

[船舶结构]

船体阻力数值计算在肥大船型球首优化中的应用*

次洪恩

(七〇八研究所 上海 200011)

[关键词] 肥大型船; 船体阻力; 球首优化

[摘要] 以一艘低速肥大型油船为研究对象, 设计了三型多参数共 18 个不同球首。采用荷兰 MARIN 水池开发的 RAPID 软件进行船体阻力数值计算, 为肥大船型的球首优化提供了必要的基本信息。

[中图分类号] U661.31⁺1 [文献标识码] A [文章编号] 1001-9855(2009)01-0024-06

Bulbous bow optimization of full-formed ships based on numerical calculation of hull resistance

Ci Hong'en

Keywords: full-formed ships; hull resistance; optimization of bulbous bow

Abstract: In this paper, 18 different bulbous bows (three types and different parameters) are designed for a large low-speed full-formed oil tanker based on a software developed by Holland MARIN basin—RAPID. Necessary information for bulbous bow optimization are obtained.

0 引言

利用数值计算方法对船舶型线进行优化, 可以减小船模试验次数, 节约时间和资金。在各种兴波阻力的理论计算方法中, 基于线性理论的 Dawson 方法是其中应用比较广泛的一种, 后来在此基础上又发展了许多非线性兴波阻力计算方法。国际上比较成熟的船体阻力计算软件有荷兰 MARIN 水池的 DAWSON、RAPID, 德国 HSVA 水池的 SHALLO, 瑞典 SSPA 的 SHIPFLOW 等。当今在模型试验前通过软件计算进行型线优化已是船舶设计的一个常规步骤。

本文采用荷兰 MARIN 水池开发的船体阻力计算软件 RAPID, 对肥大型油船球首进行组合选优, 力求能总结出此类船型球首选型的规律, 从而有效运用于工程实际。

1 非线性兴波阻力 CFD 计算原理

1.1 计算原理

根据势流假设, 流场存在速度势 ϕ , 且满足以下控制方程和边界条件:

Laplace 方程:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

物面不可穿透条件:

$$\phi_n = 0 \quad (2)$$

其中 \vec{n} 是船体表面的外法线方向, 指向流体域。

自由表面(波面)运动学边界条件:

$$\phi_z = \phi_x \zeta_x + \phi_y \zeta_y \quad \text{在 } z = \zeta(x, y) \text{ 上} \quad (3)$$

自由表面动力学边界条件:

$$\zeta(x, y) = \frac{1}{2} F_n^2 (1 - |\nabla \phi|^2) \quad (4)$$

在 $z = \zeta(x, y)$ 上

池底满足不可穿透条件:

* [收稿日期] 2008-11-10

[作者简介] 次洪恩(1983.10-), 男, 汉族, 河北人, 在读硕士研究生, 主要从事舰船总体设计与研究工作。

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad z = -\infty \quad (5)$$

采用联合自由表面条件,联立(3)、(4),消去波面起伏,得到的联合自由表面条件是在 $z = \zeta(x, y)$ 上

$$\frac{1}{2} F_n^2 \nabla \phi \cdot \nabla (\nabla \phi \cdot \nabla \phi) + \phi_z = 0 \quad (6)$$

联合自由表面条件在前次迭代解的基础上的摄动和线性化。令 $\phi = \Phi + \varphi, \zeta = \Pi + \tau$, 其中 Φ, Π 是上次迭代的速度势和波面起伏, φ, τ 是新的摄动, 假设它们相对于上次的迭代结果是小量。将联合的自由表面条件在 Π 上展开, 略去摄动量的二阶以上的量, 得到在已知波面 Π 上的线性化的联合自由表面条件为

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} [\nabla \varphi \cdot \nabla (\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi) + 2 \nabla \Phi \cdot \nabla (\nabla \Phi \cdot \nabla \varphi)] \\ & + g \varphi_z + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{2} \nabla \Phi \cdot \nabla (\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi) + g \Phi_z \right] (\zeta - \Pi) \\ & + \frac{1}{2} \nabla \Phi \cdot \nabla (\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi) + g \Phi_z = 0 \quad z = \Pi \quad (7) \end{aligned}$$

波面起伏:

$$\begin{aligned} \tau = & \frac{1}{1 + F_n^2 \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi_z} \\ & \left\{ \frac{1}{2} F_n^2 [1 - \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi - 2 \nabla \Phi \cdot \nabla \varphi] - \Pi \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

从收敛和计算简单的角度考虑,省去三阶导数项和转移项,联立运动学和动力学条件,消去波面起伏,得到新的联合自由表面条件是

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2} F_n^2 \left[\Phi_x \frac{\partial}{\partial x} + \Phi_y \frac{\partial}{\partial y} \right] [\Phi_x^2 + \Phi_y^2 + \Phi_z^2 + 2 \Phi_x \varphi_x \\ & + 2 \Phi_y \varphi_y + 2 \Phi_z \varphi_z] + \varphi_x \Pi_x + \varphi_y \Pi_y - \Phi_z - \varphi_z = 0 \\ & z = \Pi \quad (9) \end{aligned}$$

1.2 数值处理技巧

自由表面上采用“上置”奇点方法。奇点分布在高出自由表面一定距离的曲面上,奇点上置使奇点不会与配置点重合,排除了积分的奇异性,使速度场比较光滑,而且可以使用 Gauss 积分法计算积分,无需推导积分的精确解析表达式。在迭代过程中,随着自由表面的变动,调整奇点的位置,以保证奇点抬高的距离基本是常数。然后将离散得到的速度和源强的关系,代入自由表面条件和物面条件,结合迎风差分格式的应用和自由表面上游条件的设置,得

到最后的线性代数方程组。求解方程计算得到网格的源强以后可以得到所有配置点处的速度分量,将这些结果代入动力学自由表面条件可以得到新的波面升高值。然后移动配置点到新的波面位置,进行迭代计算,最后迭代过程收敛,可以得到波形、兴波阻力等。

2 母型船和球首方案

本论文的母型船为七〇八研究所于 2003 年设计的 159 000 DWT 油船,该船为低速肥大类型油船,船的主尺度见表 1:

表 1 159 000 DWT 油船主尺度参数

主尺度及参数	符 号	单 位	数 值
设计水线长	L_{wl}	m	269.00
垂线间长	L_{pp}	m	264.00
型 宽	B	m	48.00
型 深	D	m	24.00
设计吃水	T	m	16.00
方形系数	C_b	—	0.818 6
水线面系数	C_w	—	0.909 6
棱形系数	C_p	—	0.821 0
浮心位置	LCB	m	140.69

球首的几何特征形状可以用下面几个参数表示:

(1) 相对长度比 L_{pr}/L_{pp} : 这里 L_{pr} 是球首最前端至首垂线的距离, L_{pp} 是船的垂线间长;

(2) 最大宽度比 B_b/B : B_b 是首垂线处球首剖面的最大宽度, B 为船宽;

(3) 相对浸深 Z_b/T : 这里 Z_b 是球首中心或球首最前点或者最大宽度处距静水面的距离, T 为船的吃水;

(4) 球首横剖面面积比 A_b/A_{ms} : A_b 这里是首垂线处球首横剖面面积, A_{ms} 是船中横剖面的面积;

(5) 球首纵剖面面积比 A_{bl}/A_{ms} : A_{bl} 这里是球首中纵剖面面积, A_{ms} 是船中横剖面的面积;

(6) 相对排水体积比 V_{pr}/∇ : 这里 V_{pr} 是球首的排水体积, ∇ 为船体排水体积。

这些参数基本表示了球首的几何形状特征。研究球首对阻力的影响,主要是研究这些几何参数以

及球首类型变化对阻力的影响。根据历史统计资料^[7],撞角型球首、SV 型球首和上翘型球首比较适合此类船型。因而这里同时选取了这三类不同形

式的球首进行计算,为简化计算每一类型的球首仅选取长度和横剖面面积作为自变量;其他参数根据型线光顺要求进行相应的改变。参见图 1~图 3。

表 2 159 000 DWT 油船球首的特征参数

序号	C_b	$\frac{L_{pr}}{L_{pp}}$	$\frac{B_b}{B}$	$\frac{A_{bt}}{A_{ms}}$	$\frac{A_{bt}}{A_{ms}}$	$\frac{V_{pr}}{\nabla}$
S1	0.818 6	0.018 939	0.219 667	0.205 770	0.094 444	0.001 687
S2	0.815 8	0.010 000	0.219 583	0.204 340	0.049 193	0.000 998
S3	0.818 7	0.030 000	0.258 125	0.235 299	0.135 204	0.002 818
S4	0.820 3	0.018 939	0.299 167	0.302 638	0.094 444	0.002 639
S5	0.818 4	0.018 939	0.264 792	0.251 746	0.094 444	0.002 276
S6	0.809 5	0.018 939	0.161 292	0.150 432	0.094 444	0.001 128
Z1	0.817 8	0.018 939	0.242 500	0.174 069	0.053 294	0.001 182
Z2	0.817 0	0.010 000	0.211 875	0.142 344	0.029 038	0.000 585
Z3	0.818 6	0.030 000	0.257 083	0.193 619	0.089 191	0.001 940
Z4	0.821 1	0.018 939	0.318 250	0.251 051	0.053 292	0.001 825
Z5	0.819 4	0.018 939	0.271 667	0.201 933	0.053 292	0.001 400
Z6	0.817 5	0.018 939	0.210 833	0.150 049	0.053 292	0.000 921
Q1	0.817 3	0.018 939	0.267 875	0.212 786	0.089 470	0.002 214
Q2	0.815 8	0.010 000	0.248 750	0.182 279	0.040 150	0.000 991
Q3	0.818 7	0.030 000	0.285 417	0.243 398	0.139 944	0.003 386
Q4	0.820 3	0.018 939	0.345 833	0.300 123	0.089 470	0.003 030
Q5	0.818 4	0.018 939	0.301 875	0.249 763	0.089 470	0.002 557
Q6	0.809 5	0.018 939	0.204 167	0.149 580	0.089 470	0.001 301

注: (L_{pr} :球首长度; L_{pp} :垂线间长; B_b :球首宽度; B :型宽; A_{bt} :球首横剖面面积; A_{ms} :中横剖面面积; A_{bt} :球首纵剖面面积; V_{pr} :球首体积; ∇ :原型船排水量。)

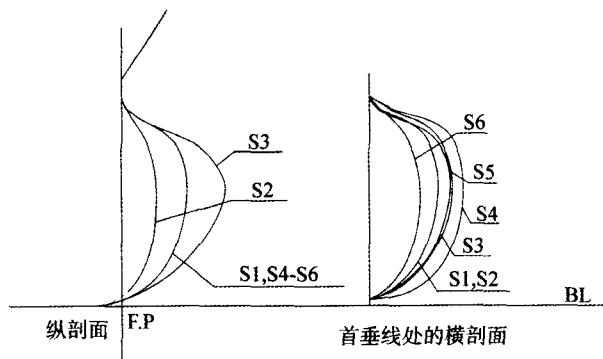


图 1 SV 型球首型线

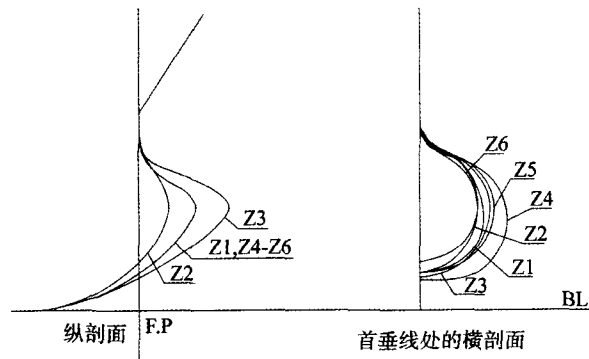


图 2 撞角型球首型线

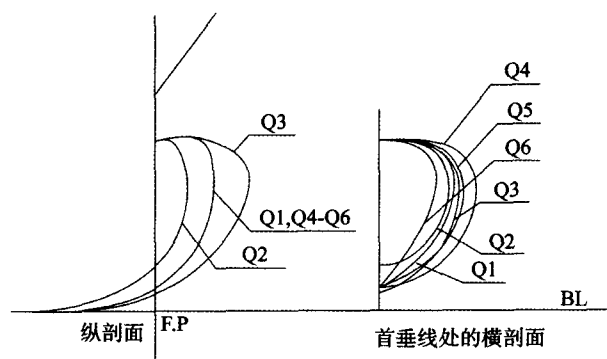


图3 上翘型球首型线

3 计算结果及分析

鉴于只有在相似网格密度及相同 Fn 数下计算

的阻力数值才有比较的意义,这里对船体表面网格均选取 2 300 左右,在相同 Fn 数下自由表面网格数取相同的数值,以保证结果有比较意义。

计算结果如表 3 所示:

结果分析:将已进行船模试验优化的母型船(S1)兴波阻力作为基准,用三类不同球首与其兴波阻力结果进行比较:(参见图 4~图 9)

在设计吃水状态下,相同 Fn 条件下,分别比较 S1-S3 和 Z1-Z3 可以看出,对于 S-V 型和撞角型球首,长度变化对兴波阻力影响不大;比较 Q1-Q3,上翘型球首随长度增加将使兴波阻力增大。而横剖面面积比过大或者过小都不利于阻力性能,每一类球首都有一个阻力最优的剖面范围,针对该船型则分别是 S1、Z1 和 Q1。

表 3 兴波阻力计算结果

(单位:kN)

工况	设计吃水				压载工况			
Fn	0.145	0.153 6	0.166 9	0.177 1	0.145	0.153 6	0.166 9	0.177 1
S1	19.291	26.874	61.436	115.537	37.169	74.131	69.569	199.881
S2	16.056	28.541	66.882	126.918	57.999	110.527	82.105	187.904
S3	15.938	26.984	61.479	118.23	28.001	58.469	46.675	113.872
S4	29.107	50.779	82.765	119.539	60.089	122.768	86.473	196.522
S5	21.606	34.942	61.259	100.623	47.308	92.828	61.242	160.442
S6	22.913	51.848	70.494	129.735	30.487	65.806	100.473	149.306
Z1	18.237	32.302	60.03	124.357	34.268	69.46	60.445	154.71
Z2	19.442	34.503	63.937	128.59	37.023	86.422	74.086	178.261
Z3	18.449	32.591	59.438	123.13	21.883	43.647	44.321	114.078
Z4	31.77	46.225	67.215	118.995	39.959	128.831	84.299	168.791
Z5	25.289	42.668	64.85	120.71	34.14	93.682	71.361	158.293
Z6	20.824	35.421	63.801	126.379	37.848	66.805	71.976	163.719
Q1	17.754	46.618	82.046	119.203	31.874	55.129	54.739	130.888
Q2	19.922	51.289	85.724	125.183	26.574	58.084	67.385	215.827
Q3	23.253	56.239	83.586	121.698	29.82	51.846	54.336	121.641
Q4	21.078	55.984	92.136	132.414	37.784	80.384	78.922	201.759
Q5	21.093	52.874	83.63	119.524	38.211	76.908	64.91	178.259
Q6	18.443	47.317	83.649	119.387	47.451	60.268	77.663	198.564

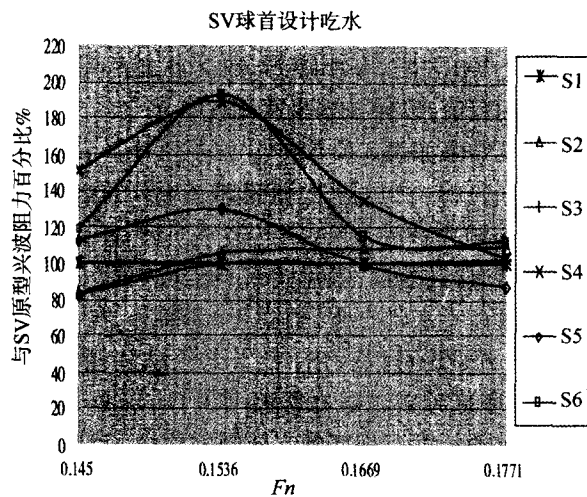


图 4 SV 型球首设计吃水阻力比较

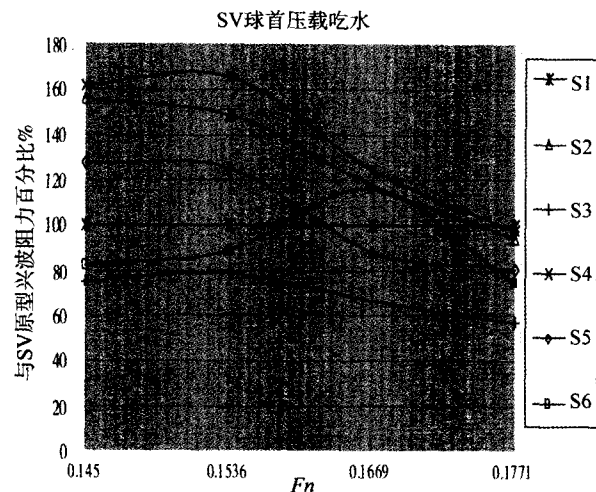


图 5 SV 型球首压载吃水阻力比较

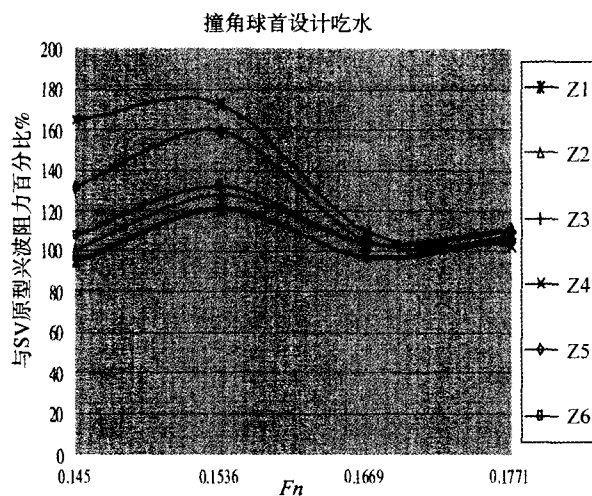


图 6 撞角型球首设计吃水阻力比较

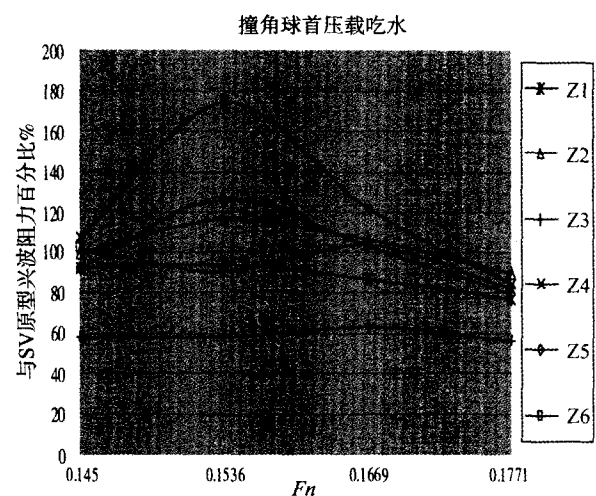


图 7 撞角型球首压载吃水阻力比较

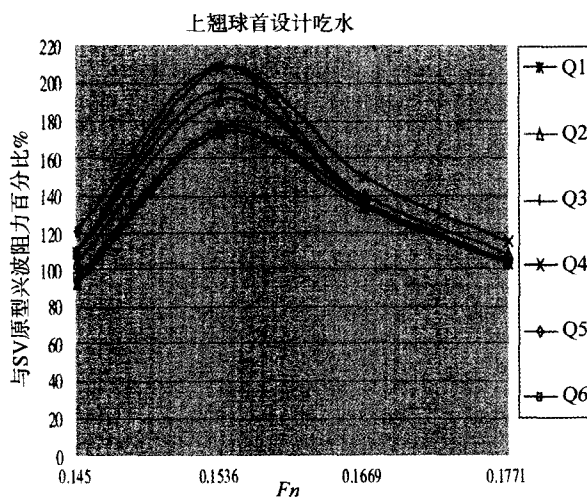


图 8 上翘型球首设计吃水阻力比较

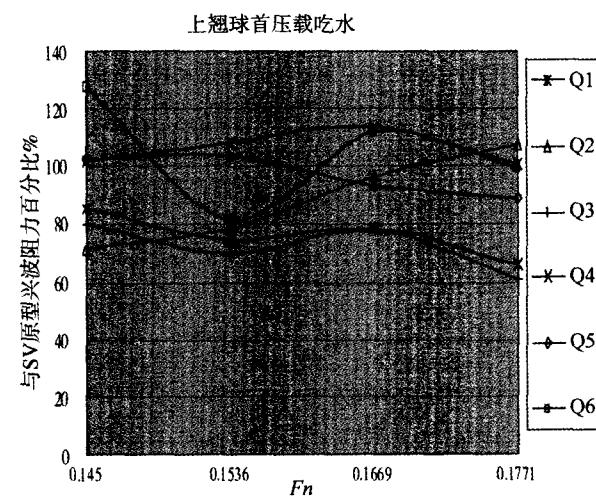


图 9 上翘型球首压载吃水阻力比较

在压载状态下,相同 Fn 条件下,分别比较 S1-S3、Z1-Z3 和 Q1-Q3 可以看出,对于这三类球首,兴波阻力随球首长度增加而逐渐降低(参见图 10、图 11),对照船体表面压力分布图(图 12、图 13)可以看出,球首长度变短,球首下方压力梯度变大,导致了阻力的增加。而横截面面积减小可以降低兴波阻力,这主要是由于消瘦的进流段可以使“凸肩”向后移,从而降低“凸肩”处的压力梯度,减小了兴波阻力。

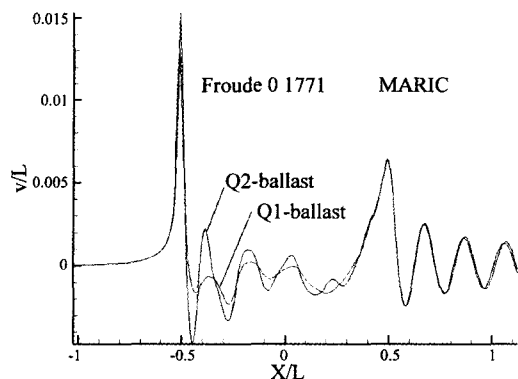


图 10 Q1 与 Q2 压载吃水纵向波高比较

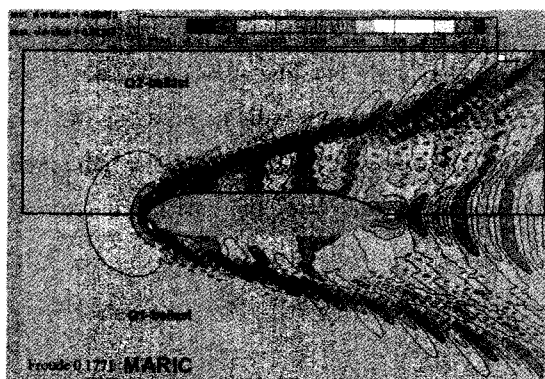


图 11 Q1 与 Q2 压载吃水波形比较

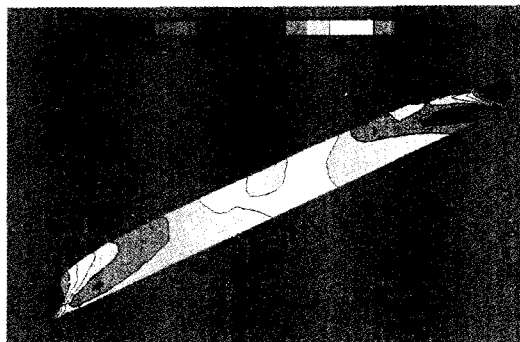


图 12 Q1 压载吃水船体表面压力分布

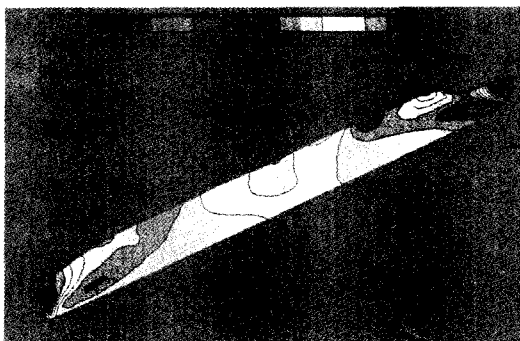


图 13 Q2 压载吃水船体表面压力分布

优的尺度范围。具体针对不同的球首类型,在参数的选择上略有不同。✕

[参考文献]

- [1] Raven H C. A practical nonlinear method for calculating ship wavemaking and wave resistance, Proc. 19th Symp. on Naval Ship Hydrodynamics, Seoul, Korea, 1992.
- [2] Raven H C. Nonlinear ship wave calculations using the RAPID method, Proc. 6th Int. Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Iowa City, 1993.
- [3] 陈京普、朱德祥、刘晓东. 兴波阻力数值预报方法研究及其在集装箱船船型优化中的应用[J]. 水动力学研究与进展. A 辑. 2006, 21(1).
- [4] 高高. 船波问题的辐射条件、自由表面条件的研究及面元法误差分析[D]. 武汉交通科技大学博士论文. 1997.
- [5] 张红玲,朱丽萍,钟应华. 应用计算流体力学进行 VL-CC 船型的线型优化[J]. 上海造船, 2006, (3).
- [6] 刘应中. 船舶兴波阻力理论[M]. 国防工业出版社. 北京. 2003.
- [7] 邵世明,赵连恩,朱念昌. 船舶阻力[M]. 国防工业出版社. 北京. 1995.
- [8] 陈霞萍. 159 000 DWT 油轮船模试验报告[R]. 交通部上海船舶运输科学研究所. 2001.

4 结 语

应用 RAPID 软件进行船体阻力计算,并不能准确预报阻力的具体数值,但是对不同的球首形状和参数的阻力差异有比较的价值。因此在型线设计初期依然是一种有效的工具。

通过本文计算分析的结果可以看出,针对此类低速肥大油船,在满足布置和主尺度要求范围内,球首长度取为船长的 2% ~ 3%,球首横剖面面积等于或略小于中横剖面面积的 20%,是球首的一个较