http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0614

一种全球临近空间大气密度建模方法及应用

程旋[1,2], 肖存英[3,*], 杨钧烽[1], 胡雄[1], 闫召爱[1], 柳丹[1,2]

(1. 中国科学院国家空间科学中心 空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190;
2. 北京师范大学 天文系, 北京 100875; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 基于 TIMED/SABER 卫星 2002—2018 年观测的 20~100 km 大气密度数据,统计获得多年月平均值和标准偏差的全球网格数据。利用网格数据,分析了大气密度的变化特征。以网格数据为基准,计算了 USSA76 的相对偏差,分析了 USSA76 相对偏差的分布特征。以网格数据为驱动,将大气密度表征为平均值与大尺度扰动量和小尺度扰动量的加和,大尺度扰动和小尺度扰动分别采用余弦函数和一阶自回归模型表征,初步建立了全球临近空间大气密度模型。通过对比模型仿真值与激光雷达观测值,表明模型仿真值与观测值具有较好的吻合度,验证了建模方法的可行性。利用蒙特卡罗方法可再现给定轨迹上所有可能的大气状态。

关 键 词: 临近空间; 大气密度; 建模; 仿真; 应用
中图分类号: V419; V219; P351; P421
文献标志码: A **文章编号**: 1001-5965(2020)12-2227-09

临近空间大气变化非常复杂,真实大气中包含复杂的大气波动信息,这也是真实大气偏离气候平均状态的主要原因。往往大气模型不能很好地表征这部分波动信息。为了避免模型不准确对实际飞行的影响,在工程上通过增加设计裕度的方式来避免。但是,设计裕度的增大是以牺牲其他方面的设计为代价的,如有效载荷质量和尺寸的减小。因此,一些学者开展了大气参数对高超声速飞行器影响的研究。例如,陈闽慷等[1]通过研究 85 km 北半球几个典型纬度和典型月份大气波动对驻点热流的影响,发现在极端情况下,SABER 观测的包含大气波动的大气参数预测的热流比 USSA76 高 40% 以上。李健等[2]利用地球扰动大气模型对再入飞行器的弹道进行仿真,结果表明,大气扰动条件下,大气扰动对飞行器的落点、过载和气动热有很大影响。黄华等[3]利用美国 Cape Canaveral 靶场上空的气象资料建立了大气环境样本集,并利用样本集数据对再入飞行器的弹道进行了仿真,研究发现,大气热力学参量的扰动能够引起落点在射向的散布,风场的扰动对射向和横向落点的散布均有较大的影响。因此,真实大气中的扰动对临近空间飞行器的影响是不可忽略的。此外,大气扰动的分布存在时空差异,飞行过程中,飞行器在不同高度受到大气扰动的影响是不同的,还需要满足不同约束条件,使得狭窄的飞行器气动布局设计对气动误差的容忍能力较弱,提升飞行器气动力和气动热的预测准确性对气动设计精细化是非常重要的[4]。飞行器的气动特性对大气密度非常敏感,获得可靠的大气密度数据是提升气动热环境预测准确性、减少设

收稿日期: 2019-12-05; **录用日期**: 2020-03-06; **网络出版时间**: 2020-04-16 15:16
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20200416.1503.004.html
基金项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA17010301); 国家自然科学基金(11872128,91952111); 国家空间科学中心"青年科技创新"课题(Y9211FAF3S)
* **通信作者**. E-mail: xiaocunying@bnu.edu.cn

引用格式: *程旋, 肖存英, 杨钧烽, 等. 一种全球临近空间大气密度建模方法及应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(12): 2227-2235. CHENG X, XIAO C Y, YANG J F, et al. A modeling method and its application of global atmospheric density in near space[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(12): 2227-2235 (in Chinese).*

http://bhxb.buaa.edu.cn

计冗余的一种有效途径。

大气模型是获取大气密度数据的重要来源。在航空航天领域,国际上常用的大气模型主要有美国标准大气(USSA76)[5]、COSPAR 国际参考大气系列模型(CIRA)[6]、质谱仪和非相干散射雷达系列模型(MSIS)[7-8]和水平风系列模型(HWM)[9]等,但这些模型存在一定的局限性,均不能给出大气的扰动信息。GRAM 系列模型[10]可以给出不同经纬度和月度下的温度、密度、气压和风场等参量的平均值,还可以模拟相对于平均状态的扰动剖面,但该模型代码未公开。相比国外,中国大气模型的发展水平比较落后,先后发布了国军标模型,如 GJB 365.1—87、GJB 366.1—87、GJB 544—88 和 GJB 5601—2006 等,除了 GJB 5601—2006 外,其余都是国际标准的引进。这些模型只能提供大气的气候平均状态,不能提供大气的扰动状态。大气模型未包含偏离平均值的大气扰动是大气模型与真实大气存在偏差的主要原因[11]。

近年来,中国学者开展了一些大气模型修正及建模方法的探索。刘一博等[12]利用酒泉 2010—2011 年的探空数据,对 GRAM 模型在酒泉上空的大气密度月均值和标准偏差进行修正,改善了酒泉上空 GRAM 模型的精度。肖存英等[13]利用 TIMED/SABER 统计获得的 11 年月平均值和标准偏差,将临近空间大气密度表征为气候平均量与扰动量的加和,建立了北纬 38°N 大气密度扰动模型,并利用激光雷达观测数据验证了建模方法的可行性。肖存英等[13]的建模方法中采用一阶自回归模型对总扰动量的表征,未对不同尺度的扰动进行区分。实际大气中的潮汐波和行星波均具有一定的周期性,这些波动不是随机的,具有一定的规律,采用基于随机过程的一阶自回归模型对整体扰动进行表征还存在一些改进空间。

本文在文献[13]建模方法的基础上,将大气扰动分别用大尺度扰动和小尺度扰动代替,大尺度扰动采用周期性的余弦函数表征,小尺度扰动采用一阶自回归模型表征,初步建立临近空间参考大气模型,并对大气模型开展测试验证。

1 数据来源与处理方法

TIMED 卫星于 2001 年发射,至今已连续积累长达 18 年的观测数据。卫星以 74.1°的轨道倾角在约 625 km 的太阳同步轨道运行,轨道周期约为 97 min。TIMED 卫星上搭载 4 个有效载荷,即 SABER、TIDI(TIMED Doppler Interferometer)、GUVI(Global Ultraviolet Imager)和 SEE(Solar ultraviolet Experiment)。其中,SABER 探测器通过测量大气中 15 μm 和 4.3 μm 的 CO_2 临边红外辐射来反演大气温度和成分等参量[14]。卫星每天大约测量 15 轨数据,相邻轨道的经向间距约为 24°。由于卫星进动缓慢,覆盖全球 24 h 地方时需要约 60 天。卫星每 60 天进行一次机动以防止卫星指向太阳,这就导致在正午无卫星数据覆盖,卫星的纬度覆盖范围从一个半球 52°到另一个半球 83°每 60 天交替变换一次。本文采用 TIMED/SABER 数据的时间范围为 2002 年 1 月至 2018 年 12 月。卫星数据最新版本为 V2.0 版本,相比 V1.07 版本,改进了反演算法,提升了产品精度。本文采用的数据版本为 V2.0 版本。在中间层及以下高度,SABER 的最大观测误差在 ±2 K[15]。与激光雷达观测结果相比,SABER 温度与激光雷达温度的偏差在 3 K 以内。与 COSMIC 掩星数据相比,在 38~60 km,最大温度偏差约为 5 K[16]。SABER 卫星数据以其较高的数据精度,在科学研究和工程技术等领域已广泛应用[1,17-20]。

采用与文献[13,21]相同的处理方法,将卫星数据通过信息范围检查、极值检查、垂直一致性检查和统计学检查等质量控制,对错误信息进行订正或野值剔除。利用式(1)和式(2),按月份统计计算每个网格内大气密度的月平均值和标准偏差。网格数据的高度间隔为 1 km,纬度间隔为 4°,经度间隔为 5°。网格内月平均值和标准偏差的计算公式如下:

$$\bar{\rho} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\rho_i \tag{1}$$

$$\sigma_\rho = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\rho_i - \bar{\rho})^2} \tag{2}$$

式中:N 为该网格内的数据量;ρ_i 为第 i 次大气密度观测量。

2 大气密度的变化特征

利用统计获得的大气密度网格化数据,对大气密度的气候平均状态和扰动状态进行分析,获得大气密度的定量变化特征,结果如图 1 和图 2 所示。

图 1 给出了 1 月份和 7 月份 120°E 大气密度多年月平均统计结果相对于年平均密度的变化量,可以看出大气密度在南北半球不同的分布特征。在 1 月份 90 km 以下,大气密度呈现出从南半球向北半球逐渐递减的趋势。在南半球,大气密度在高纬地区约 82°S 80 km 高度处存在大气密

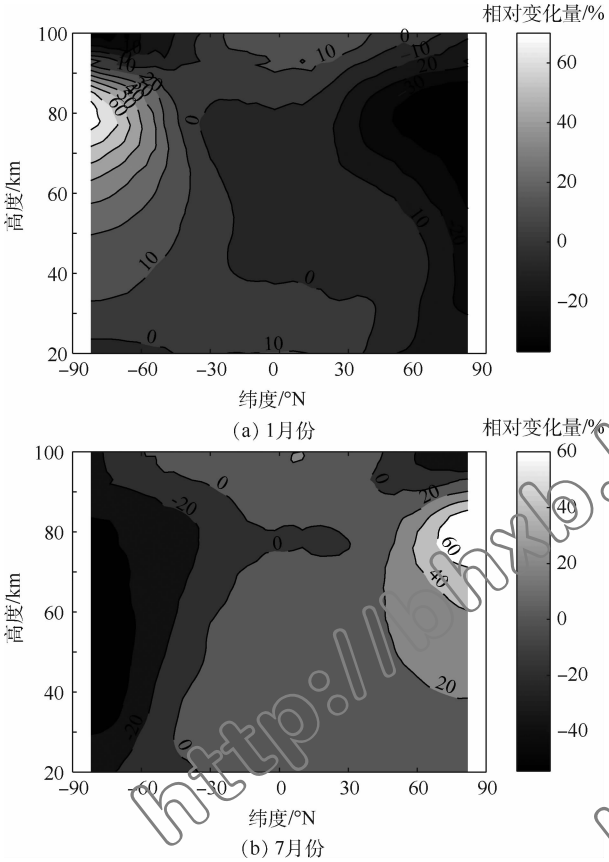

图 1　1 月份和 7 月份大气密度月平均值相对于年平均值的变化量在 120°E 随纬度和高度的分布

Fig. 1　Latitude-altitude distribution of variation of atmospheric density relative to annual average density on 120°E in January and July

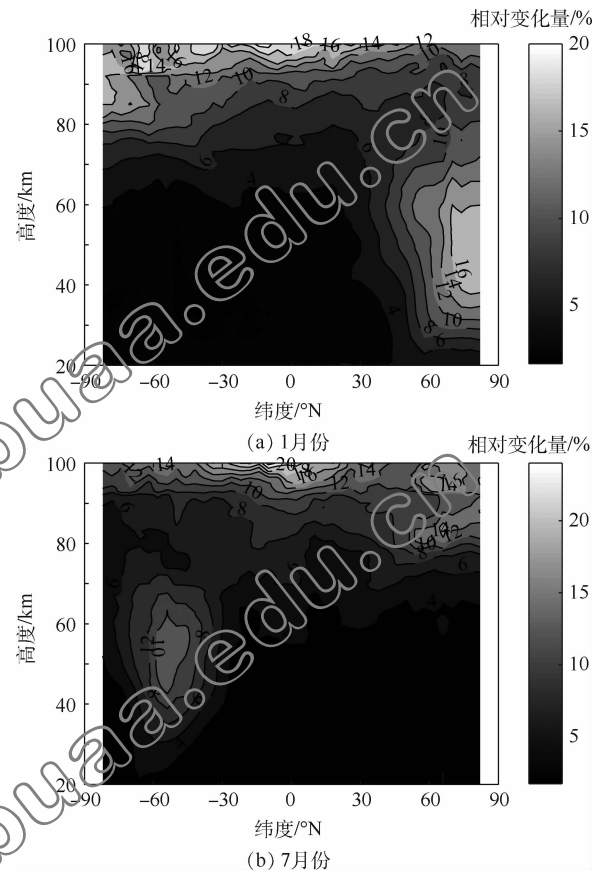

图 2　1 月份和 7 月份大气密度标准偏差相对于年平均值的变化量在 120°E 随纬度和高度的分布

Fig. 2　Latitude-altitude distribution of variation of atmospheric density standard deviations relative to annual average density on 120°E in January and July

度的极大值,最大值高于年平均值的 74.8%。在北半球,大气密度在中高纬地区 80 km 附近存在大气密度的极小值,大气密度低于年平均值的 36.9%。在 90 km 以上,大气密度呈现出从低纬地区向两极地区递减的趋势。7 月份的变化规律与 1 月份的相反。在 90 km 以下,大气密度从北半球高纬地区逐渐向南半球高纬地区递减。在北半球高纬地区约 80 km 高度存在大气密度的极大值,最大值高于年平均值的 77.9%,在南半球高纬地区存在大气密度的极小值,最小值低于年平均值的 54.3%。在 90 km 以上,大气密度也呈现出从低纬地区向高纬地区递减的趋势。

图 2 给出了 1 月份和 7 月份 120°E 大气密度多年月平均扰动量相对于年平均密度值的变化。可以看出,在 1 月份,大气密度的相对扰动量在 80 km以下,北半球中高纬地区大气密度的扰动量较大,尤其在高纬地区,大气密度相对扰动量在平流层顶附近(~45 km)存在极大值,最大值为 17.9%。在低纬地区和南半球中高纬地区,60 km 以下,大气密度相对扰动量较小,基本在 4% 以内。在 60 ~80 km,大气密度相对扰动量随高度逐渐增大,因为大气潮汐波的贡献逐渐显著。在 80 km以上,从南半球到北半球大气密度的扰动均较强,相对扰动的最大值可达 19.9%,在相同高度层,南半球的大气密度扰动量高于北半球。在 7 月份,大气密度扰动量随纬度和高度的变化规律与 1 月份相反。在 80 km 以下,南半球中高纬地区大气密度扰动较大,最大值为 15.0%。在 20 ~60 km,低纬地区和北半球中高纬地区,大气密度扰动较小。在 60 ~80 km,大气密度扰动量随高度逐渐增强。在 80 km 以上,大气密度扰动在南北半球均较强。在同一高度层,北半球的大气密度扰动量高于南半球。从 1 月份和 7 月份大气密度扰动的变化规律可以看出,在 80 km 以下,冬季半球的中高纬地区大气密度扰动较大。在 80 km以上,夏季半球的大气密度扰动量高于冬季半球。

美国标准大气模型(USSA76)是飞行器设计和仿真常用的模型,USSA76 模型与观测数据之

http://bhxb.buaa.edu.cn

间的差异是实际应用中非常关心的问题。利用大气密度网格化数据,对 USSA76 模型相对 SABER 大气密度随纬度和高度的偏差进行了评估,结果如图 3 所示。在 1 月份,90 km 以下,从北半球到南半球 USSA76 大气密度的相对偏差从正偏差逐渐向负偏差过渡。在北半球,高纬地区 80 km 附近存在正相对偏差的极大值,约为 76.7%。在南半球,高纬地区 80 km 附近存在负相对偏差的极大值,约为 38.5%。在 90 km 以上,USSA76 大气密度的相对偏差均为正偏差,且高纬地区的偏差高于低纬地区。在 7 月份 90 km 以下,从南半球到北半球,USSA76 大气密度的相对偏差从正偏差逐渐向负偏差转变。在南半球高纬地区存在正相对偏差的极大值,为 132.2%,在北半球高纬地区 80 km 附近存在负相对偏差的极大值,为 36.1%。在 90 km 以上,USSA76 大气密度相对偏差为正偏差。

从以上结果可以看出,在 90 km 以下,大气密度的相对偏差逐渐从冬季半球正偏差向夏季半球负偏差过渡,且冬季半球正偏差的最大值高于夏季半球负偏差的最大值。在 90 km 以上为正偏差。

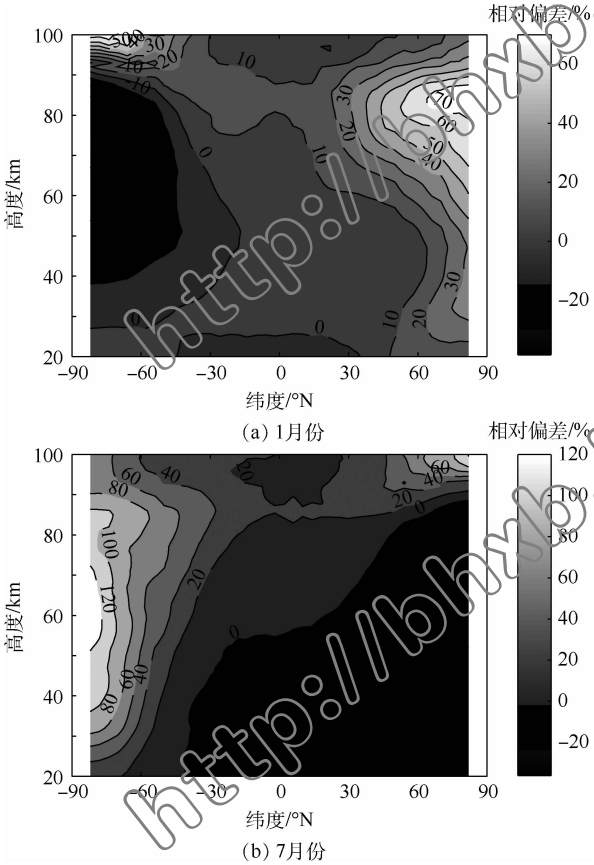

图 3 1 月份和 7 月份 USSA76 相对于 TIMED/SABER 大气密度的偏差在 120°E 随纬度和高度的分布

Fig. 3 Latitude-altitude distribution of relative error between USSA76 and TIMED/SABER atmospheric density on 120°E in January and July

3 大气密度建模方法

将临近空间大气密度表征为气候平均量与大气扰动量之和:

$$\rho_{\text{total}} = \bar{\rho} + \rho' \tag{3}$$

式中:ρ_{total} 为总大气密度;$\bar{\rho}$ 为月平均大气密度;ρ' 为大气密度扰动量。

对给定轨迹而言,沿轨迹的气候平均量和扰动量分别由网格化的月平均值和标准偏差通过对数插值获得。根据空间尺度,将大气扰动划分为大尺度扰动和小尺度扰动。大尺度扰动包括大气潮汐波和大气行星波,具有行星尺度的波长。小尺度扰动包含大气重力波和湍流,重力波的波长由几百到几十公里,湍流的空间尺度更小。大气密度扰动量表征为大尺度扰动量 ρ'_{L} 与小尺度扰动量 ρ'_{S} 之和:

$$\rho' = \rho'_{\text{L}} + \rho'_{\text{S}} \tag{4}$$

将大气扰动进行划分的优点在于:对不同尺度的大气波动的表征会更加准确,有利于后续将温度、密度和气压协同建模时,将彼此之间满足的物理规律和相关性考虑进去。大气重力波由于重力波的分布、变化不规则及大气湍流的波动尺度更小,随机性更强,对其准确建模非常困难。对于小尺度扰动,采用一阶自回归模型进行表征。连续位置 x_1 和 x_2 处的小尺度大气密度扰动满足:

$$\frac{\rho'_{\text{S}}(x_2)}{\sigma_{\text{S}}(x_2)} = r\frac{\rho'_{\text{S}}(x_1)}{\sigma_{\text{S}}(x_1)} + q(x_1)\sqrt{1-r^2} \tag{5}$$

$$r(\delta x) = \exp\left(-\frac{\delta h}{L_h} - \frac{\delta z}{L_z} - \frac{\delta t}{\tau}\right) \tag{6}$$

式中:r 为 $\rho'_{\text{S}}(x_2)/\sigma_{\text{S}}(x_2)$ 和 $\rho'_{\text{S}}(x_1)/\sigma_{\text{S}}(x_1)$ 之间的自相关,相关系数随着时间和空间尺度呈指数衰减;δh 和 δz 分别为相邻轨迹点之间位移的水平分量和垂直分量;q 为高斯分布随机数;L_h 和 L_z 分别为与小尺度扰动有关的水平和垂直尺度,L_h 的取值范围为 7.8 ~ 840 km,L_z 的取值范围为 0.53 ~ 24.03 km;τ 为与背景风速有关的时间尺度[22]。

大尺度扰动量是由于大气潮汐和行星波引起的扰动,具有一定的周期性。因此,将大尺度扰动量表征为余弦函数的形式:

$$\rho'_{\text{L}} = \sigma_{\text{L}} A\cos\left(\omega t + m\phi + n\theta + \frac{2\pi z}{\lambda} + \beta\right) \tag{7}$$

式中:ρ'_{L} 为大尺度扰动量;σ_{L} 为大尺度扰动的标准偏差;A 为振幅因子;$\omega = 2\pi/T$ 为随机波动周期为 T 的角速度;m 和 n 分别为纬向波数和经向波数;ϕ 和 θ 分别为经度和纬度;z 为高度;λ 为与高

http://bhxb.buaa.edu.cn

度有关的垂直波长;β 为 0 ~ 2π 均匀分布的随机相位。

模型的初始扰动值可以是初始位置实际观测数据计算得到的扰动值,或是从全球网格化标准偏差数据中利用插值方法得到的扰动值。

4　模型测试

为检验大气模型的仿真效果,以 2019 年中国科学院国家空间科学中心敦煌临近空间激光雷达观测试验的数据为基准,利用建立的大气模型仿真敦煌上空 20 ~ 100 km 的大气密度,并将观测结果与仿真结果进行对比。假设给定轨迹仅随高度变化,不随时间和经纬度变化,初始高度为 20 km,终点高度为 100 km。为方便与激光雷达观测数据对比,将仿真时刻均设置为 2019 年 4 月 18 日 21:30,仿真轨迹的高度间隔为 1 km,模型仿真结果如图 4 所示。图中:ρ_{mean} 为密度月均值。左图给出的是 20 ~ 100 km 高度大气密度 100 次蒙特卡罗仿真值相对于沿轨迹的大气密度月平均值的变化量,右图给出的是沿轨迹的大气密度月平均值。可以看出,大气密度的仿真结果沿月平均值基本呈对称分布,仿真值基本在 3 倍标准偏差范围内。仿真的扰动量随高度逐渐增大,仿真结果展现的规律与现有的研究结果相符。这些扰动主要由不同来源的静态行星波、传播性行星波、潮汐波、重力波和湍流等贡献。此外,较高高度上波流相互作用、波与波之间的非线性相互作用等导致了大气密度偏离气候平均态产生复杂的变化,展现了大气的整体扰动水平。

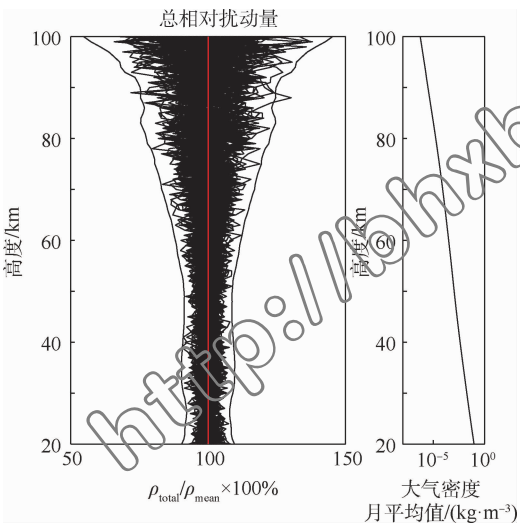

图 4　100 次蒙特卡罗仿真的大气密度相对于月平均值的变化量随高度的变化

Fig. 4　Variation of atmospheric density of 100 Monte Carlo simulations relative to monthly mean density with height

图 5 给出了大气模型在 2019 年 4 月 18 日 21:30 激光雷达观测结果与单次仿真结果的对比。图中:ρ/ρ_{US76} 为大气密度与标准大气的比值。蓝色实线表示模型仿真值,红色实线表示激光雷达观测值,观测的高度范围为 38 ~ 80 km。可以看出,在激光雷达观测高度范围内,仿真值与观测值吻合程度较好,两者随高度变化具有相同的变化趋势。单次仿真的结果存在偶然性,因此,对 100 次蒙特卡罗仿真结果进行统计分析。

将 100 次蒙特卡罗仿真结果与激光雷达观测结果进行相关系数计算,定量地展现模型仿真值与激光雷达观测值之间的吻合程度。图 6 给出了 100 次蒙特卡罗仿真值与激光雷达观测值相关性检验的结果。可以看出,100 次仿真结果与激光雷达观测结果之间存在显著的线性相关,回归斜率在 0.987 33 ~ 1.105 9 之间,表明每次的仿真结果均与观测结果在高度上具有相同的变化趋势。

对 100 次蒙特卡罗仿真结果与激光雷达观测结果之间相对偏差进行统计,结果如表 1 所示。在 65 km 以下,模型仿真结果为负偏差,模型仿真值相对激光雷达观测值偏小,在 65 km 处存在负

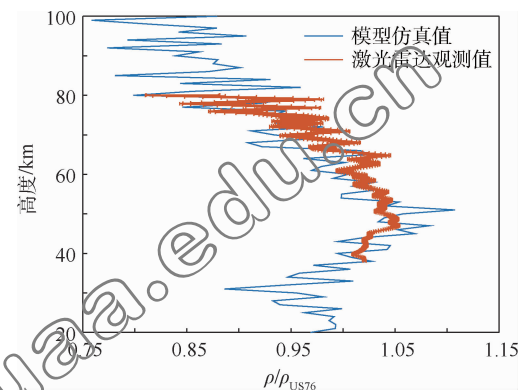

图 5　一次仿真结果与激光雷达观测值的比较

Fig. 5　Comparison between one-time simulation result and lidar observation values

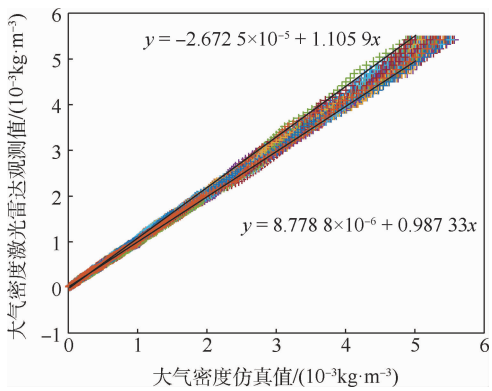

图 6　100 次蒙特卡罗仿真试验大气密度相关性检验

Fig. 6　Atmospheric density correlation test of 100 Monte Carlo simulation

http://bhxb.buaa.edu.cn

表1 100次蒙特卡罗仿真结果与激光雷达观测结果之间的平均相对偏差

Table 1 Mean relative error between 100 Monte Carlo simulation and lidar observation results

高度/km	相对偏差/%
40	-1.85
45	-1.83
50	-2.26
55	-2.44
60	-3.90
65	-5.09
70	0.31
75	-0.39
80	7.18

偏差的极大值,相对偏差可达-5.09%。在70 km和75 km模型的相对偏差较小,在±1%之间。在80 km,模型偏差较大,为7.18%。后续需要采用其他观测数据,进一步对40 km以下和80 km以上模型的可靠性进行评估。

5 模型应用

假设飞行器某次再入飞行的轨迹如图7所示,飞行器再入的初始时间为2019年11月24日10:00,初始再入的高度为100 km,经纬度为(116.0°E,40.0°N),终端高度为20 km,经纬度为(90.7°E,36.7°N),轨迹点之间的时间步长为1 s。初始位置大气密度的平均值由统计获得的网格化月平均值经对数插值计算获得。

图8再现了沿飞行轨迹大气密度的可能状态。可以看出,大气密度的仿真值均在3倍的标准偏差范围内。因为随高度大气密度呈指数减小,在飞行器每次跳跃运动的最高点时对应大气密度仿真结果的最低点,在图8中能够清晰地展现飞行器在飞行的不同阶段大气密度的变化特征。

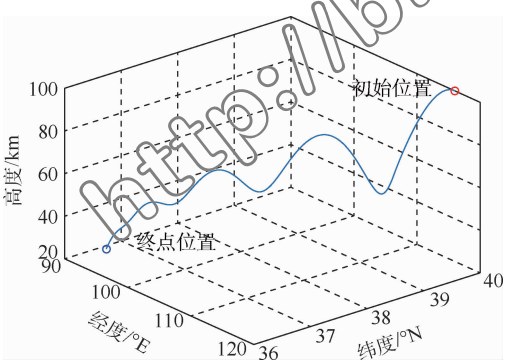

图7 假设的飞行器再入轨迹

Fig. 7 An assumed trajectory of a reentry vehicle

图9分别给出了飞行轨迹上大气密度不同尺度的扰动量和总扰动量。可以看出,大气密度大、小尺度扰动量和总扰动量的仿真结果基本呈对称分布,且均未超出3倍标准偏差范围,结果表明,大气模型能够很好地表征飞行轨迹上不同尺度大气密度的扰动量。

为分析仿真结果中大尺度扰动和小尺度扰动对总大气扰动的贡献程度,分别统计计算了大尺度扰动和小尺度扰动占总扰动的比例,如图10所

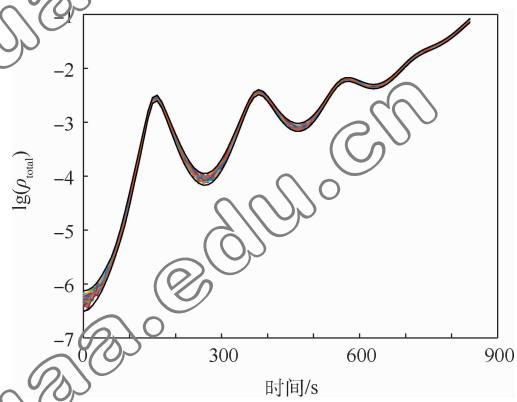

图8 沿轨迹的大气密度仿真结果

Fig. 8 Simulation result of atmospheric density along trajectory

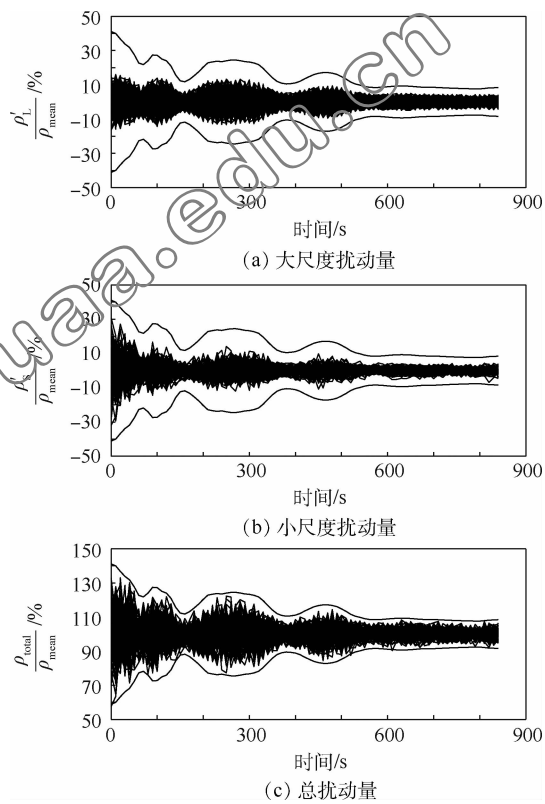

图9 沿轨迹大气密度小尺度扰动量、大尺度扰动量和总扰动量的仿真结果

Fig. 9 Simulation result of small-scale perturbances, large-scale perturbances and total perturbances of atmospheric density along trajectory

http://bhxb.buaa.edu.cn

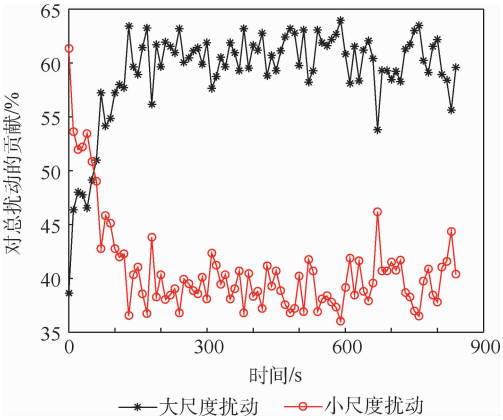

图 10　大尺度扰动和小尺度扰动对总扰动的贡献

Fig. 10　Contribution of large-scale and small-scale perturbances to total perturbances

示。在 60 s 以内,飞行高度在 90 km 以上,小尺度扰动占主导地位,60 s 以后,随着高度的降低,总扰动逐渐以大尺度扰动为主导。这一规律与文献[21]的研究结果具有较好的一致性,符合大气的物理规律。在中间层顶和低热层高度,小尺度扰动的贡献占主导地位,主要贡献来自湍流、重力波及其他随机性的小尺度扰动。在 70 km 以上,大气潮汐波的贡献逐渐显著,在 70 km 以下,大气扰动的贡献主要来自于行星波和重力波。

6　结　论

基于 2002—2018 年 TIMED/SABER 卫星观测的大气密度数据,统计获得大气密度多年月平均值和标准偏差。基于网格化的密度数据,对大气密度的变化规律进行了分析,并对大气密度建模方法进行探索。根据大气波动的特征,将波动特征显著的大尺度波动(行星波和潮汐波)以三角函数的形式进行表征,将更具随机性的小尺度扰动(重力波和湍流)用一阶自回归方法进行表征,初步建立了全球临近空间大气密度模型。得到以下结论:

1)通过分析大气密度在不同纬度的垂直分布,结果表明,在 90 km 以下,大气密度从夏季半球向冬季半球递减;在 90 km 以上,大气密度从低纬向高纬递减。在 80 km 以下,冬季半球的中高纬地区大气密度扰动较大。在 80 km 以上,夏季半球的大气密度扰动量高于冬季半球。

2)通过计算 USSA76 与 SABER 大气密度之间的相对偏差,结果表明,在 90 km 以下,大气密度的相对偏差逐渐从冬季半球正偏差向夏季半球负偏差过渡,且冬季半球正偏差的最大值高于夏季半球负偏差的最大值,最大值可达 132.2%。在 90 km 以上为正偏差。

3)通过对敦煌上空 20 ~ 100 km 大气密度进行 100 次蒙特卡罗仿真,并与激光雷达观测结果进行对比,结果表明,本文的建模方法是可行的,观测值与仿真值具有较好的吻合度。

4)通过采用蒙特卡罗方法对给定再入轨迹上的大气密度进行仿真,结果表明,模型可以再现飞行轨迹上大气密度可能的状态。

建立的大气密度模型主要优点在于:数据来源采用最近 17 年的观测数据,数据量大且数据全球覆盖性较好,有利于建立全球模型;建模方法更符合物理规律,不仅可以给出飞行轨迹上大气密度的平均态和总的扰动状态,还可以分别给出大尺度扰动量和小尺度扰动量。该模型可以作为初步工具,为临近空间飞行器气动设计、控制设计和飞行仿真等提供数据输入。后续将在建模方法中以温度、密度和气压满足的物理规律为约束,考虑不同尺度不同参量之间满足的相关性,对多物理参量进行协同建模,提升模型的可靠性和实用性。

致谢　感谢 TIMED / SABER 工作组提供的探测数据(http://saber.gats-inc.com/data_services.php)。

参考文献(References)

[1] 陈闽慷,杜涛,胡雄,等. 北半球高空大气参数波动对临近空间飞行热环境的影响[J]. 科学通报,2017,62(13):1402-1409.
CHEN M K,DU T,HU X,et al. Effect of atmosphere parameter oscillation at high altitude in the northern hemisphere for near space hypersonic flight aerothermodynamic prediction[J]. Chinese Science Bulletin,2017,62(13):1402-1409(in Chinese).

[2] 李健,侯中喜,刘新建,等. 基于扰动大气模型的乘波构型飞行器再入弹道仿真[J]. 系统仿真学报,2007,19(4):3283-3285.
LI J,HOU Z X,LIU X J,et al. Reentry trajectories simulations for waverider configuration hypersonic vehicle based on perturbation atmosphere model[J]. Journal of System Simulation,2007,19(4):3283-3285(in Chinese).

[3] 黄华,徐幼平,邓志武. 靶区大气环境对再入体落点精度影响仿真研究[J]. 系统仿真学报,2009,21(13):3910-3913.
HUANG H,XU Y P,DENG Z W. Simulation of influence of range atmospere on RV placement accuracy[J]. Journal of System Simulation,2009,21(13):3910-3913(in Chinese).

[4] 叶友达,张涵信,蒋勤学,等. 近空间高超声速飞行器气动特性研究的若干关键问题[J]. 力学学报,2018,50(6):1292-1310.
YE Y D,ZHANG H X,JIANG Q X,et al. Some key problems in the study of aerodynamic characteristics of near-space hypersonic vehicles[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied

http://bhxb.buaa.edu.cn

Mechanics,2018,50(6):1292-1310(in Chinese).

[5] COESA. U. S. standard atmosphere(1976)[S]. Washington, D. C.:U. S. Government Printing Office,1976.

[6] CIRA Working Group, REES D. COSPAR international reference atmosphere: Thermosphere (1986)[J]. Planetary and Space Science,1992,40(4):555.

[7] HEDIN A E. Msis-86 thermospheric model[J]. Journal of Geophysical Research-Space Physics,1987,92(A5):4649-4662.

[8] 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):15-16.

[9] DROB D, EMMERT J, 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.

[10] JUSTUS C G, JEFFRIES III W R, YUNG S P, et al. The NASA/MSFC global reference atmospheric model,1995 version (GRAM-95): NASA-TM-4715[R]. Washington, D. C.: NASA,1995.

[11] 程旋,肖存英,胡雄,等. 基于TIMED/SABER卫星温度数据对大气经验模型的评估[J]. 中国科学:物理学、力学、天文学,2018,48(10):79-93.
CHENG X, XIAO C Y, HU X, et al. Evaluation of atmospheric empirical model based on TIMED/SABER satellite temperature data[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2018,48(10):79-93(in Chinese).

[12] 刘一博,沈作军,张向宇. 一种区域参考大气密度的建模与应用方法[J]. 北京航空航天大学学报,2019,45(10):2079-2088.
LIU Y B, SHEN Z J, ZHANG X Y. A method for range reference density modeling and application[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(10): 2079-2088(in Chinese).

[13] 肖存英,胡雄,杨钧烽,等. 临近空间38°N大气密度特性及建模技术[J]. 北京航空航天大学学报,2017,43(9):1757-1765.
XIAO C Y, HU X, YANG J F, et al. Characteristics of atmospheric density at 38°N in near space and its modeling technique [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2017,43(9):1757-1765(in Chinese).

[14] ESPLIN R, ZOLLINGER L, BATTY C, et al. SABER instrument design update[J]. Infrared Spaceborne Remote Sensing III, 1995,2553:253-263.

[15] REMSBERG E E, MARSHALL B T, GARCIA-COMAS M, et al. Assessment of the quality of the version 1.07 temperature-versus-pressure profiles of the middle atmosphere from TIMED/SABER[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2008,113(D17):D17101.

[16] 宫晓艳,胡雄,吴小成,等. COSMIC大气掩星与SABER/TIMED探测温度数据比较[J]. 地球物理学报,2013,56(7):2152-2162.
GONG X Y, HU X, WU X C, et al. Comparision of temperature measurements between COSMIC atmospheric radio occulation and SABER/TIMED[J]. Chinese Journal of Geophysics,2013, 56(7):2152-2162(in Chinese).

[17] GU S Y, LI T, DOU X K, et al. Observations of quasi-two-day wave by TIMED/SABER and TIMED/TIDI[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres,2013,118(4):1624-1639.

[18] LI X, WAN W X, REN Z P, et al. The variability of SE2 tide extracted from TIMED/SABER observations[J]. Journal of Geophysical Research-Space Physics,2017,122(2):2136-2150.

[19] XU J Y, SMITH A K, YUAN W, et al. Global structure and long-term variations of zonal mean temperature observed by TIMED/SABER[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres,2007,112:D24106.

[20] 万玮,刘洪伟,樊菁. 100 km附近大气密度模型的误差带和置信度[J]. 中国科学:物理学、力学、天文学,2015,45(12):66-72.
WAN T, LIU H W, FAN J. Error band and confidence coefficient of atmospheric density models around altitude 100 km [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica,2015, 45(12):66-72(in Chinese).

[21] 肖存英,胡雄,王博,等. 临近空间大气扰动变化特性的定量研究[J]. 地球物理学报,2016,59(4):1211-1221.
XIAO C Y, HU X, WANG B, et al. Quantiative studies on the variations of near space atmospheric fluctuation[J]. Chinese Journal of Geophysics,2016,59(4):1211-1221(in Chinese).

[22] JUSTUS C G, JOHNSON D L. The NASA/MSFC global reference atmospheric model: 1999 version (GRAM-99): NASA/TM-1999-209630[R]. Washington, D. C.: NASA,1999.

作者简介:

程旋 男,博士研究生。主要研究方向:临近空间大气建模及应用。

肖存英 女,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:临近空间大气环境。

http://bhxb.buaa.edu.cn

A modeling method and its application of global atmospheric density in near space

CHENG Xuan[1,2], XIAO Cunying[3,*], YANG Junfeng[1], HU Xiong[1], YAN Zhaoai[1], LIU Dan[1,2]

(1. Key Laboratory of Science and Technology on Environmental Space Situation Awareness, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the 20 – 100 km atmospheric density data observed by TIMED/SABER satellite from year 2002 to 2018, the global grid data of monthly average and standard deviation are calculated statistically. Based on the grid data, the characteristics of atmospheric density variation are analyzed. The relative errors of USSA76 are calculated and the distribution characteristics of relative errors of USSA76 are analyzed. In addition, driven by the grid data, the atmospheric density is characterized as the sum of the monthly average and the large-scale disturbances and small-scale disturbances. The large-scale perturbations and small-scale perturbations are characterized by cosine functions and first-order autoregressive models, respectively. And a global near-space atmospheric density model is initially established. By comparing the simulated values of the model with the observed values of the lidar, the results show that the model values have a good agreement with the observed values, which verifies that the modeling method is feasible. Finally, Monte Carlo method can be used to reproduce all possible states of atmospheric density on a given trajectory.

Keywords: near space; atmospheric density; modeling; simulation; application

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2019-12-05; **Accepted**: 2020-03-06; **Published online**: 2020-04-16 15:16

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20200416.1503.004.html

Foundation items: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA17010301); National Natural Science Foundation of China (11872128,91952111); Youth Science and Technology Innovation Foundation of NSSC (Y9211FAF3S)

* **Corresponding author**. E-mail: xiaocunying@bnu.edu.cn