



# 基于机器学习的超大跨度悬索桥健康状态评估

石林泽<sup>1</sup>, 程 斌<sup>1\*</sup>, 曹一山<sup>2</sup>, 蒋永生<sup>3</sup>

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院土木工程系, 上海 200240;

2. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100010; 3. 贵州高速公路集团有限公司, 贵州 贵阳 550009)

**摘要:** 随着桥梁健康监测系统及其应用的不断完善, 采用机器学习进行桥梁健康状态评估成为必要趋势。以超大跨度悬索桥为研究对象, 基于桥梁监测数据与机器学习算法, 建立了一种以提取结构损伤特征为目标的回归网络, 并以峰值系数法和连续小波变换法作为对比, 采用密度聚类法对桥梁结构的健康状态进行评估。结果表明: 采用改进四分位距法可有效消除监测数据中的异常跳点, 回归网络提取的损伤特征与密度聚类法在桥梁健康状态评估中的适用性良好。研究成果为机器学习下的超大跨桥梁健康状态评估提供了理论借鉴和方法参考。

**关键词:** 超大跨度悬索桥; 健康状态评估; 机器学习; 回归网络; 密度聚类

## 0 引言

桥梁结构在运营期间易受不利因素影响而发生性能退化, 导致其无法满足预定功能的要求, 甚至造成严重安全事故, 因此桥梁健康监测系统被广泛应用<sup>[1-4]</sup>。随着国内外大型桥梁健康监测系统的海量数据积累, 基于机器学习的桥梁健康状态评估技术得到快速发展和应用<sup>[5-9]</sup>, 可有效解决常规结构状态评估技术无法处理海量监测数据的问题。

基于机器学习的桥梁健康状态评估主要分为数据预处理和结构状态评估。数据预处理方面, 张宇峰等<sup>[1]</sup>、Chandola 等<sup>[10]</sup>、Posenato 等<sup>[11]</sup>对不同异常监测数据明确了产生原因及对应解决方法。结构状态评估方面, 柏平等<sup>[5]</sup>开展了基于神经网络的桥梁异常状态识别与风险评估研究; Gonzalez 等<sup>[6]</sup>计算神经网络输出误差作为损伤特征实现了桥梁状态评估; Yan 等<sup>[7]</sup>、Finotti 等<sup>[8]</sup>运用神经网络和支持向量机完成了结构特性智能诊断; Cha 等<sup>[9]</sup>提取结构动态响应的峰值系数与连续小波变换峰值后用密度聚类法确定了结构损伤位置及程度。机器学习在健康状态评估中被证实具有良好性能, 但在实际工程应用中, 仍存在评估结果受除损伤外的其他因素干扰的问题, 其中超大跨桥梁状态评估受环境因素干扰问题相对突出。

本文依据桥梁健康状态评估思路, 以某超大跨度悬索桥的实际监测数据为基础, 运用机器学习开展超大跨公路桥梁健康状态评估技术研究。

## 1 桥梁健康监测系统

研究对象为某超大跨度钢桁梁悬索桥, 该桥位于山区高速公路段, 主跨 1 130 m, 全长 1 733 m, 桥宽 27 m, 桥梁设计荷载为公路 I 级, 已通车运营 4 年左右。桥梁结构示意及主要监测传感器布置见图 1, 健康监测系统的键组成部分见表 1。

## 2 健康状态评估方法

### 2.1 改进四分位距法

四分位法是一种用于消除数列异常值的统计方法, 基本原理是将数集一分位点和三分位点作为上下阈值, 在移动窗口上对异常数据逐个检测与修正<sup>[11]</sup>。本文运用四分位距法消除监测异常数据, 并在原算法上作适当改进, 设置两重循环, 选择大循环步长作为窗口长度的一半, 防止前部分数列变化趋势对后部分数列变化趋势的影响; 设置小循环修正窗口中每一个数据, 简化对数列前端和后端特殊处理过程。

收稿日期: 2020-04-15

基金项目: 贵州省交通运输厅科技项目(2017-121-044, 2019-122-004)、国家重点研发计划项目(2016YFB1200602-28, 2016YFB1200601-B27)

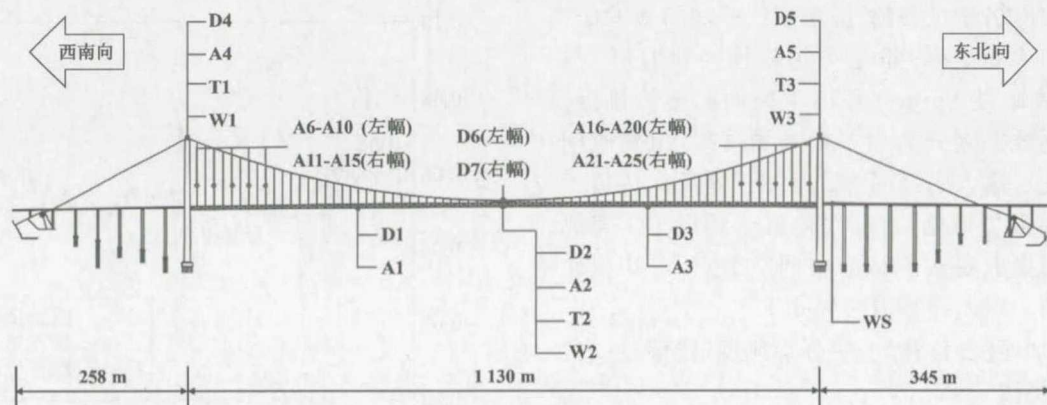


图1 桥梁结构及监测传感器布置图

表1 健康监测系统集成表

监测项目	监测传感器	测量精度
主梁加速度	加速度传感器 (A1-A3)	$\pm 2 \text{ g}$
主塔加速度	加速度传感器 (A4-A5)	$\pm 2 \text{ g}$
吊索加速度	加速度传感器 (A6-A25)	$\pm 1 \text{ g}$
主梁位移	位移传感器 (D1-D3)	$\pm 3 \text{ mm}$
主塔位移	位移传感器 (D4-D5)	$\pm 3 \text{ mm}$
主缆位移	位移传感器 (D6-D7)	$\pm 3 \text{ mm}$
风速	风速传感器 (W1-W3)	$\pm 0.3 \text{ m/s}$
温度	温度传感器 (T1-T3)	$\pm 0.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$
车辆荷载	动态称重系统 (WS)	$\pm 2 \text{ km/h}$

## 2.2 基于机器学习的回归网络

人工神经网络作为模仿动物神经网络的算法模型,能通过改变内部节点的取值与连接关系实现信息处理,已广泛应用于桥梁健康状态评估<sup>[5-8]</sup>。本文运用一种基于人工神经网络和有监督学习的回归网络,通过机器学习与误差反向传播构建环境因素与结构响应的内在关系。考虑到温度、风速与加速度、位移间关系<sup>[12-13]</sup>,建立子网络1并设置 $i$ 个节点以模拟温度与风速对结构特性影响,建立子网络2并设置 $j$ 个节点以模拟结构在车辆激励下产生加速度及位移。将以上两个子网络合并成整体网络,如图2,设定网络中间层节点值作为结构损伤特征值,表征包含病害特征的桥梁结构特性。

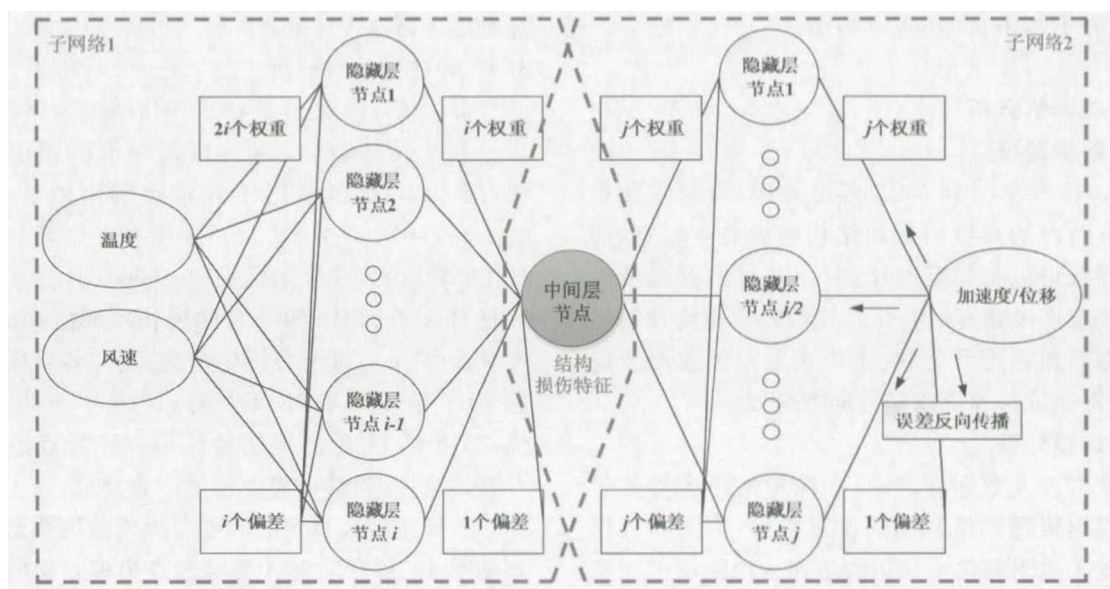


图2 回归网络结构图

确定回归网络学习参数时,采用经验法与实验法:学习集测试集容量、学习批量采用较佳经验取值<sup>[14]</sup>;最佳学习次数通过 Python 环境下的回归运算确定。将处理后监测数据划分为学习集与测试集,组建时间序列并标准化后输入回归网络。运用误差反向传播学习算法修正权重与偏差,直到误差值达到最小。完成学习与测试后提取每次测试的中间层节点,取均值作为损伤特征值。误差计算方法如式 1。

损失值 | 输出加速度(位移) - 实际加速度(位移) | (1)

### 2.3 密度聚类法

密度聚类法是一种基于点簇密度概念的聚类算法,在 2014 年率先被 Rodriguez 提出<sup>[15]</sup>,经过改进后逐渐被应用于无监督机器学习的损伤识别<sup>[9]</sup>,其基本原理如图 3。

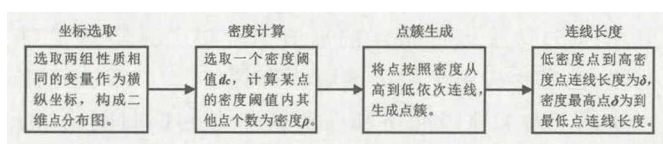


图 3 密度聚类法的基本原理

据图 3,定义密度  $\rho$  最高的点为主聚类点;定义  $\rho$  为 0 的点为 I 类异常点,表示该点不在点簇范围内;定义  $\rho$  不为 0 且  $\delta$  远大于普通点的点为 II 类异常点,表示该点为偏离主点簇的次点簇密度最高点。由于某一时段出现的结构损伤会导致其损伤特征值发生改变,之后时段会保留改变量而在密度聚类二维分布图中形成次点簇,故可用 II 类异常点存在性作为结构损伤判断依据,研究中常用  $\rho\delta$  图进行判别。

## 3 健康状态评估分析

### 3.1 监测数据选择

采集 2017 年 3 月到 2019 年 2 月中,每月车轴重及车距相近时段的环境因素和结构响应监测数据,环境因素监测数据包括温度与风速(主缆吊索处温度风速用主梁处温度风速近似替代),结构响应监测数据包括主梁竖直向加速度及位移、主塔水平向加速度及位移、主缆竖直向位移和吊索竖直向加速度。

### 3.2 监测数据处理

监测数据进入数据库时,已去除指定频率外的干扰噪声与超出传感器里程的偶发异常点,本文在数据处理过程做了适当简化。采用改进四分位距法处理监测数据中的异常跳点,某时段传感器 D1 位移监测值修正示例如图 4,可见该方法增强了数据修正效果。

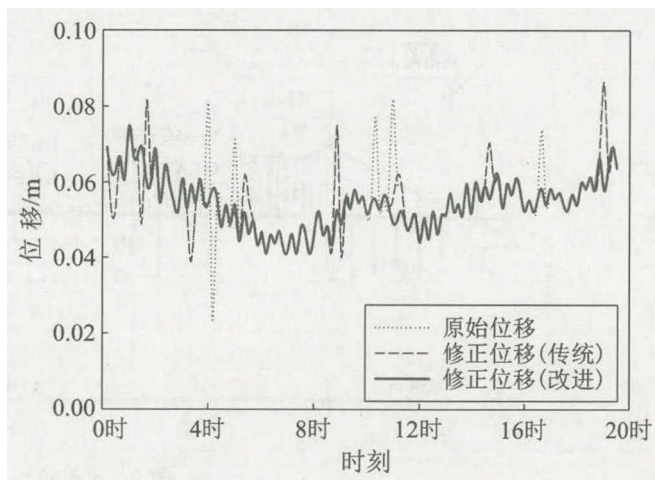


图 4 四分位距法修正位移值图

采用回归网络从修正后监测数据中提取桥梁各结构的损伤特征值  $X_i$ ,并在密度聚类法下实现桥梁健康状态评估。为了满足密度聚类法应用,采用峰值系数法和连续小波变换法提取损伤特征值  $Y_i, Z_i$ ,具体计算方法在文献<sup>[9]</sup>中介绍,本文限于篇幅不再展开。三组损伤特征值的组成样本见式(2)。

$$X_i = (X_1, X_2, \dots, X_{24}), Y_i = (Y_1, Y_2, \dots, Y_{24}), Z_i = (Z_1, Z_2, \dots, Z_{24}) \quad (2)$$

式中: $i$  代表 2017 年 3 月到 2019 年 2 月范围内各个月份。

密度聚类分析中,先分别选取  $X_i, Y_i, Z_i$  中两组损伤特征值构成二维点分布图,接着计算图中所有点与最近 5 个点连线的平均长度作为密度阈值  $d$ ,最后计算密度  $\rho$  与连线长度  $\delta$ 。

### 3.3 评估结果与分析

以主梁 1/4 处健康状态评估结果为例,图 5(a)给出了基于传感器 A1 加速度监测值的损伤特征分布图,图 5(b)给出了用于异常点判别的  $\rho\delta$  分析图。 $(X_i, Y_i), (X_i, Z_i), (Y_i, Z_i)$  维度密度聚类分析中均出现 I 类异常点,其分别代表 2017 年 5 月、2017 年 6 月、2018 年 4 月、2018 年 7 月的损伤特征值;而 II 类异常点只在  $(Y_i, Z_i)$  维度分析中出现,其与各次簇点分别代表 2017 年 3 月、2018 年 2 月、2018 年 3 月、2018 年 4 月、2018 年 12 月的损伤特征值。异常点出现的月份没有延续性,故其可能由环境因素导致。

各传感器采集到的温度与风速监测数据月变化趋势见图 6。研究发现, I 类异常点出现月份的平均风速比正常月份的平均风速增大或减小 20% 以上,说明 I 类异常点极有可能是风速发生较大变化导致; II 类异





常点及次簇点出现月份的主梁处平均温度比主塔处平均温度降低 10 ℃ 以上,说明 II 类异常点极有可能是

温度异常导致,推测可能是低温或高温导致传感器功能异常。

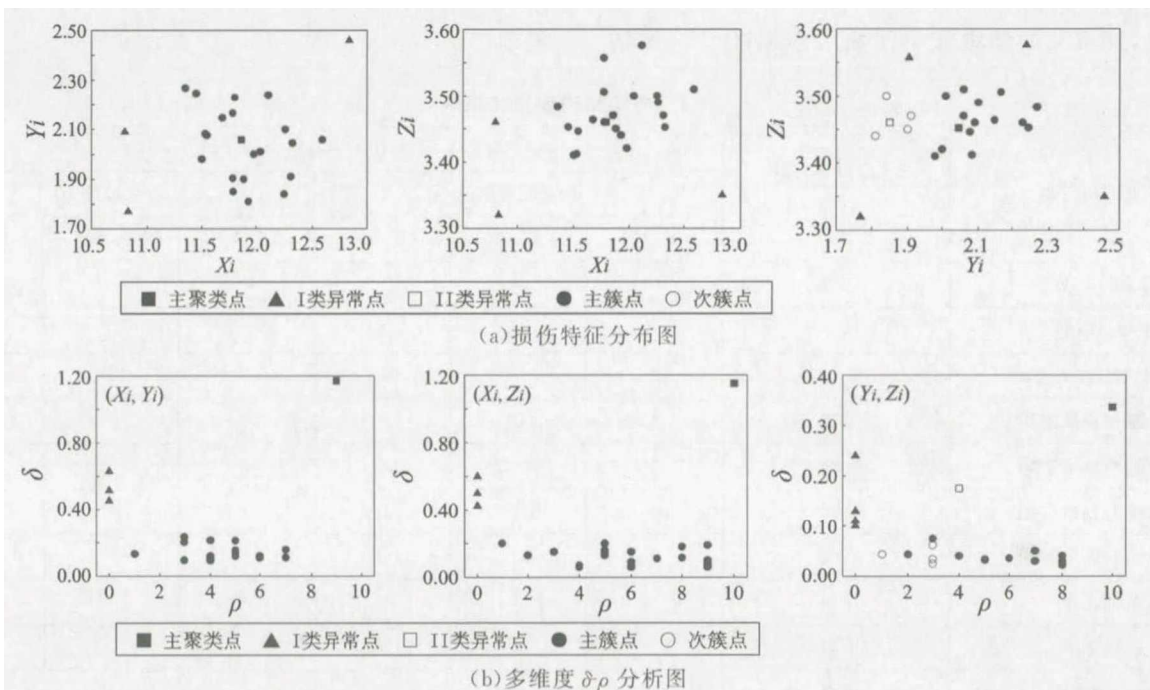


图 5 主梁 1/4 处加速度监测值的损伤特征密度聚类图

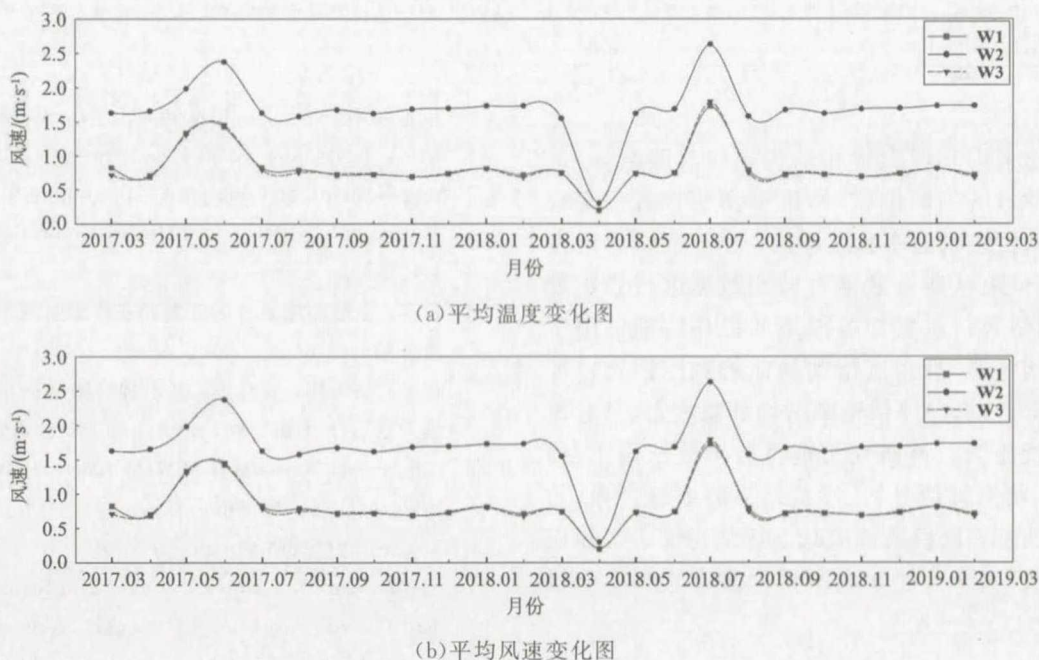


图 6 监测数据采集段温度与风速的月变化图

以相同方式评估各桥梁结构,评估结果见表 2,其中主梁 1/4 处、主梁 3/4 处以及西南侧主塔的结构评估中出现 II 类异常点,结合图 6(a)发现,这些 II 类异

常点及次簇点出现月份的结构处监测温度均出现异常,推测这些 II 类异常点都可能是温度异常导致。没有出现桥梁结构损伤导致的 II 类异常点,表明该桥健



康状态整体良好。用巡检技术等级评定验证评估结果,桥梁各结构技术等级评定为1级或2级,说明桥梁各结构基本良好,即其动力特性和损伤特征值未发生明显改变,和本文中健康状态评估结果相符<sup>[16]</sup>。评估

结果中II类异常点在 $(X_i, Y_i)$ 、 $(X_i, Z_i)$ 维度密度聚类法下产生个数比 $(Y_i, Z_i)$ 维度少,说明基于机器学习的桥梁结构健康状态评估方法抗环境因素干扰性相对较强。

表2 桥梁结构评估结果表

桥梁结构代表	巡检技术等级 评定	II类异常点个数					
		加速度监测值			位移监测值		
		$(X_i, Y_i)$	$(X_i, Z_i)$	$(Y_i, Z_i)$	$(X_i, Y_i)$	$(X_i, Z_i)$	$(Y_i, Z_i)$
主梁1/2处	1级	0	0	0	0	0	0
主梁1/4处	1级	0	0	1	0	0	1
主梁3/4处	1级	0	0	1	0	0	1
西南侧左幅吊索组	2级	0	0	0	/	/	/
西南侧右幅吊索组	2级	0	0	0	/	/	/
东北侧左幅吊索组	2级	0	0	0	/	/	/
东北侧右幅吊索组	2级	0	0	0	/	/	/
左幅主缆	2级	/	/	/	0	0	0
右幅主缆	2级	/	/	/	0	0	0
西南侧主塔	2级	1	1	1	1	1	1
东北侧主塔	2级	0	0	0	0	0	0

注:“/”表示因没有安装相应传感器而未进行评估;技术等级1级表示桥梁结构完全良好,技术等级2级表示桥梁结构基本良好<sup>[16]</sup>;吊索组中每根吊索健康状态视为近似相同。

#### 4 结语

本文通过采集环境因素和结构响应监测数据,运用基于机器学习的回归网络、密度聚类法等方法实现了超大跨悬索桥结构健康状态评估。从研究结果中发现,改进四分位距法能有效地对监测数据进行修正处理,而回归网络通过机器学习提取的损伤特征适用于表征桥梁结构状态,且密度聚类法能够利用损伤特征分布识别异常点,合理评估桥梁结构健康状态,具有抗环境因素干扰能力。该研究实现了监测数据修正、损伤特征提取、状态评估分析、巡检结果验证等过程,为机器学习下的超大跨桥梁健康状态评估提供了实际应用思路与方法,未来可能在大型桥梁健康监测中取得深入应用。

#### 参考文献:

- [1] 张宇峰,李贤琪.桥梁结构健康监测与状态评估[M].上海:上海科学技术出版社,2018.
- [2] Sun L M, Yu G. Vulnerability Analysis for Design of Bridge Health Monitoring System [C]// Health Monito-

ring of Structural and Biological Systems, 2010(1): 7650.

- [3] XU Y L. Making Good Use of Structural Health Monitoring Systems of Long-span Cable-supported Bridges [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2018, 8(3): 477-497.
- [4] 杨春. 变形监测系统的开发和在桥梁监测中的应用[J]. 上海公路, 2018(S1): 50-52.
- [5] 柏平,马志华,姜世英. 基于神经网络的桥梁异常状态识别方法[J]. 上海公路, 2015(03): 36-39+50.
- [6] Gonzalez I, Karoumi R. BWIM Aided Damage Detection in Bridges Using Machine Learning [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2015, 5(5): 715-725.
- [7] Yan B, Cui Y, Zhang L, et al. Beam Structure Damage Identification Based on BP Neural Network and Support Vector Machine [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014(2014): 1-8.
- [8] Finotti R P, Cury A A, Barbosa F D S, et al. An SHM Approach Using Machine Learning and Statistical Indicators Extracted From Raw Dynamic Measurements [J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2019, 16



- (2); e165.
- [9] Cha Y J, Wang Z L. Unsupervised Novelty Detection-based Structural Damage Localization Using A Density Damage Localization Using A Density Peaks-based Fast Clustering Algorithm [J]. Structural Health Monitoring, 2018, 17(2): 313-324.
- [10] Chandola V, Banerjee A, Kumar V. Anomaly detection: A survey [J]. ACM Computing Surveys, 2009, 41 (3): 15.
- [11] Posenato D, Kripakaran P, Inaudi D, et al. Methodologies for Model-free Data Interpretation of Civil Engineering Structures [J]. Computers & Structures, 2010, 88(7-8): 467-482.
- [12] Mao J X, Wang H, Feng D M, et al. Investigation of Dynamic Properties of Long-span Cable-stayed Bridges Based on One-year Monitoring Data Under Normal Operating Condition [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(5): e2146.
- [13] Zhou Y, Sun L M. Effects of High Winds on A Long-span Sea-crossing Bridge Based on Structural Health Monitoring [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 174: 260-268.
- [14] Mcclure N. TensorFlow Machine Learning Cookbook [M]. Birmingham: Packt Publishing, 2018.
- [15] Rodriguez A, Laio A. Clustering by Fast Search and Find of Density Peaks [J]. Science, 2014, 344 (6191): 1492-1496.
- [16] 公路桥梁技术状况评定标准:JTGT H21-2011 [S].

(上接第 42 页)

#### 4 结语

由计算分析,得到以下主要结论:

(1)桥塔塔柱整体呈现出双向压弯构件的受力形式,以承受轴力为主;而塔顶横梁主要承受桥塔平面内的弯矩。

(2)钢塔柱上段下段均表现为单向压弯的受力形式,纵桥向两侧的外壁板存在明显差异,但是均表现为受压状态。

(3)钢塔柱纵桥向腹板表现为轴压的受力形式,所受压力均匀,但是越接近其下部,其所承受的纵桥向的弯矩效应越明显。钢塔柱横桥向腹板钢结构表现为单向压弯的受力形式,主要承受轴压及横桥向弯矩作用,但其所承受的横桥向的弯矩效应较为明显。

(4)钢塔柱越靠近塔柱底部时,外壁板承受的竖桥向轴力、纵桥向弯矩、横桥向弯矩的占比越来越大,而纵横向腹板承受的竖桥向轴力、纵桥向弯矩、横桥向弯矩的占比越来越小。

(5)钢混组合塔柱呈现出明显的双向压弯的受力

形式。当截面越靠近塔柱底部时,内外壁板钢结构承受的竖桥向轴力、纵桥向弯矩、横桥向弯矩的占比总体呈现减小趋势,而混凝土承受的竖桥向轴力、纵桥向弯矩、横桥向弯矩的占比总体呈现增大趋势。

太原市通达街跨汾河的自锚式悬索桥于 2019 年 6 月通车,从通车以来的运营情况看桥塔各部分的受力性能良好。

#### 参考文献:

- [1] 俞欣. 钢桥塔及组合桥塔设计与受力性能试验研究 [D]. 西安:长安大学,2008.
- [2] 李丹,苏庆田,吴冲,等. 锚箱式钢桥塔锚固区力学性能研究[J]. 结构工程师,2014,30(1):63-69.
- [3] 吴斌,王亚飞. 自锚式悬索桥桥塔钢-混结合段局部受力分析[J]. 桥梁建设,2013(03):58-63.
- [4] 郑瑞. 矩形多格室高性能钢-混凝土组合桥塔轴心受压性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2018.
- [5] 王春生,王茜,王欣欣,等. 钢-高性能混凝土组合桥塔受力性能试验研究[J]. 长安大学学报:自然科学版,2011 (01):55-62.

fecting the lime content, some of which are important factors that are easy to be ignored in testing process. This paper described the corresponding research, and made a quantitative analysis of the relevant influencing factors.

**Key words:**lime stabilized soil; lime content; error of measurement results

**The application of porous asphalt pavement in South Hongmei Elevated Road** ..... **JIANG Lufeng, TANG Xirui (27)**

**Abstract:**With the rapid development of urbanization, the construction technology of asphalt pavement is also constantly improving. Apart from the road performance of asphalt pavement, people also pursue other performance such as higher safety, environmental protection. This paper mainly introduced the construction of porous asphalt mixture for bridge deck pavement engineering of Shanghai South Hongmei Road to Jinhai Road passage (South Hongmei Road section), so as to provide reference for similar projects in the future.

**Key words:**porous asphalt pavement; Hongmei South road; elevated road

**Scheme design of Chongming Ecological Avenue** ..... **QU Guolong (33)**

**Abstract:**Chongming Ecological Avenue is an east-west trunk road connecting the southern urban area of Chongming district. In order to meet the traffic demand and future development needs of Chongming Island during the Flower Expo, the overall design scheme of "BRT layout in bilateral roads and shady roads" is adopted. The construction of roadside landscape corridor was promoted simultaneously, and the related facilities such as slow-moving system are set in the corridor to create a high-quality ecological highway paragon and efficient intelligent public transportation system.

**Key words:**trunk highway, passenger transport corridor, green ecological corridor, scheme design

**Mechanical Analysis of Variable Section Composite Arch Tower** ..... **DAI Wei<sup>1</sup>, WANG Xiaoping<sup>1</sup>, CAO Pei<sup>1</sup>, HU Yiming<sup>2</sup> (38)**

**Abstract:**Based on the four-span single pylon self-anchored suspension bridge at Tongda street in Taiyuan city which featured a steel-concrete composite tower and was characterized by a spatial curved surface and a complicated structure, a finite element model was established to investigate the mechanical behavior of the main tower. This paper conducted some analysis and summarized the characteristics of force transfer of the variable cross-section hybrid arch tower, which aimed at providing some reference in the future designs.

**Key words:**self-anchored suspension bridge; steel-concrete composite structure; mechanical analysis; finite element model

**Stress Analysis of Anchorage Zone for Anchor Pipe Structure** ..... **REN Fei<sup>1</sup> (43)**

**Abstract:**The anchor zone of steel tower is the key part connecting the cable and tower of cable-stayed bridge. Based on a cable-stayed bridge, a finite element model of space plate and shell in anchorage zone of anchor tube steel tower was established and analyzed. The results showed that the stress distribution in the anchorage zone was not uniform, the stress concentration of the bearing plate and the steel casing near the anchor head was high, but the area with high stress level was small and the stress diffusion could be fast. The weld stress between steel casing and stiffening plate should be considered as the influence of the overall deformation of bridge tower. The tower wall was subject to the external load, but the overall stress level was low.

**Key words:**anchor pipe; Tower anchorage area; stress behavior; finite element analysis

**Health Condition Assessment of Super-long Span Suspension Bridge Based on Machine Learning** ..... **SHI Linzhe<sup>1</sup>, CHENG Bin<sup>1\*</sup>, CAO Yishan<sup>2</sup>, JIANG Yongsheng<sup>3</sup> (48)**

**Abstract:**With the continuous improvement and application of bridge health monitoring systems, bridge health condition assessment technologies by machine learning have become a research hotspot. This research was conducted on a super-long span suspension bridge. Based on bridge monitoring data and machine learning algorithms, a regression network aiming at extracting structural damage features was constructed. Meanwhile the peak coefficient method and the continuous wavelet transform method were compared to assess health condition of the bridge structures through a density clustering method. The results showed that the improved interquartile range analysis could eliminate abnormal jump points effectively, and damage features extracted by the regression network and the density clustering method was confirmed as a suitable approach to assess bridge health condition. This research provides a theoretical and methodological reference for the super-long span bridge health condition assessment based on machine learning.

**Key words:**Super-long Span Suspension Bridge; Health Condition Assessment; Machine Learning; Regression Network; Density Clustering

**Design and Construction of Steel-box Arch Bridge using Super-long Cantilever Launching Method** ..... **XU Jun, WANG Yunpeng, LI Zhengrong (54)**

**Abstract:**The Dukou Bridge above River Nu is a beneath-supported basket-type arch bridge made of steel box arch, steel-concrete composite girder and network-structure hangers. The main structure of the bridge was constructed using global incremental launching method, whose maximum cantilever had reached 100m, a new record in Asia, due to the turbulent flow velocity and deep water of River Nu. By making overall and localized analog calculation for the construction process, performing stress and displacement monitoring during construction, and adjusting the launching level and jack support counterforce in a dynamic manner during incremental launching process, the main bridge was constructed into place successfully.

**Key words:**Steel-box arch bridge; network-type hangers; composite girder; basket arch; launching

**Localized Analysis of Pin Connection Bridge Bearing** ..... **XU Dongwei (57)**

**Abstract:**As a classical hinge joint in structures, pin joint is widely used in engineering. It is an important work to analyze and design the pin joint with finite element software. Different from conventional calculation of lifting lugs, the pin connection bridge bearing should be paid more attention to the localized bearing pressure and the stress between contact surfaces. Based on the design work of a pin connection bearing of a footbridge, the finite element software ANSYS was used for solid modeling and contact analysis. Classical theories and standard formulas were adopted for calculation. The numerical results were verified and suggestions for modification were given. Validation method was provided in combination with domestic and foreign