

时间相关性在桥梁维护决策中的应用

周新金

(贵州大学, 贵州 贵阳 550000)

摘要: 定期检测数据是桥梁维护管理部门决策的基础信息, 通常很难评估这些数据对维修决策的作用, 或者数据量根本不够。对于许多桥梁, 由于支持决策的信息有限, 导致这些桥梁产生巨大的维护成本。本文展示了基于贝叶斯决策理论的时间相关性更新决策模型, 如何用于改进常见维修决策的决策过程。该模型使用来自常规检查的信息, 并结合了与时间相关的材料退化和资金的时间价值, 以达到优化决策的目的。

关键词: 桥梁; 优化更新; 维护决策; 时间价值

中图分类号: U445.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 02—0157—03

1 引言

截止 2020 年中国公路桥梁数量已经达到 91.28 万座, 位居世界第一^[1]。但是, 由于钢筋锈蚀、洪水冲刷等原因致使桥梁长期安全运营出现诸多隐患, 桥梁垮塌事故时有发生。目前我国公路约有 40% 的桥梁服役超过 20 年, 超过 10 万座桥梁为危桥, 图 1 展示了我国近 20 年桥梁总量和危桥数量的变化情况。未来 30 年内, 我国将面临日益增长的桥梁维护压力。桥梁维护部门依据现有的桥梁定期检查数据来决策桥梁的维修、加固或者更换就显得非常重要^[2-3]。近年来, 支持维修决策的方法和策略有了重大发展。重点通常是使桥梁使用寿命期间提供的利益最大化, 优化检查和维护活动, 以减少对环境和社会的负面影响, 所有这些活动都在可用维护资金范围内。本文介绍一种基于时间相关的材料退化和资金的时间价值的优化模型, 该模型相比传统基于模糊评分法^[4]得出的决策模型更具有经济量化参考价值。

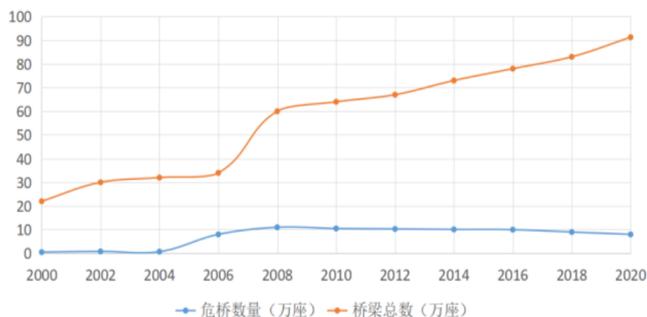


图 1 桥梁总数与危桥数量统计图

2 决策框架

2.1 理论基础

为了更好地确定桥梁结构状态条件, 选择相应的

评估方法, 然后根据试验的不确定结果选择维护措施, 使预期效果最大化。数学上, 最大预期效果 u^* ^[5] 表示为以下公式:

$$u^* = \max_e \left(\sum_{z \in Z} P(z|e) \cdot \left(\max_a \left(\sum_{\theta \in \Theta} u(e, z, a, \theta) \cdot P''(\theta|z) \right) \right) \right)$$

$P(z|e)$ 表示 z 在给定且未指定 e 的条件概率; $P''(\theta|z)$ 表示在给定条件 z 的后验条件概率; $u(e, z, a, \theta)$ 表示是与 e, z, a 和 θ 的特定组合相关联的效用或成本, 其波浪线表示随机变量 (与特定值相反)^[6]。

通过实验获得的附加信息中获得预期收益, 可以使用最佳实验和对照组之间的关系, 这通常被称为信息价值 (VoI)^[7]。它代表桥梁管理决策者为获得更多信息而愿意支付的最大金额。它可以定义为在获得和不获得额外信息的情况下, 最大预期效果之间的差异, 即可以表达为下面的公式:

$$VoI = u^*(e_1) - u^*(e_0)$$

$u^*(e_1)$ 表示选择实验时的最大预期效果; $u^*(e_0)$ 表示非实验 e_0 的最大预期效果。计算 VoI 时, 不包括实验本身的成本。通常连续评估可能比单一评估提供更大的信息价值 (VoI), 特别是对于有限制的间接成本较大的重要结构。

2.2 桥梁管理信息

应用上一节决策基础理论方法在桥梁管理系统 (BMS)^[8] 的输入信息。桥梁资产的当前状况是 BMS 中的关键信息。该条件控制桥梁是否按预期运行, 或是否应采取某些措施来改善该条件。在桥梁资产管理中使用的 BMS 中, 可以使用基于指数的方法评估桥梁设施资产的当前功能。整体结构的当前功能由单个桥梁部件的

状况控制，其中部件的状况等级按照 CD1 到 CD4 分类^[9]，根据表 1 对估计结果进行定义。如果评估结果达到 CD4 级，则必须要采取维修加固或者更换等措施。表 1 中所述的功能缺失与单个部件对整个桥梁结构正常状态的预估影响有关。本文没有考虑交通中断或其他限制。所使用的检查间隔为 6 年，如果认为有必要，可在其间进行后续检查或评估。检查后，根据给定的限值为桥梁的各个部件设置条件等级，并将信息记录在 BMS 中。负责的桥梁管理人员根据不同退化机制对桥梁结构的影响，评估单个组件的状况如何影响桥梁的整体功能。对于如何进行评估，几乎没有给出明确指导；因此，它现在主要基于经验。

表 1 梁管理系统中的条件状况分类

桥梁状态分类	预估结果	发生概率
CD1	功能缺失 10 年以上	0
CD2	功能缺失 10 年以内	10%
CD3	功能缺失 3 年以内	45%
CD4	检查时功能暂时缺失	45%

2.3 桥梁退化对决策的影响

时间对桥梁管理人员来说非常重要，因为结构或结构部件的退化会对应优先采取的行动产生重大影响。结构部件的退化可直接与通过桥梁管理系统中设定的限值给出的条件等级相关联，因此，过快退化可能导致功能的快速下降，并可能在两次常规检查之间给桥梁管理者带来维修的风险。许多桥梁部件劣化过程，如混凝土开裂和风化后的钢筋遭到腐蚀，都与时间有关。目前，多数退化模型以贝叶斯理论^[10]为基础进行数据筛选优化维修加固决策^[11]。总的时间影响决策框架如图 2 所示。

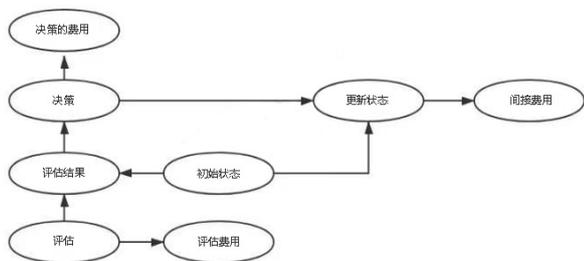


图 2 基于时间相关性更新应用框架流程图

2.4 时间对维护成本的影响

对于结构中的桥梁来说，并不是越早维修越好，而是基于决策模型精确计算后能够延迟桥梁的维修或者加固。这样对于桥梁维护管理部门来说，可以将这部分资金用于其他可以增值的项目。我们可以用一个动态的项目经济评价指标来评价这部分资金在计算期内的获利

能力，也就是财务净现值 (FNPV)^[12]，其计算公式如下：

$$FNPV = \sum_{t=0}^n (CI - CO) (1 + i_c)^{-t}$$

式中：FNPV 表示财务净现值；(CI-CO)_t 表示第 t 年的净现金流量；*i_c* 表示基准收益率；n 表示投资方案计算期。

尤其是桥梁的边梁，可以在评估状态为 CD3 时进行干预，这样在财务现金有时间限制的情况下，可以推迟该梁的维修时间，达到节约资金使用费的目的。

3 计算实例

以国道 319 益阳段一座预应力混凝土简支 T 梁和钢筋混凝土简支 T 梁桥为例，该路线于 1989 年 6 月建成通车。上部构造标准跨径组成为：8×16m+2×25m+8×16m，桥长 310.04m。该桥通车至今已有 32 年的时间，桥梁部件退化情况清晰可见，承载力已经达不到原来设计的水平但是还能够满足车辆通行的需要。假设每种状况的概率如表 1 所示。定检显示第 5 跨 T 梁于 4# 墩顶 5# 梁端混凝土剥落较为严重，钢筋锈蚀严重。传统采用模糊综合评分法，根据隶属函数，求出各个元素的隶属度（桥梁的总的分为翼墙 / 耳墙、锥坡 / 护坡、桥台及基础、地基冲刷、支座、上部主要承重构件、上部一班承重构件、桥面铺装、伸缩缝等 17 个部件），然后根据隶属度求得综合判断矩阵，采取规范的权重，根据最大隶属度原则，可知此桥属于二类桥。

当采用本文所介绍的基于时间相关性更新评价时，可以选取 5# 墩上的一片边梁进行评估，根据检测报告显示，该梁定级为 CD2。桥梁管理者可能做出的决策有：①日常维护；②维修，T 梁维修需要花费 ¥20 000；③更换部件，更换费用为 ¥100000。假设构件的日常养护费用向量为 $N=(¥1500, ¥1800, ¥2000, ¥2500)$ ，桥面维修概率矩阵为：

$$\begin{bmatrix} 0.7 & 0.15 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.7 & 0.15 & 0 \\ 0 & 0.15 & 0.7 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0.15 & 0.7 \end{bmatrix}$$

桥面状态转换概率如表 2 所示。此时可以发现该桥梁还没有到达必须维护行动的地步。按照上述假设情况若进行边梁的更换需要 10 万元，若加固的费用是 2 万元，按照两种维护决策费用平均值来计算

也就是6万元，假设需要到3年后才会达到CD3级别。按照资金年收益率5%来计算，其财务净现值为 $6 \times (1+5\%)^{-3} = 5.2$ 万元。其最后总的维护费用如图3所示。最后根据前文中提到的信息价值计算出VoI值。维护决策的费用将可以用于其他工程，省去一大部分使用资金的费用。

从上述两种方法比较中，不难发现两种评估方式都能较准确地对结构构件进行评级。但是基于模糊综合评估法需要大量的实测数据而此方法不需要。另外，还会将与桥梁相关的信息及时更新到模型中并且运用时间的相关性如资金的时间价值考虑到决策里面，使决策有经济参考价值，因此基于本文的时间相关性决策理论更加具有参考意义。

表2 混凝土桥梁桥面状态转换概率

年	CD1	CD2	CD3	CD4
0-6	0.700	0.780	0.840	0.600
7-12	0.690	0.770	0.8700	0.720
13-18	0.690	0.780	0.950	0.850
19-24	0.616	0.720	0.980	0.970
25-30	0.560	0.700	0.980	0.980
31-36	0.520	0.680	0.980	0.980
37-42	0.480	0.620	0.980	0.980
43-48	0.460	0.600	0.980	0.980
49-54	0.440	0.570	0.970	0.960
55-60	0.400	0.500	0.800	0.820

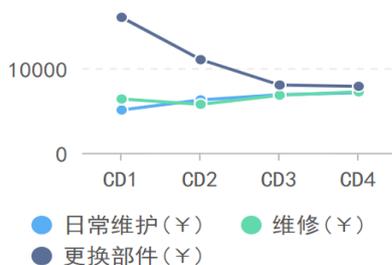


图3 桥梁维护成本曲线图

4 结论与展望

本文基于时间相关性的更新来对桥梁维护管理作出相应的决策，相对于定期检查的信息，本决策更具有科学性，并且从结构的退化和资金的时间价值综合考虑得出的结论，得到的结果更加精细，桥梁管理者可以通过资金的后延支出来增加资金的时间价值。但是由于确

定四种状况的概率带一定的主观性，可能会对结果产生不利影响。评估的费用还需要根据地方的不同，桥型的不同以及工程量的不同进行详细的分类。今后研究的方向是将各类参数进行试验优化并及时更新该决策模型中，并且用一套可用于生产的软件来操作评估，使评估可视化，将其他可能产生的费用计入这个模型中。

参考文献：

- [1] 交通运输部.2010-2020年交通运输行业发展统计公报 [Z]. 隧道建设,2021.
- [2] JTGT_J22-2008, 公路桥梁加固设计规范
- [3] JTG/T H21-2011, 公路桥梁技术状况评定标准 [S].
- [4] 模糊综合法桥梁评估方法研究 [D]. 黑龙江交通科技,2021.
- [5] Ponsard, J. P. (1976). On the concept of the value of information in competitive situations. Management Science, 22(7), 739 - 747.
- [6] Björnsson, I., Larsson Ivanov, O., Honfi, D., & Leander, J. (2019). Decision support framework for bridge condition assessments. Structural Safety, 81, 101874.
- [7] Straub, D. (2014). Value of information analysis with structural reliability methods. Structural Safety, 49, 75 - 85.
- [8] Numa J. Bertola, Eugen Brühlwiler (2021). Risk-based methodology to assess bridge condition based on visual inspection. Structure and Infrastructure Engineering, 10, 1080
- [9] Nielsen, J. S., & Sørensen, J. D. (2018). Computational framework for risk-based planning of inspections, maintenance and condition monitoring using discrete Bayesian networks. Structure and Infrastructure Engineering, 14(8), 1082 - 1094.
- [10] 王希瑞. 既有中小跨径桥梁时变可靠性分析和体系可靠性评估方法研究 [D]. 吉林大学, 2020.
- [11] 贾布裕, 余晓琳, 颜全胜. 基于离散动态贝叶斯网络的桥梁状态评估方法 [J]. 桥梁建设, 2016, 46(03): 74-79.
- [12] 林杰辉. “净现值法”应用常见问题及对策建议 [J]. 交通财会, 2020(06): 73-75.
- [13] 戴宇文, 胡利文. 桥梁构件维护决策支持模型 [J]. 水运工程, 2005(09): 75-77.