

考虑部件相关性的斜拉桥状态评估

伊西艳¹, 汪 炳², 刘小玲^{1*}

(1. 宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315832; 2. 宁波大学 土木与环境工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为提高斜拉桥评估可靠性, 开展考虑部件相关性的斜拉桥状态评估研究. 首先建立斜拉桥系统各部件故障传递有向图, 基于 Pagerank 算法分析各部件相关性, 得到部件的影响度和被影响度; 其次, 针对人工检查指标, 建立分段线性扣分评定标准, 针对健康监测指标, 根据力学模型设定主梁挠度和索力的评定标准; 最后, 考虑部件单独产生的故障率和其他部件故障被影响度, 提出一种融合部件相关性的斜拉桥状态评估方法. 以某特大跨径钢结构斜拉桥为例, 用改进方法和相关评定规范进行评定对比. 结果表明, 主梁线形、索力和索塔线形的被影响度和影响度都较大, 是桥梁健康监测的重要指标; 主梁外观检查和支座被影响度大、影响度小, 是故障表象部件, 在预防性养护时要着重关注; 排水系统和机电设施被影响度小、影响度大, 是故障源部件, 需持续保持良好状态. 本文建立的评估方法指标全面, 考虑了部件的相关性, 因此评估结果更加可靠, 可为桥梁养护决策提供依据.

关键词: 斜拉桥; 状态评估; 相关性; Pagerank 算法

中图分类号: U446.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2022) 02-0043-08

斜拉桥是现代桥梁的一种重要形式, 目前我国已成为拥有斜拉桥最多的国家^[1]. 然而, 随着斜拉桥使用年限的增加, 环境侵蚀和反复荷载作用对材料和部件易造成老化、损伤等问题, 甚至引发坍塌等严重的桥梁事故^[2]. 因此, 对斜拉桥进行及时、准确的评估和维修养护至关重要.

目前, 工程上对斜拉桥的状态评估往往采用规范的方法^[3], 该方法基于层次分析法确定, 具有指标明确、操作简单的优点, 因而被广泛应用. 但该方法存在主观成分大、未考虑指标之间相关性问题^[4]. 基于此, 有学者提出了模糊层次分析法^[5]、神经网络法^[6]、可靠度理论评估方法^[7]来弱化主观偏差; 有学者采用证据推理理论^[8]来解释人工检查与健康监测信息间的冗余或矛盾信息. 而事实上, 斜拉桥为高次超静定组合结构, 结构受力复杂^[9], 各部件之间具有较强的相关性, 例如拉索损伤会对斜拉桥索力及主梁挠度产生影响^[10]; 斜拉桥中的索力控制斜拉桥内力分布及桥形变化^[11], 辅助

墩对斜拉桥的结构受力会产生影响^[12]等. 但目前学者们所提的评估方法并未考虑各部件之间复杂的相关性对斜拉桥整体结构的影响, 同时, 各部件之间的相互影响关系尚不明确.

关于部件相关性目前在工程故障诊断领域研究已较为深入, 通常采用 Pagerank 算法^[13-14], 该算法具有原理简单、计算量少的特点, 可以实现各部件的重要性排序.

鉴于此, 本文在规范评估方法的基础上, 基于 Pagerank 算法考虑斜拉桥各部件之间的相关性, 得到各指标之间的影响度和被影响度, 进而提出改进的斜拉桥状态评估方法, 并以某斜拉桥为例, 进行评估验证.

1 基于 Pagerank 算法的部件相关性

Pagerank 算法用于计算网页中从其他页面跳转到此页面的概率, 其主要原理是如果页面 A 能够链接到页面 B, 那么将认为页面 A 传递给页面 B

收稿日期: 2021-10-11.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51808301); 浙江省自然科学基金(LQ19E080006); 跨海大桥安全保障与智能运行学科创新引智基地(D21013).

第一作者: 伊西艳(1997-), 女, 山东临沂人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 大跨径桥梁的养护与评估研究. E-mail: yixiyan111@163.com

*通信作者: 刘小玲(1988-), 女, 江苏连云港人, 副教授, 主要研究方向: 大跨径桥梁的养护与评估研究. E-mail: liuxiaoling@nbu.edu.cn

一个重要度值(PR 值), 且会根据链接关系一直迭代计算, 直至平稳. 基于此原理, 斜拉桥各部件之间的相互影响关系便可以看成互联网中页面的相互链接关系, 故障沿着关系路径进行传递, 通过对斜拉桥各部件间故障退化相关度分析来为后续评分提供可靠数据.

基于上述思想, 建立斜拉桥各部件故障传递有向图, 根据 Pagerank 算法可以通过概率转移矩阵的迭代计算来求解部件间相关度^[15].

$$W^{x+1} = \frac{E \cdot (1-d)}{n} + d \cdot [C']^T \cdot W^x, \quad (1)$$

式中: E 为元素均为 1 的 $n \times 1$ 阶矩阵; n 为系统部件个数; d 为阻尼因子, 参考相关文献^[15]取为 0.3; C' 为等概率转移矩阵; 各个节点的初始 PR 值为 W^1 ; W^{x+1} 表示第 $x+1$ 次迭代所得的各个节点的重要度所组成的 $n \times 1$ 阶矩阵. 图 1 给出了算法实现的流程.

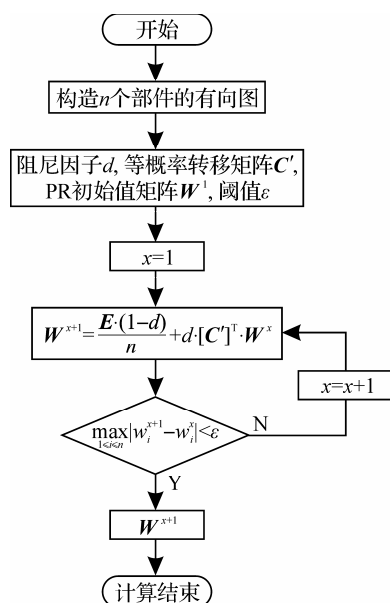


图1 Pagerank 算法实现流程

斜拉桥部件间相关性分为被影响度 C_K 与影响度 C_I , C_K 表征了某部件受其他部件故障传递影响而出现故障的概率程度, C_I 代表了某部件对其他部件产生影响的概率. 借助 Pagerank 算法, 参考式(1), 得到 C_K 和 C_I 的迭代计算公式:

$$C_K^{x+1} = \frac{E \cdot (1-d)}{n} + d \cdot [C']^T \cdot C_K^x, \quad (2)$$

$$C_I^{x+1} = \frac{E \cdot (1-d)}{n} + d \cdot [C']^T \cdot C_I^x, \quad (3)$$

本文使用幂法来求解 C_K 、 C_I 值. 一般来讲, PR 初始值并不会影响最终 PR 值的收敛性和最终的排序, 所以一般取 C_K 、 C_I 初值为 $n \times 1$ 阶元素全为 1 的矩阵.

2 斜拉桥状态评估方法

基于层次分析法的斜拉桥状态评估需确定指标体系、指标权重和指标评定标准, 然后考虑综合评估.

2.1 斜拉桥评估指标体系

斜拉桥评估指标体系中一般含有一级指标和二级指标. 总结前人关于这两个指标的研究成果, 最常用的一级指标按照主要部件划分得出. 本文也采用这种方式, 一级指标分别为斜拉索系统、主梁、索塔、下部结构、附属设施.

二级指标因桥梁部件材料、评估的关注点不同导致划分结果相差较大. 本文的研究对象为钢结构斜拉桥, 融合人工检查和健康监测数据, 参考文献^[16]的研究结果, 得到指标体系和对应权重, 具体如图 2 所示.

2.2 关键指标评定标准

在《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21-2011)^[3](以下简称《评定标准》)中, 病害的评定标准分成 3 级到 5 级的扣分方式, 主观性较大.

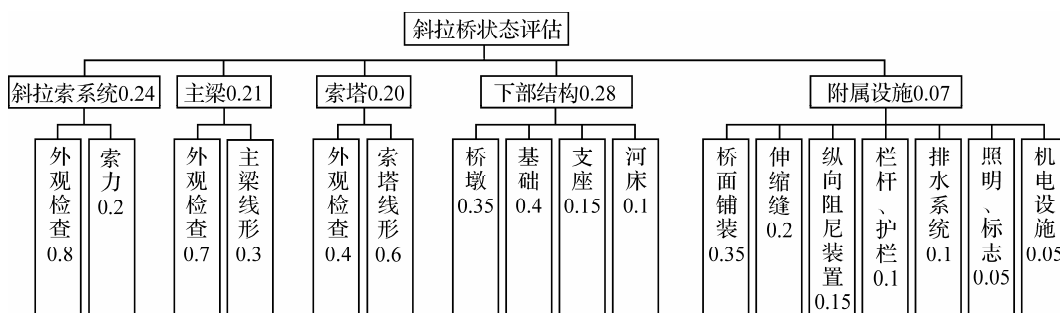


图2 斜拉桥状态评估指标体系

为能够更客观地得到病害的扣分值, 本文采用以规范中的病害严重程度为横轴, 以相应评定标度为纵轴的分段线性扣分模式. 以斜拉索护套漆膜损坏这一病害指标为例, 图3给出了其评定标准.

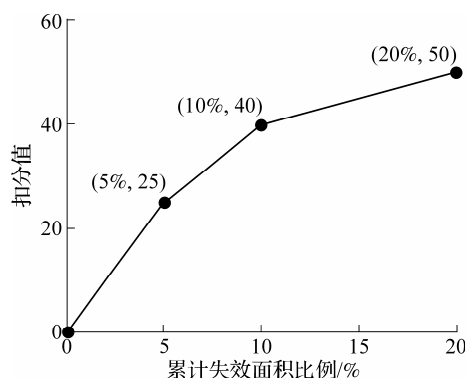


图3 斜拉索护套漆膜损坏的评定标准

而新引入的健康监测指标需建立新的评定标准. 以索力和挠度为例, 它们是斜拉桥安全评估中的重要指标, 本文取最长索索力和主梁跨中挠度作为评估指标. 对于索力, 在《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21-2011)^[17]中仅规定索力变化率超过10%时需要进一步检查. 参考《公路斜拉桥设计规范》(JTG/T 3365-01-2020)^[18]中汽车荷载引起的钢梁主梁竖向挠度限值, 即最大挠度极限为斜拉桥钢梁跨度(l)的 $1/400$, 以钢梁主梁竖向挠度值 f 满足 $f > l/400$ 为第5类等级标准, 根据斜拉桥受力分析, 可以得到当主梁挠度值 f 满足 $f > l/400$ 时, 相对应的最长索索力变化率为30%左右. 因此以索力变化率超过30%时扣100分为标准, 并按照一定的梯度建立最长索索力变化率的评定标准, 如图4所示. 根据实际结构力学模型计算, 得到相应索力变化率对应的挠度值, 从而得到挠度的评定标准, 具体如图5所示.

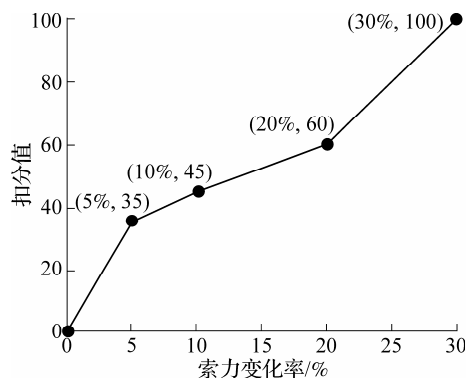


图4 索力变化率的评定标准

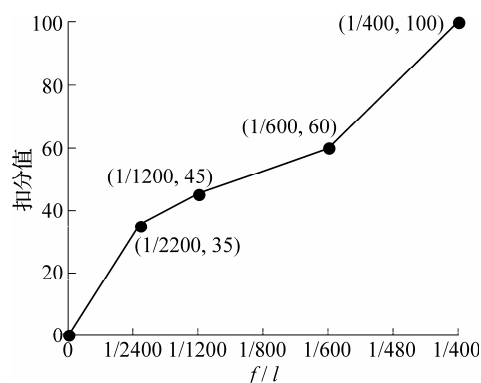


图5 主梁挠度的评定标准

2.3 评估方法

在整个斜拉桥系统中, 因各部件间具有相关性, 斜拉桥各部件的综合故障率包括两个方面, 一方面是各部件本身出现故障而产生的故障率, 另一方面是由于其他部件的故障相关性而产生的故障率. 那么与部件单独故障情况相比, 斜拉桥整体的故障率受部件相关性影响而会增大, 因此所得到的评分结果就会降低. 参考叶鹏^[19]提出的设备部件独立故障率计算方法, 将此引入到斜拉桥状态评估中. 由此考虑相关性的部件评分结果可表示为部件单独故障评分结果减去其他部件对其产生的故障影响, 具体如下所述.

假设各部件 V_i 的考虑相关性得分为 S_{ii} , 单独故障得分结果为 S_i , 将除部件 V_i 外的其他部件对 V_i 造成的故障率影响记为 $O_i \times S_{i-}$, 其中 O_i 即部件 V_i 受到其他部件故障影响的概率, 即相对应的 C_{Ki} 值, S_{i-} 为除部件 V_i 外, 对其有相关性的部件扣分值. 最终可以得到如下表达式:

$$S_{ii} = S_i - O_i \times S_{i-} \quad (4)$$

得到每个部件的得分 S_{ii} 之后, 按照相应的权重分配得到最终的一级指标及桥梁整体得分.

3 评估示例

3.1 桥梁背景信息

以江苏省某特大跨径双塔双索面钢结构斜拉桥为例, 采用考虑部件相关性评估方法对其进行评估. 该桥主桥全长 1288 m, 为钢塔钢箱梁结构, 全桥钢结构采用 Q345D 钢, 斜拉索呈东西侧对称布置, 采用 7 mm 镀锌高强度低松弛钢丝, 下部结构中采用桩柱式墩台, 钻孔灌注桩基础. 该桥于 2005 年建成通车.

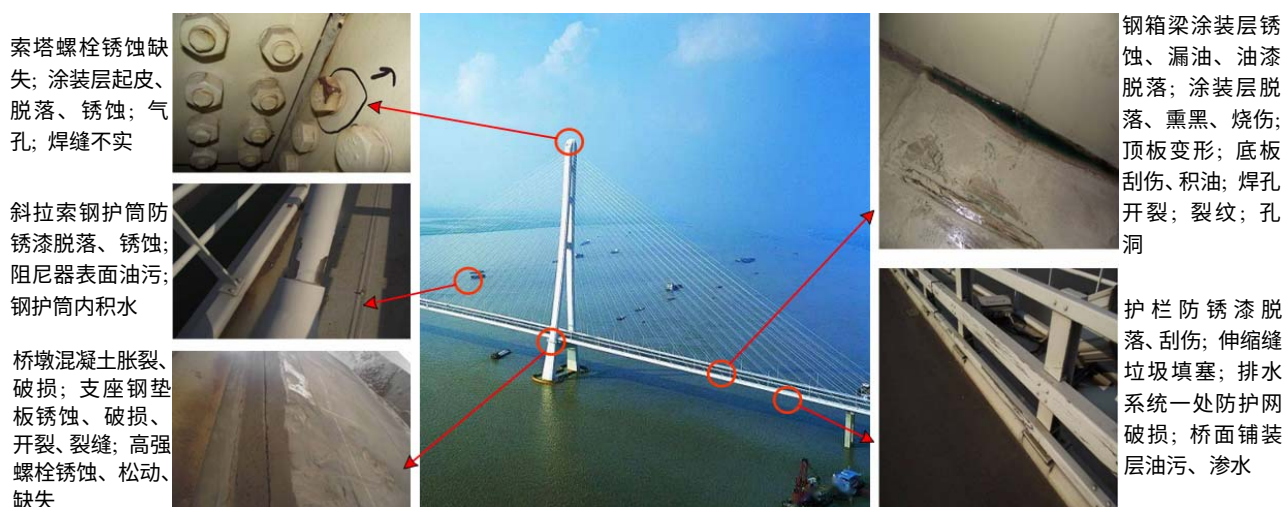


图6 某特大跨径斜拉桥病害情况

背景桥在 2013 年检测到的主要病害情况^[20]如图 6 所示。其中斜拉索系统检测出的护套病害类型大多为斜拉索钢护筒防锈漆脱落, 约占总病害的 16.1%, 同时也有涂层劣化、防腐油脂渗漏等病害; 钢箱梁内部接缝处出现多处涂装层锈蚀、漏油、油漆脱落等病害, 其中涂装层锈蚀最长 3.0 m。钢箱梁桁架式多出现过焊孔开裂、裂纹、孔洞、刮伤等病害, 其中有 73.6% 的箱室出现斜腹杆开裂; 索塔病害最多的为涂层劣化和螺栓锈蚀或松动, 分别存在于 55.8% 和 42.3% 的箱室中; 下部结构中, 支座出现垫石混凝土破损, 桥墩局部出现混凝土胀裂、破损等病害; 附属设施中护栏防锈漆脱落、刮伤, 伸缩缝垃圾堵塞, 排水系统一处防护网破损, 桥面铺装层发现两条 5 m 长的纵向裂缝, 有 0.16% 的油污、渗水等。

另外, 对该桥的索力、主梁线形和索塔线形的监测情况如下: 上游侧索力测试总和与下游侧索力测试总和基本一致, 不均匀度不超过单侧总索力的 2%, 结构索力总体表现平稳; 主梁挠度出现下沉, 至 2013 年 10 月, 跨中挠度下降了 80 mm; 对于索塔线形, 塔顶偏位暂无异常。

3.2 状态评估过程

3.2.1 系统部件间相关度值求解

基于 Pagerank 算法, 可将整个背景桥评估系统抽象成由 n 个部件和链接关系组成的有向图 $G=(V, E)$, 根据斜拉桥系统的组成结构, 可以得到图 7 所示的各部件连接图。结合相关文献对桥梁各部件间影响关系的研究结果, 进一步对各部件间

的故障传递关系进行分析, 可以得到部件之间是否有直接的退化影响, 从而得到斜拉桥系统各部件故障传递有向图, 如图 8 所示。

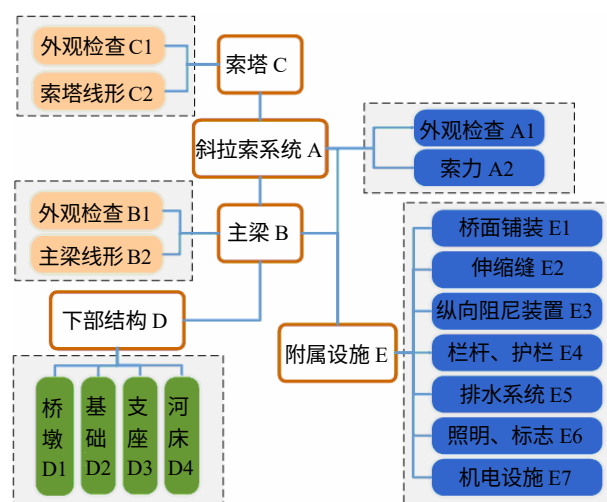


图7 斜拉桥各部件连接图

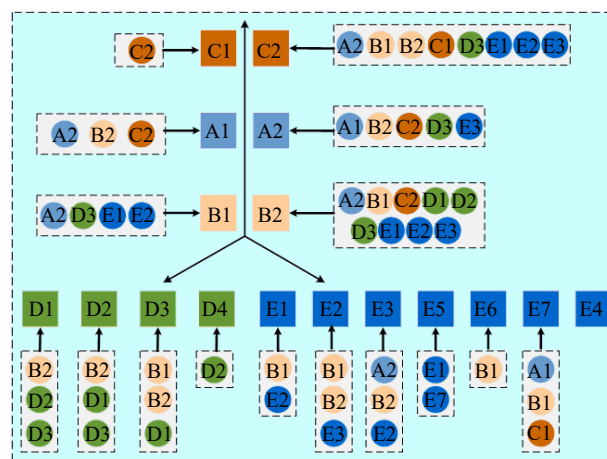


图8 斜拉桥系统各部件故障传递有向图

对于具有 n 个节点的故障传递有向图, 其邻接矩阵 C 可以用 $n \times n$ 的矩阵表示^[15].

当 $i \neq j$ 时,

$$C_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{存在从节点 } i \text{ 指向 } j \text{ 的边,} \\ 0, & \text{不存在从节点 } i \text{ 指向 } j \text{ 的边;} \end{cases} \quad (5)$$

当 $i = j$ 时, $C_{ij} = 0$.

同时状态等概率转移矩阵也可求出(式(6)).

根据式(2), 由经验 $d=0.3$ 进行矩阵迭代, 通过 Matlab 计算, 得到 C_K 值. 对邻接矩阵 C 进行相关变换, 得到转置邻接矩阵 C^T 和其等概率转移矩阵 $[C^T]'$ (式(7)).

根据式(3), 得到各部件的 C_i 值. 表1给出了各

$$C' = \begin{pmatrix} 0 & 1/3 & 0 & 1/3 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/5 & 0 & 0 & 1/5 & 0 & 1/5 & 0 & 0 & 1/5 & 0 & 0 & 0 & 1/5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/4 & 0 & 1/4 & 1/4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/9 & 1/9 & 0 & 0 & 1/9 & 1/9 & 1/9 & 1/9 & 0 & 1/9 & 1/9 & 1/9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/7 & 1/7 & 1/7 & 1/7 & 0 & 0 & 0 & 1/7 & 0 & 0 & 1/7 & 1/7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 0 & 1/3 & 1/3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3 & 1/3 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3 & 1/3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/3 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/3 & 0 & 1/3 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

$$[C^T]' = \begin{pmatrix} 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 \\ 1/5 & 0 & 1/5 & 1/5 & 0 & 1/5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/7 & 0 & 1/7 & 0 & 0 & 1/7 & 0 & 1/7 & 1/7 & 0 & 0 & 0 & 1/7 & 1/7 \\ 1/8 & 1/8 & 0 & 0 & 0 & 1/8 & 1/8 & 1/8 & 1/8 & 0 & 0 & 1/8 & 1/8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 \\ 1/4 & 1/4 & 0 & 1/4 & 1/4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 0 & 1/3 & 1/3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/6 & 1/6 & 1/6 & 0 & 1/6 & 1/6 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3 & 1/3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/5 & 1/5 & 0 & 1/5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/5 & 0 & 1/5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/4 & 0 & 1/4 & 0 & 1/4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

部件被影响度和影响度. 由表 1 可以看出, 主梁线形、索力和索塔线形的被影响度和影响度都比较大, 说明这 3 个指标影响范围较广, 因此对桥梁进行健康监测, 特别是监测这 3 个指标的变化尤其重要; 主梁外观检查和支座被影响度大、影响度小, 是故障表象部件, 最容易受其他部件故障的影响, 容易反映出结构的异常状况, 因此预防性养护时要着重关注这两个部件的状态; 排水系统和机电设施则相反, 被影响度小、影响度大, 是故障源部件, 当此类部件出现故障时易导致其他部件也出现故障, 例如排水系统不畅、机电设施停电会进一步加速钢结构的锈蚀, 因此在日常检查中需保持这两个部件的良好工作状态.

表 1 各部件被影响度及影响度

部件名称	部件序号	被影响度	影响度
斜拉索外观检查	A1	0.050 5	0.052 9
索力	A2	0.075 7	0.063 4
主梁外观检查	B1	0.073 6	0.055 2
主梁线形	B2	0.085 0	0.076 8
索塔外观检查	C1	0.048 8	0.046 2
索塔线形	C2	0.068 2	0.066 6
桥墩	D1	0.057 1	0.051 8
基础	D2	0.062 1	0.051 8
支座	D3	0.069 0	0.051 6
河床	D4	0.041 2	0.046 4
桥面铺装	E1	0.055 7	0.046 6
伸缩缝	E2	0.066 7	0.050 2
纵向阻尼装置	E3	0.058 1	0.050 9
栏杆、护栏	E4	0.041 2	0.041 2
排水系统	E5	0.041 2	0.063 4
照明标志	E6	0.041 2	0.043 5
机电设施	E7	0.047 4	0.058 4

3.2.2 桥梁状态评分

根据背景桥的病害情况, 按照《评定标准》和本文所提关键指标的评定标准对相关部件进行评定, 最终得到各二级指标的独立故障得分, 然后按照第 2.3 节所述, 将数据代入式(4), 最终得到基于 Pagerank 算法考虑部件相关性的桥梁评定结果, 见表 2.

表 2 考虑部件相关性的评定结果

一级指标	二级指标	评分	评定等级	一级指标评分	总体评分
斜拉索系统	外观检查	75.5	3	71.14	
主梁	索力	53.7	4		
	外观检查	40.1	4	51.71	
	主梁线形	78.8	3		
索塔	外观检查	77.8	3	85.00	
	索塔线形	89.8	2		
下部结构	桥墩	94.1	2	95.07	
	基础	99.1	1		77.75
	支座	83.3	2		(三类)
	河床	100	1		
附属设施	桥面铺装	84.0	2	88.55	
	伸缩缝	86.8	2		
	纵向阻尼装置	96.4	1		
	栏杆、护栏	84.8	2		
	排水系统	92.3	2		
	照明、标志	97.8	1		
	机电设施	95.3	1		

3.3 状态评估结果分析

从一级指标和总体评分、附属设施各部件方面分别用《评定标准》和本文所提方法进行评估结果对比, 具体如图 9 所示.

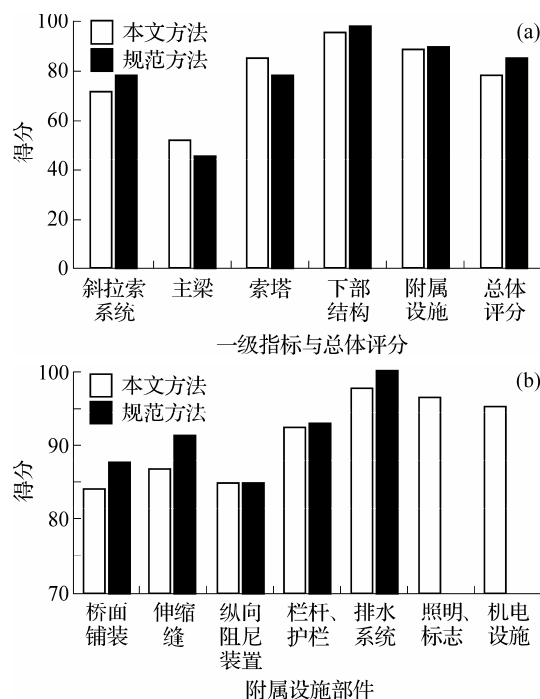


图 9 本文评估方法与《评定标准》的对比

一级指标和总体评分结果对比显示,斜拉索系统、主梁、索塔的评分存在较大差异,其他基本相同,这主要是因为改进的指标体系中增加了主梁挠度、索力和索塔线形等健康监测指标,主梁线形和索力的被影响度和影响度都较大,因此监测指标的评分值高低会影响部件之间的相关性,进而影响最终评定结果。最终的桥梁总体评分本文结果为77.75,三类桥,《评定标准》的结果为85.3,二类桥,可见桥梁部件间的相关性对桥梁整体状态有着不容忽视的影响。附属设施相比于《评定标准》增加了纵向阻尼装置和机电设施,各部件评分相差不大。其中,桥面铺装、伸缩缝装置、排水系统和照明部件因受其他部件相关性的影响,状态评分会略降低。

相比于《评定标准》,本文所提方法结合部件间的故障影响,同时考虑了健康监测和人工检查两方面指标,评估结果更加全面可靠,可为桥梁后续的维修和保养提供依据。

4 结论

(1)提出了一种考虑部件相关性的斜拉桥状态评估方法。建立斜拉桥系统各部件故障传递有向图,基于Pagerank算法分析各部件相关性,并根据斜拉桥各部件的综合故障率包括各部件单独产生的故障率及由于其他部件的故障相关性而产生的故障率这一原理,建立起一种融合部件被影响度的斜拉桥状态评估方法。

(2)针对人工检查指标,建立以规范中的定量指标病害严重程度值为横轴,以相应评定标度值为纵轴的分段线性扣分模式。针对健康监测指标,根据力学模型设定出主梁挠度和索力的评定标准,挠度限值为 $l/400$,索力变化率限值为30%。

(3)通过部件间相关性的求解可知,主梁线形、索力和索塔线形的被影响度和影响度都比较大,说明这3个指标影响范围较广,因此对桥梁进行健康监测尤为重要;主梁外观检查和支座被影响度大、影响度小,是故障表象部件,在预防性养护时要着重关注;排水系统和机电设施则相反,被影响度小、影响度大,是故障源部件,在日常检查中需着重关注。

(4)与规范相比,本文所提方法考虑了健康监

测和人工检查两方面指标,使得斜拉桥主要部件评估结果更加可靠;受部件相关性影响,附属设施评估结果有所降低。这可为桥梁养护决策提供参考。

参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2):1-97.
- [2] 薛晓锋, 靳启文, 王通行. 多损伤场景下大跨径斜拉桥易损性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019, 39(5): 39-47.
- [3] JTG/T H21-2011. 公路桥梁技术状况评定标准[S].
- [4] Yang Y, Peng J, Cai C S, et al. Improved interval evidence theory-based fuzzy AHP approach for comprehensive condition assessment of long-span PSC continuous box-girder bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(12):04019113.
- [5] 李莹, 王文华, 吴春利. 模糊层次分析法在混凝土斜拉桥评估中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2019, 38(2):154-159.
- [6] 吴多, 刘来君, 苗如松. 利用 B-TBU 模型评估桥梁状态的神经网络法[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2017, 38(4):466-471.
- [7] 李文杰, 侯天宇, 赵君黎, 等. 基于可靠度理论的混凝土桥梁安全性评估方法研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(4):87-92.
- [8] Bolar A, Tesfamariam S, Sadiq R. Condition assessment for bridges: A hierarchical evidential reasoning (HER) framework[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2013, 9(7):648-666.
- [9] Kildashti K, Alamdari M M, Kim C W, et al. Drive-by-bridge inspection for damage identification in a cable-stayed bridge: Numerical investigations[J]. Engineering Structures, 2020, 223:110891.
- [10] Tian Y D, Xu Y, Zhang D Y, et al. Relationship modeling between vehicle-induced girder vertical deflection and cable tension by BiLSTM using field monitoring data of a cable-stayed bridge[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2021, 28(2):e2667.
- [11] Huang Y H, Wang Y, Fu J Y, et al. Measurement of the real-time deflection of cable-stayed bridge based on cable tension variations[J]. Measurement, 2018, 119:218-228.
- [12] 梁建军, 巫炯. 辅助墩对大跨斜拉桥在地震作用下的影响——以禹门口黄河公路大跨斜拉桥为例[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(4):1587-1592.
- [13] 魏明奎, 周全, 宋雨妍, 等. 基于 PageRank 算法的输电网连锁故障脆弱线路辨识[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 74-82.

- [14] Zhang Y Z, Mu L M, Shen G X, et al. Fault diagnosis strategy of CNC machine tools based on cascading failure[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019, 30(5):2193-2202.
- [15] 龙哲, 申桂香, 张英芝, 等. 加工中心部件故障相关度评估[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(1):133-138.
- [16] 刘小玲, 黄侨, 任远, 等. 基于群组 AHP 的斜拉桥评估指标权重研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(6):79-84.
- [17] JTG/T J21-2011. 公路桥梁承载能力检测评定规程[S].
- [18] JTG/T 3365-01-2020. 公路斜拉桥设计规范[S].
- [19] 叶鹏. 基于数字孪生的设备多部件成组预防性维护方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [20] 刘小玲, 黄侨, 任远, 等. 斜拉桥多指标证据融合的综合评估方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(3):74-79.

Cable-stayed bridge condition evaluation considering component correlation

YI Xiyan¹, WANG Bing², LIU Xiaoling^{1*}

(1.Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315832, China;

2.School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: To improve the reliability of cable-stayed bridge evaluation, the condition evaluation of cable-stayed bridge considering component correlation was carried out. Firstly, the directed diagram of fault transmission of each component in cable-stayed bridge system was established, and the correlation of each component was analyzed based on Pagerank algorithm to obtain the influencing degree and influenced degree of each component. Secondly, the piecewise linear deduction evaluation criteria of manual inspection indicators were established. For health monitoring indicators, the evaluation criteria of girder deflection and cable force were set according to mechanical model. Finally, considering the failure rate of individual components and the influenced degree of other component faults, a condition evaluation method with component correlation for cable-stayed bridge was proposed. Taking a super long-span steel cable-stayed bridge as an example, the proposed method was compared with the relevant evaluation specifications. The results show the influencing degree and influenced degree of girder alignment, cable force and tower alignment are great, which are important indicators for bridge health monitoring. Girder appearance inspection and bridge bearing have high influenced degree but low influencing degree, which are the fault appearance components. They should be paid attention to in preventive maintenance. The drainage system and electromechanical facilities are the fault source components that have low influenced degree and high influencing degree. They must be kept in good condition. The evaluation method established in this paper has comprehensive indicators and takes into account the correlation of components. Therefore, the evaluation results are more reliable and can provide basis for bridge maintenance decision-making.

Key words: cable-stayed bridge; status valuation; correlation; Pagerank algorithm

(责任编辑 韩 超)