

Overhauser 磁力仪探头激发频率测试仪研制

刘欢^{1,2,3},董浩斌^{2,3},葛健^{2,3},白冰洁¹,袁志文³,赵志卓³,刘咏华³,朱俊³,张海洋³

(1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院,湖北武汉 430074;2. 中国地质大学自动化学院,湖北武汉 430074;

3. 近地面探测技术重点实验室,江苏无锡 214035)

摘要: Overhauser 磁力仪探头中自由基溶液激发频率的精度直接决定探头输出拉莫尔旋进信号的质量. 为准确获得激发频率,本文设计了一种 Overhauser 磁力仪探头激发频率测试仪. 针对目前测试设备存在的分辨率较低、操作复杂等问题,采用高分辨率 DDS 作为可控射频信号源;运用 ADC 同步采集技术,结合归一化数据处理方法有效解决 50MHz ~ 100MHz 范围内幅频特性曲线不平坦的问题;采用射频功放、小信号放大作为辅助测量通道,实现仪器的标准、辅助测量一体化. 通过对探头谐振腔的等效电路进行仿真,得到微调电容对探头谐振频率和品质因数的影响程度,并用商用探头进行测试,进一步验证仿真结果;同时得到自由基溶液的极化度与射频激发功率、激发时间的关系. 最终实验结果表明,利用本文研制的 Overhauser 磁力仪探头激发频率测试仪,能够准确测量自由基溶液的激发频率、频率带宽以及品质因数,还可用于在磁力仪设计过程中对激发功率和激发时间的确定,为进一步设计 Overhauser 磁力仪奠定了基础.

关键词: Overhauser 磁力仪; 动态核极化; 自由基; 拉莫尔旋进

中图分类号: TH762.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)05-1272-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.05.034

Research and Developed of the Test Apparatus for Measuring the Excitation Frequency of Overhauser Magnetometer Probe

LIU Huan^{1,2,3}, DONG Hao-bin^{2,3}, GE-Jian^{2,3}, BAI Bing-jie¹, YUAN Zhi-wen³,
ZHAO Zhi-zhuo³, LIU Yong-hua³, ZHU Jun³, ZHANG Hai-yang³

(1. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;

3. Science and Technology on Near-Surface Detection Laboratory, Wuxi, Jiangsu 214035, China)

Abstract: The excitation frequency of radical solution in Overhauser magnetometer probe directly determines the quality of larmor precession signal, which is generated by the probe. In order to obtain the excitation frequency accurately, a test apparatus for measuring the excitation frequency of Overhauser magnetometer probe was designed. In view of the existing problems of present test apparatuses, such as lower resolution, complex operation and so on. This paper adopts a high-resolution DDS as the controllable RF signal source; using the ADC synchronization acquisition technology, combined with the data processing method of normalization, and the uneven problem of the amplitude-frequency characteristic curve in the range of 50MHz ~ 100MHz has been solved effectively; moreover, by adopting the RF power amplifier, weak signal amplification as an auxiliary measurement channel, the apparatus's integration of standard measurement and aided measurement has been achieved. The equivalent circuit of the probe's resonant cavity is simulated, and the effect degree of the adjustable capacitor to the resonant frequency and quality factor of the Overhauser magnetometer probe is obtained. The simulated results are further verified by testing the curve of cavity resonance of the commercial probe under different parameters' conditions. Meanwhile, the relationship between the polarization degree of the radical solution and RF excitation power & time are also obtained. The test method and results are given and the experimental data are analyzed. Finally, the experiment results demonstrate that the excitation frequency of the radical solution, excitation frequency bandwidth and quality factor can be found

accurately by using this apparatus. And the apparatus can be also used for the determination of excitation power and excitation time in the process of magnetometer design, which lay the foundation for the design of Overhauser magnetometer in the future.

Key words: Overhauser magnetometer; dynamic nuclear polarization; radical solution; Larmor procession

1 引言

质子磁力仪是量子弱磁测量仪器家族中发展历史最为悠久的仪器,在空间探测、国防建设、地质和矿产资源调查、医学仪器等方面有着广泛的应用^[1,2]. 研究高精度、高灵敏度弱磁测量仪器有着广泛的应用空间和重要的应用意义^[3,4]. 经过改进后的基于 Overhauser 效应的质子磁力仪,进一步降低了功耗,提高了精度和灵敏度^[5-8].

Overhauser 磁力仪以自由基溶液作为质子系统,利用拉莫尔旋进效应测量磁场,通过溶液中未配对电子自旋共振从而极化质子达到双共振的效果,磁化强度增大,拉莫尔旋进信号幅度增强,信噪比较高^[9]. 国外在 Overhauser 磁力仪研究方面一直处于领先地位,目前俄罗斯乌拉尔技术学院量子实验室研制的 POS 系列、加拿大 GEM 公司的 GSM-19 系列已经商业化量产,精度可达 0.1nT,被广泛用于军事、卫星、海洋、近地表和外太空等测磁领域^[1-4]. 我国在 Overhauser 磁力仪方面还处于研究阶段,2007~2010 年,中国地质大学(武汉)承担了“863”探索导向类项目动态极化高精度磁场传感器研究,对 Overhauser 磁力仪的传感器基础部分进行了系统的研究,并研制了样机,设计了一种 Overhauser 磁力仪激发接收系统^[9],申请了专利^[10],并于 2015 年发表了关于 Overhauser 效应磁场梯度探测器的研究^[11];2009 年中国科学院空间科学与应用研究中心报道了空间用 Overhauser 磁力仪的理论研究^[12];吉林大学于 2013~2015 年,分别报道了 Overhauser 磁力仪信号检测电路的研究^[13]、RF 激发电路的仿真研究^[14]与 JOM-1 型 Overhauser 磁力仪的研究^[15]. 而由于一些关键技术无法掌握,探测精度较低,目前国内使用的 Overhauser 磁力仪全部依靠进口. 精度取决于探头输出拉莫尔旋进信号的质量,而信号质量又取决于自由基溶液激发频率的精度,Overhauser 磁力仪探头中的溶液多采用氮氧自由基类化合物溶液,不同浓度或不同溶剂的自由基溶液,所用的激发频率及激发带宽不同,并且溶液的极化程度与所用的激发功率和激发时间有关,只有充分极化自由基溶液,才能得到信噪比较高的拉莫尔旋进信号^[16,17]. 因此准确测量 Overhauser 磁力仪探头自由基溶液的激发频率至关重要. 国内外的相关研究者,普遍根据自由基溶液的成分及配比,采用大型仪器设备,通过物理-化学的手段测量自由基溶液的激发频率^[18-22],操作较为复杂,且相关文献对探头的理论设

计与仿真及自由基溶液成分分配比的研究较少.

针对上述问题,根据自由基溶液极化原理,本文研制了一种 Overhauser 磁力仪探头激发频率测试仪,如图 1 所示. 该仪器可输出 50MHz~100MHz 的稳定射频信号,为不同成分的自由基溶液提供足够的测试带宽,分辨率 1Hz,采用 ADC 同步采集技术,并运用归一化处理算法,能够将数据实时保存,并上传 PC 机进行后续分析.

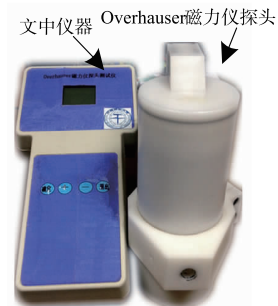


图1 本仪器和Overhauser磁力仪探头

2 Overhauser 磁力仪原理

2.1 自由基溶液动态核极化

自由基物质含有一个未成对电子,所以分子中的电子自旋磁矩未完全抵消,显现出顺磁性. 因此一般将其作为主要的自由电子载体,其中化学性质较稳定的氮氧自由基使用较多. 氮氧自由基可分为 4 类:(1) 哌啶氮氧自由基;(2) 吡咯烷氮氧自由基;(3) 恶唑烷氮氧自由基;(4) Proxyl 氮氧自由基. 上述(1)~(3)三种已经被广泛使用,其中比较有代表性的氮氧自由基的化学结构如图 2 所示,左半部分为 3-Carboxy-PROXYL,右半部分为 4-Oxo-TEMPO. 考虑到传感器的稳定性要求,目前绝大部分 Overhauser 磁力仪探头中的自由基物质都采用哌啶氮氧自由基即 4-Oxo-TEMPO.

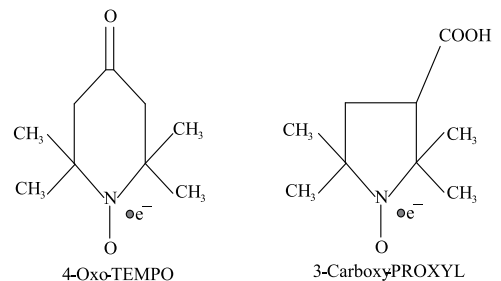


图2 典型氮氧自由基的化学结构

自由基溶液的极化,其实质是通过激发溶液中自由基的未成对电子,引起溶液中核子的激发,从而使溶液中的自由基未成对电子和溶液中的质子都处于激发态的双共振系统.根据电子顺磁共振理论,自由电子的顺磁共振频率与外磁场的关系如式(1)所示:

$$f \approx 28.025 \cdot B \quad (1)$$

式中: f 为激发频率,单位 GHz; B 为磁场,单位 T.自由基溶液中的自由基分子,可以看成是一个电子系统,而有机溶剂本身含有大量的质子,这些质子可以看成是一个质子系统,所以溶液中同时存在电子和质子两个系统满足双共振条件,若将该溶剂置于稳定外磁场中并用射频电磁波照射,当射频电磁波频率满足自由基未成对电子发生顺磁共振的条件时,溶液发生双共振,也就是动态核极化现象.

4-Oxo-TEMPO 自由基中的未成对电子处于氮原子产生的核磁场中,其大小约为 2.1mT,根据式(1)知未成对电子的共振频率约为 60MHz,即利用 60MHz 左右的固定频率能够使其达到共振状态.而对自由电子来说,其射频电磁波频率必须随着外磁场的变化而变化;同时,由于自由基中未成对电子所处的磁场是自由电子的 100 倍左右,因此极化强度比自由电子大大增加,从而导致质子系统的极化也大大提高,使动态核极化因子增加,自由电子产生核极化因子为 330,而氮氧自由基产生的动态核极化因子理论值高达 1000,实际为 1500 左右^[23].

自由基中电子的激发,实质就是能级跃迁^[24].图 3(a)为 4-Oxo-TEMPO 自由基的能级示意图.可以看出,在不存在外磁场时,自由基的能级已经发生分裂;在有外磁场时,能级发生超精细分裂,一共出现 4 个能级,分别是 $|1\rangle$ 、 $|2\rangle$ 、 $|3\rangle$ 、 $|4\rangle$,当用射频电磁波照射样品溶液时,如果自由基从能级 $|1\rangle$ 跃迁到能级 $|2\rangle$,样品溶液发生正的动态核极化,其动态核极化因子为正值,如果自由基从能级 $|1\rangle$ 跃迁到能级 $|4\rangle$ 时,样品溶液发生负的动态核极化,其动态核极化因子为负值.

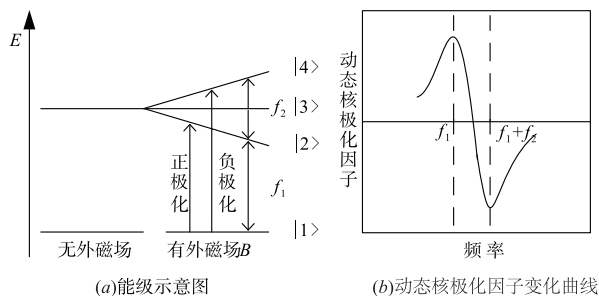


图3 能级跃迁示意图

如果利用固定频率作用于自由基溶液样品,如图 3(a)中的 B ,然后利用功率足够、频率由小到大变化的

射频电磁波照射样品溶液,当频率为 f_1 时,溶液发生正的动态核极化,若继续增加射频频率,当频率为 $f_1 + f_2$ 时,自由基溶液发生负的动态核极化,示意图如图 3(b)所示.通过差分结构可以将信号叠加,增加信噪比,提高测量精度,因此确定自由基溶液的激发频率至关重要.

2.2 Overhauser 磁力仪工作原理

Overhauser 磁力仪主要由探头、射频振荡器(VHF)、信号调理系统、频率计组成,结构图如图 4 所示.探头由高频激发线圈、低频接收线圈和密封在有机玻璃瓶中富含核子的自由基溶液组成.射频振荡器用于产生高频信号,使探头自由基溶液发生动态核极化;单刀双掷开关用于给探头施加短时间的直流脉冲,产生横向磁矩,脉冲结束后,磁矩将绕外磁场做拉莫尔旋进;信号调理系统完成对拉莫尔旋进信号的初始提取、放大、滤波整形;频率计用于对被调理之后的信号进行频率测量从而得到磁场值.

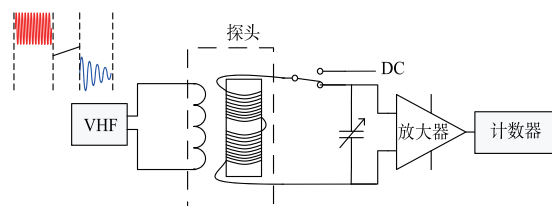


图4 Overhauser磁力仪结构图

拉莫尔旋进信号切割低频接收线圈产生感应电动势大小为^[23]:

$$\varepsilon(t) = \mu_0 n A M \omega e^{-t/T_2} \sin \omega t \quad (2)$$

式中: μ_0 为磁导率, n 为线圈匝数, A 为线圈截面积, M 为质子磁化强度, T_2 为横向弛豫时间, ω 为拉莫尔角频率.拉莫尔旋进为指数衰减且频率不变的正弦信号,如图 5 所示.

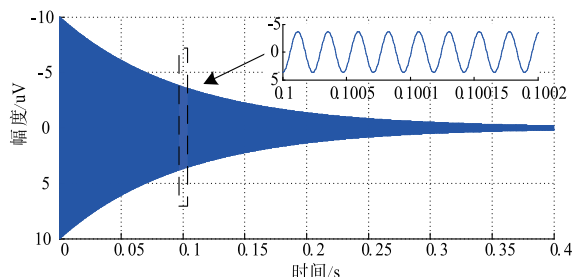


图5 拉莫尔旋进信号示意图

磁场强度与拉莫尔旋进信号频率的关系为^[23]:

$$F = \frac{2\pi}{\gamma_p} \cdot f_p = 23.4874 \cdot f_p \quad (3)$$

式中, F 为磁场强度, f_p 为拉莫尔旋进信号的频率, γ_p 为旋磁比.式(3)知旋进频率与磁场强度成正比,因此通过测量频率即可计算得到磁场值.

3 仪器系统设计

仪器整体硬件结构框图如图 6 所示,主要包含主控系统、可控射频信号源、微弱信号放大电路和高峰峰值检波器.该仪器具有两种工作模式:频率测量和辅助测

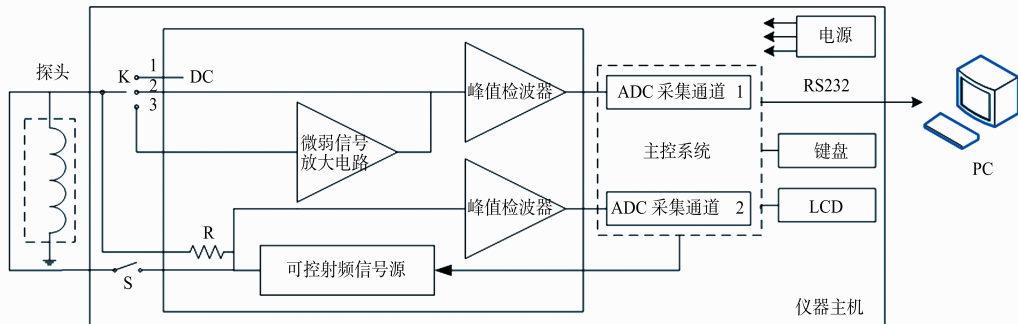


图6 仪器硬件结构

主控系统主要由意法半导体公司的低功耗单片机 STM32RB103 组成,芯片内部 12 位 A/D 用于采集峰值检波后的电压值;除此之外,主控板上还包含串行 Flash 存储器、键盘、显示接口和 RS232 转换接口,分别用作数据存储、人机交互、实时曲线显示和通信.主控系统是整个仪器的核心,主要有五个作用:(1)控制继电器 K 完成不同测量模式之间的切换;(2)控制可控射频信号源产生不同频率的信号,并控制时间长短;(3)控制 DC 模块产生直流脉冲;(4)采集峰值检波后的信号并实时存储;(5)数据采集完毕后,将数据通过串口传入 PC.

微弱信号放大电路由三级低噪声放大器级联构成,作用是将拉莫尔旋进信号放大至满足峰值检波器的有效测量范围,放大倍数过低检测不到有效信号,但也不易过高^[11],经测试放大电路的增益在 99 ~ 113dB 范围内.

峰值检波器采用凌力尔特公司的专用射频功率检测芯片 LTC5507,工作频率范围 100kHz ~ 1GHz,仅需一个电容即可实现峰值检波,实现高频带范围内的近似线性电压提取,有效解决高频信号的实时峰值提取问题,满足探头测试要求.

3.1 可控射频信号源

仪器具有两种工作模式,频率测量模式需对自由基溶液进行扫频激发,射频信号源可采用 DDS,但由于电气特性,随着频率的增加射频信号源输出的信号幅度会降低,为保证高频带内激发信号的有效性,需对信号进行放大;辅助测量模式需采用高频信号激发探头,为使探头中的自由基溶液发生动态核极化,需对该高频信号进行功率放大,基于此设计如图 7 所示可控射频信号源系统. DDS 芯片采用 ADI 公司的 AD9854,可

量,通过继电器 K 和 S 来切换.频率测量模式即测量不同自由基溶液的激发频率值;辅助测量模式即验证探头激发频率的测量结果.

输出 50MHz ~ 100MHz 频率范围内稳定的正弦波信号,步进可调,满足现有 Overhauser 磁力仪探头激发频率的测量需求(一般 60MHz 左右).由于 DDS 输出的信号含有较多高次谐波,三阶椭圆低通滤波器可用于对高次谐波的信号滤波^[25,26],滤波之后的信号幅度约为 0.5Vpp;继电器 J 用来完成两种测量模式之间的切换;考虑到信号频率较高,普通电压型运算放大器不能满足频率要求,所以高速放大器采用 ADI 公司的电流运算放大器 AD8001,通过调节放大倍数,使放大后的信号即 RF 在 50 欧姆负载条件下电压峰峰值满足后级峰值检波器的测量范围,经实测放大后的信号幅度约为 2Vpp;功率放大器采用三菱公司的射频 NMOS 功放管 RD06HVF1,经实测功率放大后的信号即 Power RF 最大输出功率 2W,满足探头自由基溶液有效极化的功率要求.

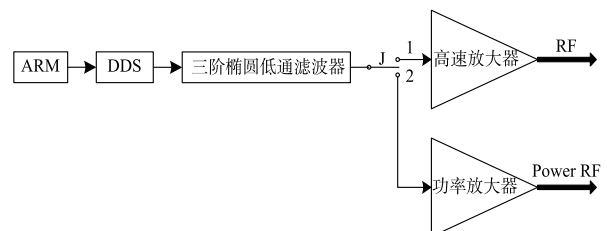


图7 可控射频信号源

测量自由基激发频率时,仪器工作过程如下:

(1)将图 6 中的 K 切换至“2”,S 断开,图 7 可控射频信号源中的 J 切换至“1”;

(2)通过键盘设置可控射频信号源产生高频信号,设置频率输出范围: $f_1 \sim f_2$,步长: Δf ;

(3)ADC 同步采集分别以探头为负载、50 欧姆电阻(图 6 中 R)为负载的两路经过峰值检波后的信号幅

度,并将数据存入内部存储器.电路如图 8 所示.峰值检波器的输出端采用二阶 RC 低通滤波器,进一步滤除电压噪声,提高数据的有效性.

(4) 射频信号频率变为 $f_1 + \Delta f$, 重复以上步骤. 该测量模式的工作时序如图 9 所示.

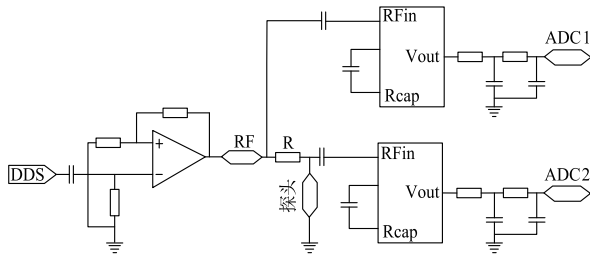


图8 高频信号放大与峰值检波

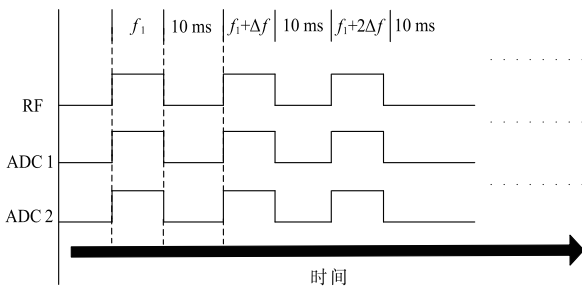


图9 工作时序图

辅助测量时,仪器工作过程如下:

(1) 将图 6 中的 K 切换至“1”, S 闭合, 图 7 可控射频信号源中的 J 切换至“2”;

(2) 通过键盘设置可控射频信号源产生高频功率信号激发探头, 根据自由基溶液激发频率测量结果 f_0 设置频率输出范围: $(f_0 - 2\text{MHz}) \sim (f_0 + 2\text{MHz})$, 步长: Δf ;

(3) 关闭射频功率信号, 主控系统控制 DC 对探头施加短时间的直流脉冲;

(4) 将图 6 中的 K 切换至“3”, 关闭 DC, 此时探头产生拉莫尔旋进信号, ADC 采集经过放大、峰值检波后的信号幅度, 并将数据存入内部存储器;

(5) 射频信号频率变为 $f_0 - 2\text{MHz} + \Delta f$, 重复以上步骤. 该测量模式的工作时序如图 10 所示.

3.2 归一化处理

受电子器件自身的电气特性所影响, 仪器在 $50\text{MHz} \sim 100\text{MHz}$ 范围内的幅频特性曲线并不是完全平坦的^[27], 本文在原有单路采集通道的基础上, 增加一路采集通道作为参考, 利用两通道所采集数据的比值得到归一化数据, 获得更真实的探头相关参数. 因此在利用该仪器对探头参数进行测试时, 分两路信号进行采集, 一路利用 $50\text{ }\Omega$ 电阻作为负载测量出第一组数据, 另一路利用探头作为负载测出第二组数据, 最后利用第二组数据除以第一组数据得到归一化数据. 为验证

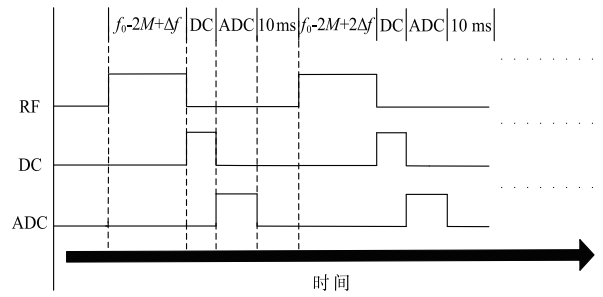


图10 工作时序图

该算法的可行性, 将射频信号直接输入到仪器测试端 (图 6 中连接探头的两个电器端: K 和地), 探头采用与其输入阻抗 (约 $50\text{ }\Omega$) 相近的电阻替代, 即两路测试通道都以纯电阻作为负载, 按照仪器测量自由基溶液激发频率的步骤测试, 得到图 11 所示两路 ADC 的幅频响应曲线以及归一化处理后的结果.

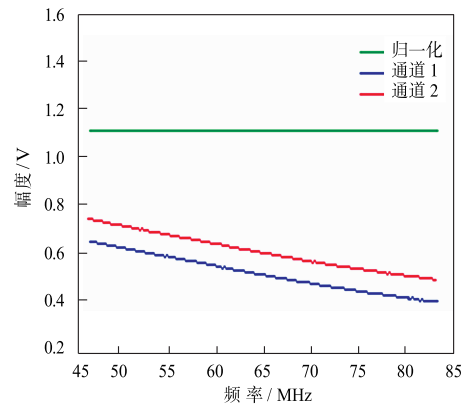


图11 归一化处理结果

图 11 可以看出, 随着射频信号的频率越来越高, 两路 ADC 所采集的信号峰值越来越小, 各频点对应信号峰值大小的不同, 与两路采用的测试负载大小和峰值检波器的电气特性不完全一致有关. 将两路数据做归一化处理, 得到的曲线近似直线且平滑, 有效解决了 $50\text{MHz} \sim 100\text{MHz}$ 范围内幅频特性曲线不平坦的问题.

4 测试与分析

Overhauser 磁力仪的探头谐振腔结构以及等效电路如图 12 所示. 图 12(a) 为腔体结构图, 图 12(b) 为谐振腔等效电路图. 可以看出谐振腔的腔体是设计在玻璃上的, 腔体的顶部不进行密封处理, 而是焊上可调电容, 用于调节谐振频率和品质因素, 该谐振腔的谐振方式为串联谐振.

选定特定的参数对等效电路进行仿真, 结果如图 13(a) 所示. 可以看出, 改变电容 C_1 和 C_2 的值, 可对谐振腔的谐振频率和品质因数进行调节. 根据仿真结果设计如图 12(b) 所示谐振电路, 设置本文仪器切换成自

由基溶液激发频率测量模式,产生 5MHz ~ 100MHz 的正弦波信号,并将仪器的测试端口分别连接如图 12(b) 所示等效测试电路的输入端和地,按图 9 所示工作时序,以 0.5MHz 步进测试反馈信号的幅度,得到的实测对比曲线如图 13(b) 所示.可以看出实测得到的不同参数条件下的两个谐振点分别约为 55MHz 和 65MHz,谐

振频率及曲线总体趋势与仿真结果基本一致,而频带宽度和增益的不同与器件本身的电气参数有关.因此在设计 Overhauser 磁力仪探头谐振腔时,为使谐振频率达到自由基动态核极化频率,需反复对可调电容进行微调,然后测试在此电容条件下的谐振频率.这也是研制此测试仪器的另一个意义所在.

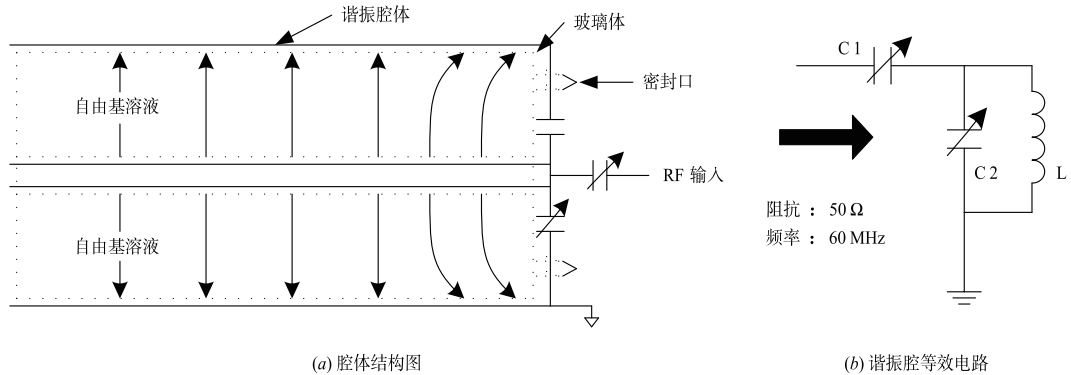


图 12 Overhauser 磁力仪探头谐振腔结构及等效电路

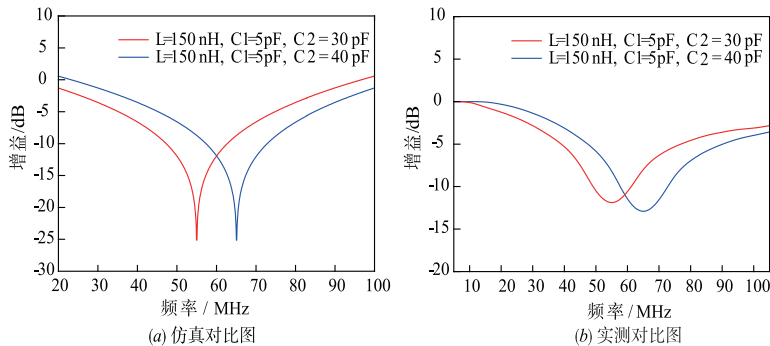


图 13 谐振腔等效电路不同参数仿真与实测曲线

4.1 探头激发频率测试

通过上述仿真实验与理论分析,采用商用 Overhauser 磁力仪探头(自由基极化频率:60.7MHz;高频激发线圈电感:29nH)作为测试对象,为保证测试结果的有效性,测试时探头方位不变,且激发功率和激发时间一定,测量时序如图 9 所示.图 14 为通过调节探头内部微调电容改变探头参数,并利用该仪器测出的三条不同谐振腔谐振曲线,参数 1 对应 $C1 = 17\text{pF}$, $C2 = 220\text{pF}$;参数 2 对应 $C1 = 12\text{pF}$, $C2 = 220\text{pF}$;参数 3 对应 $C1 = 5\text{pF}$, $C2 = 220\text{pF}$.纵坐标为测量数据经过归一化处理,转化成的分贝 (dB) 值.

图 14 可以看出,仪器测得该探头自由基激发频率在 60.7MHz 左右,与探头自身的极化频率一致,验证了该仪器测量的准确性.改变谐振腔的微调电容,谐振频率和品质因数将发生改变,如果调节不好,将直接导致对探头自由基溶液的极化度不完全而得不到良好的拉莫尔旋进信号,因此在设计磁力仪的探头谐振腔时,可

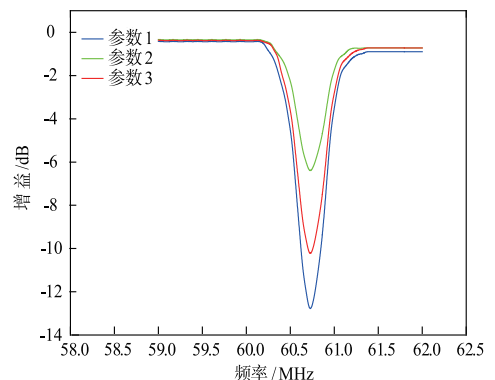


图 14 谐振腔测试曲线

利用该系统反复测量并确认,经过调节微调电容后,谐振腔的谐振频率是否等于自由基的动态核极化频率.

4.2 探头输出信号特性测试

为进一步验证上述实验结果,仪器切换为辅助测量模式,采用射频功率信号激发探头,激发功率和激发

时间一定,频率范围 59MHz ~ 62MHz、频率步进值为 0.02MHz,得到探头输出信号峰值与激发频率关系的曲线如图 15 所示。

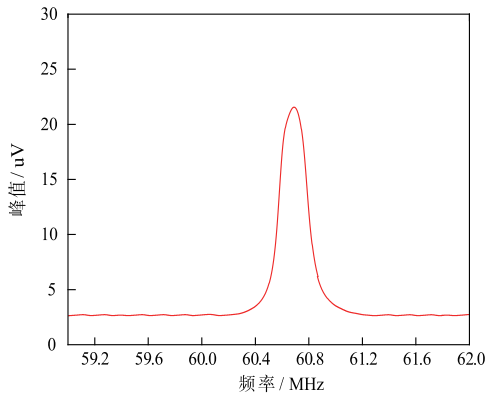


图15 输出拉莫尔旋进信号峰值随激发频率变化曲线

图 15 可以看出,采用 60.7MHz 左右的频率激发探头能够使其充分极化,即此时探头输出的拉莫尔旋进信号幅度最大;测量得到的幅频响应曲线的带宽约为 0.2MHz,与前文谐振腔测试曲线的带宽一致,进一步验证了该仪器测量的准确性。因此,利用该系统可以对 Overhauser 磁力仪探头的激发频率和频率带宽进行准确测试,证明了该仪器的有效性及必要性。

图 16 为将激发频率锁定在 60.7MHz,利用峰峰值不同的射频信号激发探头,得到探头输出的拉莫尔旋进信号峰值随激发时间变化的曲线,图中 5 条曲线,从下到上分别代表激发信号的电压峰峰值为 20V、24V、28V、32V、36V。图 16 可以看出:(1)在射频激发信号峰峰值相同的条件下,随着激发时间的增加,输出信号峰值呈指数曲线上升,在激发持续时间大于 4s 后,输出信号的峰值无明显增加;(2)利用同样的激发持续时间,输出信号峰值随激发功率(即激发信号峰值)增加而增加。由此可见,该仪器可用于研究 Overhauser 磁力仪探头所需的激发时间和激发功率之间的关系。

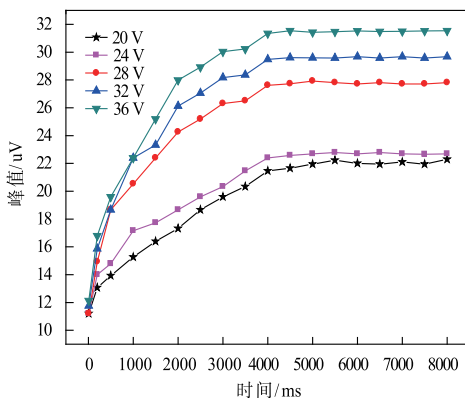


图16 输出拉莫尔旋进信号峰值随激发时间变化曲线

图 17 为利用激发时间 2s,改变激发功率即改变作用于探头上的有效电压,得到探头输出的拉莫尔旋进信号峰值随激发功率变化的曲线。图 17 可以看出,在激发时间为 2s 的条件下,探头输出信号峰值随激发功率呈指数曲线上升,当激发功率在 1.5W 以后,输出信号峰值增加不明显,说明探头输出信号与激发功率有关,为 Overhauser 磁力仪的设计提供参考。

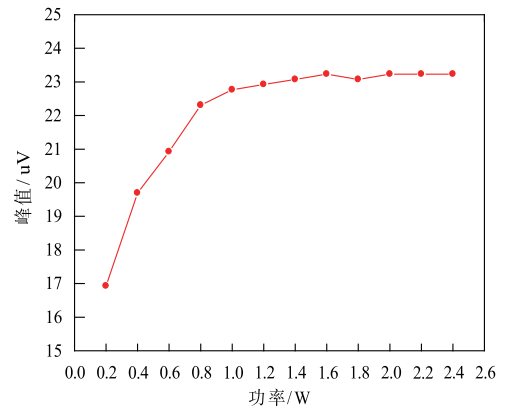


图17 输出拉莫尔旋进信号峰值随激发功率变化曲线

综上所述,探头输出信号的幅度大小直接取决于激发功率,功率越大,信号幅度越大,且呈指数上升;当功率增大到一定程度后,信号幅度接近饱和。这与探头中自由基溶液的物理特性有关,根据前文所述,当采用特定频率信号作用于自由基溶液时,电子发生自旋共振从而带动质子发生自旋极化,进而产生能级跃迁,而信号幅度的大小,根本上取决于发生能级跃迁的质子粒子数,粒子数越多,信号幅度越大。由于测试采用的探头,自由基溶液的体积已经确定,即溶液中的质子粒子数一定。因此当激发功率增大时,被激活的质子粒子数增多,进而提高信号幅度,而当激发功率足够大时,溶液中的所有质子都被激活,发生能级跃迁的质子粒子数不变,进而导致信号幅度基本不变。

5 结 论

本文设计了一种 Overhauser 磁力仪探头激发频率测试仪,采用高速电流放大器及射频功率检测器,实现了高频信号的放大与检波,解决了高频信号的实时峰值提取问题;采用高性能 DDS,提高了仪器输出高频信号的分辨率;运用同步采集技术及归一化数据处理方法,有效解决了高频带范围内幅频特性曲线不平坦的问题。该仪器能够对探头基本参数如:不同浓度或不同溶剂的自由基溶液所用的激发频率、频率带宽、品质因数以及自由基溶液的极化程度与所用的激发功率和激发持续时间之间的关系等进行测试。通过采用本文仪器的测试结果,可对探头谐振腔的谐振频率进行调整,使其与自由基动态核极化频率一致,提高探头的品质

因数,进而提高拉莫尔旋进信号的信噪比;也可为 Overhauser 磁力仪电路系统的设计提供依据,同时为后续研究利用不同自由物质设计 Overhauser 磁力仪探头提供基础平台。

参考文献

- [1] Tumanski S. Modern magnetic field sensors-a review[J]. *Preglad Elektrotechniczny*, 2013, 10(13): 1-10.
- [2] Ge J, Dong H B, Liu H, et al. Overhauser geomagnetic sensor based on the dynamic nuclear polarization effect for magnetic prospecting[J]. *Sensors*, 2016, 16(6): 806.
- [3] Hatsukade Y, Abe T, Tsunaki S, et al. Application of ultra-low field HTS-SQUID NMR/MRI to contaminant detection in food[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2013, 23(3): 1602204.
- [4] Winslow R M, Johnson C L, Anderson B J, et al. Observations of Mercury's northern cusp region with Messenger's Magnetometer[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(8): L08112.
- [5] Denisov A Y, Sapunov V A, Rubinstein B. Broadband mode in proton-precession magnetometers with signal processing regression methods[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(5): 055103.
- [6] Choi S, Kim C, Park C, et al. Estimation of hydrothermal deposits location from magnetization distribution and magnetic properties in the North Fiji Basin[A]. *Proceedings of the AGU Fall Meeting Abstracts* [C]. San Francisco, America, 2013. 1087.
- [7] Shim J H, Lee S J, Hwang S, et al. Proton spin-echo magnetometer: a novel approach for magnetic field measurement in residual field gradient [J]. *Metrologia*, 2015, 52(4): 496-501.
- [8] Sapunov V A, Rasson J, Denisov A, et al. Theodolite-borne vector Overhauser magnetometer: Dimover[J]. *Earth Planets and Space*, 2006, 58(6): 711-716.
- [9] 谭超,董浩斌,葛自强. OVERHAUSER 磁力仪激发接收系统设计[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(8): 1867-1872.
Tan Chao, Dong Haobin, Ge Ziqiang. Overhauser magnetometer excitation and receiving system design[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(8): 1867-1872. (in Chinese)
- [10] 董浩斌,谭超,董茜,等. 一种 Overhauser 磁力仪[P]. 中国专利:201010147845.5, 2010-04-09.
- [11] 刘欢,董浩斌,葛健,等. 基于 Overhauser 效应的磁场梯度探测器[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(3): 592-600.
Liu Huan, Dong Haobin, Ge Jian, et al. Magnetic field gradient detector based on the nuclear Overhauser effect [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(3): 592-600. (in Chinese)
- [12] 陈斯文,赵华,廖怀哲,等. 空间用 Overhauser 磁力仪 [A]. *中国空间科学学会第七次学术年会* [C]. 大连, 中国, 2009. 102.
- [13] 张爽,周前伟,陈曙东,等. 基于 DSP 的 JPM-1 型质子磁力仪研制[J]. *吉林大学学报(信息科学版)*, 2014, 32(5): 511-517.
Zhang Shuang, Zhou Qianwei, Chen Shudong, et al. Design of JPM-1 proton magnetometer based on DSP [J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2014, 32(5): 511-517. (in Chinese)
- [14] Zheng D, Zhang S, Guo X, et al. An improved RF circuit for Overhauser magnetometer excitation [A]. *Proceedings of the International Conference on Radiation Detectors: Systems and Applications XVI* [C]. San Diego, California, United States, 2015. 95950M1-8.
- [15] 张爽,何家泷,陈曙东,等. JOM-1 型 Overhauser 磁力仪研制[J]. *吉林大学学报(信息科学版)*, 2015, 33(4): 409-415.
Zhang Shuang, He Jialong, Chen Shudong, et al. Development of JOM-1 model overhauser magnetometer [J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2015, 33(4): 409-415. (in Chinese)
- [16] 葛健,赵志卓,董浩斌,等. 直流脉冲极化质子旋进磁力仪磁场传感器的设计[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(4): 850-858.
Ge Jian, Zhao Zhizhuo, Dong Haobin, et al. Design of the magnetic field sensor for proton precession magnetometer based on DC pulse polarization [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(4): 850-858. (in Chinese)
- [17] 孙明,龚沈光,周骏,等. 运动船舰切割地磁场在海水中产生的电场计算[J]. *电子学报*, 2003, 31(3): 464-467.
Sun Ming, Gong Shengguang, Zhou Jun, et al. Calculation of the electric field generated by vessel moving across geomagnetic field in seawater [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(3): 464-467. (in Chinese)
- [18] Yang A L, Yang G Q, Cai X M, et al. A laser pump-repump atomic magnetometer [J]. *Chinese Physics B*, 2013, 22(12): 120702.
- [19] Lingwood M D, Ivanov I A, Cote A R, et al. Heisenberg spin exchange effects of nitroxide radicals on Overhauser dynamic nuclear polarization in the low field limit at 1.5 mT [J]. *Journal of Magnetic Resonance*, 2010, 204(1): 56-63.
- [20] Seki Y, Kandori A, Hashizume T, et al. Microtesla NMR Measurement of Protons and Fluorine Nuclei Using a SQUID Gradiometer [J]. *IEEE Transaction Applied Superconductivity*, 2013, 23(3): 1600904.

- [21] Lobo N P, Ramanathan K V. Combining adiabatic and Hartmann - Hahn cross-polarization for sensitivity enhancement in solid state separated local field 2D-NMR experiments of partially ordered systems [J]. Chemical Physics Letters, 2012, 536(20):155 - 161.
- [22] Martin R V, Nazarre D J, Perigo E A. Traceability of dynamic magnetic fields by NMR magnetometry [A]. Proceedings of the IEEE Conference on Precision Electromagnetic Measurements [C]. Rio de Janeiro, Brazil, 2014. 356 - 357.
- [23] 陈文升. 核磁共振地球物理仪器原理 [M]. 北京: 地质出版社, 1992. 53 - 61.
- [24] Qiu Y, Liu C, Zhang S L, et al. A SQUID gradiometer module with large junction shunt resistors [J]. Chinese Physics B, 2014, 23(8):088503.
- [25] 徐立, 李斌, 杨中海. 一种基于高阶矢量叠层基函数去除复杂谐振腔三维有限元仿真中的伪直流模式的新方法 [J]. 电子学报, 2012, 6(6):1171 - 1176.
Xu Li, Li bin, Yang Zhonghai. A DC modes in 3-d f initelement modeling of complex cavity based on higher-order vector hierarchical basis [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 6(6):1171 - 1176. (in Chinese)
- [26] 马春燕, 袁学松, 韩煜, 等. 0.6THz 三次谐波回旋管的研究 [J]. 电子学报, 2012, 40(3):495 - 499.

Ma Chunyan, Yuan Xuesong, Han Yu, et al. Study of a 3rd-harmonic 0.6THz gyrotron [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(3):495 - 499. (in Chinese)

- [27] 王月明, 孔令富, 李英伟. 电磁相关法流量测量传感器励磁线圈轴向长度设计研究 [J]. 电子学报, 2014, 42(5):978 - 981.

Wang Yueming, Kong Lingfu, Li Yingwei. Design study on excitation coil axial length of electromagnetic correlation method flow measurement sensor [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(5):978 - 981. (in Chinese)

作者简介



刘 欢 男, 1989 年出生于黑龙江大庆, 现为中国地质大学(武汉)博士研究生, 主要研究方向为微弱信号检测方法及地球物理仪器。

E-mail: skyliuhuanblue@126.com



董浩斌(通信作者) 男, 1964 年出生于湖北大冶, 于华中科技大学获得博士学位, 现为中国地质大学(武汉)自动化学院教授、博士生导师, 主要研究方向为微弱信号检测及地球物理仪器。

E-mail: donghb@cug.edu.cn