

港珠澳大桥防船撞对策及关键技术研究

陈 伟

(港珠澳大桥管理局, 广东 珠海 519015)

摘要: 港珠澳大桥位于通航环境极为复杂的珠江口水域, 海中桥墩多, 为超长桥梁, 发生船撞桥事故的风险高. 为了大桥建成后和营运期的安全, 本文结合港珠澳大桥的结构和环境特点, 系统融合技术方法和管理措施, 从桥区水域通航管理、导助航及警示、预警技术、拦截船舶技术以及应急响应等五个方面重点探讨桥梁防船撞关键技术, 建立了一套桥梁防船撞体系.

关键词: 桥梁防船撞体系; 预警方法; 拦截技术

中图分类号: U447

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 03-0072-04

港珠澳大桥位于通航环境极为复杂的珠江口水域, 过往船舶日均四千多艘次, 是国内最繁忙的通航水域之一, 并且大桥的海中桥墩多、桥梁长度长, 发生船撞桥事故的风险高. 一旦发生船舶相撞事故, 将可能导致桥毁、船沉、人亡和桥区水域污染等重大灾难. 因此, 大桥的防船撞是大桥营运阶段的关键工作之一, 非常有必要开展系统、深入的研究^[1-2].

船舶撞毁桥梁的灾难性事件首次报道于 1960 年. 与此同时, 船撞桥的相关研究工作在几个发达国家逐步开展. 特别地, 1980 年美国阳光大桥撞塌事件进一步引起了各界对横跨通航水域桥梁安全的重视. 20 世纪 80 年代初, 国际上对船撞桥以及桥墩防护问题的研究开始关注. 特别是 1991 年美国的 AASHTO 发布了《船舶碰撞公路桥梁设计指南》, 以及 1993 年国际桥梁与结构工程学会(IABSE)发表了论文集《船舶碰撞桥梁》, 设立了桥梁的抗船撞设计基础^[3-5]. 自 2007 年广东九江大桥塌桥之后, 我国对船撞桥的问题重视程度上升到了一个新的高度, 相关的研究发展迅速^[6-10]. 但这些研究往往将重点仅集中于个别技术, 缺乏对大桥防船撞对策的系统分析. 桥梁防船撞是一项综合性的系统工程, 不仅包含桥梁结构工程, 而且涉及通航管理工程、导助航工程、预警工程、应急救援等等多部门、多领域, 目前国内外的研究尚未较全面地涉及

大型桥梁防船撞综合技术.

本文结合港珠澳大桥工程实际, 为减少船舶与桥梁碰撞事故发生概率, 争取避免发生船撞桥安全事故, 从通航管理、导助航技术、预警技术、拦截船舶技术以及应急响应等多方面入手, 建立了一套集技术方法和管理措施于一体的桥梁防船撞安全防护体系.

1 港珠澳大桥工程特点

1.1 项目概况

港珠澳大桥是连接香港特别行政区、广东省珠海市、澳门特别行政区的大型跨海通道, 是国家高速公路网规划中珠江三角洲地区环线的组成部分和跨越伶仃洋海域的关键性工程.

港珠澳大桥主体工程位于内地水域, 长约 29.6 km. 由粤、港、澳三地政府共同投资建设, 建设范围东自粤港分界线起, 西至拱北/明珠附近海中填筑的珠海/澳门口岸人工岛, 采用桥岛隧组合方式. 隧道方案穿越伶仃西航道和铜鼓航道段约 6.7 km, 其余采用桥梁方案的路段约 22.9 km. 主体工程桥梁段在跨越青州航道、江海直达船航道、九洲航道位置设置 3 座航道桥, 其余为非通航孔桥.

1.2 水上交通环境状况

大桥水域自然环境复杂. 潮流急(最大涨潮流速 $0.68\sim 0.93\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 最大落潮流速 $0.94\sim 1.37\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),

气象状况复杂,有雷暴、台风、大雾等恶劣天气。

大桥水域水上交通环境复杂。交通流量大(最大日流量约4 000艘次),大桥穿越航道多(5条),高速客船航线多(11条),班次密集(高峰每天约1 000艘),穿越大桥的船舶种类多,包括集装箱船、液化气船、油船、高速客船等。

港珠澳大桥水上交通安全涉及管理单位多。珠江口水域日常管理工作涉及海事、海洋、渔政、边防、部队、救助等多个单位。同时,桥梁水上安全涉及粤、港、澳三地相关管理部门和港口、航运等多个单位。

2 船撞桥事故

船撞桥事故主要表现为船舶撞击箱梁和撞击桥墩。基于对国内外船撞桥事故进行分析,归纳出船撞桥事故特点和原因。

2.1 船撞桥事故特点

在研究国内外船撞桥案例及相关文献的基础上,总结出船撞桥事故特点如下:(1)船撞桥事故容易发生在航线交叉、船舶通航密度大、航路复杂、船舶转向、交汇行为较为频繁的桥区水域。(2)船撞桥事故容易发生在夜间(凌晨为事故多发时间段)、大雾等能见度不良等时段。(3)船撞桥事故在通航孔和非通航孔区域均可能发生,但在非通航孔区域发生的船撞桥事故往往会造成严重后果(例如桥梁垮塌、人员伤亡等)。(4)正常航行、非正常航行以及失控的船舶均可能造成船撞桥事故的发生,其中非正常航行船舶和失控船舶更容易发生撞桥事件。非正常航行的船舶是指在桥区水域不按照规则航行的船舶;失控船舶是指因船机故障、船舶事故失去操作能力的船舶,或遭遇恶劣天气翻沉的船舶,该类船舶往往不具备独立操作能力。(5)工程船由于超高造成撞击箱梁的事故较多发,应重点管控。(6)船撞桥事故容易发生在大桥建成后期和营运初期。(7)健全管理制度。有效的管理手段、良好的通航秩序对降低船撞桥事故发生概率具有重要作用。(8)快速应急反应能力可有效降低船撞桥事故发生后的不良后果。

2.2 船撞桥事故原因

国际航运协会(PIANC)研究小组对1960~2015年的船桥事故原因分类统计显示,操作不当为

53%,违规航行18%,船舶故障16%,极端气候13%,即人为因素(违规航行或操作不当)是船撞桥事故的主要原因(约占71%)。根据国内学者对船撞桥事故研究成果,人为因素是船撞桥事故的主要原因(也是约占70%),由极端气候和船舶故障造成的事故也大约占30%。综上,学术界和工程界都普遍认为人为因素是船撞桥事故的主要原因。

3 桥梁防船撞关键技术

防船撞工作内容复杂,涉及管理因素、技术因素等诸多方面。必须结合港珠澳大桥实际工程才能建立完善的防船撞体系,体系应包括管理制度、导助航及警示、预警、拦截、应急等五个方面。

3.1 管理制度

管理制度是维持桥梁水域良好通航秩序的关键,其中关键技术包括:(1)制定大桥相关水域的水上交通管理规定。重点研究如下内容:①研究、划定大桥桥梁水域范围(包含桥梁警戒水域和禁航水域),明确管理区域;②研究高速客船航线,明确往来香港、澳门、深圳、珠海等地需穿越桥梁水域高速客船的航线;③大桥桥梁水域船舶报告制以及现行珠江口船舶报告制的衔接;④明确港珠澳大桥水上安全管理涉及到的各相关部门职责、工作内容;⑤明确渔船、公务船、军事船只等在桥梁水域航行的相关管理要求。(2)设置有效的管理机构或建立高效的工作机制,结合大桥所处水域环境,建立政府层面的协调机制和粤、港、澳海事管理联系机制。

3.2 导助航及警示

导助航及警示措施是引导船舶正常航行,帮助船舶安全通过桥梁水域的重要手段,其中的关键技术包括:(1)研究、实施航标设置工作包括水上警示标、航道标、桥上固定助航标志、AIS虚拟航标等;(2)研究、实施雷达应答器设置工作;(3)研究、实施航道桥通航限高警示工作;(4)研究、实施非通航桥孔区域灯光警示工作;(5)研究、实施桥梁段VHF自动语音播发警示工作。

3.3 预警及反应

预警措施能够及时提醒有撞桥风险的船舶纠正航行行为,也能够提醒相关管理部门采取管控措施,从而减少船撞桥事故发生的可能性。笔者认

为其中的关键技术包括: (1)研究、实施通航区超高预警及反应装置设置工作; (2)研究、实施非通航区偏航预警及反应装置设置工作; (3)研究、实施快速反应装置, 如定向喇叭、激光射灯、无人机等; (4)研究、实施预警反应装置控制系统等; (5)研究、实施 VHF 自动播放与人工呼叫系统等。

超高预警和偏航预警如图 1 和图 2 所示。



图 1 超高预警和偏航预警示意图

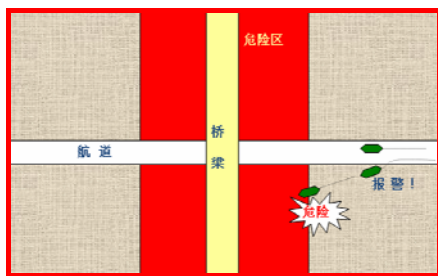


图 2 偏航预警监测示意图

预警技术的重要部分是目标(船舶)的检测与识别, 其关键在于目标识别精度。为了达到较高的目标识别精度, 利用空间目标三维位置交会测量原理^[11-12], 采用 2 台摄像机定位, 摄像机之间保持一定的距离同步拍摄, 通过图像分析计算确定目标的距离。

如图 3 所示, 假设 2 台摄像机安装的位置坐标分别为(0,0)和(b,0), 目标在 2 台相机同时捕获相片中的偏离角度分别为 θ_1 和 θ_2 , 则目标的坐标为:

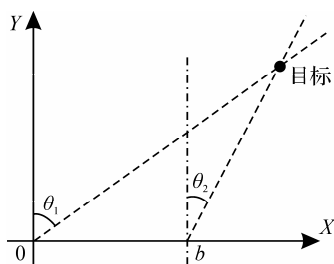


图 3 双摄像机定位原理

$$\begin{cases} X = b \tan \theta_1 / (\tan \theta_1 - \tan \theta_2), \\ Y = b / (\tan \theta_1 - \tan \theta_2), \end{cases}$$

上式中的 X 和 Y 是目标的测量坐标。测量精度的误差主要源于像机角分辨率的误差。假设 2 台摄像机的角分辨误差都是 $\Delta\theta$, 则测量误差为:

$$\begin{cases} \Delta X = b \Delta \theta \frac{\tan \theta_1 / \cos^2 \theta_2 - \tan \theta_2 / \cos^2 \theta_1}{[\tan \theta_1 - \tan \theta_2]^2} = \\ \Delta \theta (Y^2 - X^2 + Xb) / Y, \\ \Delta Y = b \Delta \theta \frac{1 / \cos^2 \theta_2 - 1 / \cos^2 \theta_1}{[\tan \theta_1 - \tan \theta_2]^2} = \Delta \theta (b - 2X). \end{cases}$$

对于一般的商用相机, 测量 3 000 m 之内目标的定位误差可控制在 1 m 左右。

3.4 拦截船舶

非通航孔桥梁通常抗船撞能力弱, 其水面净空低、跨径小, 不允许船舶碰撞, 通常采用拦截技术拒船于大桥之外, 防止船舶碰撞桥梁。拦截设施是在已经实施管理、警示、预警等一系列措施的基础上, 船舶仍有撞桥风险, 为保证桥梁安全和船舶通航安全而采取的物理措施。拦截装置往往设置于船撞桥风险较大, 容易发生恶性船撞桥事故的区域。关键技术包括: (1)研究、分析船撞桥风险、划分桥梁不同区段的船撞风险等级, 确定需要设置拦截设施的区段。根据现有国内外研究成果, 对于非通航孔桥梁的船撞风险, 可采用风险指数的评估理论来构建风险评估模型; (2)研究、实施拦截装置, 包括拦截装置设置区域、结构形式、实施方式等。目前, 已采用过的拦截装置有桩-铁链式拦截装置、走锚式拦截装置、自适应恒阻力船舶拦截装置等。其中, 自适应恒阻力船舶拦截装置已在平潭跨海大桥桥区水域使用^[13]。拦截船舶设施要解决三个关键技术: ①有效拦截船舶, 避免船舶越过拦截设施, 为此近年发展了自适应拦截技术。②船舶由于大质量, 具有巨大动能和强大的破坏力, 因此拦截设施既要保护桥梁, 也要保护船舶。③吸收船舶的动能。一艘载重万吨的船只, 具有约 150 MJ 的动能, 可靠地逐渐吸收该能量是拦截技术的关键。为此, 近年发展了恒阻力拦截技术。

3.5 应急措施

应急管理按照时间段可分两个阶段: (1)船桥事故发生前, 利用现场管理手段和资源, 快速应急, 能够有效地降低船撞桥事故的可能性; (2)船桥事故发生后, 综合利用桥上和水上管理手段和资源, 快速应急, 能够极大地降低船桥事故带来的不利

影响和后果.

4 结语

港珠澳大桥投资巨大, 是公路交通规划网中的重要组成部分, 一旦发生船舶撞桥事故, 轻则交通中断、桥梁检修, 重则造成人命和财产损失, 并且, 大桥位于敏感区域, 若发生重大事故, 对社会、政治的负面影响巨大. 因此, 必须高度重视防船撞工作.

结合港珠澳大桥工程实际和桥区水域的通航状况, 本文建立了一个集成通航管理、导助航技术、预警技术、拦截船舶技术以及应急反应等多方面的桥梁防船撞综合防护体系, 并分析了各个措施需要解决的关键技术. 该综合防护体系有望在港珠澳大桥建立示范工程, 推广应用于大型跨海桥梁, 为减少和避免船舶与桥梁的碰撞事故, 保护桥梁及船舶航行安全发挥作用.

参考文献:

- [1] 陈国虞, 王礼立, 杨黎明, 等. 桥梁防撞理论和防撞装置设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013:1-10.
- [2] LARRY D, OLSON P E. Dynamic bridge substructure evaluation and monitoring[R]. Report No. FHWA-RD-03-089, U.S. Federal Highway Administration, 2005.
- [3] International Association for Bridge and Structural Engineering. Ship collision with bridges and offshore structures, preliminary report[R]. Copenhagen: IABSE Colloquium, 1983.
- [4] JONES N. Structural Aspects of Ship Collisions[M]// JONES N, WIERZBICKI T. Structural Crashworthiness [M]. London and Boston: Butterworths Publishers, 1983: 308-337.
- [5] 王君杰, 耿波. 桥梁船撞概率风险评估与措施[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010:223-242.
- [6] 王礼立, 张忠伟, 黄德进, 等. 船撞桥的钢丝绳圈柔性防撞装置的冲击动力学分析[C]//洪友士. 应用力学进展——祝贺郑哲敏先生八十华诞, 北京: 科学出版社, 2004:172-180.
- [7] WANG L L, YANG L M, HUANG D J, et al. An impact dynamics analysis on a new crashworthy device against ship-bridge collision[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35:895-904.
- [8] 杨峰, 杨黎明. 桥墩柔性防撞装置的静力学模型研究[J]. 固体力学学报, 2011, 32(Sup1):399-405.
- [9] 何益勇. 大桥独立墩柱防船撞方法计算分析[J]. 宁波大学学报(理工版), 2012, 25(3):101-104.
- [10] ZHOU F H, YU T X, YANG L M. Elastic behavior of ring-on-foundation[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2012, 54(1):38-47.
- [11] 于起峰, 尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009:34-49.
- [12] 翁卫军. 基于远红外交叉热成像的桥梁防船撞预警系统[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(35):8800-8804.
- [13] 杨冰, 秦焜, 宋力, 等. 平潭跨海大桥防船撞拦阻系统阻拦效能实验研究[J]. 实验力学, 2015, 30(4):414-420.

Research on key technology of anti ship collision for Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge

CHEN Wei

(Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge Authority, Zhuhai 519015, China)

Abstract: The Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge is located in the Pearl River Estuary where the navigation environment is extremely complex. Because of the large number of bridge piers and the overlength, the accident of ship-bridge collision is one of the most serious risks after the construction of the bridge and during the operation period. The key technologies to protect bridge from ship collision are discussed in this paper and analyzed from five aspects, which are navigation management, navigation aids, warning methods, interception of ship and emergency response. A set of effective bridge anti ship collision systems are also established.

Key words: bridge anti ship collision system; warning methods; crashworthy technologies

(责任编辑 章践立)