

微机电系统磁场传感器信号处理电路

陈洁 秦明

(东南大学MEMS教育部重点实验室,南京,210096)

摘要:介绍了一种微机电系统(Micro-electro-mechanical system, MEMS)磁场传感器微弱信号处理电路的设计,该处理电路是MEMS磁场传感器的重要组成部分,该电路由放大电路和滤波电路构成。对设计的处理电路进行模拟分析和实验测试,处理电路性能良好。外接MEMS磁场传感器后对传感器性能进行测试,传感器的电流-电压特性以及磁场-电压特性符合最初的设计要求,灵敏度可以达到14 mV/mT。实验表明该电路对输出信号进行了放大,并有效地抑制了噪声,且有良好的灵敏度。

关键词:放大电路;滤波电路;感生电动势;磁场

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2012)06-0835-05

Signal Processing Circuit of MEMS Magnetic Field Sensor

Chen Jie, Qin Ming

(Key Laboratory of MEMS of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, 210096, China)

Abstract: A design of a micro-electro-mechanical system(MEMS) weak signal processing circuit of magnetic field sensor is described. The processing circuit is an important part of the magnetic field sensor, including an amplifier circuit and a filter circuit. The performance is good in line with the original design requirements through circuit analysis and experimental testing. The current-voltage characteristics and the magnetic field-voltage characteristics of the sensor are verified by experiment with the sensitivity of 14 mV/mT. The experiments show that the signal is effectively amplified, the noise is suppressed and the circuit has good sensitivity.

Key words: amplifier circuit; filter circuit; induced electro motive force; magnetic field

磁场传感器发展迅速,其广泛应用于消费、工业、军事等领域^[1],尤其是汽车领域^[2]。20世纪90年代以来,微电子机械技术的发展为磁场传感器制造提供了更多的选择,并且由于增加了可动结构,使得微机电系统(Micro-electro-mechanical system, MEMS)传感器具有了多种结构形式,例如利用洛伦兹力驱动MEMS微结构扭转^[3-4]、弯曲^[5-6]和平动^[7-9]等,磁场强度及方向则采用压阻、压电、频率或光学测量的方法进行表征。与大多数MEMS传感器相似,传感信号通常都比较微弱^[3],需要进行信号的有效放大,并且需要充分考虑噪声的问题^[10-13],采用载波信号加低通滤波或者放大信号加低通滤波来实

现。所以,传感器的微弱信号检测是一个重要的问题。为便于将来实现MEMS磁场传感器与信号处理电路的集成,检测电路还必须具备以下特点:灵敏度高、复杂性低、所用元件便于集成制造等。

本文所介绍的MEMS磁场传感器信号处理电路针对作者所研究的MEMS磁场传感器^[14]进行设计,传感器以谐振方式工作,谐振频率约为15.3 kHz,传感器输出信号形式为交流电压,输出信号幅度微伏量级。信号检测电路由放大器和滤波器组成。测试结果表明,设计的信号处理电路对于磁场传感器输出的信号进行了有效放大,具备了良好的噪声抑制特性。

基金项目:国家自然科学基金(61201032)资助项目。

收稿日期: 2012-06-29; **修订日期:** 2012-07-24

通讯作者: 陈洁,女,讲师,1978年出生, E-mail: seuc@seu.edu.cn。

1 MEMS 磁场传感器与信号

本文所针对的MEMS 磁场传感器主要由U型梁构成,如图1所示,在梁上制作金属导线。当金属导线中通过电流时,在磁场作用下产生洛伦兹力,驱动梁运动,当激励电流为交流且电流频率与梁的共振频率一致时,发生谐振。另一方面,在磁场中运动的金属线将产生感生电动势,测量该感生电动势即可以对磁场进行传感。显然,磁场强度不同时,或者激励电流幅值不同时,传感器受力不同,其振动幅度以及由振动所产生的感生电动势不同。

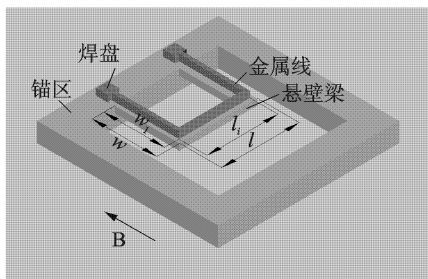


图1 谐振结构磁场传感器

在激励信号的作用下,顶端的上下振动将切割磁力线,估算产生感应电动势为

$$\epsilon = Blv = B \times 1.99 \times 10^{-3} \times 0.046 = 9.15 \times 10^{-5} \times B(\text{V}) \quad (1)$$

假设 $B=100 \text{ mT}$ 时, $\epsilon=9.15 \mu\text{V}$,所以得到的磁场传感器输出所得到的感生电动势为微伏量级,如图2所示,输出很小,所以需要加上相应的微弱信号处理电路。

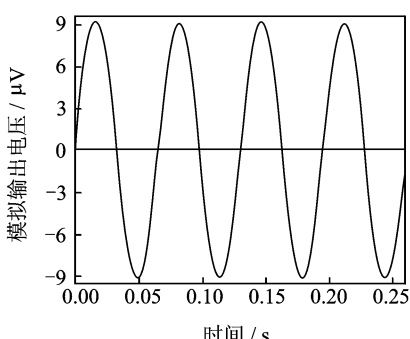


图2 传感器的模拟输出电压

2 传感信号检测电路

完整的信号链如图3所示。磁场传感器在磁场和激励电流的驱动下产生电压输出,放大电路将信号放大到足以有效处理的幅度,滤波电路则完成有效信号的检出。因为MEMS结构的振动不仅仅是

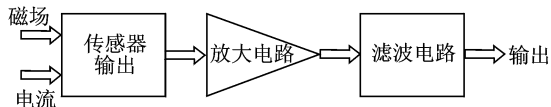


图3 信号检测电路简图

单一频率,通常存在多个振动模态,所以,这里的滤波电路除了滤除噪声外,还具有对其他模态振动信号的输出抑制作用。

本文选用OPA627作为前置放大电路中低噪声运放,放大电路主要采用3个OPA627AU构成差放电路,一个OPA627AU构成另一级放大,构成信号放大电路,如图4所示。电路中的各个电阻参数分别如下: $R_1=R_4=R_5=R_8=1 \text{ k}\Omega$, $R_2=R_3=5 \text{ k}\Omega$, $R_6=R_7=R_9=10 \text{ k}\Omega$ 。将电阻参数代入得到总的放大倍数

$$A_v = \frac{R_6}{R_4} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) \frac{R_9}{R_8} = \frac{10}{1} \times \left(1 + \frac{2 \times 5}{1} \right) \times \frac{10}{1} \quad (2)$$

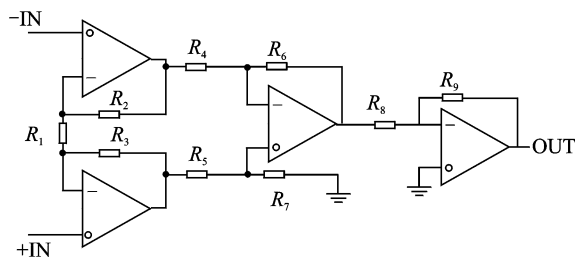


图4 三级放大电路图

信号检测电路常常在放大电路后接上相应的滤波电路,对信号有选择的读取。磁场传感器的处理电路中只关心在某一谐振频率点附近的输出信号,所以采用带通滤波器来实现对信号的选取。选用的滤波器MAX275是MAXIM公司推出的基于状态可调结构的一款连续时间模拟集成有源滤波器,片内硬件由8个运算放大器及若干电阻电容组成。每4个运算放大器构成一个二阶节,如图5所示,每个二阶节的中心频率、转折频率、品质因数和放大倍数都由4个外部电阻确定,不需外接电容。当用于低通滤波时用LPO作为输出,当用于带通滤波时用BPO作为输出。二阶节的中心频率 f_0 , Q 值及放大倍数由外接电阻 R_1, R_2, R_3, R_4 决定。

按照图1所示的传感器结构,模拟得到所要求中心频率为 16 kHz ,那么 3 dB 带宽 $BW=900 \text{ Hz}$, $Q=17.78$, $H_0=23.3$,因而最终确定电阻参数为 $R_2=124.9 \text{ k}\Omega$, $R_1=119.68 \text{ k}\Omega$, $R_3=469.8 \text{ k}\Omega$,

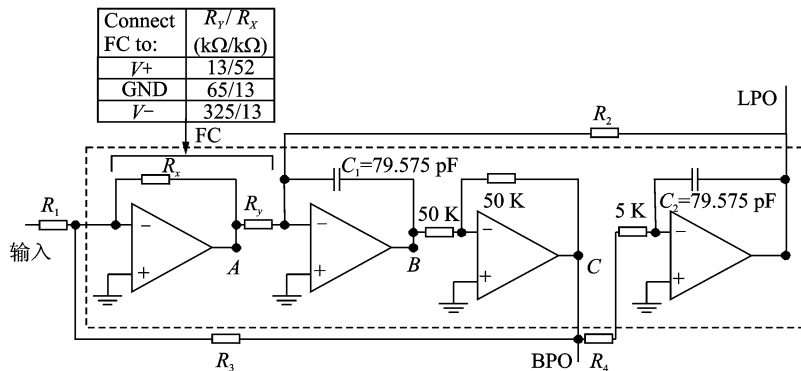


图5 Max275 单元中的二阶节结构

$R_1=20.13\text{ k}\Omega$,如果中心频率改变,改变相应的电阻参数即可,电阻阻值取标准阻值,最后使用的为 $R_2=124.9\text{ k}\Omega, R_3=119.68\text{ k}\Omega, R_4=470\text{ k}\Omega, R_5=20\text{ k}\Omega$ 。

3 电路仿真

按照所设计的电路,对传感器输出电路进行仿真。使用OPA627的宏模型,采用Pspice软件,对图4中的单级放大电路的性能进行仿真,使用 $\pm 5\text{ V}$ 电压源。采用的三级放大电路AC仿真结果如图6所示,图中数据表明放大100倍以后,运放的带宽减小到881 kHz,还是远远大于信号频率,可以满足要求。

对三级放大的电路进行Noise仿真,如图7所示。

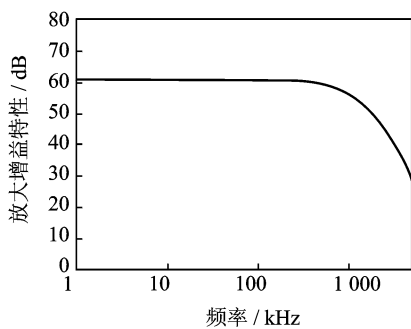


图6 三级放大交流仿真图

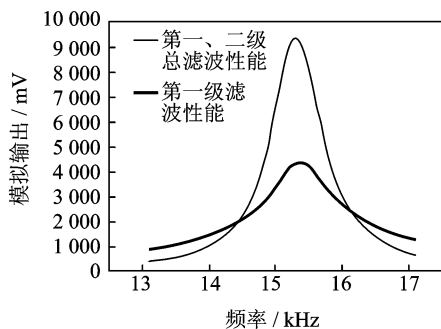


图8 一级与两级带通滤波器仿真曲线对比图

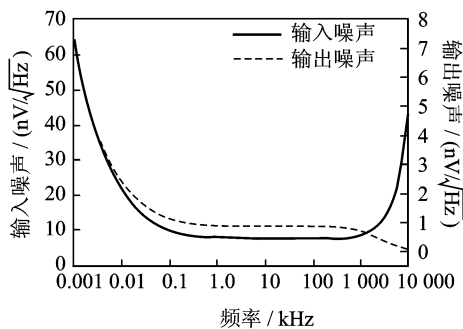


图7 三极放大电路输入输出噪声谱密度

图中数据显示,宽频等效噪声电压谱为 $7.8\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$,该噪声包含电阻的热噪声和运放的宽频噪声。转折频率小于1 kHz,即在此频率以上, $1/f$ 噪声的影响远远小于热噪声,可以忽略不计。由于后面两级的噪声折合到输入端时,需要除以前级的增益,对于第二级放大器及电阻产生的噪声需要除以11,第三级放大器及电阻产生的噪声需要除以110,折合到输入端,故后级噪声的影响不是很明显。可见低噪声放大电路最关键的是处理好输入级的噪声,尽量使其减到最小。

按照所设计的电阻参数,对滤波电路进行仿真,结果如图8所示, V_1 为第一级滤波器的输出, -3 dB 带宽约为1.5 kHz, V_2 为第二级滤波器的输出, -3 dB 带宽为0.9 kHz。可见,经过量级滤波器级联后, Q 值变大了。

4 MEMS 磁场传感器电路性能测试

对放大电路性能进行测试,图9是放大电路的增益频率特性,可以看出在高频范围的频率特性都是平缓地衰减,没有发生凸峰。

在输入短路的情况下,用有效值型交流电压表测量前置放大器的输出。测得输出噪声有效值为 3.17 mV 。由于增益不同,输出噪声会不同,所以不

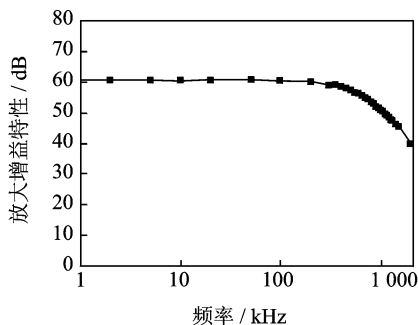


图9 放大器差动增益-频率特性

能对增益不同的放大器进行比较,一般是通过输入换算来表现噪声的。电路输入短路时的输出噪声有效值为 3.17 mV ,那么换算到输入端,输入参考噪声有效值为 $3.17 \mu\text{V}$ 。

图10为滤波器测试曲线,电阻参数取值如下:

BPF1: $R_2=130.7 \text{ k}\Omega$, $R_4=125.7 \text{ k}\Omega$, $R_3=470 \text{ k}\Omega$, $R_1=20 \text{ k}\Omega$ 。

BPF2: $R_2=130.7 \text{ k}\Omega$, $R_4=125.7 \text{ k}\Omega$, $R_3=470 \text{ k}\Omega$, $R_1=20 \text{ k}\Omega$ 。

从图10中可以看出,BPF1和BPF2的曲线基本重合,只存在细微的差别。中心频率 $f_{01}=15.4 \text{ kHz}$,当 H_0 降低到峰值的 0.707 倍时,两个频率为 $f_{11}=14.9 \text{ kHz}$, $f_{21}=15.85 \text{ kHz}$,可算得 $\text{BW}=0.95 \text{ kHz}$, $Q=16.2$ 。 $f_{02}=15.35 \text{ kHz}$,当降低到峰值的 0.707 倍时,两个频率为 $f_{12}=14.95 \text{ kHz}$, $f_{22}=15.85 \text{ kHz}$,可算得 $\text{BW}=0.9 \text{ kHz}$, $Q=17.05$ 。与设计中心频率 15.3 kHz 有 1% 的误差,可以接受。这是由于芯片内集成的电容可能有误差引起。

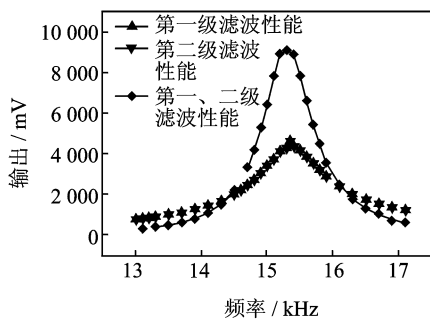


图10 滤波器特性测试

从曲线及数据可得出 3 dB 带宽 $\text{BW}_1=0.95 \text{ kHz}$, $\text{BW}_2=0.9 \text{ kHz}$ 。由公式 $Q=f_0/\text{BW}$,求得 $Q_1=16.2$, $Q_2=17.05$ 。 Q 值设计值为 20 ,可见 Q 值的误差比较大,这也是由于系统内部集成的电阻及电容的误差所引起,需要进行调整参数达到设计值。不过,两级BPF级联之后的带宽 $\text{BW}=0.6 \text{ kHz}$, $Q_c=$

25.5。基本可以达到设计目标。因此直接使用以上所述各参数。

第一级的增益测试结果为 $H_{01}=23.5$,第二级增益测试结果为 $H_{02}=23.45$ 。两级级联之后的增益为 $H_0=935$ 。增益结果比设计值略为偏大(设计每级增益为 23.3)。本文对增益没有精确要求,因此可以接受该偏差。

传感器结构中的金属线,其先后用于U型梁的激励和检测。金属线首先加上正弦电流,此时由于在磁场中受到洛伦兹力的作用,梁产生振动;然后将此电流断开,由于梁在谐振频率点振动,结构仍然处于振动状态,此时在磁场中产生的感生电动势即为传感器的输出信号。

图11说明了结构在磁场作用下的输出电压波形与磁场的关系。从图11中可看出,电流分别为 6 mA 和 10 mA 情况下,输出的感生电动势随磁场的增大而增加,基本成二次曲线的关系,与理论趋势相吻合,并且可看出随着电流的增加灵敏度也提高了,输出信号放大后实验所得到的最大灵敏度在磁场为 29 mT 的位置,其值为 14 mV/mT 。图12给出了输出感生电动势与输入电流的变化曲线,当磁场强度固定为 88 mT 时,电流从 2 mA 逐渐增加到 16 mA ,可看出随着电流不断增加,感生电动势的输出也随着相应变大,基本成线性关系,与放大相应倍数的模拟结果对比,最大误差小于 5% 。

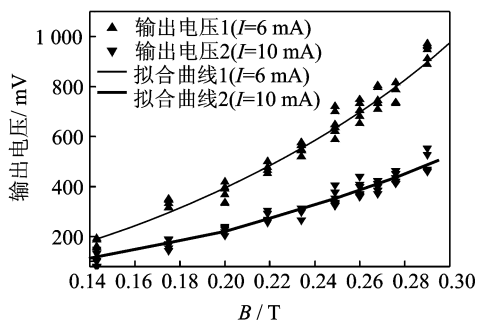


图11 输出电压与磁场的关系

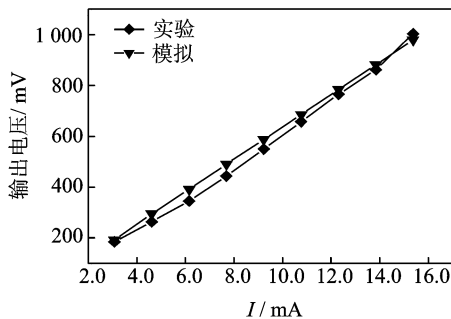


图12 输出电压与激励电流关系

5 结束语

本文针对MEMS磁场传感器设计了微弱信号测试电路,从U型梁结构磁场传感器测试结果可以看出,所得到的振动幅度随着所加的电压(电流)的增加而增加,基本成线性关系,感生电动势的输出与电压的变化成二次曲线的关系,所能够测量的灵敏度值为14 mV/mT,基本达到了预期的结果。该电路结构简单,有效地抑制了噪声,有良好的灵敏度。

参考文献:

- [1] Lenz J E. A review of magnetic sensors[J]. Proceedings of the IEEE, 1990, 78(6): 973-989.
- [2] 施云波. 汽车是磁传感器最大应用市场[N]. 中国电子报, 2010-01-26.
- [3] Kang J W, Guckel H, Ahn Y. Amplitude detecting micromechanical resonating beam magnetometer [C]//The 11th IEEE International Conference on Micro-Electro-Mechanical Systems. Heidelberg, Germany: IEEE Press, 1998: 372-377.
- [4] Baglio S, Latorre L, Nouet P. Resonant magnetic field microsensors in standard CMOS technology [C]//Instrumentation and Measurement Technology Conference. Venice: IEEE Press, 1999: 452-457.
- [5] Beroulle V, Bertrand Y. Monolithic piezoresistive CMOS magnetic field sensors[J]. Sensors and Actuators A, 2003, 103(1): 23-32.
- [6] Dumas N, Azais F. On-chip electro-thermal stimulus generation for a MEMS-based magnetic field sensor [C]//Proceedings of the 23rd IEEE VLSI Test Symposium. Palm Springs, CA, USA: IEEE Press, 2005: 213-218.
- [7] Bahreyni B, Shafai C. A resonant micromachined magnetic field sensor [J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(9): 1326-1334.
- [8] Brugger S, Paul O. Resonant magnetic microsensor with μT resolution [C]//Proceedings of the IEEE 21st Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Tucson, USA: IEEE Press, 2008: 944-947.
- [9] Brugger S, Paul O. Field-concentrator-based resonant magnetic sensor with integrated planar coils [J]. Journal of Microelectro mechanical Systems. 2009, 18(6): 1432-1443.
- [10] Yabukami S, Suzuki T, Ajiro N, et al. A high frequency carrier-type magnetic field sensor using carrier suppressing circuit [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(4): 2019-2021.
- [11] Baschiroto A, Dallago E, Malcovati P, et al. Development and comparative analysis of fluxgate magnetic sensor structures in PCB technology [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(6): 1670-1680.
- [12] Xu Fengyu, Wang Xingsong, Wu Hongtao. Inspection method of cable-stayed bridge using magnetic flux leakage detection: principle, sensor design, and signal processing [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26 (3): 661-669.
- [13] Ferri M, Surano A, Rossini A. Low-voltage fluxgate magnetic current sensor interface circuit with digital output for portable applications [C]//Proceedings of the 8th IEEE Conference on Sensors. Christchurch, Newzeland: IEEE Press, 2009. 78-82.
- [14] 陈洁, 秦明, 黄庆安. MEMS 磁场传感器的设计及测试 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2011, 41(5): 929-933.
Chen Jie, Qin Ming, Huang Qingan. Design and experiment of MEMS magnetic sensor [J]. Journal of southeast University: Natural Science Edition, 2011, 41(5): 929-933.