第21卷 第2期 空 间 科 学 学 报 Vol.21, No.2
2001 年 4 月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Apr., 2001

气球落舱内试验平台的高微重力水平分析*

高云峰[1] 王麟华[2]
[1](清华大学工程力学系 北京 100084)
[2](中国科学院空间科学与应用研究中心)

摘 要

研究了一种新型高微重力水平气球落舱内试验平台的动力特性，考虑了稀薄气体的影响，建立了落舱及平台的动力学方程. 通过数值计算获得了平台微重力水平与落舱控制精度、平台与落舱的分离时刻、真空舱内真空度的关系.

关键词 微重力—落舱—试验平台—稀薄气体—自由分子流

1 引 言

气球落舱的微重力环境是由高空自由落体而形成的. 其特点是投资少，微重力持续时间较长，可回收，便于改进试验方案. 国内外都已开展了大量的研究工作[1-4].

近年来发展了一种具有高微重力水平的气球落舱系统，落舱内部为真空腔，当落舱下落时，释放试验平台，平台在真空腔内相对落舱下落. 该系统中平台所获得的微重力水平估计可达 10^{-8}—10^{-11} g，持续时间约为 20 s(无推力装置)[2-4].

对于这种气球落舱系统，其微重力水平与气动力和各种干扰因素有直接的关系，本文将考虑以下因素对试验平台微重力水平的影响：气动力对落舱、平台的作用；落舱与气球、平台分离时的扰动.

2 气动力分析

气动力对气球落舱系统的微重力水平影响最大，本研究中所采用的气动力参数是根据几个方面的来源综合而成：落舱模型的风洞实验 (内部资料)；北京航空航天大学流体力学研究所的 “飞机和导弹纵向空气动力工程计算方法与程序”(BLAERO)(内部资料)；国际标准大气参数表[5].

根据马赫数以及气体的稀薄程度不同，本研究中气动力分三种情况考虑.

2.1 落舱高速运动的气动力 ($Ma > 0.1$)

落舱在高速运动时所受的阻力与速度平方成正比，为

$$F = \frac{1}{2} c_{D0} \rho s v^2. \tag{1}$$

* 国家自然科学基金资助项目 (49784004)
2000-05-18 收到原稿， 2001-02-25 收到修定稿

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

其中，c_{D0} 是零升阻力系数 (迎角为零时的阻力系数), 与落舱外形及马赫数、雷诺数有关, 根据 BLAERO 计算得到 (取值范围 0.1 到 0.5). ρ 是空气密度，与高度有关，可根据国际标准大气表查出. s 是落舱的横截面积. v 是落舱相对空气的速度.

由于落舱设计时考虑了动稳定性，落舱所受到的气动力矩会使其摆动角速度迅速减小趋于零，因此落舱在高速运动时可不考虑姿态运动，且迎角近似为零.

2.2 落舱低速运动的气动力 ($Ma < 0.1$)

落舱与气球分离后，开始时晃动较大，因此不但要考虑气动力，还要考虑气动力矩. 由于低速运动的物体所受阻力与速度不再是平方关系，其所受的阻力为

$$F = \frac{1}{2} c_D \rho s v^K. \tag{2}$$

其中 c_D 是阻力系数，与雷诺数和迎角有关，根据落舱模型的风洞实验结果得到. K 是待定参数，建议取 $K = 1$. 此时落舱受到的气动力矩 (以俯仰气动力矩为例 [1]) 为

$$M_z = \frac{1}{2} c_{mz} \rho v^K s L. \tag{3}$$

其中 c_{mz} 是阻力矩系数，是迎角与雷诺数的函数，可根据落舱模型的风洞实验得到. L 是落舱长度.

2.3 平台在真空舱内所受的气动力

平台在真空舱内相对落舱运动时的特点是: (1) 运动速度很低, 20 s 左右相对运动 3 m. (2) 根据分子热力学的理论 [6], 真空舱内压强为 10^{-2} Pa 时，气体分子的平均自由程约为 1.47×10^{-1} m, 与平台尺寸数量级接近. 因此真空舱内残余气体不能认为是连续介质，而应认为是自由分子流或滑流 [7].

由于平台没有尾翼，且外型对称，气动压心基本与质心重合，所以不考虑气动力矩. 平台在单位时间内所受的平均气动力 $\overline{F}$ 可由热力学理论推导出来.

假设气体分子的速度按麦克斯韦速度分布 [6]

$$f = n\Big(\frac{m}{2\pi kT}\Big)^{3/2} \cdot \exp\Big(-\frac{m}{2kT}(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)\Big). \tag{4}$$

其中 n 为单位体积内的分子数, m 为分子的质量, k 为玻耳兹曼常数, T 为开氏温度, v_x 为 x 方向的速度. 设平台相对落舱的速度为 v_r, 假设气体分子与平台的碰撞是完全弹性的，则在平台的纵向 (x 轴) 方向，平台底部在时间 t 内所受到的冲量为

$$P_b = \int_0^t \overline{F}_b \mathrm{d}t = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\int_0^{\infty}\int_s\int_0^t 2m(v_x + v_r)^2 \cdot f \cdot \mathrm{d}v_x \mathrm{d}v_y \mathrm{d}v_z \mathrm{d}s \mathrm{d}t. \tag{5}$$

其中 $2m(v_x + v_r)$ 是单个分子在 x 轴方向碰撞的冲量, $f \cdot (v_x + v_r) \cdot \mathrm{d}v_x \mathrm{d}v_y \mathrm{d}v_z$ 是在单位时间内与单位面积碰撞的气体分子数目, $\overline{F}_b$ 是平台底部所受到的平均碰撞力.

同理，平台顶部在时间 t 内所受到的冲量为

$$P_t = \int_0^t \overline{F}_t \mathrm{d}t = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\int_0^{\infty}\int_s\int_0^t 2m(v_x - v_r)^2 \cdot f \cdot \mathrm{d}v_x \mathrm{d}v_y \mathrm{d}v_z \mathrm{d}s \mathrm{d}t, \tag{6}$$

利用气体分子平均速度 $\bar{v}$ 及气体密度 ρ 的关系式

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad \rho = \frac{m \cdot N}{V} = m \cdot n, \tag{7}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

得到平台单位时间内纵向所受的平均合力为

$$\overline{F} = \overline{F}_{\mathrm{b}} - \overline{F}_{\mathrm{t}} = \frac{1}{2}\rho S\bar{v}v_r, \tag{8}$$

其中 ρ 是真空舱内气体的密度，S 是平台的截面，$\bar{v}$ 是真空舱内气体热运动的平均速度，v_r 是平台相对落舱的速度.

3　数学模型

设落舱与气球的分离时刻为 $t_0 = 0$, 落舱与平台分离的时刻为 t_1. 当 $t < t_1$ 时落舱与平台作为整体一起运动，$t > t_1$ 时平台与落舱分离后分别运动. 因此动力学方程要分段列写.

3.1　落舱与平台作为整体一起运动

设整体的方位用 $x, \theta_1, \theta_2, \theta_3$ 来描述. 其中 x 轴方向指向地心, 零点为 $t = t_0$ 时落舱与平台的质心位置. $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 分别为偏航角，俯仰角，滚动角，可按体轴 3: 2-3-1$(y-z-x)$ 次序转动得到. 则整体运动的数学模型是 [1,8]

$$\begin{cases} m\ddot{x} = m\dfrac{g_0R_{\mathrm{e}}^2}{(R_{\mathrm{e}}+H-x)^2} - m(R_{\mathrm{e}}+H-x)\Omega^2\cos^2\varphi - \dfrac{1}{2}c_{\mathrm{D}}\rho S\dot{x}^K, \\ A\dot{\omega}_x + \eta_x\omega_x = M_x, \\ B\dot{\omega}_y + \eta_y\omega_y + (A-B)\omega_x\omega_z = M_y, \\ B\dot{\omega}_z + \eta_z\omega_z + (B-A)\omega_x\omega_y = M_z, \\ \dot{\theta}_1 = (\omega_y\cos\theta_3 - \omega_z\sin\theta_3)/\cos\theta_2, \\ \dot{\theta}_2 = (\omega_y\sin\theta_3 + \omega_z\cos\theta_3), \\ \dot{\theta}_3 = \omega_x + (\omega_y\cos\theta_3 - \omega_z\sin\theta_3)/\tan\theta_2. \end{cases} \tag{9}$$

其中 R_{e} 为地球半径，Ω 为地球自转角速度，φ 为当地纬度，g_0 为地面加速度，H 为落舱的初始高度，A、B 为整体的 x、y 轴的转动惯量. ω_x 为角速度在 x 轴的分量，η_x 为 x 轴对应的阻尼系数，M_x 为 x 轴对应的气动力矩. 马赫数 $Ma < 0.1$ 时 $K = 1$, 否则 $K = 2$.

3.2　平台与落舱分离后的运动

平台与落舱间的释放机构采用机械-电磁方式可避免平台与落舱间的释放干扰 [9]. 平台与落舱分离之后，其数学模型是

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_1 = m_1\dfrac{g_0R_{\mathrm{e}}^2}{(R_{\mathrm{e}}+H_{\mathrm{c}}-x_1)^2} - m_1(R_{\mathrm{e}}+H_{\mathrm{c}}-x_1)\Omega^2\cos^2\varphi - \dfrac{1}{2}c_{\mathrm{D}0}\rho_1 S_1\dot{x}_1^2, \\ m_2\ddot{x}_2 = m_2\dfrac{g_0R_{\mathrm{e}}^2\Delta}{(R_{\mathrm{e}}+H_{\mathrm{c}}-x_2)^2} - m_2(R_{\mathrm{e}}+H_{\mathrm{c}}-x_2)\Omega^2\cos^2\varphi - \dfrac{1}{2}\rho_2 S_2\bar{v}(\dot{x}_2-\dot{x}_1). \end{cases} \tag{10}$$

其中 H_t 为平台与落舱分离时平台的质心高度，下标 1 表示落舱，下标 2 表示平台.

假设用代表点 $(x, y, z) = (0.5\,\mathrm{m}, 0.05\,\mathrm{m}, 0.05\,\mathrm{m})$ 处的微重力表示平台内部的微重力水平，则平台质心的微重力与该代表点的微重力分量分别为

$$a_{\mathrm{c}} = \frac{1}{2m_2}\rho_2 S_2\bar{v}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1), \tag{11}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

$$\begin{cases} a_x = a_c + x(\omega_y^2 + \omega_z^2) - y(\omega_x\omega_y - \dot{\omega}_z) - z(\omega_x\omega_z - \dot{\omega}_y), \\ a_y = -x(\omega_x\omega_y + \dot{\omega}_z) + y(\omega_x^2 + \omega_z^2) - z(\omega_y\omega_z - \dot{\omega}_x), \\ a_z = -x(\omega_x\omega_z - \dot{\omega}_y) - y(\omega_y\omega_z + \dot{\omega}_x) + z(\omega_x^2 + \omega_y^2). \end{cases} \tag{12}$$

其总的微重力水平为

$$a = \sqrt{(a_x)^2 + (a_y)^2 + (a_z)^2}. \tag{13}$$

4 计算结果

落舱与气球分离时具有较大的初始干扰. 按目前的控制精度, 各转角的最大幅值为 0.1°, ω_x 的最大幅值为 0.3°/s, ω_y 和 ω_z 的最大幅值为 0.2°/s. 真空舱内压强为 0.01 Pa,

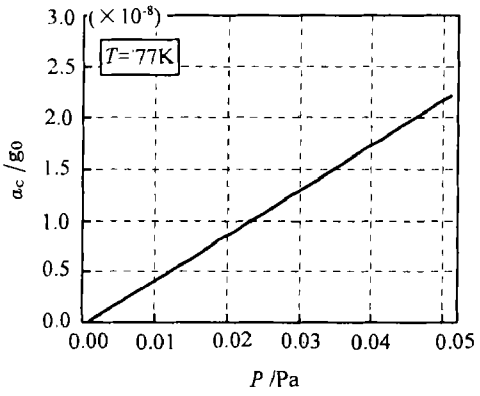


图 1 真空度-平台质心微重力曲线

Fig.1 Relation ship between microgravity and vacuum pressure

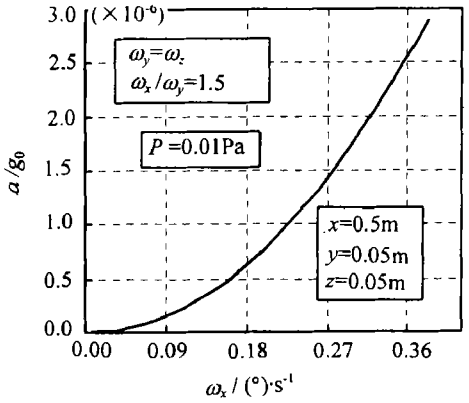


图 2 控制精度-平台微重力曲线

Fig.2 Relation ship between microgravity and contral precision

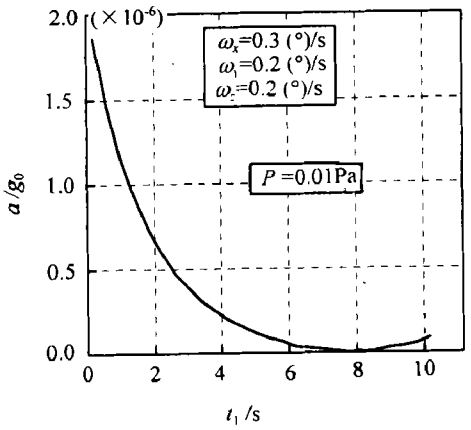


图 3 微重力水平-分离时间曲线

Fig.3 Relation ship between microgravity and detach time

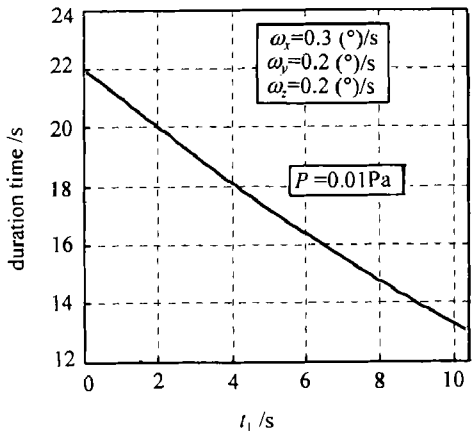


图 4 持续时间-分离时间曲线

Fig.4 Relation ship between duration time and detach time

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

温度为 77 K. 图 1、2、3 分别给出了真空舱内真空度 (压强)、控制精度 (角速度)、平台与落舱的分离时刻与平台内微重力水平的关系. 图 4 则给出了平台与落舱的分离时刻与平台内微重力持续时间的关系.

图 1 表明平台质心加速度与真空度成线性关系 (由式 (11) 可知 $a_c \propto \rho$, 而真空舱密度与压强是线性关系). 图 2 表明平台内部加速度与初始扰动近似成平方关系 (由式 (12) 可知 $a \propto r\omega^2$). 图 3 表明平台内部加速度与平台的分离时刻 t_1 有很大关系, 因为气动力矩起阻尼作用, 使落舱的角速度振荡着趋于零, $t_1 = 7.6$ s 时, 总的角速度第一次趋于零, 但随后角速度又会增加, 因此加速度在 $t_1 = 7.6$ s 时会有极小值. 图 4 表明分离时刻 t_1 越大, 平台微重力持续时间就越短. 在目前所给定的参数下, 若分离时刻 $t_1 = 0$ s, $a = 1.85 \times 10^{-6} g_0$, 持续时间为 22 s; 若 $t_1 = 5.2$ s, $a = 8.67 \times 10^{-8} g_0$, 持续时间为 17 s; 若 $t_1 = 7.6$ s, $a = 4.70 \times 10^{-9} g_0$, 持续时间为 15 s.

5　结　　论

1. 真空度 (压强) 及落舱与气球分离时的扰动 (角速度) 决定了平台的微重力水平. 其中真空度的影响是线性的关系, 而初始扰动的影响是平方关系.

2. 真空舱内的残余气体不能作为连续介质, 可处理成自由分子流或滑流, 其阻力与平台相对落舱的速度、气体分子热运动的平均速度成线性关系.

3. 目前气球落舱控制系统的精度不够高, 如要在 (0.5 m, 0.05 m, 0.05 m) 的范围内获得 $10^{-8} g_0$ 数量级的微重力水平, 有三种方案: (1) 提高控制精度, 角速度从目前的最大幅值 0.3(°)/s 至少改进为 0.06(°)/s, 微重力持续时间为 22 s; (2) 在控制精度不改变的情况下, 推迟平台与落舱分离的时刻, 在落舱与气球分离后的 5.0 s 至 9.0 s 内平台与落舱分离, 则微重力持续时间少于 17 s 大于 15 s; (3) 两方面同时考虑.

4. 在目前的控制精度及真空度下, 初始扰动的影响为 $10^{-6} g_0$ 数量级, 真空度的影响为 $10^{-9} g_0$ 数量级. 因此若要求微重力水平为 $10^{-6} g_0$ 数量级, 则真空度采用 1.0 Pa 即可; 若要求微重力水平为 $10^{-7} g_0$ 数量级, 则真空度采用 0.1 Pa 即可; 若要求微重力水平为 $10^{-8} g_0$ 数量级, 则目前真空舱内真空度 0.01 Pa 合理.

参　考　文　献

[1] 楼岳, 王麟华等. 姿态运动对落舱微重力的影响研究. 空间科学学报, 1997, **17**(3):282—287

[2] Rum G, Fuligni F, Iafolla V. Gizero-a system to scientific experimentation under microgravity conditions using stratospheric balloons. In: Mandelieu-Cabbes. Proc. 10th ESA Symp., France: ESA sp-317, 1991. 169—171

[3] Cosentino O, Spoto D, Rum G. "Gizero" microgravity project using stratospheric balloon. In: Lillehanmer. Proc. 12th ESA Symp., Norway: ESA sp-390, 1995. 197—201

[4] Iafolla V, Mandiello A, Milyukov V, Nozzoli S, GiZero. A free falling capsule for short term low gravity experiments. *Adv. Space Res.*, 2000, **26**(9):1 427—1 430

[5] M J 左克罗. 气体动力学. 北京: 国防工业出版社, 1984. 568—570

[6] 周上章. 统计物理学. 重庆: 重庆大学出版社, 1989. 80—101

[7] S A 沙夫等. 稀薄气体的流动. 北京: 科学出版社, 1988. 1—20

[8] 贾书惠. 刚体动力学. 北京: 高等教育出版社, 1987.31—33

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

[9] Wang Linhua *et al.* A conceptual design of balloon drop capsule system with high quality microgravity conditions. 51st Intern. Astron. Cong., Rio de Janeiro, Brazil, 2000

ANALYSIS OF HIGH QUALITY MICROGRAVITY ABOUT BALLOON-RELEASED TEST PLATFORM

GAO Yunfeng[1] WANG Linghua[2]

[1](*Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing* 100084)

[2](*Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences,* 100080)

Abstract

Some dynamic characters of a new balloon-released test platform in capsule with high quality microgravity are studied in this paper. The dynamics equations are obtained by considering the effect of the rarefied gas and the free molecular flow in vacuum chamber. The relationship between microgravity and control precision, detach time of platform from capsule, and pressure of the vacuum chamber are obtained by simulation.

Key words Microgravity, Capsule, Test-platform, Rare gas, Free molecular flow

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com