

制造网格的概念与系统体系结构

范玉顺

清华大学自动化系, 北京 100084

摘要: 在制造全球化和网络化环境下, 如何更好地利用全球制造资源, 实现协同制造是制造企业提高竞争力的重要手段之一。论文对网格概念的产生及其发展历史进行了概要的介绍, 给出了网格的组成和主要特点。在此基础上, 提出了制造网格的概念, 给出了制造网格的定义、系统运行模式和制造网格的系统体系结构。最后, 对制造网格的应用前景进行了展望。

关键词: 网格、制造网格、协同、系统体系结构

1. 网格概念的产生及其发展历史

从 1946 年第一台电子计算机 ENIAC 问世以来, 人类进入了采用计算机进行计算的年代。人类对计算能力的需求和计算机提供的计算能力呈交替上升趋势, 虽然计算机技术从个人 PC 机到大型高性能计算机都有了非常大的发展, 然而, 直到今天, 计算机的计算能力还依然不能够满足科学研究、工程应用和商业处理等方面的需求。人们认识到, 许多复杂的问题无法用一台计算机进行求解, 求解这些复杂问题的一种可行方法是在网络和分布式数据库的支持下, 采用多台计算机进行协同计算。由此, 产生了网络计算的概念和应用。

网络计算的两个关键技术是以网络为基础的高性能科学并行计算和分布式计算技术。经过多年的研究和应用, 这两个技术都得到了长足的发展, 也取得了许多成果。但是, 一直以来, 还没有一种技术能把并行计算及分布式计算技术较有效地结合起来, 因此在性能上也无法上升到一个更高的层次。而另外一方面有数据证明, 现今网络资源的实际利用率很低, 平均仅为 30%左右, 有些资源的空闲率甚至达到了 91%, 如何利用这些闲置的资源成为计算机领域研究和应用人员面临的重点问题之一。在这种情况下, 旨在提高网络资源利用率的网格技术受到了广泛的重视。

网格的基本思想是将每个分布的计算资源都看成一个节点, 通过高速网络连接这些分布的、异构的计算资源节点, 从而形成网格, 在软件配置系统、软件工具和应用环境的支持下, 使这些资源互相协调形成单一的超大计算环境或网络虚拟超级计算机。实现这些计算资源连接、配置、运行和管理的技术被称为网格计算技术, 简称网格计算。

伊安·福斯特指出: 网格是构筑在因特网上的一组新兴技术, 它通过高速的共享网络, 连接地理上广泛分布的异构资源(包括异构计算机、数据库、科学仪器、文件系统和超级计算系统等), 通过这些异构资源的协同来解决那些通常需要许多 CPU 或存储器来处理的问题^[1]。在形成的网格状高性能计算网中, 各个资源构成网格的节点。

网格计算将计算处理分散到多台计算机中进行，并不要求每台计算机的全部 CPU 处理能力都为某个计算服务，而只要这个计算机富余的 CPU 计算能力符合基本的要求就可以了。这样一方面可以降低用户使用计算机资源的成本，另外一方面可以提高计算资源的利用率。在网格环境中，每个计算机可以同时为多个计算提供服务，为科学研究和其他数据密集型的应用程序提供强大的运算能力，也可为普通用户提供更多的资源、功能以及信息交互上的支持。

网格计算的发展可分为以下三个阶段：

(1) 探索阶段（-1998）：

在这个阶段，研究者们从不同的角度和目的对网格计算进行了探索性的研究，标志性成果是计算网格原型 GUSTO（Globus Ubiquitous Supercomputing Testbed）的出现和《网格：21 世纪信息技术基础设施的蓝图》一书的出版。

(2) 发展阶段（1998-2001）：

在这个阶段，网格的概念得到了广泛的传播，引起了越来越多的研究机构和研究人员的重视。2001 年 3 月在阿姆斯特丹召开的首届全球网格论坛会议，以及 2001 年 5 月在澳大利亚布里斯班举行的首届 IEEE/ACM 国际机群计算研讨会可以看成是这个阶段的主要标志。

(3) 高潮阶段（2001- ）：

进入 21 世纪以后，网格计算被广大研究机构和研究人員认为是最活跃并且最具有潜力的研究领域之一。各国政府部门纷纷设立有关网格技术的科研项目和发展计划。例如，美国能源部及 NASA 等政府机构均投入巨资，用来开展以 Globus 为基础的网格计算项目，欧洲联盟设立的 DataGrid 项目将在 3 年内投资 980 万欧元，英国工业部也对 e-Science 项目给予了大量的资金支持。计算机开发与应用领域的各大公司也纷纷投资开展相关的网格计算项目。与计算机科学相关的许多研究领域的研究者也对网格计算技术的应用给予了极大的关注，并开始探讨网格计算技术与领域应用结合的问题，如与制造业相结合的网格虚拟制造及仿真技术等。

由于网格是 Internet 发展的高级形式，它可以连接广域范围内异构的资源“孤岛”，形成功能强大的全球性计算体系，因此受到世界各国政府和研究机构的高度重视。目前全球已经建立了许多有关网格技术的论坛，实验环境和研究项目，其中较有代表性的网格计算研究项目包括美国的 Globus，Legion，NetSolve、WebFlow，Javalin，日本的 Ninf，德国的 UNICORE，英国的 e-Science，荷兰的 Globe 和澳大利亚的 GridSim 等。国内的一些研究机构也开展了网格相关技术的研究，如中国科学院计算技术研究所开展了以“织女星网格”为

名称的网格研究项目^[6]。

2. 网络的组成和特点

网络具有统一的软件标准和实现互操作的环境，网络的应用层能为用户提供透明的访问接口，以形成用户希望的问题求解环境。网络一般包括如图 1^[2]所示的几个组成部分：

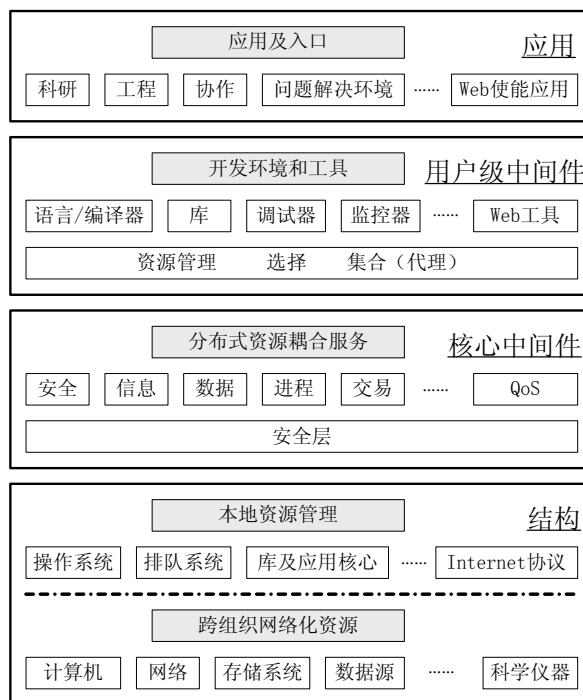


图 1 网络的组成

结构层是网格的最底层，它由网格中的各个资源（也即网格节点）组成。这些资源是通过 Internet 可以访问到的分布在不同地点的所有软硬件资源，既包括运行于不同操作系统上（UNIX 或者 Windows）的计算机、工作站、机群系统、存储设备和数据库等，也包括特殊的科学仪器，如热传感器等。

核心中间件为实现网格计算提供核心服务功能，如，远程过程管理，资源的协同分配，存储访问，信息安全，服务质量，资源的预定与交易等。

用户级中间件为程序员开发网格应用及用户代理（用户代理是网络中调度和管理基于全局资源的计算模块或应用）等提供高级服务功能。用户级中间件包括语言/编译器、类库、应用编程接口、集成开发环境等。

应用层包含网格应用和入口两个部分。应用是指利用网格使能语言（如 HPC++）及网格工具开发的网格使能应用程序。网络入口提供 Web 使能的应用服务，即用户可以通过 Web 接口实现相关任务到远程资源的提交以及任务处理结果的接收。

从总体上看，结构层是网格系统的硬件基础，实现的只是资源在物理上的连通，从逻辑上来看，各个资源之间仍然是孤立的。有了网格中间件，才真正实现了广域资源的有效共享。通过中间件屏蔽底层资源结构的分布性和异构性，从而为上层的网格应用层提供透明统一的访问和使用接口，另外，中间件还为用户提供了支持网格应用开发的用户编程接口和相应的环境。应用层是用户需求的具体体现，它在中间件的支持下，可以向用户提供各种应用和接口，从而解决大型的计算问题。

网格最主要的特征是资源共享（而不是它的规模），由此，网格必须具有的特点是^[3, 4, 5]：单一的映像空间，可以屏蔽硬件边界，实现透明的远程资源访问，消除资源孤岛；支持多管理域以及站点自治，保证各资源的相对独立性；支持高效安全与容错，保证所有资源提供方在整个系统中的安全与保密；动态灵活性，保证网格资源的动态扩展及撤出。

在现有阶段，网格应用的主流基本停留于整合分散的计算能力，这些应用都更侧重于科学研究领域，而在其他行业，比如商业、甚至工业中，却较少见到网格应用的成果，网格的应用潜力尚未得到充分的发挥。

通过对网络化制造与网格技术的对比，可以看出，网格技术提供的手段和功能能够很好地满足实施支持制造企业协同的网络化制造系统的需求，因此，探索将网格技术应用于网络化制造，基于网格技术构建支持制造企业协同的制造网格是一个非常有意义和发展前景的研究方向。

3. 制造网格的基本概念与特征

实施网络化制造的目的是实现企业间的协同，使企业能够真正实现基于网络的制造，因此，网络化制造实施的最终目标是将分散在不同区域、不同企业、组织和个体中的各类资源有效地组织起来，形成一个制造网格，通过制造网格使用户能够像目前从 Internet 上获得信息一样方便地获得各种制造服务，并在制造网络的支持下方便地形成面向特定企业制造需求的专业化应用系统，实现企业间的商务协同、设计协同、制造协同和供应链协同。在讨论制造网格的功能与特征之前，首先给出如下的制造网格定义^[7]。

制造网格是实现企业和社会资源共享和集成，支持企业群体协同运作和管理的集成支撑环境，它基于网格和相关先进的计算机与信息技术，通过网络将分散在不同企业和社会群体（包括高校、科研院所、专家、中介服务机构）中的设计、制造、管理、信息、技术、智力和软件资源通过封装和集成，屏蔽资源的异构性和地理分布性，以透明的方式为用户提供各类制造服务（这里的制造是指大制造，包括企业生产经营的一切活动），使企业或者经营个体能够以请求服务的方式方便地获得所有与制造相关的服务，能够像使用本地资源一样方便

地使用封装在制造网格中的所有资源，实现各类资源的集成和优化运行，并为构建面向企业协同制造特定需求的制造网格应用系统提供协同工作支持环境，从而实现企业间的商务协同、设计协同、制造协同和供应链协同，使基于制造网格支撑环境运行的制造企业群体能够以低的成本和短的开发周期，制造出符合市场需求的高质量产品。

通过制造网格提供的支撑环境，克服空间上的距离和异构性给企业间协同带来的障碍，为实现敏捷制造和虚拟企业的运作提供支持，形成具有数字化、柔性化、敏捷化等基本特征的优势互补的协同企业，通过制造网格环境下企业间信息、过程、资源的集成，实现设计、制造与经营管理过程中物流、信息流、价值流的优化运行。

由于制造网格及其应用系统对制造企业的支持空间从单个企业扩展到整个社会，其自身具有地域上的分布性、组织上的动态性、管理上的统一性和自治性等特点，它是现代集成制造哲理和敏捷制造模式在网络化经济环境下的一种具体物化形式，它的出现也是制造业信息化水平发展到一定程度的必然产物，是对传统制造模式（从产品设计手段、制造方式到运作模式与经营理念）的扬弃与创新。

基于制造网格，未来的企业、甚至个人能够像获得水、电、汽、Internet 上的信息一样方便地从网上获得各种所需的制造服务，因此，从运行方式和形态上，制造网格与目前的 Internet 有很大的相似性，但是由于制造网格旨在为企业提供制造服务，而制造服务与 Internet 提供的信息服务存在很大的区别。制造服务区别于 Internet 信息服务的主要特征如下：

（1） 互动性

与提供单向信息的 Internet 不同，制造网格提供的制造服务具有互动性，即支持用户和服务之间的交互，在一定的时间内，用户和服务能够联合成为一个互动的整体共同完成某个目标，如设计一个新的零件，完成一个交易，或者完成一个复杂零件的制造。

（2） 实时性

与提供静态信息的 Internet 不同，制造网格提供的服务具有更高的实时性，例如，在制造网格的支持下，用户可以直接对制造设备和设计单元等进行操作，因此要求制造服务必须实时地反映实际设备和设计单元等的状态，并实时响应用户提出的操作需求。

（3） 多方协同

在许多情况下，单一的制造服务不能够完成用户的目标，如对一个新产品的设计和分析。在制造网格的支持下，用户应该能够集成多种不同的制造服务，通过多个制造服务之间的协同工作满足用户需求，如通过 CAD、CAE、CAM 服务的协同完成一个新产品的设计和分析。

（4） 周期长

与信息服务相比,某些制造服务的周期会很长,如对一个复杂工件的加工可能会持续一个月的时间,完成一个复杂产品的协同设计可能会持续更长的时间。

(5) 数据量大

与 Internet 提供的页面信息相比,制造服务需要传递的数据量大,如在产品设计过程中,一个中等复杂程度部件的(如传动装置)设计模型的数据量就可能达到 1G 以上,而复杂产品(如汽车、飞机)的设计模型的数据量则在 10G 以上,如此大的数据传递对网络传递速度和数据交换策略都提出了更高的要求。

(6) 功能与结构复杂

与 Internet 提供的信息服务相比,制造网络提供的制造服务的功能更多,更复杂,相应地提供这些功能的服务系统的结构和完成这些服务的流程也更复杂。

(7) 专业化程度高

由于制造服务具有更高的专业化程度,因此,制造服务在提供服务的同时,通常还需要为用户提供如何正确使用这些服务的在线帮助功能。

(8) 知识密集

制造服务中既包括简单的制造信息和制造资源服务,也包括软件单元和智力单元提供复杂的服务,这些服务具有知识密集的特征。

(9) 用户多样化

使用制造服务的用户可以是产品设计制造人员,也可以是企业经营管理人员,还可以是普通的社会公众,因此,制造服务的用户具有多样化的特征。

上述区别构成了制造网络的主要特征,这些特征决定了构建制造网络需要采用先进的网络和信息技术,如网络技术、多代理技术、标准与规范技术等。

以下例子可以具体说明采用网络技术带来的好处。如果一个分布在中国各地的工程小组要设计一种新型的飞机,那么这些工程师需要和各地的部件供应厂商、质量监督机构等等打交道。在 Internet 普及之前,人们通过邮政局寄送技术文档,非常耗时。有了 Internet,工程师之间可以用电子邮件送文档,互相回答问题。到了网络阶段,它给人们创造了一个虚拟的协同工作空间。大家可以从自己的桌面工作站上实时地看到这架飞机的全设计过程,可以在本地模拟飞机的操作,评价它的性能,修改设计等。

4.制造网络的系统体系结构

制造网络是在 Internet 环境和网络等相关技术支持下构建的面向制造的虚拟网络,其物理网络还是目前的 Internet。制造网络在形态和运行模式上非常类似于目前的 Internet,它采

用与 Internet 提供信息服务类似的方式为制造企业和个体提供面向制造的各类服务，并提供支持服务之间的协同以实现企业协同。

与 Internet 类似，制造网络的系统结构是一个分布式的结构，图 2 是制造网络运行模式的示意图。从图中可以看出，制造网络通过 Internet、Intranet 和 Extranet 等提供的基础网络连接，在制造网络资源库、技术基础体系和制造网络运行管理系统的支持下，实现各类资源的共享和集成运行。在某个特定的区域还可以形成区域的制造网络，不同区域制造网络可以实现互联和集成，从而形成整个制造网络，在此基础上，实现制造企业的协同。

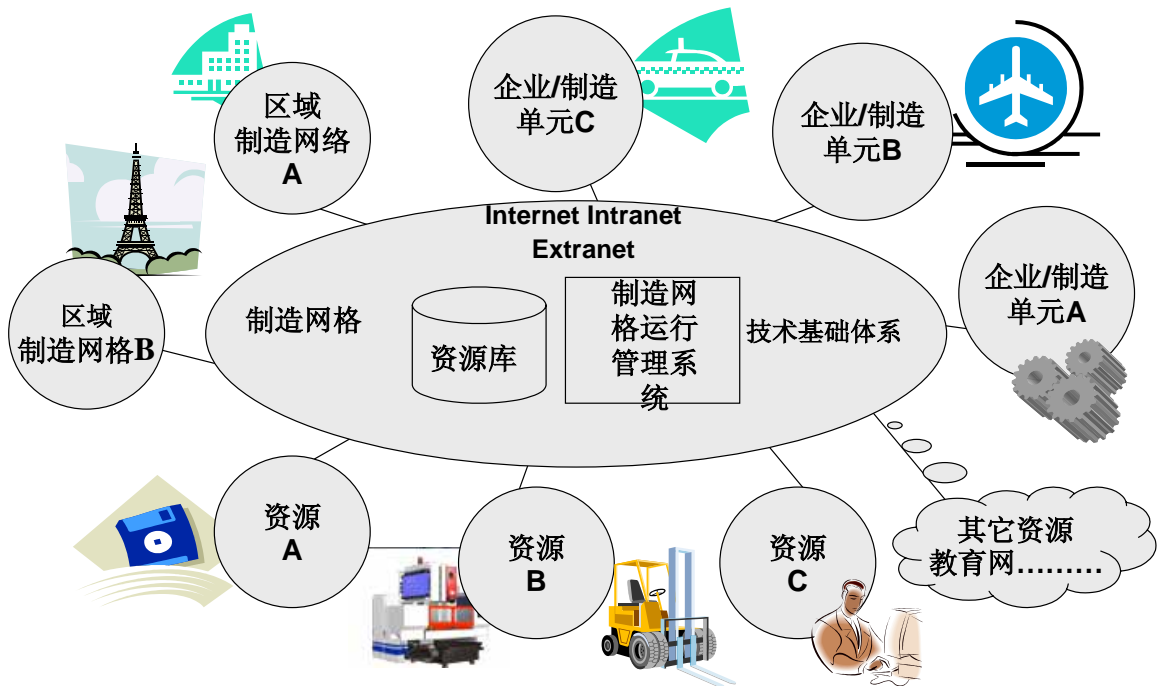


图 2 制造网络运行模式示意图

在系统的体系结构上，制造网络呈现多层结构，如图 3 所示。每个层次的功能如下：

基础网络层：基础网络层位于制造网络的最下层，它以 Internet 为核心，为制造网络环境中的资源和企业间的互联提供基础的网络环境。

单元与基础协议层：单元与基础协议层为制造网络的构建和运行提供共性和基础的技术支持，包括基础库、资源单元和基础协议。基础库为制造网络的运行提供共性和基础的模型和资源库，包括企业模型库、共享信息模型库、协同过程模型库、产品资源库、制造资源库、软件资源库、计算资源库、基础数据库和知识库等；资源单元为制造网络提供基础的单元设备、技术和软件，包括制造单元、设计单元、智力单元、软件单元、计算单元等；基础协议是构建制造网络所必须遵循的协议，包括制造网络协议、网络协议，多代理系统协议、相关技术标准与规范等。

资源封装层：资源封装层采用网格技术对各类独立运行的资源进行封装，将局部资源封装成为可供网格上所有应用共享的全局资源，并通过网格技术屏蔽资源的异构性，以一致透明的方式供应用对其进行访问。资源封装层的管理系统则完成对封装后的资源的控制和管理，并对资源的实时状态进行监控，为资源的优化调度提供基础。

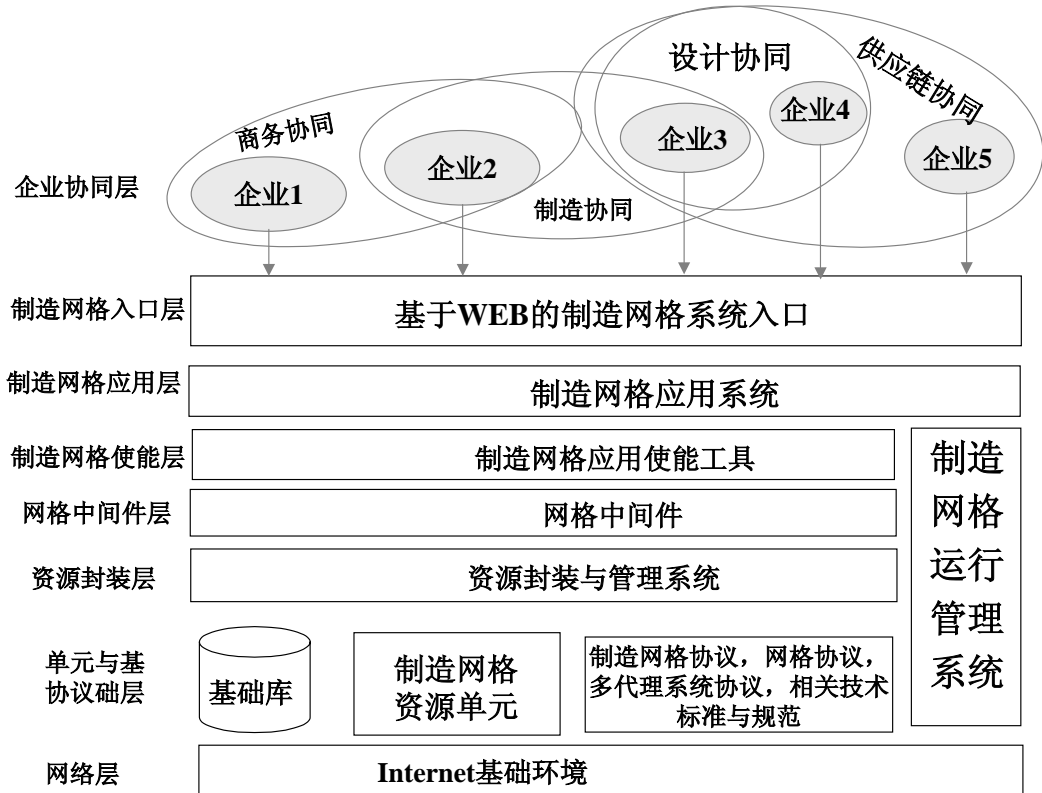


图3 制造网络的层次结构图

网络中间件层：网络中间件层为实现基于网格计算的制造服务和协同提供基本的功能，例如，远程过程管理、资源的协同分配、存储访问、信息安全、服务质量、资源的预定与交易等，并为开发基于网络的制造网格应用提供语言/编译器、类库、应用编程接口、集成开发环境等。

制造网格使能层：在网格中间件提供的编程环境和网格服务功能的基础上，制造网格使能层提供开发和运行制造网格应用系统所需要的使能工具，例如，注册管理与服务管理工具、服务发现与服务访问工具、智能搜索与服务评价工具、协同工作支持环境与集成平台、协同过程与项目管理工具、资源优化调度工具、可视化用户接口工具等。在这些使能工具支持下，用户可以非常方便地开发面向特定应用需求的制造网格应用系统。

制造网格应用层：在上面介绍的制造网格下几层功能的基础上，根据特定企业协同应用的需求，制造网格应用层重点开发专业化的制造网格应用系统，例如，基于制造网格的产品

数据管理系统、协同设计系统、协同制造系统、协同商务系统、供应链管理系统、远程设备控制与诊断系统等，从而为企业间的协同提供实用的软件支持工具和环境。

制造网格入口层：制造网格入口为用户提供基于 WEB 的统一的和安全的用户界面，使不同地点、不同身份的用户能够以一致的界面访问制造网格提供的各种服务。它主要利用基于角色的信息代理实现，记录每个用户的界面风格及关心的信息内容（采用 Push 和 Pull 方式向用户推荐其关心的更新信息），其内部可能包含个性化通知、指令发送、信息过滤、搜索等功能。

企业协同层：在制造网格的支持下实现企业间的协同，包括商务协同、制造协同、设计协同和供应链协同等。实现企业协同是制造网格构建和运行的最终目标，也是实现提升企业群体竞争力的主要手段和方法。

制造网格运行管理系统：制造网格运行管理系统跨越制造网格的多个层次，为制造网格的构建和运行提供支持，完成对制造网格上运行的用户和资源的管理、监控和应用协调，包括制造网格上的用户管理、接口管理、安全管理、运行监控、资源优化调度、服务代理管理和协调策略管理等功能。

5. 展望

通过研究分析，可以看出将网格技术应用于制造业将带来以下的好处。第一，有利于实现全社会制造资源的集成，提高制造资源的共享水平和利用率；第二，将增强我国企业的国际合作能力，提高技术上的资源互操作，使我国制造企业能够迅速利用全球的生产体系，与远程的资源进行协同工作，并行开发出新产品，以适应市场的需求；第三，能够丰富 Web 服务中的交互模型，通过提供企业最需要的各种交互模型，把 Web 服务扩展到更广泛的商业运用中；第四，将完善企业间的产品协同服务，使企业信息化的应用模式走向集成的、多层次的分布式方式，实现各类信息与制造服务组件的跨地域、跨企业的动态合作；最后，有利于形成协同的企业产业链，并最终形成制造网格系统。

这样的制造网格，能够在最大程度上实现设计、制造、信息、技术资源的共享，克服空间上的距离给不同企业间的协同带来的障碍，为实现敏捷制造和虚拟企业的运作提供支持，形成具有数字化、柔性化、敏捷化等基本特征的优势互补的协同企业。通过网络环境下企业间信息、过程、资源的集成，实现协同制造过程中物流、信息流、价值流的优化运行，使整个制造网格系统中的制造企业群体以较低的成本、较短的开发周期，制造出符合市场需求的高质量产品。可以断言，未来的企业将再也看不到实际的企业形式，所能看到的只是可以提供某种专门功能（计算、存储、铸造、装配等功能）的单元；或许将来，当个人需求单个的个性化产品时，只需要登陆网格，提出自己的需求，就能有一组功能单元通过网格进行协同

工作，将单个产品生产出来，交付给用户，而用户只需要通过网络中间件提供的记账付款服务功能，按供应方为产品提供的所有资源以及服务（原材料、设计、加工等）的支付使用费。

参考文献

1. Ian Foster , Carl Kesselman . The Grid: Blueprint for a Future Computing Infrastructure. USA: Morgan Kaufmann, 1999
2. Mark Baker, Rajkumar Buyya, Domenico Laforenza. Grids and Grid Technologies for Wide-Area Distributed Computing. Software: Practice and Experience (SPE) Journal, Wiley Press , 2002 , 32(15) , <http://www.csse.monash.edu.au/~rajkumar/papers/gridtech.pdf>
3. Ian Foster, Carl Kesselman, Steve Tuecke. The anatomy of the grid: Enabling scalable virtual organizations. International Journal of Supercomputer Applications, 2001, 15(3), 200~222
4. 桂小林, 钱德沛. 基于 Internet 的网格计算模型研究. 西安交通大学学报, 2001, 35(10), 1008~1011
5. 郑然, 李胜利, 金海. 网格资源管理与调度模型的研究. 华中科技大学学报(自然科学版), 2001, 29(12), 87~89
6. 徐志伟, 李伟. 织女星网格的体系结构研究. 计算机研究与发展, 2002, 39(8): 923~929
7. 范玉顺, 刘非, 祁国宁. 网络化制造系统及其应用实践, 北京: 机械工业出版社, 2003 年 10 月
8. 张立晴, 范玉顺. 网格技术及其在制造领域的应用, 航空制造技术, 2003 年第 2 期, pp.32-37

The Concept and System Architecture of Manufacturing Grid

FAN Yushun

Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084

Abstract: Under the environment of global manufacturing and networking, one of the important methods to improve the competition ability of manufacturing enterprise is to realize manufacturing coordination and make best utilization of global manufacturing resources. In this paper, the concept and development period of grid are introduced. The component and the

characteristics of grid are presented. Based on grid, the concept of manufacturing grid is put forward. The definitions, operation mode, and system architecture of manufacturing grid are put forward. The future application of manufacturing grid is discussed.

Key words: Grid, Manufacturing Grid, Coordination, System Architecture

个人简介：范玉顺，男，90年博士毕业于清华大学。现任清华大学自动化系责任教授，博士生导师，网络化制造实验室主任。享受国家有突出贡献的中青年专家政府津贴。国际自动控制联合会先进制造技术委员会委员，中国工业自动化与系统集成技术标准化委员会副主任。已完成20项863项目、自然科学基金项目。已发表学术论文250余篇，出版学术专著九本。