

一种用于非屏蔽 SERF 态原子磁强计的电流源设计*

林宏波, 董海峰, 卓超, 宣立峰

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 惯性技术重点实验室
新型惯性仪表与导航系统技术国防重点学科实验室, 北京 100191)

摘要: 设计了一种用于非屏蔽 SERF 态原子磁强计的电流源。利用运算放大器和 MOSFET 构建基本的电流负反馈 V/I 转换电路, 采用高性能元器件降低输出电流纹波, 并通过频率补偿的方法使电路稳定。测试结果表明: 在恒负载的条件下, 电流源的输出范围为 0~500 mA, 纹波电流小于 30.5 μ A, 对应磁场的稳定性优于 10 nT, 满足非屏蔽情况下原子磁强计利用磁补偿制备 SERF 态的要求。

关键词: 电流源; 非屏蔽; 无自旋交换弛豫态; 原子磁强计

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1000-9787(2012)12-0083-04

Design of a current source for unshielded atomic magnetometer based on SERF regime*

LIN Hong-bo, DONG Hai-feng, ZHUO Chao, XUAN Li-feng

(Science and Technology on Inertial Laboratory, Fundamental Science on Novel Inertial Instrument & Navigation System Technology Laboratory, School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, BeiHang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A current source is proposed for unshielded atomic magnetometer based on spin-exchange relaxation free(SERF) regime. It uses operational amplifier and MOSFET to construct basic V/I change-over circuit, and high-performance components is used to reduce the ripple of output current, then stabilizes the circuit by frequency compensation method. The test results show that the current source output range 0~500 mA, and the ripple current is less than 30.5 μ A when the load is invariable, the stability of corresponding magnetic field is prior to 10 nT, which meets the requirements of SERF regime atomic magnetometer for unshielded applications.

Key words: current source; unshielded; spin-exchange relaxation free(SERF) regime; atomic magnetometer

0 引言

原子磁强计是利用原子自旋对磁场的敏感特性进行磁场测量, 其分辨率主要受限于原子自旋交换弛豫带来的量子噪声^[1]。2002 年以来, 基于无自旋交换弛豫(spin-exchange relaxation free, SERF)态的原子自旋型器件得到了快速的发展^[2,3], 普林斯顿大学 Romalis M V 小组研究基于 SERF 态的超高精度原子磁强计目前已经实现了 0.16 fT/Hz^{0.5} 的磁场分辨率^[4-6], 超过了超导量子干涉仪(SQUID)磁强计, 成为了各种磁探测方式中精度最高的磁强计。

实现 SERF 态的基本条件是原子的拉莫尔进动频率远小于原子自旋交换弛豫碰撞频率^[7]。这就要求原子气室工作在 10 nT 以下的微弱磁场下。因此, 目前超高精度原子磁强计的应用研究主要集中在脑磁探测、基本物理定理

验证^[8]、考古学和材料学等被测磁场微弱且可屏蔽的场合。但在很多磁场探测应用中, 被测磁场是不可屏蔽的, 比如: 地磁导航、资源勘探和地质学中地磁场图的测绘^[9]、反潜中水下异常场的探测等。

为了充分发挥 SERF 态原子磁强计超高精度的特性, 实现非屏蔽磁场的超高精度检测, 必须通过磁补偿的方法, 抵消外界环境磁场, 使原子气室工作在零磁场附近, 同时利用磁补偿信号进行外磁场测量。目前, 有 2 种非屏蔽 SERF 态原子磁强计设计原理, 其中, 第一种如图 1 所示, 采用单光束分频调制的方法^[10]; 第二种如图 2 所示, 采用双光束交叉调制的方法^[11], 2 种方法均可测量 3 个正交方向的磁场分量, 用于反馈补偿。

但是, 这 2 种方法制备出的 SERF 态线宽还远没达到

收稿日期: 2012-05-17

* 基金项目: 国防科研计划资助项目(B2120110002); 国家自然科学基金资助项目(61074171, 61121003, 60825305); 北京市自然科学基金资助项目(3122025); 国家重大科学研究计划资助项目(2012CB934104)

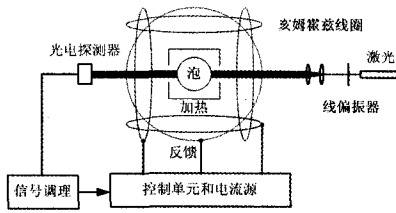


图1 单光束分频调制示意图

Fig 1 Diagram of single-beam frequency division modulation

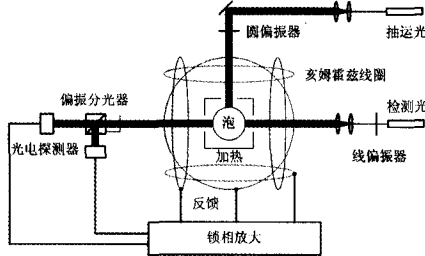


图2 双光束交叉调制示意图

Fig 2 Diagram of dual-beam crossing modulation

磁屏蔽的水平,其中一个非常重要的原因是在反馈线圈中存在由电流波动造成的磁噪声^[12]。因此,在非屏蔽 SERF 态原子磁强计的研究中,大电流输出、低纹波的电流源设计是关键,对压缩原子 SERF 态线宽、提高 SERF 态的性能和提高磁强计的检测精度具有非常重要的意义。

制备 SERF 态需在 10 nT 以下的微弱磁场中,地磁场强度大约为 50 000 nT 左右。因此,结合磁补偿精度和范围,所设计电流源的电流输出稳定度(最大输出电流纹波与输出电流范围之比)需优于 0.02%。从电流输出的角度看,如果电流输出过高,电子器件会产生较高的温升,造成器件参数的漂移,使得电流源的输入-输出线性特性恶化;反之,电流输出过低,电路容易受到噪声和扰动的影响,使得电流输出稳定度下降。实验结果表明:电流输出为 0~500 mA,最大输出纹波电流小于 0.1 mA 是适中的,可克服上述 2 个缺点。此外,为了能够补偿掉 50 Hz 及其倍频的磁场扰动,电流源还需要有较高的带宽。

1 电流源的设计实现

1.1 电流源实现原理

图3所示为电流源原理图,其中 R_L 为负载电阻, R_{sample} 为采样电阻。理想状况下根据运算放大器的虚短原则,使得 $V_s = V_{in}$,再根据运放的虚断原则,输出电流 $I_{out} = V_{in} / R_{sample}$,构成电流源^[13]。

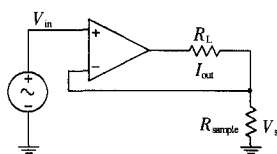


图3 电流源基本原理图

Fig 3 Fundamental principle diagram of current source

由于运放的带负载能力有限,所以,一般使用达林顿结构的三极管来放大电流^[14],如图4所示。但是,当电流源长期工作在大电流下,达林顿管通过大电流时温度升高, β 值会增大,会导致 I_{out} 增大^[15],造成电压输入和电流输出线性特性恶化;而且运放的输出电流也会很大,这将导致运放温度升高,造成运放输入偏置电压的漂移,使得电流源的纹波变大。

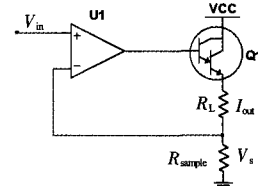


图4 带放大管的电流源

Fig 4 Current source with amplifier component

对上述问题常用的解决方法是加入数控模块,如图5所示,数控模块主要由 MCU(单片机)、A/D 和 D/A 组成,由 A/D 采样输出电流值到微处理器,微处理器再将电流采样值和给定值做比较,采取某种控制策略使得 D/A 输出一个电压值到电流源模块,通过这样的反馈作用,数控电流源可达到较高的电流输出精度和较低的电流输出纹波^[16,17]。

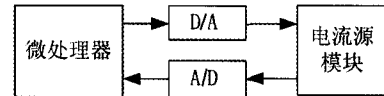


图5 数控电流源框图

Fig 5 Block diagram of digital control current source

但是由于数控电流源带宽低,适合在固定电流输出、变负载的场合中使用,因此,对于 SERF 态原子磁强计要求的高精度磁补偿闭环反馈系统,数控电流源无法满足要求。

1.2 电流源设计

为了兼顾电流源设计的输出范围、输出稳定性和带宽要求,本文重新设计了一种纯模拟电流源。如图6所示,电路由电压跟随、V/I 转换、输入滤波和电源滤波 4 个部分组成。

电压输入信号由高精度的 DA 给定,首先进入 RC 低通滤波,可衰减高频噪声信号;然后进入电压跟随电路,使得电压输入信号和功率器件(MOSFET)之间有个缓冲,起到阻抗变换器的作用,避免了 V/I 转换过程中大电流输出对高精度 DA 的影响。

在 V/I 转换电路中,采用 MOSFET 作为放大管,由于 MOSFET 是电压控制型器件和具有很大的栅源间阻抗,运放只需要提供很小的栅极电流 I_g ,不会造成运放温升过大,影响自身的性能,而且由于栅极电流 I_g 造成的采样误差可以忽略不计($I_g \approx 0, I_d \approx I_s$),所以,采样电阻器上的电压可以准确地反映负载电流大小。根据运算放大器的虚短虚断原则,推导出电流输出关系,如式(1)所示

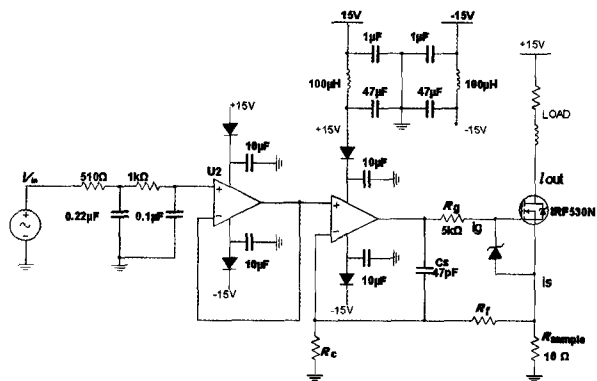


图6 电流源电路

Fig 6 Circuit of current source

$$I_{\text{out}} = \left(1 + \frac{R_f}{R_c}\right) \cdot \frac{V_{\text{in}}}{R_{\text{sample}}} \quad (1)$$

虽然使用 MOSFET 作为放大管有以上等优点,但是由于 MOSFET 存在栅源间输入电容,易引发电路产生自激振荡。所以,在运放输出端和 MOSFET 栅极加入电阻 R_g ,等效为增大运放的输出电阻,减小容性负载对运放的影响;在运放输出端和反向输入端加入前馈电容 C_s ,稳定电路,在电流负反馈回路中加入电阻 $R_e = 20\text{ k}\Omega$, $R_f = 10\text{ k}\Omega$,增加了反馈回路的增益,虽然损失了一些带宽和电流输出精度,但是可使电路更加稳定。此外,由于电流源的负载是亥姆霍兹线圈,为了消除感性负载对电路稳定性的影响,将负载置于反馈回路之外,即电源输入与 MOSFET 漏极之间。

选用温度系数为 $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 的采样电阻, V_{in} 最大为 4.096 V , $R_{\text{sample}} = 10 \Omega$, 根据式(1)可满足最大电流 500 mA 的输出, 并且具有足够的裕量。通过大电流时为了减小温度的影响, 给采样电阻特制了散热板。

选用 OP27 精密运算放大器,它具有非常好的直流特性, V_{os} 最大 $100\ \mu\text{V}$, V_{os} 的温度系数为 $4\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$,而且输出噪声特性好,开环增益高,动态特性好,适合于电流源设计。

电源输入端接 LC 滤波,减小电源纹波对电路的影响。
给运放和 MOSFET 加入二极管起保护作用。

1.3 输出电流纹波分析

理论上无论负载发生怎样的变化,只要输入电压不发生变化,输出电流是不变的。但实际上由于运放、MOSFET和采样电阻并非理想元件,它们的温度特性和电压输入误差将会影响输出电流的稳定性,所以,输出电流的大小并不是只与设定值有关^[18]。图7为V/I转换交流小信号模型,根据这个模型对输出电流的变化进行了分析和量化。

电流的输出纹波是恒量电流源性能的最重要指标之一,由 MOSFET 的交流小信号模型可得

$$\Delta I_{\text{out}} = g_m \cdot \Delta U_{gs} \quad (2)$$

其中, I_{out} 为输出电流, g_m 为 MOSFET 的跨导, U_{gs} 为 MOSFET 栅源电压。

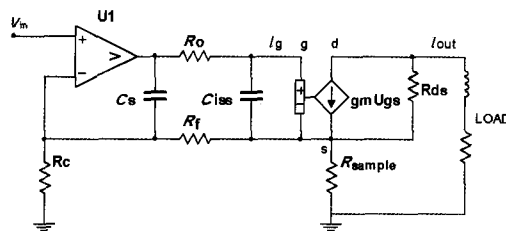


图7 V/I 转换交流小信号模型

Fig 7 AC Small signal model of V/I change over

由于 $I_g \ll I_{out}$, 所以, 忽略 I_g , 利用叠加定理可得

$$U_{gs} = A_{opa} \cdot (V_{in} - I_{out} \cdot R_{sample} \cdot \frac{R_c}{R_c + R_f} + V_{offset}) \quad (3)$$

其中, A_{opa} 为运放开环增益, V_{in} 为输入电压, R_{sample} 为采样电阻, V_{offset} 为运放输入偏置电压, $R_c \gg R_{\text{sample}}$, $R_f \gg R_{\text{sample}}$ 。由式(2)、式(3)可得

$$\begin{aligned}\Delta I_{\text{out}} &\approx \frac{\Delta V_{\text{in}}}{R_{\text{sample}}} \left(1 + \frac{R_f}{R_c}\right) + \frac{\Delta V_{\text{offset}}}{R_{\text{sample}}} \left(1 + \frac{R_f}{R_c}\right) + \frac{I_{\text{out}} \cdot \Delta R_{\text{sample}}}{R_{\text{sample}}} \\ &= \Delta I_{\text{vin}} + \Delta I_{\text{offset}} + \Delta I_{\text{sample}}.\end{aligned}\quad (4)$$

根据式(4)可对电流纹波做具体的量化计算,如下:

1) 电压输入通过 18 位 DA 给定, 电压基准为 4.096 V, DA 的相对误差为 $\pm 2\text{LSB}$, 所以

$$\Delta V_{in} = 4 \times 4.096 / 2^{18} = 63 \mu V,$$

$$\Delta I_{\text{vin}} = \frac{\Delta V_{\text{ip}}}{R_{\text{sample}}} \left(1 + \frac{R_f}{R_c}\right) = 9.5 \mu\text{A} . \quad (5)$$

2) ΔV_{offset} 为 $4 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, 实际测试运放的温度变化最高为 5°C , 那么

$$\Delta I_{\text{offset}} = \frac{\Delta V_{\text{offset}}}{R_{\text{sample}}} \left(1 + \frac{R_f}{R_c}\right) = 3 \mu\text{A} \quad (6)$$

3) 采样电阻器的温漂为 $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 经测试采样电阻器在持续通过 500 mA 的电流时, 通过良好的散热, 温升最大为 6°C , 由采样电阻器温漂 ΔR_{sample} 带来的最大电流变化量为

$$\Delta I_{\text{sample}} = \frac{I_{\text{out}} \Delta R_{\text{sample}}}{R_{\text{sample}}} = \frac{0.5 \times 5 \times 10^{-6} \times 6}{10} = 15 \mu\text{A} . \quad (7)$$

当持续输出大电流(300~500 mA)时,最大的纹波源是温度上升导致的采样电阻器阻值温度漂移,其次为输入电压误差。通过上述分析和计算,电流源纹波的最大理论输出为27.5 μA ,满足设计要求。

2 实验测试

实验测试每次测量 8 min, 采样频率为 10 Hz, 测量次数为 4 800。

图 8 所示为电流输出 370 mA 时采集曲线,从测试结果上看,纹波电流最大不到 $30.5 \mu\text{A}$,与上文的分析相符合。

实验数据如表 1 所示,表中纹波电流为测量的最大值和最小值之差。

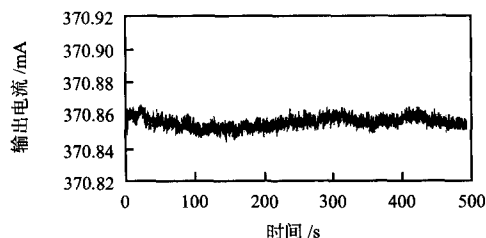


图8 电流输出采集图

Fig 8 Diagram of current output acquisition

表1 电流源测试数据

Tab 1 Test data of current source

输入电压 (mV)	平均电流 (mA)	纹波电流 (μ A)	稳定度 (%)
68	10.104	6.356	0.063
336	51.676	10.568	0.020
603	89.267	14.445	0.016
1140	170.205	19.798	0.012
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
2482	370.857	25.456	0.007
2750	412.515	27.657	0.007
3018	453.126	28.641	0.006
3286	491.112	30.544	0.006

利用 origin 对表 1 中的数据做拟合,结果如图 9 所示,拟合结果

$$I=0.1497V_{in}-0.0818 \quad (8)$$

从拟合结果式(8)上看,非常吻合式(1)的电流输出特性。而且线性好,线性相关系数 $R^2=0.99996$ 。由于运算放大器的输入偏置电压 V_{in} 没有消除等因素,所以,产生了 0.0818 的偏置,但此偏置可在之后的标定中消除,对系统没有太大影响。

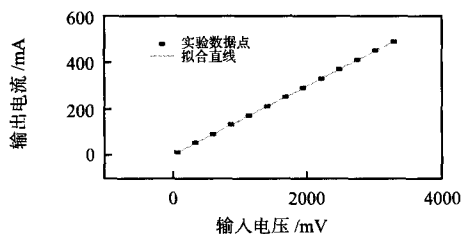


图9 实验数据拟合图

Fig 9 Fitting diagram of experimental data

3 结论

本文介绍了非屏蔽原子磁强计制备 SERF 态的磁补偿原理和提高磁补偿精度的瓶颈,据此,提出了用于磁补偿的电流源设计要求。利用运放和 MOSFET 构建 V/I 转换电路,然后对稳定电路、降低纹波电流等做了优化设计。通过实际测试,最终设计的电流源输出范围可达 0~500 mA,输出电流的纹波最大为 30.5 μ A,等效到反馈线圈中的磁噪声优于 10 nT,满足原子磁强计制备 SERF 态的磁补偿要求。

参考文献:

- [1] Budker D, Romalis M V. Optical magnetometry[J]. Nature Physics, 2007, 3(4): 227-234.
- [2] Dong H, Fang J, Zhou B, et al. Review of atomic MEMS: Driving technologies and challenges[J]. Microsystem Technologies, 2010, 16(10): 1683-1689.
- [3] 董海峰, 房建成, 周斌权, 等. MEMS 原子自旋陀螺气室芯片加工设备与工艺研究[J]. 仪器仪表学报, 2010(11): 2592-2596.
- [4] Kominis I K, Kornack T W, Allred J C, et al. A subfemtotesla multichannel atomic magnetometer[J]. Nature, 2003, 422(6932): 596-599.
- [5] Allred J C, Lyman R N, Kornack T W, et al. High-sensitivity atomic magnetometer unaffected by spin-exchange relaxation[J]. Physical Review Letters, 2002, 89(13): 130801-1-130801-4.
- [6] Romalis M V, Dang H B. Atomic magnetometers for materials characterization[J]. Materials Today, 2011, 14(6): 258-262.
- [7] Happer W, Tam A C. Effect of rapid spin exchange on the magnetic-resonance spectrum of alkali vapors[J]. Physical Review A, 1977, 16(5): 1877-1891.
- [8] Savukov I. Ultra-sensitive optical atomic magnetometers and their applications[M]. Croatia: INTECH, 2010.
- [9] Balogh A. Planetary magnetic field measurements: Missions and instrumentation[J]. Space Science Reviews, 2010, 152(1-4): 23-97.
- [10] Dong H, Fang J, Zhou B, et al. Three-dimensional atomic magnetometry[J]. European Physical Journal: Applied Physics, 2012, 57: 21004.
- [11] Seltzer S, Romalis M. Unshielded three-axis vector operation of a spin-exchange-relaxation-free atomic magnetometer[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85: 4804.
- [12] Acosta V, Ledbetter M, Rochester S, et al. Nonlinear magneto-optical rotation with frequency-modulated light in the geophysical field range[J]. Physical Review A, 2006, 73(5): 053404.
- [13] 秦玲, 张良, 赖青贵, 等. 基于功率运算放大器的恒流源技术研究[J]. 通信电源技术, 2007, 24(1): 43-46.
- [14] 钟乃元, 高飞. 大电流高精度恒流源[J]. 电子测量技术, 2007, 30(9): 176-179.
- [15] 童诗白, 华成英. 模拟电子技术基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 391-394.
- [16] 王少军, 彭喜元, 刘大同. 一种高精度直流电流源设计[C]// 2009 中国仪器仪表与测控技术大会论文集, 2009.
- [17] 王小娟, 丁锋. 基于单片微机控制的数控直流电流源的设计与实现[J]. 仪表技术, 2006(2): 75-76.
- [18] 李宏生, 万德钧. 一种高精度恒流源的设计与分析[J]. 光学·精密工程, 1996, 4(6): 87-94.

作者简介:

林宏波(1988-),男,陕西榆林人,硕士研究生,研究方向为非屏蔽 SERF 态原子磁强计磁补偿。