强干扰环境下的磁场测量系统研究

孙 勇，徐奡澍，张 洋，蔡 敏，林 君

（吉林大学仪器科学与电气工程学院，长春 130000）

摘要：精确获取待测地点的地磁场是磁共振探水（magnetic resonance sounding，MRS）方法的关键，传统的磁测技术在强干扰环境下存在误差大及效率低的问题。为提高磁场测量的抗干扰能力和测量精度，研究提出一种将实时消噪电路与后级软件消噪相结合的抗干扰方法。详细介绍了具有抗干扰能力的硬件与软件系统设计，并在不同工作环境下分别与国产磁力仪和进口磁力仪进行实验测量对比。实验结果表明，本研究设计的测磁系统的性能明显优于国内传统的磁力仪，与国外先进磁力仪基本一致。最后针对测量系统的不足，提出一定的改进意见。

关键词：勘探地球物理学；磁共振探水；磁力仪；测量系统；抗干扰

中图分类号：P631.2 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-2850(2017)24-2786-08

Research on magnetic field measurement system in strong interference environment

SUN Yong, XU Aoshu, ZHANG Yang, CAI Min, LIN Jun

(*College of Instrumentation & Electrical Engineering*, *Jilin University*, *Changchun* 130000, *China*)

Abstract: Traditional magnetic measurement technology has the disadvantage of large error, low efficiency and effectiveness under strong and complex context noises, so getting the precise geomagnetic field of the site to be measured is the key for magnetic resonance sounding (MRS). To improve the anti-interference ability and measurement precision of the magnetic field measurement system, this paper puts forward a novel method combining the real-time noise elimination circuit and post-level software de-noising. Hardware with anti-interference ability and software of the system are introduced in detail, and the system is tested under different working conditions by contrast of domestic and imported magnetometers. The experimental results show that the performance of the system designed in this paper is better than that of domestic traditional instrumentation, and consistent with the foreign advanced apparatus. Finally, the advantages and disadvantages are analyzed and some suggestions for improving the system are proposed.

Key words: exploration geophysics; magnetic resonance sounding; magnetometer; measuring system; anti-interference

0 引言

核磁共振探水技术是目前已知的唯一可以无损地对地下水进行直接探测的地球物理方法。基于核磁共振原理对地下水进行探测时，谐振发射技术是发射系统的关键技术[1]。这一技术主要利用 LC 串联谐振原理，其谐振频率为被测区域的拉莫尔频率，因此获得精确的待测点地磁场进而计算出拉莫尔频率是准确测量核磁共振信号的重要前提。目前，测量地磁场主要使用测量精度高的质子磁力仪。国外从 20 世纪

基金项目：高等学校博士学科点专项科研基金（20130061110068）

作者简介：孙勇（1989—），男，硕士研究生，主要研究方向：测试计量技术及仪器

通信联系人：林君，教授，主要研究方向：地球探测技术及仪器. E-mail: lin_jun@jlu.edu.cn

70 年代开始研究和生产质子旋进磁力仪，代表产品有 G-856 型质子旋进磁力仪和 GSM-19T 型质子旋进磁力仪。前者的分辨率高、野外适用性强，精度可达±0.1 nT[2~3]；而后者测量速度快，在外部噪声较小的情况下精度可以达到±0.2 nT，两者均在很多国家得到了广泛应用[4~5]。国内对质子旋进磁力仪的研制工作起步较晚，为满足国家磁法的需要，我国于 1958 年开始了质子旋进磁力仪的研制工作[6~7]，代表产品有 CZM-4 型质子旋进磁力仪和 WCZ-3 型质子旋进磁力仪。前者的测量精度可达±1.0 nT，适用于野外磁法勘探；后者的分辨率为 0.1 nT，测量速度快[8~9]。目前，现有的质子旋进磁力仪虽然测量精度和灵敏度均较高，但是抗干扰性普遍较差，在强干扰环境下不能正常工作。原长春地质学院仪器系（现吉林大学仪器科学与电气工程）曾孝箴先生带领的科研小组自主研制出了我国第一台航空核子旋进磁力仪[10]；随着相关电子技术和制造工艺的不断发展进步，质子旋进磁力仪的研究得到了进一步发展。针对目前国产磁力仪存在的抗干扰性较差的问题，本文设计一种在强干扰环境下可以对磁场进行准确测量的系统，并对该系统进行测试。

1 抗干扰系统设计

本文设计的抗干扰系统结合了实时消噪硬件电路与上位机软件消噪算法，下面对这两部分进行详细介绍。

1.1 实时消噪电路设计

系统的整体设计如图 1 所示，可以分为信号测量和上位机处理两部分。信号测量主要由信号拾取和实时消噪两部分组成。探头内的液体在主控系统的控制下发生极化，待控制电流撤去之后，被极化的氢质子进动，进动的氢质子会在线圈两端感应出质子旋进信号，信号幅值随时间按指数形式衰减，称为自由感应衰减（free induction decay，FID）[11]。仪器的工作环境为强干扰背景，且 FID 信号微弱，在这样的环境下，工频谐波对磁场的测量影响较大[12]。在隧道等地下工程中，主要噪声源是由变压器、供电系统等引入的低频噪声，针对这一情况，本文设计了具有针对性的低矩形系数带通滤波器，从而提高测量系统的抗干扰特性。

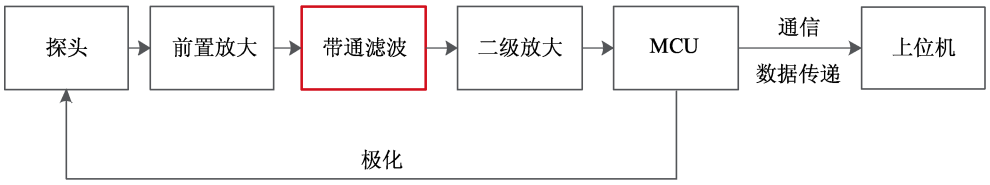


图 1 强干扰环境下的磁场测量系统整体框图

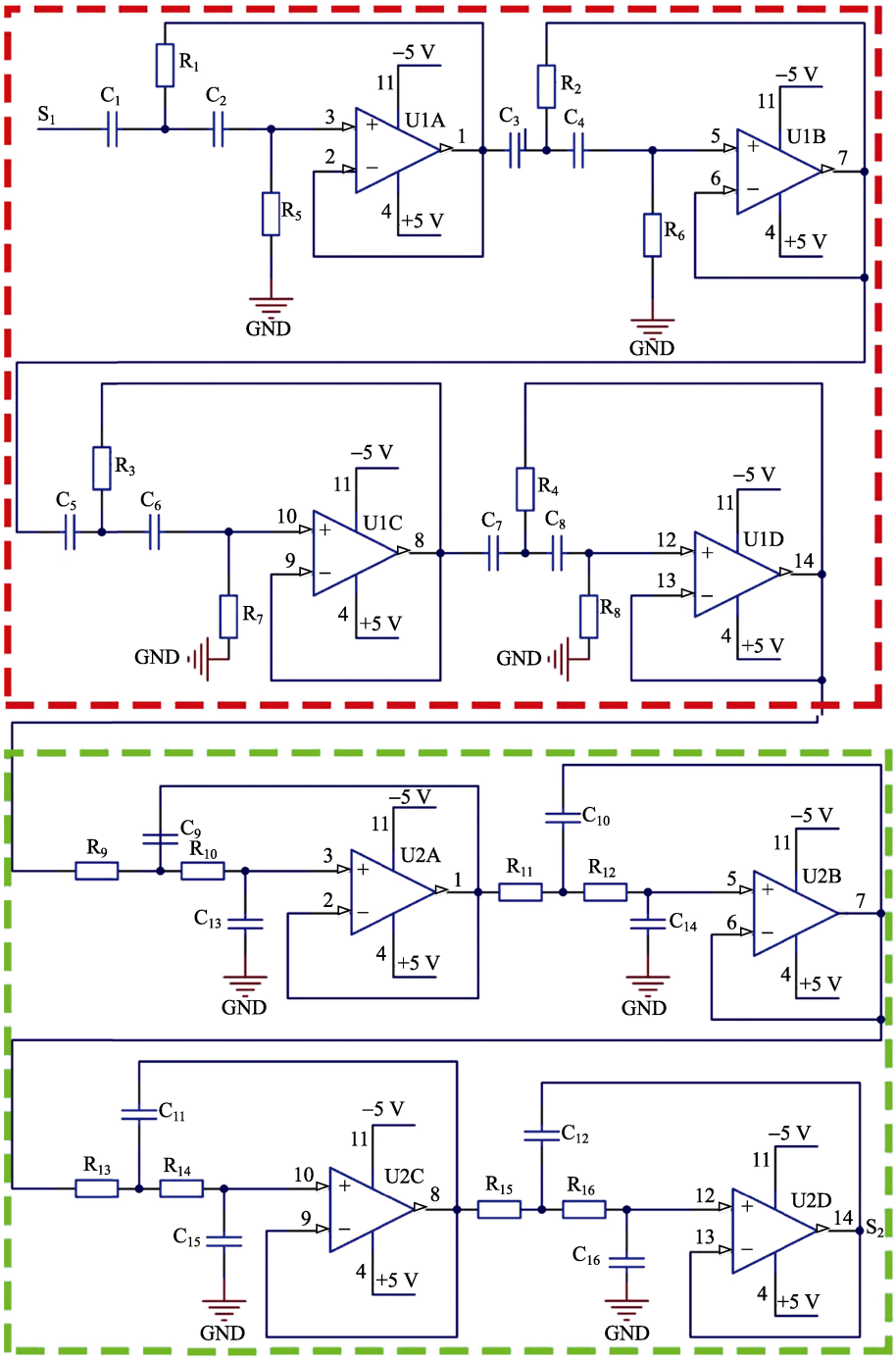
Fig. 1 Overall block diagram of magnetic field measurement system in strong interference environment

在含有多种频率成分的干扰噪声中，工频谐波对被测量信号的干扰最严重。在强噪声环境下，低频噪声往往是影响磁场测量系统结果准确度的主要因素。为消除此类噪声带来的影响，本系统的核心部分采用低矩形系数的带通滤波器（由八阶高通滤波器和八阶低通滤波器级联而成）。其原理图如图 2 所示。

对于高通滤波器，增益为 1 的二阶巴特沃斯高通滤波器的原型如图 3 所示，此时，

$$C_f=C_1=C_2\,, \tag{1}$$

$$f_c=\frac{1}{2\pi C_f R_f}\,, \tag{2}$$



注：红色虚线内为高通滤波器；绿色虚线内为低通滤波器；S_1为输入带通滤波器的输入信号；S_2为经过带通滤波器处理后的输出信号；C_1～C_{16}为设计的滤波器用到的电容；R_1～R_{16}为设计的滤波器用到的电阻；GND为接地；U1A、U1B、U1C、U1D为设计的高通滤波器用到的放大器；U2A、U2B、U2C、U2D为设计的低通滤波器用到的放大器

图2　带通滤波器原理图

Fig. 2　Prototype figure of band-pass filter

$$R_1=\frac{R_f}{2Q_n}, \tag{3}$$

$$R_5=2Q_nR_f, \tag{4}$$

其中，C_f为在利用二阶巴特沃斯高通滤波器原型进行电路设计时，为降低计算量，通常使电容值相等时所取的统一符号；f_c为滤波器的截止频率；R_f为由式（2）计算出的一个变量；Q_n为图 2 中组成高通滤波器的 4 个串联二阶高通滤波器的品质因数，分别取为 Q_1、Q_2、Q_3、Q_4. 令 C_1=C_2=10 nF，截止频率为 1 500 Hz，令品质因数 Q_1=1.961 57，可求得 R_1=7.1 kΩ，R_5=18.2 kΩ. 令 C_1= C_2= C_3= C_4= C_5= C_6= C_7= C_8=10 nF，令品质因数 Q_2=1.662 94，Q_3=1.111 14，Q_4=0.390 18，易求得其余参数[13]。

对于低通滤波器，增益为 1 的二阶巴特沃斯低通滤波器的原型如图 4 所示，此时，

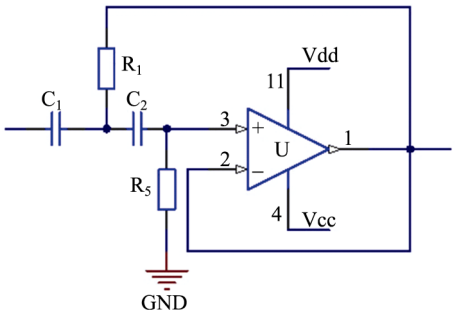
$$R_f=R_9=R_{10}, \tag{5}$$

$$f_c=\frac{1}{2\pi C_f R_f}, \tag{6}$$

$$C_9=2Q_nC_f, \tag{7}$$

$$C_{13}=\frac{C_f}{2Q_n}, \tag{8}$$

其中，R_f为在利用二阶巴特沃斯低通滤波器原型进行电路设计时，为降低计算量，通常使电阻值相等时所取的统一符号；C_f为由式（6）计算出的一个变量；Q_n为图 2 中组成低通滤波器的 4 个串联二阶低通滤波器的品质因数，分别取为 Q_5、Q_6、Q_7、Q_8. 令 C_9=10 nF，截止频率 f_c=6 000 Hz，令品质因数 Q_5=0.509 796，可求得 R_9=R_{10}=2.7 kΩ，C_2=9.6 nF. 令 C_9=C_{10}=C_{11}=C_{12}=10 nF，令品质因数 Q_6=0.601 345，Q_7=0.899 976，Q_8=2.562 915，易求得其余参数[13]。



注：U 为放大器；Vcc 为放大器正电源接入端；Vdd 为放大器负电源接入端，下同

图 3 二阶巴特沃斯型高通滤波器原型图

Fig. 3 Prototype figure of the second order Butterworth high-pass filter

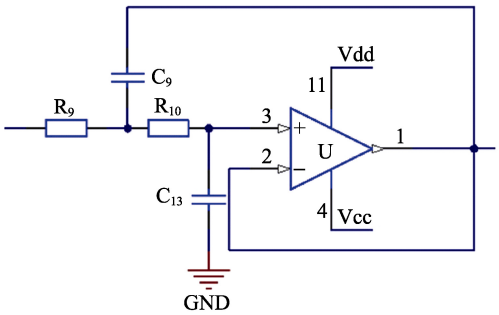


图 4 二阶巴特沃斯型低通滤波器原型图

Fig. 4 Prototype figure of the second order Butterworth low-pass filter

利用 Multisim 电路仿真软件对带通滤波器进行仿真，仿真效果如图 5 所示，在约–3 dB 处，其下限截止频率为 1.469 kHz 左右，上限截止频率为 5.996 kHz 左右，与设计的效果基本一致。

1.2 软件消噪方法研究

在强干扰环境下，磁场测量系统的软控制部分由下位机控制模块和上位机控制软件两部分构成，下位机控制模块由 ARM 组成，上位机控制软件是基于 LabVIEW 编写的控制软件，二者通过串口通信进行指令与数据的传递。本系统中涉及的软件消噪方法在上位机中通过 LabVIEW 软件平台实现，包括两种处理算法，大大增强了系统的稳定性，并使测量结果的准确度大大提高。

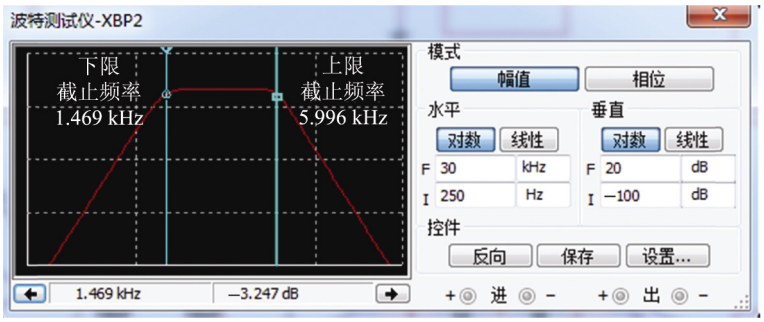


图 5　带通滤波器的仿真效果图

Fig. 5　Simulation rendering of band-pass filter

1.2.1　叠加消噪算法

叠加方法可以有效去除随机噪声。假设单次的信号为 s_i，噪声为 ε_i，经过 N 次叠加后的信号和为

$$\sum_{i=1}^{N} s_i = N\bar{s}\,; \tag{9}$$

通常用均方根衡量噪声的强度，对于随机噪声，经过 N 次叠加后的噪声强度为

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{N} \varepsilon_i^2} = \sqrt{N}\bar{\varepsilon}\,, \tag{10}$$

其中，$\bar{s}$ 和 $\bar{\varepsilon}$ 分别为 N 次叠加后信号的平均幅度和噪声的平均幅度。这样 N 次叠加后的信噪比为

$$\mathrm{SNR} = \frac{N\bar{s}}{\sqrt{N}\bar{\varepsilon}} = \sqrt{N}\frac{\bar{s}}{\bar{\varepsilon}}\,, \tag{11}$$

其中，$\dfrac{\bar{s}}{\bar{\varepsilon}}$ 为叠加消噪处理前的信噪比。经过叠加消噪处理后，信噪比提高了 $\sqrt{N}$ 倍。

在磁场测量系统进行信号采集时，外部的电磁干扰噪声也是随机信号的一种，这里运用叠加消噪的方法去除电磁干扰噪声[14]。

在上位机中预先设置好叠加次数，在系统工作时，利用循环结构对每次采集到的数据进行叠加消噪，并对结果进行实时显示。由图 6 和图 7 可以明显看出，叠加消噪后，信号（幅值最高的信号）以外的干扰得到了较好的压制，使测量到的信号质量得到了很大程度的提高，证明利用叠加的方法可以有效地去除电磁干扰噪声[14]。

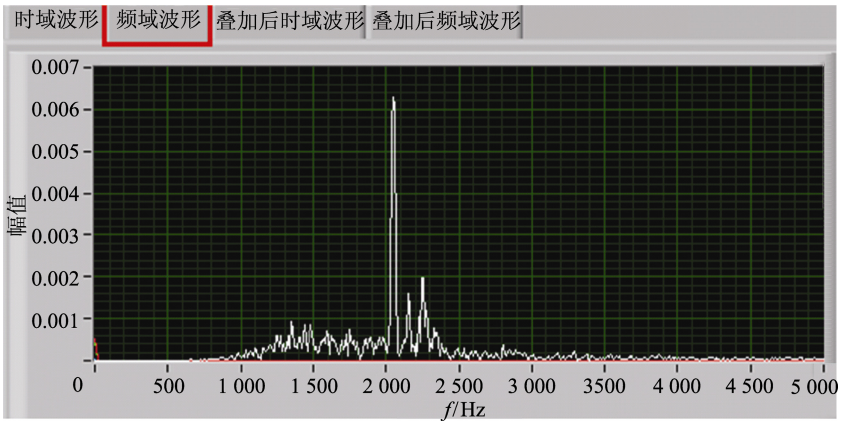


图 6　单次采集的时域波形

Fig. 6　Time domain waveform of a single collection

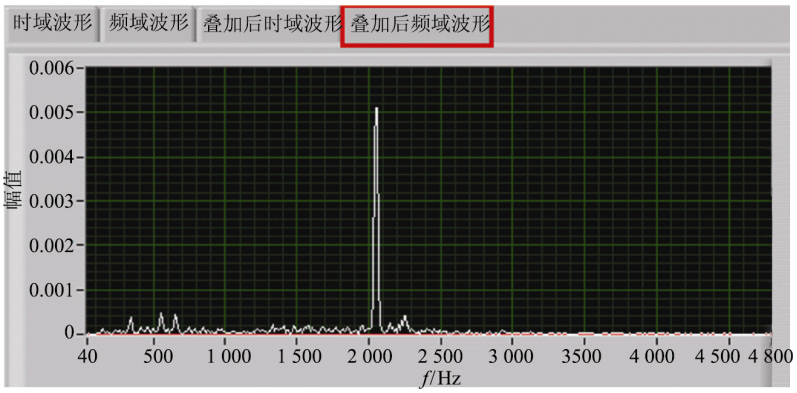


图 7 16 次叠加后采集的时域波形

Fig. 7 Time domain waveform after 16 times collections

1.2.2 软件测频方法

质子旋进磁力仪主要利用测量质子旋进信号频率的方法求得地磁场。传统的测量方法是对微弱的质子旋进信号进行放大、滤波等调理后，再通过比较器电路或全波整流检波电路，获得与质子旋进信号相同频率的方波，根据该方波的频率即可计算出地磁场大小。常用的方波测频方法主要为直接测频法和周期测频法，这两种测频方法都属于硬件测频。在大干扰环境中，这两种硬件测频方法存在检波后信号与质子旋进信号的频率一致性差、质子旋进信号的有效测频时间缩短进而降低测频精度等缺点。因此，为提高测量地磁场的精度，本文设计了基于 LabVIEW 的软件测频，利用 LabVIEW 自带的子 VI 中的单频测量 VI，该 VI 能查找信号中具有最大幅值的单频信息，实现最高幅值信号的频率、幅值及相位测量[15]，从而实现对待测信号频率的准确测量。

由表 1 的测试结果可知，测频精度可以精确到小数点后 3 位，即 0.001 Hz；单频测量整体测试结果的有效分辨率为 0.000 2 Hz，对应的地磁场值分辨率为 0.004 nT. 低信噪比的情况下，利用 LabVIEW 编写的测频软件仍能准确测出信号的频率，同时软件测频不会给地磁场测量精度带来新的误差。另外，针对大噪声干扰时地磁场的不均匀性导致弛豫时间缩短的问题，增加了针对弛豫时间长短不一、实时改变信号采集时间的功能，避免采集时间固定时尾部噪声对测频精度的影响，进一步提高了地磁场的测量精度。

表 1 软件测频测量结果

Tab. 1 Software measurement frequency measurement results

输入频率/Hz	测量频率/Hz	绝对误差/Hz	有效分辨率/Hz
2 330.000	2 330.000	0.000	0.001
2 330.005	2 330.005	0.000	0.001
2 330.009	2 330.009	0.000	0.001
2 330.000 0	2 329.999 9	0.000 1	0.000 2
2 330.000 5	2 330.000 6	0.000 1	0.000 2
2 330.000 9	2 330.000 8	0.000 1	0.000 2

2 室内测试与野外测试对比

2.1 室内测试对比

在屏蔽室利用 YL2410 直流稳压电源产生的直流电流通过英普磁电亥姆赫兹线圈模拟人工磁场，利用工作的计算机主机产生干扰。在距离探头约 0.5 m 和 1 m 的情况下进行了 2 组测试，将测试结果与国产 CZM-4 型磁力仪、进口 GSM-19 型磁力仪进行比较。测试环境如图 8 所示，测试结果如图 9、图 10 所示。

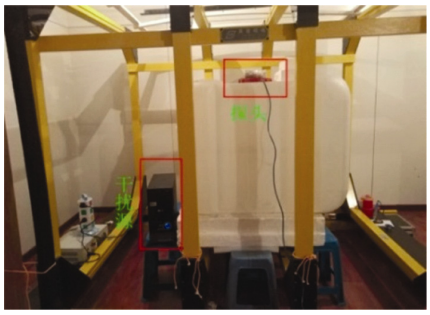


图 8 测试环境

Fig. 8 Test environment

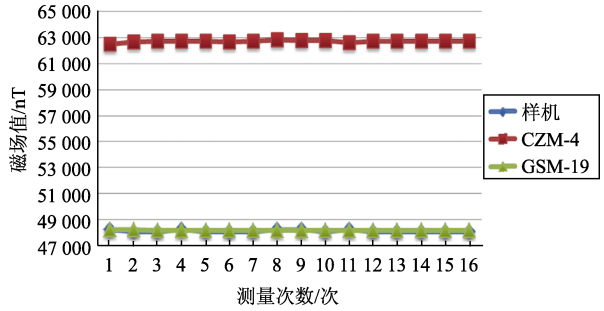


图 9　干扰源距离探头约 1 m 时的测试结果

Fig. 9　Test results of interference distance source about 1 m

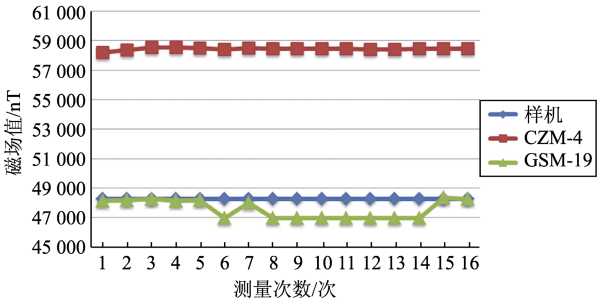


图 10　干扰源距离探头约 0.5 m 时的测试结果

Fig. 10　Test results of interference distance source about 0.5 m

测试结果显示，在干扰源距离探头约 1 m 的探测条件下，样机的极差为 50.99，国产 CZM-4 型磁力仪的极差为 291.83，进口 GSM-19 型磁力仪的极差为 37.56，样机的效果优于国产 CZM-4 型磁力仪，测试效果与进口磁力仪基本一致。在干扰源进一步靠近探头(约 0.5 m)的探测条件下，样机的极差为 150.99，国产 CZM-4 型磁力仪的极差为 319.98，进口 GSM-19 型磁力仪的极差为 250.25，三者的测量结果均出现了一定程度的波动，但是样机测量效果依然优于国产 CZM-4 型磁力仪，且稳定性较进口 GSM-19 型磁力仪好。

2.2　野外测试对比

在室内测试效果良好的前提下，在野外进行了 2 次测试。第 1 次测试时间为 2016 年 10 月 10 日，测试地点为新立城水库附近，测试地点距离市区较远，电力线的干扰小，测试结果如图 11 所示；第 2 次测试时间为 2016 年 12 月 1 日，测试地点为长春市文化广场，测试地点在市中心，各种干扰较大，由此测试系统的抗干扰性，测试结果如图 12 所示。

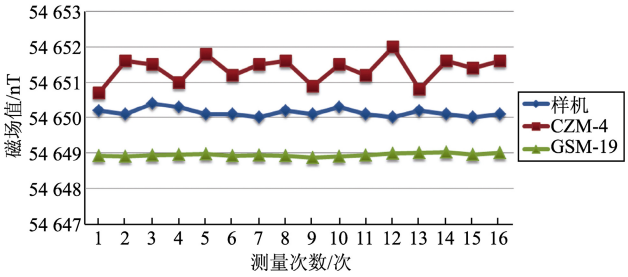


图 11　新立城水库附近的测试结果

Fig. 11　Test results of near Xin Licheng reservoir

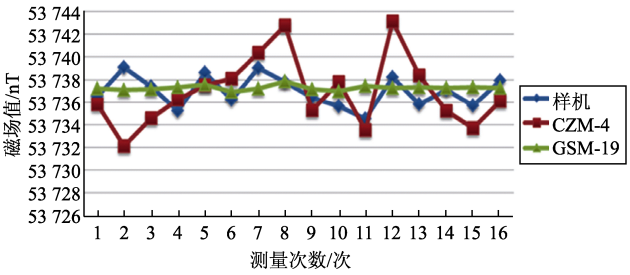


图 12　长春市文化广场的测试结果

Fig. 12　Test results of culture square in Changchun

分析野外测试的结果，可以得出以下结论：在干扰较小的情况下，样机和 GSM-19 型质子旋进磁力仪的测量结果误差波动范围均较小，而 CZM-4 型质子旋进磁力仪测量结果的波动范围较大，说明了样机的抗干扰性能优于国产 CZM-4 型质子旋进磁力仪；在干扰较大的环境下，样机和 CZM-4 型质子旋进磁力仪的测量波动均较大，样机的波动误差在±2.5 nT 以内，CZM-4 型质子旋进磁力仪的波动范围在±6 nT 以内，样机的测量结果优于 CZM-4 型质子旋进磁力仪。

3　结论

为提高磁力仪在强噪声环境下的抗干扰能力和磁测精度，本文利用高通滤波器与低通滤波器级联的方式设计了实时消噪硬件系统，并利用 LabVIEW 实现了数字叠加平均，进一步提高了信噪比。室内与野外实验的结果表明，该系统具有较高的抗干扰能力与检测精度。由于环境噪声的突变性及随机性，尤

其是工频谐波的干扰，宽带采集系统具有一定的局限性，下一步的研究可加入抗干扰能力更强的窄带滤波与梳状滤波系统。

[参考文献] (References)

[1] 林君，段清明，王应吉，等. 核磁共振找水仪原理与应用[M]. 北京：科学出版社，2011.
LIN J, DUAN Q M, WANG Y J, et al. Theory and design of magnetic resonance sounding instrument for groundwater detection and its applications[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)

[2] 张彪，张银贵. G-856AX 质子旋进磁力仪[J]. 铀矿地质，1993，9（5）：318-319.
ZHANG B, ZHANG Y G. G-856AX proton precession magnetometer[J]. Uranium Geology, 1993, 9(5): 318-319. (in Chinese)

[3] 肖凡，徐学恭，张松堂，等. G-858 磁力仪的性能测试[J]. 地质装备，2013，14（4）：20-22.
XIAO F, XU X G, ZHANG S T, et al. The performance test of G-858 magnetometer[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2013, 14(4): 20-22. (in Chinese)

[4] 肖平. JPM-1 型质子旋进磁力仪模拟电路的设计与实现[D]. 长春：吉林大学，2014.
XIAO P. Design and implementation of the simulation circuit of the JPM-1 proton precession magnetometer[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)

[5] 谈昕，张毅，王雷，等. GSM-19T 质子磁力仪性能测试[J]. 地震地磁观测与研究，2015，36（5）：40-45.
TAN X, ZHANG Y, WANG L, et al. Main performance test and analysis of GSM-19T proton magnetometer[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2015, 36(5): 40-45. (in Chinese)

[6] 丁鸿佳，刘士杰. 我国弱磁测量研究的进展[J]. 地球物理学报，1997，40（增）：238-248.
DING H J, LIU S J. Research on the research of weak magnetic measurement in China[J]. Acta Geophysica Sinica, 1997, 40(Suppl.): 238-248. (in Chinese)

[7] 林君. 地球物理弱磁测量仪器进展[J]. 石油仪器，1997，11（2）：7-11.
LIN J. Progress in magnetometer for weak signal survey[J]. Petroleum Instruments, 1997, 11(2): 7-11. (in Chinese)

[8] 刘迪仁. 高精度智能质子磁力仪的最新发展[J]. 电子制作，2013（15）：219.
LIU D R. The latest development of high-precision intelligent proton magnetometer[J]. Practical Electronics, 2013(15): 219. (in Chinese)

[9] 刘迪仁，周勋，刘海智. 高精度智能质子磁力仪的原理及应用[J]. 电子制作，2012（11）：159-161.
LIU D R, ZHOU X, LIU H Z. Principle and application of high precision intelligent proton magnetometer[J]. Practical Electronics, 2012(11): 159-161. (in Chinese)

[10] 陆其鹄，彭克中，易碧金. 我国地球物理仪器的发展[J]. 地球物理学进展，2007，22（4）：1332-1337.
LU Q H, PENG K Z, YI B J. The development of geophysical instruments in China[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(4): 1332-1337. (in Chinese)

[11] PRIMDAHL F, MERAYO J M G, BRAUER P, et al. Internal field of homogeneously magnetized toroid sensor for proton free precession magnetometer[J]. Measurement Science & Technology, 2005, 16(2): 590-593.

[12] 田宝凤，段清明. 核磁共振信号工频谐波的自适应滤除方法[J]. 吉林大学学报（信息科学版），2009，27（3）：223-228.
TIAN B F, DUAN Q M. Removal method of industrial frequency harmonics in nuclear magnetic resonance signal based on adaptive filter[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2009, 27(3): 223-228. (in Chinese)

[13] 远坂俊昭. 测量电子电路设计：滤波器篇[M]. 彭军，译. 北京：科学出版社，2006.
ENSAKA J. Electronic circuit design: filter paper[M]. Translated by PENG J. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)

[14] HOWARD R M. Principles of random signal analysis and low noise design: the power spectral density and its applications[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.

[15] 侯立峰. 基于虚拟仪器和网络技术的电能质量监测和管理系统[D]. 长沙：湖南大学，2010.
HOU L F. The power quality monitoring and management system based on virtual instrument and network technology[D]. Changsha: Hunan University, 2010. (in Chinese)