

# 云视频监控系统的能耗优化研究<sup>\*</sup>

熊永华<sup>1</sup>, 张因升<sup>2</sup>, 陈鑫<sup>1</sup>, 吴敏<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(中国地质大学 自动化学院, 湖北 武汉 430074)

<sup>2</sup>(中南大学 软件学院, 湖南 长沙 410075)

通讯作者: 陈鑫, E-mail: chenxin@cug.edu.cn

**摘要:** 随着基于云计算的视频监控系统(以下简称云视频监控系统)的兴起,其无限扩展的终端设施、众多的物理服务器、频繁的网络传输等所带来的能耗问题不容忽视.分析了云视频监控系统的体系结构、能耗的产生及其优化机理,并将云视频监控系统的能耗研究分为监控节点、物理节点和存储节点这3个层次;然后,结合国内外应用于传感器网络和云计算数据中心的相关能耗优化理论与方法,分别对3个层面上的云视频监控系统的能耗优化方法进行综述,并进行了深入的分析和比较;最后,针对当前的研究空缺和问题,提出今后可能的研究方向和重点,并进行了总结.

**关键词:** 云视频监控;能耗优化;监控节点;计算节点;存储节点

**中图法分类号:** TP303

中文引用格式: 熊永华,张因升,陈鑫,吴敏.云视频监控系统的能耗优化研究.软件学报,2015,26(3):680-698. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4763.htm>

英文引用格式: Xiong YH, Zhang YS, Chen X, Wu M. Research of energy consumption optimization methods for cloud video surveillance system. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2015,26(3):680-698 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4763.htm>

## Research of Energy Consumption Optimization Methods for Cloud Video Surveillance System

XIONG Yong-Hua<sup>1</sup>, ZHANG Yin-Sheng<sup>2</sup>, CHEN Xin<sup>1</sup>, WU Min<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

<sup>2</sup>(School of Software, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** With the rise of the video surveillance system based on cloud computing (hereinafter referred to as the cloud video surveillance system), its complex energy consumption problems, brought by the terminal facilities, physical servers and frequent network-transmissions, can't be ignored. In this paper, the architecture and mechanism of energy consumption optimization of the system are introduced. Then, the energy consumption optimization researches are categorized into three levels: monitoring node, computing node and storage node. Next, considering the existing energy optimization theories and methods applied to the sensor networks and the generalized cloud computing data center, the energy consumption optimization methods for cloud video surveillance system are analyzed and compared with respect to the upper three levels. Finally, several key problems and future research directions for reducing the comprehensive energy consumption of the system are discussed.

**Key words:** cloud video surveillance; energy optimization; monitoring node; computing node; storage node

视频监控系统经过了模拟化、数字化和网络化这3个阶段的发展演变,已被广泛应用于军事、交通、生产、医疗、服务和家居等社会生活的各个领域,且随着社会信息化、安防科技化的高速发展,视频监控系统在人们

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61202340, 61473316); 中国博士后基金国际交流派出计划(20140011); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金(2014zzts229)

收稿时间: 2013-04-21; 修改时间: 2014-03-27; 定稿时间: 2014-11-04; jos 在线出版时间: 2014-12-12

CNKI 网络优先出版: 2014-12-12 14:10, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2560.TP.20141212.1410.006.html>

生活中也承担着越来越重要的角色,但当前的视频监控系统普遍存在着远程传输困难、铺设和运营维护成本高、数据的安全性和可靠性差、难以对分散的监控视频进行数据挖掘和决策分析等问题。

近几年来,云计算的出现,推动了视频监控领域的发展,形成了一种视频监控即服务(video surveillance as a service)的全新的云计算服务模式,即云视频监控系统。云监控服务大幅降低了用户的建设维护成本,操作上也变得更加便捷,同时,云监控数据中心虚拟化的计算存储与日趋完善的安全管理模式,为系统提供了更强的可扩充与共享功能,也增加了视频数据的安全与可靠性,从而可有效解决当前视频监控所存在的问题。

虽然云视频监控系统在国内外都是刚刚兴起,但却以其低廉的运营维护成本、便捷的服务方式、可靠的管理模式等优势冲击着当前的视频监控市场。如 CloudSurveillance<sup>[1]</sup>于 2011 年在全球范围内率先向公众提供商业化试运行的云视频监控服务,华为也于同年 11 月发布了基于云计算的 eSpace 智能视频监控解决方案<sup>[2]</sup>,之后,国内的云创、Goovo、高新兴、浪潮等相继发布了云视频监控系统的结构设计方案,Aspice<sup>[3]</sup>所开发的云视频监控系统也早已进入内测阶段,到 2012 年,视高监控运营平台也正式按云架构平台规划升级<sup>[4]</sup>。近年来,这些云视频监控平台都已投入商业化运行,且据 IMS Research 统计,基于云的视频监控服务需求正以每年 20%~30% 的速率增长。可见,基于云计算的视频监控系统将是监控领域今后的发展趋势。

云监控服务降低了当前监控系统的成本,但云视频监控系统本身的电能消耗却是一个不容忽视的问题,尤其是数据中心的高能耗问题亟待解决。随着云视频监控系统的规模和数量的不断增加,众多监控节点的持续运行、海量视频数据在数据中心的管理和存储、日益增多的客户浏览端的管理等,都需要消耗巨大的电能。因此,云视频监控系统巨大的电能消耗是一个亟待解决的重要问题,在保证视频服务质量的前提下提高云视频监控系统的电能利用率,减少电能消耗,不仅符合云计算技术的发展趋势,而且对于节约能源,减少碳排放都具有重要的意义,也是当前云计算研究领域的热点问题。

本文首先概述云视频监控系统的研究背景和面临的挑战,第 1 节分析云视频监控系统的体系结构,将云视频监控系统分为监控端、监控中心和浏览端这 3 个部分,并指出系统的能耗优化研究应从监控节点、物理节点(计算节点)和存储节点这 3 个层面来展开,随后对系统的能耗来源进行了分析,第 2 节~第 4 节分别综述视频监控节点、传统云计算物理节点、云计算存储节点层面的系统能耗优化现状,对现有方法的优劣进行比较,并分析指出这些方法适用于云视频监控系统时所存在的问题,第 5 节针对当前研究存在的问题和空缺,结合我们目前的研究工作,提出几点适用于典型云视频监控系统的今后可能的研究方向。最后,本文第 6 节对全文内容进行总结。

## 1 系统体系结构与能耗分析

本节首先介绍云视频监控系统的体系结构,并简单说明系统的工作原理;在此基础上,对系统的能耗优化机理进行了分析。

### 1.1 云视频监控系统体系结构

基于云计算的视频监控系统,简称云视频监控系统<sup>[5]</sup>。在云视频监控服务模式,用户与运营者首先签订一个云计算服务模式中的服务等级协议(service level agreement,简称 SLA),就视频质量、监视时间、数据存储与访问、付费标准等各项云服务指标达成一致。此后,只须在需要监视的地方布置一个云视频监控节点,将满足用户需求的监控视频接入云监控中心,由云监控中心统一存储和管理,用户即可通过终端浏览器进行实时监控或者查看已经付费的监控视频。

云监控系统一般分为 3 个部分:云视频监控终端、云视频监控中心和客户浏览端<sup>[6]</sup>(以下分别简称监控端、监控中心和客户端),如图 1 所示。

- 监控端:云视频监控终端,一般是指云监控系统数以万计的监控终端摄像头以及相关的线路和控制设备。监控端通常具备集成视频的采集、编码和传输功能;
- 监控中心:云视频监控中心是云监控系统的核心部分,包括接入控制服务器、虚拟机、数据中心等。与普通监控系统后台监控中心不同的是,云视频监控中心不仅通过控制服务器实现对监控和浏览节点

的接入管理,还需要通过庞大的虚拟机群来调度、运行来自监控端和客户端的两类任务,实现海量视频数据的存储管理、用户需求分析、系统计费等功能;

- 客户端:客户浏览端是用户查看和管理监控视频的窗口,在云视频监控系统中,客户浏览端指支持各种主流浏览器的视频访问端口,通常具备用户识别、登录以及视频浏览、管理等功能.

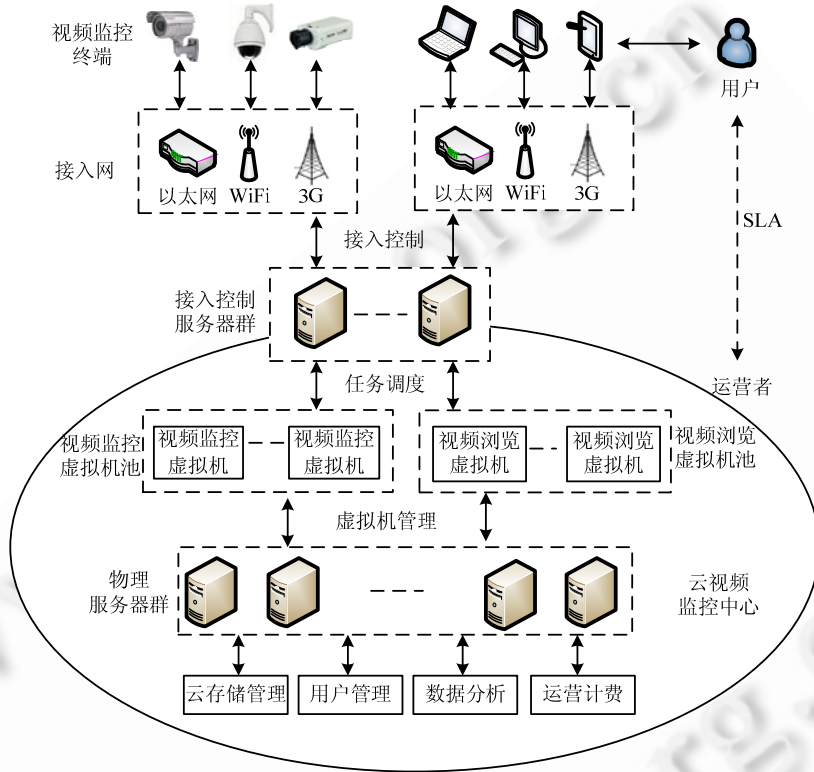


Fig.1 Architecture diagram for cloud video surveillance system  
图 1 云视频监控体系结构图

### 1.2 能耗优化机理分析

由于云视频监控系统一般规模比较庞大,理论上可以支持无限的监控终端和客户浏览端,尤其监控中心拥有着众多的物理服务器,需要对来自监控端和客户端的各种监控和浏览请求进行响应处理等,致使系统的运营和交互过程十分错综复杂.因此,在进行云视频监控系统的能耗优化研究时,如果将整个系统作为研究对象显然不太合理,所以有必要将系统的能耗研究细化为多个层次,以便有效地对云视频监控系统展开能耗优化研究.

根据上文分析,针对云视频监控系统的体系结构特点,结合传统视频的传输过程和云计算数据中心的相关研究,可以将云视频监控系统的能耗优化研究分为监控节点、物理节点和存储节点等 3 个层次,如图 2 所示.

首先将云视频监控终端的能耗优化研究定义为监控节点层面.鉴于云视频监控中心系统的结构复杂性和功能重要性,监控中心的能耗优化研究可进一步分为物理节点层面和存储节点层面.就客户端而言,由于不同的服务器、浏览器彼此的性能不一样,运行效率及其产生的能耗都有差别,用户在登录查看和管理监控视频时,客户端所产生的能耗也就有所不同.另外,用户对视频数据的访问时间和时长具有不确定性,什么时间查看视频、一天(周)查看几次等都取决于用户本身的需求和喜好.因此,云视频监控系统客户端的电能消耗以及成本费用的高低,主要取决于用户所选用的浏览器、移动设备的能耗以及用户的访问频度等主观因素,对于云视频监控系统的运营商和维护者而言,讨论客户端的能耗没有太大的实际意义,这里不做研究.

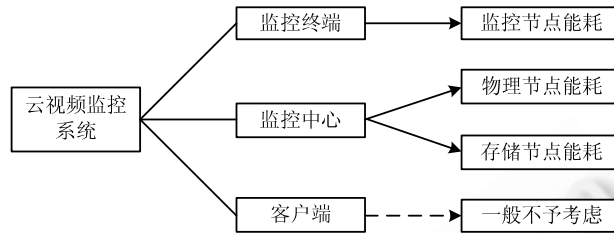


Fig.2 Hierarchical division of energy consumption optimization study for cloud video surveillance system

图2 系统能耗优化研究层次划分示意图

- 监控节点能耗

监控节点的能耗是云监控系统众多的监控终端摄像头在集成视频的采集、编码和传输过程中所产生的能耗。监控摄像头在采集视频图像时,需要对监控场景进行分析,有时为适应场景的动态变化,还需要利用多摄像头交叉采集、高速缓存等技术,容易产生许多冗余数据,造成资源浪费;视频数据在传输过程中,需要经过压缩、编码等复杂的过程,有些数据还需加密传输,不同的传输策略会有不同的能耗产生,具有很大的能耗优化空间。此外,数量不断增多的监控节点的持续运行需要消耗大量的电能,并且节点一般需要全天候工作,必然也要一直消耗电能;尤其对于特殊地域使用电池供电的无源节点,能耗的优化可以延长其监视时间。因此,无论监控节点是有源或无源,大型云视频监控系统中数以万计的监控节点持续工作,所造成的电能消耗也都是一个值得优化的问题。

- 物理节点能耗

云计算中虚拟机的主要载体可定义为物理节点(计算节点),云视频监控中心的物理节点运行视频监控和浏览两类虚拟机,各虚拟机上可以同时运行多个监控或浏览任务。物理节点拥有众多的宿主机和物理服务器,服务器的运行需要电能来维持,其磁盘、CPU、交换机以及排风扇、机械驱动等设备的低效率运转,将造成大量不必要的资源浪费和电能消耗;宿主机上运行视频监控和浏览两类虚拟机,不恰当的虚拟机部署策略会导致负载失衡,直接影响服务器能效,产生资源浪费;而各虚拟机上又需要同时运行多个监控或浏览任务,不合理的任务接入和调度会导致虚拟机的超载,使节点服务器发生故障,造成不必要的成本损失;由于云视频监控系统的任务具有不确定性,物理节点的负载处于动态变化之中,为适应这种动态变化而采取的虚拟机的实时迁移等措施也将带来巨大的通信成本和能耗成本。因此,如何调整服务器的利用率、如何将众多的云任务接入到虚拟机上、如何将众多的虚拟机部署在主机服务器上、如何对已接入的任务、虚拟机进行调度和迁移等,都将直接决定云监控物理节点所产生的能耗多少。

- 存储节点能耗

云视频存储节点主要是指构成云计算环境下分布存储的底层数据中心,是对监控视频数据进行存储和管理的节点。云视频监控系统的数据中心是一种数据容量和增长率都相当庞大的云数据中心,2012年10月,思科发布的云计算产业调研结果(2011~2016)预测表明:到2016年,全球数据中心流量将会增长4倍,每年达到6.6ZB。同时,公司还预测:全球云流量作为数据中心流量中增速最快的部分,将以44%的年复合增长率(CAGR),从2011年的683EB增长到2016年的4.3ZB,达到6倍于2011年流量的规模<sup>[7]</sup>。Cisco的预测数据(2013~2018)还表明:2018年,全球76%的网络流量是视频数据,达到62972PB/月<sup>[8]</sup>。据此也不难推测,云视频监控数据中心将会是未来占主导地位的数据中心类型。

数据中心是云视频监控中心的核心和主要组成部分,其服务器、磁盘阵列、通信设备和辅助降温设备等都需要持续消耗大量的电能,因此,数据中心的能耗在整个系统能耗中占了相当大的比重。有研究表明:从2000年以来,全球数据中心的能耗以每年17%的速度递增<sup>[9]</sup>,2011年,美国数据中心能耗占全国总能耗的1.5%~2%,达到了企业运行成本的15%~20%,全球数据中心总能耗突破了4000亿度<sup>[10]</sup>,到2012年,数据中心的能耗将至少达到服务器硬件成本的两倍<sup>[11]</sup>。Lawrence Berkeley国家实验室的研究指出:数据中心的电能消耗超过传统办公楼

的 40 倍,但其中大部分服务器等 IT 设备的平均利用率却只有 20%~30%,而空闲状态硬件设备的能耗通常占满负荷运行时能耗的 50% 以上<sup>[12]</sup>.可见,当前数据中心的电能消耗有较大部分是维持设备的低负荷运行产生的,电能的利用率较低,存在较大的能耗优化空间.

综上所述,无论是减少监控端的视频传输、节点运行等消耗的电能,还是降低计算节点产生的通信成本和资源浪费,或者节省数据中心的服务器、虚拟机、存储设备消耗的电能和硬件成本等,都是云视频监控系统的能耗优化所要研究的重要内容.本文下面分别从云视频的监控节点、物理节点(计算节点)和存储节点等 3 个层面上对系统的能耗优化方法展开研究.

## 2 监控节点的能耗优化方法

依据监控节点有源或无源(电池供电),当前在其能耗优化方面的研究大致分为两大类:基于有源监控节点和基于无源监控节点.分析云视频监控节点的功能和云计算环境下的视频传输特点可以发现,云视频监控节点的能耗优化问题与传统的无线传感网络视频传输过程的能耗优化问题有着共通之处.本节将结合国内外应用于无线传感器网络的能耗优化相关方法,从有源和无源两个方面对当前监控节点的能耗优化方法进行分析和比较,指出这些方法适用于云视频监控系统时所存在的优缺点.

### 2.1 基于有源

有源的监控节点一般是由市电转化为适当电压的直流电直接进行供电.当前,国内外针对有源监控节点的能耗优化的相关研究主要集中在如何提高视频服务质量,侧重于以网络带宽、计算能力等为约束,从视频编码和网络传输的角度,或者研究多监视端协同工作中的视频重构、分割等问题,以期提高视频服务质量.

这一类研究的代表方法主要有:

- 网络自适应实时视频的传输方法,充分利用可用带宽以最大化视频质量<sup>[13,14]</sup>;
- 运动自适应视频编码与无线传输的方法,通过量化视频的运动强度确定信道的时间和空间特点,从而灵活地在空间复用(SM)和空时分组编码(STBC)之间进行配置切换,提供较好的服务质量<sup>[15]</sup>;
- 基于背景识别的视频压缩方法,通过对单个视频帧的自适应平滑,提取单个视频帧的图像特点,保留相关度高的图像信息,具有较低的计算成本<sup>[16]</sup>;
- 基于位置的多视点视频重构合成的方法<sup>[17]</sup>等.

### 2.2 基于无源

无源的视频监控节点一般是由电池供电,用于无法由电源直接供电的特殊地域.对于无源监控节点的能耗优化,当前类似的研究主要集中在多媒体传感网络中,从视频传感节点的分布、多目标追踪、编码和传输等方面考虑如何降低能耗、延长传感网络的生存时间等问题.根据节能途径和研究侧重点的不同,当前国内外在无源视频监控节点领域的能耗优化方法主要可分为以下几大类:

#### (1) 延长视频数据的网络生存时间

延长网络生存时间的节能方法,即在能量总量不变或者能耗有所减低的前提下,使视频文件在网络上的生存时间最大化.文献[18]设计一种基于网络编码的无线视频传感器网络容错恢复机制,然后建立节点能耗优化模型,综合考虑网络编码、视频编码和传输的能量消耗,在给定网络总能量和基于峰值信噪比(peak signal to noise ratio,简称 PSNR)视频质量时,以网络的生存时间最大为优化目标,求解各个节点的最佳传输速率.文献[19]提出一种负载相似节点分布策略,根据负载分布特性配置节点,负载重的区域配置较多的节点,以平衡各区域节点的能量消耗,解决能量洞问题,对网络寿命有显著改善.文献[20]提出多 sink 无线传感器网络路由算法,综合考虑传感器节点能耗的有效性和均衡性以及 sink 的负载平衡,具有较低的时间复杂性,能够有效地均衡节点的能量消耗,延长网络生存时间.类似的还有朱艺华等人提出的比例权值路由算法(ratio-W)和和权值路由算法(sum-W)<sup>[21]</sup>、基于 Inter-Flow 网络编码的多 Sink 环境下编码感知的交叉路径任播路由协议 CodeMesh<sup>[22]</sup>、基于链路稳定性预测的组播路由协议<sup>[23]</sup>以及用马尔可夫模型优化分布式最小连通支配集的算法<sup>[24]</sup>等,都能够有

效地延长视频数据的网络生存时间。

#### (2) 多目标追踪问题中的能耗优化方法

随着视频监控的智能化发展以及对监控性能的要求越来越高,多目标追踪日益成为视频监控中非常重要的一部分。但是由于在进行多目标追踪时,每帧图像都要进行前景对象检测、分析和对多目标的识别和跟踪等<sup>[25,26]</sup>,导致监控节点能耗较高。针对这一问题,Casares 等人提出一种基于运动速度自适应的能耗优化方法,在使用视频传感节点进行多目标追踪时,能够以目标的移动速度为依据制定视频采样频率,采样完成后休眠摄像头和处理器,从而达到减少节点能耗的目的<sup>[27]</sup>。台湾大学的 Chien 等人为多重背景下的视频分割对象提出一种合适的阈值决策算法,对分析复杂场景下的目标追踪问题具有较好效果<sup>[28]</sup>。文献[29]使用几何约束的分布式算法来进行多目标的探测、跟踪和识别,能够提高监控节点的利用率。文献[30]建立了一种基于动态联盟机制的协同任务分配的分布式约束满足模型,并采用分布式随机算法求解满足约束条件的动态联盟集合,实现多动态联盟间的协同,有效地解决了多目标追踪中多个动态联盟间的资源竞争问题,能够有效降低系统的能耗。

#### (3) 选择合适的加密方式

基于合适的加密方式以降低能耗的方法,是指在研究视频传感网络的视频流加密过程的基础上,选择一种合适的加密方式,通过减少加密所造成的额外开销来降低视频传输过程中的能耗的方法。例如基于信道意识的选择性加密方法<sup>[31]</sup>,在减少加密额外开销的同时提高视频质量,尤其适用于具有相对较高的比特误码率的信道中。文献[32]提出一种混沌视频加密算法,将 Lorenz 系统和双耦合 Logistic 映射所产生的混沌序列以一种特定的方式产生复合混沌序列,通过异或操作实现了对多媒体视频流 AVI 文件加密,安全性高,复杂度适中。文献[33]针对 H.264 视频编码结构的特点,提出一种基于数据分割模式的视频流选择加密策略,使得加密的数据量大大减少,降低了传输成本。文献[34]提出一种分层加密的方法,根据密钥管理协议,采用合适的熵编码对分级视频进行选择加密,实现在不同的视频质量层次上降低能耗。

#### (4) 调整处理器电压

在大多数无线传感节点上,节点的工作负荷(workload)是随时间变化的,并不需要微处理器所有时刻都保持峰值性能,因此,可以通过对数据帧的解码工作负载进行预测<sup>[35]</sup>,动态调整处理器的工作电压(和频率等),使其刚好满足当时的运行需求,从而在性能和能耗之间取得平衡。如:文献[36]通过分析无线传感器的设计策略,提出一种节点适时休眠的降低电压的方法,考虑在合适的时间段使节点休眠,降低系统处理器的电压,减少电能消耗;文献[37]通过分析 MPEG 编码中不同类型视频帧与场景变化的关系,综合考虑视频传感节点所收到的视频帧类型、队列状态和无线信道状态建立马尔可夫决策模型,预先判断监控场景是否改变,再使用动态电压分配法调整处理器电压,实现能耗优化;文献[38]则在动态电压调节(DVS)的基础上考虑增加节点缓冲器长度或降低节点溢出概率,可以进一步节省能耗。

### 2.3 应用分析

对于有源的视频监控节点,上述方法在一定程度上能够提高视频质量,但是当前的这些研究并未直接考虑节点的能耗问题,而在实际应用中,有时候为了降低能耗,甚至不惜牺牲节点的性能和视频的质量。由于云视频监控系统的监控节点具有数量众多、大规模分布等特点,而且用户对于视频质量的要求并不一致,导致监控节点的视频采集和传输方式并不单一,因此,这些提高视频质量的方法并不能完全有效的适用于云监控系统中。

对于无源的视频监控节点:

- (1) 在延长视频的网络生存时间的研究上,当前国内外有许多成果和方法值得借鉴,但缺陷在于:这些方法大都仅考虑了传感网络的静态拓扑结构,且节点数目为已知;虽然有些考虑动态拓扑的方法,如焦贤龙等人提出的网络生存时间最优的广播算法 LONG<sup>[39]</sup>等,也主要用于移动自组网中的广播操作;
- (2) 多目标追踪问题中的能耗优化方法主要研究多目标追踪时节点的能耗,侧重于减少监控节点运行目标追踪等复杂算法时的能耗,在局部能耗上有一定的优化效果,并未考虑传输过程的能耗;
- (3) 通过选择合适的加密方式以降低能耗的方法降低加密视频流的复杂度,适用于节约传输过程中的成本,虽然能够一定程度上降低能耗,却难以作为一般化的方法用于云视频监控节点中;

(4) 调整处理器电压的方法虽然可以减少节点的空闲能耗,提高处理器利用率,但其监控节点需要在线求解其动态规划、实时需求等复杂算法,对于采集端的性能要求较高,且仅适用于无线网络。

因此,这些应用于无源场合的监控节点能耗优化方法很难适应云监控环境下节点的大规模部署与动态变化情况,直接应用于云监控节点时存在较大的局限性。

### 3 物理节点的能耗优化方法

由于云视频监控系统的服务模式,当前并没有直接针对云监控物理节点的能耗优化方法,因此,可以从传统云计算的物理节点的角度来分析云视频监控系统物理节点的能耗优化研究。根据现有的计算节点的两种能耗模型——比例模型和两段模型,可以将物理节点的能耗优化方法分为基于比例模型的方法和基于两段模型的方法两大类。本节下面将从比例模型、两段模型两个方面对物理节点的能耗优化方法进行阐述,并进行比较和分析,指出了这些方法适用于云视频监控系统时所存在的问题。

#### 3.1 基于比例模型

比例模型假设节点能耗和设备(CPU、磁盘、交换机等)的利用率成正比例关系<sup>[40]</sup>,忽略设备空闲时的能耗。基于比例模型的物理节点能耗优化方法主要有:

##### (1) 调整频率和电压

动态频率和电压调整的方法<sup>[41,42]</sup>根据负载的变化情况动态调整 CPU 频率和电压,即:在设备运行时,监测处理器的高速缓存缺失率、队列占用率等特定指标,然后与相应的阈值相比较,通过合适的算法得出比较结果,据此调整 CPU 的频率和电压以适应设备当前运转状态。类似的,文献[43]在对服务器进行功耗监控的基础上提出一种基于最佳利用率的功率控制策略,将当前 CPU 利用率与预设的利用率范围进行比较,调整 CPU 频率,达到节省功耗的目的。文献[44]通过分析实时系统数据中心实时事务基于 DVS 的能耗数学模型,结合事务执行时间与处理器频率的关系,推导一种仅依赖于服务器静态特征参数的处理器能效最优初始执行频率的计算方法,实例数据的计算结果表明,该方法比单一使用最大处理器频率可以节省 30%左右的能耗。

##### (2) 调整磁盘转速

由于磁盘的能耗主要来源于磁盘的电机,与转速的平方成正比<sup>[45]</sup>,当磁盘在执行高速的数据存取访问时,消耗的电能远远高于低速或空闲状态时的能耗。磁盘动态转速(dynamic rotations per minute,简称 DPRM)调整策略可以使得磁盘可以在不同的访问频率下以不同的转速运转,从而在满足性能要求的同时尽可能地降低磁盘的能耗<sup>[46]</sup>。又如文献[47]提出的一种磁盘转速动态调整方法,研究固态硬盘的管理方式,使磁盘能够在不同的负载下按照不同的转速运行,实现能耗和设备性能成一定的比例,进而降低电能消耗。

#### 3.2 基于两段模型

两段模型是指计算机的能耗由固定能耗和可变能耗两部分组成。固定能耗包括风扇、机械驱动、二极管等一些只要开机就会运行的设备产生的能耗;可变能耗指随着 CPU、磁盘、虚拟机负载等运行任务的变化而变化的能耗。两段模型认为:计算机空闲的能耗不可忽略,没有负载的节点应该挂起或者关闭以实现节能<sup>[48]</sup>。基于两段模型的能耗优化方法主要可以分为以下几种:

##### (1) 虚拟机优化部署

虚拟机优化部署的节能方法是指在虚拟机接入主机服务器之前,通过对后续任务的预测等手段选择一定的部署策略,将虚拟机部署于合适的宿主机上,减少后续虚拟机的迁移,从而降低能耗。虚拟机的部署是一个复杂的问题,部署过程所支持的软件系统形式多样,系统结构各不相同,部署策略具有多样性。传统虚拟机部署机制通常单一地依据宿主机当前的 CPU 状况来选择目标宿主机,容易引起负载不均衡、资源浪费等问题,可以通过建立宿主机自动选择模型对宿主机后续负载状况进行预测,估算虚拟机的资源消耗,进而自动合理部署虚拟机<sup>[49]</sup>。由于主机服务器的故障会影响节点上所有虚拟机的运行,造成不必要的成本损失,文献[50]提出使用冗余配置虚拟机的方法,根据负载任务所需的性能评估所需的最少虚拟机数量,然后决策出一个最优的虚拟机部署

方案,可以将任意  $k$  个主机服务器故障所造成的影响最小化.而文献[51]提出的一种基于网络的虚拟机部署策略,能使虚拟机之间的数据传输时间最小化,从而降低系统能耗.文献[52]提出一种基于多属性层次分析的虚拟机部署方法,将虚拟机按照资源的需求特点进行分类,对其重要程度进行量化,根据各个服务器的预测评价结果进行最佳部署,降低了整体损耗.

### (2) 虚拟机动态迁移

虚拟机动态迁移是一种典型的基于两段模型的方法,将处在不同物理节点上的虚拟机进行聚集,从而直接关停或休眠已迁空的物理节点,实现节能.虚拟机的动态迁移问题和虚拟机的优化部署问题类似,可被抽象为如何确定虚拟机到节点映射的装箱问题,属于一类 NP-hard 问题,得到了广泛研究<sup>[53-55]</sup>.近几年来,关于虚拟机迁移的研究已经愈发的深入,2011 年,Murtazaev 等人提出一种服务器整合算法,能够较大幅度地减少使用的服务器的总数量和迁移的次数<sup>[56]</sup>.由于许多虚拟机在线(实时)迁移机制存在内存迭代收敛、迁移数据冗余以及客户操作系统不透明等问题,文献[57]结合内存推送复制以及按需复制两种方式,提出一种基于内存混合复制方式的虚拟机在线迁移机制,以实现虚拟机运行状态的快速迁移,能够高效地支持虚拟化环境中低开销、低延时的虚拟机在线迁移,降低了迁移过程中的同步数据量,减少了迁移本身对物理资源的占用.2012 年,针对目前云环境资源调度采用静态负载均衡策略易导致资源浪费的问题,文献[58]提出一种双限定值的虚拟机动态迁移的调度策略,该策略将当前负载状况与负载过重或过轻时的两个限定值比较,选择介于二者之间能耗较低的虚拟机迁移至目标节点,能够有效减少迁移次数,降低虚拟机迁移能耗.文献[59]提出一种基于服务器负荷和性能综合考量的虚拟机迁移算法,相比传统迁移方法,在静态虚拟机负载和动态虚拟机负载下,分别能够降低 20.8%和 22.0%的系统能耗.2014 年,文献[60]研究了一种将物理节点负载与虚拟机迁移损耗评估、多次触发控制、目标节点定位三者有机结合的虚拟机动态迁移技术,能够较大程度上减少迁移次数和虚拟机的开启数量.类似地,还有中国科学院计算技术研究所的研究小组提出虚拟机快速全系统在线迁移方法,可以减少 50%的迁移时间和 21.68%的停机时间<sup>[61]</sup>;文献[62]设计一种基于运行时间的虚拟机集群映射框架,并通过启发式算法等来探讨集群的能耗最优化,然后实时更新虚拟机配置策略等.

### (3) 任务接入和调度

负载(任务)接入和调度的方法是指通过对待接入的任务进行调度或将虚拟机中的任务迁移到其他虚拟机中,实现资源的整合,减少虚拟机的数量<sup>[63,64]</sup>,从而间接地达到减少物理节点数目、降低能耗的目的.文献[65]用排队模型对云计算系统进行建模,分析系统的平均响应时间和平均功率,建立能耗模型,然后设计基于大服务强度和小执行能耗的任务调度策略,并采用一种最小期望执行能耗的调度算法,在保证执行性能的前提下,可大幅降低云计算系统的能耗开销.文献[66]设计了一种多虚拟机协同计算任务的分发部署及运行框架,将负载任务分解成子任务,通过对子任务进行功能特征分析,然后对任务进行合理的接入和调度,能够提高任务的分发部署速度、系统吞吐量、资源利用率、任务的加速比和系统的运行效率等,进而降低了系统能耗;文献[67]提出了一种基于弹性云的负载均衡方法,构造负载均衡模型框架,建立模型,通过对虚拟机负载状况进行实时量化评估的结果对虚拟机进行排序,将任务分配给负载量最小的虚拟机;通过对虚拟机集群资源利用率的量化评估结果对虚拟机集群进行回收和扩展,从而在实现负载均衡的同时,有效提高了资源利用率,降低了能耗.文献[68]设计了一种优先调度 I/O 任务的方法,在混合负载环境下能提高系统效率,减少负载失衡.文献[69]提出了一种云计算环境下基于任务优先级的在线调度算法,将错过接入时间期限的任务迁移到其他虚拟机上,提升了整个系统的性能和效率.

## 3.3 应用分析

基于比例模型的能耗优化方法通过调整 CPU 频率、电压或者磁盘转速等,降低系统工作时的能耗,但由于 CPU 的能耗在整个计算机的能耗中只占 25%<sup>[70]</sup>,而计算机闲置状态的能耗仍达到其峰值能耗的 50%<sup>[12]</sup>,因此这些方法的节能空间较为有限.文献[71]提出的融合静态队列分析和动态反馈控制的在线调整方法,根据静态的预测以及定期的负载反馈调整服务器配置策略,虽然能够提高服务器的利用率,但是需要持续频繁调节物理节点硬件设备,代价较高.通过分析可以发现:在云监控系统中,由于视频监控任务一般需要在虚拟机上持续运行,



并且进行密集的网络通信和磁盘读写操作,因此,基于比例模型的方法难以有效地降低系统能耗。

对于两段模型的物理节点能耗优化:

- (1) 在接入主机服务器之前选取合适的虚拟机部署策略的方法,能够减少虚拟机的迁移,实现一定的能耗优化,但是虚拟机部署策略本身的复杂性,导致其并不能有效地适用于拥有数目庞大和高频率接入(接出)的监控、浏览任务的云视频监控系统中;
- (2) 虚拟机动态迁移的方法试图通过关停或休眠已迁空的物理节点实现节能,但由于视频监控对于数据实时性和可靠性要求较高,在进行虚拟机动态迁移时很难确保各任务的连续性和实时性,而且迁移过程中的通信成本和能耗成本较高,什么时候迁移哪些虚拟机到什么地方等,也都是目前正在研究而尚未解决的问题<sup>[72-74]</sup>,故应尽量避免使用虚拟机动态迁移;
- (3) 负载(任务)接入和调度的方法在任务被接入前,通过合理调度,将其接入合适的虚拟机,减少了创建虚拟机的数量,避免了虚拟机的迁移,在较大程度上降低了能耗,但任务的接入或迁移需要确定目标虚拟机是否有能力接收该任务,这与任务的类型和虚拟机接受该类型任务的能力都有很大关系。

由于当前国内外对于虚拟机接入能力的评价并没有统一的方法和标准,如文献[75]通过向所有虚拟机预加载任务后,使用各虚拟机中最大逻辑时间最小的作为接入目标;文献[76]建立虚拟机存储能力模型,实现对于 IO 密集型任务的接入调度;文献[77]建立一种虚拟机电能消耗软测量模型等,因此,当前这些基于任务接入和调度的方法没有针对性地考虑云视频监控系统的任务和虚拟机特性,难以直接适用于云视频监控中。

## 4 存储节点的能耗优化方法

云计算数据中心存储节点的能耗研究一直是近几年来比较热门的问题,根据能耗优化的出发点和优化层次的不同,研究方法主要分为两大类:基于硬件的能耗优化方法和基于软件的能耗优化方法,本节下面分别从硬件和软件两个方面综述了当前国内外针对存储节点的能耗优化方法,通过比较分析,指出了各方法的优势和不足之处。

### 4.1 基于硬件

基于硬件的能耗优化方法是指在保证存储性能和容量的情况下,通过使用低能耗存储设备或低能耗服务器构架等,从硬件的角度实现存储节点的能耗降低。

#### (1) 使用高性能存储设备

近年来,以机械磁盘为主的传统存储设备性能提升缓慢,而支持随机访问的大容量闪存硬盘却发展迅速,闪存硬盘没有机械部件,不需要寻道时间,数据访问速度快、体积小、功耗低,在数据中心使用低能耗闪存,在保证性能的情况下,能够有效降低存储节点的能耗<sup>[78,79]</sup>。文献[80]针对 NAND 闪存不能在本地进行数据更新操作导致数据合并时消耗大量额外的能量的问题,提出一种简单有效的基于页组地址映射的闪存转换层方案,在垃圾回收时,将具有最多无效数据页的物理块回收并擦除,能够减少 18% 以上的读、写和擦除操作所消耗的能量。类似的基于硬件设备降低存储节点能耗的方法还有,通过使用变速率磁盘<sup>[46]</sup>减少传统磁盘维持高速运转时的电能,在不同速率下减轻周期性扰动等。

#### (2) 使用低能耗服务器构架

低能耗的服务器构架通过使用低能耗设备和相应的存储模式,也能够整体上降低存储系统的能耗。如:

- Lim 等人<sup>[81]</sup>使用低能耗机器构成大规模数据中心,通过内存共享和基于闪存的磁盘高速缓存,提出一种专为数据中心计算环境而设计的服务器机架结构,在相同的服务能力下,降低了存储能耗;
- 北京理工大学的刘靖宇等人<sup>[82]</sup>提出一种由 SSD 固态硬盘与普通磁盘组成的混合 S-RAID 结构:将包括超级块在内的少量随机读写数据放在由 SSD 组成的 RAID1 中,将连续数据放在由普通磁盘组成的 S-RAID 中;S-RAID 对磁盘分组,连续数据访问模式下,只有一个组处于活动状态,关闭处于空闲状态的磁盘组。在仅增加少量成本的前提下,提高了存储系统的节能效果,尤其适用于以连续数据访问为主要特征的应用环境,实验结果表明:由 12 块普通磁盘和两块 SSD 固态硬盘组成的混合 S-RAID 5 与同级别

RAID 5 相比,能耗仅为 RAID 5 的 28%,效果明显。

## 4.2 基于软件

基于软件的能耗优化方法是指通过一定的软件策略对数据进行合理的存储和管理,使部分不提供数据访问和存储的节点进入低能耗模式或者被关闭,进而减少存储节点的电能消耗的方法。基于软件的存储节点能耗优化方法主要分为以下几类:

### (1) 静态数据放置

基于静态数据放置的存储管理方法根据某一放置策略将数据在各个存储节点上进行分布存储,且一般不改变分布位置,在提供一定容错性的前提下,利用系统中的冗余磁盘,使得部分时间内某些节点不提供数据访问和存储服务,从而关闭或者挂起这些节点以实现节能<sup>[83-86]</sup>。

典型的基于静态数据放置的数据存储能耗优化方法,如斯坦福大学的 Leverich 等人<sup>[83]</sup>提出的通过改善副本放置策略的方法,关闭部分空闲节点,提高了 Hadoop 的能效,能够带来 9%~50%的能耗优化。类似的,华南理工大学的林伟伟<sup>[87]</sup>提出一种改进的 Hadoop 数据放置策略,根据结点网络距离与数据负载计算每个结点的调度评价价值,据此选择最佳的远程数据副本放置结点,可以改进数据放置的负载均衡,减少数据副本放置的时间,进而降低能耗。文献[84]把原始和冗余数据分开存放,将对数据的访问集中到原始数据所在的存储节点上,通过关闭冗余节点来实现节能。刘少伟等人<sup>[88]</sup>通过分析科学工作流数据集之间的依赖关系、数据集和数据中心之间的相关度以及任务和数据中心之间的相关度,将关系紧密型数据集尽可能放置到同一个数据中心,极大地减少了数据中心间的数据移动量,节省了费用。

### (2) 动态数据迁移

基于动态数据迁移的存储管理方法是根据数据访问模式或频度动态调整数据存放的位置,把访问频度高的数据迁移到缓存或者部分节点上,使得其余节点在一定时间内无访问请求,并使其进入低能耗状态来实现节能的<sup>[89-92]</sup>。

文献[89]最早提出了一种将磁盘中具有较高访问率的数据迁入低能耗的缓存,再将低访问率的数据集中存储,从而关闭部分磁盘进行节能的方法;接着,文献[93]提出一种具有在线能耗意识的缓存替换算法,针对数据读取操作进行优化,将近期频繁读取的数据预取到内存中以减少对磁盘的数据访问频率,使原磁盘进入低能耗模式,进而节省能耗。但是这两种方法的性能依赖于访问的缓存命中率,且受到缓存容量的限制,节能效果非常有限。后来的学者对动态数据放置的方法进行了大量研究,如:文献[90]通过数据迁移将节点按照负载分布进行排序,使得具有较低数据访问负载的节点具有较高的休眠或挂起概率;而文献[91]的研究表明:该方法影响系统的服务性能,迁移代价过高,不适用于流媒体的存储,并针对视频点播系统提出一种基于固定节点的数据迁移方法,将存储节点按照访问频度分为热点和冰点两种固定类型,对冰点类型使用节能策略,仅在点播访问较空闲的阶段实施数据分类和迁移,具有更低的迁移代价;文献[94]提出一种基于数据分级存储的数据迁移方法,将逻辑卷划分为若干子卷,对于子卷判别出热点数据并根据数据访问的热度变化,将热点数据从性能比较低的磁盘迁移到高性能的固态硬盘,可适当降低能耗;在此基础上,文献[95]进一步提出一种热点数据实时迁移算法,提高了数据访问请求的响应时间,节约了硬件配置成本。

近年来,随着大数据时代的到来<sup>[96]</sup>,人们对数据迁移算法的研究更加深入,且大都针对某一特定类型的数据展开研究<sup>[97]</sup>,根据数据实际特性,提取相关决策因素进行实时迁移。典型案例如 2014 年,上海海洋大学信息学院的黄冬梅等人<sup>[98]</sup>给出了海洋大数据的生命周期,将海洋数据的敏感度、数据访问频率、数据大小、数据时间长度等因素作为迁移因子,兼顾考虑数据存储容量、海洋数据本身的属性特征和数据访问过程中的动态变化等,提出一种混合云存储中海洋大数据的迁移算法,在保证数据访问速度的同时,能够极大地降低数据的管理成本。

## 4.3 应用分析

基于硬件的能耗优化方法无论是使用高性能设备还是低能耗服务构架,其效果好坏都依赖于所使用的存储设备。优点是在:单个存储节点上能够有效降低存储能耗,数据存储,不需要复杂的后续管理,适用于新型的数

据中心,节能效果较好;不足之处是:如果简单利用这些高性能存储设备,如闪存固态硬盘等来替换传统磁盘,也不能使得软件系统对闪存的特性得到充分利用<sup>[9]</sup>,并且这些使用高性能、低能耗存储设备的方法需要较高的硬件成本,目前仍没有形成规模化的商业应用,因此应用于拥有众多存储节点的云视频数据中心时,所需的成本代价太高。

基于软件的能耗优化方法:

- (1) 静态数据放置的方法,其能耗优化效果的好坏主要取决于数据的分类放置策略是否合适.优点在于后续阶段不需要进行数据迁移,缺点是灵活性差,数据进入系统时不合理地放置策略,易导致结点负载不均衡、利用率低下等问题.在云视频监控系统中,用户通过浏览端对监控视频历史数据的访问,根据其需要或喜好往往呈现出较大的随机性,使得数据被访问的时间和频度呈现较大差异,低频数据存储的电能利用率较低.使用基于静态数据放置的存储管理方法对视频数据进行合理分类并集中存储,使得一类数据在一定时间内不提供访问服务,从而休眠或关闭该存储节点,可实现节能.但是如何对数据进行分类是问题的关键,当前并没有适用于云监控的分类方法;
- (2) 基于动态数据迁移的方法可以动态调整数据的布局,灵活性高.缺点在于内存空间一般无法满足缓存需要,而且数据迁移的过程会占用大量的带宽等资源,容易影响服务质量,迁移代价较大.文献[9]所提的方法虽然具有较低的迁移代价,但其仅考虑了视频浏览(点播)的应用场景,未将监控与浏览应用结合起来进行考虑,也难以直接用于云视频监控系统中.

如果在静态数据分类放置的基础上分析每一类数据的用户访问特征,把具有相同特征的数据进行合理迁移,进一步集中存储,可以更大限度地提高节能效果.此时,迁移数据如何定位和迁移代价是首要考虑的问题,但是当前也没有适用于云视频监控的有效数据定位迁移方法.

## 5 未来研究展望

由于云视频监控系统是一种全新的服务模式,当前的研究正处于起步阶段,还存在许多尚未解决的问题,尤其是在云视频监控系统的能耗优化方面,还没有一种普适的、有效的方法.因此,综合云视频监控系统能耗优化所面临的挑战、研究热点以及应用前景,结合我们目前的研究工作,认为未来云视频监控系统能耗的研究可以从以下几个方面展开:

### (1) 保证视频质量的监控节点一般化节能方法

在监控节点层次,由于云视频监控系统具有超大规模分布、高扩展性等特点,当前应用于有源和无源的监控节点能耗优化方法主要注重于提高视频质量或侧重于多目标追踪等特殊应用场合的能耗优化,且对于监控节点的性能要求较高,导致通用性和普适性不足,很难适应云监控环境下节点的大规模部署与动态变化情况,直接应用于云监控节点时存在较大的局限性.因此,需要针对云监控节点的处理能力、编码方式、网络接入方式异构以及大规模分布等特点,研究一种适用于典型云视频监控系统的一般化节能方法.由于当前人们对监控视频的清晰度和流畅性要求较高,监控节点的节能方法首先必须要保证监控视频的质量;其次,考虑到监控终端具有数量众多、分布广泛等特点,监控节点的品牌和规格等难以统一,研究的方法应对具有一般的采集、编码和传输能力的所有监控节点都适用;另外,要能支持有源或无源供电、有线或无线的入网方式、典型传输层协议、常用的编码类型和编码标准等,且与网络的拓扑分布无关,能够适应监控终端在处理能力、编码、网络接入和分布方式等方面的异构性.认为具体研究可以从基于数据驱动的视频质量与综合能耗模型、兼顾视频质量和综合能耗的多目标优化方法、监控节点低能耗部署策略等3个方面展开.

### (2) 基于虚拟机接入能力智能评价的物理节点节能方法

在物理节点层次,由于综合了传统视频监控和云计算的双重特性,云视频监控系统的虚拟机任务通常兼具I/O密集、CPU密集和通信密集等特性;且大型云视频监控系统拥有数量众多的虚拟机和宿主机,规模庞大,各个虚拟机上频繁的任务接入和接出操作使得系统出现崩溃、负载失衡、性能下降等问题的概率增大,系统的优化调度变得更加困难.因此,现有的基于比例模型和虚拟机优化部署、动态迁移等方法并不适用于云视频监控

过程.为此,可以从更为合理的任务接入调度的思想出发,针对云视频监控过程的特点,研究一种基于虚拟机接入能力智能评价的节能方法,具体研究可以从基于专家知识的虚拟机接入能力智能评价模型、基于虚拟机超载系数的评价模型动态更新方法、面向负载均衡的虚拟机任务接入调度策略这3个方面展开.

### (3) 融合静态分类与动态迁移的存储节点节能方法

在存储节点层次,现有的基于硬件和软件的方法都能实现一定程度的节能,但又有各自的优缺点;而且这些方法并未针对性考虑云视频监控服务的应用场景及其所具有的数据流量高、存储空间大和用户访问随机性强等特点.考虑到使用高性能硬件设备需要较高的成本,不适合大规模应用,在研究云视频监控系统存储节点能耗优化工作时,可以从基于软件的静态数据分类和动态迁移方向着手,设计一种融合静态分类与动态迁移的方法.由于当前还没有适用于云监控的静态数据分类方法,而云视频存储节点存储海量的监控视频,且通常情况下多数监控视频都属于历史数据,处于不被访问状态,可以研究结合 SLA 中的用户访问需求,针对云监控服务的特点,根据用户对视频数据的访问频度将视频数据进行静态分类、分级存储;在此基础上,分析每一类数据的用户访问特征,研究一种适用于云视频监控系统的的核心数据定位迁移方法,把具有相同特征的数据进行合理迁移,进一步集中存储,在最大限度上实现节能.当然,迁移过程中如何降低数据的迁移代价,也是必须研究的地方.

### (4) 云视频监控系统实验平台

云视频监控系统侧重于提供可靠、安全、容错、可持续、可扩展的基础设施,并且提供能够容纳基于互联网的应用服务.由于云基础设施上的应用有着不同的组成、配置和部署需求,应用和服务模型的负载、能耗以及系统规模都在不断地发生变化,在进行能耗优化方法探究时,就必须面对这些动态变化以及对模型的调度、分配策略的性能进行量化等问题.为此,需要搭建一个有效的实验平台对云视频监控系统的各种能耗优化方法进行测试、比对、分析,并验证其有效性.由于当前并没有能够进行云视频监控系统能耗研究的实验平台,且直接搭建基础设施、软硬件实物平台等进行云监控系统的能耗优化实验需要较大的成本,容易带来不必要的损失.为降低直接构建实物实验平台所需的较高代价,可以研究先开发一个全面的仿真实验平台,然后再在针对系统特性的基础上搭建一个典型的实物平台:通过在仿真平台上对系统的各种节能策略进行初步测试,选出最佳策略部署于实物平台,进一步深入验证.

## 6 总 结

本文首先分析了云视频监控系统出现的背景和当前在其能耗优化领域所面临的挑战.通过对当前国内外云视频监控系统相关研究的调研,简要介绍了系统的运营模式,然后描述了一个典型云视频监控系统的体系结构,将系统分为监控终端、监控中心和客户浏览端这3个部分,并分析了各个部分的组成和主要功能.针对系统体系结构3个部分的各自特点和实际应用价值考虑,将云视频监控系统的能耗研究分为监控节点、物理节点(计算节点)和存储节点等3个层次,并在各个层面上结合系统特性和运行过程,对系统的能耗来源和存在的问题进行了详细的分析.

随后,分别从监控节点、物理节点和存储节点这3个层面系统阐述了云视频监控系统的能耗优化研究现状,对各个层面上现有的能耗优化方法进行了分类和应用分析:

- 在监控节点层面,结合传统视频监控系统和无线传感器网络的相关研究,详细综述了当前应用于监控节点的能耗优化方法,将其分为基于有源和基于无源两大类,对每一类方法的应用特性进行了分析,指出现有的相关研究存在侧重于提高视频质量或应用特殊场合,对节点性能要求较高,导致通用性和普适性不足等问题;
- 在物理节点层面,根据现有的计算节点的两种能耗模型——比例模型和两段模型,将物理节点的能耗优化方法分为基于比例模型和基于两端模型两大类,并进一步进行了细化分类阐述和详细应用分析.由于现有的基于比例模型的相关方法节能效果较为有限,重点研究了基于两段模型的方法,从虚拟机的优化部署、动态迁移和任务接入、调度这3个方面深入分析了当前方法应用于云视频监控系统时存在的局限性,如缺乏合适的虚拟机控制接入策略、无法保证任务的实时性和连续性等;

- 在存储节点层面,从优化数据中心能耗的角度出发,在基于硬件节能和基于软件节能两个方面对当前的存储节点能耗优化方法进行了综合阐述和详细分析,对各种方法进行了应用比较和优缺点分析,并指出基于硬件节能的方法成本太高,而基于软件节能的方法也存在数据迁移代价较大、没有合理的静态数据分类方法等问题,难以直接应用在云视频监控系统中。

综合云视频监控系統能耗优化所面临的挑战、研究热点以及应用前景,结合文中分析指出的现有的节能方法所存在的问题,提出了未来的研究方向和重点,也是本课题组下一步要具体研究的内容:在监控节点层次,需要一种保证视频质量的一般化监控节点能耗优化方法;在物理节点层次,可以研究一种基于虚拟机接入能力智能评价的节能方法;在存储节点层次,考虑一种融合静态分类与动态迁移的存储节点节能方法;另外,为验证方法的有效性,面向云视频监控系统的仿真与实物实验平台也应该成为今后的研究重点。

## References:

- [1] <http://www.cloudsurveillance.com>
- [2] <http://enterprise.huawei.com/cn/solutions/multimediasolu/uc/hw-116305.htm>
- [3] <http://www.aspice.eu>
- [4] <http://seegle.com.cn/>
- [5] Tsai YH. The cloud streaming service migration in cloud video storage system. In: Proc. of the 27th IEEE Advanced Information Networking and Applications Workshops. 2013. 672–677. [doi: 10.1109/WAINA.2013.146]
- [6] Xiong YH, Wan SY, He Y, Su D. Design and implementation of a prototype cloud video surveillance system. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2014,18(1):40–47.
- [7] [http://www.cisco.com/web/CN/aboutcisco/news\\_info/corporate\\_news/2012/10\\_26.html](http://www.cisco.com/web/CN/aboutcisco/news_info/corporate_news/2012/10_26.html)
- [8] Cisco white paper. Cisco visual networking index: Forecast and methodology 2013–2018.
- [9] Koomey JG. Worldwide electricity used in data centers. Environmental Research Letters 3. 2008. 034008. [doi: 10.1088/1748-9326/3/3/034008]
- [10] Zhang LM, Li KQ, Zhang YQ. Green task scheduling algorithms with speeds optimization on heterogeneous cloud servers. In: Proc. of the 2010 IEEE/ACM Int'l Conf. on Green Computing and Communications. Hangzhou: IEEE, 2010. 76–80. [doi: 10.1109/GreenCom-CPSCOM.2010.70]
- [11] Brill KG. The invisible crisis in the data center: The economic meltdown of moore's law. White Paper, Uptime Institute, 2007.
- [12] Yuan H, Kuo CCJ, Ahmad I. Energy efficiency in data centers and cloud-based multimedia services: An overview and future directions. In: Proc. of the 2010 Int'l Conf. on Green Computing. Chicago: IEEE, 2010. 375–382. [doi: 10.1109/GREENCOMP.2010.5598292]
- [13] Xiong YH, Wu M, Jia WJ. Delay prediction for real-time video adaptive transmission over TCP. Journal of Multimedia, 2010,5(3): 216–223.
- [14] Xiong YH, Wu M, Jia WJ. Efficient frame schedule scheme for real-time video transmission across the Internet using TCP. Journal of Networks, 2009,4(3):216–223.
- [15] Hafeez M, Jangsher S, Khayam SA. A cross-layer architecture for motion-adaptive video transmission over MIMO channels. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications. Kyoto: IEEE, 2011. 1–5. [doi: 10.1109/icc.2011.5962868]
- [16] Bagdanov AD, Bertini M, Bimbo AD, Seidenari L. Adaptive video compression for video surveillance applications. In: Proc. of the 2011 IEEE Int'l Symp. on Multimedia. Dana Point: IEEE, 2011. 190–197. [doi: 10.1109/ISM.2011.38]
- [17] Sun LF, Li F, Zhong YZ, Yang SQ. Multiview video based virtual teleconferencing synthesizing. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(2):193–196 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3321/j.issn:0372-2112.2005.02.001]
- [18] Zou JN, Xiong HK, Li CL, Zhang RF, He ZH. Lifetime and distortion optimization with joint source/channel rate adaptation and network coding-based error control in wireless video sensor networks. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2011,60(3): 1182–1194. [doi: 10.1109/TVT.2011.2111425]

- [19] Li QQ, Liu M, Yang M, Chen GH. Load-Similar node distribution for solving energy hole problem in wireless sensor networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2011,22(3):451–465 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3944.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03944]
- [20] Jiang HF, Qian JS, Sun YJ. Virtual electrostatic field based multi-sink routing algorithm in WSN. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2011,40(2):321–326 (in Chinese with English abstract).
- [21] Zhu YH, Shen DD, Wu WD, Shen ZW, Tang YP. Dynamic routing algorithms optimizing lifetime of wireless sensor networks. *Acta Electronica Sinica*, 2009,37(5):1041–1045 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3321/j.issn:0372-2112.2009.05.024]
- [22] Tong J, Du ZG, Qian DP. Inter-Flow network coding based anycast routing protocol for multi-sink wireless sensor networks. *Journal of Computer Research and Development*, 2014,51(1):161–172 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.7544/issn1000-1239.2014.20111505]
- [23] Xia H, Jia ZP, Zhang ZY, Sha EHM. A link stability prediction-based multicast routing protocol in mobile ad hoc networks. *Chinese Journal of Computers*, 2013,36(5):926–936 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3724/SP.J.1016.2013.00926]
- [24] Wang WY, Xiang Y, Dong CK, Yang T, Tang Y. Optimizing distributed algorithm for minimum connected dominating set with Markov model. *Acta Electronica Sinica*, 2010,38(10):2441–2446 (in Chinese with English abstract).
- [25] Kim JS, Yeom DH, Joo YH. Fast and robust algorithm of tracking multiple moving objects for intelligent video surveillance systems. *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, 2011,57(3):1165–1170. [doi: 10.1109/TCE.2011.6018870]
- [26] Huang CM, Fu LC. Multitarget visual tracking based effective surveillance with cooperation of multiple active cameras. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2011,41(1):234–247. [doi: 10.1109/TSMCB.2010.2050878]
- [27] Casares M, Velipasalar S. Adaptive methodologies for energy-efficient object detection and tracking with battery-powered embedded smart cameras. *Circuits and Systems for Video Technology*, 2011,21(10):1438–1452. [doi: 10.1109/TCSVT.2011.2162762]
- [28] Chien SY, Chan WK, Tseng YH, Chen HY. Video object segmentation and tracking framework with improved threshold decision and diffusion distance. *Circuits and Systems for Video Technology*, 2013,23(6):921–934. [doi: 10.1109/TCSVT.2013.2242595]
- [29] Sankaranarayanan AC, Veeraghavan A, Chellappa R. Object detection, tracking and recognition for multiple smart cameras. *Proc. of the IEEE*, 2008,96(10):1606–1624. [doi: 10.1109/JPROC.2008.928758]
- [30] Chen JX, Yu HB, Zhang JH. Multiple targets tracking oriented collaborative task allocation scheme in wireless sensor networks. *Information and Control*, 2009,38(4):412–416 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.1002-0411.2009.04.005]
- [31] Wang W, Hempel M, Peng DM, Wang HG, Sharif H, Chen HH. On energy efficient encryption for video streaming in wireless sensor networks. *Multimedia*, 2010,12(5):417–426. [doi: 10.1109/TMM.2010.2050653]
- [32] Long M, Tan L. Real-Time video stream encryption algorithm based on complicated chaotic sequence. *Computer Engineering and Applications*, 2011,47(27):94–97 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.2011.27.026]
- [33] Li D, Wang J, Ji XY. Design of encryption terminal for H.264 video based on DaVinci platform. *Video Engineering*, 2009,33(4):33–35 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.1002-8692.2009.04.011]
- [34] Asghar MN, Ghanbari M. An efficient security system for CABAC bin-strings of H.264/SVC. *Circuits and Systems for Video Technology*, 2013,23(3):425–437. [doi: 10.1109/TCSVT.2012.2204941]
- [35] Zhou YM, Shen YL, Cao LD. Dynamic voltage and frequency scaling algorithm for H.264 decoding based on heterogeneous multicore platform. *Computer Engineering*, 2013,39(11):268–271 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.1000-3428.2013.11.060]
- [36] Fuemmeler JA, Veeravalli VV. Smart sleeping policies for energy efficient tracking in sensor networks. *Signal Processing*, 2008, 56(5):2091–2101. [doi: 10.1109/TSP.2007.912265]
- [37] Fallahi A, Hossain E. A dynamic programming approach for QoS-aware power management in wireless video sensor networks.  *Vehicular Technology*, 2009,58(2):843–854. [doi: 10.1109/TVT.2008.927714]
- [38] Zhang JW, Zhang JJ. Analysis and study of low energy dissipation on a wireless sensor node. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007,20(12):2679–2683 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2007.12.030]
- [39] Jiao XL, Wang XD, Zhou XM. A maximum network lifetime broadcast algorithm for mobile ad hoc networks. *Computer Engineering and Science*, 2011,33(1):12–19 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.1007-130X.2011.01.003]

- [40] Haggerty SD, Krioukov A, Culler D. Power optimization-a reality check. EECS at UC Berkeley: Computer Science Division, 2009. <http://www.cs.berkeley.edu/~krioukov/realityCheck.pdf>
- [41] Miyoshi A, Lefurgy C, Hensbergen EV, Rajamony R, Rajkumar R. Critical power slope: Understanding the runtime effects of frequency scaling. In: Proc. of the 16th Int'l Conf. on Supercomputing. 2002. 35–44. [doi: 10.1145/514191.514200]
- [42] Wu Q, Juang P, Martonosi M, Peh LS, Clark DW. Formal control techniques for power-performance management. IEEE Micro, 2005,25(5):52–62. [doi: 10.1109/MM.2005.87]
- [43] Lin SL, Shao ZY, Liu XC, Li L. Research and implementation of a power controlling strategy based on CPU utilization. Computer Engineering and Science, 2009,31(z1):282–285 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.1007-130X.2009.A1.080]
- [44] Chen ZH, Hu XH. An energy-efficient scheduling strategy on processors frequency determination. Computer Engineering, 2013, 39(8):292–294, 298 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.1000-3428.2013.08.065]
- [45] Yin S, Alghamdi MI, Ruan XJ, Nijim M, Tamilarasan A, Zong Z, Qin X, Yang Y. Improving energy efficiency and security for disk systems. In: Proc. of the 12th IEEE Int'l Conf. on High Performance Computing and Communications. Melbourne: IEEE, 2010. 442–449. [doi: 10.1109/HPCC.2010.26]
- [46] Gurumurthi S, Sivasubramaniam A, Kandemir M, Franke H. Reducing disk power consumption in servers with DRPM. Computer, 2003,36(12):59–66. [doi: 10.1109/MC.2003.1250884]
- [47] Song M, Kim M. Solid state disk management for reducing disk energy consumption in video servers. In: Proc. of the 9th USENIX Conf. on File and Storage Technologies. 2011. 1–2.
- [48] Meisner D, Gold BT, Wenisch TF. PowerNap: Eliminating server idle power. In: Proc. of the Int'l Conf. on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. 2009. 205–216. [doi: 10.1145/1508244.1508269]
- [49] Wen SJ, Chen JJ, Guo T. Optimized virtual machine deployment mechanism in cloud platform. Computer Engineering, 2012, 38(11):17–19 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.11.006]
- [50] Machida F, Kawato M, Maeno Y. Redundant virtual machine placement for fault-tolerant consolidated server clusters. In: Proc. of the Network Operations and Management Symp. Osaka: IEEE, 2010. 32–39. [doi: 10.1109/NOMS.2010.5488431]
- [51] Liu S, Quan G, Ren SP. On-Line preemptive scheduling of real-time services with profit and penalty. In: Proc. of the IEEE Southeastcon. Nashville: IEEE, 2011. 287–292. [doi: 10.1109/SECON.2011.5752951]
- [52] Zhuang W, Gui XL, Lin JC, Wang G, Dai M. Deployment and scheduling of virtual machine in cloud computing: An “AHP” approach. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013,47(2):28–32, 130 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.7652/xjtuxb201302005]
- [53] Jang JW, Jeon MJ, Kim HS, Maeng S. Energy reduction in consolidated servers through memory-aware virtual machine scheduling. Computers, 2011,60(4):552–564. [doi: 10.1109/TC.2010.82]
- [54] Raj VKM, Shriram R. Power aware provisioning in cloud computing environment. In: Proc. of the Int'l Conf. on Communication and Electrical Technology. 2011. 6–11. [doi: 10.1109/ICCET.2011.5762447]
- [55] Van HN, Tran FD, Menaud JM. Performance and power management for cloud infrastructures. In: Proc. of the 3rd IEEE Int'l Conf. on Cloud Computing. Miami: IEEE, 2010. 329–336. [doi: 10.1109/CLOUD.2010.25]
- [56] Murtazaev A, Oh S. Sercon: Server consolidation algorithm using live migration of virtual machines for green computing. IETE Technical Review, 2011,28(3):212–231.
- [57] Chen Y, Huai JP, Hu CM. Live migration of virtual machines based on hybrid memory copy approach. Chinese Journal of Computers, 2011,34(12):2278–2291 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3724/SP.J.1016.2011.02278]
- [58] Fang YQ, Tang DH, Ge JW. Research on schedule strategy based on dynamic migration of virtual machines in cloud environment. Microelectronics & Computer, 2012,29(4):45–48 (in Chinese with English abstract).
- [59] Al Shayehi MH, Samrajesh MD. An energy-aware virtual machine migration algorithm. In: Proc. of the 2012 Int'l Conf. on Advances in Computing and Communications. Cochin: IEEE, 2012. 242–246. [doi: 10.1109/ICACC.2012.55]
- [60] Gong SW, Ai HJ, Yuan YM. Research of cloud resource dynamic scheduling strategy on migration technology. Computer Engineering and Applications, 2014,50(5):51–54,78 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.1307-0422]
- [61] Zhang X, Huo ZG, Ma J, Meng D. Fast and live whole-system migration of virtual machines. Journal of Computer Research and Development, 2012,49(3):661–668 (in Chinese with English abstract).

- [62] Liao X, Jin H, Liu H. Towards a green cluster through dynamic remapping of virtual machines. *Future Generations Computer Systems*, 2012,28(2):469–477. [doi: 10.1016/j.future.2011.04.013]
- [63] Smith JE, Nair R. The architecture of virtual machines. *Computer*, 2005,38(5):32–38. [doi: 10.1109/MC.2005.173]
- [64] Marco C, Ivan CB. Virtual machines for distributed real-time systems. *Computer Standards & Interfaces*, 2009,31(1):30–39. [doi: 10.1016/j.csi.2007.10.010]
- [65] Tan YM, Zeng GS, Wang W. Policy of energy optimal management for cloud computing platform with stochastic tasks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2012,23(2):266–278 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4143.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04143]
- [66] Chen XJ, Zhang J, Li JH. Framework for collaborative computing task distribution, deployment and execution over multiple virtual machines. *Journal of Applied Sciences*, 2011,29(5):516–528 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.0255-8297.2011.05.013]
- [67] Xu XK, Wang ZJ, Ye F, Yue ZY. A load balancing method based on elastic cloud computing. *Microelectronics & Computer*, 2012, 29(11):29–32 (in Chinese with English abstract).
- [68] Liu D, Cao J. Scheduling para-virtualized virtual machines based on events. *Future Generations Computer Systems*, 2013,29(5): 1130–1139. [doi: 10.1016/j.future.2012.12.014]
- [69] Santhosh R, Ravichandran T. Pre-Emptive scheduling of on-line real time services with task migration for cloud computing. In: *Proc. of the 2013 Int'l Conf. on Pattern Recognition, Informatics and Mobile Engineering*. Salem: IEEE, 2013. 271–276. [doi: 10.1109/ICPRIME.2013.6496485]
- [70] Lefurgy C, Wang XR, Ware M. Server-Level power control. In: *Proc. of the 4th Int'l Conf. on Autonomic Computing (ICAC 2007)*. Jacksonville: IEEE, 2007. [doi: 10.1109/ICAC.2007.35]
- [71] Chen Y, Das A, Qin W, Sivasubramanian A, Wang Q, Gautam N. Managing server energy and operational costs in hosting centers. In: *Proc. of the Sigmetrics*. 2005. 303–314. [doi: 10.1145/1064212.1064253]
- [72] Yin B, Wang Y, Meng LM, Qiu XS. A new virtual machine migration strategy based on migration cost and communication cost for power saving in cloud. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2012,35(1):1–4 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.1007-5321.2012.01.016]
- [73] Versick D, Tavangarian D. Reducing energy consumption by load aggregation with an optimized dynamic live migration of virtual machines. In: *Proc. of the Int'l Conf. on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing*. 2010. 164–170. [doi: 10.1109/3PGCIC.2010.29]
- [74] Li Q, Hao QF, Xiao LM, Li ZJ. Adaptive management and multi-objective optimization for virtual machine placement in cloud computing. *Chinese Journal of Computers*, 2011,34(12):2253–2264 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3724/SP.J.1016.2011.02253]
- [75] Li YF, Xu XH, Wan J. Load migration-based resource scheduling mechanism in virtual machine. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2009,37(9):45–48 (in Chinese with English abstract).
- [76] Gulati A, Kumar C, Ahmad I. Modeling workloads and devices for IO load balancing in virtualized environments. *ACM Sigmetrics Performance Evaluation Review*, 2009,37(3):61–66. [doi: 10.1145/1710115.1710127]
- [77] Kansal A, Zhao F, Liu J, Kothari N, Bhattacharya AA. Virtual machine power metering and provisioning. In: *Proc. of the 1st ACM Symp. on Cloud Computing*. 2010. 39–50. [doi: 10.1145/1807128.1807136]
- [78] Li HL, Yang CL, Tseng HW. Energy-Aware flash memory management in virtual memory system. *Very Large Scale Integration Systems*, 2008,16(8):952–964. [doi: 10.1109/TVLSI.2008.2000517]
- [79] Guo YF, Li Q, Liu GM, Zhang L. Research on the NAND flash-based solid state disk. *Journal of Computer Research and Development*, 2009,46(Suppl.):328–332 (in Chinese with English abstract).
- [80] Bai S, Zhao P. GFTL: A page group mapping based energy aware flash translation layer. *Sciencepaper Online*, 2011,6(10): 716–720 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.2095-2783.2011.10.004]
- [81] Lim K, Ranganathan P, Chang J, Patel C, Mudge T, Reinhardt S. Understanding and designing new server architectures for emerging warehouse-computing environments. In: *Proc. of the 35th Symp. on Computer Architecture*. 2008. 315–326. [doi: 10.1109/ISCA.2008.37]



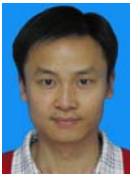
- [82] Liu JY, Zheng J, Li YZ, Sun ZZ, Wang WM, Tan YA. Hybrid S-RAID: An energy-efficient data layout for sequential data storage. *Journal of Computer Research and Development*, 2013,50(1):37–48 (in Chinese with English abstract).
- [83] Leverich J, Kozyrakis C. On the energy (in) efficiency of Hadoop clusters. *ACM Sigops Operating Systems Review*, 2010,44(1): 61–65. [doi: 10.1145/1740390.1740405]
- [84] Pinheiro E, Bianchini R, Dubnicki C. Exploiting redundancy to conserve energy in storage systems. In: *Proc. of the SIG Metrics Performance*. 2006. 15–26. [doi: 10.1145/1140277.1140281]
- [85] Wang J, Zhu HJ, Li D. Eraid: Conserving energy in conventional disk-based RAID system. *Computers*, 2008,57(3):359–374. [doi: 10.1109/TC.2007.70821]
- [86] Weddle C, Oldham M, Qian J, Wang AA, Reiher P, Kuenning G. PAR RAID: A gear-shifting power-aware RAID. *ACM Trans. on Storage*, 2007,3(3): Article No.13. [doi: 10.1145/1289720.1289721]
- [87] Lin WW. An improved data placement strategy for Hadoop. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2012,40(1):152–158 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.1000-565X.2012.01.026]
- [88] Liu SW, Kong LM, Ren KJ, Song JQ, Deng KF, Leng HZ. A two-step data placement and task scheduling strategy for optimizing scientific workflow performance on cloud computing platform. *Chinese Journal of Computers*, 2011,34(11):2121–2130 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3724/SP.J.1016.2011.02121]
- [89] Colarelli D, Grunwald D. Massive arrays of idle disks for storage archives. In: *Proc. of the ACM/IEEE Int'l Conf. on Supercomputing*. 2002. 1–11. [doi: 10.1109/SC.2002.10058]
- [90] Pinheiro E, Bianchini R. Energy conservation techniques for disk array-based servers. In: *Proc. of the ACM/IEEE Int'l Conf. on Supercomputing*. 2004. 68–78. [doi: 10.1145/1006209.1006220]
- [91] Chai Y, Du Z, Bader DA, Qin X. Efficient data migration to conserve energy in streaming media storage systems. *Parallel and Distributed Systems*, 2012,PP(99):1–13. [doi: 10.1109/TPDS.2012.63]
- [92] Yao X, Wang J. Rimac: A novel redundancy-based hierarchical cache architecture for energy efficient, high performance storage systems. In: *Proc. of the 2006 EuroSys Conf.* 2006,40(4):249–262. [doi: 10.1145/1217935.1217959]
- [93] Zhu QB, David FM, Devaraj CF, Li ZM, Zhou YY, Cao P. Reducing energy consumption of disk storage using power-aware cache management. In: *Proc. of the 10th Int'l Symp. on High Performance Computer Architecture*. 2004. 118–129. [doi: 10.1109/HPCA.2004.10022]
- [94] Zhang G, Chiu L, Liu L. Adaptive data migration in multi-tiered storage based cloud environment. In: *Proc. of the 2010 IEEE 3rd Int'l Conf. on Cloud Computing*. 2010. 148–155. [doi: 10.1109/CLOUD.2010.60]
- [95] Song LN, Dai HD, Ren Y. A learning method of hot-spot extent in multi-tiered storage medium based on huge data storage file system. *Journal of Computer Research and Development*, 2012,49(Suppl.):6–11 (in Chinese with English abstract).
- [96] Meng XF, Ci X. Big data management: Concepts, techniques and challenges. *Journal of Computer Research and Development*, 2013,50(1):146–169 (in Chinese with English abstract).
- [97] Wang YZ, Jin XL, Cheng XQ. Network big data: Present and future. *Chinese Journal of Computer*, 2013,36(6):1125–1138 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3724/SP.J.1016.2013.01125]
- [98] Huang DM, Du YL, He Q. Migration algorithm for big marine data in hybrid cloud storage. *Journal of Computer Research and Development*, 2014,51(1):199–205 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.7544/issn1000-1239.2014.20130696]
- [99] Zhang TF, Chen TZ, Wu JZ. Exploiting memory access patterns of programs for energy-efficient memory system techniques. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2014,25(2):254–266 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4537.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004537]

#### 附中文参考文献:

- [17] 孙立峰,李放,钟玉琢,杨士强.基于多视点视频的虚拟会议显示与合成.电子学报,2005,33(2):193–196. [doi: 10.3321/j.issn:0372-2112.2005.02.001]
- [19] 李巧勤,刘明,杨梅,陈贵海.负载相似节点分布解决传感器网络能量洞问题.软件学报,2011,22(3):451–465. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3944.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03944]
- [20] 江海峰,钱建生,孙彦景.WSN中基于虚拟静电场的多 sink 路由算法.中国矿业大学学报,2011,40(2):321–326.

- [21] 朱艺华,沈丹丹,吴万登,沈振伟,汤一平.无线传感器网络优化生存时间的动态路由算法.电子学报,2009,37(5):1041-1045. [doi: 10.3321/j.issn:0372-2112.2009.05.024]
- [22] 全杰,杜治高,钱德沛.基于 Inter-Flow 网络编码的多 Sink 无线传感器网络 Anycast 路由.计算机研究与发展,2014,51(1):161-172. [doi: 10.7544/issn1000-1239.2014.20111505]
- [23] 夏辉,贾智平,张志勇,Edwin H-M Sha.移动 Ad Hoc 网络中基于链路稳定性预测的组播路由协议.计算机学报,2013,36(5):926-936. [doi: 10.3724/SP.J.1016.2013.00926]
- [24] 汪文勇,向渝,董传坤,杨挺,唐勇.用马尔可夫模型优化分布式最小连通支配集算法.电子学报,2010,38(10):2441-2446.
- [30] 陈剑霞,于海斌,张建华.面向多目标追踪的无线传感器网络协同任务分配研究.信息与控制,2009,38(4):412-416. [doi: 10.3969/j.issn.1002-0411.2009.04.005]
- [32] 龙敏,谭丽.一种基于复合混沌序列的实时视频流加密算法.计算机工程与应用,2011,47(27):94-97. [doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.2011.27.026]
- [33] 李丹,王健,季晓勇.基于达芬奇平台的 H.264 视频流加密终端的设计.信息终端与显示,2009,33(4):33-35. [doi: 10.3969/j.issn.1002-8692.2009.04.011]
- [35] 周亦敏,沈云龙,曹丽东.基于异构多核平台 H.264 解码的 DVFS 算法.计算机工程,2013,39(11):268-271. [doi: 10.3969/j.issn.1000-3428.2013.11.060]
- [38] 章坚武,张季姬.无线传感器节点低功耗的研究.传感技术学报,2007,20(12):2679-2683. [doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2007.12.030]
- [39] 焦贤龙,王晓东,周兴铭.移动自组网中一种网络生存时间最优的广播算法.计算机工程与科学,2011,33(1):12-19. [doi: 10.3969/j.issn.1007-130X.2011.01.003]
- [43] 林守林,邵宗有,刘新春,李麟.一种基于 CPU 利用率的功率控制策略的研究与实现.计算机工程与科学,2009,31(z1):282-285. [doi: 10.3969/j.issn.1007-130X.2009.A1.080]
- [44] 陈专红,胡虚怀.一种确定处理器频率的节能调度策略.计算机工程,2013,39(8):292-294, 298. [doi: 10.3969/j.issn.1000-3428.2013.08.065]
- [49] 温少君,陈俊杰,郭涛.一种云平台中优化的虚拟机部署机制.计算机工程,2012,38(11):17-19. [doi: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.11.006]
- [52] 庄威,桂小林,林建材,王刚,代敏.云环境下基于多属性层次分析的虚拟机部署与调度策略.西安交通大学学报,2013,47(2):28-32, 130. [doi: 10.7652/xjtub201302005]
- [57] 陈阳,怀进鹏,胡春明.基于内存混合复制方式的虚拟机在线迁移机制.计算机学报,2011,34(12):2278-2291. [doi: 10.3724/SP.J.1016.2011.02278]
- [58] 方义秋,唐道红,葛君伟.云环境下基于虚拟机动态迁移的调度策略研究.微电子学与计算机,2012,29(4):45-48.
- [60] 龚素文,艾浩军,袁远明.基于迁移技术的云资源动态调度策略研究.计算机工程与应用,2014,50(5):51-54,78. [doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.1307-0422]
- [61] 张翔,霍志刚,马捷,孟丹.虚拟机快速全系统在线迁移.计算机研究与发展,2012,49(3):661-668.
- [65] 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.软件学报,2012,23(2):266-278. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4143.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04143]
- [66] 陈小军,张璟,李军怀.多虚拟机协同计算任务的分发部署及运行框架.应用科学学报,2011,29(5):516-528. [doi: 10.3969/j.issn.0255-8297.2011.05.013]
- [67] 徐新坤,王志坚,叶枫,岳振瑜.一个基于弹性云的负载均衡方法.微电子学与计算机,2012,29(11):29-32.
- [72] 殷波,王颖,孟洛明,邱雪松.综合迁移成本和通信成本的云计算节能策略.北京邮电大学学报,2012,35(1):1-4. [doi: 10.3969/j.issn.1007-5321.2012.01.016]
- [74] 李强,郝沁汾,肖利民,李舟军.云计算中虚拟机放置的自适应管理与多目标优化.计算机学报,2011,34(12):2253-2264. [doi: 10.3724/SP.J.1016.2011.02253]
- [75] 李运发,徐向华,万键.基于虚拟机负载迁移的资源调度机制.华中科技大学学报(自然科学版),2009,37(9):45-48.
- [79] 郭御风,李琼,刘光明,张磊.基于 NAND 闪存的固态硬盘技术研究.计算机研究与发展,2009,46(增刊):328-332.
- [80] 白石,赵鹏.GFTL:一种基于页组映射的低能耗闪存转换层.中国科技论文在线,2011,6(10):716-720. [doi: 10.3969/j.issn.2095-2783.2011.10.004]

- [82] 刘靖宇,郑军,李元章,孙志卓,王文明,谭毓安.混合 S-RAID:一种适于连续数据存储的节能数据布局.计算机研究与发展,2013,50(1):37-48.
- [87] 林伟伟.一种改进的 Hadoop 数据放置策略.华南理工大学学报(自然科学版),2012,40(1):152-158. [doi: 10.3969/j.issn.1000-565X.2012.01.026]
- [88] 刘少伟,孔令梅,任开军,宋君强,邓科峰,冷洪泽.云环境下优化科学 workflow 执行性能的两阶段数据放置与任务调度策略.计算机学报,2011,34(11):2121-2130. [doi: 10.3724/SP.J.1016.2011.02121]
- [95] 宋丽娜,戴华东,任怡.基于海量数据存储系统多级存储介质的热点数据区分方法.计算机研究与发展,2012,49(z1):6-11.
- [96] 孟小峰,慈祥.大数据管理:概念、技术与挑战.计算机研究与发展,2013,50(1):146-169.
- [97] 王元卓,靳小龙,程学旗.网络大数据:现状与展望.计算机学报,2013,36(6):1125-1138. [doi: 10.3724/SP.J.1016.2013.01125]
- [98] 黄冬梅,杜艳玲,贺琪.混合云存储中海洋大数据迁移算法的研究.计算机研究与发展,2014,51(1):199-205. [doi: 10.7544/issn1000-1239.2014.20130696]
- [99] 章铁飞,陈天洲,吴剑钟.基于程序访存模式的低功耗存储技术.软件学报,2014,25(2):254-266. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4537.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004537]



熊永华(1979—),男,湖北洪湖人,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为云计算,透明计算,智能系统.



陈鑫(1977—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为多智能体系统,机器人学,智能系统.



张因升(1988—),男,硕士生,主要研究领域为云计算.



吴敏(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为鲁棒控制,企业信息化,智能系统.