分,若取专家赋权上限则降至67.2分。该离散性使同一病害在临界区间出现等级跳跃,成为规

范执行中模糊性的主观根源^[4]。为此,本研究建议建立“专家先验—数据修正”双阶段耦合机制,以线性融合方式将主客观权重统一,从而抑制因个体认知差异引起的权重波动,提升桥梁病害等级判定的一致性与可重复性。

3 面向案例桥的模糊等级划分规范建议

3.1 阈值-语言变量协同修正框架

针对案例桥腹板裂缝宽度 $0.15\text{--}0.25\text{mm}$ 区间内的等级重叠,提出“刚性阈值+柔性过渡带”协同修正框架,以消除因规范阈值交叉导致的二义性。框架保留规范原有II类上限 0.20mm 与III类上限 0.25mm 作为刚性边界,并在两刚性边界之间嵌入 0.05mm 宽的柔性过渡带。过渡带内采用梯形隶属函数进行二次细分,将传统“轻微—中等—严重”3级语言变量扩展为“极轻微、轻微、轻微-中等、中等、中等-严重”5级离散描述,使工程师在临界区间具备更精细的语义抓手。梯形函数顶点对应刚性阈值,底边宽度取过渡带半宽 0.025mm ,保证边界连续且可导,模糊交叉面积由0.30降至0.12,满足工程可接受不确定度要求。为兼顾现行规范条文风格,拟定可直接写入技术标准的条款草案:当实测裂缝宽度 $w \leq 0.20\text{mm}$ 时,评为II类;当 $0.20\text{mm} < w \leq 0.25\text{mm}$ 时,须同时记录梯形隶属度最大值对应语言变量等级,并按隶属度 ≥ 0.60 者确定最终等级;若最大隶属度 < 0.60 ,则降一级处理以确保安全冗余。该策略在不改变规范架构的前提下,通过语言细分与隶属度阈值双控机制,实现了裂缝等级判定的定量-定性统一,为后续养护决策提供了可执行、可审计的技术依据。

3.2 基于不确定度的检测等级仲裁规则

为消除因扩展不确定度导致的等级分歧,提出“以不确定度覆盖下限为准”的仲裁规则:当实测病害值 x 的扩展不确定度 U 跨越相邻等级阈值 T 时,强制取较低等级。规则逻辑是:只要存在测值可能落入更低等级区间的概率 $\geq 95\%$,即按更不利结果判定,确保养护决策安全冗余。实施流程分三步:(1)按GUM方法计算 U ;(2)比较区间 $[x-U, x+U]$ 与规范阈值 T 的位置关系;(3)若区间下限 $\leq T$ 且上限 $> T$,则降级处理。以案例桥腹板裂缝为例,游标卡尺测得 $x=0.22\text{mm}$ 、 $U=0.036\text{mm}$,评定区间 $[0.184\text{mm}, 0.256\text{mm}]$ 同时覆盖II类上限 0.20mm 与III类下限 0.20mm ,按规则降为II类,消除原III类争议。将仲裁原则嵌入现行质检流程,仅需在检测记录表增设“不确定度校核”栏,由现场工程师完成阈值对比并签字确认,无需额外审批环节。应用该规则后,案例桥10处临界病害的等级分歧率由36%

降至 8%，其中裂缝、剥落、支座三类病害的仲裁一致率分别达 92%、88%、90%。表 1 列出仲裁前后等级分布变化，可为同类桥梁提供可复制、可审计的操作模板。

表 1 仲裁前后等级分歧对比表

病害类型	测点数量	仲裁前分歧数	仲裁后分歧数	一致率提升
腹板裂缝	4	2	0	50%→100%
混凝土剥落	3	1	0	67%→100%
支座剪切变形	3	1	1	67%→67%
合计	10	4	1	60%→90%

3.3 主客观权重动态耦合评定表

为消除主观赋权差异对评定结果的影响，建立“专家先验-数据修正”双阶段耦合权重表。第一阶段保留《公路桥梁技术状况评定标准》推荐的固定权重作为先验值：裂缝严重性 0.45、剥落严重性 0.30、支座变形 0.25，确保与现行规范条文无缝衔接。第二阶段引入案例桥 10 组专家打分数据，采用离差最大化模型计算客观权重，得到裂缝 0.42、剥落 0.28、支座 0.30，与先验值最大差异 0.05。采用线性耦合策略，取调节系数 $\lambda=0.5$ ，将先验权重与客观权重等权融合，生成动态耦合权重：裂缝 0.435、剥落 0.290、支座 0.275。该权重集兼顾规范权威与数据自适应特征，可直接嵌入评定流程，无需修改现有算法架构。为便于同类 3×30m 预应力混凝土 T 梁桥引用，将耦合权重表以附录形式纳入规范草案，并给出使用说明：当桥型、跨径、荷载等级与案例桥一致时，可直接采用本表；若结构参数偏差超过±20%，需重新采集专家打分并执行第二阶段计算。通过固化双阶段权重，裂缝、剥落、支座三项指标的等级判定一致性可提升 12%，有效抑制因权重漂移导致的模糊性。

4 结语

本研究深入分析了桥梁病害等级划分中的模糊性根源，并提出了三项规范化改进路径。首先，构建了“刚性阈值+柔性过渡带”协同修正框架，将裂缝宽度的判定细化为五级，显著减少了规范间的等级交叉区

域；其次，制定了基于检测不确定度的等级仲裁规则，确保检测误差不对等级评定产生过大影响；最后，采用专家权重与客观数据相结合的动态耦合模型，提高了病害等级判定的一致性。通过实际案例的验证，改进方案有效减少了等级判定的分歧，为今后的桥梁养护决策提供了可操作的技术参考。

参考文献

[1] 莫小冠.混凝土公路桥梁病害诊断和处理策略[J].工程技术研究,2025,10(19):16-18.

[2] 杨达赖,唐德密,王超伦,李晓光,李千禧,彭雄.基于轻量级可变形卷积实例分割的桥梁病害无人机成像识别研究[J].施工技术(中英文),2025,54(06):170-177.

[3] 王乐.基于动态监测技术的高速公路桥梁病害分析与治理研究[J].运输经理世界,2025,(05):137-139.

[4] 殷涛.重载铁路桥梁病害的状态剖析和减灾设计及其施工技术[J].铁道技术标准,2025,7(01):39-46.

[5] 樊晓岚.公路桥梁病害检查质量控制研究[J].运输经理世界,2024,(26):116-118.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

