

EasiSolar: 一种高效的太阳能传感器网络节点系统设计*^{*}

张静静^{1,2}, 赵泽^{1,2}, 陈海明¹, 崔莉¹

(1 中国科学院计算技术研究所 北京 100190;

2 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要: 设计并实现了一种具有两级能量存储结构的传感器网络能量自供给节点系统 EasiSolar。该系统将价格较低且可无限次充放电的电容与能量密度高且漏电流较小的可充电锂电池结合起来,形成高效的能量存储单元,以减少锂电池的充放电次数,延长锂电池的使用寿命。该系统还通过软硬件协同设计,实现了高效的能量管理方法,包括太阳能电池板最大功率输出跟踪器、能量存储模块充电管理模块和供电选择模块,以最大化地获取环境能量。测试实验结果表明,使用该系统设计的能量采集方法能够至少提高 28% 的能量采集效率。

关键词: 无线传感器网络; 能量采集系统; 两级能量存储; 软硬件协同设计

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5030

EasiSolar: Design and implementation of a high-efficiency solar energy-harvesting sensor node system

Zhang Jingjing^{1,2}, Zhao Ze^{1,2}, Chen Haiming¹, Cui Li¹

(1 Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: EasiSolar—An intelligent and high-efficiency solar energy harvesting sensor node for wireless sensor networks is designed and implemented. A two-stage energy storage structure is adopted to take the advantages of both the low cost capacitors with infinite rechargeable cycles and the Lithium-battery with high energy-density and low leakage current. Software/hardware co-design methods, including maximum power point tracker (MPPT), energy storage charging management and power switch control modules are proposed to improve and optimize the energy management and maximize the energy harvest. Test experiment results show that the solar energy output efficiency is improved by 28% using the implemented energy harvest method.

Key words: wireless sensor networks (WSNs); energy-harvesting system; two-stage energy storage; software/hardware co-design

1 引言

无线传感器网络 (WSNs) 和物联网 (Internet of

things, IoT) 成为目前 IT 领域中研究的热点之一^[1-2], 传感器节点是其系统的重要组成部分, 其工作寿命影响着网络的存活时间。目前大多数的传感器网络应用中都是使用干电池作为能量供给, 为节点供电, 由于体积和成本要求的限制, 节点所携带的电池能量有限, 为了尽可能延长

收稿日期: 2011-08 Received Date: 2011-08

* 基金项目: 国家自然科学基金 (61100180)、"新一代宽带无线移动通信网" 国家科技重大专项 (2010ZX03006-003-02)、工信部、财政部物联网专项 "物联网应用中间件研发及产业化" 项目资助

节点工作时间,大部分系统通过降低节点各个模块的功率^[3]或者降低节点工作周期(duty cycle)^[4]来降低节点消耗的能量。这 2 种方法在一定程度上可以延长节点使用寿命,但是不能从根本上解决问题。目前解决这个问题的思路是让传感器网络节点具有能量自供给能力,即可获取周围环境能量。这样就可以克服上述节点能量单向递减的问题。

本文设计实现了一种高效的能够获取太阳能的传感器网络节点系统,其利用太阳能电池板作为能量采集模块,采用 2 级能量存储结构,第 1 级是超级电容;第 2 级是可充电锂电池。这样既利用了超级电容可无限次充放电的特性,又发挥了锂电池高能量密度和低漏电等优点,组成一个高效的能量存储单元。结合简单、高效的硬件体系结构与智能的软件控制方法,对太阳能电池板设计实现了最大功率输出跟踪器(MPPT),保证最大化地利用太阳能;对能量存储模块实现了智能化的充电管理,使其有效地利用能量;系统的测试实验结果表明,使用该系统设计的能量采集方法能够至少提高 28% 的能量采集效率。

2 相关工作

当前传感器网络中大多数传感器网络能量采集节点的系统结构如图 1 所示^[5-6],主要由以下 4 个模块组成:能量采集模块、能量存储模块、能量管理模块和能量消耗模块(传感器节点)。能量采集模块能够通过换能器件从环境中获取能量,目前普遍利用的环境能量主要包括太阳能、风能、热能和振动能等^[7];能量存储模块主要是将能量采集模块所采集的能量进行存储,并为节点工作提供能量,一般可利用的能量存储模块包括电容和可充电电池;能量管理模块主要实现对能量存储模块的电流电压监测、充电管理和能量消耗模块的供电控制等功能;能量消耗模块一般指传感器网络节点的计算与通信部件。

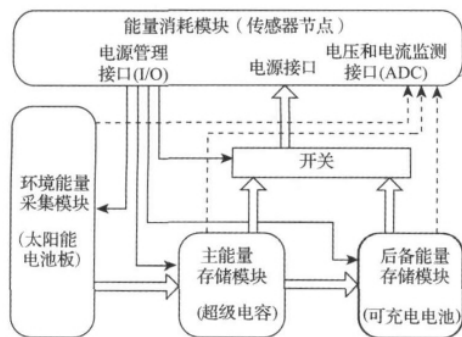


图 1 一种能量采集节点的结构图

Fig. 1 System architecture of a energy-harvesting sensor node

传感器网络中能够获取环境能量的节点平台设计有以

下几种典型的系统,UCLA 的 Helimote^[8],CSIRO ICT 的 Fleck^[9],Princeton 的 ZebraNet^[10],UC Berkeley 的 Prometheus^[5]和 Trio^[11],UC Irvine 的 Everlast^[12]和 Ambimax^[13],Minnesota 的 eShare^[14]以及台湾国立清华大学的 Duracap^[15]等。

Helimote^[8]、Fleck^[9]和 ZebraNet^[10]节点系统太阳能电池板通过一个二极管直接与可充电电池连接,只有当太阳能电池板电压大于电池电压 0.7 V 时,才会为电池充电。当电池电压高于太阳能电池板时无法给电池充电,导致能量的浪费。并且系统使用的 NiMH 电池,其充电次数有限,因此受电池寿命的影响节点无法永久地工作和使用。

Prometheus^[5]和 Trio^[11]为了解决电池由于频繁充放电而导致失效的问题,采用 2 级能量存储结构的设计,使用超级电容作为主要能量存储模块和锂电池作为后备的能量存储模块。太阳能电池板优先将采集的能量存储在电容中,同样,系统首先使用电容,只有当电容电压过低时,系统才启用后备能量存储模块电池为其供电。这样的设计大大减少了系统使用电池的次数,从而延长了节点的使用寿命。但是由于系统缺乏有效的电容充电控制设计,也存在能量的利用率不高的问题。

Everlast^[12]和 eShare^[14]等系统将电容作为唯一的能量存储模块。为了提高太阳能的利用率,系统设计实现了一个跟踪太阳能电池板最大功率输出点(MPPT)的电路,该系统的不足是 MPPT 电路需要 MCU 实时控制,增加了系统的软件开销,并且储能能力弱,漏电流大,系统存在光照不足,能量耗尽的可能,节点系统的可靠性不高。

Ambimax^[13]的设计能够组合利用多种环境能量包括太阳能和风能,并设计了硬件 MPPT 电路,能够最大化地从环境中获得能量。系统只采用超级电容作为能量存储模块,解决电池使用老化的问题。但是系统设计复杂,增加了硬件的开销,不适合应用于低成本的无线传感器节点系统中。

Duracap^[15]节点系统利用太阳能,采用电容作为能量存储模块,并设计实现了太阳能电池板的 MPPT 电路,并可以输出 2 种不同的电源电压,使系统能够适应不同的太阳能电池板和电源需求。同时系统还设计实现了冷启动模块,可解决在初始状态下,系统因为没有电能而无法启动的问题。系统的优点是能够最大化地利用环境能量,并且为不同需求的电源提供了接口。不足之处是可携带的能量有限,并且能量管理方法不够合理,导致节点电能耗尽而停止工作,限制了节点的应用。

以上系统主要存在以下问题,第一,能量存储模块结构单一,有的使用电容作为能量存储模块,由于

电容储能量较少,并且漏电流比较大,造成能量浪费和能量不足的问题,有的使用可充电电池作为能量存储模块,存在因电池频繁充放电而失效导致节点寿命有限的问题;第二,环境能量利用率不高,一些系统将太阳能电池板直接给能量存储模块充电,这样只有在太阳能电池板电压高于电容电压时,环境能量才会被系统利用,并且太阳能电池板也无法以最大功率输出;第三,能量管理方法低效,大部分系统的能量管理方法比较简单,存在能量存储、分配和管理不合理等问题,使系统无法充分有效地利用环境能量。为了解决以上问题,本文设计实现了一种高效的太阳能节点系统。该系统使用太阳能电池板作为能量存储模块,设计实现了一个简单的自适应太阳能电池板的 MPPT 电路,以最大化地采集太阳能能量;并采用 2 级能量存储模块结构,充分利用超级电容的无限充放电特性和可充电电池的高能量密度和低漏电流等优点;再结合简单有效的能量管理方法和高效的 DC/DC 充电管理,充分利用环境能量。使节点能够在满足大多数需求的情况下可以持久地工作。

3 系统方案分析

3.1 环境能量采集模块分析

太阳能是一种易于获取、能量密度高、无污染的有效能量,从而被广泛地应用。太阳能电池板是利用半导体界面的光生伏特效应而将光能直接转变为电能的装置。太阳能电池板的输出特性与材料、PN 结、光照度和温度有关。一般认为,在理论上,太阳能电池板的 $I-V$ 特性为超越方程,图 2 为本文采用的一块面积为 $90\text{ mm} \times 65\text{ mm}$ 5 V 、 0.5 W 的太阳能电池板,在温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,测量的 $I-V$ 特性曲线。

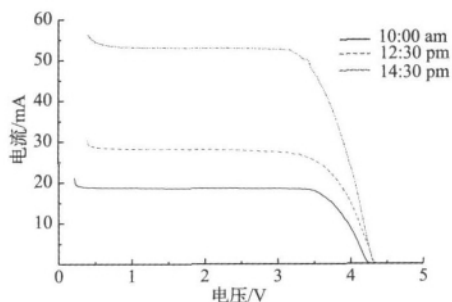


图 2 一种太阳能电池板 $I-V$ 特性曲线

Fig. 2 The measured $I-V$ characteristics of a solar cell panel

从图中可以得出以下几个结论:第一,太阳能电池板有很重要的 2 个参数:开路电压和短路电流,决定太阳能电池板的最大输出功率;第二,太阳能电池板是一个限压

电流源,这个特性和电池正好相反;第三, $I-V$ Tracer 曲线中存在一个点,使电流和电压的乘积达到最大,能够使太阳能电池板以最大功率输出能量,这个点也称为太阳能电池板最大输出功率点(MPP);第四,随着太阳辐射的强度增大(减少),太阳能电池板的短路电流也一起增大(减少),而开路电压基本不变。

系统需要根据能耗需求选择满足功率、尺寸、开路电压和短路电流等要求的太阳能电池板,具体方法请参见 4.1 节中系统模块选择中太阳能电池板的内容。

3.2 主能量存储模块特性分析

在能量采集节点系统中主能量存储模块同时从太阳能电池板获取能量并且为节点系统供电,需要支持频繁的充放电操作,可充电电池一般只有几百次的可充放电次数,电容不受充电次数限制,因此电容比电池更适合做主能量存储模块。但超级电容的能量密度低,一般都有很大的漏电流,而且电容值越大,漏电流越大,体积越大,价格越高,图 3 为通过实验测得的不同容值的超级电容自放电电压曲线图。

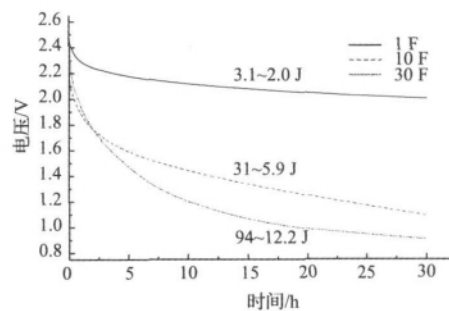


图 3 几种电容自放电电压曲线图

Fig. 3 Self-discharge curves of several supercapacitors

从图 3 中可得电容值越大,可以存储更多的能量,其漏电流也随之增大,其电压值也下降的较快,浪费更多的能量。因此,需要根据系统要求选择合适容量的电容,优先使用电容中存储的电能,而减少使用电池的次,从而延长电池的使用寿命,达到延长节点系统工作时间的目的。

3.3 后备能量存储模块特性分析

后备能量存储模块需要满足以下要求:第一,在主能量存储模块能量耗尽的情况下能够为系统长时间地供电;第二,需要有较强储能能力,其漏电流需尽可能小;第三,具有尽可能多的充放电次数,延长节点寿命。一般的可充电电池基本上都满足上述要求,目前常见的可充电电池一般有镍镉电池(NiCad),镍氢电池(NiMH)和锂电池(Lithium),它们的特性如表 1 数据所列^[5]。

表1 几种可充电电池特性比较

Table 1 Rechargeable battery characteristic comparison

种类	电压/V	能量密度 ($W \cdot h \cdot kg^{-1}$)	充放电次数	自放电率 ($\% \cdot 月^{-1}$)
NiCad	1.2	50	1200	15 ~ 20
NiMH	1.2	55	300	20 ~ 30
Lithium	3.7	80	500	5 ~ 10

通过对比,锂电池具有最高的能量密度、最低的自放电率、较多的可充电次数等优点、最适合作为后备能量存储模块,但是其需要比较复杂的充电管理。锂电池充电管理的方法一般是直接使用硬件充电管理芯片,这种方法比较容易实现,但价格比较高,并且充放电管理芯片一般消耗较多的能量;另一种方法是使用高效的DC/DC稳压电源芯片并配合一定的软件管理完成充电管理,这种方法充电效率较高,需要一定的软件开销。

3.4 节点能量消耗模型分析

传感器节点的功耗主要与4个参数有关:工作电压(V_{supply})、工作电流(I_{active})、休眠电流(I_{sleep})和工作周期(D),其功耗模型^[5]如下:

$$P_{avg} = V_{supply} (D I_{active} + (1 - D) I_{sleep}) \quad (1)$$

从式(1)中可以得出,能量效率较高的节点应当具有尽可能低的 V_{supply} 、 I_{active} 、 I_{sleep} 和 D 。以Ez240节点(类似于TelosB^[16])为例,Ez240主要由MSP4301611低功耗微处理器和2.4G射频芯片CC2420组成,同时节点上还集成了存储芯片、LED指示灯、光照和温湿度传感器等功能模块。

表2列举了实验测得的Ez240节点在3.3V电压下的各个模块的功耗电流值。从表中可以得出以下结论:带有休眠模式的节点MCU的休眠电流 I_{sleep} 为15.3 μA ,其可以忽略不计,节点MCU工作时电流为1.7 mA,点亮一个红色LED需要消耗的电流为4 mA,读传感器(SHT11温湿度传感器)时电流大约为1.9 mA,节点通过射频模块发送和接收数据时的工作电流分别17.8 mA和19.3 mA。因此估算节点工作电流 I_{active} 大约为20 mA, D 一般是根据应用的不同而设定的。

表2 Ez240节点各个模块消耗电流表

Table 2 The measured current consumption of Ez240 node

节点模块或工作状态	消耗电流
节点MCU休眠状态	15.3 μA
节点MCU工作	1.7 mA
节点点亮LED灯	4 mA
节点读取SHT11温湿度传感器	1.9 mA
节点通过射频模块发送数据	17.8 mA
节点通过射频模块接收数据	19.3 mA

4 系统设计与实现

4.1 系统模块选择

1) 太阳能电池板

考虑到能量存储模块可存储的能量有限,因此没有必要选择功率非常大的太阳能电池板为电容充电,这样也可以降低设备的价格和体积。系统须选择满足最低功耗要求的太阳能电池板以保证系统持久工作。拟设计太阳能电池板在光照适中的情况下一天输出的能量能够满足节点工作一天的需求,同时也能够充满电池。这样大部分情况节点只需要电容为其提供能量,而只有天气情况不好的情况下才使用电池,可以减少电池的使用次数。并且一旦开始消耗电池,确保在电池电量被耗尽时只需要有一天适中的太阳光照,就能将电池充满。

2) 电容

系统选用的电容容量越大,系统可利用电容的能量就多一些,使用电池的次数也会降低,但考虑电容值越大其漏电流也越大,因此需要综合考虑选择电容的容值,拟选择的电容容量只需提供节点至少一天消耗的能量,同时也需要考虑电容电压等问题。

3) 电池

电池是决定节点工作寿命的主要因素,系统选择锂电池作为后备能量存储模块,因为它具有可充电次数较多、能量密度高、漏电率低和无记忆性等优点。容量越大的电池能够为节点提供更长时间的能量,肯定也能够延长系统的寿命,但系统的体积变大,成本会增加。按照系统的设计要求功率更高的太阳能电池板,系统拟选择的电池容量可以保证节点在没有任何能量补给的情况下能够工作6~8 d。

4) 节点平台

传感器网络系统节点平台有很多选择,系统根据设计需求,希望节点能够支持低功耗工作休眠模式,同时还具有丰富的接口资源,如串行总线接口、I/O接口和ADC接口等,以方便系统能量监测与管理等功能的实现。

4.2 节点系统的设计与实现

根据4.1内容的分析阐述,系统选择Ez240传感器节点,其处理器MSP4301611支持低功耗工作休眠模式,并且具有丰富的接口资源可满足系统需求,其工作电压范围为1.8~3.6 V,工作电流 I_{active} 和休眠电流 I_{sleep} 分别为20 mA和15.3 μA 。如果节点以1%休眠占空比工作,则其平均的能耗功率通过式(1)计算大致为0.7 mW,则其工作一天需要的能量为0.7 mW \times 60 \times 60 \times 24,计算得60.5 J;电容的选择需要满足节点至少一天消耗的能量,主要是晚上没有能量补给的时候电容中需要存储足够的能量支持节点工作,系统将2个电

压为 2.7 V 的 30 F 电容串联使用以满足系统电压设计的需求,电容可存储的最高能量值为 $0.5 \times 5 \text{ F} \times 5.4 \text{ V} \times 5.4 \text{ V}$, 计算得 72.9 J, 而电容电压降到 1.8 V 就无法为系统供电, 同时还有漏电特性和充电效率等带来的能量损耗, 选择的电容容量基本能够满足系统工作一天的需求; 系统选择 4.2 V 的 200 mAh 的锂电池, 经过实际测量节点在此电池供电并以 1% 的工作休眠占空比工作的情况下, 可以持续工作 6 d 左右, 因此电池的选择也满足系统的设计需求。系统选用一块面积为 $90 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$ 、最大输出功率为 0.5 W 的太阳能电池板, 其在 1 000 lux 光照下其输出功率大约为 $3.6 \text{ V} \times 30 \text{ mA}$, 计算得 0.11 W, 经过计算和实际测量, 太阳能电池板在此功率下满充电容需要小 1 ~ 2 h, 满充锂电池需要 7 ~ 8 h。

考虑系统结构设计的灵活性, 将能量采集、存储和管理模块作为一个单独的模块, 通过 51 pin 接口与 Ez240 节点连接起来构成一个完整的传感器网络节点系统。其结构框图和实物图如图 4 和 5 所示。系统主要包括 1 个最大功率为 0.5 W 的太阳能电池板、2 个 10 F 串联的超级电容、1 块 4.2 V 200 mAh 的锂电池、能量管理模块板以及 Ez240 节点(包括温湿度传感器、光照传感器)。

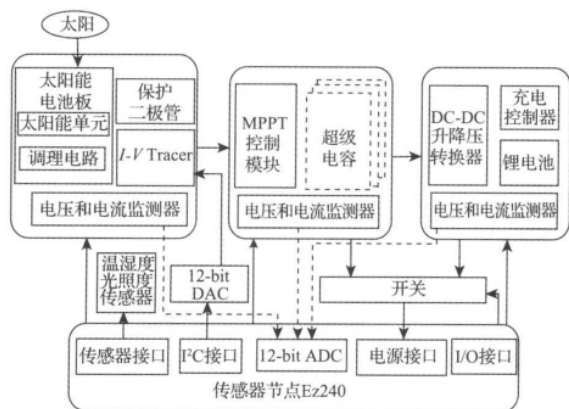


图 4 EasiSolar 太阳能节点系统框图

Fig. 4 System architecture of EasiSolar system

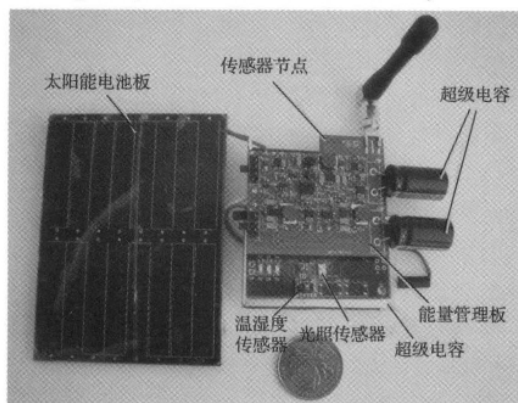


图 5 EasiSolar 太阳能节点实物图

Fig. 5 EasiSolar; a solar harvesting sensor node

4.3 能量检测模块的设计与实现

节点通过使用 ADC 模块检测系统各个模块的电压和电流状态。MSP430 的 ADC 模块有 2 个参考电压值 (1.5 V 和 2.5 V), 因此系统使用分压电阻实现电压的检测, 使用阻值比较小的电阻能够得到比较精确的电压值, 同时会消耗更多的电量。系统使用 2 个精度为 1% 的 1 M Ω 的电阻实现电压的监测。电流检测使用 0.15 Ω 的采样电阻和 MAX9928F 电流传感器实现, 具有精度高、功耗低、配置灵活等特点。

为了全面地了解系统各个模块的状态, 对太阳能电池板、超级电容、锂电池和节点的电压以及太阳能电池板的输出电流、电容输入输出电流、锂电池输入输出电流和节点输入电流都设计了相应的检测接口, 为以后更高层的能量管理机制或协议提供了全面准备的信息。

4.4 I-V Tracer 和 MPPT 电路的设计与实现

为最大化太阳能的利用率, 系统设计实现了 I-V Tracer 模块和 MPPT 电路模块。其中 I-V Tracer 模块的功能是寻找太阳能电池板最大功率输出点, 而 MPPT 电路模块是控制太阳能电池板以最大功率输出能量。

如图 6 所示, I-V Tracer 电路原理是 MCU 控制 DAC 线性输出电压驱动 N-MOSFET 管的栅极, 相当于改变源极和漏极之间的负载值, 太阳能电池板的输出电压和电流会随之改变, 通过电压传感器和电流传感器采集得到的电压电流值, 找出最大功率点对应的输出电压和输出电流。

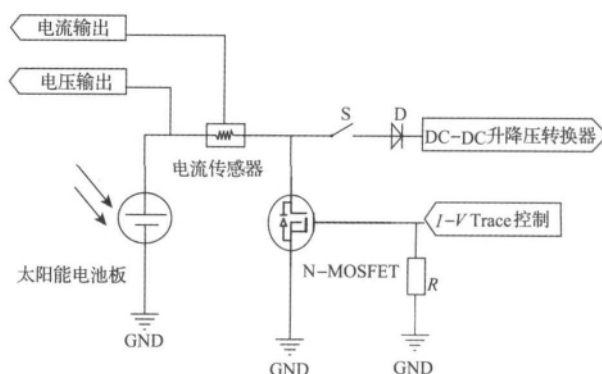


图 6 I-V Tracer 电路原理图

Fig. 6 I-V Tracer circuit diagram

为了精确地找到太阳能电池板的 MPP, 系统选用高精度 12-bit 的 DAC。如果以遍历的方式控制 DAC 的电压输出, 则一次 I-V Tracer 的时间会很长, 不但增加了软件控制的开销, 还浪费太阳能电池板产生的能量。实验发现, 同一块太阳能电池板在相同温湿度和光照度下, 其 MPP 在一个相对确定的范围内, 并且变化范围不会太大。

利用此特性,系统中预先建立一个有关环境光照度与最大功率点之间的对应关系,每次进行 $I-V$ Tracer 操作时,先利用传感器获取当前环境中的光照度和温湿度信息,查表得到预测的太阳能电池板的最大功率点范围,再在范围内进行 $I-V$ Tracer 操作。

太阳能电池板的 MPPT 输出控制是通过控制 DC/DC 升降压稳压开关电源的开关状态,使太阳能电池板电压稳定在最大功率输出电压上。一般有以下几种方法,使用 MCU 实时控制 DCDC 开关,节点需要一直处于工作状态,无法休眠,导致需要消耗更多的能量;或者使用一些比较器和触发器搭建纯硬件的 MPPT 控制电路,这样的设计电路复杂度较高,且系统的参数很难改变。本系统采用软硬件协同设计方法,使用低功耗的硬件比较器配合一个软件可配置的数字电阻实现太阳能电池板最大功率输出。MCU 根据 $I-V$ Tracer 电路获取的当前太阳能电池板最大功率输出的电压值配置数个子电阻器,比较器负极的输入为最大功率输出电压,比较器正极的输入为太阳能电池板电压,比较器的输出端控制 DC/DC 升降压开关电源的开关端,通过负反馈方式使太阳能电池板稳定工作在最大功率输出电压上。

4.5 充电管理模块的设计与实现

太阳能电池板对电容的充电控制是通过一个 DC/DC 升降压稳压电源芯片 TPS63030 实现的,该芯片的输入和输出电压范围分别为 $1.8 \sim 5.5 \text{ V}$ 和 $1.2 \sim 5.5 \text{ V}$,因此太阳能电池板输出电压在 $1.8 \sim 5.5 \text{ V}$ 范围内都可以为电容充电,因此可以充分利用太阳能电池板输出的能量;电源芯片内部还有电流保护电路防止电容短路充电;当太阳能电池板输出电压降到 1.5 V 以下时,DC/DC 升降压稳压芯片会自动关闭其内部开关停止对电容充电。

锂电池的充电管理是通过软件控制 DC/DC 升降压稳压芯片完成的。为了充分获取环境能量和提高节点系统的可靠性,只要当电容电压高于 $V_{\text{cap-ub}}$ (4.2 V),系统将控制电容为电池充电,尽量保持电池中存储更多的能量,当锂电池电压低于 $V_{\text{bat-th}}$ (4.15 V),采用恒流方式充电;当电压高于 $V_{\text{bat-th}}$ 后采用固定电压对锂电池以小电流充电,直至达到饱和电压 $V_{\text{bat-ub}}$ (4.25 V) 后,停止对锂电池充电,其充电控制算法如算法 1 所示。

算法 1 电池充电控制算法

1. if ($V_{\text{cap}} < V_{\text{cap-ub}}$ or $V_{\text{bat}} \geq V_{\text{bat-ub}}$) then
2. Stop charging.
3. else if ($V_{\text{bat}} < V_{\text{bat-ub}}$ and $V_{\text{cap}} \geq V_{\text{cap-ub}}$) then
4. if ($V_{\text{bat}} < V_{\text{bat-th}}$)
5. Start constant current charging.
6. else if ($V_{\text{bat}} \geq V_{\text{bat-th}}$) then
7. Start constant voltage charging.
8. end if

9. end if

4.6 电源开关控制模块的实现

电源开关控制模块的功能是根据需求为节点系统选择合适的能量存储模块(电容和电池)为其提供能量,通过 MCU 控制一个 2 选 1 的选择器实现。为了尽可能地减少电池的使用而延长节点的寿命,只要电容电压降到系统工作的最低电压要求,系统就选择电容为其供电,其他情况选择电池,控制算法如算法 2 所示:

算法 2 电源开关控制算法

Algorithm 2 power switch control algorithm

1. if ($V_{\text{cap}} > 1.8 \text{ V}$) then
2. Turn on the capacity switch.
3. else
4. Turn on the battery switch.
5. end if

5 系统性能评价

本节将通过实验对设计实现的系统的功能和性能进行验证和评估。为减少外界环境对实验的影响,采用室内光照度可调的日光灯代替室外真实的太阳光照,日光灯可以提供的光照范围为 $10 \sim 1\,000 \text{ lux}$ 。一般情况下,晴天时阳光直射的光照强度大约为 $10\,000 \text{ lux}$ 左右。

5.1 $I-V$ Tracer 的性能评价

如果遍历完成整个 $I-V$ Tracer 操作,需要占用 13.48 s MCU 时间。表 3 列出在不同光照度使用相关性预测 MPP 的实验结果。表中的参考值个数表示在 $0 \sim 1\,000 \text{ lux}$ 平均分布的一定光照度下参考 MPPT 的个数, $I-V$ Tracer 时间是指在参考值的帮助下运行 $I-V$ Tracer 找到实际的 MPP 需要花费的平均时间;节省能量是指使用相关预测方法找到 MPP 比不使用预测方法所节省的能量值;存储开销指存入 Flash 中的字节数。

表 3 不同参考值个数相关性预测 MPP 性能比较

Table 3 Comparison of MPP performance

参考值个数	$I-V$ Tracer 时间 /s	节省能量/J	存储开销/B
10	2.46	1.653	40
20	1.52	1.794	80
50	0.68	1.920	200
100	0.52	1.944	400

根据结果得知,参考值个数越多, $I-V$ Tracer 运行的时间越短,软件的开销减少,同时能够获取更多的环境能

量,但其存储开销也将随之增大。因此,在系统设计需要根据需求选择一定的参数,本系统使用了20个参考值实现。

5.2 MPPT 控制的性能评价

为了验证 MPPT 电路的有效性,系统将在不同光照度下(0~1 000 lux)对太阳能电池板在 MPPT 控制下和无 MPPT 控制下的输出功率进行比较和评估,其实验结果如图 7 所示。

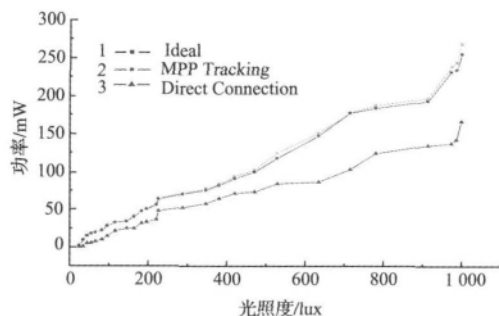


图 7 太阳能电池板功率输出性能比较图

Fig. 7 Comparison of power output efficiency of solar cell panel

其中线段 1 表示太阳能电池板理想的最大功率输出值,线段 3 表示太阳能电池板端无 MPPT 控制直接与电容相连时功率的输出情况,其与理想最大输出功率的比值平均值,也就是其平均功效值约为 67%,线段 2 表示 MPPT 电路控制下的太阳能电池板功率输出情况,从图中可以看出其线段比较接近太阳能电池板理想的最大功率输出曲线,其平均功效可以达到 95% 以上。因此该系统设计的能量采集方法能够将太阳能电池板的输出功率至少提高 28%。

5.3 充电模块的性能评价

为了验证本系统设计的充电模块的高效性,系统将对几种不同的充电方法进行比较和评估。

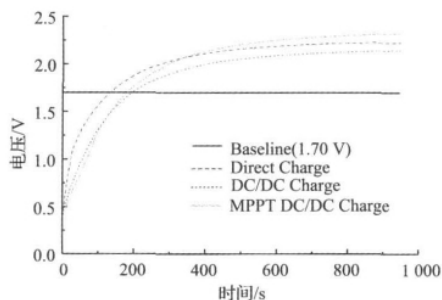


图 8 不同的电容充电方法性能比较

Fig. 8 Comparison of different charging methods

图 8 的 3 条曲线表示实验测得的在相同的环境下太阳能电池板在不同的充电方式下为 2.7 V、10 F 的超级

电容充电时的电容电压与时间关系。这 3 种方法分别是直接通过二极管为电容充电 (Direct Charge); 通过 DC/DC 升降压稳压芯片为电容充电 (DC/DC Charge); 在进行 $I-V$ Tracer 之后控制太阳能电池板输出最大功率并通过 DC/DC 升降压稳压芯片为电容充电 (MPPT DC/DC Charge)。

通过对比,MPPT 控制太阳能输出最大功率为电容充电是最有效的方法。直接通过二极管为电容充电在初始时刻由于短路充电电流过大,而 DC/DC 升降压稳压芯片内部有限流模块,所以其电流比较平稳。DC/DC 升降压稳压电源也会消耗一些能量,在本实验条件下其充电效率不如 Direct Charge,但从原理上来讲,DC/DC 升降压稳压芯片可以通过升压方式为电容充电,所以其充电效率应当比直接通过二极管为电容充电高。

5.4 节点系统验证与评估

本实验主要针对节点系统的整体功能和性能进行全面的验证和评估。节点系统以 1% 的固定工作休眠占空比方式工作,记录了节点连续 7 d 的系统能量状态和信息,如图 9 所示,其中的曲线 1 表示记录的环境的光照强度值,曲线 2 和 3 分别表示节点系统运行时电容和电池的电压值,下面将对实验结果进行概要的说明和分析。

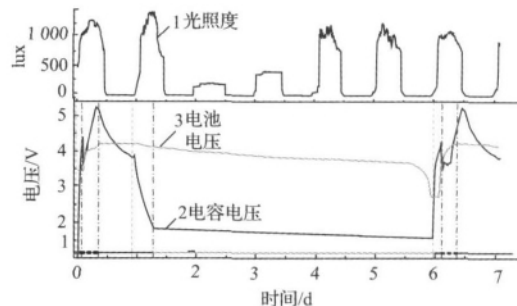


图 9 节点系统运行状态图

Fig. 9 The operation status of the node system

系统设定节点系统从第 1 天早上 7 点开始运行,在系统的初始时刻,电池的电压约为 3.5 V,电容中无存储的能量,太阳光照强度大约为 500 lux。由于电容中没有能量,系统选择电池为系统供电,太阳能电池板开始为电容充电;当电容中电压高于 1.8 V 时,系统选择电容为节点供电;大约经过 2 h 后(当天上午 9 点),电容电压达到 4.2 V,达到电池充电的条件,系统为电池进行充电;大约经过 5 h 后(当天下午 2 点),电容达到满充;大约经过 3 h 后(当天下午 5 点),电池达到满充,系统停止对电池的充电。此时太阳光照已经渐渐消失,系统无能量补给,节点继续使用电容中的能量为系统供电,到第 1 天结束时(第 2 天早上 6 点),电容电压降至 3.2 V,电池也下降大于 0.01 V。

第1天节点运行的结果验证了系统选用的0.5 W的太阳能电池板在平均1200 lux的光照强度下8 h可充满电容和锂电池,同时电容可在晚上为节点系统提供能量,说明了系统选用的模块满足系统设计的需求。

为了测试锂电池支持节点的工作的时间,从第2天起人为关断太阳能电池板,停止其为电容充电,可看出节点首先使用电容中的能量,大约6 h后(第2天下午1点),电容电压降到节点可工作的最低电压1.8 V,系统选择后备能量存储模块电池在接下来的5天中一直为系统供电。

从第7天开始,人为又开启太阳能电池板为电容充电,系统又重新获得能量的补给,能够为电容和电池充电补充能量,节点工作过程与第1天情况相似,这里不再重复。

实验过程和结果可得出只要保证电池不失效(无存储能量或损坏),节点系统就能保证持续稳定的工作。

6 结 论

本文设计实现了一种可以采集太阳能的传感器网络节点系统,它具有2级能量存储结构,主能量存储模块是电容,后备能量存储模块是可充电的锂电池。系统设计实现了太阳能电池板在线的*I-V* Tracer电路和MPPT电路,保证太阳能电池板以最大功率输出能量,使系统能够最大化地采集环境能量;并通过软硬件协同设计,实现了智能、高效的能量管理控制方法,还提供了丰富全面的能量信息接口,可以根据应用需求设计实现更高层的能量管理协议。

参考文献

- [1] 崔莉,鞠海玲,苗勇,等. 无线传感器网络研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 163-174.
CUI L, JU H L, MIAO Y, et al. Overview of wireless sensor network [J]. Journal of Computer Research and Development, 2005, 42(1): 163-174.
- [2] 王保云. 物联网技术研究综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(12): 1-7.
WANG B Y. Review on internet of things [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(12): 1-7.
- [3] 任锦绘,戴晓华,王智,等. 无线传感器网络节点系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2006, 20(6): 31-35.
REN H J, DAI X H, WANG ZH, et al. System design of nodes of wireless sensor networks [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2006, 20(6): 31-35.
- [4] MIKKO K, JUKKA S, TIMO D, et al. Energy-efficient reservation-based medium access control protocol for wireless sensor networks [J]. Journal of EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2010, 57: 1-22.
- [5] JIANG X, POLASTRE J, CULLER D. Perpetual environmentally powered sensor networks [C]. 4th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'05), California, USA, 2005: 463-468.
- [6] JEONG J, JIANG X F, CULLER D. Design and analysis of micro-solar power systems for wireless sensor networks [C]. 5th International Conference on Networked Sensing System (INSS08), Kanazawa, Japan, 2008: 181-188.
- [7] ROUNDY S, STEINGART D, FRECHETTE L, et al. Power sources for wireless sensor networks [C]. European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN04), Berlin, Germany, 2004: 1-17.
- [8] RAGHUNATHAN V, KANSAL A, HSU J, et al. Design consideration for solar energy harvesting wireless embedded systems [C]. 4th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'05), California, USA, 2005: 64.
- [9] CORKE P, VALENCIA P, SIKKA P, et al. Long-duration solar-powered wireless sensor networks [C]. 4th Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets07), Cork, Ireland, 2007: 33-37.
- [10] ZHANG P, SADLER C M, LYON S A, et al. Hardware design experiences in ZebraNet [C]. 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys04), Maryland, USA, 2004: 227-238.
- [11] DUTTA P, HUI J, JEONG J, et al. Trio: Enabling sustainable and scalable outdoor wireless sensor network deployments [C]. 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN06), Nashville, TN, USA, 2006: 407-415.
- [12] SIMJEE F, CHOU P H. Everlast: Long-life, supercapacitor operated wireless sensor node [C]. International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED06), Tegernsee, Germany, 2006: 197-202.
- [13] PARK C, CHOU P H. AmbiMax: Efficient, autonomous energy harvesting system for multiple-supply wireless sensor nodes [C]. 3th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh, and Ad Hoc Communications and Networks (SECON06), Reston, VA, USA, 2006: 168-177.
- [14] ZHU T, GU Y, HE H, et al. eShare: A capacitor-driven energy storage and sharing network for long-term

operation [C]. 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys10), Zurich, Switzerland, 2010: 239-252.

- [15] CHEN CH Y, CHOU P H. DuraCap: A supercapacitor-based, power-bootstrapping, maximum power point tracking energy-harvesting system [C]. International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED10), Austin, TX, USA, 2010: 313-318.
- [16] POLASTRE J, SZEWCZYK R, CULLER D. Telos: Enabling ultra-low power wireless research [C]. 4th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'05), California, USA, 2005: 364-369.

作者简介



张静静, 2009 年获得西安电子科技大学学士学位, 现为中国科学院计算技术研究所硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式系统和无线传感器网络。

E-mail: zhangjingjing@ict.ac.cn

Zhang Jingjing received B. Sc. degree from Xidian University in 2009. She is currently pursuing M. Sc. degree in Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences. Her main research interests include embedded system and wireless sensor networks.



赵泽, 分别于 2000 和 2003 年获得大连理工大学学士和硕士学位, 现为中国科学院计算技术研究所博士研究生、助理研究员, 主要研究方向为嵌入式系统和无线传感器网络。

E-mail: Zhaoze@ict.ac.cn

Zhao Ze received B. Sc. and M. Sc. degrees both from Dalian University of Technology in 2000 and 2003, respectively. He is currently a Ph. D. candidate and assistant researcher in Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include embedded system and wireless sensor networks.



陈海明, 分别于 2003 和 2006 年获得天津大学学士和硕士学位, 2010 年获得中科院计算技术研究所博士学位, 现为该单位助理研究员, 主要研究方向为无线自组织网络和传感器网络。

E-mail: chenhai ming@ict.ac.cn

Chen Haiming received B. Sc. and M. Sc. degrees both from Tianjin University in 2003 and 2006, respectively, and received Ph. D. degree from Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences in 2010. He is currently an assistant researcher in the same institute. His main research interests include wireless self-organized network and wireless sensor networks.



崔莉, 博士、研究员、博士生导师, 传感器网络实验室主任, 主要研究方向为传感器技术、无线传感器网络。

E-mail: lcui@ict.ac.cn

Cui Li is a Ph. D., professor, Ph. D. supervisor and the director of Sensor Network Laboratory. Her research interests include sensor technology and wireless sensor networks.