# 核磁共振陀螺仪研究进展

# 陈 颖, 刘占超<sup>†</sup>, 刘 刚

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

摘要:核磁共振陀螺仪(NMRG)是基于量子原理的、目前世界上体积最小的导航级陀螺仪,具有加速度不敏感、 抗干扰能力强且没有运动部件等优势,有望在与微机电陀螺仪同等体积、成本下达到光学陀螺仪的精度,受到了国 内外广泛关注.介绍了核磁共振陀螺仪基于核磁共振技术的基本工作原理,然后回顾了核磁共振陀螺仪自20世纪 60年代起的发展历史,重点分析了21世纪以来国内外研究机构在核磁共振陀螺领域取得的重大研究成果,并对国内 外核磁共振陀螺仪的最新研究进展进行了跟踪,美国Northrop Grumman公司已经率先研制出了面向军事领域的微 小型导航级核磁共振陀螺仪.最后对核磁共振陀螺仪未来发展的方向进行展望,将进一步向高精度、低成本和小体 积方向发展,同时分析了核磁共振陀螺可能应用前景,将广泛应用于民用领域以及军用领域.

关键词:核磁共振陀螺仪;原子陀螺仪;微陀螺仪;惯性导航;量子原理

引用格式:陈颖,刘占超,刘刚. 核磁共振陀螺仪研究进展. 控制理论与应用, 2019, 36(7): 1017 – 1023 DOI: 10.7641/CTA.2019.80613

# Advances in nuclear magnetic resonance gyroscope

CHEN Ying, LIU Zhan-chao<sup>†</sup>, LIU Gang

(National Key Laboratory of Inertial Technology, Beihang University, Beijing 100191, China; School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The NMRG which is based on the quantum principle is a kind of atomic gyroscopes and it is the smallest navigation-grade gyroscope in the world at present. At the same time, the nuclear magnetic resonance gyroscope features acceleration insensitivity, strong anti-interference ability and no moving parts. It is expected to reach the accuracy of optical gyroscopes with the same size and cost as micro-electro-mechanical system (MEMS) gyroscopes and it is widely concerned at home and abroad. The basic working principle of nuclear magnetic resonance gyroscope was summarized at first. Then, the development history of nuclear magnetic resonance gyroscope from the 1960 s was reviewed and the representative researches of it since the 21th century are analyzed. Meanwhile, the latest research results of nuclear magnetic resonance gyroscope was tracked. Northrop Grumman corporation which belongs to the US has been the first to develop the smallest navigation-grade nuclear magnetic resonance gyroscope for the US's military areas. Finally, the development direction of nuclear magnetic resonance gyroscope is prospected, which will further develop towards high precision, small volume and low cost. The possible application direction of nuclear magnetic resonance gyroscope is analyzed as well, it will be widely used in civil fields and military fields.

**Key words:** nuclear magnetic resonance gyroscope; atomic gyroscope; micro-gyroscope: inertial navigation systems; quantum theory

**Citation:** CHEN Ying, LIU Zhanchao, LIU Gang. Advances in nuclear magnetic resonance gyroscope. *Control Theory* & *Applications*, 2019, 36(7): 1017 – 1023

# 1 引言

随着人类活动范围越来越大,导航定位技术已成为日常生活中不可或缺的工具,然而常规导航技术难以在地下、水下等环境实现连续可靠的导航.尤其是

随着干扰技术的兴起,惯性导航技术作为唯一全自 主、实时、连续的导航技术,成为了实现高精度无缝导 航的关键方法<sup>[1-4]</sup>.

惯性导航技术以陀螺仪和加速度计作为核心敏感

收稿日期: 2018-08-17; 录用日期: 2019-04-28.

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup>通信作者. E-mail: liuzc@buaa.edu.cn; Tel.: +86 10-82339550.

本文责任编委:席在荣.

国家自然科学基金项目(61661136007, 61703021, 61763005), 航空科学基金项目(20170551004)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61661136007, 61703021, 61763005) and the Aeronautical Science Foundation of China (20170551004).

器,其中陀螺仪包括光学陀螺仪、微机电陀螺仪与原 子陀螺仪等.原子陀螺仪根据工作原理不同可分为原 子自旋式陀螺仪包括无自旋交换弛豫(spin exchange relaxation free, SERF)陀螺仪、核磁共振陀螺仪以及金刚石 氮空位(nitrogen-vacancy, NV)色心陀螺仪<sup>[1-3]</sup>. SERF 原子自旋陀螺仪利用电子自旋敏感物体转动,精度 高、体积小,正处于原理样机研究阶段.核磁共振陀螺 仪利用核磁共振技术工作,兼顾低功耗、小体积、低成 本、高精度、抗振动等综合优势,目前发展较为成熟. 金刚石NV色心陀螺仪也可称为新型核磁共振陀螺仪, 通过空穴中电子自旋测量旋转,兼顾体积小、启动快 的优点,目前仍处于学术研究阶段<sup>[5-10]</sup>.

本文首先介绍核磁共振陀螺仪的工作原理,然后 回顾了其发展历史,重点总结21世纪以来核磁共振陀 螺仪的研究成果,跟踪了国内外基于核磁共振陀螺的 最新研究进展.最后展望了核磁共振陀螺的发展方向, 分析了其应用前景.

## 2 核磁共振陀螺原理

原子自旋可以在惯性空间中保持其原始指向,所 以可以用原子自旋敏感转动,核磁共振陀螺就是基于 该原子敏感载体旋转的,其硬件基本结构主要包括泵 浦光源、检测激光、气室、无磁加热系统、磁补偿线 圈、磁屏蔽装置、光电探测器以及外围信号处理电路 等.

核自旋具有磁矩µ,取向与自旋轴方向一致,在自 然状态下具有随机性,无宏观指向.如图1所示将核自 旋置于静磁场B<sub>0</sub>中,核自旋将在静磁场作用下以拉莫 尔角频率绕B<sub>0</sub>方向进动.



Fig. 1 Schematic diagram of NMRG

在此基础上作用与磁场方向相同的泵浦光后,可 使原子被极化,赋予核自旋宏观指向.通过在正交于 己有稳定静磁场B<sub>0</sub>方向外加频率与原子进动频率相 等的、均匀的交变电磁场B<sub>1</sub>(t),核自旋会产生核磁共 振且共振频率等于拉莫尔角频率.

检测激光与载体系固联并随其共同旋转,通过检测宏观核自旋的拉莫尔进动频率,能够获得载体旋转角速率.载体在惯性参考系中绕 $B_0$ 方向转速为 $\omega_r$ 时,探测光观察到拉莫尔进动频率为 $\omega = \omega_L + \omega_r$ .在确定核自旋元素后 $\gamma_n$ 为物理常量,通过改变静磁场的磁场强度 $B_0$ 能够确定 $\omega_L = \gamma_n \cdot B_0$ ,根据 $\omega_r = \omega - \omega_L$ 可以检测载体的旋转角速率并实现角运动的测量.然而静磁场的磁场强度 $B_0$ 未知时,上式包含两个待求解量,通过检测同一装置中两个具有旋磁比 $\gamma_a$ 和 $\gamma_b$ 的不同原子核的核磁共振信号,根据观测到的共振频率为 $\omega_a$ 和 $\omega_b$ ,得到式(1)–(2):

$$\omega_{\rm a} = \gamma_{\rm a} \cdot B_0 - \omega_{\rm r},\tag{1}$$

$$\omega_{\rm b} = \gamma_{\rm b} \cdot B_0 - \omega_{\rm r}.\tag{2}$$

由此可解算出载体的实际转速ω<sub>r</sub>和静磁场的磁场 强度B<sub>0</sub>,实现角运动的测量<sup>[5-6]</sup>.

## 3 核磁共振陀螺发展历史

1938年,核磁共振的概念由Isidor Rabi提出,然后 Bloch在理论上进行了改进.1952年,Leete和Hansen 首次提出核磁共振陀螺原理,许多研究机构进行研究 并取得大量研究成果<sup>[11-12]</sup>.Litton公司(现为Northrop Grumman 公司)和Singer-Kearfott公司(现为Northrop Grumman 公司)和Singer-Kearfott公司(现为Kearfott 公司)于20世纪60年代起开始进行相关研究,分别研 制出核磁共振陀螺原理样机.1979年,Litton工业公 司Kanegsberg等人首次研制出了体积为100 cm<sup>3</sup>的核 磁共振陀螺原理样机,以<sup>83</sup>Kr-<sup>129</sup>Xe作为敏感介质, 零偏稳定性为0.05 (°)/h,模型如图2所示<sup>[13]</sup>.同年, Kearfott公司使用同位素<sup>199</sup>Hg和<sup>201</sup>Hg作为敏感介质 研制出核磁共振陀螺样机,零偏稳定性为0.1 (°)/h<sup>[14]</sup>. 1983年斯坦福大学利用<sup>3</sup>He与<sup>4</sup>He原子作为敏感介质 研制了低温超导核磁共振陀螺,650 cm<sup>3</sup>的体积下实 现了长达数天的弛豫时间<sup>[15]</sup>.

自20世纪80年代起,核磁共振陀螺遇到了提升技术指标的瓶颈,而当时激光陀螺、光纤陀螺仍有继续向高精度、低成本方向发展的潜力,因此大多研究机构转向研究光学陀螺<sup>[16]</sup>.

近年来,量子原理和微机电等技术的进步使核磁 共振陀螺不仅在原有基础上取得显著进展,还推动了 许多新型核磁共振陀螺仪的出现。至今,国外已经实 现小体积(<5 cm<sup>3</sup>)、高精度(< 0.01 (°)/h)、高带宽 (> 300 Hz)等特点的核磁共振陀螺仪<sup>[1-9]</sup>.



图 2 Litton公司核磁共振陀螺样机示意图<sup>[13]</sup> Fig. 2 Litton NMRG prototype diagram<sup>[13]</sup>

# 4 国外研究进展

2005年,美国国防高级研究项目局(defense advanced research projects agency, DARPA) 投入约 3000 万美元经费支持 Northrop Grumman 公司启动导航级集成微陀螺仪 (navigation-grade integrated micro gyroscopes, NGIMG)项目, NGIMG项目是DARPA定位、导航和授时(microtechnology for positioning, navigation, and timing, micro-PNT)项目内微型技术的一部分, 目的在于研制独立、芯片级惯性导航技术, 为尺寸和功率受限设备提供精确导航<sup>[1]</sup>. NGIMG项目共4个阶段,使用同位素<sup>129</sup>Xe和<sup>131</sup>Xe作为工作物质, 突破了提升核磁共振陀螺技术指标的瓶颈<sup>[6]</sup>.

2005年10月, Northrop Grumman公司展开第1阶段的研究工作, 研制出核磁共振陀螺样机.

2007年, Northrop Grumman公司完成该系列核磁 共振陀螺第2阶段研制工作, 如图3所示, 该核磁共振 陀螺样机实现了第2阶段设定的目标, 并且在某些方 面满足了第3阶段的目标参数. 通过静态与计算机控 制下的小型动态测试实验, 测得该核磁共振陀螺 仪体积约55 cm<sup>3</sup>, 零偏稳定性为1(°)/h, 随机游走为 0.12(°)/√h, 超过了第2阶段设定的目标0.5(°)/√h.

随着线圈设计工艺的进步以及电子、光学等技术 的发展, Northrop Grumman公司2010年完成的第3个 阶段研制工作在吸取前两个阶段经验教训的基础上, 令核磁共振陀螺仪体积减小到6 cm<sup>3</sup>,同时精度比第2 阶段也提升了一个数量级.第3阶段的核磁共振陀螺 仪样机如图4所示,通过大量实验,测得满量程速率 500 (°)/s,零偏稳定性0.05 (°)/h,所有参数均达到第3 阶段目标,并且标度因数稳定性25 ppm,已能够满足 第4阶段设定的目标25 ppm,性能显著提升<sup>[6,17]</sup>.



图 3 Northrop Grumman公司第2阶段核磁共振陀螺样机<sup>[6]</sup> Fig. 3 Northrop Grumman NMRG prototype in phase 2<sup>[6]</sup>



图 4 Northrop Grumman公司第3阶段核磁共振陀螺样机<sup>[6]</sup> Fig. 4 Northrop Grumman NMRG prototype in phase 3<sup>[6]</sup>

在前3个阶段的研究基础上,第4个阶段的陀螺性 能已经能够满足DARPA对该项目设定的目标参数, 第4个阶段研制的核磁共振陀螺仪如图5所示. Northrop Grumman公司于2012年对核磁共振陀螺仪进行 实验室环境测试,测得其体积10 cm<sup>3</sup>,零偏稳定性 0.01 (°)/h. 2013年,在典型环境中进行验证,随机游走 为0.001 (°)/√h,零偏稳定性为0.02 (°)/h,测量范围 2500 (°)/s,频带宽度优于200 Hz,体积10 cm<sup>3</sup>. 2014 年,经过进一步完善后,该公司研制出体积5 cm<sup>3</sup>、零 偏稳定性0.01 (°)/h的核磁共振陀螺仪,并于2017年构 建了相应的惯性导航系统,在MEMS陀螺的体积下达 到光学陀螺的精度,与传统的陀螺仪相比体积、质 量、功耗显著降低<sup>[6]</sup>.

Northrop Grumman公司最新版本的核磁共振陀螺 已经攻克了在设计和制造中存在的主要难点,然而在 核磁共振陀螺物理结构的构建中仍有部分问题待解 决. 2018年Northrop Grumman公司在精确制导弹药/ 武器应用会议上提出了一种新型铁氧体磁屏蔽内层 结构如图6所示,通过新的热消磁方法消除磁场梯度. Northrop Grumman公司提出将铁氧体屏蔽结构加热 到居里温度以上,使磁畴能够自由地重新排列,再将 其放入三层磁屏蔽室中,在零场环境下令其缓慢冷却 到居里温度以下即可消除陀螺中显著地磁场梯度.实 验结果显示,剩余磁场和磁场梯度分别降至10nT和 10nT/inch以下且能够均匀消磁,而且热消磁铁氧体 屏蔽结构的磁场梯度自旋寿命极限比场消磁铁氧体 屏蔽结构的长100~1000倍.此外,Northrop Grumman公司也在该会议上演示了其核磁共振陀螺仪循环 启动期间的角度输出,输出角度能够在启动后60s内 稳定<sup>[18]</sup>.



图 5 Northrop Grumman公司第4阶段核磁共振陀螺样机<sup>[6]</sup> Fig. 5 Northrop Grumman NMRG prototype in phase 4<sup>[6]</sup>



图 6 Northrop Grumman公司核磁共振陀螺磁屏蔽罩<sup>[18]</sup> Fig. 6 Northrop Grumman NMRG ferrite magnetic shield<sup>[18]</sup>

加州大学Irvine分校也注意到了核磁共振陀螺仪的潜力并对其展开了研究. 2008年,该校E. J. Eklund 等人研制出微型核磁共振陀螺样机并验证了陀螺效 应,重点研究气室刻蚀并开发了球形碱蒸汽气室<sup>[19]</sup>. 2015年,该校V. M. Gundeti等人采用<sup>129</sup>Xe-<sup>87</sup>Rb作为 敏感介质,研制出一种折叠式微小型核磁共振陀螺仪, 整个陀螺仪体积约为90 cm<sup>3[20]</sup>.

普林斯顿大学物理系的研究小组于2005年研制出 了基于无自旋交换弛豫磁强计的新型原子自旋陀螺 仪<sup>[21-22]</sup>,在直径25mm的球体敏感体积下,使用K, <sup>3</sup>He和N<sub>2</sub>混合气体作为敏感介质,测得该陀螺的零偏 稳定性0.04(°)/h,角随机游走0.002(°)/ $\sqrt{h}$ . 2011年, 普林斯顿大学进一步提高陀螺的长期稳定性,采 用<sup>21</sup>Ne, Rb和K作为工作物质实现角随机游走优于 1.8 × 10<sup>-7</sup>(°)/ $\sqrt{h}$ ,零偏稳定性 5 × 10<sup>-4</sup>(°)/h,并且 成立了Twinleaf公司,实现了研究成果的转化<sup>[23-24]</sup>. 2016年,普林斯顿大学研制出以<sup>3</sup>He,<sup>129</sup>Xe和Rb作为 工作物质的耦合磁强计SERF核自旋陀螺<sup>[25-26]</sup>.此外, 霍尼韦尔公司<sup>[27]</sup>和法国航空航天实验室<sup>[28]</sup>也展开了 SERF原子自旋陀螺仪的研究.

金刚石NV色心陀螺仪作为一种新型核磁共振陀 螺仪也引起了国外研究机构的广泛关注,众多研究机 构展开相关研制工作.2005年,加州大学Santa Barbara分校的R. J. Epstein等人证明了NV中心对角速率 的敏感性<sup>[29]</sup>.2012年,加州大学Berkeley分校的M. P. Ledbetter等人提出利用NV中心对称轴4个方向上的 几何相位即金刚石色心获得转动方向和速度的核磁 共振陀螺eNV-gyro<sup>[30]</sup>.同年,麻省理工大学的J. E. Ochoa等人提出利用NV中心的4个可能取向形成高灵 敏的三轴新型核磁共振陀螺nNV-gyro<sup>[31]</sup>.此种新型 核磁共振陀螺仪的优点在于体积小、精度高、启动时 间短且可实现三轴测量,但目前仍处于学术研究阶段.

#### 5 国内研究进展

目前国内多家研发单位展开核磁共振陀螺仪的研 究工作,取得显著地研究成果,有北京航空航天大 学、北京自动化控制设备研究所、北京航天控制仪器 研究所、中国科学技术大学以及国防科学技术大学等.

北京航空航天大学自2008年起,率先在国内展开 核自旋陀螺的研究,在核磁共振陀螺仪、SERF原子自 旋陀螺仪以及金刚石NV色心陀螺仪3个方向均有所 进展. 该校2013年在国家自然科学基金委重大仪器专 项支持下开始研制核磁共振陀螺仪,并于2014年成功 研制出原理验证样机,验证了核磁共振陀螺的操控技 术与原理.随着研究技术与工艺的进一步提高,2017 年该校完成核磁共振陀螺仪关键部件的微小型化,并 基于液晶可变相位延迟器(liquid crystal variable retarder, LCVR)的激光功率稳定方法, 实现了零偏稳定性 1(°)/h的核磁共振陀螺样机<sup>[32]</sup>.在SERF原子自旋陀 螺仪方向,该校2008年展开以Cs原子为工作物质的研 究,并搭建了如图7所示的相关实验平台. 2011年底. 该校研制出SERF原子自旋陀螺仪并实现了陀螺效应, 通过高精度光纤陀螺仪标定,灵敏度达到了7×  $10^{-5}$  (°)/s/ $\sqrt{\text{Hz}^{[3]}}$ . 2013年, 基于闭环法拉第调制方法 研制出以Cs和<sup>129</sup>Xe为工作物质的原子自旋陀螺仪, 标定得零偏稳定性约为3.25 (°)/h<sup>[33]</sup>. 2016年进一步 提升性能后,研制出一种可测得双轴角速度的SERF 原子自旋陀螺仪.近两年,该校也展开对核自旋陀螺 仪重要部件的研究,对核自旋陀螺仪一些部件工艺的 优化进行了理论研究并通过实验提出了新的方法,为 促进原子自旋式陀螺仪性能的提高奠定了坚实的基 础[34-42].

北京自动化控制设备研究所在核磁共振陀螺仪方

向也取得了一定进展.该研究所自2011年起开始研究 核磁共振陀螺仪,2013年研制出原理试验样机,验证 了其原理,并于2014年实现样机的微小型化.2015年, 该所在进一步提升其核磁共振陀螺样机性能的同时 实现对地速的测量.2016年该研究所研制出零偏稳定 性优于1(°)/h、表头体积50 cm<sup>3</sup>、如图8所示的核磁共 振陀螺样机,并在2017年进一步实现了精度更高、体 积更小的核磁共振陀螺样机<sup>[4-34]</sup>.



图 7 北航SERF原子自旋陀螺仪研究平台<sup>[34]</sup>

Fig. 7 Beihang University research platform for SERF atomic spin gyroscope<sup>[34]</sup>



## 图 8 北京自动化控制设备研究所核磁共振陀螺样机<sup>[35]</sup> Fig. 8 Beijing Institute of Automatic Control Equipment NMRG prototype<sup>[35]</sup>

北京航天控制仪器研究所也对核磁共振陀螺仪展 开了相关研究,并于2014年研制出原理样机,验证了 陀螺效应,2016年在进一步提升其性能后,实现了样 机的微小型化,并在2017年进一步提高了精度.同年, 该所提出泵浦激光频率波动会导致核磁共振陀螺精 度降低,并且通过波长调制法抑制了泵浦光频率波动, 为提高陀螺稳定性奠定了基础<sup>[43-46]</sup>.

2014年,中国科学技术大学针对eNV-gyro对磁场 稳定性要求高和nNV-gyro初始化困难的问题,在文 献[47]中提出以Aharonov-Anandan(A-A)几何相为基 础的NV陀螺仪,实验测试最优灵敏度0.2(°)/s/ $\sqrt{\text{Hz}}$ , 量程可以达到 $\pm 6.69 \times 10^6$ (°)/s,启动时间在微秒量 级.

自2013年起,国防科学技术大学也展开核磁共振

陀螺仪的研究,2014年验证了核磁共振陀螺仪的原理, 并正进一步向微小型化、集成化发展<sup>[48-53]</sup>.

另外,国内还有很多研发单位已经开始核磁共振 陀螺仪的研制工作,包括西安飞行自动控制研究 所<sup>[54-55]</sup>、华东师范大学<sup>[56-57]</sup>等机构都对核磁共振陀 螺关键部件或原理进行了验证,推动了我国核磁共振 陀螺仪的发展.

# 6 结论

#### 6.1 发展展望

DARPA于2012年在micro-PNT中启动了芯片级组合原子导航仪(chip-scale combinatorial atomic navigator, C-SCAN)项目,其概念图如图9所示,主要指标体系包括实现惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)体积优于20 cm<sup>3</sup>,冷启动时间优于10 s,功耗优于1 W,测量动态范围优于15000 (°)/s,加速度通道目标精度为10<sup>-6</sup> g,角速度目标精度为10<sup>-4</sup> (°)/h,标度因数稳定性1 ppm<sup>[58]</sup>. C-SCAN项目探索综合冷原子陀螺、核磁共振陀螺和其他惯性传感器优势性能的可行性,通过组合算法将各陀螺部件组合成一个整体,将改善惯性传感器长期漂移、动态范围和启动时间等问题,是促进陀螺综合性能提升的发展趋势之一.





近年来,核磁共振陀螺技术逐渐发展并日趋成熟, 国外已经在小体积下实现导航级精度,各个部件的工 艺技术也日益完善,国内在核磁共振陀螺的零偏稳定 性与单项技术研究上仍存在差距.然而与广泛应用还 存在一定的距离,成本相对较高是现在面临的主要问 题.这也成为阻碍其广泛的、大量的投入应用的首要 障碍,因此如何在保证其高精度、小体积的条件下进 一步降低成本可能成为核磁共振陀螺未来一段时间 内的发展方向.

#### 6.2 应用前景

核磁共振陀螺仪的研制进展和潜在应用受到了国 内外的广泛关注,在微小型敏感单元应用中具有突出 的潜力,现已逐渐从实验室测试转向工程化与装备化 并最终得到广泛应用.随着物理学、新材料、高度专 业化制造以及其他相关技术的发展,核磁共振陀螺有 望在5到10年内以捷联方式应用于无人机、水下潜航器、地面车辆、临近空间飞行器以及单兵装备等任何需要小尺寸和低功率高精度导航的民用和军事领域.

民用无缝导航对惯性导航系统的基本要求是精度 高至米级,体积小便于集成,成本低以广泛应用,然而 传统的惯性导航系统难以满足,其首要瓶颈就是陀螺. 高精度惯性导航系统价格昂贵,难以在民用市场规模 应用,微机电陀螺精度有限,难以应用于高精度无缝 导航.核磁共振陀螺有望在更广阔的范围内如遮挡区 域和干扰区域提供高精度无缝导航定位,对民用定位 导航带来变革性影响<sup>[4-9]</sup>.

在军事领域,核磁共振陀螺有望使得微小体积武器装备具备高精度自主导航能力,对自主导航技术发展带来重大推动作用,使武器装备可用的高精度惯性系统的体积、重量显著降低,并有望满足未来武器装备远程、长航时高精度以及小型化、低功耗等应用需求<sup>[32-54,59]</sup>.

## 参考文献:

- MEYER D, LARSEN M. Nuclear magnetic resonance gyro for inertial navigation. *Gyroscopy & Navigation*, 2014, 5(2): 75 – 82.
- [2] FANG J C, QIN J. Advances in atomic gyroscopes: a view from inertial navigation applications. *Sensors*, 2012, 12(5): 6331 – 6346.
- [3] FANG J C, QIN J, WAN S A, et al. Atomic spin gyroscope based on 129Xe-Cs comagnetometer. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(13): 1512 – 1515.
- [4] QIN Jie, WANG Shilin, GAO Boze, et al. Advances in nuclear magnetic resonance gyroscope. *Navigation Positioning & Timing*, 2014, 1(2): 64 69.
  (秦杰, 汪世林, 高溥泽, 等. 核磁共振陀螺技术研究进展. 导航定位 与授时, 2014, 1(2): 64 69.)
- [5] DONLEY E A. Nuclear magnetic resonance gyroscopes. Sensors. New York: IEEE, 2010: 17 – 22.
- [6] LARSEN M, BULATOWICZ M. Nuclear magnetic resonance gyroscope: For DARPA's micro-technology for positioning, navigation and timing program. *International Symposium on Inertial Sensors* and Systems. New York: IEEE, 2014: 1 – 5.
- [7] ZHANG Huan, MA Zongmin, XIE Yanna, et al. Research progress and application of nitrogen-vacancy(NV) centers in the diamond. *Micronanoelectronic Technology*, 2014, 51(12): 765 – 769, 775. (张欢, 马宗敏, 谢艳娜, 等. 金刚石氮空位中心的研究进展及应用. 微纳电子技术, 2014, 51(12): 765 – 769, 775.)
- [8] XUE Lianli, CHEN Shaochun, CHEN Xiaozhen. Development and review of foreign inertial technology in 2017. Navigation and Control, 2018, 17(2): 1-9, 40.
  (薛连莉, 陈少春, 陈效真. 2017年国外惯性技术发展与回顾. 导航与 控制, 2018, 17(2): 1-9, 40.)
- [9] CHENG Xiang, LIU Hua, WANG Po, et al. Research progress in nuclear magnetic resonance gyroscopes. *Micronanoelectronic Technology*, 2017, 54(9): 605 611.
  (程翔, 刘华, 王咄, 等. 核磁共振陀螺仪研究进展. 微纳电子技术, 2017, 54(9): 605 611.)
- [10] SHKEL A M. Precision navigation and timing enabled by microtechnology: Are we there yet? *Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications III.* Florida: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 2010: 5 – 9.

- [11] ZHOU Peng, LI Yelan. Patent information research on the nuclear magnetic resonance gyroscope technology. *Tactical Missile Technology*, 2015, 4: 5 9.
  (周鹏, 李夜兰, 国外核磁共振陀螺技术专利研究. 战术导弹技术, 2015, 4: 5 9.)
- [12] KARWACKI F A. Nuclear magnetic resonance gyro development. *Navigation*, 1980, 27: 72 – 78.
- [13] GROVER B C, KANEGSBERG E, MARK J G, et al. Nuclear magnetic resonance gyro: US, US4157495. Woodland Hills: Litton Industries, 1979.
- [14] GREENWOOD I A. Nuclear Gyroscope with Unequal Fields: US, US4147974. New York: Kearfott, 1979.
- [15] SHAW G L. Modeling a cryogenic HE-3 nuclear gyro. Palo Alto: Stanford University, 1980.
- [16] KUMAR K, BARBOUR N, WEINBERG M. Uncommon inertial sensing concepts revisited. *Guidance, Navigation, and Control Conference*. Baltimore: AIAA, 1995, 524 – 535.
- [17] LARSEN M, BULATOWICZ M. Nuclear magnetic resonance gyroscope for DARPA's micro-technology for positionning, navigation and timing program. San Diego: Northrop Grumman, 2012.
- [18] MASPERO F, LOPEZREY V F, JOET L, et al. Nuclear magnetic resonance gyroscope: Developing a primary rotation sensor. *International Symposium on Inertial Sensors and Systems*. New York: IEEE, 2018.
- [19] EKLUND E J. *Microgyroscope based on spin-polarized nuclei*. Irvine: University of California, 2008.
- [20] GUNDETI V M. Folded MEMS approach to NMRG. Irvine: University of California, 2015.
- [21] KORNACK T W, GHOSH R K, ROMALIS M V. Nuclear spin gyroscope based on an atomic comagnetometer. *Physical Review Letters*, 2005, 95(23): 2308011 – 2308014.
- [22] KORNACK T W. A test of CPT and Lorentz Symmetry using a K-3He comagnetometer. Princeton: Princeton University, 2005.
- [23] BROWN J M. A new limit on Lorentz and CPT-violating neutron spin interactions using a K-3He comagnetometer. Princeton: Princeton University, 2011.
- [24] VASILAKIS G. Precision measurements of spin interactions with high density atomic vapors. Princeton: Princeton University, 2012.
- [25] LIMES M, SHENG D, ROMALIS M. A 3He-129Xe comagnetometer with 87Rb magnetometry. APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics Meeting. New York: APS, 2016, 61(8): 23 – 27.
- [26] WALKER T G, LARSEN M S. Spin-exchange pumped NMR gyros. Advances in Atomic Molecular & Optical Physics, 2016, 65: 373 – 403.
- [27] LUST L M, YOUNGNER D W. Chip scale atomic gyroscope: US, US7359059. Morristown: Honeywell International, 2008.
- [28] RENON G, ZAHZAM N, BIDEL Y, et al. A nuclear-electronic spin gyro-comagnetometer. APS Division of Atomic and Molecular Physics Meeting. New York: APS, 2013: 135 – 136.
- [29] EPSTEIN R J, MENDOZA F M, KATO Y K, et al. Anisotropic interactions of a single spin and dark-spin spectroscopy in diamond. *Nature Physics*, 2005, 1(2): 94 – 98.
- [30] LEDBETTER M, JENSEN K, RAN F, et al. Gyroscopes based on nitrogen-vacancy centers in diamond. *Physical Review A*, 2012, 86(5): 27454 – 27475.
- [31] OCHOA J E, CORREA M M, VALENCIA A M, et al. Stable threeaxis nuclear spin gyroscope in diamond. *Physical Review A*, 2012, 86(6): 12184 – 12188.

- [32] ZHOU B Q, LEI G Q, CHEN L L, et al. Noise suppression for the detection laser of a nuclear magnetic resonance gyroscope based on a liquid crystal variable retarder. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(8): 0823021 – 0823025.
- [33] FANG J, WAN S, QIN J, et al. A novel Cs-Xe-129 atomic spin gyroscope with closed-loop Faraday modulation. *The Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(8): 0831081 – 0831085.
- [34] ZHANG H, ZOU S, CHEN X Y, et al. Research on the influence of alkali polarization on an all-optical atomic spin magnetometer based on hybrid pumping potassium and rubidium. *Journal of the Korean Physical Society*, 2015, 66(8): 1212 – 1217.
- [35] WAN Shuangai, SUN Xiaoguang, ZHENG Xin, et al. Prospective development of nuclear magnetic resonance gyroscope. *Navigation Positioning & Timing*, 2017, 4(1): 7 13.
  (万双爱, 孙晓光, 郑辛, 等. 核磁共振陀螺技术发展展望. 导航定位 与授时, 2017, 4(1): 7 13.)
- [36] FANG J, WAN S, YUAN H. Dynamics of an all-optical atomic spin gyroscope. *Applied Optics*, 2013, 52(30): 7220 – 7227.
- [37] FANG J, WAN S, CHEN X, et al. Linght-shift measurement and suppression in atomic spin gyroscope. *Applied Optics*, 2012, 51(31): 7714 – 7717.
- [38] ZOU S, ZHANG H, CHEN X Y, et al. Ultra-sensitive atomic magnetometer for studying magnetization fields produced by hyperpolarized helium–3. *Journal of Applied Physics*, 2016, 119(14): 1439011 – 1439016.
- [39] CHEN L, ZHOU B, LEI G, et al. Effects of temperature on Rb and 129Xe spin polarization in a nuclear magnetic resonance gyroscope with low pump power. *Aip Advances*, 2017, DOI: 10.1063/1.5000530.
- [40] LIU Gang, ZHAO Yuting, QUAN Wei. Measurement of linearly polarized light rotation caused by spherical alkali vapor cell based on difference detection. *Acta Optica Sinica*, 2017, 4: 191 197.
  (刘刚, 赵毓婷, 全伟. 基于差分检测的球形碱金属气室导致线偏光 转角的测量. 光学学报, 2017, 4: 191 197.)
- [41] CHI Haotian, WANG Xulin, QUAN Wei. Pressure measurement of each gas in alkali-metal vapor cell with a mixed gas based on saturated absorption spectrum. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(3): 948 – 952.
  (池浩湉, 王许琳, 全伟. 基于原子吸收光谱的碱金属气室内多种混

(把启砧,王叶承,王伟, 举于原于吸收无宿的喊金禹气至内多种福 合气体压强测量方法. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(3): 948 – 952.)

- [42] ZHOU Binquan, HAO Jiepeng, LIANG Xiaoyang, et al. Experimental study on electromagnetic noise suppression of atomic spin gyroscope heating chamber. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 44(1): 36 42.
  (周斌权,郝杰鹏,梁晓阳,等. 原子自旋陀螺气室加热电磁噪声抑制实验研究. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(1): 36 42.)
- [43] WANG Wei, WANG Xuefeng, LIU Yuanxing. Based on a broad spectrum laser pump NMR gyroscope: CN, CN 1046343399. Beijing: Beijing Institute of Aerospace Control Device, 2017.
  (王巍, 王学锋, 刘院省. 一种基于宽谱激光泵浦的核磁共振陀螺仪: CN, CN 1046343399. 北京: 北京航天控制仪器研究所, 2017.)
- [44] LIU Yuanxing, WANG Wei, WANG Xuefeng. Key technology and development tendency of mirco nuclear magnetic resonance gyroscope. *Navigation and Control*, 2014, 13(4): 1-6.
  (刘院省, 王巍, 王学锋. 微型核磁共振陀螺仪的关键技术及发展趋势. 导航与控制, 2014, 13(4): 1-6.)
- [45] ZHOU Weiyang, WANG Xuefeng, DENG Yicheng, et al. Nuclear magnetic resonance gyro with frequency fluctuation of pump laser. Navigation and Control, 2017, 16(2): 47 51.
  (周维洋,王学锋,邓意成,等. 泵浦激光频率波动对核磁共振陀螺仪 零偏稳定性的影响研究. 导航与控制, 2017, 16(2): 47 51.)
- [46] WANG Xuefeng, ZHOU Weiyang, DENG Yicheng, et al. Suppression of pump laser frequency drift of nuclear magnetic resonance gyroscope. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2017, 25(2): 236 –

239.

(王学锋,周维洋,邓意成,等.核磁共振陀螺仪泵浦光频率波动抑制. 中国惯性技术学报,2017,25(2):236-239.)

- [47] FU Jianwei. Gyroscopes based on nitrogen-vacancy centers in diamond. Hefei, China: University of Science and Technology of China, 2014.
  (浮建伟.基于金刚石氮-空位体系的量子陀螺仪的研究. 中国, 合肥: 中国科学技术大学, 2014.)
- [48] ZHOU Xin, XIAO Dingbang, WU Xuezhong. Application and development of MEMS gyroscope. *National Defense Science & Technology*, 2015, 36(4): 8 14.
  (周鑫,肖定邦,吴学忠. 微机电陀螺的现状与发展趋势. 国防科技, 2015, 36(4): 8 14.)
- [49] YI Xin, WANG Zhiguo, XIA Tao, et al. Research on temperature field in the vapor cell. *Chinese Optics*, 2016, 9(6): 671-677.
  (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. 中国光学, 2016, 9(6): 671-677.)
- [50] LIU X, CHEN C, QU T, et al. Transverse spin relaxation and diffusion-constant measurements of spin-polarized 129Xe nuclei in the presence of a magnetic field gradient. *Scientific Reports*, 2016, 6: 241221 – 241228.
- [51] LIU X H, LUO H, QU T L, et al. Measuring the spin polarization of alkali-metal atoms using nuclear magnetic resonance frequency shifts of noble gases. *Aip Advances*, 2015, 5(10): 1071191 – 1071197.
- [52] JIANG P, WANG Z, LUO H. Techniques for measuring transverse relaxation time of xenon atoms in nuclear-magnetic-resonance gyroscopes and pump-light influence mechanism. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, 138: 341 – 348.
- [53] WANG Z, PENG X, LUO H, et al. Comparison of operation modes for spin-exchange optically-pumped spin oscillators. *Journal of Magnetic Resonance*, 2017, 278: 134 – 140.
- [54] YAN Jizhong, LI Pan, LIU Yuanzheng. Analysis of the basic concept and the development tendency of atomic gyroscopes. *Piezoelectrics* & Acoustooptics, 2015, 37(5): 810-817.
  (严吉中,李攀,刘元正. 原子陀螺基本概念及发展趋势分析. 压电与 声光, 2015, 37(5): 810-817.)
- [55] LI Pan, LIU Yuanzheng, WANG Jiliang. Optimization design of multilayer magnetic shield for nuclear magnetic. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2016, 24(3): 383 – 389. (李攀,刘元正,王继良. 核磁共振陀螺多层磁屏蔽系统优化设计. 中 国惯性技术学报, 2016, 24(3): 383 – 389.)
- [56] ZHANG D W, XU Z Y, ZHOU M, et al. Parameter analysis for a nuclear magnetic resonance gyroscope based on (133)Cs-(129)Xe/(131)Xe. *Chinese Physics B*, 2017, 26(2): 161 – 165.
- [57] ZHANG Dawei. Optimum design of nuclear mangnetic resonance gyroscopes. Shanghai: East China Normal University, 2016. (张大伟. 核磁共振陀螺仪的优化设计. 上海: 华东师范大学, 2016.)
- [58] SHKEL A. The Chip-scale combinatorial atomic navigator. GPS World, 2013, 24(8): 8 – 10.
- [59] CHEN Xi, DAI Hongyi, ZHANG Ming. Weak-value measurements at quantum systems: theory, realizations, applications and open problems. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(11): 5 23.
  (陈希,戴宏毅,张明. 量子系统上的弱值测量:理论、实现、应用及开放性问题. 控制理论与应用, 2017, 34(11): 5 23.)

作者简介:

**陈 颖** 硕士研究生,目前研究方向为惯性导航与组合导航技术, E-mail: sy1717222@buaa.edu.cn;

**刘占超**助理研究员,目前研究方向为惯性导航与组合导航技术, E-mail: liuzc@buaa.edu.cn;

刘 刚 教授,博士生导师,目前研究方向为惯性器件及系统、惯性执行机构技术,E-mail: lgang@buaa.edu.cn.