

小型化土壤微生物燃料电池电信号放大电路的设计与运行^①

邓 欢¹, 王 日², 许 静¹, 沙亚东¹, 李稻云¹, 钟文辉^{3,4*}

(1 南京师范大学环境学院, 南京 210023; 2 南京师范大学强化学院, 南京 210023;

3 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 4 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023)

摘 要: 为了提高对小型化的土壤微生物燃料电池(microbial fuel cells, MFCs)产电信号的检测能力, 构建了采用加 Cu^{2+} 处理土壤进行产电的小型化单室 MFCs, 并设计和制作了基于集成运算的信号放大器, 设计放大倍数 100 倍。将信号放大器与 MFCs 连接后, 采用数据采集卡连续记录土壤产电的原始电压以及放大后的电压。结果显示, 土壤产电电压在 4 mV 附近波动, 而放大后的电压升至 400 mV 左右。统计显示原始电压与放大后的电压相关性达到极显著水平($P < 0.001$)。同时还发现, 并非每个电压数值都严格放大 100 倍, 而是倍率存在 5% 的误差, 原因主要在于集成运算放大芯片存在失调误差和温度漂移误差。本研究为实现小型化 MFCs 产电信号的检测提供了依据。

关键词: 集成运算放大器; 电压; 仿真电路; MFCs

中图分类号: S153 文献标识码: A

土壤微生物群落中有一类具有胞外电子传递功能的细菌, 称为产电细菌^[1], 因此土壤中的产电微生物能够在微生物燃料电池(microbial fuel cells, MFCs)中进行产电。采用土壤进行产电的 MFCs 称为土壤 MFCs。土壤产电电压和电流与土壤微生物活性密切相关, 并且随着污染物浓度增加而降低, 因而土壤产电电压和电流能够作为电信号, 用于指示土壤微生物活性以及土壤污染毒性^[2-4]。传统的检测指标如土壤酶活性, 土壤呼吸强度等检测方法需要使用一系列的化学药品, 处理不当容易造成污染^[5-7]。而采用单室 MFCs 构型进行土壤产电, 不使用化学试剂, 不产生污染, 也不消耗能源, 相反能产生少量电能, 是一种潜在的绿色、新型检测方法^[8]。

土壤产电信号一般较弱, 原因在于采用土壤进行产电时, MFCs 的内阻较大, 而且土壤有机质含量有限, 缺乏充足的葡萄糖、乙酸等产电细菌容易利用的碳源。所以, 要获得可供分析的产电信号, 通常需要较多的土壤用量以及较大的 MFCs 反应器^[3]。但是大土量和大反应器的使用限制了基于土壤产电的检测方法的应用。因此, MFCs 反应器的小型化是该检测方法取得实用性的重要途径。然而, MFCs 小型化之

后, 用于产电的土壤用量也随之大幅减少, 土壤产电信号也变得微弱, 甚至无法进行有效的检测。而解决这一问题, 需要借助信号放大电路将微弱电信号放大。集成运算放大器具有增益高、输入电阻大、输出电阻低、共模抑制比高, 以及失调与漂移误差小的优点, 因而普遍用于信号放大^[9-10]。

在本研究中, 作者设计并制作了可将电压信号放大 100 倍的集成运算放大器并将其与小型化土壤 MFCs 连接, 同时记录土壤产电的原始电压与放大后的电压。目的是探索采用集成运算放大器为小型化土壤 MFCs 进行电信号放大的可行性。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤于 2016 年 3 月采自南京师范大学仙林校区后山的阔叶林, 采样深度 0~20 cm。样地气候条件为亚热带季风气候, 年平均降雨量 1 100 mm, 年平均气温 15°C。土样采集后经研磨过 2 mm 筛用于 MFCs 运行; 少量过筛土壤风干后用于理化性质测定。土壤总碳和总氮采用元素分析仪测定, 土壤 pH 采用 pH 计(FE20, Mettler Toledo)测定。土壤基本理化性质如下:

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301260, 41671250)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(164320H116)和江苏省高校自然科学研究面上项目(16KJB210007)资助。

* 通讯作者(zhongwenhui@njnu.edu.cn)

作者简介: 邓欢 (1982—), 男, 江苏南京人, 博士, 副教授, 主要从事环境微生物技术研究。E-mail: hdeng@njnu.edu.cn

土壤 pH 7.41；总碳 17.58 g/kg；总氮 0.69 g/kg。

1.2 信号放大电路的原理和设计

本研究采用的信号放大器为集成运算放大器，是由多级直接耦合放大电路组成的高增益模拟集成电路，主要由输入、中间、输出 3 部分组成。输入部分是差动放大电路，有同相和反相两个输入端，本研究将 MFC 连接在同相输入端。同相输入端的电压变化和输出端的电压变化方向一致，反相输入端则相反；中间电压放大部分的主要作用是提高电压增益，它可由一级或多级放大电路组成，放大信号经输出部分传到信号检测器，本研究采用的信号检测器为数据采集卡。

1.2.1 集成运算放大器的原理 基本放大电路模型有 4 种：电压放大、电流放大、互阻放大和互导放大，在本试验中选择电压放大模型以及同相放大电路。基本放大电路如图 1^[11]：

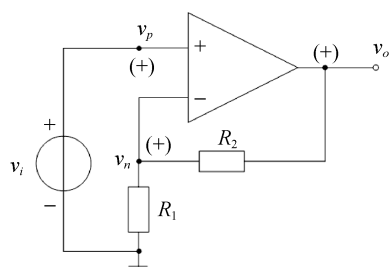


图 1 基本放大电路
Fig. 1 Basic amplifying circuit

图 1 中，输入信号 v_i 加到运算放大器的同相输入端“+”和地之间，输出电压 v_o 通过 R_1 和 R_2 的分压作用，得 $v_n = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_o$ ，作用于反向输入端“-”。

在同相放大电路中，输出通过负反馈的作用，使 v_n 自动地跟踪 v_p ，得到 $v_n \approx v_p$ ，这种现象称为虚假短路，简称虚短。由于同相和反相两输入端之间出现虚短现象，而运算放大器的输入电阻的阻值又很高，因此经两输入端之间出现虚断现象，此时 $i_n = i_p \approx 0$ 。根据虚短和虚断的概念，可以得到同相放大电路的电压增益为：

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

由上式可以看出，调节 R_1 和 R_2 的大小可以改变电压的增益大小。

本研究采用同相放大电路，同相放大电路有如下特点：输入电阻较高，输出电阻较低；由于 $v_n = v_p = v_i$ ，电路不存在虚地，且运算放大器存在共模输入信号，因此要求运算放大器具有较高的共模抑制比。共模抑制比是放大器对差模信号的电压放大倍数

与对共模信号的电压放大倍数之比，共模抑制比越大，电路的性能越优良。

1.2.2 实际电路设计 在本试验中，考虑到电压信号微小，为减小噪声干扰和失调电压的影响，选择高精度、低温漂的集成运算放大器 OP-07(Analog Devices, Inc, USA)。OP-07 是一种低噪声、非斩波稳零的双极性(双电源供电)运算放大器集成电路。由于 OP-07 具有非常低的输入失调电压($<25 \mu\text{V}$)，所以 OP-07 在很多应用场合不需要额外的调零措施。OP-07 同时具有输入偏置电流低(2 nA)和开环增益高(300 V/mV)的特点，这种低失调、高开环增益的特性使得 OP-07 特别适用于高增益的测量设备和放大传感器的微弱信号等方面。试验中拟将土壤产电电压放大 100 倍， R_1 和 R_2 分别选择 1 K 和 100 K 的电阻，设计了放大电路图(图 2)，并利用仿真软件 Multisim 进行了功能仿真^[12]，之后根据仿真电路制作出电路实物(图 3)，并且将其应用在实际电路测量中。

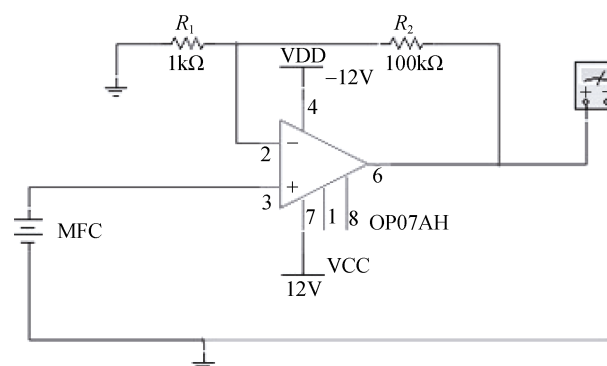


图 2 集成运算放大器的仿真电路
Fig. 2 Simulator of operational amplifier

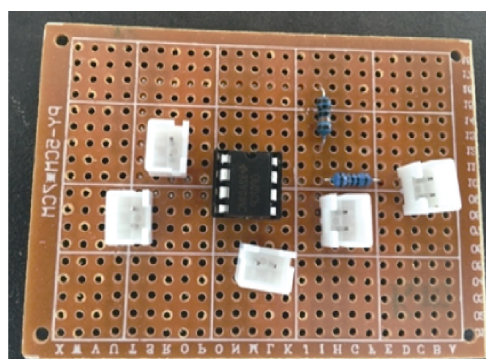


图 3 集成运算放大器
Fig. 3 Integrated operational amplifier produced

1.3 MFCs 构建和运行

取 3 只 50 ml 塑料离心管，每只离心管底部放置一块圆形碳毡(直径 2.0 cm)作为阳极。称取 60 g(干土重)过筛后的土样并分成均等的 3 份，每份 20 g。向其中两份土样分别加入 1 ml Cu^{2+} 浓度为 500 mg/L 和

1 000 mg/L 的 CuCl_2 溶液,使土壤 Cu^{2+} 浓度分别达到 25 mg/kg 和 50 mg/kg;最后一份土样仅加入 1 ml 蒸馏水作为不加 Cu^{2+} 对照。将 3 份土样分别装进上述 3 只离心管中,向离心管加入蒸馏水至土壤处于淹水状态,淹水水层深度 1 cm,再将一块圆形碳毡(直径 2.0 cm)作为阴极没入水中轻轻放置于淹水土壤表面。用钛丝作为导线链接阳极和阴极,并串联 1 000 Ω 外电阻,完成 3 个单室 MFCs 的构建,分别编号为 MFC-Ct(不加 Cu^{2+} 对照),MFC-25(25 mg/kg Cu^{2+} 处理)和 MFC-50(50 mg/kg Cu^{2+} 处理)。

在每个 MFCs 上连接一块集成电路运算放大器,采用数据采集卡(7660B,北京中泰研创)每隔 10 min 记录一次 MFCs 产生的原始电压数值,以及经过信号放大电路产生的放大后的电压数值(图 4),连续记录 22 h,共记录 132 个电压数据。MFCs 运行过程中采用空调保持环境温度 25 $^{\circ}\text{C}$ 。

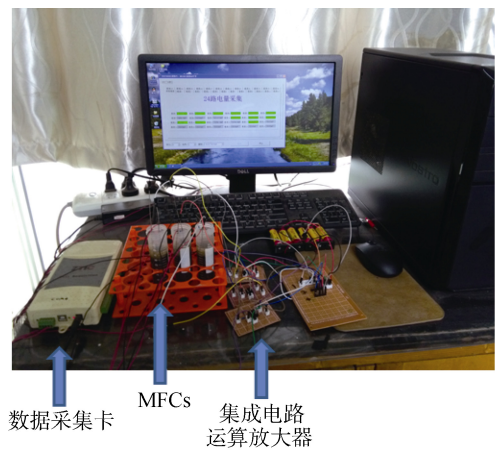


图 4 MFCs 构建和运行图
Fig. 4 The construction and operation of MFCs

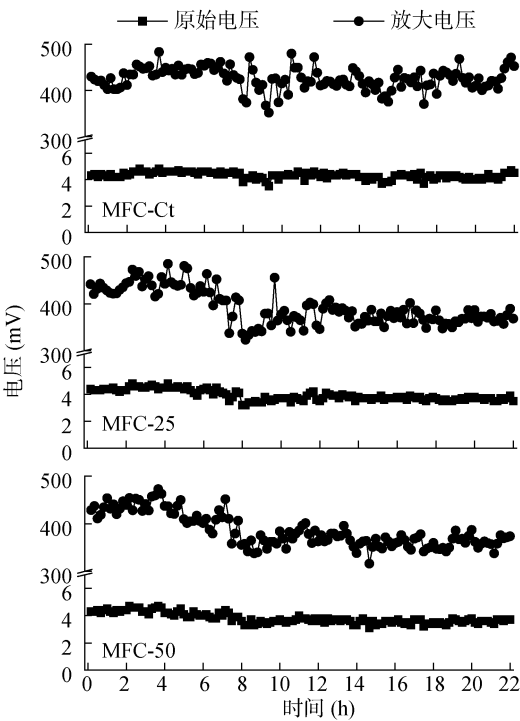
1.4 分析与统计

土壤产电的原始电压和经过放大的电压之间的相关性分析采用 SPSS18.0 软件的 Pearson 相关分析。

2 结果与讨论

图 5 显示,未添加 Cu^{2+} 的对照处理的土壤产电电压维持在 3.5 ~ 4.8 mV 之间,经过信号放大电路输出的电压在 341.9 ~ 483.7 mV 之间波动;添加 25 mg/kg Cu^{2+} 处理的土壤产电电压维持在 3.2 ~ 4.8 mV 之间,经过信号放大电路输出的电压在 323.1 ~ 485.3 mV 之间;添加 50 mg/kg Cu^{2+} 处理的土壤产电电压维持在 3.1 ~ 4.7 mV 之间,经过信号放大电路输出的电压在 316.1 ~ 472.8 mV 之间。信号放大电路基本实现了对土壤产电电压信号的 100 倍放大。Pearson 相关性分析表明,3 个 MFCs 装置的产电电压与放大后的电压

之间相关性都达到极显著水平(表 1)。另外,对每个 MFC 处理运行 22 h 所获得的 132 个电压数据做平均值后发现,不同 Cu^{2+} 浓度处理的原始电压平均值为 MFC-Ct (4.30 mV) > MFC-25 (3.92 mV) > MFC-50 (3.80 mV),而放大后的电压平均值为 MFC-Ct (427 mV) > MFC-25 (393 mV) > MFC-50 (385 mV)。从处理间的比值来看,不同处理间原始电压的差异与放大后电压的差异非常接近。



(MFC-Ct、MFC-25 和 MFC-50 分别代表不加 Cu^{2+} 对照、25 mg/kg Cu^{2+} 处理和 50 mg/kg Cu^{2+} 处理,下同)

图 5 MFCs 反应器中土壤产电原始电压和经过放大的电压

Fig. 5 Original and amplified voltage data produced by soil in three MFCs reactors

表 1 土壤产电原始电压和放大后电压的相关性分析
Table 1 Correlation between original and amplified voltage data

电压信号来源	相关系数(<i>r</i>)	显著性(<i>P</i>)
MFC-Ct	0.75	<0.001
MFC-25	0.93	<0.001
MFC-50	0.50	<0.001

我们同时也发现,并非每个电压数据都被严格放大 100 倍,绝大部分数据的放大倍数在 95 ~ 105 倍之间,这些主要是由于运算放大器电路存在一定的噪声干扰以及芯片、元器件自身的固有误差造成的。集成运算放大芯片的主要误差来源包括失调误差和温度漂移误差^[13]。试验中选择低噪声、非斩波稳零的双极性集成运算放大器 OP-07 属于精密运算放大器,25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,

其失调误差和温度漂移误差分别为 99.5 μV 和 20.2 μV ，总误差达到约 0.12 mV。本试验中，土壤产电电压大约在 3 mV 左右，因此失调误差和温度漂移误差会引起 $\pm 4\%$ 左右的误差。同时由于在理论计算时，假设了运算放大器是理想放大器，存在虚短的情况，而在实际应用中，运算放大器的开环增益有限，无法做到虚短，开环增益带来的误差也就无法忽略。本研究结果同时也表明，过低的产电信号采用集成运算放大器放大将会引起较高的误差，此时需要考虑降低误差。

有若干办法可减小运算放大电路在实际测量中的误差，包括：选择具有更高精度的运算放大器，如 AD8628、AD622 等集成运算放大器，或者采用分立元件构成低噪声放大器。可在放大电路中增加一个 OP-07 的调零电路，在运算放大器的调零端接入一个滑动变阻器，变阻器的中心头通过一个电阻接入正电源，利用此调零电路可减小部分失调误差。选择仪用放大电路，增大电路的共模抑制比。利用 3 个 OP-07 芯片可设计出具有更高精度的仪用放大电路^[14]。

参考文献：

- [1] 姜允斌, 邓欢, 黄新琦, 等. 一株土壤产电菌 *Clostridium sporogenes* 的分离及其产电性能[J]. 微生物学报, 2016, 56(5): 846–855
- [2] 姜允斌, 薛洪婧, 钟文辉, 等. 土壤微生物产电信号评价砒污染毒性研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1332–1341
- [3] Deng H, Wu Y C, Zhang F, et al. Factors affecting the performance of single-chamber soil microbial fuel cells for power generation[J]. Pedosphere, 2014, 24(3): 330–338
- [4] Deng H, Jiang Y B, Zhou Y W, et al. Using electrical signals of microbial fuel cells to detect copper stress on soil microorganisms[J]. European Journal of Soil Science, 2015, 66: 369–377
- [5] 孙瑞波, 盛下放, 李娅, 等. 南京栖霞重金属污染区植物富集重金属效应及其根际微生物特性分析[J]. 土壤学报, 2011, 48(5): 1013–1020
- [6] 边雪廉, 岳中辉, 焦浩, 等. 土壤酶对土壤环境质量指示作用的研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(4): 634–640
- [7] 赵吉. 土壤健康的生物学监测与评价[J]. 土壤, 2006, 38(2): 136–142
- [8] 邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 等. 土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展[J]. 环境科学, 2015, 36: 3926–3934
- [9] 孙成正, 尹文庆, 赵建平, 等. 植物电信号前置放大电路的设计与仿真[J]. 电子测量技术, 2007, 30(7): 168–171
- [10] Vela-Pena E, Quinones-Uriostegui I, Martinez-Pinon F, et al. Design of a microelectronic circuit to amplify and modulate the signal of a micro-electro-mechanical systems arterial pressure sensor[C]. San Diego, CA: Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2010
- [11] 康华光, 陈大钦, 张林. 电子技术基础. 模拟部分[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 28–29
- [12] 毕克玲. NI Multisim 11 仿真技术在模拟和数字电路教学中的应用[J]. 电脑知识与技术, 2014, 10(20): 4748–4750
- [13] 刘文珂. 影响集成运放输入误差信号的主要参数分析[J]. 微电子与基础产品, 2001, 27(3): 54–56
- [14] 唐万恺, 王志功, 徐建, 等. 心电信号采集放大器设计[J]. 新型工业化, 2011, 1(10): 112–118

Design and Operation of Amplification Circuit for Electrical Signals Generated by Small-scale Soil Microbial Fuel Cells

DENG Huan¹, WANG Ri², XU Jing¹, SHA Yadong¹, LI Daoyun¹, ZHONG Wenhui^{3,4*}

(1 School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2 Honors College, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 3 School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 4 Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

Abstract: A small-scale microbial fuel cells (MFCs) using Cu^{2+} spiked soil was constructed and connected with an integrated operational amplifiers designed and produced with a designed amplification of 100 times to improve the ability to detect the electrical signal generated, then a data collector was used to recorded both the original and amplified voltage data generated by soil. The results showed that the original voltage data fluctuated around 4 mV and the amplified voltage data around 400 mV. The statistical analysis revealed that the correlation reached an extremely significant level between the original and amplified voltage data ($P < 0.001$). It is noticeable that not all of the original data were amplified by 100 times strictly, instead there was a 5% error, which was attributed to the offset error and temperature drift error of the integrated operational chips. This study provided a reference in detecting electrical signals generated by small scale MFCs.

Key words: Integrated operational amplifier; Voltage; Simulation circuit; MFCs