网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/42.1755.TJ.20160921.1441.044.html 期刊网址：www.ship-research.com

引用格式：陈林，熊海峰，魏青. 深V船型大型化应用分析[J]. 中国舰船研究，2016，11(5)：9-13.
CHEN Lin, XIONG Haifeng, WEI Qing. Application of deep-Vee hull used in large ships design[J]. Chinese Journal of Ship Research，2016，11(5)：9-13.

深V船型大型化应用分析

陈林[1]，熊海峰[2]，魏青[1]
1 中国舰船研究设计中心，湖北 武汉 430064
2 陆军车船军事代表局 驻广州和柳州地区军事代表室，广东 佛山 528000

摘　要： 将深V船型应用于大型化高速船的实船设计中，采用非线性型线变换生成多样化的型线方案，运用势流CFD方法对各型线方案进行兴波阻力船型优化。通过相同主尺度及设计排水量条件下的船模阻力对比试验，验证了优化后的深V船型可以在保持高傅汝德数 Fr 阻力性能优势的同时，在低傅汝德数 Fr 时拥有与圆舭船型相当的阻力性能。运用切片理论对深V船型进行耐波性理论预报，并对预报结果进行耐波性试验验证。试验结果表明，切片理论适用于瘦长型深V船型的耐波性预报。

关键词： 深V船型；船型优化；阻力性能；耐波性能
中图分类号： U661.31　　**文献标志码：** A　　**DOI：** 10.3969/j.issn.1673-3185.2016.05.002

Application of deep-Vee hull used in large ships design

CHEN Lin[1], *XIONG Haifeng*[2], *WEI Qing*[1]
1 China Ship Development and Design Cnter, Wuhan 430064, China
2 Guangzhou & Liuzhou Military Representative Office, Army Military Representative Department of Vehiche & Boat, Foshan 528000, China

Abstract: This study involves the design of a high speed vessel with a deep-Vee hull by using a nonlinear hull transformation to diversify the hull forms, then optimizing the hull forms by the potential flow CFD. Model tests which use the same dimension and displacement ship models show that the resistance performance of the optimized deep-Vee hull is equivalent to the round-bilge hull in its low Froudes number, with it keeps the advantage of resistance performance in high Froudes number. Moreover, the study provides seakeeping predictions for the optimized deep-Vee hull by strip theory, and compares the results of the theory predictions with the model test. The results of the model test show that strip theory is able to provide reasonably accurate seakeeping predictions for the thin deep-Vee hull.

Key words: deep-Vee hull; hull form optimization; resistance performance; seakeeping

0 引　言

深V船型是国际上近10多年来热衷于研究、开发的一种单体高速新船型，适于海上高速航行，具有优良的耐波性和操纵性，且船型和建造工艺简单、造价较低、技术风险小，具有良好的总体性能。该船型虽然起步较晚，但发展较快，具有良好的发展前景[1]。

深V船型最早应用于高速滑行艇，其突出的优点是在高海况下耐波性能较常规的圆舭船型有较大改善，且在风浪中失速小。但一般认为，其静水阻力在低速下不如圆舭船型[2-3]。

本文拟将深V船型应用于千吨级高速船的实船设计。在参考母型船600 t高速深V型线的基础上，通过非线性的船型变换，进行CFD船型优化，并将优化后的高速深V船型与成熟的高速圆

收稿日期： 2016-01-09　　**网络出版时间：** 2016-9-21 14:41
作者简介： 陈林（通信作者），男，1984年生，硕士，工程师。

downloaded from www.ship-research.com

艇船型进行船模水池阻力对比试验分析，以验证CFD船型优化的效果。同时，还将对优化后的深V船型的耐波性能进行理论预报，并对预报结果进行水池耐波性试验验证。

1 深V船型优化设计

1.1 总体要素

根据目标船的主尺度、设计排水量以及航速要求，分析其主要阻力成分，明确船型优化方向。目标船的船型参数见表1。

表1 船型参数

Tab.1 Hull form parameters

参数	数值
水线长 L_{WL}/m	84.8
型宽 B/m	11
型深 D/m	6.2
设计排水量Δ/t	1 270
设计平均吃水 T_m/m	3.24
设计航速 V/kn	25
傅汝德数 Fr	0.446

由于船长的傅汝德数 Fr>0.35，目标船属于高速船，故兴波阻力为总阻力的成分比较大[4]。而兴波阻力又对船型比较敏感，因此优化型线减少兴波阻力可以有效降低船舶总阻力。

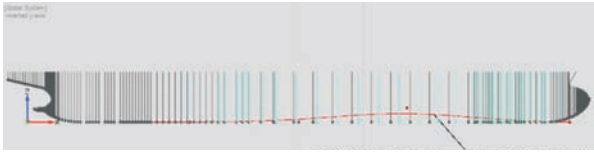
1.2 型线变换

船型优化需要生成多方案船体曲面型线，且要保证变换后曲面的光顺性。传统的型线变换通常是对船体曲面进行整体变换，如变换横剖面面积曲线的Lackenby变换，在母型船的基础上设计型线可以采用该变换。但Lackenby变换缺乏对局部型线的变换控制，尤其是艏部和艉部型线的局部控制。

为了对600 t高速深V母型船的型线进行局部变换控制，同时保证变换后整体型线的光顺性，可以利用B样条曲线的几何特性来构建一种新的型线变换。

型线变换的一般思想是通过移动母型船横剖线沿船长方向的 x 坐标值来组建新的型线[4]。相邻站位横剖线移动距离 dx 如果不连续，就会造成变换后的型线不光顺。B样条曲线具有局部支承性及二阶连续性等特性，可以将这2种特性应用在型线变换上[5]，即将沿船长方向B样条曲线shiftcurve(x)的纵坐标 z 值作为对应 x 坐标下船体横剖线的移动距离 dx。

构建一个Delta shift型线变换函数：shift function dx(x)=z shiftcurve(x)，如图1所示。



shift function dx(x)=z shiftcurve(x)

图1 Delta shift变换

Fig.1 Delta shift transformation

Delta shift型线变换既可以对母型船的型线进行整体变换，也可以进行局部变换。B样条曲线shiftcurve(x)上单个控制点 z 坐标就可进行局部变换，且Delta shift变换的控制参数非常少，可以通过修改少量参数来快速得到多方案的船体型线，为下一步CFD性能计算做好准备。

1.3 CFD船型优化

兴波阻力已经考虑了艏、艉部型线的影响，势流CFD方法的计算时间短，适于高速深V船型阻力性能前期的定性分析。因此，可基于势流理论对Delta shift变换后的多个深V船型方案进行势流CFD计算[6-7]，通过优化兴波阻力系数 C_w 来选择最优深V船型型线方案。

母型船的深V线型与尖艉或折角线型的艉部形状相配合，最主要的特点是其底部横向斜升角和常规尖艉或圆艉相比要大得多，一般最大艉部斜升角 β>20°。这有利于减小船体底部所受到的波浪冲击，增加船体在波浪中纵向摇荡的阻尼，有利于改善高速排水型船的耐波性。在Delta shift船型变换(图2)中，可以很好地保留这些优良的船型特性。

图2 深V船型变换

Fig.2 Deep-Vee monohull form transformation

由CFD船型优化结果(图3)可知，和母型船相比，优化方案(图4)在设计傅汝德数下，计算模型的兴波阻力系数 C_w 从 9.997×10^{-4} 下降到了 9.101×10^{-4}，约减小了10%。这说明针对新的总体

downloaded from www.ship-research.com

设计指标,原母型船的深V线型尚有提升的空间。

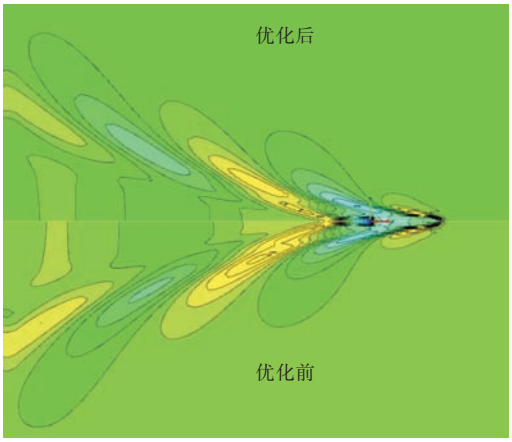


图3　优化前、后波形对比

Fig.3　Comparison of wave pattern before and after optimization

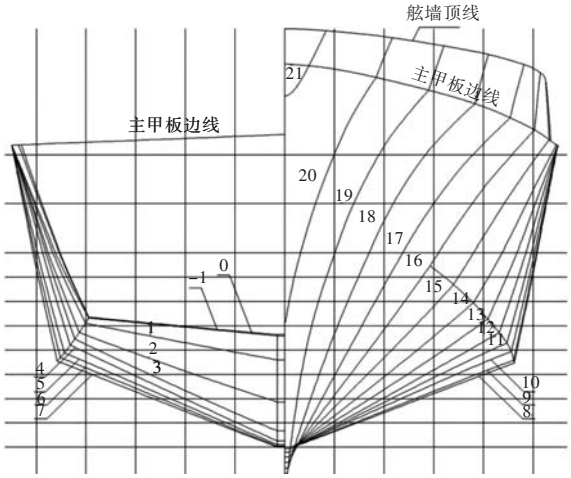


图4　深V船型优化型线方案

Fig.4　The optimized deep-Vee hull lines

2　深V船型与圆舭船型总阻力性能对比分析

在相同主尺度及设计排水量下,将高速圆舭短折角船型与优化后的深V船型进行船模阻力对比试验。为了尽可能地消除试验误差,试验在同一水池环境条件下进行。

2.1　船模阻力对比试验

用于对比的高速圆舭短折角船型是比较成熟的母型船,已成功应用于多型高速船的实船设计,其型线如图5和图6所示。

为了进行比较分析,将船模阻力换算后的总阻力R(单位:kgf)相对设计状态排水量Δ(单位:kg)进行无因次化,即单位排水量下阻力R/Δ。通过比较相同傅汝德数Fr下的R/Δ来分析阻力性能优劣。

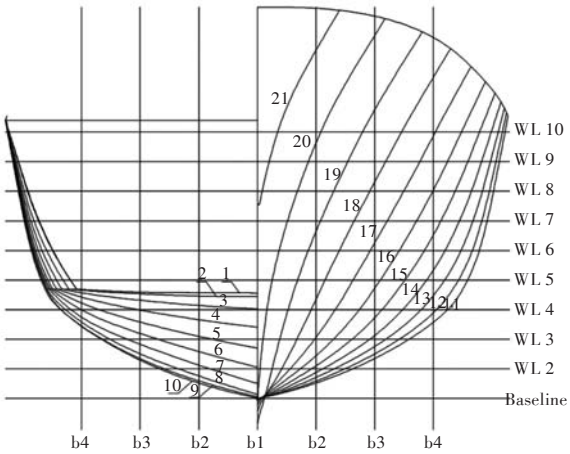


图5　圆舭船型型线方案

Fig.5　The round-bilge hull lines

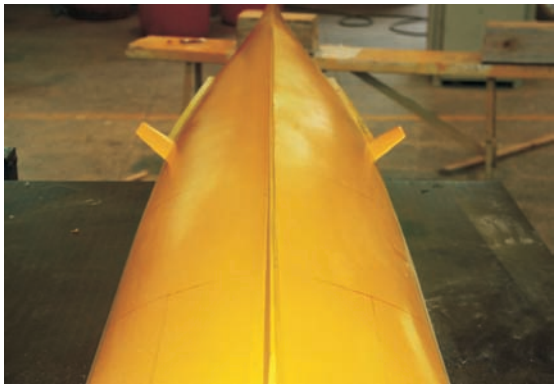


图6　圆舭船模

Fig.6　The round-bilge hull model

2.2　试验结果分析

通过CFD优化后的深V船型(图7)在傅汝德数Fr>0.4后,其阻力性能较圆舭船型更加优良。对于设计傅汝德数Fr=0.446的高速船来说,深V船型在阻力性能上和圆舭船型相比优势更明显,如图8所示,且CFD优化后的深V船型在低速时还能与圆舭船型保持相当的阻力性能。

图7　深V船模

Fig.7　The deep-Vee hull model

downloaded from www.ship-research.com

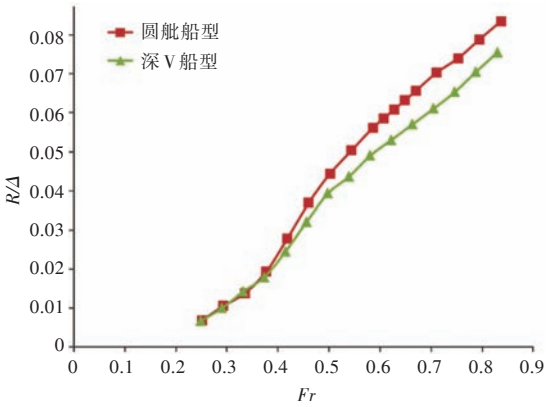


图8 总阻力性能对比

Fig.8 Comparison of ship resistance performance

3 高傅汝德数深V船型耐波性能分析

3.1 切片理论耐波性预报

深V船型的突出优点是，在汹涛中其耐波性能较常规的圆舭船型有较大改善[8]，且在风浪中能保持较高的航速。为了验证其耐波性优势，采用切片理论[9]进行耐波性预报，该切片理论比较适合用于细长船体的耐波性预报。优化后的深V船型船体切片分布如图9所示。

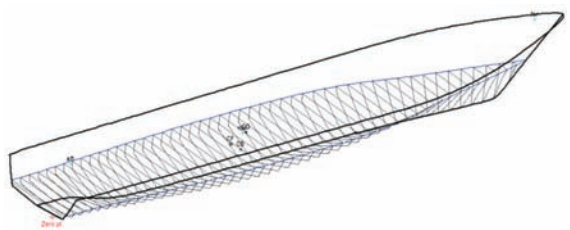


图9 船体切片分布

Fig.9 The sections of hull strip

不规则波波谱采用ITTC推荐的双参数波浪谱[9]，其波浪谱密度为

$$S_{\zeta}(\omega)=\frac{173H_{\mathrm{w1/3}}^{2}}{T_{1}^{4}\omega^{5}}\exp(-\frac{694}{T_{1}^{4}\omega^{4}})$$

式中：$H_{\mathrm{w1/3}}$ 为有义波高，m；T_1 为波浪的特征周期，s；ω 为波浪圆频率。

4个海况：$H_{\mathrm{w1/3}}$ =1.88，3.25 ，5.0，7.5 m（对应的谱峰周期 T_{p} =8.8，9.7，12.4，15.0 s）分别表示4，5，6，7级浪高有义值，对应的特征周期 T_1 取北太平洋谱峰周期中的最可能值。在采用有义波高 $H_{\mathrm{w1/3}}$ 和谱峰周期 T_{p} 为特征参数表征海浪时，特征周期 T_1 与谱峰周期 T_{p} 之间的关系采用下式[9]：

$$T_1=0.771\,7T_{\mathrm{p}}$$

切片理论预报的横摇运动响应函数如图10所示。

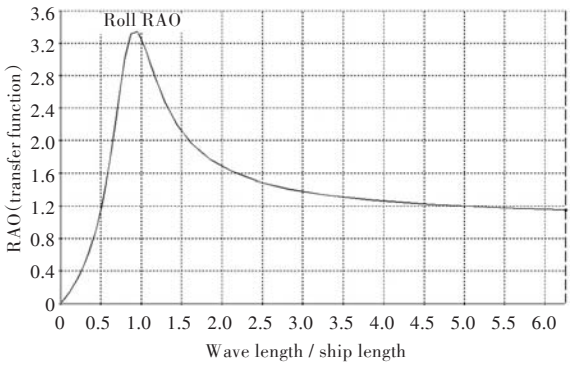


图10 横摇运动响应函数

Fig.10 Roll motion responses

垂荡、纵摇、垂向加速度只校核5，6，7级浪，计算状态取 V_{s} =18（巡航航速）和25 kn（最大航速）、浪向角 m=180°时，如表2和表3所示。

表2 运动响应（V_{s} =18 kn，m=180°）

Tab.2 Motions responses（V_{s} =18 kn，m=180°）

海况 $H_{\mathrm{w1/3}}$ /m	垂荡 $Z_{1/3}$ /m	纵摇 $\theta_{1/3}$ /(°)	垂向加速度 $a_{1/3}$ /(m·s^{-2}) 艉	艏	艏
3.25	1.121	3.47	2.811	1.201	5.697
5.0	2.076	4.89	3.433	1.919	6.745
7.5	3.371	6.20	3.955	2.325	7.574

表3 运动响应（V_{s} =25 kn，m=180°）

Tab.3 Motions responses（V_{s} =25 kn，m=180°）

海况 $H_{\mathrm{w1/3}}$ /m	垂荡 $Z_{1/3}$ /m	纵摇 $\theta_{1/3}$ /(°)	垂向加速度 $a_{1/3}$ /(m·s^{-2}) 艉	艏	艏
3.25	1.342	3.55	3.797	2.353	7.572
5.0	2.332	5.05	4.655	3.037	9.158
7.5	3.628	6.39	5.342	3.594	10.339

由表可知，和艉部相比，艏部的垂向加速度要大得多，这主要是考虑到设计傅汝德数 Fr 较高，因此，艏部线型设计较瘦能改善破波阻力，从而导致船体浮心比较靠后。

鉴于零速正横浪时横摇最为严重，故横摇计算状态只取 V_{s} =0 kn、浪向角 m=90°时，如表4所示。

表4 运动响应（V_{s} =0 kn，m=90°）

Tab.4 Motions responses（V_{s} =0 kn，m=90°）

海况 $H_{\mathrm{w1/3}}$ /m	横摇有义幅值 $\varphi_{1/3}$ /(°)
1.88	8.90
3.25	12.88
5.0	16.16
7.5	17.88

4级海况 $H_{\mathrm{w1/3}}$ =1.88 m（T_{p} =8.8 s）下的零速横摇较大，这主要是由于设计船舶的固有横摇周期 T_{θ} =8.79 s与谱峰周期 T_{p} =8.8 s很接近，发生了共振所导致。其他海况下的零速横摇均与2 000 t

downloaded from www.ship-research.com

级船舶的性能接近。

3.2　耐波性水池试验验证

受船模尺度与造波机造波能力的限制，优化后的深V船型的耐波性水池试验先在5，6级海况下进行规则波中18，25 kn、浪向角m=180°各状态下的纵摇幅值、升沉幅值和加速度幅值的试验验证（表5），然后再用5级海况不规则波试验校核规则波试验预报值（表6）。

由表6可见，规则波试验预报的换算值与切片理论预报的结果非常吻合，同时，5级海况下不规则波试验数据与规则波试验预报换算值相比差别也较小，这充分证明了切片理论适用于瘦长型（L/B>7）深V船型的耐波性预报。

表5　规则波预报结果

Tab.5　The results of prediction in regular waves

5，6级海况三一平均摇荡幅值	V_s=18 kn		V_s=25 kn	
	5级海况	6级海况	5级海况	6级海况
纵摇/(°)	3.216	4.370	3.526	4.837
升沉/m	1.390	2.112	1.477	2.311
艏垂向加速度 $a_{1/3}$/(m·s^{-2})	5.263	6.331	6.066	7.693
舯垂向加速度 $a_{1/3}$/(m·s^{-2})	1.950	2.440	2.215	2.960
艉垂向加速度 $a_{1/3}$/(m·s^{-2})	2.509	3.234	2.793	3.695

表6　不规则波试验与规则波预报值对比

Tab.6　Comparison of the model test results in irregular waves and the theory prediction resules in regular waves

5级海况三一平均摇荡幅值	V_s=18 kn		V_s=25 kn	
	不规则波试验结果	规则波预报结果	不规则波试验结果	规则波预报结果
纵摇/(°)	3.340	3.216	3.470	3.526
升沉/m	1.320	1.390	1.410	1.477
艏垂向加速度 $a_{1/3}$/(m·s^{-2})	5.390	5.263	5.939	6.066
舯垂向加速度 $a_{1/3}$/(m·s^{-2})	1.833	1.950	2.342	2.215
艉垂向加速度 $a_{1/3}$/(m·s^{-2})	—	2.509	—	2.793

4　结　论

综上所述，本文提出的应用于千吨级高速船的深V船型型线方案达到了预期的总体性能目标，由上述数值模拟和模型试验结果可得到以下结论：

1）通过CFD优化后，深V船型可以在保持高速阻力性能优势的同时，在低速时拥有与圆舭船型相当的阻力性能。

2）切片理论适用于瘦长型（L/B>7）深V船型的耐波性理论预报。

参考文献：

[1]　赵连恩. 高性能船舶水动力原理与设计[M]. 2版. 哈尔滨：哈尔滨工程大学出版社，2009.

[2]　SERTER E H. Deep-vee and round-bilge hull forms for naval applications and comparative investigation[J]. International Defense Review，1984，17(4)：462-465.

[3]　陈碧云，李文焱，俞燮. 深V船型的开发研究[J]. 舰船论证参考，1997(1)：8-19.

[4]　张恒. 单体复合船型水动力性能研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2008.

[5]　ISLAM M M，KHONDOKER M R H，RAHMAN C M. Application of artificial intelligence techniques in automatic hull form generation[J]. Ocean Engineering，2001，28(12)：1531-1544.

[6]　张志荣，李百齐，赵峰. 船舶粘性流动计算中湍流模式应用的比较[J]. 水动力学研究与进展：A辑，2004，19(5)：637-642.
ZHANG Zhirong，LI Baiqi，ZHAO Feng. The comparison of turbulence models applied to viscous ship flow computation[J]. Journal of Hydrodynamics：Ser. A，2004，19(5)：637-642.

[7]　HARRIES S. Systematic optimization-a key for improving ship hydrodynamics[J]. Hansa，2005，142(12)：36-43.

[8]　邵世明，王云才，梁永超，等. 深V型艇与圆舭型艇的阻力和耐波性比较[J]. 上海交通大学学报，1996，30(12)：53-57.
SHAO Shiming，WANG Yuncai，LIANG Yongchao，et al. The comparison of resistance and seakeeping between deep-vee and round bilge hull forms[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University，1996，30(12)：53-57.

[9]　陶尧森. 船舶耐波性[M]. 上海：上海交通大学出版社，1985.

downloaded from www.ship-research.com