

基于阻力性能船体型线精细优化的 CFD 方法

王言英

(大连理工大学 船舶工程系, 辽宁 大连 116024)

摘要: 根据基于阻力性能的船体型线优化方法的不同, 在船舶设计中可以归纳成 5 个相应水平的优化程序. 总结了基于经验或统计公式的船体尺度优化(零水平优化), 应用 CFD 方法分别对裸船体型线、局部船体型线和附体型线进行的精细优化(1, 2, 3 水平优化), 以及通过模型试验完成的船体型线的最终优化(4 水平优化)的研究成果. 所采用的 CFD 方法分别为用厚边界层近似与积分法、厚边界层近似与差分法以及部分抛物线近似与差分法求解 N-S 方程. 4 水平则是通过包括流场测量信息的模型阻力试验进行最终的型线优化.

关键词: 计算流体力学/船舶设计; 船体阻力; 优化; 势流; 粘性流

中图分类号: U 661.21 **文献标识码:** A

0 引言

船型优化是船舶设计的传统方法之一, 其中包括船体型线优化. 船体型线优化通常可以应用数学方法对型线进行光顺, 但是必须以船体的布置、水动力与结构性能的要求为目标函数. 在以船体阻力性能为型线优化对象时, 只能在某些约束条件下来完成. 因此, 实际上船体型线优化是一种综合的与权衡的优化方法.

以往, 在船体型线设计的初始阶段大多是应用母型法, 并强烈地依赖于设计经验和型线数据库. 船体型线的进一步设计, 通常要进行模型试验. 模型试验资料的积累或模型系列试验结果的分析, 都可以为船体型线优化设计提供有益的信息. 这些经验的或试验的资料处理主要应用基于最小二乘算法的回归分析技术. 众多的阻力估算与航速预报经验公式和诸如著名的 60 系列、BSRA 系列及 SSPA 系列等模型试验分析结果, 在 20 世纪 60 年代前对船舶设计发挥了重要作用. 近 40 年来, 单船建造批量愈来愈小, 性能要求愈来愈高, 同类船舶更新换代愈来愈快. 因而, 以往的船型资料难以胜任新的要求, 也很少可能籍此进行系列船型的开发.

计算机和计算流体力学(CFD)的发展, 为快速高效开发性能优异的单船(或小批量的)船型提供了可能. 同模型试验相比, CFD 方法更加经济, 也更加快捷. 在船舶水动力性能方面应用 CFD 方法的效果主要取决于 CFD 程序的数学模型水平. 应当指出, CFD 方法并不能替代模型试验, 但它可以缩小做模型试验的范围和为型线优化提供有益信息.

在船舶设计实践中, 已经取得了成功应用 CFD 程序优化船体型线的工程实例, 而且最终也得到了应用实验流体力学(EFD)方法和实船试航的验证. 美国一项对三体船的阻力性能优化研究中, 分别对外船体与中心船体的纵向相对位置和横向间距在不同航速下多体船消波效果进行探讨, 共组合了 48 678 个方案的 CFD 计算, 经优化计算确定了最佳设计方案, 并得到了模型试验验证^[1]. 船体型线精细优化是针对传统优化方法而言的, 其优化对象不仅包括主尺度、裸船体型线, 而且包括船体局部型线与附体型线. 芬兰在开发 135 000 m³ LNG 船的设计过程中, 对船体型线基于快速性的要求采用了分步优化技术. 首先运用经验方法(海军部系数法)对船体尺度与型线进行了初步优化; 其后应用 CFD 计算机程序系统对

船体型线进行了进一步的优化,并以模型试验做了验证;最终应用模型试验方法分别对舵鳍、消除舳涡装置和舵球等节能附体进行了选择性的优化处理^[2],已经形成了一个多水平的优化程序。

CFD 方法的发展已经逐步成为船体型线优化的基本手段。瑞典的 L. Larsson^[3]、美国的 F. Stern^[4],以及荷兰的 M. Hoekstra^[5]等的研究成果和开发的计算机程序系统 SHIPFLOW、CFDSHIP-IOWA、PARNASSOS 等均已船舶设计实践中应用。

本文按优化水平总结了基于阻力性能优化船体型线的理论方法,并给出计算实例以及判断船体型线优劣的相关准则。

1 优化水平

为了更有效地进行船体型线设计,在不同设计阶段可以采用不同水平的优化方法。

1.1 船体尺度优化(0 水平)

在设计初始阶段,通常是针对给定的船体尺度和选择相应的母型船,初步确定船体型线。就船体阻力而论,尺度与船型系数的选择是十分重要的。因此,在保证总体布置与结构设计的前提下,在尺度限定范围内对其进行适当的调整是可能的,也是必要的。应当指出,船舶设计实践中长期积累的经验和试验的资料与数据,是该设计阶段实现船体尺度优化的重要依据。

为使用方便,特别是为适应计算机应用,对资料与数据的数学模型化是必要的。回归分析和神经网络与遗传算法,是处理经验与试验数据的有效方法。所有的统计结果必须给出其变量使用空间以及相应的标准差和置信度,以保证其被合理地使用^[6]。对于系列 60^[6]、渔船系列^[7]、肥大型散货船系列^[8]、高速船系列^[9,10]、全升式气垫船系列^[11],以及 BSRA 系列^[12]分析给出的数学模型,是以船体主尺度与船型系数为自变量和以阻力(系数)或剩余阻力(系数)为因变量的,可以用做船体尺度优化的基本数学模型。

1.2 船体光体型线优化(1 水平)

阻力是船体光体型线优化的目标函数。对于大型与超大型船舶,根据船型可分原理,前后体型线可以分别进行优化。通常,后体型线以粘性阻力为优化的目标函数,前体型线以兴波阻力为优化的目标函数。三维边界层计算方法已被广泛地用于船体型线阻力性能优化设计^[13],在船体表面

及其外场计算网格自动产生^[14,15],对于船体粘性绕流初值确定^[16,17],以及有关湍流模式与边界层内各向速度剖面分析和应用^[18,19]方面,为船体阻力及其阻力成分的计算提供了必要的条件。应用 Navier-Stokes 方程的部分抛物线形简化模式,辅以三维 Coles 速度剖面 Head 渗入方程,在流线坐标系中以积分-差分算法,求解三维边界层的流动参数并确定船体粘性阻力^[20]。自船底龙骨到自由表面的各流线上的边界层参数(δ , θ_{11} , H , β , C_f),是改善船体粘性阻力性能和螺旋桨桨盘面处标称伴流分布的重要信息。Michell 积分法常被用来预报波形阻力。

根据船体阻力成分的三因次假定,船体总阻力为粘性阻力与波形阻力之和,成为型线设计优劣的判据。同时根据粘性阻力中的压差阻力成分和波形阻力成分,又可以作为船体首尾型线设计优劣的判据。

1.3 船体局部型线优化(2 水平)

船体型线的进一步优化中,流场信息是至关重要的。为此,计入船体绕流粘性流与势流的相互作用的流场计算是必需的。对于深水非定常不可压缩流体和计入非线性自由表面边界条件的船体绕流,根据 Navier-Stokes 方程的 TSL 模式和 Poisson 压力方程,应用有限差分方法在时域中进行船体绕流模拟计算,从而可以获得更充分的流场信息,以及确定船体的粘性阻力和波形阻力成分^[21~23]。

作为船体阻力性能优化的目标函数,除了总阻力或相关的阻力成分外,还包括船体绕流的流场信息,诸如船体首波波系的压力分布,船体表面边界层在后体的分离位置。特别地,相应的船体绕流流场可视化技术的成功开发^[24,25],对于船体局部型线优化设计是十分有意义的工具。

1.4 船体附体型线优化(3 水平)

计入粘性绕流对螺旋桨叶剖面和桨叶水动力性能影响的计算^[26~29],对于考虑桨船相互作用的计算是必需的。

利用压力匹配的差分法或有限体积法解二模式的部分抛物线形 Navier-Stokes 方程被用来模拟考虑桨船相互作用后的流场^[27~30]。此时目标函数为粘性阻力(系数)及伴流分数,优化对象为局部船体型线、附体型线及螺旋桨的配置。

1.5 船体型线定型优化(4 水平)

通过上述不同水平的基于阻力性能船体型线

的优化设计,不仅可以构造优秀的型线,还可以形成性能优异的型线子样.进一步的型线优化,可以根据给定的目标函数和约束函数进行选择,也可以应用优化程序系统进行最优化的计算.不论用何种方法从事船体型线的优化,其获得的型线的阻力性能最终只能通过模型试验来确定.实际上,所有进一步优化信息都可以通过基于 2、3 水平的计算得到.

目前利用 CFD 程序预报阻力性能的相对准确度是可以保证的,也就是说可以利用 CFD 程序的计算进行不同模型间的比较.但最终船体阻力的预报还应由模型试验来确定.迄今为止,大部分 CFD 程序还只能对模型($Re=10^{6-7}$)的阻力性能进行预报^[31~34].因此,可取与计算模型相同尺度的模型进行试验.对于实船(通常 $Re=10^{8-9}$)阻力性能的预报应考虑尺度效应.所有船舶设计者都希望 CFD 程序可以直接预报阻力性能,而不再需要做模型试验.这种愿望只有在系列船型及有相当大数据库支持的船型上才有望实现.对于新船型,模型试验是必要的.所有 CFD 程序的结果也必须经模型试验进行验证.

2 应 用

本文以 DSMT 油船为实例,在已进行尺度优化(0 水平)、裸船体型线优化(1 水平)的基础上进行局部型线优化(2 水平).

2.1 船型参数

DSMT 油船的主尺度及船型系数如表 1 所示.

表 1 船体主尺度及船型系数

Tab.1 Dimensions and coefficients of ship hull

L/B	B/T	∇/L^3	C_B
5.5	3	0.009	0.815 8

表 3 模型阻力试验和计算结果

Tab.3 Experimental and computational results for model resistance

方案		$C_t/10^{-3}$	$C_{pv}/10^{-3}$	$C_w/10^{-3}$	$1+k$	$C_t/10^{-3}$	$1-w$	η_h
		模型实验				计算		
方案	模型实验	3.334				4.376	0.734	1.164 7
	计算	3.230	0.827 8	0.155	1.216	4.213	0.498	
方案	模型实验	3.334				4.314		
	计算	3.229	0.827 7	0.151	1.215	4.208	0.498	
方案	模型实验	3.334				4.420	0.605	1.198 0
	计算	3.228	0.834 4	0.179	1.217	4.241	0.485	
方案	模型实验							
	计算	3.227	0.831 3	0.175	1.216	4.233	0.485	

在母型船基础上对首尾分别进行修改,共得 4 种船型方案,分别为 DSMT 船体母型(方案)、船体球首改型(方案,提高球首重心)、船体球尾改型(方案,增加 a/b 值)、船体球首和球尾同时改型(方案,提高球首重心和增加 a/b 值).

表 2 给出各方案的有关参数.其中 l_b/L_{pp} 为球鼻最前端至首柱距离与垂线间长之比; h_b/T 为球鼻最大宽度处距静水面的距离与吃水之比; b_{max}/B 为首柱处球鼻横剖面的最大宽度与船宽之比; S_p/S 为首柱处球鼻横剖面的面积与中横剖面的面积之比; a/b 表示球体大小, a 为特征站最窄处的半宽, b 为最窄处以下的最大半宽; h_b/h_s 为球尾中心在基线以上高度与螺旋桨轴在基线以上高度之比.

表 2 各方案方形系数及首尾参数

Tab.2 Block coefficients and geometric parameters of bow and stern

方案	C_B	球 首				球尾 a/b
		l_b/L_{pp}	h_b/T	b_{max}/B	S_p/S	
	0.815 8	0.16	0.489	0.168 4	0.006 07	0.412
	0.815 9	0.16	0.485	0.169 0	0.006 12	0.412
	0.815 9	0.16	0.489	0.168 4	0.006 07	0.538
	0.816 0	0.16	0.485	0.169 0	0.006 12	0.538

2.2 模型试验及计算

对于模型尺度($\lambda=50$)的方案~的阻力与阻力成分的试验(换算到水温 15)和根据 1 水平与 2 水平的型线优化程序计算的结果分别载于表 3.船模试验的 Froude 数为 0.12,试验的总阻力系数 C_t 为测量值,摩擦阻力系数 C_f 为根据 1957ITTC 计算公式的计算值.在相同 Froude 数下, C_t 和形状阻力系数 C_{pv} 为应用 Navier-Stokes 方程的高阶模式积分法的计算结果;波形阻力系数 C_w 为来自 Michell 积分法的计算结果.表中的 $1-w$ 和 η_h 分别为桨盘面处的平均轴向伴流分数和船身效率.

2.3 结果分析

对于方案 I, 从首部压力系数 C_p (水动压力 $p/0.5 \rho v^2$) 沿 Z 轴方向分布(图 1), 可以看出在相同高度处(0.2T 左右) 方案 II 的压力系数比方案 I 的要低, 这对于降低船舶阻力是有利的, 因此方案 II 的粘压阻力有所降低。

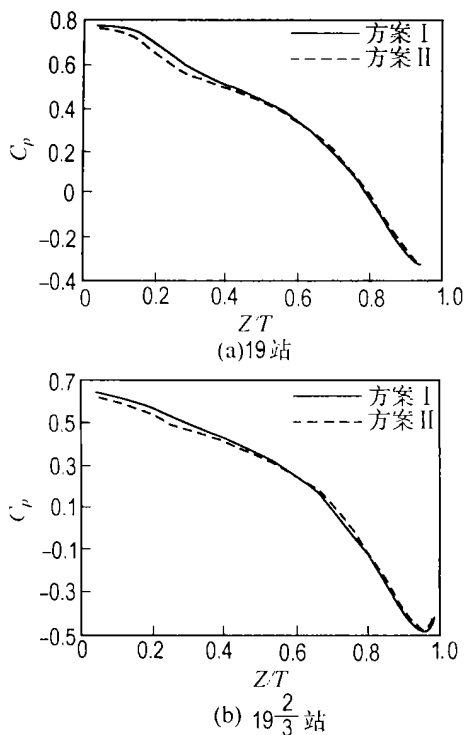


图 1 压力系数 C_p 沿 Z 轴方向分布

Fig. 1 Distribution of pressure coefficients C_p on Z axes

对于兴波阻力, 从相同 X 处沿 Y 轴方向瞬时波面升高(F_{se})(图 2), 可以看出方案 II 的 F_{se} 要比方案 I 的略低; 从能量角度讲, 这对于降低兴波阻力是有利的, 因此方案 II 的兴波阻力也有所下降。

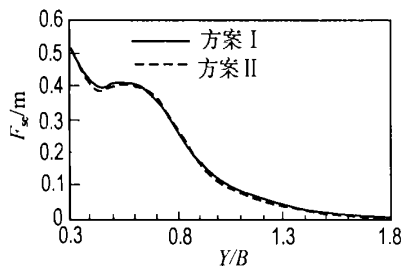


图 2 19 $\frac{1}{4}$ 站处沿 Y 轴方向瞬时波面升高 (F_{se})

Fig. 2 Instantaneous elevation (F_{se}) of wave making on transverse at station of 19 $\frac{1}{4}$

对于方案 III, 同样从尾部压力系数 C_p 沿 Z 轴方向分布(图 3), 可以看出在相同高度处(尤其

在 0.6T 左右) 方案 III 的压力系数比方案 I 的要低; 同时从相同高度处压力系数沿 X 轴分布(图 4), 可以看出方案 III 沿 X 轴压力梯度 $\partial p / \partial x$ 比方案 I 的大, 这些都不利于降低船体粘压阻力, 因此方案 III 的粘压阻力有所增加。对于兴波阻力, 同样考虑相同 X 处沿 Y 轴方向瞬时波面升高, 方案 III 在 -0.5 站处沿 Y 轴方向瞬时波面升高比方案 I 增加 0.04 m (1.2%), 这对于降低兴波阻力不利, 因此方案 III 的兴波阻力也有所增加。但是从推进角度讲, 方案 III 的伴流分数是增加的, 由试验结果可以看出船身效率提高了 2.86%。

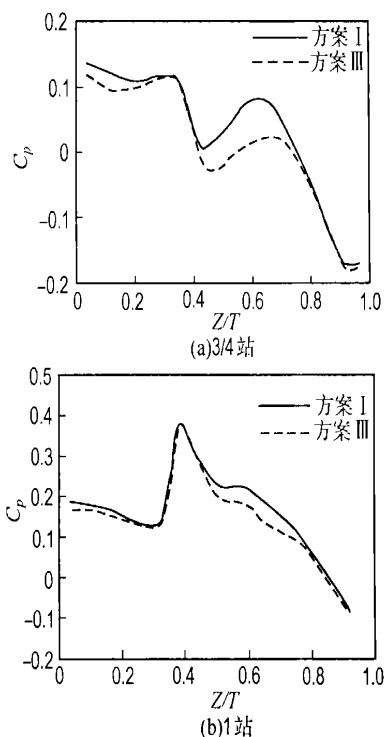


图 3 压力系数 C_p 沿 Z 轴方向分布

Fig. 3 Distribution of pressure coefficients C_p on Z axes

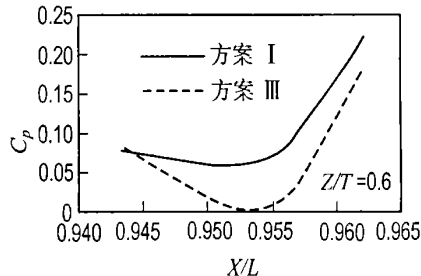


图 4 距基线 9.6 m 处 1 站附近 C_p 沿 X 方向分布

Fig. 4 Distribution of pressure coefficient C_p along X -direction at station 1 with height of 9.6 m from base line

方案 III 是对方案 I 和方案 II 的综合, 同样对

其首、尾压力分布及沿 Y 轴方向瞬时波面升高进行比较分析, 可得方案 的粘压阻力及兴波阻力都较方案 的有所增加, 且增加幅度比方案 要小, 这是由于二者首部形状不同造成的。

通过以上分析计算可以认为, 利用计算给出的船体表面的压力分布及瞬时波面升高, 可以作为判断阻力性能的衡准。还可利用计算得到的动量损失厚度沿 X 轴方向的分布来判断分离点 ($\partial/\partial x = 0$) 的位置。计算结果与模型试验结果的比较表明, 无论是在阻力性能还是在伴流分布方面都有相同的变化趋势。应用 CFD 方法可以方便地给出船体绕流的流场信息, 并具有快捷和信息量丰富的特点。

3 结 论

(1) 以阻力性能为目标函数的船体型线优化是船体设计的组成部分之一, 也是一个关键的技术环节。母型资料与设计经验至今不失为型线设计的重要手段; 模型系列试验资料与经典的流体力学计算方法至今不失为型线设计的重要依据。

(2) 基于 Laplace 方程和 Navier-Stokes 方程问题的计算流体力学方法 (CFD), 船体绕流流场的计算结果同相应的模型试验结果已经取得基本一致的趋势, 可以给出可信的定性结果和可比拟的定量结果。

(3) 应用 CFD 方法构造型线阻力性能子样和最优化计算机软件从事船体型线的精细优化是一可行的设计方法。

(4) 依靠模型试验方法 (EFD) 验证 CFD 计算结果和船体型线优化结果, 是值得推崇的一种设计与研究的途径。在不断改进 CFD 数学模型与数值方法的同时, 要特别注重全尺度船体绕流计算方法的研究和模型-实船相关关系的研究, 以及关注与重视实船试航测试资料的分析与积累。

致谢: 在本文刊出之际, 对给予本项研究支持的国家自然科学基金委员会、前国防科工委、前中国船舶工业总公司和辽宁省科学技术委员会表示衷心感谢; 对从事该项研究的研究生戴晖辉、王若兰、龙敬华、万德成、梁勃、柴树红、王清霞、许胜南、李烨、钟洪亮、李铁骊和徐丽表示诚恳的谢意。

参考文献:

- [1] YANG C, LOHNER R, SOTO O. Optimization of a wave cancellation multihull ship using CFD tools [A]. **Proceedings of PRADS 2001**[C]. Shanghai: Elsevier Science Press, 2001.
- [2] HAMDAINEN R, VALKHOF H. New generation of 135 000 m³ LNG - carrier: details of a hydrodynamic optimization process[A]. **Proceedings of PRADS 1995**[C]. Seoul: SNAK Press, 1995.
- [3] LARSSON L, BROBERG L, KIM K J, *et al.* A method for resistance and flow prediction in ship design[J]. **Trans SNAME**, 1990, **98**: 495-535.
- [4] STERN F, PATERSON E G, TAHARA Y. CFDSHIP - IOWA: Computational fluid dynamics method for surface-ship boundary layers and wakes and wave fields[R]. **Report No. 381**, IIHR. Iowa: University of Iowa, 1996.
- [5] HOEKSTRA M. **Numerical Simulation of Ship Stern Flows with a Space-marching Navier-Stokes Method** [M]. Wageningen: MARIN Press, 1999.
- [6] 王言英. 船舶实验数据的回归分析[J]. 大连理工大学学报, 1980, **19**(1): 101-114.
(WANG Yanying. Regression analysis of ship data [J]. **J Dalian Univ Technol**, 1980, **19**(1): 101-114.)
- [7] 王言英. 沿海渔船阻力计算[J]. 大连理工大学学报, 1981, **20**(4): 67-72.
(WANG Yanying. A resistance prediction method and its application to fish boat [J]. **J Dalian Univ Technol**, 1981, **20**(4): 67-72.)
- [8] 王言英, 葛萍, 叶克建. 肥大型货船的功率估算方法[J]. 船舶工程, 1986(4): 1-6.
- [9] WANG Y Y, WANG S X. Drag estimation for hovercrafts[A]. **Proceedings of the 6th International High Speed Surface Craft Conference**[C]. London: [s n], 1988.
- [10] 王言英, 许胜南. 单体高速船的推进功率计算[J]. 大连理工大学学报, 1996, **36**(3): 324-328.
(WANG Yanying, XU Shengnan. Prediction of propulsive power for ships with homogeneous hull and high speed [J]. **J Dalian Univ Technol**, 1996, **36**(3): 324-328.)
- [11] 王言英, 王少新. 全垫升气垫船模型试验研究[J]. 大连理工大学学报, 1988, **28**(2): 75-80.
(WANG Yanying, WANG Shaoxin. Study of an air-cushion vehicle with model testing [J]. **J Dalian Univ Technol**, 1988, **28**(2): 75-80.)
- [12] 王言英, 黄鼎良. BSRA CB=0.80-0.85 阻力图谱

的拓展[J]. 中国造船, 1993(3): 54-57.

- [13] WANG Y Y. On application of the three dimensional boundary layer on ship hulls [A]. **Proceedings of the 18th International Towing Tank Conference (ITTC)**: vol 2 [C]. Kobe: [s n], 1987. 36-38.
- [14] WANG Y Y. An auto-generation method of the numerical grid for the surface and the field around ship hulls [A]. **International Conference on Numerical Methods for Fluid Dynamics** [C]. Oxford: [s n], 1988.
- [15] 王言英. 船体绕流计算网格自动生成研究[J]. 大连理工大学学报, 1990, **30**(3): 11-18.
(WANG Yanying. Auto-generation method of numerical grid for surface and field around ship hulls [J]. **J Dalian Univ Technol**, 1990, **30**(3): 11-18.)
- [16] WANG Y Y. On determination of initial values in calculation of three dimensional boundary layer around ship after-bodies [A]. **The 30th British Theoretical Mechanics Conference (BTMC)** [C]. London: [s n], 1988.
- [17] 王言英, 万德成. 船体三维边界层计算的初值确定 [J]. 大连理工大学学报, 1991, **31**(1): 71-77.
(WANG Yanying, WAN Decheng. On determination of initial values in calculation of three-dimensional boundary layer around ship hulls [J]. **J Dalian Univ Technol**, 1991, **31**(1): 71-77.)
- [18] WANG Y Y, LONG J H. Analyses of turbulent boundary layer equations for ship viscous flow [A]. **Proceedings of the 18th Session of Scientific and Methodological Seminar on Ship Hydrodynamics (SMSSH)** [C]. Varna: [s n], 1989. 101-106.
- [19] WANG Y Y, WANG D C. A discussion on velocity profiles and eddy viscosities for three dimensional boundary layer around ship after-bodies [A]. **Proceedings of the 4th International Symposium on Practical Design of Ships and Mobile Units (PRADS)** [C]. Varna: [s n], 1989. 251-259.
- [20] 王言英, 龙敬华. 船体三维厚边界层理论计算 [J]. 大连理工大学学报, 1992, **32**(3): 310-320.
(WANG Yanying, LONG Jinghua. Calculation of thick three dimensional boundary layer on ship hulls [J]. **J Dalian Univ Technol**, 1992, **32**(3): 310-320.)
- [21] WANG Y Y, WANG Q X. Calculation of boundary layer considering free-surface effect around ship hulls [A]. **Proceedings of the 20th Symposium on Naval Hydrodynamics (SNH)**: vol 4 [C]. Santa Barbara: [s n], 1994. 51-56.
- [22] 王言英, 王清霞. 实际流体中船体绕流流场的理论计算 [J]. 大连理工大学学报, 1995, **35**(3): 685-689.
(WANG Yanying, WANG Qingxia. Calculation of ship flow in viscous fluid with free-surface effect [J]. **J Dalian Univ Technol**, 1995, **35**(3): 685-689.)
- [23] WANG Y Y, WANG Q X. Calculation of boundary layer considering free-surface effect for ship hulls [A]. **Naval Hydrodynamics** [M]. New York: National Academy Press, 1996. 906-912.
- [24] 李铁骊, 王言英, 林焰. 船舶兴波阻力计算的 Panel 方法计算流场的可视化实现 [J]. 大连理工大学学报, 1997, **37**(1): 87-90.
(LI Tiel, WANG Yanying, LIN Yan. Ship wave-making resistance calculation by panel method and numerical flow field visualization [J]. **J Dalian Univ Technol**, 1997, **37**(1): 87-90.)
- [25] 李铁骊, 林焰, 王言英. 稳定运动初步的自由表面兴波波形计算 [J]. 大连理工大学学报, 1998, **38**(4): 463-468.
(LI Tiel, LIN Yan, WANG Yanying. Calculation of free-surface wave patterns by steady moving ship [J]. **J Dalian Univ Technol**, 1998, **38**(4): 463-468.)
- [26] WANG Y Y. Inviscid-and-viscous flow interaction on the surface of propeller blades [A]. **Proceedings of International Symposium on Hydro- and Aerodynamics in Marine Engineering (HADMAR)**: vol 1 [C]. Varna: [s n], 1991. 171-177.
- [27] WANG Y Y. A numerical simulation for propeller-hull interaction [A]. **Proceedings of the Second International Symposium on Propeller and Cavitation (ISPC)** [C]. Hangzhou: [s n], 1992. 42-49.
- [28] 王言英, 柴树红. 船桨配合理论计算探讨 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1993, **8**(增刊): 601-608.
- [29] 王言英, 梁勃. 计入粘性影响的螺旋桨性能计算 [J]. 大连理工大学学报, 1994, **34**(3): 325-329.
(WANG Yanying, LIANG Bo. A viscous effect approach to computation of propeller performance [J]. **J Dalian Univ Technol**, 1994, **34**(3): 325-329.)
- [30] 李铁骊, 林焰, 王言英. 三维定常船尾绕流的不定常数值计算 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1997,

12(4): 123-129.

[31] 林宗熊, 王言英. 肥大船型的球首匹配[J]. 大连理工大学学报, 1980, 19(4): 141-148.

(LIN Zongxiong, WANG Yanying. The full ship forms and the bulb-bows [J]. J Dalian Univ Technol, 1980, 19(4): 141-148.)

[32] 王言英. 一艘用于欧洲北海油田的穿梭油船船型阻力性能的剖析[J]. 船舶工程, 1991(2): 6-12.

[33] 迟云鹏, 孟宪钦, 王言英, 等. 双体船阻力性能计算[J]. 船舶工程, 1996(3): 21-25.

[34] 王言英, 邢殿录, 迟运鹏, 等. 肥大型浅吃水船舶的模型试验[J]. 船舶工程, 1998(1): 18-23.

Fine optimization of ship hull lines in resistance performance by using CFD approach

WANG Yan-ying

(Dept. of Naval Archit., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract: In order to complete the fine optimization of the ship hull lines, a classified optimization procedure is developed in this paper. 5-Level is included for this procedure such as the optimization of the dimensional form, overall form, local form, appendage form, and finalizing form. The method of experience or statistical formulae, the approach of Navier-Stokes equations with thick-layer approximation and integral numerical approach, with 2-turbulence model and linear free surface boundary condition by means of differential numerical approach in the time domain, with partly-parabolic approximation and differential numerical approach, and the model test with flow field measurements are applied to the above different level optimization respectively. The practical design of the ship hull has shown that this CFD code is available for optimization of ship hull lines in the view of hull resistance performance.

Key words: computational fluid dynamics (CFD) / ship design; hull resistance; optimization; potential flow; viscous flow