

基于工程易损性理念的线路健康状态评估及养护策略

——以沪宁城际铁路为例

张 菁

中南林业科技大学 湖南长沙

【摘要】经观察发现，当下高速铁路在评价标准判定上存在一定的不合理，具体表现为仅有“维修”或“不维修”两种选择，这种“一刀切”评定方式对于目标多元化的高速铁路来说存在明显缺陷。即使有研究尝试将 TQI 与沉降观测相结合等方法，也可能产生“TQI 超限但沉降未超限”或“TQI 未超限但沉降超限”等评判结果不收敛的问题，对指导运营限速调整及养护维修作用有限。因此本文将沪宁城际铁路为例，通过引入工程易损性理念，以期可以实现考虑结构损伤、功能损失及线路维护等方面的综合评价，为线路健康状态的正确评估及实际养护维修方案提供参考建议。

【关键词】工程易损性理念；健康状态评估；线路养护

【收稿日期】2023 年 5 月 10 日 **【出刊日期】**2023 年 6 月 23 日 **【DOI】**10.12208/j.ace.20231008

Health status assessment and maintenance strategy of transmission lines based on the concept of engineering vulnerability——Take Shanghai - Nanjing intercity railway as an example

Qiang Zhang

Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan

【Abstract】 Through observation, it has been found that there are certain irrationality in the evaluation criteria of high-speed railways at present, which is manifested as only having two options: "maintenance" or "no maintenance". This "one size fits all" evaluation method has obvious defects for high-speed railways with diverse objectives. Even if research attempts to combine TQI with settlement observation and other methods, there may be issues with non convergence of evaluation results such as "TQI exceeding limit but settlement not exceeding limit" or "TQI not exceeding limit but settlement exceeding limit", which has limited guidance on speed limit adjustment and maintenance and repair. Therefore, this paper will take the Shanghai - Nanjing intercity railway as an example, by introducing the concept of engineering vulnerability, in order to achieve a comprehensive evaluation considering structural damage, functional loss and line maintenance, and provide suggestions for reference for the correct assessment of line health status and actual maintenance and repair programs.

【Keywords】 Concept of engineering vulnerability; Health status assessment; Line maintenance

通过对沪宁城际高速铁路进行走访观察发现，该线路大量工程区段存在 TQI 超限但沉降未超限或 TQI 未超限但沉降超限的情况，因此在对其进行健康状态评估的过程中，若单凭轨道几何平顺性或路基下部结构沉降变形的状态加以预测，难免会存在对于铁路健康状态的误判问题。

究其原因，是因为我国目前指导养护维修策略，主要是依赖轨检车数据 TQI 和沉降数据的超限情

况，而我国高铁的控制标准为 $TQI < 5$ 和沉降 $< 15\text{mm}$ 。由于 TQI 本质是轨道几何的标准差，与病害严重程度对应关系不明确，作为病害判据存在缺陷；沉降限值的制定依据，是轨道板与道床为整体结构，不存在调整空间，仅允许扣件 15mm 调整范围，然而路基沉降与下部结构变形，车载、轮轨长期作用等有复杂关系，且区域沉降问题用单纯的沉降监测方法无法直接体现，故沉降限值也不适于作为路基病

害的直接判据。所以仅是基于 TQI 数值进行健康状态评估，若判断的结果比实际结果理想，则可能会对安全造成隐患；若判断的结果比实际情况严重，则可能会对高速铁路运行的速度和效率产生影响。因此探讨出一个能综合两者判定结果的方法，提高判定的准确性，就显得尤为重要。基于此，本文结合现有指标的规律和关联度进行综合分析，基于工程易损性理念尝试性论述线路健康状态评估及养护策略，旨在提高判别的准确性。

1 工程易损性理念在城际铁路的适用性分析

工程易损性理念作为工程地质学的一个学术概念，是用来定量描述承灾体潜在的损失程度的评价标准，通过基于地质灾害的危险性分析，对不同地段的地质动力及对应承灾体的毁损程度展开分析，由此直观的反映出承灾体潜在损失程度的可能指标。由此可见，易损性是：承灾体（单个或整体）在地质灾害（潜在的、特定的地质灾害）中最大可能损失值占其灾前重估总值的比重或百分比。

本文以沪宁城际铁路为例，将以该城际铁路线路的路基为承灾体，以路基类型、建造材料、地基承载力、沉降维护策略等因素作为潜在的、特定的灾害因素，由此探讨铁线路健康状态在以上各类因素的综合影响下，对其最大可能损失值进行评估。在实际应用研究中，将对于受多项因素影响的高速铁路，需要对其养护维修方式和等级进行区块划分，不仅十分合理的抽象掉了地质动力现象的多变性，

做到在危险来临前提前对铁路灾害进行及时的预判，同时在危险前期也能借助该理论对铁路进行有效的养护并减缓其恶化率，针对问题较严重的地方能够及时处理，并基于工程易损性理念得出的大概率期望值，由此提出与之相对应的养护策略，旨在降低出现事故的可能性，做到在既能保证铁路安全运营的同时，又可以保证其速度维系在一个不大幅度的内加以调控。

2 线路健康状态组合赋权评估方法的确定

本研究以沪宁城际高速铁路为工程背景，对比 TQI 数据和沉降数据，甄别 TQI 超限而沉降未超限以及 TQI 未超限而沉降超限的情况，由于两项判定指标无法得出一致判定结果并为后续铁路养护维修方案提供准确建议，于是本研究在主观分析上，采取的是层次分析法；在客观研究上，采取的是 CRITIC 法；在评价模型上，选择的是未确知测度模型，以期为现有研究当中单标准评判、评价指标单一的问题的改善提供理论依据和参考。

2.1 层次分析法的确定

层次分析法（AHP）是将与决策方案相关的影响因素分成目标层、准则层、方案层，并在此基础上进行定性研究与定量研究相结合的综合分析，最终确定决策方案。层次分析法（AHP）是将决策结果作为一个整体系统，通过层次分析、比较分析和综合判断等步骤，最终得出决策结果。本文经整理后，得出如表 1 所示的影响因素。

表 1 基于层次分析法的线路健康状态评估

一级指标	二级指标	三级指标
工程易损性铁路健康状态	工程地质	黄土湿陷、不稳定斜坡、翻浆冒泥、下沉外挤、滑坡、崩塌、落石
	人类活动	临近基坑施工、破坏临近山体环境、紧急补修质量
	水文气象	季节性水流冲刷、路基冻害、风化带、泥页岩软弱
	路基结构	基体沉降、边坡滑塌、边沟排水、附属设施
	使用状态	加开临时列车、列车承载力、列车使用频率、运营平顺检测
	养护策略	养护观念、养护技术、养护方法、养护设备

2.2 CRITIC 法的确定

本文选取的 CRITIC 法，是基于评价指标的对比强度和指标之间冲突性来衡量指标的客观权重。据此，本文假设在沪宁城际铁路路段上有 n 个线路健康状态评估样本，p 项线路健康状态评估指标，由此得到数据矩阵：

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{pmatrix}$$

采取正向化或逆向化处理，在正向指标上，若所用指标值越大，说明其衡量指标越理想，其公式

如下：

$$X'_{ij} = \frac{X_j - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

与之相反的是，在逆向指标上，若所用指标值越小，则说明其衡量越接近预期，其公式如下：

$$X'_{ij} = \frac{X_{\max} - X_j}{X_{\max} - X_{\min}}$$

2.3 未确知测度模型的构建

本文为了可以让 CRITIC 法与层次分析法进行有机的结合，在构建未确知测度模型的过程中，视目标层为一级指标，准则层为二级指标，指标曾为三级指标，对沪宁城际铁路各段路基 X 设 x_1, x_2, \dots, x_n 为线路健康状态评估指标，将其记为：

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

针对沪宁城际铁路各线路健康状态 x_1 设 m 个评估指标等级，记为：

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$$

将 r_{ik} 记为 x_1 隶属 y_k 的程度，得出集合 R 在评估合集 Y 的未确知测度集：

$$B = WR = (w_1, w_2, \dots, w_n) \begin{pmatrix} r_{11} & \dots & r_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \dots & r_{nm} \end{pmatrix}$$

由此，本文形成了沪宁城际铁路各线路健康状

态的综合未确知测度评估矩阵 B，而其中的 W 则为指标权重向量。

3 线路健康状态评估结果分析

本文根据组合赋权法确定各自关键指标的权重值，为下一步运用评价模型计算提供数据支撑。同时，考虑到上述组合赋权不足以有效给高速铁路养护维修以及运营策略的调整决策做出一个明确的指导，引入工程易损性理念，因此本文也有考虑可以实现考虑结构损伤、功能损失及线路维护等方面的综合评价，为线路健康状态的正确评估及实际养护维修方案提供参考建议。最终，本文将构建的未确知测度模型与单纯仅靠 TQI 进行相关健康状态评估的结果进行对比，对沪宁城际铁路自西向东共计 21 个车站的线路展开统计，按照李克特五级量表由低至高的“恶劣”、“较差”、“中等”、“良好”、“优异”进行比照，整理出如下表 2 所示结果。

由表 2 所示，无锡新区站和仙林站 2 站，仅凭 TQI 对其线路健康状态进行评估，要优于组合赋权法；在其他个路线中，组合赋权法与仅 TQI 进行健康状态评估，其评估结果相当的有 5 站，组合赋权法优于仅 TQI 的健康状态评估结果有 13 站，且在整体上通过李克特五级评分进行评价，组合赋权法也要显著优于仅 TQI 进行健康状态评估。由此可见，本文在研究成果上，为现有研究当中单标准评判、评价指标单一的问题起到了一定的改善作用，为当下的学术研究也提供了一个可供参考的理论依据。

表 2 基于工程易损性理念的线路健康状态评估对比

线路	组合赋权法	仅 TQI	线路	组合赋权法	仅 TQI
上海西站	优异	中等	锡站	较差	较差
南翔北站	中等	较差	惠山站	良好	良好
安亭北站	中等	恶劣	戚墅堰站	中等	恶劣
花桥站	良好	中等	常州站	中等	中等
昆山南站	较差	较差	丹阳站	良好	恶劣
阳澄湖站	中等	恶劣	丹徒站	较差	较差
苏州园区站	良好	中等	镇江站	中等	中等
苏州站	中等	较差	宝华山站	良好	恶劣
苏州新区站	良好	恶劣	仙林站	恶劣	较差
无锡新区站	较差	良好	南京站	优异	良好

4 结论

本文以沪宁城际高速铁路为例,经分析发现该路线大量工程区段存在 TQI 超限但沉降未超限或 TQI 未超限但沉降超限的情况,因此若单凭轨道几何平顺性或路基下部结构沉降变形的状态来判定高速铁路线下健康状况,难免会存在对于铁路健康状态的误判问题。因此,本文在主观分析上引入了层次分析法,在客观分析上采取了 CRITIC 法,并基于工程易损性理论对各级指标进行了细分,最终构建了一个未确知测度模型。最终,本文通过该组合赋权法与仅依靠 TQI 对线路健康状态评估进行对比,得出以下结论:

(1) 在研究成果创新上,本文通过跨学科的研究手段,采取了多元化的研究方法,基于工程易损性理念尝试性提出了将 TQI 与沉降观测相结合的思路,并通过对比分析得出本文提出的组合赋权法,在实际应用中可以有效改善因“TQI 超限但沉降未超限”或“TQI 未超限但沉降超限”等评判结果不收敛的问题,故而对指导运营限速调整及养护维修作用有限。

(2) 在理论研究改进上,本文认为采取组合赋权法在实际应用中具有十分显著的优势,因此本文建议在后续的线路健康状态评估及养护进程中,需要摒弃传统的单标准评判、评价指标单一的问题,通过对其不断优化及完善,综合两者判定结果,由此不断提高铁路的线路健康状态判定准确性。

(3) 在应用实践改进上,为了有效应对受多项因素而影响到高速铁路的健康问题,作为技术人员平时也需要对其养护维修方式和等级进行区块划分,做到在危险来临前提前预判,在危险前期能有效养护并减缓其恶化率,针对问题较严重的地方能够及时处理,降低出现事故的可能性,做到在既能

保证安全的同时保证速度的不大幅度调控。比如通过不断提高基床表层强度,或是采用无纺土工纤维渗滤层来提升翻浆冒泥、下沉外挤的防治工作;通过优化抗滑挡墙,加强抗滑桩的 engineered 工艺,设计结构轻便,节省材料的锚杆挡墙做好路基滑坡的防范;把握好施工区域的水流的特性与规律,及可能破坏堤岸或者路基的性质及严重性;修建抗冻除尘能力强的地表排水系统,或者用泥炭及冷压泥炭砖对路基做保温材料,延长路基使用寿命等,由此不断丰富线路健康状态的养护策略。

参考文献

- [1] 孙敏捷.地铁隧道结构健康度多层次评价方法及工程应用分析[J].城市轨道交通研究,2021,24(1):1-6.
- [2] 李霞.土木工程结构安全性评估,健康监测及诊断述评[J].中国科技期刊数据库工业 A,2021(12):2.
- [3] 陈舒阳,曹禄来,姚永胜.基于工程易损性灾变论的高铁路基服役状态评价[J].铁道科学与工程学报,2020,17(7):10.
- [4] 毛嘉玲,杨洁,邵智娟,等.基于受体易损性评估的区域环境风险应急管理[J].苏州科技大学学报:自然科学版,2022(2): 39.
- [5] 杨欣薇,朱松青,杨柳,等.城轨门系统承载传动机构健康状态评估研究[J].南京工程学院学报(自然科学版),2021,19(2): 45-53.

版权声明: ©2023 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/>



OPEN ACCESS