

黄刚,屈侠,王鹏飞. 气象数据分析和诊断可视化平台的设计和构想及其在互联网上的实现 [J]. 大气科学学报, 2010, 33 (2): 153-159.
Huang Gang, Qu Xia, Wang Peng-fei Design of meteorological data analysis and diagnosis visualization system and its realization on the internet [J]. Trans Atmos Sci, 2010, 33 (2): 153-159.

气象数据分析和诊断可视化平台的设计和构想及其 在互联网上的实现

黄刚¹, 屈侠^{2,3}, 王鹏飞¹

(1. 中国科学院 大气物理研究所 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG), 北京 100029;
2. 中国科学院 大气物理研究所 季风研究中心, 北京 100080; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:在大气科学数据库“十五”工作的基础上,探讨大气科学数据资料分析管理和应用系统的实现框架以及结合 e-Science 提出在网络上的实现,并提出数据处理算法与数据分析系统结合的可行方案。

关键词:网络;数据分析;可视化

中图分类号: P409 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-7097 (2010) 02-0153-07

Design of Meteorological Data Analysis and Diagnosis Visualization System and Its Realization on the Internet

HUANG Gang¹, QU Xia^{2,3}, WANG Peng-fei¹

(1. State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG),
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, China Academy of Science, Beijing 100080, China;
3. Graduate University of China Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the tenth five-year plan on atmospheric sciences database, a new atmospheric data analysis, management and application and visualization system was discussed and its realization on the internet with combination of e-science was presented in this paper. A feasible project that combines common arithmetic and data analysis system was proposed.

Key words: network; data analysis; visualization

0 引言

“十五”期间,国家科学数据库已经基本完成了元数据管理系统和数据备份存储系统的工作,数据调用系统也有了很大的进展,数据访问服务系统 (DAS, Data Access System) 等已经可以使用,并取得了不错的应用效果。在数据库项目下一步工作中,不但要继续加强数据的积累,更为重要的是要加强数据的使用和服务。通过对目前数据库中心开发的数据管理工具的使用和分析中,我们发现目前的数

据管理系统比较注重数据的查询检索,非常适合于使用关系数据库的建库单位,但对于部分使用文件型数据管理的数据库支持还不够好,有改进的余地。

在大气科学领域,很多数据都使用通用的数据格式存储,而且这些数据是直接面向科研的。由于其格式与使用 Oracle 等软件管理的数据集不同,数据库中心提供的工具只能管理到元数据一级。因此为了便于这部分数据的使用和服务,发挥其科学价值,建库单位一般会使用比较特殊的数据管理系统,

收稿日期: 2009-08-20; 改回日期: 2009-11-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2006CB400500); 国家科技支撑计划项目 (2008BAK50B02); 中国科学院三期创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-220); 国家自然科学基金资助项目 (40775051; U0733002; 40890155; 40810059005)

作者简介: 黄刚 (1971—), 男, 北京人, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为季风动力学、全球变化及其区域响应、数值模拟, hg@mail.iap.ac.cn

主要的有:1)大气科学数据库早期使用的文件管理方式;2)为了下载的方便利用 FTP提供服务;3)在十五期间使用的 DODS (Distributed Oceanographic Data System)和 GDS (GrADS DODS)的网络管理方式等。

上述工作更主要的是提供简单的数据下载服务,在 e-Science^[1]的新科研背景下,仅停留在数据提供是不够的,需要更多方便用户使用科学数据进行科学研究的方法。为了实现这个目的,需要深入研究数据的格式和可能的科学内涵,提供对数据分析的手段,特别是如果能够将可视化技术的一些成果引入到数据管理系统中,简化可视化工作的难度,无疑是对科研工作的很大支持。

1 新型数据库的需求分析及提出

现在的科学研究更多是系统性的研究,需要跨学科领域的的数据支撑,但是受到中国的科研体制以及原始数据保密性等原因,很多研究人员没法拿到其他领域的原始数据。所以作为数据使用和提供的双方科研人员都希望有这样一个工具或者平台:数据使用者不用看到原始数据,但是通过该平台能够使用这些原始数据;而数据提供者不担心原始数据泄露的情况下也愿意提供经过该平台处理后的数据即数据的再分析结果。所以具备分析能力的跨学科资料整合的新型数据库的提出是很有必要,它能够提供一些分析和检索工具,既能让数据使用者方便地获取和使用资料,又能保证数据提供者的相应权利。

科学研究中常常需要下载大量的数据,以大气科学领域为例,中国科学院大气物理研究所的很多科研人员因分析需要临时去下载数以 TB 级的 IPCC 和 NCAR 的气象数据,这样既浪费科研人员的时间,也造成数据的重复下载、资源浪费,而且有些计算需要的数据量庞大,没法进行下载来计算。所以他们希望借助网络资源较好的单位,并提供一个分析平台,通过这个平台可以选择自己需要的数据进行在线分析和计算,最后在线看结果,并得到数据量已大大缩小的结果数据,这样可以大大节省网络带宽。

科学研究的很多数据分析过程实际上是一种将获取期望结果所需的一组操作按顺序链接成的操作链,这种操作顺序链可以成为科学工作流,如从数据输入、数据选择、数据计算、数据分析,最后到结果的可视化。在这个科学工作流的操作过程中,目前科研人员大部分都是手工写脚本语句反复频繁地把上

一步骤产生的结果数据输入到下一步骤的运算中去。这样产生的后果是:第一,计算模型没法共用;第二,科研人员花大量的时间在编写无谓的脚本语句,使得真正研究的时间越来越少;第三,老科学家由于年龄的关系没法自己亲手去编写这些重复的脚本,束缚了科研思路的拓展。所以科研人员需要提供一个基于可视化的能够把数据和模型无缝连接,让他们自行定制的分布式的集成分析工具。

尽管当今数据库具有简单的分析和可视化功能^[2-4],但其发展的核心集中在提供高效的 FTP 和查询服务、保障数据的安全、实现网络资源的共享等^[2-3,5],并且面向的行业过于单一。因此,传统意义上面向某一行业的数据库不能满足当今和未来科研的需要。未来的数据库必将是结合科研一线人员创建的集数据收集、挖掘、分析、可视化等于一体的综合的跨行业的高效的数据库,其建设也将需要各行业间的协作。该系统具有以下几个特点:1)数据收集上需要应用人员与数据库管理人员合作存入符合各行业应用规范的数据;2)数据库的分析平台中包含各行业需要的常规算法,并且该平台需要数学界添加最新的研究成果,并应用到各行业;3)数据分析和可视化需要各种数据分析与可视化软件的使用者与数据库开发人员的共同合作完成;4)未来的数据库将是多行业数据共享的数据库,为了实现数据更好地共享,库内数据的搜索功能的实现显得尤为重要,需要程序开发人员的工作。与此同时,为了实现数据资源最大限度的共享,国家层面上的合作是十分必要的。未来的数据库可以在世界各地设立分中心,中心与中心使用高速互联网连接,各自的数据可以镜像至其他分中心,更好地实现跨地区的数据共享使用。

2 功能设计和结构框架

2.1 常用大气数据格式和可视化软件介绍

为了能够更好地理解数据分析和可视化系统的设计,需要对气象数据格式和相关软件有一个简要的了解。大气科学领域中,除基本的 ASCII 和二进制数据外,常用的数据格式如表 1 所示。

NetCDF 是由 Unidata Program Center 发展的数据格式,其详细使用说明参见文献 [6],现在常用的版本为 3.5.0~3.6.1,基本使用办法是调用 libnetcdf 库,它提供了支持 C、C++、Java 和 Fortran 语言的调用接口 (API)。目前已有很多工具可以方便地处理 NetCDF 数据,如 ncdump、CDO (Climate Data

Operators)、NCL (NCAR Command Language)^[7]、GrADS、NCO (NetCDF Operator)等。其中 ncdump 是 NetCDF 软件包自带的工具,可以查看 NetCDF 文件信息,也可以选择变量进行解码,输出为文本格式或二进制格式的数据文件,如果用于生成天气图形,需要进一步的处理。NCO 可以方便的完成 NetCDF 文件的常规运算,以及文件的合并和分解等操作。

表 1 常见的大气科学数据格式

Table 1 Common data format in atmospheric sciences

数据格式	说明
NetCDF	network Network Common Data Form,是一种自描述 (Self-Describing)数据格式,不依赖于计算机平台,适合科学数据的交流。
GRIB	GRIBed Binary,是由世界气象组织提出的一种大气科学专用数据格式。
HDF	Hierarchical Data Format,是一种面向对象的自描述数据格式,它使得在不同的计算机系统中分享数据成为可能。

GRIB 是由世界气象组织提出的数据格式^[8]。由于 GRIB 数据格式使用了针对气象数据特点的压缩编码方式,一般数据大小仅为 NetCDF 格式的一半,可以节省存储空间。处理 GRIB 数据的常用工具包括 wgrib、GrADS、NCL、CDO 等。由于 GRIB 数据没有像 NetCDF 一样提供一套数据调用的 API,所以使用时要进行预处理或要求应用程序直接支持对 GRIB 数据的读取。wgrib 可以看成是对 GRIB 数据的一种预处理程序,它与 ncdump 的功能类似,可以解码 GRIB 数据,输出文本文件和格点数据文件,供分析程序使用。

HDF 是由美国 NCSA 发展的一种数据格式,使用元数据 (metadata)保存数组维数等信息,从而对文件结构进行自描述。HDF 遵从面向对象的编程原则,在同一个 HDF 文件中可以保存多维数组、表、图像等,可以随机访问其中的某一个对象,而不是以数据流的方式保存和访问数据。该数据格式分为 HDF4 和 HDF5 两个版本,二者并不兼容,可通过专门工具进行转换。MATLAB、GrADS、IDL 等软件可处理 HDF 数据。

以上的几种数据可借助专门软件互相转换。

表 2 罗列了常用的大气科学数据分析与可视化软件,由于篇幅所限,不做全部详细介绍。

GrADS 由于开源和免费,是大气科学领域常用的数据分析和显示软件,其使用方法有专门的介绍^[9]。它的优点是画图简单快速,占系统资源小,

而且提供了许多大气领域中常用的函数,如求涡度、散度、面积平均等,但因 GrADS 功能所限,不适宜做软件开发用。

表 2 大气科学常用的数据分析与可视化软件

Table 2 Common software used for atmospheric data analysis and visualization

软件	简要说明
GrADS	Grid Analysis and Display System, 数据分析与显示软件 (免费)
Ferret	为大气海洋学科设计的交互式数据分析与可视化软件 (免费)
NCL	NCAR Command Language
MATLAB	是建立在向量、数组和矩阵基础上的一种分析和仿真工具软件包,可绘制二维、三维图形,输出结果可视化
CDO	Climate Data Operators
IDL	The Interactive Data Language
AVS	Advanced Visual System: Data Visualization, 三维可视化软件
Vis5D	处理 5 维格点数据的可视化软件 (免费)

注:前 6 个以二维为主,后 2 个以三维为主。

NCL 是美国 NCAR (National Center for Atmospheric Research)^[10] 开发的绘图软件包 NCAR Graphics 的重要组成部分,是一种专门用于大气科学数据处理和显示的软件,也可用于地球科学数据的一些处理上,其最新版本为 5.0.0^[7]。NCL 与 ncdump 和 wgrib 不同,它集成了对多种数据格式的支持,可以完成对 NetCDF、HDF、GRIB、二进制等文件的读写,而且提供了 NetCDF 和 GRIB 数据相互转换的工具 grib2nc。NCL 提供了大气科学领域中大量函数,包括 EOF、SVD、插值、小波分析、谱分析、区域平均等,是大气科学数据处理和可视化软件中函数库相对最全面的,其直接输出的图形符合国际学术刊物上的绘图标准,并且此软件对 FORTRAN 和 C 语言有一定的支持。

CDO^[11] 是马普气象研究所 (Max Planck Institute for Meteorology, M PIM) 开发的气候数据软件。它提供了对 NetCDF 和 GRIB 等主要数据格式的支持,特别是它非常适合处理欧洲气象部门的全球气候和区域气候模式产生的数据,对数据的切割、合并和基本的数据运算等的操作简单实用,是一款非常好的大气科学数据分析预处理软件。

MATLAB 是常用的数据分析软件^[12],将 MATLAB 作为数据分析软件是基于如下的综合考虑。1) 其应用较广,有各种函数库和代码可供使用; 2) 软件的版本更新和服务都跟不上发展; 3) 本身是跨平台的,书写

的 m 文件可以在各种系统下运行; 4)支持交互功能 (GrADS对交互支持较差); 5)有 WEB 模块和相应的开发工具; 6)对 NetCDF, DODS 等的文件格式支持较好; 7)在气象相关领域已经较好的应用。

应用在大气科学领域的三维动态数据可视化软件不多。Vis5D 是一个免费的三维可视化软件^[13], 应用较广, 只要将数据按照规定的格式存储, 成为 Vis5D 可以识别的数据, 就能实现动态效果, 但功能有限。AVS 是一款功能强大的三维数据分析与可视化软件。普业等^[14]曾在数据库学术会议中介绍了利用 AVS 进行大气环流模式数据的可视化方法。在此基础上, 马晓光等在 2005 年成功地设计了具有高显示度的台风云娜、城市热岛等典型天气现象的可视化实例。从我们的实际应用来看, AVS 将是用于三维动态可视化的首选软件平台。但要使 AVS 取得较好的可视化效果是一件复杂的工作, 涉及到数据格式准备、数据插分算法、渲染、抛面、流线等很多内容。对常见数据场的可视化处理逐步实现标准化和模块化, 有可能使 AVS 使用的难度降低, 更进一步, 将成熟的模块与 WEB 服务器结合起来,

有可能使普通用户通过简单的界面选择操作就得到具有一定效果的动态天气图像。

此外, 科学数据库项目的可视化建设专题也取得了相当的进展^[15], 目前已经具有 VizWall 可视化系统。系统包含了较高计算能力的处理器系统、图形显卡系统、大屏幕显示墙和支持 OpenGL 的开发工具。如果能够利用该系统的强大性能开发出气象可视化实例, 将是数据库系统应用的一个范例。

2.2 新型数据库的功能设计和结构框架

本文作者在国际上的著名研究中心马普气象研究所 (MPI-M) 访问期间, 调研了其大气科学信息管理系统的情况。马普气象研究所使用的是一套自行开发的 JAVA 应用程序来管理所有的数据, 用户需要下载专用的 JAVA 客户端程序, 在管理员开设帐号后对授权使用的数据进行下载。用户的对数据的查询检索也由 JAVA 客户端完成, 既能查到数据的简介、位置也可以查到所有者的信息, 如果需要可与数据所有者联系, 由数据的所有者授权下载。由于版权的原因, 此管理系统仅马普研究所和少数单位在使用。图 1 展示了马普气象所的气候数据和模式结构^[16]。

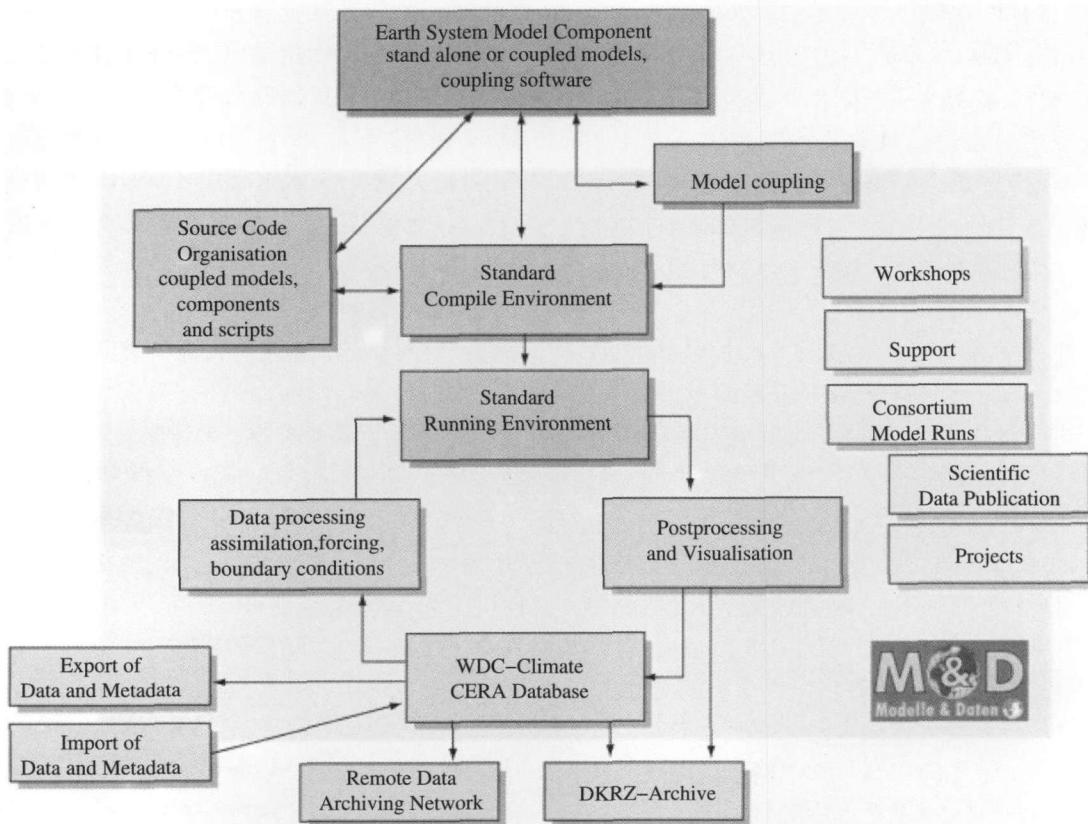


图 1 马普气象所的模式和气象数据管理系统^[16]

Fig 1 MPI-M model and meteorological data management system^[16]

与马普气象研究所不同,美国 NCAR 的数据中心使用的是由 Rhode Island 和 MIT 联合开发的 DODS 系统,这套系统目前发展成为 OPeNDAP (Open Source Project for a Network Data Access Protocol) 项目^[17],该项目的开发伙伴包括 NASA、AGU、NCAR 等十余个科学研究部门,已经有包括 NOAA、NCAR 等数以千计的用户在 OPeNDAP 基础上部署和开发的应用系统,为研究人员和数据管理人员带来极大的便利。OPeNDAP 是一个开源项目,是一套简化科学数据网络发布、调用和管理的开放式框架,它的设计思想是以简单的方式访问数据。研究人员摆脱具体的数据结构、存储格式和访问协议束缚,不必改变使用者原有熟悉的分析和可视化工具的习惯,并极大扩展了数据网络访问的内容;数据库建设过程不必重复投资,新旧数据集可以无缝结合。

德国马普气象研究所和美国 NCAR 等的数据库管理系统比原始的文件式管理系统有了很大的进步,但本质上仍然是以提供数据为主。但显然国外同行已经注意到了,在提供数据的同时,提供数据分析工具的重要性。在 OPeNDAP 项目中提供了一个 JAVA 客户端,部分功能与德国马普气象研究所的数据下载工具相似,并且增加了对数据进行分析的功能。采用的是下载数据到客户端再由 JAVA 进行运算的方式,对 PC 机的内存和速度要求非常高,往往处理一个 100M 以上的数据文件会耗尽 PC 机的计算资源。

目前大气科学数据库里使用了 DODS 的部分管理方式,而且为了方便使用 GRIB 格式的数据,引入了 GDS 的数据管理系统。系统后端的显示平台目前使用的是 LAS (Live access server)^[18],LAS 是不同于 FTP 下载的一种数据下载和显示系统,目前只能实现 A 到 A 的功能即只显示 A 数据的某些片段,而科研上不仅需要 A 到 A 的显示,更需要 B = f(A) 的功能即显示数据 A 的一些更深层次的信息也叫做某种层次的数据挖掘。大气科学数据库需要逐步实现从数据收集整理向数据分析服务的转变,以提升数据管理的水平,提高科研工作效率。而且目前对大气科学数据分析和处理的方法也急需一些标准化的处理方法以求得到系统的检验。因此急需建立该平台,使科研工作者尽早从繁重的数据检索编程等繁重的工作中解脱,真正做到数学的结果唯一的经得起检验的东西交给计算机完成而物理的思路等是科学家真正应该静下心来思考的问题,这个

也是目前我们工作中所缺少的。这个平台的建立对科学家从繁重的计算工作中解脱而回归物理本质的思考是十分必要和急需的。

由于版权及应用环境等问题,目前国际上流行的数据库管理系统难以完全照搬到我们的大气科学数据库,这就需要我们提出一个符合自身实际需求的数据分析与可视化平台,来满足广大科研用户的要求。

在下一步的数据总系统中除了继续支持查询检索之外,还将增加两大模块,一为数据分析和可视化系统,二为适合大量数据上传下载的数据交换系统(图 2)。由于篇幅所限,本文仅对第一模块进行较为详细的描述。该系统是基于网络的、跨平台的、开放的,其中的分权海量数据交换系统借鉴了马普的数据管理经验。

数据分析与可视化系统框图见图 3,主要包括:数据资源层、 workflow 执行引擎层、运行服务层。数据资源层主要是负责存储 workflow 中相关的信息,如计算模型和计算时需要调用的数据等。运行服务层为执行引擎提供运行时期的各种服务,包括流程定义的解析、任务指派、 workflow 列表管理、日志管理等。 workflow 执行引擎是整个系统的核心,采用构件化的组装结构来实现 workflow 执行引擎。主要的目的是能实现大气科学计算模型的动态组装和这些计算模型的重用。

用户的操作实现完全基于 IE,不用安装任何客户端软件,在 IE 利用拖曳等动作即可实现科学工作流程。此系统的工作的基本流程如下:用户可以通过 IE 界面来选择数据、计算模型和图像属性(如果用户不熟悉数据的存放位置,可利用系统的数据搜索功能进行定位),提交给 workflow 执行引擎, workflow 执行引擎将数据输入后,用户可按需要进行下一步流程:1)简单显示,如显示大气科学研究需要的某时全球气温数据;2)选择需要的计算模型,如 EOF、SVD 等,然后系统调用相应的程序进行数据分析,其结果可显示成所需的图像,或者可以以数据、文件的形式传递给用户,或者作为进行用户所需下一步计算的数据。与传统的数据库相比,此数据库的优势在于:1)它可以按照用户的需求提供经过加工的数据,节省了科研人员编写、调试算法程序的时间,提高了科研效率;2)数据库独特的数据搜索功能,可以让用户迅速地对数据进行定位,并从数据库中挖掘出可用的信息;3)此数据库系统可以依托与计算能力较强的机构,如中国科学院网络中心,而对用

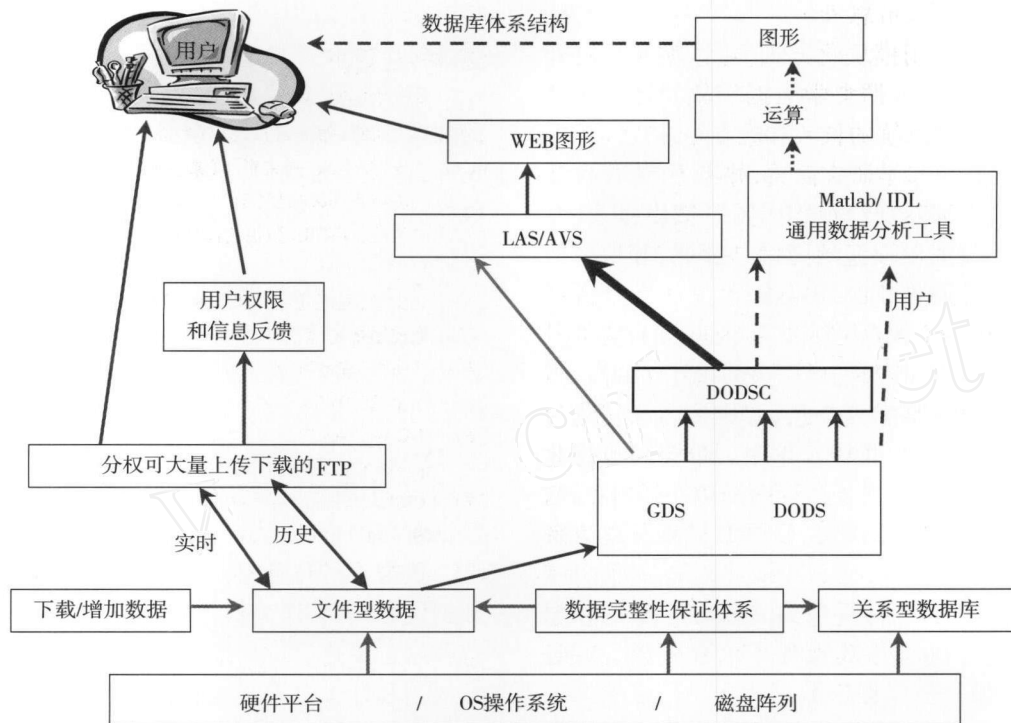


图 2 总体结构 (左侧为分权的海量数据交换系统,右侧为数据分析和可视化平台)

Fig 2 Main structure: Decentralized mass data exchange system (left) and data analysis and visualization platform (right)

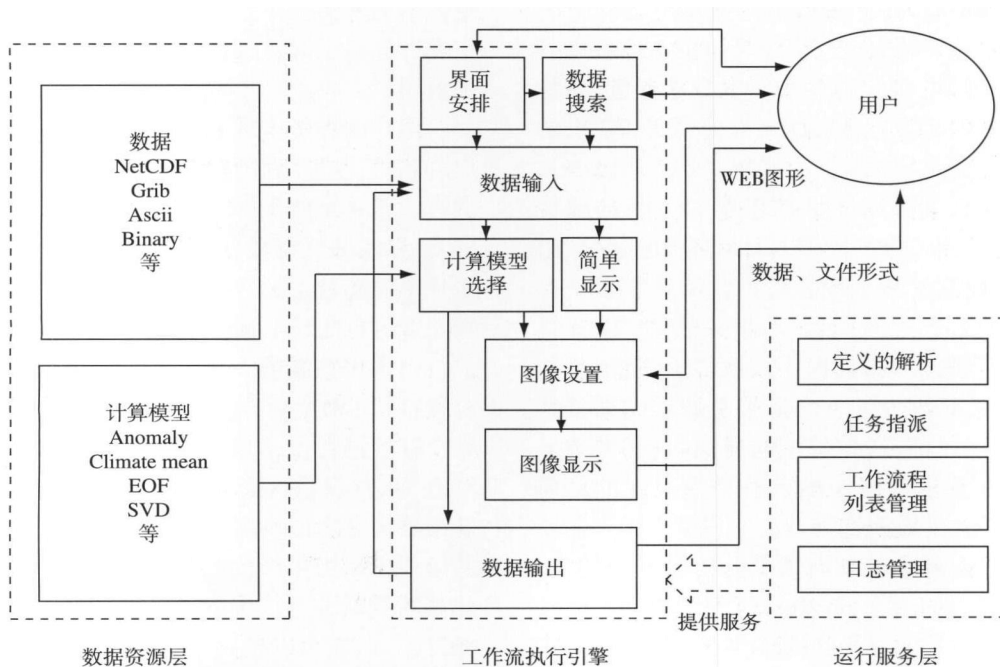


图 3 基于 WEB 的大气科学数据分析与可视化系统的流程图

Fig 3 Flow chart of the web-based atmospheric data analysis and visualization system

户端硬件要求不高; 4)该系统对科研人员创新思路的提出起到了很大的辅助作用,真正做到使科研人

员从繁重的科学计算工作中解脱出来,而回归科学问题的本质——物理层面上的思考,做到数学的可

以验证的可编程计算的交给计算机,而物理的结果的可视化留给科研人员思考。

系统的开发采用模块化方式,建立项目开发专区和相关技术文档,按照科学数据库软件开发的规范进行。开发此套系统的核心和难点在计算模型库的建设。针对大气科学研究需要,并考虑 NCL 丰富的函数库和符合国际刊物标准的图形输出格式,此系统计算模型和图形设置的开发是面向 NCL 来设计的。随着开发的不断深入,计算模型的开发也可以针 MATLAB、IDL、CDO 等来设计,使得系统可以根据用户计算的需要选择合适的数据处理软件。当然该分析模块仍需要数学界的最新研究成果转化为气象所需的计算方法,并纳入库中。希望其他行业参照大气科学分析库的制定规范进行整理并共同纳入国家科学数据库的体系中,目前大气库只是该系统的一个子库。整套系统的完成还需要大量的时间。目前,除数据搜索模块外,大气库的框架已基本实现,系统已经能够实现简单的计算和可视化功能。

3 讨论

大气科学数据的分析和可视化系统是根据科研需求和以前的工作基础提出的一套承前启后的系统。设计上参考了国内外最新研究进展,而且提出了一个新的结合 e-Science 的大气科学数据再分析平台,该平台是对未来数据库建设的创新性思路,它具有科学性、创新性和必要性。

本系统从设计理念上强调对数据的科研内涵和技术问题的统一,使科学数据库的建设从单纯的数据保管员向数据的研究者转变,加强科学数据库工作的科学性。

系统的实现难点在于数据分析系统与数据算法的集成,另外由于部分工作从客户端转移到服务器端进行,对处理机的速度和内存等有较大需求。另外一个问题是,大气科学数据量巨大,这样的一套系统需要各个环节都能够协调稳定的工作,软件的稳定性和可靠性需要特别的加强。

本系统重点考虑了大气科学的数据问题,实际上,只要处理程序稍作改动,其体系结构完全可以适应一般的地质研究部门。而且系统可以进一步完善,如与科学数据库网格平台等结合起来,其使用范

围能够进一步得到扩展。

参考文献:

- [1] 陈沈斌. 地球科学 e-Science 探索 [C] / 科学数据库与信息技术论文集 (第 7 集). 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 19-24.
- [2] 高梅, 接连淑, 张文华. 气象科研数据共享系统建设 [J]. 应用气象学报, 2004, 15(S1): 17-25.
- [3] 史宏达, 邱兆山. 数值化海区框架的建立 [J]. 海岸工程, 2003, 22(1): 41-47.
- [4] 王少平, 程声通, 贾海峰, 等. GIS 和情景分析辅助的流域水污染控制规划 [J]. 环境科学, 2004, 25(4): 32-37.
- [5] 马明国, 陈贤章, 李新. 中国冻土圈网络数据库设计 [J]. 冰川冻土, 2000, 22(3): 257-261.
- [6] UCAR. NetCDF [EB/OL]. (2009-05-30) [2009-06-09]. <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>.
- [7] CISL. Overview of NCL [EB/OL]. (2009-04-04) [2009-06-09]. <http://www.ncl.ucar.edu/index.shtml>
- [8] WMO. Satellite Data Formats and Standards [EB/OL]. (2009-06-04) [2009-06-09]. <http://www.wmo.ch/pages/program/sat/Formatsandstandards.html>
- [9] 王军. GADS 实用手册 [R] // LASG 技术报告: No. 15. 2005.
- [10] NCAR. About NCAR's Core Research [EB/OL]. (2009-06-07) [2009-06-09]. <http://www.ncar.ucar.edu/research/>.
- [11] MPIM. CDO - Climate Data Operators [EB/OL]. (2009-04-16) [2009-06-09]. <http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/software/cdo/>.
- [12] MathWorks. MathWorks products overview [EB/OL]. (2009-03-01) [2009-06-09]. <http://www.mathworks.cn/products/pfo/>.
- [13] SSES. Vis5D [EB/OL]. (1998-09-17) [2009-06-09]. <http://www.mathworks.cn/products/pfo/>.
- [14] 普业, 王鹏飞, 徐予红. AVS/Express 开发气象三维可视化系统 [C] / 科学数据库与信息技术论文集 (第 7 集). 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 394-399.
- [15] 赵骅, 郑依华, 董科军. 科学数据库可视化环境 [J]. 科学数据库通讯, 2005, 2: 52-55.
- [16] MPIM. Organization of MPIM [EB/OL]. (2009-04-16) [2009-06-09]. <http://www.mpimet.mpg.de/en/institut/organisation.html>
- [17] OPeNDAP. What is OPeNDAP? Documentation [EB/OL]. (2009-05-18) [2009-06-09]. <http://opendap.org/>.
- [18] Hankin S, Callahan J, Sirott J. LAS overview [EB/OL]. (2008-12-16) [2009-06-09]. <http://ferret.pmel.noaa.gov/LAS/las-overview>.

(责任编辑:倪东鸿)