

检测数据下城市桥梁群状态时空演化特征挖掘

孙梦瑾^{1,2}

(1. 上海市建筑科学研究院有限公司, 上海市 200032; 2. 上海市工程结构安全重点实验室, 上海市 200032)

摘要: 现有研究大多集中在单座桥梁的性能退化趋势分析上, 较少关注由众多中小跨径桥梁构成的桥梁群体。针对区域桥梁群, 构建了一个融合检测报告等多源数据的评估演绎数据库, 为后续的特征提取、预测建模和网络级评估提供了坚实的数据基础。从区域层面对桥梁的跨径、桥长及技术状况分布特征进行了分析, 并提出了基于机器学习的区域桥梁技术状态时空推演方法, 揭示了区域桥梁群的状态特征, 实现了对未来时间和未监测区域的桥梁结构状态进行预测和推演。

关键词: 桥梁群; 状态演绎; 机器学习; 回归模型; 高斯过程

中图分类号: U446.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)05-0285-06

Spatiotemporal Evolutionary Features of Urban Bridge Group State under Detection Data

SUN Mengjin^{1,2}

(1. Shanghai Research Institute of Building Science Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Engineering Structural Safety, Shanghai 200032, China)

Abstract: Existing research mostly focuses on analyzing the performance degradation trends of a single bridge. Less attention is paid to the bridge group composed of many small and medium span bridges. Aiming at the regional bridge group, an evaluation and inference database integrating multi-source data such as detection reports is built to provide a solid data foundation for subsequent feature extraction, predictive modeling and network-level assessment. The span, length and technical condition distribution characteristics of bridges are analyzed from the regional perspective. A spatiotemporal inference method for regional bridge technology state based on machine learning is proposed. The state characteristics of regional bridge group are revealed. The prediction and inference of the structural condition of bridges in future time periods and non-monitored areas are realized.

Keywords: bridge group; state inference; machine learning; regression model; Gaussian process

0 引言

随着桥梁智能检测装备性能的不不断提升、智能检测技术的快速发展以及智能算法的持续优化, 海量多类型特征数据的深入挖掘, 国内外学者在桥梁评估领域开展了大量研究工作^[1-7]。近年来, 相关研究成果不断涌现, 然而, 仍有多个研究环节亟待进一步完善。

(1) 现有研究多聚焦于单体桥梁的性能退化趋势分析, 较少考虑由众多中小跨径桥梁组成的桥梁群体, 忽视了处于相似服役环境条件和设计建造水平的区域路网桥梁结构中普遍存在的共性特征规律

及性能退化模式^[8-9]。

(2) 针对桥梁长期检测数据的利用与挖掘, 现有研究通常将数据用于桥梁技术状况的事后评定, 缺乏对数据中潜在有效信息的深入探讨, 未充分考虑桥梁长期结构性能与定期检测数据之间可能存在的关联性与延续性^[10-11]。

(3) 现有研究多通过算法建立桥梁技术状况评估模型, 但未能将评估和预测结果有效转化为区域桥梁服役状况的综合评价, 这对桥梁管理部门在路网层次上制定和规划养护策略带来了挑战^[12]。

综上所述, 尽管桥梁智能检测与评估技术取得了显著进展, 但在桥梁群体性能评估、长期检测数据的深度利用、新型评估模式的引入以及区域性服役状况的综合评价等方面, 仍存在诸多亟待解决的问题。

收稿日期: 2024-11-01

基金项目: 上海市自然科学基金面上项目(24ZR1460700)

作者简介: 孙梦瑾(1992—), 女, 博士, 工程师, 从事桥梁安全评估与智慧运维工作。

本研究基于机器学习方法挖掘桥梁群的检测数据,建立数据驱动的桥梁群状态演化模型,旨在提升城市桥梁群的结构健康识别与风险评估能力。

1 区域桥梁技术状况演化模型

1.1 时变演化模型

路网内桥梁结构性能与多源检测数据之间的关联性及其持续性是一个不可忽视的议题。当前,尽管已经拥有了海量的桥梁检测数据,但如何从这些数据中精准地提炼出有效、新颖且潜在的有价值信息,依然是一个迫切需要解决的挑战。桥梁在服役期间累积的检测数据,传统上多用于桥梁技术状况的事后评定及结构承载能力的验算,然而,这些历年检测数据以及不同桥梁之间的数据,在时间和空间上往往呈现出孤立、非连通的状态,这暴露出当前对于桥梁检测数据深入分析的不足以及数据利用率的低下。

在分析区域桥梁技术状况的时变特征时,可以选用机器学习的参数化回归算法,包括线性回归模型、Lasso 回归模型、岭回归模型和弹性网络模型等。这些模型均基于明确的数学参数来拟合数据,并能够通过参数表达桥梁技术状况的时变特征。

线性回归一般采用最小二乘法来计算离散点和拟合直线之间的差值,并使选取插值最小的拟合模型为最优模型。建立的模型中也是建立参数之间的相关性关系。线性回归模型可以表示为

$$y_i = f(a_i \times x_i) \quad (1)$$

式中: y_i 和 x_i 分别为因变量和自变量; f 为自变量与因变量之间的关系; a_i 为自变量系数。

在多项式回归中,如果模型中的多项式的最高次项比较大,则模型就易出现过拟合现象。为解决这种现象,常选用正则化方法以增加对代价函数的约束惩罚。一般有两种通用的正则化方法,L1 正则化和 L2 正则化。

L1 正则化的约束因子为加上所有参数的绝对值之和,也称为 L1 范数,或 Lasso 回归。模型的目标函数 $\hat{\beta}_{\text{Lasso}}$ 可表示为

$$\hat{\beta}_{\text{Lasso}} = \min_{\beta_0, \beta_j} \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij})^2 + \lambda \|\beta\|_1 \quad (2)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个样本第 j 个特征变量; β_0 为回截距项; β_j 为第 j 个特征的系数; p 为特征变量总数; n 为样本数量; λ 为约束因子; $\|\beta\|_1$ 为 L1 范数,

L2 正则化的约束因子为加上所有参数的平方

和,也成为 L2 范数,或岭回归。其是在线形回归的基础之上施加一个偏差度以降低标准误差。模型的目标函数 $\hat{\beta}_{\text{Bridge}}$ 可表示为

$$\hat{\beta}_{\text{Bridge}} = \operatorname{argmin}_{\beta} \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^p x_{ij} \beta_j)^2 + \lambda \sum_{j=1}^p \beta_j^2 \right] \quad (3)$$

式中: $\sum_{j=1}^p \beta_j^2$ 为 L2 范数。

弹性网络法是另一种正则化和变量选择方法,以改善 Lasso 回归的计算误差和效率。模型的目标函数 $\hat{\beta}_{\text{Elastic}}$ 可表示为

$$\hat{\beta}_{\text{Elastic}} = \operatorname{argmin}_{\beta} \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^p x_{ij} \beta_j)^2 + \frac{1-\lambda}{2} \sum_{j=1}^p \beta_j^2 + \lambda \sum_{j=1}^p |\beta_j| \right] \quad (4)$$

在惩罚项中,在弹性网络法中施加 L1 和 L2 两个因子,使得其综合了 Lasso 回归和岭回归的优势,建立了 Lasso 回归与岭回归之间的连接桥梁。

1.2 空间演化模型

在桥梁工程领域,技术状况评分是衡量桥梁结构安全性和稳定性的关键指标。随着桥梁使用年限的增加,其技术状况会逐渐发生变化,因此,准确、及时地预测桥梁技术状况评分显得尤为重要。

二维高斯过程回归是一种基于高斯过程的随机过程模型,其核心思想是利用二维高斯分布的统计特性来描述桥梁技术状况评分在时间和空间上的变化。具体而言,二维高斯过程回归将各桥梁结构视为二维空间中的点,每个点都对应一个技术状况评分。通过构建一个包含这些点的二维高斯分布模型,以捕捉不同结构之间技术状况评分的相关性,并据此进行预测。

二维高斯过程回归在桥梁技术状况评分预测中的优势主要体现在以下几个方面:(1)它能够充分考虑不同结构之间技术状况评分的相关性,从而提高预测准确性;(2)二维高斯过程回归具有强大的非线性建模能力,能够应对桥梁技术状况评分中复杂的非线性变化;(3)该方法具有较高的灵活性和可扩展性,可根据不同评估需求进行相应的调整和优化。

二维高斯过程回归涉及高斯过程在二维空间中的应用,主要用于描述和预测二维空间中的连续函数。二维高斯分布的概率密度函数可表示为

$$p(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2(1-\rho^2)} \rho \left[\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x} \right)^2 - 2\rho \left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x} \right) \left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y} \right) + \left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \right\} \quad (5)$$

式中: x 和 y 为二维空间中的点; μ_x 和 μ_y 为均值; σ_x 和 σ_y 为标准差; ρ 为 x 和 y 之间的相关系数。

高斯过程是一个随机过程的集合, 其中任何有限数量的随机变量都服从联合高斯分布。高斯过程可以由均值函数 $m(x)$ 和协方差函数(核函数) $k(x, x')$ 完全定义。均值函数 $m(x)$ 通常设为常数, 或根据具体问题设定。协方差函数 $k(x, x')$ 描述了不同点 x 和 x' 之间的相关性。常见的核函数包括平方指数核、Matern 核等。

在高斯过程回归中, 假设目标变量 y 是由某个潜在函数 $f(x)$ 加上噪声 ε 生成, 即 $y = f(x) + \varepsilon$ 。其中, $f(x)$ 服从高斯过程, ε 常为高斯噪声。

预测值 $\hat{y}^*$ 在新点 x^* 处的后验分布如下式

$$\hat{y}^* \sim N(\mu_*, \sigma_*^2) \quad (6)$$

式中: $N(\mu_*, \sigma_*^2)$ 为均值为 μ_* , 方差为 σ_*^2 的高斯分布; $\mu_* = k(x^*, X)(K + \sigma_n^2 I)^{-1} y$ 为预测均值; y 为对应于 X 的目标值向量; I 为单位矩阵; K 为训练数据点 X 之间的协方差矩阵; $k(x^*, X)$ 为新点 x^* 与训练数据点 X 之间的协方差(核函数); σ_n^2 为噪声方差; $\sigma_*^2 = k(x^*, x^*) - k(x^*, X)(K + \sigma_n^2 I)^{-1} k(X, x^*)$ 为预测方差。

2 城市桥梁群服役现状统计分析

2.1 区域桥梁状态数据库建立

建立一个全面的桥梁状态数据库是进行桥梁退化规律演化和模式识别的首要前提, 数据的好坏将直接决定后续评估工作的准确性和可靠性。区域中小跨径桥梁群的评估需要大量的数据支撑, 本研究依托收集的结构化数据, 以及通过 python 提取已有的检测报告中的关键信息, 配合数据预处理方法, 建立区域桥梁群状态数据库。

用 Python 提取报告信息的过程中, 为了从 Word 文档中提取关键词信息, 利用了 Python-docx 库。该库提供了对 Word 文档进行读写的功能, 允许遍历文档各个部分并提取关键词。还结合了自然语言处理技术, 进行了分词、词性标注、命名实体识别, 对提取出的文本进一步处理和分析, 提高了关键词提取的准确性和效率。在提取相关信息后, 将其转换为

Python 中的数据结构, 以便进行后续的数据分析和处理。并使用 pandas 等数据分析库对提取出的表格数据进行进一步的处理和分析。

完整的数据源可以涵盖人工检测信息、长期监测数据、交通量报告等, 但对于分布广且基数大的中小跨径桥梁来说检测信息仍是数据的主体, 其他数据源包括设计图纸、维修记录、监测数据等可作为补充。来自桥梁检测报告的数据是记录桥梁检测信息最完整、最直接的主要资料来源, 它可提供大量与桥梁状况相关的信息, 以揭示时空维度下桥梁状况变化。借助数据提取与预处理技术建立了桥梁结构基本属性数据库和结构技术状态评估数据库。

桥梁结构基本属性数据库包括: 桥名、路名、跨越物名、经纬度坐标、结构大类、建成年月、桥梁总长、桥梁跨数、跨径组合、桥梁总宽、主梁形式、主梁数量、桥墩形式、桥墩数量、横向布置、横向联系类型等。结构技术状态评估数据库包括: 桥名、桥梁完好状况评定值、桥梁结构状况评定表值、上部结构技术状况评估值、下部结构技术状况评估值、桥面系技术状况评估值等。

2.2 区域桥梁基本信息统计分析

根据华东某区域内桥梁的地理信息位置, 可以将路线转换成线, 桥梁转化成线上的点, 形成如图 1 所示的拓扑关系图。依据 2023 年区域桥梁的温度监测数据, 其年平均气温在 3.2~19.0 °C 之间, 如图 2 所示。

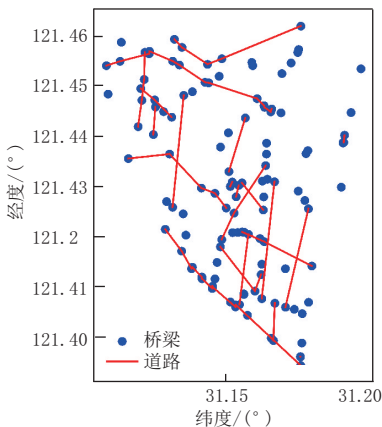


图 1 区域桥梁位置拓扑网络图

结合图 3 中不同类型桥梁的跨径分布概况, 可知绝大部分桥的总跨径在 100 m 以下, 这也充分反映了中小跨径桥梁是城市路网基础设施中数量最大、分布最广的桥型。

图 4 所示为区域中桥梁宽度的概率密度分布。并结合核密度估计曲线, 可知, 区域内桥梁宽度的分

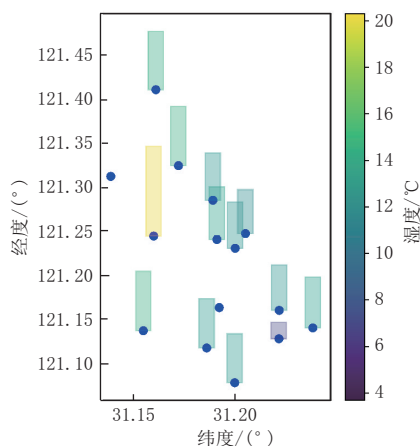


图2 区域桥梁的年平均温度

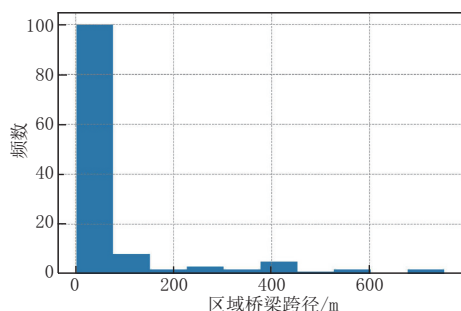


图3 区域桥梁跨径统计分布图

布服从混合高斯分布。

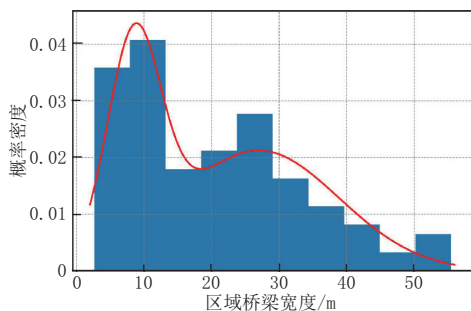


图4 区域桥梁宽度统计分布图

进一步分析区域中小桥梁的跨径数据,如图5所示,所有桥梁的单跨跨径近似服从混合指数分布。其中,空心板梁桥的单跨跨径绝大部分在25 m以下,箱形梁桥的单跨跨径在20 m以上;人行天桥的单跨跨径集中在2~50 m的范围内。

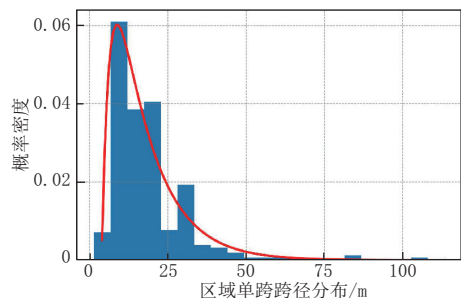


图5 区域桥梁单跨跨径统计分布图

2.2 基坑模型的建立及分析方法

依据规范《城市桥梁养护技术标准》(CJJ 99—

2017)的相关规定,技术等级落在Ⅱ~Ⅴ类养护桥梁完好状况用技术状况评分BCI表征,并将城市桥梁技术状况划分为5个等级。评分高于90为A级,介于80~90的为B级,未达到80但高于60的为C级,再次之为D、E级。区域桥梁的技术状况等级统计分布见图6。

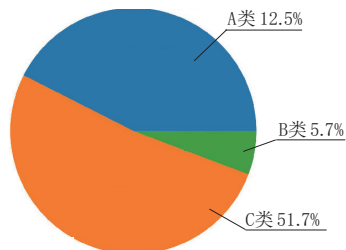


图6 区域桥梁技术状况等级统计

区域桥梁的评分统计分布如图7所示,由此可见,区域桥梁整体服役状态较好,桥梁评分密度曲线呈单峰形态,在90分处技术状况评分下降,这也是A、B级桥的临界处;各区域评分较多分布于[85,95]区间,半数桥梁处于B级状态,对桥梁管养部门来说需提早开展预防性养护,在兼顾经济性和安全性的同时,获取桥梁最优的性能提升效果;对于评分较低的桥梁,考虑到其正在或即将退化至C级桥梁,如不能及时实施维护与加固,将对整个路网安全产生不可忽视的影响。

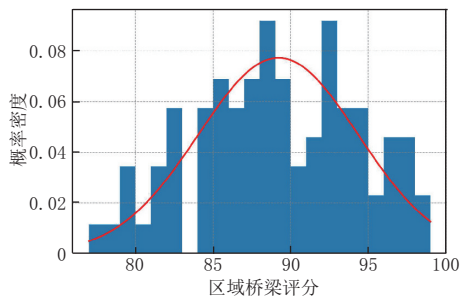


图7 区域桥梁评分统计分布

进一步考察桥梁各部件技术状况评级,如图8所示。可看出全区域桥梁桥面系、上部结构评级大部分为A、B和C级,除少数桥面系退化至D级,其他部件并未出现D、E级状态;下部结构技术状况保持良好,超过95%的下部结构评定为A级。大部分桥梁部件完好或出现轻微损伤,但并未影响结构安全,这一现象充分说明城市桥梁管养部门对道路通行管理工作以及结构定期维修加固的作用。

特别地,桥面系和上部结构相较下部结构退化程度更为明显,其主要原因是桥面系更多地暴露在恶劣的外部环境条件中,受环境影响较大,且上部结构作为整个桥梁体系的主要承重部件直接承受车辆

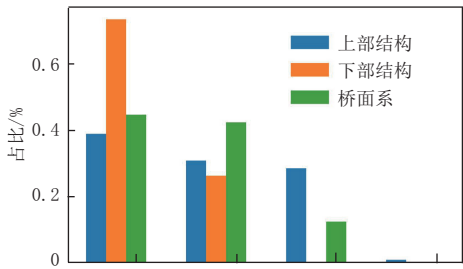


图8 区域桥梁各部件BCI分布

荷载以及可能出现的超限载情况,容易出现损坏,所以评级略低。

3 数值模拟反演计算

基于前文建立的数据库,本文采用机器学习方法进行区域桥梁数据的挖掘,建立桥梁群技术状况的时变模型和空间演绎模型,以评估区域桥梁技术状况的演化情况,并对未来时间和未测区域的桥梁进行结构状态预测和推演。

3.1 时变演化分析与状态预测

本文首先对比了线性回归、岭回归、Lasso 回归和弹性网络四个模型的预测准确率,选取了弹性网络模型为最佳模型。表1给出了各个模型的预测结果准确率,准确率由相关系数 R^2 测算,以反映变量之间相关关系密切程度,计算公式如下:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(t_i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}} \quad (7)$$

式中: R^2 为相关系数; N 为样本数; t_i 为实际输出; $\bar{t}$ 为实际输出的平均值; y_i 为预测输出; $\bar{y}$ 为预测输出的平均值。

表1 模型预测准确率

单位: %

指标	线性回归	Lasso 回归	岭回归	弹性网络
R^2	90.36	93.82	93.96	95.01

采用参数化的弹性网络回归模型拟合得到桥梁技术状况评分的时变函数,以获取桥梁在自然衰变下的时变曲线。

图9所示为整个区域桥梁技术状况评分均值与桥龄的拟合结果。尽管桥梁结构评分以散点形式呈现,但通过将其转化为连续变量进行拟合,依然能够反映评分的时变趋势,对于预测未来桥梁结构评分变化提供了可靠的依据。此外,拟合图中部分散点的离散现象可能由以下原因导致:一方面,这些离散点可能仅由几个样本点的均值,甚至单个样本点构成,少量样本难以全面代表总体的变异规律;另一方面,桥梁在运营期间进行的维修加固措施使得其部

件评分出现上升趋势。若剔除这些离散点,拟合优度较高的线性方程仍然可以获得。

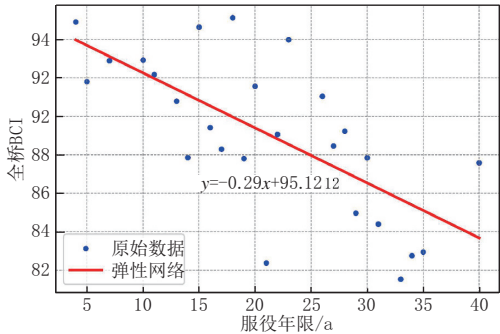


图9 服役状态时变预测

3.2 空间演化分析与状态推演

通过区域桥梁历年的技术状况评分及其地理信息位置,构建二维高斯模型,根据模型的预测结果,可以实现对桥梁的技术状况进行定量评估。

图10所示为对本区域桥梁技术状态的二维高斯模型训练结果,可以看出蕴含的区域演化特征。基于此结果,可以推测未检测桥梁的技术状态评分,并提出相应的维护建议。同时,可以不断更新模型参数和优化预测算法,提高预测的准确性和可靠性。

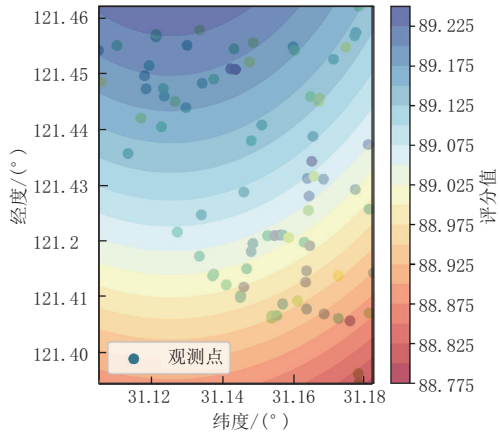


图10 区域桥梁服役状态空间分布

4 结 语

本文旨在全面掌握城市桥梁的服役现状,构建融合检测报告等多源信息的区域桥梁评估演绎数据库,为后续的特征挖掘、预测建模与网级评估提供了坚实的数据基础。从区域层面分析了跨径、桥长、技术状况分布特征,提出了基于机器学习方法的区域桥梁技术状态时空演绎方法,揭示了区域桥梁群状态特性,实现了对未来时间和未测区域的桥梁进行结构状态预测和推演。主要结论如下。

(1)拟合了区域中桥梁宽度的概率密度分布,服从混合高斯分布;拟合了桥梁单跨跨径概率密度,近

似服从混合指数分布。

(2)区域桥梁的评分统计分布显示,整体服役状态较好,密度曲线呈单峰形态,峰指出现在A、B级桥的临界处,半数桥梁处于B级状态,需提早开展预防性养护,可以在兼顾经济性和安全性的同时,获取桥梁最优的性能提升效果;减少对整个路网安全产生的影响。

(3)建立了基于弹性网络回归方法的区域桥梁群技术状态时变评估模型,完成了对实现了未来时刻区域桥梁状态预测;基于二维高斯模型的区域桥梁群技术状态空间演绎模型,实现了未测区域桥梁状态推演。

参考文献:

- [1] 邵雪军,王轶,项子儒,等.桥梁群运维管理平台构建与应用[J].中国交通信息化,2024(5):35-38.
- [2] 魏斌,许肇峰,吴益林,等.路网级桥梁集群监测系统建设关键技术及实践[J].广东公路交通,2024,50(1):62-65;71.

- [3] 王磊,陈瑞,戴理朝,等.面向低碳理念的桥梁群多目标维护决策优化研究[J].中国公路学报,2024,37(4):188-200.
- [4] 高洪,胡俊亮.城市轨道桥梁群健康监测系统设计及应用[J].世界桥梁,2023,51(5):60-68.
- [5] 周海怡,韩东睿,林颖典,等.基于物联网的城市桥梁安全监测管理系统的研究与应用[J].公路,2023,68(6):441-445.
- [6] 郭晓俊,王侃,黄宇.运营期城市桥梁群健康监测探索[J].交通节能与环保,2023,19(3):128-131.
- [7] 王崇交.公路交通网络桥梁智能检养修决策支撑理论与方法研究[D].成都:西南交通大学,2022.
- [8] 陈栎阳,汪清华,李宏龙等.城市桥梁群养护系统整体设计与管理功能研究[J].新型工业化,2022,12(5):253-257.
- [9] 何天涛,刘国衔,张一林.运营期城市桥梁群结构安全监测及系统集成应用[J].市政技术,2021,39(增刊1):139-142;190.
- [10] 陈浩波.基于物联网与云计算的城市桥梁群安全监测预警管理平台关键技术研究[R].宁波:宁波市市政设施中心,2021.
- [11] 张平.基于路网条件下结合综合成本的中小跨径桥梁健康监测系统关键技术研究[R].杭州:浙江省交通运输科学研究院,2021.
- [12] 郑祥隆,李晓娅,张勇.路网桥梁群监测优先级评价模型与算法设计[J].浙江交通职业技术学院学报,2020,21(3):11-15;36.

(上接第284页)

存稳定性。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部.2022年交通运输行业发展统计公报[Z].北京:中华人民共和国交通运输部,2020.
- [2] 钱锦华,董福营,陈晓慧,等.聚合物改性沥青的高温流变性能研究进展[J].材料导报,2023,37(增刊2):609-613.
- [3] 程丹江,华俊锋,胡照广.活化胶粉对改性沥青性能的影响及作用机理[J].弹性体,2023,33(2):83-90.

- [4] 张泽,曹东伟,许斌,等.高掺量橡胶复合改性沥青热储存稳定性研究[J].应用化工,2023,52(3):955-959.
- [5] 李纯,钱军,黄宏海,等.不同微观结构脱硫胶粉的制备及其对改性沥青性能影响[J].高分子通报,2023,36(2):213-223.
- [6] 孔佩佩,符刘旭,徐刚,等.抽出油活化废胶粉改性沥青老化性能[J].长安大学学报(自然科学版),2024,44(2):22-33.
- [7] 胡春华,孙兆斌.生物油和活化胶粉共混改性老化沥青[J].功能材料,2024,55(3):3184-3190.