

光纤陀螺特性研究及应用综合实验

陀螺是惯性技术的关键器件之一，主要用于角速度的测量。早期的陀螺是机电式的，如挠性陀螺、液浮陀螺、静电陀螺等，但其有体积大、结构复杂、成本高的缺点。1913 年，萨格奈克效应的发现，以及随后激光和光纤的发明及相关技术的飞速进步，为基于萨格奈克效应的光学陀螺奠定了技术基础。光纤陀螺与传统的机电式陀螺相比，具有体积小、重量轻、成本低、无可动部件、耐恶劣工作环境、电磁兼容性好等优点，可覆盖陆地、航空、航天等所有陀螺仪的应用领域。

【实验目的】

1. 了解萨格奈克效应；
2. 了解光纤陀螺的工作原理；
3. 学会光纤陀螺仪的特性测量及参数计算

【仪器用具】

光纤陀螺实验仪、示波器、信号源、计算机、实验软件

【实验原理】

1. 光纤陀螺原理—萨格奈克效应

萨格奈克效应是法国科学家 G.Sagnac 于 1913 年首先提出的，它构成了现代光学陀螺—激光陀螺和光纤陀螺的理论基础。在一个闭合的光学环路中，从任意一点出发的沿相反方向传播的两束光波，绕行一周后回到初始传播点，若闭合光路相对于惯性空间发生转动，则两束光波的相位将发生变化，这称为萨格奈克效应。

通常采用环形干涉仪来测量萨格奈克效应，图 1 为世界上第一个环形干涉仪结构，它被认为是最早的光纤陀螺样机。从激光器发出的平行光，通过分束器分成两束，经透镜聚焦在光纤环的两个入射端面上，在光纤环中分别沿顺时针和逆时针方向传播一周，再次经过透镜和分束器投向屏幕，可以在屏幕上观察到一个干涉图样。当整个系统在光纤环的轴向有旋转时，由于萨格奈克效应，屏幕上的干涉光强发生了变化，可以表示为：

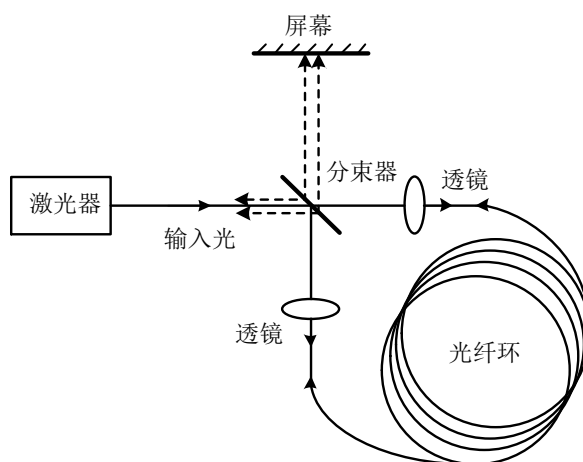


图 1 光纤环形干涉仪

通常采用环形干涉仪来测量萨格奈克效应，图 1 为世界上第一个环形干涉仪结构，它

被认为是最早的光纤陀螺样机。从激光器发出的平行光，通过分束器分成两束，经透镜聚焦在光纤环的两个入射端面上，在光纤环中分别沿顺时针和逆时针方向传播一周，再次经过透镜和分束器投向屏幕，可以在屏幕上观察到一个干涉图样。当整个系统在光纤环的轴向有旋转时，由于萨格奈克效应，屏幕上的干涉光强发生了变化，可以表示为：

$$I_D = I_0(1 + \cos \phi_s) \quad (1)$$

式中： I_D 是入射光的光强； ϕ_s 是旋转引起的相位变化，也称为萨格奈克相移，它与旋转角速度 Ω 的关系为：

$$\phi_s = \frac{4\pi RL}{\lambda_0 c} \cdot \Omega \quad (2)$$

式中： L 为光纤长度； R 为光纤环的半径； λ_0 为光波长； c 为真空中的光速。光纤环形干涉仪的优势是可以采用多匝光路来增强萨格奈克相移，此时公式（2）中的光纤长度 $L=2\pi RN$ ， N 是光线线圈的匝数。这种基于光纤环形干涉仪测量旋转角速度的装置称为干涉式光纤陀螺，本实验中所提到的光纤陀螺，均指这种干涉型光纤陀螺。

2. 开环光纤陀螺的基本组成

目前开环光纤陀螺基本结构如图 2 所示，它由光路和电路两部分组成，其中光路部分包括光源、光纤耦合器、Y 波导相位调制器、光纤环和光电探测器。从光源发出的光，经光纤耦合器、Y 波导相位调制器分为两束，在光纤环中分别沿顺时针和逆时针方向传播，然后在 Y 波导相位调制器上再次会合发生干涉，干涉光经光纤耦合器后到达光电探测器，转换为电信号，随后经电路部分的锁定放大解调得到陀螺输出。

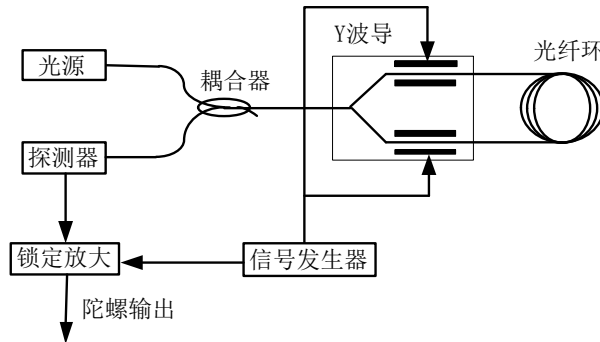


图 2 开环光纤陀螺的基本结构

光源、光纤耦合器、Y 波导相位调制器、光纤环和光电探测器为光纤陀螺的五大核心器件，下面简单介绍它们的作用和主要特性：

1) 光源

光源是光线陀螺传感载波的发射源，是保障陀螺工作并满足功能特性指标的关键器件，因此具有十分重要的地位。光纤陀螺光源必须满足以下几个条件：（1）能够提供足够大的功率，光功率大可以提高系统的信噪比；（2）光的相干长度要短，即具有宽的发射光谱，它可以降低瑞利背向散射、偏振交叉耦合和克尔效应等引起的相干误差；（3）具有良好的平均波长稳定性以保证光纤陀螺标度因子的稳定性；（4）高可靠性。目前光纤陀螺主要使用的光源包括半导体超辐射发光二极管（SLD）光源（波长 850nm 和 1300nm）和宽带光纤光源（波长 1550nm）两类。前者主要用于中低精度光纤陀螺，后者用于高精度光纤陀螺。

2) 光纤耦合器

光纤耦合器取代光纤环形干涉仪中分束器的作用，它利用光纤中光波的渐逝场耦合现象使两个相邻的线芯之间的光能量发生耦合，从而实现全光纤的分光和合光。这种渐逝场光

纤耦合器可以采用侧面抛光的方法制作，也可以采用熔融拉锥技术制作。在前一种方法中，光纤被粘在弧形石英槽中，将石英块粘有光纤的一面研磨并抛光，去掉光纤一侧的部分包层，接近模式的渐逝场。熔融拉锥技术是使光纤融化拉长成锥，使两纤芯靠近，增加模场直径，从而实现光纤间光的耦合。由于采用研磨方式制作耦合器难度较大，因此现在大都采用熔融拉锥技术制作光纤耦合器。

3) Y 波导相位调制器

光纤陀螺中所用的 Y 波导相位调制器是指含有 Y 型分束器、偏振器和相位调制器功能的波导器件，该器件将光纤陀螺多个功能元器件集成制作在同一个芯片上，即实现了高带宽相位调制器的功能，又起到高消光比的起偏器和检偏器作用，因此它具有减小体积、减少连接点、增加可靠性、降低成本等特点。该器件的优良特性保证了高性能数字光纤陀螺的实现，已经被广泛用于各种精度的光纤陀螺中。为了提高调制效率，降低调制信号中的驱动电压，Y 波导相位调制器通常采用推挽式结构：将两条波导外侧的电极相连成为一极，两条波导内侧的电极短路或制成一个公共电极。由于推挽调制时 Y 波导两臂电场符号相反，产生的相位调制也相反，致使推挽调制产生的相位差是单边调制的两倍，即推挽调制的半波电压是单边调制的一半。

4) 光纤环

光纤环是光纤陀螺的敏感介质，对于不同性能的光纤陀螺需求，只要改变光纤环的直径和长度即可满足要求，无需重新设计，这种结构设计的灵活性是光纤陀螺的一个重要优点。光纤陀螺对光纤的可靠性要求高，采用的光纤通常具有模场直径小、温度适应性好以及耐疲劳等特性。此外，对于直径大、线圈长的高灵敏度陀螺，通常采用四极对称绕法减小光纤环的温度梯度效应。

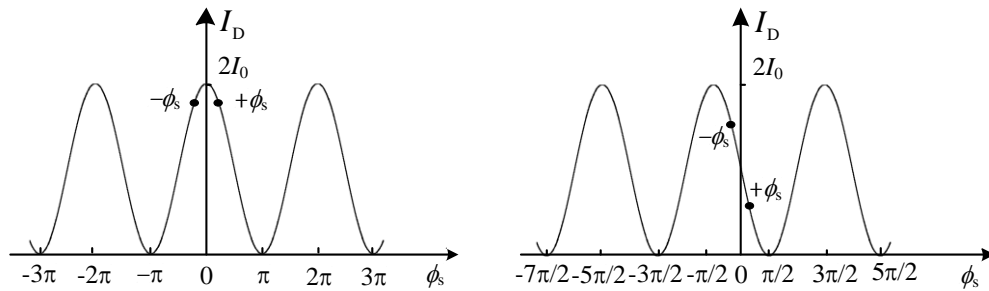
5) 光电探测器

光纤陀螺用光电探测器组件是一种模拟信号光探测器，其特性主要由两部分决定，一部分是光电二极管的特性，另一部分是前置放大器的特性。在光电探测器的应用中，探测器的工作波长与所用材料有关，不同材料的峰值响应波长不同。目前对于光纤陀螺的三种工作波长，其中 850nm 波长的探测器一般采用 Si-PIN 光电二极管，而 1310nm 和 1550nm 波长的探测器一般采用 InGaAs-PIN 光电二极管。

3. 光纤陀螺的相位调制原理

根据式 (1) 可以得到光纤陀螺的输出光强与萨格奈克相移的关系如图 3 (a) 所示，由于 I_D 是 ϕ_s 的余弦函数，由该曲线可以看出：

- 1) 当萨格奈克相移很小时，光纤陀螺输出对旋转角速度的灵敏度接近为零（即当 $\phi_s \rightarrow 0$ 时， $dI_D/d\phi_s \rightarrow 0$ ）；
- 2) 由于响应曲线的对称性，无法确定萨格奈克相移的符号或者旋转方向；
- 3) 响应曲线具有周期性。



(a) 基本输出

(b) 施加相位偏置后

图 3 光纤陀螺的输出光强与萨格奈克相移的基本关系

为了解决光纤陀螺的检测灵敏度和旋转方向问题，可以给萨格奈克干涉仪施加一个偏置相位，使干涉仪工作在响应灵敏度最大的点上。由式（1）得到：

$$\frac{dI_D}{d\phi_S} = -I_0 \sin \phi_S \quad (3)$$

即当 $\phi_S = \pi/2$ 时，光纤陀螺的相位检测灵敏度最大，而当 $\phi_S \rightarrow 0$ 时或 π 时，灵敏度趋于零。在实际应用中，通常要求陀螺对小角速率非常敏感，这需要在陀螺中引入一个 $\phi_b = \pi/2$ 的非互易相位偏置。这样，加偏置后干涉仪探测器上的光强变化为（图 3（b））：

$$I'_D = I_0[1 + \cos(\phi_b + \phi_S)] = I_0[1 + \cos(\pi/2 + \phi_S)] = I_0(1 - \sin \phi_S) \quad (4)$$

因此在 $\phi_S \rightarrow 0$ 时，陀螺具有最大灵敏度，并且此时 I'_D 是 ϕ_S 的正弦函数，可以确定 Ω 的符号。假定施加 $\pi/2$ 偏置后，在零相位附近的正、负微小萨格奈克相移分别为 $+\phi_S$ 和 $-\phi_S$ ，此时，由公式（4），探测器上的干涉光强为：

$$\begin{aligned} I'_D \Big|_{+\phi_S} &= I_0(1 - \sin \phi_S) \\ I'_D \Big|_{-\phi_S} &= I_0[1 - \sin(-\phi_S)] = I_0(1 + \sin \phi_S) \end{aligned} \quad (5)$$

可以看出，公式（5）不仅揭示了施加 $\pi/2$ 偏置后萨格奈克相移的符号，而且还给出了旋转信号的响应幅值（图 3（b））。

光纤陀螺中相位调制是通过在 Y 波导相位调制器上施加不同的调制信号来实现的。众所周知，在采用互易性结构的光纤陀螺中，到达探测器的两束反向传播光波被设计成精确的沿相同的光路传播，旋转引起的萨格奈克相移是唯一的非互易相移源。但是，如果通过 Y 波导相位调制器使两束光波在不同时间受到一个相位调制 $\phi_m(t)$ ，则可以产生一个相位差 $\Delta\phi(t)$ ：

$$\Delta\phi(t) = \phi_{CCW}(t) - \phi_{CW}(t) = \phi_m(t - \tau) - \phi_m(t) \quad (6)$$

式中： $\Delta\phi_{CW}$ 和 $\Delta\phi_{CCW}$ 分别表示光纤环中沿顺时针和逆时针方向传播的光波相位， τ 是光通过整个光纤环长度的传输时间。常用的调制函数有两种：正弦（余弦）调制和方波调制。

1) 正弦调制

假设正弦相位调制信号为 $\phi_m(t) = \phi_{m0} \cos \omega_m t$ ，则：

$$\begin{aligned} \Delta\phi(t) &= \phi_{m0} \cos \omega_m (t - \tau) - \phi_{m0} \cos \omega_m t \\ &= 2\phi_{m0} \sin \frac{\omega_m \tau}{2} \sin \omega_m (t - \frac{\tau}{2}) = \phi_0 \sin \omega_m (t - \frac{\tau}{2}) \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $\phi_0 = 2\phi_{m0} \sin \frac{\omega_m \tau}{2}$ ，施加调制后的干涉信号变为：

$$I_D(\phi_S) = I_0 \{1 + \cos[\phi_S + \Delta\phi(t)]\} = I_0 \{1 + \cos[\phi_S + \phi_0 \sin \omega_m (t - \frac{\tau}{2})]\} \quad (8)$$

施加调制的目的是可以自动获得 ϕ_S 的正弦函数项，相当于引入了一个 $\pi/2$ 相位偏置。

将公式（7）代入（8），忽略 $\Delta\phi(t)$ 中正弦项的时间延时 $\tau/2$ ，根据贝赛耳函数展开公式：

$$\begin{aligned}\cos(\phi_0 \sin \omega_m t) &= J_0(\phi_0) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\phi_0) \cos 2n\omega_m t \\ \sin(\phi_0 \sin \omega_m t) &= 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\phi_0) \sin(2n-1)\omega_m t\end{aligned}\quad (9)$$

则有:

$$\begin{aligned}I_D(t_0) &= I_0[1 + \{J_0(\phi_0) + 2J_2(\phi_0)\cos(2\omega_m t) + 2J_4(\phi_0)\cos(4\omega_m t) + \dots\} \times \\ &\quad \cos(\phi_s) - \{2J_1(\phi_0)\sin(\omega_m t) + 2J_3(\phi_0)\sin(3\omega_m t) + \dots\} \sin(\phi_s)]\end{aligned}\quad (10)$$

式中: J_n 是 n 阶贝塞尔函数。由公式 (10) 可以看出, 正弦波调制光纤陀螺的开环输出含有 ω_m 的各次谐波。当陀螺静止时 ($\phi_s=0$), 其输出仅含调制频率的偶次谐波, 其中以二次谐波为主, 如图 4 (a) 所示, 当陀螺转动时 ($\phi_s \neq 0$), 则产生调制频率的奇次谐波, 其中以一次谐波为主, 如图 4 (b) 所示。解调时通常是利用锁相放大器将其一次谐波 (与正弦调制信号同频率) 提取出来, 作为光纤陀螺的输出:

$$I_1(\phi_s) = 2I_0 J_1(\phi_0) \sin \phi_s \quad (11)$$

2) 方波调制

假设采用图 5 (a) 所示的方波调制信号为 $V_m(t)$, 则光纤环中顺逆时针光在不同时间收到一个相位调制 $\phi_m(t)$ (见图 5 (b)、(c)):

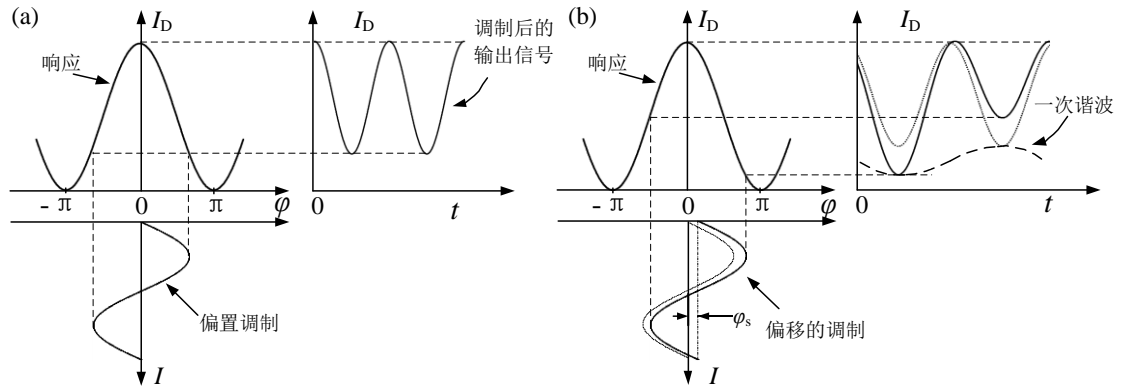


图 4 正弦波偏置调制原理

$$\phi_m(t) = \begin{cases} \pi/2 & 2m\tau \leq t < (2m+1)\tau \\ 0 & (2m+1)\tau \leq t < 2(m+1)\tau \end{cases} \quad (12)$$

式中: $m=0, 1, 2, \dots$ 。调制方波的频率要求为光纤环的本征频率 $f_0=1/(2\tau)$, 因此偏置调制产生的两束反向传播光波之间的相位差 $\Delta\phi(t)$ 为 (见图 5 (d)):

$$\Delta\phi_m(t) = \phi_m(t) - \phi_m(t-\tau) = \begin{cases} \pi/2 & 2m\tau \leq t < (2m+1)\tau \\ -\pi/2 & (2m+1)\tau \leq t < 2(m+1)\tau \end{cases} \quad (13)$$

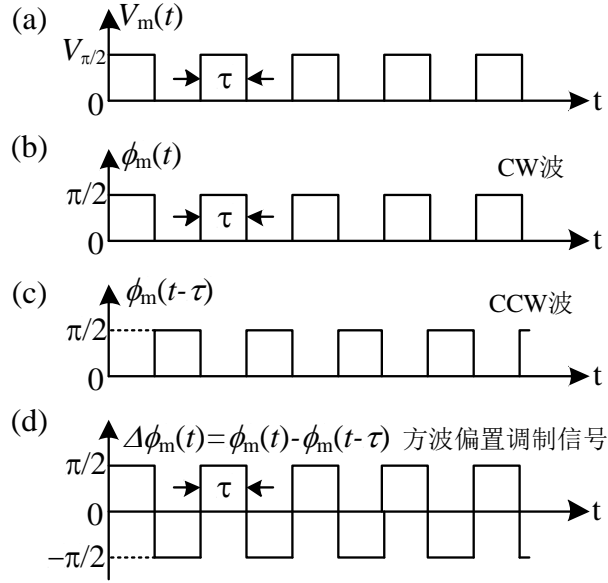


图 5 方波偏置调制信号

这样一种方波偏置调制信号施加到光纤陀螺中时，在方波调制周期的两个相邻半周期上，光纤陀螺交替的工作在 $\pm\pi/2$ 点上。如图 6 所示，静止时陀螺输出波形是一条直线，方波的两个相邻半周期给出相同的信号：

$$I_D(0, -\frac{\pi}{2}) = I_D(0, \frac{\pi}{2}) = I_0(1 + \cos \frac{\pi}{2}) = I_0 \quad (14)$$

但当旋转时，偏置点发生移动，输出一个与调制方波同频的方波信号：

$$I(\phi_s, \phi_0) = I_0[1 + \cos(\phi_s + \frac{\pi}{2})] \quad (15)$$

$$I(\phi_s, -\phi_0) = I_0[1 + \cos(\phi_s - \frac{\pi}{2})]$$

解调时将方波输出信号的相邻两个半周期的差值提取出来，作为陀螺的输出：

$$\Delta I(\phi_s, \phi_0) = I_0[\cos(\phi_s - \frac{\pi}{2}) - \cos(\phi_s + \frac{\pi}{2})] = 2I_0 \sin \frac{\pi}{2} \sin \phi_s = 2I_0 \sin \phi_s \quad (16)$$

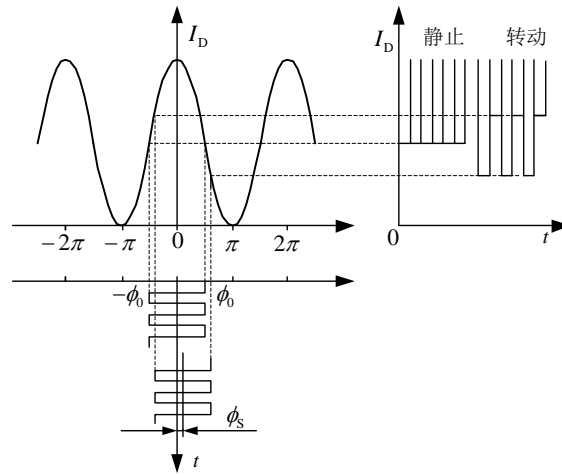


图 6 方波偏置调制原理

4. 闭环光纤陀螺的基本原理

在开环光纤陀螺中，通过相位调制器对顺逆时针光施加偏置相位调制作用，由于两束

光波受到的相位调制时间不同，因而产生一个时变相位差 $\Delta\phi(t)$ ，通过对干涉信号进行同步相敏解调，可以得到光纤陀螺的开环输出。而对于闭环光纤陀螺，除了上述的偏置调制外，还要在陀螺的敏感环中加入一个控制条件，使两束反向传播光波之间引入一个非互易相移（ ϕ_{FB} ）来响应旋转角速率， ϕ_{FB} 与萨格奈克相移幅值相同，符号相反，因此可以补偿旋转引起的萨格奈克相移。在这种方法中，不管旋转角速度是多少，干涉光波之间的总相位引起的总相位差始终为常值（ $\phi_{FB}+\phi_0=0$ ）。通过测量满足这一条件引入的反馈相移 ϕ_{FB} 可以得到陀螺的输出，由于测量的是与旋转速率成线性比例的萨格奈克相移，闭环光纤陀螺对旋转速率的响应基本上是线性的。闭环光纤陀螺的一个主要优势是角速率测量范围大，输出线性度好。

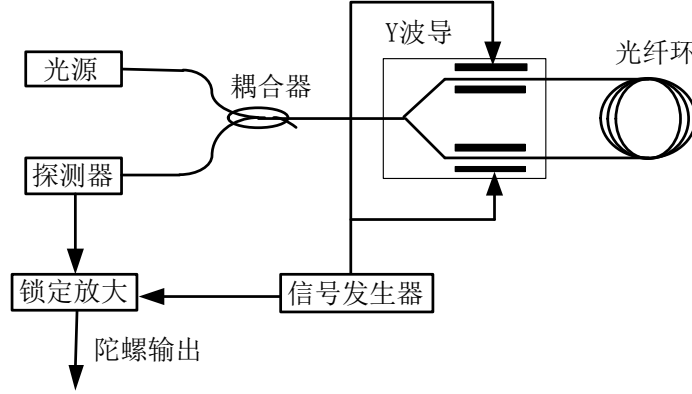


图 7 闭环光纤陀螺的基本结构

在光纤陀螺的闭环检测方案中，一般采用方波相位调制方案，而反馈相位差 ϕ_{FB} 是采用阶梯波相位调制来实现的。闭环光纤陀螺的结构如图 7 所示，在开环检测方案的基础上，检测电路通过伺服反馈电路产生阶梯波，并将阶梯波施加在相位调制器上补偿萨格奈克产生的相移，而阶梯波的幅度作为陀螺的输出信号。

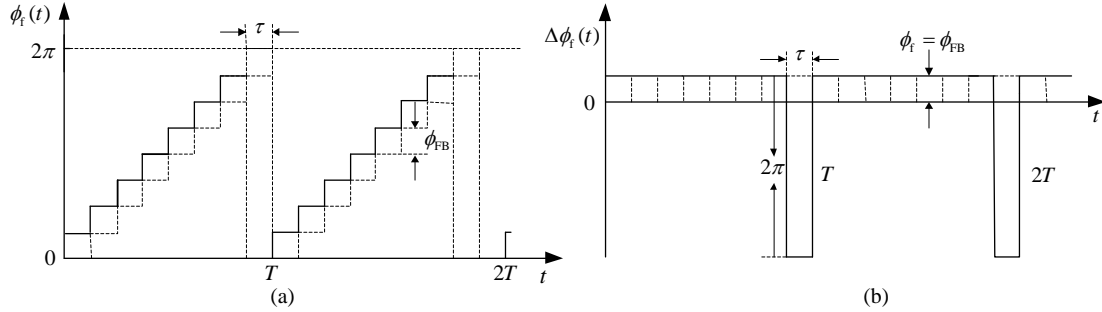


图 8 (a) 数字阶梯波波形 $\phi_i(t)$, (b) 反馈相移 $\Delta\phi_i(t)$

如图 8 所示，闭环光纤陀螺中的阶梯波由一系列幅值小、持续时间等于光纤环传输时间 τ 的相位台阶 ϕ_{FB} 构成。由于阶梯波也不能无限上升，必须进行 2π 复位。光纤环中两束反向传播光波之间因阶梯波 $\phi_i(t)$ 调制而产生的相位差 $\Delta\phi_i(t)$ 为：

$$\Delta\phi_i(t) = \begin{cases} \phi_{FB} \\ \phi_{FB} - 2\pi \end{cases} \quad (17)$$

如果阶梯波的复位幅值等于 2π rad，则复位期间陀螺输出 $V_{out}=K\sin(\phi_S + \phi_{FB}-2\pi)$ ，不会产生任何检测误差。由于光纤陀螺对相位差的响应具有周期性： $\sin\omega_r\tau=\sin(\omega_r\tau-2\pi)$ ，当光纤陀螺的工作点在 $\Delta\phi_i(t)=0$ 和 $\Delta\phi_i(t)=2\pi$ 之间跳变时， $\Delta\phi_i$ 的整个波形可以用来使旋转引起的相移偏置为零。反之，如果复位振幅不等于 2π rad，则在复位期间，陀螺输出将产生误差。

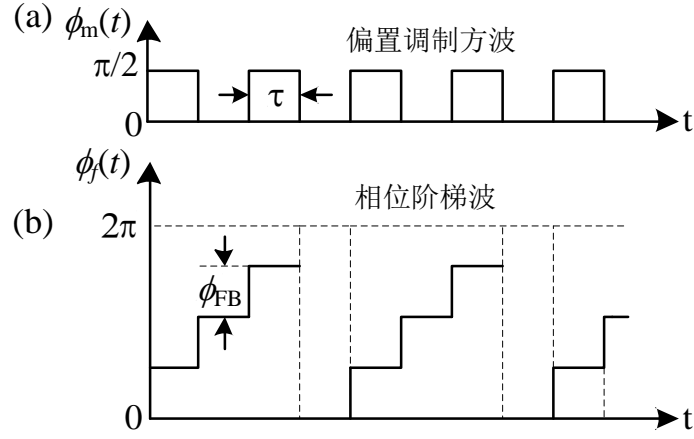


图 9 方波偏置调制信号和阶梯波信号

如图 9 所示，检测电路产生的方波和阶梯波反馈信号以电压形式分别施加到 Y 波导相位调制器的两个臂上，实现光纤陀螺的闭环检测。

5. 光纤陀螺的参数计算

评价光纤陀螺性能的参数有标度因数非线性、零偏、零偏稳定性等参数，通过本实验重点加深对光纤陀螺标度因数、标度因数非线性、零偏和零偏稳定性这四个参数的理解。下面介绍一下这四个参数的概念与计算方法：

1) 标度因数

标度因数是陀螺输出量与输入角速度的比值，它用某一特定直线的斜率表示，该直线是根据整个输入角速率范围内测得的输入输出数据，用最小二乘法拟合求得。假设第 \$j\$ 个输入角速率 \$\Omega_j\$ 时测试得到陀螺输出平均值为 \$F_j\$，则可以建立陀螺输入输出关系的线性模型为：

$$F_j = K \cdot \Omega_j + F_0 + v_j \quad (18)$$

式中 \$K\$ 为标度因数，\$F_0\$ 为拟合零位，\$v_j\$ 为拟合误差。

假设输入角速率的个数为 \$M\$，则根据最小二乘法就可以求得光纤陀螺的标度因数 \$K\$ 和拟合零位 \$F_0\$ 的表达式：

$$K = \frac{\sum_{j=1}^M \Omega_j \cdot F_j - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \Omega_j \cdot \sum_{j=1}^M F_j}{\sum_{j=1}^M \Omega_j^2 - \frac{1}{M} (\sum_{j=1}^M \Omega_j)^2} \quad (19)$$

$$F_0 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M F_j - \frac{K}{M} \sum_{j=1}^M \Omega_j \quad (20)$$

2) 标度因数非线性度

标度因数非线性度是指在输入角速率范围内，光纤陀螺输出量相对于最小二乘法拟合直线的最大的偏差值与最大输出量之比，单位为：%，ppm。

在光纤陀螺标度因数测试的基础上，用拟合直线表示陀螺输入输出关系如下：

$$\hat{F}_j = K \cdot \Omega_j + F_0 \quad (21)$$

式中 \$\hat{F}_j\$ 表示第 \$j\$ 个输入角速率 \$\Omega_j\$ 所对应拟合直线上计算的陀螺输出值。

然后按下式计算陀螺输出特性的逐点非线性偏差：

$$\alpha_j = \frac{\hat{F}_j - F_j}{|F_m|} \quad (22)$$

式中 α_j 表示第 j 个输入角速率 Ω_j 时陀螺输出值的非线性偏差， F_m 表示最大输入角速率陀螺输出的最大绝对值。

最后可以得到光纤陀螺标度因数非线性度 K_n 的表达式为：

$$K_n = |\alpha_j|_{\max} \quad (23)$$

3) 零偏

零偏是指当输入角速率为零时，陀螺的输出值。它表示规定时间内测得的输出量平均值响应的等效输入角速率表示，单位为： $(^\circ)/h$ ， $(^\circ)/s$ 。

光纤陀螺零偏 B_0 的计算公式为：

$$B_0 = \frac{1}{K} \cdot \bar{F} \quad (24)$$

式中 \bar{F} 为陀螺输出量的平均值。

4) 零偏稳定性

零偏稳定性是指当输入角速率为零时，衡量陀螺仪输出量围绕其均值的离散程度。它以规定时间内输出量的标准偏差相应的等效输入速率表示，也可以成为零漂，单位为： $(^\circ)/h$ ， $(^\circ)/s$ 。

当采样次数为 n 时，光纤陀螺零偏稳定性 B_s 的计算公式为：

$$B_s = \frac{1}{K} \cdot \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

【仪器介绍】

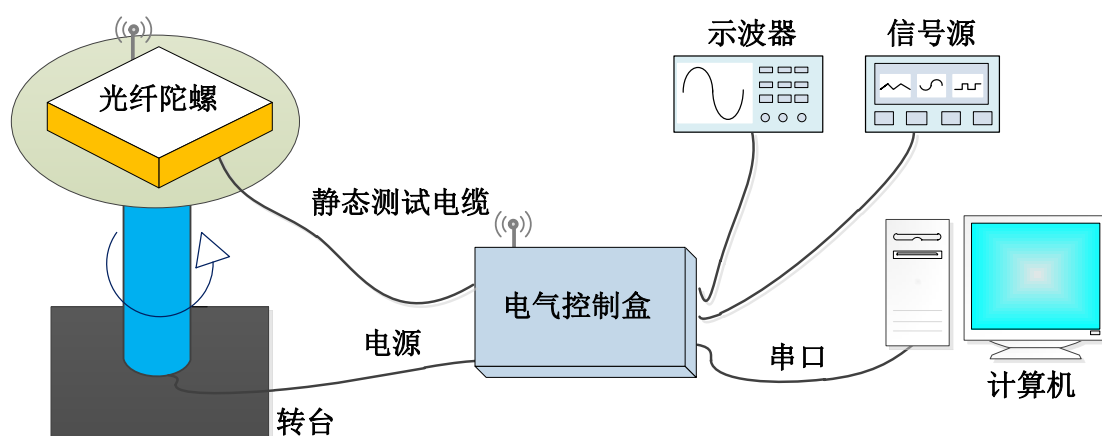


图 10 光纤陀螺教学系统

整个光纤陀螺教学系统如图 10 所示，由光纤陀螺、小型转台、电气控制盒、信号源、示波器和计算机组成，其中光纤陀螺固定在转台上，电气控制盒位于地面转台附近，电气控制盒向陀螺提供包括电源在内的所有输入电气信号，并接收陀螺的输出信号。整个教学实验内容分为静态实验和转台实验两部分，在静态实验过程中，信号发生器通过电气控制盒和静态测试电缆向陀螺提供输入信号，通过示波器观察陀螺的输出信号；在转台实验过程中，光纤陀螺通过无线通信模块将输出数据发送给电气控制盒，电气控制盒将无线接收数据通过串

口发送给计算机，最终由计算机上的数据采集软件进行采集。在整个静态和转台实验过程中，学生只需对电气控制盒的面板接口进行操作，这样可以避免学生误操作对陀螺造成的破坏，起到保护陀螺的作用。

光纤陀螺的结构如图 11 所示，它分为上下两层结构，其中顶层为光路结构，底层为检测电路。光路结构包含光纤陀螺的五大基本器件：光源、光纤耦合器、Y 波导相位调制器、光纤环和探测器，为了更好的展示光纤陀螺的基本原理，将它们按照光学信号传输原理均匀的设计在陀螺的顶层表面。检测电路包含电压转换电路、光源控制电路、陀螺信号处理电路和无线数据传输电路，主要完成陀螺的闭环信号检测以及无线数据通信。

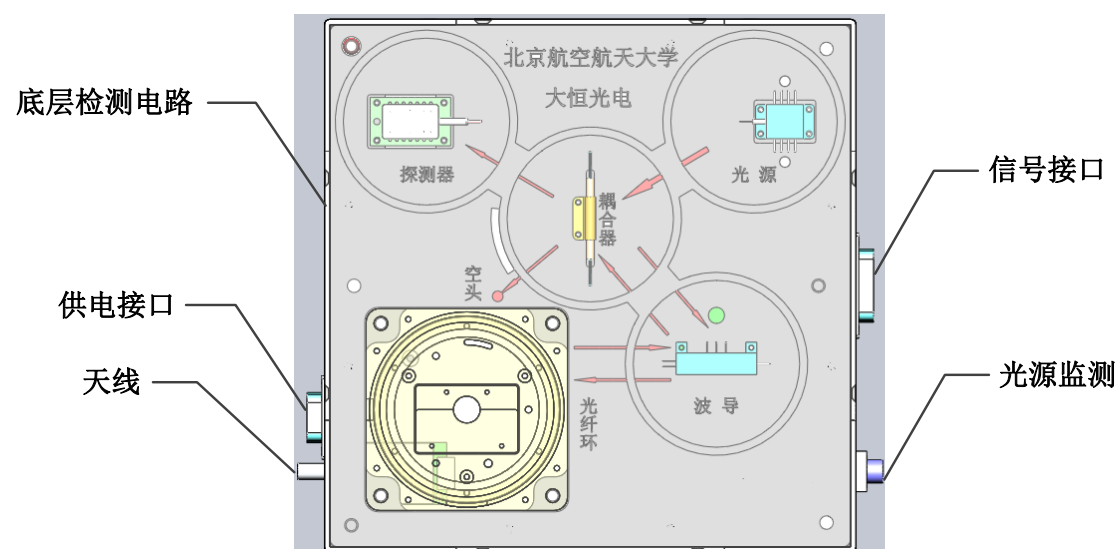


图 11 光纤陀螺结构

电气控制盒的结构如图 12 所示，它包含电源模块、无线通信模块、陀螺电气接口和信号测试接口。它既可以向陀螺供电和提供输入信号，又可以接收陀螺的输出信号，并通过信号测试接口将陀螺的输出信号输出至计算机和测试设备。

光纤陀螺教学系统的数据采集软件界面如图 13 所示，数据采集软件主要完成对陀螺输出数据的采集、显示和保存。软件界面由参数设置区、图形显示区和数据显示区三部分组成，其中参数设置区用来设置数据采集参数，主要包括“采样时间”（采样总时间），“采样间隔”（数据输出速率：0.1~10），“通信端口”（计算机串口），“平滑数”（对测试数据点求均值），“标度因数”（根据转台实验计算得到），“Y 最大值”（数据显示界面最大值），“Y 最小值”（数据显示界面最小值）；图形显示区可以将软件采集到的数据以点和线两种方式进行实时显示，通过“点/线切换”可以随意切换两种显示状态；数据显示区用来显示对软件采集数据的一些统计和计算结果，主要包括“当前值”（软件采集得到的实时数据），“最大值”（根据采集数据统计得到的最大值），“最小值”（根据采集数据统计得到的最小值），“平均值”（根据采集数据统计得到的平均值），“方差”（根据采集数据统计得到的标准差），“零偏”（根据采集数据和标度因子计算得到的陀螺零偏参数值），“零漂”（根据采集数据和标度因子计算得到的陀螺零偏稳定性参数值），“采样时间”（采集开始和结束时间）。

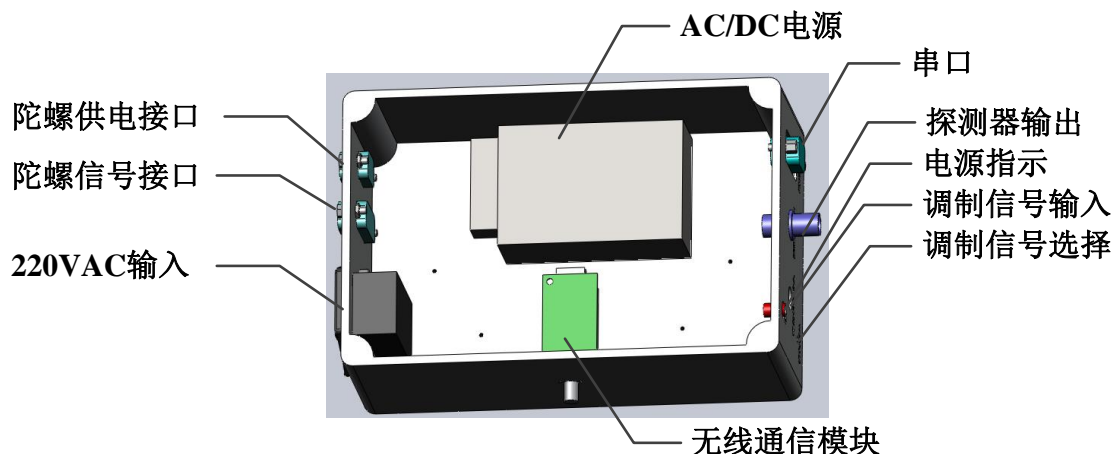


图 12 电气控制盒结构

数据采集软件的具体操作步骤如下：

首先点击“文件”下拉菜单新建一个工程文件，并设置相应的参数，包括“采样时间”，“采样间隔”，“通信端口”，“Y 最大值”和“Y 最小值”，然后点击“开始采集按钮”，软件开始按照设置参数进行数据采集，如果需要中途停止软件采集过程可以点击“停止按钮”。软件按照设置参数采集一定时间后会自动停止，软件停止后点击“自动选择坐标”按钮，软件会根据采集数据自动选择合适的坐标，同时也可以按住鼠标左键选择一定区域的数据，点击“自动选择坐标”按钮观察局部的数据，当再次需要对采集数据进行全部显示时，可以点击“全部数据显示”按钮。在对采集数据进行观察时，也可以设置不同的平滑数观察均值滤波对陀螺零漂的提高。每次测试完成之后，“文件”下拉菜单中“保存文本文件”可以将数据直接保存为“.txt”格式文件，便于后续数据处理。数据保存之后，可以点击“清屏”按钮清除屏幕现有数据，然后重新开始下次测试。



图 13 数据采集软件界面

通过采集软件记录不同转速 Ω 对应的陀螺输出数字量之后，可以根据响应的计算公式计算得到陀螺的标度因数和标度因数非线性度。然后将标度因数输入“标度因数”设置框，

对陀螺进行长期静态测试，即可从“零偏”和“零漂”两个参数框内观察到陀螺的零偏和零漂值。

【仪器参数】

1) 光纤陀螺:

零偏稳定性: $\ll 5^\circ/\text{h}$; 最大输入角速率: $3000^\circ/\text{s}$; 通信接口: RS232; 通信速率: 38400bps;
光源检测接口: FC/PC; 工作电压: +5V; 工作温度: 室温; 外形尺寸: $15 \times 15 \text{cm}$;

2) 电气控制盒:

工作电压: $\sim 220\text{V}$

3) 示波器:

采样频率: $\gg 100\text{MHz}$; 信号通道: $\gg 1$

4) 信号源:

输出波形: 方波、正弦波、锯齿波、三角波; 信号频率: $0 \sim 1\text{MHz}$ 可调; 信号幅度: $-5\text{V} \sim 5\text{V}$ 可调; 信号通道: $\gg 1$

【实验内容】

- 1、光纤陀螺结构原理展示
- 2、光源特性测试
- 3、光纤环特征频率与 Y 波导相位调制器半波电压测试
- 4、不同调制信号的开环探测器输出测试
- 5、方波调制时的闭环探测器输出测试
- 6、光纤环法平面测量
- 7、转台角速率测量
- 8、光纤陀螺参数计算

【实验步骤】

1. 光纤陀螺结构原理展示

通过光纤陀螺的透明玻璃罩直接观察光纤陀螺的基本结构。

2. 光源特性测试

1) 如遇到信号输出不正常的情况，可以使用光功率计测试陀螺光源输出的光功率，通过耦合器的分光比可以计算得到光源输出的光功率值，并可以判断光源是否正常工作；

3. 光纤环特征频率与 Y 波导相位调制器半波电压测试

1) 按图 10 连接光纤陀螺和电气控制盒之间的电缆，并将电气控制盒操作面板的“探测器输出”连接示波器，“调制信号输入”连接信号源；

2) 打开电气控制盒的 220VAC 供电开关，观察电气控制盒和光纤陀螺的电源指示灯是否正常，正常工作时电源指示灯均为绿色；

3) 将电气控制盒操作面板的“调制信号选择”开关设置为外部调制；

4) 同时打开信号源和示波器，设置信号源的初始输出波形为锯齿波，电压幅度为 2V，频率为 1KHz，对称度 0%（或 100%），按照设置参数输出锯齿波波形，可以在示波器上观察到一个直流偏置信号上面叠加了一个方波脉冲信号；

5) 缓慢调节信号源增大输出锯齿波电压，同时可以在示波器上观察到方波脉冲信号的偏置电平在变化，当方波脉冲信号的偏置电平与锯齿波相位调制引起的直流偏置的电平相等时，在方波脉冲信号的上升和下降沿处观察到两个很窄的负脉冲信号。此时，这两个负脉冲信号的周期倒数的一半即为光纤环的特征频率，此时锯齿波电压的一半即为相位调制器的半波电压。

6) 在测试得到光纤环特征频率的基础上,可以根据下式粗略估算光纤环的长度 L 。

$$L = \frac{c}{2nf_0}$$

式中 c 为光速, n 为光纤环的折射率, f_0 为光纤环的特征频率。

例如: 测试得到 $f_0=350\text{KHz}$, 取参数 $c=3\times 10^8$, $n=1.48$, 可以计算得到光纤环的长度 $L=289.6\text{m}$ 。

4. 不同调制信号下探测器输出测试

1) 设定信号源输出方波频率为光纤环的特征频率, 方波电压为相位调制器半波电压的一半, 然后从示波器观察探测器的输出, 并手动轻微旋转陀螺, 观察探测器输出信号的变化, 与方波调制原理进行对比;

2) 改变信号源输出波形为正弦波, 然后缓慢调节正弦波的频率和幅度, 从示波器观察探测器输出信号, 并手动轻微旋转陀螺, 观察探测器输出信号的变化, 与正弦波调制原理进行对比;

3) 改变信号源输出波形为锯齿波, 重复步骤 2, 观察探测器输出信号的变化。

5. 方波调制时的闭环探测器输出测试

1) 将电气控制盒操作面板的“调制信号选择”开关切换为内部调制;

2) 从示波器观察探测器的输出, 并手动轻微旋转陀螺, 观察探测器输出信号的变化, 与闭环检测原理进行对比;

6. 光纤环法平面测量

1) 关闭电气控制盒的 220VAC 供电开关, 断开光纤陀螺与电气控制盒之间的静态测试电缆, 以及电气控制盒与信号源和示波器之间的电缆, 同时连接电气控制盒与计算机之间的串口通信电缆;

2) 将电气控制盒操作面板的“调制信号选择”开关设置为内部调制;

3) 重新打开电气控制盒的 220VAC 供电开关, 确定设备供电正常;

4) 打开计算机内的数据采集软件进行数据采集;

5) 通过转台上的角度调制装置调节光纤陀螺与转台平面的角度变化, 同时记录不同倾斜角度时陀螺的输出值;

6) 通过记录数据观察陀螺输出与倾斜角度的关系, 当陀螺输出值最大时对应的光纤环平面即为光纤环的发射平面。

7. 转台角速率测量

设置转台转动转速为 12 个不同的旋转角速度 ($^{\circ}/\text{s}$), 启动数据采集软件, 每个角速度采集陀螺输出数据 60s, 记录数字量输出平均值, 共记录 12 组数据, 观察不同角速度条件下陀螺的输出, 记录不同的旋转角速度与陀螺输出的对应关系如表 1 所示。

表 1 旋转角速度与陀螺输出对应关系

角速度 ($^{\circ}/\text{s}$)												
数字量												

8. 光纤陀螺参数计算

1) 在上述转台角速度测量实验结果的基础上, 根据陀螺标度因数和标度因数非线性参数的计算公式, 可以计算得到陀螺的标度因数和标度因数非线性。

例如测试得到第 j 个输入角速率 Ω_j 与陀螺输出平均值 \bar{U}_j 的对应关系如表 2 所示:

表 2 旋转角速度与陀螺输出对应关系

j	1	2	3	4	5	6
-----	---	---	---	---	---	---

Ω_j (°/s)	0	0.2	-0.2	0.4	-0.4	0.6
F_j	-0.296	18.252	-18.839	36.772	-37.361	55.321
j	7	8	9	10	11	12
Ω_j (°/s)	-0.6	0.8	-0.8	1	-1	0
F_j	-55.897	73.851	-74.45	92.397	-92.974	-0.293

其中输入角速率的个数为 $M=12$ ，根据式 (19) 和式 (20) 可以计算得到输入角速率 Ω_j 与陀螺输出平均值的拟合直线关系为

$$\hat{F}_j = 92.69\Omega_j - 0.29$$

式中 \hat{F}_j 表示第 j 个输入角速率 Ω_j 所对应拟合直线上计算的陀螺输出值。

因此可以得到陀螺的标度因数 $K=92.69$ 。

然后根据式 (22) 可以得到第 j 个输入角速率 Ω_j 时陀螺输出值的非线性偏差 α_j 如表 3 所示：

表 3

j	1	2	3	4	5	6
$\alpha_j(\text{ppm})$	31.4	86.9	95.9	95.9	65.4	33.2
j	7	8	9	10	11	12
$\alpha_j(\text{ppm})$	76.2	42.1	95.9	54.7	43.9	89.6

最后根据式 (23) 可以得到陀螺的标度因数非线性为 95.9ppm。

2) 将计算得到的陀螺标度因数输入数据采集软件的“标度因数”输入框，然后在转台静止条件下采集 600s，将数据保存为文本文件，用 matlab 计算得到陀螺的零偏与零漂值，并与软件显示零偏与零漂值进行对比。

F/K 的单位是 度/s；乘以 3600，单位为度/h