0254-6124/2026/46(5)-1261-08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

REN Zhipeng, YU Tingting, LI Shaoyang, WANG Yuhan. Coupled Ionosphere-thermosphere Model for Spaceborne Intelligent Platforms (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1261–1268. CSTR:32142.14.cjss.2025–0239. DOI:10.11728/cjss2026.05.2025–0239

面向星载智能平台的电离层–热层耦合模式研究*

任志鹏　于婷婷　李韶阳　王瑜晗

(中国科学院地质与地球物理研究所 行星科学与前沿技术重点实验室　北京　100029)

(中国科学院地质与地球物理研究所 北京空间环境国家野外科学观测研究站　北京　100029)

(中国科学院大学地球与行星科学学院　北京　100049)

摘　要　随着航天系统向自主化、智能化发展, 传统“天感地算”的空间环境保障模式已难以满足实时响应与自主决策需求. 针对卫星平台对实时空间环境信息的迫切需求, 以自主的全球电离层–热层耦合模式 GCITEM-IGGCAS 为基础, 开展面向星载平台的改造研究. 针对星上运行中面临的系统适配性、计算效能与实时性三大挑战, 实施了运行环境适配与稳定性加固、优化计算效率以及数据接口构建等关键改造. 改造后的模式在保持原有物理内核的基础上, 显著提升了在多样化星载平台上的运行鲁棒性、计算效率与动态响应能力. 模拟结果表明, 该模式可稳定输出热层中性密度与电离层总电子含量等关键环境参数, 其空间分布符合物理规律, 具备为航天器自主轨道管理、通信导航增强等任务提供实时环境信息支撑的潜力. 本研究为高端科学模型向星载智能模块的工程化转型提供了可行路径, 对推动“天感天算”能力建设具有重要意义.

关键词　电离层–热层耦合模式, 电离层, 热层, 数值模拟

中图分类号　P352

Coupled Ionosphere-thermosphere Model for Spaceborne Intelligent Platforms

REN Zhipeng　YU Tingting　LI Shaoyang　WANG Yuhan

(*Key Laboratory of Planetary Science and Frontier Technology, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

(*Beijing National Observatory of Space Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

(*College of Earth and Planetary Sciences, University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

* 国家重点研发计划项目 (2022YFF0503900), 中国科学院重点部署项目 (ZDRY-KT-2021-3), 中国科学院前瞻战略科技先导专项 (XDA0470301), 中国气象局“电离层预报和预警”青年创新团队项目 (CMA2024QN09) 和风云卫星应用先行计划项目 (FY-APP) 共同资助

2025-12-29 收到原稿, 2026-05-06 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Abstract With the development of space systems toward autonomy and intelligence, the traditional "space-sensed, ground-computed" model for space-environment support can no longer meet the needs of real-time response and autonomous decision-making. Aiming at the urgent demand of satellite platforms for real-time space-environment information, this study carries out an onboard-oriented reconstruction of the autonomous global ionosphere-thermosphere coupled model GCITEM-IGGCAS. Focusing on three major challenges encountered during in-orbit operation-system adaptability, computational efficiency, and real-time performance-this work implements several key upgrades, including adaptation and robustness enhancement of the operating environment, optimization of computational efficiency, and the construction of standardized data interfaces. Based on preserving the original physical core, the upgraded model significantly improves operational robustness, computational efficiency, and dynamic responsiveness across diverse onboard platforms. Simulation results demonstrate that the model can stably output key environmental parameters, such as thermospheric neutral density and ionospheric total electron content, whose spatial distributions are physically consistent. This indicates strong potential for providing real-time environmental inputs for tasks such as autonomous orbit management and enhanced communication and navigation. The study offers a feasible pathway for transforming high-end scientific models into intelligent onboard modules, and is of great significance for advancing "space-sensed, space-computed" capabilities.

Key words Coupled ionosphere-thermosphere model, Ionosphere, Thermosphere, Numerical simulation

0 引言

空间环境的平静与扰动, 直接制约着通信、导航、遥感等航天系统的效能与安全. 电离层与热层作为日地空间链路的近地终端, 其状态变化对无线电波传播、航天器轨道衰减乃至载荷工作环境具有决定性影响[1–6]. 随着全球巨型低轨通信星座的快速部署及各类敏捷响应型卫星任务需求的增长, 传统"天感地算"(即探测下传、地面处理、指令上传) 保障模式因其回路长、时效慢的固有局限, 在应对突发性空间天气事件、满足卫星自主运行的实时环境信息需求方面面临巨大压力. 为应对上述挑战, 推动空间环境信息保障模式从"天感地算"向"天感天算"演进, 即将数据获取、处理分析与决策支持部分前移至星上, 已成为国际航天技术发展的重要前沿. Wei 等[7,8] 前瞻性地提出了"卫星大脑"的战略构想, 强调未来的卫星应具备能够自主感知、分析、判断和决策的"大脑", 以实现从被动执行指令到主动智能应对的跨越. 实现这一构想的关键基础之一, 在于发展能够在星载平台严苛资源约束下稳定、高效运行的高精度空间环境物理模型, 为自主决策提供实时、可靠的环境态势输入.

全球电离层–热层耦合数值模式是认知与预测电离层–热层复杂物理化学过程的核心工具. 国际上, 以 TIEGCM, CTIP, GITM 等为代表的模式经过数十年发展, 物理框架日趋完善[9–11]. 在中国, 相关理论研究与自主模式开发也已有较长发展历程. 北京大学肖佐教授是该领域研究的开拓者之一, 其早期构建的电离层物理模型[12] 及发展的二维电离层–热层耦合模式[13,14], 为国内后续研究提供了系统性参考. 沿着这一路径, 多家科研机构持续推动着电离层和热层自主模式的发展[15–18]. 其中由万卫星院士团队[18,19] 自主研发的全球时变三维电离层–热层–电动力学耦合模式 (GCITEM-IGGCAS), 继承了前期研究基础, 采用地理坐标系与高度坐标, 具备物理自洽、耦合完整的特点, 已成功应用于电离层–热层平均结构、扰动响应及耦合机理的研究, 验证了其作为一款可靠科研工具的有效性.

然而, 以 GCITEM-IGGCAS 为代表的现有先进理论模式, 其设计、优化与验证环境主要面向地面高性能计算平台, 首要目标是保障物理机制的完备性与模拟结果的科学精度. 若直接将其部署于星载嵌入式平台——该平台的计算能力、内存、功耗均受严格限制, 同时对长期无人值守运行稳定性要求极高, 将面临以下来自工程实践层面的挑战.

(1) 系统适配性与稳定性挑战. 星载操作系统与硬件架构多样, 科研模式代码通常依赖特定的编译环境与库函数, 直接移植极易出现兼容性问题. 同时, 星上长期自主运行要求软件具备极高的鲁棒性, 而复杂数值模式在极端空间天气条件 (如强磁暴) 下可能出现数值不稳定问题, 在地面可通过人工干预解决, 在轨则可能导致任务失败.

(2) 计算效能瓶颈. 星载处理器算力有限, 而第一性原理物理模式计算复杂. 原模式采用的全局同步时间步长方案, 未能充分考虑不同物理过程在时间尺度上的巨大差异, 导致计算资源利用效率不高, 难以满足星上准实时预报的时效性需求.

(3) 工程化与实时性缺口. 科研模式通常以离线方式运行, 输入输出接口固定. 而“卫星大脑”要求模型能作为标准化模块, 动态接收星上感知的实时驱动数据 (如太阳、地磁指数), 并按需输出任务关注的特定效应参量, 因而需要对模式的输入输出层进行重构.

因此, 将一款成熟的地基科研模式转化为能够嵌入“卫星大脑”并稳定业务化运行的星载智能模块, 绝非简单的代码移植, 而是一项涉及算法优化、软件改造及系统适配的深度改造任务. 该改造过程旨在解决上述三大挑战, 是实现空间环境模型从科学驱动到任务驱动转变的关键步骤. 基于上述背景, 本文针对星载智能平台的应用需求, 开展针对 GCITEM-IGGCAS 模式的工程化改造研究, 以提升运行稳定性、增强系统适配性、优化计算效能.

1 GCITEM-IGGCAS 模式

在空间物理研究领域, 构建能够自洽描述电离层与热层复杂相互作用的全球数值模型, 对于深入理解该区域的动力学、热力学及光化学行为具有基础性意义. 由中国科学院地质与地球物理研究所万卫星院士团队自主开发的全球电离层–热层耦合模型 GCITEM-IGGCAS, 是为满足上述科学需求而构建的重要的三维、时变数值模拟平台. 该模型旨在对 90～600 km 高度范围内, 电离层与热层耦合系统的关键状态参量进行一体化的数值模拟与机理分析.

本模型在数值架构上做了若干针对性设计. 其坐标系系统选择了地理坐标系与高度坐标相结合的方案, 该设计的物理框架有别于国际上许多采用压力坐标的同类模型[19]. 选择高度坐标的优势在于, 模型的输入参数与输出结果具有更加直观的物理高度对应关系, 便于直接与电离层、热层探测数据进行比较. 在空间离散化方面: 模型在水平方向设置了分辨率为 7.5°(经度)× 5°(纬度) 的均匀网格, 以刻画大尺度的全球分布特征; 在垂直方向, 则采用了随高度增加而步长增大的非均匀网格策略, 从低热层约 3 km 的精细分辨率过渡到高热层 30 km 以上的较粗分辨率, 从而在保证关键区域模拟精度的同时有效管理计算开销. 模型采用有限差分法进行时间积分, 时间步长通常设定在 2～5 min 之间. 为了确保数值求解的稳定与高效, 模型采用显式与隐式相结合的计算格式: 水平方向采用显式差分, 在垂直方向, 对扩散项等采用隐式格式处理, 以克服计算稳定性限制.

模型的核心在于对电离层–热层系统内多物理过程进行自洽耦合求解. 在给定太阳辐射、地磁活动等外部驱动条件及上下边界条件后, 模型通过联立求解一组控制方程, 同步输出各类参量的三维时空演变. 针对中性大气部分, 模型求解包括动量方程、能量方程、质量连续性方程及各组分连续性方程在内的完整方程组, 从而自洽获得中性温度场、三维风场 (含经连续性方程诊断的垂直风) 以及 O, O_2, N_2 等主要成分和 $N(^4S)$, NO 等次要成分的数密度分布. 其中对于化学过程远快于输运过程的组分, 例如 $N(^2D)$, 采用局地光化学平衡假设进行合理简化.

在等离子体物理模块中, 模型对主导性离子 O^+的处理尤为细致, 其数密度的演变不仅计入光化学源汇项, 还完整包含了沿地磁场方向的扩散、与中性风的碰撞耦合以及 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 漂移等关键输运机制. 对于 O^{2+}, NO^+等分子离子以及 N^+等次要离子, 则基于其较短的化学寿命, 采用光化学平衡近似计算其密度, 以此在保持物理解释力的同时提升计算效率. 电子数密度由各离子密度之和决定. 关于温度结构, 电子温度通过一个包含光电子加热、碰撞冷却和热传导等项的准稳态能量方程求解; 而离子温度, 在模型所涵盖的高度范围内, 通常被认为通过频繁碰撞与电子及中性成分达到局地热平衡, 据此进行计算.

为实现电离层与热层间的电动力学反馈, GCITEM-IGGCAS 耦合了一个自主发展的中低纬电离层发电机模型 TIDM-IGGCAS-II[20]. 该模块利用每个时间步计算得到的实时热层风场和电离层电导

率, 自洽求解大型电势方程, 从而给出中低纬区域的极化电场分布及相应的等离子体漂移, 这对准确模拟赤道异常等经度–纬度耦合现象至关重要[20]. 对于主要由磁层–电离层耦合控制的高纬地区, 电场输入则由 Weimer96 经验模型提供[21].

模型的可靠性建立在详尽而精确的微观物理过程参数化之上. 其光化学模块包含了由太阳 EUV 和 UV 辐射驱动的电离与光解过程, 相应的太阳光谱通量由 EUVAC 等标准模型提供[22]. 模型化学体系涵盖了 11 个关键中性反应、13 个稳态离子反应及 11 个涉及亚稳态离子的反应, 所有反应速率系数均源自权威实验室测量或理论计算. 在能量收支方面, 模型细致计算了中性大气通过吸收太阳辐射、化学反应、焦耳加热、粒子沉降等多种途径获取的能量, 以及通过 NO, O, CO_2 等粒子的红外辐射导致的能量损失. 电子和离子的能量平衡也通过相应的物理公式进行精确求解.

GCITEM-IGGCAS 模型具备对全球电离层–热层平均气候态及其变化特征的可靠再现能力[19]. 其模拟结果在宏观形态和定量比较上, 与 MSIS, IRI 等国际公认的经验模型均表现出良好的一致性[19]. 上述结果表明, GCITEM-IGGCAS 作为一个物理框架完整、数值方案稳健的全球耦合模型, 不仅为开展基础科学问题研究提供了有力的数值实验手段, 其经过验证的可靠内核也为将其进一步工程化, 发展为面向特定空间环境应用需求的业务化模型奠定了坚实的科学基础.

2 面向星上运行需求的模式适配性改造

如前所述, GCITEM-IGGCAS 模式在地面科研环境中已展现出良好的可靠性与灵活性. 然而, 将其直接部署于计算资源、功耗、可靠性均受严格约束的星载嵌入式平台, 需面临一系列工程实践层面的严峻挑战. 星上运行环境通常具备以下特点: 处理器算力与内存有限, 长期处于无人值守状态需具备极高的自主运行稳定性, 软件需与特定的星载操作系统及硬件架构深度兼容, 且需具备处理实时输入数据的能力. 为应对这些挑战, 使模式能够作为可靠的“环境感知大脑”稳定运行于卫星平台, 本研究对其进行了以提升稳定性、增强系统适配性、优化计算效能为核心目标的工程化改造.

2.1 运行环境适配与稳定性加固

原 GCITEM-IGGCAS 模式的开发与测试主要面向特定的科研计算环境. 为使其具备跨平台运行能力, 首要工作是实现与多样化运行环境, 尤其是 Linux 系统平台的全面适配. 通过系统性的移植、调试与测试, 解决了原代码在不同编译器、系统库及运行环境下的兼容性问题, 修正了因环境差异导致的运行异常, 确保模式在目标平台上编译、链接与执行的正确性. 在软件工具链层面, 针对模式主要采用 Fortran 语言的特点, 重点测试了 Intel Visual Fortran (IVF) 与 Gfortran 两类编译器, 确保在不同编译平台下的数值一致性与稳定性. 本模式是一套自包含的数值计算软件, 不依赖任何外部资源库, 该特点使其在移植到星载环境时无需处理复杂的依赖关系. 运行环境方面, 已完成在 Windows 与 Linux 操作系统下的完整编译与运行验证, 其中 Linux 环境进一步覆盖了 x86 与 ARM 架构的交叉编译场景. 该过程构成模式从实验室可运行迈向工程化可部署的基础步骤.

在提升数值稳定性方面, 针对模式原有算法在极区等高纬度地区模拟时可能出现的计算不稳定问题, 实施了针对性改进. 原版本采用松弛网格技术来抑制极区计算发散, 但该方法在一定程度上可能平滑过度, 影响极区物理结构的模拟精度. 针对原模式在极区高纬度地区可能出现的平滑过度和数值振荡问题, 这里引入一种非线性平滑技术替代原有的松弛网格方法. 该技术基于 Washington 等[23] 提出的非线性滤波框架, 根据物理场的局地梯度强度自适应调整扩散系数: 对梯度异常大的点 (对应数值振荡或奇点区域) 施加更强的平滑处理以抑制不稳定, 而对梯度较小的平缓区域使用更弱的滤波处理, 从而保护真实的物理梯度结构. 改进后的方法在保障全局数值稳定性的同时, 更好地保持了极区关键物理特征, 增强了模式在全球范围, 特别是复杂高纬区域长期积分的鲁棒性.

2.2 计算效率优化与实时数据接口构建

星载平台的计算资源尤为宝贵, 提升模式运行效率是满足实时或准实时应用需求的关键. 原 GCITEM-IGGCAS 模式在时间积分上采用全局同步策略, 即所有物理变量均采用统一的时间步长 (典型值 5 min) 进行推进与更新. 虽然这种策略逻辑简单、

易于实现, 但由于系统中不同物理过程的特征时间尺度差异巨大, 采用统一的小步长会为慢过程带来不必要的计算开销, 而采用统一的大步长则可能引发快过程的不稳定. 为解决这一矛盾, 本次改造引入了异步长技术. 在步长划分上, 对时间推进连续性要求较高的中性大气动力框架 (包括中性温度、中性风场、中性成分数密度等) 采用较小的时间步长 (典型值 2.5 min); 而对时间尺度相对较长的电离层模块、电动力学模块以及各类加热率、冷却率、产生率、损失率相关的计算, 采用较大的时间步长 (典型值 10 min) 进行更新. 在具体实现上, 采用异步推进策略: 在每个大的电离层/电动力学步长内, 中性动力框架保持原有的小步长推进多次; 到达大步长时刻时, 利用当前最新的中性场变量, 重新计算电离层参量、电动力学电场及各类源汇项, 用于后续的时间推进. 该技术有效减少了电离层及源汇项的计算频次, 在基本保持模拟精度的前提下提高了计算效率, 为满足星上有限资源下的时效性要求提供了关键技术支撑. 为量化改造效果, 在典型 PC 机环境下进行效率对比测试. 原始模式采用全局同步步长, 所有物理过程均使用 5 min 步长; 改造后模式采用异步步长, 中性动力框架采用 2.5 min 步长, 电离层模块、电动力学模块及各类源汇项采用 10 min 步长. 在 15 天全球模拟条件下, 原始模式运行耗时约 2000 s, 改造后模式运行耗时约 1500 s, 计算效率提升约 25%. 该提升主要得益于异步长积分技术对电离层及源汇项计算频次的缩减.

星上自主运行要求模式能够接收实时的空间环境驱动参数并做出响应. 原科研模式通常采用静态或气候学数据作为输入. 为实现业务化应用, 本研究为模式开发了标准化的外部数据接口模块. 该接口定义了清晰的数据格式, 使得模式能够动态读取由星上数据管理系统提供的实时或近实时的空间环境指数. 这些输入参数主要包括反映太阳辐射强度的 10.7 cm 射电流量 (即时值 $F_{10.7}$ 及 81 天平均 $F_{10.7\,\mathrm{A}}$), 表征地磁活动水平的地磁指数 Ap, 以及关键的太阳风参数 (太阳风速度、行星际磁场矢量分量等, 属于可选输入项). 接口模块负责数据的接收、解析、预处理 (必要时进行插值或品质检查), 并将其传递给模式的核心驱动模块. 标准化外部数据接口支持动态读取星上提供的实时或近实时空间环境指数. 典型输入参数及其时间分辨率包括 $F_{10.7}$ (1 d)、$F_{10.7\,\mathrm{A}}$ (1 d)、地磁指数 Ap (3 h) 以及可选的高时间分辨率太阳风参数 (统一采用 10 min 分辨率). 接口模块按模式时间步长读取相应时刻的输入参数值, 若当前时刻无对应观测数据, 则采用最近邻取值方式获取最接近时刻的输入参数. 对于太阳风参数缺失的情况, 模式利用当前 Ap 指数调用与之匹配的典型行星际数据集, 驱动 Weimer96 经验模型进行高纬电场计算. 该数据集确保 Weimer96 模型输出的极盖电势降与统计意义上的 Ap 指数对应的极盖电势降相当, 从而保障高纬驱动的连续性与物理一致性. 这标志着模式从预设场景模拟向观测数据驱动的重要转变, 是其融入星载智能信息处理流程的关键一环.

综上所述, 面向星上运行需求, 本研究对 GCITEM-IGGCAS 模式实施了一系列的精准改造. 这些改造未触及模式的物理内核, 而是聚焦于软件层面, 着力解决稳定性、适配性与效率问题. 通过环境适配加固了运行基础, 通过异步长技术优化了计算性能, 通过数据接口形成了实时响应能力. 这些工作共同将一款成熟的科研软件, 转变为更贴近星载工程应用需求的、具备更高鲁棒性与实用性的候选模型, 为其后续在各种智能平台上的集成与部署奠定了坚实的技术基础.

3 改造后模式的输出结果

经过以稳定性、适配性和效率为核心的工程化改造, GCITEM-IGGCAS 模式已转型为一个能够面向航天任务需求、稳定生成关键空间环境参量的计算模块. 本研究展示了该计算模块在地磁平静、低太阳活动春分条件下的标准模拟结果. 输出聚焦于两类对航天任务有直接影响的参量, 即热层中性大气密度与电离层总电子含量 (TEC), 其空间分布展现出与经典物理认知一致的大尺度结构.

图 1 给出 2010 年春分 00:00 UT 约 346 km 高度处全球热层中性质量密度的水平分布. 其模拟条件为: 低太阳活动条件 $F_{10.7} = 84$ sfu, $F_{10.7\,\mathrm{A}} = 81$ sfu (1 sfu= 10^{-22} $\mathrm{W{\cdot}m^{-2}{\cdot}Hz^{-1}}$), 地磁平静条件 $Ap = 0$. 图 1 揭示了由太阳辐射强迫主导的空间分布结构: 在日下点区域, 太阳极紫外辐射加热导致大气膨胀, 质量密度达到全局极大值; 而在夜间半球, 大气冷却收

缩, 密度显著减小. 该分布形态由热层大气环流的首要驱动力太阳辐射强迫决定, 其定性特征与已有物理认知及国际主流经验模型结果相符. 该结果表明, 改造后的热层模块能输出物理上合理的密度场, 具备作为轨道阻力计算输入的基本条件.

图 2 给出相同条件下的全球电离层 TEC 分布. 图 2 中最突出的特征是对称分布于磁赤道两侧的赤道异常驼峰, 这是赤道 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 垂直漂移及“喷泉效应”的直观体现. 同时, 分布图也显示出预期的昼夜强对比, 日侧 TEC 值显著高于夜侧, 其定性特征与已有物理认知及国际主流经验模型结果相符. 该输出证实, 改造后模式的电离层电动力学–光化学耦合过程运行

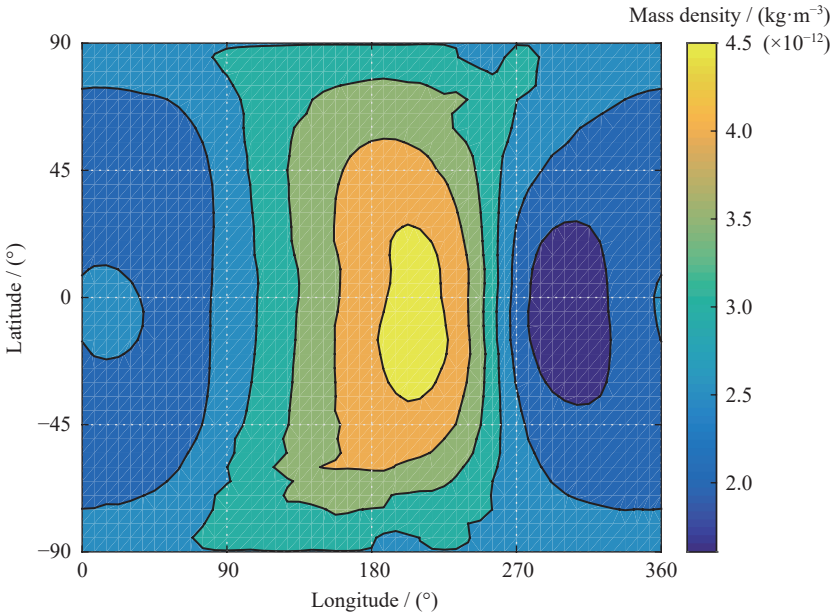


图 1 346 km 高度左右热层中性质量密度分布

Fig. 1 Neutral mass density distribution in the thermosphere at approximately 346 km altitude

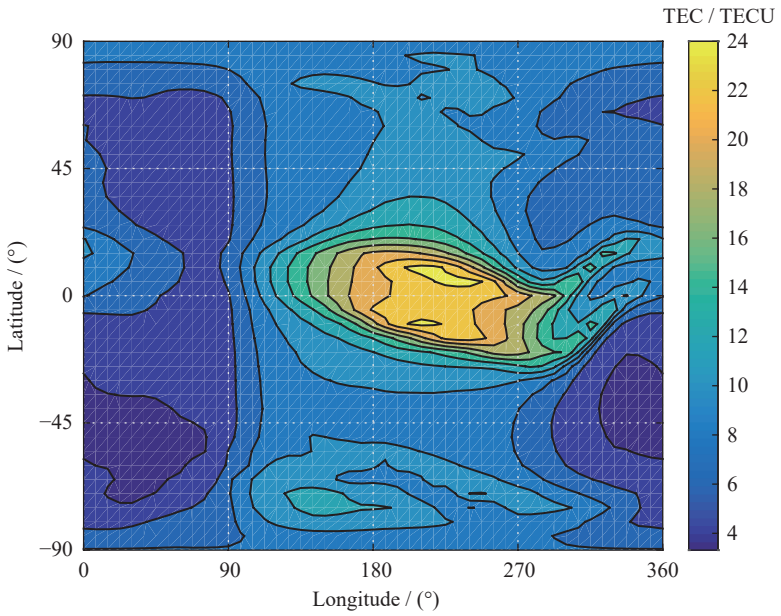


图 2 电离层总电子含量 (TEC) 分布

Fig. 2 Total Electron Content (TEC) distribution in the ionosphere

正常, 能够产出反映核心物理机制的电离层数据.

改造后模式稳定输出的密度与 TEC 场, 构成实现航天器自主环境感知与智能决策所需的两类核心信息流.

(1) 赋能自主轨道管理. 高时空分辨率的热层中性密度场 (见图 1) 是计算低轨卫星大气阻力、进行精密轨道确定与预报的关键输入. 集成此模式后, “卫星大脑”中的轨道控制子系统可实时获取或预报全球密度变化, 从而自主优化轨道保持策略的时机与燃料消耗, 并对长期任务寿命及空间碎片碰撞风险进行预估, 实现从被动摄动补偿到主动环境自适应规划的跨越.

(2) 增强通信导航性能. 精确的全球 TEC 分布 (见图 2) 为星上通信与导航系统提供了关键的环境态势信息. 在此基础上, 星地/星间通信可动态优化链路; 星载高精度 GNSS 接收机可利用视线方向延迟校正量, 显著减小电离层误差, 提升单星自主实时定轨与时间同步的精度, 减少对地面系统的依赖.

本次改造中构建的标准化外部数据接口, 为接收实时太阳、地磁驱动数据奠定了基础, 实现了从离线模拟到在线数据驱动服务的关键环节.

为进一步验证改造后模式的模拟能力, 这里还将其输出结果与 MSIS 经验模型、TIEGCM 及 WACCM-X 等国际主流模式进行了简要对比. 结果表明, 改造后模式对热层中性密度的模拟结果略好于 MSIS 模型; 对电离层的模拟结果与 TIEGCM, WACCM-X 等模式相当. 这说明改造后模式在保持物理合理性的同时, 其模拟能力与国际主流模式处于同一水平.

4 结论

针对星载智能平台的应用需求, 对全球电离层–热层耦合模式 GCITEM-IGGCAS 实施了一系列改造. 研究工作未改变其物理内核, 聚焦于解决星上运行稳定性、软硬件系统适配性及计算效能三大工程挑战. 通过运行环境适配与算法加固, 提升了模式的鲁棒性; 通过采用异步长积分技术, 优化了计算资源利用效率; 通过构建实时数据接口, 使模式具备了响应动态空间环境的能力. 结果表明, 改造后的模式能够稳定产出热层中性密度与电离层 TEC 等具有明确工程应用价值的关键电离层、热层物理参量, 且其输出展现出合理的物理结构. 这标志着该模式已从纯粹的科研模拟工具, 初步转型为可用于支持智能卫星自主决策的环境感知候选模块, 为“天感天算”能力的实现提供了模型基础, 为复杂空间环境物理模型的星上工程化应用探索了一条可行路径.

医学伦理 研究不涉及人体或动物实验.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

[1] HUANG Jin, CHANG Liang, DONG Baiyang, *et al*. Development on space environment and its dynamic and thermal problems of ultra-LEO satellites[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(4): 711-723 (黄劲, 常亮, 董佰扬, 等. 超低轨卫星的空间环境特性及其力学与热学关键问题研究进展 [J]. 空间科学学报, 2023, **43**(4): 711-723)

[2] BERGER T E, DOMINIQUE M, LUCAS G, *et al*. The thermosphere is a drag: the 2022 Starlink incident and the threat of geomagnetic storms to low Earth orbit space operations[J]. *Space Weather*, 2023, **21**(3): e2022SW003330

[3] BLANCHFIELD E J, CARTER B A, CURRIE J L, *et al*. Thermospheric density disturbances during the 2015 St. Patrick's Day geomagnetic storm: model-observation comparisons and analysis of intense polar density spikes[J]. *Space Weather*, 2025, **23**(10): e2025SW004472

[4] ZHANG Y L, DANDENAULT P B, PAXTON L J, *et al*. Variability in the thermospheric neutral mass density: a multiple model comparison[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2025, **277**: 106630

[5] GUO Y, ZHANG X H, GUO F, *et al*. Performance analysis of NRLMSIS 2.1 thermospheric mass density model using GRACE-A and SWARM-C observations[J]. *Advances in Space Research*, 2024, **74**(5): 2475-2491

[6] FANG T W, KUBARYK A, GOLDSTEIN D, *et al*. Space weather environment during the SpaceX starlink satellite loss in February 2022[J]. *Space Weather*, 2022, **20**(11): e2022SW003193

[7] 魏奉思. 率先打造“数字空间”, 让未来走进现实 [N/OL]. 中国科学报, 2025-01-01[2025-12-24]. https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2024/12/536454.shtm

[8] 朱汉斌, 刘肖勇. 魏奉思院士: 卫星不能只有“眼睛”没有“脑子”[N/OL]. 中国科学报, 2025-11-27 [2025-12-24]. https://paper.sciencenet.cn/htmlnews/2025/11/555780.shtm

[9] RICHMOND A D, RIDLEY E C, ROBLE R G. A thermosphere/ionosphere general circulation model with coupled electrodynamics[J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, **19**(6): 601-604

[10] FULLER-ROWELL T J, REES D, QUEGAN S, *et al*. Interactions between neutral thermospheric composition and the polar ionosphere using a coupled ionosphere-thermosphere model[J]. *Journal of Geophysical Research: Space*

Physics, 1987, **92**(A7): 7744-7748

[11] RIDLEY A J, DENG Y, TÓTH G. The global ionosphere-thermosphere model[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2006, **68**(8): 839-864

[12] GAO Ming, XIAO Zuo. A physical model of ionosphere for low latitudes and its' applications in discussions of F_1 valley formation[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 1992, **12**(4): 287-297 (高铭, 肖佐. 一种电离层物理模型及其在 F_1 谷区形成讨论中的应用 [J]. 空间科学学报, 1992, **12**(4): 287-297)

[13] WANG Jingsong, XIAO Zuo. Time-dependent ionosphere model in meridian plane and its boundary conditions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1999, **42**(1): 18-29 (王劲松, 肖佐. 子午面内时变电离层模型及其边界条件 [J]. 地球物理学报, 1999, **42**(1): 18-29)

[14] XIAO Z, WANG J S. Thermospheric circulation model in meridian plane (I)-storm time variations in thermal status and circulation[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2000, **43**(6): 577-585

[15] LEI J H, LIU L B, WAN W X, *et al*. Model results for the ionospheric lower transition height over mid-latitude[J]. *Annales Geophysicae*, 2004, **22**(6): 2037-2045

[16] LEI J H, LIU L B, LUAN X L, *et al*. Model study on neutral winds in the ionospheric F-region and comparison with the equivalent winds derived from the Wuhan ionosonde data[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2003, **14**(1): 1-12

[17] YUE X A, WAN W X, LIU L B, *et al*. Development of a middle and low latitude theoretical ionospheric model and an observation system data assimilation experiment[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(1): 94-101

[18] REN Zhipeng. Upper atmosphere modeling: from earth to planet[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, **65**(14): 1320-1335 (任志鹏. 高层大气建模: 从地球到行星 [J]. 科学通报, 2020, **65**(14): 1320-1335)

[19] REN Z P, WAN W X, LIU L B. GCITEM-IGGCAS: a new global coupled ionosphere-thermosphere-electrodynamics model[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2009, **71**(17/18): 2064-2076

[20] REN Z P, WAN W X, WEI Y, *et al*. A theoretical model for mid- and low-latitude ionospheric electric fields in realistic geomagnetic fields[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(24): 3883-3890

[21] WEIMER D R. A flexible, IMF dependent model of high-latitude electric potentials having "space weather" applications[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, **23**(18): 2549-2552

[22] RICHARDS P G, FENNELLY J A, TORR D G. EUVAC: a solar EUV flux model for aeronomic calculations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1994, **99**(A5): 8981-8992

[23] WASHINGTON W M, WILLIAMSON D L. A description of the NCAR global circulation models[M]//CHANG J. General Circulation Models of the Atmosphere. New York: Academic Press, 1977: 111-172

作者简介



任志鹏（通信作者） 男, 1982年10月出生于吉林省磐石市, 现为中国科学院地质与地球物理研究所研究员, 博士生导师, 主要研究方向为地球/行星电离层–中高层大气模式化等.

E-mail: zpren@mail.iggcas.ac.cn