

核磁共振陀螺技术研究进展

秦 杰, 汪世林, 高溥泽, 王宇虹, 韩文法
(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要: 核磁共振陀螺是基于量子操控技术的前沿研究新进展。具有高精度、微型、对加速度不敏感、纯固态等特点, 是未来发展高精度、微型陀螺的主要技术发展方向之一。围绕核磁共振陀螺技术的最新研究进展, 重点介绍了核磁共振陀螺的基本工作原理及其硬件构成, 分析了核磁共振陀螺在上个世纪的主要技术发展路线与面临的技术发展瓶颈, 综述了核磁共振陀螺近年来取得的研究进展及实现的技术突破, 最后对核磁共振陀螺技术的未来发展进行了展望。

关键词: 核磁共振陀螺; 原子陀螺; 陀螺; 惯性导航

中图分类号: V241.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-8110(2014)02-0064-06

Advances in nuclear magnetic resonance gyroscope

QIN Jie, WANG Shi-lin, GAO Pu-ze, WANG Yu-hong, HAN Wen-fa
(Beijing Automation Control Equipment Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: With the rapid development of frontier technologies such as quantum manipulation, Nuclear Magnetic Resonance Gyroscope (NMRG), which features high precision, micro scale, insensitive to acceleration and no moving parts, has become one of the main developing trends of the high precision and micro gyroscope at present. To summarize the recent progresses of the NMRG, the basic operation principle and typical hardware structure of the NMRG were introduced firstly; the main technical approaches to develop the NMRG and the difficulties for further improving the NMRG in the last century were analyzed secondly; the recent development of the NMRG and the realized technical breakthroughs were summarized thirdly; the development of the NMRG in the near future were prospected finally.

Key words: Nuclear magnetic resonance gyroscope; Atomic gyroscope; Gyroscope; Inertial navigation

0 引言

随着我国航空、航天、航海、测绘、交通等领域快速发展, 对高精度自主导航需求日益迫切。惯性导航是唯一的全自主、实时、连续、不受干扰, 无时间、地域、环境限制的导航技术。陀螺是惯性导航系统的核心, 是决定导航性能的关键部件。陀螺传感器历时近一个世纪的发展, 逐步采用了机械式, 光学式, 微机电式技术。但是, 如何进一步提高陀螺精度, 满足远程、长航时运动载体对超高精度惯性导航的迫切需求; 如何在保持导航级精度前提下进一步降低陀螺的体积与成本, 满足导航级、战术级运动载体对微型惯性导航器件的迫切需求, 是陀螺技术领域目前面临的两大核心难题^[1, 2]。近年来, 前沿量子技术

与传统惯性技术的交叉, 使得原子陀螺的概念得以提出, 并在实验室环境下得到了技术验证。从原理上进行区分, 原子陀螺的分类与特点如表1所示^[3-4]。其中, 核磁共振陀螺(Nuclear Magnetic Resonance Gyroscope, NMRG)与无自旋交换弛豫(Spin Exchange Relaxation Free, SERF)原子自旋陀螺均利用了原子自旋进行角运动的测量。

表1 原子陀螺的分类与特点

Tab. 1 Atomic gyroscopes and their characteristic

分类	理论精度	特点	应用对象
核磁共振陀螺	10^{-4} (°)/h	高精度 微型	导航级、战术级 运动载体
SERF 原子 自旋陀螺	10^{-8} (°)/h	超高精度 小体积	远程长航时潜器、 飞行器等运动载体
原子干涉陀螺	10^{-10} (°)/h	超高精度	

收稿日期: 2014-08-10; 修订日期: 2014-08-26。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2014AA121801)、国家自然科学基金(61473268)

作者简介: 秦杰(1984-), 男, 博士, 工程师, 主要从事量子传感技术方面的研究。E-mail: jie.qin@yahoo.com

原子陀螺技术的出现有望解决目前陀螺技术领域面临的两大核心难题,为惯性导航的未来发展提供了新的技术途径。其中,核磁共振陀螺具有高精度、小体积、低功耗、低成本等优点,并正在向芯片级尺寸、战略级精度发展^[5-7],有望对未来惯性导航市场带来重要影响^[8-9]。

1 工作原理

核自旋具有磁矩,会围绕外磁场进行拉莫尔进动。对处于外磁场中的核自旋施加一定频率的电磁辐射,当辐射频率等于核自旋的拉莫尔进动频率时,电磁辐射能量能够被核自旋吸收,使得核自旋发生能级跃迁,形成核磁共振。由于核磁共振频率仅与核自旋旋磁比、外磁场的强度相关,与核自旋的角运动、线运动无关,使得核磁共振在惯性空间提供了角运动的测量基准,并且具有对加速度不敏感的特点。

核磁共振陀螺的工作原理如图1所示。

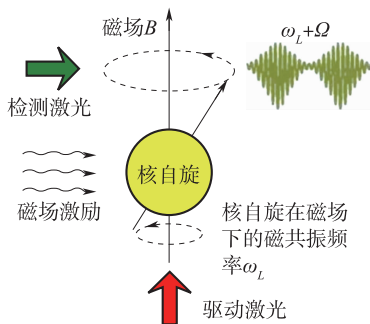


图1 核磁共振陀螺的工作原理示意图

Fig. 1 The principle of NMRG

核自旋的指向在自然状态下杂乱无章,首先采用驱动激光通过光子角动量的传递,使得核自旋获得宏观指向。核自旋在纵向外磁场和横向激励磁场下发生核磁共振,共振频率 ω_L 与核自旋旋磁比 γ_n 、外磁场强度 B 相关($\omega_L = \gamma_n \cdot B$),与载体相对惯性空间是否转动无关。检测激光固联在载体系,用于实时观测核磁共振频率。当载体相对惯性空间的转动角速率为 Ω 时,检测激光观察得到的核磁共振频率 ω_L' 为 ω_L 、 Ω 的叠加($\omega_L' = \omega_L + \Omega$)。当 ω_L 为已知量时,可以在 ω_L' 中扣除 ω_L 而得到 $\Omega = \omega_L' - \omega_L$,从而实现角运动的测量。

当核自旋的元素选定后, γ_n 为物理常量,需要控制外磁场强度 B ,以满足 ω_L 为已知量的要求。

在实际应用中,可采用两种核自旋,具有不同的核自旋旋磁比 γ_{n1} 与 γ_{n2} ,检测得到两个核磁共振频率 ω_{L1}' 与 ω_{L2}' :

$$\begin{cases} \omega_{L1}' = \omega_{L1} + \Omega = \gamma_{n1} \cdot B + \Omega \\ \omega_{L2}' = \omega_{L2} + \Omega = \gamma_{n2} \cdot B + \Omega \end{cases}$$

解上述方程组,得到:

$$\Omega = \frac{\omega_{L2}' \cdot \gamma_{n1} - \omega_{L1}' \cdot \gamma_{n2}}{\gamma_{n1} - \gamma_{n2}}$$

上式表明,通过两种核自旋的构造,可以在原理上实现对外磁场变化的隔离;同时,通过上述方程组也能够获得外磁场大小信息。虽然从上述解的形式看,可以直接获取角运动信息,但是外磁场的大幅变化,会制约核磁共振频率 ω_L' 的检测精度、磁共振闭环维持的带宽。因此,通过两种核自旋的构造,结合磁屏蔽的使用,为高精度的核磁共振陀螺提供了技术实现途径。

为实现核磁共振陀螺对角运动的测量,一种典型的核磁共振陀螺硬件构成如图2所示,各部件的基本功能说明如下:

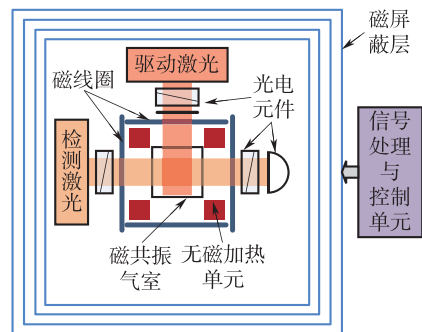


图2 核磁共振陀螺的典型硬件构成示意图

Fig. 2 A typical hardware structure for NMRG

1) 磁共振气室:位于整个核磁共振陀螺的中心,内部包含用于敏感角运动的原子(如碱金属原子、核自旋惰性气体原子、猝灭气体原子、缓冲气体原子等),是核磁共振陀螺的核心敏感单元。

2) 驱动激光:通过激光直接极化或间接超极化核自旋,赋予核自旋以宏观方向,是核磁共振陀螺的驱动机构,一般采用圆偏振光。

3) 检测激光:通过激光与核自旋的直接耦合作用,或激光与电子自旋、电子自旋与核自旋的耦合作用,获得核自旋的进动状态,是核磁共振

陀螺的检测机构,一般采用线偏振光。在图2中,给出了驱动与检测激光互相正交的布局形式,实际应用中驱动与检测激光也可以合成为一束激光,一般采用圆偏振或椭圆偏振光。

4) 磁线圈:通过闭环控制产生三维磁场,一方面降低磁共振气室附近的环境磁场波动,实现主动磁补偿,提高磁场的稳定性;另一方面实时维持核自旋的磁共振状态,从而提取角运动信息,成为核磁共振陀螺中的闭环执行机构。

5) 磁屏蔽层:通过高导磁材料屏蔽环境磁场对磁共振气室中原子自旋系综的影响,初步抑制由于环境磁场变化导致的核磁共振陀螺系统误差。

6) 无磁加热单元:加热磁共振气室中的碱金属原子,以利于超极化核自旋以及构造原子磁强计进行三维磁场测量。由于无磁加热单元一般布置在磁屏蔽层内,当采用电流加热时,需要通过较高频率的交流电、线缆的精密空间对称布置等手段,降低电加热引起的干扰磁场。当核磁共振陀螺中未采用碱金属原子时,则一般不需无磁加热单元。

7) 光电元件:包括光学元件、光电元件等,对驱动与检测激光进行精密调节与探测。

8) 信号处理与控制单元:对核磁共振陀螺中的光、磁、热、电等部件,进行综合的信号处理与控制,最终完成核磁共振陀螺所需的各种原子自旋系综精密操控。

总体来看,核磁共振陀螺的硬件结构相对简单,其内部部件一般能够进行微小型甚至芯片级加工制造,为核磁共振陀螺的微小型化、芯片化提供了条件。

2 发展历史

核磁共振陀螺近年来的快速发展,得益于核磁共振陀螺技术的历史积累。20世纪60年代末,核磁共振陀螺的概念得以提出,由于其原理上具有高精度、抗过载、纯固态等优点,多家研究机构开展了该陀螺的研究工作^[10]。20世纪80年代,Litton与Singer-Kearfott公司均研制成功了核磁共振陀螺样机。

Litton公司的核磁共振陀螺样机,直径约为7.5cm、高约8cm,精度达到 $0.05\text{ (}^\circ\text{) / h}^{[11-12]}$ 。

该陀螺采用碱金属原子⁸⁷Rb、核自旋惰性气体原子⁸³Kr与¹²⁹Xe,作为核磁共振陀螺的敏感介质,综合利用了一种碱金属原子的电子自旋与两种惰性气体原子的核自旋耦合:采用超极化手段,将光子角动量传递给电子自旋,通过电子自旋赋予核自旋以宏观指向;利用圆偏振光驱动与检测电子自旋从而构造磁强计,测量核自旋进动产生的变化磁场,提取核磁共振频率;通过两种核自旋的构造,测量并稳定外磁场。

Singer-Kearfott公司研制的核磁共振陀螺样机,直径约为10cm、高约12cm,精度达到 $0.1\text{ (}^\circ\text{) / h}^{[12-13]}$ 。该陀螺采用核自旋惰性气体原子¹⁹⁹Hg与²⁰¹Hg,作为核磁共振陀螺的敏感介质。与Litton公司的方案相比,由于没有碱金属原子的电子自旋参与核自旋的极化与检测,该公司采用²⁰⁴Hg灯直接极化¹⁹⁹Hg与²⁰¹Hg的核自旋,采用²⁰²Hg灯利用线偏振光的法拉第旋转效应,直接检测上述两种核自旋的进动频率。该陀螺同样通过两种核自旋的构造,稳定外磁场大小,与Litton公司的主要区别是采用了两个磁共振气室,布置在大小相等方向相反的外磁场下,测量得到4个核磁共振频率,联立方程组求解得到的角速率与核自旋的旋磁比无关。

斯坦福大学基利用³He原子的核自旋作为敏感介质,设计了弛豫时间长达数天的低温超导核磁共振陀螺^[14]。由于采用低温超导技术构造磁屏蔽与产生高均匀的磁场,其内部的磁场稳定性可理论上实现 $2 \times 10^{-4}\text{ (}^\circ\text{) / h}$ 的核磁共振陀螺。在检测方面,采用超导量子干涉技术读出核磁共振频率信息。

Litton公司、Singer-Kearfott公司、斯坦福大学在核磁共振陀螺领域的研究工作,代表了当时核磁共振陀螺的三条主要技术发展路线。除上述研究单位外,同期还有英国海军研究院(Admiralty Research Establishment)^[15]、Sussex大学^[12]等单位也开展了相关的研究工作。然而,经过近20年的发展,核磁共振陀螺在20世纪80年代遇到了进一步提高精度、减小体积、降低成本的技术瓶颈,如表2所示。

表 2 核磁共振陀螺在上 20 纪 80 年代面临的发展瓶颈
Tab. 2 Defects of NMRG in 1980s

性能	技术瓶颈	原因
提高精度	核自旋进动检测精度不高	缺乏相应自旋系综操控机理与方法、高性能的光源。
	磁场屏蔽精度不高	缺乏主动磁补偿所需的高精度磁场测量手段。
减小体积	磁共振气室体积难以减小	缺乏核自旋弛豫机理的深入认识, 减小气室体积导致陀螺精度下降。
	光源体积难以减小	采用的光谱灯难以小型化, 当时的小型光源缺乏相应原子自旋系综的操控波长。
降低成本	磁屏蔽成本高	系统体积较大导致磁屏蔽体积较大, 材料成本较高。
	光源成本高	高性能的光谱灯价格相对较高。

在核磁共振陀螺发展面临技术瓶颈的背景下, 同期出现的激光、光纤陀螺发展迅速。Draper 实验室曾分析指出^[16], 核磁共振陀螺的成本介于激光陀螺与光纤陀螺之间, 而精度比激光陀螺低、与光纤陀螺相当, 使得核磁共振陀螺难以找到合适的应用市场。特别是随着当时光电子技术的快速发展, 激光、光纤陀螺有进一步提高精度、降低成本的潜力, 使得美国国防部门的经费支持主要投向激光、光纤陀螺, 很多研究机构逐渐放弃了核磁共振陀螺的研究工作。

3 研究进展

近年来, 在美国国防先进研究项目局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 对微小型、高精度陀螺的需求牵引下, 在量子操控、微加工等技术发展的推动下, 随着原子磁强计的自旋进动检测^[17-18]与原位磁补偿^[19-21]、芯片级原子器件微加工集成^[22-23]等领域的前沿研究进展, 核磁共振陀螺突破了其在 20 世纪 80 年代面临的技术瓶颈^[6, 24], 诺斯罗普·格鲁门公司近年来取得的研究进展如图 3 所示。

该公司于 2013 年 4 月实现的核磁共振陀螺测试数据为^[7]: 零偏稳定性 0.02 (°) /h, 角随机游走 0.001 (°) /h^{1/2}, 测量范围 > ± 2500 (°) /s, 频带宽度 > 300Hz, 标度因数稳定性 < 5 × 10⁻⁶, 磁场抑制能力 > 3 × 10⁹, 体积 10cm³。上述技术指

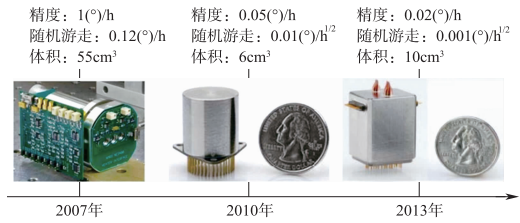


图 3 诺斯罗普·格鲁门公司的核磁共振陀螺研究进展^[6-7]

Fig. 3 Progresses in NMRG of Northrop Grumman

标表明, 该陀螺在微机电陀螺的体积下已经实现了光学陀螺的精度, 同时具有测量范围大、对加速度不敏感、纯固态等优点, 对现有陀螺形成了强有力的竞争态势。在此基础上, 诺斯罗普·格鲁门公司计划研制体积约 300cm³、功耗约 5W 的核磁共振陀螺惯性导航系统, 在导航级定位精度下, 相比传统惯性导航系统的体积、功耗大幅降低。

诺斯罗普·格鲁门公司的核磁共振陀螺已经实现了 0.02 (°) /h 的精度, 敏感体积仅为 8mm³。理论分析表明, 该敏感体积下核磁共振陀螺具有 10⁻⁴ (°) /h 量级的精度, 使得该陀螺仍然具有进一步大幅提高精度的潜力; 另一方面, 陀螺的系统体积 10cm³ 远大于敏感体积, 表明该陀螺仍然采用了较多的传统加工工艺, 随着微光机电加工制造技术的应用与进步, 陀螺的系统体积具有大幅减小的潜力。

加州大学欧文分校基于微加工技术, 开展了微小型核磁共振陀螺技术的研究^[25], 重点探索了微小型磁共振气室的加工工艺, 利用湿法刻蚀构造了光学反射面, 在同一个基板平面上实现了激光发射与检测。该学校采用¹²⁹Xe - ⁸⁷Rb 作为敏感介质, 研制了表头体积约 Φ1cm × 2cm 的原理样机, 实现了陀螺效应验证。

目前, DARPA 正在实施 C - SCAN (Chip Scale Combinatorial Atomic Navigator, 芯片级原子导航器) 项目^[9], 拟研制体积 ≤ 20cm³、功耗 ≤ 1W 的惯性测量单元, 如图 4 所示。在该项目的概念图中, 即采用了与图 2 类似的核磁共振陀螺硬件构成, 作为 C - SCAN 的原理性示意。

C - SCAN 拟实现的陀螺性能指标为: 零偏稳定性 1 × 10⁻⁴ (°) /h, 测量范围 ± 15000 (°) /s, 标度因数稳定性 1 × 10⁻⁶, 启动时间 ≤ 10s。核磁

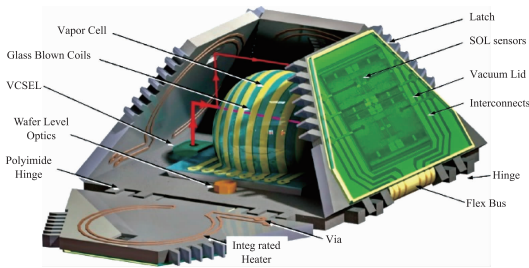


图4 DARPA提出的C-SCAN概念图^[9]

Fig. 4 C-SCAN conceptual implementation by DARPA

共振陀螺具有满足上述几乎所有指标的潜力，但是高精度核磁共振陀螺的弛豫时间相对较长，导致极化核自旋系综所需的系统启动时间较长。例如，实现的 $0.02 (^{\circ})/h$ 核磁共振陀螺，核自旋弛豫时间为26s，则陀螺的启动时间至少为26s。虽然弛豫时间与陀螺精度没有直接的比例关系，但采用10s的核自旋弛豫时间实现 $10^{-4} (^{\circ})/h$ 的陀螺仍然较为困难。诺斯罗普·格鲁门公司正在承担C-SCAN项目，提出采用微机电陀螺与核磁共振陀螺相结合的方式，在核磁共振陀螺启动前，利用微机电陀螺提供短暂的角运动信息，从而满足系统启动时间的要求。

“十二五”以来，国内多家单位积极跟踪了核磁共振陀螺技术的发展动态，开展了相关研究工作^[26-29]。北京自动化控制设备研究所自2011年开展核磁共振陀螺的前沿探索研究；2013年，研制了核磁共振陀螺的原理试验装置，走通了原子自旋系综的极化、检测、磁共振、磁补偿等操控技术，实现了核磁共振陀螺的原理验证；2014年，基于自主研制的4mm方形磁共振气室、4mm无磁电加热片、小体积三维异型线圈、小体积磁屏蔽罩等部件，设计与研制了表头体积 250cm^3 的原理样机，利用 $^{129}\text{Xe}-^{131}\text{Xe}-\text{Cs}$ 的自旋系综耦合，完成了基于核磁共振、电子顺磁共振的系统级闭环控制，同样实现了陀螺效应验证，如图5所示。目前，表头体积 80cm^3 的原理样机正在测试中。

综上所述，在量子操控、光电子、微电子等技术快速发展的推动下，核磁共振陀螺以其从原理上具有高精度、小体积的突出优势，近年来再次成为美国国防部的重点支持对象，并取得了突破性进展。相比早期面临的技术瓶颈，核磁共振陀螺依托相关技术领域的推动，近年来实现的主

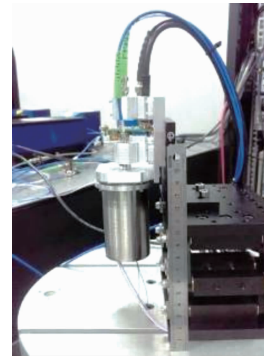


图5 研制的核磁共振陀螺原理样机

Fig. 5 The developed NMRG prototype

要技术突破如表3所示。

表3 核磁共振陀螺近年来的技术突破

Tab. 3 Breakthroughs of NMRG in recent years

性能	技术突破	相关技术推动
提高精度	核自旋进动检测精度提高	量子操控理论与方法进步，窄线宽、高稳定检测光源的应用。
	磁场屏蔽精度提高	原子磁强计技术突破，提供主动磁补偿所需的超高精度磁场测量手段；系统体积减小，被动磁屏蔽性能得到进一步提升。
减小体积	磁共振气室体积减小	核自旋弛豫机理的深入认识，气室内壁抗弛豫镀膜技术应用。
	光源体积减小	半导体激光器获得应用，可提供相应原子自旋系综的操控波长，具备小体积、窄线宽、高稳定特点。
降低成本	磁屏蔽成本降低	系统体积减小，导致磁屏蔽材料需求量降低。
	光源成本降低	半导体激光器发展快速，易于获得高性能、小体积、低成本的光源。

4 发展展望

原子陀螺已经在实验室取得了突破性研究进展，为陀螺技术的未来发展提供了新途径。在三类原子陀螺中，核磁共振陀螺的技术成熟度最高、唯一由工业部门主导研发、且应用领域最为广阔。目前的核磁共振陀螺技术研究进展表明，该陀螺具备高精度、微小型、对加速度不敏感、纯固态等综合技术优势，有望构建小体积、轻质量、低功耗、低成本的高精度惯性系统。

随着自旋磁共振系综操控技术的发展、微光机电加工技术的进步，核磁共振陀螺在现已实现的技术指标上仍有提高精度、减小体积的潜力。

在美国国防部 C-SCAN 等项目的牵引下,核磁共振陀螺正在向进一步提高综合性能的方向发展。另一方面,诺斯罗普·格鲁门公司的核磁共振陀螺已经具备较好的工程应用价值,开发相关产品进入应用领域,也是核磁共振陀螺近期的重点发展方向之一。

我国的核磁共振陀螺技术目前仍处于起步研究阶段,与国外相比差距较大,主要表现为缺乏自旋磁共振系综的操控机理与方法认识,以及缺少高性能的核心部件,需要在上述技术领域加强相关研究工作。

参考文献

- [1] Barbour N. M. Inertial Navigation Sensors [R]. Bagnaux; NATO Science and Technology Organization, 2011.
- [2] Schmidt G. T. INS/GPS technology trends [R]. Bagnaux; NATO Science and Technology Organization, 2011.
- [3] Fang J., Qin J. Advances in Atomic Gyroscopes; A View from Inertial Navigation Applications [J]. Sensors, 2012, 12 (5): 6331-6346.
- [4] 秦杰. 基于¹²⁹Xe-Cs 的 SERF 原子自旋陀螺仪原理实验研究 [D]. 北京航空航天大学, 2012.
- [5] Donley E. A. Nuclear Magnetic Resonance Gyroscopes; 2010 IEEE Sensors Conference, Kona, HI, 2010 [C]. 17-22.
- [6] Larsen M., Bulatowicz M. Nuclear Magnetic Resonance Gyroscopes; For DARPA's micro-technology for positioning, navigation and timing program; 2012 IEEE International Frequency Control Symposium, Baltimore, 2012 [C]. 1-5.
- [7] Larsen M., Meyer D. Nuclear Magnetic Resonance Gyro for Inertial Navigation [J]. Gyroscopy and Navigation, 2014, 5 (2): 75-82.
- [8] Shkel A. M. Precision navigation and timing enabled by micro-technology: Are we there yet?; Proc SPIE 8031, Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications III, 2011 [C]. Orlando: 803118: 1-9.
- [9] Shkel A. M. The Chip-Scale Combinatorial Atomic Navigator [J]. GPS World, 2013, 8: 8-10.
- [10] Karwacki F. A. Nuclear magnetic resonance gyro development [J]. J Inst Navigation, 1980, 27: 72-78.
- [11] Grover B. C., Kanegsberg E., Mark J. G., et al. Nuclear magnetic resonance gyro; USA, U. S. Patent 4, 157, 495 [P]. 1979-6-5.
- [12] Woodman K. F., Franks P. W., Richards M. D. The Nuclear Magnetic Resonance Gyroscope: a Review [J]. The Journal of Navigation, 1987, 40 (03): 366-384.
- [13] Greenwood I. A. Nuclear gyroscope with unequal fields; USA, U. S. Patent 4, 147, 974 [P]. 1979-4-3.
- [14] Shaw G. L. Modeling a cryogenic ³He nuclear gyro [D]. Stanford: Stanford University, 1981.
- [15] Potts S. P., Preston J. A Cryogenic Nuclear Magnetic Resonance Gyroscope [J]. The Journal of Navigation, 1981, 34 (01): 19-37.
- [16] Kumar K., Barbour N., Weinberg M. Uncommon inertial sensing concepts revisited [R]. AIAA-95-3230-CP, 1995.
- [17] Kominis I. K., Kornack T. W., Allred J. C., et al. A sub-femtotesla multichannel atomic magnetometer [J]. Nature, 2003, 422 (6932): 596-599.
- [18] Dang H. B., Maloof A. C., Romalis M. V. Ultrahigh sensitivity magnetic field and magnetization measurements with an atomic magnetometer [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97 (15): 151110: 1-3.
- [19] Budker D., Romalis M. Optical magnetometry [J]. Nature Physics, 2007, 3 (4): 227-234.
- [20] Fang J., Qin J. In situ triaxial magnetic field compensation for the spin exchange relaxation free atomic magnetometer [J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83 (10): 103104: 1-7.
- [21] Bulatowicz M., Larsen M. Compact Atomic Magnetometer for Global Navigation (NAV-CAM); 2012 IEEE International Position Location and Navigation System Symposium, Baltimore, 2012 [C]. 1088-1093.
- [22] Romalis M. V. Chip-scale magnetometers [J]. Nature Photonics, 2007, 1 (11): 613-614.
- [23] Kitching J., Knappe S., Donley E. Atomic Sensors - A Review [J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11 (9): 1749-1758.
- [24] Kanegsberg E. Nuclear magnetic resonance gyroscope; USA, U. S. Patent 7, 282, 910 [P]. 2007-10-16.
- [25] Eklund E. J. Microgyroscope based on spin polarized nuclei [D]. University of California, Irvine, 2008.
- [26] 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]. 惯性技术学报, 2006, 14 (6): 86-90.
- [27] 龚云鹏, 高雁翎. 导航级微型核磁共振陀螺仪技术综述 [J]. 现代防御技术, 2012, 40 (2): 1-4.
- [28] 李攀, 刘元正, 王继良. 核磁共振微陀螺的现状与发展 [J]. 微纳电子技术, 2012, 49 (12): 769-774.
- [29] 周本川, 鲁浩, 徐剑芸. 芯片原子自旋陀螺在空空导弹中的应用展望 [J]. 航空兵器, 2012, 5: 3-6.