

船舶、土木工程

文章编号: 1000-8608(2007)04-0545-07

大型船舶外板自重成型工艺参数数值试验分析

周波*, 刘玉君, 纪卓尚, 邓燕萍

(大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为提高大型船舶外板成型加工生产效率, 降低试验成本, 在考虑大应变效应基础上, 采用有限元方法建立了计算模型并经实船板自重成型试验验证. 应用数值模型进行系列船体板自重成型数值试验, 建立自重成型数据库. 以鞍型板为例, 分析工艺参数(如长度、宽度、厚度、半径)对钢板成型的影响规律, 给出各工艺参数的影响曲线. 参考梁理论计算鞍型板自重成型的公式, 建立样本数据的回归模型, 使回归模型具有一定的物理意义, 从而达到较好的回归拟合效果, 为编制船体外板自重成型预报系统打下较好的基础.

关键词: 船舶建造工艺; 船体板自重成型; 鞍型板; 数值分析; 试验分析;

ANSYS

中图分类号: U 671.3 文献标识码: A

0 引言

在船体建造中, 水火弯板工艺参数设计的前期工作需要确定船体外板是否可以自重成型. 根据在大连新船重工的调查和分析可知, 在全部展开外板中, 平板自重成型率占 10% 左右, 具有较小横向曲率的外板自重成型率占 15% 左右, 其余的曲面外板需经不同程度的水火弯工艺而达到成型. 因此本项研究是船体外板水火加工计算机模拟研究的前序工作. 本项研究将提高外板加工的经济性, 降低能源及工时消耗, 提高船舶建造的效率, 降低船舶建造的成本^[1, 2].

船体外板自重成型各种参数的影响规律十分复杂, 对于不同厚度和形状的板, 各种参数的定量影响程度不同. 由于采集实船板样本数据远达不到总体样本的要求, 而且采集工作的成本很高, 程序繁琐, 本文进行实船板自重成型试验, 根据试验结果创建实船板自重成型的有限元模型; 应用有限元模型进行大量数值试验, 得出钢板自重成型的数据样本, 分析工艺参数对钢板成型的影响规

律, 给出各工艺参数的影响曲线; 在此基础上建立自重成型数学模型^[3].

1 大变型理论建立有限元模型

在船舶建造过程中, 大型船舶船体外板的几何尺寸都比较大, 板宽 2~3 m, 板长可达 12 m. 这就使得外板在自重的作用下, 当两端处于自由支撑状态时, 产生较大的变形. 如果结构经受大变形, 变化后的几何形状可能会引起结构的非线性响应, 给分析计算带来困难. 经典的解析方法只对一些具有特殊载荷和特殊边界条件的弹性问题有效, 而对于复杂的弹-塑性大变形问题却无能为力. 目前最常用也是最有效的结构分析工具是有限元法, 文中采用大型通用有限元软件 ANSYS 进行计算分析.

1.1 大应变效应

随着位移增长, 一个有限单元已移动的坐标可以以多种方式改变结构的刚度. 一般来说这类问题总是非线性的, 需要进行迭代获得一个有效的解.

收稿日期: 2005-12-05 修回日期: 2007-06-15

作者简介: 周波* (1977-), 男, 博士生; 刘玉君 (1962-), 男, 教授, 博士生导师; 纪卓尚 (1938-), 男, 教授, 博士生导师.

一个结构的总刚度依赖于它的组成部件(单元)的方向和单刚。当一个单元的节点经历位移后,那个单元对总体结构刚度的贡献可以以两种方式改变。首先,如果这个单元的形状改变,它的单元刚度将改变。其次如果这个单元的取向改变,它的局部刚度转化到全局部件的变换也将改变。小的变形和小的应变分析假定位移足够使所得到的刚度改变无足轻重。这种刚度不变假定意味着使用基于最初几何形状的结构刚度的一次迭代足以计算出小变形分析中的位移。什么时候使用小变形和应变依赖于特定分析中要求的精度等级。

相反,大应变分析说明由单元的形状和取向改变导致的刚度改变。因为刚度受位移影响,且反之亦然,所以在在大应变分析中需要迭代求解来得到正确的位移。大应变效应改变单元的形状和取向,且还随单元转动表面载荷。在大多数实体单元,以及部分的壳单元中大应变特性是可用的。

1.2 非线性分析的主要步骤

造成非线性的因素非常复杂,因此非线性分析具有很多与普通分析不同的地方,即非线性的特殊性。ANSYS的方程求解器通过计算一系列的联立线性方程来预测工程系统的响应。然而非线性结构的行为不能直接用这样一系列的线性方程表示,需要一系列的带校正的线性近似来求解非线性问题。

尽管非线性分析比线性分析更复杂,但分析过程基本相同,只是非线性分析过程中需要考虑非线性特性。非线性静态分析是静态分析的一种特殊形式,由三个主要步骤组成:首先建立有限元模型,然后施加载荷并求解,最后查验结果。

(1) 建立有限元模型

对线性和非线性分析建立有限元模型都是必须的,不同的是非线性分析可能在单元选择和材料属性处理上有所不同,即如果需要大应变效应,必须在 ANSYS 中拟合出真实的应力应变曲线。

(2) 施加载荷并求解

非线性分析过程中需要选择求解类型并定义求解选项,指定载荷步选项最后求解。非线性分析经常要求多个载荷增量而且总是需要平衡迭

代。

(3) 查验分析结果

非线性静态分析的结果主要由位移、应力、应变,以及反作用力组成。可以用通用后处理器(POST 1),或者用时间-历程后处理器(POST 26),来考查这些结果^[4]。

1.3 建立实船板有限元模型

(1) 材料性能的假设

对于船体钢板,当其应力低于比例极限时,应力应变关系是线性的(如图 1 所示),即符合胡克定律。当超过这个限度,应力应变关系就会表现出非线性,但并不代表此时材料已经进入非弹性状态。当材料应力超过屈服极限以后,产生不可恢复的应变,这时材料进入塑性状态。实际上比例极限和屈服极限的值相差并不是很大,所以在进行有限元分析时假定它们相同。

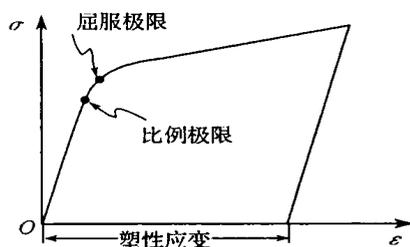


图 1 船用钢板的应力应变曲线

Fig. 1 Stress and strain curve of ship plating material

为使问题简化,可以用折线 OAB 来代替应力应变曲线(图 2),称为双线性应力-应变曲线。其中 OA 段与材料的弹性阶段相对应; AB 段则与材料的塑性阶段相对应,其中 AB 段与水平面的夹角 γ 表示了材料的强化特性, γ 的正切值 $E_t = \tan \gamma$ 称为切向斜率,表示了新的屈服应力同等效塑性应变总变量的依赖关系^[5]。

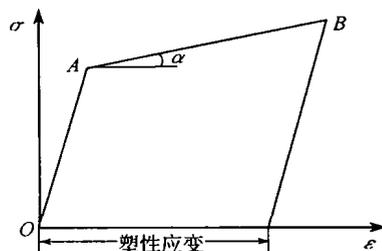


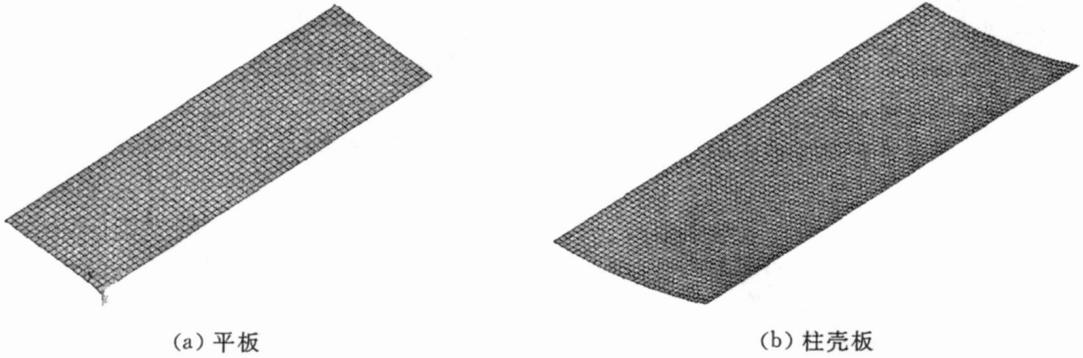
图 2 船用钢板的双线性应力应变曲线

Fig. 2 Double linear stress and strain curve of ship plating material

(2) 单元和边界条件

船体外板用壳单元进行模拟, 采用 shell143 进行计算. 该单元适合模拟平板或翘曲板在一定厚度下的非线性计算, 这种单元每个节点有 6 个

自由度: 沿 x, y, z 三个轴方向的位移和绕三个轴的转角. 根据实际工程加工情况, 边界条件采用钢板短边自由支持边界条件. 图 3 显示所建立平板和柱壳板的有限元模型.



(a) 平板 (b) 柱壳板

图 3 平板和柱壳板有限元模型

Fig. 3 Finite element model of flat plate and column shell plate

2 实船板自重成型试验对比分析

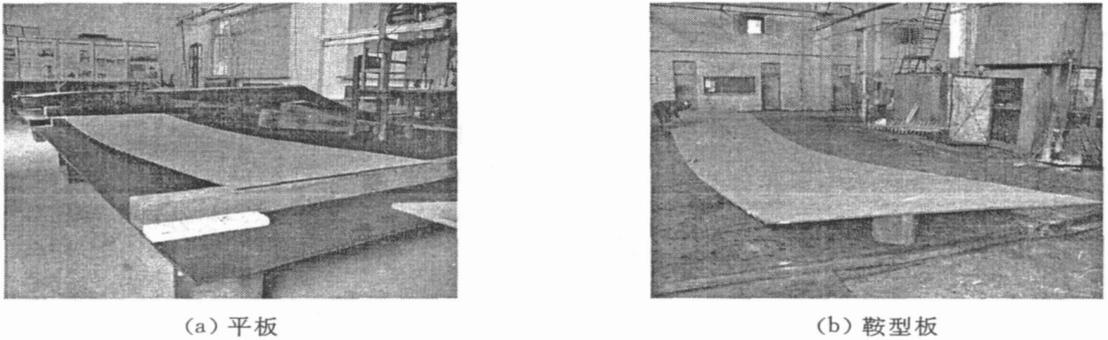
进行实船板自重成型试验, 根据试验结果建立有限元模型的边界条件并检验数值模拟的正确性. 所选用实船板根据大连理工大学 CAM 实验室和 DNS 船厂车间现有钢板, 进行自重成型试验. 图 4 为试验中所测量的钢板照片, 将部分试验板数据列表 1 显示, 按照试验板尺寸进行有限

元建模并将计算结果显示如图 5

表 2 结果对比分析发现:

(1) 从数值计算结果来看, 基本与自重试验结果一致.

(2) 从误差分析来看, 计算结果与试验相差很小, 满足工程需要, 所建立的有限元模型准确有效.



(a) 平板 (b) 鞍型板

图 4 平板和鞍型板自重成型试验

Fig. 4 Experimental measure of dead load forming of flat plate and saddle-shape plate

表 1 实船板参数

Tab 1 Geometrical parameters of ship hull plates

板型 /m	板长 /m	板宽 /m		板厚 /m	曲率半径 /m	
		前	后		前	后
平板	3 000	1 000	1 000	0 008	—	—
帆型板	8 760	1 580	2 400	0 020	7 732	500
鞍型板	10 200	1 691	1 700	0 016	5 541	5 689

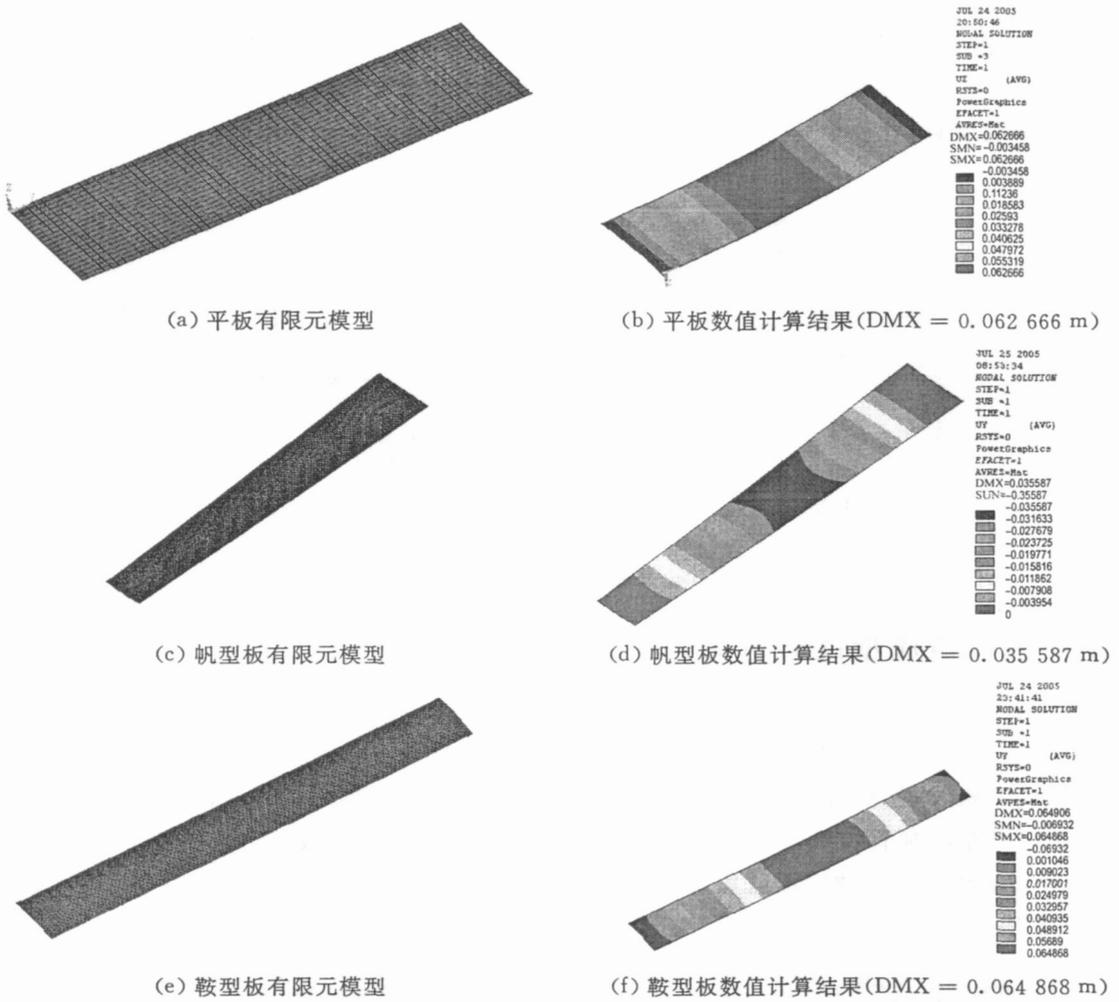


图 5 试验板有限元模型及数值计算结果

Fig. 5 Finite element model and its numerical calculation results for test plates

表 2 计算与实际测量结果

Tab 2 Results of calculation and measurement

板型	计算挠度 /m	实际挠度 /m	误差 /%
平板	0.062666	0.063	0.530
帆型板	0.035587	0.035	1.677
鞍型板	0.064868	0.063	2.965

3 数值试验分析

(1) 试验目的

应用帆型板以及鞍型板自重成型的有限元模

型, 根据实际工程钢板自重成型尺寸, 进行系列板成型数值试验, 创建样本数据库, 观察几何参数对成型参数的影响, 进一步分析影响规律.

(2) 试验参数

表 3 给出船体外板成型的主要几何参数.

(3) 测量参数

主要测量钢板准线中点挠度.

(4) 试验结果

部分鞍型板数值试验结果如表 4 所示.

表 3 试验板几何参数

Tab 3 Geometrical parameters of ship hull plates

板长 /m	板宽 /m	板厚 /m	曲率半径 /m
6.8 10 12	1.0 1.5 2.0 2.5 3.0	0.014 0.016 0.018	3.5 7.9 11
		0.020 0.022 0.024	

表 4 试验鞍型板计算结果

Tab 4 Results of saddle-shaped plates

板长 l/m	板宽 b/m	板厚 t/m	曲率半径 R/m	中点挠度 y/m
12	2.0	0.018	7	0.176 4
12	2.5	0.020	5	0.038 9
10	1.5	0.014	9	0.376 9
10	2.0	0.016	7	0.082 9
8	1.0	0.022	11	0.284 1
8	1.5	0.024	9	0.110 4
6	2.0	0.024	7	0.008 8
6	2.5	0.014	5	0.001 7

4 钢板几何参数对变形参数的影响

4.1 板长对钢板成型的影响

文中将几何参数板厚 t 和板曲率半径 R 分别定为 0.018 m 和 7 m, 考虑板宽 D 为 1.0 1.5 2.0 2.5 和 3.0 m 时, 板长 L 和挠度 y 的变化关系如图 6 所示, 二者之间为乘幂关系。

R^2 为样本相关系数的平方, 能度量拟合样本观察值的回归曲线的优劣, 数值越接近 1 拟合效果越好, R^2 计算公式为

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]} \quad (1)$$

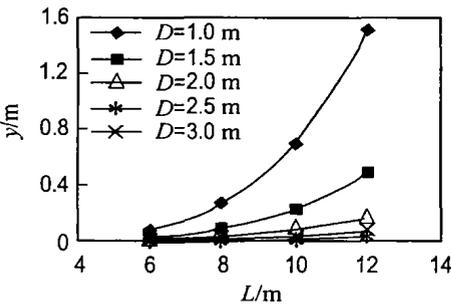


图 6 板长对钢板成型的影响
Fig. 6 The effect curves of length

4.2 板宽对钢板成型的影响

文中将几何参数板长 L 和板厚 t 分别定为 10 m 和 0.018 m, 考虑曲率半径为 3 5 7 9 和 11 m 时, 板宽 D 和挠度 y 的变化关系如图 7 所示, 二者之间为乘幂关系。

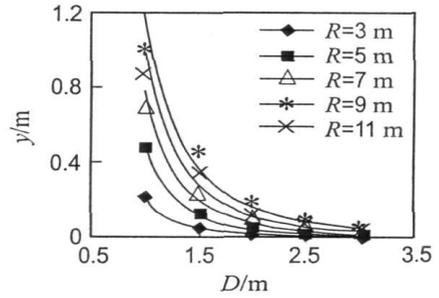


图 7 板宽对钢板成型的影响
Fig. 7 The effect curves of width

4.3 板厚对钢板成型的影响

文中将几何参数板长和板曲率半径分别定为 12 m 和 3 m, 考虑板宽为 1.0 1.5 2.0 和 2.5 m 时, 板厚 t 和挠度 y 的变化关系如图 8 所示, 二者之间为线性关系。

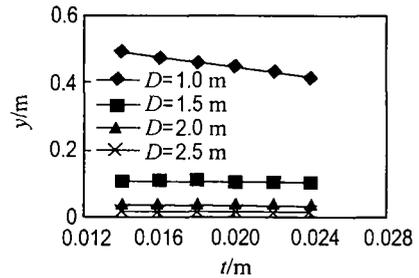


图 8 板厚对钢板成型的影响
Fig. 8 The effect curves of thickness

4.4 曲率半径对钢板成型的影响

文中将几何参数板厚和板宽分别定为 0.018 m 和 2.0 m, 考虑不同板长 12 10 8 和 6 m 时, 板曲率半径 R 和挠度 y 的变化关系如图 9 所示, 二者之间为乘幂关系。

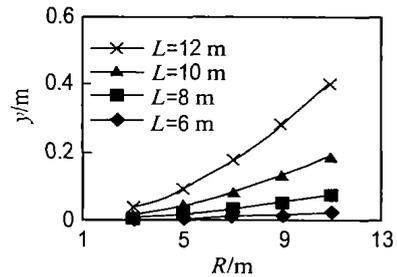


图 9 曲率半径对钢板成型的影响
Fig. 9 The effect curves of curvature radius

4.5 规律分析

(1) 从图 6 曲线趋势来看, 板长增加, 挠度增加, 板长对挠度影响较大. 采用十几种常用数学模型进行趋势预测和回归分析, 从图形和模型的相关系数分析, 乘幂模型拟合很好。

(2) 从图 7 曲线趋势来看, 板宽增加, 挠度降低, 板宽对挠度影响较大. 采用十几种常用数学模型进行趋势预测和回归分析, 从图形和模型的相关系数分析, 乘幂模型拟合很好.

(3) 从图 8 曲线趋势来看, 厚度增加, 挠度变小, 厚度对挠度影响较小. 采用十几种常用数学模型进行趋势预测和回归分析, 从图形和模型的相关系数分析, 线性模型拟合较好.

(4) 从图 9 曲线趋势来看, 曲率半径增加, 挠度降低, 曲率半径对挠度影响较大. 采用十几种常用数学模型进行趋势预测和回归分析, 从图形和模型的相关系数分析, 乘幂模型拟合很好.

5 建立船体板自重成型数学模型

在对工程试验数据进行回归建模时, 人们通常选用一些常用的经典模型进行回归, 通过比较来选用一个最好的模型. 这样往往导致建模过程具有一定的盲目性和随意性, 有时回归效果不理想. 文中结合梁理论建立回归模型, 使回归模型具有一定的物理意义, 模型更加科学可靠, 显著降低误差, 从而达到较好的回归拟合效果.

5.1 应用梁理论建立模型

已知长为 L , 受均布载荷 q 作用的简支梁, 其抗弯刚度 EI 为一常量, EI 中 I 是截面对中性轴的惯性矩, E 为材料常数, 称为弹性模量. 由于梁挠曲线对称, 最大挠度必在梁跨中点^[5]. 此时, 最大挠度为

$$v_{\max} = \frac{-5qL^4}{384EI} \quad (2)$$

使用自重成型计算中常用的参数, 柱壳板计算中常用到板长 L , 板宽 D , 曲率半径 R 和板厚 t . 可推导出应用梁理论的鞍型板挠度计算公式为

$$v_{\max} = -5d_g D L^4 \left\{ 384E \left[\left[\frac{1}{8} \sin\left(\frac{D}{R}\right) \times \left[\cos\left(\frac{D}{R}\right) + 1 \right] + \frac{1}{8} \frac{D}{R} - \frac{1}{16} \sin\left(2\frac{D}{R}\right) \right] \times R (4R^2 + t^2) - \frac{4}{9} \frac{\left(3R^2 + \frac{t^2}{4}\right)^2 \sin^2\left(\frac{D}{2R}\right)}{D} \right] \right\} \quad (3)$$

根据式 (3) 的形式分析, 可得出如下规律:

(1) 挠度和板长的 4 次方成正比;

(2) 板宽和曲率半径是相关性很强的两个变量, 根据方程形式, 将二者的比值 D/R 作为一个变量 θ 出现, θ 为柱壳板的圆心角;

(3) 一般来说, R/t 是一个大于 100 的数值, 所以 $R^2 \gg t^2$, 考虑当 R^2 和 t^2 相加时, 省略 t^2 不会给结果带来太大影响;

根据上面的规律, 式 (3) 可变成

$$v_{\max} = \frac{-5d_g L^4}{192ER^2 \left[\frac{\sin\theta}{\theta} + 1 - \frac{4(1 - \cos\theta)}{\theta^2} \right]} \quad (4)$$

将上式右边所乘的常数用 C_0 代换, 模型定为

$$v_{\max} = \frac{C_0 L^4}{R^2 \left[\frac{\sin\theta}{\theta} + 1 - \frac{4(1 - \cos\theta)}{\theta^2} \right]} \quad (5)$$

5.2 模型效果验证

根据式 (5), 以 14 mm 厚的钢板数据为例, 建立回归模型

$$v_{\max} = \frac{\exp(-19.692)L^{4.492}}{R^{1.782} \left[\frac{\sin\theta}{\theta} + 1 - \frac{4(1 - \cos\theta)}{\theta^2} \right]^{0.937}} \quad (6)$$

表 5 列举部分计算结果, 从回归误差来看, 数学模型拟合的精度较高; 从拟合前后的差值来看, 达到工程的精度要求.

表 5 梁理论模型计算结果

Tab 5 Computational results of models on beam theory

L /m	D /m	R /m	有限元结果 /m	模型结果 /m	回归误差 /%
12	1.5	11	1.128 70	1.192 302	5.634 939
12	2.0	11	0.422 79	0.405 813	-4.015 47
12	3.0	11	0.090 47	0.088 907	-1.729 69
10	1.5	11	0.521 42	0.525 659	0.812 938
10	2.0	11	0.196 30	0.178 914	-8.856 97
10	2.5	11	0.085 37	0.077 570	-9.136 38
10	3.0	11	0.041 92	0.039 197	-6.495 38
8	1.5	11	0.200 64	0.192 923	-3.846 15

6 结 论

采用大变形理论建立有限元数值模型, 经实船板自重试验证明有限元模型准确有效; 通过大量数值试验, 节约试验成本, 并为船体外板自重成型提供了数据样本; 通过变型规律定性分析, 建立鞍型板自重成型的数学模型, 为编制船体外板自重成型预报系统打下了较好的基础。

参考文献:

[1] 戴寅生, 邓燕萍, 林 哲, 等. 大型船舶外板自重成型预报研究 [J]. 大连理工大学学报, 1998, 48(4):

400-404

(DAI Y in-sheng, DENG Yan-ping, LIN Zhe, *et al*. An approach of forming by acting of GT in machine manufacturing works [J]. *J Dalian Univ Technol* 1998, 48(4): 400-404)

[2] 刘玉君, 陈 涛, 张 骏, 等. 船体外板鞍形板自重成型的数学模型 [J]. 中国造船, 2004(6): 73-80

[3] 刘玉君. 水火弯板成型参数回归分析 [J]. 中国造船, 1994(1): 65-73

[4] 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999

[5] 魏兆正. 材料力学 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1994

Numerical analysis of several effective parameters in dead load forming of hull steel plates

ZHOU Bo*, LU Yu-jun, JI Zhuo-shang, DENG Yan-ping

(School of Naval Archt., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract To increase the rate of production for the forming operation in the shipbuilding process and reduce the cost of the experiments, the relatively large deflections of sheet are described and the models of finite element method are built and checked up by experimental measures of dead load forming. The database of the calculations for dead load forming of hull steel plates is established. Data of effective parameters of hull saddle-shaped steel plates are measured, and the effect principles of the primary parameters such as length, width, thickness and radius are qualitatively analyzed, and their curves and data tables are presented. According to beam theory formula, mathematical models are constructed with multi-variable stepwise regression analysis method. It is testified that the model can provide basis for editing the prediction system of dead load forming parameters of hull steel plates.

Key words ship construction processing; dead load forming of hull steel plates; saddle-shaped plate; numerical analysis; experimental analysis; ANSYS