

文章编号 1004-924X(2014)07-1808-06

## 无自旋交换弛豫原子磁强计的主动磁补偿

楚中毅, 孙晓光\*, 万双爱, 房建成

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 北京航空航天大学惯性技术重点实验室, 北京 100191)

**摘要:** 由于外界磁场扰动会降低无自旋交换弛豫(SERF)原子磁强计的磁场测量灵敏度, 本文根据 SERF 原子磁强计的测量原理, 提出了一种基于原位磁测补偿外部磁场扰动的方法。该方法通过调制解调的方法对 3 个方向的磁场进行解耦, 实现 3 个方向磁场信息的独立测量。然后, 将 3 个方向磁场的测量信息作为反馈, 调节电流源输出给线圈的电流, 使线圈产生一个与外界扰动磁场大小相同方向相反的补偿磁场。最后, 在现有的 SERF 原子磁强计实验平台上搭建了主动磁补偿系统, 实现了对外部扰动磁场的补偿。与手动补偿方式相比, 本文提出的主动磁补偿方法可将剩余磁场的平均值从 0.317 8 nT 降低到 0.040 4 nT, 同时将剩余磁场的均方差由 0.348 1 nT 降低到 0.024 7 nT。得到的实验结果验证了本文所述方法的有效性。

**关键词:** 原子磁强计; 主动磁补偿; 无自旋弛豫状态; 解耦; 原位磁测

**中图分类号:** TM937 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142207.1808

## Active magnetic compensation of spin-exchange-relaxation-free atomic magnetometer

CHU Zhong-yi, SUN Xiao-guang\*, WAN Shuang-ai, FANG Jian-cheng

(*Science and Technology on Inertial Laboratory, School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: 136072016@163.com*

**Abstract:** As the measuring sensitivity of a Spin-Exchange-Relaxation-Free (SERF) atomic magnetometer will be reduced when it is suffered from the disturbance by environment magnetic field. Therefore, according to the measuring principle of the SERF atomic magnetometer, this paper proposes a active magnetic compensation method for the external magnetic field disturbance based on in-situ magnetic measurement. Firstly, a modem was used to decouple the magnetic field in three directions to achieve the magnetic information of the three axes. Then, the measuring information from three directions was taken as a feedback to adjust the current of coil to generate a magnetic field which is opposite and equal to the disturbance. Finally, an active magnetic compensation system for SERF atomic magnetometer was built to compensate the magnetic disturbance in real time. Compared with the manual compensation method, the proposed method reduces the surplus magnetic field from 0.317 8 nT to 0.040 4 nT, and the mean square error from 0.348 1 nT to 0.024 7 nT. The experimental results validate the efficiency of the active magnetic compensation method.

**收稿日期:** 2013-12-07; **修订日期:** 2014-01-25.

**基金项目:** 国家自然科学基金国家重大科研仪器专项基金资助项目(No. 61227902)

**Key words:** atomic magnetometer; active magnetic compensation; spin-exchange-relaxation-free (SERF); decouple; in-situ magnetic measurement

## 1 引言

近年来,随着弱磁探测技术在物质结构分析<sup>[1]</sup>、矿产勘探<sup>[2-3]</sup>、生物医疗<sup>[4]</sup>及深海反潜<sup>[5]</sup>等方面的广泛应用,对磁强计的测量灵敏度要求越来越高。目前测量灵敏度达到亚 fT 量级的磁强计只有无自旋交换弛豫(Spin-Exchange-Relaxation-Free, SERF)原子磁强计<sup>[6-10]</sup>。SERF 原子磁强计通过测量原子自旋在磁场作用下的拉莫尔进动角完成磁场测量<sup>[11-14]</sup>,其在 2002 年首次实现原理验证就已经达到 15 fT/Hz<sup>1/2</sup> 的测量灵敏度<sup>[15]</sup>,经过几年的发展,测量灵敏度已经达到了 0.16 fT/Hz<sup>1/2</sup>。并且通过对各项技术的改进, SERF 原子磁强计可达 10<sup>-4</sup> fT/Hz<sup>1/2</sup> 的理论测量灵敏度<sup>[16-17]</sup>。

超高灵敏度 SERF 原子磁强计以高质量原子自旋 SERF 状态为前提,但是来自地磁场等外界磁场的干扰会影响原子自旋 SERF 状态的质量,因此需要对外界磁场进行屏蔽和补偿。目前主要采取磁屏蔽筒,但是由于磁屏蔽材料本身的缺陷,磁屏蔽筒只能将外界扰动磁场衰减到 nT 量级,所以需要一种补偿外界扰动磁场的方法来提高原子自旋 SERF 状态的质量。国外的研究机构,如普林斯顿大学和威斯康辛大学麦迪逊分校,设计了一套使用磁通门磁强计作为传感器的主动磁补偿系统来补偿磁屏蔽筒内 3 个方向的扰动磁场<sup>[18]</sup>,但磁通门磁强计灵敏度较低,且其本身就是一个磁干扰源,阻碍了 SERF 原子磁强计磁场测量灵敏度的进一步提高;美国 Sandia 国家实验室基于原位磁测,使用螺线管线圈作为补偿磁场的执行器,设计了单轴的主动磁补偿系统<sup>[4]</sup>,但是此系统对另外两个轴向的扰动磁场没有补偿作用,因此经过补偿后的剩余磁场仍然较大。国内的研究机构,如北京航空航天大学使用手动补偿的方式对扰动磁场进行补偿<sup>[11]</sup>,但补偿扰动磁场精度较低,只能将磁场补偿到亚 nT 量级,而且对于扰动磁场的变化不能进行修正,所以采用这种方式补偿磁场的 SERF 原子磁强计难以实现高质量 SERF 状态。因此,研究一种可以补偿磁场扰动的主动磁补偿系统,成为有效提高 SERF 原子磁强计

磁场测量灵敏度的关键技术之一。

本文根据 SERF 原子磁强计测量磁场的基本原理,提出了一种基于原位磁测的主动磁补偿方法,在此基础上基于 LabVIEW 设计了可以补偿外界扰动磁场的主动磁补偿系统。最后结合 SERF 原子磁强计实验平台进行了实验验证。

## 2 SERF 原子磁强计试验平台组成

图 1 所示为原子磁强计试验平台示意图。主要由光抽运系统、光检测系统、磁屏蔽系统、碱金属气室和加热室等组成。

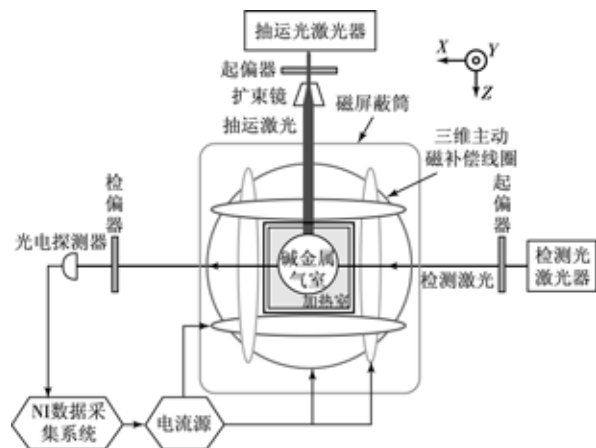


图 1 SERF 原子磁强计试验平台构成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SERF atom magnetometer experimental setup

光抽运系统由抽运激光器、起偏器和扩束镜组成。主要作用是驱动原子自旋,使其自旋方向一致。光检测系统由检测激光器、起偏器、检偏器和光电探测器组成。主要作用是检测碱金属原子的自旋指向<sup>[19]</sup>。磁屏蔽系统分为磁屏蔽筒和主动磁补偿系统。磁屏蔽筒可将外界扰动磁场衰减到 nT 量级。但仍然会影响原子自旋的 SERF 状态,因此还需要进行主动磁补偿。主动磁补偿系统由 NI 数据采集系统、电流源和三维主动磁补偿线圈组成。主要是根据数据采集系统所得的磁场信息,控制电流源输出给三维主动磁补偿线圈的电流,产生与扰动磁场方向相反大小相同的补偿磁场来补偿扰动。碱金属气室内装有需要被抽

运至 SERF 状态的碱金属原子(Cs),碱金属气室外增加了一个加热室,以保证原子处于高质量 SERF 状态要求的温度范围。

由上述可知 SERF 原子磁强计主动磁补偿系统的工作过程为:首先抽运激光将原子抽运至原子自旋状态,采用光电探测器检测原子自旋的拉莫尔进动角,根据数据采集系统采集到的原位磁场信息,控制电流源给三维主动磁补偿线圈的电流来补偿扰动磁场。

### 3 SERF 原子磁强计主动磁补偿原理

SERF 原子磁强计的碱金属气室内只有一种碱金属原子——Cs,描述这种碱金属原子的动力学方程为<sup>[8]</sup>:

$$\frac{d}{dt}\mathbf{S}=\frac{1}{q}\left[\gamma\mathbf{B}\times\mathbf{S}+R_{OP}\left[\frac{1}{2}s\hat{z}-\mathbf{S}\right]-R_{rel}\mathbf{S}\right], \quad (1)$$

式中: $\mathbf{S}$ 表示原子自旋极化率矢量; $q$ 表示减慢因子; $\mathbf{B}$ 表示磁场矢量; $\gamma$ 表示电子旋磁比; $R_{OP}$ 表示抽运激光的抽运率。 $s$ 表示光子极化率; $R_{rel}$ 表示总的弛豫率。

为简化计算,定义一个无量纲的磁场分量:

$$\beta=\left[\frac{\gamma}{R_{OP}+R_{rel}}\right]\mathbf{B}. \quad (2)$$

假设磁场缓慢变化,认为  $d\mathbf{S}/dt=0$ ,由此可得式(1)的稳态解<sup>[8]</sup>:

$$\begin{cases} S_x=S_0\frac{\beta_y+\beta_x\beta_z}{1+(\beta_x^2+\beta_y^2+\beta_z^2)}, & (3) \\ S_y=S_0\frac{-\beta_x+\beta_y\beta_z}{1+(\beta_x^2+\beta_y^2+\beta_z^2)}, & (4) \\ S_z=S_0\frac{1+\beta_z^2}{1+(\beta_x^2+\beta_y^2+\beta_z^2)}, & (5) \end{cases}$$

式中: $S_0$ 为常值,如式(6)所示:

$$S_0=\frac{sR_{OP}}{2(R_{OP}+R_{rel})}, \quad (6)$$

$S_x$ 、 $S_y$ 、 $S_z$ 表示各个轴的原子自旋极化率,可被光电探测器探测到,且正比于光电探测器的输出。系统中检测光在 X 轴方向,光电探测器的输出正比于  $S_x$ 。假设光电探测器比例系数为  $k$ ,在磁场非常小的情况下近似认为  $|\beta|\ll 1$ ,式(3)可化简为:

$$V_{light}=kS_0(\beta_y+\beta_x\beta_z), \quad (7)$$

其中: $\beta_x$ 、 $\beta_y$ 、 $\beta_z$ 表示 3 个轴的磁场信息,正比于磁场强度。由式(7)可知光电探测器的输出包含有 3 个轴向的磁场信息。

在进行超高灵敏磁场测量之前需要先对 3 个轴的磁场进行补偿,使补偿之后的剩磁非常小,满足  $|\beta|\ll 1$  的条件,以实现高质量原子自旋 SERF 状态。由式(7)可知,X 轴和 Z 轴的磁场相互耦合,无法直接进行单独测量,因此需要首先对 X 轴磁场和 Z 轴磁场进行解耦。首先对这两个轴的磁场进行调制,如式(8)、式(9)所示:

$$\beta_x=\beta_x^0+\beta_x^{\text{mod}}\sin(\omega_x t), \quad (8)$$

$$\beta_z=\beta_z^0+\beta_z^{\text{mod}}\sin(\omega_z t), \quad (9)$$

式中: $\beta_x^0$ 和  $\beta_z^0$ 是磁场的常值分量, $\beta_x^{\text{mod}}$ 和  $\beta_z^{\text{mod}}$ 是调制幅值, $\omega_x$ 和  $\omega_z$ 是调制频率,将式(8)、(9)代入式(7)并展开可得:

$$V_{light}=kS_0[\beta_y+\beta_x^0\beta_z^0+\beta_x^0\beta_z^{\text{mod}}\sin(\omega_z t)+\beta_x^{\text{mod}}\sin(\omega_x t)+O(\beta^3)]. \quad (10)$$

从式中可以看出光电探测器的输出中各频率分量表示了不同轴的磁场信息,将其送入锁相放大器,若锁相放大器的输入频率为  $\omega_x$ ,就可以从其输出信号中提取出  $\beta_x$ ,即 X 轴的原位磁场信息,将此信息作为反馈控制输出给 X 轴方向线圈的电流,就可以补偿 X 轴磁场。使用同样的方法可以补偿 Z 轴方向的磁场。

若 X 轴磁场和 Z 轴磁场都被补偿到极小,近似认为  $\beta_x\beta_z\approx 0$ ,式(7)可简化为:

$$V_{light}\approx kS_0\beta_y. \quad (11)$$

此时光电探测器的输出正比于 Y 轴原位磁场信息,由此采用与 X 轴、Z 轴相同的方法就可以直接补偿 Y 轴磁场。

根据以上论述可知,主动磁补偿系统的工作原理为:首先调制 Z 轴磁场,得到 X 轴的原位磁场信息,并对 X 轴磁场进行补偿;然后调制 X 轴磁场,得到 Z 轴的原位磁场信息,对 Z 轴磁场进行补偿。当完成 X 轴 Z 轴磁场补偿后,近似认为光电探测器输出仅为 Y 轴的原位磁场信息,由此再对 Y 轴磁场进行补偿。

为验证上述方法的有效性,进行了 Simulink 系统仿真,仿真参数选择如下: $\gamma=2.1985\times 10^{10}$  rad $\cdot$ s $^{-1}$ /T; $R_{OP}=6000$  s $^{-1}$ ; $R_{rel}=12000$  s $^{-1}$ ; $\beta_x^{\text{mod}}$

= 16 pT;  $\beta_z^{\text{mod}} = 16 \text{ pT}$ ;  $\omega_x = 2\pi \text{ rad/s}$ ;  $\omega_z = 0.2\pi \text{ rad/s}$ .

在系统中加入均值为 1.5 nT, 方差为 100 pT 的扰动磁场, 系统输出如图 2 所示。

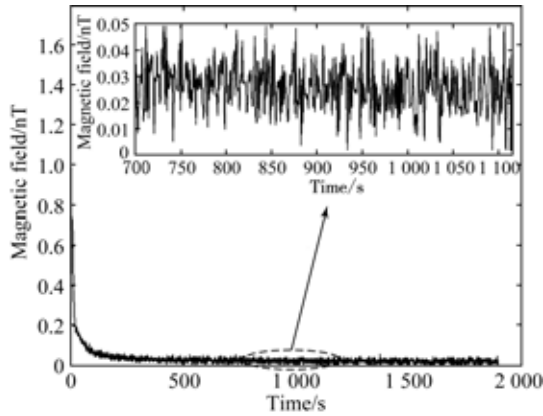


图 2 SERF 原子磁强计主动磁补偿系统 Simulink 系统输出

Fig.2 Simulink system output of active magnetic compensation system for SERF atom magnetometer

由以上仿真结果可知, 基于主动磁补偿方法的调节, 经过 200 s 将磁场补偿到 25 pT, 且始终保持稳定, 不受外界磁场扰动影响。

### 4 SERF 原子磁强计主动磁补偿系统软件设计

基于上述原理, 在 LabVIEW 平台上开发了 SERF 原子磁强计的主动磁补偿系统软件, 系统执行流程如图 3 所示。

(1) 首先对系统进行初始化, 包括参数设定和电流源初始化命令等。

(2) 待系统信号稳定后, 调制 Z 轴方向的磁场, 调制幅度为  $\beta_z^{\text{mod}}$ , 调制频率为  $\omega_z$ 。

(3) 根据锁相放大器的输出信号补偿 X 轴磁场。

(4) 等待系统信号稳定后, 调制 X 轴方向的磁场, 调制幅度为  $\beta_x^{\text{mod}}$ , 调制频率为  $\omega_x$ 。

(5) 根据锁相放大器的输出信号补偿 Z 轴磁场。

(6) 判断是否达到了 X、Z 轴的补偿极限, 如果达到了补偿极限则转到步骤(7), 若没有达到补偿极限则转到步骤(2)。

(7) 根据输出补偿 Y 轴方向磁场。

(8) 判断是否完成补偿, 若完成补偿则停止, 若没有完成补偿则转到步骤(2)。

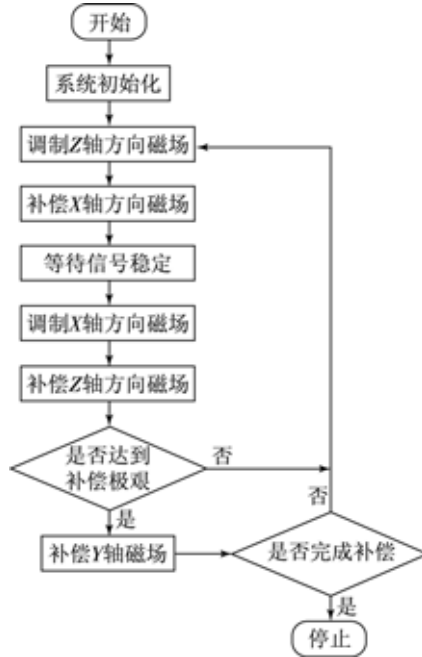


图 3 主动磁补偿系统程序流程图

Fig.3 Software flow of active magnetic compensation system

### 5 实验验证

将上述主动磁补偿系统接入现有 SERF 原子自旋磁强计实验平台进行实验。图 4 所示为实验系统的实物图。图 5、图 6 分别为使用手动补偿和主动磁补偿系统时的剩磁。

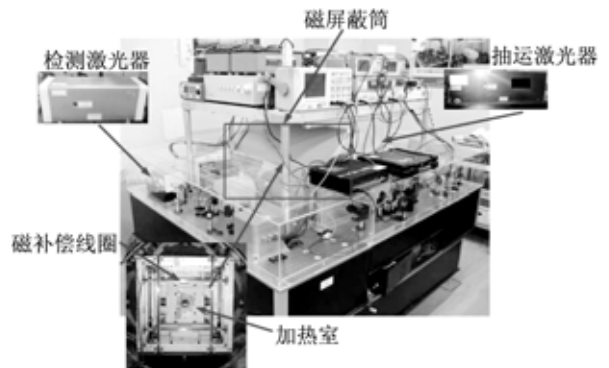


图 4 SERF 原子磁强计主动磁补偿系统实物图

Fig.4 Hardware of active magnetic compensation system for SERF atom magnetometer

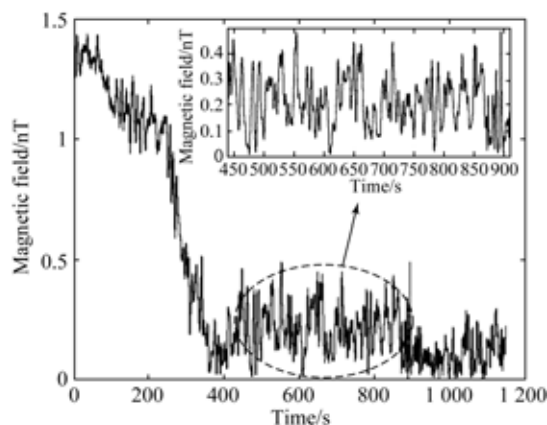


图 5 使用手动补偿时的剩磁

Fig. 5 Surplus magnetic field by using manual compensation method

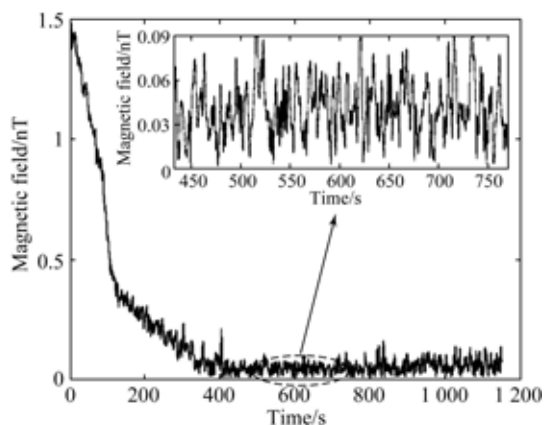


图 6 使用主动磁补偿系统时的剩磁

Fig. 6 Surplus magnetic field by using active magnetic compensation system

从图 5 可以看出经过手动补偿后剩磁从 1.4 nT 逐渐降低,在 450 s 左右达到 300 pT,由于无法修正补偿磁场,因此剩磁受外界磁场扰动影响较大。图 6 所示为使用主动磁补偿系统时的剩磁,由图中可以看出,经过主动磁补偿系统的调节

作用后,在 320 s 将磁场补偿到 40 pT,并在之后保持稳定。表 1 所示为对使用手动补偿以及使用主动磁补偿后的剩磁数据求平均值和均方差后的对比结果:

表 1 两种补偿方式的剩磁平均值和均方差对比

Tab. 1 Surplus magnetic field averages and mean square errors of two comparison methods

(nT)

	手动补偿	主动磁补偿
平均值	0.317 8	0.040 4
均方差	0.348 1	0.024 7

由表 1 可以看出,使用主动磁补偿系统后,剩磁由 0.317 8 nT 降低到 0.040 4 nT,均方差由 0.348 1 nT 降低到 0.024 7 nT。实验结果表明,基于本文所述方法搭建起的主动磁补偿系统有效地补偿了由地磁场和磁屏蔽材料热效应而引入的外界磁场扰动,将剩磁降低到了 pT 量级。

## 6 结 论

针对提高 SERF 原子磁强计测量灵敏度需要补偿外界磁场扰动的要求,根据 SERF 原子磁强计的磁场测量原理,提出了一种基于原位磁测的主动磁补偿方法。在实验室现有的 SERF 原子磁强计平台上搭建了主动磁补偿系统,并进行了实验验证。与手动补偿方式相比,该方法将剩磁由 0.317 8 nT 降低到 0.040 4 nT,均方差由 0.348 1 nT 降低到 0.024 7 nT。实验结果表明,主动磁补偿系统有效地补偿了外界磁场扰动,将剩磁降低到 pT 量级,为下一步提高 SERF 原子磁强计的磁场测量灵敏度奠定了技术基础。

## 参考文献:

- [1] BUDKER D, ROMALIS M. Optical magnetometry [J]. *Nature Physics*, Apr., 2007, 3(4): 227-234.
- [2] 张昌达,董浩斌. 量子磁力仪评说[J]. *工程地球物理学报*, 2004, 1(6): 499-508.  
ZHANG CH D, DONG H B. A review of quantum magnetometers [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2004, 1(6): 499-508. (in

Chinese)

- [3] 张昌达. 量子磁力仪研究和开发近况[J]. *物探与化探*, 2005, 29(4): 283-287  
ZHANG CH D. Recent advances in the research and development of quantum magnetometers [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2005, 29(4): 283-287. (in Chinese)
- [4] SCHWINDT P, JOHNSON C N. Atomic magnetometer for human magnetoencephalography [R]. *Sandia*

- National Laboratories, 2010.
- [5] 叶萍,张炎华,翟传润. 磁干扰误差补偿算法在舰船及水下航向测量技术中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(9): 1297-1301.  
YE P, ZHANG Y H, ZHAI CH R. Geomagnetism compensation based on disturbance analysis for shipboard and underwater attitude determination [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2010, 44(9): 1297-1301. (in Chinese)
- [6] WYLLIE R, KAUER M, SMETANA G S, *et al.*. Magnetocardiography with a modular spin-exchange relaxation-free atomic magnetometer array [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2012, 57(9): 2619-2632.
- [7] FANG J, QIN J, WAN S, *et al.*. Atomic spin gyroscope based on  $^{129}\text{Xe}$ -Cs comagnetometer [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012: 1512-1515.
- [8] LEDBETTER M P, SAVUKOV I M, ACOSTA V M, *et al.*. Spin-exchange-relaxation-free magnetometry with Cs vapor [J]. *Physical Review A*, 2008, 77(3): 033408: 1-7.
- [9] NELSON I A. *Physics of Practical Spin-Exchange Optical Pumping* [D]. Whsconsin: University of Whsconsin- Madison, 2001.
- [10] KOMINIS I, KORNACK T, ALLRED J, *et al.*. A subfemtotesla multichannel atomic magnetometer [J]. *Nature*, 2003, 422(6932): 596-599.
- [11] 秦杰. 基于 $^{129}\text{Xe}$ -Cs的SERF原子自旋陀螺仪原理实验研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2012.  
QIN J. *Experimental Development of SERF Atomic Spin Gyroscope based on  $^{129}\text{Xe}$ -Cs* [D]. Beijing: Beihang University, 2012. (in Chinese)
- [12] TAKAYOSHI K. 利用激光实时频谱直接观测分子结构变化[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 200-212.  
TAKAYOSHI K. Direct observation of molecular structural change during intersystem crossing by real-time spectroscopy with a few optical cycle lasers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 200-212. (in English)
- [13] 赵智亮, 夏伯才, 陈立华, 等. 相移干涉测量中相移误差的自修正[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1116-1121.  
ZHAO ZH L, XIA B C, CHEN L H, *et al.*. Self-correction of phase step error in phase shifting interferometric measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1116-1121. (in Chinese)
- [14] 李秀明, 黄战华, 朱猛. 扩展光束型激光多普勒速度测量系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1102-1109.  
LI X M, HUANG ZH H, ZHU M. Differential laser Doppler system with expanded beams for velocity measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1102-1109. (in Chinese)
- [15] QIN J, WAN S, CHEN Y, *et al.*. Ultrahigh sensitive magnetic field and rotation measurement with atomic spin [J]. *Science*, 2012, 338(6104): 274: 101-102.
- [16] ALLRED J C, LYMAN R, N. High-sensitivity atomic magnetometer unaffected by spin-exchange relaxation [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(13): 1-4.
- [17] KORNACK T W. *A Test of CPT and Lorentz Symmetry Using a  $K^3\text{He}$  Co-magnetometer* [D]. Princeton: Princeton University, 2005.
- [18] SELTZER S J. *Developments in Alkali-metal Atomic Magnetometry* [D]. Princeton: Princeton University, 2008.
- [19] 杨生元, 黄文浩. 激光光强分布对原子力显微镜中光学偏转法检测结果的影响[J]. 光学精密工程, 1997, 5(1): 125-132.  
YANG SH Y, HUANG W H. Influence of distribution of light intensity of laser source on detecting results of optic-deflection detecting in atomic force microscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(1): 125-132. (in Chinese)

#### 作者简介:



楚中毅(1977—),男,河北清河人,博士,副教授,2004年于哈尔滨工业大学获博士学位,主要从事精密机械及其控制、磁屏蔽与磁补偿技术及其应用等方面的研究工作。E-mail: chuzy@buaa.edu.cn