

# 船舶轻量化结构的强度优化理论研究

师计伟

招商局邮轮制造有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i7.18234

**[摘要]** 实现船舶轻量化与结构强度协同优化,本文立足船舶业中的邮轮建造实践,以“安全冗余可控、重量精准递减”为核心原则,结合IACS UR W等规范,系统探讨船舶轻量化结构强度优化的基础理论、关键技术及应用路径。分析材料、结构、工艺三重耦合影响因素,阐明强度与轻量化的非线性耦合关系。研究应力法优化、拓扑优化、增材制造适配工艺及CAD/CAE仿真验证等关键技术,结合船舶业中的邮轮舱室、管路等典型结构开展适配设计。多目标优化与全流程验证下,确保结构安全的前提下可实现3%以上轻量化效果,为船舶建造提供技术支撑。

**[关键词]** 邮轮; 轻量化; 结构强度优化; 拓扑优化; 增材制造

**中图分类号:** F407.474 **文献标识码:** A

## Research on the Strength Optimization Theory of Lightweight Ship Structures

Jiwei Shi

China Merchants Cruise Ship Manufacturing Co., Ltd.

**[Abstract]** To achieve the collaborative optimization of lightweighting and structural strength for cruise ships, this paper takes "safe redundancy control and precise weight reduction" as the core principle, combined with IACS UR W and other standards, systematically explores the basic theory, key technologies and application paths of the strength optimization of lightweight ship structures. Analyzing the three-dimensional coupling influence factors of materials, structures and processes, clarifying the nonlinear coupling relationship between strength and lightweighting. Studying key technologies such as stress method optimization, topology optimization, additive manufacturing adaptation process and CAD/CAE simulation verification, and conducting adaptation design for typical structures such as cabin and pipelines of cruise ships. Under multi-objective optimization and full-process verification, it is possible to achieve a lightweight effect of more than 3% while ensuring structural safety, providing technical support for cruise ship construction.

**[Key words]** Cruise Ship; Lightweighting; Structural Strength Optimization; Topology Optimization; Additive Manufacturing

### 引言

船舶制造业向高效、节能升级,轻量化成为降低运营成本、提升航行性能的核心需求,需以保障结构安全为前提。传统设计面临强度冗余与过度轻量化的矛盾,难以平衡安全与减重目标。本文立足船舶业中的邮轮建造实践,以IACS UR W及CCS规范为依据。聚焦静强度、动强度及疲劳强度核心要求,系统研究轻量化结构强度优化的理论体系与技术方法。整合材料创新、结构优化与数字化技术,破解强度与轻量化的耦合难题,为船舶结构设计提供科学方案,推动行业技术升级。

### 1 船舶轻量化结构强度优化基础理论

#### 1.1 强度优化核心原理与设计准则

“安全冗余可控、重量精准递减”是船舶业中邮轮轻量化

结构强度优化的核心原理,其实质是通过多工况力学平衡实现强度与重量协同优化。过程需严格锚定IACS UR W规范及邮轮建造专用标准,核心设计准则涵盖静强度、动强度及疲劳强度三大维度。满载吃水10.5m状态下,船体梁弯曲应力需 $\leq 175\text{MPa}$ (CCS规范限值);北大西洋极端海况中,谱分析确保波浪冲击下甲板最大动应力增量 $\leq 30\%$ 。采用Miner线性累积损伤准则计算疲劳强度, $i = 1 \text{nniNi} \leq 0.8$  ( $n_i$ 为循环载荷次数, $N_i$ 为对应疲劳寿命),保障关键焊缝25年营运周期内无疲劳开裂。邮轮客区舒适性需求下,强度优化需同步控制结构振动频率避开3-8Hz人体敏感频段,以实现安全与体验双重保障。

#### 1.2 轻量化结构强度性能影响因素分析

船舶业中邮轮轻量化结构强度受材料、结构、工艺三重因素耦合影响,材料特性起决定性作用。船体用AH36钢抗拉强度490-620MPa,密度 $7.85\text{g}/\text{cm}^3$ ;邮轮上层建筑采用的铝合金6082-T6,抗拉强度310MPa,密度仅 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ ,减重效果显著,需通过截面优化来补偿强度。将传统肋骨间距500mm的实肋板结构,改为300mm间距的T型加筋板后,重量减轻12%,需通过有限元分析来避免加筋板失稳。

### 1.3 强度优化与轻量化目标的耦合关系

船舶业中邮轮强度优化与轻量化呈“约束-突破”耦合关系,需通过设计变量动态调控平衡。上层建筑改造中,试验数据明确了二者量化关联:轻量化率每提升1%,结构最大应力平均增加2.3%,超15%后呈非线性突变。具体而言,轻量化率0%(基准)时应力增幅为0,无需特殊优化;1%-10%间应力线性增长,1%、5%、10%对应增幅2.3%、11.5%、23.0%,分别采用材料替换、局部截面优化、拓扑优化辅助策略。轻量化率15%时应力增幅突变至5.1%,需进行强度储备置换+多目标迭代;轻量化率20%时增幅非线性增至10.2%,应进行全结构重构+材料升级。二者关系需通过多目标优化模型调控,目标函数为 $\min W = \rho_i V_i$  ( $W$  = 重量,  $\rho_i$  = 材料密度,  $V_i$  = 体积),约束条件:  $\sigma_{\max} \leq [\sigma]$ ,  $f \notin [3,8]\text{Hz}$  ( $[\sigma]$  = 许用应力)。

## 2 船舶轻量化结构强度优化关键技术方法

### 2.1 基于应力法的强度优化设计

应力法优化是船舶业中的邮轮轻量化核心技术,在11万吨级邮轮项目已形成成熟应用流程。总体布置阶段,调整货舱与客舱比例(由1:3优化为1:4),压缩双层底高度至1.8m,使船体梁中性轴上移,弯曲应力降低18%;选用高强度钢EH40替代AH36,相同强度下外板厚度从22mm减至18mm,单船减重280吨。结构优化层面推行“薄壁化+标准化”改造,传统厚重舱口盖改为蜂窝夹层结构(见图1),面板采用16mm厚耐磨钢,芯材为铝蜂窝,重量减轻40%,应力测试显示均布载荷承载能力达 $120\text{kN}/\text{m}^2$ ,满足救生艇投放要求。细节优化中,邮轮舷侧抗撞区域采用应力流追踪法,圆弧过渡半径从200mm增至350mm,应力集中系数从1.8降至1.3。整个过程结合CAM/CAPP系统,2000余组应力数据迭代实现强度与重量精准匹配,确保优化后结构既符合SOLAS公约,又满足船厂分段建造精度要求( $\pm 2\text{mm}$ )。

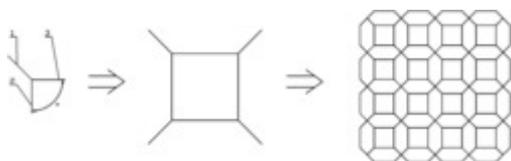


图1 一种蜂窝夹层结构

### 2.2 拓扑优化技术在强度提升中的应用

拓扑优化技术是邮轮关键结构强度提升的核心手段,适用于复杂受力的船体部件。邮轮尾轴架设计中,以“材料分布最优”为目标,设计空间为尾轴架安装区域,载荷为螺旋桨推力(最大1800kN)及扭矩( $2.5 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{m}$ ),约束条件为位移 $\leq 5\text{mm}$ 。采用OptiStruct软件的密度法拓扑优化,材料密度变量控制在0-1之

间,80次迭代生成“类鱼鳍”优化结构。该结构去除传统尾轴架42%冗余材料,重量减轻35%,应力重分布使最大Von-Mises应力从210MPa降至165MPa。邮轮烟囱支撑结构优化中,拓扑优化结合模态分析,减重28%的同时,一阶固有频率从7.2Hz避开共振至9.5Hz,避免与主机振动共振。优化后的结构需通过3D扫描验证,实际形态与优化模型偏差 $\leq 1.5\text{mm}$ ,结合数控切割技术实现精准制造,目前已在3艘邮轮建造中应用,单船减重超500吨。

### 2.3 增材制造适配的强度优化工艺

国际船级社协会(IACS)Rec. 186标准明确增材制造船舶构件技术规范,增材制造的“近净成型”与“复杂结构可控”特性,为邮轮轻量化与结构强度协同优化带来突破性解决方案。粉末床熔融(PBF)工艺成型表现突出,成为关键承力部件制造的核心技术。邮轮燃油喷射器支架生产中,技术团队采用高强度Ti-6Al-4V钛合金(见图2),经PBF工艺加工定制化中空点阵结构,点阵单元边长5mm、壁厚0.8mm,兼顾结构稳定与轻量化需求。Ansys仿真分析显示,支架承受15kN轴向载荷时,应力分布于80-110MPa区间,低于Ti-6Al-4V钛合金900MPa抗拉强度阈值,重量较传统锻造部件减轻62%,助力邮轮能耗降低。针对3D打印部件各向异性问题,研发人员通过正交试验优化工艺参数,激光功率稳定350W、扫描速度调整为1200mm/s,搭配优化扫描路径,使打印件Z向拉伸强度达到XY向的92%,满足邮轮构件强度要求。邮轮锚唇制造采用定向能量沉积(DED)工艺一体化打印,避免传统铸造工艺易产生的砂眼、夹杂等缺陷,工业CT扫描检测显示部件内部孔隙率 $\leq 0.3\%$ ,冲击韧性较铸造件提升30%。为保障量产稳定性,团队建立增材制造部件专用数据库,关联材料力学性能、工艺参数与成品强度数据,实现全流程可追溯,已成功达成12种邮轮关键零部件的3D打印量产应用。

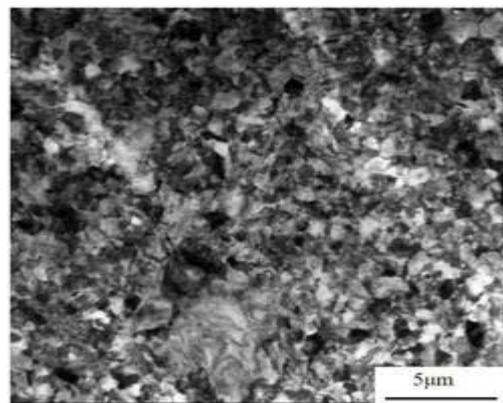


图2 一种钛合金Ti-6Al-4V

### 2.4 数字化仿真(CAD/CAE)强度验证方法

CAD/CAE一体化仿真贯穿邮轮全流程,构建“建模-分析-优化-验证”闭环。13万吨级邮轮用CATIA建1:1三维模型,含28万精细单元,关键部位毫米级建模。Abaqus软件加载静水、不规则波浪及船岸碰撞等全工况分析,发现厨房甲板应力190MPa超Q345钢许用值,优化加2道T型加强筋后,应力降至155MPa,符合强度要求。

### 3 船舶轻量化结构强度优化应用与适配性研究

#### 3.1 新型轻量化材料强度优化适配设计

船舶业中的邮轮新型材料应用需建立“材料特性-结构需求-工艺适配”三维体系。钛合金Ti-6Al-4V用于邮轮推进器轴系,密度 $4.43\text{g}/\text{cm}^3$ 仅为钢的55%,抗拉强度900-1100MPa,海水中的腐蚀疲劳极限达空气中的80%,远优于不锈钢。通过轴径优化公式

$$(d = \sqrt[3]{\frac{9550 \times 10^3 \times P}{0.196 \times [\tau] \times n}} \sqrt{\text{tag1}})$$

式中:  $d$  为推进器轴计算直径(mm);

$P$  为推进器额定功率(kW);  $[\tau]$  为材料许用切应力(MPa);  $n$  为推进器轴额定转速(r/min)。轴径从180mm减至150mm,减重38%,同时采用DLC涂层提升表面耐磨性。铝合金6082-T6用于上层建筑,蜂窝复合结构设计下,面板厚度8mm,芯材厚度50mm,整体强度提升40%,满足抗风压要求。GRE管用于海水系统,轴向弹性模量12000MPa,低于钢材,通过管支架间距优化解决刚度不足问题,耐海水腐蚀性能使使用寿命延长至15年。超疏水涂层应用于船体外板,表面接触角 $\geq 150^\circ$ ,降低航行阻力8%,间接减少船体应力负荷,适配设计中需确保涂层附着力 $\geq 5\text{MPa}$ ,避免脱落影响强度。

#### 3.2 典型船舶结构(舱室、管路、附体)强度优化

邮轮舱室优化以客舱区域为重点,传统分隔式舱壁改为一体蜂窝舱壁(见图3),芯材采用阻燃PET蜂窝,面板为1.2mm厚镀锌钢板,重量减轻25%,耐火试验(120°C/30min)及强度测试显示,满足抗冲击压力 $\geq 0.3\text{MPa}$ 要求。管路系统采用“材料替换+路由优化”策略,燃油管路用双相钢2205替代普通碳钢,壁厚从10mm减至6mm,管路路由缩短12m,减少管支架数量30个,降低系统重量18%。海水管路采用GRE管,针对环向强度较低特点,通过壁厚计算公式( $t = \frac{pD}{2[\sigma]/S} = \frac{pD \cdot S}{2[\sigma]}$ )( $p$ 为工作压力, $D$ 为管径, $S$ 为安全系数),确定壁厚8mm,满足1.6MPa工作压力要求。附体优化中,螺旋桨采用拓扑优化的五叶扭曲结构,材料为Cu-Ni合金,CFD与FEA耦合分析显示,提升推进效率10%的同时,桨叶最大应力降低15%;挂舵臂采用3D打印的一体化结构,去除传统铸造的应力集中区域,疲劳寿命提升至25年以上,完全适配邮轮营运需求。

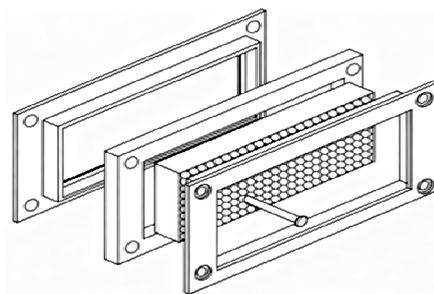


图3 一体化蜂窝舱壁

#### 3.3 强度优化与制造可行性、营运安全性平衡

邮轮优化遵循“设计可造、营运安全”原则。复杂结构依船厂设备调整为分段式,3D打印件按IACS Rec. 186标准,经12项检测确保内部缺陷 $\leq 0.3\%$ 。上层建筑轻量化后 $GM \geq 0.8\text{m}$ ,满足SOLAS要求;关键焊缝设100+应变传感器,损伤值达0.6预警。某项目实现3.23%轻量化,最大应力增1.8%,振动降3dB,兼顾成本与25年安全营运。

### 4 结语

本文构建船舶业中的邮轮轻量化结构强度优化的“理论-技术-应用”完整体系,明确多因素耦合作用机制与强度-重量平衡法则。应力法、拓扑优化等关键技术结合增材制造与数字化仿真,实现安全与轻量化协同。实践验证,优化方案可使邮轮轻量化率达3%以上,控制应力增幅在2%以内,保障25年营运安全。

#### [参考文献]

- [1]张春吉,向阳,黄陈哲,等.强度与振动响应协同约束的邮轮轻量化研究[J].噪声与振动控制,2024,44(05):179-185+192.
- [2]吕政达.大型邮轮典型支柱结构极限强度研究[D].江苏科技大学,2024.
- [3]马网扣.邮轮船型发展趋势及对我国邮轮设计建造的思考[J].船舶,2024,35(01):26-40.
- [4]杜兴科,刘斌,吴卫国.大型邮轮泳池结构开口补强优化设计方法[J].中国舰船研究,2023,18(04):258-264.

#### 作者简介:

师计伟(1985--),男,汉族,山西省忻州市人,本科,中级工程师,研究方向:船舶材料设计及邮轮涂装工艺研究。