

文章编号 1004-924X(2013)07-1707-06

微生物燃料电池的电能采集系统

莫 冰^{1*}, 黄荣海¹, 赵 峰², 凌朝东¹

- (1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 中国科学院 城市环境研究所, 福建 厦门 361021)

摘要: 设计了用于微生物燃料电池的电能采集电路。考虑微生物燃料电池输出功率小(约 0.5 mW), 不足以直接驱动负载和升压电路, 故采用电荷泵收集电池的电量作为后续直流变换电路的启动电压。以超级电容为储能元件, 最终直流变换成负载需要的电压。电荷泵和升压电路之间设计了一个电子开关, 根据设定的阈值能自动闭合与断开。实验显示: 该电路在 0.3 V, 0.5 mA 输入时就能开始运行, 电子开关在 2.2 V 时闭合, 在 1.6 V 时断开, 可实现储能电容自动循环充放电, 充电速度和输入电压成正比, 和储能电容的大小成反比, 最终电压变换成 3.3 V 或者 5 V。实验结果表明: 该电路适用于微生物燃料电池电能的采集, 能收集污水处理时产生的电能, 能间歇地为户外水质检测系统提供电能, 实现了燃料电池电能的实用化。

关键词: 微生物燃料电池; 电荷泵; 电能采集系统

中图分类号: TM911.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132107.1707

Electric energy harvester for microbial fuel cells

MO Bing^{1*}, HUANG Rong-hai¹, ZHAO Feng², LING Chao-dong¹

- (1. Department of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Institute of Urban and Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China)

* Corresponding author, E-mail: mobing@hqu.edu.cn

Abstract: An electric energy harvesting circuit was designed for microbial fuel cells. Because of the account of the low output of the microbial fuel cell(about 0.5 mW), it was inadequate to drive the load or the boosted circuit. Therefore, this paper employed a charge pump to harvest the electric energy of the microbial fuel cell and stored it in a super-capacitor as the starting voltage. A super capacitor was taken as the energy storage component, then, the voltage was transferred to the needed value. An electronic switch was designed between the charge pump and the boost circuit, which could switch on and off automatically according to the setting threshold. Experimental results indicate that the circuit can operate at the input of 0.3 V, 0.5 mA. The electronic switch is closed at 2.2 V and opened at 1.6 V, and the charge-discharge in circulation is implemented automatically with a charge speed in direct proportion to the input voltage and indirect proportion to the energy storage capacitor. Furthermore, the final voltage is boosted to 3.3 V or 5 V, which can be changed on the basis of loads. In conclu-

收稿日期: 2013-01-18; **修订日期:** 2013-03-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61204122); 厦门科技计划资助项目(No. 3502Z20123034); 泉州市科技计划资助项目(No. 2012Z98)

sion, the circuit satisfies the microbial fuel cell requirement of low power input. It can harvest the electrical energy generated from the sewage disposal, and can supply power for a water measurement system in outdoor with an intermittence.

Key words: microbial fuel cell; charge pump; electric energy harvester

1 引言

能源与环境是人类共同要面对的问题,石油等化石燃料逐渐耗尽不仅使能源短缺也严重污染了环境,因此新能源如太阳能、风能、振动能,温差能等的开发成为目前研究的重要方向。基于 MEMS 技术的甲醇燃料电池近几年发展迅速^[1-4],但其必须以甲醇为燃料,限制了它的通用性。1990 年英国植物学家 Potter 发现细菌的培养液能产生电流,从此出现了直接以生物质能为燃料的电池。微生物燃料电池 (Microbial Fuel Cell, MFC) 以有机物为燃料,微生物为催化剂。MFC 燃料来源广泛,反应条件温和,在常温常压、pH 为中性的条件下即能发生反应。目前的研究主要集中在 MFC 的产电机理以及用微生物降解污水中的有机物方面,对 MFC 产生电能的收集的研究很少。C. Donovan 等人采用在 MFC 两端直接接超级电容的方法收集电量,但 MFC 输出电压低,因此电容存储的电量少^[5]。Yanming Gong 等人采用 MFC 和备用电池相结合,实现了为海水的溶解氧和温度传感器供电,但 MFC 输出功率小,大部分的电能是由备用电池提供的^[6]。赵志伟等人设计的 MFC 电压长期定时采集系统,实现了 MFC 电压的精确测量^[7]。Li Zhuang 等人在实验室采用 40 个燃料电池串联,稳定时期输出开路电压 23.0 V,最大输出功率密度 4.1 V/m³^[8],但是串联的电池在运行一段时间后,某些电池的电压会发生反转,即电压变为负。Aelterman 等人的推论是微生物催化燃料效率有限导致的,Logan 等人的研究认为电压反转是底物缺乏引起的^[9-10]。朱禧等人通过串联正向和反向二极管的方法,研究认为电压反转是因为电池中电子和质子的不平衡导致的^[11]。本文设计的电源管理电路适用于 MFCs 的电能采集,储能电容自动循环的充放电,负载间歇的工作,能应用于污水处理时的

电能采集,可为户外水质检测系统提供电能。

2 微生物燃料电池的工作原理

MFC 工作原理如图 1 所示,由阳极、阴极、质子交换膜组成。在电池的阳极,有机物在微生物的催化下分解出电子和氢离子,电子通过外部的导线转移到阴极,氢离子通过中间的质子交换膜转移到阴极;在阴极,电子、氢离子和电子受体氧气又反应生成水。其中电极的材料、电极的间距、催化剂的种类、燃料的浓度等是影响 MFC 产电效率的因素^[9]。

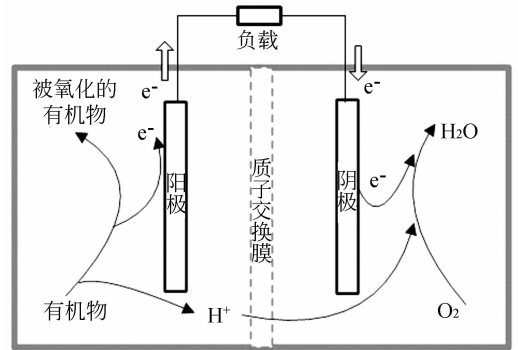


图 1 微生物燃料电池的工作原理

Fig. 1 Working principle of microbial fuel cell

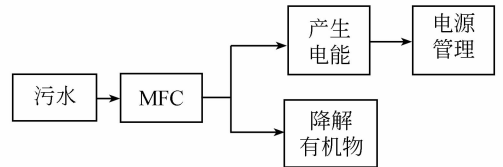


图 2 微生物燃料电池污水处理系统

Fig. 2 Sewage disposal system of microbial fuel cell

微生物燃料电池污水处理系统如图 2 所示,以污水处理厂的废水为 MFC 的燃料,MFC 一方面能降解污水里的有机物,另一方面可产生电能,需要高效的电源管理电路采集 MFC 的电量。收集的电量能补偿污水处理时消耗的能量,甚至还

有剩余的电能。MFC 如果以水底沉积物为燃料,产生的电能为户外水质监测系统供电,可实现系统无人值守,不需要频繁的更换电池。

3 MFC 电能采集系统的工作原理

3.1 MFC 电能采集系统的原理图

微生物燃料电池输出功率小,不足以直接驱动负载工作,因此产生的电能要先经过存储和直流变换后再提供给负载。电荷泵的电能存储原理如图 3 所示。MFC 电能采集使用电荷泵(charge pump),存储的电能作为升压元件的启动电压;储能元件采用超级电容,它的放电能力强,循环使用寿命长。MFC 通过电荷泵给超级电容储能,当电容电压充到一定阈值时,电荷泵输出一个控制信号,使开关 S 闭合,超级电容开始放电,通过直流变换转换成负载需要的电压。当电容电压降到设定阈

值时,开关 S 断开,实现储能电容自动的循环充放电。

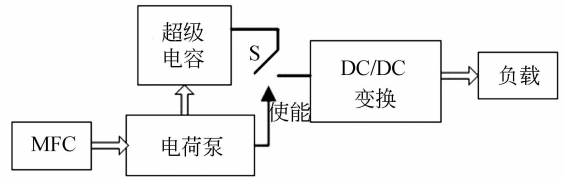


图 3 基于电荷泵的电能采集原理图

Fig. 3 Schematic of energy storage based on charge pump

3.2 MFC 电能采集系统的电路图

MFC 电能采集电路如图 4 所示,实物如图 5 所示。电荷泵采用的是 S-882Z22,储能元件是 5 F 的超级电容,开关使用 P 型和 N 型场效应管,其中还包含直流变换电路。

MFC 产生的电能通过电荷泵给储能电容充电,当电容电压充到 2.2 V 时,电荷泵的 OUT 引

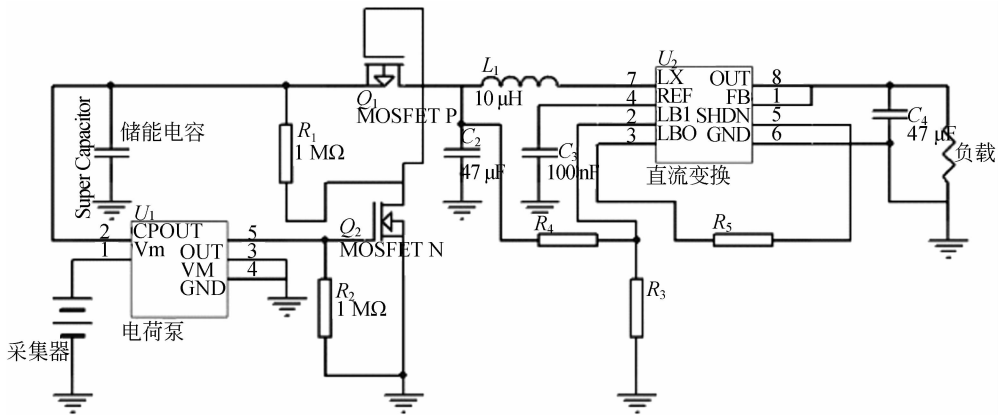


图 4 基于电荷泵的电能存储电路图

Fig. 4 Energy storage circuit based on charge pump

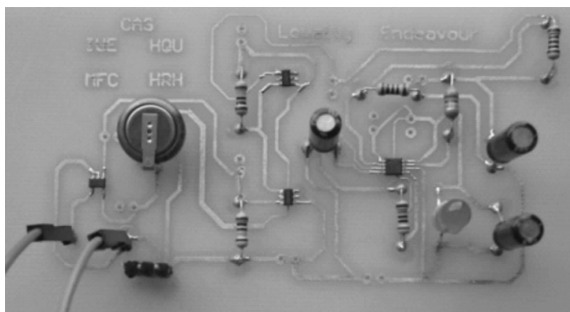


图 5 基于电荷泵的电能存储电路实物图

Fig. 5 Photograph of energy storage circuit based on charge pump

脚输出高电平 2.2 V,使 N 型场效应管导通,N 管的漏极为低电平,即 P 管的栅极为低电平,从而 P 管导通,相当于图 3 中的开关闭合。电容开始放电,经过直流变换,电压转换成 3.3 或 5 V。

S882Z 是一种在超低输入时就能工作的电荷采集电路,它采用完全耗尽 SOI(Silicon on Insulator)技术,分别输入 0.3 V、0.5 mA 时电路就能运行,采集的电能存储于储能电容 C_{cpout} 中。S882Z 电荷泵的原理如图 6 所示,当有 0.3 V 以上的输入时,振荡电路输出时钟,使电荷泵电路工作,电容开始缓慢的充电。芯片内有比较器 COMP1,当

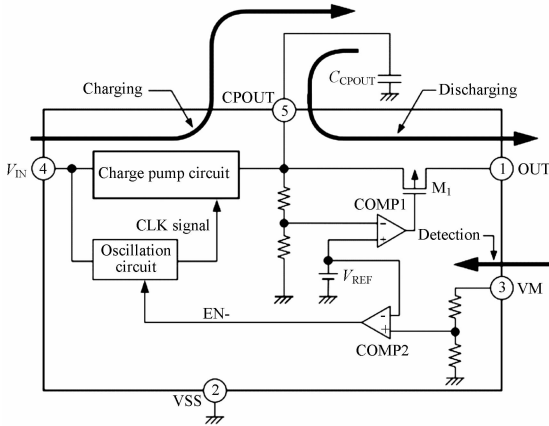


图 6 电荷泵 S882Z 的工作原理图

Fig. 6 Fundamental diagram of the S882Z

储能电容电压为 2.2 V 时,和参考电压 V_{ref} 比较后,输出使能信号使开关管 M_1 导通,OUT 引脚输出高电平。当电容电压降到 1.6 V 时, M_1 截止,OUT 引脚输出低电平,储能电容又开始充电。

4 电路充放电的测试结果

当储能电容为 1 F,输入电压为 0.6 V,电流为 1 mA 时的充电曲线如图 7 所示。电压的测量采用 Tektronix 万用表 DM4040,NI Labview Signal Express 记录数据。由 0.8 V 充到 1.8 V 用了 3.3 h。中间有一段输入电压为 0.3 V,充电曲线的斜率减小,即充电速度下降,可推论出电路的充电速度和输入电压的大小成正比。

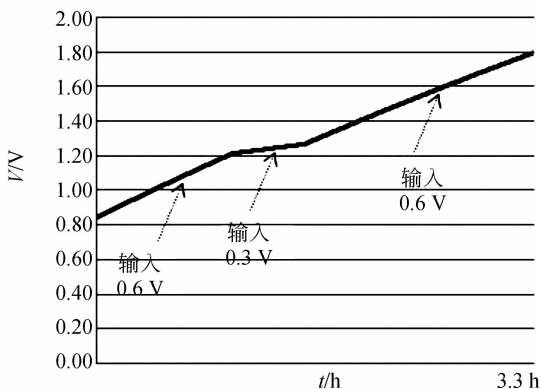


图 7 1 F 电容的充电曲线

Fig. 7 Charging curve of 1 F super-capacitor

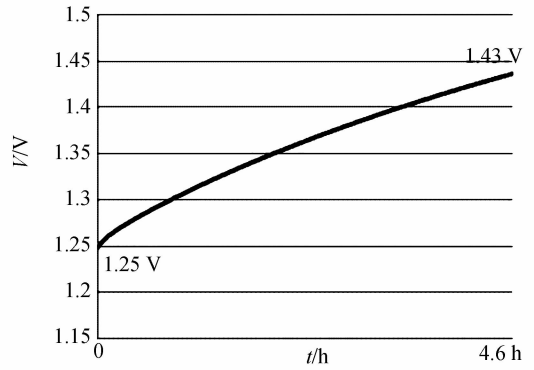


图 8 5 F 电容的充电曲线

Fig. 8 Charging curve of 5 F super-capacitor

当输入为 0.6 V、1.2 mA,储能电容为 5 F 时,电容的电压由 1.25 V 充到 1.43 V 用了 4.6 h,充电曲线如图 8 所示。根据 $Q=CU$ 可知,储能电容越小时,电容充到相同的电压时需要的电量越少,也就是充电时间越短。图 8 和图 7 的比较可以发现 5 F 储能电容充电时间比 1 F 的长。

电路的充放电曲线如图 9 所示,储能电容充到 2.2 V 时开关导通,放电至 1.6 V 时开关断开,电容又开始充电,放电时间约 3.5 min。充放电的转折点 2.2 V 和 1.6 V 的放大曲线如图 10 和 11 所示。

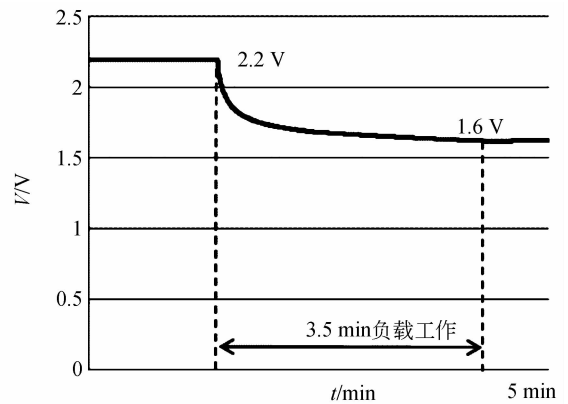


图 9 电路的充放电曲线

Fig. 9 Charging and discharging curves of circuit

负载的工作时间和储能电容的大小有关,电容越大,放电时间越长,但充电时间也会相应的延长。该电路适用于微生物燃料电池小的输出功率,负载每隔一段时间工作一次,能间歇地检测和存储数据。

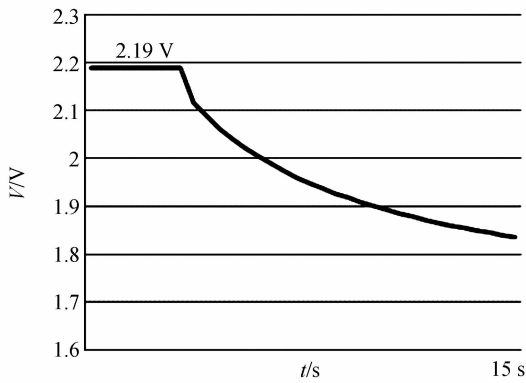


图 10 充电到放电的 2.2 V 转折点放大图
Fig. 10 Enlarged view of 2.2 V turning point

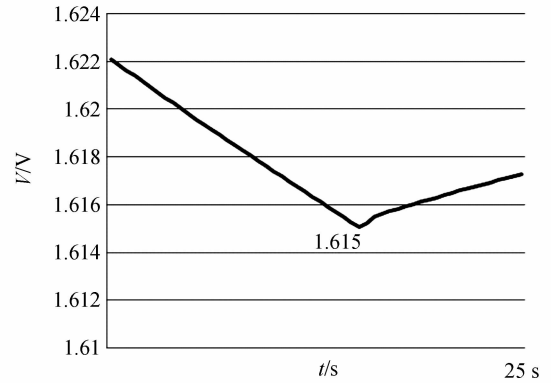


图 11 放电到充电的 1.6 V 转折点放大图
Fig. 11 Enlarged view of 1.6 V turning point

5 结 论

MFC 通过电荷泵给超级电容储能,电子开关在 2.2~1.6 V 之间闭合和断开,实现储能电容自动的循环充放电,充电速度和输入电压成正比,

和储能电容的大小成反比,最终电压直流变换成 3.3 或 5 V,为负载提供电能。本文设计的电能采集电路适用于微生物燃料电池,能收集 MFC 污水处理时产生的电能;能间歇地为户外水质检测系统提供电能,使系统无需外加电源,实现了 MFC 电能的实用化。

参考文献:

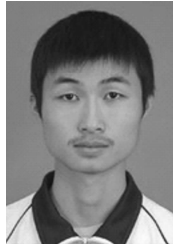
- [1] 汤小川,张宇峰.应用硅和非硅 MEMS 技术的微型直接甲醇燃料电池 [J]. 光学精密工程,2009,17(6):1218-1222.
TANG X CH,ZHANG Y F. Micro direct methanol fuel cells based on silicon and non-silicon MEMS technologies [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6):1218-1222. (in Chinese)
- [2] 张鹏,张宇峰.微型直接甲醇燃料电池阴极集流板多孔结构设计 [J]. 光学精密工程,2011,19(4):820-827.
ZHANG P,ZHANG Y F. Design of perforated structures of cathode current collectors in micro-direct methanol fuel cells [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(4):820-827. (in Chinese)
- [3] 贺学锋,杜志刚.悬臂梁式压电振动能量采集器的建模及实验验证 [J]. 光学精密工程,2011,19(8):1771-1778.
HE X F, DU ZH G. Modeling and experimental verification for cantilevered piezoelectric vibration energy harvester [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8):1771-1778. (in Chinese)
- [4] 孙韶春,石庚辰.旋转式微发电机的设计与制造 [J]. 光学精密工程,2011,19(6):1306-1312.
SUN SH CH, SHI G CH. Design and fabrication of micro rotational generators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(6):1306-1312. (in Chinese)
- [5] DONOVAN C, DEWAN A, HEO D, *et al.* Battery-less wireless sensor powered by a sediment microbial fuel cell [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2008, 42: 8591-8596.
- [6] GONG Y M, SAGE E R. Benthic microbial fuel cell as direct power source for an acoustic modem and seawater oxygen temperature sensor system [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(11):5047-5053.
- [7] 赵志伟,刘凯,江和龙,等.微生物燃料电池电压的长期定时采集系统,中国,201110142403.6 [P]. 2011.
ZHAO ZH W, LIU K, JIANG H L, *et al.*. The voltage acquisition system of microbial fuel cell, China, 201110142403.6 [P]. 2011.
- [8] ZHUANG L, YUAN Y. Long-term evaluation of a 10-liter serpentine-type microbial fuel cell stack treating brewery wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 123:406-412.

- [9] BRUCE E L. Scaling up microbial fuel cells and other bioelectrochemical systems [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2010, 85:1665-1671.
- [10] YONGTAE A, BRUCE E L. A multi-electrode continuous flow microbial fuel cell with separator electrode assembly design [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2012, 93:2241-2248.
- [11] 陈禧, 朱能武, 李小虎. 串联微生物燃料电池的电压反转行为 [J]. *环境科学与技术*. 2011, 34(8): 139-142.
CHEN X, ZHU N W, LI X H. Voltage reversal behavior during stacking microbial fuel cells in series [J]. 2011, 34(8): 139-142. (in Chinese)

作者简介:



莫冰(1981—), 男, 福建福清人, 副教授, 硕士生导师, 2003、2008 年于哈尔滨工业大学分别获得学士、博士学位, 2010 年于韩国高丽大学博士后出站, 主要从事 MEMS 传感器系统、专用集成电路设计方面的研究。E-mail: mo-bing@hqu.edu.cn



黄荣海(1987—), 男, 福建永定人, 硕士研究生, 2011 年于西南大学获得学士学位, 主要从事电路与系统方面的研究。E-mail: huangronghai@hqu.edu.cn



赵峰(1976—), 男, 山东烟台人, 研究员, 博士生导师, 1998 年于烟台大学获得学士学位, 2004 年于中科院长春应用化学研究所获得博士学位, 主要从事生物能源和环境技术方面的研究。E-mail: fzha@iue.ac.cn



凌朝东(1964—), 男, 福建泉州人, 教授, 硕士生导师, 1984 年于华侨大学获得学士学位, 1996 年于香港中文大学获得硕士学位, 主要从事集成电路设计、生物医学电子学方面的研究。E-mail: edac@hqu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)