

基于 CPUfreq 的 DVFS 节能技术的研究与实现

王益涵¹, 王凯林¹, 孙宪坤¹, 张冬松², 吴飞¹

(1. 上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620;

2. 中国人民解放军 镇江船艇学院, 江苏 镇江 212000)

摘要: 针对目前计算机系统普遍存在的功耗较大的问题, 研究和实现了基于 CPUfreq 的 DVFS 节能软件; 首先, 分析和比较了计算机系统现有主要的功耗管理框架; 然后, 阐述了 CPUfreq 子系统及其框架结构, 并基于 CPUfreq 子系统开发了 DVFS 节能软件, 实现了对计算机 CPU 的动态电压频率调节 (DVFS); 最后, 以 720 p 视频播放为应用实例, 对使用 DVFS 节能软件后的计算机系统功耗进行测试; 测试结果表明, DVFS 节能软件可以实现对以 PC 为代表的计算机系统的初步节能。

关键词: 节能; 功耗管理; 动态电压频率调整

Research and Implementation of DVFS Energy-Saving Technologies Based on CPUfreq

Wang Yihan¹, Wang Kailin¹, Sun Xiankun¹, Zhang Dongsong², Wu Fei¹

(1. College of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. Zhenjiang Watercraft College of PLA, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: Nowadays, computer system requires larger power consumption. In order to solve this problem, the DVFS energy-saving software based on CPUfreq was researched and implemented. Firstly, analyzes and compares the existing main power management frameworks. Secondly, describes CPUfreq subsystem and its frame structure. Furthermore, develops the DVFS energy-saving software based on the CPUfreq subsystem and implements Dynamic Voltage Frequency Scaling (DVFS). Finally, takes the video display of 720p as example and the power consumption testing has been conducted on the computer system where the DVFS energy-saving software runs. The test results show that the DVFS energy-saving software can relatively save the energy consumption of the computer system such as PC.

Keywords: energy-saving; power management; DVFS

0 引言

随着计算机系统的普及, 计算机芯片的集成度和复杂度的不断提升。使得计算机的功耗, 芯片温度问题越来越突出, 具体体现在: 1) 计算机能耗问题: 计算机系统消耗的电能以及由此导致的资源环境问题越来越严重, 这与当前提倡的环境意识与环境行为相违背; 2) 手提电脑等移动设备的电池寿命和续航时间问题: 计算系统配置的处理器基本都是由三星、高通的公司生产的高频处理器, 然而这些处理器消耗的能耗是很大的。致使这些可移动设备的耗电能力不断增强, 但是目前的电池续航时间, 不能从根本上解决用户的需求; 3) 芯片的温度改变造成的芯片可靠性下降的问题: 处理器复杂度和集成度不断提高, 使得处理器的温度问题也越来越突出, 温度问题在很大程度上影响着芯片的可靠性。研究资料表明, 芯片的温度会提高十度, 处理器的可靠性会降至原来的 50% 左右^[1]。为了

减少以上问题带来的影响, 研究计算机的节能问题是十分必要的。

1 计算机系统现有的功耗管理模块

计算机系统中, 现有主要的功耗管理模块有: PM 子系统和 DPM 子系统。

1.1 PM 子系统

PM 子系统主要实现系统的管理和设备到低功耗状态的切换的功能^[2]。PM 子系统的结构如图 1 所示, 由硬件不相关的 PM 核、设备功耗管理模块以及底层 CPU 低功耗管理 BSP 组成^[2]。

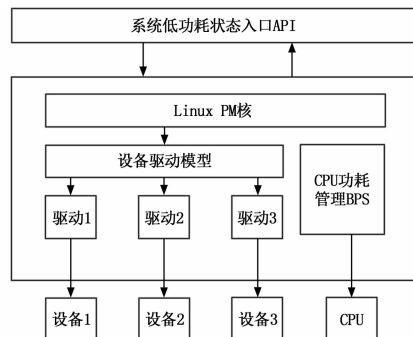


图 1 PM 子系统结构说明

收稿日期:2015-07-13; 修回日期:2015-09-16。

基金项目:国家自然科学基金(61272097);上海市大学生创新训练项目(cs1402012)。

作者简介:王益涵(1981-), 硕士讲师, 主要从事嵌入式与实时系统方向的研究。

吴飞(1968-), 博士, 教授, 主要从事计算机并行处理与节能控制方向的研究。

PM 核是 PM 子系统的重要组成部分，和具体硬件没有关联。它作为功耗管理主体与客体的接口，是整个系统节能的实现机制。PM 核定义了 pm_ops 结构来对 CPU 功耗管理底层设备进行抽象来支持 CPU 功耗管理和保证 PM 核的硬件不相关性，在此结构中定义了一些与低功耗状态进行切换的相关回调函数^[2]，例如，.prepare 函数是让 CPU 完成功耗状态切换前的准备工作，.enter 函数是将 CPU 转换至低功耗工作状态等。这些回调函数会根据系统功耗状态的要求对 CPU 实现实际的设置。

Linux 设备驱动模型为 Linux 系统中设备提供依赖。

PM 子系统的框架结构层次分明，可移植性强。但是它的缺点是在多核设备上的运行效能将大打折扣。因为在 PM 框架中某一个 CPU 功耗状态的变化不能够切换系统的功耗状态，只有系统中全部的 CPU 状态同步变化时才能将系统切换至相应的功耗状态。使得多核处理器的硬件特性没有被充分利用，以至于系统的电能资源没有被很好的分配给系统。另外，Linux PM 框架在对设备进行功耗管理时对其设备驱动模型的依赖很严重，限制了 PM 子系统在其他操作系统中的应用。

1.2 DPM 子系统

DPM 是以策略框架为核心的功耗管理框架^[3]。它面向对象主要是装有嵌入式系统设备的节能，能够最大程度的利用这些设备的处理器特性进行功耗管理，并且提供一些机制来保证软件系统和硬件设备在功耗需求上的协调。DPM 子系统的结构如图 2 所示。

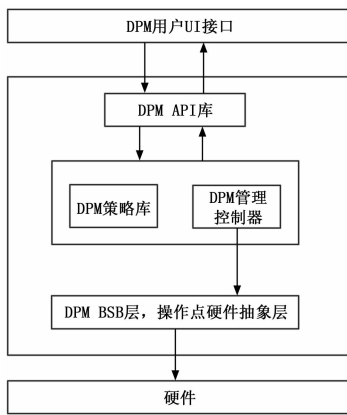


图 2 DPM 子系统结构图

DPM 子系统之所以能够以任务为基本单位进行系统功耗管理是因为它通过内核模块的方式来实现操作系统的电源管理。在这方式下使得系统中的每个任务都能够运行在一个满足自身需求的操作状态下，避免了不必要的功耗浪费，从而提高了系统功耗管理效率，实现了有效的设备电源管理，满足了 Linux 的需求^[4]。但是，DPM 框架也存在一些不足之处，例如，DPM 框架存储策略库中的必要数据需要花费相当大的内存空间，如果数据相对较多，则会占用过多的内存。而且，该框架目前还不能对多核设备的功耗进行有效的管理，只能面向单核平台进行功耗管理。

2 CPUfreq 子系统

CPUfreq 面向不同的处理器提供了一个统一的设计架构，

使得 Linux 内核更好地支持不同的 CPU 调频技术^[5]。它负责在系统运行时动态地调整内核的运行频率和降低系统运行时功耗^[6]。

CPUfreq 子系统的体系架构如图 3 所示，它由内核调控器、体系结构无关的 CPUfreq 核和底层的 CPU-specific Driver 组成。

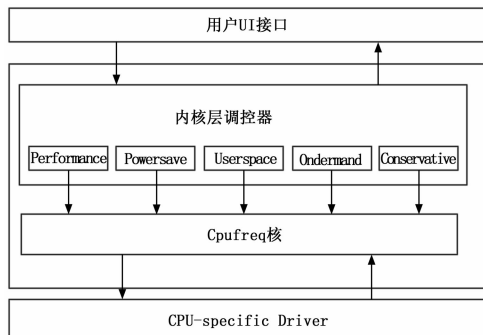


图 3 CPUfreq 子系统结构图 sss

2.1 CPU-Specific Driver

CPU-Specific Driver，位于 CPUfreq 子系统的最底层，其功能是实现 CPU 的调频等一系列与之相关的操作的驱动程序。

2.2 CPUfreq 核

CPUfreq 核，位于 CPU-Specific Driver 的上层，具有硬件不相关性。封装了变频技术以及根据工作负载选择合适的运行频率，为机制与策略提供了规范的通信接口。

2.3 内核调控器

内核调控器，位于 CPUfreq 核的上层，是 CPUfreq 子系统的核心。它根据策略在必要的时间选择一个 CPU 适合的工作频率。目前的 Linux 内核（自 2.6.0 以后）中提供了 Performance、Powersave、Userspace、Ondemand 和 Conservative 等 5 种调控器供用户选择使用^[7]，如图 4 所示。

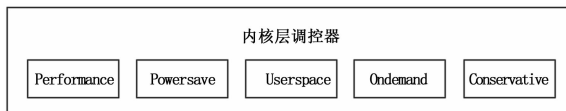


图 4 CPUfreq 内核调控器

- 1) Performance: CPU 工作在它所支持运行的最高频率上。
- 2) Powersave: CPU 工作在它所支持运行的最低频率上。
- 3) Userspace: 用户态应用程序通过它提供的接口按照需求调节 CPU 的运行频率^[8]。
- 4) Ondemand: Ondemand 只能在内核态下运行，能够以更加小的时间间隔对系统的负载采集并分析。
- 5) Conservative: Conservative 是在 Ondemand 算法的基础上改进而来的，它在降低频率时会可供选择的频率中选出确保 CPU 运行在 80% 以上的负载频率。在这个前提下，Conservative 选择 CPU 所支持运行的最低频率。大量测试数据表明 Conservative 能够在不影响系统性能的前提下实现更加高效的节能。

CPUfreq 以上 5 个内核调控器，不能在同一时刻使用其中

的两个或两个以上的调控器。但是, 这些调控器可以在设备运行中根据运行的需要进行相应的切换。另外, CPUfreq 的内核调控器也可以作为一个策略管理模型, 能够根据 CPUfreq 现有的调控器模型派生出相应的自定义调控器来实现在 DVFS 算法下的 CPU 调频。

2.4 用户接口

CPUfreq 子系统在用户态为用户提供以下接口^[9-10]:

cpufreq _ max _ freq: CPU 运行在最高频率。

cpufreq _ min _ freq: CPU 运行在最低频率。

cpufreq _ cur _ freq: 获取当前运行的 CPU 的工作频率。

governor: 规定了运行频率在最高运行频率和最低运行频率所确定的区间内选择。

scaling _ cur _ freq: 不会对 CPU 的硬件寄存器进行检查, 仅返回当前 CPUfreq 缓存的内核的运行频率。

scaling _ available _ governors: 通知用户当前状态下可以使用的调控器。

scaling _ governor: 显示当前的管理策略。

3 基于 CPUfreq 的 DVFS 节能软件

针对目前 PC 功耗较大的问题, 以 Linux 为操作系统平台, 基于 CPUfreq 子系统, 以 C/C++ 语言为开发语言, 以 QT 为图形界面开发工具, 以 MySQL 为数据库管理系统, 以功耗测试仪为测试工具, 开发了 DVFS 节能软件。

3.1 系统架构

DVFS 节能软件, 运行在 PC 机 Linux 系统上, 基于 CPUfreq 子系统, 可根据需要灵活调节 CPU 内核的频率, 同时通过 USB 接口连接功耗测试仪, 并将 CPU 内核频率和 PC 当前功耗实时记录到 MySQL 数据库管理系统的日志表中, 其体系架构如图 5 所示。

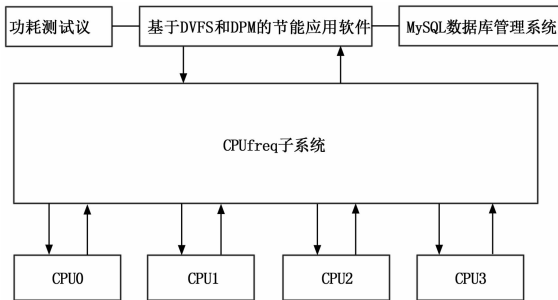


图 5 基于 CPUfreq 的 DVFS 节能软件的架构

3.2 系统功能

DVFS 节能软件, 面向不同的处理器和 Linux 操作系统, 实现了 CPU 内核模式和频率读取、CPU 内核模式和频率设置、PC 有功功率读取、CPU 频率功耗日志记录和显示等功能。

3.3 模块划分

根据上述分析, DVFS 节能软件, 可划分为 CPU 内核模式读取和设置、CPU 内核频率读取和设置、功耗测试仪驱动、CPU 各核频率和功耗日志、CPU 各核频率和功耗显示等 5 个功能模块, 如图 6 所示。

3.4 程序流程

DVFS 节能软件的流程如图 7 所示。

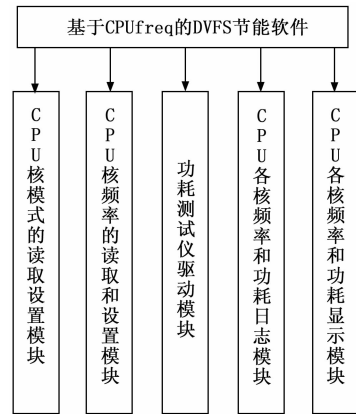


图 6 基于 CPUfreq 的 DVFS 节能软件的功能模块划分

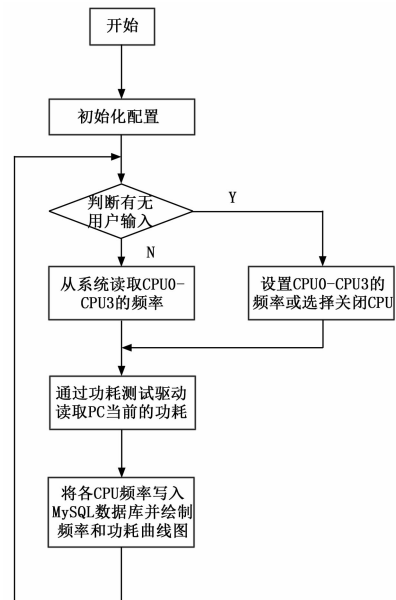


图 7 基于 CPUfreq 的 DVFS 节能软件的流程图

1) CPUfreq 初始化配置。

2) 用户根据实际需要选择是否调节内核 CPU0-3 的工作频率, 例如, 当负载较低时, 可适度降低 CPU0-3 的工作频率, 甚至关闭 CPU1-3。

3) 若有用户输入, 根据用户指令改变 CPU 各内核的频率及其工作状态, 同时通过功耗测试仪驱动读取 PC 当前的功耗, 将这些数据写入 MySQL 数据库中, 并绘制当前 CPU 各内核的频率和 PC 功耗曲线图。

4) 若无用户输入, 仅读取当前 CPU 各内核的频率及其工作状态, 同时通过功耗测试仪驱动读取 PC 当前的功耗, 将这些数据写入 MySQL 数据库中, 并绘制当前 CPU 各内核的频率和 PC 功耗曲线图。

5) 回到 2), 重新开始。

4 测试环境、实例和结果

4.1 测试环境

基于 CPUfreq 的 DVFS 节能软件的测试环境, 由目标 PC 机和功耗测试仪构成, 如图 8 所示。

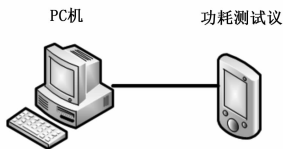


图 8 DVFS 节能软件的测试环境

1) 目标 PC 机: 目标 PC 机是基于 CPUfreq 的 DVFS 节能软件的运行主体, 其软硬件配置如表 1 所示。

表 1 测试用目标 PC 机的软硬件配置

处理器	英特尔 Core i5-3230M(四核)
内存	4 GB
硬盘	500 GB
操作系统	CentOS 6.3

2) 测试工具: 选用手持式用电检测仪 HP-8713/2A 作为运行 DVFS 节能软件的目标 PC 的功耗测试工具, 该检测仪的工作范围如下:

- 负载电流: 0.001~2 A;
- 输入电压: 85~265 V;
- 电源频率: 45~65 Hz;
- 有功功率: 0.01~440 W.

3) 测试条件: 测试时环境温度为 15~35℃, 相对湿度为 (25~75)%, 大气压力为 86~106 kPa。测试电源为交流 220 (±2.2) V, 电源频率为 50 (±1) Hz, 总谐波失真不超过 2%^[11]。

4.2 测试实例和结果

将 PC 上常见的应用——视频播放作为测试实例: 即在目标 PC 上播放同一影片 (720 p), 对比未使用和使用基于 CPUfreq 的 DVFS 节能软件的情况时目标 PC 的功耗。

1) 未使用基于 CPUfreq 的 DVFS 节能软件的情况:

当目标 PC 机的 CPU 四核全速 (即 CPU0、CPU1、CPU2 和 CPU3 均运行在最高频率 2 600 MHz) 播放 720 p 影片时, 目标 PC 的功耗在 26~29 W。

2) 使用基于 CPUfreq 的 DVFS 节能软件的情况:

当运行基于 CPUfreq 的 DVFS 节能软件, 通过调节频率使 CPU 处于节能状态 (即 CPU1、CPU2 和 CPU3 均关闭, CPU0 运行在最高频率 2 600 MHz) 播放同一部 720p 影片时, 目标 PC 的功耗在 22~24 W, 相比未使用基于 CPUfreq 的 DVFS 节能软件, 功耗降低了 20~25%, 如图 9 所示。

5 结语

为解决计算机在使用过程中的能耗问题, 本文在研究 Linux 各种功耗管理框架的基础上, 基于 CPUfreq 子系统实现了对 CPU 各个内核频率的动态调节。测试结果表明, 采用基于 CPUfreq 子系统的节能程序可以方便快速地实现 DVFS, 从而有效地降低功耗。下一步的工作, 将其移植和应用到基于

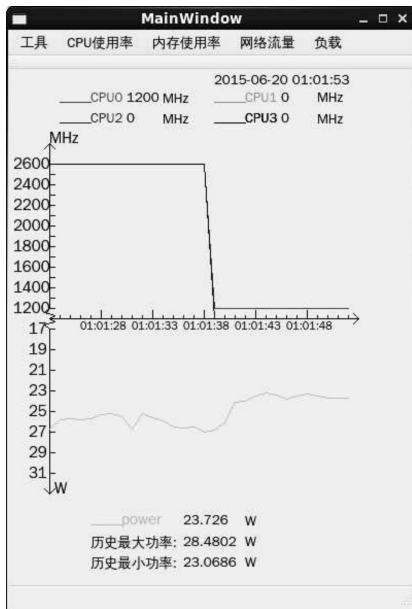


图 9 运行 DVFS 节能软件情况下播放 720 p 影片 PC 功耗的测试结果

Linux 的嵌入式移动设备中, 延长其电池寿命和待机时间。

参考文献:

- [1] 高旭宏. 操作系统级低功耗技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
- [2] 汪琳玫. 多核环境下动态功耗管理框架的研究及在 aComl 中的应用 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [3] 韩进. 嵌入式系统功耗管理研究与实现 [D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [4] 黄武陵, 宋莉, 何小庆, 等. 嵌入式 Linux 的动态电源管理技术 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2005 (9): 30-33.
- [5] 贺小川. 单芯片系统 (SoC) 中的实时任务调度算法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- [6] 宋靖. SkyDPM 动态电源管理模拟系统的研究与实现 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [7] 范圆圆. 基于资源监控的 Linux 电源管理系统的设计与实现 [D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院, 2013.
- [8] 张国琛. 基于 Linux 的低功耗手持设备系统的设计与实现 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [9] Chen J. J. and Kuo. C. F. Energy-Efficient Scheduling for Real-Time Systems on Dynamic Voltage Scaling (DVS) Platforms [a]. //RTCSA [C]. 2007: 28-38.
- [10] Isci C, Contreras G, Martonosi M. Live, runtime phase monitoring and prediction on real systems with application to dynamic power management [a] Proceedings of the 39th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture [C]. IEEE Computer Society, 2009: 359-370.
- [11] CQC3114-2009, 中国质量认证中心认证技术规范 [S].