

文章编号:1671-8879(2017)06-0047-07

# 改进贝叶斯方法在桥梁状态评估中的应用

刘来君,吴 多,张 夏,薛成凤,李 晓

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

**摘 要:**为了更有效地对桥梁状态进行准确评估,以现有评估体系中的层次分析理论为基础,根据桥梁的不同部位及其功能将其整体进行逐层依次分解,将每个子构件转换为贝叶斯概率网络中的节点,使得桥梁各子构件的状态得分与贝叶斯网络节点的状态概率一一对应,进而确定某一时刻桥梁的整体状态;同时,结合时变效应,考虑贝叶斯方法中先验信息对后验信息的影响,对桥梁不同时刻的状态信息进行更新、传递与评估,按照时间序列建立完整的评估体系,提出一种基于改进贝叶斯理论的桥梁状态评估方法,并通过某座桥梁的评估实例,分析该桥不同年份级别评定的状态概率分布。研究表明:采用改进贝叶斯方法训练后,桥梁不同年份对应的状态级别概率均有明显提高,评估准确度从 50%~60%提高到 95%左右;另通过对比桥梁不同年份的状态级别概率分布曲线可知,随着运营时间的增加,曲线的主要包络区域级别呈现下降趋势。反映出桥梁在运营过程中产生累积损伤,对应的状态等级呈现下降趋势。与此同时,曲线最高点对应的概率呈现增大趋势。也反映出采用这一方法进行桥梁评估更加直观、可靠,其评估结果更符合实际。

**关键词:**桥梁工程;状态评估;贝叶斯理论;状态信息;评价指标

**中图分类号:**U448.21

**文献标志码:**A

## Application of improved Bayesian method in bridge state assessment

LIU Lai-jun, WU Duo, ZHANG Xia, XUE Cheng-feng, LI Xiao

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** To more effectively make an accurate assessment of bridge state, based on the theory of analytic hierarchy process (AHP) in existing system, the whole bridge was decomposed hierarchically according to its different parts and functions, and each sub-component was converted into a node in Bayesian probability network. Therefore, the state score of each sub-component was set to be corresponding to the state probability of Bayesian network node, and then the whole state of bridge at a certain time was determined. At the same time, combined with time-varying effect and based on Bayesian inference which considered the influence of the prior information, a complete assessment system was established in chronological order by updating, transmitting and evaluating the state information of bridge at different moments, and a bridge state evaluation method based on Bayesian theory was proposed. Through the evaluation example of a bridge, the state probability distribution of bridge assessed in different years was analyzed. The results show that the probability of the corresponding state level in different years has been improved significantly after training with the improved Bayesian method,

收稿日期:2017-05-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51408040);陕西省交通运输厅科研项目(13-25K);

云南省交通运输厅科技项目(云交科 2013(A)02)

作者简介:刘来君(1963-),男,吉林前郭人,教授,博士研究生导师,E-mail:liulj@chd.edu.cn。

and the assessment accuracy has been increased from 50% or 60% to 95%; by comparing the probability distribution curves of bridge state level in different years, the main enveloping region level of the curve shows a decreasing trend with the increase of operating time, indicating that a cumulative damage is produced during the operation of bridge, and the corresponding state level shows a descending trend. Meanwhile, the probability corresponding to the highest point of the curve presents an increasing trend, indicating that the use of this method to evaluate bridge is more intuitive and reliable, and the evaluation results are more in line with the actual situation. 3 tabs, 6 figs, 21 refs.

**Key words:** bridge engineering; Bayesian theory; state information; evaluation index; bridge assessment

## 0 引言

在桥梁全寿命周期监测系统中,通过及时对由高性能传感器、信号检测设备和传输设备等组成的监测系统实时传送的监控数据进行分析,可得到动态管理的桥梁状态评估系统<sup>[1-6]</sup>。目前国内外已经有不少学者根据模糊理论<sup>[7-9]</sup>、层次分析<sup>[10-12]</sup>和专家评估<sup>[13-14]</sup>等手段得到许多行之有效的桥梁评估方法。黄侨等在桥梁的综合评估中引入不确定型层次分析法,结合最优传递矩阵法,通过对一座斜拉桥的评估,验证了该方法的可靠性<sup>[11]</sup>;任远等将模糊理论、集值统计应用到斜拉桥的综合评估中,建立了完整的评估体系和评估模型,通过这一方法评估得到科学、合理的状态结论,确保了桥梁的安全运营<sup>[12]</sup>。由于这些常用方法分别存在评价专家主观性较大、计算模型较复杂、结构关联最佳值的取值等问题,导致这些方法均无法考虑桥梁性能退化的时效效应。

贝叶斯方法将经典统计学中的未知参量问题转换成随机变量问题进行求解,是一种利用先验信息的统计推断方法<sup>[15-17]</sup>。在结构分析领域:Chen 采用贝叶斯参数修正的方法,选取合适的影响参数,如裂纹扩展、黏结强度和承载能力等对结构性能恶化的影响,并通过实例分析证明钢筋的腐蚀与混凝土裂纹的扩展是结构性能恶化的主要因素,可评估结构的可靠性<sup>[18]</sup>;樊学平等引入动态线性模型建立了退化抗力的状态方程,通过折扣因子确定了桥梁的状态和承载力的变化趋势<sup>[19]</sup>。综上,现有研究主要是针对桥梁结构的某一特性参数或局部构件进行可靠性评估,且大多仅限于静态评估方面。对于桥梁状态实时动态评估方面的研究较少。

鉴于此,本文提出基于改进贝叶斯理论的桥梁状态评估方法,通过信息样本随时间序列的退化性能分析,对不同时段的桥梁整体状态进行评估,根据

监测数据设定相应的先验参数,对其进行更新与传递,进而对桥梁的实时状态进行评估。

## 1 改进贝叶斯理论

动态的传递贝叶斯方法是由传统的静态贝叶斯网络发展而来的,它能够利用各类参数变量信息对模型进行更新、修正,使修正后的先验模型更符合实际情况<sup>[20]</sup>。

通过传统贝叶斯方法得到的结构状态若要考虑时序影响,应对不同时刻的先验信息  $R_T$  进行分析,并且相对于  $R_T, R_{T+1}$  就成为其后验信息与目标函数。引入时间序列的影响,即考虑了其传递作用。

通常,通过贝叶斯网络对结构状态进行更新的过程中,为了得到更符合实际的后验概率分布。先验概率分布和状态信息概率也应被考虑,即

$$\mathbf{P}(R_T) = \mathbf{c} \mathbf{L}_{T-1} \mathbf{P}(R_{T-1}) \quad (1)$$

$$\mathbf{c} = \left[ \sum_{T=1} \mathbf{L}_{T-1} \mathbf{P}(R_{T-1}) \right]^{-1} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{P}(R_T)$  为  $T$  时刻的后验信息概率分布向量;  $\mathbf{L}_T$  为当前状态信息的概率分布向量;  $\mathbf{P}(R_{T-1})$  为先验信息概率分布向量;  $\mathbf{c}$  为常数向量。

对于大多数贝叶斯推理应用,通过合理的校准测量系统产生似然,如各类信号传感器、检测仪器等。在这些情况下,实测系统从相应的数据库中选择似然值或通过阈值进行校准,给定一个关键变量的状态得分。假设这些状态(分数的更新)是基于似然分布独立地给出了分值(权重)。则改进的贝叶斯方法即为某时刻结构更新后模型的状态  $R_T$  与考虑当前状态信息的概率分布向量  $\mathbf{L}_T$  的综合信息处理过程。

## 2 桥梁状态评估方法

### 2.1 桥梁状态层次分解

根据桥梁结构各组成部分、构件的功能及其位置和重要性对桥梁进行层次分解,按照由整体到局

部的原则将结构逐层展开为多个层级结构。参考《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011),将梁式桥按照由结构至构件的划分原则进行逐层分解,建立桥梁状态评估的多层次结构体系。

采用层次分析法对梁式桥的总体状态进行评估。将桥梁总结构  $m_k(k=1$ ,为总结构编号)分解为桥面体系  $s_1$ 、上部结构体系  $s_2$ 、下部结构体系  $s_3$ ,其状态得分分别为  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 。这 3 个子结构体系又可根据其组成构件分为子构件。子构件是将子结构  $s_l(l=1,2,3$ ,为子结构编号)按构件的不同部位、功能逐个分解为若干个功能部件  $c_i(i=1,2,\cdots,16$ ,为子构件编号),其中:桥面体系  $s_1$  可分为铺装  $c_1$ 、伸缩缝  $c_2$ 、栏杆  $c_3$ 、人行道  $c_4$ 、排水  $c_5$  和照明  $c_6$ ;上部结构体系  $s_2$  可分为一般构件  $c_7$ 、承重构件  $c_8$  和支座  $c_9$ ;下部结构体系  $s_3$  可分为桥墩  $c_{10}$ 、桥台  $c_{11}$ 、基础  $c_{12}$ 、翼(耳)墙  $c_{13}$ 、护坡  $c_{14}$ 、河床  $c_{15}$  和调治构造物  $c_{16}$ 。

### 2.2 桥梁状态评级

桥梁当前的使用状况、损伤程度等因素可反映桥梁的实时状态,以此为基础可进行级别评定。参阅相关文献可知,目前国内桥梁评定主要根据《公路养护技术规范》(JTG H10—2009)、《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)等标准,并结合相关评分机制对桥梁状态进行打分,将其分为 5 类。本文结合改进贝叶斯方法,将桥梁状态划分为 7 个级别。除最低失效级别评分范围为 25 分外,其余各级别区间为 12.5 分,见表 1。

表 1 桥梁等级评分  
Tab. 1 Bridge rating

桥梁级别	7	6	5	4	3	2	1
评分	[87.5,100)	[75,87.5)	[62.5,75)	[50,62.5)	[37.5,50)	[25,37.5)	(0,25)
描述情况	优秀	良好	中等	一般	较差	很差	失效

### 2.3 桥梁状态评估的改进贝叶斯方法

将改进贝叶斯方法应用到桥梁状态的评估,其步骤可分为 2 个阶段:①导出当前状态信息;②导出考虑时变影响的状态信息。

第 1 阶段桥梁当前状态信息的导出是通过梁式桥层次分解中子构件  $c_i$  的状态得分  $C_i$  累计求和得到子结构  $s_l$  的状态得分  $S_l$ ,二次迭代求和得到总结构的状态得分  $M$ ,即

$$\begin{aligned} M &= S_1 W_{s1} + S_2 W_{s2} + S_3 W_{s3} \\ \begin{cases} S_1 = C_1 W_{c1} + C_2 W_{c2} + \cdots + C_6 W_{c6} \\ S_2 = C_7 W_{c7} + C_8 W_{c8} + C_9 W_{c9} \\ S_3 = C_{10} W_{c10} + C_{11} W_{c11} + \cdots + C_{16} W_{c16} \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $W_{c_i}$ 为子构件  $c_i$  的权重; $W_{s_l}$ 为子结构  $s_l$  的权重。

完成第 1 阶段工作后,可进行第 2 阶段考虑时变影响的状态信息的导出。考虑某时刻  $T$  的总体状态  $M_T$ ,结合时间序列下似然函数的影响,可将下一时刻的状态得分进行更新,得到更新后的状态  $\bar{M}_T$ 。通过分析更新后的初始时刻状态  $\bar{M}_1$  到  $T$  时刻状态  $\bar{M}_T$  的变化规律,即可得出桥梁实际状况的变化,其过程如图 1 所示。采用改进贝叶斯方法进行桥梁评估的流程如图 2 所示。

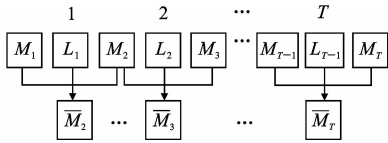


图 1 考虑时变影响的状态信息

Fig. 1 State information considering effect of time-varying

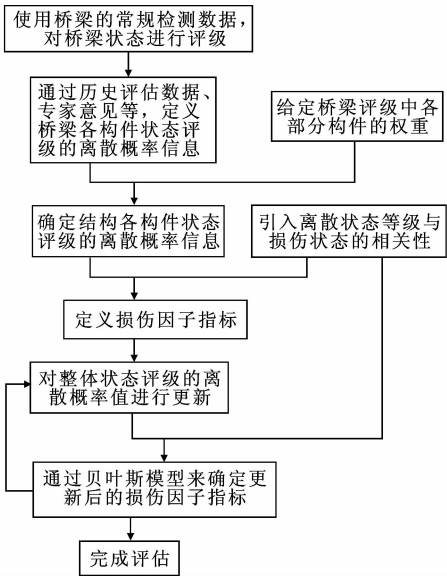


图 2 改进贝叶斯方法的桥梁状态评估流程

Fig. 2 Bridge state evaluation procedure with improved Bayesian method

### 2.4 评估过程

#### 2.4.1 参量确定

利用改进贝叶斯方法进行桥梁状态评估前,应首先确定先验信息中的各类参量<sup>[21]</sup>。

##### (1)某时刻状态信息的确定

确定某时刻的状态信息,首先需确定先验条件,根据现有子构件的评估数据转换得到其状态概率,将桥梁的子构件、子结构、总结构等层次结构依次写成概率形式

$$\begin{cases} P(C,b) = P_b(c_i) \\ P(S,b) = P_b(s_l) \\ P(M,b) = P_b(m_k) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P(C,b)$ 、 $P(S,b)$ 、 $P(M,b)$ 分别为子构件  $c_i$ 、子

结构  $s_l$ 、总结构  $m_k$  处于状态等级  $b$  的概率分布向量; $b=1,2,\cdots,v,\cdots,7$ 。

则有

$$\begin{cases} E(S_C)=\frac{P_{b,v}(c_i s_l)}{P_b(c_i)} \\ E(M_S)=\frac{P_{b,v}(m_k s_l)}{P_b(s_l)} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $E(S_C)$ 为某时刻子构件  $c_i$  处于状态  $b$  时,子结构  $s_l$  处于状态  $v$  的概率分布向量; $E(M_S)$ 为某时刻子结构  $s_l$  处于状态  $b$  时,总结构  $m_k$  处于状态  $v$  的概率分布向量; $P_{b,v}(c_i s_l)$ 为子构件  $c_i$  处于状态  $b$  与子结构  $s_l$  处于状态  $v$  同时发生的概率分布向量; $P_{b,v}(m_k s_l)$ 为总结构  $m_k$  处于状态  $b$  与子结构  $s_l$  处于状态  $v$  同时发生的概率分布向量。

(2)时变状态信息的确定

当某时刻的状态信息确定后,引入当前的状态概率分布向量,即可得到下一阶段桥梁状态的状态概率信息,即

$$P_v(m_{k,T})=cL_{T-1}P_v(m_{k,T-1}) \quad (6)$$

式中: $P_v(m_{k,T})$ 为  $T$  时刻总结构  $m_k$  处于状态  $v$  的概率分布向量。

然后可算得信息传递过程中桥梁状态变化的概率,即

$$F(M)=\frac{P_{b,v}(m_{k,T-1}m_{k,T})}{P_b(m_{k,T-1})} \quad (7)$$

式中: $F(M)$ 为  $T-1$  时刻总结构  $m_k$  处于状态  $b$  时, $T$  时刻总结构  $m_k$  处于状态  $v$  的概率; $P_{b,v}(m_{k,T-1}m_{k,T})$ 为  $T-1$  时刻总结构  $m_k$  处于状态  $b$  与  $T$  时刻总结构  $m_k$  处于状态  $v$  同时发生的概率分布向量。

2.4.2 状态更新

某一时段的初始状态可根据第 2.4.1 节的方法确定,进而进行状态更新,评估步骤如下。

(1)使用当前时间  $T$  的实时监测数据对桥梁状态进行初步评定。

(2)结合桥梁先前的评估成果和专家意见等,对每个子构件的现状进行初步评定。例如,某桥梁中桥墩与桥台子构件的评级对比情况如图 3 所示。

(3)分析桥墩  $c_{12}$  和桥台  $c_{13}$  构件,取其在不同状态级别概率的最大值作为当前评级。由图 3 可知:该桥桥墩  $c_{12}$  的评级取  $b=5$ ,概率为 40%;桥台  $c_{13}$  的评级  $b=6$ ,概率为 50%。当不同评级的概率相同时,根据偏安全评定的原则,取较小值。

(4)确定总结构的损伤概率指标  $d_{M,v}$  和更新后的概率指标  $\bar{d}_{M,v}$ 。由各子结构的损伤概率指标可组成整体结构的指标向量  $D_{M,v}=[d_{s1,v},d_{s2,v},\cdots,$

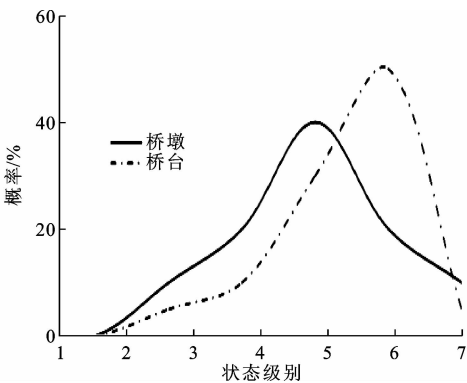


图 3 桥墩与桥台的评级对比

Fig. 3 Comparisons of rating of pier and abutment

$d_{s7,v}]$ ,其中  $d_{s1,v}$ 、 $d_{s2,v}$ 、 $d_{s3,v}$  为子结构的损伤概率指标;通过总体状态概率,可确定总结构的损伤概率指标  $d_{M,v}=D_{M,v}P_v(m_{k,T})$ ;结合式(8)进行参数学习,可得到更新后的损伤指数  $\bar{d}_{M,v}=D_{M,v}P_v(m_{k,T+1})$ 。

(5)计算步骤(4)中  $T$  时刻对应的  $\bar{d}_{M,v}$ ,即可得到各年份桥梁整体的实际状态。

2.4.3 状态的再更新

评估完成以后,根据桥梁的实际情况,设定相应的阈值,当部分构件或者整体结构出现严重破坏,导致桥梁状态值接近阈值,就需要对其进行维修加固,因维修加固后,其损伤概率指标  $d_{M,v}$  会大大降低,此时应重新取定似然函数进行更新。设备改进、监测精度提高的新方法会改变评定的结果,当新旧方法的结果出现较大偏差时,也应重新取定似然函数进行更新,以保证评估的准确性。

3 评估结果与分析

3.1 权重划分

采用改进贝叶斯方法进行桥梁状态评估,其构件划分、权重定义部分是基于《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011)中梁式桥评定部分进行设定的。为在同一标准下与传统评定方法对比,根据各子结构的权重比例( $W_{s1}:W_{s2}:W_{s3}=1:2:2$ )重新定义各子构件的权重值,并对权重数据进行归一化,如表 2 所示。

表 2 梁式桥中各子构件的权重值

Tab. 2 Weight values of each component in beam bridge

桥面系	子构件	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	
	权重	0.08	0.05	0.02	0.02	0.02	0.01	
上部结构	子构件	$c_7$	$c_8$	$c_9$				
	权重	0.28	0.072	0.048				
下部结构	子构件	$c_{10}$	$c_{11}$	$c_{12}$	$c_{13}$	$c_{14}$	$c_{15}$	$c_{16}$
	权重	0.008	0.004	0.12	0.12	0.112	0.028	0.008

3.2 桥梁常规综合评估法

常规的状态评估方法一般是采用加权算术平均、加权几何平均和这 2 种方法的混合算法对桥梁状态进行评估的。基于桥梁各子构件的权重因子与本文划分的 7 个级别,采用层次分析法对桥梁状态进行评价,即

$$D = \sum_i^n R_i W_i \tag{8}$$

式中: $D$  为桥梁整体的状态得分,通过评分的高低在一定程度上可以反映桥梁当前的状态与损伤情况; $R_i$  为桥梁构件  $i$  的得分; $n$  为桥梁中构件数量; $W_i$  为桥梁构件  $i$  的权重。

3.3 梁式桥实例评估

罗家桥位于浙江省杭州市郊区,该桥修建于 20 世纪 90 年代。本文选取杭州市绕城高速管理中心对该桥 1996~2015 年的定期检测报告,将其中的状态评估数据对应于本研究的 7 个状态等级,即可得到各年份的初始状态概率分布,利用改进的贝叶斯方法对该桥进行重新评定。

3.3.1 状态得分及损伤指数

表 3 为该桥 1996~2015 年间的整体状态得分及损伤指数的变化情况。

由表 3 可知,桥梁整体状态得分随年份延长呈现下降的趋势,但不明显,不能很好地反应出桥梁的

表 3 1996~2015 年桥梁整体状态得分及损伤指数

Tab. 3 Overall state scores and damage Indices of bridge from 1996 to 2015

年份	状态得分	损伤指数	年份	状态得分	损伤指数
1996	87.50	0.03	2006	61.85	0.09
1997	87.00	0.03	2007	60.18	0.09
1998	84.80	0.03	2008	58.33	0.09
1999	80.08	0.04	2009	56.43	0.10
2000	74.45	0.06	2010	53.93	0.11
2001	71.70	0.06	2011	52.30	0.12
2002	69.15	0.07	2012	51.30	0.12
2003	68.68	0.07	2013	62.45	0.10
2004	65.28	0.08	2014	58.55	0.09
2005	63.05	0.09	2015	56.90	0.10

真实状态变化。因此引入改进贝叶斯方法对该桥进行评估。由评估后得到的损伤指数可知,随着年份的增加,这一指数呈增长趋势,且数据变化趋势明显,能反映桥梁整体状态的发展情况。且由 2013~2015 年数据的波动也可看出,该指数可较好地表征桥梁由于实际情况变化(维修加固、检测设备更新)而产生的状态变化。

3.3.2 不同级别的概率分布

罗家桥在 1996~2015 年间初始状态、常规方法和改进贝叶斯方法得到的状态级别 6(良好)~4(一般)的概率分布如图 4 所示。

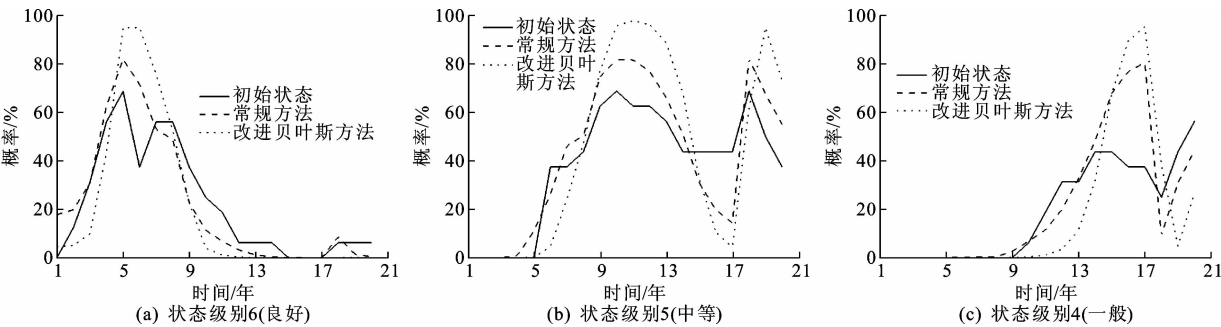


图 4 状态级别 6~4 随年份变化的概率分布

Fig. 4 Probability distributions of state 6 to 4 change with year

由图 4 可知,随着年份的增加,桥梁状态级别呈降低趋势,且前期主要分布在级别 6(良好)范围,中期主要分布在级别 5(中等)范围,后期主要分布在级别 4(一般)范围。

对比图 4 中初始状态、常规方法和改进贝叶斯方法的概率分布曲线可知,通过初始状态曲线可大体判断出桥梁状态的级别情况,但其分布曲线对应的概率值较低,无法得到准确的状态等级,需进一步处理。通过常规方法和改进贝叶斯方法训练学习后得到的桥梁状态级别的概率进一步增大,特别是通

过改进贝叶斯方法可使评估的准确度从 50%~60% 提高到 95% 左右。保证了评估结果的可靠性,使其更符合实际情况。

采用常规方法与改进贝叶斯方法所得各子结构体系状态的概率分布如下页图 5 所示。通过分析可知:当处于高级别状态时,贝叶斯方法得到的概率高于常规方法;处于低级别状态时则低于常规方法。

3.3.3 不同年份桥梁状态级别

下页图 6 为 2003、2009、2011 年这 3 年级别评定情况的条件概率分布。由图 6 可知:随着年份的

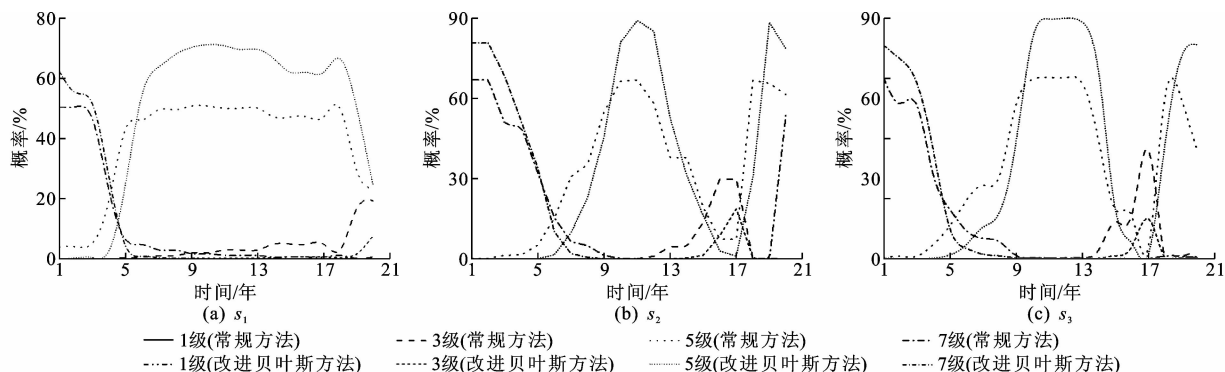


图5 各子结构体系的概率分布

Fig. 5 Probability distribution of each substructure

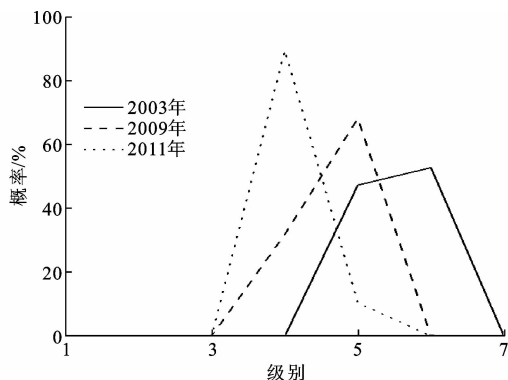


图6 不同年份桥梁状态级别的概率分布

Fig. 6 Probability distributions of bridge rating condition in different years

增加,概率分布曲线整体出现向低级别转移、变窄和变高的发展趋势。这3个年份的概率分布曲线对应的最大损伤概率级别分别为6、5、4级;曲线最高点对应的概率为53%、68%、89%。说明桥梁在运营过程中在内部构件疲劳的影响及外力的作用下,整体状态等级呈下降趋势。同时也反映出通过改进贝叶斯方法对桥梁状态进行更新,可使桥梁状态级别的评定变得更加直观、可靠。

## 4 结 语

(1)改进贝叶斯方法能准确评估桥梁整体状态的级别,可在一定程度上降低传统评估方法中人为主观因素对级别评定结果的影响。

(2)采用改进贝叶斯方法得到的损伤指数能快速识别桥梁状态随时间的实际发展趋势,基于历史评估数据能够更加快速、准确地评估出桥梁当下的真实状态,使桥梁状态的评估在时间上具有连续性。

(3)该方法能反映出桥梁真实的维修加固、监测设备更新等工作对状态评估的影响,通过研究历史评估数据进行状态评价,能减少整体评估的费用。

(4)基于改进贝叶斯方法的以上特点,下一步研

究工作可分为两方面开展:将该方法应用于桥梁结构健康监测中损伤识别、测点优化布置、模型修正、可靠性分析等模块的研究;由于各种原因,大部分桥梁的历史评估数据与健康监测数据并不完整,因此,如何结合相关智能算法进行先验条件的学习与训练,进一步提高桥梁状态评估的水平也是下一步研究的重点。

## 参考文献:

## References:

- [1] 李 惠,周文松,欧进萍,等.大型桥梁结构智能健康监测系统集成技术研究[J].土木工程学报,2006,39(2):46-52.  
LI Hui,ZHOU Wen-song,OU Jin-ping,et al. A study on integration technique of intelligent monitoring systems for soundness of long-span bridges[J]. China Civil Engineering Journal,2006,39(2):46-52.
- [2] 余加勇,邵旭东,晏班夫,等.基于全球导航卫星系统的桥梁健康监测方法研究进展[J].中国公路学报,2016,29(4):30-41.  
YU Jia-yong,SHAO Xu-dong,YAN Ban-fu,et al. Research and development on global navigation satellite system technology for bridge health monitoring[J]. China Journal of Highway and Transport,2016,29(4):30-41.
- [3] WEBB G T,VARDANEGA P J,MIDDLETON C R. Categories of SHM deployments: Technologies and capabilities[J]. Journal of Bridge Engineering,2015,20(11):1-15.
- [4] 苏 成,廖 威,袁 昆,等.桥梁健康监测在线预警指标研究[J].桥梁建设,2015,45(3):44-50.  
SU Cheng,LIAO Wei,YUAN Kun,et al. Research of online early warning indices for bridge health monitoring[J]. Bridge Construction,2015,45(3):44-50.
- [5] 马宏伟,聂振华.桥梁安全监测最新研究进展与思考[J].力学与实践,2015,37(2):16-170,181.  
MA Hong-wei,NIE Zhen-hua. Recent advances and review of bridge safety monitoring[J]. Mechanics in

- Engineering, 2015, 37(2): 161-170, 181.
- [6] 胡健勇, 苏木标. 基于监测数据的铁路桥梁结构健康状况评估[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2016, 29(3): 39-44.
- HU Jian-yong, SU Mu-biao. Assessment of the health status of railway bridge structure based on monitoring data[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University: Natural Science, 2016, 29(3): 39-44.
- [7] 淡丹辉, 孙利民. Mamdani 型模糊推理系统在桥梁状态评估中的应用[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(9): 1131-1135.
- DAN Dan-hui, SUN Li-min. Bridge linguistic monitoring methods based on Mamdani fuzzy inference systems[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(9): 1131-1135.
- [8] 任 远, 黄 侨, 林阳子. 大跨度斜拉桥综合评估系统的研制与开发[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(4): 535-539.
- REN Yuan, HUANG Qiao, LIN Yang-zi. Study and development of comprehensive assessment system of long span cable-stayed bridges[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007, 39(4): 535-539.
- [9] 陈大川, 李华辉, 欧阳攀. 城市混凝土梁式桥健康状况的模糊综合评判法[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(5): 139-143.
- CHEN Da-chuan, LI Hua-hui, OUYANG Pan. Study on fuzzy comprehensive assessment of city servicing concrete girder bridge[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2010, 30(5): 139-143.
- [10] 介玉新, 胡 韬, 李青云, 等. 层次分析法在长江堤防安全评估系统中的应用[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(12): 1634-1637.
- JIE Yu-xin, HU Tao, LI Qing-yun, et al. Application of analytical hierarchy process in the comprehensive safety assessment system of Yangtze River Levee[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44(12): 1634-1637.
- [11] 黄 侨, 任 远, 林阳子. 大跨径桥梁综合评估中的不确定型层次分析法[J]. 公路交通科技, 2008, 25(3): 79-83.
- HUANG Qiao, REN Yuan, LIN Yang-zi. Uncertain type of AHP method in comprehensive assessment of long span bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(3): 79-83.
- [12] 任 远, 黄 侨, 林阳子. 大跨度斜拉桥综合评估系统的研制与开发[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(4): 535-539.
- REN Yuan, HUANG Qiao, LIN Yang-zi. Study and development of comprehensive assessment system of long span cable-stayed bridges[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007, 39(4): 535-539.
- [13] 尚 鑫, 徐 岳. 基于灰色理论的斜拉桥拉索安全性评价[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(1): 52-55.
- SHANG Xin, XU Yue. Safety-based cables' condition evaluation of cable-stayed bridge with grey theory[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(1): 52-55.
- [14] 李昌铸, 王丽云, 谢经纬, 等. 特尔斐专家评估法在公路桥梁评价中的应用[J]. 中国公路学报, 1993, 6(2): 46-52.
- LI Chang-zhu, WANG Li-yun, XIE Jing-wei, et al. The TELFE expert evaluation in the highway bridge assessment[J]. China Journal of Highway and Transport, 1993, 6(2): 46-52.
- [15] MOHAMMADFAM I, GHASEMI F, KALATPOUR O, et al. Constructing a Bayesian network model for improving safety behavior of employees at workplaces[J]. Applied Ergonomics, 2017, 58: 35-47.
- [16] MOTA P P, ESQUÍVEL M L. Model selection for stock prices data[J]. Journal of Applied Statistics, 2016, 43(16): 2977-2987.
- [17] LE T, CLARKE B. Using the Bayesian Shtarkov solution for predictions[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2016, 104: 183-196.
- [18] CHEN H P. Monitoring-based reliability analysis of aging concrete structures by Bayesian updating[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2016, 30(2): 1-8.
- [19] 樊学平, 吕大刚. 基于 DLM 的桥梁结构承载力的贝叶斯预测[J]. 哈尔滨工业大学, 2012, 44(12): 13-17.
- FAN Xue-ping, LU Da-gang. Bayesian prediction of structural bearing capacity of aging bridges based on dynamic linear model[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(12): 13-17.
- [20] 魏冠军, 党亚民, 章传银. 应用贝叶斯动态模型的地基沉降概率分析与预测[J]. 测绘科学, 2012, 37(2): 52-53, 90.
- WEI Guan-jun, DANG Ya-min, ZHANG Chuan-yin. Foundation settlement probability analysis and prediction based on Bayes dynamic linear model[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(2): 52-53, 90.
- [21] 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.
- WU Duo, LIU Lai-jun, MIAO Ru-song. Neural network method in bridge condition assessment by B-TBU model[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2017, 38(4): 466-471.