

考虑弯扭强度和频率约束的集装箱船中剖面优化设计

张 丽, 王德禹

(上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200030)

摘 要: 结合 CCS 规范和薄壁杆件理论, 建立了考虑弯扭强度和频率约束的集装箱船中剖面优化设计的模型, 考虑到中剖面优化设计中的设计变量为连续和离散的混合变量, 利用 isight 中集成的自适应模拟退火算法, 建立了巴拿马型集装箱船中剖面优化设计系统, 并对 3100TEU 集装箱船中剖面进行了优化设计, 取得了合理的结果。

关键词: 薄壁杆件理论; 频率约束; 中剖面优化设计; 自适应模拟退火算法; 混合设计变量

中图分类号: U662.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-8354(2008)02-0001-04

Optimum design of midship section of container ships in view of crankle strength and frequency constraints

ZHANG Li, WANG De-yu

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The model is set up in view of the optimum design of midship section of container ships with crankle strength and frequency constraints according to CCS rules and thin-walled beam theory. Considering that design variables are continuous and discrete ones, the optimum design system with adaptive simulated annealing which can solve mixed variables optimum problems in ISIGHT environment is set up. The system is applied in the optimum design of the midship section of 3100TEU container ship in this paper, and the ideal result was obtained.

Key words: thin-walled beam theory; frequency constraint; midship optimum design; adaptive simulated annealing; mixed design variables

0 前言

船舶中剖面的结构形式和构件尺寸集中反映了整个船体结构的概貌, 它包括了中部区域各类板的厚度、骨架形式、纵向加强材的尺寸等。并且可以参照它确定首尾部区域相应构件尺寸, 这样全船纵向构件尺寸就基本确定了, 其重量约占全船结构重量的 80% 以上^[1], 因此, 寻求满足各种约束条件下的结构重量最轻或成本最省的船舶中剖面结构优化设计, 有重要的实际意义, 国内外学者也作了大量的研究, 如文献[2]利用弹塑性有限元法实现了对船舶中剖面构型的优化设计, 文献[3]则提出了一种针对内河船的多目标函数中剖面优化设计方法。

集装箱船与普通货船相比, 具有吨位大、航速快、

装卸效率高等特点, 因此近年来发展很快。现代大型集装箱船为了存放更多的集装箱, 争取更大存放空间, 有甲板大开口和舱口围板结构, 并且在船首部、尾部设计中也尽量争取更多空间存放集装箱。同普通货船相比, 有些集装箱船的货舱舱口宽度已超过船宽的 80%, 舱口长度已达到船长的 90%, 并且大舱口结构破坏了主甲板的连续性, 所以总纵强度和扭转强度不易满足。集装箱船的弯扭强度问题也是近年来船舶界的热门研究课题^[4-6]。本文参照 CCS 规范^[7]以及相关文献对于大开口船舶扭转强度的研究结论, 利用薄壁杆件理论, 建立了考虑弯扭强度约束和频率约束的集装箱船中剖面优化设计模型, 并对 3100TEU 集装箱船中剖面进行了优化设计。

收稿日期: 2007-06-01; 修回日期: 2007-07-16

基金项目: 教育部“船舶数字化智能设计系统”专项课题

作者简介: 张丽(1982-), 女, 硕士, 研究方向: 船舶结构优化设计。

1 优化模型

船舶中剖面优化设计是典型的约束非线性问题,是以船中剖面面积最小为目标来确定钢板和型钢的截面特征尺寸,达到更合理的材料分配和降低结构应力水平的目的。其一般式可写成:

$$\begin{aligned} \min f(X), X \in R^n \\ \text{s. t. } g_j(X) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m \\ x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \end{aligned} \quad (1)$$

式中, n 为设计变量总数; m 为约束条件总数; $f(X)$ 为目标函数; $g_j(X)$ 为约束函数; x_i^L 和 x_i^U 分别为设计变量 x_i 的上下限; $X(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 为设计变量组成的列向量。

1.1 设计变量

本文所做的优化是针对船长在 90m ~ 300m 之间的巴拿马型集装箱船,如图 1 所示。因此,船体外形已定,构件之间的连接关系明确,主要以钢板厚度和型钢截面面积作为设计变量。

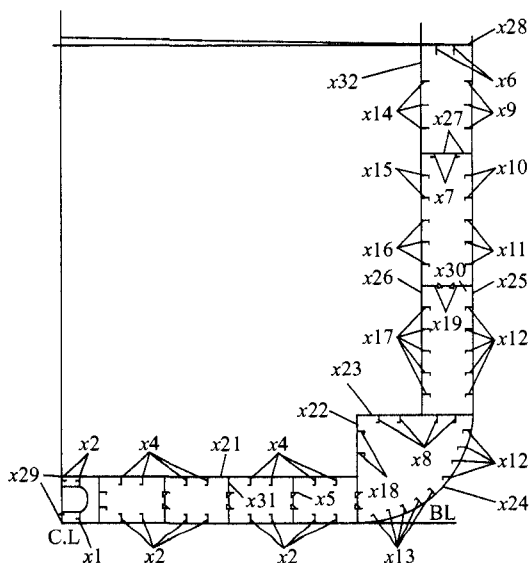


图1 船中剖面示意图

图中, $x_1 \sim x_{19}$ 为型材截面面积,其值从钢材市场供应的规格中选取(可查阅常用型材规格),为离散设计变量; $x_{20} \sim x_{28}$ 、 $x_{30} \sim x_{32}$ 为钢板厚度,一般取为整型连续设计变量; x_{29} 为双层底高度,为连续设计变量。

1.2 约束函数

为了满足设计的要求,甲板处总纵弯曲应力和船底总纵弯曲应力与板架弯曲应力的合应力以及中和轴处舷侧板的剪应力分别小于或等于规范规定的许用应力,对于集装箱这类大开口船舶,必须考虑扭转

的影响,在设计中还应该考虑振动对结构的影响。

1.2.1 正应力约束

船长方向正应力有静水弯曲应力、波浪弯曲应力和扭转翘曲应力,依据规范,合成应力是静水弯曲应力、波浪弯曲应力和扭转翘曲应力的线性叠加。

根据文献[7],集装箱船中剖面处垂向波浪弯矩 M_v 应按下式计算:

$$M_v = 9.81 K F L^2 B (C_b + 0.7) \times 10^{-2} \quad (2)$$

式中, M_v 为垂向波浪弯矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$; K 、 F 为与船长相关的系数; C_b 为方形系数; L 为船长; B 为船宽。

船舶处于迎浪时的垂向弯曲合成应力为

$$\sigma_c = \frac{M_s + M_v}{W_v} \times 10^3 \quad (3)$$

式中, σ_c 为垂向弯曲合成应力, N/mm^2 ; M_s 为静水弯矩; W_v 为剖面模数。

由文献[8],集装箱船作为大开口薄壁梁结构,中剖面处翘曲应力小,弯曲应力大,在设计过程中应偏重于降低弯曲应力,因此正应力约束可以为:甲板处正应力约束 $\sigma_c^d \leq [\sigma^d]$,船底处正应力约束 $\sigma_c^b \leq [\sigma^b]$,还要求船中剖面对水平中和轴的惯性矩 $I \geq I_0$,对于翘曲正应力的约束,劳氏规范中规定中剖面抗扭箱的截面积 A_t (cm^2) 大于等于排水量 Δ (t) 的 0.15 倍^[9],本文的在优化设计中也要要求 $A_t \geq 0.15 \Delta$ 。

1.2.2 剪应力约束

船体梁波浪剪力 F_w 应按下式计算:

$$F_w = 21 C L B (C_b + 0.7) \times 10^{-2} \quad (4)$$

式中, F_w 为波浪剪力, kN ; C 为与船长相关系数。

舷侧外板上由静水切力和波浪切力引起的剪应力 τ_1 (N/mm^2) 按下式计算:

$$\tau_1 = \frac{|F_s + F_w| S}{I \delta_1} \times 10^2 \quad (5)$$

式中, S 为静矩; F_s 为静水切力; I 为惯性矩; δ_1 为与剖面形式相关的系数。

由于大开口船舶扭转时在船体中部波浪扭矩有最大值,而翘曲应力较小,因此认为船体中部处于纯扭转状态^[10]。由于船体是一个由钢板焊接而成的薄壁结构,其长度远大于宽度和深度,所以可以把整个船体理想化为一根薄壁梁。根据薄壁杆件扭转理论^[11],将其中的纵桁等略去而近似的当作一多闭室来处理,计算出由扭矩引起的剪应力 τ_2 。

船中剖面处的波浪扭矩 M_{tw} ($\text{kN} \cdot \text{m}$) 按下式计算:

$$M_{tw} = 9.81 e^{-0.00295L} \frac{L B^3 C_T}{20000} \left(1.75 + 1.5 \frac{\varepsilon}{D} \right) \quad (6)$$

式中, D 为型深; C_T 为与船舶主尺度相关的系数; ε 为从船基线以下的剪切中心至船基线的距离。

船中剖面处的货物扭矩 M_{TC} (kN · m) 按下式计算:

$$M_{TC} = 15.7 B n_B n_i \quad (7)$$

式中, n_B 、 n_i 分别为在船中部货舱内沿船宽方向的集装箱行数和集装箱层数。

中剖面处总扭矩 $M_T = M_{TC} + M_{Tw}$, 再由薄壁杆件理论求出由扭矩引起的剪应力 τ_2 , 优化设计中对于剪应力的约束为 $\tau_2 + \tau_1 \leq [\tau]$ 。

1.2.3 稳定性约束

受压板格的理想弹性屈曲应力 σ_E 应按下式计算:

$$\sigma_E = 0.9 K_C E \left(\frac{t_b}{1000s} \right)^2 \quad (8)$$

式中, s 为板格短边长度; K_C 为系数; t_b 为板净厚度; E 为材料弹性模量。

板的临界屈曲应力 σ_C 应按下式计算:

$$\begin{cases} \sigma_C = \sigma_E & \sigma_E \leq \frac{\sigma_s}{2} \\ \sigma_C = \sigma_s \left(1 - \frac{\sigma_s}{4\sigma_E} \right) & \sigma_E > \frac{\sigma_s}{2} \end{cases} \quad (9)$$

板的工作压应力 σ 应满足

$$\sigma \leq \frac{1}{\beta} \sigma_C \quad (\text{对板和加强材腹板}, \beta = 1) \quad (10)$$

1.2.4 频率约束

在结构设计中应考虑振动对结构的影响。通常, 在设计初步阶段, 首先要避开船体的低谐调共振区域, 设法使干扰频率和船体固有频率错开一定值, 避免发生共振, 本文考虑一、二、三阶的船体固有频率, 使其与主机转速保持一定差距, 建立三个频率禁区, 控制范围系数分别取 6%、8% 和 10%。

本文采用希列克的公式^[12]估算船舶首阶固有频率:

$$N_{v2} = C \sqrt{\frac{I_v}{\Delta_v L^3}} \quad (11)$$

其中, C 为统计系数, 按照文献[13]提供的统计数据, 对于巴拿马型集装箱, 可取为 2.8×10^6 ; Δ_v 为计入附连水质量后船体垂向弯曲振动的总质量, 可取为 $\Delta_v = \Delta \left(1.2 + \frac{1}{3} \cdot \frac{B}{T} \right)$ 。

三节点、四节点固有频率根据文献[12], 分别由 $N_{v3} = 1.8 N_{v2}$, $N_{v4} = 2.53 N_{v2}$ 得到。

若 n 为主机转速, 建立频率约束: $n \leq 0.97 N_{v2}$ 或 $1.03 N_{v2} \leq n \leq 0.96 N_{v3}$ 或 $1.04 N_{v3} \leq n \leq 0.95 N_{v4}$ 或 $n \geq 1.05 N_{v4}$ 。

1.2.5 上下限约束

对于如双层底高度、船底板板厚、内底板板厚、舷侧板厚等规范有规定的变量, 依照规范来取上下限, 对于规范没有明确规定的变量, 为了避免产生过大或过小的不切实际的结果, 各变量的变化范围只能在可行域内选取。而对于离散型材截面面积, 则按照市场上已有的规格选取。

1.3 目标函数

优化目标为船中剖面面积最小, 即

$$f(X) = \sum_{i=1}^{\text{型钢数}} x_i + \sum_{j=1}^{\text{钢板数}} s_j x_j$$

其中, s_j 为编号为 j 的钢板宽度。

2 优化的实现

Isight 是美国 Engineious 公司开发的过程集成、优化设计和稳健性设计的通用性软件, 它提供了一个优化工具包, 集成了 20 多种常用的优化算法, 并且可以很方便的增加自己的算法。文献[13]已经证明, 模拟退火算法对于解决船舶中剖面优化设计这类非线性约束混合变量优化问题是可行且高效的, 本文则借助 isight 工具包中的自适应模拟退火算法实现对结构的优化设计。利用 VC 编译可执行文件, 建立优化设计变量、约束函数和目标函数, 控制输入文件和输出文件, 通过 isight 实现对可执行文件的调用, 利用 isight 工具包中的自适应模拟退火算法, 建立巴拿马型集装箱船中剖面优化设计系统, 只要输入船长 L 、型宽 B 、型深 D 、方型系数 C_b 、设计吃水 d 、主机转速 n 、船中部货舱内集装箱沿船宽方向行数 n_B 和层数 n_i 、设计静水弯矩 M_s 和设计静水切力 F_s 等船舶初步设计基本参数, 便可对其进行中剖面的优化设计。

3 算例

本算例研究的母型船—3100TEU 集装箱船的主要输入参数: 船长 L 为 214.20m; 型宽 B 为 32.20m; 型深 D 为 18.80m; 方型系数 C_b 为 0.67; 设计吃水 d 为 12.00m; 主机转速 n 为 100r/min; 集装箱行数 n_B 为 10; 集装箱层数 n_i 为 10; 设计静水弯矩: 中垂为 10×10^4 kN · m, 中拱为 22.5×10^5 kN · m。

母型船的型钢主要采用了扁钢和角钢, 所以程序中输入了市场上角钢和扁钢的基本规格, 按照本文所述优化设计模型, 对其进行了优化设计, 优化结果与初始计算的结果比较如表 1 所示。

优化前中横剖面的面积为 14871.39cm², 优化后中横剖面的面积为 13432.94cm², 中剖面面积减少了 9.67%。既保证强度满足规范的要求, 又减轻了重量。

表 1 优化结果

序号	构件名称	设计变量	初始设计	优化结果	序号	构件名称	设计变量	初始设计	优化结果
1	纵骨 1	x1	23.00	20.94	17	纵骨 14	x17	33.40	29.66
2	纵骨 2	x2	45.30	41.70	18	纵骨 15	x18	45.30	37.47
3	中内龙骨 2	x3	23.00	16.50	19	纵骨 16	x19	16.50	12.00
4	纵骨 3	x4	42.48	38.50	20	船底板	x20	20.00	20.00
5	纵骨 4	x5	15.00	15.00	21	内底板	x21	14.00	15.00
6	甲板扶强材 1	x6	154.00	140.00	22	内侧板 1	x22	13.00	10.00
7	甲板扶强材 2	x7	23.00	13.62	23	内侧板 2	x23	12.00	10.00
8	纵骨 5	x8	33.40	19.00	24	舷侧板 1	x24	15.00	17.00
9	纵骨 6	x9	132.00	140.00	25	舷侧板 2	x25	13.00	10.00
10	纵骨 7	x10	23.00	16.50	26	内侧板 3	x26	11.00	10.00
11	纵骨 8	x11	28.80	19.00	27	甲板	x27	11.00	10.00
12	纵骨 9	x12	33.40	27.36	28	主甲板	x28	44.00	36.00
13	纵骨 10	x13	46.50	46.50	29	双层底高度	x29	1780.00	1627.00
14	纵骨 11	x14	132.00	120.00	30	内侧板 4	x30	10.00	15.00
15	纵骨 12	x15	23.00	16.50	31	内侧板 5	x31	11.00	11.00
16	纵骨 13	x16	28.80	29.66	32	舷侧板 3	x32	22.00	12.00

其中,纵骨截面面积单位为 cm^2 ;板材厚度单位为 mm;双层底高度单位为 mm.

4 总结

本文依据 CCS 规范以及相关文献对于大开口船舶扭转强度的研究结论,利用薄壁杆件理论,建立了考虑弯扭强度约束和频率约束的集装箱船中剖面优化设计模型.通过 VC 程序编译了可执行文件,考虑了船舶中剖面优化设计的设计变量的混合性,利用 isight 中的自适应模拟退火算法,建立了巴拿马型集装箱船中剖面优化设计系统,只要输入船舶初步设计中的基本数据,便可进行优化设计,并以 3100TEU 集装箱船为母型,对其进行了优化设计,结果证明,优化效果很好.

参考文献:

[1] 曾广武. 船舶结构优化设计[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2004.

[2] Mermiris George, Das P. K., Moatsos Ioannis, Winkle, I. E. Towards a method for the optimization of midship section in terms of production cost in preliminary ship design[J]. American Society of Mechanical Engineers, 2005, (30): 981-990.

[3] M. K. Rahman. Automated optimization of transverse frame layouts for ships by elastic-plastic finite element a-

nalysiss[J]. Structural Optimization. 1998, (15): 187-200.

[4] Kim Yunyoung, Kim, Ki-Sung, Park Je-Woong. Midship section optimization of hatchcoverless container ship based on real-coded micro-genetic algorithm[M]. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd. 2006.

[5] 陆红干,陆利平. 3100TEU 集装箱船扭转强度研究[J]. 船舶设计通讯,2004, (2): 18-23.

[6] 张健,尹群. 提高大开口船舶弯扭组合强度的方法研究[J]. 船海工程,2006, (1): 4-7.

[7] 中国船级社. 钢质海船入级与建造规范[S]. 北京:人民交通出版社,2002.

[8] 陆伟东,李斌. 顶级巴拿马型集装箱船总强度的前期研究[J]. 船舶工程,2001, (3): 12-15.

[9] 陆伟东,蔡乾亚,裘泳铭. 集装箱船中剖面结构基于知识的计算机辅助设计系统[J]. 上海交通大学学报, 2000, (1): 36-40.

[10] 袁洪涛,王辉辉. 集装箱船的总纵强度和扭转强度校核[J]. 江苏船舶,2006, (1): 14-16.

[11] 陈伯真,胡毓仁. 薄壁结构力学[M]. 上海交通大学出版社,1998.

[12] 金成定,赵德有. 船体振动学[M]. 上海交通大学出版社,2000.

[13] 许华文,肖熙. 基于模拟退火算法的舰船中剖面优化设计[J]. 上海交通大学学报,2000, (1): 95-98.