

Qiaoliang de Fangzhuang
Baohu Xitong Jiqi Sheji

桥梁的防撞保护系统及其设计

杨渡军 编译

人民交通出版社

内 容 提 要

本书是一部论述桥墩防撞保护系统的专著，包含许多最新研究成果及大量的应用实例。全书共分八章：概论，桥梁防撞保护系统，缓冲设施，碰撞概率，船舶撞击桥墩的实验及碰撞理论，缓冲设施计算示例，防护系统支承结构的计算机设计，碰撞可能性分析及防护系统设计实例。

本书可供从事桥梁研究、设计、施工人员及有关人员使用。

桥梁的防撞保护系统及其设计

杨渡军 编译

插图设计：赵跃华 正文设计：周 元

人民交通出版社出版发行

(北京和平里东街10号)

各地新华书店经销

人民交通出版社印刷厂印刷

开本：850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张：8.25 字数：215千

1990年7月 第1版

1990年7月 第1版 第1次印刷

印数：0001—3260册 定价：9.10元

ISBN7-114-00850-3

U·00524

编译者序

随着交通运输事业的不断发展，船舶、汽车和火车交通量增大，因受船舶撞击而诱发的桥梁垮塌事件正在日益增多。资料统计表明，最近十余年来，世界上发生的船舶撞墩毁桥的重大事故就已超过100余起。这类事件往往造成桥塌、船沉、人亡、和 水陆运输干线长期中断的严重后果。重建桥梁和疏通航道的费用十分惊人。因此，预防桥梁免遭船舶撞击这一问题已成为具有广泛意义的国际性课题，日益引起有关各国政府、学者、工程界的关注。

美国的河流众多，建有许多跨越通航水域的大型桥梁，发生了许多船舶撞墩毁桥的恶性事件。鉴于这种情况，美国政府和海岸警卫队认为，必须有一部概括已有技术成果的参考书籍，向设计者推荐有关设计标准。因此，美国政府于1978年同马里兰大学土木工程系签订了一项研究合同（合同代号CG—71955—A），专门研究桥梁及桥墩的防撞保护系统。这是世界上首次对此课题的系统研究。研究工作由汉斯（C.P.Heins）和德鲁彻（K.N.Derucher）教授主持，并于1979年出版了《桥梁与桥墩的防护系统》一书（Bridge and Pier Protective Systems and Devices）。该书是目前世界上唯一的一部论述桥墩防撞保护系统的专著。

1979年以后，又有许多国家（地区）开展了预防船舶撞击桥梁的研究工作。国际桥梁及结构工程协会（IABSE）主席图尔利曼（Turliman）教授指出：“由于船舶撞击桥梁时造成的严重后果，应大力推进预防这类事故的研究工作……我深信，这个问题会得到全世界的关注。”这项研究工作广泛开展的标志，是1983年国际桥梁及结构工程协会在丹麦首都哥本哈根召开的专题讨论会，与会者有土木、建筑、航海和造船等方面的权威人士，

目 录

第一章 概论	1
第一节 船舶撞墩毁桥事件.....	1
第二节 防撞保护系统的作用.....	10
第三节 设置防护系统的重要桥梁.....	13
第二章 桥梁防撞保护系统	17
第一节 附着式防护系统.....	17
第二节 重力摆式防护系统.....	20
第三节 薄壳筑沙围堰防护系统.....	24
第四节 胶囊沙袋防护系统.....	34
第五节 人工岛防护系统.....	43
第六节 集群式护墩桩.....	46
第七节 漂浮网状防护系统.....	48
第八节 非结构物防护系统.....	57
第三章 缓冲设施	59
第一节 概述.....	59
第二节 漂浮箱缓冲设施.....	60
第三节 单桩或群桩缓冲设施.....	61
第四节 收缩式缓冲设施.....	67
第五节 橡胶缓冲垫层.....	68
第六节 液压及弹簧缓冲垫层.....	78
第四章 碰撞概率	79
第一节 几何碰撞概率原理.....	79
第二节 船舶碰撞桥墩的概率.....	83
第五章 船舶撞击桥墩的实验及碰撞理论	91
第一节 米诺斯盖理论.....	91

第二节 沃辛碰撞理论..... 98

第三节 汉斯—德鲁彻理论.....112

第四节 能量交换原理.....122

第五节 AREA 推荐设计方法.....125

第六章 缓冲设施计算示例.....129

第一节 缓冲框架计算.....129

第二节 橡胶缓冲垫层的计算.....132

第三节 雷金缓冲设施的计算.....134

第四节 液压或填充泡沫的缓冲装置计算.....136

第五节 诺德柔性缓冲装置的计算.....139

第六节 重力摆缓冲设施的计算.....141

第七节 弹簧缓冲垫层的计算.....141

第七章 防护系统支承结构的计算机设计.....143

第一节 设计原理.....143

第二节 撞击荷载横向分布系数.....146

第三节 计算机分析的特点.....154

第四节 单排桩框架的计算.....163

第五节 船舶泊靠过程分析.....169

第六节 护墩桩的公式解和计算机解.....174

第八章 碰撞可能性分析及防护系统设计实例.....203

第一节 托宾纪念桥.....203

第二节 伊利诺伊河桥.....217

第三节 大贝尔特桥.....232

第四节 萨拉特—布拉索拉戈桥.....237

参考文献索引.....253

第一章 概 论

第一节 船舶撞墩毁桥事件

1. 桥梁垮塌原因分类

桥梁垮塌的原因很多，其结果是灾难性的。史密斯 (D.W. Smith) 曾对1847~1975年世界各地发生的143例桥梁垮塌事件作过分类，按不同的诱发原因归纳列表（见表1-1）。另外，对105例吊桥和177例钢桥的诱发垮塌原因亦进行了分析，其结果示于图1-1及图1-2中。

1847~1975年桥梁垮塌原因分类

表1-1

垮 塌 原 因	数 量 (座)	百 分 比 (%)	备 注
洪水及基础移动	70	49.0	表面滑动2座，泥石流1座，冲刷66座，基础移动1座
材料不良及制作缺陷	22	15.4	板或锚杆脆性破坏的占19座
超载及突发事件	14	9.8	船舶撞击10座
临时结构或 架设程序不恰当	12	8.4	
地震荷载	11	7.7	
设计不恰当	5	3.5	
风载	4	2.8	
疲劳破坏	4	2.8	铸铁3座，因材料腐蚀而加速破坏1座
材料腐蚀	1	0.6	
桥梁事故总数	143	100	

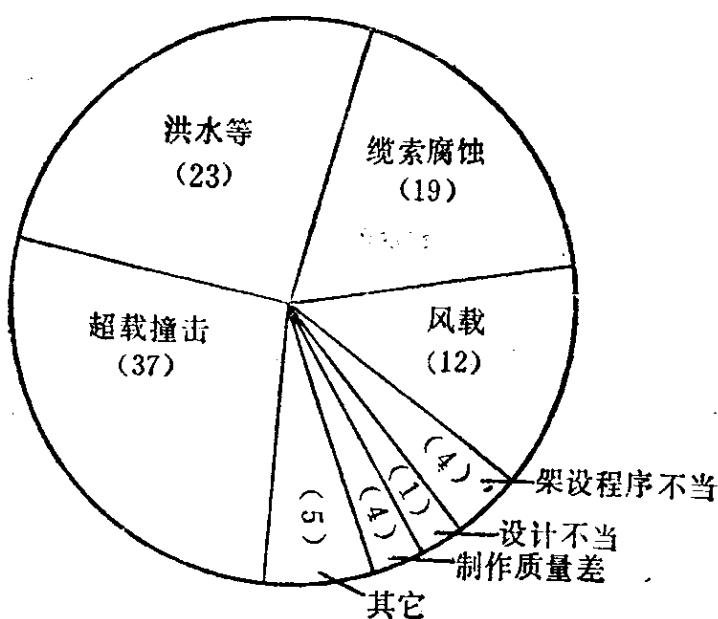


图1-1 105例吊桥垮塌的诱因

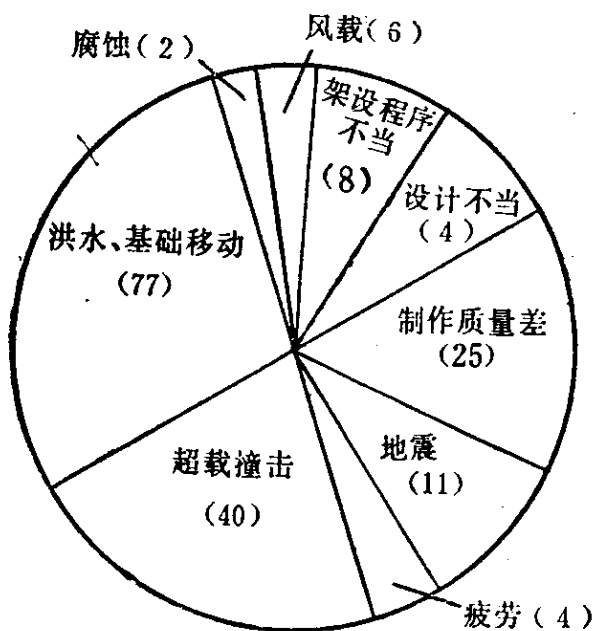


图1-2 177例钢桥垮塌的诱因

由此可见，船舶撞击诱发的各类大型桥梁垮塌事故，在70年代以前就始终占据垮塌总数的第三位。况且，这类事故几乎每天都有发生，但因修复费用系由少数公司支付的，故有许多事件没有在国家级的机构中公布，史密斯的统计也是不全面的。

70年代开始，随着交通运输事业的不断发展，跨越通航江

河、港区、和海峡的大型桥梁数量逐步增加，船舶尺寸和排水量逐渐趋于大型化，受到船舶撞击致使桥梁坍塌的重大事件也逐年增长。根据事故调查分析，船舶撞墩毁桥的可能性已经成为桥梁工程界面临的尖锐问题之一。值得注意的是，垮塌桥梁的通航净空和构造一般均符合有关国家规范要求的。因此，引起这类事件的主要原因是航运业的发展和船舶吨位的增加。根据1980年英国劳埃德船级社(Lloyd's Register of Shipping)年鉴，1970年以后的世界船舶总吨位和船舶数量已经大为增长，而且还有继续增长的趋势（见图1-3），这种状况与1970年后碰撞事件显著上升是吻合的。

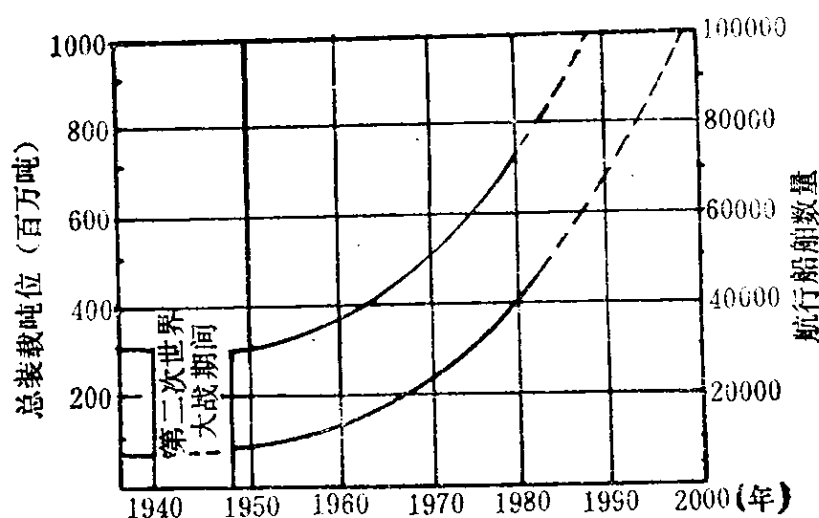


图1-3 航行商船增长示意图

美国通航水域较多，约有100余座大型桥梁的主跨通行大型船舶。仅在1970~1980年这十年里，就发生了11起重大的恶性碰撞事件，至少有53人死于桥梁垮塌，这些交通干线和航道阻塞时间达二年之久。

从世界各地和美国的统计数字可以预计，在通航的大型桥梁运营期间，约有10%的桥梁会因船舶撞击而垮塌。这个百分比在将来还会逐渐上升。如果我们不重视桥梁的防撞问题的话，也许被撞垮的桥梁将占通航桥梁总数的50%。

2. 船舶撞击毁桥事件

(1) 澳大利亚

霍巴特的德温特河塔斯曼桥 (Tasman Bridge, Derwent R., Hobart) : 塔斯曼桥于1964年建成通车。该桥为四车道预应力混凝土梁桥, 正桥全长为 $13 \times 140 + 197 + 310 + 197 + 6 \times 140 = 3364$ 英尺(1026m)。主跨为94.55m的带挂梁T型刚构, 通航净空宽94m, 高45m, 航道水深37m。边跨为42.7m的高架连续梁, 但其支座上梁的连续性较薄弱, 只用剪力键和普通锚筋联结相邻的两跨梁。这种构造上的削弱加剧了桥梁受到撞击时的破坏情况。分离的双柱式桥墩支承在高桩承台上, 基础为群桩。桥位上游有锌矿, 运载锌矿的货轮一般是40000t, 河上航运繁忙。位于通航跨的两个主墩用重力式防撞系统保护, 其余桥墩未设防。按照设计能力, 重力式防护系统应能吸收15000t 船舶以时速8海里(撞击角 15°) 对其突然碰撞时的撞击能量。

1975年1月5日, 7200t的依拉瓦纳轮(SS Lake Illawara) 撞在两个未设防的桥墩上, 撞击角度较小。发生事故的原因是船舶操纵设备失灵。碰撞发生后, 桥梁的三跨上部结构坠水, 两个桥墩完全被撞毁, 依拉瓦纳轮沉没, 12~20人死亡。碰撞垮塌过程见图1-4及图1-5。

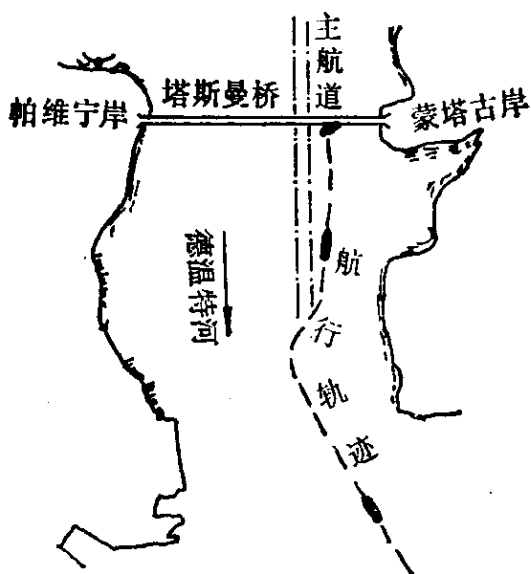


图1-4 依拉瓦纳轮航行路线

(2) 加拿大

温哥华港铁路桥 (Railway Bridge, Vancouver P.) : 该桥由新、旧两座桥组成。旧桥建于1925年, 新桥于1968年动工。1968年5月8日, 约苏马鲁号 (Yohu Maru) 煤船 (23000t) 首

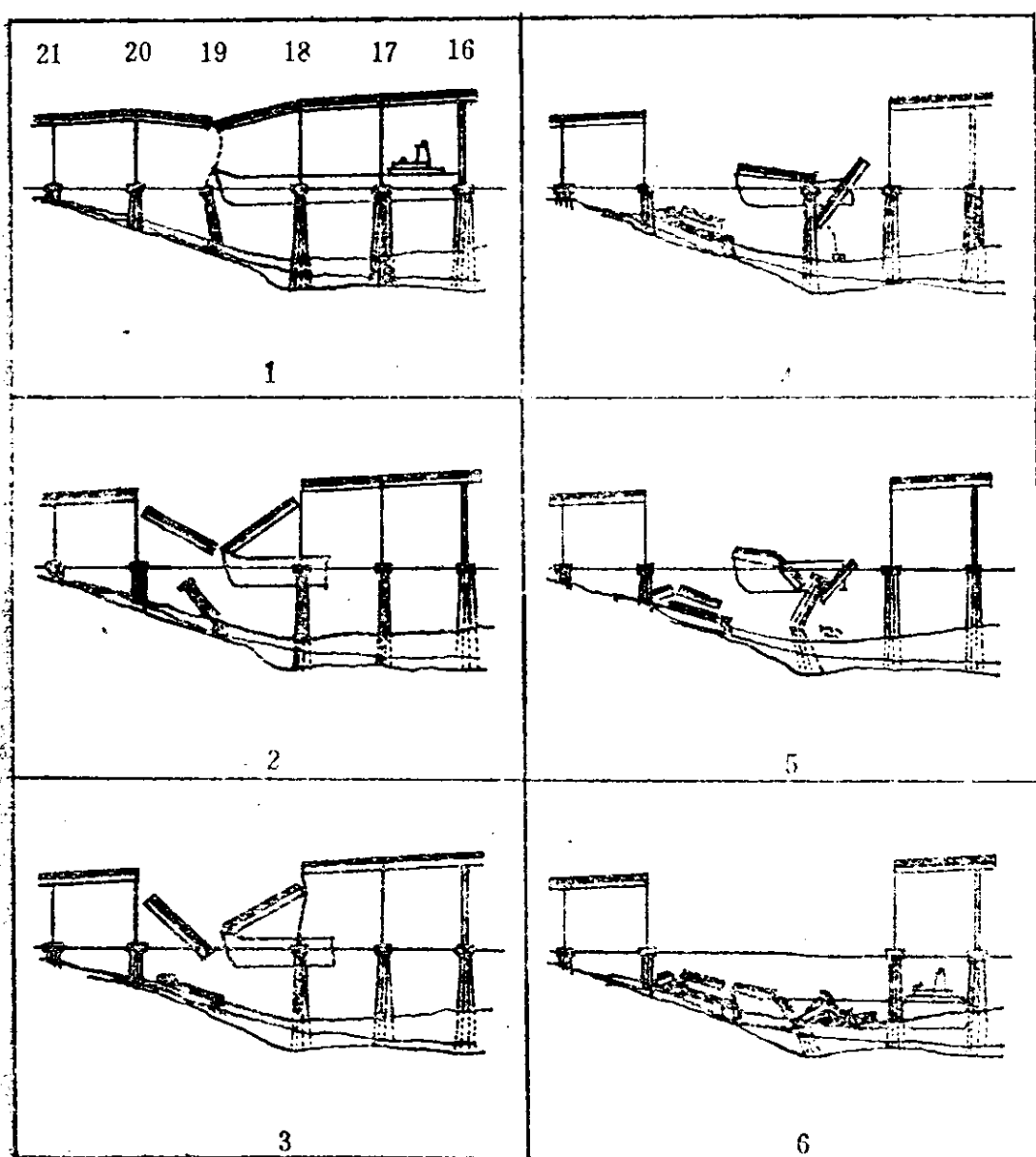


图1-5 塔斯曼桥垮塌过程

先撞击一个旧桥墩，而后又撞坏了一个正在修建的新桥墩，使旧桥和桥墩受到严重损坏。

新西明斯特的弗雷泽河 (Fraser R., New Westminster) 开启桥：1975年12月26日，700m长的斯威夫特亲王号 (Swiftsure Prince) 在大风下漂离了锚泊地点，与开启桥上部结构相撞，致使130m长的桥跨结构垮塌。

(3) 瑞典

哥德堡港的廷斯塔特桥 (Tingstad Brücke, Göteborg)：

廷斯塔特桥为开启式钢桁架铁路桥。1977年9月10日，受到1600t瑟伦·托斯特鲁轮 (Sørine Tholstrup) 的撞击后，桥跨结构的一端掉入水中。

阿尔摩桥 (Almö Brücke)：阿尔摩桥是瑞典工程界的一项重要工程，于1960年建成通车。该桥系哥德堡群岛与大陆联结工程的一部分，全长约532m。主跨结构为两根31.75cm直径的薄壳钢管拱，跨度为278m，桥面宽约10m。1980年1月，一艘数千吨的荷兰货轮碰撞拱座，致使钢管拱倒塌，上部结构砸在轮船上，死亡约10余人(图1-6)。



图1-6 被撞垮的阿尔摩桥

(4) 苏联

伏尔加河铁路桥 (Железнодорожный Мост через р.Волга)：伏尔加河铁路桥位于乌里亚纳弗斯克郊区。1984年6月5日，一艘客船与桥梁相撞，使桥梁倒塌，在桥上行驶的四节列车车厢落水，死亡人数达240多人。

(5) 日本

波的上桥 (波の上橋)：该桥为预应力混凝土T型桁架桥，全长362.6m，跨度为35.86 + 8 × 40.80m。1983年12月17日，一

艘999t的南朝鲜油轮与桥梁相撞,使 $3 \times 40.80\text{m}$ 的桥梁严重损伤。

(6) 美国

弗吉尼亚州的切萨皮克湾隧道桥 (Chesapeake Bay Bridge-Tunnel)：切萨皮克湾隧道桥于1964年建成,全桥长达28km(含二座隧道和四个人工岛)。航道水深为 $7 \sim 12\text{m}$,设计时未考虑船舶对桥墩的撞击荷载。1972年9月、1970年1月和1967年,该桥屡次遭到船舶的撞击。1967年碰撞时,一跨垮塌,五跨严重破坏;1970年碰撞时,五跨垮塌,五跨严重破坏;1972年碰撞时,二跨垮塌,五跨严重破坏。

新奥尔良的蓬恰特雷恩湖桥 (Pontchartrain L. Bridge)：该桥由新、旧两座桥梁组成,均为预应力混凝土连续结构,高桩承台基础。1974年8月,一艘拖轮拖着四只空驳船从桥下驶过时,撞在一个未设防的桥墩上,使四跨梁倒塌。该桥建成后的五年里,就被撞过9次。

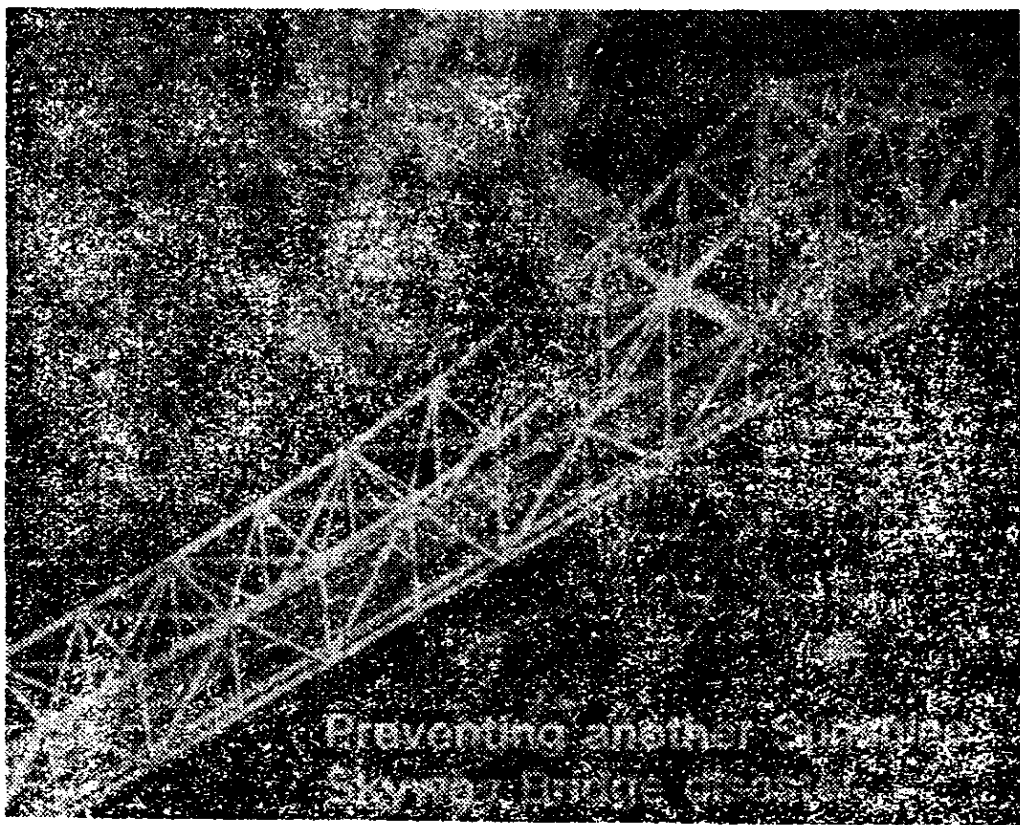


图1-7 被撞垮的空中通道桥

被撞垮的重要桥梁

表1-2

桥 名	国 名	被撞年	破 坏 情 况
塞纹铁路桥 (Severn Railway)	英 国	1963	引桥桥墩撞毁
里奇满—圣拉斐尔桥 (Richmond-San Rafael)	美 国	1961 (1965)	缓冲系统及桥墩横系梁破坏
外交叉桥 (Outerbridge Crossing)	美 国	1963	缓冲系统和桥墩严重破坏
索苏恩特桥 (Sorsund)	挪 威	1963	边墩被撞毁
马拉开波桥 (Maracaibo)	委内瑞拉	1964	桥墩曾被撞毁两次
切萨皮克湾隧道桥 (Chesapeake Bay Bridge-Tunnel)	美 国	1967 (1970) (1972)	一跨垮塌, 五跨严重损坏 五跨倒塌, 五跨严重破坏 二跨垮塌, 五跨严重破坏
温哥华港铁路桥 (Vancouver Harbour Railway)	加拿大	1968	二个墩被连续撞毁
西门桥 (West Gate)	澳大利亚	1970	箱梁被撞垮
西迪尼·兰尼尔桥 (Sidney Lanier)	美 国	1972	三跨垮塌
霍普山桥 (Mount Hope)	美 国	1974	主墩严重损伤
蓬恰特雷恩湖桥 (Pontchartrain Lake)	美 国	1974	四跨倒塌, 曾九次被撞
塔斯曼桥 (Tasman)	澳大利亚	1975	三跨垮塌, 二墩撞毁
弗雷泽桥 (Fraser River)	加拿大	1975	130m的主跨垮塌
格兰德海峡桥 (Grand Narrows)	加拿大	1975	主墩被撞毁
曼查克口桥 (Pass Manchac)	美 国	1976	三跨垮塌
本杰明·哈里逊纪念桥 (Benj. Harrison Memorica)	美 国	1977	引桥桥墩撞毁

续上表

桥 名	国 名	被撞年	破 坏 情 况
廷斯塔特桥 (Tingstad)	瑞 典	1977	梁端落水
旧金山—奥克兰湾桥 (San Francisco-Oukland Bay)	美 国	1977	
西西雅图桥 (West Seattle)	美 国	1978	
第二海峡铁路桥 (Second Narrows Railway)	加拿大	1979	钢筋混凝土竖直升开启桥的边跨(85m)落水, 修理时间5个月
伯拉德湾桥 (Burrard Inlet)	加拿大	1979	边墩撞毁
空中通道桥 (Sunshine Skyway)	美 国	1980	主墩撞毁, 三跨垮塌
阿尔摩桥 (Almö)	瑞 典	1980	拱座撞毁, 钢管拱倒塌
密苏里河第59号桥 (No.59B., Missouri R.)	美 国	1983	主墩被撞毁
波的上桥 (波の上橋)	日 本	1983	三跨严重破坏
伏尔加河铁路桥 (Железнодорожный Мост через р.Волга)	苏 联	1984	桥梁撞垮, 四节列车落水, 死亡人数达240多人

弗吉尼亚州跨詹姆斯河 (James R.) 的本杰明·哈里逊纪念桥 (Benj. Harrison Memerica Bridge) : 本杰明·哈里逊纪念桥长1340m, 双车道, 双柱式桥墩, 主跨为竖旋开启结构, 1967年建成。主跨及相邻两跨为钢桁架结构, 通过索塔用钢缆相连。1977年2月24日, 25000t的马琳·佛罗里达号 (Marine Floridan) 油轮撞毁了一个桥墩后, 又撞垮了开启跨。在修复过程中, 索塔和两相邻跨先后倒塌, 桥梁完全破坏。

佛罗里达州坦帕海湾 (Tampa Bay) 的空中通道桥 (Sunshine Skyway) : 该桥全长约6840 m, 横跨坦帕海湾入口。1980年5月9日, 一艘空载散装货轮撞垮了一个主墩, 使三跨上部结构垮

塌，死亡人数约35人（见图1-7）。

第二节 防撞保护系统的作用

1. 设置防护系统的条件

（1）典型事件调查分析

典型的碰撞事件是1980年美国的空中通道桥和瑞典的阿尔摩桥垮塌事件。这两座桥梁垮塌后，两国（州）政府均组织特别调查委员会进行事故的调查分析。

阿尔摩桥于1960年建成，主跨达278m，由两根直径为31.75cm的薄壳钢管拱构成，跨越瑞典西海岸的海湾，联结科隆岛(Kolloen I.)和阿尔摩岛(Almö I.)。为保证繁忙的海湾航运要求，设计通航净空高41m，宽50m。为防止风荷载作用在桥上时造成钢管拱的侧倾，在拱座处用高强螺栓锚固钢管拱，形成无铰拱形式。1977年瑞典公路管理部门曾对该桥进行过全面检查，并用X射线对钢管拱探伤，未发现内部断层，结构处于良好的工作状态。

1980年1月，一艘荷兰空船夜间通过桥下主航道。当时的船速为5海里/小时，准备转 20° 进入桥下航道。由于液压系统失灵、船舶失速、及舵手反应不及时，轮船未能转满 20° ，向西海岸驶去，撞击了离岸边20m远的拱座。该拱座不仅支承两根薄壳钢管拱，还支承着引桥的两根钢筋混凝土立柱式墩身。顷刻间，钢管拱倒塌，正桥和引桥的结合处完全剪断，船舶严重受损，航道阻塞（图1-6）。

空中通道桥全长6839m，横跨佛罗里达州西海岸的坦帕海湾入口，由两座平行分离的桥梁组成。主跨为 $110+264+110$ m，钢桁架梁。引桥为跨度88m的混凝土梁桥。全桥均为双柱式桥墩，未设防护系统。

1980年5月，一艘海轮从西面进入坦帕海湾时，因风浪大能见度差而与一主墩相撞，致使桥梁的主跨及两邻跨($187+110+$

88m)连续垮塌,桥墩被彻底撞毁。墩身被撞部位在水面上6.1m,接触面积64.52cm²。

(2) 设置防护系统的条件

瑞典的桥梁防撞特别调查委员会经过调查分析后,认为一般的钢管拱桥能够承受时速5海里的2000t以下船舶的撞击,所能承受的最大冲击动能约为665MJ。

瑞典国家公路局(Sweden's National Highway Administration)指出,凡通航跨过往船舶排水量在2000t以上者,必须验算桥墩的防撞能力,并按需要设置适当的防护系统。同时强调指出,凡撞击动能大于上述情况时,想用加强桥梁自身的强度以提高其抗冲击能力的作法,在技术上和经济上都是行不通的。

佛罗里达州交通运输部(DOT of Florida)及桥梁检查公司组成的调查委员会指出,对于通航的长大桥梁,当主航道两侧的桥梁长度小于600m时,不需对每个桥墩防护,仅防护易遭撞击的桥墩;当主航道两侧的桥梁长度大于600m时,有必要对两侧各600m范围内的桥墩均加以防护。

在新的联邦德国铁路规范中,规定跨越莱茵河(Rhine)桥梁的桥墩应能承受30MN的等效水平撞击荷载。与此规定对应,桥墩设计时必须能承受速度为5.88m/s的1800t排水量的驳船撞击。大于1800t排水量的船舶通航的桥梁,必须设置防护系统。

2. 防撞保护系统的作用

对阿尔摩桥、空中通道桥等上百座被撞垮的桥梁调查得知,几乎所有的桥梁均未设置防撞保护系统;即使少数有防护系统的桥梁,也因设计防护能力不足而未能抵抗住船舶的撞击。

目前,按通航要求设计桥梁的通航净空已不存在困难。但由于各种不可预料因素的影响,满足通航净空要求的桥梁仍然经常受到船舶碰撞的威胁。因此,桥梁的防护问题是与桥梁结构设计完全不同的范畴。

从概念上讲,当撞击力大于桥墩的承载能力时,桥梁的抗冲

击能力既不能由桥墩提供，也不能靠撞击桥墩的船舶提供。这是因为：

①桥墩的刚度总是较大的，不可能产生较大的塑性变形来缓解撞击动能；

②为了桥梁上部结构的安全，不允许桥墩有较大的位移；

③肇事船只的船头刚度不论多小，变形量也只能由船头钢板的压扁长度提供，故不可能产生较大的变形，由此缓解的撞击动能与总的撞击动能相比是较小的。

由此可见，桥梁不设防护系统时，船舶将直接与墩身接触。由于二者的刚度均较大，变形量较小，不能缓解撞击动能，因而将产生极大的撞击力，造成船毁桥塌事件。所以，桥梁的抗冲击能力只能由防撞保护系统提供，以缓冲船舶的撞击力，使桥梁和船舶的损失程度尽可能缩小。

目前的各国规范尚没有防护系统应起何种作用的明确条文。因此，在此援引美国铁路工程协会（AREA）混凝土及基础结构分会主席基利（T.R.Kealey）建议的规范条文^[26]，即可明确防护系统所起的作用。防撞保护系统设计规范见美国铁路工程协会1979年第674号通报第23部分：

①总则(23.1.)

②适用条件(23.1.1.)

本规范适用于设置在通航水域航道附近的铁路桥梁防撞保护系统的设计、施工、维修和观察。

③设置防撞保护系统的目的(23.1.2.)

设置防撞保护系统的目的，是使其保护的铁路桥梁及桥墩免遭船舶突然撞击而可能产生的破坏。设计这类防护系统以改变撞击力的方向，或吸收撞击能量，使撞击动能消散，或限制及降低由船舶转移到桥墩上的撞击能量，使桥墩不被毁坏。

④特殊考虑(23.2.)

⑤船舶(23.2.1.)

被选定作为桥梁防撞保护系统的设计船舶尺寸及船型应反映