

## 某型充气救生筏承载能力仿真计算分析

安徽坤 周昊 代绍晓

航宇救生装备有限公司, 湖北 襄阳 441003

[摘要] 充气救生筏作为海上落水人员的救生装备, 能够为海上落水人员提供救生场所, 并保障落水人员生命安全。文章对某型充气救生筏进行了简要介绍, 采用有限元仿真技术对其进行承载能力仿真计算, 验证该型充气救生筏的承载能力, 加快了正向设计过程, 缩短了项目周期, 节约了试验经费, 为同类产品设计提供了借鉴。

[关键词] 充气救生筏; 承载能力; 正向设计

DOI: 10.33142/ec.v8i4.16303

中图分类号: U667.6

文献标识码: A

### Simulation Calculation and Analysis of the Bearing Capacity of a Certain Type of Inflatable Life Raft

AN Aokun, ZHOU Hao, DAI Shaoxiao

Aerospace Life Saving Equipment Co., Ltd., Xiangyang, Hubei, 441003, China

**Abstract:** Inflatable life rafts, as life-saving equipment for drowning people at sea, can provide a place for them to live and ensure their safety. The article provides a brief introduction to a certain type of inflatable life raft, and uses finite element simulation technology to simulate and calculate its load-bearing capacity, verifying the load-bearing capacity of the inflatable life raft, accelerating the forward design process, shortening the project cycle, saving testing costs, and providing reference for the design of similar products.

**Keywords:** inflatable life raft; carrying capacity; forward design

#### 1 概述

随着全球海洋事业的发展和国家海洋战略的不断深化, 海洋科学勘探、维权反恐等活动和任务越来越频繁, 加之各种海上军事活动也不断增多, 空中和海上力量的有效作用范围已大幅扩展, 海情和作战环境更加恶劣。随之而来的各种海难事故也频频发生, 造成巨大的人员伤亡和财产损失, 如舰船碰撞或搁浅、空难飞机迫降等。面对各种突发的海上灾难事件, 亟需高效、可靠的海上救援产品, 确保在不同海况及海域, 对落水人员实施有效救治。

海空救援 (air-sea rescue, ASR) 是将海上与空中救援力量相结合, 发挥二者优点与特长, 对海难事故进行应急响应, 及时救助因突发事件落水或伤者; 当前我国的海上搜救搜救区域以近海、浅海为主, 只能满足我国领海内范围的搜救需求, 难以在短时间内实施及时有效的更大距离搜救。人员在海上遇险后, 将面临低温、高海况等诸多复杂海洋环境, 仅仅依靠遇险人员自带的救生装置无法维持长时间生存。某型充气救生筏作为远海遇险人员的救生装备, 直升机或运输机将充气救生筏投送至待救海域后, 待其充气成型后, 落水人员登上充气筏后在复杂海况环境下可进行长时间的漂浮并等待救援, 保障落水人员生命安全。

#### 2 产品介绍

某型充气救生筏主浮筒结构如图 1 所示, 该充气救生筏为正八边形立体结构, 顶部与底部设计为对称结构, 中

间增加两层支撑浮筒; 为了增强充气救生筏的整体刚度, 顶部与底部的正八边形内设计有十字支撑浮筒, 中间部分通过立柱相连, 形成顶部与底部中间的支撑; 四周空间开口为登筏口, 方便落水人员进出, 但开口后该处主浮筒成为整个充气救生筏的承载的薄弱环节, 是设计中为了满足产品需求不得已的妥协。

该充气救生筏采用通用聚氨酯柔性材料, 不充气时可以折叠起来, 放入包装袋中, 利于存放和节约空间; 充气成型后, 主浮筒、支撑浮筒等内部具有一定的压力, 柔性结构具有承载能力, 特别是在水上, 还可以提供很大的浮力。

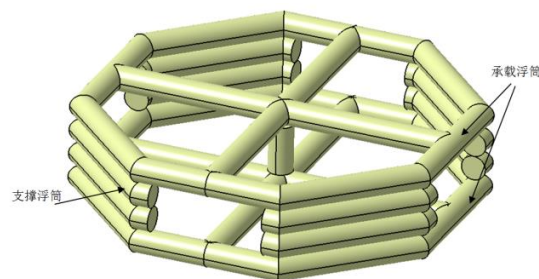


图 1 主浮筒结构示意图

#### 3 某型充气救生筏承载能力评估

某型充气救生筏承载能力设计成 5t, 采用柔性材料设计成多边形密闭可充气囊类结构, 通过充气到一定囊压提供充气救生筏刚度满足设计承载能力; 该型充气救生筏承载能力评估有三种方法, 一是通过理论计算, 通过推导

理论公式,根据该型充气救生筏尺寸,所采用的材料性能参数、充气的囊压来确定其承载能力;二是通过有限元仿真,建立该型充气救生筏有限元模型,通过承载设计能力一样的重物进行流固耦合动态仿真计算,确定其承载能力;三是通过试验验证,做多个试验件(每个尺寸都做成试验件),通过试验迭代验证。显然通过大量的试验验证不仅需要人力、物力、试验条件,还需要时间周期,显然是不可取;由于某型充气救生筏为柔性囊类充气成型、四层叠加的结构,理论假设比较多且结构复杂,理论公式很难推导,最后确定通过有限元流固耦合动态仿真计算确定其承载能力。

### 3.1 仿真方法

该型充气救生筏载重物在水上漂浮是典型的流固耦合问题,流体和固体介质之间相互作用,一方面固体在流体作用下会产生变形或运动,而固体的变形或运动又会影响流场的流动。随着计算机科学和数值技术的快速发展,用于流固耦合的数值方法也日渐成熟,目前已经发展了多种方法,主要有边界元法、有限元法、无网格粒子法及有限体积法<sup>[1]</sup>。

其中,任意拉格朗日-欧拉耦合方法(ALE)兼具 Lagrange 方法和 Euler 方法二者的特长,采用 Lagrange 方法处理结构边界运动,能够有效地跟踪物质结构边界的运动,同时,吸收了 Euler 的长处,使内部网格单元独立于物质实体的存在,网格可以根据定义的参数在求解过程中适当调整位置,使得网格不致出现严重的畸变。对于充气救生筏载重物漂浮和结构在重物下变形问题,ALE 方法在模拟液面溅和水面大波动、弹性体的流固耦合以及空气垫等方面等具有较好的优势<sup>[2]</sup>。

充气救生筏是可以看作充气气囊,主要有 CV 法和 ALE 方法,其中 ALE 方法主要在预测气囊展开及气体喷射部分表现较好,但需要较为精细的欧拉网格,且占用计算资源较多。本文重点关注充气救生筏展开后的承载能力,对其展开及气体喷射部分需求较低,故使用 CV 方法,即将气囊看作一个理想气体均匀压力模型,假设气囊内部压力符合理想气体状态方程,即气囊内部气体压力处处相等,假设其为绝热过程。

### 3.2 仿真分析流程

计算流程如下:

- 几何结构:由结构设计人员提供充气救生筏的三维几何模型;
- 计算方法的确定:由强度分析人员对三维几何模型进行分析研究,确定模型简化原则及分析思路;
- 网格划分:将三维几何模型导入到 Hypermesh 软件中进行网格划分;
- 参数设置:将网格模型导入到 LS-PrePost 软件中,进行边界条件、初始条件等设置,并导出 k 文件;
- 工况与载荷的确定:根据工作条件及计算任务书

的要求,确定工况及载荷;

f)提交求解:将 k 文件提交至 LS-Dyna 求解器,进行求解;

g)后处理:输出结果。

### 3.3 单位制

为保证模型的适用性、计算结果的准确性以及载荷的施加,有限元模型采用统一单位制,具体见表 1。

表 1 单位制

名称	长度	弹性模量	力	应力
单位	米	帕	牛	帕
符号	m	Pa	N	Pa

### 3.4 坐标系

坐标系选用右手直角坐标系,以水平向左的方向为 Y 轴正向,水平向右为 X 轴为竖直向上,Z 轴符合右手定则,具体见图 1 所示。

### 3.5 有限元模型建立

在建模中遵循以下原则:

- 保证主结构的质量特性不发生变化;
- 各部件的运动特性不发生变化;
- 各连接件之间的连接方式不发生变化;
- 保证各部件的质量转动惯量与实际一致。

根据上述建模原则采用 HyperMesh 软件分别建立网格模型如图 2~图 6 所示。其中充气救生筏浮筒连接部分的单元类型选用壳单元,定义为薄膜截面属性,网格大小为 70mm,共 41156 个单元;浮筒与浮筒连接以及连接部分与浮筒连接均采用共节点模拟;重物采用刚体模拟,划分成六面体单元,网格尺寸为 50mm,共 32000 个单元,并设定充气救生筏承载能力四分之一的重量。

流体域分为空气域和水域,空气域的范围为 2.5m×16m×16m,水域的范围为 5m×16m×16m。充气救生筏初始时刻均在水面上,其最低点距离水面的距离为 20mm,水和空气域采用欧拉网格,三维六面体单元模拟,为了减少计算量,耦合区域采用局部加密控制,非耦合区域采用渐变式网格控制,与耦合区相接部分网格与耦合去网格尺寸一致,越往外部区域网格尺寸越大。网格处理好后通过 HyperMesh 和 LS-Dyna 的接口,导出 K 文件,在将该文件导入到 LS-PrePost 软件进行材料参数赋值和单元类型的设定,以及初始条件和边界条件设置。

为了便于评估充气救生筏的承载能力,输出充气救生筏的流固耦合力。

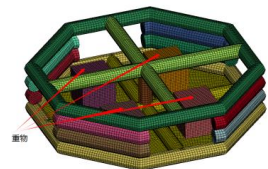
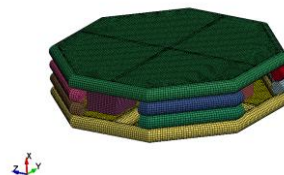


图 2 充气救生筏有限元模型 图 3 重物在浮筒位置

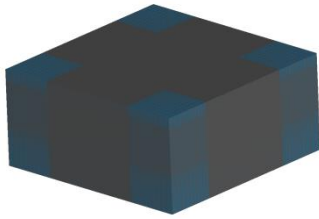


图4 流体域有限元模型图

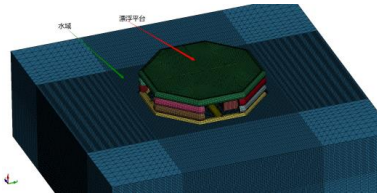


图5 水域与充气救生筏有限元模型图

### 3.6 边界条件及求解设置

流体域由水和空气组成,采用空材料模型,水和空气均为欧拉网格。因为流体的区域有限,为了减小误差,对空气和水域施加无反射约束。欧拉域的压力梯度由重力产生,通过定义水域的重力加速度的方式,从而可以考虑不同深度下水压对充气救生筏体的作用。LS-DYNA 软件中可以通过关键字\*DEFINE\_CURVE 定义重力加速度曲线,从初始时刻零时刻定义重力加速度值,结束时刻定义大于求解时间或一个很大的值,同时对应重力加速度值,再通过\*LOAD\_BODY\_Z 来定义加速度的方向和加速度曲线的编号,作用在整个模型区域。

流体单元使用多物质 SALE 算法,即允许流体区域有多种物质共存。结构与水体的流固耦合作用通过定义接触来模拟。

设置充气救生筏浮筒与重物、连接布与重物的接触为自动接触。

### 3.7 气囊设置

采用均压法对气囊进行模拟,气囊单元类型为膜单元。通过气囊专用结果输出的关键字\*DATABASE\_ABSTAT 来得到充气救生筏气囊在水面上流固耦合作用过程中的内压和体积的变化历程等数据。

气囊模型采用 LS-DYNA 软件控制体积法中的 SIMPLE\_AIRBAG 模型,关键字为 \*AIRBAG\_SIMPLE\_AIRBAG\_MODEL, 可以通过该关键字定义充气救生筏气囊所处环境的初始压力、环境密度和初始气囊内压。初始环境压力和气囊内压均设置为 1 个大气压,即 1e5Pa。由于充气救生筏气囊是采用弹性体,用充气展开后的外形模型,未模拟载荷过程,初始时刻内外压差不一致时,会有一个外形稳定的过程,为了避免气囊初始内外压差带来的不稳定变形对整体着水计算的影响,采用先对气囊进行充气,充气时间设定为 10ms,充气速率为 0.064kg/ms,达到额定内压 114KPa (绝压)时,再进行承载能力仿真计算。

### 3.8 水体和空气材料设置

水体和空气材料采用空材料,压力采用状态方程进行定义,对于实体单元,可以采用空材料类型来调用状态方程来避免偏应力的计算,并通过一个截断压力值来定义压力的更小边界值,对于水体和空气的低速问题,常用的状态方程有线性多项式和 Gruneisen 状态方程,空气的 Polynomial 状态方程参数见表 2 和水体的 Gruneisen 状态方程参数见表 3<sup>[3]</sup>。

表2 空气的 Polynomial 状态方程参数

	$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub> (GPa)	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>
空气	1.18	0	0	0	0	0.4	0.4	0

表3 水体的 Gruneisen 状态方程参数

	$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	c (m/s)	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	$\gamma_0$
水	1000	1467	1.92	-0.0960	0	0.35

### 3.9 计算工况

根据承载能力要求,充气救生筏静水下承载极限为载重 5 吨,浮筒工作内部压力为 14KPa。

### 3.10 仿真计算结果

利用 LS-Dyna 求解器进行流固耦合仿真,仿真动画如图 6 所示,局部放大图如图 7 所示,充气救生筏的承载能力,即充气救生筏的流固耦合力与时间的曲线如图 8 所示。通过动画可以看出充气救生筏受载后底部囊布向下变形,囊布带动承载浮筒发生变形,与十字连接部分浮筒在载荷作用下发生局部褶皱,但充气救生筏没有发生塌陷,仍具有承载能力;通过充气救生筏流固耦合力与时间的曲线关系可以看出,重物释放后,重物在重力作用下向下运动,冲击救生筏与重物接触部分受载提供反力,当重物向下运动速度为零时,充气救生筏与水域流固耦合力最大,大于重物的重量,该时刻系统并未平衡,充气救生筏弹性系统会有回弹,回弹时重物速度再回到零后,再下落行程振动过程,在阻力作用下系统逐步达到平衡稳定,稳定时力值为:51700N,即充气救生筏的承载能力,如果再增加重量,局部会有塌陷。

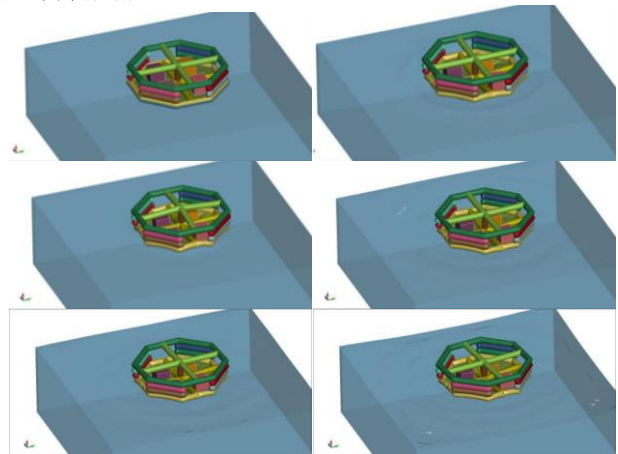


图6 充气救生筏仿真动画



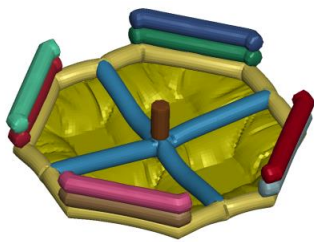


图 7 充气救生筏变形局部放大图

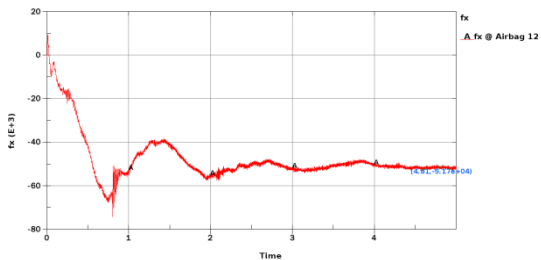


图 8 充气救生筏浮力与时间的关系图

#### 4 结论

通过以上分析，可以得出如下结论：

- (1) 采用流固耦合仿真充气救生筏的承载能力方法是可行的，且时间周期短、节约经费；
- (2) 该型充气救生筏的承载能力为 51700N；
- (3) 该型充气救生筏在载重 5 吨时而不垮塌。

#### 【参考文献】

[1]刘沛清,屈秋林,郭保东,等.数值计算技术在航空器水上迫降中的应用[C].第七届:全国流体力学学术会议论文摘要集,2012.

[2]王学.基于 ALE 方法求解流固耦合问题[D].安徽:国防科学技术大学,2006.

[3]佚名.柔性气囊直升机着水载荷数值分析及试验验证[D].中国:中国航空研究院,2019.

作者简介:安徽坤(1986—),男,航宇救生装备有限公司,高级工程师,主要从事强度设计、仿真研究;周昊(1986—),男,航宇救生装备有限公司,高级工程师,主要从事强度设计、仿真研究;代绍晓(1987—),男,航宇救生装备有限公司,高级工程师,主要从事救生产品设计。