

文章编号:1671-6833(2018)01-0090-07

微生物燃料电池处理废水产电及其驱动监控系统的研究

田 野, 杨嘉敏, 成少安, 陆俊弘, 李艳宾, 杜玉坤

(浙江大学 清洁能源利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 城市排水管网存在管道泄露、爆裂等问题, 需实时监控其液位、气体浓度等参数. 针对目前下水道监测装置和驱动装置的电池更换不便等问题, 提出利用微生物燃料电池(MFC)处理下水道污水获得电能, 为监测、照明等设备供电, 同时降解清洁污水中的部分有机污染物. 为保证空气阴极稳定的气固液三相反应界面和避免高速水流对 MFC 性能的损害, 研制水滴状浮标式 MFC 反应器结构. 结果表明, MFC 处理实际污水获得的能量经能量采集电路收集和低功耗能量管理能驱动监测设备.

关键词: 微生物燃料电池; 污水产能与清洁; 能量采集; 低功耗管理; 无线监控; 流速限制

中图分类号: X703.1 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.01.024

0 引言

当前城市排水系统面临着有害气体超标、内涝频繁等问题, 危害管道工作人员的安全, 造成巨大经济损失. 故建立实时监控报警系统具有重要意义^[1].

现有的监控报警系统需要建立无线检测节点, 但这些节点电池更换成本高, 废弃电池造成环境污染大. 微生物燃料电池 (microbial fuel cell, MFC) 利用微生物的呼吸作用降解污水中的有机物, 将化学能转换为可利用的电能^[2-5], 是一种清洁可再生能源. 利用 MFC 取代蓄电池, 实现监控设备的自供能是解决上述问题的最佳方法之一.

本研究基于下水道环境特点, 研制水滴状浮标式单室空气阴极 MFC 反应器, 建立用于 MFC 产电的能量采集和控制电路, 研究了 MFC 处理下水道污水产生电能并驱动排水管网信息无线监控系统的可行性, 对城市“智能管网”建设具有实际意义^[6-7].

1 实验与方法

1.1 总体设计

本研究系统由 MFC、能量采集、能量管理和微处理器控制 4 个模块组成. 系统结构图见图 1.

MFC 用于给整个系统供电, 同时降解排水管网污水中的有机污染物. MFC 反应器设计成水滴状

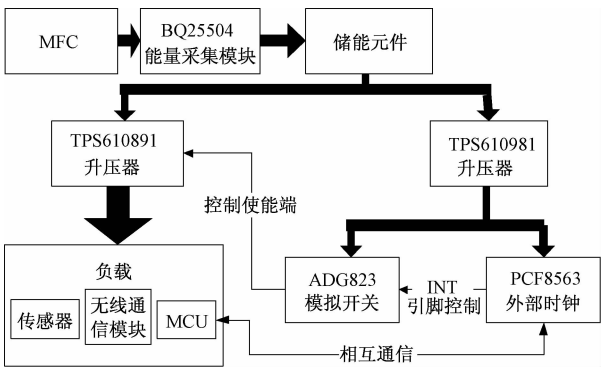


图 1 总体结构图

Fig. 1 The diagram of general structure

浮标式结构, 保证空气阴极在水位变化时始终位于气固液三相反应界面, 同时避免污水流速过大影响 MFC 的工作性能. 能量采集与存储模块通过能量采集芯片 BQ25504 采集 MFC 处理污水产生的能量, 并将其储存在储能元件中.

能量管理模块通过外部时钟 PCF8563 控制模拟开关 ADG823 的通断, 进而控制升压稳压芯片 TPS610891 的使能端, 使得系统在工作状态和休眠状态间进行转换, 工作状态下负载部分工作, 进行监测. 休眠状态仅 PCF8563 和 ADG823 工作, 实现平均低功耗管理. 升压稳压芯片 TPS610891 为 PCF8563 和 ADG823 提供稳定的电压.

1.2 MFC 模块

1.2.1 MFC 装置构造

水滴状漂浮式单室空气阴极 MFC 结构如图

2 所示。反应器重心在下半部,始终正向放置并浮于水面。顶部设弹簧挂钩与管道内壁相对固定,连接阴阳极的导线与挂钩组合成束并引出,以连接外部电路。挂钩可维持反应器处于漂浮状态,同时弹簧的使用避免绳状挂钩潜在的缠绕打结问题。上半部设有 4 个直径为 22 mm 和 15 mm 的透气小孔以供空气流通,鳃型孔型可防止污水溅入。底部设有直径分别为 45、40、34 mm 的透水孔,供污水流通。阴极紧贴在带孔隔板上,边缘密封良好。在外壳紧贴隔板下端处布置若干个透气孔,使阳极室在水面安装布置时可将空气排清。

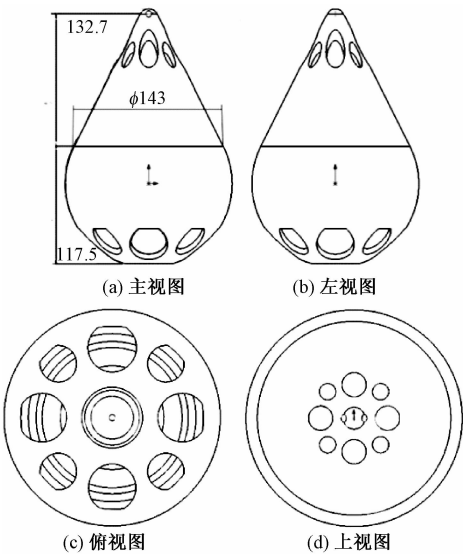


图 2 MFC 反应器结构参数图

Fig.2 Structural parameters of MFC reactor

空气阴极由活性炭催化剂、泡沫镍集电体、PTEE 粘结剂和 PTFE 扩散层组成,表面积为 160.61 cm²,直径 14.3 cm,安装于反应器上半部分的锥体的底部,具有产电性能好、成本低廉等优点,适用于大规模污水处理系统。阳极由多根长度为 7.7 cm,直径为 2 cm 的碳纤维刷组成,微生物附着在阳极上。碳纤维刷呈星形放射状分布,其安装位置在反应器的处于污水中的下半部分球体中,阳极轴线所在平面距离阴极表面的距离为 1.5 cm。碳纤维具有低成本、耐腐蚀、生物亲和性良好等优点,其高比表面积可减少电池性能受阴极氧气扩散的影响^[8]。为提高该装置的实用性,反应器中不使用质子交换膜。

目前我国地下排水管道直径一般为 0.5 ~ 7 m,下水道适宜流速为 0.61 ~ 1.07 m/s^[9],但在天气突变等因素的影响下,流速远高于该范围。阳极室的透水孔具有显著的减速特性,减少高速水流对反应器工作性能的影响。本研究通过 ANSYS

Fluent 对透水孔的减速特性进行模拟。反应器外壳最大直径为 355.4 mm,管道直径为 560 mm,管道截面流速均匀,为 3 m/s,污水的动力黏度取为 0.005 kg/(m·s),水面光滑。模拟所得的流速分布图如图 3 所示。

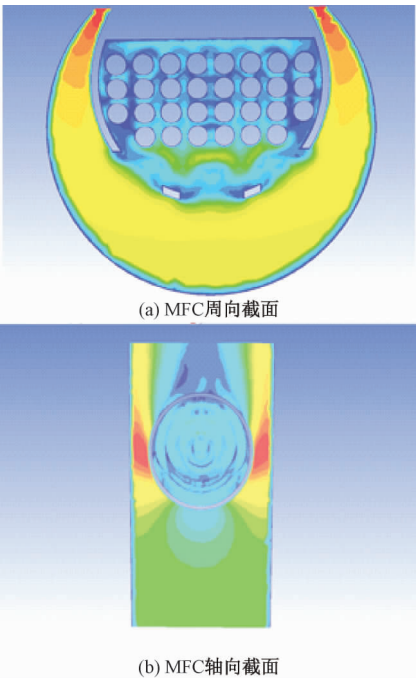


图 3 管道流速仿真

Fig.3 Simulation of the flow velocity profiles in the drain

由模拟结果可得,该结构可将水速降低至入口流速的 53%。若需进一步提高减速效果,可适当减小孔径或调整开孔位置。

1.2.2 MFC 接种与运行

接种源为已运行(含 1 g/L 乙酸钠的 50 mMPBS 缓冲液)1 a 的 MFC 出水。采用比例为 1:1 的接种源液和含有 1 g/L 乙酸钠、12.5 mL/L 矿物质和 5 mL/L 维生素的 50 mMPBS 缓冲液的混合液对 MFC 进行接种和培养。MFC 运行的人工污水的组成: Na₂HPO₄ · 12H₂O, 11.466 g/L; NaH₂PO₄ · 2H₂O, 2.75 g/L; NH₄Cl, 0.31 g/L; KCl, 0.13 g/L; 乙酸钠, 1 g/L; 矿物质, 12.5 mL/L; 维生素, 5 mL/L。MFC 采用的菌种为混合菌。

MFC 在接种和运行过程中外接电阻 200 Ω。采用改变外接电阻法测试 MFC 功率和极化曲线,电阻变化范围为 20 ~ 140 Ω。MFC 采用序批次方式在 30 ℃ 恒温室中运行。

1.2.3 MFC 分析和计算方法

采用电压测量仪实时记录 MFC 输出电压数据并存储;采用 DR2800 便携式分光光度计测定

需要连续进行,因此可将一个运行周期分为休眠和工作两个状态,工作状态下无线监控系统工作,休眠状态下系统维持着较低功耗,从 MFC 中获取能量以补充工作状态的电能消耗,实现系统整体的持续运行。

该方法的关键在于休眠状态的系统功耗低于

从 MFC 采集能量的功率. 依此本研究设计了能量管理模块对系统进行低功耗管理^[10,13]。

能量管理模块由 DC/DC 升压器 TPS610891、DC/DC 升压芯片 TPS610981、外部时钟 PCF8563、CMOS 模拟开关 ADG823 构成^[13]。

能量管理模块电路原理图如图 5 所示。

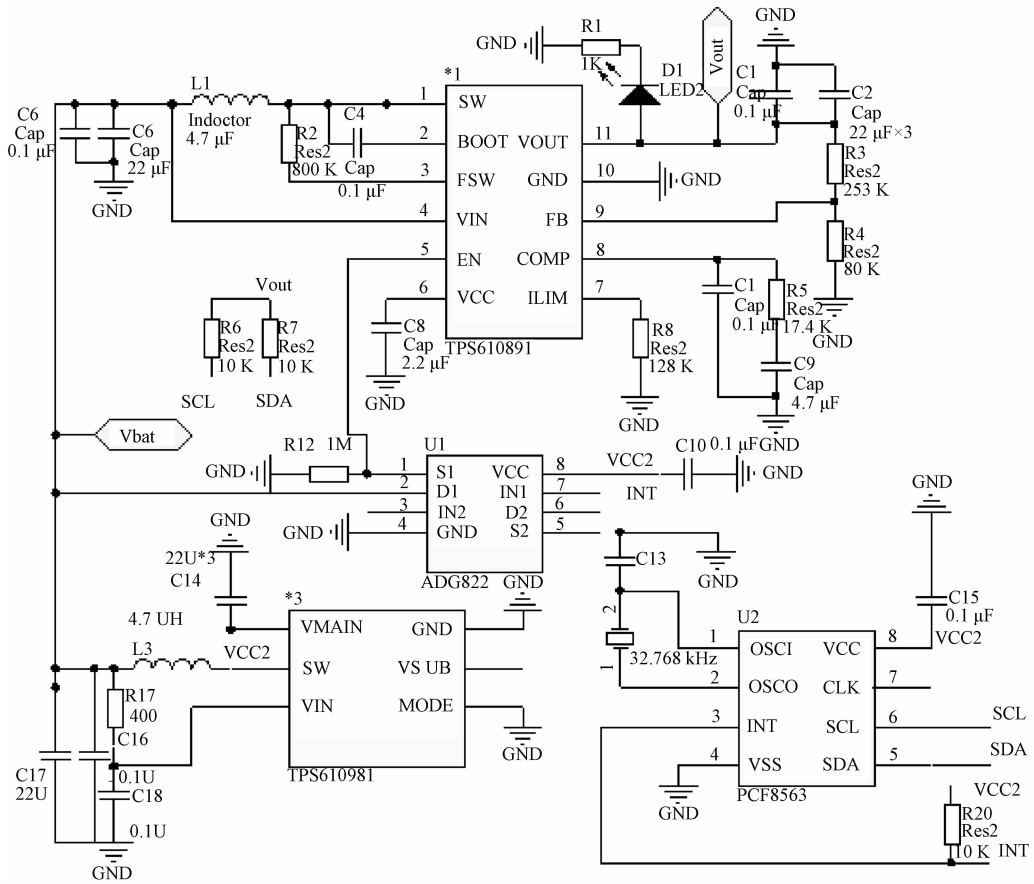


图 5 能量管理模块电路原理图

Fig. 5 Schematic diagram of energy management module

DC/DC 升压器 TPS610981 用于向 PCF8563、ADG823 提供稳定的 3.3 V 工作电压. DC/DC 升压器 TPS610891 用于向 MCU、传感器和无线发送模块等提供稳定的 5 V 电压^[14]. TPS610891 的最大输入电流为 1.5 A,可以满足负载对于功率和电流的要求. 其具有用电平控制的使能端 EN, EN 为低电平则使能端被禁止,切断负载与输入电源的联系. EN 为高电平则使能端被使能。

外部时钟 PCF8 563 具有计时和中断功能,其中断引脚 INT 与模拟开关 ADG823 的 S2、D2 相连. PCF8563 的中断时间可由软件设置,由 SDA、SCL 引脚实现与 MCU 的通信. 中断到来时,INT 引脚会由非中断状态的高电平变为低电平,改变 ADG823 的开关状态,进而控制 TPS610891 的使

能端由禁止状态转换到使能状态,实现系统在休眠状态到工作状态的转换。

注意,为防止由输入电源提供的电流因 MCU 的 IO 口电压为低电平而从 MCU 的 IO 口倒流入 MCU,增大系统空载休眠状态的损耗,本研究将 SDA、SCL 引脚所接的电阻接到 TPS610891 的电压输出端上. 这样,只有系统在工作状态时,该电压输出端才会有高电平的电压. 所以,在 SDA、SCL 引脚上所接的电阻引起的损耗只出现在系统的工作时间内,并不会增加系统休眠状态下的损耗. 一个完整的工作周期描述如图 6 所示。

1.5 无线监控模块

无线监控模块包括 MCU、传感器和无线通信设备等。

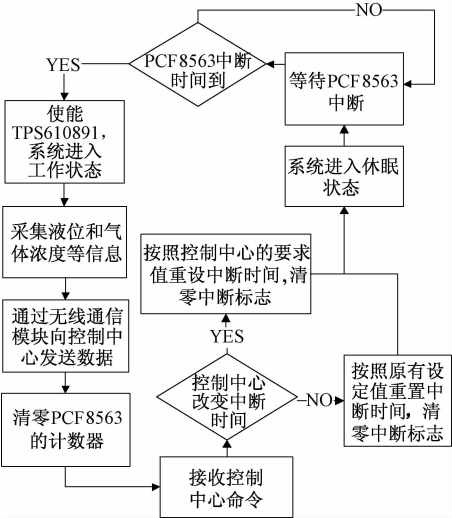


图 6 定时工作的运行逻辑框图

Fig. 6 Logic diagram of regular running

2 结果与分析

2.1 MFC 产电性能

MFC 启动后, 外接电阻 $200\ \Omega$, 其端电压随时间的变化如图 7 所示. 电池电压可稳定在约 $500\ \text{mV}$. 电压的突降是电解液中有机质被产电菌耗尽的结果, 更换溶液后, 电压可在短时间内恢复正常工作水平.

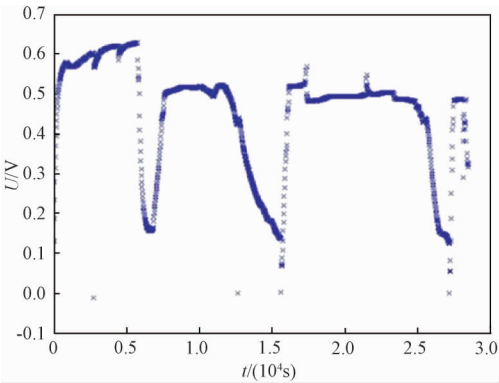


图 7 MFC 外电压随时间变化曲线

Fig. 7 Voltage curve of MFC

MFC 稳定后, 测量电池的极化曲线和功率曲线测量结果如图 8 所示. 数据处理后得到电池开路电压为 $544.4\ \text{mV}$, 内阻为 $30\ \Omega$, 电池产电最大功率为 $4.94\ \text{mW}$, 面积功率密度为 $241.58\ \text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$.

2.2 MFC 污水处理能力

对于单个运行周期, MFC 处理前和处理后反应液的 COD 值分别为 $949\ \text{mg/L}$ 和 $100\ \text{mg/L}$, COD 去除率为 89.5% . 表明 MFC 反应器具有较高的污水处理能力.

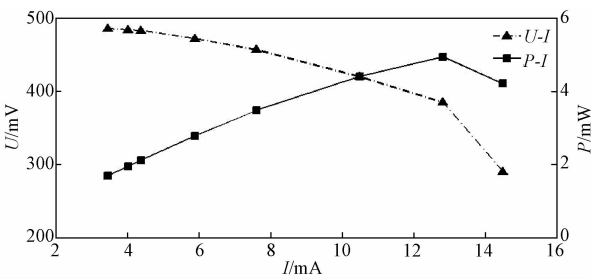


图 8 电池极化及功率曲线

Fig. 8 Polarization and power curve of MFC

2.3 微能量采集功率

MFC 产生的能量经 BQ25504 采集后储存在储能元件中, 为系统供电. 储能元件的实际储存能量的功率即为 MFC 的输出功率乘以 BQ25504 的效率. 本研究以储能元件中实际储存能量的功率作为能量采集功率, 并进行监测. 利用电压定时采集设备测量超级电容两端的电压, 计算出储能元件储存的电能 W , 所获得的采集功率-时间 ($P-t$) 和超级电容电压-时间 ($U-t$) 曲线如图 9 所示.

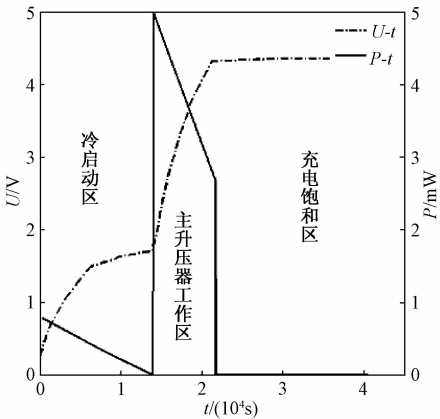


图 9 MFC 的 $U-t$ 、 $P-t$ 曲线

Fig. 9 Voltage and power curves of the super capacitor of BQ25504 attached to MFC

由于充电方式不同, 整个充电过程可分为 3 个区域. BQ25504 在 V_{store} 引脚电压低于 $1.8\ \text{V}$ 时处于冷启动区, 采集功率低于 $1\ \text{mW}$. V_{store} 引脚电压高于 $1.8\ \text{V}$ 后, 主 BOOST 升压器工作, 能量采集功率迅速上升, 最大可达 $5\ \text{mW}$, 当超级电容电压达到设定的电压上限后, 充电停止, 充电功率接近 0.

2.4 系统功耗分析

2.4.1 系统休眠状态损耗

休眠状态的低损耗是系统持续稳定运行的关键. 对系统进行休眠状态下的功耗分析. BQ25504 与 MFC 断开, 当系统处于休眠状态时, 记录电容储能随时间的变化曲线 $W-t$ 和空载功率随时间的

变化曲线 $P-t$ 如图 10 所示。

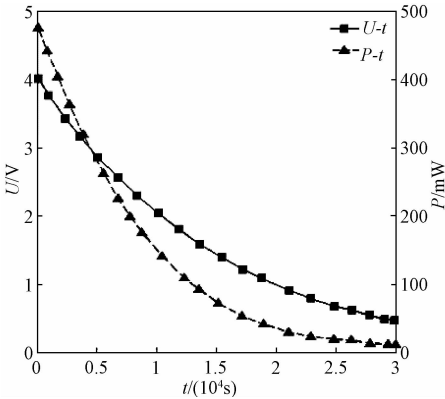


图 10 系统休眠状态功耗特性

Fig. 10 Power consumption characteristics of the system in sleep mode

结果表明：

$$P_{loss} \leq 500 \mu W < P_{in-min} \leq 1.757 \text{ mW}, \quad (3)$$

式中： P_{in-min} 为系统在主升压器运行状态下给超级电容充电的最小功率，mW。

式(3)说明：系统在休眠状态下的功耗不大于 $500 \mu W$ ，低于 $P_{in-min} = 2 \text{ mW}$ 。因此，在休眠状态下系统储能元件净吸收功率大于 0 W 。

2.4.2 系统全负荷运行状态功耗

为确定系统所需的休眠时间，采用上述同样的分析方法，对全负荷运行状态（所有传感器工作，无线模块采用最大功率发送的状态）下系统的功耗进行分析。结果表明：当系统处于全负荷工作状态时，系统功耗达到 0.749 W ，储能元件中的能量迅速耗尽。

2.5 系统运行周期的确定

系统工作时间需要考虑系统从启动到稳定运行所需的时间和监控需要。假设每个运行周期内系统工作 3 s ，依此计算运行周期。一个周期内工作状态下消耗的能量计算如下：

$$W_{work} = P_{work} t_{work} \leq 2.25 \text{ J}, \quad (4)$$

式中： W_{work} 为系统工作时间内消耗的总能量，J； P_{work} 为系统工作状态的功率，W； t_{work} 为系统在一个周期中工作状态持续的时间，s。

要保证系统在休眠时间内采集足够的能量 W_{get} 补充工作状态消耗的能量 W_{work} ，系统休眠状态下储存的能量计算如下：

$$W_{get} = (P_{in} - P_{loss}) t_{sleep} \geq W_{work}, \quad (5)$$

式中： t_{sleep} 为在一个周期中的休眠时间，s。

因此，休眠时间为：

$$t_{sleep} \geq 762 \text{ s}. \quad (6)$$

以上计算表明在保证休眠时间大于 762 s 时，系统可持续稳定运行，对污水管道进行间断性监控测量。

2.6 系统正常运行测试

静态环境下（MFC 电压达到稳定后）进行系统实际运行测试，设定休眠时间为 $1\,000 \text{ s}$ ，工作时间为 2.6 s 。

图 11 为 3 个周期的储能元件 $W-t$ 曲线。每一个周期中， $W-t$ 曲线可以分为 3 个工作区。在负载接通及能量补充区间中，系统首先进入工作状态，持续 2.6 s ，储能元件的储能从约 29.5 J 降至 26.5 J ，随后进入休眠状态，储能增加，在 500 s 内完成了能量的补充，再进入电量充满区。在电量充满区内，系统仍处于休眠状态，但此时超级电容的电压接近上限，其储能保持在最大值，直到下一个工作状态到来。

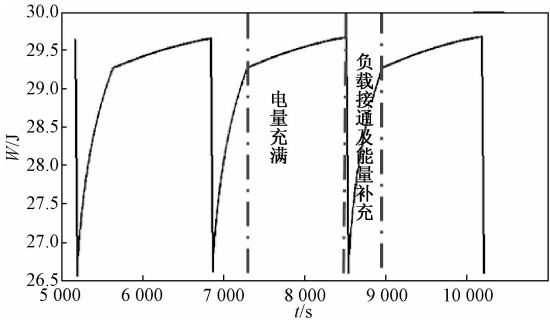


图 11 实际正常运行测试储能元件 $W-t$ 曲线

Fig. 11 $W-t$ curve of energy storage element in normal working state

实验结果表明，系统能在休眠状态补充工作状态消耗的能量，实现持续稳定运行。

3 结论

本研究设计了一种利用 MFC 发电的排水管道监控系统。一般的城市排水管道中污水的 COD 浓度在 $100 \sim 1\,000 \text{ mg/L}$ 范围内，此范围内，COD 的波动对 MFC 产电的影响不大，MFC 在 $4 \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围内皆可正常工作。其次，氨氮和总氮对 MFC 的影响较小，MFC 在污水环境中运行有助于脱氮和脱氨。所以排水管道中的污水环境能满足 MFC 正常工作的原料和环境需求。通过将污水中的化学能转化为电能，结合低功耗能量管理方案实现了对排水管网的监测。该系统无需更换电池或是从电网引接电线，降低了维护成本和废旧电池带来的污染，为“智能水网”的实现提供了能量来源方面的支持。

参考文献：

[1] 何嘉莉. 城市内涝在线监控与信息服务数字化系统设计及监测点优化布置研究[D]. 广州: 华南理工大学环境与能源学院, 2014.

[2] DU Z, LI H, GU T. 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.

[3] LEE Y, OA S W. High speed municipal sewage treatment in microbial fuel cell integrated with anaerobic membrane filtration system [J]. Water science and technology, 2014, 69(12): 2548 – 2553.

[4] JIANG J, ZHAO Q, ZHANG J, et al. Electricity generation from bio-treatment of sewage sludge with microbial fuel cell[J]. Bioresource technology, 2009, 100(23): 5808 – 5812.

[5] RODRIGO M A, CANIZARES P, LOBATO J, et al. Production of electricity from the treatment of urban waste water using a microbial fuel cell[J]. Journal of power sources, 2007, 169(1): 198 – 204.

[6] 陈东升. 基于 GPRS 的下水道气体远程监测系统设

计[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(12): 3932 – 3934.

[7] 包亮, 王里奥, 陈萌, 等. 基于 GPRS 的市政下水道气体安全监测预警系统[J]. 中国给水排水, 2009, 25(15): 39 – 42.

[8] 潘彬, 孙丹, 刘伟凤, 等. 碳纤维阳极构造对微生物燃料电池性能的影响[J]. 化工学报, 2014, 65(8): 3250 – 3254.

[9] 黄建洪. 城市生活排水系统废气产排污系数核算研究[D]. 昆明: 昆明理工大学环境工程学院, 2013.

[10] 刘杰, 李开宇, 丁豪杰, 等. 基于太阳能供电的森林环境无线监测系统[J]. 自动化技术与应用, 2016, 35(2): 57 – 62.

[11] 钟政. 微电能量收集技术及发展概况[J]. 内江科技, 2014(5): 123 – 123.

[12] 朱俊杰, 李美成. 无线传感器微能源自供电技术研究[J]. 可再生能源, 2012, 30(11): 55 – 60.

[13] 杨维剑, 王梅英. 无线网络传感器中超低功耗节点能源技术研究[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2010, 23(1): 44 – 47.

[14] 莫冰, 黄荣海, 赵峰, 等. 微生物燃料电池的电能采集系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(7): 1707 – 1712.

Using Microbial Fuel Cell to Dispose Waste Water to Generate Electric Power and Drive the Monitoring System

TIAN Ye, YANG Jiamin, CHENG Shaoan, LU Junhong, LI Yanbin, DU Yukun

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Accidents like leakage or pipeline bursting frequently happened in urban drainage network. Real time monitoring of gas concentration and other relevant parameters is in urgent need. Aiming to overcome the lack of monitor devices, the inconvenience of changing batteries and the high expense of waste water treatment, microbial fuel cell(MFC) was applied to dispose sewage water and provide electric power for monitor and lighting equipment simultaneously. The original drop-like and buoy-type structure of MFC reactor ensured that the cathode remains in gas-liquid interface, while avoiding potential destruction from high-speed flow. Energy harvesting module collected the tiny amounts of energy and monitored parameters periodically through low-power-consumption energy managing module.

Key words: microbial fuel cell; electricity generation by sewage; energy harvesting; low power consumption management; wireless monitoring; flow velocity limitation