



# 山区桥群河段桥梁间距与净跨关系研究\*

张有林<sup>1</sup>, 陈明<sup>2</sup>, 魏彭林<sup>2</sup>, 张溢<sup>1</sup>

(1. 四川省交通运输厅交通勘察设计研究院, 四川成都 610017;

2. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

**摘要:** 桥群的形成增加了碍航程度, 给船舶的正常航行及通航安全带来较大影响。基于概化弯道桥群河道条件, 采用船舶操纵运动数值模拟方法, 拟定出了概化弯道桥群河段上的桥间距与桥梁净跨间的内在关系。同时考虑实际的河道条件, 给出了桥群河段桥间距与桥梁净跨耦合关系的一般形式。利用上述研究成果, 分别以四川沱江邓家坝和重庆长江菜园坝桥群河段为例, 分析研究了拟建邓家坝大桥桥址与桥跨布置方案的可行性, 评估了菜园坝桥群河段的通航环境。

**关键词:** 桥群; 桥间距; 桥梁净跨; 二维水流数学模型; 船舶运动数学模型

中图分类号: U 611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0136-05

## Relationship between bridge distance and span at bridge group reach in mountainous rivers

ZHANG You-lin<sup>1</sup>, CHEN Ming<sup>2</sup>, WEI Peng-lin<sup>2</sup>, ZHANG Mi<sup>1</sup>

(1. Sichuan Communication Surveying & Design Institute, Chengdu 610017, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Hydraulic and Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Ship navigation safety will be greatly influenced by the obstruction due to bridge group. Based on generalized meandering river with bridge group, the corresponding relationship between bridge span and distance is confirmed using the ship maneuvering motion simulation method. Considering the actual conditions of the river, the general coupling relationship between the distance and span is obtained. Taking Dengjiaba bridge group of Tuojiang river in Sichuan province for example, the feasibility of the proposed site and span layout scheme of Dengjiaba bridge is proved by the obtained general coupling relationship. Moreover, the navigation condition of Caiyuanba bridge group reach of the Yangtze River is evaluated.

**Keywords:** bridge group; bridge distance; bridge span; 2D flow mathematical model; ship motion numerical model

随着现代陆路交通网络的快速发展, 内河上桥梁的数量快速增加, 不仅对陆上路网建设发挥了巨大作用, 方便了人们生活, 也促进了区域经济的迅速发展。但是, 由于在桥梁规划、设计、选址和桥墩布设等方面存在“重陆轻水”意识, 已建桥梁经常侵占航道尺度、恶化通航水流条件, 给船舶安全航行带来困难, 也留下了船撞桥事故的隐患。在实际建桥过程中, 由于桥位资源、城

市规划等诸多复杂因素, 往往使得两桥间距小于船行安全所需距离。此等建桥情况, 陈明栋等<sup>[1]</sup>首次给出了“桥群”的基本定义, 即指同一河段上建有两座或两座以上、且其间距不满足《内河通航标准》<sup>[2]</sup>要求的多座桥梁。形成“桥群效应”后, 桥墩跨布设对桥梁间距尤为敏感。Shoji K 等<sup>[3]</sup>认为, 若顺直航道中桥梁间距小于船长的 8 倍, 或者主通航孔的跨度小于船长的 2~3 倍, 船撞桥

收稿日期: 2015-10-12

\*基金项目: 四川省交通科研项目 (2013C13-1); 重庆市教委科学技术研究项目 (KJ1400322)

作者简介: 张有林 (1975—), 男, 高级工程师, 从事水运工程设计工作。

的风险概率就会提高。该项研究对象较为单一, 只针对顺直河段的桥间距进行了分析研究, 且不够具体, 与实际情况有所偏差。彭钜新<sup>[4-5]</sup>针对跨河桥群引发的通航标准问题开展了初步的探讨, 基于桥洞纵深长度和船舶通视角等对船舶安全通过桥区的影响, 以及船舶碰撞角和桥群斜交对桥梁净宽要求的影响, 提出了限制桥洞纵深长度的建议和调整桥群净宽的计算方法。徐亚平等<sup>[6]</sup>对平原宽滩河流上的一河多桥特殊情况下的流量分配进行了简要分析, 给出了计算方法, 以便合理确定一河多桥桥孔位置及合理的桥孔长度。黄美兰<sup>[7]</sup>根据每座桥的桥前壅水高度, 采用壅水平衡法综合确定每座桥的孔径长度, 从而确定一河多桥的总长度。陈明<sup>[8]</sup>根据重庆石板坡长江大桥一储奇门河段的河势条件以及通航环境, 将该河段(桥群河段)半概化为山区河流典型的顺直微弯河道。通过采用二维水流数值模拟和小尺度船舶物理模型试验相结合的方法, 得出了在山区河流典型的顺直微弯桥群河段上的桥跨与桥间距的合理组合。林巧<sup>[9]</sup>通过菜园坝桥群河段, 对形成的桥群桥梁选址及桥跨布置方法进行了细化研究, 提出试验河段在已有桥梁的约束下修建新桥合适的桥间距和桥跨布设方案。

然而综合目前研究成果, 针对桥群河段桥间距与桥跨(净跨)的内在联系, 尚未进行系统研究。基于船舶航行安全考虑, 开展桥群河段桥间距与桥梁净跨关系的研究尤为迫切。本文在船舶操纵运动数学模型基础上, 耦合平面二维水流数学模型。通过一定条件下的通航水流条件, 结合船舶下行通过桥群河段的操纵参数, 研究不同桥梁净跨及间距情况下建桥对通航的影响, 从而拟定出桥群河段上的桥间距与桥梁净跨间的内在关系。同时, 以四川沱江邓家坝桥群河段为例, 验证分析了拟建邓家坝大桥桥跨布设的可行性。

### 1 平面二维水流数学模型

采用沿水深平均的封闭浅水方程组描述二维水流运动, 基本控制方程为:

水流连续方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0 \quad (1)$$

x 方向动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial a}{\partial x} \right) - f_x - \frac{\varepsilon_{xx}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\varepsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{u \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

y 方向动量方程:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left( \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial a}{\partial y} \right) - f_y - \frac{\varepsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\varepsilon_{yy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{v \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^{4/3}} = 0 \quad (3)$$

式中:  $t$  为时间;  $u$ 、 $v$  分别为沿  $x$ 、 $y$  方向的流速;  $h$  为水深;  $a$  为床面高程;  $g$  是重力加速度;  $\varepsilon_{xx}$ 、 $\varepsilon_{yy}$ 、 $\varepsilon_{xy}$  是紊动黏性系数;  $n$  为糙率系数。

方程(1)~(3)的离散包括时间离散和空间离散, 时间的离散采用差分法, 空间的离散采用有限单元法。运用伽辽金加权余量法把浅水方程离散成非线性代数方程, 然后采用 Newton-Raphson 方法求解。离散区域内采用三角形六节点等参单元和四边形八节点等参单元相耦合, 单元插值采用混合插值方法。

## 2 船舶操纵运动数学模型

### 2.1 船舶操纵运动方程

研究中通常采用船体运动坐标系( $xGy$ ), 以船体质心  $G$  为原点, 船首尾向为  $x$  轴, 垂直于船首尾向为  $y$  轴, 见图 1。

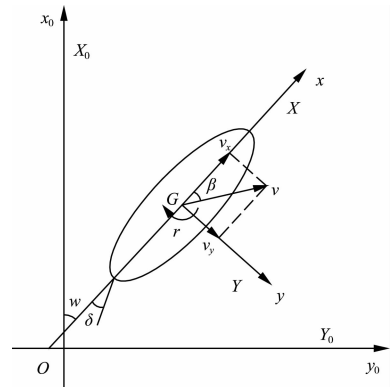


图 1 船舶操纵运动原理

当船舶在动水中航行时，设在固定坐标系中水流的绝对速度和方向为  $v_F$ 、 $\psi_F$ ，通过推导可得

$$\begin{cases} (m + m_{11}) \dot{u}_x = X(v_x, v_y, r) + (m + m_{22}) v_y r + (m + m_{11}) v_F r \sin(\psi_F - \psi) \\ (m + m_{22}) \dot{u}_y = Y(v_x, v_y, r) - (m + m_{11}) v_x r - (m + m_{22}) v_F r \cos(\psi_F - \psi) \\ (I_z + m_{66}) \dot{r} = N(v_x, v_y, r) \end{cases} \quad (4)$$

式中： $m$  为船的质量； $\psi$  为船的首向角； $v_x$ 、 $v_y$  是船体与水流的相对速度； $r$  为转首角速度； $X$ 、 $Y$  分别是作用于船  $x$ 、 $y$  轴方向的合力； $N$  是绕船重心垂直轴的合力矩； $m_{11}$ 、 $m_{22}$  为  $x$ 、 $y$  向的附加质量； $m_{66}$  为附加惯性矩， $I_z$  是绕  $z$  轴的船的质量惯性矩。

### 2.2 船舶运动方程数值方法

船舶操纵运动方程(4)是具有一阶导数的常微分方程组，求解析解极为困难，而龙格-库塔法则是求解这类方程的有效数值方法。实际工程运用中，考虑计算精度和稳定性，对于船舶操纵运动方程的数值求解采用龙格-库塔法四阶格式计算。

### 2.3 船模操纵性及相似验证

根据重庆长江轮船公司提供的船舶资料，本文采用的船型为 2 640 HP + 2 × 1 000 t 船队(船队尺度为 121 m × 21.5 m × 2.6 m)，利用其 10° “Z”形实船试验对船舶操纵运动数学模型进行验证。验证结果见表 1、图 2。

以动坐标原点速度  $u_x$ 、 $u_y$  为表征的形式：

船舶操纵性能与实船试验结果基本一致。本文所建立的船舶操纵运动数学模型可用于研究实际工程中的船舶操纵运动模拟。

### 3 概化弯曲河段参数

船舶航行于弯曲河段桥群过程中，航行参数主要取决于河道条件、水流条件、桥群条件和船舶自身特性等。其中，河道条件主要为弯曲半径( $R$ )；水流条件主要为表面流速( $v$ )；桥梁条件主要为桥梁间距( $D$ )及桥梁净宽( $S$ )；船舶特性主要为几何尺度(长、宽、吃水等)及静水航速  $v_s$ 。参考《内河通航标准》要求，弯曲半径分别取  $R = 5L$  ( $6L, 7L, 8L$ )， $L$  为代表船队长度。根据典型山区河道特征，同时尽可能地减小河道边界的影响，选取河宽为 500 m、水深取约 14.0 m 进行概化。以弯道表面流速约 2.50 m/s、船舶静水航速约 4.0 m/s 作为计算控制条件。桥梁净宽采用 170、220、270 m 共 3 种桥跨进行分析，图 3 为  $R = 6L$  时桥跨布置。

表 1 “Z”形试验数值船模与实船试验结果比较

2 640 HP + 2 × 1 000 t 船队	舵角/ (°)	$K'$		$T'$		航速/ (m/s)
		数值	误差/%	数值	误差/%	
实船值	10	1.578		0.661		4.2
计算值		1.628	3.17	0.691	4.54	

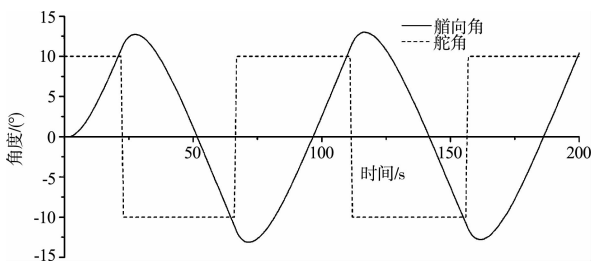


图 2 2 640 HP + 2 × 1 000 T 船队 “Z”形试验计算结果

由表 1 可见，回转指数  $K'$  误差为 3.17%，航向稳定性指数  $T'$  误差为 4.54%，说明数模计算的

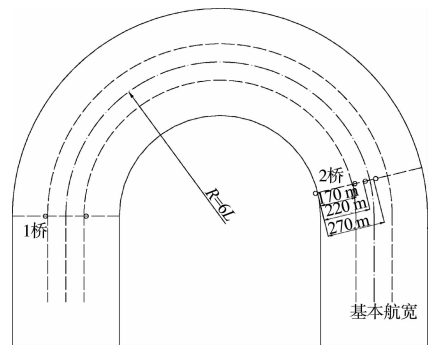


图 3 不同桥跨布置 ( $R = 6L$ )

### 4 计算结果分析

基于不同的概化弯道条件，可模拟各种桥跨组合而成的桥群对船舶航行影响情况，从而根据船舶操纵参数确定所需的最小桥间距要求

值。图4、5给出的是  $R=5L$ 、 $S=220\text{ m}$  情况下的船舶操纵参数过程及相应的运动轨迹。由图可知, 当桥梁净宽为  $220\text{ m}$  时, 船舶能顺利通过弯道桥群的最小间距为  $1\ 550\text{ m}$ , 最大舵角约  $23^\circ$ , 局部漂角近  $30^\circ$ 。同理, 可计算得出不同桥梁净宽情况下的桥梁间距(表2)。

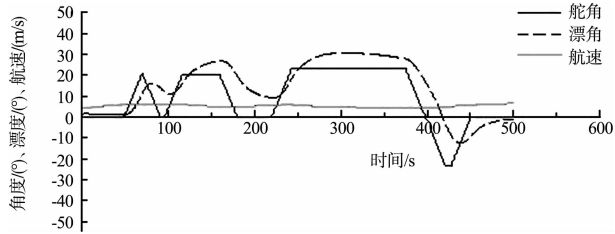


图4 船舶操纵参数过程

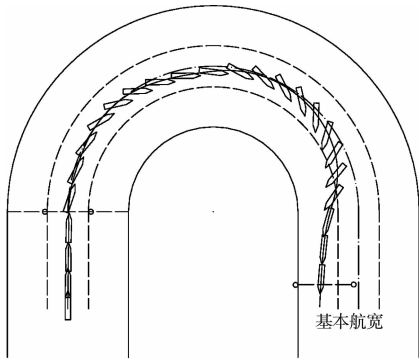


图5 船舶运动轨迹

表2 不同桥净跨情况下桥间距

弯曲半径 $R$	桥净跨 $S/\text{m}$	对岸航速/ ( $\text{m/s}$ )	最大舵角/ ( $^\circ$ )	最大漂角/ ( $^\circ$ )	桥间距 $D_0/\text{m}$	$D_0/L$
5L	170	6.5	25.0	30.0	2 415	19.96
	220	6.5	23.0	30.0	1 550	12.81
	270	6.5	22.5	30.0	1 250	10.33
6L	170	6.5	22.5	25.0	2 215	18.31
	220	6.5	21.5	25.0	1 500	12.40
	270	6.5	21.4	25.0	1 210	10.00
7L	170	6.5	22.0	25.0	2 100	17.36
	220	6.5	20.5	24.5	1 460	12.07
	270	6.5	19.5	23.6	1 190	9.83
8L	170	6.5	21.5	24.0	2 030	16.78
	220	6.5	20.5	23.2	1 450	11.98
	270	6.5	19.0	23.0	1 170	9.67

若以  $D_0/L$  表示无量纲的桥梁间距,  $v_a = v + v_s$  表示对岸航速,  $R/L$  表示弯曲半径,  $S/L$  表示桥梁净跨。结合上述计算成果(表2), 经综合分析,

得到弯道桥群桥梁合理间距与净跨间的耦合关系(图6)。

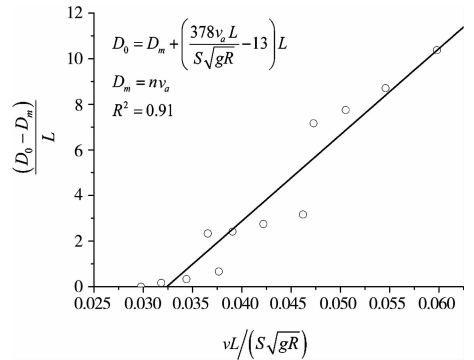


图6 弯道桥群桥梁合理间距与净跨拟合关系

拟合关系为:

$$D_0 = n v_a + \left( \frac{378 v_a L}{S \sqrt{gR}} - 13 \right) L = n v_a + k_r L \quad (5)$$

式中:  $n v_a$  为顺直航道桥梁基本间距;  $n$  为代表船舶下行时间( $\text{min}$ ), 由以上计算成果可知,  $n$  基本在  $5\text{ min}$  以内, 原因在于计算边界的前提条件是概化河道。而考虑实际的河道条件, 应在其基础上增加, 研究分析认为  $n$  取为  $5\text{ min}$ , 如需继续加大, 应根据具体的水流和航道复杂情况确定, 必要时应采取实船试验、船模运动数值计算或物模试验确定; 其二为航道弯曲的间距增加值  $D_r$ , 可按  $D_r = k_r L$  取值, 其中  $k_r$  为航道弯曲对桥梁间距的影响系数:

$$k_r = \frac{378 v_a L}{S \sqrt{gR}} - 13 \quad (6)$$

## 5 工程实例

### 1) 工程实例1。

拟建邓家坝大桥位于天宫堂枢纽库区内跨越沱江, 下距天宫堂枢纽大坝约  $12.2\text{ km}$ , 大桥上游约  $770\text{ m}$  有在建沱江五桥(桥跨为  $200\text{ m}$ , 净跨为  $183\text{ m}$ ), 见图7。根据2010年修编的《四川省内河水运发展规划》<sup>[10]</sup>, 沱江金堂至龙门阵  $341\text{ km}$  规划为V级航道, 代表船型为  $300$  吨级船队, 相应尺度为  $91.0\text{ m} \times 9.2\text{ m} \times 1.3\text{ m}$ (长  $\times$  宽  $\times$  设计吃水)。按船舶下水航速  $15\text{ km/h}$  计算, 则下行  $5\text{ min}$  航程为  $1\ 250\text{ m}$ , 加上代表船队长度  $91\text{ m}$ , 其最小

安全距离为 1 341 m。因此,邓家坝大桥与在建沱江五桥之间的距离不能满足规范要求,由此将形成“桥群”河段。该河段属于沱江中游地区,河谷开阔,河漫滩发育,枯水期沙洲出露,水面宽

200~450 m,河床质多为沙卵石,河道弯曲,多呈连续的“S”形。沱江五桥桥区处于弯道上,弯曲半径约为 1 365 m ( $R=15L$ );邓家坝大桥位于弯道下游的顺直河段上。

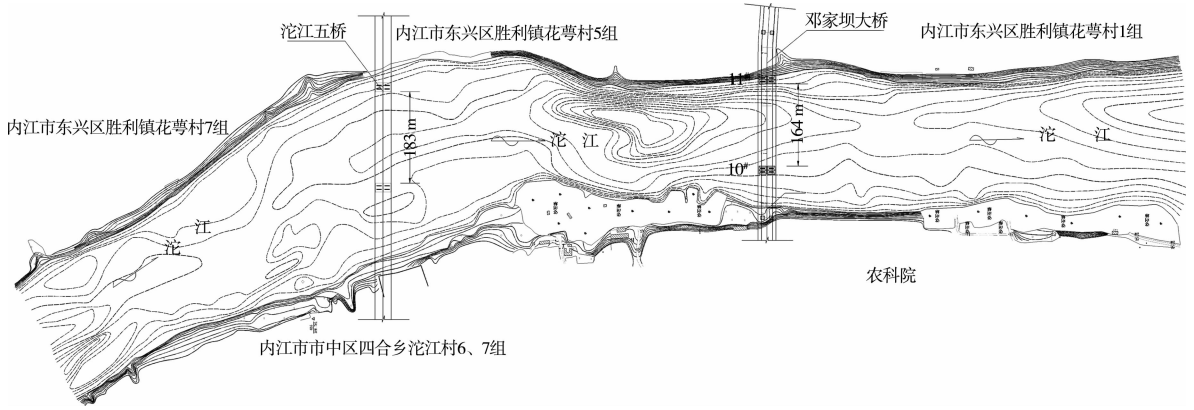


图7 邓家坝桥群河段桥位及桥墩布设

根据《内河通航标准》,可计算得出拟建邓家坝大桥所需的单孔双向通航净宽为 84.68 m,但由于该桥与沱江五桥不满足桥间距要求,出于对船舶航行安全的考虑,应对桥梁跨度进行加大以保障通航安全。将船舶下行航速、实际桥间距、船队长度以及河道弯曲半径代入公式(5)中,可计算得出拟建邓家坝大桥的桥梁净宽值应不小于 160.33 m,该值与设计提出的主跨 180 m(净宽 164 m)较为一致,且较规范值富余 79.32 m。因此,根据该桥群河段的通航条件,设计推荐采用了大跨度方案后,拟建邓家坝大桥桥址和桥跨布设是可行的。

## 2) 工程实例 2。

在重庆长江菜园坝河段上,1 100 m 范围内建有菜园坝长江大桥(主跨 420 m)和石板坡复线大桥(主跨 330 m)。根据 1 000 t 代表船队尺度(175 m×34 m×2.8 m)和下水 5 min,航速取 25 km/h,则容易得出两桥间需满足的最小间距值 2 275 m,而实际间距为 1 100 m,由此将形成“桥群”河段。该桥群河段属丘陵山区河道,受地质构造作用的影响,在平面上呈连续弯曲形态,弯道曲率半径约 2 500 m。将船舶下行航速、实际桥间距、船队长度以及河道弯曲半径代入公式(5)中,得出石板坡复线桥的最小净跨需 405 m,而已

建的石板坡复线桥通航主跨为 330 m。由此可知,石板坡复线桥跨度与形成“桥群”后的通航环境不相适应,由此将会影响船舶航行视线,给安全航行带来一定的隐患。

## 6 结论

1) 基于概化弯道桥群河道条件,耦合平面二维水流数学模型,采用船舶操纵运动数值模拟方法,拟定出了概化弯道桥群河段上的桥间距与桥梁净跨间的内在关系。同时考虑实际的河道条件,给出了桥群河段桥间距与桥梁净跨耦合关系的一般形式。

2) 选择山区河流两种典型的桥群河段——四川沱江邓家坝和重庆长江菜园坝桥群河段,利用拟合的桥间距与桥梁净跨间关系式,分析得出设计提出的邓家坝大桥主跨 180 m(净宽 164 m),满足该桥群河段的船舶航行要求;石板坡复线桥跨度与形成“桥群”后的通航环境不相适应,将会在一定程度上影响该河段的通航环境。

3) 关于船舶操纵运动数值模拟成果是基于较适应于山区航行条件的实船,且仅选择了一种代表船型。因此,本文成果可适用于山区河流,而对其应用的普遍性,需作进一步的研究。