

陈国虞 王礼立 杨黎明 陈明栋 著

桥梁防撞理论和防撞装置设计



人民交通出版社
China Communications Press

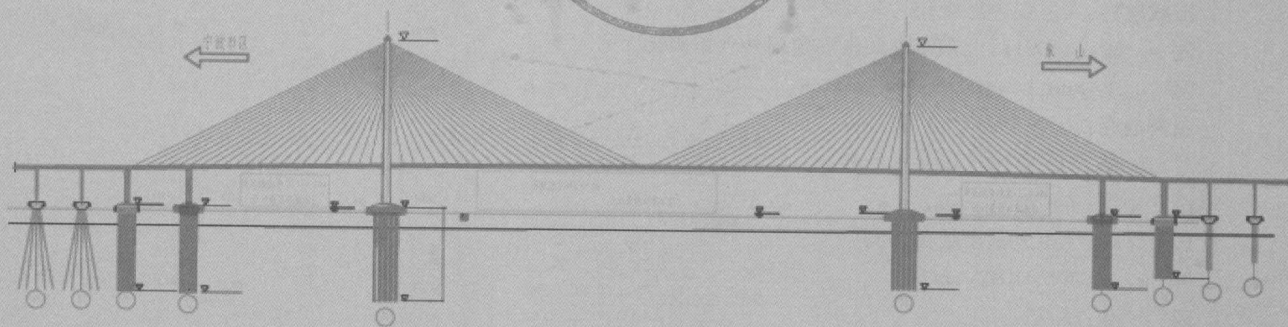
014012855

U443.8
01

The Protection Theory for Ship-Bridge Collisions
and the Design of Crashworthy Devices

桥梁防撞理论和防撞装置设计

CHEN Guoyu WANG Lili YANG Liming CHEN Mingdong
陈国虞 王礼立 杨黎明 陈明栋 著



北航

C1699664



人民交通出版社
China Communications Press

U443.8
01

内 容 提 要

该书分析了世界 40 年来“船撞桥”事故的概况,综述了世界各国工程力学学者和工程界,利用多个有关学科积累的知识和方法,研究这个边界学科的成就。叙述了我国 20 年前提出的防撞设施追求的目标,并指出我国现在推广的桥梁柔性防船撞装置,可以达到保护桥的同时也保护船和环境——实现了“三不坏”的目标。书中记录了世界首次用实船撞向柔性防撞装置保护下的桥墩,船头被拨开,船回到航线上去的全过程。书中还列举了多个柔性防撞装置设计的实例,并介绍以通用程序进行数值计算的方法。书内还附有中文的桥梁防船撞文献 200 则,供学者、工程师和师生们研究、设计参考之用。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁防撞理论和防撞装置设计 / 陈国虞等著. —北京:人民交通出版社, 2013. 9
ISBN 978-7-114-10900-3

I. ①桥… II. ①陈… III. ①桥梁工程—防撞 IV.
①U443. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 222538 号

书 名:桥梁防撞理论和防撞装置设计

著 作 者:陈国虞 王礼立 杨黎明 陈明栋

责任编辑:刘永芬

出版发行:人民交通出版社

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:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:中国电影出版社印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:15.75

字 数:400 千

版 次:2013 年 11 月 第 1 版

印 次:2013 年 11 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-10900-3

定 价:55.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

序

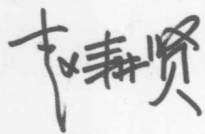
当陈国虞先生拿着《桥梁防撞理论和防撞装置设计》一摞文稿要我为之作序时,多少有些茫然。作为从事船舶与海洋工程载体设计 50 年的设计师,了解多少有关桥梁防撞问题?能写点什么?我信手翻动着这些文稿,一件件中外船舶撞击桥墩的典型事例浮现在眼前,一项项防御船舶撞击桥墩的特种设施呈现在面前。一时间引起了学习真知的兴趣,看到了作者在船舶撞击桥墩能量传递特点的基础上,对世界上船舶撞击桥墩的作用力进行了分析与比对,进一步推导了涉及桥墩防撞装置刚度在内的撞击力公式;看到了作者提出的“三不坏”柔性耗能防撞装置的物理意义,论述了其原理和设计方法;看到了作者所推荐装置的数值分析与实验验证,并在国内多座跨江和跨海桥梁得到了成功应用。掩卷沉思:懵懂船舶撞击桥墩知识的我,轻轻地打开了这一知识的窗户。

船舶撞击桥墩,古今有之,于今尤烈。随着海运、江河航运业的发展,以及跨江和跨海桥梁建设的发展,桥墩的防船舶撞击问题突显,涉及船舶运输、桥梁工程、船舶结构、材料力学和冲击动力学的交界学科,越来越受到工程界和航运业的关注和重视。

20 世纪 90 年代,在上海造船工程学会一次船体结构钢材疲劳断裂研讨会的偶然机会与陈国虞先生相识。2000 年在中国钢结构协会海洋钢结构分协会的年会上讨论《桥墩的船撞力计算及柔性防撞装置设计指南》时,认识王礼立教授。陈国虞先生是冶金材料学专家,40 年长期从事海洋结构物载体材料研究,在 20 世纪 90 年代后,更是集中精力研究船舶撞击桥梁问题,取得了不少成果,并有所创造发明,发表了多篇论文,著有《船撞桥及其防御》一书。王礼立教授是我国冲击动力学的学科带头人之一,著有《应力波基础》(第二版)等专著。

《桥梁防撞理论和防撞装置设计》一书,对桥梁设计、船舶设计、航运部门的技术人员有重要的参考价值。该书的出版,不仅是作者多年来辛勤劳动的系统总结,而且能使读者从中感悟到:成功解决边界学科的工程问题,并有所创造发明,不但要具备扎实的理论基础,还要有理论探索的勇气,坚持实验验证。真诚祝贺该书出版,为造船和桥梁学科技术的发展,添砖加瓦。并希望将有更多的著作不断地涌现在大家面前。

中国船舶设计大师



2013 年 8 月

前言

——防御船撞桥的几项进展

本书首先分析了我国桥梁建设及相关的船撞桥所面临的具体情况。现在建造的桥梁，从江河上中游发展到下游，由内河走向港湾，由大陆通向离岸的岛屿，并且跨过海峡连接陆块，甚至建设洲际大桥。跨越航线的桥梁愈来愈多，通过桥下的船舶愈来愈大，航速也愈来愈快。所以我国防御船舶撞击桥梁的研究，一开始就不局限于内河。显然，国外基于内河航运得来的结论，对我们有局限性，不一定适用。例如：河渠化的航道不同位置的流速分布，宽度在船长3倍以内的航速假定，从而得出的撞击速度沿航道横向分布规律；内河船与海船撞桥力估算；驳船对通航净宽的要求；驳船对墩的撞击力等均有相当的差别。本书根据调查测定，作了具体分析，取代了曾经借用的外国假定。

第二，经查阅历年桥梁防撞研究的记录，发现船撞桥的样本搜集比较少（与相邻的学科比较，以及使用中由于样本少产生的误差的分析等方面而言），因此使用“撞塌年概率”作为建与不建防撞装置的决定性指标，就不合适。本书提出了新的原则：“万一撞上也能保护桥梁、船舶和环境的安全”——“应保尽保”的原则。船撞桥是小概率事件，但一旦撞上了，不论于桥于船于环境，还是于物于人于社会，其损失和影响都较大，因此采用这个原则进行设计，不是从区分船桥责任的利害角度出发，而是着眼于尽量避免物毁人亡、环境恶化等灾难性后果，“对国家负责，对社会负责，对人民负责”，符合“以人为本”的指导思想。

第三，总结了搜集到的中外代表性的16种船撞力半经验公式。经过研究，指出它们从根本原理来说都是同源的等效准静态分析。鉴于船桥相撞是一个在短历时中发生的动力学过程，撞击力和船桥间的能量交换实际上是基于应力波的传播而随时间变化的，船桥相撞及其防御的科学分析应该建立在冲击动力学的原理上。在计算机和数值模拟技术已经高度发展的今天，桥墩及其抗撞能力的设计，已完全可以采用按照冲击动力学原理建模的较精确的动态数值计算方法。传统的各类半经验公式也许仅用在开始设计时对船撞力进行初步的粗略估算，从而供桥梁设计师对跨航线的桥梁决定桥型、桥跨和桥墩分布的时候参考使用，最终还应该按照冲击动力学的动态数值计算为准。本书有一章专门讨论有关的冲击动力学原理。

第四，采用数值计算法进行分析设计时，不论采取何种商用程序（尚无专有程序），重要的是要把握两个基本点：一是必须采用能反映惯性效应（应力波效应）的动态计算程序；二是建模中的材料特性必须采用能反映应变率效应的材料

动态本构关系和动态失效准则。当桥梁采用柔性缓冲防护装置时,问题的难点还在于如何建立能够刻画柔性耗能防护装置特性的子程序,从而能正确计算出船撞桥墩过程中各个瞬时的力、变形和能量转换。本书有一章专门讨论这方面的问题。

第五,一切重大工程应用,除了需要理论分析指导和数值模拟分析外,实验研究与验证也至关重要。然而,与船桥相撞的数值模拟研究相比,国内外有关的实验研究则较为缺乏。值得高兴的是,我们已基于冲击动力学原理,实施专门设计的实船撞墩试验,以特别研制的动态传感器系统,进行撞击力和变形的动态测试,并检验软件程序的计算结果(特别检验了总撞击力)。本书反映了这方面的最新进展。

第六,在选择设计防撞装置时,要避免两种极端倾向:第一种是“可以不要防撞装置”,这种倾向可以追溯到美国指南:先将桥分为“一般”和“重要”两类,然后用一系列的指南给出的“系数设计法”公式,评估“年撞塌概率”。当普通桥梁“年撞塌概率” $\leq 1/1000$ 和重要桥梁年撞塌概率 $\leq 1/10000$ 时,均可不作防撞装置。其实,船撞桥都是小概率事件。问题在于所定的撞塌概率衡准值尚缺乏理论和实践检验依据。另外,在美国指南中还用到一个撞塌成本,引入一个比值:“撞塌损失/防撞成本”。但没有考虑死伤一个人算多少钱,如果人值钱了,这个比值就大了。极言之,如果人的价值是不能用金钱衡量的,这个比值就是无穷大。工程师无所适从。

第二种倾向是不愿利用桥墩和桥梁其他构件的水平抗力,要求桥墩防船撞仅用“御敌于国门之外”的方法。换言之,只要间接式防撞装置,不要直接式防撞装置。如设计中违反规范关于计入偶然作用的规定,在桥墩设计中不计入水平船撞力,不设计足够的水平抗力,造成桥墩防撞性能先天不足;导致建设间接式防撞装置影响自然环境较大或投资很大等缺点。

第七,防御船撞桥的设计指南在中国是给谁用的?要回答这个问题,首先要弄清楚哪些人在研究设计桥梁防船撞装置。

现实往往和人们想的不一样,粗略一看,防御船撞桥应该是桥梁设计的一部分,从20世纪80年代开始,我国最先引进桥梁防船撞方面文章的是桥梁专家。但是,研究防御船撞桥的人除了桥梁设计者之外,还有一部分力学、船舶和水运专业的研究者。而研究船撞桥文献内容中大量引用船的资料。1994年,交通部科技司将黄石长江公路桥防撞装置任务下达给部属上海船舶运输研究所,并有武汉的水运和水利专业人员的课题平行研究。不久在桥梁界出现了一个意见:“研究船撞桥的人以船舶和水运工作者比较合适”,于是近30年来,在上海、重庆、黑龙江和武汉出现了一批船舶和水运专业的研究者,在宁波和重庆出现了研究力学和材料的研究者参加进来。

现在形成的认识是:研究防御船撞桥必须结合船舶和桥梁两个方面的专业

知识，研究的方法是工程力学的三种方法即理论分析、数值计算和实验。因此研究船撞桥的人和设计桥梁的人可以具备不同专业背景。根据防撞研究者研究的结果编制的设计指南，应该是提供给设计桥梁的人使用的，而设计桥梁和设计桥梁防撞设施的人，不可能从事很多防撞理论研究和进行防撞现场实验等工作，因此指南需要简单明了、可供桥梁设计者使用。

在本书中，上述几点新论是骨架，专业人士只要阅读这些内容就可以了。但是为了系统化，为了让更多的人认识“船撞桥”，就写进很多配套的内容。所以对于青年学生和非本专业读者，是一本比较系统的全面的参考书。

本书船撞桥的冲击动力学一章由王礼立教授执笔，防御船撞桥的数值计算一章由杨黎明教授执笔，建桥通航条件与桥梁防撞一章由陈明栋教授等执笔，桥梁防撞塌的鲁棒问题由汤国栋教授提出，半经验公式一章由陈国虞研究员和王礼立教授共同执笔，其余各章由陈国虞研究员执笔。部分插图由张澄高工绘制、周勤康同志整理，某些重要的外国原版资料由刘燕同志协助搜集，还有倪步友同志、黄世连同志、巴添同志协助编写。全书由陈国虞研究员初校，陆宗林教授审校，并得到张炳炎院士、王景全院士、吴有生院士推荐。

陈国虞

目 录

第1章 船桥相撞事故的沿革和防御船桥相撞的理念	(1)
1.1 船舶撞击毁桥事故概述	(1)
1.2 我国近期船撞桥事故	(2)
1.3 我国近年发展的桥梁防船撞理念	(4)
1.4 桥梁与船舶相撞后防止倒塌的设计——鲁棒性设计	(9)
参考文献	(10)
第2章 桥区通航条件与桥梁防船撞	(12)
2.1 桥区河段通航条件及通航安全	(12)
2.2 桥梁选址与通航条件	(16)
2.3 桥跨布置原则	(21)
2.4 桥孔通航净空尺度	(25)
2.5 船舶适航速度与船撞速度	(34)
2.6 桥区船舶航行数值模拟	(38)
2.7 实船试验	(47)
参考文献	(52)
第3章 桥梁防船撞设施的推荐介绍	(54)
3.1 间接构造	(55)
3.2 直接构造	(69)
3.3 桥梁非结构物防撞(非接触防撞)	(82)
参考文献	(84)
第4章 防御船撞桥墩的冲击动力学分析	(87)
4.1 船撞桥墩本质上属于冲击动力学问题	(88)
4.2 船桥撞击力分析的应力波基础知识	(97)
4.3 应力波传播过程中的能量吸收与转换	(110)
4.4 新型柔性耗能防护装置及其工程应用	(114)
参考文献	(124)
第5章 船撞桥墩的实验研究	(126)
5.1 国外进行过的“船撞船”实验简述	(126)
5.2 国外进行过的“船撞闸门”实验简述	(129)
5.3 国外进行过的“船撞桥”实验简述	(130)
5.4 国内进行过的船撞桥实验简述	(132)
5.5 中外各国几个重要的船撞桥实验中值得学习的地方	(142)
5.6 我国进行船撞桥实船试验观测和可能实现的目标	(143)
参考文献	(143)

第6章 桥墩船撞力(正撞、侧撞)及其半经验公式研究	(145)
6.1 研究方法 with 判定标准	(145)
6.2 文献记载的桥墩船撞力的半经验公式	(146)
6.3 防撞装置降低船撞力的研究	(153)
6.4 半经验公式是同源的——半经验公式分析研究的总结	(155)
6.5 侧撞力	(156)
6.6 船撞力半经验公式的应用	(161)
参考文献	(162)
第7章 船撞桥墩及防御的数值计算	(163)
7.1 结构动态响应的数值计算简介	(165)
7.2 桥墩柔性防船撞装置的数值计算分析	(167)
7.3 实船撞击柔性防撞装置实验及数值计算	(181)
参考文献	(185)
第8章 防御船撞桥的柔性防撞装置的研究试验和工程实例	(187)
8.1 缘起	(187)
8.2 柔性防撞装置的试验研究	(188)
8.3 柔性防撞装置的工程设计实例	(195)
8.4 柔性防撞装置的技术特点	(206)
8.5 小结	(209)
参考文献	(210)
附录1 桥墩的船撞力计算及柔性防撞装置设计指南	(211)
附录2 “船撞桥”文献目录	(226)

第1章 船桥相撞事故的沿革和防御船桥相撞的理念

Chapter 1 Evolution and Prevention Aspects on Accidents of Ship-bridge Collision

摘要 2007年广东九江塌桥之后,交通部要求加强船舶防泄漏和对船员的培训等工作,有关部门检修了船上的导航设备,减少了船桥相撞的部分起因。深入的研究指出,桥梁的桥位、桥型等因素对船桥相撞有很大影响。本章提出了防御船桥相撞事故的5点理念。即:一跨过江中无墩;保护桥的同时也保护船和环境;规划设计早期考虑船桥相撞;全桥防撞和应保均保的理念;桥梁被撞的鲁棒设计。

关键词 船桥相撞事故 一跨过江 既保护桥也保护船 全桥防撞 应保均保

Abstract: After the collapse of Guangdong Jiujiang Bridge in 2007, Ministry of Transport demands shipman preventing leakiness and overhauling the navigation equipment to decrease the cause of ship-bridge collision. According to intensive study, the location of the bridge, the type of the bridge, etc., greatly affect ship-bridge collision. This chapter mentions 5 aspects for avoiding accidents of ship-bridge collision. They are: one span over river without piers in water area, protecting both ships and circumstance at the same time, considering ship-bridge collision at early time of bridge design, considering collision on all the areas of a bridge and protecting all the cases as needed and carrying out robustness design.

Key words: accidents of ship-bridge collision, one span over river, protecting both bridges and ships, preventing collision on all the areas of a bridge, protect all the cases as needed

1.1 船舶撞击毁桥事故概述

通航河道上的桥梁,占桥梁总数的1/10左右。此类桥梁,存在受船舶撞击而垮塌的危险。虽然,航船撞塌的桥梁,在垮塌桥梁总数中的比例不大,但由于跨越航道的桥梁规模(跨径、桥长和桥宽)一般较大,桥梁所处位置多为重要的交通要隘,以致此类桥梁垮塌的后果较为严重:车毁人亡,交通骤断,媒体聚焦,社会震动。

在船舶撞击桥梁的研究中,凡损失超过100万美元者,常界定为重大事件,将着重其撞毁的肇因和防护技术的研究。

船舶撞毁桥梁的事件，始载于1837年；近200年来的重大船舶撞毁桥梁的事件，则首次发生于1960年。我国汤国栋^[1]和杨渡军^[2]的文献，编译了1960—1983年27座大桥被撞塌的实例；1993年欧洲学者拉尔森(Larsen)主持编写的“综述与指南”^[3]，附录了1960—1990年共29起严重的撞桥事故。

2006年出版的《船撞桥及其防御》一书^[4]详细地列举了1952年以来我国的船撞桥事件：计有公铁两用桥5座、公路桥10座和铁路桥20座。在这35座桥梁中，多为撞击多次而未垮的例子；且上游木排撞桥的事故较多。

之后，又陆续发生了一些船撞桥梁的实例^[5]。研究者多次到现场调查、研究和分析，对于积累资料、深化认识，撞击设防，具有重要意义。

国外学者的早期文献指出，船撞桥梁的原因，40%~60%系人为的失误。在我国，广东九江公路桥被撞垮塌后，交通部发文^[6]，要求加强对水运人员的培训和完善船上的导航设备，意在避免人为的过失。关于船舰撞击桥梁的研究及防护技术，成为桥梁建设者和管理者关注的重点之一。

本书作者认为除了上述近因、诱因之外，根本原因是桥梁设计问题。下面通过近期的船舶撞毁桥梁的分析便可以知道。不管是什么原因，不管是新桥、老桥，当万一撞上时，都应该减轻损失或避免损失。

2006年我国自行研究和应用的柔性防撞装置，用于湛江海湾大桥项目中。这是一种在防撞理念上全新的装置，它不仅保护桥而且同时保护船，因而也保护了环境。

1.2 我国近期船撞桥事故

表1-1列出2007年到2011年5年间国内20余起较大的船撞桥事故，稍小的事故(没有人员伤亡，经过处理后可缓解的)都未列入表内。从这20余起事故中可以看出：被撞塌的桥梁中，一些是撞上拱脚或梁的下弦；一些是撞到双柱墩或排架墩的一根柱子。还有的是撞到新设置障碍物(如施工期间船员未注意到的围堰或栈桥)，或原航线限高、限宽、限航等情况下发生的撞击事故。

2007—2011 年较大的船舶与桥梁相撞事故
2007—2012 years, the bigger accidents of ship-bridge collision
表 1-1
Table 1-1

序号	名 称	日 期	地 点	船型、船速、天气、水流、与桥型等摘要	主要原因及后果
1	海门港引桥	200703	江苏海门	载有280t磷肥的货船在大风中断缆，撞上引桥，不到1min船沉	船沉，死1人
2	川沙路桥	200704	上海川沙	河宽15m，10艘200吨级空载运石船直拖，撞上不足30cm桥墩，桥塌，1978建	水平抗力不足，桥塌
3	佛湛线九江大桥	20070615	广东	载重1500t的运沙船撞独塔斜拉桥的水中引桥第一墩，塌下50m×4跨	墩无防撞，9人失踪
4	如东蔡渡大桥	20070713	江苏	3孔混凝土拱桥，长66m，宽6m，被1+13空载驳船队撞塌，压毁一驳船	桥塌，压毁1驳船
5	大洋桥	20070830	江苏昆山	200t级散装水泥船，会船避让撞墩，桥面塌下压船	桥面压下，死2船员
6	广珠轻轨特大桥	20071211	广东江门	机动货船撞垮西江特大桥施工平台，约10m ² 平台塌下	施工平台、船均受损

续上表

序号	名称	日期	地点	船型、船速、天气、水流、与桥型等摘要	主要原因及后果
7	金塘大桥	20080327	浙江舟山	台州籍散货船勤丰 128 号驶入原航道, 净高不足, 撞到未紧固的 1600t 重的预制梁板, 梁板将驾驶室压入下层货仓内	走原航线, 压死 4 人
8	望江门大桥	20081013	浙江临海	长 30m、宽 8m 的货船涨潮时撞桥, 驾驶室被货物压塌, 2 人被压	通航净高不足, 压伤 2 人
9	城西大桥	200901	江苏盐城	17 艘几百吨级驳船队, 尾船撞上了危桥拱肋, (1976 年建) 主跨 36m	桥塌
10	兴化老阁大桥	20090918	江苏泰州	临城镇老阁乡, 桥长百米、宽 8m, 1 + 20 直拖, 拖头让船, 撞双柱墩, 桥塌压船	桥塌, 1 人坠下
11	金沙镇金余大桥	20091113	江苏南通	约建于 1975, 已定于 2009 年 11 月 23 日拆除, 船撞 4 柱排架墩一柱, 桥塌, 水中捞梁、柱	停航半月, 阻船数百
12	大治河随塘桥	20100325	上海浦东	双车道, 约 25m 跨 7 孔, 5 孔在水中, 4 圆柱排架墩, 载 360t 压缩垃圾集装箱环卫船撞墩, 塌 3 跨, 桥压船头, 5 名船员落水	断航, 死 2 人
13	长山河联合桥	20100427	浙江嘉兴	长 56m, 宽约 3m, 混凝土桁架拱, 约 10min 通过一船, 撞断北侧下弦, 1h 后桥塌	桥倒塌前拦船, 无死伤
14	嘉绍大桥	20100716	浙江钱塘江	运输船撞施工平台钢管桩, 原航道中出现新的碍航物	新碍航物 7 人失踪
15	刘砦木里大桥	20100717	武汉家集镇	长 10m, 15t, 吃水 1m 挖沙船 3 艘, 桥设计为断航漫水桥, 桥面距河床 4.5m, 撞桥时水漫桥面 1m, 船骑在桥上	桥两处塌毁成 3 截
16	松花江浮桥	20100820	哈尔滨	黑鱼捕 23208 号夫妇 2 人载 6 客过江, 撞钢质浮桥, 翻船全落水, 失踪 2 男 2 女	死 4 人
17	万江大桥	20101010	广东东莞东江	长 100m 载货量 2000 吨级, 空载货船尾楼撞梁下弦, 船卡住	驾驶船员 1 死 1 伤
18	长江大桥(一桥)	20110606	湖北武汉	1 + 2 空油驳船队中长江 62036 号撞 7 号墩, 船头凹陷、升高约 1m, 墩表面擦伤	检测后通车, 无漏油
19	天生港华沙大桥	20110929	江苏南通通州区	横跨长江北叉天生港水道, 桥长 1500m, 桥跨 50m、25m 两种, 双柱墩, 涨潮水急	连撞翻 5 艘百吨级货船
20	油墩港桥	20111226	上海松江	桥长约百米, 宽 5m, 双柱墩, 通行拖拉机, 桥塌	断航
21	平江大桥	20120513	湖南	120m 长, 3 连孔空腹石拱桥, 1998 年建, 12 日大水, 沙船铁架撞桥并阻水, 13 日 8:50 塌	2 人死 4 人失踪

注: 较大的船舶撞桥事故, 是指桥毁、船沉、死人或有重大交通影响者。

学者们经深入研究发现^[7,8]，船舶撞桥的根本原因是通航河流中碍航桥梁的出现，如桥墩及承台占据或缩窄了航道，桥梁的结构压缩了通航净空尺度，均会诱发船撞事故的发生。船舶沿习惯航线及航道的中心航行，遇到偶发情况时，如发现顶上的梁限制了净高，或因意外情况偏离航线航行至桥墩附近等，往往会因避让不及而撞桥。目前已建成的桥梁中，许多上部建筑均没有紧固，桥梁没有水平抗力，只要船舶对其施加很小的碰撞力，桥梁上层建筑就会移位塌下。而船舶对桥墩的撞击，往往是在桥墩占据或部分侵入航道情况下，由于气候变化导致视线不良，洪水导致航道水流条件变化，船长疲劳驾驶，船舶出现机械故障，以及上游的停靠船舶发生走锚等不利因素，造成船舶失控而产生的。对于已经设有防撞装置的桥梁，若防撞装置达不到防撞设计要求，也会导致桥塌人亡^[8]。

因此，了解船舶撞桥的近因和诱因之后，更应该分析事故发生的根本原因，在桥梁规划和设计时，就积极做好船桥碰撞的防御工作，不但要将事故发生概率降至最低，而且在万一撞上之后将损失减到最小。

1.3 我国近年发展的桥梁防撞理念

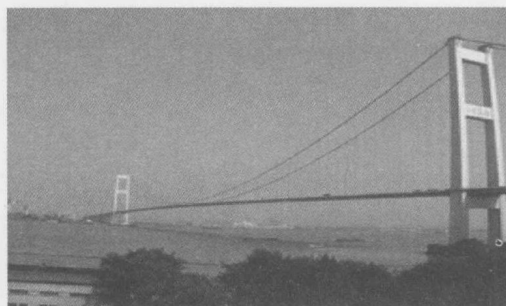
1.3.1 选择一跨过江，江中无墩的桥型，比较彻底地防止船桥相撞

桥梁防撞属于一门新兴交界性小学科，1998 年曾有过一篇著名的论文：《几座当代大桥的防撞设计理念》^[9]，是科威(Cowi)公司的 A. G. 菲赖德逊(Frandsen)在该公司发起的桥船相撞会议上提出的。这篇文章叙述了 22 座当代大桥的防撞设计，该作者想让读者从中弄清桥梁防撞设计的发展动向，从而自己体会出桥梁防撞设计理念。文中列出了当时我国刚建成的江阴、青马、汀九三桥，其中两座是一跨过江，汀九则是因为蓝巴勒海峡航道中间有礁石，桥梁采用两跨过海峡，航线按来往方向分为两条，船舶各靠右侧航行。这三座桥的防撞建造实际，反映了我国先进的防撞设计理念。三峡水利枢纽以下有 7 座跨长江航道的桥梁，也采用了这一理念，选用了大跨度的悬索桥和斜拉桥桥型(表 1-2)。

一些跨长江桥梁采用一跨过江，江中无墩桥型举例
Some bridges of one span over Yangtze River
表 1-2
Table 1-2

序 号	桥 名	桥 型	跨 度(m)	通 车 年 份
1	西陵长江公路大桥	悬索	900	1996
2	宜昌长江公路大桥	悬索	960	2001
3	阳逻长江公路大桥	悬索	1280	2007
4	鄂东长江大桥	斜拉	926	2010
5	南京长江第四大桥	悬索	1418	2013
6	润扬长江大桥	悬索	406	2005
7	江阴长江大桥	悬索	1385	1999

这种选择不但达到保护桥梁的目的，而且保护了航船，从而也保护了水体不被污染，是一种很好的方式。图 1-1 所示为一跨过江的桥型实例。



a) 悬索桥—跨过江，江中无墩——江阴长江大桥
Suspension bridge—Jiangyin Yangtze bridge



b) 斜拉桥—跨过江，江中无墩——鄂东长江大桥
Stayed-cable bridge—Erdong Yangtze bridge

图 1-1 一跨过江桥型，江中无墩，较为彻底地避免了船桥碰撞

Fig. 1-1 The type of one span over the river, without piers in the water area

1.3.2 水中墩选用能够既保护桥又保护船(或部分地保护船)的防撞装置，在保护桥梁安全的同时保护船舶不受过大损坏，还可避免船舶泄漏对水体的污染

这个理念在美国旧金山奥克兰湾大桥于2007年11月7日与釜山号集装箱船相撞后，被更多的人接受。美国旧金山奥克兰湾大桥分为东西两桥，“西桥主跨为两座相连的悬索桥，各3孔，主孔为704.9m”^[10]。两座悬索桥相连处建有共用的大锚台，锚台两边各有两个支撑悬索的墩塔。由于5个墩塔均立于航道中(最强的合用锚台置于深水航道中)，没有采用既保护桥又保护船的防撞装置，反而在混凝土承台周围布满了型钢，刮破了釜山号船的舷侧，致使燃油泄漏，大批海鸟和海生物资源被毁损，花了2亿美元去清理油污。

我国的大江大河主要有长江、珠江、黑龙江和黄河，在这些河流的上、中游如果发生泄漏事故，对下游水域及生态环境的损害将是巨大的。表1-3列出了几个有防护装置的桥梁。

选用既保护桥又保护船的防撞装置的桥梁实例

表 1-3

Bridges protecting both the bridge and the ship

Table 1-3

序号	桥 名	保护桥、保护船	原 理	建 成 年 份
1	湛江海湾大桥	既保护桥，也保护船	柔性防撞、拨开船头	2007
2	浙江象山港大桥	既保护桥，也保护船	柔性防撞、拨开船头	2012
3	黄石长江公路桥	保护桥、部分保护船	弹塑性吸能防撞，减轻船头损伤	1997

表1-3中前面两种采用了新型的柔性防撞装置(图1-2)，该防撞装置具有以下特点：

(1)可在撞击瞬间改变撞击力的方向和船体位移方向，同时利用水流的作用，将船舶推离桥墩，沿防撞装置外侧滑走。从而带走船舶大部分动能，大大降低了“船-桥”撞击过程中的能量交换。

(2)柔性防撞装置的外钢围与其包络的防撞圈共同起作用，使得船撞桥产生的冲击波不直接传到桥墩，而是经过柔性防撞圈阻尼后传到桥墩。柔性耗能部件起到延长撞击过程时间，阻隔强冲击波，减小撞击力，延长撞击过程中低载荷段的时间，消耗部分撞击能等多种效果。

(3)柔性及缓冲使船撞力大幅衰减，在有效保护桥梁安全的同时又能保护船舶(或大大降低船舶损坏程度)。

(4) 与弹塑性压毁耗能方案比较, 用钢量大幅减少, 可降低防撞设施造价及维护费用。

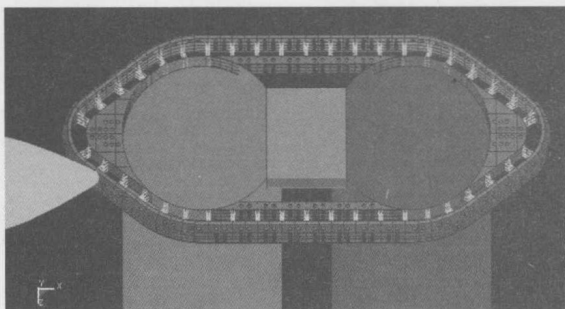


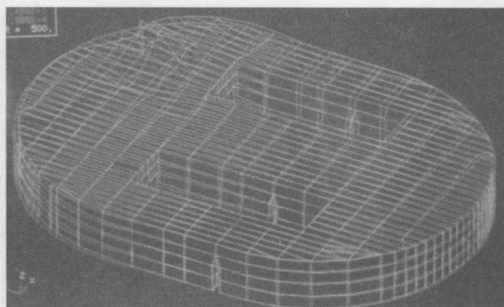
图 1-2 新型的柔性防撞装置

Fig. 1-2 A new type of flexibility anti-collision equipment

图 1-3 所示的防撞装置实现了既保护桥又保护船从而也保护水体理念。黄石长江公路桥(双薄壁墩)的防撞装置是 1994 年设计建造的浮式钢格子弹塑性耗能防撞装置, 由于该结构设计得比较大, 其柔度与船舶结构相当, 且在钢结构的后面配备橡胶 A 型碰垫, 因此可在船桥撞击时与船体共同分担一半左右的变形能(其设计原理与日本同期建造的名古屋中央大桥的钢板格子防撞装置相同, 日本的该装置也分担一半左右的变形能), 减轻船体一半左右的破坏, 可部分地起到保护船和水体的作用。



a) 广东湛江海湾大桥主塔柔性防船撞装置
The soft anti-collision equipment at the main tower of Zhanjiang Bay Bridge, Guangdong province



b) 湖北黄石公路桥弹塑性吸能钢格子结构
防船撞装置(部分保护船)
The anti-collision equipment with steel cases structure, as elastics-plastics deformation absorb energy (partly protects the ship) at Huangshi Yangtze bridge, Hubei province

图 1-3 实现了既保护桥又保护船从而也保护水体理念的防撞装置

Fig. 1-3 The anti-collision equipments, protecting both the bridge and the ship consequently protecting the water area

在既保护桥也保护船的理念指导下诞生的柔性防撞装置, 实现了上述对船桥的共同保护。同时, 为了精确地计算船撞力, 科技人员在理论、数值模拟以及实船撞击试验三者结合的基础上, 发展了船桥相撞的冲击动力学计算。

1.3.3 全桥防撞理念

主桥、辅桥、引桥及其两端的连接线是一条连续的交通线, 只要其中任何一点破坏, 交通便中断了。多数船撞实例表明, 偏航船舶所撞的往往是较弱的辅助墩、边墩或水中的引桥墩。而这些桥墩被撞塌后, 结果同样是车毁、人亡、船沉和交通中断。修复时也费工费时。例如广东九江大桥的修复, 就用了整整两年时间。所以, 桥梁防船撞需要实行全桥(主桥和

引桥)防撞设计理念。

我国近年对海湾大桥实行全桥防撞设计的例子不少,如表 1-4 所示:

我国近年全桥防船撞设计的例子
Examples of protecting the collision on all location of the bridge,
in the nearly several years at China

表 1-4

Table 1-4

序号	桥 名	摘 要	建 成 年 份
1	浙江杭州湾跨海大桥	主航道侧面用浮筒链条拦船装置(图 1-4)	2009 ^[11]
2	浙江象山港大桥	主墩及两侧共 10 个墩用柔性防撞装置(图 1-5)	2012
3	福建平潭大桥	来往航线右侧(岸侧)均用绳网拦船装置(图 1-6)	2013 ^[12]



图 1-4 浙江杭州湾跨海大桥浮筒链条拦船装置

Fig. 1-4 The chain hold back system, at the over sea bridge of Hangzhou bay, Zhejiang province



图 1-5 浙江象山港大桥主桥及两侧共 10 个桥墩柔性防船撞装置

Fig. 1-5 Construction with soft anti-collision equipments at the 2 towers and at the 8 piers besides the 2 main towers (total 10 units) at Xiangshan harbor bridge. Zhejiang province

1.3.4 “桥梁规划设计阶段考虑船桥碰撞”的主动防船撞理念

凡是跨越航道的桥梁,在其规划设计阶段均应该考虑船桥相撞的问题,这本来是工程技术人员实事求是态度的必然结果。

建设桥梁比建设渡船和码头贵,只有在繁忙的渡口才改为建设桥梁。未建桥梁之前渡口多已存在,渡船航线与长途航船的航线相交,渡船与长程航船会互相避让。建桥后桥墩不会动,不能互相避让,才产生船桥相撞事故。

深入的调查和分析指出,水中墩塔设置不合理,是船桥相撞的根本原因,因此在桥梁规划设计阶段,考虑桥型和墩塔设置的开始就应该考虑船桥相互关系的影响。

早期及时考虑船桥相互关系的理念,已经带来有效的成果。安庆铁路桥在我国交通(航

政)主管部门及时关心下,在铁路桥梁设计部门大力支持下,对桥型及时进行修改,增加了船舶航行的通道,将水面尽量多地留给航船,实践了主动防船撞先进理念。如图 1-7 所示。

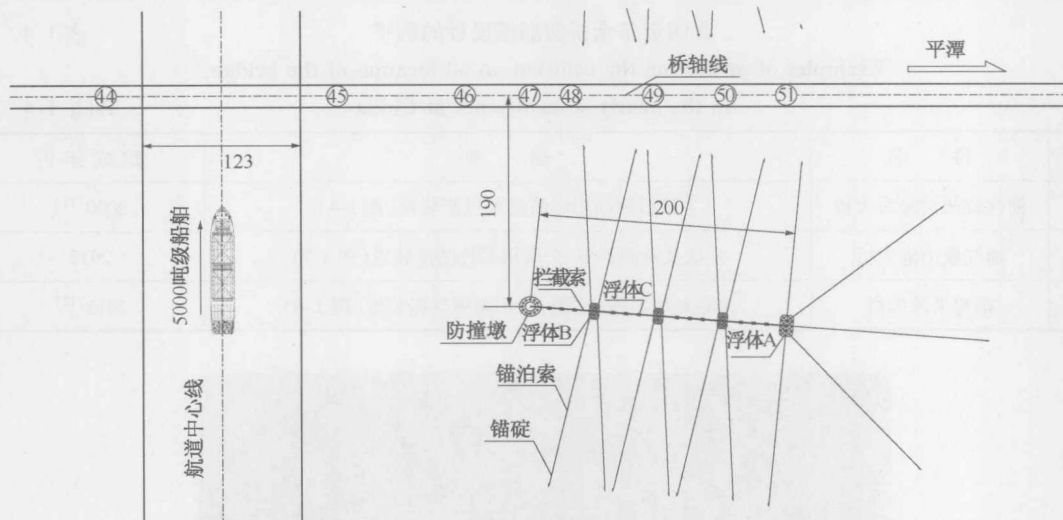
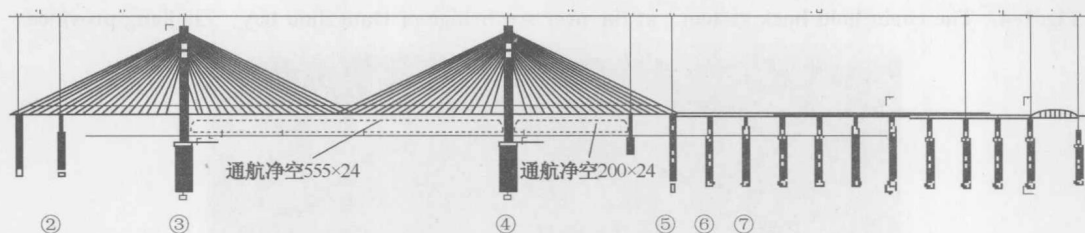


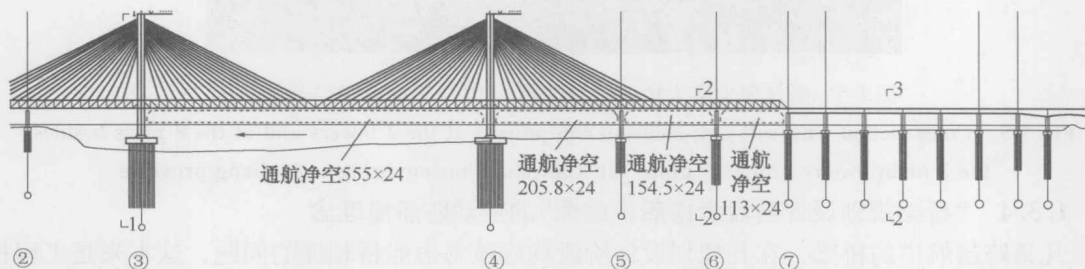
图 1-6 福建平潭大桥航线靠岸侧非通航孔绳网拦船装置

Fig. 1-6 The rope net holding back system, at the right sides of the route (near the shore), the Pingtan channel bridge, Fujian province



a) 修改前的桥墩布置和跨距(两个通航孔)

Before modification, the pier layout and the distance between the piers (2 sail spans)



b) 修改后的桥墩布置和跨距(四个通航孔)

After modification, the pier layout and the distance between the piers (4 sail spans)

图 1-7 安庆铁路桥及时修改桥墩设置和间距

Fig. 1-7 Anqing railway bridge modification of the pier layout and the distance between the piers

1.3.5 “应保均保”理念

这是一个与“由概率估算决定是否设置防撞装置”相平行的概念。1994 年美国公路桥梁