

文章编号:1673-9469(2025)01-0009-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.01.002

## 基于改进 PCA-K 均值聚类-特征值分析法的 桁架式拱梁组合体系性能评估

王亮<sup>1,2</sup>, 刘磊<sup>1,2</sup>, 张伟<sup>1,2</sup>, 陈晓杰<sup>1,2</sup>, 桂成中<sup>3,4\*</sup>, 程雨<sup>5</sup>

(1. 中电建路桥集团有限公司, 北京 100038; 2. 中电建(广东) 中开高速公路有限公司, 广东 江门 529142;

3. 防灾科技学院, 土木工程学院, 河北 三河 065201; 4. 北京防灾科技有限公司, 河北 三河 065201;

5. 中咨公路养护检测技术有限公司, 北京 100097)

**摘要:** 提出一种基于改进 PCA-K 均值聚类-特征值分析法的双层桥面桁架式拱梁组合体系桥梁性能评估算法, 并应用于基于安全监测的双层桥面桁架式拱梁组合体系中的吊杆体系养护阶段性能评估。该算法主要包括监测数据采集、多源异构数据预处理、关键因子确定、改进 K 均值聚类分析、目标阈值确定和基于特征值分析的性能评估等内容。通过收集桥梁性能监测数据, 并对这些数据进行清洗, 接着采用三次样条插值法对多源异构数据进行预处理。基于主成分分析法确定关键因子, 并基于改进 K 均值聚类方法将性能参数数据分为三类。然后, 基于有限元计算结果确定测点位置所对应的测点力学性能状态的目标阈值, 通过将提取的均值与方差等特征值与目标阈值进行比较来评估桥梁性能状态。通过实例验证方法, 并提出实际应用和未来研究方向的建议。研究表明, 改进后 K 均值聚类方法与原始数据更接近, 且相关系数最高, 能够提高聚类分析的准确性和可靠性, 基于改进 PCA-K 均值聚类-特征值分析法能够评估桥梁结构性能状态。

**关键词:** 拱梁组合体系; 目标阈值; 主成分分析法; K 均值聚类法; 性能评估; 数据预处理

中图分类号: U448

文献标识码: A

## Performance Evaluation of Arch-Truss Girder Combination Bridge Based on Improved PCA-K-Means Cluster- Eigenvalue Analysis Algorithm

WANG Liang<sup>1,2</sup>, LIU Lei<sup>1,2</sup>, ZHANG Wei<sup>1,2</sup>, CHEN Xiaojie<sup>1,2</sup>, GUI Chengzhong<sup>3,4\*</sup>, CHENG Yu<sup>5</sup>

(1. China Energy Construction Highway Group Co., Ltd., Beijing 100038, China;

2. China Energy Construction (Guangdong) Zhongkai Expressway Co., Ltd., Jiangmen,

Guangdong 529142, China; 3. Department of Civil Engineering, Institute of Disaster

Prevention, Sanhe, Hebei 065201, China; 4. Beijing Disaster Prevention Science and Technology Co., Ltd.,

Mechanism and Disaster Prevention, CEA, Sanhe, Hebei 065201, China;

5. CHECC Highway Maintenance and Inspection Technology Co., Ltd., Beijing 100097, China)

**Abstract:** This integrated study aims to provide a novel performance evaluation algorithm for double-layer arch-truss girder composite bridges based on an improved PCA-K-means-feature analysis method, and to apply it to the performance evaluation of cable-stayed systems in the maintenance phase based on safety monitoring. This algorithm mainly includes monitoring data collection, pre-processing of heterogeneous data from multiple sources, determination of key factors, improvement of K-means cluster analysis, determination of target thresholds, and performance evaluation based on eigenvalue analysis. By collecting bridge performance monitoring data, cleaning these data, and then using the cubic spline in-

收稿日期: 2024-01-05

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划项目(XH24063A)

第一作者: 王亮(1985—), 男, 江西吉安人, 硕士, 高级工程师, 主要从事桥梁安全监测与性能评估方面的研究。

\* 通信作者: 桂成中(1984—), 男, 湖北黄梅人, 博士, 副教授, 主要从事桥梁健康监测和性能评估等方面研究。

terpolation method to preprocess multi-source heterogeneous data. Determine key factors based on principal component analysis and classify performance parameter data into three categories using an improved K-means cluster method. Then, based on the finite element calculation results, the target threshold for the mechanical performance state of the measurement point corresponding to the measurement point position is determined. The performance state of the bridge is evaluated by comparing the extracted feature values such as mean and variance with the target threshold. Validate the method through examples and provide suggestions for practical applications and future research directions. Research has shown that the improved K-means cluster method can improve the accuracy and reliability of clustering analysis. Based on the improved PCA-K means cluster feature analysis method, the performance status of bridge structures can be evaluated.

**Key words:** arch-girder combination bridge; target threshold; principal component analysis; K-means algorithm; performance assessment; data preprocessing

桥梁作为交通基础设施的关键组成部分,其安全性和可靠性对社会的稳定和发展具有重大影响。随着信息化和智能化时代的到来,桥梁性能状态评估的方法也在不断进步,特别是在处理桁架式拱梁组合体系这类复杂结构体系时,传统的评估方法已不足以应对当前的需求。因此,研究者们正在探索新的综合性评估方法,以处理庞大的监测数据并克服单一算法的局限性。桥梁状态评估方法<sup>[1]</sup>主要分为规范类方法、层次分析法、可靠度理论、模糊推理、多影响因素分析方法<sup>[2-4]</sup>以及随机类算法<sup>[5-6]</sup>。具体应用中, Li等<sup>[7]</sup>基于机器学习提出了斜拉索状态评估方法;王红伟等<sup>[8]</sup>结合层次分析法和模糊理论评估预应力混凝土连续刚构桥;安新正等<sup>[9]</sup>利用层次分析法建立钢筋混凝土高桥墩腐蚀损伤的模糊综合评价模型;屈兵等<sup>[10]</sup>基于模式形态距离进行时间序列相似性度量和层次聚类分析。这些研究展示了桥梁状态评估方法的多样性和进步,同时也指出了未来研究的方向,即结合多种方法以提高评估的准确性和可靠性,以及利用机器学习和数据分析技术实现更智能化和自动化的评估。

尽管这些方法在桥梁状态评估方面具有一定的优势和可行性,但在模型可靠性、应用场景适配性等方面仍有需要改进的地方。因此,本文通过建立桥梁评估模型,利用采集的大量桥梁监测数据,选择关键参数数据,在聚类算法的基础上,以量化的方式提取出桥梁的性能特征,从而对桥梁的性能状态进行定量评估,实现桥梁管理的科学化和精细化,进一步提高桥梁的安全性、可靠性以及经济性,并为大跨度桥梁智慧运维提供科学的决策支持。

## 1 研究思路

### 1.1 多源异构数据处理

数据分析之前,对原始数据进行缺失值处理、异常值检测与处理、重复值处理等预处理。对于缺失值常见的处理方法,主要基于多源异构数据处理的插值方法,包括样条插值法、Kriging插值法、反距离加权插值法、最近邻插值法、泰森多边形法<sup>[11]</sup>。其中,样条插值法利用局部插值函数逼近整个数据集,使用分段低次多项式逼近数据,最常用的是三次样条插值法。其原理是在相邻数据点之间构建三次多项式,保证在这两个数据点上的函数值和导数值连续。它需要满足相应的边界条件<sup>[12]</sup>,常用的是自然边界条件或固定边界条件。其优点包括插值结果光滑、局部逼近性以及振荡性较低。

### 1.2 基于主成分分析法的关键子参数确定

对于第 $p$ 个参数,含有 $n$ 个子参数、 $m$ 个数据长度组成的原始数据矩阵 $X_{m \times n}$ ,各子参数之间不存在相关性,采用主成分分析法(Principal Components Analysis, PCA)选取最关键子参数,将原始数据通过线性变换,转化为一组新的、互相不相关的变量,提取关键信息,降低原始数据的维度,其目标是在保持数据可解释性的前提下,最大限度地对数据的差异性进行解释。PCA法<sup>[13-14]</sup>计算的具体流程见表1。

### 1.3 改进的K均值聚类分析

聚类分析的目的是对关键参数产生标签。依据动态聚类法中的K均值法<sup>[15]</sup>以及最短距离法的基本原理<sup>[16]</sup>,将一组分析数据分成 $k$ 个不同的

表 1 主成分分析法的计算流程

Tab.1 Calculation process of PCA method

步骤	步骤名称	具体描述
1	对数据进行中心化	原始数据矩阵为 $X_{m \times n}$ , 对每个特征值进行中心化处理得到 $X'_{m \times n}$
2	计算数据的协方差矩阵	将中心化后的数据 $X'_{m \times n}$ 的协方差矩阵记作 $C_{m \times n}$
3	对协方差矩阵进行特征值分解	将协方差矩阵 $C_{m \times n}$ 分解为其特征值和特征向量的乘积, 即 $C = \Lambda V^T$ , 其中 $\Lambda$ 为特征值对角矩阵, $V$ 为包含特征向量组成的矩阵
4	选取主成分	将特征值从大到小排序, 选取前 $k$ 个主成分参数

类别。由于 K 均值法中凝聚点的选择直接决定初始分类, 对分类结果也有很大影响<sup>[16]</sup>, 使用层次聚类时, 选择不同的特征序列、不同的时间段, 可能得到不一样的结果<sup>[10]</sup>; 此外, 不同的初始分类可能导致不同的局部最优解, 从而影响整体的聚类效果。此外, 对于存在交叉或重叠的聚类簇, K 均值法很难有效地进行划分。为了解决初始分类选择、处理交叉或重叠聚类簇以及提高聚类效果和准确性等问题, 提升动态聚类法的性能和可靠性, 需要对 K 均值聚类方法进行改进。改进 K 均值聚

类方法的基本思路详见表 2。

1.4 构件极限承载力阈值的确定

确定桥梁极限状态下结构体系承载能力, 进而确定桥梁构件的极限承载能力作为性能监测评估的目标阈值。计算构件极限承载能力时, 依次进行有限元模型建立, 成桥阶段静力计算, 弹性屈曲特征值分析, 考虑几何、材料双重非线性稳定系数分析等<sup>[17]</sup>, 具体计算流程见表 3。

表 2 改进 K 均值聚类方法的计算流程

Tab.2 Calculation process of the improved K-means cluster algorithm

步骤	步骤名称	具体描述
1	原始参数数据	在 $T$ 时间段内第 $p$ 个参数含有 $n$ 个数据长度 $\sigma_{p1}(t), \sigma_{p2}(t), \dots, \sigma_{pn}(t)$
2	选择聚类数 $k$ 值	$k$ 个不同的聚类类别
3	初始化 $k$ 个聚类中心	每个类别的中心点有一个 $d$ 维向量 $\mu_k$
4	原始数据升序排列	$\sigma_{p1}(t), \sigma_{p2}(t), \dots, \sigma_{pn}(t)$ 从小到大排列为数据列 $x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pn}$ 指示函数 $R_p(i) = (R_{p1}(i), R_{p2}(i), \dots, R_{pk}(i))$ ,
5	计算样本点与各个聚类中心的距离	其中 $R(i) = \operatorname{argmin} \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j - \mu_{kj})^2} (1 \leq j \leq k)$
6	迭代优化聚类中心	(a) 分配数据点到最近的聚类中心 (b) 更新聚类中心为聚类中数据的平均值
7	输出聚类结果	得到聚类标签 $\text{idx}$ 和聚类中心 $\text{centroids}$

表 3 确定构件极限承载力阈值的计算流程

Tab.3 Calculation process of threshold determination of the ultimate bearing capacity of components

步骤	步骤名称	具体描述
1	确定结构模型	根据桥梁的实际情况, 构建相应的稳定性计算模型
2	定义加载条件	确定桥梁所承受的荷载条件, 包括自重、活载和温度等
3	成桥阶段静力计算	确定桥梁成桥状态在初始荷载作用下的静力状态
4	弹性屈曲特征值计算	确定弹性屈曲阶段所对应的弹性特征值
5	定义非线性模型	考虑材料的非线性模型和结构的几何非线性模型, 预估非线性破坏或者失效的状态
6	进行非线性稳定分析	使用适当的数值分析方法, 如有限元法, 考虑材料的非线性行为和结构的几何非线性, 进行非线性稳定分析。通过逐步增加荷载, 分析结构的响应并评估结构的稳定性
7	判断极限状态	根据得到的分析结果, 判断桥梁是否处于极限状态。可以通过分析结构的位移、应力、应变等参数来评估结构体系的极限状态
8	确定构件的目标极限阈值	根据结构体系的极限状态确定各构件性能参数所对应的极限阈值

## 1.5 总体框架图

基于改进 PCA-K 均值聚类-特征分析法的桥梁性能状态评估方法研究流程图,见图 1,主要包括传感器测点数据采集、多源异构数据预处理、关键因子分析、改进 K 均值聚类分析、目标阈值确定和基于特征值分析的性能评估等步骤。

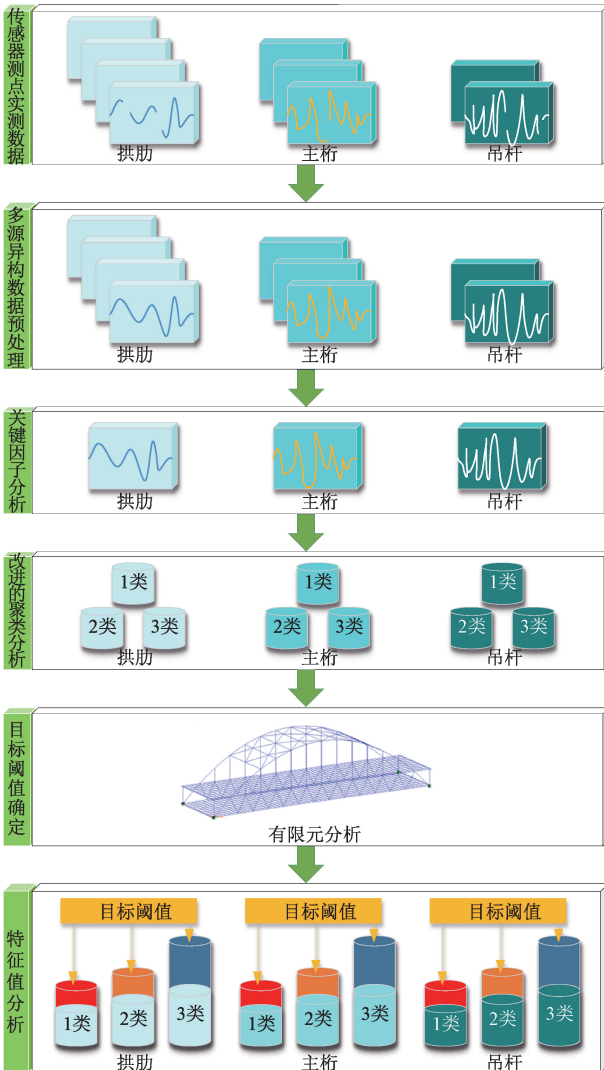


图 1 总体框架图

Fig. 1 Overall framework diagram

具体地,数据采集主要用于收集相关桥梁性能数据和检测信息;多源异构数据预处理主要用于对收集的数据进行清理和预处理,以去除噪声、异常值和缺失值;关键因子确定主要应用 PCA 法从预处理过的数据中提取最显著的特征作为关键因子;改进 K 均值聚类分析主要根据提取的特征,应用 K 均值聚类算法将桥梁性能数据分类到不同的聚类中,以提高其在桥梁性能评估中的准确性和有效性;目标阈值的确定主要基于有限元计算结果确定测点位置所对应的测点力学性能

状态作为目标阈值;基于特征值分析的性能评估主要通过将提取的特征与预定义的目标阈值进行比较,评估桥梁的性能状态;最后通过实例验证所提出的方法,并提出实际应用和未来研究方向的建议。

## 2 案例分析

### 2.1 测试桥梁概况

#### 2.1.1 测试桥梁传感器布置

本研究以一座位于广东省的双层桥面桁架式拱梁组合体系桥梁上部结构作为研究对象,见图 2(a),该桥计算跨度为 150 m。横桥向上两主桁、拱肋的间距为 37.3 m,上下主桁的中心线高差约为 10 m,标准节间距为 10.6 m。拱轴线采用二次抛物线,矢跨比为 1/4。桥面结构采用正交异性钢桥面板+超高性能混凝土+形状记忆合金的沥青混凝土铺装层的组合形式。拱肋共设有 22 根吊杆,吊杆规格型号均为 2×PES7-91。左幅和右幅拱肋与主桁之间的双索面各有 11 对。

该桥下层桥面已正常通车。该桥梁上部结构健康监测系统的主要监测内容为结构响应、环境因素和动力特性,其中结构响应包括主梁应变、主梁挠度和吊杆索力等<sup>[18]</sup>。本桥重点关注桥梁结构响应,故在现场安装的传感器主要包括应变传感器和磁通量传感器,具体安装位置和数量见表 4。传感器通过安装在桥梁跨中桥面外侧的数据采集系统和太阳能供电系统进行传输和供电。

#### 2.1.2 桥梁极限状态有限元计算

本实例桥梁采用 midas Civil 2021 软件建立有限元模型。材料设置方面,吊杆弹性模量  $E$  按照  $1.9 \times 10^5$  MPa 计算,名义屈服强度等级  $f_y$  为 1 670 MPa,极限抗拉强度等级  $f_u$  为 1 770 MPa。主桁截面采用屈服强度等级  $f_y$  为 345 MPa,极限抗拉强度等级  $f_u$  为 490 MPa<sup>[19-21]</sup> 的 Q345qD 材料。拱肋四分点至拱顶部分采用屈服强度等级  $f_y$  为 345 MPa,极限抗拉强度等级  $f_u$  为 490 MPa 的 Q345qD 材料;而拱肋四分点底部截面采用屈服强度等级  $f_y$  为 420 MPa,极限抗拉强度等级  $f_u$  为 540 MPa<sup>[19]</sup> 的 Q420qD 材料。这三种材料中,都采用了 Von Mises 双折模型来描述非线性特性。单元类型方面,拱肋部分和主桁杆件采用梁单元进行建模,而吊杆则采用只受拉桁架单元进行建模。吊杆采用正装-倒退优化分析方法施加荷载,其两端按照简支方式计算。支座设置方面,桥梁支座位于下桁与拱肋相交端

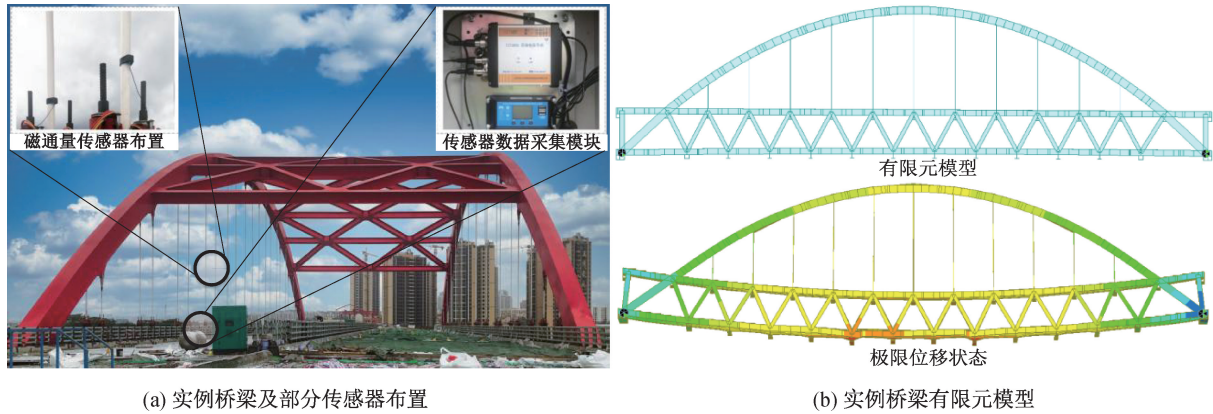


图 2 测试桥梁部分传感器布置及有限元模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sensor layout and finite element model for testing bridge instances

表 4 安装在测试桥梁上的传感器布置位置、数量及编号

Tab. 4 Sensor placement, quantity and code installed in the test bridge

类型	部件	位置	数量	编号
应变传感器	拱肋	拱脚、拱肋四分点处、跨中处	拱脚各布置 2 个应变传感器,拱肋四分点处、跨中拱顶各布置 2 个应变传感器	$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, \epsilon_5, \epsilon_6, \epsilon_7, \epsilon_8, \epsilon_9, \epsilon_{10}$
	主桁	上、下主桁四分点处、跨中处	跨中处上下主桁截面均在主桁截面底部布置 2 个应变传感器,四分点处各布置 1 个应变传感器	$\epsilon_{11}, \epsilon_{12}, \epsilon_{13}, \epsilon_{14}$
磁通量传感器	吊杆	跨中和四分点处	跨中和四分点处各安装 1 个磁通量传感器	C3-1、C6-1

部,均采用符合简支支座特点的单向或双向滑动支座。非线性计算方面,确定桥梁结构体系和构件的极限状态,考虑了材料非线性和几何非线性,对全桥进行极限承载能力分析,确定弹塑性阶段的极限承载状态。在材料非线性计算中,考虑了材料的屈服强度等级和极限抗压、抗拉强度等级对结果的影响,采用了弧长法等小步增量的方式来计算这种非线性行为。由于该桥在横桥向和竖桥向具有较大的整体刚度,桥梁结构的几何非线性主要是由于大变形引起的,在计算过程中,需考虑结构的初始几何形状以及材料刚度随变形的变化。

2.1.3 计算结果与验证

通过图 2(b)建立的有限元模型计算发现,双层桥面桁架式拱梁组合体系的上层主桁横肋截面首先达到材料屈服状态,并且最早达到材料的极限抗拉、抗压状态,这两种状态均使双层梁桁拱组合体系上部结构构件的应力和位移水平局部达到了非线性阶段,此时可认定桥梁结构达到了材料非线性阶段。

以有限元计算结果来判断双层桥面桁架式拱梁组合体系在极限承载阶段下拱肋、弦杆、腹杆以及吊杆截面的位移和应力情况。尽管上层主桁横肋截面最先达到了材料的屈服和极限强度等级,

但在桥梁构件中,拱肋截面在桥梁结构达到极限承载能力状态时承受的最大压应力值为-425 MPa,腹杆截面的拉、压强度值分别为 340 MPa 和 -397 MPa,均超过了各自截面材料的屈服强度。此外,拱肋、上弦杆和下弦杆的最大位移值分别为 -222.29、-366.78 和 -365.52 mm。相应地,极限状态下拱肋、上弦杆和下弦杆的最大挠跨比为 1/410,接近规范<sup>[22]</sup>中关于钢桁架桥正常使用极限状态承载能力评定的挠度限值 1/500。因此,可以认为本实例桥梁的极限状态的确定是合理的。

2.2 基于测试桥梁极限状态构件承载能力的目标阈值确定

通过有限元计算得到了双层梁桁拱组合体系拱肋、主桁、吊杆在成桥状态、材料屈服状态、极限状态时的各杆件的应力情况,最大应力值分别为 425、366.78、1 087 MPa,组成了各自构件的目标极限应力阈值。当实测监测数据超过相应的目标阈值时,即可认定桥梁上部结构已达到极限承载能力。

2.3 桥梁性能参数监测与评估

2.3.1 传感器实测数据

选取 2023 年 7 月 23 日 00:00:00 至 23:59:59

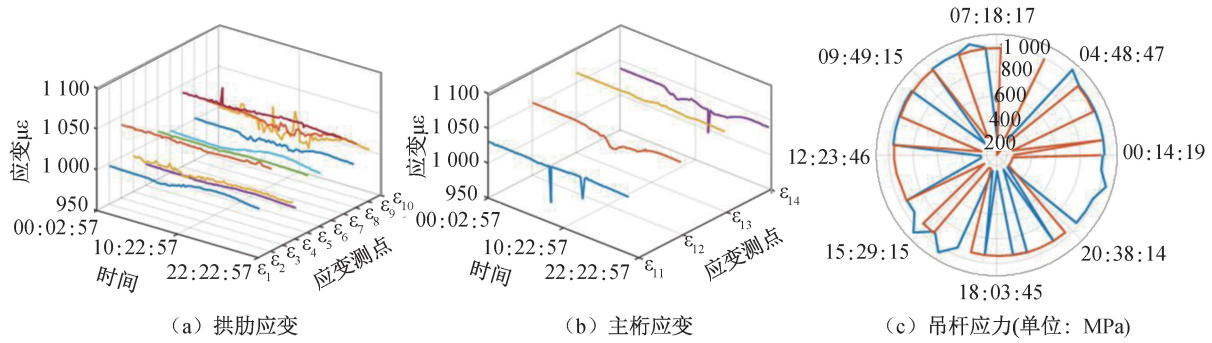


图3 测试时间段内构件上传感器测点实测数据

Fig. 3 Actual measurement data of sensor measuring points on components during the testing period

区间内数据为本文研究内容。拱肋及主桁采集的应变数据,均由振弦应变计采集得到,如图3(a)(b)所示。其中安装在不同位置处的拱肋、主桁、吊杆的传感器测点分别有10个、4个和2个。

根据现场的吊杆索力测试,采集位于拱肋跨中及四分点的两根吊杆(编号分别为C6-1和C3-1)的实测振动时域数据。使用傅里叶变换方法进行频谱分析,选择最大峰值振动频率作为各时间点上吊杆的振动频率。在经过频谱分析后,按照吊杆索力计算公式求解得到了吊杆的索力及其相应的应力。图3(c)展示了测试时间段内C3-1和C6-1吊杆实测振动频率转换为应力的变化情况。

### 2.3.2 多源异构数据预处理

选取实例桥梁中所有传感器监测数据,根据多源异构插值方法,分别进行各参数数据预处理,使得各参数数据长度和质量保持一致。图4显示了自编程序计算得到的拱肋截面的4个应变传感器的多源异构数据预处理结果示意图,其他参数的多源异构数据预处理结果见图3。

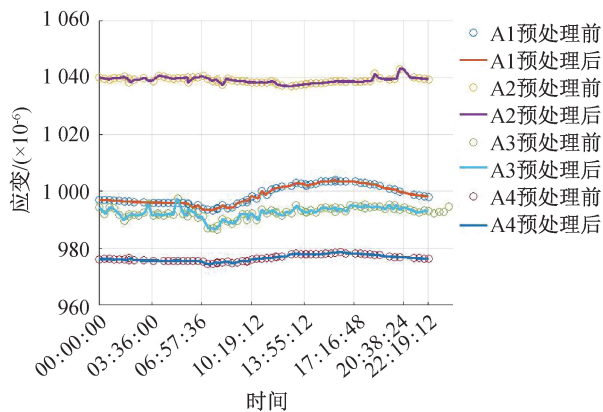


图4 拱肋截面监测数据的多源异构数据预处理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of preprocessing of heterogeneous multisource monitoring data for arch rib sections

### 2.3.3 关键因子分析结果

经PCA法计算后,得到拱肋、主桁和吊杆构件上所有传感器测点中的关键测点,见图5。其中,拱肋左拱脚上游侧截面应变测点 $\varepsilon_1$ (红线)、左拱肋3/4上游侧截面测点 $\varepsilon_7$ (蓝线)、主梁跨中上游侧截面测点 $\varepsilon_{14}$ ,以及吊杆C6-1位置处均为关键测点,符合桁拱组合体系结构一般受力特性规律。

### 2.3.4 改进的K均值聚类分析结果

图6显示了以上主桁、拱肋和吊杆构件上传感器测点中的关键测点实测数据,该图对比了改进前、后的K均值聚类结果及3倍无量纲原始数据的结果。通过对图6左侧的聚类图形以及中间柱状图比较发现,对主桁、拱肋和吊杆关键测点实测数据采用改进后的K均值聚类结果与3倍无量纲原始数据较为接近,主要由于K均值聚类在开始时初始化聚类中心的随机性,进而导致产生不同的聚类结果,这使得原始K均值算法的结果可靠性降低。

通过实测数据进行分布类型检验,发现桥梁结构吊杆实测应力数据离散性较大,不满足正态分布的特点,难以评估吊杆性能,故采用K均值聚类方法对非参数型的原数据进行聚类分析。本研究中的聚类簇数均设为3个。最大迭代次数为100,当簇中心移动距离小于 $10^{-4}$ 时停止迭代,最后返回每个数据点的聚类标签和聚类中心的坐标。经聚类分析之后,吊杆C3-1应力的聚类中心为247.57、957.73、1 011.68 MPa。相应地,吊杆C6-1应力的聚类中心为949.20、222.67、986.04 MPa。最大聚类中心均位于第3类,即此类所对应的吊杆应力对吊杆结构体系最不利,故需单独分析最大聚类位于第3类的吊杆应力,来评估该吊杆结构体系性能变化情况。当然,分析3类吊杆应力聚类分析结果,一方面可以反映3个聚类中心之间的相对距离大小,另一方面反映测试时间段内吊杆性能的

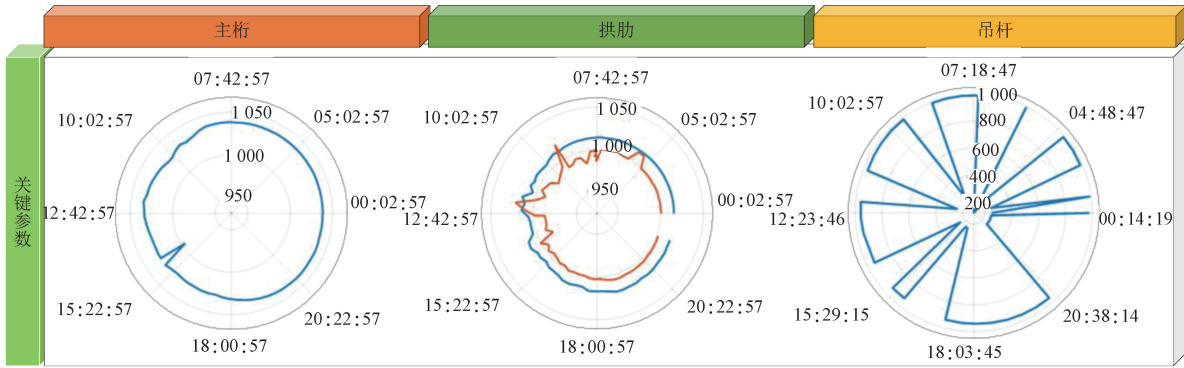


图 5 经主成分分析后构件关键测点选取

Fig. 5 Key test points selection of components after principal component analysis

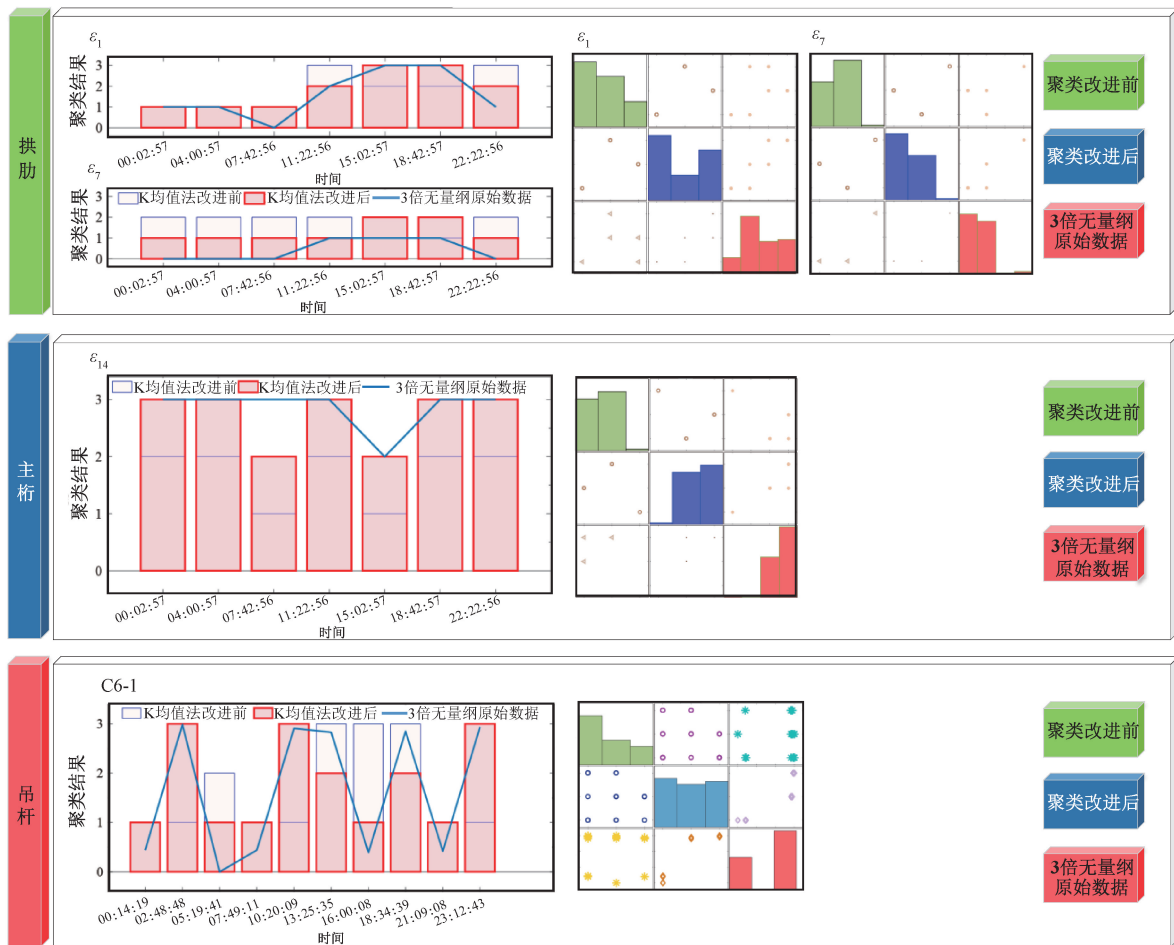


图 6 基于改进前、后 K 均值法的测试时间段内桥梁结构传感器关键测点聚类分析结果比较

Fig. 6 Comparison of cluster analysis results of key sensor measurement points of bridge structure during the experimental period based on improved before-and-after K-means method

平均变化情况,因此将两种情形结合起来评价吊杆性能非常有必要。

### 2.3.5 基于特征值分析的结构构件性能评估

基于改进的聚类分析法得到的三类聚类结果,分析所对应的特征值(如平均值和方差等)来评估桥梁结构性能状态,具体的计算结果见图 7。通过现场实测数据发现,第 1 类聚类结果对应的主

桁、拱肋、吊杆截面的应力状态差别不大,基本位于 210 MPa 左右;第 2 类、第 3 类聚类结果对应的主桁、拱肋截面的应力状态差别不大,基本位于 210 MPa 左右,远小于拱肋和主桁的目标极限阈值 425 MPa 和 366.78 MPa;但与拱肋和主桁的应力状态相比,在测试时间段内,C6-1 的实测应力最大值和最小值分别为 992.26 MPa 和 123.07 MPa,

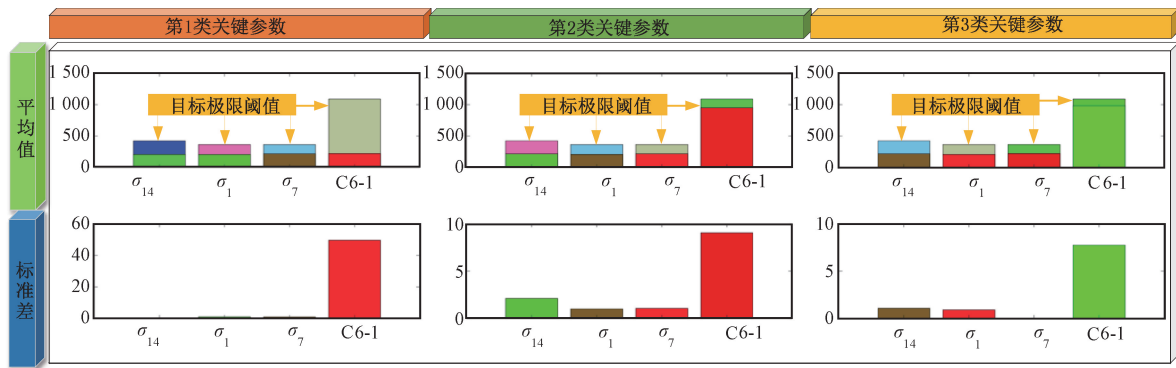


图7 基于改进的K均值聚类方法的测试时间段内结构构件性能特征值分析结果

Fig. 7 Performance characteristics analysis results of structural component based on improved K-means cluster algorithm during the experimental period

两者之间差别较大。对应的吊杆截面的第2类和第3类聚类结果为947.944、984.763 MPa,与拱肋和主桁相应的平均值差别非常大,且接近于桥梁结构达到极限状态时所对应的吊杆构件的目标极限阈值1087 MPa,这主要由于施工阶段跨中吊杆拉升较大而引起的。

通过方差分析,主桁、拱肋的三类聚类结果最大方差为2.13 MPa,而相对于第2类、第3类的9.063 MPa和7.755 MPa,在第1类聚类结果时吊杆方差达到最大49.631 MPa。由于跨中吊杆C6-1所对应的均值和方差均较大,故建议在养护阶段通过调索的方式来优化吊杆应力状态。

### 3 结论

1) 本文构建了基于改进PCA-K均值聚类-特征值分析法的桥梁性能状态评估算法模型,该模型需要进行监测数据采集、多源异构数据预处理、关键因子确定、改进K均值聚类分析、目标阈值确定和基于特征值分析的性能评估等步骤的计算。

2) 通过与K均值聚类法改进前、后以及3倍无量纲原始数据聚类结果比较分析,发现改进后的聚类结果更接近原始数据。

3) 通过将提取的均值与方差等特征值与基于理论计算结果确定的目标阈值进行比较发现,本例中主桁和拱肋的应力均值远低于目标极限阈值,且方差较小,变异系数小于1%,表明其性能状态总体良好。然而,吊杆的应力均值较高且方差较大,变异系数达到3.35%,表明其应力分布不均匀,需要进一步优化。

### 参考文献:

- [1] 焦峪波. 不确定条件下桥梁结构损伤识别及状态评估的模糊计算方法研究[D]. 长春:吉林大学,2012.
- [2] 上官廷华,冯荣耀,柳宏川. 一种基于熵和均方差法综合赋权的K-means算法[J]. 计算机与现代化,2010(4):38-40.
- [3] 顾晓光,马义中,张延静,等. 基于置信水平和熵权法的参数和容差经济性设计[J]. 哈尔滨工业大学学报,2017,49(11):73-80.
- [4] 欧阳林寒,马义中,汪建均,等. 基于熵权理论和双响应曲面的稳健设计[J]. 管理工程学报,2014,28(2):191-197.
- [5] TANG Songsheng, PENG Minjun, XIA Genglei, et al. Optimization design for supercritical carbon dioxide compressor based on simulated annealing algorithm[J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, 140: 107107.
- [6] HARIRI-ARDEBILI M A. Risk, Reliability, Resilience (R3) and beyond in dam engineering: A state-of-the-art review[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018, 31: 806-831.
- [7] LI S, WEI S, BAO Y, et al. Condition assessment of cables by pattern recognition of vehicle-induced cable tension ratio[J]. Engineering Structures, 2018, 155: 1-15.
- [8] 王红伟,谢开仲. 预应力混凝土连续刚构桥模糊综合评价法研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2020,37(3):52-56.
- [9] 安新正,杨硕,张晓婧,等. 基于模糊理论的高桥墩腐蚀损伤综合评价[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2015,32(2):10-13.
- [10] 屈兵,肖汝诚,郝佳佳. 基于模式形态距离的桥梁监测测点相似性聚类研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2015,32(3):70-74.
- [11] 李海涛,邵泽东. 空间插值分析算法综述[J]. 计算

- 机系统应用, 2019, 28(7): 1-8.
- [12] 郭昌言, 高尚. 三次样条插值的推广[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(7): 1507-1510.
- [13] GUI C, ZHANG J, LEI J, et al. A comprehensive evaluation algorithm for project-level bridge maintenance decision-making [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 289: 125713.
- [14] GUI C, LIN W, HUANG Z, et al. A decision-making algorithm for concrete-filled steel tubular arch bridge maintenance based on structural health monitoring[J]. *Materials*, 2022, 15(19): 6920.
- [15] 贾凡, 严妍, 张家琪. 基于 K-means 聚类特征消减的网络异常检测[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(2): 137-142.
- [16] 陈希镇. 现代统计分析方法的理论和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [17] 计静, 罗干, 姜信贺, 等. 斜靠式钢箱系杆拱桥成桥索力检测及稳定性分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2023, 40(1): 41-48.
- [18] 蒋国富, 郭龙, 王龙林, 等. 在役部分斜拉桥健康监测系统设计及实现[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2021, 38(1): 61-68.
- [19] 中国钢铁工业协会. 桥梁用结构钢: GB/T 714—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 6-7.
- [20] QIANG B, LI Y, YAO C, et al. Through-thickness distribution of residual stresses in Q345qD butt-welded steel plates[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 251: 54-64.
- [21] YUANZHOU Z, JI B, FU Z, et al. Local stress variation in welded joints by ICR treatment[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 120: 45-51.
- [22] 中国建筑科学研究院, 广东省建筑科学研究院. 城市桥梁检测与评定技术规范: CJJ/T 233—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 37-38.

(责任编辑 王利君)

(上接第 8 页)

2) 对于 L 型不规则结构隔震层宜保持整体连接、上部结构设抗震缝, 既能通过隔震层支座布置来调整质心与刚心重合, 又能通过上部结构设缝使之分为独立的部分, 隔震层屈服力总和比整体隔震方案降低了 25%, 实现隔震目标。

3) 对于不规则结构, 本文探讨了其基于整体设计法的隔震设计流程, 在设防烈度下应补充弹性时程分析对比反应谱法结果, 在罕遇地震下应补充弹塑性时程分析, 精确计算隔震层非线性效应。

#### 参考文献:

- [1] 范夕森, 赵玉鹏, 李玉琳, 等. 不规则结构的扭转效应控制研究[J]. 山东建筑大学学报, 2017, 32(6): 517-523.
- [2] TENA-COLUNGA A, GÓMEZ-SOBERÓN L. Torsional response of base-isolated structures due to asymmetries in the superstructure[J]. *Engineering Structures*, 2002, 24(12): 1587-1599.
- [3] RUIJUN Z, TONG G, WENHUA Q, et al. Research on seismic performance of a novel fully precast RC frame isolation structure[J]. *Structures*, 2024: 59105750.
- [4] WANG H C, LI J H, WU F J. Base-isolated multi-storey reinforced concrete frame structure modal analysis [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 204: 869-871.
- [5] 干洪, 罗辉. 考虑扭转效应的平面不规则大底盘单塔楼减震性能分析[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 2014, 22(2): 19-23.
- [6] 刘鑫刚, 张玲, 马伯涛, 等. 成都博物馆基础隔震不规则结构扭转效应控制研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(11): 24-29.
- [7] 石艳旺. 不规则结构的扭转效应控制研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2016.
- [8] 张曼生, 张国军, 马伯涛, 等. 基础隔震结构隔震层水平性能设计研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(11): 123-127.
- [9] 凯里. 平面不规则结构扭转效应分析的思考和讨论[J]. 建筑结构, 2013, 43(7): 47-51.
- [10] 孙任武, 杨晓东, 刘怀超. 基于隔震设计的不规则结构扭转效应控制研究[J]. 四川建筑科学研究, 2022, 48(4): 10-16.
- [11] 黄小宁, 王威, 王宁, 等. 平面不规则基础隔震结构抗扭设计研究[J]. 地震工程学报, 2020, 42(5): 1283-1288.
- [12] 王威, 黄小宁, 王宁, 等. 基于隔震技术的偏心结构扭转控制研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(1): 83-89.
- [13] 刘德稳, 王琼芬, 吴跃红, 等. 不规则结构隔震设计与研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(6): 1041-1046.
- [14] 马永宏. 不规则隔震结构研究进展及展望[J]. 四川水泥, 2020(1): 284-285.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑隔震设计标准: GB/T 51408—2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.

(责任编辑 王利君)