

半硬式飞艇结构有限元计算及试验验证

刘玉标，*邢云林，罗俊清，申仲翰

(中国科学院力学研究所，北京 100190)

摘要：本文通过半硬式飞艇模型试验与飞艇结构有限元计算模拟结果的对比分析，给出了半硬式飞艇模型支撑骨架应变和蒙皮径向位移随内部压力的变化规律。试验结果显示，随飞艇内部压力增大，蒙皮产生应力刚化，导致蒙皮位移、骨架应变随内压的增长速度变慢的这一非线性现象。同时计算与试验结果对比分析表明，有限元计算模拟方法有相当好的计算精度。

关键词：半硬式飞艇；结构试验；有限元计算；应力刚化

THE FINITE ELEMENT METHOD SIMULATION AND STRUCTURAL EXPERIMENT OF SEMI-HARD AIRSHIP

LIU Yu-biao, *XING Yun-lin, LUO Jun-qing, SHEN Zhong-han

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Based on the comparison between the Finite Element Method simulation results and the semi-hard airship experimental results, the relationships between the response of semi-hard airship, such as the strains of backbone and the radial displacements of envelopes et al., and the internal pressure are analyzed. The experimental results show that the growth rate of strains and displacements becomes slower as the internal pressure increasing, which means that the envelopes become stress stiffening. In addition, the paper shows that the finite element simulation method we used can get satisfactory calculation accuracy.

Key words: Semi-hard Airship; Structural Experiment; Finite Element Method; Stress Stiffening

传统飞艇结构主要有软式、硬式和半硬式三种。由于结构加工水平和蒙皮材料限制，平流层飞艇大多采用半硬式飞艇结构。半硬式飞艇没有支撑骨架或者只有少许骨架，只有一根贯穿艇身的龙骨承担飞艇和设备重量^[1-2]。Hunt 利用 NASTRAN 建立理想化的结构模型，分析静力作用下应力分布和结构变形^[3]。Boeing 利用 ABAQUS 软件包 FEA 计算飞艇内力。本文设计半硬式飞艇模型试验，利用弹簧和位移传感器并联测得蒙皮位移和拉力，最后通过建立有限元模型与试验结果对比来验证计算模拟方法的精度。

1 试验模型

本文试验模型主要模拟半硬式飞艇结构，加工的飞艇试验模型最大直径为 $D = 420\text{mm}$ ，长细比为 4:1，总长度 $L = 1600\text{mm}$ 。飞艇模型的龙骨采用一根贯穿艇身的钢管模拟，钢管上焊接两个圆盘以便与橡胶蒙皮连接。飞艇模型蒙皮是由八根铜条与橡胶蒙皮组成，焊接在钢管中部的支架不承担压力载荷，只

基金项目：国家重大专项，××流固耦合分析

作者简介：刘玉标(1961)，男，湖南人，副研究员，主要从事结构动力学研究(E-mail: yubiao@imech.ac.cn)；

*邢云林(1987)，男，山东人，博士生。主要从事结构动力学研究(E-mail: xingyunlin@yeah.net)；

罗俊清(1989)，男，江西人，硕士生，主要从事结构动力学研究；

申仲翰(1939)，男，北京人，教授，主要从事结构动力学研究。

用于测力弹簧及位移传感器固定。铜条长度为 1645mm，厚度为 $d = 1\text{mm}$ ，如图 1 所示，在圆周方向，铜条在环向每隔 45 度均匀分布，每根铜条宽度为 4 度，铜条两端焊接在钢管两端的铜盘上。图 2 给出了 1/2 根铜条的尺寸。橡胶蒙皮粘贴在铜条支撑骨架上。

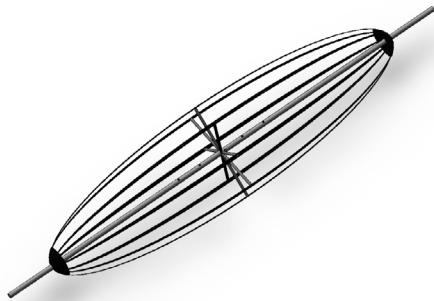


图 1 飞艇铜条骨架

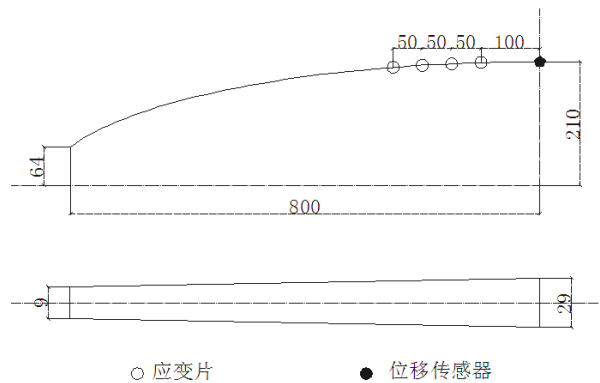


图 2 1/2 铜条箍筋

由于铜条比较薄，不易维持椭球形状，因此我们在钢管中部设置了支架。八根套筒呈轮辐式排列，套筒长度为 $l_s = 150\text{mm}$ 。套筒一端与钢管焊接，初始时一端与铜条中部接触，但不连接，施加压力载荷后，蒙皮不受其约束。为了模拟飞艇径向支架的刚度，用弹簧将铜条中部和钢管中部连接，弹簧放置在套筒中，两端分别与钢管和铜条连接。同时，将拉线位移传感器与弹簧并联，一端固定在钢管上，另一端连接在铜条中部，用于测量蒙皮径向位移并得出弹簧拉力。图 3 给出了钢管与铜条通过弹簧、套筒及位移传感器连接的示意图。套筒的作用有两个，一个是维持铜条形状，使铜条的支撑的形状为椭球形，另一个作用是保护弹簧，弹簧的外径小于套筒的内径，弹簧可以在套筒内自由伸缩。弹簧原长 $l = 140\text{mm}$ 小于套筒的长度，安装完成后，弹簧将伸长 $l_0 = l_s - l$ 。通过试验标定，弹簧的刚度系数为 $k = 0.248\text{N/mm}$ 。

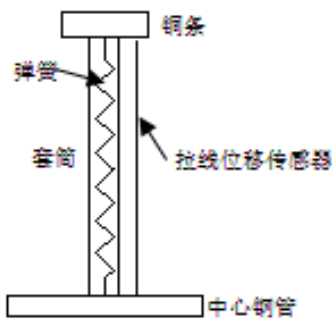


图 3 弹簧、套筒连接钢管与铜条

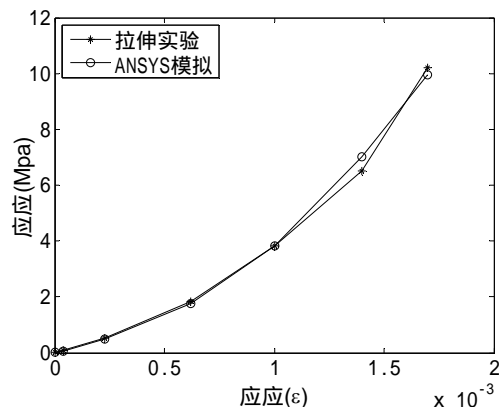


图 4 橡胶材料应力应变关系

为保持橡胶蒙皮与铜条粘接处的密封，采用两层橡胶，分别粘贴在铜条箍筋内外部。当改变飞艇内部压力时，铜条可随橡胶一起变形。试验中使用的橡胶材料厚度为 $h = 1.3\text{mm}$ ，根据拉伸试验得出的橡胶应力应变关系如图 4。

以铜条 1/2 处为原点，应变片粘贴位置为 $\pm 100\text{mm}$ 、 $\pm 150\text{mm}$ 、 $\pm 200\text{mm}$ 、 $\pm 250\text{mm}$ ，如图 2 所示，应变片测量铜条表面的弯曲与轴向应变。应变片和位移传感器的导线都由钢管的内部穿出，然后将钢管密封。精密气压表串联飞艇进气孔，可以实时测量飞艇内部压力。试验时对飞艇充气，测量不同气压时铜条的应变和变形并计算弹簧拉力。

2 计算模型

采用 ANSYS 建立有限元模型，其中铜条和两端圆盘采用 SHELL63 单元，支撑骨架都采用 beam44

单元。弹簧使用 COMBIN14 单元，弹簧预拉力为 $f = l_0 k$ 。在有限元分析中，用三节点三角形 SHELL181 单元模拟蒙皮材料^[4]，其材料属性采用 5 参数 Mooney-Rivlin 非线性超弹性模型^[5]，经过拟合，可以得到与蒙皮材料拉伸试验符合很好的结果(见图 4)。

非线性超弹性 5 参数 Mooney-Rivlin 模型为：

$$w = \sum_{i+j=2}^2 C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \frac{1}{d} (J - 1)^2$$

其中 $\bar{I}_k = J^{-2/3} I_k$ ， $k=1,2,3$ 。 w 为应变能， J 为压缩体积比， $J = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3$ ， I_1 、 I_2 和 I_3 分别为三个 GREEN 应变不变量。

建立的有限元模型如图 5 所示。采用小应变大变形假设，考虑膜应力引起的应力刚化现象。加载时分两步进行加载，第一步加载弹簧预拉力，获得膜结构初始位形，第二步逐步加载内部压力获最终的变形。

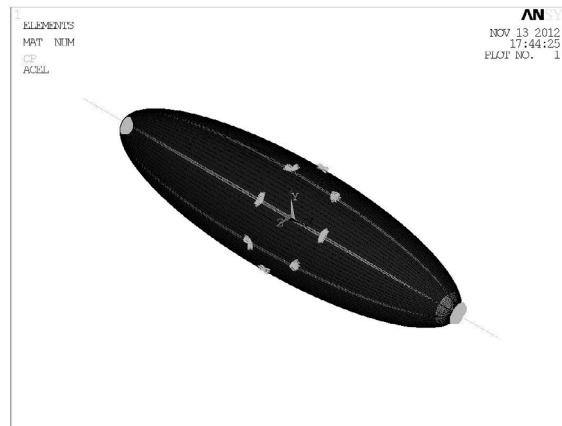


图 5 飞艇有限元模型

3 结果分析

由于加工制造的原因，飞艇模型初始外形很难保持为理想的椭球形，只有当飞艇内部达到一定压力时，飞艇模型才能保持为椭球形，为了进行试验与计算对比，截取内部气压为 1500pa~3500pa 范围的试验测量数据结果验证计算结果。本飞艇模型虽是对称的，由于加工制造的原因，八根铜条上的应变和弹簧位移很难保持一致，图 6、图 7 分别给出了压差为 2000pa 时八根铜条上的应变和橡胶蒙皮位移实测平均值与计算的对比图。

从图 6、图 7 两个图对比中，我们可以看出计算结果和试验结果基本一致，说明这种分析模型的方法是合理的。图中试验曲线波动主要是由于压力荷载加载不稳定造成的。在图 7 中曲线变化趋势可以看出，随着内部压力逐渐增大，橡胶膜绷紧，产生应力刚化现象^[6-7]，导致测点位移和应变增长速度变慢。

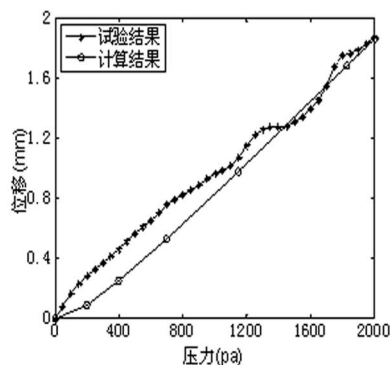


图 6 铜心中部位移随压力变化图

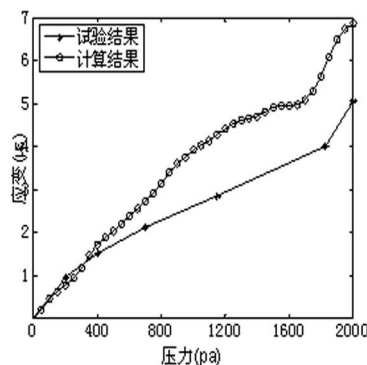


图 7 铜条 100mm 处应变随压力变化图

4 结论

本文通过半硬式飞艇模型试验,测量获得飞艇试验模型支撑骨架应变、变形与内压的关系。并与有限元模拟分析结果进行对比,结果表明,有限元计算模拟方法有相当好的计算精度。

试验和模拟结果可以看出,当飞艇内部压力增大时,由于橡胶膜应力增加,膜结构产生应力刚化现象,使得橡胶膜位移与骨架应变随内压的增长速度变慢。

参考文献:

- [1] 王飞,半硬式平流层飞艇龙骨结构与有限元分析,[J],航天返回与遥感,第32卷第四期,2011年8月
- [2] Casey Stockbridge, Airship Research and Development in the Areas of Design, Structures, Dynamics and Energy Systems,[J],Int'l J. of Aeronautical & Space Sci. 13(2), 170-187 (2012)
- [3] John D. Hunt. "Structural Analysis of Aerostat Flexible Structure by the Finite-Element Method", Journal of Aircraft, Vol. 19, No. 8 (1982), pp. 674-678.
- [4] 林文静,陈树辉,薄膜横向振动的有限元分析,[J],应用力学学报,Vol 28,No.1, Feb 2008
- [5] 张振秀,ANSYS 中超弹性模型及其在橡胶工程中的应用,[J],橡胶技术与装备,第35卷,2005年
- [6] 任俊超,空间悬索杂交结构的几何非线性分析,[J],空间结构,Vol 12,No.1, Mar 2006
- [7] 丁洁民,张弦空间结构的非线性分析,建筑结构学报,Vol 30 No.5, Oct 2009