

摘要

既有公路桥梁由于长期的超载车辆作用,以及养护和管理的缺乏等原因,会形成各种类型的损伤,使得承载能力下降超过预期,使用安全性也大大降低,成为危害交通安全的重要隐患。因此,可以借助桥梁健康监测系统,对桥梁服役过程中的承载能力和安全性进行实时监控,对承载能力低于规范要求或突破预设预警阈值的桥梁及时预警,让桥梁养护管理部门及时介入,提高桥梁服役安全性。但现有桥梁健康监测系统往往直接应用规范要求的监测项目和预警阈值,对特定桥梁缺乏针对性,同时其阈值的设计也不能精确贴合实际工程的静动力特性,实际监测过程中或是因预警阈值低而时常报警,造成人力物力浪费,或是因预警阈值高而对桥梁的承载能力降低、结构损伤缺乏敏感性,造成桥梁老化加剧。

本文基于吉林省交通规划设计院“吉林省大跨径桥梁智能监测及预警技术研究”项目,针对吉林省乌金屯松花江大桥监测系统这一实际工程背景,开展了胶结节段拼装预应力混凝土简支箱梁桥的数值模拟分析和预警机制设计。

采用响应面法并依据静动载试验取得的主梁应力、应变、挠度、裂缝、自振频率数据对建立的有限元模型进行了修正,验证了胶结节段拼装预应力混凝土简支箱梁桥在荷载作用下开裂主要发生和发展在阶段粘接面内。根据节段拼接桥梁构造形式制定了裂缝损伤工况,选定并验证了分离裂缝模型作为本文裂缝损伤模拟的方案。

分析桥梁极限承载能力和模态频率对不同裂缝特征的敏感性,运用拉丁超立方抽样法确定不同裂缝损伤特征样本。采用响应面分析方法分别建立了极限承载能力与裂缝损伤特征关系模型、一阶频率与裂缝损伤特征关系模型及一阶频率与极限承载能力关系模型。

采用支持向量回归算法实现监测数据中的温度效应剔除,此方法同时可用于湿度等其他因素影响的剔除,采用 EMD 小波阈值降噪算法对采集数据进行降噪处理。结合桥梁监测传感器种类及布设位置为乌金屯桥设置了四级预警机制,根据荷载效应组合、最不利荷载工况、桥梁结构弹塑性转化点、预应力钢筋屈服点为桥梁设置了精确到测点的应变预警阈值。根据现有桥梁模态频率研究成果、规

范要求和基于一阶频率与极限承载能力关系模型计算的桥梁极限承载能力下降率为本桥设置了一阶频率预警阈值。

关键词：节段拼装预应力混凝土梁；桥梁健康监测；预警阈值；响应面模型修正

Abstract

The existing highway bridges, due to prolonged exposure to overloaded vehicles, as well as a lack of maintenance and management, can develop various types of damage, leading to a reduction in their carrying capacity beyond expectations and a significant decrease in safety during use, becoming a significant threat to traffic safety. Therefore, it is possible to utilize a bridge health monitoring system to continuously monitor the carrying capacity and safety of bridges during their service life, provide timely warnings for bridges that fall below code requirements or exceed preset alert thresholds, and enable timely intervention by bridge maintenance and management authorities to enhance bridge service safety. However, existing bridge health monitoring systems often directly apply monitoring parameters and alert thresholds specified by codes, lacking specificity for structurally unique bridges. Additionally, their threshold designs may not precisely match the dynamic characteristics of real-world engineering. As a result, during actual monitoring, they may either trigger frequent alarms due to low alert thresholds, resulting in the waste of human and material resources, or have reduced sensitivity to changes in bridge carrying capacity and structural damage due to high alert thresholds, exacerbating bridge aging.

This paper, based on the "Intelligent Monitoring and Early Warning Technology Research for Large-Span Bridges in Jilin Province" project conducted by the Jilin Provincial Transportation Planning and Design Institute, focuses on the practical engineering context of the monitoring system for the Songhua River Bridge in Wujintun, Jilin City. It conducts numerical simulation analysis and early warning mechanism design for the prestressed concrete simply supported box girder bridge with bonded joint segments.

Using the response surface method and modifying the finite element model based on the stress, strain, deflection, crack, and natural frequency data obtained from static and dynamic load tests, the occurrence and development of bond interface cracks in prestressed concrete simply supported box girder bridges with bonded joint segments under loading conditions were verified. Crack damage scenarios were established based

on the bridge's structural form, and a separation crack model was selected and validated as the damage simulation approach in this paper.

The sensitivity of the bridge's ultimate carrying capacity and modal frequencies to different crack characteristics was analyzed. Latin hypercube sampling was used to determine samples with different crack damage characteristics. Response surface analysis methods were employed to establish relationship models between ultimate carrying capacity and crack damage characteristics, first-order frequency and crack damage characteristics, and first-order frequency and ultimate carrying capacity.

The support vector regression algorithm was used to eliminate temperature effects from monitoring data, which can also be applied to eliminate the effects of other factors such as humidity. The acquired data was denoised using the EMD wavelet thresholding algorithm. Considering the types and locations of bridge monitoring sensors, a four-level early warning mechanism was established for the Wujintun Bridge. Strain alert thresholds were set at specific measurement points based on load combinations, the most critical load conditions, bridge structural yield points, and prestressed steel yielding points. Based on existing research on bridge modal frequencies, code requirements, and the bridge's first-order frequency and ultimate carrying capacity relationship model, a first-order frequency alert threshold was established for this bridge to detect decreases in its ultimate carrying capacity.

Keywords: segmentally precast prestressed concrete beam; BHM; warning threshold; response surface model adjustment

目 录	
摘 要.....	I
Abstract.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	4
1.2.1 国内外开裂桥梁承载能力与动力特性研究现状	4
1.2.2 桥梁健康监测研究现状	10
1.3 本文的主要研究工作	12
1.3.1 研究内容	12
1.3.2 创新点	13
第 2 章 胶结节段拼装预应力混凝土简支箱梁模型建立	15
2.1 引言.....	15
2.2 工程概况.....	15
2.3 有限元模型的建立	16
2.3.1 建模思路及过程	16
2.3.2 使用单元介绍	17
2.3.3 材料本构和破坏准则	18
2.3.4 网格划分	20
2.4 有限元模型修正	22
2.4.1 响应面基本原理	23

2.4.2 核函数的选取	24
2.4.3 参数的选取和显著性分析	26
2.4.4 响应面模型的建立	29
2.4.5 精度检验	31
2.5 有限元模型损伤工况模拟	34
2.5.1 桥梁裂缝分类	34
2.5.2 预应力混凝土简支箱常见裂缝及其发展规律	35
2.5.3 节段拼装预应力混凝土箱梁主要裂缝类型及破坏模式	37
2.5.4 有限元模型裂缝损伤模拟及工况设置	40
2.6 本章小结.....	43
第 3 章 桥梁静动力特性关联性分析	45
3.1 引言.....	45
3.2 桥梁设计承载能力及无损伤模型极限承载能力分析	45
3.2.1 桥梁设计承载能力计算	45
3.2.2 有限元模型极限承载能力试验	47
3.3 裂缝各项参数对桥梁自振频率与结构校验系数的单因素敏感 性分析.....	49
3.3.1 裂缝高度对桥梁自振频率和极限承载能力的影响	49
3.3.2 裂缝位置对桥梁自振频率和极限承载能力的影响	53
3.4 基于响应面法的桥梁动力特性与承载能力关系模型	56
3.4.1 拉丁超立方抽样基本原理	56

3.4.2 参数设计	57
3.4.3 自振频率改变率、承载能力下降率与裂缝参数关系模型的建立.....	58
3.4.4 极限承载能力改变率与自振频率变化率关系模型	61
3.5 本章小结.....	61
第 4 章 桥梁结构安全监测体系设计	63
4.1 引言	63
4.2 桥梁预警系统设计	63
4.2.1 监测内容及传感器	63
4.2.2 分级预警机制	64
4.3 监测信号的预处理	65
4.3.1 温度影响剔除	66
4.3.2 监测数据降噪	69
4.4 桥梁监测预警阈值设置	77
4.4.1 频率预警阈值的设置	78
4.4.2 应变预警阈值的设置	78
4.5 本章小结.....	79
第 5 章 结论及展望	81
5.1 主要结论.....	81
5.2 展望.....	82
参考文献.....	83

作者简介及科研成果	89
致谢.....	91

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

自从改革开放以来,我国经济高速发展,以道路桥梁建设为代表的基础设施建设发展速度突飞猛进,随着近些年计算机技术的推广普及,道路桥梁服役期信息化智能化建设也得到快速推进。由于工程技术的不断创新以及新材料的持续发展,我国在桥梁建设方面不断突破,截至 2021 年底,有 96.11 万座公路桥梁已经顺利建成,其中涵盖特大桥 7400 余座,大桥 13.45 万座,中小跨径桥梁 81.92 万座。经过大规模的道路桥梁建设后,我国人民的交通出行条件迅速地得到了改善,但随着运营时间的增长,之前建成的桥梁也暴露出了一系列问题和隐患。

随着桥梁服役年限的增长,结构老化,承载能力下降不可避免。2000 年至 2019 年,全国约有 83 座桥梁因各种意外遭到破坏。主要原因有施工、自然灾害、超载、撞击等。我国自 1990 年左右完成的第一批大基建项目,到现在为止,已经使用了 30 多年。参考发达国家的经验可知,在桥梁服役 20-30 年后,便会由于日晒、雨水侵蚀、超过设计荷载的长期超载影响导致桥梁快速老化、承载能力下降、耐久性和安全性不足。而现阶段检测手段单一、管养不当导致的桥梁承载能力评估、保养、维护缺失会使得桥梁病害进一步恶化。且此类桥梁受限于设计建造阶段设计、施工、材料等方面的落后,以及长期超负荷运营导致桥梁现阶段实际承载能力可能已低于设计承载力,如果不经合理的承载能力和安全性评估并建立常态化的监测预警系统,便难以承担其在交通线路中的重要作用。

桥梁作为公共交通系统中最关键的节点,其服役性能直接影响着与之相连的交通网络,相应的,它出现问题后,也会对交通网络产生巨大的负面影响,如若损坏,将造成难以估计的影响。2001 年宜宾市小南门桥钢缆吊杆断裂,进而导致桥面板整体脱落;2004 年盘锦市田庄台大桥垮塌,跨中一段长 27m 的梁体及在桥上行驶的两三汽车全部落入水中,经调查,事故由桥梁在长期超限度荷载作用下结构受损导致;2010 年栾川县伊河汤营大桥整体垮塌,导致数十人丧生;2013 年 2 月 10 日宁夏吴忠市水套西桥发生桥梁坍塌事故,调查表明是车辆超载造成;2023 年 2 月 19 日广西贺州市步头大桥第一跨桥面坍塌,造成交通干线中断。

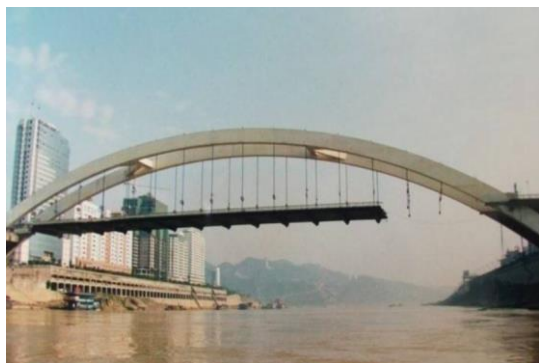


图 1.1 宜宾市小南门桥面板脱落事故



图 1.2 盘锦田庄台大桥垮塌事故



图 1.3 伊河汤营大桥垮塌事故



图 1.4 贺州步头大桥桥面板坍塌事故

数据显示，截至目前我国已经建成的超过 100 万座桥梁中，超过 10 万座桥梁处于危险状态，这引起了政府和相关从业人员对于这类桥梁的承载能力和安全性评估的关注。为了解决这个问题，目前存在几种评估手段，包括外观检查、动载实验测试和静载实验测试。但这几种方法都无法实时反应桥梁在服役期内承载能力的动态变化，导致其难以进行大规模常态化应用。

面对如此庞大的桥梁技术状况评估需求，如何以低成本实现桥梁结构的承载能力和智能分析评估决策已经成为亟待解决的重要问题。因此，实时准确地掌握桥梁的承载能力和安全性状况已成为当前学者们研究的热点领域。

上世纪 80 年代，西方国家研究人员首先明确提出桥梁结构健康监测这一理念。在此之后国内外建设的各种规模的桥梁工程开始运用桥梁健康监测系统，且系统的可靠性和经济性也随着科技的进步逐渐发展。桥梁健康监测是一种对桥梁进行实时、连续监测和评估的技术。它通过在桥梁上安装各种传感器，收集桥梁在使用过程中产生的振动、变形、温度等各种数据，并通过计算机等信息技术手段进行数据分析和处理，以实现桥梁健康状态的监测和评估。通过桥梁健康监

测,可以及时发现桥梁的变形、裂缝、疲劳、腐蚀等问题,及时采取维修或加固措施,保证桥梁的安全和可靠性,延长其使用寿命。桥梁健康监测技术包括传感器技术、数据采集与处理技术、信息传输技术和数据分析与处理技术等。其中,传感器技术是桥梁健康监测的核心技术之一,不同类型的传感器可以用于监测桥梁的不同参数,如应变、振动、温度等。数据采集与处理技术可以实现对传感器采集到的数据进行实时处理和分析。信息传输技术则可以将监测数据及时地传输到监测系统中进行分析和处理。数据分析与处理技术则可以对数据进行分析 and 诊断,提供桥梁健康状况的评估和预测。通过桥梁健康监测技术的综合应用,可以对桥梁的健康状况进行全面的监测和评估,为桥梁的安全管理和维修提供有力支持。

近年来随着电子产品及计算机技术的普及,桥用传感器、计算机、通讯技术与人工智能技术被广泛地应用到了服役桥梁的健康监测中。韩国 new Jindo Bridge 斜拉桥^[1]、南京三桥斜拉桥^[2]、广东省海印大桥斜拉桥^[3]、美国 Fitzpatrick 桁架桥^[4]、德国高速铁路 VDE8 路段桥梁^[5]、四川雅西高速姚河坝大桥^[6]以及香港青马大桥、香港汀九大桥、江阴长江大桥等知名大型特大型桥梁都在建设过程中或建设完成后相继构建起了较为全面的桥梁健康监测系统。但服役桥梁中保有量大,投入运营年限接近或超过 20 年的桥梁受限于资金投入量低、受重视程度弱,难以建立全面的桥梁健康监测及分析系统,因此如何构建成熟、低造价且可靠的桥梁健康监测评估体系将是今后相当长时期内我国加大发展的研究方向^[7]。

现有的桥梁监测系统的监测内容主要有桥梁不同位置的温度、位移、应力、振动等。面对海量的桥梁监测数据,现在常见的桥梁监测系统预警阈值设置有运用统计学方法、机器学习方法、人工智能等方法通过长期监测数据的上下限给定;或是通过有限元模型在最不利荷载工况下的响应值作为预警阈值;还有直接把相关规范要求作为预警阈值。上述方法往往难以量化描述预警指标与桥梁承载能力下降之间的关联性。

本文依托“吉林省大跨径桥梁智能监测及预警技术研究”项目,针对桥梁损伤状态下的承载能力及桥梁健康监测预警阈值展开研究。依托于实体工程,以所建立的承载能力评价方法为理论基础,对其桥梁模态频率预警阈值进行了研究。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国内外开裂桥梁承载能力与动力特性研究现状

桥梁裂缝是桥梁上部结构技术状况评定中最重要的影响因素^[8]，且对桥梁承载能力和动力特性都有着显著的影响。混凝土桥梁出现裂缝之后会导致其连续性和完整性受到破坏，在受力的情况下，桥梁静力响应会提早进入非线性增长状态，极限承载能力显著减弱。目前，对于服役桥梁的承载能力评价方法包括以下几种：基于外观调查的方法、基于专家经验的方法、基于设计规范的方法、基于荷载试验的剩余承载力判断方法、基于可靠度理论的方法、常规综合评估法和层次分析法，这些方法在评估桥梁承载能力方面各具特点。基于外观调查的方法主要通过观察桥梁的外观状况来初步评估其承载能力。基于专家经验的方法则依赖于专家的知识和经验来进行评估。基于设计规范的方法则参考相应的设计规范和标准来评估桥梁的承载能力。此外，还有基于荷载试验的剩余承载力判断方法，它通过施加不同的荷载并监测桥梁的反应来评估其剩余承载能力。其中外观调查和专家经验两种方法受检测人员主观影响较大，难以量化桥梁承载能力下降程度。荷载试验和设计规范虽然能准确评定桥梁的承载能力，但需要耗费大量的人力物力，对于存量巨大的中小跨径桥梁难以普遍推广。其余的方法均是基于上述四种方法的结果对桥梁进行评定，因此并不适用于对大量的服役桥梁进行评价。随着有限元软件日益发展成熟，国内外专家开始结合外观调查和荷载试验与有限元模拟结合的方式，对损伤后桥梁的承载能力进行模拟计算^[9, 10]。

预应力混凝土箱梁桥常见裂缝及其特征方面：

王国亮^[11]通过对 180 座预应力混凝土箱梁桥的检测结果，总结出 7 种箱梁常见裂缝类型及产生原因，发现跨中底板的裂缝会在通车后发生，并随着使用年限的增长从腹板逐渐向上延伸。

郑博^[12]总结出了 8 种预应力箱梁桥腹板裂缝形态，结合裂缝产生原因，对预应力箱梁的施工分别给予了建议。

Aimin Yuan^[13]通过建立缩尺模型，研究了不同预应力筋配置情况下，节段预制拼装预应力简支箱梁桥的开裂情况，研究结果表明桥梁的开裂均从底板接缝处

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/006223105132010054>