

超压气球上升过程温度与动力学特性仿真分析*

祝榕辰^{1,2}, 王生^{1,2}, 杨燕初^{1,2}, 刘强², 才晶晶²

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院光电研究院, 北京 100094)

摘要:针对带加强筋的超压气球,分析上升过程热环境及受力状态,建立热力学与动力学模型并分析其耦合关系。基于 MATLAB 开发仿真程序,对超压气球进行仿真分析。分析了气球上升过程中高度、速度、温度变化特性,数据表明上升过程中的热力学环境和动力学特性都对球内气体温度有重要影响,气球上升速度和球内气体温度相互耦合并与自由浮力系数存在相关性。飞行试验实测数据验证了仿真结果的准确性。理论分析结果和仿真模型可为后续超压气球设计和飞行试验提供指导。

关键词:超压气球;热力学模型;动力学模型;仿真程序;飞行试验

中图分类号:V273 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2020)03-151-08

Simulation and analysis of thermal and dynamic properties of super-pressure balloon during ascent

ZHU Rongchen^{1,2}, WANG Sheng^{1,2}, YANG Yanchu^{1,2}, LIU Qiang², CAI Jingjing²

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Academy of Opti-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: The thermal and dynamic properties of a pumpkin-shape super-pressure balloon with load tendons during ascent were studied. Thermal environment and forces were analyzed, and the thermal and dynamic models were proposed, and a simulation program was developed by using MATLAB. A simulation of a super-pressure balloon flight was conducted, the flight altitude, the ascent rate and temperature were analyzed during ascent. The results suggest that the thermal environment as well as the dynamic properties exert a great influence on the temperature of the Helium inside the balloon, the ascent rate and Helium temperature interact with each other, and both are relevant to the free lift ratio. The comparison between the simulation results and flight data reveal that the two sets of data match well. The theoretical analysis and simulation model are helpful in the super-pressure balloon design and mission planning.

Keywords: super-pressure balloon; thermal model; dynamic model; simulation program; flight test

超压气球是一种能够承受较高压差的高空气球,其球体完全封闭,飞行过程中温度波动造成的压差均由球体承担,具有长航时飞行能力。目前的研究热点是带加强筋的超压气球,其采用轻质聚乙烯薄膜,并利用加强筋结构来降低球膜应力。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)采用这种超压气球完成了多次飞行,在获得接近零压气球载重和升限能力的同时又不过多增加球体质量^[1-2]。

超压气球上升过程中的温度与动力学特性影响气球的飞行安全。气球的最低温度会影响材料强度;气球的上升速度则直接影响气球转入平飞过程中的内外压差增加速率。上升过程的温度与动力学特性还将决定气球进入平飞时的初始温

度、压差,影响长航时平飞过程。

国内外针对高空气球的温度特性开展过大量研究,Carlson 和 Horn 针对气球上升建立了热力学模型^[3];Farley 对气球飞行中热力学环境及参数进行了详细的推导和仿真分析^[4];杨希祥等^[5-7]、吕明云等^[8]、戴秋敏等^[9]都针对气球飞行过程中的热力学问题进行了分析研究。目前,专门针对超压气球的研究偏少,而且多为仿真分析,很少有试验验证。超压气球外形区别于零压气球,而且球体完全封闭,在热力学和动力学方面与高空气球存在一定的区别,需有针对性地开展研究。

本文参考高空气球的相关分析过程,针对带加强筋超压气球开展辐射环境及受力状态分析,

* 收稿日期:2018-12-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51606197);中国科学院战略性先导专项资助项目(XDA17020201)

作者简介:祝榕辰(1985—),男,山东烟台人,博士研究生,E-mail:zhurongchen@aoe.ac.cn;

王生(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师,E-mail:shengwang@aoe.ac.cn

建立热力学和动力学模型,分析其耦合关系。为便于工程仿真应用,利用 MATLAB 编写仿真程序,实现仿真结果快速输出,为实际飞行参数的选择提供参考。为验证模型的准确性,将仿真结果与实测结果进行对比分析。

1 热力学模型

全面分析超压气球上升过程中的热环境,建立热力学模型。文献[4]中给出了气球飞行中的部分辐射源,但将球内气体视为完全透明,而文献[3]中观察到球膜和球内气体温度存在差异,因此需要考虑球内气体对辐射的吸收。文献[4]只考虑了云层对太阳辐射、地面红外辐射等的影响,而气球上升过程中有较长时间位于云层高度以下或位于云层之中,因此需全面考虑所有外部辐射量透过云层到达球体的情况。经补充完整的超压气球上升段辐射环境如图 1 所示。

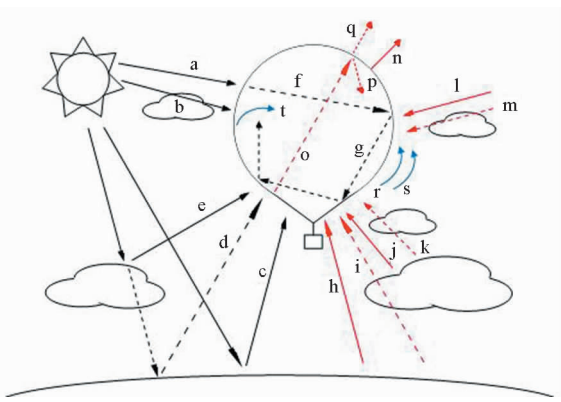


图 1 超压气球上升段的辐射环境

Fig. 1 Radiation environment of super-pressure balloon during ascent

图 1 中各符号对应的辐射源如下:a 为直接照射到球体表面的太阳光;b 为穿过云层后照射到球体表面的太阳光;c 为直接照射于地面后反射的太阳光;d 为穿过云层照射于地面后反射的太阳光;e 为直接照射于云层后反射的太阳光;f 为穿过球膜后进入球体内部的太阳光;g 为穿过球膜后经球体内表面反射的太阳光;h 为直接到达球体的地表辐射;i 为穿过云层后到达球体的地表辐射;j 为直接到达球体的云层辐射;k 为穿过云层后到达球体的云层辐射;l 为直接到达球体的天空背景辐射;m 为穿过云层后到达球体的天空背景辐射;n 为球膜外表面发射的红外辐射;o 为球膜内表面发射到球体内部的红外辐射;p 为经球膜内表面反射的球膜内表面发射的红外辐射;q 为穿过球膜逸出的球膜内表面发射的红外辐射;r 为球膜与外部空气的强迫对流;s 为球膜

与外部空气的自然对流;t 球膜与球内气体的自然对流。

1.1 直接太阳辐射

设球体表面积为 S ,球膜质量为 M_{film} ,球内气体质量为 M_{gas} 。球膜对太阳光的吸收率为 α_{film} ,透射率为 τ_{film} ,反射率为 r_{film} ,则全面考虑球体吸收的直接太阳辐射、透过球膜进入球体后再次被球膜吸收的太阳辐射以及经球膜内表面多次反射后被吸收的太阳辐射,可得到球膜和球内气体吸收的直接太阳辐射量分别为:

$$Q_{\text{Sun}} = \alpha_{\text{film}} \cdot S_{\text{projected}} \cdot q_{\text{Sun}} \cdot [1 + \tau_{\text{film}} \cdot (1 + r_{\text{effective}})] \quad (1)$$

$$Q_{\text{SunGas}} = \alpha_{\text{gas}} \cdot S_{\text{projected}} \cdot q_{\text{Sun}} \cdot \tau_{\text{film}} \cdot (1 + r_{\text{effective}}) \quad (2)$$

式中, q_{Sun} 是到达球体处的太阳辐射通量,与云层高度和遮盖率有关。计算中以云层覆盖率来模拟云层厚度和分布情况。多次反射的有效反射率

$$r_{\text{effective}} = \frac{r}{1 - r}, r \text{ 为球膜对太阳光的反射率。}$$

$S_{\text{projected}}$ 是气球的光投影面积,文献[4]中给出了计算方法。

1.2 经反射后到达球体的太阳辐射

球膜和球内气体吸收的反射太阳辐射量分别为:

$$Q_{\text{rFilm}} = \alpha_{\text{film}} \cdot S \cdot q_{\text{rSun}} \cdot VF \cdot [1 + \tau_{\text{film}} \cdot (1 + r_{\text{effective}})] \quad (3)$$

$$Q_{\text{rGas}} = \alpha_{\text{gas}} \cdot S \cdot q_{\text{rSun}} \cdot VF \cdot \tau_{\text{film}} \cdot (1 + r_{\text{effective}}) \quad (4)$$

式中, VF 是球体表面有效接收散射辐射角系数^[4], q_{rSun} 是到达球体的反射太阳辐射通量^[4]。

1.3 地表红外辐射

球膜对红外辐射的吸收率为 α_{IRfilm} ,透射率为 τ_{IRfilm} ,反射率为 r_{IR} ,有效红外反射率 $r_{\text{IReffective}} = \frac{r_{\text{IR}}}{1 - r_{\text{IR}}}$ 。球膜和球内气体吸收的地表红外辐射量分别为:

$$Q_{\text{IRgroundFilm}} = \alpha_{\text{IRfilm}} \cdot S \cdot q_{\text{IRgroundH}} \cdot VF \cdot [1 + \tau_{\text{IRfilm}} \cdot (1 + r_{\text{IReffective}})] \quad (5)$$

$$Q_{\text{IRgroundGas}} = \alpha_{\text{IRgas}} \cdot S \cdot q_{\text{IRgroundH}} \cdot VF \cdot \tau_{\text{IRfilm}} \cdot (1 + r_{\text{IReffective}}) \quad (6)$$

式中, $q_{\text{IRgroundH}}$ 是地面红外辐射通量 q_{IRground} 经过云层修正后到达球体处的通量^[4], α_{IRgas} 为球内气体对红外辐射的吸收率。

$$q_{\text{IRground}} = \varepsilon_{\text{ground}} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{ground}})^4 \quad (7)$$

其中, σ 为斯特藩常数, $\varepsilon_{\text{ground}}$ 为地面的红外发射率, T_{ground} 为地表温度。

1.4 云层红外辐射

球膜和球内气体吸收的云层红外辐射量分别为:

$$Q_{\text{IRcloudFilm}} = \alpha_{\text{IRfilm}} \cdot S \cdot q_{\text{IRcloudH}} \cdot VF \cdot [1 + \tau_{\text{IRfilm}} \cdot (1 + r_{\text{IRreflective}})] \quad (8)$$

$$Q_{\text{IRcloudGas}} = \alpha_{\text{IRgas}} \cdot S \cdot q_{\text{IRcloudH}} \cdot VF \cdot \tau_{\text{IRfilm}} \cdot (1 + r_{\text{IRreflective}}) \quad (9)$$

式中, q_{IRcloudH} 是经过云层修正后到达球体的全部云层红外辐射通量。

1.5 天空背景辐射

球膜和球内气体吸收的天空背景红外辐射量分别为:

$$Q_{\text{IRskyFilm}} = \alpha_{\text{IRfilm}} \cdot S \cdot q_{\text{IRskyH}} \cdot (1 - VF) \cdot [1 + \tau_{\text{IRfilm}} \cdot (1 + r_{\text{IRreflective}})] \quad (10)$$

$$Q_{\text{IRskyGas}} = \alpha_{\text{IRgas}} \cdot S \cdot q_{\text{IRskyH}} \cdot (1 - VF) \cdot \tau_{\text{IRfilm}} \cdot (1 + r_{\text{IRreflective}}) \quad (11)$$

式中, q_{IRskyH} 是经过云层修正后到达球体的天空背景红外辐射通量。

1.6 球膜自身的红外辐射

球膜和球内气体吸收的球膜自身红外辐射量分别为:

$$Q_{\text{IRfilm}} = \alpha_{\text{IRfilm}} \cdot S \cdot q_{\text{IRfilm}} \cdot (1 + r_{\text{IRreflective}}) \quad (12)$$

$$Q_{\text{IRfilmGas}} = \alpha_{\text{IRgas}} \cdot S \cdot q_{\text{IRfilm}} \cdot (1 + r_{\text{IRreflective}}) \quad (13)$$

式中, 球膜发射的红外辐射通量为:

$$q_{\text{IRfilm}} = \varepsilon_{\text{film}} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{film}})^4 \quad (14)$$

式中, T_{film} 为球膜温度。

球膜内外表面发射的红外辐射量为:

$$Q_{\text{IRout}} = 2 \cdot S \cdot q_{\text{IRfilm}} \quad (15)$$

1.7 外部对流换热

外部对流使球膜吸收的热量为:

$$Q_{\text{ConvExt}} = HC_{\text{external}} \cdot S \cdot (T_a - T_{\text{film}}) \quad (16)$$

式中: T_a 为气球所在高度大气温度; HC_{external} 是外部对流传递系数, 其数值等于自然对流和强迫对流传递系数中较大的一个。对于上升段的气球, 强迫对流占主导。强迫对流传递系数计算公式如下^[4]:

$$HC_{\text{forced}} = \frac{k_a}{D} \cdot (2 + 0.41 \cdot Re^{0.55}) \quad (17)$$

式中: k_a 为空气传导系数, 推导公式见文献[10]; D 为当前时刻球体的最大直径; Re 为雷诺数, 与气球和空气相对速度有关, 是气球热力学与动力学模型的重要耦合参数。

1.8 内部对流换热

内部热对流主要是自然对流, 热量为^[4]:

$$Q_{\text{ConvInt}} = HC_{\text{internal}} \cdot S \cdot (T_{\text{film}} - T_{\text{gas}}) \quad (18)$$

式中, 球体内部热传递系数的计算公式如下^[4]:

$$HC_{\text{internal}} = 0.13 \cdot k_{\text{gas}} \cdot \left[\frac{(\rho_{\text{gas}})^2 \cdot g \cdot |T_{\text{film}} - T_a| \cdot Pr_{\text{gas}}}{T_{\text{gas}} \cdot (\mu_{\text{air}})^2} \right]^{1/3} \quad (19)$$

式中: k_{gas} 为氦气传导系数; Pr_{gas} 是氦气的普朗特数, 推导公式见文献[4]。

1.9 球体温度变化微分方程

假设超压气球上升段无浮升气体排出, 球内浮升气体温度变化微分方程如下:

$$\frac{dT_{\text{gas}}}{dt} = \frac{1}{c_v \cdot M_{\text{gas}}} (Q_{\text{SunGas}} + Q_{\text{rGas}} + Q_{\text{IRgroundGas}} + Q_{\text{IRcloudGas}} + Q_{\text{IRskyGas}} + Q_{\text{IRfilmGas}} + Q_{\text{ConvInt}}) + (\gamma - 1) \cdot T_{\text{gas}} \cdot \left(\frac{dV}{dt} \cdot \frac{1}{V} \right) \quad (20)$$

式中: M_{gas} 是球内浮升气体的质量; c_v 是球内气体比热容; γ 是球内气体定压热容与定容热容的比值; V 是上升过程中的球体体积, 随时间变化。

球膜温度变化微分方程如下^[4]:

$$\frac{dT_{\text{film}}}{dt} = \frac{1}{c_f \cdot M_{\text{film}}} (Q_{\text{Sun}} + Q_{\text{rFilm}} + Q_{\text{IRgroundFilm}} + Q_{\text{IRcloudFilm}} + Q_{\text{IRskyFilm}} + Q_{\text{IRfilm}} + Q_{\text{ConvExt}} - Q_{\text{ConvInt}} - Q_{\text{IRout}}) \quad (21)$$

式中, M_{film} 是球膜质量, c_f 是球膜材料比热容。

2 动力学模型

以起飞点 O 为原点建立坐标系, 当地东向为 x 方向, 南向为 y 方向, 垂直向上为 z 方向。

设气球运动速度为 (v_x, v_y, v_z) , 大气运动速度为 (v_{wx}, v_{wy}, v_{wz}) , 气球与大气相对速度为 (v_{rx}, v_{ry}, v_{rz}) , 均定义与坐标轴方向一致为正。

$$\begin{cases} v_{rx} = v_x - v_{wx} \\ v_{ry} = v_y - v_{wy} \\ v_{rz} = v_z - v_{wz} \end{cases} \quad (22)$$

对上升过程中的气球系统受力分析如图2所示。

图中各物理量定义如下: F_B 是总浮力, 作用点为浮心 O_1 , 与球体当前外形下的体心重合, 方向垂直向上:

$$F_B = \rho_a \cdot g \cdot V \quad (23)$$

M_S 是飞行系统总质量, 定义如下:

$$M_S = M_L + M_g \quad (24)$$

式中: M_L 为气球系统起飞质量, 是工程上常用的参数, 定义为飞行系统除球内气体外的全部质量;

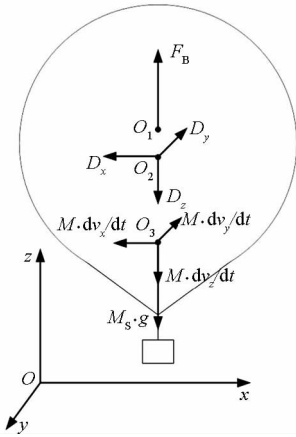


图 2 上升过程中的气球系统受力分析

Fig. 2 Force analysis of balloon system during ascent

M_g 为球内气体质量。

M 为气球的等效质量,定义如下:

$$M = M_s + M_v \quad (25)$$

式中, M_v 为球体的虚拟质量,是考虑到黏性阻力作用下球体周围部分空气会随球体一起运动,其计算公式如下:

$$M_v = C_m \cdot \rho_a \cdot V \quad (26)$$

式中: C_m 为虚拟质量系数,根据文献[4], C_m 可取 0.25 ~ 0.5; ρ_a 为气球所在高度的大气密度。

D_x 、 D_y 、 D_z 分别为阻力在三个方向的分量。阻力作用点为球体当前外形下的压心 O_2 ,方向与合速度方向相反。

$M \frac{dv_x}{dt}$ 、 $M \frac{dv_y}{dt}$ 、 $M \frac{dv_z}{dt}$ 分别为惯性力在三个方向的分量。惯性力作用点为整个球体系统的质心 O_3 ,方向与合加速度相反。

假设气球上升过程中水平方向与空气相对速度为 0,且空气水平速度变化速率为 0,则 D_x 、 D_y 、 $M \frac{dv_x}{dt}$ 、 $M \frac{dv_y}{dt}$ 均为 0,剩余各力共线,不存在力矩。

根据达朗贝尔原理,建立球体上升过程中垂直方向动力学方程如下:

$$F_B - M_s g - D_z - M \frac{dv_z}{dt} = 0 \quad (27)$$

式中,垂直方向的阻力 D_z 计算公式如下:

$$D_z = 0.5 \cdot \rho_a \cdot v_{rz}^2 \cdot \frac{v_{rz}}{|v_{rz}|} \cdot C_{Dz} \cdot S_s \quad (28)$$

式中: C_{Dz} 为垂直方向的阻力系数,随来流方向和球体外形变化; S_s 为气球水平投影面积。式(27)和式(28)中的变量除质量以外,均随时间变化。

根据动力学方程,可得到气球与大气相对速度,该参数影响热力学模型中的外部对流换热。

热力学模型和动力学模型都涉及气球上升过程中的体积 V ,其与地面充气量 V_0 有关,随高度变化。超压气球在球体完全胀满后不自动排出气体,增加的压差由球体承受。假设球体压差增加时体积不变,则球体胀满后体积不再增加。球体胀满前体积的计算公式如下:

$$V = \frac{P_{g0}}{P_g} \frac{T_g}{T_{g0}} V_0 \quad (29)$$

式中, P_g 为球内气体压强, P_{g0} 和 T_{g0} 分别为起飞时刻球内气体压强和温度。上升过程球体胀满前内外压差始终为 0,即 $P_g = P_a$,式(29)变为:

$$V = \frac{P_{a0}}{P_a} \frac{T_g}{T_{g0}} V_0 \quad (30)$$

式中, P_{a0} 为发放地点大气压。可以看出,球体体积与球内气体温度相关。球体体积又影响浮力和虚拟质量,因此是热力学模型与动力学模型相互耦合的一个重要参数。

地面充气量 V_0 与自由浮力系数 f 有关。自由浮力系数是工程上常用的参数,定义为充入浮升气体的净浮力相对起飞质量的百分比,即:

$$f = \frac{\rho_{a0} \cdot g \cdot V_0 - M_s \cdot g}{M_L \cdot g} \quad (31)$$

式中, ρ_{a0} 为发放地点大气密度。根据该公式,可得到自由浮力系数与地面充气量的关系。

3 仿真分析

按照热力学和动力学模型,基于 MATLAB 软件编写超压气球温度与动力学仿真计算程序,并以直径 27 m 飞行试验气球为例,开展仿真分析。气球主要参数见表 1。

表 1 直径 27 m 气球主要参数

Tab. 1 Main parameters of the 27 m balloon

参数	数值
球体体积/m ³	7240
最大直径/m	27
起飞质量/kg	280
设计平飞高度/km	24

针对上升速度和球体最低温度开展仿真分析。两个参数都是影响气球飞行安全的重要参数,前者影响气球的飘移距离和进入平飞时压差的增加速率,后者影响材料的强度。

控制超压气球上升速度的一个重要手段就是设定合适的自由浮力系数。下面分析自由浮力系数对升速和球体最低温度的影响。按

直径 27 m 气球,假定飞行环境为平均环境,飞行时间为 9 月 1 日,起飞地点为北纬 40°,起飞时刻为早上 6:00。在仿真计算程序中输入球体参数、环境参数等,设定计算步长为 1 s,总时长为 2 h,根据气球起飞质量,设定自由浮力系数分别为 4%、8%、12%、16%、20%,计算对应的升速、球内气体温度及其与大气温度差值的变化情况。

计算时忽略大气的垂直运动,即 $v_{wz} = 0$ 。垂直方向阻力系数 C_{Dz} 随球体外形变化,为便于计算,这里简化处理,假定阻力系数不变,采用文献[4]将上升过程中的球体简化为球形与倒圆锥的组合外形得到的数值为 0.8。后续可通过气动分析得到不同外形的阻力系数,使仿真结果更精确。按上述假设和简化处理,仿真结果见图 3、图 4 及表 2。

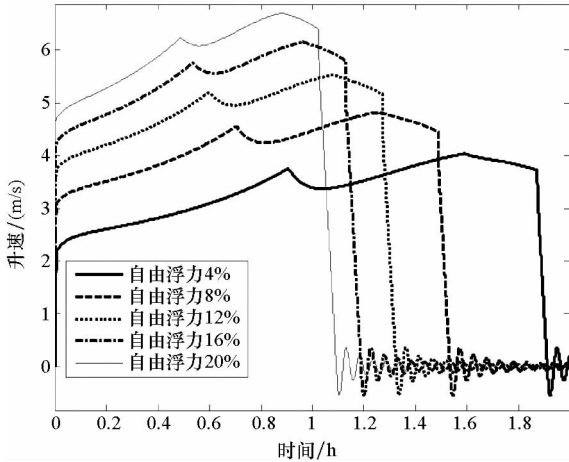


图 3 不同自由浮力对应的气球上升速度仿真结果曲线
Fig. 3 Simulation of the vertical velocity of the balloon corresponding to different free lift ratio

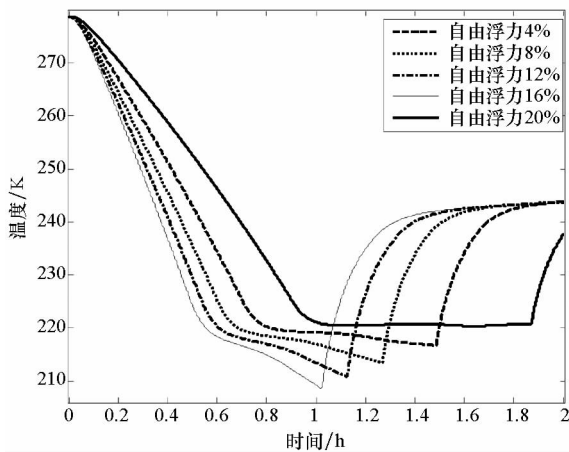


图 4 不同自由浮力对应的球内气体温度仿真结果曲线
Fig. 4 Simulation of the temperature of the lift gas corresponding to different free lift ratio

表 2 不同自由浮力对应的初始升速及球内气体最低温度

Tab.2 Initial velocity and lowest temperature of the lift gas corresponding to different free lift ratio

自由浮力/ %	初始升速/ (m/s)	平均升速/ (m/s)	最大升速/ (m/s)	球内气体 最低温度/ K
4	2.2	3.5	4.0	221
8	3.1	4.4	4.8	217
12	3.7	5.1	5.5	213
16	4.2	5.6	6.2	211
20	4.7	6.1	6.7	209

根据仿真结果可以看出,自由浮力越大,对应的升速越大,球内气体温度越低且低温区持续时间越长。经分析,主要是球体体积膨胀以及强迫对流的影响。

从升速仿真结果可以看出,气球飞行过程中初始升速约是平均升速的 60% ~ 80%,最大升速约是平均升速的 107% ~ 115%。这一结果可为自由浮力的选取及升速变化的判断提供参考。

根据期望升速要求,综合考虑球内气体最低温度情况,选择自由浮力系数为 8%,气球上升至平飞高度用时 92 min,平均升速 4.4 m/s。

在仿真计算程序中输入自由浮力系数 8%,其余设定和参数不变,计算气球高度、升速、球内气体温度、球膜温度的变化情况,仿真结果见图 5 ~ 7。

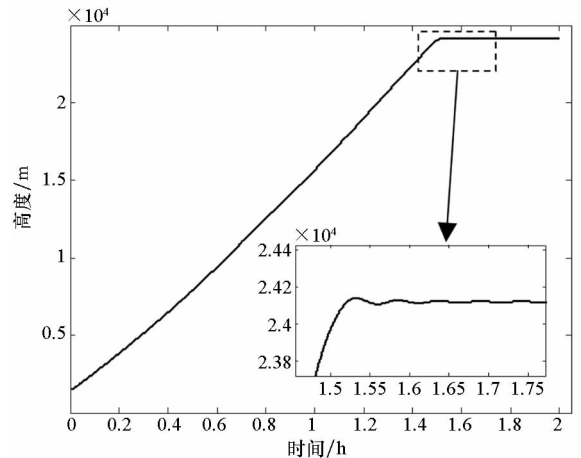


图 5 气球飞行高度仿真结果曲线
Fig. 5 Simulation of the altitude of the balloon

根据仿真结果可以看到,气球进入平飞状态时高度存在波动,但在阻力和惯性力的作用下逐渐趋于平衡,并稳定在 24.12 km。

气球升空后升速快速增加至 3.1 m/s,之后

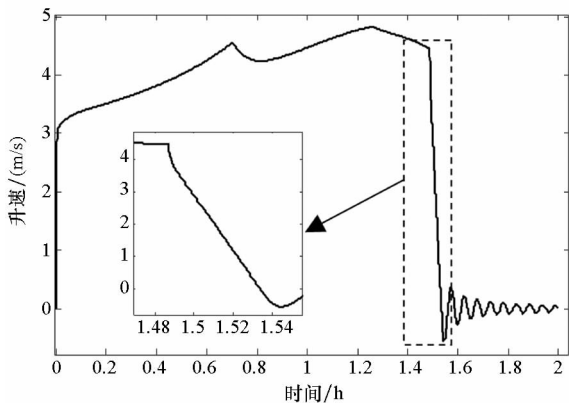


图 6 气球上升速度仿真结果曲线

Fig. 6 Simulation of the vertical velocity of the balloon

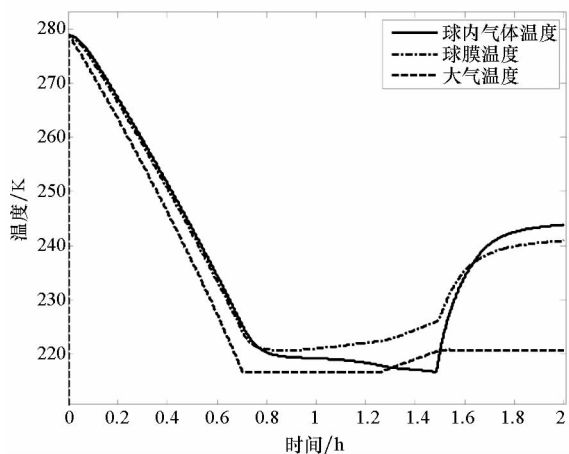


图 7 球内气体和球膜温度以及所在高度大气温度曲线

Fig. 7 Simulation of the temperature of lift gas and film of the balloon and temperature of atmosphere

缓慢增加,在 0.70 h 出现短时降低,随后继续增加,最大达到 4.8 m/s,之后再次缓慢降低,并在 1.49 ~ 1.54 h 之间快速降低至 0。1.49 h 对应的高度为 23.85 km。根据自由浮力系数经过推算得到的球体完全胀满高度为 23.65 km,与上述高度接近,此时球体完全胀满后体积不再增加,球体继续上升,大气密度降低,浮力降低,进而影响升速。

气球升空后球内气体温度逐渐降低,并在经过两个拐点后逐渐回升。第一个拐点与大气温度拐点位置接近,出现在 0.70 ~ 0.80 h 之间,对应高度是 12 km 左右,为流层顶部的低温区。此后球体温度一直处于低温,直至在 1.49 h 出现第二个拐点,此处出现上升过程球内气体温度的最低值 207 K,比周围大气温度低 3 K。

升速出现短时降低现象的时间与气球进入低温区的时间点都是 0.7 h,证明了热力学模型和动

力学模型的耦合关系。这一现象也为实际飞行提供了参考:需保证足够的自由浮力,否则在低温区域可能出现升速过低、水平飘移过远的情况。温度的第二个拐点同样与速度开始快速降低的时间点吻合,都是 1.49 h。此时球体胀满,温度变化微分方程中体积变化项消失,导致温度变化出现拐点。

上述仿真分析表明,气球上升过程的热力学环境和动力学特性都对球内气体温度有重要影响,气球动力学特性和热力学特性相互耦合,并与自由浮力系数存在相关性。球体胀满后的压差增加速度与外界大气压降低速度有关,因此升速越快,对应球体内外压差增加速度也会越大。气球自由浮力系数越大,则升速越大,球内气体最低温度越低,球内气体温度持续时间也越长。

4 仿真结果与飞行试验数据对比

设计并开展直径 27 m 气球飞行试验。试验于 2017 年 9 月完成,气球发放后顺利上升至平飞高度,获得了高度、速度、温度等参数,为仿真分析提供了对比数据。高度、速度数据通过 GPS 定位数据计算得到。GPS 定位精度为水平方向 5 m、垂直方向 10 m。温度数据通过球体内部垂直分布的三个传感器测量数据平均后得到,传感器测量精度 0.1 K。

参考前面的仿真结果,实际充气发放时将自由浮力系数控制在 8% 左右。仿真结果与实测数据对比情况见图 8 ~ 10。

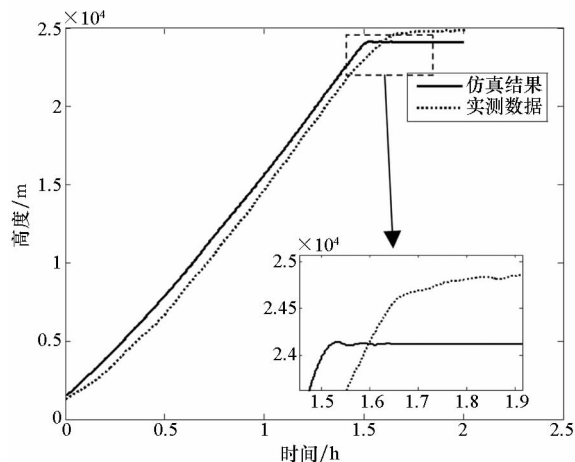


图 8 仿真结果与实测飞行高度数据对比

Fig. 8 Comparison of the altitude of the balloon between simulation and flight data

几组仿真结果在趋势上与实测数据基本一致。从图 8 的对比结果可以看出,上升段仿真结果用时 92 min,实际用时约 100 min,飞行高度结

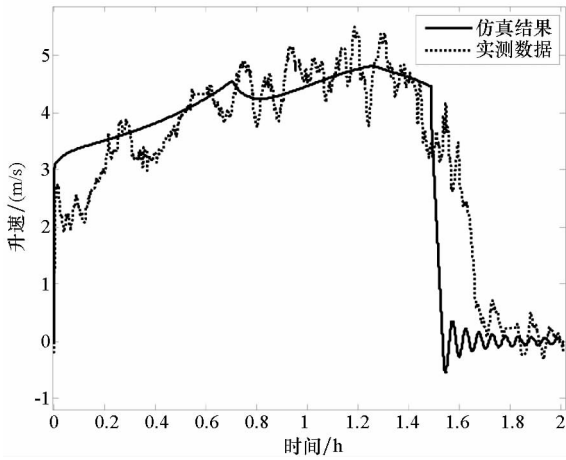


图9 仿真结果与实测上升速度数据对比

Fig. 9 Comparison of the vertical velocity of the balloon between simulation and flight data

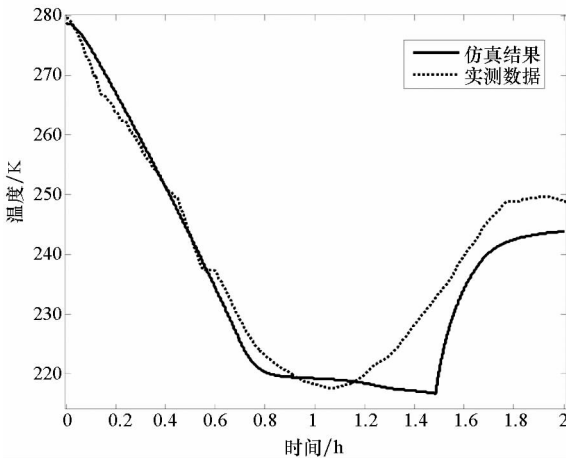


图10 仿真结果与实测球内气体温度数据对比

Fig. 10 Comparison of the temperature of lift gas between simulation and flight data

果在起飞后初始段存在一定偏差,后续变化情况基本一致。实际平飞高度在 24.80 km,比仿真结果高出 0.68 km,经分析,是由于仿真中使用的是标准大气参数表,与试验地点的当地大气参数存在偏差,具体还有待分析。另外,实际飞行时参考了仿真结果中气球进入平飞状态时的高度波动情况,在球体胀满时进行了排气操作,使得实际进入平飞状态过程中高度变化更为平稳,球体压差增长速度平稳,球体未出现破坏。

从图9的对比结果可以看出,实际初始升速约 2.7 m/s,平均升速 4.1 m/s,最大升速 5.5 m/s。实际初始升速比仿真结果小 0.4 m/s,这也解释了高度曲线出现偏差的原因。分析实际升速偏低的一个原因可能是地面充气时,气体从高压气瓶进入球体时压力快速降低导致温度低于环境温度,而这一点在仿真时未加以考虑。另一个原因可能

是采用恒定阻力系数 0.8 不一定准确,不能很好地反映实际阻力系数的情况。

随着高度的增加,仿真结果与实际升速逐渐接近,尤其是变化趋势整体接近。实测升速有比较剧烈的波动,经分析,原因可能是气球上升过程中周围大气存在垂直风速,这个因素同样在仿真时未加以考虑。实测最大升速比仿真结果大 0.7 m/s,出现在升速剧烈波动段的波峰,仿真结果没有体现具体的波动现象。

从图10的对比结果可以看出,实测温度变化趋势在前半部分与仿真结果非常接近。数值上,实测上升段最低温度约为 218 K,仿真值为 217 K,误差约 0.5%,但最低温度对应的时刻点有一定的偏差。实测温度与仿真相比,在拐点处更为平滑,经分析,原因可能是速度的波动使得温度拐点相比仿真结果更不明显。同时注意到,球体进入平飞状态及平飞段初期实测温度比仿真结果高约 8 K,可能是温度传感器受光照的影响,测量温度偏高,具体原因还有待对传感器进行对比标定。如果证明传感器测量的温度确实比实际温度高,则可推断上升初期球内气体温度实际上要比仿真结果低,也就解释了实测初始升速较低的原因。

5 结论

建立了带加强筋超压气球上升段热力学模型和动力学模型,编写仿真计算程序,以实际飞行气球为例开展仿真分析,并研究了自由浮力的影响。通过将仿真结果与飞行试验实测结果进行对比分析,证明了仿真结果可以模拟实际飞行中温度和动力学参数的变化趋势,计算结果与实测值接近,但也存在一定的误差,有待根据工程实践进一步细化模型,提高准确度。虽然存在一些问题,但通过仿真结果与实际飞行数据的对比,对仿真程序的可用性进行了检验,尤其是在目前实测结果较少的情况下更具实际意义。目前建立的模型及仿真程序可初步用于工程实际,后续加以改进后仿真结果将更符合实际情况,并进一步开展长航时平飞阶段温度特性的仿真分析。

参考文献 (References)

- [1] Cathey H M. Evolution of the NASA ultra long duration balloon[C]. AIAA Balloon Systems Conference, 2007.
- [2] Smith M S, Cathey H M. Test flights of the revised ULDB design[C]//Proceedings of AIAA 5th Aviation, Technology, Integration, and Operations Conference, 2005.
- [3] Carlson L A, Horn W J. A new thermal and trajectory model

- for high-altitude balloons [C]//Proceedings of AIAA 7th Aerodynamic Decelerator and Ballon Technology Conference, 1981.
- [4] Farley R E. BalloonAscent: 3-D simulation tool for the ascent and float of high-altitude balloons[C]//Proceedings of AIAA 5th Aviation, Technology, Integration, and Operations Conference, 2005.
- [5] 杨希祥, 侯中喜, 麻震宇. 平流层长航时气球上升过程超冷现象影响因素分析[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(5): 91 - 96.
- YANG Xixiang, HOU Zhongxi, MA Zhenyu. Analysis of influential factors to supercooling phenomenon during ascent stage of stratospheric long duration balloons[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(5): 91 - 96. (in Chinese)
- [6] Yang X X. Prediction of thermal behavior and trajectory of stratospheric airships during ascent based on simulation[J]. Advances in Space Research, 2016, 57(11): 2326 - 2336.
- [7] 刘婷婷, 麻震宇, 杨希祥, 等. 平流层超压气球长期驻空热特性分析[J]. 计算机仿真, 2018, 35(10): 78 - 82.
- LIU Tingting, MA Zhenyu, YANG Xixiang, et al. Analysis of thermal characteristics of super pressure balloon [J]. Computer Simulation, 2018, 35(10): 78 - 82. (in Chinese)
- [8] 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 Mingyun, WU Zichun. 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)
- [9] 戴秋敏, 方贤德, 王昊, 等. 大气模型对高空气球运动特性和热特性的影响[J]. 计算机仿真, 2013, 30(9): 79 - 82, 139.
- DAI Qiumin, FANG Xiande, WANG Hao, et al. Simulation of influence of different atmospheric models on dynamic and thermal properties of high altitude balloons [J]. Computer Simulation, 2013, 30(9): 79 - 82, 139. (in Chinese)
- [10] Morris A L. Scientific ballooning handbook [M]. NCAR Technical Note, National Center for Atmospheric Research, 1975.