



船舶与海洋工程®

NAVAL ARCHITECTURE AND OCEAN ENGINEERING

ISSN 2095-4069

CN 31-2076/U

6

2017

第33卷
总第118期

上海市船舶与海洋工程学会
THE SHANGHAI SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS & OCEAN ENGINEERS

www.ssname.com.cn

热烈祝贺

第19届中国国际海事会展隆重举行



ISSN 2095-4069



12>

9 772095 406173



沪东中华造船(集团)有限公司

HUdong-ZHONGHUA SHIPBUILDING (GROUP) CO., LTD

网址: hz-shipgroup.cssc.net.cn

地址: 中国上海浦东新区浦东大道2851号 (200129)

电话: 021-58713222

传真: 021-58712603



展台号
W5馆、N1H61

[青岛双瑞]
BalClor[®] 船舶压载水管理系统
通过USCG型式认证

蔚蓝梦想，我们一起努力



青岛双瑞海洋环境工程股份有限公司
T: +86-532-68725835, 68725811
F: +86-532-68725001
lishb@sunrui.net or lims@sunrui.net
www.sunrui.com.cn



船舶与海洋工程®

CHUANBO YU HAIYANG GONGCHENG

上海市船舶与海洋工程学会学刊

(双月刊 1985年创刊)

2017

6

第33卷(总第118期)

2017年12月25日出版

主管单位: 上海市科学技术协会
主办单位: 上海市船舶与海洋工程学会
编辑出版: 《船舶与海洋工程》编辑部
地址: 上海市江宁路495号2103信箱
邮政编码: 200041
电话: (021) 62715814 62560122
传真: (021) 62560122
E-mail: shipeo@163.com
网址: www.ssname.com.cn
印刷: 上海七〇四研究所印刷厂
发行范围: 公开发行
国内发行: 上海市邮政公司
国内订购: 全国各地邮政局
邮发代号: 4-890
国外发行代号: BM3747
海外总发行: 中国国际图书贸易集团有限公司
地址: 北京市海淀区车公庄西路35号
邮政编码: 100048
广告代理: 谐通船舶海洋工程技术(上海)有限公司
广告经营许可证号: 3100620130028
刊名商标注册证号: 9846910
中国标准连续出版物号: ISSN 2095-4069
CN 31-2076/U
定价: 15.00元

目次

设计与研究

国内外船舶气泡减阻技术的研究与应用

..... 胡以怀, 李慧晶, 何浩(1)

计及温度载荷的沥青船结构强度有限元计算分析

..... 陈第一, 王伟, 谢永和, 鲁昕(7)

一种具有目标识别功能的舰载警用飞行系统的设计

..... 何学明(13)

LNG接收站薄膜型储罐技术研究

..... 宋忠兵, 徐岸南, 刘恒(17)

船体极限强度非线性有限元计算方法

..... 伍友军, 万琪, 周博(20)

中小型C型罐LNG船甲板布置 周伟(26)

轮机与辅机

大型LNG船回气压缩机运行工况点分析

..... 刘涛, 岑卓伦, 徐岸南(30)

一种新型船舶节能设备——门式艏侧推盖的探索

..... 吴安, 王忠强, 孔明敏(36)

工艺与材料

液化气船独立C型液罐主体材料的选择和应用

..... 张朝华, 冯大成, 华学明(39)

小组立机器人装焊生产线总体设计研究

..... 吉永军, 朱玉龙, 刘建峰(44)

小组立智能流水线关键技术分析

..... 赵德鑫, 朱玉龙, 刘建峰(49)

浮动地板在某居住舱室的应用研究

..... 尚朝阳, 张玉立, 肖健(55)

规范与标准

VLCC上层建筑噪声分析与控制

..... 张明, 陈惠勤, 陈虹, 赵敬德(59)

管理现代化

结构有限元模型局部细网格快速生成方法

..... 张志康, 韩钰, 林焰, 陈彬, 唐宇(66)

CONTENTS

DESIGN AND RESEARCH

- Research and Application of Ship's Bubble Drag Reduction Technologies at Home and Abroad
..... HU Yi-huai, LI Hui-jing, HE Hao (1)
- Finite Element Calculation and Analysis of Asphalt Carrier's Structural Strength Taking into Account
the Temperature Load CHEN Di-yi, WANG Wei, XIE Yong-he, et al. (7)
- Design of a Shipborne Police Flight System with Target Identification Function
..... HE Xue-ming (13)
- Technical Study on the Membrane Type Storage Tanks of LNG Receiving Station
..... SONG Zhong-bing, XU An-nan, LIU Heng (17)
- Research on the Nonlinear Finite Element Method for Ultimate Strength of Ship Hulls
..... WU You-jun, WAN Qi, ZHOU Bo (20)
- Deck Arrangement of Small-and Medium-Size LNG Carrier with Type C Independent Tank
..... ZHOU Wei (26)

POWER INSTALLATION AND AUXILIARIES

- Analysis on the Vapor Return Compressor Operating Point of Large LNG Carriers
..... LIU Tao, CEN Zhuo-lun, XU An-nan (30)
- Exploration of a New Type of Energy-Saving Device for Ships—Door-Type Bow Thruster Cover
..... WU An, WANG Zhong-qiang, KONG Ming-min (36)

TECHNOLOGY AND MATERIAL

- Selection and Application of Main Body Material for the Independent Type C Cargo Tank of Liquefied
Gas Carrier ZHANG Zhao-hua, FENG Da-cheng, HUA Xue-ming (39)
- Study on the Overall Design of the Robot Production Line for Sub Assembly
..... JI Yong-jun, ZHU Yu-long, LIU Jian-feng (44)
- Analysis on the Key Technologies of Sub Assembly Intelligent Production Line
..... ZHAO De-xin, ZHU Yu-long, LIU Jian-feng (49)
- Research on the Application of Floating Floor in a Cabin
..... SHANG Zhao-yang, ZHANG Yu-li, XIAO Jian (55)

RULE AND STANDARD

- Noise Analysis & Control in VLCC Superstructure
..... ZHANG Ming, CHEN Hui-qin, CHEN Hong, et al. (59)

MODERNIZATION OF MANAGEMENT

- Fast Generation of Local Fine Mesh for Finite Element Structure Model
..... ZHANG Zhi-kang, HAN Yu, LIN Yan, et al. (66)

DOI: 10.14056/j.cnki.naoe.2017.06.001

设计与研究

国内外船舶气泡减阻技术的研究与应用

胡以怀, 李慧晶, 何浩
(上海海事大学 商船学院, 上海 201306)

摘要: 介绍国内外船舶气泡减阻技术的研究情况, 包括微气泡减阻技术、气幕减阻技术及气膜减阻技术的试验研究和理论计算结果, 特别是俄罗斯倾斜板气泡减阻技术、日本微气泡减阻技术和我国薄层气膜减阻技术的特点。同时, 介绍国内外微气泡减阻理论方面的力学模型、数值计算方法和重要结论。回顾 20 世纪 60 年代以来气泡减阻技术在船舶上的应用情况, 特别是俄罗斯、日本及丹麦等国设计的气泡减阻船舶的性能和节能效果。针对我国目前气泡减阻节能技术在实船上的应用现状, 分析存在的问题和不足, 探讨我国船舶气泡减阻技术的应用前景。

关键词: 微气泡减阻; 气膜减阻; 气幕减阻; 船舶节能

中图分类号: U661.31⁺1

文献标志码: A

文章编号: 2095-4069 (2017) 06-0001-06

Research and Application of Ship's Bubble Drag Reduction Technologies at Home and Abroad

HU Yi-huai, LI Hui-jing, HE Hao

(Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: This paper introduces the domestic and foreign research work on ship bubble drag reduction technologies, including experimental and numerical calculation results related to micro-bubble drag reduction, bubble curtain drag reduction and air film drag reduction. Special attention has been paid to the inclined plate bubble drag reduction technology developed in Russia, the micro-bubble drag reduction technology developed in Japan and the thin air film drag reduction technology developed in China. Meanwhile, both domestic and overseas mechanical models, numerical calculation methods and important conclusions are introduced. The applications of bubble drag reduction technologies on board ships since the 1960s are reviewed, especially the performance and the energy saving effect of those ships using bubble drag reduction designed by Russia, Japan and Denmark. In view of the present situation of the application of the bubble drag reduction energy saving technology in our country, this paper analyzes the existing problems and shortcomings, and discusses the application prospects of the ship's bubble drag reduction technology in our country.

Key words: micro-bubble drag reduction; air film drag reduction; bubble curtain drag reduction; ship energy saving

0 引言

随着工业时代的到来, 能源和环境问题日益突出, 温室气体排放量日益增多, 加快了全球温室效应的进程, 船舶运输业正面临着前所未有的危机与挑战。当前, 航运业以其独有的优势在全球贸易中发挥着举足轻重的作用, 国际社会对其高能耗、重污染问题越来越关注。对此, 国际海事组织 (International Maritime

收稿日期: 2016-09-06

作者简介: 胡以怀, 男, 教授, 博士, 1964 年生。1986 年毕业于武汉理工大学, 1993 年获得博士学位, 现从事船舶动力装置故障诊断、系统仿真及船舶新能源利用的教学和研究工作。

Organization, IMO) 制定船舶能效设计指数 (Energy Efficiency Design Index, EEDI) 来规定船舶碳排放指标, 并逐步推行。

气泡减阻技术可有效减小船舶阻力, 这已在实船试验中得到很好的验证。俄罗斯、日本早先在气泡减阻理论领域所做的理论研究和实船测试奠定了其在军舰及民用船舶改进设计上的领先优势。此类技术在高速滑翔艇和低速运输船上的应用带动了其新型气泡船的发展, 给国际航运业带来不小的冲击。我国对气泡减阻理论的研究起步较晚, 与西方国家 (甚至是日本、韩国) 的差距较大, 但有很大的发展前景。目前船舶空气润滑减阻按机理的不同主要为 3 种技术形式:

- 1) 俄罗斯的倾斜板断级气泡减阻技术, 主要适用于过渡型浅吃水高速艇;
- 2) 日本的微气泡减阻技术, 利用风机, 通过在船底开设的诸多小气孔向船底输送空气, 从而形成不连续船底气泡层, 实现气泡减阻;
- 3) 我国的薄层气膜减阻技术, 利用风机向船底输送空气, 通过船底设置的导流板装置形成有效的船底连续薄层空气膜。

1 研究现状

早在 19 世纪末, 傅汝德就已提出通过向船底输送空气来将水与船体隔离, 从而减小船舶阻力的设想。受制于当时有限的理论研究, 直到 20 世纪 60 年代微气泡减阻技术才得以在民船上应用。目前该技术主要着眼于发展高速快艇、双体船, 与其他高速船 (如水翼船、气垫船) 相比, 高速气泡船具有结构简单、造价较低、离港方便和维护方便等优点。此类产品已率先在俄罗斯成型生产, 日本也已在散货船、矿石运输船上对微气泡减阻装置的效果进行试验, 可见国内外对气泡减阻技术较为重视。

1.1 国内外试验研究

1.1.1 国外主要研究

1975 年, 苏联学者 Migiernk, Dunisehev 和 Bogdevieh 等采用多孔不锈钢平板喷气的方法进行微气泡减阻试验, 将微气泡引入到湍流边界层内, 从而达到降阻效果。试验结果表明, 喷气孔直径及气泡体积浓度对减阻率的影响很大。当喷气孔直径为 $1\sim 3\mu\text{m}$ 时, 减阻率最高; 而当喷气孔直径 $> 50\mu\text{m}$ 时, 气泡减阻几乎不起作用。理想的气泡直径在 $1\sim 50\mu\text{m}$, 在距离壁面 $1/10$ 边界层厚度处气泡体积浓度达到最大, 此时增大气流通量, 气泡减阻效果会随之提高, 当喷气量在流域中达到饱和后, 增大喷气量对减阻率没有影响。

20 世纪 80 年代初, 美国研究人员在封闭循环水洞中进行平板试验, 对苏联的研究进行验证, 试验最大喷气流量约为其 6 倍, 试验结果基本与其一致, 局部摩擦阻力最大可减小 80%。试验结果表明: 保持来流速度不变, 增大单位喷气流量, 减阻率明显提高, 直至流域中气流量达到饱和; 保持单位喷气流量不变, 增大来流速度, 减阻效果下降。在试验过程中发现, 喷气孔直径与减阻率没有直接关系, 在相同单位喷气流量和来流速度下, 孔径为 $0.5\mu\text{m}$ 与 $100\mu\text{m}$ 的减阻效果没有区别。

20 世纪 90 年代, 日本广岛大学在空泡水筒内进行回转体微气泡减阻试验^[1], 分别向 2 组试验模型注入微气泡, 对比试验结果并观察分析。研究发现: 随着喷气量的增加, 安装整流帽的模型阻力由于摩擦阻力和模型后端的形状阻力的增大而相应增大; 加入气泡覆盖部分的另一模型的阻力随来流速度和气泡量的增大而明显减少, 气泡吹出部分对兴波阻力影响很小。由于模型被气泡覆盖, 气泡容易在浮力的影响下脱离边界层, 导致减阻率较低。

1.1.2 国内主要研究

国内也有不少学者对气泡减阻机理进行模型试验, 得到一些研究成果。

1982 年, 上海船舶运输科学研究所的蔡金琦^[2]研究出气膜定理, 提出船舶薄层气膜减阻节能技术, 研究设计出能有效形成船底连续薄层空气膜的船舶气膜减阻节能装置, 获国家发明专利。在船模试验的基础上, 在 1000t 非机动驳船上对该装置进行实船测试, 实现减阻 20.1%, 节能 15.2%^[3]。根据 35000t 浅吃水船气膜减阻模型试验结果^[3], 实现气膜减阻 22.8%, 压载 31.6%。在纵倾状态和横倾状态下, 船底气膜覆盖面减小, 影响减阻效果; 压载时气膜覆盖面相对增大, 利于提高气膜减阻效果。船模试验和实船应用验

证了在船上应用气膜减阻节能技术的可行性, 可实现船舶减阻 15%~30%。

武汉理工大学的王家崑等^[4-5]针对某平底型船模, 在其底部的艏部和中部位置处安装多孔硅板以生成微气泡, 分别进行不同拖曳速度、不同喷气量下喷气方式和船舶吃水对减阻率影响的对比性试验, 试验数据是在测试 5 种拖曳速度和 5 种喷气量之后采集的。结果表明, 在艏部和中部同时喷气的减阻效果要好于仅在艏部喷气的减阻效果; 吃水较浅且 $Fr \leq 0.646$ 时, 2 种喷气方式下的减阻率较高; 纵倾角随 Fr 的提高而大幅增大, 但受喷气量的影响不大。

海军工程大学的董文才等^[6]就喷气方式变化对平板气膜减阻的影响进行试验研究, 包括孔喷、缝喷、喷气流量、来流速度及横向断阶对平板阻力的影响。结果表明: 无论采用哪种喷气方式, 在喷气板后相当长的范围内, 摩擦阻力可减少 80%; 当 $v \geq 2\text{m/s}$ 时, 增大气流量, 摩擦阻力明显减小, 同一气流量下减阻率随来流速度的增大而降低。孔径大小对减阻率的影响不大, 过度减小供气面积会导致同一孔径和流量下的气压增大。当有横向断阶时, 前后测力板处摩擦阻力急剧下降, 这是由于断阶空穴的形成引起了回流, 使得气膜减阻的效果增强。

1.2 微气泡减阻的理论分析

当前对微气泡减阻理论的研究仍处于探索阶段, 在研究微气泡的减阻机理时, 必须对气泡的产生过程有所了解, 包括微气泡产生过程中各影响因素的作用及气泡进入到边界层中造成边界层流动方式发生改变, 使流动由 1 相变为气、液 2 相。因此, 微气泡群在边界层中的运输是以气泡与水的混合 2 相流进行的, 对微气泡减阻机理的研究主要着眼于 2 相流动, 通过流动交界面的相互作用 (即气相与液相的相互作用力) 来实现控制减阻效果的目标。

HARTMUT 等^[7]在研究微气泡减阻原理的过程中提出微气泡减阻的简化应力模型。在单相二维湍流中, 剪切应力为

$$\tau = \mu_1 \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho_1 \overline{u'v'} \quad (1)$$

式(1)中: μ_1 为湍流黏性系数; ρ_1 为水的密度; $\overline{u'v'}$ 为雷诺应力。雷诺应力可通过梯度扩散近似得到, 即

$$\overline{u'v'} = -\Lambda \sqrt{K} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (2)$$

令涡黏性系数 $\nu_1 = -\Lambda \sqrt{K}$, Λ 为湍流能量尺度, 则式(1)可表示为

$$\tau = (\mu_1 + \rho_1 \nu_1) \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (3)$$

令 τ_{mix} 为微气泡射流剪切应力, $\tau_{1,\text{mix}}$ 为微气泡与水混合后的湍流黏性系数, $\nu_{1,\text{mix}}$ 为微气泡与水混合后的涡黏性系数, 则 τ_{mix} 与不通气泡时的 τ 的比值为

$$\frac{\tau_{\text{mix}}}{\tau} = \frac{(\mu_{1,\text{mix}} / \mu_1 + \rho_{\text{mix}} \nu_{1,\text{mix}} / \mu_1) (\partial \bar{u} / \partial y)_{\text{mix}}}{(1 + \rho_1 \nu_1 / \mu_1) (\partial \bar{u} / \partial y)} \quad (4)$$

混合介质的密度定义为

$$\rho_{\text{mix}} = (1 - \alpha) \rho_1 + \alpha \rho_0 \quad (5)$$

考虑到水和空气的密度差异, 水汽混合物的密度可简化为

$$\rho_{\text{mix}} = (1 - \alpha) \rho_1 \quad (6)$$

式(5)和式(6)中: α 为空隙率; ρ_1 , ρ_0 分别为水的密度和空气的密度。

对完全发展的湍流而言, 湍流黏性系数要比运动黏性系数小几级, 因此式(4)可进一步简化为

$$\frac{\tau_{\text{mix}}}{\tau} = \frac{\mu_{1,\text{mix}} / \mu_1}{\rho_1 \nu_1 / \mu_1} + (1 - \alpha) \frac{\nu_{1,\text{mix}}}{\nu_1} \quad (7)$$

式(7)中: 涡黏性系数与湍流黏性系数之比为 10^3 量级。

在对固体颗粒悬浮二相流的研究中, 周明等^[8]根据试验测量数据分析得到一个经验公式为

$$\mu_{1,\text{mix}} / \mu_1 = 1 / (1 - 1.09\alpha^{1/3}) \quad (8)$$

式(8)对液体中大范围分布的气泡扩散是成立的, 故将其应用到式(7)中可得

$$\frac{\tau_{\text{mix}}}{\tau} = 10^{-3} \frac{1}{(1-1.09\alpha^{1/3})} + (1-\alpha) \frac{v_{l,\text{mix}}}{v_i} \quad (9)$$

式(9)中: 第 1 项为黏性项; 第 2 项为密度-湍流项。式(9)表明剪切力的减小主要依赖于空隙率 α 和湍流变换 $v_{l,\text{mix}} / v_i$ 。湍流在气泡密集的情况下发生变化与气泡聚集形成的混合媒介有关。为此, 通常可对涡黏性系数 v_i 取某个合适的数值来进行修正, 特引入

$$\frac{v_{l,\text{mix}}}{v_i} = \frac{1-\alpha}{\alpha_{\text{lim}}} \quad (10)$$

式(10)中: α_{lim} 为气泡极限体积浓度, 可取 0.8。最终得到

$$\frac{\tau_{\text{mix}}}{\tau} = 10^{-3} \frac{1}{(1-1.09\alpha^{1/3})} + \frac{(1-\alpha)^2}{\alpha_{\text{lim}}} \quad (11)$$

式(11)的应用范围为 $0.3 < \alpha < 0.6$ 。

MADAVAN 等^[9-10]采用混合长度模型对微气泡减阻进行数值计算。HARTMUT 等^[7]和 MADAVAN 等^[9-10]认为, 微气泡能改变气、液 2 相混合流的局部密度和黏度, 从而改变 Re 数, 微气泡的流动使得边界层的结构向湍流转变。随着气泡向边界层外扩散, 有必要修改湍流模型, 适应新的气、液 2 相混合流模型。由于处理方法不同, 在对气泡体积浓度分布的认识上, HARTMUT 等^[7]和 MADAVAN 等^[9-10]持不同观点。HARTMUT 等^[7]认为近壁面处气泡体积浓度最大, 并取边界层缓冲区中气泡的体积浓度为矩形分布; MADAVAN 等^[9-10]则认为近壁面和边界层外气泡的体积浓度为 0, 假定缓冲区中体积浓度为梯形分布。在水与微气泡混合稳定的情况下, 减阻效果十分明显, 边界层中气泡的体积浓度和位置分布很大程度上决定减阻率的大小。只有当气泡处于缓冲区中时减阻效果最好, 在黏性底层中的气泡无法起到减阻效果。

梁志勇^[11]运用伪谱矩阵计算方法, 从平板的上表面和下表面引入微气泡, 对微气泡平板减阻进行数值计算, 在考虑有无压力影响的情况下, 研究来流速度和气泡体积浓度的大小对减阻的影响。计算结果表明: 微气泡减阻与气泡浓度、气泡量、来流速度、气泡引入方式及平板位置等诸多因素有关。在来流速度不变的情况下, 通过增大气泡体积浓度使气泡减阻效果得到提高。在气泡体积浓度不变的情况下, 来流速度越大, 减阻率越高, 最高可达到 82.21%。观察发现, 微气泡的引入会在边界层产生一定的压力梯度, 且气泡引入方式不同也会影响减阻效果。当喷射量一定时, 三角形分布的减阻效果要比梯形分布好, 相反倒三角分布的减阻效果不佳。

2 实船应用

20 世纪 80~90 年代, 气泡减阻技术得到迅猛发展, 高速气泡船先后在美国、俄罗斯试航成功。在速度方面, 20 世纪 60~80 年代相继建造出航速达 40~60kn 的气垫船、水翼艇, 之后又建造出航速 >100kn 的地效翼艇。虽然相关产品已日趋成熟, 但因建造工艺复杂、开发成本和日常维护费用高, 难以推广。我国和日本也相继对安装有气泡减阻装置的低速平底船进行改进, 多次实船测试已证明气泡船在民用市场上的价值, 但这难以掩盖目前对气泡船的应用仍处于初级阶段的事实。

据报道, 俄克雷洛夫研究院早在 1965 年就已对气泡减阻技术进行应用研究, 该机构先后完成 30 多个气泡减阻船型的设计方案, 排水量为 14~360t。据不完全统计, 已有超过 70 艘气泡船投入运营^[12], 涉及的船型主要有客运船、散货船、巡逻艇、登陆艇、高速双体船及多体船等 (见表 1), 这其中就包括为海军研制的“赛加羚羊”号和“鹅喉羚”号小型气泡登陆舰。1993 年, 俄罗斯建成世界上第一艘气泡内河船“琳达”号, 其排水量为 24.6t, 最多容纳 70 人, 设计航速为 29.5kn, 航行里程可达 400km。船模试验结果表明, 采用气泡减阻技术可使高速滑翔艇提速 10% 左右, 大多数滑翔艇降阻 15%~20%, 而压缩机功率消耗不到主机功率的 3%^[13]。

表 1 苏联和俄罗斯所建气泡船

船名	赛加羚羊	岩羚羊	琳达	欧洲盘羊	水星	幻影
交付时间	1981	1992	1993	1992	1995	2001
满载排水量/t	13.0	105.0	24.6	13.2	99.0	121.0
总长/m	14.05	25.65	24.10	15.50	35.40	35.00
总宽/m	3.50	5.85	4.60	3.56	8.30	6.80
最大吃水/m	0.65	1.52	0.95	—	2.00	—
最大航速/kn	40	32	31	50	52	50
续航力/km	250	185	400	—	1100	—
主机功率/kW	1000	—	735	—	—	—
推进方式	喷水	半浸桨	螺旋桨	喷水	螺旋桨	螺旋桨
用途	巡逻	登陆	内河	巡逻	巡逻	缉私巡逻

2009年, 鹿特丹海军工程企业DK集团成功开发出气腔系统(ACS)技术, 并为丹麦船东Dannebrog集团12580DWT的多用途货船安装了该系统。这是该公司的空气润滑技术在国际商船上的首次应用, 很好地践行了船舶低碳环保的设计理念。ACS由气腔、控制系统和喷气系统等3部分组成(见图1)。通过安装在船底的气腔减小船底与水的接触面积, 使船在水面“滑翔”, 减小船舶摩擦阻力, 从而达到降低燃油消耗、控制CO₂排放量的目的。受船型、主尺度和吨位的影响, 油耗节省率保守估计在10%左右, 投资回报期为1~2a, 届时ACS设备的投资回报率可达7%~10%。

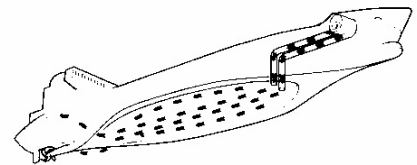


图1 搭载ACS设备的演示船

据报道, 大岛造船厂和日本邮船公司联合开发的搭载“主机旁通管空气润滑系统”的煤炭运输船“双洋”号于2012年7月27日正式竣工。该船配有最新的“空气润滑系统”, 借助气泡减小摩擦阻力, 可削减4%~8%的CO₂排放量。同时, 该船设有“扫气旁路”, 不必在甲板上安装鼓风机, 不受载重增大导致吃水增加的影响, 依靠扫气余量投入到空气润滑中, 从主机增压器输出部分燃烧空气引导至船底, 通过减小船体摩擦阻力提高发动机效率。该船在随后的试航中顺利通过信赖度确认和性能评价, 证明了“空气润滑系统”的可靠性和高效性。

对于普通货船、大型油船及集装箱船等运输船而言, 在应用船舶气膜减阻节能技术时, 可有效形成船底连续薄层空气膜, 且仅需在船底开设1个或多个船底孔, 风机消耗的功率约为主机功率的3%, 可实现船舶节能15%左右。该气膜减阻系统较为简单, 且适合在旧船上加装, 利用船舶坞修期1~2d即可安装完成, 从而向船底输送空气, 通过安装的导流板装置有效形成船底连续薄层空气膜, 但旧船的减阻节能效果取决于其实施条件。

3 结 语

在我国, 船舶气泡减阻技术尚未得到广泛应用, 大部分研究还处于模型试验阶段。因此, 应尽快落实相关理论研究和实践成果, 大力开展应用技术的推广, 在借鉴国外研究成果的同时, 注意以下几个方面:

1) 当高速滑行船以一定速度航行时, 船首底部水流产生的抬升力连同螺旋桨对船尾后部产生的负压区会导致船体出现舰倾。在该航行状态下, 船首底板不断受到水流的冲击, 将附近的空气卷入到水中, 并迅速随水流向船底后方流去。这些随水进入船底的气泡将很快向上浮动并扩散, 产生一定的“气膜效应”。随着航速进一步提高, 航行阻力的减小放缓, 不妨将该阶段称为“亚气膜航行状态”, 高速快艇气泡船大多通过在船底开槽来达到增强“亚气膜效应”的目的。这正是该类船舶能在高速航行状态下节能的原因, 减阻率在相同喷气压力下基本上是随速度的增大而提高的。但是, 高速滑行的均系小艇, 其滑行状态与傅

汝德数有关,当船艇处于滑行状态时,艏部存在升力的同时也存在一个阻力分量,船艇的摩擦阻力为总阻力的 20%~30%,因此空气减阻实际效果受到影响。由于船艇主机功率小,节能效果和低碳社会效益低于大功率的运输船。

2) 与高速滑翔艇相比,低速运输船往往具有较深的吃水和肥大的船体型线,采用球鼻艏可改善其适航性和耐波性。船舶在低速航行时,形状阻力有所下降;在提高航速时,肥大的船首会使航行阻力成倍增长。同时,船舶在低速航行时气泡有效覆盖面积较小,部分气泡来不及覆盖船底便已逃逸,因此很难在船底形成气膜。此外,随着船舶吃水的增加,减阻效果大打折扣,较小的喷气流量使得减阻效果并不明显,这也是低速运输船在运用气膜减阻技术时所面临的一大难题。

3) 气泡扩散进入螺旋桨,即混有气体的水流进入螺旋桨的功能区,会严重干扰螺旋桨的功能,加快螺旋桨的剥蚀,给螺旋桨结构带来损害,使船舶推进效率降低。因为许多船舶的螺旋桨是安装在船尾底板龙骨线之上的,发动机座和艉轴大致与龙骨线平行。出于螺旋桨推力与船体型线配合考虑,其结构一般都水平安装,这会减小轴系振动给设备带来的磨损。高速滑翔艇为尽量减少“亚气膜”对螺旋桨的干扰,通常会将螺旋桨安装在船尾后方较远的位置,将机座向后倾斜来满足要求,并选用可在稍倾斜条件下使用的发动机。因此,船舶在应用微气泡减阻技术和船舶气膜减阻节能技术时都需处理好船底空气对螺旋桨的影响,需依赖船模试验研究实现科学合理的设计。

因此,船舶气泡减阻技术的应用应针对不同船(艇)型,就喷气形式、位置、喷孔大小及喷气流量对减阻效果的影响,就气膜(幕)对船体的稳定性和耐波性影响及导流装置的使用进行一些优化设计,制订出经济、合理的气泡减阻方案。

【参 考 文 献】

- [1] 土井康明,茂里一宏. 微小气泡による摩擦抵抗の軽減[C]//日本造船学会论文集. 东京:日本造船工程学会,1992,170: 55-63.
- [2] 蔡金琦. 35 000t 浅吃水货船薄层气膜减阻试验研究报告[R]. 上海:上海船舶运输科学研究所,1997.
- [3] 顾家彪. 1000t 甲板驳薄层气膜减阻实船试验报告[R]. 上海:上海船舶运输科学研究所,1990.
- [4] 王家楣,郑晓伟,姜曼松,等. 不同喷气形式船舶微气泡减阻水池试验研究[J]. 华中科技大学学报,2004,32(12): 78-80.
- [5] 王家楣,郑晓伟,姜曼松,等. 不同吃水对船舶微气泡减阻影响的水池试验研究[J]. 船舶工程,2004,26(6): 9-12.
- [6] 董文才,郭日修. 平板气幕减阻试验研究[J]. 中国造船,1998(S): 100-106.
- [7] HARTMUT H, LEGNER A. Simple model for gas bubble drag reduction[J]. Phys. Fluids, 1984, 27(12): 2788-2790.
- [8] 周明,李文采. 气液两相流的流场特性研究——随机轨迹分离流数学模型[J]. 金属学报, B 辑, 1990, 26(3): 164-169.
- [9] MADAVAN N K, DEUTSCH S, MERKLE C L. Reduction of turbulent skin friction by microbubbles[J]. Phys. Fluids, 1984, 27(2): 356-363.
- [10] MADAVAN N K, DEUTSCH S, MERKLE C L. Measurements of local skin friction in a microbubble-modified turbulent boundary layer[J]. J. Fluid Mech., 1985, 156: 237-256.
- [11] 梁志勇. 微气泡减少船舶阻力的理论研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2000.
- [12] BUTUZOV A, SVERCHKOV A, POUSTDSHNY, et al. State of art in investigations and development for the ship on the artificial cavities[J]. Journal of Whuan Transportation University, 1999, 23(S1): 1-10.
- [13] MATVEEV K I. Transom effect on the properties of an air cavity under a flat-bottom hull[J]. Ships and Offshore Structures, 2012, 7(2): 143-149.
- [14] 梁桂华. 谁与争锋——俄罗斯海军“布拉风”级气垫导弹舰[J]. 现代兵器, 2003(11): 10-13.

计及温度载荷的沥青船结构强度有限元计算分析

陈第一, 王伟, 谢永和, 鲁昕

(浙江海洋大学 船舶与机电工程学院, 浙江 舟山 316022)

摘要: 沥青船在运载高温沥青时, 过高的温度会对其船体结构产生不可忽略的影响。以 6600DWT 沥青船为例, 运用 MSC/PATRAN 和 MSC/NASTRAN 有限元软件, 对其在计及温度载荷时的结构强度进行有限元计算研究。分析温度场载荷对沥青船结构强度的影响, 对不满足强度要求的结构提出合理的加强方案。

关键词: 沥青船; 温度载荷; 有限元; 结构强度

中图分类号: U661.43

文献标志码: A

文章编号: 2095-4069 (2017) 06-0007-06

Finite Element Calculation and Analysis of Asphalt Carrier's Structural Strength Taking into Account the Temperature Load

CHEN Di-yi, WANG Wei, XIE Yong-he, LU Xin

(Naval Architecture and Electromechanical Engineering College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: The influence of excessive high temperature on the asphalt carrier's hull structure cannot be neglected, during its transportation of high temperature asphalt. For this, taking the 6600DWT asphalt carrier as the example, the MSC/PATRAN and MSC/NASTRAN software are used to perform the finite element calculations on the asphalt carrier's structural strength, while taking into account the temperature load. The influence of temperature field load on the asphalt carrier's structural strength is analyzed, and proper strengthening schemes are proposed for those structures which do not meet the strength requirements.

Key words: asphalt carrier; temperature load; finite element; structural strength

0 引言

随着我国的现代化建设逐步加快, 石油沥青的需求量不断增大, 沥青船在沥青运输中的作用日益凸显^[1]。沥青船是专门用来运输高温、散装的液态石油沥青的船舶, 所运载货物的温度通常控制在 120~180 °C^[2-3]。

沥青船的液货舱分为独立式和整体式 2 种。虽然采用整体式液货舱的沥青船具有货舱舱容利用率高和便于清理等优势^[4], 受到越来越多的船东青睐, 但其装载的高温液态沥青易损坏船体结构^[5-6], 且钢材的屈服强度在高温下会随温度的升高而降低, 因此需对沥青船进行热应力分析。

本文对沥青船货舱作考虑温度场^[7]和不考虑温度场的结构强度直接计算, 分析温度场对沥青船结构强度的影响, 并对不满足强度要求的结构提出合理的加强方案, 提高结构设计的合理性, 为货舱结构优化及今后沥青船的改造提供可靠的数据来源。

以 6600DWT 的整体式液货舱沥青船为例, 采用规范要求的计及温度的加载方式, 同时进行考虑温度场^[7]作用的应力分析。对不满足强度要求的结构提出合理的加强方案, 提高结构设计的合理性。此外, 研究岩棉层的厚度和隔热系数对热传导的影响, 为今后沥青船的强度校核、结构设计及改造提供参考。

收稿日期: 2016-10-31

基金项目: 浙江省自然科学基金 (LQ13E090002)

作者简介: 陈第一, 男, 硕士, 1989 年生。研究方向为船舶结构强度。

1 沥青船概括

该整体式液货舱沥青船全长 113.6m, 垂线间长 107.4m, 型宽 16.80m, 型深 8.80m, 设计吃水 6.60m, 方形系数 0.7892, 肋骨间距 700mm, 强框架间距 2800mm, 双层底高 1200mm, 双舷侧间距 1000mm。

该船货油舱区为双壳、双底结构, 并被 1 道槽型纵舱壁和 4 道槽型横舱壁分隔成 10 个货舱。货舱区域的顶部、底部及内侧部均敷设厚度为 100mm 的岩棉保温材料, 横舱壁四周到边界 900mm, 1000mm 及 1100mm 处设有厚度为 100mm 的岩棉保温材料。沥青船强框架的典型横剖面图及带岩棉层的强框架的典型横剖面图见图 1 和图 2。

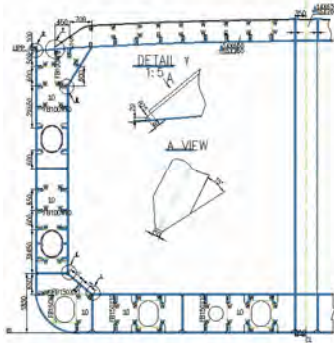


图 1 沥青船强框架的典型横剖面图

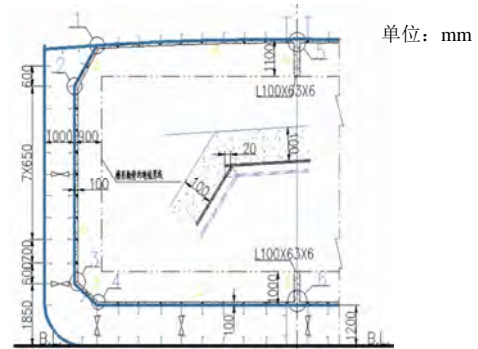


图 2 沥青船带岩棉层的强框架的典型横剖面图

2 有限元直接计算

本文基于以下假设^[8]对计及温度载荷作用的结构强度进行直接计算研究。

1) 有限元中的传热计算是基于三维空间定常稳态传热假定, 且材料参数和边界条件为不随温度变化的线性热传导, 并在计算中仅考虑结构和绝缘的传导效应。

2) 热力学计算是基于“场序热—结构耦合”假定, 即计及温度场变化对结构产生的影响, 但不考虑后者变化对前者的影响。此外, 计算中不考虑结构的高温蠕变效应。

3) 计算中假定船体各构件之间以传导的方式进行热传递, 空气仅以自然对流的方式与所接触的船体构件进行对流换热。

2.1 舱段有限元模型

依据 6600DWT 沥青船的相关设计建造图纸, 运用大型有限元软件 MSC/PATRAN 及 MSC/NASTRAN 进行数值模拟计算分析。

依据中国船级社《钢质海船入级规范》^[8]第二篇要求, 采用三维有限元模型进行沥青船主要构件的强度直接计算研究。舱段模型范围为船中货舱区的近 3 个货舱, 其中: 纵向范围为从肋位 Fr49 到肋位 Fr113; 垂向范围为船体型深, 采用全宽模型。货舱区内的岩棉材料采用三维体单元建模, 其余各船体构件采用板、梁单元。坐标系采用右手坐标系, 原点位于 Fr49 号船底中线处, x 轴指向船首为正方向, y 轴指向左舷为正方向, z 轴指向上为正方向。舱段有限元模型见图 3, 体单元的岩棉绝缘层模型见图 4。

对于热传导分析, 模型中应包含模型范围内所有参与作用的热绝缘材料和结构, 但可忽略不锈钢内胆; 对于热应力分析, 模型仅为结构模型。钢材的材料属性及温度场计算所需参数见表 1。

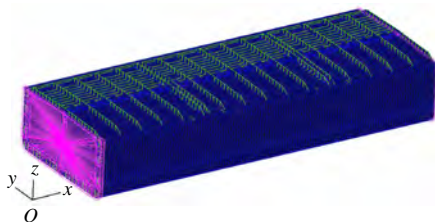


图 3 舱段有限元模型

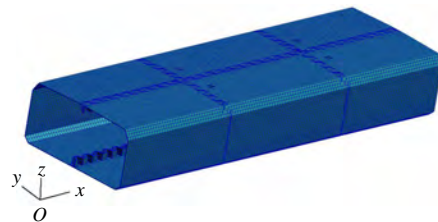


图 4 体单元的岩棉绝缘层模型

表 1 钢材的材料属性及温度场计算所需参数

参数	取值	参数	取值
钢材弹性模量/(N/mm ²)	2.06×10 ⁵	岩棉的热传导系数/(W/(m·°C))	0.046
钢材泊松比	0.3	钢材的热膨胀系数/(°C ⁻¹)	1.1×10 ⁻⁵
钢材的材料密度/(t/m ³)	7.85	压载舱内空气与钢板的对流系数/(W/(m ² ·°C))	11.6
钢材的热传导系数/(W/(m·°C))	60.6		

2.2 边界条件

根据《钢质海船入级规范》^[8]的要求, 边界约束参考双壳油船。在端面 A 及端面 B 内中和轴与纵中剖面相交处建一个独立点 H, 在独立点上施加总纵弯矩, 端面各纵向构件节点自由度 T_x , T_y , T_z 与独立点相关。总体载荷工况的边界条件见表 2。局部载荷工况的边界条件见表 3。

表 2 总体载荷工况的边界条件

位置	线位移约束			角位移约束		
	T_x	T_y	T_z	R_x	R_y	R_z
端面 A 和端面 B	相关	相关	相关	—	—	—
独立点 H (端面 A)	约束	约束	约束	约束	弯矩	—
独立点 H (端面 A)	—	约束	约束	约束	弯矩	—
节点 G (全宽模型)	—	约束	—	—	—	—

表 3 局部载荷工况的边界条件

位置	线位移约束			角位移约束		
	T_x	T_y	T_z	R_x	R_y	R_z
端面 A 和端面 B	约束	—	—	—	约束	约束
交线 C	—	—	弹簧	—	—	—
节点 G (全宽模型)	—	约束	—	—	—	—

注: 节点 G 的位置为中部货舱前后舱壁处纵中剖面与船底板的交点

2.3 计算工况和载荷

2.3.1 沥青船的装载工况

对于该沥青船的整体液货舱的装载工况, 按照《钢质海船入级规范》^[8]取用, 即: 且对于(a), (b), (c), 均考虑上述模式下的满载和半载状态。具体装载工况见图 5a)~图 5c), 分别包括水平剖面图和纵剖面图。

2.3.2 沥青船的局部和总体工况

局部工况主要包含的载荷有沥青载荷、舷外海水载荷、压载水载荷和液货舱结构温度分布引起的温度载荷。总体工况中对应的总体载荷为舱段两端通过 MPC 点加载的垂向弯矩, 分别对应中拱状态和中垂状态。最终的应力计算结果需将局部工况下的计算结果与总体工况下的计算结果相叠加。具体载荷工况结果叠加明细表见表 4。

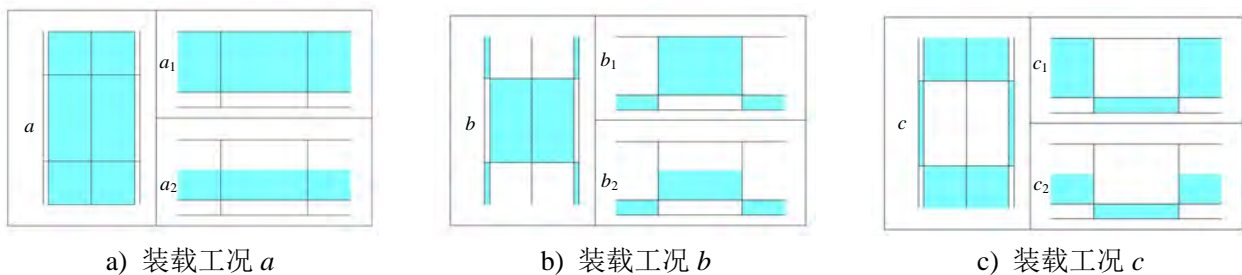


图 5 装载工况

表 4 载荷工况叠加明细

工况序号	局部载荷工况	总体载荷工况	总体和局部组合工况
工况 1	LC-a ₁ -JUBU	LC_abc_ZT_zhongchui	Combine,zhongchui, a ₁
工况 2	LC-a ₂ -JUBU	LC_abc_ZT_zhongchui	Combine,zhongchui, a ₂
工况 3	LC-b ₁ -JUBU	LC_abc_ZT_zhongchui	Combine,zhongchui, b ₁
工况 4	LC-b ₂ -JUBU	LC_abc_ZT_zhongchui	Combine,zhongchui, b ₂
工况 5	LC-b ₁ -JUBU	LC_bc_ZT_zhonggong	Combine,zhonggong, b ₁
工况 6	LC-b ₂ -JUBU	LC_bc_ZT_zhonggong	Combine,zhonggong, b ₂
工况 7	LC-c ₁ -JUBU	LC_abc_ZT_zhongchui	Combine,zhongchui, c ₁
工况 8	LC-c ₂ -JUBU	LC_abc_ZT_zhongchui	Combine,zhongchui, c ₂
工况 9	LC-c ₁ -JUBU	LC_bc_ZT_zhonggong	Combine,zhonggong, c ₁
工况 10	LC-c ₂ -JUBU	LC_bc_ZT_zhonggong	Combine,zhonggong, c ₂

在局部工况的载荷加载中，装载工况 a 和装载工况 c 对应的是满载状态，装载工况 b 对应的是压载状态。在总体载荷工况的载荷加载中，装载工况 a 仅考虑中垂状态，装载工况 b 及装载工况 c 分别考虑中垂状态和中拱状态。

2.3.3 温度载荷

沥青船的 6 种装载工况分别对应 6 种温度设置方式，经热传导计算分析后，使从传热分析中得到的三维空间温度场的温度分布作为热力学计算的温度载荷^[9-10]，可对应地产生 6 种热应力计算所需的温度载荷。温度场的温度设置见表 5；各温度场下产生的温度载荷及各温度载荷对应的局部工况见表 6；船体各结构的温度分布见图 6~图 9。

表 5 温度场的温度设置

位置	温度/℃	位置	温度/℃
沥青加热温度	180	外界大气温度	-20
海水温度	0	船舱内空气温度	40

表 6 温度场、温度载荷及局部工况的对应关系

温度场	LC-T-a ₁	LC-T-a ₂	LC-T-b ₁	LC-T-b ₂	LC-T-c ₁	LC-T-c ₂
温度载荷	T-a ₁	T-a ₂	T-b ₁	T-b ₂	T-c ₁	T-c ₂
局部工况	LC-a ₁ -JUBU	LC-a ₂ -JUBU	LC-b ₁ -JUBU	LC-b ₂ -JUBU	LC-c ₁ -JUBU	LC-c ₂ -JUBU

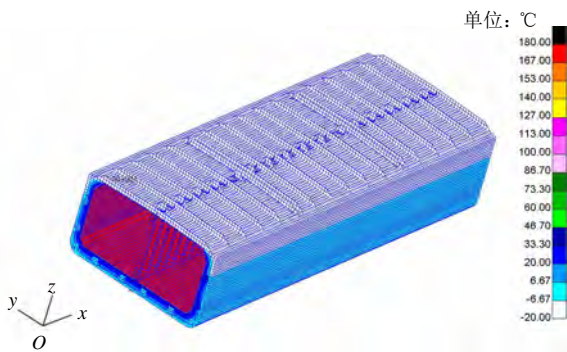


图 6 整体舱段在 LC-T-a₁ 下的温度分布

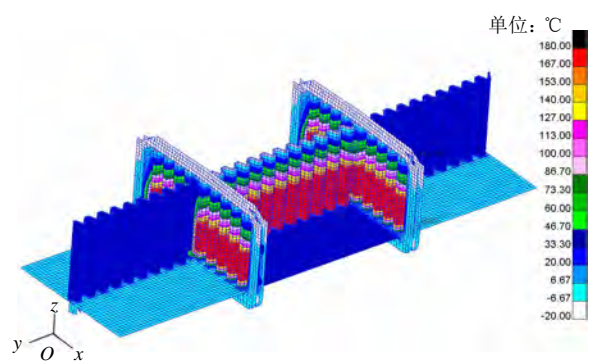


图 7 横舱壁、纵舱壁及船底内板在 LC-T-b₂ 下的温度分布

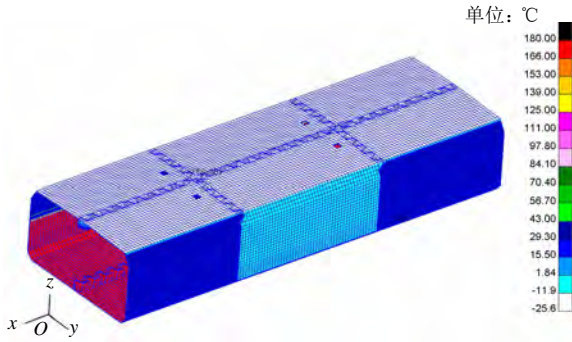


图8 岩棉层在 LC-T-c₂ 下的温度场分布

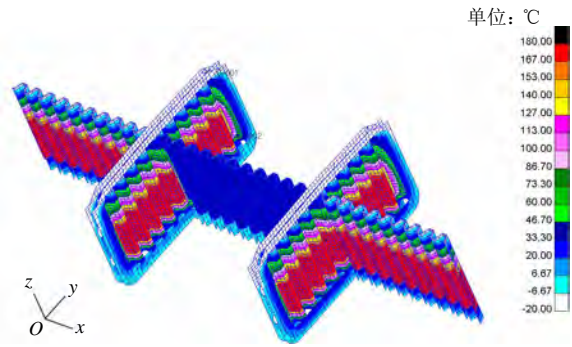


图9 横舱壁和纵舱壁在 LC-T-c₂ 下的温度分布

3 计算结果及结构加强

在上述 10 种工况下, 考虑温度载荷对结构强度的影响, 对该沥青船各船体结构的相当应力结果进行分析。通过计算发现: 计及温度时的甲板、内底板、内壳板、船底纵桁、顶边舱斜板、横舱壁及双层底肋板的结构屈服强度不满足要求, 其余结构满足强度要求。下面对强度不满足要求的结构提出加强方案。表 7 仅列出不满足强度要求的船体结构的应力值及结构加强后的相当应力结果, 未列出强度满足要求的结构。结构加强后的相当应力分布见图 10~图 15。

- 1) 甲板、内底板及顶边舱斜板的板厚由 12mm 加强到 15mm, 其中顶边舱斜板用 AH32 高强度钢。
- 2) 肋位 Fr65~Fr73 及 Fr89~Fr97 的船底纵桁用高强度钢 AH32 代替。
- 3) 在距离船舳 4270~5690mm 非水密肋板上的开孔附近及肋位 FR70 和 FR94 处的水密肋板上距离船舳 6030~8400mm 位置, 用高强度钢 AH36; 在距离船舳 6730~8400mm 非水密肋板上的舭部位置, 板厚由 10mm 加强到 15mm, 并用 AH36 高强度钢。
- 4) 在槽型横舱壁上距离船舳 6998mm 位置, 加垂向尺寸为 FB100-15 的球扁钢, 将距离船舳 7123~7400mm 处的舱壁板厚增加到 16mm, 并在 6873~7400mm 处用 AH36 高强度钢。

表 7 原结构和结构加强后的相当应力计算结果

船体结构	原结构的相当应力/(N/mm ²)	许用相当应力/(N/mm ²)	原结构是否满足要求	结构加强后的相当应力/(N/mm ²)	结构加强后是否满足要求
甲板	243	220	否	209	是
内底板	235	220	否	208	是
内壳板	237	220	否	216	是
船底纵桁	306	235/301	否	205/296	是
双层底肋板	270	175/224	否	170/231	是
横舱壁	206	175/243	否	157/242	是
顶边舱斜板	270	195/250	否	234	是

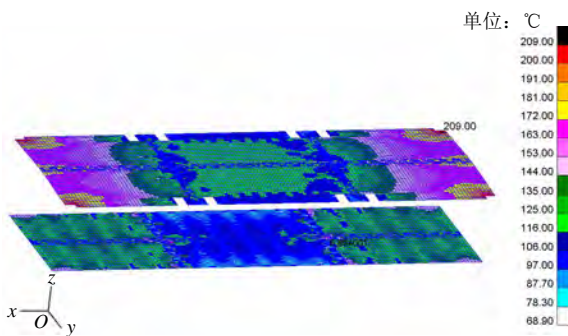


图10 甲板和内底板的相当应力分布

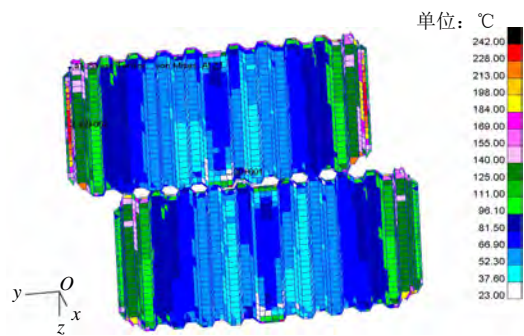


图11 横舱壁的相当应力分布



图 12 顶边舱斜板相当应力分布

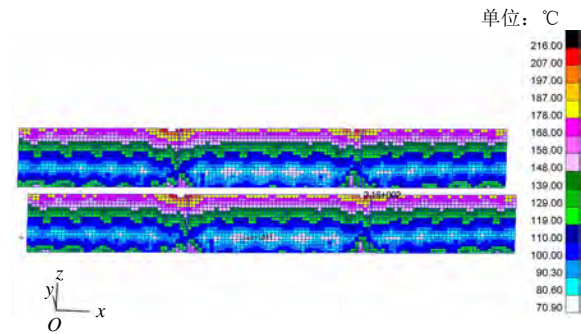


图 13 内壳板的相当应力分布

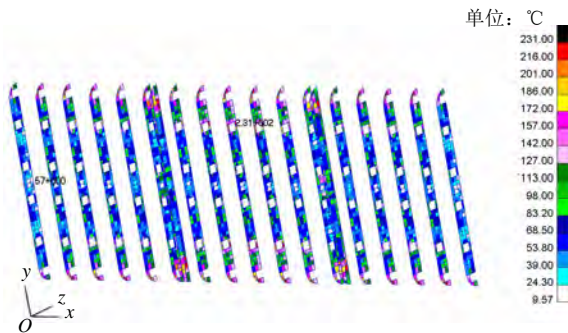


图 14 肋板的相当应力分布

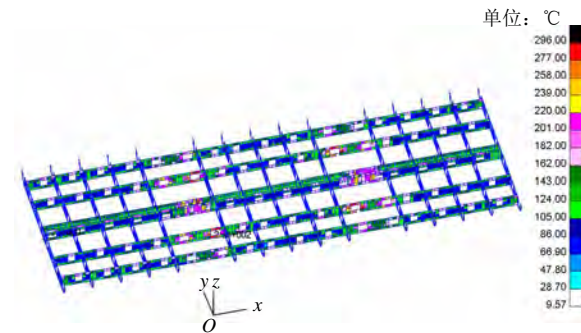


图 15 船底纵桁的相当应力分布

4 结 语

通过对计及温度作用的沥青船的船体结构强度的直接计算发现, 船底纵桁是整个船体结构应力值最大的地方, 远超过许用要求, 通过筛选结构加强方案, 用高强度钢代替普通钢是一种非常有效的方式。此外, 甲板和内底板的应力计算结果只超过许用值 20N/mm^2 左右, 可通过增加板厚来加强。

研究发现, 在顶边舱斜板处增加板厚很难减小应力的计算值, 故建议采用 AH32 高强度钢来加强。双层底肋板的应力计算值只有小范围超过许用要求, 通过加强发现, 需采用 AH36 高强度钢并增加板厚来加强才更有效。由于槽型横舱壁结构相对复杂, 又连接甲板、内壳板、内底板及顶边舱斜板等结构, 需通过局部增添扶强材、增加板厚和用 AH36 高强度钢来加强。此外, 由于结构的关联性, 主要结构加强后, 内壳板上的应力值即可得到减小。

除上述传统加强方案外, 还建议通过增大岩棉层的厚度或更换岩棉层的材料使岩棉的热传导系数降低, 从而降低温度对结构强度的影响。由于岩棉层是用体单元表达的, 在横舱壁上的体单元与顶边舱斜板的体单元之间协调难度非常大, 没有进一步计算验证增大岩棉层的厚度对降低应力值的影响, 故需进一步探讨。

【参 考 文 献】

- [1] 冯国增, 孙少哲, 董瑞. 6000DWT 沥青船液货梯级加热系统设计[J]. 船舶工程, 2015 (2): 38-40.
- [2] 李兵. 计及温度应力的沥青船强度有限元计算[J]. 机电设备, 2012, 29 (4): 50-52.
- [3] 杜华明. 不同舱壁形式沥青船温度场和应力有限元分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008: 1-3.
- [4] 黄旒. 计及温度应力的船体结构直接计算[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007: 2.
- [5] 李俊来, 王伟. 基于热变形下的沥青船货舱结构温度应力分析[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2014 (2): 180-184.
- [6] 李俊来, 张吉萍. 基于温度应力场的沥青船货舱结构强度分析[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2008, 27 (1): 5-8.
- [7] 李敏. 中小型 LNG 船 C 型独立液货舱温度场及应力场分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 9.
- [8] 中国船级社. 钢质海船入级规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [9] 许一敏. 船舶结构强度、疲劳强度直接计算技术研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 32-35.
- [10] 徐松, 卢金树. LNG 船液舱预冷时货物维护系统温度场数值预报模型[J]. 船舶与海洋工程, 2016, 32 (3): 27-33.

一种具有目标识别功能的舰载警用 飞行系统的设计

何学明

(公安海警学院 机电管理系, 浙江 宁波 315801)

摘要: 为使海警部队在海上执法时能从众多船舶中快速寻找可疑船舶, 并快速获得其详细信息, 设计一种舰载警用飞行系统。该系统可实现空中抵近侦察, 运用舰载的目标识别系统获得可疑目标的图像, 配有功能强大的可疑目标数据库, 从而达到快速、准确地识别海上目标的目的。试验结果表明, 所提出的方法和设计完全符合海警执法的要求, 设计的飞行系统适合舰载和警用, 设计的目标识别系统精确、可靠, 具有较高的推广应用价值。

关键词: 目标识别; 舰载; 警用; 飞行器; 设计

中图分类号: E962; V211.8

文献标志码: A

文章编号: 2095-4069 (2017) 06-0013-04

Design of a Shipborne Police Flight System with Target Identification Function

HE Xue-ming

(Department of Electrical and Mechanical Management, China Maritime Police Academy, Ningbo 315801, China)

Abstract: A shipborne police flight system is designed to enable the maritime police force to fast identify suspicious vessels from numerous ships and to fast obtain the detailed information of the suspicious vessel during law enforcement at sea. This system can achieve low altitude scout and gather images of the suspicious object through the shipborne target identification system, and is equipped with powerful suspicious object database for the fast and accurate identification of objects at sea. The experimental result shows that the proposed method and the design will fully satisfies the requirements of the maritime police force, the designed flight system is suitable for ship-borne and police purpose, and the designed target identification system is accurate, reliable and has high value for wider application.

Key words: target identification; ship-borne; police; aircraft; design

0 引言

当前, 随着海洋强国战略走向国家层面, 海警部队作为海上执法单位的作用日益凸显。海警部队大多通过雷达回波和瞭望来识别海上目标。通过雷达识别只能判断出可疑船舶大致的形状和位置, 无法判断出其装备情况、人员配备情况及其他详细信息, 且在复杂、陌生的海域容易被其他形状类似于船舶的海岛或设施干扰。瞭望人员大多由其他人员兼任, 工作强度较大, 同时瞭望器材仅局限于传统的望远镜, 存在视

收稿日期: 2016-09-29

基金项目: 浙江省自然科学基金 (LY15E090004)

作者简介: 何学明, 男, 教授, 博士, 1966 年生。1997 年毕业于华中科技大学机械电子工程专业, 现从事轮机工程、机电智能控制、水下机器人技术的教学与研究。

距有限、舰艇抵近侦察易发生碰撞事故及舰艇人员的安全得不到保障等不足^[1-3]。因此,海警舰艇作为执法工作的载体,在空中目标侦察、海上争端的空中证据收集及可疑目标识别等方面的能力还有待提高。

针对上述问题,设计一种舰载警用飞行系统。该系统由空中飞行器和舰载主控中心 2 部分组成,可实现空中抵近侦察,运用机载的目标采集系统获得可疑目标的图像并将其传输给舰载主控中心的目标识别系统,配有功能强大的可疑目标数据库并能进行识别,达到快速、准确地识别海上目标的目的,解决当前海警执法面临的重大难题。

1 舰载警用飞行器的设计

根据警用和海上飞行的实际要求,设计一种舰载警用多旋翼飞行器。该飞行器是一种适用于海上飞行、搭载高精度云台相机的多旋翼飞行器,不仅能完成基本的飞行动作(包括垂直起降、前后运动、横滚、俯仰及悬停等),实现遥控/自主的低空飞行,还能完成航拍侦察任务,采集半径 500m 范围内的视频和图像信息,并通过高频信号将其传送回来或存储在飞行器的随机存储设备中。该飞行器通过全球定位系统(Global Positioning System, GPS)导航,按设定的航迹完成直径 2km 范围内的航点飞行,并按要求完成航拍、侦察等高空作业任务。针对警用和舰载的要求,对该飞行器做以下特殊设计:

1.1 机身设计

选择空心碳纤维材料,在达到最大强度的同时减轻机身整体质量,为搭载警用装备预留起飞质量。同时,空心碳纤维材料的电磁屏蔽性好,可使飞行器在舰载复杂电磁的条件下使用。此外,飞行器各部分结构采用防水防雾处理,可满足在海洋环境下飞行的要求。

1.2 能源与动力装置设计

为适应海上飞行环境,该飞行器的动力装置选用特殊的防水型小型无刷直流电机,桨叶与电机直连,减少了减速器,增大了扭矩,减轻了质量。此外,选用 5200mA·h 25C DC 的锂电池组,通过 4 组电子调速器(Electronic Speed Controller, ESC)将电压降至 5V 的稳定电压,并通过无感换向方式将直流电供给电机,有效避免水汽对电池组产生影响。该电池组可供飞行器飞行 30min 左右,满足任务需求。

1.3 起落架设计

飞行器降落在地时,整个机身的质量将全部由起落架承担,因此必须具有良好的支撑和减震功能,以避免飞行器降落时震动对部件造成损坏。每个起落架的上端都装有一个由碳纤维材料制成的弹性支架,上面开有大小不等的孔,以减轻整体质量;支架与下层连接板通过尼龙螺母连接,以保证连接强度。对支架末端进行磨砂处理,使飞行器可在雨天湿滑的甲板面上平稳起降。

1.4 保护设计

飞行器在实际使用中可能会遇到电磁条件复杂、遥控信号丢失和电量过低无法返航等情况,而其保存有许多重要的图像及视频资料,不能轻易丢失,因此设计着重对其安全保护功能进行完善。

1) 遥控信号丢失。在丢失遥控信号之后立即启用失控保护功能。飞行器会在失控位置悬停 3s,以确认信号是否会恢复。若飞行器所处的悬停高度低于海拔 20m(水面舰艇高度大多 <20m),则飞行器会自动抬升,以避免返回时可能触碰到的障碍物;若飞行器的飞行高度 >20m,则其会按最短路径返回至起飞地点上空悬停 15s 后自动降落。若飞行器遥控信号在该过程中恢复,则失控保护模式会自动关闭,转入 GPS 模式飞行。

2) 低电压保护。飞行器处于长时间紧张飞行作业状态时,操作者极易忽略电源电压的高低,使得飞行器极易因电源电压过低而产生坠机的危险。当电源电压 <10.80V 时自动触发第一级保护,此时飞行器会发出低电压报警,红色 LED 灯急速闪烁,但仍能保持正常飞行。当电源电压 <10.50V 时触发第二级保护,此时飞行器将停止报警,但红色 LED 灯仍急速闪烁,飞行器将从悬停地点自主返航降落并不再接收遥控信号。

2 图像采集系统的设计

图像采集系统的硬件设计见图 1，分别由飞行器云台控制系统、通信数据链和辅助操控手柄图像采集系统等设备组成。

CCD 相机通过安装在舰载飞行器上的云台实现 $0^{\circ}\sim 350^{\circ}$ 水平旋转角度及 $+90^{\circ}$ 垂直旋转角度范围内目标的监视，获取视频和图像信息，并将其传送给机载主控处理器，通过无线通信系统传送给地面主控计算机，从而完成可疑目标的获取和信息传输^[4]。

良好的拍摄效果需稳定的云台，即无论飞机在空中以何种姿态飞行，云台都要一直保持绝对的水平姿态。云台的 PID 调节在整个云台调试过程中尤为重要。该设计利用 Simple BGC 软件调节云台参数，对云台的横滚、俯仰及三轴陀螺仪进行细节上的修正，使其在没有接收到动作信号的状态下始终与地面保持水平，并使飞行器能在不同的飞行姿态下对云台的工作状态进行实时监测。图像识别流程图见图 2。

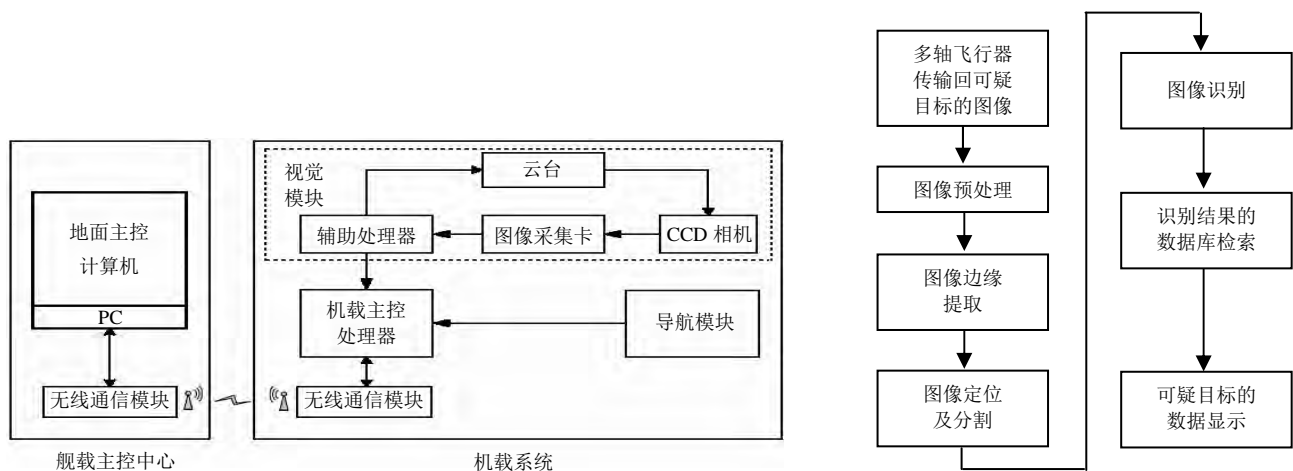


图 1 飞控及图像采集系统硬件设计

图 2 图像识别流程图

地面站屏幕菜单调节系统即 OSD (On-Screen Display) 系统，数据传输给 LCD 显示器，由其通过一些规定的字形或图形显示飞行器的状态，让使用者获得所需的信息。

在 MAX7456 芯片的基础上建立一个 OSD 模块，分别与飞行控制器和图传发射机连接，将飞行器的 GPS 坐标、飞行高度、速度、航向及电量等实时信息呈现在地面站显示器上，使操作者清晰、直观地了解飞行器的实时状态，以保证可疑目标图像获取的准确性和飞行器飞行的安全性。

通过上述设计，解决视频和图像信息的实时传输、云台的稳定性及实时监控等问题，从而获得可疑目标的清晰图像。

3 舰载主控中心目标识别系统的软件设计

基于计算机视觉的目标识别技术是指对图像序列中的目标进行检测和识别，获取可疑目标的更多信息，并对其相关技术进行分析和处理，从而完成目标识别^[5]。

图像处理 (Image Processing) 技术是指通过计算机对图像进行去除噪声、增强、复原、分割及提取特征等处理的方法和技术。图像处理舰载主控中心系统是一套图像识别及数据库检索系统^[6-7]，其主要功能是处理和识别飞行器捕捉到的可疑目标的图像，识别流程图如图 2 所示。目标识别是本文研究的重点。飞行器采集到的图像是海上目标的外形，可通过比较其艏艉特征、船桥的外形特征及艏艉的吃水深度比等，并与系统建立的数据库相对比，识别出其详细信息。

利用 MATLAB 软件设计可疑目标识别软件，利用 MATLAB 的内建函数，直接调用图像处理及识别函数，将图像转化为矩阵的形式，利用矩阵运算实现不同的图像处理^[8-10]。

4 试验研究

4.1 悬停测试

飞行器在实际完成任务过程中通常需要悬停,以对可疑目标进行实时侦察。悬停性能决定着完成任务的质量。在 5s 的测试时间内,该飞行器在 GPS 飞行模式下无遥控信号悬停,若能保证前后左右移动幅度 $<10\text{cm}$,倾斜角度 $<15^\circ$,则说明满足悬停要求。

4.2 飞行器航拍测试

清晰的航拍效果是侦察和后期数字化处理的基础。在飞行器飞行过程中,无线图传模块将采集到的图像通过图传操控器(见图 3)的雪花屏显示给操作者,配合由 AT89C52 控制、无刷电机带动的二自由度云台,使飞行器以任意姿态飞行且云台没有接收到动作指令时,摄像头能始终保持水平,优化航拍效果。图 4 为航拍效果图,试验选择在中雨天气下进行,同时测试飞行器的全天候防水效果。试验结果表明,飞行器平台及图像采集系统工作正常,图像采集系统可清晰、真实地反映飞行器所处环境的情况,效果良好,达到了预期目标。



图 3 图传操控器



图 4 航拍效果图

4.3 目标识别试验

该试验以某舰艇的舷号为试验模板,对该舷号进行数字化识别及数据库检索。测试可疑目标识别系统的工作性能,读入原始图像,将拍摄到的舰艇图像写入到可疑目标识别程序中(见图 5)。

按顺序进行图像预处理、边缘提取、舰艇定位、字符分割和字符识别,并通过检索数据库得到最后的识别结果(见图 6)。

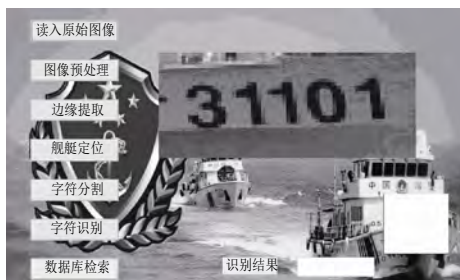


图 5 导入程序中的原始图像

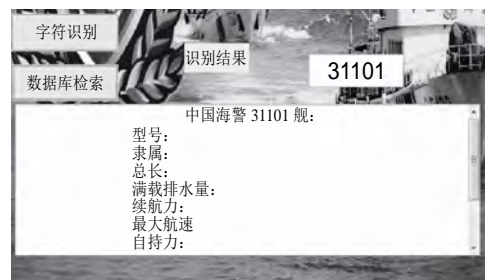


图 6 识别后的数据库检索结果

5 结 语

本文阐述一种具有目标识别功能的舰载警用飞行系统设计,该飞行系统由多旋翼飞行器(图像采集系统)和舰载主控中心(图像识别系统)2部分构成。通过对飞行平台进行稳定悬停及夜间飞行测试、图像采集系统实际工作状态测试和海警舰艇舷号识别等试验,表明该系统的设计合理,硬件设计简洁,满足海警部队的实际海上任务需求,云台及摄像系统工作稳定。此外,软件界面编程简单易使用,可对实际舰艇的外形特征进行准确识别,并能完成模拟数据库信息展示。试验结果表明该系统可靠,能达到设计要求,具有较高的推广应用价值。

(下转第 58 页)

LNG 接收站薄膜型储罐技术研究

宋忠兵, 徐岸南, 刘 恒

(沪东中华造船(集团)有限公司, 上海 200129)

摘要: 液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)接收站储罐技术不仅决定着 LNG 接收站的规模, 还直接影响 LNG 接收站的建造周期和投资成本。概述 LNG 接收站薄膜型储罐技术的构成、材料及容量等, 对比不同 LNG 接收站储罐技术的优缺点。研究发现, 薄膜式储罐具有容积大、占地面积小、建造周期短和建造成本低等特点, 是未来建造 LNG 接收站储罐的首选。

关键词: LNG 接收站储罐; 9 镍钢式; 薄膜式

中图分类号: U674.13⁺3.3

文献标志码: B

文章编号: 2095-4069(2017)06-0017-03

Technical Study on the Membrane Type Storage Tanks of LNG Receiving Station

SONG Zhong-bing, XU An-nan, LIU Heng

(Hudong-Zhonghua Shipbuilding (Group) Co., Ltd., Shanghai 200129, China)

Abstract: The technologies of the storage tank for Liquefied Natural Gas (LNG) receiving station not only determines the size of the station, but also directly influences its construction period and investment cost. This paper summarizes the structure, material and capacity of the membrane type storage tanks for LNG receiving stations, and compares the advantages and disadvantages of different technologies. As a result it is found though the study that the membrane type storage tanks have the characteristics of large volume, small footprint, short construction period and low construction cost. It is the first choice for building LNG storage tanks of receiving stations in the future.

Key words: LNG receiving station storage tank; 9 nickel steel type; membrane type

0 引 言

天然气的开发利用由一条环环相扣的供应链实现, 包括液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)开采、LNG 运输、LNG 储藏及 LNG 利用等。从上游的天然气开采、生产、液化、运输、储存及再气化, 到下游的发电和城市燃气利用等, 目前已形成包括 LNG 生产、储存、运输、接收、再气化及冷量利用等在内的完整的产、运、销 LNG 工业体系。

LNG 接收站中的储罐与 LNG 船运输环节紧密配套, 船运来的 LNG 经卸船装置输送到 LNG 接收站中的储罐内进行储存, 并加以气化后通过管道输送给下游用户, 或通过槽车直接运输给卫星站、调峰站^[1]。

当前日本、美国及韩国等发达国家的 LNG 接收站建设技术已非常成熟, 而我国尚处于高速成长期。LNG 接收站中的储罐主要可分成 9 镍钢型储罐(见图 1)和薄膜型储罐 2 种, 其中 9 镍钢型储罐主要分为混凝土外罐和 9 镍钢内罐^[2]。

收稿日期: 2016-11-11

作者简介: 宋忠兵, 男, 工程师, 1987 年生。2011 年毕业于江苏科技大学轮机工程专业, 现主要从事 LNG 船、LNG-FSRU、FLNG、LNG 接收站和 LNG 动力船等的液货系统研发工作。

国内的 LNG 接收站全部采用 9 镍钢储罐，容积均为 16万 m^3 ，无薄膜型储罐应用的案例。本文重点介绍薄膜型储罐技术。

1 薄膜型储罐基本构成

薄膜型储罐是法国 GTT 公司开发设计的，该技术已在 LNG 船上得到大量应用，且已有多个在国外的 LNG 接收站应用的案例。此外，目前菲律宾和马来西亚正在建造薄膜型 LNG 接收站储罐。薄膜型 LNG 储罐示意图 2。

薄膜型储罐系统的设计基于各功能分离的原则。从混凝土外罐到主层薄膜，每个组件的设计都保证具有一种功能。薄膜型储罐内部实景见图 3。

1.1 正常操作情况

1) 混凝土外罐 (1) 保证承受液货负荷、LNG 蒸发气压力负荷及抵抗外界的结构抗力。外层混凝土外罐在室温下工作，因此不受过高热应力的影响。混凝土外罐的结构类似于 9 镍钢罐，由圆筒壁组成，置于钢筋混凝土面板上，且顶层覆盖钢筋混凝土拱顶。混凝土外罐的内壁是有 56 个面的多面体。

2) 混凝土罐底和罐顶 (2) 及铝吊顶 (4) 都采用与 9 镍钢型储罐相同的结构。

3) 不锈钢薄膜内罐 (3) 兼具液密性和气密性。内层薄膜并非该系统的结构组成部分 (只具有密封功能)；内层薄膜的形态为双层正交波纹网格，作用类似于风箱，使之可在受热条件下双向收缩/扩张。内层薄膜由不锈钢薄膜片组成，焊在隔热板上，且薄膜片之间通过嵌入的方式搭接焊。内层薄膜通过嵌入板 (6) 的方式固定在墙面上。

4) 拱顶内侧的碳钢内衬 (5)、墙面上的受压环及内层薄膜全部致密焊接，以保证该围护系统的气密性。

5) 混凝土外罐的内侧底座和侧墙上全部涂有防潮层，以防止使用过程中液态水或水蒸气从混凝土内渗透至隔热层。

6) 薄膜与混凝土墙之间的隔热结构 (7) 保证混凝土外罐结构处在室温下。隔热层在某种意义上具有“承载力”，因为其将 LNG 的质量从内层储罐传递到混凝土外罐。隔热空间从内层 (内层薄膜) 到外层 (防潮层) 全部具有密封性，且永久置于氮气层中，使之便于监测。隔热空间可认为是独立空间。氮气监测可保证对围护系统内层密封性的持续控制。

7) 上层具有隔热性的悬桥通过充分隔热使拱顶温度保持在可接受的范围内。该悬桥由覆盖有玻璃棉或玻璃纤维毡的铝片构成，安装在初级围护层的上半部分，设计上与应用在 9% 镍钢罐上的技术相似。隔热厚度取决于每日蒸发率的控制要求，原理与 9% 镍钢罐相同。悬桥上有排气孔，保证所储存的气态形式产品可通过悬桥。

8) 所有的管道和仪表 (管筒结构和隔热空间监测系统) 都是通过储罐拱顶与储罐连接，确保薄膜无穿透。管筒结构固定在罐顶，只在储罐底部的部分进行导引。

1.2 内层薄膜出现泄漏情况

1) 隔热空间中的氮气采样系统可检测到任何进入其中的气体产品 (气体样品连续采样并自动分析，以确保膜外没有可燃气体)。一旦发生甲烷泄漏，氮气清扫模式便被激活，使得隔热空间中的气体浓度保

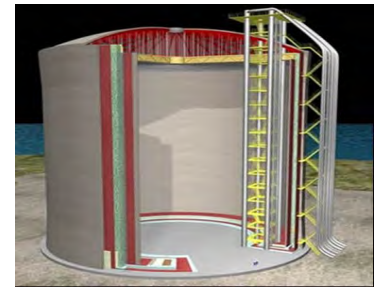


图 1 9 镍钢型 LNG 储罐

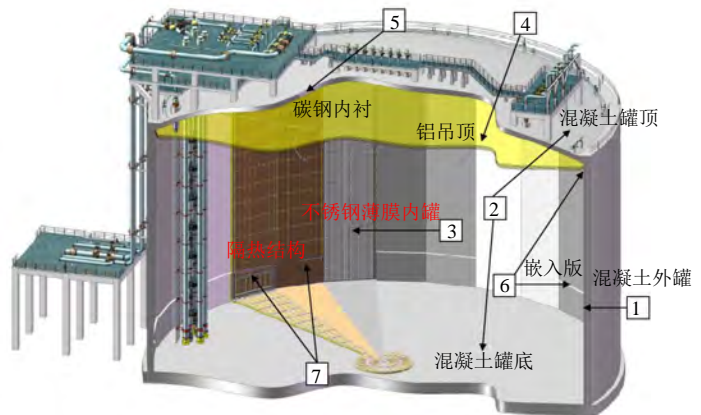


图 2 薄膜型 LNG 储罐



图 3 薄膜型储罐内部

持在 30% 的可燃下限以下。

2) 二级薄膜确保储罐底部倒角, 即垂直侧墙与底板之间连接部位的密闭性, 使之在一定时间内不受低温造成的热冷却的影响, 使系统可安全关闭 (也可在必要情况下停用)。该系统被称为热保护系统。由此, 可保证薄膜型储罐的功能要求与 9 镍钢罐相同。

2 薄膜型储罐主要部件

薄膜型储罐的主要部件包括主层薄膜、次层薄膜和预制泡沫板 (见图 4)。

2.1 主层薄膜

主层薄膜应用于罐壁和罐底, 材质为 1.2mm 厚的不锈钢 (304L 型), 采用双层正交波纹网络, 允许热负荷下双向自由收缩/扩张。主层薄膜由预制泡沫板焊接而成, 确保了密封性。

2.2 次层薄膜

次层薄膜应用于 5m 以下的罐壁和罐底, 材质为约 0.7mm 厚的复合材料, 这种复合材料通过在 2 层玻璃布之间插入铝片制得。铝片保证了材料的密封性, 而玻璃布保证了材料的机械抗拉力。次层薄膜由预制泡沫板粘接而成, 确保了密封性。

2.3 预制泡沫板

起隔热保温作用的泡沫板为预制件。墙壁和底部的主层薄膜与次层薄膜之间及次层薄膜与混凝土外罐之间都安装预制的泡沫板。泡沫板呈“三明治”形态, 增强硬质闭孔聚氨酯泡沫夹在 2 层胶合板之间, 在胶合板与泡沫接触面之间进行粘连。

2.4 热保护区域

当内罐发生泄漏时, 为保证外罐免于低温的影响, 专门在罐底及距罐底 5m 高的范围内安装热保护系统。

3 薄膜型储罐的优点

与 9 镍钢储罐相比, 薄膜型储罐具有以下特点:

1) 由于薄膜并非储罐的结构部件, 而是作为液体容器, 不论容量大小, 薄膜板都不需要增加厚度, 其设计都是一样的, 因此可建造 25 万 m^3 的 LNG 储罐和 32 万 m^3 的 LNG 储罐等, 甚至更大的 LNG 储罐, 从而节约土地, 提高土地的利用率。

2) 由于薄膜型储罐的绝缘层较薄, 在外罐相同的情况下, 容积平均可增大 10% 以上。

3) 薄膜型储罐不采用价格很高的 9 镍钢, 而是采用普通的不锈钢、聚氨酯泡沫板等材料, 建造成本可节约 10%~30%。

4) 由于薄膜及聚氨酯泡沫板等都是预制件, 且焊接相对简单, 薄膜型储罐的建造周期可缩短 3 个月左右。

5) 由于绝缘材料性能优越, 在 0.05% 蒸发率情况下, 9 镍钢储罐的绝缘厚度为 1m, 而薄膜型储罐的厚度只有 0.35m。

6) 薄膜型储罐采用预制的泡沫板和不锈钢薄膜等部件, 焊接工作量较少, 拼接工作量较大^[2]。

7) 薄膜型储罐的绝缘层内充满氮气, 绝缘层内的压力自动控制, 一旦有泄漏, 可立即监测到, 保证系统的安全^[3]。

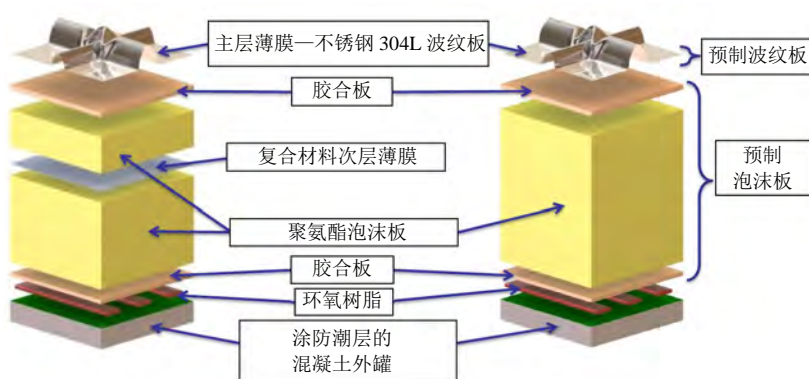


图 4 薄膜型储罐主要部件

船体极限强度非线性有限元计算方法

伍友军, 万 琪, 周 博

(中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011)

摘要: 船体极限强度是关系到船体生命力和安全的重要指标之一, 各国规范都对其提出明确要求。以某双壳油船为研究对象, 采用非线性有限元法计算其极限承载能力。通过采用不同的网格尺寸、边界条件、加载方式及施加或不施加侧向载荷, 对同一对象进行有限元计算。对计算结果进行对比分析, 提出合适的网格尺寸、边界条件设置方式和加载方式, 同时得出施加侧向载荷及不施加侧向载荷的优缺点。该研究可为采用非线性有限元法计算船体结构极限强度提供参考。

关键词: 非线性有限元; 极限强度; 船体结构

中图分类号: U661.43

文献标志码: A

文章编号: 2095-4069 (2017) 06-0020-06

Research on the Nonlinear Finite Element Method for Ultimate Strength of Ship Hulls

WU You-jun, WAN Qi, ZHOU Bo

(Marine Design & Research Institute of China, Shanghai 200011, China)

Abstract: The ultimate strength of ship hulls is one of the important factors for ship vitality, the requirements on which are clearly specified in the rules and regulations of classification societies around the world. Taking a double hull oil tanker as the research object, the nonlinear finite element method is adopted to calculate its ultimate strength. Finite element calculations on the same object are performed with different grid sizes, boundary conditions, loading modes and with or without lateral loads. The calculation results are compared and analyzed to propose the proper grid size, boundary condition configuration and loading mode, and to obtain the advantages and disadvantages of whether or not to apply the lateral loads. This study can provide some reference for the hull structure ultimate strength calculations using nonlinear finite element method.

Key words: nonlinear finite element; ultimate strength; hull structure

0 引 言

船体极限强度分析是船体结构强度分析的重要内容之一, 关系到船舶的安全运营。船体总纵极限强度^[1]是指船体抵抗纵向整体崩溃的最大能力, 是评估船体结构在特殊装载状态或恶劣海况下的安全性的重要指标。对船体结构的极限强度进行分析能准确把握船体的实际承载能力, 为进一步优化构件尺寸、提高船舶的经济效益提供依据^[2]。目前, 相关规范^[3-4]推荐采用渐进崩溃法 (Smith 方法) 计算船体的极限强度, 进行船体极限强度评估, 同时认可采用非线性有限元法替代 Smith 法。劳氏军规在剩余强度三级评估 (RSA3) 中明确要求需采用有限元法计算破损船舶的极限承载能力。

船体结构是一个由纵横方向上设置加强筋的加筋板组成的三维结构, 随着对船体发生极限强度破坏的

收稿日期: 2016-11-15

作者简介: 伍友军, 男, 高级工程师, 1980 年生。2002 年毕业于上海交通大学船舶与海洋工程专业, 现从事船舶结构设计工作。

崩溃机理的研究不断深入, 人们逐渐认识到船体结构在外载荷作用下达到极限状态是一个伴随着构件遭到破坏和应力重新分布的过程, 包含构件的后屈曲行为、几何大变形和材料的非线性应力-应变关系等复杂的力学响应过程。相较于渐进崩溃法, 非线性有限元方法是一种能反映船体构件局部破坏模式与整体破坏模式之间的相互作用, 计及几何、材料及边界非线性因素, 模拟船体发生整体崩溃全过程的计算方法^[5]。通过大量计算发现, 在采用非线性有限元方法计算极限强度时, 单元网格大小、边界条件和加载方式等因素会对计算结果产生较大的影响, 需通过对不同参数下的计算结果进行对比分析, 为极限强度的计算分析提供一种较为合理的方法, 从而使得采用有限元法计算极限强度更加规范、高效和准确^[6]。

1 单元网格大小的影响

采用非线性有限元方法计算极限强度是基于有限元模型进行的, 有限元模型的质量直接影响计算结果的准确性。在将实际的船体结构抽象为适合计算机求解的有限元模型时, 需针对不同的研究内容合理地选择网格划分技术, 合适的网格尺寸应是在综合考虑计算精度和计算成本的基础上得到的。更加细化的网格有助于更加敏感地捕捉到构件局部产生的屈曲现象, 但会增加计算成本。通过分析比较发现, 过密的网格划分不会对计算结果产生明显影响, 但会使计算代价大大提高。本文对同一船体结构建立 1 肋位、1/2 肋位和 1/4 肋位单元网格大小的模型, 在相同的边界条件和相同的载荷加载方式下模拟中拱状态的极限强度破坏, 计算模型见图 1, 3 种不同网格尺寸模型的极限弯矩计算结果比较见表 1。



图 1 3 种不同网格尺寸计算模型

表 1 3 种不同网格尺寸模型的极限弯矩计算结果比较

单元网格大小	边界条件	极限弯矩值/(kN·m)	相对差值/%
1 肋位	两端简支	1.13×10^7	—
1/2 肋位	两端简支	9.48×10^6	-15.97
1/4 肋位	两端简支	9.24×10^6	-18.12

对比 3 种不同单元网格大小的计算模型可知, 单元网格的大小对加筋板的屈曲破坏模式有很大影响, 内底板架的屈曲模式见图 2~图 4。从 3 种模型分别处于极限状态时的破坏模式中可看出: 对于单元网格较大的 1 肋位模型, 当其发生极限强度破坏时, 内底加筋板格的破坏模式属于加强筋与板格同时发生屈曲失稳破坏的梁-柱破坏模式; 对于单元网格较小的 1/2 肋位模型和 1/4 肋位模型, 当其发生极限强度破坏时, 内底加筋板格的破坏模式属于加强筋之间的板格屈曲失稳引起整体板格失稳的破坏模式。

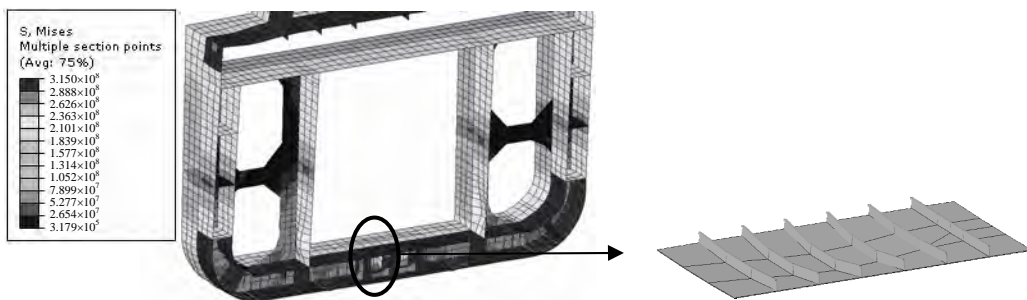


图 2 1 肋位单元网格模型中拱状态底部破坏模式

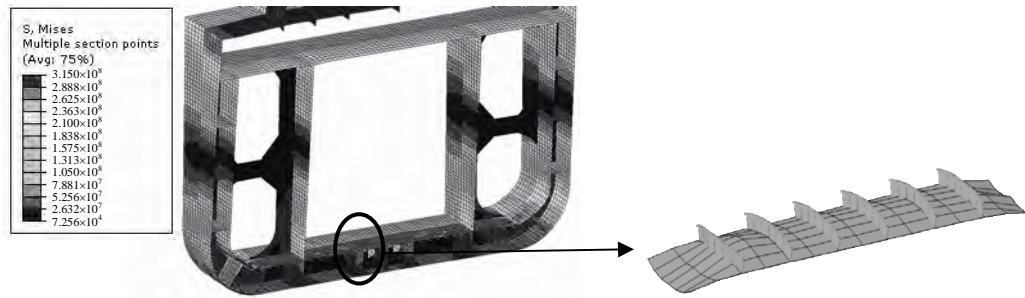


图 3 1/2 肋位单元网格模型中拱状态底部破坏模式

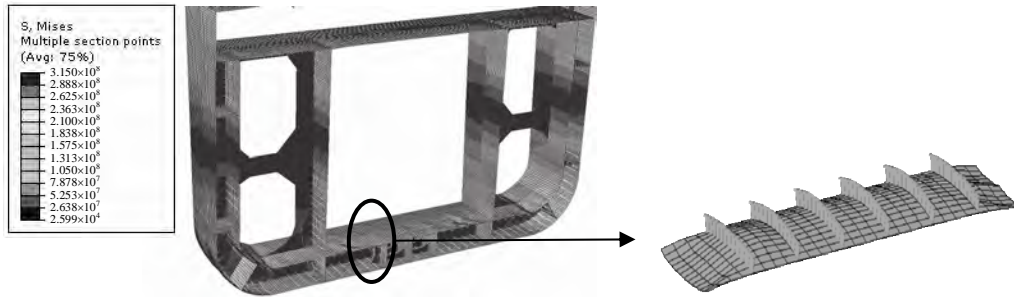


图 4 1/4 肋位单元网格模型中拱状态底部破坏模式

加筋板板格基本上可按总体屈曲和局部屈曲 2 种方式屈曲。通过理论计算发现，由于目标船型船底结构的加筋板板格发生总体屈曲的应力要比板格屈曲的应力大，较大的单元网格无法反映构件的局部破坏模式。通过对比发现，单元网格的大小会直接影响船体结构关键区域的破坏模式，导致计算结果出现较大偏差。采用 1 肋位单元网格无法反映构件的局部破坏模式，而采用 1/4 肋位单元网格对提高计算精度的作用较小且会增加计算成本，因此推荐采用 1/2 肋位单元网格建立有限元模型。

2 边界条件的影响

目前在采用非线性有限元法分析船体结构极限承载能力时，有采用无延伸段和有延伸段加载及施加边界条件 2 种方式。分别在 3 种单元网格大小和 2 种加载方式条件下对 2 种计算模型进行计算。对于没有延伸段的模型，其边界条件和载荷均直接作用在框架模型的两端。对于有延伸段的模型，其两端各延伸出 1 个强框架的长度，并对延伸段的板厚进行加厚处理，保证破坏发生在中间核心段。有延伸段模型和无延伸段模型见图 5，计算结果对比见表 2。



图 5 有延伸段模型和无延伸段模型

表 2 2 种模型计算结果对比

参数		无延伸段模型			有延伸段模型		
		1 肋位	1/2 肋位	1/4 肋位	1 肋位	1/2 肋位	1/4 肋位
极限弯矩/(kN·m)	载荷控制	1.02×10^7	9.64×10^6	9.27×10^6	1.13×10^7	9.48×10^6	9.24×10^6
	位移控制	1.06×10^7	9.26×10^6	9.02×10^6	1.12×10^7	9.40×10^6	9.05×10^6
差值/%		-3.56	4.10	2.77	0.82	0.88	2.10

通过对计算结果分析可知: 对于无延伸段模型, 按不同的加载方式在 3 种单元网格大小条件下所得计算结果的差值离散性较大, 而在相同的单元网格大小条件下, 不同的加载方式会对模型的计算结果产生影响; 有延伸段模型在 3 种单元网格大小条件下的极限弯矩值的差值离散性较稳定, 同时在相同的单元网格大小条件下, 不同的加载方式对模型的极限弯矩值没有明显影响。将有延伸段模型作为计算船体局部框架极限强度的模型是更加符合实际情况的处理手段, 能得到更为准确的计算结果。

当计算模型选取两个相邻横框架之间的结构时, 在原有计算模型的两侧增加用于施加载荷和边界条件的延伸段, 并增加延伸段的板厚, 保证整体崩溃发生在所关注的原横框架之间, 这种方法能更好地模拟实际情况, 降低边界条件的影响。在相同网格大小和相同加载方式的有限元模型两端, 采用 2 种不同的边界条件 (见表 3), 计算结果见表 4, 相应边界条件下的极限强度破坏模式见图 6 和图 7。

表 3 端面 2 种边界条件

边界条件	线位移约束			角位移约束		
	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
端面左 MPC	Link	Link	Link	Link	Link	Link
端面右 MPC	Link	Link	Link	Link	Link	Link
简支边界条件	Cons	Cons	Cons	Cons	—	Cons
	—	Cons	Cons	Cons	—	Cons
一端简支, 一端固支	—	Cons	Cons	Cons	—	Cons
	Cons	Cons	Cons	Cons	Cons	Cons

注: Cons 表示对应的位移约束; Link 表示面内相关点位移与参考点连接

表 4 2 种边界条件计算结果

边界条件	极限弯矩值/(N·m)	相对误差/%
简支边界条件	9.48×10^9	0.88
一端简支, 一端固支	9.40×10^9	

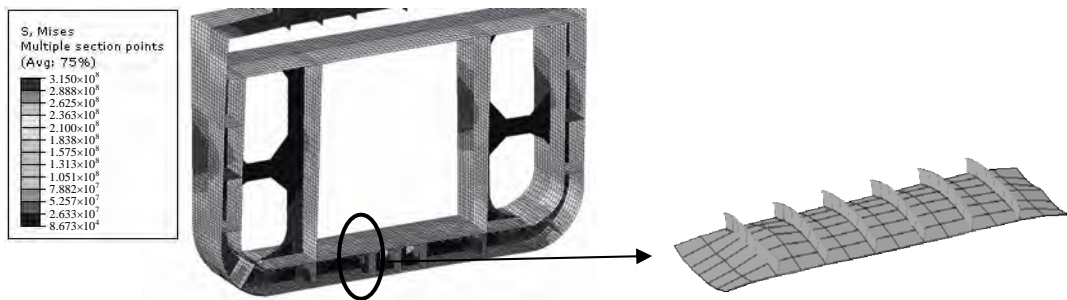


图 6 简支边界底部破坏模式

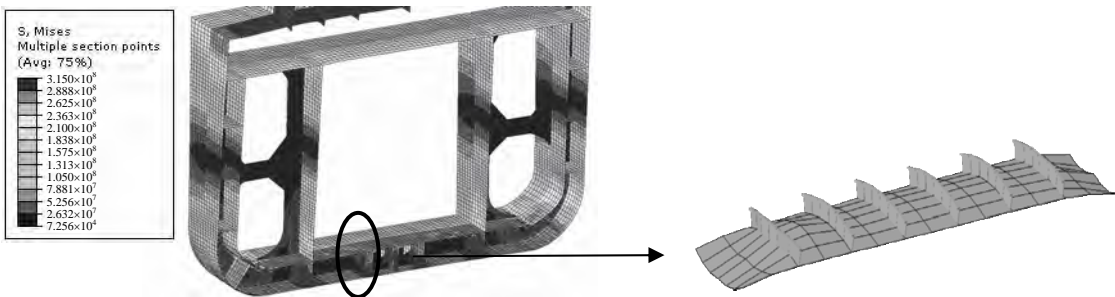


图 7 一端简支一端固支边界底部破坏模式

对比 2 种不同边界条件的计算结果可发现, 由于延伸段的存在, 模型中间核心段的极限弯矩值及其相

应极限状态下的破坏模式基本一致, 采用在有限元模型两侧增加延伸段的方法能有效消除边界条件对计算结果的影响, 使所关注区域结构的极限强度计算结果更接近于实船。在采用核心段两侧加延伸段的方式之后, 两侧边界条件采用简支或一端简支一端固支均可。

3 加载方式的影响

弧长法是增量非线性有限元分析中的一种由弧长控制, 在包含真实平衡路径的增量位移空间中利用 Newton-Raphson 迭代方法自动确定各增量步中满足力平衡方程的增量大小和加载方向的高级非线性追踪方法。在增量加载分析中, 加载方式可分为按载荷控制的加载和按位移控制的加载 2 种。对具有延伸段的 1/2 肋位模型分别采用按载荷控制的加载方式和按位移控制的加载方式进行极限弯矩的计算。

载荷控制方法是在一组给定的节点载荷增量下求解与其相应的节点位移增量; 要顺利计算得到目标结构的极限承载能力, 需经过多次试算来确定加载历程中的平衡路径。针对有延伸段的 1/2 肋位模型, 采用按载荷控制的加载方式, 采用简支约束条件, 向左右端面施加初始弯矩载荷 $M_0 = 1 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}$, 选取 5 个典型的载荷增量步进行极限弯矩值的计算, 计算结果见表 5 和图 8。

表 5 载荷控制加载方式计算结果

载荷步长	两端边界条件	初始载荷 $M_0/(\text{N} \cdot \text{m})$	极限弯矩值/ $(\text{N} \cdot \text{m})$
Step=0.02	简支约束	1×10^{10}	9.34×10^9
Step=0.03	简支约束	1×10^{10}	9.65×10^9
Step=0.04	简支约束	1×10^{10}	9.67×10^9
Step=0.05	简支约束	1×10^{10}	9.48×10^9
Step=0.06	简支约束	1×10^{10}	9.67×10^9

从计算结果中可看出, 在相同的初始载荷和边界条件下, 选取不同的初始载荷步长会对极限弯矩值的计算产生较大影响, 且不同的初始载荷步长有着显著的收敛性差异。某些初始载荷步长能平稳地接近或通过极限载荷峰值点, 而某些初始载荷步长则无法准确计算出极限载荷, 整个加载历程的平衡路径不稳定, 这可归因于在某些增量步的迭代过程中收敛性较差。

采用与按载荷控制的加载方式相同的有延伸段的 1/2 肋位单元网格模型, 在模型的一端施加转角位移, 在其另一端施加固支约束, 通过计算固定端的反作用弯矩来确定整个模型中各转角位移下的弯矩值。计算结果见表 6 和图 9。

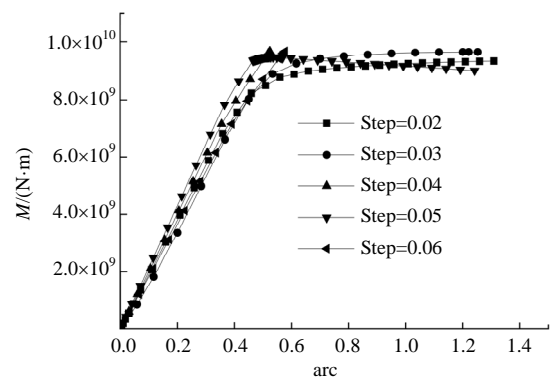


图 8 不同初始载荷步长的加载曲线

表 6 位移控制加载方式计算结果

转角步长	两端边界条件	初始转角 θ_0/rad	极限弯矩值/ $(\text{N} \cdot \text{m})$
Step=0.02	一端固支; 一端简支	0.01	9.43×10^9
Step=0.03	一端固支; 一端简支	0.01	9.45×10^9
Step=0.04	一端固支; 一端简支	0.01	9.42×10^9
Step=0.05	一端固支; 一端简支	0.01	9.40×10^9
Step=0.06	一端固支; 一端简支	0.01	9.42×10^9

从计算结果中可看出, 在采用按位移控制的加载方式时, 不同初始载荷步长下的极限弯矩的计算值都非常接近, 且每个初始载荷步长都能平衡、顺利地逼近结构载荷-位移曲线的峰值, 几条加载曲线所经历

的结构的平衡路径基本上是吻合的。

通过比较分析可知, 在结构形式复杂的情况下, 采用按载荷控制的加载方式计算需具有丰富的计算经验, 否则需经过多次试算, 计算效率较低。采用按位移控制的加载方式计算得到的结果离散程度较小, 计算效率较高, 推荐采用该方式进行计算。

4 侧向载荷的影响

船体梁载荷分为静水载荷和波浪载荷, 船体的极限破坏过程为船体在静水载荷下具有一个初始状态, 在此基础上叠加恶劣波浪载荷直至船体遭到破坏, 此时对应的极限载荷可认为是船体的极限承载能力。船体梁在不同载荷形式下的极限承载能力会有差异, 实际采用非线性有限元法计算极限弯矩时, 有不施加静水载荷而直接在舱段端部增加转角(这种方式比较简便)和施加静水载荷后在舱段端部增加转角 2 种加载方式。选取目标船典型的舱段建立有限元模型, 分别采用施加静水载荷和不施加静水载荷 2 种方式进行计算, 静水载荷采用散货船和油船共同结构规范(Common Structural Rules, CSR) 舱段强度分析中的加载方式加载, 此处不再详细描述静水载荷的施加过程, 计算选取一个舱长范围的舱段, 舱段有限元模型见图 10, 内外壳侧向载荷施加模型见图 11, 2 种加载方式模型计算结果见表 7。

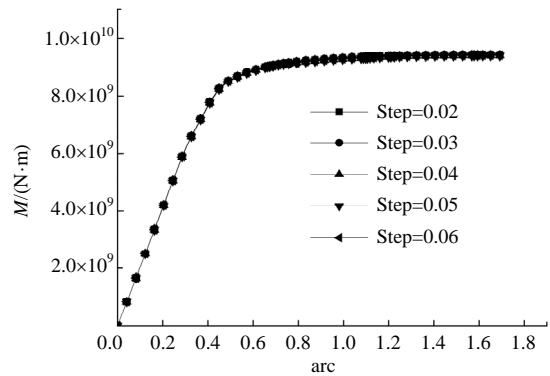


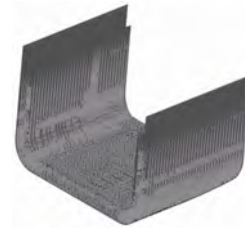
图 9 不同初始载荷步长的加载曲线



图 10 舱段有限元模型



a) 外壳加载



b) 内壳加载

图 11 内外壳侧向载荷施加模型

表 7 2 种加载方式模型计算结果

模型类型	极限弯矩值/(N·m)
纯舱段结构模型	9.29×10^9
静水载荷舱段模型	9.03×10^9

相对于施加侧向载荷的舱段模型, 纯舱段结构模型的计算由于不必考虑静水载荷的影响, 计算过程比较简便, 但计算结果偏大, 只能反映出船体结构在纯弯情况下的极限承载能力, 没有计及实际船舶在不同装载条件下的静水载荷对船体结构中应力分布的影响。此外, 纯舱段结构在极限状态下的破坏位置也会与实际情况有差别。由于实际舱段结构的薄弱剖面的位置不仅与船体结构有关, 而且会在不同载荷分布(局部载荷)的作用下发生变化, 因此有可能导致纯舱段结构模型发生极限状态破坏的位置与实际情况不同, 这会对运用非线性有限元方法预报实船的极限强度大小和破坏模式产生不利影响。在考虑静水载荷的影响后, 有限元模型舱段与实船舱段在相同的装载工况下具有近似的静水载荷分布, 能较为真实地模拟实船的初始变形和初始应力分布。在此基础上, 舱段的极限强度计算结果的可靠性和准确性更高, 计算结果相对安全。

5 结 语

通过采用非线性有限元法对目标船型的极限承载能力进行计算, 比较不同的单元网格大小、边界条件、加载方式和侧向载荷对计算结果的影响, 结果表明:

(下转第 48 页)

中小型 C 型罐 LNG 船甲板布置

周 伟

(大连中远船务工程有限公司, 辽宁 大连 116113)

摘要: 以 28000m³ C 型罐液化天然气 (Liquefied Natural Gas, LNG) 运输船“启元”轮为研究对象, 详细分析其甲板布置, 主要包括系泊布置、储罐 (钟形穹顶气室) 布置、集管区布置和船对船过驳布置等。研究各系统布置的合理性及优化的可行性。

关键词: C 型罐; LNG 船; 甲板布置

中图分类号: U674.133.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-4069 (2017) 06-0026-04

Deck Arrangement of Small-and Medium-Size LNG Carrier with Type C Independent Tank

ZHOU Wei

(COSCO Dalian Shipyard, Dalian 116113, China)

Abstract: Taking *QI YUAN*, a 28000m³ Liquefied Natural Gas carrier (LNG) with C type independent liquid cargo tanks, as the research object, this paper analyzes in detail the deck arrangement, including the mooring arrangement, tank DOME arrangement, manifold area arrangement, ship to ship transferring arrangement and etc. The arrangement rationality of each system and the feasibility of design optimization are studied.

Key words: type C independent tank; LNG carrier; deck arrangement

0 引言

近几年我国出台了多项针对新能源的政策, 大力扶持新能源的推广和应用。液化天然气 (Liquefied Natural Gas, LNG) 作为替代化石能源的主要清洁能源之一, 是我国目前能源产业发展的重中之重。目前国内已营运的 LNG 岸站有 14 座, LNG 年接收量可达 3750 万 t; 在建 LNG 岸站 7 个, 规划 LNG 岸站 15 个, 预计 LNG 年接收量将达 5760 万 t^[1]。虽然 LNG 岸站众多, 但运力不足是目前制约我国 LNG 产业发展的因素之一。C 型独立液货罐 LNG 船无须设置次屏壁, 船型结构简单, 建造周期短, 是目前我国沿海运输 LNG 采用的最为经济、实用的中转船型。

目前该船型主要有以下 2 种形式:

1) 将 C 型罐安置在货舱内, 主甲板是与油船/散货船一致的开敞式甲板, 甲板和舱室内布置所有功能性设施, 如“启元”轮及“海洋石油 301”号船;

2) 将主甲板设置成凸形甲板, LNG 液货传输设备集中布置在集管区内, 如鼎衡建造的 12000m³ 多用途 LNG 船。

“启元”轮为单机单桨、由双燃料主机驱动、带功率输出 (Power Take Off, PTO) 功能、独立 C 型罐 2G 型船, 营运于国际航线; 运载的 LNG 主要成分为甲烷, 设计货物密度为 0.50t/m³, 最小设计温度为 -164℃,

收稿日期: 2016-08-26

作者简介: 周伟, 男, 工程师, 1985 年生。2007 年毕业于大连理工大学船舶与海洋工程专业, 现从事船舶舾装设计工作。

设计压力为 0.35MPa。

本文以“启元”轮为研究对象，总结常见的中小型 C 型 LNG 船的布置特点，提出相应的优化方案。

1 主甲板布置

根据规范、规则^[2]的要求，LNG 船的甲板布置几乎与油船一致，包含救助、救生、安全、系泊、通风、透气、卸载、甲板管线、船对船过驳设备及登乘设施等；此外，LNG 船甲板还需布置甲板罐、蒸发气处理装置、废气燃烧装置、压缩机室及储罐钟形穹顶气室（DOVE）等。

“启元”轮全长 176.8m，垂线间长 166m，型宽 27.6m，型深 18.5m，设计吃水 7.8m，结构吃水 8m。该船为典型的瘦长型船，其长宽比相对较大；在船长方向上有足够的空间布置所需的各种设备设施；但其宽度有限，使得甲板布置十分困难，尤其是艏部系泊区域和船中集管装卸货区域（见图 1）。

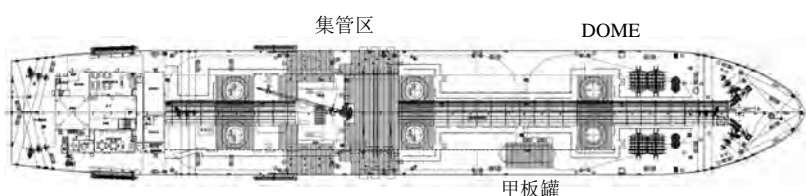


图 1 “启元”轮甲板布置图

2 艏部系泊区域

由于货物的特殊性，LNG 船在与 LNG 岸站连接时，是采用钢臂或软管与 LNG 岸站连接的。为保证安全，船舶系泊必须稳固，以减少系泊弹性，因此设置更多的系泊索是必要的，这就直接导致艏部必须布置更多的系泊件^[3]。此外，艏部区域一般还需配置苏伊士运河灯吊、应急拖曳装置、艏部水手长间的进出口（甲板房及物料舱口盖）及艏桅等。

然而，为满足 LNG 的多功能性和操作便利性，艏部一般还设有氮气间和艏侧推间，对通风的要求大大提高，由此艏部区域布置通风帽等也就成为必然，这更加剧了艏部空间的局限性。

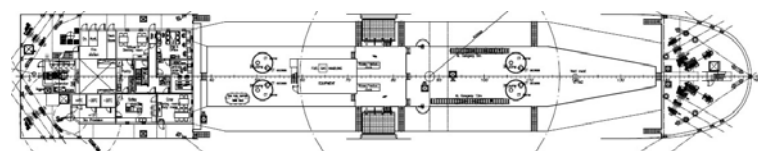


图 2 国外设计船型

“启元”轮目前延续了一般散货船的设计，将锚绞机和系泊设备布置在相对靠近艏部的位置处，甲板房和艏桅布置在相对靠后的位置处，并兼顾以上各点，从而导致艏部系泊操作和人员通行空间狭小。国外有设计将甲板房和艏桅尽量靠近艏部布置，将锚绞机布置在相对靠后的位置处，可在一定程度上将系泊区域和人员通行区域分离，保证操作和使用的安全性（见图 2）。

但是，从实用的角度和目前船型发展的情况看，艏部的布置可采用更好的方案：

1) 将艏部设计成一个抬升甲板，不设置甲板房，通过主甲板直接进入艏部房间；艏桅设置在抬升甲板尾部与主甲板相连，保证结构强度满足要求；锚绞机与各系泊件搭配设计，充分利用整个抬升甲板及其空间高度；艏部水手长间的物料舱口与应急拖曳防擦链放置箱前后布置，苏伊士运河灯吊则兼顾防擦链的存放和水手长间内部物料的吊运。由于已设置抬升甲板，通风设施完全可布置在舱室舱壁上，以进一步减少甲板通风帽所占用的系泊空间。

2) 建议船东将系泊索由普通的涤丙混合缆改为石油公司国际海事论坛推荐的超高分子量聚乙烯缆^[4]，从而减小艏部组合锚绞机的尺寸，保证左右两舷的安全空间；其他布置无需更改。

第 2 种方案虽然会导致成本提高，但更利于船舶在码头停泊装卸货。

3 艏部系泊区域

在“启元”轮初始设计阶段，船东没有考虑需安装废气燃烧装置，艏部 2 个系泊绞车出绳相互交叉，

并配有艏部应急拖曳装置和自由降落式救生艇；交叉出绳的系泊布置占据艏部绝大部分空间，使得缆索舱口盖和舵机房逃生舱口盖只能穿插布置在不阻挡缆绳出绳的狭小空间内；而应急拖曳防擦链储存箱紧贴在生活区尾部的舱壁上，这会占用有限的逃生通道，使用和回收相对困难。之后增加的废气燃烧装置直接覆盖艏部整层甲板，设置为悬空舱室，舱室支撑有可能阻碍特定位置处的系泊出绳。

国外有设计将系泊绞车的布置角度调大，将交叉出绳方式改为非交叉方式；同时，将船中区域完全节省出来布置缆索舱口盖、舵机房逃生舱口盖及应急拖曳装置等，并保证艏部逃生通道得到合理布置。废气燃烧装置布置在机舱棚区域，合理利用生活区与机舱之间的空间。

4 储罐 DOME 区域

相较于其他船舶，“启元”轮上比较特殊的区域是甲板面上的储罐 DOME 区域。单个圆柱形罐体必须具有一个 DOME 作为液罐内货物传输的进出口，DOME 上带有液货管、蒸汽管、喷淋管、取样管、扫舱管、液位遥测、温度遥测、压力遥测及深井泵等设施，因此每多 1 个 DOME 就必然会增加 1 套完整的系统，这就意味着会占用整个 DOME 区域的甲板空间。“启元”轮采用的是双圆柱形（又称双耳形）液货罐，因此需 2 个 DOME，这 2 个 DOME 自成一个完整的功能性区域，各种管线布置汇合到船中管廊上。DOME 与船体之间采用 Σ 型橡胶连接，可保证罐体在 6 个自由度上的位移。

5 甲板罐区域

LNG 在运输过程中会不断产生蒸发气，这部分气体若得不到及时处理，会导致储罐压力过高而发生危险；LNG 作为一种能源，运营方一般不会随意浪费，因此会考虑采用双燃料主机或 LNG 气体燃料主机，从而使 LNG 蒸发气作为动力燃气得到应用。因此，会在甲板上设置甲板罐，作为燃料罐及缓冲罐^[5]。甲板罐是一个相对独立的系统，可将其视为独立的整体单元，合理地布置在甲板上即可，但需考虑甲板罐靠近舷侧的维修检验空间和照明。

6 集管区

集管区是 LNG 船上最重要的一个功能性区域，包含压缩机室、集管区平台、液货管吊车和码头梯平台等。“启元”轮上集管区的布置是将压缩机室与集管区平台分离成 2 个单独的区块，集管区平台位于压缩机室首部，中间用液货管吊车分隔。

压缩机室一般为非封闭式甲板房间；在“启元”轮初始设计阶段未确定软管数据，压缩机室两侧的空间仅考虑作为一般杂物间，后期无法储存大弯曲半径的低温软管，只能将其放置在生活区内部的房间内，使用时搬至集管区域。因此，设计时应将压缩机两侧空间释放成独立的甲板储藏室，或采取偏置式设计将压缩机室设置在偏左右舷，而另一舷可设计成完整的甲板储藏室，用于安全、有效地储存低温软管。

“启元”轮将集管区平台放置到压缩机室前部，形成独立的装卸货区域。由于国内目前建设的 LNG 岸站基本上都是按照停泊 80000m³ 以上的 LNG 船设计建造的，中小型 LNG 船靠泊岸站码头时，其装卸货管口与码头卸货臂的相对位置会受到极大的约束；“启元”轮综合各 LNG 岸站的数据后，将卸货口设定在高于主甲板 7000mm 的高度才满足 LNG 各岸站的要求。因此，整个装卸货区域设置了一层高于主甲板 6000mm 的操作平台。

软管吊布置在压缩机室与集管区平台之间，需预留一定的旋转空间；集管区卸货口上方有喷淋管线；吊臂下平面需高于软管吊和喷淋管线，以实现 360° 全回转的功能。

对集管区影响最大的是码头梯平台。以往的货船设计，或用舷梯或用跳板作为船岸连接人员通行的主要通道；但 LNG 岸站码头不同于常规设计，其在卸货臂附近单独匹配一个电动液压单臂式码头梯，可实现垂直升降和小角度旋转，这就限定了中小型 LNG 船必须在集管区附近设置一个平台，满足码头梯的停靠及人员通往船舶各区域的需求。因此，“启元”轮在集管区平台艏部的压缩机室左右舷侧各设置一个 10m×7m 的码头梯平台。这样原本仅有的甲板空间就被压缩机室、集管区平台及码头梯平台完全遮挡住，

这就意味着甲板上的吊运区域被完全遮挡，甲板的吊运功能和储物放置功能受到一定的限制。

凸形甲板的设计既可降低钢板用量，又能使左右两舷形成人员通道；同时，凸形甲板的斜边可作为放置护舷、软管、异径短管接头及跳板等设备的空间，既不影响人员通行，又在软管吊车覆盖范围之内，操作几乎不受影响。

国外有设计将吊车布置在集管区平台艏部，这样将使软管吊首部空间得到完全释放。凸形甲板在空间上存在一定的优势，压缩机室布置在凸顶甲板上，而集管区平台则布置在主甲板上，这种错落的布置可减少集管区在船长方向上占用的空间，软管吊车即使布置在整个集管区平台艏部，也无需增加吊臂长度。同样，虽然必须设置码头梯平台，但码头梯平台与压缩机室几乎是一体的，占用的是凸形甲板斜边区域，不影响吊车的正常使用。

7 船对船过驳区域

“启元”轮兼具船对船过驳功能，即可在海上完成液态货物装卸^[6]。“启元”轮采用 4 个 $\phi 3.3\text{m} \times 4.5\text{m}$ 和 2 个 $\phi 1.5\text{m} \times 3.0\text{m}$ 的 YOKOHAMA 型橡胶护舷作为 2 艘过驳船之间的能量吸收体及隔离体^[7]，3 个不锈钢鞍座作为货物软管行径载体。由于 LNG 甲板属于危险区域，要求橡胶护舷本身不产生静电或火花，且在甲板上的固定件也必须牢固、不产生火花或静电，因此将原护舷外表面轮胎绑扎链改为涤丙混合缆，端头钢环上涂聚脲涂料，固定用的钢丝绳外包 PVC 绝缘材料，全方位保证不产生火花或静电。船中 4 个主护舷按照船方要求采用并联加串联的方式悬挂在舷侧（见图 3）。

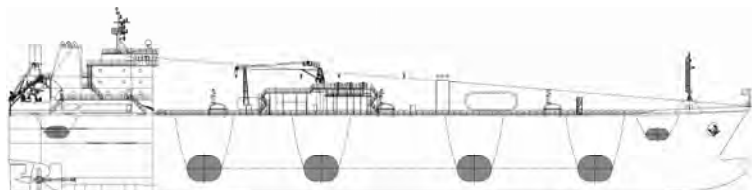


图 3 “启元”轮橡胶护舷布置图

由于集管区空间有限，不足以再布置 6 个护舷，因此将这些护舷放置到艏部货舱甲板上，这样将使得吊车无法直接吊运橡胶护舷，只能通过间接方式将护舷拖移到位。若将软管吊布置到集管区平台艏部，则可解决该问题。

LNG 在过驳时仍处于低温状态，过驳的软管也处于低温状态，由于低温脆性会破坏甲板及舷侧外板，因此操作平台需延伸至舷侧，在货物软管行径上增加不锈钢鞍座，部分鞍座延伸至舷外，以保证货物传输过程中软管不与甲板或舷侧外板接触，避免对材料产生低温脆性破坏。

8 结 语

“启元”轮和“海洋石油 301”号船是目前我国自主设计并建造的 C 型罐 LNG 船，其中“启元”轮的甲板布置可满足国际上绝大多数码头的停泊与装卸货需求；同时，“启元”轮是当今世界上为数不多的可实现船对船过驳的 LNG 船，也是功能相对完善的 LNG 船之一。

本文根据实际的设计、建造经验，整理出艏艙系泊区域、储罐 DOME 区域、集管区及船对船过驳区域布置的重点和难点，通过对国内外相关设计船型进行对比，给出相对应的解决和优化方案，为后续中小型 LNG 船的设计提供实船参考。

【参 考 文 献】

- [1] 孙家庆, 孙倩雯, 李沛泽. 我国 LNG 码头建设现状与对策建议[J]. 中国港口, 2016 (3): 5-8.
- [2] 中国船级社. 散装运输液化气体船舶构造与设备规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- [3] 陈汝夏, 王立国, 刘涛. Q-MAX 型 LNG 船舶系泊方案[J]. 油气储运, 2012, 31 (Z1): 9-13.
- [4] OCIMF. Mooring equipment guidelines[M]. 3rd ed. Witherby Seamanship International, 2008.
- [5] 张黎. 小型 LNG 加注船的总体设计思路[J]. 船舶与海洋工程, 2015, 31 (2): 17-21.
- [6] 顾祖旭. LNG 船对船过驳作业碰垫配置研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2015.
- [7] ICS. Ship to ship transfer guide (liquefied gases) [M]. 2nd ed. London: Witherby & Co., Ltd., 1995.

DOI: 10.14056/j.cnki.naoe.2017.06.007

轮机与辅机

大型 LNG 船回气压缩机运行工况点分析

刘 涛, 岑卓伦, 徐岸南

(沪东中华造船(集团)有限公司, 上海 200129)

摘要: 以某大型液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG) 船的运用和设计参数为依据, 基于 LNG 装卸货工艺流程, 采用状态方程法研究气液态天然气和惰性气体的物性参数。分析装货过程中回气压缩机(Vapor Return Compressor, VRC) 处理过程气体所需的负荷, 确定回气压缩机的最大处理能力。根据气体置换、货舱初始冷却及货舱升温的工艺流程的设计, 分析回气压缩机在不同工艺流程下的运行工况点。运行工况点的确立可为大型 LNG 船回气压缩机的设计提出基本技术指标要求。

关键词: 大型液化天然气船; 挥发气; 回气压缩机; 运行工况点

中图分类号: U671.99; U664.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-4069 (2017) 06-0030-06

Analysis on the Vapor Return Compressor Operating Point of Large LNG Carriers

LIU Tao, CEN Zhuo-lun, XU An-nan

(Hudong-Zhonghua Shipbuilding (Group) Co., Ltd., Shanghai 200129, China)

Abstract: Based on the operation and design parameters of a large Liquefied Natural Gas (LNG) carrier, the state equation method is used to study the physical parameters of the gas-liquid natural gas and the inert gas. The load required for the Vapor Return Compressor (VRC) to treat the process gas during cargo loading is analyzed so as to determine its maximum treatment capacity. Then the operating points of the VRC under different technological process are analyzed according to the process design of gas displacement and the initial cooling and heating-up of cargo tank. The establishment of the operating points can provide the basic technical specification requirements for the design of VRC of large LNG carriers.

Key words: large LNG carrier; vapor; vapor return compressor; operating point

0 引 言

大型液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG) 船是运输 LNG 的重要工具, 在运营期间, 装货、货舱加热、气体置换及货舱初始冷却等工艺流程中将产生大量的天然气、氮气及惰性气体, 为维持液货舱压力的稳定, 必须将过量的过程气体通过回气压缩机输送到岸站处理。回气压缩机作为过程气体处理的核心设备, 在大型 LNG 船运营过程中发挥着重要作用。大型 LNG 船回气压缩机的设计涉及液货围护系统热容量、装卸货工艺流程、所处理货物的物性参数及岸站兼容性(岸站设备、管系)等因素。挥发气(Boil-Off Gas, BOG) 的挥发量是大型 LNG 船回气压缩机运行工况点分析的重要影响因素。吕俊等^[1]和吕寻贞等^[2]分别研究 LNG 接收站 BOG 产生量的各种影响因素, 进行蒸发量的波动分析, 为岸站回气压缩机的选择提

收稿日期: 2016-10-31

基金项目: 工信部高技术船舶科研项目(Z1215E01)

作者简介: 刘涛, 男, 高级工程师, 1983 年生。2013 年毕业于上海交通大学轮机工程专业, 现从事船舶动力装置开发设计工作。

供依据;李亚军等^[3]根据LNG接收站BOG的挥发量,对接收站回气压缩机进行运行工况点分析和选型研究。然而,目前对大型LNG船回气压缩机运行工况点进行的分析研究较少。

本文以目前较为常见的配备有气体燃烧单元和再液化装置的大型LNG船为例,分析其回气压缩机的运行工况点,为回气压缩机的设计提出基本技术指标要求。

1 LNG物性参数计算

大型LNG船在装货过程中需进行一系列的工艺流程操作^[4]。回气压缩机的主要功能有:装载货时将BOG输送到岸站;货舱初始冷却时将BOG输送到岸站;货舱加热时用于BOG的循环;气体置换时输送惰性气体与天然气的混合物。

回气压缩机的运行工况点及选型设计涉及气液态天然气和惰性气体混合物的物性参数计算,这些参数包括混合物密度、定压热容、焓值及气化潜热等。对于LNG这样的多组分混合物,其热力学性质的确定比较复杂,往往还需求解多组分相平衡的问题。确定LNG的热物性是一项复杂的工作,通过试验法获得的试验数据有着很高的可靠性,但这些数据或是在狭窄的温度、压力区域内获得,或是在气相(或液相)的单一相态中获得,或是从某固定组成的混合物中获得,因此适用范围有限。由于货舱中LNG的热物性是随着温度、压力和组分的变化而改变的,因此需建立相应的数学模型来准确估算不同时刻的热物性。

1.1 状态方程的选用

本文在计算天然气热力学性质时,采用油气处理工艺模拟中应用较为广泛的立方型状态方程中的PR方程,其形式为

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a\alpha}{V^2 + 2bV - b^2} \quad (1)$$

式(1)中: R 为理想气体常数; V 为气体摩尔体积; T 为气体温度; P 为气体压力。

1.1.1 单组分参数

单组分参数表示为

$$a_i = \frac{0.45724R^2T_{ci}^2}{P_{ci}} \quad (2)$$

$$b_i = \frac{0.0778RT_{ci}}{P_{ci}} \quad (3)$$

$$\alpha_i = \left[1 + 0.37464 + 1.54226\omega_i - 0.26992\omega_i^2 (1 - T_r^{0.5}) \right]^2 \quad (4)$$

式(2)~式(4)中: T_c 为临界温度; P_c 为临界压力; T_r 为对比温度; i 为某一组分。

1.1.2 多组分混合

所采用的混合法则为

$$(a\alpha)_{ij} = (1 - k_{ij}) \sqrt{(a\alpha)_i (a\alpha)_j} \quad (5)$$

$$a\alpha = \sum \sum x_i x_j (a\alpha)_{ij} \quad (6)$$

$$b = \sum x_i b_i \quad (7)$$

式(5)~式(7)中: x_i 为混合物中各组分的物质质量浓度; k_{ij} 为二元交互系数,文献[2]中已通过试验得出PR方程中LNG混合物的二元交互系数(见表1)。

表1 PR方程中LNG混合物的二元交互系数

混合物组分	N ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀
N ₂	0	0.02	0.12	0.12	0.12
CH ₄	0.02	0	0	0	0.02
C ₂ H ₆	0.12	0	0	0.01	0.01
C ₃ H ₈	0.12	0	0.01	0	0.01
C ₄ H ₁₀	0.12	0.02	0.01	0.01	0

1.1.3 多元系相平衡计算

多元系相平衡与单元系相平衡有本质区别。对于单元系，各相的成分始终是单一的；但对于多元系，处于平衡的各相的成分一般是不同的，且在不同的平衡条件下各相的成分一般也是不同的。相平衡条件可定义为

$$\phi_i^l x_i = \phi_i^v y_i \quad (8)$$

式(8)中： x_i ， y_i 分别为液相、气相中*i*组分的摩尔分数； ϕ_i^l ， ϕ_i^v 分别为液相、气相中*i*组分的逸度系数。本文采用状态方程法求解逸度和逸度系数，计算式为

$$\ln \phi_i = \frac{b_i}{b}(Z-1) - \ln(Z-b) + \frac{a}{2.828b} \left[\frac{b_i}{b} - \frac{2}{a\alpha} \sum y_i(a\alpha)_{ij} \right] \ln \left[\frac{Z+2.414b}{Z-0.414b} \right] \quad (9)$$

式(9)中： Z 为压缩因子。

在求解多元系相平衡过程中，首先通过分压初值求解各组分的摩尔体积和逸度系数、内层迭代组分的摩尔分数及外层迭代压力，一般将迭代残差小于 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 作为收敛条件^[4]。

1.2 各工艺流程下物性参数的计算

不同工艺流程下物性参数的计算使用 ASPEN PLUS^[5]进行，选择 PR 状态方程。对于 LNG，输入如表 1 所示的二元交互系数^[6]。

1.2.1 装载工况

大型 LNG 船在装货过程中，通过回气压缩机将货舱压力控制在 $1.06 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，表 2 给出某大型 LNG 船运输的 LNG 在相平衡状态下的物性参数。

表 2 某大型 LNG 运输船运输的 LNG 在相平衡状态下的物性参数

组分	液相质量分数/%	气相质量分数/%	定压热容/(J/(kg·K))
N ₂	0.86	20.84	1.935
CH ₄	74.93	79.09	
C ₂ H ₆	13.25	0.07	
C ₃ H ₈	8.06	—	
C ₄ H ₁₀	2.91	—	

注：状态方程：PR， $1.06 \times 10^5 \text{ Pa}$ ， -161.7°C

从货舱液面蒸发的气态天然气在通过气穹和甲板 BOG 管道进入回气压缩机之前被环境加热到 -140°C ^[7]，该过程近似为定压流动过程，天然气气体组分不变，根据状态方程计算在组分不变的情况下将自然 BOG 加热到 -140°C 时的密度和定压热容（见表 3）。

表 3 在 $1.06 \times 10^5 \text{ Pa}$ 定压下自然 BOG 物性参数

参数	密度/(kg/m ³)	定压热容/(J/(kg·K))
-140°C 自然 BOG	1.722	1.907
20°C 自然 BOG	0.768	1.950

1.2.2 货舱升温过程

货舱升温过程是首先将货舱中剩余的天然气（不考虑 LNG 运输过程中的老化）通过回气压缩机输送给加热器加热；加热器输出后，通过 BOG 总管输送到气穹。回气压缩机进口温度初始为 -140°C ，最终为 20°C 。

货舱在进行惰化和通风之前要加热到环境温度，以防止惰性气体中的 CO₂ 凝结成干冰损坏货舱的殷瓦薄膜和阻塞液货系统管道。货舱加热分为 2 部分，首先是没有完全泵出的 LNG 在舱压下蒸发，此时 BOG 物性见表 4。在完成 LNG 蒸发后，使用回气压缩机和加热器循环加热天然气，进行货舱加热操作。回气压缩机将低温的天然气从货舱中抽出，并送入加热器加热至 80°C ，通过注入管送至货舱底部。

表4 强制蒸发到 -140°C 的天然气的物性参数

组分	液相质量分数/%	气相质量分数/%
N_2	0.001	1.160
CH_4	9.420	96.990
C_2H_6	47.110	1.850
C_3H_8	31.910	—
C_4H_{10}	11.550	—
密度/(kg/m^3)	611.290	1.834

注: 状态方程: PR, $1.06 \times 10^5 \text{ Pa}$, -140°C

1.2.3 气体置换过程

在进行货舱冷却之前,用天然气替换货舱中的惰性气体。由LNG岸站供应的LNG经过LNG蒸发器蒸发,LNG蒸发器出口温度控制在 20°C ,通过BOG总管输送到气穹,利用活塞效应和回气压缩机将货舱中的惰性气体通过液体总管输送至岸站,惰性气体的物性参数见表5。

表5 在 $1.06 \times 10^5 \text{ Pa}$ 压力下惰性气体的物性参数

组分	N_2	CO_2	密度/(kg/m^3)	定压热容/($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)
质量分数/%	79.120	20.880	1.281	1.010

注: 状态方程: PR, $1.06 \times 10^5 \text{ Pa}$, 20°C

气体置换过程中LNG在 20°C 时强制蒸发, 20°C 已超出 $1.06 \times 10^5 \text{ Pa}$ (舱压)下LNG的泡点,因此蒸发出的天然气成分与蒸发前的成分相同。气体置换过程使用的 20°C 强制蒸发的天然气的物性参数见表6。

表6 强制蒸发的天然气的物性参数

温度/ $^{\circ}\text{C}$	-2	20	80
密度/(kg/m^3)	0.879	0.812	0.673

注: 状态方程: PR, $1.06 \times 10^5 \text{ Pa}$

1.2.4 初始货舱冷却

货舱初始冷却可利用可控的温度变化率来降低货舱舱壁、泵塔及绝缘层空间的温度,进而降低装货过程中的热应力和装货中BOG的量。岸站输送的液态LNG经喷淋总管,经液穹处的喷嘴喷入货舱中,喷嘴进口压力为 $(2\sim 3) \times 10^5 \text{ Pa}$,喷淋率达 12.7 t/h ,快速的喷淋过程类似于强制蒸发。该过程物性参数的计算与强制蒸发过程计算相同。

2 各工艺流程下返岸压缩机工况点分析

2.1 装载过程回气压缩机工况点分析

在装载LNG进入液货舱时,会导致液货舱内LNG的体积发生变化;同时,绝缘层冷却、岸站泵电机运转、输送管系及装卸臂漏热等外界能量的输入会产生大量的BOG。为维持储罐压力的稳定,必须使用回气压缩机将过量的BOG输送至岸站处理。

2.1.1 装载过程LNG替代BOG的体积流量 V_1

装载LNG时,液态LNG占据原有BOG的空间,将其排出货舱,单位时间内的排出量等于单位时间内LNG的装载量。某大型LNG船在 -140°C , $1.06 \times 10^5 \text{ Pa}$ 下将回气压缩机进口的体积流量设计为 $12000 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

2.1.2 装载过程中绝缘层冷却产生的BOG体积流量 V_2

装货是在货舱冷却之后进行的,货舱初始冷却时平均温度为 -130°C ,货舱绝缘层空间平均温度为 -5°C ,远高于液货装货率在98.5%时的绝缘层温度。这部分温差将导致装货时液态LNG挥发。通常情况

下, 根据船舶建造和运营经验, 这部分热负荷为绝缘层总热容量的 30%~40%。某型 LNG 船绝缘层系统的热容量为 416629MJ^[8], 货舱初始冷却后按剩余 30%热负荷用于产生 BOG 计算, 在规定的 14.5h 装货时间内, 每小时产生的 BOG 为 16689kg。BOG 在-140℃, 1.06×10⁵Pa 下回气压缩机进口的体积流量 $V_2=9100\text{m}^3/\text{h}$ 。

2.1.3 装载过程外界环境漏热量产生的 BOG 体积流量 V_3

与装载航行相比, 装载过程中由于液货量随时间变化, 相比 98.5%的填充量, LNG 与外界环境的对流换热系数远大于 BOG 与外界环境的对流换热系数, 因此装载过程中从外界环境输入的热量要远小于满载货物时输入的热量(根据建造和运营经验, 约为满载运营时的 40%~60%)。某大型 LNG 船设计挥发率为 5322kg/h, 装载过程漏热量按满载运营时 50%热负荷计算, BOG 在-140℃, 1.06×10⁵Pa 下的回气压缩机进口的体积流量 $V_3=1451\text{m}^3/\text{h}$ 。

2.1.4 甲板管系、岸站管系、LNG 液货泵及装卸臂漏热量产生的 BOG 体积流量 V_4

装载过程中, LNG 使用 LNG 液货泵, 通过岸站管系、LNG 装卸臂和甲板管系输送到 LNG 船货舱。LNG 液货泵、岸站管系、甲板管系及装卸臂的热负荷主要取决于岸站的设计。对于与某岸站配套的大型 LNG 船, 其液货泵、岸站管系、装卸臂及甲板管系的热负荷达到 7180kW, 按照表 2 中液态 LNG 的组分计算, 每小时可产生的 BOG 为 49681kg。BOG 在-140℃, 1.06×10⁵Pa 下的回气压缩机进口的体积流量为 27809m³/h。

回气压缩机设计应考虑最恶劣的工况, 装载工况下回气压缩机处理的气体量为上述 4 种负荷之和。

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \quad (10)$$

以上述大型 LNG 船为例, 总负荷为 49641m³/h, 可采用 2 台回气压缩机, 单机设计负荷余量 40%。圆整后可选择单台回气压缩机设计体积流量为 36000m³/h。

基于岸站管系及火炬塔的要求, 回气压缩机排压最低为 2.0×10⁵Pa。因此, 在装载工况下采用绝热压缩机, 回气压缩机设计工况点的基本要求见表 7。

表 7 装载工况下回气压缩机设计工况点的基本要求

参数	进口温度/℃	进口压力/Pa	天然气密度/(kg/m ³)	进口质量流量/(kg/h)	进口体积流量/(m ³ /h)	出口压力/Pa	出口温度/℃	出口天然气密度/(kg/m ³)	出口体积流量/(m ³ /h)
数值	-140	1.06×10 ⁵	1.834	54621	29785	2.0×10 ⁵	-117	2.969	18398

2.2 货舱升温过程回气压缩机设计工况点

装载过程是大型 LNG 船运营过程中最为常用的操作流程, 应根据装载过程设计回气压缩机的最大负荷。根据该最大负荷设计回气压缩机在其他工况下的工况点。根据货舱升温的工艺流程要求, 为保证次级绝缘层温度 >-10℃, 货舱气体循环 13 次, 循环 40h。回气压缩机出口压力为 1.6×10⁵Pa。

2.2.1 货舱升温初始阶段回气压缩机设计工况点

在货舱升温的初始阶段, 由于 BOG 为低温气体, 其密度较大, 回气压缩机设计流量为压缩机最大负荷的 60%。因此, 在货舱升温初始阶段采用绝热压缩机, 回气压缩机设计工况点的基本要求见表 8。

表 8 货舱升温初始阶段回气压缩机设计工况点的基本要求

参数	进口温度/℃	进口压力/Pa	天然气密度/(kg/m ³)	进口质量流量/(kg/h)	进口体积流量/(m ³ /h)	出口压力/Pa	出口温度/℃	出口天然气密度/(kg/m ³)	出口质量流量/(kg/h)
数值	-140	1.06×10 ⁵	1.722	34091	19800	1.61×10 ⁵	-124	2.348	14519

2.2.2 货舱升温结束阶段回气压缩机设计工况点

在货舱升温的结束阶段, 由于 BOG 为高温气体, 其密度较小, 回气压缩机设计流量为压缩机最大负荷的 100%。因此, 在货舱升温结束阶段采用绝热压缩机, 回气压缩机设计工况点的基本要求见表 9。

表9 货舱升温结束阶段回气压缩机设计工况点的基本要求

参数	进口温度/℃	进口压力/Pa	天然气密度/(kg/m ³)	进口质量流量/(kg/h)	进口体积流量/(m ³ /h)	出口压力/Pa	出口温度/℃	出口天然气密度/(kg/m ³)	出口质量流量/(kg/h)
数值	20	1.06×10 ⁵	0.812	26792	33000	1.61×10 ⁵	48	1.126	23785

2.3 气体置换过程回气压缩机设计工况点

根据气体置换过程的工艺流程要求,为保证货舱中CO₂体积百分比<1%,货舱气体循环1.7次,循环23h。气体置换过程中,经回气压缩机输出的气体输送到岸站处理,其出口压力为2.0×10⁵Pa^[9]。回气压缩机单位时间内处理的气体量 of 总的气体处理量除以循环时间。根据工艺流程,使用20℃的BOG置换表5中的惰性气体。气体置换过程回气压缩机设计工况点的基本要求见表10。

表10 气体置换过程回气压缩机设计工况点的基本要求

参数	进口温度/℃	进口压力/Pa	天然气密度/(kg/m ³)	进口质量流量/(kg/h)	进口体积流量/(m ³ /h)	出口压力/Pa	出口温度/℃	出口天然气密度/(kg/m ³)	出口质量流量/(kg/h)
数值	20	1.06×10 ⁵	1.318	16777	12729	2.0×10 ⁵	76	2.086	8044

2.4 货舱初始冷却过程回气压缩机设计工况点

货舱初始冷却过程采用定常流量向货舱喷入LNG液体,在保证舱压的前提下,由于喷入LNG液体气化的初始温度最高,其密度最小,因此在整个货舱初始冷却的过程中,在第1个小时回气压缩机需处理的BOG量最大。假设回气压缩机排出的气体量由喷入的LNG液体气化提供,排出量等于喷入的LNG气化为第1小时内货舱平均温度时的体积减去原货舱中BOG缩小的体积。以上述某大型LNG船为例,根据其工艺流程设计,每小时喷入的LNG量为12.7t。货舱的起始温度为20℃,1h后货舱的平均温度为-24℃,1h内货舱的平均温度为-2℃。根据表6的数据,货舱初始冷却过程的第1小时货舱超出的BOG为20766kg,体积流量为23634m³/h。因上述设计采用的是1h内的平均法,采取设计安全系数1.25。设计货舱BOG温度余量为10℃。采用绝热压缩机设计,初始货舱冷却过程回气压缩机设计工况点的基本要求见表11。

表11 初始货舱冷却过程回气压缩机设计工况点的基本要求

参数	进口压力/Pa	天然气密度/(kg/m ³)	进口质量流量/(kg/h)	进口体积流量/(m ³ /h)	出口压力/Pa	出口温度/℃	出口天然气密度/(kg/m ³)	出口体积流量/(m ³ /h)
数值	1.06×10 ⁵	0.847	25035	29542	2.0×10 ⁵	50	1.39	18005

3 结 语

回气压缩机是大型LNG船装卸货系统的重要组成设备。本文梳理了大型LNG船回气压缩机的设计流程。根据回气压缩机在大型LNG船上的功能,采用PR状态方程法计算了回气压缩机在不同工况下需处理的气体的热物性参数,详细计算了回气压缩机在不同工况下需输送的气体和压缩机出口排压,对压缩机制造商设计经济、高效,并能在各典型工况点远离喘振区的回气压缩机提出了技术指标要求。

【参 考 文 献】

- [1] 吕俊,张昌维,傅皓.LNG接收站BOG压缩机处理能力计算及选型研究[J].化工设计,2011,21(1):14-16.
- [2] 吕寻贞,张磊,李亚军,等.LNG接收站BOG蒸发量及波动性分析[J].低温工程,2014(2):70-76.
- [3] 李亚军,夏岩.LNG接收站BOG蒸发量的影响因素及稳定性[J].低温工程,2012(4):70-76.
- [4] 宋斌杰.低温液体储罐无损储存的规律研究[D].上海:上海交通大学,2008.
- [5] 孙义兰.化工流程模拟实训—Aspen Plus教程[M].北京:化学工业出版社,2012.
- [6] 石玉美.混合制冷循环液化天然气流程的热力研究[D].上海:上海交通大学,1998.
- [7] GTT. Evolution of boil off gas temperature between gas dome and boil off gas compressors[R]. France: GTT, 2014.
- [8] GTT. Insulation system heat capacity analysis[R]. France: GTT, 2013.
- [9] GTT. CHS gas test procedures[R]. France: GTT, 2014.

一种新型船舶节能设备 ——门式艏侧推盖的探索

吴安, 王忠强, 孔明敏

(沪东中华造船(集团)有限公司, 上海 200129)

摘要: 介绍一种新型船舶节能设备——门式艏侧推盖装置的应用和研发探索过程。从艏侧推延伸筒体两端常规配置的保护格栅到外置的盖板, 不断进行优化探索, 最终找到一种既能实现节能减排, 又可方便操作的门式艏侧推盖装置。

关键词: 节能; 船舶; 门式艏侧推盖

中图分类号: U661.31⁺³

文献标志码: A

文章编号: 2095-4069(2017)06-0036-03

Exploration of a New Type of Energy-Saving Device for Ships —Door-Type Bow Thruster Cover

WU An, WANG Zhong-qiang, KONG Ming-min

(Hudong-Zhonghua Shipbuilding (Group) Co., Ltd., Shanghai 200129, China)

Abstract: This paper introduces the application and the exploration of a new type of ship energy saving device—the door-type bow thruster cover equipment. From the conventionally used gratings that extend from the bow thruster tunnel at two ends to the external cover plates, the design is continuously optimized and explored. And eventually is found the door type bow thruster cover device that will not only save energy for ships but also operate conveniently.

Key words: energy saving; ship; door-type bow thruster cover

0 引言

随着国际贸易和航运业的不断发展, 航运业温室气体排放量和能源消耗量不断增加, 而近年来频发的全球能源危机和不断上涨的燃料成本促使节能减排成为世界各大航运公司的主要任务之一。研究潜在的节能技术、减少能源消耗, 不仅可降低对环境的污染, 还可为航运企业节约燃料成本。

船舶进港过程中, 随着航速的逐渐降低, 操舵产生的舵力转船力矩逐渐减小, 控制航向的能力逐渐变差。为解决该问题, 提出一种产生转船力矩的方法, 即在船上安装侧推装置, 简称侧推器。

侧推器也称横向舵、横向喷流舵, 安装在艏艉部较低处, 以便在船舶低速航行时与布置在艏部的常规舵协作完成专项操作, 在船舶停车或后退时获得较好的控向性能。侧推器适用于靠泊操纵及离泊操纵频率较高的船舶, 如滚装船、大型客船、大型集装箱船及部分成品油船和化学品船等。由于艏部有螺旋桨和舵设备, 艏侧推器的安装工艺较为复杂, 且成本相对较高, 故侧推器大多安装在艏部(见图1)。

船舶安装的侧推器大多数为隧道式推进器。该侧推器工作时, 利用布置在横向导管中的螺旋桨产生的推力实现船舶改向。侧推装置的螺旋桨推进器一般放置在横贯船体的导筒内, 导筒一直延伸至船舶两舷外板, 在外板上形成一个大开口。

收稿日期: 2016-11-08

作者简介: 吴安, 男, 工程师, 1985年生。2007年毕业于江苏科技大学船舶与海洋工程专业, 现从事船舶外舾装设计工作。

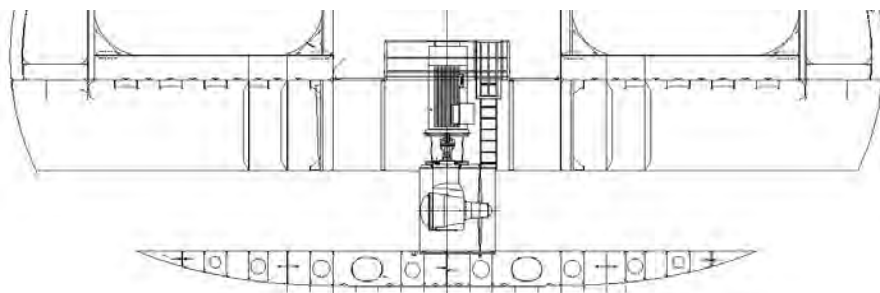


图1 某型船舶侧推布置图

船舶正常航行过程中,其两舷外板开口处容易形成水流阻力而影响航速。以某型排水量为 50000t 左右的化学品船为例,在船模拖曳水池试验中增加一项对比试验,发现在同等工况下,无侧推开孔的船模的水流阻力要比有侧推开孔的船模小 10%~20%,换算成燃效指标则提高 1%~2%。这对于船舶节能推进过程来说是一个很大的提升。

由此,对如何在保证船舶操纵性的前提下减少能耗进行应用设计探索。

1 应用设计探索

1.1 导流格栅

为防止异物进入侧推器,一般会在安装有侧推器的船舶导筒两端增设导流格栅(见图2)。

在设计该导流格栅时,使其与船体外板有一定的线型匹配,既防止异物进入侧推器,又改善侧推器筒体附近的水流,减小部分航行阻力。但是,导流格栅之间的间距较大,无法完全封闭筒体,船舶在航行过程中仍有额外的水流阻力,造成航行过程中燃油损耗过多。因此,必须设计一种既可完全封闭侧推器筒体,又能在使用侧推器时完全打开的装置。



图2 某型船上侧推导流格栅

1.2 盖板式侧推盖

导流格栅的缺点是无法完全封闭筒体,因此可考虑直接给延伸筒体配置盖板,使其完全关闭(见图3)。

该盖板可将侧推器筒体完全封闭,但盖体部分突出于船体外,无法与船体型线完全贴合,在航行状态下反而可能增大航行阻力。此外,侧推器筒体一般浸没于水中,在装卸盖体时需潜水员配合,操作程序烦琐,耗时较长,船东每次操作均需承担额外的费用,经济效用不高。潜水员配合装卸盖体 3D 模拟图见图4。

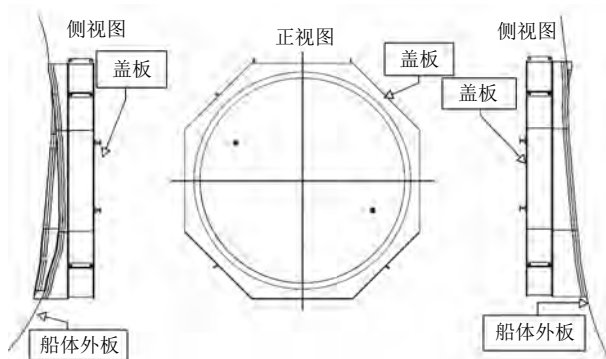


图3 盖板 3D 效果图

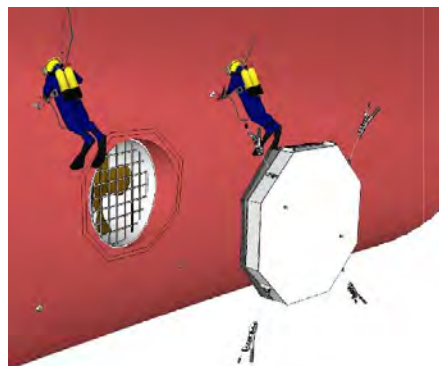


图4 潜水员配合装卸盖体 3D 模拟图

因此,必须设计一种既可将侧推器筒体完全封闭,又能贴合船体型线且操作简单的设备。

1.3 门式侧推盖

在日常生活中,门是常用的一种启闭装置,可考虑给筒体增设类似的门(见图5)。

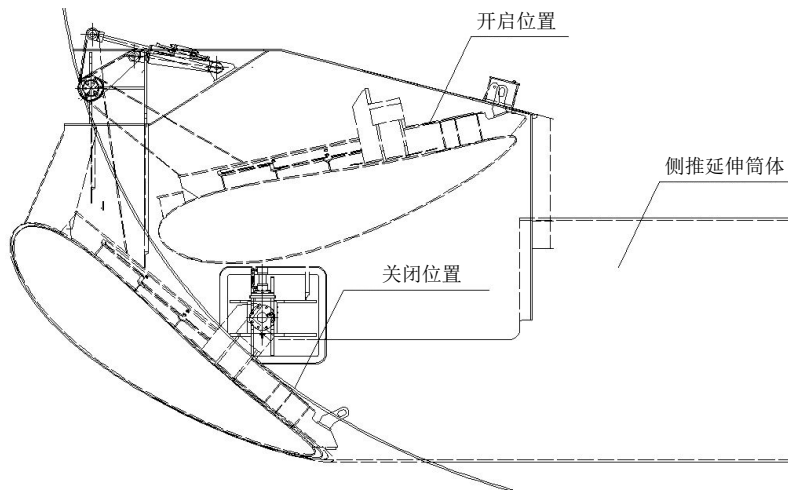


图 5 门式侧推盖运行效果图

该方案将类似门的盖体布置于延伸筒体内侧，通过转动轴进行侧推器盖体的启闭运行。在船舶航行过程中，可利用该侧推器盖体将侧推器筒体完全封闭，改善船部水流，减小水流阻力。该方案已成功安装并运行在某型化学品船上（见图 6 和图 7）。

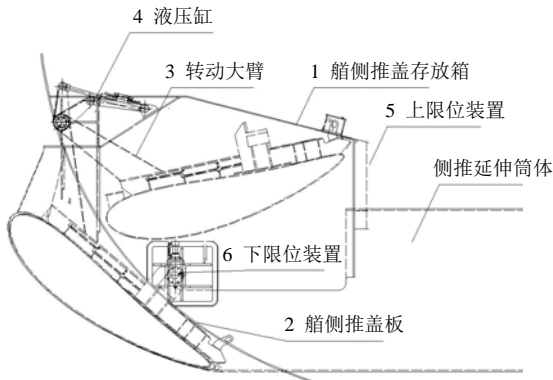


图 6 某型化学品船侧推盖右舷布置侧视图

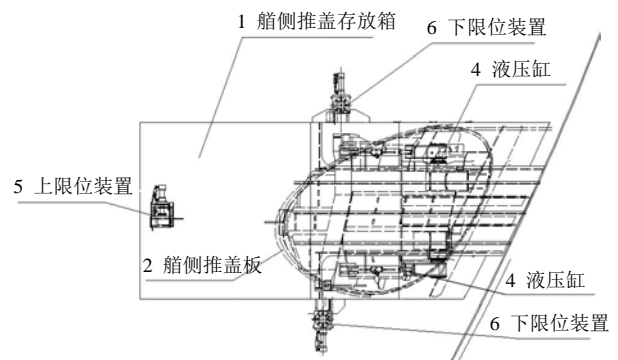


图 7 某型化学品船侧推盖右舷布置俯视图

由图 6 和图 7 可知，船侧推盖系统主要包括船侧推盖存放箱体、船侧推盖板、转动大臂、液压缸、上限位装置和下限位装置，其主要部件的连接关系如下：

- 1) 船侧推盖存放箱体分别固定在船侧推延伸筒体两侧，用于存放船侧推盖板；
- 2) 船侧推盖板与转动大臂连接，由液压缸驱动，进行开启和关闭操作；
- 3) 上限位装置装配焊接在船侧推盖存放箱体顶端，用于船侧推盖板完全打开后的锁紧固定；
- 4) 下限位装置装配焊接于船侧推盖存放箱体与延伸筒体之间，用于船侧推盖板关闭后的锁紧固定。

图 8 为某化学品船侧推盖实物图。与前面 2 种方案相比，该设计方案具有以下优点：

- 1) 延伸筒体完全封闭，并与外板型线完美贴合，可极大地改善航行中的水流，减小航行阻力；
- 2) 侧推盖通过液压臂的转动完成启闭操作，简单方便，安全系数高；
- 3) 侧推器打开后隐藏在筒体上方的箱型框架内，确保侧推器延伸筒体两端无任何障碍物影响侧推器的功效；
- 4) 维护保养方便。

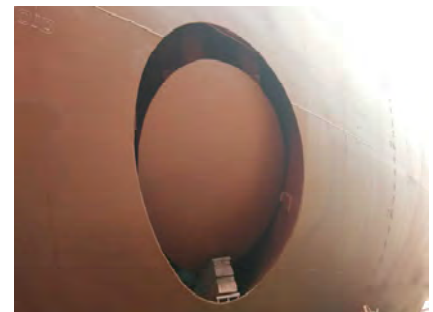


图 8 某型化学品船侧推盖实物图

(下转第 65 页)

DOI: 10.14056/j.cnki.naoe.2017.06.009

.....
 工艺与材料

液化气船独立 C 型液罐主体材料的选择和应用

张朝华^{1,2,3}, 冯大成^{1,2,3}, 华学明^{1,2}

(1. 上海交通大学 上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240;

2. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240;

3. 上海锐韧气体工程有限公司, 上海 200441)

摘要: 介绍 C 型液罐的定义和分类。根据液货的种类和液化方式, 确定设计最低温度, 从而选择液罐的主体材料。列举液罐的 4 种典型主体材料, 并阐述其在工程应用中独特的使用性能和质量要求。

关键词: 液化气船; 独立 C 型液罐; 材料

中图分类号: U663.85; U668

文献标志码: A

文章编号: 2095-4069 (2017) 06-0039-05

Selection and Application of Main Body Material for the Independent Type C Cargo Tank of Liquefied Gas Carrier

ZHANG Zhao-hua^{1,2,3}, FENG Da-cheng^{1,2,3}, HUA Xue-ming^{1,2}

(1. Shanghai Key Laboratory of Laser Manufacturing and Material Modification, Shanghai Jiao Tong University,

Shanghai 200240, China; 2. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration Equipment,

Shanghai 200240, China; 3. CRYOLOBE Gas Technology Co., Ltd., Shanghai 200441, China)

Abstract: This paper introduces the definition and categorization of type C Cargo tanks. According to the type and liquefaction method of the liquid cargo, the minimum design temperature can be determined, whereby the materials for the main body of the tank are selected. Four typical types of main body material are listed, and their unique application performance and quality requirements in engineering applications are elaborated.

Key words: liquefied gas carrier; independent type C Cargo tank; material

0 引言

液化气作为重要的工业和民用燃料及有机化学原料, 在世界能源结构中占有十分重要的地位。随着世界气体能源需求日益增多, 液化气的海运量逐年增长。因此, 液化气船具有较好的市场前景, 且其作为高技术、高附加值船舶, 可获得较好的经济效益。

世界各大船级社的最新资料显示: 当前液化气船的数量及总装机容量正在不断增长, 出于经济性考虑, 在中长距离干线上运营的液化气船正朝着大型化方向发展; 而短途运营的液化气船正朝着环保、节能、轻便的方向发展。这种发展趋势对液罐(又称液货舱)用钢提出了更高的要求, 不仅要求钢板具有很高的强度, 而且要求钢板具有优良的低温韧性、加工性和焊接性。

根据当前的行业发展情况, 中小型液化气船一般指货物装载容积 $<100000\text{m}^3$ 的液化气船, 常用的货

收稿日期: 2017-03-01

基金项目: 工信部高技术船舶科研项目

作者简介: 张朝华, 男, 主任工程师, 1979 年生。2001 年毕业于西华大学焊接专业, 现上海交通大学材料工程专业工程硕士在读。

舱类型是独立 C 型（即压力容器型）。目前，只有少数国家具有设计和建造船用独立 C 型液罐的能力。船用独立 C 型液罐在使用温度和压力等方面有很多特殊要求，因此研究和总结如何正确选择其主体材料，并使其满足使用要求，显得尤为重要。

1 液化气船独立 C 型液罐的定义和分类

按照《国际散装运输液化气体船舶构造与设备规则》^[1]（即 IGC 规则）的规定，液化气体船有独立液货舱、薄膜液货舱、半薄膜液货舱、整体液货舱和内部绝热液货舱等 5 种货物围护系统，其中独立液货舱和薄膜液货舱是较常用的液货舱。

独立液货舱系指自身支持的液货舱，不构成船体结构的一部分。独立液货舱又分为 A 型、B 型和 C 型等 3 类。独立 C 型液罐的设计、建造、检验和试验符合压力容器标准，适用范围广，不需要次屏壁，是中小型液化气船较常采用的货物围护系统。按照液化气液化方式的不同，该型液罐又分为全压式 C 型液罐和半冷半压式 C 型液罐。

1) 全压式 C 型液罐装载的气体只能通过加压来液化，船上不设置再液化设备，货物装载时的温度和压力不可调，可装载货物的种类有限。该液罐的设计压力 $\leq 1.8 \text{ MPa}$ ，设计温度 $\geq -10 \text{ }^\circ\text{C}$ ，主要用来装载液化石油气（Liquefied Petroleum Gas, LPG）和氨，船舶最大装货容积约为 7000 m^3 ；其结构通常为圆筒形或球形压力容器，外表面无须敷设隔热绝缘。

2) 半冷半压式 C 型液罐装载的气体可通过制冷和（或）加压来液化，船上设有再液化设备，可根据不同货物的需要调整货物装载时的温度和压力，可装载的货物种类较多，适应性较强。该液罐的设计压力为 $0.3 \sim 0.8 \text{ MPa}$ ，根据所装载货物的类型，典型的设计最低温度有 $-163 \text{ }^\circ\text{C}$ （以适应近年来在我国市场迅速增长的液化天然气（Liquefied Natural Gas, LNG）并兼容液化乙烯、乙烷气（Liquefied Ethylene/Ethane Gas, LEG）和 LPG）， $-104 \text{ }^\circ\text{C}$ （以适应 LEG 并兼容 LPG）和 $-48 \text{ }^\circ\text{C}$ （以适应 LPG）等 3 种。船舶装货容积多为 $3000 \sim 30000 \text{ m}^3$ ，当前有 36000 m^3 及 85000 m^3 装货容积的船舶正在研发和建造中。该液罐的结构通常为圆筒形压力容器，为充分利用船体空间，常采用双联甚至三联圆筒形结构，外表需敷设隔热绝缘。

2 液化气船独立 C 型液罐主体材料的选择

在满足一定强度要求的前提下，C 型液罐主体材料最重要的性能要求是抗低温脆性破坏，保证在使用温度下具有足够的低温韧性。

由于欧洲研发和应用船用 C 型液罐较早，且长期占据领先地位，加上其材料标准体系完整、应用广泛，因此国际船用液罐行业在选用主体材料时，通常选用欧洲的压力容器所用钢板标准。

根据上述 C 型液罐的分类，以设计最低温度为基准，结合常用欧洲钢材标准和设计压力等因素，可较为合理地选择和确定 C 型液罐的主体材料。现对 C 型液罐常用的 4 种典型主体材料及其选择因素进行归纳和整理，见表 1。

表 1 C 型液罐典型主体材料及其选择因素

设计最低温度/ $^\circ\text{C}$	液化方式	设计压力/ MPa	钢材种类	钢材标准和牌号	筒体一般厚度/ mm
-10	全压	≈ 1.8	细晶高强度钢	EN 10028-6 ^[2] P690QL2	≈ 40
-48	半冷半压	0.3~0.8	0.75%镍钢	EN 10028-4 ^[3] 13MnNi6-3	15~35
-104	半冷半压	0.3~0.8	5%镍钢	EN 10028-4 X12Ni5	15~30
-163	半冷半压	0.3~0.8	9%镍钢	EN 10028-4 X7Ni9	15~25

表 1 中: EN 10028-6 为压力容器用淬火加回火可焊接细晶粒钢; EN 10028-4 为压力容器用镍合金低温钢。从表 1 中可看出: 全压式液罐由于设计压力大, 不仅筒体较厚, 而且钢板的屈服强度较高(为 690MPa), 仅从材料质量方面考虑, 没有半冷半压式液罐经济; 而对于半冷半压式液罐, 随着设计最低温度的降低, 钢板所需镍合金越来越多, 既能保证足够的低温韧性, 同时可使强度得到提高, 筒体所需厚度有逐步下降的趋势。

3 液化气船独立 C 型液罐主体材料的使用性能和质量要求

鉴于上述液罐常用材料均为标准材料, 其使用性能在 EN 10028-6 和 EN 10028-4 上都可查询, 因此以下主要结合 IGC 规则、船级社规范和工程实践分析这些钢材的通用要求、特殊要求及质量要求, 以便更好地指导工程应用。

3.1 冶炼方法

由氧气转炉或电炉冶炼, 并进行炉外精炼, 全镇静处理。

3.2 交货状态

13MnNi6-3 为正火或正火加回火状态, 其他 3 种一般为调质(即淬火加回火)状态, 以细化晶粒、均化组织, 获得良好的低温韧性。

目前该行业也有引入交货状态为热机控轧钢板的产品实例。与同强度级别调质钢相比, 热机控轧钢具有更低的碳含量和碳当量、更好的塑性, 除特厚钢板外, 焊接时通常无须预热。

3.3 化学成分

冶金机理和措施如下。

1) 提高低温钢韧性的措施: 具有体心立方晶格的材料(α -Fe)均有低温冷脆现象, 而面心立方晶格的材料如 Al, Cu, Ni, 奥氏体不锈钢(γ -Fe)等均无低温冷脆现象。Ni 和 Mn 可扩大奥氏体相区, 若 Ni 含量增大到 20% 以上, 可使奥氏体相区扩大到常温。Mn 同 Ni 一样, 能使钢的相变温度下降, 对降低脆性转变温度是有效的。

2) 固溶强化和晶粒细化: 低温用钢一般通过合金元素 Ni 和 Mn 的固溶强化; 通过加入 V, Al, Nb 及 Ti 等合金元素形成稳定的氮化物, 达到细化晶粒的目的。同时, 还应提高 Mn 与 C 的比值, 降低含 C 量, 从而得到较低的脆性转变温度。

3) 增加钢材中的 Ni 含量: 与无 Ni 钢相比, 含 Ni 钢具有较小的屈强比(σ_s / σ_b); 钢材的屈强比越大, 表明其塑性变形能力储备越小, 越易促使脆性断裂。由于 Ni 的加入, 含 Ni 钢的屈强比优于无 Ni 钢, 使低温韧性得到显著改善。

4) 提高钢材的纯净度: 为充分发挥 Ni 在钢中的有利作用, 在提高 Ni 含量的同时, 降低 C 含量和严格限制 S 及 P 的含量。

特别地, 针对 P690QL2, 在满足标准要求的范围内, 其 C 含量、C 当量、S 含量和 P 含量越少越好, 以获得较好的焊接性; 而 Ni 含量越多越好, 以获得较好的低温韧性。

3.4 力学性能

除满足船级社规范的要求外, 强度、延伸率和冲击功最好具有足够的富余量, 屈强比不宜过大, 横向冲击功平均水平最好 >40J, 冲击试验温度须按 IGC 规则的要求选择(见表 2)。

表 2 C 型液罐典型主材的冲击试验温度

°C

厚度/mm	P690QL2	13MnNi6-3	X12Ni5	X7Ni9
≤ 25	-20	-53	-110	-196
>25~≤ 30	-20	-58	-115	-196
>30~≤ 35	-25	-63	-120	-196
>35~≤ 40	-30	-68	-125	-196
>40	与船级社商定	与船级社商定	与船级社商定	-196

对于 X12Ni5 和 X7Ni9, 其每一炉批钢板中的最厚板 (厚度>13mm 或>16mm) 须根据 EN 10274^[4] 进行落锤试验。

特别地, 对于双联甚至三联圆筒形液罐的专有结构纵舱壁, 所用钢板须具有 Z25 性能, 按 EN 10164^[5] 验收, 以保证其板厚方向的塑性。

3.5 工艺性能

1) 机加工: X12Ni5 和 X7Ni9 由于含有较多的镍合金, 在机加工时易粘连刀具, 可通过减少刀头进给量和增大机床夹具回转速度等措施来改善。

2) 冷成型: 对于 P690QL2 和 13MnNi6-3, 若加工变形度超过 2%, 则需消除应力热处理; 对于 X12Ni5 和 X7Ni9, 若加工变形度超过 5%, 则需消除应力热处理。热机控轧钢板在加工后应尽量避免热处理。焊接试验做冷弯项目时, 对于 P690QL2, 弯曲直径为 6 倍试样厚度; 其他 3 种材料, 弯曲直径为 4 倍试样厚度; X12Ni5 和 X7Ni9 材料, 少数船级社规范甚至要求弯曲直径为 3 倍试样厚度。

3) 热成型: 热成型工艺包括初始温度、加热速度、加热温度、保持时间、冷却速度、加热冷却方法和均匀度等, 应按照相关船级社规范或压力容器标准执行。原始供货为正火或正火加回火的钢板, 工件成型后只需在静止空气中冷却, 无须进行热处理。原始供货为调质 (即淬火加回火) 钢板, 成型后需按钢厂热处理工艺制度重新进行调质热处理。

4) 焊接性: 由于有关高强钢和低温钢焊接的研究较多, 这里不再赘述。值得关注的是: C 型液罐的焊接工艺正朝自动化和机械化方向发展; 焊接材料, 尤其是国产化和气保焊丝的开发是需加强研究和发展的领域。

3.6 钢板外形和尺寸公差

钢板外形公差即不平度、镰刀弯和切斜 (脱方), 尺寸公差即厚度、宽度和长度的公差, 二者测量和验收的标准遵照 EN 10029^[6]。液罐受压元件 (即壳体钢板) 的厚度公差皆为 C 级 (即正公差), 其他部位钢板的厚度公差可为 A 级 (即非对称正负公差)。

3.7 表面质量

钢板的表面质量标准应不低于 EN 10163-2^[7] Class B Subgroup 2 的要求。钢板的表面不得有裂纹、结疤、拉裂和夹杂, 且不得有分层。行业应用中更严格的要求是: 每张钢板的表面最终瑕疵面积不得超过 3%, 且表面有瑕疵的张数不得超过总张数的 3%。钢厂只能用修磨方法对钢板表面的局部缺陷进行清除, 且不得使钢板的厚度小于最小允许厚度。除非供需双方同意且在合同中注明, 否则不允许焊补。

3.8 内部质量

对于钢板的内部质量, 钢厂应按照标准 EN 10160^[8] 对每张钢板进行超声波检测, 板体区域按 Class S1 (纵舱壁所用钢板按 Class S2) 验收, 板边区域按 Class E3 验收。

特别地, 对于 X7Ni9 钢板, 为避免后期焊接施工时其剩磁引发电弧偏吹, 板材既不能采用磁铁吊运, 也不能存放在高压电线或大型电机设备附近。应避免采用电机车铁路运输或其他有可能增加磁化的运输方法。钢板边缘剩磁须 <50 Gauss。钢板出厂前, 钢厂须在板材的四角测量剩磁, 并记录到钢板证书中。

3.9 质量证明书

钢板的生产和检验必须符合船级社规范的要求, 钢厂交货时须按照 EN 10204^[9] Type 3.2 的要求提供船级社认可的质量证明书。

质量证明书内容应包含钢板的牌号、标准、冶炼方法、交货状态、炉批号、规格尺寸、质量、化学成分、机械性能、外形尺寸检查、表面质量、内部质量、钢厂质检签名章印及船检签名章印等。

3.10 钢板复查

钢板运到液罐制造厂后, 由其质量管理部门对钢板进行复查, 核对钢板证书, 并复查钢板外形尺寸和表面质量。钢板首次应用时, 必要时由试验部门抽查复验其化学成分和机械性能。若发现钢板有质量问题, 需及时向物资和技术部门反馈。

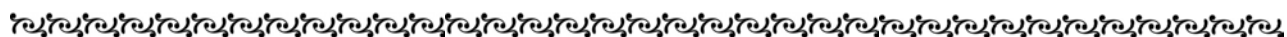
4 结 语

液化气船独立C型液罐主体材料的选择、使用性能和质量要求有很多特殊性。在相关工程领域应用该

类材料时, 大体可参考以上论述来设计和确定材料技术方案。当前, 该领域的材料除上述相对较成熟的品种外, 主要有高锰低温钢和节镍低温钢2个新的研究发展方向, 值得行业人士密切关注。

【参 考 文 献】

- [1] International Maritime Organization. International code for the construction and equipment of ships carrying liquefied gases in bulk: MSC.370(93)[S]. 2014.
- [2] European Committee for Standardization. Flat products made of steels for pressure purposes—Part 6: Weldable fine grain steels, quenched and tempered: EN 10028-6:2009[S].
- [3] European Committee for Standardization. Flat products made of steels for pressure purposes—Part 4: Nickel alloy steels with specified low temperature properties: EN 10028-4:2009[S].
- [4] European Committee for Standardization. Metallic materials—drop weight tear test: EN 10274:1999[S].
- [5] European Committee for Standardization. Steel products with improved deformation properties perpendicular to the surface of the product—Technical delivery conditions: EN 10164:2004[S].
- [6] European Committee for Standardization. Hot-rolled steel plates 3 mm thick or above—Tolerances on dimensions and shape: EN 10029:2010[S].
- [7] European Committee for Standardization. Delivery requirements for surface condition of hot-rolled steel plates, wide flats and sections—Part 2: Plate and wide flats: EN 10163-2:2004[S].
- [8] European Committee for Standardization. Ultrasonic testing of steel flat product of thickness equal or greater than 6 mm (reflection method): EN 10160:1999[S].
- [9] European Committee for Standardization. Metallic products—Types of inspection documents: EN 10204:2004[S].



(上接第 19 页)

4 应用情况

薄膜型储罐已在法国、日本及韩国等国家得到广泛应用。当前全球已建成 33 座薄膜型储罐。印度尼西亚和菲律宾正在新建薄膜型储罐。

最早在法国建造的薄膜型储罐已安全运营 44a, 证明其技术是可靠的, 且在 2011 年日本福岛地震中, 该地区的薄膜型储罐完好无损, 更加证明了其安全性。

此外, 根据初步收集到的资料, 国内已建、在建及拟建的 LNG 接收站共计约 26 个, 其中, 6 个项目的一期工程已建成投产, 8 个项目的一期工程在建; 已投产项目的二期工程、三期工程正在积极筹划之中。考虑到薄膜型储罐的优点, 拟建和扩建项目若都采用薄膜型储罐, 将带来极大的经济效益和社会效益。随着天然气的需求量不断增加, LNG 接收站的数量将不断增多, 薄膜型储罐的应用前景是可观的^[4]。

5 结 语

随着LNG的需求量不断增加, LNG接收站储罐的建造量会越来越多。薄膜型储罐由于其自身的优点, 既可保证经济、安全、可靠地供气, 也能促进LNG接收站储罐技术优化和成本降低。

【参 考 文 献】

- [1] 敬加强, 梁光川, 蒋宏业. 液化天然气技术问答[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [2] 孙法峰. FPSO-LNG 储罐储存特性及安全技术[D]. 青岛: 中国石油大学, 2015.
- [3] 孙青峰, 赵德贵. LNG 接收站储罐配置[J]. 油气储运, 2009, 28 (3): 17-18.
- [4] 王冰, 陈学东, 王国平. 大型低温 LNG 储罐设计与建造技术的最新进展[J]. 加工利用, 2010, 30 (5): 108-112.

小组立机器人装焊生产线总体设计研究

吉永军^{1,2}, 朱玉龙², 刘建峰²

(1. 江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212003;

2. 上海外高桥造船有限公司, 上海 200137)

摘要: 基于典型小组立工件的生产纲领, 分析小组立工件的加工工艺, 制订详细的加工工艺路线, 对小组立机器人装焊生产线的工位进行总体布置设计。依据典型工件的生产纲领, 从组成设备和系统集成控制 2 个方面对焊接机器人工作站进行设计研究。从生产节拍、工作人数、产品质量、生产连续性和生产管理等 5 个方面对小组立机器人装焊生产线与传统小组立生产方式进行对比分析。结果表明: 相对于传统小组立生产方式, 小组立机器人装焊生产线的生产效率更高, 所需人数更少, 产品质量更稳定、更优异; 同时, 具有生产连续性好、生产管理更智能化等特点, 能达到提高生产效率、降低人数、改善焊接质量的目标, 使小组立工件生产形成规模化、高效化和批量化的智能制造模式。

关键词: 小组立机器人装焊生产线; 工艺分析; 总体设计; 效果评价

中图分类号: U671.8

文献标志码: A

文章编号: 2095-4069 (2017) 06-0044-05

Study on the Overall Design of the Robot Production Line for Sub Assembly

JI Yong-jun^{1,2}, ZHU Yu-long², LIU Jian-feng²

(1. Naval Architecture and Ocean Engineering College, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;

2. Shanghai Waigaoqiao Shipbuilding Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: Based on the production program of typical sub assembly, this paper analyzes the processing technology of sub assembly, sets up the detailed processing route and studies the overall layout design of work stations of the robot production line for sub assembly. According to the production program of typical work pieces, design studies on the welding robot workstations are carried out from two aspects, i.e., the equipment composition and the system integrated control. Meanwhile, based on the five aspects of cycle time, number of workers, product quality, production continuity and production management, the comparisons between robot production line and the conventional production scheme for sub assembly are made. The result shows that compared with the conventional sub assembly production scheme, the robot welding production line has higher production rate, requires fewer people, has more stable and more excellent product quality, and has the characteristics of good production continuity and more intelligent production management, therefore can achieve the goal of higher production efficiency, reducing number of workers, improving welding quality, and enabling the realization of intelligent manufacturing of large scale, high efficiency and batch production of the sub assembly work pieces.

Key words: robot production line for sub assembly; process analysis; overall design; effect evaluation

收稿日期: 2017-01-05

基金项目: 中国船舶工业集团公司创新计划项目

作者简介: 吉永军, 男, 硕士生, 1991 年生。2017 年毕业于江苏科技大学船舶与海洋工程结构物设计制造专业, 现从事船舶智能制造方面的研究工作。

0 引言

随着机器人焊接技术的快速发展, 机器人焊接技术在船舶建造过程中的应用得到广泛关注。小组立工件作为船舶建造过程中的重要中间产品, 具有结构简单、数量庞大等特点, 适合形成机器人装焊流水线进行生产^[1]。然而, 当前我国绝大部分造船企业仍采用传统的人工焊接方式进行小组立部件的生产制造, 自动化程度不高, 没有形成智能化流水作业, 存在劳动力成本高、耗费工时长、质量不稳定和生产连续性差等问题, 远不能满足现代造船企业的要求^[2]。采用小组立机器人装焊生产线能有效降低劳动成本、缩短生产工时及提升生产质量^[3]。

本文对此, 基于小组立机器人装焊生产线项目的前期研究, 对生产线的总体设计进行探讨。总体设计需满足周边设备和生产环境对机器人的约束, 其合理性直接关系到整个生产线的总体性能, 影响船舶建造过程中物流和信息流的传递。

1 小组立机器人装焊生产线的总体设计依据

该生产线以生产船体中部肋板为主(见图1), 与生产双层底分段的平直流水线形成前后道流水线。该类型小组立尺寸为 $3200\text{mm}\times 2400\text{mm}$, 焊缝为长 12600mm , 焊脚高度为 7mm 的双面角焊缝; 要求表面无气孔、裂纹及未熔合等缺陷, 成型均整, 焊缝边缘与母材融合良好; 达到所要求的焊接速度, 保证焊接质量。根据生产纲领, 计划该类型小组立月产量为 1200 件, 日产量为 50 件, 采用二班制, 要求每个工件的生产工时 $\leq 1200\text{s}$ 。

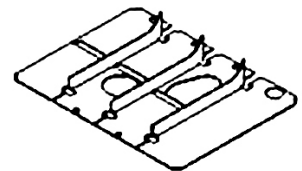


图1 双层底分段肋板

2 工艺分析及工位布置设计

在规划小组立机器人装焊生产线之前, 需对该类型小组立加工工艺流程进行分析, 制订详细的小组立加工工艺路线, 确定生产线的生产工位^[4]。

传统小组立制造通常按照装配→点焊→焊接→修补→背烧的工艺流程进行操作, 工件位置不发生移动。采用机器人装焊时, 考虑到提高生产效率, 通过将生产工艺流程转化为机器人装焊生产线上的每道工位, 使小组立工件的位置随着工艺流程的变化发生流动, 而原有的各工艺流程依照流水线的方式布置为各工位, 主要包括进料区域、装配工位、机器人焊接工位、修补工位、背烧工位和托盘区域(见图2), 生产线布置按工艺流程顺序连接, 避免物流交叉; 在对小组立工件进行组焊时, 事先在装配工位点固焊, 提高工作效率; 小组立工件按照设计的焊接工艺顺序实现机器人自动焊接; 在修补工位检验小组立工件的焊接质量, 对焊接有缺陷的工件进行手工修补, 提升焊接质量; 在背烧工位采用自动背烧设备施工, 以消除焊接过程中可能产生的应力和局部变形; 小组立以零件的形式进入到流水线上, 从流水线出来后变为合格的小组立产品。生产工位布置图见图2。

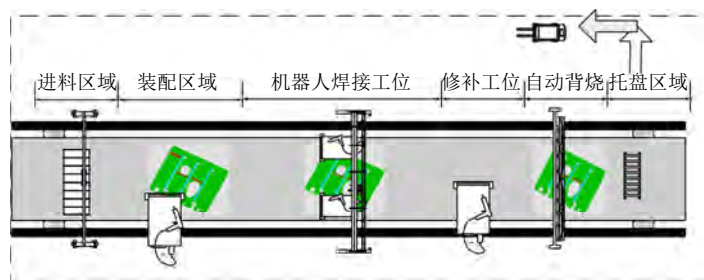


图2 工位布置图

3 焊接机器人工作站的设计

3.1 焊接机器人工作站

根据生产节拍的要求及焊缝长度, 对焊接机器人工作站进行设计。该类型小组立焊缝总长度为

12600mm, 其总体布置形式见图 3, 由双机器人、龙门架、机器人旋转装置、焊接电源、送丝装置、清枪剪丝装置、冷却水循环器、防撞器、CCD 相机、系统集成控制箱及安全围栏等组成。工作站机器人需在焊接工作开始之前进行示教, 检验是否存在干涉, 耗费时间约为 100s; 待检验完成之后, 工作站通常采用双机器人同时焊接, 若该类型小组立工件焊缝为 7mm 双面角焊缝, 则水平焊速度为 400mm/min, 立焊速度为 130mm/min, 耗时为 960s; 考虑到工件输送及其他时间约为 100s, 该类型小组立的焊接机器人工作站生产节拍为 1160s。



图 3 焊接机器人工作站总体布置形式

3.2 工作站系统集成控制

工作站系统主要包含焊接工艺数据库、自动编程及仿真系统、视觉识别系统、运行控制系统和生产信息管理系统（见图 4）。

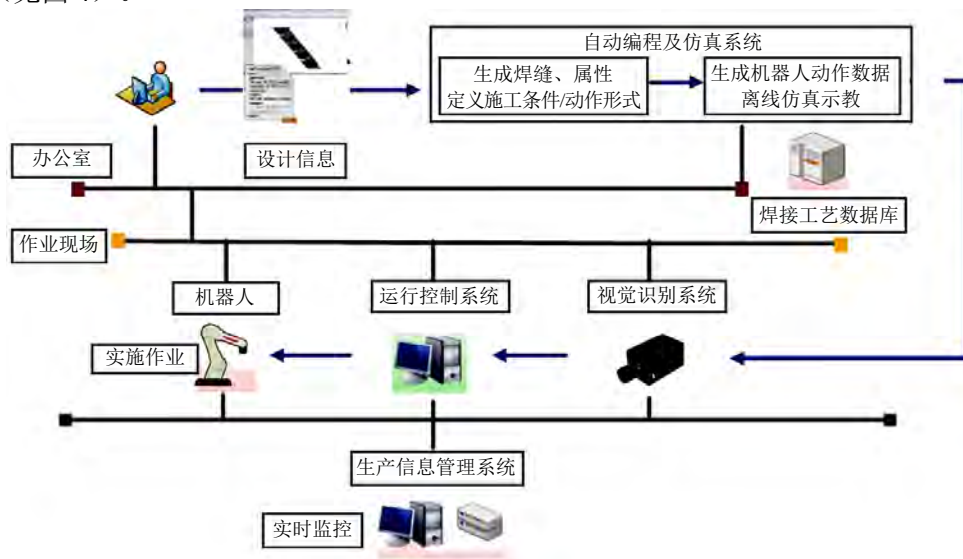


图 4 系统集成控制图

读取小组立工件 Tribon 图纸数据, 通过系统分析获得焊缝位置; 基于焊接工艺数据库, 根据不同构件的焊接要求自动生成焊接工艺; 自动编程及仿真系统将焊接的路径、焊枪的姿态及焊接工艺相叠加, 形成机器人焊接程序, 并进行离线仿真优化; 在实际焊接过程中, 基于工件基准点, 通过视觉识别系统对焊接工件进行识别判断, 并修正焊缝偏移; 运行控制系统读取焊接程序, 对焊接机器人、焊接电源及送丝机等设备进行综合调度控制, 完成小组立工件复杂轨迹的自动焊接; 生产信息系统对机器人工作站、物流系统及辅助设备等进行实时监测, 从而实现对生产过程参数、生产状况和故障信息的统计^[5]。

3.2.1 焊接工艺数据库

焊接专家数据库技术是一种预先设定焊接条件, 通过数据库命令调出设定的焊接条件的技术。该数据库为多种焊缝形式设定特定的焊接参数及工艺, 可根据工件焊缝形式直接调用相应数据, 自动生成焊接工艺表, 并直接在焊接程序中应用; 同时, 可根据自身工艺需求对该工艺表进行调整和修改。该技术可大大简化示教工作量, 提高编程效率。

3.2.2 自动编程及仿真系统

不同小组立的焊缝形式和焊缝布置不同, 自动编程系统能通过读取 Tribon 图纸数据完成工件坐标系位置标定和工作轨迹信息获取, 实现工件焊缝数据编辑、自动编程、自动调用焊接数据库及调用程序自动焊接等。编程时, 系统将焊接的路径、焊枪的姿态及焊接工艺相叠加, 形成机器人焊接程序, 可在系统中进行离线仿真, 判断与工件的干涉, 并自动优化。

3.2.3 视觉识别系统

视觉识别系统采用安装在移动装置上的摄像机, 通过移动装置的运动对工件进行扫描, 根据扫描结果对焊接工件的种类进行识别判断, 自动调用相应的焊接程序。扫描完成后, 可在监控器上生成带有工件种类和工件位置信息的 2D 图像。视觉识别系统不仅不必从外部输入任何信息, 而且可自动调用、编辑已识别的工件信息。

在操作人员完成对系统的简单编辑后, 利用龙门架视觉摄像头对平台工件进行位置校正, 选取工件 2~3 个基准点, 并检测其实际位置, 通过修正程序中基准点的位置, 使机器人在焊接过程不受工件加工、组对拼焊和焊接装夹定位带来的误差的影响, 自动寻找焊缝并识别焊接情况, 修正焊缝偏移。

3.2.4 运行控制系统

生产线运行控制系统通过应用变位机空转回避技术、断电记忆技术和喷嘴接触防碰撞技术, 对焊接机器人、焊接电源及送丝机等设备进行综合调度控制, 完成小组立工件复杂轨迹的自动焊接, 实现柔性化、自动化的焊接制造。

3.2.5 生产信息管理系统

信息管理系统采用单元式模块化全数字控制, 采用基于 Visual Studio 可视化界面及 Oracle 数据库开发的 B/S 架构研制, 由生产管理、设备管理、故障诊断、质量监控、物流及生产状况视频监控等 5 个模块组成, 能实时监控机器人工作站、物流系统及辅助设备车间所有设备的实时状态, 统计生产过程参数、生产状况、故障信息和品质管理, 同时能生成各种报表。

4 效果分析评价

4.1 生产节拍对比分析

通过对小组立生产进行统计可知, 当前 1 名焊工每天焊接的长度约为 100m, 若该类型小组立 (如图 1 所示) 焊缝长度为 12600mm, 则焊接生产节拍为 4536s。若采用小组立机器人装焊生产线焊接该类型小组立, 焊缝长度为 12600mm, 采用双机器人进行焊接, 焊脚高度 7mm, 双面角焊缝, 水平焊接速度为 400mm/min, 则该工件的生产节拍为 1160s。

4.2 人数对比分析

目前, 小组立工件生产主要采用分段区域生产模式, 1 个分段的小组立集中在 1 个区域生产, 以此降低管理难度。但这也会降低小组立的生产效率。采用分段区域生产模式时会大量小组立零件运输至该区域, 装配工需花费大量时间寻找相互对应的小组立零件, 因此装配效率较低。此外, 当前小组立生产的火工仍采用人工火工修补的方式, 与小组立机器人装焊流水线的自动背烧工位相比效率偏低。按照生产纲领要求, 日产量为 50 件, 每个小组立焊缝长度为 12600mm, 需焊工 7 人、装配工 4 人、修补火工背烧人员 3 人, 共计 14 人。

采用小组立机器人装焊生产线后, 在对该类型小组立工件进行装配时将配有一张快速装配图, 零件将形成固定流向, 可减少不必要的辅助装配时间 (如寻找与板材配对的加强筋所耗费的工时), 且装配工仅需装配 1 种类型的小组立, 动作熟练, 因此仅需 1 名装配工即可满足流水线生产要求。此外, 流水线采用自动背烧设备, 能对小组立工件进行快速背烧, 需 1 名工人来控制背烧设备。因此, 根据生产纲领, 采用两班次, 每班次需配备 1 名装配工、1 名机器人操作员及 1 名修补火工人员, 两班制共需 6 人。

4.3 其他对比分析

小组立机器人装焊生产线采用机器人进行生产, 得到的小组立产品的质量相比采用传统小组立生产方式更优, 返修率更低; 机器人装焊生产线形成流水线式生产, 相比传统的生产方式具有良好的连续性; 机器人装焊流水线具有一套智能管理系统, 能对产量、生产速率及质量等生产信息进行实时监控和管理, 减少传统管理中存在的漏洞和错误。

4.4 效果评价

从生产节拍、工作人数、产品质量、生产连续性和生产管理等 5 个方面对小组立机器人装焊生产线及传统小组立生产方式进行对比分析, 结果见表 1。由表 1 可知, 小组立机器人装焊生产线生产效率更高,

所需人数更少, 产品质量更稳定、更优异, 具有生产连续性好、生产管理更智能化的特点。

表 1 小组立机器人装焊生产线与传统小组立生产方式对比

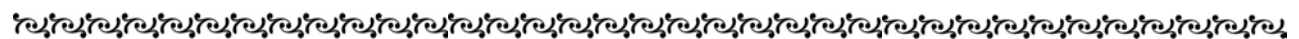
项目	小组立机器人装焊生产线	传统小组立生产方式
生产节拍	1 160s	4 536s
工作人数	3 人/班	14 人
产品质量	稳定且良好	偶尔会出现质量问题
生产连续性	好	混乱
生产管理	智能化管理、错误率低	人工管理

5 结 语

针对基于典型小组立工件的生产纲领, 从组成设备和系统集成控制2方面对小组立机器人装焊生产线进行总体设计, 能实现小组立工件复杂轨迹的智能化焊接。与传统小组立生产方式相比, 小组立机器人装焊生产线生产效率更高, 所需人数更少, 产品质量更稳定、更优异; 同时, 具有生产连续性好、生产管理更智能化等特点, 能达到提高生产效率、降低人员数量和改善焊接质量的目的, 使小组立工件生产走向规模化、高效化和批量化的智能制造模式, 为小组立机器人装焊生产线的后续研究打下基础。

【参 考 文 献】

- [1] 国际船舶网. 南通中远川崎入选智能制造试点示范项目[EB/OL]. (2015-07-23). http://www.eworldship.com/html/2015/Shipyards_0723.104645.html.
- [2] 衣正尧, 林焰, 刘英想. 造船工业机器人现状分析[J]. 机械工程师, 2016 (7): 89-92.
- [3] 彭常青. 南通中远川崎船舶智能制造项目案例[J]. 中国远洋航务, 2015 (11): 28-30.
- [4] 朱金权. 机器人自动生产线的工艺分析与总体设计[J]. 中国新技术新产品, 2014 (8): 1-3.
- [5] KANG S W, YOUN H J. Development of multi welding robot system for sub assembly in shipbuilding[J]. The International Federation of Automatic Control, 2008, 41 (2): 5273-5278.



(上接第 25 页)

1) 综合考虑计算精度和计算时间, 网格尺寸取为 1/2 肋距大小时, 能以合适的时间代价得到足够精确的计算结果, 是相对最优的选择;

2) 由于采用在校核剖面增加延伸段的方法时, 边界条件对计算结果的影响较小, 端部采用简支和固支方式均可;

3) 采用按位移控制的加载方式能更好地追踪极限弯矩的最高点, 相较于按载荷控制的加载方式有一定的优越性;

4) 采用考虑侧向载荷的舱段分析方法能得到相对更准确的极限承载能力, 但加载方式复杂, 目前规范衡准对应的是不施加侧向载荷的计算方法。

【参 考 文 献】

- [1] 卢润泽. 舰船总纵弯曲极限承载能力[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [2] 王峰, 陈毓珍, 张青敏. 全船有限元简化方法在总纵强度计算[J]. 船舶与海洋工程, 2014 (1): 24-27.
- [3] DNV-GL. DNV GL rules for classification [S]. 2015.
- [4] IACS. Common structural rules for bulk carriers and oil tankers[S]. 2015.
- [5] 郑牡丹, 卢俊峰, 赵耀. 非线性有限元计算船体总纵极限强度浅析[J]. 中国水运, 2007 (2): 130-131.
- [6] 汤红霞, 王晓宇, 刘见华, 等. 舰船极限强度计算及试验研究[J]. 船舶, 2014 (3): 26-29.

小组立智能流水线关键技术分析

赵德鑫^{1,2}, 朱玉龙², 刘建峰²

(1. 江苏科技大学, 江苏 镇江 212000; 2. 上海外高桥造船有限公司, 上海 200137)

摘要: 对国内外小组立智能流水线进行分析, 从小组立生产流程前期设计和流水线控制系统等方面对小组立智能流水线关键技术进行分析。基于离线编程, 对小组立模型导入和数据转换进行分析; 通过分析焊接工艺参数, 为焊接工艺库提供数据支持; 通过对机器人传感技术的研究, 分析工件定位、焊缝跟踪等技术。通过仿真验证建立流水线的可行性, 为建立小组立智能流水线提供参考。

关键词: 小组立; 离线编程; 焊接工艺库

中图分类号: U673.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-4069 (2017) 06-0049-06

Analysis on the Key Technologies of Sub Assembly Intelligent Production Line

ZHAO De-xin^{1,2}, ZHU Yu-long², LIU Jian-feng²

(1. Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China;

2. Shanghai Waigaoqiao Shipbuilding Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: This paper studies the sub assembly intelligent production line at home and abroad, and analyzes its key technologies such as early stage design of the production process and the production line control system. The sub assembly model import and date conversion are analyzed based on off-line programming, and the analysis of welding process parameters provides important data support for the welding process library. On the basis of robot sensing technology, work piece positioning, seam tracking and other technical questions are discussed. The feasibility of the production line established in this way is verified by simulation, which is referential for the establishment of sub assembly intelligent production line.

Key words: sub assembly; off-line programming; welding process library

0 引言

在国外, 工业焊接机器人^[1]发展较早, 技术也较成熟, 智能设备已在汽车、航天等重工业领域得到广泛应用, 但尚未在船舶行业普及。目前, 我国的船舶生产仍处在传统的人工作业阶段, 尚未形成智能化流水线, 船舶产业升级和生产模式改革势在必行。小组立作为船舶零部件最小单元, 对其进行归类划分, 建立小组立智能流水线, 对实现船舶智能化生产具有重要意义。

欧洲小组立流水线的智能化和自动化程度非常高, 在各造船企业中的应用已较为成熟。奥地利 IGM 公司生产的轻便型门架式智能焊接机器人系统已在丹麦集装箱船的建造中得到成功应用, 机器人系统是整個工业机器人应用的核心^[2]。芬兰 PEMA 公司拥有现代造船及海洋工程钢材加工机械化和自动化的资源, 是预处理流水线及焊接工位领域的领先供应商, 其设计的小组立智能流水线自动化程度较高, 已在德国迈尔船厂、韩国现代重工和新加坡吉宝等大型船舶建造企业得到广泛应用。韩国和日本虽然在小组立流水线智能化程度方

收稿日期: 2017-01-03

作者简介: 赵德鑫, 男, 1991 年生。现为江苏科技大学船舶与海洋结构物设计制造专业硕士生。

面不及欧洲，但其机器人智能焊接应用已较为成熟。中日合资企业中远川崎在建立小组立流水线之后，实现了工件传输和焊接智能化^[3]，工作人员大幅减少，生产效率提高 2~4 倍^[4]，取得很好的实施效果。国外船厂已建成的小组立智能流水线见图 1。



图 1 国外船厂已建成的小组立智能流水线

1 小组立生产前期设计

小组立流水线设置有上料工位、装配工位、焊接工位、修补工位、背烧工位和下料工位等 6 个工位。小组立流水线布局见图 2，其中：上料工位和下料工位的工作由平板车运输完成；装配工位、修补工位和背烧工位的工作由人工完成；小组立流水线的智能化以焊接工位为起点，实现智能化焊接，提高小组立的生产效率和质量。在小组立拼板进入流水线生产之前，需设计部门完成小组立分类、几何模型导出及特征建模。

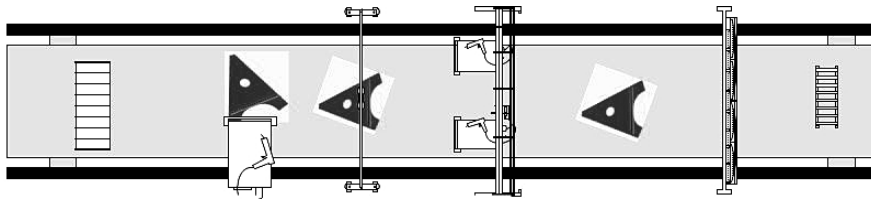

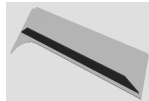
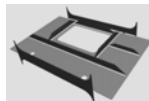

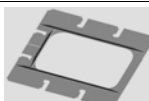



图 2 小组立流水线布局

1.1 小组立分类

小组立是船舶建造中最基本的零部件单元，数量和种类均较多。实现小组立批量生产能大大提高生产效率，首先需设计部门对小组立进行分类，选择适合在流水线上生产的小组立，主要遵循的原则是小组立的数量及结构的复杂程度在机器人的焊接能力范围内。根据当前机器人的焊接能力，以 18000TEU 集装箱船货舱区为例，对 C 型小组立和 S 型小组立进行梳理（C 型小组立是仅由小型基面板加上 1~2 个扶强构件组成的最简单、最低级的组立，不包含任何更低一级的组立；S 型小组立是由基面板加上加强筋、肘板等扶强构件组成的组立，也不包含任何更低一级的组立）。18000TEU 集装箱船货舱区小组立信息梳理见表 1（选取数量较多、适合机器人生产的几类）。

表 1 18000TEU 集装箱船货舱区小组立信息梳理

分段类型	组立类型	组立名称	组立图片	数量/个
双层底（四平台）	S	肋板		1010
横舱壁	C	肘板 （纵桁上）		760
横舱壁	S	小水平桁 （格栅区域两纵桁之间）		560
深油舱	C	小肘板		430
双层底（管弄）	S	管弄肋板		405
横舱壁	S	纵桁 （上端箱体内存）		370

1.2 几何模型导出

为保证流水线顺利生产, 必须建立小组立几何模型, 而目前国内大多数船厂还没有单独的小组立模型。编程系统虽然具备建模模块, 可完成工件建模、设备建模及工作单元的设计与布置, 但小组立种类和数量均较多, 在编程系统中建立小组立模型会增加设计部门的工作量。大多数船厂通常采用 Tribon 软件建立船体模型, 设计人员可从分段模型中提取小组立模型, 通过 Tribon 自带的接口, 以 XML 文件的形式导出模型数据。要求开发人员建立编程系统相应的接口, 由编程系统对 XML 文件进行读取, 识别小组立模型结构, 保存模型数据, 并在控制系统中以模型的形式呈现。XML 文件生成流程图 3, XML 文件仅包含小组立几何信息, 如工件位置坐标、几何尺寸等。

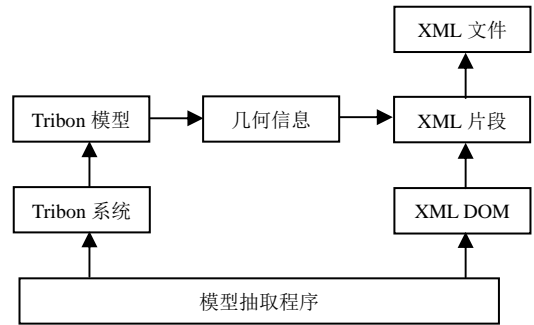


图 3 XML 文件生成流程

1.3 小组立特征建模

小组立模型是离线编程系统对焊接工艺、焊接路径进行推理求解的平台, 特征建模技术是焊接机器人完成任务的支撑。智能流水线要求小组立模型既包含工件的几何信息, 又包含工件的加工信息。特征建模首先定义特征, 形成特征库, 进行特征解释, 对板的特征进行定义, 通过板设计和接头设计对焊缝进行建模, 根据焊缝模型和特征解释定义接头特征, 最终完成小组立特征建模。小组立特征建模流程图 4。

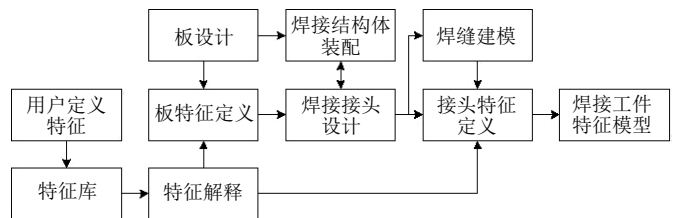


图 4 小组立特征建模流程

小组立工件特征建模的内容包括拼板特征材料、拼板形状、接头特征形式、坡口特征形式及焊缝形状等。在建模系统中, 每个对象又具有对象属性、对象服务和对象关系等 3 个要义。在特征建模中, 焊缝建模既是其重要组成部分, 也是焊缝信息的载体。焊缝模型既包含焊接的工艺信息, 同时也包含机器人焊接该焊缝时的最优路径。进行焊缝建模的目的是记录构成焊缝的几何信息和工艺信息, 根据焊接接头设计结果建立破口几何模型。在系统中, 不同的接头特征对象编辑不同的焊缝名称, 通过对焊缝几何信息进行拾取, 得到相应的焊缝类型、形状和尺寸信息, 最终建立小组立特征模型库。

2 小组立流水线控制系统

小组立流水线控制系统即小组立生产过程控制系统。为保证小组立的焊接质量和生产效率, 不仅要求焊接设备能保质保量地加工, 而且要求自动控制工位节拍, 对小组立进行运输和装卸。在流水线上, 各工位设备依次排列, 通过自动输送装置连接在一体, 并利用控制系统将各模块协调统一起来, 使其依据控制命令自动工作。控制系统的性能决定着小组立流水线生产的效率和生产成本, 因此小组立流水线控制系统对流水线生产至关重要。小组立智能流水线控制系统见图 5。

2.1 离线编程系统

船舶是一种定制化产品^[5], 其小组立是典型的单件小批量生产构件, 生产系统

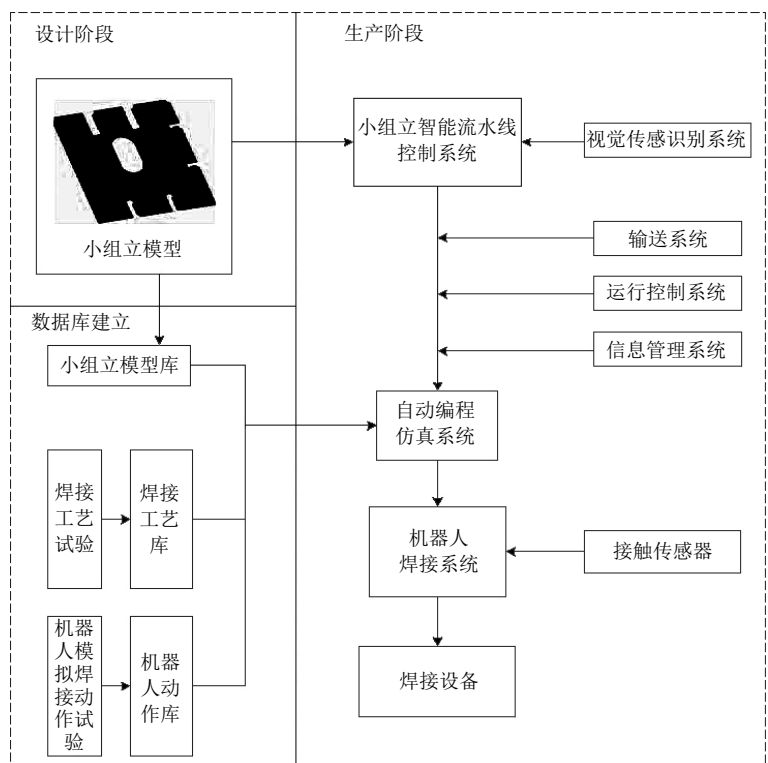


图 5 小组立智能流水线控制系统

必须趋于柔性制造,包括流水线上的自动化设备。传统的机器人示教编程不适用该小组立生产,独立于机器人,在计算机系统上实现的离线编程较为适合。机器人离线编程是利用计算机图形学成果建立机器人、工作环境模型,利用规划算法对图形进行控制和操作,在离线情况下完成轨迹规划。机器人离线编程的优势有:可减少机器人非工作时间;可改善编程环境;使用范围广,程序便于修改;可提高编程效率和质量。离线编程系统分为执行级离线编程系统和任务级离线编程系统 2 种,该流水线采用任务级离线编程系统,采用更高的指令系统,用户输入指令更加简便,即在识别小组立结构之后,自动调用焊接参数,规划焊接路径。

离线编程系统的输入信息由传感系统提供,通过工件视觉识别系统获得流水线上小组立的几何特征信息,将其与模型库中的小组立模型相对比,确定小组立对应模型,得到小组立加工信息;通过接触传感器对装配好的小组立进行检测定位。焊接工艺库提供小组立焊接工艺参数,根据匹配的小组立模型来调用。离线编程进行焊接参数规划,即焊接工艺库提供的焊接参数由离线编程检索选定。任务级离线编程系统避免了机器人焊接参数由人工输入,可大大降低出错率;焊接参数与模型自动匹配,可有效提高机器人编程的效率和质量。根据小组立模型焊缝信息进行路径规划,目的是确定机器人系统中各路径点处的各关节值,使焊接质量最佳。在对小组立进行定位、对焊接工艺参数进行确定之后,通过调用机器人动作库的程序来控制机器人的动作,完成焊接任务。

离线编程作为智能流水线焊接工位的核心,利用编程语言存储模型导入的信息,以半自动的定位方式确定小组立位置信息,调用焊接工艺库中的焊接参数,规划机器人的运动路径,在离线编程系统的控制下完成小组立焊接。

2.2 机器人传感系统

感知系统是使机器人走向智能化的保障,传感器对建立焊接机器人柔性生产系统至关重要。小组立智能流水线需利用传感系统来识别外部信息,同时为离线编程控制系统提供输入信息。小组立智能流水线通过视觉传感系统来识别工件,通过接触传感系统来检测定位,通过电弧传感系统进行焊缝跟踪。

将视觉传感系统摄像机安置在流水线移动门架上,通过移动门架对辊道上的小组立工件进行扫描,获取工件图像;对图像进行预处理之后,分割图像,识别出装配完成的焊接小组立;通过抽取特征得到小组立特征轮廓,利用模式识别与模型库小组立相匹配。接触传感器通过焊丝对工件进行定位,通过设定程序,当带电的焊丝接触到小组立时,与小组立形成回路,造成电压降;机器人收到电压降信号,记录焊枪的绝对位置及对应角度。接触传感器检测出工件的位置之后,将信号传输给控制系统,与模型位置相比较,即可计算出偏差量,相应地求出补偿量,将补偿量反馈到焊接执行过程中,修正焊接轨迹;电弧传感保证焊枪不偏离焊缝中心,对机器人焊接进行焊缝跟踪,检测焊接偏差;主要利用焊枪摆动引起电流变化,利用电流变化反馈值寻找焊缝中心线,修正轨迹偏差。

2.3 焊接工艺库

焊接工艺库是建立小组立智能流水线的保障,包含小组立焊接的所有加工信息。首先,对船厂小组立材料的特性进行分析,结合当前手工焊生产采用的焊接方法及机器人采用的焊接方法的可行性,综合考虑生产效率、能耗、焊接工艺性能和船厂生产环境,最终确定小组立智能流水线应用的焊接方法为药芯焊丝气体保护焊。

在焊接中,要考虑焊件的接头形式和坡口形式。在小组立焊接中,T型接头占绝大多数,因此主要针对 T 型接头建立焊接工艺库。在实际生产中,小组立 T 型接头采用 I 型坡口形式,即不开坡口型。根据以上条件,进行材料的选取和参数的确定。选用合适的焊接材料尤为重要,主要是焊丝的选取和保护气体的确定。在选择焊丝时,考虑的因素有焊接母材级别、药粉类型、单道或多道的适用性及焊接位置等。此外,焊丝的直径直接影响焊接电流、送丝速度等。在确定保护气体时,主要考虑焊接质量、成本和生产效率等因素。由于不同气体在电弧热中的反应不同,因此选用不同的保护气体具有不同的保护效果,对电弧的平稳程度和飞溅程度等都有影响。焊接参数根据《焊接手册》和现场生产经验初步确定,包括电流种类、电流极性、焊接电流、电弧电压、焊接速度、焊丝伸长度及保护气体流量等。此外,每套焊接参数都要有对应的焊枪行走角、工作角和焊枪摆动姿势。

在选定焊接材料和焊接参数之后,进行焊接数值仿真,修正之前的焊接参数。运用修正后的焊接参数进行试验,试验完毕后进行焊接工艺检测。若焊接质量未达标,则调整焊接参数重新进行试验;若焊接质量达标,即形成一套关于所试验焊件的工艺标准。通过多次试验,不断进行调整,建立一个包含所有智能流水线可生产小组立的焊接参数工艺库,以便在生产中自动调用离线编程系统。焊接工艺库建立流程见图 6。

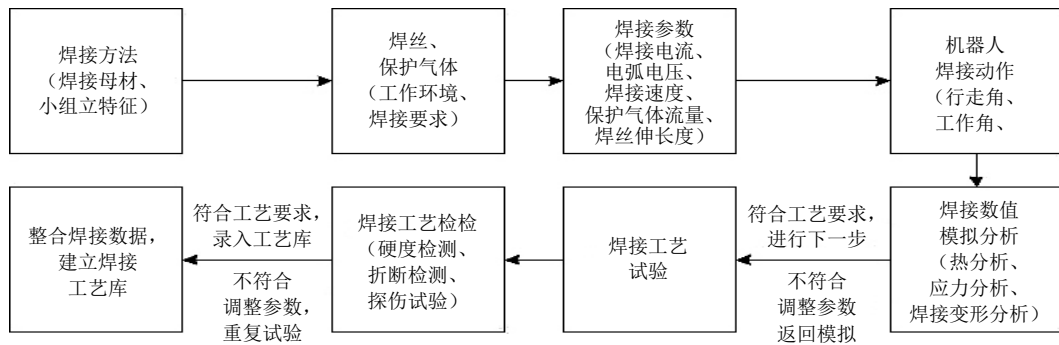


图6 焊接工艺库建立流程

2.4 机器人动作库

机器人动作库可为机器人路径规划提供基础, 机器人路径规划的约束条件即机器人动作库的动作范围, 包括机器人各关节限定值、焊接机器人与工件及设备不发生碰撞等。机器人焊枪的行走角和工作角、机器人的摆动姿势等机器人动作直接影响焊接质量, 这些信息由焊接工艺库提供, 由机器人动作库执行。机器人各轴之间的运动范围由机器人厂家提供, 在选定机器人之后, 各轴的运动范围不能改变; 机器人厂家提供焊接机器人基础动作库, 并开放数据, 便于使用者修改、补充适用于具体生产的动作库。在进行焊接生产时, 在离线编程系统中选定焊接模型, 自动生成焊缝, 根据焊缝形式调用机器人动作库的运动动作。机器人动作库建立完成之后, 经过不断试验, 优化机器人动作路径, 检验焊接质量, 确定每种焊缝对应的工作角、行走角和摆动姿势。在建立动作库时, 要注意机器人对自身和外部环境的规避导致焊枪姿态偏离理想姿态及机器人系统运行的平稳性。

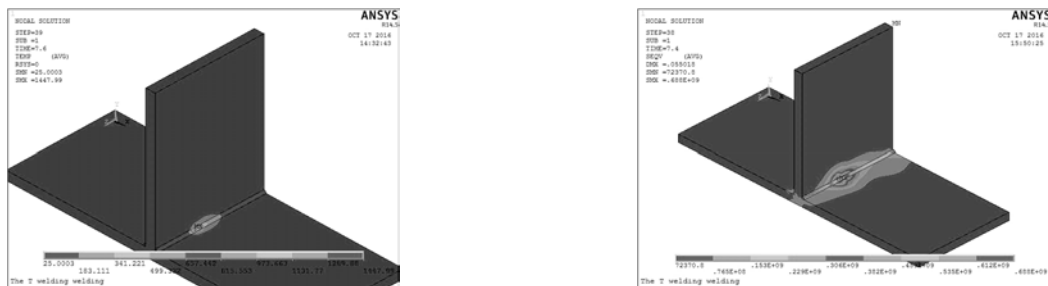
3 小组立流水线仿真技术

仿真技术对小组立智能流水线的建立尤为重要, 主要应用于以下 2 方面:

- 1) 焊接数值模拟仿真, 可在焊接试验之前优化焊接参数, 提高焊接试验的成功率, 避免使用错误参数进行焊接试验, 减少试验次数;
- 2) 对小组立智能流水线进行模拟仿真, 为流水线布置提供依据, 避免机器人运动自身干涉, 避免机器人与外部环境干涉。

3.1 焊接数值模拟仿真

利用焊接工艺仿真软件, 采用有限元分析方法进行计算。焊接工艺仿真主要针对焊接温度场、焊接应力场和焊接变形。首先设定焊件的材料常数, 建立试件模型, 对模型进行网格划分, 输入焊接参数, 施加载荷 (模拟焊接热源), 进行温度场计算, 模拟焊接传热过程和熔化冷却过程, 分析温度场计算结果 (见图 7a)); 随后, 在温度场计算的基础上进行应力场计算, 包括应力应变及残余应力应变等, 分析应力场计算结果 (见图 7b)); 最后, 分析焊接变形情况, 根据分析结果评估焊接质量, 优化焊接参数, 将优化后的焊接参数运用到焊接试验中, 降低因焊接参数致使试验失败的可能性。



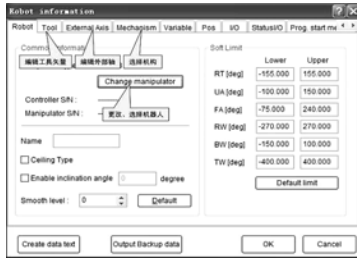
a) 温度场分布

b) 应力场分布

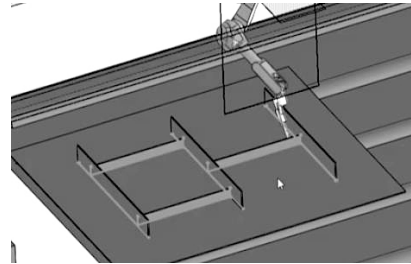
图7 焊接数值模拟

3.2 小组立智能流水线模拟仿真

利用离线编程仿真软件对小组立智能流水线进行仿真。通过软件自带的模型库（针对小组立流水线，系统供应商提供主要设备模型），选出合适的门架、辊道、机器人手臂和控制柜等，建立基本流水线模型。根据实际情况设计门架辊道高度和长度等参数信息，首先对机器人外部轴信息进行设定（包括行走轴、横行轴及旋转轴），输入机器人信息，主要是 6 个轴的运动范围（见图 8a）；随后添加焊接机构，如焊枪、送丝机等。小组立模型既可编辑输入也可导入，对模型设定起弧点和收弧点。设定工艺参数，进行生产模拟（见图 8b）。流水线模拟仿真为建立流水线提供参考，同时模拟机器人动作，避免干扰。



a) 流水线模型信息输入



b) 小组立焊接模拟

图 8 流水线模拟仿真

4 结 语

建立小组立智能流水线需集成多种先进智能制造技术，需建立小组立焊接工艺库和机器人动作库，在焊接过程中需对焊件进行定位，对焊缝进行跟踪。应用先进的仿真技术可在流水线建设前期大大减少试验量，降低建设过程中的出错率。以离线编程系统为主导，调研各关键模块，形成智能流水线应用于生产中，能大大改善劳动环境，降低劳动强度，提高劳动效率。

建立小组立智能流水线不仅可提高生产效率，还具有使船舶零部件在流水线上批量生产的作用，是中组立、大组立，甚至是分段实现流水线生产的基础。

【参 考 文 献】

- [1] 欧爽翔. 六自由度焊接机器人本体结构设计及开发[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
- [2] 夏群峰. 工业机器人软件平台及焊接相关视觉功能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [3] 彭常青. 南通中远川崎船舶智能制造项目案例[J]. 中国远洋航务, 2015 (11): 28-30.
- [4] 范乾. 南通中远川崎投产第四条机器人自动化生产线并举办智能制造创新成果展示现场会[J]. 中国远洋航务, 2016 (1): 17.
- [5] 周波. 船舶建造流程的虚拟仿真[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.



版 权 声 明

为适应我国信息化建设，扩大本刊及作者知识信息交流渠道，本刊已被国内外文献索引、文摘、全文数据和出版网站收录，凡投稿本刊的文章，均视为同意本刊授权的合作媒体使用，本刊支付的稿酬已包含授权费用。

本刊刊名船舶与海洋工程®具有商标注册证书，亦受法律保护。未经许可，不得冒用。

《船舶与海洋工程》编辑部

浮动地板在某居住舱室的应用研究

尚朝阳, 张玉立, 肖 健

(沪东中华造船(集团)有限公司, 上海 200129)

摘要: 针对采用调整结构形式和敷设阻尼涂料 2 种措施降低船舶某居住舱室的振动与噪声收效甚微的问题, 尝试采用船用浮动地板进行减振降噪, 浮动地板原理、浮动地板构成、浮动地板施工工艺、测试方案和测试结果等 5 个方面进行阐述, 验证船用浮动地板的减振降噪效果。运用浮动地板后, 经过专用仪器测量, 振动和噪声情况得到极大改善, 对其他舱室的减振降噪有一定的指导和借鉴作用。

关键词: 浮动地板; 居住舱室; 应用研究

中图分类号: U667.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-4069 (2017) 06-0055-04

Research on the Application of Floating Floor in a Cabin

SHANG Zhao-yang, ZHANG Yu-li, XIAO Jian

(Hudong-Zhonghua Shipbuilding (Group) Co., Ltd., Shanghai 200129, China)

Abstract: In view of the fact that structural form adjustment and application of damping coatings can barely solve the vibration and noise issues in a ship cabin, this study tries to lower the vibration and noise by means of marine floating floor. The five aspects including the principles, composition, work process, testing plan and test results of the floating floor are elaborated and analyzed in this paper, and the effect of the floor in terms of vibration and noise reduction is checked. After the the float floor is installed, the vibration and noise condition are significantly improved according to the measurements by special instrument, which can provide some guidance and reference for the vibration and noise reduction in other cabins.

Key words: floating floor; accommodation cabin; application research

0 引言

在船舶领域, 减振降噪是一项系统性、复杂性工程。减振降噪措施的有效性不仅需要理论支持, 更需要通过实践的检验。

某居住舱室因空间有限而布置在冷冻机房的上方, 当冷冻机组工作时, 其产生的振动和噪声严重影响居住人员的作息。通过调整结构形式及敷设阻尼涂料^[1]2 种措施控制居住舱室的振动和噪声, 效果不理想。针对上述问题, 尝试采用船用浮动地板进行减振降噪, 并从浮动地板原理、浮动地板构成、浮动地板施工工艺、测试方案和测试结果等 5 个方面进行阐述分析, 验证船用浮动地板减振降噪的效果。

1 常规措施

在船舶试航过程中发现某居住舱室的振动和噪声现象严重, 传统的改善措施是进行局部加强及敷设阻尼。

收稿日期: 2017-01-11

作者简介: 尚朝阳, 男, 工程师, 1982 年生。2007 年毕业于江苏科技大学船舶与海洋工程专业, 现从事船体结构设计工作。

由于船舶已处于试航阶段, 轮机、电气等专业的设备已安装到位, 电缆已敷设完成, 因此在进行局部加强之前需进行大量的拆除和保护工作。待拆除和保护工作完成之后, 在甲板的反面增设纵向和横向的 T 型材加强, 之后对振动和噪声进行测量, 噪声平均降低 2dB, 振动平均降低 0.2mm/s, 振动和噪声测量结果不符合居住舱室振动规则^[2]和噪声规则^[3]的要求。

由于局部加强无效, 再在甲板上敷设 T54 型阻尼涂料, 之后对振动和噪声进行测量, 噪声平均降低 3dB, 振动平均降低 0.4mm/s, 振动和噪声结果仍不符合居住舱室规范的要求。

2 常用浮动地板

常用浮动地板将隔热材料或其他弹性体直接敷设在钢甲板上作为底层材料, 上面敷设木板, 为多层式结构, 具有减振、降噪和吸声功能。常用浮动地板在建筑行业应用广泛, 并有较好的效果。

3 船用浮动地板

3.1 船用浮动地板原理

受建筑行业浮动底板启发, 可做出具有相同功能的船用浮动地板, 结构形式也为多层。船舶产品常用的隔热材料是岩棉^[4], 具有优良的防火、保温和吸声性能, 因此船用浮动地板可将岩棉作为其底层部分。为改善浮动地板的功能, 可在岩棉的上面敷设一层阻尼, 岩棉与阻尼的组合运用可使减振降噪效果最大化, 这也是一种尝试。舱室内的舾装件多为金属材质, 为便于焊接固定地板和舾装件, 浮动地板的最上层应为钢板结构。

3.2 船用浮动地板构成

浮动地板由 50mm 岩棉、1.5mm 钢条、2.0mm 钢条、西卡阻尼和 3.0mm 钢条等 5 部分组成(见图 1)。岩棉和钢板的厚度可根据具体情况进行调整, 以满足实际需要。

3.3 浮动地板施工工艺

浮动地板由多层组成, 为充分发挥其作用, 在施工过程中要严格遵守施工工艺。

- 1) 为防止岩棉弯曲, 在钢甲板上直接敷设岩棉之前, 移除钢甲板上的所有杂物。
- 2) 将岩棉(厚度为 50mm)紧密铺设在一起, 岩棉与岩棉之间不能有缝隙。同时, 将岩棉错缝铺设, 避免接缝在一条线上(见图 2)。
- 3) 在岩棉上敷设钢条, 规格为 140mm×2000mm×1.5mm。
- 4) 在钢条上敷设钢板(规格为 1000mm×2000mm×2mm, 电镀锌), 钢板的每个角间距 5cm 处及环钢板边缘每隔 25cm 处都进行点焊, 且在敷设下一层之前必须对点焊位置进行打磨。
- 5) 在西卡阻尼施工之前, 先预先测量和切割好 3mm 的钢板, 然后将切割好的钢板移开。
- 6) 使用锯齿镘刀刮涂西卡阻尼到 1.5mm 厚度(见图 3), 西卡阻尼的施工面积要略大于每次铺设的钢板面积。
- 7) 在湿的西卡阻尼层上, 直接压上 3mm 的钢板(规格为 1000mm×2000mm×3mm, 电镀锌)。
- 8) 敷设的浮动地板要与舱壁、船体结构和通舱件等保持 10mm 的距离, 并使用西卡阻尼密封边缘。
- 9) 每片顶层钢板用 5 个自攻螺钉固定, 即 4 个角和中心点各固定 1 个螺钉(见图 4)。避免将螺钉固定在顶层钢板的缝隙中, 且不要将螺钉拧到第一层钢板的钢条中。
- 10) 切除自攻螺钉的螺头。
- 11) 切除多余的西卡阻尼(见图 5)。

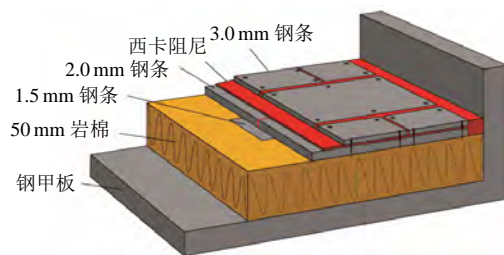


图 1 浮动地板



图 2 岩棉接缝



图 3 刮涂西卡阻尼



图 4 自攻螺钉



图 5 切除西卡阻尼

4 测试方案

4.1 概况

分 2 次对居住舱室的振动和噪声进行测量, 第 1 次测量在整改前, 第 2 次测量在整改后, 对数据进行记录分析。

4.2 测量时主要机械设备的运行情况

测量在码头进行, 2 台冷冻机组先后开启, 其余各类器械设备不运行。测量分为 3 种工况, 即: 冷冻机组 A 开启; 冷冻机组 B 开启; 冷冻机组 A 和冷冻机组 B 同时开启。

4.3 测点布置

居住舱室内共布置 6 个测点, 其中 5 个测点分布在舱室四周及中间。由于舱室前壁振动剧烈, 另在前壁构架上布置 1 个测点 (见图 6)。

4.4 测量仪器

采用丹麦 B&K 公司的 2230 型声级计^[5]测量噪声(在码头用 A 声级计对居住舱室进行噪声测量), 采用东昊公司的 DH5903 型振动仪^[6]测量振动。

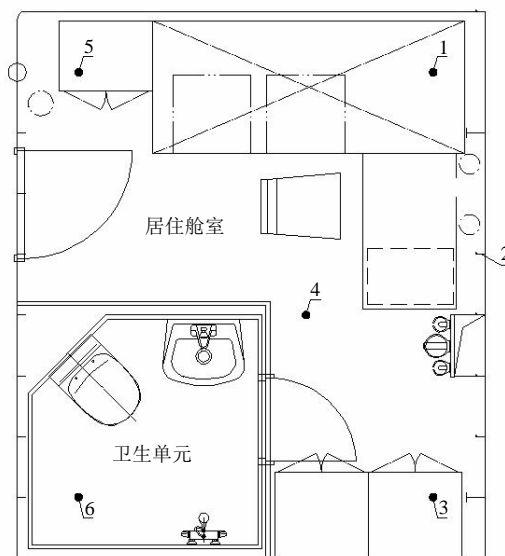


图 6 测点布置

5 测试结果

测量分 2 次进行, 分别在浮动地板敷设前和敷设后, 每次测量对应 3 种工况。表 1 为敷设前的振动测量结果, 表 2 为敷设前的噪声测量结果, 表 3 为敷设后的振动测量结果, 表 4 为敷设后的噪声测量结果。

表 1 敷设前振动测量结果

mm/s

测点号	1	2	3	4	5	6
冷冻机组 A	3.0	3.2	3.0	2.8	2.7	2.7
冷冻机组 B	2.6	2.6	2.7	2.5	2.4	2.4
冷冻机组 A+冷冻机组 B	3.5	3.6	3.5	3.3	3.2	3.1

表 2 敷设前噪声测量结果

dB

测点号	1	2	3	4	5	6
冷冻机组 A	61	61	61	60	60	60
冷冻机组 B	60	60	60	59	59	59
冷冻机组 A+冷冻机组 B	64	64	64	63	63	63

表 3 敷设后振动测量结果

mm/s

测点号	1	2	3	4	5	6
冷冻机组 A	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.6
冷冻机组 B	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6
冷冻机组 A+冷冻机组 B	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9

表 4 敷设后噪声测量结果

dB

测点号	1	2	3	4	5	6
冷冻机组 A	52	52	52	51	51	51
冷冻机组 B	51	51	51	50	50	50
冷冻机组 A+冷冻机组 B	54	54	54	53	53	53

从 4 组测量结果中可直观地看出, 敷设浮动地板后振动和噪声都有大幅度的降低, 尤其是噪声降低了 10dB, 这靠常规的措施是做不到的。民用船舶的振动标准为 6mm/s, 噪声标准为 55dB^[2], 通过采用浮动地板, 居住舱室的振动和噪声均已符合规范的要求。

6 结 语

本文通过 5 个方面的分析, 验证船用浮动地板在减振降噪方面的作用。当居住舱室因布置或其他原因存在振动和噪声问题时, 可通过敷设浮动地板来解决。当采用其他措施减振降噪效果不佳时, 也可尝试采用浮动地板来解决。目前, 国内的一些船企已逐步将上述措施运用到生产中, 并已取得良好的效果, 以后该措施的应用会更加广泛。

【参 考 文 献】

- [1] 常冠军. 黏弹性阻尼材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [2] IMO. 船上噪声等级规则: MSC.337(91)[S]. 2012.
- [3] ISO. 机械振动 客船和商船可居性振动测量、报告和评价准则: ISO 6954—2000[S]. 2000.
- [4] 中国国家标准化管理委员会. 绝热用岩棉、矿渣棉及其制品: GB/T 11835—2007[S]. 2007.
- [5] 中国国家标准化管理委员会. 电声学 声级计: GB/T 3785—2010[S]. 2010.
- [6] 中国国家标准化管理委员会. 对振动烈度测量仪的要求: GB/T 13824—1992[S]. 1992.



(上接第16页)

【参 考 文 献】

- [1] SHARP C S, NAFFIN D J, SUKHATME G S. Autonomous flying vehicle research at the university of southern california[J]. Proceedings of the 1st International Workshop on Multi-Robot Systems, 2002, 3 (9): 73-82.
- [2] 邹荣. 四旋翼飞行器姿态控制系统的研究与设计[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [3] 江斌. 小型四旋翼低空无人飞行器综合设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [4] 蔡平, 赵兴涛. 计算机云台控制系统[J]. 中国人民警官大学学报, 2006, 7 (2): 29-30.
- [5] 宁金星, 卢京潮, 闫建国. 基于 VC++的无人机飞控地面站软件的开发[J]. 计算机测量与控制, 2009, 171 (3): 596-598.
- [6] 张家怡. 图像识别的技术现状和发展趋势[J]. 电脑知识与技术, 2010, 21: 34-39.
- [7] 田书成. 基于 CMOS 图像传感器的宽动态低照度一体化摄像机的设计[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- [8] 霍宏涛. 数字图像处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [9] 高飞. MATLAB 图像处理 375 例[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015.
- [10] 周妮娜, 王敏, 黄心汉, 等. 车牌字符识别的预处理算法[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39 (15): 220-221.

VLCC 上层建筑噪声分析与控制

张明^{1,2}, 陈惠勤², 陈虹², 赵敬德¹

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 上海外高桥造船有限公司, 上海 200137)

摘要: 基于 MSC.337(91)决议通过的《船上噪声等级规则》对船舶不同处所的噪声级限值提出的新要求, 从声源、传播途径及听者等 3 个方面对船舶噪声进行系统分析, 提出开展船舶降噪设计的重点研究方向。结合某型超大型油船 (Very Large Crude-oil Carrier, VLCC) 系列船在设计优化前后、在实船试航状态下测得的典型位置的噪声数据, 重点分析部分位置噪声超标的原因, 提出并实施有针对性的噪声控制措施, 并为未来更有效地进行船舶噪声控制提供一些建议。

关键词: 噪声; 分析; 控制

中图分类号: U662.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-4069 (2017) 06-0059-07

Noise Analysis & Control in VLCC Superstructure

ZHANG Ming^{1,2}, CHEN Hui-qin², CHEN Hong², ZHAO Jing-de¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Shanghai Waigaoqiao Shipbuilding Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: Based on the new requirements on noise limits at different locations on board the ship according to the *Code on Noise Levels on Board Ships*, adopted by the Resolution of MSC.337(91), this paper carries out a general systematic analysis on ship noises from three aspects including the noise source, the noise transmission route and the recipients, so as to propose the key research directions for ship noise reduction design. Considering the noise measurement data of a series of Very Large Crude-oil Carriers (VLCCs) at some typical locations during sea trial both before and after design optimization, the reasons behind excessive noises at certain locations are analyzed, and some corresponding noise control measures are proposed, along with some suggestions for more effective ship noise control in the future.

Key words: noise; analysis; control

0 引言

1981 年, 国际海事组织 (International Maritime Organization, IMO) 发布《船上噪声级规则》(A.468(XII)), 并将其作为推荐性文件纳入 SOLAS 公约第 II-1/36 条中。2007 年, 欧洲 27 国联合向第 83 届海上安全委员会 (MSC83) 提交“船上噪声防护”提案, 以推动船上噪声控制水平的提高和强制化。该提案的提出主要基于以下 5 点理由:

- 1) 船上噪声涉及人员健康和航运安全问题, 具有导致事故发生的风险;
- 2) SOLAS 公约第 II-1/36 条中有关控制机器处所噪声至可接受水平的规定较为模糊;

收稿日期: 2017-05-08

作者简介: 张明, 男, 工程师。1985 年生。2007 年本科毕业于武汉理工大学热能与动力工程专业, 东华大学工程硕士在读, 现从事船舶设计工作。

3) 不仅是噪声最大的机器处所, 其他处所的噪声也会影响船员的健康, 而 SOLAS 公约第 II-1/36 条中只规定机器处所的噪声;

4) A.468(XII)已制定实施超过 25 a, 随着船舶设计和建造水平的不断提高, 该规则要求也应进一步提高;

5) 国际劳工组织 (International Labour Organization, ILO) 海事劳工公约也提及控制船上噪声的要求。

对此, 在 2012 年的 IMO 第 91 届海上安全委员会 (MSC91) 会上, 通过了第 338 号关于 SOLAS 修正案的决议, 自 2014 年 7 月 1 日起生效, 新增了 SOLAS 公约第 II-1/3-12 条, 要求船舶建造应符合 MSC.337(91) 决议通过的《船上噪声等级规则》, 降低船上噪声并保护人员免受噪声伤害。

对比原标准 A.468(XII), 经 MSC.337(91)修订的《船上噪声等级规则》中部分舱室可接受的噪声级限值标准有较大幅度的提高, 尤其对于 ≥ 10000 GT 的船舶, 其规定的居住舱室、医务室、餐厅、娱乐室及办公室的噪声级限值在 A.468(XII)标准的基础上减小 5dB(A), 具体见表 1^[1-2]。

表 1 不同处所的噪声级限值标准

dB(A)

舱室和处所的名称		A.468(XII)标准	MSC.337(91)标准 (船舶尺度 ≥ 10000 GT)
工作处所	机器处所	110	110
	机器控制室	75	75
	并非机器处所组成部分的工作间	85	85
	未规定的工作处所	90	85
驾驶处所	驾驶室和海图室	65	65
	瞭望位置, 包括驾驶室两翼和窗口	70	70
	无线电室 (无线电设备工作, 但不产生声响信号)	60	60
	雷达室	65	65
居住处所	居住舱室和医务室	60	55
	餐厅	65	60
	娱乐室	65	60
	露天娱乐区域 (外部娱乐区域)	75	75
	办公室	65	60
服务处所	厨房 (食物加工设备不工作)	75	75
	备膳室和配膳间	75	75
未指定的处所		90	90

1 船舶噪声的系统分析

噪声系统一般由声源、传播途径及听者等 3 部分组成^[3], 下面从这 3 个方面对船舶噪声进行系统分析。

1.1 声源

1.1.1 螺旋桨和艏部船体的噪声

在许多场合, 螺旋桨是船舶上产生剧烈振动和结构噪声的根源, 其振动部分是由作用于轴承的螺旋桨力和力矩的周期性变化引起的, 部分由作用于螺旋桨附近船体上的表面力产生。这 2 种形式的激振主要源于螺旋桨不均匀的伴流, 这同时也是产生螺旋桨噪声的主要原因^[4]。在设计阶段, 应进行船模试验, 以检查流动情况, 若需要, 可适当改变艏部船体型线, 以改善伴流。

1.1.2 机器的噪声

船舶机器的噪声主要来自主机、发电机、泵组、液压设备和排气管等设备, 其对船舶噪声级的主要影响有:

1) 机器直接辐射到空气中的噪声决定了机器附近的噪声级;

2) 空间反射的空气噪声及其混响时间决定了离机器一定距离的噪声级;

3) 相邻舱室中的噪声级一般由机器传递的结构噪声确定,也可由安装在这些舱室中的其他设备的噪声确定。

1.1.3 通风系统的噪声

在确定船上各处所的噪声级时,各通风系统的噪声亦是十分重要的影响因素。通风系统的噪声来源主要包括:

- 1) 空调装置、锅炉通风机和机舱通风机等装置的噪声;
- 2) 通风机和通风管道传递的结构噪声;
- 3) 通风管道、消声器等装置的空气噪声;
- 4) 进风口和出风口的噪声。

1.2 传播途径

在考虑船舶舱室噪声的传播途径时,通常需考察 2 种类型的声音传播,即空气噪声和结构噪声。

1.2.1 空气噪声

已发射到空气中的人耳能听到的振动称为空气噪声。在自由声场(即在没有任何屏蔽空间和反射面的情况下),根据经验公式,与声源的距离每增加 1 倍,声压级即降低 6dB^[3]。当声波在空气中传播遇到另一种性质不同的媒介时,部分能量或透过媒介传播过去,或作为媒介结构内的摩擦损失而散逸,其余的在边界面上反射。

1.2.2 结构噪声

结构噪声是指在可听频率范围内(16~20000Hz)的、在结构中以波动传播的机械振动^[3],由舱壁、木作等第二噪声源以空气噪声的形式辐射出来。由于船舶结构的主要材料是钢,其内部的阻尼很小,因而导致结构噪声在传播时的能量损失非常小。尽量使声能反射回声源的方法可有效克服结构噪声。例如,在传播途径中引入阻抗的改变、插入其他媒介及使传播途径上的几何形状发生变化等均会引起这种反射。

1.3 听者

针对听者(即噪声接受者),可考虑采取必要的管理机制和防护设备降低噪声对听者的危害。例如,根据听觉损害的危险标准和个人的感觉限制工作人员持续处在噪声环境中的时间,并配备耳塞、护耳套和护耳盔等。

2 船舶噪声的控制

设计、建造和配套是船舶噪声控制的 3 个重要环节。在设计初始阶段就将声学设计纳入整个船舶的设计过程中,可极大地降低后期进行噪声处理的成本,达到事半功倍的效果^[5]。通过上述系统分析,可将开展降噪设计的重点概述为:

- 1) 设计伴流均匀的螺旋桨和艉部船体结构;
- 2) 选用低噪声的动力装置和机械设备,对某些机械设备/排气管采取消音隔振的措施;
- 3) 在总布置设计中使噪声敏感处所尽可能地远离噪声源;
- 4) 确定合适的风管静压和风速,平稳组织通风系统的气流;
- 5) 在噪声敏感处所设置有效的吸声隔声装置,如高隔音板、浮动地板等。

3 VLCC 实船的噪声控制

3.1 VLCC 首制船的噪声数据

在基本设计阶段,为指导详细设计和生产设计采用合理的方案有效控制实船的总噪声水平,对某型超大型油船(Very Large Crude-oil Carrier, VLCC)进行噪声的计算预报。基于统计能量法的噪声预报结果(见表 2),针对预报中噪声级不满足 MSC.337(91)标准的舱室(如表 2 中的医务室、健身房和苏伊士工人

间), 为避免建造完成后实际噪声级超标, 在前期设计阶段, 对靠近机舱区域的这些主甲板舱室的围壁和天花板进行防火绝缘及吸声处理, 加装隔声效果在 42 dB(A) 以上的隔声板, 并在主甲板结构反面增加敷设隔声绝缘 (100mm 厚岩棉外包玻璃纤维布)。经过上述设计优化之后, 这 3 个舱室的实际测量结果均达到标准要求 (具体见表 3), 且位于上层建筑艏部的健身房的实际噪声环境明显优于位于上层建筑艉部、靠近机舱棚的苏伊士工人间。

表 2 某型 VLCC 的噪声计算预报结果节选

dB(A)

序号	舱室	满载工况总 噪声级预报	压载工况总 噪声级预报	A.468(XII)标准 噪声级限值	MSC.337(91)标准 噪声级限值	所属区域
1	医务室	59.076	58.480	60	55	主甲板
2	健身房	66.929	66.874	65	60	
3	苏伊士工人间	60.246	60.191	65	60	
4	水手 B 卧室	51.510	51.732	60	55	B 甲板
5	服务员卧室	52.088	52.557	60	55	

但是, 上述噪声预报亦不可避免地存在部分误差, 导致预报结果满足标准要求 (如上表 2 中的水手 B 卧室和服务员卧室) 的舱室实际测量结果仍然超标 (见表 3)。此外, 由于上述统计能量法不适用于露天开敞位置的驾驶甲板两舷, 而此处通常是船舶噪声控制的难点, 因此在实际设计过程中, 亦不可单纯依靠计算预报的结果, 而应在前者的指导下, 综合多方面的因素进行评估考虑。

表 3 某型 VLCC 试航状态的噪声测量表

dB(A)

序号	测量点	实测噪声级	A.468(XII)标准 噪声级限值	MSC.337(91)标准 噪声级限值	所属区域
1	驾驶室	58.0	65	65	驾驶 甲板
2	引水员间	48.6	60	55	
3	驾驶甲板左舷 (露天)	71.5	70	70	
4	驾驶甲板右舷 (露天)	71.1	70	70	
5	船东卧室	48.5	60	55	E 甲板
6	船长接待室	47.3	65	60	
7	船长办公室	44.6	65	60	
8	二副卧室	49.9	60	55	D 甲板
9	电机员卧室	48.1	60	55	
10	轮机长办公室	49.3	65	60	
11	轮机长卧室	45.4	60	55	
12	二管轮卧室	47.9	60	55	C 甲板
13	干部备员 3 卧室	48.3	60	55	
14	大管轮办公室	45.3	65	60	
15	大副办公室	44.0	65	60	
16	干部备员 6 卧室	50.6	60	55	B 甲板
17	船员备员 1 卧室	47.7	60	55	
18	机工 B 卧室	47.1	60	55	
19	一水手 C 卧室	44.7	60	55	
20	水手 C 卧室	52.6	60	55	
21	水手 B 卧室	56.3	60	55	
22	服务员卧室	55.6	60	55	

续表 3

dB(A)

序号	测量点	实测噪声级	A.468(XII)标准 噪声级限值	MSC.337(91)标准 噪声级限值	所属 区域
23	普通船员餐厅	55.0	65	60	A 甲 板
24	货控室	55.7	65	60	
25	高级船员餐厅	56.7	65	60	
26	厨房	64.2	75	75	
27	苏伊士工人间	57.9	65	60	主 甲 板
28	医务室	54.6	60	55	
29	健身房	51.4	65	60	
30	集控室	69.6	75	75	机 舱
31	机修间	72.4	85	85	
32	主机平台(艏)	97.8	110	110	
33	主机平台(艉)	94.1	110	110	

对表 3 中的实测数据与 A.468(XII)标准和 MSC.337(91)标准进行比较可知: 该型 VLCC 的噪声级水平均满足 A.468(XII)标准的要求; 除了驾驶甲板左/右舷及 B 甲板的水手 B 卧室、服务员卧室的实测噪声级超过 MSC.337(91)标准限值之外, 其他位置的噪声级水平均满足 MSC.337(91)标准的要求。

下面对上述超过 MSC.337(91)标准限值的噪声控制方案进行重点分析。

3.2 VLCC 后续船驾驶甲板两舷的噪声控制

驾驶甲板左/右舷的噪声测量点位于室外露天位置(见图 1), 其噪声级的大小主要取决于海面的风浪、机舱的风机和烟囱的排气口等 3 个因素。

由于海面的风浪属于不可控的自然环境因素, 故仅对机舱风机和烟囱排气口的噪声影响做进一步的分析。通过在 VLCC 首制船试航期间使其主机按试验状态正常运行及先后短暂关闭机舱棚前部左/右舷的机舱风机, 对应测得驾驶甲板左/右舷的噪声数据, 发现这 2 处的噪声级仍超标, 且与表 3 中的测量数据接近。因此, 针对后续船的驾驶甲板两舷的噪声控制, 应对烟囱排气口进行优化。

图 2 和图 3 为 VLCC 首制船的烟囱排气管布置图, 位于舷侧的锅炉排气口的末端变径部分遮挡了主机排气口(见图 3 中的阴影部分), 导致主机排气在锅炉排气管弯头处加剧了气流扰动和空气噪声向上层建筑驾驶甲板的反射。为改善后续船的主机排气, 降低从烟囱向上层建筑辐射的空气噪声, 适当加大主机排气口与锅炉排气口之间的高度差, 并更换排气管末端防火网的型式(见图 4)。

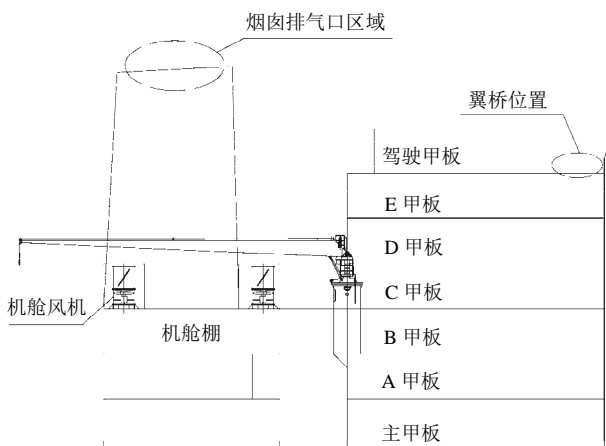


图 1 VLCC 上层建筑及机舱棚侧视图

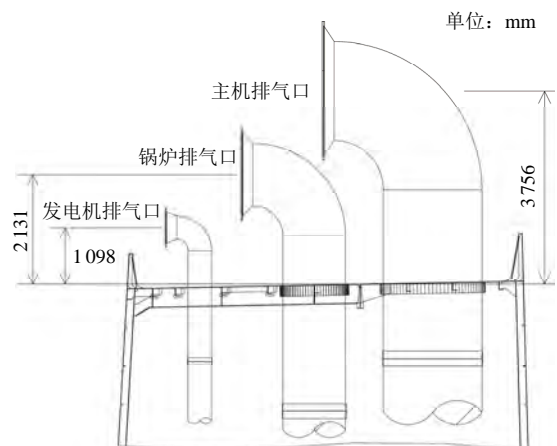


图 2 首制船的烟囱排气口侧视图

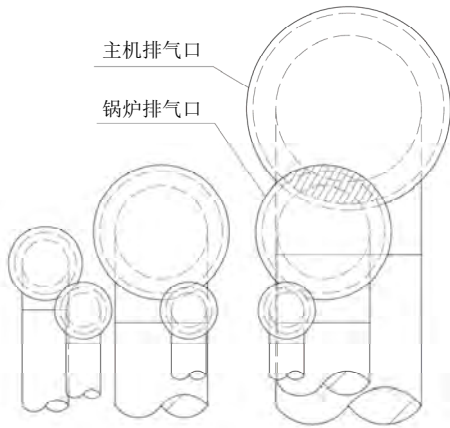


图3 首制船的烟囱排气口(从艉向艏看)

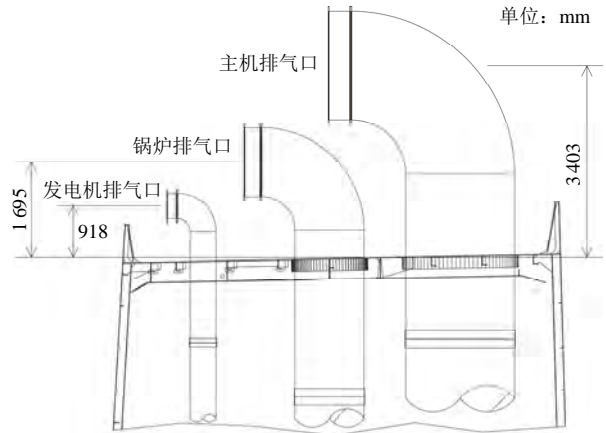


图4 后续船的烟囱排气口侧视图

经设计优化之后, 后续船测得的驾驶甲板两舷的噪声级均达标, 具体见表 4。

表 4 VLCC 后续船驾驶甲板两舷的噪声测量

dB(A)

测量点	VLCC 后续船 1	VLCC 后续船 2	MSC.337(91)标准限值
驾驶甲板左舷(露天)	68.7	68.3	70
驾驶甲板右舷(露天)	68.6	69.4	70

3.3 VLCC 后续船 B 甲板舱室的噪声控制

为查找 B 甲板的服务员卧室和水手 B 卧室噪声级偏高的原因, 选取相邻的船员备员 1 卧室和水手 C 卧室进行比较分析。相关的上层建筑 B 甲板噪声测试位置见图 5。实地勘察发现, 机舱棚 C 甲板的风机室是附近比较大的一个噪声源(见图 6), 为确定其对前述噪声敏感舱室的具体影响, 在该型 VLCC 抛锚状态下再次对上述 4 个舱室的噪声进行试验测量, 得到的相关噪声数据见表 5。

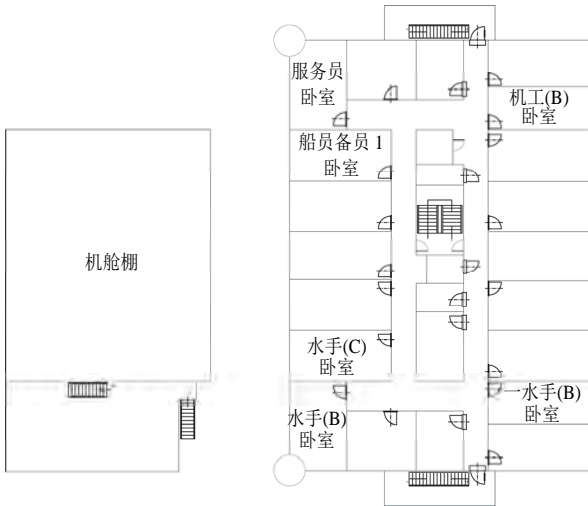


图5 VLCC 上层建筑及机舱棚 B 甲板平面图

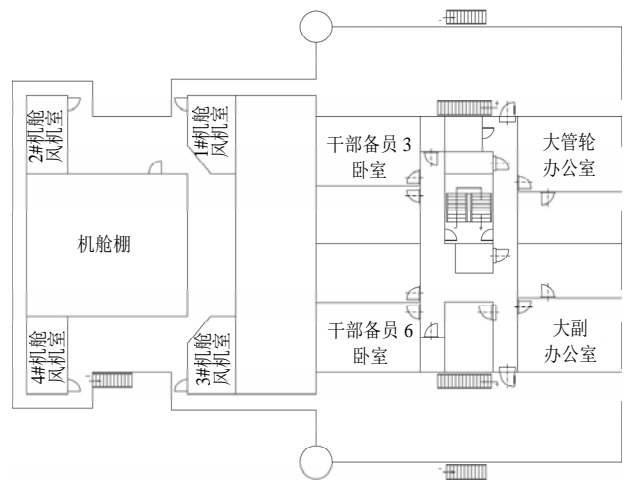


图6 VLCC 上层建筑及机舱棚 C 甲板平面图

表 5 VLCC 上层建筑 B 甲板艉部典型舱室噪声测量

dB(A)

舱室	试航状态 (主机 NCR 运行)	抛锚状态 1 (停主机)	抛锚状态 2 (停主机和 1#及 3#机舱风机)
服务员卧室	55.6	54.5	50.7
船员备员 1 卧室	47.7	47.0	45.3
水手(C)卧室	52.6	51.3	45.6

通过分析表 5 中的噪声测量数据可知:

- 1) 在上述 3 种试验状态下, 舷侧舱室的噪声级均显著高于邻近舱室;
- 2) 在关闭机舱棚 C 甲板上的 1#和 3#机舱风机后, 4 个测量点的噪声数据均大幅下降。

由上述试验结果可进一步确认: 上层建筑 B 甲板艉部舱室的噪声受到机舱风机的影响较大; 由于上层建筑 C 甲板与机舱棚之间由结构过桥直接相连, 机舱风机通过结构传递的噪声要远大于空气噪声。

为降低机舱风机结构噪声的影响, 对 VLCC 后续船进行以下降噪设计优化:

- 1) 在机舱风机室内部钢围壁增加隔音绝缘 (50mm 厚的岩棉外包玻璃纤维布、外贴铝箔);
- 2) 舷侧舱室的木作围壁采用厚度为 50mm 的高隔音板, 代替原厚度 25mm 的木作围壁板。

经过后续船的实际效果测试, 上述舱室的噪声级最终均 <55dB(A), 满足 MSC.337(91)的要求。虽然通过提高舱室隔声性能的方法可解决上述问题, 但若能在总图设计阶段将靠近机舱棚的 B 甲板舷侧住舱与靠前部的储藏室互换位置, 或改变上层建筑 C 甲板与机舱棚之间的结构过桥的整体刚性连接, 则可更好地改善居住舱室的环境, 同时降低施工成本。

4 结 语

船舶噪声控制是一项复杂的系统工程, 应在项目的基本设计阶段就予以足够的重视。此外, 为更有效地进行噪声控制, 对舱室噪声水平影响较大的关键设备, 应尽可能地在其技术协议中明确相关的工作噪声要求。此外, 在建造施工的过程中, 应严格执行工艺规范, 保障施工质量, 以达到控制噪声的总目标。

【参 考 文 献】

- [1] 国际海事组织. 船上噪声级规则: A.468(XII)[S].
- [2] 国际海事组织. 船上噪声等级规则: MSC.337(91)[S].
- [3] GHERING W L. 噪声控制参考手册[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1982.
- [4] PETERSEN J W E, STORM J F. 船舶噪声控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.
- [5] 吴刚. 船舶降噪设计、建造、船配环节[J]. 广东造船, 2014 (3): 14-15.
- [6] 吴文伟, 殷学文. 大型油船舱室噪声评估与控制[J]. 船舶力学, 2014 (12): 1524-1533.
- [7] 李艳华, 郑超凡, 崔晓兵, 等. 船舶舱室噪声总体综合控制技术[J]. 舰船科学技术, 2015 (8): 85-89.



(上接第 38 页)

该方案具有以上优点, 但也存在一定的不足。例如, 该方案对布置空间的要求略高, 要求艉侧推延伸筒体两侧足够长, 从而有足够的空间完成侧推盖启闭操作。因此, 该方案对于化学品船、油船等中低速的肥大型船舶特别适用。此外, 该套设备属于特种船舶设备, 采购成本较高, 需船东在设计前期做好预算。

2 结 语

在一艘安装有门式侧推盖的化学品船试航期间对其进行一次对比试验, 通过测量侧推盖开启和关闭 2 种状态下的航速发现, 在相同海况及相同主机功率状态下, 侧推盖关闭状态下的航速比开启状态提高 2% 左右, 燃效值提高较多。由此证明侧推盖是一种有效的节能设备, 可使船舶在保证操纵性的同时, 提高燃油效率, 降低能耗。因为操作简单、维护保养方便, 该设施适用于安装艉侧推的船舶。虽然前期需承担较高的采购成本, 但相比营运期间节省的燃油, 该设施使用仍具有很高的经济性。

【参 考 文 献】

- [1] 徐周华. 船舶艉侧推器适用的船速域[J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2002, 26 (1): 116-119.
- [2] 侯增源. 调距桨与侧推器[M]. 北京: 人民交通出版社, 1985.

DOI: 10.14056/j.cnki.naoe.2017.06.014

管理现代化

结构有限元模型局部细网格快速生成方法

张志康^{1,2}, 韩钰², 林焰¹, 陈彬², 唐宇²

(1. 大连理工大学 船舶 CAD 工程中心, 辽宁 大连 116024;

2. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011)

摘要: 在船舶结构设计环节, 一般采用直接计算方法评估结构强度。对于应力集中区域, 需采用子模型法进行细网格计算。考虑到这项工作繁琐费时, 严重影响设计效率, 提出一种快速生成结构有限元子模型局部细网格的方法。该方法基于“由几何生成有限元网格, 并采用添加辅助硬线以保证网格质量”的思路。利用 Visual Basic 语言, 基于 Catia 和 Femap 的二次开发功能, 编制可靠、实用的程序, 可极大地提高子模型的建模效率。以某集装箱船的舱口角隅为例, 验证其可靠性和快速性。

关键词: 细网格; Catia; Femap; 二次开发

中图分类号: U662

文献标志码: A

文章编号: 2095-4069 (2017) 06-0066-05

Fast Generation of Local Fine Mesh for Finite Element Structure Model

ZHANG Zhi-kang^{1,2}, HAN Yu², LIN Yan¹, CHEN Bin², TANG Yu²

(1. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Marine Design & Research Institute of China, Shanghai 200011, China)

Abstract: Direct calculation is usually used for the structure strength analysis in ship structure design and a sub-model with fine mesh is necessary for the calculation of critical stress concentration areas. Considering the fact that the modeling process is time-consuming and it severely affects the design efficiency, this study proposes a fast local fine mesh generation method for the finite element structure model. The method is based on the idea of “generating finite element mesh geometrically and adding auxiliary hard lines to guarantee mesh quality”. Taking the advantage of customized development function of Catia and Femap, a reliable and useful code has been developed with Visual Basic language, which significantly improves the efficiency of modeling. The reliability and speed of the code is validated in the modeling of hatch corner for some container ships.

Key words: fine mesh; Catia; Femap; customized development

0 引言

目前, 船舶结构强度直接算法已被广泛应用在各类船舶的设计与研究中, 主要包括设备加强计算、舱段计算和全船计算等 3 类。在工程实践中, 常采用的流程是首先进行整体粗网格模型有限元计算, 其次筛选出应力集中区域和关注区域, 最后通过建立子模型进行细网格计算, 校核关键部位的结构强度^[1]。子模型作为局部模型, 其单元属性、边界条件和载荷均可由成熟的工具自动从粗网格模型中获取, 并进行独

收稿日期: 2016-03-30

基金项目: 工业和信息化部高技术船舶科研计划 (工信部联装[2014]498号); 广东省科技计划项目 (2015B090904010; 2016B090918092); 海洋可再生能源专项资金项目 (QDME2013ZB01)

作者简介: 张志康, 男, 硕士, 1991 年生。研究方向为船舶与海洋结构物设计制造。

立的有限元计算。子模型中某些局部细网格需单独建立, 这项工作不仅枯燥烦琐, 而且费时费力, 特别是因为不规则结构(如不规则开孔和舱口角隅等)的存在, 会严重降低结构设计的效率。

为解决上述有限元建模效率较低的问题, 国内已进行许多相关研究。朱永洲等^[2]基于过程重用的思想, 利用 Catia 和 Patran 实现机翼结构有限元快速建模。陆善彬等^[3]基于 HyperMesh, 应用 Tcl/Tk 语言和内置函数开发整车铆接 SPR2 的有限元快速建模模块。李平书等^[4]利用二次开发技术, 根据 AutoCAD 中的二维结构图, 实现快速生成船舶结构的三维有限元模型的功能。单威俊等^[5]针对舱口盖的结构特点和人工建模流程, 利用 Patran 二次开发技术, 设计开发参数化有限元建模程序。总体而言, 有限元快速建模技术在船舶领域的应用较少, 尤其是结构强度计算方面。

本文在国内外已有的相关研究的基础上, 提出一种快速生成结构有限元模型局部细网格的方法(见图 1)。首先对局部结构几何建模过程中用到的方法和规则等知识进行封装; 其次采用模板参数化技术实现其外形几何模型的快速生成, 并进一步通过添加辅助硬线控制网格划分, 以保证网格质量满足计算要求及保证网格边界的协调性; 最后通过自动划分生成细网格。本文利用以下 2 款软件, 对其进行二次开发, 以便实现该方法。

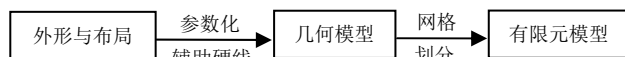


图 1 局部结构细网格生成方法

Catia V5 是法国达索公司开发的一款高端 CAD/CAM/CAE 软件系统, 在几何参数化建模方面有独特优势。此外, 为满足用户对专业化和工作效率的需求, 该系统提供了强大的二次开发接口^[6]。然而, 该版本的有限元建模和分析模块尚不完善, 且计算结果还未被船舶行业所认可。因此, 采用 Femap11.2 软件进行有限元建模。Femap 是一款高级工程有限元建模和分析应用程序, 具有高端的有限元前后处理器; 同时, 与 Catia 一样支持 Visual Basic 对其进行二次开发, 且数据接口良好, 满足各类导入、导出需求^[7]。

1 几何模型

创建准确的几何模型是实现上述方法的关键, 本文从分析局部结构的关键参数入手, 利用进程外应用程序(Out-Process Application)的方式驱动 Catia 完成外形几何模型的创建, 并结合专业规范的要求为其添加辅助硬线, 以保证网格质量。下面以简单的单圆弧正角隅为例说明该过程。

1.1 关键参数分析

单圆弧正角隅常见于大型集装箱船的货舱舱口角隅处, 是一种有效的减少应力集中的结构形式。本文基于“定形+定位”的思想, 分析其主要控制参数, 实现几何外形的快速生成。

1) “定形”: 确定单圆弧正角隅的形状, 经分析共包括 5 个形状参数, 分别为 1 个半径、2 个宽度和 2 个长度参数。

2) “定位”: 保证局部结构细网格能直接准确地嵌套在子模型中。本文采用与子模型相同的全船坐标系, 通过参考点坐标和开口方向确定其空间位置, 共有 3 个位置参数, 分别为 1 个三维点坐标和 2 个定位轴的值。

另外, 考虑到主甲板处可能会有梁拱, 再添加一个位置修正参数, 即梁拱升高角度。单圆弧正角隅及其关键参数分别见图 2。

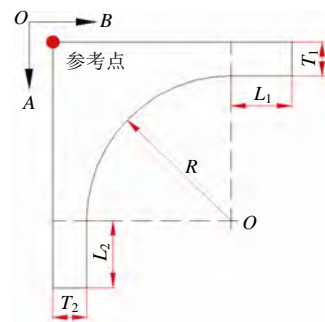


图 2 单圆弧正角隅示意图

1.2 添加辅助硬线控制

对局部结构的外形几何自动划分往往不能生成理想的有限元细网格, 因此必须添加辅助硬线来控制网格划分。本文结合相关规范的要求, 归纳工程实践经验, 总结出一套完善的细网格划分控制方法。对于单圆弧正角隅, 其圆弧自由边处为高应力区域, 必须划分高质量的有限元网格, 通过分析, 最终确定添加 3 条辅助硬线的方案(见图 3)。辅助硬线 CL_1 为一段与 R 同心的圆弧, 半径差为所需的细网格尺度; CL_2 和 CL_3 均与 CL_1 相

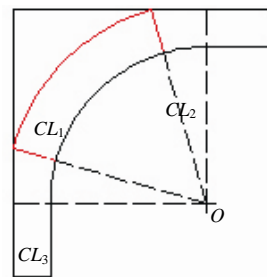


图 3 添加硬线示意图

交, 且指向圆心 O , 这样便能保证最后的网格质量。若有限元网格质量要求更高, 也可在辅助硬线 CL_1 的外圈增加一段半径为 $R+2 \times$ 网格尺寸的同圆心圆弧。

1.3 创建几何模型

经过关键参数和辅助硬线分析, 即可利用 VB 驱动 Catia 进行快速几何建模。具体处理方式: 首先建立基础几何长方形, 其次利用圆弧切割, 随后进行 L_1 和 L_2 两段长方形的拉伸操作, 最后合并各曲面, 完成“定形”操作。“定位”操作主要利用平移和旋转功能确定其空间位置, 最后利用切割几何的思想实现添加硬线的功能。部分操作代码如下:

```
.....
Set sketch2 = sketches1.Add (ref4)      '进入草图 2
Set circle2D1 = factory2D3.CreateClosedCircle (0, 0, 600)    '创建半径 R=600 mm 的圆
.....
Set Split1 = hSF1.AddNewHybridSplit(ref24, ref25, 1)    '切割操作
.....
Set Extrude1 = hSF1.AddNewExtrude (ref27, 100, 0, Direction1)    '拉伸 L1=100 mm
.....
Set Assemble1 = hSF1.AddNewJoin (ref34, ref35)    '合并曲面
.....
```

此处只给出代码的一部分, 凭借 Catia 强大的参数化建模功能, 只需上述几个关键参数便可建立局部结构的外形几何模型, 无须计算各点坐标, 因此编写任务并不繁重。

2 有限元模型

2.1 数据接口

在完成几何建模之后, 只需利用 Catia 与 Femap 之间的数据接口, 保存中间文件*.model, 便可将其导入到 Femap 中进行网格划分, 实现 CAD 模型向 CAE 模型转换的无缝衔接。该过程可由代码控制自动完成, 部分代码如下:

```
.....
Set pD1 =Catia.ActiveDocument    '激活当前文件
FilePath = "C:\Temp.model"    '设置路径
pD1.ExportData FilePath, "model"    '保存成 model 格式文件
.....
rc =Femap.feFileReadCatia (False, FilePath)    '中间文件导入 Femap
.....
```

2.2 网格划分及赋属性

由于是对曲面进行自动网格划分, 因此只需控制网格的大小。另外, 单元的属性可通过前期在 Femap 中创建、后期在程序中自动调用其 ID 进行赋值的方式完成, 部分操作代码如下:

```
.....
msize =50    '设置网格大小
For i = 0 To 3 Step 1
surfID = surf.PrevID - i
rc = Femap.feMeshSizeSurface (-surfID, True, msize)    '划分曲面边界
rc = Femap.feMeshSurface2 (-surfID, propID)    '划分曲面
Next i
rc = Femap.feViewRegenerate(0)
.....
```

至此, 单圆弧正角隅的细网格划分完成, 过程见图 4。细网格圆弧自由边上均为边长=50mm 左右的四边形单元, 满足规范对利用细网格进行屈服强度校核的要求。

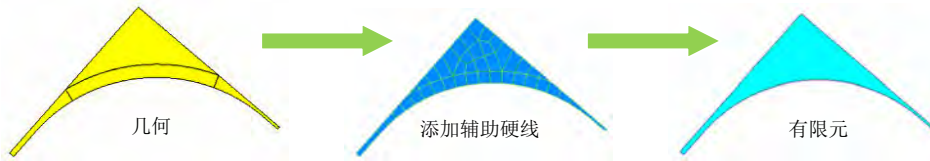


图 4 单圆弧正角隅建模过程示意图

3 程序开发

搭建程序整体框架, 采用 Visual Basic 语言, 基于 VB 6.0 平台编写程序, 并创建良好的用户界面, 以提高其程序的可操作性和交互便利性。

根据本文提出的方法, 并参照上述实现流程, 选取几个典型的局部结构作为对象编写参数化建模程序。编写对象主要分为开孔和角隅 2 种, 具体结构分类见图 5。每个局部结构都有其特点, 因此在分析关键参数和添加硬线等环节处理方法不同, 但大体上与上述思路相近, 本文不再展开说明。

程序主体框架呈星形, 以主窗体为中心, 连接各节点的子窗体。该结构简单明了、可拓展性强。主窗体作为程序的主界面, 具有启动关联软件、选择结构类型和关闭程序等作用 (见图 6)。子窗体具有主要参数输入和快速建模的功能, 同时具有交互性的提示功能, 随着输入的“定位”信息的改变而在窗体左侧显示不同的示意, 更加贴切、直观。单圆弧正角隅的子窗体见图 7。

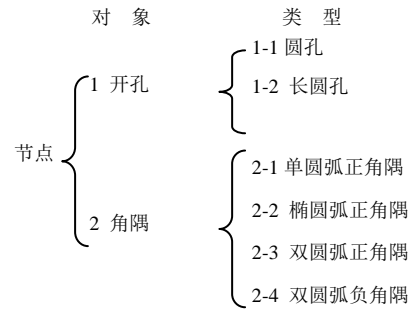


图 5 结构分类图



图 6 程序主界面

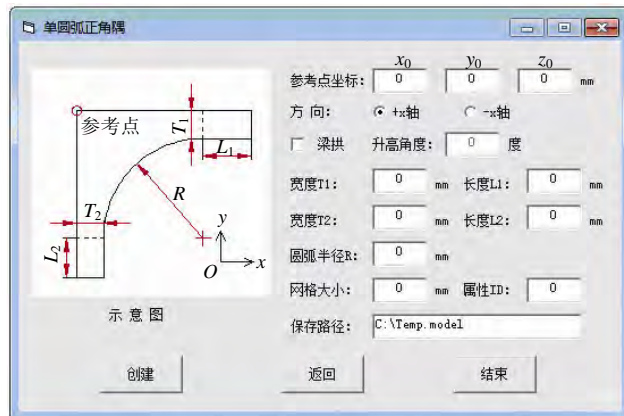


图 7 单圆弧正角隅的子窗体

选取常见的尺寸对各局部结构进行建模, 网格大小取 50mm, 各局部结构细网格模型见图 8。

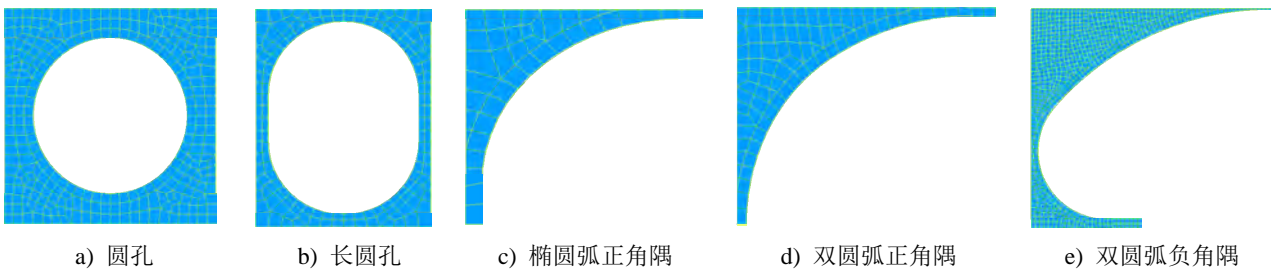


图 8 各局部结构细网格模型

4 实例应用

为验证程序的可靠性和快速性, 阐述操作过程, 以某超大型集装箱船的舱口角隅为例进行验证。该角隅为椭圆弧正角隅, 位于机舱前相邻货舱舱口围顶板处 (见图 9)。该类船型具有大开口的特点, 且大量使用高强度钢, 导致货舱舱口的角隅疲劳强度问题突出, 通常需多次优化才能满足规范的要求。因此, 不论是板厚变化, 还是几何形状改进, 都需重新划分局部细网格, 建模工作量非常大。

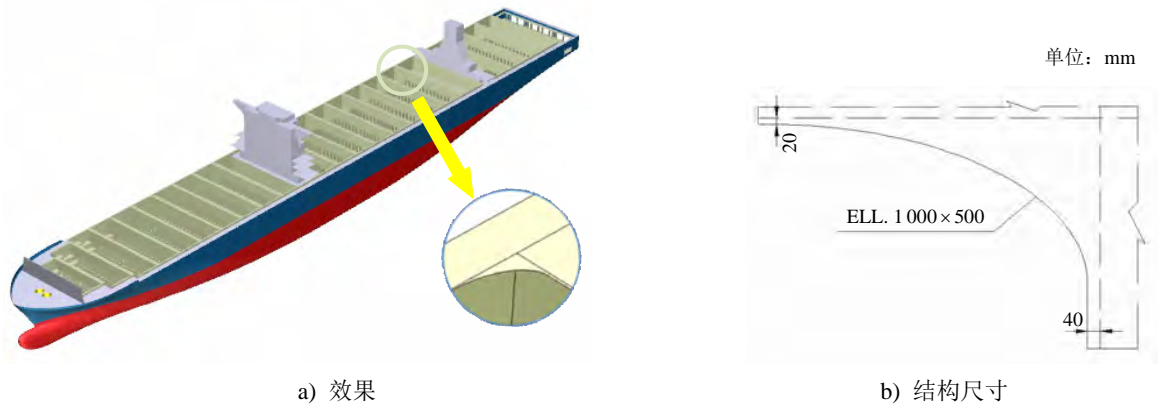


图 9 某超大型集装箱船舱口角隅

借助开发的程序建立子模型, 具体操作流程如下:

- 1) 打开本文开发的程序, 进入主界面, 点击按钮启动 Catia 和 Femap 软件;
- 2) 向 Femap 中导入子模型并初步细化;
- 3) 参照图纸确定局部结构的形状、位置和属性;
- 4) 在 Femap 中确定局部结构的板单元属性 ID (若没有该属性, 则手动创建);
- 5) 在程序主界面选择“椭圆弧正角隅”角隅类型, 点击“确定”;
- 6) 进入子窗体后, 输入关键参数、网格大小和属性 ID, 点击“创建”;
- 7) 在 Femap 中完善网格, 保证其协调性, 子模型的舱口角隅细网格划分效果见图 10。

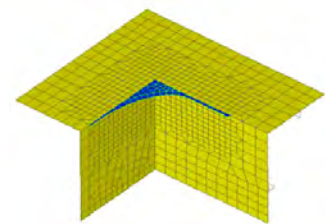


图 10 舱口角隅细网格划分效果

通过上述操作, 便可快速生成高质量的局部细网格。与传统的手动创建方法相比, 运用开发的程序使得效率有了极大提高。

5 结 语

本文提出的方法可有效解决船舶结构有限元模型局部细网格划分效率较低的问题, 既有利于提高结构设计效率, 又可为其他有限元二次开发问题提供参考。实测证明, 本文开发的程序实用、可靠, 能在一定程度上减少设计人员的重复劳动。另外, 局部细网格与相连结构网格之间的自动细化过渡技术具有后续研究价值, 实现后可进一步提高设计效率。

【参 考 文 献】

- [1] 韩钰, 陈磊, 王伟飞, 等. 超大型集装箱船的结构设计[J]. 船舶与海洋工程, 2015, 31 (4): 10-17.
- [2] 朱永洲, 席平, 唐家鹏, 等. 机翼结构有限元快速建模技术研究[J]. 航空制造技术, 2015 (19): 47-51.
- [3] 陆善彬, 吕婕, 陈伟, 等. 基于 HyperMesh 二次开发的无铆钉铆接有限元快速建模[J]. 图学学报, 2014, 35 (5): 804-808.
- [4] 李平书, 严家文, 任鸿. 船舶结构有限元模型快速生成研究[J]. 船舶, 2007 (4): 52-55.
- [5] 单威俊, 许方, 王灿, 等. 舱口盖参数化建模程序设计[J]. 船海工程, 2014, 43 (6): 10-14.
- [6] 周桂生, 陆文龙. CATIA 二次开发技术研究与应用[J]. 机械设计与制造, 2010 (1): 81-83.
- [7] 黄飞. 网络环境下桥式起重机参数化 CAE 技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2012.

《船舶与海洋工程》

2017 年第 33 卷总目次

论文名	作者	(期·页)
设计与研究		
45000t 集装箱滚装船结构设计	欧阳杰, 沈朝晖	(1·1)
基于反应谱法的水下采油树结构地震响应分析	郭俊华, 刘浏昊知, 温志杰, 吴璠, 马光灿, 陈旭俊	(1·5)
大型海洋救助船破舱稳性研究	刘金刚	(1·10)
30000dwt 载货教学实习船总体设计	杨博, 王德安, 曹山林, 武雄丽, 万芳, 东昉	(1·15)
薄膜型 LNG 船全船结构屈服和疲劳强度分析	王佳颖, 金燕子, 杨仁记, 刘金峰	(2·1)
深水钻井立管建模与角度安全控制	王芳, 白勇, 徐锋	(2·10)
FPSO 单点系泊系统安装及回接技术	梁稷, 韦卓, 余国核, 任翔, 逯晶晶	(2·18)
两种典型截面立柱绕流特性数值模拟	郭传山, 黄维平, 曹淑刚, 周阳	(3·4)
UR S11A 及 UR S34 对超大型集装箱船结构设计的影响	徐义刚, 韩钰, 李丹丹, 陈磊	(3·12)
特征载荷下海工管状结构屈曲临界载荷分析	张永强	(3·18)
自升式服务平台桩靴结构优化设计	刘玉坤	(3·23)
“海洋石油 707”综合勘察船的总体设计	贺明鸣, 李辉, 桂满海	(3·27)
开体泥驳的船型特点及其稳性计算与研究	董恩春, 贾蕊	(3·31)
边际油田开发的简易平台设计原则探讨	谢彬, 谭越, 王春升	(4·1)
海洋水下拖曳体的设计要点	王志博	(4·5)
滚装船的研究与研发	张文斌, 张敏健	(4·9)
极地双向推进破冰油船的开发与设计	汤国民	(4·15)
一种用于登乘栈桥的主动波浪补偿方法	苏长青, 郑文彬, 曾悠兵, 丁德甫	(4·22)
声学驱鱼技术研究	殷勇勤, 吕友林, 赵传达, 彭文林	(4·26)
集滚船艏部船体搭载下沉预报与实测分析	万忠, 王佳颖, 杨立志	(5·9)
基于能量法的船用气囊爆炸模型及破坏研究	赵殿华, 段青灵	(5·15)
13000DWT 敞口多用途船耐波性试验研究	何新宇, 杨博, 陈晓敏	(5·23)
SPB 型 LNG 运输船温度场研究	马晨增, 唐文勇	(5·28)
直升机甲板结构优化设计	马振淼, 朱伯华, 张金宝, 周俊, 于洋	(5·34)
DP 状态下船舶噪声测量方法分析	储年生, 练兆华	(5·39)
基于 MSC.337 (91) 的组合结构的隔声计算与设计	潘溜溜, 刘锟, 陈惠勤	(5·43)
物探震源船的总体设计	刘学勤, 蒋洪涛, 张海彬	(5·48)
NAPA STEEL 在豪华邮轮开发设计中的应用	沈童伟, 杨晓锐, 徐旭敏, 樊祥栋	(5·53)
月池水动力特性及其对船舶运动的影响研究	邹康, 桂满海, 罗良	(5·59)
国内外船舶气泡减阻技术的研究与应用	胡以怀, 李慧晶, 何浩	(6·1)
计及温度载荷的沥青船结构强度有限元计算分析	陈第一, 王伟, 谢永和, 鲁昕	(6·7)

一种具有目标识别功能的舰载警用飞行系统的设计	何学明 (6·13)
LNG 接收站薄膜型储罐技术研究	宋忠兵, 徐岸南, 刘恒 (6·17)
船体极限强度非线性有限元计算方法	伍友军, 万琪, 周博 (6·20)
中小型 C 型罐 LNG 船甲板布置	周伟 (6·26)

轮机与辅机

36000dwt 多用途船动力系统集成方案设计研究	王建政, 李善从, 王涛, 付军涛 (1·23)
重载情况下船舶及主机加速问题分析	王冬冬, 邓高雄, 周勇祥, 王磊 (2·24)
双燃料发动机在 LNG 运输船上应用难点与对策	段斌, 王志敏 (2·30)
基于 ANSYS-WORKBENCH 的绞车卷筒受力分析与试验研究	孙凯, 柳胜 (3·35)
中国首批大型 LNG 船振动问题及解决方案研究	朱哲仁, 袁红良 (3·40)
双燃料柴油机超负荷工况燃烧特性分析	葛越锋, 龚希武, 张恒 (4·32)
基于 VGT 技术的游艇发动机推进特性分析	官德亮, 夏清梁, 高占斌 (4·37)
LNG 船推进装置对比分析	宋丹, 郭强 (4·43)
某矿砂船主机燃油限制问题分析	刘永歆, 柯小磊, 刘清江, 王家支 (4·48)
船舶螺旋桨轻转裕度探讨	吴小平 (5·64)
大型 LNG 船回气压缩机运行工况点分析	刘涛, 岑卓伦, 徐岸南 (6·30)
一种新型船舶节能设备——门式艏侧推盖的探索	吴安, 王忠强, 孔明敏 (6·36)

电气与自动化

基于变频驱动的自升式钻井平台升降控制系统	袁飞晖, 张纪昱 (1·31)
中大型 AHTS 推进及电站系统的配置分析	胡鹏 (1·39)
超大型集装箱船低压配电系统设计	傅晓红, 陆士平, 谢宋清, 周祎隆, 夏骏 (2·35)
自升式钻井平台安全系统设计	袁飞晖, 陈霖 (2·40)
基于喷水推进器的单手柄操纵系统推力分配策略	谢笑颖, 郝芳, 刘赞 (2·46)
5000dwt 多用途天然气动力滚装船电气设计	夏明宽 (3·46)
太阳能光伏电力系统在 800PCC 滚装船上的应用研究	邹丽丽 (3·51)
内河船舶操纵模拟器中 AIS 的仿真	丛琳, 任鸿翔, 张新宇 (4·52)
超大型集装箱船冷箱配电系统设计探析	傅晓红, 谢宋清, 周祎隆, 夏骏 (4·56)
电机集中管理系统在船舶上的设计应用	王福利, 郭力峰 (5·68)

规范与标准

集装箱安全系固新要求	马小明 (2·62)
ISO 15016—2015 及其对实船测速的影响分析	余欣, 陈胜兰, 蔡跃胜 (5·82)
VLCC 上层建筑噪声分析与控制	张明, 陈惠勤, 陈虹, 赵敬德 (6·59)

工艺与材料

基于仿真的室内装焊工场分段建造方案评估与优化	朱明华, 李沛田, 单小芬, 毛申飞, 朱仁贵 (1·43)
45000t 集装箱滚装船导轨架、挡雨盖的安装设计	赵志华, 王忠强, 杨瑞玲 (1·48)
45000t 集装箱滚装船汽车升降甲板安装研究	王忠强, 赵志华, 蒋冬华 (1·54)

大型艀跳板铰链对中及其测量技术研究	黄中坚, 黄云峰, 杨立志, 王 辉 (1·59)
18000TEU 集装箱船关键建造技术	刘建峰, 张海甬, 孙建志, 卢军国, 邵 丹 (1·65)
45000t 集装箱滚装船水密门精度控制	王寿祥, 宫劲楠, 刘 杨 (2·53)
45000t 集装箱滚装船超高导轨架精度控制	蔡鹏天, 杨立志, 张晨俊 (2·57)
45000t 集装箱滚装船超大型艀门安装技术研究	姜志强, 赵志华, 杨瑞玲 (3·55)
双相不锈钢热处理变形矫正工艺预研	黄一平, 林 坤 (3·62)
船舶关键节点监控工艺的特别关注	李克杰 (3·67)
深水水下作业工具简易运输装置研究	赵 洁, 刘富鹏, 杨 宁, 王 青 (3·73)
特种钢材双曲板焊接压模设计与制造方法	伍朝晖, 吴一忠, 俞 峰, 尹 群, 钱春俊 (4·63)
管子先焊后弯法兰预转角的计算和验证方法	邵国庆, 赵寅妮, 石 萍, 李冲健 (4·68)
LNG 船货舱专用小螺柱焊机国产化选型及应用	翁红兵, 金戈天, 王 森 (4·73)
AH32 船用钢板韧脆转变温度测试与分析	陈静华, 赵 华, 吴泽南, 张春娥 (5·72)
FPSO 单点系泊上锚缆更换技术	符方超, 高 原, 高 超, 杨 盛 (5·77)
液化气船独立 C 型液罐主体材料的选择和应用	张朝华, 冯大成, 华学明 (6·39)
小组立机器人装焊生产线总体设计研究	吉永军, 朱玉龙, 刘建峰 (6·44)
小组立智能流水线关键技术分析	赵德鑫, 朱玉龙, 刘建峰 (6·49)
浮动地板在某居住舱室的应用研究	尚朝阳, 张玉立, 肖 健 (6·55)

综 述

国有企业技术创新的思考	蔡惠星 (3·1)
美国舰船总体概念设计技术发展典型特点分析	汪 浩, 裴大茗, 甘 霖, 郝威巍, 陈荣志, 陈宜坤 (5·1)

管理现代化

基于 PLC 技术的船舶摇摆平台模型程序设计	余泛泳, 刘彦东, 陈海泉 (1·72)
基于 VR 技术的船厂分段堆场数字资产管理系统开发	王 真, 郑鹏飞, 丁炜杰, 俞凌云, 何 迪, 邱宇舟 (2·67)
基于工作包/派工单的船舶总组/搭载仿真与优化	朱明华, 单小芬, 毛申飞, 朱仁贵 (2·72)
SEM 系统在内协项目中的应用优化	盛 兴, 宋瑞鹏, 凌 兵 (3·78)
结构有限元模型局部细网格快速生成方法	张志康, 韩 钰, 林 焰, 陈 彬, 唐 宇 (6·66)

信息与统计

2016 年上海建造完工主要民用船舶主尺度要素表	(1·76)
2016 年《船舶与海洋工程》第 32 卷总目次	(6·I)

NAVAL ARCHITECTS AND OCEAN ENGINEERS

2017 Vol. 33 General Index

DESIGN AND RESEARCH

- Structural Design of 45 000t Con-Ro Ship OUYANG Jie, SHEN Zhao-hui (1 • 1)
- Study on the Seismic Response Analysis of Subsea Christmas Tree Structure Based on Response Spectrum Method
..... GUO Jun-hua, LIU Liu-hao-zhi, WEN Zhi-jie, et al. (1 • 5)
- Study on the Damage Stability of Large Seagoing Rescue Ships LIU Jin-gang (1 • 10)
- General Design of a 30 000dwt Training Ship YANG Bo, WANG De-an, CAO Shan-lin, et al. (1 • 15)
- Analysis on the Yield Strength and Structure Fatigue of a Membrane LNG Carrier with Global Finite Element Method
..... WANG Jia-ying, JIN Yan-zi, YANG Ren-ji, et al. (2 • 1)
- Modeling and Safety Control of Deepwater Drilling Riser Angles WANG Fang, BAI Yong, XU Feng (2 • 10)
- Installation and Hook-up Technology for FPSO Single Point Mooring System
..... LIANG Ji, WEI Zhuo, YU Guo-he, et al. (2 • 18)
- Numerical Simulation of the Flow Around Two Columns with Different Sections
..... GUO Chuan-shan, HUANG Wei-ping, CAO Shu-gang, et al. (3 • 4)
- The Impact of UR S11A and UR S34 on the Structure Design of Ultra Large Container Ship
..... XU Yi-gang, HAN Yu, LI Dan-dan, et al. (3 • 12)
- Analysis on the Critical Buckling Load of Offshore Pipe Structure under Characteristic Load
..... ZHANG Yong-qiang (3 • 18)
- Design Optimization for the Spudcan Structure of Jack-up Service Platform LIU Yu-kun (3 • 23)
- General Design of the Multi-Functional Survey Vessel *Hai Yang Shi You 707*
..... HE Ming-ming, LI Hui, GUI Man-hai (3 • 27)
- Study on the Hull Form of Hopper Splitter Barge and Calculation of Its Stability DONG En-chun, JIA Rui (3 • 31)
- Discussion on Design Philosophy of Minimal Platform for Marginal Oil Field Exploration
..... XIE Bin, TAN Yue, WANG Chun-sheng (4 • 1)
- Key Factors for Design of the Object Towed Underwater WANG Zhi-bo (4 • 5)
- Research and Development of Ro-Ro Ships ZHANG Wen-bin, ZHANG Min-jian (4 • 9)
- Development and Design of a Double Acting Ice Breaking Tanker Operating in the Polar Area TANG Guo-min (4 • 15)
- An Active Wave Compensation Method for the Gangway of Wind Turbine Maintenance Vessel
..... SU Chang-qing, ZHENG Wen-bin, ZENG You-bing, et al. (4 • 22)
- A Research on the Acoustic Fish Herding Technology
..... YIN Yong-qin, LYV You-lin, ZHAO Chuan-da, et al. (4 • 26)
- Prediction and Measurement Analysis on the Stern Hull Sinkage of a CON-RO Vessel in Erection Stage
..... WAN Zhong, WANG Jia-ying, YANG Li-zhi (5 • 9)
- Study on Marine Airbag Explosion Model and Damage Based on Energy Method
..... ZHAO Dian-hua, DUAN Qing-ling (5 • 15)

Research on the Seakeeping Model Test of a 13 000 dwt Open-Top Multi-Purpose Vessel	HE Xin-yu, YANG Bo, CHEN Xiao-min (5 • 23)
Research on the Temperature Field of SPB Type LNG Carrier	MA Chen-zeng, TANG Wen-yong (5 • 28)
Design Optimization of Helicopter Deck Structure	MA Zhen-miao, ZHU Bo-hua, ZHANG Jin-bao, et al. (5 • 34)
Analysis on Ship Noise Measurement Under DP Condition	CHU Nian-sheng, LIAN Zhao-hua (5 • 39)
Sound Insulation Calculation and Design of Composite Structure Based on MSC.337(91)	PAN Liu-liu, LIU Kun, CHEN Hui-qin (5 • 43)
General Design of Seismic Source Vessel	LIU Xue-qin, JIANG Hong-tao, ZHANG Hai-bin (5 • 48)
Application of NAPA STEEL to the Development and Design of Luxury Cruiser	SHEN Tong-wei, YANG Xiao-ru, XU Xu-min, et al. (5 • 53)
Study on Moonpool Hydrodynamics and Its Effect upon Ship Motions	ZOU Kang, GUI Man-hai, LUO Liang (5 • 59)
Research and Application of Ship's Bubble Drag Reduction Technologies at Home and Abroad	HU Yi-huai, LI Hui-jing, HE Hao (6 • 1)
Finite Element Calculation and Analysis of Asphalt Carrier's Structural Strength Taking into Account the Temperature Load	CHEN Di-yi, WANG Wei, XIE Yong-he, et al. (6 • 7)
Design of a Shipborne Police Flight System with Target Identification Function	HE Xue-ming (6 • 13)
Technical Study on the Membrane Type Storage Tanks of LNG Receiving Station	SONG Zhong-bing, XU An-nan, LIU Heng (6 • 17)
Research on the Nonlinear Finite Element Method for Ultimate Strength of Ship Hulls	WU You-jun, WAN Qi, ZHOU Bo (6 • 20)
Deck Arrangement of Small-and Medium-Size LNG Carrier with Type C Independent Tank	ZHOU Wei (6 • 26)
POWER INSTALLATION AND AUXILIARIES	
Study on the Power System Integration Design of a 36 000 dwt Multi-Purpose Vessel	WANG Jian-zheng, LI Shan-cong, WANG Tao, et al. (1 • 23)
Analysis of the Acceleration of Ship and Main Engine under Heavy Load	WANG Dong-dong, DENG Gao-xiong, ZHOU Yong-xiang, et al. (2 • 24)
Difficulties and Countermeasures for the Application of Dual Fuel Engine on LNG Carriers	DUAN Bin, WANG Zhi-min (2 • 30)
ANSYS-WORKBENCH Based Load Analysis and Experimental Study of Winch Drum	SUN Kai, LIU Sheng (3 • 35)
Study on the Vibration and Solutions of China's First Series of LNG Carriers	ZHU Zhe-ren, YUAN Hong-liang (3 • 40)
Analysis on the Combustion Characteristics of Dual Fuel Engine Under Overload Conditions	GE Yue-feng, GONG Xi-wu, ZHANG Heng (4 • 32)
Analysis on the Engine Propulsion Characteristics of Yacht Based on VGT Technology	GUAN De-liang, XIA Qing-liang, GAO Zhan-bin (4 • 37)
Analysis and Comparison of Main Propulsion Units for LNG Carrier	SONG Dan, GUO Qiang (4 • 43)
A Reason Analysis for the Malfunction of Main Engine Fuel Limiter on an Ore Carrier	LIU Yong-xin, KE Xiao-lei, LIU Qing-jiang, et al. (4 • 48)
On the Light Running Margin of Marine Propellers	WU Xiao-ping (5 • 64)

Analysis on the Vapor Return Compressor Operating Point of Large LNG Carriers
 LIU Tao, CEN Zhuo-lun, XU An-nan (6 • 30)

Exploration of a New Type of Energy-Saving Device for Ships—Door-Type Bow Thruster Cover
 WU An, WANG Zhong-qiang, KONG Ming-min (6 • 36)

ELECTRIC EQUIPMENT AND AUTOMATION

Study on the Jacking Control System for Jack-Up Drilling Platform Based on Variable Frequency Drive
 YUAN Fei-hui, ZHANG Ji-yu (1 • 31)

Analysis on the Configuration of Propulsion and Power Systems for both Medium and Large AHTS Vessels ... HU Peng (1 • 39)

Design of Low Voltage Power Distribution System for Very Large Container Ship
 FU Xiao-hong, LU Shi-ping, XIE Song-qing, et al. (2 • 35)

Design of the Security System for Jack-Up Drilling Rig YUAN Fei-hui, CHEN Lin (2 • 40)

Research on Waterjet Propeller Thrust Allocation Based on Joystick Operating System
 XIE Xiao-ying, HAO Fang, LIU Yun (2 • 46)

Electrical Design of a LNG Powered 5 000 dwt Multi-Purpose RORO Vessel XIA Ming-kuan (3 • 46)

Research on the Application of Solar Photovoltaic System onboard 800PCC RO-RO Ship ZOU Li-li (3 • 51)

Simulation of AIS in Inland Waterway Ship Handling Simulator
 CONG Lin, REN Hong-xiang, ZHANG Xin-yu (4 • 52)

Design Analysis on the Power Distribution System for Reefer Containers of Very Large Container Vessel
 FU Xiao-hong, XIE Song-qing, ZHOU Yi-long, et al. (4 • 56)

Design and Application of Centralized Motor Management System on Ships WANG Fu-li, GUO Li-feng (5 • 68)

RULE AND STANDARD

New Requirements on Safe Practice for Container Securing MA Xiao-ming (2 • 62)

Analysis of ISO 15016-2015 and its Effect on the Speed-test in Sea Trial
 YU Xin, CHEN Sheng-lan, CAI Yue-sheng (5 • 82)

Noise Analysis & Control in VLCC Superstructure ZHANG Ming, CHEN Hui-qin, CHEN Hong, et al. (6 • 59)

TECHNOLOGY AND MATERIAL

Evaluation and Optimization of Simulation Based Block Construction Scheme for Indoor Assembly in Welding Workshop
 ZHU Ming-hua, LI Pei-tian, SHAN Xiao-fen, et al. (1 • 43)

Installation Design of Guide Rail Bracket and Rain Cover for 45 000t Con-Ro Vessel
 ZHAO Zhi-hua, WANG Zhong-qiang, YANG Rui-ling (1 • 48)

Study on the Installation of Hoistable Car Deck for 45 000t Con-Ro Vessel
 WANG Zhong-qiang, ZHAO Zhi-hua, JIANG Dong-hua (1 • 54)

Study on Hinge Alignment and Its Measurement Technique in Large Quarter Ramp Installation
 HUANG Zhong-jian, HUANG Yun-feng, YANG Li-zhi, et al. (1 • 59)

Key Technologies of 18000TEU Container Ship Construction
 LIU Jian-feng, ZHANG Hai-yong, SUN Jian-zhi, et al. (1 • 65)

Precision Control of the Watertight Door on 45 000t Con-Ro Ship
 WANG Shou-xiang, GONG Jin-di, LIU Yang (2 • 53)

Precision Control Technique for Ultra-High Guide Frame onboard 45 000t Con-Ro Ship

.....	CAI Peng-tian, YANG Li-zhi, ZHANG Chen-jun (2 • 57)
Research on the Installation of Super Large Stern Door of 45 000 t Con-Ro Ship	
.....	JIANG Zhi-qiang, ZHAO Zhi-hua, YANG Rui-ling (3 • 55)
Pre-research on Heat-Treatment Flatten Method in Duplex Stainless Steel Construction	
.....	HUANG Yi-ping, LIN Kun (3 • 62)
Special Attention Paid to Monitoring Procedure of Ship's Critical Nodes LI Ke-jie (3 • 67)
Research on the Simple Transport Device for Deepwater ROV Tools	
.....	ZHAO Jie, LIU Fu-peng, YANG Ning, et al. (3 • 73)
Design and Manufacturing Method for Welding Pressing Die of Special Hyperbolic Plate	
.....	WU Zhao-hui, WU Yi-zhong, YU Feng, et al. (4 • 63)
Calculation and Verification Method of Flange Pre-Rotation Angle for Pipes Welded Before Bending	
.....	SHAO Guo-qing, ZHAO Yin-ni, SHI Ping, et al. (4 • 68)
Selection and Application of Chinese Branded Small Stud Welding Machine for the Cargo Tank Construction of LNG Carrier	
.....	WENG Hong-bing, JIN Ge-tian, WANG Sen (4 • 73)
Test and Analysis of Ductile-Brittle Transition Temperature for AH32 Marine Steel Plate	
.....	CHEN Jing-hua, ZHAO Hua, WU Ze-nan, et al. (5 • 72)
The Technology of FPSO Single Point Mooring Upper Wire Replacement	
.....	FU Fang-chao, GAO Yuan, GAO Chao, et al. (5 • 77)
Selection and Application of Main Body Material for the Independent Type C Cargo Tank of Liquefied Gas Carrier ZHANG Zhao-hua, FENG Da-cheng, HUA Xue-ming (6 • 39)
Study on the Overall Design of the Robot Production Line for Sub Assembly	
.....	JI Yong-jun, ZHU Yu-long, LIU Jian-feng (6 • 44)
Analysis on the Key Technologies of Sub Assembly Intelligent Production Line	
.....	ZHAO De-xin, ZHU Yu-long, LIU Jian-feng (6 • 49)
Research on the Application of Floating Floor in a Cabin SHANG Zhao-yang, ZHANG Yu-li, XIAO Jian (6 • 55)
SURVEY	
Consideration of Tech-Innovation in State-Owned Enterprises CAI Hui-xing (3 • 1)
An Analysis on the General Concept Design Technology of the U.S. Naval Ship	
.....	WANG Hao, PEI Da-ming, GAN Lin, et al. (5 • 1)
MODERNIZATION OF MANAGEMENT	
PLC Based Model Programming Design for Ship Swaying Platform	
.....	YU Fan-yong, LIU Yan-dong, CHEN Hai-quan (1 • 72)
Development of Digital Asset Management System for Shipyard Block Stock Based on VR Technology	
.....	WANG Zhen, ZHENG Peng-fei, DING Wei-jie, et al. (2 • 67)
Ship Pre-erection/Erection Simulation and Optimization Based on Work Package/Work Order	
.....	ZHU Ming-hua, SHAN Xiao-fen, MAO Shen-fei, et al. (2 • 72)
Application and Optimization of SEM System in the In-house Collaboration Projects	
.....	SHENG Xing, SONG Rui-peng, LING Bing (3 • 78)
Fast Generation of Local Fine Mesh for Finite Element Structure Model	
.....	ZHANG Zhi-kang, HAN Yu, LIN Yan, et al. (6 • 66)

《船舶与海洋工程》编辑委员会

Editing Committee of 《Naval Architecture and Ocean Engineering》

特邀顾问：何友声 院士 潘镜芙 院士

主任：邢文华

主编：蔡惠星

副主编：陈传明 易智强

广告负责人：范成阳

委员（以姓氏笔画为序）：

王文涛 王鸣放 毛欣维 冯明志 叶锦文 刘 赟 李小平 李正建 李国瑞 杨平西
肖善红 邹元晶 陈 钢 范余明 张 敏 张世联 周国平 俞则人 陶 颖 唐文勇
桂文彬 谢子明 楼丹平 甄在龙

海外特邀编委

Specially Invited Overseas Members of the Editing Committee

Mr Peter Noble	President, the Society of Naval Architects and Marine Engineers 美国造船工程学会理事长
Prof. Vladimir L. Aleksandrov	President, Science and Technology Society of Shipbuilders of Russian Federation 俄罗斯造船科技学会理事长 教授
Prof. Kirill Rozhdestvensky	Vice-President, Science and Technology Society of Shipbuilders of Russian Federation 俄罗斯造船科技学会副理事长 教授
Mr Trevor Blakeley	Chief Executive, the Royal Institution of Naval Architects 皇家造船师学会首席执行官
Dr. William Megill	Chair of Proceedings Supervisory Board, the Institute of Marine Engineering, Science and Technology 轮机工程及海事科技学会监事会主席 博士
Dr. Shuhong Chai	The Australia, New- Zealand and South Pacific Division of the Institute of Marine Engineering, Science and Technology 轮机工程及海事科技学会澳新南太平洋分会 博士
Prof. Hiroyuki Yamato	President, the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 日本造船师与海洋工程师学会理事长 教授
Prof. Sang -Rai Cho	Former president, Society of Naval Architects of Korea 韩国造船学会原理事长 教授
Prof. Yoo Sang Choo 曹耀生	President, Society of Naval Architects and Marine Engineers Singapore 新加坡造船工程学会理事长 教授
Ir Chan Ming Yau 陈铭佑	Chairman, the Hong Kong Joint Branch of the Royal Institution of Naval Architects and the Institute of Marine Engineering, Science and Technology 香港联合分会主席
Ir Tang Kai Fun 邓启勋	Committee member, the Hong Kong Joint Branch of the Royal Institution of Naval Architects and the Institute of Marine Engineering, Science and Technology 香港联合分会委员
Dr. Jiahn -Hong Chen 陈建宏	Council member, Taiwan Society of Naval Architects and Marine Engineers 台湾造船暨轮机工程师学会理事 博士



ROPENET

中国绳业领导品牌

鲁普耐特集团经过15年的快速发展，现已成为集化纤绳缆生产、设计和研发为一体的综合绳缆服务商。本着立足高端，更好服务于全球海洋工程的发展战略，我们投入巨资从欧洲引进高精度缆绳生产设备，并建成两个总面积之和约360亩的绳缆生产和研发产业园区；同时，我们联合国内知名大学和科研院所共同为客户提供全方位的绳缆需求解决方案。未来，我们将持续研发绳缆新技术应用新材料，以此来满足日益多样化的绳缆需求。

Through 15 years fast growth RopeNet Group has become one of the most professional fiber rope manufacturers in China. Right now we have two industrial parks with totally 60 acres production area and made big investment to equip advanced production facilities from Europe and also cooperate with top universities and academies in China to provide full solution to global maritime industry customers. We always focus on new technology and material to design and make rope for diversified applications.



Lloyd's Register



EAST HIGH-TECH DEVELOPMENT ZONE
TAIAN, SHANDONG, CHINA

TEL 86-538-8669566 rope7@ropenet.com
FAX 86-538-8516628 www.ropenet.com

**SWS**上海外高桥造船有限公司
SHANGHAI WAIGAOQIAO SHIPBUILDING CO., LTD.

筑梦海洋 造福人类

Sailing With Success

CONTRIBUTE TO THE DREAMS OF OCEAN



上海外高桥造船有限公司成立于1999年，是中国船舶工业集团公司旗下的上市公司——中国船舶工业股份有限公司的全资子公司。发展至今，公司已成为业内具备规模化、现代化、专业化和影响力的造船企业之一。

公司累计承建并交付的好望角型散货船占全球好望角型散货船队比重的15%，30万吨级超大型油轮（VLCC）累计交付量占全球VLCC船队的9%；已交付3艘18000TEU超大型集装箱船和8艘83000m³大型液化气运输船；在建的民用产品还有40万吨超大型矿砂船、20000TEU和21000TEU超大型集装箱船、苏伊士型油轮以及冰区加强型阿芙拉型油轮等。在海工装备领域，公司承建的产品有海上浮式生产储油轮（FPSO）、深水半潜式钻井平台、自升式钻井平台（Jack-up）、深水钻井船、海工辅助船（PSV）等。根据中船集团的统一部署，公司计划开始国内首制豪华邮轮项目的建造工程。截至2017年10月，公司累计交付的各类船舶、海工产品超过415艘（座）。

民船

超大型矿砂船
好望角型散货船
阿芙拉型油轮
苏伊士型油轮
超大型原油轮
集装箱船
气体船

豪华邮轮

海工

海上浮式生产储油轮
自升式钻井平台
深水半潜式钻井平台
钻井船
海工辅助船



扫描二维码关注公司官方微信

地址：上海市浦东新区洲海路3001号
电话：021-38864500
邮箱：office@chinasws.com
www.chinasws.com

展位号：W5馆

中国标准连续出版物号：

ISSN 2095-4069

CN 31-2076/U

邮发代号：4-890

定价：15.00元