

多核嵌入式系统节能调度 算法及相关技术研究

DuoHe QianRuShi XiTong JieNeng DiaoDu
SuanFa Ji XiangGuan JiShu YanJiu

◎ 王颖锋 著



经济科学出版社
Economic Science Press

多核嵌入式系统节能调度 算法及相关技术研究

王颖锋 著

经济科学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

多核嵌入式系统节能调度算法及相关技术研究 /
王颖锋著. —北京: 经济科学出版社, 2014. 8
ISBN 978 - 7 - 5141 - 4890 - 9

I. ①多… II. ①王… III. ①微处理器 -
系统设计 - 算法 - 研究 IV. ①TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 179734 号

责任编辑: 王长廷 袁 激
责任校对: 杨晓莹
版式设计: 齐 杰
责任印制: 邱 天

多核嵌入式系统节能调度算法及相关技术研究

王颖锋 著

经济科学出版社出版、发行 新华书店经销
社址: 北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮编: 100142
总编部电话: 010 - 88191217 发行部电话: 010 - 88191522

网址: [www. esp. com. cn](http://www.esp.com.cn)

电子邮件: [esp@ esp. com. cn](mailto:esp@esp.com.cn)

天猫网店: 经济科学出版社旗舰店

网址: [http: //jjkxcbs. tmall. com](http://jjkxcbs.tmall.com)

北京万友印刷有限公司印装

880 × 1230 32 开 5.625 印张 210000 字

2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5141 - 4890 - 9 定价: 30.00 元

(图书出现印装问题, 本社负责调换。电话: 010 - 88191502)

(版权所有 翻印必究)

前 言

近年来，芯片特征尺寸的不断缩小和处理器性能的不不断提高导致了能量消耗的快速增长。能量的快速增长带来了诸多隐患。比如说引起系统可靠性下降，缩短供电电池的使用寿命，增加处理器的制冷、散热成本，造成噪声污染，加重电磁、辐射干扰，影响设备的体积和重量等。因此能量消耗问题成为嵌入式系统设计关注的重点。解决能量消耗问题可以从多层面进行。然而在诸多层面的研究中，算法的节能效果是最为明显的。有资料显示，使用算法进行节能最多可以降低能量消耗的 75%。这种节能效果是其他层面的方法无法企及的。目前，节能调度算法的设计与分析已经成为嵌入式系统领域的研究热点，得到了来自世界范围的广泛关注。节能调度算法的研究不仅具有理论研究价值，而且有着现实推广价值。动态电压调节技术是降低动态能量消耗的有效技术，而自适应衬底偏置技术是降低泄露能量的有效技术。如何将动态电压调节技术并入调度算法，降低多核嵌入式系统的动态能量，是多核嵌入式系统节能调度领域的研究重点。如何将动态电压调节技术和自适应衬底偏置技术相结合并入调度算法，有效降低多核嵌入式系统的动态能量和泄露能量，是应对泄露能量和动态能量相当甚至超过动态能量这一趋势的良策。如何调整任

务顺序和任务内性能模式顺序以获得最小的电压转换时间,为松弛时间的产生和节能降耗提供更多的机会有着重要意义。研究节能调度算法的有效性需要用到任务图。随机有向无环图生成问题已经有相应的成熟研究成果,但随机条件任务图和随机扩展任务图生成问题尚没有相应的研究。对于总线冲突避免的节能调度中有待解决问题的分析还比较缺乏。这一系列问题的解决,对多核嵌入式系统的发展将起到极大的推动作用。针对上述问题,本书主要从以下几个方面做了积极的探索研究,概括如下:

为了提供更多的机会降低能量消耗,利用重定时有向无环图只有迭代间数据依赖这一特点,以及一个任务重排序性能模式顺序对任务执行没有影响这一优点,提出了一个技术重排序任务和性能模式。首先,当一个组件上的一个任务被设置为第一个执行的任务时,对于该组件上给定的任务集,计算最小的电压转换时间。然后从这些最小转换时间里选择一个最小的,作为该组件上任务集的最小电压转换时间。相应任务顺序和性能模式顺序是最终要执行的任务和性能模式顺序。

在电压转换时间是固定的或者可以忽略不计的情况下,为了降低具有动态电压调节能力的多核系统的能量消耗,提出了一种用于最小化多核系统能量消耗的算法。提出的算法考虑了性能模式转换开销和处理核之间的通信开销,这种算法用于降低含有依赖任务,并具有公共时间限制的应用程序的电压转换能量消耗和动态能量消耗。提出的算法首先在给定时间限制下通过选择合理的任务映射和频率安排获取最小的初始调度长度。接着迭代地选择任务进行频率调节,以便当将被选择的任务降低一个频率档并把被选择的任务所在的处理核上的任务按降电压顺序执行时产生最小的能量消耗。

日益缩小的特征尺寸导致在未来泄露能量会超过动态能量。动态电压调节和自适应衬底偏置的联合使用是同时降低动态能量和泄露能量的有效手段。为了响应这一趋势,提出了一个算法应用上述两种技术,降低具有硬时间限制的应用程序在多核系统上的能量消耗。首先,提出的方法确定初始的任务顺序和频率安排以在给定的时间限制下获得最小的初始调度长度。然后迭代地选择候选任务,调节候选任务的频率以获得最大的压缩能量和增长时间的比值。为了能够获得更多的松弛以降低能量消耗,它在每次频率调节后重排序候选任务所在处理核的任务。

在新的多核系统里,不仅处理核,且总线均具有动态电压调节和自适应衬底偏置能力。对于这样的系统,一个算法被提出用来降低处理核和通信链路的能量消耗。首先,提出的算法利用映射选择以降低处理核之间的通信量。然后,它通过同时调节计算任务和总线的频率以获得最大的压缩能量和增长时间比。这样的操作一直进行到进一步调节会导致背离给定时间限制为止。

提出了一种基于普通有向无环图获取条件任务图的算法。该算法首先采用随机有向无环图生成算法生成随机的有向无环图。然后基于相应的邻接矩阵或有向无环图计算每个节点的出边数量。接着,从这些有出边节点中选择作为有条件边的节点。为每个有条件边的节点生成随机整数。对每个有条件边的节点,生成的整数的数量与其出边的个数相一致。最后,对每个有条件边的节点将除了最后一个整数的每个整数与所有整数的和相除,得到相应的条件值。对于每个被选作具有条件分支的节点,当它具有 k 个条件分支,最后一个条件分支的条件值是1和前 $k-1$ 个条件值的和的差。该算法为面向条件任务图调度算法的测试、比较提供了公平、合理的测试基准。

提出了一种基于普通有向无环图获取包含计算任务和通信事务的随机扩展条件任务图算法。该算法首先基于随机邻接矩阵生成算法生成邻接矩阵。然后根据生成的邻接矩阵,确定有多于一个分支的计算任务,接着随机地选择有一个以上分支的计算任务作为有条件分支的计算任务,在考虑调度算法对计算任务大小的要求的基础上随机生成计算任务时间。随机生成小于计算任务时间的通信事务时间,随机生成一组随机整数为每个有条件分支的计算任务设置条件值。

对于本书中的每种算法,为了验证其有效性,都进行了详细实验条件描述,采用有效的测试集进行测试,并与同等测试条件下一些经典算法的测试结果进行了对比分析。测试结果表明:任务和性能模式重排序技术能确定合理的任务顺序和性能模式顺序,使最终电压安排或作为中间结果的电压安排产生的电压转换时间最小。基于动态电压调节技术的节能调度算法,在满足任务集时间限制的条件下取得了良好的节能效果。具有动态电压调节和自适应衬底偏置能力的多核系统节能调度算法,在满足给定时间限制的条件下,能够有效地降低动态能量和泄露能量。同时降低通信和处理核能量消耗的任务调度方法,能够在满足时间限制的条件下,同时降低多核系统中总线和处理核的动态能量消耗及泄露能量消耗。生成随机条件任务图的算法,依据同一个节点出发的条件边的条件值之和为1的原理,生成了满足测试要求的随机条件任务图。基于普通有向无环图获取包含计算任务和通信事务的随机扩展条件任务图满足了通信感和调度算法的测试需求。另外,多核嵌入式系统总线冲突避免的节能调度指出总线冲突避免的节能调度算法设计中有待解决的问题,并给出了多核嵌入式系统总线冲突避免的节能调度算法的发展方向。

笔者现为河南财经政法大学计算机与信息工程学院讲师，多年从事多核嵌入式系统节能调度相关领域的教学与科研工作。本书是笔者多年研究工作的成果。本书受郑州市普通科技攻关项目(141PPTGG379)的支持。在开展研究和本书撰写过程中，获得了苗许娜和邓淼磊博士的大力支持和帮助，在此对他们表示诚挚的谢意。本书引用他人研究成果的地方，均指明了文献出处，对于一些无法查明出处的信息，希望能够获得作者的谅解。

总体来看，本书的研究内容仅仅涉及多核嵌入式系统节能调度领域及相关技术的部分内容。由于笔者的学术水平和研究时间的限制，对于可以抽象为条件任务图的应用程序的节能调度以及缓存分配和调度算法的联合使用还没有进行研究，对于可以抽象为有向无环图的节能调度没有深入到作业层面进行节能调度研究。对于多核嵌入式系统节能调度领域及相关技术的研究还存在很多不足，在此恳请广大读者批评指正。如果本书的研究工作能对同行的研究有所启示，那将是笔者的莫大安慰。

作 者

2014年7月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究涉及的重要概念	1
1.2 引发嵌入式系统节能降耗的原因	4
1.3 嵌入式系统节能的有利因素	6
1.4 嵌入式系统的功耗组成	9
1.5 嵌入式系统的主要节能技术	11
1.6 研究中用到的多核处理器模型	13
1.7 多核嵌入式系统中的任务类型	14
1.8 本书的主要工作及结构安排	15
1.8.1 主要工作	15
1.8.2 结构安排	17
第2章 任务和性能模式重排序技术	19
2.1 背景知识	19
2.2 电压转换时间和能量模型	24
2.2.1 同时考虑电源电压和体偏置电压的 电压转换开销模型	24

2.2.2 仅考虑电源电压的电压转换开销模型	25
2.3 降低双模多任务电压转换时间的算法	25
2.4 模拟实验结果	30
2.5 本章小结	35
第3章 具有动态电压调节能力的多核系统节能调度算法	37
3.1 背景知识	38
3.2 相关研究工作	39
3.3 相关模型	43
3.3.1 系统模型	43
3.3.2 任务模型	44
3.3.3 功耗和性能模型	44
3.4 基于动态电压调节技术的节能调度算法	45
3.5 模拟实验结果	53
3.6 本章小结	57
第4章 具有动态电压调节和自适应衬底偏置能力的多核 系统节能调度算法	59
4.1 背景知识	60
4.2 相关研究工作	61
4.3 相关模型	63
4.3.1 系统模型	63
4.3.2 任务模型	64
4.3.3 功耗和性能模型	64
4.4 同时降低处理器动态和静态能量的算法	66
4.5 模拟实验结果	71

4.6 本章小结	75
第5章 同时降低通信和处理器能量消耗的任务调度方法	76
5.1 背景知识	77
5.2 相关研究工作	78
5.3 相关模型	80
5.3.1 系统模型	80
5.3.2 任务模型	81
5.3.3 功耗和性能模型	83
5.4 同时降低通信和处理器能量消耗的任务 调度方法	85
5.5 模拟实验结果	90
5.6 本章小结	94
第6章 生成随机条件任务图的算法	95
6.1 背景知识	95
6.2 激发动机的例子	97
6.3 CTG 模型	99
6.4 条件任务图的生成算法	100
6.5 实验结果	102
6.6 本章小结	105
第7章 包含计算任务和通信任务的扩展条件任务图生成算法	106
7.1 背景知识	106
7.2 激发动机的例子	108
7.3 扩展条件任务图表示	111

7.4	提出的扩展任务图生成算法	112
7.5	实验结果	114
7.6	本章小结	118
第8章	多核嵌入式系统总线冲突避免的节能调度	119
8.1	背景知识	119
8.1.1	多核嵌入式系统的能量构成	120
8.1.2	多核嵌入式系统结构简介	121
8.2	设计节能调度算法需要考虑的因素	126
8.2.1	任务优先级的研究现状与分析	126
8.2.2	任务粒度的研究现状与分析	129
8.2.3	通信事务和计算任务协同调度的研究 现状与分析	130
8.3	总结与展望	131
第9章	结束语	132
9.1	本书研究成果	132
9.2	未来展望	135
参考文献		138

第 1 章

绪 论

嵌入式系统经过几十年的发展，日益强大，赢得了广大的市场。其应用范围已经深入到国防科技、工业设计、医疗设备和个人生活等众多领域。嵌入式系统给人们的工作和生活带来了极大的便利。同时也带来了一些挑战，其中之一就是降低能量消耗的问题，该问题越来越受到人们的重视。能量消耗问题如果得不到很好地解决，势必会制约嵌入式系统的发展，其重要性不言而喻。本章介绍了本研究中用到的几个重要概念，介绍了引发嵌入式系统节能降耗的原因，研究了嵌入式系统节能降耗的有利因素，介绍了多核嵌入式系统中任务的类型，研究了嵌入式系统中的功耗组成，并对几个主要的节能技术进行了描述和总结，介绍了研究中用到的多核处理器模型，最后给出了本书的主要工作和章节安排。

1.1 研究涉及的重要概念

嵌入式系统诞生于微型计算机时代^[1,210,211]。嵌入式系统是

先进的计算机技术、半导体技术、电子技术和各个行业相结合的产物^[2,212]。对于嵌入式系统的定义比较多,但比较常见且被广泛接受的定义为以下两种:

从技术的角度定义:以应用为中心,以计算机技术为基础,软硬件可配置,对功能、可靠性、成本、体积、功耗有严格约束的专用计算机系统^[3,4,213,214]。

从系统的角度定义:嵌入式系统是设计完成复杂功能的硬件和软件,并使其紧密耦合在一起的计算机系统。术语嵌入式反映了这些系统通常是更大系统中的一个完整的部分,称为嵌入的系统。嵌入的系统中可以共存多个嵌入式系统^[4]。

它一般由以下几部分组成^[5]:

- (1) 嵌入式微处理器。
- (2) 外围硬件设备。
- (3) 嵌入式操作系统。
- (4) 用户的应用程序。

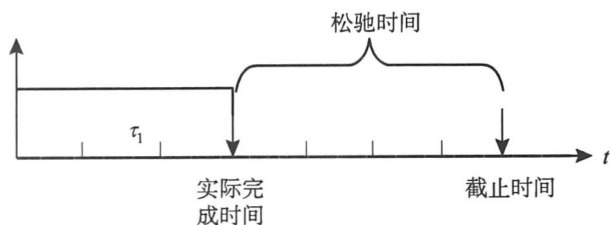
任务(任务集)松弛时间是指任务(任务集)先于截止时间完成时所剩余的时间(见图1)。

电压转换时间是指电压转换过程中产生的时间开销。

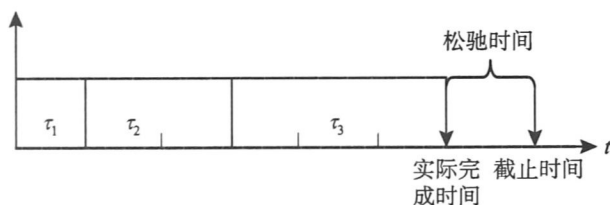
电压转换能量是指电压转换过程中产生的能量开销。

多核处理器又叫片上多处理器或单芯片多处理器。是将多个处理器核集成到一个单芯片上,整个芯片作为一个统一的结构对外提供服务,输出性能^[6,215]。

重定时技术首先由莱瑟森(Leiserson)提出,用于时序电路的优化问题^[216,217]。它能够在保证电路功能不变的前提下,通过移动时序元件的位置来优化时序电路。随后被扩展到应用程序的循环优化当中^[218-221]。它通过平均分布延迟(寄存器)来达到



(a) 任务的松弛时间



(b) 任务集的松弛时间

图 1-1 松弛时间

改善循环周期的目的。采用如下方式分配延迟：每从一个节点的输入边抽取一个延迟，就在该节点的输出边添加一个延迟，或者做相反的操作。从程序的角度，它是对循环体的重组。使在原循环体中存在相同迭代内数据依赖的任务，分别处于不同的迭代，从而提高了任务的并行能力。

重定时有向无环图是在有向无环图基础上，借助一定算法得出的每个节点都具有明确重定时值的有向无环图。例如，借助 RDAG 算法^[7]得出重定时有向无环图。该算法的思想是首先将每个节点的初始重定时值赋以零，然后将所有的叶节点放入一个队列，在放入的过程中每次尾指针均指向新进入的叶节点。在队列不为空的情况下，将队列中的每个节点依次出队，对于每个出队节点，判断该节点的重定时值加 1 和其父节点的重定时值哪个最大，取其中最大值作为其父节点的重定时值，如果其父节点不是尾节点，则将其父节点入队，并将尾指针指向其父节点，如此反

复就可以获得任务图中所有节点的重定时值。

所谓软件流水线就是让各个软件程序以流水线的方式运行,即一个程序的输出连接到另一个程序的输入。并且软件流水线的实现不受机器硬件的影响(硬件可以支持硬件流水技术,也可以不支持)^[8]。

1.2 引发嵌入式系统节能降耗的原因

嵌入式系统自问世以来,经过几十年的迅猛发展,已经深入到国防科技、工业设计、医疗设备到个人生活等众多领域。其应用之广、发展之快、普及之速,使得嵌入式系统为社会的进步做出了巨大贡献。在这几十年里,半导体工艺迅猛发展,元件尺寸日益缩小。例如,2010年Intel正式发布了采用32nm工艺制造的第一批处理器^[9]。缩小的单位面积和日益复杂的功能要求,导致单位面积里所集成的晶体管数目激增。另外为了满足高性能的需要,往往要以消耗大量的能量为代价,从而使功耗/能量飞速增长。正如文献[10]指出的:加工工艺调整和积极的性能改善导致能量消耗成为嵌入式系统的首要设计标准。“绿色计算”特指人们降低其使用的信息技术硬件能耗的努力^[11]。绿色计算目前已得到世界的广泛重视。因此,嵌入式系统节能问题成为国内外学者密切关注并积极研讨的重要课题之一^[12,13]。引发嵌入式系统节能研究的原因可以归纳概括为以下几个方面:

(1) 与通用的计算机不同,嵌入式系统只能消耗有限的能源。通常,嵌入式系统的能源是一节电池。如手机、掌上电脑

或是 CD 播放机等^[14]。受体积和重量的限制,电池的容量是有限的,并且电池的寿命也是有限的。因此有必要采取一定的措施降低能量消耗,从而延长电池的使用时间,减少电池的更换周期。

(2) 功耗的增加会激化处理器的散热、制冷问题^[15]。处理器单位面积功耗的增加,使得处理器内核的发热量提高,导致处理器稳定性降低,同时也增加了处理器散热成本,而且处理器的发热量在各个处理器内部模块之间分布极度不均,导致部分器件老化过快^[16],因此功耗增加意味着对散热、制冷的要求更为苛刻。

(3) 现在的嵌入式系统越来越趋向于智能化、多功能化,而智能化、多功能化则意味着更高的功耗/能量^[17]。只有降低功耗/能量才能使嵌入式系统引入更多、更复杂的智能控制。

(4) 性能与能量同为嵌入式系统设计的两个重要标准,为了满足日益增加的高性能计算的要求,导致计算功耗呈现近指数的增长。往往改善性能会遭遇能量的限制^[18],降低功耗/能量有利于性能的改善。

(5) 过高的能量消耗会影响到嵌入式系统的可靠性^[19-21]。大多数嵌入式系统都有着实时性要求。而大多数实时系统都有着可靠性的要求。任何不可靠性因素的发生都可能导致不可预测的灾难性后果。

(6) 功耗问题不仅仅会影响到用电池驱动的产品,也会影响到一般产品上市所需的时间和成本^[22]。

(7) 低功耗是嵌入式处理器的一个重要特性,它对终端设备的成本及体积大小具有显著影响^[23]。

(8) 功耗的问题如果得不到很好的解决,势必会影响到嵌