

高能物理与数据网络

陈 刚

高能物理是物理学研究中最前沿的科学研究。由于高能物理研究越来越复杂，近代高能物理学实验规模非常大，常常需要举多国之力，数百甚至上千的物理学家共同参与。为了便于科学家进行信息交流和共享，物理学家们在 20 年前发明了万维网（WWW）技术，使得科学家们能够通过互联网方便地进行信息的共享。WWW 技术是 20 世纪最重要的技术革命，彻底改变了人们的生活。

从 21 世纪初开始，世界各国的物理学家们联合起来，共同建造规模更大的高能物理实验，如欧洲的大型强子对撞机 LHC，中国的正负电子对撞机 BEPC II，美国、德国、日本等的大型对撞机，以及许多大型的宇宙线物理实验。所有这些实验每年产生的数据将达到约 200 亿兆字节（20PB），相当于 300 亿本《红楼梦》或 2000 万部电影的信息量。物理学家们需要对这样海量的数据进行分析和研究，因此需要一个强大的由十几万台计算机组成的超级计算机系统。这样一个超级计算机不太可能容纳在一个机房里，因此科学家们研究开发了网格（Grid）系统，即采用网格技术将分布在世界各地的计算机整合到一起，形成一个分布式的计算机系统，共同承担艰巨的数据分析计算工作。

“网格”是一个新出现的概念，代表了一种先进的技术和基础设施，是继 WWW 后又一次重大科技进步。什么是网格？网格就是一个集成的计算与资源环境，或者说是一个计算资源池。网格能充分吸纳各种计算资源，并将它们转化成一种随处可得、可靠的、标准的、经济的计算能力。除了各种类型的计算机，这里的计算资源还包括网络通信能力、数据资料、仪器设备、甚至是人等各种相关资源。网格技术的创始人之一依恩·福斯特（Ian Foster）说：“今天我们使用电力资源时，不管电力从何而来，也不管由何产生，一旦接入电器，便立即可以工作，这就是电力网。网格技术的目的就是使计算资源如同电力资源一样，当我们使用的时候，只需要接入自己的终端设备，就可以访问计算资源并获得需要的计算服务。”网格是借鉴电力网的概念提出来的，网格的最终目的是希望用户在使用网

格计算能力时，就如同现在使用电力一样方便。网格希望给最终用户提供的是与地理位置无关、与具体计算设施无关的通用的计算能力。

网格作为一种新的超级计算机，有四个基本要求：

1. 可靠性要求：即网格的计算能力必须保证是持续、稳定的，而且网格还应该满足各种形式的安全要求，如数据传输加密、权限认证等。

2. 标准化要求：网格对用户提供的计算能力应该满足一定的标准，有一种比较统一的形式，以便于以统一的方式进行访问。

3. 易访问性要求：网格的易访问性要求是指用户可以在任何时间、任何地点，以自己习惯的形式访问和使用各种网格资源。

4. 价格低廉要求。网格费用的低廉性要求是网格能够被普遍接受和推广的前提。网格正是通过将资源充分共享，最大限度发挥资源的使用价值，将原来闲置和浪费的资源收集起来供网格用户使用；而且，网格还可以避免以前由于地理位置限制所带来的各种额外开销。

网格概念的提出将从根本上改变人们对“计算”的看法，因为网格提供的是与以往根本不同的计算方式，它所提供的计算能力是以前所无法得到的，也是不能够通过其他方式得到的。网格概念的核心就是突破了以往强加在计算资源上的种种限制，使人们可以更自由、更方便地使用计算资源。

网格技术突破了计算能力大小的限制。在单机运行时代，绝大多数用户无法得到足够的计算能力，为了解决计算资源稀缺的问题，集群技术应运而生，虽然这在一定程度上解决了大规模计算的问题，但对于大部分超大规模计算来说，计算能力的缺乏仍然是严重的问题。网格技术让人们看到了希望，它所提供的远远超过我们想象的计算能力，足以满足任何计算的需求，因此，就突破计算能力大小的限制来说，网格技术具有划时代的意义。

网格技术突破了地理位置的限制。从世界上出现第一台计算机至今，计算机已经在全世界范围内得到了普及。但是，据统计，在全球目前所拥有的全

部计算能力当中，有近 3/4 集中于少数国家或机构，地理上的分隔使这些计算资源形成了一个计算资源的孤岛，以致产生了大量急需使用计算能力的用户无法得到满足与大量的计算能力闲置并存的现象，造成了资源的严重浪费。网络技术突破了地理位置的限制，使资源的使用者和资源的所在地位置无关，能够使任何用户在任何地方方便地使用全球范围内的资源。

网络技术打破了传统共享或协作方面的限制，并改变了以前对资源的共享停留在数据文件传输层的现象，允许用户直接对资源进行控制，并使共享资源的各方在协作时可以通过多种方式更广泛地交流信息，充分利用网络提供的各种功能。

高能物理网络计划的初始目标是为大型强子对撞机 (LHC) 提供计算资源，包括 CPU 计算资源、存储资源和网络通信设施等。LHC 建造在欧洲核子物理研究中心 (CERN)，是世界上最大的高能物理研究计划，也是高能物理领域的最前沿研究。2009 年开始运行后。LHC 上的探测器每年将产生海量实验数据，LHC 刻度、模拟、重建和分析需要非常强大的计算资源支持。当 LHC 加速器正式运行以后，全世界 500 多个科研机构和 6000 多位物理学家需要访问由 LHC 获得的实验数据，并且必须保证这些实验数据在 15 年的生命期内可被利用。

建立这样一个世界上最大的粒子物理实验，任

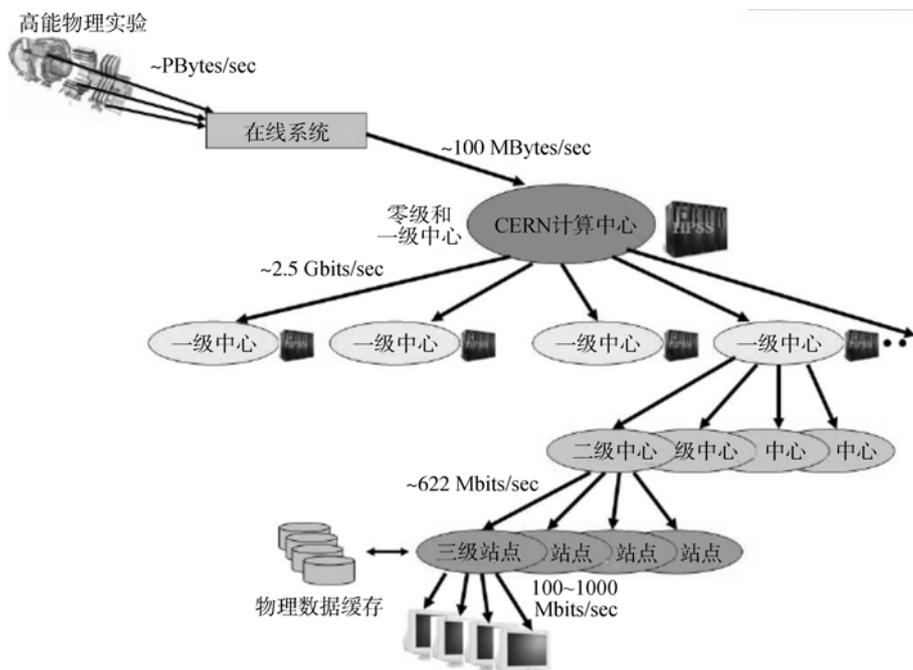


图 1 WLCG 体系结构

何一个研究机构都无法承担建造、运行和维护其计算环境，包括资金、策略、技术和人员。另外，传统的集中式计算和存储模式已经不能满足 LHC 大型实验的需要。因此，合作成为唯一可行的解决方案，需要采用最新的网络技术来解决面临的难题。基于这些原由，CERN 提出并主持开发了 WLCG (Worldwide Lhc Computing Grid) 网络项目，其目的就是为了给全世界所有使用 LHC 的高能物理研究机构提供强大的数据存储和高性能计算服务。

WLCG 是当前世界上最成功的大型网络系统之一，它专注于高能物理计算，并可应用于生物、大气等其他科学研究领域，从而成为一个科学研究的通用计算平台。通过 WLCG 项目，可以有效地共享、管理和分配全球范围内的计算和存储资源，从而避免资源浪费，提高资源利用率，节约投资成本。目前包括欧洲、北美、亚洲在内的 50 多个国家加入了该项目的合作，在计算能力和存储能力等方面都已经具有较大的规模。

WLCG 采用网络技术，按分级 (Tier) 机构来组织计算环境。按设计规划，WLCG 体系结构分为五层：第一层，CERN 的零级中心 Tier-0；第二层，国家/地区的一级中心 Tier-1；第三层，国家/地区的二级中心 Tier-2；第四层，研究机构的三级中心 Tier-3；第五层，物理学家的分析平台。

WLCG 体系结构和 LHC 计算模型如图 1。

LHC 的实验数据将被按照以上 Tier-0 至 Tier-3 四层结构分布在全球范围内, 最基本的实验原始数据保存在 Tier-0, 在对数据进行初步处理以后, 这些数据将被分发到 Tier-1 站点去, 这就要求这些 Tier-1 站点必须是能够保证充足存储容量和不间断用户支持的大型计算中心; Tier-1 站点必须保证数据可以被 Tier-2 站点随时利用。Tier-2 站点由一些共享的计算设备组成, 并确保充足的存储容量和足够的计算能力便于物理学家通过 Tier-3 的计算平台来访问这部分资源。因此 Tier 各级功能有所不同, Tier-0 主要负责原始数据记录、数据重建和向 Tier-1 中心分发数据; Tier-1 负责数据分析、数据存储管理、再处理和地区支持中心; Tier-2 负责磁盘存储管理、模拟、终端用户分析和并行交互分析。

由于 WLCG 网格系统一方面可以为高能物理提供服务, 同时还可以应用于其他领域, 该网格系统已经成为多用途的数据网格平台。到目前为止, 全世界 270 多个站点加入 WLCG 网格 (如图 2 所示), 形成了具有约 10 万个 CPU 的计算能力, 每天有数以万计的计算任务在该网格平台上运行, 涉及包括高能物理在内的数十个不同领域的应用。



图 2 高能物理数据网格部分站点

中国有多个研究机构与大学参加了 LHC 实验, 在前期的探测器建造工作中投入了大量的人力与物力, 仅在资金上就达到了数千万元人民币的规模, 为 LHC 实验的建造做出了重要贡献。2009 年夏天, LHC 将正式开始运行, 中国的科学家们将积极参与 LHC 实验的数据分析研究, 并争取获得一流的物理成果。通过参加国际高能物理数据网格 WLCG, 可以利用该系统的全部计算资源进行自己的物理研究。另外高能物理研究所拥有正负电子对撞机的 BESIII 实验、羊八井宇宙线实验等众多的国内国际合作实验, 需要将这些实验的所有数据长期保存下

来进行物理分析, 同时还需向合作单位分发数据。实际上, BESIII、羊八井等实验所需的计算、存储等方面的资源非常巨大, 迫切需要采用网格技术, 整合不同单位的资源进行协同工作, 加速物理研究成果的出现, 提高我国在世界物理领域的竞争力。WLCG 网格是世界上最先进成熟的网格系统之一, 参与并引入该网格系统对我国的网格技术发展具有重大意义。

从 2001 年开始, 高能所开始探索与研究网格计算技术在高能物理中的应用。在国家自然科学基金委等部门的支持下, 建立起了高能物理网格实验床, 并加入国际高能物理网格环境, 为 LHC、羊八井宇宙线、BESIII 等实验提供支持。2006 年, 高能所与 CERN 签订了建设高能物理网格二级站点的协议, 并开始建设网格站点。此后, 高能所与国外同行一起在网格中间件、网格文件系统、网络安全, 资源预测与作业调度, 网格门户等领域进行大量的研究工作。高能所还建立了具有亚洲领先水平的网络安全授权与认证系统。高能所的网格平台为国内的科学家提供了优质的计算服务, 在 LHC 物理、羊八井宇宙线物理、BESIII 物理等方面取得了一批重要的成果。高能所还积极参与生物信息研究的应用, 为疟疾、禽流感病毒研究做出了贡献。

目前, 高能所计算中心建立起完整的 WLCG 二级站点, 和若干小型网格站点, 包括中国科技大学站点、山东大学站点、北京大学站点、南京大学站点等。

高能所的二级站点目前装备了 400 个 CPU, 200TB 的磁盘存储空间。该二级站点包含访问网格资源的用户界面 UI (User Interface), 管理调度计算资源的计算单元 CE (Computing Element), 管理和调度存储资源的存储单元 SE (Storage Element), 资源代理系统 RB (Resource Broker), 网格资源监控系统 BD II (Monitoring and Discovery Service), 用户电子身份证书代理 MyProxy, 以及计算节点 WN (Work Nodes), 如图 3 所示。网格系统的安全控制是靠电子身份证书来实现的, 高能所采用 Openssl 技术开发了中国高能物理身份电子证书签发 CA 系统, 该系统于 2005 年 7 月通过欧洲网络安全管理委员会 (EUGridPMA) 会议的审核, 被 EUGridPMA 接受为覆盖中国大陆的 CA 系统, 并同时得到亚太地区网络安全委员会 (APGridPMA)

的审核。该系统在亚洲地区处于领先地位。作为网格平台的重要基础条件，高能所分别建立了从北京到欧洲和到美国各 1Gb/s 的网络专用链路，这两个高速网络每天用于国际间的数据交换和计算任务的调度，数据传输的速度最高达到每秒 90MB 字节以上，每天可交换数据 3TB。高能所的二级站点已经完成了数十万个计算作业，为高能物理、生物医学等应用提供服务，下面简单介绍几个典型的应用。



图 3 高能所二级站点装备的网格资源

中国物理学家利用中国的二级站点以及国际上的大量网格资源进行了大量物理计算，完成了数十万个计算任务，得到一批重要的物理模拟结果，在 LHC 实验国际合作中做出重要的成果，发表了数十篇文章和内部报告，这些模拟结果对即将到来的正式物理数据分析至关重要。

高能所与意大利国家核物理研究院 (INFN) 合作，建立了羊八井宇宙线实验网格系统，该网格系

统包括羊八井、高能所和 INFN 三个站点，其中羊八井是原数据产生站点，高能所和 INFN 的站点进行数据分析处理。通过分析羊八井的宇宙线数据，在银河系天鹅座宇宙线超出、月影等方面获得重大发现，预示新的物理结果的存在。

高能所是欧盟第六框架 (FP6) 下的欧中网格 (EUChinaGrid) 的发起单位和中方协调单位。欧中网格项目共有意大利、波兰、希腊、CERN 的 6 个合作单位和中国的高能所、网络中心、北京大学和北京航空航天大学 4 个合作单位组成。利用高能所的二级站点，参与了生物信息研究计划 Rosetta。Rosetta 的目标是在网络上部署蛋白质结构计算软件，用于产生自然界不存在的新蛋白质 (never born protein) 基因序列数据库，研究用计算机产生自然界不存在的新蛋白质。一系列的研究表明，新蛋白质具有和自然界存在的蛋白质相类似的稳定性，可以采用生物技术进行研究开发。

21 世纪，随着科学的发展，科学研究进入大科学时代，科学实验的规模越来越大，由此产生的数据规模也越来越大。大科学研究同时也意味着广泛的地区和国际合作。科研人员需要进行跨地域的交流、共享计算资源和数据。网格技术为这些大科学研究提供了一个有效的共享和交流的手段，因此网格技术正在成为未来科学研究的基础。研究和建立网格系统对促进计算技术的发展和推动科学的发展具有重大意义。根据规划，中国的高能物理数据网格将在不久的将来，扩展成具有数千个 CPU 计算能力，数百 TB 存储能力的大型网格平台，为包括高能物理在内的更多科学研究服务。

(中国科学院高能物理研究所 100049)



科苑快讯

坠落物产生的射流

高能物理学家很快就能研究 LHC 的射流了，而荷兰屯特大学和西班牙塞维利亚大学的盖克尔 (Stephan Gekle) 和同事则在研究另一种射流——物体落入水中时溅射出的水流。主要因物体坠入水中后产生的空气腔崩溃，水在填补空气腔空间时向外、向上溅射。

崩溃是因“惯性调节”而产生的，即空气腔在

周围的压力下集中了很大能量，但水的表面张力却促使其崩溃。通过理论联系实验以及计算机模拟，研究小组完整描述了这个过程。当空气腔因被水填充而崩溃时，水溅射到空气腔顶部，就像牙膏受到挤压而喷出一样，其实表面张力的作用完全可以忽略不计。

(高凌云编译自《欧洲核子研究中心快报》2009 年第 2 期)