

数据中心电费最小化的负载调度策略

郑 剑¹ 蔡 婷² 杜 兴¹

(重庆师范大学计算机与信息科学学院 重庆 401331)¹ (重庆邮电大学移通学院 重庆 401520)²

摘 要 为了降低电费成本,一些数据中心使用绿色能源供电。然而,负载的波动性和电价的时间差异性给数据中心电费成本带来了挑战。针对上述问题,提出一种低成本的负载调度算法,使得数据中心电费最小化。首先,建立电力耗费模型;然后,将电费最小化问题形式化为一个多目标约束的优化问题;最后,求解该优化问题得到相应的负载调度策略。实验结果表明:该算法可以在保证负载性能的前提下,有效降低数据中心的电费成本。

关键词 电费,低负载,调度优化,数据中心

中图法分类号 TP391 **文献标识码** A

Workload Scheduling for Minimizing Electricity Cost of Data Center

ZHENG Jian¹ CAI Ting² DU Xing¹

(College of Computer and Information Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)¹

(College of Mobile Telecommunications, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 401520, China)²

Abstract In order to reduce both electricity cost and carbon emission, some data centers begin to use green energy supply. However, challenges arise with the fluctuating workload and temporally diverse electricity price to data center electricity cost. To deal with these challenges, this paper presented a workload scheduling algorithm which can minimize the total electricity cost was data center. First, a model for the total electricity cost was introduced. Then a multi-objective constrained optimization problem to the electricity cost was formulated. Finally, the corresponding workload scheduling policy was formed by solution of the optimization problem. Experimental results show that the proposed algorithm can effectively reduce the total electricity cost.

Keywords Electricity bills, Low workload, Lyapunov optimization, Data center

1 引言

由于需要给数目巨大的服务器供电和冷却,数据中心的电力消耗已经占到全球电力总供给的 1.3%,而且预计到 2020 年,这一数字将达到 8%^[1]。根据估算,谷歌公司每年的电力消耗达 6.3×10^5 兆瓦时,并需要为此支付高达 3800 万美元的电费,在美国、欧洲等地的电力批发市场中,数据中心面临的市电电价是随时间变化的^[2]。在中国,虽然电力产业化仍处于起步阶段,但是北京、上海等地已经开始实行分时电价^[3,4]。虽然使用绿色能源可以有效地降低整体成本,但是在某些时刻会高于市场价格。为了有效地减少电费的支出,电价的时间差异性需要考虑。如何减少数据中心面临的巨额电费,成为国内外研究的热点。目前的研究工作主要分为利用功耗管理节约电费^[5,6]、利用市电电价的差异性节约电费^[2,7,8]以及使用绿色能源节约电费^[9-11]。如何在不使用负载波动性和电价的时间差异性的前提下,设计出负载调度策略使得总电费支出最小化?为了解决以上问题,本文借鉴被广泛使用的 Lyapunov 优化技术^[12,13],设计了一种负载调度算法。

由于负载的波动性,这些服务器很少能够同时被充分利

用,从而浪费了大量的空闲能耗^[14]。Chase 等人通过把数据中心面临的负载集中到部分服务器上去处理,而把剩余的服务器关闭来减少数据中心的能耗^[15]。动态电压频率调整(DVFS)是另一种常用的降低数据中心能耗的技术,它通过降低利用率较低的服务器的 CPU 频率来节约能耗^[16]。这些工作的主要目标都是最小化电力消耗而不是电费,因此并没有考虑利用电价的差异性来节约电费。

Quereshi 等人提出利用电价的时间和地域差异性,通过将负载调度到电价较低的数据中心去执行来减少电费^[2]。Rao 等人综合考虑多个电力市场的电价差异以及负载的性能需求,通过求解优化问题得到电费最小化的负载调度策略^[7]。Wang 等人指出:数据中心的电力消耗会影响市场电价,减少数据中心的电力成本必须考虑负载调度对电价的影响^[17]。Zhang 等人则根据数据中心的实际需求,提出一种可以将数据中心电费限制在预算之内的负载调度策略^[18]。

2 系统模型

2.1 电费模型

本文主要解决如何通过负载调度策略来节约电力成本。在市场中电力价格是随时间波动变化的,设定时间 t 对应的

本文受重庆市教委科学技术研究项目(KJ400518),重庆市教育研究项目(143018)资助。

郑 剑(1984—),男,硕士,初级实验师,主要研究方向为云计算、系统建模, E-mail: zhengjian.002@163.com; 蔡 婷(1984—),女,硕士,讲师,主要研究方向为软件工程; 杜 兴(1983—),男,博士,副教授,主要研究方向为软件工程、数字图像处理。

用电量和价格分别为 $u(t)$ 和 $p(t)$ 。因此,数据中心的电费支出为 $u(t) \times p(t)$ 。为了简化模型,本文不考虑电价不受用电量的影响。用电量的取值范围如下:

$$0 \leq u(t) \leq u_{\max} \quad (1)$$

其中, $u_{\max}$ 是可以从电网中获得的最大功率。综上所述,数据中心在时间 t 的电费支出 $C(t)$ 表示为:

$$\begin{cases} C(t) = u(t) \times p(t) \\ 0 \leq u(t) \leq u_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

2.2 负载模型

假设时间 t 完成负载需要的功耗为 $W(t)$,在一般情况下,数据中心的负载由当前负载和可延迟负载组成,分别用 $W_L(t)$ 和 $W_D(t)$ 表示,因此有 $W(t) = W_L(t) + W_D(t)$,且 $W_L(t)$ 和 $W_D(t)$ 独立分布。记 $\{u(t) - W_D(t)\}$ 表示用于处理当前负载的功率,时间 t 对应的可延迟负载队列记为 $q(t)$,对于可延迟负载允许推迟到下一时间执行,使用递推公式求得 $q(t)$:

$$q(t+1) = \max\{q(t), \max\{u(t) - W_D(t), 0\}\} + W_D(t) \quad (3)$$

当前负载 $W_L(t)$ 必须在当前的时间内完成,有以下约束:

$$0 \leq W_L(t) \leq u(t) \quad (4)$$

设定可延迟队列 $q(t)$ 长度是稳定的,在一定的时间长度 T 范围内可延迟负载的平均队列长度记为 $\overline{q(t)}$,那么计算公式如下:

$$\overline{q(t)} = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^{T-1} E\{q(t)\} \quad (5)$$

把用电量作为负载调度策略中的控制变量,在该策略中 T 个时间长度范围内的平均电费为:

$$\overline{C(t)} = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^{T-1} E\{p(t) \times u(t)\} \quad (6)$$

本文的调度策略只需观察当前时间 t 对应的负载功耗 $W_L(t)$ 、 $W_D(t)$ 、电价 $p(t)$ 、从电网中获得的最大功率 $u_{\max}$,然后通过求解优化式(7)确定在每个时间内采用的负载调度策略。

$$\begin{cases} \min_{t \rightarrow T} \{\overline{C(t)} * \overline{q(t)}, \overline{C(t+1)} * \overline{q(t+1)}, \dots, \overline{C(T)} * \overline{q(T)}\} \\ 0 \leq W_L(t) \leq u(t) \\ 0 \leq u(t) \leq u_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

3 实验分析

实验采用的负载数据来源于谷歌最近公布的一个负载样本数据集,这个数据集记录了一个拥有 11000 台服务器的集群在 29 天内每个小时的详细负载信息^[19]。实验的时间长度设定为 1 小时,假设负载的功耗与负载的数量成正比,且最大为 15MW。每个负载都拥有一个可以反映其对延迟敏感程度的参数,使用这个参数来区分一个负载是否为可延迟负载,可得到数据中心全部负载和可延迟负载的功耗变化曲线,如图 1 所示。

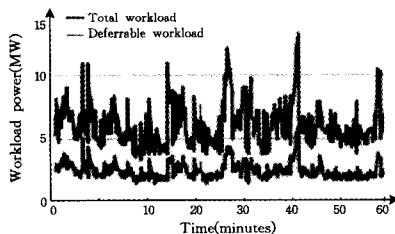


图 1 负载功耗对比

为了模拟风力发电设备的真实功率输出,选择美国国家可再生能源实验室(NREL)位于加州 San Clemente Island 地区的测量站实地测得的历史风速数据集^[20]。根据文献[21]中所阐述的风力发电模型,可以得到该地发电厂的输出,如图 2 所示。

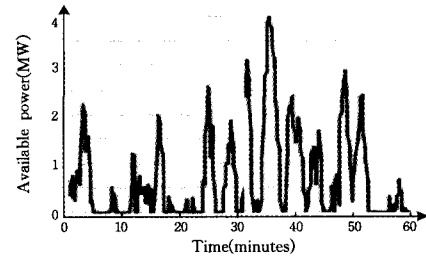


图 2 可用电能

实验中比较了 Online_WORK(online without future knowledge, Online_WORK)算法和 Power_WORK 算法。其中 Power_Work 算法是本文算法,Online_WOFK 算法则完全不考虑变量未来可能发生的变化,只根据相关变量的当前值求出当前时间槽的最小电费,因此,该算法没有利用任何可延迟负载。

实验从电力成本和负载性能两个方面验证本算法的效果,对 24 小时内的电力成本进行了计算,结果如图 3 所示。由于 Online_WOFK 算法只根据当前时间槽内的电价、负载和风速取值来进行调度,因此得到的总电费比本文算法大,约为 146.93,Power_Work 算法得到的电费总支出是最小的,为 158.33。在一天的用电量上 Power_Work 算法比 Online_WOFK 算法节约了 7.2% 的成本。

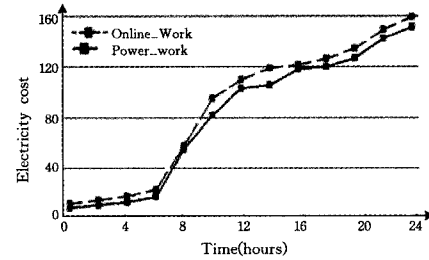


图 3 电费的比较

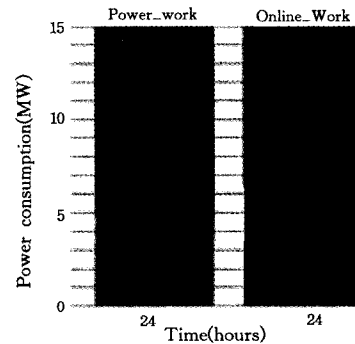


图 4 负载调度的对比

Power_Work 算法允许大量的可以延迟负载被推迟到下一时间槽中执行,即图中发生迁移的用电量,由于在这些时间槽内使用市电不会增加甚至可以减少电费,因此大量可延迟

(下转第 553 页)

coefficients[J]. Medical Engineering & Physics, 2001(23): 127-134

- [12] Lu Zhi-tao, Kim D Y, Pearlman W A. Wavelet Compression of ECG Signals by the Set Partitioning in Hierarchical Trees Algorithm[J]. IEEE Trans. Biomed. Eng. , 2000, 47(7): 849-856
- [13] Hilton M L. Wavelet and wavelet packet compression of electrocardiograms[J]. IEEE Trans. Biomed. Eng. , 1997, 44: 394-402
- [14] Djohan A, Nguyen T Q, Tompkins W J. ECG compression using discrete symmetric wavelet transform[J]. IEEE 17th Annual Conference on Engineering in Medicine and Biology Society,

1995; 167-168

- [15] Zigel Y, Cohen A, Abu-ful A, et al. Analysis by synthesis ECG signal compression[J]. Comput. in Cardiol. , 1997, 24: 279-282
- [16] 刘波. DNA—蚁群算法在车辆路径优化问题中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2015(5): 7
- [17] 张伟娟, 张红梅, 陈峰. 基于蚁群算法的基因路径预测[J]. 计算机系统应用, 2015(3): 280-283
- [18] 陈亮, 吴更生, 吴卫. 针对应急救援路径规划的一种改进蚁群算法[J]. 后勤工程学院学报, 2015(1): 86-90

(上接第 543 页)

负载被推迟到这些时间槽内执行, 如图 4 所示。Power_Work 算法发生迁移的用电量高于 Online_WORK 算法, 从而有效地降低了电费成本。

结束语 本文针对如何最小化数据中心的电费进行了深入研究, 主要贡献包括基于 Lyapunov 优化提出一种负载调度算法, 可以在不使用任何未来的负载、电价的基础上最小化数据中心的电费; 进行实验分析, 并将结果与 Online_WORK 算法进行比较, 结果表明 Power_Work 可以节约 7.2% 的电费。

综上所述, 在电力的调度过程中, 需要综合考虑负载波动性、电价差异性等因素。

参 考 文 献

- [1] Koomey J. Growth in data center electricity use 2005 to 2010. Oakland: Analytics Press, 2011 [OL]. <http://www.analyticspress.com/datacenters.html>
- [2] Qureshi A, Weber R, Balakrishnan H, et al. Cutting the electric bill for internet-scale systems[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2009, 39(4): 123-134
- [3] 北京市电网峰谷分时销售电价表[OL]. <http://www.bjpc.gov.cn/ywpc/wjgl/cx/jz/201208/t3884351.htm>
- [4] 上海市居民生活用电试行居民阶梯电价的实施细则[OL]. http://www.sh.sgcc.com.cn/FSM_CMS/html/main/col41/2013-03/21/20130321134924057695122_1.html
- [5] Chase J S, Anderson D C, Thakar P N, et al. Managing energy and server resources in hosting centers[J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2001, 35(5): 103-116
- [6] 谭一鸣, 曾国荪, 王伟. 随机任务在云计算平台中能耗的优化管理方法[J]. 软件学报, 2012, 23(2): 266-278
- [7] Rao L, Liu X, Xie L, et al. Minimizing electricity cost: Optimization of distributed internet data centers in a multi-electricity market environment [C] // Proc. of the IEEE INFOCOM. IEEE, 2010: 1-9
- [8] Urgaonkar R, Urgaonkar B, Neely M J, et al. Optimal power cost management using stored energy in data centers [C] // Proc. of the ACM SIGMETRICS Joint Int'l Conf. on Measurement and Modeling of Computer Systems. New York: ACM Press, 2011: 221-232
- [9] Gao P X, Curtis A R, Wong B, et al. It's not easy being green

[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2012, 42(4): 211-222

- [10] Liu Z H, Lin M H, Wierman A, et al. Greening geographical load balancing [C] // Proc. of the ACM SIGMETRICS Joint Int'l Conf. on Measurement and Modeling of Computer Systems. New York: ACM Press, 2011: 233-244
- [11] Deng W, Liu F M, Jin H, et al. SmartDPSS: Cost-Minimizing multi-source power supply for datacenters with arbitrary demand [C] // Proc. of the 2013 IEEE 33rd Int'l Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS). IEEE, 2013: 420-429
- [12] Georgiadis L, Neely M J, Tassioulas L. Resource allocation and cross-layer control in wireless networks[J]. Foundations and Trends in Networking, 2006, 1(1): 1-144
- [13] Neely M J. Stochastic network optimization with application to communication and queueing systems[J]. Synthesis Lectures on Communication Networks, 2010, 3(1): 1-211
- [14] Fan X, Weber W D, Barroso L A. Power provisioning for a warehouse-sized computer[J]. ACM SIGARCH Computer Architecture News, 2007, 35(2): 13-23
- [15] Chase J S, Anderson D C, Thakar P N, et al. Managing energy and server resources in hosting centers[J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2001, 35(5): 103-116
- [16] Chen Y, Das A, Qin W, et al. Managing server energy and operational costs in hosting centers[J]. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, 2005, 33(1): 303-314
- [17] Wang P J, Rao L, Liu X, et al. Dynamic power management of distributed Internet data centers in smart grid environment [C] // Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM 2011). IEEE, 2011: 1-5
- [18] Zhang Y W, Wang Y F, Wang X R. Capping the electricity cost of cloud-scale data centers with impacts on power markets [C] // Proc. of the 20th Int'l Symp. on High Performance Distributed Computing. New York: ACM Press, 2011: 271-272
- [19] googleclusterdata [OL]. <https://code.google.com/p/googleclusterdata/>
- [20] San clemente island data [OL]. <http://www.nrel.gov/midc/scid/>
- [21] Zhang Y W, Wang Y F, Wang X R. GreenWare: Greening cloud-scale data centers to maximize the use of renewable energy [C] // Kon F, ed. Proc. of the Middleware 2011. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011: 143-164