

某型水上飞机复合材料浮筒结构与试验验证

刘福佳^{1,2}, 李东辉², 李群芳¹, 郭义林¹

(1.辽宁通用航空研究院, 辽宁 沈阳 110136; 2.沈阳航空航天大学 航空宇航学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘要:作为水上飞机的关键部件,浮筒的结构设计对水上飞机在水面起降的安全性起到至关重要的作用。结合某型水上电动飞机的设计要求,设计了一款厚蒙皮多框式复合材料浮筒结构及桁架式金属支撑结构,在有限元软件中建立了浮筒结构及支撑结构的有限元模型,并采用 Von-Mises 准则和 Tsai-Wu 准则分别对结构中金属材料 and 复合材料结构进行了强度校核。为了进一步验证结构设计的承载能力和有限元模型的准确性,采用自主研发的水上飞机浮筒及连接结构静强度验证试验装置,进行了静力试验验证。试验结果表明厚蒙皮多框式复合材料浮筒结构及桁架式金属支撑结构的强度、刚度满足设计要求,有限元模型准确,可以为后续轻量化复合材料浮筒结构的设计提供参考。

关键词:水上飞机;复合材料;浮筒;强度分析;试验验证

中图分类号:V216.1⁺1

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2025)04-0723-09

电动水上飞机作为新能源飞机的一种,具有无污染、低噪音、低运营成本等特点,可应用于航空运输、体育运动、旅游观光等方面,尤其在拥有河流和湖泊的旅游景区具有较大应用前景^[1-3]。复合材料与传统材料相比,具有比强度高、质量轻、比模量高、抗疲劳性能好等优点,因此复合材料在飞机结构设计中所占比重越来越大,尤其是在小型轻型飞机结构设计中,除了连接接头、支撑等结构采用金属材料,所有主承力结构全部采用全复合材料进行设计^[4-5]。浮筒作为水上飞机在水上的起降装置,在起降过程中承受水面的水动力载荷,并通过支撑结构将载荷传递给机身结构,是水上飞机的主要承力部件之一,其结构设计和安装设计对水上飞机的安全性能、使用性能和飞行性能有较大的影响^[6-7]。

目前国内外对于水陆两栖飞机研究的时间较长,在理论基础、仿真分析及试验验证等方面开展了深入系统的研究,并在水动载荷及强度设计等方面积累了丰富的理论成果和工程经验^[8-12]。由于水上飞机在水面迫降或着水时发生事故的严重程度远高

于常规飞行阶段,所以近年来国内外在水上飞机冲击与落水过程方面开展了大量数值仿真研究工作,主要集中在起飞性能分析、着水动态过程分析、着水力学特性分析、水上迫降运动特性分析、水上迫降力学特性分析等方面^[13-19]。与模型试验相比,数值仿真成本低、灵活性高,不仅可以提取冲击载荷等重要参数,还可以详细地展示相应的流场结构、运动状态和压力分布,为飞机机身、浮筒设计等方面提供参考。但是现有数值仿真研究多集中在静水面条件下,对于波浪水面的研究内容较少,仅少数学者对波浪水面下民机水上迫降以及落水动态响应特性等进行了研究,并且研究不够深入^[20-21]。此外,目前国内对水上飞机浮筒的外形设计研究比较单一,主要是在理论上对浮筒线型、浮筒截面进行设计,通过 CFD 仿真结合试验,研究在已有陆地飞机上改装浮筒引起的气动特性变化^[22-27]。现在对水上飞机的研究重点集中在水动力学、水面滑行稳定性、浮筒外形设计等方面,而对轻型飞机的浮筒结构设计和试验验证研究较少。浮筒作为水上飞机不可缺少的承力部件,承受着与水面撞击时产生的载荷,合理地进行浮筒结构设计和试验、系统地评估浮筒承载能力,对水上飞机的浮筒及支撑结构设计具有指导性意义。

本文以某型双座水上电动飞机为原型,设计了

收稿日期:2024-08-28

基金项目:辽宁省教育厅重点攻关项目(JYT2020161)与国家科技重大专项(MJG4-1N21)资助

作者简介:刘福佳(1987—),讲师

通信作者:刘福佳(1987—) e-mail:718880677@qq.com

厚蒙皮多框式复合材料浮筒结构及桁架式金属支撑结构,运用有限元分析软件对浮筒及支撑结构进行了建模分析,分析结果满足强度设计要求,为了进一步验证结构设计的合理性,采用自主研发的水上飞机浮筒及连接结构静强度验证试验装置,开展了静力试验,试验结果验证了浮筒及其支撑结构满足强度设计要求,为后续更高性能、轻量化的复合材料浮筒结构设计提供依据。

1 浮筒及支撑结构设计

浮筒结构为复合材料结构,采用湿法手糊成型工艺制成。浮筒内部设置 10 个隔框与浮筒上、下蒙皮采用二次胶接的工艺进行合模装配。浮筒 2 框、3 框、6 框、7 框为加强框。浮筒上顶面设置 6 个 4 寸甲板盖和 2 个 8 寸甲板盖,为维护和检查提供通道。

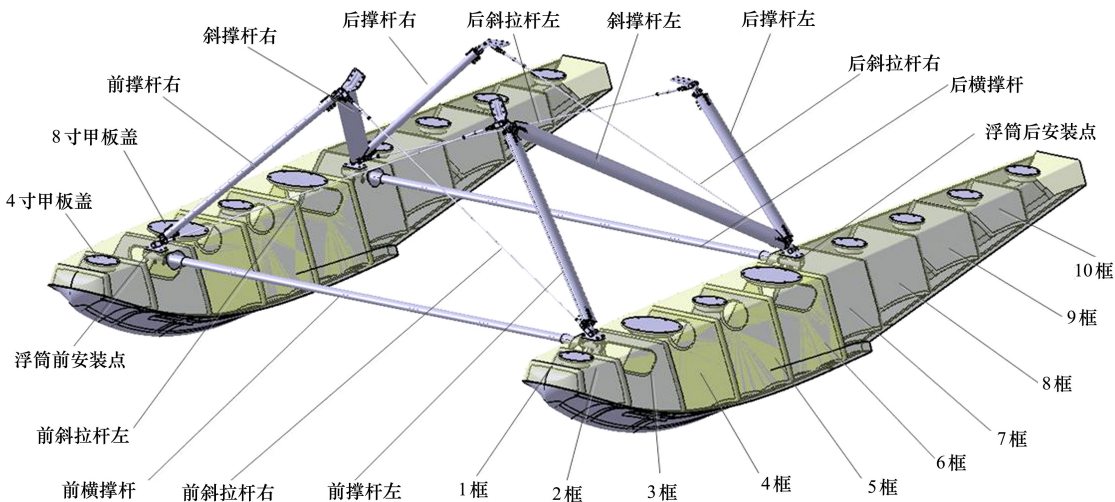


图 1 浮筒与支撑结构示意图

左右浮筒使用 2 根横撑杆相连接,撑杆为定制的翼型型材,材料为 6061-T6 铝合金。浮筒与支撑结构形式见图 1。

浮筒支撑结构起到将双浮筒结构与机体结构连接的作用,均为金属材料。整个浮筒支撑结构分为前撑杆、斜撑杆、后撑杆及前、后斜拉杆,构成三角形稳定桁架形式,前撑杆、斜撑杆、后撑杆由定制的翼型型材制成,材料为 6061-T6 铝合金。左、右前撑杆及左、右后撑杆间各有 2 根交叉的斜拉杆,材料为不锈钢材质,用来对左、右撑杆起到稳定的作用,详见图 1。浮筒与支撑结构通过铝制接头连接,共 2 个安装点,前安装点位于浮筒 2 框和浮筒 3 框之间,后安装点位于浮筒 6 框和浮筒 7 框之间,通过螺栓进行紧固安装。浮筒与浮筒支撑结构连接形式如图 2 所示。

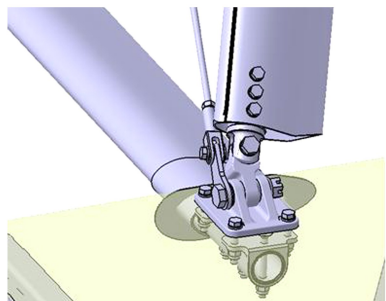


图 2 浮筒与浮筒支撑结构连接形式

2 载荷工况计算

2.1 参数说明

本文参考 ASTM 2245-23《Standard specification for design and performance of a light sport airplane》^[28] 中的条款要求,对浮筒载荷系数及浮筒着水载荷进行计算,为后续有限元分析和静力试验加载提供载荷输入。本文水上飞机的浮筒外形参数依据经验系数和飞机所需浮性等参数确定的。首先根据设计经验和查阅相关资料选择浮筒设计模型,然后通过飞机质量计算飞机所需浮性,并根据公式

计算得出浮筒断阶截面以及三维外形的特征参数,最后通过多方权衡以及反复迭代计算得到浮筒的外形参数。本文计算过程中所用到的参数及其取值见表 1。

表 1 载荷工况计算参数

名称	数值
浮筒前体长度 L_f/m	2.447
浮筒后体长度 L_a/m	2.225
船艏站位的斜升角 $\beta_f/(\circ)$	25.735
断阶站位的斜升角 $\beta_M/(\circ)$	28.472
船艉站位的斜升角 $\beta_R/(\circ)$	28.107
飞机重心距浮筒前缘距离 C_G/m	2.174
飞机失速速度 $V_{s0}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	23.055 3
飞机重力 W/N	6 376.5
回转半径 R_g/m	1.099 5
水上飞机操纵经验系数 C_1	0.012
船艏加权系数 K_{1f}	1.687
船艉加权系数 K_{1R}	0.906

2.2 对称断阶着水工况

依据 ASTM 2245-23 中 X8.4.1.1 节的要求,对于断阶着水工况,水面反作用力系数为

$$n_{wM} = \frac{C_1 V_{s0}^2}{(\tan^{\frac{2}{3}}\beta_M) \left(\frac{W}{4.448}\right)^{\frac{1}{3}}} = 3.214 \tag{1}$$

对称断阶着水载荷(单个浮筒)为

$$F_M = \frac{n_{wM} W}{2} = 10\,247\text{ N} \tag{2}$$

2.3 非对称断阶着水工况

ASTM 2245-23 中 X8.5.2.1 节要求,非对称载荷由作用于每一个浮筒断阶处向上载荷 F_{MU} 和仅作用于一个浮筒上的侧向载荷 F_{MS} 组成,其值分别如 (3)~(4) 式所示。

$$F_{MU} = 0.75F_M = 7\,685.25\text{ N} \tag{3}$$

$$F_{MS} = 0.25F_M \tan\beta_M = 1\,389.2\text{ N} \tag{4}$$

2.4 船艏着水工况

依据 ASTM 2245-23 中 X8.4.1.2 节的要求,对于船艏着水工况,水面反作用力系数为

$$n_{wF} = \frac{C_1 V_{s0}^2}{(\tan^{\frac{2}{3}}\beta_F) \left(\frac{W}{4.448}\right)^{\frac{1}{3}}} \times \frac{K_{1f}}{(1 + r_{xF}^2)^{\frac{2}{3}}} = 2.622 \tag{5}$$

式中, r_{xF} 为平行于浮筒基准轴,从水上飞机重心到

进行船艏载荷系数计算的船体纵向站位的距离与水上飞机的俯仰回转半径之比,如 (6) 式所示。

$$r_{xF} = \frac{C_G - 0.2L_f}{R_g} = 1.532 \tag{6}$$

船艏着水载荷(单个浮筒)为

$$F_F = \frac{n_{wF} W}{2} = 8\,359.6\text{ N} \tag{7}$$

2.5 船艉着水工况

对于船艉着水工况,水面反作用力系数为

$$n_{wR} = \frac{C_1 V_{s0}^2}{(\tan^{\frac{2}{3}}\beta_R) \left(\frac{W}{4.448}\right)^{\frac{1}{3}}} \times \frac{K_{1R}}{(1 + r_{xR}^2)^{\frac{2}{3}}} = 1.023 \tag{8}$$

式中, r_{xR} 为平行于浮筒基准轴,从水上飞机重心到进行船艉载荷系数计算的船体纵向站位的距离与水上飞机的俯仰回转半径之比,如 (9) 式所示。

$$r_{xR} = \frac{L_f - C_G + 0.85L_a}{R_g} = 1.968 \tag{9}$$

船艉着水载荷(单个浮筒)为

$$F_R = \frac{n_{wR} W}{2} = 3\,261.6\text{ N} \tag{10}$$

3 有限元分析

3.1 有限元模型

在 Catia 三维设计软件中完成浮筒和浮筒支撑的结构建模,以 stp 格式导入 Ansys 中进行几何处理,去除不影响分析结果的微小细节如倒圆角、小孔等。浮筒蒙皮、隔框等复合材料结构采用 CQUAD4 壳单元,浮筒撑杆等铝型材结构采用 CQUAD4 壳单元,斜拉杆结构采用 CBEAM 梁单元,浮筒与支撑的连接等采用 RBE2 刚性单元。采用网格自动划分功能对模型进行网格划分,并对网格质量进行了检查,未出现网格奇异,整个有限元模型单元数为 1 041 365,节点数为 2 795 625。基于 Ansys 建立的浮筒和浮筒支撑有限元模型见图 3。

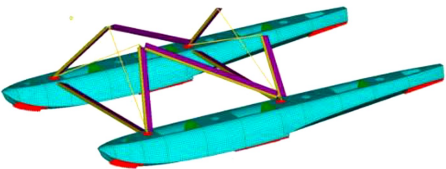


图 3 浮筒和浮筒支撑有限元模型

3.2 有限元分析结果

在 Ansys 软件中,分别在船舶载荷极限工况、断阶载荷极限工况、船艏载荷极限工况下,对建立的浮筒和浮筒支撑有限元模型进行静力分析,数值计算结果见图 4~6。

图 4 给出了 3 种载荷极限工况下结构变形情况。在船舶载荷下,船舶处的位移最大,最大变形为 6.648 mm,相当于浮筒长度(4 671 mm)的 0.14%,变形较小。在断阶载荷下,断阶处的位移最大,最大变形为 13.72 mm,相当于浮筒长度的 0.29%,变形较小。在船艏载荷下,船艏处的位移最大,最大变形为 28.61 mm,相当于浮筒长度的 0.61%,变形较小。

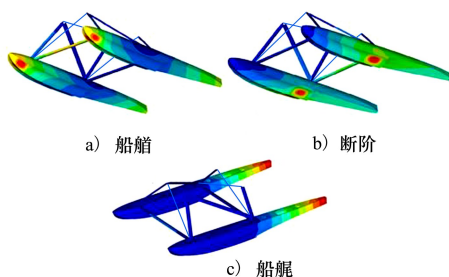


图 4 3 种载荷极限工况结构变形图

图 5 给出了 3 种载荷极限工况下浮筒支撑的应力分布图。在船舶载荷下,浮筒支撑的最大应力为 55.26 MPa,位于前支撑杆上,因为船舶载荷作用于浮筒前端,因此分析结果合理。在断阶载荷下,浮筒支撑的最大应力为 98.25 MPa,位于后支撑杆上,因为断阶载荷作用于浮筒断阶处,而后支撑也位于断阶处附近,因此分析结果合理。在船艏载荷下,浮筒支撑的最大应力为 58.55 MPa,位于后支撑杆上,因为船艏载荷作用于浮筒船艏处,而后支撑杆安装点位于浮筒断阶处上方,距离船艏较近,因此分析结果

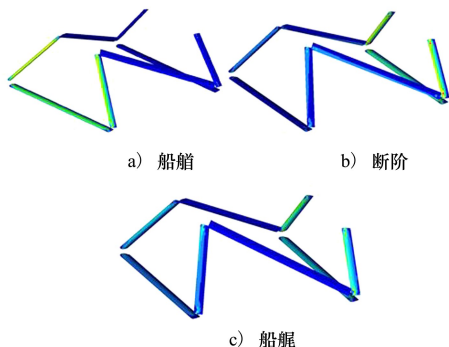


图 5 3 种载荷极限工况浮筒支撑应力分布图

合理。浮筒支撑采用材料为 6061-T6 铝合金,其拉伸强度为 260 MPa,在 3 种工况下浮筒支撑的安全裕度分别为 3.7, 1.64 和 3.44,满足强度设计要求。

图 6 给出了 3 种载荷极限工况下浮筒的剩余强度分布图。在船舶载荷下,浮筒的最小剩余强度为 3.185,位于船舶前端附近,因为船舶载荷作用于浮筒前端,因此分析结果合理。在断阶载荷下,浮筒的最小剩余强度为 2.684,位于浮筒断阶附近,因为断阶载荷作用于浮筒断阶处,因此分析结果合理。在船艏载荷下,浮筒的最小剩余强度为 2.257,位于船艏附近,因为船艏载荷作用于船艏处,因此分析结果合理。浮筒结构为碳纤维复合材料,根据 Tsai-Wu 强度判定准则,在 3 种工况下浮筒结构最小安全裕度分别为 2.185, 1.684 和 1.257,满足强度要求。

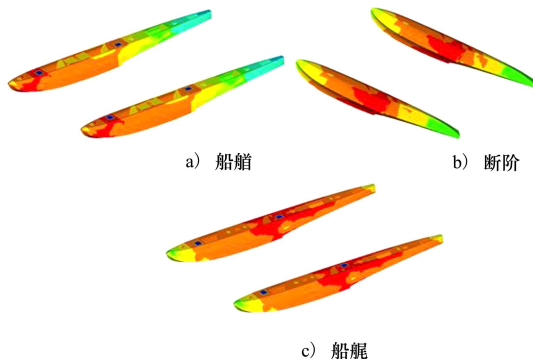


图 6 3 种载荷极限工况浮筒剩余强度分布图

4 静力试验验证

4.1 试验件和试验设备

为了进一步验证结构设计是否满足强度要求,以及验证有限元计算的准确性,进行了浮筒和浮筒支撑的静力试验。试验过程中所需的试验设备及测量工具包括:浮筒静力试验装置 1 个(包括试验件约束及加载装置),5 t 拉压力传感器 6 个,2 t 拉压力传感器 1 个,激光水平仪 1 个,刻度尺 4 把,试验用到的测量设备均在合格的有效期内。

为确保试验件安装状态与实际飞机安装状态一致,设计了一款用于浮筒式水上飞机的浮筒及连接结构静强度验证的试验装置,由主体框架、单向加载单元、双向加载单元组成,安装于地轨上。浮筒结构试验件通过转接件与主体框架进行连接,实现试验件的安装约束,模拟浮筒与机身连接的 4 个连接点。浮筒及连接结构静力试验装置见图 7。

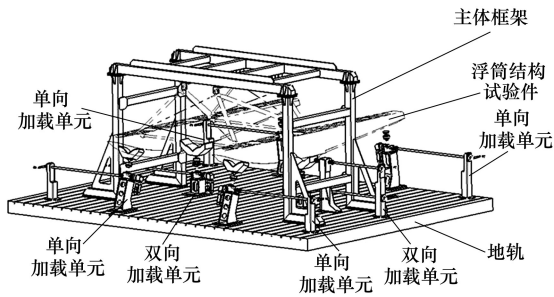


图 7 试验件在浮筒静力试验台架安装示意图

4.2 试验方法与步骤

4.2.1 试验方法

结合水上飞机适航规章及强度试验要求,每套试验装置可配合 4 套单向加载单元和 2 套双向加载单元。单向加载单元用于浮筒的船艏和船艉试验,双向加载单元用于浮筒断阶处试验。

单向加载单元由手摇杆、手摇杆支柱、手摇转接杆、加载单元立柱、螺旋升降机、随形加载头、压力传感器、联轴器、轴承等组成,如图 8 所示。试验加载时,加载人员通过手摇杆驱动螺旋升降机进行加载操作,试验加载时,由螺旋升降机将试验载荷传递至随形加载头上,压力传感器读取试验压力载荷值,球型压头在加载过程中起到万向节的作用,用来抵消因浮筒异性和加载时结构变形产生的角度偏转,使加载方向保持在球心位置加载至预期的位置和方向上。

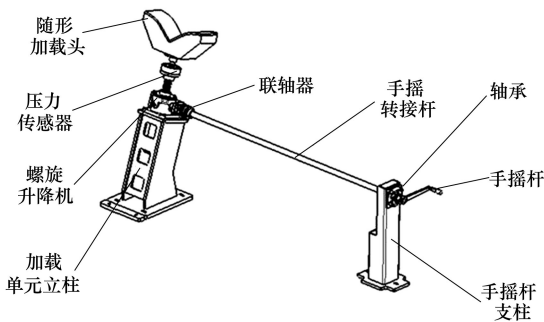


图 8 单向加载单元

双向加载单元是在单向加载单元的基础上增加横向加载机构,该形式的加载单元用于浮筒断阶载荷工况的加载,如图 9 所示。

纵向加载摇杆与纵向加载联动杆通过联轴器驱动螺旋升降机实现纵向加载。横向加载摇杆与横向加载联动杆通过联轴器驱动加载丝杠实现横向加载。在纵向加载的螺旋升降机与压力传感器之间增

加导轨滑块使随形加载头不受试验加载机构和试验夹具的约束,能够自由地横向移动,试验载荷能够准确地传递至试验件上,通过试验件来抵消横向载荷带来的变形和位移。

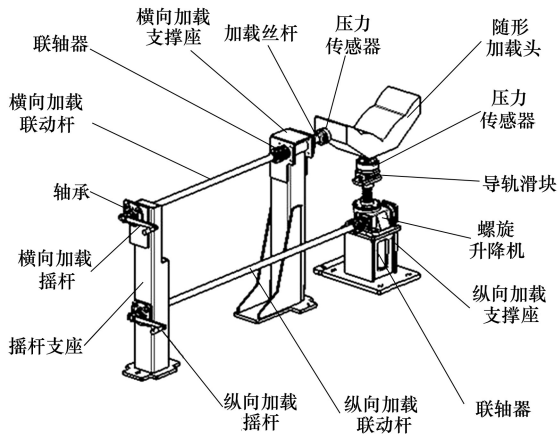


图 9 双向加载单元

4.2.2 试验步骤

- 1) 对试验件按照试验要求进行约束和装配;
- 2) 检查测试设备都已清零;
- 3) 按照加载要求进行预加载,检查试验件和试验设备状态;
- 4) 对试验件进行卸载,检查试验件和试验设备状态;
- 5) 确认试验件无问题后,按照加载要求进行逐级加载,并记录数据。关键加载阶段须注意:限制载荷(即 67%)时,保持 30 s,检查和测试变形是否影响结构件功能,并在卸载后记录位移测量点位置;极限载荷(100%)时,注意保持不少于 3 s;
- 6) 试验结束后卸载,关闭测试设备,清理现场;
- 7) 对试验件进行目视和无损检查,并拍照。

4.3 试验结果

试验过程中分别进行了船艏着水工况试验、船艉着水工况试验、非对称断阶着水工况试验、对称断阶着水工况试验,按照本文中载荷工况计算中给出的加载位置进行加载。每一个工况首先进行了 20%极限载荷预加载,在达到 20%极限载荷过程中,试验件无异响。然后进行卸载,卸载后检查试验件未发现破损、断裂。再进行 67%极限载荷加载,在施加载荷达到 67%极限载荷时,试验件结构未发生异响;在 67%极限载荷保持 30 s 过程中,试验件结构未发生异响。然后进行卸载,卸载后检查试验件

结构未发现破损、断裂。之后进行 100% 极限载荷加载,加载过程中试验件结构无异响,达到 100% 极限载荷后,保持 3 s 的过程中,试验件结构无异响。试验的加载过程见图 10~12。

在进行船艏着水工况和船艉着水工况加载时,

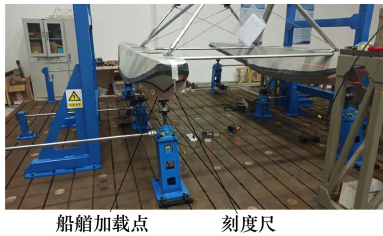


图 10 船艉着水工况试验

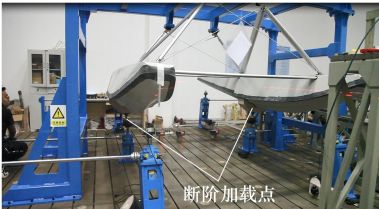


图 11 非对称断阶着水工况试验

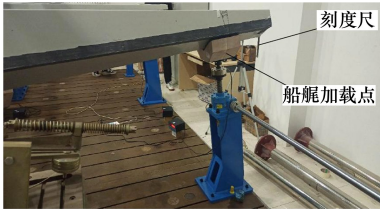


图 12 船艏着水工况试验

图 13 为船艏着水工况的位移改变量与加载量的示意图,从图中可以看出,位移改变量基本呈线性变化,处于弹性变形阶段,未产生塑性变形,满足结构强度设计要求,并且两侧位移改变量基本一致,最大位置改变量也相同,说明在预加载后船艏部分不存在装配间隙。

图 14 为船艉着水工况的位移改变量与加载量的示意图,从图中可以看出,位移改变量的变化基本

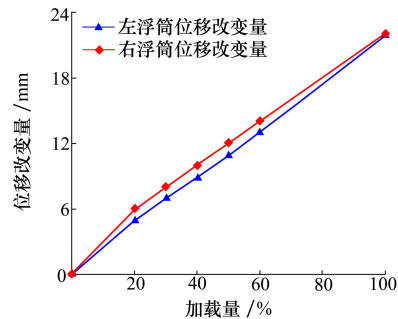


图 13 船艏位移曲线

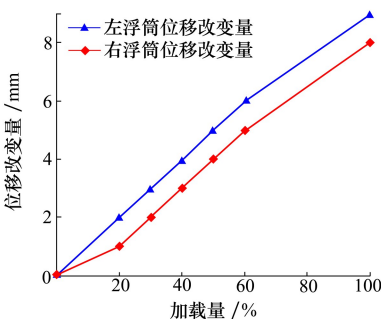


图 14 船艉位移曲线

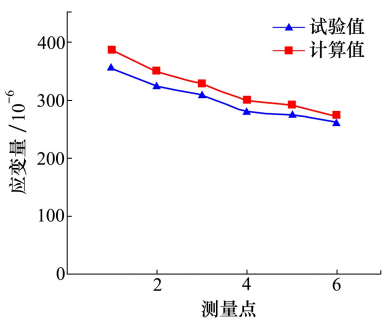


图 15 断阶着水工况浮筒应变试验值和计算值对比

5 结 论

以某型水上飞机为研究对象,本文设计了一种厚蒙皮多框式复合材料浮筒结构及桁架式金属支撑结构,并通过有限元强度分析和静力强度试验验证了该结构设计的可行性。静力试验中采用自主研发的浮筒式水上飞机的浮筒及连接结构静强度验证试验装置,完成了对称断阶着水工况、非对称断阶着水

逐级加载过程中分别对浮筒两侧的船艏和船艉的位移进行了记录,左侧船艏的最大位移为 22 mm,右侧船艏的最大位移为 22 mm,左侧船艉的最大位移为 9 mm,右侧船艉的最大位移为 8 mm,且卸载后并未产生有害的永久变形。

呈线性变化,处于弹性变形阶段,未产生塑性变形,满足结构强度设计要求,但两侧位移改变量相差大约 1 mm,最大位置改变量相差 1 mm,说明在预加载后右侧船艉部分存在装配间隙,导致两侧结果存在不一致的现象。

图 15 给出了断阶着水工况浮筒下表面应变测量值和有限元分析值对比情况,从图中可以看出,应变测量值和应变计算值吻合度较高。

工况、船艉着水工况及船艏着水工况静力试验。与仿真结果对比可以发现,船艉位移和船艏位移试验值与仿真值也比较接近,船艉应变和船艏应变试验值与仿真值比较接近,说明本文采用的有限元模型具有较高的精度。试验结束后,浮筒及其支撑结构未发生破损和断裂,船艉位移和船艏位移较小,断阶载荷下应变测量值和应变计算值吻合度较高,结果验证了浮筒及其支撑结构强度和刚度满足设计要求,同时也说明本文设计的复合材料浮筒及其支撑

结构具有较强的承载能力,可为后续轻量化的复合材料浮筒结构设计提供依据。

参考文献:

- [1] 范振伟, 杨凤田, 项松, 等. 我国电动飞机发展现状及建议[J]. 航空科学技术, 2019, 30(11): 18-21
FAN Zhenwei, YANG Fengtian, XIANG Song, et al. Present situation and advice of electric aircraft development in China[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(11): 18-21 (in Chinese)
- [2] 杨凤田, 康桂文, 项松, 等. 某型电动水上飞机设计与试验[J]. 新能源航空, 2023, 1(1): 1-9
YANG Fengtian, KANG Guiwen, XIANG Song, et al. Design and test of an electric seaplane[J]. Green Energy Aviation, 2023, 1(1): 1-9 (in Chinese)
- [3] 黄洪明. 水陆两栖型轻型运动飞机技术现状及发展研究[J]. 价值工程, 2018, 21(53): 124-125
HUANG Hongming. Research on the status and development of amphibious light sport aircraft technology[J]. Value Engineering, 2018, 21(53): 124-125 (in Chinese)
- [4] 党婧, 高丽红, 杨利. 通用飞机用复合材料应用现状与发展趋势[J]. 粘接, 2013, 34(7): 73-76
DANG Jing, GAO Lihong, YANG Li. Application status and development trends of general aircrafts' composite materials[J]. Adhesion, 2013, 34(7): 73-76 (in Chinese)
- [5] 郑锡涛, 陈浩远, 李泽江, 等. 先进复合材料在未来飞行器中的应用[J]. 航空工程进展, 2011, 2(2): 181-187
ZHENG Xitao, CHEN Haoyuan, LI Zejiang, et al. Application of advanced composite materials to future aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2011, 2(2): 181-187 (in Chinese)
- [6] SNORRI Gudmundsson. General aviation aircraft design: applied methods and procedures[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014
- [7] ALAN Canamar. Seaplane conceptual design and sizing[D]. Glasgow: University of Glasgow, 2012
- [8] 吕继航, 杨仕福, 杨荣, 等. 水陆两栖飞机水动强度技术的现状与发展[J]. 航空制造技术, 2023, 66(6): 74-84
LYU Jihang, YANG Shifu, YANG Rong, et al. Review on strength technology of amphibious aircraft induced by hydrodynamics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(6): 74-84 (in Chinese)
- [9] 陈诚, 高立华, 孙卫平, 等. 水陆两栖飞机活动波浪地板地效试验研究[J]. 气动研究与试验, 2023, 1(5): 113-118
CHEN Cheng, GAO Lihua, SUN Weiping, et al. Experimental study on the ground effect of moving wavy floor for an amphibious aircraft[J]. Aerodynamic Research & Experiment, 2023, 1(5): 113-118 (in Chinese)
- [10] 张永杰, 崔博, 王明振, 等. 水陆两栖飞机着水试验与理论分析方法研究进展[J]. 航空学报, 2023, 44(21): 528665
ZHANG Yongjie, CUI Bo, WANG Mingzhen, et al. Research progress of amphibious aircraft water landing test and theoretical analysis methods[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(21): 528665 (in Chinese)
- [11] 张舵, 何月洲, 王海. 水陆两栖飞机浮筒及其连接结构非对称筒首着水工况试验技术研究及应用[J]. 工程与试验, 2019, 59(3): 53-57
ZHANG Tuo, HE Yuezhou, WANG Hai. Amphibious aircraft pontoon and its connection structure symmetric cylinder head water test technical research and application[J]. Engineering & Test, 2019, 59(3): 53-57 (in Chinese)
- [12] 赵长辉, 王猛, 张继斌, 等. 水陆两栖通用飞机浮筒安装系统结构设计[J]. 飞机设计, 2022, 42(6): 51-57
ZHAO Changhui, WANG Meng, ZHANG Jibin, et al. Structure design of float installation system of floatplane[J]. Aircraft Design, 2022, 42(6): 51-57 (in Chinese)
- [13] DIMAS Bahtera Eskayudha, KENJI Yamamoto, TAIGA Kanehira, et al. A proposed seaplane float in water entry problem and landing in waves using particle based method[J]. Journal of Advanced Research in Numerical Heat Transfer, 2023, 13(1): 31-38
- [14] GUO Yang, MA Dongli, YANG Muqing, et al. Numerical analysis of the take-off performance of a seaplane in calm water[J]. Applied Sciences, 2021, 11(14): 6442
- [15] 赵立杰, 田孟伟, 李景奎, 等. 水上电动飞机浮筒设计及起飞滑行[J]. 航空学报, 2021, 42(3): 624950
ZHAO Lijie, TIAN Mengwei, LI Jingkui, et al. Float design and take-off of electric seaplanes[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(3): 624950 (in Chinese)
- [16] 李新颖, 曹楷, 吴彬, 等. 水陆两栖飞机静水面高速滑行性能数值计算与试验分析[J]. 气体物理, 2019, 4(4): 56-62

- LI Xinying, CAO Kai, WU Bin, et al. Numerical calculation and test analysis of high speed taxiing performance of amphibious aircraft on calm water[J]. *Physics of Gases*, 2019, 4(4): 56-62 (in Chinese)
- [17] CHEN Jichang, XIAO Tianhang, WANG Mingzhen, et al. Numerical study of wave effect on aircraft water-landing performance[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(5): 2561
- [18] EBRAHIMI A, SHAFAGHAT R, HAJIABADI A, et al. Numerical and experimental investigation of the aero-hydrodynamic effect on the behavior of a high-speed catamaran in calm water[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2022, 21(2022): 56-70
- [19] JAFAR M, DALA L, HUARD B. A review of the analytical methods used for seaplanes performance prediction[J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2019, 91(6): 820-833
- [20] RHYS D, FERNANDES R. Sundaravadivelu. Hydrodynamic response of floating pontoon for seaplane operation[C]//OCEANS Conference & Exposition, Chennai, India, 2022
- [21] 王心怡, 陈吉昌, 付晓琴, 等. 水上飞机不同滑行速度下的动态响应特性研究[J]. *航空计算技术*, 2024, 54(2): 20-25
WANG Xinyi, CHEN Jichang, FU Xiaoqin, et al. Study on dynamic characteristics of seaplane at different gliding speeds[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2024, 54(2): 20-25 (in Chinese)
- [22] UTOMO A, GUNAWAN Yanuar. Biomimetics Design optimization and drag reduction analysis for indonesia N219 seaplanes catamaran float[J]. *Processes*, 2021, 9(11): 2024
- [23] 李鹏, 闵锴瑞, 秦洪德, 等. 基于近似模型理论的水上飞机浮筒优化设计[J]. *船舶工程*, 2022, 44(5): 75-81
LI Peng, MIN Kairui, QIN Hongde, et al. Optimal design of seaplane buoy based on approximate model theory[J]. *Ship Engineering*, 2022, 44(5): 75-81 (in Chinese)
- [24] 赵立杰, 田孟伟, 李景奎. 一种水上电动飞机支撑结构分级优化方法[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(4): 1660-1666
ZHAO Lijie, TIAN Mengwei, LI Jingkui. Hierarchical optimization for the supporting structure of electric seaplane[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(4): 1660-1666 (in Chinese)
- [25] 曹楷, 唐彬彬, 黄淼, 等. 水上飞机浮筒布局形式对气动特性的影响[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(36): 15132-15139
CAO Kai, TANG Binbin, HUANG Miao, et al. Influence of the float layout on the aerodynamic characteristics of seaplane[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(36): 15132-15139 (in Chinese)
- [26] 刘永军. 运-12 双浮筒式水上飞机改型设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008
LIU Yongjun. The design of Y-12 floatplane variant[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008 (in Chinese)
- [27] 黄钰清. 水上轻型飞机总体方案设计与分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019
HUANG Yuqing. A study on conceptual design and analysis of light seaplane[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019 (in Chinese)
- [28] American Society for Testing and Materials. American society for testing and materials. standard specification for design and performance of a light sport airplane[S]. ASTM 2245-23, 2023

Design of composite pontoon structure of seaplane and verification

LIU Fujia^{1,2}, LI Donghui², LI Qunfang¹, GUO Yilin¹

(1.Liaoning General Aviation Academy, Shenyang 110136, China;
2.College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: As a key component of seaplanes, the structural design of the pontoon plays a vital role in the safety of seaplanes taking off and landing on the water. Combining with the design requirements of a certain type of seaplane, a thick-skinned multi-frame composite pontoon structure and truss-type metal support structure are designed. The finite element model for pontoon structure and supporting structure is established via finite element software, and the strength analysis of metal and composite structure in the structure is carried out in terms of the Von-Mises criterion and Tsai-Wu criterion, respectively. In order to further verify the bearing capacity of the structural design and verify the accuracy of the finite element model, the self-developed testing device for static strength verification of seaplane pontoons and connecting structures was used to verify the static test of the structure. The tested results show that the strength and stiffness of the thick-skinned multi-frame composite pontoon structure and the truss metal supporting structure meet the design requirements, and the finite element model is accurate, which can provide a reference for subsequently designing the lightweight composite pontoon structure.

Keywords: seaplane; composite; pontoon; strength analysis; verification

引用格式:刘福佳, 李东辉, 李群芳, 等. 某型水上飞机复合材料浮筒结构设计与试验验证[J]. 西北工业大学学报, 2025, 43(4): 723-731

LIU Fujia, LI Donghui, LI Qunfang, et al. Design of composite pontoon structure of seaplane and verification[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2025, 43(4): 723-731 (in Chinese)