

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0618

超低轨道热层大气密度原位探测

李永平^{1,2,*}, 朱光武¹, 郑晓亮¹, 艾讲赵¹, 闫亚飞³, 周建华⁴

(1. 中国科学院国家空间科学中心 天基空间环境探测北京市重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院文献情报中心, 北京 100190;

4. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201108)

摘 要: 超低轨道(VLEO)由于其轨道较低,在该轨道运行的航天器在对地观测、科学研究方面具有独特优势,但对该轨道的大气密度变化特性认知不足。在阐述国内外超低轨道大气密度原位探测发展历史及现状的基础上,总结了现有超低轨道大气密度原位探测技术,对中国超低轨道大气密度原位结果进行了初步分析和讨论。结果表明:在2020年10月空间环境平静期,250 km和350 km高度大气密度相差一个量级;升降轨期间,超低轨道大气密度每千米分别下降 $0.025 \times 10^{-12} \text{ kg/m}^3$ 和 $0.041 \times 10^{-12} \text{ kg/m}^3$,均小于模式值的0.5倍;北纬40°时,处于午夜的升轨段(约250 km)大气密度是处于正午的降轨段(约420 km)大气密度的11.2倍,高度的影响大于地方时的影响;不同纬度下,实测日均值和模式日均值的比值从高纬的0.49降为低纬的0.39,模式值偏大。在超低轨道上,实测值总体上比模式值小,可为大气物理研究和应用研究提供基础数据。

关键词: 大气密度;超低轨道(VLEO);大气环境;原位探测;大气模式;数据分析

中图分类号: V11:P365

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2022)10-1875-08

超低轨道(very low Earth orbit, VLEO)一般指距地球表面150~400 km^[1]。航天器在该轨道上运行时,可获得更高的分辨率,减小质量和体积,改善地理空间定位精度,提高运载火箭的载重能力^[2],同时具有较低的碎片碰撞风险和辐射风险;但超低轨道具有大通量原子氧和较为稠密的大气密度,使得航天器表面敏感材料加速剥蚀和污染,卫星加速陨落,增大轨道预报的不确定性。原子氧是超低轨道热层大气中最为丰富的元素,也是对超低轨道航天器影响最严重的因素之一^[3],其相对航天器飞行速度快,化学性质活泼,能量较高,对航天器表面材料有明显的剥蚀效应^[4-5]。超低轨道大气密度较大,大气密度引起的大气阻力对于航

天器的发射和再入、寿命、轨道预报等也具有重要的影响^[2,6]。而现有的大气模型误差较大,截止到21世纪初精度依然没有突破15%^[7]。

超低轨道对于气球探测来说太高,对于低轨道卫星来说比较低,无法长时间驻留,且该区域辐射光谱特征少,遥感探测相对困难,因此超低轨道大气密度探测较少,实测数据较为缺乏且覆盖不足,使得该高度上的大气模型误差较大,圈层之间的能量动量耦合规律尚未厘清,科学家们经常称该区域为“未知层”^[2,8]。结合超低轨道大气密度原位探测的发展历程,本文对超低轨道大气密度原位探测手段及中国探测结果进行分析和讨论,区别于以往圆轨道卫星的同一高度探测,椭圆轨

收稿日期: 2021-10-20; 录用日期: 2022-03-04; 网络出版时间: 2022-03-21 15:06

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20220318.1621.001.html

基金项目: 中国载人航天工程(Y59003AC40); 国家子午工程(Y91GJC15ES)

* 通信作者。E-mail: lyp@nssc.ac.cn

引用格式: 李永平, 朱光武, 郑晓亮, 等. 超低轨道热层大气密度原位探测[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(10): 1875-1882.
LI Y P, ZHU G W, ZHENG X L, et al. In-situ measurement of atmospheric density in very low Earth orbits[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(10): 1875-1882 (in Chinese).

道卫星可以探测不同高度上大气密度变化,比较不同高度、不同纬度和地方时的大气密度变化特征,为后续数据应用打下基础。

1 国内外超低轨道卫星大气密度原位探测计划

1.1 美国超低轨道卫星大气密度原位探测

NASA 研制的 AE-C、D、E 系列卫星发射于 20 世纪 70 年代^[9-10],其目的是探测和研究全球中性大气和电离层的结构和动力学过程。在该卫星上装载了中性大气温度探测仪(neutral atmosphere temperature instrument, NATE),初步获得了 220~400 km 高度的轨道大气参数。AE-C 卫星实物图如图 1 所示(https://en.wikipedia.org/wiki/Explorer_51)。

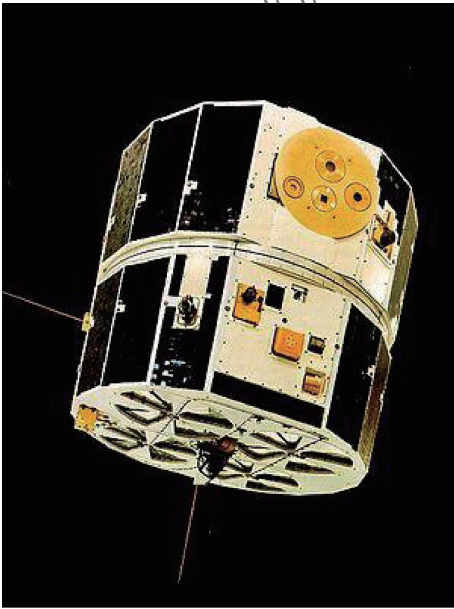


图 1 AE-C 卫星

Fig.1 AE-C satellite

NASA 研制的 DE-2 卫星发射于 1981 年^[11-13],其目的是为研究电离层、热层、磁层的耦合规律。在该卫星上装载了中性大气成分探测器,用于测量轨道的大气环境,获得了该时期空间环境条件下 200~600 km 高度的大气参数。DE-2 卫星实物图如图 2 所示(https://en.wikipedia.org/wiki/Dynamics_Explorer_2)。

美国科罗拉多大学研制的 DANDE 卫星发射于 2013 年^[14],其目的是为研究卫星阻力,轨道为 200~1 200 km。主要仪器有大气密度探测仪,用于测量近地点附近的大气参数,大气密度测量精度为 $2 \times 10^{-13} \text{ kg/m}^3$ 。DANDE 卫星外形如图 3 所示(<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/d/dande>)。

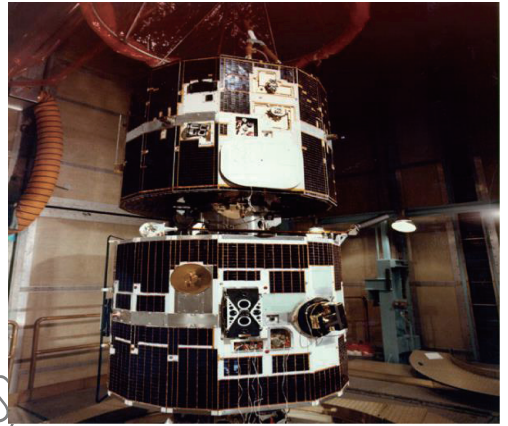


图 2 DE-2 卫星

Fig.2 DE-2 satellite

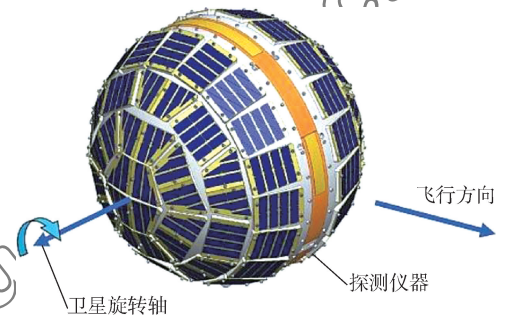


图 3 DANDE 卫星

Fig.3 DANDE satellite

1.2 欧盟超低轨道卫星大气密度原位探测

欧盟主导的 QB50 计划在 2017 年后陆续分批次发射,运行在 200~380 km 高度范围,部分卫星装载大气探测器对轨道中性大气进行原位探测,卫星设计寿命为 3 个月。图 4 为探测卫星示意图^[15]。

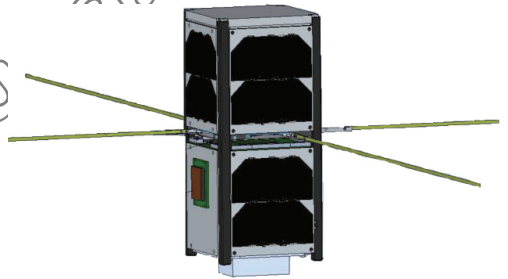


图 4 QB50 卫星^[15]

Fig.4 QB50 satellite^[15]

1.3 日本超低轨道卫星大气密度原位探测

日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)设计研制的一颗超低轨道卫星于 2017 年 12 月发射,该卫星轨道高度 180~250 km,简称 SLATS(super low altitude satellite)^[16]。该卫星的主要目的是验证超低轨卫星系统,测量原位大气密度,在轨监测原子氧,研究超低轨道大气环境对卫星的影响。图 5 为 SLATS 卫星模型(<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/slats>)。

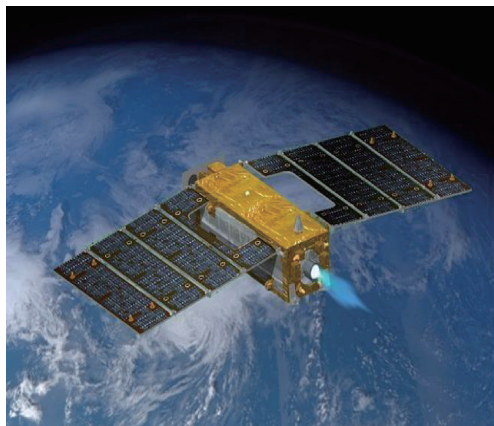


图 5 SLATS 卫星

Fig. 5 SLATS satellite

1.4 中国超低轨道卫星大气密度原位探测

从 20 世纪 90 年代开始,在中国载人航天工程重大任务的支持下,由中国科学院国家空间科学中心研制的星载质谱仪及大气密度探测器分别在“神舟二号”、“神舟三号”和“神舟四号”飞船轨道舱上开展了连续在轨大气环境监测,获得了在地磁宁静期与磁暴期、太阳活动期大气密度的长期变化特性^[17-21]。后期在天宫实验室及其他应用卫星上装载质谱仪获得了热层大气成分和大气密度实测数据,保障载人飞船安全运行。上述航天器均运行于低轨道,目前中国长期运行在超低轨道的卫星还在论证之中,但也有椭圆轨道卫星运行在 250 ~ 700 km,在该卫星上搭载了大气密度探测器,进行大气环境探测。

超低轨道大气密度探测数据取自中国星载大气密度探测器在轨原位探测结果,探测器搭载在椭圆形轨道运行的中国卫星上,卫星运行轨道高度为 250 ~ 700 km,倾角为 92°。探测器采用测量传感器内气体压力和温度的方法,并由气体分子动力学理论所建立的基本方程,结合卫星运行的姿态和速度来获得自由大气密度^[18,21-22]。图 6 为大气密度探测器工作原理示意图,表 1 为探测器的主要性能参数。

探测器获取的原始数据与卫星平台数据经过地面数据系统处理后,最终得到 3 级数据产品,包括北京时、世界时、地方时、经度、纬度、高度及大

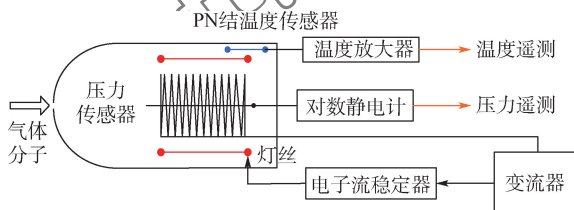


图 6 大气密度探测器原理示意

Fig. 6 Schematic diagram of atmospheric density detector

表 1 中国原位大气密度探测器的主要性能

Table 1 Performance of Chinese in-situ atmospheric density detector

参数	数值
传感器内气体压力范围/Pa	$5 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-2}$
传感器内气体温度范围/°C	-20 ~ 60
最小可检测压力/Pa	1×10^{-8}
温度分辨率/°C	0.1
压力校准总不确定度/%	3
探测器质量/kg	1.5
探测器功耗/W	1.5

气密度信息。该探测器已实现多次在轨探测,也发布了相关的探测成果^[18],分析了不同高度和不同地磁扰动期间模式值与在轨实测值的差异。

1.5 分析

国外虽早在 20 世纪 70 年代利用卫星开展了超低轨道大气密度原位探测,但截止到现今探测次数少,持续时间短,覆盖有限,基于实测数据所建立的模型在该高度范围误差较大。而国内起步晚,在借鉴国外超低轨道大气探测经验的基础上进行了初步探测。

2 超低轨道大气密度原位探测手段

超低轨道大气密度原位探测手段主要包括质谱仪、微量天平及密度计。质谱仪既可测大气成分,也可以测大气密度,同时还可获取原子氧信息;微量天平用于测量原子氧通量信息;密度计用于测量大气密度。

1) 质谱仪

质谱仪可用于测量轨道空间的各气体成分及其含量,获得大气成分和大气密度。其是把中性气体粒子电离,通过质量分析器把不同质荷比的离子在电磁场中加以分类计数的一种仪器,既可以测量气体成分,又可以测量分压强,获得总压强,国际上将其广泛地应用于空间探测中。

按传感器特性,可以将质谱仪分为四极杆质谱仪、飞行时间质谱仪、磁质谱仪等。四极杆质谱仪质量轻、分辨率好,可在较恶劣的真空条件下工作,且无漏磁现象,可适应超低轨道较低的真空度,在星载原位探测中应用最多。

2) 微量天平

微量天平可用于测量轨道空间的原子氧通量。主要原理是:以压电石英晶体(quartz crystal microbalance, QCM)作为敏感传感器,利用石英晶体传感器的压电特性,当石英晶体敏感表面沉积微小物质质量或表面质量被剥蚀减小时,其谐振频率就会发生变化,并由此获得敏感晶体上沉积

或者剥蚀质量的变化。

在敏感石英晶片表面上涂覆 Kapton 薄膜, Kapton 的原子氧剥蚀率已经过多次飞行试验及地面试验验证,剥蚀率较为稳定。通过监测敏感石英晶片表面质量损失,根据材料已知的原子氧反应系数,即可推算轨道上原子氧通量。

3) 密度计

密度计可用于测量轨道空间的大气密度。探测器采用测量传感器内气体压力和温度的方法,并由气体分子动力学理论所建立的基本方程,结合卫星运行的姿态和速度来获得自由大气密度。

上述3种超低轨道大气密度原位探测手段在国内外均有运用,中国科学院国家空间科学中心研制的轨道大气综合探测器,具有质谱仪、压力计及微量天平的综合功能,在天宫实验室及应用卫星上获得成功运用。

3 中国超低轨道大气密度原位探测结果

3.1 地磁指数和太阳活动指数数据

采用美国国家海洋和大气管理局空间环境中

心发布的地磁指数 K_p 、 A_p 日均值和太阳辐射通量 $F_{10.7}$ 日均值数据,地磁活动指数 A_p 是表征地磁扰动强度的分级指标,地磁活动指数 K_p 表征国际 3 h 磁情指数,每天 8 个值。太阳活动指数 $F_{10.7}$ 是表征太阳活动水平的重要参数。

3.2 模式数据

选用 NRLMSIS00 模式数据(简称 MSIS00)与实测数据进行比较。MSIS 系列模式基于卫星质谱仪资料和非相干散射雷达测量温度的结果建立^[23-25]。MSIS00 模式是美国海军实验室(Navy Research Laboratory, NRL)以 MSISE90 和 Jacchia70 为基础开发改进而来,包含卫星加速度计和卫星轨道反演得到的大气总质量密度数据、氧分子数密度数据及非相干散射雷达的温度数据。该模式描述了从地面到热层(0~1 000 km)的中性大气密度和温度等大气物理性质,可以反映热层大气密度的基本变化特征。

输入如表 2 所示的参数,可求出与原位探测数据点对应的模式值。该模式不仅能输出不同地磁扰动和不同太阳活动水平条件下热层大气密度数据,还可以输出主要大气成分的数据。

表 2 MSIS00 模式的输入和输出参数

Table 2 Input and output parameters of MSIS00 model

输入/输出参数	名称
输入参数	年、月、日(UTS)、高度、地理纬度、地理经度、日出时间,81 d 平均 $F_{10.7}$, 前 1 天的 $F_{10.7}$, 当日地磁活动指数 A_p , 3 h 前地磁活动指数 A_p , 6 h 前地磁活动指数 A_p , 9 h 前地磁活动指数 A_p , 12~33 h 前地磁活动指数 A_p , 36~57 h 前地磁活动指数 A_p
输出参数	He 数密度, O 数密度, O ₂ 数密度, N 数密度, N ₂ 数密度, A 数密度, H 数密度, 原子氧数密度, 总质量密度, 外逸层温度, 高层温度

3.3 探测结果

卫星运行在 250~700 km 轨道高度,对 250~400 km 超低轨道大气密度实测数据进行分析,获得其随时间和空间变化特征,并与 MSIS00 模式进行比较。

3.3.1 250 km、350 km 大气密度实测值随时间变化特征

图 7(a)为 2020 年 10 月 7 日至 11 日之间 250 km、350 km 大气密度实测值,图 7(b)、(c)分别为 $F_{10.7}$ 和 K_p 变化, $F_{10.7}$ 为 73.4, K_p 最大值为 2。这段时间太阳活动及地磁活动处于平静状态,大气密度整体处于较低值,250 km 实测平均值为 1.923×10^{-11} kg/m³, 350 km 实测平均值为 2.014×10^{-12} kg/m³, 两者高度相差 100 km, 大气密度相差近一个量级。

3.3.2 实测大气密度随高度、纬度、地方时变化特征

导致大气密度变化的因素除了太阳活动及地

磁扰动之外,地方时、高度、纬度也是影响实测密度值变化的因素。因此,对大气密度随高度、纬度和地方时的变化特征进行分析和讨论。

1) 升轨、降轨期间超低轨道不同高度大气密度变化特征

图 8 为不同地方时 13:00LT(LT 指地方时)前后(降轨)和 01:00LT 前后(升轨)大气密度实测值随高度的变化情况,高度范围为 250~400 km。

图 8 表明,大气密度值随着高度的升高而减小。其中,降轨阶段卫星从 300 km 上升到 400 km,大气密度从 5.2×10^{-12} kg/m³ 下降到 1.1×10^{-12} kg/m³, 每千米密度值平均下降 0.041×10^{-12} kg/m³;同时,模式值从 1.0×10^{-11} kg/m³ 下降到 1.3×10^{-12} kg/m³。对降轨阶段实测值进行 3 次多项式拟合,实测值和拟合值的相关系数 r 为 -0.805 33, 残差均值和标准偏差分别为 $1.526 5 \times 10^{-13}$ kg/m³ 和 $6.658 5 \times 10^{-12}$ kg/m³。在

升轨期间,轨道高度从 400 km 下降到250 km,大气密度从 $5 \times 10^{-13} \text{ kg/m}^3$ 上升到 $1.8 \times 10^{-11} \text{ kg/m}^3$,

在 300 km 时,大气密度为 $3 \times 10^{-12} \text{ kg/m}^3$,每千米密度值平均下降 $0.025 \times 10^{-12} \text{ kg/m}^3$,约为降轨阶段的 0.6 倍。模式值从 $5 \times 10^{-13} \text{ kg/m}^3$ 上升到 $2.8 \times 10^{-11} \text{ kg/m}^3$,300 km 时为 $7 \times 10^{-12} \text{ kg/m}^3$ 。如表 3 所示。

以上分析表明,相比于升轨阶段,降轨阶段的大气密度随高度的升高下降得更快。该现象可能是由于降轨-升轨阶段处于 13:00/01:00 地方时,升轨时阴影区大气密度整体处于较低水平,使得高度变化引起的密度变化偏小。升轨时实测值下降值与模式值下降值比值为 0.385,在降轨时两者比值为 0.471,该现象可能是由于模式为基于物理模型建立,代表统计平均结果,误差较大所致。

2) 相同纬度不同高度和地方时大气密度变化特征

在相同纬度下,卫星可处于不同的高度和经度,从而研究大气密度随高度和经度的变化,也就是大气密度随高度和地方时的变化。图 9(a)、(b)分别为北纬 40°升轨和降轨阶段大气密度变化。可以看出,低高度(245~265 km)的大气密度相比于较高高度(390~450 km)高出近一个量级,图 9(a)平均密度为 $1.56 \times 10^{-11} \text{ kg/m}^3$,地方时处于午夜 01:00,图 9(b)平均密度为 $1.36 \times 10^{-12} \text{ kg/m}^3$,地方时处于中午 13:00。大气密度受太阳极紫外辐射的影响,午夜和中午时分别对应大气密度一天中的极小值和极大值,但午夜

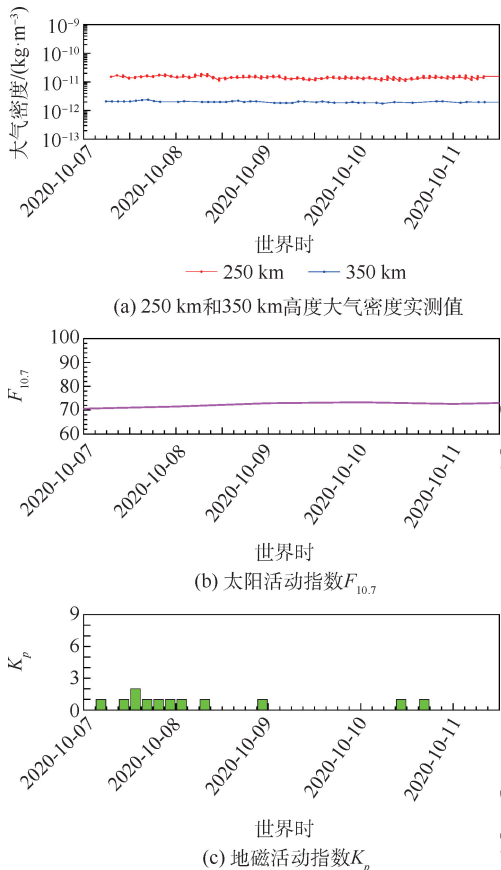


图 7 大气密度实测值、太阳活动指数和地磁活动指数随时间的演化

Fig. 7 Changes of observed results of atmospheric density, solar radiation index and geomagnetic index

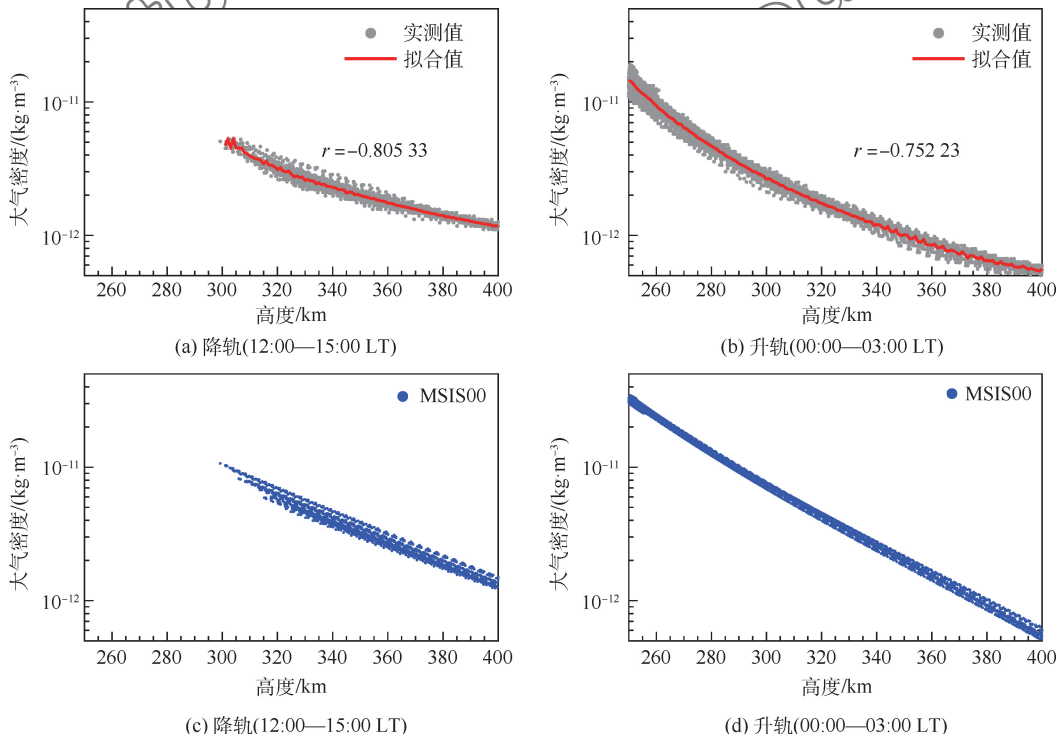


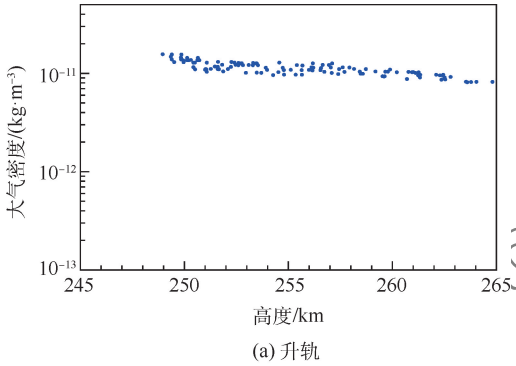
图 8 大气密度实测值随高度的变化

Fig. 8 Changes of observed value of atmospheric density with altitude

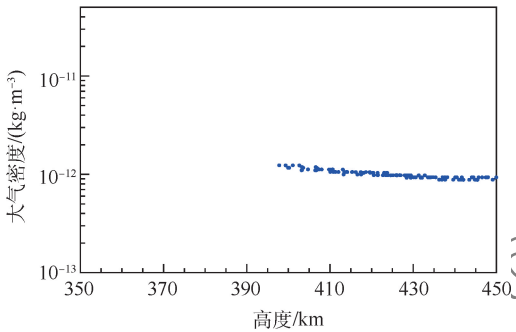
表3 大气密度每千米下降值

Table 3 Decrease of atmospheric density per kilometer

kg/m ³		
升/降轨	每千米下降实测值	每千米下降模式值
升轨	0.025×10^{-12}	0.065×10^{-12}
降轨	0.041×10^{-12}	0.087×10^{-12}



(a) 升轨



(b) 降轨

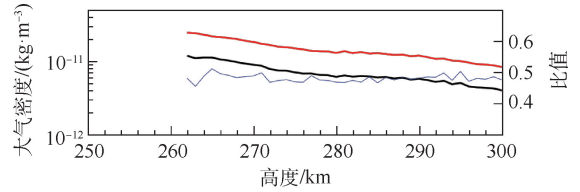
图9 相同纬度(北纬40°)下升轨和降轨期间大气密度实测值随高度的变化

Fig.9 Changes of observed atmospheric density with altitude during orbit ascent and descent at the same latitude (40°N)

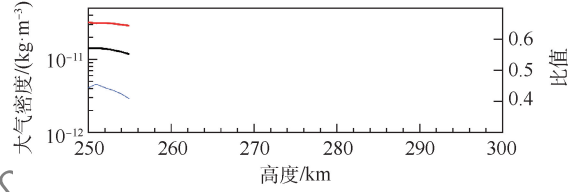
时运行轨道更低。因此,综合高度和地方时的影响,显然高度的影响大于地方时的影响,即使升轨段地方时处于午夜时分,而降轨段处于正午,升轨段大气密度依然是降轨阶段的11.2倍。

3) 不同纬度条件下大气密度实测值与MSIS00模式值的比较

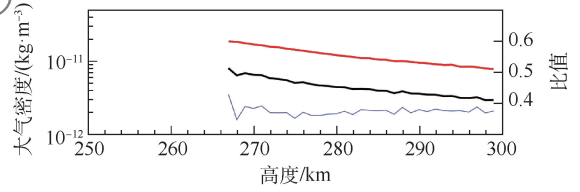
由图10所示,在不同纬度下,实测日均值和模式日均值均随高度的升高而下降,且实测值与模式值变化趋势保持一致。图10(a)大气密度实测值和模式值分别从 $1.35 \times 10^{-11} \text{ kg/m}^3$ 、 $2.57 \times 10^{-11} \text{ kg/m}^3$ 下降到 $4.07 \times 10^{-12} \text{ kg/m}^3$ 、 $8.43 \times 10^{-12} \text{ kg/m}^3$,两者日均值比值维持在0.49附近。由于卫星在经过北纬50°时处于升轨或降轨阶段,时间较短,实测值数据量较少,如图10(b)所示,但是也可看出随高度下降的趋势。图10(c)在268~290 km范围内实测值下降较快,两者比值下降到0.39。



(a) 北纬80°



(b) 北纬50°



(c) 北纬20°

— 实测值 — 模式值 — 实测值与模式值比值

图10 不同纬度下大气密度实测值与MSIS00模式值及比值随高度的变化

Fig.10 Changes of observed result, MSIS00 model, and ratio of observed to model values with altitude at different latitudes

综上所述,在高中低纬度地区上空,大气密度均随高度上升而下降,且随着纬度的减小实测值与模式值的比值也减小,表明两者的相对误差增大,可能与模式在该高度缺乏实测数据有关。

4 结论

本文分析了中国首次获得的椭圆超低轨道原位大气密度探测数据,获得了大气密度随纬度、高度、地方时的初步变化特征,并与大气模式进行了比较。主要结论如下:

1) 高度相差100 km,大气密度相差近一个量级。

2) 获得了升降轨期间超低轨道的大气密度变化特征,降轨阶段的大气密度随高度的升高下降更快,每千米分别下降 $0.025 \times 10^{-12} \text{ kg/m}^3$ 、 $0.041 \times 10^{-12} \text{ kg/m}^3$ 。该现象是由于降轨、升轨阶段处于13:00/01:00地方时,升轨时阴影区大气密度整体处于较低水平,使得高度变化引起的密度变化偏小。

3) 分析了相同纬度下大气密度随高度和地方时的变化,升轨段地方时处于午夜时分,而降轨段处于正午,升轨段(低高度)大气密度是降轨阶段的11.2倍,高度对大气密度的影响大于地方时的影响。

4) 在北半球高中低纬度地区上空,大气密度日均值均随高度上升而下降,且随着纬度的减小,实测日均值与模式日均值的比值也减小,表明两者的相对误差增大,实测数据可为模式修正提供支持。

中国利用椭圆轨道卫星,开展了超低轨道大气密度原位探测,其分布符合空间环境规律变化,后续将开展数据应用工作。随着航天技术和应用需求的发展,未来在超低轨道上长期驻留的卫星将逐步增多,对该轨道的环境认识也应逐步加深,进行更多的原位探测。

参考文献 (References)

- [1] 姜海富,柴丽华,周晶晶,等. 国外超低轨卫星计划及环境效应研究进展[J]. 环境技术,2015,33(5):30-34.
JIANG H F, CHAI L H, ZHOU J J, et al. Super low orbit satellite program and study progress of environment effect in foreign countries[J]. Environmental Technology, 2015, 33(5):30-34 (in Chinese).
- [2] CRISP N H, ROBERTS P C E, LIVADIOTTI S, et al. The benefits of very low earth orbit for earth observation missions[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2020, 117:1-18.
- [3] BANKS B A, MILLER S K, DE GROH K K, et al. Low earth orbital atomic oxygen interactions with materials: AIAA-2004-5638[R]. Reston: AIAA, 2004.
- [4] SAMWEL S W. Low earth orbital atomic oxygen erosion effect on spacecraft materials [J]. Space Research Journal, 2014, 7(1):1-13.
- [5] KUMIKO Y, NOBUO O, MASABITO T. Effect of relative intensity of 5 eV atomic oxygen and 172 nm vacuum ultraviolet in the synergism of polyimide erosion[J]. High Performance Polymers, 2016, 16(2):221-234.
- [6] 王英鉴. 中高层大气对卫星系统的影响[J]. 中国科学(A辑), 2000, 30(S1):17-20.
WANG Y J. The influence of the middle and upper atmosphere on satellite systems [J]. Science in China (Series A), 2000, 30(S1):17-20 (in Chinese).
- [7] MAROCS F A. New satellite drag modeling capabilities[C]//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston: AIAA, 2006, 8:5594-5606.
- [8] SARRIS T E, TALAAT E R, PALMROTH M, et al. Daedalus: A low-flying spacecraft for the exploration of the lower thermosphere-ionosphere [J]. Geoscientific Instrumentation Method and Data Systems, 2020, 9(1):153-191.
- [9] HERRERO F A, MAYR H G, SPENCER N W. Low latitude thermospheric meridional winds between 250 and 450 km altitude: AE-E satellite data [J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1988, 50(10-11):1001-1006.
- [10] SPENCER N W, NIEMANN H B, CARIGNAN G R. The neutral-atmosphere temperature instrument [J]. Radio Science, 1973, 8(4):287-296.
- [11] SPENCER N W, CARIGNAN G R. In situ measurements of thermospheric composition, temperature and winds by mass spectrometry [J]. Advances in Space Research, 1988, 8(5-6):107-117.
- [12] KILLEEN T L, MCCORMAC F G, BURNSA G, et al. On the dynamics and composition of the high-latitude thermosphere [J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1991, 53(9):797-814.
- [13] BALTHAZOR R L, BAILEY G J. Transonic neutral wind in the thermosphere observed by the DE 2 satellite [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111:A01301.
- [14] MARCIN D P, SCOTT E P. An innovative method for measuring drag on small satellites [C]//The 23rd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2009.
- [15] EVGENIY S, IGOR B, IVAN T, et al. SSAU project of the nano-satellite SamSat-QB50 for monitoring the Earth's thermosphere parameters[J]. Procedia Engineering, 2015, 104:139-146.
- [16] KONOUE K, IGARASHI N, MAMURA S, et al. Development of super low altitude test satellite (SLATS) [C]//The 28th International Symposium on Space Technology and Science, 2011, 111(239):43-46.
- [17] 秦国泰, 强磁暴、能量粒子暴与热层大气密度涨落之间的相位关系[J]. 空间科学学报, 2013, 33(1):39-47.
QIN G T. Relationship between severe geomagnetic storm, energetic particle storms and thermosphere density strong disturbances[J]. Chinese Journal of Space Science, 2013, 33(1):39-47 (in Chinese).
- [18] 李永平, 朱光武, 秦国泰, 等. 不同高度和不同地磁扰动期间热层大气密度模式值与探测值的显著差异[J]. 地球物理学报, 2014, 57(11):3703-3714.
LI Y P, ZHU G W, QIN G T, et al. Significant difference of the thermospheric density between the model and observation values of satellite during different geomagnetic storm events and different altitudes [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(11):3703-3714 (in Chinese).
- [19] QIN G, QIN S, YE H, et al. The thermospheric composition different responses to geomagnetic storm in the winter and summer hemisphere measured by "SZ" atmospheric composition detectors [J]. Advances in Space Research, 2008, 42(7):1281-1287.
- [20] 李永平, 朱光武, 秦国泰, 等. 地磁扰动期间热层大气 N₂ 数密度异常增变 [J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(8):883-889.
LI Y P, ZHU G W, QIN G T, et al. The abnormal variation of N₂ number density in thermosphere during geomagnetic disturbance [J]. Science China: Technological Sciences, 2014, 44(8):883-889 (in Chinese).
- [21] 李颢, 徐寄遥, 唐歌实, 等. APOD 卫星大气密度数据处理与标校 [J]. 地球物理学报, 2018, 61(9):3567-3576.
LI X, XU J Y, TANG G S, et al. Processing and calibrating of in-situ atmospheric densities for APOD [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(9):3567-3576 (in Chinese).
- [22] 闫亚飞, 李永平. 中高层大气密度研究态势及热点分析 [J]. 科技导报, 2020, 38(11):141-151.
YAN Y F, LI Y P. Development trend and hotspot analysis of middle and upper atmospheric density research [J]. Science &

Technology Review, 2020, 38(11):141-151 (in Chinese).

- [23] 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):SIA 15-1-SIA 15-16.

[24] PICONE M, HEDIN A E, DROB D. NRLMSISE-00 model 2001 [EB/OL]. [2021-10-01]. <http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/atmos/nrlmsise00.html>.

[25] EMMERT J T. Thermospheric mass density: A review [J]. Advances in Space Research, 2015, 56(5):773-824.

In-situ measurement of atmospheric density in very low Earth orbits

LI Yongping^{1,2,*}, ZHU Guangwu¹, ZHENG Xiaoliang¹, AI Jiangzhao¹, YAN Yafei³, ZHOU Jianhua⁴

- (1. Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201108, China)

Abstract: Very low Earth orbit (VLEO) has unique advantages in Earth observation and scientific research due to their low orbital altitude; however, the knowledge of the atmospheric density variation in these orbits is insufficient. A preliminary analysis and discussion of the in-situ results of atmospheric density in VLEOs in China is carried out, based on the description of the history and current status of in-situ exploration of VLEO atmospheric density, and on the summary of the existing in-situ detection techniques of atmospheric density. The results show one order of magnitude difference in atmospheric density between 250 km and 350 km altitudes during the quiet period of the space environment in October 2020. During the orbit ascent and descent, the atmospheric density of VLEOs decreases by $0.025 \times 10^{-12} \text{ kg/m}^3$ and $0.041 \times 10^{-12} \text{ kg/m}^3$ per kilometer, respectively, each 0.5 times less than that of the NRLMSISE00 model. At 40°N , the atmospheric density in the ascending section at midnight ($\sim 250 \text{ km}$) is 11.2 times higher than that in the descending section at noon ($\sim 420 \text{ km}$), and the effect of altitude is greater than that at local time. At different latitudes, the daily mean ratio of the observed values to the model values decreases from 0.49 at high latitudes to 0.39 at low latitudes, with the NRLMSISE00 model values being larger. At the VLEO, the observed values are generally smaller than the NRLMSISE00 model values, which can provide basic data for atmospheric physical studies and applied research.

Keywords: atmospheric density; very low Earth orbit (VLEO); atmospheric environment; in-situ detection; atmospheric model; data analysis

Received: 2021-10-20; Accepted: 2022-03-04; Published online: 2022-03-21 15:06

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20220318.1621.001.html

Foundation items: Manned Space Program of China (Y59003AC40); Meridian Program of China (Y91GJC15ES)

* Corresponding author. E-mail: lyp@nssc.ac.cn