

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210318

多分立电流源低噪声 JFET 差分放大技术研究<sup>\*</sup>李文彬<sup>1</sup> 王圣捷<sup>2</sup> 朱平杰<sup>1</sup> 叶璇<sup>1</sup> 张洋<sup>2</sup>

(1. 中国船舶集团有限公司第七二研究所低频电磁通信技术实验室 武汉 430000;

2. 吉林大学仪器科学与电气工程学院 长春 130061)

**摘要:** 结型场效应管具有输入阻抗大、噪声低的优点,已被广泛用于设计高性能瞬变电磁传感器前置放大电路。然而,由于同一型号 JFET 器件间参数差异较大,多个 JFET 器件差分并联放大时难以匹配工作。针对这一问题,本文提出了一种基于多分立电流源的低噪声 JFET 差分放大技术,结合每一路 JFET 放大支路电路特性单独设计恒流源,并调整为最佳静态工作点,以消除 JFET 参数离散性引发的放大支路不均流、无法可靠工作问题。最后,通过 LTspice 仿真与实际电路测试结果表明基于该技术设计的差分放大电路能够可靠工作,其中每一 JFET 支路电流均为 4.68 mA,增益达到 40.00 dB,且具有较低的本底噪声( $0.51 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}@1.10 \text{ kHz}$ )。本文提出的新方法能够有效消除 JFET 参数离散性问题,为设计差分并联低噪声 TEM 传感器前置放大电路奠定良好的技术基础。

**关键词:** 前置放大电路;低噪声;结型场效应管;分立电流源;瞬变电磁

**中图分类号:** TP212.13;TH76 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Research on differential amplification technology of  
multi-discrete current source low noise JFETLi Wenbin<sup>1</sup> Wang Shengjie<sup>2</sup> Zhu Pingjie<sup>1</sup> Ye Xuan<sup>1</sup> Zhang Yang<sup>2</sup>

(1. Laboratory of Low frequency Electromagnetic Communication Technology with the 722 Research Institute, CSSC, Wuhan 430000, China;

2. College of Instrumentation &amp; Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China)

**Abstract:** Junction field-effect transistor has a large input impedance and low noise, which has been widely used to design high performance transient electromagnetic sensor preamplifier circuit. However, the parameters fluctuate greatly between JFET devices of the same type, which makes it difficult to match when the JFET devices are differentially amplified. Aiming at this problem, a low-noise JFET differential amplification technique based on multi-discrete current sources is proposed in this paper. Combined with the characteristics of each JFET amplifier branch circuit, the constant current source is designed separately and adjusted to the optimal static operating point to eliminate the problem of uneven current flow and unreliable operation of the amplifier branch caused by the discreteness of JFET parameters. Finally, the LTspice simulation and actual circuit test results show that the differential amplifier circuit designed based on this technology can work reliably, and the current of each JFET branch is 4.68 mA, and the gain of the amplifier circuit designed based on this technology reaches 40.00 dB and the noise floor is  $0.51 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}@1.10 \text{ kHz}$ . The new method proposed in this paper can effectively eliminate the discrete problem of JFET parameters, and lay a good technical foundation for designing a differential parallel low-noise TEM sensor preamplifier circuit.

**Keywords:** preamplifier circuit; low noise; junction field-effect transistor; discrete current sources; transient electromagnetic method

## 0 引言

瞬变电磁法(transient electromagnetic method, TEM)是利用不接地回线向地下发射一次场,在一次场脉冲间歇

期间,利用线圈观测地下介质二次场响应的一种地球物理方法,具有穿透性强、分辨率高等优点,可实现无损探测,已广泛应用于城市地下空间、野外资源探测等领域<sup>[1-2]</sup>。线圈传感器作为瞬变电磁系统的核心部件,其检测灵敏度直接

收稿日期:2022-06-14

\* 基金项目:中国船舶重工集团第七二所重点实验室基金、吉林省自然科学基金(2020122207JC)项目资助

决定了系统的探测深度和范围<sup>[3]</sup>。改善线圈传感器的检测灵敏度可大大提高对晚期电磁信号(反映深部地质信息)的分辨能力<sup>[4-5]</sup>。线圈传感器由空心线圈和低噪声前置放大电路构成,对于参数固定的线圈而言,传感器检测灵敏度主要受限于前置放大电路的本底噪声。因此,设计适用于 TEM 线圈传感器的高性能低噪声前置放大电路至关重要。

目前,国内外学者开展了大量针对 TEM 线圈传感器的低噪声前置放大电路的优化设计研究,主要分为基于集成运算放大器和基于分立元器件(junction field-effect transistor, JFET)的两种放大电路。林君等<sup>[6]</sup>基于集成运放设计了差分式低噪声空心线圈传感器,给出了精确电路噪声模型,为线圈传感器本底噪声分析奠定了理论基础。Chen 等<sup>[7]</sup>详细研究了直升机瞬变电磁空心线圈和基于集成运放差分电路的理论模型和噪声源,研制了等效输入噪声为  $1.83 \text{ nV} \sqrt{\text{Hz}} @ 1.00 \text{ kHz}$  的线圈传感器。Lin 等<sup>[8]</sup>通过 3 个集成运放并联的方式降低放大电路等效输入电压噪声,线圈传感器本底噪声为  $1.40 \text{ nV} \sqrt{\text{Hz}} @ 2.00 \text{ kHz}$ 。基于集成运算放大器设计的前置放大电路具有结构简单、易实现的特点,但电路本底噪声较高,很难突破到  $1.00 \text{ nV} \sqrt{\text{Hz}}$  以下。为有效降低系统本底噪声, Cannata 等<sup>[9]</sup>基于分立元器件 JFET 研制出  $0.80 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}} @ 1.00 \text{ kHz}$  的通用单端放大器,但该放大电路对两个 JFET 器件参数的一致性要求较高。Scandurra 等<sup>[10]</sup>设计了一种反馈补偿的 JFET 差分放大电路,放大电路噪声为  $1.00 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}} @ 1.00 \text{ kHz}$ 。Liu 等<sup>[11]</sup>采用多级反馈方式设计了具有高增益低噪声的差分 JFET 放大电路。王言章教授团队<sup>[12-13]</sup>通过并联 JFET 器件设计了低噪声放大电路,尤其适用于低频信号的放大。基于分立结型场效应管设计的放大电路虽然设计复杂,但具有高跨导与极低的等效输入噪声,适用于高灵敏 TEM 传感器的设计。然而, JFET 因工艺缺陷导致不同器件间参数离散性大,设计的差分电路或并联放大电路存在静态工作点偏移、无法可靠工作的问题。目前,为了设计能够可靠工作的差分式或并联 JFET 低噪声放大电路,只能通过人工测试挑选参数一致的器件。因此,亟需一种能够有效解决 JFET 器件参数离散性引发的静态工作点偏移的技术方案。

针对 JFET 参数离散引发的放大电路静态工作点偏移问题,本文提出了一种基于多分立电流源的低噪声 JFET 差分放大技术,通过设计独立的电流源,简化对 JFET 外部参数的设置,确保每一路 JFET 的静态工作点满足实际参数要求,避免传统 JFET 器件并联不均流的影响。本文主要内容安排如下:首先,分析了 JFET 工作原理及导致参数离散性的原因,利用测试电路验证了参数离散性对静态工作点的影响,量化了器件离散性偏移对传统差分电路的影响。在此基础上提出了多分立电流源 JFET 差分放大技术,对新型电路的工作原理进行了介绍。其次,采用

LTspice 软件对提出的多分立电流源 JFET 差分放大电路进行仿真研究。最后,对设计的实际电路测试分析,验证本文提出技术的有效性。

## 1 多分立电流源低噪声放大电路设计与分析

### 1.1 结型场效应管的参数离散性分析

JFET 结构及工作示意图如图 1 所示,其本质是利用半导体内电场效应,通过控制栅源电压  $V_{GS}$  改变栅 PN 结势垒宽度,利用耗尽层的夹断实现对内部载流子的控制,从而控制漏极电流  $I_D$  的大小<sup>[14-16]</sup>。

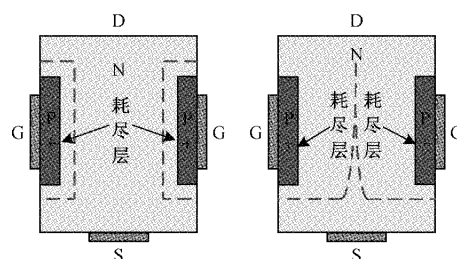


图 1 N 沟道 JFET 结构及工作示意图

根据 JFET 内部耗尽层状态,其工作状态分为 3 种:线性区(耗尽层未夹断)、放大区(耗尽层部分夹断)、夹断区(耗尽层完全夹断),3 种状态的  $V_{GS}$  值各不相同。JFET 作为放大器使用,需工作在放大区,满足:  $0 > V_{GS} > V_{GS(OFF)}$ ,  $V_{DS} > 0$ 。其中  $V_{GS(OFF)}$  为夹断电压,  $I_{DSS}$  为饱和漏电流,此时 JFET 具有如式(1)的函数关系:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(OFF)}}\right)^2 \quad (1)$$

以 JFET 共源放大电路为例,其电路结构如图 2 所示,当电源固定后,调整电阻大小即可改变 JFET 静态工作点,以确保 JFET 放大电路正常工作,根据式(1)~(3)可计算某一静态工作点的器件参数。

$$R_s = \frac{12 \text{ V} - V_{DS} + V_{GD}}{I_D} \quad (2)$$

$$R_b = \frac{12 \text{ V} - V_{GS}}{I_D} \quad (3)$$

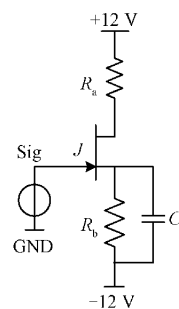


图 2 JFET 共源放大电路

在实际电路调试中静态工作点与理论计算存在偏差,导致放大电路无法可靠工作。这是因为 JFET 器件内半导

体掺杂存在差异,且受加工工艺精度等限制,同一型号的器件之间存在一定的参数分布(parameter spread),称之为离散性<sup>[13]</sup>。

通常采用 JFET 器件数据手册中静态参数的最大值与最小值之比衡量其离散性<sup>[17]</sup>,例如噪声较低的 IF3601 器件之间  $V_{GS(OFF)}$  离散性为 5.8 : 1;  $I_{DSS}$  未给出参考最大值,若使用典型值代替最大值,其离散性为 10 : 1,其参数如表 1 所示。因此,JFET 的离散性对于设计可靠放大电路是需要考虑的重要因素之一。

表 1 IF3601 夹断电压与饱和漏电流

参数	最小值	典型值	最大值
$V_{GS(OFF)}/V$	-0.35	—	-2.00
$I_{DSS}/mA$	30.00	300.00	—

为了验证 JFET 器件的离散性,本文以 IF3601 为研究对象,采用如图 3 所示的电路实测分析<sup>[18]</sup>。使用电流源为 JFET 提供稳定电流,仅需调试外部电阻即可使 JFET 与所需静态工作点匹配,便于电路设计与分析。以数据手册所给的最小噪声静态工作点为目标 ( $V_{DS} = 3.00 V, I_D = 5.00 mA$ ),设置  $R_A$  为 1.70 k $\Omega$ ,  $R_B$  为 10.00  $\Omega$ ,  $R_C$  为 2.40 k $\Omega$ 。同批次 IF3601 接入电路获得的静态参数结果如表 2 所示。可以看出,即使在相同静态工作点下,同一批次 JFET 器件,其参数的离散差异较大。

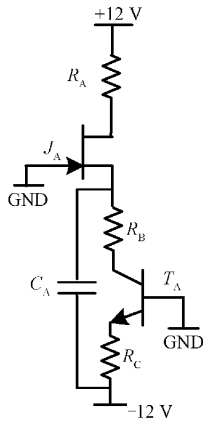


图 3 IF3601 检测电路

表 2 同批次 IF3601 静态参数

序号	$I_D/mA$	$V_{DS}/V$	$V_{GS}/V$
1	5.00	6.78	-0.65
2	5.00	6.91	-0.68
3	5.00	6.90	-0.73
4	5.00	7.04	-0.62
5	5.00	6.85	-0.75

在实际瞬变电磁线圈传感器前置放大电路设计时,为了抑制线圈共模噪声,通常采用如图 4 所示的差分放大电

路结构。然而,由于 JFET 器件的离散性导致两个管子不均流,其中一个管子不能满足静态工作点要求,无法有效放大。

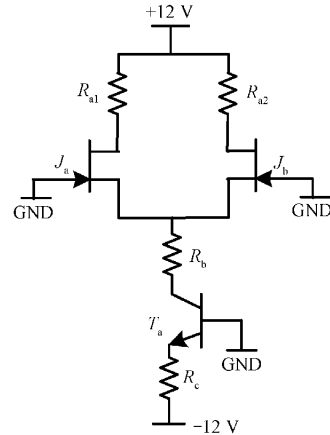


图 4 差分放大电路

下面对器件离散性导致的静态工作点偏移进行定量评估和分析。

首先在理想条件下,即两个管子参数完全相同,对图 4 的差分放大电路进行分析。设  $V_{DSideal}$ 、 $I_{Dideal}$  为静态工作点电压与电流,  $I_{Da}$ 、 $I_{Db}$  为支路电流,  $V_{s+}$ 、 $V_{s-}$  为供电电压,  $V_{PN}$  为三极管 PN 结压降,  $V_{GS(OFF)max}$  为最大夹断电压。考虑  $V_{GS(OFF)}$  的最大值为  $V_{GS(OFF)max}$ , 因此设置 JFET 管  $J_a$  和  $J_b$  的源极电位  $V_s = -V_{GS(OFF)max}$ ; 且  $I_{Da} = I_{Db}$ , 电路中  $R_{a1}$ 、 $R_{a2}$ 、 $R_c$  应满足:

$$R_{a1} = R_{a2} = \frac{V_{s+} - V_{DSideal} + V_{GS(OFF)max}}{I_{Dideal}} \quad (4)$$

$$R_c = \frac{0.00 V - V_{PN} - V_s}{I_a + I_b} \quad (5)$$

代入 IF3601 最小噪声静态工作点数值 ( $I_{Dideal} = 5.00 mA, V_{DSideal} = 3.00 V, V_{PN} = 0.7 V$ ), 电源  $V_{s+} = 12.00 V, V_{s-} = -12.00 V$ 。则  $R_{a1} = R_{a2} = 1.73 k\Omega, R_c = 1.13 k\Omega$ 。

实际电路由于 JFET 管  $J_a$  和  $J_b$  的离散性会导致  $I_a$  和  $I_b$  不相等, 设  $I_{Db} = 2I_{Dideal} - I_{Da}$ 。根据 JFET 特性, 当  $J_a$  管和  $J_b$  管的  $V_{DS} > 0$ , JFET 才能工作在放大区, 因此可得:

$$V_{s+} - R_{a1} I_{Da} + V_{GS(OFF)max} > 0.00 V \quad (6)$$

$$V_{s+} - R_{a2} I_{Db} + V_{GS(OFF)max} > 0.00 V \quad (7)$$

代入数值后, 两条支路电流  $I_{Da}$  与  $I_{Db}$  满足:  $3.26 mA < I_{Da} < 6.73 mA, 3.26 mA < I_{Db} < 6.73 mA$ , 放大器才能可靠工作, 否则 JFET 无法满足静态工作点要求。

因此, 本文定义两条支路的不均流度  $\eta$  表征管子离散性对系统可靠性的影响程度:

$$\eta = \frac{|I_{Da} - I_{Dideal}|}{I_{Dideal}} = \frac{|I_{Db} - I_{Dideal}|}{I_{Dideal}} \quad (8)$$

经计算 IF3601 差分放大电路在其最小噪声静态工作点处  $\eta = 0.34$ , 当两支路不均流度超过 0.34 则差分放大电路无法正常工作。

对于差分放大电路,必须使用高度相似的 JFET 才可保证电路的稳定工作。若不消除 JFET 参数的差异性,导致不均流度过大,将直接导致差分放大电路无法放大、器件损坏等一系列问题。

目前,为了消除器件参数差异为 JFET 电路设计带来的影响,JFET 器件生产公司通过集成双 JFET 的思路设计对管,对管由于采用同一批次材料及工艺制作,其参数差异性大大降低。IF3602 就是由两个参数基本一致的 IF3601 构成,这种方式在一定程度上减弱了管内参数的差异程度,但不同 IF3602 的管间参数差异依然很大,做差分并联放大时导致无法满足静态工作点的要求;另外,IF3602 器件的价格成本也是 IF3601 器件的 3 倍以上。因此,如何利用外部电路设计,消除 JFET 器件间的参数差异是亟需解决的技术难题。

### 1.2 多分立电流源低噪声放大电路的设计与分析

为了消除 JFET 器件参数离散性导致放大电路无法工作的问题,本文提出了基于多分立电流源的 JFET 差分放大技术,通过独立电流源单独调节每一路 JFET 静态工作点,确保其在数据手册所给的最小噪声静态工作点稳定可靠工作,以满足差分放大和极低噪声特性的需求。基于多分立电流源的 JFET 差分放大电路结构如图 5 所示,由两级放大电路组成,一级放大为两路独立供电的 JFET 构成的差分放大电路,二级放大为低噪声集成运放实现的求差放大电路,两级电路放大避免了传统集成运放与 JFET 共源放大电路的增益带宽限制。

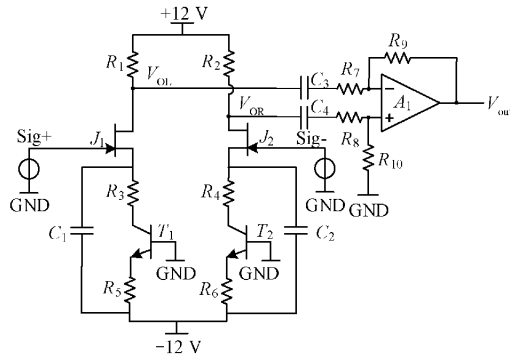


图 5 多分立电流源低噪声放大电路

在一级 JFET 差分放大电路中,参照检测电路设计思路,由 NPN 晶体管  $T_1$  和  $T_2$  设计的恒流源电路独立设置通路电流大小为  $J_1$  与  $J_2$  供电。为满足结型场效应管对电流控制的要求,用  $T_1$  和  $T_2$  及相应的电阻  $R_5$  与  $R_6$  组成恒流源为 JFET 提供稳定的漏极电流,理论上二者阻值相等,恒流源电流计算公式为<sup>[19]</sup>:

$$I_D = \frac{0.00 \text{ V} - 0.70 \text{ V} + 12.00 \text{ V}}{R_5} \quad (9)$$

旁路电容  $C_1$  和  $C_2$  对静态工作点设置并无影响,仅影响 JFET 的交流等效回路,使电路在最小静态工作点对输入交流信号 Sig+ 与 Sig- 低噪声放大。独立的恒流源设计

可确保各支路  $I_D$  大小一致,规避因 IF3601 参数差异导致两臂不均流、静态工作点偏移问题。在实际电路检测中,调节  $R_1, R_2$  中的滑动变阻器大小,配合示波器与万用表监测输出波形与  $V_{DS}$  电压,即可使 IF3601 实现对差分信号的低噪声放大。前置放大电路的器件型号与参数如表 3 所示。

表 3 多分立电流源低噪声放大电路组成

组件	组件类型	组件值
$R_1, R_2$	1%电阻 3.3 k $\Omega$ 0805 $\times$ 2+100 $\Omega$ 滑动变阻器	1.75 k $\Omega$
$J_1, J_2$	IF3601 低噪声 N 沟道 JFET	InterFET
$R_3, R_4$	1%电阻 0805	10.00 $\Omega$
$T_1, T_2$	双极性晶体管	2N1711
$R_5, R_6$	1%电阻 0805	2.40 k $\Omega$
$C_1, C_2$	10 $\mu$ F CCB 电容 $\times$ 2	20.00 $\mu$ F
$C_3, C_4$	Y5V 0805	10.00 $\mu$ F
$R_7, R_8$	1%电阻 0805	5.10 k $\Omega$
$R_9, R_{10}$	1%电阻 0805	510 k $\Omega$
$A_1$	低噪声集成运放	LT1028

基于多分立电流源的 JFET 差分放大电路工作原理分析如下。为保证 IF3601 工作在最小噪声静态工作点,将管压降  $V_{DS}$  稳定在 3.00 V,漏极电流  $I_D$  稳定在 5.00 mA,因  $V_{GS(OFF)}$  在  $-0.35 \sim -1.50$  V 范围内波动,故以  $V_{DS} = 3.00$  V,  $I_D = 5.00$  mA,  $V_{GS(OFF)} = -0.35$  V 来估算静态工作点,后续微调上拉电阻即可消除因 JFET 离散性引起的参数差异。

首先,根据  $I_D = 5.00$  mA 计算  $R_5$  与  $R_6$  阻值,因  $R_5$  与  $R_6$  结构对称,其计算公式:

$$R_5 = \frac{0.00 \text{ V} - 0.70 \text{ V} + 12.00 \text{ V}}{5.00 \text{ mA}} = 2.26 \text{ k}\Omega \quad (10)$$

实际电路中,PN 结的管压降略小于 0.70 V,为保证电路的稳定运行, $R_5, R_6$  选取 2.40 k $\Omega$  贴片电阻。

其次,因  $V_G = 0, V_{GS(OFF)\min} = -0.35$  V,故  $V_S$  取 0.35 V,理论上  $R_3$  与  $R_4$  相等,与集电结共同承担 0.35 V,等效电阻为 70.00  $\Omega$ ,经过调试最终取  $R_3 = R_4 = 10.00$   $\Omega$ 。又因为最小静态工作点  $V_{DS} = 3.00$  V,故  $V_D = 3.35$  V。 $R_1, R_2$  的计算公式为:

$$R_1 = R_2 = \frac{12.00 \text{ V} - 3.35 \text{ V}}{5.00 \text{ mA}} = 1.73 \text{ k}\Omega \quad (11)$$

并联的 3.30 k $\Omega$  贴片电阻可使电路在 JFET 放大区建立阶段承受更大的电流。考虑到 JFET 内部电阻的差异,串联 100  $\Omega$  滑动变阻器对电路微调,可使 IF3601 的管压降  $V_{DS}$  稳定在 3.00 V。

JFET 的交流参数与静态工作点密切相关,稳定的静态工作点可使 JFET 发挥最佳的性能。利用多分立电流源供电方案设计的差分电路将 JFET 内部的参数差异转变为

外部的静态工作点设置问题,大大简化了 JFET 器件的选型工作,也不需要使用时示仪对器件的转移特性曲线进行测试。

静态工作点设置完毕后,需对电路进行交流通路分析,计算其交流特性。因两侧电路对称,对一侧 JFET 进行交流通路分析即可。图 6(a)和(b)分别为单侧 JFET 交流通路及其小信号模型。其中  $T_1$  与  $R_3$  组成的恒流源等效为  $R_1$  分析。

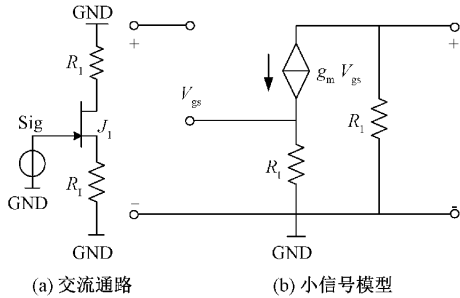


图 6 不含旁路电容单侧 JFET 电路

不添加旁路电路  $C_1$  和  $C_2$  时,单侧 JFET 放大电路为共源放大电路,其放大倍数为:

$$A_v = -\frac{g_m R_1}{1 + g_m (R_3 + R_1)} \quad (12)$$

其中,  $g_m$  为 IF3601 的跨导,共源放大电路的放大倍数受  $R_1$  与  $(R_3 + R_1)$  的比值约束。对于由恒流源供电的共源放大电路而言,理想电流源内阻无穷大,式(12)结果趋于 0,故无法对输入交流信号稳定放大。为给 JFET 提供稳定静态工作电流,需充分利用恒流源。通过旁路电容可消除恒流源内阻在交流通路中造成的放大倍数钳制。改进后单侧 JFET 交流回路与小信号模型分别如图 7(a)和(b)所示。

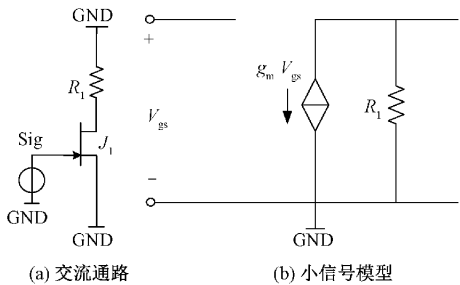


图 7 含旁路电容的单侧 JFET 电路

根据小信号模型,第一级放大电路的传递函数如式(13)所示:

$$H_1(\omega) = -g_m R_1 \quad (13)$$

其中,  $g_m$  为 IF3601 的交流跨导,交流跨导的估算公式如下:

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \right|_{v_{DS}} \quad (14)$$

由式(14)可看出,  $g_m$  受静态工作点  $V_{DS}$  的影响。  $R_1$  的改变会影响  $V_{DS}$  大小,  $R_1$  增加导致  $V_D$  下降,  $V_{DS}$  减小。

此时靠近漏极的内部耗尽层夹断长度减小,对交流信号的导通能力下降,使  $g_m$  数值下降,即  $g_m$  与  $R_1$  成反比关系。在消除 JFET 参数差异的同时保证第一级放大电路放大倍数稳定。

实际电路中,  $C_1, C_2$  的容值与器件特性对电路放大能力影响颇深,否则不能应用范围内视为短路。如表 3 所示,  $C_1, C_2$  分别由两个  $10.00 \mu\text{F}$  CCB 电容并联而成,CCB 电容特性更稳定,因频率与温度导致的容值变化更小,能维持 JFET 共源放大电路的稳定。

二级放大电路为低噪声集成运放构成的求差放大电路,在同相输入端与反向输入端分别串入电容  $C_3, C_4$  以消除一级 JFET 放大电路的直流偏置,其传递函数如式(15)所示。

$$H_2(\omega) = \frac{j\omega R_9 C_3}{1 + j\omega R_7 C_3} \quad (15)$$

其中,  $R_7 = R_8, R_9 = R_{10}, R_9/R_7$  与  $R_{10}/R_8$  决定二级放大电路的放大倍数。

整个基于多分立电流源的 JFET 差分放大电路的传递函数如式(16)所示:

$$H(\omega) = H_1(\omega) H_2(\omega) = \frac{j\omega R_9 C_3 g_m R_1}{1 + j\omega R_7 C_3} \quad (16)$$

综上,为了消除 JFET 器件参数离散性的影响,本文提出了多分立电流源的 JFET 差分放大技术,确保每一个 JFET 支路的静态工作点的稳定可靠,并通过交直流小信号模型分析了传递函数。

## 2 多分立电流源低噪声放大电路的仿真

为了验证本文提出的多分立电流源 JFET 差分放大技术的有效性,采用 LTspice 软件对该电路的信号放大性能和噪声特性进行仿真分析。LTspice 是一款由 ADI 公司开发的高性能开源 SPICE 仿真软件,其中具有丰富的电路模型,除进行信号仿真外,还可以配合器件模型进行噪声仿真<sup>[20]</sup>。

首先,针对多分立源低噪声放大电路的放大功能进行电路仿真,验证第一级 JFET 放大电路的静态电路特性与动态电路特性。针对电路分析的器件参数,结合上一章节提出的电路原理图和具体参数,搭建第一级放大电路,其静态工作点如表 4 所示。

表 4 LTspice 仿真静态工作点

参数	数值
$V_{DS}$	2.63 V
$V_{GS}$	-1.39 V
$I_D$	4.68 mA

静态工作点设置完毕后,在输入端信号源施加幅值为 40 mV,频率为 1 kHz 的差分信号,在第一级放大电路的输

出端检测两路输出的单端信号及差分信号,效果如图 8 所示。

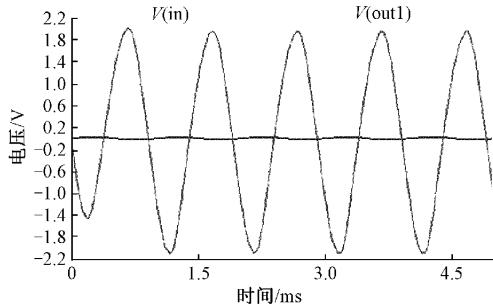


图 8 LTspice 一级电路放大仿真

经 LTspice 软件仿真,基于多分立电流源低噪声放大电路可完整实现对信号的放大,且参数设置与理论分析相符,放大倍数 40.00 dB。进一步利用 LTspice 内的噪声仿真功能,获得电路输出噪声仿真,结合 MATLAB 中 LTspice2Matlab 组件分析电路等效输入噪声。

设置 LTspice 进行 noise 分析,得到如图 9 所示的放大电路噪声输出特性。LTspice 无法直接计算等效输入噪声曲线,需结合电路输出噪声曲线与传递函数,求取准确的等效输入噪声。对于分立电流源共源放大电路而言,第一级放大电路因旁路电容影响,输出信号的仿真放大倍数为 40.00 dB。跨导  $g_m$  与静态工作点相关,但缺乏 IF3601 的输入特性曲线,无法直接计算  $g_m$ ,不能结合  $R_1, R_2$  阻值直接计算理论放大倍数。考虑到第一级放大电路利用独立电流源技术稳定静态工作点,  $g_m$  与  $R_1, R_2$  为常量,在旁路电容影响下可忽略频率特性对第一级放大电路的影响,其放大倍数也为常量,故直接测试第一级放大电路的放大倍数,与二级差分电路的传递函数结合,计算电路整体传递函数如图 10 所示。

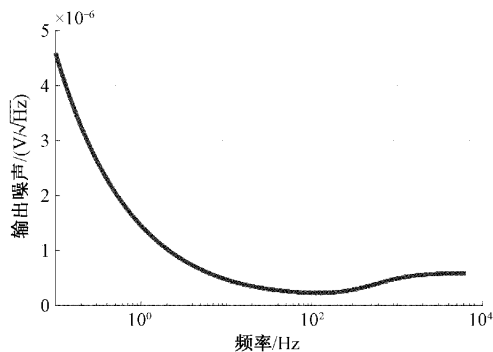


图 9 LTspice 电路输出噪声仿真

利用 LTspice2Matlab 插件,在 MATLAB 中读取 LTspice 仿真数据图,结合传递函数计算得到图 11 所示的等效输入噪声曲线。观察等效输入噪声曲线可知,多分立电流源低噪声放大电路具有极佳的噪声特性,在 TEM 信号频带(10.00 Hz~100.00 kHz)范围内,噪声水平绝大多

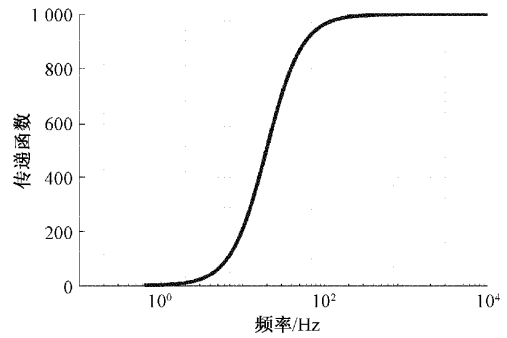


图 10 系统整体传递函数

数低于  $1.00 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。在 10.00 Hz 以下低频段,虽受  $1/f$  噪声干扰严重<sup>[21]</sup>,等效输入噪声较高,在 10.00 Hz 以上的平坦区噪声约为  $0.60 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,与理论计算相符。

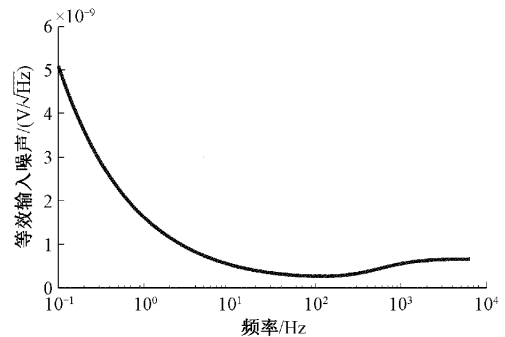


图 11 LTspice 电路仿真等效输入噪声

LTspice 仿真结果从放大能力与噪声水平两方面验证了方案的可行性,但在低频段对噪声的仿真结果过于理想且未能提现 IF3601 参数离散性差异。原因在于 LTspice 对 IF3601 的内部参数  $I_{DSS}, V_{GS(OFF)}$  以及  $g_m$  均基于数据手册中常量进行理想曲线建模,未考虑管间参数离散性与器件参数的实际变化。通过仿真实验,验证了基于分立电流源的低噪声 JFET 差分放大电路工作稳定性,兼具较低等效输入噪声,满足预期设计需求。

### 3 多分立电流源低噪声放大电路性能测试

为了进一步验证本文提出的多分立电流源低噪声 JFET 差分放大技术性能,弥补 LTspice 仿真的不足,本文设计了如图 12 所示的实际放大电路,进行方案验证。

在输入端利用 Tektronix AFG3102C 信号发生器输出两路信号,其幅值为 20.00 mV,频率为 1.00 kHz,相位差  $180^\circ$ ,构成差分输入信号。经电路放大后,利用罗格施瓦茨 RTA4004 示波器检测其输出信号如图 13 所示,曲线①为支路  $J_1$  端输出的信号、曲线②曲线为放大支路  $J_2$  端输出的信号、曲线③为二级放大端输出信号(由于超过  $\pm 12.00 \text{ V}$ ,所以部分饱和)。实验结果表明一级 JFET 差分放大可靠有效,放大倍数为 103 倍,约等于 40.00 dB,与理论仿真一致,证明了实际电路能够工作在稳定状态,可有效放大。

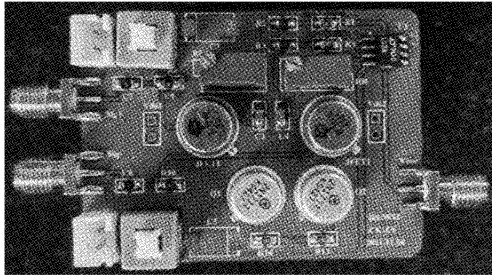


图 12 多分立源低噪声 JFET 差分放大电路

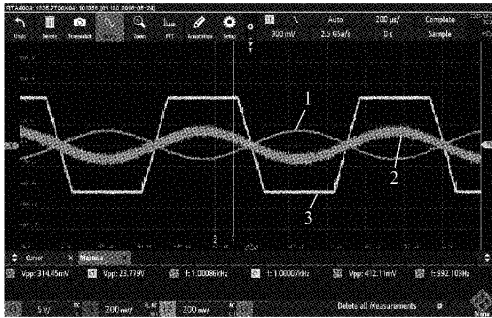


图 13 放大效果测试图

最后,为准确测量放大电路的本底噪声,在外部电磁噪声较小的屏蔽室内利用 Agilent 35670A 动态信号分析仪测量输出噪声。考虑到电磁屏蔽室内部照明电路与供电电路带来的电磁干扰,以及 TEM 仪器探测频段的需要,对 Agilent 35670A 的测试方案进行修正。在 6.40 k 频段范围内进行 1 600 点测量,以在测试量程内具有最大的分辨率;另外,Agilent 35670A 在 TEM 关注的几 Hz 到几十 Hz 频带的等效输入噪声从几到十几  $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。放大器的输入噪声经过放大后输出等效噪声达到几百  $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,甚至更高,因此动态信号分析仪内部的本底噪声可忽略不计,满足测量要求。同时,测量时要采用多次叠加平均,多次叠加平均可消除屏蔽室内部电磁干扰,但电路底噪从本质上是一种随机噪声,叠加次数过多将导致结果的失真影响测试结果。经过多次实验,经过 20 次叠加后的数据既可降低工频噪声对实验结果的影响,又避免叠加过多使底噪功率谱失真。

采用上述测试方法,对多分立电流源低噪声 JFET 差分放大电路测试,其等效输入噪声如图 14 所示。多分立电流源低噪声 JFET 差分放大电路的等效输入噪声,在 100 Hz 以上频段处于  $1.00 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  以下,1.10 kHz 时噪声为  $0.51 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,与理论计算和仿真结果吻合,验证了本文所提出的多分立电流源 JFET 差分放大电路的低噪声特性。另外,测量结果在噪声低频段与高频段与仿真有所差异,其原因在于动态信号分析仪对低频段信号点数少采集较慢,且电磁屏蔽室并非理想无噪环境,对低频段环境噪声抑制能力较差。

总体而言,在所需频段测量的噪声值在均值与仿真曲

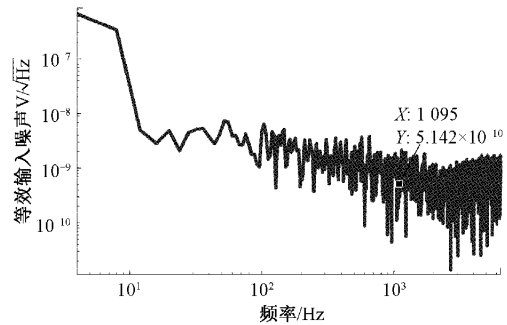


图 14 4 Hz~6.4 kHz 等效输入噪声实测图

线吻合。证明多分立电流源低噪声 JFET 差分放大技术在一定程度上消除了 JFET 离散性对电路的影响。所设计的多分立源低噪声 JFET 差分放大电路具有良好的噪声特性,十分接近 IF3601 数据手册中最小噪声静态工作点的噪声指标,可以为低噪声放大电路设计提供参考。

## 4 结 论

针对由于同一型号 JFET 器件间参数差异较大,多个 JFET 器件差分并联放大时难以匹配工作,无法获得理想的放大效果的问题,提出了一种基于分立电流源的 JFET 差分放大电路结构,设置外电路参数消除 JFET 自身参数差异,降低了对 JFET 特性的要求,节约了 JFET 测试选管的时间成本与硬件成本。经仿真与实测,该电路有着优秀的噪声特性,实测噪声最低可达  $0.51 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。将多分立电流源低噪声放大电路运用于城市小尺寸 TEM 系统,能有效降低电路本底噪声对仪器信号分辨率的影响,提升探测深度。

## 参考文献

- [1] CHEN J, PI S, ZHANG Y, et al. Weak coupling technology with non-coplanar bucking coil in a small-loop transient electromagnetic system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69 (3): 3151-3160.
- [2] SUN Y, HUANG S, ZHANG Y, et al. An efficient preprocessing method to suppress power harmonic noise for urban towed transient electromagnetic measurement data [J]. Measurement, 2021, 186:110171.
- [3] LIN J, CHEN J, ZHANG Y. Rapid and high-resolution detection of urban underground space using transient electromagnetic method [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 18(4): 2622-2631.
- [4] 林君, 贾文枫, 皮帅, 等. 小尺寸 TEM 非共面偏心自补偿零耦合收发技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2020(8):150-159.

- [5] HUANG S, WANG S, SUN Y, et al. Efficient processing power harmonic noise with fluctuation frequency in urban transient electromagnetic surveys[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(4):044501.
- [6] 林君, 符磊, 王言章, 等. 接地电性源空地瞬变电磁探测传感器的研制[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2014(3): 888-894.
- [7] CHEN C, LIU F, LIN J, et al. An optimized air-core coil sensor with a magnetic flux compensation structure suitable to the helicopter TEM system[J]. *Sensors*, 2016, 16(4):508.
- [8] LIN T, CHEN W, DU W, et al. Signal acquisition module design for multi-channel surface magnetic resonance sounding system[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(11):3.
- [9] CANNATA G, SCANDURRA G, CIOFI C. An ultralow noise preamplifier for low frequency noise measurements[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2009, 80(11):658.
- [10] SCANDURRA G, CIOFI C, CANNATA G. Differential ultra low noise amplifier for low frequency noise measurements [J]. *AIP Advances*, 2011, 1(2):022144.
- [11] LIU K, ZHU W, YAN B, et al. Ultralow noise preamplifier and optimization method for induction magnetometers [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(6):3293-3300.
- [12] SHI H, WANG Y, LIN J. Optimal design of low-noise induction magnetometer in 1 mHz ~ 10 kHz utilizing paralleled dual-JFET differential pre-amplifier[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(10):3580-3586.
- [13] 王言章, 石佳晴, 时洪宇. 航空 ZTEM 磁传感器调理电路低噪声优化设计[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(9): 187-194.
- [14] 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.
- [15] LEVINZON F A. Measurement of low-frequency noise of modern low-noise junction field effect transistors [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2005, 54(6):2427-2432.
- [16] BARGIE K, BISEWSKI D, ZARBSKI J. Modelling of dynamic properties of silicon carbide junction field-effect transistors(JFETs)[J]. *Energies*, 2020, DOI: 10.3390/en13010187.
- [17] BORBELY E. JFETS: The new frontier, Part 1[J]. *Audio Electronics*, 1999, 5: 26-31.
- [18] SCANDURRA G, GIUSI G, CIOFI C. Single JFET front-end amplifier for low frequency noise measurements with cross correlation-based gain calibration[J]. *Electronics*, 2019, 8(10):1197.
- [19] ZHAO J, ZHANG Y, LEE Y H, et al. Investigation and optimization of low-frequency noise performance in readout electronics of DC superconducting quantum interference device [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(5):1-5.
- [20] SAAD P, HUSSAIN N A, HASHIM H, et al. Simulation of breakdown voltage using LTSpice for boost converter application[C]. *2021 IEEE Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics (RSM), IEEE*, 2021: 42-45.
- [21] LI J, XI Z, CHEN X, et al. Ultralow noise low offset chopper amplifier for induction coil sensor to detect geomagnetic field of 1 mHz to 1 kHz[J]. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 2020, 25(4):497-511.

### 作者简介

李文彬, 高级工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为低噪声放大器、感应式磁传感技术。

E-mail: lwb020431@sina.com

张洋(通信作者), 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为电磁探测技术及仪器。

E-mail: zhangyang19@jlu.edu.cn