

文章编号:1005-9865(2016)02-0088-07

考虑晃荡效应的独立 B 型 LNG 液舱结构多目标优化

王 元^{1,2}, 王德禹^{1,2}

(1. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240; 2. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘 要:独立 B 型 LNG 液舱内部设置舱壁板材及多种桁材,有效缓解了液舱晃荡效应。针对晃荡载荷下的独立 B 型 LNG 液舱结构多目标优化,利用规范中的公式计算晃荡载荷,并引入液舱晃荡系数,以期综合反映液舱内部构件对晃荡特性的影响,在此基础上进一步建立以液舱结构重量和液舱晃荡系数为目标的多目标优化模型,采用多目标遗传算法(NCGA),计算得到改进的独立 B 型 LNG 液舱结构设计方案。

关键词:独立 B 型 LNG 液舱;晃荡效应;多目标优化;多目标遗传算法

中图分类号: U662.2 **文献标志码:** A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2016.02.012

Structural multi-objective optimization of SPB LNG tanks under sloshing pressure

WANG Yuan^{1,2}, WANG Deyu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

Abstract: SPB (Self-supporting Prismatic-shape type B) LNG tanks are designed with internal bulkheads and girders to reduce liquid sloshing resonances in the tanks. The present research aims to give a structural multi-objective optimization for the SPB LNG tanks under sloshing pressure. Sloshing loads are calculated according to formulas recommended in rules. Sloshing coefficient, which is related to internal girders of tanks, is defined and introduced as one of the objectives combined with tank weight. The structural multi-objective optimization model of SPB LNG tank is established and performed based on NCGA algorithm. Numerical results show that an improved scantling design of SPB LNG tanks is achieved.

Keywords: SPB LNG tank; sloshing pressure; multi-objective optimization; NCGA

LNG 船根据液舱围护系统的不同可分为薄膜型和独立液舱型两种,其中独立液舱型又有 A 型、B 型和 C 型三种。独立 B 型 LNG 液舱结构如图 1 所示,与其它液舱围护系统相比,独立 B 型 LNG 液舱设置了内舱壁板,具有良好的抗晃荡性能,有效缓解了液舱晃荡效应,保证了运输过程中液舱在部分装载时的结构安全^[1-2]。LNG 船液舱内部温度低至零下 163 摄氏度,对结构材料有特殊要求^[3-4]。本文独立 B 型 LNG 液舱采用耐低温的 9%镍钢。

考虑独立 B 型液舱内部板材结构的多样性及材料的特殊要求,在保证液舱结构安全的前提下,为了减轻液舱结构重量,对该型液舱进行结构优化研究具有重要的工程意义。针对独立 B 型 LNG 液舱结构设计, Song 等人^[2]对独立 B 型 LNG 液舱进行了晃荡模型试验,并基于试验结果研究该型液舱在晃荡载荷作用下的结构强度。然而,在独立 B 型 LNG 液舱结构优化方面的研究并不多,特别是晃荡载荷作用下的液舱结构

收稿日期:2015-02-02

基金项目:教育部、财政部“船舶数字化智能设计系统”资助项目(201335)

作者简介:王 元(1991-),女,山西运城人,硕士研究生,主要研究方向为船舶结构优化。

通讯作者:王德禹。E-mail:dywang@sjtu.edu.cn

多目标优化设计研究较少。目前 LNG 晃荡研究以试验和数值模拟为主^[5-7],但因试验成本较高、数值模拟较复杂而难以用于工程计算。因此,本文利用 CCS 及 CSR 规范^[8-9]所推荐的公式计算晃荡载荷;同时,本文引入与液舱内部板材结构有关的液舱晃荡系数,以期综合反映液舱内部构件对晃荡特性的影响,并将其作为液舱结构优化的目标之一,从而改善独立 B 型液舱的抗晃荡性能。

本文建立了以液舱结构重量和液舱晃荡系数为目标的多目标优化模型,采用多目标遗传算法(NCGA)对独立 B 型 LNG 液舱结构进行优化,得到改进的液舱结构设计。优化结果表明,液舱结构质量和液舱晃荡系数均有较明显的下降和改善。进一步开展灵敏度分析,评估液舱内部各构件对液舱结构重量和晃荡系数的影响,从而为该型 LNG 液舱结构优化设计提供了参考。

1 液舱晃荡特性

1.1 液舱运动固有周期

根据 CCS《液舱晃荡载荷及构件尺寸评估指南》,液舱运动固有周期包括纵向晃荡周期 T_x 和横向晃荡周期 T_y ,定义如下:

$$T_x = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{g\pi}{l_s} \tanh\left(\frac{\pi h_l}{l_s}\right)}} \tag{1}$$

$$T_y = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{g\pi}{b_s} \tanh\left(\frac{\pi h_b}{b_s}\right)}} \tag{2}$$

式中: h_l 、 h_b 分别为纵向有效装载高度、横向有效装载高度, l_s 、 b_s 分别为纵向有效晃荡长度、横向有效晃荡长度。

参考规范中对有效晃荡长度的定义,纵向有效晃荡长度与液舱内横向强框架的数目、横向强框架系数等有关;横向有效晃荡宽度与液舱内纵桁的数目、桁材系数等有关。若修改液舱内部构件的腹板高度,则横向强框架系数和桁材系数会相应改变,液舱有效晃荡长度和液舱运动固有周期也会随之变化。

1.2 晃荡水平

参考 CCS《液舱晃荡载荷及构件尺寸评估指南》计算晃荡载荷时,根据液舱中晃荡运动和载荷的特点将晃荡运动及其载荷分为水平一、水平二、水平三。

所有液舱均应计算水平一晃荡载荷;当液舱满足 $l_s \leq 0.13L$ 或 $b_s \leq 0.56B$ 时,且液舱运动固有周期处于谐振周期范围内,则需按要求计算水平二晃荡载荷;当液舱满足 $l_s \geq 0.13L$ 或 $b_s \geq 0.56B$ 时,应根据船舶运动周期与谐振周期范围的关系分别考虑水平二和水平三晃荡载荷。

根据指南规定,计算不同装载率下的有效装载高度和有效晃荡长度,并计算出相应的液舱晃荡周期,装载率取 5%~95%,计算步长为 0.05。将计算得到的液舱晃荡周期与船舶运动周期进行比较,根据二者的关系,进行晃荡水平判断。

1.3 晃荡系数

参考规范中对横向强框架系数、桁材系数的定义^[9],二者分别考虑了横框架结构、船底纵桁对液体晃荡的减缓作用。

横向强框架系数:

$$\alpha_{uf} = A_{0-uf-h} / A_{tk-t-h} \tag{3}$$

式中: A_{tk-t-h} 为液舱横剖面在所考虑的装载高度以下的总面积, A_{0-uf-h} 为强框架处横剖面开口在所考虑的装载高度以下的总面积。

桁材系数:

$$\alpha_{grd} = A_{0-grd-h} / A_{tk-L-h} \tag{4}$$

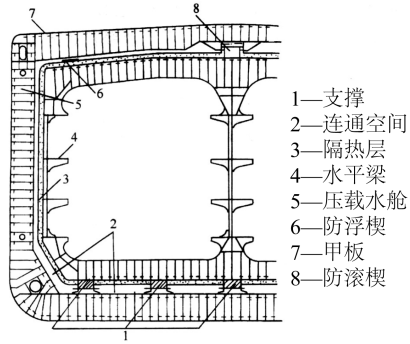


图 1 独立 B 型 LNG 液舱结构

Fig. 1 Structure of SPB LNG tank

式中： A_{lk-L-h} 为液舱纵剖面在所考虑的装载高度以下的总面积， $A_{O-grd-h}$ 为纵剖面开口在所考虑的装载高度以下的总面积。

易知,液舱的晃荡特性受横向强框架系数和桁材系数的影响,进一步分析其对液舱晃荡的影响,如图 2 所示。由图 2(a)可知,当液舱装载率低于 20%时,横框架对液舱纵向晃荡运动周期有很大影响,可以明显减小液舱纵向晃荡周期,避免液舱处于晃荡谐振范围;由图 2(b)可知,当液舱装载率低于 20%时,船底纵桁对液舱横向晃荡运动周期有很大影响,可以明显减小液舱横向晃荡周期,避免液舱处于晃荡谐振范围;当液舱装载率高于 20%时,液舱一般不处于晃荡谐振范围,这也与实际相符。

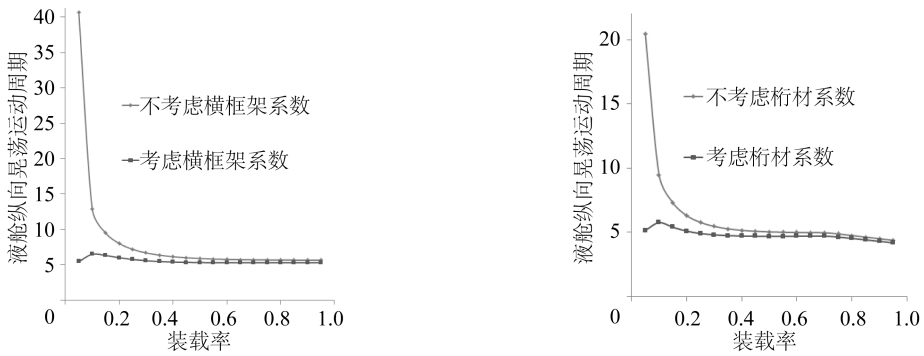


图 2 不同装载率下的液舱晃荡周期

Fig. 2 Natural periods of the fluid motions in the tank

由上述分析可知,横向强框架系数和桁材系数对减缓晃荡均有很大的关联度,综合考虑二者的影响,本文引入液舱晃荡系数 α , 定义如下:

$$\alpha = (\alpha_{wf} + \alpha_{grd}) / 2 \tag{5}$$

由定义可知,在液舱外形和大小一定时, α 与横框架结构腹板高度、船底纵桁腹板高度、水密舱壁上的垂直桁材腹板高度有关; α 越小,液舱内部结构对晃荡的减缓作用越大。晃荡系数 α 反映了液舱内部主要桁材对液舱晃荡效应的综合影响,该系数越大,则液舱晃荡效应越显著,因此设计中晃荡系数越小越好。

2 LNG 船液舱结构多目标优化

独立 B 型液舱内部板材结构较多,如强框架、水平桁、垂直桁等,这些桁材除了承受由板材传递的载荷,还对液舱晃荡有缓冲作用。对该液舱进行结构优化时,选取液舱结构重量作为目标函数之一,并考虑液舱的晃荡效应,选取前文中定义的晃荡系数作为另一个目标函数,由此进行液舱结构多目标优化。

本文建立了独立 B 型 LNG 船舱段有限元模型,进行多工况下的有限元分析和计算。以液舱质量和液舱晃荡系数为目标,在 Isight 平台上采用多目标遗传算法 (NCGA) 进行优化。优化流程如图 3 所示。

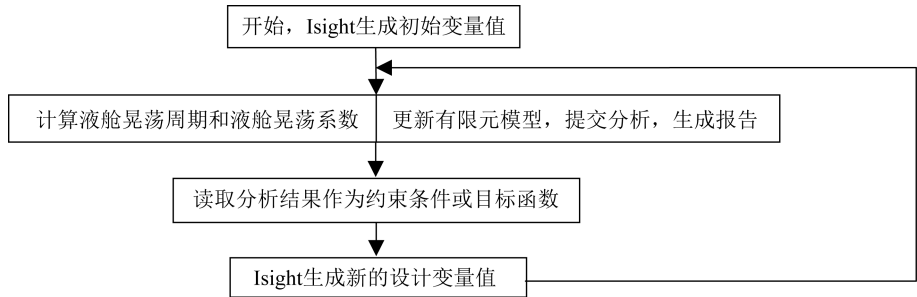


图 3 优化流程

Fig. 3 Optimizationflow chart

2.1 优化设计变量

综合考虑船体受力及晃荡载荷作用,取液舱内部桁材的腹板高度作为设计变量,则有 $x_1, x_2, \dots, x_{10}$ 共十个设计变量,均为离散型变量,步长为 100 mm,其中 x_7 赋值时取桁材腹板高度的 2 倍值,步长为 200 mm。设计变量具体信息见表 1,具体位置如图 4 所示。

表 1 设计变量信息表
Tab. 1 Design variables

变量名	位置	初始值/mm	取值范围
x_1	船底肋板	1 400	[1 000,3 000]步长为 100
x_2	舷侧肋板	1 600	[1 000,3 000]步长为 100
x_3	强横梁	1 600	[1 000,3 000]步长为 100
x_4	中纵舱壁垂直桁	1 400	[1 000,3 000]步长为 100
x_5	船底纵桁	1 400	[1 000,3 000]步长为 100
x_6	舷侧纵桁	2 700	[1 000,3 000]步长为 100
x_7	中纵舱壁水平桁 * 2	2 800	[2 000,6 000]步长为 200
x_8	水密舱壁垂直桁	160	[1 000,3 000]步长为 100
x_9	水密舱壁水平桁	2 100	[1 000,3 000]步长为 100
x_{10}	缓冲舱壁水平桁	1 200	[1 000,3 000]步长为 100

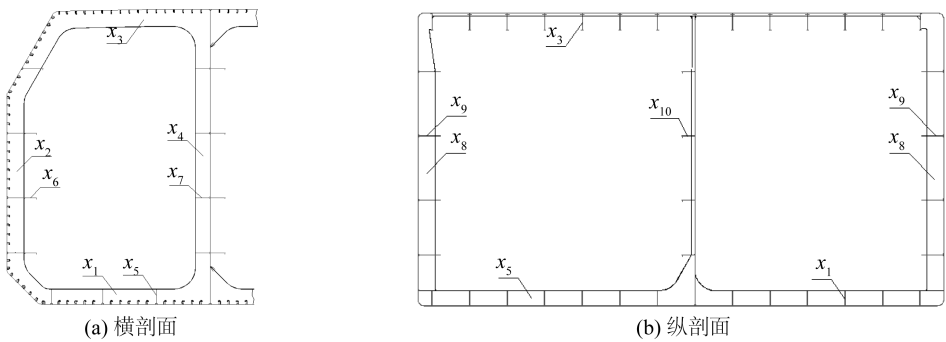


图 4 设计变量具体位置
Fig. 4 Locations of design variables

2.2 舱段有限元模型

建立舱段有限元模型,选取中间舱段作为应力评估范围。模型分为三个部分:船体、液舱、支承结构。船体结构主要有船体外板、强框架、横舱壁;液舱结构主要有外板、缓冲舱壁、水密舱壁、中纵舱壁、内部桁材等;支承结构包括垂向支撑块、防横摇楔、防纵摇楔,在结构分析时可将其等效为弹簧处理^[10]。

根据规范要求,板材结构用板单元模拟,骨材用梁单元模拟,船体主要桁材的腹板用板单元模拟。本文选取液舱内主要桁材的腹板高度作为优化设计变量,因此这些结构的腹板用梁单元模拟。模型边界条件按规范选取。

整个舱段模型施加载荷包括静水弯矩、重力、舷外水压力及液舱内部液体压力。其中,舱内液体压力按 CSR 规范及 CCS《液舱晃荡载荷及构件尺寸评估指南》分别计算。比较计算结果,选取最危险的状态作为计算工况。根据 CCS 指南,本船液舱满足 $l_s \leq 0.13L$ 和 $b_s \leq 0.56B$,且液舱运动固有周期不处于谐振周期范围内,因此只需计算水平一的晃荡载荷。本文中晃荡载荷包括舱内液体静压力和附加晃荡载荷两部分,其中附加晃荡载荷是参考 CSR 规范以均布载荷的形式施加在整个舱壁表面。

- 根据舱内液体压力不同,可分为以下三个计算工况:
- 工况 1:满载工况,舱内液体压力为在舱壁表面施加液体静压力;
 - 工况 2:液舱装载率为 0.7 时,舱内液体压力为在中纵舱壁和左舷侧的整个舱内表面施加横向附加晃荡载荷,同时在 0.7 h 以下的舱壁表面施加液体静压力;
 - 工况 3:液舱装载率为 0.7 时,舱内液体压力为在缓冲横舱壁和右侧水密横舱壁的整个舱内表面施加纵向附加晃荡载荷,并在 0.7 h 以下的舱壁表面施加液体静压力。

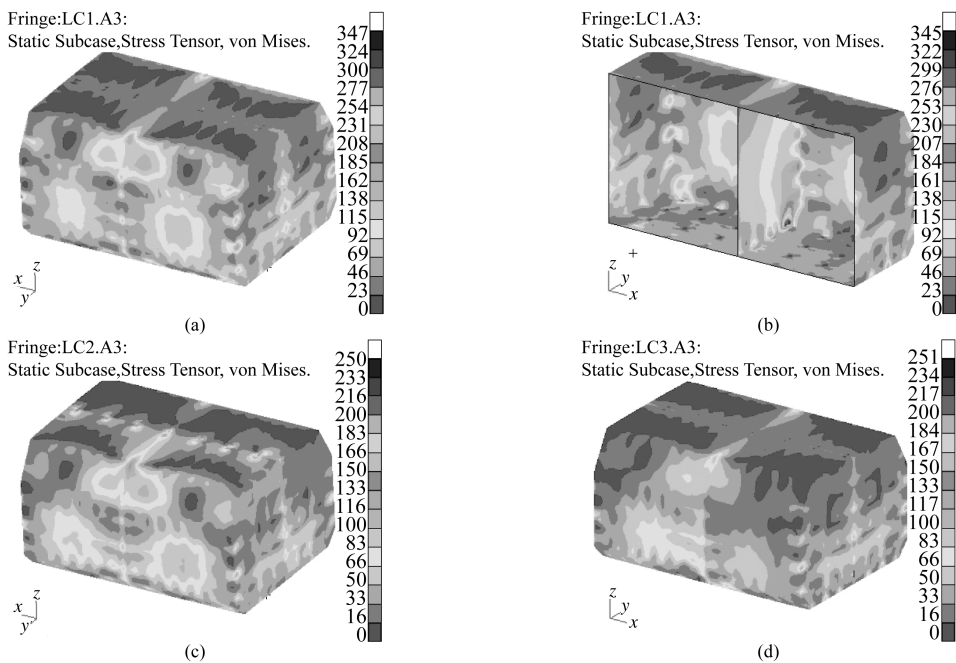


图 5 应力评估区域液舱 von Mises 应力云图 (单位:MPa)

Fig. 5 Von Mises stress distribution of tank structure (unit: MPa)

由有限元计算结果可知,在应力评估区域,船体结构应力较小,不超过船体材料的许用应力;液舱结构应力较大,也是本文优化设计的重点。各工况的液舱结构应力云图如图 5 所示。图 5(a)和 5(b)是工况 1 下的 von Mises 应力云图,其中图 5(b)是液舱左舷模型;图 5(c)和 5(d)分别是工况 2 和工况 3 下的 von Mises 应力云图。由有限元计算结果可知,工况 1 应力最大,为 347 MPa,因此在优化模型中选此工况作为载荷工况。

2.3 约束条件及目标函数

约束条件为板的中面应力不超过许用应力,依规范选取板单元上下表面 von Mises 应力的平均值作为板单元的中面应力,应力评估区域包括中间舱段的液舱外板和内部舱壁板。另外,考虑液舱晃荡,将计算得到的液舱晃荡周期控制在谐振范围之外,令液舱纵向晃荡运动周期 T_x 不大于 11 s,液舱横向晃荡运动周期 T_y 不大于 9 s。优化目标函数有两个,分别是液舱总质量 M 最低、晃荡系数 α 最小。

根据以上描述,可以建立如下的多目标优化数学模型:

$$Find \quad x = (x_1, x_2, \cdots, x_{10})$$
$$\min F(Mass, \alpha)$$
$$s.t. \quad \sigma_{\max} \leq 400 \text{ MPa}$$
$$T_x \leq 11 \text{ s}$$
$$T_y \leq 9 \text{ s}$$

(6)

用 Isight 进行多目标优化时,通过设置各目标的权重和比例因子,得到最终的目标函数,可表示为:

$$F(x) = MW_1/S_1 + \alpha W_2/S_2$$

(7)

式中: W_1 、 W_2 分别是液舱质量和晃荡系数的权重, S_1 、 S_2 分别是对应的比例因子。

表 2 LNG 船多目标优化比例因子和权重设置

目标函数	初值	比例因子 scale factor	权重 weight factor
液舱质量 M	1 891.8	2 000	5
晃荡系数 α	0.777	1	1

LNG 船液舱多目标优化选取的权重和比例因子见表 2。在选取权重时,考虑到液舱质量是本次优化的主要目标,而液舱晃荡效应是次要目标,因此本算例中液舱质量权重设置为 5,晃荡系数的权重为 1。选取合适的比例因子和权重后,液舱质量最终比重约占 87%,晃荡系数比重约占 13%。

2.4 优化策略及优化结果

采用多目标遗传算法 NCGA 对液舱结构进行优化。相比于其它多目标优化算法,NCGA 具有较高的优化效率。NCGA 方法最早是由 GA 遗传算法发展而来,它视各目标同等重要,通过排序后分组进行交叉的方法实现“相邻繁殖”的机制,从而使接近于 Pareto 前沿的解进行交叉繁殖的概率增大,加快收敛速度^[11]。NCGA 中每代种群数为 100,总共进化代数为 30,交叉概率为 1.0,变异概率为0.01。经过 3 000 次迭代计算,得到 Pareto 前沿如图 6 所示,图中实线为拟合后的曲线。

由图 6 可知,NCGA 算法得到的 Pareto 前沿有较高的分散性和均匀性,优化结果是理想的。根据不同偏好在 Pareto 前沿中选择了一组解作为最优妥协解,目标函数和设计变量的结果如表 3 所示。

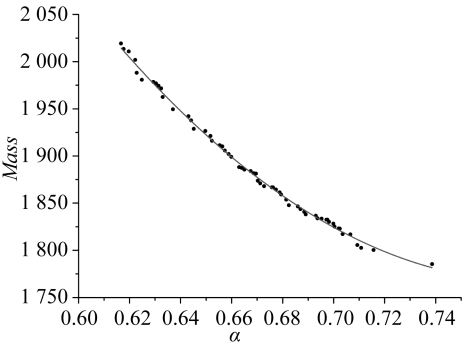


图 6 Pareto 前沿
Fig. 6 Pareto optimal front

表 3 NCGA 算法优化结果

Tab. 3 Optimization results

变量名	初始值/mm	优化值/mm
x_1	1 400	1 200
x_2	1 600	1 000
x_3	1 600	1 100
x_4	1 400	1 800
x_5	1 400	2 700
x_6	2 700	1 100
x_7	2 800	2 000
x_8	1 600	1 200
x_9	2 100	1 300
x_{10}	1 200	1 100
液舱质量 M	1 891.8	1 785.4
晃荡系数 α	0.777 2	0.738 6

由表 3 可知,液舱结构重量 M 下降了 5.62%,晃荡系数 α 下降了 4.97%,取得了较好的优化结果。比较优化前后液舱晃荡载荷大小,以 CSR 规范计算为例,优化液舱内部桁材腹板高度后,液舱横向晃荡载荷减小了 19.46%,而液舱纵向晃荡载荷增大了 6.45%,但由于优化前后的横向晃荡载荷均大于纵向晃荡载荷,且计算得到的纵向晃荡载荷值均小于 CSR 规范中规定的晃荡载荷最小值,因此从整体上说,优化后晃荡载荷有所减小。

在 Isight 平台上进一步对目标函数进行设计变量灵敏度分析,得到图 7 所示的灵敏度图谱,图中黑色条形表示正效应,白色表示反效应。由图可知,舷侧肋板 x_2 对液舱质量影响最大,其次是船底肋板 x_1 ,而缓冲舱壁水平桁 x_{10} 对液舱质量影响最小; x_5 、 x_1 、 x_2 、 x_8 、 x_4 对晃荡系数有影响,其中船底纵桁 x_5 和船底肋板 x_1 对晃荡系数的影响较大。综合上述分析,在独立 B 型 LNG 液舱结构设计中,应适当减小舷侧肋板腹板高度,并尽量增大船底纵桁腹板高度,以达到液舱质量和晃荡特性最优。

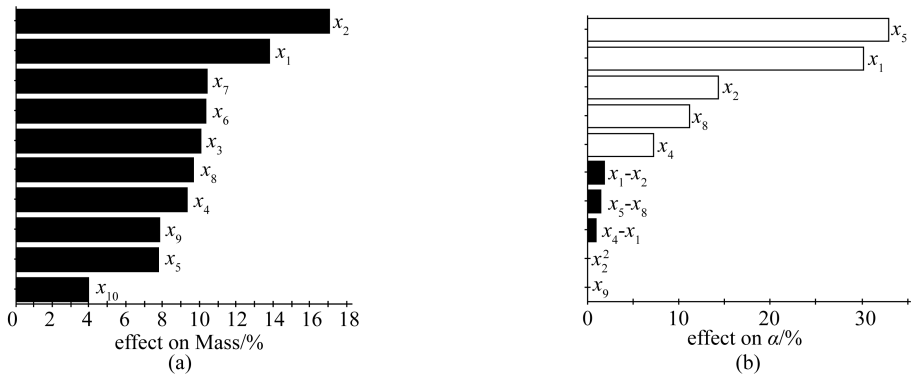


图 7 目标函数灵敏度图谱
Fig. 7 Sensitivity graphs of M & α

3 结 语

本文研究考虑晃荡效应的独立 B 型液舱结构多目标优化,引入与液舱内部板材结构有关的液舱晃荡系数,建立了以液舱结构重量和液舱晃荡系数为目标的多目标优化模型,采用多目标遗传算法 (NCGA) 对液舱结构进行优化,并进行了灵敏度分析,得到的主要结论有:

- 1) 引入了晃荡系数 α , 以期反映液舱内部主要桁材对液舱晃荡效应的综合影响,该系数越大,则液舱晃荡效应越显著。
- 2) 计算得到改进的独立 B 型 LNG 船液舱结构设计方案,为该型 LNG 船液舱结构优化提供了参考,特别是液舱晃荡系数的引入,为晃荡载荷作用下的液舱结构优化问题提供了新的且易实施的思路。
- 3) 舷侧肋板腹板高度对液舱质量的影响最大,船底纵桁腹板高度和船底肋板腹板高度对晃荡系数的影响居于首要地位。

参考文献:

[1] MANABE H, SAKURAI T. Seismic analysis of an SPB tank installed in the offshore GBS LNG terminal[J]. Ishikawajima-Harima Engineering Review, 2006,46(4):176-180.

[2] SONG MyungJae, AHN YangJun, KIM SangYeob. Effects of sloshing loads on fatigue strength of independent type B LNG tank [J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2013,23(2):112-119.

[3] LEE JinSung, YOU WonHyo, YOO ChangHyuk. An experimental study on fatigue performance of cryogenic metallic materials for IMO type B tank[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2013,5(4):580-597.

[4] A Study on the application of cryogenic design criteria to a self-supporting prismatic IMO type B LNG tank made of Sus304 [C]//30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.2011:375-379.

[5] XU Guohui, QI Enrong. Experimental investigation of sloshing loads and structural dynamic responses in tanks of LNG carriers [J]. Journal of Ship Mechanics, 2011,15(12):1375-1383.

[6] 金晶,薛鸿祥,唐文勇,等.大型补给舰船液舱晃荡载荷计算方法[J].中国舰船研究,2012,7(6):50-56. (JIN Jing, XUE Hongxiang, TANG Wenyong, et al. Calculation procedure of sloshing loads for large-scale depot ships[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2012,7(6):50-56. (in Chinese))

[7] 陈海阳,李玉星,孙法峰,等.LNG FPSO 液舱内储液晃动特性的数值模拟[J].中国石油大学学报, 2011,35(4):134-143. (CHEN Haiyang, LI Yuxing, SUN Fafeng, et al. Numerical simulation of liquid sloshing characteristics in LNG FPSO containers[J]. Journal of China University of Petroleum, Edition of Natrual Science, 2011,35(4):134-143. (in Chinese))

[8] 液舱晃荡载荷及构件尺寸评估指南[M].CCS,2014. (Sloshing loads and scantling assessment of tanks[M].CCS,2014. (in Chinese))

[9] IACS.Common structural rules for bulk carriers and oil tankers[M]. International Association of Classification Society,2014.

[10] Strength analysis of liquefied gas carriers with independent type B prismatic tanks[M].DNV,2013.

[11] BADALLO P, TRIAS D, MARIN L. A comparative study of genetic algorithms for the multi-objective optimization of composite stringers under compression loads[J]. Composites Part B-Engineering, 2013,47:130-136.