

基于全程监测的超流体陀螺量程扩展方法

郑睿^{1,2}, 赵伟¹, 刘建业¹, 聂威¹, 程庆¹

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016; 2. 安徽工业大学电气与信息工程学院, 安徽马鞍山 243032)

摘要: 新型高精度超流体陀螺当前面临的关键问题之一是量程较小, 极大地限制了其应用领域. 为此, 提出了基于全程监测的超流体陀螺量程扩展方法, 并设计了实现方案. 该方法采用调整其面积矢量方向并在初始时刻注入热相移的技术, 避免了超流体陀螺的工作点达到盲点, 从而实现对其工作点的全程监测. 仿真结果表明, 该方法能够有效地解算角速度测量值, 使超流体陀螺的测量量程不再受到限制, 并且能够判别旋转的极性.

关键词: ⁴He 量子干涉仪; 超流体陀螺; 全程监测; 量程

中图分类号: V241.5; U666.1

文献标志码: A

Method for measure range extension of superfluid gyroscope based on tracing whole pattern

ZHENG Rui^{1,2}, ZHAO Wei¹, LIU Jian-ye¹, NIE Wei¹, CHENG Qing¹

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China.

Correspondent: ZHAO Wei, E-mail: zhwa@nuaa.edu.cn

Abstract: One of the key problems that the novel high-accuracy superfluid gyroscope is facing is that its measure range is very small, so its applying domain is limited greatly. Therefore, a method for measure range extension of the superfluid gyroscope based on tracing whole pattern is presented, and the implementation scheme of the method is designed. The method utilizes the technologies of adjusting area vector direction and injecting thermal phase shift at initial time to avoid working points of superfluid gyroscope reaching blind points, then the working points can be traced whole pattern. Simulation results show that the detecting value of angular velocity can be solved by using the proposed method effectively, the measure range of the superfluid gyroscope is not limited anymore, and the rotational polarity can be distinguished.

Key words: ⁴He quantum interferometer; superfluid gyroscope; tracing whole pattern; measure range

0 引言

基于萨格纳克效应, 干涉式陀螺仪能够避免传统陀螺仪中由转子部分带来的误差^[1-3]. 目前, 光波干涉的激光和光纤陀螺已普遍应用于较高精度的惯性导航系统中^[5-6]. 2005年, Hoskinson等^[6]发现了超流体⁴He(氦4)物质波. 在此之后, 研究者利用该物质波的干涉原理研制出⁴He量子干涉仪^[7-9]. 在同等感应面积的条件下, 物质波干涉对旋转的灵敏度高于光波干涉约10个数量级^[10], 因此基于超流体⁴He物质波的干涉式陀螺仪(下文简称超流体陀螺)具有超高测量精度的潜力, 近年来学术界开展了一系列研究^[11-15].

角速度测量范围是陀螺仪重要的性能指标, 称为

陀螺仪的量程. 一般情况下, 陀螺仪的量程越大, 其应用动态范围越大, 应用领域越广泛. 文献[12]的研究表明: 因为超流体陀螺的工作曲线(旋转通量与总流量幅值之间的关系曲线)呈现周期性变化, 所以尽管超流体陀螺可以测量大范围的角速度, 但有效的量程仅为 10^{-5} rad/s的数量级. 为了扩展超流体陀螺的量程, 文献[13]基于热相移注入技术提出了相移锁定法. 但是热相移不能超出极限值 500π , 否则超流体中会出现量子紊乱^[10], 因此相移锁定法只能把超流体陀螺的量程扩展到约 10^{-2} rad/s的数量级, 该量程仍然不能满足常规的测量要求, 极大地限制了超流体陀螺的应用领域.

收稿日期: 2013-01-04; 修回日期: 2013-07-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61074162); 高等学校博士学科点专项基金项目(200802870011); 安徽工业大学青年教师科研基金项目(QZ201315).

作者简介: 郑睿(1980-), 男, 讲师, 博士, 从事超流体陀螺的研究; 刘建业(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 从事新型惯性传感技术、卫星导航与惯性组合导航、信息融合技术等研究.

为了充分开发超流体陀螺测量大范围角速度的能力, 需要研究在测量过程中不依赖热相移的量程扩展方法. 为此, 本文分析了超流体陀螺量程小的原因, 并研究了调整面积矢量方向和在初始时刻注入热相移对其工作点的影响, 提出了基于全程监测的量程扩展方法, 使超流体陀螺的量程不再受到限制, 在保持其高精度测量的基础上拓宽了其应用领域.

1 超流体陀螺的量程分析

具有化学势能差的超流体在弱连接处发生约瑟夫森效应, 产生超流体物质波. 设 I 表示流过弱连接的超流体质量流量 (单位为 kg/s), 则超流体物质波的数学表达式为^[6]

$$I = I_c \sin(\Delta\phi) = I_c \sin\left(2\pi \frac{\Delta\mu}{h} t\right). \quad (1)$$

其中: I_c 为 I 的幅值, $\Delta\phi$ 为弱连接两侧超流体的相位差 (单位为 rad), $\Delta\mu$ 为由弱连接两侧压力差与温度差形成的化学势能差 (单位为 J), h 为普朗克常数, $\Delta\mu/h = f_J$ 为约瑟夫森频率, t 为时间.

^4He 量子干涉仪的结构中具有双弱连接^[15], 在化学势能差的作用下, 双弱连接处形成了两路超流体物质波. 设 $\Delta\phi_1$ 和 $\Delta\phi_2$ 表示双弱连接两侧超流体的相位差, 则角速度矢量 Ω 引起的萨格纳克相移 $\Delta\phi_s$ (单位为 rad) 为^[7]

$$\Delta\phi_s = \Delta\phi_1 - \Delta\phi_2 = \frac{4\pi\Omega \cdot \mathbf{A}}{\kappa_4}. \quad (2)$$

其中: \mathbf{A} 为感应面积矢量; $\Omega \cdot \mathbf{A} = \Omega A \cos\theta$, Ω 和 A 为矢量大小, θ 为矢量方向的夹角, Ω 方向为旋转轴的指向, \mathbf{A} 的方向为感应面积的法线方向; $\kappa_4 = h/m_4$, m_4 为 ^4He 原子的质量. 设 I_m 为两路物质波形成的总流量幅值, I_m 与 $\Delta\phi_s$ 的关系为^[7]

$$I_m = 2I_c \left| \cos \frac{\Delta\phi_s}{2} \right| = 2I_c |\cos(\pi F)|. \quad (3)$$

其中 F 为旋转通量 (单位为 rad), 其表达式为

$$F = \frac{2\Omega \cdot \mathbf{A}}{\kappa_4} = \frac{2\Omega A \cos\theta}{\kappa_4}. \quad (4)$$

由于超流体流过弱连接会引起超流体腔体薄膜处位移的变化, 检测薄膜位移 x 可以监测到物质波. 设 x 频谱中约瑟夫森频率的幅值为 x_m , 则^[7]

$$I_m = 2\pi\rho a f_J x_m. \quad (5)$$

其中: ρ 为流体密度, a 为薄膜面积.

由式 (2)、(3) 和 (5) 可知, 根据 x_m 可以依次解算 I_m 、 F 和 Ω . 式 (3) 中 F 与 I_m 的对应关系, 即 ^4He 量子干涉仪的工作曲线 (如图 1 所示, 取 $I_c = 4.5 \times 10^{-12}$ kg/s) 呈现周期性变化, 因此当 $|F| > 0.5$ rad 时, F 可以表示为

$$F = k + F'. \quad (6)$$

其中: k 为整数; F' 为旋转通量的余量, 其范围在 $-0.5 \sim 0.5$ rad 之间. 那么当 $|F| > 0.5$ rad 时, 由 I_m 解算的旋转通量是 F' , 没有真实反映出 F , 因此超流体

陀螺的测量范围是 F' 为 $-0.5 \sim 0.5$ rad 的区间. 取超流体陀螺通用的参数 $A = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $\theta = 0$, 这时该陀螺的量程约在 $-4.9 \times 10^{-5} \sim 4.9 \times 10^{-5}$ rad/s 之间. 当采用相移锁定法时, 其量程可以扩展至 $-0.012 \sim 0.012$ rad/s 之间, 该测量范围仍然太小, 不能满足大部分测量要求, 严重制约了超流体陀螺的应用领域.

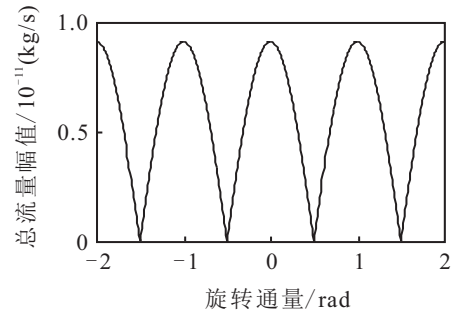


图 1 ^4He 量子干涉仪的工作曲线

从图 1 可以看出, ^4He 量子干涉仪的工作曲线可以在旋转通量轴正反两个方向上无限延伸, 因此只要能全程监测到工作点的位置, 就能开发超流体陀螺测量大范围角速度的潜力, 实现大量程、高精度.

2 超流体陀螺工作点位置的全程监测方法

由上节的分析和图 1 可知, 根据 I_m 的变化, 全程监测超流体陀螺的工作点可以解算出角速度. 在工作过程中, 超流体陀螺工作点会到达图 2 中 I_m 最大值 $I_{m(\max)}$ 和最小值 $I_{m(\min)}$ 的位置, 这些位置左右两边完全对称, 那么当工作点在这些位置时, 不能由 I_m 的变化判断工作点的变化方向, 导致全程监测无法进行, 本文称这些工作点为盲点.

由上述分析可知, 为了全程监测超流体陀螺工作点, 需要重点研究避免工作点到达盲点的方法.

2.1 调整面积矢量方向

由式 (4) 可知, 在 Ω 不变时, 改变 \mathbf{A} 的方向即可改变 $\cos\theta$, 使得 F 产生跳变, 这样可使工作点产生跳跃. 设置接近 $I_{m(\max)}$ 的流量幅值 I_{m1} 和接近 $I_{m(\min)}$ 的流量幅值 I_{m2} , 如果 i 时刻的总流量幅值 I_{mi} 满足下式中的任意一个:

$$I_{mi} \geq I_{m1}, \quad (7)$$

$$I_{mi} \leq I_{m2}, \quad (8)$$

则工作点有到达盲点的可能, 因此需要调整其工作点让 I_{mi} 不在式 (7) 和 (8) 的范围内, 使工作点跳跃盲点. 设 $\cos\theta$ 最小值为 $\cos\theta_{\min}$, 最大值为 $\cos\theta_{\max}$, 初始值为 $\cos\theta_0$. 设计调整步骤为: 1) 从 $\cos\theta_0$ 开始, 由高到低搜索满足使工作点跳跃盲点的 $\cos\theta$ 值; 2) 若 $\cos\theta$ 调整为 $\cos\theta_{\min}$, 则从 $\cos\theta_0$ 开始, 由低到高搜索满足使工作点跳跃盲点的 $\cos\theta$; 3) 若 $\cos\theta$ 调整为 $\cos\theta_{\max}$, 则按照步骤 1 进行搜索.

由式(4)可知,当 Ω 为零时,无论 $\cos\theta$ 如何调整, F 恒为零.因此上述方法只能在有旋转时使工作点跳跃盲点,而不能使零点处的盲点跳跃,这就造成了无法判别角速度旋转极性的问题.为解决该问题,采用在初始时刻注入热相移的方法.

2.2 在初始时刻注入热相移

在 ^4He 量子干涉仪中采用热阻进行加热,可以在该干涉仪中注入热相移.存在热相移注入时, I_m 与 F 的关系表示为^[13]

$$I_m = 2I_c \left| \cos \left(\pi F + \frac{\Delta\phi_h}{2} \right) \right|. \quad (9)$$

由式(9)可知,当 F 为零时,只要在初始时刻热相移的数值同时满足

$$-\pi < \Delta\phi_h < \pi, \quad (10)$$

$$\Delta\phi_h \neq 0, \quad (11)$$

就可以确保在注入很小热相移的情况下偏移陀螺零点,使其避免盲点位置.取 $I_c = 4.5 \times 10^{-12} \text{ kg/s}$, $\Delta\phi_h = \pi/3$,超流体陀螺零点偏移如图2所示.

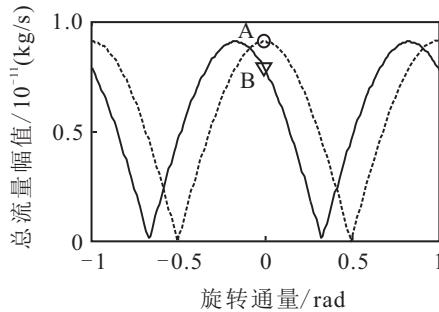


图2 超流体陀螺零点偏移示意图

图2中,虚线为原始的工作曲线,零点在A处,位于盲点位置.实线为注入热相移后的工作曲线,零点在B处,如果下一时刻检测到 I_m 减小,则可以判断转速为正向旋转;反之转速为反向旋转.因此在初始时刻注入热相移可以解决零点盲点无法跳跃的问题,实现对输入角速度旋转极性的判别.

2.3 递推算法

在避免超流体陀螺工作点达到盲点的情况下,可以对工作点进行全程监测.设 F_{i-1} 为第 $i-1$ 时刻的 F ,如果未调整面积矢量的方向,则由式(6)和(9)可以得到从 $i-1$ 时刻到 i 时刻 F 的变化量

$$\delta F = \pm \arccos \frac{I_{mi}}{2\pi I_c} - \frac{\Delta\phi_h}{2\pi} - F'_{(i-1)\cos\theta_i}, \quad (12)$$

其中 F'_{i-1} 表示由式(6)决定的 F_{i-1} 余量.当 F'_{i-1} 为正时,式(12)中的符号取+;当 F'_{i-1} 为负时取-.

如果调整了面积矢量的方向,设 $\cos\theta_{i-1}$ 和 $\cos\theta_i$ 分别表示第 $i-1$ 时刻和第 i 时刻的 $\cos\theta$ 值,假设 $i-1$ 时刻的 $\cos\theta$ 为 $\cos\theta_i$,则此时的旋转通量 $F_{(i-1)\cos\theta_i}$ 表示为

$$F_{(i-1)\cos\theta_i} = F_{i-1} \frac{\cos\theta_{i-1}}{\cos\theta_i}. \quad (13)$$

由式(6)、(9)和(13)可知,此时

$$\delta F = \pm \arccos \frac{I_{mi}}{2\pi I_c} - \frac{\Delta\phi_h}{2\pi} - F'_{(i-1)\cos\theta_i}, \quad (14)$$

其中 $F'_{(i-1)\cos\theta_i}$ 表示由式(6)决定的 $F_{(i-1)\cos\theta_i}$ 余量.当 $F'_{(i-1)\cos\theta_i}$ 为正时,式中的符号取+;当 $F'_{(i-1)\cos\theta_i}$ 为负时取-.

由式(12)和(14)可以计算出在未调整面积矢量方向和调整了面积矢量方向两种情况下的 δF ,那么第 i 时刻的旋转通量为

$$F_i = \frac{\cos\theta_i}{\cos\theta_{i-1}} F_{i-1} + \delta F, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (15)$$

如果在 $i-1$ 时刻到 i 时刻未调整面积矢量方向,则 $\cos\theta_{i-1}$ 与 $\cos\theta_i$ 相等;若调整了面积矢量方向,则 $\cos\theta_{i-1}$ 与 $\cos\theta_i$ 的值不相等.这样,在初始时刻旋转通量 F_0 已知的情况下,由式(15)可以递推任意 F_i .由式(4)可得 i 时刻的角速度测量值

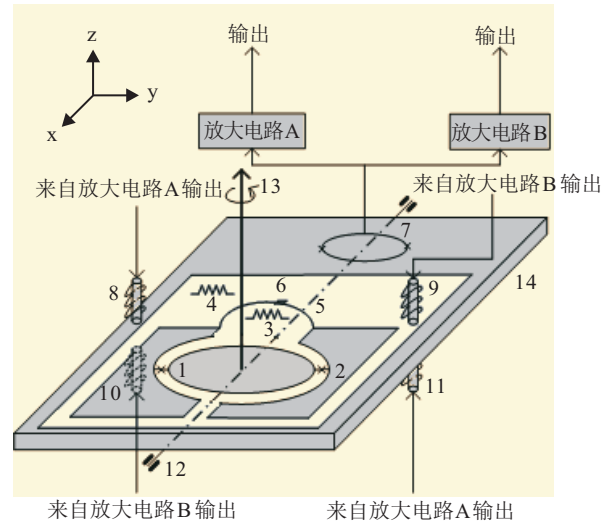
$$\Omega_{di} = \frac{F_i \kappa_A}{2A \cos\theta_i}. \quad (16)$$

3 实现方案研究与仿真分析

为检验本文所提方法的有效性,设计了实现方案,并进行了仿真分析.

3.1 实现方案

基于全程监测的超流体陀螺量程扩展方法的实现方案如图3所示.



1,2 弱连接; 3,4 热阻; 5 薄膜; 6 稀土磁铁; 7 超导量子干涉仪;
8,9,10,11 控制线圈; 12 超流体陀螺装置偏转轴;
13 角速度旋转轴; 14 超流体陀螺装置

图3 基于全程监测的超流体陀螺量程扩展方法实现方案

图3中:白色部分充满超流体 ^4He ;角速度矢量旋转轴与 z 轴方向一致;面积矢量方向与超流体陀螺装置的法线方向一致;热阻3的加热使双弱连接两侧产生化学势能差,热阻4的加热使在初始时刻注入热相移;薄膜表面附有可以产生磁场的稀土金

属,当物质波干涉引起薄膜位移变化时,磁场产生变化;超导量子干涉仪通过检测磁场的变化测量薄膜位移;在超流体陀螺装置周围对称布置4个相同的控制线圈8,9,10和11,放大电路A输出作为控制线圈8和11的输入,放大电路B输出作为控制线圈9和10的输入,控制线圈8和10产生的合成磁场以及控制线圈9和11产生的合成磁场使超流体陀螺装置受到电磁力矩而偏转,由此调整面积矢量的方向。

在此方案中,超导量子干涉仪检测分辨率为 $10^{-15} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[9],确保对极小薄膜位移的检测.应用热阻加热产生热相移^[13]和产生化学势能差的技术^[16]已较为成熟,因此该实现方案是可行的。

3.2 仿真分析

根据上述实现方案,对本文方法进行仿真分析.仿真的参数设置如下:

1)基本参数^[7]. $A = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$,微孔数量为4225,微孔孔径为 $7 \times 10^{-8} \text{ m}$,工作温度为2.169 K,

$f_J = 700 \text{ Hz}$, $a = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, $I_c = 4.5 \times 10^{-12} \text{ kg/s}$.

2)面积矢量方向调整参数. $\cos \theta$ 可调整的范围为0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, $\cos \theta_0 = 0.5$, $I_{m1} = 8.6 \times 10^{-12} \text{ kg/s}$, $I_{m2} = 9.1 \times 10^{-13} \text{ kg/s}$.

3)热相移参数. 初始时刻注入 $\pi/3$ 的热相移.

4)快速傅里叶变换(FFT)参数. 薄膜位移幅值 x_m 是对薄膜位移 x 进行FFT获取的,而 x 的频率为约瑟夫森频率,所以FFT时间窗口应取约瑟夫森周期(约瑟夫森频率的倒数)的整数倍.因此,本文中FFT时间窗口设置为1个约瑟夫森周期,即 $1/700 \text{ s}$,在每个时间窗口内采样10个点。

5)输入角速度.为了验证全程监测法测量输入角速度的能力,设置两种典型的输入角速度.①输入角速度的变化较复杂:输入角速度由零开始,在300个FFT窗口内按照幅值为 0.0001 rad/s 、频率为3 Hz的正弦规律变化.②输入角速度的范围超出 10^{-2} rad/s 的数量级,超出基于相移锁定法的超流体陀螺量程:

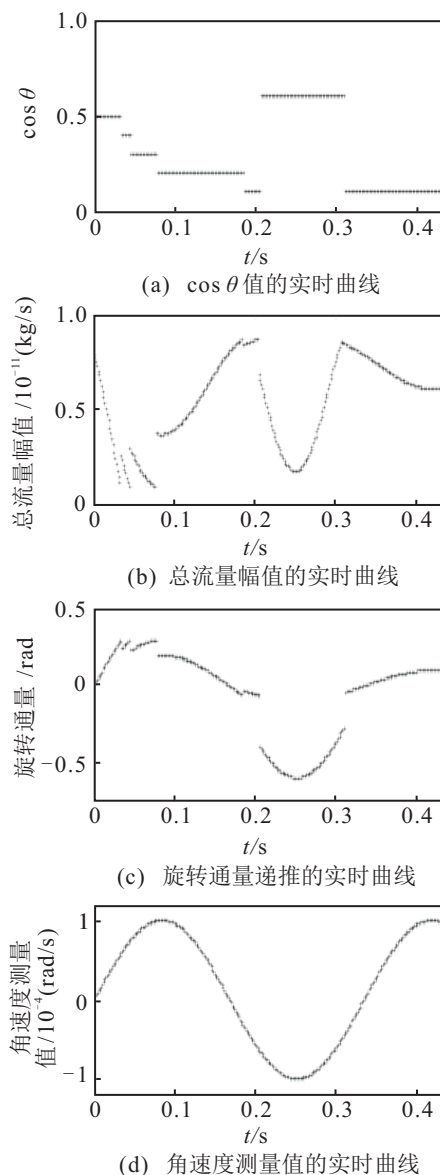


图4 按正弦规律变化的角速度的仿真曲线

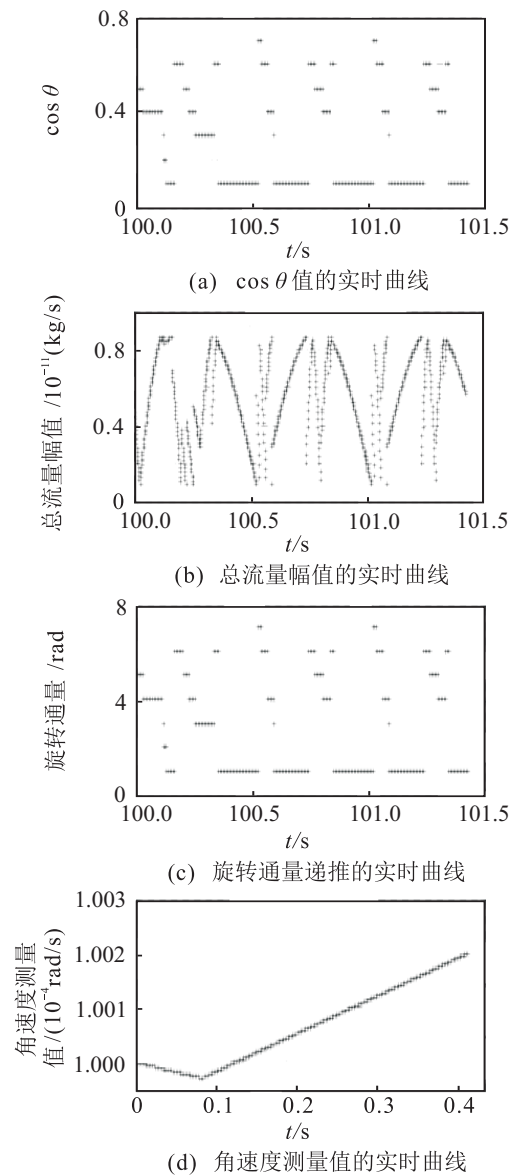


图5 按先减速、再加速的输入角速度的仿真曲线

第 100 s 时输入角速度为 1 rad/s, 前 200 个 FFT 窗口以 -0.001 rad/s^2 减速, 后 800 个 FFT 窗口以 0.002 rad/s^2 加速.

按上述两种角速度输入方式, 根据设置的参数对超流体陀螺的工作过程进行仿真, 仿真结果如图 4 和图 5 所示.

由图 4 和图 5 中的子图 (a) 和 (b) 可知, 当总流量幅值小于 $9.1 \times 10^{-13} \text{ kg/s}$ 或大于 $8.6 \times 10^{-12} \text{ kg/s}$ 时, 通过调整 $\cos \theta$, 总流量幅值被限制在 $9.1 \times 10^{-13} \sim 8.6 \times 10^{-12} \text{ kg/s}$ 之间, 由此使工作点跳跃盲点. 由子图 (a) 和 (c) 可以看出, 在调整了 $\cos \theta$ 的时刻, 递推出的旋转通量呈现跳跃性. 由子图 (d) 可以看出, 超流体陀螺解算得到与输入角速度一致的角速度测量值.

由图 4 中 $t = 0 \text{ s}$, $t = 0.17 \text{ s}$ 和 $t = 0.33 \text{ s}$ 时刻的数据可知, 通过在初始时刻注入热相移对零点进行偏移, 超流体陀螺可判别旋转极性. 由图 5 可知, 经过前 100 s 对工作点不间断地监测, 解算出 1 rad/s 数量级的输入角速度. 因此, 利用全程监测法, 超流体陀螺具有了测量大范围角速度的能力.

4 结 论

针对超流体陀螺测量量程小的缺点, 本文采用调整面积矢量方向和初始时刻注入热相移的技术, 使超流体陀螺的工作点避免达到盲点, 实现了对工作点的全程监测. 仿真结果表明, 基于全程监测的量程扩展方法能有效地解算角速度测量值, 使超流体陀螺量程不再受到限制, 并且能判别旋转极性, 拓宽了超流体陀螺的应用领域, 发挥了超高测量精度的优势.

参考文献(References)

- [1] 秦勇元. 国际惯性器件发展现状和趋势[J]. 航空制造技术, 2008(9): 68-69.
(Qin Y Y. Current status and development trend of international inertial instrument[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(9): 68-69.)
- [2] Xu Q. The current status and development trends of inertial technology in China[C]. 2010 Int Symposium on Inertial Technology and Navigation. Nanjing, 2010: 1-5.
- [3] 王巍. 干涉型光纤陀螺仪技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010: 4-6.
(Wang W. Technology of interference fibre optic gyroscope[M]. Beijing: China aerospace press, 2010: 4-6.)
- [4] 张通, 张骏, 张怡. 基于改进小波阈值的激光陀螺漂移信号降噪[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(2): 258-263.
(Zhang T, Zhang J, Zhang Y. Ring laser gyro drift signal denoising based on improved wavelet threshold[J]. Chinese J of Scientific Instrument, 2011, 32(2): 258-263.)
- [5] 孙枫, 孙伟. 基于双轴转位机构的光纤陀螺标定方法[J]. 控制与决策, 2011, 26(3): 346-350.
(Sun F, Sun W. Research on calibration of IFOG based on two-axis indexing[J]. Control and Decision, 2011, 26(3): 346-350.)
- [6] Hoskinson E, Packard R E, Haard T M. Quantum whispering in superfluid helium-4[J]. Nature, 2005: 443(7024): 376.
- [7] Hoskinson E, Sato Y, Packard R. Superfluid ^4He interferometer operating near 2K[J]. Physical Review B, 2006, 74(10), 100509.1-100509.8.
- [8] Golovashkin I, Zherikhina L N, Tskhovrebov A M, et al. Ordinary SQUID interferometers and superfluid helium matter wave interferometers: The role of quantum fluctuations[J]. J of Experimental and Theoretical Physics, 2010, 111(2): 332-339.
- [9] Sato Y. Fiske-amplified superfluid interferometry[J]. Physical Review B, 2010, 81(17): 172502.1-172502.4.
- [10] Sato Y, Packard R. Superfluid helium quantum interference devices: physics and applications[J]. Reports on Progress in Physics, 2012, 75(1): 016401.1-016401.27.
- [11] 刘建业, 谢征, 冯铭瑜, 等. 超流体陀螺仪的发展概况与研究进展[J]. 航空学报, 2012, 33(1): 1-10.
(Liu J Y, Xie Z, Feng M Y, et al. current status and development of superfluid gyroscope[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(1): 1-10.)
- [12] 谢征, 刘建业, 赵伟, 等. 双弱连接结构的高精度超流体陀螺的量程分析[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(1): 79-83.
(Xie Z, Liu J Y, Zhao W, et al. Analysis and simulation of measure range of double weak-links structured high sensitivity superfluid gyroscope[J]. J of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(1): 79-83.)
- [13] Sato Y, Joshi A, Packard R. Flux locking a superfluid interferometer[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91: 074107.1-074107.3.
- [14] Zheng R, Zhao W, Liu J Y, et al. Mathematical model of ^4He quantum interferometer gyroscope[J]. Trans of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 29(4): 360-366.
- [15] 郑睿, 赵伟, 刘建业, 等. 超流体量子干涉陀螺仪的热噪声分析[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(6): 739-743.
(Zheng R, Zhao W, Liu J Y, et al. Analysis on thermal noise in superfluid gyroscope[J]. J of Chinese Inertial Technology, 2012, 20(6): 739-743.)
- [16] Hoskinson E, Sato Y, Penanen K, et al. A Chemical Potential "Battery" for Superfluid ^4He Weak Links[C]. Proc of the 24th Int Conf on Low Temperature Physics. Orlando, 2005: 117-118.