

MEMS 压电矢量水听器低噪声前置放大电路

邓威^{1,2}, 樊青青¹, 李俊红¹, 马军¹, 孔超¹

(1. 中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:等效自噪声是微机电系统(MEMS)压电矢量水听器重要的性能指标,前置放大电路的噪声是其主要来源之一。为降低 MEMS 压电矢量水听器的自噪声,设计了一种低噪声前置放大电路。采用双 JFET 并联电路结构,辅以合适的偏置电路,对不同噪声源进行理论分析,优化电路参数,最终实现了噪声性能较优的低噪声前置放大电路的设计与制备。测试结果表明,在 MEMS 压电矢量水听器的工作频带内,低噪声前置放大电路信号放大无失真,电压增益为 43.8 dB,等效输入噪声电压谱密度为 0.7 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @1 kHz,其噪声性能较国内外同类型的放大电路具有一定优势。

关键词:等效自噪声; MEMS 压电矢量水听器; 前置放大电路; 1/f 噪声; 噪声电压谱密度

中图分类号: TN384; TN929.3 **文献标识码:** A

Low-Noise Preamplifier Circuit for MEMS Piezoelectric Vector Hydrophone

DENG Wei^{1,2}, FAN Qingqing¹, LI Junhong¹, MA Jun¹, KONG Chao¹

(1. State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Equivalent self-noise is an important performance indicator for micro-electromechanical systems (MEMS) piezoelectric vector hydrophones, and the noise of the preamplifier circuit is an important consideration. This study entailed the design of a low-noise preamplifier circuit to reduce the self-noise of MEMS piezoelectric vector hydrophones. By using a circuit structure with dual junction field-effect transistors (JFETs) in parallel and supplementing it with appropriate bias circuits, a theoretical analysis of different noise sources was conducted to optimize the circuit parameters. The design and fabrication of a low-noise preamplifier circuit with superior noise performance were ultimately achieved. The test results show that, within the operating frequency band of the MEMS piezoelectric vector hydrophone, the low-noise preamplifier circuit amplifies signals without distortion, with a voltage gain of 43.8 dB and an equivalent input noise voltage spectral density of 0.7 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @1 kHz. This noise performance provides evident advantages over similar amplification circuits domestically and internationally.

Key words: equivalent self-noise; MEMS piezoelectric vector hydrophone; preamplifier circuit; 1/f noise; noise voltage spectral density

0 引言

微机电系统(MEMS)压电矢量水听器具有体积小、成本低、功耗低、易成阵等优点,是未来重要的发展方向。等效自噪声是 MEMS 压电矢量水听器重要的性能参数指标,其自噪声主要来源于压电传感芯片和前置放大电路^[1-2]。前置放大电路不仅

影响 MEMS 压电矢量水听器的自噪声,还承担着信号放大的功能,直接决定着 MEMS 压电矢量水听器的整体性能水平。因此,研究应用于 MEMS 压电矢量水听器的前置放大电路具有重要意义。

2019 年,中国计量大学的茹鸿菲等为满足海洋甚低频压力波动探测方面的需求,设计了一种甚低

收稿日期:2024-04-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12174420,11874388);中国科学院声学研究所自主部署“目标导向”类项目(MBDX202112)和“前沿探索”类项目(QYTS202002)

作者简介:邓威(1998-),男,重庆市云阳人,硕士生。通信作者:孔超,男,研究员。李俊红,男,研究员,博士生导师。

频、低噪声的压电水听器。其前置放大电路在 1 Hz、10 Hz 和 100 Hz 时,等效输入噪声电压谱密度分别约为 $2.8 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、 $2 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 和 $1.7 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。2023 年,该团队针对带前置放大器压电水听器的自噪声展开优化,基于结型场效应管设计制作低噪声放大电路,放大电路的等效输入噪声电压谱密度为 $8.48 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}@1 \text{ kHz}$ 。2020 年,浙江大学的杨磊^[5]针对氮化铝压电薄膜 MEMS 水听器设计了一款信号调理电路,仿真结果表明,该电路的等效输入噪声电压谱密度在 10 Hz 以后基本稳定在 $15.8 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。2020 年,科钦科技大学的 Krishnakumar 等^[6]搭建了一个实验装置用于测量水听器的自噪声,水听器的微弱信号通过前置放大电路输出。该电路的等效输入噪声电压谱密度约为 $3 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}@1 \text{ kHz}$ 。2021 年,武汉大学的 JIA 等^[7]设计了一种仿生蜂窝结构的 MEMS 压电水听器,其 MEMS 水听器传感芯片和前置放大电路集成在印刷电路板上。该前置放大电路的等效输入电压谱密度为 $5.5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}@1 \text{ kHz}$ 。本文针对应用于低噪声压电水听器的前置放大电路展开研究,设计并制备了一种低噪声前置放大电路。

1 低噪声前置放大电路设计

电路结构相似的集成电路与由分立元器件组成的电路相比,其噪声要大 2~5 倍^[8]。因此,采用分立元件搭建前置放大电路在理论上可实现更低的噪声。常用的分立元件有双极型晶体管(BJT)、结型场效应晶体管(JFET)、金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)。BJT 具有相对较低的 1/f 噪声,但其等效输入电流噪声较大,源阻抗较小,并且是流控器件,源阻抗较大的传感器例如 MEMS 压电芯片无法为其提供足够的电流。MOSFET 的 1/f 噪声和等效输入电压噪声较大,不符合本文对前置放大电路低噪声的要求。相比之下,JFET 具有较小的 1/f 噪声,等效输入电压和电流噪声都较小,且源阻抗较大,符合本文对前置放大电路低噪声和阻抗匹配的要求。

单级放大电路往往无法满足增益需求,因此,本文所设计的低噪声前置放大电路采用两级放大。其中,第一级放大电路基本决定了低噪声前置放大电路的噪声水平。为降低低频段的主要噪声(1/f 噪声),第一级放大电路采用 JFET 并联结构,JFET

并联可降低 3 dB 的 1/f 噪声^[9-10]。两级放大电路之间采用交流耦合,保证各级电路的静态工作点相互独立^[11]。第二级放大电路采用低噪声运放并辅以小阻值反馈电阻,以确保不影响低噪声前置放大电路的噪声性能。所设计的低噪声前置放大电路的基本结构如图 1 所示。

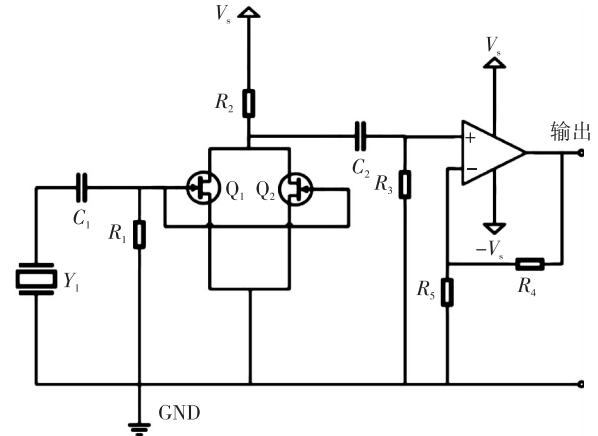


图 1 低噪声前置放大电路原理图

2 低噪声前置放大电路噪声分析与设计

将第一级放大电路通过 En-In 噪声模型进行等效,如图 2 所示。等效到 JFET 输入端的等效输入噪声电压谱密度 $\overline{e_{ni}^2}$ 为

$$\overline{e_{ni}^2} = \overline{e_{nR1}^2} + \overline{e_{nR2}^2} + \overline{e_{nt}^2} + \overline{e_{n(1/f)}^2} + \overline{v_{ns}^2} \quad (1)$$

式中: $\overline{e_{nR1}^2}$ 和 $\overline{e_{nR2}^2}$ 分别是偏置电阻 R_1 与负载电阻 R_2 的等效输入噪声电压谱密度; $\overline{e_{nt}^2}$ 是 JFET 的沟道热噪声电压谱密度; $\overline{e_{n(1/f)}^2}$ 是 JFET 的 1/f 噪声电压谱密度; $\overline{v_{ns}^2}$ 是栅极中散粒噪声电流流过阻抗所产生的等效输入噪声电压谱密度。

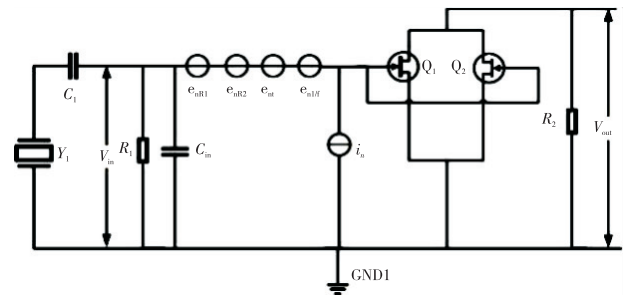


图 2 低噪声前置放大电路 En-In 噪声模型等效图

JFET 的沟道热噪声^[9,12]为

$$\overline{e_{nt}^2} = \frac{4k_B T A}{g_{fs}} \quad (2)$$

式中: $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 是玻尔兹曼常数; T 是

开尔文温度; g_{fs} 为场效应管的正向跨导; A 为经验常数, 一般约等于 0.67。JFET 并联后, 沟道热噪声和 $1/f$ 噪声都将降低 3 dB。并联 JFET 后的等效沟道热噪声为

$$\overline{e_{nt}^2} = \frac{2i_{nd}^2}{(2g_{fs})^2} = \frac{2k_B TA}{g_{fs}} \quad (3)$$

JFET 的散粒电流噪声为

$$\overline{i_{ns}^2} = 2qI_{GSS} \quad (4)$$

式中: $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C 为电子电荷; I_{GSS} 为 JFET 反偏漏电流。JFET 并联后, 散粒噪声将增加 3 dB^[13]。

$$\overline{v_{ns}^2} = 2\overline{i_{ns}^2} |Z_2|^2 = 4qI_{GSS} |Z_2|^2 \quad (5)$$

$$Z_2 = C_1 // R_1 // C_{in} = \frac{R_1}{1 + j\omega R_1(C_1 + C_{in})} \quad (6)$$

假设 $Z_s = 0$, 且 $C_1 \gg C_{in}$, 偏置电阻 R_1 的等效输入噪声电压谱密度为

$$\overline{e_{nR1}^2} = \frac{4k_B TR_1}{1 + (\omega R_1 C_1)^2} \quad (7)$$

负载电阻 R_2 的等效输入噪声电压谱密度为

$$\overline{e_{nR2}^2} = \frac{k_B T}{g_{fs}^2 R_2} \quad (8)$$

第一级电路基本决定了低噪声前置放大电路的整体噪声水平, 交流耦合与第二级放大电路基本不影响电路的噪声水平。以交流耦合电阻 R_3 为例, 其等效输入噪声为

$$\overline{e_{nR3}^2} = \frac{4k_B TR_3 |Z_3|^2}{A^2} \quad (9)$$

$$|Z_3|^2 = \frac{\omega^2 C_2^2 R_2^2 + \omega^4 C_2^4 R_2^2 (R_2 + R_3)^2}{[\omega^2 C_2^2 (R_2 + R_3)^2 + 1]^2} \quad (10)$$

若 $R_3 \gg R_2$, $\omega^2 C_2^2 (R_2 + R_3)^2 \gg 1$, 式(10)、(9)可化简为

$$|Z_3|^2 = \frac{R_2^2}{R_3^2} \quad (11)$$

$$\overline{e_{nR3}^2} = \frac{k_B T}{R_3 g_{fs}^2} \quad (12)$$

当 R_3 选取为高阻值电阻时, 交流耦合部分所产生的等效输入噪声可以忽略。第二级放大电路选用低噪声运放与小阻值反馈电阻, 该部分噪声等效到输入端十分微弱, 同样可以忽略。

测量低噪声前置放大电路的等效输入噪声时, 将输入端短路即 $Z_s = 0$, $C_1 \gg C_{in}$, 则等效输入电压噪声 $\overline{e_{ni}^2}$ 为

$$\overline{e_{ni}^2} = \overline{e_{nR1}^2} + \overline{e_{nR2}^2} + \overline{e_{nt}^2} + \overline{e_{n(1/f)}^2} + \overline{v_{ns}^2} = \frac{4k_B TR_1}{1 + (\omega R_1 C_1)^2} + \frac{k_B T}{g_{fs}^2 R_2} + \frac{2k_B TA}{g_{fs}} + \frac{\alpha q V_G^*}{4C_{in} f} + 4qI_{GSS} \frac{R_1^2}{1 + (\omega R_1 C_1)^2} \quad (13)$$

基于理论分析, 对不同的噪声源可以进行针对性的降噪处理, 优化电路元器件选型。运放采用 ADI 公司的 ad797, 为了实现良好的阻抗匹配, R_1 的阻值选取为 100 M Ω 。 C_1 的容值选取为 10 μ F。 R_2 为负载电阻, 其阻值选取为 390 Ω 。

低噪声前置放大电路中各部分的噪声如图 3 所示。

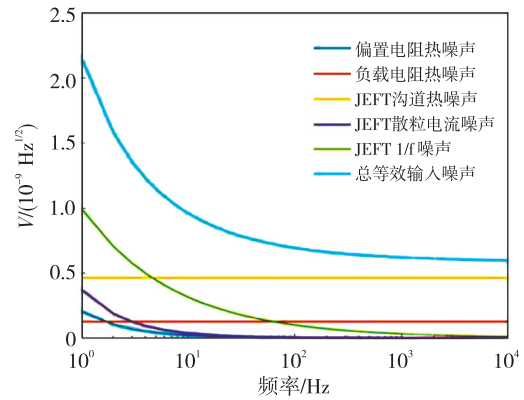


图 3 低噪声前置放大电路中的不同噪声源

由图可知, 低噪声前置放大电路的等效输入噪声主要取决于 JFET 的 $1/f$ 噪声、JFET 的沟道热噪声和负载电阻热噪声。本文所设计的低噪声前置放大电路在 1 Hz、10 Hz、100 Hz 和 1 kHz 时, 其等效输入噪声电压谱密度的理论值分别为 2.16 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、0.96 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、0.69 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 和 0.62 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。

3 低噪声前置放大电路性能测试

在合理的布局布线后, 制作完成的低噪声前置放大电路如图 4 所示, 该电路外形为半径 9 mm 的圆, 在保证低噪声前置放大电路性能的同时兼顾了 MEMS 压电矢量水听器芯片体积小优势。

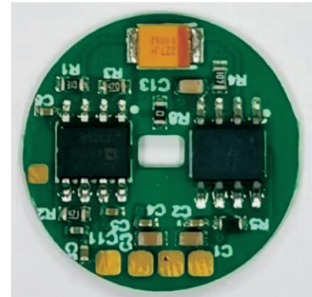


图 4 低噪声前置放大电路

3.1 低噪声前置放大电路增益测试

为测试低噪声前置放大电路的实际性能,本文采用信号发生器(KENWOOD FG-273A)对低噪声前置放大电路输入峰值 5 mV 的正弦信号,并利用示波器(Tektronix DPO 3012)读取低噪声前置放大电路的输出信号。本文所设计的低噪声前置放大电路的实际增益如图 5 所示。MEMS 压电矢量水听器主要在低频段工作,低噪声前置放大电路在 1 Hz~2 MHz 内的实测增益为 43.8 dB(155 倍),带内波动小于 0.5 dB,带宽与增益满足需求。

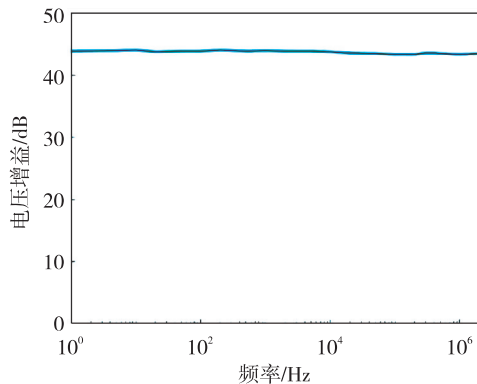


图 5 低噪声前置放大电路增益

3.2 低噪声前置放大电路自噪声测试

低噪声是本文前置放大电路设计最重要的性能指标,低噪声测量系统如图 6 所示,其中数据采集器为丹麦 B&K 公司的 Type 3160-B-042。

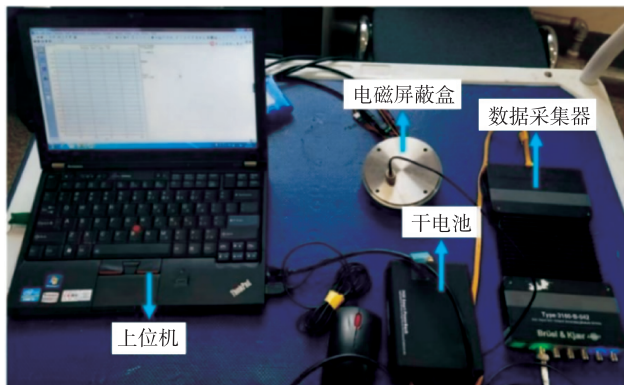


图 6 低噪声测量系统

低噪声测量系统的本底噪声如图 7 所示,在 1 Hz、2 Hz、10 Hz、100 Hz 和 1 kHz 时测量系统的等效噪声电压谱密度分别为 $0.9 \text{ mV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、 $2.4 \text{ } \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、 $35.8 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、 $31.9 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 和 $11.8 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。低噪声测量系统在 10 Hz 以下的本底噪声过大,无法真实反映待测电路的噪声水平。

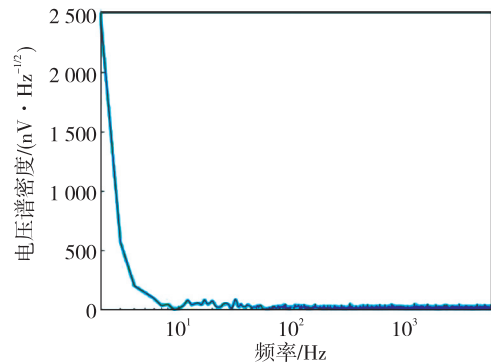


图 7 低噪声测量系统的本底噪声

将低噪声前置放大电路的输入端短路,实际测量得到本文所设计的低噪声前置放大电路的等效输入噪声,如图 8 所示。

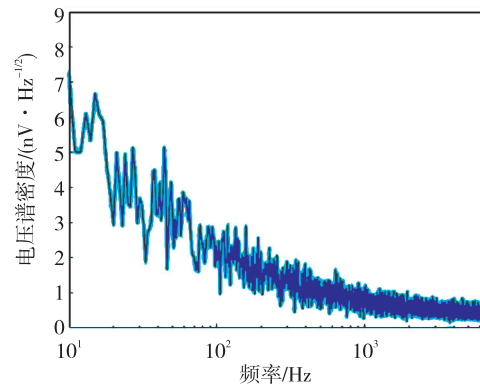


图 8 前置放大电路等效输入噪声

本文所设计的低噪声前置放大电路在 10 Hz、100 Hz 和 1 kHz 时,等效输入噪声电压谱密度分别为 $7.01 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、 $1.83 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 和 $0.7 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

表 1 对比了 1 kHz 下国内外同样应用于低噪声水听器的前置放大电路的噪声水平。由表可见,本文所研制的低噪声前置放大电路的噪声性能较同类型放大电路具有一定优势。

表 1 同类型低噪声前置放大电路的噪声性能

低噪声前置放大电路	等效输入噪声/($\text{nV} \cdot \sqrt{\text{Hz}}^{-1/2}$)
文献[5]	15.8
文献[7]	5.5
文献[4]	8.48
文献[14]	3
本文	0.7

4 结束语

矢量水听器已成为水下低频目标探测技术中的主要接收器,而 MEMS 压电矢量水听器具有体积小、功耗低、成本低等优点,是未来重要的研究方

向。MEMS 压电矢量水听器自噪声是影响其能否完成微弱信号探测的关键因素。为降低 MEMS 压电矢量水听器的自噪声,本文对低噪声前置放大电路展开了详细的研究。采用双 JFET 并联的电路结构,并根据不同噪声源的特性优化选择元器件,最终实现了噪声性能较优的低噪声前置放大电路的设计与制备。实际测得本文所设计的低噪声前置放大电路的增益为 43.8 dB,等效输入噪声电压谱密度为 $0.7 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} @ 1 \text{ kHz}$,其噪声性能较国内外同类型的低噪声前置放大电路具有一定优势。

参考文献:

- [1] 李智. 低噪声矢量水听器设计及其校准方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2017.
- [2] 李智, 杨士莪, 陈洪娟. 压电矢量传感器的低噪声设计[J]. 声学学报, 2018, 43(4): 432-444.
- [3] 茹鸿菲, 郭世旭, 王月兵, 等. 基于超低噪声 JFET 的甚低频压电水听器设计[J]. 传感技术学报, 2019, 32(12): 1775-1783.
- [4] 肖屹立, 郭世旭. 带前放压电水听器噪声建模及低噪声设计方法[J]. 压电与声光, 2023, 45(2): 264-270. XIAO Yili, GUO Shixu. Noise modeling and low-noise design method of piezoelectric hydrophone pre-amplifier[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2023, 45(2): 264-270.
- [5] 杨磊. 氮化铝压电薄膜 MEMS 水听器的设计、加工与测试[D]. 杭州:浙江大学, 2020.
- [6] KRISHNAKUMAR R, RAMESH R. A method and an experimental setup for measuring the self-noise of piezoelectric hydrophones[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2020, 67(2): 413-421.
- [7] JIA L C, SHI L, LIU C B, et al. Design and characterization of an aluminum nitride-based MEMS hydrophone with biologically honeycomb architecture[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(9): 4656-4663.
- [8] 胡志峰. 应用于低频微弱信号检测的前置放大电路设计[D]. 长沙:湖南大学, 2015.
- [9] VAN DER ZIEL A. Noise, sources, characterization, measurement[M]// Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall Information and System Sciences Series, 1970.
- [10] NETZER Y. The design of low-noise amplifiers[J]. Proceedings of the IEEE, 1981, 69(6): 728-741.
- [11] 殷铸灵. 低频小信号放大电路的研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2012.
- [12] VAN DER ZIEL A. Thermal noise in field-effect transistors[J]. Proceedings of the IRE, 1962, 50(8): 1808-1812.
- [13] LEVINZON F A. Noise of the JFET amplifier[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2000, 47(7): 981-985.
- [14] KRISHNAKUMAR R, RAMESH R. A method and an experimental setup for measuring the self-noise of piezoelectric hydrophones[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2020, 67(2): 413-421.