

## 高空气球地面充氦气量计算方法分析与试验评估\*

杨燕初<sup>1,2</sup>, 杜千仟<sup>1,2</sup>, 曾丹丹<sup>1,2</sup>, 王帆<sup>1</sup>, 张航悦<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094; 2. 中国科学院大学航空宇航学院, 北京 100040)

**摘要:**作为高空气球研究中的一个重要问题,气球在地面发放前充入的氦气量会直接影响其上升速度和驻空高度,进而影响平台的可靠性和稳定性。因此研究充氦气量的准确计算方法十分必要。建立了高空气球上升过程动力学模型,计算了气球初始升速的理论值,用于与实际初始升速对比,为评估充氦气量计算方法提供依据。归纳了三种较为典型的高空气球地面充氦气量计算方法,根据实际开展的飞行试验,分析对比了三种方法的准确性和误差范围。提出了浮力补偿规律,完成了对三种方法的评估。通过研究可以对现有充氦气量计算方法进行有效修正,进而为高空气球的实际飞行提供指导。

**关键词:**高空气球;充氦气量计算;初始升速;浮力补偿规律

中图分类号:V214.4 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2021)06-001-07

## Analysis and experimental evaluation of helium inflation calculation methods on the ground of high-altitude balloon

YANG Yanchu<sup>1,2</sup>, DU Qianqian<sup>1,2</sup>, ZENG Dandan<sup>1,2</sup>, WANG Fan<sup>1</sup>, ZHANG Hangyue<sup>1,2</sup>

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

2. School of Aeronautics and Astronautics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100040, China)

**Abstract:** The amount of helium used in a balloon is an important issue, which directly affects balloon's ascent velocity and altitude, and then affects the reliability and stability of the platform. Therefore, the study of accurate calculation method of helium is requested. Vertical dynamic model of balloons was established and the theoretical values of initial ascent velocity were calculated. It can be used to compare with the actual initial ascent velocity and provide a basis for evaluating helium inflation calculation methods. Three helium inflation calculation methods of high-altitude balloon were summarized, the accuracy and error range of the three methods were analyzed and compared according to the flight experiments. The buoyancy compensation law was put forward, and three methods have been evaluated. Through the study, it shows that the existing helium inflation calculation methods can be modified effectively, and then it can provide guidance for future flight experiments.

**Keywords:** high altitude balloon; calculation of the amount of helium; initial ascent velocity; buoyancy compensation law

浮空器作为一种稳定的空中平台,具有成本低、易操作、可持久驻空等优势。近年来,各国的研究机构都在开展有关浮空器的技术研究。高空气球作为浮空器的一种,被广泛应用于气象观测和科学研究等领域<sup>[1]</sup>。各国开展的高空气球项目,主要涉及大气科学、空间工程、宇宙射线物理等多个学术领域,并在这些领域取得丰硕成果<sup>[2-3]</sup>。高空气球内部充有比重轻于空气的浮升气体,可以依靠大气浮力升空。文献[4]研究了高空气球的发展史,在早期的高空气球试验中,气球内部充入氢气。氢气易燃易爆,氢气球有一定的危险性。随着氦气的发现和推广,其不可燃、稳定等特点也逐渐被人们认可,随之取代氢气成为高空气球内部浮升气体的首要选择。

如何准确计算高空气球内部充入的氦气量十分重要,其直接影响气球能否顺利升空,进而决定气球的上升速度和驻空高度。如果充气量不足,会导致上升速度过慢,以致不能达到预期高度。反之,如果充气量过多,会导致上升速度过快甚至因排气不够迅速而损坏气球。传统方法是利用气体在不同压力下密度值的对应关系和气体状态方程来计算充气量。文献[5]在此基础上提出了一种新的计算方法,即在原有气体关系的基础上,考虑充气过程中氦气储气罐容积的变化,以及关闭阀门后罐内压强回升问题,来计算充氦气量。除此之外,利用电子流量计来直接测定也是一种目前较为常用的方法。充气完成后,高空气球加速上升,定义气球达到浮重平衡时的速度值为气球

\* 收稿日期:2020-05-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(91638301);中国科学院战略性先导科技专项(A类)资助项目(XDA17020103)

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

的初始升速。选用初始升速作为研究对象是因为其与后面上升过程中的升速比较一致,具有代表性。通过建立高空气球上升过程的动力学模型,可以得出飞行试验中气球初始升速的理论值。飞行试验中,实际初始升速与理论值有一定的偏差,通过实际初始升速,可反算出实际真实的充氦气量。本文将在仿真和试验的基础上,分析、对比三种充氦气方法的优缺点和误差范围,提出修正方法,为更准确地评估充氦气量计算方法提供参考。

## 1 高空气球上升段动力学模型

建立高空气球上升段动力学模型,可求解气球上升过程中的理论升速。高空气球在上升过程中,不考虑水平方向运动,其在竖直方向上受到的力主要有浮力、重力、空气阻力,以及由于浮力,气球带动周围空气运动而产生的附加惯性力。附加惯性力写成质量形式为:

$$m_{\text{add}} = C_m \rho_{\text{air}} V \quad (1)$$

式中: $\rho_{\text{air}}$ 为空气密度; $V$ 为气球体积,可通过计算球内充入的氦气体积得来; $C_m$ 为附加质量系数,对于正球形球体, $C_m$ 的取值是 0.50,而对于零压球, $C_m$ 的垂直分量大约从气球发放时的 0.40 变化到气球完全膨胀时的 0.65,水平分量从气球发放时的 0.65 下降到气球膨胀时的 0.40<sup>[6]</sup>。这里不考虑水平分量。

定义  $m_{\text{He}}$  为氦气质量; $m_s$  为结构质量,包括气球、降落伞、吊舱等的质量; $m_a$  为空气质量,对零压球来说, $m_a$  一般为 0,则系统质量为:

$$m = m_{\text{He}} + m_s + m_a \quad (2)$$

理论充入氦气质量可由下式计算:

$$m_{\text{He}} = \frac{(1+f)m_s}{\frac{1.225}{0.1693} - 1} \quad (3)$$

式中, $f$ 为自由浮力比,不同飞行试验的自由浮力比不同。

考虑附加质量在内的整个系统的总质量  $m_{\text{total}}$  为:

$$m_{\text{total}} = m_{\text{He}} + m_s + m_a + m_{\text{add}} \quad (4)$$

定义  $F$  为总浮力, $L$  为净浮力,则净浮力为:

$$L = F - mg \quad (5)$$

定义  $v$  为气球上升过程中竖直方向上的速度,空气阻力  $D$  可表示为<sup>[7]</sup>:

$$D = C_d \rho_{\text{air}} R^2 v^2 \quad (6)$$

式中: $R$ 为气球直径,是一个变量,其数值可通过气球体积反算; $C_d$ 为阻力系数,大小与雷诺数  $Re$  有关。对于高空气球,在地面时雷诺数为  $10^6 \sim$

$10^7$ ,在高空时雷诺数为  $10^4 \sim 10^5$ ,具体数值取决于浮力大小<sup>[5]</sup>。文献[8]给出了计算圆球阻力系数的经验公式,即:

$$\begin{cases} C_d = \frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0.4 \\ Re \leq 2.7 \times 10^5 \\ \lg C_d = 25.821 - 4.825 \lg Re \\ 2.7 \times 10^5 \leq Re \leq 3.7 \times 10^5 \\ \lg C_d = -0.699 - 0.347 e^{-38.533 \left( \lg \frac{Re}{3.7 \times 10^5} \right)^{5.306}} \\ 3.7 \times 10^5 \leq Re \leq 10^6 \\ C_d = 0.2 \\ Re \geq 10^6 \end{cases} \quad (7)$$

由于球在上升过程中外形不是正球形,所以阻力系数可取圆球的 1.5 倍<sup>[8]</sup>,即在地面附近时, $C_d$  为 0.30。

由上述公式,可得出气球上升过程中的动力学方程为:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} m_{\text{total}} = F - mg - D \\ \frac{dH}{dt} = v \end{cases} \quad (8)$$

式中, $H$ 为气球上升的高度, $t$ 为上升时间。

上述参数可根据球体实际选取,附加质量系数  $C_m$  的值一般介于 0.25 ~ 0.50 之间,阻力系数  $C_d$  的值一般介于 0.10 ~ 0.47 之间<sup>[9]</sup>。

## 2 高空气球地面充氦气量计算方法

在实际的飞行试验中,通常采用三种方法来计算充氦气量,分别为流量计直接测量法、气体状态方程计算法和容器变化补偿修正法。

### 2.1 流量计直接测量法

电子流量计可以测量流体的质量流量和总质量输出,在给高空气球充气的过程中,一般利用流量计来直接测得充氦气量。飞行试验中常采用科里奥利质量流量计,简称科氏流量计。充气时,将科氏流量计的一端与氦气罐连接,另一端与充气管连接,流量计上即可显示流速和流量。其优点是操作简单、使用方便、可即时读数。缺点是测量结果有一定的误差性,零点漂移问题、外界振动和干扰、流体温度和密度、流体流速等都对测量结果有影响,原则上流速应大于额定流量的 10%<sup>[10]</sup>。实验测得,当流速在科氏流量计额定流量的 2% 以内时,测量误差非常大,且容易产生零点漂移<sup>[5]</sup>。这就要求在充气时,充气速度不能过慢。所以使用流量计有一定的局限性。

## 2.2 气体状态方程计算法

理想气体状态方程可表示为:

$$PV = \frac{m}{M}RT \quad (9)$$

式中: $M$ 为氦气摩尔质量, $R$ 为气体常数。而对于真实气体,由于气体分子间存在范德华力,则将其状态表示为:

$$PV = z \frac{m}{M}RT \quad (10)$$

式中: $z$ 为压缩因子,随压强 $P$ 和温度 $T$ 变化。通常可采取以下形式表达:

$$z = 1 + B(T)P + C(T)P^2 + \dots \quad (11)$$

式中, $B(T)$ 、 $C(T)$ 是 $T$ 的函数,与气体种类有关。对于氦气,其压缩因子 $z$ 与温度和压强的关系为:

$$z = 1 + [0.1523 - 5.1727 \times 10^{-4}T + 5.7102 \times 10^{-7}T^2]P - 4.9154 \times 10^{-4}P^2 \quad (12)$$

式中, $P$ 的单位为kPa, $T$ 的单位为K。

根据式(10),可计算高空气球内充入的氦气质量 $m$ 为:

$$m = \frac{101.325P_i V_i M}{z_i R T_i} - \frac{101.325P_f V_f M}{z_f R T_f} \quad (13)$$

式中: $P_i$ 和 $P_f$ 分别为充气初始时刻和末时刻的氦气储气罐压强,单位为kPa,具体数值可以从氦气储气罐上的压强计中读出; $V$ 为氦气储气罐容积,单位为 $m^3$ ; $T_i$ 和 $T_f$ 分别是初始时刻和末时刻的氦气储气罐温度,单位为K; $z_i$ 和 $z_f$ 分别为初始时刻和末时刻的压缩因子。根据式(13)计算气球内充入氦气量的方法,即为气体状态方程计算法<sup>[5]</sup>。

## 2.3 容器变化补偿修正法

容器变化补偿修正法<sup>[5]</sup>在气体状态方程计算法的基础上,考虑在充气过程中氦气储气罐容积变化和压强回升问题,从而对其进行补偿修正。

### 2.3.1 气罐容积变化

文献[11]中提出,实际情况下,随着温度升高和压强增大,氦气储气罐的容积会随之增大。对于当前较为常用的不锈钢圆柱形氦气储气罐来说,其容积随氦气储气罐温度及压强的变化关系为:

$$V = V_0 [1 + 3.402 \times 10^{-5} \times (T - 294.35)] \times (1 + 1.1019 \times 10^{-3}P) \quad (14)$$

式中: $V_0$ 为氦气储气罐初始容积。常温条件下, $P$ 为20265kPa时,氦气储气罐的容积增大0.23%。

### 2.3.2 气罐压强回升

上述气体状态方程计算法中, $P_c$ 为阀门关闭

时的压强(即截断压强),但其并未考虑压强回升问题。所谓压强回升问题,是指在进行地面充气时,氦气储气罐内的氦气做膨胀运动,压强越高,对应气体膨胀越快。由于膨胀做功,罐内氦气温度会随之降低。若充气停止,即氦气储气罐阀门关闭,由于氦气温度回升,所以压强也随之回升。

在实际充气中,可以根据所需充氦气量 $m$ ,以及氦气储气罐初始压强 $P_i$ 和初始温度 $T_i$ ,求得回升之后的压强 $P_f$ ,进而通过 $P_i$ 与 $P_f$ 求得截断压强 $P_c$ 。得出 $P_c$ 后,即可根据压强计上的压强变化,判断何时关闭阀门。

理论上 $P_c$ 还与充气速度(即阀门大小)以及氦气储气罐的容积有关,对应美国矿物部标准, $P_c$ 可用以下经验公式<sup>[5]</sup>估计:

$$P_c = 680.484 + 50.6625P_i - \sqrt{(680.484 + 50.6625P_i)^2 - 1.379 \times 10^5 P_f} \quad (15)$$

式中,压强的单位均为kPa。此外,已知 $P_i$ 、 $P_c$ 也可求得 $P_f$ ,即:

$$P_f = P_c \left( 1 + \frac{P_i - P_c}{13.4317} \right) \quad (16)$$

### 2.3.3 充氦气量的计算

综上,充氦气量 $m$ 可根据以下公式计算:

$$m = \frac{101.325P_i V_i M}{z_i R T_i} - \frac{101.325P_f V_f M}{z_f R T_f} \quad (17)$$

式中, $V_i$ 和 $V_f$ 分别为初始时刻、末时刻的氦气储气罐容积。

根据上述公式计算充氦气量,即为容器变化补偿修正法。根据气体状态方程计算法和容器变化补偿修正法给出的公式,可用MATLAB编写程序计算充氦气量。

## 3 基于飞行试验的充氦气量和初始升速分析

结合2019年度开展的六次飞行试验,通过对实测各项数据进行研究,特别是对实测高空气球初始升速的分析,反推充氦气量,从而对上一章中所述的三种方法进行评估,进而得出各方法的误差所在及其适用性。某次飞行试验中,给高空气球充气如图1所示。

### 3.1 实际初始升速与理论初始升速

飞行试验中,高空气球上搭载有GPS设备和加速度计,可以实时向地面飞控计算机传回气球所在高度和速度值,从而可以得出高空气球的实际初始升速。根据气球上升段动力学模型,可以在MATLAB的Simulink模块中求解每次飞行试



图 1 高空气球发放前充气

Fig. 1 Inflating a high altitude balloon before it is released

验中气球的理论初始升速。

六次试验中高空气球参数如表 1 所示。

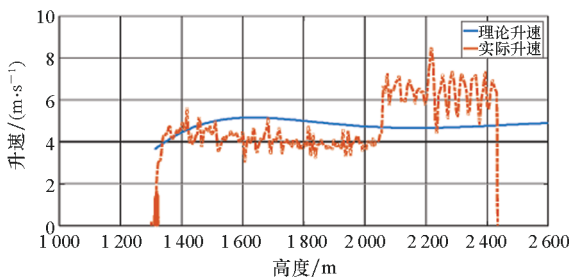
表 1 六次试验高空气球主要参数

Tab. 1 Main parameters of high altitude balloon in six experiments

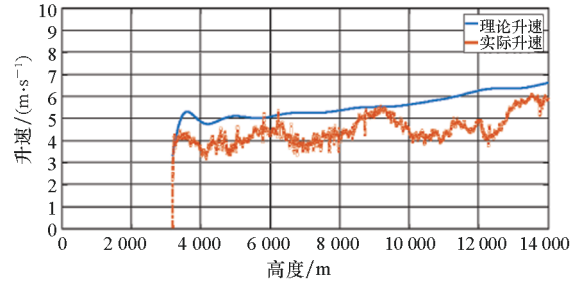
试验名称	海拔/m	时间	体积/ $m^3$	最大直径/m	起飞质量/kg	理论浮力/N
试验一	1 313	6:00	700	11.60	275	3 020
试验二	3 192	7:00	10 000	28.14	665	7 208
试验三	3 192	4:00	700	11.60	129	1 579
试验四	3 192	7:00	10 000	28.14	661	7 159
试验五	3 192	4:00	5 000	22.45	287	3 138
试验六	3 192	4:00	20 000	35.37	804	8 483

根据上述参数求得六次试验理论升速,并与实际升速对比,如图 2 所示。由于试验一中的高空气球搭载了无人机,并在到达一定高度时释放了无人机,所以实际升速出现激增现象。

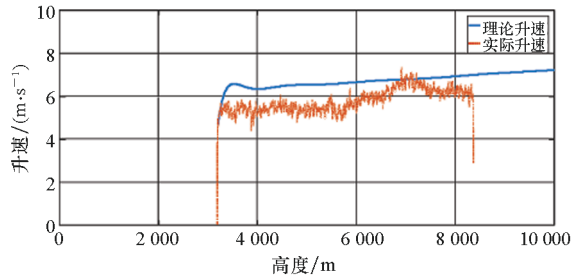
根据上述六次试验,可以看出,实际升速曲线与理论升速曲线均有一定偏差,取气球理论初始升速和实际初始升速,记录如表 2 和图 3 所示。



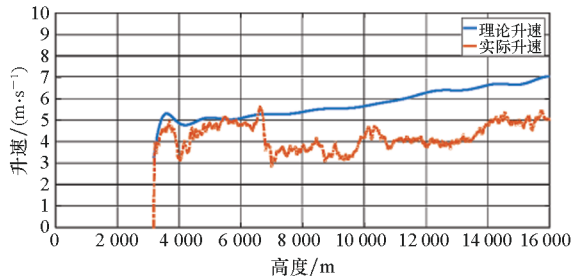
(a) 试验一  
(a) Experiment 1



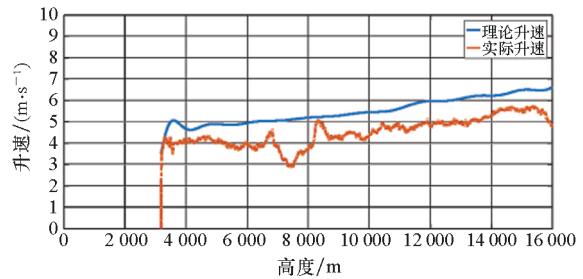
(b) 试验二  
(b) Experiment 2



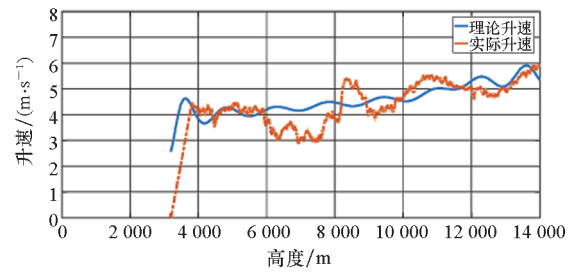
(c) 试验三  
(c) Experiment 3



(d) 试验四  
(d) Experiment 4



(e) 试验五  
(e) Experiment 5



(f) 试验六  
(f) Experiment 6

图 2 六次试验气球升速对比

Fig. 2 Comparison of ascent velocity of balloon in six experiments

表2 六次试验气球初始升速

Tab. 2 Initial ascent velocity in six experiments

试验名称	理论初始升速/ (m · s <sup>-1</sup> )	实际初始升速/ (m · s <sup>-1</sup> )	初始升速误差/ (m · s <sup>-1</sup> )
试验一	5.17	4.96	0.21
试验二	5.33	4.42	0.91
试验三	6.58	5.71	0.87
试验四	5.31	5.04	0.26
试验五	5.07	4.30	0.77
试验六	4.62	4.48	0.14

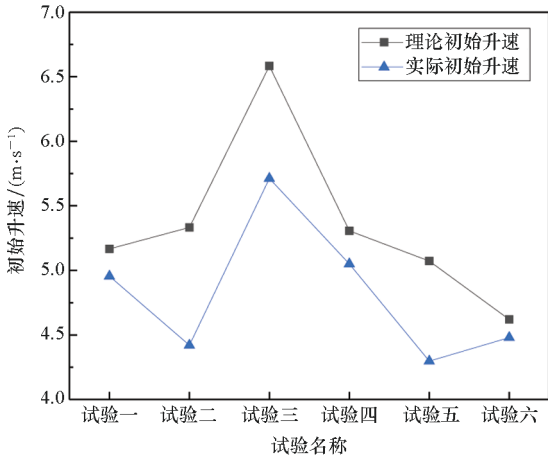


图3 初始升速对比图

Fig. 3 Comparison of initial ascent velocity

由表2和图3可以看出,六次飞行试验中,气球的实际初始升速均低于理论初始升速,低0.14~0.91 m · s<sup>-1</sup>,相对误差范围为3.03%~17.07%,由实际充氦气量偏低导致。

### 3.2 实际浮力与理论浮力

浮力  $F$  与氦气质量  $m$  的关系为:

$$F = m \cdot \left( \frac{U_{\text{air}}}{U_{\text{He}}} - 1 \right) \cdot g \quad (18)$$

式中,  $U_{\text{air}}$  为空气分子量,  $U_{\text{He}}$  为氦气分子量,  $g$  为重力加速度,则浮力约为氦气质量的61.10倍。为计算方便,用浮力代替氦气质量进行比较。根据六次飞行试验的实际初始升速可计算出实际浮力,与理论浮力对比如表3所示。

表3 理论浮力与实际浮力

Tab. 3 Theoretical and actual buoyancy 单位:N

试验名称	实际浮力	理论浮力	浮力误差
试验一	2 994.56	3 020	-25.44
试验二	6 993.12	7 208	-241.88
试验三	1 501.40	1 579	-77.60
试验四	7 095.11	7 159	-63.89
试验五	3 047.12	3 138	-90.88
试验六	8 447.55	8 483	-35.45

由表3可以看出,六次飞行试验的实际浮力均小于理论浮力,误差范围是-214.88~-25.44 N,相对误差范围为-4.91%~-0.42%。

### 3.3 三种充氦气量计算方法的误差分析

上述六次飞行试验,均采用了流量计直接测量法、气体状态方程计算法和容器变化补偿修正法来计算浮力。三种方法计算浮力如表4所示。

表4 三种方法计算的浮力

Tab. 4 Buoyancy calculated by three methods 单位:N

试验名称	流量计直接测量法	气体状态方程计算法	容器变化补偿修正法
试验一	2 934.052	3 134.50	3 026.92
试验二	7 074.027	7 184.35	7 014.99
试验三	1 548.96	1 588.87	1 569.26
试验四	7 063.338	7 260.75	7 111.00
试验五	3 160.781	3 095.57	3 073.11
试验六	8 409.987	8 731.84	8 340.36

将三种方法计算的浮力与理论浮力和实际浮力对比,误差如表5所示。其中,A为流量计直接测量法计算浮力与理论浮力误差,B为气体状态方程计算法计算浮力与理论浮力误差,C为容器变化补偿修正法计算浮力与理论浮力误差,D为流量计直接测量法计算浮力与实际浮力误差,E为气体状态方程计算法计算浮力与实际浮力误差,F为容器变化补偿修正法计算浮力与实际浮力误差。与理论浮力对比误差如图4所示。

表5 浮力误差

Tab. 5 Error of buoyancy 单位:N

名称	A	B	C	D	E	F
试验一	-85.95	114.50	6.92	-60.51	139.94	32.36
试验二	-133.97	-23.65	-193.01	80.91	191.23	21.87
试验三	-30.04	9.87	-9.74	47.56	87.47	67.86
试验四	-95.66	101.75	-48.00	-31.77	165.64	15.89
试验五	22.78	-42.43	-64.89	113.66	48.45	25.99
试验六	-73.01	248.84	-142.64	-37.56	284.29	-107.19

根据表5和图4,流量计直接测量法测得的充氦气量大多比理论充氦气量低,浮力相差范围是-133.97~22.78 N,相对误差为-2.85%~0.73%;气体状态方程计算法计算的充氦气量大多比理论充氦气量高,浮力相差范围是-42.43~

248.84 N, 相对误差为  $-1.35\% \sim 3.79\%$ ; 容器变化补偿修正法计算的充氦气量整体上低于理论充氦气量, 浮力相差范围为  $-193.01 \sim 6.92$  N, 相对误差为  $-2.68\% \sim 0.23\%$ 。与实际浮力对比误差如图 5 所示。

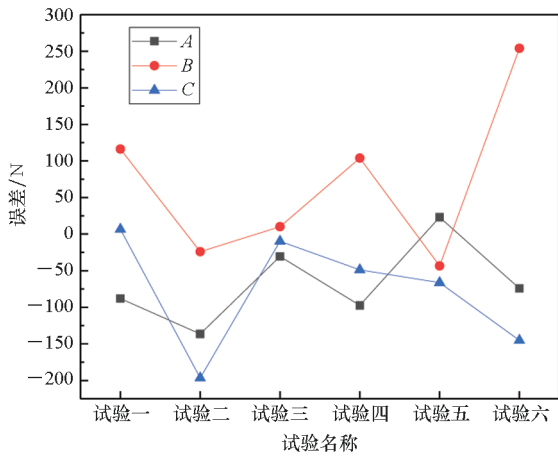


图 4 与理论浮力对比误差

Fig. 4 Comparison with theoretical buoyancy

根据表 5 和图 5, 流量计直接测量法测得的充氦气量在实际充氦气量上下波动, 浮力相差范围是  $-60.51 \sim 113.66$  N, 相对误差为  $-2.02\% \sim 3.73\%$ ; 气体状态方程计算法计算的充氦气量全部比实际充氦气量高, 浮力相差范围是  $48.45 \sim 284.29$  N, 相对误差为  $1.59\% \sim 5.83\%$ ; 容器变化补偿修正法计算的充氦气量大多比实际充氦气量高, 浮力相差范围是  $-107.19 \sim 67.86$  N, 相对误差为  $-1.27\% \sim 4.52\%$ 。

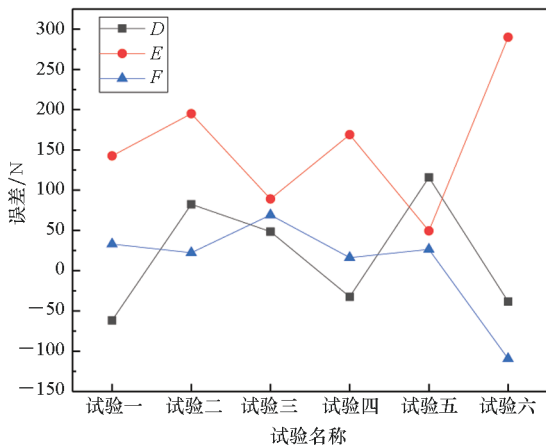


图 5 与实际浮力对比误差

Fig. 5 Comparison with actual buoyancy

### 3.4 浮力补偿规律分析

在实际的充气过程中, 因为三种计算充氦气量的方法都有偏差, 所以通常无法一次性将所需氦气充入气球内。一般根据实际情况, 结合理论

浮力和三种方法计算结果, 来决定何时停止充气。停止后, 稳定一段时间, 再重新计算, 权衡是否补充氦气以及补充多少。

通过分析、对比六次飞行试验中三种方法计算的充氦气量, 与理论充氦气量比较, 考虑是否继续补充氦气, 并提出如下浮力补偿公式, 使得补偿之后的实际浮力更接近理论浮力。

$$Z = \frac{(98.07 + 3V - W - X - Y)}{2} \quad (19)$$

式中,  $V$  为理论浮力,  $W$  为流量计直接测量法计算浮力,  $X$  为气体状态方程计算法计算浮力,  $Y$  为容器变化补偿修正法计算浮力,  $Z$  为需要补偿的浮力。

试验一中, 流量计直接测得浮力比理论浮力低 85.95 N, 气体状态方程计算浮力比理论浮力高 114.50 N, 容器变化补偿修正法计算浮力比理论浮力高 6.92 N。综合流量计和补偿修正法计算结果, 可再补充氦气。采用式 (19) 补偿浮力, 则可再补偿 31.30 N 浮力, 而实际浮力比理论浮力少 25.44 N, 补偿后的相对误差为 0.19%。

试验二中, 流量计直接测得的浮力比理论浮力低 133.97 N, 气体状态方程计算浮力比理论浮力低 23.65 N, 容器变化补偿修正法计算浮力比理论浮力低 193.01 N, 三种方法计算结果都比理论浮力低, 应继续充氦气。采用式 (19) 补偿浮力, 则可再补偿 224.35 N 浮力, 而实际浮力比理论浮力少 214.88 N, 补偿之后的相对误差为 0.13%。

其他试验同上分析, 结合浮力补偿规律, 补偿浮力如表 6 所示。

表 6 六次试验补偿浮力

Tab. 6 Buoyancy compensation in six experiments

试验名称	少充浮力/N	补偿浮力/N	补偿后相对误差/%
试验一	25.44	31.30	0.19
试验二	214.88	224.35	0.13
试验三	77.60	63.99	-0.86
试验四	63.89	69.99	0.09
试验五	90.88	91.31	0.01
试验六	35.45	32.44	-0.04

根据表 6, 利用浮力补偿公式, 可将充气量相对误差从  $-4.91\% \sim -0.42\%$  降低到  $-0.86\% \sim 0.19\%$ 。此浮力补偿规律具有通用性, 可扩展到其他需要补偿浮力的试验。结合 3.3 中对三种充

氦气方法的误差分析,选用其中一种方法进行补气。容器补偿修正法计算结果的相对误差最小,可以采用此方法进行浮力补偿。补偿后,相对误差为 $-0.68\% \sim 0.21\%$ 。

### 3.5 三种方法的分析对比

高空气球在实际飞行前进行氦气充气时,受到地面环境和测试设备等因素的影响,难免会出现误差。通过对上述三种方法的分析,可以看出:

1) 流量计方法的优点在于简单实用,且读数直观,适用于连续充气、中间间断次数较少的工况,但对于充气过程中充断次数较多的情况,则会引入较多的误差,造成误差累积。

2) 利用气体状态方程计算是应用时间最长、范围最广的方法,其有着较高的准确度和置信度,但由于在实际操作时涉及氦气贮存装置压强回升的问题,使得其在应用时受到的限制较多,尤其是在充气结束后需要等待一定的时间,因此给试验带来了一定的不便。

3) 容器变化补偿修正法是在气体状态方程计算法的基础上进行的改进,其考虑了气罐容积变化和压强回升问题,修正了气体状态方程方法中的一些参数,因此较之前一种方法,其计算出来的氦气量更为准确,同时在实际操作时因其可以直接采信氦气贮存装置的截断值作为输入,因此避免了等待带来的误差和不确定性,因此也更有利于外场试验使用。

## 4 结论

本文首先建立了高空气球上升段动力学模型,并对高空气球地面氦气充气量计算方法进行了系统性整理,从理论推导的角度进行了深入分析和归纳。随后,结合飞行试验实测的数据计算了高空气球的实际初始升速,并利用上升段动力学模型计算了理论初始升速。核算了实际充入浮力与理论充入浮力,进而对三种氦气量计算方法进行误差分析,在此基础上开展了浮力补偿规律的研究,提出的浮力补偿公式可将充氦气量误差降低。最后完成了对三种充气量计算方法的评估。总的来说,本文在之前学者研究的基础上,对其方法进行了总结,并通过试验对其进行了验证和修正,能够为后续研究人员提供相应的参考和借鉴。

## 参考文献 (References)

- [1] COLLOZZA A, DOLCE J L. High-altitude, long-endurance airships for coastal surveillance[R]. USA: NASA, 2005.
- [2] FUKE H. Recent highlights of scientific ballooning in Japan[J]. Journal of Astronomical Instrumentation, 2017, 6(2): 1740001.
- [3] HERTZOG A, BASDEVANT C, VIAL F, et al. The accuracy of stratospheric analyses in the Northern Hemisphere inferred from long-duration balloon flights [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2004, 130(597): 607-626.
- [4] NISHIMURA J. Scientific ballooning in the 20th century; a historical perspective [J]. Advances in Space Research, 2002, 30(5): 1071-1085.
- [5] SMITH M S. Review and assessment of helium inflation calculation methods [C]//Proceedings of AIAA balloon Systems Conference, 2013.
- [6] YAJIMA N, IZUTSU N, IMAMURA T, et al. Scientific ballooning [M]. Heidelberg: Springer, 2009: 52-57.
- [7] 孙学金, 王晓蕾, 李浩, 等. 大气探测学[M]. 北京: 气象出版社, 2009.  
SUN Xuejin, WANG Xiaolei, LI Hao, et al. Atmospheric observation [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009. (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] 廖俊, 袁俊杰, 蒋祎, 等. 高空零压气球上升过程的运动特性研究[J]. 航天返回与遥感, 2019, 40(1): 11-19.  
LIAO Jun, YUAN Junjie, JIANG Yi, et al. Motion characteristics of zero-pressure balloon in ascending process [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2019, 40(1): 11-19. (in Chinese)
- [10] 林建达, 卢嘉敏, 胡候林, 等. 科里奥利质量流量计检定过程误差影响要素研究[J]. 计量技术, 2019(4): 49-50, 67.  
LIN Jianda, LU Jiamin, HU Houlin, et al. Study on the influence factors of coriolis mass flowmeter calibration errors [J]. Measurement Technique, 2019(4): 49-50, 67. (in Chinese)
- [11] KALMAN H S. Computing the volume of helium in cylindrical steel containers at 10 to 10.000 psia [J]. Vacuum, 1968, 18(11): 613.