

光吸收法控制核磁共振陀螺原子气室温度

许国伟, 张 焱, 江奇渊, 汪之国, 夏 涛, 杨开勇

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 核磁共振陀螺系统中原子气室的温度稳定性对陀螺的性能有着十分重要的影响。介绍了一种利用核磁共振陀螺探测光透过气室的光强来控制原子气室温度的方法。首先,从理论上解释了核磁共振陀螺测试过程中发现的探测光透过光强与原子气室温度的负相关关系;进一步通过具体实验得到了探测光透过光强与原子气室内温度的拟合关系曲线。在此基础上,设计出利用探测光透过光强来反馈控制温度的 LabView 程序,实现原子气室温度的稳定控制。最后,通过实验验证了这种方法具有较好的控温效果(1 h 内温度漂移约为 0.02 °C),同时还具有精确反映气室内温度、测温及时等优势。

关键词: 核磁共振陀螺; 透过光强; 温度控制

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.S106003

Temperature control of vapor cell based on the light absorption of nuclear magnetic resonance gyroscope

Xu Guowei, Zhang Yi, Jiang Qiyuan, Wang Zhiguo, Xia Tao, Yang Kaiyong

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The temperature stability of the vapor cell plays an important role in improving the performance of the nuclear magnetic resonance gyroscope. It's meaningful to explore an approach for temperature stabilization of the vapor cell based on the light intensity of nuclear magnetic resonance gyroscope's probe laser. The negative correlation between the light intensity of the probe laser and the temperature of the vapor cell was analyzed theoretically. Then the concrete corresponding fitting curve about temperature and the light intensity was obtained experimentally. Furthermore, a LabView program for the feedback control of the temperature was designed, which achieved the temperature stabilization of the vapor cell. Finally, the experimental results validated the proposed approach in stabilizing the temperature of the vapor cell, which had advantages of high sensitivity and accuracy. The achieved long-term temperature drift is within 0.02 °C/h.

Key words: nuclear magnetic resonance gyroscope; light transmission intensity; temperature control

收稿日期: 2018-12-12; 修订日期: 2019-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(2018JJ608, 61701515); 湖南省自然科学基金(61671458); 国防科技大学科研项目(ZK170204)

作者简介: 许国伟(1993-), 男, 硕士生, 主要从事核磁共振陀螺方面的研究。Email: 1079928134@qq.com

导师简介: 杨开勇(1974-), 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事核磁共振陀螺方面的研究。Email: muyiky@163.com

通讯作者: 汪之国(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要从事核磁共振陀螺方面的研究。Email: maxborn@nudt.edu.cn

张焱(1987-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事核磁共振陀螺方面的研究。Email: abnormal_zy@163.com

0 引言

惯性导航技术以其自主性好、抗干扰能力强、受地域环境影响小等优势在导航领域中具有不可替代的地位。陀螺作为惯性导航系统的核心部件,其技术指标对整个惯性导航系统的性能有着重要影响,因此备受关注。而核磁共振陀螺仪因其测量精度高、可微型化、抗干扰能力强等优势得到了各国的广泛重视^[1]。对于核磁共振陀螺的研究,国外起步很早,经过 60 多年的发展,技术已趋于成熟。美国的诺斯罗普·格鲁曼公司是目前核磁共振陀螺技术的领跑者,近些年在技术上也有了很大突破。诺斯罗普·格鲁曼公司在 2013 年公布了其实现的核磁共振陀螺测试数据,其零偏稳定性达到 0.02 (°)/h, 体积为 10 cm³。近年来,核磁共振陀螺的性能已达到:零偏稳定性 0.01 (°)/h, 体积为 5 cm³。国内对核磁共振陀螺技术的研究虽起步较晚,但进展较快。以北京自动化控制研究所的研究进展为例,其自 2011 年开始了核磁共振陀螺的前沿探索研究,2013 年成功研制出核磁共振陀螺原理实验系统,完成了原子自旋系统极化、极化检测、核磁共振、磁补偿等技术及原理验证,2016 年成功研制出零偏稳定性达到 1 (°)/h、表头体积为 50 cm³ 的核磁共振陀螺样机^[2-3]。

核磁共振陀螺的基本工作原理是通过原子气室内的碱金属原子(铷原子)被泵浦光极化后与氙原子核发生自旋交换,从而极化氙原子,利用极化后的氙原子在恒定磁场中做拉莫尔进动的频率与载体转动角速度相关的特性来敏感载体转动的。气室温度的变化会引起碱金属原子蒸气密度的变化,从而引起其由于极化产生的磁场的变化。这种磁场变化会显著影响氙原子的拉莫尔进动频率,从而影响陀螺测量结果。因此,要想获得高精度的核磁共振陀螺就必须精确控制核磁共振陀螺的气室温度^[4]。

核磁共振陀螺中原子气室的温度控制系统主要是由无磁加热、温度测量以及反馈控制电路等部分组成。目前常用的温度控制方式是将热敏电阻置于加热片附近,再通过电路与控制程序来实现温度测量与反馈控制^[5]。这种方法的优点是能实现对无磁加热端温度的精确控制。但劣势也很明显,一方面是无磁加热端的温度并非原子气室内的温度,两

者之间存在热传导带来的温度差和温度变化延迟等效应,因此无法实现对气室内气体温度准确及时的控制;另一方面是现有方案需要在系统中增加专门的测温结构与电路等,不利于系统的简化和小型化。为了解决这些问题,文中提出用核磁共振陀螺探测光透过气室后的光强变化来测量并稳定气室温度的方法。

文中首先从理论上解释了探测光透过气室后的光强随气室温度的变化关系,并通过实验得到了光强与温度的具体关系曲线;然后利用关系曲线与 LabView 程序实现了气室温度的反馈控制,并得到了较好效果。

1 探测光透过光强与气室温度的关系

1.1 理论分析

核磁共振陀螺系统正常工作状态下,需要维持原子气室的温度稳定,一般情况下需要对原子气室采取加热、保温、反馈控制等控温措施^[6],参考文献[7]给出了原子气室内碱金属气体(铷蒸气)的压强和温度之间的关系:

$$\log_{10}P_{Rb}=15.882\ 53-\frac{4\ 529.635}{T}+0.000\ 586\ 63\cdot T-2.991\ 38\cdot\log_{10}T \quad (1)$$

式中: P_{Rb} 为原子气室内铷蒸气的压强; T 为原子气室内的温度(文中涉及的公式中温度单位均为 K,实验数据中温度单位均为 °C,在此说明)。

由原子气室内压强,可以根据公式(1)及理想气体方程得到原子气室内铷原子密度与温度的关系^[8]:

$$N_{Rb}=\frac{P_{Rb}}{k_B T}=\frac{10^{\left(\frac{15.882\ 53-\frac{4\ 529.635}{T}+0.000\ 586\ 63\cdot T-2.991\ 38\cdot\log_{10}T}{\right)}}}{k_B T} \quad (2)$$

式中: N_{Rb} 为原子气室内铷原子密度; k_B 为玻耳兹曼常数。

另一方面,探测光经过原子气室后的透射光强满足^[8-9]:

$$I=I_0\cdot e^{-N_{Rb}\sigma(v)L} \quad (3)$$

式中: I 为探测光透过的光强; I_0 为初始光强; L 为探测光穿过气室的长度; $\sigma(v)$ 为气室内的铷原子对探测光的吸收截面。其可以表示为^[10-12]:

$$\sigma(v)=c r f \frac{\Gamma/2}{(v-v_0)^2+(\Gamma/2)^2} \quad (4)$$

式中： c 为真空中的光速； r_e 为电子直径； f 为铷原子 D_1 线跃迁振子强度^[9]； ν 为探测光频率； ν_0 为铷原子吸收频率； Γ 为吸收谱线的展宽。

根据公式(1)~(4)，可以得到原子气室内的温度和探测光透过光强之间的联系。在核磁共振陀螺系统中，探测光频率在远离铷原子吸收频率时，公式(3)

中 $\frac{\Gamma/2}{(\nu-\nu_0)^2+(\Gamma/2)^2}$ 一项的值受吸收谱线展宽变化的影响会慢慢降低，探测光频率在远离铷原子吸收频率的范围内取适当的值，并保持探测光频率不变时吸收截面 $\sigma(\nu)$ 和探测光穿过气室的长度 L 可以认为是常数，则可知气室内铷原子密度由于升温而增加时会导致探测光透过光强减弱，即温度与探测光透过光强呈负相关关系。

实际应用时，需要给出实验所使用的实验系统的光强电压信号(U)和实际光强(I)之间的关系：

$$U = \lambda I + A \quad (5)$$

式中： λ 和 A 均为常数，其数值由实验系统决定。

根据公式(1)~(5)，可以得到透过光强的电压信号与原子气室感受到的温度之间的联系，在误差允许的范围内可以对其进行适当的简化，作为两者之间的拟合函数。在公式(1)中，由于一次项的系数远小于其他项系数，故可以忽略；同时，其对数项系数也较小，且在 60~100 °C 范围内变化较小，可以视作常数。则可设测得的光强电压信号与温度之间的拟合函数为：

$$U = a \cdot e^{\left(\frac{b}{x-B_0} \cdot 10^{\left(-\frac{c}{x-B_0}\right)}\right)} + A_0 \quad (6)$$

式中： a, b, c, d, A_0, B_0 为待定系数； B_0 为原子气室内的温度与加热片温度之间的差值。

1.2 实验测量

为了获得探测光透过光强与温度的具体关系，以实现光强控温，先通过实验测量不同温度点对应的光强，然后利用理论公式拟合实验数据得到准确的温度-光强曲线。实验所使用的装置如图 1 所示。

首先，由分布式反馈(DFB)激光器(ECL801D)产生波长为 795 nm 左右的探测激光，然后经起偏器起偏成为线偏光，入射到原子气室(含 Rb、¹²⁹Xe 和 ¹³¹Xe)内，受气室内 Rb 原子蒸气吸收后，剩余部分透过气室照射到光电探测器上，产生电压信号，通过采集卡传给电脑进行数据记录。现有的温控反馈回路

如图 1 中(a)部分所示，加热片贴在固定原子气室的铝制框架上，热敏电阻贴在加热片上，通过测温与放大电路、数据采集卡、LabView 程序构建温度反馈控制系统，在实验中可以将加热片的温度稳定在所需的任意数值，以便建立温度与光强的关系。

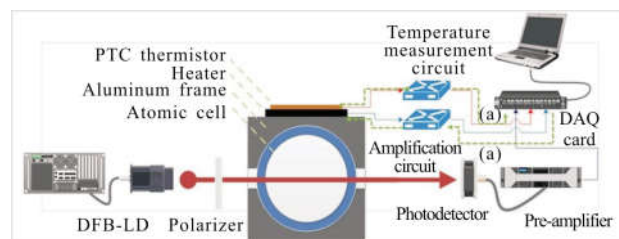


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental set-up

在实验测量时，保持激光器出光强度波长不变，利用上述反馈系统，在 65~100 °C 范围内每 5 °C 取一个点，测量探测光透过光强的电压，具体如表 1 与图 2 所示。

表 1 光强电压随加热端温度的变化

Tab.1 Variation of light intensity voltage with heating temperature

Temperature/°C	Voltage/V
65.332 7	-1.603 111 438
69.995 7	-1.664 600 91
74.994 4	-1.814 777 365
79.995 7	-2.050 070 527
84.977 5	-2.366 753 841
89.974 9	-2.880 180 413
94.984 7	-3.871 975 702
99.995 2	-5.431 308 779

从图 2 中可以看出，透过光强的电压与加热端温度确实呈负相关的关系，与 1.1 节中的理论分析相符。另外可以看到，测量时每变化一个温度都等待了较长时间，以使温度达到稳定后再进行光强与温度测量，可以保证测量的准确性。

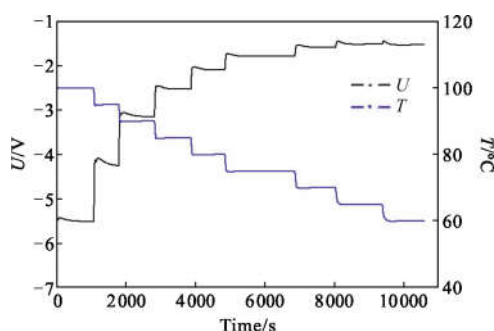


图 2 光强电压信号随加热端温度变化

Fig.2 Voltage signal of light intensity vs the temperature of the heater

以公式(6)作为拟合函数,经拟合探测光透过光强的电压信号与加热端温度关系曲线如图 3 所示。

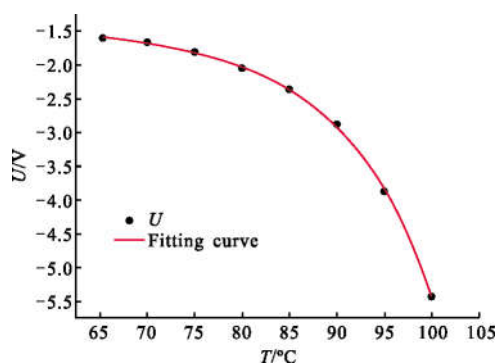


图 3 探测光透过气室的光强电压信号与加热端温度关系拟合结果

Fig.3 Fitting curve of the relation between the voltage signal of the light transmission intensity of the probe laser and the temperature of the heater

经拟合,可以得到 $a=-2.15247 \times 10^{-5}$, $b=-135.20622$, $c=0.95776$, $d=57.55022$, $A_0=-1.34117$, $B_0=297.42979$ 。根据 B_0 的拟合结果,加热片温度比原子气室内的温度约高出 $24.27979 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta T=B_0-273.15$), 与实际情况比较接近。但公式(6)所给出的拟合函数难以求得反函数,无法直接应用于 LabView 程序,所以这里根据加热端温度(T)和光强的电压信号(U)的关系曲线形状,提出以二阶指数函数作为加热端温度(T)关于光强的电压信号(U)的拟合关系函数,用于 LabView 程序中,将光强电压信号转化为温度信号。

从图 4 可以看出,以二阶指数函数作为拟合函数的拟合结果较好,拟合得到的函数为:

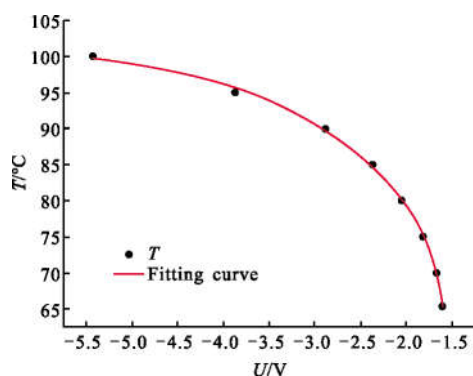


图 4 加热端温度与探测光透过气室的光强电压信号关系拟合结果

Fig.4 Fitting curve of the relation between the temperature of the heater and the voltage signal of the light transmission intensity of the probe laser

$$T = -3080980 \times e^{\frac{U}{0.12371}} - 86.60148 \times e^{\frac{U}{1.46889}} + 101.85682 \quad (7)$$

2 利用探测光透过光强稳定气室温度

探测光透过光强反馈控制原子气室温度的结构框图如图 5 中(b)回路所示。

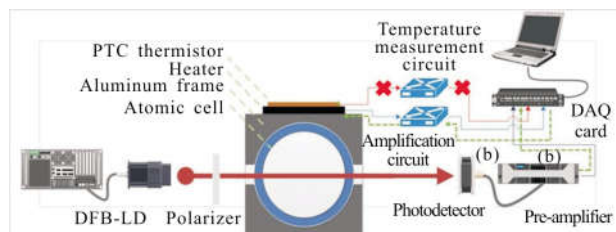


图 5 探测光透过光强反馈控制气室温度的结构框图

Fig.5 Structural diagram of the temperature control approach for the vapor cell based on the light transmission intensity of the probe laser

将测得的探测光透过光强的电压信号作为反馈起点,利用拟合得到的关系函数公式(7),将光强电压信号转化为温度值,再输入到 PID 子程序(如图 6 所示),实现对加热片输入电压的控制,进而达到控温效果。

程序左边分别指定了采集卡的输入输出通道,将采集卡输入通道采集的电压信号,计算得到温度值,再通过一个 PID 子程序形成加热电流幅度控制信号,通过放大电路对加热片输出功率进行控制,最终实现温度的稳定。

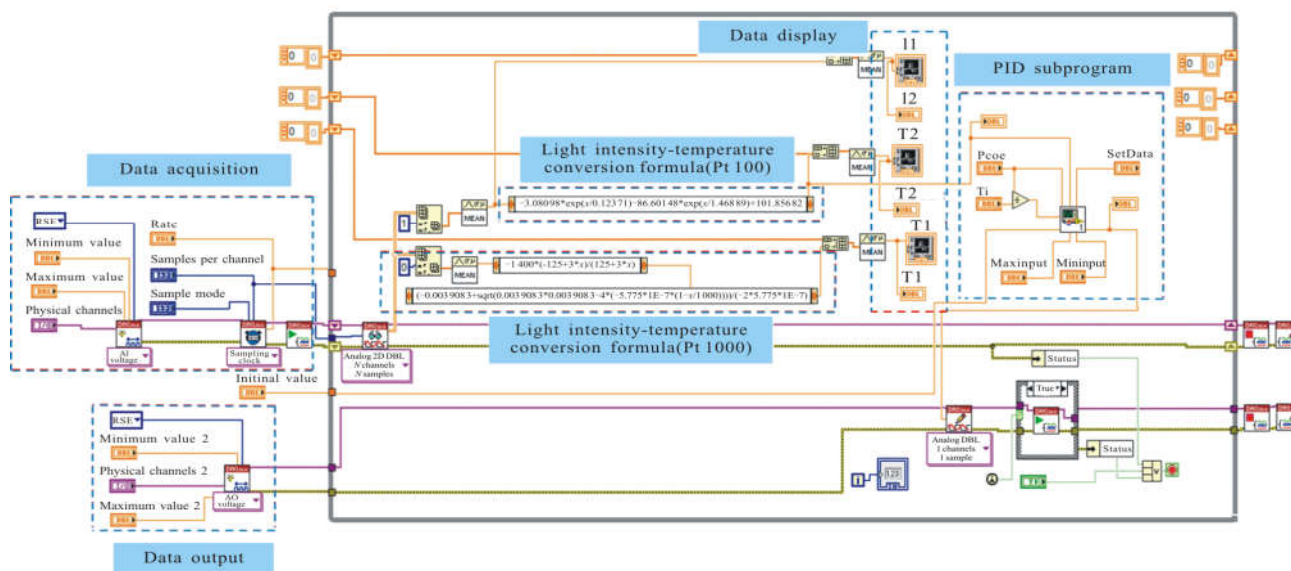


图 6 LabView 反馈控制程序图

Fig.6 Diagram of the LabView feedback program

将透过光强的电压信号作为反馈起点，对实验系统进行控温验证实验，测得的原子气室内温度变化曲线如图 7 所示。

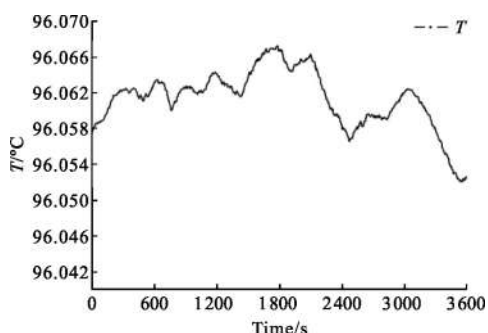


图 7 使用光吸收温控方法后 1h 内气室温度

Fig.7 Temperature fluctuation of the vapor cell within 1h after stabilization by light absorption approach

如图 7 所示,该温控方法的控温精度为在 1h 内的长期漂移小于 0.02°C 。在核磁共振陀螺正常工作条件下,其能达到的理论精度^[8-9]:

$$\delta\omega = \frac{7 \mu\text{Hz/K}}{100} \times 0.02 \text{ K} = 1.4 \text{ nHz} = 5 \times 10^{-8} (^\circ)/\text{s} \quad (8)$$

即该方案能达到的对原子气室的温控精度能充分满足现阶段核磁共振陀螺研究的要求。

但该方案与原有电阻控温方法相比并不占优势。而目前限制该方案控温精度进一步上升的主要

因素有:(1) 探测光激光器的输出功率有波动,给光强反馈温控系统带来了基底噪声;(2) 光电探测器的测量精度会对温控系统精度造成较大影响;(3) 简化的光强电压信号与原子气室温度之间的拟合函数与真实的函数存在误差。

但是,光强反馈控温与之前的加热端温度反馈控温相比最大的优势在于其反馈起点反映的是气室内实时的温度情况,而加热端温度反馈控温的反馈起点只能体现气室附近的温度情况。在验证实验中,将使用光强反馈控温得到的气室内温度变化曲线和加热端测得的温度进行对比,通过调整 PID 子程序中的相关参数,使施加到加热片上的电压产生周期波动,这将导致加热片温度出现周期波动,原子气室内温度也将响应加热片的温度变化,出现周期波动现象。加热片温度和原子气室内温度变化曲线如图 8 所示,可以看到两者之间存在延迟和波动幅度不同等现象。

图 8 中, T_0 表示的曲线为光强反馈控温过程中测得光强转化的温度变化曲线,其反映的是原子气室内的温度变化情况, T_1 表示的曲线为加热端测得的温度的变化曲线,可见两者之间存在温度响应的延迟,并且从光强与电阻测得温度曲线波动的相位可以初步判断,二者大致有 10s 左右的延迟,这种延迟必然会影响到加热端温度反馈控温时原子

气室温度的稳定性。另一方面,加热片端温度波动幅度约为 0.01 °C,而测得光强转化的温度波动幅度约为 0.06 °C,造成这种现象的主要原因是简化的光强电压信号与原子气室温度之间的拟合函数与真实的函数存在误差,这也是提高探测光透过光强反馈控温精度的一个关键之处。

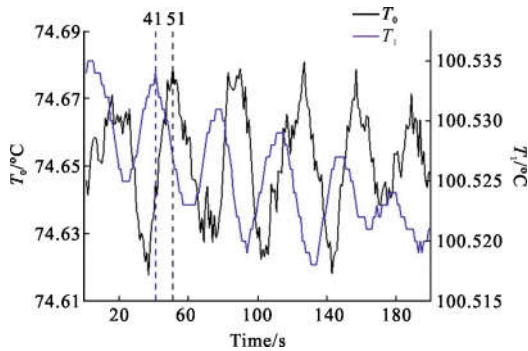


图 8 光强反馈控温测得的气室内温度曲线和加热端测得的温度曲线对比

Fig.8 Contrast between the temperature of the vapor cell and the heater after stabilization by light absorption approach

3 结论

文中提出了使用探测光透过气室后的光强来反馈控制温度的控温方法,通过理论分析给出了透过光强控温的原理,并进一步通过实验验证了该方法的可行性和精度。通过使用文中提出的控温方法,原子气室 1 h 内的温度漂移能控制在 0.02 °C 以内,满足了现阶段核磁共振陀螺的研究要求,并能在核磁共振陀螺正常工作的条件下保持较好的温控稳定性,其优势在于其测量的温度直接反应原子气室内温度,用它来控温具有准确及时的优点。另一方面,在核磁共振陀螺实际研制使用过程中,希望系统的各个部分简单可靠,而文中提出的控温方法可以省去测温电阻与测温电路,这对于核磁共振陀螺小型化系统的研制有着重要的意义。

参考文献:

[1] Cheng Xianghong, Chen Hongmei, Zhou Yuqing, et al. Review of nuclear-magnetic resonance gyroscopes [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2006, 14(6): 86–90. (in Chinese)
程向红, 陈红梅, 周雨青, 等. 核磁共振陀螺仪分析及发展方向[J]. 中国惯性技术学报, 2006, 14(6): 86–90.

[2] Qin Jie, Wang Shilin, Guo Puze, et al. Advances in nuclear

magnetic resonance gyroscope [J]. *Navigation Positioning & Timing*, 2014, 1(2): 64–70. (in Chinese)
秦杰, 汪世林, 高溥泽, 等. 核磁共振陀螺技术研究进展[J]. 导航定位与授时, 2014, 1(2): 64–70.

[3] Wan Shuang'ai, Sun Xiaoguang, Zheng Xin, et al. Prospective development of nuclear magnetic resonance gyroscope [J]. *Navigation Positioning & Timing*, 2017, 14(2): 7–13. (in Chinese)
万双爱, 孙晓光, 郑欣, 等. 核磁共振陀螺技术发展展望[J]. 导航定位与授时, 2017, 14(2): 7–13.

[4] Kornack T W, Ghosh R K, Romalis M V. Nuclear spin gyroscope based on an atomic comagnetometer [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95(23): 23–31.

[5] Salleras M, Eklund E J, Prikhodko I P. Predictive thermal model for indirect temperature measurement inside atomic cell of nuclear magnetic resonance gyroscope [J]. *Transducers*, 2009, 7: 304–307.

[6] Eklund E J. Micro gyroscope based on spin-polarized nuclei [D]. US: University of California, 2008: 11–40.

[7] Song Junling, Hong Yanji, Wang Guangyu, et al. Measurement of supersonic flow parameters using laser absorption spectroscopy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3510–3515. (in Chinese)
宋俊玲, 洪延姬, 王广宇, 等. 基于激光吸收光谱技术的超声速气流参数测量 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(11): 3510–3515.

[8] Walker T G, Larsen M S. Spin-exchange pumped NMR gyros [J]. *Advances in Atomic Molecular & Optical Physics*, 2016, 65: 373–401.

[9] Yi Xin, Wang Zhiguo, Xia Tao, et al. Research on temperature field in the vapor cell of nuclear magnetic resonance gyroscope [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9 (6): 671–677. (in Chinese)
易鑫, 汪之国, 夏涛, 等. 核磁共振陀螺中原子气室温度场的研究 [J]. 中国光学, 2016, 9(6): 671–677.

[10] Zhong Hong, Tao Wei, Zhao Hui, et al. Measurement of magnetic bead concentration based on laser transmission method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(2): 297–303. (in Chinese)
钟虹, 陶卫, 赵辉, 等. 激光透射法磁珠浓度测量系统 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(2): 297–303.

[11] Li Zhe, Zhang Zhirong, Sun Pengshuai, et al. Multi-point full range monitoring of methane based TDLAS technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0917009. (in Chinese)
李哲, 张志荣, 孙鹏帅, 等. 利用 TDLAS 技术的多点甲烷气体全量程监测 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(9): 0917009.

[12] Donley E A. Nuclear magnetic resonance gyroscopes [C]// *Sensors, IEEE*, 2010, 4(1): 17–22.