

应用理论

乳胶气球浮力变化分析与垂直运动轨迹模拟

朱华健^{1,2}, 李凡珠^{1*}, 谌志鹏³, 何红^{2*}, 肖迪斌³, 张立群¹

(1. 北京化工大学 有机无机复合材料国家重点实验室, 北京 100029; 2. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029;
3. 中国化工株洲橡胶研究设计院有限公司 临近空间探空气球材料与技术湖南省重点实验室, 湖南 株洲 412000)

摘要: 基于理想气体状态方程, 对乳胶气球的浮力进行计算推导, 剖析气球内外气压差和昼夜浮升气体温度差对乳胶气球浮力的影响, 并进一步探索中性浮力高度与浮重比的关系。通过建立几何模型、大气模型和动力学模型, 利用开发的算法, 结合施放试验数据, 对乳胶气球升空过程中的垂直运动轨迹进行模拟预测。结果表明, 当阻力系数为0.45时, 模拟预测结果与试验测试结果的吻合性较好。

关键词: 乳胶气球; 浮力; 垂直运动轨迹; 气压差; 温度差; 浮重比; 阻力系数; 模拟

中图分类号: TQ336.8; TQ330.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2021)01-0017-08

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2021.01.0017



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

临近空间通常是指离地面20~100 km范围的空域, 其下是传统航空器的活动空间, 其上是航天器的运行范围。临近空间浮空器是一种主要依靠浮力对重力进行平衡, 能够长时间滞空并执行任务的飞行平台, 主要包括高空气球和平流层飞艇两大类^[1]。其中高空气球不需要推进装置, 具有飞行高度大、成本低、准备时间短、使用灵活等特点。目前广泛应用的高空气球主要有零压气球、超压气球和乳胶气球^[2]。

零压气球的底部设有排气管道, 当达到最大体积后, 产生自由升力的浮升气体从排气管道排出, 气球高度随之保持稳定。但是由于浮升气体的密度随大气的昼夜温度差而变化, 零压气球内的浮升气体不可逆地排出, 导致浮力减小, 滞空时间有限。超压气球采用封闭结构, 蒙皮为高强度塑料, 升空过程中可以承受浮升气体与大气之间的压力差而使气球体积不变, 因此浮力基本稳定, 可以实现超长时间滞空, 但其成本昂贵(超过数百万美元^[2-3])。乳胶气球是以天然胶乳为主要原料, 再

配合适量助剂加工而成, 其拉断伸长率极高。乳胶气球在升空过程中不断膨胀, 直至球皮的拉伸强度超过极限, 气球破裂, 探测结束。乳胶气球具有成本低廉、施放方便、使用灵活的特点, 探测高度在30 km左右, 如中国化工株洲橡胶研究设计院有限公司2010年研制开发的750 II型气象乳胶气球的平均升空高度在29 km以上。本研究正是基于此型号乳胶气球而展开^[4]。

世界很多科研机构在研究高空气球, 如美国国家航空航天局(NASA)、法国国家空间研究中心、日本宇宙科学研究所、中国科学院光电研究院气球飞行器研究中心等。其中NASA在1989年就开始对长时滞空气球进行研究。1989—1994年, NASA进行了长时气球(LDB)^[5]工程, 旨在开发能在南极和中纬度地区飞行的长时零压气球。1994年, NASA开始了长时气球飞行器(LDBV)^[6]的研究计划, 对气球蒙皮材料和超压技术进行研究, 大大减小了昼夜浮升气体温度差导致的超压气球飞行高度变化。1997年, NASA开展超长时气球(ULDB)^[7]

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFC1506202)

作者简介: 朱华健(1997—), 男, 安徽六安人, 北京化工大学硕士研究生, 主要从事乳胶气球的动力学模型及理论研究。

***通信联系人:** (lifanzhu@mail.buct.edu.cn; hehong@mail.buct.edu.cn)

引用本文: 朱华健, 李凡珠, 谌志鹏, 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.

Citation: ZHU Huajian, LI Fanzhu, SHEN Zhipeng, et al. Analysis of Buoyancy Change of Latex Balloon and Simulation of Vertical Trajectory[J]. China Rubber Industry, 2021, 68(1): 17-24.

的研发,通过采用新型的材料和结构设计,提高了超压气球的超压承受能力和延长了飞行时间。

尽管零压气球和超压气球具有更长的滞空时间和更大的负荷能力,但是成本远远高于乳胶气球。因此仍然有研究团队在对乳胶气球进行开发和改进,目前国内的气象台站也基本采用乳胶气球作为探空仪器的载体进行高空探测。

斯坦福大学的Sushko等开发了一种乳胶气球(ValBal),通过控制ValBal向外排气和向下抛重物,使其在10~25 km范围内任意高度保持稳定,并大大延长了滞空时间。在2016年11月的试验中,其飞行时间达到79 h,从美国加州飞至加拿大的魁北克,飞行里程达到5 633 km(3 500英里)^[2]。2017年,该团队通过对ValBal的机械结构和控制系统进行改进,于12月创下了121 h的最长飞行时间记录。至此,该团队已先后5次打破乳胶气球飞行时间的世界纪录。ValBal的成本在1 000美元以下,远低于同等性能的零压气球和超压气球^[8]。而目前国内对乳胶气球的研究仍然不够。

本课题组联合临近空间探空气球材料与湖南省重点实验室对乳胶气球进行研究,基于理想气体状态方程对乳胶气球浮力进行推导计算,分析乳胶气球内外气压差以及昼夜浮升气体温度差对其浮力及运动产生的影响;通过对中性浮力的推导和计算,得到中性浮力高度与浮重比的关系,确立乳胶气球在特定高度水平漂浮的原理和条件;在合理假设的基础上,建立乳胶气球的几何模型、大气模型以及动力学模型,利用开发的算法,结合施放试验数据,对乳胶气球的垂直运动轨迹进行模拟预测,分析阻力系数对模拟结果的影响,从而为乳胶气球的进一步研究和实际施放提供参考。

1 乳胶气球浮力变化分析

对于乳胶气球浮力变化的分析,从最基本的理想气体状态方程开始:

$$PV=nRT \quad (1)$$

式中: P , V , n 和 T 分别表示气体的压力、体积、物质的量和温度; R 为理想气体常数,取值 $8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ 。

若温度恒定,则由质量守恒和理想气体状态方程可以得到气体密度(ρ)计算式:

$$\rho=\rho^0(P/P^0) \quad (2)$$

式中,上角标0表示初始状态,即 ρ^0 为气体初始密度, P^0 为初始气压。

1.1 乳胶气球内外气压差对浮力的影响

初始状态下乳胶气球内外气压差与大气压相比数量级很小,故假设初始状态下气球内外气压差为0,即 $P_{\text{gas}}^0 = P_{\text{air}}^0 = P^0$,气球浮力(F_B)表示为:

$$F_B = (\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{gas}})gV_{\text{gas}} = g\frac{V_{\text{gas}}}{P^0}(P_{\text{air}}\rho_{\text{air}}^0 - P_{\text{gas}}\rho_{\text{gas}}^0) \quad (3)$$

式中:下角标air表示气球周围大气, gas表示气球内的浮升气体; g 为重力加速度。用 ΔP 表示气球内外气压差,即 $\Delta P = P_{\text{gas}} - P_{\text{air}}$ 。式(3)可表示为:

$$F_B = gV_{\text{gas}}^0 \left[(\rho_{\text{air}}^0 - \rho_{\text{gas}}^0) - \frac{\Delta P}{P_{\text{gas}}^0} \rho_{\text{air}}^0 \right] \quad (4)$$

图1所示为试验测得的10 km海拔高度范围内乳胶气球内外气压差与海拔高度的关系曲线。从图1可知,在10 km海拔高度范围内气球内外气压差在0~150 Pa之间,这与A. Sushko等^[2]的研究中乳胶气球内外气压差保持在150 Pa范围内的要求吻合。故将气球的内外气压差设为150 Pa,并求出气球内外气压差与大气压的比值。

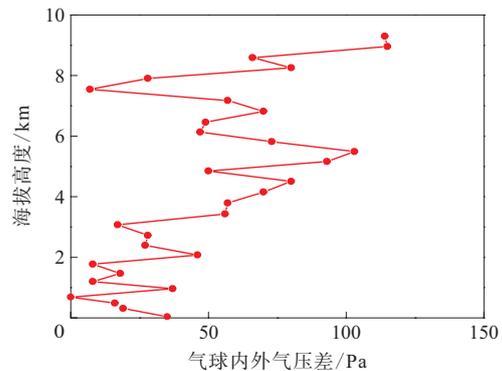


图1 乳胶气球内外气压差与海拔高度的关系曲线

Fig. 1 Relationship curve of gas pressure difference inside and outside latex balloon and altitude

图2所示为乳胶气球内外气压差、大气压以及两者的比值。

从图2可以看出,气球内外气压差在25 km高度范围内比大气压小1个数量级以上,故可忽略。则根据式(4),乳胶气球浮力几乎不受内外气压差的影响,保持恒定。

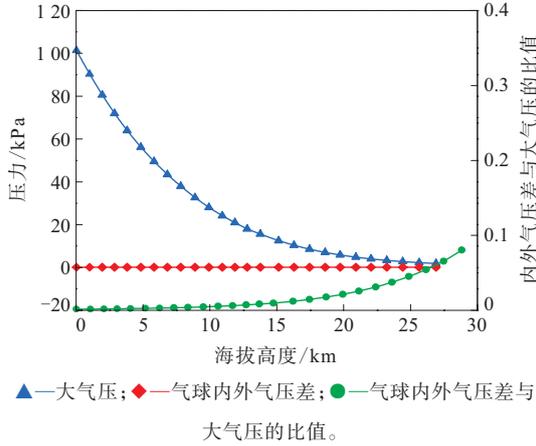


图2 乳胶气球内外气压差与大气压的比值
Fig. 2 Ratio of gas pressure difference inside and outside latex balloon to atmospheric pressure

1.2 昼夜浮升气体温度差对乳胶气球浮力的影响

温度也是影响乳胶气球运动的重要因素。在忽略气球内外气压差的条件下,结合理想气体状态方程,气球浮力可以表示为:

$$F_B = \left(\frac{M_{\text{air}} T_{\text{gas}}}{T_{\text{air}}} n_{\text{gas}} - m_{\text{gas}} \right) g \quad (5)$$

式中, M 为摩尔质量, m 为质量。若忽略浮升气体的质量,则温度变化对气球浮力的影响如下:

$$F_B - F_B^0 = \frac{T - T^0}{T^0} F_B^0 \quad (6)$$

式中, T^0 和 T 分别表示变化前后的温度, F_B^0 和 F_B 分别表示温度变化前后的气球浮力。

图3所示为乳胶气球内浮升气体(氢气)昼夜温度的测试值。由图3可知,高空中夜晚的氢气温度明显低于白天的氢气温度,这主要由白天的太阳辐射导致。由式(6)可知,氢气温度的变化将导致乳胶气球的浮力产生同等比例的变化。因此若乳胶气球在高空中漂浮,昼夜交替产生的氢气温度差会导致气球运动状态发生改变。对于普通的乳胶气球,难以实现在高空滞留过夜。因此,若要使乳胶气球实现长达数天的滞空,需要加装排气和抛下配重装置:夜晚温度降低导致浮力减小,适量抛下配重进行平衡;白天温度升高,则需排出一定量的浮升气体,以减小浮力。

1.3 乳胶气球中性浮力

中性浮力状态即气球的浮力与自身质量以及负载产生的重力达到平衡。达到此状态后,在阻

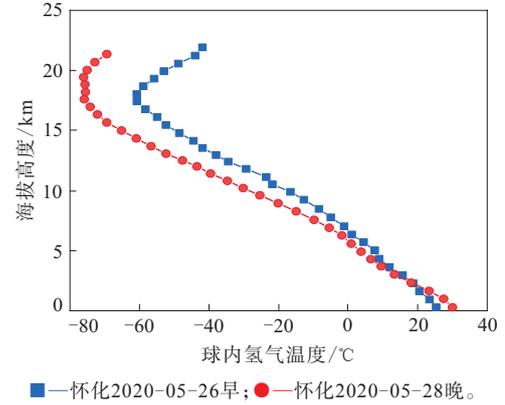


图3 乳胶气球浮升气体昼夜温度的测试值
Fig. 3 Day and night temperature test data of lifting gas of latex balloon

力作用下气球逐渐减速,最终在某一高度漂浮。浮力与重力平衡的表达式如下:

$$g V_{\text{gas}} (\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{gas}}) = (m_{\text{payload}} + m_{\text{balloon}}) g \quad (7)$$

式中, m_{balloon} 为气球质量, m_{payload} 为系统其他负载,进一步推导:

$$V_{\text{gas}} \rho_{\text{air}} = m_{\text{gas}} + m_{\text{payload}} + m_{\text{balloon}} \quad (8)$$

$$n_{\text{gas}} M_{\text{air}} \frac{T_{\text{gas}} P_{\text{air}}}{P_{\text{gas}} T_{\text{air}}} = m_{\text{gas}} + m_{\text{payload}} + m_{\text{balloon}} \quad (9)$$

$$n_{\text{gas}} M_{\text{air}} \left(1 + \frac{\Delta T}{T_{\text{air}}} \right) \left(1 - \frac{\Delta P}{P_{\text{air}} + \Delta P} \right) = m_{\text{gas}} + m_{\text{payload}} + m_{\text{balloon}} \quad (10)$$

式中, ΔT 为气球内外温度差。

假设不考虑气球内外温度差,且气球内外气压差保持恒定,则只要气球未破裂,由于大气压(P_{air})随高度增大而减小,等式两边最终必在某一高度相等,即达到中性浮力。

采用750 II型气象乳胶气球施放试验时的数据,即气球质量(m_{balloon})为0.75 kg,其他负载(m_{payload})为0.6 kg,净举力(F_L ,以质量计)为1.4 kg,即 $F_L = \frac{F_B}{g} - (m_{\text{balloon}} + m_{\text{payload}})$ 。

结合经典的美国标准大气1976年模型^[1,9],对乳胶气球达到中性浮力的具体高度进行计算。试验中采用氢气作为浮升气体。

不考虑气球内外温度差,设气球内外气压差为150 Pa。根据大气模型,利用Matlab软件编写程序,对式(10)进行求解,得到实现中性浮力的海拔高度为44 377 m。而普通乳胶气球的最大飞行高度约为30 km,在达到中性浮力前气球即发生了破裂。

将施放时净举力与系统自质量的比值定义为浮重比,用 k 表示,即 $k = \frac{F_L}{m_{\text{gas}} + m_{\text{balloon}} + m_{\text{payload}}}$ 。

当浮重比等于0时,乳胶气球在地面即达到中性浮力。取不同的浮重比,即改变净举力,得到中性浮力高度与浮重比的关系曲线,如图4所示。

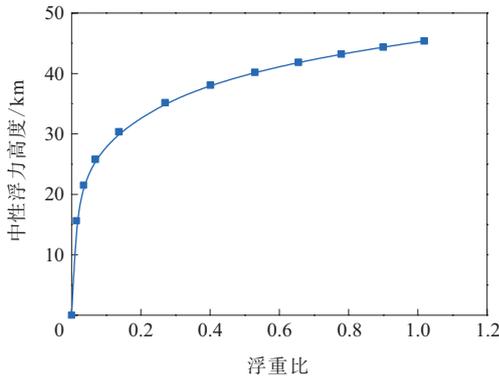


图4 乳胶气球中性浮力高度与浮重比的关系曲线

Fig. 4 Relationship curve of equilibration height and buoyancy to weight ratio of latex balloon

对于乳胶气球的中性浮力高度,图4的结果与A. Sushko等^[8]的研究结果呈现一致性。由图4即可根据实现中性浮力的目标高度得到所需的氢气充气量,如若要使乳胶气球在30 km高度处达到中性浮力,则地面的浮重比约为0.13,即需要控制 F_L 为0.19 kg。而乳胶气球若要在更大的高度实现平衡,则需要进一步提高球皮材料的拉断伸长率,保证其在达到中性浮力前不发生破裂。

通过理论推导,分析气球内外气压差和昼夜浮升气体温度差对乳胶气球浮力的影响,讨论了乳胶气球运动的特点以及难以长时间滞空和过夜的原因;再通过对中性浮力的计算,得到中性浮力高度与浮重比的关系,这对乳胶气球的施放工艺具有指导意义。以上研究均基于理论推导,只能对乳胶气球在某一特定条件下的状态进行表征,而不能直观地预测其运动轨迹。下面通过建立算法模型对乳胶气球升空过程中的垂直运动轨迹进行模拟预测。

2 算法模型的建立

为了实现对乳胶气球垂直运动轨迹进行模拟预测,在如下假设的基础上,建立了几何模型、大气模型和动力学模型。

(1) 乳胶气球的形状始终为球形。

(2) 乳胶气球内外温度和气压均相等,

$$P_{\text{gas}} = P_{\text{air}}, T_{\text{gas}} = T_{\text{air}}。$$

(3) 浮升气体采用纯氢气,且上升过程中不存在漏气。

(4) 不考虑大气湿度、风等其他因素的影响。

2.1 几何模型

根据地面处的受力分析,乳胶气球初始体积为:

$$V_{\text{gas}}^0 = \frac{m_{\text{balloon}} + m_{\text{payload}} + F_L}{(M_{\text{air}} - M_{\text{gas}})P_{\text{air}}^0} RT_{\text{air}}^0 \quad (11)$$

再根据理想气体状态方程,即可得到浮升气体物质的量,这个量在运动过程中保持不变。

$$n_{\text{gas}} = \frac{P_{\text{air}}^0 V_{\text{gas}}^0}{RT_{\text{air}}^0} \quad (12)$$

则升空过程中的气球体积为:

$$V_{\text{gas}} = \frac{n_{\text{gas}} RT_{\text{air}}}{P_{\text{air}}} \quad (13)$$

气球直径为:

$$D = \left(\frac{6V_{\text{gas}}}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

气球从上向下的垂直投影面积(A_{top})为:

$$A_{\text{top}} = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (15)$$

2.2 大气模型

本算法采用施放试验中实际测得的大气温度与大气压数据(如图5和6所示)。大气温度随海拔高度呈现出先降低后升高的趋势,最低温度低于 -70°C 。当海拔高度在0~16 km范围内,每升高1 km,大气温度下降约 5.7°C ;当海拔高度在16~27

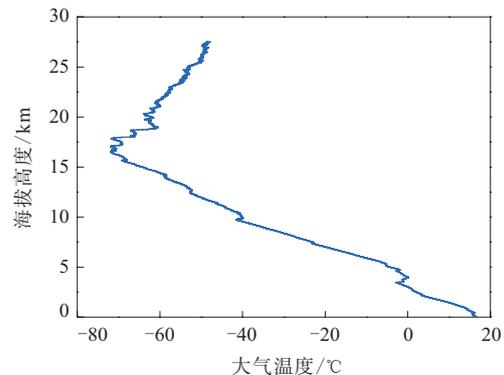


图5 大气温度与海拔高度的关系曲线

Fig. 5 Relationship curve of atmospheric temperature and altitude

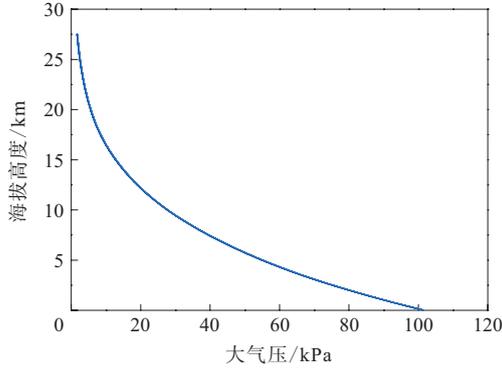


图6 大气压与海拔高度的关系曲线

Fig. 6 Relationship curve of atmospheric pressure and altitude

km范围内,每升高1 km,大气温度升高约2.2 °C。

根据理想气体状态方程,即可由大气温度与压力得到大气密度为:

$$\rho_{\text{air}} = \frac{P_{\text{air}} M_{\text{air}}}{RT_{\text{air}}} \quad (16)$$

2.3 动力学模型

高空乳胶气球的浮力由浮升气体与周围大气的密度差产生,以帮助探测系统克服重力和阻力升空并驻留。系统在垂直方向上的运动微分方程为^[10-11]:

$$\frac{dv_z}{dt} = \frac{F_B - (m_{\text{balloon}} + m_{\text{payload}})g - R}{m_{\text{virtual}}} \quad (17)$$

式中: v_z 为系统在垂直方向上的速度; R 为垂直方向上受到的阻力,用阻力系数(C_d)计算; m_{virtual} 为系统总质量,其中考虑了被气球拖动的空气质量,采用虚拟质量系数(C_{virtual})计算。

$$R = 0.5 \rho_{\text{air}} v_z^2 C_d A_{\text{top}} \quad (18)$$

$$m_{\text{virtual}} = m_{\text{balloon}} + m_{\text{payload}} + m_{\text{gas}} + C_{\text{virtual}} (\rho_{\text{air}} V_{\text{gas}}) \quad (19)$$

阻力系数为气球系统形状以及雷诺数(Re)的函数;虚拟质量系数由气球的尺寸和形状决定,取值范围为0.25~0.5。本算法参考I. V. Dosselaer^[12]的研究,取值为0.37。

3 模拟结果分析

基于上述模型,采用Matlab软件开发的算法可对乳胶气球垂直运动轨迹进行模拟预测,同样采用乳胶气球高空探测数据。

阻力系数为算法模型中重要的影响因素,存在多种取值方法。将气球形状简化为球形后,阻

力系数的数值取决于雷诺数。

$$Re = \frac{\rho_{\text{air}} v l}{\mu_{\text{air}}} \quad (20)$$

$$\mu_{\text{air}} = 1.458 \times 10^{-6} \times \frac{(T_{\text{air}})^{1.5}}{T_{\text{air}} + 110.4} \quad (21)$$

式中: v 为气球与大气的相对速度; l 为气球的特征长度,对于圆形球体即为直径 D ; μ_{air} 为大气的动力粘度^[10]。

对于阻力系数与雷诺数的关系,A. L. Morris^[13]推荐采用下式进行取值。

$$C_d = \begin{cases} 0.47 + \frac{24}{Re + 0.01} & Re \leq 4.5 \times 10^5 \\ 0.3 & Re > 4.5 \times 10^5 \end{cases} \quad (22)$$

在L. A. Carlson等^[14]建立的算法中,阻力系数根据下式取值:

$$C_d = \begin{cases} 2.400 & Re \leq 10^{-2} \\ 24/Re & 10^{-2} < Re < 10^0 \\ 24 \times Re^{-0.757} & 10^0 < Re < 10^1 \\ 16.04 \times Re^{-0.582} & 10^1 < Re < 10^2 \\ 6.025 Re^{-0.369} & 10^2 < Re < 10^3 \\ 0.47 & 10^3 < Re < 10^5 \\ 0.5 & 10^5 < Re < 2.5 \times 10^6 \\ 6.7297 \times 10^{-20} Re^{3.9495} & Re > 2.5 \times 10^6 \end{cases} \quad (23)$$

根据J. Conner等^[15]的研究,阻力系数可以用下式计算:

$$C_d = 0.72 - 2.57 \times 10^{-6} Re + 4.71 \times 10^{-12} Re^2 - 4.04 \times 10^{-18} Re^3 + 1.31 \times 10^{-24} Re^4 \quad (24)$$

除了以上根据雷诺数进行阻力系数的取值方法外,也有部分研究阻力系数取定值,如ACHAB算法^[16-17]和SINBAD算法^[18]中阻力系数取值为0.45,BADS算法^[12]中阻力系数取值为0.55。

根据雷诺数($10^2 \sim 10^6$)对阻力系数进行取值的方法如图7所示。根据A. Gallice等^[19]的研究,对于地面半径约为1 m的探空气球,在其升空过程中,雷诺数从地面的 $8 \times 10^5 \sim 9 \times 10^5$ 逐渐减小至30 km处的 $6 \times 10^4 \sim 9 \times 10^4$ 。

将动力学模型中的阻力系数分别按以上方法取值,基于本算法,得到的乳胶气球垂直运动轨迹如图8所示。

分别计算以上各阻力系数取值方法得到的结果与试验结果的相对平方误差(E),计算公式如下:

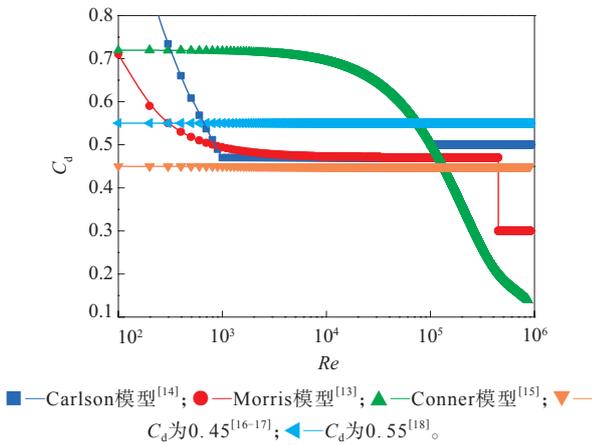


图7 根据雷诺数对阻力系数进行取值的方法

Fig.7 Methods to determine values of drag coefficient based on Reynolds number

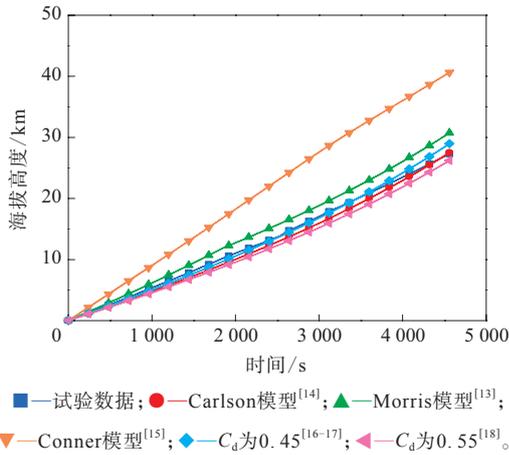


图8 不同阻力系数取值对应的乳胶气球垂直运动轨迹模拟结果

Fig.8 Simulation results of vertical trajectory of latex balloon corresponding to different drag coefficients

$$E = \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{H_{\text{simulation}}}{H_{\text{test}}} \right)^2 \quad (25)$$

式中, N 为数据点数量, $H_{\text{simulation}}$ 为模拟得到的高度, H_{test} 为试验测得的高度。

Carlson模型、Morris模型、Conner模型、阻力系数为0.45和阻力系数为0.55的 E 分别为34.80, 76.44, 1785.82, 12.35和72.15。

根据误差计算结果,当阻力系数为0.45时,模拟得到的乳胶气球垂直运动轨迹与试验数据最为吻合。从图8可以看出,与试验结果相比,模拟结果具有较高的精确度,说明建立的模型可以用于对乳胶气球垂直运动轨迹的模拟预测。当阻力

系数为0.45时,程序运行得到的乳胶气球状态(浮力、阻力、速度、加速度)变化如图9和10所示。

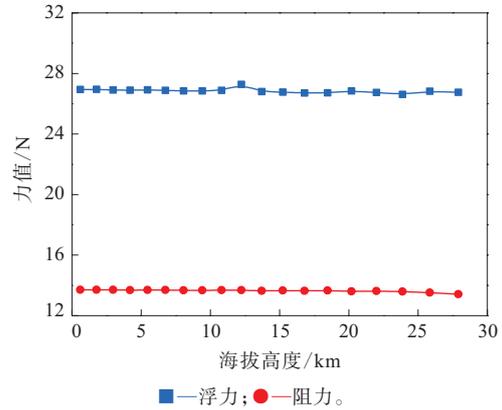


图9 乳胶气球升空过程中浮力和阻力的变化

Fig.9 Changes of buoyancy and drag force of latex balloon during lift-off process

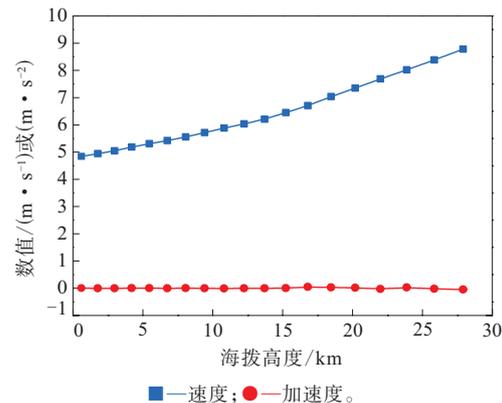


图10 乳胶气球升空过程中速度和加速度的变化

Fig.10 Changes of velocity and acceleration of latex balloon during lift-off process

对浮力、阻力和加速度的均值进行求解,并计算其方差,以衡量离散程度,计算结果如下:浮力、阻力和加速度的均值分别为26.83 N, 13.64 N和 $0.0028 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;均值方差分别为 0.0118 N^2 , 0.0351 N^2 和 $0.0052 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-4}$ 。

综上所述可以看出,乳胶气球升空过程中,其浮力和阻力基本保持不变,与1.1节中理论推导的结果一致。乳胶气球升空过程中的加速度同样几乎恒定,速度随高度增大而增大。

4 结论

(1) 在25 km高度范围内,当温度恒定,乳胶气

球内外气压差对浮力的影响可以忽略,浮力几乎恒定。

(2) 由昼夜浮升气体温度差导致乳胶气球浮力变化,这是普通乳胶气球难以在高空滞留过夜的原因,可以通过控制气球排气和抛重物延长滞空时间。

(3) 乳胶气球在未破裂的前提下,必定在某一高度达到中性浮力,从而实现水平漂浮。可以通过控制乳胶气球净举力与系统总质量的比值来控制这一高度。

(4) 将乳胶气球形状简化为球形,忽略气球内外温度差和气压差,在不考虑气体纯度、漏气、大气湿度、风速等因素的前提下建立的算法模型,可以较好地模拟预测乳胶气球的垂直运动轨迹,且阻力系数为 0.45 时得到的模拟结果精确度最高。乳胶气球升空过程中的浮力、阻力和加速度几乎不变,速度增大。

(5) 通过理论推导分析了乳胶气球浮力的变化,为深入探讨乳胶气球运动的特点提供了借鉴。通过建立算法模型,对乳胶气球升空过程中的垂直轨迹进行了模拟,可以直观地预测其运动状态,从而指导实际施放工艺。但是本研究在理论推导和模型建立过程中进行了一系列假设和简化,包括乳胶气球形状、气球内外气压差和温度差、大气中其他要素的影响等,这些因素对试验结果的影响仍然有待分析和研究。

参考文献:

- [1] 李小建. 临近空间浮空器热-结构耦合数值模拟研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013: 10-11.
- [2] Sushko A, Tedjarati A, Creus-Costa J, et al. Low Cost, High Endurance, Altitude-controlled Latex Balloon for Near-space Research (ValBal) [C]. 2017 IEEE Aerospace Conference. Piscataway, New Jersey: IEEE, 2017: 1-9.
- [3] 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]. New York: Springer Science & Business Media, 2009: 9-12.
- [4] 中国化工株洲橡胶研究设计院有限公司. 气象气球[EB/OL]. http://www.chemchina.com.cn/xjzzy/cpyfw/ppysb/qxqq/B27030201web_1.htm, 2020-06-01.
- [5] Cathey H M. Development of the NASA Long Duration Balloon Vehicle[J]. Advances in Space Research, 2000, 26(9): 1345-1348.
- [6] Orr G. The Long Duration Balloon Vehicle (LDBV) Fight System Development[C]. 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 1996: 1-11.
- [7] Smith I S. Overview of the Ultra Long Duration Balloon Project[J]. Advances in Space Research, 2002, 30(5): 1205-1213.
- [8] Sushko A, Tedjarati A, Creus-Costa J, et al. Advancements in Low-cost, Long Endurance, Altitude Controlled Latex Balloons (ValBal) [C]. 2018 IEEE Aerospace Conference. Piscataway, New Jersey: IEEE, 2018: 1-10.
- [9] Schlatter T W. Atmospheric Composition and Vertical Structure[J]. Environmental Impact and Manufacturing, 2009(6): 1-54.
- [10] Farley R E. BalloonAscent: 3-D Simulation Tool for the Ascent and Float of High-altitude Balloons[C]. AIAA 5th ATIO and 16th Lighter-Than-Air Sys Technology and Balloon Systems Conferences. Reston, Virginia: AIAA, 2005: 1-15.
- [11] Saleh S, Weiliang H E. New Design Simulation for a High-altitude Dual-balloon System to Extend Lifetime and Improve Floating Performance[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(5): 1109-1118.
- [12] Dosselaer I V. Buoyant Aerobot Design and Simulation Study: BADS[D]. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2014: 46-54.
- [13] Morris A L. Scientific Ballooning Handbook[M]. Boulder, Colorado: NCAR Technical Note, 1975: 18-23.
- [14] Carlson L A, Horn W J. A Unified Thermal and Vertical Trajectory Model for the Prediction of High Altitude Balloon Performance[D]. College Station, Texas: Texas A & M University, 1981: 16-20.
- [15] Conner J, Arena A. Near Space Balloon Performance Predictions[C]. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Reston, Virginia: AIAA, 2010: 1-8.
- [16] Palumbo R, Russo M, Filippone E, et al. ACHAB: Analysis Code for High-altitude Balloons[C]. AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2007: 1-11.
- [17] Palumbo R. A Simulation Model for Trajectory Forecast, Performance Analysis and Aerospace Mission Planning with High Altitude Zero Pressure Balloons[D]. Naples, Italy: Università degli Studi di Napoli Federico II, 2007: 21-24.
- [18] Garde G. Comparison of Two Balloon Flight Simulation Programs[C]. AIAA 5th Aviation, Technology, Integration, and Operations Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2005: 1-19.
- [19] Gallice A, Wienhold F G, Hoyle C R, et al. Modeling the Ascent of Sounding Balloons: Derivation of the Vertical Air Motion[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2011, 10(4): 2235-2253.

收稿日期: 2020-08-01

Analysis of Buoyancy Change of Latex Balloon and Simulation of Vertical Trajectory

ZHU Huajian¹, LI Fanzhu¹, SHEN Zhipeng², HE Hong¹, XIAO Di'e², ZHANG Liqun¹

(1. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. Hunan Key Laboratory of Near-space Meteorological Balloon Materials and Technology, Zhuzhou Rubber Research & Design Institute Co., Ltd of ChemChina, Zhuzhou 412000, China)

Abstract: Based on the ideal gas equation of state, the buoyancy of the latex balloon was calculated and deduced, and the effects of the air pressure difference inside and outside latex balloon and the temperature fluctuation of the lift gas between day and night on the buoyancy of the latex balloon were analyzed. The relationship between the equilibration height and buoyancy to weight ratio was also studied. By establishing geometric model, atmospheric model and dynamic model, using the developed algorithm and release experimental test data, the vertical trajectory of the latex balloon during the lift-off process was simulated and predicted. It was found that, when the drag coefficient was 0.45, the simulated prediction results were in good agreement with the experimental test results.

Key words: latex balloon; buoyancy; vertical trajectory; pressure difference; temperature difference; buoyancy to weight ratio; drag coefficient; simulation

装配曙光院国产航空轮胎的ARJ21飞机首飞成功 2020年11月23日11时50分,在山东东营胜利机场,伴随着ARJ21-700飞机有力的轰鸣声由远及近,ARJ21飞机平稳着陆,装配中国化工曙光橡胶工业研究设计院有限公司(简称曙光院)“三环”牌航空轮胎的ARJ21飞机历经4天试飞,各科目测试圆满成功。装配国产航空轮胎的ARJ21飞机首飞成功,标志着其国产化进程向前迈进了新的一步。

ARJ21飞机是我国首次按照国际标准研制的具有自主知识产权的中短程新型涡扇支线商用飞机,也是我国第1次完全自主设计并制造的支线飞机,是中国民航业“两干两支”战略的重要组成部分。目前,中国商用飞机有限责任公司已向客户交付ARJ21飞机39架,包括国航、南航等在内的ARJ21飞机航线运行客户已达7家,累计航线86条,通航城市64座。

航空轮胎是影响民航客机飞行安全的关键部件,其设计制造技术位于轮胎行业的金字塔顶端,全球只有屈指可数的企业可以研制并制造航空轮

胎。在此之前,ARJ21飞机一直装配国外航空轮胎,价格昂贵,受制于人。2020年9月16日,中国科学院白春礼院长将航空轮胎列入美国“卡脖子”任务清单。曙光院研发团队历经3年攻关,自主成功研制可在额定速度为 $378 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、超速着陆速度为 $418 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,以及多种苛刻工况下安全使用的高性能航空轮胎,其产品性能超越国外同类型航空轮胎,减小了飞机更换轮胎的频率,降低了航空公司的运营成本,成功突破ARJ21飞机轮胎“卡脖子”难题。

曙光院是上市公司中国化工昊华科技旗下子公司,50年来在航空轮胎设计、制造和检测方面积淀了雄厚的研发实力,掌握国内领先、国际一流的航空轮胎核心技术,擎起了“航空轮胎国家队”的旗帜,先后成功研制出多种型号民航航空轮胎。

“随着航空轮胎国产化的持续推进,未来将有越来越多的飞机装备国产高性能‘三环’航空轮胎翱翔蓝天!”在装配曙光院国产航空轮胎的ARJ21飞机首飞现场,曙光院院长王继泽如是说。

(中国化工曙光橡胶工业研究设计院有限公司 高香丽)