

冷原子干涉技术原理及其在深空探测中的应用展望

张国万^{1,2}, 李嘉华^{1,2}

(1. 北京航天控制仪器研究所, 北京 100854; 2. 中国航天科技集团量子工程技术中心, 北京 100854)

摘要: 简要介绍了基于冷原子干涉技术的陀螺仪与重力仪的特点以及国内外研究现状, 重点介绍冷原子制备、冷原子分束、反射以及原子内态探测等冷原子干涉关键技术的基本原理及其实现方法。结合深空探测特点, 冷原子干涉技术在深空探测领域潜在的应用有两个方面: 一方面可应用于深空探测器在飞行、交互、对接以及着陆过程中的自主导航; 另一方面可应用于深空探测器引力助推过程中的重力以及加速度的精密测量。

关键词: 冷原子干涉仪; 深空探测; 自主导航; 高精度陀螺仪

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2017)01-0014-06

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2017.01.002

引用格式: 张国万, 李嘉华. 冷原子干涉技术原理及其在深空探测中的应用展望[J]. 深空探测学报, 2017, 4(1): 14-19.

Reference format: Zhang G W, Li J H. The principle of cold atom interferometry and its potential applications in deep space exploration [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(1): 14-19.

0 引言

干涉是“波”的一个重要属性, 自迈克尔逊和莫雷利用光干涉测量“以太”漂移建立干涉仪以来, 干涉仪在光学、精密测量领域得到了广泛的应用。随着激光的出现, 干涉技术得到了飞速的发展, 极大地拓展了其应用范围。以迈克尔逊干涉为基础的绝对重力仪, 具有精度高、绝对重力测量等优点, 在石油勘探、地震以及精密测量等领域得到了广泛的应用。同时, 人们以Sagnac效应为基础研制了激光陀螺仪和光纤陀螺仪, 相比机械式陀螺, 这种陀螺仪精度高、动态范围宽、性能稳定且寿命长, 目前已经在航空航天等许多领域得到了应用。然而, 一方面随着技术的发展与提高, 应用领域特别是惯性应用领域对惯性产品的精度要求越来越高; 另一方面“提高精度”是惯性技术领域一个永恒的主题。这些基于经典理论(相比量子理论)的惯性仪表在提高精度方面越来越困难, 与此同时, 对理论与新技术的探索也从未停止。

根据量子力学理论, 原子也具有“波”的特性, 可以构建物质波干涉仪, 制备物质波源, 然后使其分束与反射, 依据光学Sagnac干涉仪结构构建物质波干涉。理论计算表明, 相同几何条件下, 由于原子的质量较光子运动质量大, 其惯性拖曳效应明显, 物质波干涉仪的精度较光学干涉仪精度高10个量级^[1-2]。而光学干涉仪在环路面积一般较物质波(原子)干涉仪高

4~5个量级, 相位测量灵敏度高1~2个量级, 综合考虑物质波干涉仪的精度较光学干涉仪精度高3~4个量级。类似的利用物质波干涉也可以实现对重力(加速度)的绝对测量, 并且由于重力(加速度)效应直接影响干涉的相位(激光绝对重力仪中测量的是物体的位置), 因此物质波(原子)重力仪相对激光绝对重力仪也具有较高的测量精度。总而言之, 原子干涉仪能够实现对角速度、加速度的精密测量, 由此也可构建基于原子干涉技术的陀螺/重力同时测量仪器。

一般情况下, 原子的热运动速度大, 波长非常短, 波动性难以体现, 而且对原子的分束与反射非常困难, 所以很难实现原子的干涉效应。直到20世纪80—90年代, 随着原子光学、量子光学领域的发展, 美国华裔物理学家朱棣文等人提出了激光冷却技术, 利用该技术可以将热原子温度降低到百微开量级。随后, 磁光囚禁技术、亚多普勒冷却技术、蒸发冷却技术等一系列技术被提出并得到发展, 使得人们可以稳定地获得一团温度极低的原子(小于100 nK), 特别是实现了波色-爱因斯坦凝聚(BEC), 极大地提高了冷原子的相干性。原子具有极强的“波”属性, 利用激光操控原子技术, 实现对物质波的分束和反射, 进而实现冷原子的干涉, 在此基础上实现对角速度^[3-4]、加速度(重力)^[5]等惯性参量的精密测量, 相继出现了冷原子重力仪和冷原子陀螺仪。冷原子陀螺仪、冷原子重

力仪一出现就展示了其在精度方面的优势，属于高精度惯性仪表，目前相关技术的发展一方面致力于在实验室内进一步提高原理样机的测量精度，同时也在开展小型化、工程实用化产品研制^[6]。

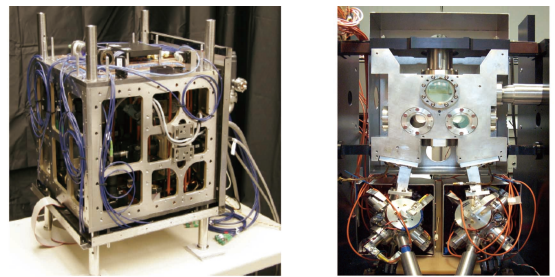
本文将首先简要介绍冷原子干涉技术的国内外发展现状以及发展趋势；其次着重介绍冷原子干涉技术原理及所涉及关键技术；接着讨论其在深空探测领域的应用模式；最后给出全文总结。

1 冷原子干涉技术国内外发展简介

1991年，斯坦福大学朱棣文小组通过拉曼（Raman）脉冲对冷的Na原子团实现分束与反射，进而实现脉冲式冷原子干涉仪^[7]。次年，该小组通过原子干涉技术实现了对重力的绝对测量，重力测量灵敏度达 $1.3 \times 10^{-7} \text{ g}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，在2 000 s的积分时间下，重力测量分辨率为30 μGal ，经过改进分辨率进一步达3 μGal ，这与当时国际上最高精度的激光绝对重力仪指标相当。此后，世界各国均启动了对冷原子干涉仪的研究计划，使对冷原子干涉仪的研究成为热点，加快了其发展速度。2003年，DARPA启动了“精确惯性导航系统”（Precision Inertial Navigation System, PINS）研究计划，“PINS”旨在研究不依赖于GPS信号，利用冷原子干涉仪实现自主惯性导航系统。在该计划的支持下，美国AOSense公司与斯坦福大学Kasevich小组联合研制了一套基于冷原子干涉技术的可移动惯性传感系统，此系统集成单轴加速度计、单轴陀螺仪和重力梯度仪于一体，该系统以“ $\pi/2-\pi-\pi-\pi/2$ （脉冲间隔T-2T-T）”Raman脉冲冷原子干涉仪为基础，整个传感装置的体积不足 1 m^3 ，如图1（a）所示。系统中各原子传感装置的指标如下：陀螺仪角度随机游走（Angular Random Walk, ARW）小于 $100 \mu^\circ/\text{Hz}$ ，最大角速度测量值为 $10^\circ/\text{s}$ ，绝对精度小于100 ppm，实际测得地球自转角速度，测量值与理论值的比值为 $1.000\ 7 \pm 0.000\ 5$ 。通过对重力进行实时补偿，这套演示系统漂移仅有5 m/h，比现有高性能GPS/INS系统提高大约280倍。在重力测量方面，斯坦福大学的冷原子干涉重力仪灵敏度达 $4 \times 10^{-9} \text{ g}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，后来采用大型10 m喷泉将重力测量的灵敏度提高至 $3 \times 10^{-11} \text{ g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

同期，2003年欧洲航天局（ESA）制定了“空间高精度原子干涉测量技术（Hyper Precision Cold Atom Interferometry in Space, HYPER）计划”，该计划打算利用原子干涉技术进行精细结构常数测量并以此验证爱因斯坦的广义相对论，同时也利用该技术对空间飞行器进行姿态控制与导航。在该计划前期研究中，法国巴黎天文台与德国汉诺威大学分别进行了冷原子干

涉技术的研究。巴黎天文台于2006年设计了一个六自由度冷原子陀螺仪，如图1（b）所示，该陀螺仪采用对抛结构差分方式来消除环境噪声带来的相位改变，从而实现对角速度以及加速度的精确测量。该陀螺仪在一个方向上的干涉条纹对比度达30%，转动测量灵敏度为 $2.4 \times 10^{-7} \text{ (rad/s)}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，2008年其重力仪测量灵敏度达 $1.4 \times 10^{-8} \text{ g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。汉诺威大学采用“ $\pi/2-\pi-\pi/2$ ”Raman脉冲序列，也建立了左右对抛的长基线（实验中90 cm）冷原子干涉装置，如图2所示，2012年通过对Raman光路的精准调节实现了对转动角速度的测量，测量灵敏度为 $6.7 \times 10^{-7} \text{ (rad/s)}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，条纹对比度为18.7%。



（a）斯坦福大学便携式冷原子干涉系统（b）巴黎天文台冷原子干涉系统

图1 冷原子干涉系统

Fig. 1 Cold atom interferometer systems

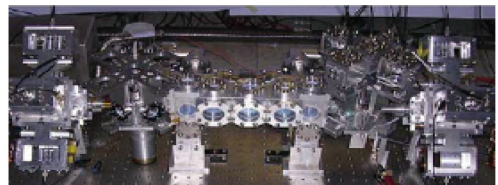


图2 汉诺威大学冷原子干涉系统

Fig. 2 Atom interference gyroscope developed by Hannover university

此外，德国航天中心空间技术研究所计划利用双色差分原子干涉仪在空间进行弱等效原理的验证，并将在2022—2024年的某个发射窗口发射STE-QUEST（空间时间探索和量子等效原理的空间验证）卫星搭载。此原子干涉仪采用 ^{87}Rb 和 ^{85}Rb 原子，预期捕获的冷原子为 10^6 个，仪器整体重221 kg，总功耗608 W，峰值功耗819 W。加速度的单次测量精度达 $2.07 \times 10^{-12} \text{ m/s}^2$ ，差分测量精度达 $2.92 \times 10^{-12} \text{ m/s}^2$ 。2014年美国圣地亚哥国家实验室将对抛式冷原子干涉仪放入一个腔内，腔体的尺寸为 $2 \text{ cm} \times 3 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$ ，使干涉仪的输出带宽到60 Hz，转动测量灵敏度为 $1 \times 10^{-6} \text{ (rad/s)}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，加速度测量灵敏度为 $0.9 \times 10^{-6} \text{ g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

我国在冷原子干涉技术方面的研究单位主要有华中科技大学、中国科学院武汉物理与数学研究所、浙江大学、清华大学以及中国航天科技集团公司第九研

究院13所等高校和科研院所。中国科学院武汉物理与数学所利用上抛式冷原子干涉技术对重力进行了测量,目前已经搭建了10 m高的下落式冷原子干涉重力测量装置,同时该所还搭建了对抛式冷原子干涉仪,2011年该所冷原子干涉装置对重力的测量灵敏达 $2.0 \times 10^{-7} \text{ g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。华中科技大学在超低振动的环境下,采用上抛式冷原子方案实现对重力的精密测量,测量灵敏度达 $4.2 \times 10^{-9} \text{ g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。浙江大学与浙江工业大学联合小组也利用冷原子干涉技术对当地重力进行了测量,2014年浙江大学冷原子干涉系统对重力的测量灵敏度达 $1 \times 10^{-7} \text{ g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。清华大学采用连续冷原子源进行角速度的测量实验工作。中国航天科技集团公司第九研究院13所量子工程中心采用芯片冷原子方案进行角速度测量的研究。

2 冷原子干涉原理及关键技术

2.1 原理简介

如图3所示,设系统加速度为 \mathbf{a} ,角速度为 $\boldsymbol{\Omega}$,整个干涉过程可描述为以下几个阶段。1)初态制备阶段。经过初态制备后冷原子团全部处于基态,原子团数量为 N ,并且具有平动速度 \mathbf{v}_0 ;2)原子团分束。在时刻 t_0 ,作用一个Raman $\pi/2$ 脉冲,在此脉冲的作用下,冷原子团发生分束;3)自由演化阶段。分束后的冷原子团沿两条路径自由演化;4)原子反射阶段。经过 T 时长的自由演化,在时刻 t_0+T ,作用一个Raman π 脉冲,原子发生反射,两条路径的冷原子开始聚拢;5)自由演化阶段。两条路径的原子自由演化 T 时长,并逐渐靠拢;6)合束、干涉阶段。 t_0+2T 时刻两条路径的原子团在空间上重合,作用一个Raman $\pi/2$ 脉冲,此时原子团的路径信息被擦除,无法区分冷原子究竟经过哪条路径的演化,原子团发生干涉;7)探测阶段。不同演化路径经历不同,造成相位不同,这种相位的差别 Φ 反映在原子的内态上,最终由测量处于另外一个基态的原子个数 N_2 (N_1)来获得相位差信息,这样就能够反演计算得到引起相位差的角速度 $\boldsymbol{\Omega}$ 和加速度 \mathbf{a} 的精确值,实现冷原子的惯性测量。其中关系如下。

$$P_2 = \frac{N_2}{N} = \frac{1}{2} (1 - \cos(\Phi)) \quad (1)$$

$$\Phi = \mathbf{k}_{\text{eff}} \cdot (2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}_0) T^2 - \mathbf{k}_{\text{eff}} \cdot \mathbf{a} T^2 + \Phi_R \quad (2)$$

其中, P_2 表示干涉后原子处于另外一个内态的概率,式(2)中 \mathbf{k}_{eff} 与Raman脉冲有关,为Raman脉冲有效波矢量,式(2)相位表达式第一项由角速度引起,第二项由加速度引起,第三项由Raman脉冲引起。

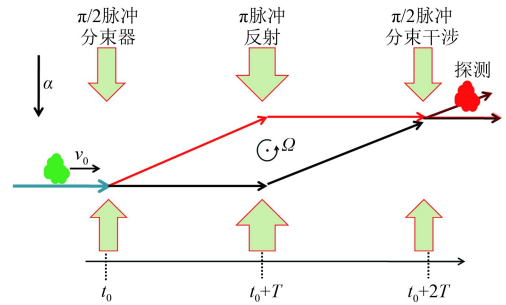


图3 冷原子干涉原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cold atom interferometer

这样通过精确控制Raman脉冲有效波矢量 \mathbf{k}_{eff} 的方向,通过3个方向以及对抛等组合测量,可以实现对角速度与加速度的同时测量,测量角速度的为冷原子干涉陀螺仪,测量加速度的为冷原子干涉重力仪及加速度计。在重力测量中,Raman光的传播方向与重力加速度 \mathbf{g} 平行,此时重力加速度引起粒子数跃迁几率 P_2 为

$$P_2 = \frac{1}{2} (1 - \cos(\mathbf{k}_{\text{eff}} \mathbf{g} T^2)) \quad (3)$$

只考虑角速度引起的相位改变,设角速度 $\boldsymbol{\Omega}$ 垂直于干涉环路,制备冷原子初态时,使其与Raman光传播方向垂直,则角速度与粒子数跃迁几率 P_2 关系如下

$$P_2 = \frac{1}{2} \left(1 - \cos\left(\frac{2mA}{\hbar} \boldsymbol{\Omega}\right) \right) \quad (4)$$

其中: $A = \frac{\hbar \mathbf{k}_{\text{eff}} \mathbf{v}_0 T^2}{m}$ 为干涉环路面积; \hbar 为约化的普朗克常量; m 为原子质量。干涉环路面积越大则相同情况下角速度测量越敏感。

2.2 关键技术

冷原子干涉技术所涉关键技术主要有冷原子制备技术,冷原子分束、反射技术,冷原子态探测技术。

冷原子制备通过磁光阱中的激光冷却与偏振梯度冷却技术实现,磁光阱结构如图4所示,一对反亥姆霍兹线圈(灰色线圈)通入电流(粉色箭头)形成中心为零的梯度磁场。6束激光(紫色箭头)两两对射构成3束相互垂直的激光对,此时原子的能级结构如图4(b)所示,原子发生塞曼(Zeeman)分裂,离中心越近劈裂越小,调节激光频率使其相对相应跃迁能级红失谐,通过偏振器件调节激光偏振使其具有图中所示的偏振状态。这样由于多普勒效应,背离中心运动的原子定向吸收与其运动方向相反的光子,而向 4π 立体角内自发辐射荧光,平均来看,原子获得一个与运动方向相反的动量,实现减速,并在磁阱中汇集,形成冷原子。为防止原子辐射到暗态不能参与冷却,需要一束再泵浦光将其抽回继续冷却。冷原子形

成后，可以通过对冷却光频率、功率调节进一步降温（偏振梯度冷却），进一步调节使对射激光形成频率（功率）差，使原子获得一定的初速度。

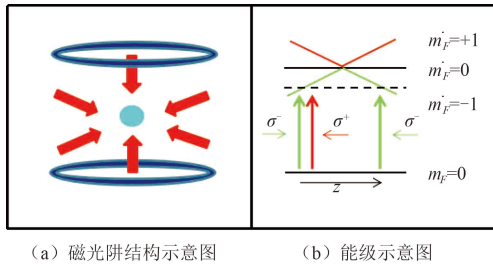


图 4 磁光阱 (MOT) 结构及能级示意图
Fig. 4 Schematic diagram of MOT

冷原子的分束、反射和干涉靠Raman脉冲来实现，Raman脉冲包括两束相互对射的激光，频率分别为 ω_1 和 ω_2 ，与原子能级构成如图 5 (a) 所示的拉曼形

式耦合，且满足双光子失谐为零，相互耦合的拉比 (Rabi) 频率相等为 Ω_{eff} ，并通过激光锁相技术，使两束激光随机相位差恒定。这样当脉宽 τ 满足时 $\Omega_{\text{eff}}\tau=\pi/2$ ，这个脉冲对能够将基态原子以一半的概率相干地抽运到态，此脉冲称为Raman $\pi/2$ 脉冲。如图 5 (b) 所示，Raman $\pi/2$ 脉冲能够使冷原子团进行分束，Raman光波矢量与原子运动方向垂直，原子团在脉冲的作用下有一半原子发生跃迁，根据动量守恒这部分原子同时在Raman光方向上获得了一部分动量，从而运动方向发生改变，造成原子团分束。当脉宽满足时 $\Omega_{\text{eff}}\tau=\pi$ ，这个脉冲对能够将基态 $|1\rangle$ ($|2\rangle$) 原子都被相干地抽运到态 $|2\rangle$ ($|1\rangle$)，此脉冲称为Raman π 脉冲。如图 5 (c) 所示， π 脉冲能够使冷原子团发生反射，Raman光波矢量与原子运动方向垂直，原子团在脉冲的作用下发生跃迁，且获得一定的动量，运动方向发生改变，形成反射。

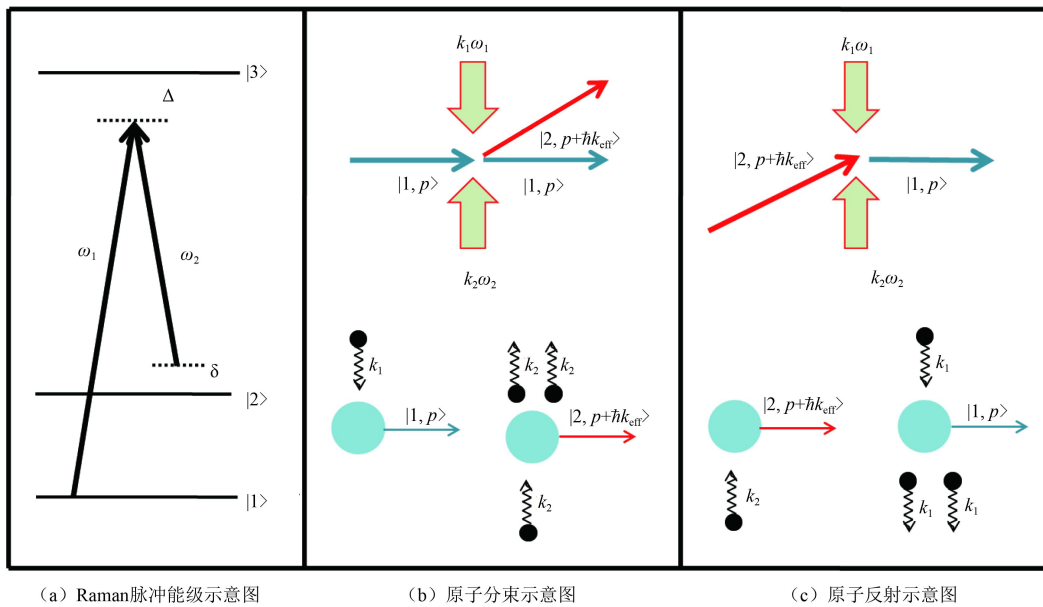


图 5 冷原子分束，反射原理示意图
Fig. 5 Schematic diagram of atomic wave beam splitting and reflecting

原子态探测，通过荧光法对处于特定能级如 $|2\rangle$ 的原子数进行探测，如图 6 所示的探测能级与光路示意图，探测能级 $|2\rangle$ 上的原子数，首先用一束共振的激光照射原子团，原子团在光的作用下向立体角内辐射荧光，通过大口径透镜对荧光进行收集，并进行光电探测转化为电信号，根据信号强度获得能级上的原子数，采用Raman跃迁、微波跃迁以及光抽运技术，使处于 $|1\rangle$ 的原子全部跃迁到 $|2\rangle$ ，然后重复上述过程，则获得处于态 $|1\rangle$ 的原子数，这样完成归一化的态探测。则原子跃迁几率为

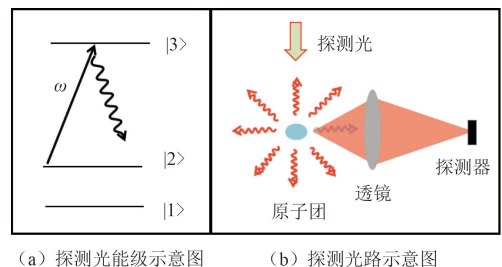


图 6 荧光法探测示意图
Fig. 6 Schematic diagram of fluorescence detection

$$P_2 = \frac{N_2}{N_1 + N_2} \quad (5)$$

3 深空探测领域应用展望

深空探测是指对月球以及月球以远空间的探测, 具有探测目标远、飞行时间长、所处环境动态多变等特点, 使得深空探测难以实时控制和长期安全运行。深空探测的一项关键技术为自主技术, 同时自主技术也是深空探测技术发展的一个重要方向^[8]。自主技术可理解为深空探测器根据自身运行状态、姿态、位置、速度、加速度以及角加速度等信息, 实现自主管理、自主导航、自主规划、自主故障识别与恢复等功能, 确保探测器在遇到突发事件、地面指令不能及时传达的情况下, 交互对接以及星体着陆时能够自主运行并完成任务。此外, 大多数深空探测器如火星探测器在没有动力的情况下将会逐渐减速, 需要助推。一般方法是携带燃料助推, 但是增加燃料的同时也会增加质量, 对燃料的要求更高。采用引力助推^[9]即所谓的引力弹弓技术, 就是利用行星的重力场来给探测器加速, 能够节省燃料并压缩成本。

结合深空探测上述特点以及冷原子干涉技术对角速度与加速度的超高精度测量, 冷原子干涉技术在深空探测领域的应用主要体现在两个方面。

第一, 深空探测器在飞行、交互、对接以及着陆过程中的自主导航。深空环境未知因素多且复杂, 地面通信指挥不能及时到达, 而且受观察站位置、太阳等天体位置阻挡等影响, 不利于探测器躲避危险, 需要自主导航技术使探测器具有一定的生存能力。目前研究最广泛的深空自主导航技术为天文导航, 即靠星敏感器件获得探测器自身姿态信息而进行导航, 其一个缺点是难以获得探测器速度与角速度等信息, 惯性器件如陀螺仪和加速度计能够提供这两个信息, 因此天文/惯性组合导航在深空探测中有越来越重要的应用。基于冷原子干涉技术的陀螺仪与加速度计具备对角速度、加速度的精密测量能力, 而且在空间特别是深空环境中, 其测量灵敏度将更高^[10], 此技术应用于自主导航, 将降低惯性导航的时间累积误差, 辅之以星敏感器的位置修正, 有望大幅度提升自主导航的导航精度。

第二, 引力助推过程中重力及加速度的精密测量。引力助推是指探测器从目标行星飞过, 受行星引力作用而获得加速度, 从而改变探测器速度与运动方向, 这种技术已经被证明是一种有效的基础技术。冷原子干涉技术有望应用于引力助推, 将能够对行星引

起的重力变化进行及时准确的测量, 实时监控探测器各项性能, 使探测器能够成功进行助推并加速。

4 结 论

利用冷原子干涉仪可进行精密物理测量, 例如: 测量转动、加速度等, 并且具有集陀螺仪、重力仪以及频率标准等于一体的特点, 使得自主导航的精度大幅度提高, 同时在深空探测中能够给探测器在交互对接、着陆以及引力助推过程中提供物理参数的精确值, 具有重要的应用价值。制约冷原子干涉技术精密测量精度的因素主要有: 冷原子干涉所围环路面积较小、冷原子束难以实现50:50分束以及冷原子探测散粒噪声极限限制等。因此需进一步理论与实验探索, 提升基于冷原子干涉技术的测量精度。制约冷原子干涉技术应用的主要因素有: 冷原子干涉技术目前还处于起步阶段, 工程化水平较低; 基于该技术的精密测量设备体积较大, 难以在中、小型载体上应用; 冷原子干涉技术测量带宽较小, 制约其应用范围; 特别是对重力和加速度测量的量程较小。针对以上应用困难, 一方面可通过对所涉及关键部组件的小型化研究, 降低整机体积, 加快工程化研究进度; 另一方面可通过释放再捕获或者连续冷原子源技术方案来提高其测量带宽, 扩大应用范围。

现在欧美等发达国家已投入了大量的人力、物力发展冷原子干涉技术的工程化应用研究, 随着我国科技实力的提升以及在量子通信和空间原子钟太空实验方面经验的积累, 我们在冷原子干涉技术方面的研究水平会大幅度提升, 推动冷原子技术的发展, 使其能够尽快在深空探测领域得到应用。

参 考 文 献

- [1] 王巍, 王学峰, 马建立, 等. 原子干涉陀螺仪关键技术与发展[J]. 导航与控制, 2011, 10(2): 55-60.
Wang W, Wang X F, Ma J L, et al. Key technology and development of atom interferometric gyroscope[J]. Navigation and Control, 2011, 10(2): 55-60.
- [2] 邹鹏飞, 颜树华, 林存宝, 等. 冷原子干涉陀螺仪在惯性导航领域的研究现状及展望[J]. 现代导航, 2013(4): 263-269.
Zou P F, Yan S H, Lin C B, et al. Research status and prospects of cold atom interferometry gyroscope in inertial navigation fields[J]. Modern Navigation, 2013(4): 263-269.
- [3] Gustavson T L, Bouyer P, Kasevich M A. precision rotation measurements with an atom interferometer gyroscope[J]. Phys. Rev. Lett., 1997, 78: 2046-2409.
- [4] Stockton J K, Takase K, Kasevich M A. Absolute geodetic rotation measurement using atom interferometry[J]. Phys. Rev. Lett., 2011, 107: 133001-133004.

- [5] Peters A, Chung K Y, Chu S. Measurement of gravitational acceleration by dropping atoms[J]. *Nature*, 1999, 400: 849-852.
- [6] 吴彬, 王肖隆, 王河林, 等. 冷原子干涉重力仪的发展现状与趋势[J]. *导航与控制*, 2015, 14(2): 1-8.
Wu B, Wang X L, Wang H L, et al. The current situation and trend of the gravimeter based on cold atom interferometer[J]. *Navigation and Control*, 2015, 14(2): 1-8.
- [7] Kasevich M, Chu S. Atomic interferometry using stimulated Raman transitions[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 67: 181-184.
- [8] 王大轶, 黄翔宇. 深空探测自主导航与控制技术综述[J]. *空间控制技术与应用*, 2009, 35(3): 6-12.
Wang D Y, Huang X Y. Survey of autonomous navigation and control for deep space exploration[J]. *Aerospace Control and Application*, 2009, 35(3): 6-12.
- [9] 夏炎, 汤建仁, 倪维斗, 等. ASTROD I轨道设计与模拟[J]. *紫金山天文台台刊*, 2004, 23(Z1): 63-86.
Xia Y, Tang J R, Ni W D, et al. The track design and simulation of ASTROD I[J]. *Publications of Purple Mountain Observatory*, 2004, 23(Z1): 63-86.
- [10] 侯永利, 万彦辉. 惯导系统传递与对准综述[J]. *导航与控制*, 2005, 4(2): 65-68.
Hou Y L, Wan Y H. Review of technology for transfer alignment of inertial navigation systems[J]. *Navigation and Control*, 2005, 4(2): 65-68.

作者简介:

张国万(1984-), 男, 博士, 高级工程师。主要研究方向: 冷原子干涉。

通信地址: 北京市142信箱403分箱(100039)

电话: (010)88104439

E-mail: guowan209@163.com

李嘉华(1986-), 女, 硕士, 工程师。主要研究方向: 冷原子干涉。

通信地址: 北京市142信箱403分箱(100039)

电话: (010)88104438

E-mail: jiahuaedipan@126.com

The Principle of Cold Atom Interferometry and Its Potential Applications in Deep Space Exploration

ZHANG Guowan^{1,2}, LI Jiahua^{1,2}

(1. Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100854, China;

2. Quantum Engineering Research Center, China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100854, China)

Abstract: In this paper, the characteristics and the development trend of atomic gyroscope and gravimeters based on cold atom interferometer are introduced. The principle of the cold atom interferometry and related key technologies such as atom trapping and cooling, cold atom beam-splitting and reflecting, detecting are presented in detail. In the field of deep space exploration, the cold atom interferometry has two potential applications: autonomous navigation for spacecraft during flying, docking, landing phases and precision measurement of gravity during gravity assisting phase.

Key words: cold atom interferometer; deep space exploration; autonomous navigation; high-precision gyroscope

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱鲁青]