

基于能量控制与资源调度的信息物理系统建模

邢静宇¹, 张立臣²

(1. 南阳理工学院 软件学院, 河南 南阳 473004;

2. 广东工业大学 计算机学院, 广东 广州 510090)

摘要:数据中心作为信息物理系统的一种,消耗着巨大的能量。通过对信息物理系统的能量特点进行分析,根据信息物理系统中有大量的具有计算能力的信息设备,将信息物理系统的构件分为两类:计算部件和非计算部件,并以此进行能量系统建模。通过分析信息物理系统资源调度的特点,针对其资源调度的三要素:资源实体能力、资源实时状态和资源上所执行的任务类型进行资源调度建模。最后,以信息物理系统的数据中心为例,针对数据中心的计算部件,给出了一个对能量控制与资源调度进行结合的信息物理系统模型。

关键词:能量控制;资源调度;数据中心;信息物理系统;建模

中图分类号:TP273+5

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)07-0120-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.07.030

Cyber Physical System Modeling Based on Energy Control and Resource Scheduling

XING Jing-yu¹, ZHANG Li-chen²

(1. School of Software, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China;

2. Faculty of Computer, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China)

Abstract: Data center as a cyber physical system, is consuming huge amounts of energy. Cyber physical systems have a large number of information devices with computing capabilities, dividing the components of cyber physical systems into two types: computing components and non-computing components, and according to this category to make energy system modeling. Based on scheduling features of the cyber physical system, by analyzing the three elements of cyber physical systems including resource entity capabilities, resource real-time status and the task type performed on the resource for resource scheduling modeling. Finally, take the computing components of data centers for example, give a cyber physical systems model which combines energy control and resource scheduling.

Key words: energy control; resource scheduling; data center; cyber physical system; modeling

0 引言

信息物理系统(Cyber Physical System)强调计算,网络与物理实体紧密结合,通过计算,通信和控制的协同合作,使得物理资源、网络资源和计算过程紧密结合,以获得整个系统在适应性、功能性、可靠性、效率性等各方面的提升。信息物理融合系统集成了计算系统与物理系统,并通过嵌入式计算机与网络实现了两者之间的协作和融合^[1]。目前在国内从事CPS研究的机构不多,随着CPS关注度的提高,国内从事CPS研究的学者和机构会越来越多^[2]。

在宏观上,信息物理系统是在不同时间和空间上的同构或者异构的动态混合系统^[3],包括感知资源、通信资源、计算资源和控制执行资源。系统通过分布在物理设备上的各种类型的传感器采集信息,利用多维信息网络进行信息数据的传输和交互,最终经过计算实现对物理和工程系统的精确动态的控制与执行。

数据中心作为一个典型的信息物理系统,在数据中心内部,CPS各个层级的组件与子系统都围绕数据融合向上提供服务,数据沿从物理世界接口到用户的路径上不断提升抽象级,用户最终得到全面的、精确的

收稿日期:2013-10-09

修回日期:2014-01-13

网络出版时间:2014-04-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61173046);广东省自然科学基金(S2011010004905)

作者简介:邢静宇(1981-),女,河南新乡人,讲师,硕士研究生,研究方向为实时系统、信息物理系统;张立臣,博士,教授,研究方向为实时系统、计算机网络、数字图书馆。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140424.0842.094.html>

事件信息。

在以往的研究中,Padala 等人在文献[4]中提出了一个能够在服务器上分配 IT 资源的控制算法。林剑柠等人在文献[5]中提出了一种基于遗传算法的资源调度算法,解决了种群中的非法问题。X. Wang 等人在文献[6]中研究了在虚拟服务器集群上如何协调功率控制和性能管理。L. Parolini 等人在文献[7]中给出了一种针对数据中心能量管理的基于信息物理系统的方法。Cheng Shao-wu 等人在文献[8]中提出一种基于行动的资源能力建模方法,将资源能力定义为输入对象、输出对象和行为。王小乐等人在文献[9]中给出一种面向服务的 CPS 体系框架。近年来 CPS 的研究得到了充分重视,2010 年的 1 月 15 日在上海举办了“信息物理融合系统 CPS 发展战略论坛”,论坛中重点讨论了国民经济领域 CPS 应用系统示范及国家急需的 CPS 应用系统战略布局研究。

文中首先对信息物理系统中的能量系统进行研究,以信息物理系统中计算部件和非计算部件分类为基础,对 CPS 能量系统进行建模。接下来通过分析 CPS 的资源调度特点,在 CPS 资源执行任务时对 CPS 资源调度进行建模。最后,以数据中心为例,给出基于能量控制和资源调度的 CPS 系统模型架构。

1 能量系统建模

1.1 CPS 的能量系统特点

随着近年对可持续发展的关注,可持续计算也逐渐引起人们的关注。可持续计算大致可分为三类:

(1)降低计算设施运行的能量消耗,例如,提高计算设施的能量效率;

(2)延长设备的使用寿命,以降低报废率,例如,对于数据中心,可以通过维持安全的运行环境温度以降低服务器的崩溃;

(3)充分利用可再生资源,例如,在身体传感器中可以通过人的呼吸,运动或太阳能来进行能量供给。

以 Google 数据中心为例,数据中心是能源的大消耗源,一个数据中心所消耗的能源与一个中型城镇的耗费相当。数据中心的可持续性实际上是能源使用(瓦数或功效)、性能(每瓦的功效)和产品生命周期管理(购买与报废的周期)的综合叠加。多种技术对这种可持续性都有贡献,如节能的服务器和冷却技术、数据中心的设计、虚拟化等。Google 数据中心冷却水循环系统如图 1^[10]所示。

1.2 CPS 能量消耗的非功能性因素

由于信息物理系统中有大量的具有计算能力的信息设备,因此在 CPS 系统中的能量消耗,可以根据 CPS

系统的构成分成两类:计算部件的能耗和非计算部件的能耗。计算部件的能耗依据不同的工作负载和不同的计算节点而不同。非计算部件的能耗首先需要确定非计算部件参数集合和非计算处理的属性集合,并对不同的工作负载和计算节点进行实验。

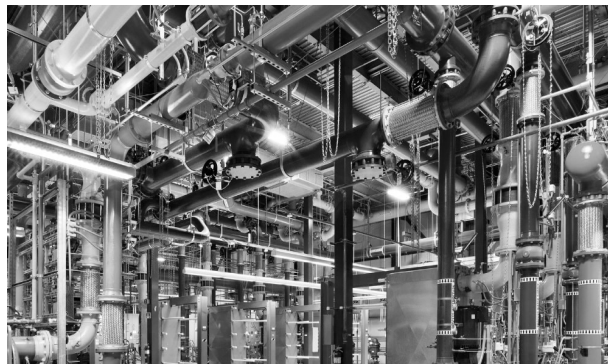


图 1 Google 数据中心冷却水循环系统

由于信息物理系统中,计算资源和控制执行资源存在信息与数据的通信与交互,因此,非计算部件参数集合受计算资源的影响。对于数据中心而言,冷却单元的空气温度取决于数据中心房间产生的热量,而数据中心产生的热量取决于计算服务器节点的能量消耗,计算服务器节点的能量消耗又因时间和空间的不同而有很大的变动。例如,由于数据中心房间的热循环模式,可能导致在某一时刻,在某一位置的计算节点产生的影响和另一位置的具有同样能量消耗特性的计算节点有很大的不同。

1.3 CPS 能量系统建模

将 CPS 系统能量消耗的计算部件的能耗和非计算部件的能耗分别使用 p^c 和 p^{nc} 表示,由 p^c 和 p^{nc} 组成的 CPS 系统总能耗由 p^{total} 表示,由 M 和 N 表示计算部件和非计算部件的总和。 p_i^c 表示第 i 个计算部件的能量消耗, p_j^{nc} 表示第 j 个非计算部件的能量消耗。因此,CPS 系统总能耗由公式(1)表示:

$$p^{\text{total}} = \sum_{i=1}^M p_i^c + \sum_{j=1}^N p_j^{nc} \quad (1)$$

对于每个 p_i^c 而言,有两个制约因素,一个是在 i 个计算部件上的工作负载,一个是第 i 个计算部件的功耗模式。使用 w_i 和 m_i 分别表示在第 i 个计算部件上的工作负载和功耗模式,使用 W 和 M 分别表示所有可能的工作负载和功耗模式,那么 p_i^c 由公式(2)所示:

$$p_i^c = f(w_i, m_i) \quad (2)$$

其中, $w_i \in W$; $m_i \in M$ 。

对于 p_j^{nc} 而言,需要考虑非计算部件处理过程的属性集合,这个属性集合对于不同的信息物理系统也表现出不同的形式。对于数据中心而言,非计算部件包含冷却装置,非计算部件处理过程的属性集合包括冷却单元入口的空气温度、冷却处理过程中获取的热量

等等。若使用 q_i 表示非计算部件处理过程的某一属性, Q 表示在某一具体的信息物理系统中所有非计算部件处理过程的属性总和, 那么 p_j^{nc} 由公式(3)所示:

$$p_j^{\text{nc}} = f(q_1, q_2, \dots, q_i) \quad (3)$$

其中, $q_i \in Q$ 。

2 资源调度建模

2.1 CPS 的资源调度特点

人们在日常生活中对任务进行分配和调度时, 最关心的是执行任务的单元是否具备完成任务的能力, 是否有意愿去执行任务。在 CPS 系统中, 可将资源分为四类: 感知资源、通信资源、计算资源和控制执行资源。CPS 作为一种自感知系统, 通过资源执行任务时, 必须明确哪些资源具有完成任务的能力, 哪些资源具备完成任务的状态。

资源的能力和状态密不可分, CPS 系统中资源的能力可按照资源的分类而分成四类: 感知能力、通信能力、计算能力和控制执行能力。资源的能力针对具体处理的任务而分, 任务的类型是考量资源能力的基准。资源的状态包括资源的时间空间状态、资源的能量状态、资源的是否闲置状态和资源的剩余执行力状态, 在对任务进行资源的调度时, 还需综合考虑资源的使用平衡状态等。

资源调度表示在不同的任务到达时, 需根据任务的类型, 种类进行区分, 在具备处理该任务的资源集合中, 找出最合适的资源与任务进行匹配。对于复杂任务, 需考虑资源间的组合匹配问题。

2.2 CPS 资源调度建模

不同的资源有不同的能力, 不同的工作负载需要有不同的任务调度, 不同的任务调度需要不同的资源调度。资源调度模型具有三个要素: 资源实体的能力, 资源的实时状态, 所要执行的任务类型。

使用 RS 表示资源调度映射函数, C 表示资源实体的能力, S 表示资源的实时状态, T 表示所有执行的任务, t_i 表示 T 中的第 i 个子任务, T 面临着资源的整合与匹配, 需要对每一个 t_i 都匹配到合适的资源。将资源调度映射函数投射到空间 $\{0-1\}$ 中, 那么 RS 由公式(4)所示:

$$RS = f(C) \cup f(S) \cup f(T) \quad (4)$$

其中, $f(C) \rightarrow \{0, 1\}$, $f(S) \rightarrow \{0, 1\}$, $f(T) \rightarrow \{0, 1\}$ 。

$f(T) \rightarrow \{0, 1\}$ 表示, 如果对于任一任务 T 的子任务 t_i 都能匹配或者组合匹配到合适的资源, 那么 $f(T) = 1$ 。

信息物理系统中资源的状态是一种资源外在表现

和内在性能的综合考量, 资源的实时状态包括资源的能量状态、资源的处理极限状态、资源的利用率状态等。在所有的状态都满足的情况下, $f(S) = 1$ 。

$RS = f(C) \cup f(S) \cup f(T) = 1$ 表示资源实体在资源的实时状态下能够完成所分配的任务。

不同的信息物理系统由于用到不同功能的设备、不同公司的设备、软件系统不同的设备、编码系统不同的设备等等导致了 CPS 资源之间的高异构性。但是对于某个具体的信息物理系统, 在某类资源中, 包括感知资源、通信资源、计算资源和控制执行资源内部, 会包含大量的同构设备。因此, 针对某个具体的信息物理系统, 设定同一种资源实体在同样的实时状态下的能力是一致的。用 R 表示某一种资源, 那么会有公式(5):

$$C(R_i, S_{k_1}) = C(R_j, S_{k_1}) \quad (5)$$

当资源的实时状态从 k_1 更新至 k_2 时, 有公式(6):

$$C(R_i, S_{k_2}) = C(R_j, S_{k_2}) \quad (6)$$

3 能量控制与资源调度结合的 CPS 系统模型

3.1 数据中心 CPS 系统组成

CPS 是一种典型的分布式异构实时系统, 分布式服务系统设备的日常运转耗费巨大的能量。以数据中心为例, 在“2012 中美清洁能源论坛”上, 有专家表示, 中国联通数据中心的能耗数据显示, 该中心每年耗电 99 亿千瓦时。以中国目前标准煤的效能看, 需要消耗 92 万吨标准煤才能提供足够的电力供中国联通数据中心的能耗需求。在通信业, 运营商的数据中心是耗电大户。从全球范围来看, ICT (Information Communication Technology) 总耗电量大约占全球耗电总量的 8%, 其中数据中心是 ICT 中耗电最大的项目, 每年的耗电量已达近千亿千瓦时^[11]。因此, 在资源调度的观点上有必要考虑能量消耗, 为任务分配合理的资源, 完成任务并能够降低能耗。

在数据中心, 一方面是信息技术系统, 一方面是信息技术系统的支撑架构。信息技术系统提供给终端用户服务, 支撑架构用于给信息技术系统提供电力支持和冷却服务。因此, 数据中心的功耗主要包括信息技术系统中服务器等正常工作功耗和支撑架构中的冷却系统功耗, 分别对应着能量系统建模中的计算部件的能耗和非计算部件的能耗。数据中心 CPS 系统组成如图 2 所示^[12]。

不同的工作负载可能使用不同的数据中心服务器资源, 因此, 分配不均的工作负载可能会引起每个服务器上的能量消耗不均。并且, 由于在机架中的相对位置不同, 某些服务器可能会比其他的服务器更容易冷

却。在文中,将工作负载模拟为任务流的状态,每一个任务由多个子任务组成。互联网数据中心在收到服务请求之后,将请求按照到达次序放置在等待队列中,然后通过调度器进行全局负载指派,将服务请求调度到某个计算资源上进行处理,当一个任务在某个计算资源节点执行完成之后离开数据中心。

3.2 以数据中心为例建模

由于冷却系统(非计算部件)功耗与服务器工作

频率基本不相关,基本独立于数据中心承担的工作负载。因此文中主要考虑服务器正常工作(计算部件)功耗,对冷却系统功耗进行简单介绍。

只有对任一任务 T 的子任务 t_i 都能匹配或者组合匹配到合适的资源时, $f(T) = 1$ 。支持资源是指能够满足指定任务所需能力要求的资源集合^[13]。如果数据中心需要处理的任务 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_i\}$, 那么该任务的支持资源 SR 由公式(7)所示:

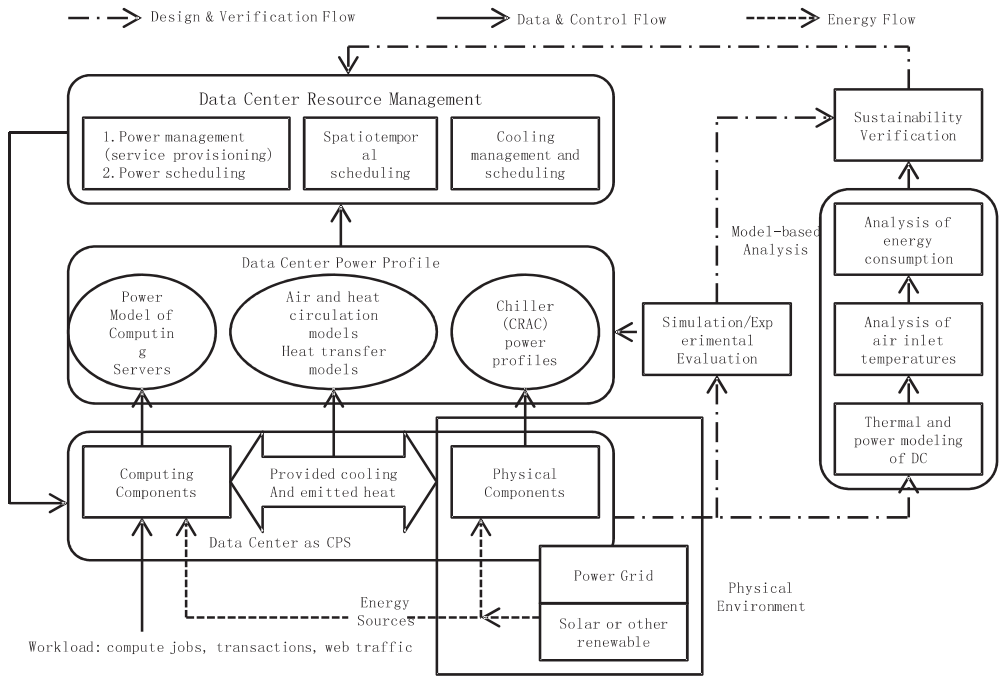


图2 数据中心 CPS 系统组成

$$SR(T) = SR(t_1) \cup SR(t_2) \cup \dots \cup SR(t_i) \quad (7)$$

对于数据中心中的计算部件,每一个计算部件完成所分配的工作都决定着在该计算部件上 RS 资源调度映射函数是否为 1 和该计算部件完成该工作所需的电力总量。

对于在第 m 个计算部件上的任务 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_i\}$, 在 t 时刻在第 m 个计算部件上执行完任务 T 所需的计算资源为 $SR_m^t(T)$, 该计算部件可获得的全部计算资源为 SR_m^t , 那么有公式(8):

$$0 \leq \frac{SR_m^t(T)}{SR_m^t} \leq 1 \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

对于多个任务 $k(k = 1, 2, \dots, K)$, 有公式(9):

$$\sum_{k=1}^K \frac{SR_m^t(k)}{SR_m^t} \leq 1 \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (9)$$

用 $P_m^t(T)$ 表示在时刻 t 在第 m 个计算部件上任务 T 的能量消耗, L_m^t 表示在 t 时刻第 m 个计算部件的工作负载总量, 那么在时刻 t 在第 m 个计算部件上的能量消耗为公式(10):

$$P_m^t(T) = f(m, L_m^t, \frac{SR_m^t(T)}{SR_m^t}) \quad (10)$$

另外,数据中心计算设备在将一部分电能转换为服务计算的同时也将一部分电能转换为热量。这些热量需要通过冷却系统从数据中心排出。对于每个数据中心的规模,若服务器数量和配置是已知的,那么冷却系统的能耗在某个时刻 t 被视为是一个定值^[14]。

4 结束语

CPS 的出现是传感器技术、嵌入式技术、普适计算、人机交互技术、通信网络等多种技术综合发展的必然结果^[15], CPS 将改变人与物理世界的交互方式,将成为推动新技术革命的重要动力。CPS 具有比纯计算系统或网络系统更复杂的环境,在物理设备和程序控制下,集成了传感器、网络、计算器和控制单元,具有庞大、复杂而多样的资源系统。CPS 应用非常丰富,各种应用的特征各不相同,例如在健康医疗生命体征检测应用中,需要较高级别的 QoS 保证^[16]。针对数据中心,文中通过对 CPS 能量消耗和资源能力进行分

析,给出一种基于能量控制和资源调度的 CPS 系统模型,今后,对 CPS 能量系统和任务分配,资源调度进行进一步的详细分析和形式规约是文中的下一步工作。

参考文献:

- [1] 李仁发,谢 勇,李 蕊,等. 信息-物理融合系统若干关键问题综述[J]. 计算机研究与发展,2012,49(6):1149-1161.
 - [2] 谭朋柳,舒 坚,吴振华. 一种信息-物理融合系统体系结构[J]. 计算机研究与发展,2010,47(5):312-316.
 - [3] 黎作鹏,张天驰,张 菁. 信息物理融合系统(CPS)研究综述[J]. 计算机科学,2011,38(9):25-31.
 - [4] Padala P, Shin K G, Zhu Xiaoyun, et al. Adaptive control of virtualized resources in utility computing environments[J]. SIGOPS Oper Syst Rev, 2007, 41(3):289-302.
 - [5] 林剑柠,吴慧中. 基于遗传算法的网格资源调度算法[J]. 计算机研究与发展,2004,41(12):2195-2199.
 - [6] Wang Xiaorui, Wang Yefu. Coordinating power control and performance management for virtualized server clusters[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2011, 22(2):245-259.
 - [7] Parolini L, Tolia N, Sinopoli B, et al. A cyber-physical systems approach to energy management in data centers[C]//Proceedings of the 1st ACM/IEEE international conference on cyber-physical systems. New York, NY, USA: ACM, 2010:168-177.
 - [8] Cheng Shaowu, Xu Xiaofei, Wang Gang, et al. Activity-based resource capability modeling[J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 2008, 15(3):307-311.
 - [9] 王小乐,陈丽娜,黄宏斌,等. 一种面向服务的 CPS 体系框架[J]. 计算机研究与发展,2010,47(z2):299-303.
 - [10] Google. Google data centers[EB/OL]. [2013-07-23]. <http://www.google.com/about/datacenters/gallery/#/tech>.
 - [11] 张国宝. 云计算高能耗数据中心年用电百亿度[EB/OL]. [2013-07-25]. <http://www.cloudcomputing-china.cn/Article/cloudcomputing/201205/1479.html>.
 - [12] Gupta E K S, Mukherjee T, Varsamopoulos G, et al. Research directions in energy-sustainable cyber-physical systems[J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2011, 1(1):57-74.
 - [13] Sun Xuedong, Xu Xiaofei, Wang Gang, et al. Multi-objective optimization of process based on source capability[J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 2007, 14(4):450-453.
 - [14] Tang Q, Gupta S K S, Varsamopoulos G. Energy-efficient thermal-aware task scheduling for homogeneous high-performance computing data centers: a cyber-physical approach[J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2008, 19(11):1458-1472.
 - [15] Lui Sha, Gopalakrishnan S, Liu Xue, et al. Cyber-physical systems: a new Frontier[C]//Proc of 2008 IEEE international conference on sensor networks, ubiquitous, and trustworthy computing. Taichuang: IEEE, 2008:1-9.
 - [16] 刘祥志,刘晓建,王知学,等. 信息物理融合系统[J]. 山东科学,2010,23(3):56-61.
-
- (上接第 119 页)
- conference on wireless communication, vehicular technology, information theory and aerospace & electronic systems technology. Chennai: IEEE, 2011:1-5.
 - [6] Shang Xufeng, Yuan Yubo. Group mobility model in disaster area networks[C]//Proc of international conference on machine learning and cybernetics. Xi'an: IEEE, 2012:1508-1513.
 - [7] Hong X, Gerla M, Pei G, et al. A group mobility model for ad hoc wireless networks[C]//Proceedings of the 2nd ACM international workshop on modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems. [s. l.]: ACM, 1999:53-60.
 - [8] Williams S A, Huang D. A group force mobility model[C]//Proc of communications and networking simulation symposium. [s. l.]: [s. n.], 2006:333-340.
 - [9] Williams S A, Huang Dijiang. Group force mobility model and its obstacle avoidance capability[J]. Acta Astronautica, 2009, 65(7/8):949-957.
 - [10] Chang Y C, Liao H C. EMM: an event-driven mobility model for generating movements of large numbers of mobile nodes[J]. Elsevier Journal of Simulation Modeling Practice and Theory, 2005, 13(4):335-355.
 - [11] Musolesi M, Mascolo C. A community based mobility model for ad hoc network research[C]//Proceedings of the 2nd international workshop on multi-hop ad hoc networks: from theory to reality. New York: ACM, 2006:31-38.
 - [12] 熊 熙,胡 勇. 基于社交网络的观点传播动力学研究[J]. 物理学报, 2012, 61(15):104-110.
 - [13] 卢珺珈,张宏莉,张 玥. 基于 BBS 的热点话题发现与态势预测技术的研究[J]. 智能计算机与应用, 2012, 2(2):1-5.
 - [14] 李克潮,梁正友. 适应用户兴趣变化的指数遗忘协同过滤算法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(13):154-156.
 - [15] 郭力军,朱群雄. 基于 RSS 数据源的用户兴趣模型改进及应用[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2011, 38(1):125-129.
 - [16] Bai F, Sadagopan N, Helmy A. IMPORTANT: a framework to systematically analyze the impact of mobility on performance of routing protocols for Adhoc networks[C]//Proc of INFOCOM 2003. San Francisco, CA: IEEE, 2003:825-835.

作者: 邢静宇, 张立臣, XING Jing-yu, ZHANG Li-chen
作者单位: 邢静宇, XING Jing-yu(南阳理工学院 软件学院, 河南 南阳, 473004), 张立臣, ZHANG Li-chen(广东工业大学 计算机学院, 广东 广州, 510090)
刊名: 计算机技术与发展 ISTIC
英文刊名: Computer Technology and Development
年, 卷(期): 2014(7)

参考文献(16条)

1. 李仁发;谢勇;李蕊 信息-物理融合系统若干关键问题综述 2012(06)
2. 谭朋柳;舒坚;吴振华 一种信息-物理融合系统体系结构 2010(S)
3. 黎作鹏;张天驰;张菁 信息物理融合系统(CPS)研究综述 2011(09)
4. Padala P;Shin K G;Zhu Xiaoyun Adaptive control of virtualized resources in utility computing environments 2007(03)
5. 林剑柠;吴慧中 基于遗传算法的网格资源调度算法 2004(12)
6. Wang Xiaorui;Wang Yefu Coordinating power control and performance management for virtualized server clusters 2011(02)
7. Parolini L;Tolia N;Sinopoli B A cyber-physical systems approach to energy management in data centers 2010
8. Cheng Shaowu;Xu Xiaofei;Wang Gang Activity-based resource capability modeling 2008(03)
9. 王小乐;陈丽娜;黄宏斌 一种面向服务的CPS体系框架 2010(z2)
10. Google Google data centers 2013
11. 张国宝 云计算高能耗数据中心年用电百亿度 2013
12. Gupta E K S;Mukherjee T;Varsamopoulos G Research directions in energy-sustainable cyber-physical systems 2011(01)
13. Sun Xuedong;Xu Xiaofei;Wang Gang Multi-objective optimization of process based on source capability 2007(04)
14. Tang Q;Gupta S K S;Varsamopoulos G Energy-efficient thermal-aware task scheduling for homogeneous high-performance computing data centers:a cyber-physical approach 2008(11)
15. Lui Sha;Gopalakrishnan S;Liu Xue Cyber-physical systems:a new Frontier 2008
16. 刘祥志;刘晓建;王知学 信息物理融合系统 2010(03)

引用本文格式: 邢静宇, 张立臣, XING Jing-yu, ZHANG Li-chen 基于能量控制与资源调度的信息物理系统建模[期刊论文]-计算机技术与发展 2014(7)