

我国惯性导航用陀螺仪现状与发展趋势

曲 研

北京新材料和新能源科技发展中心, 北京

收稿日期: 2021年7月9日; 录用日期: 2021年9月21日; 发布日期: 2021年9月28日

摘 要

惯性导航是一种不依赖于外部信息、也不向外界辐射能量的自主式导航系统。陀螺仪作为惯性导航系统中的核心部件, 本文梳理介绍了机械陀螺仪、激光陀螺仪、光纤陀螺仪、MEMS陀螺仪的特点和产业现状, 并展望了常见陀螺仪和下一代陀螺仪的发展趋势。

关键词

惯性导航, 陀螺仪, MEMS陀螺仪, 发展趋势

Current Status and Development Trend of Gyroscopes in Inertial Navigation in China

Yan Qu

Beijing Advanced Materials and New Energy Technology Development Center, Beijing

Received: Jul. 9th, 2021; accepted: Sep. 21st, 2021; published: Sep. 28th, 2021

Abstract

Inertial navigation system is an autonomous navigation system which does not rely on external information nor radiate energy to the outside world. Gyroscope is the core component of inertial navigation system. This paper introduces the characteristics and industry status of mechanical gyroscope, laser gyroscope, fiber optic gyroscope and MEMS gyroscope, and looks forward to the development trend of common gyroscopes and next generation gyroscopes.

Keywords

Inertial Navigation, Gyroscope, MEMS Gyroscope, Development Trends

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现代比较常见的几种导航技术,包括天文导航、惯性导航、卫星导航、无线电导航等。其中惯性导航(Inertial Navigation System, INS)是一种不依赖于外部信息、也不向外界辐射能量的自主式导航系统,具有不受外界干扰,隐蔽性好的特点。

陀螺仪是惯性导航系统中不可缺少的核心测量器件,又叫角速度传感器,是用高速回转体的动量矩敏感壳体相对惯性空间绕正交于自转轴的一个或二个轴的角运动检测装置,或利用其他原理制成的角运动检测装置起同样功能的装置。提高陀螺仪的测量精度,一直是惯性导航领域研究的重点,因为导航系统的性能很大程度上受陀螺仪的性能影响。现今我国惯性导航中应用的陀螺仪大致可以分为机械陀螺仪,光学陀螺仪和 MEMS 陀螺仪这三类。

2. 机械陀螺仪

机械陀螺仪,指利用高速转子的转轴稳定性来测量物体正确位置的角运动检测装置。最常见的机械陀螺仪包括液浮陀螺仪、静电陀螺仪和动力调谐陀螺仪等。机械陀螺仪对工艺结构等要求很高,结构复杂。

液浮陀螺仪和静电陀螺仪都是超高精度陀螺仪。液浮陀螺精度虽高,但结构复杂,制造困难、成本也很高,我国 2011 年之前主流舰艇全部采用的液浮陀螺仪平台式惯导。静电陀螺仪是目前最高精度的陀螺仪,精度可达 $10^{-8}\sim 10^{-6}$ ($^{\circ}$)/h 量级,但成本较高,结构体积较为庞大,且需要严格控制工作时温度,另外启动速度慢,需要加阻尼之后才能运行[1],一般应用在弹道导弹核潜艇或航空母舰上,目前全球只有中国、美国、俄罗斯和法国具备研制并成功应用静电陀螺的实力。

动力调谐陀螺仪是中低精度陀螺仪,体积较小,成本低廉[1],在 20 世纪 70 年代到 20 世纪 90 年代被广泛应用。美国第二代战机采用液浮陀螺仪,但到第三代战斗机已多采用动力调谐陀螺仪,目前国内外已基本停止了对动力调谐陀螺仪的研究且少有应用。

3. 光学陀螺仪

光学陀螺仪是借助法国科学家 Sagnac 提出“萨格纳克效应”(Sagnac Effect)效应,依据相干光学理论,来计算方向,从而获取高精度。萨格纳克效应是相对惯性空间转动的闭环光路中所传播光的一种普遍的相关效应,即在同一闭合光路中从同一光源发出的两束特征相等的光,以相反的方向进行传播,最后汇合到同一探测点。随着光电技术的发展并应用于陀螺领域,激光陀螺仪和光纤陀螺仪应运而生。国际上,美国科学家 2018 年研制出的光学陀螺仪成为全球最小的光学陀螺仪,相比于市场上比高尔夫还大的其他光学陀螺,它体积比一粒米还小。

3.1. 激光陀螺仪

激光陀螺仪,发展于 20 世纪 60 年代,是指利用激光光束的光程差测量物体角位移的装置。在一个三角形环状激光器中放置激光发生器,产生激光在三角形三个顶端放置反射镜形成闭合光路,使分光镜将一束激光分为正反两向传播的两束激光。当物体(激光器)没有角位移时,两束激光没有光程差,它们会聚在一起时不相干涉。如果物体移动产生角位移,两束激光相遇时就会产生干涉,利用光的干涉条纹测

出物体的角位移，以此计算出物体的角速度，从而完成机械式陀螺同样的任务(见图 1)。激光陀螺，具有重量轻、尺寸小、精度高、可靠性好、动态范围大、响应时间短、耐冲击和振动、工作寿命和存放时间长等特点，可用于提供实时航向、速度、高度、姿态等空间位置信息，可视为惯性导航系统这项皇冠上的“明珠”。目前，激光陀螺最高零偏稳定性可达 $1.5 \times 10^{-4} (^{\circ})/h$ [2]，广泛用于国防、航空航天及其他高端导航战略应用领域。



Figure 1. Laser gyroscope and its internal structure
图 1. 激光陀螺仪及内部构造

2019 年全球激光陀螺仪市场规模约为 18 亿美元，我国激光陀螺仪受军工、航空等产业的发展影响，2019 年市场规模达到 55 亿元。目前，全球只有美国、法国、俄罗斯、日本及中国等少数国家可以进行研制量产激光陀螺仪。该领域的相关研制单位有美国 Draper 实验室、霍尼韦尔公司、诺格公司、斯佩里公司、基尔福特公司等，法国萨基姆公司、Sextant 公司等，俄罗斯的 Polyus 研究所、电子光学公司，日本的国家宇航实验室、宇宙开发事业团、航空电子工业有限公司等。美国现役主流战机包括 F-22 和 F-35 等，基本采用激光陀螺仪。

我国国防科技大学教授、中国工程院院士高伯龙是中国激光陀螺奠基人。国内激光陀螺经过多年的积累，已有北京航空航天大学、哈尔滨工程大学、中航工业西安飞行自动控制研究所(618 所)、航天 33 所、航天 16 所、航天 13 所、中船 707 所等单位开展相关研制工作[3]。

我国从事激光陀螺研制生产的企业有北京航天时代激光导航技术有限责任公司、华惯科技有限公司、西安北方捷瑞光电科技有限公司、北京中科科美科技股份有限公司等。

3.2. 光纤陀螺仪

光纤陀螺仪即光纤角速度传感器，发展于 20 世纪 80 年代，是继激光陀螺之后的第二代光学陀螺。光纤陀螺的工作原理也是基于萨格纳克(Sagnac)效应。光纤陀螺仪的成本比激光陀螺仪的低，适合产业化进行批量生产。

光纤陀螺仪目前是惯性技术研究领域的主流陀螺仪。目前，全球研制和生产光纤陀螺仪的美国和法国属于第一梯队，日本和俄罗斯属于第二梯队，我国处于第三梯队。具体相关单位有美国的斯坦福大学、麻省理工大学、Draper 实验室、霍尼韦尔公司、诺格公司、KVH Industries 等，法国萨基姆公司、iXblue 公司等，日本三菱精密公司，俄罗斯 Optolink 公司和 Fizoptika 公司，意大利 Civitanavi 系统等。光纤陀螺的零偏稳定性最高可达 $0.00003 (^{\circ})/h$ [4]，在性能和成本优势方面已经超过环形激光陀螺仪，在不少军事和商业应用领域极具竞争力。随着国际上光纤陀螺的精度不断提高，中低精度陀螺仪已经完成了产品化，部分高精度陀螺仪开始在军方进行装备调试，应用领域也越来越广泛。美国新研飞机和改进改

型飞机大多采用光纤陀螺仪导航系统[5]。

我国光纤陀螺的研究起步较晚，清华、北大、北航、北理、北交大、浙大、航天科工集团、航天科技集团等单位相继开展了光纤陀螺的研究。国内的中低精度的光纤陀螺的部分技术水平与国际上技术水平相当，且已经达到了应用于惯导系统的要求。由于卫星对惯性仪器要求其具有长寿命和高可靠性，光纤陀螺仪优势越发凸显，且我国光纤陀螺正逐渐由实验室样机步入产业化应用阶段。国内外高精度陀螺均属于朝阳产业，技术逐渐成熟，应用范围越来越广泛。2017年北京航空航天大学研制的高精度光子晶体光纤陀螺成功实现了在中国首艘货运飞船“天舟一号”上搭载飞行，是国际上空间领域首次应用光子晶体光纤陀螺(见图2)。

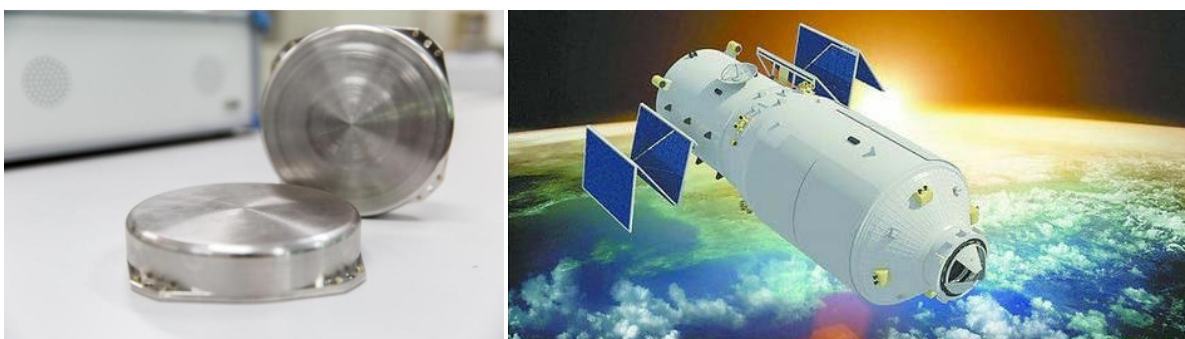


Figure 2. Fiber gyroscope on tianzhou-1
图 2. 天舟一号所搭载的光纤陀螺

我国从事光纤陀螺研制生产的企业有北京理工导航控制科技有限公司、中航捷锐(北京)光电技术有限公司、北京航天时代光电科技有限公司、北京中星寰宇科技有限责任公司、武汉长盈通光电技术股份有限公司、锐光信通科技有限公司、湖北三江航天红峰控制有限公司、广州奥鑫通讯设备有限公司、株洲菲斯罗克光电技术有限公司、重庆鹰谷光电股份有限公司等。其中株洲菲斯罗克光电技术有限公司 2016 年总投资约 4 亿元，定制了 5 万多平方米厂房，中国最大光纤陀螺项目进驻中国动力谷自主创新园，预计 2025 年年产值将超过 5 亿元。重庆鹰谷光电股份有限公司 2019 年与重庆涪陵新城区管委会、北京航空航天大学签署投资协议，总投资 5 亿元建设光纤陀螺及光纤传感器核心器件生产项目，预计 2021 年底达产，年产值约 20 亿元。

4. MEMS 陀螺仪

MEMS 技术的发展受益于半导体集成电路微电子技术和精密机械加工技术，它与陀螺结合成就了 MEMS 陀螺仪，实现了设备的小型化。MEMS 陀螺仪利用科里奥利力(Coriolis force)，在其内部产生微小的电容变化，然后测量电容，计算出角速度。MEMS 陀螺仪(见图 3)是高新技术的产物，不仅体积小、重量轻，而且还具有环境适应性强、易于批量生产、成本低等优点，精度为 $0.01\sim 500 (^{\circ})/h$ [6]，在军民等领域均有广泛的应用[5]。

2019 年全球 MEMS 陀螺仪总市场共计约 15 亿美元，在整体 MEMS 市场中占比达到 10%。目前，全球 MEMS 陀螺仪相关研究单位有美国 Draper 实验室、斯坦福大学、密歇根大学、霍尼韦尔、大西洋惯性系统公司、InvenSense 公司、波音公司、亚诺德半导体公司等，英国 BAE 系统公司，挪威 Sensoror 公司，日本东芝公司、韩国首尔国立大学等。到 2020 年，美军约九成的制导武器采用 MEMS 惯性传感器。

我国 MEMS 陀螺的研究开始于 20 世纪 80 年代，清华、北大、上海交通大学、复旦、浙大、东南大学、中北大学、中科院上海微系统所、航天 33 所、中电 13 所等开展了相关研究工作[7] [8]。我国从事

MEMS 陀螺研制生产的企业有深迪半导体(上海)有限公司、上海矽睿科技有限公司、安徽芯动联科微系统股份有限公司、亚德诺半导体技术(上海)有限公司、北京航宇测通电子科技有限公司、水木智芯科技(北京)有限公司、成都振芯科技股份有限公司等。

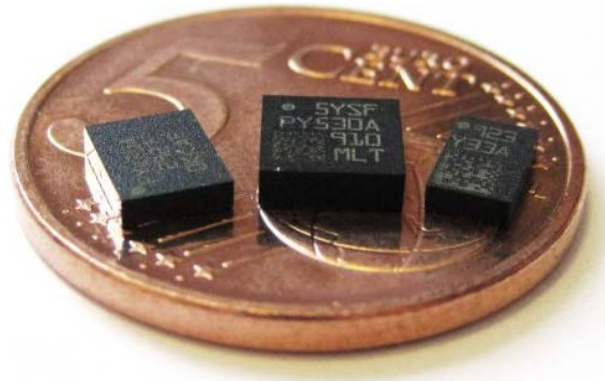


Figure3. MEMS gyroscope
图 3. MEMS 陀螺仪

2010 年发布的 iPhone 4 是全球第一款搭载陀螺仪的智能手机。陀螺仪最早主要应用于手机游戏中，提高游戏体验，后来也逐渐被应用于手机 VR、辅助导航、摄影防抖等功能中。随着技术的成熟及硬件成本的降低，陀螺仪已基本成为智能手机的标配。但据 2015 年的统计数据，我国智能手机出货中 MEMS 陀螺仪的进口比例高达 98%。

5. 发展趋势

5.1. 常见陀螺仪发展趋势

通过对常见的液浮陀螺仪、静电陀螺仪、动力调谐陀螺仪、激光陀螺仪、光纤陀螺仪、MEMS 陀螺仪的精度和成本对比(详见表 1)，总结分析其各自未来发展趋势。

Table 1. Accuracy and cost of common gyroscopes
表 1. 常见陀螺仪精度和成本情况

种类	精度	成本
液浮陀螺仪	超高	高
静电陀螺仪	超高	高
动力调谐陀螺仪	中低	低
激光陀螺仪	中高	高
光纤陀螺仪	中低	低
MEMS 陀螺仪	低	低

机械陀螺仪领域，目前我国主流舰艇惯导系统依然为液浮陀螺仪，随着我国激光陀螺仪惯导系统技术的成熟，未来我国主要新型舰艇装备将和美国海军一致，逐渐更换为激光陀螺仪；静电陀螺仪经过几十年的发展，技术上已经十分成熟，在高精度领域有着不可替代的地位，未来将在保证精度的基础上尽可能地降低成本，扩大应用范围[1]；动力调谐陀螺仪的精度区间由于被光纤陀螺仪全部覆盖，动力调谐陀螺仪基本被光纤陀螺仪取代。

光学陀螺仪领域,激光陀螺仪将逐渐向高精度、高可靠性、体积小、低成本、结构牢靠等方向发展,未来激光陀螺仪行业发展前景较好;光纤陀螺具有其精度较高和成本较低的优势,因此在未来能够获得良好发展[9]。光纤陀螺仪近些年是国内军用导航设备的主力传感器,占据了绝大部分的市场份额。另外,由于光纤陀螺仪及光纤惯导系统的性价比较高,在中高端无人机的飞行控制、高铁振动传感及铁路轨道检测、航空/陆上移动测绘、无人驾驶汽车等民用领域也有广泛应用,光纤陀螺有望基本替代传统机械陀螺。未来激光陀螺仪和光纤陀螺仪在我国军用飞机市场前景广阔。

MEMS 陀螺仪目前虽然精度低,但低廉的价格使其在未来几年内应用范围将更加广泛,将有很大可能在精度要求较低的中低端市场和短时领域完全取代光纤陀螺仪。现今人工智能、自主导航等新兴产业的发展给 MEMS 陀螺带来了机遇[5],同时 MEMS 陀螺仪势必向着高精度、微型化、高集成度、适应性强、低成本等方向发展[5]。

5.2. 下一代陀螺仪发展趋势

下一代陀螺仪有原子陀螺和半球谐振陀螺。

原子陀螺被称为机械陀螺、光学陀螺、MEMS 陀螺后的第四代陀螺[9]。目前则仍处于实验室阶段,根据工作原理可以大致分为基于原子干涉的冷原子陀螺和基于原子自旋的核磁共振陀螺[5]。基于原子干涉的冷原子陀螺最大优点是精度高,理论上能够超过静电陀螺,国内主要研制单位有清华大学、中科院武汉物数所、中船 717 所和北京航天控制仪器研究所等;基于原子自旋的核磁共振陀螺最大优点在于有望能够在 MEMS 的体积下实现激光陀螺的精度,国内主要研制单位有北京航天控制仪器研究所、航天 33 所、航空 618 所、北京航空航天大学 and 国防科技大学等[10]。

半球谐振陀螺是一种利用半球壳径向振动产生的驻波沿环向的偏转来敏感旋转运动的一种振动陀螺,拥有高精度、高过载等优势,寿命长达 15 年,极其适合在太空中使用。半球谐振陀螺是目前国际上非常有前景的一种创新的、颠覆性的高精度陀螺仪,未来高性能应用领域它将挑战激光陀螺仪和光纤陀螺仪的地位[11],甚至重构整个陀螺仪技术的蓝图[5]。美国却是第一个研制半球谐振陀螺仪的国家,代表着世界上的最高水平,我国中电科 26 所和上海航天控制技术研究所开展相关研制工作[12]。

6. 小结

全球以及我国陀螺仪的发展都经历了漫长的岁月,时至今日仍是世界各国的研究热点。本文主要介绍了常见的机械陀螺仪、光学陀螺仪、MEMS 陀螺仪的基本原理、特点、发展现状以及三种陀螺仪的未来趋势,作为下一代陀螺仪的原子陀螺和半球谐振陀螺也在加速研发中。陀螺仪作为惯性导航系统的核心,已经在军事、航空、航天领域发挥了巨大的作用,未来低成本、高精度、小体积的陀螺在国民经济中的其他领域也将发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 赵砚驰,程建华,赵琳. 惯性导航系统陀螺仪的发展现状与未来展望[J]. 导航与控制, 2020(Z1): 189-196.
- [2] 张斌,罗晖,袁保伦. 国外激光陀螺的发展与应用[J]. 国外惯性技术信息, 2017(4): 20.
- [3] 雷一非,谢波,李淑英. 激光陀螺捷联惯导系统旋转调制技术综述[J]. 导航与控制, 2019(6): 10-20+54.
- [4] 郑辛,吴衍记,于怀勇. 光子晶体光纤在光纤陀螺中的应用现状及其关键技术[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(6): 1-8.
- [5] 薛连莉,葛悦涛,陈少春. 从第五届惯性传感器与系统国际研讨会看国外惯性技术的发展情况[J]. 飞航导弹, 2018(9): 4-8.
- [6] 沈玉芑,杨文钰,朱鹤,隋毅. 2020 年国外惯性技术的发展与展望[J]. 飞航导弹, 2021(4): 7-12.

- [7] 卞玉民, 胡英杰, 李博, 徐淑静, 杨拥军. MEMS 惯性传感器现状与发展趋势[J]. 计测技术, 2019, 39(4): 50-56.
- [8] 李晓阳, 王伟魁, 汪守利, 彭泳卿, 金小锋. MEMS 惯性传感器研究现状与发展趋势[J]. 遥测遥控, 2019, 40(6): 1-13.
- [9] 江文清, 夏志平. 微机械陀螺仪的新进展及发展趋势[J]. 科技视界, 2017(28): 87+90.
- [10] 刘院省, 阚宝玺, 石猛, 魏小刚, 王学锋. 原子陀螺仪技术研究进展[C]//第四届航天电子战略研究论坛论文集. 2018: 11-17+23.
- [11] 王巍, 邢朝洋, 冯文帅. 自主导航技术发展现状与趋势[J/OL]. 航空学报. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.v.20210429.1303.036.html>
- [12] 刘付成, 赵万良, 杨浩, 李绍良, 成宇翔. 半球谐振陀螺技术[J]. 导航与控制, 2020(Z1): 208-215.