

文章编号:1005-0930(2023)05-1278-019 中图分类号:U445.7 文献标识码:A
doi:10.16058/j.issn.1005-0930.2023.05.017

基于多属性效用的桥梁综合性能维养决策算法

林涛¹, 贾磊¹, 董优², 张佳鑫²

(1.深圳交通规划设计研究中心股份有限公司,广东深圳5180001;2.香港理工大学土木与环境工程学院,中国香港999077)

摘要:近年来,我国交通路网迅猛发展,桥梁结构作为其中的重要载体,不仅要满足技术安全,也要满足社会和经济发展的要求,亟需对桥梁的综合性能进行有效准确地评估,并选取对应维养策略以保证其维养周期内综合性能处于最优状态。首先提出基于模糊评价的多属性效用综合评估法(MAUFE),对桥梁养护规划中的多种性能评估指标进行多属性效用分析;并结合马尔可夫模型、LSTM算法建立桥梁退化过程预测模型;而后建立智能维养决策框架保证维养周期内 MAUFE 评估结果的最优。评估模型以多属性效用函数将桥梁技术状况评分、全寿命周期费用及可持续性指标转化为反映综合性能的效用值,采用层次分析法和熵权法权重进行融合权重计算(AHP-EW),结合模糊分析理论计算指标隶属度并完成综合性能评估;根据桥梁退化实际观测数据结合数据驱动手段对桥梁性能进行准确预测;建立指定目标及约束下桥梁全寿命维养决策数学模型,采用遗传算法进行求解。最终,选取代表性桥梁对其全寿命周期内的综合性能进行评估,设定不同维养场景分析对比不同的评估指标作为目标与约束对桥梁全寿命周期性能的影响,并对某单体桥梁30a周期内的维养策略进行求解。结果表明,评估方法能充分反映决策者的风险态度,避免综合性能评估中的“指标偏好”;预测模型能对桥梁健康状态进行准确预测;以综合评估模型作为维养目标时,能得到令各单项评估指标均较优的维养决策场景,维养决策模型能在有限预算内最大限度提升桥梁综合性能。

关键词:多属性效用;模糊评价法;融合权重;综合评估;马尔可夫模型;长短期记忆 LSTM;遗传算法;多目标优化;智能维养

桥梁性能的准确评估和维养决策是保证其正常服役,发挥其社会、经济价值的关键。因此,对于桥梁状态的估计和性能提升算法的开发成为当今学者的研究重点。在我国现有的桥梁评价研究中,多数关注桥梁自身状态,且对于评估指标的权重分析较少。我国规范

收稿日期:2022-02-24;修订日期:2022-11-28

基金项目:科技部国家重点研发计划项目(2019YFB2102700)

作者简介:林涛(1975—),男,博士,教授级高级工程师.E-mail:

通信作者:张佳鑫(1994—),男,博士研究生.E-mail:jiaxinnn.zhang@connect.polyu.hk

采用常权方法对指标权重进行定义^[1],在此基础上,部分学者引入变权理论,考虑构件退化及重要性等因素进而对权重进行改进^[2-5].然而此类权重分析方法偏于主观,缺乏对客观事实的反映;熵权法、标准离差法、CRITIC^[6-8]等客观定权方法通过对历史数据的统计信息确定对象权重,而客观方法却缺少对于实际重要程度的阐述;国内外诸多学者研究尝试将主、客观定权方法进行融合,以同时体现指标在评价体系中的重要程度和数据本身的信息挟带情况^[9-10].

仅对桥梁自身性能评估往往忽略了桥梁的社会经济价值,对此,Bukhsh等分析了荷兰境内桥梁的状况、养护费用、环境因素和间接成本等诸多因素^[11].Antoniou等采用多属性效用理论对希腊的高速公路路网的服役性能进行了评价^[12].美国里海大学的Frangopol和香港理工大学的Dong将全寿命周期费用、灾害等级等因素列入评估指标中,结合多属性效用理论,对桥梁的综合性能评估做出了诸多探索^[13-15].然而,现有的评估指标仍有模糊定界不明确的现象,在融合为综合评估指标时往往难以实现,需要进一步采用模糊理论对各项指标分析.孙晓燕等^[16]针对桥梁碳排放指标引入模糊理论对其进行了单一指标评估.

受到工程技术、经济等方面制约,考虑不同限制下合理决策提升性能评估结果成为各国学者的研究重心.养护决策模型需要养护指标指导数学模型的建立,如基于系统可靠度、经济指标、技术状况等单一性能指标建立单目标规划问题,进而得到养护决策清单^[17-21];Dong等引入多属性效用函数对桥梁养护中的多目标规划问题进行分析,采用遗传算法对桥梁多属性值为目标函数的决策问题进行了优化求解^[22-24].已有的养护优化研究中,研究者对算法的实现及性能的提升做出了诸多探索,但在实际中,不同工程的实际情况及环境有所区别,目标及约束对养护方案效果的影响仍待讨论.同时,决策过程需要对目标系统状态变化进行准确地预估^[25],进而选取合适的养护手段组合,因此,高精度、长时效的状态预测模型是养护决策模型准确实施的基础,传统的结合桥梁定检数据的退化模拟方法一般以马尔可夫模型为主,通过状态转移矩阵模拟结构在不同等级状态下的分布情况^[26];得益于复合传感技术的发展和各类计算机算法的提出,机器学习模型结合定检、健康监测的数据融合、预测方法被广泛应用于结构状态预测当中^[27].

首先提出了一种针对桥梁全寿命周期内综合性能的评估算法,考虑了桥梁技术状况评定、全寿命周期费用和可持续性3项评价指标,采用效用函数将指标值转化为考虑决策者态度的效用值,通过加权求和的方式确定多属性效用;指标权重由主客观相结合的层次分析法融合熵权法(AHP-EW)决定,结合模糊综合评价法对桥梁综合性能进行评估.而后根据实际桥梁定检历史数据,最后以特定的养护目标及约束建立数学模型,采用遗传算法进行求解,得到不同养护场景下的养护策略.

1 桥梁多属性效用分析

多属性效用分析法(Multi-Attribute Utility Analysis, MAUA)在消除关联性、数据无量纲、建立数据层次保证评价结果等方面具有较强的优越性,在众多领域发展了多项应用.在诸多国家,也同样应用于桥梁养护评估中^[12,17,28].

1.1 多属性效用函数

多属性效用函数一般需要先对单一效用函数进行计算,而后通过权重融合.对于单因素的效用函数,一般假定为指数函数形式^[29]

$$U_i(x_i) = A - B \cdot e^{-\frac{x_i}{RT}} \quad (1)$$

各项参数计算如下

$$A = \frac{e^{-\frac{\min(x_i)}{RT}}}{e^{-\frac{\min(x_i)}{RT}} - e^{-\frac{\max(x_i)}{RT}}} \quad (2)$$

$$B = \frac{1}{e^{-\frac{\min(x_i)}{RT}} - e^{-\frac{\max(x_i)}{RT}}} \quad (3)$$

$$RT_i = \frac{-CE_i}{\ln\left(\frac{-0.5U_i(\max(x_i)) - 0.5U_i(\min(x_i)) + A}{B}\right)} \quad (4)$$

其中: U_i 为在单项指标*i*的效用值; A 和 B 分别为放缩常数; $\min(x_i)$ 和 $\max(x_i)$ 分别为单项指标效用最小和最大时的指标值; RT (Risk tolerance)为风险态度.

当 RT 为负时,为风险偏好型(risk-prone)决策; RT 为0时,为风险中立; RT 为正时,为风险规避型(risk-averse)^[30].风险态度 RT 按式(5)通过确定等值 CE (certainty equivalent)计算得到

$$e^{-\frac{CE}{RT}} = 0.5 \times e^{-\frac{\max(x_i)}{RT}} + 0.5 \times e^{-\frac{\min(x_i)}{RT}} \quad (5)$$

每个属性的 CE 是通过构造有最佳和最差选择的彩票设定法来计算的,其中每个均有50%的被选中的概率^[31].将 CE 带入式(5)后得到 RT 值,而后将 RT 代入式(1)即可得到单一效用函数.

单一指标的效应函数须通过加权求和的方式融合为多属性效应函数

$$U = \sum_i k_i \cdot U_i(x_i) \quad (6)$$

其中: k_i 为指标*i*效用函数 U_i 对应权重,满足关系 $\sum_i k_i = 1$.

1.2 桥梁评估指标

1.2.1 桥梁技术状况评定 桥梁技术状况指标一般用于反映桥梁的当前状态,通过对构件的表观破坏、内部损伤进行构件评分,将所得分数加权求和得到桥梁整体技术评估分数.在我国的桥梁评估中,公路桥涵规范一般采用 BCI 值对桥梁的技术状况进行打分评级^[1].将桥梁分为上部结构、下部结构和桥面系,遵循先部位再全桥的评估顺序,根据定检信息首先对各部位分别进行评估,再分层加权得到整个桥梁的技术状况.如式(7)

$$BCI = BCI_m \cdot w_m + BCI_s \cdot w_s + BCI_w \cdot w_w \quad (7)$$

其中: BCI 为全桥的技术状况评估分数; BCI_m 、 BCI_s 和 BCI_w 分别为桥面系、上部结构和下部结构的单项指标值, w_m 、 w_s 和 w_w 分别为桥面系、上部结构和下部结构的权重,由规范分别为0.40、0.40、0.20.

1.2.2 全寿命周期费用 桥梁的全寿命周期费用主要由日常维养费用、检测费用、维

修费用及潜在失效损失组成^[15]

$$C_{ET} = C_T + C_{PM} + C_{INS} + C_{REP} + C_F \quad (8)$$

其中: C_T 为初始花费; C_{PM} 为日常维养费用; C_{INS} 为检测费用; C_{REP} 为维修费用; C_F 为潜在失效损失.初始花费此处视为与桥梁几何参数,如跨径、桥宽有关的函数^[32].桥梁全寿命周期内的日常维养费用较难进行预测,一般来说,各年份的日常维养费用被视为与时间有关的线性函数^[33],检测费用通过检测质量进行估计,一般为初始花费的百分比.维修费用采用全寿命周期内的维修产生费用的期望值表示.

实际灾害(如地震、洪水)可以视为泊松过程,在全寿命周期内的失效损失风险可以表示为^[34]

$$C_F(t_{int}) = \sum_{k=1}^{N(t_{int})} l(t_k) \cdot e^{-\gamma t_k} \quad (9)$$

其中: t 为全寿命周期; N 为全寿命周期内灾害发生次数; l 为平均灾害损失; γ 为净折现率.

1.2.3 可持续性 可持续性应根据经济、社会和环境指标进行综合量化.对于社会可持续性,一般采用交通停运而导致的绕路时间来表示^[35]

$$DT = d \cdot ADT \cdot \frac{D}{S} \quad (10)$$

其中: d 为交通停运时间; ADT 为需要绕路的日平均车流量; D 为绕路距离; S 为绕路中车辆时速.

环境可持续性包含能量损耗、温室效应和空气污染等.在实际计算中,主要将能量的损耗和碳排放作为影响因素.因此,桥梁中的环境可持续性指标可以定义为车辆碳排放量和维修动作排放量

$$EN_{DT} = ADT \cdot D \cdot d \cdot \left[Enp_{car} \left(1 - \frac{T}{100} \right) + Enp_{truck} \cdot \frac{T}{100} \right] \quad (11)$$

$$EN_{RE} = (Enp_{steel} \cdot V_{steel} + Enp_{conc} \cdot V_{conc}) \cdot RCR \quad (12)$$

其中: Enp_{car} 和 Enp_{truck} 分别为汽车和火车每公里碳排放量,kg/km; T 为日平均车流量中卡车比例; Enp_{steel} 和 Enp_{conc} 分别为维修过程中钢筋和混凝土所引起的碳排放量; V_{steel} 和 V_{conc} 分别为维修中钢筋和混凝土的消耗量; RCR 为不同灾害等级下的维修比例.

经济可持续性一般视为灾害或特殊荷载场景下桥梁的重建、维修费用,可以视为与桥梁施工总体造价有关的函数.

2 模糊综合评价法

模糊综合评价法作为模糊数学中的一种重要手段,用于解决评价过程中评价指标复杂、标准模糊,定性的评价难以量化的问题,目前在工业、制造业等领域进行了诸多应用^[36-38].模糊评价法中通过隶属度来描绘模糊边界,需要确定评价层次及待评价指标,在桥梁综合性能评估中,模糊评价层次如图1所示.模糊评价法主要用于将目标层的桥梁综合评估指标与准则层的桥梁评判指标建立联系,准则层与子准则层直接通过指标定义联系.

准则层的3项指标通过多属性效用分析定量描述后进行模糊判断,并构造隶属度矩阵,通过AHP-EW方法确定各项指标的权重,进而得到桥梁综合性能的加权隶属度.

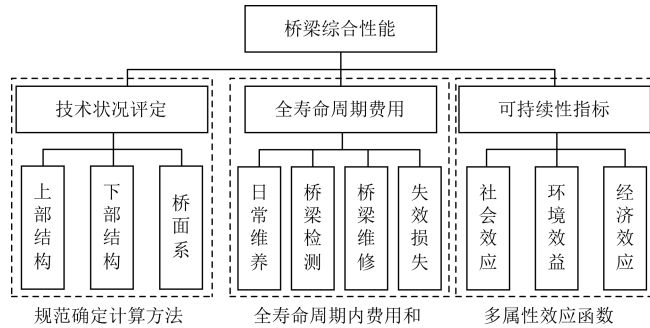


图1 桥梁多属性效用综合评估分析层次

Fig.1 Hierarchy of bridge multi-attribute evaluation

2.1 隶属度表示法

由于客观环境的不确定性、人为操作的主观性,只能通过建立近似的隶属度予以评价.隶属函数表示法,将某一元素 u_i 的归类 (v_i) 问题不进行明确的区分,而利用隶属函数表示.对于确定空间内的指标 X ,其对于模糊集 \tilde{A} 的隶属度一般采用模糊统计、模糊分布等^[39].模糊统计一般通过直接调研的方式,寻求相关人员对指标的分级评价,通过数理统计得到模糊统计方法下的模糊隶属度.模糊分布通过假定指标隶属度的分布情况,得到相应的模糊隶属度,此处采用较为常见的 Sigmoid 分布的形式^[40].如图 2 所示.

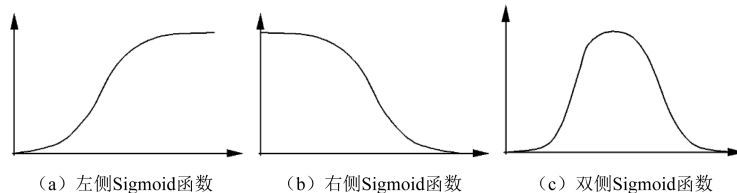


图2 Sigmoid 分布的隶属度函数

Fig.2 Membership functions of sigmoid distribution

2.2 AHP-EW 法

AHP-EW 法是一种将主观权重和客观权重进行融合的技术^[10],弥补了主观权重缺乏客观显示及客观权重缺乏重要性展示的不足.

2.2.1 层次分析法 (AHP) 层次分析法将决策者的经验判断给予量化,对目标(因素)结构复杂而且缺乏必要数据的情况下,采用此方法较为实用.层次分析法中需要对于准则层的各项指标建立成对比较阵(判断矩阵):根据指标重要性两两进行比较,一般按照 1、3、5、7、9 进行赋值,数值越大代表相对另一个指标越重要,1 表示同等重要;若重要性低于另一指标,选用 1/3、1/5、1/7、1/9 进行赋值.其他数值按照重要程度可以进行内插.通过构造判断矩阵,并对其最大特征根 λ_{max} 对应的特征向量 W 进行一致性检验选取权重,若判断矩阵通过一致性检验,则该特征向量为权重向量.

2.2.2 熵权法 (EW) 在熵权法中,信号所携带信息与熵成反比.指标反映的信息量越大,其熵值越小.为防止各指标量纲不统一,量级不一致,需对原始数据进行标准化处理,

将每个指标下标准化后的数据视为一条信号,根据信息熵的定义,对于第 i 项指标的信息熵

$$E_i = - \frac{1}{\ln(n)} \sum_{j=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \tag{13}$$

其中: $p_{ij} = Y_{ij} / \sum_{j=1}^n Y_{ij}$; n 为样本总量.

通过各指标信息熵计算得到指标权重

$$\beta_i = \frac{1 - E_i}{m - \sum_{i=1}^m E_i} \tag{14}$$

其中: m 为指标个数.

2.2.3 综合权重确定技术 将熵权法确定的客观权重 (objective weight) 和由层次分析法确定的主观权重 (subjective weight) 融合为综合权重

$$\omega_i = \frac{\alpha_i \cdot \beta_i}{\sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot \beta_i} \tag{15}$$

其中: α_i, β_i 分别为评价的主、客观权重.

2.3 计算流程

通过单项指标的隶属度矩阵和综合权重确定综合评估结果的加权隶属度

$$B = W \cdot R = (w_1, w_2, \dots, w_m) \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{pmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_n) \tag{16}$$

结合融合权重 AHP-EW 的 MAUFE 方法的综合评价方法整体流程如图 3 所示.

首先对桥梁技术状况评定、全寿命周期费用和可持续性 3 个单项指标属性值进行计算,而后通过多属性效用函数将属性值转化为效用值,采用 AHP-EW 法将层次分析法和熵权法进行权重融合,最后通过单项指标的隶属度矩阵和综合权重确定综合评估结果的加权隶属度.

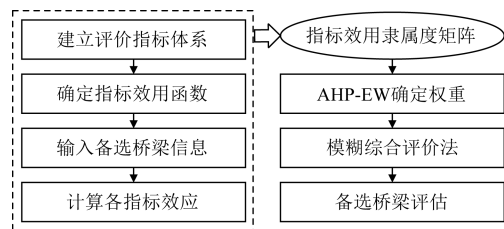


图 3 MAUFEM 基本流程
Fig.3 The flow chart of MAUFE

3 桥梁性能预测

桥梁维养规划的本质是预示桥梁未来性能变化,据此选取最合适维养方案组合保证整体服役性能.因此,高精度的性能预测模型是维养决策模型的保障.以马尔可夫链及长短期记忆模型分别建立桥梁结构性性能退化模型,用于对桥梁的长期性能状态及瞬时响应进行预测.

3.1 马尔可夫长期状态预测

马尔可夫模型是一种经验统计模型.在马尔可夫随机理论中,构件将来的状态只与现在的状态有关,而与过去状态无关.马尔可夫链是马尔可夫过程中的一种,它代表着时间和状态都是离散的马尔可夫过程.马尔可夫过程中的变量值称为状态,它的全部取值组成的集合称为状态空间.随机变量 S 的状态空间中包含 5 个单元,对应桥梁技术状态评定规范里的 1 类到 5 类的状态.它的时间参数是离散的时间段.假设随机过程 $\{X_n | 1, 2, 3, 4, 5\}$, X_n 只依赖于 X_{n-1} , 而不依赖 $X_{n-i}, i > 1$. 因此状况转移概率矩阵由一个 5 阶矩阵组成.一个周期的概率转移矩阵 P 可以表示为

$$P = \begin{pmatrix} r_1/(r_1 + 1) & 1/(r_1 + 1) & & & \\ & r_2/(r_2 + 1) & 1/(r_2 + 1) & & \\ & & r_3/(r_3 + 1) & 1/(r_3 + 1) & \\ & & & r_4/(r_4 + 1) & 1/(r_4 + 1) \\ & & & & 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

马尔可夫过程矩阵为方阵,其中矩阵行号代表当前构件的状态,矩阵列号代表构件经历一个周期后的状态,行列在矩阵中的对应值代表概率,即状态的转移概率.

3.2 长短期记忆神经网络 (LSTM) 响应预测

作为一种时间循环神经网络,长短期记忆网络(Long Short-Term Memory, LSTM)被广泛应用于机器学习的时间序列预测中.不同于一般人工神经网络,递归神经网络(RNN)充分考虑了在时间序列中的重要数据之间可能存在未知持续时间的滞后;在此基础上, LSTM 为了处理在训练传统 RNN 时可能遇到的爆炸和消失的梯度问题,在 RNN 的基础上,在单个循环结构中引入 4 个状态.相比于 RNN, LSTM 循环结构之间保证了一个持久单元的持续传递,用于判别输入信息的去留问题.

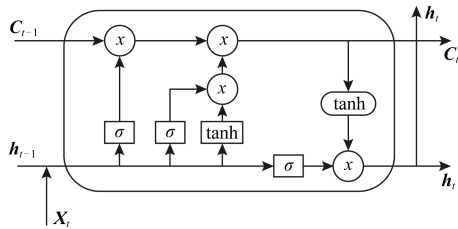


图 4 LSTM 单元结构
Fig.4 A common LSTM unit

每个 LSTM 层由单个循环结构组成,输入数据的维度和循环次数决定了整体结构自我更新次数,当前层 LSTM 仅需计算一个循环单元,而无需对多个连续单元进行计算.如图 4 所示,单个 LSTM 由输入门、遗忘门、输出门和单元状态组成,各单元门功能如下.

输入门:决定当前时刻网络的输入数据到单元的储存数量;

遗忘门:判断前一时刻到当前时刻的状态

转移量;

输出门:控制当前单元状态的输出量.

4 维保决策优化

在桥梁维保问题中,以综合性能的最优化引导维保策略是保证桥梁正常运营、充分发挥社会经济效应的基本保障,因此成为众多学者的研究重点.以桥梁历年模糊综合评估结果的期望最优为目标函数,维保总成本为约束条件,建立数学模型,并结合遗传算法求解.

4.1 数学模型建立

桥梁养护决策模型本质即为在特定年份中是否选择某项养护方法,即为优化问题中的 0-1 规划问题.以 0-1 变量 x_{ij} 表示在年份 i 对养护方法 j 的选取与否,则对于年份 i 内的总成本 C_i 可以定义为

$$C_i = \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot c_j \quad (18)$$

其中: c_j 为动作 j 所需要的维养成本.所有养护方法维养成本均在当年产生,无提前或滞后.

年份 i 内由于养护方法产生的碳排放量为

$$E_i = \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot e_j \quad (19)$$

其中: e_j 为动作 j 发生产生的碳排放量,该年份产生的碳排放不会累积到下一年份养护方法发生.

第 s 年养护方法产生的效应为

$$B_s = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot b_j \quad (20)$$

其中: b_j 为养护方法 j 的维养效用.在维养效应计算中,维养效应受先前养护方法的影响,即第 s 年的维养效应是第 1 到第 s 年所有养护方法产生的共同作用.

综上,桥梁养护决策的数学模型可建立为

$$\begin{aligned} & \max f(C, B, E) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \sum_i C_i \leq \text{Budget} \\ \eta(s) + B_s \leq 100 \\ FR(\eta(s) + B_s, ML(s)) > 0.8 \\ x_{ij} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (17) \end{aligned}$$

其中:维养目标为多属性效用评估结果 $f(\cdot)$ 最高,该项受技术状况指标、全寿命周期费用和可持续性共同作用.模型约束主要为累计维养费用 $\sum_i C_i$ 不超过设定预算,各年份桥梁技术状况评分(即自然退化性能 $\eta(s)$ 和养护方法产生效用 B_s 的作用总和)不超过评定结果的满分,其中自然退化模型由马尔可夫状态预测模型得到; $FR(\cdot)$ 为模糊评价模型,用于将长期状态与瞬时响应结合,该约束令桥梁长短期综合性能处于一类区间.

4.2 遗传算法求解

区别于传统“背包问题”中的 0-1 规划模型,数学模型中各年的桥梁性能均视为一个“背包”,模型需要兼顾维养周期内所有“背包”内养护方法的选取.对于该类复杂的多背包问题,传统的分支定界、贪心算法存在容易陷入局部最优、对目标可导性要求高、结果难以收敛等问题,一般需要借助群体智能算法进行全局最优解的求解,其中以遗传算法应用较广^[41].

遗传算法模拟生物的进化过程中优胜劣汰的选择机制,通过种群中对环境适应度最佳的个体繁衍、进化,在不断地迭代中通过选择、交叉和变异实现优化.在算法实现中,首

先随机生成一组种群,计算种群中适应度最高的个体,并对群体中的其他个体进行排序,依据这一排序次序选取进入下一次迭代的个体,在这一过程中,个体间可能会进行遗传编码的交叉及自身编码变异,通过这一策略,最优个体有更大的概率遗传到下一代中.经过多代循环,即可得到多背包问题中的最优解,如图 5 所示.

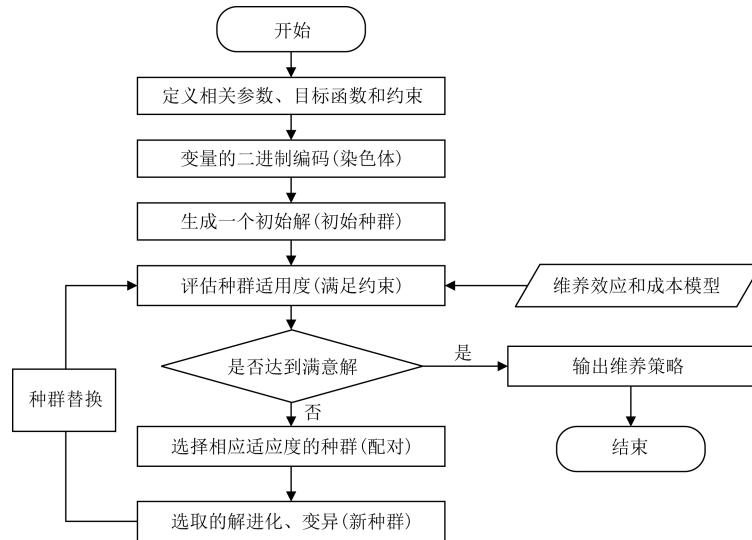


图 5 遗传算法求解流程

Fig.5 Solving flow of genetic algorithm

5 实际应用

5.1 MAUFE 法综合性能评估

文献[24,42]对公路桥梁进行了多属性效用分析及维修决策优化,经过文献调研、数据统计和等方式,总结得到桥梁各单项指标分布形式及参数,如表 1 所示.

表 1 计算相关的随机变量的参数

Table 1 Parameters of the random variables associated with the calculation

指标参数	分布均值	分布形式	指标参数	分布均值	分布形式
重建费用/(USD·m ⁻²)	1 292	固定值	绕路距离/km	7.9	对数正态分布
桥梁宽度/m	10.4	固定值	平均绕路速度/(km·h ⁻¹)	104	对数正态分布
桥梁跨径/m	69.2	均匀分布	车辆碳排放量/(kg·km ⁻¹)	0.22	对数正态分布
非卡车比例	1.56	固定值	卡车碳排放量/(kg·km ⁻¹)	0.56	对数正态分布
日平均车流卡车比例/%	4	固定值	混凝土碳排放量/(kg·m ⁻³)	376	对数正态分布
日平均车流量	5 000	对数正态分布	钢筋碳排放量/(kg·m ⁻³)	9 749	对数正态分布

参照表 1 的分布情况,变异系数均取 0.2,生成桥梁 1 000 组样本数据,并将样本中的桥梁单体分别进行评估比较,验证评估算法的有效性.

对于各单项指标的效用函数,通过决策者构造最大效用与最小效用的概率相等时的属性值确定函数期望值 EV (Expected Value),进而通过式(5)得到风险态度 RT 值,代入

式(1)即可得到各指标的效用函数.需要注意的是,效用函数计算中,属性值转化后的效用值均为“趋利”的选择导向,因此所有评估指标效用值都具有同一方向,即效用值越大,结果越积极.按照等值划分的原则将 $[0,1]$ 的效用函数值划分到由好及坏的5个类别中,形成隶属度矩阵.由效用函数的特殊性,第I类桥梁多属性效用值不会大于1,第V类桥梁效用值不会小于0.因此,对第I类和第V类的隶属度函数,选用图2(a)、(b)中所示的单边 Sigmoid 函数,中间的第II、III、IV类桥梁采用2(c)中的双边隶属度函数,构成指标隶属度矩阵.

对于模糊综合评价中的各项指标权重,选用2.2节提出的主客观融合的 AHP-EW 方法确定.对于 AHP 方法,由于决策系统的复杂性,基于单个专家的经验 and 知识获得的指标权重的可靠性无法保证.对国内外 30 余名相关领域专家学者采用问卷调查的形式,结合群组 AHP 方法^[4,43],对各专家的群组差异与相似性进行分析,如图6(a)所示,确定指标体系的主观权重.而后对文献[11,22]所述的35座桥梁的技术状况等级、全寿命周期费用及可持续性指标进行统计,如图6(b)所示,结合EW方法构造多指标的客观权重.最终采用式(15)进行权重融合,得到主客观相结合的各指标融合权重.

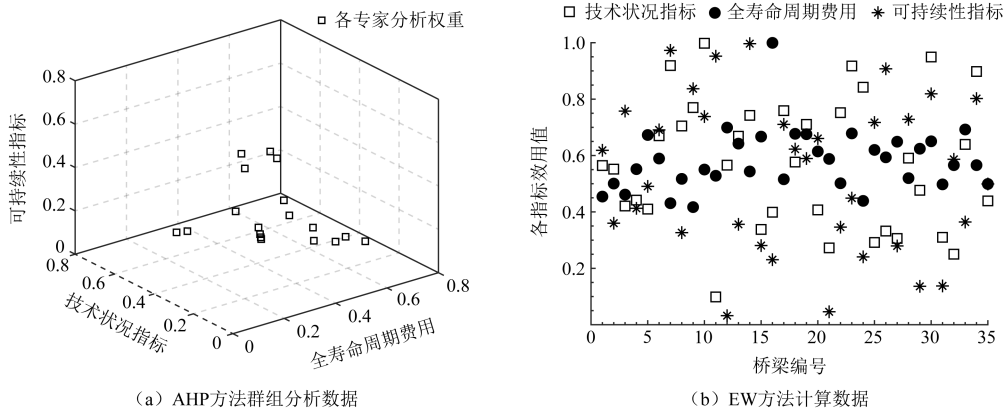


图6 AHP-EW 方法权重分析

Fig.6 Weight analysis by AHP-EW method

通过单项指标效用值的隶属度函数和 AHP-EW 法确定的权重计算综合评估的加权隶属度,按照最大隶属度原则得到对应桥梁的综合性能所属类别.以表1所示的参数分布生成1000组桥梁样本属性值,对其进行综合模糊评价,绘制评价结果如图7所示.

由图7可以看出,综合性能I类的桥梁大多集中在单项指标效用均较高的位置,而V类桥梁所在位置的单项指标也同样较低.采用本文方法得到的桥梁综合评价结果没有明显的“指标偏

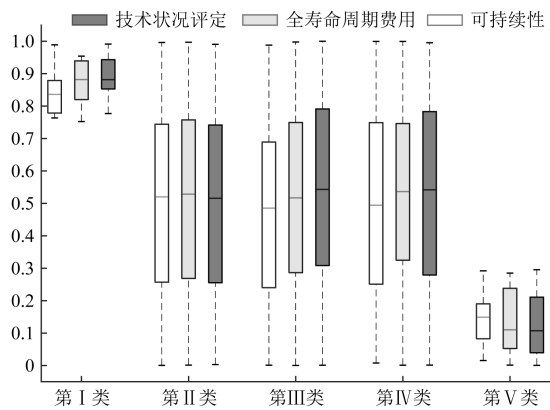


图7 桥梁多属性效用模糊评估结果

Fig.7 MAUFE results of bridge different risk attitudes

好”,即单一指标的过大或过小不会导致综合评估结果严重偏向一侧.在评价结果中,只有各单项指标均处于较高标准时,桥梁综合性能才可以定为高等级,而单项指标的突出不会导致综合性能过高.桥梁评价算法能综合考虑桥梁的技术状况、经济和可持续性指标,避免单项指标引导评价结果而忽略其他指标的情况.

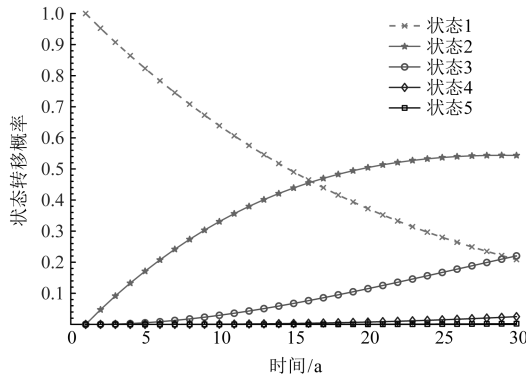


图8 桥梁马尔可夫状态预测模型

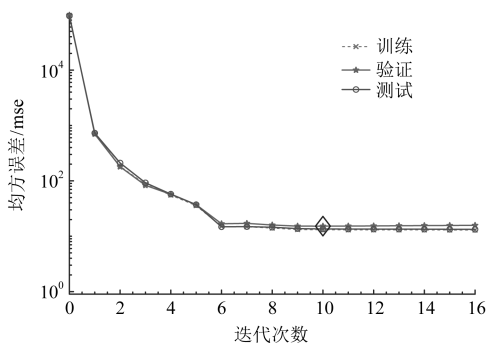
Fig.8 Markov long-term state prediction mode

5.2 桥梁性能预测

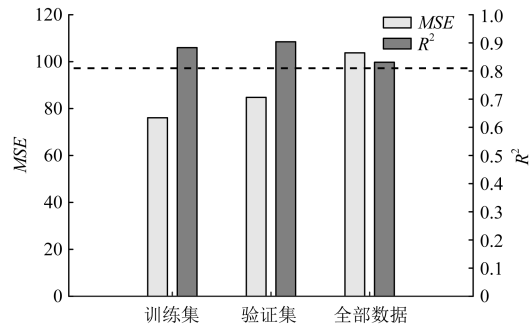
5.2.1 马尔可夫状态模型建立 以辽宁、浙江宁波两交通路网长期定检数据建立数据集,作为先验模型输入建立马尔可夫状态模型,得到其状态转移矩阵,并以深圳路网 2018~2020 年的定检数据结合卡尔曼滤波方法作模型更新,最终得到适用于深圳某路网内桥梁的状态转移矩阵,并对其长期性能进行预测,如图 8 所示.

5.2.2 LSTM 模型建立 以深圳城市路网中某高架简支梁桥为例,该桥梁布置了较为完备的健康监测系统,整体包

括 14 个应变传感器;数据集记录时间为 2020-09-25~2021-12-24,采样间隔 1h.为保证机器学习的预测精度及真实信息的完备,采用 3σ 准则及小波分析对原始数据进行数据处理,整体数据集以 70%/30% 的比例分割为训练集和数据集.LSTM 模型由 2 层 LSTM、1 层 Dropout 及 Dense 层组成,各 LSTM 层包含 32 个单元,训练过程及结果误差如图 9 所示.



(a) LSTM模型训练迭代过程



(b) 模型在各测试集表现

图9 LSTM 模型训练过程及模型表现

Fig.9 LSTM model training process and model performance

由图 9 可以看出,模型在处理应变响应预测问题中能较快达到收敛状态,各数据集上均方根误差分布较为均匀, R^2 指标最低值为 0.83,具有较高的预测能力.训练后模型在训练集和测试集上的预测结果如图 10 所示.

图 10 所示反映 LSTM 模型在数据集上的预测能力,能较好地桥梁响应数据的趋势

及波动进行有效地预测,未来能服务于
养护决策优化中桥梁的状态预估.

5.3 桥梁养护决策优化

以前例的深圳某简支梁桥为算例,
该桥梁最近一次于 2020 年 6 月进行定
检并进行表面涂装,以这一年份定检结
果为养护决策的时间起点,并结合前节
的预测结果对桥梁未来自然退化状态进
行预估,该桥梁的检测、涂装后如图 11
所示.

为充分论证养护决策模型对实际问
题的处理能力,并对比不同养护目标和
约束对于养护计划的影响及最终养护效
果的优劣程度,设计养护决策场景,如
表 2 所示.其中场景一到三均以本文
提出的多属性效用评估结果为养护目标,
施加不同程度的预算约束.场景四到六
分别以各单一的评估指标为养护目标,
在基础约束外施加不同附加约束,防
止为满足单一养护目标时其他反向评
估指标超标的现象.

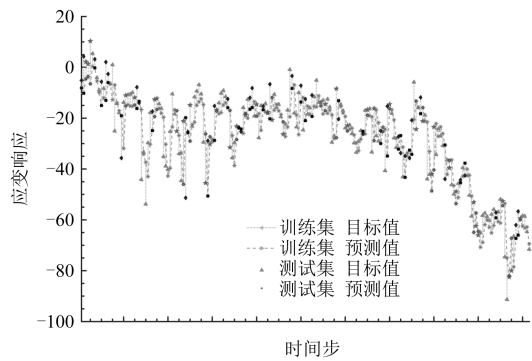


图 10 LSTM 响应预测模型结果

Fig.10 Results of LSTM response prediction model



图 11 深圳某高架简支梁桥

Fig.11 A viaduct simply supported bridge in Shenzhen

表 2 养护决策场景设计

Table 2 Designed scheme of maintenance decision

场景	养护目标	基础约束	附加约束	场景	养护目标	基础约束	附加约束
一	多属性效用评估	全部预算	—	四	技术状况评定	全部预算	可持续性指标
二	多属性效用评估	70%预算	—	五	全生命周期费用	全部预算	技术状况评定
三	多属性效用评估	50%预算	—	六	可持续性指标	全部预算	技术状况评定

采用本文提出算法对某服役桥梁养护策略进行最优化搜索,以年为节点进行养护方
法布置,每年份提供 10 种养护方法进行选取,整体流程如图 12 所示.养护方法对整体决
策产生的影响从 3 方面考虑:提升技术状况指数,增加养护成本及增加碳排放量,具体参
数如表 3 所示.

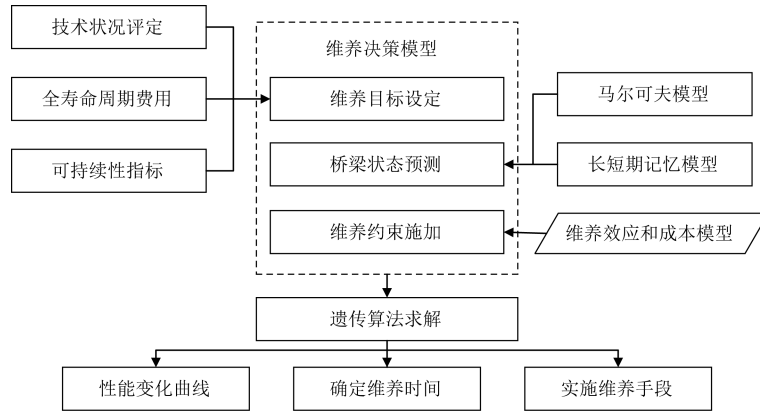


图 12 维修决策整体流程

Fig.12 Flow chart for maintenance decision-making

表 3 养护方法参数取值表格

Table 3 Parameters of the maintenance action

养护方法	维修效应	维修成本/万元	碳排放量/kg	养护方法	维修效应	维修成本/万元	碳排放量/kg
动作 1	2	20	1 000	动作 6	10	80	10 000
动作 2	4	30	2 000	动作 7	12	90	12 000
动作 3	5	40	5 000	动作 8	15	100	15 000
动作 4	6	50	6 000	动作 9	20	120	20 000
动作 5	8	60	8 000	动作 10	25	150	25 000

5.3.1 不同维修目标及约束下维修决策对比 场景四、五、六(表 2)分别以单一指标作为维修目标,并以全部预算(1 000 万元)作为基础约束,并选取与目标指标方向的评估指标作为附加约束,如:提升技术状况指标会由于碳排放量的提升而降低其可持续性;并与场景一全部预算下的以综合评估结果为目标场景进行对比.采用遗传算法求解得到桥梁在不同维修场景下 30a 服役期内的维修策略及性能变化情况,如图 13 所示.

场景四、五、六,维修周期内最低技术状况评定分数分别为 91.79、77.8、83.57,对应维修成本分别为 640 万元、500 万元、510 万元.对比图 13(a)、(b)、(c)可以看出,以单一评估指标为维修决策目标时一般会导致其综合评估结果较低;相对而言,以桥梁技术状况评定结果为目标时能维持综合性能较高,但所需成本相对最高,而以维修成本及可持续性为维修决策目标时,综合性能较低,同时技术状况等级也远低于其他维修场景,这是由于在综合评估模型中决策者态度(即效用函数)中对桥梁技术状况评分较重视,且其评估权重较高.为对比分析单一评估结果与综合评估结果作为维修目标时的维修决策方案,得到场景一的决策结果(图 14).

对比图 13、图 14,在场景一中,桥梁技术状况评定标准最低为 90.25,对应维修成本为 570 万元;相较于场景五、六,其维修成本较高,但技术状况指标远高于该两种场景下;相较于场景四,其技术状况指标略低,但维修成本远低于场景四;同时,在场景一中,采用综合评估模型作为维修目标时,其综合性能在 30a 周期内全部可归于 I 类桥梁.本文所提出的维修决策模型能根据不同维修场景提供最优维修优化策略;同时,采用本文综合评估模

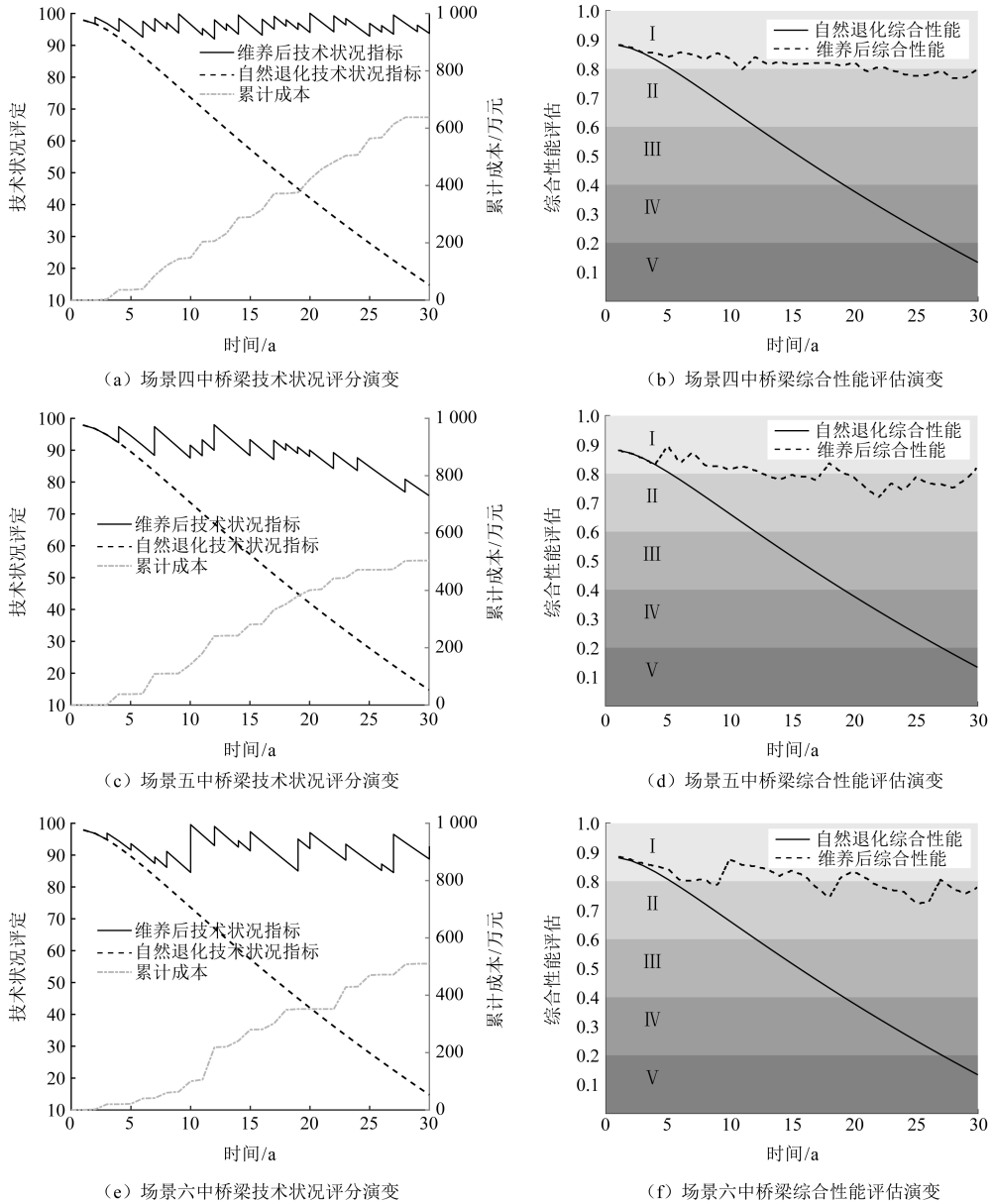


图 13 场景四、五、六中桥梁养护决策结果

Fig.13 Bridge maintenance decision making results in scenario 4,5,6

型能得到最均衡的养护效果,即在尽可能提高技术状况指标的条件下,其养护成本及可持续性指标达到较优.

5.3.2 不同养护成本下养护决策对比 为探求不同预算等级下桥梁决策对于综合性能的影响情况,分别设定 3 个预算等级:50%,70%及 100%(即为表 3 中的场景三、二、一),其中全部预算费用为 1 000 万元.采用遗传算法求解得到在不同预算等级下,桥梁 30a 服役期内的养护策略及性能变化情况,如图 15 所示.

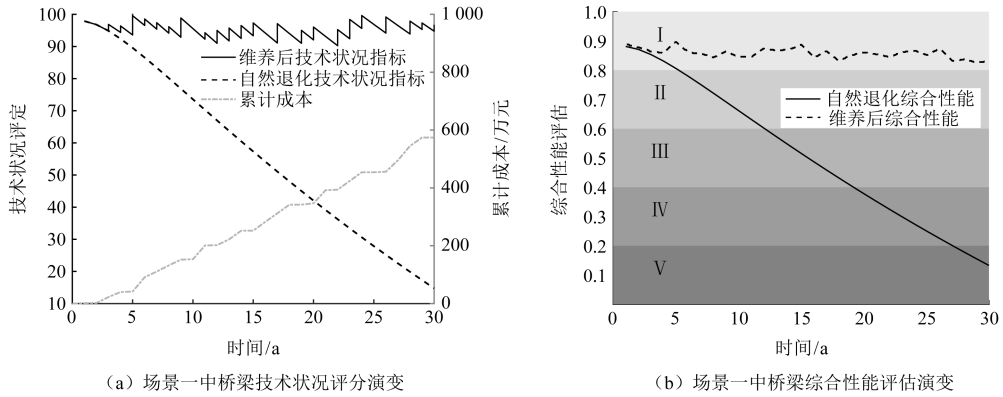


图 14 场景一中桥梁养护决策结果

Fig.14 Bridge maintenance decision making results in scenario 1

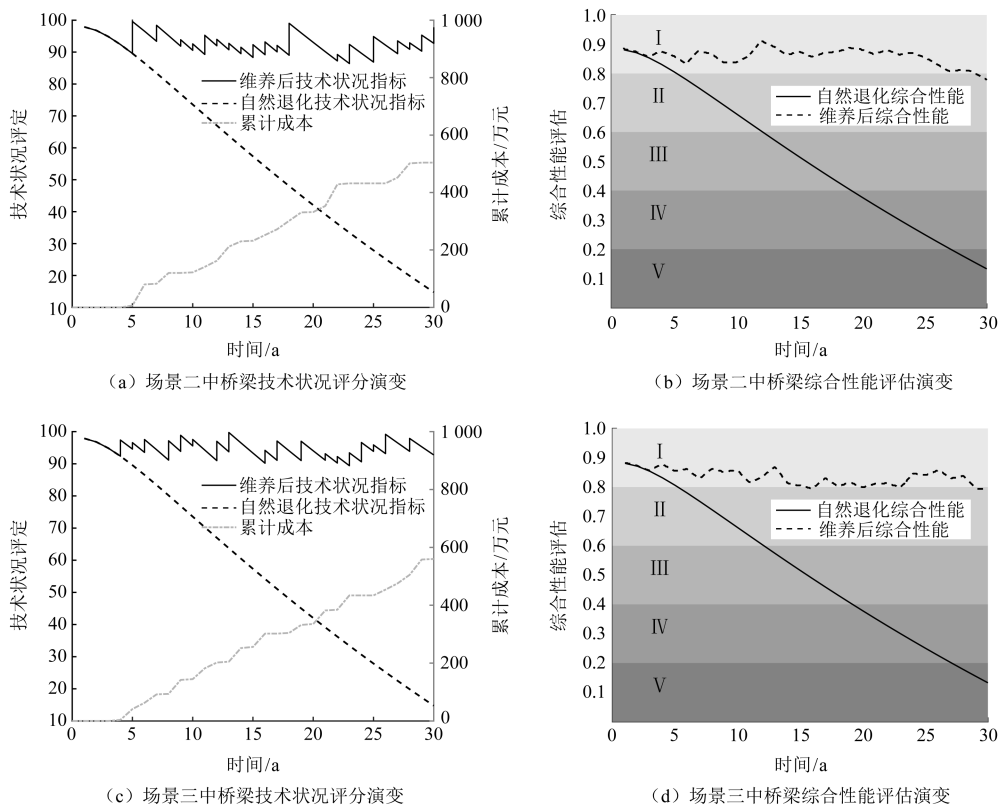


图 15 场景二、三中桥梁养护决策结果

Fig.15 Bridge maintenance decision making results in scenario 2,3

由图 14(a)、图 15(a)、(c)可以看出,采用桥梁综合性能的多属性效用评估方法作为目标函数时,提升预算等级能逐步提升桥梁技术状况评定分数,随着预算等级提高,养护周期内最低评定分数分别为 86.41、89.40、90.25;其对应养护成本也随之提升为 500 万元、

550 万元、570 万元,更多养护方法被考虑到养护决策中.但由于费用和可持续性两项指标的限制,优化决策不会全部充分使用预算,用于桥梁技术状况指标的提高,本文提出的评估理论会在养护决策过程中避免资金过度浪费及过多养护带来的环境问题,如过量碳排放.

由图 14(b)、图 15(b)、(d)可以看出,采用的决策模型对于综合评估结果提升更为显著;相比较于预算等级较低的情况,在预算等级最高时,桥梁在 30a 的养护周期内桥梁综合性能均达到 I 类桥梁标准,这一现象主要由于综合评估指标考虑了技术状况、全寿命周期费用和可持续性 3 项指标,随着预算等级的提高,决策者对于费用的效用函数发生改变,即相同的养护成本在高预算等级下效用值更高,在其他两项指标类似的情况下综合评估结果也相应提高.

6 结论

结合多属性效用函数和模糊评价法提出一种能综合考虑桥梁多项指标的评估方法.选取了技术状况、全寿命周期费用和可持续性 3 项评估指标;通过多属性效用将指标属性值转化为反映决策者态度的效用值;采用主客观相结合的 AHP-EW 方法对指标定权,结合模糊综合评价法确定加权隶属度矩阵,完成对桥梁综合性能的评估;采用实测数据驱动方法建立马尔可夫状态预测模型及长短期记忆的机器学习模型;最终以桥梁综合性能评估结果最高为目标、养护成本不超过预算为约束建立数学模型,完成桥梁养护决策.得到主要结论如下:

(1)采用本文方法得到的桥梁综合评价结果没有明显的“指标偏好”.只有各单项指标均处于较高标准时,桥梁综合性能才可以定为高等级,而单项指标的突出不会导致综合性能过高.该性能评估框架能较好解决多个指标下的综合评估问题,具有较好的应用前景,并可以在未来服务于桥梁的养护决策中;

(2)马尔可夫模型可以为桥梁性能的长期状态预测提供较好的参考,反映其长期效用下的自然退化规律;同时 LSTM 模型能结合桥梁监测系统对其瞬时动力响应进行较高精度的预测,在各数据集的表现均能达到 R^2 结果大于 0.83;

(3)提出的养护决策模型能根据不同养护场景提供最优养护优化策略;采用综合评估模型能得到更均衡的养护效果,即在尽可能提高技术状况指标的条件下,其养护成本及可持续性指标达到较优;

(4)基于效用函数引导的养护决策模型能尽可能贴近实际状况与决策者对于资源的管理.随着预算等级的提升,相同养护成本产生的效用值随之增大,养护决策过程中,桥梁技术状况指标及可持续性差异较小的桥梁,预算等级更高时其经济效用更高,综合评估结果更优.

参考文献

- [1] 单位交通运输部公路科学研究院.公路桥梁技术状况评定标准:JTG/T H21—2011[S].北京:人民交通出版社,2011
- Research Institute of Highway Ministry of Transport. Standards for technical condition evaluation of highway bridges: JTG/T H21—2011[S]. Beijing: China Communication Press, 2011

- [2] 兰海,史家钧.灰色关联分析与变权综合方法在桥梁评估中的应用[J].同济大学学报(自然科学版),2000,(6):103
Lan Hai, Shi Jiajun. Degree of grey incidence and variable weight synthesizing applied in bridge assessment[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2000, (6): 103
- [3] 黄侨,任远,许翔,等.大跨径缆索承重桥梁状态评估的研究现状与发展[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(9):1-9
Huang Qiao, Ren Yuan, Xu Xiang, et al. Research progress of condition evaluation for large span cable supported bridge [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(9): 1-9
- [4] Xu X, Huang Q, Ren Y, et al. Condition evaluation of suspension bridges for maintenance, repair and rehabilitation: A comprehensive framework[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2019, 15(4): 555-567
- [5] Ren Y, Xu X, Liu B, et al. An age- and condition-dependent variable weight model for performance evaluation of bridge systems[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(5): 1816-1825
- [6] Fahu P, Naiqun Z, Yuying L. Evaluation of water quality by standard deviation weight fuzzy-assessment on water source area in Middle Line Project of Transferring Water from South to North[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2008, 36(2): 229-234
- [7] Fan W, Xu Z, Wu B, et al. Structural multi-objective topology optimization and application based on the criteria importance through intercriteria correlation method[J]. Engineering Optimization, 2021: 1-17
- [8] Mon D, Cheng C, Lin J. Evaluating weapon system using fuzzy analytic hierarchy process based on entropy weight[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1994, 62(2): 127-134
- [9] Chuansheng X, Dapeng D, Shengping H, et al. Safety evaluation of smart grid based on AHP-entropy method[J]. Systems Engineering Procedia, 2012, 4: 203-209
- [10] He Y, Wang X, Lin Y, et al. Optimal partner combination for joint distribution fuzzy EW-AHP and TOPSIS for online shopping[J]. Sustainability, 2016, 8(4): 341
- [11] Bukhsh Z A, Stipanovic I, Klanker G, et al. Network level bridges maintenance planning using Multi-Attribute Utility Theory[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2019, 15(7): 872-885
- [12] Antoniou F, Konstantinidis D, Aretoulis G N. Application of the multi attribute utility theory for the selection of project procurement system for Greek highway projects[J]. International Journal of Management and Decision Making, 2016, 15(2): 83-112
- [13] Frangopol D M, Dong Y, Sabatino S. Bridge life-cycle performance and cost: analysis, prediction, optimisation and decision-making[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2017, 13(10): 1239-1257
- [14] Liu M, Frangopol D M. Time-dependent bridge network reliability: Novel approach[J]. Journal of Structural Engineering (New York, N.Y.), 2005, 131(2): 329-337
- [15] Frangopol D M, Lin K, Estes A C. Life-cycle cost design of deteriorating structures [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(10): 1390-1401
- [16] 孙晓燕,董伟伟,王海龙,等.桥梁全寿命周期碳强度指标模糊综合评估[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(4):735-747
Sun Xiaoyan, Dong Weiwei, Wang Hailong, et al. Comprehensive fuzzy assessment of bridge life-cycle carbon intensity index[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(4): 735-747
- [17] Frangopol D M, Liu M. Maintenance and management of civil infrastructure based on condition, safety, optimization, and life-cycle cost[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2007, 3(1): 29-41
- [18] Marsh P S, Frangopol D M. Lifetime multiobjective optimization of cost and spacing of corrosion rate sensors embedded in a deteriorating reinforced concrete bridge deck[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(6): 777-787
- [19] Morcoux G, Lounis Z. Maintenance optimization of infrastructure networks using genetic algorithms[J]. Automation in Construction, 2005, 14(1): 129-142
- [20] Saydam D, Frangopol D M. Risk-based maintenance optimization of deteriorating bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(4): 4014120
- [21] Yang S, Frangopol D M, Kawakami Y, et al. The use of lifetime functions in the optimization of interventions on existing bridges considering maintenance and failure costs[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2006, 91(6): 698-705
- [22] Dong Y, Frangopol D M, Saydam D. Sustainability of highway bridge networks under seismic hazard[J]. Journal of Earthquake Engineering: JEE, 2014, 18(1): 41-66

- [23] Dong Y, Frangopol D M, Saydam D. Time-variant sustainability assessment of seismically vulnerable bridges subjected to multiple hazards[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013, 42(10):1451-1467
- [24] Dong Y, Frangopol D M, Sabatino S. Optimizing bridge network retrofit planning based on cost-benefit evaluation and multi-attribute utility associated with sustainability[J]. *Earthquake Spectra*, 2015, 31(4):2255-2280
- [25] 李家叶, 贾昆, 李铁键, 等. 多尺度多模型的梯级水库优化调度决策支持系统[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2018, 26(6):1164-1176
Li Jiaye, Jia Kun, Li Tiejian, et al. A decision support system for optimal scheduling of cascade reservoirs with multiple time scales and multiple models[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, 26(6):1164-1176
- [26] 岳遥, 李天宏. 基于模糊集理论的马尔可夫模型在水质定量预测中的应用[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2011, 19(2):231-242
Yue Yao, Li Tianhong. The application of a fuzzy-set-theory based markov model in the quantitative prediction of water quality[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2011, 19(2):231-242
- [27] 陈守开, 蒋海峰, 李海瑞, 等. 基于 RST-LSTM 模型的堤坝渗压动态预测分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(1):112-122
Chen Shoukai, Jiang Haifeng, Li Hairui, et al. Prediction analysis of dam seepage pressure based on RST-LSTM model[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, 29(1):112-122
- [28] Bukhsh Z A, Stipanovic I, Palic S S, et al. Robustness of the multi-attribute utility model for bridge maintenance planning[J]. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2018, 13(4):404-415
- [29] Kirkwood C W. Strategic decision making multiobjective decision analysis with spreadsheets[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1998, 49(1):96-97
- [30] Claudio D, Okudan G E. Utility function-based patient prioritisation in the emergency department[J]. *European Journal of Industrial Engineering*, 2010, 4(1):59-77
- [31] Keeney R L, Raiffa H, Rajala D W. Decisions with multiple objectives: Preferences and value trade-offs[J]. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 1979, 9(7):403
- [32] Lin K, Frangopol D M. Reliability-based optimum design of reinforced concrete girders[J]. *Structural Safety*, 1996, 18(2-3):239-258
- [33] Mori Y, Ellingwood B R. Maintaining reliability of concrete structures. I: Role of inspection/repair[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1994, 120(3):824-845
- [34] Dong Y, Frangopol D M. Probabilistic time-dependent multihazard life-cycle assessment and resilience of bridges considering climate change[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2016, 30(5):4016034
- [35] Stein S M, Young G K, Trent R E, et al. Prioritizing scour vulnerable bridges using risk[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 1999, 5(3):95-101
- [36] Gunduz M, Nielsen Y, Ozdemir M. Fuzzy assessment model to estimate the probability of delay in Turkish construction projects[J]. *Journal of Management in Engineering*, 2015, 31(4):4014055
- [37] Xu K, Tang L C, Xie M, et al. Fuzzy assessment of FMEA for engine systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2002, 75(1):17-29
- [38] Tsourveloudis N C, Phillis Y A. Fuzzy assessment of machine flexibility[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 1998, 45(1):78-87
- [39] Icaga Y. Fuzzy evaluation of water quality classification[J]. *Ecological Indicators*, 2007, 7(3):710-718
- [40] Zhao J, Bose B K. Evaluation of membership functions for fuzzy logic controlled induction motor drive[C]. *IEEE*, 2002
- [41] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2):182-197
- [42] Sabatino S, Frangopol D M, Dong Y. Sustainability-informed maintenance optimization of highway bridges considering multi-attribute utility and risk attitude[J]. *Engineering Structures*, 2015, 102:310-321
- [43] Dong Q, Cooper O. A peer-to-peer dynamic adaptive consensus reaching model for the group AHP decision making[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 250(2):521-530

Bridge Optimal Maintenance Using the Multi-attribute Utility Assessment Method

LIN Tao¹, JIA Lei¹, DONG You², ZHANG Jiabin²

(1.Shenzhen Urban Transport Planning Center Co., Ltd, Shenzhen, Guangdong 5180001, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract

With the rapid development of highway networks, the bridges not only need to meet the safety requirement but also social and economic development goals. In order to plan maintenance strategies to maintain the maximum performance of the bridge during its service life, it is necessary to develop a methodology that evaluates the comprehensive performance of the bridge effectively. In this paper, the multi-attribute utility incorporating the fuzzy evaluation method (MAUFE) is proposed to assess the bridge performance. Furthermore, the Markov model and LSTM algorithm are utilized to build a bridge degradation prediction model. The optimal model is established to maximize the MAUFE results. Various performance indicators are integrated by using a multi-attribute utility function. The bridge condition, life-cycle cost, and sustainability index are selected to assess the comprehensive performance of the bridge. The fusion weight of the performance index is determined by combining the analytical hierarchy process and entropy weight method (AHP-EW). The fuzzy comprehensive evaluation method is adopted to construct the fuzzy membership matrix of different indicators, and the comprehensive performance of bridges is calculated. A data-driven framework is used to predict the bridge's performance based on actual observation data. The mathematical model of bridge life-cycle maintenance decision-making under specified objectives and constraints is established, which is solved by a genetic algorithm to obtain an optimal maintenance strategy. Finally, the representative bridges are selected to assess the life-cycle comprehensive performance. And the maintenance strategies over thirty years of a particular bridge under different evaluation indicators as objectives and constraints are planned by using the proposed optimal model. The results show that the assessment method can fully reflect the decision-makers attitudes and cover many aspects within the performance assessment process. The prediction model is capable of accurately predicting the bridge's health status. The maintenance schedule that makes each evaluation indicator better can be obtained with the objective of comprehensive assessment model. The maintenance decision-making model can maximize the comprehensive performance of the bridge within the limited budget.

Keywords: multi-attribute utility; fuzzy evaluation; fusion weights; comprehensive assessment; Markov models; long short-term memory LSTM; genetic algorithms; multi-objective optimization; intelligent maintenance