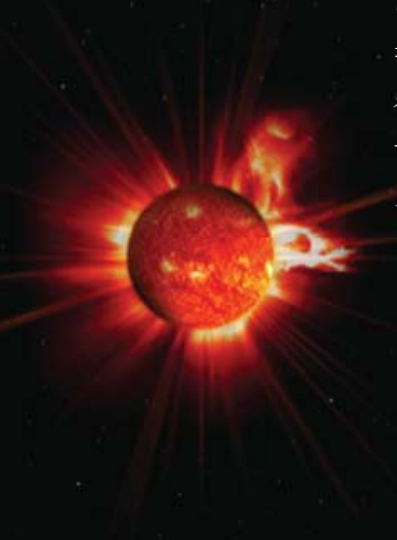


空间天气学是一个多学科交叉的科学，主要体现在空间天气（状态或事件）的监测、研究、建模、预报、效应、信息的传输与处理、对人类活动的影响以及空间天气的开发利用和服务等方面的集成。其多学科交叉、强烈依赖探测数据与超级计算及其国际合作特征使得传统的小范围、封闭式的科学研究方法和手段暴露出明显的不足，迫切需要e-Science这个使得在空间天气学领域中实现全球性合作成为可能的下一代基础设施。“十一五”国家重大科学基础设施项目——“东半球空间环境地基监测子午链”（简称子午工程）有机融合了观测台站、网络通信系统、数据和高性能计算等多种e-Science的要素，是空间天气领域e-Science应用的典范。



本图片由作者提供

子午工程：空间天气领域 e-Science应用的典范

王赤 黄朝晖 冯学尚

中国科学院空间科学与应用研究中心空间天气学国家重点实验室，北京 100190

摘要： 本文简要分析了空间天气领域的发展现状和趋势以及对e-Science的需求，介绍了子午工程的建设思路和内容，阐述了子午工程涵括的e-Science基本要素，表明子午工程是空间天气领域e-Science应用的典范。

关键词： 空间天气；子午工程；e-Science

Meridian Project: a Typical Example of e-Science Application in Space Weather

Wang Chi, Huang Zhaohui, Feng Xueshang

State Key Laboratory of Space Weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: We briefly analyzed the development status and trend of the space weather and its demand of e-Science, and introduced the Meridian Project, which covers all the basic elements of e-Science. In a word, the Meridian Project is a typical example of e-Science application in space weather.

Keywords: Space weather; Meridian Project; e-Science

► 1. 空间天气领域的发展现状、趋势和对e-Science的需求

1957年人造卫星上天，标志着人类进入了空间时代。历经其后短短50年的飞速发展，人类对其生存环境有了全新的认识，即地球是处在从太阳发出的超声速等离子体流和磁场的包围之中的。地球的空间系统由大气层、电离层和磁层构成，它和太阳大气、行星际介质一起构成相互耦合的系统——日地系统。来自太阳的能量、动量和质量输出的变化，制约着地球空间环境的形成、结构和变化。

空间物理学是伴随人造卫星发射进入空间而迅速发展起来的一门新兴的、前沿的多学科交叉基础学科。它把日球作为一个系统，研究太阳、太阳风与行星、彗星的上层大气、电离层、磁层、高能粒子以及其它星际物质间的相互作用。人类特别关注的是地面二三十公里以上直到太阳大气这一广阔的日地空间环境中的基本物理过程，这是当代自然科学最活跃的前沿学科之一。20世纪90年代末是空间物理走向“硬”科学时代的一个新的发展阶段，研究者强调科学与应用的密切结合，从而产生了一门专门研究和预报空间环境中灾害性过程变化规律、减轻或防止空间灾害、为人类活动服务的空间环境、空间天气学科^[1-2]。

空间天气学是一个多学科交叉的科学，主要体现在空间天气（状态或事件）的监测、研究、建模、预报、效应、信息的传输与处理、对人类活动的影响以及空间天气的开发利用和服务等方面的集成，是多种学科（太阳物理、空间物理、地球物理、大气物理、宇宙线物理、空间等离子体物理、磁流体力学、数值计算、图像处理等）与多种技术（信息技术、计算机技术、各种探测技术和成像技术、空间和地面技术系统与环境相互作用等）的高度综合与交叉。

空间环境探测是空间天气研究的基础，没有探测，空间天气研究就成为无本之木，无源之水，空间天气学研究对大量有效的观测数据的需求不言而喻。半个世纪以来，人类发射了数百颗航天器用于空间物理探测，人们发现了辐射带的存在，发现和证实了太阳风的存在，相继发现了太阳风中激波、高速流、Alfvén波和各种磁流体间断面的存在。从90年代开始，人们将日地系统作为一个整体进行研究。由于人类社会发 展诸多领域如航天、通信、导航等高科技领域和国家安全的强烈需求，空间物理和空间天气正迅速发展成为国际科技活动的热点之一。人们逐渐认识到把日地系统整体作为一个有机因果链进行研究的重要性。目前美国、欧洲、日本等航天大国既有监测和研究太阳活动的卫星，也

有探测太阳风的卫星，还有研究地球空间的卫星，组成了日地空间的“大观测台计划”。国际上在着力发展空间探测的同时，也十分注重地基观测。事实上，大型国际合作计划“国际与日同在计划”和“日地系统空间气候和天气计划”中，地基观测是非常重要的组成部分。正是由于具有“5C”（连续、方便、可控、可信和便宜）的优越性，地基观测既是空间环境监测的基础，也是空间探测计划的重要补充。由于要对空间环境进行全天时和整体性监测，世界空间环境地面监测正沿着多台站、网络式综合监测的方向迅速发展。加拿大最近提出了地球空间监测计划（CGSM），包括了协调观测、数据同化和模式研究等各个方面。作为世界最先进的空间环境监测国家，美国在众多的卫星探测计划之外，也提出了先进模块化的可移动雷达（AMISR）计划，通过2007~2012年和2013~2016年两个阶段的研制与发展，为研究迅速变化的高层大气以及观测空间天气事件提供强有力的地面空间环境监测手段。在此基础上，美国宇航局针对空间探测计划建立了一系列数据中心，美国国家空间科学数据中心（NSSDC）是美国空间探测计划长期的数据中心，也是美国宇航局空间科学数据永久的存档库（<http://nssdc.gsfc.nasa.gov>）。

20世纪迅速发展起来的IT

技术（国际互联网、XML和网络服务、高性能计算等）大大提升了探测数据的共享和利用，分散的数据由于网络观测台而虚拟集成在一起。然而对数据的充分利用、让数据转化为知识还需要模型和高性能计算的运用。空间天气的建模具有重要的需求，主要表现在以下几个方面：第一，任何探测卫星所探测的区域对于广袤的空间而言都是非常有限的，如何利用有限的轨道探测设计出揭示重大物理过程和规律的空间探测计划，建立在基本物理过程基础上的空间模型是不可或缺的工具；第二，空间建模所提供的空间环境的背景要素是进行航天器空间环境防护辅助设计的重要依据，特别是对于以前航天器很少涉足的空间区域；第三，空间建模还是人们从空间探测的有限区域数据中了解整个空间全貌和理解空间探测数据的重要手段。然而日地系统的太阳日冕、行星际、地球空间（磁层、电离层和中高层大气）的物理结构和动力学过程的复杂性，使得传统的理论分析变得非常困难，大规模计算的数值模拟方法成为攻克这一世界难题的最有效的途径。

空间天气学研究特点决定其国际合作与交流的日益扩大，这是一种需求互动的过程。美国和欧洲等空间强国尽管在空间天气的探测、研究和应用领域已经取得了实质性的重要进展，但在空间天气探测、研究、建模、预

报等方面仍然存在许多需要改进、完善的环节，所以他们在积极发展自己的空间天气研究的同时，广泛谋求国际合作。空间天气的全球性和局域性的二重性决定了空间天气研究的国际性。任何国家的探测卫星和地基设备所探测的空间对于广袤的空间而言都是非常有限的，没有一个国家的卫星和地基探测设备可以覆盖整个日地空间，这也是促成更有效与更积极的国际合作的重要原因，比如“国际与日共存”计划（International Living With a Star简称ILWS）就是21世纪前20年最大规模的国际合作日地空间探测计划，目前已有美、欧、俄、日、加拿大和中国等24个国家空间局和两个国际空间学术组织加入，该计划旨在协调各国系统探测从太阳到地球之间的各种空间活动。

空间天气学的多学科交叉、强烈依赖探测数据与超级计算及其国际合作特征使得传统的小范围、封闭式的科学研究方法和手段暴露出明显的不足，迫切需要e-Science^[3]这个使得在空间天气学领域中实现全球性合作成为可能的下一代基础设施。高性能计算资源、海量科学数据库、科学数字图书馆、野外观测台站、空间探测计划、大型科学装置、计算模拟的软件工具等通过高速的网络联接，组成e-Science的基础设施与资源，实现资源的集成与共享，形成支撑科研人员大

范围交流协作的协同工作环境；在e-Science基础设施支撑下，科研人员组成跨学科、跨组织、跨地域的虚拟研究团队，通过远程实验观测、计算模拟、协同工作等新的科研方法和手段开展科学研究活动，这就是科研活动的信息化或e-Science。其中，分布式的、海量的科学数据是e-Science的基础，与观察实验、理论分析鼎足而立的科学计算是e-Science的核心，e-Science的基本特点是开放式的科学研究、大范围的资源共享和广泛的协同合作，这意味着空间天气学研究者将越来越多地通过因特网等先进的信息化基础设施开展研究工作，比如可以通过高速网络完成极大规模的数据获取、先进计算和可视化实现以及其他协同工作和科研管理。

2. 子午工程和e-Science

“十一五”国家重大科学基础设施项目——“东半球空间环境地基监测子午链”（简称子午工程）^[4]有机融合了观测台站、网络通信系统、数据和高性能计算等多种e-Science的要素，是空间天气领域e-Science应用的典范。

2.1 子午工程的建设思路和目标

空间环境系指地球表面20~30公里以上的中高层大气、电离层、磁层、行星际空间和太阳大气。它是由太阳不断向

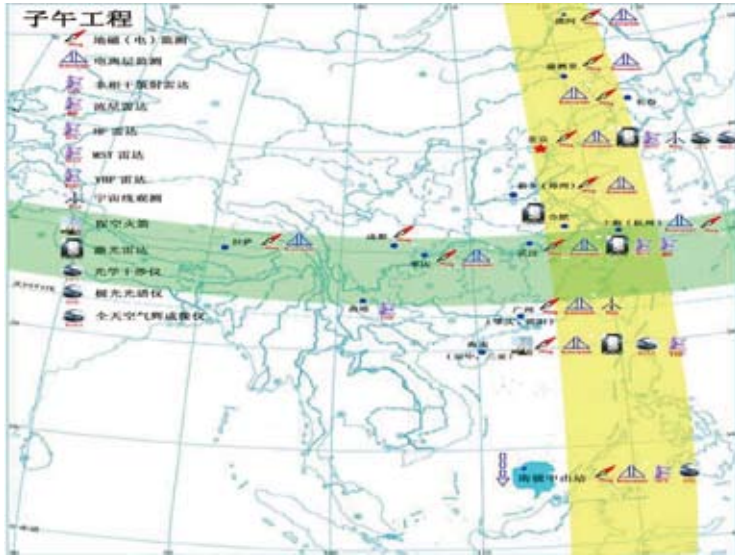


图1 子午工程台站分布图

▶ 外输出巨大的能量和物质与地球相互作用形成。它的形态、结构和变化主要受到太阳活动制约。此外，地球系统动力学过程，如地震过程和火山活动等，以及人类的各種生产、空间和军事等活动也对地球空间环境施以重要影响。它是空间科学研究的主要空间范围，也是现代人类航天、通信和空间军事等高科技活动的重要场所。

空间环境中的地球磁场线接近地球子午线的分布，太阳电磁辐射（可见光、X射线、紫外辐射等）沿子午线的天顶角效应，以及地球自转和绕日的公转效应，使地球空间环境具有随时间、随地域的全球三维结构。它们对磁层结构、电离层结构、带电粒子和等离子体输运过程等起重要的调控作用，使许多基本的物理过程沿子午圈发生，随着地球的自转，子午圈上的空间环境将经历白天和黑夜的变化。因而沿地球的子午线经圈配置空间环境监测

链，对于了解近地空间环境的全球结构的时间和空间变化规律具有重要的科学意义。

子午工程是对沿东半球 120° E子午线附近，利用北起漠河、经北京、武汉、南至海南并延伸到南极中山站，以及东起上海、经武汉、成都、西至拉萨的沿北纬 30° N附近共15个综合性观测台站（台站分布图见图1），建成一个以链为主、链网结合的，运用无线电、地磁、光学和探空火箭等多种探测手段，连续监测地球表面20~30公里以上到几百公里的中高层大气、电离层和磁层，以及十几个地球半径以外的行星际空间环境中的地磁场、电场、中高层大气的风场、密度、温度和成分，电离层、磁层和行星际空间中的有关参数，联合运作的大型空间环境地基监测系统。子午工程于2008年1月开始动工建设，预期3年完成建设。

子午工程将建造一条目前世界上跨度最长（南北陆地跨度

约4000公里，东西跨度约3500公里）、监测方法和手段最全（采用地磁（电）、无线电、光学、探空火箭等多种综合监测手段）、综合性最高（多学科交叉）的空间环境地基监测子午链。子午工程建成后将监测和研究我国上空空间环境的区域性特征和空间环境的全球变化规律，为我国各类用户提供完整、连续、可靠的多学科、多空间层次的空间环境地基综合监测数据。

这将全面提升我国在日地关系这一重大基础科学领域取得原创性重大科研成果的能力，提高我国空间天气预报能力和服务水平，减少和避免灾害性空间天气对空间和地面高技术系统以及人类健康造成的破坏和损伤。

2.2 子午工程的建设方案和采用的技术

子午工程的建设包括空间环境监测系统、数据与通信系统、研究与预报系统三大系统，结构框图如图2。

空间环境监测系统按观测手段不同分为地磁（电）、无线电、光学和探空火箭四个分系统，由15个监测台站（共95台监测仪器）组成。数据与通信系统利用互联网将监测数据传送到子午工程数据中心，并对数据进行集中存储、加工和服务。研究与预报系统将制定科学监测计划，建立必要的空间天气预报模式，并充分利用高性能计算条件，生

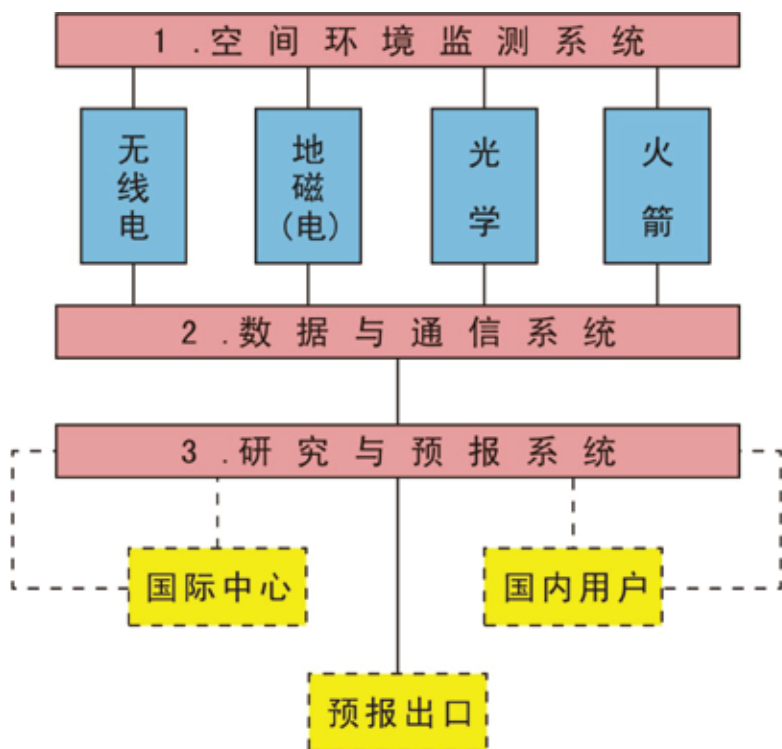


图2 子午工程的结构框图

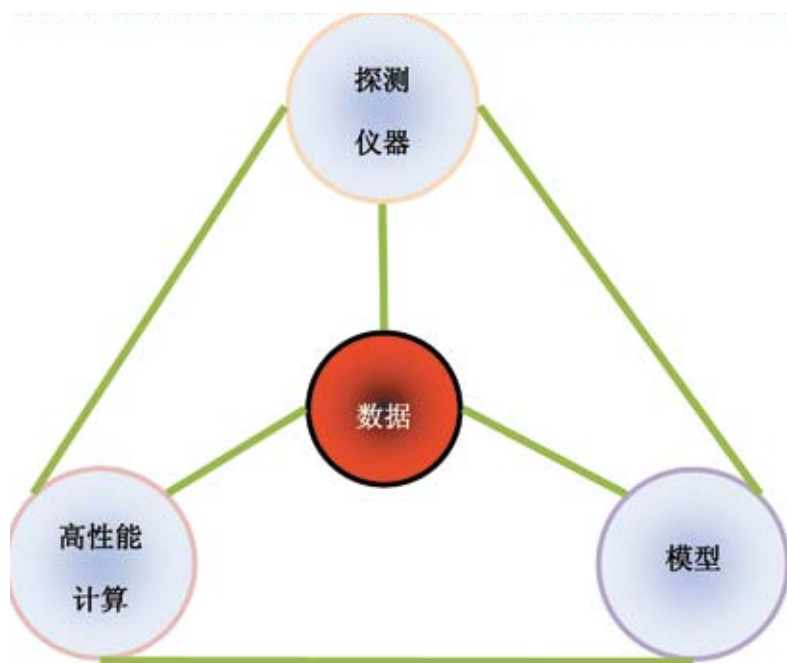


图3 子午工程e-Science基本要素

成相应的空间天气产品。

2.3 子午工程的e-Science要素

子午工程具备了e-Science的

各种基本要素（见图3），包括了e-Science的基础设施（开放共享的科学探测设备、数据资源、网络通信资源、计算资源）、核心

技术和应用（基础网格技术和空间天气物理和应用模式）。子午工程的建设中的探测设备、数据中心、高性能计算，都是通过互联网而有机联系在一起，为广大科研人员提供服务的研究与建模虚拟平台由研究平台、建模平台以及为虚拟平台服务的空间天气基础网格组成^[5-6]。

空间天气基础网格是基于互联网的面向空间天气模式的虚拟计算环境，可实现资源管理、数据动态迁移、任务调度和服务部署等功能，为科学家和广大用户提供一个计算资源共享、建模信息交互的平台，基于该平台实现远程使用高性能计算和调用空间天气探测数据或模式产品并显示模式结果，它涵盖几个方面的内容：（1）整合异构高性能计算机的应用，为用户提供安全的数据共享服务，提供透明的高性能计算环境；（2）为用户提供web化的计算服务；（3）为系统管理员提供远程web化的用户管理方式^[7-10]。

子午工程专用高性能计算环境是为空间天气物理模式计算需要而设计的一套由128结点（双路四核）的大规模并行计算机、大容量存储系统、高速局域网组成的高性能计算环境（含存储与可视化），该设备总体架构包括：

硬件：结点服务器、存储、机群域网、基础架构等几大部分；

软件：结点系统软件、机群系统软件、开发运行环境和应用

► 软件四大部分。

机群包括128个计算结点、1个管理结点、2个存储结点、1套独立光纤存储设备、1套系统域网、1套管理域网和完备的基础架构。机群是一个有机的、高性能、高可靠性的系统。系统的硬件都选用经过严格测试的主流产品，保证系统的可靠性；互联系统各组件的网络都是专用的高效网，通过机群核心的管理系统使得整个系统协调一致地运行，如同单独的一台高性能计算机一样为用户提供统一的服务。该机群系统预计每秒LINPACK理论峰值达9.8万亿次，按2008年中国超级计算机100强估算可以位列TOP100的第22名^[11]。

子午工程数据中心隶属于数据与通信系统，数据与通信系统旨在建立与国际接轨的空间数据共享与通信平台，构成具有世界先进水平的现代化高效信息传

输网络，以满足空间物理学科发展的需要，为该领域科学研究、学术交流和国际合作提供良好环境。数据与通信系统是一个开放的、基于标准的统一应用平台，能够实现信息交换和资源共享。该平台支撑数据、语音和视频业务，为逐步实现视频、语音、数据的“三网合一”奠定基础，同时平台具有完善的信息安全体系和相应的备份机制。

子午工程可谓有机融合了观测台站、网络通信系统、数据和高性能计算等多种e-Science要素，并通过e-Science的各种基本要素来实现其科学与应用目标，是空间天气领域e-Science应用的典范。

3. 子午工程e-Science预期效果

子午工程e-Science各要素的有效应用将极大提升我国空间

天气学研究的支撑水平及信息化环境。其先进的网络使得研究者、科研与探测工具和信息连接在一起（示意图见图4），消除了地域、时间、团队和学科领域的壁垒，这将极大改变和拓展传统的研究方法，推进空间天气学发展，为探索灾害性空间天气过程物理规律的国际前沿研究和形成空间天气连锁过程的整体性理论框架提供强有力的支撑，将实现空间天气基础研究成果向应用的转化，并初步建立以物理预报为基础的预报方法，为航天、通信、导航等高科技领域的发展以及需要提供相关的科学基础。

4. 展望

随着探测、网络、计算等技术的发展，以网络为依托的空间天气e-Science应用将会呈现以下几个特点：

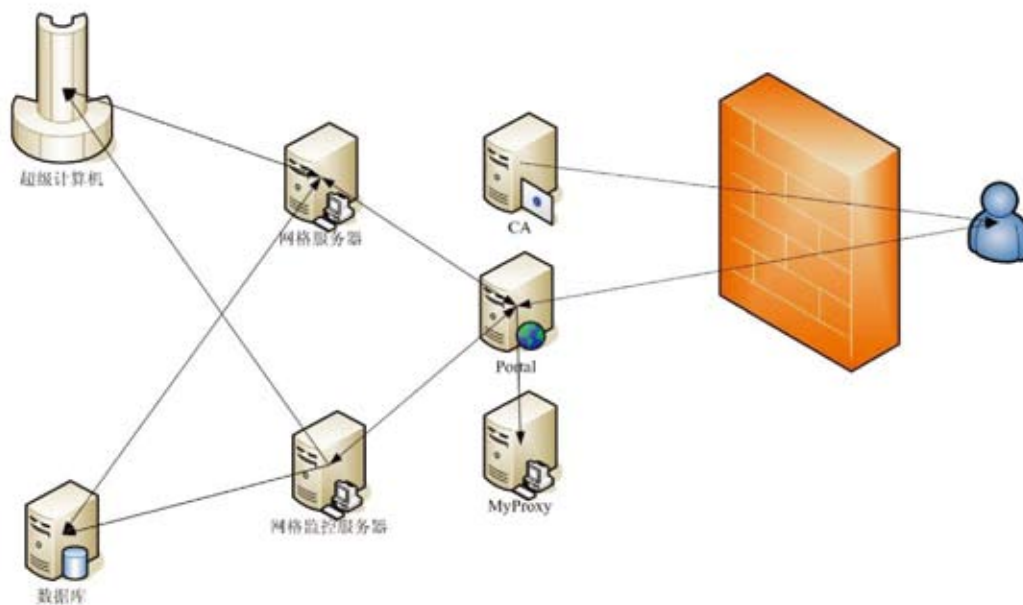


图4 子午工程e-Science流程示意图

1) 探测的领域不断扩大。

为了进一步满足空间天气的精细和全球范围的监测需求,建议在“十二五”实施的子午工程二期将在子午工程为骨干的地基监测链的基础上向经、纬方向延拓,形成“井”字形的地基监测网。国际空间天气子午圈计划将通过国际合作,充分利用国外资源,向北延伸至俄罗斯,向南经过东南亚有关国家以及澳大利亚等,并和西半球60°附近的子午链构成第一个、也是唯一一个环绕地球一周的空间环境监测子午圈。地基探测和天基探测相互配合,构成天地一体化空间天气监测系统。

2) 探测的数据呈数量级增长。

目前子午工程数据估计达到每日10GB。随着观测手段的丰富,探测领域的不断扩大,太阳、行星际、磁层、电离层等卫星观测数据被纳入到空间天气数据中心,国际合作交流的数据不断增加,预计空间天气的探测数据将呈数量级增长。

3) 高性能计算将发挥更大作用。

目前有关空间天气的物理模式,其运行速度还未达到实时预警的要求,即从行星际日地引力平衡点(L1)卫星观测的空间天

气时间到达地球空间的时间应在半个小时内完成,而现实的子午工程其计算能力完成一个事件的计算需要几个小时。随着高性能计算技术的发展,实时预警的要求可望实现。

4) 虚拟研究平台将越来越完善。

目前子午工程的空间天气基础网格还只是一个起步,随着e-Science及其应用技术的进步,包含了互联网络、超级计算和数据处理等信息化科研手段的虚拟研究平台将对我国和世界空间科学研究活动发挥越来越大的支撑作用。

参考文献:

- [1] 王赤.空间物理和空间天气探测与研究.中国工程科学,2008,6.
- [2] 冯学尚.空间天气学——21世纪的新兴学科.世界科技研究与发展,2000,2.
- [3] 桂文庄.什么是e-Science?.科研信息化技术与应用,2008,1.
- [4] 王赤,魏奉思.子午工程简介.中国地球物理学会第二十三届年会论文集,2007.
- [5] 王赤,黄朝晖.空间天气网格.<http://www.segrid.cn/page/15.html>.
- [6] 黄朝晖,王赤,胡友秋,郭孝城.灾害性空间天气数值预报模式的初步应用开发.第十一届全国日地空间物理学学术讨论会论文集,2005.
- [7] A.Menezes,P.van Oorschot,S.Vanstone.Handbook of Applied Cryptography.CRC Press,1996.
- [8] XML Encryption.<http://www.w3.org/Encryption/2001/>.
- [9] Open Grid Services Infrastructure v1.0.<http://www.gridforum.org>.
- [10] Web service activities.<http://www.w3.org/2002/ws/>.
- [11] 中国高性能计算机性能TOP100排行榜.中国软件行业协会数学软件分会.

收稿时间:2009年3月30日

作者信息



王赤

中国科学院空间科学与应用研究中心研究员,副主任,兼任空间天气学国家重点实验室主任,子午工程总工程师,研究方向为空间物理学。