

# 一种 NRLMSISE-00 模型太阳辐射校正方法

薛炳森 苍中亚

(中国气象局空间天气重点开放实验室 北京 100080)

**摘要** 根据空间天气的状态, 调整大气模型的相关输入参数能够减小模型的计算误差. 通过对比 CHAMP 卫星在轨大气密度探测数据与 NRLMSISE-00 模式的计算结果发现, 通过调整  $F_{10.7}$  的输入, 使轨道大气密度积分的模式计算结果与探测结果之间的误差达到最小, 此时的  $F_{10.7}$  被称为理想  $F_{10.7}$  输入 ( $F^*$ ). 进一步的分析发现,  $F^*$  与太阳紫外辐射 MgII 指数存在很好的相关性, 因此可以选择其他的太阳紫外辐射代理参数取代  $F_{10.7}$ , 从而减小模型计算误差. 本文采用神经网络技术, 建立新的太阳紫外辐射代理参量  $F_{\text{euV}}$  与 MgII,  $F_{10.7}$  等的对应模型, 能够根据当日参数值计算  $F_{\text{euV}}$ . 研究表明, 新的代理参数能够有效减小 NRLMSISE-00 的计算误差.

**关键词** 热层大气密度, NRLMSISE-00 模式, 太阳紫外辐射, 代理参数

**中图分类号** P 353

## Optimizing the NRLMSISE-00 Model by a New Solar EUV Proxy

XUE Bingsen CANG Zhongya

(Key Laboratory for Space Weather, China Meteorological Administration, Beijing 100080)

**Abstract** Solar EUV radiation is one of the sources for atmospheric density variation in thermosphere. NRLMSISE-00 model is widely used to simulate the density variation in the satellite orbit. However, this model always exhibits large density errors compared with satellite observations. In this work, the model output is compared with CHAMP satellite observation on the same position, and an ideal value of proxy for solar EUV ( $F^*$ ) is chosen through changing the input  $F_{10.7}$ . Further investigation shows that  $F^*$  is closely related to another solar EUV index MgII. By using of neuron network technique, the correspondence relationship between the new proxy of solar EUV ( $F_{\text{euV}}$ ) and  $F_{10.7}$  and MgII. The target parameter is  $F^*$ . The new proxy substitutes  $F_{10.7}$ , and is input into NRLMSISE-00 model. The results show the difference of thermosphere density between those detected by CHAMP and GRACE-A satellite and that calculated by the NRLMSISE-00 model is dropped significantly.

**Key words** Thermosphere density, NRLMSISE-00 model, Solar EUV radiation, Proxy

## 0 引言

太阳活动低年到高年, 太阳紫外波段的辐射通量变化可达 2~10 倍<sup>[1]</sup>. 早期的太阳紫外频谱模型以  $F_{10.7}$  作为输入参数, 如 Tobiska<sup>[1]</sup> 建立的太阳辐射模型. Hedin<sup>[2]</sup> 研究发现, 高层大气的密度与  $F_{10.7}$  的大小密切相关. 因此在随后出现的高层大气和电离层模型中,  $F_{10.7}$  都是不可或缺的反映太阳辐射通量的重要参数. 随着探测精度的提高, 使用作为紫外辐射替代参量的  $F_{10.7}$  可能引起大气密度误差. 以紫外辐射通量对模式中的  $F_{10.7}$  进行改正, 可以显著改善模式的计算结果, 例如 Thuillier<sup>[3]</sup> 使用 MGII 指数取代  $F_{10.7}$  计算卫星的大气阻力, 轨道计算精度提高 20%~40%.

受太阳活动和地磁扰动的影响, 热层大气质量密度的变化非常强烈. 探测和研究大气密度的分布和变化规律具有重要意义. 利用卫星来探测热层大气密度是一种有效的方法. 其中, 利用卫星质谱计探测构建的 MSIS 系列大气模式在卫星轨道相关业务中应用广泛<sup>[4]</sup>, 本文的研究主要针对其中的 NRLMSISE-00 模型.

在轨卫星就地探测大气密度等参数是验证大气模型计算效果的主要依据. 在卫星探测的基础上, 已有很多研究对卫星就地测量的热层大气密度进行系统分析, 发现大气模型存在不同程度的误差. Guo 等<sup>[5]</sup> 利用 CHAMP 卫星探测的连续大气密度数据, 研究热层密度的经纬度分布和随太阳活动及地磁扰动的变化规律, 并与 NRLMSISE-00 经验大气模式预报的密度进行比较, 发现太阳活动高年 CHAMP 卫星探测的密度显著大于 NRLMSISE-00 模式预报的大气密度, 随太阳活动的降低二者差别逐渐减小. Li 等<sup>[6]</sup> 通过分析中国卫星的热层大气探测数据也发现, 即使在地磁活动平静期, 探测数据与大气模型之间的误差也达到 15%~20%.

Guo 等<sup>[5]</sup> 认为, 反映影响大气密度的太阳紫外辐射的代理参数是大气模型的误差来源之一. 他采用  $F_{10.7}$  和 EUV 等多种太阳活动指数对 CHAMP 卫星的大气密度数据进行拟合, 其通过拟合可以解释 71% 的密度变化, 比仅用  $F_{10.7}$  指数拟合效果好. 这进一步说明选择更合适的指数表征太阳活动, 可以显著减小大气密度模型的计算误差. Wen 等<sup>[7]</sup> 对 NRLMSISE-00, JB08 大气模型的计算结果

与 GRACE 卫星加速度计所测得的大气密度进行比较发现, 上述模型的计算结果普遍偏高, 但并未对其形成机制进行深入讨论.

长期以来, 由于缺少有效观测手段, 很难获得 EUV 的直接观测数据. 因此, 各种分析计算中通常使用其他太阳参数作为 EUV 代理数据,  $F_{10.7}$  和 MgII 是两种广泛使用的代理参数. Viereck 等<sup>[8,9]</sup> 的研究结果表明, MgII 与太阳紫外辐射具有极好的相关性, 其可以作为太阳紫外辐射的代理参数. Huang 等<sup>[10]</sup> 对 SOHO/SEM 监测到的紫外射线流量与  $F_{10.7}$ , MgII 进行比较分析发现, 仅用 MgII 拟合太阳 EUV 辐射存在偏差,  $F_{10.7}$  同样有一定的调节作用, 利用二者联合建立的关系式计算太阳 EUV 通量, 结果精度会优于文献 [9] 中的结果.

通用模式例如 NRLMSISE-00 没有太阳紫外辐射参数的接口, 因此许多研究者使用其他代理参数替代  $F_{10.7}$ . Tobiska<sup>[11]</sup> 构建了太阳紫外辐射全波段计算模型, 并构造出  $E_{10.7}$  指数, 用来代替大气、电离层模式中的  $F_{10.7}$  指数, 作为太阳紫外辐射的代理参量. Wang 等<sup>[12]</sup> 利用 2001 至 2005 年 CHAMP 卫星加速仪资料反演的大气点密度数据, 结合多种大气模型分析了不同辐射指数  $F_{10.7}$ ,  $E_{10.7}$ ,  $S_{10}$ , MgII 对模型精度的影响, 对  $E_{10.7}$  在 NRLMSISE-00 模式中的应用进行了验证. 其研究表明: 在低太阳辐射时, 利用  $E_{10.7}$  取代  $F_{10.7}$  使模型精度提高约 15%; 在强太阳辐射时,  $E_{10.7}$  计算的误差弥散度急剧增大, 从而导致模型精度降低. 因此, 在中低太阳辐射时,  $E_{10.7}$  指数能够降低模型的平均误差.

综上所述, 大气模型计算结果与卫星实测大气密度之间的误差与早期探测手段有关, 同时太阳紫外辐射的代理参数  $F_{10.7}$  造成的反映太阳紫外辐射强度的不真实性也是误差的重要来源. 因此, 可以通过对  $F_{10.7}$  进行必要的改进, 改善大气模型的计算精度.

## 1 数据准备

### 1.1 理想太阳紫外代理参数 $F^*$

大气模型建立基于对大量探测数据的统计分析, 已经形成了完整的体系框架, 对其中的算法进行优化较为困难. Chen 等<sup>[13]</sup> 在模式计算结果的基础上, 结合相同位置和地方时的 CHAMP 卫星实测数据, 构建与  $F_{10.7}$  相关的误差表达式来调整 NRLMSISE-00

的计算结果, 以期减小模型的误差. 另外的思路是, 考虑到代理数据  $F_{10.7}$  反映的是太阳辐射强度的偏差, 利用实测的太阳紫外辐射探测结果, 调整模型输入的  $F_{10.7}$ , 形成新的太阳紫外辐射代理参数, 使得大气模型的计算结果误差减小, 这种方法的关键是新代理参数的生成方法.

大气阻力引起的轨道衰减通常需要一定时间才比较明显. 大气阻力造成的阻力加速度可表示为

$$a = \frac{1}{2}C_D\rho\frac{s}{m}v. \quad (1)$$

其中:  $C_D$  为大气阻力系数, 与卫星表面材料、形状、轨道高度以及大气成分等因素有关;  $\rho$  为大气密度;  $s/m$  为卫星面质比;  $v$  为卫星质心相对于当地大气的速度. 要控制卫星的姿态稳定, 而且在短时间内速度变化较小, 因此  $C_D$ ,  $\rho$ ,  $s/m$  在一段时间内为恒定值. 在一段时间内速度的变化可表示为

$$\Delta v = \int a dt, \quad (2)$$

进一步可改写为

$$\Delta v \approx \frac{1}{2}C_D\frac{s}{m}\int \rho dt. \quad (3)$$

由于需要在一定的时间累积后才可能观测到卫星轨道变化, 因此在大气对卫星轨道影响的评估中, 大气密度沿卫星轨道的积分是更直接的参考量. 这里采用大气密度沿轨道积分的探测值作为评估大气模型的参考量.

为了使太阳 EUV 通量对大气的扰动更加明显, 选取不同太阳活动水平时的地磁指数  $A_p < 8$  的单日 CHAMP 卫星探测数据, 同时根据 NRLMSISE-00

模式的输入规则, 以当日实测  $F_{10.7}$  为中心, 连续均匀地改变  $F_{10.7}$  的输入, 这里每步增加或减小  $F_{10.7}$  的 1.01 倍, 计算当日轨道上的大气密度积分值, 进而计算该  $F_{10.7}$  输入时, 沿轨积分密度的差值. 通过误差的变化选出最适合的  $F_{10.7}$  输入值, 称之为  $F^*$ .

通过对多组  $F^*$  的分析发现, 该值存在且唯一, 这应该与 NRLMSISE-00 的建模原理相关. 不同轨道、不同地方时的采样数据  $F^*$  比较相近. 图 1 给出了 CHAMP 和 GRACE-A 卫星探测的大气密度的沿轨积分值与 NRLMSISE-00 计算得到的当日沿轨积分值的相对误差, 计算公式为

$$E_{rate} = \frac{|\rho_{ID} - \rho_{IM}|}{\rho_{ID}}. \quad (4)$$

其中,  $\rho_{ID}$  为实测数据的沿轨密度积分,  $\rho_{IM}$  为连续改变  $F_{10.7}$  得到的 NRLMSISE-00 模式的沿轨密度积分.

选取 2007 年 5 月 31 日的 CHAMP 卫星的实测数据, 当日  $F_{10.7}$  的实测值为 75, 地磁指数  $A_p = 4$ . CHAMP 卫星的轨道高度为 357 km, 向日面轨道地方时约为 13:00 LT; GRACE-A 卫星的轨道高度为 475 km, 向日面轨道地方时约为 14:30 LT. 以当日实测的  $F_{10.7}$  作为输入, NRLMSISE-00 模型计算的沿轨积分密度与实测值的误差分别为 70% 和 95%. 从图 1 可以看出, NRLMSISE-00 模式计算的沿轨积分大气密度与实测值相差很小, 理想状况下误差均小于 1%. 误差最小值对应的  $F_{10.7}$  参量值被称为最佳太阳辐射代理参量, 用  $F^*$  表示. 由图 1 可见, 两个高度和地方时相差很大的卫星轨道上得到的  $F^*$  非

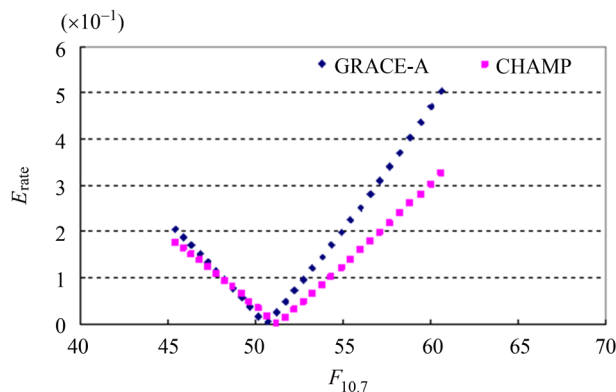


图 1 利用 NRLMSISE-00 模型计算得到的沿轨大气密度积分与 CHAMP 和 GRACE-A 卫星实测结果的相对误差

Fig. 1 Relative error of thermosphere density between those detected by CHAMP, GRACE-A satellites and calculated by the NRLMSISE-00 model

常接近. 在其他地磁活动平静的日期, 两个卫星对应的  $F^*$  也都非常接近. 因此, 利用一个合理的能够反映太阳紫外辐射对大气密度影响的参数取代现有的  $F_{10.7}$ , 将有效提高大气密度模型的准确性, 更好地为卫星轨道控制服务.

### 1.2 $F^*$ 与太阳紫外辐射相关参数的统计分析

以上验证了 NRLMSISE-00 模型存在一个最佳太阳紫外辐射代理量. 但是该量的得出需要在轨大气实测密度的配合. NRLMSISE-00 模型建立在大量真实数据基础上, 而 CHAMP 卫星的大气密度探测数据是通过精确就地测量得到的, 其基本变化趋势与 NRLMSISE-00 模型符合, 实测数据更能反映热层大气对  $F_{10.7}$  的响应. 进一步可以分析  $F^*$  与太阳辐射参数的相关性, 建立基于其他物理参量且与  $F^*$  更加接近的太阳紫外辐射代理参量, 有效减小大气模型的计算误差.

已有研究表明, 太阳  $F_{10.7}$  通量与太阳活动水平密切相关<sup>[14]</sup>. 但是, 现行的  $F_{10.7}$  国际标准值为单一基准站 12:00 LT 的探测值, 且  $F_{10.7}$  在一天中是变化的, 因此利用单个时间点的  $F_{10.7}$  测量值描述 1 天的太阳紫外辐射通量存在一定误差. 如果在测量时刻附近出现太阳爆发活动, 则得到的  $F_{10.7}$  值偏高, 从而造成基于  $F_{10.7}$  的热层大气密度模型计算值偏大. 图 2 给出了 2004 年 10 月 26 日大气模型计算值与实测值 4 个圈次的比较. 由图 2 可以看出, 误差最高

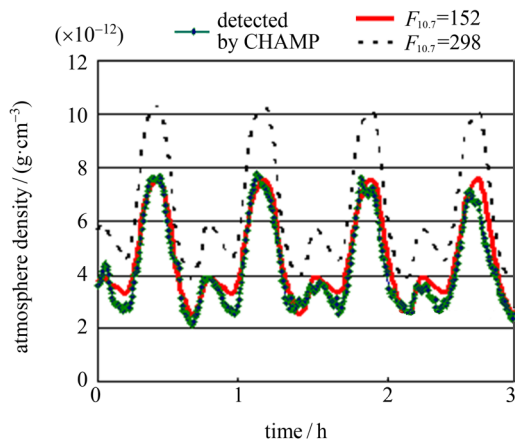


图 2 将  $F_{10.7}$  实测值 (黑虚线) 和  $F^*$  (红线) 输入 NRLMSISE-00 模型计算得到的轨道大气密度与 CHAMP 卫星 2003 年 10 月 26 日探测到的轨道大气密度的对比  
Fig. 2 Comparison of the atmosphere density calculated by NRLMSISE-00 model and those detected by CHAMP satellite

可达 30% 以上. 通过分析当日的太阳耀斑情况, 发现当日 18:10 UT 爆发了一次伴随射电爆发的 X1.4 级强耀斑.  $F_{10.7}$  通量处于耀斑影响时段, 因此通量幅度高出正常值. 利用当日的  $F^*$  值 (152 替代  $F_{10.7}$ ), 输入大气模型得到的大气密度计算结果与实测值非常接近.

因此, 太阳  $F_{10.7}$  作为太阳紫外辐射代理参数, 有时不能准确反映太阳紫外辐射通量, 这是地磁活动平静期间热层大气密度模式产生误差的主要原因. 其他原因主要包括: (1)  $F_{10.7}$  为定时测量, 不能反映全天太阳紫外辐射; (2) 测量  $F_{10.7}$  的时间附近可能有太阳爆发事件发生, 使计算结果的误差较大. 图 3 是随机选取的不同太阳活动水平下  $F_{10.7}$  与  $F^*$  的比较. 由图 3 可以看出, 在  $F_{10.7}$  较高和较低时, 其作为太阳紫外辐射代理参数处于普遍偏高的状态, 进而导致模型计算的大气密度偏高, 这与 Wen 等<sup>[7]</sup> 的统计结果符合.

MgII 能够比较好地反映太阳紫外波段的通量. 通过前面的计算和统计分析发现, 采用  $F^*$  作为 NRLMSISE-00 模式的输入能够大幅度改善大气模型的误差. 分析  $F^*$  与 MgII 的关系, 这里随机选取地磁活动平静期间  $F_{10.7}$  不同的日期进行  $F^*$  的计算, 并与当日的 MgII 指数 (定义数学符号  $F_{MgII}$ ) 进行相关性分析, 计算结果如图 4 所示. 由图 4 可以看出, 二者成准线性关系且相关系数高达 88%, 其表达式为

$$F^* = -1987.5 + 754F_{MgII}. \quad (5)$$

仍以 2013 年 10 月 26 日为例, 当日 MgII 指数

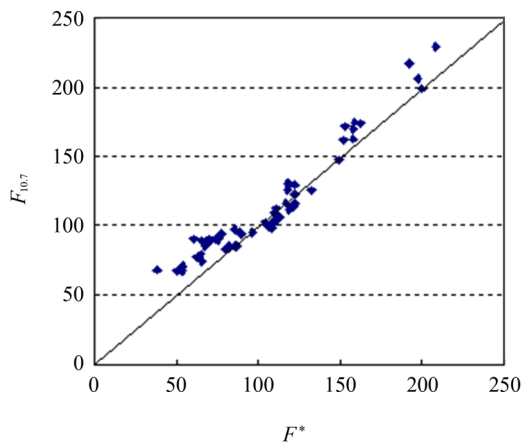


图 3  $F_{10.7}$  与  $F^*$  的相关性  
Fig. 3 Corr relation between  $F_{10.7}$  and  $F^*$

为 0.277. 根据式 (5) 得到当日的  $F^*$  为 139, 代入 NRLMSISE-00 模型计算当日的沿轨密度积分, 误差为 49.41%. 而以实测的  $F_{10.7} = 298$  进行计算的误差可达 95.6%. 这一结果与 Huang 等 [10] 的结论一致.

上述分析说明, 模式构建时仅采用  $F_{10.7}$  作为太阳紫外辐射的代理参量, 则利用 NRLMSISE-00 模型所得结果的误差变化规律除与太阳辐射直接测量参数相关外, 也与  $F_{10.7}$  有关. 进行太阳紫外辐射参量优化时, 需要对太阳辐射参量直接测量值和  $F_{10.7}$  进行综合考虑.

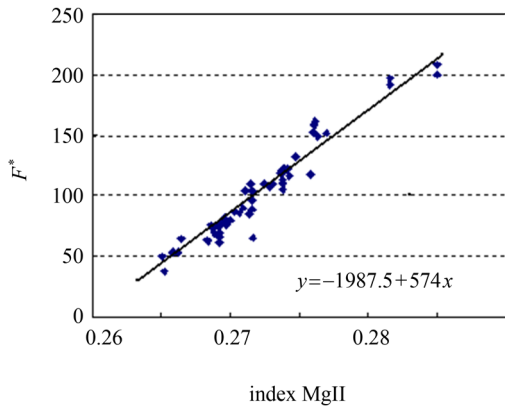


图 4 太阳 EUV 辐射 MgII 指数与  $F^*$  的统计相关特性  
Fig. 4 Correlation between solar EUV index MgII and  $F^*$

## 2 太阳紫外代理参数的计算方法

在大气模型中使用  $F_{10.7}$  会引起不同程度的误差, 但在建模过程中, 相关的统计公式均基于  $F_{10.7}$  建立, 而且当时的探测数据与  $F_{10.7}$  也具有较好的相关性. 因此, 在选择反映太阳紫外辐射代理参数时, 考虑  $F_{10.7}$  的作用能够使太阳紫外辐射与大气作用原理和统计模型更好地结合, 尽量减小大气模型的误差.

这里在太阳活动的不同时期选择了 200 组各种大小的  $F_{10.7}$  的日期. 在此期间, 地磁指数  $A_p$  小于或等于 5. 将每天的  $F_{10.7}$  以及  $F_{10.7}$  的 81 天平均值和 MgII 日均值进行组合, 利用全连接神经网络技术 [15], 设定神经网络的目标值为当日的  $F^*$ , 对这些数据进行训练, 形成权重系数矩阵, 进而建立基于神经网络的太阳紫外辐射代理参数  $F_{euV}$  的计算模型.

随机选取没有参加训练的 10 组数据对该计算方法进行检验, 检验结果如表 1 所示.

由表 1 可以看出, 随机选取的 8 天中, 采用计算得到的  $F_{euV}$  作为 NRLMSISE-00 模型的输入, 得到的大气密度沿轨积分值比将  $F_{10.7}$  直接输入 NRLMSISE-00 模型的计算误差显著下降. 此外, 输入  $F_{10.7}$  的计算结果与实测值误差越大, 修正的效果也越差. 这说明: 本文的方法难以从根本上消除 NRLMSISE-00 模型在建模过程中由探测数据和

表 1 将实测  $F_{10.7}$  与  $F_{euV}$  作为 NRLMSISE-00 模式输入得到的结果与 CHAMP 卫星实测数据的误差

Table 1 Difference between the results obtained by NRLMSISE-00 model and CHAMP satellite observations

日期	$F_{10.7}$	MgII	$F_{euV}$	$F_{10.7a}$	原模型误差/(%)	改进模型误差/(%)
2004-06-20	117	0.2726	109	107	40	23
2004-06-21	113	0.2725	108	107	47	29
2004-07-05	78	0.2694	64	107	44	5
2004-07-06	79	0.2688	61	108	45	7
2004-08-15	139	0.2751	129	112	40	9
2004-08-16	134	0.2749	125	113	35	16
2004-10-22	123	0.2721	112	108	16	1
2004-10-23	132	0.2728	121	107	15	0.3

注  $F_{10.7a}$  表示  $F_{10.7}$  的 81 天平均值.

统计近似误差造成的系统误差; 尽管现有优化技术能够减小误差, 但是一些随机的影响因素如潮汐、重力波等仍体现在模型的误差中。

图 5 给出了表 1 中 2007 年 5 月 31 日轨道大气密度修正前后与 CHAMP 卫星实测值的比较. 由图 5 可见, 以  $F_{\text{euV}}$  作为 NRLMSISE-00 模型输入, 计算得到的大气密度偏差由 16% 降为 1%, 该结果显然更加接近实测值。

### 3 结论

通过连续改变 NRLMSISE-00 模型的  $F_{10.7}$  输入, 发现存在一个最佳的  $F_{10.7}$  输入值, 能够使大气模型计算得到的沿卫星轨道的积分密度值与实测值的误差达到最小。

通过比较一系列  $F^*$ , 发现  $F^*$  与当日 MgII 指数具有很好的线性关系, 这说明由于早期建模过程中采用  $F_{10.7}$  作为表征太阳紫外辐射强度的代理参数引起了大气密度误差, 而大气密度模型仍能很好地反映大气密度, 采用与太阳紫外辐射相关性更好的代理参数可以在一定程度上改善大气密度模型精度。

由于大气模型的输入参数已经确定, 因此需要考

虑生成一个新的参量来取代  $F_{10.7}$  作为太阳辐射的代理参数. 考虑到建模时  $F_{10.7}$  的关键作用, 在不改变模型结构的前提下, 采用神经网络方法建立与  $F_{10.7}$  和太阳 MgII 指数存在线性关系的新指数  $F^*$ . 经过检验, 新指数能够显著改善大气模型的计算精度. 新的代理参数能够将原有误差减小一半以上. 此外, 新参数是基于现有的连续监测量计算得到的, 能够保证业务应用。

大气模型是经过多年研究多次修订并被验证采纳的成果. 针对目前得到的大气模型与最新观测数据的误差可知, 对大气模型进行根本性修订的条件尚不具备. 但是, 可以通过改变模型的输入, 采用物理意义更明确、更贴近实用的代理参数提高模型的精度. 本文研究结果表明,  $F^*$  参量对改进 NRLMSISE-00 模型精度具有较好的效果, 今后的工作是进一步修订这一参数, 并继续研究  $F_{10.7}$  81 天平均值的替代方法。

此外, 利用大气模型计算得到的密度误差来自太阳辐射和地磁活动的共同作用. 通过  $F^*$  的使用能够降低太阳紫外辐射参量不准导致的误差, 剔除该辐射参量不准造成的误差后, 可将地磁扰动引起的误差分离出来. 采用类似方法得到反映地磁活动引起的大

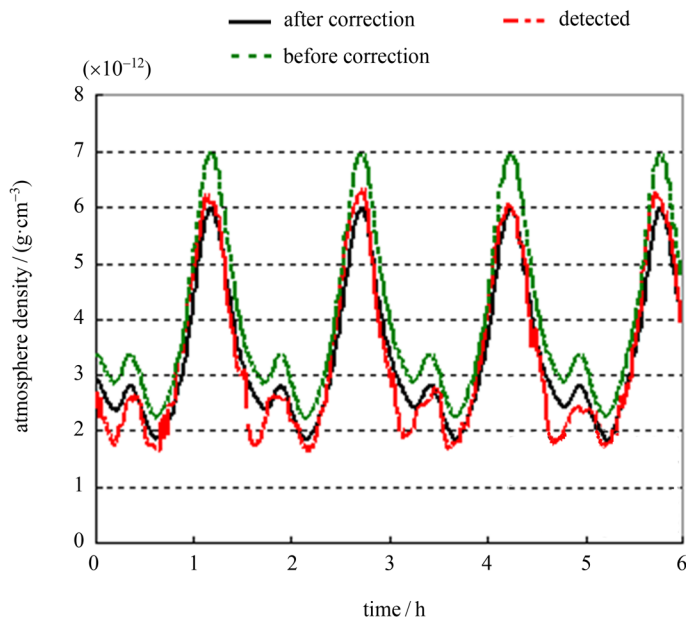


图 5 2007 年 5 月 31 日轨道大气密度修正前后与 CHAMP 卫星实测值的比较

Fig. 5 Comparison of orbit atmosphere density calculated by NRLMSISE-00 model before and after correcting solar EUV proxy and those detected by CHAMP satellite

气密度变化和反映地磁活动的代理参量, 从而对大气模型的输入进行全面修订, 可从根本上提高短期模型的精度, 更好地为卫星轨道管理服务。

**致谢** 太阳辐射数据由 NOAA/SWPC 提供, 卫星轨道大气数据由科罗拉多大学提供。

## 参考文献

- [1] TOBISKA W K. Revised solar extreme ultraviolet flux model [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1991, **53**(11/12): 1005-1081
- [2] HEDIN A E. Correlations between thermosphere density and temperature, solar EUV flux, and 10.7-cm flux variations [J]. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**(A11): 9828-9834
- [3] THUILLIER G, BRUINSMA S. The MgII index for upper atmosphere modeling [J]. *Ann. Geophys.*, 2001, **19**(2): 219-228
- [4] PICONE J M, HEDIN A E, DROB D P, *et al.* NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(A12): SIA15-1-SIA15-16
- [5] GUO Jianpeng, WAN Weixing, FORBES J M, *et al.* Effects of solar variability on thermosphere density from CHAMP accelerometer data [J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**(A10): A10308
- [6] LI Yongping, ZHU Guangwu, QIN Guotai, *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]. *Chin. J. Geophys.*, 2014, **57**(11): 3703-3714 (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)
- [7] WEN Shenglin, YAN Ye. Atmosphere density modeling and prediction in low earth orbit based on AR model [J]. *Sci. Tech. Eng.*, 2015, **15**(6): 104-108 (温生林, 闫野. 基于 AR 模型的低轨卫星大气密度建模与预报 [J]. *科学技术与工程*, 2015, **15**(6): 104-108)
- [8] VIREECK R A, PUGA L C. The NOAA MgII core-to-wing solar index: construction of a 20-year time series of chromospheric variability from multiple satellites [J]. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(A5): 9995-10005
- [9] VIREECK R, PUGA L, MCMULLIN D, *et al.* The MgII index: a proxy for solar EUV [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**(7): 1343-1346
- [10] HUANG Fuxiang, JIANG Yue, HUANG Guangdong, *et al.* Construction of long-time series of solar extreme ultraviolet radiation with  $F_{10.7}$  and MgII [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2013, **56**(9): 2912-2917 (黄富祥, 江月, 黄光东, 等. 利用  $F_{10.7}$  和 MgII 构建太阳极紫外辐射长时间序列 [J]. *地球物理学报*, 2013, **56**(9): 2912-2917)
- [11] TOBISKA W K. Validating the solar EUV proxy,  $E_{10.7}$  [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A12): 29969-29978
- [12] WANG Hongbo, ZHAO Changyin. Analysis of the influence of different solar radiation index on the accuracy of atmospheric model [J]. *Sci. China: G*, 2009, **39**(3): 467-475 (汪宏波, 赵长印. 不同太阳辐射指数对大气模型精度的影响分析 [J]. *中国科学: G 辑*, 2009, **39**(3): 467-475)
- [13] CHEN Xuxing, HU Xiong, XIAO Cunying, *et al.* Correction method of the low Earth orbital neutral density prediction based on the satellites data and NRLMSISE-00 model [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2013, **56**(10): 3246-3254 (陈旭杏, 胡雄, 肖存英, 等. 基于卫星数据和 NRLMSISE-00 模型的低轨道大气密度预报修正方法 [J]. *地球物理学报*, 2013, **56**(10): 3246-3254)
- [14] MIAO Juan, LIU Siqing, XUE Bingsen, *et al.* Primary research on prediction method of 10.7 cm solar radio flux [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2003, **23**(1): 50-54 (苗娟, 刘四清, 薛炳森, 等. 太阳 10.7 cm 射电辐射流量预报方法初探 [J]. *空间科学学报*, 2003, **23**(1): 50-54)
- [15] GONG Jiancun, XUE Bingsen, LIU Siqing, *et al.* Short term forecast of solar proton event [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2003, **23**(6): 443-451 (龚建村, 薛炳森, 刘四清, 等. 神经网络方法在太阳质子事件短期预报中的应用 [J]. *空间科学学报*, 2003, **23**(6): 443-451)