

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.03.001

基于超级电容的储能模块自放电分析

刘轩, 王越, 吴义鹏

(南京航空航天大学航空学院, 江苏 南京 210006)

摘要:低功耗自供电设备随着物联网技术的不断进步逐渐成为发展主流。基于超级电容搭建的储能模块可应用于低功耗自供电智能设备,但超级电容的自放电特性会导致存储能量的损失及端电压的下降,不利于低功耗自供电设备的功耗管理及测量。文中建立了所述储能模块的等效可变漏电阻模型,通过实验确定了等效模型中的相关参数并通过 Matlab/Simulink 数值仿真软件对该储能模块的自放电过程进行了分析。最后对仿真结果进行了分段线性化拟合以便于后续测试误差修正或数学计算,并使用拟合后的等效电路模型预测了自放电期间储能模块的电压变化。该电压变化值与实验所测结果吻合,验证了模型的有效性,为低功耗自供电设备的电源管理单元设计及功耗测量等奠定了基础。

关键词:超级电容;储能系统;自放电分析;等效电路模型;低功耗;自供电

中图分类号: TM53

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)03-0002-05

0 引言

低功耗及自供电是物联网时代的发展主流。物联网是互联网络与传感器网络的融合,通过各种传感器实时采集信息并通过各类可能的网络接入,实现物与物、物与人的泛在连接以及对物品和过程的智能化感知、识别和管理。感知层是物联网的核心,通过传感网络获取环境信息^[1]。目前多数传感器节点由电池^[2]或外接电源供电^[3],也有部分研究表明节点可通过收集周围环境能量实现自供电,如太阳能、机械振动能、温差能等。通常由环境能量供电的无线传感器节点使用可充电电池^[4-7]、超级电容^[8-10]或混合采用^[11-13]两者来储存能量。

尽管可充电电池容量高且泄漏率低,但其循环寿命会限制传感器节点的寿命^[8],充放电循环中的老化过程会导致电池容量逐渐降低、内部电阻逐渐增加^[14]。例如,镍氢电池^[5]和锂离子电池^[7]的循环寿命分别为500~800次和1 000~1 200次。超级电容具有更长的循环寿命,一般超过50万次且充放电效率更高^[9]。但超级电容的自放电特性也会导致存储能量的损失和端电压的下降,不利于低功耗自供电设备的电源管理,所以全面理解超级电容自放电的动态特性,研究能够准确预测超级电容端电压变化的模型非常重要。超级电容自放电过程可分成线性过程及非线性过程,端电压线性下降阶段可以用漏电流机理进行解释,而非线性部分则涉及到法拉第氧化还原机理和电荷再分配机理。在实际

应用中一般只考虑线性部分^[15]。

超级电容的等效电路模型可模拟并预测自放电现象,其原理是用电路来等效超级电容的内部结构,复杂度低且精度高。其中最简单的是标准 R-C 模型^[16],但模拟性能并不理想。文献[17]提出包含3个 R-C 支路的模型,考虑了电荷再分配及自放电现象,需要1种8个步骤的测试计算方法,且对测试精度要求很高。文献[18]提出包含3个 R-C 支路及1个漏电阻的模型来模拟超级电容的自放电过程,对不同规格的超级电容分别作了研究,估算出了不同规格超级电容的模型参数。文献[19—20]针对无线传感器网络中使用的超级电容提出了可变漏电阻(variable leakage resistance, VLR)模型,实验结果证明 VLR 模型在预测超级电容自放电过程方面,精度比传统三支路 R-C 模型高且更实用。

文中设计了基于超级电容器单体且可应用于低功耗自供电设备的储能模块,参考 VLR 模型建立了该储能模块的等效 VLR 电路模型,分析了储能模块自放电现象并进行端电压变化预测,最后通过实验验证了该模型的精确性。

1 储能模块及自放电模型的参数确定

1.1 储能模块及实验设备介绍

对于采用高输出阻抗的环境能量采集器,其电源管理单元一般选用降压型的稳压器,使单元输出如3.3 V, 3.6 V之类的稳定直流电压。亚德诺半导体技术公司提供的电源管理芯片 LTC3588-1 可为上述应用提供较完美的解决方案。LTC3588-1 的最大输入电压为20 V,输出电压有1.8 V, 2.5 V, 3.3 V,

收稿日期:2020-11-12;修回日期:2020-12-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51705251)

3.6 V。考虑到储能模块可能的应用范围,文中采用中国台湾 CDA 公司的 CXHP 系列额定电压 2.7 V,标称容量 0.5 F 的 10 个超级电容器单体串联组成储能模块。其理论额定电压 27 V,标称容量 0.05 F。但考虑到模块的充放电寿命以及超级电容器单体一致性较差的问题,为提高安全系数,增加安全余量,该模块的实际工作电压不应超过 20 V。

实验原理如图 1 所示,储能模块通过直流稳压电源进行充电,台式万用表采集储能模块电压变化并通过 USB 接口与计算机相互通信。借助专门设计的用户界面和相应的测试程序,可以轻松地从计算机上获得和观察实验结果。与专用仪器相比,该设备测试过程简单方便、精度良好。文中储能模块相关参数的确定都基于此实验设备测量获得。

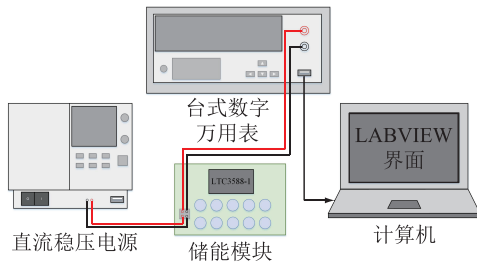


图 1 实验原理

Fig.1 Principle of the experiment

1.2 储能模块自放电模型及相关参数

储能模块由超级电容器单体串联组成,因此仍基于单体的 VLR 模型^[19-20]来假设储能模块的自放电现象。如图 2 所示,包含 R_1 和 C_1 的第一分支为主分支,微分电容 C_1 是恒定电容 C_0 和电压相关电容 $K_V \cdot V$ 的总和,主分支对超级电容的充放电行为产生即时响应,代表了充放电循环过程中短时间内电压的线性变化^[17,21]。包含 R_2 和 C_2 的第二分支代表了自放电过程中长期的电荷再分配现象^[17,21]。包含可变漏电阻 R_3 的第三分支代表了由漏电流主导的自放电过程,其值随着自放电时间而变化^[19-20]。VLR 模型中主分支和第二分支中的 5 个参数 R_1, C_0, K_V, R_2, C_2 可通过测量计算储能模块充电和电荷在分配过程的电压变化特性曲线来获得。

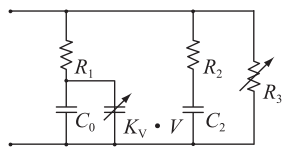


图 2 可变漏电阻模型

Fig.2 The model of variable leakage resistance

图 3 为直流稳压电源以 0.01 A 的恒定电流 I_c 给储能模块充电时,主支路的电压变化图。在充电

过程中,假设所有的电流 I_c 都只经过主分支,刚接通充电电流 I_c 的很短时间内微分电容 C_1 可以认为是断开状态,此时电阻 R_1 的电压为 ΔV ,微分电容 C_1 接通并开始充电的很短时间内主支路电压变化速率会有所下降。

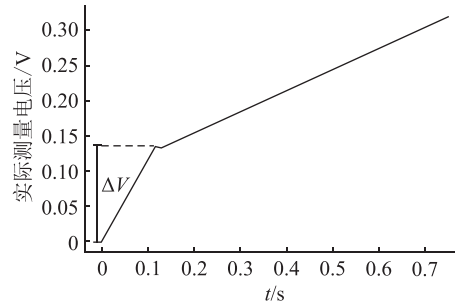


图 3 初始电压变化量 ΔV 示意

Fig.3 Schematic diagram of initial voltage variation ΔV

综上所述, R_1 的值可以通过初始电压变化量 ΔV 与充电电流 I_c 的比值来确定,如式(1)所示。

$$R_1 = \Delta V / I_c \quad (1)$$

图 4 为充电阶段,使用直流稳压电源在 200 s 内以恒定电流 I_c 给储能模块充电至 20 V 后关闭电源,模块内部在接下来的 1 000 s 内进行电荷再分配的电压时间关系曲线。因此,主分支的参数 C_0 及 K_V 可以通过式(2)确定^[20]。

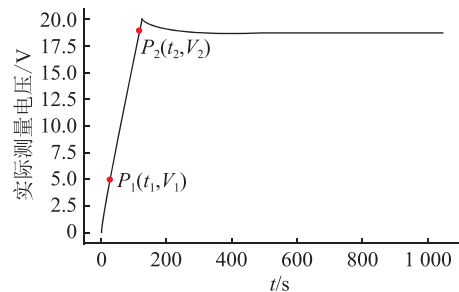


图 4 充电-电荷再分配状态下储能模块电压

Fig.4 Voltage of energy storage module in charging-redistribution state

$$\begin{cases} C_0 = \left(\frac{t_1}{V_1} - \frac{V_1 t_2 - t_1 V_2}{V_2^2 - V_1 V_2} \right) I_c \\ K_V = 2 \left(\frac{V_1 t_2 - t_1 V_2}{V_1 V_2^2 - V_1^2 V_2} \right) I_c \end{cases} \quad (2)$$

需要指出的是, P_1, P_2 的选取应尽可能多地覆盖整个充电阶段。确定主分支的参数后,就能确定第二分支的参数^[21]。在电荷再分配阶段,储存在主分支中的部分电荷将重新分配到第二分支,如果第二分支的时间常数 $\tau_2 = R_2 C_2$ 固定,则可认为 2 个分支的电压在 $3\tau_2$ 时刻相等。根据此时储能模块的端电压 V_{2f} ,时间常数 τ_2 预估为 240 s,则 C_2 可以通过式(3)确定^[21],其中 T_c 为充电阶段的持续时间。

$$Q_{\text{tot}} = I_C T_C = C_2 V_{2f} + \left(C_0 + \frac{K_V}{2} V_{2f} \right) V_{2f} \quad (3)$$

根据多次实验测试结果,表 1 列出了文中所搭建的 0.05 F 储能模块 VLR 模型的主分支和第二分支的模型参数值。通过 5 组测试数据可以发现,储能模块的相关参数测试结果一致性较好,能用于 VLR 模型的相关分析与计算。

表 1 VLR 模型中储能模块的相关参数值

Table 1 Parameters of the energy storage module in VLR model

实验编号	R_1/Ω	C_0/F	$K_V/(\text{F}\cdot\text{V}^{-1})$	R_2/Ω	C_2/F
1	13.255 2	0.047 1	0.001 47	39 221.93	0.006 119
2	13.729 9	0.046 3	0.001 38	40 722.37	0.005 894
3	13.210 8	0.048 4	0.001 60	40 371.06	0.005 945
4	13.775 1	0.045 2	0.001 66	42 465.87	0.005 652
5	13.533 6	0.052 2	0.001 64	38 659.08	0.006 208
平均值	13.500 9	0.047 84	0.001 55	40 288.06	0.005 963

2 储能模块的自放电分析

用于分析自放电过程的等效电路模型见图 5,电源移除后储能模块通过 R_3 进行自放电。 R_3 随自放电时间变化,电压 V_3 可通过实验测量得到。

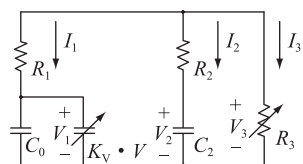


图 5 自放电分析等效电路

Fig.5 The equivalent circuit of self-discharge analysis

使用直流稳压电源将储能模块充电至 20 V,断开电源并在未来 3 h 内测量储能模块开路电压,自放电过程中储能模块端电压即 V_3 的变化见图 6。

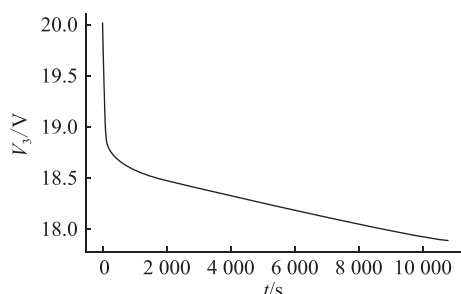


图 6 自放电状态中储能模块电压

Fig.6 Voltage of energy storage module in self-discharge state

3 个分支电流的关系可以通过基尔霍夫电流定律确定,如式(4)所示。

$$I_3 = -I_1 - I_2 \quad (4)$$

通过确定 I_3 以及自放电期间测量得到的储能模块端电压 V_3 , 可得 R_3 为:

$$R_3 = V_3 / I_3 \quad (5)$$

其中,主分支电流 I_1 计算如下:

$$I_1 = \frac{d(C_1 V_1)}{dt} = \frac{d(C_0 + K_V V_1) V_1}{dt} = (C_0 + 2K_V V_1) \frac{dV_1}{dt} \quad (6)$$

微分电容 C_1 上电压 V_1 与 V_3 的关系为:

$$V_1 = V_3 - I_1 R_1 \quad (7)$$

第二分支电流 I_2 及电压 V_2 的关系为:

$$I_2 = \frac{d(C_2 V_2)}{dt} = C_2 \frac{dV_2}{dt} \quad (8)$$

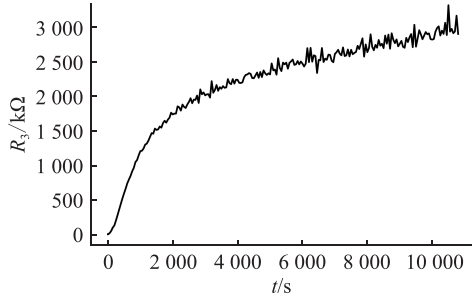
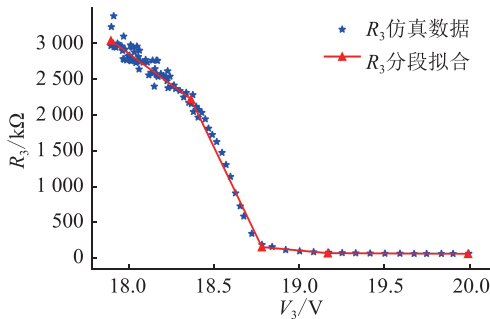
$$V_2 = V_3 - I_2 R_2 \quad (9)$$

联立式(4)一式(9),将建立自放电电流 I_3 与 R_3 之间的微分方程。这类微分方程较难获得解析解,可采用 Matlab/Simulink 数值仿真软件,利用 ODE45 求解器,获得 R_3 与 V_3 之间的关系。求解过程中,应首先获得 V_3 随时间的变化关系。但在自放电过程初始阶段, V_3 较大且下降较为明显,计算得到的 R_3 值无明显波动现象;而当 V_3 较低时,其变化趋于平缓,此时由于测量电路噪声影响, R_3 的波动较为激烈。若测试得到下一时刻的 V_3 值突然大于前一时刻值, R_3 值甚至将变为负值,明显无实际物理意义。针对该问题,可通过设置 V_3 在不同阶段的实际采样频率或改变仿真步长避免。

将储能模块 3 h 内测得的电压变化值 V_3 作为输入,仿真计算得到的 R_3 阻值变化如图 7 所示,在自放电期间, R_3 阻值前 1 h 内从 6 k Ω 迅速增加到 2 166 k Ω ,在自放电进行 3 h 后缓慢增加到 2 979 k Ω 。图 8 为仿真得到的 R_3 随 V_3 变化的关系曲线。 V_3 从 20 V 降至 18.78 V 时,可变漏电阻 R_3 从 6 k Ω 迅速增加到 100 k Ω ; V_3 从 18.78 V 降低到 18.36 V 时, R_3 从 100 k Ω 迅速增加至 2 166 k Ω ; V_3 从 18.36 V 降至 17.89 V 时, R_3 从 2 166 k Ω 缓慢增加到 2 979 k Ω 。

3 储能模块自放电特征的实验验证

为了更直观地描述和分析 R_3 与 V_3 的关系并得到一个便于后续测试误差修正或数学计算的结果,文中对 R_3 进行了分段线性拟合。基于连续分段线性函数拟合思想,采用全局优化算法找到最佳断点位置,再针对不同的断点位置使用最小二乘法拟合得到最终的分段函数,如图 8 和式(10)所示, R_3 分段线性拟合结果与实际仿真数据相吻合。

图7 R_3 与自放电时间的变化关系Fig.7 The relationship between R_3 and self-discharge time图8 R_3 与储能模块电压 V_3 的关系Fig.8 The relationship between R_3 and V_3

$$R_3 = \begin{cases} (-0.172V_3 + 3.377) \times 10^7 & V_3 = (17.89, 18.36) \\ (-0.492V_3 + 9.248) \times 10^7 & V_3 = (18.36, 18.78) \\ (-0.218V_3 + 4.193) \times 10^6 & V_3 = (18.78, 19.17) \\ (-0.114V_3 + 2.329) \times 10^5 & V_3 = (19.17, 20.00) \end{cases} \quad (10)$$

将图5所示的VLR电路模型用于预测储能模块在自放电期间的电压变化,由表1和式(10)可得该0.05 F储能模块的模型参数。图9为该等效模型预测的超级电容电压变化及实验测试结果,可以明显发现,2种结果数据吻合良好。

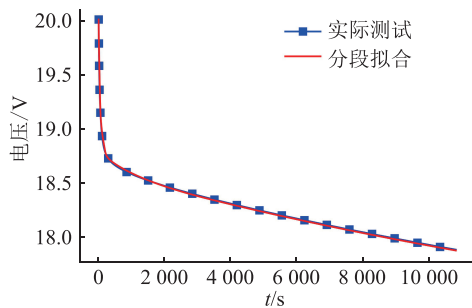


图9 自放电导致的实验电压与其预测电压

Fig.9 Experimental and the calculated voltages caused by self-discharge phenomenon

4 结语

文中首先搭建了一个基于超级电容器单体的储能模块,建立了用于研究模块自放电现象的VLR模型,并对模型相关参数进行了测试。借助实验测试获得的储能模块自放电电压数据,采用数值仿真软件计算得到模块可变漏电阻值,同时对其进行分段线性化拟合。研究结果可以计算预测基于超级电容器搭建的储能模块的自放电电压,为后续供电设备的电源管理单元设计、功耗优化甚至测试奠定了基础。

参考文献:

- [1] 吕继伟. 基于泛在电力物联网的换流站在线监测系统优化综述[J]. 电力工程技术, 2019, 38(6): 9-15.
LYU Jiwei. Optimization survey of online monitoring system for converter station based on ubiquitous power IoT[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(6): 9-15.
- [2] ZHANG H B, LI J P, WEN B, et al. Connecting intelligent things in smart hospitals using NB-IoT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(3): 1550-1560.
- [3] 李海涛, 鞠平, 须雷, 等. 一种高可靠性智能型避雷器在线监测系统的设计[J]. 电力工程技术, 2019, 38(4): 159-164.
LI Haitao, JU Ping, XU Lei, et al. Design of a high reliable intelligent on-line monitoring system for metal oxide arrester[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4): 159-164.
- [4] RAGHUNATHAN V, KANSAL A, HSU J, et al. Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems [C]//IPSN 2005. Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2005. Boise, ID, USA. IEEE, 2005: 457-462.
- [5] TANEJA J, JEONG J, CULLER D. Design, modeling, and capacity planning for micro-solar power sensor networks [C]//2008 International Conference on Information Processing in Sensor Networks (ipsn 2008). St. Louis, MO, USA. IEEE, 2008: 407-418.
- [6] ALIPPI C, GALPERTI C. An adaptive system for optimal solar energy harvesting in wireless sensor network nodes [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2008, 55(6): 1742-1750.
- [7] ZHANG P, SADLER C M, LYON S A, et al. Hardware design experiences in ZebraNet [C]//Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems. Baltimore, MD, USA. New York: ACM Press, 2004: 227-238.
- [8] SIMJEE F, CHOU P H. Everlast: long-life, supercapacitor-operated wireless sensor node [C]//Proceedings of the 2006 International Symposium on Low Power Electronics and Design. Tegernsee, Germany. IEEE, 2006: 197-202.
- [9] ZHU T, ZHONG Z G, GU Y, et al. Leakage-aware energy synchronization for wireless sensor networks [C]//Proceedings of the 7th international conference on Mobile systems, applica-

- tions, and services-Mobisys. Wroclaw, Poland. New York; ACM Press, 2009; 319-332.
- [10] BRUNELLI D, MOSER C, THIELE L, et al. Design of a solar-harvesting circuit for batteryless embedded systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2009, 56(11): 2519-2528.
- [11] JIANG X, POLASTRE J, CULLER D. Perpetual environmentally powered sensor networks[C]//IPSN 2005. Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2005. Boise, ID, USA. IEEE, 2005; 463-468.
- [12] DUTTA P, HUI J, JEONG J, et al. Trio: enabling sustainable and scalable outdoor wireless sensor network deployments [C]//2006 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks. Nashville, TN, USA. IEEE, 2006; 407-415.
- [13] ONGARO F, SAGGINI S, MATTAVELLI P. Li-ion battery-supercapacitor hybrid storage system for a long lifetime, photovoltaic-based wireless sensor network [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(9): 3944-3952.
- [14] UMEMURA T, MIZUTANI Y, OKAMOTO T, et al. Life expectancy and degradation behavior of electric double layer capacitor part I [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No. 03CH37417). Nagoya, Japan. IEEE, 2003; 944-948.
- [15] 杨丽华, 胡惜春, 吴维德, 等. 超级电容器的电性能及其在智能仪表上的应用[J]. 电测与仪表, 2019, 56(23): 139-145.
- YANG Lihua, HU Xichun, WU Weide, et al. The electrical-property of supercapacitor and its application in smart meter [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(23): 139-145.
- [16] SPYKER R L, NELMS R M. Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(3): 829-836.
- [17] ZUBIETA L, BONERT R. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(1): 199-205.
- [18] DIAB Y, VENET P, GUALOUS H, et al. Self-discharge characterization and modeling of electrochemical capacitor used for power electronics applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(2): 510-517.
- [19] ZHANG Y, YANG H Z. Modeling and characterization of supercapacitors for wireless sensor network applications [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(8): 4128-4135.
- [20] YANG H Z, ZHANG Y. Self-discharge analysis and characterization of supercapacitors for environmentally powered wireless sensor network applications [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(20): 8866-8873.
- [21] FARANDA R. A new parameters identification procedure for simplified double layer capacitor two-branch model [J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(4): 363-371.

作者简介:



刘轩

刘轩(1995),男,硕士在读,研究方向为振动控制及振动能量收集(E-mail:lx0612@nuaa.edu.cn);

王越(1996),男,硕士在读,研究方向为基于振动能量收集的自供电无线传感器设计;

吴义鹏(1986),男,博士,副教授,研究方向为自供电电源管理单元的设计及开发。

Self-discharge analysis of energy storage module based on supercapacitor

LIU Xuan, WANG Yue, WU Yipeng

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210006, China)

Abstract: Low-power self-powered equipment has gradually become the mainstream of development with the continuous advancement of Internet of Things technology. Energy storage module based on supercapacitors can be applied to low-power self-powered smart devices, but the self-discharge characteristics of supercapacitors will cause the loss of stored energy and the drop in terminal voltage, which is not conducive to the power consumption of low-power self-powered devices management and measurement. A variable leakage resistance model which is used to analyze the introduced energy storage module is established in this paper. The relevant parameters in the equivalent model are determined through experiments and the self-discharge process of the energy storage module is analyzed by Matlab/Simulink. Finally, the simulation results are fitted with piecewise linearization in order to facilitate subsequent test error correction or mathematical calculations in the future, and the fitted equivalent circuit model is used to predict the voltage of the energy storage module during self-discharge. The voltage variation of the energy storage module predicted by the equivalent model fits well with the experimental data. The work in this paper completes the basic steps for the designation of power management unit and the power consumption measurement in low-power and energy autonomous devices.

Keywords: supercapacitor; energy storage system; analysis of self-discharge; equivalent circuit model; low-power consumption; self-powered

(编辑 方晶)