

网格计算在气象高性能计算领域的应用前景探讨

■ 沈文海

气象行业对高性能计算需求十分强烈，其需求主体是数值天气预报模式的科学研究和业务运行。而高性能计算资源的长期匮乏，成为近几十年来制约数值天气预报事业发展的最主要的基础条件障碍。

数年前，网格计算一度风生水起，成为当时IT界热议的主要话题。它充分挖掘利用散布于互联网上丰富的闲置计算资源，以解决大规模计算资源匮乏问题的构想，为人们提供了全新的思路。如同所有被高性能计算资源短缺所困扰的行业一样，气象部门IT界人士也被这一方案所吸引，积极探索实践，数年来付出了大量心血和汗水。

数年过去，网格计算渐渐淡出业界的话题，气象行业内高性能计算资源仍然匮乏，资源饥渴症并未得到有效缓解。无情的现实令人反思：网格计算在目前及可预见的将来是否适用于气象行业的高性能计

算？其应用领域和价值究竟体现在何处？我们应根据现有情况冷静分析思考，做出自己的判断。

一、高性能计算的基本形态和条件

1. 并行计算是高性能计算的基本形态

高性能计算的实现者和执行者，是高性能计算机（HPC）。按目前通常的定义，HPC是指由数以千计甚至更多处理器组成的、能计算普通PC机和服务器无法完成的大型复杂科学计算课题的计算机；它通常使用高速网络和相应的操作系统及管理工具，将这些数目众多的处理器有机整合起来，构成一台单一的用于运算和数据处理的高性能计算资源。HPC是计算机家族中功能最强、运算速度最快的一类计算机。

分布式计算是发挥HPC基本能力的唯一方式和途径，而并行计算

强调计算资源之间的协同，关注整体计算性能的提升，因此并行计算是高性能计算的基本形态。

2. 并行计算中的耦合度

耦合度是指运算中计算节点之间对于彼此信息的相互依赖程度；依赖程度高者称为“紧耦合”，反之称为“松耦合”。“紧耦合”式的运算，其运算效率对于各计算节点间彼此工作的协调、计算的同步以及信息的高速传输有很强的依赖性；而“松耦合”式计算则对此依赖较轻。

3. 计算节点间的高速通信——高性能并行计算必备的基本条件

并行计算中的“紧耦合型”问题体现在运算过程中计算节点之间无法避免的频繁通信，而信息通信的时延，直接影响到相关计算节点在启动下一步计算前的等待时间的长短。因此，各计算节点之间通信

研究，以“中国天气网”为核心，逐步建立起3G手机网、台风网、交通旅游网、气象科普网、气候变化网、兴农网等气象服务网站群，实现网络校园气象站、网络个人天气顾问、网络天气景观直播、网络智能交通服务、网络智能家居服务、网络商业服务平台等服务功能。

未来网络气象服务的发展水平是衡量我国气象服务能力和科技水平的重要指标，代表着气象服务先进生产力的发展方向，具有无限的生命力。在网络气象服务领域，将由国家级业务单位来构建网络气象服务的基础技术框架，各地气象服

务部门根据自身特点来添加或改良服务内涵，从而形成上下一体、协作分工的服务体系。让我们共同努

力，一起来建设神奇而美好的未来网络气象服务。

(作者单位：中国气象局公共气象服务中心)

深入阅读

矫梅燕. 2008. 坚持需求牵引 推进改革创新 努力开创公共气象服务工作的新局面//第五次全国气象服务工作会议报告.

矫梅燕. 2009. 探索公共气象服务发展的体制机制创新. 浙江气象, 30(4): 3-6.

矫梅燕. 2012. 在中国气象局公共气象服务中心2012年度工作会议上的讲话//关于印发中国气象局公共气象服务中心2012年工作会议文件的通知(气发〔2012〕12号).

孙健, 裴顺强. 2010. 加强公共气象服务的几点思考. 气象软科学, (3): 36-42.

孙健, 裴顺强. 2011. 转变气象服务发展方式刻不容缓. 气象软科学, (2): 29-35.

许小峰, 等. 2010. 现代气象服务. 北京: 气象出版社.

郑国光. 2012. 坚持改革创新 提高四个能力 以优异气象服务迎接党的十八大召开//关于印发2012年全国气象局长会议文件的通知(气发〔2012〕1号).

中国互联网络信息中心. 2011. 中国互联网络发展状况统计报告.

中国气象局公共气象服务中心. 2010. 中国网络气象服务专项调查报告(2010年).

网络的传输带宽，是HPC运算性能高低的另一个关键性技术指标。正因为如此，经典意义上的HPC不采用当时业界最高端的传输技术。以2009年HPC世界TOP500的前十名为例，其平均的内部通信点带宽均为40Gb/s或以上，所采用的主流技术为Infiniband。

由于具备了各处理节点间的高速网络，以及相应的操作系统和管理工具，HPC有能力应对和处理各种类型的高性能计算问题，包括“紧耦合”型和“松耦合”型。

因此，计算节点间的高速通信，是经典意义上的HPC必备的基本组成内容。

二、网格计算的几个相关话题

1. 网格计算的由来、本质和特征

网格计算是伴随着互联网而迅速发展起来的专门针对复杂科学计算的充满理想色彩的新型计算模式。其原理是：利用互联网把分散在不同地理位置的闲置的计算机组织成一个虚拟的计算机，其中每一台参与计算的计算机为一个处理节点，而整个计算资源是由成千上万个节点组成的一张网格，所以这种计算方式叫网格计算。这样组织起来的“虚拟计算机”有两个优势：其一，从理论上讲，真正有效组织起来的计算网格，其处理能力相当于该网格所能组织起来的所有闲置计算机处理能力的总和，而互联网上闲置的计算机（包括PC机）成千上万，潜在的能力资源蕴藏丰富，故理论上它具有超强的数据处理能力。其二，其资源来自于网上的闲置资源，“化闲为宝”，因而这些资源的使用代价相对低廉。

网格计算的需求缘自于信息爆炸所引发的处理能力需求的激

增，现有HPC昂贵价格所导致的高昂的信息处理代价，以及遍布于互联网之上的无数闲置计算机所蕴含的丰富的潜在计算能力资源。其构想缘自于遍布全球、近百年来行之有效并应用广泛的电力网格。因此计算网格的本质就是在分布式网络环境下实现各种资源的全面协同共享。

互联网上闲置的计算和存储资源千差万别，如何充分利用这些资源，是网格计算面临的最大挑战。因此，网格计算强调“共享”与“协同”：所谓“共享”，是将互联网上海量、自治、分布、异构的资源进行有效组织，以服务的方式为用户提供统一透明的访问机制。而“协同”是指资源可以相互交互、理解、协作，以共同完成复杂的网格应用。

从技术角度看，网格计算通过互联网将地理位置上呈分布状态的各个计算资源和数据资源虚拟化，从而创建一个单一的系统映像，保证用户和应用程序能够透明访问和使用这些巨大的IT资源。通过网格计算，地理上分布并且异构的环境或组织可以互相通信，共享所有资源，协同解决问题。此外，由于这些“网上的闲置资源”的实际拥有者千差万别，各拥有者使用各自设备的时间、方式和频度等无法事先预知并掌握，因此这些闲置资源在网上的存在和消失是随机和动态的。亦即，网格计算的资源在内容和规模方面，都是动态的，是时常变化的。

综上所述，通常意义下的计算网格具有基于互联网，资源规模动态变化，资源异构等特点。

2. 网格计算与高性能计算之间的关系

网格计算从理论上为人们展

示了一幅光明的画面：蕴藏丰厚的计算和存储资源，极其低廉的使用代价，“化闲为宝”的构想充满时代特征。不少专家和学者惊叹于其可能发掘出来的计算资源是如此的丰富，以至于只要认真加以充分利用，所有计算资源问题皆可迎刃而解；一些人甚至激动地将其称为“虚拟的超级计算机”。

前景虽然美好，但要实现人们所期待的目标，网格计算首先必须解决资源异构、资源可扩展、资源动态自适应、结构的不可预测、多级管理域等一系列技术问题（限于篇幅，不予展开讨论）。而就高性能计算领域而言，异构资源的组织和管理，高性能数学计算面对动态资源池的动态管理和调度等问题，都是目前尚未攻克的世界性难题。

众所周知，HPC是能够解决当时技术能力发挥到极致时所能解决的最难的计算问题的最强者。从架构上看，HPC绝不仅仅是一堆处理器的简单堆砌互联，一台HPC不但包括众多当时先进的处理器做为计算单元，而且包括用以将这些计算单元连接成一个强有力实体的高速互连网络，以及一整套能有效提升计算和内部通信性能的管理系统和软件工具包。而这一切，无一不是当时所可能采用的最新、最先进的技术成果。惟其如此，这个经典意义上的HPC方能在计算能力和计算时效方面达到当时科学计算领域所能达到的最高水平；也正由于此，HPC的商业价格方才如此昂贵。

反观网格计算，“闲置资源的共享”以及“资源的可有效利用”是其本质和关注重点。网格计算自身并不主动关注或推动科

学计算以及高速通信等有关IT技术的创新和发展；事实上，网格计算在硬件方面完全沿用现有的技术、产品、设备及相关基础设施；它是一种计算资源组织和使用方式的创新理念。就高性能计算领域而言，网格计算的优势在于其潜在的可能被利用的计算资源规模的巨大。

然而，且不谈由于“异构性”难题尚未解决，散布在互联网上的大量异构资源目前难以（或无法）有效整合利用；即便该问题获得解决，可以因此得到巨大的计算资源，也并不等价于一定具备了计算性能的高指标。就并行计算的“紧耦合”问题而言，计算节点间高速通信条件的具备与拥有充足的计算节点同等重要。目前网格计算所依托的现有远程商用通信网络，其最高带宽相当于Gb/s级，即便将这些商业公网资源全部用于某个计算网络的节点间通信，其带宽与目前HPC所采用的内部点到点通信带宽相比，也至少低两个数量级（国内网格计算的带宽则还要再低一个数量级）。而且，由于网格计算所辖资源地理分布的分散性，以及利用现有所有硬件技术设备及基础设施的基本特征，使得它永远不可能拥有与其同时代的经典意义上的HPC所具有的节点间高速互联的基础条件。

所以，单就节点间通信带宽匮乏而言，也是网格计算真正涉足于高性能计算领域的难以跨越的门槛。

三、气象行业高性能计算的主要特征

1. 高性能计算资源长期匮乏

高性能计算在气象行业中主要应用于数值天气预报领域的业务和

科研工作，而数值天气预报的具体工作内容实质，相当于计算数学领域中的“偏微分方程组的数值求解”。

由于“次网格尺度物理过程”的始终存在，导致数值预报模式的分辨率难有满意的终结目标，而数值预报模式分辨率的不断提高，又使得求解方程组的计算量呈几何级数上升。因此，在可预见的将来，高性能计算资源在气象行业中，将始终是稀缺资源。

2. 并行化业务模式的“紧耦合型”特征

高时间敏感度要求具有巨大计算量的数值天气预报业务模式必须在规定时间内完成；因此HPC的使用以及高效并行计算的实地化应用，是必然的选择。

数值预报模式的并行计算方法大致如下：将离散化成规则水平和垂直格点的计算区域在水平方向上划分成若干个规则的计算域，计算域的数量一般与可使用的高性能计算节点数量大致相等（或略低），每个计算节点上运行一个计算域。由于偏微分方程组在每个格点进行时间和空间数值积分计算时都需要初始值以及相邻格点的计算值作为其边界值，因此最初的初始值和边界值需要按照计算域的划分进行组织和准备；而在整个计算过程中，每积分一个时间步长，相邻计算域之间便至少需要互相通信一次，交换上一次积分的计算结果，以作为下一时间步长积分的边界值。计算节点只有在得到相邻节点传来的本计算域所需要的边界值后，方能开始下一个时间步长的计算。

因此，就高性能计算而言，数值天气预报模式属于大规模“紧耦合型”的科学计算问题。

对“紧耦合型”并行计算而言，各计算节点的运算时间应精确

一致，如此方能避免某一计算域虽已完成计算，但因相邻计算域的计算结果尚未产生，信息无法交换，从而导致该计算域因无法获得相邻计算域的计算结果而发生的等待现象。

四、网格计算在气象行业高性能计算领域中的适用性探讨

1. 在业务领域的适用度不高

由上可知，作为业务系统运行的已经充分并行化的数值天气预报模式具有“紧耦合”特征，并对时间高度敏感。以目前网格计算所具备的基础条件，即便解决了计算资源的异构性以及资源池动态分布的适应性等世界性技术难题，数值天气预报模式能够动态地拆分成若干个计算域，在散布在全国各地的各计算节点上协同计算，单就数值天气预报模式计算的“紧耦合”性特征所产生的计算节点间的频繁通信，也会将“内部通信带宽有限”这一网格计算软肋的劣势呈指数倍地持续放大，导致计算时效的难以提高，从而无法实现真正意义上的“高性能计算”。

所以，由于作为业务系统运行的数值天气预报模式的“紧耦合”特征及其对时间的高度敏感性，网格计算并不适用于作为业务系统的数值天气预报的高性能计算问题。

2. 在研究领域的“高性能计算资源共享”

气象行业数值预报的研究工作具有巨大的计算量需求，目前世界气象界数值预报水平居领先地位的国家或单位，其HPC的70%以上的计算能力用于有关的数值预报研究工作，中国气象局的情况与此类似。

由于数值天气预报研究工作的

重点在于科学问题的解决，模式的并行化不是其主要关注对象，因此研究阶段的数值天气预报模式，其并行化程度均大大低于已业务化的数值模式；因此这些科研模式多以单节点运算作为其主要运算方式。我国科研体制在研究成果方面有很强的时限要求，使得这些模式的使用者对模式科研运算结果的尽早获得十分迫切，因此对单计算节点的运算性能有很高的要求。而这一严苛要求对于网格计算的资源构成而言，相当于将网上大部分处理能力有限、呈动态提供形式的计算资源过滤一空，只剩下那些计算能力强、且提供形式相对稳定的闲置高性能计算资源。

因此，对数值天气预报科研领域而言，经典意义上的网格计算的适用方向是“闲置高性能计算资源的再利用”。

3. 可能的适用形态分析

由前可知，气象行业高性能网格计算目前可能的构建方案是：利用网上闲置的、稳定的、具有较高性能和配置的单一计算节点（计算资源），独立运算一个完整的数值模式，以这类“高性能计算节点”构成“高性能计算网格”。

虽然以如此方案构建的“计算网格”较之业界普遍认同的经典意义上的网格计算定义有较大偏差，但毕竟该方案仍然符合“闲置

资源共享”这一网格计算的本质。

该方案的实质，是气象行业闲置高性能计算资源的共享管理和调度。然而，它没有解决这些闲置资源的协同工作问题。目前由该方案所构建的“高性能计算网格”，非但无法在“网格”内实现计算节点间的并行计算，甚至连网格内节点之间真正意义上的分布式计算也无法实现，这是由网格计算不适用于“紧耦合型”并行计算这一自身缺陷所造成的。因此，目前该“高性能计算网格”的适用范围相对有限：当一个科研模式，其计算规模和时效要求超出该网格上每个节点的自身能力范围时，无论该网格内所有节点累加起来的总体能力如何巨大，由于每个节点都无力独自承担该科研模式的高性能计算需求，因此该网格仍然无法实际满足该科研模式的高性能计算需求。

更棘手的问题是，由于目前及在可预见的未来，高性能计算资源在气象行业始终处于紧缺状态，因

此该方案所可能汇聚的闲置资源将十分有限，理论中能力无限的“虚拟超级计算机”将无法变成事实。

五、结语

综上所述，由于网格计算“基于互联网”和“资源动态”的特质，使得其自身不适用于紧耦合型高性能计算，目前和可预见的未来都无法满足数值天气预报业务的高性能计算需求。由于关键技术尚未突破，网格计算目前无法实现“共享互联网上所有闲置资源”的既定目标；其在气象行业中的价值，主要体现在“闲置高性能计算资源的再利用”方面；而在目前及可预见的未来，气象行业高性能计算资源整体上将长期处于短缺状态，可再利用的闲置资源十分有限。

因此，网格计算在气象高性能计算领域内的作用是较为有限的。

(作者单位：国家气象信息中心)

深入阅读

- 桂小林, 等. 2005. 网格技术导论. 北京: 北京邮电大学出版社.
- 哈廷纳 G J 著. 1975. 北京大学地球物理系气象专业译, 数值天气预报. 北京: 科学出版社.
- 李(Li M), 贝克(Baker M)著. 王相林, 等译. 2006. 网格计算核心技术. 北京: 清华大学出版社.
- 王彬, 等. 2010. 气象计算网格模式预报系统的建立与优化. 计算机应用研究, (11):4182-4184.
- 曾庆存. 1979. 数值天气预报的数学物理基础. 北京: 科学出版社.
- Berman F, 等编著. 都志辉, 等译. 2005. 网格计算: 支持全球化资源共享与协作的关键技术. 武汉: 华中科技大学出版社.

下期要目

- ◆ 近20年来青藏高原低涡的研究进展
- ◆ 从云计算看气象部门未来的信息化走向
- ◆ 陆气相互作用中普通双源模型与ALEXI模型的比较
- ◆ 2009年7月珠江流域暴雨致洪成因分析
- ◆ 一种基于复杂网络社团的CDN性能优化模型