



沪通铁路长江大桥水域通航环境 综合风险评价研究

赵仓龙

(南通航运职业技术学院, 江苏南通 226010)

摘要: 通过对影响桥梁水域通航环境的因素综合分析, 构建出桥梁水域通航风险评价指标体系, 以模糊理论为基础, 采用层次分析法 (AHP) 建立了桥梁水域通航环境综合风险评价模型, 并利用该方法对沪通铁路长江大桥水域通航环境进行综合风险评价。通过综合风险评价的结果, 可以充分掌握沪通铁路长江大桥水域通航环境的危险程度以及各项指标因素的危险状况, 为海事管理部门改善桥梁水域的通航环境及通航管理提供科学的决策依据和参考。

关键词: 沪通铁路长江大桥; 通航环境; 风险评价; 模糊综合评价; 桥区水域

中图分类号: U 612.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)08-0123-06

On risk assessment of navigation environment of Shanghai-Nantong railway Yangtze River Bridge Waters

ZHAO Cang-long

(Nantong Shipping College, Nantong 226010, China)

Abstract: Based on the analysis of the factors influencing the navigation environmental the bridge navigable waters, we construct the indices system for the risk assessment of the bridge navigable waters. Based on the fuzzy theory, we build a comprehensive environmental risk assessment model for the bridge navigable waters using Analytic Hierarchy Process (AHP), and carry out a comprehensive risk assessment on the navigation environment of Shanghai-Nantong railway Yangtze River Bridge. The result indicates the degree of risks and index factors in dangerous condition, and may serve as reference for the maritime administrative department to improve the navigation condition and maritime administration for the bridge waters.

Key words: Shanghai-Nantong railway Yangtze River Bridge; navigation environment; risk assessment; fuzzy comprehensive evaluation; bridge waters

沪通铁路是国家铁路“十二五”规划建设的重点项目之一, 是国家沿海铁路大通道的重要组成部分。然而沪通铁路长江大桥是新建沪(上海)通(南通)铁路建设的关键性节点工程, 建成后将是世界上规模最大的公铁两用桥。拟建桥梁位于长江澄通河段(图1), 苏通长江大桥上游40 km处。桥梁主通航孔跨越长江12.5 m深水航道, 辅通航孔跨越专用航道。随着长江南京以下12.5 m

深水航道一期工程的竣工, 长江江苏段进江海轮的船型尺度将会不断增大, 使长江澄通河段水上通航环境变得复杂。沪通铁路长江大桥的建设对工程河段水上通航环境影响主要有: 1) 桥梁水域位于多分汊河段, 既是涨潮流的分流区, 又是落潮流的汇流区, 水流动力条件复杂; 2) 桥梁水域是航道的交汇处, 船舶流量大, 通航环境复杂, 属于交通安全敏感区; 3) 历史上工程上游长青

收稿日期: 2013-12-26

作者简介: 赵仓龙(1983—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为水上交通环境与安全保障。

沙、友谊沙河势不稳定(但长青沙至泓北沙导流堤工程建成,对维护下游河势的稳定起到积极的作用),从而影响桥梁工程选址及墩位布置;4)沪通铁路长江大桥桥墩及其净空尺度影响到该水域定线制的实施;5)当桥区河段处于船舶流高峰时,桥区水域的正常航行将受到影响,桥孔的通过能力制约了船舶的顺利通过,船舶将出现排队、等候通过的情况,随着船舶流量的增大,高峰期交通堵塞现象会变得严重;6)由于工程水域内桥墩多,桥墩附近易出现不正常水流,对船舶通过大桥的正常航行带来较大的影响。特别是桥区上游侧有停泊区 NO.8 内的船舶在洪水期及枯水急落潮时易发生走锚事故,失控船漂移淌航的动态具有随机性。因此,工程水域船桥碰撞的风险将长期存在,必须注重对沪通铁路长江大桥水域通航环境综合风险评价研究,这对寻求降低大桥水域交通事故的对策和提高安全管理水平具有积极的意义和指导性作用。

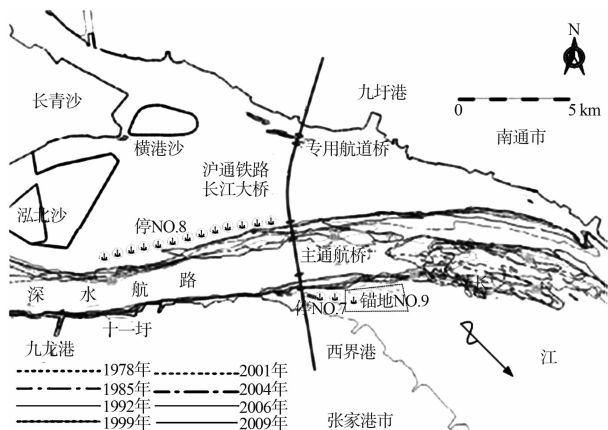


图1 沪通铁路长江大桥位置及水域概况

1 综合风险评价模型构建

1.1 因素集

因素集 U 是由影响评价对象的各个因素组成的集合,可表示为:

$$U = (u_1, u_2, \dots, u_n) \quad (1)$$

其中, $u_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 是若干影响因素,一般说来,各个因素在评价中具有的重要程度不同,因而必须对各个因素 u_i 按照重要程度的不同给出不同的权重 w_i , 由权重 w_i 组成因素集

W , 是因素集 U 上的模糊子集,可用模糊向量表示为:

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_n) \quad (2)$$

其中, $w_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 是因素 u_i 对 W 的隶属度,即反映了各个因素在综合风险评价中所具有的重要程度。通常应满足归一性和非负性的条件

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad w_i \geq 0 \quad (3)$$

1.2 评价集

评价集是对评价对象可能做出的评价结果组成的集合,表示为:

$$V = (v_1, v_2, \dots, v_n) \quad (4)$$

其中, $v_j (j=1, 2, 3, \dots, n)$ 是若干可能做出的评价结果。模糊综合评价目的就在于通过对评价对象考虑所有影响因素,能够从评价集中获得一个最佳的评价结果。

1.3 模糊综合评价

因素集 U 和评价集 V 之间的模糊关系可用评价矩阵表示:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

当因素权重集 W 和评价矩阵 R 已知时,按照模糊矩阵的乘法运算,便得到模糊综合评价集 B , 即

$$B = W \times R$$

$$= (w_1, w_2, \dots, w_n) \times \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (6)$$

1.4 评价结果

求出评价指标 b_j 后,以 b_j 为权重,对评价集元素 v_j 进行加权平均得到的值作为评价结果,即

$$v = \frac{\sum_{j=1}^5 b_j v_j}{\sum_{j=1}^5 b_j} \quad (7)$$

2 桥梁水域通航风险评价指标体系的构建

2.1 评价指标体系的构建

影响桥梁水域通航环境的因素有很多，经过调查统计，考虑沪通铁路长江大桥水域通航环境综合风险评价系统的特点，并结合国内外类似综合风险评价指标的应用，经综合分析，建立沪通铁路长江大桥水域通航环境综合风险评价指标体

系（图 2），可分为自然条件因素、航行水域条件因素和交通条件因素，其中包括风、流、能见度、桥梁净空尺度、桥梁条件、航道条件、碍航物、交通复杂度、船舶流量、助航标志及交通管理等航行条件。这些因素复杂多变，互相联系，必须准确地掌握各因素变化规律，及时准确定位，拟定正确航路，才能保证船舶航行安全。

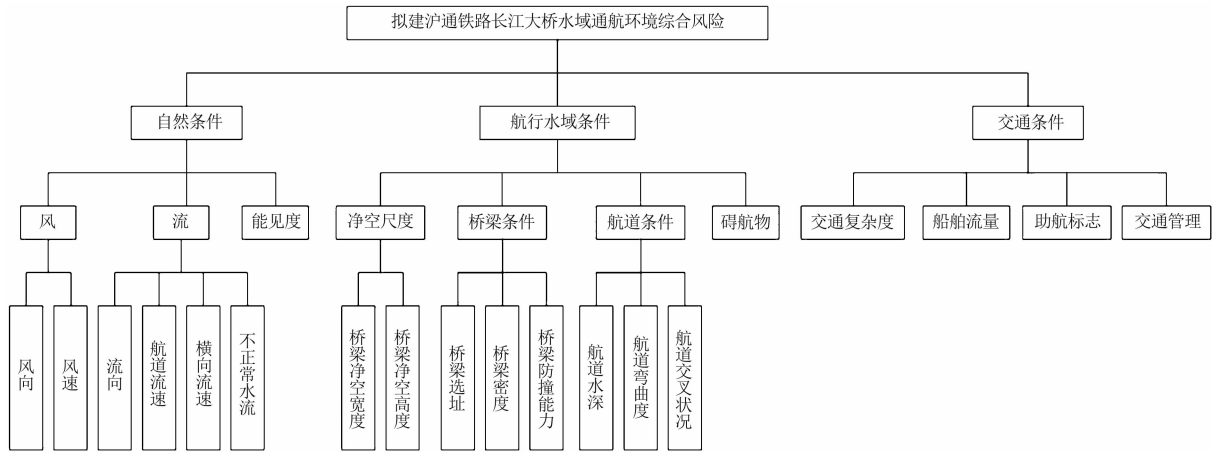


图 2 沪通铁路长江大桥水域通航环境综合风险评价体系

2.2 评价指标权重的确定

在桥梁水域通航安全评价系统中，各通航影响因素之间的关系是错综复杂的，该模型的评价是一个多指标、多属性的问题。因此，本文采用层次分析法对同一层次上各指标对上一层次指标的重要程度进行两两比较，建立比较判断矩阵。构建判断矩阵过程中采用航海专家调查问卷的方式，对于回收得到的专家调查表上两两指标的相对重要度数值，采用几何平均法进行归纳整理，得到判断矩阵，进而计算出各评价指标的权重值，并经过一致性检验。确定出桥梁水域通航安全评价指标的权重^[1]见表 1。

2.3 隶属度函数的确定

在构建模糊评价模型的过程中，需要得到评价指标的评价矩阵，常用的方法是采用专家调查的方式来构建。专家调查法的方式如下：根据航海专家依据其多年的海上航行经验对调查表中每一项具体指标评价打分，然后通过多位专家的打分情况进行汇总得到各项因素对应的评价等级

表 1 沪通铁路长江大桥水域通航环境综合风险评价指标的权重

一级指标	权重	二级指标	权重	单因素指标	权重
自然条件	0.11	风	0.42	风向	0.18
				风速	0.82
		流	0.17	流向	0.26
				航道流速	0.31
				横向流速	0.32
不正常水流	0.11				
能见度	0.41				
航行水域条件	0.58	净空尺度	0.36	桥梁净空宽度	0.65
				桥梁净空高度	0.35
		桥梁条件	0.24	桥梁选址	0.27
				桥梁密度	0.42
				桥梁防撞能力	0.31
		航道条件	0.26	航道水深	0.09
				航道弯曲度	0.66
航道交叉状况	0.25				
碍航物	0.14				
交通条件	0.31	交通复杂度	0.33		
		船舶流量	0.36		
		助航标志	0.19		
		交通管理	0.12		

的概数，再次对这些数值经过归一化处理就可以得到各因素对应的评价等级的隶属度，最后就可以得到评价指标的评价向量。本文将评价模型分为 5 个等级，根据上述方法得出各危险度评价指标的隶属度模糊子集（表 2）。

表 2 各危险度评价指标的隶属度模糊子集

指标	等级				
	1(低)	2(较低)	3(一般)	4(较高)	5(高度危险)
评价依据 1	0.8	0.2	0	0	0
评价依据 2	0.2	0.6	0.2	0	0
评价依据 3	0	0.2	0.6	0.2	0
评价依据 4	0	0	0.2	0.6	0.2
评价依据 5	0	0	0	0.2	0.8

2.4 桥梁水域通航环境危险度评价标准

本文结合国内外有关的研究结论及文献[2]关于水域通航环境危险度评价指标及等级划分见表 3。将水域通航环境的危险程度从低到高分为 5 个危险等级（1,2,3,4,5），则被评价水域各项指标的危险度可以根据表 3 中的评价标准进行最终确定。

3 沪通铁路长江大桥水域通航环境综合风险评价

3.1 沪通铁路长江大桥水域评价指标值

根据《沪通铁路长江大桥初步设计》^[4]关于沪通铁路长江大桥桥梁设计情况及《长江江苏段船舶定线制指南》^[5]，大桥水域风、流、航道等实际情况如表 4 所示。

表 3 水域通航环境危险度评价指标及等级划分

评价指标	评价标准	危险度等级				
		低	较低	一般	较高	高度危险
风向	风向与航道轴线方向的夹角/(°)	<10	10~30	30~50	50~70	>70
风速	桥梁水域实时风速/(m·s ⁻¹)	<0.5	0.5~5	5~10	10~15	>15
流向	水流与桥梁轴线法线方向之间的夹角/(°)	<1	1~3	3~5	5~7	>7
水流流速	桥梁水域水流流速/(m·s ⁻¹)	<0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~3.0	>3.0
航道横向流速	垂直航道轴线方向的流速/(m·s ⁻¹)	<0.25	0.25~0.5	0.5~0.75	0.75~1.0	>1.0
不正常水流	桥区水域乱流、紊流等	很弱	较弱	一般	较强	很强
能见度	年均能见度小于 1 000 m 的天数/d	<15	15~25	25~40	40~50	>50
桥梁净空宽度	桥梁净宽与代表船型宽度的比值	>8.0	7.0~8.0	5.0~7.0	3.0~5.0	<3.0
桥梁净空高度	富裕高度/m	>2.0	1.5~2.0	1.0~1.5	0.5~1.0	<0.5
桥梁工程选址	桥梁选址是否合理	好	较好	一般	较差	差
桥梁密度	桥区附近桥梁数量/座	0	1	2	3	>3
桥梁防撞能力	桥墩防护系统完善程度	高	较高	一般	较差	差
航道水深	航道水深与船舶吃水的比值	>4.0	3.0~4.0	1.8~3.0	1.4~1.8	<1.8
航道弯曲度	累计转舵角度/(°)	<5	5~10	10~15	15~20	>20
航道交叉状况	多条航道交叉点个数/个	0	1	2	3	>3
碍航物状况	离航道最近障碍物距航道的距离/m	>200	100~200	50~100	20~50	<20
交通复杂度	桥梁水域交通总体概况	简单	较简单	一般	较复杂	复杂
船舶流量	船舶交通量/(艘·d ⁻¹)	小	较小	一般	较大	大
助航标志	桥区助航信息的完善率/%	>95	90~95	80~90	70~80	<70
交通管理	桥区交通管理的完备率/%	>95	90~95	80~90	70~80	<70

3.2 水域通航环境综合风险评价

利用上述评价模型对沪通铁路长江大桥水域通航环境综合风险评价时，是从第 3 层次（即最低层次）的危险因素开始计算的。首先利用表 2~4 可以得出单因素指标危险因素的评价向量，结合单因素指标的权重值来求得第 2 层次危险

因素的评价向量，进而得出二级指标的评价矩阵；再利用二级指标的权重值与二级指标的评价矩阵求得一级指标的评价向量，进而得出一级指标的评价矩阵；最后再利用一级指标的权重值与一级指标的评价矩阵求得最终的评价结果。

表 4 沪通铁路长江大桥水域评价指标值

评价指标	评价指标值
风向	50°(次常风 NE)
风速	3.1 m/s(多年平均风速)
流向	5°
水流流速	2.25 m/s(最大平均流速)
航道横向流速	0.2 m/s
不正常水流	一般
能见度	30.9 d(多年平均雾天数)
桥梁净空宽度*	13.9(主孔双向通航净宽 900 m, 以大桥上游江苏长源钢铁散货码头代表船型 5 万吨级船舶船宽 32.3 m)
桥梁净空高度	2 m
桥梁工程选址	一般
桥梁密度	2 座(江阴大桥、苏通大桥)
桥梁防撞能力	设施完善度高
航道水深*	0.98(长江 12.5 m 深水航道一期工程已竣工, 5 万吨级船舶满载吃水 12.8 m, 大型船舶需乘潮减载进港)
航道弯曲度	23°(大桥上/下游不远处分别有一段深水航道弯曲段)
航道交叉状况	1 个(大桥水域有深水航道和专用航道, 虽没有直接相交, 但船舶航行相互之间存在一定的干扰)
碍航物状况	96 m(碍航物为主桥墩, 主跨 1 092 m, 通航净宽 900 m)
交通复杂度	复杂
船舶流量	约 3 000 艘次/日, 船舶流量较大
助航标志	完善率 95% 以上
交通管理	完备率 95% 以上

采用隶属度函数的方法构造第 3 层次危险因素(即本文最低层次危险因素)的隶属度, 通过调研搜集到的沪通铁路长江大桥水域通航环境的相关资料(表 4), 通过隶属度函数的方法(表 2, 3)建立起相应的评价矩阵并计算出指标因素“风”、“流”、“净空尺度”、“桥梁条件”、“航道条件”评价向量。

3.2.1 求取二级指标的评价向量

“风”评价向量:

$$\begin{aligned}
 B_{11} &= W_{11} \times R_{11} \\
 &= (0.18 \quad 0.82) \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 &= (0.164 \quad 0.492 \quad 0.2 \quad 0.108 \quad 0.036)
 \end{aligned}$$

“流”评价向量:

$$\begin{aligned}
 B_{12} &= W_{12} \times R_{12} = (0.26 \quad 0.31 \quad 0.32 \quad 0.11) \times \\
 &\begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 \end{bmatrix} \\
 &= (0.256 \quad 0.138 \quad 0.284 \quad 0.26 \quad 0.062)
 \end{aligned}$$

“净空尺度”评价向量:

$$\begin{aligned}
 B_{21} &= W_{21} \times R_{21} \\
 &= (0.65 \quad 0.35) \times \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 &= (0.59 \quad 0.34 \quad 0.07 \quad 0 \quad 0)
 \end{aligned}$$

“桥梁条件”评价向量:

$$\begin{aligned}
 B_{22} &= W_{22} \times R_{22} = (0.27 \quad 0.42 \quad 0.31) \times \\
 &\begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 &= (0.248 \quad 0.2 \quad 0.414 \quad 0.138 \quad 0)
 \end{aligned}$$

“航道条件”评价向量:

$$\begin{aligned}
 B_{23} &= W_{23} \times R_{23} = (0.09 \quad 0.66 \quad 0.25) \times \\
 &\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.8 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.8 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 &= (0.05 \quad 0.15 \quad 0.05 \quad 0.15 \quad 0.6)
 \end{aligned}$$

3.2.2 求取一级指标的评价向量

“自然条件”评价向量:

$$\begin{aligned}
 B_1 &= W_1 \times R_1 = (0.42 \quad 0.17 \quad 0.41) \times \\
 &\begin{bmatrix} 0.164 & 0.492 & 0.2 & 0.108 & 0.036 \\ 0.256 & 0.138 & 0.284 & 0.26 & 0.062 \\ 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 \end{bmatrix} \\
 &= (0.112 \quad 0.312 \quad 0.378 \quad 0.172 \quad 0.026)
 \end{aligned}$$

“航行水域条件”评价向量:

$$\begin{aligned}
 B_2 &= W_2 \times R_2 = (0.36 \quad 0.24 \quad 0.26 \quad 0.14) \times \\
 &\begin{bmatrix} 0.59 & 0.34 & 0.07 & 0 & 0 \\ 0.248 & 0.2 & 0.414 & 0.138 & 0 \\ 0.05 & 0.15 & 0.05 & 0.15 & 0.6 \\ 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 \end{bmatrix} \\
 &= (0.285 \quad 0.237 \quad 0.222 \quad 0.1 \quad 0.156)
 \end{aligned}$$

“交通条件”评价向量:

$$\begin{aligned} B_2 &= W_2 \times R_2 = (0.33 \quad 0.36 \quad 0.19 \quad 0.12) \times \\ &\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.8 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ &= (0.248 \quad 0.062 \quad 0.072 \quad 0.282 \quad 0.336) \end{aligned}$$

3.2.3 求取综合评价向量

而 $W = (0.11 \quad 0.58 \quad 0.31)$, 则能够计算出拟建沪通铁路长江大桥水域通航环境综合风险最终评价向量为:

$$\begin{aligned} B &= W \times R = (0.11 \quad 0.58 \quad 0.31) \times \\ &\begin{bmatrix} 0.112 & 0.312 & 0.378 & 0.172 & 0.026 \\ 0.285 & 0.237 & 0.222 & 0.1 & 0.156 \\ 0.248 & 0.062 & 0.072 & 0.282 & 0.336 \end{bmatrix} \\ &= (0.254 \quad 0.191 \quad 0.193 \quad 0.164 \quad 0.198) \end{aligned}$$

上式反映了拟建沪通铁路长江大桥通航环境危险度在评价集 v 上的模糊分布状态。对于最终评价结果, 本文采用加权平均的方法来获取。以 1,2,3,4,5 分别代表危险程度由低到高的危险度低, 危险度较低, 危险度一般, 危险度较高, 危险度高, 则评价集 v 可表示为

$$V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5) = (1, 2, 3, 4, 5)$$

对上述模糊综合评价结果进行加权平均, 可得最终评价结果。 $v = 2.861$ 。

以上计算结果表明: 沪通铁路长江大桥建成后, 大桥水域通航环境处于“危险度较低”与“危险度一般”的状态但偏向于“危险度一般”。因此, 该沪通铁路长江大桥的建设在一定程度上增加了水域船舶安全航行的危险性, 应引起主管部门的重视。

4 相关对策和建议

4.1 对船舶安全过桥建议

1) 船舶过桥时应充分考虑风、流及横向流速对船舶操纵和漂移的影响。洪水季节船舶过桥时, 注意控制偏航角度, 根据当时的风流情况预配风、

流压角。其中船队由于船长较长, 若通过沪通铁路长江大桥时应充分考虑到横向水流对船队的不良影响。船队过桥前在保持桥区安全航速的前提下加车助舵, 提高舵效。

2) 船舶在侧风作用下过桥时, 应挂高船位。船舶在过桥前离桥轴线适当距离时, 就应将船舶引向上风一侧, 即把船位摆在来风一边, 以便预留一定漂移量以抵消横风所产生的漂移。

3) 在能见度不良的情况下, 船舶驾引人员应谨慎驾驶, 安全通过大桥水域。当能见度 ≤ 500 m 时, 禁止船舶过桥。

4) 船舶进入桥区水域后应根据当时风、流情况合理调整船位, 确保与桥墩柱保持安全富裕距离, 防止船舶撞桥或碰撞浮标事故发生。

5) 船舶过桥前应认真核对桥区水域的水位、本船吃水及水线上高度是否满足本船安全过桥的水深及沪通铁路长江大桥通航净空高度的要求。

6) 船舶通过桥梁水域前, 驾引人员应保持足够的航行戒备。船舶进入或通过桥区水域前, 应对主机、辅机、舵、锚、号灯、号型、信号、通讯、导航和系缆状况等进行检查, 保持良好技术状态, 并由熟悉该水域情况、技术熟练的驾驶人员驾驶, 同时应加强了望, 使用安全航速, 谨慎操作, 遵守主管机关公布的船位报告制等相关规定。

7) 过往船舶进入桥区水域前应加强联系, 以了解周围船舶的动态, 并及时协调避让, 避免水上交通事故的发生。

4.2 对桥梁主管部门建议

1) 沪通铁路长江大桥业主单位需要对通航孔桥墩设置有效的防撞设施(需论证), 负责设置和维护桥涵标及大桥水域的助航标志, 并使其处于正常状态。

2) 根据海事主管机关的要求, 航道部门需要定期进行桥区水深维护, 保证航道水深, 业主及相关部门制定桥区水域应急措施等。