

# 开环光纤陀螺故障机理探讨

薛晓蕾, 黄今纯, 范超

(陕西宝成航空仪表有限责任公司, 陕西 宝鸡 721000)

**摘要:**随着国内惯性技术的发展, 光纤陀螺目前已广泛应用于惯性导航领域, 开环光纤陀螺是光纤陀螺应用领域的-一个重要分支, 由于开环光纤陀螺实现方案简单, 成本相对较低, 同时启动时间短, 整体的体积和质量较小, 在某些领域具有不可替代的优势。本文简要地介绍了典型开环光纤陀螺的工作原理, 主要探讨了开环光纤陀螺常见的几种故障模式, 并进行简单的机理分析, 提出减少这些故障的改进措施, 一定程度上提高开环光纤陀螺的环境适应性及可靠性, 避免同类故障反复发生。

**关键词:**开环光纤陀螺; 故障模式; 机理分析

中图分类号: U666.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-7344(2021)08-0151-02

## 1 开环光纤陀螺简介

光纤陀螺是一种全固态角速率传感器, 按照信号调制、处理及控制的方式不同, 光纤陀螺从设计原理上可以分为开环和闭环两种方案。

图 1 所示的一种典型的开环陀螺工作原理示意图。如图所示, 光源发出一束光后, 经过光路传输到达耦合器 2, 分成两束进入光纤环完成干涉, 同时被 PZT 相位调制器调制, 然后再返回耦合器 1, 到达探测器。此时带有角速率信息的光信号被探测器转换为带有大量噪声的电信号, 经过前置放大电路及滤波电路处理, 最后由相敏检测电路完成检测及输出。

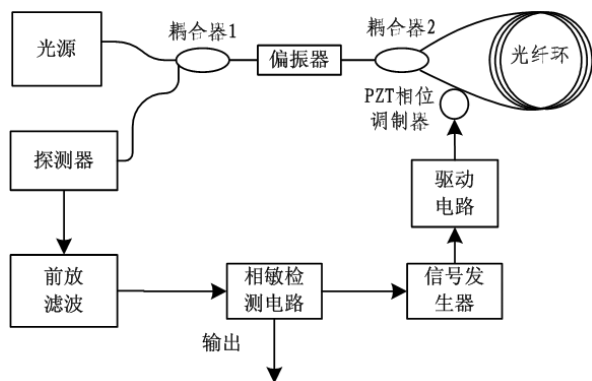


图 1 工作原理

载体旋转时的 Sagnac 相位差(即相移)为:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \cdot \Omega \quad (1)$$

式中:  $\lambda$ -真空中波长;  $D$ -线圈直径;  $L=N\pi D$ -光纤总长度;  $N$ -线圈匝数。这是光纤陀螺的基本原理公式, 只要测出顺、逆两束光的相位差, 就可以用式(1)得到相应的转动角速率。

需要注意的是图 1 中的探测器和 PZT 相位调制器, 这二者属于光电交联器件, 探测器主要将干涉后的光信号转换为电信号, 而 PZT 相位调制器则通过电路的控制实现对光信号相位的调制。

## 2 常见的几种故障模式

### 2.1 无陀螺效应类故障

一般情况下, 光纤陀螺在线性工作区间的输出(常见的有电压信号、电流信号及数字信号)与载体旋转的角速率成一定比例关系, 这一关系可以表示为:

$$F_{out} = K \times \omega + B_0$$

式中:  $K$ -光纤陀螺的刻度系数;  $\omega$ -载体旋转角速率;  $B_0$ -零偏, 即陀螺在静态下的输出。因此, 当载体旋转时, 陀螺输出有较为明显变化。而无陀螺效应故障则是陀螺输出为一定值, 不随着载体的旋转发生变化, 失去了陀螺感测角速率的功能。

无陀螺效应故障是开环陀螺经常会遇到的问题, 无陀螺效应故障可以分为四类:

#### 2.1.1 光路存在断点

如前文所述, 光路的主要功能完成光信号的传输及干涉, 当光路任何一个部分出现断点时, 都会导致光信号无法到达探测器, 也就无法实现 Sagnac 的干涉效应, 因此导致陀螺输出不正常, 对角速率不敏感。

常见的光路断点存在于前文提到的光路部分及 PZT 组件部分, 一般是由于制作上述光学器件时对光纤的有损伤, 产生微裂纹, 后期微裂纹在环境应力作用下逐渐增大, 最终导致光纤断裂。

#### 2.1.2 光源、探测器工作异常

光源是光路的起点, 探测器是光路的终点, 如果光源工作异常, 如光源不发光、对接耦合异常等, 则光路中没有光信号, 探测

器接收不到光信号,导致无陀螺效应的故障;同样地,若探测器工作异常,如探测器感光异常、耦合偏离等,导致光电转换模块出现异常,最后发生故障。

### 2.1.3 PZT 组件工作异常

为了保证光纤陀螺工作的灵敏度,开环陀螺使用 PZT 组件来调制光相位的光纤参数的变化。如图 2 所示,常常采用交变相位调制实现  $\pi/2$  的相位偏置,将余弦信号转换为正弦信号,这样陀螺在较小速率时极性出现正负,可以判断载体的旋转方向。

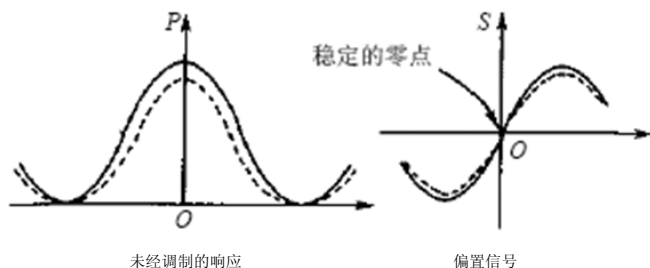


图 2  $\pi/2$  相位偏置

相位调制器常见的工作异常的原因包含压电陶瓷性能异常、压电陶瓷供电异常、压电陶瓷信号连接异常。以上三种故障模式均会导致相位调制器不能正常地将电路的正弦调制信号转化为对光信号相位的调制,导致没有陀螺效应。

### 2.1.4 电路故障

开环陀螺的电路采用的都是模拟器件,目前发展已非常成熟,可靠性较高,一般情况下发生故障的可能型性非常小。

如前文所述,电路主要完成转换后的信号的处理输出,还包括对光源光功率进行控制及对压电陶瓷输送调制信号。电路常见的故障模式包括光源光功率控制模块工作异常,使光源不能正常发光,光功率过大或过小均会使得光路工作异常,导致无陀螺效应故障;或是调制电路工作异常,正常相位调制由压电驱动电压控制,当故障发生时,组件的调制解调不能正常工作,因此没有陀螺效应。

## 2.2 零偏超差类故障

零偏是指陀螺在输入为零的情况下(即载体处于静止条件下)输出的平均值,是一个随机变化的量,通常除以标度因数后转化为角速度( $^{\circ}/s$  或  $^{\circ}/h$ )来表征。陀螺的零偏中一般包含地球自转分量、光路误差及光电检测的误差等,成分较为复杂,为了便于讨论,从常用的衡量零偏的性能的角度出发,分为以下几种情况。

### 2.2.1 零偏绝对值超差

零偏绝对值超差指的是零偏绝对值过大,超过指标的要求范围。一般情况下,零偏作为一个较为稳定的值,在系统应用时可以被补偿掉,因此其值大小并不影响系统的应用。但在某些伺服领域,过大的零偏(常采用差分电压或电流等模拟信号)通常会影响到后级系统的稳定,因此要求零偏绝对值不能过大。

零偏绝对值超差常见的原因包括某些器件的温度性能较差,这种故障模式通常表现为明显的温度相关性,只在某些特定的温度点或温度范围超差,比如常见的低温零偏超差,这种故障通常在温度升高后陀螺零偏迅速恢复正常。发生这种故障时,应首先进行光电分离处理,将故障点锁定在光路或电路上,然后重点

检查光学器件或电子元器件是否存在温度性能下降的情况。

### 2.2.2 零偏稳定性超差

零偏稳定性指的是陀螺在单次测试中零偏的波动程度,一般采用信号的方差表示。

零偏稳定性超差的原因较多,常见的故障模式包括光路的噪声及器件性能的下降等。光路噪声通常是光纤中存在微裂纹、光路损耗过大或非互易性误差过大等原因;器件性能下降与零偏绝对值超差原因类似,往往与器件的温度性能不合格有关,导致陀螺在测试过程中出现零位扭曲等现象。

### 2.2.3 零偏重复性超差

与零偏稳定性不同的是,零偏重复性衡量的是多次测试中零偏的波动情况,将多次测量的零偏(平均值)组成新的数列,然后求其方差即为零偏重复性。

零偏重复性超差的常见原因是器件性能的不稳定,表现为器件在多次启动时工作状态差异有关,也就是说,在陀螺工作稳定后,虽然陀螺总体上表现为正常工作,但器件的工作状态仍然是有差异的,这就导致多次测试中陀螺输出零位出现较大差异。这里的器件既包括电子器件,也包含光学器件。因此常见的是每次启动时零偏稳定性合格,但每组测试时零偏的差异较大。

## 2.3 刻度系数超差故障

由于陀螺工作时受到光学器件误差影响、电路增益的不稳定性及环境干扰等,二者并不是严格意义上的线性关系,通常采用最小二乘法对刻度系数进行拟合。

这里我们重点讨论刻度系数非线性度超差的情况。顾名思义,非线性度指的是陀螺在其测量范围内输出值偏离标称值的情况。开环光纤陀螺刻度系数容易受到光源、PZT 相位调制器及相敏检测电路等器件性能的影响,在温度环境下这种误差会更大。

因此,常见的刻度系数超差的故障模式包含光源功率稳定性差、光纤环绕制不均匀、光谱不对称性、光路损耗以及电路增益变化等。在开环陀螺中,要保证较低的刻度系数非线性度,最重要的是稳定的光功率,一般采用对注入电流进行稳定控制的方式保证光路中光功率的稳定。

## 3 结论

开环陀螺一般精度较低,体积相对也较小,适用于对陀螺精度要求较低的领域。本文对开环光纤陀螺的原理进行简单的介绍,并对最重要的、也是常见的几种故障模式进行简单分析,给出了几种提高开环光纤陀螺可靠性的方法,希望能对相关从业者起到一定的启发作用,并达到降低故障发生率的目的。

### 参考文献

- [1] 王巍.干涉型光纤陀螺仪技术[M].广州:中国宇航出版社,2010.
- [2] 汪顺亭,邓政.开环光纤陀螺仪特点及应用[J].中国惯性技术学报,2006.
- [3] 赵玉新,李绪友,刘承香,等.光纤陀螺信号处理方法的比较研究[J].中国惯性技术学报,2003.

收稿日期:2021-01-06

作者简介:薛晓雷(1987—),男,汉族,陕西宝鸡人,工程师,本科,研究方向为惯性导航、光纤陀螺。