

空间天气定量化预报系统的设计与实现

邹自明¹, 高文健^{1,2}, 张效信³, 佟继周¹

1. 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190
2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 中国气象局国家空间天气监测与预警中心, 北京 100081

摘要 空间天气模型系统是在特定的模型计算框架下,对多个空间天气模型进行封装集成,实现对空间天气定量化分析功能的系统。为加强模型间联系,提高模型预报应用水平和国内空间天气预报能力,设计实现了针对中国空间天气模型的系统——空间天气定量化预报系统。该系统采用以计算框架为核心,模型服务组件、可视化服务组件、数据管理服务组件为支撑的思想进行架构设计,提供对5大空间区域模型的高速计算环境,实现模型的封装集成,并以多种可视化形式对计算结果进行丰富的展现。系统具有高效的业务调度和数据传输能力,有效提高了系统运行性能、预报效率和科研用户的交互体验。

关键词 空间天气模型系统;模型集成;计算框架

中图分类号 TQ050.4*25

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.10.001

Design and Implementation of Space Weather Quantitative Forecasting System

ZOU Ziming¹, GAO Wenjian^{1,2}, ZHANG Xiaoxin³, TONG Jizhou¹

1. Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract The space weather model system is a system that works under a particular model computing framework, an integration of multiple space weather models, and the realization of the quantitative analysis of the space weather. In order to strengthen the links among the models, to improve the operation ability of the prediction model and to enhance the domestic space weather forecast capacity, we have designed and implemented the space weather model system that integrate models for China's space weather quantitative forecast system. With the computing framework as the core, it makes use of the model service component, the visualization service component, the data management service component in its architecture. The system can provide a high-speed computing environment for models in five space areas, realize the encapsulation and the integration of the space weather models, and output the calculation results in a variety of visual forms. The system has a high efficient business scheduling and data transmission capacity, with good system performance, prediction efficiency and interface for scientific research users.

Keywords space weather model system; model integration; computing framework

0 引言

空间天气指瞬时或短时间内太阳表面、太阳风、磁层、电离层和热层的状态,涉及从地球表面几十千米到太阳表面的广阔区域,空间天气预报是基于对空间天气监测数据的分析,掌握其变化规律,给出空间天气未来变化趋势的预测^[1,2]。由于空间天气繁杂多变,为了从宏观角度定量地对空间天气

变化进行预报,空间天气模型孕育而生。空间天气模型建立在大量空间探测数据的基础上,是对各种参数在空间分布的定量化描述,随着研究工作的不断深入,空间天气模型已由单一应用发展到集成应用的阶段^[3,4]。如何将物理类型、运行条件不同的单一模型集合为一个有机的整体,建立基于空间天气模型的定量化预报系统,加强模型间的联系,提高模型

收稿日期:2012-12-21;修回日期:2013-01-23

基金项目:公益性行业(气象)科研专项项目(GYHY200806024)

作者简介:邹自明,研究员,研究方向为空间物理及空间科学信息学,电子邮箱:mzou@nssc.ac.cn

预报的应用水平,是当前空间天气预报研究的重要课题。

近年来,欧美等国家已经研发出一系列空间天气模型系统,如 SWMF、CCMC、SPENVIS 等。SWMF 是由美国密歇根大学的空间环境建模中心开发的模型系统,其采用高效的计算框架,对模型进行组件化封装,可将太阳地球系统中的多区域模型编译成一个完整的模型应用程序^[5]。CCMC 是美国国家航空航天局(NASA)、美国国家海洋和大气管理局(NOAA)等多组织共同研制的模型应用系统,其采用标准接口封装集成空间天气模型,并为模型提供所需观测台站数据的喂养服务,实现从日冕到高层大气的空间天气预报功能^[6]。SPENVIS 是比利时联邦科学研究所欧洲航天局(ESA)的支持下开发的综合模型应用系统,该系统基于 C/S 架构提供丰富的工程应用和计算工具,支持模型间的耦合计算,并对计算结果进行可视化表达,实现空间天气中问题的分析及事件的预测^[7]。空间天气模型系统的建立关键在于模型计算框架的构造、模型接口的封装、数据服务的支持以及计算结果的可视化等多种功能服务的实现。

空间天气量化预报系统的研制是气象行业专项,旨在发展空间天气模型系统、提升预报能力而开展的课题^[8]。该系统集成了太阳/行星际、太阳风/磁层、内磁层、电离层、中高层大气的 24 个空间天气模型,提供高效的模型计算框架,实现对多空间天气模型的统一封装、计算资源的有效整合调度、环境监测数据的高速喂养、计算结果的多形式可视化展现的功能,最终完成对定制区域的空间天气预报。

1 系统设计

1.1 系统架构

大型空间天气模型系统的性能往往与其各功能模块间的耦合度相关。功能模块间联系越紧密,则模型计算的执行效率越高,但系统扩展性、灵活性将急剧下降,耦合松弛,则具有良好的系统整体性能,但因组件间连接不紧密而降低模型计算的效率^[9]。本系统进行架构设计时充分考虑了以上两点,采用组件的松耦合与高速数据通道相结合的设计思想,既维护了系统扩展、灵活度,同时保证了模型计算的高执行率。

系统整体架构呈现以计算框架为核心、多个服务组件为支撑的稳定结构,其中服务组件包括模型服务组件、可视化服务组件和数据管理服务组件。计算框架负责模型计算的任务调度和对整条预报业务链的流程监管,同时对模型参数、计算结果进行高速管道传输和格式转换,起到独立传输指令、数据的效果,规避了松耦合架构带来的模型执行率低的问题。模型服务组件对模型接口进行封装,驱动模型计算,同时面向计算框架提供统一的适配接口,完成参数的接收和调度命令的解析。可视化服务组件通过对多种绘图工具的集成,实现对模型计算结果的可视化,最终生成对计算结果直观表达的二维、三维图形产品。数据管理服务组件对系统集成的环境监测数据库、产品数据库进行整合、管理,提供数据抽取、产品收集等数据支持性功能,架构如图 1 所示。

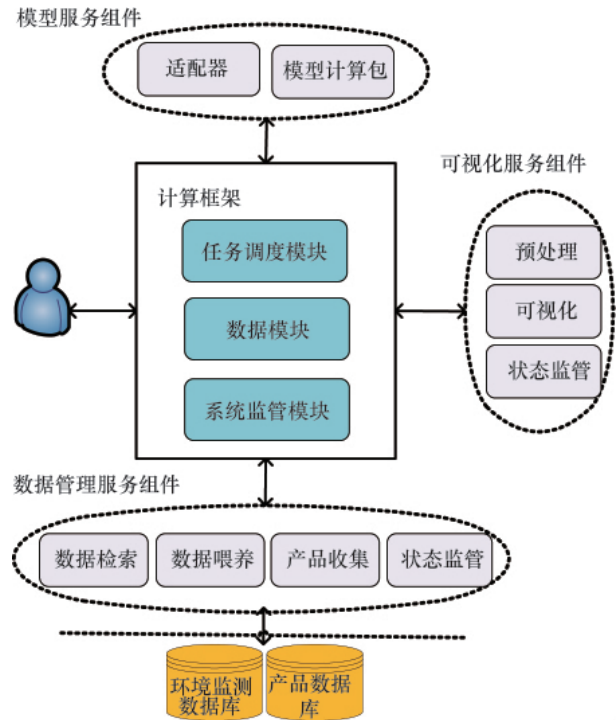


图 1 空间天气量化预报系统架构

Fig. 1 The framework of space weather quantitative forecasting system

1.2 服务组件设计

1.2.1 计算框架

计算框架是空间天气模型系统的核心功能模块。为了向模型计算提供调度机制,对模型所需参数提供高速传输、格式标准化的服务,将计算框架分为任务调度模块、数据模块和综合监管模块,其中数据模块又包括数据管道和格式转换。

任务调度模块根据用户的输入,调用用户选定的模型进入模型计算、结果可视化、数据产品管理的业务链,同时由系统监管模块负责整条业务链中的状态监管。数据管道负责数据的高速传送,对模型服务组件传送用户输入参数和模型的运行参数,对可视化服务组件传送模型的计算结果,对数据管理服务组件传送待入库的模型计算结果和可视化图形产品。格式转换模块完成对模型计算结果的标准化处理,将不同格式的计算结果转化为统一的数据格式,再送往可视化服务组件和数据管理服务组件。

计算框架工作时,首先由任务调度模块接收用户的计算命令,向数据管理服务组件发送数据指令,然后通过数据通道将获取到的运行参数传送到模型服务组件,再由任务调度模块向模型服务组件发送模型指令,驱动模型计算。计算完成后,计算结果首先经过格式转换模块做标准化处理,再经由数据通道传送到数据管理和可视化服务组件,分别进行产品入库和结果可视化。最后数据通道获取可视化服务组件返回的图形产品,将其和计算结果一同返回给用户,并将图形产品送入数据服务组件入库,计算流程如图 2 所示。

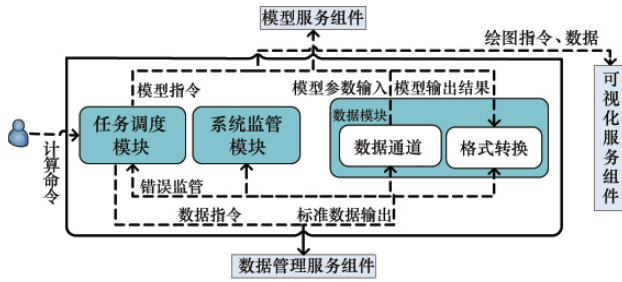


图2 计算框架流程

Fig. 2 The process of the computing framework

1.2.2 模型服务组件

除计算框架外,系统设计的另一难点在于对多样性的空间天气模型进行集成。集成的模型来源于研究空间天气不同区域的多家科研机构,模型采用多种编程语言实现(Fortran, C, Matlab),运行于多种不同系统环境(Windows, Linux),并且模型参数的输入与结果的输出形式各异(文件、命令行等),为了提升系统调度管理的高效性,集成时必须规避模型的各异特征。综合考虑上述模型特点,模型服务组件使用为模型定制的包装类实现对模型接口的统一封装,并通过适配器模块完成对模型参数的代理及统一调度,因此将模型服务组件分为模型计算包和适配器模块两部分。

模型计算包是由模型包装类对模型进行封装集成后所得的可执行程序包,其对外暴露4个接口方法,包括参数输入、结果输出、启动运行和结束运行。适配器模块包括控制解析、数据代理2个子模块,控制解析负责接收并解析计算框架的启动、结束命令,数据代理模块实现对模型参数的输入和计算结果的输出功能。模型服务组件工作时,首先由数据代理模块接收计算框架的模型参数,并通过参数输入接口向用户选定的模型写入参数,然后由控制模块解析运行命令,通过启动、结束接口控制模型是否进行计算。计算结束后再由数据代理模块通过结果输出接口获取计算结果,传送回计算框架,计算流程如图3所示。

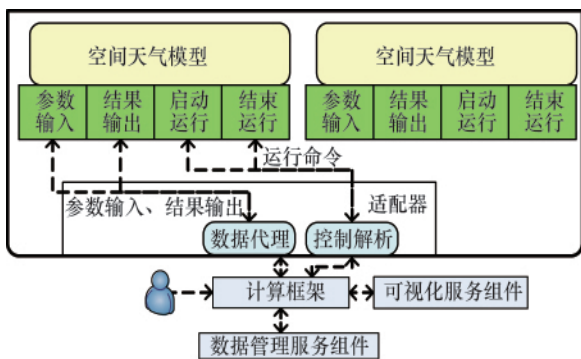


图3 模型服务组件

Fig. 3 Model service component

1.2.3 可视化服务组件

可视化服务组件实现模型计算结果的可视化功能。系统

通过集成的多种可视化绘图工具对模型计算结果进行展现,但是不同的可视化绘图工具对计算结果格式的需求不同,所以需要根据绘图情况对模型计算结果进行格式预处理,然后再用绘图工具实现可视化。因此将可视化服务组件分为预处理模块、可视化模块和状态监控模块3个模块。

可视化服务组件的各模块分工不同,相互配合完成可视化工作。预处理模块将标准格式的模型计算结果转化为符合不同绘图工具所需的数据格式。可视化模块调用 Matlab、IDL、OpenGL 等语言编写的可视化绘图工具,完成对计算结果的平滑滤波、颜色渲染等可视化方法的处理,最终以规定的标准图像格式进行输出。状态监控模块对本组件的运行进行监管,并将状态信息汇报给计算框架的系统监管模块。

可视化服务组件工作时,首先由预处理模块接收计算框架喂养的数据和参数,对数据做格式处理,再将结果和参数传入可视化模块。可视化模块根据参数选择合适的绘图工具进行二维、三维图像生成,最后再将生成的图像产品送往计算框架进行产品的保存,计算流程如图4所示。

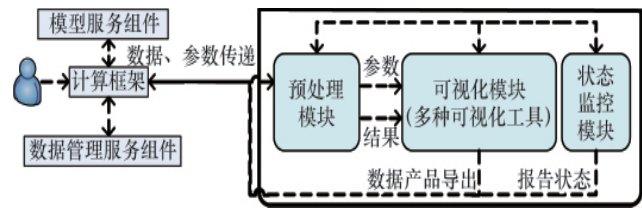


图4 可视化服务组件

Fig. 4 Visualization service component

1.2.4 数据管理服务组件

模型计算所得的数据本身包含了非常重要的预报信息,为了充分利用数据资源,减少预报耗时较长模型的重复计算,系统设计实现了多个模型预报的产品数据库,由数据管理服务组件负责向产品数据库中录入模型计算结果和可视化图形产品。同时为向系统的正常运行提供数据支持和保障,本组件需实现模型运行参数和产品的检索、抽取和派遣功能。因此将数据管理服务组件分为产品收集、数据检索、数据喂养和状态监控4个模块。

产品收集模块对计算框架传递的模型计算结果和绘图产品完成录入,其中需要将计算和绘图结果作为产品入库的模型有:F10.7, Aurora, PolarCurrent, TEC 区域预报模型和 SWT 模型。数据检索模块根据接收到的计算框架传递的参数,对环境监测数据库和产品数据库进行实时数据检索和抽取,再将结果传给数据喂养模块。数据喂养模块与计算框架的数据管道直接对接,实现对检索结果的高速数据派遣和喂养,为整个系统提供数据支持。状态监控模块对本组件,并将状态信息汇报给计算框架的系统监管模块。

数据管理服务组件工作时,首先分析接收到的计算框架传递的参数内容,如果是产品数据,则调用产品收集模块,将

产品录入相应产品数据库中; 如果传递的是数据请求命令, 则启动数据检索模块进行检索和抽取, 通过喂养模块实现数据喂养, 将数据返回到计算框架, 计算流程如图 5 所示。

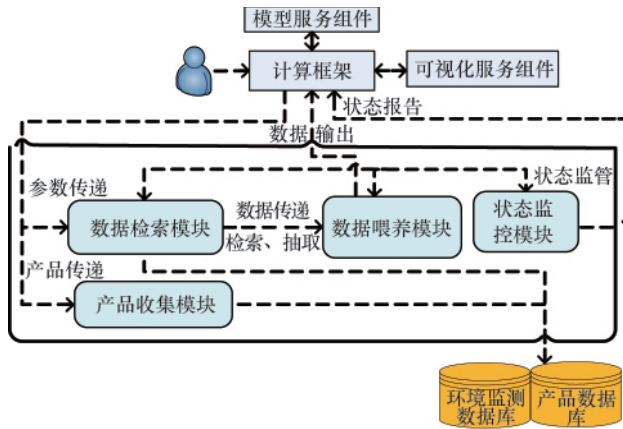


图 5 数据管理服务组件

Fig. 5 Data management service component

2 系统实现

2.1 系统集成要素

空间天气量化预报系统集成了多区域的空间天气模型和种类繁多的空间天气数据。系统对来自多家合作单位的 24 个空间天气模型实现了集成, 模型预报范围覆盖日地 5 大空间区域, 包括太阳/行星际、太阳风/磁层、内磁层、电离层、中高层大气区域。

太阳/行星际区域包括预报太阳风暴到达地球时间和强度的智能化业务预报模型 Swarive, 预报 CME 在日地空间传播时间的 CME 冰激凌-锥模型, 预报地球轨道附近的太阳风和磁场值预报的运动学模型, 预报未来 1~3d $F_{10.7}$ 指数的定量预报模型等 6 个模型。

太阳风/磁层耦合区域包括预报磁层的等离子体和电磁场特性的磁层状态模型, 预报地球弓激波和磁层顶位置和形状的弓激波/磁层顶模型, 预报地磁活动期间极光卵的分布特性的极光卵分布模型和预报外磁层等离子体和电磁场特性的太阳风传输模型的 4 个模型。

内磁层预报区域包括预报辐射带南大西洋异常区等离子体(高能粒子通量)分布特性的通量模型, 预报辐射带边界变化及内外辐射带最大辐射通量位置的辐射带边界演化模型, 预报地球辐射带槽区高能粒子环境参数的地球中、低轨道航天器高能带电粒子环境诊断和预警模型和预报地磁扰动模型等 5 个模型。

电离层区域包括实现中国电离层 TEC 现报技术的发展与完善的 IONO_TECFOR_PRIC 模型, 实现中国电离层多种参量数据同化模型建立的 CCATECNmF2 模型, 单站电离层总电子含量(TEC)短期预报模型, 预报电离层闪烁效应的时空分布特性的电离层闪烁效应预报模型等 5 个模型。

中高层大气区域模型包括中低纬度地区中高层大气温

度、密度及风场预报模型, 实现中国中纬度地区大气 TD_WIND_MODEL 共 4 个模型。同时, 系统整合了多种空间天气要素数据, 包括 $F_{10.7}$, 太阳耀斑, 同步地球轨道电子强度, 同步地球轨道质子强度, Dst 、 A_p 指数, 行星际等离子体密度、温度、磁场、速度等。系统的产品数据库中也累积了丰富的数据, 包括未来 3d $F_{10.7}$ 预报值, Aurora 预报产品和 TEC 区域预报模型的预报产品等。

2.2 用户交互

使用系统进行空间天气预报时, 用户首先登录系统, 选定预报模型, 然后输入参数启动模型进行预报。通过对用户使用习惯的调研分析, 系统的交互部分采用简单易用、清新简洁的界面风格, 便于用户轻松上手使用, 获得较好的用户体验(图 6)。空间天气量化预报系统以最直观的可视化图形向用户呈现模型计算结果。模型预报结果界面中, 左侧为参数设置及计算结果的数据显示区域, 右侧为计算结果的可视化显示区域, 可拖动鼠标调整左右两侧显示区域的宽度(图 7)。

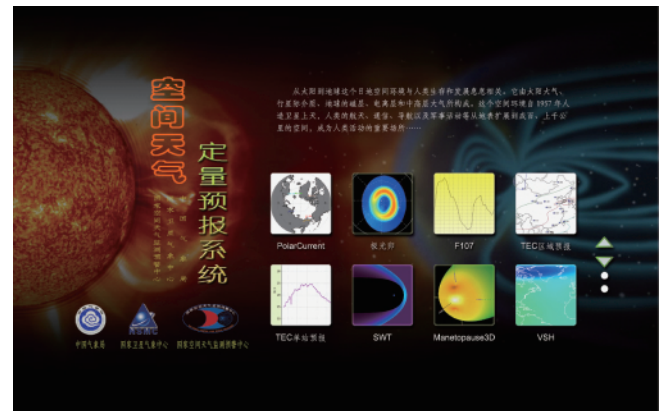


图 6 模型选择界面

Fig. 6 Interface of selecting models

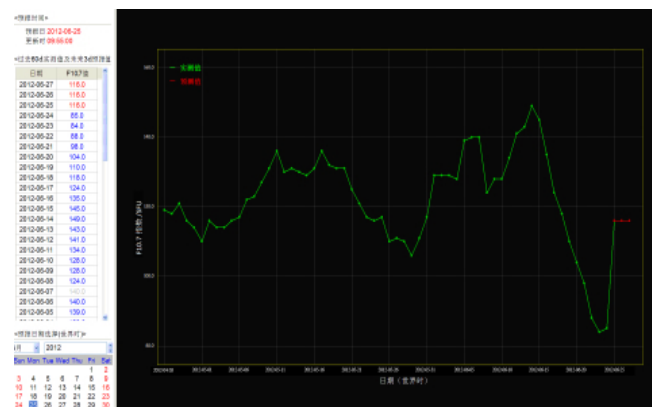


图 7 $F_{10.7}$ 模型计算界面

Fig. 7 Interface of model computing

2.3 模型结果可视化

通过多种绘图工具的集成, 系统对集成的全部空间天气

模型的计算结果进行了多形式多角度的可视化展现,使用户能最直接地了解预报结果。

模型结果的可视化按内容特征分为时序图、全球分布图、等值线图、等高线图、剖面图、空间三维图等多种图形^[10]。其中,时序图以时间为横坐标,物理要素为纵坐标,可视化图形充分表现出物理要素随时间的变化情况。使用时序图表现计算结果的模型包括辐射带槽区高能电子通量预报模型,辐射带边界演化模型,太阳风传输同化模型等(图8)。全球分布图以地球平面图或全球经纬坐标为背景,用颜色表明物理量的浓度、密度等属性在空间的分布情况,使用全球分布图表现计算结果的模型有电离层参量化 TEC 模型,中高层大气气候模型等(图9)。剖面图通常为固定空间位置、物理要素、时间中的一项,灵活的展现另外两个变量间的变化关系(图10)。空间三维图是在特定坐标系下,对物理要素在三维空间的分布情况进行表现,如三维磁场模型的可视化展现(图11)。

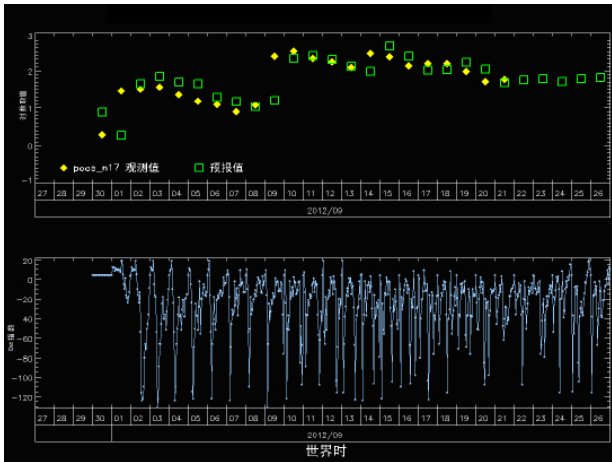


图8 辐射带槽区高能电子通量预报时序图

Fig. 8 Timing diagram of high-energy electron flux of radiation belt slot region

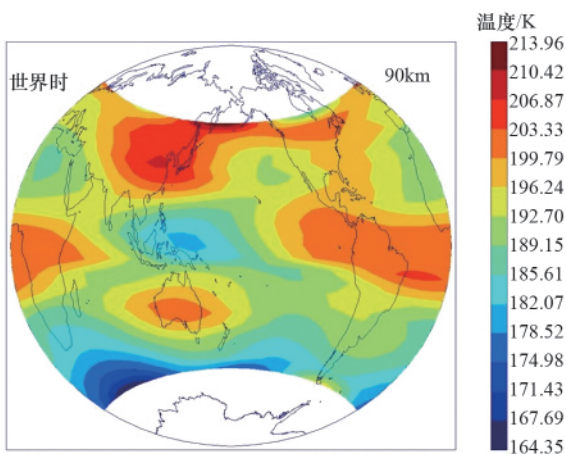


图9 中高层大气气候学模型全球分布

Fig. 9 Global map of middle and upper atmosphere model

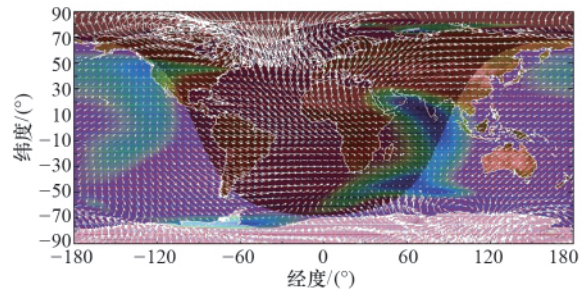


图10 中高层大气矢量球面谐波同化模型剖面

Fig. 10 Profile of middle and upper atmosphere vector spherical harmonic assimilation model

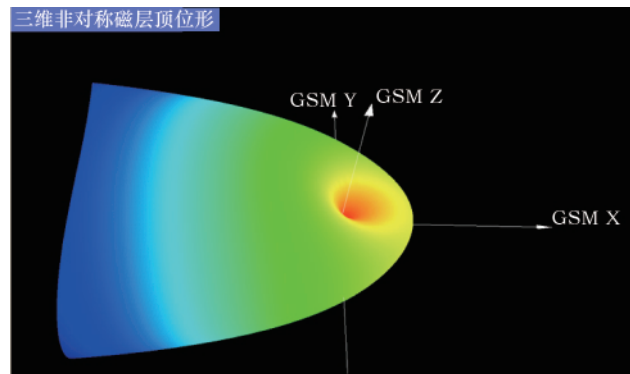


图11 三维磁场模型可视化图

Fig. 11 Visualization of 3D magnetic field model

模型结果的可视化按交互形式分为二维静态图、二维动态图、三维操作图。其中,二维动态图以 GIF 动态图片的形式将多时间点的图片进行叠加呈现,同时支持对 GIF 动画的帧操作,高层大气模型的全球分布图便是采用 GIF 动画的形式。三维交互图支持对三维图形的用户交互,包括制作三维切片、视角切换、拖拽、放大、缩小等操作。

3 讨论

空间天气量化预报系统是国内搭建的创新性空间天气模型系统,通过对模型的封装集成和结果可视化展现,直观地满足了用户对空间天气预报、警报的需求。作为国内空间天气模型系统的初步尝试,系统在以下方面还存在缺陷。(1) 系统对模型进行集成前需定制封装包,可能会涉及模型接口的修改,一定程度上影响了系统的扩展性。后续工作将制定一套模型集成的接口标准,符合标准的模型可直接添加到系统中。(2) 计算框架中由高速数据通道负责数据的传送,计算任务较少时传送效率很高,但当用户访问量增加时,任务调度模块会占用系统较多资源,导致传送效率的降低。未来工作中将考虑独立出数据通道模块,计算框架传送命令的同时,在另一服务器上完成服务组件间的数据传送工作。

4 结论

空间天气量化预报系统加强了模型间的联系,提高模

型预报的应用水平。系统集成多区域的空间天气模型,高效地实现对模型预报业务流程的调度与监管,同时提供高速数据传输通道,有效地提升系统运行性能及预报效率。此外,系统具有良好的交互体验和丰富的可视化效果,成为科研人员研究分析天气模型的良好平台。

致谢: 本项目中使用的 Dst 、 A_p 指数数据来自地球系统科学数据共享网——空间科学数据共享平台,感谢该平台提供的数据支持。

参考文献 (References)

- [1] 焦维新. 空间天气学[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 7-8.
Jiao Weixin. Science of space weather [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 7-8.
- [2] 郑程. 空间天气模式集成框架设计与实现 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
Zheng Cheng. Design and implementation of space weather model integration framework [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [3] 方成. 走进我们生活的新学科——空间天气学[J]. 自然杂志, 2006: 28(4): 194-198.
Fang Cheng. Chinese Journal of Nature, 2006: 28(4): 194-198.
- [4] 龚建村, 刘四清, 师立勤, 等. 空间环境天基探测现状与需求分析[J]. 空间科学学报, 2009, 29(3): 346-352.

- Gong Jiancun, Liu Siqing, Shi Liqin, et al. Chinese Journal Space Sciences, 2009, 29(3): 346-352.
- [5] Tóth G, Sokolov I V, Gombosi T I. Space weather modeling framework: A new tool for the space science community [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(A12): 1-21.
- [6] AFOSR, AFRL, AF/XOW, et al. Concept of operations for the community coordinated modeling center [C]. Committee for Space Weather Chair, 2002.
- [7] Heynderickx D, Quaghebeur B, Fontaine B, et al. New features of ESA's Space Environment Information System (SPENVIS)[C]. 34th COSPAR Scientific Assembly, 2005.
- [8] 黎芳芳, 姜秀杰, 刘成, 等. 空间天气模式集成可视化演示软件设计[J]. 空间科学学报, 2012, 32(2): 245-250.
Li Fangfang, Jiang Xiujie, Liu Cheng, et al. Chinese Journal of Space Sciences, 2012, 32(2): 245-250.
- [9] 李姗姗, 王群. 分布式高性能空间天气建模框架的研究 [J]. 计算机应用研究, 2008, 25(6): 1731-1735.
Li Shanshan, Wang Qun. Application Research of Computers, 2008, 25(6): 1731-1735.
- [10] Wiltberger M, Weigel R S, Gehmeyr M, et al. Analysis and visualization of space science model output and data with CISM-DX [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, A9(110), doi: 10.1029/2004JA010956.

(责任编辑 吴晓丽)

·学术动态·



《科技导报》参与评选的 2012 年度“中国科学十大进展”揭晓

2013年3月11日,2012年度“中国科学十大进展”揭晓,《科技日报》、《科学时报》等媒体予以专门报道。该评选活动由科技部基础研究管理中心联合《科技导报》、《中国科学院院刊》、《中国科学基金》、《中国基础科学》4家学术期刊共同举办。权威专家评选出的2012年度“中国科学十大进展”分别是:(1) 神舟九号和天宫一号成功实现载人交会对接;(2) 可扩展量子信息处理取得系列重要进展;(3) 阐明二叠-三叠纪之交生物大灭绝及其复苏模式和原因;(4) 大亚湾中微子实验发现新的中微子振荡模式;(5) 揭示两种天然产物靶向特异蛋白治疗白血病的机制;(6) 证实单倍体孤雄干细胞具有可替代精子和快速传递基因修饰的能力;(7) 生态学试验证实 Bt 转基因棉花种植可促进对害虫的生物控制;(8) 解析出 TAL 效应蛋白特异性识别 DNA 的结构基础;(9) 揭示营养匮乏引发细胞自噬的分子机制;(10) 发现利用倒置结构可提高聚合物太阳能电池的能量转换效率。

年度“中国科学十大进展”评选活动始创于2007年,最初由科技部基础研究管理中心和科技日报社共同举办,最初起名为“中国基础研究十大新闻”,评选程序分为推荐、初评、函评、发布4个环节。《科技导报》已连续6年参与评选“中国科学十大进展”活动,在2012年度“中国科学十大进展”评选中,《科技导报》等4家学术期刊共推荐240项备选“进展”,评审专家委员会据此评遴选出30项候选“进展”,然后交中国科学院院士、中国工程院院士、“973计划”顾问组和咨询组专家、“973计划”项目首席科学家、国家重点实验室主任等专家函评投票选出最终的“十大进展”。