

环境及其效应

临近空间落球探测仿真分析

刘卫^{1,3,4}, 刘四清^{1,3,4}, 龚建村^{2,3,4}, 王荣兰^{1,4}

(1.中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190; 2.中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201210;
3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190)

摘要: **目的** 基于硬质落球, 分析探测临近空间大气密度和水平风场的载荷需求和探测性能。**方法** 仿真计算自由下落探测段受力情况, 建立运动方程。以假定释放条件, 仿真落球的探测过程, 给出各作用力量级。**结果** 面质比的变化不能改变气动力范围。相同加计灵敏度下, 增大面质比可提高探测高度。150 km 以下的探测中可忽略光压力, 探测到水平风场米级变化的加计灵敏度需求为 $1 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 。**结论** 面质比的变化不能改变气动力范围。相同加计灵敏度下, 增大面质比可提高探测高度。

关键词: 临近空间; 落球; 仿真; 作用力

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.08.001

中图分类号: V11 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2020)08-0001-07

Simulation Analysis of Falling Ball Detection in Near Space

LIU Wei^{1,3,4}, LIU Si-qing^{1,3,4}, GONG Jian-cun^{2,3,4}, WANG Rong-lan^{1,4}

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Key Laboratory of Science and Technology on Environmental Space Situation Awareness, CAS, Beijing 100190)

ABSTRACT: The work aims to analyze the atmospheric density of near space and the load demand and detection performance of wind field based on hard falling ball. The force of free falling detection section was subject to simulating calculation and then a motion equation was established. Taking the assumed release condition as initial state, the detection process was simulated, and the acting force levels and ranges were given. The variation of the area-to-mass ratio (AM) could not change the range of aerodynamic force. Increased AM could improve detection height if at the same accelerometer sensitivity. The solar pressure could be neglected in the detection below 150 km. The meter level changes in horizontal wind field could be detected in case of accelerometer sensitivity $1 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$. In conclusion, the variation of the area-to-mass ratio (AM) cannot change the range of aerodynamic force. Increased AM can improve detection height if at the same accelerometer sensitivity.

KEY WORDS: near space; falling ball; simulation; acting force

收稿日期: 2019-12-17; 修订日期: 2020-07-20

Received: 2019-12-17; Revised: 2020-07-20

基金项目: 北京市科技重大专项(Z181100002918004)

Fund: Beijing Major Science and Technology Projects(Z181100002918004)

作者简介: 刘卫(1984—), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为空间碎片碰撞预警与高层大气。

Biography: LIU Wei(1984—), Male, Doctor, Assistant researcher, Research focus: space debris collision warning and upper atmosphere.

通讯作者: 刘四清(1965—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为空间环境预报研究与应用。

Corresponding author: LIU Si-qing(1965—), Female, Ph.D., Researcher, Research focus: space environment forecast research and application.

临近空间(20~100 km)及以上至200 km的区域,因大气拖曳力作用,常规航天器无法长期驻留。同时,由于处于航空器的升限之上,航空器在该区域无法工作。随着新一代临近空间飞艇和亚轨道航天器等技术的发展,临近空间正在成为开展高技术应用和国防安全活动的新领域^[1-2],而临近空间环境(包括大气密度、温度、成分和风场等)对载人航天返回舱落点预报、空间目标的陨落再入及风险评估、弹道导弹打击精度等具有重要影响。

目前,对临近空间的探测相对较少,主要采用激光雷达和探空火箭等方法。现有探空火箭系统,火箭运行高度可超过100 km,但受降落伞开伞高度和温度传感器工作原理等限制,数据可信高度只能达到60 km左右,不能满足60 km以上高度的大气环境要素探测要求,而中频雷达可以实现白天60~100 km和晚上80~100 km高度大气风场及电子密度的持续测量^[3]。因此,有必要研究不同原理的探测手段,以解决对较高高度临近空间探测的应用需求^[4-7]。落球是国外用于探测30~100 km大气密度和风场的重要手段。美国自20世纪50年代开始研制落球探测器,开展临近空间大气参数的探测工作^[7];60—70年代,美国、欧洲等西方国家进行过多次火箭飞行试验,积累了大量探测数据,为临近空间大气密度、温度、风场建模提供了有力支撑。经多年研制、试验和改进,落球探测技术现在已成为临近空间环境探测的常规手段。根据球体构型可分为膨胀落球和硬质落球。其中,膨胀落球一般采用雷达或球载GPS跟踪记录落球斜距、方位角、高度角和位置等信息;而硬质落球由于运行速度较快,运行时间较短则需要更加精确和高采样率的测量设备—三轴加速度计(加计)。在膨胀落球探测技术发展过程中,最具有影响力的是美国空军组织实施的ROBIN(Rocket Ballon Instrument)项目以及美国宇航局组织实施的Super-Loki项目。1965年,美国空军开始实施ROBIN1965项目,连续进行了多次落球探测试验,获取了70 km以下高度大气密度和风场等剖面数据,并通过密度测量进一步计算得到气压和温度数据。为获取更高处的数据,1970年,他们又实施了ROBIN1970计划,抛球高度提高至125 km,落球探测的有效高度增加到100 km。

笔者基于硬质落球,设计了依赖三轴加速度计测量非保守力的探测方案。基于假定抛球条件和不同尺寸、质量落球信息,分析探测临近空间大气密度和水平风场参数对仪器精度的需求和对平台的需求,并给出相关结论。

1 探测方案

基于硬质落球,设计一种依赖三轴加速度计测量非保守力的探测方案。分析落球抛射后的受力情况,基于假定抛球条件和球自身尺寸、质量信息,分析探

测过程对加速度计精度需求和对落球平台能力需求等。

硬质落球较膨胀落球具有如下优势:探测高度下限更低,由于硬质落球无需填充气体,所以没有填充气体随高度引起的压力变化相关问题,故可拓展大气要素的高度探测范围;硬质落球为刚性结构,球体体积对压力不敏感,可避开面积质量比变化引起的反演误差;硬质落球运行过程中速度跨度远远大于膨胀落球,采集的数据对研究不同马赫数下的气动力系数非常有利。

选用硬质落球作为探测试验载体。落球从发射前的准备到最终试验结束,可以分为如下几个阶段:发射准备、动力飞行、自由上升和自由下落(见图1)。发射准备阶段:发射前1~2 d,进行发射前最后的测试等工作;动力飞行阶段:落球搭载于运载火箭,在合适高度被抛出,抛出前落球各仪器加电,建立绝对姿态信息(时间尺度:百秒级);自由上升阶段:落球在重力、气动力、浮力和日月引力作用下减速上升,直至垂直方向速度为零,达到最高点(时间尺度:秒级—百秒级,取决于释放时垂直向上速度大小);自由下落阶段:落球在重力、气动力、浮力和日月引力作用下先加速下降,垂直方向速度和大气密度不断增加,运行至各作用力平衡点,落球速度将逐渐下降,最终落地(时间尺度:百秒级,取决于释放高度和释放垂直向上速度大小)。其中,自由上升段和自由下落段是落球试验的数据采集段。

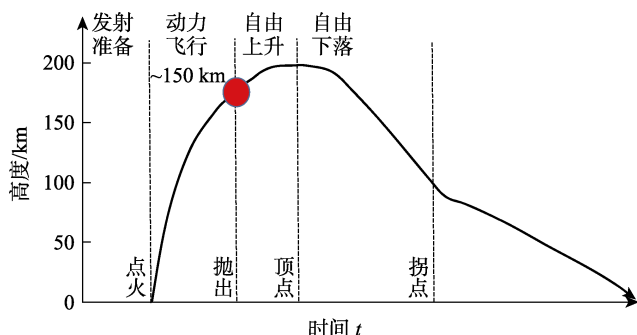


图1 落球飞行程序

Fig.1 Flight procedures of falling ball

2 落球运动方程

落球释放后在地球引力、日月引力、气动力和光压力等作用下自由下落,具体情况如下。

2.1 运动方程

在地心惯性系中,落球的运动方程可表示为^[8]

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_s}{dt^2} = \mathbf{g} + \frac{1}{2} \frac{C_a A}{m_s} \rho v_r^2 - \rho \mathbf{g} V + a_{\text{solar}} + a_{\text{lunar}} + a_{\text{rad}} \quad (1)$$

式中: \mathbf{r}_s 为落球在地心惯性系中的位置矢量;右侧第1项为落球重力加速度 \mathbf{g} ;第2项为气动力加速度, ρ 为落球处的大气密度, v_r 为落球相对大气的运动速度, C_a 为落球气动力系数矢量, A/m_s 落球面积质

量比；第 3 项 $-\rho g V$ 为浮力加速度，负号表示浮力与重力加速度 g 反向， V 为落球体积；第 4 项 a_{solar} 为太阳引力加速度；第 5 项 a_{lunar} 为月球引力加速度；第 6 项 a_{rad} 为太阳辐射压加速度。相对速度 v_r 可表示为：

$$v_r = v_s - v_w \quad (2)$$

式中： v_w 为大气风场速度。

气动力中最大分量是沿相对速度 v_r 反方向的阻力，其他分量通常很小。因此，三维的阻力向量可以简化为：

$$C_D = C_a \cdot v_r \quad (3)$$

式中： C_D 就是阻力系数，气动力加速度 $0.5 C_D (A/m_s) \rho v_r^2$ 可以近似写成如下形式：

$$\frac{1}{2} \frac{C_D A}{m_s} \rho v_r^2 \quad (4)$$

注意到 $C_a \cdot v_r$ 式中的夹角大于 90° ，乘积为负。因此，式(4)通常写成带有负号的表达式。

进一步简化 $C_D A/m_s$ ，以反弹道系数 B 代替。气动力加速度可以简化为：

$$\frac{1}{2} B \rho v_r^2 \quad (5)$$

2.2 作用力分类

式(1)中的力可分为保守力和非保守力，保守力加速度为：

$$g + a_{\text{solar}} + a_{\text{lunar}} \quad (6)$$

式中：重力加速度 g 包括地球中心引力和非球形引力。

非保守力加速度为：

$$\frac{1}{2} \frac{C_a A}{m_s} \rho v_r^2 - \rho g V + a_{\text{rad}} \quad (7)$$

非保守力也是加速度计的测量内容。

3 作用力量级与探测需求分析

根据任务给定的释放条件和落球的运动方程，编

写程序计算分析落球释放后的运动轨迹和整个过程各作用力量的量级。

3.1 释放条件

假定的两种面积质量比条件见表 1。

表 1 落球参数及释放条件

Tab.1 Parameters and release conditions of falling ball

释放高度/km	初始水平速度/(km·s ⁻¹)	初始垂直速度(向上)/(km·s ⁻¹)	球直径/cm	球质量/kg
150	0.2064161	-2.0926962	20	20
150	0.2064161	-2.0926962	50	20

3.2 量级分析

将假定的释放条件作为初始状态，根据建立的运动方程对落球的运行过程进行仿真计算。各作用力量级以及运行过程中的变化见图 2，图注中包括地球中心引力、地球非球形引力、太阳引力、月球引力、气动力、光压和浮力。不同尺寸落球各作用力变化上下限见表 2。由于气动力与速度平方成正比，落球在最高点附近时速度（垂直方向）接近 0，故顶点附近气动力最小。另外，由于试验期间落球与太阳光线夹角变化较小，光压加速度稳定在 10^{-8} 量级，变化很小，约在 300 km 高度处光压和气动力量级大致相同。加速度计测量的是所有非保守力总和：气动力+浮力+光压力。浮力方向始终与重力加速度方向相反，其大小仅与所处位置的大气密度相关，随高度的变化如图 3 所示。分析可知，面质比的变化并不能改变加速度计的量程，但在相同灵敏度加速度计的情况下，增大面质比可以提高探测的高度。图 2—3 显示，下落过程中，由于速度和密度不断增大，气动力和浮力也不断增大，约在 150 km 高度处，二者均出现快速增长的拐点，气动力接近 10^{-4} 量级，浮力约为 10^{-10} 量级；继续下降过程中，约在 50 km 高度，垂直方向速度出现拐点急剧下降后趋于平稳，气动力也开始急剧下

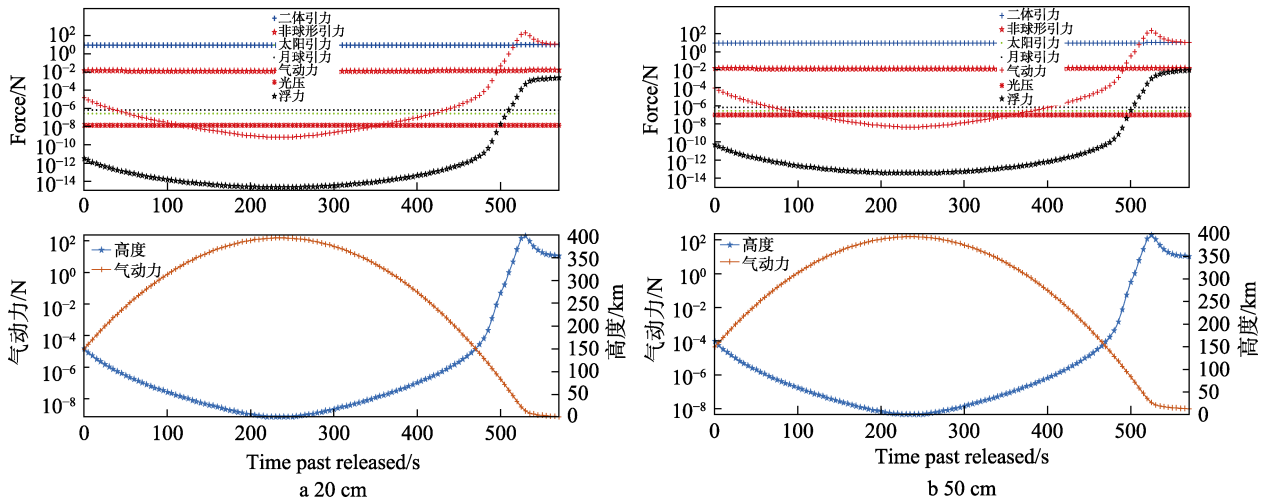


图 2 各作用力量的量级及变化
Fig.2 The magnitude and variation of acting force

降, 此时的气动力接近 3 N 量级, 此后继续增大, 最终可超过 200 N。

表 2 不同尺寸落球各作用力变化量级
Tab.2 Variation of acting force of falling balls with different sizes (m/s²)

作用力	20 cm		50 cm	
	上限	下限	上限	下限
中心引力	9.825075	8.714164	9.824964	8.714165
非球形引力	0.016088	0.012599	0.016086	0.012599
太阳引力	2.86×10^{-7}	2.69×10^{-7}	2.86×10^{-7}	2.69×10^{-7}
月球引力	7.02×10^{-7}	6.61×10^{-7}	7.02×10^{-7}	6.57×10^{-7}
气动力	211.8235	7.10×10^{-10}	1.95×10^2	4.44×10^{-9}
光压	1.48×10^{-8}	1.48×10^{-8}	9.25×10^{-8}	9.25×10^{-8}
浮力	0.002621	2.29×10^{-15}	4.08×10^{-2}	3.58×10^{-14}
非保守力	211.8238	1.23×10^{-8}	194.8601	7.66×10^{-8}

不同高度的具体量级见表 3。

表 3 不同尺寸落球典型高度非保守力量级
Tab.3 Non-conservative force level of typical height for falling ball with different size

20 cm 落球高度/km	50 cm 落球高度/km	非保守力量级/ (m·s ⁻²)
210	260	10 ⁻⁶
156	198	10 ⁻⁵
124	148	10 ⁻⁴
106	120	10 ⁻³
93	103	10 ⁻²
77	90	10 ⁻¹
58	75	10 ⁰
40	54	10 ¹
24	36	10 ²
6	10	10 ¹

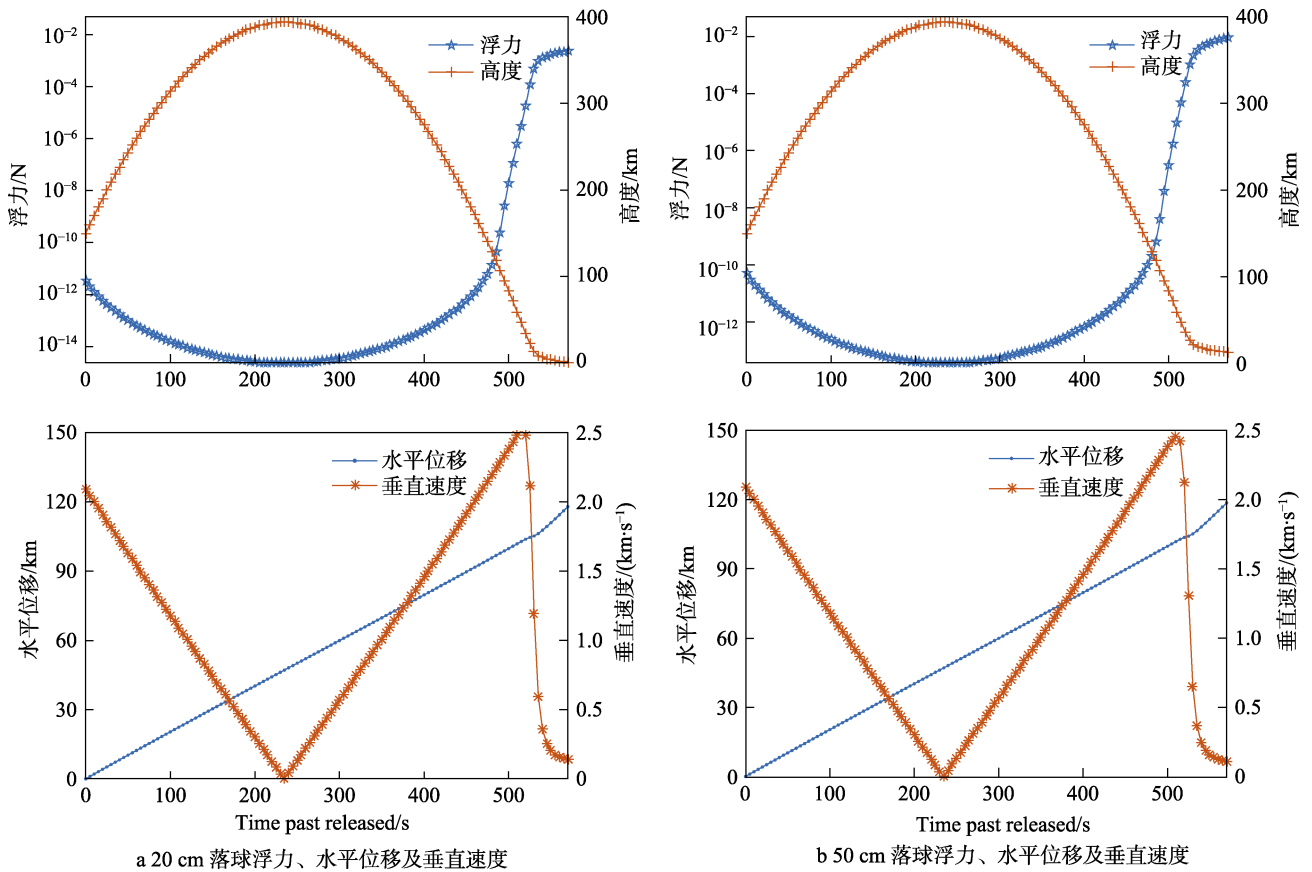


图 3 浮力量级变化和落球的水平位移及垂直速度

Fig.3 Variation of buoyancy and horizontal displacement and vertical velocity of falling ball

3.3 探测的空间分辨率

落球探测过程是高速运动的, 尤其在垂直方向上, 加速度计采样频率决定探测的空间分辨率。根据落球运行过程的垂直速度、水平速度和加速度计的采样频率, 图 4 为加速度计采样频率为 10、100、

1000 Hz 时, 在垂直和水平方向上的分辨率。水平速度一般远小于垂直方向, 故水平探测分辨率对加速度计采样率要求不高, 10 Hz 即可达到 20 m 水平分辨率。垂直方向上, 探测加速度计采样频率为 10、100、1000 Hz 时, 垂直探测分辨率分别优于 200、25、2.5 m。

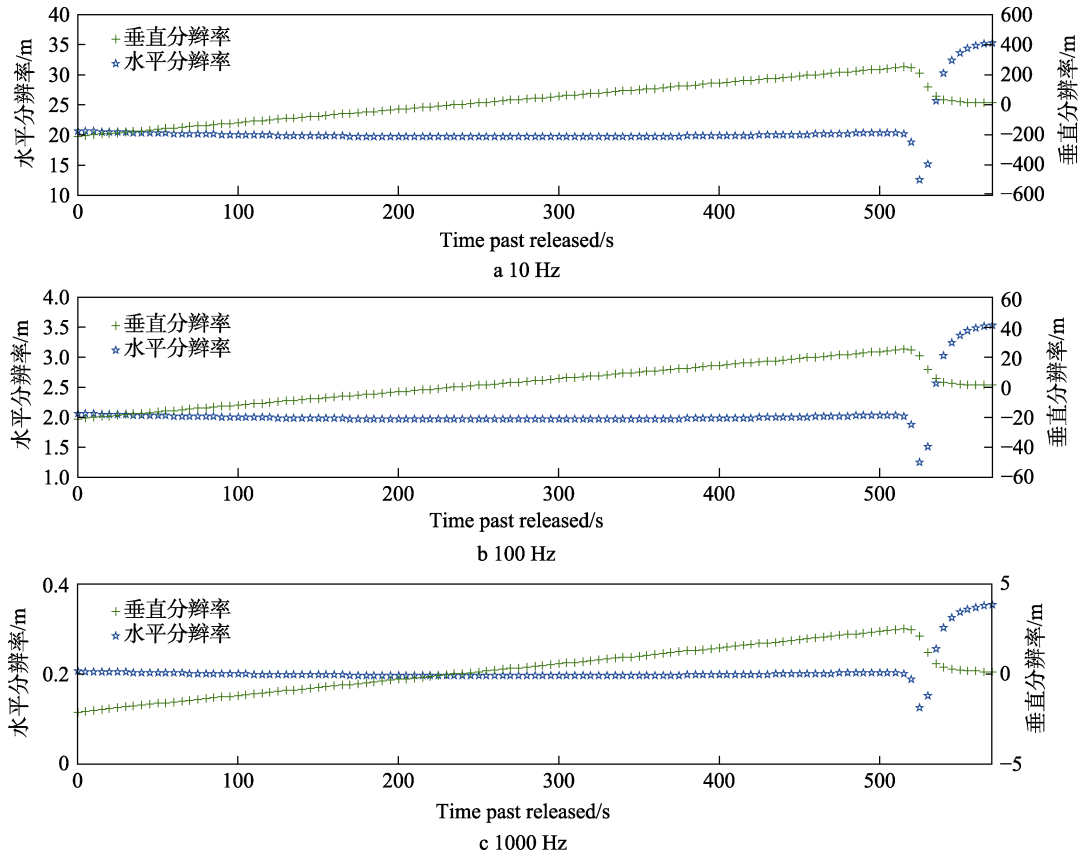


图 4 不同加计采样率对应的水平、垂直分辨率
Fig.4 Horizontal and vertical resolution in different accelerometer sampling rates

3.4 水平风场探测

水平风场是临近空间的重要要素。通过气动力公式，只讨论水平方向速度。水平方向的相对速度为：

$$v_{rH} = \|v_{sH} - v_w\| \quad (8)$$

式中： v_{sH} 是落球速度在水平方向的分量。

v_{rH} 的变化范围为：

$$(v_{sH} - v_w) \leq v_{rH} = \|v_{sH} - v_w\| \leq (v_{sH} + v_w)$$

$$v_{rH}^2 = \|v_{sH} - v_w\|^2 = (v_{sH} - v_w) \cdot (v_{sH} - v_w) =$$

$$v_{sH}^2 + v_w^2 - 2v_{sH}v_w \cos \theta$$

当 $v_{sH} \gg v_w$ 时：

$$v_{rH}^2 \approx v_{sH}^2 - 2v_{sH}v_w \cos \theta$$

当 $v_{sH} \approx v_w$ 时：

$$v_{rH}^2 = 2v_w^2(1 - \cos \theta)$$

当 $v_{sH} \ll v_w$ 时：

$$v_{rH}^2 \approx v_w^2$$

在风场和落球水平速度满足式(3)的情况下，取直径 $D=50$ cm，质量 $m=20$ kg，下落过程弹道系数 $0.5 C_a(A/m_g)\rho$ 和高度关系见图 5(上)，并给出不同加速度计分辨率为 1×10^{-5} 、 1×10^{-6} 、 1×10^{-7} 、 1×10^{-8} m/s^2 时可探测的水平风场量级，如图 5(下)所示，且在图中标注虚线处存在拐点，具体统计见表 4。可见，

在加速度计分辨率为 1×10^{-5} m/s^2 时，即可探测到米级的风场。磁暴情况 ($ap=400$) 下，使用 HWM07 风场模型计算我国及周边区域，高度为 10~90 km 区域的水平风场切片如图 6 所示，可见，水平风场变化范围是 0~80 m/s。

表 4 不同加速度计分辨率在不同高度可探测的水平风场
Tab.4 Detectable horizontal wind field at different accelerometer resolutions

加计分辨率/ ($m \cdot s^{-2}$)	水平风场/($m \cdot s^{-1}$)		
	150 km	100 km	50 km
1×10^{-5}	690	31	1.38
1×10^{-6}	218	9	0.43
1×10^{-7}	69	3	0.14
1×10^{-8}	21	1	0.04

4 不同流域对气动力系数的影响

由气动力公式可知，阻力系数是落球探测反演大气密度的重要参数。落球探测过程跨多个领域，阻力系数变化非常复杂。稀薄气体流动分为三大领域：滑流领域、过渡领域和自由分子流领域。领域划分的依据是克努森数 (Knudsen number) ^[9-10]

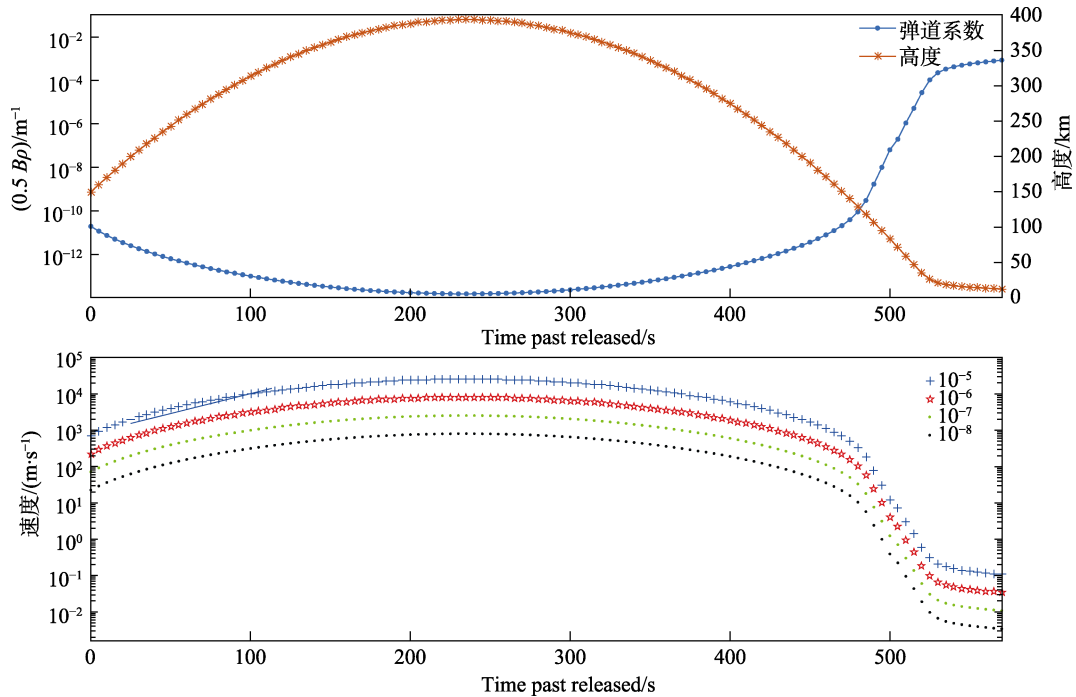


图5 弹道系数变化及不同加计分辨率对应可探测风场量级

Fig.5 Variation of ballistic coefficients and corresponding detectable wind in different accelerometer resolutions

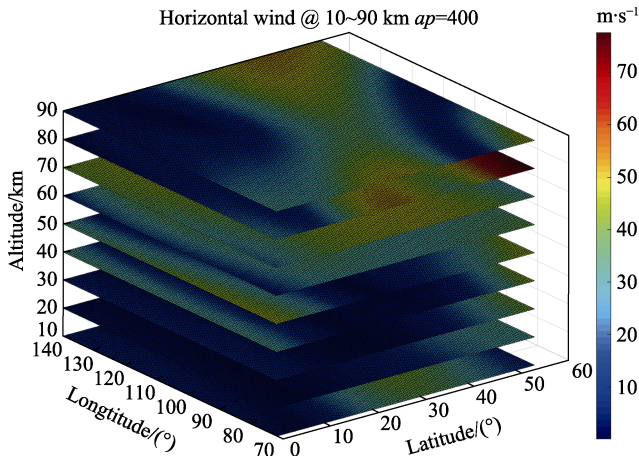


图6 我国及周边区域在10~90 km高度的水平风场
Fig.6 Horizontal wind at 10~90 km height in China and surrounding regions

表5 计算中阻力系数插值

Tab.5 Interpolation of drag coefficient calculation

高度/km	马赫数	雷诺数	阻力系数
115	2.75	2.41	2.44
110	3.12	5.99	2.37
105	3.40	14.5	2.20
100	3.69	38.4	1.84
95	3.88	101.0	1.51
90	3.98	277.0	1.29
85	3.66	645.0	1.19
80	2.87	1277.0	1.12
75	1.61	1491.0	1.03
70	0.854	1540.0	0.604

5 结论

1) 地球中心引力、非球形引力、太阳月球引力、气动力和浮力在探测中必须考虑, 气动力在 150 km 以下的变化区间为 $1 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^2 \text{ m/s}^2$ 。

2) 由于探测时间短, 太阳入射光线夹角几乎不变, 光压加速度稳定在 10^{-8} 量级。

3) 约在 300 km 高度时, 光压和气力量级相同, 150 km 以下的探测中可忽略光压力。

4) 面质比的变化并不能改变气动力变化范围 (即: 加计量程), 但在相同加速度计灵敏度情况下, 增大面质比可以提高探测的高度; 加速度计采样频率为 100 Hz 时, 垂直探测分辨率优于 25 m。加速度计灵敏度在 $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 时, 即可探测到水平风场米级

$$Kn = \lambda/l \tag{9}$$

式中: λ 为分子平均自由程; l 为流动特征长度。不同流动领域所对应的 Kn 数为:

$$\left. \begin{aligned} 0.01 < Kn < 0.1 & \text{ 滑流区} \\ 0.1 < Kn < 10 & \text{ 过渡流区} \\ 10 < Kn & \text{ 自由分子流} \end{aligned} \right\}$$

$$C_D = C_0 \left[1 + \frac{C_1}{C_0} Kn^{-1} \right] = C_0 \left[1 + \left(\frac{C_H + 2C_R}{C_0} \right) Kn^{-1} \right] \tag{10}$$

式中: $Kn^{-1} = \sqrt{2\pi n} \sigma^2 R$ 。

表5给出了计算中使用的阻力系数插值。

变化;

5) 综合考虑硬质落球探测大气密度风场时, 三轴加速度计灵敏度应不低于 $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 采样频率应在 100 Hz 水平。

参考文献:

- [1] 吕达仁, 陈泽宇, 郭霞, 等. 临近空间大气环境研究现状[J]. 力学进展, 2009, 39(6): 674-682.
LYU Da-ren, CHEN Ze-yu, GUO Xia. Recent Progress in Near Space Atmospheric Environment Study[J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(6): 674-682.
- [2] 陈凤贵, 陈光明, 刘克华. 临近空间环境及其影响分析 [J]. 装备环境工程, 2013, 10(04): 71-75.
CHEN Feng-gui, CHEN Guang-ming, LIU Ke-hua. Analysis of Near Space Environment and Its Effect[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(4): 71-75.
- [3] 李娜, 陈金松, 丁宗华, 等. 临近空间大气扰动风场的探测与分析[J]. 装备环境工程, 2017, 14(07): 35-40.
LI Na, CHEN Jin-song, DING Zong-hua, et al. Wind-oscillation Measurement and Study in Near Space[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(7): 35-40.
- [4] JONES M L, PETERSON W J. Falling Sphere Measurements, 30 to 120 km[J]. Meteorological Monographs, 1968, 8(31): 176-189.
- [5] 史东波, 胡雄, 涂翠, 等. 临近空间环境探空火箭膨胀落球探测技术[J]. 装备环境工程, 2018, 15(7): 89-92.
SHI Dong-bo, HU Xiong, TU Cui, et al. Near Space Environment Detection Technology—Sounding Rocket Falling Sphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(7): 89-92.
- [6] QUIROZ R S. Some Properties of Data from Falling Sphere Soundings[J]. Space Weather, 1969, 10(10): 227-256.
- [7] WRIGHT J B. A Summary of AFCRL Passive-Sphere Development Efforts and Experience[J]. Space Weather, 1969, 10(10): 1-38.
- [8] VALLADO D A. Fundamentals of Astrodynamics and Applications [M]. Spain: Springer Science & Business Media, 2001.
- [9] SENEGERS J V, LIN W Y Y, KAGMAR-PARSI B, et al. Kinetic Theory of Drag on Objects in Nearly Free Molecular Flow[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2014, 413(11): 409-425.
- [10] PHIBBS R G, STAFFANSON F L. A Capability Model for Passive Spheres at High Altitudes[J]. Space Weather, 1969, 10(10): 165-174.