

考虑模糊机会约束的手持抄表终端处理器功耗研究

针对手持抄表终端（Hand-held Meter-reading Terminal, HMT）低功耗控制的效果难以满足日益增长的应用需求问题，分析了支持动态电压调节的HMT处理器CMOS电路功耗的调节手段，确立通过设备本身提供的多工作电压层级和工作频率联合调节来实现对设备的功耗管理的节能方案。在考虑任务截止时间和负载需求不确定性的前提下，以不发生电压调节和发生电压调节场景的功耗之差最大为目标，建立基于时间片精细调节的多任务功耗优化模型。根据模糊理论形成负载需求平衡约束的模糊机会约束形式，并通过分布参数拟合和模糊隶属度将其转化成清晰等价类，再利用混合整数规划理论得到各任务划分的时间片周期内功耗调节的优化方案。实测结果表明，所提优化调节策略可有效减少处理器能耗。

梁捷 李刚/广西电网有限责任公司电力科学研究院
王建楠/广西大学电气工程学院

0 引言

手持抄表终端（Hand-held Meter-reading Terminal, HMT）主要用于电力、供水部门的电表或水表的运维、控制或资费抄缴等方面，其低成本、高性能且易操作的特点具有一定的市场推广价值^[1]。

近年来有不少对处理器动态电压调节（Dynamic Voltage Scaling, DVS）控制策略的研究，文献[2]采用PAST算法根据处理器占用率的两个门限值来预测在下一个时间片上是增加抑或减少，然而该选择策略基于独立DVS算法，其门限值是基干特定场景根据经验确定，环境变化时效果难以保证。文献[3]采用马尔科夫决策链理论描述受到用户和设备随机请求影响的能耗需求状态转移过程，

建立了动态电源管理问题的带约束优化模型，但系统状态转移和用户请求等概率分布模型难以确定，也无法描述系统的风险程度。

本文首先分析HMT硬件结构和应用需求，据此给出DVS功耗综合优化思路，建立基于时间片精细调节的多任务功耗优化模型，以保证系统的实时调节需求和系统负载平衡为前提，考虑工作频率对任务实际执行时间的影响。基于模糊理论建立负载需求平衡约束的模糊机会约束形式，并将其转化成清晰等价类，再利用混合整数规划理论求解。最后通过实例验证本文方法的处理器节能效果。

1 HMT应用需求

HMT常见应用场景首先是通过红外或RS 485接口和电能表通信，实现抄表、实时数据交互、电表参数设置和电表控制等功能。然后是帮助供电营销人员故障信息采集和拉合闸试验。此外终端通过USB接口与电脑通信，实现数据保存和上传功能，以及终端开机定检和升级等。具有各场景持续通信时间较短，某些场景存在地理位置变动，接口唤醒等用户行为相关性等特点。作为手持移动设备，必须保证在有限电池容量的基础上持续足够长的工作和待机时间，因此要求抄表终端节能性好，具有较低的功耗。面对市场竞争，还需考虑低成本设计，为满足上述使用需求，HMT硬件结构一般包括键盘、LCD液晶



梁捷/工程师

关键词/Keywords

动态电压调节 ·
手持抄表终端 ·
多任务功耗优化 ·
模糊机会约束 ·
清晰等价类 ·

屏、发声装置、GSM无线收发模块、处理器、存储模块（SDRAM/Falsh）、时钟源、供电电池、票据打印接口、主机接口和电源模块等^[4]。其处理器多选用支持DVS的嵌入式处理器，即支持编程动态功耗管理。常见HMT处理器包括ARM系列、MIPS系列等，主频通常选用30~110 MHz。

2 HMT低功耗设计关键技术

2.1 处理器电路功耗与行为分析

HMT处理器芯片主要由CMOS电路组成，不考虑随机影响因素时，CMOS功耗主要可分为两部分：一部分为非线性器件充放电转换过程中的开关功耗；另一部分是由漏电流、衬底和源极之间的漏抗等引起的静态功耗^[2]，则处理器总体功耗为

$$P(V_{dd}, f_{clk}) = V_{dd}^2 f_{clk} C_{EFF} + V_{dd} K_0 e^{K_1 V_{dd}} e^{K_2 V_{be}} + |V_{dd}| I_q \quad (1)$$

式中， V_{dd} 、 f_{clk} 分别为处理器core供电电压和工作频率； C_{EFF} 为等效负载电容； I_q 为CMOS电路的漏电流； V_{be} 为衬底和源极之间的电压； K_0 、 K_1 和 K_2 为常数。由上式可知通过调节处理器供电电压和工作频率，可降低其功耗。

DVS调节过程首先需要通过负载监测器对系统负载状况进行分析判断，可通过PMU单元^[5]查看系统资源来实现，也可以通过硬件方法采集中断、内存等使用情况来实现。其次，通过对负载分析所得出的数据来预测下阶段的系统荷载状况，通过对下阶段系统状况的分析动态计算出系统所需电压。最后由电源管理模块通过I²C等数字接口在较短的时间内通过控制内核电压转换器完成对电压的调节。

传统DVS技术的调节过程为当处理器需要完成大量处理任务时便提高处理器的电压以增加其处理速度，而当系统负荷不高或待机时便降低CPU电压从而节省功耗。由于大部分处理器不支持电压连续调节，故节能效果不佳。本文采用电压与频率调节相结合的优化方法，根据负载和性能需求动态管理电压与频率。

2.2 实时任务模型

本文以32 bit ARM核心的Motorola Drangon

Ball i.MX5的处理器为例，其工作电压可进行多级动态调节，即具有多个可快速切换的固定电压值。但时钟频率的小范围调节并不需要改变工作电压，且频率控制粒度更细，已经可以提供一定区间内几乎连续的值。

为保证操作系统上运行的每个任务能够在规定时间点之前完成规定的工作，采用经典周期性任务模型描述任务在时间上的需求，由 n 个任务组成的任务集 $T_{set} = \{\tau_0, \tau_1, \tau_{n-1}\}$ ，任务 τ_i 的截止时间为 D_i （ $0 < i < n-1$ ，其单位为处理器基本时钟周期），第 j 个时间片的时长为 Δt_{ij} ，最大允许执行时间为 C_{ij} （ $1 < j < m$ ），实际执行时间 t_{ij} 受工作频率、CPU占用率及任务性质等多方面影响，本文仅考虑工作频率影响，简化为

$$t_{ij} = \frac{K_3}{f_{clk}} + K_4 \quad (2)$$

式中， K_3 、 K_4 为常数。为细化能耗调节的粒度，本文将任务进一步划分为 m 个时间片，然后以时间片为单位分配电压 V_{ij} 和频率 $f_{clk,ij}$ 。

为实现任务集的可调度，需满足各时间片的执行时间和能耗状态转换延时之和小于任务截止时间，即

$$\sum_{j=1}^m t_{ij} + \sum_{j=1}^m \lambda_j t_{tran,j} \leq D_i \quad (3)$$

式中， t_{tran} 为DVS在进行动态电压调整时时间上的损耗，即 $t_{tran} = \{t | V = V_{j-1} | V = V_j\}$ 。由于调频时间较短可忽略，则 t_{tran} 主要受电压切换时间影响。 λ_j 为0表示不发生电压切换， λ_j 为1表示发生电压切换。

每个时间片的实时性要求为

$$t_{ij} \leq C_{ij} \quad (4)$$

3 模糊机会约束处理器DVS模型

3.1 目标函数

DVS的核心问题是在满足任务处理需求的基础上，如何通过控制供电电压和频率，使得处理器总功耗最小化。

如图1所示， P_{a1} 、 P_{a2} 为两个不同工作电压下的功耗率，且 $P_{a1} > P_{a2}$ ； E_{tran} 为 P_{a1} 和 P_{a2} 之间的状态转

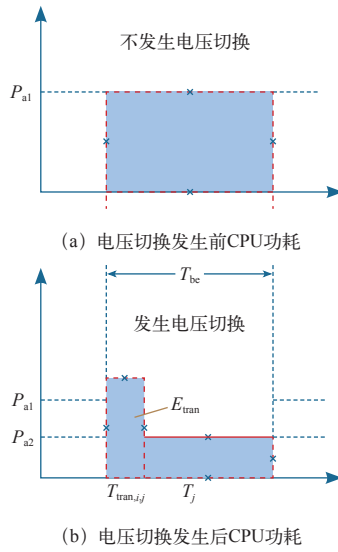


图1 电压切换发生前后CPU功耗比较

换能耗。令 T_{be} 表示处理器在一次状态转换过程中能耗策略评估的临界值，即处于低功耗的时间片数量至少要为 T_{be} ，使得图1a和图1b的阴影区面积相等，即功耗相等，否则转换到低电压状态将比保持在原状态消耗更多的能量，即此次低功耗转换的节能策略失败。据此以同一时段内不发生电压切换的功耗 E_t 和发生电压切换的功耗 E'_t 之差最大为目标函数，即

$$f = \max(E_t - E'_t) \quad (5)$$

$$E_t = \sum_{i=0}^{n-1} \left(\sum_{j=1}^m P_{be,j,i} \Delta t_{i,j} \right) \quad (6)$$

$$E'_t = \sum_{i=0}^{n-1} \left[\sum_{j=1}^m P_{i,j} (\Delta t_{i,j} - t_{tran,i,j}) + E_{tran,i,j} \right] \quad (7)$$

式中， $P_{be,i,j}$ 和 $P_{i,j}$ 分别为对应 E_t 和 E'_t 的功耗率，见式(1)； $E_{tran,i,j}$ 为从任务 i 时间片 $j-1$ 到 j 的转换功耗。

3.2 考虑系统负载随机波动的模糊机会约束处理

令任务 i 的负载，即任务执行功耗需求实际值为 $P_{L,i}$ ，预测值为 $\tilde{P}_{L,i}$ ，DVS调节的能耗需求平衡约束为

$$\sum_{j=1}^m P_{i,j} \Delta t_{i,j} + \sum_{j=2}^m \lambda_j E_{tran,i,j} \geq \tilde{P}_{L,i} \quad (8)$$

由于受预测准确度、供电电压、温度波动和交叉耦合噪声等影响， $\tilde{P}_{L,i}$ 存在随机性偏差，为体现这一点，将其绝对预测误差 $\Delta P_{L,\omega}$ 视为模糊变量，即 $\Delta P_{L,\omega} = P_{L,i} - \tilde{P}_{L,i}$ ，则式(8)可用机会约束

规划表示为

$$Pr \left\{ \sum_{j=1}^m P_{i,j} \Delta t_{i,j} + \sum_{j=1}^m E_{tran,i,j} \geq \tilde{P}_{L,i} \right\} \geq \alpha \quad (9)$$

式中， $Pr\{\cdot\}$ 为事件成立的概率； α 为决策者预先给定的模糊可信性置信水平。

本文利用绝对预测误差描述误差隶属度函数 $\mu_{\Delta\omega}$ ，其表达式为

$$\mu_{\Delta\omega} = \begin{cases} \frac{1}{1 + \eta_{\omega}^+ \left(\frac{\Delta P_{L,\omega}}{P_{L,\omega}^+} \right)^2} & \Delta P_{L,\omega} \geq 0 \\ \frac{1}{1 + \eta_{\omega}^- \left(\frac{\Delta P_{L,\omega}}{P_{L,\omega}^-} \right)^2} & \Delta P_{L,\omega} < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中， $P_{L,\omega}^+$ 、 $P_{L,\omega}^-$ 分别为正误差和负误差的平均值； η_{ω}^+ 、 η_{ω}^- 分别为正负误差的隶属度参数，可根据分布式电源输出的历史预测不确定性数据确定^[6]。

模糊建模的步骤：①对历史数据进行统计分析，得到预测值与预测误差分布图；②根据模糊统计法获得隶属度，再通过拟合得到误差模糊隶属度分布参数；③通过误差公式和预测误差隶属度得到实际值的隶属度函数^[7]。

为将机会约束转换为清晰等价类，文献[8]的等价类清晰化方法，首先给出定理： $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 为相互独立的模糊变量； $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为相应的可能取值；隶属度函数分别表示为 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ 。如果 $f: R_n \rightarrow R$ 是一个实值函数，那么 $\xi = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ 的隶属度函数 μ 可由 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ 计算，公式为^[8]

$$\mu(x) = \sup_{x_1, x_2, \dots, x_n \in R} \{ \min_{1 \leq i \leq n} \mu_i(x_i) | x = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \} \quad (11)$$

式中， $\sup$ 为上确界，即最小上界。

对于可信性机会约束 $Pr\{g(x, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) \geq 0\} \geq \alpha (\alpha > 0.5)$ ，等价于 $h(x) \leq K_{\beta}^1$ ，其中

$$K_{\beta}^1 = \sup \{K | K = \mu^{-1}[2(1-\beta)]\} \quad (12)$$

系统负载平衡机会约束，即式(9)，可按照该定理转换为相应的清晰等价类。

此外，2.2节所提处理器支持少数几个非连续的电压值，频率可在一定区间内连续调节。则电压和频率调节约束为

$$V_{rk} \in \{V_{r1}, V_{r2}, \dots, V_{rg}\} \quad (13)$$

f_{min,k} \leq f_{clk} \leq f_{max,k} \quad k=1,2,\cdots,g \tag{14}

式中， $V_{r1}, V_{r2}, \cdots, V_{rg}$ 为处理器支持的电压调节值。 $f_{max,k}, f_{min,k}$ 分别为电压值 V_{rk} 对应的处理器工作频率调节的最大，最小值。

式（1）~式（9）以及式（13）~式（14）构成以式（5）为目标函数的含0~1整数变量和复杂约束的非线性规划问题，可通过分支定界法结合广义梯度算法等方式求取优化解^[9]。根据优化结果，可确定考虑负载不确定性后处理器的DVS控制策略，包括以时间片为调节单位的各任务频率调整方案和处理器供电电压优化序列。

4 实例分析

测试对象为广西某供电局14个同型号的HMT，其中7个新入库，7个已用约2年。使用恒压直流源ITECH IT6862B供电，整机和处理器负载通过直流源内置电流计分别对CPU板级Vcore引脚测量负载电流 I_L 。首先将HMT充满电，编写测试程序让其重复执行某抄表任务，收发报文总长度在40~60 B中乱序选择。选取3组电压和频率恒定组合的测试场景，如表1所示。任务时间间隔为6 s，用示波器监测测试过程中的处理器负载电流，场景1和场景3的DVS优化前负载电流曲线如图2所示。

表1 各场景功耗测试结果

场景编号	V_{dd}/V	f_{clk}/MHz	处理器负载电流/mA	
			新入库	在用
1	1.3	63	43.7	46.9
2	1.3	59	35.9	36.8
3	1.0	44	11.2	11.3

如图2所示，由于商用处理器的每个供电电压点常对应于所提供的特定的运行模式。不同的运行模式下处理器对核心频率、存储系统及外设控制器的控制方案不同，需要采用不同的时钟周期执行不同的指令集，故负载电流曲线各异。

比较表1的场景1和场景2可知，当处理器供电电压相等，频率较高时电流消耗较大，场景1比场景2的 I_L 提高约14%；供电电压1.0 V比1.3 V的场景负载电流减小幅度较明显，场景3比场景2的 I_L 降低约43%。在用HMT的负载电流比新入库稍大，

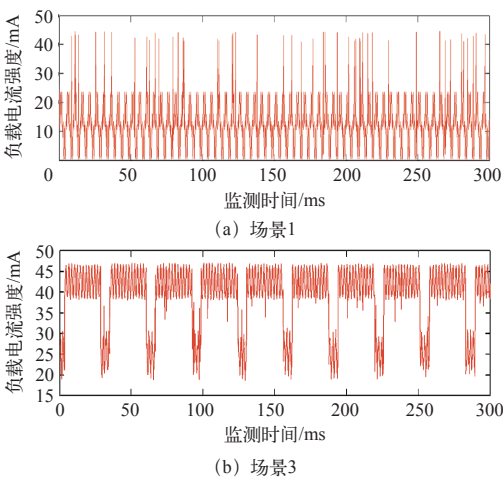


图2 处理器不同 V_{dd} 下的负载电流曲线

这是由于处理器部分电阻等元器件的老化失效，接头氧化等导致电阻增大。或晶体管隔绝栅极和沟道的绝缘层阻抗下降，关断沟道时无法完全关闭，产生额外的漏电回路能耗。

图3分别显示任务时间间隔为2 s和6 s的周期抄表任务执行过程时，所研究处理器板级负载电流变化情况。抄表通信时处理器进行总线通信控制和报文解析处理等工作，负载需求增加，为保证任务正常处理，处理器功耗随之增大，当前任务处理完至下一个任务的间隔时处理器空闲，处理器功耗小，如此反复。图3a可见，其电压恒定

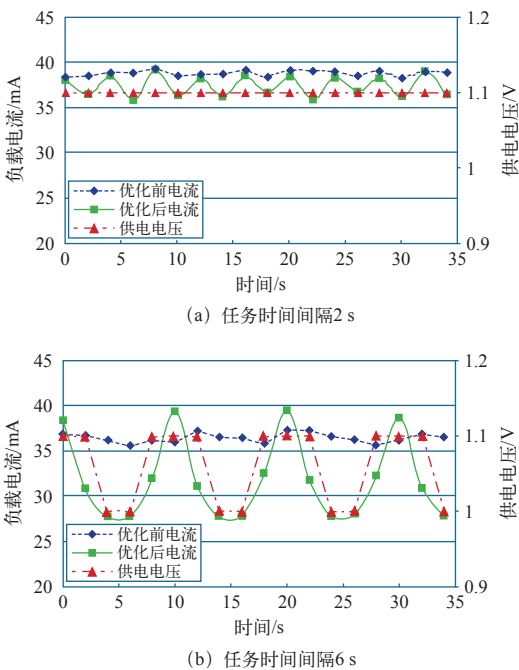


图3 Motorola DragonBall处理器在不同任务下的功耗

为1.0 V, 平均负载电流约为37.2 mA。图3b的电压在1.0~1.1 V间调节, 平均负载电流约为32.4 mA。相比于不采用本文DVS策略节省能耗约12.9%。这是由于图3b的抄表任务间隔时间较长, 可采用电压和频率综合调节的方案降低功耗, 节能效果较好, 而图3a的抄表任务时间间隔较短, 根据第3节的模型优化结果为仅采用频率调节, 若仍采用电压和频率综合调节的方案, 处理器会频繁地在两个不同电压对应的能耗状态之间切换, 将增加转换能耗和时延, 导致系统整体功耗反而升高。

为比较可信度表征的负载需求不确定性对处理器功耗的影响, 不同置信水平下的功耗 E_i 和 E'_i 如表2所示。由表2可见, 随着置信水平的增大, 不发生电压切换和发生电压切换的功耗均有增大趋势。由于置信水平反映了风险的概念, 置信水平越高, 风险越低。高风险时为了保持式(9)的负载需求绝对满足, 往往不得不采取保守的恒压调节策略。故约束条件置信水平的选取会对DVS控制策略产生影响, 实际决策可在分析任务负载需求和影响基础上, 给予综合考虑。在手持终端处理器功耗优化问题中, 置信水平所反映的风险主要来源于任务负荷预测误差和HMT用户操作行为的不确定性, 使常规机组出力不能满足能耗需求平衡和任务截止时间约束, 但决策时需这种不满足控制在一定的可信性置信水平下。例如, 可根据历史负荷预测和用户操作行为记录的数据进行风险和能耗的最佳平衡点分析^[10], 选择既能忍受的风险, 又能达到最大节能的功耗调节方案。

表2 不同置信水平下的功耗

置信水平(%)	不发生状态转换的功耗/mW	发生状态转换的功耗/mW
95	21.5	21.2
90	20.3	19.7
85	19.6	16.0

5 结束语

在分析HMT功能结构 and 应用需求的基础上, 给出DVS功耗综合优化思路, 即通过动态调节处理器的工作电压和频率来达到节能的目的, 建立了基于时间片精细调节的多任务功耗优化模型,

基于模糊理论形成负载需求平衡约束的模糊机会约束形式, 并通过分布参数拟合和模糊隶属度将其转化成清晰等价类, 再利用混合整数规划理论求解。电压和频率恒定组合的测试场景表明, 受到元器件老化等因素影响, 在用HMT的功耗比新入库稍大。在本实验平台下所提DVS策略在抄表操作时间间隔较大时能节能约12.9%, 节能效果较好。但抄表操作时间间隔较小时, 本文DVS算法主要通过降低工作频率减少能耗, 节能效果降低。置信水平的选取对DVS控制策略产生影响值得进一步研究。

参考文献

- [1] 李晓静. 含分布式电源的配电网供电恢复的多Agent方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [2] 宋兰兰. 基于改进遗传算法的配电网重构研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
- [3] 杨建军, 战红. 基于图论的改进遗传算法在配网重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 122-125.
- [4] 易楠. 手持电力抄表终端的研究与开发[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [5] 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.
- [6] 陆海, 彭晓涛, 张彬, 等. 考虑分布式电源并网不确定性的需求侧分时电价运营策略[J]. 电力建设, 2017, 38(1): 144-150.
- [7] 苏洁. 自结构神经-模糊控制算法的研究及其应用[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2009.
- [8] 刘文学, 梁军, 负志皓, 等. 考虑节能减排的多目标模糊机会约束动态经济调度[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 62-70.
- [9] 谭跃. 具有混沌局部搜索策略的粒子群优化算法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [10] 范松丽, 艾芊, 贺兴. 基于机会约束规划的虚拟电厂调度风险分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4025-4034.

(收稿日期: 2017-09-30) EA