

# 针对微生物燃料电池能量采集的最优电容理论计算方法与实验研究

张大兴<sup>1,2</sup>, 邱雪娜<sup>1</sup>, 梁 英<sup>3</sup>, 贾建援<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学机电工程学院, 陕西西安 710071; 2. 西安电子科技大学工程学院, 陕西西安 710071;  
3. 四川大学建筑与环境学院, 四川成都 610065)

**摘 要:** 微生物燃料电池(Microbial Fuel Cells, MFCs)已被认可为最具前景的可替代、可再生的清洁能源之一, 但是其输出电压和电流较小, 几乎难以直接驱动目前任何商用电子器件. 在实际应用中, 通常需要能量管理系统(Power Management System, PMS)来存储其输出能量, 然后经变换处理后间歇式的驱动负载. 在 PMS 中, 超级电容器通常被选作为电能存储器件. 由于 MFC 输出能量有限, 如何使最多的能量转存到超级电容器中成为 MFC 应用领域重要的研究内容. 通过分析 MFC 反应机理, 采用目前普遍公认的 MFC 等效电路模型, 提出了一种计算最优电容值的理论方法, 选用该最优电容, 能够使 MFC 在一个充电周期内产生的平均功率最大. 基于建立的单室空气阴极 MFC 实验系统, 进行了最优电容值检验实验. 理论和实验结果验证了该方法的有效性.

**关键词:** 微生物燃料电池; 能量管理系统; 平均功率; 最优电容

**中图分类号:** TK6      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2012) 08-1635-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.08.022

## Theoretical Method and Experimental Study of Determining the Optimal Capacitance for Energy Harvesting from MFCs

ZHANG Da-xing<sup>1,2</sup>, QIU Xue-na<sup>1</sup>, LIANG Ying<sup>3</sup>, JIA Jian-yuan<sup>1</sup>

(1. School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

3. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

**Abstract:** Microbial Fuel Cells (MFCs) are considered to be one of the most promising alternative renewable power sources. But MFC cannot drive almost all the present commercial electron devices because of its low output voltage and current. Power Management System (PMS) is designed to accumulate power from MFCs and then discharge it to drive the load intermittently. Super-capacitor is usually selected as the power storage device in PMS. As MFC provides limited power output, maximizing the power transferred to the super-capacitor is of great importance. A theoretical method of determining the optimal capacitance that can maximize the average power generation in a single charging cycle was presented based on the generally accepted equivalent circuit model of MFC. A single chamber air-cathode MFC experiment system was built and experiments were implemented. Simulation and experimental results show the validity of the proposed method.

**Key words:** microbial fuel cells; power management system; average power; optimal capacitance

### 1 引言

微生物燃料电池(Microbial Fuel Cells, MFCs)是一种使用细菌作为催化剂进行氧化反应进而产生电能的装置, 已被认可为最具前景的可替代、可再生的清洁能源之一<sup>[1~5]</sup>. 面临目前日益严重的能源危机和越来越紧迫的环境可持续发展问题, 尽快实现 MFCs 在日常生活中

的实际应用引起了世界各国众多研究机构广泛的关注<sup>[1~20]</sup>.

虽然 MFCs 具有广阔的发展前景, 近年来对其研究也取得了显著的成果, 但是在实际应用时还面临较多挑战. 其中主要的问题之一是 MFCs 存在较大的内阻, 导致其输出的能量太低, 难以直接用于驱动现有的商用电子器件. 而 MFCs 重要的应用对象, 节点能量有限的无

线传感器网络<sup>[21,22]</sup>,其中的多数传感器及关键电子器件正常工作电压一般为 3.3V,所需电流一般在几十 mA, MFCs 无法直接驱动其正常工作。

在实验室条件下,虽然可以像干电池一样将若干密闭结构的 MFCs 串联组成 MFCs 堆,以提高输出电压,但是这种方法在开放的水系统中(MFCs 主要的应用场合),如江、海、湖以及污水排放池等,是无法实现的.因为在这样的开放水系统中,所有 MFCs 共用相同的电解液,任意两个阴阳电极之间的电压总是等于单个 MFC 的输出电压<sup>[4,7]</sup>.另外,使用 MFC 串联组成 MFCs 堆还会出现电极翻转现象,会造成 MFCs 堆电压不增反降<sup>[20]</sup>.使用 DC-DC 变换器提高输出电压也是一种常用的方法,但是通常 MFCs 的输出电压本身就无法驱动 DC-DC 变换器正常工作.即使将电压升到足够的水平,如果不能提供充足的电流,负载仍然无法正常工作.因此,需要使用一个能量管理系统(Power Management System, PMS)来连接 MFCs 和负载<sup>[6-8]</sup>,以解决 MFCs 的低能量输出问题,以满足 MFCs 的实际工程应用需要.采用充电电池或超级电容器储存电量是目前常用的方法<sup>[6-8]</sup>,由于超级电容器具有更长的寿命,可以在短时间内提供足够大的能量,其充电电压也可以连续的调整以适用 PMS 整流电压的需要<sup>[23,24]</sup>,因此更多的 MFCs 研究人员采用超级电容器作为存储电量的装置.使用超级电容器存储电能,采用间歇式供电已证明是 MFCs 最佳的供电工作方式<sup>[9]</sup>.超级电容器的容值大小是决定 PMS 工作周期长短的重要因素,如何选择合适的超级电容值以使 MFC 在单个工作周期内输出最大的能量是设计 PMS 要关注的主要问题之一. Alim 等<sup>[12]</sup>用实验方法得出了最优电容器容值,但实验方法既繁琐又费时间,缺乏通用性,实用价值较低.还有一些研究优化电容器充电过程的理论方法<sup>[25,26]</sup>,但是这些方法需要额外的电路或者器件来控制充电过程,都不适合 MFC 输出能量受限的使用场合。

本文基于 MFC 反应机理,基于目前普遍公认的等效电路模型,提出了一种计算最优电容值的理论方法,使用该方法确定的最优电容值,能够使 MFC 在一个充电周期内产生的平均功率最大.建立了一个单室空气阴极 MFC 实验系统,基于此系统,用实验方法辨识了等效电路模型的相关参数,并进行了最优电容值验证实验.通过对理论计算结果和实验结果比较,验证了所提出的针对 MFC 能量采集的计算最优电容值理论方法的有效性。

## 2 MFC 等效电路建模和参数辨识

等效电路建模是研究 MFC 反应机理和性能的重要方法之一.燃料电池的内阻通常包含阳极电阻,阴极电

阻和欧姆电阻三部分,阳极和阴极电阻用来表示电极的活化损失和浓度损失,两者都是电流的函数<sup>[18,19]</sup>.另外,当电荷从电极和电解液或基质分离的时候,在电极和周围电解液之间还存在一个电极等效电容<sup>[13]</sup>.所有这些因素都应该体现在 MFC 等效电路模型中.一个被广泛认可的 MFC 等效电路模型如图 1 所示。

图中  $R_{act}$ ,  $R_{con}$ ,  $R_{ohm}$  分别为 MFC 活化损失,浓度损失和欧姆损失的等效电阻,  $C_e$  为电极间等效电容,  $E_{OCV}$  为 MFC 开路电压,  $I$  为流过欧姆电阻的电流。

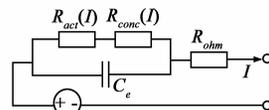


图1 MFC等效电路模型

在实际操作条件下,由于活化损失、浓度损失和欧姆损失的存在, MFC 的输出电压  $V_{cell}$  通常小于其开路电压  $E_{OCV}$ :

$$V_{cell} = E_{OCV} - V_{act} - V_{con} - V_{ohm} \quad (1)$$

其中  $V_{act}$ ,  $V_{con}$ ,  $V_{ohm}$  分别为由于活化损失、浓度损失和欧姆损失导致的活化电压降,浓度电压降和欧姆电压降.基于 Tafel 方程和 Nernst 方程<sup>[27]</sup>,  $V_{act}$  和  $V_{con}$  可分别表示为:

$$V_{act} = T[a + b \ln(I)] \quad (2)$$

$$V_{con} = -\frac{RT}{nF} \ln\left(1 - \frac{I}{I_{limit}}\right) \quad (3)$$

其中  $T$  是绝对温度,  $R$  是通用气体常数,  $n$  是每摩尔反应的电子数,  $F$  是 Faraday 常数,  $I_{limit}$  是 MFC 限制电流,  $a$  和  $b$  是两个需要辨识的参数。

由于活化损失、浓度损失和欧姆损失都是基于 MFC 稳态的分析,没有电流流过电极间等效电容  $C_e$ .因此,欧姆电压降可以表示为:

$$V_{ohm} = IR_{ohm} \quad (4)$$

基于以上分析, MFC 输出电压可以表示为:

$$V_{cell} = E_{OCV} - IR_{ohmic} - aT - bT \ln(I) + c \ln\left(1 - \frac{I}{I_{limit}}\right) \quad (5)$$

其中  $c$  为需要辨识的参数,  $R_{ohmic}$  和  $I_{limit}$  同样需要进行参数辨识得到.  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $R_{ohmic}$  和  $I_{limit}$  可以通过用等效模型拟合 MFC 极化曲线的方法辨识,等效电容  $C_e$  可以用等效模型拟合通过动态阻抗测量的 Nyquist 曲线或者 MFC 在电流下降的瞬变过程中的电压响应曲线获得<sup>[13]</sup>.

## 3 最优电容值理论计算方法

由于商用的 DC-DC 变换器不易改变参数来优化 PMS 的性能,超级电容器的容值成为易于调整以影响 MFC 输出性能的主要因素.本文定义最优电容值为能使 MFC 在一个充电周期内产生的平均功率最大的容值。

基于建立的 MFC 等效电路模型, MFC 给超级电容器充电的等效电路原理如图 2 所示。

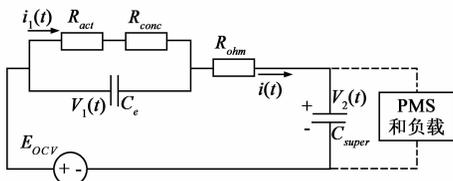


图2 超级电容充电等效电路原理图

其中  $C_{super}$  为超级电容器容值,  $V_1(t)$  为电极间等效电容上的瞬时电压,  $V_2(t)$  为超级电容器上的瞬时电压,  $i(t)$  为流过等效欧姆电阻支路的瞬时电流,  $i_1(t)$  为流过等效活化电阻和等效浓度电阻支路的瞬时电流。

由图 2 可知, MFC 给超级电容器充电, 当电压  $V_2(t)$  达到超级电容器的开始放电电压时, 电容器开始放电以驱动 PMS 和负载, 直到  $V_2(t)$  降到超级电容器开始充电电压。基于基尔霍夫定律和欧姆定律, 可得如下方程组:

$$\begin{cases} C_e \frac{dV_1(t)}{dt} = i(t) - i_1(t) \\ E_{OCV} - V_1(t) - i(t)R_{ohm} = V_2(t) \\ C_{super} \frac{dV_2(t)}{dt} = i(t) \\ i_1(t) = V_1(t)/(R_{act} + R_{con}) \end{cases} \quad (6)$$

假设超级电容器开始放电的电压为  $V_d$ , 开始充电的电压为  $V_c$ , 则 MFC 在一个充电周期内产生的平均功率  $P_{ave}$  可表示为:

$$P_{ave} = C_{super} (V_d^2 - V_c^2)/2T_c \quad (7)$$

式中  $T_c$  为充电时间。则超级电容器容值可表示为:

$$C_{super} = (V_d^2 - V_c^2)/(2P_{ave}T_c) \quad (8)$$

由图 2 和式(2)、(3)可得:

$$R_{act} = T[a + b \ln(i_1(t))]/i_1(t) \quad (9)$$

$$R_{con} = -c \ln(1 - i_1(t)/I_{limit})/i_1(t) \quad (10)$$

基于式(9)、(10), 通过求解方程组(6), 可得到充电时间  $T_c$ 。超级电容器开始充放电的电压  $V_c$  和  $V_d$  由 PMS 的开关电路决定, 一旦开关电路确定, 超级电容器开始充放电的电压也就确定了。这样 MFC 在一个充电周期内产生的平均功率只与超级电容器的容值有关。基于式(8), 可计算出平均功率  $P_{ave}$  最大时对应的超级电容器容值。

## 4 实验和结果分析

### 4.1 MFC 实验装置

建立了一个单室空气阴极 MFC 系统, 如图 3 所示。MFC 反应室容积为 316 毫升, 阳极和阴极材料分别为碳布(CCP30CM, Fuel Cell Earth, Stoneham, MA, USA)和碳纸(TGP-H-090, Fuel Cell Earth, Stoneham, MA, USA), 阴极碳纸上涂有一层铂金催化剂(XC-72, Fuel Cell Store, Boulder, CO, USA)。两个电极间距为 2.5cm, 且由一层 Nafion

膜隔离(N117, DuPont, Wilmington, DE, USA), 电极和 Nafion 膜均为直径 12.7cm 的圆形, 一层不锈钢网安装在阴极外侧以防止碳纸变形而影响 MFC 的性能。

MFC 细菌培养实验中采用厌氧性的生活污水(Greenville Wastewater Treatment Plant, Greenville, SC, USA)作为培养液和基质。培养液由生活污水和营养培养基以 1:1.5 的比例混合而成。营养培养基由以下成分组成(每升去离子水): 310 毫克  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , 130 毫克  $\text{KCl}$ , 2,690 毫克  $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , 4,330 毫克  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ , 1,510 毫克  $\text{NaCl}$ , 0.15 毫克  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , 0.006 毫克  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , 0.009 毫克  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , 0.012 毫克  $\text{Co} \cdot (\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 0.0132 毫克  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 0.0025 毫克  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 0.0014 毫克  $\text{CuCl}_2$ , 0.0025 毫克  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 0.00088 毫升 37%  $\text{HCl}$  和 4 毫升醋酸钠。培养实验过程参考文献[10]。

培养实验完成后, 培养液用去氧的污水上清液(Clemson Wastewater Treatment Plant, Clemson, SC, USA)替代, 为了提高 MFC 的性能, 在上清液中配有 10mM 醋酸钠和 30mM 的  $\text{NaCl}$ 。上清液通

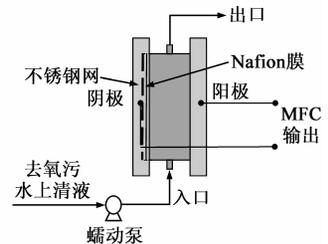


图3 单室空气阴极MFC系统简图

过蠕动泵(Cole-Parmer, Chicago, IL, USA)以 0.4ml/min 的速度连续的注入反应室。待 MFC 输出电压稳定后, 便可以使用该 MFC 反应室进行常规的实验测试。整个准备实验过程中, MFC 电极间始终接一个  $1\text{K}\Omega$  的电阻。

### 4.2 MFC 等效电路模型参数辨识

当 MFC 在连续工作模式下达到稳定状态后, 首先将电极间  $1\text{K}\Omega$  的电阻断开, 进行 MFC 开路电压的测量, 测量结果约为 0.79V。然后采用文献[11]的方法测量 MFC 的极化曲线( $U-I$  曲线), 本实验选用的电阻范围为  $10\text{K}\Omega$  到  $50\Omega$ , 测量时间间隔为 10min。实验中的电压测试结果使用万用表(34410A, Agilent, Santa Clara, CA, USA)进行连续的记录, 其相应的电流用所测得电压除以对应的外接电阻计算得到。

获得 MFC 的极化曲线后, 基于式(5), MFC 等效电路模型的参数可以用曲线拟合的方法进行辨识, 其中绝对温度  $T = 297\text{K}$ 。参数辨识的结果为:  $a = 3.6e^{-4}$ ,  $b = 2.7e^{-5}$ ,  $c = 0.3568$ ,  $R_{ohmic} = 221.52\Omega$ ,  $I_{limit} = 0.002\text{A}$ 。实验测试的极化曲线和拟合的曲线结果如图 4 所示。

电极间等效电容  $C_e$  采用拟合瞬时电压响应曲线的方法辨识<sup>[13]</sup>。采用文献[13]中的方法进行电压响应曲线的拟合得到  $C_e$  辨识的结果为  $0.0042\text{F}$ 。

### 4.3 结果与分析

参数辨识完成后, 基于式(6)~(10), 给定一个超级

电容器容值  $C_{super}$ , 就可以算出对应的平均功率  $P_{ave}$  (本实验系统中,  $V_c = 0.18V$ ,  $V_d = 0.41V$ ). 通过简单的求极值算法就可以得到 MFC 在单个充电周期内产生的平均功率最大时对应的容值, 即本文所定义的最优电容值. 基于本文的拟合结果和计算方法, 得到的最优电容值为 1.5F.

为了检验所述计算方法的有效性, 进行了相应的验证实验. 实验中所选用的超级电容器容值范围在 0.1F 到 6F, 具体容值为 0.1F, 0.47F, 0.67F, 0.87F, 1F, 1.5F, 2F, 3F, 4F, 5F 和 6F. 以 0.1F 电容器为例, 测试过程如下: 将初始电压低于开始充电电压  $V_c$  的 0.1F 的超级电容器直接连到 MFC 输出端, 用 MFC 给超级电容器充电, 记录电容器上的电压随时间的变化数据, 可以得到电容器上电压从开始充电电压  $V_c$  到开始放电电压  $V_d$  的充电时间  $T_c$ , 这样基于式(7)就可以计算得到在单个周期内 MFC 产生的平均功率  $P_{ave}$ . 其他容值的超级电容器测试方法相同, 每个不同容值的电容器重复测试三次. 实验方法同样得到当电容值为 1.5F 时, 得到的平均功率最大.

对于不同容值的电容器, 实验和理论计算的结果如图 5 所示. 由图 5 可见, 实验测试与理论计算的结果吻合良好, 基于本实验系统, 两种方法均得到相同的最优电容值结果.

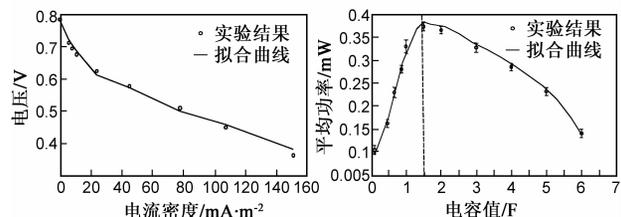


图4 实验和拟合的极化曲线对比图

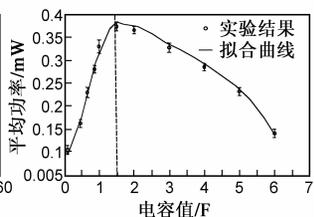


图5 不同容值对应的平均功率的实验和计算结果比较图

本文还进行了理论计算和实验测试时间成本的比较. 用理论计算方法, 测试的电容值范围为 0.1F 到 6F, 电容值递增步长为 0.1F, 整个计算过程小于 1min (HP Z400 Workstation). 用实验测试方法, 对于上述的 11 个不同电容值, 进行一次测试的时间约为 2.5 小时 (不包含每次测量 10min 左右等待 MFC 重新稳定的时间间隔). 以上对比结果表明, 本文所述方法不但能够保证计算结果的准确性, 又可以避免繁琐费时的实验测试过程.

## 5 结束语

为了充分利用 MFC 产生的电能, 使最多的电能转到超级电容器中, 基于目前普遍公认的 MFC 等效电路模型, 提出了一种使 MFC 在单个充电周期内产生的平均功率最大的最优电容值理论计算方法. 该方法不仅能够保证计算结果的准确性, 还能避免繁琐费时的

实验测试过程. 基于所建立的工作在连续模式下的单室空气阴极 MFC 系统, 对算法进行了实验验证, 实验结果与理论计算结果吻合, 验证了所提出算法的有效性. 相对于实验测试方法, 此算法为针对 MFC 的 PMS 中超级电容器的设计提供了一种更加有效简单的方法.

**致谢** 真诚的感谢美国克莱姆森大学 CAMSIL 实验室老师和同学的支持和帮助, 文中的主要实验工作均在该实验室完成.

## 参考文献

- [1] Logan B E. Microbial Fuel Cells[M]. 1st Edition. New York: Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, Inc. 2008.
- [2] Korneel Rabaey, Largus Angenent, et al. Bioelectrochemical Systems: from extracellular electron transfer to biotechnological application[M]. London: IWA Publishing, 2010.
- [3] Fengxiang Li, Yogesh Sharma, Yu Lei, et al. Microbial Fuel Cells: The Effects of Configurations, Electrolyte Solutions, and Electrode Materials on Power Generation[J]. Appl Biochem Biotechnol, 2010, 160(1): 168 - 181.
- [4] Zhuwei Du, Haoran Li, Tingyue Gu. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy[J]. Biotechnology Advances, 2007, 25(5): 464 - 482.
- [5] Allen, R M, Bennetto, H P. Microbial fuel cells - Electricity production from carbohydrates [J]. Appl. Biochem. Biotechnol., 1993, 39-40(1): 27 - 40.
- [6] Conrad Donovan, Alim Dewan, et al. Batteryless, Wireless Sensor Powered by a Sediment Microbial Fuel Cell[J]. Environ. Sci. Technol. 2008, 42(22): 8591 - 8596.
- [7] Andrew Meehan, Hongwei Gao, Zbigniew Lewandowski. Energy Harvesting with Microbial Fuel Cell and Power Management System[J]. IEEE transactions on power electronics, 2011, 26(1): 176 - 181.
- [8] Shantaram A, Beyenal H, et al. Wireless Sensors Powered by Microbial Fuel Cells[J]. Environ. Sci. Technol. 2005, 39(13): 5037 - 5042.
- [9] Alim Dewan, Haluk Beyenal, Zbigniew Lewandowski. Intermittent Energy Harvesting Improves the Performance of Microbial Fuel Cells[J]. Environ. Sci. Technol., 2009, 43(12): 4600 - 4605.
- [10] Hong Liu, Bruce E. Logan. Electricity Generation Using an Air-Cathode Single Chamber Microbial Fuel Cell in the Presence and Absence of a Proton Exchange Membrane[J]. Environ. Sci. Technol., 2004, 38(14): 4040 - 4046.
- [11] Pinto R P, Srinivasan B, et al. A two-population bio-electrochemical model of a microbial fuel cell[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(14): 5256 - 5265.
- [12] Alim Dewana, Conrad Donovan, et al. Evaluating the perfor-

- mance of microbial fuel cells powering electronic devices[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(1): 90 - 96.
- [13] Phuc Thi Ha, Hyunsoo Moon, et al. Determination of charge transfer resistance and capacitance of microbial fuel cell through a transient response analysis of cell voltage [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2010, 25(7): 1629 - 1634.
- [14] Manohar A K, Mansfield F. The internal resistance of a microbial fuel cell and its dependence on cell design and operating conditions [J]. Electrochimica Acta, 2009, 54(6): 1664 - 1670.
- [15] Liu, H, Cheng, S, Logan, B E. Production of electricity from acetate or butyrate using a single-chamber microbial fuel cell [J]. Environ. Sci. Technol. 2005, 39(2): 658 - 662.
- [16] Cheng, S, Liu, H, Logan, B E. Increased power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing [J]. Environ. Sci. Technol. 2006, 40(7): 2426 - 2432.
- [17] S Sato, A Kawamura. A new estimation method of state of charge using terminal voltage and internal resistance for lead acid battery [A]. Proc. IEEE PCC [C]. Japan, 2002. 565 - 570.
- [18] P Zhang, Experimental study of the microbial fuel cell internal resistance [J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(24): 8013 - 8018.
- [19] Yanzheng Fan, Quantification of the Internal Resistance Distribution of Microbial Fuel Cells [J]. Environ. Sci. Technol., 2008, 42(21): 8101 - 8107.
- [20] S E Oh, B E Logan. Voltage reversals during microbial fuel cell stack operation [J]. Journal of Power Sources, 2007, 167(1): 11 - 17.
- [21] 刘亮, 秦小麟, 戴华, 等. 能量高效的无线传感器网络时空查询处理算法 [J]. 电子学报, 2010, 38(1): 54 - 59.  
LIU Liang, QIN Xiao-lin, DAI Hua, et al. An Energy-Efficient Spatio-Temporal Query Processing Algorithm in Wireless Sensor Networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(1): 54 - 59. (in Chinese)
- [22] 林恺, 赵海, 尹震宇, 等. 一种基于能量预测的无线传感器网络分簇算法 [J]. 电子学报, 2008, 36(4): 824 - 828.  
LIN Kai, ZHAO Hai, YIN Zhen-Yu, et al. A Clustering Hierarchy Arithmetic Based on Energy Prediction for Wireless Sensor Networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(4): 824 - 828. (in Chinese)
- [23] Buchmann. Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers [M]. 2nd Edition, Cadex Electronics Inc, Richmond, Canada, 2001.
- [24] M J Guan, W H Liao. Characteristics of energy storage devices in piezoelectric energy harvesting systems [J]. Journal of intelligent material systems and structures, 2008, 19(6): 671 - 680.
- [25] Jincan Chen. Optimaization on the charging process of a capacitor [J]. Int. J. Electronics, 2001, 88(2): 145 - 151.
- [26] Mor Mordechai Peretz, Sam Ben-Yaakov. A heuristic digital control method for optimal capacitor charging [A]. Energy Conversion Congress and Exposition [C]. ECCE 2009, San Jose, 2009. 1118 - 1125.
- [27] Fuel Cell Handbook [M]. Seventh Edition, Morgantown: EG&G Technical Services, Inc. 2004.

#### 作者简介



张大兴 男, 1978 年 11 月出生于山东即墨, 工学博士, 现为西安电子科技大学机电工程学院副教授, 硕士生导师. 主要研究方向为机电一体化、自主机器人技术、无线传感器网络、微弱能量采集与管理等.

E-mail: zhangdx@xidian.edu.cn

邱雪娜 女, 1988 年 5 月出生于福建莆田, 西安电子科技大学机电工程学院硕士研究生, 研究方向是微生物燃料电池数学建模及能量管理方法.