

地球边缘大气密度时空特性分析

郭正雄, 李文皓, 张 珩

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 分析了地球边缘大气密度的时变特性及空间分布特性。从物理原因出发并基于 NRLMSISE-00 和 MET-99 大气模型计算随不同时空变量变化的相对大气密度, 以说明各时空因素对地球边缘大气密度的影响程度。分析结果表明地球边缘大气密度具有较强的时变特性, 昼夜和季节均对大气密度产生一定影响。空间特性表现为纬度对大气密度的影响明显, 而经度影响微弱。季节不同导致纬度的影响程度不同, 纬度因素在夏季和冬季的影响强于春秋。随着纬度的增加, 季节对地球边缘大气密度的影响逐渐增强, 而当地时间的影响呈减弱趋势。相比较而言, 低纬区的昼夜波动强于季节波动, 高纬区的季节波动强于昼夜波动。

关键词: 地球边缘大气; 大气密度; 时空特性; NRLMSISE-00; MET-99

中图分类号: V11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2012)08-1177-08

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2012.08.026

Analysis of Time-Varying Spatial Characteristics for Atmospheric Density of Earth Edge

GUO Zheng-xiong, LI Wen-hao, ZHANG Heng

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The time-varying and spatial characteristics of the atmospheric density of Earth edge are discussed in this paper. Based on physical reasons and results of relative atmospheric density calculated from NRLMSISE-00 and MET-99 atmospheric models, the influence caused by all spatial and temporal factors can be illustrated. The results show that the atmospheric density of Earth edge has obvious time-varying characteristics and the impact of latitude on the atmospheric density is significant, while the impact of longitude is not obvious. The influence of latitude is more obvious in summer and winter than spring and autumn. With the increase of latitude, season influences the atmospheric density of Earth edge stronger, while the local solar time weaker. In comparison, the diurnal fluctuations are more obvious than seasonal fluctuations in the area of lower latitude, while the influence caused by season is stronger in areas of higher latitude.

Key words: Atmosphere of Earth edge; Atmospheric density; Temporal and spatial characteristics; NRLMSISE-00; MET-99

0 引言

近空间(高度范围是 20 ~ 100km)及近空间飞行器是近年来国际上的研究热点^[1],随着近空间飞行器和近空间飞行器技术的迅猛发展,以及近空间科技的技术带动性和与国家安全的密切相关性,近空间资源得到各国的重视,已成为竞相争夺的空间。

目前研究的近空间飞行器问题主要还是集中在近空间的中低层空域,对于远层近空间及其以上的空域研究不多。地球边缘大气是指分布在离海平面 80 ~ 120km 高度范围内的大气环境,处于近空间的顶层附近,包括一部分中间层和一部分热层空域。该空域内大气密度较海平面低 5 ~ 8 个量级,一方面它不能为现有高超声速巡航飞行器提供足够的升力,

另一方面它产生的阻力不能被忽视,不适合航天器长期在轨飞行,因此尚未得到足够重视。随着近空间资源利用的不断深入,远层近空间空域或是未来空天技术发展的重要方向,因此首先需研究地球边缘大气的环境特性。密度特性是地球边缘大气环境特性的重要表征,精确计算大气密度对于航空航天活动意义重大,而掌握时空特性是计算及预测大气密度的必要前提。

目前尚未发现专门研究地球边缘大气密度的报道,在已有的工作中,薛大同^[2]讨论了地球大气密度随高度分布规律;Mayr^[3]研究了热层大气密度的年变化、半年变化特性;Liu^[4]等利用 CHAMP 卫星 4 年的探测数据分析了赤道地区热层大气密度异常的气候学特征;Hedin^[5-6]给出了 400km 高度上的大气密度随季节、地磁、昼夜的变化特征,但这些研究均没有考虑地球边缘大气作为中间层和热层的过渡区域的特殊性。国际上流行的部分大气模型覆盖了该空域范围,如 USSA76 大气模型的覆盖范围是 -5 ~ 1000km, NRLMSISE-00 大气模型^[7]的覆盖范围则是 0 ~ 1400km,然而这些模型多是基于卫星阻力和加速度计等实测数据,并没有说明地球边缘大气作为过渡地带的密度分布特性及波动规律。

基于工程应用的背景,本文从大气密度波动的物理原因出发,分别利用 NRLMSISE-00 和 MET-99 大气模型^[8-9]对地球边缘大气密度时空特性进行探讨,提出相对大气密度的概念以直观地说明地球边缘大气密度随各时空因素的波动特点,计算在一定高度、不同的变量条件下的相对大气密度及其波动标准差,分别讨论地球边缘大气密度随当地太阳时、季节、经纬度的变化规律,经统计分析得出大气密度波动定性的结论,并给出各时空因素影响地球边缘大气密度的程度强弱对比分析。

1 NRLMSISE-00 和 MET-99 大气模型简介

NRLMSISE-00 大气模型由美国海军研究实验室(Navy Research Laboratory, NRL)于 2000 年在 MSIS-1990 模型的基础上发展完善而来,与 90 模式的区分主要有:在总质量密度上广泛使用阻力和加速度计数据;对总质量密度增加一个要素以解释在 500km 高度以上 O⁺ 和热氧可能重要的贡献;包含针对 [O²] 的太阳峰年计划的极紫外掩星数据。MSIS

系列大气模型应用广泛,并且已经被证实在模拟精度上具有明显的优势^[10-11]。

MET-99 大气模型(Marshall Engineering Thermosphere)是一个利用卫星阻力分析得到的修正系数静态扩散方法的半经验模型,这是基于 NASA 马歇尔工程热层模型(MET-88)的改进版本,而 MET-88 是从 JACCHIA 系列模型发展而来, MET-99 的计算空域范围是 90 ~ 2500km,利用卫星阻力计算得到的数据拟合经验公式,进而计算得到大气参数。然而短期地磁扰动会造成总密度较大的变化,基于卫星阻力的模型不能很好地反映这一点,因此对于大气密度昼夜变化等短时间内的变化不能给出较为精确的结果,另外, NRLMSISE-00 大气模型对于 120km 以下的空域综合了 MSIS-90 大气模型、大气探测器和质谱仪的数据,相比较 MET-99 模型,在计算地球边缘大气密度的精度以及分析密度波动特性方面 NRLMSISE-00 模型的参考价值相对较大。

NRLMSISE-00 和 MET-99 大气模型的输入输出参数基本相同,大致可以分为时间、经纬度和日地环境参数等。以 NRLMSISE-00 为例,其输入参量具体包括年份(year)、当年 1 月 1 日至当天的天数(day)、当地太阳时(lst)、地理纬度(lat)、地理经度(long)、海拔(alt)、地磁活动强度指数(ap)、前一天太阳 10.7cm 射电辐射流量(fl07)、以当天为中心的 81 天(3 个太阳自转周期)的平均太阳 10.7cm 射电辐射流量(fl07a)。

2 地球边缘大气密度随经度的变化

由于地球关于极轴对称,当其他条件不变只有经度因素变化时,在构成大气的多种气体中只有部分微量元素发生了细微的改变,因而对气体总密度造成的影响可以忽略不计。Jacchia 提出的 Jacchia64 模型^[13],以扩散平衡方程的数值积分为基础,讨论了大气密度随太阳辐射指数和地磁指数的变化规律,Hedin 在文献[5]中论述了反映地磁活动强度的 AP 指数对大气密度造成的影响。随着纬度的增加,特别是在极地附近由于地磁活动十分活跃,经度不同造成地磁活动的强弱分布不同,因此对密度有所影响,然而其影响仍旧不十分明显,并且其区域相对全球范围较小,故本文认为经度对地球边缘

大气密度的影响十分微弱。

定义高度 alt 和经度 long 是变量,其余参数为已知量,则大气密度为 $\rho(\text{alt}, \text{long})$ 。定义经度的变化范围是 $[-180, 180]$, 取 $n + 1$ 个节点,则第 i 个节点的密度值为 $\bar{\rho}_{\text{lst}}(\text{alt}, 360(i - 1)/n - 180)$ 。可以得到同一高度下随经度变化的平均大气密度

$$\bar{\rho}_{\text{long}}(\text{alt}) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \rho(\text{alt}, 360(i - 1)/n - 180) \quad (1)$$

定义随经度变化的相对大气密度为

$$\gamma(\text{alt}, \text{long}) = \rho(\text{alt}, \text{long})/\bar{\rho}_{\text{long}}(\text{alt}) \quad (2)$$

随经度变化的相对大气密度表征了当前经度所对应的大气密度与平均密度的比值,反映了大气密度随经度的变化趋势,再利用如下所示的计算公式得到相对大气密度均方差:

$$s_{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{n} [(\gamma_1 - \bar{\gamma})^2 + (\gamma_2 - \bar{\gamma})^2 + \dots + (\gamma_n - \bar{\gamma})^2]} \quad (3)$$

表 1 基于 NRLMSISE-00 得到标准差计算结果
Table 1 Standard deviations based on NRLMSISE-00

s_{γ}		春分	夏至	秋分	冬至
lat = 0	lst = 0	1.91×10^{-4}	7.02×10^{-4}	4.03×10^{-4}	5.61×10^{-4}
	lst = 8	2.16×10^{-4}	8.53×10^{-4}	4.36×10^{-4}	6.64×10^{-4}
	lst = 16	2.11×10^{-4}	8.21×10^{-4}	4.29×10^{-4}	6.42×10^{-4}
lat = 40	lst = 0	1.80×10^{-3}	1.50×10^{-3}	1.70×10^{-3}	2.80×10^{-3}
	lst = 8	1.70×10^{-3}	1.30×10^{-3}	1.60×10^{-3}	2.90×10^{-3}
	lst = 16	1.70×10^{-3}	1.20×10^{-3}	1.60×10^{-3}	2.80×10^{-3}
lat = 80	lst = 0	2.90×10^{-3}	2.70×10^{-3}	2.90×10^{-3}	3.30×10^{-3}
	lst = 8	2.90×10^{-3}	2.70×10^{-3}	2.90×10^{-3}	3.30×10^{-3}
	lst = 16	2.90×10^{-3}	2.60×10^{-3}	2.80×10^{-3}	3.30×10^{-3}

利用 NRLMSISE-00 和 MET-99 模型分别计算得到标准差结果,表 1 给出了基于 NRLMSISE-00 模型在 lat = 100km 条件下得到的结果,可以看出标准差在各种条件下均比较小,然而随着纬度的增加,标准差的值随之增加,和前文的分析结果一致,在高纬度地区经度不同的地区其地磁活动强度不同,导致了密度的不同,然而其影响总体来说还是非常微弱,甚至可以忽略不计,因此在后面的分析中将不予以考虑,图 1 给出了两个算例的相对大气密度在 90km、100km、110km 三个高度上的波动图,两个算例的参数如下:

算例 1: year = 2009, day = 79, 当天对应的日地环境参量分别为 ap = 4, fl07 = 69, fl07a = 69.65。

算例 2: year = 2009, lat = 45, day = 266, 当天对应的日地环境参量分别为 ap = 2, fl07 = 75, fl07a = 70。

3 地球边缘大气密度随纬度的变化

除了地磁活动强度对大气密度具有一定的影响,太阳辐射强度对大气密度也有所影响,文献 [10] 讨论了考虑表征太阳辐射不同的指数会对模型误差造成一定的影响。纬度对地球边缘大气的密

度影响较大,纬度的不同直接导致其地磁活动强度的不同,在大部分情况下,高纬区的地磁活动强度比低纬区高,图 2 给出了 2010 年 3 月份高纬度地区和低纬度地区的地磁活动强度对比,可以看到纬度不同导致其地磁活动差异很大;另外,高纬度地区与低纬区太阳辐射强度以及温度均有所差异,并且直接导致了密度随纬度的波动。由于南北球和北半球的温度差异在春秋较小,而在夏季和冬季较大,因此在一定程度上造成了春秋随纬度的相对大气密度波动相比夏冬小。

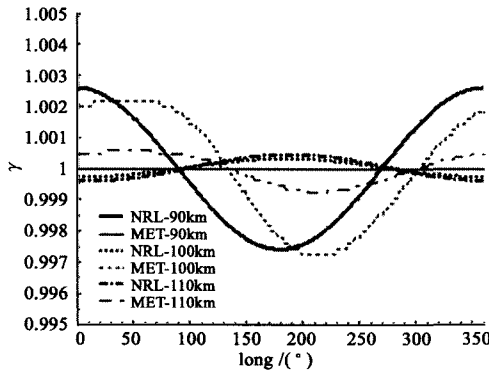
定义高度 alt 和纬度 lat 是变量,其余参数为已知量,则大气密度为 $\rho(\text{alt}, \text{lat})$ 。定义纬度的变化范围是 $[-90, 90]$, 取 $n + 1$ 个节点,则第 i 个节点的日平均密度值为 $\bar{\rho}_{\text{lat}}(\text{alt}, 180(i - 1)/n - 90)$ 。可以得到同一高度下随纬度变化的平均大气密度为

$$\bar{\rho}_{\text{lat}}(\text{alt}) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \bar{\rho}(\text{alt}, 180(i - 1)/n - 90) \quad (4)$$

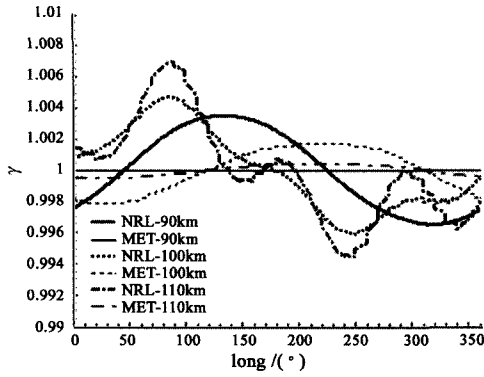
定义随纬度变化的相对大气密度为

$$\gamma(\text{alt}, \text{lat}) = \rho(\text{alt}, \text{lat})/\bar{\rho}_{\text{lat}}(\text{alt}) \quad (5)$$

该相对大气密度表征了地球边缘大气密度随纬度的变化趋势和程度,利用相对大气密度随纬度变化的曲线容易得到其标准差,而这里的标准差表征



(a) 算例 1
(a) Case 1



(b) 算例 2
(b) Case 2

图 1 相对大气密度随经度的波动

Fig. 1 Relative atmospheric density varying with longitude

了大气密度受纬度因素的影响程度,计算公式为式(3)给定不同的参数条件,再利用 NRLMSISE-00 和 MET-99 大气模型得到不同条件下的相对大气密度标准差,说明纬度因素对 100km 高度附近大气密度的影响,由于前文中已经证明了经度因素对于地球

表 2 基于纬度的相对大气密度标准差

Table 2 Standard deviation of relative atmospheric density caused by latitude

s_y^2		春分	夏至	秋分	冬至
NRL	lst = 0	9.19×10^{-2}	2.36×10^{-1}	7.75×10^{-2}	2.55×10^{-1}
	lst = 8	8.30×10^{-2}	2.08×10^{-1}	7.38×10^{-2}	2.27×10^{-1}
	lst = 16	3.98×10^{-2}	1.25×10^{-1}	4.54×10^{-2}	1.40×10^{-1}
MET	lst = 0	3.30×10^{-3}	1.01×10^{-1}	2.80×10^{-3}	9.19×10^{-2}
	lst = 8	3.10×10^{-3}	1.01×10^{-1}	2.30×10^{-3}	9.22×10^{-2}
	lst = 16	3.30×10^{-3}	1.01×10^{-1}	2.60×10^{-3}	9.30×10^{-2}

4 地球边缘大气昼夜波动特性

昼夜变化导致地磁活动强度、太阳活动强度和大气温度等因素的必然变化,最终导致了大气密度的波动。图 4 给出了某日 AP 指数和 F107 的变化

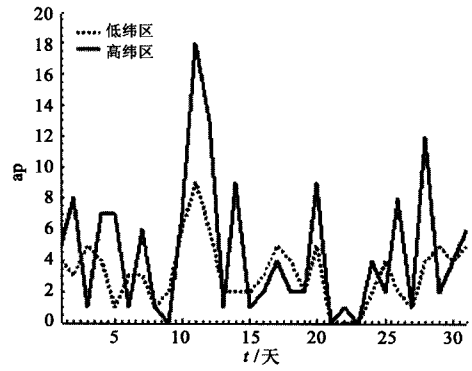


图 2 2010 年 3 月份高纬区和低纬区地磁活动强度对比

Fig. 2 Ap in high latitudes and low latitudes in march 2010

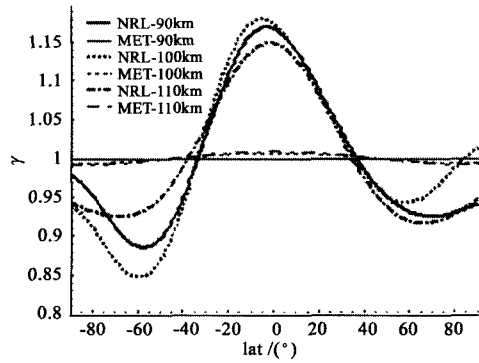
边缘大气密度的影响十分微弱,在此以及后面的讨论中均将经度设置为 0,即 $long = 0$ 。表 2 给出了基于两个模型分别得到在 100km 高度上的计算结果,图 3 给出了两个算例的相对大气密度在 90km、100km、110km 三个高度上的波动图。两个算例的参数如下:

算例 1: $long = 0, year = 2009, day = 79, ap = 4, f107 = 69, f107a = 69.65$ 。

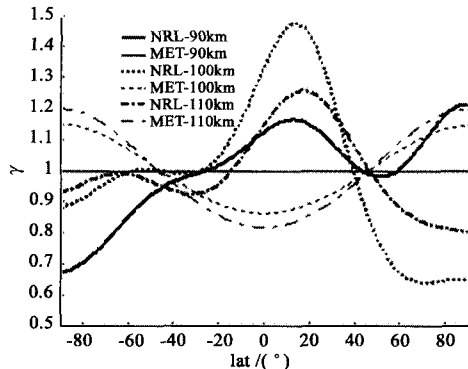
算例 2: $long = 0, day = 180, year = 2009, ap = 5, f107 = 68, f107a = 68$ 。

结果表明两个模型得到的结果差别较大, NRLMSISE-00 比 MET-99 计算得到的标准差大,特别是在春秋季节两个模型得到的结论不一致,然而两个模型均认为夏季和冬季的波动较强,因此可以定性地认为纬度对地球边缘大气密度具有一定的影响,并且在夏季和冬季的影响比春秋更大。

曲线,图 5 则给出了某日内不同纬度地区的温度波动情况,可以看出随着昼夜变化时相应的 AP 指数和 F107 均会发生较大幅度的变动,因此可以认为昼夜波动对于大气密度的波动具有明显的作用。尽管在高纬区的地磁活动更为活跃,然而在高纬区的昼



(a) 算法 1
(a) Case 1



(b) 算例 2
(b) Case 2

图 3 相对大气密度随纬度的波动

Fig. 3 Relative atmospheric density varying with latitude

夜温度变化相对低纬区较小,因而总体看来高纬区的昼夜波动比低纬区小,图 5 给出了某日不同纬度地区(0,40,80)的昼夜温度变化曲线。

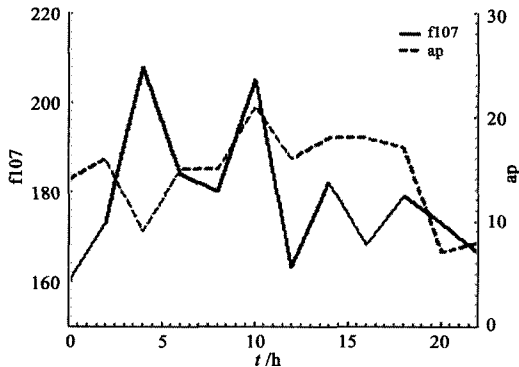


图 4 某日 AP 指数和 F107 的变化曲线

Fig. 4 AP index and F107 curves one day

定义高度 alt 和当地太阳时 lst 为变量,其他输入条件为已知量,则大气密度为高度和当地太阳时的函数 $\rho(\text{alt}, \text{lst})$, lst 取值范围是 $[0, 24]$, n 为所选择的一天内的时间节点数,第 i 个时间节点对应

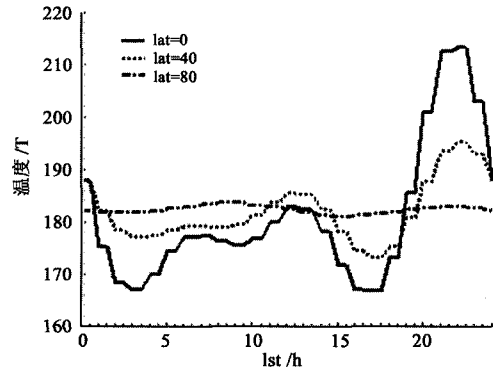


图 5 某日不同纬度地区的昼夜温度变化

Fig. 5 Diurnal temperature changes in different latitudes one day

的当地太阳时为 $24i/n$ 时。得到随当地时间变化的日平均大气密度为

$$\bar{\rho}_{\text{lst}}(\text{alt}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho(\text{alt}, 24i/n) \quad (6)$$

定义随昼夜时间变化的相对大气密度为

$$\gamma(\text{alt}, \text{lst}) = \rho(\text{alt}, \text{lst}) / \bar{\rho}_{\text{lst}}(\text{alt}) \quad (7)$$

该式表征了地球边缘大气密度随当地时间变化的规律及幅度,利用式(3)容易计算得到其标准差。表 3 给出了 100km 高度不同参数条件下的相对大气密度标准差,图 6 给出两个算例的相对大气密度波形图,对应的参数分别为:

算例 1: year = 2009, day = 79, lat = 0, long = 0, 该日对应的日地环境参数分别为 $a_p = 4, f_{107} = 69, f_{107a} = 69.65$ 。

算例 2: year = 2009, day = 266, lat = 45, long = 0, 该日对应的日地环境参数分别为 $a_p = 2, f_{107} = 75, f_{107a} = 70$ 。

可以看出 NRLMSISE-00 和 MET-99 模型得到的结果差别较大,前者随着当地太阳时的密度波动较大,而后者密度起伏十分微小。由于 MET 模型是利用卫星阻力计算得到的数据拟合经验公式,因而不能很好地反应短期地磁扰动及太阳辐射强度变化造成的密度波动,在此认为 NRLMSISE-00 模型得到的结果更能真实地反映地球边缘大气密度的波动情况。因而可以认为当地太阳时对地球边缘大气密度波动具有一定的影响,另外,两个模型均认为随着纬度的增加,密度昼夜波动的幅度相应减小。

表 3 基于昼夜的相对大气密度标准差

Table 3 Standard deviation of relative atmospheric density caused by local solar time

s_γ^2		春分	夏至	秋分	冬至
NRL	lat = 0	1.35×10^{-1}	1.39×10^{-1}	1.34×10^{-1}	1.43×10^{-1}
	lat = 40	5.25×10^{-2}	9.20×10^{-2}	6.34×10^{-2}	4.45×10^{-2}
	lat = 80	1.83×10^{-2}	2.22×10^{-2}	1.39×10^{-2}	2.95×10^{-2}
MET	lat = 0	1.80×10^{-3}	1.80×10^{-3}	1.90×10^{-3}	1.80×10^{-3}
	lat = 40	1.50×10^{-3}	1.40×10^{-3}	1.50×10^{-3}	1.30×10^{-3}
	lat = 80	3.51×10^{-4}	3.62×10^{-4}	3.60×10^{-4}	3.20×10^{-4}

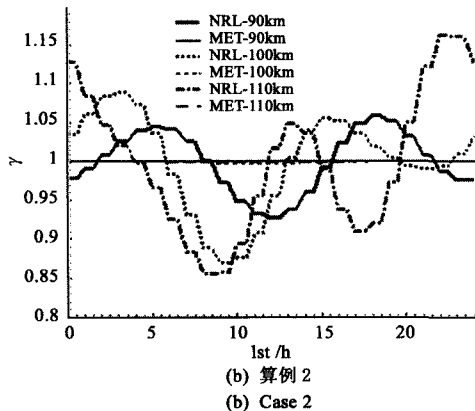
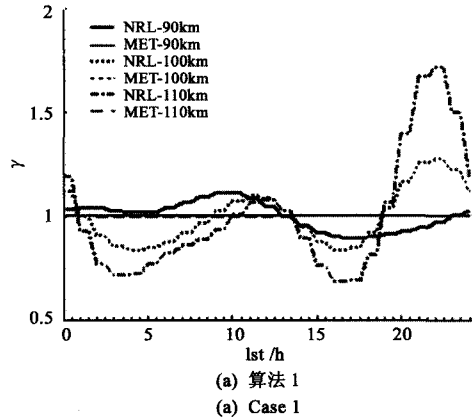


图 6 相对大气密度随当地太阳时的波动图
Fig.6 Relative atmospheric density varying with local solar time

5 地球边缘大气季节波动特性

随着季节的变换,日平均温度、AP 指数、F107 均会发生改变,图 7 给出了第 23 太阳活动周期^[14]即 1997-2007 年 Ap 和 F107 的变化曲线,可以看出日地环境参量随着季节的波动十分明显,特别是磁暴的产生对密度的影响比较明显^[15-16],因而大气密度随当地时间发生波动。由于高纬区的地磁活动较为活跃,随当地时间波动更强,因而高纬区大气密度随昼夜波动强于低纬区。另外,由于太阳活动的 11

年周期特性,因此地球边缘大气密度还具有年波动特性,只是其波动幅度非常小,可以近似忽略。

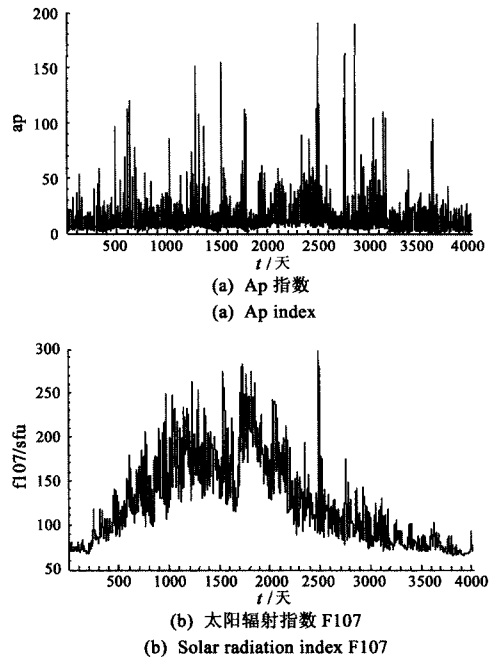


图 7 1997 年至 2007 年 11 年间的 Ap 和 F107 值
Fig.7 Values of Ap and F107 from 1997 to 2007

定义高度 alt 和一年中所在的天数 day 是变量,其余参数为已知量,日平均密度为 $\bar{\rho}_{lst}(alt, day)$,其计算公式参见式(1),不同的是式(1)中的 day 为常量,这里的 day 为变量,day 的取值范围是 [1,365],可以得到随季节变化的平均大气密度和相对大气密度分别为

$$\bar{\rho}_{day}(alt) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{\rho}(alt, i) \quad (8)$$

定义随季节变化的相对大气密度为

$$\gamma(alt, day) = \bar{\rho}(alt, day) / \bar{\rho}_{day}(alt) \quad (9)$$

该式表征了地球边缘大气密度随季节变化的波动规律,利用式(3)计算得到在 100km 高度随季节变化的大气密度波动标准差如表 4 所示。图 8 给出了如

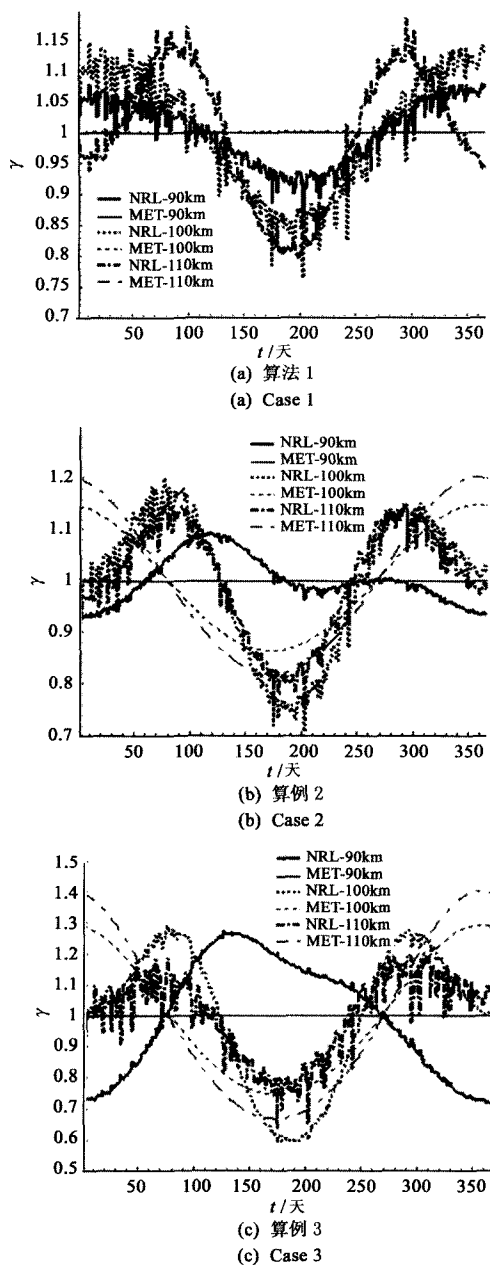


图 8 相对大气密度随季节的波动图

Fig. 8 Relative atmospheric density varying with seasons

下三个算例的波动曲线,算例的参数分别为:

算例 1: $lat = 0, long = 0$, ap 及 $f107$ 的取值为当日实际的数据,根据 $f107$ 的历史数据容易求得 $f107a$ 。

算例 2: $long = 0, lat = 45$,其余参量不变。

算例 3: $long = 0, lat = 80$,其余参量不变。

可以看出随着季节的变化,相对大气密度有一定的波动,说明季节对大气密度有一定的影响,高纬区比低纬区受到季节影响的程度更高,而低纬区的

影响相对较小;另外,与昼夜波动相比较,可以认为在低纬区昼夜波动强于季节波动,而在高纬度地区,季节波动强于昼夜波动。

表 4 基于季节的相对大气密度标准差

Table 4 Standard deviation of relative atmospheric density caused by season

	s_y^2	lst = 0	lst = 8	lst = 16
NRL	lat = 0	9.82×10^{-2}	9.74×10^{-2}	9.69×10^{-2}
	lat = 40	1.16×10^{-1}	1.50×10^{-1}	1.00×10^{-1}
	lat = 80	2.29×10^{-1}	2.09×10^{-1}	2.20×10^{-1}
MET	lat = 0	8.37×10^{-4}	8.54×10^{-4}	6.57×10^{-4}
	lat = 40	8.27×10^{-2}	8.28×10^{-2}	8.29×10^{-2}
	lat = 80	1.93×10^{-1}	1.93×10^{-1}	1.93×10^{-1}

6 结束语

(1) 根据物理分析和基于 NRLMSISE-00 等大气模型的数值分析,可以得知经度对地球边缘大气密度的影响十分微弱,尽管在高纬区有所影响,然而总的的影响可以忽略。由于高纬区和低纬区的地磁活动强度差异显著,纬度因素对地球边缘大气密度的影响较为明显,纬度的不同导致大气密度出现较大的波动,另外,夏季和冬季纬度对地球边缘大气密度的影响比春秋更加明显。

(2) 通过相对大气密度的标准差分析可知,地球边缘大气密度具有较强的时变特性,具体表现为大气密度随昼夜和季节均会出现一定波动,近似认为低纬区的昼夜波动强于高纬区,而高纬区的季节波动强于低纬区;随着纬度的增加,季节波动愈发显著,而昼夜波动随着纬度的增加而逐渐减弱。因而在从事地球边缘大气环境下的空天飞行器活动时需要特别考虑密度随各因素尤其是昼夜的波动特性对大气密度所造成的影响。

参 考 文 献

[1] 崔尔杰. 近空间飞行器研究发展现状及关键技术问题[J]. 力学进展, 2009, 39(6): 658 - 673. [Cui Er-jie. Research statutes, development trends and key technical problems of near space flying vehicles[J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(6): 658 - 673.]

[2] 薛大同. 对地球大气密度随高度分布规律的讨论[J]. 真空科学与技术学报, 2009, 5(9): 1 - 8. [Xue Da-tong. Studies of altitude distribution of Earth's atmosphere density[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2009, 5(9): 1 - 8.]

[3] Mayr H G, Volland H, et al. Theoretical model for latitude

- dependence of the thermospheric annual and semiannual variations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 77(34): 6774 - 6790.
- [4] Liu H X, Hermann L, Shigeto W. Climatology of the equatorial thermospheric mass density anomaly[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(a5): A05305.
- [5] Hedin A E. MSIS-86 thermospheric model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92: 4649 - 4662.
- [6] Hedin A E. Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96: 1159 - 1172.
- [7] 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*, 2002, 107(a12): 1468.
- [8] Owens J K. NASA Marshall engineering thermosphere model-version 2.0[R]. NASA TM -2002 -211786, June 2002.
- [9] Hickey M P. The NASA Marshall engineering thermospheric mode[R]. NASA CR -179359, July 1988.
- [10] Wang H B, Zhao C Y. Effects of various solar indices on accuracy of Earth's thermospheric neutral density models[J]. *Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy*, 2009, 52(7): 1120 - 1128.
- [11] 汪宏波, 赵长印. 用 CHAMP 加速仪数据校验太阳活动峰年的大气模型精度[J]. *天文学报*, 2008, 49(2): 168 - 178. [Wang Hong-bo, Zhao Chang-yin. Use CHAMP/STAR accelerometer data to evaluate atmospheric density models during solar maximum year [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2008, 49(2): 168 - 178.]
- [12] 卢明, 李智, 陈冒银. NRLMSISE-00 大气模型的分析 and 验证 [J]. *装备指挥技术学院学报*, 2010, 21(4): 57 - 61. [Lu Ming, Li Zhi, Chen Mao-yin. Analysis and verification of the NRLMSISE-00 atmospheric model [J]. *Journal of Academy of Equipment Command & Technology*, 2010, 21(4): 57 - 61.]
- [13] Jacchia L G. Static diffusion models of the upper atmosphere with empirical temperature profiles [J]. *Smithsonian Contributions to Astrophysics*, 1965, 8: 215 - 257.
- [14] Schwabe S H. Sunspot cycle [J]. *Astron Nachr*, 1844, 21: 233 - 239.
- [15] Marcos F A, Bowman B R, Sheehan R E. Accuracy of Earth's thermospheric neutral density models [R]. AIAA 6167, 2006.
- [16] 秦国泰, 孙丽琳, 曾宏, 等. 2005 年 8 月 24 日强磁暴事件对高层大气密度的扰动 [J]. *空间科学学报*, 2008, 28(2): 137 - 141. [Qin Guo-tai, Sun Li-lin, Zeng Hong, et al. Disturbance of the upper atmospheric density during August 24, 2005 severe geomagnetic storm event [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2008, 28(2): 137 - 141.]

作者简介: 郭正雄(1986 -), 男, 博士研究生, 主要从事飞行器动力学和控制研究。

通信地址: 北京市海淀区北四环西路 15 号(100190)

电话: (010)82543786

E-mail: guoxiong1986@sina.com

(编辑: 曹亚君)