

## 车载应用的光纤陀螺

**摘要** 转动的测量是飞行器导航和定位的一个基本因素。干涉式光纤陀螺(IFOG)对于许多类似的应用正逐渐成为可行。它具有高可靠性,耐冲击振动。基于 Sagnac 效应,IFOG 没有移动的部分,它由一个光纤敏感线圈、半导体光源、光探测器、偏振器、一个或多个定向耦合器以及信号处理电路等组成。对于地面导航而言,只有开环信号处理方法是实用的,它是由简单的电子设备和全光纤光学回路结构组成的。不久以前,光学回路还需要两个定向耦合器(最小结构),但现在生产只使用一个定向耦合器(简化的最小结构)的光学回路也是可以实现的,这样将进一步简化结构、节省费用。目前,这两种开环陀螺都在生产投入中。本文给出了温度下的偏置和标度因数,以及速度线性度等性能参数。当前使用中的低价位的光纤陀螺主要是路上地面导航系统和公交车站自动宣告系统。

### 1 引言

为了描述空中运动物体的位置,角度旋转是需要精确测量的参数之一。对于依靠估算导航或精确角度定向的汽车应用来说,尤其如此。习惯上,一个旋转物体的角动量被用于决定角速率或位移。这些仪表容易受震动的冲击损坏,还表现出轴间交叉敏感,对较低成本存在可靠性问题。IFOG 是一种真正的单转动轴速率传感器,它对轴间转动、冲击振动的不敏感,没有可移动部件具有较高可靠性。

1913年发现的 Sagnac 效应的第一次实际应用是在几十年前环形激光陀螺(RLG)中,现在则广泛应用在商业飞行器惯性导航中。但是,由于这种仪表要求高真空度和精密镜面技术,因此成本较高,这些成为限制它在宇航中应用的一个因素。Sagnac 指出,当这个回路绕它的轴旋转时,两个相对传播的波穿过回路干涉仪,获得一个相位差。Sagnac 回路干涉仪是由位于自由空间介质中的大型棱镜组成的。1976年 Valihe 和 Shorthill 证实,可以通过使用多匝光纤线圈来大大提高 Sagnac 干涉仪的灵敏度,在 1981年研制成功了第一个全光纤陀螺。

在 Sagnac 干涉仪光学路径中采用纤维介质虽然不能直接改变 Sagnac 效应,但它确实产生了乱真信号。这些不希望的信号限制了灵敏度并且减小了

旋转测量的稳定性。现代 IFOG 使用了不同的技术,包括光学互异技术,目的是为了这些误差源对陀螺性能的影响减到最小。

光纤陀螺的性能主要由以下几个因素决定:偏置稳定性、标度因数线性度和稳定性及被称为角随机游走(ARW)的随机噪声分量。在 IFOG 技术领域中,偏差稳定性的范围是从 1 度/秒到 0.001 度/小时;标度因数线性度从 10000ppm 到 1ppm;ARW 从  $200(\text{度/小时})/\sqrt{\text{Hz}}$  到  $0.01(\text{度/小时})/\sqrt{\text{Hz}}$ 。光纤陀螺的价格是各不相同的,对于满足汽车使用性能的 IFOG,它的价格一般低于 1000 美元。

### 2 光纤陀螺概念

干涉光纤陀螺可以通过“闭环”或“开环”构成,但是由于前者的复杂性,限制了它在航空电子和惯性导航中的应用。如图 1 所示是最小结构(MC)开环光线陀螺,它由光纤线圈、两个定向耦合器、一个偏振器、低相干半导体激光光源和探测器组成。由纤维线圈的一端的一小部分缠绕着压电介质(PZT)器件作为非互异相位调制这个设备。激光器发出的光通过第一个定向耦合器、偏振器、第二个定向耦合器,分成了强度相同的两个信号。然后反向通过线圈,光在耦合器重新结合,穿过偏振器其中一半光经耦合器引导进入光探测器。值得注意的是,这个结

构允许测量两个信号之间  $10^6$  分之几的相位差,这是由于互异作用原理。从激光器发出的光通过偏振器后被限制成单一偏振状态,定向耦合器和线圈是由特殊的保偏光纤构成的,以确保单模路径。两个方向传播的光都经过了相同的路径。除了旋转以外几乎大部分环境影响在每束光上都有同样的影响,而这些环境影响已经被消除了。

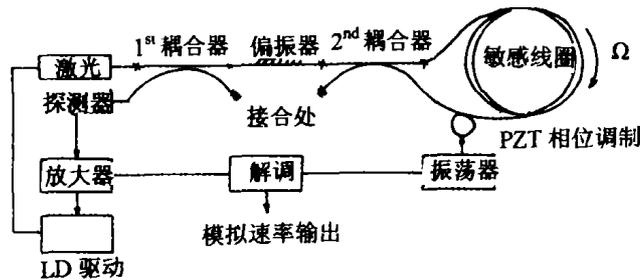


图 1

在与线圈相连的耦合器上,两个光波合并进入一个光学干涉仪中。从线圈返回到偏振器的光波强度是一个上升的余弦函数,当没有旋转时出现最大值,当光波相位差是  $\pm \pi$  (半个波长) 时出现最小值。可以看出这一效应与光学路径形状和传播介质无关。陀螺只敏感于绕垂直于线圈轴的旋转,由于是余弦函数,对于小的角位移输入量,干涉仪的输出变化量也很小,在两个旋转方向上振幅的衰减量是相同时,也不可能确定旋转方向,可见给光学路径提供动态的相位偏置是很有必要的。这样不仅可以解决这些问题而且可以使解调频率很好地远离 DC,消除了与低级放大器补偿有关的偏置漂移。

使用正弦电压调整 PZT 可以在两束光之间调整频率施加一个微分光学相移。没有线圈旋转的干涉仪输出表示出一个周期的行为,它的频率谱包含调频的贝塞尔(Bessel)谐波。由于相位调制是对称的,只有偶次的谐波存在。谐波振幅的比率决定于相位调制幅度。当线圈旋转的时候调制发生在干涉仪响应的移动位置。调制是不平衡的,基本的和奇数的谐波也将会出现。基本的和奇数谐波的振幅正比于角速度的正弦,而偶数的谐波具有的余弦关系,最简单的解调方案是在基频同步探测信号。

开环 IFOG 在一段时期由于输入和输出特性之间的正弦关系而受到批评。然而由于这是一个大家熟知的解析函数,可以通过后面的信号处理或工作在较低的 Sagnac 相位来处理它。也有解调方案利用高阶谐波信号达到同样的目的。

### 3 简化的最小结构(RMC)IFOG

在最小结构中,第一个耦合器不是光学互换 Sagnac 干涉仪中的一部分。它的作用就是同时使引导一部分反光进入探测器没有进入干涉仪的激光信号的振幅减小到最小。“简化的最小结构”(RMC)IFOG 的提出,是为了减小光学结构的复杂性和成本,而保持互异原理(如图 2 所示)。

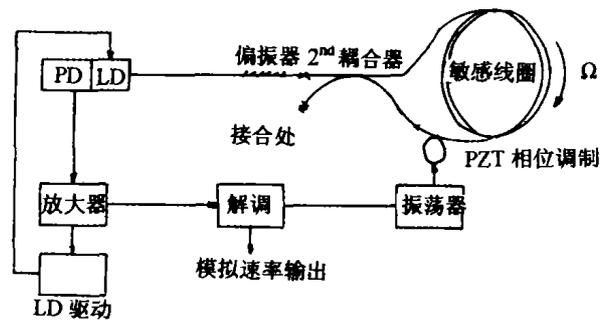


图 2

第一个耦合器被去除,并且干涉仪调制光输出通过安放在激光二极管后面的光探测器来测量。光在被光探测器接收到之前先穿过了激光器的腔。

许多低成本的激光二极管组件都有一个后面光探测器,生产者已经将它与激光器后面对准。购买单独探测器的成本,以及将第一个耦合器输出光纤与单独的探测器对准的硬件和劳力,在 RMC 陀螺设计中的都被删除了。当输入光纤相对于光源对准时,输出就自动和探测器对准了。在新的设计中也减少了 MC 设计中的六个光纤-光纤熔接中的两个。

### 4 性能参数

Andrew 公司正在生产的 IFOG 就是基于这些技术。陀螺工作波长 820 纳米,包括 75 米长的椭圆保偏光纤线圈。短线圈长度导致工作在正弦响应曲线的线性部分,而不需要进一步的线性化。这种陀螺的主要性能指标如下:

输入旋转速率	$\pm$ 稳定性 100 度/秒
标度因数	$\pm 1.5\%$ , 全温度范围
标度因数线性度	0.5% rms
偏置稳定性	$\pm 0.005$ 度/秒, 恒温
偏置可重复性	0.02 度/秒, 恒温
偏置差值	0.2 度/秒(高点到高点), 全温度范围
随机游走	5 或 20(度/秒)/ $\sqrt{\text{Hz}}$ (相当于 1Hz 带宽的旋转率)
工作温度	-40 - - - +70 摄氏度

图3显示了在恒温下这种陀螺相对于时间的偏置漂移(不稳定性),它比角随机游走要小。由于跟踪探测器的DC放大器的偏差,偏置随温度缓慢变化(如图4所示),但是这个影响是重复的,而且通过内部温度传感器的帮助可以被校准。

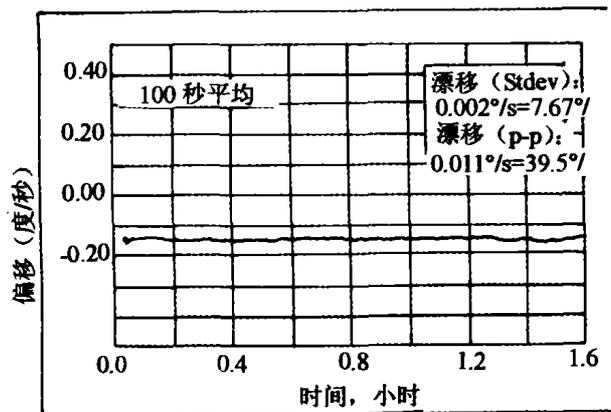


图3

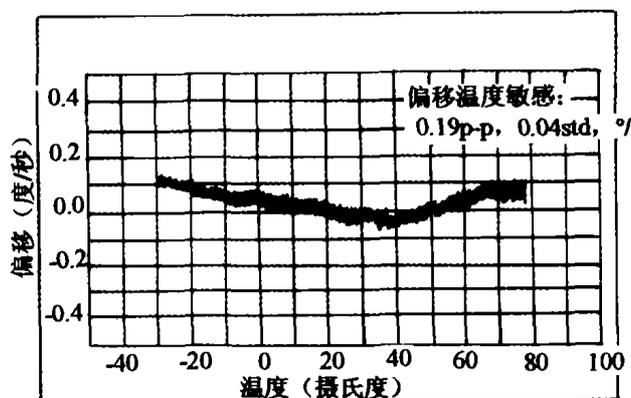


图4

图5显示了输入-输出速率关系,图中显示的很好的线性度可以通过简单的调制技术来实现。本产品对模拟或数字输出格式通用。

## 5 总结

自从 Sagnac 效应在光纤陀螺中的应用第一次被提出后的 20 年里,这项技术已经得到了不断的发展,现在已经有许多种类的陀螺都是基于这一原理。较低性能和低价位的陀螺尤其适用于商业应用。这

些产品的大批量生产有望进一步降低成本。

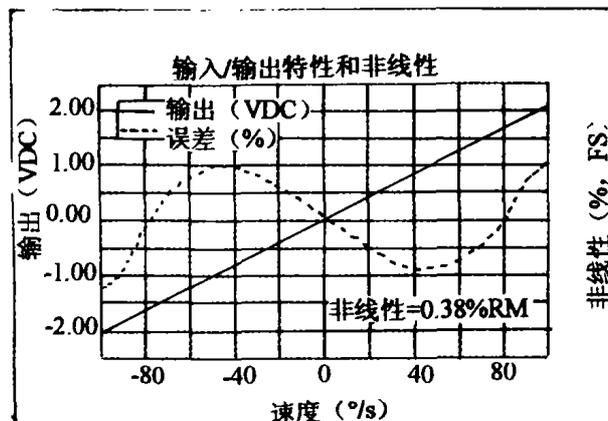


图5

## 参考文献

- [1] Sagnac, G., "L'ether lumineux demontre par l'effet du vent relatif d'ether dans un interferometre en rotation uniforme", C. R. Acad. Sci. Vol.95 pp.708 - 719, 1913.
- [2] Vali, V. and Shorthill, R. W., "Fiber ring interferometer", Appl. Opt., Vol. 15. pp.1099 - 1100, 1976.
- [3] R. A. Bergh, H. C. Lefevre, and H. J. Shaw, "All-single-mode-fiber-optic gyroscope with long term stability," Opt. Lett., vol. 6, pp.502 - 504, 1981.
- [4] R. A. Bergh, H. C. Lefevre, and H. J. Shaw, "An Overview of Fiber-Optic Gyroscopes," IEEE Jour, Light, Tech., vol. LT-2(2), pp.91 - 107, 1984.
- [5] IEEE Std. 647 - 1995, "Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single Axis Laser Gyros" IEEE Standards, Piscataway, NJ, USA, 1995.
- [6] Ulrich R. "Fiber-Optic Rotation Sensing with Low Drift", Opt. Lett., vol 5, pp. 173 - 175, 1980.
- [7] Lefevre, H., "The Fiber-Optic Gyroscope", Artech House, Boston, 1993.
- [8] H. Arditty, H. Lefevre, "Monomode Optical Fiber Ring Interferometer Device with Semiconductor Doide as Light Energy Emission Reception/Amplification Means," U. S. Patent, number 484240.