

DAM 大气模型构建与验证*

刘 卫^{1,4} 罗冰显^{2,4} 龚建村³
贺 泉¹ 王荣兰² 向开恒¹

1(中国星网网络创新研究院有限公司 北京 100029)

2(中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

3(中国科学院微小卫星创新研究院 上海 201210)

4(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 根据热层物理、经验模型原理和代码分析,研究模型构建方法。进而剖析国内热层大气探测和热层模型构建现状,提出存在的困难和未来的发展思路。以 GOST 模型为基础,分析模型的工作机制、地磁扰动期大气密度预报误差来源和密切相关的模型系数,推导模型密度对相关模型系数的偏导数矩阵。利用天基实测密度,有针对性地构建磁暴期大气模型 (DAM)。并通过独立于建模的实测密度数据,验证 DAM 模型性能。统计发现,地磁活动指数 A_p 介于 100~132 时 GOST, MSIS00 和 DAM 模型的相对误差均值依次为 64.32%, -176.72%, -14.83%。 A_p 指数 80~132 时,相对误差均值对应为 77.44%, -136.74%, -14.14%, DAM 模型性能较 GOST 和 MSIS00 均有明显提升。证明通过搭建大气模型框架和实测密度数据估计模型参数的建模方法是可行和有效的。

关键词 经验模型, 模型构建, DAM 大气模型, 性能评估

中图分类号 P351

Construction and Verification of DAM Model

LIU Wei^{1,4} LUO Bingxian^{2,4} GONG Jiancun³
HE Quan¹ WANG Ronglan² XIANG Kaiheng¹

1(*China Satellite Network Innovation Co., LTD, Beijing 100029*)

2(*State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*)

3(*Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210*)

4(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

* 中国科学院重点部署项目资助 (ZDRE-KT-2021-3)

2023-01-12 收到原稿, 2023-03-19 收到修定稿

E-mail: liupodt@sina.com

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract The physical model of the thermosphere and the empirical and semi-empirical model of the thermosphere are analyzed. The basic theory and code analysis of the empirical thermosphere model are used to clarify the model construction methods. Based on the current situation of atmospheric modeling in China, the difficulties are analyzed and development suggestions are given. Based on the GOST model, the prediction performance of atmospheric model in geomagnetic disturbed period was analyzed, and the construction of atmospheric model in geomagnetic storm period was studied. The Disturbed Atmospheric Model (DAM) was constructed based on the measured density data, and its validity was verified. It is found that the mean relative errors of GOST, MSIS00 and DAM models are 64.32%, -176.72% and -14.83%, respectively, within the range of geomagnetic index A_p 100~132. As A_p is within the range of 80~132, the relative error mean of each model is 77.44%, -136.74%, -14.14% respectively, DAM model is significantly improved compared with GOST and MSIS00. It is proved that the modeling method of estimating model parameters by building an atmospheric model framework and measured density data is feasible and effective.

Key words Thermosphere models, Model construction, DAM model, Evaluation

0 引言

低轨航天器的大气阻尼摄动是影响轨道预报精度的关键,航天任务设计和运行阶段的轨道设计、推进剂预算、寿命估计、精密定轨与预报、碰撞规避、再入预报等,均需要高精度的大气模型支撑。空间物体的轨道数据,富含大气密度变化信息,最早大气密度变化的多种重要特征,来自轨道变化数据分析^[1]。Harris 和 Jacchia 等^[2,3]基于卫星轨道数据,构建了首代 HP、Jacchia 经验模型。虽然经过多年各系列模型不断迭代演进,但是模型标准差仍不低于 15%^[4],地磁扰动期间可超 100%^[5,6]。

中国早期因经济和技术等因素所限,在空间探测方面投入不足,缺乏跨太阳活动周尺度、时空连续覆盖的热层大气探测数据。中国开展了热层大气模型相关探索和研究工作。以 DTM94 模型和 40 余颗空间目标多年的轨道跟踪数据为基础, Wu 等^[7]构建了 PMO-2000 模型。大气模型动态修正方面, Zhang 等^[8]利用神经网络修正 MSIS00 模型, Li 等^[9]、Ruan 等^[10]和 Liu 等^[11]分别基于模型边界温度,对模型进行动态修正。建模、动态修正理论研究和业务化应用方面,缺乏体系化的工作,整体落后于国际先进水平。限于投入、规划和探测技术的不足,热层密度实测数据的积累严重不足。另外,建模理论研究存在不系统、不完善等问题。同时缺乏足够的实践工作,多

种因素叠加使得热层大气模型自主化研究难以深入。工程中借助 MSIS 等模型达成密度预测的基本需求。近年来随着中国在空间科学探测研究方面的不断投入,获取了一些轨道跟踪数据和大气密度自主探测数据,为大气密度模型构建工作提供了数据基础。

本文分析了热层经验模型建模方法,针对 GOST 模型短板,探索改进方法。推导密度对模型系数的灵敏度矩阵,基于实测密度数据,对部分模型系数重新解算,构建地磁扰动期大气模型(DAM),并验证模型效能。

1 物理模型理论

热层大气模型按运行机制分为物理和经验模型,两类模型均有各自的优势和应用领域。热层环流模型(TGCM)、热层-电离层耦合模型(TIEGCM)等物理模型,由基本物理方程主导。热层/电离层系统的主要外部驱动是太阳紫外线辐射和地磁强迫,其中太阳辐射是主要的能量输入。地磁扰动期地磁能量的输入可与太阳辐射输入相当甚至更大。此外,低层大气也将动量和能量转移到中层顶附近。能量的主要损失是通过红外辐射冷却,包括CO₂辐射冷却、NO辐射冷却、O结构冷却。能量在系统内部通过垂直热传导、涡流扩散、水平扩散、水平和垂直对流及中性、离子和电子之间的弹性和非弹性碰撞进行传递。TIE-

GCM 模型解决了内部物理过程和自洽一致性,可对全球 97~600 km 高度区域的热层/电离层耦合系统进行三维数值模拟^[12]。物理模型的运算比经验模型更耗时,同时物理模型的使用需要一定的专业基础。对比工程应用,物理模型更适用于中高层大气的理论研究。

物理模型从基本物理、化学原理出发,推演中性大气和电离层变化。描述大气状态及变化主要是通过求解热力学、质量守恒、动量守恒和流体静力学方程来实现的^[12-15],即

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{ge^z}{p_0 c_p} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_T}{H} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - aT - V \cdot \nabla T - w \left(S + \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{RT}{c_p m} \right) + Q'/c_p; \quad (1)$$

$$\frac{1}{r \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (v \cos \phi) + \frac{1}{r \cos \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + e^z \frac{\partial}{\partial z} (e^{-z} w) = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{ge^z}{p_0} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu}{H} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \left(f + \frac{u}{r} \tan \phi - \lambda_{xy} \right) v - \lambda_{xx} u - V \cdot \nabla u - w \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{1}{r \cos \phi} \frac{\partial \Phi'}{\partial \lambda} + (F_\lambda + \lambda_{xy} v_I + \lambda_{xx} u_I),$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{ge^z}{p_0} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu}{H} \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \left(f + \frac{u}{r} \tan \phi - \lambda_{xy} \right) u - \lambda_{yy} v - V \cdot \nabla v - w \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi'}{\partial \phi} + (F_\phi + \lambda_{yy} v_I - \lambda_{yy} u_I) n; \quad (3)$$

$$\partial \Phi' / \partial z = R(T_0 + T')/m. \quad (4)$$

其中, t 为时间, ϕ 为纬度, λ 为经度, Φ 为重力势; $z = \ln p_0/p$, 这里 p 和 p_0 分别为气压及其参考值; u 和 v 为纬向及经向风速; $w = dz/dt$; T 为温度, H 为标高, K_T 为热传导系数。

可以看出物理模型的机理非常复杂,网格点上的微积分计算过程异常耗时,无法支撑工程中的实时定轨和预报。与经验模型相比,物理模型更适于热层和电离层变化机制研究^[16]。

2 经验模型

经验大气模型参考大气温度、气压和密度物理定律,如质量和动量守恒、理想气体状态方程等,对主要

成分数密度、温度等主要变化分项建模。也有经验模型将总质量密度表达为时间、经纬高和空间环境指数的函数,其参数由历史观测数据拟合得到。经验模型通常不能表征短时间、小空间尺度的大气变化特征。物理和经验模型的预报精度均与自身建模完整度相关,此外还依赖于太阳、地磁等空间环境指数的预报水平。

2.1 经验模型理论

经验大气模型由一系列表征大气主要成分数密度、气压和温度等变化的表达式组成。利用累积的实测密度数据,拟合获取模型参数,可视为物理机制简化后,对实测密度和空间环境参数的拟合与插值。因此,空间环境指数预报水平严重影响大气模型的预报性能^[16]。

大气的压力 p , 密度 ρ 和温度 T 近似满足理想气体状态方程

$$\frac{p}{\rho} = \frac{RT}{M}. \quad (5)$$

其中, R , M 为气体常数和分子量,大气在垂直结构上遵循流体静态平衡,气体间的外推压力平衡重力。通过流体静态方程,关联压力梯度、密度 ρ 和重力加速度 g , 有

$$\frac{dp}{dz} = -\rho(z)g(z). \quad (6)$$

结合式(5)和式(6),积分可得大气压力随高度变化的表达式为

$$p(z) = p(0)e^{-\int_0^z \frac{1}{H(r)} dr}. \quad (7)$$

类似可推导密度 ρ 随高度 z 的变化,即大气密度的指数模型,有

$$\rho(z) = \rho(0)e^{-\int_0^z \frac{1}{H'(r)} dr}. \quad (8)$$

其中, H 和 H' 是压力和密度标高,表征数值降低至 $1/e$ 时的垂直距离变化。由式(9)可见,密度标高相比压力标高增加了温度梯度项。对恒温区域,密度标高与压力标高相同。海平面上密度标高约为 8.5 km,热层中密度标高随高度增加而增大,100~600 km 高度范围标高约为 6~75 km,有

$$H(z) = \frac{RT(z)}{g(z)M(z)},$$

$$\frac{1}{H'(z)} = \frac{1}{T(z)} \frac{dT(z)}{dz} + \frac{g(z)M(z)}{RT(z)}. \quad (9)$$

经验模型多是基于静态扩散平衡理论,垂直温度剖面决定了成分数密度。Jacchia, DTM 和 MSIS 模型差异在复杂度上,MSIS 等模型发展过程中,引入大量密度和温度的变量。例如 DTM94 模型由 172 个非零系数确定,根据 DTM2020 代码分析,其含有 614 个非零系数。MSIS00 模型为 1300 个非零系数,MSIS2.0 的非零系数增至 3306^[17, 18]。经验大气模型通过物理约束构建参数化的分析公式,描述大气状态的平均时空行为^[19]。

2.2 经验模型构建

通过 MSIS 和 GOST 等模型文献和代码,推导典型热层大气经验模型建模过程,模型共性特征如下。(1)各系列经验模型具有稳定的理论基础,多以静态平衡方程为主导。(2)多数模型构建过程中,按大气主成分分别构建数密度参数方程,只有 GOST 模型以时间、空间位置和空间环境等为参数构建总质量密度函数。(3)经验模型构建过程:首先搭建模型框架,如时空表达式、空间环境指数驱动函数,密度变化项等形式。其次框架确定之后,使用标校的实测密度数据结合参数估计理论,解算并复核模型参数。(4)模型在迭代演进中,不断拓展、融合多源探测数据和模型参数,当前典型经验模型参数数量均在数百至数千之间。

目前热层密度变化的物理机制未完全掌握,模型框架搭建时难以避免部分参数相关,导致模型参数解算中可能存在不收敛或参数吸收问题。欧洲和美国在经验模型构建工作上,通过不断的迭代积累了大量经验,目前已演进至模化小尺度的密度变化阶段。

中国在中高层大气探测方面的研究起步较晚,天宫卫星及部分风云卫星和 APOD 等搭载了质谱仪和压力规等大气密度探测设备,缺乏可持续性的热层大气探测专项计划。对于热层模型构建,在探测数据、建模理论和实践等因素制约下,尚未发布完全自主的大气模型。建模核心技术缺乏系统性和实践迭代,工程中多依赖国外公开模型。短期、中长期大气密度预测能力与国际先进水平差距较大。对热层模型构建有如下思路。(1)拓展、融合多源密度探测或反演数据,构建并开放国家热层大气探测基础库,为热层理论和建模研究提供数据支撑。(2)参考 GOST 等模型,前期从总质量密度模型入手,不断增加和完善大气密度短周期、小尺度变化,开展自主建模的探

索工作,并不断迭代演进。(3)推进大气成分数密度建模,并构建海量模型参数稳健估计理论,最终实现理论和实践的横向覆盖、纵向贯通。

3 磁扰期大气模型构建

目前地磁扰动期的模型密度预报是制约模型性能的主要问题。基于 GOST 模型,利用地磁扰动期 GRACE 和 CHAMP 卫星密度探测数据,解算参考密度、太阳和地磁活动相关项的模型系数,构建地磁扰动期大气模型(DAM)。使用非建模实测密度数据集,检验评估 DAM 模型性能。

3.1 GOST 模型

基于宇宙系列卫星轨道数据和拟合方法,早期构建了最初的 GOST77 模型,历经改进目前发展至 GOST04 版本,模型考虑了太阳指数、地磁指数、周日和半周日等密度变化^[20, 21],即

$$\rho = \rho_n k_0 k_1 k_2 k_3 k_4. \quad (10)$$

其中, k_0 表征太阳活动指数 $F_{10.7}$ 及均值 F_{81} 的密度长期影响, k_1 为密度的周日与纬度变化, k_2 为密度的半年变化相关项, k_3 为 $F_{10.7}$ 指数相对 F_{81} 偏离的短期变化, k_4 为密度变化对地磁活动 Kp 指数的响应,有

$$\begin{aligned} k_0 &= 1 + (l_1 + l_2 h_{\text{ellp}} + l_3 h_{\text{ellp}}^2) (F_{81} - F_0), \\ k_1 &= 1 + (c_1 + c_2 h_{\text{ellp}} + c_3 h_{\text{ellp}}^2 + c_4 h_{\text{ellp}}^3) \cdot \\ &\quad \cos^{(n_0 + n_1 h_{\text{ellp}})} \left(\frac{\phi}{2} \right), \\ k_2 &= 1 + (d_1 + d_2 h_{\text{ellp}} + d_3 h_{\text{ellp}}^2) A(d), \\ h_3 &= 1 + \frac{(b_1 + b_2 h_{\text{ellp}} + b_3 h_{\text{ellp}}^2) (F_{10.7} - F_{81})}{F_{10.7}}, \\ k_4 &= 1 + (e_1 + e_2 h_{\text{ellp}} + e_3 h_{\text{ellp}}^2 + e_4 h_{\text{ellp}}^3) \cdot \\ &\quad (e_5 + e_6 \bar{k}_p + e_7 \bar{k}_p^2). \end{aligned} \quad (11)$$

其中, ρ_n 为夜侧参考密度(单位 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),其随高度指数递减,有

$$\rho_n = 9.80665 e^{a_1 - a_2 \sqrt{h_{\text{ellp}} - a_3}}. \quad (12)$$

其中,模型系数依照高度分段拟合确定, h_{ellp} 为卫星高度。

为简化这里只讨论常用高度 180~600 km 的 GOST 模型,表 1 列出了模型相关系数。 $A(d)$ 为大气半年变化, d 为年积日, $A(d)$ 系数如表 2 所示。

表 1 GOST 模型参数(180<h<600 km)

Table 1 Parameters of GOST model

F_0	75	100	125	150	175	200	250
a_1	-1.5560×10^1	-1.5640×10^1	-1.522×10^1	-1.69752×10^1	-1.7304×10^1	-1.8266×10^1	-1.92782×10^1
a_2	8.248×10^{-1}	7.754×10^{-1}	7.569×10^{-1}	6.736×10^{-1}	6.382×10^{-1}	5.797×10^{-1}	5.118×10^{-1}
a_3	7.69132×10^1	6.79162×10^1	5.58165×10^1	8.5444×10^1	8.19596×10^1	1.009417×10^1	1.165792×10^1
d_1	-1.721×10^{-1}	-1.721×10^{-1}	-1.721×10^{-1}	-1.721×10^{-1}	-1.721×10^{-1}	-1.721×10^{-1}	-1.721×10^{-1}
d_2	5.756×10^{-3}	5.756×10^{-3}	5.756×10^{-3}	5.756×10^{-3}	5.756×10^{-3}	5.756×10^{-3}	5.756×10^{-3}
d_3	-3.635×10^{-6}	-3.635×10^{-6}	-3.635×10^{-6}	-3.635×10^{-6}	-3.635×10^{-6}	-3.635×10^{-6}	-3.635×10^{-6}
b_1	-8.607×10^{-1}	-7.54×10^{-1}	-5.7×10^{-1}	-4.76×10^{-1}	-2.92×10^{-1}	-3.113×10^{-1}	-3.307×10^{-1}
b_2	7.861×10^{-3}	6.85×10^{-3}	5.25×10^{-3}	4.4×10^{-3}	2.80×10^{-3}	2.839×10^{-3}	2.878×10^{-3}
b_3	-5.711×10^{-6}	-4.6×10^{-6}	-3.0×10^{-6}	-2.40×10^{-6}	-8.0×10^{-6}	-1.089×10^{-6}	-1.378×10^{-6}
c_1	1.2791	1.2791	1.2903	1.2903	2.057×10^{-1}	2.057×10^{-1}	1.499×10^{-3}
c_2	-1.576×10^{-2}	-1.576×10^{-2}	-1.547×10^{-2}	-1.547×10^{-2}	-2.912×10^{-3}	-2.911×10^{-3}	-2.399×10^{-4}
c_3	6.499×10^{-5}	6.499×10^{-5}	5.964×10^{-5}	5.964×10^{-5}	1.739×10^{-5}	1.739×10^{-5}	7.006×10^{-6}
c_4	-5.145×10^{-8}	-5.145×10^{-8}	-4.503×10^{-8}	-4.503×10^{-8}	-8.565×10^{-9}	-8.565×10^{-9}	-5.999×10^{-10}
e_1	-2.152×10^{-1}	-2.162×10^{-1}	-1.486×10^{-1}	-1.495×10^{-1}	-8.19×10^{-2}	-8.286×10^{-2}	-2.048×10^{-1}
e_2	4.167×10^{-3}	4.086×10^{-3}	3.263×10^{-3}	3.182×10^{-3}	2.358×10^{-3}	2.278×10^{-3}	3.596×10^{-3}
e_3	1.587×10^{-6}	1.27×10^{-6}	3.143×10^{-6}	2.825×10^{-6}	4.698×10^{-6}	4.381×10^{-6}	-1.587×10^{-6}
e_4	-1.651×10^{-9}	-1.587×10^{-9}	-3.429×10^{-9}	-3.365×10^{-9}	-5.206×10^{-9}	-5.143×10^{-9}	3.175×10^{-10}
e_5	-1.2×10^{-1}	-1.2×10^{-1}	-1.0×10^{-1}	-1.0×10^{-1}	-1.3×10^{-1}	-1.1×10^{-1}	-9.0×10^{-2}
e_6	5.0×10^{-3}	2.5×10^{-2}	2.083×10^{-2}	2.75×10^{-2}	4.389×10^{-2}	3.81×10^{-2}	3.117×10^{-2}
e_7	1.5×10^{-2}	7.5×10^{-3}	6.25×10^{-3}	3.75×10^{-3}	1.821×10^{-3}	1.178×10^{-3}	9.662×10^{-4}
l_1	-1.698×10^{-2}	-1.249×10^{-2}	-7.879×10^{-3}	-4.882×10^{-3}	-5.195×10^{-3}	-5.017×10^{-3}	-5.455×10^{-3}
l_2	1.448×10^{-4}	1.111×10^{-4}	7.258×10^{-5}	4.692×10^{-5}	4.664×10^{-5}	4.282×10^{-5}	4.273×10^{-5}
l_3	-9.535×10^{-8}	-7.706×10^{-8}	-3.658×10^{-8}	-1.742×10^{-8}	-2.164×10^{-8}	-2.132×10^{-8}	-2.273×10^{-8}

表 2 GOST 模型半周年效应相关参数

Table 2 Parameters related to the semi-annual effect

d	$A(d)$	d	$A(d)$	d	$A(d)$
0	-0.028	130	0.013	260	0.015
10	-0.045	140	-0.037	270	0.07
20	-0.047	150	-0.086	280	0.115
30	-0.035	160	-0.128	290	0.144
40	-0.011	170	-0.162	300	0.155
50	0.022	180	-0.185	310	0.145
60	0.057	190	-0.199	320	0.120
70	0.090	200	-0.202	330	0.084
80	0.114	210	-0.193	340	0.044
90	0.125	220	-0.173	350	0.006
100	0.118	230	-0.140	360	-0.023
110	0.096	240	-0.096	370	-0.04
120	0.060	250	-0.042	—	—

通过前 81 天的 $F_{10.7}$ 加权 w_i 求和, 除以总权重得到

$$F_{81} = \frac{\sum_{i=1}^{81} F_{10.7} \omega_i}{\sum_{i=1}^{81} \omega_i},$$

$$\omega_i = 0.5 + \frac{0.5(i-1)}{80}. \quad (13)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, 81$, $i = 81$ 代表当天。

ϕ 为纬度、周日、周年变化耦合效应的等效角, 有

$$\cos \phi = \sin \varphi \sin \delta_s + \cos \varphi \cos \theta. \quad (14)$$

其中, θ 为计算密度处与周日密度峰值的夹角, 比日下点滞后 ϕ_B , $\theta = t_L + \phi_B$ 。 t_L 为太阳的地方时角, δ_s 为太阳赤纬。 $\bar{k}_p$ 为 3 h 地磁 Kp 指数的日平均。

3.2 修正方法

GOST 模型表达式中, 地磁扰动期 GOST 模型误差可能源自参考密度、太阳和地磁活动相关项。数值分析表明, 扰动期模型误差来自焦耳加热引起的大

气抬升、参考密度 ρ_n 的不准确; 太阳指数 $F_{10.7}$ 相关项表达不准确; 地磁指数 k_p 相关项表达不准确。据此确定了修正参数为 $a_1, a_2, b_1, b_2, b_3, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7$ 。

3.3 模型参数偏导数

根据大气密度计算式(10), 含 27 项系数 g_i ($i = 1, 2, \dots, 27$), 系数不存在直接交叉项, 可推导获取密度对各参数的偏导数, 有

$$\frac{\partial \rho}{\partial g_i} = \frac{\partial \rho}{\partial k_j} \frac{\partial k_j}{\partial g_i},$$

$$i = 1, 2, \dots, 27; j = 0, 1, \dots, 4. \quad (15)$$

其中, k_j 依次为 k_0, k_1, k_2, k_3, k_4 ; g_i 依次为 $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3, c_4, d_1, d_2, d_3, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, l_1, l_2, l_3, n_0, n_1, A, \phi$ 。

经分析确定对参考密度 ρ_n 相关的 a_1, a_2 系数, 太阳活动变化相关的 b_1, b_2, b_3 系数, 地磁活动相关的 $e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7$ 系数, 共计 12 项 g_i 系数进行重新估计。

具体的偏导数矩阵如下。

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \rho}{\partial a_1} \\ \frac{\partial \rho}{\partial a_2} \\ \frac{\partial \rho}{\partial b_1} \\ \frac{\partial \rho}{\partial b_2} \\ \frac{\partial \rho}{\partial b_3} \\ \frac{\partial \rho}{\partial e_1} \\ \frac{\partial \rho}{\partial e_2} \\ \frac{\partial \rho}{\partial e_3} \\ \frac{\partial \rho}{\partial e_4} \\ \frac{\partial \rho}{\partial e_5} \\ \frac{\partial \rho}{\partial e_6} \\ \frac{\partial \rho}{\partial e_7} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_0 k_1 k_2 k_3 k_4 \frac{\partial \rho_n}{\partial a_1} \\ k_0 k_1 k_2 k_3 k_4 \frac{\partial \rho_n}{\partial a_2} \\ \rho_n k_0 k_1 k_2 k_4 \frac{\partial k_3}{\partial b_1} \\ \rho_n k_0 k_1 k_2 k_4 \frac{\partial k_3}{\partial b_2} \\ \rho_n k_0 k_1 k_2 k_4 \frac{\partial k_3}{\partial b_3} \\ \rho_n k_0 k_1 k_2 k_3 \frac{\partial k_4}{\partial e_1} \\ \rho_n k_0 k_1 k_2 k_3 \frac{\partial k_4}{\partial e_2} \\ \rho_n k_0 k_1 k_2 k_3 \frac{\partial k_4}{\partial e_3} \\ \rho_n k_0 k_1 k_2 k_3 \frac{\partial k_4}{\partial e_4} \\ \rho_n k_0 k_1 k_2 k_3 \frac{\partial k_4}{\partial e_5} \\ \rho_n k_0 k_1 k_2 k_3 \frac{\partial k_4}{\partial e_6} \\ \rho_n k_0 k_1 k_2 k_3 \frac{\partial k_4}{\partial e_7} \end{bmatrix} \cdot \text{其中,} \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_n}{\partial a_1} \\ \frac{\partial \rho_n}{\partial a_2} \\ \frac{\partial k_3}{\partial b_1} \\ \frac{\partial k_3}{\partial b_2} \\ \frac{\partial k_3}{\partial b_3} \\ \frac{\partial k_4}{\partial e_1} \\ \frac{\partial k_4}{\partial e_2} \\ \frac{\partial k_4}{\partial e_3} \\ \frac{\partial k_4}{\partial e_4} \\ \frac{\partial k_4}{\partial e_5} \\ \frac{\partial k_4}{\partial e_6} \\ \frac{\partial k_4}{\partial e_7} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9.80665 e^{a_1 - a_2} \sqrt{h_{\text{ellp}} - a_3} \\ -9.80665 \sqrt{h_{\text{ellp}} - a_3} e^{a_1 - a_2} \sqrt{h_{\text{ellp}} - a_3} \\ \frac{(F_{10.7} - F_{81})}{F_{10.7}} \\ \frac{h_{\text{ellp}}(F_{10.7} - F_{81})}{F_{10.7}} \\ \frac{h_{\text{ellp}}^2(F_{10.7} - F_{81})}{F_{10.7}} \\ (e_5 + e_6 \bar{k}_p + e_7 \bar{k}_p^2) \\ h_{\text{ellp}}(e_5 + e_6 \bar{k}_p + e_7 \bar{k}_p^2) \\ h_{\text{ellp}}^2(e_5 + e_6 \bar{k}_p + e_7 \bar{k}_p^2) \\ h_{\text{ellp}}^3(e_5 + e_6 \bar{k}_p + e_7 \bar{k}_p^2) \\ (e_1 + e_2 h_{\text{ellp}} + e_3 h_{\text{ellp}}^2 + e_4 h_{\text{ellp}}^3) \\ (e_1 + e_2 h_{\text{ellp}} + e_3 h_{\text{ellp}}^2 + e_4 h_{\text{ellp}}^3) \bar{k}_p \\ (e_1 + e_2 h_{\text{ellp}} + e_3 h_{\text{ellp}}^2 + e_4 h_{\text{ellp}}^3) \bar{k}_p^2 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

3.4 参数估算

模型中部分参数存在相关性,因此需筛选待估参数。模型对空间环境变化响应不当,是地磁扰动期模型预报性能差的主因。通过 3.2 节修正方法中误差源理论分析和典型密度模型与实测密度对比分析^[22, 23],确定表 3 中标注的 12 个待估参数。以 2001—2010 年 CHAMP 和 GRACE 卫星探测任务中,满足 A_p 指数不小于 132, $F_{10.7}$ 不小于 200, 共 12507 条实测密度为校正段数据,进行参数重新估计,称为 DAM 模型。

比较 DAM 模型与 GOST 和 MSIS00 模型大气

密度预报残差和误差百分比。定义模型预测相对误差 ε 的计算公式为

$$\varepsilon = \frac{\rho_o - \rho_M}{\rho_o} \times 100\%.$$
 (17)

其中, ρ_M 为模型值, ρ_o 为实测密度。使用 μ 和 σ 分别表示相对误差 ε 的均值和标准偏差。图 1(a) 为三种模型预报残差绝对值的变化曲线, 图 1(b) 为相对误差变化。

与图 1 对应的模型密度和实测密度如图 2 所示, 图中绿色曲线为 CHAMP 和 GRACE 卫星实测密度。对比可见, GOST 模型磁扰期严重低估密度变化, 正如前面分析模型对地磁指数 k_p 相关项响应不

表 3 GOST 与 DAM 模型系数
Table 3 Parameters comparison of GOST and DAM

参数	GOST	DAM	参数	GOST	DAM
a_1	18.266	-17.37078425	n_0	1.5	1.5
a_2	0.5797	0.54020803	n_1	0.006	0.006
a_3	10.09417	10.09417	e_1	-0.08286	-0.086750778
d_1	-0.1721	-0.1721	e_2	0.002278	0.002907369
d_2	0.005756	0.005756	e_3	4.38×10^{-6}	5.43×10^{-6}
d_3	-3.64×10^{-6}	-3.64×10^{-6}	e_4	-5.14×10^{-9}	-3.98×10^{-9}
l_1	-0.005017	-0.005017	e_5	-0.11	-0.11880196
l_2	4.28×10^{-5}	4.28×10^{-5}	e_6	0.0381	0.030412034
l_3	-2.13×10^{-8}	-2.13×10^{-8}	e_7	0.001178	0.000911514
c_1	0.2057	0.2057	b_1	-0.3113	-0.385954838
c_2	-0.002911	-0.002911	b_2	0.002839	0.002566231
c_3	1.74×10^{-5}	1.74×10^{-5}	b_3	-1.09×10^{-6}	-1.34×10^{-6}
c_4	-8.57×10^{-9}	-8.57×10^{-9}	φ_B	0.5585	0.5585

注 黑色字体表示建模确定的 12 个待估参数。

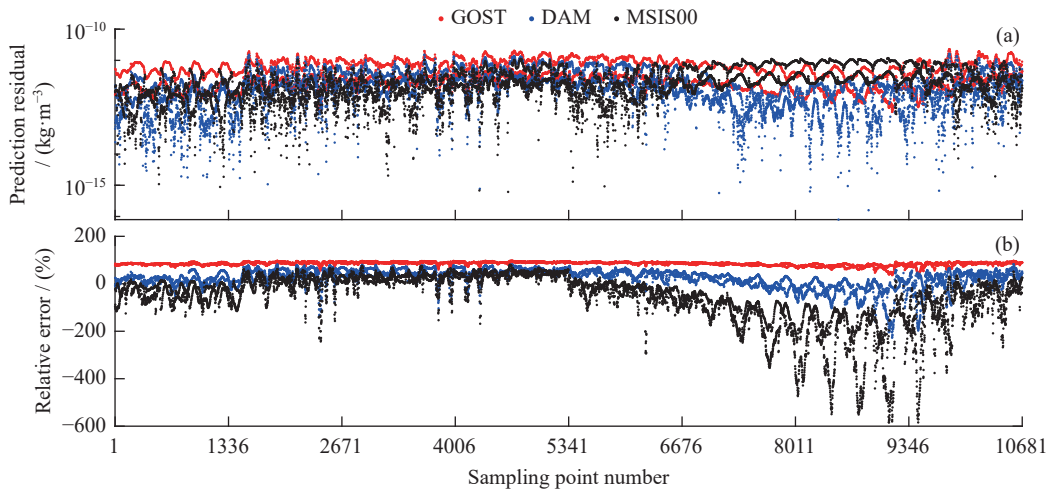


图 1 GOST, DAM 和 MSIS00 模型预报残差 (a) 和误差百分比 (b)

Fig. 1 Prediction residual (a) and error percentage (b) of GOST, DAM and MSIS00 model

足。改正后的 DAM 模型性能提升明显,与 MSIS00 模型相比性能也更稳定。

地磁扰动期大气模型(DAM),相对误差均值指标优于 GOST 和 MSIS00 模型。DAM 相对误差标准差较 MSIS00 模型也具有优势,说明 DAM 性能更稳健。表 4 列出了相对误差均值和标准差值,三种模型的相对误差均值依次为 84.99%,−57.84%,24.94%。DAM 模型地磁扰动期密度预报相对误差均值不大于 30%,较另两种模型性能有显著提升。

3.5 性能评估

仅建模数据还不能说明 DAM 模型性能的优越。利用独立于建模数据的实测密度才可以客观评估新模型性能。筛选 A_p 指数介于 100~132 之间,不与建模数据重叠的 CHAMP 和 GRACE 卫星实测密度数据(共计 5373 条)为评估段数据集 1。统计三种模型相对误差均值、标准差,依次为 64.32%,−176.72%,−14.83% 详见表 5,DAM 模型较另外两种模型提升显著。图 3(a)为三种模型预报残差绝对值的变化,

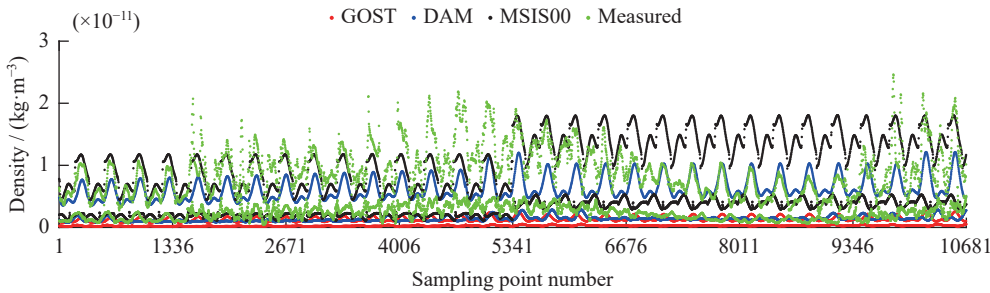


图 2 GOST, DAM, MSIS00 模型预报与实测密度

Fig. 2 GOST, DAM, MSIS00 model prediction and measured density

表 4 基于校正数据集评估的地磁扰动期模型预报性能

Table 4 Performance of each model in disturbed period based on correction data set

模型名称	相对误差均值 μ /(%)	相对误差标准差 σ /(%)
GOST	84.99	7.66
MSIS00	−57.84	108.20
DAM	24.94	38.38

表 5 基于数据集 1 评估的地磁扰动期各模型预报性能

Table 5 Performance of each model in disturbed period based on evaluation data set 1

模型名称	相对误差均值 μ /(%)	相对误差标准差 σ /(%)
GOST	64.32	20.22
MSIS00	−176.72	161.35
DAM	−14.83	63.70

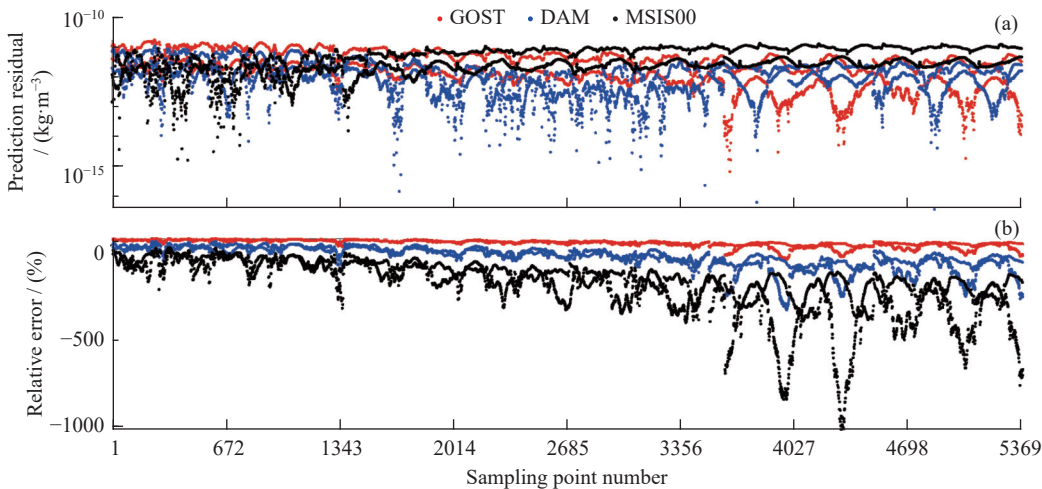


图 3 基于数据集 1 评估的各模型预报残差 (a) 与误差百分比 (b)

Fig. 3 Prediction residual (a) and error percentage (b) of each model based on evaluation data set 1

表 6 基于数据集 2 评估的地磁扰动期各模型预报性能
Table 6 Performance of each model in disturbed period based on evaluation data set 2

模型名称	相对误差均值 μ /(%)	相对误差标准差 σ /(%)
GOST	77.44	11.10
MSIS00	-136.74	155.91
DAM	-14.14	56.31

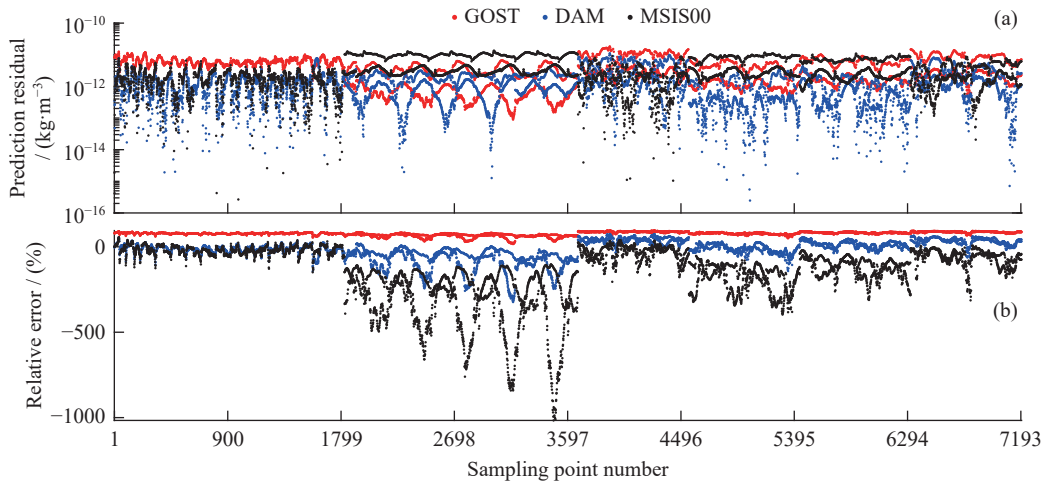


图 4 数据集 2 评估的 GOST, DAM 和 MSIS00 模型预报残差 (a) 和误差百分比 (b)
Fig. 4 Prediction residual (a) and error percentage (b) of GOST, DAM and MSIS00 model with evaluation data set 2

图 3(b)为相对误差变化。

同样,筛选 CHAMP 和 GRACE 卫星数据,在 A_p 指数 80~132 范围内,且不与 3.4 节数据重叠的实测密度(共计 7199 条)为评估段数据集 2。统计 GOST, MSIS00 和 DAM 模型的相对误差均值和标准差(见表 6),分别为 77.44%, -136.74%, -14.14%。DAM 模型较 GOST 和 MSIS00 有明显提升。图 4(a)为不同模型预报残差绝对值对数的变化曲线,图 4(b)为相对误差变化曲线。MSIS00 模型在磁扰期间性能不稳定,在相对误差标准差中也有体现。

4 结语

通过分析热层物理模型和经验模型工作原理,基于模型代码,分析了经验模型的建模方法。针对 GOST 模型存在的短板,探索改进方向。推导密度对模型系数的灵敏度矩阵,为模型构建奠定理论基础。基于实测密度数据对模型中与地磁扰动期性能强相关的 12 个系数重新解算,构建地磁扰动期大气模型

(DAM)。采用与建模时不重叠的数据,对模型的有效性进行验证。分析发现,地磁 A_p 指数 80~132 范围内, GOST, MSIS00 和 DAM 三种模型的相对误差均值依次为 77.44%, -136.74%, -14.14%, DAM 模型较另外两种模型提升显著。研究表明,模型预报密度的相对误差均值对轨道预报性能提升非常关键^[24]。

伴随火箭发射和卫星技术的飞速发展,进入空间的成本呈指数下降,近地轨道空间物体密度将大幅增加,碰撞风险直接威胁航天器的在轨安全。热层大气密度的可靠预测是规避碰撞风险的关键。热层模型构建工作需要探测数据累积、理论研究深入和建模实践的迭代演进。规划探测累积大时间跨度、全时空覆盖的热层大气密度数据,系统研究经验模型构建理论和参数最优估计方法,在建模与应用实践中推动自主模型的迭代演进。以支撑构建全空间环境条件下的高精度自主热层大气模型。

参考文献

[1] PRIESTER W, RÖEMER M, VOLLAND H. The physic-

- al behavior of the upper atmosphere deduced from satellite drag data[J]. *Space Science Reviews*, 1967, **6**(6): 707-780
- [2] HARRIS I, PRIESTER W. Time-dependent structure of the upper atmosphere[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1962, **19**(4): 286-301
- [3] JACCHIA L G. Static diffusion models of the upper atmosphere with empirical temperature profiles[J]. *Smithsonian Contributions to Astrophysics*, 1965, **8**(9): 213-257
- [4] BOWMAN B R, TOBISKA W K, MARCOS F A, *et al.* A new empirical thermospheric density model JB2008 using new solar and geomagnetic indices[C]//Proceedings of the AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit. Honolulu: AIAA, 2008
- [5] MARCOS F A. Accuracy of atmospheric drag models at low satellite altitudes[J]. *Advances in Space Research*, 1990, **10**(3/4): 417-422
- [6] GRANHOLM G R. Near-real time atmospheric density model correction using space catalog data[R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2000
- [7] WU Lianda. Orbiting and Detection of Artificial Satellites and Space Debris[M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2011 (吴连大. 人造卫星与空间碎片的轨道和探测[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011)
- [8] ZHANG Y, YU J J, CHEN J Y, *et al.* An empirical atmospheric density calibration model based on long short-term memory neural network[J]. *Atmosphere*, 2021, **12**(7): 925
- [9] LI Xie, TANG Geshi, LI Zheng, *et al.* A method for calibrating empirical density model based on temperature parameters[J]. *Manned Spaceflight*, 2015, **21**(1): 48-52,90 (李颢, 唐歌实, 李正, 等. 基于温度参数的经验密度模式修正方法[J]. *载人航天*, 2015, **21**(1): 48-52,90)
- [10] RUAN H B, LEI J H, DOU X K, *et al.* An exospheric temperature model based on CHAMP observations and TIEGCM simulations[J]. *Space Weather*, 2018, **16**(2): 147-156
- [11] LIU Wei, GONG Jiancun, LIU Siqing, *et al.* Analysis and evaluation of high accuracy satellite drag model[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2019, **39**(5): 638-647 (刘卫, 龚建村, 刘四清, 等. HASDM修正方法分析与评估[J]. *空间科学学报*, 2019, **39**(5): 638-647)
- [12] QIAN L Y, BURNS A, EMERY B A, *et al.* The NCAR TIE-GCM: a community model of the coupled thermosphere/ionosphere system[M]//HUBA J, SCHUNK R, KHAZANOV G. Modeling the Ionosphere-Thermosphere System. Washington: John Wiley & Sons, 2014: 73-84
- [13] BOUGHER S W, BLELLY P L, COMBI M, *et al.* Neutral upper atmosphere and ionosphere modeling[J]. *Space Science Reviews*, 2008, **139**(1/2/3/4): 107-141
- [14] DICKINSON R E, RIDLEY E C, ROBLE R G. A three-dimensional general circulation model of the thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1981, **86**(A3): 1499-1512
- [15] SUTTON E K. A new method of physics-based data assimilation for the quiet and disturbed thermosphere[J]. *Space Weather*, 2018, **16**(6): 736-753
- [16] DOORNBOS E. Thermospheric Density and Wind Determination from Satellite Dynamics[M]. Heidelberg: Springer, 2012
- [17] EMMERT J T, DROB D P, PICONE J M, *et al.* NRLM-SIS 2.0: A whole-atmosphere empirical model of temperature and neutral species densities[J]. *Earth and Space Science*, 2021, **8**(3): e2020EA001321
- [18] BRUINSMA S, BONIFACE C. The operational and research DTM-2020 thermosphere models[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2021, **11**: 47
- [19] EMMERT J T. Thermospheric mass density: a review[J]. *Advances in Space Research*, 2015, **56**(5): 773-824
- [20] CEFOLA P, VOLKOV I, SUEVALOV V. Description of the russian upper atmosphere density model GOST-2004[C]//37 th COSPAR Scientific Assembly. Montréal: COSPAR, 2008
- [21] VALLADO D A, MCCLAIN W D. Fundamentals of Astrodynamics and Applications[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001
- [22] LIU Wei, WANG Ronglan, LIU Siqing, *et al.* Error analysis of typical atmospheric density model[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2017, **37**(5): 538-546 (刘卫, 王荣兰, 刘四清, 等. 典型热层密度模式误差分析[J]. *空间科学学报*, 2017, **37**(5): 538-546)
- [23] LIU Wei. Modeling and application of Dynamic Calibration Atmosphere[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022 (刘卫. 热层大气模型动态修正建模与应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022)
- [24] LIU Wei, LIU Siqing, GONG Jiancun, *et al.* Analysis of effect of gauss distribution density error on spacecraft orbit[J]. *Space Debris Research*, 2019, **19**(2): 10-17 (刘卫, 刘四清, 龚建村, 等. 基于高斯分布的密度误差对航天器轨道的影响分析[J]. *空间碎片研究*, 2019, **19**(2): 10-17)