

# 夹层结构玻璃钢游艇整船结构强度有限元分析

刘雪松 周玉龙

江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212003

**摘要:** 目前各大船级社普遍缺乏新颖玻璃钢艇体结构强度的计算规范, 因此设计者需要直接计算艇体结构强度。在研究玻璃钢游艇的基础上, 用 ANSYS 软件建立全船有限元模型, 采用层合壳单元处理复合材料和复合材料夹层结构并计算分析整船结构强度。分析中所采用的方法对于正确地进行玻璃钢游艇整船直接计算具有指导作用和实用价值。同时所采用的冲击力和水动力加载方法可应用于其他类型的高速艇结构强度的有限元分析。

**关键字:** 玻璃钢; 夹层结构; 结构强度; ANSYS

中图分类号: U661.43, U674.934 文献标志码: A

文章编号: 1673-3185(2010)02-45-04

## Finite Element Analysis of the Global Strength of FRP Yacht with Sandwich Structures

*Liu Xue-song Zhou Yu-long*

College of Marine and Shipbuilding Engineering, Jiangsu University of Science and Technology,  
Zhenjiang 212003, Jiangsu

**Abstract:** The codes and regulations provided by the major ship classification societies for computing strength of fashionable FRP yacht are very rare. Therefore, designers turn to the direct method to compute the structural strength. Based on the study of FRP yacht, a finite element model of full yacht was generated by software ANSYS with layered shell elements to treat composite materials and sandwich structures as well as to compute the structural strength of the full model. The methods used in the paper have provided some advices on how to perform direct computations of FRP yacht in a right way and therefore are of practical values. The two loading methods applied in this paper, impulsive forces and hydrodynamics, can also be used to perform finite element analysis for other similar boats of high speed.

**Key words:** FRP; sandwich structure; structural strength; ANSYS

## 1 引言

目前国外的玻璃钢船长度已经达到 70 m 以上, 甚至某些军船也采用玻璃钢材料, 而我国现阶段只能制造长 40 m 以下的玻璃钢船。不但在尺度上落后于国外, 即使同尺度玻璃钢船, 其结构形式也跟国外先进技术存在差距<sup>[1,2]</sup>。受限制的不是玻璃钢材料本身的性能, 而是缺乏这方面的结构设计和结构计算方法。

## 2 玻璃钢船的结构特性

玻璃纤维增强复合材料由于比强度高、不锈

蚀、建造工艺性好、使用周期成本低等优点, 在船舶工业中得到越来越广泛的应用。与同尺度、等截面的钢质船相比, 玻璃钢船的刚度只是钢质船的  $\frac{1}{15} \sim \frac{1}{20}$ 。因此, 为了满足强度要求, 玻璃钢船在结构形式上和钢质船有所差别。

### 2.1 玻璃钢船的骨材形式

玻璃钢材料因其弹性模量低而容易产生扭曲和弯曲变形, 因此玻璃钢船的骨材就需要采用特定的截面形式来抵抗弯扭变形。通常情况下, 玻璃钢船的骨架梁材会采用梯形帽形截面, 截面表面

收稿日期: 2009-07-13

作者简介: 刘雪松(1985-), 男, 硕士研究生。研究方向: 船舶结构力学。E-mail: tinsug@yahoo.com.cn

周玉龙(1955-), 男, 研究员。研究方向: 船体结构强度和船舶性能

铺设玻璃纤维,中间空心部分填充芯材。

## 2.2 玻璃钢船的船体结构形式

在船体底部一般采用玻璃纤维结合树脂为材料设置铺层,每一层会设有一定的方向角。龙骨区域需要加强,会比其他区域厚。

舷侧、甲板和舱壁等与底部的不同之处在于其独特的夹层结构,即在铺层结构的中间铺设一层泡沫芯材。尽管芯材的力学性能比较低,但整个结构的剪切强度主要由芯材承受,面板对于剪切仅起部分作用。

## 3 玻璃钢游艇的有限元模型

根据实船的结构形式、受力情况、精度要求等<sup>[3]</sup>,运用结构力学和有限元知识对实际结构进行简化,选用合适的单元加以模拟而得出有限元模型<sup>[4]</sup>。在结构强度的计算中,载荷和约束都关于中纵剖面对称,因此只需要建立全船的半宽模型。

### 3.1 单元选择

与铁和钢等各向同性材料相比,复合材料的有限元网格划分则显得非常复杂。由于各层材料为任意正交各向异性,材料性能和材料主轴取向有关。

在 ANSYS 中,用于建立复合材料模型的单元有 SHELL 99、SHELL 1、SHELL 81、SOLID 46 和 SOLID 191 五种单元。SHELL 91 单元可用于夹层结构并且允许面板和夹心层有不同的性质,设置该单元的 KEYOPT(9)=1 即可激活“夹层”选项。在上述的几种单元中,只有 SHELL 91 单元有此夹层选项。

玻璃钢游艇的骨架梁材划分网格时,并没有像普通钢质船那样使用梁单元,其原因是玻璃钢船的骨材也是用玻璃纤维进行多层铺设而成,并带有芯材。而普通的梁单元并不能准确地表达层合结构形式,因此选用了壳单元来替代梁单元。

### 3.2 层合结构和夹层结构的模拟

层合结构如图 1 所示,各单层板采用玻璃纤维作为增强材料,Y 向为纤维的轴向方向,Z 向为垂直于纤维轴线的方向(即叠层方向)。根据玻璃纤维的性能特点,各单向板是正交各向异性板,所以在 ANSYS 中定义单向板的材料属性为 Orthotropic。每一层材料,可以通过单元实常数来定义如下性质:材料属性(通过材料参考号 MAT 来定义)、层的定向角(THETA)和层的厚度(TK)。

夹层结构(“三明治结构”)如图 2 所示,有两

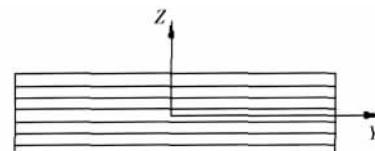


图 1 层合结构

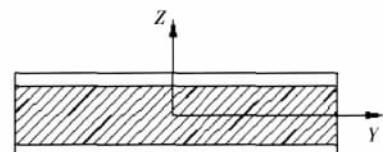


图 2 夹层结构

个薄的面板和一个较厚但相对软的夹心层,它允许夹层结构中面板和夹心层有不同的材料属性。在玻璃钢游艇中,夹心层一般为泡沫,根据泡沫的特性,可将其视为各向同性体。夹层结构材料性质的定义与普通层合结构相同<sup>[5-7]</sup>。

## 4 约束与载荷

### 4.1 全船有限元边界条件

船体是一个漂浮体,处于平衡力系之下,但没有对刚体运动的约束。而有限元分析要求结构的刚体被支座所限制,以便计算结构的相对变形。为此,必须给浮动船体加上适当的约束,令船体不能做刚体运动,同时也不能限制船体变形,不能影响全船结构的受力,这样求出的相对变形与内力才是真实的<sup>[8]</sup>。通常,在艉部舱壁处对称位置和艏部纵剖面的节点上施加 6 个独立约束,同时还要在中纵剖面施加对称约束。

### 4.2 艇体载荷

作用在艇体上的平衡力系组成如下:

- 1) 波浪对艇体的冲击力和艉部水动力;
- 2) 艇体惯性力;
- 3) 艇体浮力;
- 4) 艇体重力。

波浪对艇体的冲击力  $F$  按式(1)计算确定:

$$F = 1.957m_e \cdot n \cdot g \quad (1)$$

式中, $F$  为冲击力; $m_e$  为冲击作用中心处艇的有效质量(如表 1 所示); $g$  为重力加速度; $n$  为冲击力作用中心处的艇体惯性系数。

表 1 载荷作用区域

艇体弯曲状态	舯垂	舯拱
冲击力作用中心位置	第 4 号理论站	第 10 号理论站
艉部水动力作用中心位置	第 16 号理论站	第 16 号理论站

注:理论站自艏至艉分别为第 0~20 站。

艇的(冲击)有效质量按下式计算:

$$m_e = \frac{m}{1.2 + \frac{r_1^2}{R^2} (1 + 0.2 \frac{r_2}{r_1})} \quad (2)$$

式中,  $m$  为艇在正常装载状态下的总质量;  $r_1$  为冲击力作用中心至艇重心的距离(自重心向艏为正, 如图 1 所示);  $r_2$  为艉部水动力作用中心至艇重心的距离;  $R$  为艇体对通过重心横轴的惯性半径。

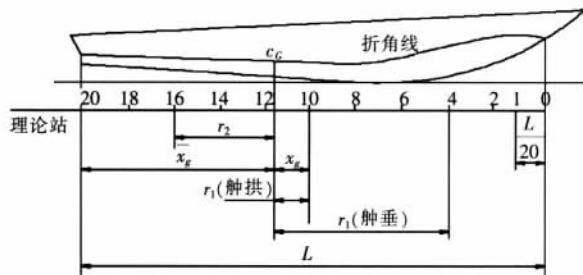


图 1 符号定义

$x$  号理论站处的惯性力按式(3)计算:

$$F(x) = 1.957m(x) \cdot n(x) \cdot g \quad (3)$$

式中,  $F(x)$  为  $x$  号理论站处单位长度的惯性力;

$m(x)$  为  $x$  号理论站艇体单位长度的质量;  $n(x)$  为  $x$  号理论站处的惯性系数, 按公式(4)计算;  $g$  为重力加速度。

$$n(x) =$$

$$\frac{m_e \cdot n}{m} \left\{ 1.2 + \frac{r_1^2}{R^2} \left[ \frac{L}{20} (10 - x) - X_g \right] (1 + 0.2 \frac{r_2}{r_1}) \right\} \quad (4)$$

式中,  $m_e$  为冲击力作用中心处的有效质量(按式(2)计算);  $L$  为计算长度;  $X_g$  为艇重心到舯剖面的距离(自重心向艏为正, 见图 1);  $r_1, r_2, R, m$  参见式(2)中的符号说明;  $x$  为理论站号。

艏部冲击力作用区的浮力应按式(5)计算确定:

$$F_F = m \frac{-r_2 \cdot g}{r_1 - r_2} \quad (5)$$

艉部水动力作用区的浮力按式(4)计算:

$$F_A = m \frac{r_1 \cdot g}{r_1 - r_2} \quad (6)$$

艇体载荷按梯形分布, 如图 2 和图 3 所示。

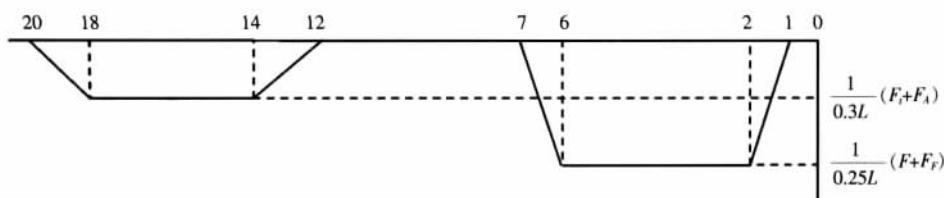


图 2 艇体舯垂时载荷分布

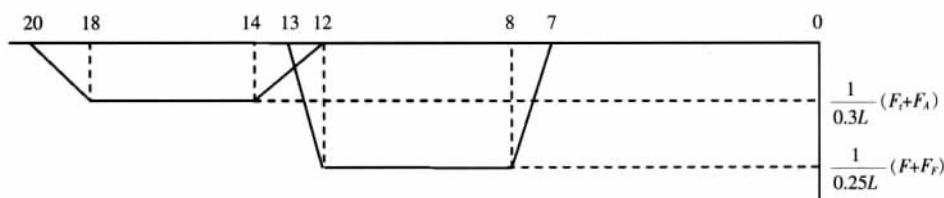


图 3 艇体舯拱时载荷分布

## 5 计算及后处理

完成约束和载荷后, 可以直接用 solve 求解器计算<sup>[9,10]</sup>。对于计算结果, 在缺省情况下, 只有第一层(底层)的底面、最后一层(顶面)的顶面以及最大失效值所在层的结果数据被写入结果文件, 如果用户对所有层的结果数据都感兴趣, 则应设置 KEYOPT(8)=1, 但这样可能导致结果文件很大。具体某一层的结果可以在后处理 POST1 中使用 LAYER 命令 (Main Menu>General Postproc>Options for Outp) 来指定层号。

## 6 算例

以 62' 豪华游艇为例, 应用以上方法对该艇在

舯拱状态下进行整船结构强度有限元分析。该艇总长 19.51 m、计算长度 17.50 m、设计型宽 5.02 m、设计型深 2.875 m、设计吃水 1.08 m、设计航速 29 kn, 正常排水量 32 t。全艇材料选用不饱和聚酯树脂结合无碱玻璃纤维布和无碱玻璃纤维毡, 芯材 Corecell 牌 SAN 船用泡沫。全船共 4 745 个单元, 14 373 个节点。

## 7 结束语

通过对玻璃钢游艇在舯拱载荷下整船结构三维有限元强度的计算分析, 获得底部、舷侧、甲板和骨材等构件的应力, 结果可作为判断艇体总强度的依据。

计算表明, 艇体在舯拱载荷作用下, 6 号肋位

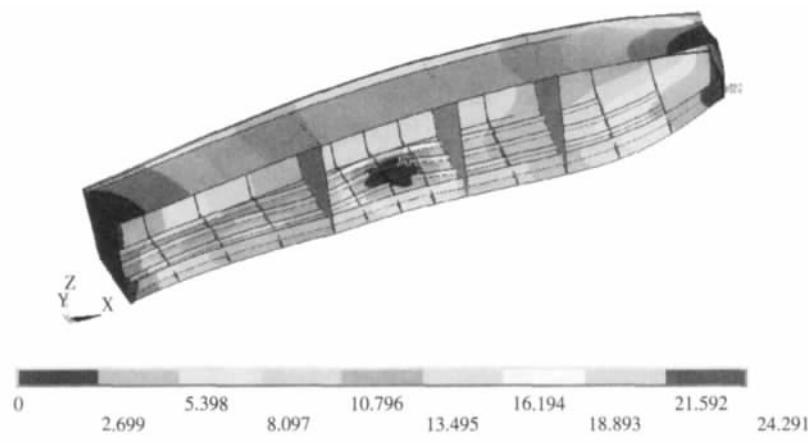


图4 艇体在肿拱载荷下的变形图

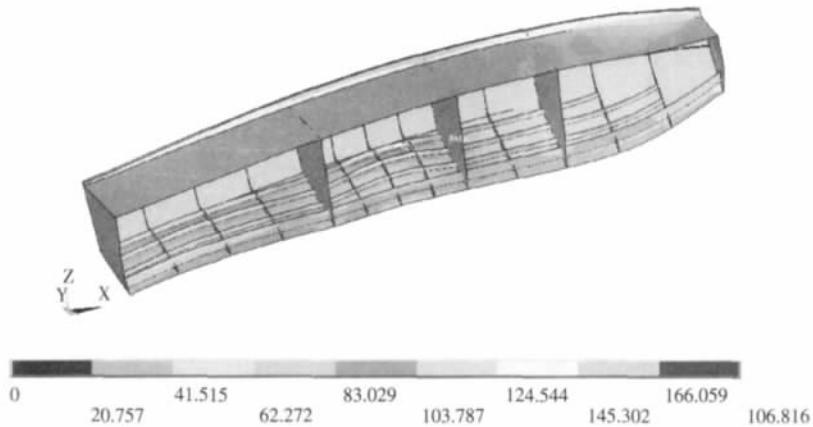


图5 艇体在肿拱载荷下的等效应力分布图

的变形最大。艇体的最大变形 24.291 mm, 方向为 Z 方向。按照规范, 最大变形小于艇体长度的 1/200, 说明艇体的变形不大, 刚度是有保证的。最大等效应力为 186 MPa, 位于艇底及舷侧上部, 整艇满足强度要求。

本文所建立的玻璃钢游艇整船有限元分析计算艇体结构强度应力的方法和步骤具有通用性, 文中处理复合材料以及夹层结构的方法也适用于其他类型玻璃钢船的强度分析。

#### 参考文献:

- [1] 朱珉虎. 滑行艇的受力与强度 [J]. 中外船舶科技, 2006 (1):25-27.
- [2] 董祖舜. 快艇动力学 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1991.
- [3] 王瑞, 武玲. 船舶用玻璃钢及其性能分析 [J]. 中国纺织大学学报, 2000, 26(3):123-126.
- [4] 孙丽萍. 船舶结构有限元分析 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程

大学出版社, 2004.

- [5] 周艳秋, 洪明. 舰船用夹层板的力学特征与应用 [J]. 中国造船, 2004, 45(B12):79-85.
- [6] 曹明法, 胡培. 船用玻璃钢/复合材料夹层结构中的泡沫芯材 [J]. 江苏船舶, 2004, 21(2):3-6, 19.
- [7] 唐文勇, 陈念众, 张圣坤. 复合材料加筋层合板的极限强度分析, 2007, 24(8):43-48.
- [8] 陈念众, 张圣坤, 孙海虹. 复合材料帽形加筋板极限承载能力 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2001(3):46-48.
- [9] CARRERA E. A refined multilayered finite-element model applied to linear and non-linear analysis of sandwich plates [J]. Composites Science and Technology, 1998, 58 (10):1553-1569.
- [10] DOMNISORU L, DRAGOMIR D, KOLEV P. The strength analysis of a patrol boat with composite material structure based on 3D-FEM-hull model approach [J]. Annals of "Dunarea de Jos" University Galati. Fascicle XI, Shipbuilding, 2006, 24:11-20.