基于改进的有限马尔可夫链的桥梁性能退化预测系统*

卢 新[1], 刘 朔[2]
(1. 中国科学院城市环境研究所, 福建 厦门 361021; 2. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094)

摘 要: 桥梁是交通系统的重要组成部分,对在役桥梁的结构性能进行有效评估和预测能促进桥梁的养护工作。根据实际项目应用情况,提出了一种符合国家行业标准,有效地进行桥梁结构性能评估与退化预测的模型。该模型建立了基于病害影响因素、病害、构件、桥梁与项目的自下向上五个层次的基于优化的有限马尔可夫链的桥梁结构性能退化预测方法,通过实际检测数据说明了该模型的适用性。最后对桥梁检测中得到的所有病害种类进行统计分析,结合病理分析知识库和改进的有限马尔可夫链,发现了现有桥梁的主要病害模式和主要病害因素,并预测桥梁未来的主要病害模式和主要病害因素。

关键词: 知识库; 桥梁结构性能退化; 有限马尔可夫链; 泊松分布
中图分类号: TP391 **文献标志码**: A **文章编号**: 1001-3695(2012)09-3348-04
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.09.038

Bridge performance degradation prediction system based on improved finite Markov chain

LU Xin[1], LIU Shuo[2]
(1. *Institute of Urban Environment*, *Chinese Academy of Sciences*, *Xiamen Fujian* 361021, *China*; 2. *Center for Earth Observation & Digital Earth*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100094, *China*)

Abstract: Bridge is an important part of transportation system. Effective assessment and prediction of bridge structural performance can promote bridge maintenance. This paper proposed a model in line with national industry standard based on the actual project to effectively assess the structural performance of bridges. The model established a bottom-up and five-levels(that was: disease factors, disease, components, bridges, projects) evaluation method of bridge structural performance, and used an optimized finite Markov chain to predict and illustrate the applicability of the model by using actual test data. Finally, this paper did some statistics on the disease data of bridges, using the knowledge-base of pathological analysis and the improved finite Markov chain, to find the main diseases and main disease factors of a bridge and predict the main diseases and main disease factors of a bridge in the future.

Key words: knowledge base; structure and performance degradation of bridges; finite Markov chain; Poisson distribution

0 引言

桥梁是国家交通体系中的重要组成部分,在役桥梁的安全对于国民经济的发展、人民的生命财产安全和社会稳定产生深远影响。桥梁在长期使用过程中,在内部的或外部的、人为的或自然的因素作用下,将发生材料老化与结构损伤,这个过程是不可逆的,这种损伤的累积将导致结构性能劣化、承载力下降、耐久性能降低[1]。

为了保证桥梁结构的性能处于较好的状态,许多国家都开发了各自的桥梁管理系统(CEBMS),把计算机辅助决策作为有效的桥梁管理方法,这其中有美国的 PONTIS 和 BRIGIT、丹麦的 DANBRO、我国有交通部的 CBMS,另外还有日本的 BMC、欧盟的 BRIME 等[1,2]。这些主流桥梁管理系统中,桥梁结构性能退化预测是其重要模块,退化预测是进行养护、维修及决策优化的前提,也是制定综合计划的必要环节。然而当前这些桥梁管理系统中的退化预测功能相对较弱,实际应用价值也未完全实现。总的来讲,现有桥梁管理系统软件中桥梁性能退化预测不足表现在两个方面:

a)桥梁检测所提供给数学模型挖掘的桥梁性能现状知识不够充分;

b)预测桥梁性能退化过程的数学模型不够合适,因为建立的数学模型是以已有的监测数据为基础的, 它反映的是过去结构在自身和环境的综合条件下的状况, 包括发展趋势、周期规律、随机干扰等因素。建立在这个模型上的预测能够反映被监测结构的内在信息。

本文研究采用对桥梁的各种检测方法获取的数据进行输入,并采用"病害影响因素,病害,构件,桥梁,项目"自底向上的组织方式,构建桥梁结构性能现状数据的知识库;根据国家行业规范的桥梁性能评估规则,参考现有的成熟的评估方法[3],建立桥梁结构适应性评估和桥梁承载能力评估方法;根据桥梁性能评估和预测需求将病害模式进行统计,结合病理分

收稿日期: 2012-02-09; **修回日期**: 2012-03-25 **基金项目**: 国家"863"计划资助项目(2008AA12Z203)
作者简介: 卢新(1978-),男,博士研究生,主要研究方向为空间数据挖掘模型(xlu@iue.ac.cn).

析知识库,得到桥梁的最大病害模式与最大病害隐私,建立桥梁运营风险评估方法,从而建立一套符合国家行业规范的、基于知识库的桥梁性能评估方法。最后,本文以构件病害为计算单元,使用改进的有限 Markov 链随机过程模型进行外延推理,预测得到了未来时间每一桥梁构件病害的状况,依据自底向上的、基于知识库的桥梁性能评估方法,对桥梁性能退化情况作出预测。基于改进的有限 Markov 链的桥梁结构性能退化预测过程结构如图 1 所示。

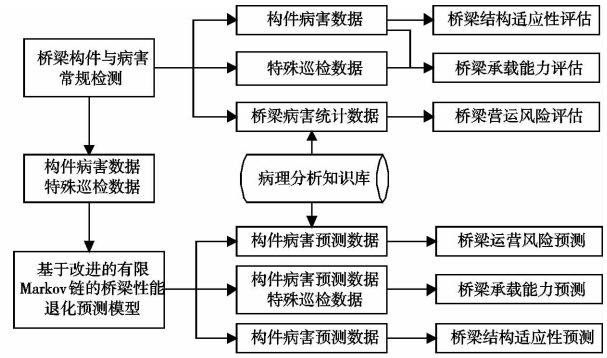

图1　桥梁结构性能退化预测过程结构

1　桥梁结构性能现状数据的逻辑组织

桥梁结构性能现状知识是桥梁结构性能退化预测的基础。根据检测数据应用逻辑:一个项目包含一个或多个桥梁,每个桥梁包含 17 类构件,每类构件均包括该类的若干个构件,每个构件包含若干个构件病害。根据桥梁实际检测情况,桥梁构件病害共分为 112 种,每一种病害对桥梁结构性能的影响程度有所不同。构件的一种病害的形成因素很多,本文根据实际应用情况归结为以下四个病害影响因素:桥梁荷载因素、材料风化因素、自然环境因素以及物理与化学损伤因素,在检测过程中根据病害成因进行排查和检测。以下给出一个项目的一般巡检的数据逻辑,如图 2 所示。

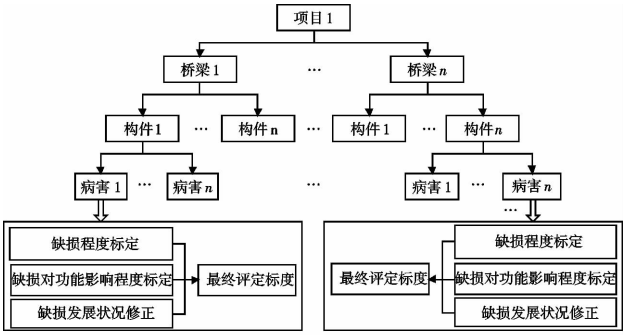

图2　桥梁巡检与评估的数据逻辑

2　桥梁结构性能现状的评估

2.1　桥梁结构性能现状知识库的建立

桥梁结构性能现状数据来源于外业桥梁检测,检测方法为桥梁常规检测。根据桥梁结构性能现状知识库构建的需要,桥梁一般巡检工作的内容包括桥梁信息、17 类构件的基本信息,每个构件的信息、每个构件出现的每种病害信息。这里,本文要对桥梁、构件、病害以及病害影响因素这四个层级的数据确定状态空间。

病害的状态空间取 0 ~ 5 的整数,而构件的状态空间参考我国规范《公路桥涵养护规范》(TTG H11-2004)[4] 对结构的状态空间加以说明。在《公路桥涵养护规范》中,将桥梁构件根据缺损状况分为五个等级。根据构件等级计算出桥梁的状态评分。

2.2　桥梁结构性能现状的评估

确定了桥梁各个构件的性能数据后,本文再采用国家行业规范[5] 中桥梁结构适应性评估方法进行计算,完成桥梁的结构性能现状评估。

计算方法实际是一种自底向上的方法,就是获得每类构件中评定状态值的最大值,即最差的构件的状态值代表该类构件的技术评定,然后设定每类构件所占的权值,对所有类别的构件的最终技术状况评定进行加权求平均值,求得该桥梁现阶段的全桥结构技术状况评分(Dr 值),进而评估出预测桥梁所处的状态与等级。具体的评定方法可以参考《公路桥涵养护规范》一书中的“推荐的桥梁各部件权重及综合评定方法表”。

2.3　桥梁的运营风险评估

桥梁的运营风险主要是由桥梁的典型病害造成的。本文第 1 章中提到,根据实际桥梁实际检测情况,桥梁构件病害共分为 112 种,为了对运营风险进行评估,有必要对这 112 种构件病害出现的总数、每类构件中的严重病害在该类构件中占的比例情况作统计,通过统计汇总,按照比例降序排列,取前几种病害作为该桥梁的最大病害模式。

各种病害模式的风险因素都有可能不同,风险因素又包含风险来源、风险种类、风险因素名称等内容。这里需要参考 112 种病害与风险因素表之间的参照关系,得到最大病害因素。这个参照关系可以根据对实际检测数据的归纳与分析,得到构件病害的病理分析知识库,这个知识库可以通过一个关系表,实质是表达出病害与风险因素之间的这种多对多的关系。

3　桥梁结构性能退化预测模型

基于桥梁现状性能知识库,运用基于 Poisson 分布与有限 Markov 链的桥梁性能退化预测模型,进行外延推理完成了桥梁结构性能预测。本研究采用的是时间预测,即采用桥梁过去和现在的性能知识,推断桥梁未来的性能知识。

3.1　使用马尔可夫链建立桥梁退化与预测模型的可行性

根据马尔可夫链模型定义,马尔可夫链是满足下面两个假设的一种随机过程:

a) $t+1$ 时刻系统状态的概率分布只与 t 时刻的状态有关,与 t 时刻以前的状态无关;

b) 从 t 时刻到 $t+l$ 时刻的状态转移与 t 的值无关。

根据以上介绍,桥梁数据分为五个层次,另外,桥梁构件的病害是符合有限马尔可夫链的四个性质[6]:

a) 有限状态数,构件病害的状态值只可取 0 ~ 5 的整数;

b) 符合马尔可夫性质,即病害在时间 $t+1$ 的状态仅与时间 t 相关,而与时间 $t-1, t-2, \cdots, 1, 0$ 的状态无关;

c) 稳定的状态转移概率,在完成了病害的状态转移矩阵后,转移概率已不受时间 t 之前的影响,呈现稳定概率;

d)有在时间 0 时各状态的起始概率,起始概率可以使用病害影响的四个因素,采用 Poisson 分布求得某一状态值转换到另一状态值的初始概率,这将在后面详细介绍。

整个桥梁的退化过程符合马尔可夫链[6]。如果转移概率与系统以前的状态无关,则此过程可简化为 Poisson 过程[6,7]。因此,就可以采用桥梁现状评估的自底向上的计算方法,分别从病害、构件、桥梁三个层次进行桥梁结构性能预测。

3.2　建立桥梁退化与预测模型

根据前面的分析,对于桥梁一个检测周期内的病害状态值,由当前状态值向转移的过程符合有限马尔可夫链,而在该检测周期内,病害状态值下降等级数符合 Poisson 分布,并可用下式表示:

$$P(Z_{in}=j)=\frac{e^{-\lambda_{in}}\lambda_{in}^{j}}{j!} \tag{1}$$

病害状态值下降与四个病害影响因素相关,即桥梁的荷载因素、构件的物理化学损伤、构件的材料风化因素与构件的自然环境因素[8]。因此本文将这四个因素纳入状态下降概率中分析[9],令

$$\lambda_{in}=e^{-\beta_i X_{in}}=e^{-(\beta_{i1}X_1+\beta_{i2}X_2+\beta_{i3}X_3+\beta_{i4}X_4)} \tag{2}$$

式(1)(2)中,Z_{in}为某病害在一个检测周期内状态值由状态 i 下降的等级数,故 i 取值为 0 ~ 5,j 可取值为:0,1,…,5 - i;λ_{in}为该病害在状态 i 下的劣化的 Poisson 分布的平均值 λ;β_i 为该病害在状态 i 下的劣化影响因素系数向量,在模型中它是一个 1 × 4 的行向量$[\beta_{i1},\beta_{i2},\beta_{i3},\beta_{i4}]$,这个向量是待求的;$X_{in}$ 为该病害在状态 i 时的四个病害影响因素标定值,这四个病害影响因素的标定值是根据实测经验确定的。标定值为0 ~ 5 的整数,数值越大,说明影响程度越明显。

针对不同类型的病害的不同状态,可以选取不同的病害影响因素系数向量β_i,根据最大似然法计算出该病害在不同状态下的病害影响因素系数向量β_i,如下式

$$\max L_i^{*}=\prod_{n=1}^{N}\frac{e^{-\lambda_{in}}\lambda_{in}^{Z_{in}}}{Z_{in}!} \tag{3}$$

其中 N 代表一类构件中某病害处于状态值 i 的总数。

为求解式(3)的最大值,建立目标函数$f(\beta_i)=-\ln L(\beta_i)$,即在约束条件式(4)下:

$$\begin{aligned}&\beta_i=(\beta_{i1},\beta_{i2},\beta_{i3},\beta_{i4})\\&\beta_{i1}+\beta_{i2}+\beta_{i3}+\beta_{i4}=1\\&\beta_{i1},\beta_{i2},\beta_{i3},\beta_{i4}\in[0,1]\end{aligned} \tag{4}$$

求解该目标函数的最小值问题。该问题属于有约束条件的最优化求解,实际求解中,本文对自变量 β_{i1}、β_{i2}、β_{i3}、β_{i4} 进行枚举[10],搜索出最优解,即最小值时的系数向量。实验证明,穷举搜索求解的结果是准确的,求解速度也是可以接受的。

然后,可求得对应的 Poisson 分布的 λ 值,再以式(5)求得转移概率[11]:

$$\bar{P}(Z_{in}=j\mid X_n,j)=\frac{e^{-\bar{\lambda}_{in}}\bar{\lambda}_{in}^{j}}{j!} \tag{5}$$

求得转移概率后,就可以获得此检测周期内病害的状态转移矩阵,如式(6)所示。

$$P=\begin{bmatrix}P_{11} & P_{12} & \cdots & \cdots & \cdots & P_{1(K-1)} & P_{1K}\\ 0 & P_{22} & \cdots & \cdots & \cdots & P_{2(K-1)} & P_{2K}\\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \vdots & \vdots\\ \vdots & \vdots & \cdots & \cdots & \cdots & \vdots & \vdots\\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & P_{(K-1)(K-1)} & P_{(K-1)K}\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & P_{KK}\end{bmatrix} \tag{6}$$

令某种构件病害当前的状态值为 $i=3$,则可用向量 A 表示为[0,0,0,1,0,0],令

$$B=AP^{r} \tag{7}$$

则可依据以下公式预测下一期($r=1$)或者下几期($r>1$)的状态值,令

$$B=[b_0,b_1,b_2,b_3,b_4,b_5] \tag{8}$$

则可以根据期望值求预测的状态值,第 r 期的病害状态值 i_r 为

$$i_r=b_1+2b_2+3b_3+4b_4+5b_5 \tag{9}$$

依次求得各个构件的病害的预测值后,就可以基于这批数据得到预测的桥梁性能知识。

4　桥梁结构性能现状评估的实现

本研究中,桥梁技术状况的评估、预测及其管理系统的开发取得了一定的进展,其中桥梁技术状况的评估与管理系统开发中的关键方法与技术都已经很成熟了[12]。基于上面分析得到的评估方法和预测模型开发了“在役桥梁性能退化与预测管理系统”,该系统功能完善,其中桥梁结构功能预测模块改进了原有的预测模型,提高了预测水平。

笔者获取了某市一座大桥的结构性能现状数据,即构件信息以及构件巡检信息录入到该系统中,建立了结构性能现状知识库。然后对桥梁进行三项评估,即桥梁适应性评估、桥梁承载力评估以及桥梁运营风险评估。

根据 3.1 节详细介绍的方法,实现了对该桥梁结构适应性的自动评估,图 3 给出对该桥梁进行适应性评估的结果,包括桥梁等级、桥梁 Dr 值以及各个构件的最终评定。

图3　桥梁结构适应性现状评估结果

基于病害数据就可以完成该桥梁的运营风险评估,运营风险评估即是根据桥梁检测与统计得到的病害数据,结合病理分析知识库综合构建了最新的病害知识库,对病害知识库进行统计分析,从而发现现有桥梁的主要病害模式和主要病害因素。图 4 给出了该桥梁的主要病害模式分析结果。

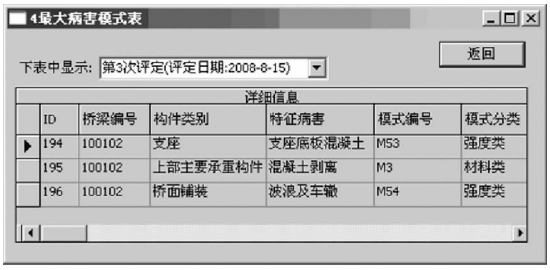

图4　桥梁的病害统计与主要病害模式

5　桥梁结构性能退化预测的实现

基于 3.2 节详细分析得出的基于有限 Markov 链与 Poisson 分布的桥梁结构性能退化预测模型,编写了算法,成功开发出预测模块,实现了桥梁结构适应性、结构承载力、结构运营风险的预测功能。并在实际测试与应用中应用了这个预测模块,取得了一定的进展。以下是基于此预测模型得到的该桥梁,未来两个周期内该桥梁构件的状态值预测结果和桥梁 Dr 值预测结果。桥梁 Dr 值的两期预测结果如图 5 所示。

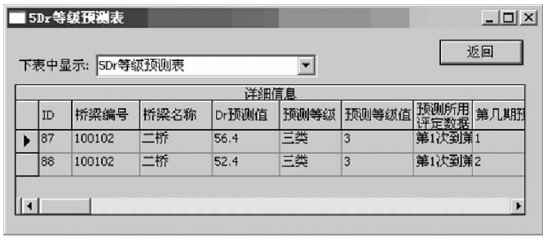

图5　桥梁结构适应性预测评估结果

同样,以桥梁构件的 112 种病害为计算单元,基于 3.2 节的预测模型,可以完成桥梁未来几期内最大病害模式以及最大病害因素的预测。给出该桥梁未来 1 期内的最大病害因素预测结果界面截图,如图 6 所示。

图6　桥梁的病害预测与主要病害因素预测

从以上的评估与预测结果中抽取出“桥梁结构适应性”的现状评估与预测,通过比较分析,对桥梁结构性能退化的趋势进行了评估,如表 1 所示。通过表 1 可以发现,桥梁的 Dr 值有明显的减小,这说明桥梁的某些构件的性能正在老化,整个桥梁的结构性能退化明显。根据预测得到的桥梁每个构件的状态值,可以为桥梁养护与构件修护提供明确的指导意见。

表 1　桥梁结构与性能退化趋势预测分析

	现状	未来 1 期	未来 2 期
桥梁 Dr 值/等级	68.2/二类	56.2/三类	52.2/三类
病害严重的构件种类	桥墩、上部一般承重构件	桥墩、上部主要承重构件、上部一般承重构件	桥墩、上部主要承重构件、上部一般承重构件

6　结束语

本文结合国家行业标准,提出了一种自底向上的、基于构件病害检测的桥梁结构性能评估方法,基于有限 Markov 链与 Poisson 分布建立了桥梁性能退化预测模型,并编写算法,研发出了可用性强的软件系统。该套系统也正逐步投入使用,对现实桥梁设施检测工作有很高的参考价值。其中提到的巡检规范、结构性能评估方法、性能退化预测算法已在实际应用中得到了有效的验证,得到了以下结论:

a)采用本文提到的自底向上的、五个层次的桥梁结构性能评估方法,能比较真实地反映桥梁的构件的病害情况以及桥梁的整体性能。

b)以病害为基本巡检单元建立病害知识库,并对整个桥梁的病害进行统计分析,能有效地反映桥梁的主要病害,这些数据能真实反映桥梁的运营风险,对病害的防治与桥梁的养护具有很高的参考价值。

由于桥梁性能退化的预测工作是一个十分复杂、尚处于研究阶段的工作,本系统开发的预测模块还有待更多的实测桥梁数据录入,在不断的学习、验证过程中,提高其预测的准确率,这也是后续研究工作的重点。

参考文献:

[1] 戴宇文,韩大建. 桥梁管理系统中的桥梁退化模型实现 [J]. 水运工程,2005(9):78-82.

[2] 梁峥,曹明兰. 国内外桥梁管理系统发展综述[J]. 建筑管理现代化,2007(4):54-56.

[3] 吕颖钊,贺拴海. 在役桥梁承载力模糊可靠性的马尔科夫预测[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(4):41-43.

[4] 陕西省公路局,长安大学. 中华人民共和国行业标准:公路桥涵养护规范(JTG H11-2004)[S]. 北京:人民交通出版社,2004.

[5] 梁烜. 桥梁状态综合评价及预测方法研究 [D]. 北京:北京工业大学,2006.

[6] STRPPCK D W. Markov 过程导论[M]. 林正炎,等译. 北京:高等教育出版社,2007.

[7] 威廉·费勒. 概率论及其应用[M]. 胡迪鹤,译. 北京:人民邮电出版社,2006.

[8] 肖浩然. 在役桥梁病害检测与承载力评定研究 [J]. 湖南交通科技,2009,35(2):114-118.

[9] 张晋玮. 台湾地区钢筋混凝土桥梁构件劣化模型之建立[D]. 台湾:台湾中央大学土木工程研究所,2004.

[10] 程进. 基于枚举法的锥齿轮传动优化设计 [J]. 西昌学院学报:自然科学版,2009,23(1):44-46.

[11] De STEFANO P D, GRIVAS D A. Method for estimating transition probability inbridge deterioration models [J]. Journal of Infrastructure Systems,1998,4(2):56-62.

[12] 汤怀胜. 桥梁技术状况评估、预测及管理系统开发研究[D]. 长沙:湖南大学,2008.