

文章编号:1671-7953(2008)01-0019-04

## 基于等强度板格稳定的船体结构优化设计研究

张少雄,喻之凯,向林浩

(武汉理工大学 交通学院,武汉 430063)

**摘 要:**以一艘 110 m 江海直达散货船为研究对象,通过全船有限元直接计算,对货舱区各主要构件的板厚进行优化,使船中 0.6 L(即 0.2 L~0.8 L)范围内构件的屈服强度、屈曲强度都在 IACS《散货船共同结构规范》规定的许用标准之内(或不超过许用标准 5%),并且没有较大富余(至少有一种强度余量在±5%以内)。在参考其他优化算法的基础上,推出了适合文中模型的算法,通过计算证明该算法是可行的,收敛速度也比较快。

**关键词:**净尺寸;直接计算;优化设计;等强度**中图分类号:**U661.4 **文献标志码:**A

## Research of the Optimal Design of Ship Structures Based on the Iso-strength and Plating Stability

ZHANG Shao-xiong, YU Zhi-kai, XIANG Lin-hao

(School of Transportation Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** The whole hull structure strength FE analysis was carried out for a 110m river-to-sea bulk carrier to optimize the plating thickness of the main structures, aiming at that the yield strength and buckle strength in the range of the midship 0.6L don't exceed the allowable standard of the JBP of IACS, without large margin of strength at same time. On the basis of common optimization algorithm, a suitable optimal method was proposed for the direct calculation, which was proved to be feasible with rapid convergency rate.

**Key words:** net-dimension; direct calculation; optimization design; iso-strength

IACS《散货船共同结构规范》于 2006 年 4 月 1 日开始实施。其中有很多技术亮点,包括采用了新的净尺度概念等。

所谓“净尺寸”,即为从船舶新建阶段开始一直到整个船舶设计寿命中都得以保持的厚度,以满足结构强度的要求,它提供了结构承受载荷所需的强度特征,不包括任何船舶运营期间可能发生的腐蚀余量和船东自愿增加的厚度。

我国现行的各种船舶入级规范都是基于构件的建造厚度以及相应的统计规律、统计结果和研究手段等建立的,与净尺寸的要求有一定的距离。

从理论和实用的角度上说,将船舶运营期间可能发生的腐蚀余量(和磨损余量等)从船体构件

的建造厚度中剥离出去,采用净尺寸的概念对船体构件的最低要求进行规定,对于确保船舶结构在全生命周期内的安全是合理的和必要的。

针对江海通航船的特点和要求、根据目前所掌握的计算分析手段,认为所研究的“净尺寸”应该保证的项目应有所侧重:疲劳强度暂不考虑,极限强度不予考虑,所得到的“净尺寸”实际为对应于“等效设计波”的波浪载荷以及船舶正常的装载状态,船体结构构件满足屈服强度和板格稳定最低要求的最小厚度。

## 1 计算模型

## 1.1 主尺度及结构形式

总长:112.50 m;水线长:110.00 m;型宽:24.40 m;型深:8.20 m;方形系数:0.862。

双尾、首部球鼻首。2 个大开口货舱,范围分别为:No. 2 从 Fr28~Fr90,长度 40.3 m;No. 1 从 Fr92~Fr152,长度 39.0 m。船中处的横舱壁

**收稿日期:**2007-10-15**修回日期:**2007-11-14**作者简介:**张少雄(1965—),男,博士,教授。**研究方向:**船舶结构。**E-mail:**shaoxiongzhang6556@126.com

为双壁舱壁,内部垂直桁、水平桁与底纵桁、平台甲板位置对应。计算模型见图 1。

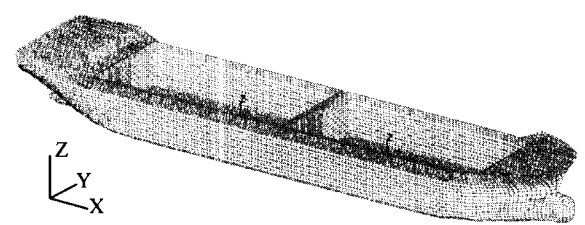


图 1 计算模型

1.2 应力评估范围

取  $0.2L\sim0.8L$  范围内的主要(板壳)构件的应力结果进行评估。

直接计算的经验表明:在常规的计算(不考虑舱口盖的刚度)情况下,对于常规设计的舱口围板及其面板、舱口处甲板,其强度一般都难以满足。故本文中仅提取其应力但不修改其板厚,在优化完成后建议根据其应力状况进行局部加强。

该范围内主要构件的分组见表 1。其中各主要构件的初始设计尺寸以及纵骨和骨材不变。

表 1 应力评估范围内主要构件分组

编号	名称	构件
1	m6_1deckcorner	舱口处甲板
2	m6_2deck	甲板
3	m6_3crossdeck	横甲板
4	m6_4outshelltop	舷顶列板
5	m6_5outshell	外壳板
6	m6_6bilge	舭板
7	m6_7outbtm	外底板
8	m6_8outbtmcenter	平板龙骨
9	m6_9inbtm	内底板
10	m6_10inshell	内壳板
11	m6_11-0	中纵桁
12	m6_12btmgirder	旁纵桁
13	m6_13btmg_inshell	内壳下旁纵桁
14	m6_14stringer	舷侧纵桁
15	m6_15hatch	舱口围板

续表 1

编号	名称	构件
16	m6_16hatchface	舱口围板面板
17	m6_17floor	实肋板
18	m6_18sidefloor	舷侧肋板
19	m6_19bhd	横舱壁
20	m6_20bhd_stiff	横舱壁扶强材
21	m6_21hatchbracket	舱口围板肘板

2 边界条件及载荷

2.1 惯性释放

航行的船舶结构处于“全自由”状态,但是对它进行有限元静力分析计算时,不能处理为全自由结构。

惯性释放<sup>[1]</sup>是 MSC. NASTRAN 或 ANSYS 中的一个高级应用,允许对完全无约束的结构进行静力分析。它对于船舶结构强度的有限元直接计算具有很强的实际意义。如果结构上作用有一个自平衡力系或者作用(如温度载荷或电磁载荷等),即使完全不受约束的全自由结构,也会产生应力;但此时在结构上任意一点进行约束,得到的反力应该等于 0。

2.2 计算工况

考虑在压载出港、满载出港、半载出港 3 种载况下,船体在不同的波浪条件作用下的 21 种工况,见表 2。

按照《江海通航船舶检验指南》2.3.5.2 条的规定,大开口船舶计算工况考虑下列波浪条件:随(迎)浪工况;斜浪 60°工况;横浪工况。

在计算模型中,施加了以下几种载荷:

- 1) 空船重量。
- 2) 货物压力(包括矿石货物或者压载水)。
- 3) 舷外水压力(考虑静水、中拱波浪以及中垂波浪等波浪条件,以“等效设计波”的概念、用“理想”波面以静水压力的形式处理舷外水压力)。

表 2 不同波浪条件下的 21 种工况

压载			满载			半载		
编号	工况名称	波浪条件	编号	工况名称	波浪条件	编号	工况名称	波浪条件
1	1_static	静水	8	2_static	静水	15	3_static	静水
2	1_hog_head	迎浪、中拱	9	2_hog_head	迎浪、中拱	16	3_hog_head	迎浪、中拱
3	1_sag_head	迎浪、中垂	10	2_sag_head	迎浪、中垂	17	3_sag_head	迎浪、中垂
4	1_hog_slope	斜浪、中拱	11	2_hog_slope	斜浪、中拱	18	3_hog_slope	斜浪、中拱
5	1_sag_slope	斜浪、中垂	12	2_sag_slope	斜浪、中垂	19	3_sag_slope	斜浪、中垂
6	1_hog_beam	横浪、中拱	13	2_hog_beam	横浪、中拱	20	3_hog_beam	横浪、中拱
7	1_sag_beam	横浪、中垂	14	2_sag_beam	横浪、中垂	21	3_sag_beam	横浪、中垂

## 2.3 调整外力平衡

要得到一个精确平衡的外力极其困难。为了尽量减小由于外力的不平衡程度太高而造成的计算结果有较大的误差,本次计算中对各工况下计算得到的舷外水压力进行适当调整,使得外力中的垂向合力(重力与浮力)基本平衡,以此作为外力平衡的基本要求<sup>[3]</sup>。

## 3 本船优化方法

### 3.1 优化算法

由于本船所涉及到的优化设计变量 21 个、工况 21 个,属于多工况多变量的复杂结构的优化<sup>[4]</sup>,变量之间互相影响关系复杂,一般的数学优化算法比较难以实现。

借鉴满应力准则<sup>[5]</sup>的优化算法来处理。对于屈服强度分析,定义最大 Mises 应力与许用应力的差值相对于许用应力的比值为余量(即  $yul = \frac{S_{\max}(n) - 205}{205}$ )。对于屈曲分析,定义最大纵向应力与临界应力的差值相对于临界应力的比值为余量(即  $yull = \frac{|S_{\min}(n)| - S_{cr}(n)}{S_{cr}(n)}$ )。

若余量为正值说明强度不够,需要加大板厚;若余量为负值说明板厚有富余,需要减小。

显然,希望屈服余量、屈曲余量都在  $\pm 5\%$  以内,但是这样不可能做到。

实际情况是每组板屈服余量或者屈曲余量之一在  $\pm 5\%$  范围之内(一些构件是以屈服强度控制的,其屈曲有一定的富余;而有些构件是以屈曲强度控制的,屈服强度有一定的富余。)另一个余量小于  $5\%$ 。

在本文编制的 FORTRAN 程序中不仅给出了余量衡准,即判断余量是否在  $\pm 5\%$  以内,若在为“yes”,反之为“no”;而且给出了应力衡准,即最大应力是否超出相应的许用应力和临界应力,若没超出为“yes”,反之为“no”。

对于屈服余量不满足要求( $\pm 5\%$ 以外),则取新板厚为  $t(i+1) = t(i) \times (1 + Yul(i))$

对于屈曲余量不满足要求( $\pm 5\%$ 以外),则取新板厚为  $t(i+1) = t(i) \times \sqrt{1 + Yull(i)}$

取屈服强度分析和屈曲强度分析的两个新板

厚中的最大值为修正板厚,这样保证了程序的收敛,也保证了最后板厚使得某一余量在  $\pm 5\%$  范围之内,另一余量小于  $5\%$ (基本上有较大的富余)。

### 3.2 优化过程中各程序

#### 3.2.1 结果后处理的 PCL 程序

每次计算完成后需要提取  $0.2L \sim 0.8L$  范围内的主要(板壳)构件的应力结果进行评估。

由于涉及到 21 个组在 21 个工况作用下的应力结果,所以有必要编写 PCL 程序对数据库直接读取结果。利用 `res_data_load_dbresult()`, `res_display_report_create()`, `res_display_report_write()` 编写循环程序,提取 21 个组在 21 个工况分别作用下的应力结果,将 shell、beam 单元的应力值<sup>[2]</sup>分别写到 shell.txt, beam.txt 文件中便于后面再处理。

#### 3.2.2 结果后处理的 FORTRAN 程序

利用 FORTRAN 程序,提取 shell.txt, beam.txt 文件中所需应力,并评判 21 个组分别在 21 个工况作用下的最大应力值是否超过许用屈服强度标准和屈曲临界应力,并且根据屈服、屈曲强度的不足或者富余编写算法分别建议新板厚。在屈服和屈曲分析分别建议的新板厚中,再建议修正板厚并写入 thickness.txt 文件。

#### 3.2.3 PCL 参数化修改板厚程序

利用 FORTRAN 程序读取修正板厚文件 thickness.txt 中各组板厚数值,并写入 PCL 程序 `elementprops_modify()` 中,修正 21 个组的板厚(其中舱口处甲板、舱口围板及其面板厚度不修改)。

### 3.3 结果分析

经过 5 次优化计算后,结果收敛,所有各组构件(不包括未修正的 3 组),都能满足屈服、屈曲强度要求(低于许用标准或不超过许用标准的  $5\%$ ),见表 3。

主甲板、壳下纵桁屈服屈曲余量都能控制在  $5\%$  以内,中纵桁、旁纵桁、实肋板、横框架由屈服强度控制,其余各组构件都由屈曲强度控制。

未修正的 3 组,其中角隅甲板屈服屈曲强度都能满足;舱口围板、舱围面板在船中部分屈服屈曲强度均不足,需要局部加强,见表 4。

表3 修正后的构件屈服强度分析

分组	初始板厚/mm	修正板厚/mm	屈服强度分析				屈曲强度分析				强度控制
			最大应力/MPa	对应工况	屈服平衡	余量/%	最大应力/MPa	对应工况	临界应力/MPa	余量/%	
主甲板	16.0	20.51	206.9	10	no	0.93	-207.82	10	199.028	no	兼有
横甲板	8.0	8.51	114.82	14	yes	-43.99	-118.22	14	117.29	no	屈曲
舷顶列板	14.0	14.01	68.66	10	yes	-17.73	-164.16	10	169.957	yes	屈曲
外壳板	9.0	8.46	123.79	10	yes	-39.61	-115.04	10	116.147	yes	屈曲
舳板	9.5	7.75	128.91	10	yes	-37.12	-102.52	2	98.219	no	屈曲
外底板	9.5	8.34	142.46	10	yes	-30.51	-118.32	2	113.322	no	屈曲
平板龙骨	11.5	8.43	138.58	10	yes	-32.4	-114.36	2	115.452	yes	屈曲
内底板	9.5	7.7	152.92	10	yes	-25.4	-93.46	9	96.956	yes	屈曲
内壳板	12.0	13.43	178.45	10	yes	-12.95	-181.15	10	174.951	no	屈曲
中纵桁	13.0	13.0	210.23	10	no	2.55	-98.73	14	198.925	yes	屈服
旁纵桁	10.0	9.09	205.52	10	no	0.25	-82.69	2	183.548	Yes	屈服
壳下纵桁	14.0	4.85	199.78	10	yes	-2.55	-108.02	2	107.943	no	兼有
平台甲板	9.0	5.6	108.21	14	yes	-47.21	-57.49	10	58.229	yes	屈曲
实肋板	8.0	8.0	202.97	14	yes	-0.99	-40.59	10	4.658	yes	屈服
横框架	8.0	5.66	195.72	12	yes	-4.53	-55.91	2	150.486	yes	屈服
横舱壁	10.0	5.57	111.37	10	yes	-45.67	-52.93	2	50.735	no	屈曲
壁内板	6.0	5.71	120.93	10	yes	-41.01	-55.12	2	53.317	no	屈曲
舱围肘板	14.0	2.7	115.66	14	yes	-43.58	-30.85	2	31.48	yes	屈曲

表4 未经修正的构件计算结果

	屈服强度分析			屈曲强度分析				备注
	对应工况	最大应力/MPa	余量/%	对应工况	最大应力/MPa	临界应力/MPa	余量/%	
角隅甲板	10	177.07	-13.62	10	-184.08	206.808	-10.99	满足要求
舱口围板	10	223.49	9.02	10	-228.41	198.773	14.91	局部加强
舱围面板	10	234.15	14.22	10	-234.77	211.638	10.93	局部加强

#### 4 结论

1) 同时考虑屈服强度和屈曲强度的“净尺寸”研究是可行的。

2) 文中的优化算法是可行的,计算5次即收敛。

3) 有相当大一部分构件是由屈曲强度控制的,所以进行屈曲分析是必要的。

4) 在优化的过程中,没有考虑角隅甲板、舱口围板、舱围面板的强度。直接计算的经验表明:在常规的计算(不考虑舱口盖的刚度)情况下,对于常规设计的舱口围板及其面板,其强度一般都难以满足。而且其整体应力水平并不十分大,只是在船中货舱区横舱壁处较大,没有必要为了满足局部的应力集中,而加大整个构件的尺寸,而且这样也容易导致其他尺寸的不可信。

虽说达到了预期的研究目标,但这其中也存在一些不足,对于这种复杂情况下的优化还需要进一步不断的努力,具体为:

1) 得到的“净尺寸”优化解不一定是全局最优解,对于每次计算后修正板厚的算法,还需要进一步的研究,以期能找到全局的最优解。

2) 由于优选的过程中,没有改变结构形式以及骨材的截面和分布,所以所得到的优选结果是:在给定的结构形式和骨架尺寸,在“等效设计波”载荷条件下,同时满足屈服强度以及屈曲最低要求的“净板厚”。能否进一步同时考虑结构形式以及骨材的截面和分布。

3) “等效设计波面”的方法施加的波浪状态下的载荷,与规范要求的载荷(波浪弯矩)之间的相互关系,需要进行深入细致的研究。

#### 参考文献

- [1] 张少雄,杨永谦. 船体结构强度直接计算中惯性释放的应用[J]. 中国舰船研究. 2006(2):40-43.
- [2] 张少雄,李雪良. 船舶结构强度直接计算中板单元应力的取法[J]. 船舶工程, 2004(3):36-39.
- [3] 张延辉. 船体结构强度直接计算中载荷平衡方法研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2006.
- [4] 钱令希. 工程结构优化设计[M]. 北京:水利电力出版社, 1983.
- [5] 隋允康. 建模·变换·优化—结构综合方法新进展[M]. 大连:大连理工大学出版社. 1996.