

高性能并行仿真中程序与平台之间的适用性研究

敖富江 杜 静 马孝尊 汪连栋

(63880 部队 洛阳 471003)

摘 要 开发高性能仿真程序的前提是选择合适的并行计算平台以及明确程序的并行优化方向。为此,研究了并行计算平台和高性能仿真程序之间的适用性。重点提炼出仿真程序特性集合、并行计算平台的性能指标体系和并行优化目标要素集合,从而使平台选择和程序优化技术有更完善的理论指导。基于这三项研究,提出了确定程序适用性和平台适用性的方法。实例分析表明,研究成果能够指导选择适合的并行计算平台,以及指导开发面向平台性能的并行优化技术。

关键词 并行计算平台,仿真程序,性能特征,平台选择,程序优化

中图法分类号 TP391 **文献标识码** A

Research on the Applicability between Program and Platform in High Performance Simulation

AO Fu-jiang DU Jing MA Xiao-zun WANG Lian-dong

(Unit 63880 of PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract The development of high performance simulation application works on the premise that the appropriate computing platform is selected, and the parallel optimization direction of program is determined. Therefore, this paper researched on the applicability between the parallel computing platform and high performance simulation program. Especially, three character sets are distilled, including the performance character set of simulation program, the performance indicator system of parallel computing platform, and the element set of parallel optimization targets, so as to theoretically guide the methods of platform selection and program optimization more completely. Moreover, based on these three researches, this paper proposes the methods of determining the program applicability and platform applicability. The cases study indicates that the research achievement in this paper can guide the selection of the appropriate computing platform, and guide the development of performance-oriented parallel optimization techniques.

Keywords Parallel computing platform, Simulation program, Performance character, Platform selection, Program optimization

1 引言

高性能仿真要求数值模拟达到高分辨、高逼真、全系统的规模和能力,其仿真程序通常具有极大规模的数据量和计算量^[1]。采用并行计算平台和并行算法对仿真程序进行加速,是实现高性能仿真的必由之路。

高性能并行仿真程序是高性能并行计算平台和优化程序相结合的产物。目前,主流的并行计算平台形式多样,仿真程序的特点也各不相同。研究平台和程序之间的适用性至关重要,其作用主要体现在以下两个方面:

(1) 确定平台的适用性

对于给定并行计算平台,确定平台的适用性包括两个方面:确定适合的仿真程序集合以及指导设计相应的并行优化技术。该研究针对许多研究机构已购置并行计算平台的实际情况,根据研究结论能够使开发的并行仿真程序充分发掘并

行计算平台的性能潜力,获得高效的系统运行效率。

(2) 确定程序的适用性

对于给定仿真程序,确定程序的适用性指选择合适的并行计算平台,是加速并行仿真程序的首要前提。随着 VLSI 技术和高速网络的发展,并行计算机系统的造价越来越低,使得在仿真开发过程中选择并行计算平台成为可能。目前,国内的研究院所通常都在某一类或者几类仿真领域进行深入研究。如果能够根据给定仿真领域中程序的特性选择合适的并行计算平台,那么这将获得很高的性能收益,并加快问题研究和工程实践的进程。

为此,本文研究了开发高性能仿真程序的基础——并行计算平台和高性能仿真程序之间的适用性,主要贡献体现在以下 4 个方面:

- 分析了高性能仿真程序的特性,及各种特性所能够开发的并行计算平台性能优势。

本文受 973 国家安全重大基础项目(613900103),中国博士后科学基金(20090451525)资助。

敖富江(1975—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为复杂系统仿真、数据挖掘等, E-mail: aofj2001@yahoo.com.cn; 杜 静(1979—),女,博士,助理研究员,主要研究方向为高性能计算、并行仿真等; 马孝尊(1971—),男,博士生,高级工程师,主要研究方向为雷达对抗仿真试验与评估; 汪连栋(1966—),男,博士,研究员,主要研究方向为电子对抗仿真试验与评估。

• 建立并行计算平台的 CMCPS 性能指标体系,以指导不同并行计算平台性能的分析 and 度量。

• 研究了并行优化目标要素集合,以及针对性的并行优化技术,为高性能仿真程序提供优化方向。

• 基于以上三项研究,提出对于给定平台确定其适用性和对于给定仿真程序进行平台选择的方法。

实例分析表明,提出的程序和平台之间的适用性研究不但能够准确指导并行计算平台的选择,而且还应当贯穿整个并行仿真程序的开发过程中,用以指导设计面向平台性能的并行仿真优化技术。

2 程序与平台特性分析

本节提炼归纳了仿真程序特性集合、并行计算平台的性能指标体系和并行优化目标要素集合,使平台选择和程序优化具有更完善的理论指导。

2.1 高性能仿真程序的特性分析

研究高性能仿真程序的特性是并行仿真开发的基础。高性能仿真领域主要包括核爆炸模拟、气象预报、天体物理、计算流体动力、生物信息学等^[2,3]。这些领域要求数值模拟达到高分辨、高逼真、全系统的规模和能力,而这些需求造成了高性能仿真程序具有独特的性质,主要体现在数据量、计算量、访问模式 3 个方面。本文将(数据量,计算量,访问模式)定义为高性能仿真程序的特性集合,简称为 DCA(Data, Computation, Accessing pattern)程序特性集合。根据该集合对程序进行分析,能够得出以下主要结论。

• 若数据量庞大,则适合于以数据并行为主的多种方式并行执行,以挖掘平台的并行能力。

• 若计算量大且操作复杂,则适合于片上计算单元密集的并行计算平台,以提供很强的计算能力。

• 若数据访问模式复杂,则不适合将数据访问分散到不同计算结点,这样将增大通信开销。可以考虑增加冗余计算或者边界通信以构造规整的访问模式,从而实现数据在多结点上的分布且提高并行性。

• 通过判断数据量与计算量的差距,归纳出该程序属于访存密集型程序还是计算密集型程序,从而得出计算平台是否需要更加密集的存储层次,以提供可持续的供数能力。

对程序特性进行实际分析时,可以在(数据量,计算量,访问模式)这 3 个方面挖掘更细粒度的程序特性,进而获得这些特性所能够开发的体系结构性能潜力,为选择合适的并行计算平台和开发适合的并行优化技术奠定基础。

2.2 并行计算平台的 CMCPS 性能指标体系

并行计算平台包括并行体系结构和相应的并行编程模型。为了便于更加有针对性地对并行计算平台的性能特征进行分析,需要建立并行计算平台的关键性能指标体系,基于该指标体系指导不同的并行计算平台性能的分析 and 度量。经过分析比较,发现影响现有并行计算平台性能的因素主要归结于 5 个方面,包括:通信开销 (Communication)、访存开销 (Memory Access)、计算能力 (Computation)、并行能力 (Parallelism) 和可扩展性 (Scalability)。这 5 种性能指标构成了并行计算平台的关键性能指标体系,简称为 CMCPS 性能指标体系。下面对该体系中每个指标性能特征的产生途径、度量方法、评判标准分别进行阐述。

通信开销 C:来源于任务之间的信息交换。度量标准依据结点间的网络拓扑结构。若通信开销小,则该计算平台具有高效的互联网络,并且本地存储器具有良好的局部性。

访存开销 M:来源于计算单元对所处理数据的读写延迟。度量标准依据所访问数据位于的存储器与计算单元的层次距离。若访存开销小,则该计算平台的局部存储器具有良好的数据重用。

计算能力 C:来源于计算单元的综合计算能力。度量依据片上计算单元是否密集,能否饱和工作。若计算能力强,则该计算平台能够处理大量复杂的计算操作。

并行能力 P:来源于计算单元或结点的协同工作能力。度量依据并行计算平台能够提供哪些层次的并行,包括任务级并行、数据级并行、线程级并行和指令级并行。若并行能力强,则该计算平台能够高度协同处理同一问题。

可扩展性 S:来源于随着并行计算平台的规模扩展,并行额外开销的变化情况。度量依据并行计算平台能否随着处理器数目的增多而获得线性增长的加速比。若可扩展性强,则该计算平台能够高效处理更大规模的计算任务。

根据 CMCPS 性能指标体系,能够更加高效地获取各种并行计算平台的性能特征,从而分析出所适合的程序特性,以及需要采用的并行优化技术。

2.3 并行优化目标要素

前面两节分析了高性能仿真程序的特性和并行计算平台的关键性能指标。而能够将两者紧密联系在一起则需要引入并行优化技术。通过对程序采用面向平台特性的并行优化方法,能够使优化后程序尽可能发掘并行计算平台的性能优势。为了更好地指导并行优化技术设计,通过分析程序和平台对并行优化方向的需求,将并行优化目标归纳为下面 5 方面要素:负载均衡 (Load Balancing)、并行度 (Parallel Degree)、CPU 利用率 (CPU Utilization)、延迟避免 (Latency Avoiding) 和延迟隐藏 (Latency Hiding)。这 5 方面要素构成了并程序的关键优化目标要素集合,简称为 LPCAH 优化目标要素集合。这些优化目标最终都是为了加速并程序,提高系统的并行效率。

为了挖掘给定并行计算平台的某性能指标优势,需要采用针对性的并行优化技术,以实现相应的并行优化目标。可见,并行优化技术是实现 CMCPS 性能指标实际效益的必要手段。下面,表 1 列举了 CMCPS 平台指标、相应的并行优化目标以及所需采用的常用并行优化技术。实际应用时,可以通过查阅该表,确定已有并行计算平台上的程序优化方向和程序设计方法。

表 1 各平台指标所对应的并行优化目标和并行优化技术

并行平台指标	并行优化技术	并行优化方向
通信开销	合理任务分配	通信延迟避免
	双缓冲、块通信	通信延迟隐藏
访存开销	数据重组	访存延迟避免
	预取、双缓冲	访存延迟隐藏
计算能力	计算重组	CPU 利用率
并行能力	合理任务划分	负载均衡、并行度
可扩展性	设计可扩展并行算法	并行度

3 程序与平台的适用性

综合上一节的研究,可以实现两个目的:确定平台的适用

性和确定程序的适用性。现有研究主要集中于平台的适用性这一单向研究^[4,5],缺少根据给定程序领域来确定程序适合的平台类型的研究。而研究平台和程序相互之间的适用性是构架高性价比的并行计算平台及开发高性能仿真程序的必然趋势。下面进行详细介绍。

3.1 确定平台的适用性

对于给定并行计算平台,确定平台的适用性包括两个方面,一方面是确定其适合的并行仿真程序特点;另一方面是针对待开发仿真程序,确定适合的并行优化技术。其研究动机主要源于目前各高性能仿真的研究机构都已购置了不同类型的并行计算平台。随着研究的深入,研究人员已熟悉了本单位拥有的平台,包括其体系结构和编程模型。为了加速高性能仿真程序开发的进度,并保证程序的高效性,需要深入研究本单位平台的性能特性及其适合的程序特性,从而指导研究人员选择合适的仿真领域进行研究,并设计能够扬长避短的并行优化技术。

确定平台的适用性过程如图1所示,图中灰色方框代表并行计算平台适用性研究的结论:适合的程序特性和待开发的程序适合采用的并行优化技术。具体过程包括3个阶段:首先,针对给定并行计算平台,通过CMCPS性能指标分析,确定平台性能优势和瓶颈,并确定所适合的程序特性;然后,根据DCA程序特征集合分析待开发程序,得出程序的特性,并与并行计算平台所适合的程序特性进行对照;最后,根据程序特性的对照结果,采用LPCAH并行优化目标要素集合分析方法,得出待开发程序在该并行计算平台上的并行优化目标,并最终得出需要采用的并行优化技术。其中,第一阶段(图中虚线框中过程)是典型并行计算平台的平台指标以及适合的程序特性的分析过程,该阶段是并行计算平台适用性分析过程中的最关键部分。通过详细分析典型并行计算平台的适用性并得出相应结论,能够更加高效地指导任意平台的适用性分析。

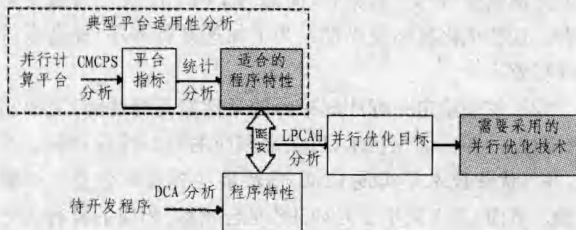


图1 确定平台的适用性过程

文献[6]依据本节提出的确定平台适用性方法,对4类典型并行计算平台的性能特征进行了分析,并得出所适合的程序特性和优化技术。这4类并行计算平台根据并行计算机系统中结点与存储器的组织方式进行划分,具体包括:共享存储计算平台、分布存储计算平台、混合存储计算平台和新型计算平台^[7,8]。文献[6]的典型并行计算平台分析结果,不但可以应用于本节的确定平台适用性过程,还可以应用于下一节的平台选择过程。

3.2 确定程序的适用性

3.1节平台适用性的研究针对的是许多研究机构已购置并行计算平台的实际情况。然而,受限于工作性质,也有部分研究机构需要开发特定领域的高性能仿真程序。如果需要加

速这类仿真程序,那么需要通过确定程序的适用性来选择适合的并行计算平台,即定制适合的平台。这样能够使待开发的程序尽可能发掘所定制的并行计算平台的性能优势,以避免性能瓶颈。本节详细研究了根据程序特性选择平台的方法,并给出了示例程序以说明所提出的定制平台过程。

过去,并行计算机系统非常昂贵,使得根据程序特性定制平台的需求难以实现。随着计算机VLSI技术的飞速发展,在摩尔定律的作用下,单个芯片上可集成的晶体管数目快速增长,目前已经超过10亿个。这些丰富而廉价的运算资源使得并行计算平台的价格越来越低,从而定制平台成为现实而有效的性能优化途径。图2给出了针对待开发程序选择适合的并行计算平台的过程,其中虚线方框所标示过程的实现可以参照上一节典型平台适用性的分析结果。选择平台的具体过程如下:首先,给定待开发程序,需要经过两方面过程分析获得其程序特性。一方面,直接通过DCA分析获得待开发程序的特性;另一方面通过LPCAH分析获得待开发程序的并行优化目标,采用相应的并行优化技术后得到优化后程序,对优化后程序实施DCA分析获得程序特性。可见,这两方面过程所获得的程序特性包括待开发程序能够直接或间接优化后体现出来的程序特性。其次,对待开发程序的特性进行统计分析,对照上一节典型平台适用性的分析结果,获得适合的平台指标,并进一步通过CMCPS分析获得适合的并行计算平台。

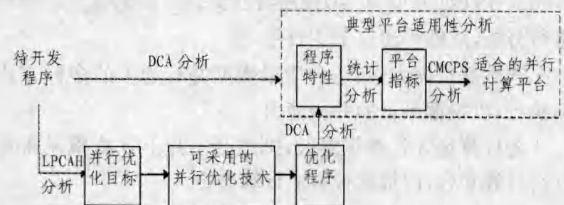


图2 并行计算平台选择过程

为了更加清楚地说明根据程序特性选择平台的方法,本节列举了图3中上图所示的待开发程序示例代码,并进行了相应的平台选择。该示例代码通过一个二维循环完成对矩阵A的更新过程。经过分析可知,更新内容主要发生在列向量j一维,行向量i一维相互之间没有数据相关性。因此,行向量i适合分配到不同的并行结点上同时并发执行,而列向量j一维适合分配到具有共享存储的结点内部运行。目前根据行向量一维可以初步判断,示例程序适合分布存储并行计算平台。下面进一步分析列向量j一维,判断其是否存在可挖掘的并行性,以确定结点内是否需要具有多计算单元来提供列向量一维的并行。

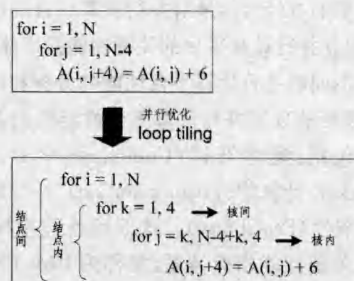


图3 示例代码和采用的优化技术

图4给出了第*i*行数据按照循环迭代顺序的访问序列,图中曲线箭头连接的两个数据具有数据依赖关系。经过分析可知,该访问序列中任意相隔3个数据的两项存在数据依赖,而序列中每个数据和相邻连续三项数据不存在数据依赖,因此这样的4个数据可以被同时访问且并行执行。可见,整个数据序列按照是否具有数据相关性可以分为4组,分别为 $(A_{i,1}, A_{i,5}, A_{i,9}, \dots, A_{i,N-3})$, $(A_{i,2}, A_{i,6}, A_{i,10}, \dots, A_{i,N-2})$, $(A_{i,3}, A_{i,7}, A_{i,11}, \dots, A_{i,N-1})$, $(A_{i,4}, A_{i,8}, A_{i,12}, \dots, A_{i,N})$ 。这4组内部具有紧密的数据依赖,而组之间没有任何依赖关系。因此,需要将组内相互之间具有数据依赖的多个数据分配于同一计算单元,以避免分配于不同计算单元引起的额外数据交换开销。而这4组可以分别分配到不同的计算单元以提高系统运行时的并行度。



图4 优化前第*i*行数据序列的访问情况

为了显示每行的列向量之间也存在可挖掘的并行性,对原始待开发程序采用循环分块(loop tiling)并行优化技术^[9],优化后的程序代码如图3下图所示。图3中,优化后代码的最外层循环表示行向量遍历,其迭代可以分配于不同结点以开发结点间并行;而内部两层循环需要分配于同一结点内部,以保证同一行向量能放置于同一片共享存储区域,对于按行访问的C语言来说,这是一种快速的连续访问方式。其中,第二层循环的不同迭代控制上述4组数据在不同计算单元分配,而最内层循环完成组内的数据依赖访问和计算,将分配于同一计算单元。图中为了便于表示,计算单元简称为核。优化后代码的第*i*行数据按照循环迭代顺序的访问序列如图5所示。可以明显看出,采用循环分块并行优化技术后,具有数据相关性的所有数据被密集在一起。这样能够区分可并行化任务,有利于结点内并行任务的分配。

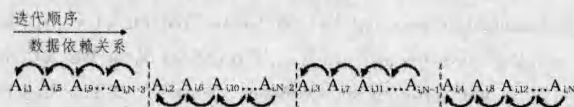


图5 优化后第*i*行数据序列的访问情况

可见,根据示例代码经过并行优化后的程序特性分析可知,该示例代码适合运行于单结点具有4个计算单元的分布共享并行计算平台,平台结构如图6所示。其中,这4个计算单元可以采用多CPU或者多核技术。图7给出了示例代码向分布式共享存储并行计算平台进行任务分配的过程。图7(a)给出了初始A矩阵的数据布局情况。经过按行粗粒度并行化后,将不同的行数据分配于各个分布式结点,如图7(b)所示,这样结点之间将进行完全无关的行数据访问与计算。进一步对每个结点上的行数据实施循环分块并行优化,将行数据分成可并行执行的4组数据,并分配于4个计算核。图7(c)给出了1号结点上第1行数据的细粒度任务分配情况,这4组数据将在共享存储的4个计算核上同时并行计算。

综上所述,根据程序特性分析结果选择合适的并行计算平台是一种行之有效的并行程序优化方法。随着并行计算机

的普及和高性能仿真需求的扩大,越来越需要熟悉程序和计算平台的特性,以增强其相互适用性,最大程度地挖掘系统运行时的性能潜力。

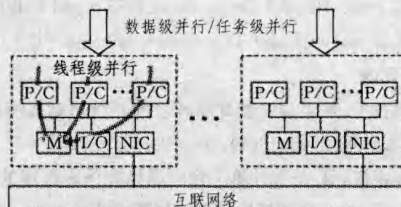


图6 混合存储计算平台

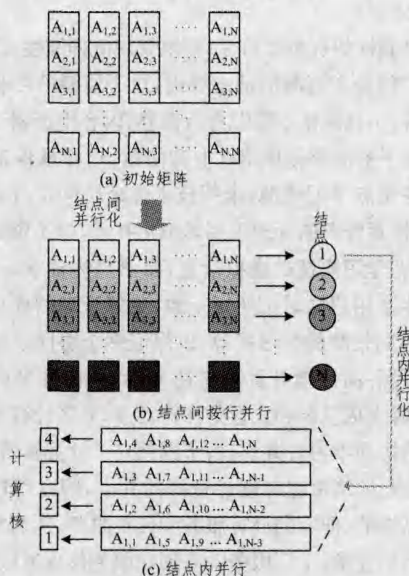


图7 示例代码向多层次并行计算平台的任务分配

结束语 随着高性能计算技术的发展,高性能仿真技术成为解决复杂大规模系统仿真的关键技术^[10]。高性能并行仿真程序是高性能并行计算平台和优化算法相结合的产物。为了使仿真程序能够充分发挥并行计算平台的性能优势,本文研究了高性能仿真的基础——并行计算平台和高性能仿真程序之间的适用性。首先,总结了程序特性集合、并行计算平台的性能特征集合和并行优化目标集合,并建立相应的指标体系,使得平台选择和程序优化技术有更完善的理论指导。其次研究了高性能仿真程序和并行计算平台之间的适用性,旨在对于给定仿真程序,能够根据其特性并结合当前主流并行计算平台的性能特征,确定合适的并行计算平台,并且指导设计面向平台性能的并行优化技术。

未来的工作主要包括以下几个方面:首先,从模型指导的角度,进一步详细分析并量化影响程序开发的关键因素;其次,以更多的仿真程序来验证所提出程序与平台之间的适用性研究;最后,继续针对主流并行计算平台研究其详细的性能特征和适用的优化技术。

参考文献

- [1] Scientific Computing Research Environments for the Mathematical Sciences [R]. <http://www.nsf.gov/pubs/2007/nsf07502.htm>, 2007
- [2] IBM Blue Gene team. Blue Gene: A Vision for Protein Science Using a Petaflop Supercomputer [J]. IBM System Journal,

- [3] 车永刚. 科学计算程序性能分析与优化关键技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2004
- [4] Feng B, et al. Parallel simulation of DEVS and Cell-DEVS models on Windows-based PC cluster systems [C] // Proc. of HPCS. 2008
- [5] 刘奥,姚益平. 基于高性能计算环境的并行仿真建模框架 [J]. 系统仿真学报,2006,18(7):2049-2051
- [6] 杜静,敖富江,等. 并行计算平台对高性能仿真程序的适用性研究 [C]//2009 年全国系统建模与仿真技术高层论坛. 2009
- [7] Culler D E, Singh J P, Gupta A. 并行计算机体系结构:硬件/软件结合的设计与分析(第二版) [M]. 北京:机械工业出版社,2003
- [8] 杜静. 流体系结构的编译技术研究——面向科学计算程序的编译优化 [D]. 长沙:国防科技大学,2008
- [9] Allen R, Kennedy K. Optimizing Compilers Modern Architectures: A Dependence-Based Approach [M]. 2004
- [10] 钟海荣. 大规模分布式仿真系统的时空一致性研究[D]. 长沙:国防科技大学,2005

(上接第 421 页)

就可以共享同样的资源和目标;资源管理的伸缩性,网格服务技术实现广域分布资源的动态管理,对于资源的变化能够做出实时反映,一旦网格中资源有所调整,内容生产者 CG 就会实时调整电子资源数据库 RD 中的信息,这样就保证了协同学习能使用最新学习资源;虚拟技术保证协同学习者同时共享资源,网格对资源的管理采用虚拟化技术,电子资源数据库 RD 存储的是学习资源的虚拟信息,而不是物理学习资源,这样就允许多个用户同时按照更一致、更好管理的虚拟实体收集和组织不同来源的学习资源,以保证多个协同学习者同时使用学习资源;高性能计算支持协同学习,在许多协同学习中,需要实时完成复杂和大量的计算任务,并将计算结果实时远程传送给协同学习者共享,由于网格对于计算资源、软件资源、存储资源、网络带宽等硬件资源的共享,因此可以为协同学习提供高端的、便宜的计算服务和传输服务,从而符合协同学习这方面的要求;工厂服务动态创建服务体现适应性,底层 GRAM 的受管理作业工厂服务 MJFS 和文件流工厂服务 FS-FS 动态创建作业服务和文件流服务,以满足协同学习中适应性的需要;接受第三方学习资源,资源分配器也可以接受第三方服务 TPS 的帮助,分配独家资源或驻留在其它领域的资源。

5 实现细节

对于所提模型的测试,我们选择了开源的、成熟的、兼容的和经过良好测试的 Linux、Apache、MySQL 和 PHP 构建实验实施环境,采用 GT4 作为网格服务,交互使用建立在 HTTP 之上的 SOAP,认证和授权采用 WS-Security,资源分配器和执行器依托 GT4 实现,信息数据库使用 XACML 创建,已实现的各种服务采用网格服务。通过测试,能够实现模型的设计预期,并能较好地支持协同学习环境对资源管理的需要。

结束语 本文在总结目前学习管理系统在资源管理方面缺失的基础上,根据协同学习环境对资源管理的需求,分析了网格资源管理中间件 GRAM 的结构和特性,以 GRAM 为基础构建了一种协同学习环境的资源管理模型,并选择一些开源技术进行了测试,结果表明,这种模型能够较好地支撑协同学习中资源管理的适应性、伸缩性和无处不在等要求。下一步我们计划在资源管理要求更高的环境下和协同学习方式支

持等方面,对基于网格的协同学习环境开展进一步的研究和实验。

参考文献

- [1] Dagger D, O'Connor A, Lawless S, et al. Service-Oriented E-Learning Platforms from Monolithic Systems to Flexible Services[J]. J. Internet Computing, IEEE, 2007, 11(3): 28-35
- [2] Foster I, Kesselman C, Nick J M, et al. Grid services for distributed system integration[J]. J. Computer, 2002, 35(6): 37-46
- [3] Smith M S, Casserly C M. The promise of open educational resources[J]. The Magazine of Higher Learning, 2010, 38(5): 8-17
- [4] Terrell R L, Caudill J G. OPENCOURSEWARE: Open Sharing of Course Content and Design[J]. J. Computing Sciences in Colleges, 2011, 27(3): 38-42
- [5] Krishnan M S. NPTEL: A programme for free online and open engineering and science education[C] // International workshop on Technology for Education(T4E'09). Bangalore, 2009: 1-5
- [6] Reyes N R, Candeas P V, Galán S G, et al. Comparing open-source e-learning platforms from adaptivity point of view[C] // EAEEIE Annual Conference. Valencia, 2009: 1-6
- [7] Lengyel P, Herdon M, Szilágyi R. Comparison of Moodle and ATutor LMSs[M]. Summer University on IT in Agriculture and Rural Development, Debrecen Hungary, 2006
- [8] Fislera J, Schneidera F. Creating, Handling and Implementing E-learning Courses using the Open Source Tools OLAT and eLML at the University of Zurich[C] // Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, WCECS 2009. 2009
- [9] Bote-Lorenzo M L, Vaquero-Gonzalez L M, Vega-Gorgojo G, et al. GRIDCOLE: a Grid Collaborative Learning Environment[C] // International Symposium on Cluster Computing and the Grid. 2004: 105-112
- [10] Bagnasco A, Scapolla A M. A grid of remote laboratory for teaching electronics[C] // the 2nd LEGE-WG international workshop on e-Learning and Grid technologies. Paris, 2003
- [11] Lafifi Y, Halimi K, Hadjeris M. COLEG: Collaborative Learning Environment within Grid[J]. J. Computing and Information Technology-CIT, 2010, 18(1): 69-90
- [12] Joseph J, Fellenstein C. Grid Computing[M]. Prentice Hall PTR Upper Saddle River, NJ, USA: Biliometrics, 2004