

浮空器气体混充定高建模与仿真*

杨燕初^{1,2}, 曹胜鸿^{1,2}, 赵荣¹, 祝榕辰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 100190)

摘要:依据浮空器浮重平衡特性以及理想气体状态方程,探索了一种气体混充控制浮空器平飞高度的定高方式,并对浮空器气体混充定高技术进行了总体设计研究。考虑到热力学特性对于浮空器上升过程和平飞过程的重要性,结合工程热力学中混充气体的热物性能,以超压气球作为研究对象,分析球体上升和平飞过程中的热环境,并与动力学模型进行耦合。在此基础上,对混充气球上升及平飞过程进行力学仿真,得到气球上升过程中高度、速度、气体温度以及压强的变化,验证了浮空器混充定高技术的可行性,为后续浮空器飞行试验提供指导。

关键词:浮空器;气体混充;热力学;动力学;数值仿真

中图分类号:V273 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2023)06-196-09



与作者互动
听语音聊科研

Modeling and numerical simulation of constant-height flight by air-lifting gas mixing for aerostats

YANG Yanchu^{1,2}, CAO Shenghong^{1,2}, ZHAO Rong¹, ZHU Rongchen¹, SONG Lin¹

(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: According to the floating weight balance characteristics and the ideal gas state equation, a method to control the height of the aerostat's flat flight by gas mixing was explored, and the overall design research of constant-height flight by air-lifting gas mixing was carried out. Considering the importance of thermodynamic characteristics to the ascent process and the flat flight process of the aerostat, combined with the thermophysical properties of mixed gas in engineering thermodynamics, the super-pressure balloon was taken as the research object to analyze the thermal environment during the ascent and flight processes of spheres, and coupled with dynamic models. On this basis, the mechanical simulation of the ascent and flat flight process of the balloon was carried out, and the changes in altitude, speed, gas temperature and pressure during the ascent of the balloon were obtained, so as to verify the feasibility of the theoretical model of constant-height flight by air-lifting gas mixing, and provide guidance for the subsequent aerostat flight test.

Keywords: aerostats; air-lifting gas mixing; thermodynamics; dynamics; numerical simulation

浮空器的有效定高技术对于临近空间的环境监测、区域通信、实时监控、预警与导弹防御等领域有很大的应用价值^[1-2]。现有研究中的浮空器高度调节控制技术主要为排气定高、抛砂定高等外控定高技术^[3-5]。浮空器通过排气阀和风机的开合实现球内气体的排放,或者通过抛砂减载的方式,控制球体保持在预定高度。但目前针对浮空器气体混充定高的研究较少。

图1为超压气球的系统组成,球顶安装排气阀,球底安装风机,吊舱配备铁砂。

关于浮空器定高技术的研究最早运用于定高气球上。定高气球(定容气球)采用非弹性薄膜

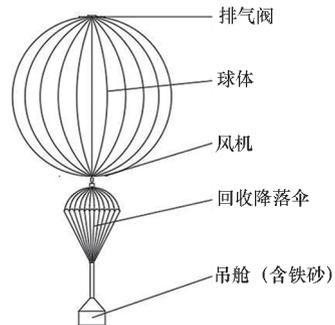


图1 超压气球系统组成

Fig. 1 Composition of an overpressure balloon system

材料制成,充入浮升气体,可沿一定高度做较长时

* 收稿日期:2022-06-29

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)资助项目(XDA17020100)

作者简介:杨燕初(1982—),男,河南郑州人,研究员,博士,博士生导师,E-mail:yangyanchu@aoe.ac.cn

间的平飞运动。定高气球主要受到垂直气流的作用,依照浮重平衡,气球升高至一定高度^[6]。但是,定容气球的设计研究仅考虑了纯浮升气体的充入情况,缺少对气体混充方式的研究。此外,定高气球的体型较小,飞行高度较低,一般在几百米高空作业。

国内外针对有效定高技术的研究参考记录较少。1979年,美国国家大气研究中心提出,由世界气象组织采纳的热带定高气球系统开启了全球大气研究中的第一次全球实验,其目的是取得全球气象观测和海洋观测数据^[7]。国内对于定高气球的应用可追溯到20世纪80年代,如用定高气球探测复杂地形上空的流场和大气扩散参数^[6,8]。

因此针对浮空器定高技术的研究具有十分重要的科学价值,尤其是平飞高度下充气定高理论模型的确立,对于后期定高技术的研究及相应的飞行试验具有十分重要的指导意义。本文拓展研究了一种新型高空气球定高方式,即按照一定的比例混合充入空气和浮升气体,从而达到控制高空气球的平飞高度的目的。以超压气球作为研究对象,依照球体的浮重平衡特性及理想气体状态方程,构建气体混充定高理论模型,分析其上升过程中的热环境,并与球体动力学模型进行耦合计算,验证气体混充定高理论模型的可行性。

1 气体混充定高技术理论模型

浮空器的气体混充定高技术理论模型主要分为预定高度充气量模型和成型高度理论模型。预定高度充气量理论模型主要针对不同体积和不同

类型球内气体的情况给出所需的气体质量和对应的混充比例,为后续气体混充定高飞行实验提供理论基础。

成型高度对于飞行实验的系列操作和监控是一个重要的参考指标,因此本文在混充定高技术理论上建立球体成型高度理论模型。

1.1 预定高度充气量理论模型

考虑气体混充之后成型要求,本文以超压气球作为研究对象。超压气球采用封闭结构,球膜材料采用一种类似于铝膜的高承压材料,升空成型之后,球膜受到压差作用,体积达到极限并维持不变,在飞行过程中一般不排气或者排很少的气,浮升力基本稳定^[9]。相较于零压气球,其可以实现长时间稳定的飞行^[10]。

球体在预定高度下主要受到浮力和重力作用并达到浮重平衡,如式(1)所示。

$$(\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{gas}})gV = G \quad (1)$$

式中, ρ_{air} 和 ρ_{gas} 分别对应飞行高度下的大气密度和球内气体密度, V 为体积, G 为系统总质量。

将系统总质量进行拆分,如式(2)所示。

$$\rho_{\text{air}}V = m_{\text{gas}} + m_{\text{air}} + m_{\text{balloon}} + m_{\text{payload}} \quad (2)$$

式中, ρ_{air} 为预定高度下的大气密度, V 为成型体积, m_{gas} 、 m_{air} 、 m_{balloon} 、 m_{payload} 分别为球内气体质量、空气质量、球皮质量和载荷质量。

引入理想气体状态方程,如式(3)所示。

$$\rho_H = \frac{P_H}{R_{\text{gas}} T_H} \quad (3)$$

式中, ρ_H 、 P_H 、 T_H 分别为某一高度下的气体密度、压力、温度, R_{gas} 为通用气体常数。

大气模型参照文献[11],如式(4)所示。

$$\begin{cases} T_{\text{air}} = \begin{cases} 288.15 - 0.0065H & 0 \text{ m} < H \leq 11\,000 \text{ m} \\ 216.65 & 11\,000 \text{ m} < H \leq 20\,000 \text{ m} \\ 216.65 + 0.0010(H - 20\,000) & 20\,000 \text{ m} < H \leq 32\,000 \text{ m} \end{cases} \\ P_{\text{air}} = \begin{cases} 101\,325 [(288.15 - 0.0065H)/288.15]^{5.25577} & 0 \text{ m} < H \leq 11\,000 \text{ m} \\ 22\,632 e^{-(H-11\,000)/6\,341.62} & 11\,000 \text{ m} < H \leq 20\,000 \text{ m} \\ 5\,474.87 \{ [216.65 + 0.0010(H - 20\,000)] / 216.65 \}^{-34.163} & 20\,000 \text{ m} < H \leq 32\,000 \text{ m} \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

结合式(4),则气体混充定高充气技术理论模型如式(5)所示。

$$\frac{P^{H_1}}{R_{\text{air}} T^{H_1}} = [m_{\text{gas}}(1 + \eta) + m_{\text{balloon}} + m_{\text{payload}}] \frac{1}{V} \quad (5)$$

式中, H_1 表示平飞高度, η 为空气与球内气体的质量比。

依据式(5),在得知高空气球的相关设计参

数和浮升气体质量以及空气质量的前提下,可以求得球体的平飞高度。同样,预先设定平飞高度,在确定球体参数和球内气体质量后可根据式(5)求得所需充入的空气质量,从而达到有效定高的目的。

1.2 浮空器成型高度

成型高度对于浮空器上升过程的系列调控工作具有十分重要的参考价值。在前文所建立的充

气量理论模型基础上,依照超压气球的成型规律,成型后体积不再变化,进一步求得球体的成型高度。体积计算如式(6)所示。

$$V_{\text{balloon}} = V_{\text{float-gas}} + V_{\text{air}} \quad (6)$$

式中, $V_{\text{float-gas}}$ 为浮升气体的体积, V_{air} 为空气所占体积, V_{balloon} 为球体成型体积。

球内浮升气体体积参照式(7)。

$$V_{\text{float-gas}} = \frac{m_{\text{float-gas}}}{P_{\text{gas}}^H / (R_{\text{float-gas}} \cdot T_{\text{gas}}^H)} \quad (7)$$

浮升气体体积与空气体积关系计算参照式(8)。

$$\frac{V_{\text{float-gas}}}{V_{\text{air}}} = \frac{m_{\text{float-gas}}}{m_{\text{air}}} \cdot \frac{R_{\text{float-gas}}}{R_{\text{air}}} \quad (8)$$

因此将式(7)~(8)代入式(6),可改写为式(9)。

$$\frac{P^{H_2}}{T^{H_2}} = \frac{m_{\text{float-gas}} \cdot R_{\text{float-gas}}}{V_{\text{balloon}}} \left(1 + \frac{m_{\text{air}}}{m_{\text{float-gas}}} \cdot \frac{R_{\text{air}}}{R_{\text{float-gas}}} \right) \quad (9)$$

式(9)即为球体成型高度理论模型,其中 H_2 为球体成型高度。根据充入的气体质量和球体体积可以求得球体的成型高度,从而为浮空器的系列控制操作提供理论指导。

2 热力学分析

考虑到热力学特性对于球体上升和平飞阶段的重要性,同时为了验证气体混充定高理论模型的可行性,进一步分析球体上升和平飞过程的热环境,并与动力学模型进行耦合计算,求得球体上升过程的温度、高度和速度变化。

2.1 球体模型

超压气球在上升阶段成型后,球内气体封闭形成超压,故在球体成型前可认为内外压力一致,球内气体自由膨胀。结合理想气体状态方程,则球体在上升过程中的体积计算参照式(10)。

$$V_{\text{balloon-up}} = \frac{m_{\text{He}}}{\rho_{\text{He}}} + \frac{m_{\text{air}}}{\rho_{\text{air}}} \quad (10)$$

参考文献[12],球体在上升过程中的有效面积和顶部投影面积计算根据式(11)~(12)。

$$A_{\text{eff}} = 5.3V^{\frac{2}{3}} \quad (11)$$

$$A_{\text{top}} = \frac{1}{4}\pi D^2 \quad (12)$$

其中, D 为上升过程中的最大单向尺寸,计算可参照式(13)。

$$D = k \left(\frac{0.75}{\pi} \cdot \frac{m_{\text{gas}}}{\rho_{\text{gas}}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

式中,参数 k 的选取参照文献[12]。

2.2 超压量模型

超压气球在上升过程中,随着气压的降低,球体逐渐展开并胀满。但超压气球胀满后并不自动排出气体,而是将多余气体封闭在球内形成超压^[13]。

本文采用超压气球模型进行分析与仿真运算,故在给出平飞高度和成型高度的相关理论模型之后,进一步研究超压气球的超压量,从而指导超压气球的球体设计工作。

超压气球的压差主要由球体内外的温度差引起。白天球体受到太阳照射,内部温度上升,气体膨胀,内部压强增大;日落时,球体内部温度降低,浮力减小,压强减小,此即为日落效应^[5]。

根据查理定律,当物质的量 n 和体积 V 一定时,压强和温度成正比^[14]。

设外界大气压为 P_{air} , 温度 T_{gas} 降低 ΔT_{gas} , 为保证气球始终处于超压状态,则白天球体压强为 $P_{\text{air}} / (1 - \Delta T_{\text{gas}} / T_{\text{gas}})$, 最小超压量计算参照式(14)。

$$\Delta P_{\text{min}} = P_{\text{air}} \left(\frac{1}{1 - \Delta T_{\text{gas}} / T_{\text{gas}}} - 1 \right) \quad (14)$$

根据文献[15],超压气球在地面发放时要预先充入气体,使球体具有一定的自由浮力和一定的初速度,到达预定高度后,气体封闭在球囊内形成超压,因此可以确定超压量的最大值,其计算参照式(15)。

$$\Delta P_{\text{max}} = P_{\text{air}} [f + (1 + f) \Delta T_{\text{gas}} / T_{\text{gas}}] \quad (15)$$

式中, f 是气球发放时的自由浮力系数,不同试验取值不同^[16]。

本文混充定高技术以超压气球为研究对象,故要考虑球体成型后的超压量,结合式(14)~(15)以及文献[12],超压量计算参照式(16)。

$$\Delta P = \frac{m_{\text{gas}} \cdot R_{\text{gas}} \cdot T_{\text{gas}}}{V_{\text{design}}} - P_{\text{air}} \quad (16)$$

2.3 热环境

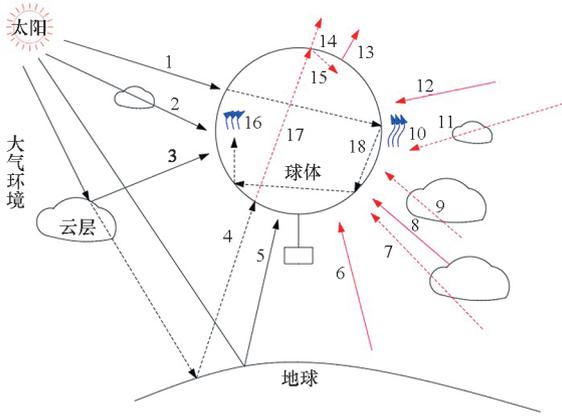
参考文献[11-12, 17-23],本文混充超压气球的热环境主要包括太阳直射、太阳散射、地表散射、红外辐射、天空辐射、云层辐射等,如图2所示。

2.3.1 太阳高度角

太阳高度角取决于纬度和日期^[11],如式(17)所示。

$$\alpha_{\text{ELV}} = \arcsin[\sin\delta\sin\varphi + \cos\delta\cos\varphi\cos\theta_{\text{HRA}}] \quad (17)$$

式中, δ 为赤纬角, φ 为维度角, θ_{HRA} 为时间角。



1—直接太阳辐射;2—穿过云层后的太阳辐射;3—云层反射;4—穿过云层后的地面反射;5—地面反射;6—地面辐射;7—穿过云层后的地面辐射;8—云层辐射;9—穿过云层后的云层辐射;10—球膜与外部空气自然对流;11—穿过云层后的天空辐射;12—天空辐射;13—球膜外表面红外辐射;14—穿过球膜逸出的球膜内表面发射的红外辐射;15—球膜内表面反射后的红外辐射;16—球膜与球内气体自然对流;17—球膜内表面发射到球体内部的红外辐射;18—球体内表面反射。

图2 球体热环境分析

Fig. 2 Analysis of the sphere thermal environment

2.3.2 太阳辐射

球膜材料受到的太阳辐射包括直接太阳辐射和太阳反射,计算参照式(18)。

$$Q_{sun} = Q_{sun-reflect} + Q_{sun-direct} \quad (18)$$

参照文献[12],直接太阳辐射计算参照式(19)。

$$Q_{sun-direct} = \alpha A_{top} q_{sun} [1 + \tau(1 + r_{eff})] \quad (19)$$

式中: α 为球膜材料对太阳辐射的吸收率; τ 为球膜材料对太阳辐射的透射率; q_{sun} 是太阳辐射通量,和云层遮盖率有关^[22],其计算方式为

$$q_{sun} = \begin{cases} I_{sun,H} (1 - \lambda_{CF}) & H \leq 11\,000 \text{ m} \\ I_{sun,H} & H > 11\,000 \text{ m} \end{cases} \quad (20)$$

λ_{CF} 为云层遮盖率^[8], $I_{sun,H} = I_{sun} \cdot \tau_{atm}$ 为一定高度下的太阳强度,其中 I_{sun} 为太阳辐射常数, τ_{atm} 为大气透射率(计算公式参照文献[12]); r_{eff} 为多次反射的有效反射率,计算参照文献[22]。

太阳反射计算如式(21)所示。

$$Q_{sun-reflect} = \alpha A_{eff} q_{Albedo} \tau_{ViewFactor} [1 + \tau(1 + r_{eff})] \quad (21)$$

式中, $\tau_{ViewFactor}$ 为气球表面对地球表面的角系数; q_{Albedo} 为太阳反射辐射通量,计算式为

$$q_{Albedo} = \lambda_{Albedo} \cdot I_{sun} \cdot \sin \alpha_{ELV} \quad (22)$$

其中, λ_{Albedo} 为地面反照率^[24]。

球内气体受到的太阳辐射同样包括直接太阳辐射和太阳反射,参照文献[11],其计算如

式(23)所示。

$$Q_{sun-gas} = \alpha_{eff-gas} \cdot A_{eff} \cdot q_{sun} \cdot (1 + \lambda_{Albedo}) \quad (23)$$

式中, $\alpha_{eff-gas}$ 为球内气体对太阳辐射的有效吸收率^[25]。

2.3.3 地球和天空的红外辐射

球膜材料受到的红外辐射参照式(24)。

$$Q_{IR-earth\&sky} = \varepsilon_{eff} \cdot \sigma \cdot A_{eff} \cdot T_{BB}^4 \quad (24)$$

式中: ε_{eff} 为球膜材料对红外辐射的有效发射率; σ 为斯忒潘·玻耳兹曼常数,取值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$; T_{BB} 为黑体辐射等效温度。

球内气体受到的地球和天空的红外辐射与球膜材料相似,如式(25)所示。

$$Q_{IR-earth\&sky-gas} = \varepsilon_{eff-gas} \cdot \sigma \cdot A_{eff} \cdot T_{BB}^4 \quad (25)$$

式中, $\varepsilon_{eff-gas}$ 为球内气体对红外辐射的有效发射率^[25]。

2.3.4 球膜内表面与球内气体的热交换

热交换主要发生在球内气体和球膜之间,其计算参照式(26)。

$$Q_{IR-int} = \varepsilon_{int} \cdot \sigma \cdot A_{eff} \cdot (T_{gas}^4 - T_{film}^4) \quad (26)$$

式中, ε_{int} 为红外辐射有效交换率^[25]。

2.3.5 球膜外表面红外辐射

球膜外表面红外辐射至外界大气,如式(27)所示。

$$Q_{IR-emit} = \varepsilon_{eff} \cdot \sigma \cdot A_{eff} \cdot T_{film}^4 \quad (27)$$

2.3.6 球内气体的红外辐射

球内气体红外辐射膨胀至球膜,计算参照式(28)。

$$Q_{IR-emit-gas} = \varepsilon_{eff-gas} \cdot \sigma \cdot A_{eff} \cdot T_{gas}^4 \quad (28)$$

2.3.7 对流换热

浮空器的对流换热主要分为球膜材料和外界大气之间的对流换热以及球膜材料与球内气体之间的对流换热两部分^[26]。

球膜与外界大气之间的对流换热主要分为自然对流和强迫对流两部分,计算参照式(29)。

$$Q_{con-ext} = HC_{external} \cdot A_{eff} \cdot (T_{air} - T_{film}) \quad (29)$$

式中, $HC_{external}$ 为外部对流换热系数,计算参照式(30)。

$$HC_{external} = (H_{force}^3 + H_{free}^3)^{\frac{1}{3}} \quad (30)$$

式中, H_{force} 为强迫对流换热系数, H_{free} 为自然对流换热系数^[12]。

球膜与球内气体的对流换热属于自然对流换热,计算参照式(31)。

$$Q_{con-int} = HC_{internal} \cdot A_{eff} \cdot (T_{film} - T_{gas}) \quad (31)$$

式中, $HC_{internal}$ 为内部对流换热系数^[12]。

2.3.8 导热系数

本文研究对象与其他浮空器不同之处在于采

用浮升气体与空气混合充入控制浮空器的平飞高度,因此,需要对浮空器内部气体环境的热物性能进行进一步分析。结合文献[27],混合气体的导热系数计算参照式(32)。

$$k_m = \frac{\sum_{i=1}^n k_i}{1 + \sum_{i=1}^n G_{ij} \frac{y_j}{y_i}} \quad (32)$$

式中: k_m 为气体混合物的导热系数; k_i 为各组分的导热系数; y_i 为各组分气体摩尔分数; G_{ij} 为结合系数,计算参照式(33)。

$$G_{ij} = \varepsilon_{ij} \cdot \phi_{ij} \quad (33)$$

式中, ε_{ij} 为修正系数, ϕ_{ij} 为相互作用系数,计算参照文献[27]。

2.4 热力学模型

综合国内外对于浮空器的研究,热力学模型主要分为对球膜材料温度的分析和对球内气体温度的分析两部分。

球膜主要受到太阳辐射、红外辐射、热交换、对流换热等的影响,如式(34)所示。

$$\frac{dT_{\text{film}}}{dt} = \frac{Q_{\text{sun}} + Q_{\text{IR-int}} + Q_{\text{IR-earth\&sky}} + Q_{\text{con-ext}} - Q_{\text{con-int}} - Q_{\text{IR-emit}}}{c_{\text{film}} \cdot m_{\text{film}}} \quad (34)$$

球内气体热力学模型主要受到太阳辐射、红外辐射、热交换、对流换热,以及体积变化引起的膨胀功的影响,计算如式(35)所示。

$$\frac{dT_{\text{gas}}}{dt} = \frac{1}{c_v \cdot m_{\text{gas}}} (Q_{\text{sun-gas}} - Q_{\text{IR-int-gas}} + Q_{\text{IR-earth\&sky-gas}} - Q_{\text{con-int}} - Q_{\text{IR-emit-gas}}) + (\gamma - 1) \cdot \frac{dT_{\text{gas}}}{dt} \cdot \frac{dp_{\text{gas}}}{dt} \quad (35)$$

式中, γ 为比热容比,即定压比热容 c_p 与定容比热容 c_v 的比值^[12]。

根据文献[28],混合气体的热物性质取决于混合气体中各组成气体的成分及其热力学性质。由理想气体组成的混合气体,仍然具有理想气体特性,服从理想气体各种规律。式(35)中涉及的比热容计算参照式(36)。

$$c = g_1 c_1 + g_2 c_2 + \dots + g_n c_n = \sum_{i=1}^n g_i c_i \quad (36)$$

式中, g_i 为各组分气体的质量成分, c_i 为各组分气体的比热容。

3 动力学分析

高度和速度对于浮空器的系列操作是十分重要的参照指标,故以起飞点作为坐标系原点,垂直

向上为 z 轴正向,南向为 x 轴正向,东向为 y 轴正向。球体上升过程受力分析如图 3 所示。

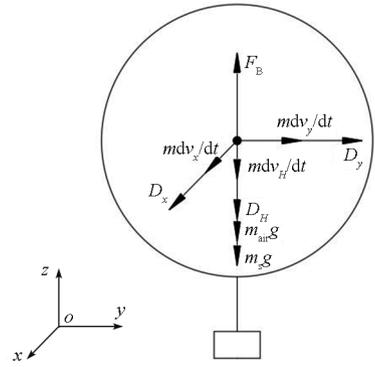


图 3 球体上升过程中的受力分析

Fig.3 Analysis of the force during the ascent of the sphere

本文主要针对球体的垂直向受力进行分析,其中 F_B 为总浮力,其计算如式(37)所示。

$$F_B = \rho_{\text{air}} \cdot g \cdot V \quad (37)$$

m_s 为系统总质量,定义为 $m_s = m_1 + m_g + m_{\text{air}}$,主要包括结构质量、浮升气体质量和充入空气质量。

m 为系统等效质量,定义为 $m = m_s + m_v$,包括系统总质量和附加质量,附加质量计算参照式(38)。

$$m_v = C_m \cdot \rho_{\text{air}} \cdot V \quad (38)$$

式中, C_m 是虚拟质量系数,取值范围为 0.25 ~ 5^[12]。

球体在上升过程还受到阻力影响,如式(39)所示。

$$D_H = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot v_H^2 \cdot C_D \cdot S \quad (39)$$

式中: C_D 为阻力系数,其值与雷诺数有关,相关计算可参照文献[16]; S 为垂直向最大投影面积。

故根据受力分析,球体在上升过程中的动力学模型如式(40)所示。

$$\begin{cases} \frac{dv_H}{dt} = (F_B - D_H - m_s g) \frac{1}{m} \\ \frac{dH}{dt} = v_H \end{cases} \quad (40)$$

4 仿真分析

4.1 仿真程序框架

本文针对浮空器的气体混充定高技术展开研究,主要采用浮升气体和空气不同比例混充来实现对高度的控制。首先建立浮空器平飞高度下的充气数学模型,考虑到浮空器的系列操作,同时对浮空器成型高度数学模型进行研究;然后,考虑

到气体温度对于浮空器上升、平飞过程的重要性,分析了球体上升过程中的热环境,并与球体动力学模型进行耦合;最后,借用软件进行运算,得出

并分析球体的高度、速度和气体温度变化,验证混充定高理论模型的可行性,并为后续的飞行试验提供指导,如图4所示。

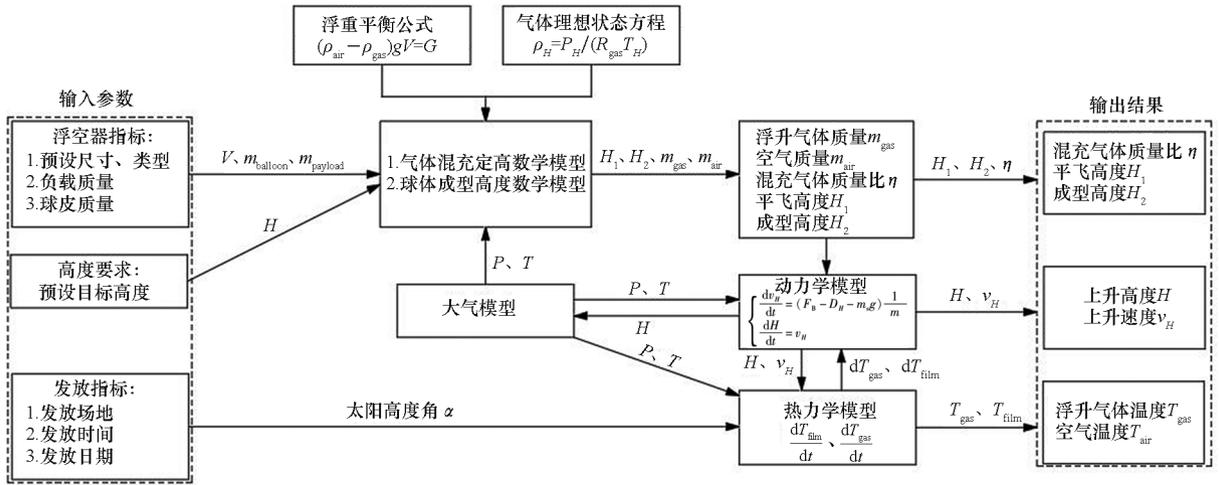


图4 浮空器有效定高技术仿真程序框架

Fig.4 Simulator framework for the effective height of the aerostat

4.2 混充定高仿真运算

4.2.1 仿真参数

按照上述模型对不同体积的超压气球做气体混充处理并进行仿真计算,得到不同高度下对应的气体质量和混充比例,相关参数参照表1。

表1 球体参数

Tab.1 Sphere parameters

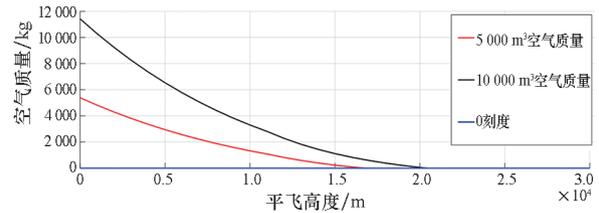
体积/m ³	球皮质量/kg	负载质量/kg	系统总质量/kg
5 000	127.264 3	500	627.264 3
10 000	202.019 5	500	702.019 5

4.2.2 仿真结果分析

按照上述参数首先选用氦气作为浮升气体对理论模型进行仿真运算。

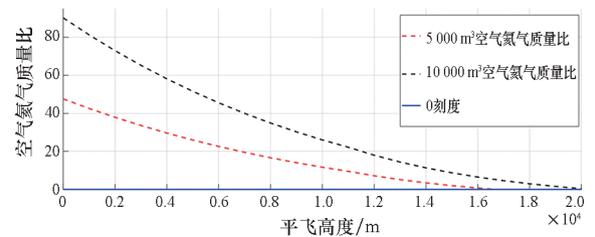
图5为超压气球对应平飞高度所需氦气与所需空气质量关系。相同高度下,不同球体所需的空气质量和空气氦气质量比随着体积的增大也相应增大;另外,同一球体在不同平飞高度,所需的空气质量和氦气质量比随着高度的增加逐渐减小。

本文在球内气体为氦气的研究基础上,同时针对浮升气体为氢气的情况展开研究。



(a) 平飞高度下空气质量

(a) Mass of air at the level of flat flight



(b) 平飞高度下空气氦气质量比

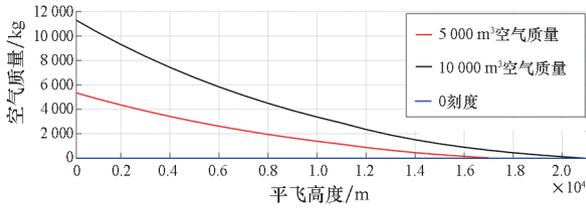
(b) Air-to-helium mass ratio at the level of flat flight

图5 平飞高度下氦气与空气质量关系

Fig.5 Relationship between helium mass and air mass at the level of flat flight

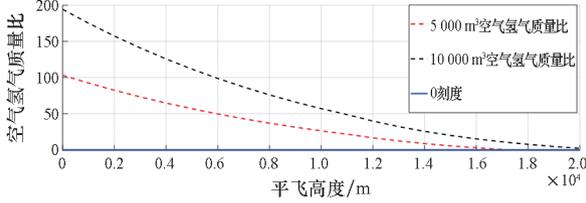
图6为超压气球对应平飞高度所需氢气与所需空气质量关系,其结果与氦气情况一致。

图7为超压气球平飞高度与对应成型高度关系,针对空气-氦气、空气-氢气两种混充类型,球体的成型高度均低于平飞高度,符合成型经验。



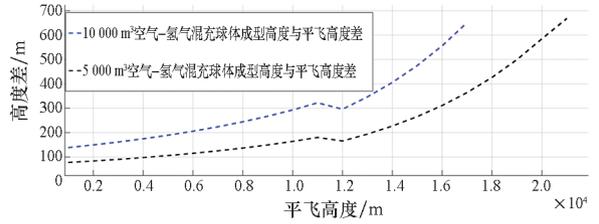
(a) 平飞高度下空气质量

(a) Mass of air at the level of flat flight



(b) 平飞高度下空气氢气质量比

(b) Air-to-hydrogen mass ratio at the level of flat flight



(d) 空气 - 氢气混充球体成型高度与平飞高度差
(d) The differential value of the forming height and the level of flat flight of the air-hydrogen mixed balloon

图 7 混充球体成型高度与平飞高度关系

Fig. 7 Relationship between the forming height and the level of flat flight of the mixed balloon

图 6 平飞高度下氢气与空气质量关系

Fig. 6 Relationship between hydrogen mass and air mass at the level of flat flight

4.3 热力学仿真

4.3.1 仿真参数

浮空器目前多采用氦气作为浮升气体,故本文在混充定高模型的基础上进一步引入热力学因素,针对直径 30 m 的球体充入氦气的情况进行分析,并与动力学模型进行耦合计算,验证混充定高理论模型的可行性,相关参数如表 2 所示。

表 2 高空气球参数

Tab. 2 High balloon parameters

名称	参数
放飞时刻	9 月下旬上午 6:00
球体直径/m	30
平飞高度/m	24 000
载荷质量/kg	150
氦气质量/kg	75.657 3
空气质量/kg	149.710 7

关于球膜材料的辐射吸收率和透射率等光学特性如表 3 所示^[24]。

表 3 球膜材料光学特性

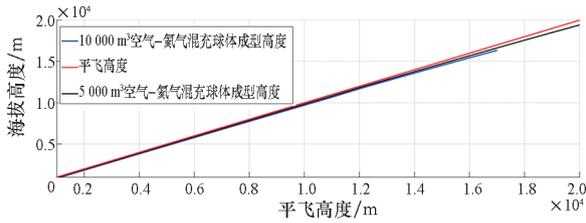
Tab. 3 Optical properties of skin materials

参数	$c_{fm}/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	α	τ	α_{IR}	τ_{IR}
数值	2 302.7	0.33	0.05	0.75	0.20

4.3.2 仿真运算结果分析

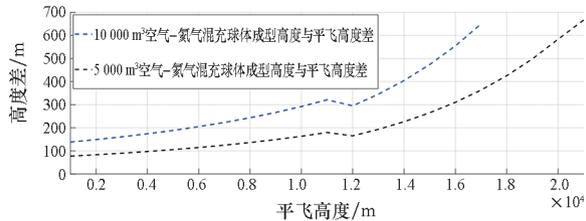
图 8 为球体上升过程中球膜内外压差变化值。球体成型之后,球内气体封闭在球体内部形成超压,参照文献[29],实验结果符合超压气球的成型规律。

图 9 为球体上升过程中球膜、外界环境和球内气体温度变化情况。球体在上升过程中,球膜、



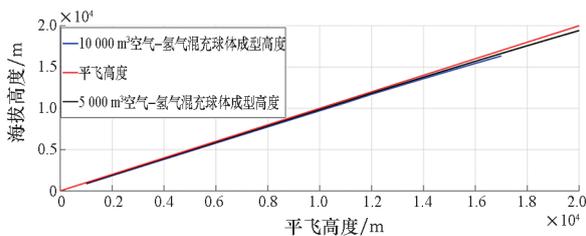
(a) 空气 - 氦气混充球体成型高度与平飞高度

(a) The forming height and the level of flat flight of the air-helium mixed balloon



(b) 空气 - 氦气混充球体成型高度与平飞高度差

(b) The differential value of the forming height and the level of flat flight of the air-helium mixed balloon



(c) 空气 - 氢气混充球体成型高度与平飞高度

(c) The forming height and the level of flat flight of the air-hydrogen mixed balloon

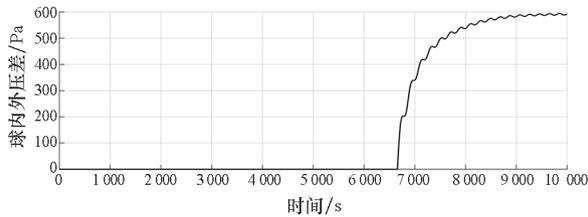


图8 球体内压差

Fig. 8 Pressure difference

外界大气与球内气体三者温度随高度的增加而减小,并且出现超冷现象^[30],符合球体上升成型规律。在成型之后,由于热辐射作用,球内气体温度和球膜温度逐渐升高并稳定在某一值。实验结果符合超压气球上升过程的热力学特性。

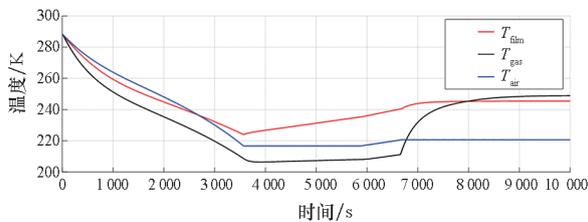


图9 球体上升过程中的温度变化

Fig. 9 Temperature change during sphere ascent

图10为球体上升过程中的高度变化。由图可知,随着时间的增加,球体高度逐渐增加并最终稳定在预定高度,符合超压气球上升过程的高度变化。

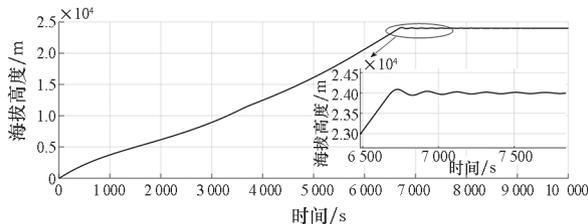


图10 球体上升过程中的高度变化

Fig. 10 Height change during sphere ascent

图11为球体上升过程中的速度变化。由图可知,在发放时,球体速度急增至5.15 m/s,随着时间的增加,球体速度呈现“V”形变化^[24],在预定高度附近,速度逐渐衰减为0 m/s,实验结果符合超压气球上升过程动力学规律。

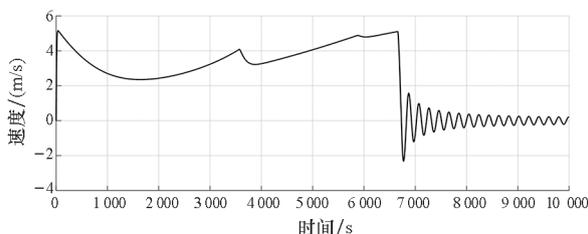


图11 球体上升过程中的速度变化

Fig. 11 Change in velocity during sphere ascent

5 结论

本文探索了通过混合充入空气与浮升气体控制浮空器平飞高度的定高方式。首先结合力学分析与理想气体状态方程建立了浮空器气体混充定高技术理论模型,为浮空器的有效定高技术提供了新的思路;然后,结合仿真程序给出常用工况下的气体质量混充值;最后,将热力学模型与动力学模型进行耦合计算,结合工程热力学中混合气体的热物性能,从热力学角度分析球体上升过程中的速度、高度、压强和温度变化,仿真结果验证了混充定高技术理论模型的可行性。总的来说,本文在以往研究基础上探索了一种新型定高方式,能够为后续研究提供相应的参考和借鉴。

参考文献 (References)

- [1] COLOZZA A, DOLCE J L. High-altitude long-endurance airships for coastal surveillance [R/OL]. [2022-06-01]. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20050080709/downloads/20050080709.pdf>.
- [2] DU H F, LYU M Y, LI J, et al. Station-keeping performance analysis for high altitude balloon with altitude control system[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 92: 644-652.
- [3] JIANG Y, LYU M Y, ZHU W Y, et al. A method of 3-D region controlling for scientific balloon long-endurance flight in the real wind[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 97: 105618.
- [4] DU H F, LYU M Y, ZHANG L C, et al. Energy management strategy design and station-keeping strategy optimization for high altitude balloon with altitude control system [J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 93: 105342.
- [5] YAJIMA N, IZUTSU N, IMAMURA T, et al. Scientific ballooning: technology and applications of exploration balloons floating in the stratosphere and the atmospheres of other planets[M]. Berlin: Springer, 2009.
- [6] 何玉贵, 黄建国, 施介宽, 等. 定高气球探测复杂地形上空的流场和大气扩散参数[J]. 兰州大学学报, 1984, 20(2): 135-143.
HE Y G, HUANG J G, SHI J K, et al. Air trajectories and Lagrangian dispersion parameters over complex terrain determined by the tetron[J]. Journal of Lanzhou University, 1984, 20(2): 135-143. (in Chinese)
- [7] GILCHRIST A. First GARP global experiment [J]. Meteorological Magazine, 1979, 128(2): 129-134.
- [8] 李卫英, 王华聪, 蔡存福. 等容气球试验研究包钢地区大气扩散规律[J]. 大气科学, 1985, 9(4): 434-441.
LI W Y, WANG H C, CAI C F. The study of atmospheric diffusion law with tetron experiment over the area of Baotou steel company[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1985, 9(4): 434-441. (in Chinese)
- [9] 朱华健, 李凡珠, 湛志鹏, 等. 乳胶气球浮力变化分析与垂直运动轨迹模拟[J]. 橡胶工业, 2021, 68(1): 17-24.
ZHU H J, LI F Z, SHEN Z P, et al. Analysis of buoyancy

- change of latex balloon and simulation of vertical trajectory[J]. *China Rubber Industry*, 2021, 68(1): 17 - 24. (in Chinese)
- [10] 俞朝阳, 李源源. 浮空器学科发展研究[R]. 北京: 中国科学技术出版社, 2016: 27 - 50, 218.
YU C Y, LI Y Y. Research on the development of aerostat discipline [R]. Beijing: China Science and Technology Press, 2016: 27 - 50, 218. (in Chinese)
- [11] SALEH S, HE W L. Ascending performance analysis for high altitude zero pressure balloon [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(8): 2158 - 2172.
- [12] FARLEY R E. Balloon ascent; 3-D simulation tool for the ascent and float of high-altitude balloons [C]//AIAA 5th Aviation, Technology, Integration and Operations Conference (ATIO), 2005.
- [13] 祝裕辰, 王生, 姜鲁华. 超压气球球体设计与仿真分析[J]. *计算机仿真*, 2011, 28(12): 32 - 37.
ZHU R C, WANG S, JIANG L H. Design and simulation of super pressure balloons [J]. *Computer Simulation*, 2011, 28(12): 32 - 37. (in Chinese)
- [14] 백중호, 정대홍, 황세영. 탐구 실험을 활용한 과학교사 논변 과제 개발과정에서 드러난 쟁점 및 수정 효과: 기체에 대한 사들의 법칙 실험 사례[J]. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 2014, 34(2): 79 - 92.
BAEK J, JEONG D H, HWANG S. Issues and effects in developing inquiry-based argumentation task for science teachers: a case of Charles' law experiment [J]. *Journal of the Korean Association for Science Education*, 2014, 34(2): 79 - 92. (in Korean)
- [15] 褚林塘. 2011 年中国浮空器大会论文集[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011.
CHU L T. Proceedings of the 2011 China aerostat conference [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [16] 杨燕初, 杜千仟, 曾丹丹, 等. 高空气球地面充氦气量计算方法分析与试验评估[J]. *国防科技大学学报*, 2021, 43(6): 1 - 7.
YANG Y C, DU Q Q, ZENG D D, et al. Analysis and experimental evaluation of helium inflation calculation methods on the ground of high-altitude balloon [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2021, 43(6): 1 - 7. (in Chinese)
- [17] JIANG Y, LYU M Y, LI J. Station-keeping control design of double balloon system based on horizontal region constraints [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 100: 105792.
- [18] 程晨, 王晓亮. 考虑蒙皮透射率的飞艇热力学模型及其热特性 [J]. *上海交通大学学报*, 2021, 55(7): 868 - 877.
CHENG C, WANG X L. Thermal dynamic model and thermal characteristics of airships considering skin transmittance [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2021, 55(7): 868 - 877. (in Chinese)
- [19] 秦利宇. 平流层浮空器上升过程的热 - 结构数值仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
QIN L Y. Numerical research on the thermal-deformation behavior of stratospheric aerostat during ascent [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2020. (in Chinese)
- [20] 程晨, 王晓亮. 平流层飞艇热敏感因素分析[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020, 54(1): 202 - 212.
CHENG C, WANG X L. Thermal sensitivity factors analysis of stratospheric airships [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2020, 54(1): 202 - 212. (in Chinese)
- [21] SCHULER T K, BOWMAN D C, IZRAELEVITZ J S, et al. Long duration flights in Venus' atmosphere using passive solar hot air balloons [J]. *Acta Astronautica*, 2022, 191: 160 - 168.
- [22] 祝裕辰, 王生, 杨燕初, 等. 超压气球上升过程温度与动力学特性仿真分析[J]. *国防科技大学学报*, 2020, 42(3): 151 - 158.
ZHU R C, WANG S, YANG Y C, et al. Simulation and analysis of thermal and dynamic properties of super-pressure balloon during ascent [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2020, 42(3): 151 - 158. (in Chinese)
- [23] LIU Y, XU Z Y, DU H F, et al. Increased utilization of real wind fields to improve station-keeping performance of stratospheric balloon [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 122: 107399.
- [24] 吕明云, 巫资春. 高空气球热力学模型与上升过程仿真分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2011, 37(5): 505 - 509.
LYU M Y, WU Z C. Thermodynamic model and numerical simulation of high altitude balloon ascending process [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 37(5): 505 - 509. (in Chinese)
- [25] CARLSON L A, HORN W J. New thermal and trajectory model for high-altitude balloons [J]. *Journal of Aircraft*, 1983, 20(6): 500 - 507.
- [26] 杨希祥. 高空科学气球下降过程航迹与热性能耦合分析[J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(4): 608 - 612.
YANG X X. Analysis of trajectory and thermal performance during descent stage of high altitude scientific balloons [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2016, 50(4): 608 - 612. (in Chinese)
- [27] 童景山. 气体混合物及液体混合物的粘(黏)度和导热系数[J]. *化学工程*, 1977(6): 66 - 84.
TONG J S. Viscosity and thermal conductivity of gas mixture and liquid mixture [J]. *Chemical Engineering (China)*, 1977(6): 66 - 84. (in Chinese)
- [28] 谭羽菲, 吴家正, 朱彤. 工程热力学[M]. 6 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
TAN Y F, WU J Z, ZHU T. Engineering thermodynamics [M]. 6th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [29] 祝裕辰. 超压气球球体设计方法研究与仿真[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
ZHU R C. Study and simulation of the design method of super-pressure balloon [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [30] YANG X X, ZHANG W H, HOU Z X. Improved thermal and vertical trajectory model for performance prediction of stratospheric balloons [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2015, 28(3): 04014075.