

ZEREN ZHIMA, HUANG Jianping, YANG Yanyan, YAN Rui, LIN Jian, ZHANG Zhenxia, CHU Wei, LIU Dapeng, YANG DeHe, XU Song, LU Hengxin, WANG Jie, HUANG He, HU Yunpeng, TAN Qiao, LI Wenjing, ZHOU Na. High-precision In-orbit Calibration Technology for the CSES-01 Geophysical-field-detection Satellite (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1–17. CSTR:32142.14.cjss.2026–0023. DOI:10.11728/cjss2026.05.2026–0023

张衡一号地球物理场探测卫星高精度 在轨定标技术*

泽仁志玛 黄建平 杨艳艳 颜蕊
林剑 张振霞 楚伟 刘大鹏 杨德贺
许嵩 鲁恒新 王婕 黄河 胡云鹏
谭巧 李文静 周娜

(应急管理部国家自然灾害防治研究院 北京 100085)

摘要 聚焦张衡一号电磁监测试验卫星 (01 星)4 大类 8 种载荷的数据定标难题, 构建了电磁卫星数据全链路在轨定标技术体系. 该体系纵向实现了各载荷原始电信号—物理量—数据的逐级在轨定标, 横向发展了载荷间、星间、星地、模型与实测数据之间的多维交叉校验方法. 经过在轨定标优化, 张衡一号 01 星 (CSES-01) 数据指标满足: 电磁场频率分辨率为 0.45 Hz、高能粒子通量 0.01 MeV 及投掷角分辨率 5°; 磁场精度优于 1 nT、等离子体相对精度优于 10%; 基于掩星接收机观测数据估算 GPS 卫星仪器偏差精度 0.8 ns. 该在轨定标技术体系形成了电磁卫星定标领域的自主技术方案, 已成功应用于张衡一号 01 星常规数据生产, 并驱动了张衡一号 02 星 (CSES-02) 工程改进, 提升了卫星整体观测性能, 为中国在该领域实现从技术追赶向并跑与引领的跨越奠定了关键技术基础.

关键词 张衡一号, 电磁卫星, 数据处理, 在轨定标技术

中图分类号 P353

High-precision In-orbit Calibration Technology for the CSES-01 Geophysical-field-detection Satellite

ZEREN ZHIMA HUANG Jianping YANG Yanyan YAN Rui
LIN Jian ZHANG Zhenxia CHU Wei LIU Dapeng YANG DeHe
XU Song LU Hengxin WANG Jie HUANG He HU Yunpeng
TAN Qiao LI Wenjing ZHOU Na

* 民用航天技术预先研究项目 (D040203), 国家重点研发计划项目 (2025YFE0218000), 卫星服务平台系统建设项目 (255304210) 和子午工程二期项目共同资助

2026-01-28 收到原稿, 2026-06-28 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/>)

(National Institution of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of the
People's Republic of China, Beijing 100085)

Abstract This study focuses on the data calibration challenges of eight types of payloads in four major categories (electromagnetic field, in-situ plasma, energetic particles, and ionospheric structure) carried by the China Seismo-Electromagnetic Satellite (CSES-01, also known as Zhangheng-1). The in-orbit full-chain calibration system for electromagnetic satellite data has been established. Vertically, this system achieves precise end-to-end validation from “raw signals to physical quantities and then to data products” for each payload. Horizontally, it conducts multidimensional cross-validation among payloads, satellites, and ground-based observations, as well as between models and measurements. Overall, the validated data from CSES-01 have reached an internationally advanced level, with some indicators leading globally. The frequency resolution of electromagnetic fields (0.45 Hz), as well as the flux (0.01 MeV) and pitch angle (5°) resolution of high-energy particles, outperform those of DEMETER and POES; the magnetic field accuracy (better than 1 nT) and plasma relative accuracy (better than 10%) are comparable to those of the Swarm satellites; the instrument bias accuracy of the GNSS occultation receiver is comparable to that of COSMIC. The magnetic field data have become an important data source for international models such as IGRF and CHAOS-8. This on-orbit validation technology system establishes a proprietary technical framework in the field of electromagnetic satellites, and has been successfully applied to the data production of the CSES-01 satellite and has driven engineering improvements for the CSES-02 satellite, significantly enhancing satellite observational performance. The validated data products have been applied to earthquake monitoring and space weather research, laying a key technological foundation for China's transition from “catching up” to “keeping pace” and even “leading” in related technological domains.

Key words CSES-01, Electromagnetic satellite, Data processing, In-orbit calibration technology

0 引言

地球物理场是维系地球宜居环境的本底物理系统, 地球物理场高精度探测能力, 已成为事关国家主权、公共安全与可持续发展的重要战略资源。自 20 世纪中叶以来, 西方发达国家逐步构建起以电磁卫星为代表的地球物理场空间观测体系, 实现了从单星探测到多星组网、从单一磁场测量到多物理场协同观测的技术跨越。1964 年阿拉斯加地震期间, 前苏联 Interkosmos 系列电磁卫星首次记录了震区上空的电磁辐射异常^[1], 揭示了电磁卫星在自然灾害监测中的潜在应用价值。2004 年, 法国成功发射电磁卫星 DEMETER^[2], 其超过 6 年的在轨运行推动了地震、火山等灾害电磁前兆监测技术的持续发展。

进入 21 世纪, 中国将地球物理场天基观测体系建设列为国家重要战略任务, 先后于 2018 年 2 月与 2025 年 6 月, 发射张衡一号 01 星 (CSES-01, 电磁监测试验卫星) 及张衡一号 02 星 (CSES-02, 首颗地球

物理场业务星), 初步建成服务于地震等重大灾害监测、国土资源勘查、空间环境及通信导航安全的天基观测平台。张衡一号具备空间电磁场、等离子体、电离层结构与高能粒子等多要素一体化探测能力, 有效弥补了地面观测的时空局限性, 标志着中国步入地球物理场全球立体观测的新阶段。

现阶段张衡一号卫星 (CSES) 面临的核心挑战在于: 如何从复杂动态的空间电磁环境中, 有效提取微弱、非线性、跨圈层的地震等灾害前兆信号, 并实现其可溯源、可比对、可复现的解析。因此, 开展全方位的卫星在轨数据定标, 确保科学数据的可靠性与准确性, 是自然灾害风险监测预警科学研究和业务化应用的根本前提。

卫星数据定标指通过标准化算法与流程, 将星载传感器输出的原始电信号转换为具有明确物理含义与准确量纲的科学数据的过程。未经定标的数据仅为难以直接使用的数字信号, 定标后的数据方可成为支持定量分析与实际应用的物理信息。在轨定标能有效

消除传感器响应特性、仪器性能漂移及空间环境干扰等引入的系统误差, 是所有定量遥感与应用的基础。

目前, 光学、微波等成像遥感卫星的数据定标已形成较为成熟的技术体系, 主要包括辐射定标与几何定标。辐射定标用于建立传感器输出与入瞳辐射亮度之间的定量关系, 涵盖绝对定标 (借助星上定标源)、替代定标 (基于地面定标场) 及交叉定标 (以已定标传感器为参考)。几何定标则依赖地面控制点或高精度星敏/GPS 数据, 对相机几何模型进行校准。

然而对于张衡一号这类非成像地球物理场探测卫星, 在轨定标面临更为严峻的挑战: 其一, 观测对象并非静态地物, 而是随时空连续演变的动态物理场; 其二, 缺乏类似地面定标场的稳定绝对参考源, 亦无固定控制点可供几何校正。因此, 传统成像遥感中基于“单点—单手段”的标校方法难以直接适用。该特性决定了张衡一号的在轨定标必须寻求创新: 在纵向上, 实现载荷自身从原始电信号到科学数据的逐级精准定标; 在横向上, 开展载荷间、星间、星地、实测与模型之间的交叉验证与协同标定。唯有如此, 才能确

保产出高质量、可信赖的科学数据, 避免因系统性偏差或数据质量问题导致科学误判与决策失误, 保障相关研究与应用的正确开展。

1 技术路线

张衡一号 01 星搭载了高精度电磁场、等离子体及高能粒子类探测载荷, 各载荷及其对应的探测物理量详见表 1。

由于卫星载荷构型复杂, 平台、载荷与空间环境之间存在耦合效应, 观测扰动来源多样且具有不确定性, 因此必须开展多载荷、多平台的协同交叉验证。同时, 空间电磁环境的复杂性及载荷元器件在轨老化等因素, 使在轨定标成为贯穿卫星全生命周期的关键任务。目前, 国际上尚无统一的电磁卫星在轨定标方法标准, 不同载荷的处理方法各异, 且与卫星平台设计、载荷配置等密切相关。因此, 本研究在纵向上实现了各载荷从原始电信号到物理量再到数据的全链路定标; 在横向上借助强磁暴、闪电、人工信号等事件, 开展了载荷间、星间、卫星与地基、实测与模型之

表 1 张衡一号卫星科学载荷及探测物理量分类表

Table 1 Classification of scientific payloads and detected physical parameters of the CSES-01

类别	物理量名称	科学载荷
电磁类	地磁场矢量(北向分量 B_n , 东向分量 B_e , 地面向量 B_c), 标量(F), 频段: DC-15 Hz	高精度磁强计(High Precision Magnetometer, HPM) ^[3-5] , 包括两个磁通门磁力仪(Fluxgate Magnetometer, FGM) 和一个光泵磁力仪(Coupled Dark State Magnetometer, CDSM)
	感应磁场波形和功率谱(0 Hz~25 kHz), 分别为ULF, ELF, VLF三个频段	感应式磁力仪(Search-Coil Magnetometer, SCM) ^[6]
	空间电场波形和功率谱(DC-3.5 MHz), 分别为ULF, ELF, VLF, HF四个频段	电场探测器(Electric Field Detector, EFD) ^[7]
原位等离子体类	电子密度(N_e)/温度(T_e)、悬浮电位(V_f)/等离子体电位(V_p)	朗缪尔探针(Langmuir Probe, LAP) ^[8,9]
	离子密度($H^+/\text{He}^+/O^+$), 离子温度, 离子漂移速度(V_x, V_y, V_z)	等离子体分析仪(Plasma Analyzer Package, PAP) ^[8,10]
高能粒子类	粒子通量, 能谱, 投掷角等信息, 具体能段如下: HEPP-L: 电子0.1~3 MeV, 质子 2~20 MeV HEPP-H: 电子2.0~50 MeV, 质子 15~200 MeV HEPP-X: 太阳X射线 1.0~20 keV HEPD: 电子3~100 MeV, 质子30~200 MeV	高能粒子探测器(High Energy Particle Package, HEPP) ^[11,12] 、意大利高能粒子探测器(High-Energy Particle Detector, HEPD) ^[13]
电离层结构类	电子密度总含量(TEC)、电离层电子密度剖面(EDP), F_2 层峰值高度($h_m F_2$), F_2 层峰值电子密度($N_m F_2$)	GNSS掩星接收机(GNSS Occultation Receiver, GOR) ^[14-16]
	绝对TEC、电离层闪烁指数、电子密度剖面	三频信标机(Tri Band Beacon, TBB) ^[17,18]

间的多维交叉校验,以全面评估科学数据质量.技术路线如图1所示.

1.1 载荷自身在轨定标 (纵向)

单载荷在轨定标侧重于载荷自身及其工作环境下的数据标定与校正,核心内容如下.

电信号至物理量转换.包括传递函数校正、反演曲线拟合、单粒子事件识别与剔除、电子密度剖面校正等,确保原始电压信号向物理量的准确转换.

矢量数据坐标系转换.针对电磁场、等离子体漂移速度、高能粒子投掷角等矢量观测,开展从探头坐标系到卫星本体坐标系,再依次转换至地心惯性坐标系、地心地固坐标系及地磁坐标系,确保观测的一致性与物理意义的明确性.

扰动识别与抑制.识别并校正各类扰动信号,包括载荷自身固有单频干扰、同平台其他载荷带来的电磁耦合干扰,以及卫星平台状态变化引起的背景漂移等,从而提升数据的纯净度与稳定性.

1.2 载荷数据在轨校验 (横向)

鉴于非成像类卫星难以实现同一时间、同一位置的重复观测,这里利用已知信号(包括磁暴、闪电、强震等自然事件以及甚低频发射站等人工源信号)开展多维度校验,系统评估数据质量.具体包括以下4种校验.

载荷-载荷交叉校验:利用同一卫星上不同载荷对同一物理现象的观测进行对比,检验数据一致性.

卫星-卫星交叉校验:联合国内外其他卫星同类载荷的观测数据,开展跨平台数据互校.

卫星-地基交叉校验:与地面台站观测的相同物

理参量进行对比,实现天基与地基观测的相互验证.

实测-模型交叉校验:将卫星实测数据与成熟的物理模型进行对比,评估物理量合理性.

2 电磁场类数据在轨定标技术

电磁场类数据主要来自高精度磁强计(HPM)、感应式磁力仪(SCM)和电场探测仪(EFD),覆盖从静态到高频的电磁场信息(见表1).其定标主要包括地磁场与变化电磁场两方面.

地磁场数据定标的核心在于磁通门磁力仪探测的矢量磁场,主要实现正交校正与坐标转换^[19,20].由于制造工艺的限制,磁通门的三个分量轴通常并非严格正交,因此需利用同平台探测的标量磁场进行在轨正交校正.校正后,由矢量磁场计算的总场与标量磁强计测量值之间的残差,是评估定标精度的关键指标.国际同类卫星(例如CHAMP、Swarm)经校正后,磁场测量精度已达到1 nT以内^[19].张衡一号在轨定标前磁场测量精度约为几十 nT,需开展在轨定标以提升其磁场测量精度.

此外,矢量磁场在轨定标还需解决从探头坐标系到卫星本体坐标系的转换问题,即欧拉角的精确求解.目前主要有两种方法:一是以现有全球地磁场模型(例如IGRF, CHAOS等)为基准进行直接计算^[5],该方法简便,但需引入外部模型;二是将欧拉角作为待求解参数,嵌入全球地磁场建模过程中进行一体化反演^[20,21],该方法具有较好的自洽性,但计算较为复杂.

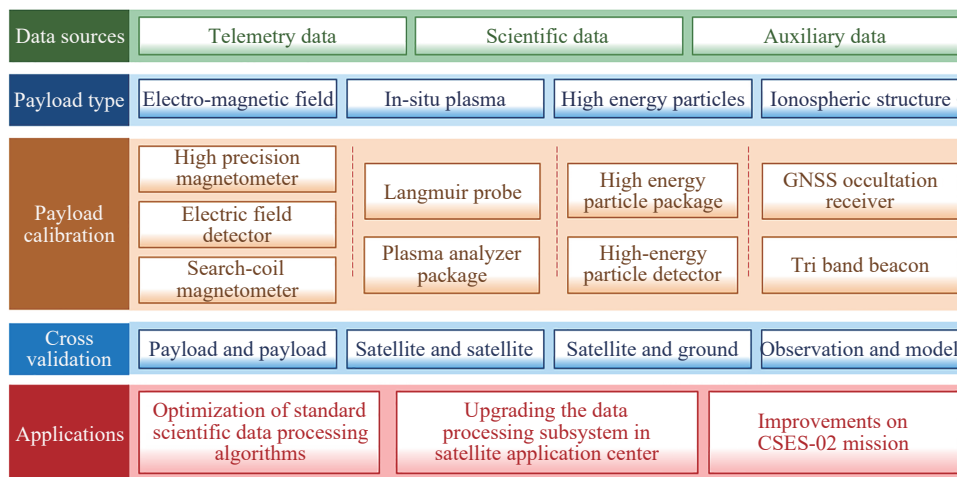


图1 张衡一号卫星电磁卫星数据在轨定标技术流程

Fig. 1 Flowchart of the on-orbit data validation process for the CSES-01

变化电磁场定标方面, 确保电场与磁场数据时间标识高精度对齐同步, 是实现有效定标的核心挑战之一. 法国 DEMETER 卫星由于共用一个信号采集系统, 能够相对容易地实现电磁场测量的时间标识一致性^[2]. 而张衡一号卫星平台上, EFD 与 SCM 分属独立的电子学采样系统, 二者之间存在系统时差^[22]. 若不能对该时差进行精确测定与校准, 将直接影响电磁波传播分析等研究的可信度.

此外, 对电场与磁场观测数据进行物理一致性评估, 通常选取天然或人工产生的典型电磁波观测信号(例如磁暴期间的 ELF/VLF 频段自然波动信号、地面 VLF 台站信号等)作为验证源. 通过分析上述多源观测信号在时域与频域上的相关性, 可有效检验并提升数据质量.

2.1 电磁类载荷自身定标

2.1.1 HPM 数据在轨定标

针对 HPM 地磁场矢量数据, 分别采用正交校正、坐标转换、干扰识别与修正等方法, 构建了一套在轨定标技术流程, 将矢量磁场数据精度从定标前的几十 nT 提升至优于 1 nT, 矢量数据在轨定标主要包括正交校正、欧拉角计算与干扰识别与修正三个关键步骤^[20].

正交校正旨在修正矢量探头三轴之间的非正交性. 以同平台 CDSM 的高精度标量磁场数据为基准, 建立 FGM 探头由非正交坐标系到正交坐标系的转换关系, 采用迭代加权最小二乘反演算法求解校正参数. 校正后, 由 HPM 矢量场计算的总场与 CDSM 标量探头实测总场之间的残差显著降低, 精度达到 1 nT 以内^[20].

欧拉角计算用于实现从 FGM 正交坐标系到卫星本体坐标系的精确转换. 将欧拉角作为全球地磁场建模过程中的一组参数进行求解, 确保算法的自洽性. 结果表明, 欧拉角在轨求解结果稳定, 采用 10 天更新周期与原有每日更新并分日夜侧计算的效果相当, 显著减少了日常定标的计算量. 对比经欧拉角定标后的矢量数据与 CHAOS 模型的残差可见, 东向分量的纬度效应有所改善.

干扰识别与修正有效识别了影响数据质量的 3 类主要磁干扰——磁力矩器工作、TBB 开机工作以及卫星出地影干扰^[20]. 其中后两者主要影响矢量数据, TBB 干扰集中在中国区域上空, 干扰幅度达几至十几 nT. 对此, 通过筛选受干扰数据段进行参数拟

合, 将受干扰数据的精度恢复至 1 nT 以内, 与无干扰数据质量一致(见图 2). 此外, 为获取高质量磁测数据, 支撑地磁场模型构建等工作, 自 2022 年 1 月 13 日起对 TBB 采取夜侧过境关机措施, 彻底消除了夜侧磁干扰. 所有干扰类型均在 2 级数据中增加了相应质量标签, 便于用户识别与使用.

2.1.2 EFD 数据在轨定标

EFD 采用主动式双探头电场测量方法, 探针安装在 4.5 m 伸杆末端, 处于空间等离子体环境中, 耦合感应相对于周围等离子体环境的电势. 通过测量一对探针之间的相对电势差, 除以间距即可获得沿连线方向的空间电场分量^[7].

探头传递特性与单频干扰评估. 量化分析了 4 个探测球 (A, B, C, D) 的电势波动对 E_x , E_y , E_z 三分量的差异化影响. 定标发现: 对 E_x 分量影响较大的是探头 B 和 C, 二者作用相反, 影响较小的是探头 A 和 D; 对 E_y 分量影响较大的是探头 A(与探头 A 位于-Y 方向有关), 影响最小的是探头 C; 对 E_z 分量, 4 个探头的影响程度基本一致, 其中探头 A 和 D 为负向作用, 探头 B 和 C 为正向作用.

电场功率谱特征分析. 电场功率谱图中出现显著的水平线或水平条状特征. 定标发现, 部分水平信号来源已知, 包括人工加热源信号、长波通信信号^[23]、舒曼谐振信号^[24]等, 但仍有较多信号来源尚未有效确认^[25,26]. 这些水平信号的空间位置不固定, 频率升降变化复杂, 反映了空间电磁信息的复杂性.

数据阶跃现象识别. 针对 EFD 在 ULF/ELF 频段的数据阶跃现象, 利用遗传神经网络模型, 对电场波形数据中的直下式与渐变式阶跃现象进行了自动识别与统计分析^[27]. 为探究阶跃现象是否由尾迹效应引起, 开展了卫星偏航机动试验(旋转 90°与 180°), 对比不同姿态下各探头的阶跃特征, 发现并无显著差异, 从而排除了尾迹效应(见图 3)的主要影响^[28], 证实了载荷设计的鲁棒性.

2.1.3 SCM 数据在轨定标

针对 SCM 的频谱和波形数据, 开展了以下工作. 一是功率谱处理优化. 针对功率谱数据处理流程, 调试了不同类型窗函数, 最终选定汉宁窗函数以有效压制频谱泄漏^[29], 突出了原本被淹没的 28.5 Hz 卫星动量轮基频干扰及其各次倍频分量, 有效提升了低频段有效信号(例如 28 Hz 附近信号)的分辨率与识别度.

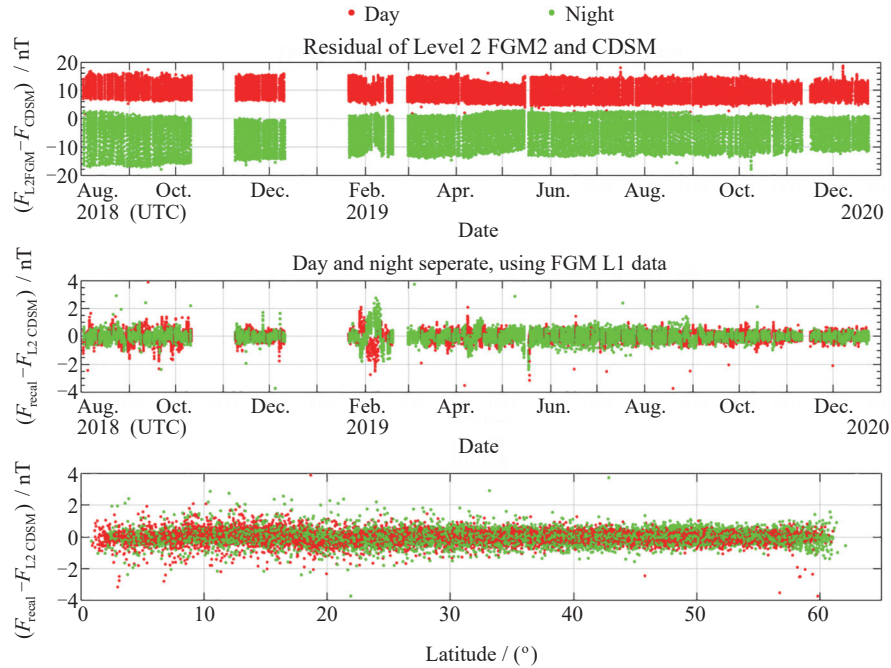


图2 张衡一号卫星 (CSES-01) 三频信标磁干扰修正前后磁场数据对比. (a)(b) 三频信标磁干扰修正前和后 FGM 计算总场与 CDSM 测量总场残差随时间的变化, (c) 三频信标磁干扰修正后 FGM 计算总场与 CDSM 测量总场残差随纬度的变化

Fig. 2 Comparison of magnetic data from CSES-01 satellite before and after correction for TBB magnetic interference. Time series of residuals between the total magnetic field calculated by FGM and that measured by CDSM, before (a) and after (b) correction for TBB magnetic interference, respectively, (c) latitudinal variation of residuals between the total magnetic field calculated by FGM and that measured by CDSM after correction for TBB magnetic interference

二是干扰识别与抑制. 系统识别了 SCM 数据中的两类主要干扰. 一是以 28.5 Hz 为基频, 包含其 2~50 倍频分量的动量轮谐波干扰; 二是卫星经过磁赤道等地磁场特殊区域时, 磁力矩器工作产生的低频扰动 (1.5, 3.7, 10.7, 12.7 Hz). 针对动量轮造成的基频及谐波干扰, 引入霍夫变换算法, 在全轨道时频图中自动检测水平状干扰条纹, 并进行自适应滤波压制, 电磁场信号显著度得到提升. 三是时间标记校正. 针对 SCM 低频段的时间标记问题, 统计分析了时间间隔与出现位置, 发现时间间隔从 78~83 ms 不等, 且大部分出现位置与卫星校时时时刻对应. 梳理感应式磁力仪硬件内部时间管理和 0 级数据处理过程, 明确了从 GPS 时间 (准绝对时间) 到数据打包时间戳的总误差小于 1.641 ms.

2.2 电磁类数据交叉校验

2.2.1 载荷-载荷

地磁场数据交叉校验通过两个磁通门磁力仪

(FGM1 和 FGM2) 与 CDSM 的对比开展. 结果显示, CDSM 标量磁场数据与 FGM1, FGM2 矢量数据计算的总场差值在 1 nT 以内 (TBB 干扰除外). FGM1 与 FGM2 探头间的差异主要源于 TBB 干扰的空间不均匀性及伸杆变形差异^[20]. 此外, 在 ULF 频段, 联合开展了 FGM, EFD 和 SCM 在磁力矩器工作期间电磁场扰动的响应研究, 验证了三个载荷的一致性^[22].

利用电磁场数据发现了 SCM 与 EFD 因独立采样系统导致的系统时间差, 并发展了两类同步方法. 一是线性相位法, 其适用于短数据片段 (例如 0.1 s), 可实现 0.1 s 的同步精度, 并能消除 EFD 因模式切换产生的 240 s 周期时间偏差^[22]; 二是针对大量 VLF 详查模式数据, 提出粗匹配+精匹配 (STA/LTA 特征函数) 的两步策略, 有效实现波形对齐, 时间差稳定在 0.5 s 以内^[29]. 2019—2021 年的 3 年观测数据统计^[29]表明, EFD 与 SCM 之间的系统时间差保持稳定, 验证了两个载荷采样系统具有良好的长期稳定性.

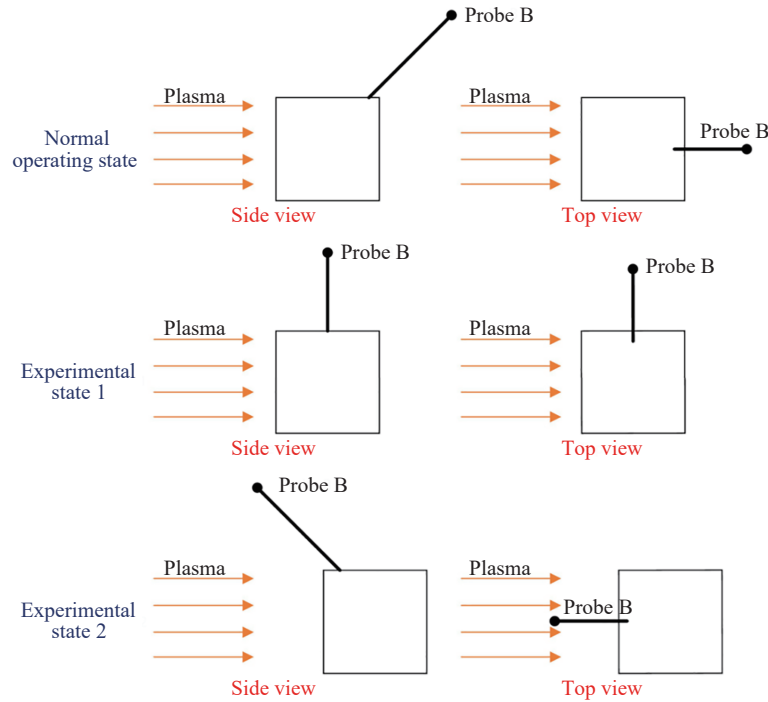

 图 3 尾迹效应与电场观测的在轨试验^[28]

 Fig. 3 On-orbit experiment of wake effect and electric field observation^[28]

基于空间典型电磁波动事件, 采用奇异值分解 (SVD) 波矢量分析等方法, 验证了数据在揭示波物理特性方面的能力. 研究表明, HPM, EFD 和 SCM 在 ULF/ELF/VLF 频段记录了丰富的电磁波动现象^[25], 例如具备清晰上升调的准周期辐射^[30], 以及跨越南北半球的大尺度磁力线辐射^[31]等.

2.2.2 卫星-卫星

与 Swarm 卫星磁测对比显示, 二者矢量数据高度一致, 但张衡一号卫星 (CSES-01) 存在纬度效应差异, 这与张衡一号缺少光学平台引起的伸杆变形有关. 在 2018 年强磁暴事件的场向电流观测中, 两颗卫星的场向电流观测结果完全一致, 验证了矢量数据在空间物理现象探测中的有效性^[20].

与 DEMETER 卫星对比显示, 强磁暴期间 ELF/VLF 电磁场强度时空变化特征, 包括波动增强的 L 壳、日侧夜侧差异及与等离子体层顶的关联等, 均与 DEMETER 历史观测高度一致, 从现象学层面验证了张衡一号电磁场观测数据的可靠性与观测性能^[32,33]. 进一步引入深度学习技术^[34], 构建了闪电哨声波与准周期 (QP) 辐射的自动识别框架. 两类现象的全球分布特征——QP 辐射主要出现在磁纬 30°以上, 闪电哨声波源区与全球雷暴活动区吻合, 不仅实

现了对特定波动现象的精准检出, 更从多模态观测一致性角度, 为数据质量提供了可物理阐释的交叉验证判据.

2.2.3 卫星-地基

地磁场数据采用夜间数据研发空间天气 Dst 指数, 结果与世界数据中心 (WDC) 地磁台站数据计算的 Dst 指数及 Swarm 磁测数据计算的 Dst 结果趋势和量值均高度吻合. 此外, 2018 年 8 月 25 日强磁暴期间, 张衡一号观测到西向赤道电集流^[20], 该现象得到卫星轨道附近地面台站观测数据的证实, 充分体现了星地磁场观测的一致性.

电磁场数据以地基甚低频发射站 NWC 的 VLF 信号为基准源, 分析了电磁场功率谱最强点的时空稳定性^[23]. 结果表明, 卫星接收 VLF 信号最强点相对于地面台站位置的经纬度偏移总体稳定, 夜侧偏移通常在 $\pm 2^\circ$ 以内, 日侧变化稍大. 该结果表明 EFD/SCM 载荷对已知人工源信号的记录长期保持稳定.

3 原位等离子体类数据在轨定标技术

原位等离子体数据主要由朗缪尔探针 (LAP) 和

等离子体分析仪 (PAP) 获取, 主要观测参数包括电子/离子的密度和温度以及离子漂移速度等关键物理量. 发射前的实验室标定与测试表明, LAP 和 PAP 性能指标已达到国际同类载荷的水平. 张衡一号卫星是中国首次将等离子体探测载荷用于星载平台, 具有重要的里程碑意义^[8].

由于空间等离子体环境复杂多变, 且 LAP 的探测存在一定固有局限, 探测传感器不可避免地会受到多种因素干扰, 包括传感器表面污染、材料特性在空间环境下的退化、电子学系统杂散电容的耦合效应, 以及卫星与周围等离子体相互作用导致的空间电位浮动等^[35,36]. 这些因素可能导致在轨数据出现未预见的系统性偏差或异常.

国际上通常将卫星原位观测数据与地基非相干散射雷达测量、地基 GPS-TEC 数据^[37]、国际参考电离层 (IRI) 等经验模型, 以及其他卫星的同类观测进行交叉比对, 通过评估数据在反映全球电离层结构上的合理性、在特定区域或事件中变化的一致性, 以及对同一物理现象的响应特征, 来综合判断数据质量, 进而确定经验性校正系数或算法, 对原始数据进行优化^[38].

DEMETER, DMSP, Swarm 等卫星均已搭载功能类似的等离子体探测载荷. 然而, 目前公开发表的学术文献大多侧重于显示校正后的数据结果及其衍生的科学发现, 对于如何从观测数据异常现象逐步追溯至具体的载荷硬件、卫星平台干扰或特殊空间环境效应等根本原因, 通常缺乏详细的诊断分析流程与系

统性的方法论. 这一知识空白, 给中国自主建立并完善此类探测载荷在轨定标技术体系带来了现实挑战. 为此, 针对该类载荷观测数据中出现的各类异常扰动现象, 需发展针对性的校正算法, 持续提升等离子体观测数据质量.

3.1 原位等离子体类载荷自身定标

3.1.1 LAP 数据在轨定标

I-V 曲线反演. LAP 科学数据处理算法的核心是 I-V 曲线反演, 为提高反演精度, 针对不同 I-V 曲线首先开展预处理, 提出对平滑曲线采用二次求导^[9]、对波动曲线先平滑再判断的综合策略, 避免 V_p 点误判. 此外, 针对不同数据质量, 灵活选用直线拟合或曲线拟合处理电子饱和区, 最终形成了集成平滑、判断与拟合的自动化 I-V 曲线定标流程, 系统性提升了 LAP 数据的可靠性.

干扰识别与抑制. 系统识别该载荷数据出现的 5 类主要扰动现象, 包括分流干扰、日侧赤道异常扰动、夜侧突降、随机跳点及极区/磁暴事件扰动. 针对不同扰动引起的 I-V 曲线变形特征 (例如电子/离子饱和区波动、迟滞现象), 制定了差异化处理策略 (见图 4), 对已识别的固定干扰添加质量标签, 对随机跳点进行平滑处理, 对自然现象引起的扰动则予以保留.

此外, 定标发现了两种呈现稳定年周期变化的规律性扰动^[39]. 一是夜侧 V_f/V_p 突降, 每年 3—9 月出现于北纬 $40^\circ \sim 65^\circ$ 区域, 明确其与卫星出地影相关, 由光照变化引发卫星电流体系调整所致; 二是日侧赤道 V_f 突起, 集中在磁纬 $-10^\circ \sim 40^\circ$ 区域, 春秋季节最显著,

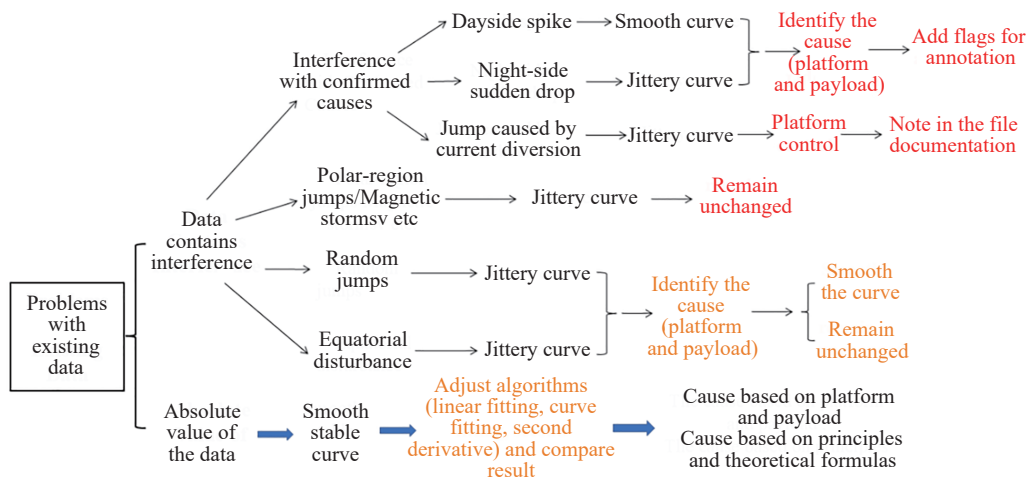


图 4 LAP 数据出现的不同干扰溯源与定标技术

Fig. 4 Technical process for traceability and validation of different interferences in LAP data

该现象由 EFD 伸杆对 LAP 探针的光照遮挡引起. 上述结果揭示了卫星平台材料性能退化引起的电位漂移及载荷间几何遮挡对观测的影响, 为后续卫星设计提供了重要改进依据.

偏压动态调整. 针对卫星平台电位 (V_g) 负向漂移导致 I-V 曲线无法覆盖完整电子饱和区的问题, 提出了动态调整 LAP 偏压扫描范围的解决方案^[40]. 在轨期间共实施 8 次精准调控, 有效恢复了 I-V 曲线的完整性. 调整前后数据对比表明, 校正后的电子密度 (N_e) 和电子温度 (T_e) 的纬度剖面、全球分布结构及长期变化趋势, 均与 Swarm 卫星观测及 IRI-2020 模型高度吻合, 验证了校正措施的有效性.

3.1.2 PAP 数据在轨定标

卫星入轨后, PAP 观测的离子密度出现系统性下降. 经溯源分析, 确认原因为传感器栅网与收集极表面污染. 污染层在空间环境中积聚正电荷, 形成电场, 抑制正离子收集, 导致电流减小. 2019 年起, 污染现象进一步加剧, 直接影响离子密度、温度与漂移速度的反演. 为此, 发展了针对污染数据的校正算法, 恢复原始 I-V 曲线基本形态, 使之可正常用于参数拟合, 在一定程度上有效恢复了受污染影响的观测数据. 经修正后, 观测数据的相对值可清晰反映电离层全球分布特征^[41].

定标过程中也发现了 PAP 原始电流数据受到 10 Hz(升轨) 和 15 Hz(降轨) 低频信号干扰, 导致 I-V 曲线严重畸变. 通过 FFT 分析确定了干扰主频及其全球分布区域, 该区域与离子温度无效数据区高度重合, 采用低通滤波提取 I-V 曲线包络线的方法, 最大程度还原了观测数据的正常形态, 使受影响数据得以恢复, 显著提高了氧离子密度、离子温度等的可用性^[41].

3.2 原位等离子体类数据交叉校验

3.2.1 载荷-载荷

EFD 的 4 个球形传感器安装于 4.5 m 长伸杆末端, 类似于 LAP 传感器在悬浮状态下的工作方式, 测量相对于卫星本体的电位值, 并可推算出直流至 3.5 MHz 频率范围内的电场^[7]. 借助 EFD 传感器测得的电位数据与 LAP 测得的平台电位数据开展联合分析, 有效检验了卫星电位的漂移. 为排除季节性趋势影响, 提取相同季节时段的 EFD 探头电位数据与 LAP 等离子体电位数据进行对比, 二者逐年变化趋

势一致, 为卫星电位漂移现象提供了有力证据^[40].

随着卫星运行, PAP 数据在中低纬地区出现大范围锯齿状波纹干扰. 定标表明, 该干扰源于卫星平台材料性能退化后, LAP 扫描电压 (0.3 Hz/1 Hz) 对 PAP 电学测量产生的串扰加剧. 通过对 PAP 二级数据施加低通滤波, 开发了串扰滤除算法, 在保持数据原始形态特征的基础上, 有效消除锯齿状波纹. 校正后的离子密度、离子温度等参数质量显著改善.

3.2.2 卫星-卫星

与 Swarm 卫星交叉定标表明, LAP 观测的 N_e 和 T_e 全球分布可呈现赤道电离异常 (EIA)、经度波数 (WN3/4)、威德尔海异常 (WSA) 等典型结构, 与 Swarm-B 卫星相对变化一致^[42]. 但二者的 N_e 绝对值差异较大, 主要源于数据处理方法与轨道特征的差异. 联合 Swarm-A/B 及 CHAMP 历史数据, 对比分析了 N_e 与 T_e 的相关性, 证实了 LAP 观测的可靠性. 同时发现 Swarm 卫星的 T_e 数据存在两个异常特征, 这说明仍需针对该数据开展进一步的深度交叉检验^[43].

3.2.3 卫星-地基

与美国 Millstone Hill 非相干散射雷达 (ISR) 的对比校验表明, LAP 观测的 N_e 、 T_e 长期变化趋势与 ISR 观测高度一致, 其数据稳定性甚至优于 ISR, 与本地经验模型 (ISRIM) 结果符合度较好^[42]. 地基甚低频发射站 (例如 NAA, NWC) 上空数据分析结果表明, PAP 可观测到清晰的电离层加热扰动现象. 在发射站沿卫星飞行方位约 100~300 km 范围内, 氧离子密度、离子温度、离子漂移速度均出现同步的加热扰动变化^[41,44].

4 高能粒子数据在轨定标技术

张衡一号卫星高能粒子类数据主要由国产 HEPP 载荷 (高能段 HEPP-H 与低能段 HEPP-L) 及意大利航天局搭载的 HEPD 载荷获取, 包括不同能量范围带电粒子的通量、能谱与投掷角分布^[11-13].

高能粒子探测技术应用历史悠久, 标志性成果如利用盖革计数器首次发现地球辐射带^[45]. 传统探测器受限于时空分辨率与科学目标, 能量及投掷角分辨率相对有限^[46]. 张衡一号采用高、低能段协同工作模式: 低能段 HEPP-L 针对高通量低能粒子, 采用小几何因子设计避免信号饱和; 高能段 HEPP-H 和 HEPD 采

用大几何因子设计,有效捕捉通量较低的高能粒子,确保全能量范围测量的有效性与可靠性。

数据质量评估通常采用国际通用的 AES/AP8 高能粒子模型^[47]。该模型能较好地给出近地空间高能粒子分布的整体形态,特别是南大西洋异常区和高纬度区域^[48]。然而,模型在特定区域的预测精度仍有待提高,尤其在磁暴等极端事件下,模型与实测偏差可达 3~4 个数量级。此外,20 世纪 70 年代发展的 AES/AP8 模型因地球磁场变化而适应性降低^[49]。因此,需结合多源在轨观测与数值模拟进行交叉对比。张衡一号卫星独特的探测器组合也带来特定定标需求:需精确评估 HEPP-H 在高通量区域的粒子误判或堆积效应;确保高、低能段探测器在重叠能量区间的平滑衔接;保证投掷角分布的物理自洽性。

国际上,DEMETER 及 NOVA/POES 系列卫星的探测任务与张衡一号卫星相近。三者均为极轨卫星,但在探测能量范围、轨道高度及投掷角观测能力上存在差异:DEMETER 仅能观测单一方向粒子,POES 配备两个相互垂直的探头,而张衡一号卫星具备 180°范围的投掷角观测能力。该差异性为交叉验证提供了宝贵机会。通过在相近轨道条件下对比同类卫星对同一空间区域的观测结果,可有效检验张衡一号卫星在绝对通量、能谱形态及投掷角分布方面的可靠性,是建立数据可信度的重要途径。

4.1 高能粒子类载荷自身定标

HEPP 载荷包括高能段 HEPP-H 和低能段 HEPP-L 两个探测器,覆盖了宽能段的电子 (0.1~50 MeV) 与质子 (2~200 MeV) 原位探测。在粒子探测中,即使探测器具有较高的粒子鉴别效率,在极端通量环境下(例如太阳质子事件期间或南大西洋异常区),仍可能因计数率过高而产生粒子堆积效应,甚至导致部分高能质子被误判为电子。这种污染会直接影响对辐射带电子加速与损失机制的准确理解。因此,定量评估质子污染水平至关重要。利用 2020 年 11 月底一次太阳质子事件(SPE)作为纯质子样本进行定量评估^[50]。对比 HEPP-L 质子通量与 HEPP-H 电子通量计算得出,平均约 0.022%(约 1/4500)的质子被误判为电子。进一步分析表明,在典型辐射带区域(例如 $L=4$),由此引起的污染电子通量较实际观测电子通量低约一个量级,对绝大多数科学研究(包括电子扰动事件)影响可忽略。该结果量化了探测器

粒子鉴别的可靠性。

4.2 高能粒子数据交叉校验

4.2.1 载荷-载荷

利用 2021 年 10 月强太阳质子事件,对 HEPP-L, HEPP-H 及 HEPD 3 个探测器的质子能谱进行联合分析。通过对观测通量进行本底扣除与效率修正,并使用多种能谱函数(例如指数衰减、幂律等)拟合。结果显示,三个探测器在不同能量区间的观测能谱衔接连续,拟合结果一致,验证了各探测器通量观测的准确性与标度一致性,如图 5 所示。

4.2.2 卫星-卫星

选取 2021 年 10 月与 2020 年 12 月两次太阳质子事件,将 HEPP-H, HEPD 的质子通量与 NOAA/POES 卫星观测的质子通量进行对比。定标结果显示,在 50 MeV 能段,HEPP-H 与 HEPD 的质子通量变化趋势一致,且与 NOAA 卫星通量变化趋势基本吻合。考虑到两颗卫星轨道高度(张衡一号卫星约 507 km, NOAA 约 800 km)及探测器视场差异,通量绝对值的微小差别在合理范围内。在 2.5~6.9 MeV 较低能段,二者通量也保持在同一量级。另外,还对比了 CSES 和 NOAA 对南大西洋异常区高能质子通量演化的观测结果,两颗卫星的观测结果一致性较好^[51]。对比结果进一步验证了张衡一号质子通量观测的可靠性。

4.2.3 卫星-地基

基于全球 10 余个地基甚低频(VLF)人工信号发射站中信号最强的澳大利亚西北部 NWC 站(19.8 kHz)^[52],开展卫星观测与地面信号的联合验证。VLF 信号可穿透大气进入电离层,与辐射带高能电子发生波粒相互作用,通过动量变化与投掷角散射引发粒子扩散,导致电子在特定 L 壳内积累形成通量增强。张衡一号卫星(CSES-01)观测到 NWC 信号引起的电子沉降带分布于 1.4~1.8 之间,其通量、能谱及投掷角特征显著,在 0.1~0.3 MeV 能量范围内呈现清晰的 wisp 结构。该现象与投掷角及动量扩散机制相符,证实了地基 VLF 信号对辐射带电子动态的可观测影响。

4.2.4 实测-模型

为验证 HEPP 数据的可靠性,将其观测结果与 AES/AP8 模型进行系统的对比。结果显示,HEPP 观测的内、外辐射带及槽区空间形态与模型基本一致,

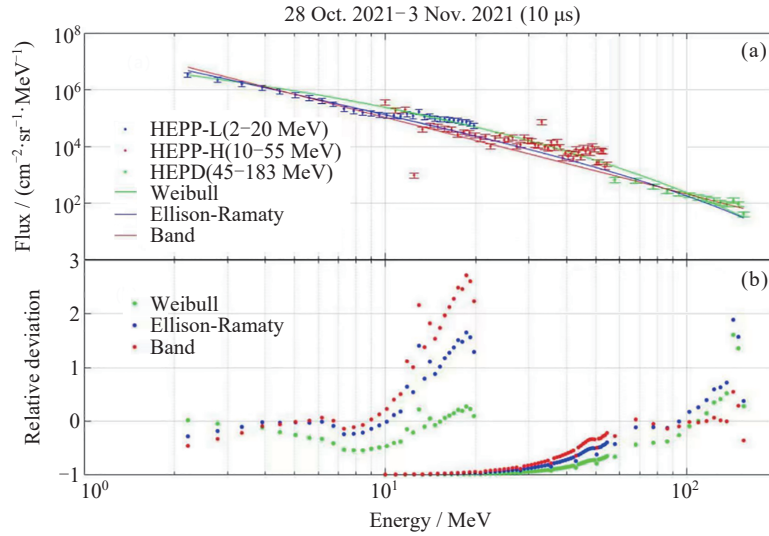


图 5 三个高能粒子探测器的能谱连续性定标. (a) 经修正后总事件积分谱拟合结果, (b) 实测修正通量与不同理论模型在不同能量点的相对偏差分布^[50]

Fig. 5 Energy spectrum continuity validation for the three high-energy particle detectors. (a) Fitting results of the corrected total event integral spectra, (b) relative deviation distributions corresponding to different fitting functions^[50]

通量水平和全球分布吻合良好, 初步验证了数据准确性. 基于卫星轨道与地磁场模型计算的电子赤道投掷角分布显示, 3 个探测器在不同磁壳层的观测范围基本一致, 且集中于低投掷角区及损失锥附近, 验证了投掷角算法的正确性. 对 2019 与 2023 年地磁平静期南大西洋异常区低能电子 (<1 MeV) 背景通量的分析表明, 其空间分布与地磁场极小值区域对应, 4 年间最大相对变化约 1‰ (年均 0.25‰), 证实探测器对微弱长期变化具有灵敏响应, 为研究地磁场演变对辐射环境的影响提供了直接观测依据.

5 电离层结构类数据在轨定标与校验

电离层结构数据主要通过 GOR、TBB (配套的地基 15 站 TBB 接收机网络) 实现, 其科学数据主要包括电离层电子密度剖面、总电子含量 (TEC)、电离层闪烁等.

GOR 接收 GPS/BDS 导航卫星信号穿越电离层时的相位延迟与幅度变化, 获取信号传播路径上的 TEC, 进而反演得到电子密度剖面^[15]. 需说明的是, 传统掩星反演方法基于电子密度球对称分布假设, 与电离层实际存在的纬度、经度、高度和地方时等多维变化不符, 简化了水平方向变化, 导致低纬度地区 (水

平变化更显著) 反演精度受限.

掩星反演的验证通常依赖于电离层垂测仪、非相干散射雷达 (ISR) 等的独立观测数据. 早期 GPS/MET 反演的 $N_m F_2$ 与垂测仪偏差在 20% 以内; COSMIC 反演的 $N_m F_2$ 与垂测仪相关系数达 0.8 以上^[53], 与 ISR 的峰值高度一致性较高^[54]. 反演精度存在区域和高度依赖性: 中纬地区优于低纬地区^[55]; 电离层底部精度较低^[54]; 较高轨道卫星 (例如约 800 km) 优于较低轨道卫星 (例如约 500 km)^[56].

地面三频信标接收机接收卫星 TBB 发射的特定频率信号, 利用差分相位测量值反演卫星至地面路径上的 TEC, 并通过层析成像重构电离层电子密度空间结构. 目前, 利用密集地基观测网对三频信标 TEC 反演结果进行系统性评估的研究相对有限. 通过对比张衡一号卫星三频信标反演结果、国际参考电离层 (IRI) 模型预测值及兰州、重庆、昆明三站的垂测仪实测 $N_m F_2$ 数据, 以此开展交叉验证^[17].

5.1 电离层结构类载荷自身定标

5.1.1 GOR 数据在轨定标

通过载噪比分析确认, GOR 的 GPS L2 信号载噪比均值为 11.15 dB-Hz, 显著低于 L1 及 BDS 信号, 表明该通道观测噪声较大. 历元间三次差分评估显示, GPS 伪距观测值存在异常跳跃现象, 异常占比约 3%; BDS 观测值质量更优, 异常占比仅为 0.6%. 基于

电离层球对称假设, 利用几何映射函数与最小二乘法估算了 GPS 卫星仪器偏差, 校正结果与 CODE 数据对比的外符合精度为 2.56 TECU, 内符合精度为 0.45 TECU, 达到 COSMIC 卫星相当水平.

多路径效应分析发现 GPS P2 观测值在观测弧段初始阶段存在明显的多路径波动, 随观测时间增加趋于稳定, 统计发现 GOR 的 BDS 观测值多路径误差 (MP1: 0.193 m, MP2: 0.125 m) 显著低于其 GPS 观测值 (MP1, 0.692 m 和 MP2, 1.977 m), 也优于 Swarm 卫星的 GPS 观测值.

掩星反演算法通过联合处理掩星侧与非掩星侧的载波相位观测值, 精确估计并剔除卫星轨道高度 (约 500 km) 以上的电离层影响, 以获取更准确的斜向 TEC, 提升电子密度剖面反演精度. 该算法基于信号直线传播假设 (弯曲角通常小于 0.01°), 利用双频载波相位延迟观测值的线性组合求解斜向 TEC. 由于 LEO 卫星处于电离层内部, 直接反演易受高层电离层干扰, 算法在圆轨道及局部球对称假设下, 利用非掩星侧辅助数据校正初始 TEC, 精准剔除轨道高度以上的 TEC 贡献, 最终通过 Abel 积分逆变换反演出电子密度垂直廓线. 数据完整性定标表明, GOR 每日可产生约 600 个掩星事件 (GPS 约 500 个, BDS 约 100 个), 实现全球基本覆盖, 中高纬度事件较多与 GPS/BDS 星座构型有关.

5.1.2 TBB 数据在轨定标

TBB 通过向地面发射三个频段的无线电波, 由地面接收站接收信号. 利用卫星运动与电离层引起的多普勒频移差异, 通过差分方法消除卫星运动分量, 反演得到电离层总电子含量 (TEC). 鉴于 TBB 实际工作中仅双频正常观测^[18], 通过数据仿真验证了三频反演方法的有效性. 在已知卫星与地面站位置及电离层背景信息条件下, 模拟生成含观测噪声的多普勒频移数据, 通过多站法联合解算相位积分常数, 最终获取高精度 TEC. 仿真结果表明, 在观测噪声为 3° 时, 三频反演 TEC 的误差 RMS 在 0.25~0.48 TECU 之间.

选取 2018 年 8 月 26 日强磁暴事件, 分析了 TBB 反演电子密度在磁暴不同阶段的响应特征. 在磁暴主相阶段 (轨道 031170), 北纬 20° — 30° 区域 F2 层电子密度显著增大, 呈现正暴相, 最大增幅约为 50%. 在恢复相初期 (轨道 031180), 中纬度地区电子密度转为显著降低的负扰动, 而低纬度仍维持正暴相特征.

该结果与磁暴期间电离层扰动理论相符, 表明 TBB 具备监测电离层对空间天气事件快速响应的能力.

5.2 电离层结构数据交叉校验

选取同期 COSMIC 卫星掩星数据 (GOX) 进行对比, 如图 6 所示. 2019 年 7—8 月数据显示, GOR 与 GOX 反演的 $N_m F_2$ (峰值电子密度) 全球分布无论在数量级还是空间结构特征上均高度一致^[16]. 二者均清晰描绘出赤道异常、日夜差异等典型电离层现象, 验证了 GOR 数据的可靠性.

5.2.1 卫星—地基

选取子午工程海南富克、武汉左岭、黑龙江漠河三个不同纬度的测高仪数据, 与 GOR 反演结果进行严格时空匹配对比. $N_m F_2$ 对比中, 富克站 (199 个事件)、左岭站 (103 个事件)、漠河站 (323 个事件) 的均方根误差 (RMSE) 分别为 17.1%, 13.8%, 13.2%, 整体相关性良好. $h_m F_2$ 对比中, 三站 RMSE 依次为 12.6%, 8.2%, 6.9%, 吻合度较高. 中高纬度 (漠河) 精度优于中低纬度, 与掩星反演中球对称假设在电离层水平梯度较小区域性能更优的理论预期一致.

针对 TBB 反演的电子密度数据, 利用中国西部 13 个地面站的实际观测数据, 反演得到了台站上空的电离层电子密度剖面. 进一步分析得到的 F2 层峰值电子密度 ($N_m F_2$) 月均值变化, 在 $23^\circ N$, $30^\circ N$, $40^\circ N$ 三个纬度均清晰观测到电离层的冬季异常和半年异常现象, 表明观测数据能有效捕捉电离层季节变化规律^[18].

5.2.2 实测—模型

利用 2018—2020 年共 28 万个 GOR 掩星剖面, 构建了电离层三维电子密度经验模型 CSES_NePrf^[57]. 内部检验表明, 该模型能较好地重现 GOR 观测到的 $N_m F_2$, $h_m F_2$ 等参数的全球分布及时空变化特征 (如经度四波结构、冬季异常等), 两者误差较小. 外部检验显示, CSES_NePrf 模型对第三方 COSMIC-2 卫星掩星观测的再现能力, 与国际广泛使用的 IRI-2016 模型相当, 甚至略优. 这从模型层面证实了张衡一号掩星数据与国际同类观测数据具有高度一致性与可靠性.

6 讨论与结论

围绕张衡一号卫星 (CSES-01) 四大类观测数据

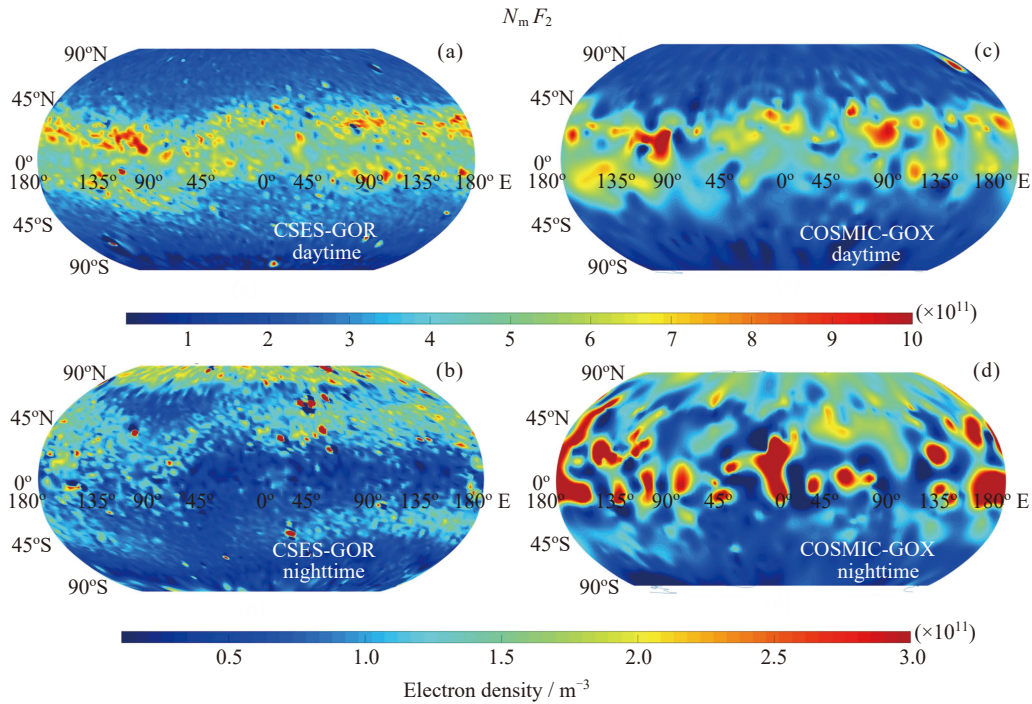


图 6 2019 年 7—8 月张衡一号 GOR 与 COSMIC-GOX 观测的 $N_m F_2$ 全球分布特征比较. (a)(b) GOR 观测的白天与夜间结果, (c)(d) COSMIC-GOX 观测的白天与夜间结果^[16]

Fig. 6 Comparison of the global $N_m F_2$ distribution characteristics observed by the CSES-GOR and COSMIC-GOX from July to August 2019. Daytime (a) and nighttime (b) results from CSES-GOR observations, daytime (c) and nighttime (d) results from COSMIC-GOX observations^[16]

(电磁场、原位等离子体、高能粒子及电离层结构), 攻克了 8 种载荷在轨定标难题, 构建了电磁卫星数据全链路在轨定标技术体系. 主要成果及创新如下.

(1) 电磁场类数据定标. 优化了在轨坐标转换流程; 实现矢量磁场的高精度定标与扰动抑制, 定标精度由几十 nT 提升至优于 1 nT; 识别并抑制了磁力矩器、动量轮等平台部件的固定扰动信号; 厘清电磁场载荷间的时间标记偏差并提出校正技术, 将二者时间标记差从 0.3~0.5 s 缩小至 0.1 s 以内; 定量评估电场仪探头误差, 通过平台机动试验验证伸杆设计, 有效消除了尾迹效应; 利用多源自然电磁现象开展了多维交叉校验.

(2) 原位等离子体类数据定标. 系统识别等离子体观测中的干扰来源, 提出了伏安曲线平滑与反演优化算法; 针对光照变化及材料退化导致的电流平衡问题, 提出了朗缪尔探针扫描偏压动态调整方案; 研发了阻滞式分析器电流的修正方法, 解决了在轨污染数据问题; 提出了中低纬 10~15 Hz 低频电磁干扰滤波方法.

(3) 高能粒子类数据定标. 评估了中国探测器的性能, 修正了探测效率曲线; 研发了包含进动、章动、极移及星时影响的坐标变换矩阵, 修正后高能粒子探测器的投掷角趋势一致性达 80% 以上; 定量评估了 MeV 能段电子观测中的质子污染问题; 解决了高能段单粒子事件的时间分辨率不匹配问题; 改进了基于 AE8/AP8 模型的评估方法.

(4) 电离层结构类数据定标. 针对三频信标机, 结合仿真与多普勒频移估计积分常数, 获得了可靠的 TEC; 针对掩星接收机, 提出了消除卫星高度以上电离层影响的 TEC 改正方法, 反演得到高精度电子密度剖面; 基于电离层局部球对称假设与零和基准, 精确估计差分码偏差 (DCB), 获得高质量的绝对 TEC 数据.

经上述定标优化后, 张衡一号卫星数据整体指标为: 电磁场频率分辨率 (0.45 Hz)、高能粒子通量 (0.01 MeV) 及投掷角分辨率 (5°) 优于 DEMETER, POES 等国际同类卫星; 磁场精度 (优于 1 nT)、等离子体相对精度 (优于 10%) 与欧空局 Swarm 卫星相

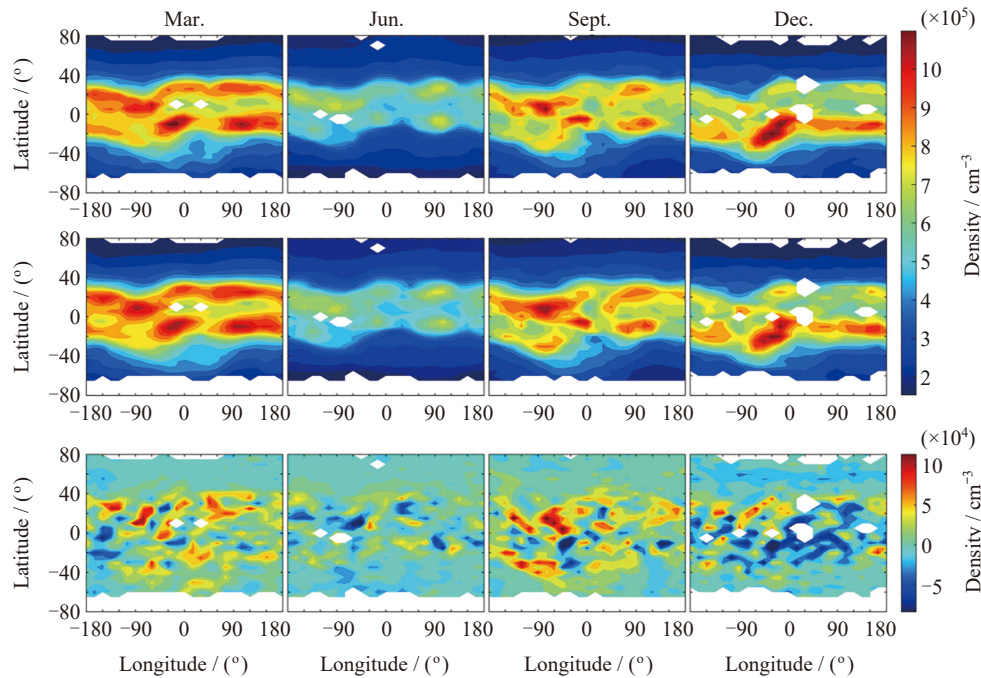


图 7 14:00 LT 张衡一号观测与基于其构建的电子密度模型 $N_m F_2$ 比较. (a) 观测结果, (b) 模型结果, (c) 二者差值^[58]

Fig. 7 Comparison of $N_m F_2$ between CSES observations and the electron density model constructed based on CSES data at 14:00 Local Time (LT). (a) Observational results, (b) model results, (c) differences between observations and model^[58]

当; 掩星接收机仪器偏差估计精度与 COSMIC 结果一致. 磁测数据成为 IGRF, CHAOS-8 等全球地磁场模型的重要数据源, 形成了电磁卫星定标领域的中国方案.

上述成果在张衡一号 01 星应用系统升级及张衡一号 02 星工程研制中发挥了系统性作用. 累计将 38 项定标成果用于张衡一号 01 星应用系统数据处理算法等迭代, 开展了 8 个核心载荷的持续定标, 产出涵盖四大类 60 余种参量的标准科学数据集. 该数据集是中国首套具有完全自主知识产权的全球地球物理场长期观测标准数据, 包含 100 余次 7 级以上强震、180 余次空间天气事件及多种地球物理现象, 打破了欧美国家在电磁卫星数据领域的垄断, 对应急管理、国家安全、资源测绘、通信导航等领域具有重要应用价值. 在张衡一号 02 星方面, 基于张衡一号 01 星暴露的问题, 形成了 9 项关键改进措施并应用于工程研制, 涵盖平台与载荷多个层面. 在轨测试表明, 改进成效显著, 未复现张衡一号 01 星的典型问题, 卫星整体观测效能得到实质性提升.

未来将依托现有技术积累, 持续开展张衡一号 02

星的在轨定标工作, 进一步提升数据质量, 深化多源数据融合与多学科协同研究, 为自然灾害精准预警与地球系统科学研究提供坚实的数据支撑, 助力中国在该领域实现从“跟跑”到“并跑”乃至“领跑”的跨越.

致谢 谨向张衡一号卫星工程研制团队的全体成员致以诚挚的谢意, 感谢参与卫星平台、载荷研制、数据处理及科学应用的各位工程师与科学家, 以及各级管理层面的领导. 本研究使用的张衡一号卫星 (CSES-01) 观测数据由中国国家航天局和中国地震局 (现应急管理部) 提供 (<https://leos.ac.cn>). 研究过程中也参考或使用了国际同类卫星数据, 包括法国 DEMETER、欧空局 Swarm、美国 NOAA/POES、COSMIC 系列卫星, 以及国内外地基观测台站 (如麻省理工学院 ISR 非相干散射雷达、子午工程) 数据与世界数据中心 (WDC) 发布的空间天气指数数据, 特向上述数据提供机构一并致谢.

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] PULINETS S, BOYARCHUK K. Ionospheric Precursors of

- Earthquakes[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005
- [2] PARROT M, BERTHELIER J J, LEBRETON J P, *et al.* Examples of unusual ionospheric observations made by the DEMETER satellite over seismic regions[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2006, **31**(4/5/6/7/8/9): 486-495
- [3] CHENG B J, ZHOU B, MAGNES W, *et al.* High precision magnetometer for geomagnetic exploration onboard of the China Seismo-Electromagnetic Satellite[J]. *Science China Technological Sciences*, 2018, **61**(5): 659-668
- [4] POLLINGER A, LAMMEGER R, MAGNES W, *et al.* Coupled dark state magnetometer for the China Seismo-Electromagnetic Satellite[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, **29**(9): 095103
- [5] ZHOU B, CHENG B J, GOU X C, *et al.* First in-orbit results of the vector magnetic field measurement of the high precision magnetometer onboard the China seismo-electromagnetic satellite[J]. *Earth, Planets and Space*, 2019, **71**(1): 119
- [6] CAO J B, ZENG L, ZHAN F, *et al.* The electromagnetic wave experiment for CSES mission: search coil magnetometer[J]. *Science China Technological Sciences*, 2018, **61**(5): 653-658
- [7] HUANG J P, LEI J G, LI S X, *et al.* The Electric Field Detector (EFD) onboard the ZH-1 satellite and first observational results[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2018, **2**(6): 469-478
- [8] LIU C, GUAN Y B, ZHENG X Z, *et al.* The technology of space plasma *in-situ* measurement on the China Seismo-Electromagnetic Satellite[J]. *Science China Technological Sciences*, 2019, **62**(5): 829-838
- [9] YAN R, GUAN Y B, SHEN X H, *et al.* The Langmuir Probe onboard CSES: data inversion analysis method and first results[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2018, **2**(6): 479-488
- [10] LIU D P, ZEREN Z, HUANG H, *et al.* The ionospheric plasma perturbations before a sequence of strong earthquakes in Southeast Asia and northern Oceania in 2018[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(24): 5735
- [11] CHU W, HUANG J P, SHEN X H, *et al.* Preliminary results of the high energetic particle package on-board the China Seismo-Electromagnetic Satellite[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2018, **2**(6): 489-498
- [12] LI X Q, XU Y B, AN Z H, *et al.* The high-energy particle package onboard CSES[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2019, **3**(3): 22
- [13] SCOTTI V, OSTERIA G, CSES-Limadou Collaboration, *et al.* The HEPD detector on board CSES satellite: in-flight performance[J]. *Nuclear and Particle Physics Proceedings*, 2019, **306-308**: 92-97
- [14] CHENG Y, LIN J, SHEN X H, *et al.* Analysis of GNSS radio occultation data from satellite ZH-01[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2018, **2**(6): 499-504
- [15] LIN J, SHEN X H, HU L C, *et al.* CSES GNSS ionospheric inversion technique, validation and error analysis[J]. *Science China Technological Sciences*, 2018, **61**(5): 669-677
- [16] XU S, CUI J, ZHIMA Z, *et al.* The Global Navigation Satellite System occultation receiver onboard the China Seismo-Electromagnetic Satellite: data and observational results[J]. *Acta Astronautica*, 2025, **236**: 914-928
- [17] CHEN L, OU M, YUAN Y P, *et al.* Preliminary observation results of the Coherent Beacon System onboard the China Seismo-Electromagnetic Satellite-1[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2018, **2**(6): 505-514
- [18] LU Hengxin, SHEN Xuhui, ZHAO Shufan, *et al.* Typical event observation of the tri-band beacon onboard the CSES (ZH-1) satellite[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2022, **37**(3): 426-433 (鲁恒新, 申旭辉, 赵庶凡, 等. 张衡一号卫星三频信标载荷典型事件观测[J]. 电波科学学报, 2022, **37**(3): 426-433)
- [19] OLSEN N, CLAUSEN L T, SABAKA T J, *et al.* Calibration of the Ørsted vector magnetometer[J]. *Earth, Planets and Space*, 2003, **55**(1): 11-18
- [20] YANG Y Y, ZHOU B, HULOT G, *et al.* CSES high precision magnetometer data products and example study of an intense geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(4): e2020JA028026
- [21] ALKEN P, OLSEN N, FINLAY C C. Co-estimation of geomagnetic field and in-orbit fluxgate magnetometer calibration parameters[J]. *Earth, Planets and Space*, 2020, **72**(1): 49
- [22] ZHIMA Z, ZHOU B, ZHAO S F, *et al.* Cross-calibration on the electromagnetic field detection payloads of the China Seismo-Electromagnetic Satellite[J]. *Science China Technological Sciences*, 2022, **65**(6): 1415-1426
- [23] HUANG J P, JIA J, YIN H C, *et al.* Study of the statistical characteristics of artificial source signals based on the CSES[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, **10**: 883836
- [24] LIU J L, HUANG J P, LI Z, *et al.* Recent advances and challenges in Schumann resonance observations and research[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(14): 3557
- [25] HU Y P, ZHIMA Z, WANG T Y, *et al.* The typical ELF/VLF electromagnetic wave activities in the upper ionosphere recorded by the China Seismo-Electromagnetic Satellite[J]. *Remote Sensing*, 2024, **16**(15): 2835
- [26] HAO B, HUANG J P, LI Z, *et al.* Spatiotemporal characteristics of parallel stacked structure signals in VLF electric field observations from CSES-01 satellite[J]. *Atmosphere*, 2025, **16**(10): 1198
- [27] HUANG J P, LI Z Y, LI Z, *et al.* Automatic identification and statistical analysis of data steps in electric field measurements from CSES-01 satellite[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(24): 5745
- [28] HUANG J P, LI Z Y, LI Z, *et al.* Evaluation of the satellite's wake effect on the electric field detector onboard the CSES-01 satellite[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2025,

- 9(2): 400-409
- [29] YANG D H, ZHIMA Z, WANG Q, *et al.* Stability validation on the VLF waveform data of the China-Seismo-Electromagnetic Satellite[J]. *Science China Technological Sciences*, 2022, **65**(12): 3069-3078
- [30] ZHIMA Z, HUANG J P, SHEN X H, *et al.* Simultaneous observations of ELF/VLF rising-tone quasiperiodic waves and energetic electron precipitations in the high-latitude upper ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(5): e2019JA027574
- [31] HU Y P, ZHIMA Z, FU H S *et al.* A large-scale magnetospheric line radiation event in the upper ionosphere recorded by the China-Seismo-Electromagnetic satellite[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(2): e2022JA030743
- [32] ZHIMA Z, CAO J B, LIU W L, *et al.* Storm time evolution of ELF/VLF waves observed by DEMETER satellite[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(4): 2612-2622
- [33] ZHIMA Z, HU Y P, SHEN X, *et al.* Storm-time features of the ionospheric ELF/VLF waves and energetic electron fluxes revealed by the China Seismo-Electromagnetic Satellite[J]. *Applied Sciences*, 2021, **11**(6): 2617
- [34] RAN Z L, LU C, HU Y P, *et al.* Automatic detection of quasi-periodic emissions from satellite observations by using DETR method[J]. *Remote Sensing*, 2024, **16**(15): 2850
- [35] LEBRETON J P, STVERAK S, TRAVNICEK P, *et al.* The ISL Langmuir probe experiment processing onboard DEMETER: scientific objectives, description and first results[J]. *Planetary and Space Science*, 2006, **54**(5): 472-486
- [36] WANG X, SAMANIEGO J I, HSU H W, *et al.* Development of a double hemispherical probe for improved space plasma measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(4): 2916-2925
- [37] LOMIDZE L, KNUDSEN D J, BURCHILL J, *et al.* Calibration and validation of Swarm plasma densities and electron temperatures using ground-based radars and satellite radio occultation measurements[J]. *Radio Science*, 2018, **53**(1): 15-36
- [38] CATAPANO F, BUCHERT S, QAMILI E, *et al.* Swarm Langmuir probes' data quality validation and future improvements[J]. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2022, **11**(1): 149-162
- [39] YAN R, GUAN Y B, MIAO Y Q, *et al.* The regular features recorded by the Langmuir probe onboard the low earth polar orbit satellite CSES[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(1): e2021JA029289
- [40] PU W X, YAN R, GUAN Y B, *et al.* Study on the impact of the potential variation in the CSES satellite platform on Langmuir probe observations[J]. *Acta Astronautica*, 2025, **230**: 104-118
- [41] LIU D P, ZEREN Z, SHEN X H, *et al.* Typical ionospheric disturbances revealed by the plasma analyzer package onboard the China Seismo-Electromagnetic Satellite[J]. *Advances in Space Research*, 2021, **68**(9): 3796-3805
- [42] YAN R, ZHIMA Z, XIONG C, *et al.* Comparison of electron density and temperature from the CSES satellite with other space-borne and ground-based observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(10): e2019JA027747
- [43] YAN R, XIONG C, ZHIMA Z, *et al.* Correlation between N_e and T_e around 14: 00 LT in the topside ionosphere observed by CSES, Swarm and CHAMP satellites[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, **10**: 860234
- [44] LIU Dapeng, SHEN Xuhui, YANG Dehe, *et al.* Characteristics of ionospheric heating disturbances caused by ground-based VLF waves observed by ZHANGHENG-1satellite[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2021, **36**(6): 970-976 (刘大鹏, 申旭辉, 杨德贺, 等. 张衡一号卫星观测的地基 VLF 波电离层加热扰动特征 [J]. *电波科学学报*, 2021, **36**(6): 970-976)
- [45] VAN ALLEN J A, LUDWIG G H, RAY E C, *et al.* Observation of high intensity radiation by satellites 1958 Alpha and Gamma[J]. *Journal of Jet Propulsion*, 1958, **28**(9): 588-592
- [46] KRESS B T, RODRIGUEZ J V, ONSAGER T G. The GOES-R Space Environment *in Situ* Suite (SEISS): measurement of energetic particles in geospace[M]//GOODMAN S J, SCHMIT T J, DANIELS J, *et al.* The GOES-R Series. Amsterdam: Elsevier, 2020: 243-250
- [47] ZOU H, XIAO Z, HAO Y Q, *et al.* Observation of the disturbed events by the particle detector inside "Zy-1" satellite[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, **49**(3): 559-564
- [48] LE Guiming, YE Zonghai, ZHOU Guocheng. Low altitude satellite orbit radiation belt particle environment variation due to geomagnetic long term variation[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2001, **21**(3): 238-245 (乐贵明, 叶宗海, 周国成. 地磁长期变化引起的低高度卫星轨道辐射带粒子环境的变化 [J]. *空间科学学报*, 2001, **21**(3): 238-245)
- [49] YANG Yanyan, WANG Jie, ZHIMA Z, *et al.* Advancements in low Earth orbit satellite magnetic field measurements and global geomagnetic field modeling[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2024, **55**(6): 652-667 (杨艳艳, 王婕, 申旭辉, 等. 低轨卫星磁测及全球地磁场建模 [J]. *地球与行星物理理论评 (中英文)*, 2024, **55**(6): 652-667)
- [50] ZHANG Z X, LI X Q, WANG L, *et al.* Evaluation of the proton contamination to MeV electrons by solar proton events based on CSES observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(9): e2022JA030550
- [51] Wang L, Zhang Z, Li X, *et al.* Investigation of the South Atlantic Anomaly (SAA) by proton flux variabilities based on 6 years' CSES data[J]. *Science China Earth Sciences*, 2025, **68**(11): 3776-3788, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1672-2> (王璐, 张振霞, 李新乔等. 南大西洋异常区质子通量演化研究——基于 CSES 卫星 6 年观测 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2025, **55**(11): 3918-3931, doi: 10.1360/N072025-

- 0208)
- [52] Zhang, Z. , Chen, L. , Li, X. , Xia, Z. , *et al.* Observed propagation route of VLF transmitter signals in the magnetosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, 123. <https://doi.org/10.1029/2018JA025637>
 - [53] LEI J H, SYNDERGAARD S, BURNS A G, *et al.* Comparison of COSMIC ionospheric measurements with ground-based observations and model predictions: preliminary results[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, **112**(A7): A07308
 - [54] ZENG Z, HU X, ZHANG X J. Applying artificial neural network to the short-term prediction of electron density structure using GPS occultation data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, **29**(9): 1321
 - [55] WU X C, HU X, GONG X Y, *et al.* Analysis of inversion errors of ionospheric radio occultation[J]. *GPS Solutions*, 2009, **13**(3): 231-239
 - [56] LIN Jian, WU Yun. Abel ionospheric inversion technique and its error analysis[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, **56**(4): 1070-1076 (林剑, 吴云. Abel 电离层掩星反演方法及误差分析 [J]. *地球物理学报*, 2013, **56**(4): 1070-1076)
 - [57] YUE X, SCHREINER W S, LEI J, *et al.* Error analysis of Abel retrieved electron density profiles from radio occultation measurements[J]. *Annales Geophysicae*, 2010, **28**(1): 217-222
 - [58] HUANG H, LIN J, XU S, *et al.* A 3D empirical model of electron density based on CSES radio occultation measurements[J]. *Space Weather*, 2022, **20**(5): e2021SW003018.

作者简介



泽仁志玛 女, 藏族, 四川省甘孜藏族自治州九龙县人, 现为应急管理部国家自然灾害防治研究院研究员, 博士生导师, 主要研究方向为空间物理学、地球物理场卫星探测技术、电磁卫星观测技术及自然灾害监测应用等。

E-mail: zerenzhima@ninhm.ac.cn