

DOI: 10.7652/xjtuxb201701023

用于环境嵌入式系统的多时段动态功耗管理方法

李鑫, 刘强

(天津大学电子信息工程学院, 300072, 天津)

摘要: 针对现有以无线传感器网络为代表的环境嵌入式系统的功耗管理方法不能很好地兼顾系统性能和稳定持久工作的问题,提出了一种能量驱动的多时段动态功耗管理方法。该方法综合考虑系统当前及未来 N 个时段的可用能量,并引入能量预测最大误差指数,实时地决定系统下一时段的工作状态,在满足能量约束的前提下最大化系统性能。通过实验模拟了太阳能供电环境嵌入式系统在不同天气下的工作情况,结果表明:使用该动态功耗管理方法的环境嵌入式系统的采集能量利用率达到 99.79%,并且在不同天气下均能持续工作,即该方法实现了系统性能和工作稳定性的同时优化。

关键词: 无线传感器网络;环境嵌入式系统;动态功耗管理;优化

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)01-0147-06

Multi-Time-Segment Dynamic Power Management for Environmentally Embedded Systems

LI Xin, LIU Qiang

(School of Electronics and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Aiming at the existing methods for managing power of the environmentally embedded systems represented by wireless sensor network, which cannot simultaneously ensure the system performance and stability, this paper proposes a multi-time-segment dynamic power management method. This method could determine the operational mode of the systems in real time by considering the energy available in the current and the future N time-segments and the effect of energy prediction error, resulting in maximized system performance within the energy constraint. Experiment simulates a solar energy powered environmentally embedded system working under different weathers, and the results demonstrate that the system using the proposed method can make its energy utilization reach 99.79%, and work continuously under diverse weathers. Hence the proposed method achieves simultaneous optimization of the system's performance and stability.

Keywords: wireless sensor network; environmentally embedded system; dynamic power management; optimization

近年来,环境嵌入式系统得到了迅速发展,并已广泛安置在诸如森林、河流、火山、道路、桥梁等区域,用于监控环境和建筑物的变化^[1-3]。为了采集所有有价值的信息,并根据出现的问题作出及时反应,

环境嵌入式系统需要能够长期、持续、稳定地采集并传输环境信息,因此,保证环境嵌入式系统长期稳定工作就成为了极为重要的问题。

传统的嵌入式系统多采用电池作为电源。为保证系统长期稳定工作,大量更换电池在所难免,但是这种做法既不经济,又不环保。此外,对环境嵌入式系统而言,在森林、河流、火山等区域内更换电池并不现实。因此,大部分环境嵌入式系统通过采集环境能(如太阳能)来驱动系统工作^[4]。作为一种充裕持久的能源,太阳能为系统长期工作提供了可能,但是,太阳能随时间、地域、天气等条件变化较大,将直接影响到系统工作的稳定性。太阳能的骤降会导致系统供电不足并最终停止工作^[4]。因此,太阳能驱动的环境嵌入式系统需要采用动态功耗管理,即一种根据系统当前工作状态和未来时段可用太阳能的情况调整系统工作状态的方法,以保证系统稳定持久的运行。

文献[4-12]介绍了多种动态功耗管理方法。这些方法可以按照动态功耗管理的时段数和依据进行分类。按照时段数可以分为单时段动态功耗管理方法和多时段动态功耗管理方法,其中:单时段动态功耗管理方法(以下简称单时段法)根据当前时段和下一时段的系统状态决定系统在下一时段的工作状态^[12];多时段动态功耗管理方法(以下简称多时段法)根据系统当前时段的状态和未来 N 个时段的可用能量决定系统在下一时段的工作状态^[4]。和单时段法相比,多时段法由于考虑了系统多个时段的状态,便于实现系统长期稳定的工作。

按照依据可以分为基于负载的动态功耗管理方法和基于能量的动态功耗管理方法。文献[5-11]设计的动态功耗管理方法是基于负载的动态功耗管理方法,此类方法根据系统处理任务的多少决定未来时段系统的工作状态,如果任务多,则系统工作快一些,否则就降低系统工作速度以减少功耗。文献[4, 12]设计的动态功耗管理方法是基于能量的动态功耗管理方法,即根据系统可用能量的多少来决定未来时段系统的工作状态,如果能量足,则系统工作快一些,否则就工作慢一些。文献[5-11]的动态功耗管理方法在满足执行时间的前提下通过降低系统性能来降低功耗,而文献[4, 12]的方法在满足能量约束的前提下最大化系统能效,因此,前者更适用于传统的嵌入式系统,后者更适用于环境嵌入式系统^[12]。考虑到本文设计的动态功耗管理方法针对的是环境嵌入式系统,因此仅对基于能量的动态功

耗管理方法进行详细的分析和比较。

本文对根据能量调节的功耗动态优化问题进行了建模,并在单时段法^[12]的基础上设计出多时段法。该方法以最大化时段 N 的系统性能为优化目标,综合考虑了系统当前和未来 N 个时段的可用能量,通过实时求解动态地决定系统的工作状态,同时,由于引入了能量预测最大误差指数,从而避免了由预测误差造成的系统功耗高于能量供给的情况,在保持系统稳定性上更有优势。

1 环境嵌入式系统的基本结构及工作原理

图1为本文所使用的环境嵌入式系统模型^[12]。该系统由能量采集模块、能量存储模块、应用处理模块和动态功耗管理模块组成,其中:能量采集模块负责采集太阳能;能量存储模块存储采集的能量,同时驱动应用模块处理任务;应用处理模块完成信息采集、预处理及发送等任务,是主要的能量消耗单元;动态功耗管理模块决定应用模块的工作状态。

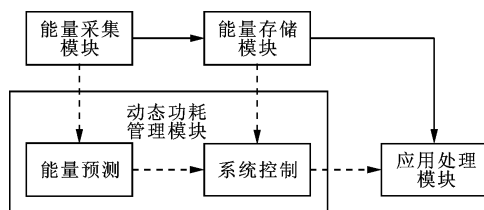


图1 太阳能驱动的环境嵌入式系统模型

本文主要研究基于能量的动态功耗管理方法。动态功耗管理模块由能量预测单元和控制单元2部分构成。能量预测单元根据系统过去采集的能量,采用一定的预测算法预测未来采集的太阳能。控制单元根据采集能量的预测值和存储的能量等系统参数,通过自身加载的功耗动态管理方法决定应用模块的工作状态,如处理速度等,以实现功耗的动态调节。对控制单元而言,能量预测单元能否准确预测能量采集情况,尤其是能量采集不足的情况,对于保证系统稳定工作具有极其重要的作用。

2 单时段动态功耗管理方法

基于能量的单时段功耗管理方法^[12]在第 $i-1$ 时段,根据第 i 时段采集的太阳能预测值 $E_{es}(i)$ 和能量存储单元剩余的能量 $E_{cell}(i-1)$ 决定应用处理模块在第 i 个时段的工作状态。为了在满足能量约束前提下实现采集能量利用率的最大化,该方法以最大化处理速度为优化目标。单时段动态功耗管理

模型如下

$$\begin{aligned} & \max \quad k(i) \\ & \text{subject to} \quad K_{\min} \leq k(i) \leq K_{\max} \\ & \quad E_c(i, k) \leq E_{\text{cell}}(i-1) + E_{\text{es}}(i) \\ & \quad E_D \leq E_{\text{cell}}(i) \end{aligned}$$

式中: $k(i)$ 为应用处理模块在第 i 个时段的处理速度; $K_{\min}$ 、 $K_{\max}$ 分别为处理模块的最小和最大处理速度, 通常这 2 个值分别由具体应用和底层硬件决定; E_D 为应用处理模块的最小能耗, $E_D \geq 0$; $E_c(i, k)$ 为应用处理模块在第 i 个时段处理速度为 k 时的能耗; $E_{\text{cell}}(i)$ 为系统完成第 i 个时段的工作后存储单元的剩余能量, 其表达式如下

$$E_{\text{cell}}(i) = (1 - \gamma)[E_{\text{cell}}(i-1) + E_{\text{es}}(i) - E_c(i, k)] \quad (1)$$

式中: γ 为能量存储单元的漏电系数。该模型的最后一个约束条件要求第 i 个时段后能量存储单元的剩余能量能够维持应用处理模块在第 $i+1$ 个时段的最基本状态。

该管理模型实例化后是一个几何规划求解问题。几何规划是凸优化问题, 可以保证全局最优解。问题的解 $k(i)$ 决定了应用处理模块在第 i 个时段的工作状态。在太阳能充足的情况下, 应用处理模块可以保持全天高速运行, 但是在如下 2 种情况下, 单时段法可能导致系统停止工作。

第一, 太阳能连续多个时段采集不足的情况。例如在多云天气, 或者太阳能采集装置被树荫短期遮挡, 此时由于应用处理模块在能量充足时全速工作, 存储单元没有预留足够多的能量, 所以当突然遭遇上述情况时, 优化问题可能出现无解的情况, 系统将长时间停止工作。

第二, 能量的预测值连续多个时段高于实际采集到的太阳能。文献[12]采用基于神经网络的太阳能预测算法, 预测精度为 $\pm 5\%$ 。如图 2 所示, 由于存在预测误差, 代表能量预测值的虚线在代表实际

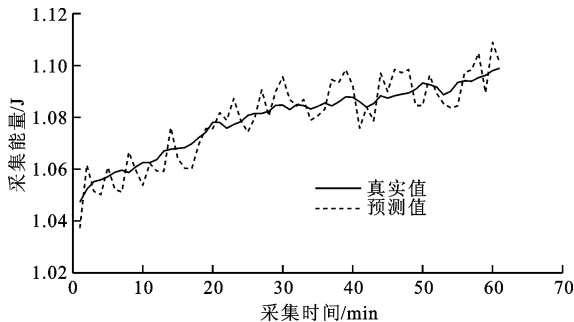


图 2 采集太阳能真实值与预测值的对比

采集能量的实线上下浮动。当能量预测值高于实际采集能量值时, 应用处理模块在 i 时段的功耗将高于 i 时段采集的能量, 如果这种情况连续多个时段出现, 存储单元的能量将被快速消耗, 导致应用单元停止工作。

针对这些问题, 本文设计了一种基于能量的多时段功耗动态管理方法, 在保持系统性能的同时可避免采集能量长期不足和预测误差带来的影响。

3 多时段动态功耗管理方法

与单时段法不同, 多时段法在第 $i-1$ 个时段决定系统第 i 个时段的工作状态时, 考虑后续 N (时段 i 到时段 $i+N-1$) 个时段系统的工作状态和可用太阳能, 如果当前时段能量充足而后续时段采集的太阳能出现不足, 可以多留一些能量在存储单元中, 以保证系统在未来 N 个时段都可以持续工作。

此外, 为了消除能量预测值高于实际采集能量的影响, 本文使用能量预测的最差情况值, 即假设能量预测时总是高估了实际采集值。因此, 使用的能量预测值为

$$E'(i) = \frac{E_{\text{es}}(i)}{(1 + \alpha)} \quad (2)$$

式中: α 为能量预测误差指数, 即能量预测最大误差的绝对值。此时, 多时段法将使用 $E'(i)$ 代替式(1)中的 $E_{\text{es}}(i)$ 。

本文建立的多时段动态功耗管理模型如下

$$\begin{aligned} & \max \quad k(i+N-1) \\ & \text{subject to} \quad K_{\min} \leq k(i+j) \leq K_{\max} \\ & \quad E_c(i+j, k) \leq E_{\text{cell}}(i+j+1) + E'(i+j) \\ & \quad E_D \leq E_{\text{cell}}(i+j+1) \\ & \quad \forall 0 \leq j \leq N-1 \end{aligned}$$

此时, 优化变量变为 N 个, 优化目标为最大化所需考虑区间的最后一个时段中应用处理模块的处理速度。当采集能量不足时, 该方法将预留足够多的能量来驱动系统持久工作。

在优化模型中, 第 i 个时段系统的功耗

$$E_c(i, k) = E_{\text{constant}} + \tau k E_{\text{dynamic}} \quad (3)$$

该系统功耗由静态功耗 E_{constant} 和动态功耗 $\tau k E_{\text{dynamic}}$ 组成, 其中 E_{dynamic} 为应用处理模块完成一次任务的功耗, τ 为处理模块的工作时间, 由于环境嵌入式系统要求保证全部时段工作, 因此该值又等于单位时间间隔。

本文模型的最后一个约束条件要求系统完成工作后, 能量存储单元的剩余能量至少要保证应用处

理模块在下一个时段能以最低速度工作,即要求应用处理模块的最小能耗 $E_D \geq 0$ 。 E_D 表示单位时间间隔内系统以最低速度工作的能耗,表达式为

$$E_D = E_{\text{constant}} + K_{\min} \tau E_{\text{dynamic}} \quad (4)$$

将式(1)、式(3)代入本文设计的多时段法模型中,可以看出,对于每一个时段 i ,其优化区间内的 $k(i+j)$ 均满足如下的限定条件

$$K_{\min} \leq k(i+j) \leq K_{\max} \quad (5)$$

$$\frac{1-\gamma^N}{1-\gamma} E_{\text{constant}} + \tau E_{\text{dynamic}} \sum_{j=0}^{N-1} [(1-\gamma)^{N-j+1} \cdot k(i+j)] \leq (1-\gamma)^N E_{\text{cell}}(i) + \sum_{j=0}^{N-1} [(1-\gamma)^{N-j+1} E'(i+j)] - E_D \quad (6)$$

考虑到 γ 、 E_{constant} 、 E_{dynamic} 和 E_D 为常数, $E_{\text{cell}}(i)$ 、 $E'(i+j)$ 在时段 i 为固定值,因此式(6)可以写为

$$\sum_{j=0}^{N-1} a_j k(i+j) + b \leq c_{i+j} \quad (7)$$

$$a_j = \tau E_{\text{dynamic}} (1-\gamma)^{N-j+1} \quad (8)$$

$$b = \frac{1-\gamma^N}{1-\gamma} E_{\text{constant}} \quad (9)$$

$$c_{i+j} = (1-\gamma)^N E_{\text{cell}}(i) + \sum_{j=0}^{N-1} [(1-\gamma)^{N-j+1} E'(i+j)] - E_D \quad (10)$$

其中对于每一个时段 i , a_j 、 b 、 c_{i+j} 均为定值。

根据式(5)、式(7)的限定条件可以看出,本文设计的多时段动态功耗管理方法属于线性规划。值得注意的是,本文方法在每个时段都会求解该优化问题,解中只有 $k(i)$ 被传递到应用处理模块,用于控制应用处理模块,其余的 k 值不传入应用处理模块。

此外,由于使用能量预测的最差值, i 时段采集的能量可能大于实际消耗的能量,多出的能量存储在能量存储单元,在下一个时段将被利用,因此,本文方法在避免由于预测误差引起系统停止工作的同时充分利用了能量。

综上所述,本文提出的多时段法可以解决单时段法存在的问题。下面将通过仿真实验对本文的多时段动态功耗管理方法进行评估。

4 仿真实验及结果分析

为验证以上理论分析结果,根据真实的太阳能采集值,利用 MATLAB 进行仿真对比实验,对本文方法进行分析 and 评估。随机选取美国橡树岭国家实验室网站 7 天的太阳能采集数据^[13] (见图 3) 作为实验使用的太阳能采集值。太阳能采集从 08:00 开始

至 16:00 结束,每分钟采集 1 次,1 天共采集 481 次。太阳能数据范围为 $0 \sim 281.25 \text{ W/m}^2$,并根据实验需要按比例缩小。另外,应用处理模块采用文献[12]中的多核并行架构,包含 94 个处理单元,每个处理单元执行点积运算,向量长度为 1 024。在能量充足的情况下,94 个处理单元可以同时工作,每个单元在一个时段内最多完成 1 024 次点积。因此,系统同一时间内最多完成 96 256 次点积,此值即为 $K_{\max}$ 。另外,要求系统至少有 1 个处理单元工作,因此 $K_{\min}=1$ 024。控制单元通过调整同时工作的处理核的数量和处理速度来控制系统的运算量及功耗,任务执行一次即完成一次点积运算。其他仿真实验参数如下: $N=10$; $\alpha=5\%$; $K_{\max}=96\,256$; $K_{\min}=1\,024$; $E_D=0.027\,5$; $\gamma=1.75 \times 10^{-4}$; 时段长度为 1 min。由于采用基于神经网络的太阳能预测算法^[12],本实验选用其最大预测误差作为能量预测误差指数。

实验采用的主要评估指标包括:①点积乘法的完成次数,称为运算量;②由于能量低而停止工作的时段数;③最大连续工作时段数。运算量用于衡量系统的性能,处理速度越快、运算量越大,则功耗管理方法对系统性能的优化越好。另 2 个指标用于衡量系统的稳定性,停止工作的时段数越少、连续工作的时段数越多,则系统的稳定性越好。

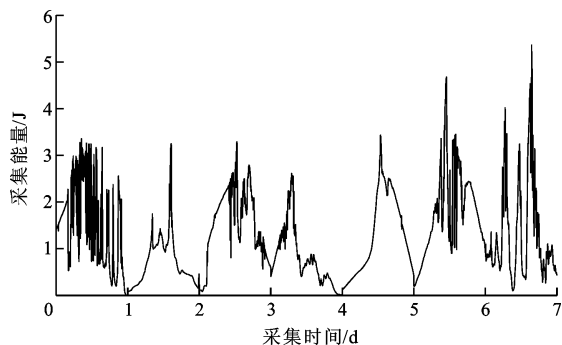


图 3 仿真实验选用的太阳能数据

4.1 参数 N 、 α 对多时段法的影响

为了验证优化时段数 N 和预测误差指数 α 对多时段法的影响,设计了 2 组对比实验。表 1 为 N 取 7 个不同值时,多时段法在太阳能骤降、能量采集长期不足的极端天气下连续工作的实验结果,可以看出:①随着 N 的增大,运算量略有下降,这是因为 N 越大,系统保留的用于未来运算的能量就越多;②随着 N 的增大,优化问题求解时间增加,这是因为 N 越大,求解变量就越多(本实验中,求解时间不超过太阳能采样间隔 1 min);③当 $N \geq 10$ 之后,系

统实现了稳定工作;④在 $N < 10$ 时, N 越大系统停止工作的时间就越早,这是因为系统提前 N 个时段预测到最后一个时段由于能量存储不足而无法工作,此时优化问题无解,系统在下一时段无法工作。

表 1 采集能量连续不足时 N 对系统稳定性的影响

N	运算量/次	求解时间/s · 次 ⁻¹	n	停止工作时刻
2	3 197 284	0.35	1	15:59
6	3 175 184	0.42	1	15:55
7	3 174 562	0.44	1	15:54
8	3 174 054	0.47	1	15:53
9	3 172 948	0.51	1	15:52
10	3 171 598	0.53		
11	3 170 118	0.60		

n :停止工作时段数。

综上所述, N 的大小对系统性能影响不大,但是影响系统的稳定性。在实际应用中, N 的取值可以通过以下方法确定:选用历史数据中系统采集太阳能最少的或者采集能量骤降并长时间不足的某一天进行仿真,调整 N 的大小,直至找出可使系统持续稳定工作的最小 N 值。

为评估采用预测误差指数 α 是否会对系统优化产生影响,采用第 4 天的太阳能采集数据进行仿真,结果如表 2 所示:当不考虑 α 时,多时段法会出现 38 个时段无法工作的情况;当考虑 α 时,系统不受预测误差的影响,性能得到了改善。

表 2 考虑 α 对系统性能优化的影响

预测误差	是否考虑 α	运算量/次	停止工作时段数
5%	考虑	1 762 789	0
5%	不考虑	1 714 889	38

4.2 多时段法与单时段法的比较

如前所述,连续稳定地工作是环境嵌入式系统的首要条件,因此,可以使用停止工作时段数和最大连续工作时段数来有效地评估动态功耗管理方法。

由于本文的功耗管理方法针对的是环境嵌入式系统,所以选择同样适用于这种系统的一种多时段法^[4]和一种单时段法^[12]进行对比,3 种方法连续 7 天的优化结果见表 3。从总体上看:3 种方法的系统完成点积运算的次数相近,2 种多时段法的次数仅比单时段法的低了 4%,原因是多时段法在 7 天后剩余了更多能量用于后续运算;3 种方法的能量利用率(即系统消耗能量与采集能量的比值)分别为

99.79%、99.79%和 99.84%,表明 3 种方法对系统性能的优化效果相近。

表 3 3 种不同方法的优化效果

参数	本文的多时段法	文献[4]的多时段法	文献[12]的单时段法
运算量/次	19 422 894	19 479 565	20 327 527
求解时间/s · 次 ⁻¹	0.53	0.61	0.12
能量利用率/%	99.79	99.79	99.84
停止工作时段数	0	28	43
最大连续工作时段数	3 367	2 943	2 285

在连续稳定工作方面,本文方法的性能明显优于另外 2 种方法,可保证系统 7 天全天候工作。为了清晰地观察 3 种方法遭遇采集能量不足时的优化效果,图 4 展示了系统在第 1 天最后 2 个小时(遭遇阴天)的工作情况:在 14:20 之前、14:40 和 15:40 左右系统能量采集不足,在这 3 个时段单时段法的功耗多次“触底”,系统停止工作。由于单时段法的功耗在大部分时段与采集能量“重合”,即采集能量大多用于矩阵乘法运算,系统完成运算后储存能量较少,在遭遇采集能量不足时连续出现多个时段无法工作的情况,而本文的多时段法适当减少了运算,存储了更多能量,所以在采集能量不足时仍可维持系统的工作。

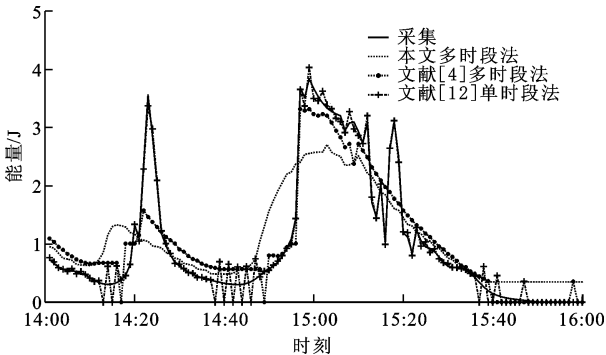


图 4 3 种优化方法的功耗对比

由于文献[4]的多时段法以最大化未来 N 个时段处理单元运算的最小速度为优化目标,与本文的多时段法相比,系统用于运算的能量较多,存储的能量较少,面对连续多个时段采集能量不足的情况,系统会在多个时段停止工作,但是相对于单时段法而言,它由于考虑了系统多个时段的采集能量,所以系统的稳定性更高。

5 结 论

针对环境嵌入式系统的性能和稳定性协同优化问题,本文设计了一种多时段动态功耗管理方法。该方法在实时决定系统下个时段工作模式时,考虑未来多个时段的系统状态,将优化目标设为最大化优化区间最后时段的运算速度,并且引入了能量预测误差指数。仿真实验表明,与文献中的一种单时段法和一种多时段法相比,本文方法可以在保持太阳能供电环境嵌入式系统性能的同时,提高系统的工作稳定性。

参考文献:

- [1] SADEGHIOON A M, METJE N, CHAPMAN D, et al. SmartPipes: smart wireless sensor networks for leak detection in water pipelines [J]. *Journal of Sensor & Actuator Networks*, 2014, 3(1): 64-78.
- [2] LOPES P R, TRINDADE J, GONÇALVES F, et al. A wireless sensor network for monitoring volcano-seismic signals [J]. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 2014, 14(12): 3123-3142.
- [3] HE B, LI Y, HUANG H, et al. Spatial-temporal compression and recovery in a wireless sensor network in an underground tunnel environment [J]. *Knowledge & Information Systems*, 2014, 41(2): 449-465.
- [4] MOSER C, THIELE L, BRUNELLI D, et al. Adaptive power management for environmentally powered systems [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2010, 59(4): 478-491.
- [5] 齐小刚, 陆赞赞, 郑耿忠, 等. 一种低能耗低时延的睡眠调度算法 [J]. *西安电子科技大学学报*, 2015, 42(1): 124-129.
QI Xiaogang, LU Zanzan, ZHENG Gengzhong, et al. Low-power and low-delay sleep scheduling algorithm based on the data aggregation tree [J]. *Journal of Xidian University*, 2015, 42(1): 124-129.
- [6] 王毅, 张德运, 陈海荣. 无线传感器网络汇聚节点动态功耗管理方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42(2): 138-142.
WANG Yi, ZHANG Deyun, CHEN Hairong. Dynamic power management of sink node of wireless sensor networks [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(2): 138-142.
- [7] 刘超, 刘丽萍, 安新升, 等. 基于模糊控制的太阳能驱动无线传感器网络路由算法 [J]. *传感技术学报*, 2014, 27(9): 1238-1246.
LIU Chao, LIU Liping, AN Xinsheng, et al. A fuzzy routing algorithm for solar powered wireless sensor networks [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2014, 27(9): 1238-1246.
- [8] 沈玲, 夏银水, 叶益迭. 基于指数平均模型的无线传感器网络动态功耗管理 [J]. *传感技术学报*, 2014, 27(11): 1551-1556.
SHEN Ling, XIA Yinshui, YE Yidie. Dynamic power management based on exponential average model for WSN [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2014, 27(11): 1551-1556.
- [9] 褚超强, 马德, 罗小华. 一种自适应的动态功耗管理系统 [J]. *电子技术*, 2016(1): 1-6.
CHU Chaoqiang, MA De, LUO Xiaohua. A self-aware dynamic power management system [J]. *Electronic Technology*, 2016(1): 1-6.
- [10] LAI Z, LAM K T, WANG C L, et al. PoweRock: power modeling and flexible dynamic power management for many core architectures [J]. *IEEE Systems Journal*, 2016, PP(99): 1-13.
- [11] OKAMURA H, DOHI T. Dynamic power management with optimal time-out policies [J]. *IEEE Systems Journal*, 2015, PP(99): 1-11.
- [12] LIU Qiang, MAK T, ZHANG Tao, et al. Power adaptive computing system design for solar-energy-powered embedded systems [J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems*, 2014, 23(8): 1402-1414.
- [13] Oak Ridge National Laboratory. Rotating shadowband radiometer [EB/OL]. [2014-10-20]. http://www.nrel.gov/midc/ornl_rsr/. DO.

(编辑 葛赵青)