

# 铝合金直升机甲板整体框架结构设计研究

向林

招商局新材料科技(重庆)有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i2.18978

**[摘要]** 围绕直升机甲板在海洋工程应用中面临自重控制、受力复杂及耐久性能要求提升等问题,开展铝合金直升机甲板整体框架结构设计研究。结合直升机起降荷载特征与甲板空间约束条件,构建以铝合金挤压工字梁为主要受力构件整体框架结构体系,对结构方案、构件体系、参数模型及连接构造进行系统设计。在此基础上,引入典型工程案例,基于统一边界与工况条件,对整体框架方案与传统对标方案进行性能对比分析。结果表明,所提出结构体系在整体刚度、局部变形控制、构件应力水平、稳定性及动力响应等方面呈现协调变化特征,为铝合金直升机甲板结构设计提供工程参考。

**[关键词]** 铝合金直升机甲板; 整体框架结构; 挤压工字梁; 参数化设计

**中图分类号:** S972.7+3 **文献标识码:** A

## Research on the Overall Framework Structure Design of Aluminum Alloy Helicopter Deck

Lin Xiang

China Merchants New Materials Technology (Chongqing) Co., Ltd

**[Abstract]** Focusing on issues such as self-weight control, complex stress distribution, and enhanced durability requirements faced by helicopter decks in marine engineering applications, this study conducts research on the overall framework structural design of aluminum alloy helicopter decks. By integrating the characteristics of helicopter takeoff and landing loads with spatial constraints of the deck, a structural system primarily composed of aluminum alloy extruded I-beams as load-bearing components is developed. Systematic design is performed for the structural configuration, component system, parameter model, and connection details. Based on this, a typical engineering case is introduced to conduct performance comparative analysis between the overall framework scheme and conventional benchmark schemes under unified boundary and operational conditions. The results demonstrate that the proposed structural system exhibits coordinated variations in overall stiffness, local deformation control, component stress levels, stability performance, and dynamic response, providing engineering references for the structural design of aluminum alloy helicopter decks.

**[Key words]** Aluminum alloy helicopter deck; integral frame structure; extruded I-beam; parametric design

### 引言

直升机甲板作为舰船及海洋工程关键功能构筑物,其结构性能直接关联飞行作业安全性与平台服役可靠性<sup>[1]</sup>。随着海洋装备大型化与功能集成化趋势增强,甲板结构面临自重控制、耐腐蚀能力及整体受力协调等多重约束,传统钢结构体系在长期服役条件下逐渐显现维护成本高、结构效率受限等问题。铝合金材料凭借较高比强度、良好耐蚀特性及适宜工业化加工条件,逐步进入直升机甲板工程应用视野。围绕直升机起降工况复杂、荷载作用集中且空间受限等工程特点,构建适配铝合金材料特性整体框架结构体系,已成为当前甲板结构设计重要研究方向<sup>[2]</sup>。基于工程需求与结构发展趋势,本文围绕直升机铝合金甲板整体框架结构开展系统性研究,探讨结构构型、构件组织

及设计思路,为后续工程应用提供参考依据。

### 1 需求分析

直升机甲板承受起降冲击、轮载集中、旋翼下洗脉动压力及设备堆载等多源作用,荷载幅值与频次随机性强,结构受力呈现局部效应与整体耦合特征,常见风险集中在局部压溃、节点应力集中、疲劳裂纹萌生与刚度不足引发振动不适等方面<sup>[3]</sup>。海洋盐雾环境叠加温湿循环,对材料耐蚀性、涂装体系与构造排水提出更高要求,异种金属接触还可能诱发电化学腐蚀,维护可达性与更换便利性直接影响全寿命成本。铝合金应用带来轻量化优势,同时受屈服敏感、热影响区性能折减、焊接变形控制难等因素制约,构件标准化与连接可靠性成为关键约束。基于上述需求,设计思路围绕整体框架受力路径清晰、梁格体系规则化、挤

压工字梁系列化选型、节点构造减弱应力峰值、装配化施工与检修友好展开,为后续整体框架结构方案构建提供依据。

## 2 直升机铝合金甲板整体框架结构设计

### 2.1 结构方案构建

甲板整体框架取多边形外轮廓,平面控制线采用对称轴约束,形成规则梁格。梁系沿主要跨度方向布置主梁,主梁端部锚固于周向边梁,主梁间距依据起落架轮距及荷载扩散角确定。次梁沿次要方向等间距布置,与主梁构成正交网格,节点落位采用“线交点对齐”,便于后续构件长度标准化。斜向边区设置斜梁,与周向边梁共同闭合外缘受力回路,斜梁与主梁端部形成三角单元,平面刚度控制采用环向连续路径<sup>[4]</sup>。图1给出梁格布置示意:外缘为闭合边梁,内部为主梁与次梁网格,角区由斜梁过渡。甲板面层受压区对应次梁跨中,轮载作用区优先布置于主梁交汇带,轮迹线沿主梁方向投影,形成直接传力通道。局部设备基础布置于主梁上翼缘线,基础边界与次梁轴线对齐,避免偏心布置引入附加扭矩。整体框架纵横控制线统一编号,主梁、次梁、斜梁采用同一坐标体系生成,便于制造放样与装配定位。

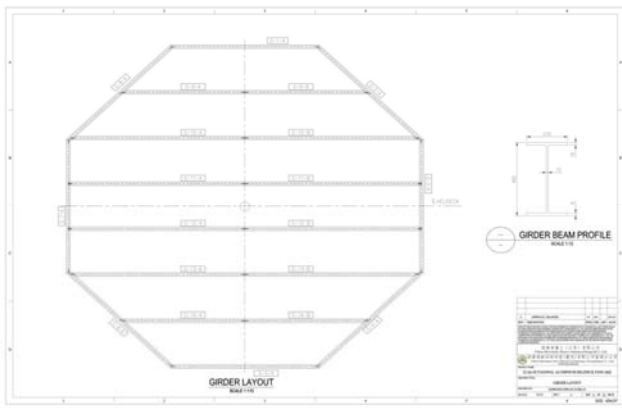


图1 直升机甲板整体框架结构梁布置示意图

### 2.2 构件体系划分

构件体系划分采用“刚度份额—受力路径”联合准则。对任一梁向集合,主梁定义为承担该方向弯曲刚度份额达到设定阈值者;次梁定义为承担局部层面支承与荷载分配的角色;边梁与斜梁归入边界构件组,负责闭合周向传力路径。梁向集合内第根梁刚度份额系数如公式(1)所示:

$$\eta_i = \frac{E_i I_i L_i^{-3}}{\sum_{j=1}^n E_j I_j L_j^{-3}} \quad (1)$$

式中,  $\eta_i$  表示第  $i$  根梁在同向梁集合内弯曲刚度份额;  $E_i$  表示材料弹性模量;  $I_i$  表示梁截面关于受弯轴惯性矩;  $L_i$  表示梁计算跨度;  $n$  表示同向参与分担集合内梁数量;  $\sum$  表示集合求和算子。划分流程:建立同向梁集合,按几何边界与支承线划分计算跨  $L_i$ ; 依据挤压工字梁截面参数计算  $I_i$ ; 代入上式得到  $\eta_i$  序列; 按  $\eta_i$  由大至小排序,累积份额达到阈值区间者划

入主梁组,剩余者划入次梁组。边界构件组按外轮廓闭合线识别,边梁沿周向连续布置,斜梁按角区过渡线识别并与主梁端部相接,形成边界传力单元。

### 2.3 参数模型建立

在整体框架与构件体系明确前提下,参数模型围绕梁格几何、截面属性与质量分布展开<sup>[5]</sup>。平面层面引入梁间距参数  $S_x, S_y$ , 分别对应主梁方向与次梁方向控制间距,形成规则网格坐标;立体层面引入挤压工字梁截面参数  $h, b_f, t_f, t_w$  用于统一描述不同构件系列。单根梁截面面积表达式写作公式(2):

$$A = 2b_f t_f + (h - 2t_f) t_w \quad (2)$$

式中,  $A$  表示工字梁截面面积;  $b_f$  表示翼缘宽度;  $t_f$  表示翼缘厚度;  $h$  表示梁总高度;  $t_w$  表示腹板厚度。该表达式作为质量与稳定性计算基础,与梁长参数耦合生成线质量分布。

弯曲性能参数采用惯性矩函数描述,如公式(3)所示:

$$I = \frac{b_f h^3 - (b_f - t_w)(h - 2t_f)^3}{12} \quad (3)$$

式中,  $I$  表示截面关于主受弯轴惯性矩,其余符号含义同前。该关系用于主梁与次梁截面系列匹配,配合构件体系划分中刚度份额判定,实现截面高度与梁向角色之间一一对应。

整体框架质量模型采用离散梁单元叠加形式,如公式(4)所示:

$$M = \sum_{k=1}^m \rho A_k L_k \quad (4)$$

式中,  $M$  表示甲板整体框架结构质量;  $\rho$  表示铝合金材料密度;  $A_k$  表示第  $k$  根梁截面面积;  $L_k$  表示对应梁单元长度;  $m$  表示梁单元总数。质量函数与梁间距参数、截面参数形成耦合关系,可用于不同梁格密度与截面组合条件下方案演化。参数模型采用统一变量集驱动,几何、刚度与质量关系同步更新,为后续算例分析提供一致输入条件。

### 2.4 连接形式设计

连接构造围绕挤压工字梁端部受力状态与装配逻辑展开。梁端连接采用端板—连接板体系,端板与梁腹板及翼缘形成整体焊接单元,连接板位于相交梁构件节点区,受力路径沿腹板中线传递,减少翼缘局部拉压反转。主梁与次梁节点以单面连接板布置,板厚依据腹板承载能力选取,连接板高度与腹板有效高度对齐,避免力线偏折。边梁节点构造采用双侧连接板形式,周向边梁端部设置加宽腹板区,与斜梁端部连接板形成夹持结构,节点区构件轴线在同一平面内交汇,平面内剪力与弯矩协同传递。斜梁端部切割角度与平面轮廓一致,端板外形随梁轴线旋转生成,保证节点拼装精度。

连接构件孔位采用规则阵列布置,孔距沿力流方向递减,孔间距满足挤压型材局部稳定要求。节点区构件长度控制在标准

运输尺寸内,避免现场二次拼接。连接板与端板厚度分级设置,主梁节点厚度高于次梁节点,形成刚度渐变区,降低节点区应力集中。面层与梁系连接采用面板支承件布置,支承件与次梁翼缘对齐,面层荷载沿短路径传递至梁腹板。整体连接体系在构造层面保持构件标准化与节点类型有限化,为装配顺序与检修路径预留空间,同时维持整体框架受力连续性。

### 3 应用分析

#### 3.1 案例概况

工程案例选取一处典型直升机甲板结构作为研究对象,甲板主体承载体系采用铝合金挤压工字梁整体框架形式。整体梁格布置遵循规则化原则,主梁沿主要跨度方向连续布置,次梁正交设置,边界区域配置边梁与斜梁形成闭合受力路径,轮载作用区位于主梁交汇带附近,竖向荷载沿主梁方向传递至周向构件。案例中主要承载构件统一采用铝合金挤压工字梁截面形式,其典型截面尺寸如图2所示。工字梁总高度为460mm,翼缘宽度为230mm,上下翼缘厚度均为18mm,腹板厚度为10mm。该截面比例在满足整体框架受弯需求前提下兼顾局部稳定控制,适用于直升机轮载作用下以弯曲响应为主导受力状态。主梁直接采用该截面形式,次梁在保持截面比例一致前提下对梁高参数作缩减处理,边梁在翼缘宽度方向进行局部调整,以适应周向传力路径。案例模型在材料属性、边界约束条件及荷载工况设置方面保持一致,截面几何参数直接取自挤压型材设计尺寸,用于后续结构性能分析中刚度、应力及动力响应评价。

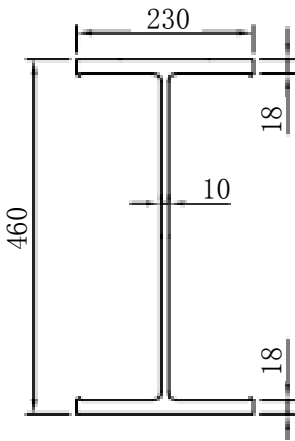


图2 铝合金挤压工字梁截面形式及尺寸示意图

#### 3.2 结构性能分析

结构性能分析采用对比实验设计思路,在材料属性、边界约束与荷载工况一致前提下,对传统对标方案与本文提出整体框架方案进行系统评估。评价指标围绕整体刚度、局部响应、构件强度、稳定性能、动力特性、疲劳响应及结构效率设置,重点反映挤压工字梁截面定型与梁格组织方式对结构行为产生影响。表1结果显示,整体框架方案在竖向变形控制方面表现明显差异,最大竖向挠度与轮载区局部挠度分别下降26.19%与29.06%,与主梁采用460mm高度挤压工字梁截面形成直接关联。主

梁与次梁等效应力水平同步下降,反映规则梁格与刚度份额分配方式对内力重分布产生作用。腹板屈曲利用系数由0.87降至0.66,与截面中10mm腹板厚度配置相一致。动力响应方面,一阶固有频率提升23.20%,表明整体框架刚度与质量分布关系发生改变。节点热点应力范围与单位面积质量均呈下降趋势,体现连接构造与截面选型在疲劳响应与结构效率方面协同作用。

表1 方案对标综合性能评价表

指标类别	评价指标	对标方案	本文方案	变化幅度(%)
整体刚度	最大竖向挠度/mm	19.82	14.63	-26.19
局部响应	轮载区局部挠度/mm	9.74	6.91	-29.06
构件强度	主梁等效应力/MPa	168.47	132.38	-21.43
	次梁等效应力/MPa	121.96	98.27	-19.44
稳定性能	腹板屈曲利用系数	0.87	0.66	-24.14
动力特性	一阶固有频率/Hz	6.38	7.86	+23.20
疲劳响应	节点热点应力范围/MPa	54.92	42.67	-22.31
结构效率	单位面积质量/kg·m <sup>-2</sup>	389.73	314.28	-19.35

### 4 结语

针对直升机铝合金甲板结构设计需求,本文围绕整体框架受力体系展开系统研究,形成以挤压工字梁为核心构件直升机甲板结构设计思路。围绕梁格布置、构件分工、截面参数与连接构造进行协同设计,建立结构参数模型并引入工程案例完成性能验证。对比分析结果显示,整体框架结构在变形控制、应力分布及动力特性方面表现出良好协调性,结构质量分布更为合理。研究过程表明,挤压工字梁截面定型与规则梁格组织方式对直升机甲板整体性能具有显著影响。相关设计思路可为同类铝合金甲板结构工程提供参考,后续研究可围绕疲劳行为与长期服役性能展开深化分析。

#### 【参考文献】

- [1]张旭,董威,周维星,等.铝合金直升机平台设计与强度校核[J].中国水运,2023,23(12):1-3+6.
- [2]宋扬.中大型公务船直升机甲板结构设计[J].中国水运,2024,(01):100-102.
- [3]段艳丽,张金平,辛晓辉,等.直升机甲板安全网支架结构设计优化[J].石油和化工设备,2022,25(12):164-166.
- [4]葛坤玮,邹聪,史誉州,等.固定式导管架平台直升机甲板结构强度分析[J].珠江水运,2025,(09):22-25.
- [5]王庆丰,洪旺,诸俊楷,等.海上移动平台直升机甲板圆管支撑结构安全评估[J].江苏科技大学学报(自然科学版),2024,38(01):7-12.

#### 作者简介:

向林(1989-),男,汉族,重庆万州人,本科,工程师,研究方向:船舶设计、船舶轻量化装备设计与开发。