0254-6124/2022/42(1)-0103-14 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

FAN Zhiqiang, SHENG Zheng, ZHAO Zengliang, ZHOU Yufeng, ZHANG Yisheng, JIANG Jun. Impact of Coriolis Force in the Falling-sphere Detection of Near-Space Atmospheric Environment (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(1): 103-116. DOI:10.11728/cjss2022.01.201203104

临近空间大气环境落球探测中的科氏力影响*

范志强[1,2] 盛 峥[3] 赵增亮[1,2]
周育锋[1,2] 张义生[1,2] 江 军[1,2]

1(中国人民解放军 61540 部队 北京 100029)

2(地理信息工程国家重点实验室 西安 710054)

3(国防科技大学气象海洋学院 长沙 410073)

摘 要 气象火箭落球探测技术是临近空间大气环境探测的重要方法。在落球探测数据处理过程中，通常忽略科氏力项的影响。本文利用经验预报模式构建落球探测正演仿真模型，并根据落球探测原理建立参数反演模型，在此基础上仿真模拟了落球探测数据处理过程中忽略科氏力项对大气参数反演精度的影响。在 95～100 km 高度范围内，忽略科氏力项将引起温度、密度、纬向风和经向风等大气参数较大反演误差，其误差特性随探测点纬度、各方向初始速度等呈现不同的变化规律，之后反演误差将随高度下降而逐渐下降。当高度下降至约 70 km 时科氏力项带来的影响基本可以忽略不计。研究结果表明在临近空间大气环境落球探测数据处理过程中不能忽略科氏力项的影响。本文结果对提高落球探测大气参数反演精度具有重要的参考价值。

关键词 临近空间，落球探测，大气参数反演，科氏力，误差评估

中图分类号 P356

Impact of Coriolis Force in the Falling-sphere Detection of Near-Space Atmospheric Environment

FAN Zhiqiang[1,2] SHENG Zheng[3] ZHAO Zengliang[1,2]

ZHOU Yufeng[1,2] ZHANG Yisheng[1,2] JIANG Jun[1,2]

1(61540 *Troops of PLA*, *Beijing* 100029)

2(*State Key Laboratory of Geo-Information Engineering*, *Xi'an* 710054)

3(*Institute of Meteorology and Oceanology*, *National University of Defense Technology*, *Changsha* 410073)

Abstract Meteorological rocket falling-sphere detection technology is an important method for detecting atmospheric environment in near space. The influence of Coriolis force was usually ignored in

* 国家自然科学基金项目资助 (41875045)

2020-12-03 收到原稿，2021-09-03 收到修定稿

E-mail：zqfan2016@sina.com

the data processing of falling-sphere detection. The empirical forecasting models were used to build a forward simulation model for falling-sphere detection, and a parameter inversion model was established according to the principle of falling-sphere detection. The forward model and inversion model were combined to simulate the inversion error of retrieved parameters when ignoring the Coriolis force term. In the height range of 95 ～ 100 km, the inversion errors of atmospheric parameters such as temperature, density, zonal wind and meridional wind are relatively large, and the error characteristics vary with the latitude of the detection point and the initial velocity in each direction. After that, the inversion error gradually decreases as the height decreases. When it drops to about 70km, the influence caused by the Coriolis force term is gradually negligible. The research results show that the influence of the Coriolis force term can't be ignored during the data processing of falling-sphere detection. The results of this paper have an important reference value for improving the accuracy of atmospheric parameter inversion for falling-sphere detection.

Key words Near-space, Falling-sphere Detection, Atmospheric Parameter Inversion, Coriolis force, Error assessment

0 引言

临近空间通常是指距地球表面 20～100 km 的空域,处于现有航空器最高飞行高度和卫星最低轨道高度之间[1]。相比低层大气环境和轨道大气环境,临近空间大气环境是目前了解最少的,主要原因是稀薄的临近空间中性大气探测比较困难,对其的关注和投入也相对较晚[2]。随着临近空间重大应用价值逐步被挖掘,对临近空间大气环境的探测认知成为关注的重点[3],开发了激光雷达、流星雷达、火箭与下投式探空仪、落球探测、卫星遥感探测、掩星探测等多种探测手段[4-7]。

在诸多临近空间大气环境探测方法中,气象火箭落球探测技术能够原位获取 30～100 km 高度范围内的大气环境信息,是一种极具应用价值的临近空间大气环境探测手段[8]。自 20 世纪 50 年代以来,国外已经开展了落球探测实验,以研究中高层大气环境参数。Bartman 等[9] 通过使用携带应答器和天线的膨胀式落球获得大气密度廓线和大气温度廓线。Otterman 等[10] 提出了使用携带加速度计的膨胀充气式落球观测大气密度和风速。Faucher[11] 通过装载加速度计的落球来反演不同高度的大气密度。Lübken 等[12] 对激光雷达、落球探测、电离真空计与探空仪等确定中高层大气密度和温度的各种探测方法进行了广泛的比较,结果表明落球探测数据与激光雷达、探空仪等探测数据之间的一致性较好。Schmidlin 等[13] 的研究结果表明落球探测获得的密度数据包含一些与探测误差无法区分的线性偏差,但这些线性偏差不会显著影响由大气密度数据导出的大气温度数据的准确度。欧洲大学生火箭实验计划(REXUS)利用 GPS 对刚性落球的下降过程进行定位[14],并根据位移数据来反演计算大气密度、温度以及风场廓线,这个实验被进一步应用于 2016 年发射的研究探测火箭。

中国开展气象火箭落球探测技术的试验研究始于 1971 年,主要利用和平六号气象火箭搭载膨胀落球作为探测器开展初步试验,而到 1979 年和平六号气象火箭终止研制,此后一段时间内气象火箭落球探测技术进入停滞期[15]。近年来临近空间飞行器的研究活动日益增多,临近空间大气环境要素的探测需求日益迫切,落球探测技术引起国内重新关注并开展了相关飞行试验。Shi 等[16] 系统介绍了探空火箭膨胀落球探测原理、系统组成和探测过程,利用理想仿真模型对落球探测技术进行了验证。Ge 等[17] 利用实际膨胀落球飞行数据初步反演获得大气水平风场参数,其风场数据与 MERRA-2 风场数据在 30～60 km 高度范围内具有较好的一致性,特别是两组数据的纬向风相关系数达到 0.98。国外早期科研人员在气象火箭落球探测数据处理过程中,认为科氏力量级较小,为简化计算,通常对科氏力影响忽略不计[18],然而这可能引起 70 km 以上高度范围内的落球探测大气风场反演数据较大的偏差。目前,研究人员在开展落球探测数据处理过程中逐渐加入科氏力项进行反演计算,但对科氏力项在落球大气参数反演精度中的作

用认识还不够清晰,还没有相关文献对科氏力影响进行系统分析。

本文在落球探测基本原理的研究基础上,利用 NRLMSISE-00 经验大气模式和 HWM07 水平风场模式提供大气背景环境,构建落球探测正演仿真模型和大气参数反演模型。通过数值模拟方法,量化评估了科氏力项对落球探测大气参数反演精度的影响,明确给出落球探测数据处理过程中科氏力项不可忽略的证据。本文研究工作对于深入认识落球探测技术和推动临近空间大气环境落球探测业务化运行具有重要应用价值。

1 落球探测原理

气象火箭落球探测能够实现 30～100 km 高度范围内密度、风场、温度等气象要素的原位测量,其基本工作原理为:通过发射气象火箭,在 100 km 以上高度分离释放落球,落球在被释放出去后通过内部充气机构快速完成自动充气,形成超压球;球体由于惯性飞行至顶点开始下落,由雷达或 GPS 跟踪下降的球体,获得球体的位置信息及其下降路径;当下降至 30 km 左右,由于球体内部气压小于 30 km 左右高度上的气压,落球将产生形变,至此探测过程结束。在数据处理过程中,可通过求解动力学平衡方程反演出 30～100 km 高度范围内的大气密度廓线及大气风场,大气温度廓线可通过流体静力学方程和理想气体方程由已获得的大气密度廓线计算导出。

图 1 给出了气象火箭落球探测时的三维坐标系及其落球的受力分析结果。由图 1 所示,以发射点在海平面上的投影为原点 O,建立三维直角坐标系,x 轴指向正东,y 轴指向正北,z 轴垂直于 Oxy 平面。

根据牛顿第二定律,落球在运动时主要受重力、大气浮力、空气阻力和科氏力的影响,其动力学平衡方程为

$$m\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = m\boldsymbol{g} - \frac{1}{2}\rho C_\mathrm{d} A_\mathrm{s} |\boldsymbol{v}_\mathrm{r}| \boldsymbol{v}_\mathrm{r} - \rho V_\mathrm{s} \boldsymbol{g} - 2m\boldsymbol{\omega}\boldsymbol{v}. \quad (1)$$

其中,m 代表落球质量,$\boldsymbol{g}$代表重力加速度,ρ 代表大气密度,C_d 代表阻尼系数,A_s 代表落球的横截面积,$\boldsymbol{v}$代表落球运动速度,$\boldsymbol{v}_\mathrm{r}$代表落球相对于空气的运动速度,$V_\mathrm{s}$ 代表落球体积,ω代表地球自转角速度,h 代表落球距海平面的高度。

将式 (1) 改写为如下三维分量表达式:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = (m-\rho V_\mathrm{s})g_x - \dfrac{1}{2}\rho C_\mathrm{d} A_\mathrm{s} |\boldsymbol{v}_\mathrm{r}| (\dot{x} - W_x) - mC_x, \\ m\ddot{y} = (m-\rho V_\mathrm{s})g_y - \dfrac{1}{2}\rho C_\mathrm{d} A_\mathrm{s} |\boldsymbol{v}_\mathrm{r}| (\dot{y} - W_y) - mC_y, \\ m\ddot{z} = (m-\rho V_\mathrm{s})g_z - \dfrac{1}{2}\rho C_\mathrm{d} A_\mathrm{s} |\boldsymbol{v}_\mathrm{r}| (\dot{z} - W_z) - mC_z. \end{cases} \quad (2)$$

其中,W_x、W_y、W_z代表风速的三维分量,C_x、C_y、C_z代表科氏力加速度的三维分量,且有落球相对于空气的相对速度为

$$\boldsymbol{v}_\mathrm{r} = \sqrt{(\dot{x}-W_x)^2 + (\dot{y}-W_y)^2 + (\dot{z}-W_z)^2}. \quad (3)$$

由万有引力公式可得简化的重力加速度三维分量表达式

$$g_x = g_0\frac{x}{R_\mathrm{e}},\ g_y = g_0\frac{y}{R_\mathrm{e}},\ g_z = g_0\left(1-\frac{2z}{R_\mathrm{e}}\right). \quad (4)$$

其中,g_0 代表发射位置的海平面重力加速度,R_e 为地球平均半径。求解在三维坐标系中的运动分量方程组即式 (2),经整理后可得密度和风速三维分量的表达式

$$\rho = \frac{2m(g_z - \ddot{z} - C_z)}{C_\mathrm{d}A_\mathrm{s}(\dot{z}-W_z)\boldsymbol{v}_\mathrm{r} + 2V_\mathrm{s}g_z}, \quad (5)$$

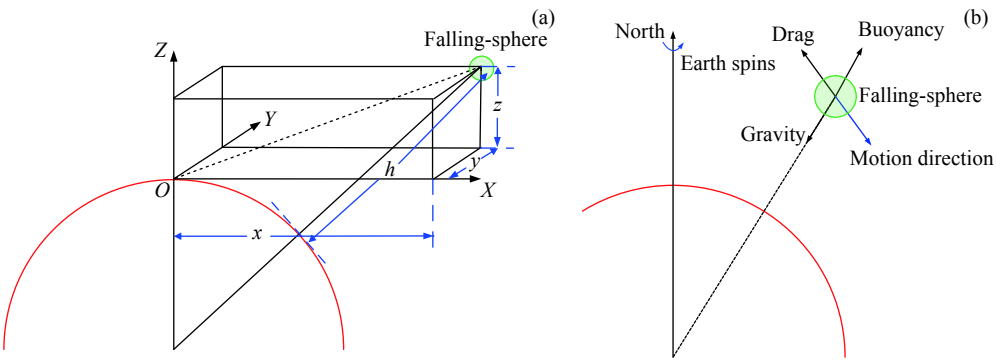


图 1 落球的空间三维坐标系(a)与受力分析(b)

Fig. 1 Three-dimensional coordinate system (a) and force analysis (b) of falling-sphere

$$\begin{cases} W_x = \dot{x} - \dfrac{(\dot{z}-W_z)[\ddot{x}-g_x(1-\rho V_s/m)+C_x]}{\ddot{z}-g_z(1-\rho V_s/m)+C_z}, \\ W_y = \dot{y} - \dfrac{(\dot{z}-W_z)[\ddot{y}-g_y(1-\rho V_s/m)+C_y]}{\ddot{z}-g_z(1-\rho V_s/m)+C_z}, \\ W_z = 0 \text{ 或 } \dfrac{xW_x+yW_y}{z+R_e}. \end{cases} \tag{6}$$

通过对落球下降过程进行跟踪定位，可得落球的位置坐标 x, y, z, 进而求得速度$\dot{x}$，$\dot{y}$，$\dot{z}$与加速度$\ddot{x}$，$\ddot{y}$，$\ddot{z}$, 解上述方程组可求出大气密度 ρ 和风速分量 W_x, W_y, W_z。

在已获得大气密度廓线的基础上，通过静力平衡方程和理想气体方程可反演获得大气温度廓线。其中，大气温度 T 的计算公式为

$$P(z_i)=P(z_{i-1})-\int_{z_{i-1}}^{z_i}\rho(z)g(z)\mathrm{d}z, \quad i=1,2,3,\cdots,N; \tag{7}$$

$$T(z_i)=\frac{P(z_i)}{\rho(z_i)R}=\frac{\rho(z_{i-1})}{\rho(z_i)}T(z_{i-1})-\frac{1}{R}\int_{z_{i-1}}^{z_i}\frac{\rho(z)g(z)}{\rho(z_i)}\mathrm{d}z. \tag{8}$$

其中，P 代表大气压力，ρ 代表大气密度，R 代表气体常数（R=287.04 J·kg^{-1}·K^{-1}），g 代表垂直重力加速度，z 代表海拔高度，下标 i 代表海拔高度序列号（共分 N 层高度）。式 (7) 中的积分计算由下式完成：

$$\int_{z_{i-1}}^{z_i}\rho(z)g(z)\mathrm{d}z = g_z\ \exp\left[\frac{\ln(\rho_i)+\ln(\rho_{i-1})}{2}\right](z_i-z_{i-1}). \tag{9}$$

2 正演仿真模型

为验证气象火箭落球探测原理，深入研究误差影响因素，利用 NRLMSISE-00 大气模式和 HWM07 风场模式构建大气背景环境，并在此基础上建立落球探测正演仿真模型。该模型能够在已知球体参数、坐标系、大气环境背景和初始值（初始位置和速度）等条件下，给出落球下降时的飞行轨迹。

2.1 经验模式介绍

MSIS（Mass Spectrometer and Incoherent Scatter empirical model）是基于卫星上测得的成分资料（OGO-6、SanMarco3、AEROS-A、AE-C、AE-D、AE-E、ESRO4、and DE-2），地面非相干散射雷达包括 Millstone Hill、St. Santin、Arecibo、Jicamarca、Malvern 测得的温度资料和火箭探测的大气资料创建的高层大气模式，模式经历了 MSIS-83、MSIS-86、MSIS-90 几个版本，NRLMSISE-00 是最新版本。该系列的模式考虑大气的混合及扩散过程，定义了大气温度，并提供大气成分和密度，能较好地计算 He、O、N_2、O_2、Ar、H、N 等 7 种气体的数密度和总的数密度以及大气温度[19]。

HWM（Horizontal Wind Model）是高层大气风场的经验模式，可给出大气平均风场和大气潮汐波动的信息。最早的 HWM 模式是基于 AE-E 和 DE-2 卫星的风场数据，利用有界球谐函数来描述纬向和经向分量。模式的第一个版本是 HWM87，模拟 220 km 以上的大气风场。后来随着地面非相干散射雷达和 Fabry-Perot 光学干涉仪探测数据的增多，建立了可模拟下延至 100 km 风场的 HWM90 版本。之后随着 MF 雷达和流星雷达的发展，建立了可模拟地面风场的 HWM93 模式。近些年各种高空探测方式迅速发展，卫星、火箭和地基探测的数据越来越丰富，经验模式进一步发展为 HWM07 模式，可模拟 0～500 km 高度范围内的地球大气风场[20]。

2.2 仿真模型建立

正演仿真模型计算流程如图 2 所示。其中输入参数包含：球体直径和质量、球体初始位置和速度、大气温度、密度、水平风场等环境背景参数以及确定的站点经纬度以建立坐标系。首先根据输入参数计算空气阻尼系数，进而计算各个方向上的加速度；然后利用位置、速度、加速度等信息计算一定时间间隔内的落球位移，进而更新落球的位置和速度；判断当前位置是否低于 30 km，若否，则重新计算空气阻尼系数、加速度和位移，并更新位置，若是，则输出落球飞行轨迹。需要说明的是：①垂直风速的计算方法设定为 $W_z=\dfrac{xW_x+yW_y}{z+R_e}$；②时间步长统一设置为 0.1 s；③空气阻尼系数计算是落球探测参数反演计算中的关键步骤，同样也是正演仿真模型的重要计算步骤。本文主要分析科氏力项对落球探测参数反演精度的影响，只要在正演模型与反演模型中应用同样的阻尼系数计算方法，即可排除空气阻尼系数对反演结果的影响。为便于计算，本文采用 Henderson[21] 提出的阻力系数计算方案。

2.3 仿真模型验证

为验证上述仿真模型的有效性和准确性, 利用落球飞行试验中的实测数据对仿真模型进行检验。将模型输入参数设置为实际落球飞行试验的初始参数, 运行后获得的模拟飞行轨迹与落球试验飞行轨迹相比较, 以验证仿真模型。表 1 给出了进行模型验证使用的初始参数设置。

图 3 给出了正演模型仿真落球飞行轨迹与实际探测中落球飞行轨迹的对比结果。由图 3 可以看出, 两者在 z 方向上位移廓线、以及 x, y, z 方向上的速度、加速度廓线一致程度较高, 仅在 x, y 方向上的位移轨迹存在一定差异, 这主要是由仿真模型的背景风场与飞行试验时的大气风场不同而造成的。总体来说, 落球探测正演仿真模型能准确模拟出经验模式大气背景环境下球体的下降轨迹, 但因经验模式大气数据缺少瞬时变化信息, 仿真模型还不能模拟扰动背景下球体运动速度和运动加速度的复杂变化。

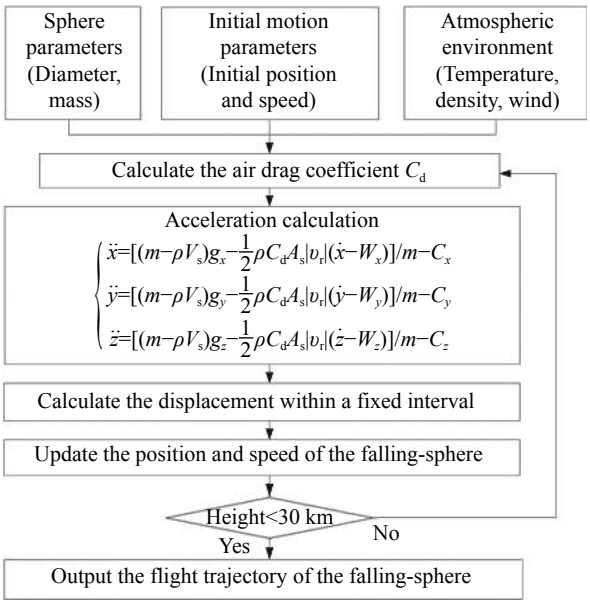


图 2 落球探测正演仿真模型流程

Fig. 2 Flow chart of forward simulation model for falling-sphere detection

3 参数反演模型

3.1 反演模型构建

根据气象火箭落球探测的基本原理, 在式(5)和式(6)中 m 代表球体的质量, g_0 代表重力加速度, A_s 代表球体的横截面积, V_s 代表球体的体积, 这些都是已知常量; 垂直风速 W_z 可通过水平风场计算获得; 同时根据球体下降时的定位数据可计算获得速度 $\dot{x}$, $\dot{y}$, $\dot{z}$ 与加速度 $\ddot{x}$, $\ddot{y}$, $\ddot{z}$ 等信息, 因此通过简化可知大气风场是一个关于大气密度的一元函数。若将式(6)代入到式(5)中, 则可以得到大气密度的表达式为

$$\rho = \boldsymbol{F}(\rho)/C_d(\rho, T, \boldsymbol{v}_r). \tag{10}$$

其中: $\boldsymbol{F}$ 为关于大气密度的一元函数, $|\boldsymbol{v}_r|$ 表示落球与空气的相对速度; 阻尼系数 C_d 由马赫数、雷诺数计算获得, 可简要表示成关于大气密度、大气温度以及相对速度的函数。由于大气温度可由大气密度廓线推导计算获得, 而且落球与空气的相对速度也是关于大气密度的函数, 因此上式可简化为

$$\rho = \boldsymbol{F}(\rho)/C_d(\rho). \tag{11}$$

综上所述, 落球探测大气参数的反演计算可以转化为求解关于大气密度的非线性方程。因为空气阻尼系数 C_d 由马赫数和雷诺数决定, 没有通用的表达形式, 因此无法直接通过解析法得出大气密度, 需要进行迭代计算。具体反演迭代计算流程如图 4 所示, 具体步骤为:

Step 1 利用经验模式生成初始的大气密度廓线 ρ_0 及相应的大气温度廓线 T_0, 输入落球飞行轨迹、速度和加速度信息;

Step 2 计算得到风场数据 W_x, W_y, W_z 和球体与空气的相对运动速度 $\boldsymbol{v}_r$;

Step 3 计算马赫数、雷诺数和阻力系数 C_d;

Step 4 利用阻力系数、风场数据与落球运动数据计算获得新的大气密度廓线 ρ, 相应可得到大气温度廓线 T;

表 1 模型验证的初始参数设置

Table 1 Initial parameter settings for model verifications

球体参数		坐标系原点		初始位置/km			初始速度/(m·s^{-1})		
直径/m	质量/g	经度	纬度	x_0	y_0	z_0	v_x	v_y	v_z
1.003	275.3	86°E	41°N	48.6	–1.8	99.3	243.6	–16.3	307.1

Step 5 判断$|\rho-\rho_0|<10^{-5}\rho_0$,若满足,则结束迭代计算;若不满足,则令$\rho_0=\rho_0+a(\rho-\rho_0)$(其中$0<a<1$),并计算相应的大气温度落线 T_0,然后重复执行 Step 2 到 Step 5 直至迭代结束;

Step 6 输出大气密度、大气温度、经向风和纬向风等大气参数反演结果。

3.2 反演模型验证

将正演仿真模型计算结果作为反演模型的输入,对比反演输出大气参数和仿真模型的大气环境背景,以综合验证两个模型的准确性,并为误差因素分析提供基础。为消除阻尼系数、初始密度廓线、垂直风速和最高点温度猜想值等因素的影响,相关参数条件设

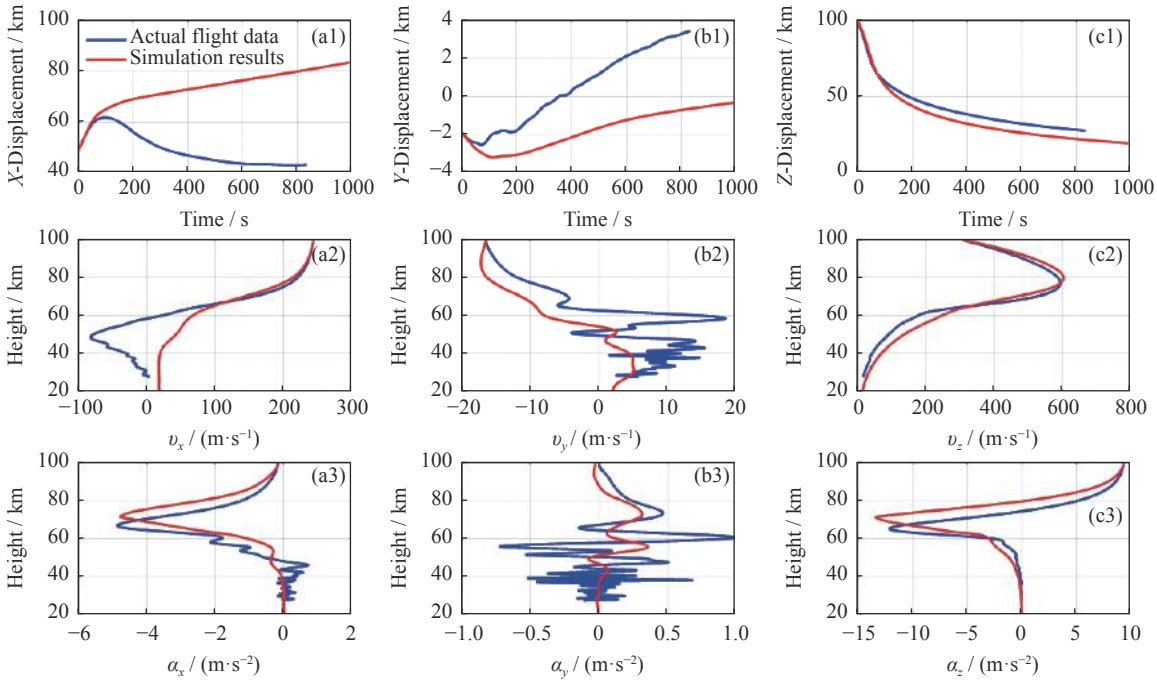


图 3 正演仿真模型落球飞行轨迹与真实落球飞行轨迹的对比

Fig. 3 Comparison of the modeling flight path and the real flight path

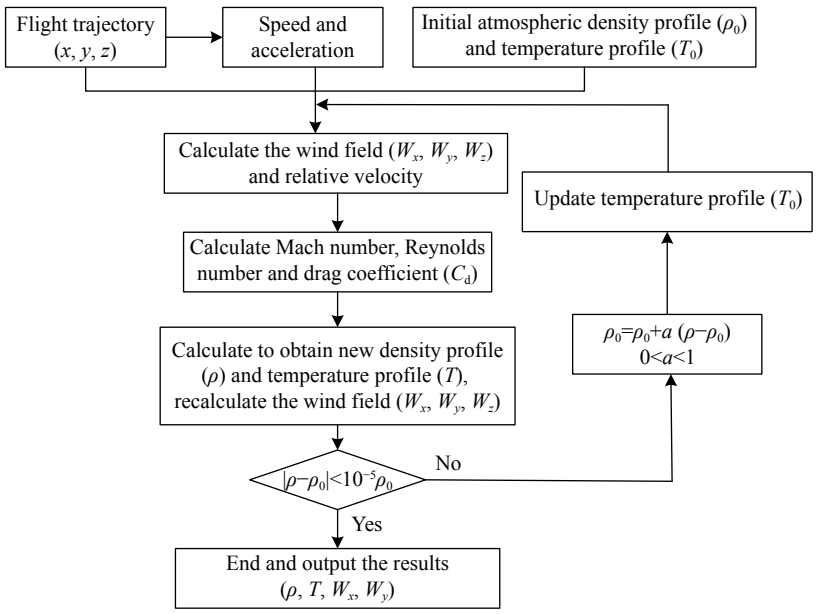


图 4 落球探测大气参数反演模型流程

Fig. 4 Flow chart of inversion model of atmospheric parameters for falling-sphere detection

置为:

①两个模型使用同样的空气阻尼系数计算方法;②两个模型使用同样的垂直风速计算方法;③反演模型中的初始大气密度廓线与正演时的大气密度廓线一致;④反演计算中由大气密度廓线推导大气温度廓线时,初始最高点的温度值设置与背景环境在该点温度值一致。

在上述条件设置情况下应用 2.3 节中正演仿真模型获得的落球飞行轨迹对落球探测反演模型进行验证。图 5 给出落球探测大气参数反演结果与正演模型设定的背景环境大气参数的对比结果。由图 5 可知,反演获得的大气参数廓线与背景环境大气参数廓线具有高度的一致性,其温度误差仅在–1.2～0.8 K 之间,密度误差在–0.9%～0.3% 之间,经向风和纬向风的误差均在–0.15～0.1 m·s^{-1} 之间。另外,温度误差还包含大气密度廓线推导计算大气温度廓线时的自身误差。如图 6 所示,由大气密度计算获得的温度廓线与模式提供的温度廓线存在微弱的偏差,这些偏差在–1～0.6 K 之间。综上所述,联合验证结果表明本文设计的落球探测正演仿真模型和反演计算模型准确、有效,同时较直观地证明落球探测技术是一种高精度临近空间大气环境探测方法。

4 科氏力影响评估

科氏力是对旋转体系中进行直线运动的质点,由于惯性相对于旋转体系产生的直线运动偏移的一种描述[22]。地球自转就是一种旋转体系,落球在运动过程中不可避免地要受到科氏力的影响。然而在较多落球探测数据处理算法中忽视了科氏力的影响,认为落球探测中科氏力项可忽略不计,这直接降低了落球探测大气参数反演精度。本文将在前面建立的正演仿真模型和反演计算模型的基础上,量化分析忽略科氏力项对落球探测大气参数反演精度的影响。

4.1 科氏力计算方法

根据标准坐标系中运动方程,地球自转角速度可表示成为

$$\boldsymbol{\omega}=\omega_x\boldsymbol{i}+\omega_y\boldsymbol{j}+\omega_z\boldsymbol{k}. \tag{12}$$

其中,$\omega_x=0$,$\omega_y=\boldsymbol{\omega}\cos\varphi$,$\omega_z=\boldsymbol{\omega}\sin\varphi$,$\varphi$表示纬度,$\boldsymbol{\omega}$表示地球自转角速度大小,$\omega=2\pi/(24\times3600)\ \mathrm{s}^{-1}\approx7.3\times10^{-5}\ \mathrm{s}^{-1}$。于是科氏力为

$$\begin{aligned}-2\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{v}&=-2\begin{vmatrix}\boldsymbol{i}&\boldsymbol{j}&\boldsymbol{k}\\ \omega_x&\omega_y&\omega_z\\ \dot{x}&\dot{y}&\dot{z}\end{vmatrix}=\\&-2\Big[(\omega_y\dot{z}-\omega_z\dot{y})\boldsymbol{i}-(\omega_x\dot{z}-\omega_z\dot{x})\boldsymbol{j}+\\&(\omega_x\dot{y}-\omega_y\dot{x})\boldsymbol{k}\Big].\end{aligned} \tag{13}$$

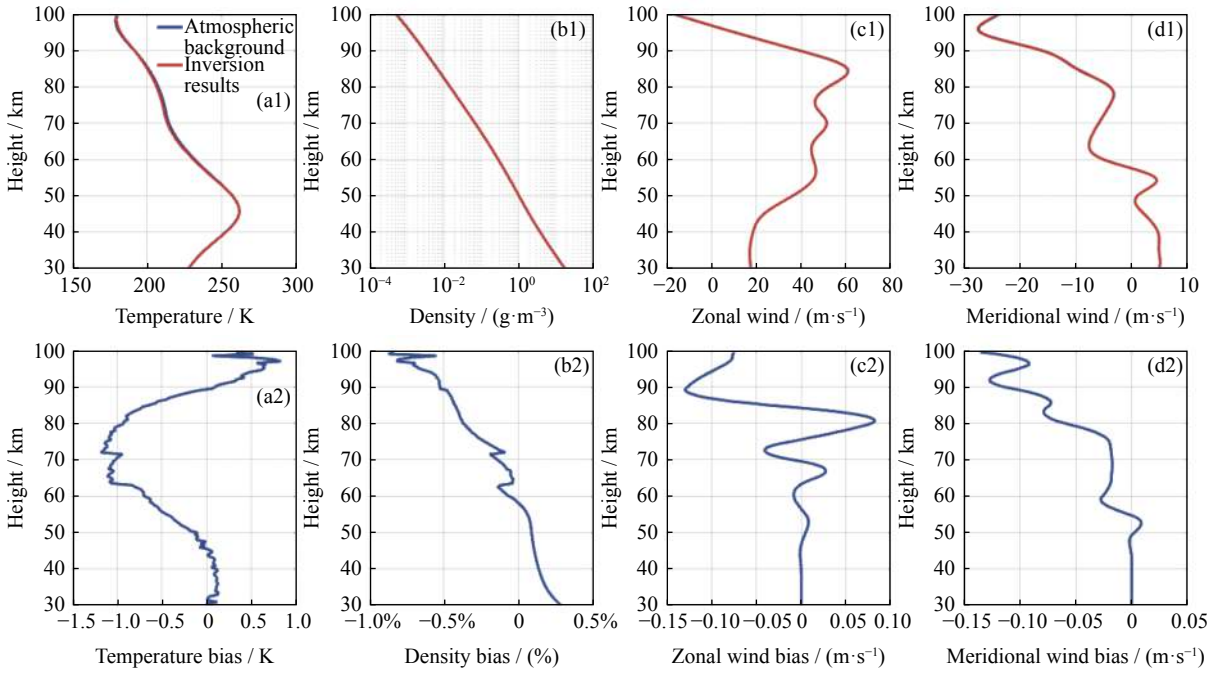


图 5 落球探测大气参数反演结果与背景环境大气参数对比

Fig. 5 Comparison of atmospheric parameters between inversion results and background environment

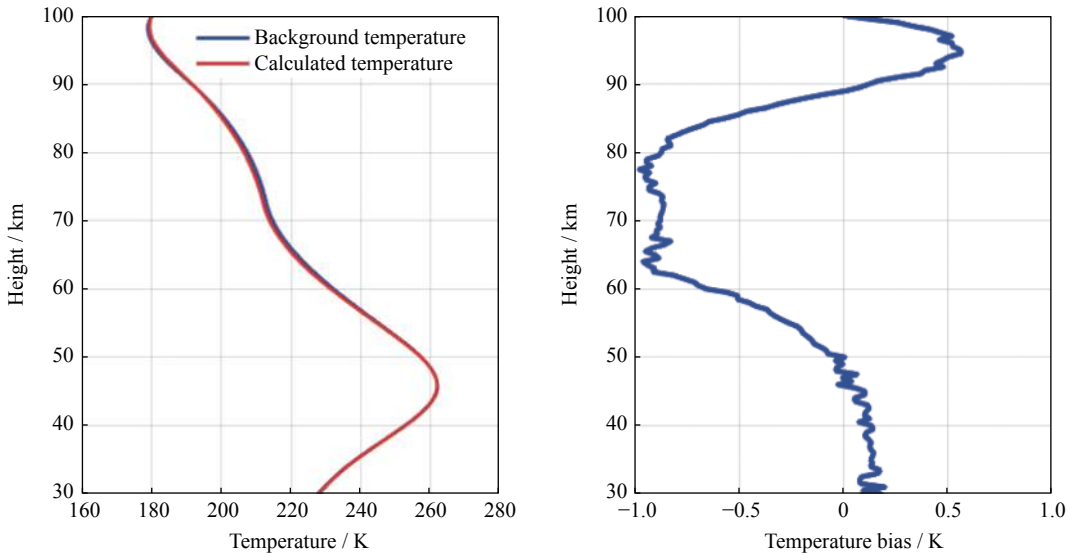


图 6 大气密度廓线推导计算大气温度廓线时的误差

Fig. 6 Error diagram of atmospheric temperature profile derived from atmospheric density profile

因此式 (2) 中的科氏力加速度分量可表示为

$$\begin{cases} C_x = 2(\omega_y \dot{z} - \omega_z \dot{y}), \\ C_y = 2(\omega_z \dot{x} - \omega_x \dot{z}), \\ C_z = 2(\omega_x \dot{y} - \omega_y \dot{x}). \end{cases} \tag{14}$$

4.2 评估计算方法

根据大气参数的数据特点, 温度、纬向风和经向风速以反演结果与背景环境参数之间的绝对误差来评估不同条件对这些参数反演精度的影响; 而大气密度则以反演结果与背景环境参数之间的相对误差来评估所受到的影响。具体方法为

$$\Delta X_i = X_i^{\mathrm{r}} - X_i^{\mathrm{b}}, \tag{15}$$

$$\Delta Y_i = \frac{Y_i^{\mathrm{r}} - Y_i^{\mathrm{b}}}{Y_i^{\mathrm{b}}}. \tag{16}$$

其中, X 代表大气温度、纬向风和经向风等环境元素, Y 代表大气密度, 上标 r, b 分别表示反演结果和背景环境, 下标 i 表示高度分层, ΔX_i和ΔY_i分别表示相应元素的绝对误差和相对误差。图 7 给出了科氏力项影响的计算分析流程。为评估科氏力项对落球探测大气参数反演精度的影响, 分别在正演仿真模型和参数反演模型中考虑和忽略科氏力项, 然后将反演输出的大气参数与正演设定的环境背景进行比较, 比较结果便是科氏力项在落球探测中的误差影响。

4.3 仿真模拟方案

根据科氏力的计算方法可知, 其大小仅与纬度和 x, y, z 方向上物体绝对运动速度有关, 因此本文通过设置 4 种不同的初始参数方案以评估不同条件下忽略科氏力项对落球探测数据反演精度的影响(其他条件设置见 3.2 反演模型验证中的条件设置)。表 2 列出 4 种不同初始参数方案, 其中每种方案中的变量为该方案条件下需要进行分析的影响因子, 这些变量的具体取值在评估结果中给出。

4.4 影响评估结果

4.4.1 不同纬度条件下科氏力项的影响

采用方案一的初始参数设置方案, 以评估不同纬度条件下忽略科氏力项对落球探测大气参数反演精度的影响, 其中纬度变量取值分别为 0°, 20°N, 40°N, 60°N, 80°N。图 8 给出了不同纬度条件下忽略科氏力项时的大气参数反演结果及误差廓线。作为对比, 同时给出了背景环境大气参数和考虑科氏力项时的大气参数反演结果。由图 8 可知, 在方案一的初始参数条件下, 忽略科氏力项对落球探测反演获得的温度、密度、纬向风和经向风均存在一定影响, 特别是在 90～100 km 高度区域内具有显著的影响。随着纬度增大, 温度、密度和纬向风受科氏力项的影响越来越小, 而经向风受科氏力项的影响逐渐增大。特别是, 在赤道区域(纬度 0°), 温度、密度和纬向风在 90～100 km 高度区域的最大误差分别能达到–59 K, 26% 和 –60 m·s^{-1}; 在 80°N 纬度区域, 经向风在 100 km 高度处的误差最大, 约为–13 m·s^{-1}。其中, 温度反演误差在 100 km 高度上为 0, 这与参数设置有关, 并不能代表忽略科氏力项时引起的误差。在约 98 km 以下高度范围内, 随着高度下降, 温度、密度、经向风和纬向风

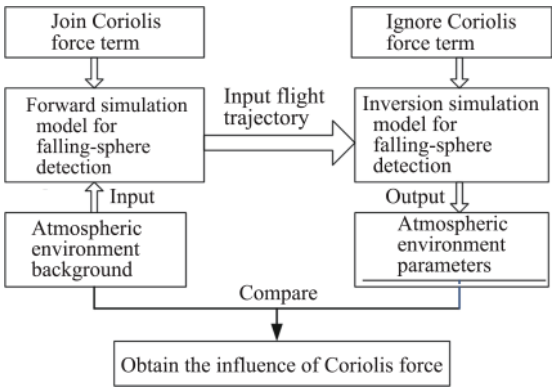


图 7　科氏力项影响的计算分析流程

Fig. 7　Calculation flow chart of Coriolis force term influence

表 2　初始参数设置

Table 2　Initial parameter schemes

方案	球体参数		坐标系原点		初始位置/km			初始速度/(m·s^{-1})		
	直径/m	质量/g	经度	纬度	x_0	y_0	z_0	v_{x_0}	v_{y_0}	v_{z_0}
方案一	1	300	86°E	**变量**	0	0	100	50	50	200
方案二	1	300	86°E	40°N	0	0	100	**变量**	50	200
方案三	1	300	86°E	40°N	0	0	100	50	**变量**	200
方案四	1	300	86°E	40°N	0	0	100	50	50	**变量**

的误差均呈下降趋势; 当下降到 85 km 时, 反演密度受科氏力项的影响已极小, 忽略科氏力项时反演的密度廓线和考虑科氏力项时反演的密度廓线高度一致; 当下降到 70 km 时, 反演温度和水平风场受科氏力项的影响也变得极小, 忽略科氏力项时的温度廓线、水平风场廓线和考虑科氏力项时的反演结果也相当一致。

表 3 给出典型高度上不同纬度条件下忽略科氏力项时的大气参数反演误差。与图 8 显示的结果一致, 表 3 给出的数据结果同样证实了落球探测中的科氏力项影响随纬度和高度的变化规律。而数值结果更为直观地表明: 虽然在 70 km 高度上的大气参数反演误差已极小, 但仍存在温度、密度和纬向风误差随纬度增加而变小、经向风误差随纬度增加而变大的规律, 且在所有纬度区域内, 忽略科氏力项时的大气参数反演误差仍超过考虑科氏力项时的反演误差。

4.4.2　不同v_{x_0}条件下科氏力的影响

采用方案二的初始参数设置方案, 以评估不同v_{x_0}(x 轴方向上的初始速度, x 轴向东为正)条件下忽略科氏力项对落球探测大气参数反演精度的影响, 其中v_{x_0}变量取值分别为 0, 50 m·s^{-1}, 100 m·s^{-1}, 150 m·s^{-1}。与图 8 相一致, 图 9 给出的也是忽略科氏力项时的大气参数反演结果及误差廓线, 但其中的考察变量为v_{x_0}参数。由图 9 可知, 在方案二的初始参数条件下, 忽略科氏力项时, 温度、密度、纬向风和经向风的反演误差大致随v_{x_0}取值增加而增加。有所不同的是在 95～100 km 高度范围内, 温度误差和密度误差未随v_{x_0}取值增大而增大, 而表现为更复杂的变化规律。进一步研究可以发现, 当v_{x_0}取值为 0 时, 温度、密度和经向风等参数受科氏力项的影响较小, 特别是经向风在忽略科氏力项后与考虑科氏力项的反演结果极为一致, 其误差均为厘米级风速量级。

表 4 给出典型高度上不同v_{x_0}条件下忽略科氏力项时的大气参数反演误差。与图 9 的结果一致, 表 4 给出的数据结果同样证实了落球探测中的科氏力项影响随v_{x_0}取值的变化规律。其中当v_{x_0}取值为 0 时, 经向风误差在 30～100 km 高度范围内均在–0.01～–0.09 m·s^{-1} 之间, 这一结果与考虑科氏力项时的经向风误差极为相近, 这表明在落球的东西向速度为 0 时, 其经向风反演将不受科氏力项影响。

4.4.3　不同v_{y_0}条件下科氏力影响分析

采用方案三的初始参数设置方案, 以评估不同v_{y_0}(y 轴方向上的初始速度, y 轴向北为正)条件下忽略科氏力项对落球探测大气参数反演精度的影响, 其中v_{y_0}变量取值分别为 0, 50 m·s^{-1}, 100 m·s^{-1}, 150 m·s^{-1}。与图 9 相一致, 图 10 给出了忽略科氏力项时的落球探测大气参数反演结果及误差廓线, 但其中的考察变量为v_{y_0}参数。由图 10 可知, 在方案三的初始参数条件下, 忽略科氏力项时大气温度和纬向风的反演误差随v_{y_0}取值增大而减小, 而经向风则相反, 其反演误差随v_{y_0}取值增大而增大; 大气密度的反演误差变化较为为复杂, 在约 95 km 以上高度范围, 大气密度的反演误差大致随v_{y_0}取值增大而减小, 而在 95 km 高度以下, 大气密度反演误差则随v_{y_0}取值增大而增大。分析反演误差的极值情况, 当v_{y_0}取值为 0 时, 温度、密度、纬向风和经向风的最大误差分别为–60 K, 24%, –46 m·s^{-1} 和–8 m·s^{-1}, 而当v_{y_0}取值为 150 m·s^{-1} 时, 这些最大误差分别变为–8 K, –3%, –24 m·s^{-1} 和–15 m·s^{-1}。

表 5 给出典型高度上不同v_{y_0}条件下忽略科氏力项时的大气参数反演误差。与图 10 的结果一致, 表 5

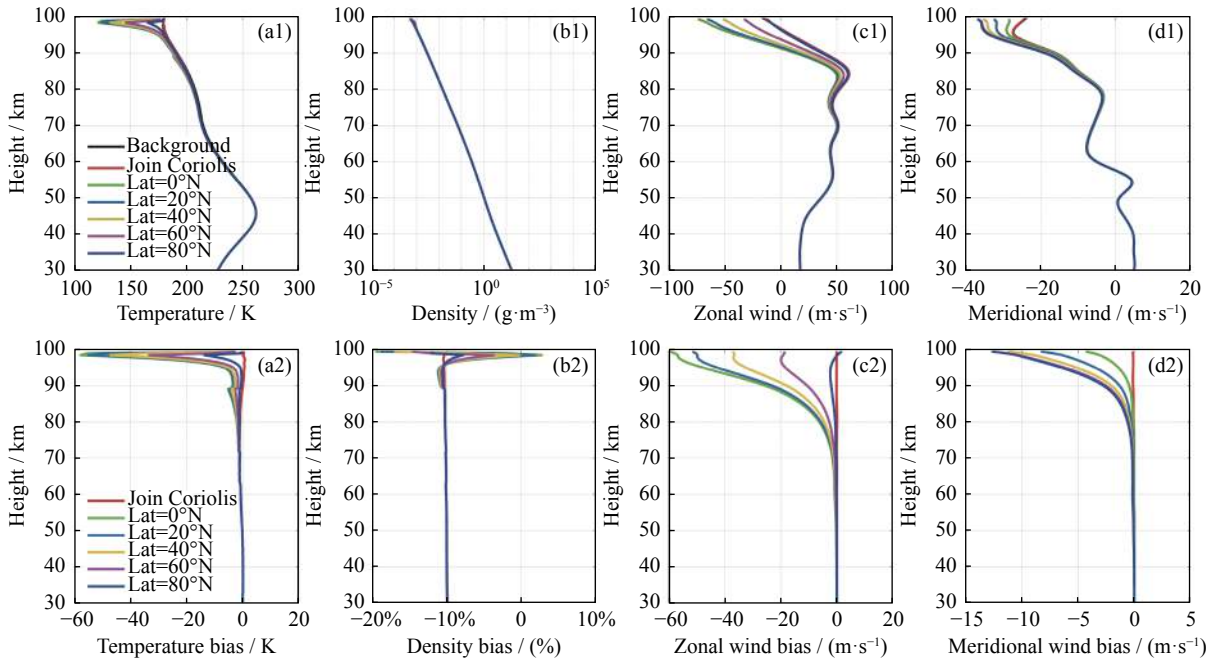


图 8 不同纬度条件下忽略科氏力项时的大气参数反演结果及误差廓线

Fig. 8 Atmospheric parameter inversion results and error profiles when the Coriolis force term is ignored for different latitudes

表 3 不同纬度条件下忽略科氏力项时的大气参数反演误差

Table 3 Atmospheric parameter errors when the Coriolis force term is ignored for different latitudes

大气参数	考虑科氏力	纬度/(°)N					高度/km
		0	20	40	60	80	
温度误差/K	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	30
	–1.02	–1.17	–1.16	–1.14	–1.10	–1.05	70
	–0.64	–3.30	–3.14	–2.67	–1.99	–1.20	85
	0.65	–6.56	–6.19	–5.13	–3.34	–0.83	95
密度误差/(%)	0.29	0.21	0.21	0.22	0.23	0.24	30
	–0.14	–0.20	–0.20	–0.19	–0.18	–0.16	70
	–0.43	–0.35	–0.36	–0.38	–0.41	–0.43	85
	–0.66	–1.82	–1.71	–1.42	–1.09	–0.88	95
纬向风误差/(m·s^{-1})	0.00	–0.02	–0.01	–0.01	–0.01	0.00	30
	–0.01	–1.52	–1.41	–1.12	–0.70	–0.20	70
	–0.04	–12.71	–11.59	–9.07	–5.46	–1.21	85
	–0.09	–47.70	–42.63	–32.40	–18.32	–2.18	95
经向风误差/(m·s^{-1})	0.00	0.00	0.00	–0.01	–0.01	–0.01	30
	–0.02	–0.03	–0.08	–0.12	–0.16	–0.18	70
	–0.07	–0.18	–0.56	–0.88	–1.11	–1.22	85
	–0.10	–1.41	–3.47	–5.13	–6.18	–6.49	95

给出的数据结果同样证实了落球探测中的科氏力项影响随v_{y_0}取值的变化规律。

4.4.4 不同v_{z_0}条件下科氏力的影响

采用方案四的初始参数设置方案，以评估不同v_{z_0}（z轴方向上的初始速度，z轴向下为正）条件下忽略科氏力项对落球探测大气参数反演精度的影响，其中v_{z_0}变量取值分别为 50 m·s^{-1}, 100 m·s^{-1}, 150 m·s^{-1}, 200 m·s^{-1}。与图 10 相一致，图 11 给出的也是忽略科氏力项时的大气参数反演结果及误差廓线，但其中的考察变量为v_{z_0}参数。由图 11 可知，在方案四的初始参数条件下，忽略科氏力项时经向风的反演误差大致随v_{z_0}取值增大而减小，而纬向风的反演误差随v_{z_0}取值增大而增大。相对来说，大气温度和密度的反演误差变化更为复杂，在约 97 km 以上高度范围内，当v_{z_0}取值分别为 100 m·s^{-1}, 150 m·s^{-1}, 200 m·s^{-1}时，大气温度和密度的反演误差均较为接近，而在v_{z_0}取值 50 m·s^{-1}时，大气温度和密度的反演误差远大于v_{z_0}取值较大时的反演误差；在约 95～97 km 高度范围内，大气温度和密度的反演误差大致随v_{z_0}取值增大而减小，在约 95 km 高度附近，大气密度的反演误差由正值转为负值；在 95 km 高度以下范围，大气温度和大气密度的反演误差均较小，且两者因v_{z_0}取值不

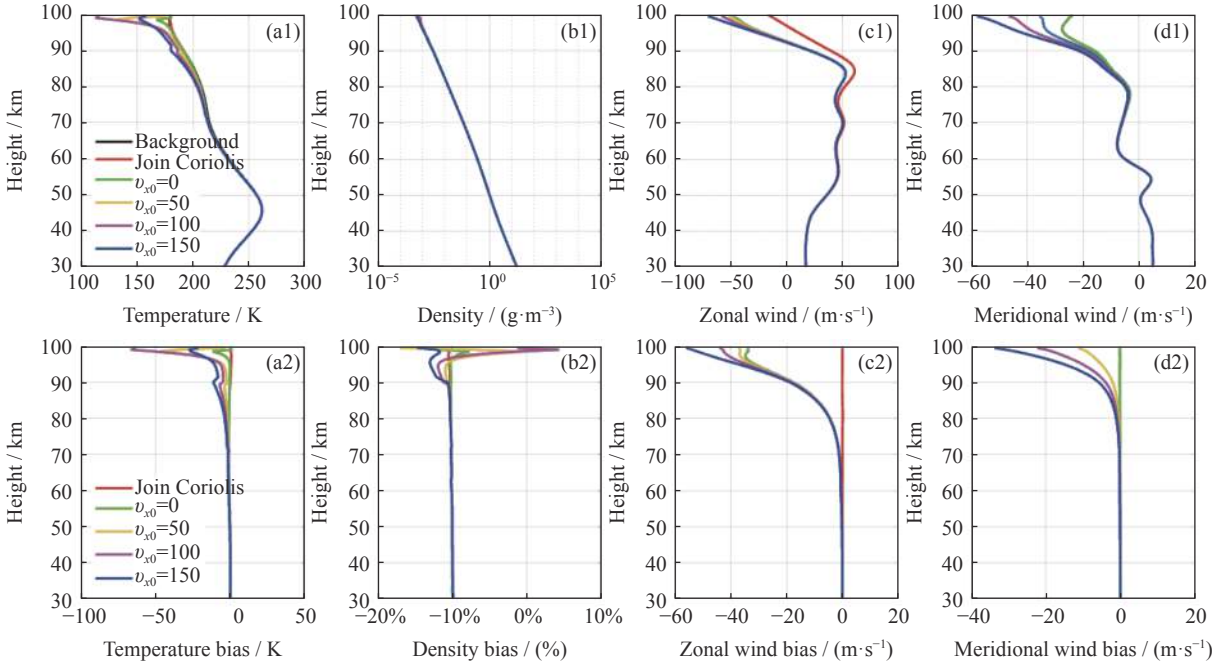


图 9 不同v_{x_0}条件下忽略科氏力项大气参数反演结果及误差廓线

Fig. 9 Atmospheric parameter inversion results and error profiles when the Coriolis force term is ignored for different v_{x_0}

表 4 不同 v_{x_0} 条件下忽略科氏力项时的大气参数反演误差

Table 4 Atmospheric parameter errors when the Coriolis force term is ignored for different v_{x_0}

大气参数	考虑科氏力	v_{x_0}/(m·s^{-1})				高度/km
		0	50	100	150	
温度误差/K	0.12	0.12	0.07	0.03	–0.01	30
	–1.01	–0.99	–1.14	–1.28	–1.43	70
	–0.66	–0.65	–2.67	–4.47	–6.42	85
	0.64	–0.18	–5.13	–6.66	–10.64	95
密度误差/(%)	0.16	0.16	0.22	0.28	0.33	30
	–0.16	–0.14	–0.19	–0.24	–0.29	70
	–0.45	–0.32	–0.38	–0.49	–0.59	85
	–0.72	–0.46	–1.42	–3.64	–5.87	95
纬向风误差/(m·s^{-1})	0.00	–0.01	–0.01	–0.01	–0.01	30
	0.02	–1.09	–1.12	–1.15	–1.19	70
	0.00	–8.99	–9.07	–9.24	–9.50	85
	–0.05	–31.48	–32.40	–34.39	–37.39	95
经向风误差/(m·s^{-1})	0.00	–0.01	–0.01	–0.01	–0.01	30
	–0.02	–0.07	–0.12	–0.18	–0.23	70
	–0.07	–0.09	–0.88	–1.66	–2.42	85
	–0.10	–0.05	–5.13	–10.23	–15.23	95

同而发生的变化也较小。分析反演误差的极值情况，当v_{z_0}取值为 50 m·s^{-1} 时，温度、密度、纬向风和经向风的最大误差分别为 –115 K, 60%, –30 m·s^{-1} 和 –18 m·s^{-1}，而当v_{z_0}取值为 200 m·s^{-1} 时，这些最大误差分别变为–50 K, 20%, –38 m·s^{-1} 和–11 m·s^{-1}。

表 6 给出典型高度上不同v_{z_0}条件下忽略科氏力项时的大气参数反演误差。与图 11 的结果一致，表 6 给出的数据结果同样证实了落球探测中的科氏力项影响随v_{z_0}取值的变化规律，并且更显著地反映了大气温度、密度和风场等参数的反演误差在 85, 70 和 30 km 高度上随v_{z_0}取值的变化情况。尤其是，在 85 km 高度上，忽略科氏力项时大气密度的反演误差在不同v_{z_0}取值条件下均小于考虑科氏力项时的反演误差，表明科氏力项在相关条件下对落球探测大气密度的反演误差影响极小，其中不同v_{z_0}取值条件下大气密度反演误差之间的差异，其原因应该是由落球探测非线性系统误差造成的微小偏差。

5 结语

临近空间气象火箭落球探测技术能够获取 30～100 km 高度范围内的大气环境信息，是一种极具应

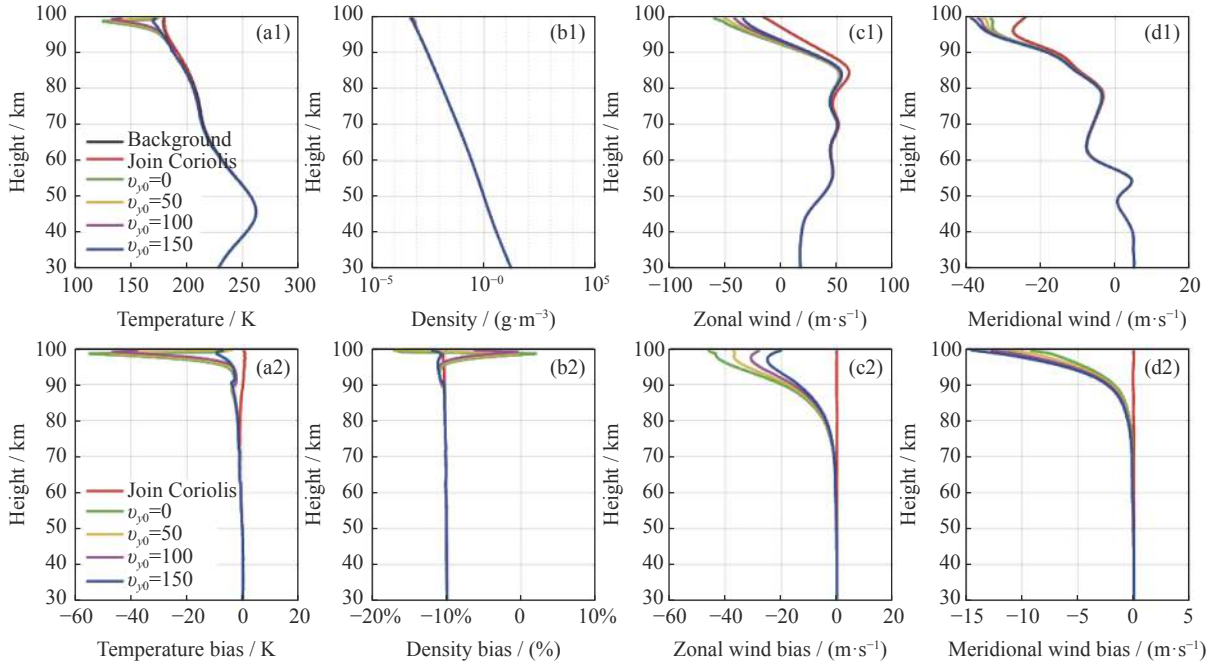


图 10 不同v_{y0}条件下忽略科氏力项大气参数反演结果及误差廓线

Fig. 10 Atmospheric parameter inversion results and error profiles when the Coriolis force term is ignored for different v_{y0}

表 5 不同v_{y0}条件下忽略科氏力项时的大气参数反演误差

Table 5 Atmospheric parameter errors when the Coriolis force term is ignored for different v_{y0}

大气参数	考虑科氏力	v_{y0}/(m·s^{-1})				高度/km
		0	50	100	150	
温度误差/K	0.09	0.09	0.07	0.06	0.05	30
	–1.02	–1.14	–1.14	–1.13	–1.14	70
	–0.66	–2.77	–2.67	–2.50	–2.55	85
	0.64	–6.17	–5.13	–3.63	–3.52	95
密度误差/(%)	0.26	0.20	0.22	0.24	0.25	30
	–0.14	–0.19	–0.19	–0.19	–0.19	70
	–0.43	–0.36	–0.38	–0.41	–0.44	85
	–0.70	–1.09	–1.42	–1.85	–2.29	95
纬向风误差/(m·s^{-1})	0.00	–0.01	–0.01	–0.01	–0.01	30
	–0.01	–1.18	–1.12	–1.06	–1.00	70
	–0.04	–9.80	–9.07	–8.30	–7.51	85
	–0.11	–36.78	–32.40	–27.87	–23.29	95
经向风误差/(m·s^{-1})	0.00	–0.01	–0.01	–0.01	–0.01	30
	0.01	–0.09	–0.12	–0.15	–0.18	70
	–0.03	–0.76	–0.88	–0.98	–1.09	85
	–0.04	–4.45	–5.13	–5.76	–6.32	95

用价值的临近空间大气环境探测手段。本文针对落球探测数据处理中忽略科氏力项这一问题，建立落球探测正演仿真模型和参数反演模型，在排除其他误差因素的基础上模拟计算忽略科氏力项时大气参数反演结果的误差，量化评估了忽略科氏力项对落球探测大气参数反演精度的影响，模拟计算结果如下。

(1)经过正演仿真模型与实际飞行数据的对比，以及正演仿真模型与参数反演模型的联合验证，结果表明落球探测技术是一种高精度的临近空间大气环境探测方法，本文建立的正演和反演模型准确、有效，其中正演仿真模型可应用于落球探测试验中进行落球飞行轨迹预测，参数反演模型可为落球探测试验数据处理提供基础模型。

(2)科氏力项影响评估结果表明，落球探测数据处理中忽略科氏力项将引起反演参数较大的误差，这些误差大致都是负偏差，且随探测点纬度、各方向初始速度等变量的变化而呈现不同变化规律。在落球直径 1 m、质量 300 g、释放高度 100 km 条件下，本文设定的仿真方案引起的各参数最大误差分别为温度–115 K、密度 60%、纬向风–60 m·s^{-1} 和经向风–33 m·s^{-1}，这些最大误差均出现在 95～100 km 高度范围内，其中引起温度和密度较大误差的原因是初始

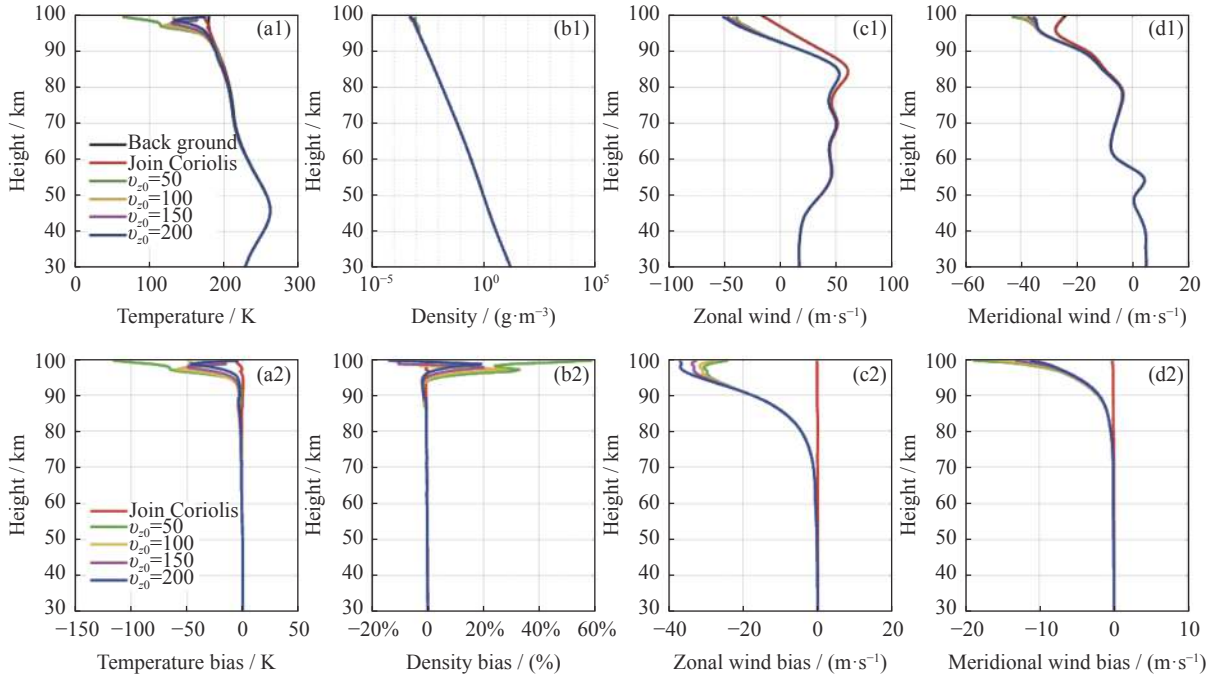


图 11 不同v_{z_0}条件下忽略科氏力项大气参数反演结果及误差廓线

Fig. 11 Fig.11 Atmospheric parameter inversion results and error profiles when the Coriolis force term is ignored for different v_{z_0}

表 6 不同v_{z_0}条件下忽略科氏力项时的大气参数反演误差

Table 6 Atmospheric parameter errors when the Coriolis force term is ignored for different v_{z_0}

大气参数	考虑科氏力	v_{z_0}/(m·s^{-1}) 50	100	150	200	高度/km
温度误差/K	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	30
	–1.01	–1.12	–1.15	–1.15	–1.14	70
	–0.74	–2.86	–3.58	–3.21	–2.67	85
	0.07	–17.00	–16.40	–10.26	–5.13	95
密度误差/(%)	0.29	0.23	0.23	0.22	0.22	30
	–0.16	–0.21	–0.21	–0.20	–0.19	70
	–0.40	–0.28	–0.25	–0.31	–0.38	85
	–0.42	5.51	3.00	0.28	–1.42	95
纬向风误差/(m·s^{-1})	0.00	–0.01	–0.01	–0.01	–0.01	30
	–0.01	–1.14	–1.14	–1.13	–1.12	70
	–0.03	–8.86	–8.91	–8.98	–9.07	85
	–0.10	–28.98	–29.77	–30.96	–32.40	95
经向风误差/(m·s^{-1})	0.00	–0.01	–0.01	–0.01	–0.01	30
	–0.02	–0.13	–0.13	–0.13	–0.12	70
	–0.07	–0.91	–0.90	–0.89	–0.88	85
	–0.12	–5.65	–5.53	–5.36	–5.13	95

高度为 100 km, 在开始 1～2 km 阶段内参数不稳定造成温度和密度参数反演结果的复杂变化。在 95 km 高度以下, 各参数误差将随高度下降而逐渐下降, 当高度下降至约 70 km 处时, 各参数误差变得极小, 忽略科氏力项对大气参数反演带来的影响可以忽略不计。

通过对落球探测中科氏力项的影响分析, 证明了在落球探测数据处理过程中不能忽略科氏力项的影响, 这对深入认识落球探测参数反演误差因素和推进落球探测业务化应用具有重要的参考价值。然而在排除科氏力项影响后, 仍存在球体阻尼系数不确定度、忽略垂直风速和运动参数计算引起误差等重要因素制约着落球探测技术的高精度应用, 这些因素是提高落球探测数据精度必然面临和亟需解决的问题, 需要进一步深入研究。

参考文献

[1] WAN Mingjie. Ten major threats to national aerospace defense[J]. *National Defense Technology*, 2019, **40**(5): 1-5

[2] LV Daren, CHEN Zeyu, GUO Xia, *et al*. Recent progress in near space atmospheric environment study[J]. *Advances in Mechanics*, 2009, **39**(6): 674-682

[3] ZHU Jiajia, MI Lin, LI Xiaohui, *et al*. Near space scientific exploratory data sharing research and practice[J].

Chinese Journal of Space Science, 2021, **41**(5): 828-835 (朱家佳, 米琳, 李晓辉, 等. 临近空间科学探测数据的共享与实践[J]. 空间科学学报, 2021, **41**(5): 828-835)

[4] GAO Yingzhe, LIU Xiao, XU Jiyao. Quantitative estimations on the gravity wave extraction methods from nighttime Lidar observation[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(4): 597-608 (郜颖哲, 刘晓, 徐寄遥. 基于激光雷达夜间观测提取重力波方法的定量比较[J]. 空间科学学报, 2021, **41**(4): 597-608)

[5] YANG Junfeng, XIAO Cunying, HU Xiong, *et al*. Observations and simulations of the mean winds in mesosphere and lower thermosphere over Langfang of China[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2017, **37**(3): 284-290 (杨钧烽, 肖存英, 胡雄, 等. 中国廊坊中间层和低热层大气平均风观测模拟[J]. 空间科学学报, 2017, **37**(3): 284-290)

[6] XIE Yanxin, XIAO Cunying, HU Xiong, *et al*. Comparison between temperature data of TIMED/SABER and AURA/MLS[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, **38**(3): 361-367 (谢衍新, 肖存英, 胡雄, 等. TIMED/SABER与AURA/MLS临近空间探测温度数据比较[J]. 空间科学学报, 2018, **38**(3): 361-367)

[7] DU Xiaoyong, DU Zhitao, GUO Yuening, *et al*. Research of monthly zonal winds derived from radio occultation temperature data[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(6): 1030-1038 (杜晓勇, 杜智涛, 郭粤宁, 等. 利用掩星温度数据推算大气月平均纬向风场[J]. 空间科学学报, 2020, **40**(6): 1030-1038)

[8] SHENG Zheng, ZHOU Shudao, GE Wei, *et al*. Gravity wave in near space by falling-sphere detection[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, **16**(6): 21-24

[9] BARTMAN F L, CHANEY L W, JONES L M, *et al*. Upper-air density and temperature by the falling-sphere method[J]. *Journal of Applied Physics*, 1956, **27**(7): 706-712

[10] OTTERMAN J, SATTINGER I J, SMITH D F. Analysis of a falling-sphere experiment for measurement of upper-atmosphere density and wind velocity[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1961, **66**(3): 819-822

[11] FAUCHER G A, PROCUNIER R W, SHERMAN F S. Upper-atmosphere density obtained from measurements of drag on a falling sphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1963, **68**(11): 3437-3450

[12] LÜBKEN F J, HILLERT W, LEHMACHER G, *et al*. Intercomparison of density and temperature profiles obtained by Lidar, ionization gauges, falling spheres, datasondes and radiosondes during the DYANA campaign[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1994, **56**(13/14): 1969-1984

[13] SCHMIDLIN F J, LEE H S, MICHEL W. The inflatable sphere: a technique for the accurate measurement of middle atmosphere temperatures[J]. *Journal of Geophysical Research:Atmospheres*, 1991, **96**(D12): 22673-22682

[14] BORDOGNA M T, FIDJELAND L, FJÄLLID M, *et al*. MUSCAT experiment: active free falling units for in situ measurements of temperature and density in the middle atmosphere[C]//Proc. 21 st ESA Symposium European Rocket & Balloon Programmes and Related Research. Thun, Swizerland: ESA, 2013, 350: 575-582

[15] JIANG Xiujie, LIU Bo, YU Shiqiang, *et al*. Development status and trend of sounding rocket[J]. *Science & Technology Review*, 2009, **27**(23): 101-110

[16] SHI Dongbo, HU Xiong, TU Cui, *et al*. Near space environment detection technology- sounding rocket falling sphere[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2018, **15**(7): 89-92

[17] GE W, SHENG Z, ZHANG Y Y, *et al*. The study of in situ wind and gravity wave determination by the first passive falling-sphere experiment in China's northwest region[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2019, **182**: 130-137

[18] China Meteorological Administration Climate Monitoring Application Management Division. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (5 ed.)[M]. Beijing: Meteorological Press, 1992

[19] PICONE J M, HEDIN A E, DROB D P, *et al*. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, **107**(A12): 1468

[20] DROB D P, EMMERT J T, CROWLEY G, *et al*. An empirical model of the Earth 's horizontal wind fields: HWM07[J]. *Journal of Geophysical Research:Space Physics*, 2008, **113**(A12): A12304

[21] HENDERSON C B. Drag coefficients of spheres in continuum and rarefied flows[J]. *AIAA Journal*, 1976, **14**(6): 707-708

[22] SHENG Peixuan, MAO Jietai, LI Jianguo, *et al*. Atmospheric Physics[M]. 2 nd ed. Beijing: Peking University Press, 2013

(责任编辑: 孙伟英)