

自激式混合原子自旋振荡器的实验研究

马千金^{1,2}, 李二伟^{1,2}, 刘国宾^{1,2}

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于碱金属-惰性气体混合自旋体系的原子共磁力计被广泛应用于寻找新相互作用、暗物质粒子等基础物理研究, 以及惯性导航与生物磁探测等现实应用领域. 基于 Rb-Xe 原子共磁力计, 我们实现了一种自激式的混合原子自旋振荡器. 其原理是在 z 轴方向上使用圆偏振光将碱金属原子极化, 碱金属与惰性气体原子在高温下发生碰撞, 进而将惰性气体的核自旋极化. 当外磁场存在时, 核自旋磁矩将在磁力矩的作用下以拉莫尔频率绕外磁场进动. 在 x 方向上使用线偏振光进行探测, 可得到原子自旋振荡信号, 通过将光检信号放大、滤波、移相再施加到横向激励磁场线圈上, 产生的交变磁场同步驱动核自旋进动, 实现闭环自激的原子自旋无衰减振荡信号. 本文从实验角度研究了该自旋振荡器的开环频率响应特性, 及闭环状态下的自旋振荡频率移动随增益、相位参数变化的关系. 实验结果与前期理论预期基本符合, 并为提高该振荡器的频率稳定性提供重要参考.

关键词: 原子自旋振荡器; 频移; 增益; 相位

中图分类号: O562.3

文献标志码: A

DOI: 10.19855/j.1000-0364.2025.044001

Experimental study on self-driven hybrid atomic spin oscillator

MA Qian-Jin^{1,2}, LI Er-Wei^{1,2}, LIU Guo-Bin^{1,2}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Atomic comagnetometers based on alkali-metal-noble gas hybrid spin system are widely used for both fundamental and practical applications, such as the search for new interactions or axion-like particles, as well as practical applications such as inertial-navigation and biomagnetism detection. Based on the Rb-Xe atomic comagnetometer, a self-driven hybrid atomic spin oscillator is realized. Here we experimentally study the open-loop frequency response characteristics of the oscillator and the relations between the oscillation frequency shift and the gain and phase parameters in the closed-loop state, which provides important reference for improving the frequency stability of the oscillator.

Key words: Atomic spin oscillator; Frequency shift; Gain; Phase

1 引言

自 1962 年第一次实现了基于光抽运原理的原子磁力计^[1], 并且给出了光抽运磁力计的理论模型以来, 原子磁力计的发展备受关注 and 重视. 目前无自旋交换弛豫原子磁力计的测量磁场极限已

超过超导量子干涉仪, 成为最灵敏的测磁装置^[2]. 共磁力计是原子磁力计的一种, 指测量探头中至少含有两个旋磁比不同且占据相同空间的原子. 当今使用碱金属-惰性气体混合体系共磁力计进行磁场探测的研究已成为热点^[3], 并被用于基础物理研究和实际应用中, 如寻找新相互作用

收稿日期: 2023-10-08

基金项目: 中国科学院重点人才项目 BRB(E209YC1101)

作者简介: 马千金(1997—), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为原子共磁力计精密测量与应用.

E-mail: maqianjin@ntsc.ac.cn

通信作者: 刘国宾. E-mail: liuguobin@ntsc.ac.cn

用力和暗物质粒子^[4,5], 及惯性导航传感器^[6]等.

近年来, 国内外许多科研机构在基于碱金属-惰性气体混合体系共磁力计上展开了相关研究, 并取得了一定的进展. 1994年, 美国 Chupp 等人实现了³He/¹²⁹Xe Zeeman Maser 式的原子共磁力计, 在 1000 ~ 10000 秒积分时间, 实现 1×10^{-2} Hz/ $\tau^{3/2}$ 的频率稳定度下降趋势^[7]; 2018年, Sato 等人实现了¹²⁹Xe - ¹³¹Xe 双原子自旋 Maser, 在 10000 秒积分时间实现了 6.2×10^{-6} Hz 的频率稳定度^[8]; 2018年, 美国普林斯顿大学 Romalis 小组使用自旋退耦合技术研究了 Rb - ³He - ¹²⁹Xe 共磁力计, 实现了 8 小时内 7 nHz 的频率稳定度^[9]; 2019年, 美国威斯康星麦迪逊大学 Walker 小组提出使用脉冲磁场激发, 研究了自旋横向极化的 Rb - ¹²⁹Xe - ¹³¹Xe 共磁力计, 实现了约 1 μ Hz 的频率稳定度^[10]; 2020年, 中科大盛东小组研究了 Rb - ¹²⁹Xe - ¹³¹Xe 共磁力计中方形原子气室中¹³¹Xe 原子核的电四极频移, 提出了量化和控制该频移的方法^[11], 并于 2021 年实现了 0.15 μ Hz 的频率稳定度^[12]; 2021年, 中科大彭新华小组提出了一种闭环反馈磁场结合 Floquet 调制磁场的 Rb - ¹²⁹Xe 共磁力计方案, 实现了 $7.2 fT/\sqrt{Hz}$ 的磁场灵敏度^[13].

影响原子共磁力计灵敏度的主要因素是原子自旋进动信号的信噪比和线宽^[9,14]. 为了提高信噪比, 经常使用各种参数调制和锁定检测来抑制噪声^[4,10,12,15]; 对于线宽, 增加自旋弛豫时间是首要考虑途径, 如在原子蒸气室中填充缓冲气体或抗弛豫涂层^[16,17]. 碱金属-惰性气体共磁力计的优势是具有更长的核自旋弛豫时间, 因此, 我们提出了基于碱金属-惰性气体共磁力计的自激式混合原子自旋振荡器^[18], 并从理论和实验上展开了探索. 与 Chupp 等人研究的³He 和¹²⁹Xe 塞曼脉泽相比^[7], 我们的原子气室中包括 Rb 自旋和 Xe 自旋, 其中 Rb 自旋被作为 Xe 自旋进动信号的探测器; 并且我们使用光学偏振器来读出自旋进动信号, 而不是传统的基于法拉第电磁感应的耦合线圈. 与 Sato 等人研究的¹²⁹Xe 和¹³¹Xe 自旋脉泽相比^[8], 主要的区别是他们在¹²⁹Xe 自旋的基础上引入了¹³¹Xe 自旋. 与彭新华课题组的 Floquet Maser 方案相比^[13], 我们没有使用外加的周期调制磁场和锁相检测技术, 简化了结构. 在我们已有的工作基础^[18]上, 本文将从实验角度具体研究该混合原子自旋振荡器的开环特性, 以及振荡器

的频移与增益、相位等参数的关系.

2 实验装置简介

以碱金属-惰性气体为核心, 我们自主搭建了 Rb - Xe 原子共磁力计装置, 并设计了具有增益和相位参数可调的驱动电路系统^[18], 如图 1 所示.

Rb - Xe 原子气室是共磁力计的核心部分, 气室内充有碱金属⁸⁷Rb、4 torr 惰性气体¹²⁹Xe、35 torr 惰性气体¹³¹Xe 以及几十 torr 缓冲气体 N₂, 其形状为直径约 10 mm 的球体. 采用薄膜交流电加热的方式对原子气室进行加热控温, 加热温度设定为 120 °C, 加热装置温度控制精度可达 0.003 °C. 原子气室位于 x, y, z 三个方向的三组亥姆霍兹线圈中心, 三组线圈的电流-磁场转换系数均为 $C_{B-I} \sim 2$ mG/mA, 其中 z 磁场线圈用于提供原子自旋 Larmor 进动的主磁场 B_z , x 磁场线圈产生使原子自旋磁化偏离 z 方向的磁力矩, y 磁场线圈提供闭环反馈激励磁场. 为了避免地磁场及环境磁场噪声对共磁力计磁场测量的干扰, 使用磁屏蔽筒装置来实现磁场屏蔽.

共磁力计的外部光路采用两路相互垂直的激光分别作为泵浦光和探测光. 泵浦光为一束沿 z 轴方向传播的圆偏振光, 波长为 795 nm, 功率为 46 mW, 射入到原子气室中使 Rb 自旋方向一致, 实现了碱金属原子的极化. 极化后的 Rb 在高温下通过自旋交换碰撞将极化转移给 Xe^[19], 然后极化的 Xe 自旋又以经典的方式驱动 Rb 自旋^[20]. 探测光为沿 x 轴方向传播的线偏振光, 波长为 780 nm, 功率为 1.2 mW, 我们使用高消光比的线偏振片、偏振分束器和平衡光电探测器, 构成了高灵敏度的光学偏振检测计. 探测光的偏振方向随着 Rb 自旋磁化场发生变化, 被偏振检测计记录下来, 作为共磁力计的原始输出信号.

驱动电路系统包括对光电探测器输出的电信号进行放大和滤波处理的窄带通滤波放大器, 可调节相位的相移器, 可调节增益的电流驱动器, 以及实现开环和闭环切换功能的可通过编程控制的继电器. 在闭环状态下, 驱动电路的输出电流施加到 y 磁场线圈, 产生激励磁场, 从而实现闭环反馈激励原子自旋产生持续的振荡信号.

3 共磁力计的开环频率响应与 Rb 原子自旋磁化场的测量实验

首先, 我们通过继电器断开 Rb - Xe 共磁力

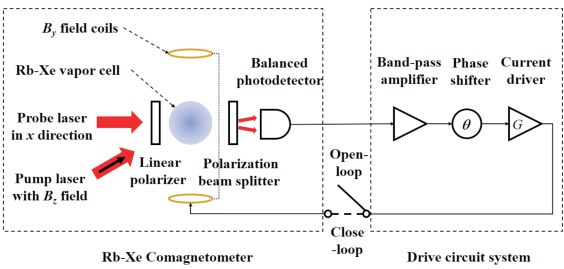


图 1 自驱动 Rb - Xe 自旋振荡器实验原理图
Fig. 1 Experimental schematic of the self-driving Rb - Xe spin oscillator

计和驱动电路系统之间的连接, 即将原子自旋振荡器设定在开环状态下, 改变主磁场 B_z 的大小, 获得不同的 ^{129}Xe 和 ^{131}Xe 自旋磁共振谱线, 通过拟合得到谱线强度随 Xe 原子的自旋 NMR 频率的变化趋势, 即共磁力计的频率响应特征, 如图 2 所示. 从图中可以看出, Rb 原子自旋对于 Xe 原子自旋的 Larmor 进动呈现低通响应特点, 即 Xe 原子 Larmor 频率越低, 输出 Rb 原子信号幅度越大, 这为我们设计原子自旋振荡器的驱动电路确立了原则, 即 Xe 原子 Larmor 频率越低越好. 另一方面, 由于电磁噪声的 $1/f$ 特性, 频率越低, 噪声越大, 折中考虑, 我们将 Xe 原子 Larmor 频率设定在 35 Hz 附近, 并由此设计了以带通滤波器为核心的驱动电路系统.

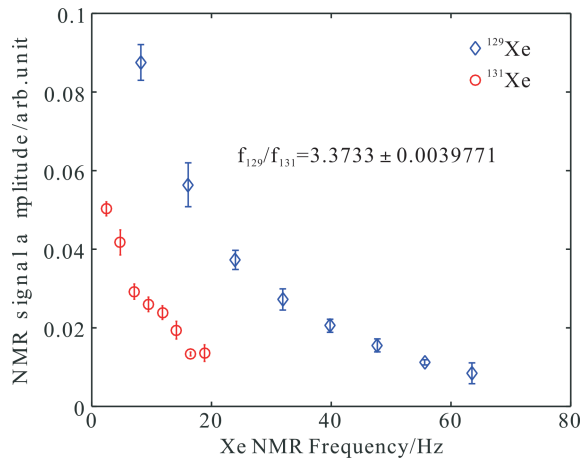


图 2 Rb - Xe 自旋振荡器频率响应特征
Fig. 2 Frequency response characteristics of the Rb - Xe spin oscillator

另一方面, 我们定义开环增益 G 为施加在 y 线圈上的磁场与 Rb 原子自旋磁化场的比值, 即 $G = B_y/M_{Rb}$. 为了计算 G , 需要先测出 B_{Rb} 的大小. 首先在原子自旋振荡器的开环状态下, 将 $1/4$ 波片固定在角度 θ_0 处, 使泵浦光为左旋圆偏振光, 记录此时开环状态下的 ^{129}Xe 自旋 Larmor 进动频

率, 接着将 $1/4$ 波片转动 90° , 使泵浦光为右旋圆偏振光, 再次记录开环状态下的 ^{129}Xe 自旋 Larmor 进动频率, 如图 3 所示. 我们通过分析数据得到泵浦光的偏振方向从 σ^+ 到 σ^- 时 ^{129}Xe 自旋进动的频率变化 $\Delta\nu_{Xe}$, 该频移量是由于 ^{129}Xe 感受到的总磁场 $B = B_z \pm \lambda M_{Rb}$ 的变化而导致的, 即 $\nu_{Xe} = \gamma^{Xe} \times B = \gamma^{Xe} \times (B_z \pm \lambda M_{Rb})$, 其中 λ 为 Rb - Xe 自旋交换碰撞增强因子, 由此可得到真空中的 Rb 自旋磁化场 M_{Rb} .

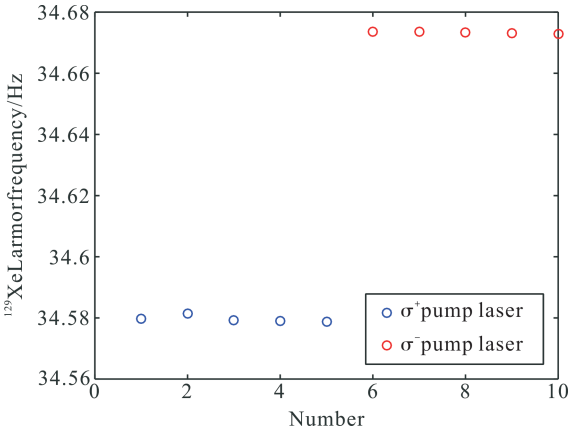


图 3 泵浦光偏振方向从 σ^+ 到 σ^- 时 Xe 自旋进动频率变化
Fig. 3 Variation of Xe spin - precession frequency while reversing the pump - laser polarization from σ^+ to σ^-

4 自旋振荡器的闭环临界自激与频移实验

为了探究产生自激振荡信号产生的临界条件, 我们通过继电器恢复 Rb - Xe 共磁力计和驱动电路系统之间的连接, 首先将相位 θ 的值固定在 90° , 驱动电压固定在 0.4 V, 然后逐渐改变负载电阻的阻值, 获得不同驱动电流下闭环自激的原子自旋振荡信号, 如图 4 所示.

从实验结果可以看出, 在相位固定不变的情况下, 自旋振荡信号会随着驱动电流的变化产生不同的现象. 当驱动电流较小时, 此时 y 磁场线圈上产生的激励磁场较小, 导致闭环自激效果较差, 振荡信号呈现以原子本征弛豫时间为特征常数的指数衰减 (约为 7 秒), 如图 4 最上方的曲线所示. 当电流增加使得 y 线圈激励磁场增加到某个阈值时, 系统中逐渐产生自旋回波信号; 随着电流继续增加, 回波信号逐渐趋于稳定, 直至产生稳定持续的无衰减振荡信号, 如图 4 下方的三条曲线所示. 实验上发现, 当 y 方向磁场线圈上

的驱动电流达到约 20 μA 时, 即驱动场强度 B_y 为 40 μG , 此时自旋振荡能够被激发.

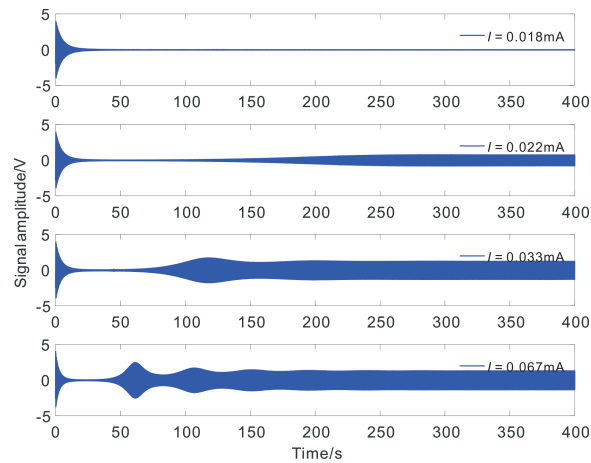


图4 自激振荡信号随驱动电流的变化
Fig. 4 Variation of self-driven oscillation signal with driving current

确定临界激励磁场参数后, 接下来我们从实验角度探究了该自旋振荡器的中心振荡信号的频移对于激励磁场的增益 G (正比于驱动电压) 和相位 θ 的响应特性. 我们定义混合原子自旋振荡的频移为其闭环振荡频率与开环振荡频率之差. 实验上, 我们将自旋振荡器开环, 测量一次频率, 然后再闭环, 设定驱动电压和相位 θ , 测试振荡频率. 随后逐点改变驱动电压或 θ , 将上述实验重复多次, 获得 ^{129}Xe 自旋 Larmor 进动频率的变化趋势, 如图 5 所示, 其中直线表示开环频率数据, 散点表示闭环频率数据.

从实验结果可以看出, 当增益参数不变时, 在一定区间内, 频移随相位的变化几乎呈现线性关系, 相位偏离 90° 越多, 频移则越大. 另一方面, 在相同相位条件下, 增益参数越大时, 频移也越大. 该实验研究与理论模拟结果基本吻合, 验证了理论模型的正确性^[18], 同时也为将来实现原子自旋振荡器的无频移工作, 提升其频率稳定性提供了重要参考.

5 结论与展望

本文提出并研究了一种基于碱金属-惰性气体混合体系的原子自旋振荡器的工作特性. 研究了开环状态下的 Rb 原子对 Xe 原子自旋 Larmor 进动的频率响应, 测量了 Rb 原子自旋磁化场的大小. 实验给出了闭环状态下, 振荡器振荡频率的移动与开环增益和相位参数的依赖关系, 验证了理论模型的正确性, 并为实现原子自旋振荡器的

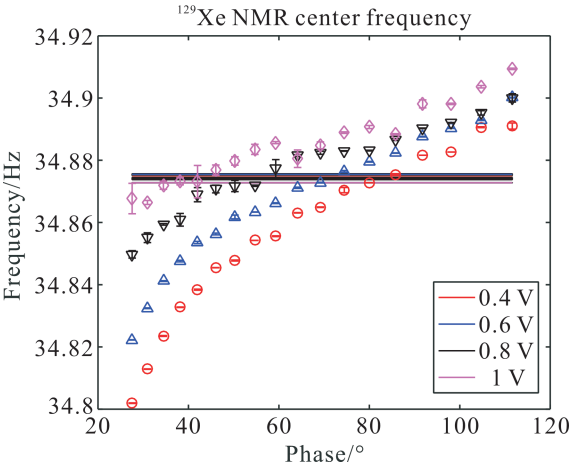


图5 Rb-Xe 自旋振荡器频移随增益与相位的变化
Fig. 5 Variation of frequency shift of the Rb-Xe spin oscillator with gain and phase

无频移工作, 进一步提高其频率稳定度提供了重要参数依据.

混合原子自旋振荡器, 以其简单的结构, 初步测试达到了较高的稳定度. 预期在采取激光功率稳定, 提高主磁场电流源稳定性等措施后, 能够获得更高的频率稳定度至 10 nHz 水平, 在惯性导航传感与地球自转测量陀螺仪等领域发挥作用.

参考文献:

[1] Bloom A L. Principles of operation of the rubidium vapor magnetometer [J]. *Appl. Opt.*, 1962, 1: 61.
[2] Kominis I K, Kornack T W, Allred J C, et al. A sub-femtotesla multichannel atomic magnetometer [J]. *Nature*, 2003, 422: 596.
[3] Li H, Jiang M, Zhu Z N, et al. Calibration of magnetic field measurement capability of rubidium-xenon vapor cell atomic magnetometer [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2019, 68: 160701 (in Chinese) [李辉, 江敏, 朱振南, 等. 铷-氙气室原子磁力仪系统磁场测量能力的标定 [J]. *物理学报*, 2019, 68: 160701]
[4] Bulatowicz M, Griffith R, Larsen M, et al. Laboratory search for a long-range odd, p -odd interaction from axionlike particles using dual-species nuclear magnetic resonance with polarized ^{129}Xe and ^{131}Xe gas [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 111: 102001.
[5] Pospelov M, Pustelny S, Ledbetter M P, et al. Detecting domain walls of axionlike models using terrestrial experiments [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 110: 021803.
[6] Kornack T W, Ghosh R K, Romalis M V. Nuclear spin gyroscope based on an atomic comagnetometer [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 95: 230801.
[7] Chupp T E, Hoare R J, Walsworth R L, et al. Spin-

- exchange – pumped ^3He and ^{129}Xe Zeeman masers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, 72: 2363.
- [8] Sato T, Ichikawa Y, Kojima S, *et al.* Development of co – located ^{129}Xe and ^{131}Xe nuclear spin masers with external feedback scheme [J]. *Phys. Lett. A*, 2018, 382: 588.
- [9] Limes M E, Sheng D, Romalis M V. ^3He – ^{129}Xe Co-magnetometry using ^{87}Rb detection and decoupling [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2018, 120: 033401.
- [10] Thrasher D A, Sorensen S S, Weber J, *et al.* Continuous comagnetometry using transversely polarized Xe isotopes [J]. *Phys. Rev. A*, 2019, 100: 061403.
- [11] Feng Y K, Zhang S B, Lu Z T, *et al.* Electric quadrupole shifts of the precession frequencies of ^{131}Xe atoms in rectangular cells [J]. *Phys. Rev. A*, 2020, 102: 043109.
- [12] Hao C P, Yu Q Q, Yuan C Q, *et al.* Herriott – cavity – assisted closed – loop Xe isotope comagnetometer [J]. *Phys. Rev. A*, 2021, 103: 053523.
- [13] Jiang M, Su H W, Wu Z, *et al.* Floquet maser [J]. *Sci. Adv.*, 2021, 7: 0719.
- [14] Terrano W A, Meinel J, Sachdeva N, *et al.* Frequency shifts in noble – gas comagnetometers [J]. *Phys. Rev. A*, 2019, 100: 012502.
- [15] Li S, Vachaspati P, Sheng D, *et al.* Optical rotation in excess of 100 rad generated by Rb vapor in a multipass cell [J]. *Phys. Rev. A*, 2011, 84: 061403.
- [16] Dehmelt H G. Slow spin relaxation of optically polarized sodium atoms [J]. *Phys. Rev.*, 1957, 105: 1487.
- [17] Bouchiat M A, Brossel J. Relaxation of optically pumped Rb atoms on paraffin – coated walls [J]. *Phys. Rev.*, 1966, 147: 41.
- [18] Li E W, Ma Q J, Liu G B, *et al.* Self – driven hybrid atomic spin oscillator [J]. *Phys. Rev. Appl.*, 2023, 20: 014029.
- [19] Walker T G, Happer W. Spin – exchange optical pumping of noble – gas nuclei [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1997, 69: 629.
- [20] Liu G B, Guarrera V, Gu S H, *et al.* Response dynamics of an alkali – metal – noble – gas hybrid trispin system [J]. *Phys. Rev. A*, 2021, 104: 032827.