

文章编号:1674-8190(2022)04-162-06

柔性飞艇主气囊湿模态分析及试验研究

刘路, 张伟, 王鹏飞

(中国特种飞行器研究所 试验与计量中心, 荆门 448035)

摘要: 大型柔性飞艇是临近空间“长驻空”重要平台,具有重要的国防及民用价值,是近年来浮空器结构工程领域研究的热点之一。主气囊是柔性飞艇核心结构部件,为了研究大型柔性飞艇主气囊周边流场对其模态性能的影响,将柔性飞艇主气囊内、外气体视为不可压缩流体,将空气随囊体振动的影响作为附加质量添加到囊体结构中,采用基于势流理论的附加质量计算方法完成主气囊在5种不同内压下的干、湿模态分析;通过模态试验测得该主气囊内压在2、4、6、8和10 kPa下的前三阶振型及频率。结果表明:干、湿模态的前3阶频率均随内压的增加而增大;同种内压下,计入囊体周围空气的附加质量后,主气囊的湿模态频率降低。

关键词: 柔性飞艇;主气囊;附加质量;湿模态分析

中图分类号: V274

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.04.19

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Wet Modal Analysis and Experiment Research on Flexible Airship Main Airbag

LIU Lu, ZHANG Wei, WANG Pengfei

(Test and Metrology Center, China Special Aircraft Research Institute, Jingmen 448035, China)

Abstract: Large flexible airship is an important platform for “long stay in the air” in near space. It is of important national defense and civil value. It is one of the hotspots in the field of structural engineering of aerostat in recent years. The main airbag is the core structural component of the flexible airship. In order to study the influence of the flow field around the main airbag of the large flexible airship on its modal performance, the air around the main airbag of the flexible airship is assumed as incompressible fluid, adding the influence of air vibrating with the airbag as an additional mass to the capsule structure. The dry and wet modal analysis of the main airbag under 5 different internal pressures is completed by the additional mass calculation method based on the potential flow theory. The first three order of vibration modes and frequencies of the internal pressure of the main airbag at 2, 4, 6, 8 and 10 kPa is obtained by experiment. The test and analysis results show that: the first 3 order of vibration frequencies of dry and wet mode gradually increase with the increase of internal pressure, under the same internal pressure, the wet modal frequency of the main airbag reduced when considering the influence of the air surrounding the airbag body with the structural vibration.

Key words: flexible airship; main airbag; additional mass; wet modal analysis

收稿日期: 2021-07-22; 修回日期: 2022-01-27

通信作者: 刘路, liul019@avic.com

引用格式: 刘路, 张伟, 王鹏飞. 柔性飞艇主气囊湿模态分析及试验研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(4): 162-167.

LIU Lu, ZHANG Wei, WANG Pengfei. Wet modal analysis and experiment research on flexible airship main airbag[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(4): 162-167. (in Chinese)

0 引言

柔性飞艇的主气囊是大型柔性充气薄膜结构,正常工作状态下主气囊处于空气包围中,当主气囊振动时会带动膜内外气体振动,从而产生附加质量,影响膜结构动力特性^[1]。

国内外研究人员对柔性薄膜结构的动态特性进行了深入研究。J. L. Sewall等^[2]测试了薄膜在空气和真空环境下的动态特性,发现环境气压从大气到接近真空的变化导致动态响应幅度和频率显著增大;H. Minami^[3]研究表明,空气密度及膜尺寸对矩形平面薄膜在空气中的附加质量影响非常显著;K. L. Apedo等^[4]和谭惠丰等^[5]分别研究了充气梁自振特性并给出了数值计算方法;毛国栋等^[6]利用薄翼理论计算了薄膜在空气中的附加质量;高海健^[7]采用拟密度法计算了薄膜充气管的干、湿模态;王基胜等^[8]采用势流理论、流体力学与声学理论给出了薄膜结构三种附加质量的计算方法;Y. Yadykin等^[9]对柔性薄板的附加质量进行了数值与试验研究,结果表明模态阶数越高附加质量越小;王磊等^[10]研究了空气密度对薄膜振动特性的影响,证明薄膜自振频率随空气密度的减小而增大;宋林等^[11]采用声—固耦合方法研究了矩形膜结构的振动特性并进行了试验验证;陈宇峰等^[12]研究了影响柔性飞艇干、湿模态计算精度的主要因素;邱振宇等^[13-14]基于流固耦合理论和势流理论,建立了薄膜与内外空气流场共同作用的理论模型,对薄膜充气管和尾翼模型进行了试验研究及湿模态分析。

上述研究的研究对象多为柔性薄膜、矩形腔体膜及充气软管等典型结构,此类构件与大型柔性飞艇主气囊的结构形式存在明显差异,均未考虑囊体热合缝对结构刚度的加强,且柔性薄膜与充气管结构的质量较小,试验过程中外界扰动对模态的影响更为明显。

本文设计大型柔性飞艇1:60缩比主气囊,测试其在2、4、6、8和10 kPa内压下的前3阶频率及振型,并采用基于势流理论的附加质量计算方法计算主气囊在空气中振动产生的附加质量,完成主气囊在5种不同内压下的干、湿模态分析,以期大型柔性飞艇主气囊模态性能分析提供参考。

1 缩比主气囊湿模态分析

1.1 附加质量计算

将柔性飞艇主气囊内、外气体视为不可压缩流体且做无旋运动,结构振动引起周边静止流体运动所产生的动能可表示为

$$T_i = \frac{1}{2} \iiint_v \rho q^2 d\tau \quad (1)$$

$$q = \nabla\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z} \mathbf{k} \quad (2)$$

$$\varphi = \sum_{i=1}^6 U_i \varphi_i \quad (3)$$

式中: q 为流体质点速度; φ 为流体速度势函数; $U_i(i=1,2,3)$ 为结构平动速度分量; $U_i(i=4,5,6)$ 为结构转动速度分量; φ_i 为结构第*i*速度分量对应的速度势。

流体的动能用附加质量可表示为

$$T_i = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^6 m_{ij} U_i U_j \quad (4)$$

式中: m_{ij} 为结构的附加质量; $U_i, U_j(i,j=1,2,3)$ 为结构平动速度分量; $U_i, U_j(i,j=4,5,6)$ 为结构转动速度分量。

周围气体的动能等于膜面结构运动所做的功 W_A ,则:

$$T_A = W_A = \frac{1}{2} \iiint_v \rho q^2 d\tau = -\frac{1}{2} \rho \iint_s \varphi \frac{\partial\varphi}{\partial n} dS \quad (5)$$

单位面积质量为 m_s 的薄膜结构的动能为

$$T_M = \frac{1}{2} m_s \int_s \left(\frac{dw}{dt} \right)^2 dS \quad (6)$$

做一阶往复振动的圆形薄膜的空气附加质量计算公式为

$$m_{\text{add}} = \frac{8\rho_a r^3}{3} \quad (7)$$

把三角形单元按面积等效为圆形,将等效半径代入式(7)便可求得三角形单元薄膜的空气附加质量,再将其均分至单元的三个节点。

$$m_{\text{add}} = \frac{8\rho_a S_c^{3/2}}{3\pi^{3/2}} \quad (8)$$

式中: S 为膜面面积; $\partial\varphi/\partial n$ 为速度势在薄膜表面外法线方向上的变化梯度; dw/dt 为结构运动速度; ρ_a 为空气密度; S_c 为单元的特征面积。

当三角形单元其中一个节点的振动远小于另外两个节点时,可近似认为该节点的振动方向即为单元的振动主方向,即: $\max(U_x, U_y, U_z) = U_y$, $\frac{U_x}{U_y} < 1\%$, $\frac{U_z}{U_y} < 1\%$, 则 y 方向为单元的振动主方向, S_c 等于单元在 xz 平面上的投影面积。

1.2 缩比主气囊模态计算

建立考虑热合胶接缝的缩比主气囊有限元模型,并采用 S3 壳元对其进行网格划分,共计 4 653 个节点,9 300 个三角形单元。首先进行缩比主气囊的干模态分析,然后基于干模态计算结果,进行单元附加质量计算,最后完成缩比主气囊内压分别为 2、4、6、8 和 10 kPa 下的湿模态分析。各内压工况下,缩比主气囊的湿模态前 3 阶计算振型及对应频率如图 1 所示。

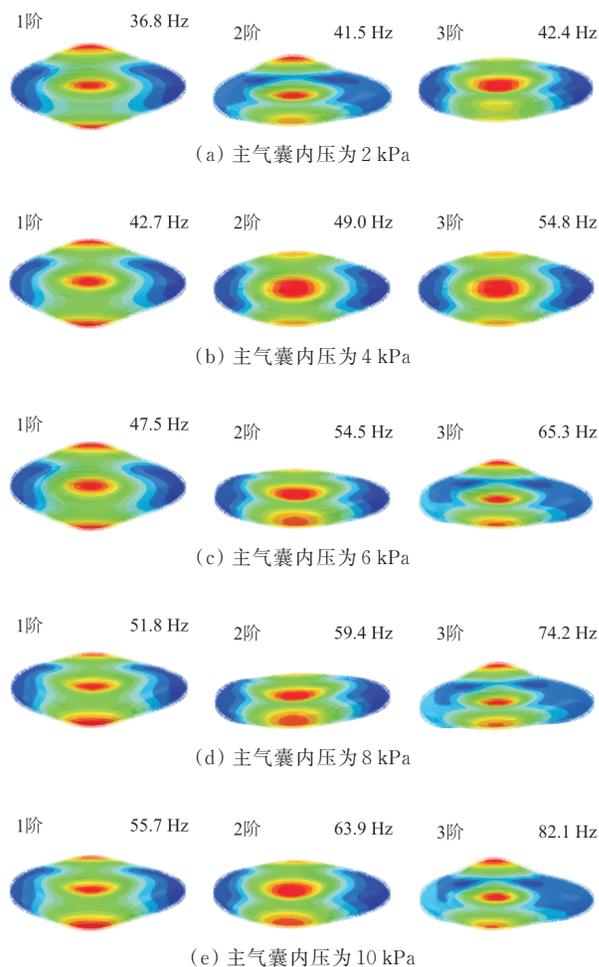


图 1 主气囊前三阶计算振型及频率
Fig. 1 First three calculation modes and frequency of the main airbag

主气囊内压在 2、4、6、8 和 10 kPa 下的干模态及湿模态的前 3 阶频率变化趋势如图 2 所示,可以看出:在同种内压下,主气囊干模态的前 2 阶频率无明显变化;随着内压的增加,主气囊刚度变大,干模态及湿模态前 3 阶频率随内压的增加而逐渐增大;在同种压力下,干模态的各阶频率明显大于湿模态的各阶频率,这是由于湿模态计算时,考虑了囊体周围空气随结构振动的影响,将囊体周围空气质量作为附加质量添加到主体结构中,增加了主囊体结构的质量,降低了自振频率。

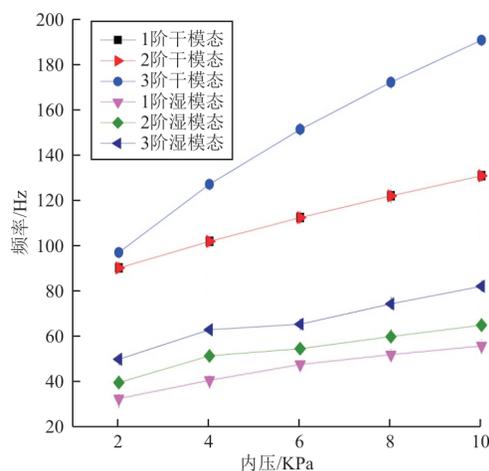


图 2 不同内压下干、湿模态对比
Fig. 2 Comparison of dry and wet modes under different internal pressure

2 缩比主气囊模态试验

大型柔性飞艇的尺寸较大,地面试验多采用缩比试验件进行模态性能测试,缩比试验件应与原结构的刚度相似^[15]。本文研究的大型柔性飞艇主气囊长度为 150 m, 体积为 100 000 m³, 为研究其主气囊的自振特性,特设计 1:60 缩比主气囊,并进行 5 种不同内压下的模态测试。

2.1 主气囊几何构型

飞艇主气囊采用 1:60 缩比模型,缩比主气囊分为前段、中段和后段,三段几何体分别由椭圆母线绕飞艇气囊纵向长轴旋转构成,模型全长为 2 480 mm,最大直径为 548 mm,主气囊膜材为 URETEK-3216LV 层合织物材料,几何尺寸如图 3 所示。

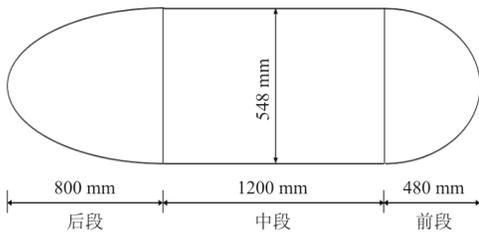


图 3 主气囊几何尺寸

Fig. 3 The geometric size of main airbag

2.2 主气囊模态测试

主气囊模态测试系统主要由气源、充气 and 压力控制系统、固定支架、激振器、激光测振仪、数据采集和控制系统等组成。为了模拟飞艇的真实飞行状态,采用两根低模量橡皮筋将主气囊悬挂于支架上,同时在囊体下侧增加橡皮筋以保证飞艇处于稳定状态;采用充气和压力控制系统对主气囊内压进行实时调节,以保持内压恒定;通过激振器对主气囊施加扫频激励;使用激光测振仪对主气囊的振动信号进行采集。主气囊模态测试系统组成如图 4 所示。

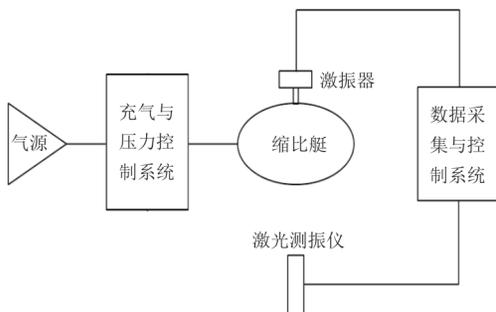


图 4 主气囊模态测试系统

Fig. 4 Modal test system of main airbag

主气囊的长度为 2 480 mm,由于在空气中的阻尼较大,故选用能量较大的电动式激振器作为激振设备,采用基于激光测振原理的 PSV-500-3D 三维全场扫描式激光测振仪对主气囊振型模态进行测量。把电动式激振器布置在囊体中间位置,将激振器的激振端部与囊体粘连,在每一个气压工况下,对主气囊施加扫频激励;由于主气囊尺寸较大,在囊体上选择 4 个测量区域并布置激光测振仪,分 4 次进行模态振型测量,通过振型图拼接得到囊体整体振型模态图;将模态测试结果导入

LMS 模态分析软件完成模态后处理分析。飞艇主气囊模态试验现场布置如图 5 所示。

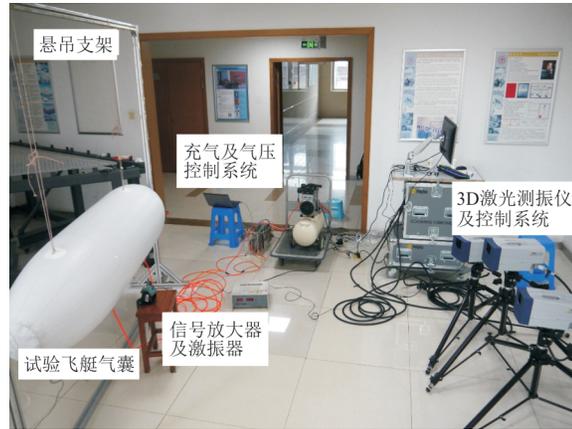
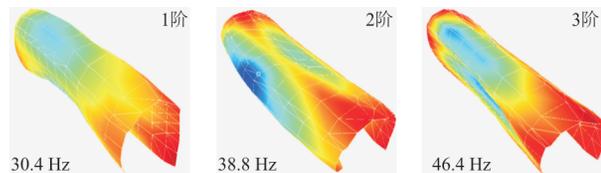


图 5 主气囊模态试验

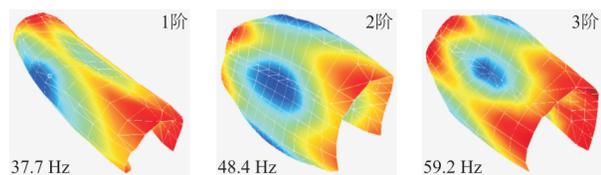
Fig. 5 Main airbag modal test

2.3 试验结果及分析

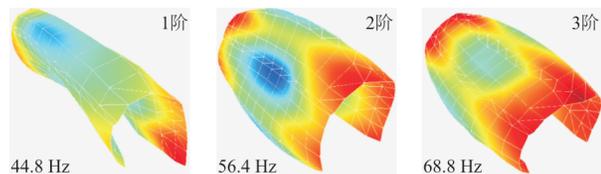
采用三维全场扫描式激光测振仪,对内压为 2、4、6、8 和 10 kPa 的主气囊振型进行测量。为了获取囊体前三阶模态,通过 LMS 分析软件对囊体典型模态进行识别,频域范围选取为 0~160 Hz,囊体的刚体模态集中在 0~10 Hz,得到各内压工况下主气囊前三阶振型的侧视图及对应频率如图 6 所示。



(a) 主气囊内压为 2 kPa



(b) 主气囊内压为 4 kPa



(c) 主气囊内压为 6 kPa

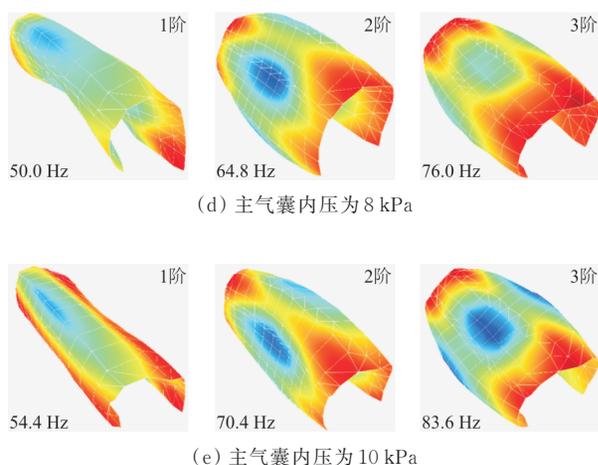


图6 主气囊前三阶试验振型及频率

Fig. 6 First three test modes and frequency of the main airbag

从图6可以看出:主气囊各工况刚体振动模态均小于第一阶主模态频率的1/3;振型分布以呼吸为主,前3阶振型均为呼吸振型。

不同内压下的主气囊频率变化如图7所示,可以看出:随着内压的升高,飞艇主气囊的前3阶模态频率基本呈上升趋势,说明飞艇内压越大,刚度越大。

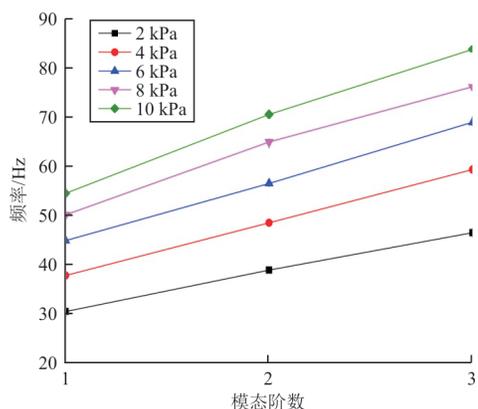


图7 不同内压下主气囊频率变化

Fig. 7 Frequency change of main airbag under different internal pressure

缩比主气囊在5种不同内压下,基于附加质量法的前3阶湿模态计算结果与试验结果的对比如表1所示,可以看出:囊体内压越小,刚度越小,试验过程中外界的干扰对囊体模态的测量影响越明显;随着内压逐渐增大,囊体的刚度逐渐增大,试验测试的精度逐渐提高,计算结果与试验结果的误差呈减小趋势。

表1 主气囊试验与计算频率对比
Table 1 Frequency comparison of test and calculation of main airbag

内压/kPa	振型阶数	计算频率/Hz	试验频率/Hz	误差/%
2	1	36.8	30.4	21.05
	2	41.5	38.8	6.96
	3	42.4	46.4	-8.62
4	1	42.7	37.7	13.26
	2	49.0	48.4	1.24
	3	54.8	59.2	-7.43
6	1	47.5	44.8	6.03
	2	54.5	56.4	-3.37
	3	65.3	68.8	-5.09
8	1	51.8	50.0	3.60
	2	59.4	64.8	-8.33
	3	74.2	76.0	-2.37
10	1	55.7	54.4	2.39
	2	63.9	70.4	-9.23
	3	82.1	83.6	-1.79

3 结 论

(1) 主气囊内压越大,囊体刚度越大,气囊的干、湿模态频率也越大,考虑空气的附加质量增加了囊体结构重量,降低了囊体自振频率。

(2) 对比试验与计算结果,基于势流理论的附加质量计算方法具有足够的精度,适用于大型柔性飞艇主气囊的振动特性分析。

参 考 文 献

- [1] 王基胜, 杨庆山. 流体环境中结构附加质量的计算[J]. 北方交通大学学报, 2003, 27(1): 40-43.
WANG Jisheng, YANG Qingshan. Calculation on added mass of structures in fluid environments [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2003, 27(1): 40-43. (in Chinese)
- [2] SEWALL J L, MISERENTION R S, PAPPA R S. Vibration studies of a lightweight membrane suitable for space application [R]. USA: National Aeronautics and Space Administration Scientific and Technical Information Branch, 1983.
- [3] MINAMI H. Added mass of a membrane vibrating at finite amplitude [J]. Journal of Fluids and Structures, 1998, 12 (7): 919-932.
- [4] APEDO K L, RONEL S, JACQUELIN E. Free vibration analysis of inflatable beam made of orthotropic woven fabric [J]. Thin-Walled Structures, 2014, 78: 1-15.

- [5] 谭惠丰, 李云良, 毛丽娜, 等. 空间充气展开支撑管的自振特性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(5): 709-713. TAN Huifeng, LI Yunliang, MAO Lina, et al. Free vibration characteristics of inflatable supporting tube[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(5): 709-713. (in Chinese)
- [6] 毛国栋, 孙炳楠, 楼文娟. 膜结构的附加空气质量[J]. 工程力学, 2004, 21(1): 153-158. MAO Guodong, SUN Bingnan, LOU Wenjuan. The added air-mass of membrane structures [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(1): 153-158. (in Chinese)
- [7] 高海健. 大型平流层平台柔性飞艇结构分析理论与特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010. GAO Haijian. Structure analysis theory and performance research for large flexible airship of stratospheric platform[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010. (in Chinese)
- [8] 王基胜, 杨庆山, 武岳, 等. 薄膜结构附加质量的计算方法[J]. 空间结构, 2003, 3(9): 38-41. WANG Jisheng, YANG Qingshan, WU Yue, et al. Methods for calculating added mass for fabric structures[J]. Spatial Structures, 2003, 3(9): 38-41. (in Chinese)
- [9] YADYKIN Y, TENETOV V, LEVIN D. The added mass of a flexible plate oscillating in a fluid[J]. Journal of Fluids and Structures, 2003, 17: 115-123.
- [10] 王磊, 李元齐, 沈祖炎. 薄膜振动附加质量试验研究[J]. 振动工程学报, 2011, 24(2): 125-132. WANG Lei, LI Yuanqi, SHEN Zuyan. Experiment investigation on the added mass of membranes vibrating in air [J]. Journal of Vibration Engineering, 2011, 24(2): 125-132. (in Chinese)
- [11] 宋林, 姜鲁华, 张远平. 飞艇囊体膜弹性振动特性预测仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36(7): 34-40. SONG Lin, JIANG Luhua, ZHANG Yuanping. Predictive simulation of elastic vibration for an airship capsule [J]. Computer Simulation, 2019, 36(7): 34-40. (in Chinese)
- [12] 陈宇峰, 陈务军, 何艳丽, 等. 柔性飞艇主气囊干湿模态分析与影响因素[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(2): 234-238. CHEN Yufeng, CHEN Wujun, HE Yanli, et al. Dry and wet modal analysis and evaluation of influencing factors for flexible airship envelop [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2014, 48(2): 234-238. (in Chinese)
- [13] 邱振宇, 陈务军, 赵兵, 等. 飞艇主气囊结构湿模态分析与试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(12): 61-67. QIU Zhenyu, CHEN Wujun, ZHAO Bing, et al. Wet modal analysis and experiment study on an airship envelop [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(12): 61-67. (in Chinese)
- [14] 邱振宇, 陈务军, 赵兵, 等. 充气尾翼湿模态分析与试验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(15): 140-143. QIU Zhenyu, CHEN Wujun, ZHAO Bing, et al. Wet modal analysis and tests for pneumatic empennages [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(15): 140-143. (in Chinese)
- [15] 周利霖, 唐国金. 大型飞艇缩比模型设计方法研究[C]// 第三届高分辨率对地观测学术年会. 北京: 中国科学院重大科技任务局, 2014: 1-14. ZHOU Lilin, TANG Guojin. Design method of scale model for large airship [C]// The 3rd Annual Conference on High Resolution Earth Observation. Beijing: Bureau of Major Scientific and Technological Tasks, Chinese Academy of Sciences, 2014: 1-14. (in Chinese)

作者简介:

刘路(1992—)男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 飞机结构强度分析及试验。

张伟(1984—)男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 飞机结构强度分析及试验。

王鹏飞(1982—)男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 飞机结构强度分析及试验。

(编辑: 马文静)

(上接第154页)

- SHAO Yunbin, QI Xiaoye. Distributed simulation platform for vehicle management system [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008(4): 1-4. (in Chinese)
- [17] 陈薇, 吴刚. 非线性双容水箱建模与预测控制[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(8): 2078-2081. CHEN Wei, WU Gang. Modeling of nonlinear two-tank system and model predictive control [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(8): 2078-2081. (in Chinese)
- [18] 王志新, 谷云东, 李洪兴. 三水箱多变量液位控制实验设计[J]. 实验技术与管理, 2007, 24(1): 32-36. WANG Zhixin, GU Yundong, LI Hongxing. Design of

several multi-variable experiments on three tank liquid-level control system and the controllability and observability [J]. Experimental Technology and Management, 2007, 24(1): 32-36. (in Chinese)

作者简介:

张雪苹(1987—), 女, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 民机水废水系统设计。

(编辑: 丛艳娟)