

基于多源信息的桥梁网级评估方法

夏 焱¹, 王 鹏¹, 孙利民²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 针对区域内既有桥梁, 研究了路网桥梁结构的共性与个性特点, 利用网级相关性总结规律并演绎推广, 系统地提出了基于多源信息的桥梁网级评估与预测方法. 对桥梁历史检测报告、监测评估报告、设计图纸等进行数据集成与规整, 将提取的关键参数及数据集进行神经网络训练与验证, 生成一系列桥梁构件及结构层的退化模型. 考虑维修行为对结构性能的直接干涉作用, 对路网区域范围内的桥梁群进行状态评估及退化趋势预测. 以石家庄市高速路网历史数据为依托, 通过算例验证了方法的系统性和有效性.

关键词: 桥梁检测; 区域路网; 结构退化模型; 网级评估; 管养维修

中图分类号: TU997

文献标志码: A

A Condition Assessment Method for Bridges at Network Level Based on Multi-Source Information

XIA Ye¹, WANG Peng¹, SUN Limin²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper studied the commonality and personality of bridges at network level, summarized, and generalized the intrinsic rules according to their similar deterioration patterns. A network-level assessment and prediction method was proposed, for the first time, based on multi-source data. For large quantities of inspection reports, monitoring reports and bridge design drawings, the data integration and regulation process was conducted in order to extract key parameters and data sets applying to neural network of structures and components. A series of deterioration models were generated incorporating maintenance effects, based on which the condition assessment and deterioration prediction was realized for bridge populations. Based on the highway network in Shijiazhuang, an example was presented to verify

the systematization and effectiveness of the proposed method for the purpose of bridge network management and decision-making.

Key words: bridge inspection; regional network; structural deterioration model; network assessment; management and maintenance

近 30 年来,我国以公路桥梁为典型的基础设施建设高速发展,随之而来的结构受损和退化正愈来愈引起工程界的注意. 作为交通路网中至关重要的节点,桥梁群体长期承受着复杂的外部作用,诸如超重荷载、极端事件荷载、复杂环境荷载等. 根据交通部发布的 2017 年交通运输行业发展统计公报^[1],截止 2017 年末全国公路桥梁共有 83.25 万座,总长 5 225.62 万 m,分别比上年增加 2.72 万座和 308.66 万 m,其中大部分桥梁处于不同程度的损伤状态,部分桥梁被评定为二类桥甚至更差. 类似的事例在世界范围内亦不少见,美国土木工程师学会(The American Society of Civil Engineers, ASCE)统计数据指出,美国共计 607 380 座桥梁的平均年龄近 50 年,并且有四分之一被标记为有缺陷或是废弃的桥梁^[2].

鉴于我国集中建设、集中管养的基建模式,区域路网内桥梁结构普遍存在共性特点和规律. 针对运营年限日益增长的桥梁,如何从区域路网角度把握桥梁群的退化规律,判断其结构性能状态,针对性地制定管养措施,已成为现阶段研究的热点问题. 桥梁管理者急切地需要健全、科学、完整的分析流程,即桥梁结构评估、桥梁性能预测,以及路网应用拓展,用于辅助管理决策^[3]. 通过及时分析和处置,避免像美国 I-35W 桥类似惨剧的发生^[4].

目前,桥梁结构评估采用的普遍做法为对目标

收稿日期: 2018-12-27

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1500605); 上海市科学技术委员会资助项目(18DZ1201203)

第一作者: 夏 焱(1983—),男,副研究员,工学博士,主要研究方向为桥梁健康监测. E-mail: yxia@tongji.edu.cn

通信作者: 孙利民(1963—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为桥梁健康监测与振动控制. E-mail: lmsun@tongji.edu.cn

桥梁定期执行人工目检和无损测试(NDT). 此类方法确立并发展了基于技术状况的桥梁评定体系^[5], 通过检测手段获取退化信息, 使用综合指标量化评估结果^[6]. 事实上, 大多数桥梁管理系统(BMS)都是这一评定体系的延伸, 如美国的 PONTIS、BRIDGIT, 英国的 NATS, 日本的道路共用桥梁管理系统等^[7]. 近年来, 有部分学者尝试研究基于结构可靠度的桥梁结构评估方法^[8-10]. 然而, 可靠度类方法无法利用长年检测工作积累的海量报告中的宝贵信息, 同时极大地增加了评估流程计算的复杂度和所需专业知识, 在工程应用和推广上仍有明显的限制. 因此, 技术状况类方法仍是目前桥梁评定工作的主流, 但积淀的数据价值如何在网级评估中得到有效应用, 尚缺乏系统的理论支持.

以海量监测报告为样本, 通过数学模型从中抽象出桥梁的退化机理是一种可行的做法^[11]. 研究表明, 单体桥梁的性能退化趋势可以准确地预测^[12-13], 但实际的桥梁管养方案通常是由管理机构在路网层次进行规划和筹备的. 因此, 在路网层次进行退化规律的归纳和演绎通常更有意义^[14-18]. 该方法的难点在于, 单体桥梁问题中的假设, 即一座桥梁的技术状况变化曲线可以被准确地测量并获取, 在路网桥梁群体问题中变得不再适用. 事实上, 在指定交通路网内, 只有部分桥梁进行了全面的检测和评估; 而对于其他桥梁, 这些资料则是缺失的, 仅能提供基本的结构信息, 如跨径、类型、位置、建成年月等. 马尔可夫链是传统 BMS 在解决该问题时一贯的选择, 但在应用中被证明有诸多局限性^[19]; 而机器学习方法, 则逐渐获得了更多的重视, 被认为具有更优秀的潜力^[20-21]. 例如, Li 等^[21]根据密歇根州桥梁数据库, 建

立神经网络模型, 实现了对桥墩构件的状态预测.

综上所述, 研究者对区域路网内桥梁群的性能退化规律做出了初步的探索. 但在已有研究中, 研究者多以桥梁的某一重要构件(如桥面板^[19]、桥墩^[21]等)为对象, 而少有考虑由众多构件组成的桥梁整体. 事实上, 对于构件-桥梁-路网的完整环路, 相关研究仍处于空白. 同时几乎所有研究都忽略了维修对构件或桥梁的正面干涉作用, 而仅考虑无维修构件的退化发展, 这极大地限制了其在工程实际中的应用, 并导致维修产生的改善效果无法在后续分析中被量化. 如何将桥梁网级评估与预测的结果, 有效地转化为管理者进行决策的依据, 仍是一个亟待解决的难题. 为此, 本文提出了桥梁网级评估和管养维修决策优化的技术理论框架, 阐述了其 3 个子步骤的功能和原理, 明确了具体的工作流程和研究方法: ①借助数据规整技术, 对以桥梁检测报告为主的多源信息进行检索和融合; ②采用人工神经网络, 以生成的桥梁数据集为样本, 考虑维修行为对结构性能的直接干涉作用, 训练得到合适的桥梁退化模型; ③通过基因遗传算法, 计算指定路网区域内最优的管养方案. 本文以石家庄市高速路网的部分历史检测数据为依托, 通过衍生算例验证网级评估方法及技术框架的可行性, 随着数据的不断积累, 以期能有效应用于工程实践.

1 技术理论框架

总体技术框架如图 1 所示, 由 3 个子步骤组成, 分别为数据处理、模型构建与应用分析, 即数据子步、建模子步、应用子步.

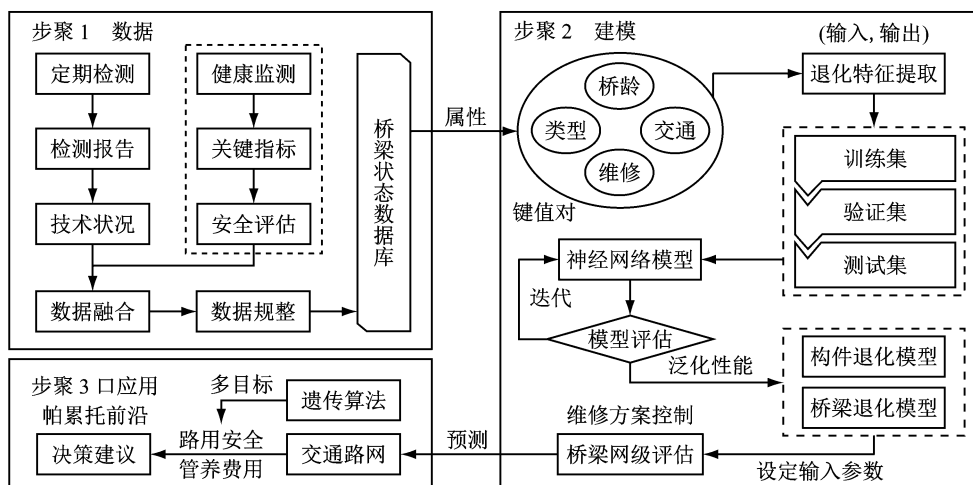


图 1 总体技术框架及其数据、建模、应用 3 个子步骤

Fig.1 Technical framework with three sub-steps: data, modeling, and application

数据子步用于存储并管理长年桥梁检测工作(目检与 NDT)或结构健康监测积累下的报告文件,通过原始资料获取单个桥梁的时变结构状态曲线,并进行汇总统计,形成桥梁状态数据库。已有研究表明,属于同一交通路网内的桥梁群体在相似的环境因素(车流量、温湿度等)作用下,倾向于呈现类似的结构退化模式。此外,同一路网内采用的桥梁设计规范和施工水平、质量也往往趋同。因此,有必要将此类因素纳入状态数据库,以考虑相关性的影响。对于数量少、个性强的大跨或特大跨桥梁,由于其结构形式复杂,同时在管理和养护上有一定的专门性和特殊性,故暂不纳入考虑中;而数量多、共性大的中小跨径桥梁及其构件,将作为数据库的主体。

在建模子步中,采用人工神经网络技术建立、训练、优化适用于桥梁结构及其构件的退化模型。退化模型是桥梁退化规律的具现形式,可用于桥梁性能的未来预测。值得一提的是,维修行为对桥梁结构有着明显的改善作用,因此,需要在建模过程中考虑已有样本的维修历史作为影响因子之一,以便进行不同维修方案下的结构性能预测。本研究采用人工神经网络技术实现这一过程。

应用子步用于开展进一步的分析或研究,辅助桥梁网级管理与决策。基于对目标交通路网在指定时间段内的评估和预测结果,应用子步内考虑预算并优化管养策略、指导实践。一个典型的应用场景为考虑预算的养护维修方案计算,结合维修总预算和路网安全状态需求,计算多目标下的优化方案。

2 多源信息集成与规整

2.1 数据来源

数据源是以桥梁检测报告作为主体,其他数据源(如交通量报告,监测评估报告,设计施工图等),可作为补充。桥梁检测报告是记录结构评定结果最直接、相对最完整的历史资料,通常以技术状况评定表的形式录入电子文档。为完成数据准备工作,有必要借助一些数据规整技术,将分立的各桥、各年技术状况评定表中的信息录入数据库中,用于后续分析。监测数据对应的桥梁数量通常很少,在区域桥梁评估中起到样本点的作用。

技术状况评定表表征了桥梁的结构特征、服役年限、区位分布、环境作用、状态评级等关键属性,包含了目标桥梁结构退化的大部分信息。交通量数据为评估中及其关键的评估影响因素,考虑到桥梁

检测报告中未记录目标桥梁所处路段的交通流信息,因此,需要通过引入其他数据源,对桥梁状态数据库进行补充和完善。通过考虑各观测站记录的历年国、省道路段年平均日交通量统计数据,选取目标桥梁对应路段的机动车合计当量,用于表征当年桥梁结构所承受的交通荷载;亦可通过结合动态称重系统或视频监控,获取主干道车流信息,充分考虑区域内车流量闭合及其他相关性条件,实现对区域内交通流信息的量化估计。

2.2 数据预处理

本文提出的数据预处理方法如图 2 所示。该方法将原始多源数据转换为适于挖掘的形式。

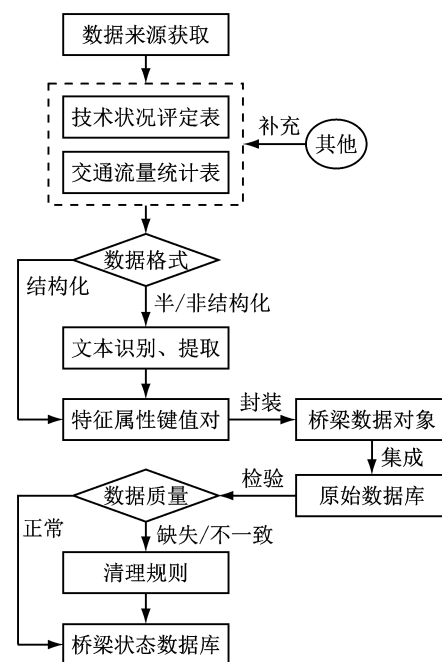


图 2 多源数据预处理流程

Fig. 2 Pre-processing flowchart for multi-data source

对获取的半/非结构化数据开展文本的识别和提取。自动检索每份电子表格中符合要求的特征属性及其属性值,形成键值对集合,并封装为与每个桥梁个体对应的数据对象。每个对象(或实例)应包含来自指定数据源的 3 个方面信息:① 路线层次的属性键值对;② 桥梁层次的属性键值对;③ 构件层次的属性键值对,详见图 3。

通过将生成的各个桥梁数据对象进行集成,形成一个完整、全面的关系数据库。具体方式为:按每座桥在每年的数据子集生成一行记录,而记录的每列为不同属性对应的取值,涵盖指定交通路网内所有桥梁的重要参数以及当年的运营信息。

此时得到的原始数据库尚无法满足后续研究的

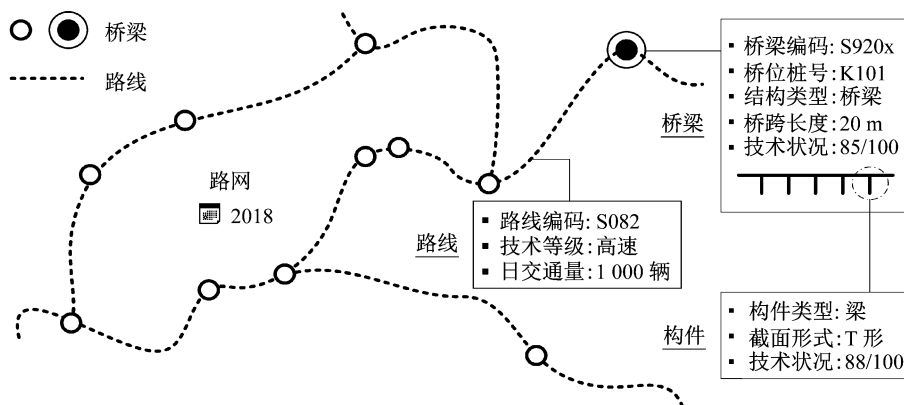


图 3 路线、桥梁、构件层次的属性键值对

Fig. 3 Key-value pairs for attributes at route, bridge, and component levels

要求,存在缺失、不一致等质量问题,故仍需进行数据清理操作,以保证数据库的高可用性.检索数据库中的缺失字段,进行类比填充或者直接删除整条记

录等.同时查询取值不一致的字段,参考同一对象的历年数据,选取众数作为该字段统一取值.清理完成后得到桥梁状态数据库,如表 1 所示.

表 1 桥梁状态数据库示例

Tab.1 An example of bridge state database

记录	路线编码	桥梁编码	日交通量/辆	结构类型	桥跨长度/m	桥龄/年	维修记录/次	技术状况	构件 1	...
1	S082	S920a	1 000	箱梁	20	5	1	89	90	...
2	S082	S920x	1 200	T 梁	20	8	0	85	82	...

2.3 问题导向的数据规整

原始多源数据从非结构化、半结构化转换为结构化后,可方便地用于数据建模和模式挖掘.虽然桥梁状态数据库对交通路网内桥梁群体的相关信息提供了全面的参考,但存储的数据类型不统一,取值范围相差甚远,同时,并非所有属性都对目标问题有足够的贡献.针对具体问题,即如何提取交通路网中桥梁对象的退化规律并延伸应用,先明确哪些数据的引入对该问题的求解是有益的.对数据库进行属性子集选择,定义桥龄、类型、交通量、维修记录为与桥梁总体技术状况最相关的参数集合,并将其他属性舍去,如桥梁名称、路段名称等,得到数据库对特定问题的简化表示.若研究对象为桥梁构件技术状况,则应增加与构件相关的其他属性.

考察属性子集中对应的不同数据类型,将其编码为计算机可以理解的格式.桥龄为数值属性,取值具有直接的表征意义,因而可直接沿用.类型为标称值属性,以梁构件为例,常见的取值内容有空心板梁、T 梁、大箱梁等,不同取值间未有明显联系或比较关系,因此,可将其编码为二值向量,对于以上 3 种取值,分别用(1, 0, 0),(0, 1, 0),(0, 0, 1)表示.交通量亦为数值属性,转换方式同桥龄.维修记录为布尔型属性,以 1 代表当年进行维修,0 代表当年未进行维修.

由于不同属性的值域各异,导致在计算过程中具有不同的权重.桥龄的取值范围通常为 1~50 年,而交通量的数量级可能为 10^4 ,后者可以轻易地将前者的影响稀释,此外量纲的改变也会影响任一属性的取值,即属性间具有不可公度性.因此,需通过规范化的方法,将所有的属性值量纲一化到 $[0, 1]$ 区间上,即

$$a_{ij} = a'_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m a'_{ij}{}^2} \quad (1)$$

式中: a'_{ij} 为记录 i 下属性 j 的原始取值; a_{ij} 为规范化后的取值.

规范化过程主要针对数值属性,而对于向量表示的标称属性及布尔属性,因其取值已满足区间要求而无需进行转换.

3 基于神经网络的退化特征建模

3.1 退化模型

一般认为结构状态的量度与一系列自变量之间存在某种联系或者规律,称之为桥梁退化模型.具体而言,该模型为

$$f(X_1, X_2, \dots, X_n) = Y \quad (2)$$

其中,结构状态的量度即考虑结构损伤程度的量化评估,可采用技术状况进行表征,而各类自变量影响

结构退化过程,具有可观测性的属性.以检测信息为主的多源融合,为桥梁退化特征的提取和建模提供了基础,但如何从海量数据实现模型的构建仍是核心问题.传统方法(诸如确定性模型、随机性模型)在建模过程中有诸多限制,而运算结果与实际亦有较大偏离.本研究考虑的神经网络具有对复杂逻辑运算和非线性关系的刻画能力,提出基于该算法的桥梁退化特征建模过程,通过对数据样本的学习和训练,从而达到较高的准确率和置信度.

3.2 神经网络原理

神经网络是近年广泛使用的一种机器学习方法,具有将数据提炼为知识的能力.本文利用神经网络的优势,从构件层次和结构层次建立基于统计的桥梁结构群的退化模型.在此通过三大要素简要阐述其原理,即神经元、连接与权重、激活函数与阈值.神经网络模型以众多的神经元作为基本结构,一个神经元可以接受来自其他神经元的输入信号,亦可将输出信号传递给其他神经元.信号的传递方式称为“连接”.不同的连接可以被定义不同的权重,神经元将接收到的总输入值与其阈值进行比对,并由“激活函数”计算相应的输出,例如超过阈值,则神经元兴奋,输出“1”,反之则抑制,输出“0”.该神经元通过连接将兴奋或抑制的信号向外传递,进而影响并改

变其他神经元的状态.将多个神经元按一定层次结构连接,形成一个神经网络.若神经网络的层级结构采用每层神经元与下一层全互连,但不存在同层连接和跨层连接的方式,则称之为多隐层前馈神经网络.第一层为输入层,接收预定的外部输入;最后一层为输出层,导出最终结果;而若干中间层均为隐含层.隐含层与输出层通常包含对信号的复杂加工与运算.

采用上述多隐层前馈神经网络进行桥梁退化特征建模.根据研究对象的层级,即结构层次或构件层次,神经网络的设计有所不同.结构层次构建模拟退化规律的神经网络,以结构技术状况为输出,以桥龄、结构类型、交通量、维修记录等为输入;构件层次构建相应网络,则以目标构件技术状况为输出;同时,由于输出的改变,输入属性的组合也相应调整.例如,考虑桥墩构件为研究对象,在充分的数据支持下,桥龄、墩梁连接方式、墩柱类型、温湿度条件、基础沉降等可能是更好的输入组合.图 4 阐明了神经网络的设计和建模过程,即从桥梁状态数据库中抽取关联度较高的属性子集,配置在输入层和输出层的对应位置.根据输入、输出的复杂度调节隐含层的数量和各层中神经元的数量,最终生成桥梁退化模型的神经网络结构.

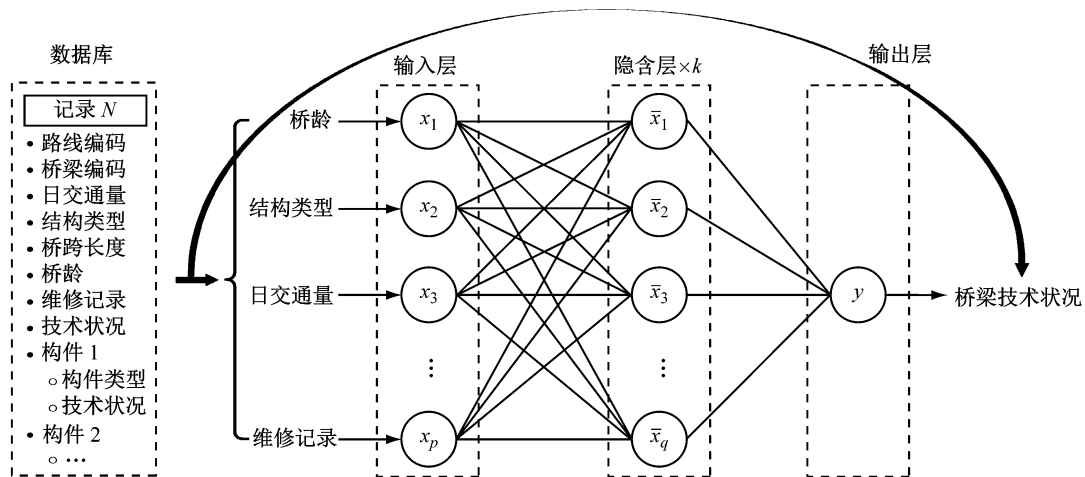


图 4 神经网络的设计和建模(以结构层次为例)

Fig.4 Neural network design and modeling (taking the structural level as an example)

3.3 模型训练与测试

神经网络的本质可以视为若干函数组成的嵌套结构,其中包含有众多的权重、阈值参数.而神经网络对数据样本的学习(数据训练)就是每个功能神经元的阈值以及神经元之间的权值随着数据的输入、反馈、迭代而不断调整的过程.对于本研究,关于结构退化规律的深层知识,便蕴含在上述各参数的最

终取值中.通常使用误差逆传播(BP)算法进行神经网络训练,其基本思路为:①对网络中的所有参数,即权重和阈值,进行初始化;②输入一组样本,逐层前传,计算当前参数下输出层的误差;③将该误差逆向传播至隐层,依次计算输出层、隐层神经元的梯度项,并依此更新各层对应的权重和阈值;④重复步骤②和③,直至达到停止条件,如误差小于预设值

或迭代次数达到上限.

在训练过程中虽然使用了大量数据作为样本,但相对真实世界而言,仍是一个很小的子集.合格的模型应当既在样本数据上表现出足够的精度,同时对于未知数据亦具有优秀的性能.本研究期望所得到的桥梁退化模型拥有良好的泛化能力,可以有效地推广到各个地域的不同路网,而不会受限于欠拟合或过拟合的制约.为此,需要对桥梁状态数据库进行划分.用于训练的数据为训练集,同时需使用测试集来测试模型在新样本上的泛化误差,以评估其性能.出于模型选择和调参的考虑,需额外设置验证集来辅助判断计算结果.以上 3 类集合应保证与样本总体独立同分布,同时彼此之间尽可能互斥,数据量占比为训练集 70%、验证集 15%、测试集 15%.

3.4 退化模型数值算例

笔者在对桥梁结构及构件退化模式的探索中提出了不同的理论公式,诸如双线性模型、二次函数模型、均方根模型以及指数模型,其中,指数模型兼顾了复杂度和契合度,有较高的应用价值.在已有研究的基础上,本算例将建立一个表达构件退化规律的标准曲线,用于生成神经网络训练所需的参考数据.考虑构件的技术状况仅由服役时间、桥梁类型、构件类型、交通量、维修记录共同决定.其中,桥梁类型包含板梁桥、T 梁桥、大箱梁桥、小箱梁桥 4 类典型结构.鉴于研究主要针对构件退化过程,在此假设退化开始的节点为 $t=0$,且所有构件的初始状态均按 100 进行计算.改进的标准曲线计算公式参见式(3),其实质为 β 关于 $t, T_b, T_c, V(t), M(t)$ 的多元函数.详细的参数意义和取值参见表 2.

表 2 退化模型关键参数

Tab.2 Key parameters of deterioration model

关键参数	取值
桥梁构件的技术状况 β	$[0, 100]$
桥梁构件的服役时长 t /年	$[0, 50]$ 取整
桥梁结构类型影响系数 T_b	$\{55, 60, 65, 70\}$
桥梁构件类型影响系数 T_c	$\{15, 20, 25, 30, 35\}$
桥梁所处路段年均日交通量 V /万辆	$[0, 2]$
维修活动的累计次数 M	$[0, t]$ 取整

注:55 为板梁桥;60 为 T 梁桥;65 为小箱梁桥;70 为大箱梁桥;15 为退化最快;35 为退化最慢.

不同的参数取值组合产生不同的退化模式,如图 5 所示.图 5 对关键参数的影响进行了研究,以 $T_b=55, T_c=15, V=1$ 参数组为基准曲线,仅改变其中某一个参数,而保持其他参数不变,通过对比可以发现曲线的挠曲形态、下降速度、收敛点发生了明显变化.针对有维修的情况, $T_b=55, T_c=15, V=1, M$ 参

数组,设定 $M(t) = \begin{cases} 1, t > 8 \\ 2, t > 12 \\ 3, t > 16 \end{cases}$, 则其相对于基准曲线

将在相应的时间节点发生上移.

$$\beta(t, T_b, T_c, V, M) = (100 - T_b) \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{T_c}\right)\right] - \frac{V(t)t}{10} + T_b + 5M(t) \quad (3)$$

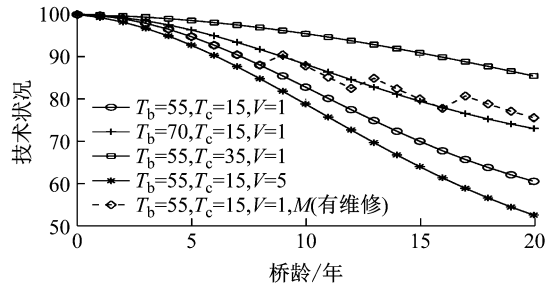


图 5 退化模型关键参数分析

Fig.5 Parameter analysis of deterioration

式(3)给出了各类退化因子与构件技术状况间的映射关系,考虑检测报告等来源获取的数据不准确性和不稳定性,对理论数据进行加噪处理,加入服从分布 $N(0, 1)$ 的高斯噪声,处理后的数据如图 6 所示.此时问题由退化规律的识别转化为神经网络对理论曲线的复现.

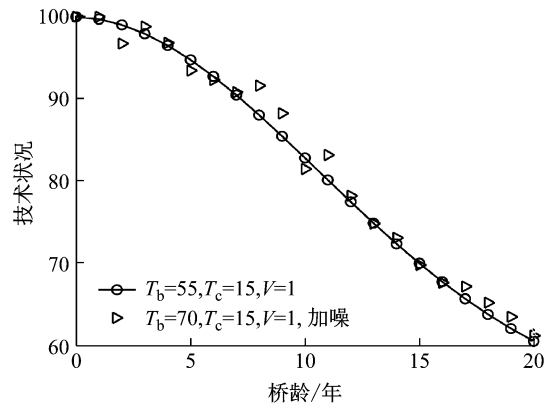


图 6 正常数据与噪声处理的数据对比

Fig.6 Comparison of processed data with/without noise

对于数据集 $D = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)\}$, 以 $x_i = [t_i, T_{b_i}, T_{c_i}, V_i, M_i]$ ($i=1, 2, \dots, m$) 作为输入, $y_i = \beta_i$ ($i=1, 2, \dots, m$) 作为输出, 建立一个神经网络模型. 设定 4 层神经元, 输入层神经元数量为 5 个, 输出层神经元数量为 1 个, 2 个隐含层中的相应数量各为 15 个. 按默认设置进行数据划分, 3 个子集分别为总数据的 70%、15% 和 15%, 且均按 2.3 节进行规范化处理. 训练过程的误差-迭代曲线如图

7 所示. 由图 7 可知, 随着迭代次数的增加, 输出结果的误差迅速收敛, 大约在 17 次迭代后基本达到稳定, 此时误差数值已满足精度要求. 训练完成后, 使用未见数据研究网络的泛化能力, 其计算结果如图 8 所示. 图 8 表明, 所建神经网络在 3 个子集上均具有极高的精度, 其输出值和真实目标的相关系数 R 分别为 0.961 3、0.960 8、0.962 7, 在全体数据上的相关系数 R 则为 0.961 4. 在不同数据集上性能表现出高度一致性, 证明了该网络拥有优秀的泛化性能.

基于该模型验证结果, 参考已有技术状况评定标准中的建议方法^[5], 可通过分层加权的方式将构件技术状况转化为桥梁技术状况, 实现进一步的评

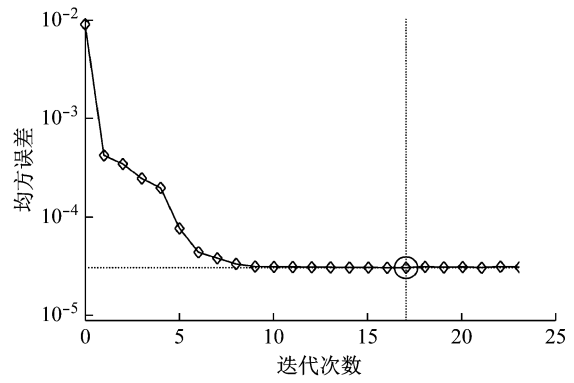


图 7 训练过程的误差-迭代曲线

Fig.7 Error-iteration curve of training process

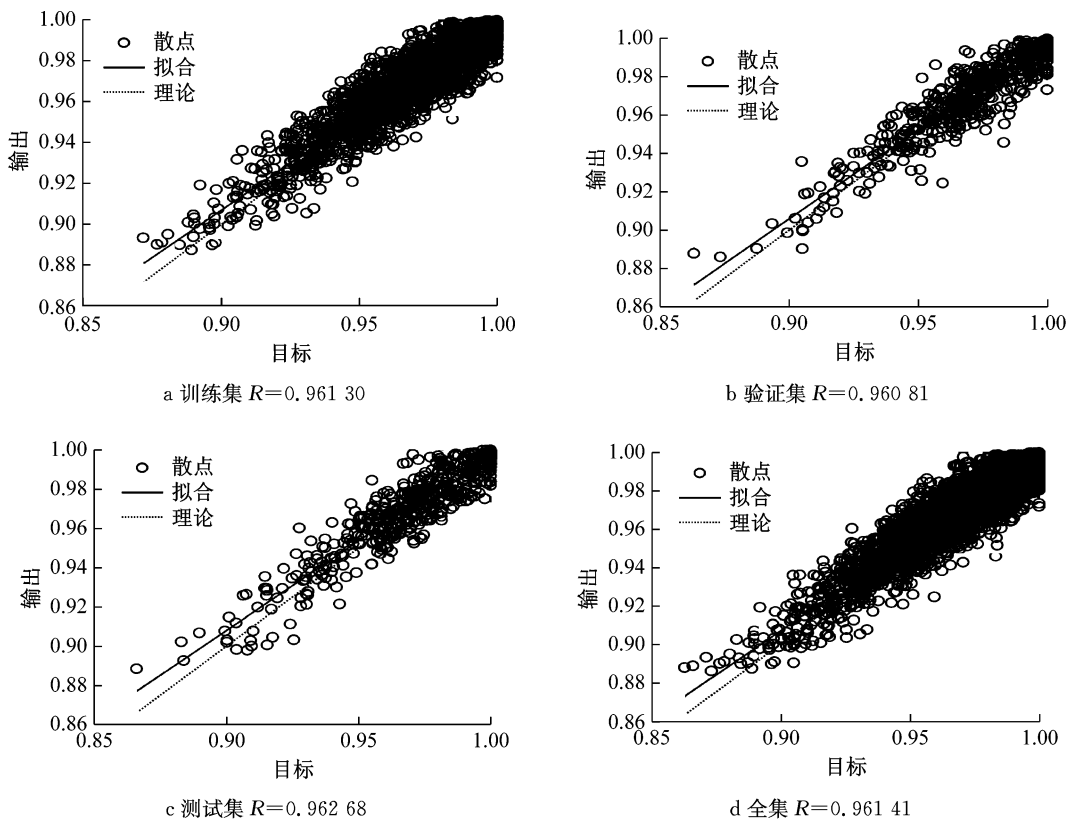


图 8 模型泛化性能检验

Fig.8 Generalization performance of generated deterioration model

估和预测. 指定不同构件类型与 T_c 的对应关系, 则在给定 $t, T_b, V(t), M(t)$ 的条件下, 可以实现构件与结构的层次化评估. 例如, 对于 $t=10$, 考察由 $T_b=60, V(t)=1, M(t)=0$ 构件组成的目标桥梁, T_c 参数取值规则和评估预测结果如表 3 所示. 在表 3 中, 首先得到 10 年后各构件的具体评分, 由此推出对应的上部结构、下部结构、桥面系状态分别为 76.3、84.3、81.7, 总体的桥梁技术状况为 80.6.

4 桥梁网级评估方法应用

本文以石家庄市高速路网为工程背景, 汇总了保阜高速、邢临高速、张石高速主线 209 座桥梁 2013—2018 年的检测报告, 简化路网节点及退化模型的影响因素, 通过算例系统验证方法的可行性和有效性.

表 3 目标桥梁构件技术状况预测

Tab.3 Prediction results of target bridge

组成部位	编号	构件	权重	T_c	构件预测	部位预测
上部结构 (40%)	1	上部承重构件	0.70	15	75.6	76.3
	2	上部一般构件	0.18	15	75.6	
	3	支座	0.12	20	81.2	
下部结构 (40%)	4	翼墙、耳墙	0.02	30	85.8	84.3
	5	锥坡、护坡	0.01	30	85.8	
	6	桥墩	0.30	25	84.1	
	7	桥台	0.30	25	84.1	
	8	墩台基础	0.28	25	84.1	
	9	河床	0.07	30	85.8	
	10	调治构造物	0.02	30	85.8	
桥面系 (20%)	11	桥面铺装	0.40	20	81.2	81.7
	12	伸缩缝装置	0.25	15	75.6	
	13	人行道	0.10	35	86.9	
	14	栏杆、护栏	0.10	35	86.9	
	15	照明标志	0.10	35	86.9	
	16	排水系统	0.05	35	86.9	
总体预测						80.6

4.1 路网状态与管养预算

考虑预算的养护维修方案优化作为桥梁管理的难题,是网级评估的应用方向之一。路网安全状态与组成该路网的各个桥梁的安全状态是密切相关的,若所有桥梁都处于不同程度的退化阶段,则路网安全状态将明显受到影响。增大经费投入有助于改善桥梁状态,进而改善路网状态,然而,桥梁管理部门可享有的管养预算通常是受限的。对于决策者而言,利用有限预算更有效地改善桥梁安全状况是核心问题,但在巨大的桥梁体量和匮乏的专家知识面前,这一问题尚无法通过传统方法得到闭合解。

本研究通过数据与建模 2 个子步的工作,已实现对指定路网的桥梁网级评估和预测,为养护维修方案的优化提供了基础。以表 3 中讨论的桥梁对象为例,构造 4 种维修方案并比较其效果,如图 9 所示。设定方案 A 为无维修,方案 B 为在第 5 年进行全

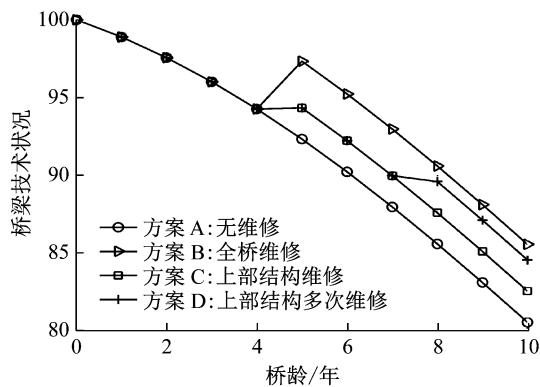


图 9 4 种桥梁维修控制方案效果比较

Fig.9 Comparison of bridge rating of 4 maintenance strategies

桥维修,方案 C 为在第 5 年仅进行上部结构维修,方案 D 为在第 5 年及第 8 年进行两次上部结构维修。

由图 9 可知,在执行方案 A 的情况下,未来 10 年内目标桥梁将从 100 退化至 80.6,退化幅度接近 20%;若执行方案 B,由于发生全桥维修,仅退化至 85.6;方案 C 的维修范围仅限于上部结构,故改善效果较差;方案 D 在方案 C 的基础上额外增加一次维修活动,最终与方案 B 较为接近;而不同的维修范围和次数亦将导致总经费的变化。类似的分析过程可扩展至路网内的所有桥梁,得到在不同方案组合下的路网安全状态和管养经费使用情况。以此为参照,考虑两者的平衡以及初始约束条件,可将原问题转化为一个优化问题,并通过数值算法求解。

4.2 基于遗传算法的多目标优化

遗传算法是求解优化问题的有效方法,其本质为模仿生物进化和自然选择过程的启发式算法,在土木工程各领域中已有广泛的应用。其算法原理为:定义一定数目变量的组合为染色体,每个染色体都是所研究问题的一个可行解;一组染色体的集合包含了该问题的各种可能解答,定义为种群;基于目标函数的计算结果,对该种群进行评估,得到每个染色体的适合度排名;按排名进行染色体的筛选,选择当前在目标函数下最优的若干个体,以期望保留其优点,即好的特征,形成优胜劣汰;令选择后的种群进行繁殖,使其种群数量回复至筛选前。借鉴生物学类似概念,一方面,将父染色体和母染色体进行配对和交换,使生成的新染色体优而不同,从而有可能将优点进行集中;另一方面,交换的过程中有一定概率发生突变,以此跳出局部最优,实现对整个可行域的搜索。

将遗传算法应用于路网管养决策,完整流程如图 10 所示。在本问题中,染色体为该路网内可用的维修方案,即维修作用的桥梁对象和时间节点。与前述不同的是,维修方案需要在多个维度上进行权衡,因此,有必要增加目标函数的数量用于种群评估。一个可行的做法为,设置两个目标函数,函数 1 为表征路网总体状态的安全指标,函数 2 则为表征路网管养投入的费用指标,分别计算每种备选方案在 2 个目标函数下的排名情况。考虑支配与非支配的概念,对于方案 P,若在种群内存在方案 Q,其 2 个排名均高于方案 P,称 Q 支配 P,则在筛选过程中保留 Q 淘汰 P;若在种群内不存在符合要求的方案 Q,则 P 是非支配的,将被保留。交换和变异操作同上。重复上述步骤直至满足终止条件。

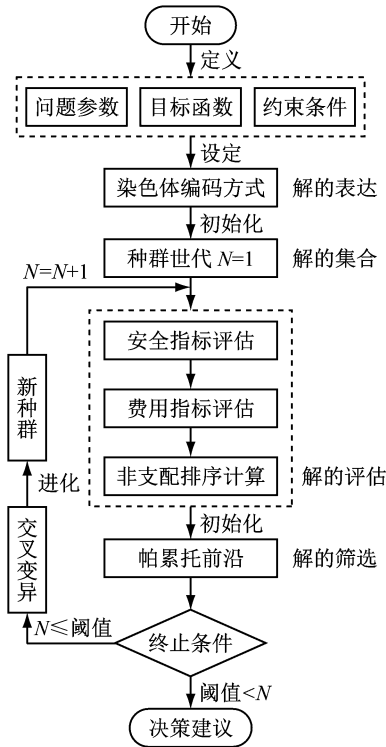


图 10 基于遗传算法的多目标优化过程

Fig. 10 Multi-objective optimization process based on genetic algorithm

4.3 桥梁网级评估数值算例

通过数值算例验证本文方法的可行性和合理性. 定义一个由 30 座桥梁组成的虚拟路网, 求解其未来 3 年的管养维修方案. 虚拟路网的构成参见图 11, 路线 1 和 2 的车流量将汇聚于路线 3, 每条路线上各有 10 座桥梁, 详细参数见表 4.

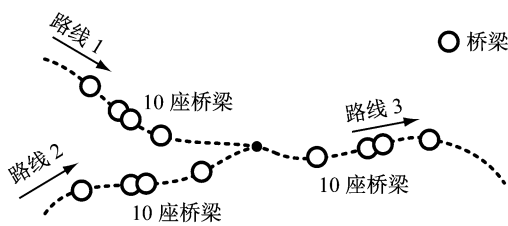


图 11 数值算例采用的简化路网

Fig. 11 Bridge network in the numerical example

设定染色体 x 的格式为一个 30×3 的矩阵, 其中, 每个分量存放一个 1×16 的二值向量, 代表某座桥梁在某一年采取的具体维修操作. 例如, $[1, 1, 0, \dots, 0]$ 表示该桥在这一年中将对上部承重构件和上部一般构件进行维修. 设定种群数量为 1 000, 即每代种群将包含 1 000 个最优的染色体. 设定世代数量为 1 000, 即种群的筛选和繁殖过程将重复 1 000 次. 设定交换概率为 90%, 突变概率为 10%.

表 4 虚拟路网桥梁参数

Tab. 4 Parameters of bridges within the network

桥梁编号	参数组 $[t, T_b, V]$		
	路线 1	路线 2	路线 3
1	[6, 60, 8]	[6, 55, 5]	[6, 70, 13]
2	[7, 65, 8]	[7, 55, 5]	[7, 70, 13]
3	[8, 60, 8]	[8, 55, 5]	[8, 70, 13]
4	[9, 65, 8]	[9, 55, 5]	[9, 70, 13]
5	[10, 60, 8]	[10, 55, 5]	[10, 70, 13]
6	[11, 65, 8]	[11, 55, 5]	[11, 70, 13]
7	[12, 60, 8]	[12, 55, 5]	[12, 70, 13]
8	[13, 65, 8]	[13, 55, 5]	[13, 70, 13]
9	[14, 60, 8]	[14, 55, 5]	[14, 70, 13]
10	[15, 65, 8]	[15, 55, 5]	[15, 70, 13]

按式(4)和式(5)分别定义 2 个目标函数

$$f_1 = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} \omega_i \cdot \beta_{it} \quad | \quad t = 3 \quad (4)$$

$$f_2 = \sum_{i=1}^{30} \sum_{t=1}^3 E_{it} \cdot x_{it} \quad (5)$$

式中: ω_i 为第 i 座桥在路网中的重要性系数; x_{it} 为染色体的组成分量; β_{it} 为在 x_{it} 影响下第 i 座桥梁在第 t 年的结构状态; E_{it} 为对应的维修费用向量; f_1 为总体安全指标; f_2 为投入费用指标.

在每一轮迭代中, 为估计不同 x 在路网中产生的效果, 需要将 x 转换为式(3)中的 $M(t)$, 然后基于 3.4 节所建立的退化模型, 计算每座桥梁在该方案下的退化或改善情况, 并集成为 B 矩阵.

在此假设 $\omega_i = 1$, 且 $E_{it} = [E_{i1}, \dots, E_{i16}]$, 以简化计算, 最终的求解结果如图 12 所示. 多目标优化问题无法得到唯一解, 最终得到由各项非支配解组成的帕累托前沿, 即未来 3 年的备选维修方案集. 在图 12 中, 每个点代表符合给定约束条件的一种可行解, 且具有各自的相对优势. 经济偏好可行解得到的执行效果如图 13 所示, 与安全偏好可行解(见图 14)相比, 前者要求更少的经费投入, 但与之相对的路网状态也会适当降低. 具体而言, 前者的桥梁技术状况分布呈现双峰形态, 即状态劣化的桥梁获得较少的维修, 而状态良好的桥梁获得了积极的改善与保持, 虽然符合问题中限定的约束和目标函数, 但就实际应用而言存在一定的不合理性; 而后者则呈现为单峰形态, 且向 80 以上聚集, 状态保持良好的桥梁明显增多, 但所消耗的总经费亦是所有备选方案中最高的. 若考虑位于中部的均衡方案, 其结果如图 15 所示, 单峰且在 80 左右聚集, 大部分桥梁位于中部区间, 状态极好或极差的桥梁均较少. 由上述讨论可见, 桥梁管理者宜根据工程实际的需求、地理区域的差异性以及工作执行的侧重点, 从中选择最匹配的

方案,形成科学的管养维修决策.

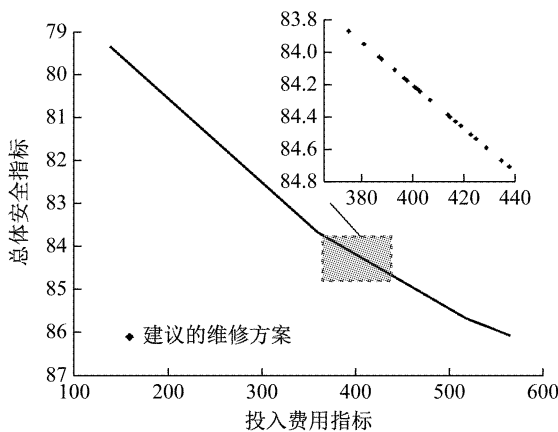


图 12 帕累托前沿:未来 3 年的备选维修方案集

Fig.12 Pareto front: a set of alternative maintenance programs for the next 3 years

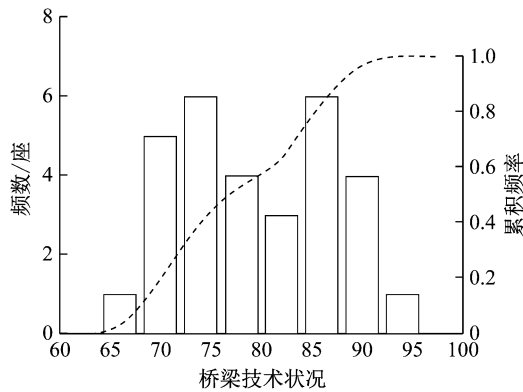


图 13 经济偏好方案的管养效果

Fig.13 Maintenance result: economic preference

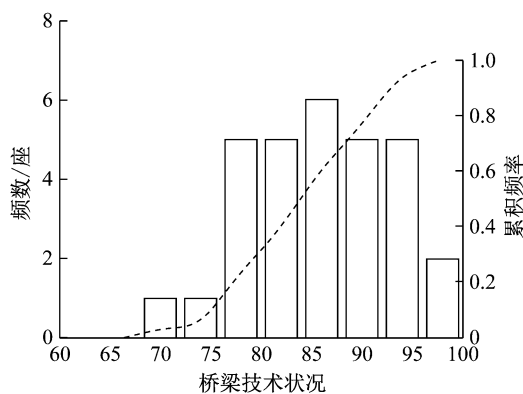


图 14 安全偏好方案的管养效果

Fig.14 Maintenance result: safety preference

5 结论

本文针对区域内既有桥梁结构,首次系统地提出了基于多源信息的桥梁网级评估与预测方法,包

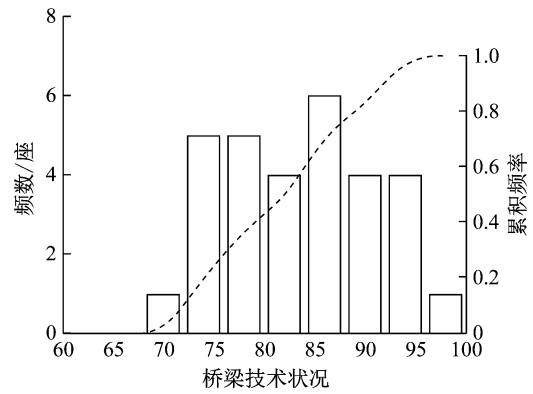


图 15 均衡考量方案的管养效果

Fig.15 Maintenance result: balanced consideration

括多源数据集成及规整,基于神经网络的退化模型构建,以及基于退化模型的状态评估与预测,对桥梁网级管理与决策具有指导意义及参考价值.以石家庄市高速路网历史数据为背景,通过简化算例验证了系统方法的可行性和有效性.

(1) 提出的评估方法降低了对多源数据完备性的需求,部分桥梁信息的缺失或错误会影响评估的区分度和精度,但不会影响评估正常进行,且评估及预测结果会随着数据的积累、修正而逐渐回归真实状况.

(2) 桥梁构件维修历史是评估方法中重要却又常常缺失的信息,采用神经网络模型能有效模拟路网内任一桥梁在给定条件下的退化趋势,通过控制结构维修记录作为有效变量之一,可实现针对单个桥梁修改善的动态预测和针对整个路网的桥梁状态评估.

(3) 结合路网安全性能和总体维修预算的多目标优化问题,在有限数据条件下是可解的,基于数据规整和建模结果,采用遗传算法进行寻优,可取得该问题帕累托最优解,兼顾性能与预算,提供决策选择.

(4) 通过简化算例验证了评估预测方法的有效性和可靠性,退化模型实现了对理论公式的复现,考察了不同数据集上的模型输出误差,取得了良好的泛化性能,基于分层加权的方法准确完成了构件与结构的评估预测.

参考文献:

[1] 中华人民共和国交通运输部. 2017 年交通运输行业发展统计公报[J]. 人民公交, 2018(5):31.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. 2017 statistical bulletin of transportation industry development [J].

- People's Public Transportation, 2018 (5): 31.
- [2] HERRMANN A W. ASCE 2013 report card for america's infrastructure [EB/OL]. (2013-05-06)[2019-06-26]. https://www.researchgate.net/publication/262905741_ASCE_.
- [3] 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.
- [4] HAO S. I-35W bridge collapse [J]. Journal of Bridge Engineering, 2009,15(5):608.
- [5] 中华人民共和国交通运输部. 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. Ministry of Transport of the People's Republic of China. Standard for the assessment of highway bridge technology status; JTG/T H21—2011 [S]. Beijing:China Communications Press, 2011.
- [6] 贺拴海, 赵祥模, 马建, 等. 公路桥梁检测及评价技术综述 [J]. 中国公路学报, 2017,30(11):63. HE Shuanhai, ZHAO Xiangmo, MA Jian, et al. Review of highway bridge inspection and condition assessment [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(11):63.
- [7] 王能谋. 既有桥梁的评估理论及其应用[D]. 成都:西南交通大学, 2010. WANG Nengmou. Evaluation theory of existing bridges and its application [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [8] CATBAS F N, SUSOY M, FRANGOPOL D M. Structural health monitoring and reliability estimation; long span truss bridge application with environmental monitoring data [J]. Engineering Structures, 2008,30(9):2347.
- [9] 成仲鹏. 大规模桥梁网的可靠性评估模型及应用[J]. 兰州理工大学学报, 2016,42(5):133. CHENG Zhongpeng. Reliability assessment model of large-scale bridge network and its application [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2016,42(5):133.
- [10] 李慧乐, 夏禾. 基于车桥耦合随机振动分析的钢桥疲劳可靠度评估[J]. 工程力学, 2017(2):75. LI Huile, XIA He. Fatigue reliability evaluation of steel bridges based on coupling random vibration analysis of train and bridge [J]. Engineering Mechanics, 2017(2): 75.
- [11] 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. HUANG Qiao, REN Yuan, XU Xiang, et al. Research progress of condition evaluation for large span cable supported bridges [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(9):1.
- [12] NEVES L A C, PETCHERDCHOO A, FRANGOPOL D M. Probabilistic lifetime-oriented multiobjective optimization of bridge maintenance: combination of maintenance types [J]. Journal of Structural Engineering, 2006,132(11):1821.
- [13] NEVES L A C, CRUZ P J S, FRANGOPOL D M. Probabilistic lifetime-oriented multi-objective optimization of bridge maintenance: single maintenance type [J]. Journal of Structural Engineering, 2006,132(6):991.
- [14] LEE Y, SONG J, GARDONI P, et al. Post-hazard flow capacity of bridge transportation network considering structural deterioration of bridges [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2011,7(7/8):509.
- [15] ZHOU Y, BANERJEE S, SHINOZUKA M. Socio-economic effect of seismic retrofit of bridges for highway transportation networks: a pilot study [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2010,6(1/2):145.
- [16] GAO L, XIE C, ZHANG Z. Network-level multi-objective optimal maintenance and rehabilitation scheduling [EB/OL]. [2019-06-26]. <http://trid.trb.org/view/2010/C/910697>.
- [17] GOLROO A, MOHAYMANY A S, MESBAH M. Reliability based investment prioritization in transportation networks [C] //89th Annual Meeting of the Transportation Research Board of the National Academies. Washington D C: Transportation Research Record, 2010:3-5.
- [18] SHIRAKI N, SHINOZUKA M, MOORE J E, et al. System risk curves; probabilistic performance scenarios for highway networks subject to earthquake damage [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2007,13(1):43.
- [19] MORCOUS G. Performance prediction of bridge deck systems using Markov chains [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2006,20(2):146.
- [20] ALIPOUR M, HARRIS D K, BARNES L E, et al. Load-capacity rating of bridge populations through machine learning: application of decision trees and random forests[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017,22(10):4017076.
- [21] LI Z, BURGUEÑO R. Using soft computing to analyze inspection results for bridge evaluation and management[J]. Journal of Bridge Engineering, 2010,15(4):430.