



航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

——中国科技核心期刊

基于一维等熵流的飞行器舱内气压动态特性分析

杜晨慧 丁晨

Dynamic characteristics analysis of vehicle cabin pressure based on one-dimensional isentropic flow analysis

DU Chenhui, DING Chen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2024016>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

载人航天器密封舱内强制通风下的火灾温度场及流场特性仿真分析

The characteristics of fire temperature and flow field for different ventilation angles in manned spacecraft's sealed cabin
航天器环境工程. 2020, 37(1): 31–36 <https://doi.org/10.12126/see.2020.01.005>

卫星低气压与真空放电安全性设计分析

Safety design and analysis of low pressure and vacuum discharge for satellites
航天器环境工程. 2024, 41(5): 581–588 <https://doi.org/10.12126/see.2023178>

可动态校准的六维激励系统设计与实验研究

Design and experimental study of six-dimensional excitation system with dynamic calibration
航天器环境工程. 2023, 40(3): 257–262 <https://doi.org/10.12126/see.2023018>

环形CW型原表面回热器通道流动换热及熵产特性分析

Analysis of flow heat transfer and entropy generation characteristics of annular CW primary surface recuperator channel
航天器环境工程. 2023, 40(4): 338–348 <https://doi.org/10.12126/see.2023089>

太赫兹波在高速飞行器等离子体鞘套中的传输特性

Propagation characteristics of terahertz wave in plasma sheath of high-speed aircraft
航天器环境工程. 2020, 37(5): 421–427 <https://doi.org/10.12126/see.2020.05.001>

氧化铜气体传感器动态测试及基于神经网络的识别特性研究

Dynamic test and identification characteristics of indium oxide gas sensor based on neural network
航天器环境工程. 2020, 37(6): 628–635 <https://doi.org/10.12126/see.2020.06.015>

基于一维等熵流的飞行器舱内 气压动态特性分析

杜晨慧¹, 丁晨^{2*}

(1. 中国航空研究院, 北京 100029; 2. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 飞行器爬升与下落过程中舱室外的气压快速变化, 不断增大的舱内外压差载荷作用在壳体上, 存在结构失效、舱内设备低气压环境适应性不足等风险。文章提出一种基于一维等熵流的飞行器舱内外压力动态特性分析方法, 探究通气孔所在物面相对来流倾角、通气孔截面积、舱内空气体积以及飞行加速度等对舱内气压的影响机制。结果表明: 爬升过程中, 随着通气孔倾角的增大, 舱内压力增大, 但进入巡航状态后较快达到内外平衡, 舱内外压差随着舱内空气体积与通气孔面积比值的增大而增大; 随着爬升加速度的增大, 舱内气压降低速率增大, 舱内外压差增大。研究成果可为飞行器通气孔设计及设备低气压环境条件设计提供参考。

关键词: 舱内气压; 气压动态特性; 一维等熵流; 通气孔; 计算分析

中图分类号: V412

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2024)06-0675-06

DOI: [10.12126/see.2024016](https://doi.org/10.12126/see.2024016)

Dynamic characteristics analysis of vehicle cabin pressure based on one-dimensional isentropic flow analysis

DU Chenhui¹, DING Chen^{2*}

(1. Chinese Aeronautical Establishment Technology, Beijing 100029, China;

2. School of Mechanical Engineering Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: During vehicle launch and descent, rapid changes in ambient and cabin pressure can create differential pressure loads that may lead to structural failure and inadequate adaptation of cabin equipment to low-pressure environment. This study proposed a method for analyzing the dynamic characteristics of cabin pressure based on one-dimensional isentropic flow analysis. The effects of various factors, including the tilt angle of the surface where ventilation hole located, venting area, cabin air volume, and vehicle acceleration, on cabin pressures were investigated. The results show that cabin pressure increases with the tilt angle of the surface where ventilation hole located during ascent but reaches equilibrium quickly upon entering the cruise stage. The differential pressure between the cabin interior and exterior increases with the ratio of cabin air volume to venting area. Additionally, as ascent acceleration increases, cabin pressure decreases more rapidly, leading to a higher differential pressure. This research provides a reference for the design of aircraft ventilation holes and the development of equipment suitable for low-pressure conditions.

Keywords: cabin pressure; dynamic characteristics of pressure; one-dimensional isentropic flow; ventilation holes; calculation analysis

收稿日期: 2024-01-22; 修回日期: 2024-12-09

引用格式: 杜晨慧, 丁晨. 基于一维等熵流的飞行器舱内气压动态特性分析[J]. 航天器环境工程, 2024, 41(6): 675-680

DU C H, DING C. Dynamic characteristics analysis of vehicle cabin pressure based on one-dimensional isentropic flow analysis[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2024, 41(6): 675-680

0 引言

火箭及导弹等飞行器爬升及下落过程中,外界气压随高度快速变化,使舱内外压差增大,继而使壳体承载的压差载荷增大,故需设计通气孔以降低舱内外压差。但舱内压力的动态特性受飞行器结构、弹道、通气孔位置与截面积、舱内空气体积等因素影响而难以预计,从而制约结构内外压差下应力分析和舱内低气压环境条件设备设计。因此需要研究飞行器舱内外压力动态特性快速预计方法,揭示舱内压力的影响机制。

一维等熵流能较准确描述飞行器泄压与充气过程,已有基于该方法预测飞行器舱压的多项研究。针对航天飞机发射过程中的载荷舱气压, Mironer 等^[1]提出基于一维等熵流的舱内气压预计方法,给出了排气系数的表达式。梁志伟等^[2]利用一维等熵流分析方法构建了航天器舱壁穿孔时的舱压与氧分压变化模型,并通过试验验证了该模型具有高可信度。郭鹏飞等^[3]定义充排气系数为穿过通气口的气体质量流量与一维等熵流的理论解的比值,使用计算流体力学(CFD)方法对一维等熵模型进行修正,给出了充排气系数与流经通气口的气流马赫数和舱内外气压比之间的关系。解静等^[4]亦利用 CFD 方法获取充排气系数,并使用遥测数据验证模型准确性。张敏捷等^[5]采用 CFD 方法分析了龙飞船发射过程中的非定常泄压过程,获取了放气流动状态和压力分布,得出舱内外压差与放气速率随舱室通气孔截面积的增大而减小,并且一维等熵流分析与 CFD 方法的计算结果吻合。詹慧玲等^[6]基于一维等熵流和数值模拟提出某飞行器充排气系统舱内压力预测方法,为充排气设计提供了依据。目前对于飞行器舱室压力特性分析主要围绕舱室通气孔特性和舱室内部压力变化开展:使用 CFD 方法能准确获取充排气系数,但计算所需时间和资源较多,无法实现舱室通气孔外部环境的快速预计;采用一维等熵流分析时,未考虑舱室通气孔外部环境压力动态变化,且在舱室内外压力动态特性快速预测上存在不足,需要进一步开展研究工作。

本文提出一种基于一维等熵流的飞行器舱室内外压力动态特性快速预计方法,探究飞行器在爬升与下落过程其通气孔所在物面相对来流倾角、通气孔截面积、舱内空气体积和飞行加速度等因素对

舱内外气压的影响,旨在为飞行器结构与通气孔设计、舱内设备低气压环境条件设计提供理论依据。

1 飞行器舱内压力动态特性预计方法

飞行器舱内压力动态特性预计方法基于如下假设:1)舱内气体温度与压力均匀,流速为 0;2)气体流经通气孔为一维等熵无黏流;3)外界空气流动为无黏流动。

基于一维等熵流的飞行器舱内压力瞬态计算流程如图 1 所示。

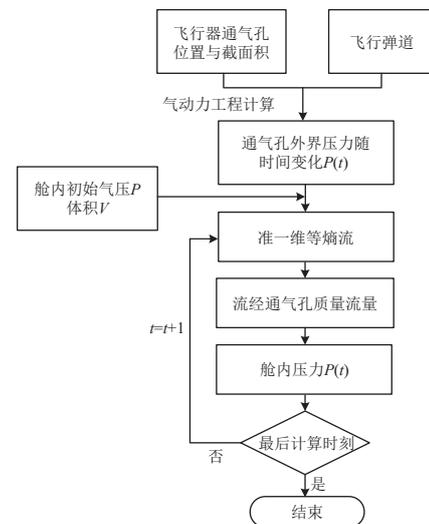


图 1 基于一维等熵流的飞行器舱内压力瞬态计算流程图
Fig. 1 Flow chart for calculation of vehicle inner-cabin pressure based on one-dimensional isentropic flow

将飞行器简化为典型的锥形结构。首先确定爬升或者开始下落时的初始压力,利用理想气体状态方程计算舱内空气质量。然后依据弹道曲线分析下一时刻飞行器海拔与飞行马赫数,计算当前大气参数,进一步考虑飞行器通气孔所在物面相对来流的倾角,预计通气孔外界环境压力。

飞行器超声速飞行时产生的激波导致通气孔外界气压超过所在海拔大气压力。为获取通气孔附近环境压力,采用气动力工程预测方法进行预计。若通气孔位于迎风面,则使用达黑姆-巴克公式计算通风孔附近的压力系数,

$$C_p = C_{pD} \frac{C_{pcone}(Ma_\infty \neq 20)}{C_{pcone}(Ma_\infty = 20)}, \quad (1)$$

其中,

$$C_{pD} = \begin{cases} \left[\frac{1.0}{\sin^{3/4}(4\delta)} + 1.0 \right] \sin^2 \delta & 0^\circ \leq \delta \leq 22.5^\circ \\ K \sin^2 \delta & \delta > 22.5^\circ \end{cases}, \quad (2)$$

$$C_{p\text{cone}} = 2\varepsilon \sin^2 \theta_{\text{TC}} \quad (3)$$

式(1)~(3)中: Ma_∞ 表示来流马赫数; C_p 为压力系数, $C_p = 2(p - p_\infty) / (\rho_\infty U_\infty^2)$ (下标 ∞ 为来流参数, p 为通气孔外界气压, ρ 为空气密度, U 为空气流速); δ 为来流与物面切线的夹角; K 为机身部位修正系数; θ_{TC} 为等价锥角, 即通气孔所在物面相对来流倾角(通气孔倾角), $\theta_{\text{TC}} = \arcsin(\sin\theta \cos\alpha + \cos\theta \sin\alpha \sin\phi)$ (θ 为物面倾角, α 为攻角, ϕ 为径向角)。公式中涉及的飞行器各角度如图2所示。

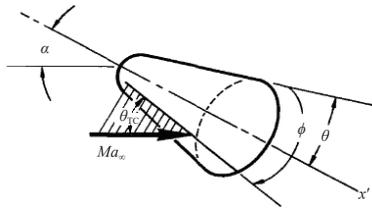


图2 飞行器各个角度示意

Fig. 2 Schematic of angle parameters of the vehicle for calculation

通气孔通常位于机身, 则式(2)中 K 以及式(3)中 ξ 分别为:

$$K = 2.38 + 3.792 \times 10^{-2} \delta - 2.521 \times 10^{-3} \delta^2 + 4.583 \times 10^{-5} \delta^3 + 2.917 \times 10^{-7} \delta^4; \quad (4)$$

$$\xi = 0.18145 - 0.20923\eta + 9.092 \times 10^{-2} \eta^2 + 6.876 \times 10^{-3} \eta^3 - 6.225 \times 10^{-3} \eta^4 - 9.71 \times 10^{-4} \eta^5. \quad (5)$$

其中, $\eta = (\ln \sqrt{Ma_\infty^2 - 1}) \cdot \sin \theta_{\text{TC}}$ 。

若通气孔位于背风面, 则采用普朗特-迈以耳公式计算压力系数^[7],

$$C_p = -\frac{\gamma+1}{2} \delta^2 \left\{ \sqrt{1 + \left[\frac{4}{(\gamma+1) Ma_\infty \delta} \right]^2} - 1 \right\}, \quad (6)$$

式中: γ 为气体比热比; δ 为来流在物面的撞击角。

获取通气孔外界压力后, 计算舱室排出或充入的空气质量流量, 更新当前时刻舱内空气质量。假设该流动过程为一维等熵无黏流, 则空气流经通气孔马赫数 Ma_m 与舱内外气压满足^[8]

$$\frac{P_H}{P_L} = \left(\frac{\gamma-1}{2} Ma_m^2 + 1 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}, \quad (7)$$

式中: P_H 与 P_L 分别为高压侧与低压侧气压。在爬升阶段, 舱内压力为 P_H , 外界气压为 P_L ; 而在下降阶段, 外界气压为 P_H , 舱内压力为 P_L 。当 $Ma_m=1$ 时, 流动发生壅塞现象, 气体流量不再随着内外气压比的增加而发生变化。

流经充排气孔的空气质量流量为^[4,9]

$$\dot{m} = \varepsilon A P_H \sqrt{\frac{\gamma}{RT_H}} \frac{Ma_m}{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} Ma_m^2\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}}, \quad (8)$$

式中: ε 为充排气系数, 其值与充排气马赫数和舱内外压力等相关, 本文选取文献[3]中不同压力与充排气马赫数下的充排气系数; A 为通气孔横截面积; R 为气体常数, 287 J/(kg·K); T_H 为高压侧温度。飞行器爬升阶段, 舱内空间排气, 高压侧温度为舱内温度, 本文取 $T_H=300$ K; 飞行器下落阶段, 舱内空间充气, 高压侧温度为充排气孔附近的环境温度。依据前文获取环境压力 P 后, 可认为环境空气温度由远场空气绝热压缩确定^[10], 满足

$$T_\infty P_H^{(\gamma-1)/\gamma} = T_H P_\infty^{(\gamma-1)/\gamma}. \quad (9)$$

不同海拔高度下的大气温度 T_∞ 与压力 P_∞ 采用《美国标准大气》^[11] 数据, 依据式(9)可以获取 T_H 。在此基础上, 计算空气流经通气孔的质量流量, 更新舱内空气质量流量, 再利用理想气体状态方程更新舱内压力参数。接下来, 进入下一个时刻的计算, 直到最后计算时刻。

2 结果与讨论

设巡航高度 $H=40$ km, 该巡航高度下大气环境压力为 0.23 kPa。考察通气孔倾角和截面积、舱内空气体积以及上升加速度对舱压的影响。

2.1 通气孔倾角对舱压的影响

由式(2)(3)可知, 通气孔倾角 θ_{TC} 影响通气孔附近外界压力, 进而影响舱内气体与环境的交互。飞行器爬升过程中, 设加速度为 $2g$, 飞行器的通气孔横截面积为 10 cm^2 , 舱内空气体积 2 m^3 ; 则不同通气孔倾角下, 舱内外压力随时间的变化如图3所示。可以看出:

1) 飞行第 10 s 前, 由于飞行速度较慢, 外界压力略微下降; 随着飞行速度增大, 外界压力与舱内压力近似线性下降; 随后下降速率减慢, 到达巡航高度后, 外界压力与舱内压力保持不变。

2) 随着倾角增大, 外界压力增大。其原因在于, 随着通气孔倾角增大, 来流空气激波强度增强, 激波后压力增大导致通气孔附近外界压力增大。

3) 舱内压力与外界压力变化趋势相近。第63 s前, 随着通气孔倾角增大, 舱内压力增大; 然而到达巡航高度后, 随着倾角增大, 舱内压力降低。原因在于, 随着倾角增大, 外界压力增大, 依据式(7), 通气孔处马赫数降低, 充排气系数增大, 导致通气孔的空气质量流量增大, 舱内压力下降速度增大, 使得大倾角下舱内压力更快与外界压力平衡。

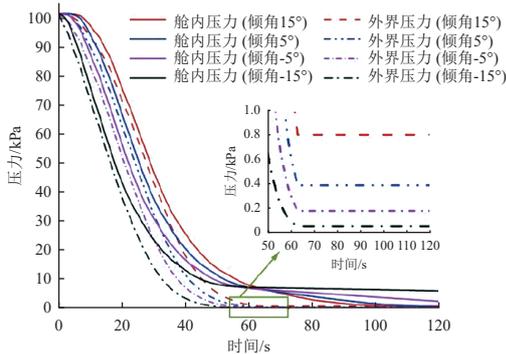


图3 爬升过程中, 舱内与外界压力随时间的变化

Fig. 3 Variations of ambient pressure and cabin pressure with time during ascent stage

下落过程中, 对于水平降落飞行器, 下降速率较低, 舱内与外界压力平衡; 而对于一次性使用飞行器, 其在重力作用下加速下落, 考虑气动阻力, 本文取下落加速度为 $0.8g$, 从 $Ma=5$ 工况开始下落。不同倾角下舱内与外界压力随时间的变化如图4所示。可以看出: 下落过程中, 舱内与外界的压力均加速上升, 且随着倾角增大, 外界压力增大, 导致进入舱内的空气质量流量增大, 使得舱内压力增大。此外, 同一时刻舱内外压差随着倾角增大而增大。

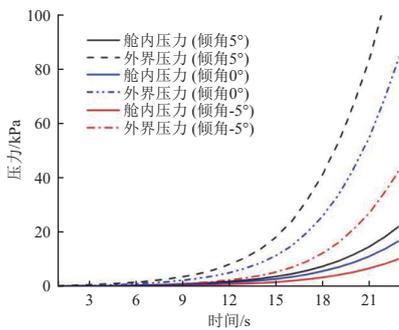


图4 下落过程中, 舱内与外界压力随时间的变化

Fig. 4 Variations of ambient pressure and cabin pressure with time during descent stage

对比爬升与下落过程的舱内外压差, 下落过程舱内外压差大于爬升过程压差。其原因为下落过程速度较快, 外界压力变化率大, 通气孔无法快速平衡内外压差。

2.2 通气孔横截面积与舱内空气体积对舱压的影响

设通气孔横截面积分别为 5 、 7.5 和 10 cm^2 , 通气孔倾角为 15° , 舱内空气体积分别为 1 m^3 和 2 m^3 , 爬升过程中飞行加速度为 $2g$, 舱内外压力随时间变化如图5所示。可以看出: 舱内空气体积不变时, 随着通气孔横截面积增大, 流经通气孔的空气质量流量增大, 舱内外压差降低; 通气孔横截面积不变时, 随着舱内空气体积增大, 平衡内外压差所需的气体质量增大, 内外压差增大。值得关注的是, 当舱室舱内空气体积与通气孔横截面积的比值 ($\alpha=V/A$) 相同时, 舱内压力随时间变化关系相同, 因此, 可以使用该比值表征舱内空气体积以及通气孔横截面积对舱内压力的影响。进一步分析 α 对舱内外压差的影响, 上升过程中舱内外压差平均值与最大值随 α 的变化如图6所示: 可以看出, 平均压差与最大压差均随 α 增大而增大; 当 $\alpha > 2000$, 压差增长率随着 α 线性增大。在工程设计中, 针对已知舱内有效容积, 可以依据 $\alpha < 2000$ 原则开展舱室通气孔设计, 以得到较好的通气效果。

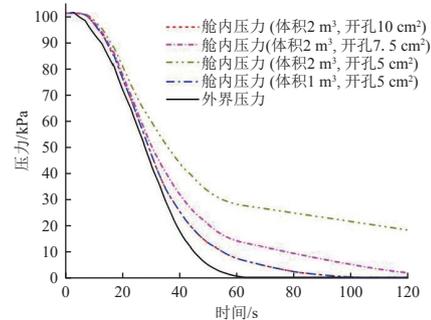


图5 爬升过程中, 不同通气孔截面积及舱内空气体积下舱内外压力随时间的变化

Fig. 5 Variations of pressures inside and outside the cabin with time during ascent stage for different venting sectional areas and cabin air volumes

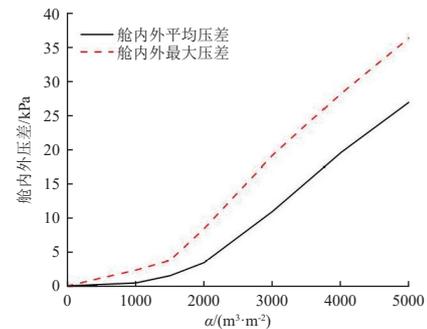


图6 舱内外压差随 α 的变化

Fig. 6 Differential pressure between inside and outside the cabin vs. α

飞行器下落过程中,不同通气孔横截面积及舱内空气体积下舱内外压力随时间变化如图 7 所示,其中通气孔倾角为 5° ,飞行加速度为 $2g$ 。可以看出,舱内空气体积与通气口截面积对舱内压力的影响与上升过程中的规律一致,当舱室舱内空气体积与通气孔横截面积的比值 $\alpha(\alpha=V/A)$ 相同时,舱内压力随时间变化规律相同。

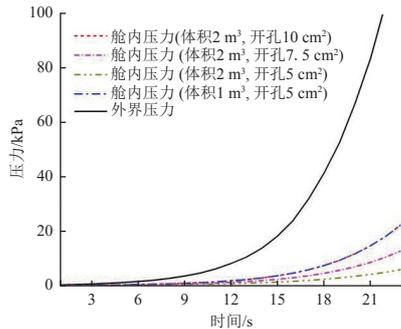


图 7 下落过程中,不同通气孔截面积及舱内空气体积下舱内外压力随时间的变化

Fig. 7 Variations of pressures inside and outside the cabin with time during descent stage for different venting sectional areas and cabin air volumes

2.3 上升加速度对舱内压力的影响

飞行器从海平面高度起飞,飞行倾角为 15° ,上升加速度分别为 $1g$ 、 $2g$ 、 $3g$ 时,舱内与外界压力随着时间的变化如图 8 所示。可以看出:随着上升加速度增大,飞行高度上升的速度和外界大气压力降低加快,空气密度相应降低;而随着加速度增大,飞行速度加快,更快达到巡航高度,通气孔附近外界压力降低程度更大,更快趋于平衡状态,导致舱内外压差增大,舱室环境向外流出的空气流量增大,舱室压力更快达到平衡。

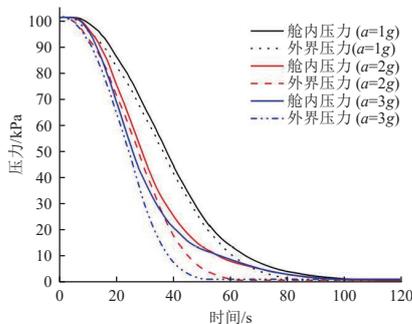


图 8 上升加速度对舱内与外界压力动态特性的影响

Fig. 8 Effect of ascent acceleration on dynamic characteristics of differential pressure between inside and outside the cabin

3 结束语

着眼于为飞行器结构受力分析及舱内设备低气压环境条件设计提供依据,本文提出基于一维等熵流的飞行器超声速飞行阶段快速预测舱内外压力动态特性的计算方法,通过数值计算探讨了飞行过程中舱内外压力动态变化特性,探究了通气孔横截面积和通气孔所在物面相对来流倾角、舱内空气体积和飞行加速度等对舱内外压力的影响特性,得出以下结果:

1) 爬升过程中,外界压力和舱内压力随着通气孔倾角增大而增大;到达巡航高度后,舱内压力降低,并趋于平缓接近大气环境压力。随着飞行加速度增大,舱内外压差增大。

2) 随着通气孔横截面积增大,舱内外压差降低;随着舱内空气体积增大,舱内外压差增大。当舱室舱内空气体积与通气孔横截面积的比值 $(\alpha=V/A)$ 相同时,舱内压力随时间变化关系相同;随着 α 增大,舱内外平均压差与最大压差增大。

3) 下落过程中,舱内与外界压力加速上升,舱内外压差随着倾角增大而增大。

后续,考虑采用 CFD 或地面试验方法对本文研究结果进行验证。

参考文献 (References)

- [1] MIRONER A, REGAN F. Venting of space-shuttle payloads[C]//Shuttle Environment and Operations Meeting. Lexington, MA, USA, 1983
- [2] 梁志伟,尹永利,朱艳芳. 载人航天器压力应急状况下舱压变化的仿真研究[J]. 航天医学与医学工程, 2000, 13(2): 128-131
LIANG Z W, YIN Y L, ZHU Y F. A simulation study of cabin pressure changes under accidental leakage[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2000, 13(2): 128-131
- [3] 郭鹏飞,刘杰平,陈龙. 高超声速飞行器舱内压力预测[J]. 宇航学报, 2016, 37(1): 55-60
GUO P F, LIU J P, CHEN L. Internal pressure prediction of hypersonic vehicle[J]. Journal of Astronautics, 2016, 37(1): 55-60
- [4] 解静,张莽,周正阳,等. 再入返回飞行器舱内压力动态变化的预测技术研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2016(4): 59-62
XIE J, ZHANG M, ZHOU Z Y, et al. Study on dynamic change prediction of inner pressure of reentry vehicle

- cabin[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2016(4): 59-62
- [5] 张敏捷, 杨雷, 左光, 等. 航天器通气孔放气过程计算研究[J]. *载人航天*, 2018, 24(6): 759-764
- ZHANG M J, YANG L, ZUO G, et al. Study on venting process through venting holes of spacecraft[J]. *Manned Spaceflight*, 2018, 24(6): 759-764
- [6] 詹慧玲, 解静, 刘周, 等. 飞行器舱内压力预测方法研究[C]//第九届全国流体力学学术会议. 南京, 2016
- [7] 黄志澄. 高超声速飞行器空气动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995
- [8] ZHANG T, LIN G P, BU X Q, et al. Simulation research on rapid decompression of aircraft cabins[C]//2019 IEEE 10th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE). Washington, D.C., 2019
- [9] 刘书博, 赵东升, 杨懿. 高超声速飞行器热防护与热管理综合分析方法[J]. *飞机设计*, 2023(4): 32-36
- LIU S B, ZHAO D S, YANG Y. Comprehensive analysis method of thermal protection and management design of hypersonic vehicles[J]. *Aircraft Design*, 2023(4): 32-36
- [10] CHE J, TANG S. The engineering calculation of aerodynamics for quasi-waverider vehicle[J]. *Acta Aerodynamic Sinica*, 2007, 25(3): 382-384
- [11] U. S. standard atmosphere, 1976: NOAA-S/T-76-1562[R]

(编辑:王 洋)

一作简介: 杜晨慧, 博士研究生, 工程师, 主要从事飞行器设计。

*通信作者: 丁 晨, 副教授, 主要从事飞行器与车辆热管理研究。