非通航孔桥墩“拦-防”组合防撞方案应用研究

陈明栋，向 祎
（重庆交通大学 河海学院，重庆 400074）

摘要：非通航孔桥墩通常结构设计单薄，即便在采用最新防撞技术情况下，也难以将船撞力减少至桥墩自身抗力可承受的范围以内。为解决这一问题，对国内外最新防船撞技术进行了调研分析，提出“拦-防”组合的非通航孔桥墩防撞方法，即触发旋转式拦截网与柔性防撞圈组合的防撞装置。当失控船舶以一定速度靠近大桥桥墩时，首先被桥梁上游的拦截网拦截，在拦截网被拉断过程中，船舶航速将大幅降低。船舶冲出拦网再撞上桥墩时，防撞装置能及早发挥整体作用，化撞击集中力为分布载荷，以及让船尽早滑离而带走尽量多的剩余动能，以达到有效保护桥梁的目的。计算分析研究表明，该装置防撞护效果良好，造价相对低廉，并且易于实施。设计中只要充分结合桥区河床地形，可避免对环境造成负面影响。

关 键 词：非通航孔桥墩；防撞装置；组合方案；拦截消能；柔性耗能
中图分类号：U443.26 **文献标志码：**A **文章编号：**1009-640X(2014)04-0098-07

在桥梁防船撞设计中，主航道及主通航桥孔的安全已得到了足够的重视。经过多年的设计实践，主通航孔桥墩防撞技术已逐渐发展成熟，主流技术是采用直接安装在桥墩边上随着水位上下浮动的柔性防撞装置。由于充分考虑了迎撞角，采用高耗能黏滞性复合防撞圈[3]得到低的波阻抗，延长了冲击过程时间[4]，得以滑开并拨正船头，使船回到正确航向，船的动能大部分保留在船上，在桥墩受到保护的同时，船舶也不会受到明显破坏。

然而近年来国内外分别发生几起位于非通航孔桥墩的船撞桥事故，非通航孔桥墩的安全问题也逐渐暴露出来。非通航桥孔桥墩的特点是：桥墩结构单薄、自身抵御船撞能力较差，即使按照当今最先进耗能理念设计的防撞圈，也难达到对桥梁的有效保护。一旦遭遇船舶撞击，极易造成船桥俱毁的悲剧[1-2]。目前，国内外专门针对非通航孔桥墩的防撞研究较少，尚无较为有效及成熟的研究思路和方法，以致同样会导致桥梁垮塌的非通航孔桥墩安全没有得到足够重视。

由于非通航孔桥墩自身抗力太小，即使采用主通航孔桥墩防撞技术也无法保障桥梁安全，需要寻求新的研究思路。通过对国内外防撞技术与发展的综合分析，结合非通航孔桥墩的自身特点，研究提出适合于非通航孔桥墩的新型“拦-防”组合式防撞方案。

1 设计思路

现今桥梁的防撞装置可分为直接构造和间接构造两类。“拦”的防撞方案属于间接构造类防撞，有漂浮拦网防撞系统[5]、浮体系泊索防撞系统[6]等方式。但仅靠“拦”的方式无法达到桥墩防撞安全要求，原因在于系统消耗能量需要很长的缓冲位移，同时失控船舶动能巨大，容易压过拦索或冲破拦网，消能后仍具有很大撞击力，依然对桥墩存在危险。所以本着“消能为主、防撞为辅”的原则[7]，设计采用两道屏障拦截船舶：一是在非通航桥梁上游一定距离布置拦网装置，二是在桥墩上安装柔性浮式防撞圈。工作原理是：当失控船

收稿日期：2013-12-05
作者简介：陈明栋(1954-)，男，浙江奉化人，研究员，主要从事船闸水力学和港航工程科研工作。
通信作者：向 祎(E-mail：xiangyicsh@163.com)

舶以一定速度靠近大桥桥墩时，首先被桥梁上游的拦截网拦截，在拦截网被绷紧、受力、缆索拉断以及地锚被拔出的过程中，船舶航速将大幅降低。船舶冲出拦网再撞上桥墩后，由于航速降低船撞力减小，依靠安装在桥墩上的柔性耗能防撞圈，就能够达到有效抵御船舶剩余撞击力的目的。

第一部分的拦网装置由触发式拦网、支架、浮筒以及钢索联系在河床上的地锚等四大部分组成。其中拦网由串联在浮筒上的支架支撑，网面平铺漂浮在水面以下，浮筒由穿越在中间的主轴联系，在上游和两侧方向整体牵引在河床上；牵引钢索由埋设在河床面下的地锚固定。第二部分，直接沿用最新的柔性防撞技术，即新型高耗能复合黏滞性防撞装置。

2　方案应用及设计

万州长江河段属山区性河流，三峡工程正常蓄水后该河段处于常年回水区内。拟建于此的万州长江三桥[8]虽然采用了主跨 730 m 大跨度双塔斜拉桥方案，但高水位期位于非通航区域的 Z7、Z8 辅助墩仍然靠近洪水期下行船舶的航路范围。由于该桥墩结构单薄，自身设计抗力仅 6 kN，根据大桥通航研究意见，需要对右岸的非通航桥墩进行设防。以该河段通行数量较大的 3 000 t 级船舶为例，当船舶下行航速为 4 m/s 左右时，计算的正船撞力可达到 23.32 kN。按照目前我国直接式防船撞装置的最大承载力可将船撞力降低约 55%，均大于桥墩自身的抗撞能力。因此，按照以上研究思路，对该桥的防撞设计采用了“拦-防”结合的新方案。

2.1　触发旋转式拦截消能系统

触发旋转式拦截装置布置在上游距桥墩 100 m 处，横向从 Z6、Z7 两墩中间布置到 Z8、Z9 两墩中间，总计长 115 m，共分为 3 个单元（每两个系泊浮体之间为 1 个单元）。防撞装置环绕布置在 Z7、Z8 桥墩周围。系统布置如图 1 所示。

图 1　系统布置

Fig. 1　Layout of anti-collision system

拦截装置单元内部由两侧的系泊浮体、钢索、大浮筒、钢杆、拦截网、轻质钢索、水下重力锚锭及锚链组成。

（1）系泊浮体设计　系泊浮体（底面近似椭圆）为长径 4 m、短径 2 m、表层厚 2 cm 的铁铸体。每个系泊浮体连接 4 个锚链，每个锚链另一端连接 3 m×3 m×3 m 的混凝土锚块。系泊浮体的主要作用是固定装置在水中的横向位置，使其不能左右摆动；同时也固定装置中的钢索旋转轴，保证钢索的位置能随水位变化。

（2）浮筒设计　大浮筒采用玻璃钢材料制成，形状为两端削平的橄榄球形，其主径 3 m、两端直径 2 m、长 4 m、玻璃钢外壳厚 2 cm。支撑拦网的钢杆与浮筒制成一体，浮筒中间留有直径为 5.5 cm 的圆形通道，直径 5 cm 的钢索从中穿过，作为拦网竖立起来的旋转轴。

（3）钢杆设计　钢杆直径 10 cm，在浮筒两边支出的长度均为 3 m，两侧每隔 1 m 焊有固定环，用于固定拦截网和轻质钢索。

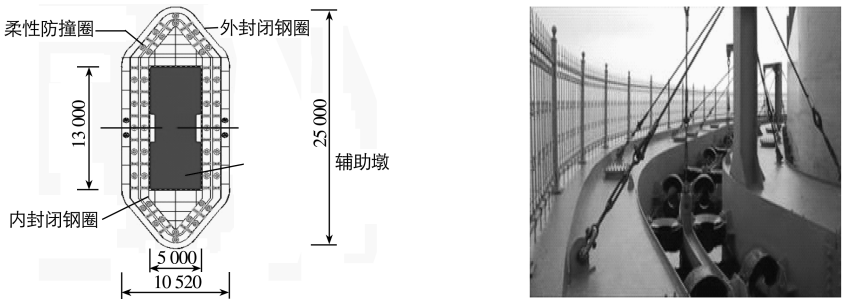
（4）拦截网及钢索设计　拦截网采用预先编织好的锦纶绳网，有 5 根横向工作主绳，绳径均为 64 mm，通过固定环与钢杆连接；5 根工作主绳在每个单元的两侧留有 2 m 的富裕长度之后再与系泊浮体相连。在远

离桥墩的钢杆顶端,布置一根直径为 5 cm 的轻质钢索,通过固定环固定于钢杆上,不与系泊浮体相连。

(5)锚及锚链设计　为了保证锚、锚链、拦截网在船撞过程中同时破坏,根据锦纶网的承载力,选择链径为 28 mm 的船用有档锚链 AM3 作为装置所用锚链,在锚链下部连接 3 m×3 m ×3 m 的混凝土锚锭。

2.2　防撞装置设计

(1)防撞装置外型　防撞装置设计见图 2。Z7、Z8 辅助墩由顺桥向布置的 1 个 13 m×5 m 以及中间对称布置的 2 个 1 m×3 m 的凹槽组成;防撞装置设置在其外围,并将桥墩全部包围。防撞装置外部尺寸为:25.00 m×10.52 m×3.00 m(长×宽×高),内部尺寸与墩柱契合,内层的趸船是 1 个包围在桥墩外面并随水深变化而升降的浮体,可在水位变化时上下自由浮动。内圈与桥墩间留有 50 cm 空隙,设置有缓冲橡胶和消浪透水孔;内外钢围之间除设置构造钢桁外,还需设置柔性橡胶圈,即内层紧密缠绕钢丝绳、外层橡胶包裹,这有利于缓冲船舶撞击。橡胶圈按二排三层布置,每层 64 个,总共 192 个,型号 Φ600 cm。



(a)　平面图(单位:mm)　　(b)　构造图

图 2　防撞装置构造

Fig. 2　Anti-collision facility

(2)防撞装置头部形状　防撞装置上下游的头部设计采用 75°迎撞角,有助于在船撞初期迅速拨开船头,改变防撞装置的受力方向。

(3)防撞装置高度　辅助墩采用的防撞装置总高度为 3 m,考虑到代表船型满载吃水的深度和空载时船头浮于水面的高度,设计防撞装置在正常使用时水上、水下高度分别为 1.2 和 1.8 m(依靠防撞装置浮力)。辅助墩承台以上桥墩的截面不变,均为 13 m×5 m,且中间有 1 m×3 m 的凹槽,墩与装置间隙为 50 cm。

2.3　系统工作过程

拦截装置平时平铺于水面上,一旦有船舶撞击,先触发推动装置最外层的轻质钢索,在船撞挤压作用下,轻质钢索沿着船体向下滑动,与其连接的钢杆随钢索下压而另一端翘起,同时带动大浮筒绕其中心轴旋转,拦截网也随钢杆逐渐被翘起。在船撞力的持续作用下,拦截网逐渐由水平变成竖立状态。此时,拦截网包住船头或拦截网包住大型船舶的球鼻艏,并与之一起运动。当拦截系统随失控船舶运动时,锦纶绳伸长、变形,当锦纶绳吸收一定能量时,绳子断裂,此时河底的锚块也被拔出。在此过程中消耗船舶动能,降低船速,同时也能减轻失控船舶的损伤程度。

当失控船舶挣破拦截装置后,撞击非通航孔桥墩时,首先接触到外钢围。由于防撞装置上下游头部设计成弧形外形,可使船头很快改变方向。同时外钢围的后退及船头的滑动,延长了撞击时间,降低了撞击力,又为船舶在低应力下转向滑离创造条件,从而带走尽可能多的剩余动能。当余下能量作用到外钢围时,因本身具有的较强刚度[9]及柔性防撞圈的缓冲,钢围的位移、变形吸收了大量的撞击能量。因为此时环绕桥墩的柔性防撞圈全部受力(前面的受压,后面的受拉),可有效地将更多的动能保留在船上,大幅降低防撞圈及船舶的损坏,从而达到保护桥墩的目的(拦截装置工作示意图见图 3)。

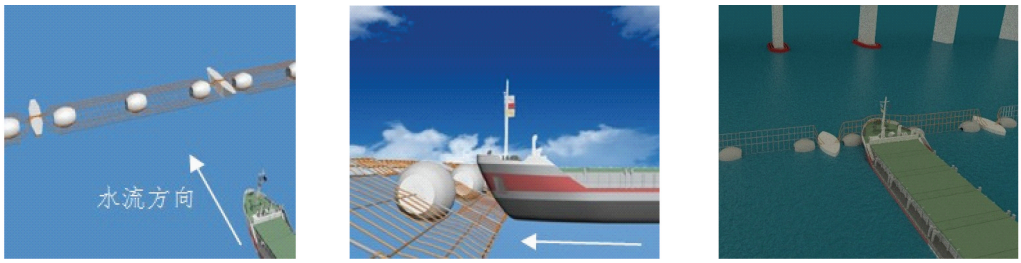


图 3　拦截装置工作示意

Fig. 3　The working drawing of the intercepting device

3　安全性与可行性验证

根据长江上游及三峡库区前期进行的桥梁防船撞多项研究，选择万州长江三桥辅助墩防船撞设计代表船型为“川江及三峡库区运输船舶标准船型主尺度系列”3 000 t 级干散货船，其尺度为 90.0 m×16.2 m×3.2 m，计入附连水质量为 4 260 t。

3.1　船舶撞击速度

主航道的航速选择主要依据实测和桥位河段船舶航速调查成果，在三峡水库正常蓄水期，船舶下水适航及船撞速度为 15 km/h，即 4.17 m/s。对于非通航区域，在主航道航速的基础上进行折减较符合实际[10]。根据实际测量或数值计算方法得到建桥后桥区水域的流速分布数据，计算出桥区水域的流速差值[11]。

$$V(x) = V_0 - v_0 + v(x) \tag{1}$$

式中：$V(x)$ 和 $v(x)$ 分别为距离航道中心 x 处的船舶典型航速和流速；V_0 和 v_0 分别为桥区正常航速和航道中心的流速。

根据河道流场横向分布折减计算方法，选择万州河段在三峡水库正常蓄水期时的最大流量，折算出需要设防的 3 个水中桥墩的船撞速度：三峡水库蓄水期，主流流速 0.6 m/s 左右时，Z6 南主墩、Z7、Z8 辅助墩处流速分别为 0.45，0.33 和 0.18 m/s，船撞速度分别为 4.02，3.84 和 3.50 m/s。

3.2　强度验证

本装置中单根锦纶绳的破坏承载力为 540 kN，单根锚链破坏承载力为 642 kN，锚锭重度为 25 kN/m^3。单元体中锦纶绳全部破坏的承载力 $F_1 = 540\times5 = 2\ 700$ kN，锚链全部破坏的承载力 $F_2 = 642\times4 = 2\ 568$ kN；锚锭全部被拔出需要的力 $F_3 = 25\times3\times3\times3\times4 = 2\ 700$ kN。三者所需力大致相等，在拦截装置工作过程中，三者基本可以同时破坏，从而使得船舶能量消耗最大。

在拦截网工作过程中，主要通过拦网的破坏，大量吸收船舶能量，从而降低船舶速度。根据文献 5 中所测试的锦纶复丝绳的性能数据，拦截网破坏过程中消耗船舶的能量 $E_{消耗} = 24.90$ MJ。因锚链断裂破坏的力和锚锭拔出的力无法通过计算公式转换成能量，且它们非主要消能方式，所以取 24.90 MJ 作为拦截装置的保守消能值。

根据船撞速度结果，船舶具有动能：

$$E_{船Z7} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\times 4\ 620\times10^3\times3.84^2 = 34.06\text{MJ}$$

$$E_{船Z8} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\times 4\ 620\times10^3\times3.50^2 = 28.30\text{MJ}$$

船舶与拦截装置作用之后船舶余下的动能为：

$$E'_{船Z7} = E_{船Z7} - E_{消耗} = 34.06 - 24.90 = 9.16\text{MJ}$$

$$E'_{船Z8} = E_{船Z8} - E_{消耗} = 28.30 - 24.90 = 3.4\text{MJ}$$

作用后速度为

$$v'_{船Z7} = \sqrt{\frac{2E_{船Z7}}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 9.16 \times 10^3}{4\ 620}} = 1.99\ \text{m/s}$$

$$v'_{船Z8} = \sqrt{\frac{2E_{船Z8}}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 3.4 \times 10^3}{4\ 620}} = 1.21\ \text{m/s}$$

根据中国铁路规范[12],墩台承受船只或排筏的撞击力 F 可按下式计算:

$$F = \gamma V \sin\alpha [W/(C_1 + C_2)]^{0.5} \tag{2}$$

式中:γ 为动能折减系数($s/m^{1/2}$),取最大船撞力,即当船只正向撞击时取 0.3;V 为船只或排筏撞击墩台时的速度(m/s);α 为船只驶近方向与墩台撞击点处切线所成的夹角,取最大船撞力,即 $\alpha=90°$;W 为船只重或排筏重(kN),其中重力加速度按 $g=9.81\ m/s^2$ 计算;C_1,C_2 分别为船只或排筏的弹性变形系数、墩台圬工的弹件变形系数(m/kN),其三者关系为 $C_1+C_2=0.000\ 12$。

本工况在无防撞装置桥墩的最大正撞力数值中采用了中国铁路规范公式计算,Z7,Z8 辅助墩船撞力分别为 11.60 和 7.05 MN。

3.3 可行性验证

根据万州长江三桥船撞风险分析结果,得 Z7、Z8 辅助墩自身抗力为 6 MN,即最小抗力。选择 3 000 t 级机动船作为防撞典型船舶,直接船舶撞击力分别为 22.4 和 20.4 MN。经过触发旋转拦截系统初次消能后,可将船舶的撞击速度分别降低到 1.99 和 1.21 m/s,由此根据船撞力计算,可得此时撞击力分别为 11.60 和 7.05 MN。按柔性防撞圈性能指标(以及宁波实船撞击试验成果),以降低船撞力 55% 保守估算,该防撞装置可将船撞力分别降低至 5.22 和 3.17 MN;与设计提供的 6 MN 的辅助墩抗力比较,说明能满足桥梁的防撞要求。

若出现拦截网被失控船舶冲破而未能完全发挥吸能作用的情况,船舶撞击第二道防护即柔性耗能防撞装置,根据其性能,可降低失控船舶船撞力 55%,使船撞力降低到 6 MN 的可承受范围内,亦能达到保护辅助墩的目的,因此使辅助墩的安全性得到最大保障。

3.4 安装与施工要求

锚的安装必须达到设计承载力要求,安装时为船舶机动作业,做好水上交通管制。安装必须严格按照施工顺序,确保工程质量、工程进度、施工安全。对水中易腐蚀钢结构采用喷涂锌铝伪合金底层,加氟碳涂料面漆的体系,并加上铝锌钢阴极保护,预计做到第一个维修周期为 20 年(以后要涂面漆),而全寿命与桥梁一样,在 100 年左右不需拷铲、喷砂出白,即不需重做整个防锈系统。

柔性防撞装置由 3 层组成:内层是趸船,外层是钢围,中间是防撞圈。外层钢围是用钢丝绳吊在趸船的立柱上的。桥墩外面包围着随水位而升降的趸船,施工中可将趸船做成两半运到桥墩两侧,在桥墩外连接。趸船在建造终了前需进行预连接。为了将分成两半的趸船从建造的船台运到桥墩两侧,可将其放在浮吊上运送。用浮吊并辅以挂在桥墩上面的吊具,进行防撞装置的安装。如遇枯水期,可放在承台上安装。趸船用高强螺栓连接。外层钢围在船台上整体建造。割开两半前,先焊上多个丝杠拉马。运到桥墩两侧后,焊成整体。中间的防撞圈预先组合,例如先安装在钢围上,到桥墩两侧后,吊在工作位置上将其连接到趸船上。安装完毕应对连接部位进行防腐补涂处理。

趸船应该浮态正常,如果浮态不够平衡,本设计采用的是固体压载法使它达到平衡。调整浮态时,所有的船装设备均已安装完毕,搅拌好的素混凝土从设计指定的人孔注入,自然流动,准确控制注入量,并随时观察趸船两侧的水线,允许注入量有少许调整,以达到趸船的平衡状态,但应准确记录调整后的注入量。

4 结 语

随着水运事业的不断发展和船舶数量的增多,许多建桥影响较大的桥梁,逐渐暴露出易遭遇船撞的风险。以往针对主桥墩的防撞研究逐渐成熟,但对于结构单薄、抗力较小的非通航孔桥墩(引桥墩、辅助桥墩)

的防护问题尚未得到足够的重视。本文针对非通航孔桥墩防撞研究现状，提出了“拦-防”组合式防船撞的方案，经计算分析研究总结如下：

(1)按照新型高耗能复合黏滞性防撞圈和触发旋转拦截消能系统的性能指标，本文计算得出该组合防撞装置可将 Z7、Z8 桥墩的船撞力分别降低至 5.22 和 3.17 MN，能满足桥梁所设计的 6 MN 抗力的防撞要求。

(2)设计提出的“拦-防”组合式防船撞的方案，实际为间接与直接防撞方案结合，解决了任何单一的防撞装置都不能实现的有效防护问题。

(3)该装置防撞效果可靠，造价相对低廉，并且易于实施。设计中只要充分结合桥区河床地形，可避免对环境的影响。

(4)该装置在三峡库区及山区河流中应用时，应考虑拦网系统在水位变化时的工作状态，以及对其维护的要求，避免因河流垃圾缠绕而影响防撞装置的工作性能。

(5)该防撞装置可供众多非通航孔桥墩的安全防护所借鉴，并具有较大的推广应用价值。

参 考 文 献：

[1] JONES N. Structural aspects of ship collisions[J]. Structural Crashworthiness, 1983: 308-337.

[2] 陈国虞，王礼立. 船撞桥及其防御[M]. 北京：中国铁道出版社，2006.（CHEN Guo-yu, WANG Li-li. Protection against ship-bridge collision[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006.（in Chinese））

[3] 陈国虞，倪步友，吴德兴. 复合消能防撞圈：中国，200520042237.2[P]. 2006-12-20.（CHEN Guo-yu, NI Bu-you, WU De-xing. Flexible energy dissipation anti-collision: China, 200520042237.2[P]. 2006-12-20.（in Chinese））

[4] WANG Li-li, YANG Li-ming, HUANG De-jin, et al. An impact dynamics analysis on a new crashworthy device against ship-bridge collision[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(8): 895-904.

[5] 陈国虞，倪步友，张澄，等. 跨海湾(河湾)桥梁非通航孔柔性拦船防撞装置[J]. 广东造船，2011，30(1)：38-41.（CHEN Guo-yu, NI Bu-you, ZHANG Cheng, et al. Flexible ship-bridge collision protection for the piers of un-navigable spans of bay bridge[J]. Guangdong Shipbuilding, 2011, 30(1): 38-41.（in Chinese））

[6] 吴全友，伏耀华，金允龙. 杭州湾大桥非通航孔桥防船撞试验段工程研究[J]. 公路，2012，4(4)：128-132.（WU Quan-you, FU Yao-hua, JIN Yun-long. Research of anti-ship collision test-engineering on non-navigable openings of Hangzhou Bay major bridge[J]. Highway, 2012, 4(4): 128-132.（in Chinese））

[7] 陈明栋. 重庆菜园坝长江大桥防船撞设计报告[R]. 重庆：重庆交通大学，2010.（CHEN Ming-dong. Research on the anti-collision for Chongqing Caiyuanba Yangtze River bridge[R]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.（in Chinese））

[8] 陈明栋. 重庆万州长江三桥防船撞专题研究报告[R]. 重庆：重庆交通大学，2012.（CHEN Ming-dong. Research on the anti-collision for the 3rd Wanzhou Yangtze River bridge[R]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012.（in Chinese））

[9] WANG Li-li, YANG Li-ming, TANG Chang-gang, et al. On the impact force and energy transformation during ship-bridge collisions[J]. International Journal of Protective Structures, 2012, 3(1): 105-120.

[10] 陈明栋，陈明，陈国虞，等. 安庆长江铁路大桥防船撞研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版)，2009，28(2)：203-207.（CHEN Ming-dong, CHEN Ming, CHEN Guo-yu, et al. A study of anti-ship collision for Anqing Yangtze River railway bridge[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2009, 28(2): 203-207.（in Chinese））

[11] 陈国虞，陈明栋，郑丹. 计算船撞力选择撞击速度时考虑墩位流速的方法[J]. 广东造船，2010，29(3)：33-37.（CHEN Guo-yu, CHEN Ming-dong, ZHENG Dan. Considering water flow velocity at every pier in selection of impact speed to calculate ship collision force[J]. Guangdong Shipbuilding, 2010, 29(3): 33-37.（in Chinese））

[12] GB/TB 10002.1-2005，铁路桥涵设计基本规范[S].（GB/TB 10002.1-2005, Fundamental code for design of railway bridge and culvert[S].（in Chinese））