

特大桥梁结构风险识别与预测技术进展

何文胜 陈志华
(广东交通职业技术学院, 广东广州 510000)

摘要: 本文概述了近三十年来中国特大跨径桥梁建设的基本情况, 介绍了中国特大跨径桥梁上部结构、下部结构、钢桥面铺装的典型结构型式和设计、施工关键技术。文章还总结了中国特大跨径桥梁在安全、耐久、减灾防灾方面的技术现状, 回顾了中国特大跨径桥梁在标准体系、高性能材料、信息化技术、工程装备以及监测评估等方面取得的进步, 并对未来特大跨径桥梁技术发展方向进行了展望。此外, 文章还探讨了大型桥梁结构健康监测及安全评估的重要性, 以及智能检测技术在桥梁检测中的应用进展。

关键词: 特大跨径桥梁; 健康监测; 损伤识别; 安全评价

Technological progress in risk identification and prediction of extra-large bridge structures

He Wensheng Chen Zhihua
(Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou, Guangdong 510000)

Abstract: This paper summarizes the basic situation of the construction of super-large span bridges in China in the past 30 years, and introduces the typical structural types and key technologies of design and construction of superstructure, substructure and steel bridge deck pavement of super-large span bridges in China. The paper also summarizes the technical status of China's super-large-span bridges in terms of safety, durability, disaster reduction and prevention, reviews the progress made by China's super-large-span bridges in terms of standard system, high-performance materials, information technology, engineering equipment, monitoring and evaluation, and looks forward to the future development direction of extra-large-span bridges. In addition, the paper also discusses the importance of structural health monitoring and safety assessment of large bridges, as well as the application progress of intelligent detection technology in bridge inspection.

Keywords: extra-large span bridge; health monitoring; Damage identification; Safety evaluation

一、特大跨径桥梁的发展现状和技术进步

（一）特大跨径桥梁的发展现状和技术进步

近三十年来，中国桥梁建设取得了举世瞩目的成就，特别是在特大跨径桥梁的建设方面，更是达到了世界领先水平。据统计，中国保持着年均增长约 3 万座桥梁的建设速度，极大地推动了中国交通行业的快速发展。这些桥梁不仅跨越了江河湖海，还连接了山脉与平原，为国家的经济建设和区域协调发展提供了坚实的交通保障。

在这一时期，中国相继建成了多座具有世界影响力的特大跨径桥梁，如上海南浦大桥（主跨 423 米，1991 年建成）、上海杨浦大桥（跨径超过 600 米，1993 年建成）、汕头海湾大桥（主跨 452 米，首座现代悬索桥）和江阴长江大桥（主跨 1385 米，首座跨径超千米的钢箱梁悬索桥）等。这些桥梁的建成，标志着中国特大跨径桥梁建设技术的不断成熟和进步。

进入 21 世纪后，中国特大跨径桥梁的建设更是呈现出井喷式的发展趋势。据不完全统计，世界上已建成 400 米以上跨径的斜拉桥中，中国占比超过 59%；已建成 500 米以上跨径的悬索桥中，中国占比超过 39%；已建成 300 米以上跨径的拱桥中，中国占比超过 55%。这些数据充分展示了中国在全球特大跨径桥梁建设领域的领先地位。

（二）特大跨径桥梁的结构型式和设计、施工关键技术

特大跨径桥梁的结构型式主要包括斜拉桥、悬索桥和拱桥等。这些桥梁结构型式各有特点，设计复杂，施工难度大，是衡量一个国家桥梁技术水平的重要指标。

斜拉桥：斜拉桥主要由索塔、主梁和斜拉索组成。中国已建成的斜拉桥超过 100 座，其中不

乏世界级的工程如苏通长江大桥（主跨 1088 米，2008 年建成）和沪通长江大桥（主跨 1092 米，公铁两用）。这些桥梁在设计上采用了先进的结构形式和技术手段，如苏通长江大桥采用了双塔双索面钢箱梁及七跨连续结构体系，成功解决了多项技术难题。

悬索桥：悬索桥主要由主缆、桥塔、吊索、锚碇和加劲梁等组成。中国悬索桥的跨越能力不断提升，如舟山大陆连岛工程西堠门大桥（跨径 1650 米，世界第二）就是其中的杰出代表。这些桥梁在设计和施工中采用了高强度的主缆材料、复杂的锚固系统和精细的施工工艺，确保了桥梁的安全性和耐久性。

拱桥：拱桥在中国有着悠久的历史和深厚的文化底蕴。现代大跨径拱桥以跨江与跨山谷大桥为主，多次设计建成不同时期不同形式的世界最大跨度拱桥。如拉林铁路藏木特大桥（2021 年建成）就是目前世界海拔最高、跨度最大的铁路钢管混凝土拱桥，展示了中国拱桥建设技术的世界领先水平。

（三）中国特大跨径桥梁在安全、耐久、减灾防灾方面的技术现状

中国特大跨径桥梁在安全、耐久和减灾防灾方面取得了显著的技术进步。首先，在桥梁设计阶段就充分考虑了各种安全因素，采用了先进的计算方法和模拟技术，对桥梁的承载能力、抗风性能、抗震性能等进行了全面评估和优化设计。其次，在桥梁施工过程中采用了严格的质量控制措施和先进的施工工艺手段，确保了桥梁的施工质量和使用寿命。此外，中国还建立了完善的桥梁监测和评估体系，对桥梁的运营状态进行实时监测和评估，及时发现并处理潜在的安全隐患。

在耐久性方面，中国特大跨径桥梁采用了高

性能材料、防腐涂层和耐久性设计等技术手段，有效延长了桥梁的使用寿命。同时，还加强了对桥梁的日常维护和保养工作，确保了桥梁的良好运营状态。

在减灾防灾方面，中国特大跨径桥梁在设计和施工中充分考虑了自然灾害的影响因素，如地震、洪水、风灾等，并采用了相应的抗震、抗洪和抗风等技术措施。此外，还建立了完善的应急预案和救援机制，以应对可能发生的突发事件。

（四）标准体系与高性能材料

标准体系：中国已经建立了完善的桥梁建设标准体系，包括设计标准、施工标准、验收标准等各个方面。这些标准不仅为桥梁建设提供了科学依据和技术支撑，还促进了桥梁建设行业的规范化和标准化发展。

高性能材料：在特大跨径桥梁的建设中，中国广泛采用了高性能材料如高强度钢材、高性能混凝土等。这些材料具有优异的力学性能和耐久性能，能够满足特大跨径桥梁对材料性能的高要求。

二、特大跨径桥梁的未来发展趋势

特大跨径桥梁作为工程技术的杰出代表，其设计、施工与养护技术的发展对于国家基础设施建设具有重要意义。以下是对特大跨径桥梁未来发展趋势的展望，以及对建设发展的参考和指导。

（一）未来发展趋势

1. 全生命周期设计：未来的桥梁设计将更加注重全生命周期的维护和管理，实现结构的耐久性、生态友好性和经济性。这包括基于全生命周期费用的设计方法、养护管理以及风险评估。

2. 高性能材料应用：随着材料科学的进步，未来桥梁将采用更高强度、高耐久性的材料，如Q500qE高强桥梁钢，以及更高级别的高强钢丝，这将有助于提高桥梁的承载能力和耐久性。

3. 信息化技术：物联网、大数据和人工智能

技术的应用将为桥梁的智能建造、监测和维护提供支持。**BIM**技术的应用将实现桥梁全生命周期的信息化管理。

4. 工程装备创新：为适应更复杂桥梁工程的需求，未来的工程装备将向更高可靠性、更长服役寿命方向发展，减少对进口部件的依赖，提升自主生产能力。

5. 健康监测与评估：结构健康监测系统将成为标准配置，实现对桥梁结构性能的实时监测和评估，确保运营安全。

6. 抗震与减隔震技术：基于性能的抗震设计理念将得到更广泛应用，减震装置与桥梁结构的相互作用关系将被更明确地研究和应用。

（二）对建设发展的参考和指导

1. 标准体系建设：建立和完善国家层面的大跨径桥梁设计标准体系，整合国内外先进经验，形成适应中国桥梁建设特点的技术要求。

2. 技术创新与研发：加大对新材料、新工艺、新技术的研发力度，推动桥梁设计和施工技术的持续创新。

3. 智能化管理：推动智能化管理系统的发展，提高桥梁养护的效率和质量，降低维护成本。

4. 环境与社会影响评估：在桥梁规划和设计阶段，充分考虑对环境和社会的影响，实现可持续发展。

5. 国际合作与交流：加强与国际先进水平的交流与合作，引进和消化吸收国外先进技术，提升国内桥梁建设水平。

6. 人才培养与教育：注重桥梁工程人才的培养和教育，提高从业人员的专业技能和创新能力。

可以预见，特大跨径桥梁将更加安全、经济、环保，为社会经济发展提供更加坚实的支撑。

三、大型桥梁结构健康监测及安全评估的重要性

大型桥梁作为关键的交通基础设施，其安全

性直接关系到人民生命财产和社会经济活动的正常运行。随着时间的推移和使用负荷的累积，桥梁结构可能会发生损伤和劣化，因此，结构健康监测和安全评估在桥梁维护中的重要性日益凸显。

（一）大型桥梁可能出现的损伤和劣化

大型桥梁在建造和使用过程中，可能会因为环境侵蚀、车辆荷载、风、地震、疲劳、人为因素以及材料性能退化等多种原因产生损伤和劣化。这些损伤如果未能及时发现和处理，可能会影响行车安全，缩短桥梁使用寿命，甚至导致桥梁突然破坏和倒塌。

（二）结构健康监测和安全评估的重要性

结构健康监测（SHM）利用现场传感设备收集数据，分析结构系统特性，以达到监测结构损伤或退化的目的。这一过程对于确保桥梁的安全性、适用性和耐久性至关重要。与传统的人工检查相比，SHM 系统可以提供更为实时、客观的评估依据，有助于及时发现结构问题并采取相应措施。

（三）传统监测方法与新兴技术的比较

传统的桥梁检查方法存在一些局限性，如需要大量人力物力、主观性强、缺少整体性、影响交通运行、周期长和实时性差等。而新兴的监测技术，如基于无线传感网络的 SHM 系统，提供了更为高效、实时的监测解决方案，能够对桥梁结构进行全面、连续的监测，并采用先进的数据处理技术来识别结构损伤和评估健康状况。

四、智能检测技术在桥梁检测中的应用进展

随着科技的进步，智能检测技术在桥梁检测领域得到了广泛应用。这些技术不仅提高了检测的准确性和效率，还极大地提升了桥梁结构健康监测和安全评估的水平。本节将探讨智能检测技

术的发展背景和意义，及其在桥梁检测中的应用实例和对桥梁结构健康监测和安全评估的贡献。

（一）智能检测技术的发展背景和意义

智能检测技术的发展背景可以追溯到 20 世纪末，随着计算机技术、传感器技术、网络技术等的发展，智能检测技术逐渐成熟。这些技术在桥梁检测领域的应用，对于提高桥梁检测的效率和准确度具有重要意义。

首先，智能检测技术可以实现对桥梁结构的全天候监测。传统的桥梁检测方法往往依赖于人工操作，受到天气、时间等因素的限制。而智能检测技术可以实现对桥梁结构的全天候监测，不受天气、时间等因素的影响。

其次，智能检测技术可以提高检测的准确性和效率。传统的桥梁检测方法往往依赖于人工操作，检测结果受到检测人员技术水平、经验等因素的影响。而智能检测技术可以实现对桥梁结构的自动化检测，检测结果更加准确，检测效率更高。

最后，智能检测技术可以实现对桥梁结构健康监测和安全评估的实时反馈。传统的桥梁检测方法往往依赖于定期检测，检测结果存在一定的滞后性。而智能检测技术可以实现对桥梁结构的实时监测，及时发现桥梁结构的问题，为桥梁结构健康监测和安全评估提供实时反馈。

（二）智能检测技术在桥梁检测中的应用实例

1. 远程监测系统：通过安装在桥梁上的传感器，实时监测桥梁结构的应力、位移、温度等参数，并将数据传输到远程监测中心，实现对桥梁结构的远程监测。

2. 无人机检测：利用无人机对桥梁进行近距离拍摄和扫描，获取桥梁结构的详细图像和数据，实现对桥梁结构的快速检测和评估。

3. 激光扫描技术：利用激光扫描技术对桥梁

结构进行扫描，获取桥梁结构的详细三维模型和数据，实现对桥梁结构的准确检测和评估。

4. 声发射技术：利用声发射传感器对桥梁结构进行监测，实时检测桥梁结构的损伤和裂纹，实现对桥梁结构的实时检测和评估。

（三）智能检测技术对桥梁结构健康监测和安全评估的贡献

智能检测技术对桥梁结构健康监测和安全评估的贡献主要体现在以下几个方面：

1. 实时反馈：智能检测技术可以实现对桥梁结构的实时监测，及时发现桥梁结构的问题，为桥梁结构健康监测和安全评估提供实时反馈。

2. 早期预警：通过实时监测桥梁结构的参数，智能检测技术可以及时发现桥梁结构的异常变化，为桥梁结构的健康监测和安全评估提供早期预警。

3. 优化维护：智能检测技术可以对桥梁结构的健康状况进行评估，为桥梁结构的维护和维修提供科学依据，优化桥梁结构的维护策略。

4. 延长寿命：通过实时监测桥梁结构的健康状况，及时发现和修复桥梁结构的损伤，智能检测技术可以延长桥梁结构的寿命，降低桥梁维护成本。

5. 节约资源：智能检测技术可以实现对桥梁结构的实时监测和评估，为桥梁结构的维护和维修提供科学依据，节约桥梁维护资源。

综上所述，智能检测技术在桥梁检测中的应用进展显著，可以提高桥梁检测的准确性和效率，实现对桥梁结构健康监测和安全评估的实时反馈，为桥梁结构的健康监测和安全评估提供科学依据。随着科技的不断进步，智能检测技术在桥梁检测领域的应用将更加广泛，为桥梁结构的健康监测和安全评估提供更加有效的手段。

参考文献

[1] 张玉娥,白宝鸿,张昀清.桥梁风险管理及防

恐设计[J].世界桥梁,2006(4):71-75.

[2] 祝孝成,胡开建.浅谈桥梁风险评估[J].城市建设理论研究,2014(11).

[3] 李喜梅,苏润田,李明睿,等.主余震序列作用下考虑断层距的桥梁风险分析[J].地震研究,2024,47(2):300-310.

[4] 黄伟,袁光杰.基于博弈论和BP神经网络的桥梁风险预测模型[J].西部交通科技,2024(4):173-176.

[5] 张荣凤,亓兴军.运营期桥梁风险评估综述[J].中国水运(下半月),2020,20(10):123-125.

[6] 李会会.桥梁风险分析方法研究[J].企业技术开发(下半月),2009,28(6):139,143.

[7] 查显来.桥梁风险评价及运营系统韧性度量、提升策略研究[D].武汉轻工大学,2023.

[8] 朱劲松,王诗青.公路桥梁风险估测方法[J].哈尔滨工业大学学报,2012,44(2):124-128.

[9] 车鑫,刘旭.山区大跨高墩桥梁风险评估研究[C].//中国公路学会桥梁和结构工程分会2018年全国桥梁学术会议论文集.2018:1149-1156.

[10] 吕娜娜,郝伟.对在役桥梁风险损失的量化研究[J].价值工程,2014(11):116-117,118.

[11] 阮欣,陈艾荣,石雪飞.考虑公众意愿的桥梁风险评估和决策方法[J].哈尔滨工业大学学报,2009,41(4):164-168.

[12] 张风华.桥梁风险评估方法与发展研究[C].//城市道桥与防洪.2007:164-167.

[13] 张丹丹.桥梁风险评价算法与健康监测软件研究[D].陕西:长安大学,2019.

[14] 徐广明.浅析桥梁风险理论在桥梁评估中的应用[J].城市道桥与防洪,2014(1):70-71.

版权所有©2024本文作者和香港科技出版集团。
本作品根据知识共享署名国际许可证(CC BY 4.0)获得许可。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access