

# 地球低纬区边缘大气密度的预测

郭正雄, 李文皓, 张 珩, 肖歆昕, 刘开磊  
(中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

**摘要:** 基于 NRLMSISE-00 大气模型讨论日地空间环境对地球低纬度地区边缘大气密度的影响, 提出预测地球低纬地区边缘大气日平均密度的简化模型法和经验法。简化模型法利用地磁活动和太阳活动的 11 年准周期特性, 通过预测地磁活动和太阳活动的变化规律以预测地球边缘大气密度。经验法则直接利用第 23 个太阳活动周期的日平均密度变化曲线经过傅里叶变换处理得到日平均密度变化规律曲线, 然后将曲线拟合得到不同高度下的密度昼夜波动规律, 再利用预测得到的日平均密度即可计算出具体当地时间对应的密度情况。误差分析说明经验预测法比简化模型法精度更高。两种方法均具有较高的精度并且使用方便, 可用于地球边缘大气密度的工程化预测计算。

**关键词:** 地球边缘大气; 空间环境; 密度波动预测; NRLMSISE-00 大气模型

中图分类号: P351

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2012)06-0637-08

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2012.06.008

## 0 引言

地球边缘大气是指距地高度约 80 ~ 130 km 范围内的大气, 位于近空间<sup>[1]</sup>的上层, 包含了中间层的顶部和热层的底部。从高度上讲, 地球边缘大气对各种航空器和低轨航天器都可造成一定的影响, 研究其环境特性对于飞行器气动特性设计及控制具有重要的意义。

大气密度是大气环境的重要表征, 对地球边缘大气内大气密度的准确预测对于确保飞行器的飞行安全至关重要。国外已开展很多大气密度研究工作, Mayr 等<sup>[2]</sup>研究了热层大气密度的年变化、半年变化特性; Jacchia<sup>[3]</sup>、Hedin<sup>[4-5]</sup>等人在研究大气密度波动规律的同时提出了大气模型, 经过不断完善发展成为如今的 Jacchia 系列和 MSIS 系列大气模型; 其他的大气模型还有 DTM、USSA76、CIRA86、JB2006、NASA MET、指数模型等。MSIS-1990 大气模型是以实测数据为依据的大气模式, 它描述在地球大气中从地面到热层高度的电中性粒子(分子和原子)的温度和密度: 该模式在 72.5 km 以下主要以《地图手册》(Map Handbook, Barnett 和 Corney 于 1985 年著)提供的区域平均温度和压力表格为基础, 20 km 以下的

数据用来自美国国家气象中心的平均值补充。72.5 km 以上 MSIS-1990 本质上是一个修订了的 MSIS-1986 模式, 它考虑到源于航天飞机飞行的数据和比较新的不连贯散射结果。国内方面, 汪宏波等<sup>[6]</sup>讨论了不同太阳辐射指数对大气模型精度的影响, 秦国泰等<sup>[7-9]</sup>利用“神舟二号”和“神舟三号”飞船携带的大气密度探测器所得到的数据分析了所在高度上大气密度的分布规律以及强磁暴对大气密度的影响。

NRLMSISE-00 模型<sup>[10-11]</sup>是 MSIS 系列的最新版本, 具有较高的可信度, 然而其缺陷是使用不便, 需要较多的输入量, 包括时间、日地空间环境参数、经纬度等。在航空航天工程计算中, 常用的是指数大气模型及 USSA1976 大气模型, 因为它们计算相对简单并且使用方便, 然而其精度与 NRLMSISE-00 相比较差, 尤其是在精度要求比较高的气动力计算方面其缺陷十分明显, 不能满足工程要求。因此如何给出精度较高且使用方便的大气模型是一个具有一定现实意义的研究课题。

本文基于太阳活动及地磁活动的周期特性提出了简化模型预测法, 在减少模型输入量情况下可预测大气密度变化趋势, 同时对第 24 个太阳活动

收稿日期: 2012-05-07; 修回日期: 2012-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目“低轨航天器磁推进方法研究”(编号: 11002143)

作者简介: 郭正雄(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事飞行器环境、动力学和控制研究。E-mail: guoxiong1986@sina.com。

周期即 2007—2017 年的大气密度波动趋势进行了预测；提出了直接利用第 23 个太阳活动周期的日平均密度变化曲线，通过傅里叶变换消噪处理得到日平均密度变化规律的经验预测法。利用这两种方法均建立了预测第 24 个太阳活动周期的大气密度数据库，进而用于地球边缘大气环境下的飞行仿真计算。

## 1 日地空间环境对地球低纬地区边缘大气密度的影响

地球边缘大气密度具有较强的时变特性。随着时间推移，大气密度相应发生变化，其中重要原因是均有周期波动特性的地球磁场活动、太阳活动<sup>[12-14]</sup>。1843 年，Schwabe 首先发现了太阳黑子的活动周期约为 11 年，该周期也被称为 Schwabe 周期。地磁活动与太阳活动紧密相关，均有 11 年准周期特性，地磁活动的周期滞后太阳活动约 1~2 年<sup>[15]</sup>。产生磁暴时，高层大气中的大气密度会增大。研究大气密度预测方法首先需要分析日地空间环境因素对大气密度的影响。本节从地磁活动强度、太阳活动强度两方面分别进行讨论，假定时间等其他因素均不变化，计算大气密度随空间环境的变化规律。

### 1.2 地磁活动强度对地球边缘大气密度的影响

表征地磁活动强度有  $A_p$ 、 $K_p$  等指数。假定高度和地磁活动强度是变量，其余参数为已知量，则大气密度为  $\rho(h, A_p)$ 。定义地磁活动强度的变化范围是  $[0, 120]$ ，取  $n+1$  个节点，则第  $i$  个节点的密度值为  $\rho[h, 120(i-1)/n]$ 。可以得到同一高度下随  $A_p$  指数变化的平均大气密度和相对大气密度分别为

$$\bar{\rho}(h) \Big|_{A_p} = \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} \rho[h, 120(i-1)/n] \quad (1)$$

$$\gamma(h, A_p) = \rho(h, A_p) / \bar{\rho}(h) \Big|_{A_p} \quad (2)$$

计算选取的具体参数为：年  $t_y=2009$ ；天  $t_d=79$ ；当地时间  $t_h=16$ ；纬度  $\psi=0$ ；经度  $\lambda=116.3$ ；太阳活动强度  $F_{10.7}=69$ ；81 天平均太阳活动强度  $F_{10.7a}=69.65$ 。计算得到不同高度下随  $A_p$  指数变化的平均大气密度值如表 1 所示，相对大气密度如图 1 所示。可以看出地磁活动强度对地球边缘大气密度的影响具体表现为：在 85 km 以下其影响比较微弱，几乎可以忽略；在 85~106 km，随着  $A_p$  指数

的增加，大气密度随之减小，即大气密度和地磁活动强度成反比例关系；在 106 km 以上，随着  $A_p$  指数的增加，大气密度随之增大，即大气密度和地磁强度指数成正比例关系。

表 1 随日地环境参量变化的平均大气密度  
Table 1 Average atmospheric density in sun-earth space environment

$h/\text{km}$	$\bar{\rho}_{A_p}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\bar{\rho}_{F_{10.7}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\bar{\rho}_{F_{10.7a}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
75	$4.09 \times 10^{-5}$	$4.13 \times 10^{-5}$	$3.96 \times 10^{-5}$
80	$1.81 \times 10^{-5}$	$1.79 \times 10^{-5}$	$1.71 \times 10^{-5}$
85	$7.64 \times 10^{-6}$	$7.81 \times 10^{-6}$	$7.44 \times 10^{-6}$
90	$3.08 \times 10^{-6}$	$3.47 \times 10^{-6}$	$3.31 \times 10^{-6}$
95	$1.21 \times 10^{-6}$	$1.51 \times 10^{-6}$	$1.44 \times 10^{-6}$
100	$4.79 \times 10^{-7}$	$5.87 \times 10^{-7}$	$5.53 \times 10^{-7}$
105	$1.97 \times 10^{-7}$	$2.07 \times 10^{-7}$	$1.92 \times 10^{-7}$
110	$8.30 \times 10^{-8}$	$7.67 \times 10^{-8}$	$7.11 \times 10^{-8}$
115	$3.55 \times 10^{-8}$	$3.27 \times 10^{-8}$	$3.18 \times 10^{-8}$
120	$1.66 \times 10^{-8}$	$1.63 \times 10^{-8}$	$1.69 \times 10^{-8}$
125	$9.63 \times 10^{-9}$	$9.64 \times 10^{-9}$	$1.00 \times 10^{-8}$
130	$6.34 \times 10^{-9}$	$6.31 \times 10^{-9}$	$6.54 \times 10^{-9}$

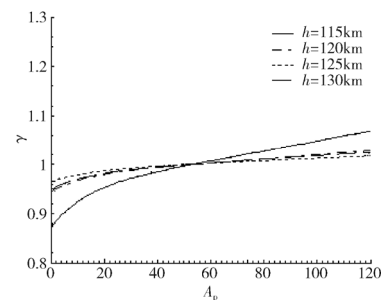
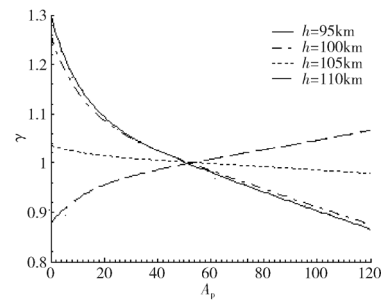
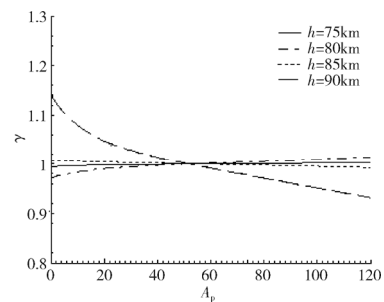


图 1 相对大气密度随地磁活动强度的变化规律  
Fig. 1 Variation of relative atmospheric density against geomagnetic activity

### 1.2 太阳活动强度对地球边缘大气密度的影响

太阳活动是影响中高层大气和电离层变化的重要因素<sup>[11]</sup>， $F_{10.7}$ （波长为 10.7 cm 的太阳射电辐射流量）是目前最常用的太阳活动指数之一，被用来表征太阳对地球高层大气的加热效应，单位是 sfu（太阳辐射通量， $1 \text{ sfu} = 1 \times 10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ）。太阳活动对地球边缘大气密度的影响表现为前一天太阳活动强度和 81 天平均太阳活动强度对大气密度均有影响，在 NRLMSISE-00 模型中分别定义为  $F_{10.7}$  和  $F_{10.7a}$ 。

#### 1.2.1 前一天太阳活动强度 $F_{10.7}$ 对地球边缘大气密度的影响

假定高度  $h$  和前一天太阳辐射强度指数  $F_{10.7}$  是变量，其余参数为已知量，则大气密度为  $\rho(h, F_{10.7})$ 。设  $F_{10.7}$  的变化范围是 [50, 300]，取  $n+1$  个节点，则第  $i$  个节点的密度值为  $\rho[h, 50+250(i-1)/n]$ 。可以得到同一高度下随  $F_{10.7}$  变化的平均大气密度和相对大气密度分别为

$$\bar{\rho}(h) \Big|_{F_{10.7}} = \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} \rho[h, 50 + 250(i-1)/n] \quad (3)$$

$$\gamma(h, F_{10.7}) = \rho(h, F_{10.7}) / \bar{\rho}(h) \Big|_{F_{10.7}} \quad (4)$$

具体参数为  $A_p=4$ ，其他参数见 1.1 节。计算得到不同高度下随  $F_{10.7}$  指数变化的平均大气密度值见表 1，相对大气密度如图 2 所示。可以看出所求时间前一天的太阳辐射强度  $F_{10.7}$  对大气密度分布均有一定影响，并且在 75 ~ 130 km 范围内均为正影响，即大气密度和  $F_{10.7}$  呈正比例关系；随着高度的增加，其相对大气密度波动幅度增加，说明其影响程度和高度同样呈正比例关系，但总的来说其相对大气密度始终在 [0.95, 1.1] 以内，影响程度不很明显。

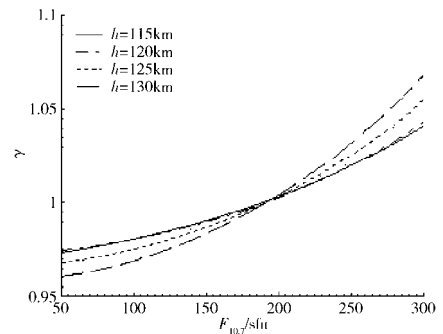
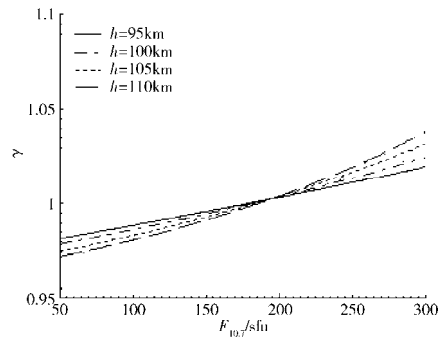
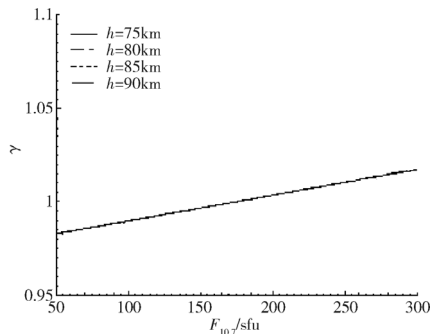


图 2 相对大气密度随  $F_{10.7}$  变化规律

Fig. 2 Variation of relative atmospheric density against  $F_{10.7}$

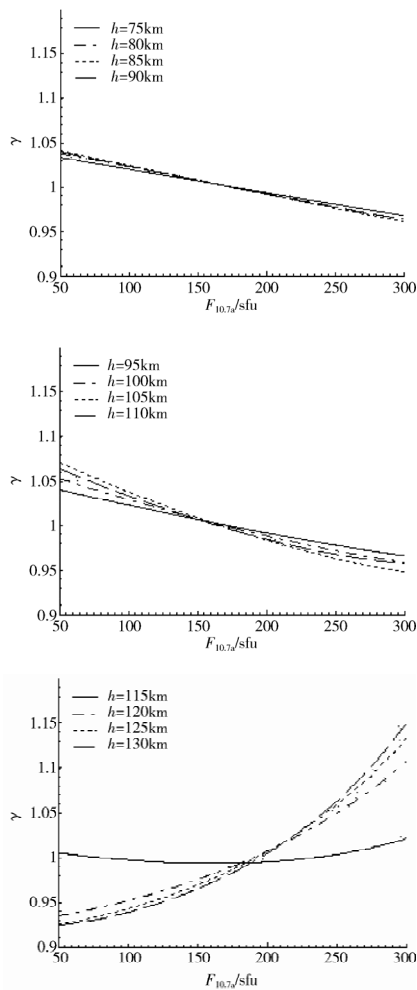
#### 1.2.2 81 天平均太阳活动强度 $F_{10.7a}$ 对地球边缘大气密度的影响

假定高度  $h$  和 81 天平均太阳辐射强度指数  $F_{10.7a}$  是变量，其余参数为已知量，则大气密度为  $\rho(h, F_{10.7a})$ 。设  $F_{10.7a}$  的变化范围是 [50, 300]，取  $n+1$  个节点，则第  $i$  个节点的密度值为  $\rho[h, 50+250(i-1)/n]$ 。可以得到随  $F_{10.7a}$  变化的平均大气密度和相对大气密度分别为

$$\bar{\rho}(h) \Big|_{F_{10.7a}} = \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} \rho[h, 50 + 250(i-1)/n] \quad (5)$$

$$\gamma(h, F_{10.7a}) = \rho(h, F_{10.7a}) / \bar{\rho}(h) \Big|_{F_{10.7a}} \quad (6)$$

计算得到不同高度下随  $F_{10.7a}$  指数变化的平均大气密度值见表 1，相对大气密度如图 3 所示。可以看出以所求时间为中心的 81 天平均太阳辐射强度  $F_{10.7a}$  对大气密度有着较大的影响（相对  $F_{10.7}$  而言），并且其波动曲线特征在 114.5 km 处发生改变：在 114.5 km 以下的地区，大气密度和  $F_{10.7a}$  负相关，大气密度随着  $F_{10.7a}$  的减小而增大；而在 114.5 km 以上，大气密度和  $F_{10.7a}$  正相关，其影响程度随着高度的增加而增加。

图3 相对大气密度随  $F_{10.7a}$  变化规律Fig. 3 Variation of relative atmospheric density against  $F_{10.7a}$ 

## 2 两种方法的预测

### 2.1 简化模型预测法

NRLMSISE-00 大气模型的主要缺陷是输入参数较多且使用不便, 因此如果能减少其输入参数, 并且保持较高的精度, 则该模型将是应用于工程计算的高效工具。根据太阳活动和地磁活动的 11 年周期特性, 基于曲线拟合的方法将第 23 个太阳活动周 (1997—2007 年) 的  $A_p$ 、 $F_{10.7}$  值拟合成为以下多项式:

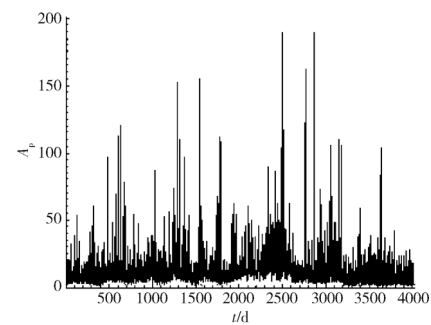
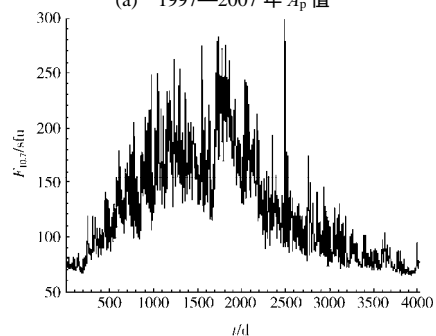
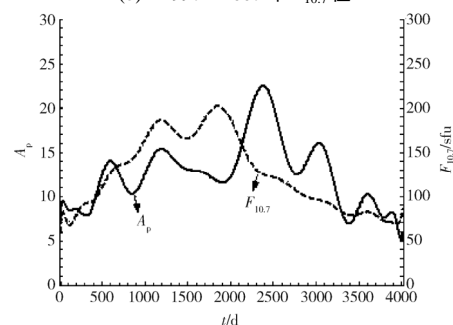
$$\begin{cases} A_p(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + \dots + a_nt^n \\ F_{10.7}(t) = b_0 + b_1t + b_2t^2 + \dots + b_nt^n \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7)拟合得到的多项式可以近似估计太阳活动周期内的  $A_p$  和  $F_{10.7}$  波动情况, 结果如图 4 所示, 其中(a)、(b)分别为 1997—2007 年的  $A_p$ 、 $F_{10.7}$  变化情况, 图(c)为拟合得到的波动曲线。

将 11 年内的日地空间环境参数作为常量代入大气模型, 即可实现减少输入参数的目的, 此时只需输入时间和经纬度即可得到大气密度值。将经纬度设为常量, 即选取  $\psi=0$ ,  $\lambda=116.3$ , 容易求得具有 11 年周期的不同高度条件下的日平均密度变化曲线。日平均密度的计算公式为

$$\bar{\rho}(h) \Big|_{t_h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho[h, t_h(i), \varphi(t)], t_h(i) = 24i/n, \quad (8)$$

式中:  $n$  为所选择的一天内的时间节点数;  $\varphi(t)$  为日地空间环境变量, 由时间决定,  $\varphi(t)=[A_p(t), F_{10.7}(t), F_{10.7a}(t)]$ , 输入天数即可得到。计算得到一个太阳活动周期内的日平均大气密度波动曲线如图 5 所示。将不同高度和日期的密度波动建立一个三维数据库, 可以方便地用于飞行仿真计算。

(a) 1997—2007 年  $A_p$  值(b) 1997—2007 年  $F_{10.7}$  值(c) 曲线拟合得到的  $A_p$  和  $F_{10.7}$  波动曲线图4 1997—2007 年  $A_p$  和  $F_{10.7}$  的变化规律及其拟合曲线  
Fig. 4  $A_p$  and  $F_{10.7}$  from 1997 to 2007 and their fitting curves

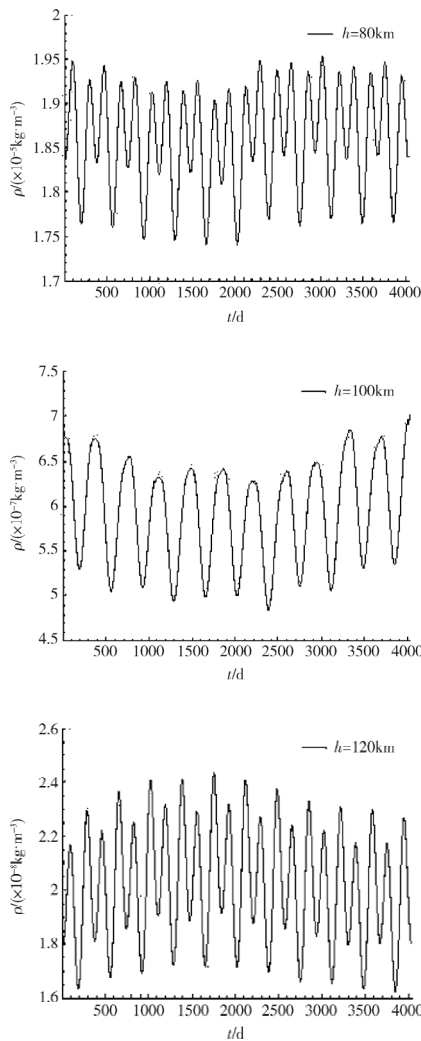


图 5 简化模型法求得的一个太阳活动周的密度波动预测曲线

Fig. 5 Predicted density fluctuation curves in a solar cycle obtained by the simplified model method

### 2.2 经验预测法

由于大气密度具有准 11 年周期特性,因而密度大致变化规律在各个太阳周期内区别不大,因而可以将第 23 个太阳活动周期的日平均密度波动曲线进行消噪处理后直接用以预测下一个太阳活动周期的密度波动情况,该预测方法称为经验预测法。常用的消噪方法有傅里叶变换和小波变换的方法,本文选用傅里叶变换的方法,经过傅里叶变换处理后可以有效消除由于不确定因素导致的密度波动,而保留了大时间尺度上的总体变化趋势,能够较为准确地反映出密度在太阳活动周内的波动情况。

经验预测法的具体步骤为:首先基于 NRLMSISE-00 大气模型计算第 23 个太阳活动周期地球边缘大气范围内不同高度条件下的日平均大气密度变化情况,本文计算 11 年、80~120 km 高

度范围内每隔 20 km 的大气密度;再对其结果进行傅里叶频谱分析,设置产生毛刺的频谱中间部分为 0;最后对修正过的频谱进行傅里叶反变化即得到较为平滑的密度波动曲线。计算结果如图 6 所示,其中虚线表示利用大气模型计算得到的 1997—2007 年的日平均大气密度波动曲线,粗实线表示利用傅里叶变换消噪处理得到的经验预测曲线。

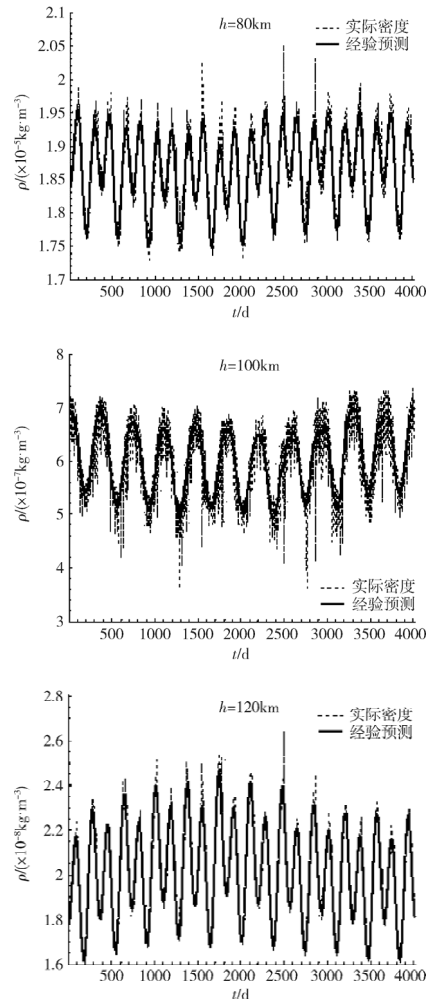


图 6 经验预测法得到的一个太阳活动周内的密度波动预测曲线

Fig. 6 Predicted density fluctuation curves in a solar cycle obtained by the empirical method

### 2.3 基于两种方法的大气密度昼夜波动性预测

由于以上介绍的两种方法只能预测地球边缘大气的日平均密度,而一般情况下高超声速飞行器在该空域内的驻留时间非常短暂,如果利用日平均密度计算气动力则会产生较大的误差,因而在预测大气密度时必须考虑昼夜的波动情况。

计算表明,在低纬区固定高度上的密度昼夜波动是有规律可循的,图 7 给出了不同高度下春分、夏至、

秋分、冬至 4 天的日波动曲线,可以发现在高度相同时不同季节的昼夜波动规律几乎相同,因而可以近似认为低纬区相同高度、不同季节条件下的昼夜波动规律是相同的。利用简化模型法容易得到相对大气密度随昼夜波动的拟合多项式,从而实现随当地时间的相

对大气密度波动预测。计算表明 6 次多项式拟合得到的曲线拟合效果较好,得到各个高度下的多项式系数如表 2 所示,  $p_1$  到  $p_7$  分别代表从高次项到低次项的系数,利用插值的方法即可得到地球边缘大气内所有高度上的波动曲线多项式系数。

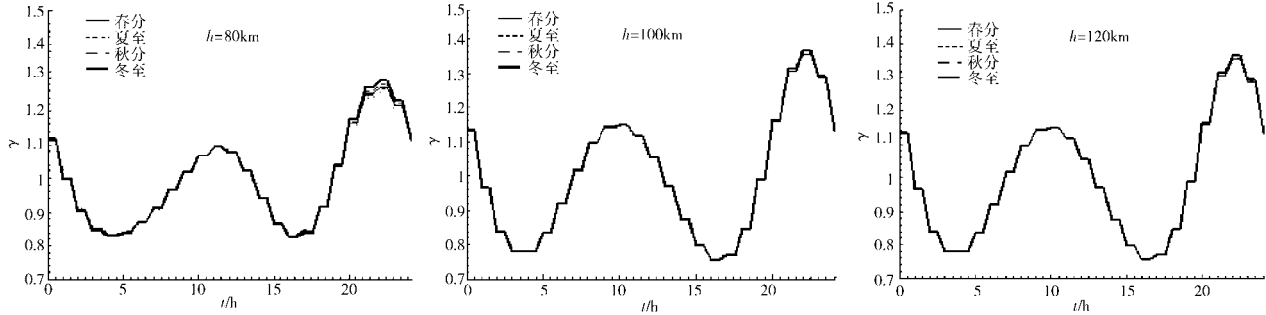


图 7 大气密度昼夜波动曲线

Fig. 7 Diurnal fluctuations of atmospheric density

表 2 拟合得到的相对大气密度昼夜波动曲线多项式系数

Table 2 Polynomial coefficients of diurnal fluctuations of relative atmospheric density based on curve fitting

$h/km$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	$p_6$	$p_7$
80	$-7.998 \times 10^{-8}$	$4.922 \times 10^{-6}$	$-1.001 \times 10^{-4}$	$7.571 \times 10^{-4}$	$-2.686 \times 10^{-3}$	$1.584 \times 10^{-2}$	1.004
90	$-2.223 \times 10^{-7}$	$1.433 \times 10^{-5}$	$-3.191 \times 10^{-4}$	$2.775 \times 10^{-3}$	$-7.097 \times 10^{-3}$	$-3.819 \times 10^{-3}$	1.039
100	$-8.519 \times 10^{-7}$	$5.481 \times 10^{-5}$	$-1.249 \times 10^{-3}$	$1.159 \times 10^{-2}$	$-3.106 \times 10^{-2}$	$-6.909 \times 10^{-2}$	1.123
110	$-1.668 \times 10^{-6}$	$1.063 \times 10^{-4}$	$-2.405 \times 10^{-3}$	$2.249 \times 10^{-2}$	$-6.626 \times 10^{-2}$	$-8.546 \times 10^{-2}$	1.154
120	$-8.763 \times 10^{-7}$	$5.207 \times 10^{-5}$	$-1.018 \times 10^{-3}$	$6.188 \times 10^{-3}$	$1.754 \times 10^{-2}$	$-2.133 \times 10^{-1}$	1.178
130	$-3.336 \times 10^{-7}$	$1.647 \times 10^{-5}$	$-1.801 \times 10^{-4}$	$-2.125 \times 10^{-3}$	$4.552 \times 10^{-2}$	$-1.915 \times 10^{-1}$	1.096

2.4 预测方法的误差分析

将 2008—2010 年实测日地空间环境数据代入大气模型,计算得到日平均密度的变化规律,近似认为该规律符合实际的地球边缘大气波动情况,并以此作为基准密度。将两种预测方法得到的 2008—2010 年的密度波动与基准密度比较(如图 8 所示),可得到地球边缘大气范围内各个高度条件下的标准误差和相对误差。标准误差和相对误差计算公式分别为

$$\varepsilon = \sqrt{(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \dots + \varepsilon_n^2) / n} \quad (9)$$

$$e = \sqrt{(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \dots + \varepsilon_n^2) / n} / \bar{\rho} \times 100\% \quad (10)$$

式中:  $\varepsilon_i$  为日平均密度的误差;  $n$  为 3 年的总天数,即  $n=1096$ 。计算得到几种预测方法与基准密度之间的相对误差如图 9 所示,可以看出经验预测法与模型简化预测法都能够较好地预测地球边缘大气密度,一方面解决了指数模型等大气模型精度不足的问题,另一方面克服了由于 NRLMSISE-00 大气模型输入量过多带来的使用不便问题。另外,经验预测法得到的密度数据比简化模型法得到的数据误差更小,具有更高的精度。

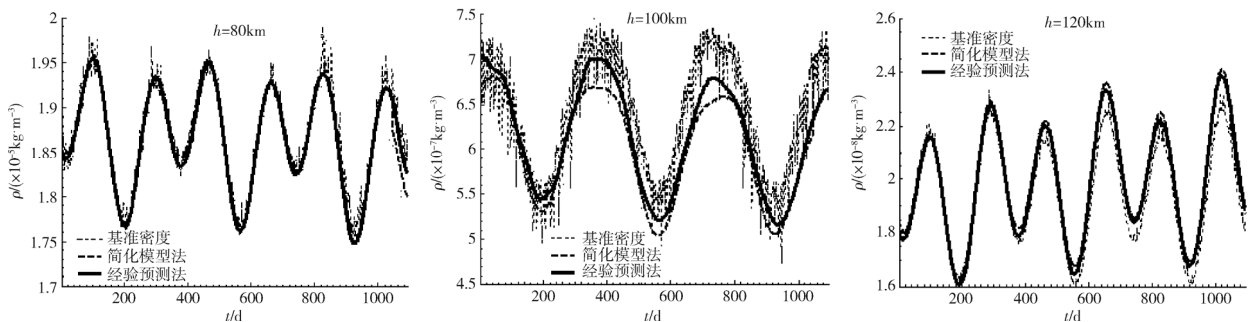


图 8 密度波动预测曲线与基准密度的对比

Fig. 8 Comparison between the predicted density fluctuation and the benchmark density curves

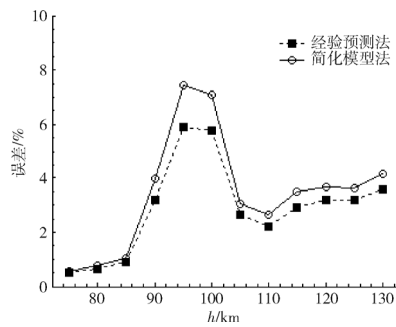


图9 两种大气密度预测法的误差对比

Fig. 9 Comparison of errors caused by two prediction methods for atmospheric density

### 3 结束语

1) 地磁活动强度和太阳活动强度对地球边缘大气密度均有一定的影响,在计算和预测大气密度时都是不可忽略的因素。在85 km以下高度,地磁活动强度对地球边缘大气密度几乎没有影响;而在85~106 km的高度,大气密度和地磁活动强度指数 $A_p$ 成反比关系;而在106 km以上高度,大气密度和地磁强度指数成正比关系。太阳活动强度对地球边缘大气密度的影响表现为前一天太阳活动强度及81天平均太阳活动强度均对其有影响。地球边缘大气密度和前一天太阳活动强度成正比例关系,并且随着高度的增加影响程度增加。81天平均太阳辐射强度对大气密度较前一天太阳活动强度影响更大,其波动特征曲线在114.5 km处发生拐点,在114.5 km以下的高度,大气密度和81天平均太阳辐射强度负相关;114.5 km以上,大气密度和81天平均太阳辐射强度正相关,且其影响程度随高度增加而增加。

2) 简化模型法可用于近似预测未来每个太阳活动周期内的日地空间环境的变化规律,既减少了输入参数的量,而且可以较准确地预测大气密度。经验预测法可以直接用来预测未来地球边缘大气密度。对两种方法预测结果进行误差分析,经验预测法的预测精度比简化模型预测法高。这些研究结果可以为航空航天工作者提供一定的参考。

### 致谢

文中用到的 NRLMSISE-00 大气模型代码由 Picone J M、Hedin A E 等提供, $A_p$ 、 $F_{10.7}$  值由美国海洋大气管理局空间环境预报中心提供,在此表示

感谢。

### 参考文献 (References)

- [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 Erjie. Research statutes, development trends and key technical problems of near space flying vehicles[J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(6): 658-673
- [2] Mayr H G, Volland H. Theoretical model for latitude dependence of the thermospheric annual and semiannual variations[J]. Journal of Geophysical Research, 1972, 77(34): 6774-6790
- [3] Jacchia L G. Thermospheric temperature, density, and composition: new models, Smithsonian Astrophys Obs Spec Rept 375[R], 1977
- [4] Hedin A E. Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96(A2): 1159-1172
- [5] Hedin A E. MSIS-86 thermospheric model[J]. Journal of Geophysical Research, 1987, 92: 4649-4662
- [6] 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
- [7] 秦国泰, 邱时彦, 贺爱卿, 等. “神舟二号”大气密度探测器的探测结果(II)在太阳和地磁扰动期间高层大气密度的变化[J]. 空间科学学报, 2003, 23(2): 135-141  
Qin Guotai, Qiu Shiyuan, He Aiqing, et al. "SZ-2" atmospheric density detector measurement result : change of the thermosphere density during solar and geomagnetic activity[J]. Chinese Journal of Space Science, 2003, 23(2): 135-141
- [8] 秦国泰, 邱时彦, 贺爱卿, 等. “神舟3号”运行高度上大气密度的变化[J]. 空间科学学报, 2004, 24(4):269-274  
Qin Guotai, Qiu Shiyuan, He Aiqing, et al. Changes of the atmospheric density at SZ-3 orbit altitude[J]. Chinese Journal of Space Science, 2004, 24(4): 269-274
- [9] 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 Guotai, Sun Lilin, 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
- [10] 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

[11] Picone J M, Hedin A E, Drob D P, et al. Enhanced empirical models of the thermosphere[J]. Physics and chemistry of the Earth, 2000, 25: 537-542

[12] Schwabe S H. Sunspot cycle[J]. Astron Nachr, 1844, 21: 233-239

[13] Schoves D J. The sunspot cycle, 649 B.C. to A.D. 2000[J]. Journal of Geophysical Research, 1955, 60(2): 127-146

[14] 徐彤, 吴健, 吴振森, 等. 地磁  $A_p$  指数滞后太阳周期循环分析[J]. 空间科学学报, 2008, 28(3): 210-214

Xu Tong, Wu Jian, Wu Zhensen, et al. Analysis of the time lag between geomagnetic  $A_p$  index and solar cycle[J]. Chinese Journal of Space Science, 2008, 28(3): 210-214

[15] 苗娟, 田剑华. 太阳黑子数及  $A_p$  指数周期变化特征的小波分析[J]. 空间科学学报, 2004, 24(1): 28-34

Miao Juan, Tian Jianhua. Morlet transform of sunspot number and  $A_p$  index[J]. Chinese Journal of Space Science, 2004, 24(1): 28-34

### Prediction of atmospheric density at earth edge in low-latitude regions

Guo Zhengxiong, Li Wenhao, Zhang Heng, Xiao Xinxin, Liu Kailei  
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The influence of the space environment on the atmospheric density at earth edge in low-latitude regions is discussed based on the NRLMSISE-00 model. Two methods are proposed to predict the daily average atmospheric density, the simplified model method and the empirical method. The simplified method predicts the values of  $A_p$  and  $F_{10.7}$  for the atmospheric density at earth edge in the low-latitude regions in the 11-year period of geomagnetic activity and solar activity. The empirical method directly predicts the value of the future atmospheric density by using the daily average density in the 23rd solar cycle and by means of the Fourier transformation. The diurnal fluctuations in different altitudes can be derived by using the method of fitting curve. Thus the atmospheric density at a local time can be calculated by using the predicted average density. The error analysis for the two methods shows that the empirical method is more accurate than the simplified method. Both methods have high accuracy and are easy to use as engineering prediction algorithms for the atmospheric density at the edge of the earth.

**Key words:** atmosphere of earth edge; space environment; density fluctuation forecast; NRLMSISE-00 atmospheric model

~~~~~

## 国际眺望

### 解析 NASA 月球空间站：定点在地月拉格朗日点

据国外媒体报道，美国宇航局计划在地球和月球的拉格朗日点（地-月 L2）上建设空间站。地-月 L2 处于地球和月球连线的延长线上，距离月球 65 000 km。由于处于该点的航天器还要受到太阳引力的干扰，实际运行轨迹非常复杂，形成了围绕地-月 L2 的晕轨道（halo orbit）。

处于地-月 L2 上的空间站能够为宇航员和工程师积累深空操作的经验，最终会确保人类脱离地月系统而探索更为广阔的宇宙空间。地-月 L2 上的空间站还能够作为维修大型天文望远镜的平台，并且由于地-月 L2 距离月球较近，因此还可以用来对月球上的地质勘探机器人进行实时遥控。

在月面上投放和远程遥控机器人比让宇航员登陆更安全和节约成本。机器人能够在月球上工作数年，就像在火星上工作的火星车一样。人类可以利用远程遥控的机器人建立月球基地，为 21 世纪第一批登陆月球的宇航员做好前期准备。

美国宇航局对在地-月 L2 上建立空间站的想法由来已久。早在 1999—2000 年期间，地-月拉格朗日点和地-日拉格朗日点就成为了美国宇航局“十年规划团队”（DPT）的宠儿。NASA 提出建设地-月 L2 空间站的计划并不是说下一步真的派遣宇航员去那里。这应当看作 NASA 向外界发出的一个信号：美国的载人航天仍有美好的未来。

（摘自 2012-11-20 中国科技网 搜狐科学）