



# 光纤陀螺技术 发展现状及其应用

中国船舶重工集团公司724所 || 罗睿  
中国电子科技集团公司44所 || 张瑞君

## 光纤陀螺优点

光纤陀螺 (FOG) 是新一代角速度传感器, 是继激光陀螺之后的第二代光学陀螺。与传统机械陀螺相比, FOG无运动部件和磨损部件, 有体积小、重量轻、灵敏度和分辨率极高 (可达 $10^{-7}^{\circ}/s$ )、可靠性高、寿命长、功耗低、瞬时启动、抗电磁干扰、抗振动冲击能力强、无加速度引起的漂移、结构简单、价格低、易于集成、动态范围极宽 (约为 $2000^{\circ}/s$ )、应用范围广等优点。

FOG一般由光纤传感线圈、集成光学芯片、宽带光源、调制器和光电探测器组成。FOG精度分为三类 (见表1), 不同应用领域采用不同精度的FOG。飞船、卫星等空间应用均采用高精度的FOG。

## FOG技术发展现状

现今, FOG已发展了三代。第一代干涉型光纤陀螺 (I-FOG) 是迄今为止发展比较完善的一

表1 FOG精度

随机漂移 ( $^{\circ}/h$ )	1~100	0.01~1	0.001~0.01
标度因子误差 (ppm)	1~5	30~300	500~5000

类FOG, 技术上已经成熟, 已广泛应用于实际领域中; 第二代谐振环形腔型光纤陀螺 (R-FOG), 其理论上的检测精度高于第一代I-FOG, 正处于实验室研究向实用化的发展阶段; 第三代受激布里渊散射光纤陀螺 (B-FOG), 尚处于理论研究阶段, 它比前两代FOG有更大的优越性, 受到人们的瞩目。

此外, 根据采用光学元器件的不同, 还发展了集成光学型和全光纤型FOG。

集成光学型FOG将主要光学元件如耦合器、偏振器、调制器都集成在一块芯片上, 可靠性高, 可以在平面工艺线上批量生产, 成本较低。目前得到广泛应用的是采用数字闭环解调结构的FOG, 它是以多功能芯片Y波导为核

心的全保偏光路结构，包括超辐射激光二极管（SLD）、耦合器、光电检测器、光纤环等。

全光纤型FOG是将主要的光学元件都加工在一条保偏光纤上，从光源到光接收器的全部光路都采用光纤。目前，全光纤型FOG技术比较成熟，成本较低，但实现高精度的技术难度较大。

FOG对一个国家的国防和经济建设具有十分重要的意义，受到发达国家的高度重视。美、日、欧洲的FOG的研发处于世界领先地位，特别是欧美在中高精度FOG的研发上占有明显优势，日本则更侧重于低精度FOG的商业应用。

FOG已取得很大的进展。FOG的大部分关键技术已得到解决，FOG性能（灵敏度、稳定性、动态范围、标度因子）大大提高。特别是得益于光纤通信技术发展，FOG的工作波长逐渐从850nm移向1550nm，使FOG不仅能采用光纤通信中不断进步的新型光纤、高性能光源、光电集成、数字信号处理等技术提高性能，同时又降低了成本。目前，高分辨率、宽动态范围、高稳定性及m k数字输出的FOG已成为研究热点。

## 国外发展状况

美国是最早研制与应用FOG的国家。主要研发单位有利顿、Honeywell、KVH等公司。中、低等精度的FOG已相当成熟并产品化，有FOG200、600、1000、2500等系列，既有单轴结构，也有双轴、三轴结构。美国Honeywell公司的第二代高性能I-FOG采用了集成光学多功能芯片技术以及全数字闭环电路、2~4km的保偏光纤线圈、高功率的光纤激光器，获得偏置精度 $0.00023^\circ/\text{h}$ ，角度随机游走（ARW）精度为 $0.00019^\circ/\sqrt{\text{h}}$ ，标度因子 $0.3 \times 10^{-6}$ ，并已应用在高性能惯性参考系统中。现在，该公司的研究重点已经从战术级的FOG转移到姿态与航向参考系统应用的高精度、战略级FOG（如高精度消偏型FOG）。

日本是研究与生产FOG的大国，研制FOG

的单位有东京大学尖端技术室、日本航天航空电子（JAE）和日立电缆、住友电工、三菱等公司。日本在I-FOG的实用化，特别是中、低精度级别的实用化方面走在世界的前列。日本简化了I-FOG的系统配置，大大地降低了系统成本，已批量生产多级别的FOG，也使FOG在民用范围得到很大扩展。另外，JAE公司还开发航天航空用的高性能FOG，目前的研究主要集中在三轴I-FOG的集成技术和EDA ASE光源的研制。日本最近研制的全光纤型FOG分辨率可达到 $10^{-4} \sim 10^{-5}^\circ/\text{s}$ 。

欧洲的FOG研发工作主要集中在法国、俄罗斯和德国。法国研制的THP、HP、MP三个系列FOG，其光纤直径220mm，偏置稳定性达到 $0.003^\circ/\text{h}$ ，ARW达 $0.00015^\circ/\sqrt{\text{h}}$ ，零漂 $0.001^\circ/\text{h}$ ，标度因子误差 $25 \times 10^{-6}$ 。

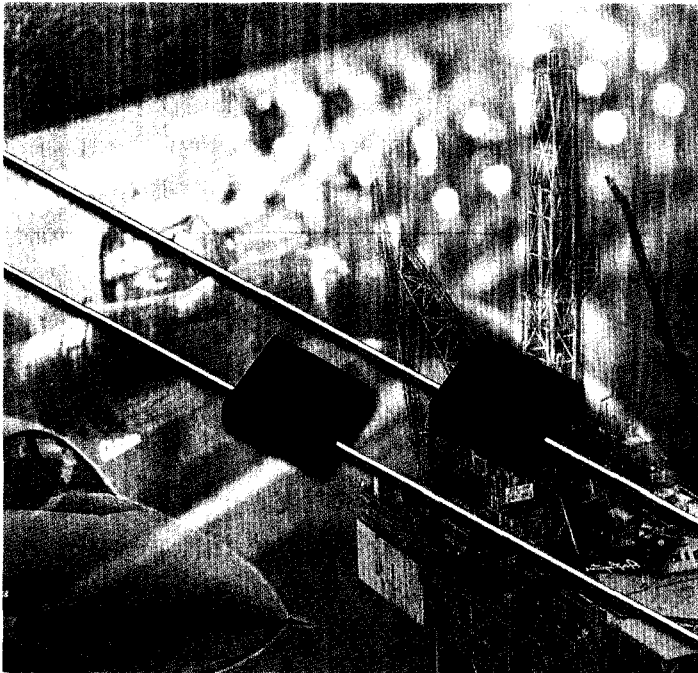
德国LITEF公司的微型FOG由多功能光学收发模块（MOM）、Sagnac效应敏感模块（SSM）、包括Y波导耦合器与两个电/光调制器的多功能集成光学芯片（MIOC）和全数字闭环控制电路模块（ADCL）组成，精度为 $0.65 \sim 1.3^\circ/\text{h}$ 。

俄罗斯的FOG有全光纤型和集成光学型。包括VG910、VG941、VG951型在内的VG系列已商用化。Fizoptika公司发明的微型FOG技术，可将所有的光学元件并列放置，元件之间没有光学的连接，其动态范围达到 $\leq 500^\circ/\text{s}$ ；零偏稳定性可达 $0.3^\circ/\text{h} \sim 1.0^\circ/\text{h}$ ；最小重量仅40g。

## 国内发展现状

我国也非常重视FOG技术的研究，北京航空航天大学、北京理工大学、北方交大、航天集团13所、33所、上海803所，国防科大、清华大学、浙江大学、中科院上海技物所等都相继开展了FOG的研制。

近年来，国内FOG技术得到快速发展，特别是航天13所在各类FOG研制和工程化技术方面较为突出。在多项关键指标上都取得突破性进展。成功研制出采用Y分支多功能集成光路、零偏稳定性达 $0.4^\circ/\text{h}$ 全数字闭环保偏FOG，高



精度FOG达到了 $0.01^\circ/h$ ，中低精度FOG在 $-40\sim+65^\circ\text{C}$ ，零偏重复性 $<2^\circ/h$ 。

北航研制的PM-IFOG测试精度优于 $1.0^\circ/h$ ，消偏FOG检测精度约 $2^\circ/h$ 。为了满足空间应用高可靠性、小体积、低功耗的要求，北航开发出了集成化三轴FOG，光路部分采用1550nm波长的保偏光纤环和大功率ASE光源，光源为三轴复用，并增加了一个备用光源，既降低了30%的功耗又提高了可靠性。其主要技术指标为：零偏稳定性为 $0.1^\circ/h$ ，ARW为 $0.02^\circ/\sqrt{h}$ ，标度因子非线性度为 $5\times 10^{-5}$ ，耐辐射剂量为500Gy。

清华大学采用光纤敏感环研制的循环I-FOG，可使双向光束在敏感环中循环传播，使导航级FOG的光纤长度 $<200\text{m}$ ，降低了FOG成本。

目前我国正致力于高精度IFOG和集成光学芯片、全数字式设计的研制和开发，并力求产业化。

## FOG的应用

FOG作为一种新型的旋转角速度测量仪器和全固态惯性仪表，可用于定位、姿态控制和绝对方向测量。在确定方位时，FOG作为一种惯性参考物并提供方位角（如车辆导航）；

在姿态控制系统中，FOG提供移动物体（运载器）的倾斜角（如飞机、卫星等）；在绝对方向的测量时，FOG作为基本的方向功能单元测量地球旋转速率（如指南针）起校准作用。

FOG有巨大的应用市场，在国家经济和国防建设中起重要作用。目前，已广泛用于太空、空间、陆地和海洋等涉及军民两用范围的许多重要领域。

## 在空间的应用

### 1) 航天

飞船等空间应用均采用高精度的FOG，FOG既可用于载人飞船航天员舱外活动机动装置导航和定姿，也可作为通用航天器定姿的备份，高精度、高可靠的FOG与GPS组合定姿已成为国内外航天器定姿系统的典型构型。

美国不仅将FOG用于航天飞机、宇宙飞船及与地形跟踪匹配和导向，还将FOG用于深层空间飞行器。美国的LN210型FOG已用于火星探测器。2004年，美国的“勇气”号和“机遇”号探测车成功登陆火星，所用的导航系统为诺斯罗普-格鲁门公司生产的FOG导航系统。该系统提供了飞船飞行中姿态测量所需的线加速度和角加速度信息；确定了飞船进入火星大气层缓慢降落和着陆伞最佳打开时机；提供了火星探测车在火星陆地表面运动过程中姿态、速度信息和探测车上高增益天线的定位。

我国防科技大学也将FOG与GPS组合定姿定轨技术用于航天器定姿，作为微小型航天器或舱外机动装置上高精度自主姿态确定系统。

### 2) 飞机

采用FOG为主要惯性元件的捷联惯导系统，可为飞机提供三维角速度、位置以及攻角和侧滑角。FOG可用于空间飞行器稳定、摄影/测绘、姿态测量控制、运动补偿、EO/FLIR稳定、导航及飞控等，FOG组件还是航空火力控制系统的重要组成部分，可用于武装直升机等武器系统瞄准线和射击线的稳

定, 保证武器在运动中进行搜索、瞄准、跟踪和射击。

美国的中精度( $0.1 \sim 10^\circ/h$ ) FOG已用于飞机飞行姿态的控制。其中LN210型FOG-IMU已用于Comanche直升机RAH-66、F-14、MH-53、运输机CH-46等。Honeywell公司的开环全保偏FOG已用于民用航空, 其中波音777的惯导系统由6个精度为 $0.01^\circ/h$ 的环行激光陀螺和4个精度为 $0.5^\circ/h$ 的闭环I-FOG组成。最高精度达 $0.00038^\circ/h$ 的I-FOG也正在用于波音777飞机、道尼尔飞机和Pomier328等地方航班。

此外, Northrop公司研制的F600型FOG-IMU已用于F/A-18C/D和E/F型飞机的精确长程先进目标指示前视红外系统(ATFLIR), 主要为JDAM和JSOW武器提供目标指示, 其光纤长度为600m, FOG精度优于 $0.1^\circ/h$ , 带宽 $>500\text{Hz}$ , 工作温度 $-40 \sim 70^\circ\text{C}$ 。F600型FOG-IMU大大提高了ATFLIR的视距、光束偏差、定点精度和MTBF等性能指标。

法国Photonics公司将高精度180型FOG-IMU用于机载同温层红外天体观测(SOFIA)系统。将一个口径2.5m的天文望远镜装在波音747飞机上, 在12505m的高空实现红外天体的高分辨率观测, 波段范围为 $0.3 \sim 1.6\text{mm}$ 。

日本三菱、日立电缆等公司主要将FOG用于农用飞机姿态控制, 可进行播种、喷洒农药、高架电缆等。FOG动态范围 $\pm 60^\circ/s$ , 漂移率 $<1.5^\circ/\sqrt{h}$ , 标度因子误差 $<2\%$ , 系统运行温度 $-20 \sim 70^\circ\text{C}$ , 闭环I-FOG惯性测量装置精度等级为 $0.02^\circ/h$ 。

德国SFIM公司生产的FOG-pl-A/AI型低精度FOG还用于直升机等平台。LITEF公司研制的 $\mu$ FOGS36型FOG也用于旋风式战斗机与电子战飞机的GPS惯性导航系统, 还可在没有先进惯性导航系统的教练机平视显示器上获得速度矢量。

### 3) 火箭

在火箭发射场上, FOG可用于火箭升空发射跟踪和测定。日本JAE在世界上首次将I-FOG用于TR-1A火箭的姿态控制系统, 并进行了微

重力实验。三菱公司生产的几种型号FOG都已用于发射运载器, 其开环FOG已用于S-520-11宇宙实验火箭, 闭环FOG-INS系统已用于M-3SII-7号火箭和M-V火箭, 并正在用于奔月运载火箭。

美国史密斯公司也将第一个适于飞行的FOG-IMU于轻便外气层火箭飞行控制系统。

### 4) 卫星

姿态控制系统是卫星的重要组成部分, 卫星运行时要求卫星姿态在空间保持高精度定向, 姿控模块保证卫星入轨初始姿态捕获和工作时三轴稳定的对地指向, 并保证系统的可靠性和安全性。将FOG与GPS作为星上定姿系统, FOG不仅能使三轴姿态的动态过程测量精度不受姿态传感器带宽的限制, 而且小体积、低功耗的FOG可提高卫星的有效载荷。所以, 目前使用FOG进行卫星姿态控制将是一种趋势。高精度惯导系统FOG的零偏误差为 $0.001^\circ/h \sim 0.01^\circ/h$ , 标度因子误差为 $1\text{ppm} \sim 5\text{ppm}$ 。

美国的LN210型FOG-IMU已用于Clemintine、DeepspaceI、TSX5、MightysatII、Coriolis、Muscs-C等卫星。法国THP、HP、MP三个系列的FOG均已用于通讯和观察卫星, 地球观测卫星Pleiades及巴西Micro卫星(FBM)均采用了THP系列。地球同步卫星和观察宇宙微波背景的科学实验卫星采用 $0.1^\circ/h$ 和 $0.01^\circ/h$ 精度的FOG。此外, 日本MUSES-B卫星上应用了具有 $0.05^\circ/h$ 偏差稳定性的闭环I-FOG, 俄罗斯也将VG951和VG910两种型号FOG应用于捷联式惯性/卫星组合导航与定位系统和转台式陀螺仪水平罗经。

我国上海技物所在小卫星中使用了三轴FOG-MU, 采用I-FOG作为高精度速率积分陀螺, 可进行速率和卫星姿态测量。

## 在航海的应用

FOG已用于商用和军用船舶及船用设备。日本Tokimec公司已将有 $0.0035^\circ/h$ 偏差稳定性和 $10^{-5}$ 刻度误差的闭环I-FOG罗盘用于船舶。美

国KVH公司的DSP-300FOG已用于海上雷达和导弹防御系统的稳定系统。

此外，FOG是水下唯一有效的导航技术，可用于潜艇的定位、定向和导航。法国和英国已分别将FOG用于舰艇PIVAIR潜望镜和CM010光电桅杆，进行瞄准线的稳定。

## 在陆地的应用

### 1) 车载

FOG在车辆中主要是用于自动导航、姿态控制和车辆控制。典型的航位推算系统是由FOG和里程计组成的一种自主式导航系统，采用GPS与航位推算系统相结合的办法可弥补GPS失去卫星定位信号而产生的数据空缺，完全依靠车载设备自主完成导航任务。

分辨率约 $0.1^{\circ}/s$ 、动态范围 $\pm 60^{\circ}/s$ 、漂移率 $< 2^{\circ}/\sqrt{h}$ 、偏置稳定度 $< 0.1^{\circ}/s$ 、标度因子误差 $< 1\%$ 、系统运行温度 $-20\sim 70^{\circ}C$ 的FOG已广泛进入日本汽车市场，除用于出租车、警车和高级凌志轿车的导航外，还将FOG应用于叉车、起重机、矿山翻斗车、无人驾驶垃圾车、自动导引拖拉机、自动除草车等自主式车辆。

德国将FOG组合导航系统用于军用侦察车，以提供位置、航向和姿态信息。我国东南大学也将FOG用于消防车和救护车的综合导航系统。

FOG还可用于WJRShinkansen(子弹火车)中的火车定位检测系统。我国北方交大研制的列车导航消偏I-FOG，可对高速列车实时追踪和实现行车指挥智能化。其检测精度优于 $2.0\%$ ，已在北京-太原的铁路上对列车定位及运行参数进行测试，可准确、全方位的反映列车运行平面轨迹与姿态，给出行驶列车的速度、加速度、方位角、侧滚角、俯仰角等信息，还可进行列车自动导航和无人驾驶，从而增加行车安全、缩短行车间隔时间，提高车速和运输能力，对实现铁路现代化和促进国家经济发展有重大意义。

此外，FOG还可用于坦克自行火炮与转塔、装甲突击车的定位、定向和导航。美国

KVH公司将E-Core4000型FOG用于战车，其中单轴E-Core4000型FOG用于主战坦克转塔的升级，双轴E-Core型FOG集成到新装甲车的转塔上，该FOG稳定性和可靠性极高，平均无故障运行时间为615万小时。

### 2) 工程

FOG在许多精度要求不高的定位、导航和姿态控制民用场合有很大的市场。在地下工程维护中，FOG可作为寻找损坏的电力线、管道和通信光(电)缆位置的定位工具和抢救工具。此外，FOG还可用于大地测量、矿物勘察、石油勘察、石油钻井导向、隧道施工定位与路径勘测、地震探测等工程。

道格拉斯公司将FOG用于钻井设备，FOG能承受很宽的湿度变化和强度冲击。日立电缆公司将开环I-FOG用于隧道掘进机的指北针，有 $0.02^{\circ}/\sqrt{h}$ 的随机移动。

我国将FOG用于大坝倾斜监测，通过开环单模FOG的转动角和线速度值，可获得坝体的形变状态信息。

除以上应用外，FOG在工业上也具有极大的应用潜力，可用于建筑机械、农业机械、草坪修整机、足球场割草机、机器人(清洁机器人、工业机器人)等，还可用于环保、工业控制、武器制导等。

如今全球每年生产的FOG单元已达到十万个左右，FOG产量不断上升的同时其价格也不断下降。随着光纤技术、工艺设备、材料科学和集成光路技术的不断发展，FOG性能将得以整体提高，并推动产业化进程，FOG的应用范围将更加广泛，必将成为陀螺仪市场的主导产品。CEM

