

# 一种基于能耗优化的云计算系统任务调度方法

何 丽, 饶 俊, 赵富强

HE Li, RAO Jun, ZHAO Fuqiang

天津财经大学 信息科学与技术系, 天津 300222

Department of Information Science and Technology, Tianjin University of Finance and Economics, Tianjin 300222, China

HE Li, RAO Jun, ZHAO Fuqiang. Task scheduling method based on energy optimization in cloud computing system. *Computer Engineering and Applications*, 2013, 49(20): 19-22.

**Abstract:** The energy consumption of servers produced in tasks executing is an important part of system dynamic energy in cloud computing system. In order to lower the total task execution energy consumption of system, this paper presents a task scheduling method based on energy optimization with the earliest task completion time, builds the dynamic power computing model of server, energy model based on dynamic power of servers, and the energy optimization model of cloud computing system. The proposed method uses different scheduling algorithms to get less task execution energy according to the deadline of task and the execution energy on each server. Experimental results show that this scheduling policy can better meet the deadline of task, and reduce the total energy of cloud computing system considerably.

**Key words:** cloud computing; energy optimization; task scheduling; task deadline

**摘 要:** 服务器执行任务产生的能耗是云计算系统动态能耗的重要组成部分。为降低云计算系统任务执行的总能耗,提出了一种基于能耗优化的最早完成时间任务调度方法,建立了服务器动态功率计算模型,基于动态功率的服务器执行能耗模型,以及云计算系统的能耗优化模型。调度策略根据任务的截止时间要求和在不同服务器上的执行能耗,选择不同的调度算法,以获得最小任务执行总能耗。实验结果证明,提出的任务调度方法,能够较好地满足任务截止时间的要求,降低云计算系统任务执行的总能耗。

**关键词:** 云计算; 能耗优化; 任务调度; 任务截止时间

**文献标志码:** A **中图分类号:** TP316 **doi:** 10.3778/j.issn.1002-8331.1304-0449

## 1 引言

云计算系统通常由异构的服务器组成,由于不同服务器硬件配置和计算性能的不同,使得任务映射到不同服务器上执行产生的能耗也可能不同。在大规模的云计算系统中,有效降低系统能耗是云计算系统面临的一个新挑战。在大规模云计算系统中,云计算系统的任务调度不仅要满足用户对服务质量的要求,还要尽可能降低云计算系统任务执行的总能耗。云计算系统任务执行的总能耗由各个服务器执行能耗的和。服务器执行能耗是任务在服务器上运行时产生的能耗,它随着服务器的执行功率和任务在服务器上执行时间的变化而变化。目前,云计算系统的能耗优化方法可分为两大类:一类是基于 DVFS(Dynamic Voltage/Frequency Scaling)的能耗优化方法,它通过降低

数据中心服务器的运行频率,延长任务执行周期来降低数据中心的能量消耗;另一类是通过将任务集中到少数服务器上运行,让闲置服务器关闭或处于睡眠状态来降低数据中心的总能耗。能耗优化是实现绿色云计算系统的一个重要基础,众多学者从不同的视角提出了针对云计算系统的能耗优化管理方法。文献[1]提出了一种基于 CPU 使用率和频率来计算云计算系统的能耗;文献[2]提出了基于数据中心服务转移的能耗控制框架;文献[3]提出了基于 DVFS 的多目标能耗优化模型,它通过引入虚拟机的最小运行频率,将云计算系统中的虚拟资源分配问题建模为一个多目标优化模型并使用多目标进化算法求解该模型;文献[4]针对硬实时服务模型和软实时服务模型,提出了基于 DVFS 的能量感知的虚拟机分配算法;文献[5]建立了基于

**基金项目:** 天津市高等学校科技发展基金(No.20120817);天津财经大学预研项目(No.Y1211)。

**作者简介:** 何丽(1969—),女,博士,副教授,主要研究方向:Web 服务、分布式计算;饶俊(1979—),男,博士,讲师,主要研究方向:分布式计算;赵富强(1974—),男,博士,副教授,主要研究方向:社会网络、分布式计算。E-mail:renke21@vip.sina.com

**收稿日期:** 2013-05-02 **修回日期:** 2013-07-09 **文章编号:** 1002-8331(2013)20-0019-04

**CNKI 出版日期:** 2013-07-29 <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20130729.1105.006.html>

多个数据中心的能耗计算模型,该模型通过跨数据中心的服务器转移来提高数据中心的能量消耗;文献[6]提出了基于CPU利用率的服务器能量消耗模型;文献[7]提出了基于成本驱动的虚拟机调度策略,实现了系统利益最大化的虚拟机调度策略;文献[8]提出了一种基于机器学习和能耗感知的任务调度算法,通过建立基于决策树和线性回归的机器学习模型来预测数据中心服务器的能量消耗,但这种调度算法需要依赖相关任务的历史行为;文献[9]提出了基于任务类型调度概率的云计算平台能耗优化管理方法;文献[10]提出了基于蚁群优化算法的云计算任务分配方法。此外,学者们还提出了基于虚拟机动态分配的云计算系统能耗管理方法<sup>[11-15]</sup>。以上研究成果主要通过虚拟资源优化管理来降低云计算系统的运行能耗,没有根据不同的任务要求来调整任务调度策略。本文根据用户对任务截止时间的要求,提出了一种基于能耗优化的最早完成时间调度方法。该调度方法首先选择在所有服务器上具有最早完成时间的任务,然后根据任务截止时间的紧迫程度,将其映射到相应的服务器上执行,在尽可能满足任务截止时间要求的情况下,将任务分配到执行能耗最小的服务器上执行,以获得更好的能耗优化效果。

## 2 问题描述

在由异构服务器组成的云计算系统中,由于同一任务在不同服务器上的运行时间和服务器执行功率的不同,使得同一任务在不同服务器上执行的计算性能和产生的能耗也会有所差别。服务器的执行能耗与服务器执行任务时的动态功率和任务在服务器上的执行时间密切相关<sup>[1]</sup>。

为了建立云计算系统的能耗优化模型,首先需要建立云计算系统中任务和服务器描述模型。假设云计算系统中配置了  $M$  台异构服务器,则将服务器集合描述为  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$ 。对集合  $S$  中的任意一个服务器  $s_j (1 \leq j \leq M)$ , 令  $s_j = \langle sid, SNumCpu, P^{peak}, P^{idle} \rangle$ 。其中  $sid$  是服务器  $s_j$  的编号,  $SNumCpu$  表示服务器  $s_j$  拥有的CPU个数,  $P^{peak}$  和  $P^{idle}$  分别表示  $s_j$  的峰值功率和空闲功率。

云计算系统中的任务集合用  $T$  表示,将由  $N$  个任务组成的任务集描述为  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ 。对  $T$  中的任务  $t_i (1 \leq i \leq N)$ , 令  $t_i = \langle tid, RCpu, Runtime, deadline \rangle$ 。其中,  $tid$  是任务  $t_i$  的编号,  $RCpu$  表示  $t_i$  请求的CPU数量,  $Runtime$  表示  $t_i$  在单处理器上的估计运行时间,  $deadline$  表示用户对  $t_i$  的截止时间要求。

为记录任务在不同服务器上的执行时间,建立矩阵  $A_{N \times M}$ ,  $A$  的每一行表示一个任务,  $A$  的每一列表示一个服务器,对任一元素  $A_{ij} (1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq M)$ , 其值是任务  $t_i$  在服务器  $s_j$  上的执行时间。理论上每增加一个CPU,服务器每个时钟周期内执行的指令数可以增加一倍。因此,本文将  $A_{ij}$  的值定义为:

$$A_{ij} = \begin{cases} \frac{t_i.Runtime}{s_j.SNumCpu}, & t_i.RCpu \leq s_j.SNumCpu \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

## 3 服务器执行能耗和任务调度

### 3.1 服务器能耗计算模型

服务器在运行状态的功率称为服务器的执行功率,服务器的执行功率与该服务器的峰值功率和CPU的利用率成正比。服务器的执行功率一般在  $P^{idle}$  和  $P^{peak}$  之间。对任意一个服务器  $s_j (1 \leq j \leq M)$ , 用  $u_{ij}$  表示表示  $s_j$  执行任务  $t_i (1 \leq i \leq N)$  时的CPU利用率,将  $s_j$  的执行功率计算公式描述为:

$$P_{ij} = s_j.P^{idle} + (1 - \alpha).P^{peak}.u_{ij} \quad (1)$$

在式(1)中,  $u_{ij} = t_i.RCpu/s_j.SNumCpu$ ,  $\alpha$  为服务器空闲功率与峰值功率的比值。当服务器处于执行状态时,其执行功率与CPU的利用率成正比。服务器处于空闲状态时,其执行功率等于  $P^{idle}$ 。

服务器执行任务时产生的能耗称为服务器的执行能耗。服务器的执行能耗与服务器的执行功率和分配到该服务器上的任务总数和每个任务的运行时间相关。假设用  $e_{ij}$  表示服务器  $s_j$  在执行任务  $t_i$  时产生的执行能耗,则根据公式(1),可以将  $e_{ij}$  的计算模型描述为:

$$e_{ij} = P_{ij} \times A_{ij} \quad (2)$$

云计算系统执行任务集合中所有任务产生的总能耗等于各个服务器执行能耗的和。云计算系统能耗优化的目标是使系统在该任务集上产生的总能耗最小。根据式(2)可以将云计算系统的能耗优化模型描述为:

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M e_{ij} \\ t_i.RCpu \leq s_j.SNumCpu \end{aligned} \quad (3)$$

### 3.2 任务调度算法

在一个拥有  $M$  台服务器和  $N$  个任务的云计算系统中,任务调度的目标是把  $N$  个任务映射到  $M$  台处理器上,在尽可能满足任务截止时间要求的前提下,使系统在任务集上产生的总能耗最小。min-min算法是一种经典的分布式任务调度算法,它每次从任务队列中选择一个当前最小任务,并将其映射到具有最早完成时间的服务器上执行,该算法能够获得较好的计算性能。云计算系统一般由多个异构服务器组成,不同服务器对任务的执行功率和响应时间可能会不同,任务执行产生的系统能耗也可能不同。鉴于此,本文提出了一种基于能耗优化的最早完成时间任务调度方法。该调度算法将能耗优化方法应用到 min-min 任务调度算法中,它根据系统对任务截止时间要求的满足程度,优先选择任务队列中的最短任务,并将其分配执行能耗最小的服务器上执行。当任务集合不为空时,每次从任务集中选择一个完成时间最小的任务执行,然后计算该任务在每个服务器上的执行能耗,首先考虑将任务分配到执行能耗最小的服务器上执行,并计算任务在该服务器上的完成时间,如果完成时间能满足该任务的截止时间要求,本次任务调度结束,否则,使用 min-min 调度策略,将当前任务映射到完成时间最小的服务器上执行。

为方便模型实现,在算法实现过程中,建立两个临时矩阵  $b_{N \times M}$  和  $mct_{N \times M}$ ,  $b_{N \times M}$  和  $mct_{N \times M}$  的每一行表示一个任务,每一列表示一台服务器。 $b_{N \times M}$  描述任务与服务器之间的映射结果,以及任务在相应服务器上的执行时间。当任务  $t_i(1 \leq i \leq N)$  被调度到服务器  $s_j(1 \leq j \leq M)$  上执行时,令  $b_{ij} = A_{ij}$ ,其他情况令  $b_{ij} = 0$ 。矩阵  $mct_{N \times M}$  描述服务器按照调度结果执行任务后的就绪时间。若任务  $t_i$  被映射到服务器  $s_j$  上执行,则  $mct_{ij}$  等于  $t_i$  在  $s_j$  上的完成时间。同时,为避免服务器出现过载现象,设置一个服务器负载上限  $W_h$ ,当服务器负载大于  $W_h$  时,暂不接收新任务。服务器  $s_j$  的负载用  $w_j$  表示,将  $w_j$  的计算模型描述为:

$$w_j = \frac{\sum_{i=1}^N b_{ij}}{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M b_{ik}} \tag{4}$$

云计算系统提供的服务是一种有偿服务,需要满足用户对任务服务质量的要求。本文以任务的完成截止时间来描述用户对任务服务质量的要求,并用  $SLAs$  来统计调度算法对任务集合中任务服务质量的违反情况。当一个任务的完成时间大于该任务的完成截止时间时,则认为违反了当前任务的服务质量要求,令  $SLAs$  加1。

根据上述描述,将基于能耗优化的最早完成时间任务调度算法描述如下:

输入: 服务器集合  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$ , 任务集合  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ , 任务在各个服务上执行时间矩阵  $A_{N \times M}$ , 服务器负载上限  $W_h$ 。

输出: 系统总能耗  $TE$  和违背截止时间的任务比例  $SLAs$ 。

步骤:

1. 初始化

- (1)  $TE = 0; SLAs = 0;$
- (2) FOR ( $j = 1$  to  $M$ ) {
  - ①  $E_j = 0$ ; //  $E_j$  表示  $s_j$  的执行能耗
  - ② FOR ( $i = 1$  to  $N$ ) {
    - $mct_{ij} = A_{ij}$ ;
    - $b_{ij} = 0$ ; }

2. WHILE ( $T$  不为空) {

- (1)  $t = \text{Min}_t(mct)$   
//函数  $\text{Min}_t$  返回  $T$  中完成时间最小的任务  $t$
- (2)  $tempE = \infty; s = -1$ ;
- (3) FOR ( $j = 1$  to  $M$ ) {
  - ① 根据式(2)计算  $e_{ij}$ ;
  - ② 根据公式(4)计算  $w_j$ ;
  - ③ IF ( $e_{ij} < tempE$  &&  $w_j \leq W_h$ ) {
    - $tempE = e_{ij}; s = j$ ;
- (4) IF ( $mct_{ts} + A_{ts} > t.deadline$ )
  - $s = \text{Min}_s(mct[t]);$   
//函数  $\text{Min}_s$  返回完成时间最小的服务器  $s$

(5) 完成任务  $t$  到服务器  $s$  的映射

- ①  $t \rightarrow s$ ; //将  $t$  映射到  $s$  上执行
- ②  $b_{ts} = A_{ts}$ ;  $mct_{ts} = mct_{ts} + A_{ts}$ ;
- ③ IF ( $mct_{ts} > t.deadline$ )  $SLAs++$ ;
- ④  $E_s = E_s + e_{ts}$ ;
- ⑤  $T = T - \{t\}$ ;
- } //ENDWHILE
- 3.  $TE = \sum_{i=1}^M E_i$ ;  $SLAs = SLAs / |T|$ ;

4 实验

4.1 实验设置

为验证本文提出的基于能耗优化的最早完成时间任务调度算法的有效性,本文使用 VC++ 6.0 进行仿真,在仿真实验中,数据中心中设置两种异构服务器模型,参数设置见表1。实验随机生成5个服务器和5 000个任务,随机抽取其中的100、300、500、1 000、2 000、3 000、4 000和5 000个任务建立8个任务集合。实验中,两种服务器模型的峰值功率分别设为250 W和150 W,空闲功率分别设为150 W和75 W,服务器空闲功率和峰值功率的比值  $\alpha$  设为0.7。

表1 实验参数设置

参数名	取值设置	说明
$M$	5	数据中心服务器总数
$N$	5 000	数据中心任务数
$SNumCpu$	[1, 5]	服务器的CPU总数
$W_h$	0.65	服务器负载上限阈值
$P^{peak}/W$	$\leq 250$	最大服务器峰值功率
$P^{idle}/W$	$\leq 120$	最大服务器空闲功率
$RCpu$	[1, 2]	任务的CPU要求
$Runtime/s$	[1, 50]	任务的运行时间
$deadline/s$	[50, 100]	任务的截止时间要求

4.2 实验分析

4.2.1 性能分析

为验证基于能耗优化云计算系统任务调度算法在响应时间上的有效性,分别在上述8个任务集合上对本文算法、min\_min算法、文献[9]算法的计算性能进行了比较,具体包括三种调度算法在各个任务集上的平均响应时间和违背任务截止时间的百分比。一个任务的响应时间定义为该任务完成时间减去该任务提交时间,平均响应时间为任务集上所有任务响应时间的平均值。调度算法在一个任务集上违反任务截止时间情况用  $SLAs/|T|$ ,  $|T|$  表示任务集中的任务总数。

三种调度算法在不同任务集上得到的平均响应时间和违反任务截止时间情况如图1和图2所示。

在图1中,当任务数少于1 000时,由于每台服务器上的任务负载比较轻,任务分配到能耗较小的服务器上也能够满足用户对任务截止时间的要求,因此,本文算法会将任务映射到能耗较小的服务器上执行。由于这类服务器通常具有较好的计算性能,能够获得比较好的平均响应时



间,而且,任务在服务器上等待的时间也会比较短,能够获得较好的  $SLAs$ 。随着任务集的增大,本文算法使用 min-min 调度策略将不能满足截止时间要求的任务映射到具有最早完成时间的服务器上执行。随着服务器任务负载的增大,任务在服务器上等待的时间也会延长,使得违反截止时间要求的任务数量增多,导致  $SLAs$  呈上升趋势。但是,由于本文算法对不能满足截止时间要求的任务使用 min-min 调度策略,所以,当任务集较大时,本文算法在平均响应时间和  $SLAs$  上比较接近 min-min 算法。

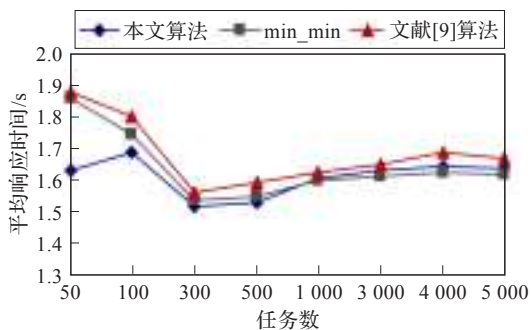


图1 平均响应时间对比

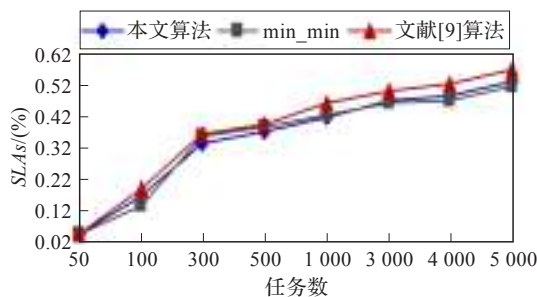


图2  $SLAs$  对比

#### 4.2.2 能耗分析

为验证本文算法能耗优化的有效性,在8个任务集上分别运行本文算法、min\_min算法和文献[9]算法,并计算在不同任务集上系统执行任务产生的总能耗,结果如图3所示。

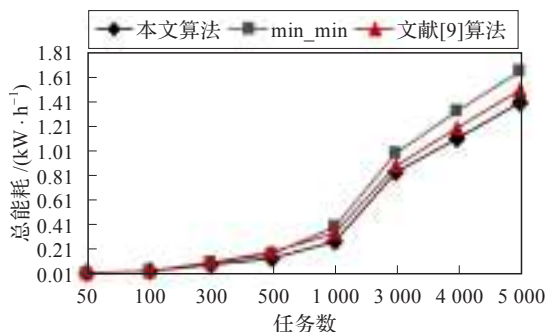


图3 总能耗对比

从图3中可以看出,本文算法在所有任务集上都具有更低的执行能耗。并且,随着任务集的增大,本文算法在任务执行总能耗上的优势越来越大。随着任务集的增大,本文算法会将更多任务映射到能耗较小的服务器上执行,因而获得了更好的能耗优化效果。

通过上述实验分析可知,随着任务集的增大,本文算法在平均响应时间和  $SLAs$  上接近 min\_min 算法,而在系统总能耗方面,本文算法具有更明显的优势。

## 5 结束语

本文针对传统任务调度算法存在的能耗浪费问题,利用不同服务器执行同一任务的执行功率和任务在不同服务器上运行时间的不同,建立了服务器的执行能耗模型,和基于服务器动态执行功率的云计算系统能耗优化目标模型,提出了基于能耗优化的最早完成时间任务调度策略。该调度策略能够根据任务的截止时间要求和服务器的执行能耗,尽可能将任务映射到执行能耗最小的服务器上执行。实验证明,基于能耗优化的最早完成时间任务调度策略不仅能够保持传统调度算法的计算性能,还能够有效降低云计算系统任务执行的总能耗。本文讨论了在现有系统资源配置的情况下,通过调整任务调度策略来降低系统的任务执行能耗,没有考虑不同负载情况下的服务器动态配置问题。接下来将从服务器动态配置和虚拟资源优化管理的角度,研究针对负载变化的云计算系统资源管理和能耗优化问题。

## 参考文献:

- [1] 宋杰,李甜甜,闫振兴,等.一种云计算环境下的能效模型和度量方法[J].软件学报,2012,23(2):200-214.
- [2] Phan D H, Suzuki J, Carroll R, et al. Evolutionary multi-objective optimization for green clouds[C]//Proceedings of the 14th International Conference on Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion, 2012:19-26.
- [3] 史少锋,刘宴兵.云计算环境中虚拟资源分配优化策略研究[J].通信学报,2012,33(z1):9-16.
- [4] Kim K H, Beloglazov A, Buyya R. Power-aware provisioning of virtual machines for real-time cloud services[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2011, 23(13): 1491-1505.
- [5] Das R, Kephart J O, Lefurgy C, et al. Autonomic multi-agent management of power and performance in data centers[C]//Proceedings of the 7th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: Industrial Track, 2008:107-114.
- [6] Duy T V T, Sato Y, Inoguchi Y. Performance evaluation of a green scheduling algorithm for energy savings in cloud computing[C]//2010 IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing, 2010:1-8.
- [7] 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.
- [8] Berral J L, Goiri I, Nou R, et al. Towards energy-aware scheduling in data centers using machine learning[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking, 2010:215-224.

(下转111页)