

# 光纤陀螺技术的军事应用及前景

于明飞

(中国人民解放军 93313 部队, 吉林 长春 130111)

**摘要:**介绍了光纤陀螺的原理及种类, 通过将光纤陀螺与其它陀螺进行比较, 总结出了光纤陀螺的优点。最后, 综述了光纤陀螺在武器装备上的应用, 并对光纤陀螺的应用前景作了预测。

**关键词:** 光纤陀螺; 制导; 军用

**中图分类号:** V241.5; E919 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-6061(2007)03-0001-03

## The Application and Prospect of Fiber-optic Gyroscope (FOG) Technology in Military

YU Ming-fei

(Unit 93313 of the PLA, Changchun 130111, China)

**Abstract:** This paper introduces the principle and types of fiber-optic gyroscope (FOG), compared fiber-optic gyroscope with other gyroscopes, and summarized the merits of fiber-optic gyroscope. Finally, the purpose of fiber-optic gyroscope in the weaponry is summarized, and the application prospect of fiber-optic gyroscope is forecasted.

**Key words:** fiber-optic gyroscope (FOG); guidance; military application

## 0 前言

光纤陀螺是一种轻便的由固体元件组成的全固态器件, 作为新一代重要惯性器件, 它具有其它种类陀螺所不具有的独特优点。在航天、航空、航海和兵器等领域以及工业领域中已具有相当强的竞争力, 在战术级军用及民用场合中目前已得到广泛应用, 如制导鱼雷、光纤制导导弹、地下探测、地面车辆定位定向、机载惯导系统等。

## 1 光纤陀螺的原理及分类

光纤陀螺的分类方式有多种, 若按其原理来划分, 可分为: 干涉型光纤陀螺 (IFOG)、谐振型光纤陀螺 (RFOG) 及布里渊型光纤陀螺 (BFOG)。

### 1.1 干涉型光纤陀螺 (IFOG)

IFOG 是第一代光纤陀螺, 其原理如图 1 所示。它是利用干涉测量技术把相位调制光转变为振幅调制光; 把光相位的直接测量转化成光强度测量, 这样就能比较简单地测出 Sagnac 相位变化。IFOG 的光纤元器件一般都用单模光纤或保偏光纤制作。用保偏光纤制作

光纤线圈可得到高性能光纤陀螺, 但是若要提高它的灵敏度就必须增加光纤的长度, 一般为数百米到数千米, 光纤陀螺的体积相应较大。

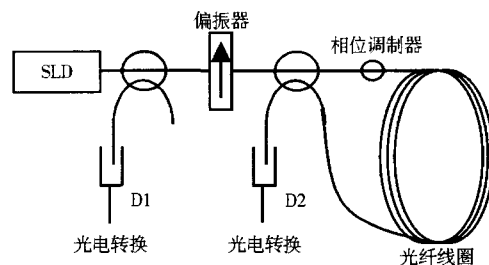


图 1 干涉型光纤陀螺原理示意图

IFOG 又分为开环 IFOG 和闭环 IFOG, 开环 IFOG 主要用作角速度传感器。这种光纤陀螺结构很简单, 价格便宜, 但是线性度差 ( $10^{-3}$  量级), 动态范围小 ( $10^{-6}$  量级)。闭环 IFOG 是一种较精密且复杂的光纤陀螺, 主要应用于中等精度的惯导系统。IFOG 是光纤陀螺中研究最早的, 现在其实验室精度已达  $10^{-4} (^{\circ})/h$ , 在国内外的军用和民用方面得到了广泛的应用, 目前世界各国开发的实用产品大部分都是干涉型光纤陀螺。

### 1.2 谐振型光纤陀螺 (RFOG)

RFOG 是第二代光纤陀螺, 原理如图 2 所示。从激光器发出的光通过光纤耦合器 C4 和 C1 分成两路进入

收稿日期: 2006-11-30

作者简介: 于明飞 (1979-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 精密测控技术及仪器。

光纤谐振器,在其中形成传播方向相反的两路谐振光。谐振器静止时,这两束光的谐振频率相等。但当谐振器以角速度 $\Omega$ 旋转时,它们的谐振频率不再相等,两束谐振光的谐振频率差为 $\Delta f = \frac{4S}{\lambda L} \Omega$  ( $L$ 为谐振器的光纤长度, $S$ 为谐振器所包围的面积, $\lambda$ 为光波长)。因此,通过测量RFOG中两谐振光束的谐振频率差 $\Delta f$ ,可以确定旋转角速度 $\Omega$ 。

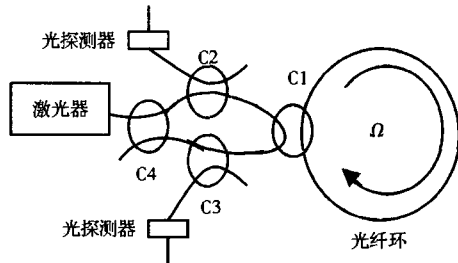


图2 谐振型光纤陀螺原理图

RFOG的研究较晚,主要用来解决光源的波长稳定性,对光源的要求十分苛刻,在技术上还不太成熟,但是很多研究人员认为它能提供最大潜在的精度。国内外很多科研机构都在研究此类陀螺,目前已经有少数产品在实际中得到应用,处于由实验室向实用化过渡阶段。与激光陀螺相比,由于RFOG的光源是在谐振器外,因此无闭锁效应;与IFOG相比,具有光源稳定度高、所用光纤短(10 m左右)、受环境影响小、成本低的优势。

### 1.3 布里渊型光纤陀螺(BFOG)

BFOG是第三代光纤陀螺,原理如图3所示。此光纤陀螺是用光纤线圈代替了传统的RLG的激光谐振腔。它与RLG在原理上都是利用谐振腔中沿相反方向传播的谐振光频差与旋转角速度成比例来测量旋转体的角速度。它是用泵浦激光器耦合进入光纤线圈中,并产生增幅的布里渊散射,在光纤线圈中产生光学谐振。它用光纤线圈代替了环形激光腔,不需要高反射率的反射镜和高真空封装,因此结构简化、体积减小,而且生产成本降低,使陀螺全固体化。其优势在于具有更大的动态范围。目前尚处于实验室研究阶段,暂未有实用化的产品。

光纤陀螺和环形激光陀螺原理相似,它采用的是光纤环,具有普通的机械陀螺及激光陀螺所不具有的独特优点:结构简单、耐振动、工作寿命长、响应速度快、精度高、动态范围大、抗电磁干扰、无加速度引起的漂移且重量轻、成本低、可靠性优于机械陀螺和激光陀螺等,因此,光纤陀螺具有更多的优势<sup>[1]</sup>。

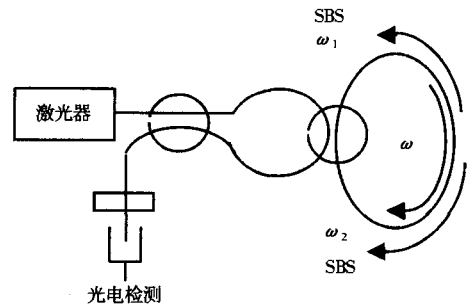


图3 布里渊型光纤陀螺

## 2 光纤陀螺在武器装备系统中的应用

近年来在科索沃、阿富汗以及伊拉克战争中所使用的精确制导武器,相比于传统武器弹药有更高的打击精度,特别是精确制导炸弹所取得的辉煌战果,使世界各国普遍认识到制导武器在精确打击中的重要性。

由于光纤陀螺本身在测量旋转和加速度变量方面的优越性,采用光纤陀螺构成的陀螺组件既可以测量导弹运动过程中的俯仰角、偏航角和横滚角,引导导弹飞向目标,也可以测量飞行器的方位角速度和俯仰角速度,提供制导武器所需的初始资料。因此,光纤陀螺在制导武器以及与制导武器有密切关系的机载惯性导航系统中获得了广泛的应用。

德国利特夫有限股份公司通过引入全球定位系统(GPS),以及从大气数据计算机获取真实空速,把最初用来替代旋转式姿态与航向传感器的光纤陀螺系统用在了导航领域,产品包括导弹的光纤陀螺惯性测量单元和旋风式战斗机与电子战飞机的GPS惯性导航系统。系统还可以将速度矢量提供给平视显示器,用在没有先进惯性导航系统的军用教练机上。美国在20世纪80年代中期研制的中精度(0.1~10°/h)战术光纤陀螺,目前已装备飞机和战术导弹飞行姿态的控制系统中;进入20世纪90年代,美国海军研制所已经研制出一种全光纤陀螺,其漂移率为0.005°/h,惯导装置的短期水平角速度分辨力已达到 $5.3 \times 10^{-7}$  rad/s,成为20世纪90年代中期水平最高的光纤陀螺,而中精度的干涉型光纤陀螺可应用于近程导弹,已经投入批量生产,在制导武器领域进入了使用阶段<sup>[2]</sup>。例如,LN-200光纤陀螺惯性测量组件是美国Litton公司研制的惯性制导设备,美国的AIM-120B/C型中距空空导弹,AGM-142空地导弹都采用该惯性测量组件。LN-200采用的光纤陀螺,漂移重复性 $1 \sim 10^\circ/\text{h}$ ,角随机游走 $0.01 \sim 0.04^\circ/\sqrt{\text{h}}$ ,测量范围 $1000^\circ/\text{s}$ 。它与微硅加速度计一起构成的整个惯性测量组合的尺寸为 $\Phi 89 \times 85$ ,重700 g,稳态功耗仅10 W。近几年,一种用于惯导级的漂

移率为  $0.0009 \sim 0.0017(^{\circ})/h$  的干涉型光纤陀螺也已经研制成功,可以应用于战略导弹等制导武器系统中。继美国之后,英、法、德、日以及俄罗斯等国,主要致力于发展漂移率为  $0.1(^{\circ})/h$  以及  $10(^{\circ})/h$  以上的中精度和低精度陀螺,以装备海军和空军的制导武器系统。如英国航空系统设备公司已推出漂移率为  $10^{-4} (^{\circ})/h$  的小型光纤陀螺,并已经装备海军和空军。而日本和法国于 20 世纪 80 年代末分别研制出精度为  $0.1 \sim 10(^{\circ})/h$  的小型光纤陀螺,目前也已装备于导弹制导系统中。俄罗斯的 R-77<sub>3</sub> 被认为是与美国的 AIM-120 并列的第四代中距空导导弹,尽管 R-77<sub>3</sub> 在机动性和射程上占有优势,但由于它采用传统的机械陀螺而不是光纤陀螺,使得其作战准备时间相对较长,载机在空中作战时容易陷入被动地位。目前,俄罗斯已将新近开发的光纤陀螺技术用于其最新主动雷达导引头的研制,以加快战术导弹的启动速度。

### 3 光纤陀螺仪的应用前景

目前美、日、德等国已有 30 多个实验室专用于研究光纤陀螺技术,第一代光纤陀螺仪早已投入生产和使用,少数产品已经过实战演习和装备。一个完整的导航和制导系统通常要采用 3 台光纤陀螺仪、3 个加速度计及信号处理器和封装元件等。表 1 列出了光纤陀螺仪在各类系统中的性能、主要用途及从 1990 年至 2004 年用于各类系统时所占的比例<sup>[3]</sup>。

表 1 光纤陀螺仪的主要性能、用途及所占比例

主要用途	漂移率/ ( $^{\circ}$ )·h <sup>-1</sup>	用于各类系统所占比例/%		
		1990~ 1994 年	1995~ 1999 年	2000~ 2004 年
短期导弹系统、战术导弹、小型舰艇及反潜武器	>10	84~64	60~41	38~20
低性能:近/中程导弹,一般飞机	1~10	13~20	25~46	50~68
中性能:近程导弹、军用飞机	0.1~1	3~11	15~40	45~75
高性能:大型舰艇、潜艇,战略导弹、超高速隐形飞机、卫星、宇宙飞船	<0.1	0~5	10~30	40~85

从表 1 看出,用于短期导航和制导的光纤陀螺仪从 1991 年起在逐渐减少,到 2004 年预计仅占 20%;而用于中程和近程制导的光纤陀螺仪从 1991 年起在逐渐增加,到 2004 年预计分别增加到 68% 和 75%;特别用于高性能的战略导弹制导的光纤陀螺仪从 1991 年起实现了

零的突破,到 2004 年预计达到 85%。随着光纤技术和光电电子技术的进一步发展和应用,预计光纤陀螺仪的主要技术指标将达到高性能惯导系统的要求,逐步取代惯性陀螺仪。据美军专家预测,到 21 世纪初,不仅全部飞机、舰艇、潜艇和导弹均将装备光纤陀螺仪以用于导航和制导,而且卫星和宇宙飞船也将装备光纤陀螺仪用于与地形跟踪匹配和导向,火箭发射场上用于火箭升空发射跟踪和测定。

21 世纪的战争将是高技术条件下的战争,在充满电子干扰的战场上,只有惯性技术具有高隐蔽性、强抗干扰性和信息连续性等可贵的军事特点,从而使装备惯导系统的作战飞机或武器既能保持自身的生存,又有参与攻击的能力,因此各国对惯性导航和制导武器的需求较为迫切。由于光纤陀螺仪应用在军事装备上可以获得良好的军事效益和经济效益,许多国家已把光纤陀螺技术列为国防关键技术予以大力发展,光纤陀螺仪也成为 21 世纪初最重要的惯性器件之一。

从长期来看,随着技术的不断进步和完善,光纤陀螺仪将在精度、类型和大小等方面覆盖武器装备的各个应用领域,与挠性陀螺标准惯性测量组件甚至是激光陀螺标准组件在外形、功能和适用性三方面都是可以互换的光纤陀螺惯性测量组件必将出现。当前除了美国和北约一些国家的空军中的绝大部分主战飞机装备了以激光陀螺为核心的第二代标准惯导仪外,其它大多数国家的航空武器系统中用于惯性测量的陀螺基本上都是传统的机电陀螺,即使新型战机使用的也只是挠性陀螺。从抗过载能力考虑,光纤陀螺要大大优于挠性陀螺,无论从成本、快速性,还是抗过载能力考虑,光纤陀螺仪应该是发展及应用的方向,届时极有可能出现一个用光纤陀螺惯性测量单元来改装现役以及应用到新式武器装备的局面<sup>[4]</sup>。

### 4 结束语

自美国 1976 年提出第一个光纤陀螺方案和 1980 年研制出第一台光纤陀螺仪以来,经历了 20 多年的发展和研究,目前的技术已达到了惊人的水平,以美、日、法为主体的光纤陀螺研究工作已取得了很大进展,中低精度光纤陀螺已产品化,并在众多领域得到应用,高精度的光纤陀螺的开发和研制也正走向成熟,一个个关键技术均被攻下,灵敏度提高了 5 个数量级,主要技术指标与高性能的惯性导航和制导系统基本一致。我国也相继开展了这方面的研究工作,且取得了一定的成果,有些光纤陀螺仪的技术水平已达到或超过了国

(下转第 30 页)

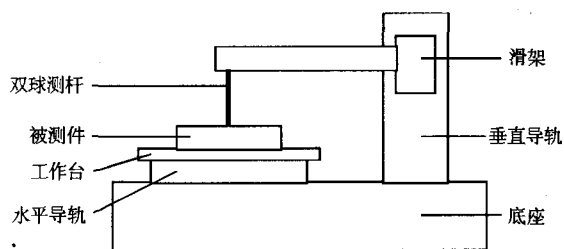


图3 仪器的结构示意图

## 4.2 测量方法

将双球量杆伸入内螺纹中(如图4所示),测量时在垂直和水平两个方向调整仪器,使量杆测球在径向剖面内与螺纹牙侧接触(如图4中I位置),然后移动仪器使量杆测球与螺纹另一边牙侧接触(如图4中II位置),仪器移动的距离为 $M$ ,则被测内螺纹的中径 $D_2$ 可以按下式计算。

$$D_2 = M + l_0 + \frac{d_k}{\sin \frac{\alpha}{2}} - \frac{1}{2} P \cot \frac{\alpha}{2}$$

式中: $l_0$ 为双球量杆的双球中心距; $d_k$ 为双球量杆双球的直径; $P$ 为被测螺纹螺距; $\alpha$ 为被测螺纹的牙型角。

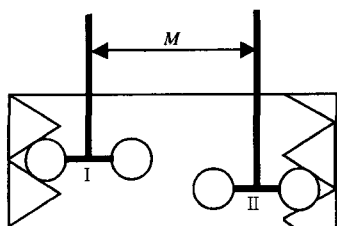


图4 测量示意图

## 4.3 测量中应注意的几个问题

### 4.3.1 双球量杆的设计和校准

双球量杆的参数直接对测量结果产生影响,它也是影响测量精度的主要因素。所以应注意按照国标螺纹螺距系列,设计或选择最佳球径系列;应对球径以及双球中心距进行校准,球径的测量不确定度应达到 $0.4 \mu\text{m}$ ,双球中心距测量不确定度应达到 $0.6 \mu\text{m}$ 。

### 4.3.2 测量前的调整

(上接第3页)

外同类产品的水平。如果合理地应用集成电路、集成光路等技术,进一步减小体积、重量和降低成本,简化组装工艺,提高可靠性、稳定性和耐用性,光纤陀螺还可广泛用于强振动和高冲击等民用运载车辆和钻井平台。可以预见,不久的将来,光纤陀螺在各国武器装备上必将得到大量应用,在提高武器装备的战斗力的方面,光纤陀螺将发挥巨大作用。

应保证仪器沿两个方向移动(水平导轨和垂直导轨),即能够进行二维空间尺寸的测量,同时工作台应该能够在水平面前后移动及绕水平轴旋转,仪器在使用前应具备良好的状态以便于测量时作必要的调整,保证测量值与定义相一致。

### 4.3.3 螺纹标准的应用

测量螺纹量规不仅要给出测量数据,而且要给出合格性的判别;螺纹种类繁多,同时国内外标准众多,同样的内容表述可能也有不一致的地方。所以在做合格性判别的时候一定要注意该量规的使用标准。

### 4.4 技术指标

技术指标应根据仪器以及其它条件获得,因为三针法测量螺纹中径的技术已经很成熟并且关于测量不确定度分析的参考资料很多,所以本文不再作分析,只给出在一般应用时的参考指标。

仪器测量范围:200 mm(水平导轨) $\times$ 100 mm(垂直导轨)

螺纹测量不确定度: $U = 2.5 \mu\text{m} (k=2)$

## 5 小结

综合测量方法主要适用于大批量的生产以及单项测量无法实现的螺纹的测量。而单项参数测量方法,主要适合于对单件或小批量的量规;螺纹生产厂家的质量控制和工艺分析;特殊尺寸的螺纹量规的测量。实际工作中由于场合的不同,可能选择的测量手段也不同,例如一件量规,在螺纹生产厂家属于同一规格大批量中的一件,适合采用综合测量,但是对使用单位,即成为众多不同规格的量规中的一件,适合采用单项参数测量。目前的螺纹测量还存在一定的问题,有必要进一步开展螺纹的单项参数测量与综合测量关系的研究。

### 参考资料

- [1]徐孝恩,等.《螺纹测量》[M].北京:机械工业出版社,1986.
- [2]余志新,等.《螺纹量规检验手册》[M].北京:中国计量出版社,1988.

### 参考文献

- [1]杨亭鹏,刘星桥,陈家斌.光纤陀螺仪(FOG)技术及发展应用[J].火力与指挥控制,2004,29(2):76-79.
- [2]孙丽,王德钊.光纤陀螺的最新发展[J].航天控制,2003,(3):75-80.
- [3]Yan Fengping, Yao Yi, Xu Hongjie. Investigation of the Depolarized Single-Mode Fiber Optic Gyroscope [A]. SPIE-20th Anniversary Conference[C]. 1996,402-405.
- [4]金杰,王玉琴.光纤陀螺研究综述[J].光纤与电缆及其应用技术,2003,(6):4-7.