

绿色计算与绿色嵌入式系统

郭荣佐¹ 郭进² 黎明¹

(四川师范大学计算机科学学院 成都 610101)¹ (西南交通大学信息科学与技术学院 成都 610031)²

摘要 绿色计算是一种先进的计算技术,其目的是利用先进的思想、技术和方法来降低计算系统的能耗,从而减少对人和环境的影响。而今嵌入式系统占整个计算系统的绝大多数,因此,嵌入式系统也需要绿色计算技术,使其能耗降低而不影响其性能。先对绿色计算的研究现状进行综述。然后对绿色嵌入式系统进行定义,并对其内涵进行探讨。最后对绿色嵌入式系统的绿色评价进行了讨论,对绿色嵌入式系统待研究的内容进行了探究。主要创新点在于利用绿色计算思想,提出了绿色嵌入式系统的概念,并对其相关问题进行了研究,指出了绿色嵌入式系统待研究的内容和方向。

关键词 绿色计算,绿色嵌入式系统,绿色评价,能耗,能效

中图分类号 TP393,TP311 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.8.003

Green Computing and Green Embedded Systems

GUO Rong-zuo¹ GUO Jin² LI Ming¹

(College of Computer Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China)¹

(School of Information Science & Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)²

Abstract Green computing is an advanced computing technology, which aims to take advantage of advanced ideas, techniques and methods to reduce energy consumption of computing systems, thereby reducing the impact on people and the environment. Embedded systems now account for the vast majority of the entire computing systems, therefore, embedded systems also need green computing technologies to reduce energy consumption without affecting its performance. First, green computing research status was reviewed. Then the green embedded system definition and its connotation were discussed. Finally, the green appraisal of green embedded systems was discussed, and the contents of the green embedded systems research were carried out to explore. The main innovation of the article is the use of green computing ideas, and we put forward the concept of green embedded systems and studied related problems, pointed out the contents and direction of the green embedded systems to be studied.

Keywords Green computing, Green embedded system, Green evaluation, Energy consumption, Energy efficiency

1 引言

全球变暖和各种恶劣天气的频现,使得人们不得不重新考虑技术对环境的影响。绿色计算试图减少计算系统的能量消耗,进而减少对环境的影响。而计算系统越来越要求高性能,使高性能与节能的矛盾越来越突出,比如为节能而降低计算系统的逻辑电压,导致电路的频率较低,从而导致系统性能的严重下降。因此,计算系统的高性能与节能需要从系统的硬件、软件、软硬件综合和应用等多方面进行研究,从理论上解决高性能与节能的矛盾,在提高系统性能的同时降低系统功耗,真正实现计算系统的绿色环保。

嵌入式系统是一种具有专门用途的特定的计算系统。在全球倡导低碳经济的背景下,嵌入式系统的能耗是一个日益引起人们关注的热点问题,成为嵌入式系统设计的重要考虑

因素。目前,嵌入式系统在信息家电、智能控制、军事电子等领域得到了广泛的应用。截至 2012 年底,全世界嵌入式设备的保有量超过了 70 亿台,且数量继续呈快速增长的势头,每年电力消耗达到 1700 亿千瓦时以上。随着各种消费类嵌入式系统产品的不断推出,各种应用需求对其性能的要求在不断提高,使其智能化程度和功能等方面都在不断增长,这就要求嵌入式系统软硬件整体高性能,由此造成嵌入式系统在能耗、热传播、温室气体排放和资源消耗等方面不断拓展和扩张,从而导致了嵌入式系统对环境和社会可持续发展等的影响。

因此,使用绿色嵌入式系统(Green Embedded System, GES)取代传统的嵌入式系统,正是顺应低碳、环保的要求而产生的一种新型计算系统;本文从绿色计算研究现状出发,得出绿色嵌入式系统的定义,并对其研究内容进行探讨,以使绿色嵌入式系统得到更好的发展和应用。

到稿日期:2014-08-14 返修日期:2015-01-12 本文受国家自然科学基金(61373162,61373163),国家科技计划支撑项目基金(2012BAH76F01),四川省教育厅自然科学基金一般项目(15ZB0045),四川师范大学科研项目基金(ZZYQ2013-05,13YB007)资助。

郭荣佐(1973-),男,教授,硕士生导师,主要研究方向为嵌入式系统、物联网感知技术、绿色计算;郭进(1960-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为绿色控制理论与技术、自动控制理论与应用、安全可靠理论和技术等;黎明(1966-),男,教授,硕士生导师,主要研究方向为计算机软件与理论。

2 绿色计算综述

国外研究者从绿色计算的概念、综述和能效/能耗的测量与评估等方面,对绿色计算进行了相应的研究和探索。

2.1 国外研究现状

从对绿色计算的综述而言,国外研究者对此进行了相关研究。主要从绿色计算概念、计算系统能耗/功耗测量与评估以及异构/并行系统的能耗等方面,对绿色计算进行了相关研究。

在绿色计算概念方面,主要研究和阐述绿色计算的内涵、资源利用率和降低功耗等方面。Dheera Jadhvani^[1]等阐述了绿色计算的基本内涵,从绿色计算的文献表述出发,为提高计算系统的资源利用率和降低能耗,提出了绿色计算的框架和绿色云架构,并详细介绍了架构的组成及各部分的功能,且详细阐述了实现绿色计算的途径等方面。Rabindra Ku Jena^[2]阐述了绿色计算的基本内容,介绍了绿色计算的产生背景和发展历程,提出了一些可能的途径、方法来实现在绿色计算,还介绍了绿色计算在印度的发展情况。

对计算系统的功耗测量与评估,现有文献一般采用硬件测量、理论计算、软件模拟等方法,进行系统功耗或能耗的粗略测量;而硬件测量和理论计算得到的功耗结果的精度欠佳,软件模拟法获得节点级的功耗或能耗的粒度较粗,不能进行细粒度预测;在功耗或能耗评估方面,主要有 EPEAT(电子产品环境评估工具,美国环保署推行的一个自愿执行的标准)和 SpecPower ssj2008 测试平台,EPEAT 采用多个等级对计算系统的环保表现进行综合评价,得到较粗粒度的评估报告,而 SpecPower ssj2008 测得的计算系统的性能与功耗之间的关系为较粗粒度的关系估计,不能得到计算系统性能与能效的关联关系和关联模型。

对异构、并行计算和网络的绿色研究,国外研究者提出了一些新型异构、新型并行体系结构,来实现异构系统和并行系统的节能高效。Andersen D G^[3]等对数据密集型系统进行研究,提出了全新的低功耗集群体系结构,有效地提高了系统的性能,并降低了系统的功耗。Richard Murphy^[4]等对先进体系结构的并行计算系统进行低功耗研究,提出了能耗约束下的并行高效体系结构,实现并行计算的绿色环保。Tomoya Enokido^[5]等对 P2P 型系统从进程级进行研究,提出了宏观模型来研究计算量与能耗之间的关系,以使系统的总能耗降低;Ponciano L^[6]等从另一个侧面研究了 P2P 网络,建立了基于睡眠的能耗算法来分析系统能耗,并延长硬盘等的寿命。Maja Etinski^[7]等利用整数线性规划策略,研究了能量约束系统的并行作业调度算法,提出了基于整数线性规划的并行作业调度策略 MaxJobPerf,该策略有效降低了系统功耗。Joanna Kołodziej^[8]对大规模异构计算系统的能源、资源进行建模,建立了一种通用分类法分类模型来管理大规模异构计算系统的能源和资源。将绿色计算与绿色通信、绿色网络相联系,如 Zahra Abbas^[9]等对分布式网络系统进行了绿色研究,提出相应的算法和模型来提高系统的能效,并对数据中心、无线传感网和本体传感网进行了实例研究。

在能量感知的编程模型与编译优化、软件功耗建模与优化和能量感知的编译优化方面已经有了初步的发展,且能量感知的编译优化技术已将高性能的编译优化技术转向综合考虑能量和性能。能耗感知方面,从体系结构层面设计节能策

略也能取得较好的降耗效果。研究者们从操作系统运行状态出发,提出了动态电压/频率调节 DVFS、硬件运行状态的动态功耗管理 DPM、功耗感知的程序调度、低功耗驱动程序等,这些方法能在全系统范围内有效地发挥低功耗硬件的特性,降低系统能耗。Hamady F^[10]等从电源能耗角度对多核系统进行研究,提出了以电源管理的能耗、电池寿命和性能为核心的评价方法,通过实验验证该方法有效降低了 40% 的电源能耗。系统软件的节能技术研究主要从操作系统的动态电压管理、核间调度和资源管理及虚拟机管理器下的简单能耗框架等入手,尚存在不足,主要为未从全局层面把能耗作为一种资源进行系统抽象、未依托硬件特性以及未把处理器温控机制纳入考虑范围。

以上关于绿色计算的研究,未从整体上考虑计算系统的绿色特性,仅从功耗、能耗的角度予以研究,认为计算系统只要降低了能耗或功耗,就是绿色计算系统;其实,绿色计算的概念包括很多方面,如对环境的影响、对人的危害和对资源的消耗等。

而国外研究者们对绿色计算的研究,大都选择嵌入式系统为对象。研究者们从嵌入式系统能耗/功耗的感知与评估、软件层面的功耗管理与优化和嵌入式系统功耗等方面,对嵌入式系统的绿色特性进行了相关研究,阐述了绿色计算与嵌入式系统的关系。

从能耗与功耗建模、功耗测量与评估和能效评价标准等方面,研究者们对嵌入式系统的绿色计算进行了相关研究。Tan^[11]等对 $\mu\text{C}/\text{OS II}$ 和 Embedded Linux 两种嵌入式实时操作系统的能耗实验数据进行归纳、分析,得出了服务例程级的宏模型,即能耗与软件的算法复杂度、通信量和路径基本块关联信息等高层度量特征之间的函数关系。Feng Xi-zhou^[12]等提出了一种在分布式计算系统中对科学计算应用的功耗和能耗特性进行建模的方法。Baynes K^[13]等从指令级对 $\mu\text{C}/\text{OS}$ 、Echidna 和 NOS 等 ERTOS 的功耗和性能数据进行了实验、度量、分析与比较,揭示了 ERTOS 的动态运行行为,对 ERTOS 的结构改进提出了一些有价值的建议。Arslan Munir^[14]等对高效节能的多核嵌入式计算系统进行了研究,提出了 HPEEC 技术来提高系统每瓦特能耗的性能,并指出高效节能多核嵌入式计算是未来嵌入式系统的发展方向。Lee^[15]等提出了一种基于进程代数的形式化框架,对能源受限的实时系统进行建模与分析。这些研究仅针对系统某一方面,未兼顾硬件平台、系统软件以及应用组成的计算系统整体的能效模型。

从软件层面对嵌入式系统的功耗进行管理,逐步成为控制嵌入式系统功耗的重要手段。最先对嵌入式系统软件进行功耗研究的是 Tiwari V^[16]等,其在 1994 年就建立了指令级功耗模型,并以具体处理器为例探究了低功耗编译技术。之后,许多学者从不同层面对编译优化技术在低功耗方面进行了相应的研究,形成了各种功耗优化编译技术。Era Johr^[17]等对分布式计算的效率和能耗进行了研究,提出了通过计算阈值来使闲置的处理器降低能耗的算法,从而实现分布式计算系统的绿色环保。Patricia^[18]等在系统级通过软硬件协同交互来研究嵌入式软件的功耗问题,使得系统节省 20%~40% 的功耗。Fakhar^[19]等从软件层研究了大规模计算系统的功耗问题,提出了能量感知的分布式绿色编译器优化和分布式交互工程工具箱调度器优化算法。Anshul Pa-

chouri^[20]等从操作系统角度研究计算系统的绿色问题,提出了绿色操作系统概念。

对嵌入式系统功耗的研究,国外学者们还进行了其他方面的探索与研究。Chung^[21]等从源程序代码入手,分析了在硬件体系结构上编译器对于功耗和性能的影响,并说明了对功耗优化可能导致性能的降低,对性能的优化可能导致功耗增加。Konstantakos^[22]等通过对基于微处理器的嵌入式系统能耗进行建模,证实了在特定嵌入式系统中,内存访问次数是决定其能耗的主要因素。Senn^[23]等针对具体的体系结构建模语言AADL(the architecture analysis and design language)研究了基于AADL模型的嵌入式系统的能耗评估精化方法。Jeeva Susan Jacob^[24]等提出了一种通过以事件驱动来进行功率监控的普适计算方法来实现绿色计算,并在嵌入式手持设备上进行了验证。

这些研究都是从单一角度对计算系统进行绿色研究,而未来的发展趋势是对计算系统进行多角度、多层面、多方位的功耗与性能的建模和优化,提供更加绿色环保的计算系统。对嵌入式系统的绿色研究,现仅限于对其功耗或能耗的研究,未涉及其材料和辐射等,而未来嵌入式系统的趋势是更加低功耗、高性能,且对人友好、低辐射、低危害和可回收等;现有研究为绿色嵌入式系统打下了坚实的基础,为绿色嵌入式系统的发展和应用程序提供更为广阔的机遇与挑战。

2.2 国内研究现状

国内关于绿色计算的研究,较之于国外而言,相对要稍晚一些。但经过国内科研工作者的刻苦努力攻关,在近些年已在绿色计算方面,取得了一定的成果。

对绿色计算的概念、内涵和意义等进行的综述,亦取得了一定的成果。郭兵^[25]等将计算系统的环境分为人文环境和自然环境两个部分,绿色计算是一种以环境为中心的计算模式,通过努力消除计算机系统的环境不友好方面,使得计算机系统、人、社会与自然环境更加和谐,实现节能、环保和节约的目标,且提出了绿色计算的一些基本思路和一般性方法,为下一步研究各种条件下绿色计算的具体模型、方法与工具打下了必要的基础。Luyang Wang^[26]等对2005—2009年中国北京、广州等5个主要城市的IT行业和家庭电脑的能耗进行了研究,指出绿色计算势在必行。过敏意^[27]对绿色计算的内涵和趋势进行了研究,对绿色计算的研究现状、发展动向等进行了较为全面的论述,为科研工作者研究绿色计算提供了很好的参考和方向。钮俊^[28]等提出了绿色计算系统的绿色模型的互模拟等价规则和逻辑保持评价方法,为绿色评价提供一定的理论支撑和相应的技术手段。

在系统软件层面、网络和数据中心等多方面对绿色计算进行的研究,取得了相应的成果。赵霞^[29]等对计算系统软件能耗优化技术进行了综述,综述了国内外研究现状及进展,深入讨论了低能耗软件优化的关键支撑技术。王海峰^[30]等对GPU功耗预测进行研究,提出了针对应用程序源代码的静态功耗预测模型,并对模型进行了验证与评估。林闯^[31]等从资源分配和任务管理角度对绿色网络的机制和策略进行了综述,提出了基于随机模型的绿色评价方法。王继禾^[32]等对片上网络进行研究,提出了一种基于位置概率分布的目录协议能耗模型,该模型在发包概率稳定的Mesh(网孔)网络中可有效计算出不同类型目录协议产生的能耗。张帅^[33]等对多核片上网络的性能与能耗的关系进行了研究,提出了一种性能

与能耗的优化方法。伍元胜^[34]等对核心网能耗进行研究,提出了一种多层网络能耗优化模型。廖彬^[35]等提出了一种分布式存储系统节能算法,该算法能够提高分布式存储系统的能耗利用率。王巍^[36]等对数据中心的能耗成本优化进行了研究,提出了基于动态定价策略的数据中心能耗成本优化方案。曹仰杰^[37]等对众核处理器系统核资源的动态分配与调度算法进行了研究,提出了一种支持核资源动态分组的自适应调度算法,通过实验验证了该算法能够在相同能耗下大幅提高系统性能。王桂彬^[38]等从异构系统功耗进行感知研究,建立了异构系统功耗感知的并行循环调度问题基本模型,并提出了处理器内循环再调度方法以进一步降低功耗。曹洁^[39]等对云环境下计算资源动态能耗感知进行研究,提出了调度模型,并对模型进行了模拟实验。李翔^[40]等从数据中心的热量管理方面入手,研究了绿色数据中心应该具备的特点,提出了热量管理架构,并对其全局能耗等进行了评价。罗亮^[41]等对云计算中心的能耗进行建模,提出了一种精确度高的能耗模型来预测云计算数据中心单台服务器的能耗状况。这些关于绿色计算的研究,大部分从能耗或功耗方面入手,研究计算系统的能耗或功耗,设计算法以降低能耗或功耗;但绿色计算的内容十分丰富,并不限于计算系统的能耗或功耗的降低,还应考虑人、环境和资源等各种因素,以使计算系统满足绿色环保之要求。

在嵌入式系统硬件层面,国内学者对其进行了相应的功耗或能耗方面的研究。周宽久^[42]等对嵌入式系统低功耗优化进行综述,从硬件级、指令级和编译过程3个层次对低功耗的优化进行描述,并对其进行了低功耗优化仿真研究。徐勇军^[43]等对集成电路功耗进行估计及优化,定义了一种逻辑级电路的中间表示形式和一系列极具特色的与低功耗技术相关的操作,研究了功耗敏感性原理,并推导出相关的数学模型,给出了一套完整的组合电路的功耗敏感性理论,用于动态功耗和静态功耗的分析,同时研究了低功耗微处理器。凡启飞^[44]等设计了基于微处理器的RTL代码的快速准确的功耗评估方法,同时研究了基于延迟写回的嵌入式处理器设计和异构处理器功耗分析模型。黄海林^[45]等以“龙芯1号”处理器为研究对象,研究嵌入式处理器中访存部件的低功耗设计方法,并通过实验证实该方法能够有效降低系统功耗并略微提高处理器性能。张冬松^[46]等对对嵌入式多处理器系统节能进行研究,提出了一种基于帧任务模型的最优节能实时调度算法。易会战^[47]等对高性能应用系统的能耗优化进行了研究,提出了一种面向高性能业务应用的能量优化技术,建立了SEOM(simplified energy optimization model)和CEOM(complex energy optimization model)两种能耗优化模型。这些研究仅从嵌入式系统硬件层面入手,以硬件方式降低嵌入式系统功耗。

在嵌入式系统的软件功耗管理与优化和编译优化降耗方面,国内研究者们进行了较为深入的研究。过敏意^[48]等提出了一种基于标签归约的用于减少片上多处理器的一级指令缓存能耗的方法,该方法最大限度地减少每个核上的标签归约冲突,从而实现能耗的减少。郭兵^[49]等提出了一种基于离散Hopfield神经网络的RTOS软/硬件划分方法,在一定运行时间约束下优化RTOS的功耗,明显地降低RTOS的运行功耗。黄江伟^[50]等分析了移动嵌入式系统中的电池模型,以此为出发点研究了DVS技术支持的低功耗设计问题,研究了操

作系统对低功耗调度的支持,特别是在实时调度和存储设备访问请求调度情况下的低功耗调度方法,并研究了通过编译器对执行程序进行改造,在运行时为操作系统提供低功耗调度支持的方法;而DVS技术本身存在不足之处,DVS在降低处理器功耗的同时,会带来降低处理器运行时速度的副作用,导致本来就十分有限的处理器资源变得更加拮据;对于有实时性要求的任务,由于处理器运行时速度的降低,将存在无法保证实时性。熊冰^[51]等研究了构件化的嵌入式软件的能耗,提出了一种基于马尔科夫链的嵌入式软件能耗估算模型。郭兵等^[52,53]对嵌入式系统软件功耗、能耗,从源程序级和算法级进行分析与优化,对嵌入式操作系统功耗进行测试与评估,对嵌入式软件从体系结构级进行能耗建模,提出了一种利用BP神经网络在体系结构级估算软件能耗的模型。赵霞^[54]等从嵌入式操作系统层面,研究嵌入式系统软件能耗,提出了一种嵌入式操作系统能耗量化分析方法。范贵生^[55]等对分布式嵌入式系统的能耗进行了研究,从系统的启动设备集和设备动态供电电压两个方面着手,提出了一种基于Agent的自适应能耗管理及分析方法,并对其进行了分析与验证。

综上,从国内外对绿色计算研究的现状看,研究独立系统和通用体系结构的较多,研究某个局部节能的较多;虽然国内外研究者从硬件到软件、从处理器到操作系统、编译器和应用程序等不同方面,对嵌入式系统的能耗或功耗进行了研究,但现有研究几乎都是从能耗或功耗角度来研究计算系统的绿色计算,而绿色计算的因素是多方面的,应多层面、全方位研究计算系统的绿色特性。就嵌入式系统的绿色计算研究而言,主要是研究嵌入式系统硬件或软件的功耗,而嵌入式系统的绿色特性是全面的,因此,需要对嵌入式系统进行全方位研究,研究其绿色环保特性,并提出绿色嵌入式系统概念。

3 绿色嵌入式系统定义

绿色嵌入式系统不同于传统意义的嵌入式系统,而是将绿色计算的思想、理念和方法等应用于嵌入式系统,使传统意义的嵌入式系统得到绿色计算的改造,成为绿色环保的嵌入式系统。

3.1 定义

绿色嵌入式系统是一种专门用途的绿色计算(Green Computing)系统,以具体应用为中心,在其设计、制造、使用和回收等全部过程中,按照绿色计算的原则来使用专用计算机及相关资源的应用系统。因此,GES系统应从软硬件设计、硬件制造与回收、软件研制和使用等过程进行绿色化定义。

假设GES的硬件由若干功能相关的硬件功能模块(Hardware Function Module, HFM)构成,每个HFM模块由电子元器件(Electronic Components, EC)、电路及其结构(Circuit and its Structure, CiS)、电路板(Circuit Board, CB)和执行装置(Executive Device, ED)等组成。硬件组成及约束为:电子元器件 I_{EC1} 不超过 B_1 、可选电路及其结构 I_{CS2} 不能超过 B_2 、……,电路板布线方式 I_{CBn} 不能超过 B_{n-1} ,执行装置可选种类或可选装置不超过 B_n ;而某种功能的可选硬件有很多种,这些可选的硬件又具有不同的性能和能耗指标。

而GES硬件的每个HFM模块在进行设计和选型时,其功能和性能指标要受到一定的约束,约束需进行定性或定量分析与计算。

定义1 设HFM模块的总的功耗为 $P_{HFMTotal}$ 、正常运行

功耗为 P_{HFMRun} 、空闲功耗为 $P_{HFMFree}$,且运行功耗为HFM模块的硬件功耗与软件功耗之和,则可定义 $P_{HFMTotal}$ 为:

$$P_{HFMTotal}(i) = P_{HFMFree}(i) + P_{HFMRun}(i) \\ = P_{HFMFree}(i) + P_{HFMRun}(i, task) \quad (1)$$

其中, i 表示GES硬件组成中的第 i 个HFM模块, $i=1, 2, \dots, n$; $P_{HFMRun}(i, task)$ 表示HFM模块运行时功耗。

GES的HFM模块功耗由定义1予以确定,而功耗是GES主要的绿色指标之一。每个HFM模块的绿色因子主要包括功耗、回收、排放和水耗等。

定义2 设GES的HFM模块的综合绿色因子 GF_{GES_HFM} 为一个5元组表,即:

$$GF_{GES_HFM} = \{P_{HFM}, RC_{HFM}, DG_{HFM}, W_{HFM}; GF_{gfHFM}\} \quad (2)$$

则可用 GF_{GES_HFM} 表示HFM模块的综合绿色因子。其中, P_{HFM} 表示HFM模块的功耗; RC_{HFM} 表示HFM模块的不可回收率,用GES电路板不可回收面积与总面积的百分比来描述,表示为:

$$RC_{HFM}(i) = \frac{\text{不可回收件的PCB面积}}{\text{GES总面积}} \times 100\%, i=1, 2, \dots, n$$

DG_{HFM} 表示HFM模块生产时、运行时和回收时的碳、有毒有害气体和光电磁辐射等的排放; W_{HFM} 表示HFM模块生产和回收时的水消耗量; GF_{gfHFM} 表示HFM模块的绿色因子,可用以下函数描述:

$$GF_{gfHFM}(i) = C_0 + C_1 P_{HFM}(i) + C_2 RC_{HFM}(i) + \\ C_3 DG_{HFM}(i) + C_4 W_{HFM}(i)$$

其中, $i=1, 2, \dots, n$, C_0 为常数, C_j 为第 j 个事件对绿色的影响因子, C_0 与 C_j 通过简单线性回归得到, $j=2, 3, 4$ 。

每个HFM模块又具有许多与性能相关的指标和与性能无关的指标,这些指标中,较为重要的指标有成本、速度和可靠性等。HFM模块成本主要由开发成本和设备成本构成,而设备成本即为组成系统所需的HFM的固件及软件构架等决定,因此HFM模块成本为:

$$C_{HFM}(i) = De_{UHFM}(i) + Coe_{HFM}(i) \leq C_{Cost_HFM}(i) \quad (3)$$

且可选HFM模块的成本需满足一定的条件,即小于等于一个给定的常数 $C_{Cost_HFM}(i)$,其中 $i=1, 2, \dots, n$ 。

HFM模块的执行时间尤为重要(特别是嵌入式实时系统中),执行时间是主要的指标参数。HFM模块的执行时间 T_{T_HFM} 由其硬件和软件执行时间构成,即:

$$T_{T_HFM}(i) = T_{SWHFM}(i) + T_{HWHFM}(i) \\ = T_{HWHFM}(i) + T_{SWHFM}(i, task) \leq T_{time}(i) \quad (4)$$

且可选HFM模块的执行时间需满足一定的条件,即小于等于一个给定的常数 $T_{time}(i)$,其中 $i=1, 2, \dots, n$ 。

同样,HFM模块在面积、体积、重量等方面,也必须满足一定的约束条件,即 $AVWE_{HFM} \leq Con$, Con 为给定的常数组。

定义3 设 C_{GES} 为GES的HFM模块,是一个多元组,即:

$$C_{GES} = (I_{EC1}, I_{CS2}, \dots, I_{CBn-1}, I_{EDn}; GF_{gfHFM}(j)) \quad (5)$$

其中, $I_{EC1}, I_{CS2}, \dots, I_{CBn-1}, I_{EDn}$ 为与HFM模块硬件相关的EC、CiS、CB和ED; $GF_{gfHFM}(j)$ 服从定义2。

定义4 设GES硬件由若干个功能单元构成,即 $F_{GES} = \{F_1, F_2, \dots, F_M\}$,且每种功能单元对应多个可选的HFM模块集合,即:

$$F_1 \rightarrow \{C_{GES11}, C_{GES12}, \dots, C_{GES1a}; GF_{gfHFM1a}\} \\ F_2 \rightarrow \{C_{GES21}, C_{GES22}, \dots, C_{GES2b}; GF_{gfHFM2b}\} \\ \dots$$

$$F_M \rightarrow \{C_{GESm1}, C_{GESm2}, \dots, C_{GESmM}; GF_{gf/HFMm}\}$$

则 GES 硬件即为 C_{GES} 的最优组合, 且该组合满足:

$$S_1(I_{EC1i}, I_{EC2j}, \dots, I_{ECmk}) \leq B_1$$

$$S_2(I_{GS1i}, I_{GS2j}, \dots, I_{GSmk}) \leq B_2$$

.....

$$S_n(I_{ED1i}, I_{ED2j}, \dots, I_{EDmk}) \leq B_n$$

其中, $C_{GES} = (I_{EC1}, I_{GS2}, \dots, I_{CBn-1}, I_{EDn}; GF_{gf/HFM}(j)); a, b, \dots, n$ 是常数, 分别表示 F_1, F_2, \dots, F_M 所对应的可选 IP 核的数目; S_1, S_2, \dots, S_n 分别对应不同硬件组成部件 $I_{EC1}, I_{GS2}, \dots, I_{EDn}$ 和约束 B_1, B_2, \dots, B_n , 用来分析和计算由多个 HFM 模块组成的 GES 硬件。

由上述定义可知, GES 是由多个 HFM 模块构成的以具体应用为中心的专用计算系统, 系统的每个 HFM 模块在功能和性能达到预期目的外, 其综合绿色因子还必须满足要求。故 GES 的硬件可描述为如图 1 所示的形式化图。

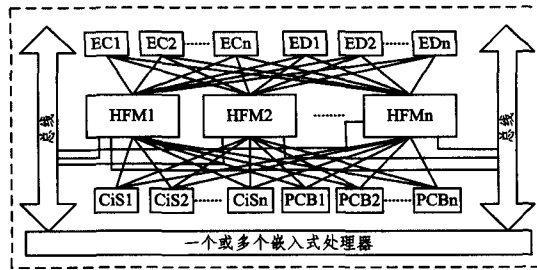


图 1 GES 硬件形式化描述图

GES 由硬件和软件两个部分构成, 其中硬件是软件赖以运行的物质基础。软件掌控 GES 的所有硬件资源并驱动其工作, 即软件间接造成了电能的消耗。因此, 必须对 GES 软件的绿色特征进行定义。

GES 硬件完成设计、生产后, 系统将进入使用阶段; 在使用 GES 时, 其绿色特性主要表现为电磁辐射、光污染和能耗等, 但电磁辐射和光污染等也是系统消耗能量产生的, 因此, 可将 GES 使用时的绿色特性主要表现为软件功耗。GES 使用时功耗主要由软件运行产生, 也就是 GES 软件的能耗主要表现为处理器运行时能耗。而处理器的能耗可通过处理器自身的微程序进行调节, 也可通过上层软件进行调整和改善, 对能耗影响较大主要有系统内存的容量与存取次数和存取时间、总线访问周期与访问时间、整数运算或浮点运算的数据通路的能耗和系统时钟分布与控制等, 如内存的访问与控制的能耗占到系统总能耗的 10% 到 25%。

定义 5 GES 软件功耗即为系统使用时的绿色特性, 从微结构级可定义其软件运行时间 T 的总功耗为:

$$P_{GESYS}^T = P_{Pro}^T + P_{Idle}^T + P_{Mem}^T + P_{IF}^T + P_{PE}^T \quad (6)$$

其中, P_{GESYS}^T 为软件总功耗, P_{Pro}^T 为处理器运行时功耗, P_{Idle}^T 为处理器空闲时功耗, P_{Mem}^T 为存储器功耗, P_{IF}^T 为接口功耗, P_{PE}^T 为外设功耗。

GES 硬件设计完成后, 其处理器空闲功耗、外设功耗和接口功耗就被限定, 即这些的功耗可当作一个固定常数来看待; 这些功耗无需在使用时进行测量, 而其值仅与使用时间有关。因此, 定义 5 的系统软件总功耗可重定义为:

$$P_{GESYS}^T = P_{Pro}^T + P_{Mem}^T + \int_0^T k(t) dt \quad (7)$$

其中, $k(t)$ 表示其他功耗为时间 t 的线性函数。故系统软件总功耗与处理器运行功耗和存储器功耗相关。

GES 软件运行时处理器功耗主要与运行的指令类型、数量和对存储的访问等因素相关, 则可定义处理器运行时功耗为:

$$P_{Pro}^T = \sum_{i=1}^{N_{Inst}^T} (P_{Pro}(InstType(i)) * NC(i)) \quad (8)$$

其中, N_{Inst}^T 为时间 T 内处理器执行的总的指令数; $InstType(i)$ 为第 i 条指令的类型; $P_{Pro}(InstType(i))$ 为执行 $InstType(i)$ 类指令的处理器在每个时钟周期的功耗; $NC(i)$ 为第 i 条指令执行所需的周期数。

处理器指令执行时每个时钟周期功耗与处理器的工作电压、工作电流和频率有关, 即可描述为:

$$P_{Pro} = V_{ccv} * I_{Inst} / f_{clock} \quad (9)$$

其中, V_{ccv} 为处理器核的工作电压; I_{Inst} 为执行指令时的电流; f_{clock} 为时钟频率。

存储器消耗的能量主要与存储器运行时所需总线周期有关, 而每个总线周期存储器消耗的功耗为固定值, 则存储器功耗可定义为:

$$P_{Mem}^T = P_{Mem} * NC_{MC} \quad (10)$$

其中, NC_{MC} 为存储器工作状态时占用的总线周期数; P_{Mem} 为每个总线周期存储器的功耗。

因此, 定义 5 可改写为:

$$P_{GESYS}^T = P_{Pro}^T + P_{Mem}^T + \int_0^T k(t) dt$$

$$= \sum_{i=1}^{N_{Inst}^T} \left(\frac{V_{ccv} * I_{Inst}}{f_{clock}} (InstType(i)) * NC(i) \right) + P_{Mem} * NC_{MC} + \int_0^T k(t) dt \quad (11)$$

定义 5 从处理器指令级对 GES 软件功耗进行了定义, 即 GES 的软件功耗可使用式(11)描述。因此, 减少 GES 软件运行时的指令数量和访问存储器的指令数量, 可有效降低 GES 的软件功耗, 能使 GES 系统更加绿色环保。

3.2 内涵

虽然给定了 GES 的定义, 但从不同视角对其理解是完全不同的。嵌入式系统生产者对 GES 的概念有着自己独到的理解, 并在其开发流程中, 采用不同的绿色技术来开发自己的产品, 且在业界并没有一个统一的认识和一致认可的 GES 概念或定义; 生产者认为 GES 是在产品的全部生命周期内, 既要实现产品的高效能和高性价比, 又要考虑减少能源消耗、水消耗和回收利用等因素, 还要尽量做到节能环保。而学术界或者理论研究者认为, GES 应从元器件的材料角度, 使用绿色化学与技术, 使组成 GES 的所有元器件和物质基础都遵循可持续发展的理论和方法, 采用统一或抽象方法对 GES 进行形式化定义或描述, 从根源上改变 GES 与环境的关系, 建立 GES 与人和环境的和谐一致的绿色关系。从多学科、多门类交叉角度理解, GES 是一种理念、一种思维或者一种哲学, 其各组成要素间是相互矛盾、相互制约、相互联系的关系。GES 是计算机科学、经济学、材料学、生态与环境学、机械科学等多学科、多门类的交叉领域, 其指导思想是绿色思想, 该思想指导 GES 生产者从人、社会和环境等多方位使其产品具有较好绿色因子, 从而做到 GES 为环境友好型计算系统。

因此, 需要进一步明确 GES 定义的内涵。

GES 的定义给出了其要研究的对象。嵌入式系统就是 GES 所要研究的对象, 并且是嵌入式系统具有绿色计算的所有特征和特性, 这主要包括 GES 对使用者的健康、安全要承

担责任,GES不能散发危害使用者健康的有毒有害气体、不能有不良信息侵扰和不安信息危害或侵蚀使用者,GES产生的废弃物、辐射不能污染环境和人类以及不能造成资源的浪费等;而GES研究的主要内容在GES定义中已经阐述清楚,即在嵌入式系统的设计、制造、使用和回收的全过程中,从其体系结构到软硬件划分与设计、从硬件的原理图设计到PCB布线与生产、从元器件的选型到焊接、从HFM模块驱动到系统软件的设计和开发与下载、从用户使用到管理与回收等,都必须对GES的生命周期进行评价,全面研究GES的每个步骤对环境的影响。

由GES的定义可以知道,GES的研究目标是非常明确的,就是在嵌入式系统的设计、制造、使用和回收的全过程中,采用技术和管理手段,使其减少或降低对环境、人和社会的不利因素,真正使GES成为节能、环保型的嵌入式系统,并更好地为人类服务。

定义5对GES软件的功耗进行了定义,明确定义了GES系统软件功耗的决定因素。由此可知,GES的软件应尽量精简指令,同时要减少访问RAM和Flash存储器的指令数量,才能有效降低GES软件功耗。同时,定义5还蕴含了对GES软件功耗需进行优化,一味地减少指令量将使系统功能和性能受到限制;从软件功耗优化方面需进行深入研究和探讨,如编译器功耗优化、源程序功耗优化、算法功耗优化和体系结构功耗优化等,即需从GES软件的各个方面进行功耗优化与重构。

从GES的定义和内涵可知,GES与传统的嵌入式系统存在很大的差异,其研究的内容和目的是完全不同的,且GES与事件驱动或其他的感功计算^[25]在研究范畴、内容和目标等方面存在较大的区别^[56]。GES不仅关注系统功耗、能耗,更注重系统对人的危害、废弃物对环境的影响、资源的使用与浪费,GES的本质是节能环保,为建立资源节约型社会贡献GES的力量。

4 GES 相关问题研究

从上面分析来看,要全面研究GES系统,还存在许多亟待解决的问题。在此对这些亟待解决的问题予以描述,以明确GES研究的方向和目的。

4.1 GES 绿色评价

要判断嵌入式系统是否为GES系统,则需要依据相应的判断准则,对其进行定性或定量分析与评价后,方可做出判断。只有建立了绿色评价判断准则和评价方法,才能使GES具有绿色环保特性;而计算系统的绿色特性,越来越受到关注和重视^[57]。

就绿色评价而言,许多国家的政府或组织对绿色建筑物或工业提出了评价方法,如美国的AIA(The American Institute of Architects, AIA)就专门针对建筑物提出了绿色评价的要素和指标;又如印度科学和环境中心的Chandra Bhushan,利用工业企业生命周期和利益感知方法对印度工业的环境性能进行了绿色评价。而对计算系统的绿色评价,国内外研究者们进行了相应的研究,取得了一定的成果。Norman G^[58]等对计算系统进行能耗优化建模,建立系统模型并对系统进行研制与评价;文献^[59]设计了一种绿色算法来对云计算的服务器功耗进行优化,有效降低了云计算服务器的功耗并对其进行绿色评价;如前所述,国内外研究者对嵌入

式系统功耗进行了多方面的研究;文献^[60]对信息系统进行了绿色和可持续的评价,应用灰色系统理论、模糊决策和TOPSIS标准等对系统进行了评价,提出了对应的评价方法和策略。这些研究对评价GES具有很好的价值和借鉴意义,但存在一定的局限性,因此,需要对GES的绿色评价进行研究。

对GES进行绿色评价,首要问题就是对其评价原则和评价的内容进行全面、完整的定义。要全面、完整评价GES的综合绿色因子,需要理论模型与方法来进行指导;而对某个具体的GES进行绿色评价,则需要明确哪些因素、哪些因子为绿色因子,并对这些因素或因子进行量化,以准确反映被研究的GES在动态演变中对综合绿色因子的改变或影响程度。因此,对GES进行绿色评价,主要应遵循的原则是:GES的设计、生产、使用和回收等全生命周期中,对经济、环境、生态和社会的影响,应按照可持续发展的要求来进行定性或定量分析。

GES绿色评价的内容可从3个层面进行分析,即系统对环境、人和社会的影响;而每个层面又包含一定的评价指标。GES绿色评价内容采用表1予以描述,其中的主要指标有水耗、能耗、减少不可再生自然资源量、使用可再生资源量、废物排放量、可回收废物及处理成本和处理过程对环境的影响程度、生产过程对环境的影响程度以及使用过程对环境、人及社会的影响程度等。

表1 GES绿色评价的主要内容

生命周期	影响	环境	人	社会
		设计	生产	使用
设计	碳排放 有毒有害气体 热效应 光污染	碳排放	辐射量	能耗
		有毒有害气体	有毒有害气体	能耗水耗氧耗 资源占用量
		热效应 光污染	性能指标	经济效益 社会效益
生产	光污染 碳排放 有毒有害气体	光污染	辐射量	能耗
		碳排放	光污染	社会效益
		有毒有害气体	性能指标	
使用	碳排放 有毒有害气体	碳排放	辐射量	能耗
		有毒有害气体	光污染	社会效益
		有毒有害气体	性能指标	
回收	碳排放 有毒有害气体	碳排放	辐射量	能耗
		有毒有害气体	有毒有害气体	水耗
		有毒有害气体	光污染	

GES系统的各个过程,都会对环境、人和社会带来影响,要对其进行绿色评价,首要的就是研究其评价的内容;表1仅是主要的影响因素,而非GES系统全过程的所有影响因素。因此,GES系统的绿色评价内容就表现在GES系统的设计、生产、使用和回收过程,对资源的使用以及对人、环境和社会的影响程度。

从现有文献看,对计算系统进行绿色评价的方法中,主要是使用不同的建模方法对系统的软件或硬件功耗或能耗进行建模与评价,如文献^[39]使用Markov方法建立了嵌入式系统软件能耗估算模型、文献^[36]采用形式化描述方法建立了计算系统的绿色评价模型并对其进行了互模拟研究;而这些对计算系统的绿色评价,大都是从能耗或功耗角度,对其中的某一方面的能耗或功耗进行建模与评价。

对GES系统而言,其绿色评价应从其设计、生产、使用和回收等多方面进行综合评价,评价GES各个阶段的绿色特性及其对人、社会和自然的综合影响。

4.2 GES 待研究内容

GES系统有待进一步研究使其更加绿色、环保,主要表

现为以下几个方面:

首先是对 GES 从多个层面建立其综合能效模型并研究其理论。在研究 GES 时,按照一定的层次进行划分,将其划分为物理层、系统层、业务层和交互层,从组成 GES 的多个层面入手,研究建立其综合能效模型的理论,最终建立多层面综合能效模型。GES 的物理层主要包括元器件、电路及结构、印制板设计布线与生产工艺等,对物理层的能耗进行研究,从元器件到电路、从电路到印制电路板和从印制电路板的设计、布线到生产工艺,全过程进行能耗/功耗测试、评估与建模,从理论上减少物理层的能耗/功耗对 GES 能效的影响。对 GES 的系统层进行能效分析与评估,建立系统层的芯片级、电路板级和系统级的能耗/功耗模型;对业务层而言,从 GES 的硬件抽象、设备驱动出发,对整个业务层进行理论研究,提出一种能够有效分析和描述该层能效的模型;其交互层主要实现各种接口与用户的交互、各种组件与应用程序的交互和节能优化编译技术等,掌控 GES 的硬件资源、驱动硬件工作,因此,其间接造成能量的消耗,需对其进行能效模型的建立及理论研究,得到交互层能效模型。对 GES 进行从低层到高层的运行时效能模型的建立,以得到更高精度和细粒度的运行时能效测量方法和预测模型。因此,在这方面的研究亟待解决的关键问题为:在对 GES 进行各个层面的能效问题研究的基础上,如何建立与 GES 实际情况相符合的多层面综合模型,在理论分析的基础上提出多层面综合稳定的能效模型;如何建立从 GES 低层到高层的运行时效能模型,从理论上取得突破,进而得到更高精度和细粒度的运行时能效预测。

其次是开展 GES 与环境的能效模型的建立及其理论研究。GES 的广泛使用,需要消耗大量的电力能源,其运行产生了严重的环境影响,如大气质量恶化、建筑资源消耗、维护成本巨大、人力资源浪费、回收再利用成本高等。因此,需研究 GES 技术与产品和环境的关系,以减少对环境的影响。开展 GES 与环境的能效研究,利用各种软/硬件先进技术,降低 GES 功耗,提高其运算效率,使 GES 的能耗降低,进一步降低电力能源的使用;同时,改善 GES 的设计,提高其资源利用率和回收率,降低一氧化碳/温室气体排放,从而达到节能、环保和节约的目的。基于此,建立 GES 与环境的能效模型,并从理论上研究如何建立其与环境的能效模型。现有的研究未考虑 GES 与环境的能效关系与模型,尚未出现该方面的理论和研究方法。因此,在这方面的研究要解决的关键问题为:在研究 GES 对环境的影响程度的基础上,如何建立与 GES 实际情况相符合的环境能效关系与模型,在理论分析的基础上提出合理的环境能效模型。

再次而非最后,则为开展 GES 的能效与其安全性、可靠性、可信度和实时性等的关联进行模型的建立及其理论研究。GES 的安全可靠性是其必须具备的特性,人们都期望 GES 是安全可靠的,更是可信的系统。对 GES 进行多项数据指标的精确测量,用数据分析其能效与安全性、可靠性和可信度的关系,测试各种实时任务条件下系统的实时性能是否得到满足。在理论上对系统运行时的状态特性进行合理的分类聚合而建立数学模型,然后应用模型的分析技术,并结合算法,分析得到系统的各种性能评价指标及其参数的优化方案,这也是本项目着力解决的理论与实践应用相互对接的关键问题。对 GES 的能效与安全性可信度的关联进行研究,建立一个适应 GES 的可信平台模块。在平台上的总线仲裁提高平台的控

制能力并有效优化 GES 功耗的同时,增强 GES 的安全性。从 GES 的元器件、电路及其结构、印制电路板及生产工艺和软件等多方面考虑,建立能效与可靠性的关联模型。从 GES 的硬件和软件两方面,研究 GES 能效与实时性的关系,建立模型并研究其理论。因此,在这方面的研究要解决的关键问题为:开展 GES 的能效与诸多特性的关联研究,旨在从实践上和理论上研究 GES 与各特性间的关系,建立 GES 的能效与诸多特性的关联模型。

当然,对 GES 系统进行全面的绿色研究,远非以上几点亟待解决的问题,还有诸多方面未提及,有待进一步对其进行探讨。

结束语 绿色嵌入式系统是推动科技进步和社会可持续发展的一种新型计算模式,已成为国际竞争的焦点和制高点,关系到国家政治、经济和社会安全。嵌入式系统的广泛使用,需要消耗大量的电力能源,其运行产生了严重的环境影响,如大气质量恶化、建筑资源消耗、维护成本巨大、人力资源浪费、回收再利用成本高等。因此,需研究 GES 技术与产品和环境的关系,以减少对环境的影响。绿色嵌入式系统在低碳目标引导下,展示以能耗为导向的环境友好型计算系统构建模式,其发展和应用将会给人类生活和生产的各个领域带来深远影响。

本文从国内外对绿色计算的研究现状出发,综述了国内外对绿色计算的现有研究成果,在此基础上提出了绿色嵌入式系统的概念,并对绿色嵌入式系统进行了定义,阐述了绿色嵌入式系统的内涵;然后对绿色嵌入式系统的绿色评价进行了分析,并对绿色嵌入式系统的相关问题进行了探讨,主要提出了绿色嵌入式系统的研究内容。本文的主要创新在于,提出了绿色嵌入式系统概念,指出了绿色嵌入式系统研究的主要内容和亟待解决的问题,为今后进一步研究绿色嵌入式系统打下基础。

参 考 文 献

- [1] Jadhvani D, Agrawal M, Mande H. Study of Efficient Utilization of Power Using Green Computing[J]. International Journal of Advanced Computer Research, 2012, 2(4): 108-113
- [2] Jena R K. Green Computing: Need of the Hour[M]// Organizational, Business, and Technological Aspects of the Knowledge Society. Springer, 2010: 312-318
- [3] Andersen D G, Franklin J, Kaminsky M, et al. FAWN: A Fast Array of Wimpy Nodes[C]// Proc. of SOSP'09. ACM, 2009: 1-14
- [4] Murphy R, Sterling T, Dekate C. Advanced Architectures and Execution Models to Support Green Computing[J]. Computing in Science & Engineering, 2010, 11/12: 38-47
- [5] Enokido T, Aikebaier A, Takizawa M. Process Allocation Algorithms for Saving Power Consumption in Peer-to-Peer Systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(6): 2097-2105
- [6] Ponciano L, Brasileiro F. Assessing green strategies in peer-to-peer opportunistic grids[J]. Journal of grid computing, 2013, 11(1): 129-148
- [7] Etinski M, Corbalan J, et al. Linear Programming Based Parallel Job Scheduling for Power Constrained Systems[C]// International Conference on High Performance Computing & Simulation-HPCS. 2011: 72-80
- [8] Kołodziej J. Evolutionary Inspired Solutions for Energy Manage-

- ment in Green Computing; State-of-the-Arts[M]// Evolutionary Hierarchical Multi-Criteria Metaheuristics for Scheduling in Large-Scale Grid Systems. Springer, 2012; 139-153
- [9] Abbasi Z, Jonas M, et al. Evolutionary Green Computing Solutions for Distributed Cyber Physical Systems[M]// Evolutionary Based Solutions for Green Computing. Springer, 2013; 1-28
- [10] Hamady F, Kayssi A, Chehab A, et al. Evaluation of Low-Power Computing when Operating on Subsets of Multicore Processors [J]. Journal of Signal Processing Systems, 2013, 70(2): 193-208
- [11] Tan T K, Raghunathan A K, Jha N K. Energy macromodeling of embedded operating systems[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS), 2005, 4(1): 231-252
- [12] Feng Xi-zhou, Ge Rong, Cameron K W. Power and Energy Profiling of Scientific Applications on Distributed Systems [C]// Proc. of IPDPS'05. IEEE, 2005; 34
- [13] Baynes K, Collins C, Fiterman E. The performance and energy consumption of embedded real-time operating systems[J]. IEEE Transactions on Computers, 2003, 52(11): 1454-1469
- [14] Munir A, Ranka S, Gordon-Ross A. High-Performance Energy-Efficient Multicore Embedded Computing [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(4): 684-700
- [15] Lee I, Philippou A, Sokolsky O. Process algebraic modelling and analysis of power-aware real-time systems[J]. Journal of Computing and Control Engineering, 2002, 13(4): 180-188
- [16] Tiwari V, Malik S, Wolfe A. Power Analysis of Embedded Software: A First Step Towards Software Power Minimization[J]. IEEE Transactions on VLSI Systems, 1994, 2(4): 437-445
- [17] Johri E, Shaikh S. Improving Performance of Algorithms in Distributed Computing with Perspective of Green Information Technology[J]. International Journal of Computer Applications, 2010, 1(18): 71-74
- [18] Patricia G O, et al. Energy Optimization in a HW/SW Tool: Design of Low Power Architecture System [C]// Proc. of IWSOC'03. ACM, 2003; 38-43
- [19] Fakhar F, Javed B, et al. Software level green computing for large scale systems [J]. Journal of Cloud Computing, 2012, 1(4): 1-17
- [20] Pachouri A, Sharma M, Tewari T. Green Operating System: Future Low Power Operating System [J]. International Journal of Computer Applications, 2010, 1(21): 77-80
- [21] Chung Eui-young, Benini L, de Micheli G. Source code transformation based on software cost analysis [C]// Proceedings of ISSS'01. Montréal, Québec, Canada, 2001; 153-158
- [22] Konstantakos V, Chatzigeorgiou A, Nikolaidis S, et al. Energy consumption estimation in embedded systems [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(4): 797-804
- [23] Senn E, Laurent J, Juin E, et al. Refining power consumption estimations in the component based AADL design flow [C]// Proc. of the IEEE Conf. on Specification, Verification and Design Language. 2008; 173-178
- [24] Jacob J S, Preetha K G. A Novel Approach for Green Computing through Event-Driven Power Aware Pervasive Computing [M]// Advances in Computer Science and Information Technology. Springer 2012 ; 81-88
- [25] 郭兵, 沈艳, 邵子立. 绿色计算的重定义与若干探讨 [J]. 计算机学报, 2009, 32(9): 2311-2319
Guo B, Shen Y, Shao Z L. The Redefinition and Some Discussion of Green Computing [J]. Chinese Journal of Computer, 2009, 32(9): 2311-2319
- [26] Wang Lu-yang, Wang Tao. Green Computing Wanted: Electricity Consumptions in the IT industry and by Household Computers in Five Major Chinese Cities [C]// 2011 IEEE/ACM International Conference on Green Computing and Communications. 2011; 226-229
- [27] 过敏意. 绿色计算: 内涵及趋势 [J]. 计算机工程, 2010, 36(10): 1-7
Guo M Y. Green Computing: Connotation and Tendency [J]. Computer Engineering, 2010, 36(10): 1-7
- [28] 钮俊, 曾国荪, 王伟. 绿色评价模型的互模拟等价及逻辑保持 [J]. 计算机学报, 2013, 36(5): 967-976
Niu J, Zeng G S, Wang W. Bisimulation Equivalence and Logical Preservation for Green Evaluation Model [J]. Chinese Journal of Computer, 2013, 36(5): 967-976
- [29] 赵霞, 郭耀, 陈向群. 软件能耗优化技术研究进展 [J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(12): 2308-2316
Zhao X, Guo Y, Chen X Q. Research Progresses on Energy-Efficient Software Optimization Techniques [J]. Journal of Computer Research and Development, 2011, 48(12): 2308-2316
- [30] 王海峰, 陈庆奎. 静态程序切片的 GPU 通用计算功耗预测模型 [J]. 软件学报, 2013, 24(8): 1746-1760
Wang H F, Chen Q K. Power Consumption Prediction Model of General-Purpose Computing GPU with Static Program Slicing [J]. Journal of Software, 2013, 24(8): 1746-1760
- [31] 林闯, 田源, 姚敏. 绿色网络和绿色评价: 节能机制、模型和评价 [J]. 计算机学报, 2011, 34(4): 593-612
Lin C, Tian Y, Yao M. Green Network and Green Evaluation: Mechanism, Modeling and Evaluation [J]. Chinese Journal of Computer, 2011, 34(4): 593-612
- [32] 王继永, 郭兵, 等. NoC 目录协议能耗分析与建模研究 [J]. 计算机学报, 2011, 34(9): 1603-1610
Wang J H, Guo B, et al. Analysis and Modeling of Directory Protocol Energy Consumption in NoC [J]. Chinese Journal of Computer, 2011, 34(9): 1603-1610
- [33] 张帅, 宋凤龙, 王栋, 等. 多核结构片上网络性能-能耗分析及优化方法 [J]. 计算机学报, 2013, 36(5): 988-1003
Zhang S, Song F L, Wang D, et al. Energy-Performance Analysis and Optimization for Networks-on-Chip [J]. Chinese Journal of Computer, 2013, 36(5): 988-1003
- [34] 伍元胜, 郭兵, 等. 面向核心网的多层网络能耗优化方法 [J]. 计算机学报, 2013, 36(7): 1538-1578
Wu Y S, Guo B, et al. Method of Multi-Layer Network Energy Consumption Optimization Orienting to Core Networks [J]. Chinese Journal of Computer, 2013, 36(7): 1538-1578
- [35] 廖彬, 于炯, 等. 基于存储结构重配置的分布式存储系统节能算法 [J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(1): 3-18
Liao B, Yu J, et al. Energy-Efficient Algorithms for Distributed Storage System Based on Data Storage Structure Reconfiguration [J]. Journal of Computer Research and Development, 2013, 50(1): 3-18
- [36] 王巍, 罗军舟, 宋爱波. 基于动态定价策略的数据中心能耗成本优化 [J]. 计算机学报, 2013, 36(3): 599-612
Wang W, Luo J Z, Song A B. Dynamic Pricing Based Energy Cost Optimization in Data Center Environments [J]. Chinese Journal of Computer, 2013, 36(3): 599-612
- [37] 曹仰杰, 钱德沛, 伍卫国, 等. 众核处理器系统核资源动态分组的

- 自适应调度算法[J]. 软件学报, 2013, 23(2): 240-252
- Cao Y J, Qian D P, Wu W G, et al. Adaptive Scheduling Algorithm Based on Dynamic Core-Resource Partitions for Many-Core Processor Systems[J]. Journal of Software, 2013, 23(2): 240-252
- [38] 王桂彬, 杨学军, 徐新海, 等. 异构系统功耗感知的并行循环调度方法[J]. 软件学报, 2011, 22(9): 2222-2234
- Wang G B, Yang X J, Xu X H, et al. Power-Aware Parallel Loop Scheduling Method for Heterogeneous System[J]. Journal of Software, 2011, 22(9): 2222-2234
- [39] 曹洁, 曾国荪. 云环境下计算资源动态能耗感知的并行任务调度方法[J]. 计算机科学, 2013, 40(10): 39-44
- Cao J, Zeng G S. Scheduling Method for Parallel Task of Dynamic Energy-aware of Computing Resources in Cloud Environment[J]. Computer Science, 2013, 40(10): 39-44
- [40] 李翔, 姜晓红, 吴朝晖, 等. 绿色数据中心的热量管理方法研究[J]. 计算机学报, 2014, 37(5): 1-21
- Li Xiang, Jiang Xiao-hong, Wu Zhao-hui, et al. Research of Thermal Management Methods for Green Data Centers[J]. Chinese Journal of Computers, 2014, 37(5): 1-21
- [41] 罗亮, 吴文峻, 张飞. 面向云计算数据中心的能耗建模方法[J]. 软件学报, 2014, 25(7): 1371-1387
- Luo Liang, Wu Wen-jun, Zhang Fei. Energy Modeling Based on Cloud Data Center[J]. Journal of Software, 2014, 25(7): 1371-1387
- [42] 周宽久, 迟宗正, 西方. 嵌入式系统软硬件低功耗优化研究综述[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(2): 423-428
- Zhou K J, Chi Z Z, Xi F. Survey on power optimization of embedded software and hardware[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(2): 423-428
- [43] 徐勇军. 集成电路功耗估计及低功耗设计[D]. 北京: 中国科学院计算技术研究所, 2006
- Xu Y J. Power Dissipation Estimation and Low Power Design for Integrated-Circuits [D]. Beijing: Institute of Computing Technology of Chinese Academy of Science, 2006
- [44] 凡启飞. 高性能嵌入式处理器低功耗技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009
- Fan Q F. Study on Low-Power Technologies of High Performance Embedded Processors[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009
- [45] 黄海林, 范东睿, 许彤, 等. 嵌入式处理器中访存部件的低功耗设计研究[J]. 计算机学报, 2006, 29(5): 815-821
- Huang H L, Fan D R, Xu T, et al. Research on Low-Power Memory Hierarchy of Embedded Processor[J]. Chinese Journal of Computer, 2006, 29(5): 815-821
- [46] 张冬松, 吴飞, 等. 开销敏感的多处理器最优节能实时调度算法[J]. 计算机学报, 2012, 35(6): 1297-1312
- Zhang D S, Wu F, et al. An Overhead-Aware Optimal Energy-Efficient Real-Time Scheduling Algorithm on Multiprocessors[J]. Chinese Journal of Computer, 2012, 35(6): 1297-1312
- [47] 易会战, 罗兆成. 面向高性能业务应用的基于剖视信息的系统能耗优化[J]. 软件学报, 2013, 24(8): 1761-1774
- Yi Hui-zhan, Luo Zhao-cheng. Profile-Guided Optimization of System Energy Consumption for High-Performance Operational Applications[J]. Journal of Software, 2013, 24(8): 1761-1774
- [48] Guo Min-yi, Pan Lin-feng, Yang Yan-qin, et al. An Effective State-based Predictive Approach for Leakage Energy Management on Embedded Systems[J]. Design Automation for Embedded Systems, 2009, 13(4): 311-332
- [49] Guo Bing, Wang Dian-hui, Shen Yan, et al. A Hopfield Neural Networks Approach for Power Optimization of Real-time Operating Systems[J]. Neural Computing and Applications, 2007, 17(1): 11-17
- [50] 黄江伟. DVS技术支持的移动嵌入式系统软件低功耗计算研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009
- Huang J W. Low-Power computing for embedded mobile system software with DVS support[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009
- [51] 熊冰, 郭兵, 等. 基于马尔科夫链的构件化嵌入式软件能耗估算模型[J]. 小型微型计算机系统, 2012, 33(3): 655-659
- Xiong B, Guo B, et al. Component-based Embedded Software Energy Estimated Model Based on Markov Chain[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2012, 33(3): 655-659
- [52] 刘啸滨, 郭兵, 等. 嵌入式软件体系结构级能耗建模方法[J]. 软件学报, 2012, 23(2): 230-239
- Liu X B, Guo B, et al. Embedded Software Energy Modeling Method at Architecture Level[J]. Journal of Software, 2012, 23(2): 230-239
- [53] 罗钢, 郭兵, 等. 源程序级和算法级嵌入式软件功耗特性的分析与优化方法研究[J]. 计算机学报, 2009, 32(9): 1869-1875
- Luo G, Guo B, et al. Analysis and optimization method of energy consumption characteristics in embedded software based on source-code and algorithm level[J]. Chinese Journal of Computer, 2009, 32(9): 1869-1875
- [54] 赵震, 郭耀, 雷志勇, 等. 基于模拟器的嵌入式操作系统能耗估算与分析[J]. 电子学报, 2007, 36(2): 209-215
- Zhao X, Guo Y, Lei Z Y, et al. Estimation and Analysis of Embedded Operating System Energy Consumption[J]. ACTA Electronica Sinica, 2007, 36(2): 209-215
- [55] 范贵生, 虞慧群, 陈丽琼, 等. 分布式嵌入式系统的自适应能耗管理和分析[J]. 软件学报, 2014, 25(2): 419-438
- Fei Gui-sheng, Yu Hui-qun, Chen Li-qiong, et al. Adaptive Energy Consumption Management and Analysis for Distributed Embedded System[J]. Journal of Software, 2014, 25(2): 419-438
- [56] Jacob J S, Preetha K G. A Novel Approach for Green Computing through Event-Driven Power Aware Pervasive Computing[M]// Advances in Computer Science and Information Technology. Springer, 2012: 81-88
- [57] Kipp A, Jiang T, Fugini M, et al. Layered green performance indicators[J]. Future Generation Computer Systems, 2012, 28(2): 478-489
- [58] Norman G, Parker D, et al. Using probabilistic model checking for dynamic power management[J]. Formal Aspects of Computing, 2005, 17(2): 160-176
- [59] 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, Workshops and Phd Forum (IPDPSW). IEEE, 2010: 1-8
- [60] Bai C, Sarkis J. Green information technology strategic justification and evaluation[J]. Information Systems Frontiers, 2013, 15(5): 831-847