

附有集中质量的飞艇囊体材料动力特性*

程靖淞^{1,2} 王 生^{1,2} 聂 莹¹ 宋 林¹

1(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 针对平流层飞艇刚柔一体大型复杂结构系统设计与分析,开展了附有集中质量的飞艇囊体材料动力特性仿真分析研究,将刚度大、质量相对集中的结构零部件简化为集中质量,飞艇囊体简化为双向拉伸的十字形囊体材料试样,分析预张力大小、集中质量的质量和尺寸对囊体材料试样的动力特性影响。结果表明,试样的固有频率随着预张力增大而增大,随着集中质量的质量增大而减小,随着集中质量与试样连接的边长增加而增大;试样的基频与集中质量的高度无关,但第2,3阶频率随着集中质量的高度增加而减小。研究结论为飞艇结构的总体设计与分析以及进一步开展附有集中质量的飞艇囊体材料动力试验提供了理论依据。

关键词 平流层飞艇, 囊体材料试样, 集中质量, 动力特性

中图分类号 V274

Dynamic Characteristics of Airship Envelope Material with Concentrated Mass

CHENG Jingsong^{1,2} WANG Sheng^{1,2} NIE Ying¹ SONG Lin¹

1(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

2(University of Chinese Academic of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Aiming at the design and analysis of stratospheric airship rigid and flexible integrated large complex structure system, this paper carried out the simulation analysis of dynamic characteristics of airship envelope material with concentrated mass. The structural parts with high stiffness and relatively concentrated mass are simplified as concentrated mass. The airship envelope is simplified as a biaxially stretched cross envelope material sample. Firstly, the influences of the number of open arm slits on the stress transfer uniformity in the central region of the cross envelop material sample are analyzed. Then the influences of pretension, mass and concentrated mass of the size on the natural frequency of cross film material sample are analyzed. The influence of the mass and concentrated mass of the size on the natural frequency of the airship capsule is also reflected. The results show that the uniformity of stress transfer in the central region of the cross envelop material sample is better with the increase of the num-

* 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) 项目资助 (XDA17020103)

2023-01-12 收到原稿, 2023-03-08 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

ber of arm slits. When the number of arm slits is 3, the proportional coefficient of stress transfer uniformity is 0.943. In addition, the natural frequency of the sample increases with the pretension increase, decreases with the mass of the concentrated mass increase, and increases with the side length of the connection between the concentrated mass and the sample increase. The fundamental frequency of the sample is independent of the height of the concentrated mass, but the second and third order frequencies decrease with the height of the concentrated mass increase. The second and third order frequencies are significantly more affected by various physical quantities than the first order. Under the condition of the same pretension and mass, the influence of the height of the concentrated mass on the second and third order frequencies of the cross envelop sample is higher than that of the side length. The research results provide a theoretical basis for the overall design and analysis of airship structure and the further dynamic experiments of airship envelope materials with concentrated mass.

Key words Stratospheric airship, Envelope material sample, Concentrated mass, Dynamic characteristic

0 引言

平流层飞艇具有驻空时间长、使用效费比高等特点,在对地观测、通信中继等领域具有广阔应用前景^[1-3].囊体材料是飞艇的主体结构材料,其破坏可能直接导致飞艇结构整体失效^[4].飞艇囊体上安装有刚度大、质量相对集中的结构零部件^[5,6].这些结构零部件对囊体材料的力学性能和荷载长期作用下的强度起到重要的影响作用.因此,在不同内压条件下,针对结构零部件的质量、与囊体连接处的边长、高度,对囊体材料动力学特性的影响进行研究具有重要意义.

目前对囊体材料力学性能的研究主要集中在拉伸试验方面^[7-9].柔性囊体材料不能提供弯曲刚度,只能承受张力,对囊体材料进行预张拉可使其产生相应的刚度,用来抵抗外部载荷作用.飞艇囊体材料在实际应用中会受到多轴载荷的作用,单轴拉伸不能较好地体现其在受力变形阶段的应力和应变^[10,11],并且根据薄壁圆筒受内压时的应力状态,忽略安装于艇体上的结构零部件对艇体纵向截面形状的影响,将艇体纵向截面近似视为圆形,此时囊体材料的经向与纬向应力大小之比为 2:1,因此应对囊体材料在不同比例 (2:1) 双轴拉伸状态下的力学性能进行研究.在双轴拉伸的仿真和试验分析中,常采用十字形试样进行研究^[12,13],并且对十字形试样采用开臂缝设计^[14],可使十字形试样中心区域应力分布更加均匀,更加真实地模拟平流层飞艇在正常工作状态下囊体材料受到内压时被均匀张拉的力学性能,得到理想的双向拉伸效果. Peng 等^[15]引入均匀度 r ,对十字形试样中心测试

区域应力分布均匀性进行研究,但没有对中心区域应力传递均匀性进行研究. Wang 等^[16]分析了等质量、等面积、不同形状的附加质量块对十字形双向拉伸试样结构振动特性的影响,结果显示附加质量块的形状对试样振动特性的影响很小.在现有的文献中,缺乏在不同内压条件下,结构零部件的质量、与囊体连接处的边长、高度对囊体材料试样动力学特性影响的研究,对安装有结构零部件的飞艇囊体材料动力学特性指导性不足,需要开展进一步的研究.

本文将充气囊体简化为双向拉伸的十字型囊体材料试样,将刚度大、质量相对集中的结构零部件简化为集中质量,建立附有集中质量的十字形囊体材料试样有限元模型,并分析预张力大小,集中质量的质量、尺寸对十字形囊体材料试样低阶频率的影响,进而得到结构零部件质量和尺寸对飞艇囊体固有频率的影响,为飞艇结构的总体设计及后续试验研究提供指导.

1 十字形囊体材料试样设计与有限元分析

这里针对飞艇囊体结构简化的十字形囊体材料试样进行设计,并分析开臂缝条数对十字形囊体材料试样中心区域应力传递均匀性的影响.

1.1 十字形囊体材料试样设计

囊体材料按照经纬向对称取样,主轴与囊体材料的经纬一致.根据后续开展动力实验的双向拉伸机尺寸,设计试样的核心区域为 160 mm×160 mm,悬臂

长为 160 mm, 厚度为 0.2 mm, 图 1 为三条均匀分布臂缝十字形囊体材料试样, 臂缝长度为 120 mm, 臂缝宽度为 1 mm.

1.2 十字型囊体材料试样有限元分析

囊体材料试样与平流层飞艇囊体的材料相同, 面密度为 $150 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 弹性模量为 $1.2 \times 10^{10} \text{ Pa}$, 泊松比为 0.3.

这里采用的 SHELL181 单元常用于薄面板或曲面模型, 该单元为 4 节点单元, 每个节点 6 个自由度, 适用于线性、大旋转和大应变非线性分析, 并且该单元包含大应变的完全非线性性能. 为了避免出现臂缝处网格不均匀, 十字型囊体材料试样划分网格时设置网格大小为 1 mm, 单元数为 120740, 节点数为 122904.

十字形试样的 4 个端部固支, 在振动过程中固支端挠度 w 始终为零. 因此以十字形试样中心为原点, 其边界条件为

$$\begin{aligned} w(x, y)|_{x=-240, 240 \text{ mm}, y=0} &= 0, \\ w(x, y)|_{y=-240, 240 \text{ mm}, x=0} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

在 x 和 y 方向上分别同时施加大小相同的预张力, 预张力会以载荷密度的形式均匀分布在试样固支端, 此时十字形试样核心区域应力 σ_1 的大小将由下式确定:

$$\sigma_1 = \frac{F}{t}. \quad (2)$$

其中, F 为预张力, t 为囊体材料试样的厚度.

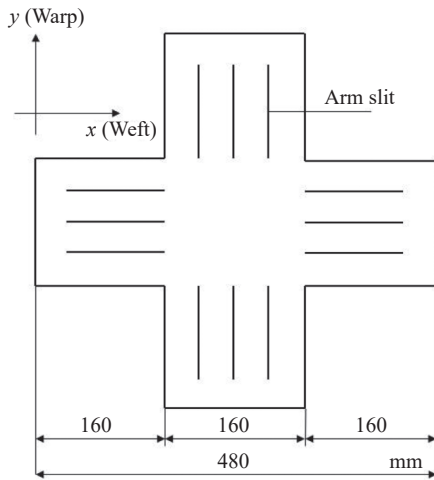


图 1 三条均匀分布臂缝十字形囊体材料试样

Fig. 1 Three evenly distributed arm slit cross envelop material sample

以预张力大小 $2000 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 为例, 边界条件和施加载荷如图 2 所示, 根据式 (2) 可得中心区域理论应力 σ_1 的大小为 $1 \times 10^7 \text{ Pa}$.

分别对臂缝均匀分布, 臂缝条数为 0~5 条的十字形试样进行有限元分析. 为了让结果更加直观, 截取试样中心 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 区域的等效应力云图进行比较, 图 3 分别为 0~5 条臂缝条数的中心区域等效应力云图.

为了验证试样固支端受到的拉力均匀地传递到中心区域, 引入比例系数 q , 其数学表达式为

$$q = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}. \quad (3)$$

其中, σ_2 为中心区域有限元分析得到的平均应力值, q 值越接近于 1, 说明固支端的预张力传递均匀性效果越好. 不同臂缝条数十字形试样的 q 值列于表 1, 由表 1 可以看出, 随着臂缝条数的增加, q 值更加接近 1; 臂缝条数为 3 时 q 值大于 0.94, 随着条数的增加, q 值的增幅很小. 考虑到试样固支端整体尺寸, 臂缝条数不宜太多, 因此这里取臂缝条数为 3.

2 附有集中质量的囊体材料试样动力特性

这里建立附有集中质量的十字型试样有限元模型, 进行动力模态分析, 分析预张力大小以及集中质量的质量、边长和高度对囊体材料试样固有频率的影响.

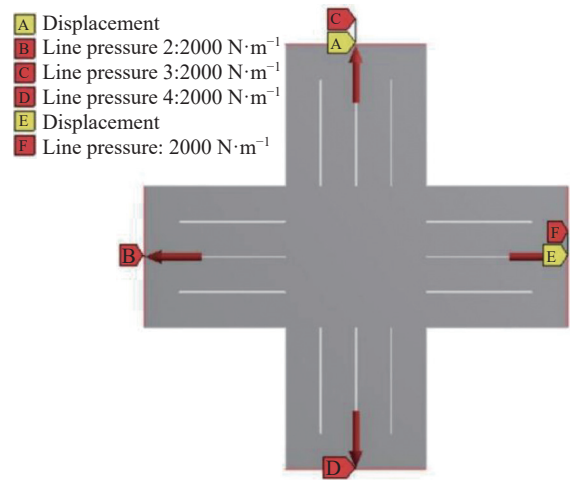


图 2 试样边界条件和施加载荷示例

Fig. 2 Schematic diagram of sample boundary conditions and loads

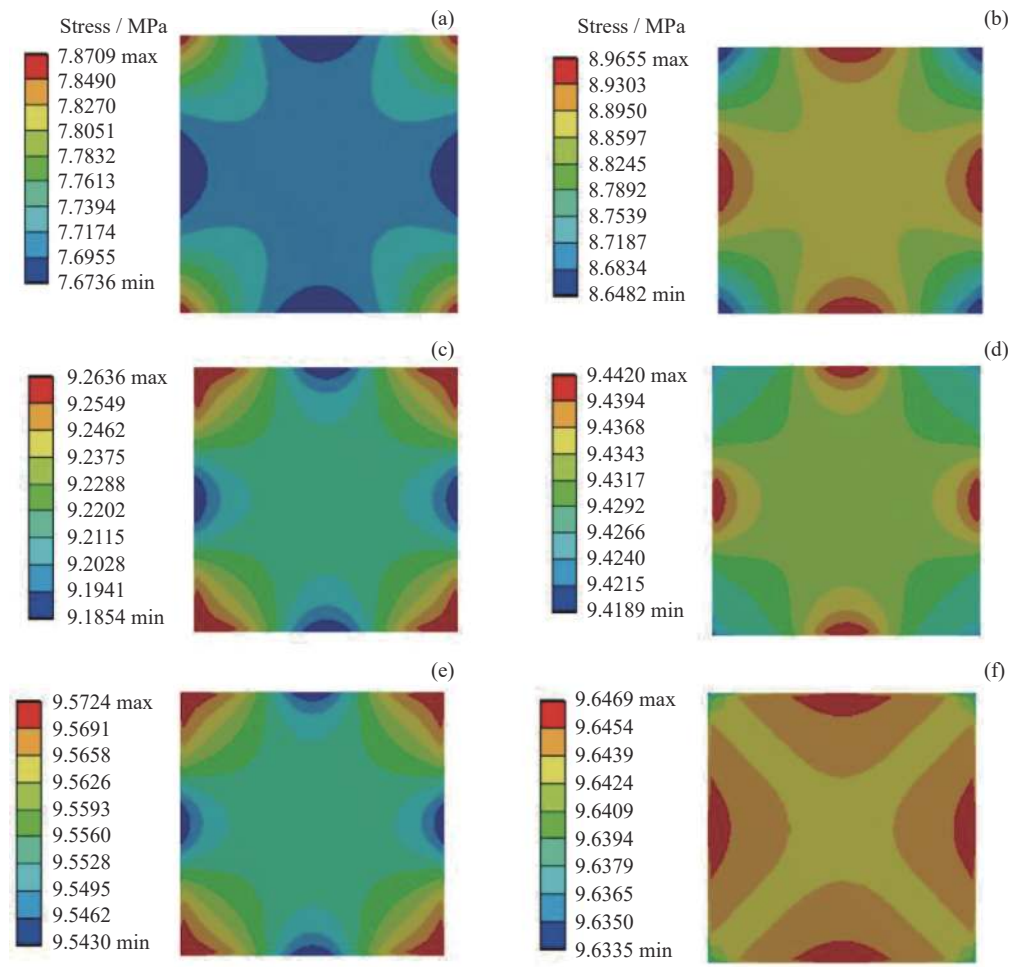


图 3 不同臂缝条数中心区域的等效应力云图

Fig. 3 Equivalent stress nephogram of the central region with different number of arm slits

表 1 不同臂缝条数十字形试样的 q 值

Table 1 q values of cross sample with different arm slits

臂缝条数	0	1	2	3	4	5
q 值	0.7772	0.8807	0.9225	0.9430	0.9558	0.9640
增幅/(%)	—	13.3	4.7	2.2	1.4	0.9

2.1 附有集中质量的十字形试样有限元模型

十字形试样的材料属性、单元类型、单元大小、边界条件及所施加的载荷类型均与静力有限元模型相同, 在 x (纬向)方向与 y (经向)方向施加的预张力大小之比为 1:2.

在静力有限元模型基础上, 将集中质量附加于十字形试样的中心位置, 并且相对十字形试样呈对称分布. 为方便分析集中质量的质量、边长和高度对试样固有频率的影响, 采用磁铁作为集中质量的材料, 该

材料的弹性模量为 1.6×10^{11} Pa, 泊松比为 0.24.

集中质量在划分网格时采用单元大小为 1 mm 的 SOLID185 实体单元, 边长和高度均为 30 mm, 集中质量的单元数为 27000, 节点数为 54000, 附有集中质量的十字型试样有限元模型如图 4 所示.

集中质量与十字形试样选择绑定接触形式, 由于集中质量与十字形试样的单元类型均为正六面体, 单元大小相同, 在接触区域, 集中质量与试样共节点.

2.2 预张力、集中质量对固有频率的影响

2.2.1 附有集中质量的十字型试样模态分析

对 y (经向)方向受到预张力大小为 $2000\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$; x (纬向)方向受到预张力大小为 $1000\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, 附有质量为 110 g , 边长为 30 mm 立方体集中质量的十字型试样, 其第1~4阶振型如图5所示。

根据振型图, 对各阶振型分析如下: 第1阶振型集中质量和试样沿垂直试样方向振动, 频率为 25.901 Hz ; 第2阶振型集中质量和试样绕 x 轴(纬向)旋转并往复振动, 频率为 42.577 Hz ; 第3阶振型集中质量和试样绕 y 轴(经向)旋转并往复振动, 频率为 52.773 Hz ; 第4阶振型试样沿垂直试样方向振动, 并且振型关于 y 方向的中心轴对称, 频率大小为 174.14 Hz 。第4阶频率值较大, 对工程应用价值较低, 因此这里只针对预张力大小及集中质量的质量、边长和高度对试样第1, 2, 3阶固有频率的影响进行分析。

2.2.2 预张力大小对试样固有频率的影响

平流层飞艇在实际飞行中, 囊体材料所受预张力大小与囊体直径、内外压差有关。根据平流层飞艇工程实际, 在十字形试样 y (经向)方向固支端分别施加大

小为 $2000\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, $4000\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, $6000\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, $8000\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, $10000\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, x (纬向)方向大小为 y (经向)方向二分之一的预张力进行研究。这里所指预张力大小均为 y (经向)方向预张力的大小。

为研究预张力与固有频率之间的关系, 对受到不同大小预张力作用, 并且附有质量大小为 $60, 70, 80, 90, 100\text{ g}$, 边长为 20 mm , 高度为 10 mm 集中质量的十字形试样进行动力特性分析, 分别得到预张力大小对试样固有频率及其增量的影响, 如图6所示。

由图6可知, 十字形试样第1, 2, 3阶频率均随着预张力的增大而逐渐增大, 其中第1阶频率增量较小, 第2, 3阶频率增量较大。随着预张力的增大, 第1, 2, 3阶频率的增量均在减小。

2.2.3 集中质量的质量大小对试样固有频率的影响

为研究集中质量的质量大小与固有频率之间的关系, 对受到预张力作用, 并且附加质量为 $60, 70, 80, 90, 100\text{ g}$, 边长为 20 mm , 高度为 10 mm 集中质量的十字形试样进行动力特性分析, 分别得到集中质量的质量大小对试样固有频率及其减小量的影响, 如图7所示。

由图7可知, 在不同大小预张力作用下, 十字形试样第1, 2, 3阶频率均随着集中质量的质量增大而逐渐减小, 其中第1阶频率减小量较小, 第2, 3阶频率减小量较大。随着质量的增大, 第1, 2, 3阶频率的减小量均在减小。

2.2.4 集中质量的边长对试样固有频率的影响

为研究集中质量的边长与固有频率之间的关系, 对受到预张力作用, 并且附加质量为 60 g , 边长为 $10, 15, 20, 25, 30\text{ mm}$, 高度为 10 mm 集中质量的十字形试样进行动力特性分析, 分别得到集中质量的边长对试样固有频率及其增量的影响, 如图8所示。

由图8可知, 在不同大小预张力作用下, 十字形试样第1, 2, 3阶频率均随着集中质量边长的增加而

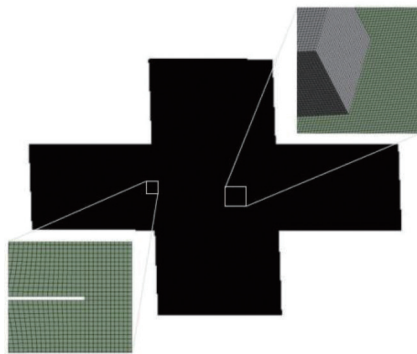


图4 附有集中质量的十字形试样有限元模型

Fig. 4 Finite element model of cross sample with concentrated mass

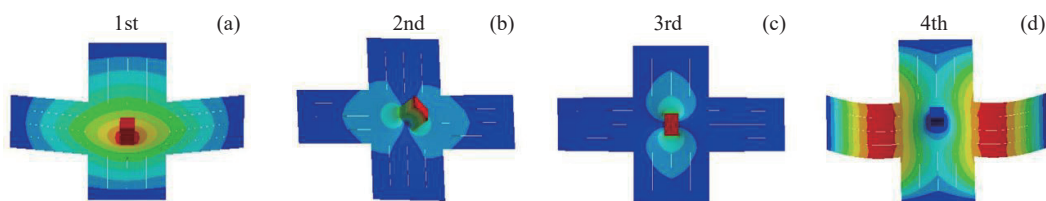


图5 十字形试样第1~4阶振型

Fig. 5 1st to 4th order modes diagram of cross sample

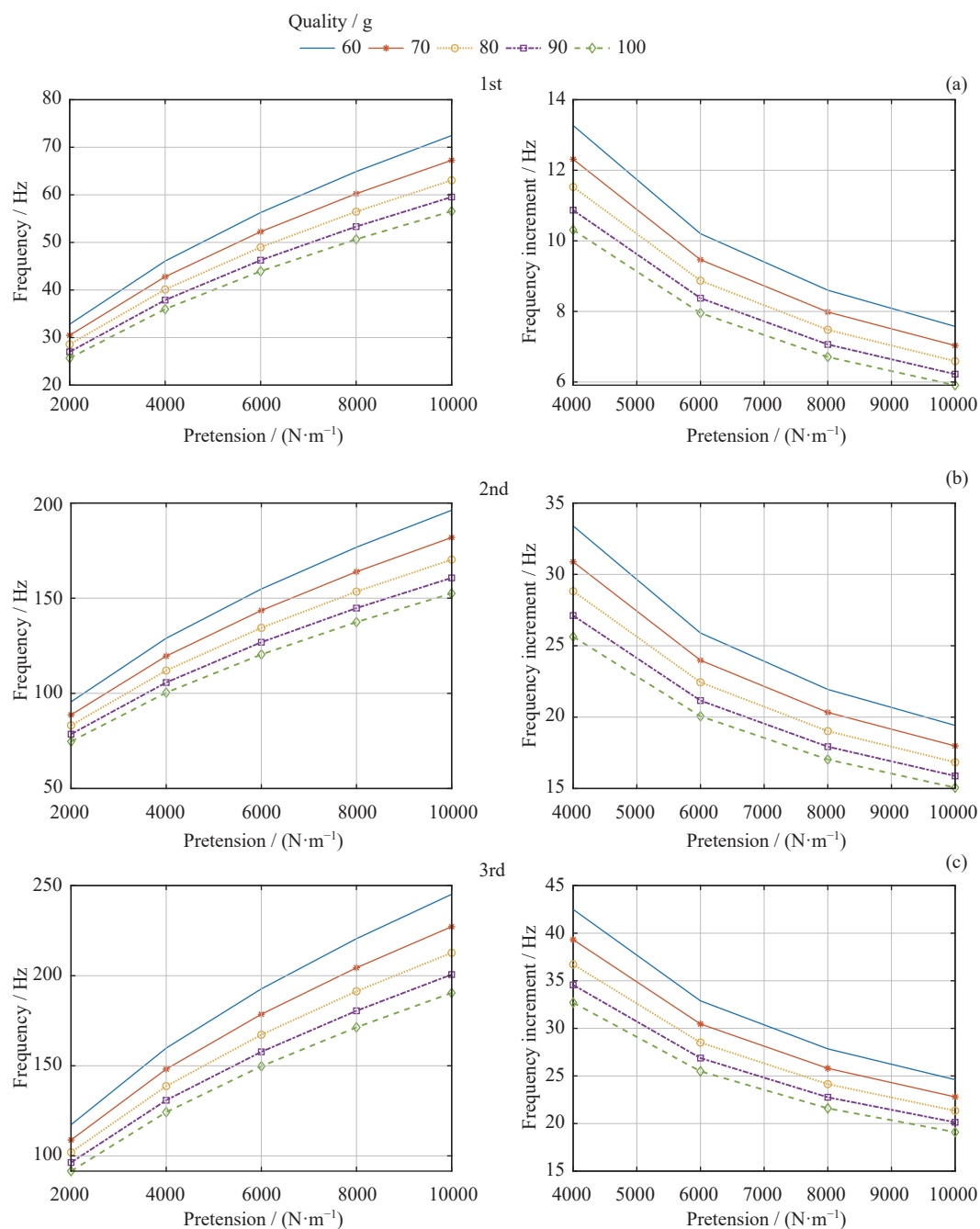


图6 预张力大小对试样固有频率及其增量的影响

Fig. 6 Effect of pretension on natural frequency and increment of sample

逐渐增大, 其中第1阶频率增量较小, 第2, 3阶频率增量较大. 随着质量的增加, 第1, 2, 3阶频率的增量均在减小.

2.2.5 集中质量的高度对试样固有频率的影响

为研究集中质量的高度与固有频率之间的关系, 对受到预张力作用, 并且附加质量为 60 g, 边长为 20 mm, 高度为 5, 10, 15, 20 mm 集中质量的十字形

试样进行动力特性分析, 分别得到集中质量的高度对试样固有频率及其减小量的影响, 如图9所示.

由图9可知, 在不同大小预张力作用下, 十字形试样第1阶频率不受集中质量高度影响, 第2, 3阶频率随着集中质量高度增加而逐渐减小, 减小量也在逐渐减小. 并且由图8和图9可知, 在相同预张力和质量条件下, 集中质量的高度对十字形试样第2, 3阶频

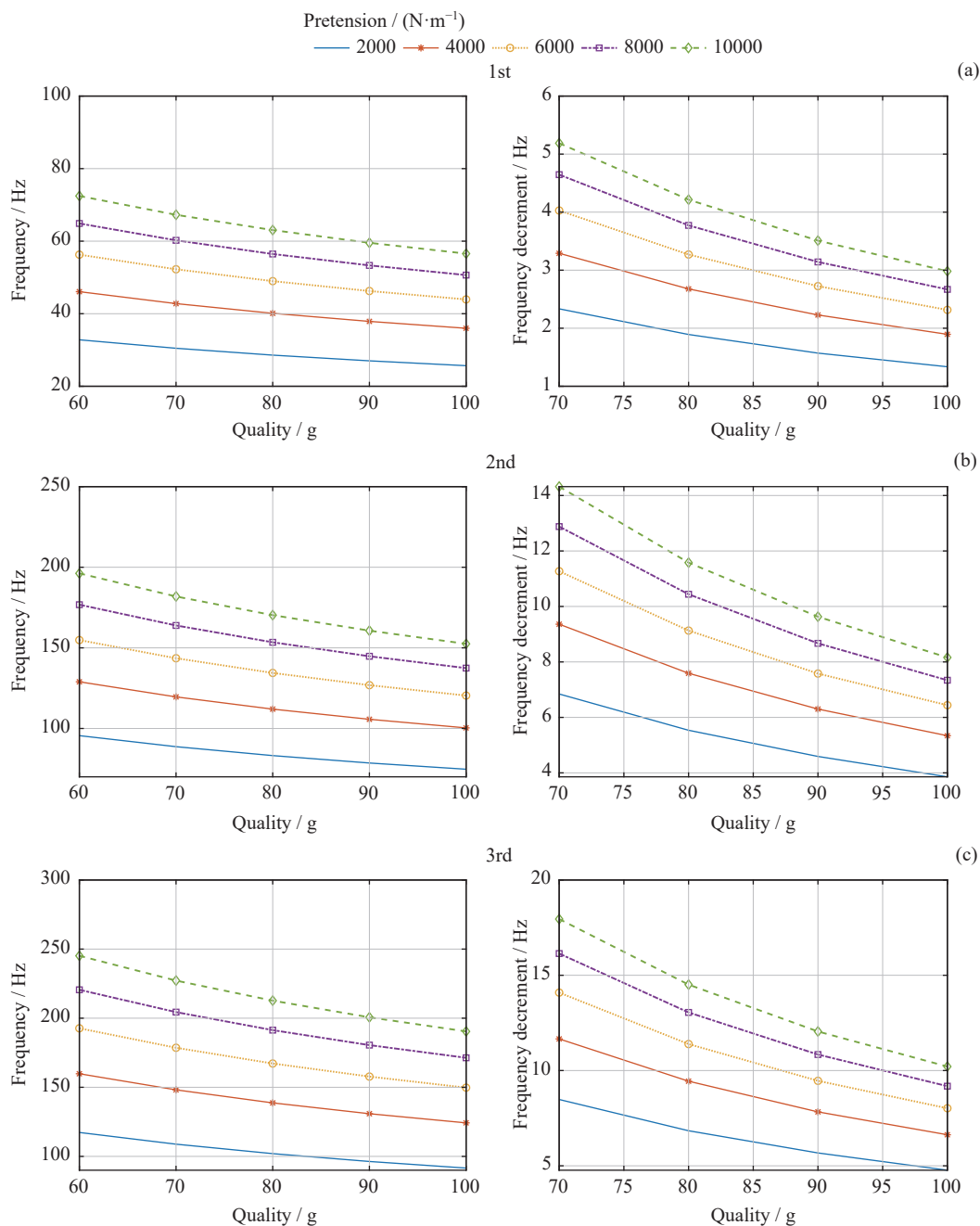


图7 集中质量的质量对试样固有频率及其减小量的影响
Fig. 7 Effect of mass on natural frequency and decrement of sample

率的影响大于边长的影响。

3 结论

对附有集中质量十字形试样进行有限元分析,并对预张力大小及集中质量的质量大小、边长和高度对十字形试样固有频率的影响进行分析,分析结论如下。

(1) 十字形试样中心区域应力传递均匀性随着臂缝条数的增加发生显著改善,当臂缝条数为3时,继续增加臂缝条数对中心区域应力传递均匀性的改善趋缓。

(2) 十字形试样第1阶频率随预张力增大而增大,随集中质量的质量增大而减小,随边长增加而增大,与高度无关;十字形试样第2,3阶频率随着预张

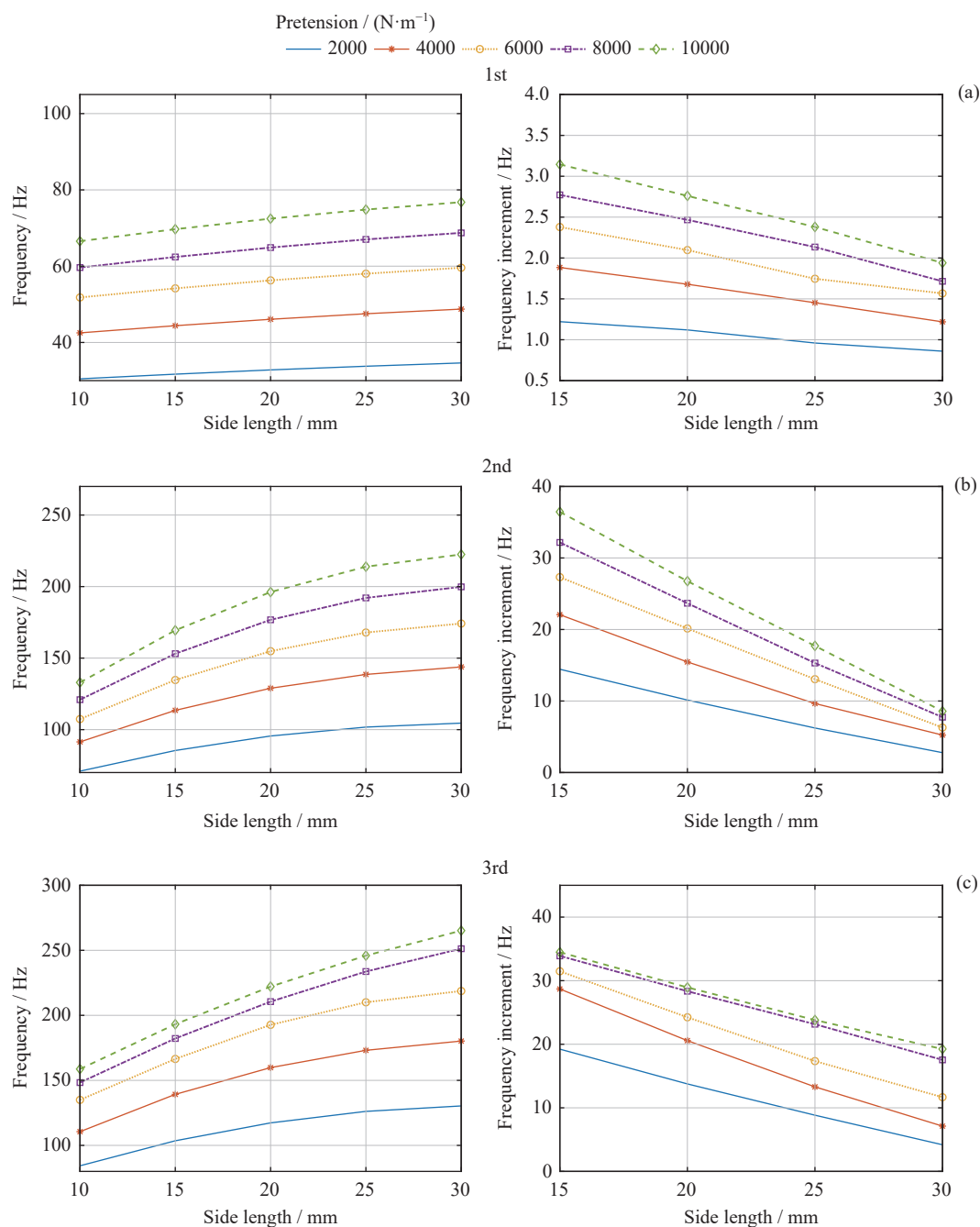


图 8 集中质量的边长对试样固有频率及其增量的影响

Fig. 8 Effect of side length on natural frequency and increment of sample

力增大而增大, 随集中质量的质量增大而减小, 随边长增加而增大, 随高度增加而减小, 受高度影响比边长影响显著. 并且第 2, 3 阶频率受各物理量的影响明显大于第 1 阶. 在相同预张力和质量条件下, 集中质量的高度对十字形试样第 2, 3 阶频率的影响大于边长的影响.

通过研究预张力以及集中质量的质量大小和尺

寸对十字型试样低阶频率的影响, 在飞艇结构的总体设计中, 通过系统设计飞艇零部件的质量和尺寸, 可以有效避免各结构零部件在艇体经常工作的内压状态下产生共振及对结构造成的破坏. 并且可以指导螺旋桨的使用工况 (转速), 使螺旋桨快速通过可能引发共振的工况 (转速). 该结果也可为进一步开展试验研究提供参考.

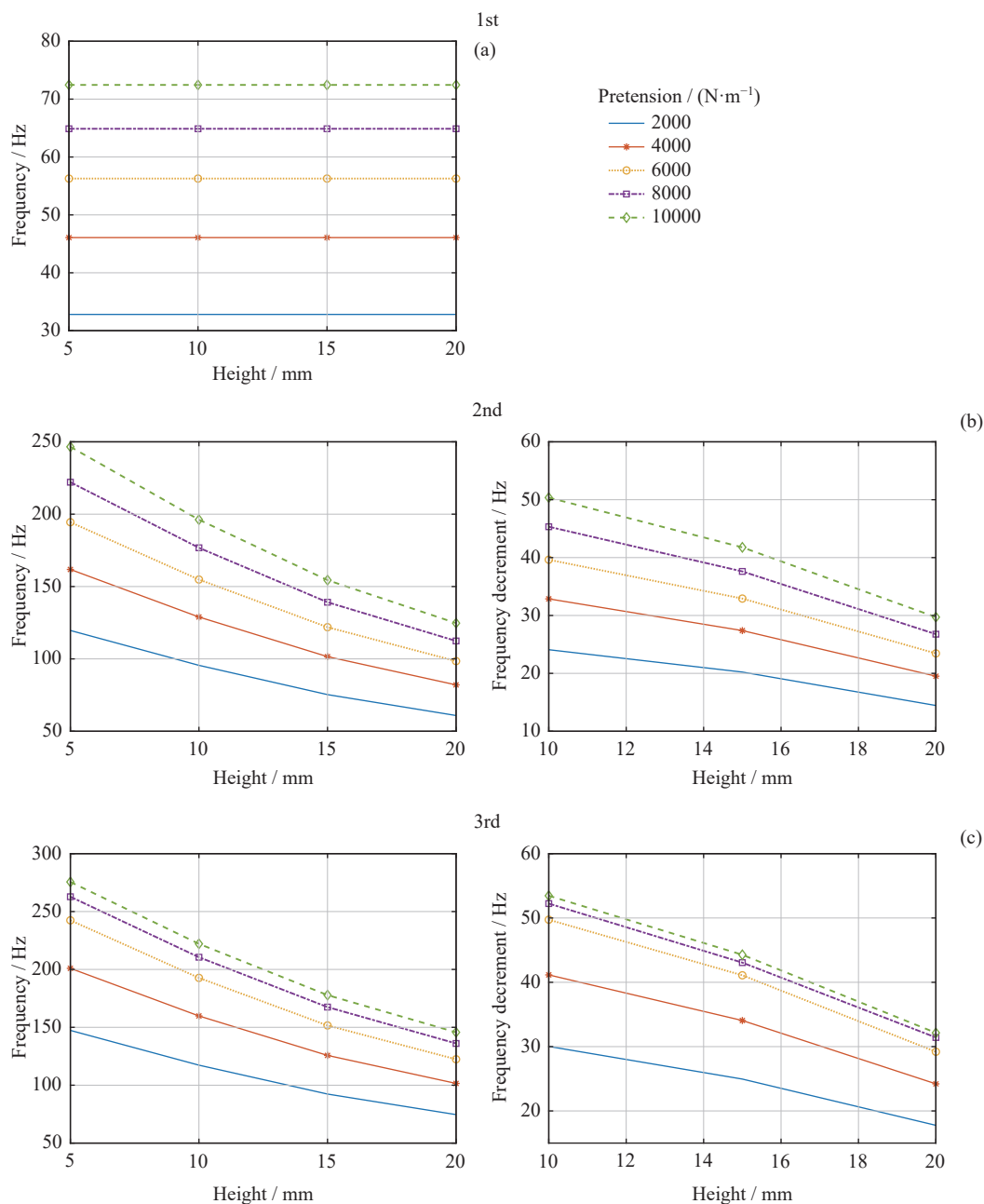


图9 集中质量的高度对试样固有频率及其减小量的影响

Fig. 9 Effect of height on natural frequency and decrement of sample

参考文献

- [1] QIN P F, WANG X L. Construction on aerodynamic surrogate model of stratospheric airship[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2022, **27**(6): 768-779
- [2] ZUO Z Y, SONG J W, ZHENG Z W, *et al.* A survey on modelling, control and challenges of stratospheric airships [J]. *Control Engineering Practice*, 2022, **119**(4): 104979
- [3] MA J, WEI Q, FAN H B, *et al.* Mechanical properties evolution and damage mechanism of kevlar fiber under ozone exposure in near-space simulation[J]. *Coatings*, 2022, **12**(5): 584
- [4] SHI T B, CHEN W J, GAO C J, *et al.* Yarn tensile experiments and numerical simulations based on the decomposition of stratospheric airship envelopes[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2018, **31**(3): 04018011
- [5] LIU Y, SUN K W, XU Z Y, *et al.* Energy efficiency assessment of photovoltaic array on the stratospheric airship under partial shading conditions[J]. *Applied Energy*, 2022, **325**(4): 119898
- [6] JIAO J, SONG B F, ZHANG Y G, *et al.* Optimal design

- and experiment of propellers for high altitude airship[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2018, **232**(10): 1887-1902
- [7] ZHANG H, FUJIKI K, IDO K, *et al.* Tensile testing of freestanding polymer thin films with non-standard geometries[J]. *Polymer Testing*, 2020, **91**: 106825
- [8] LIN X T, WU Y C, CHEN X, *et al.* Structural evolution and properties of polyamide-6/ poly (ether block amide) films during the simultaneous biaxial stretching[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, **139**(19): 52152
- [9] WANG F X, CHEN Y L, LIU G Z, *et al.* Investigation of the tearing properties of a new airship envelope fabric based on experimental and theoretical methods[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2019, **48**(8): 1327-1347
- [10] BAYAZIAN H, YADEGARI A, SCHÖPPNER V. Probing tensile properties of LLDPE stretch films prepared in cast extrusion process[J]. *Polymer Bulletin*, 2022, **79**(3): 1873-1886
- [11] WANG F X, CHEN Y L, LIU G Z, *et al.* Experimental investigation and theoretical analysis of tear propagation of GQ-6 airship envelope[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2018, **48**(1): 304-321
- [12] ZHANG Yibei, CHEN Wujun, DENG Xiaowei, *et al.* Simulation and experiment for membrane modal identification in the air and low vacuum environment[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, **39**(20): 168-174,182 (张玮贝, 陈务军, 邓小伟, 等. 薄膜结构空气与低真空环境下模态辨识仿真及试验 [J]. 振动与冲击, 2020, **39**(20): 168-174,182)
- [13] CHEN Y L, YANG W D, XIE W C, *et al.* Meso-Scale tearing mechanism analysis of flexible fabric composite for stratospheric airship via experiment and numerical simulation[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2022, **27**(6): 873-884
- [14] CHEN Jianwen, ZHOU Han, CHEN Wujun, *et al.* Analysis of elastic parameters for laminated fabrics used in airships under biaxial stresses[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2017, **51**(03): 344-352 (陈建稳, 周涵, 陈务军, 等. 飞艇用层压织物膜材料在双向应力作用下的弹性参数分析 [J]. 上海交通大学学报, 2017, **51**(03): 344-352)
- [15] PENG Dongdong. Finite element analysis of rubber biaxial tensile specimen and design of its true biaxial tensile test device[D]. *Qingdao: Qingdao University of Science and Technology*, 2020 (彭冬冬. 橡胶材料双向拉伸试样有限元分析及其真双轴拉伸试验装置设计 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2020)
- [16] WANG Jingyi. Analysis of vibration characteristics of thin structure based on additional mass[D]. *Harbin: Harbin Institute of Technology*, 2021 (王靖义. 薄膜结构基于附加质量的振动特性分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021)

作者简介



程靖淞 男, 1997年7月出生于山西省朔州市, 现为中国科学院空天信息创新研究院硕士研究生, 主要研究方向为平流层飞艇动力学特性、结构动力学仿真与分析等。
E-mail: chengjingsong20@mails.ucas.ac.cn



王 生(通信作者) 男, 1963年10月出生于河北省玉田县, 现为中国科学院空天信息创新研究院研究员, 博士生导师, 主要研究方向为飞行器总体技术、结构动力学与控制、计算机应用技术等。
E-mail: shengwang@aoe.ac.cn