

文章编号 1004-924X(2014)07-1929-09

非平稳服务请求下的功耗管理

马喜强^{1,2*}, 宋喜佳^{1,2}, 刘维亚¹, 郑喜凤¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:针对嵌入式系统的多任务环境,提出了混合模型功耗管理算法,用于对服从一般分布的系统进行建模。首先,介绍了现有的动态功耗管理策略算法,阐述了算法需要改进的原因。然后,使用重标极差法(Rescaled Range Analysis, R/S)对非平稳服务请求下的时间序列进行长距离相关性分析;根据不同的分析结果选择相应的最大概率策略,即基于电池剩余电量的超时策略、模糊非标准 PID 策略和半 Markov 随机策略。最后,给出了策略参数的确定方法并通过实验的方法对本文提出的策略进行分析。实验结果表明,本文策略弥补了常规动态电源管理策略的不足,具有更广泛的适应性;在性能损失 10% 的条件下,系统平均功耗减少了 37%,命中率大于 60%,更稳定、有效地降低了功耗,有利于在嵌入式系统中应用。

关键词:功耗管理;重标极差法;半 Markov 决策过程;策略优化;嵌入式系统

中图分类号: TP273; TP301 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142207.1929

Power-aware management for non-stationary service requests

MA Xi-qiang^{1,2*}, Song Xi-jia^{1,2}, LIU Wei-ya¹, ZHENG Xi-feng¹

(1. *Changchun Institute of Optic, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

* *Corresponding author, E-mail: maxiqiang200@sina.com*

Abstract: For multitasking environment of an embedded system, an improved method called hybrid model for power management algorithm was proposed for modeling of system with general distribution. First, the dynamic power management strategy algorithm was introduced, and the reason why it needed to be improved was expounded. Then, the Rescaled Range Analysis (R/S) method was used to analyze the long distance correlation of non-stationary time service requests and the corresponding strategy was selected depending on the different results. These strategies are remaining battery power timeout strategy, fuzzy not quite PID strategy and semi-Markov random strategy. Finally, the method for determining the strategy parameters was given and the strategy proposed in this paper was analyzed experimentally. The experimental results show that this strategy makes up for the deficiency of conventional dynamic power management strategy and has more extensive adaptability. Under the condition of 10% performance loss, the average system power

收稿日期: 2013-07-26; 修订日期: 2013-09-24.

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目 (No. 2009BAE73B01)

consumption is reduced by 37%, and the hit rate is more than 60%. The algorithm reduces power consumption more efficiently than other methods, and is applicable in embedded systems.

Key words: power management; rescaled range analysis; semi-Markov decision processes; policy optimization; embedded system

1 引言

目前,随着便携式电子设备(如手机、笔记本电脑等)的广泛应用,由其引发的电子系统对环境的影响问题以及系统级的节能设计越来越受到关注^[1-3]。动态功耗管理(Dynamic Power Management, DPM)是将处于空闲状态的系统组件置于低功耗模式,从而使系统性能与功耗之间达到平衡的一种灵活性高且应用广泛的设计方法^[4-5]。系统可通过功耗管理器来监测整个系统以及系统组件的运行状态,并且控制状态转换。整个控制过程被称为功耗管理策略。

功耗管理策略大体上可分为 3 类:(1)超时(Timeout)策略^[6];(2)预测(Predict)策略^[7];(3)随机 Markov 策略^[8]。超时策略具有原理简单应用广泛的特点,但它是一种探索式策略,耗时较低;预测策略的特点在于一旦阈值预测不准确,结果可能适得其反,增大功耗;随机 Markov 策略则需要负载满足马尔科夫链条件。以上策略均忽略了负载的远距离历史效应,且均未考虑多任务下系统负载的非平稳问题。

多任务下系统负载的非平稳特性是指在不同任务中由于设备的使用方式和任务的执行顺序有差别而使设备负载表现出的随机性。对于非平稳系统,Chung^[9]和 Luiz^[10]等提出了基于滑动窗口的 DPM 算法;Li^[11]等应用基于强化学习的 Q 学习方法对参数未知系统进行了优化,这种方法能够有效地优化确定型策略,但对带约束优化问题不适用;S. Irany 提出了基于概率统计的超时策略,即用窗口内的样本直方图近似计算分布,从而确定最佳超时门限^[12]。以上算法都假设负载符合一定的特性,如几何分布、负指数分布、重尾分布等,不具有通用性。Lee^[13]等人对于属于一般分布情况的负载进行了分析,提出了基于人工神经网络的(Multi-layer Perception, MLP)和

(Time Delay Neural Network, TDNN)算法,但算法计算量大,不适用于实际嵌入式设备。

以上的分析表明,功耗管理策略的关键在于下一时段负载空闲时间长度的确定。Srivastava^[14]等人的研究结果显示,负载工作(Busy)状态和空闲(Idle)状态的统计分布是有规律的,即它们形成一个 L 型分布。Busy 时段和 Idle 时段本质上是一种非周期性循环关系,即 Busy 时段和 Idle 时段之间的循环是不确定的,但大致的平均循环周期是固定的。非周期性循环在混沌理论中被称作混沌吸引子。重标极差法(Rescaled Range Analysis(R/S)分析法是计算时间序列是否遵从随机游走的主要方法,并且能够估计非周期性循环的长度,在经济学领域应用广泛。因此,本文使用 R/S 分析法分析了用户空闲时间序列的长距离相关性,并综合传统策略的优点提出了混合模型功耗管理策略。

2 混合模型功耗管理策略整体架构

混合模型功耗管理策略的算法流程图如图 1 所示。首先对系统负载的历史空闲时间序列特性进行分析,主要包括集中趋势效应和长距离相关性,然后根据相应的结果选择概率最大的功耗策略。集中趋势测度(Central Tendency)在统计学中是指一组数据向某一中心值靠拢的程度。用标准差 $\sigma(X)$ 与平均值 \bar{X} 的比值表示:

$$\text{COEF} = \sigma(X) / \bar{X}. \quad (1)$$

如果集中趋势小于 1,则表明序列集中趋势明显,因此,可简单地采用平均值作为空闲时间的预测值;如果集中趋势大于 1,则需要计算 Hurst 指数。Hurst 指数(H)是判断时间序列是否遵从随机游走的指标^[15]。如果 $H=0.5$,则表明时间序列满足无记忆分布,此时满足马尔科夫链条件。当系统只有一种低功耗模式时,为降低算法复杂度,可以采用基于电池剩余电量的超时策略(属于

超时策略);当系统具有多种低功耗模式时,采用与之相适应的半马尔科夫随机策略(属于随机策略)^[16]。如果 $H \neq 0.5$, 则表明时间序列具有正的长程相关性或负的长程相关性, 此处统称为长距离相关性, 即长期记忆性, 此时采用模糊非标准 PID 策略(属于预测策略)。

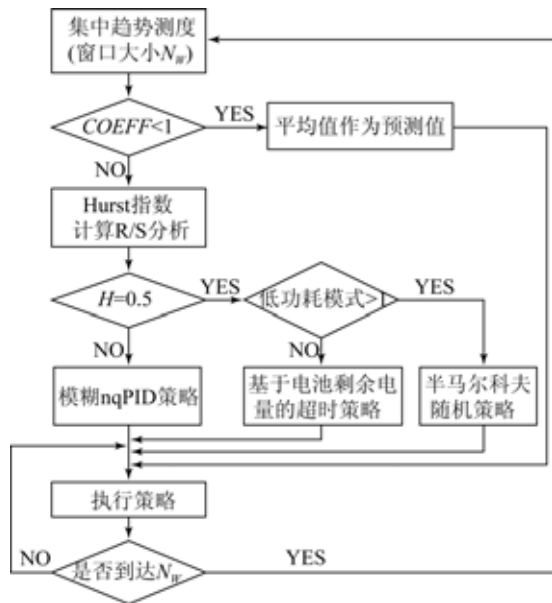


图 1 混合模型电源管理策略流程图

Fig. 1 Flowchart of management policy for hybrid model power

3 Hurst 指数计算——R/S 分析法

R/S 分析法的表达式通常如下:

$$\left(\frac{R}{S}\right)_n = cn^{H}. \quad (2)$$

R/S 分析法具体实现步骤如下:

(1) 假定一个时间序列 P_i , 长度为 M , 则定义 R_i 为:

$$R_i = \text{Log} \left\{ \frac{P_{i+1}}{P_i} \right\}, i = 1, 2, 3, \dots, M-1. \quad (3)$$

(2) 以长度 A 将序列均分为 n 个子区间。其中任一子区间表示为 I_a , 在 I_a 中的元素表示为 $N_{k,a}$, 则 I_a 的均值 e_a 为:

$$e_a = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^A N_{k,a}. \quad (4)$$

(3) 子区间 I_a 的累积截距 $X_{k,a}$ 定义为:

$$X_{k,a} = \sum_{i=1}^k (N_{i,a} - e_a). \quad (5)$$

(4) 极差定义为:

$$R_{I_a} = \max(X_{k,a}) - \min(X_{k,a}). \quad (6)$$

(5) 子区间 I_a 的标准差为:

$$S_{I_a} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^A (N_{k,a} - e_a)^2}{A}}. \quad (7)$$

(6) R/S 定义为:

$$\left(\frac{R}{S}\right)_n = \frac{1}{n} \sum_{a=1}^n \frac{R_{I_a}}{S_{I_a}}. \quad (8)$$

(7) 不断增加 A 的长度, 并重复 (1)~(6) 步, 直到 $A = (M-1)/2$ 。以 $\text{Log}(n)$ 为解释变量, $\text{Log}(R/S)$ 为被解释变量, 进行线性回归, 式 (9) 计算得到的斜率就是 Hurst 指数 H 的估计值。

$$\text{Log}(R/S) = \text{Log}(c) + H \cdot \text{Log}(n) + \epsilon. \quad (9)$$

4 基于电池剩余电量的超时策略

4.1 电池应用特性研究

大多数手持设备的研究中都将电池作为一个理想模型, 这是因为电池电压是恒定不变的, 电池电量随电池电流线性变化。然而, 在实际使用过程中电池会体现出非理想特性。目前在不同的电流负载下对电池行为进行建模, 主要可以分为 4 类: 电化学模型、随机模型、电路模型和分析模型^[17]。分析模型是通过少量的公式来描述电池的特定性质, 其公式参数少, 应用十分方便。分析模型的主要代表有: Kinetic 模型、Peukert 模型、Vrudhula 模型等^[18]。

对于实际电池来说, 由于电池的化学特性, 电池在使用过程中主要呈现出 2 个非理想特性: 电流相关性和自恢复效应, 如图 2 所示。其中: 电流相关性反映了电流负载和电池容量的非线性关系,

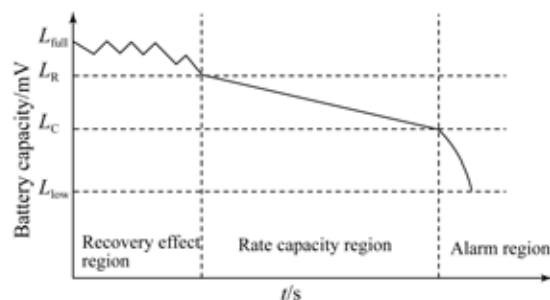


图 2 电池的非理想特性

Fig. 2 Nonideal characteristics of battery

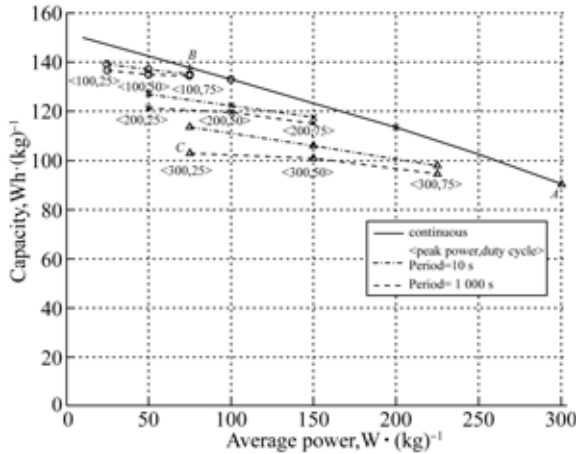


图 3 不同峰值功率下的电池容量

Fig. 3 Battery capacity varies with active peak power

电流负载的变化率决定电池容量的变化率, 电流越大, 电池总容量越小; 自恢复效应反映了当电池空闲时电池容量的恢复现象。Martin^[19]等人通过实验发现, 电池容量主要受峰值电流的影响, 如图 3 所示。由图 3 可知, 同等条件下, 峰值电流越大, 电池容量越小, 电池使用时间越短。

4.2 策略的基本思想

从图 2 中可以看出, 系统工作时间与电池电量局部呈不规则关系, 但曲线变化整体上还是有一定规律的, 其共分为三个阶段: 第一阶段自恢复效应补偿明显, 电量下降缓慢; 第二阶段电池电量与时间趋于线性关系, 电流负载决定电池电量, 电池电量下降加快; 最后阶段电池放电行为占主导, 电池电量急速下降。因此, 当电池状态处于第一阶段时, 以充分利用电池恢复效应为主, 本文采用折扣超时阈值 $a \times T_{be}$ (平衡时间 T_{be} 表示能够节省能量的最小空闲时间) 作为超时策略的固定阈值, a 值一般取 $0.5 \sim 0.8$ ^[20]; 当电池状态处于第二阶段时, 因为电池电量与时间趋于线性关系, 所以采用超时阈值 T_{be} 作为超时策略的固定阈值; 当电池状态处于第三阶段时, 电池电量急速下降, 采用立即关闭、延时唤醒的贪婪策略, 延时唤醒时间一般大于平衡时间 T_{be} 。

4.3 电池状态的确定方法

由于建立精确的电池模型比较复杂, 所以假定电池供电是连续的, 并且系统负载到来的时刻独立且同分布。Peukert 方程中电池非线性模型的形式为 $Q = K/I^a$, 其中: k 是由电池的化学物理

特性决定的常数; I 表示负载电流。一般情况下, a 取值为 $0.2 \sim 0.7$ 。由于 Peukert 方程只是考虑了电池的电流相关性, 在此基础上, 本文提出了改进型的 Peukert 方程, 表示如下:

$$Q = K/I^a - \Delta B(I) + \Delta P(I_P), \quad (10)$$

其中: $\Delta B(I)$ 为电池空闲时间恢复的电量; $\Delta P(I_P)$ 表示峰值电流 I_P 对应的电量函数映射。本文将系统任务分成若干时间段, 在系统工作期间单位时间段内的平均能耗用 ΔH 表示, 相邻空闲期间单位时间段内的平均能耗用 ΔB 表示, 并设 $B(L_i)$ 表示截止时间为 L_i 时的能耗, Q_i 表示第 i 时间段的电池剩余电量, 这 2 个值可以通过监测得到。则 ΔH 和 ΔB 可以用以下 2 式表示:

$$\Delta H = \int_1^2 B(L_i) dt / (t_2 - t_1), \quad (11)$$

$$\Delta B = (Q_i - Q_{i-1}) / \Delta t. \quad (12)$$

设 $\Delta M = \Delta H + \Delta B$, 若 $\Delta M \leq 0$, 则电池状态处于第一阶段; 若一定时间内持续有 $\Delta M > 0$ 且 $\Delta B < 0$, 这表明电池第一阶段状态开始模糊, 则认为电池状态进入第二阶段; 若 $\Delta M > 0$, 并且数值增大, 则认为电池状态进入第三阶段。

5 模糊非标准 PID 策略

Varma^[21]等人提出了一种应用于动态电压调度的控制理论方法, 并取得了良好的效果。本策略参考其基本思想: 用历史空闲周期的预测值、空闲周期的实际值和空闲周期的变化率的线性组合来预测下一空闲周期长度。在一般 PID 思想的基础上提出了非标准 PID 策略, 然后根据模糊控制原理对非标准 PID 参数进行在线自整定。

5.1 一般 PID 策略

PID 控制策略使用方便, 适应性强, 鲁棒性好。 K_p 、 K_i 、 K_d 都是大于 0 小于 1 的变量。通过调节 PID 参数, 可以使系统的节能效果趋于最优^[1]。一般 PID 控制的表达式如下:

$$y(t) = K_p x + K_i \int_0^t (x - y) dt + K_d \frac{dx}{dt}. \quad (13)$$

5.2 非标准 PID 策略

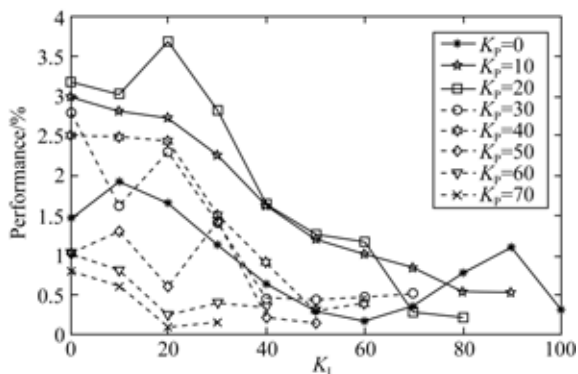
本文根据一般 PID 思想, 对其进行了改进和转化, 首先把连续时间转换为离散时间, 即用求和代替积分, 用差分代替微分, 并把无限时段的求和

改为有限时段的求和, 即只求取负载变量过去的 m 个时间段的平均值; 接着移除等式右端的包含反馈特征的 y 项, 目的是预测下一空闲周期长度, 移除反馈项之后降低了系统复杂度。把 x_i 定义为第 i 个实际空闲时间的长度, y_i 定义为第 i 个估计空闲时间的长度, 则 PID 等式变为:

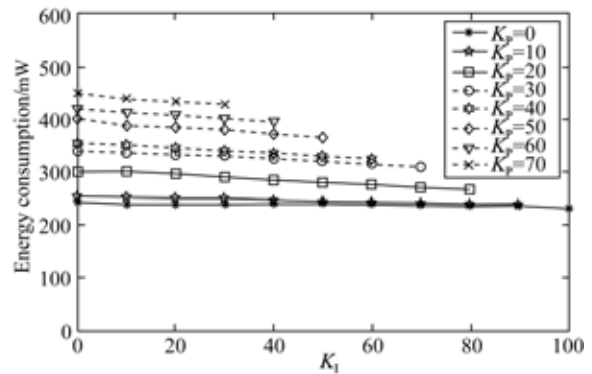
$$y_{n+1} = K_P \times x_n + K_I \times \sum_{i=n-m+1}^n \frac{x_i}{m} + K_D \times (x_n - x_{n-1}). \quad (14)$$

比例部分(等式右端第一项)表示的实际意义是把上次实际空闲时间作为下一次空闲时间的预测时间。这样就确保系统能快速地跟踪负载的变化; 积分部分(等式右端第二项)表示的实际意义是把历史实际空闲时间的平均值作为下一次空闲时间的预测时间。这样就平滑了负载的“毛刺”, 使系统趋于稳定; 差分部分(等式右端第三项)表示的实际意义是把上次实际空闲时间的变化率作为下一次空闲时间的预测时间的补偿。这在实际的系统中是经常遇到的。

本策略的优点在于: 系统负载稳定时, 输出也稳定; 暂时的系统负载输入波动不会导致输出波动; 并且该算法具有收敛性。策略执行的关键在于参数 K_P 、 K_I 、 K_D 的选取。为了缩小搜索空间、简化设计过程, 假定参数之和为 100% (此处令 $K_P + K_I + K_D = 100$), 从而将三维问题转化为二维问题。 K_P 、 K_I 参数的选取对系统敏感度的影响如图 4 所示。由图 4 可知, 当 $K_P = 40$, $K_I = 20$, $K_D = 40$ 时, 设计空间相对平滑。为了使本策略具有灵活性和可扩展性, 下面使用模糊推理方法进行非标准 PID 参数的在线自整定。



(a)不同的参数选取对系统性能的影响
(a)Influence of K_P , K_I on system performance



(b)不同的参数选取对系统能耗的影响
(b)Influence of K_I , K_P on energy consumption for system

图 4 非标准 PID 参数的选取对系统的影响

Fig. 4 Influence of selection of nonstandard PID parameters on system

5.3 模糊非标准 PID

PID 模糊自整定是在常规 PID 的基础上, 应用模糊理论找出 PID 参数 (K_P 、 K_I 、 K_D) 同偏差值 e 和偏差变化值 ec 之间的模糊关系^[22], 并根据不同的 e 和 ec 对控制参数进行在线修改整定, 从而使对象具有良好的动、静态性能。首先利用 FIS 图形窗口创建一个两输入 (e 、 ec) 和三输出 (K_P 、 K_I 、 K_D) 的模糊控制器, 这里选用 Mamdani 的极小极大推理作为模糊推理规则。 e 和 ec 的论域值均为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, -0, +0, +1, +2, +3, +4, +5, +6\}$, K_P 、 K_I 和 K_D 的模糊论域为 $(-4, 4)$, 对应实际变量的取值为 $(0, 70)$ (由图 4 可知, 当 K_P 、 K_I 和 K_D 超过 70 时, 系统变的不稳定), K_P 、 K_I 和 K_D 在各自论域上有 8 个语言变量取值: PB、PM、PS、PZ、NZ、NS、NM、NB, 令所有输入、输出变量的隶属度函数均为 trinf, 根据

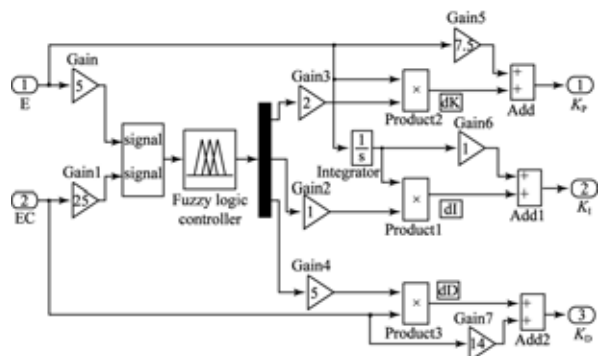


图 5 模糊非标准 PID 参数自整定仿真模型
Fig. 5 Self-adjusting simulation model of fuzzy nonstandard parameters

实际经验分析得出的非标准 PID 控制的 3 个参数的模糊控制规则共 $14 \times 8 = 112$ 条。最终构建的仿真模型如图 5 所示。

6 实验结果

为了评估所提策略的节能效果和对系统性能的影响,本文采用 OMAP-L137 平台某型诸元计算器作为实验对象,将本文算法与不同超时阈值的超时策略、预测策略和随机策略进行了比较。OMAP-L137 应用处理器采用浮点 DSP 与 ARM9 相结合的架构,以及用于联网的各种外设,并运行 Linux 或 DSP/BIOS 实时内核以实现操作系统的灵活性,还可在极低的功耗水平下工作。本文实验对象的主要工作模式及功耗如表 1 所示。

表 1 某型射击诸元计算器的工作模式及功耗
Tab.1 Working mode and power of a certain type of firing data calculator

工作模式	延迟时间/ μs	功耗/mW
S0:高速		725
S1:低速		225
S2:待机		130
S2 转换为 S0	100	1 000
S1 转换为 S0	20	250
S2 转换为 S1	40	350

本文考虑四种类型的负载。第一类为用户实际活动的轨迹分布,通过记录空闲时间(大于 2 s)完成对用户活动轨迹的跟踪,然后在策略执行时使用。第二类负载为从空闲状态转换为繁忙状态,其服从 Pareto 分布的概率模型,其表达式为: $1 - \alpha t^{-\beta}$ 。其中: t 表示时间; α 和 β 为常量;本文取 $\alpha = 0.7, \beta = 0.5$ 。第三类为时间序列为 0~10 min 的几何分布。第四类为周期为 1~5 min 随机变换的非循环性周期分布时间序列。一旦用户请求结束,另外一个用户请求将在 2 min 后创建,每类负载运行 10 hour 以上。

在本文的实验环境中,产生了 6 个不同的任务列,每个任务列分别应用以下电源管理策略:

(1) Timeout: 超时阈值为 T_{tr} 的固定时限超时策略,当达到超时时间值时,直接转为 S2 低功耗状态;

耗状态;

(2) CTMDP^[23]: 连续时间马尔可夫随机策略;

(3) Predict^[24]: Hwang 的指数平均法(预测策略),取 $\alpha = 0.5$,使最近的历史和先前的历史权值相等,当达到预测时间值时,直接转为 S2 低功耗状态。

(4) Adaptive^[6]: 超时阈值为 T_{tr} 的自适应 DPM 策略,当达到超时阈值时,直接转为 S2 低功耗状态;

(5) DTMDP^[25]: 离散时间马尔可夫随机策略;

(6) Ours: 本文策略,窗口大小为 $N_w = 2\ 100$ 。

本文采用竞争率作为功耗评估指标,延迟率作为性能指标,命中率作为策略的容错率指标,它们分别定义如下:

$$\text{竞争率 } \zeta = \frac{E_{no} - E_A}{E_{no} - E_{opt}}, \quad (15)$$

其中: E_A 为当前策略的能耗; E_{no} 为无策略的能耗, E_{opt} 为最优离线策略下的能耗。

$$\text{延迟率 } \delta = \frac{T_A - T_{no}}{T_{no}}, \quad (16)$$

其中: T_A 为当前策略下的总时间; T_{no} 为无策略时的总时间。

$$\text{命中率 } \eta = \frac{\text{预测正确次数}}{\text{预测总次数}}. \quad (17)$$

各策略的竞争率、延迟率和命中率比较如表 2 所示,其中:竞争率 ζ 表示当前策略相对于最优策略的功耗效率, ζ 值越高表示节能效果越接近最优策略。从表 2 可以看出,本文策略的功耗效率是显著的,其平均竞争率达到了 0.62。CTMDP 的功耗效率最低。这是因为 CTMDP 策略是基于用户到达服从指数分布的假定,导致长的空闲时间缺失和设备关闭次数增加。另外,该策略还需要计算周期性的模型,从而消耗了大量的能量。用户实际使用时,Adaptive 策略的延迟率较低且命中率较高, Predict 策略的竞争率有较大的波动性。只有准确选择超时阈值时,超时策略的节能效果才趋近于最优,否则效果十分不理想。由于对同一系统进行决策时,其估计值可能不同,所以很难得到准确的超时阈值。从整体上看,在不同的负载分布下,超时策略、预测策略和马尔可夫随

机策略的节能效果有较大差别。除本文策略延迟率小于 0.13 外,其他策略的都超过了 0.15;本文策略的命中率在 0.6 以上,尤其在非循环周期分布条件下,相较于其他策略,本文策略优势更为明显。

表 2 不同策略的竞争率、延迟率和命中率的比较

Tab. 2 Comparison of competitive ratios, delay ratios and hit ratios for all policies

负载	策略	竞争率 $\xi/\%$	延迟率 $\delta/\%$	命中率 $\eta/\%$
1 实际用户轨迹	1	37.1	15.3	40.2
	2	41.2	29.8	38.1
	3	56.1	23.5	43.2
	4	54.8	17.8	49.9
	5	52.3	27.1	39.1
	6	66.9	10.2	60.5
2 Pareto 分布	1	40.2	27.8	49.5
	2	43.2	30.9	30.1
	3	45.1	25.1	45.2
	4	52.7	20.5	55.2
	5	50.1	29.8	40.9
	6	60.8	12.8	63.8
3 几何分布	1	35.1	18.2	35.9
	2	35.3	24.8	50.5
	3	48.8	20.1	57.8
	4	54.4	15.3	38.9
	5	59.6	19.6	59.8
	6	60.2	9.1	60.1
4 非循环周期分布	1	30.1	28.8	20.8
	2	40.2	35.8	25.1
	3	49.1	32.2	38.2
	4	45.8	26.8	43.5
	5	40.3	30.5	29.3
	6	59.8	11.3	60.5

本文策略的实验平台不具有典型性,由以上的实验分析可知,只要系统或设备进行状态转换所节省的能量大于因为转换而引起的额外开销时,便可以使用本文策略。在策略执行过程中,把负载的历史空闲时间序列的特性分析算法作为系统的一个任务执行,当窗口大小达到 N_w 时,则执

行这个子任务。如果预测错误,则挂起时间序列,分析子任务,以避免由于等待所引起的系统不可靠的问题。一般情况下 N_w 的取值都很大,因此虽然在执行本文策略时会消耗一定的能量,但从长远看,系统在保证主要功能的同时,可靠性水平几乎不会降低。

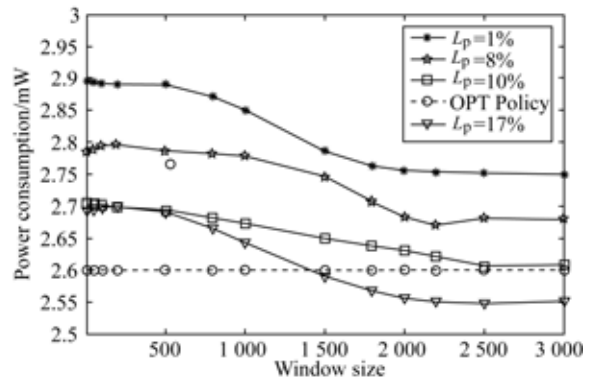


图 6 系统负载实际跟踪功耗比较

Fig. 6 Comparison of actual tracking power consumption with system trace

为进一步探讨本文策略的窗口大小 N_w 与实际负载的相互关系,在负载为非循环周期分布下产生了四个任务(两个周期性任务和两个非周期任务),用最优离线策略 OPT 作为对比,系统负载实际跟踪曲线如图 6 所示(L_p 表示系统性能损失量)。

从图 6 可以看出,系统功耗随着窗口 N_w 的增大而减小,当 N_w 取值为 2 000~2 500 时,系统功耗与系统性能之间达到完美的折衷。这是因为 R/S 分析法对时间序列的数据量要求较大,当时间序列小于一定数量时,本文策略对时间序列的长距离相关性判断不准确,因此功耗较高。对于窗口大小 N_w 的取值,各个系统不太一致,需要通过实验的方法予以确定。本文实验系统中 N_w 取值为 2 000~2 500 时,系统性能仅损失 10%,节能效果可趋近于最优离线策略,系统平均功耗减少了 37%。图 6 中当 N_w 取值大于 1 500 时,有部分系统功耗低于最优离线策略。这是因为此时是在性能衰减比较严重的条件下(性能损失 17%)得到的,在实际应用中不具有可取性。

7 结 论

针对嵌入式系统的多任务环境,本文提出了

一种混合模型功耗管理策略,文中详细介绍了策略的具体实现方法,通过分析时间序列,对每个阶段分别采用相适应的策略:基于剩余电量的超时策略,模糊非标准 PID 策略和半马尔科夫随机策略,从而弥补了常规动态电源管理策略的不足。

参考文献:

- [1] GROVER P, WOYACH K, SAHAI A. Towards a communication-theoretic understanding of system-level power consumption [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, 29(8): 1744-1755.
- [2] 朱尧, 赵龙彪, 韩东, 等. 基于图像分类的全局调光算法的 FPGA 实现[J]. *液晶与显示*, 2013, 28(5): 742-746.
- ZHU Y, ZHAO L B, HAN D, *et al.*. FPGA implementation of global dimming algorithm based on image classification [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(5): 742-746. (in Chinese)
- [3] 商广良, 赵天月, 赵星星, 等. 低功耗 TFT-LCD 驱动方法[J]. *液晶与显示*, 2012, 27(6): 785-788.
- SHANG G L, ZHAO T Y, ZHAO X X, *et al.*. Driving method for low power consumption in TFT-LCDs[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(6): 785-788. (in Chinese)
- [4] CHANDRA S, LAHIRI K, RAGHUNATHAN A, *et al.*. Variation-tolerant dynamic power management at the system-level [J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2009, 17(9): 1220-1232.
- [5] SALVADORI F, DE CAMPOS M, SAUSEN P S, *et al.*. Monitoring in industrial systems using wireless sensor network with dynamic power management [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(9): 3104-3111.
- [6] 曹哲, 尤政. 超时策略动态阈值的阈值选择影响因素[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2013, 45(6): 119-123.
- CAO ZH, YOU ZH. The influencing factor of threshold selection in dynamic threshold of timeout policies [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2013, 45(6): 119-123. (in Chinese)
- [7] 潘钰. 云计算平台中的能耗管理方法[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.
- PAN Y. *Policy of energy management for cloud computing platform*[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2012.
- [8] RODGERS S, BETANCOURT C, KEE E, *et al.*. Integrated power recovery using Markov modeling[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2011, 133(11): 114506-114510.
- [9] CHUNG E Y, BENINI L, BOGLIOLO A, *et al.*. Dynamic power management for nonstationary service requests [C]. *Design, Automation, and Test in Europe, Springer Netherlands*, 2008: 195-206.
- [10] LUIZ S O D, PERKUSICH A, LIMA A M N. Multisize sliding window in workload estimation for dynamic power management[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2010, 59(12): 1625-1639.
- [11] LI M, WU X, YAO R, *et al.*. Q-DPM: an efficient model-free dynamic power management technique [C]. *Design, Automation and Test in Europe, Proceedings, IEEE*, 2005: 526-527.
- [12] IRANI S, SHUKLA S, GUPTA R. Online strategies for dynamic power management in systems with multiple power-saving states[J]. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, 2003, 2(3): 325-346.
- [13] LEE W K, LEE S W, SIEW W O. Hybrid model for dynamic power management[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2009, 55(2): 656-664.
- [14] SRIVASTAVA M B, CHANDRAKASAN A P, BRODERSEN R W. Predictive system shutdown and other architectural techniques for energy efficient programmable computation[J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 1996, 4(1): 42-55.

- [15] 万丽,邓小成,王庆飞,等. 基于Hurst指数的矿化强度识别[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2013,43(1):87-92.
WAN L, DENG X CH, WANG Q F, et al.. Identification of mineral intensity based on Hurst[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2013,43(1):33-42.
- [16] 马喜强,刘维亚,郑喜凤,等. 非平稳多任务下的动态功耗管理随机策略[J]. 吉林大学学报:工学版,2014,44(3):776-781.
MA X Q, LIU W Y, ZHENG X F, et al.. Dynamic power management stochastic policy for non-stationary multi-task [J]. *Journal of Jilin University Engineering and Technology Edition*, 2014, 44(3): 776-781. (in Chinese)
- [17] CHOI S, CHA H, HA R. A selective dvs technique based on battery residual [J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2006, 30(1): 33-42.
- [18] MANWELL J F, MCGOWAN J G. Lead acid battery storage model for hybrid energy systems [J]. *Solar Energy*, 1993, 50(5): 399-405.
- [19] MARTIN T L, SIEWIOREK D P. *Balancing batteries, power, and performance: system issues in CPU speed-setting for mobile computing* [D]. Department of Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University, 1999.
- [20] DOUGLIS F, KRISHNAN P, BERSHAD B. Adaptive disk spin-down policies for mobile computers [J]. *Computing Systems*, 1995, 8(4): 381-413.
- [21] VARMA A, GANESH B, SEN M, et al.. A control-theoretic approach to dynamic voltage scheduling [C]. *Proceedings of the 2003 International Conference on Compilers, Architecture and synthesis for embedded systems*. ACM, 2003: 255-266.
- [22] 李佳. 模糊自整定PID控制在过热汽温控制系统中的研究与应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2012.
LI J. *Study and application of the fuzzy self-tuning PID control in superheated steam temperature system* [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [23] 江琦, 奚宏生, 殷保群. 动态电源管理的随机切换模型与策略优化 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(5): 680-686.
JIANG Q, XI H SH, YIN B Q. Stochastic switching model and policy optimization for dynamic power management [J]. *Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics*, 2006, 18(5): 680-686. (in chinese)
- [24] HWANG C H, WU A C H. A predictive system shutdown method for energy saving of event-driven computation [J]. *ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems (TODAES)*, 2000, 5(2): 226-241.
- [25] BENINI L, BOGLIOLO A, PALEOLOGO G A, et al.. Policy optimization for dynamic power management [J]. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 1999, 18(6): 813-833.

作者简介:



马喜强(1986—),男,河南开封人,博士研究生,2008年于吉林大学获得学士学位,主要研究方向为数字信号处理、嵌入式系统的低功耗研究。E-mail: maxiqiang200@sina.com

导师简介:



刘维亚(1952—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,现为长春希达电子技术有限公司副总经理,主要从事数字信号处理、信号检测方面的研究。E-mail: liuweiya@qq.com