

# 云计算资源调度:策略与算法

储雅<sup>1</sup> 马廷淮<sup>2</sup> 赵立成<sup>3</sup>

(南京信息工程大学计算机与软件学院 南京 210044)<sup>1</sup>

(南京信息工程大学江苏省网络监控中心 南京 210044)<sup>2</sup> (中国气象局国家气象信息中心 北京 100081)<sup>3</sup>

**摘要** 资源调度是云计算的关键问题之一,它的调度策略与算法直接影响到云系统的性能及成本。首先,根据现有云计算资源调度中的各种策略和算法归纳出4大热点问题:本地性感知任务调度、可靠性感知任务调度、能量感知资源调度以及工作流调度。然后,根据不同的优化目标(性能和成本)将这4个问题划分成3大类型,并对每一类问题中的策略及算法进行了详细描述和比较分析。其次,对4个问题中的相关算法进行了总体比较。最后,对云资源调度的未来研究方向进行了展望。

**关键词** 云计算,资源调度,数据本地性,可靠性,能源有效性,工作流调度

中图分类号 TP393 文献标识码 A

## Cloud Computing Resource Scheduling: Policy and Algorithm

CHU Ya<sup>1</sup> MA Ting-huai<sup>2</sup> ZHAO Li-cheng<sup>3</sup>

(School of Computer and Software, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)<sup>1</sup>

(Jiangsu Engineering Centre of Network Monitoring, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)<sup>2</sup>

(National Meteorological Information Center, China Meteorology Administration, Beijing 100081, China)<sup>3</sup>

**Abstract** Resource allocation and scheduling(RAS)are the key issue of cloud computing, and their policy and algorithm have a direct effect on cloud performance and cost. Firstly, four hot topics of cloud RAS, locality-aware task scheduling, reliability-aware scheduling, energy-aware RAS, and workflow scheduling, were presented. And then these fours were classified into three parts according to different optimization objectives (performance and cost), and various existing RAS policies and algorithms were discussed in details. In addition, a comparative analysis of four problems with their representative algorithms was made. Finally, some future research directions of cloud RAS were pointed out.

**Keywords** Cloud computing, Resource allocation and scheduling, Data locality, Reliability, Energy efficiency, Workflow scheduling

## 1 引言

云计算是一种新兴的商业分布式计算模型,它通过互联网为远程用户按需提供低成本、高可靠性、规模可伸缩的计算资源及服务。数据中心管理、虚拟技术、资源调度、QoS保证、安全与隐私保护等已经成为云计算的研究重点和难点。其中,资源调度的策略及算法会直接影响云系统的性能和成本。

在云环境中,云提供商(如 Google、Amazon 和 Microsoft)提供计算资源及服务,用户可以像访问那些被租用或释放的一般应用程序一样来访问它们。同时,云提供商必须对资源进行管理、存储并保证其可靠性,而用户只需要在执行任务时根据使用情况进行相应付费。为了满足用户的请求并且能够获得最大利润,云提供商必须在资源调度过程中考虑云系统的性能和成本。目前,已经有大量学者从多个方面对云计算资源调度进行了深入研究。例如,为了提高任务执行效率增

强云系统的可靠性,数据本地性调度和可靠性感知调度分别得到了广泛研究;为了最小化运营成本,有些研究者对能源消耗资源调度进行了大量研究;为了满足由用户提出的多个 QoS 请求,如何为工作流任务分配资源成为云计算资源调度的热点。

## 2 问题和描述

为了解决云计算资源调度问题,研究者从各个方面作了大量的研究工作。从这些工作中可以总结出以下4个热点问题:1)本地性感知任务调度;2)可靠性感知任务调度;3)能量感知资源调度;4)工作流调度。

问题1):本地性感知任务调度问题——如何在云资源调度中采用数据本地性来提高执行效率以及节约网络带宽。

在云计算中,将计算迁移到靠近本地数据的地方所需的开销少于将数据移动到运行应用程序的地方所需的开销。此

投稿日期:2013-01-25 返修日期:2013-05-04 本文受江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(2012-WLW-022),江苏省“青蓝工程”中青年学术带头人资助。

储雅(1989-),女,硕士,主要研究方向为气象数据网格、气象私有云存储,E-mail:chu\_ya@foxmail.com;马廷淮(1974-),男,博士,教授,主要研究方向为计算智能、分布式数据共享存储;赵立成(1962-),男,研究员,主要研究方向为气象信息化。

外,由于网络带宽属于急缺资源,为了避免网络拥堵,并且增加系统整体吞吐量,研究本地性感知任务调度问题来增强作业间的数据本地性是非常有必要的<sup>[6]</sup>。一般来说,好的数据本地性是指将计算任务分配到它所需数据的附近。现有许多研究人员<sup>[1-7]</sup>努力尽可能地获得好的数据本地性。

问题2):可靠性感知调度问题——如何减少云计算资源调度中任务的失效率来提高云系统的可靠性和执行效率。

一个云环境可能拥有成千上万个数据节点,资源发生失效是不可避免的,这可能导致执行中止、数据损坏丢失、性能下降、违反服务水平协议(SLA),进而可能造成大量的客户流失。因此,研究可靠性感知调度问题来提高云系统的可靠性是一项严峻的挑战。例如,MapReduce能够自动处理故障:如果一个节点崩溃了,MapReduce能够将任务分配到另一个节点上重新运行<sup>[8]</sup>。现在,已经有许多学者<sup>[8-11]</sup>将可靠性纳入云计算资源调度策略中。

问题3):能量感知资源调度问题——如何通过降低数据中心的能源消耗来减小云提供商的运营成本。

随着对高性能计算设施的需求大大提高,数据中心的能源消耗也在快速增长,这引起了各界的广泛关注。大量的能耗不仅增加了云提供商的运营成本,而且产生了大量影响环境的二氧化碳(CO<sub>2</sub>)排放物<sup>[21]</sup>。因此,在保证满足用户与云平台提供商之间的SLA前提下,为了尽可能多地降低能耗,有必要研究能量感知资源调度问题。现如今,已经展开很多研究云计算中能源有效性资源调度方案的工作<sup>[12-21]</sup>来节约能源。

问题4):工作流调度问题——如何优化工作流调度来权衡完成时间与成本。

在分布式系统中,通常采用由工作流构成的公共模型来描述大量的应用程序。在类似网格这样的分布式系统中所采用的调度方式主要是为了获得最小工作流执行时间。然而,在云计算中,除了执行时间还有其他重要的影响因素,如成本。一般来说,资源运行速度越快,它所需要的成本代价就越高。因此,研究工作流调度问题来权衡完成时间与成本是一项重要的工作<sup>[23-31]</sup>。

### 3 资源调度策略及算法

如图1所示,资源调度策略及算法根据不同的优化目标,可以划分成3个部分:基于性能的资源调度、基于成本的资源调度、基于性能和成本的资源调度。本地性感知任务调度主要是为了提高任务的执行效率,可靠性感知任务调度主要是为了提高云系统的可靠性,都属于云计算资源调度的性能优化方面。能量感知资源调度主要是为了减小运营成本,属于云计算资源调度的成本优化。工作流调度同时优化了时间和成本,因此把它归结在基于性能与成本的资源调度部分。

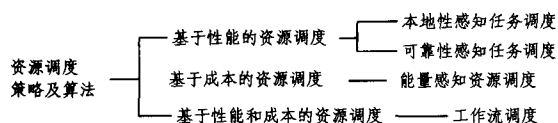


图1 资源调度策略及算法分类

#### 3.1 基于性能的资源调度

基于性能的资源调度策略与算法可以分为本地性感知任务调度和可靠性感知任务调度。对于本地性感知任务调度方

面的研究主要用来解决问题1),对于可靠性感知任务调度方面的研究主要用来解决问题2)。

##### 3.1.1 本地性感知任务调度

云计算的海量数据处理平台(如 MapReduce, Dryad, Hadoop 等)需要同时执行大量的数据敏感性作业(每个作业包含多个子任务)。一般来说,作业之间会互相竞争计算资源和网络带宽,因此为了在作业执行过程中通过减少网络传输来提高执行效率,一些学者表明应该将任务尽可能地分配到距离数据近的计算节点来提高数据本地性。

本节从 Hadoop 默认调度器及其改进、提高数据本地性以及权衡数据本地性和公平性3个方面进行描述。

##### 1. Hadoop 调度器

在 Hadoop 中,现有的作业调度器有 FIFO 调度器、HOD 调度器(Hadoop on Demand Scheduler)、公平调度器(Fair Scheduler)以及计算能力调度器(Capacity Scheduler)<sup>[1]</sup>。FIFO 调度器是 Hadoop 默认调度器,采用贪婪法在队头作业中搜索一个数据本地任务,并将它尽可能地分配给空闲计算节点。HOD 调度器使用户共享一个公共文件系统,同时又设立私有 MapReduce 集群,以此来解决 FIFO 调度器在处理大作业时对小作业响应时间慢的问题。公平调度器使每个用户幻想自己拥有一个私有集群,并从一些用户那里动态地重新分配未使用的计算能力给其他一些用户。计算能力调度器是由 yahoo 公司创建的,功能类似于公平调度器。它保证了每个数据节点的最小计算力并且能够在用户中共享多余的计算能力。

##### 2. 数据本地性

为了能够进一步获得数据本地性,一些研究者基于现存的 Hadoop 调度算法提出了一些改进策略<sup>[2-5]</sup>。为了达到全局优化并且能够在 Hadoop 中有效分配任务,Fischer 等人<sup>[2]</sup>建立了理想化 Hadoop 模型,设计了一个基于流的 MaxCover-BalAssign 算法,它通过多次迭代产生最优分配方案。但是,该方法时间复杂度过高,因此 Jin 等人<sup>[3]</sup>提出了一个启发式任务调度算法 Balance-Reduce(BAR),它首先调度全局任务,然后根据网络状态和集群负载动态调整任务数据本地性。此外,Seo 等人<sup>[4]</sup>和 Hammoud 等人<sup>[5]</sup>试图分别通过提高 map 任务和 reduce 任务的数据本地性来提高 MapReduce 的性能。Seo 等人<sup>[4]</sup>建立了高性能 MapReduce 引擎(HPMR)用来在 map 阶段检测输入分片以及在 reduce 阶段预测键/值对在哪个分区。HPMR 在未来可能的 reducer 附近为 map 任务分配预期数据,这使得作业的执行时间不会随着网络带宽的变化而变化。与 HPMR 正好相反,由 Hammoud 等人<sup>[5]</sup>提出的本地性感知 reduce 任务调度器(LARTS)试图在了解输入数据的网络位置和大小后计算出最大请求数据来配置 reduce 任务,从而获得较好的数据本地性。

##### 3. 数据本地性与公平性相结合

公平性是作业调度器必需考虑的另一个重要因素,研究公平调度算法能够快速为即时作业分配资源。但是,数据本地性与公平性是互相制约的。为进一步提高作业的执行效率,一些研究人员<sup>[6,7]</sup>关注怎样在调度算法中平衡数据本地性与公平性。Zaharia 等人<sup>[6]</sup>在 max-min 公平调度算法的基础上提出了延迟调度算法,即在请求下一个调度作业时,如果当前空闲计算节点的本地磁盘没有该作业所需的数据,那么

就会让该作业跳过该节点继续等待。此外,还有两种调度方法类似于延迟调度:Quincy 和 Good Cache Compute (GCC)<sup>[3]</sup>。Quincy 基于全局成本模型,将调度问题映射成一个图形数据结构,并通过最小代价流算法来解决这个调度问题。GCC 在延迟调度的基础上,为空闲计算节点的数量设定了一个最大值,如果当前空闲节点的数量低于这个值,它会跳过该节点继续等待。由于延迟调度采用静态等待时间阈值,不能适应数据中心动态负载的变化,因此,Jin 等人<sup>[7]</sup>提出了等待时间阈值自适应调整模型,并设计了自适应延迟调度算法(ADS)。

基于本地性感知任务调度策略和算法从数据本地性、公平性、执行效率、利用率等方面进行了比较。表 1 列出了本地性感知任务调度中各策略及算法的比较情况。

表 1 本地性感知任务调度中各策略及算法的比较

	FIFO <sup>[1]</sup>	HOD/ Fair/ Capacity <sup>[1]</sup>	Fischer et al. <sup>[2]</sup> /Jin et al. <sup>[3]</sup>	Seo et al. <sup>[4]</sup>	Hammoud et al. <sup>[5]</sup>	Zaharia et al. <sup>[6]</sup> / Quincy/ GCC <sup>[3]</sup> / Jin et al. <sup>[7]</sup>
数据本地性	✓		✓	✓	✓	✓
公平性		✓				✓
执行效率			✓	✓	✓	✓
利用率		✓	✓			✓
全局优化			✓			
Map 任务				✓		
Reduce 任务					✓	

### 3.1.2 可靠性感知任务调度

可靠性感知任务调度就是在云计算资源调度过程中减少任务的失效率来提高云系统的可靠性以及执行效率。现有的研究有:Chen 等人<sup>[19]</sup>提出了自适应 MapReduce (SAMR) 调度算法,它与 Zaharia 等人<sup>[8]</sup>提出的 LATE(Longest Approximate Time to End)调度方法具有互补性,与 Kumar 等人<sup>[10]</sup>的算法具有共同的特性。Wang 等人<sup>[11]</sup>基于信任机制提出了另一种新的调度算法。

在 Hadoop 调度器中,假设集群中数据节点是同构的,并且对任务进行线性规划,以此来决定何时投机重新执行掉队的任务,这些假设严重限制了调度器的性能发挥。在实际异构环境中,不同的设备装置的算力、通讯力、体系结构、内存和处理能力都有所不同。因此,Zaharia 等人<sup>[8]</sup>研究了异构环境下异常任务的发现机制,并基于 Hadoop 的投机执行调度器提出了 LATE 调度算法。该算法定义了一个 Slow Task Threshold,用来防止不必要的投机行为,并依据预估剩余时间对任务进行排序,然后选择排在最前面且进展率低于阈值的任务,并执行它的备份。LATE 算法的优点是对于异构环境中的节点具有可靠性,因为只有一些最慢的投机任务才能被重新启动。但是,这个方法不能正确计算任务的剩余时间,也不能找到真正慢的任务。因此,Chen 等人<sup>[9]</sup>提出了 SAMR 调度算法来保证可靠性、提高 MapReduce 的执行效率以及提高资源利用率。由于 Hadoop 调度器和 LATE 调度算法都采用静态方式来寻找 slow 任务,因此它们找到的任务不一定是真正延迟整个执行时间的任务。然而,SAMR 能够结合每个节点的历史信息记录来调整参数,并能够找到真正需要备份的 slow 任务。此外,Kumar 等人<sup>[10]</sup>在所提出的调度算法中也利用了诸如以前任务成功率、失效率以及执行时间等历史

信息记录,并且在调度过程中采用改进的线性规划问题来适应分布式动态云计算环境。

通过对云环境中各节点的可靠性进行评估,Wang 等人<sup>[11]</sup>提出了一个基于动态机制与 DLS (Dynamic Level Scheduling)算法的 Cloud-DLS 调度算法,以此来降低任务分配的失效率。

将以上各策略及算法从可靠性、执行效率、资源利用率、静态、动态以及历史信息几个方面进行比较。表 2 列出了可靠性感知任务调度策略及算法的比较情况。

表 2 可靠性感知任务调度中各策略及算法的比较

	Zaharia et al. <sup>[8]</sup>	Chen et al. <sup>[9]</sup>	Kumar et al. <sup>[10]</sup>	Wang et al. <sup>[11]</sup>
可靠性	✓	✓	✓	✓
执行效率	✓	✓	✓	✓
资源利用率		✓		
静态	✓			
动态		✓	✓	✓
历史信息		✓	✓	

### 3.2 基于成本的资源调度

基于成本的资源调度策略及算法涉及能量感知资源调度。针对能量感知资源调度的研究主要用来解决问题 3)。

随着计算应用程序和数据的快速增长,需要加大服务器和磁盘,以便能在规定时间内快速处理它们,这时,服务器和磁盘的能源消耗就成为数据中心的主要开销。现已有许多解决方案,有些能够直接分配服务器,有些采取了虚拟技术,有些能够跨多个数据中心来达到能源有效性。因此,我们从 3 个角度对能量感知资源调度策略及算法进行讨论分析:服务器、虚拟技术、多数据中心。

#### 1. 从服务器角度

在服务器场中,现已有的节约能源的技术可以大致分为两类:动态电压/频率缩放(DVFS)和动态电源管理(DPM)。Mezmas 等人<sup>[12]</sup>和 Huang 等人<sup>[13]</sup>在调度平行应用程序过程中采用 DVFS 技术来减少能源消耗和完成时间。Mezmas 等人<sup>[12]</sup>结合多目标平行遗传算法和能源感知启发式调度算法提出了一个平行双目标混合遗传算法。Huang 等人<sup>[13]</sup>提出了一个增强型能源有效性调度算法。Duy 等人<sup>[14]</sup>和 Mazzucco 等人<sup>[15]</sup>采用 DPM 技术来关闭不使用的服务器,通过减少运行服务器的数量来节约云计算的能源。为了解决不断随时间变化且很难精确预测的用户需求,Duy 等人<sup>[14]</sup>提出了一种基于历史需求记录并结合神经网络预测器来预测未来负载需求的策略,Mazzucco 等人<sup>[15]</sup>则提出了一种根据预测来寻找导致最高收益的策略。

#### 2. 从虚拟技术角度

在数据中心中,用来解决服务器能源有效性的关键技术为虚拟技术。它通过在物理服务器上建立多个虚拟机(VM)实例来减少能源消耗以及提高资源利用率,并通过解析服务与应用程序之间 QoS 串扰来保证用户与云平台提供商之间的 SLA。各种虚拟服务被封装在 VM 中,然后根据 VM 的管理决策,能够进行创建、复制、迁移以及删除操作。

Younge 等人<sup>[16]</sup>提出了一个绿色云框架来优化云计算环境的能源消耗,并考虑了 VM 调度和 VM 管理两个部分。其中,VM 调度采用贪婪算法来减少能耗,VM 管理则采用 VM 镜像和动态迁移来减少运行的主机。Beloglazov 等人<sup>[17-19]</sup>为

能源有效性云计算定义了新的体系结构以及各种原理,并将能源优化方法划分成两个阶段:VM 选择阶段和 VM 放置阶段。基于这个体系结构,在文献[17]中,他们提出了 VM 放置阶段的 3 个优化:通过优化资源利用率使数据节点的使用数量最小,通过优化网络状态使整个网络的数据传输费用最少,通过优化散热方式使冷却系统操作成本最小。在文献[18]中,他们在 VM 选择阶段采用了 4 种启发式方法来遵守严格的 SLA:单阈值策略以及 3 个双阈值策略,如最小迁移策略、最高可能性增长策略和随机选择策略,在 VM 放置阶段采用了改进的最佳拟合递减(MBFD)算法。但是固定的阈值并不能适应动态环境和不可预测的工作负载,因此在文献[19]中,他们基于自适应利用率阈值提出了一种动态合并 VM 的方法,这进一步减小了违反 SLA 的可能性以及 VM 的迁移量。

信贷调度器(Credit Scheduler)是 Xen 默认 VM 调度器,它根据已选 VM 信贷价值占整个 VM 总信贷价值的比例来为 VM 分配最小处理器时间。但是,对于一个 VM 来说,处

理器时间并不是精确评估能耗的满意标准,因为有一些处理器内部事件会明显影响到处理器的能耗。因此, Kim 等人<sup>[20]</sup>设计了一个评估能耗的模型,它通过监控处理器性能计数器来计算 VM 的耗能量。另外,通过改进信贷调度器,他们提出了一个能源信贷调度器(Energy-Credit Scheduler),将由用户定义的预算替换了处理器时间信贷,以此来限制 VM 的能耗率。

### 3. 从多数据中心角度

以上提到的各种解决方案主要以节约单个服务器或单个数据中心(拥有很多服务器)的能源为目的。基于各种影响因素如能源成本、CO<sub>2</sub> 排放率、工作负载以及 CPU 能源有效性, Garg 等人<sup>[21]</sup>提出了一些简单有效的通用调度策略,其能够在多个数据中心间获得能源有效性。

最后,我们对以上各策略及算法从能量感知资源调度、服务器、虚拟技术、多数据中心、应用程序、SLA&QoS 等几个方面进行比较。表 3 列出了能量感知资源调度策略及算法的比较情况。

表 3 能量感知资源调度策略及算法的比较

	Mezma et al. <sup>[12]</sup>	Huang et al. <sup>[13]</sup>	Duy et al. <sup>[14]</sup>	Mazzucco et al. <sup>[15]</sup>	Younge et al. <sup>[16]</sup>	Beloglazov et al. <sup>[17-19]</sup>	Kim et al. <sup>[20]</sup>	Garg et al. <sup>[21]</sup>
能量感知资源调度	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
服务器	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
虚拟技术					✓	✓	✓	
多数据中心								✓
应用程序	✓	✓						
SLA & QoS	✓	✓				✓		
处理器	✓	✓					✓	
CO <sub>2</sub> 排放								✓

### 3.3 基于性能和成本的资源调度

基于性能和成本的资源调度策略及算法主要涉及到工作流调度。研究工作流调度主要用来解决问题 4)。

工作流调度属于全局任务调度,因为它需要将每一个任务映射到合适的资源上,并对每一个资源上的任务按一定性能标准进行优先排序。工作流调度策略具有两种形式:基于 best-effort 调度策略和基于 QoS 限制的调度策略<sup>[22]</sup>。基于 best-effort 工作流调度策略主要应用于类似集群、网格这种分布式系统,它们的资源可以免费访问,并在社区成员中共享,它们只追求使得工作流应用程序的完成时间最小,而不需要考虑资金成本和用户的 QoS 请求。正好相反,基于 QoS 限制的工作流调度策略主要应用于具有以市场为导向的商业模型的云系统,它既可以满足用户特定的 QoS 请求(如完成时间、成本、可靠性),也可以保证工作流调度系统的最优性能。

根据不同的 QoS 限制,如完成时间限制、预算限制、多个 QoS 限制,工作流调度策略及算法可以从这 3 个方面进行讨论。

#### 1. 限制完成时间的 QoS 请求

任务调度是一个 NP 完全问题,因此,云计算工作流调度采用了启发式或元启发式方法来解决。

基于启发式的策略主要是为满足某一特定类型问题而创建的调度算法。Bittencourt 等人<sup>[23]</sup>提出了一种混合云优化成本(HCOC)调度策略来获得最优执行成本。基于网格环境中为限制完成时间的工作流调度,设计了部分关键路径(PCP, Partial Critical Paths)算法, Abrishami 等人在文献[24]中为 SaaS 云的工作流调度设计了 SC-PCP(SaaS Cloud-PCP)算法,它主要递归采用 PCP 算法进行调度,直到遇到已调度的任务才停止。此外,为了在 IaaS 云环境中执行工作流

调度,他们在文献[25]中提出了两种新的算法:IC-PCP(IaaS Cloud-PCP)和 IC-PCPD2(IaaS Cloud-PCP with Deadline Distribution),它们结合了现有商业云的几个主要特点:按需资源调配、同构网络、按次计费价格模型。Genez 等人<sup>[26]</sup>提出了一个整数线性规划,用来解决具有两层 SLA 的 SaaS 或 PaaS 中工作流调度问题。

基于元启发式的策略是根据元启发式方法(如遗传算法(GA, Genetic Algorithm)、粒子群优化算法(PSO, Particle Swarm Optimization)、蚁群优化算法(ACO, Ant Colony Optimization)等)来建立的调度策略,它为满足某个特殊类型的问题而提供通用的解决方案。Pandey 等人<sup>[27]</sup>提出了基于 PSO 的调度启发式方法,使得执行应用程序工作流的全部开销最小,其中包括资源间的通讯开销以及计算资源的执行开销。Wu 等人<sup>[28]</sup>提出了一种以市场为导向的分层调度方法,即在任务层调度中采用基于 ACO 的调度算法来处理 Task-to-VM 的分配优化。

#### 2. 限制预算的 QoS 请求

在满足用户限制预算的请求下,尽量使云系统中工作流执行时间最短。Zeng 等人<sup>[29]</sup>解决了云系统中调度多任务工作流(MTW)的问题,并且提出了一个云提供商和用户都关心的预算感知调度算法来提高整个系统的完成时间以及 MTW 应用程序的资源利用率。

#### 3. 多 QoS 限制请求

在满足用户多个 QoS 请求的情况下,保证科学工作流系统最好的性能已经成为研究工作流调度的热点。Oliveira 等人<sup>[30]</sup>基于 3 个目标(执行时间、可靠性、资金成本)的加权成本模型,为科学工作流的平行执行设计了一种自适应调度启

发式方法。Varalakshmi 等人<sup>[31]</sup>首先采取了资源发现算法来减少信息泛滥,然后提出了最优 workflow 调度算法,将任务型集群分配给资源,并要求满足用户多个 QoS 请求,如执行时间、可靠性和资金成本。

将以上各策略及算法从完成时间限制、预算限制、多 QoS 限制、启发式方法、元启发式方法、成本优化、完成时间优化等几个方面进行比较。表 4 列出了 workflow 调度策略及算法的比较情况。

表 4 workflow 调度策略及算法的比较

	Bittencourt et al. <sup>[23]</sup>	Abrishami et al. <sup>[24,25]</sup>	Genez et al. <sup>[26]</sup>	Pandey et al. <sup>[27]</sup>	Wu et al. <sup>[28]</sup>	Zeng et al. <sup>[29]</sup>	Oliveira et al. <sup>[30]</sup>	Varalakshmi et al. <sup>[31]</sup>
完成时间限制	✓	✓	✓	✓	✓			
预算限制						✓		
多 QoS 限制							✓	✓
启发式方法	✓	✓	✓			✓	✓	✓
元启发式方法				✓	✓			
成本优化	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
完成时间优化						✓	✓	✓
伸展性					✓		✓	
可靠性							✓	✓
资源利用率						✓		✓
SaaS/IaaS		✓	✓					

#### 4 比较与分析

如表 5 所列,我们根据算法的几个主要特征(如执行效率、成本有效性、可靠性、资源利用率以及 QoS)对本文中总结的 4 大热点问题进行了比较分析。此外,在比较过程中,我们为每个问题列举了两个资源调度算法的例子。问题 1)主要针对本地性感知任务调度来优化执行效率,两个比较例子分别为:由 Fischer 等人<sup>[2]</sup>提出的 MaxCover-BalAssign 算法和由 Jin 等人<sup>[7]</sup>提出的自适应延迟调度(ADS)算法。问题 2)主要针对可靠性感知任务调度来提高云系统的可靠性以及执行效率,两个比较例子分别为:由 Chen 等人<sup>[9]</sup>提出的自适应 Map-Reduce(SAMR)调度算法和由 Kumar 等人<sup>[10]</sup>提出的基于传输问题(Transportation Problem)调度算法。问题 3)主要针

对能量感知资源调度来降低能耗和运营成本,两个比较例子分别为:由 Huang 等人<sup>[13]</sup>提出的一个增强型能源有效性调度算法和由 Beloglazov 等人<sup>[18]</sup>提出的改进的最佳拟合递减(MBFD)算法。问题 4)主要针对 workflow 调度来权衡时间和成本,两个比较例子分别为:由 Bittencourt 等人<sup>[23]</sup>提出的混合云最优成本(HCOC)调度策略和由 Oliveira 等人<sup>[30]</sup>提出的基于 3 个目标(执行时间、可靠性、资金成本)加权开销模型的自适应调度启发式方法。

我们发现问题 1)和问题 2)主要是为了提高执行效率和资源利用率;问题 3)是为了节约运营成本并满足用户的 QoS 请求;问题 4)不仅提高了执行效率,还在没有违反用户 QoS 的情况下使利润最大。

表 5 4 大问题的资源调度策略及算法的比较与分析

	问题 1		问题 2		问题 3		问题 4	
	Fischer et al. <sup>[2]</sup>	Jin et al. <sup>[7]</sup>	Chen et al. <sup>[9]</sup>	Kumar et al. <sup>[10]</sup>	Huang et al. <sup>[13]</sup>	Beloglazov et al. <sup>[18]</sup>	Bittencourt et al. <sup>[23]</sup>	Oliveira et al. <sup>[30]</sup>
执行效率	✓	✓	✓	✓			✓	✓
成本有效性					✓	✓	✓	✓
可靠性			✓	✓				✓
资源利用率	✓	✓	✓					
QoS					✓	✓	✓	✓

**结束语** 本文提出了云计算资源调度中 4 大热点问题,并根据每一类问题中策略和算法所涉及的不同特点因子进行了详细描述与分析。此外,我们还通过比较 4 大问题的相关算法来分析 4 大问题各自的不同特点。

云资源调度领域的未来研究方法大致可以概括为以下几点。(1)负载均衡(load balancing)<sup>[32]</sup>是提高云计算资源调度性能的重要因素之一。在调度中结合负载均衡能够避免热点(hotspot),并且能够提高资源的利用率。(2)混合云计算<sup>[33]</sup>中的资源调度引起了很多研究者的关注,它需要决定将应用程序分配到公共云还是私有云,从而根据不同云的特点来运行所有的应用程序,以达到整体开销最优。(3)多目标(multi-objective)资源调度已成为学术界研究领域的热门话题,考虑的影响因子越多,那么获得的性能将越好,开销将越低。

#### 参考文献

[1] Phan L, Zhang Zhuo-yao, Zheng Qi, et al. An Empirical Analysis of Scheduling Techniques for Real-time Cloud-based Data Pro-

cessing [C] // Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Service-Oriented Computing and Applications, 2011:1-8  
 [2] Fischer MJ, Su Xue-yuan, Yin Yi-tong. Assigning tasks for efficiency in hadoop: extended abstract [C] // Proceedings of the 22nd ACM symposium on Parallelism in algorithms and architectures. 2010:30-39  
 [3] Jin Jia-hui, Luo Jun-zhou, Song Ai-bo, et al. Bar: an efficient data locality driven task scheduling algorithm for cloud computing [C] // Proceedings of the 11th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid). 2011: 295-304  
 [4] Seo S, Jang I, Woo K, et al. HPMR: Prefetching and Pre-Shuffling in Shared MapReduce Computation Environment [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Cluster Computing and Workshops (CLUSTER). 2009:1-8  
 [5] Hammoud M, Sakr M F. Locality-Aware Reduce Task Scheduling for MapReduce [C] // Proceedings of IEEE Third International Conference on Cloud Computing Technology and Science

- (CloudCom), 2011;570-576
- [6] Zaharia M, Borthakur D, Sarma J S, et al. Delay scheduling, a simple technique for achieving locality and fairness in cluster scheduling [C]// Proceedings of the 5th European Conference on Computer Systems. 2010;265-278
- [7] Jin Jia-hui, Luo Jun-zhou, Song Ai-bo, et al. Adaptive delay scheduling algorithm based on data center load analysis [J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(7): 47-56
- [8] Zaharia M, Konwinski A, Joseph A D, et al. Improving mapreduce performance in heterogeneous environments [C]// Proceedings of the 8th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation(OSDI). 2008;29-42
- [9] Chen Quan, Zhang Da-qiang, Guo Min-yi, et al. SAMR: A Self-adaptive MapReduce Scheduling Algorithm in Heterogeneous Environment [C]// Proceedings of IEEE 10th International Conference on Computer and Information Technology (CIT). 2010;2736-2743
- [10] Kumar S K S, Balasubramanie P. Dynamic Scheduling for Cloud Reliability using Transportation Problem [J]. *Journal of Computer Science*, 2012, 8(10): 1615-1626
- [11] Wang Wei, Zeng Guo-sun, Tang Dai-zhong, et al. Cloud-DLS: Dynamic trusted scheduling for Cloud computing [J]. *Expert Systems with Applications: An International Journal*, 2012, 39(3): 2321-2329
- [12] Mezmaz M, Melab N, Kessaci Y, et al. A parallel bi-objective hybrid metaheuristic for energy-aware scheduling for cloud computing systems [J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2011, 71(11): 1497-1508
- [13] Huang Qing-jia, Su Sen, Li Jian, et al. Enhanced Energy-Efficient Scheduling for Parallel Applications in Cloud [C]// Proceedings of the 12th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing(CCGrid). 2012;781-786
- [14] Duy T V T, Sato Y, Inoguchi Y. Performance Evaluation of a Green Scheduling Algorithm for Energy Savings in Cloud Computing [C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing, Workshops and Phd Forum. 2010;1-8
- [15] Mazzucco M, Dyachuk D. Optimizing Cloud Providers Revenues via Energy Efficient Server Allocation [J]. *Sustainable Computing, Informatics and Systems*, 2012, 2(1): 1-12
- [16] Younge A J, Laszewski G, Wang L Z, et al. Efficient Resource Management for Cloud Computing Environments [C]// Proceedings of International Green Computing Conference. 2010; 357-364
- [17] Beloglazov A, Buyya R. Energy Efficient Resource Management in Virtualized Cloud Data Centers [C]// Proceedings of the 10th IEEE/ACM International Conference on Cluster, Cloud and Grid Computing(CCGrid). 2010;826-831
- [18] Beloglazov A, Abawajy J, Buyya R. Energy-aware resource allocation heuristics for efficient management of data centers for Cloud computing [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2012, 28(5): 755-768
- [19] Beloglazov A, Buyya R. Adaptive threshold-based approach for energy-efficient consolidation of virtual machines in cloud data centers [C]// Proceedings of the 8th International Workshop on Middleware for Grids, Clouds and e-Science. 2010;1-6
- [20] Kim N, Cho J, Seo E. Energy-credit scheduler: An energy-aware virtual machine scheduler for cloud systems [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2012, In Press, Corrected Proof, Available online
- [21] Garg S K, Yeo C S, Anandasivam A, et al. Environment-conscious scheduling of HPC applications on distributed Cloud-oriented data centers [J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2011, 71(6): 732-749
- [22] Yu J, Buyya R, Ramamohanarao K. Workflow Scheduling Algorithms for Grid Computing [J]. *Metaheuristics for Scheduling in Distributed Computing Environments, Studies in Computational Intelligence*, 2008, 146: 173-214
- [23] Bittencourt L F, Madeira E R M. HCOC: a cost optimization algorithm for workflow scheduling in hybrid clouds [J]. *Journal of Internet Services and Applications*, 2011, 2(3): 207-227
- [24] Abrishami S, Naghibzadeh M. Deadline-constrained workflow scheduling in software as a service Cloud [J]. *Scientia Iranica*, 2012, 19(3): 680-689
- [25] Abrishami S, Naghibzadeh M, Epema D H J. Deadline-constrained workflow scheduling algorithms for Infrastructure as a Service Clouds [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2013, 29(1): 158-169
- [26] Genez T A L, Bittencourt L F, Madeira E R M. Workflow Scheduling for SaaS / PaaS Cloud Providers Considering Two SLA Levels [C]// Proceedings of IEEE Network Operations and Management Symposium(NOMS). 2012;906-912
- [27] Pandey S, Wu L, Guru S M, et al. A particle swarm optimization-based heuristic for scheduling workflow applications in cloud computing environments [C]// Proceedings of the 24<sup>th</sup> IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications(AINA). 2010;400-407
- [28] Wu Zhang-jun, Liu Xiao, Ni Zhi-wei, et al. A market-oriented hierarchical scheduling strategy in cloud workflow systems [J]. *The Journal of Supercomputing*, 2013, 63(1): 256-293
- [29] Zeng Ling-fang, Veeravalli B, Li X L. ScaleStar: Budget Conscious Scheduling Precedence-Constrained Many-task Workflow Applications in Cloud [C]// Proceedings of the 26th International Conference on Advanced Information Networking and Applications(AINA). 2012;534-541
- [30] Oliveira D, Ocaña K A C S, Baião F, et al. A Provenance-based Adaptive Scheduling Heuristic for Parallel Scientific Workflows in Clouds [J]. *Journal of grid Computing*, 2012, 10(3): 521-552
- [31] Varalakshmi P, Ramaswamy A, Balasubramanian A, et al. An Optimal Workflow Based Scheduling and Resource Allocation in Cloud [C]// Proceedings of the First International Conference on Advances in Computing and Communications(ACC). 2011: 411-420
- [32] Babu L D D, Krishna P V. Honey bee behavior inspired load balancing of tasks in cloud computing environments [J]. *Applied Soft Computing*, 2013, 13(2): 2292-2303
- [33] Bosschce R, Vanmechelen K, Broeckhove J. Online cost-efficient scheduling of deadline-constrained workloads on hybrid clouds [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2013, 29(4): 973-985