

# 海洋桥梁工程全寿命管理维护战略探讨

刘沐宇, 梁磊, 吴浩, 徐刚, 李倩

(武汉理工大学道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 武汉 430070)

**摘要:** 我国海洋桥梁工程建设正不断向离岸深海长联大型发展, 但由于其所处自然环境恶劣、地质与荷载条件复杂, 针对海洋桥梁工程全寿命期的健康监测、测量技术、巡检技术、管理与维护, 仍存在许多难题亟待解决。本文在总结目前桥梁工程全寿命管理维护存在问题的基础上, 针对海洋桥梁提出多参量、高可靠、大容量、长距离的光纤传感健康监测、“天-空-地-海”一体化测量、自动化巡检和智能化管理维护平台等技术及其发展要点, 研究各技术要点的重点难点问题和发展方向, 探讨海洋桥梁工程全寿命管理维护技术的发展战略目标, 为海洋桥梁工程建设和运营安全提供技术支撑。

**关键词:** 海洋桥梁工程; 全寿命管理; 健康监测; 自动化巡检; 工程测绘; 智能维护

**中图分类号:** U448      **文献标识码:** A

## Lifecycle Management and Maintenance of Marine Bridge Engineering

Liu Muyu, Liang Lei, Wu Hao, Xu Gang, Li Qian

(Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge & Structural Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Marine bridge engineering in China is continuously developing to the offshore, deep-sea, long-distance, and large-scale directions. However, due to its harsh natural environment and complex geological and loading conditions, there still exist many problems in health monitoring, measurement technology, inspection technology, and maintenance-management for the lifecycle of marine bridge engineering. Therefore, after summarizing the existing problems in lifecycle management and maintenance of bridges, this paper proposes several key technologies for marine bridge development, including health monitoring based on multi-parameter, high-reliability, large-capacity, and long-distance optical-fiber sensing; space-air-ground-sea integrated measurement; automated inspection; and intelligent management and maintenance platforms. Meanwhile, this paper studies the difficulties and development directions of these technologies, and explores development strategies and recommendations for the lifecycle management and maintenance technology of marine bridge engineering, thereby providing technical support for the construction and operation safety of marine bridge engineering.

**Keywords:** marine bridge engineering; lifecycle management; health monitoring; automated inspection; engineering mapping; intelligent maintenance

收稿日期: 2019-04-25; 修回日期: 2019-05-15

通讯作者: 刘沐宇, 武汉理工大学教授, 博士研究生导师, 主要从事桥梁工程的教学与科研工作; E-mail: liumuyu@whut.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“海洋桥梁工程技术发展战略研究”(2016-XZ-13)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

### 一、前言

随着东海大桥、杭州湾大桥、青岛海湾大桥和港珠澳大桥等跨海大桥的建成运营，我国海洋桥梁建设不断从常规桥型向离岸深海长联大型发展。但由于海洋桥梁工程所处海域水深、流急、流向紊乱、潮汐影响频繁，施工水文、地质等条件复杂，强风、地震、波浪力等环境荷载作用远高于内陆桥梁，导致其在全寿命期内风险极高；同时海洋桥梁工程跨度大且远离陆地，测量距离长，现有地面测量基准难以直接利用，高精度测量定位易受恶劣环境制约；此外，在高温、高湿、盐害、冻融及海雾等极端自然环境与交通荷载的共同作用下，桥梁结构性能退化更早、更快、更严重。海洋桥梁工程在勘察、设计、施工与运营全寿命管理维护中都面临着严峻的挑战。

海洋桥梁工程生命周期内的管理与维护面临的主要难题有：

(1) 亟需解决实时在线和长期可靠的海洋桥梁健康监测技术难题。近年来，越来越多的桥梁结构安装了长期健康监测系统，对桥梁结构的损伤状态进行损伤识别，对可能出现的损伤和灾害进行预测、评估，但对桥梁结构的应力状态进行长期可靠的检测仍然难以实现 [1]。

(2) 亟需解决实时、快速和精确的海洋桥梁工程测量技术难题。工程测量中许多常规技术和方法不能满足海洋桥梁工程实时、快速和精确的需求，亟需一种连续、动态、同步、实时、自动化的监测手段。

(3) 亟需解决海洋桥梁工程自动化巡检技术难题。桥梁工程巡检主要针对内陆桥梁工程，巡检以人工为主，辅以机械化设备实施，工作效率较低，且受到各种条件的制约，检查范围有限 [2]。

(4) 亟需解决海洋桥梁工程全寿命管理维护平台难题。目前，国内外桥梁管理系统为独立开发的单系统，且彼此不兼容，桥梁信息管理系统之间无法共享数据，难以做出科学合理的管理维护决策。国内外的风险影响研究主要针对内陆大型桥梁，现行风险评估体系对海洋桥梁开展评估需进一步完善 [3]。

针对上述难题，利用时代前沿技术，重点发展光纤传感、卫星导航定位、自动化巡检等新技术与装备，提出多参量、高可靠、大容量、长距离的光

纤传感健康监测、“天-空-地-海”一体化测量、自动化巡检和智能化管理维护平台等技术及其发展要点，研究其重点难点问题和发展方向，探讨海洋桥梁工程全寿命管理维护技术的发展战略目标和建议。以实现海洋桥梁工程管理维护的自动化、信息化和智能化，确保海洋桥梁结构运营安全，延长海洋桥梁结构服役寿命。

### 二、海洋桥梁工程全寿命管理维护研究战略发展要点

#### (一) 基于光纤传感的海洋桥梁工程健康监测技术

##### 1. 重点难点问题

桥梁工程健康监测技术从最原始目测发展到电测（电阻应变计、钢弦式应变传感技术和电磁类测试），对桥梁结构的应力状态进行长期可靠的检测仍然难以实现，光纤传感技术的发展实现了监测的实时在线并提高了长期可靠性 [4]。综合国内外桥梁工程健康监测技术的研究现状，海洋桥梁工程健康监测技术目前主要存在如下问题：①海洋桥梁工程全寿命健康监测系统的长寿、可靠性；②技术条件的局限性导致必要测量参数不全面；③监测大数据的有效利用和预警。

##### 2. 技术发展方向

##### (1) 满足海洋环境的长寿命光纤传感技术

海洋恶劣环境对传感器提出了高强度、耐腐蚀和适应大温差传感特性等耐久性要求，结构复杂、建设周期长的海洋桥梁，其在线监测设备更换难度大，要求传感器具有更长的寿命周期 [5]。因此，海洋桥梁工程长寿命特种光纤的研究要点有：①特种光纤结构与组分设计；②特种光纤预制棒生产工艺；③特种光纤的拉丝工艺；④特种光纤的涂层制备及涂覆工艺；⑤特种光纤的光纤光栅制备技术；⑥特种光纤光栅在线制备装备集成。

##### (2) 多参量、高可靠、大容量、长距离光纤传感元件研发

光纤传感容量大，适合海洋桥梁监测参量和监测点多的特点。多参量监测需要传感器种类繁多，安装空间狭小需要传感器体积小，从而对狭小空间里光栅的布设、黏贴与保护以及复杂结构里多光栅的走线与安装提出了技术要求。针对海洋桥梁及其建造装备对温度、应变与振动等物理参量的超高精

度测试需求, 研究复杂物理场与光纤导波场高效耦合相关问题、传感器增敏机理、多物理量交叉敏感机理。采用对特定参量敏感的材料以及借助 3D 打印技术, 设计微型光纤传感器封装结构, 优化传感器的响应度, 实现温度、应变与振动等物理量的高精度测量。

### (3) 海洋环境全方位、多尺度监测技术

由于海洋桥梁在建设技术上的超前性和结构体系上的复杂性, 其对健康监测的全面性也提出了更高的要求, 包括海洋地理环境、海风、海浪、温度、波浪力和运营期结构信息变化等。为能更加准确判断海洋桥梁结构的健康状况, 搜集的信息须全面且准确, 包括结构的荷载静力响应、动力特性以及结构在运营期出现各种结构变化信息等 [1]。同时, 桥梁不同部位的监测尺度也不尽相同, 有的要求局部密集化网格化监测, 如缆索等部位应力; 有的要求全局化整体监测, 如主梁线形与主塔偏移 [6]。因此, 针对海洋桥梁结构不同的监测需求, 需要开展全方位、多尺度的监测。

### (4) 海洋桥梁工程健康监测系统

由于材料老化、环境腐蚀、自然灾害等原因, 海洋桥梁结构在服役过程中会受到不同程度的损伤, 对桥梁结构的安全性和使用寿命造成威胁。因此有必要在现有技术水平的的基础上, 将健康在线监测技术与自动化巡检技术等相结合, 构建一个综合系统工程, 集结构计算分析、计算机技术、通信技术、网络技术、传感技术以及信息分析处理评判等高新技术于一体, 使得海洋桥梁工程全寿命管理维护能够真正满足安全运营和维护管理的需要 [2]。

## (二) 海洋桥梁工程“天-空-地-海”一体化测量技术

### 1. 重点难点问题

海洋桥梁工程通常具有规模大型化、结构新颖化、地理位置特殊化等特点, 工程测量中许多常规测量技术与方法已经不能满足海洋桥梁工程实时、快速和精确的需求, 卫星导航定位技术以其独特的优势成为一种必然趋势, 但其在勘测设计、施工和运营管理阶段仍然有很多工程测量问题需要解决 [7]。

### 2. 技术发展方向

#### (1) 海洋桥梁工程勘测设计阶段的测绘技术

以我国自主研发的北斗卫星导航系统为主体,

全球定位系统 (GPS) 和俄罗斯全球导航卫星系统 (GLONASS) 等卫星定位系统为辅助的多模全球导航卫星系统 (GNSS) 技术, 在桥梁勘测设计阶段建立控制网方面具有高度自动化、全天候、高精度、实时性、布点灵活和操作方便等优点, 能够克服单卫星系统容易受到局部信号遮挡所造成的定位卫星不足、影响定位性能的缺陷。GNSS 技术辅助达到厘米级甚至更高精度的水下地形测量, 需要在海洋桥梁工程 GNSS 垂直基准建立及转换技术方面开展研究 [8]。同时, 开展无人机技术, 突破海洋地形对传统测图方法的限制, 将极大提高工作效率和自动化程度。

#### (2) 海洋桥梁工程施工阶段的测绘技术

基于 GNSS 的海洋桥梁施工定位技术具有全天候、高精度、兼容广、易管理等优势, 能提供直观、准确、连续的船位、航向和施工区概况, 还为船舶施工提供连续的三班作业和全天候施工作业。同时, 三维激光扫描技术在桥梁施工中可实现自动化核查构件尺寸的正确性、预先模拟拼装过程、检查施工质量和评价施工精度; 无人机巡查技术可实时掌握施工状态, 与通信、地理信息系统 (GIS) 技术相结合可实现对施工进行实时监控和实时调度。

#### (3) 海洋桥梁工程运营管理阶段的测绘技术

将多模 GNSS 技术同网络通信技术、计算机技术、传感器融合技术以及当前最前沿的物联网、大数据、云计算等其他信息技术结合, 实现海洋桥梁三维变形监测的实时在线监测, 可显著提高海洋桥梁运营管理水平和安全预警能力。在 GNSS 测量不到的关键部位, 将 GNSS 与测量机器人综合应用则可实现全面的桥梁监测。此外, 三维激光扫描技术又是作为 GNSS 自动化变形监测的有力补充, 其可利用扫描得到的点云数据, 获取成片的监测点信息, 获取密度更大的变形监测数据, 这是其他监测手段所无法比拟的。大力发展机载、移动式三维激光扫描应用, 并与 GNSS 监测技术、测量机器人监测技术进行综合运用, 有利于形成点面结合的海洋桥梁三维变形监测技术体系。

## (三) 海洋桥梁工程自动化巡检技术

### 1. 重点难点问题

通过海洋桥梁技术状况检查, 可得到桥梁结构的损伤类型、程度和位置等, 并可评估海洋桥梁的

技术状况，为制定养护策略提供可靠的技术参数，而技术状况检查目前主要存在以下两个问题：①缺乏针对海洋桥梁工程的巡检技术体系；②海洋桥梁工程巡检装备自动化程度低。

### 2. 技术发展方向

#### (1) 建立海洋桥梁工程自动化巡检技术体系

针对海洋桥梁工程高温、高湿、盐害、冻融、以及海雾等极端环境和交通荷载作用，基于现有的内陆桥梁巡检技术方案与规范、标准、指南等，确定海洋桥梁工程的经常检查、定期检查和特殊检查的内容、频率及指标等，开展适用于海洋桥梁工程的巡检技术体系研究，确保巡检技术方案的合理性、及时性和专业性。

#### (2) 海洋桥梁工程自动化巡检设备

研发海洋桥梁工程缆索智能检测机器人、梁底自动检测机器人、无人机等自动化巡检装备以及智能移动终端移动，提高海洋桥梁工程巡检的安全性、全面性、可靠性和及时性 [9]。

## (四) 海洋桥梁工程全寿命管理维护平台

### 1. 重点难点问题

海洋桥梁工程项目的生命周期是指从项目勘测阶段目标的产生到项目实施阶段工程的竣工验收再到项目运营阶段整个过程。目前，我国的建设工程项目管理模式遵循传统的分阶段管理模式，各阶段相对独立的管理理论不能满足海洋桥梁重大工程项目实施的需要 [10]。

(1) 海洋桥梁工程管理维护平台开放性不足，不够规范化，网络化与移动化程度不充分，缺乏桥梁状态预测评估。

(2) 海洋桥梁工程风险现有研究多偏向于理论与主观因素，现有风险防范措施难以及时有效地确定具有针对性的避险策略。

(3) 由于海洋桥梁工程的特殊性、所处环境的恶劣和复杂多变性，现有的养护技术方案难以完全适用于海洋桥梁工程。

### 2. 技术发展方向

#### (1) 构建海洋桥梁工程全寿命管理维护平台

海洋桥梁管理维护平台是融合桥梁基础数据、设计资料、施工信息、监测数据，基于云技术的大型信息系统，用于状态评估、结构退化预测、维护对策和计划等，将海量多维信息深度挖掘分

析后储存于大型数据库中，确定桥梁的当前状态及维修对策，并对结构的未来状况发展进行预测分析。

#### (2) 海洋桥梁工程全寿命风险识别与评估体系

海洋桥梁工程风险源具有客观性、普遍性和必然性。现有桥梁工程风险识别和评估系统难以满足海洋桥梁工程动态风险评估需求，以构架系统完整的海洋桥梁风险评估体系为目标，提出适用于海洋桥梁工程的全寿命风险识别评估体系，基于海量监测数据以及云技术的深度挖掘分析，确定及时有效的避险策略 [11]。

#### (3) 海洋桥梁工程养护与维修技术体系

预防性养护是一种事前、主动的养护方式，能够有效推迟中修和大修的期限、延长海洋桥梁工程的服役寿命。目前，海洋桥梁工程的养护与维修技术还没有形成完善的技术体系，发展适应于海洋桥梁的养护与维修技术，提高养护维修人员的专业水平，基于人工智能与大数据技术的海洋桥梁工程养护与维修决策将为桥梁管理维护决策提供专业的数据支撑。

#### (4) 海洋桥梁工程管理维护云技术

作为分布式计算的一种特殊形式，云技术引入了效用模型来远程供给可测量和可扩展的资源，能够完美应对海洋桥梁工程大数据的挑战 [12]。因此，大力发展云技术是确保海洋桥梁工程实现海量数据快速处理与深度挖掘的有力保障，能够加速推动海洋桥梁管理维护实现信息化与智能化。

## 三、海洋桥梁工程全寿命管理维护研究战略目标

本课题重点围绕海洋桥梁工程全寿命管理维护的关键技术难题，通过广泛资料查阅与现场调研，经过不断地研讨分析与多次专家咨询论证，提出海洋桥梁工程全寿命管理维护技术发展的战略重点。

(1) 基于光纤传感技术、卫星导航定位技术、自动化巡检技术以及智能移动终端等，大力发展海洋桥梁工程健康监测预警系统及装备。

(2) 着力研发适用于海洋环境的长寿命特种光纤传感技术与多参量、高可靠、大容量、长距离的光纤传感元件，以及全方位、多尺度监测技术。

(3) 建立以北斗卫星导航定位为主、其他卫星导航定位为辅的多模卫星融合定位机制, 灵活运用测量机器人、三维激光扫描、无人机航摄测绘等多种现代化测量手段, 形成面向海洋桥梁工程多手段集成、数据融合处理的施工测量体系, 研发“天-空-地-海”海洋桥梁工程一体化空间信息集成技术。

(4) 建立海洋桥梁工程全寿命管理和维护智能决策体系, 构建以大数据为支撑的信息化、智能化管理维护平台, 推动我国海洋桥梁工程全寿命管理维护自动化、信息化与智能化, 实现海洋桥梁智能管养。

#### 四、海洋桥梁工程全寿命管理维护研究战略发展建议

大力开发适用于海洋桥梁工程管理维护的新技术、新设备、新材料、新工艺等, 引领高校、科研院所以及企业等相关机构加强全寿命管理维护技术与推广应用, 在相关重要科技领域实现技术突破, 促进海洋桥梁工程管理维护跨越式发展, 包含:

- ①着力发展光纤传感技术在海洋桥梁工程健康监测中的应用, 研发适用于海洋环境的特种光纤, 建立全方位、多尺度的海洋桥梁工程健康检测技术;
- ②重点发展以北斗卫星导航定位为主、其他卫星导航定位为辅的多模卫星融合定位技术, 构建“天-空-地-海”海洋桥梁工程一体化空间信息集成技术;
- ③建立以“海洋桥梁工程大数据中心”为支撑的“物联网”海洋桥梁平台, 推动海洋桥梁工程全寿命管理维护自动化、信息化与智能化, 实现“智慧海洋桥梁”。

#### 五、结语

针对海洋桥梁工程所处环境的严酷性与复杂多变性, 在海洋桥梁工程勘察、设计、施工与运营整个生命周期中, 基于全寿命期海洋桥梁结构安全与长寿耐久需求, 以光纤传感技术、卫星导航定位技术为主, 结合自动化巡检与智能移动终端等技术, 实现海洋桥梁工程的健康监测与全天候、高精度空间定位, 通过构建信息化与智能化海洋桥梁工程管理维护平台, 开展海洋桥梁工程健康监测、养护维

修、风险管理等研究, 并与信息技术深度融合, 实现海洋桥梁智能管养, 达到海洋桥梁工程自动化、信息化与智能化管理维护的目的, 确保海洋桥梁工程全寿命期安全可靠与长寿耐久。

#### 参考文献

- [1] 郭健. 跨海大桥健康监测的关键技术分析 [J]. 中国工程科学, 2010, 12(7): 90-95.  
Guo J. Key technical analysis of cross-sea bridge health monitoring [J]. Strategic Study of CAE, 2010, 12(7): 90-95.
- [2] 聂功武, 孙利民. 桥梁养护巡检与健康监测系统信息的融合 [J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(S1): 104-108.  
Nie G W, Sun L M. Fusion of bridge maintenance inspection and health monitoring system information [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2011, 45(S1): 104-108.
- [3] 成虎, 韩豫. 工程管理系统思维与工程全寿命期管理 [J]. 东南大学学报 (哲学社会科学版), 2012, 14(2): 36-40.  
Cheng H, Han Y. Engineering management system thinking and engineering life cycle management [J]. Journal of Southeast University (Philosophy and Social Sciences), 2012, 14(2): 36-40.
- [4] 徐刚, 王岗, 梁磊, 等. 基于光纤光栅的叶片状态在线监测研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2017 (3): 64-67.  
Xu G, Wang W, Liang L, et al. On-line monitoring of blade state based on fiber Bragg grating [J]. Instrument Technique and Sensor, 2017 (3): 64-67.
- [5] 张宁, 陈伟, 郑兴, 等. Fe-C 膜光纤光栅锈蚀传感器在模拟海洋环境中的特性研究 [J]. 功能材料, 2015, 46(1): 1074-1078.  
Zhang N, Chen W, Zheng X, et al. Fe-C film fiber grating rust sensor in the simulation of marine environment characteristics [J]. Functional Materials, 2015, 46(1): 1074-1078.
- [6] 徐一旻, 李盛. 结构健康监测系统在大型桥梁运营维护与安全管理中的应用 [J]. 武汉理工大学学报 (信息与管理工程版), 2017, 39(3): 254-258.  
Xu Y Z, Li S. Application of structural health monitoring system in maintenance and safety management of large bridge operations [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information and Management Engineering Edition), 2017, 39(3): 254-258.
- [7] 杨元喜, 徐天河, 薛树强. 我国海洋大地测量基准与海洋导航技术研究进展与展望 [J]. 测绘学报, 2017, 46(1): 1-8.  
Yang Y X, Xu T H, Xue S Q. Research progress and prospects of marine geodetic reference and marine navigation technology in China [J]. Journal of Surveying and Mapping, 2017, 46(1): 1-8.
- [8] 赵建虎, 王爱学. 精密海洋测量与数据处理技术及其应用进展 [J]. 海洋测绘, 2015, 35(6): 1-7.  
Zhao J H, Wang A X. Precision ocean measurement and data processing technology and its application progress [J]. Marine Mapping, 2015, 35(6): 1-7.
- [9] 李德仁, 李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2014, 39(5): 505-512.  
Li D R, Li M. Research progress and application prospects of UAV remote sensing system [J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2014, 39(5): 505-512.
- [10] 朱明敏, 尹新刚, 王晓晶. 基于生命过程的桥梁智能养护决策方法研究 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2012, 8(12): 17-19.

- Zhu M M, Yin X G, Wang X J. Research on decision-making method of bridge intelligent maintenance based on life process [J]. Highway Traffic Technology (Application Technology Edition), 2012, 8(12): 17–19.
- [11] Miyamoto A, Kawamura K, Nakamura H. Bridge management system and maintenance optimization for existing bridges [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2010, 15(1): 45–55.
- [12] Roshandeh A M, Poormizaee R, Ansari F S. Systematic data management for real-time bridge health monitoring using layered big data and cloud computing [J]. International Journal of Innovation and Scientific Research, 2014, 2(1): 29–39.