

声学惯性技术的发展现状

刘荣贵,袁小平,何杰,马晋毅

(中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060)

摘要:声学惯性器件是一种新型的惯性器件,其具有工作频率高,品质因数 Q 值高,封装简单等特点,与其他惯性器件相比,声学惯性器件在体积和成本上拥有较大优势。该文在分析了国内、外相关声学惯性技术报道的基础上,对声学惯性技术的国内、外研究现状及应用情况等进行了综合报道和评述,并对声学惯性技术的未来发展趋势进行了展望。

关键词:声学惯性技术;声表面波(SAW)陀螺;体声波(BAW)陀螺;发展趋势

中图分类号:TN966 **文献标识码:**A

Development Status of Acoustic Inertial Technology

LIU Ronggui, YUAN Xiaoping, HE Jie, MA Jinyi

(26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: The acoustic inertial device is a kind of novel inertial device which has the features of high operating frequency, high quality factor and simple package. The acoustic inertial device has size and cost advantages over other inertial devices. Based on analyzing the reports on the acoustic inertial technology at home and abroad, the development status and applications of acoustic inertial technology have been overviewed and commented in this paper. The future trends of acoustic inertial technology are also prospected.

Key words: acoustic inertial technology; SAW gyroscope; BAW gyroscope; future trend

0 引言

微声电子技术是通过将固体声学技术与电子技术的融合,以微电子和微机电系统(MEMS)工艺技术为核心手段,开发出多种用于信号处理的电子器件;同时,基于微声电子技术的传感器产生,声表面波(SAW)传感器和声体波(BAW)传感器是其中的典型代表。其中,将声学传感器技术运用到惯性领域已成为一种新的技术选择。

从目前国际上声学惯性器件发展的现状和趋势可看出,作为新一代惯性器件,声学惯性器件工作频率高,品质因数(Q)高,封装简单,拥有体积和成本上的优势,将成为惯性技术领域中有潜力的发展方向。现阶段声学惯性器件的研究主要包括 SAW 陀螺和 BAW 陀螺。

1 SAW 陀螺技术

1.1 概述

由于采用压电材料和标准微电子工艺加工,SAW 器件具有工作频率高, Q 值高,结构牢固及抗

冲击能力强等优点,从 20 世纪 70 年代开始广泛应用于各类军民系统中。如何将 SAW 技术与惯性技术结合起来,开发出小型化、无悬浮结构,可利用标准 IC 工艺批量生产、不用真空封装的 SAW 陀螺一直是各国学者希望突破的研究方向。SAW 陀螺的研究历史较短,但其优点显著,因而受到人们的高度重视。SAW 陀螺的主要优点有:

- 1) SAW 陀螺具有优异的抗冲击和抗振动特性。
- 2) 高精度、高敏感和高灵敏度。
- 3) 具有驱动模式和振动模式间的谐振频率较易匹配的特点。
- 4) 可直接与微处理器相连,接口简单;SAW 陀螺能直接把被测物理量转换为抗干扰能力较强的准数字频率量,不需要 A/D 转换就可同数字微处理器组成自适应实时处理系统。
- 5) 结构工艺性好,便于批量生产;SAW 陀螺是平面结构,设计灵活方便,其平面设计使其易于实

收稿日期:2014-12-22

作者简介:刘荣贵(1964-),男,湖南株洲人,工程师,主要从事惯性技术情报的研究。

现集成化和批量生产。

6) 体积小,质量轻,功耗低。

7) SAW 陀螺具有较高的稳定性和可靠性。

1.2 SAW 陀螺技术的发展现状

20 世纪 70 年代,国外开始了对 SAW 陀螺的实验室研究。Frost 等借鉴光学陀螺的 Sagnac 效应,采用外置的电磁换能器激发和接收 SAW,在一个圆柱体上发射两束相向的 SAW,当圆柱体旋转时会产生相位差,检测相位差的大小即可检测出角速度的大小,根据上述工作原理,利用外置换能器激励,接收 SAW 并测得输出信号,但外置换能器导致器件的体积较大。但迄今为止,这样的情形并未出现。图 1 为电磁 SAW 换能器(EMT)旋转速率传感器原理图^[1-2]。

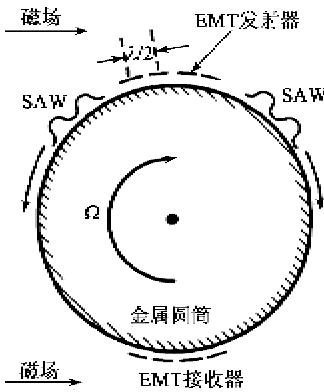


图 1 最早的 EMT 旋转速率传感器原理

从理论上分析, Sagnac 效应引起的两束波的相位差 $\Delta\phi$ 来源于两束波回到起点的时间差 Δt 。在圆柱半径 R 确定的情况下, Δt 与圆柱转动角速率 Ω 和总行程($n \times 2\pi R$)成正比,而与波速 v (声速或光速)无关;通常情况下, Δt 极小(10^{-16} s),无法直接检测。在光学陀螺中,光的工作频率为 10^{14} Hz,总行程可达 10^8 m,因此, $\Delta\phi$ 在 10^8 (°)/s 量级时可直接检测。而对于 SAW 而言,其工作频率为 10^9 Hz 时,由于传播损耗的限制,总行程不超过 1 m,此时 $\Delta\phi$ 在 10^{-2} (°)/s 量级,一般技术手段难以检测。

在 1980 年, Binney, Y. Lao 从理论上推导了 SAW 传播介质的 Ω 对 v 、角速度为 ω 的 SAW 速度的影响。从结论上看, Ω 确实会引起 v 发生变化,且在各向同性介质上, Δv 是介质泊松比的函数,但其量级仅为 $(\Delta v/v) \propto (\Omega/\omega)$ 。由于 SAW 一般工作在兆赫兹,而传播介质的旋转为赫兹甚至更低,因此, $\Delta v/v$ 很小,综合考虑温度等因素对 Δv 的影响,因

此,利用 Δv 来检测 Ω 不现实。这项研究避免了更多的人走弯路,推动了 SAW 陀螺的发展。其原理图如图 2 所示^[3-4]。

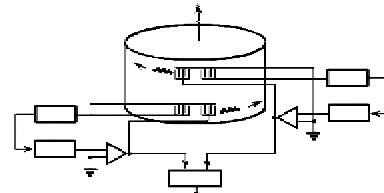


图 2 早期的 SAW 陀螺原理

1997 年,日本 Kurasava 等提出了一种全新的 SAW 陀螺的设计思想,即在 SAW 双端对谐振器间置入一系列有规律地且敏感科里奥利力的金属点,并在垂直方向激励出与谐振器内频率相同大小与角速度成正比的 SAW。虽然实验结果未检测到输出信号,但这种设计思想为 SAW 陀螺开辟了新的发展道路。图 3 为带金属点阵的 SAW 陀螺的工作原理图^[5]。

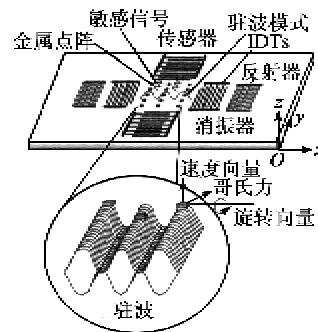


图 3 带金属点阵的 SAW 陀螺工作原理图

美国宾州大学的 Varanda 等参考 Kurasava 的设计思想,利用标准 IC 工艺制作出 SAW 陀螺样机,并获得 0.38 (°)/s 的灵敏度,推动了 SAW 陀螺的发展及研究。图 4 为 SAW 陀螺结构结构图^[6]。

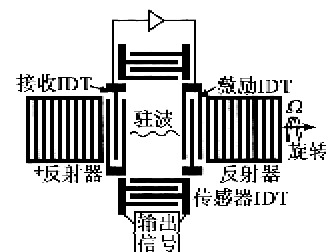


图 4 SAW 陀螺结构

2010 年,中科院王文和韩国 Ajou 大学 Haekwan 等提出了新的 SAW 陀螺结构,此结构包括驱动部分和感应部分,感应部分又由感应和参比两个振荡器组成。布有金属点阵的驱动部分在旋转时将在垂直方向产生 SAW,当它传播到感应部分的感应

振荡器时,对其中的 SAW 产生影响,这种影响通过与参考振荡器的频率差提取出来。在 $0\sim 500$ ($^{\circ}$)/s 旋转范围内,灵敏度为 $172\text{ Hz}/((^{\circ})\cdot\text{s})$ 。图 5 为陀螺的结构图和测试曲线^[7]。

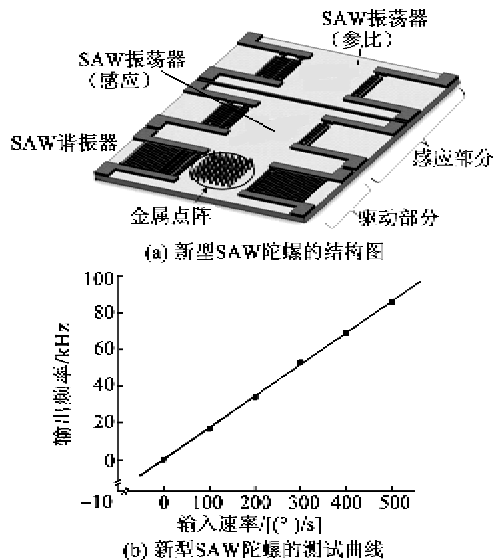


图 5 新型 SAW 陀螺的结构图和测试曲线

理论分析表明,SAW 具有陀螺效应。利用这一特征有望制成无旋转部件的 SAW 陀螺。虽然国外对 SAW 陀螺的研究从 20 世纪 70 年代就已开始,世界上很多国家的科学家都尝试并试验过,但结果不理想。从发达国家研制 SAW 陀螺的实践经验看,用金属点阵探测、检测 SAW 陀螺效应信号很难。由文献[6]可看出,目前只有美国宾州大学的 Varadan 小组的 SAW 陀螺样机的实验结果较好,日本 Kurasava 的实验未取得预期的结果。其原因可能是 SAW 陀螺信号过于微弱或其检测方案和测量原理不完善。因此,对 SAW 陀螺的研究还需各国科学家们进行更深入的研究。

2 BAW 陀螺技术

2.1 概述

BAW 陀螺仪是近年来发展起来的一种新概念陀螺,是微机械振动陀螺研究领域一个新的研究方向。BAW 是一种微波超声,可借助电、磁、光、热、超导隧道结等多种方法来产生 BAW,常用的方法是压电激励,即在压电单晶薄片或压电薄膜上施加交变场,激发沿厚度方向的基频或谐频共振,从而获得高频体声波。2006 年,美国佐治亚理工学院的 Hourri Johari 等首先报道了利用声体波制作陀螺。陀螺采用 HARPS 工艺制作在厚 $50\ \mu\text{m}$ 的 SOI 基

片上,工作频率为 5.9 MHz ,获得的 Q 值超过 200 000,DC 极化电压 5 V 。其原理为在其结构激发 2 个不同 BAW 模式,哥氏加速度能量在 2 个不同 BAW 模式间传递,能量造成某一 BAW 模式振动增强并被灵敏电极感知后浮出电流,工作原理如图 6 所示。BAW 陀螺仪本质上是一种固态陀螺,采用 HARPS 工艺来实现,对真空封装无特别要求,加工成本和功耗比其他陀螺仪低。

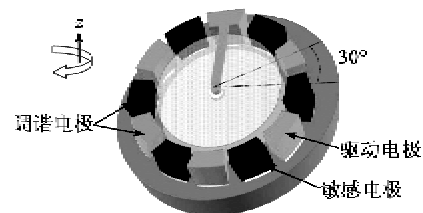


图 6 BAW 陀螺原理图

与其他的 MEMS 振动陀螺相比,BAW 陀螺具有以下优势:

1) 工作频率高 ($1\sim 10\text{ MHz}$)。高频工作可使陀螺仪的频率带宽增加几个数量级,使传感器的响应时间减少并简化了模匹配的要求。高谐振频率使装置的刚度增加若干数量级,使传感器具有高的抗冲击性 (100 kg 的容许量)。此外,装置的大刚性使其受空气阻尼的影响较小,这可通过不需高真空的封装而简化封装,降低制造成本。

2) 振动幅度小于 20 nm ,因此可获得很高的 Q 值及较大的带宽和高的抗冲击能力。

3) 工作电压低。非常低的 DC 工作电压 ($V_p < 5\text{ V}$) 和 AC 启动电压 (160 mV) 简化了使用标准的 CMOS 工艺的接口电路设计和实现。

4) Q 值高。在大气压或接近大气压下保持高 Q 值,这降低了陀螺仪的晶片级封装的成本和复杂性。在 6 MHz 的圆盘陀螺测得的 Q 值高达 235 000。

5) 热稳定性好。在空气环境中就可以达到高的热稳定性,避免了真空封装和温度补偿,在降低成本的同时提高器件的可靠性。

6) 与传统振动陀螺仪相比,容性体声波盘状陀螺仪是静止的装置,这是由于它具有小的容性间隙 (约 200 nm),其振动幅值小于 20 nm 。

2.2 BAW 陀螺技术发展现状及应用

美国佐治亚理工学院的研究小组一直坚持 BAW 陀螺技术的研发,2006 年首次报道了其研制的 BAW 陀螺后,2010 年,该学院的 Wang-kyung

Sung 等报道了一种双轴轮辐 BAW 陀螺。陀螺的工作频率为 3.12 MHz,器件厚为 60 μm ,电容间隙为 200 nm,极化电压为 10 V, -1 dB 带宽为 1.5 kHz,速率敏感度为 15.0 $\mu\text{V}/(^{\circ})/\text{s}$,动态范围为 30 000 $(^{\circ})/\text{s}$ 。图 7 为佐治亚理工学院 Wang-kyung Sung 等人报道的 BAW 陀螺结构示意图。

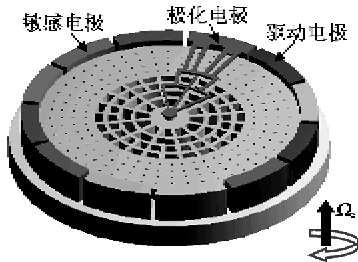


图 7 BAW 陀螺结构示意图

2013 年,佐治亚理工学院的 Roozbeh Tabrizian 报道了一种利用压电换能的高频谐振矩形 BAW 陀螺。采用正交挠性谐振模式的简并模式对来提供对应于 z -轴转动的哥氏谐振陀螺的能量交换通道,AlN 薄膜为驱动和敏感模式提供高效的电-机换能,无需施加任何 DC 极化电压。陀螺采用简单 4 层掩模制作,大小为 300 $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$,频率 11 MHz,线性速率敏感度为 20.38 $\mu\text{V}/(^{\circ})/\text{s}$ 。图 8 为这种陀螺的驱动和敏感谐振模式。

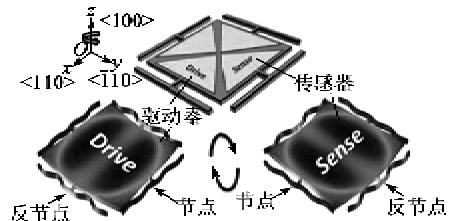


图 8 矩形 BAW 陀螺的驱动和敏感谐振模式

BAW 陀螺技术在美国的发展已较成熟。2008 年,佐治亚理工学院的 Farrokh Ayazi 通过购买佐治亚理工学院的 BAW 陀螺技术专利成立了 Qualtré 公司。在创立初期,公司获得了 Matrix Partners 风险投资公司 500 万美元的风投基金和 DARPA 的项目资金支持,致力于 BAW 陀螺技术的工程化和商业化研究。公司相继开发出了硅基单轴 MEMS BAW 陀螺和三轴 BAW 陀螺;2009 年,Qualtré 公司的 QIMU600 型惯性测量组合(IMU)问世,该 IMU 由制作在同一芯片上的 3 个 BAW 陀螺仪和 1 个三轴加速度计构成。2011 年,该公司获得了追加的 1 000 万美元风险投资基金支持以用于 BAW 陀螺生产能力建设和市场营销。目前,

Qualtré 公司开发出了 QGYRTM 110Hx 系列单轴和 QGYRTM330 系列三轴硅基 MEMS BAW 陀螺,在军事、汽车、医疗等多种领域获得了广泛应用。

BAW 惯性传感器由于采用 HARPSS MEMS 工艺生产,使成本更低,且相比于目前正在使用的运动控制器中产品来说精确度更高。BAW 陀螺仪在短距离导航、防滑系统和安全系统、侧滑检测、下一代安全气囊和防锁死制动系统等汽车领域中具有许多应用,且在游戏控制器,数字照相机中的图像稳定性,手持装置的灵巧的用户界面,WiFi 遥控器,GPS 单元和智能手机在内的器件都将受益于这种新的传感器。BAW 陀螺仪不需真空封装,且可与 CMOS 电路及其他传感器集成。其他陀螺的使用尺寸更大,非硅基材料或要求真空封装的传感器,难以以消费电子的成本来满足短程导航等高性能要求的应用。业内认为,由于运动传感器在消费电子平台上的大量应用,市场机遇正在呈指数式增长。

BAW 陀螺的低成本,高精度,小体积特性将使其在未来的惯性微系统中获得广泛应用。2014 年 6 月,美国 DARPA 微系统办公室(MTO)授予诺斯罗普-格鲁曼公司一项价值约 65 万美元的为期 12 个月的合同,为 DARPA 的芯片级组合原子导航仪(C-SCAN)研制微型惯性测量组合(IMU),该 IMU 将融合诺-格公司的 MEMS BAW 陀螺技术和核磁共振(NMR)陀螺技术。相关工作还包括 NMR 陀螺的工程化,进一步降低组件体积、开发新型高精度光学加速度计等。据诺-格公司介绍,在完成首次为期 12 个月的合同后,后期的潜在合同价值将达到 1 340 万美元。

3 结束语

惯性器件是自主性惯性导航系统的关键部件,其军事地位是 GPS 等导航技术无法替代的。在众多惯性器件中,声学惯性器件已成为惯性传感器家族中的重要成员。它很有希望带来惯性测量技术及其惯性导航应用技术的新突破。

目前从国内、外的文献报道来看,在声学惯性器件技术领域,我国在 SAW 陀螺技术方面的研究投入较大,与国外技术水平差距不大,SAW 陀螺技术方面的研究尚处在理论研究阶段,国内、外均未取得突破性进展。SAW 陀螺器件的实际应用还需克服很多困难。在 BAW 陀螺技术方面,目前国内还未见相关报道,我国在 BAW 陀螺技术领域的研究还

是空白。国外美国 Qualtré 公司已研发出相关 BAW 陀螺产品,这些器件将在军事、汽车、医疗等领域获得广泛的应用。

参考文献:

- [1] FROST H M, SETHARES J C, SZABO T L. Rotation sensing through electromagnetic-surface acoustic-wave transduction[J]. J Appl Phys, 1977, 48(1): 52-58.
- [2] SETHARES J C, BURLINGTON M H. Surface acoustic wave rate sensor and position indicator. U. S. Patent, 4126047[P]. 1978-04-03
- [3] BINNEG Y L. Gyroscopic effect in surface acoustic waves[J]. Ultrasonics Symposium, 1980: 687-691.
- [4] BINNEG Y L. Surface acoustic wave gyroscope; U. S. Patent, 4384409[P]. 1983-05-05.
- [5] KUROSAWA M, FUKUDA Y, TAKASAKI M, et al. A surface acoustic wave gyro sensor[C]//Chicago: Int Conf Solid-State Sensors and Actuators, 1997: 863-

866.

- [6] VARADAN V K, XAVIER P, SUH D, et al. MEMS-IDT based accelerometers and gyroscopes[J]. Proc of the SPIE Conference on Smart Electronics and MEMS, 1999, 3673: 182-189.
- [7] HAEKWAN O, WEN W, SANGSIK Y. Development of SAW based gyroscope with high shock and thermal stability[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 165(1): 8-15.
- [8] 马晋毅. 微机械叉指换能器声表面波陀螺[J]. 压电与声光, 2003, 25(6): 442-444.
- MA Jinyi. MEMS-IDT gyroscope based on SAW[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2003, 25(6): 442-444.
- [9] SUNG W K, DALAL M. A 3 MHz spoke gyroscope with wide bandwidth and large dynamic range [C] // Hongkong, China: Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2010: 104-107.

(上接第 261 页)

参考文献:

- [1] 陈财政, 邢动秋. 基于 MATLAB 的加速度传感器振动信号处理方法研究[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2003(9): 16-19.
- CHEN Caizheng, XING Dongqiu. Research of acceleration sensor signal processing based on MATLAB[J]. Microcontroller & Embedded Systems, 2006(9): 16-19.
- [2] JIM S. Enhancing the performance of pedometers using

a single accelerometer[EB/OL]. http://www.analog.com/static/imported-files/application_notes/47076-299220991AN_900.pdf, 2007-05-10

- [3] LIBBY R. A simple method for reliable footstep detection on embedded sensor platforms[DB/OL]. <http://www.ubicomp.cs.washington.edu>, 2008-07-25.
- [4] ICNINOSEKI-SEKIN N, KUWAE Y, HIGASHI Y J, et al. Improving the accuracy of pedometer used by the elderly with the FFT algorithm[J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 2006, 38(9): 1674-1681.

(上接第 265 页)

- [8] 何学文, 黄国平. 基于 Ansys 的 0-3 型压电振子的有限元分析[J]. 压电与声光, 2011, 33(6): 968-972.
- HE Xuwen, HUANG Guoping. Ansys-based finite element analysis of 0-3 model piezoelectric vibrator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(6): 968-972.
- [9] 王光庆. 压电叠堆式发电装置的建模与仿真分析[J]. 中国机械工程, 2009, 20(19): 2298-2303.
- WANG Guangqing. Modeling and simulation of a piezoelectric stacked generator[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(19): 2298-2303.

- [10] DEMIR I, OLSON A L. High strain behavior of composite thin film piezoelectric membranes[J]. Microelectronic Engineering, 2004, (75): 12-23.
- [11] 袁江波, 谢涛, 单小彪, 等. 复合型悬臂梁压电振子振动模型及发电试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(9): 87-92.
- YUAN Jiangbo, XIE Tao, SHAN Xiaobiao, et al. Vibrated model and experiments of multiple piezoelectric cantilevers in energy harvesting[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(9): 87-92.