

# 船舶撞击桥梁研究进展综述

陈耀金, 邱政男

广州市番禺区地方公路管理总站, 广东 广州 511400

DOI:10.61369/ERA.2026090039

**摘 要 :** 随着国内跨江、跨海桥梁大规模建设, 船舶撞击已成为桥梁垮塌、结构损伤的核心诱因之一, 船撞安全是通航桥梁全生命周期运维的关键研究方向。本文系统梳理国内外桥梁船撞相关研究成果, 从船撞事故统计特征、船撞风险评估方法、碰撞响应分析手段三大维度展开综述, 对比各类试验、数值、理论方法的适用场景与固有缺陷。综合现有研究指出当前存在多灾害耦合机理不清、等效计算方法精度不足、防撞设计规范不完善等短板, 可为通航桥梁抗撞设计与防护工程提供理论参考。

**关 键 词 :** 桥梁船撞; 风险评估; 碰撞响应; 有限元仿真; 防撞规范

## A Review of Recent Research on Ship-Bridge Collisions

Chen Yaojin, Qiu Zhengnan

Panyu District Local Highway Management Station, Guangzhou, Guangdong 511400

**Abstract :** With the large-scale construction of bridges spanning rivers and seas in China, vessel collisions have become one of the primary causes of bridge collapse and structural damage; vessel collision safety is a key research area for the full lifecycle operation and maintenance of navigable bridges. This paper systematically reviews domestic and international research findings on vessel-bridge collisions, providing a comprehensive overview across three dimensions: statistical characteristics of collision accidents, vessel-bridge risk assessment methods, and collision response analysis techniques. It compares the applicable scenarios and inherent limitations of various experimental, numerical, and theoretical methods. A synthesis of existing research highlights current shortcomings, including unclear mechanisms of multi-hazard coupling, insufficient accuracy of equivalent calculation methods, and incomplete collision-resistant design codes, thereby providing a theoretical reference for the collision-resistant design and protective engineering of navigable bridges.

**Keywords :** bridge-vessel collisions; risk assessment; collision response; finite element simulation; collision prevention standards

## 引言

船舶冲击桥梁是一个十分复杂的耦合冲击动力学问题。首先, 船舶在冲击桥梁时的撞击形态是不断演变, 因此如何科学准确地评估它是设计的前提; 第二, 桥梁力学行为的复杂性, 桥梁在遭受冲击时, 桥梁材料经历了复杂的损伤破坏过程; 第三, 耦合作用的复杂性, 船舶撞击桥梁的碰撞时间很短, 一般最多只需要几秒钟, 在这极短的时间内却产生了巨大的撞击力和能量的相互转换, 且还涉及到了船舶-桥墩-水-土的流固耦合问题, 这是一个非常复杂的非线性动态耦合过程。正是由于这些复杂的冲击动力学问题, 导致桥梁防撞设计十分复杂困难。这也直接导致了桥梁受撞击后的各种事故。

早期船撞研究以经验公式简化计算、模型冲击试验为主, 仅能给出峰值撞击力近似值, 无法捕捉碰撞全过程能量转化、流场扰动对撞击载荷的放大作用。2020年《公路桥梁抗撞设计规范》(JTG/T 3360-2-2020)<sup>[1]</sup>正式实施, 建立分级设防、概率风险评估的标准化设计框架, 推动国内船撞研究从单一撞击力计算转向“风险评估-动力响应-防护优化”一体化研究体系。同时, LS-DYNA等显式动力学软件普及、SPH无网格粒子算法、离散元耦合技术成熟, 使得船-桥-水多场耦合精细化仿真成为主流研究手段; 机器学习、机器视觉技术逐步应用于船舶通航预警、碰撞损伤快速预测领域, 形成理论、数值、试验、工程规范协同发展的研究格局。

现有综述多侧重单一数值方法或防撞装置分类, 缺少对多场耦合算法、公铁两用桥船撞联动灾害、老旧桥梁抗撞补强、AI智能防控等前沿方向的系统整合, 且未结合近年典型重大船撞事故总结新型损伤特征。本文立足内河与沿海桥梁工程实际, 整合国内外核心期刊、学位论文与工程标准成果, 全面归纳船撞桥领域研究脉络, 指出现存研究局限并提出未来攻关方向, 完善船舶碰撞动力学综述体系。

# 一、船撞事故统计与结构损伤机理研究

## （一）近年国内船撞事故分布与新特征

樊伟等<sup>[2]</sup>整理2012—2022年国内航道桥梁船撞事故数据，总结出现阶段事故四大典型特征：一是中小型内河驳船失控撞击占比超75%，低吨位船舶因驾驶员操作失误、航道标识缺失成为主要风险源；二是水位季节性变化加剧撞击概率，汛期高水位下撞击点上移，桥墩中上部薄壁截面易发生弯曲断裂；三是公铁两用桥船撞次生灾害风险显著高于普通公路桥，撞击引发桥梁振动易造成桥上列车脱轨；四是老旧低标准通航桥梁普遍未配套防撞设施，局部撞击即产生不可逆墩身裂缝、桩基沉降损伤。

## （二）船桥碰撞能量转化与破坏机理

船桥碰撞属于动能向内能、流体耗散能快速转化的短时刻力学过程，系统能量演化直接决定船体与桥梁损伤程度。刘建成等<sup>[3]</sup>利用整船整桥模型计算了一艘4万吨实船与桥梁的碰撞过程，结果表明船撞桥过程中的船舶动能主要转化为船首结构和桥梁结构的变形能。潘晋等<sup>[4]</sup>对比了流固耦合方法与附加质量系数法的计算结果，研究发现附加质量法会低估防撞钢套箱的撞击力，常规设计偏于危险，有必要用流固耦合法考虑流场作用。侯跃鹏<sup>[5]</sup>通过建立船撞桥有限元模型分析得到桩基是在撞击过程中损害最为严重的部分，且正向碰撞是最不利情况。研究多聚焦瞬时撞击动力响应，然而针对撞击后桥墩残余变形、长期疲劳累积损伤的成套评估理论，侧重瞬时碰撞峰值力分析，忽略结构长期服役性能衰减方面的研究较少<sup>[6]</sup>。除此之外，水下桩基撞击后损伤隐蔽，现有规范缺少水下桩基损伤的定量判定标准<sup>[7]</sup>。

# 二、桥梁船撞风险评估研究现状

## （一）确定性评估与概率风险评估

早期桥梁抗撞采用确定性设防思路，依据最大通航船舶吨位给定固定撞击力，未考虑船舶通航概率、事故发生频率，重要桥梁与普通小桥设防标准无区分，经济性较差。

2020版公路抗撞规范确立概率风险评估核心地位，完整流程包含航道通航流量统计、船舶失控概率计算、撞击后果分级、可接受风险阈值判定四大模块，采用分位值法确定设防船撞力，建立了精细化程度高的概率-风险分析法，依据桥梁重要性实行分级设防，兼顾安全与造价平衡。但该规范适用于公路新建桥梁中主体结构的抗船撞设计。与新建桥梁不同，既有服役桥梁由于设计时无专门的规范可依，很多都没有进行详细的防撞设计，其船撞安全性存在疑问。随后国内湖南等地出台地方标准《既有桥梁防船撞性能评估与提升设计标准》(DB43/T 3066—2024)<sup>[8]</sup>，专门针对服役多年老旧桥梁建立船撞性能评估流程，补充既有桥梁承载力不足、防撞设施老化的补强判定准则，完善新建与在役桥梁双维度评估体系。

## （二）国内外抗撞设计规范对比

国际主流规范包括美国AASHTO船舶撞击规范<sup>[9]</sup>、德国KUNZI规范<sup>[10]</sup>、欧洲Eurocode规范<sup>[11]</sup>，而国内以《公路桥梁抗撞设计规范》(JTG/T 3360-2—2020)为核心。美国规范未考虑强制性停船措施，影响了船撞桥概率评估的准确性；德国规范考虑了人为停船距离，但未研究船舶横向分布；尽管欧洲规范通过改进考虑了人为停船距离与船舶横向分布，但尚未提供具体的定

量计算公式。欧美规范侧重跨海大型船舶撞击，附加水质量系数取值偏大；我国规范区分内河I~VII级航道，细化中小型驳船计算参数，更适配国内内河航运特点。各类规范在撞击力计算公式、动力放大系数、风险可接受阈值上存在明显差异，跨流域桥梁设计难以直接套用单一标准。现有规范仍存在短板：对FEM-SPH等多场耦合仿真结果缺少统一校核方法；未针对梁拱组合刚构、异形薄壁墩、公铁两用桥等特殊桥型给出细化计算条款；缺少极端洪水、大风与船舶撞击多灾害耦合的设防规定。

# 三、船桥碰撞响应分析方法

## （一）理论计算方法

国内外学者围绕船桥碰撞问题已提出多种撞击力计算方法，归纳起来主要有六类代表性公式<sup>[12-13]</sup>。我国铁路规范中的计算公式基于能量守恒原理，但由于公式中的两个弹性变形系数难以准确标定，若取值偏大则会使计算结果趋于保守，低估实际撞击力。我国公路规范采用冲量定理形式，其中撞击时间参数在缺乏现场资料时统一取为1秒，这一处理方式对不同吨位、不同尺度的船舶而言缺乏区分度，易导致计算偏差。挪威及北欧公共道路管理局的公式结构过于简化，未将船舶撞击速度作为独立变量引入，理论上存在明显不足。欧洲规范公式引入船舶等效刚度概念，但仅按内河船舶与远洋船舶两类进行划分，分类粒、较粗，适用范围受限。相较而言，美国AASHTO规范公式综合考虑了Woisin和Dornberg等学者的试验数据与理论成果，并经大量工程实践检验，是目前国际公认度较高的计算方法。但总体来看，各国规范在船撞桥设计中大多仍采用等效静力法，未能充分反映撞击过程中动力效应的瞬态特征。同时，船桥碰撞受船型参数、通航条件、结构响应等多因素耦合影响，现有简化模型难以全面涵盖各类工况，相关技术标准仍存在持续完善的空间

## （二）冲击试验方法

试验分为缩尺船舶落锤冲击试验、水槽船桥碰撞模型试验、实船现场撞击试验三类。国外船桥碰撞试验研究大致经历了三个阶段。早期德国学者Woisin<sup>[14]</sup>采用1:7.5与1:12的缩尺模型开展了系列高能碰撞试验，研究成果随后被引入船桥碰撞分析领域。1991年，日本与荷兰合作进行了实船尺度的碰撞试验，获取了包括撞击力、碰撞历时、撞入深度及应变响应在内的系统数据<sup>[15]</sup>。此后，Nakamura等<sup>[16]</sup>为规避缩尺效应的干扰，以1:2的比例对超大型油轮舷侧结构进行了准静态与动态碰撞试验，结果表明动态条件下能量吸收能力较准静态提升10%至30%，且脆性断裂倾向更为显著。国内学者的研究起步相对较晚，但近年来取得了一定成果。唐长刚等<sup>[17]</sup>运用量纲分析法构建了船-桥墩碰撞模型，系统探讨了撞击角度、船舶重心高度及防撞装置等因素对船舶运动状态的影响，同时考虑了水流的耦合效应。曾鹏<sup>[12]</sup>基于相似理论加工了桥墩模型，在不同撞击速度工况下进行水平加载试验，获得了碰撞力、加速度、速度、位移及应变等时程曲线，提炼出若干规律性认识。Guo等<sup>[18]</sup>聚焦于撞击力大小与结构薄弱部位的识别，指出撞击力时程呈现上升段与塑性段两阶段特征，且船舶撞击可能导致支座与梁体滑移，设计中应对落梁风险予以关注。

## （三）数值仿真方法

显式有限元软件LS-DYNA是船撞仿真主流工具，数值方

法历经纯结构 FEM、ALE 流固耦合、FEM-SPH 耦合、DEM-FEM 多介质耦合四代迭代，计算精度逐步提升。汪宏<sup>[19]</sup>利用 LS-DYNA 建立了船舶撞击桥墩的数值模型，该方法为传统的 FEM 方法，忽略水体作用，计算速度快，但严重低估撞击载荷，仅适用于无水干撞对比工况。郑植等<sup>[20]</sup>基于 ALE 流固耦合方法构建了水—船—墩精细化数值模型，其中流体域以 ALE 格式描述，船体与桥墩结构则采用 Lagrange 网格，两类介质之间的耦合通过罚函数算法加以实现。该方法可以解决中等变形流固耦合问题，但缺陷是船体大变形时网格畸变，计算极易中断，内河中小型船舶仿真适用性有限。Luo G 等<sup>[21]</sup>采用 FEM-SPH 耦合方法，流体域以 SPH 无网格粒子描述，锚缆、SFT 和海底电缆采用有限元法（FEM）建模，结果表明，论证了 SFEM-SPH 耦合方法适用于水中碰撞问题，可为船桥碰撞 FEM-SPH 仿真的可行性提供参考，用于规避大变形导致的网格畸变问题。Fan W 等<sup>[22]</sup>采用 DEM-FEM 耦合方法建立了船—桥—土相互作用的耦合模型，将岩土采用离散元 DEM 描述，并提出了再船撞桥的相互作用过程中可分为四个典型阶段：初始接触、近似等速加载、卸载和自由振动。研究表明，该模型在保证结果合理性的同时，显著提高了计算效率。

#### 四、当前研究存在的关键问题

现有研究体系仍存在多方面明显短板，制约桥梁抗撞设计精细化发展：

**（一）多场、多系统耦合仿真研究深度不足**

多数仿真仅简化模拟单船—单墩正撞工况，缺少船—水—土—

桥—车多介质双向耦合分析；水流、潮汐、风浪、船舶撞击多灾害叠加效应研究稀缺，无法满足极端工况下桥梁韧性评估需求；DEM-FEM、FEM-SPH 耦合计算效率偏低，难以支撑全桥多参数批量分析。

**（二）老旧在役桥梁抗撞性能提升理论不完善**

现有规范、研究成果多针对新建桥梁，大量服役二三十年的低标准航道桥存在截面薄弱、桩基老化、无防撞设施等问题，缺少一套完整的承载力评估、补强设计、防撞改造一体化技术体系。

#### 五、结论

船舶撞击桥梁动力学历经验公式、模型试验、单场有限元、多场粒子耦合、智能预测多阶段发展，现已形成风险评估、动力响应计算、主动被动防护完整研究框架。FEM-SPH、DEM-FEM 多介质耦合数值方法大幅提升碰撞仿真精度，概率风险评估体系取代传统确定性设计成为行业主流。

当前研究仍面临多系统耦合分析不足、老旧桥梁改造理论缺失等问题。后续应聚焦多灾害耦合仿真、在役桥梁抗撞补强、特殊桥型设计规范方向持续深化，进一步提升跨航道桥梁抵御船舶撞击的安全韧性，为内河与沿海大规模桥梁工程建设、运维提供完善理论与技术支撑。

#### 参考文献

[1] JTG/T 3360-02-2020, 公路桥梁抗撞设计规范 [S].

[2] 樊伟, 钟正午, 王君杰, 等. 桥梁船舶研究进展综述：事故，分析与防护 [J]. 中国公路学报, 2024, 37(5):38-66.

[3] 刘建成, 顾永宁. 基于整船整桥模型的船桥碰撞数值仿真 [J]. 工程力学, 2003, 20(5):8.

[4] 潘晋, 张小强, 许明财, 等. 船—桥梁浮式钢套箱碰撞数值模拟中的流场处理方法对比研究 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(7):7.

[5] 侯跃鹏. 桥墩在船舶撞击下的动力响应分析及防撞措施研究 [D]. 天津大学 [2026-07-10].

[6] 王君杰, 耿波. 桥梁船舶概率风险评估与措施 [M]. 人民交通出版社, 2010.

[7] 卞海丁, 刘红平, 魏进, 李鹏程. 水平冲击作用下非新建桥梁桩基动力响应及损伤特性 [J]. 中国公路学报, 2024, 37(5):222-333.

[8] DB43/T 3066—2024, 既有桥梁防船撞性能评估与提升设计标准 [S].

[9] AASHTO. Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges[ S]. Washington D.C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1994.

[10] C. U. Kunz. Ship Bridge Collision in River Traffic, Analysis and Design Practice [C]. Ship Collision Analysis, 1998:13-21.

[11] A. C. W. M. Vrouwenvelder. Design for Ship Impact according to Eurocode 1, Part 2.7 [C]. Ship Collision Analysis, 1998:123-131.

[12] 曾鹏. 桥墩碰撞力理论与试验研究 [D]. 广东工业大学, 2013.

[13] 陈国虞, 王礼立. 船撞桥及其防御 [M]. 中国铁道出版社, 2006.

[14] Woisin G. Collision experiments of GKSS [J]. Jahrbuch SYG, 1976.

[15] Verdevelde AW, Wevers L.J. Full scale ship collision tests[C]. Proceedings of Conference on Prediction Methodology of Tanker Structural Failure (ASIS), 1992.

[16] Nakamura T, Kuroiwa T. Experimental study on failure of ship's side structure [C]. Proceedings of MARIENV' 95. Tokyo, Japan, 1995, 1:130-136.

[17] 唐长刚, 王敏, 杨黎明. 船撞桥墩模型试验及分析 [J]. 力学季刊, 2010, (4): 478-484.

[18] Guo J, He JX. Dynamic response analysis of ship-bridge collisions experiment [J]. Journal of Zhejiang University - Science A: Applied Physics & Engineering, 2020, 21(7): 525-534.

[19] 汪宏. 桥梁船舶数值模拟重力与浮力分析 [D]. 重庆交通大学, 2011.

[20] 郑植, 耿波, 董俊宏, 等. 不同碰撞角度下水—船—墩流固耦合数值模拟研究 [J]. 船舶力学, 2023, 27(4):558-572.

[21] Luo G, Pan S, Zhang Y, et al. Response Analysis of Submerged Floating Tunnel Hit by Submarine Based on Smoothed-Particle Hydrodynamics[J]. Shock and Vibration, 2019.

[22] Fan W, Yuan W C. Numerical simulation and analytical modeling of pile-supported structures subjected to ship collisions including soil-structure interaction[J]. Ocean Engineering, 2014, 91(nov.15):11-27.