



Technology and Engineering Practice of **Bridges**
Under Vessel Collisions in Three Gorges Reservoir

三峡库区桥梁船撞技术与工程实践
耿波 王福敏 汪宏 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

Technology and Engineering Practice of Bridges
Under Vessel Collisions in Three Gorges Reservoir

三峡库区桥梁船撞技术 与工程实践

耿 波 王福敏 汪 宏 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书以三峡库区跨航道桥梁为对象,总结了作者近些年来在桥梁船撞风险评估以及防撞设计方面的研究成果以及工程经验,介绍了桥梁船撞风险评估理论和防撞设计方法,并给出了库区典型桥梁的评估和设计案例。主要内容包括:桥梁船撞技术及其评估分析方法、三峡库区跨江桥梁船撞安全等级分类、三峡库区典型桥梁船撞安全评估事例、三峡库区桥梁防撞设计、三峡库区典型桥梁的防撞设施设计案例和三峡库区桥梁船撞设计数据库信息系统。

本书可供桥梁科研和设计人员、桥梁养护管理人员、港航及航道管理人员参考使用,也可作为高等院校桥梁工程专业研究生和高年级本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

三峡库区桥梁船撞技术与工程实践 / 耿波, 王福敏, 汪宏著. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016. 8
ISBN 978-7-114-13276-6

I. ①三… II. ①耿… ②王… ③汪… III. ①三峡水利
工程—桥—船舶碰撞 IV. ①U447

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 192651 号

书 名: 三峡库区桥梁船撞技术与工程实践

著 者: 耿 波 王福敏 汪 宏

责任编辑: 周 宇 韩 帅

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 14.5

字 数: 346 千

版 次: 2016年8月 第1版

印 次: 2016年8月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-13276-6

定 价: 45.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

前 言

Foreword

随着我国公路与铁路的快速发展,近年来我国兴建了大量跨越繁忙航道的桥梁,同时,航运业的发展也使得通航船舶吨位不断加大,通航密度不断提高,加上桥区环境的改变,导致船撞桥事故屡见不鲜。自2007年以来,我国发生了多起由于船舶撞击导致桥梁垮塌的事故。船撞桥事故不但威胁船舶的通行安全,还严重影响桥梁的运营安全,往往带来巨大的生命和财产损失。

三峡库区自2009年开始蓄水以来,库区基本按照145m-155m-175m水位运行,由于库区的蓄水与放水,导致库区一年四季水位变化巨大,最大落差可达40m,这将导致众多桥梁在高水位时更多桥墩入水,船舶撞击点位置抬高,给桥梁防撞带来不利影响。同时,国家也提出了要大力发展长江航运,将库区打造成我国的西部航运中心,航道等级将不断提高,船舶将不断大型化。水位变幅的增大也使得船舶的习惯航迹不断变化,航线管理越来越复杂,大型船舶在避让障碍物时碰撞事故的发生概率也会加大。因此,库区跨江桥梁的防船撞问题日益突出,应未雨绸缪,及早做好桥梁的防撞工作。

本书依托交通运输部西部项目以及结合作者开展的三峡库区相关桥梁的防撞评估与防撞设计工程,系统总结了库区桥梁、航道、船舶的现状与趋势,阐述了防撞评估理论与设计方法,并以实际工程为依托给出了典型案例,供研究与设计参考。

本书共七章,第一章介绍了桥梁船撞技术国内外现状、三峡库区桥梁、船舶、航道现状与趋势,以及库区桥梁面临的船撞问题;第二章介绍了桥梁船撞风险评估的理论方法;第三章对三峡库区跨江桥梁船撞风险等级进行了分类,明确了高、中、低风险的桥梁;第四章给出了四座库区典型桥梁的船撞风险评估案例;第五章介绍了库区桥梁的防撞设计理念、原则与方法;第六章给出了4座库区典型桥梁的防撞设计案例;第七章介绍了作者开发的三峡库区桥梁船撞设计数据库信息系统。

本书是三位作者带领的研究团队多年来工作成果的总结和提升,在编制过程中团队成员也付出了大量的辛勤劳动。本书第一章由耿波执笔完成,第二章由尚军年执笔完成,第三章由李嵩林执笔完成,第四章由魏思斯执笔完成,第五章由袁佩执笔完成,第六章由陈忆前执笔完成,第七章由向苇康执笔完成。书稿统稿由耿波和王福敏共同完成。本书工程案例的校对工作由汪宏完成。同时,在本书编写过程中,作者指导的研究生高珍、潘邑伟、杜欣、史康、罗进、何利、郑植等也做了大量的文字和图片编辑工作。对此,作者对团队成员和研究生们辛勤和出色的工作深表感谢。

特别感谢同济大学桥梁工程系王君杰教授对作者在桥梁船撞研究工作方面的大力支持;

感谢中交公路规划设计院有限公司赵君黎教授级高工长期以来的支持;感谢四川师范大学邵俊虎博士对本书数据库信息系统付出的辛勤劳动。

在本书的编写过程中,得到了招商局重庆交通科研设计院有限公司各位专家、领导的无私帮助和指导,以及重庆市港航管理局、重庆海事局提供的相关资料,作者在此一并表示深切的谢意!

书中有些资料特别是图片来源于网络,由于部分来自网络的数据和图片引用关系复杂,作者没有将所查询的网址一一列出,但对网络信息发布者的工作表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限,书中不足和疏漏之处在所难免,恳请各位读者批评指正!

耿 波

2016年1月 重庆

目 录

Contents

第一章 绪论	1
第一节 桥梁船撞技术的研究现状与趋势	1
第二节 三峡库区航道及船舶构成	9
第三节 三峡库区跨江桥梁概况	15
第四节 三峡库区桥梁面临的船撞问题	19
本章参考文献	21
第二章 桥梁船撞技术及其评估分析方法	23
第一节 船桥撞击概率分析方法	23
第二节 桥梁损伤概率分析方法	35
第三节 桥梁船撞设防标准确定方法	40
第四节 桥梁船撞风险决策准则	42
本章参考文献	50
第三章 三峡库区跨江桥梁船撞安全等级分类	52
第一节 三峡库区跨江桥梁统计与分析	52
第二节 三峡库区跨江桥梁船撞风险源识别	65
第三节 三峡库区桥群船撞安全等级分类	70
本章参考文献	76
第四章 三峡库区典型桥梁船撞安全评估事例	77
第一节 菜园坝长江大桥	77
第二节 忠县长江大桥	96
第三节 黄花园嘉陵江大桥	106
第四节 千厮门嘉陵江大桥	118
本章参考文献	131
第五章 三峡库区桥梁防撞设计	132
第一节 三峡库区桥梁防撞设计基本要求 ^[1]	132
第二节 三峡库区大水位落差下防撞设施的设计理念	136
第三节 防撞设施的有限元数值模拟	141
第四节 桥梁主动防船撞设计	146

第五节 桥梁常用被动防船撞设计·····	149
本章参考文献·····	151
第六章 三峡库区典型桥梁的防撞设施设计案例·····	152
第一节 万州长江大桥·····	152
第二节 菜园坝长江大桥·····	164
第三节 黄花园嘉陵江大桥·····	170
第四节 千厮门嘉陵江大桥·····	174
本章参考文献·····	180
第七章 三峡库区桥梁船撞设计数据库信息系统·····	181
第一节 引言·····	181
第二节 桥梁船撞数据库的基本概念及软硬件配置·····	181
第三节 数据库功能及内容·····	183
第四节 桥梁船撞设计数据库软件介绍·····	196
第五节 工程应用·····	215
本章参考文献·····	225

第一章 绪 论

第一节 桥梁船撞技术的研究现状与趋势

一、国内外典型桥梁船撞事故

据国外统计资料,自20世纪60年代以来,船桥碰撞事故时有发生,平均每年约有一座大型桥梁因船舶撞击而倒毁或遭受严重破坏,事故带来了巨大的经济损失和人员伤亡。

1980年5月9日,一艘19734t的空载散货轮船撞断美国旧阳光大桥南侧一个主墩,三跨桥面结构坠入海中,死亡35人,直接经济损失3000多万美元^[1]。如图1-1所示。

1980年1月,一艘数千吨的荷兰货轮碰撞瑞典的阿尔摩桥钢管拱基座,致使钢管拱倒塌,上部结构坍落在货轮上,死亡10余人^[2]。如图1-2所示。



图 1-1 美国旧阳光大桥船撞事故



图 1-2 瑞典阿尔摩桥船撞事故

1984年6月5日,一艘名为“亚尼山德鲁·依凡诺夫”号客船与俄罗斯伏尔加河铁路桥相撞,使桥梁倒塌。正在通过该桥的一列客车四节车厢落水,死亡人数达240多人,这也是死亡人数最多的一次船撞桥事故^[3]。

1993年,美国亚拉巴马州莫比尔附近横跨贝尤卡诺特(Bayou Carot)的CSX铁路大桥,被一个因大雾而误驶入侧航道的拖驳船队严重撞击,桥梁结构产生巨大位移。几分钟后,一列旅客列车从桥上驶过,大桥即刻坍塌,列车出轨,47人死亡。如图1-3所示^[4]。

2001年9月16日,美国南部德克萨斯州最长的跨海大桥“伊莎贝拉皇后大桥”被一艘拖轮撕开一道长达72m的缺口,两个桥拱垮塌,5辆汽车落水,4人死亡,通信设施遭到严重破坏^[5]。

2002年5月26日,由于船长突发疾病,拖轮失去控制,顶着两艘空驳船撞上阿肯色河公

路桥的一个桥墩,导致该桥坍塌,17 辆汽车坠河,17 人死亡。如图 1-4 所示^[6]。



图 1-3 美国 CSX 铁路大桥船撞事故



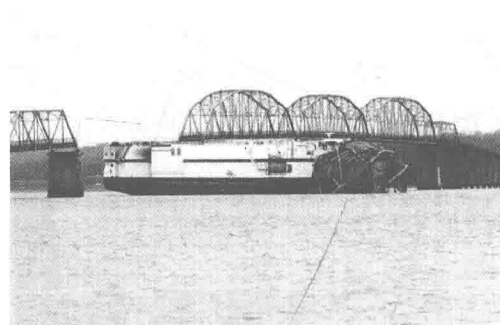
图 1-4 美国阿肯色河船撞事故

2007 年 11 月 7 日,“中远釜山”号货轮在穿过旧金山海湾大桥时撞上桥梁,使得船身被撕开一条 30m 长的裂缝,致使 22 万升重油泄漏进旧金山湾区,影响恶劣^[3]。

2012 年 1 月 27 日,肯塔基州奥罗拉市的艾格勒(Eggner Ferry)大桥被一艘满载航空部件的巨大货轮撞击,致使该桥垮塌。如图 1-5 所示。



a)



b)

图 1-5 美国艾格勒大桥船撞事故

国外因船撞导致桥梁倒塌或严重破坏的事故统计如图 1-6 所示。

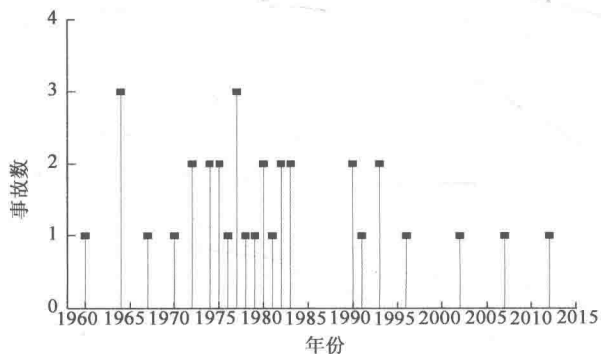


图 1-6 国外因船撞导致桥梁倒塌或严重破坏的事故统计

在我国,船撞桥的事故也频繁发生,武汉长江大桥自 1957 年建成以来已经发生了 70 多起船撞桥事故,黄石长江大桥仅 1993 年、1994 年两年时间就连续发生 19 起船撞桥事故;南京长江大桥自 1968 年建成通车以来,共发生大的碰撞事故 28 起;重庆白沙沱大桥仅 1998 ~

2005年,就发生过9起严重的船撞桥事故,造成了严重的经济损失和恶劣的政治影响。

2007年6月15日晨,一条长70m左右的运沙船满载2000t左右河沙行至九江大桥河面时,因雾天偏离主航道,试图从九江大桥主航道旁一个桥眼穿行,导致运沙船撞到桥墩,九江大桥靠鹤山段200多米的桥面坍塌。事故同时造成4辆汽车落水,一艘中型运沙船沉没,8人死亡。这也是我国有史以来最严重的一次船撞桥事故。如图1-7所示。

2008年3月27日凌晨1时15分,台州籍散货船“勤丰128”行至金塘海域时,竟驶入非通航桥孔,将金塘大桥非通航孔第19号、20号桥墩之间两片长约60m的箱梁(钢筋混凝土结构)撞落,船上20名船员,16人获救,4人失踪,造成了巨大的经济损失。如图1-8所示。



图1-7 九江大桥船撞事故



图1-8 金塘大桥船撞事故

2010年3月25日深夜两点,上海南汇滨海路大治河桥发生一起事故。一艘载满生活垃圾的环卫船撞断了滨海大治河桥的桥墩,致使大桥发生严重坍塌。20m左右桥面都压在了环卫船的船头,船头顷刻进水,随即沉入河底。如图1-9所示。

2010年12月25日下午,江苏盐城市盐都区秦南镇境内的一座长约60m的跨河大桥,遭到船队撞击后轰然垮塌,垮落的桥面砸向正在桥下通过的船舶。如图1-10所示。



图1-9 滨海大治河桥船撞事故



图1-10 盐城跨河大桥船撞事故

2012年5月13日,湖南岳阳一艘挖沙船只撞击平江大桥桥墩,致使三孔石拱桥全部垮塌。如图1-11所示。

2013年7月8日,由于嘉陵江洪峰通过重庆段,嘉陵江水位快速上涨到169.5m,水流速度约6m/s,“江渝777”散货船锚索断裂,顺水漂流,靠船尾的船体侧面撞到嘉陵江牛角沱大桥2号主墩,造成2号主墩局部混凝土破损。

2014年3月10日凌晨,上海松蒸公路斜塘大桥被大型船只撞击,桥墩处开裂,桥面出现倾斜。如图1-12所示。

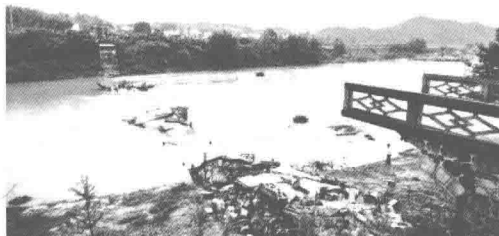


图1-11 平江大桥船撞事故

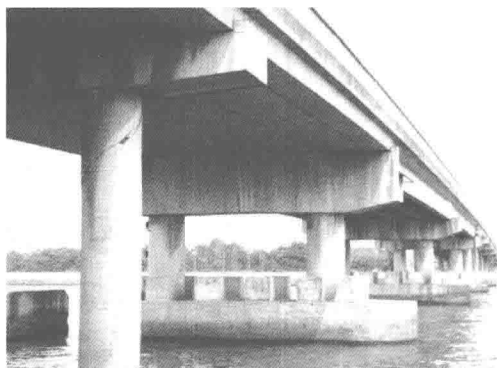


图1-12 斜塘大桥船撞事故

我国船撞桥年平均事故统计如图1-13所示。

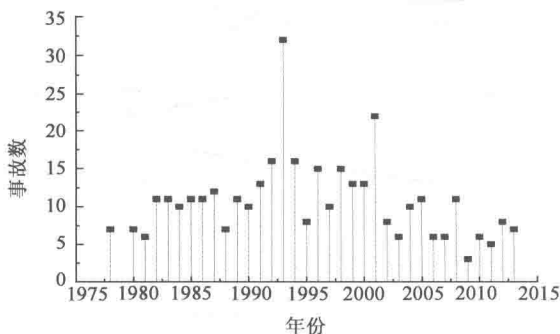


图1-13 我国船撞桥年平均事故统计

二、国外桥梁船撞技术研究现状

国际上关于船桥碰撞问题的研究从20世纪60年代末就开始了,但最初进展缓慢,直到1978年,美国发生了多起船舶撞毁桥梁的恶性事故之后,美国政府和马里兰大学土木工程系签订了一项研究合同,专门研究桥梁的防撞保护系统,这是世界上首次对此课题进行的系统研究^[7]。且从20世纪70年代末,尤其是80年代后期开始,一些技术咨询公司和研究机构专门针对某些跨海大桥进行了船桥碰撞问题的专项研究,并取得了一些重要研究成果,如开普公司(Cap-Consult)、茂盛公司(Maunsell&Artners)、科威公司(Cowi-Consult)、摩基斯基公司(Modjeski&Masters)等先后对丹麦大带桥、澳大利亚塔斯曼桥、美国阳光大桥、直布罗陀海峡大桥和路易斯安那州水道桥墩进行船桥碰撞专题研究^[7-9]。

1980年发生的阳光大桥被撞塌事件被视为桥梁船撞领域一个重要的转折性事件,阳光大桥撞塌事件唤醒了各界对横跨通航水域桥梁安全的再次重视,并由此次惨剧引发了一个由美国11个州和美国联邦公路局共同投资开展的研究项目。IABSE(International Association of Bridge and Structural Engineering)于1983年在哥本哈根召开了一次国际会议讨论此问题^[10],这是关于这个题目的第一次研讨会,研讨会的一部分为船舶碰撞桥梁和近海建筑物的事故报

告,会上提出建议,建立一个船舶碰撞桥梁事故的国际数据库,主要内容是自1960年以来世界范围发生的船撞桥事故。美国Moffat and Nichlo工程师事务所的诺特(Knott. M. A)等人参加了研究工作,并陆续有研究成果发表。这项研究工作最显著的成果就是在此基础上,于1991年形成了美国第一部《公路桥梁船撞设计指南》^[5]。这是第一部受到普遍认可并具有指导意义的桥梁船撞设计指南。此指南的核心条款分别于1991年和1994年被写入了美国的《公路桥梁设计规范》^[5,6](1991&1994),成为桥梁工程师进行桥梁船撞设计的实用性规范。之后,该指南于2009年进行了进一步修订。

同样是在1991年,IABSE在列宁格勒召开了一次年会^[10]。在会上,IABSE接受了由拉森(O. D. Larsen)主笔撰写的“Ship Collision with Bridge”,即《船舶碰撞 桥梁-船舶交通与桥梁结构间的相互影响综述与指南》,文中对船撞桥研究的已有成果进行了系统的归纳和总结。该文作为IABSE的文件于1993年正式发表,系统地论述了在桥梁初步规划及具体设计时船撞冲击风险及防撞设计问题,从而进一步推动了对船撞桥问题的研究工作^[11]。

1995年,国际航海协会常务会议PIANC成立了一个第19工作小组^[12],专门从事船桥碰撞事故的研究工作,这也是航运界第一次组织国际性的船桥碰撞问题专题研究。成员来自9个国家:比利时、法国、德国、日本、西班牙、瑞典、英国、美国和荷兰,该小组经过5年的工作,建立了包括151起船撞桥事故的国际数据库,并对相关问题进行了研究。

1996年,美国铁路工程师协会(AREA)出版了《铁路桥梁防撞保护系统设计规范》。1997年,欧洲统一规范(Eurocode)第一卷(Eurocode 1)第2.7分册^[2]开始试用,试用期为3年,此分册规定了冲击与爆炸事故设计荷载的确定方法。之后,欧洲一些国家也相继对桥梁的船撞问题制定了一些标准或规范。

1998年,国际桥梁界在丹麦再次召开会议,全面讨论了船撞桥问题,指出它是个多学科的问题,涉及水利水文学、桥梁工程、碰撞力学(冲击动力学)、船舶结构与材料以及驾驶、导航、通信等多个方面,并发表了论文20余篇,有力地推动了船桥碰撞问题的研究^[13]。

2001年9月16日,美国德克萨斯州的跨海大桥Queen Isabella Causeway被一艘拖轮撞击倒塌,2002年5月26日,美国俄克拉荷马州东部马斯科吉县附近的阿肯色河公路桥被拖轮撞击倒塌,美国德克萨斯大学和佛罗里达大学开展了比较系统的桥梁船撞计算方法和碰撞试验研究工作,研究成果从2004年起逐步发表。这期间桥梁船撞安全问题得到了国际桥梁工程界的充分重视,研究文献大量涌现。从1999年至今,发表相关研究文献78篇。

从目前国际上的应用情况来看,美国AASHTO的《公路桥梁船撞设计指南》(2009版)所提供的桥梁船撞风险评估方法最为实用,该方法是通过将桥梁的失效概率与可接受风险水平的比较来合理确定桥梁的设防船撞力,有效指导了桥梁基于风险-效益理念的船撞设计。但该方法是基于美国内河航道事故的统计资料提出的经验系数方法,对于我国内河航道并不完全适用,因此,发展基于我国航道特点的桥梁船撞风险评估方法,用以指导我国跨航道桥梁的船撞设计就具有重要的工程应用价值。

三、国内桥梁船撞技术研究现状

在我国,船桥碰撞问题的研究主要是从20世纪80年代末期开始的,部分专家学者结合湛

江海湾大桥、平潭海峡大桥、青岛海湾大桥、南京长江四桥^[14-16]等进行了桥梁设防船撞力的专题研究工作,结合湖北黄石长江大桥、上海奉浦大桥、广州洛溪大桥和解放桥、香港青马大桥和汀九桥、澳门澳凼大桥、汕头海湾跨海大桥、珠海伶仃洋大桥、江苏苏通长江大桥等项目进了桥梁船撞设施的试验研究和实践^[17-21]。结合崇明越江通道工程、南京长江四桥、哈尔滨松花江斜拉桥等进行了桥梁船撞的风险评估工作^[22-24]。此外,桥墩水域流场对船舶航行安全的影响也进行了研究,海事和航运部门的专家对局部水域的船撞桥事故及影响因素也进行了相关的研究工作^[25,26]。

虽然进行了多项专题研究,但我国桥梁船撞设计规范的发展却远远没有跟上桥梁设计的要求。我国交通运输部于2015年颁布实施了《公路桥涵设计通用规范》(JTJ D60—2015)^[27],铁道部于2005年颁布实行了《铁路桥涵设计基本规范》(TB 10002·1—2005)^[28],但这两部规范对桥梁船撞问题的说明都相对较为简单。《公路桥涵设计通用规范》(JTJ D60—2015)将需要考虑船舶与桥梁相互作用的河流分为内河和通行海轮的河流(包括海湾)两类,分别根据内河航道等级(四~七级)和通航海轮情况给出了桥梁的设计代表船舶和设计船撞力;《铁路桥涵设计基本规范》(TB 10002·1—2005)仅给出了桥梁墩台承受船舶或排筏撞击力的计算公式。从设计实践看,这两部规范都难以满足桥梁建设中复杂的通航安全需求。

此后,为了应对我国大量跨江跨海大桥船撞设计的需求,我国交通运输部分别于2006年、2007年编列了西部交通建设科技项目“三峡库区船桥碰撞规律、防撞措施设计与预警系统研究(项目编号:200631800047)”和“西部地区内河桥梁船撞标准与设计指南研究(项目编号:2007ZB06)”。项目承担单位包括招商局重庆交通科研设计院有限公司、同济大学、上海船舶运输科学研究所、中交公路规划设计院有限公司等国内多家知名的高校和科研院所。目前该两项项目俱已结题,并取得了丰硕的研究成果。2006年,西部项目主要在桥梁船撞风险评估、桥梁船撞力静力简化计算方法、大水位落差下桥墩浮式防撞装置、桥梁船撞在线监控预警等方面取得了多项创新性成果。在此基础上,由招商局重庆交通科研设计院和同济大学联合编制了重庆市地方标准《重庆市三峡库区跨江桥梁船撞设计指南》(DBJ/T 50-106—2010),该指南是我国现阶段第一本有关桥梁船撞的设计指南,目前该指南已在重庆市颁布实施,对库区跨江大桥的船撞设计提供了有力的技术支持。2007年西部项目主要在桥梁船撞危险性分析方法、基于性能的桥梁船撞设计方法、桥梁船撞动力分析方法、桥区在线监控预警系统等方面取得了诸多成果,将桥梁船撞设计方法从传统的静力设计方法推向了动力设计方法。可以说,两项西部项目的研究成果对我国的船撞研究水平起到了极大的推动作用,研究成果也得到了大规模推广,成果已成功应用于三峡库区菜园坝长江大桥、万州长江大桥等20多座跨江大桥的防撞评估和设计中,以及东部包括苏通长江大桥、舟山连岛工程在内的十多座跨江跨海大桥的防撞设计中,取得了良好的社会效益和经济效益。同时,研究成果也为2008年交通运输部行业标准《公路桥梁抗撞防撞设计规范》的制定奠定了坚实的基础。

为了更好地促进桥梁船撞领域的学术交流和推广,2011年5月26、27日,由交通运输部西部交通建设科技项目管理中心和重庆市交通委员会主办,招商局重庆交通科研设计院有限公司、同济大学等单位承办的“2011年全国桥梁船撞学术研讨会”在重庆成功举办。这是第一次全国性的桥梁船撞学术研讨会,来自全国15个省40多家单位的百余名代表参加了此次研讨会,并形成了《桥梁船撞研究与工程应用》^[29]一书,极大地促进了该领域的技术进步。

同时,为了更好地推广科学防撞的理念,由宁波大学、上海海洋钢结构研究所、招商局重庆交通科研设计院有限公司等单位共同主办的“国际船桥相撞及其防护学术研讨会”于2014年3月在宁波顺利召开,并形成了《国际船桥相撞及其防护学术研讨会论文集》^[30],为我国各类防撞技术的进步提供了良好的交流平台。

此外,在防撞装置的研发方面,我国诸多高校及科研机构也做了大量的尝试,如用于桥墩防撞的钢套箱、复合材料套箱、橡胶钢丝圈、柔性护舷等,具体工程分别如图1-14~图1-16所示。



图 1-14 厦漳跨海大桥防撞钢套箱



图 1-15 黄花园嘉陵江大桥防撞复合材料套箱



a)



b)

图 1-16 湛江海湾大桥防撞橡胶钢丝圈

应该说,通过近十年的研究工作,我国的桥梁防撞技术已取得了一定的研究成果,研究的热点主要围绕桥梁防撞安全评估、船撞设防标准确定、基于性能的桥梁静动力设计方法、桥梁主动防撞预警技术、桥梁被动防撞系统等内容进行,研究成果为我国跨江跨海工程的兴建提供了有力的技术支撑。

四、桥梁船撞技术研究趋势

从国内外桥梁船撞标准规范的编制情况看,主要有:美国 AASHTO 的《公路桥梁船撞设计指南》(2009 版)、美国铁路工程师协会的《铁路桥梁防撞保护系统设计规范》、欧洲统一规范 (Eurocode) 第 1.2.7 分册、我国交通运输部的《公路桥涵设计通用规范》(JTJ D60—2015) 和《铁路桥涵设计基本规范》(TB 10002.1—2005)、重庆市地方标准《重庆市三峡库区跨江桥梁船撞设计指南》(DBJ/T 50-106—2010)。

从设计思想上看,美国桥梁船撞设计指南全面采用了基于风险的设计思想;欧洲船撞设计规范虽然考虑到了严重的桥梁船撞是风险事件,在编写规范时也考虑到了失效频率的问题,但

这种考虑是隐含的,因而是非常粗糙的。美国的船撞桥设计指南明确规定了设计的目标倒塌频率(对于典型性桥梁取 10^{-3} ,对于关键性桥梁取 10^{-4}),欧洲规范未对一个事故作用规定任何年频率,但参照了 ISO 的 DP10252(由于人类活动导致的事故作用)中的相应条款,目标倒塌频率约为 10^{-4} 。欧美的规范都对桥梁结构的重要性进行了分类,如美国的设计指南将桥梁结构区分为典型桥梁和关键性桥梁,同时对桥梁各部件的重要性进行了区分,倘若不引起桥梁结构的整体失效,允许由事故作用引起的局部失效。对于局部失效和整体失效的这一区分是强制性的,以便区分常规设计和风险事件作用设计的本质不同。

在我国,2015年颁布的《公路桥涵设计通用规范》(JTJ D60—2015)将船舶分为轮船和内河驳船两类,分别根据航道等级列表给出了设计船舶撞击力。2005年颁布的《铁路桥涵设计基本规范》(TB 10002·1—2005)中,仅给出了设计船舶撞击力的计算公式。2010年重庆市建委颁布《重庆市三峡库区跨江桥梁船撞设计指南》(DBJ/T 50-106—2010),该指南是我国现阶段第一本有关桥梁船撞的设计指南,指南的颁布为工程设计中桥梁防撞击提供参考。指南中对桥梁的设防水准、碰撞概率、倒塌概率、撞击速度、轮船对桥墩的撞击力、防撞措施等给予了较为详细的介绍。该指南是国内一部较为完善的桥梁船撞设计指南,具有极大的工程意义。表 1-1 给出了该设计指南与美、欧规范的概要比较。

中、美、欧规范船撞桥条款的简要比较

表 1-1

项目	重庆市桥梁船撞设计指南	欧洲统一规范	美国桥梁设计规范
设计思想	基础等主要构件不失效	基础等主要构件不失效	基础等主要构件不失效
设计方法	方法 I:半确定性的,适用水深较浅的航道,且在這些航道上的船舶吨位不大,航道中的船舶差別较小,基础资料较为缺乏; 方法 II:重现期方法,适用各种情况下的桥梁; 方法 III:目标极限状态概率法,适用对既有桥梁进行船撞加固,宽阔水域中很多桥梁构件存在被船舶撞击的风险; 方法 IV:费用-效率分析方法	确定性的,但隐含风险(目标倒塌频率)约为 10^{-4}	方法 I:半确定性的,适用浅水桥梁; 方法 II:指定目标频率法,年目标倒塌频率取 0.001(典型性桥梁)、0.000 1(关键桥梁),适用少量桥墩可能遭受船舶撞击的一般水深桥梁; 方法 III:投资效益分析,适用深水处有桥墩和很多桥墩可能遭受船舶撞击的桥梁,适用于因船舶撞击而需要加固的桥梁
适用范围	三峡库区跨江桥梁	内河桥梁和跨海桥梁	内河桥梁
船舶撞击撞力	轮船: $F = \alpha_k \cdot \eta \cdot \xi \cdot (DWT)^{\beta_k} \cdot v$ 驳船: $FB = f(LB)$	按式 $v \sqrt{km}$ 计算	驳船: $P = f(\alpha_B)$ 轮船: $P = 0.122 \sqrt{DWT} \cdot v$ 塔楼撞击力: $P_{up} = \beta \cdot P$
力学计算方法	静力方法	静力方法	静力方法
设防船舶撞击力	方法 I:根据半确定性方法设计代表船舶,按式 $f = \alpha_k \cdot \eta \cdot \xi \cdot (DWT)^{\beta_k} \cdot v$ 计算船舶撞击力; 方法 II:基于桥梁船撞概率,获得桥梁的年碰撞概率; 方法 III:计算桥梁的船撞概率,然后进行桥梁结构的失效概率计算; 方法 IV:投资效益分析,无须确定设防撞力	驳船:无 轮船:表格形式给出 塔楼撞击力:无	方法 I:按式 $P = f(\alpha_B)$ 计算; 方法 II:概率分析得到; 方法 III:投资效益分析,无须确定设防船舶撞力

续上表

项目	重庆市桥梁船撞设计指南	欧洲统一规范	美国桥梁设计规范
总体评价	指南引用风险分析方法,在对桥梁重要性分类的前提下,根据船撞重现期设定桥梁船撞设防水准。同时进一步提出4种分析方法来设定船撞力与代表船舶,对设计过程中所需计算的船撞力、碰撞概率、倒塌概率均给予了计算方法。总体上来说该指南适用性比较强,但是计算模型采用静力方法,不能考虑撞击的动力效应	引入了风险分析方法,适合处理桥梁船撞这类发生概率小且后果严重的桥梁外部作用。关于船撞力的确定方法过于简化。计算模型采用静力方法,不能考虑撞击的动力效应	全面引入风险分析方法,适合处理桥梁船撞这类发生概率小且后果严重的桥梁外部作用。方法系统,但一些具体规定存在不足,需要进一步的研究和完善。方法Ⅲ实际可操作性不强。计算模型采用静力方法,不能考虑撞击的动力效应

概括地说,我国重庆市桥梁船撞设计指南与美国、欧洲规范主要思路一致,均是将船撞事情处理为风险事件,根据可接受风险的水平来指导桥梁的船撞设计。该指南根据中国特殊的地理情况而编制,比前期颁布的《公路桥涵设计通用规范》(JTJ D60—2015)和《铁路桥涵设计基本规范》(TB 10002·1—2005)有了一个很大的提升。针对前期规范中只是将船舶分为轮船和内河驳船两类,然后分别根据航道等级列表给出了设计船舶撞击力的缺陷。指南中给出了详细的船撞力计算公式,并介绍了轮船对桥梁上部结构、驳船对桥梁下部结构的撞击力。同时,根据我国的基本国情将桥梁分成了A、B和C类,根据船撞重现期来分级设定桥梁船撞的设防水准,并且还考虑了结构安全措施相对费用的多少来划分安全极限状态年目标失效概率。但是,该指南仍然存在不足,需要进一步的完善。例如在桥梁船撞力计算的基本方法还是采用等效静力方法,此方法尽管计算较方便,但是却与实际受力不符。在实际的船撞过程中,船撞力是一个动荷载,其值随着时间的变化而变化。较为准确的计算方法是借鉴地震作用中动力时程的方法。所以,该指南中涉及的方法与思想总体上达到了国际领先的水平,但是还需要进一步的完善。

从设计实践看,《重庆市三峡库区跨江桥梁船撞设计指南》(DBJ/T 50-106—2010)中提供的方法明确,应用简单,给三峡库区新桥建设与旧桥中有关防撞方向的设计、研究提供了指导。尽管我国现阶段还未颁布桥梁船撞设计的行业标准,但是该指南为未来行业标准的编制提供了借鉴。

新一代桥梁结构设计规范的总体发展方向是“基于性能的设计”。“基于性能的设计”意味着考虑寿命期内的风险、投资的效益、桥梁拥有者的决策等很多新理念的明确建立。《重庆市三峡库区跨江桥梁船撞设计指南》(DBJ/T 50-106—2010)比较系统地实现了“基于性能”的设计思想,虽然在某些方面还显得过于简化,但是代表了桥梁船撞设计思想,即桥梁船撞设计标准和设计规范(或指南)应建立在概率分析、投资效益、风险决策等概念的基础之上。

第二节 三峡库区航道及船舶构成

一、三峡库区航道现状

作为三峡库区上游的西部重镇,重庆现有内河航道总里程约有4 222km,且干支连通,多

属山区河流,平面形态复杂、水位变化大,航道急、弯、浅、险并存,航行条件差。

新中国成立以来,三峡库区的航道建设取得了显著成就。上游航道,共治理险滩 150 余处,清障 110 多处,初步改变了上游(特别是重庆至宜昌段)航道。重庆段航道维护尺度现达到了深度 2.7~2.9m、航宽 50~60m。近 30 年来,长江航道规划设计研究院等单位完成规划、设计和研究项目 400 余项,但总体科研规模较小,河工试验室仅 4 个,水平较低,不能适应航道发展和建设的需要,航道测量及信息传输手段落后,无法实现信息共享,应急处理能力较低,信息化建设尚处起步阶段。

随着三峡蓄水的提升,库区航道条件将得到极大改善。2006 年 9 月,蓄水已达至 156m。2009 年蓄水至 175m 后,整个三峡库区坝址三斗坪至江津红花碛将形成约 700km 的库区航道,其中坝址至黄草峡 528km 为常年库区航道。表 1-2、表 1-3 为库区蓄水前后航道尺度、水流条件比较一览表^[23]。

三峡工程重庆库区成库前及 175m 蓄水后航道尺度一览表

表 1-2

时期	河段	坝址—忠县	忠县—朝天门	朝天门—九龙坡	九龙坡以上
成库前	通航船队	1+6×1 000t	1+3×1 000t	1+2×1 000t	1+1×1 000t
	航深(m)	2.9	2.9	2.7	2.7~2.5
	单行航宽(m)	100	60	50	50
	弯曲半径(m)	1 000	750	750	750
175m 蓄水后	通航船队	6 000~10 000t	6 000~10 000t	6 000~10 000t	1+1×1 000t
	航深(m)	3.5	3.5	3.5	2.9
	单行航宽(m)	100	100	100	60~80
	弯曲半径(m)	1 000	1 000	1 000	750

三峡工程重庆库区成库前及 175m 蓄水后通航水流标准一览表

表 1-3

时 期	最大局部比降(%)	相应最大水流速度(m/s)
成库前	1.3	4.4
	2.6	3.9
	3.5	3.5
	4.4	3.0
175m 蓄水后	0.1	2.5
	0.2	2.3
	0.3	2.1

二、三峡库区通航船舶现状及发展趋势

据统计,截至 2005 年仅重庆市共有各类运输船舶 4 052 艘,船型涉及客船、货船、集装箱船、滚装船、化学品船、油船以及驳船等。三峡工程 175m 蓄水位前的船舶很大程度上受江川航道滩多、流急的制约,总的来说船型比较复杂,标准化程度不高。主要货船船型以 1 000t 级组成的 1+2×1 000t 船舶和 2 000t 级船舶为主。现阶段航行于整个库区的代表船型见表 1-4~