

# 有稳定回路的纤维光学角速度传感器

阎 万 昌

(国防科技大学)

**提要:** 本文提出在环形偏振激光干涉仪的基础上增加反馈稳定回路, 用补偿法直接测量光程差, 从而可增加角速度传感器输出的稳定性, 减小干扰误差和保证精确度。

## Fiber optic angular rate sensor with stable circuit

Yan Wanchang

(University of National Defence Science and Technology)

**Abstract:** A stable feedback circuit is added on the basis of polarized ring laser interferometer. Direct measurement of optical path difference with compensation method leads to the improvement of stability of the angular rate sensor output and decrease in interference error and ensures the accuracy.

### 前 言

激光陀螺自 1963 年间世以来, 引起各方面的极大注意。由于它没有活动部件, 起动时间短, 消耗功率少, 能承受大的加速度和冲击等特点, 在航空特别是在导弹、宇宙飞行等应用方面对它抱有很大希望。经过十几年的努力研制, 已经有了象 GG-1300 型激光陀螺研制成果的报导<sup>[1]</sup>。然而由于它存在着温度稳定性和频率闭锁等问题, 妨碍了它的性能进一步改善和提高<sup>[2]</sup>, 因而还没能广泛使用。主要问题是有源环形谐振腔内的热源、反射镜的散射和损耗等造成陀螺性能的不稳和锁频, 这是不易解决的难题。近年来的大量研究已有相当的进展, 出现了如差动式激光陀螺方案<sup>[3]</sup>, 使这方面的问题有部分解决, 但从

报导来看, 还处在研制阶段。最近有人提出了无源谐振腔或被动腔激光陀螺<sup>[4]</sup>和纤维光学陀螺<sup>[5~8]</sup>。这类激光陀螺或角速度传感器无闭锁区, 稳定性也好, 正是克服了有源环形腔激光陀螺的困难, 但灵敏度还较差。解决这个问题方法之一是采用稳定回路组成闭环系统, 实际上这是一种补偿法。这种方法在许多测量装置中被广泛采用, 实践证明是有效的。本文重点讨论这种光学角速度传感器的工作原理, 系统方框图, 并提出结构简图。

### 工 作 原 理

工作原理如图 1 所示。自光源  $L$  发出的相干性很好的方向稳定的激光, 经  $45^\circ$  偏振片

收稿日期: 1980 年 2 月 4 日。

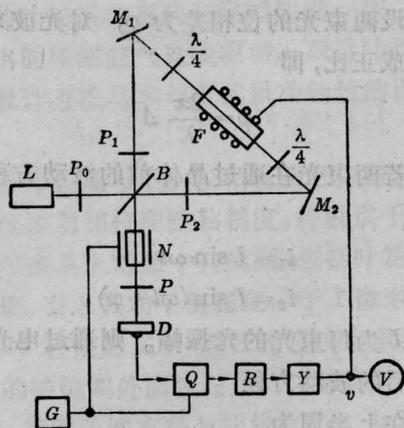


图1 工作原理图

$P_0$  到达分光器  $B$ , 分成光强相等的两束光。一束光经起偏器  $P_1$  使光成为  $p$  偏振, 经角反射镜  $M_1$  反射后, 通过  $\frac{\lambda}{4}$  片使光成为左圆偏振光, 通过法拉第室  $F$  后再经  $\frac{\lambda}{4}$  片。这个  $\frac{\lambda}{4}$  片要这样放置: 使左偏振光通过它之后成为  $s$  偏振光, 它再通过偏振片  $P_2$  (与  $P_1$  垂直放置) 到分光镜  $B$  走完一个环路反射出来。同样, 由分光器分出的另一束光沿相反方向经  $P_2$ 、 $M_2$ 、 $\frac{\lambda}{4}$ 、 $F$ 、 $\frac{\lambda}{4}$ 、 $M_1$ 、 $P_1$ 、 $B$  路线, 也走了一个环路。显然这一束光在通过  $P_2$  后为  $s$  偏振光, 通过第一个  $\frac{\lambda}{4}$  后应成为右圆偏振光, 再通过第二个  $\frac{\lambda}{4}$  后则成为  $p$  偏振光。这样, 当两束光由  $B$  引出时, 便成为  $p$  偏振光和  $s$  偏振光的合成。

当这个环形光路没有绕垂直于光路平面的轴转动时, 两束光走过相同的路程, 从  $B$  引出时应有相同的位相, 合成光应为  $45^\circ$  的线偏振光。当这个环形光路绕垂直于光路平面的轴转动时, 沿不同方向传播的光便产生了附加的光程差。传播方向和转动方向相同的那束光增加光程, 相反的那束光减少光程。这时从  $B$  引出的两束光便有不同的位相, 合成后便成为椭圆偏振光。这个椭圆偏振光的旋向和整个系统的转动方向相对应。

为测出由这个椭圆偏振光所得到的信号, 采用铌酸锂电光调制器  $N$ 。铌酸锂晶体沿  $Z$  轴通光,  $Y$  轴加电压产生横向电光效应。当电压满足

$$V = \frac{\lambda}{4n_0^3 r_{22}} \cdot \frac{d}{l} \quad (1)$$

时, 晶体作用相当于  $\frac{\lambda}{4}$  片。式中  $\lambda$  为光波波长,  $n_0$  为晶体对  $o$  光的主折射率,  $r_{22}$  为晶体电光系数矩阵元,  $d$  为晶体电极间厚度,  $l$  为晶体  $Z$  向长度。晶体的安装方向为晶体的  $Y$  轴方向与  $p$  光、 $s$  光的偏振方向皆成  $45^\circ$  角。晶体所加电压为附合 (1) 式的方波电压。

当系统无转动时, 同位相的  $p$ 、 $s$  光通过加有正半周电压的晶体后, 合成为圆偏振光, 通过加有负半周电压的晶体后, 合成仍为圆偏振光, 只是旋向相反。由晶体出来的合成光再通过一个与晶体  $Y$  轴方向相同的检偏器  $P$  后, 由光电接收器  $D$  接收, 转换成电压信号。显然这时对晶体调制电压的正负半周来说得到幅度相等的转换电压信号。

当系统有转动输入时,  $p$ 、 $s$  光的位相在进入晶体前就有差异, 再加晶体的调制作用, 由光电接收器接收到的电压便是正负半周幅度不等的电信号。这个电信号通过鉴相比较便可得到和输入转速成一定函数关系的直流输出电压。鉴相器  $Q$  和比较器  $R$  的参考线路图如图 2 所示。图中  $u_1$ 、 $u_2$  为与门,  $f$  为非门。因此  $u_1$  输出上半周信号,  $u_2$  输出下半周信号。两信号分别加到由电阻  $r$  构成的两

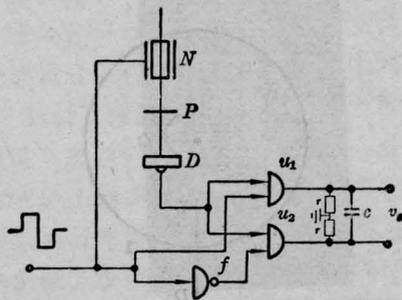


图2 鉴相器、比较器参考线路图

臂进行比较,再由电容  $c$  滤波,便得到一个直流输出电压信号  $v_g$ 。

在开环系统中,这个直流电压信号  $v_g$  经过放大成为  $v$ ,就做为速度传感器的输出,  $v$  的正负反映了转动的方向。对于有稳定回路的速度传感器,即闭环系统,则需要把信号电压  $v$  反馈回来加到安装在环形光路中的法拉第室  $F$  的线圈上,对反向传播的两束光的光程差进行补偿。而速度传感器的输出仍然取  $v$ ,在试验过程中可由数字电压表  $V$  读出。

### 系统方框图

为简单起见,设两束光沿圆形光路向正反两个不同方向传播(图3)。系统的转动角速度为  $\Omega$ ,光源  $L$  和接收器  $D$  都在转动系统上。于是光从  $L$  出发沿圆周向不同方向传播到达  $D$  点时,两束光的光程差  $\Delta$  为:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$$

式中  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$  分别为光束 1 和 2 因系统转动而产生的附加光程差,由下式确定

$$\frac{\Delta_1}{\Omega R} = \frac{2\pi R}{c}$$

$$\frac{\Delta_2}{-\Omega R} = \frac{2\pi R}{-c}$$

式中  $R$  为圆形光路半径,  $c$  为光速,于是

$$\Delta = \frac{4A}{c} \Omega \quad (2)$$

式中  $A = \pi R^2$  为光路所包围的面积。完全可以证明 (2) 式对于不是圆形的光路也是适用的。

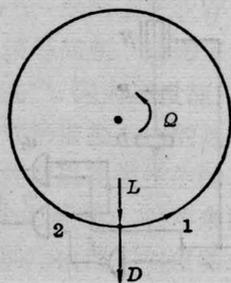


图3 光学转动系统

设两束光的位相差为  $\varphi$ ,对光波来说  $\varphi$  与  $\Delta$  成正比,即

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta \quad (3)$$

若两束光在通过晶体前的波动方程分别为

$$i_1 = I \sin \omega t$$

$$i_2 = I \sin(\omega t + \varphi)$$

式中  $I$  为每束光的光振幅。则通过电光调制晶体后的波动方程

在上半周为

$$i_1(+)=I \sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)$$

$$i_2(+)=I \sin(\omega t+\varphi)$$

在下半周为

$$i_1(-)=I \sin\left(\omega t-\frac{\pi}{2}\right)$$

$$i_2(-)=I \sin(\omega t+\varphi)$$

当检偏器  $P$  的方向与晶体的  $Y$  方向一致时,考虑两束光通过  $P$  后合成

上半周为

$$i_Y(+)= -i_1(+)\cos 45^\circ + i_2(+)\sin 45^\circ$$

由此得合成光(在  $Y$  方向)的振幅为

$$I_Y(+)=\sqrt{2} I \sin \frac{\varphi-\frac{\pi}{2}}{2}$$

同样下半周有

$$I_Y(-)=\sqrt{2} I \sin \frac{\varphi+\frac{\pi}{2}}{2}$$

两半周光强由同一光电接收元件接收转换为电信号,再经过鉴相后加到由电阻构成的两臂上进行比较,得到输出信号电压  $v_g$  为

$$v_g = K_g 2I^2 \sin \varphi$$

式中  $K_g$  为光电接收和鉴相比较元件的转换系数。对于负反馈的闭路系统,  $\varphi$  总是很小的,因此

$$v_g \approx K_g 2I^2 \varphi \quad (4)$$

信号  $v_g$  可经过线性放大器进行比例放大,但为了消除系统的静态误差及高频干扰,可采用积分放大器。其传递函数可写为

$$W(S) = \frac{K_v}{S}$$

式中  $K_v$  为积分放大器的比例系数,  $S$  为拉普拉斯算子符号。于是放大器的输出电压

$$v = \frac{K_v}{S} v_g \quad (5)$$

法拉第室的转换系数为  $K_F$ , 它所调节的光程为  $\Delta'$ , 则

$$\Delta' = K_F v \quad (6)$$

应用(2)~(6)式的转换关系, 可以画出具有稳定回路的光学角速度传感器的系统方框图如图4所示。

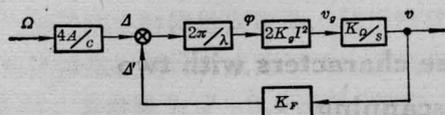


图4 系统方框图

由方框图得

$$v = \frac{K_\Omega}{TS+1} \Omega \quad (7)$$

式中  $T = \frac{1}{K_v 2K_g I^2 \frac{2\pi}{\lambda} K_F}$  为系统的时间

常数;  $K_\Omega = \frac{4A}{CK_F}$  为激光角速度传感器的刻度因子。由(7)式可见, 该系统具有典型的非周期特性。稳态时

$$v = K_\Omega \Omega \quad (8)$$

表示输出电压与输入转速之间简单的线性关系。(8)说明了激光角速度传感器具有稳定回路时的特殊性能。传感器的刻度因子和稳态精度只和反馈元件的转换系数  $K_F$  以及光路面积  $A$  有关, 并不反映其它参数。增加  $A$  对提高传感器的灵敏度有效, 而降低  $K_F$  就会影响反馈作用。采用偏振干涉法提高了检测分辨率, 即提高了传感器的测量下限。 $A/K_F$  的不稳定度即为传感器的稳态相对误差。系统对常值干扰不敏感, 对高频干扰的反应也不灵敏, 但对放大器的漂移, 光电接收元件的噪声以及光强和光源方向性的不稳定等动态干扰作用, 还是有误差的。适当地选取系统的时间常数  $T$ , 可降低这些干扰的影响。

## 结构方案

结构方案简图如图5所示。光源  $L$  可采用氦-氖激光器或半导体激光器。光经  $45^\circ$  偏振片  $P_0$  到达分光镜分成光强相等的两束, 一束经偏振片  $P_1$  和  $\lambda/4$  片及聚光透镜  $T_1$  进入光导纤维, 另一束则经过  $P_2$  和  $\lambda/4$  片、法拉第室  $F$  和聚光透镜  $T_2$  进入光导纤维。两个  $\lambda/4$  片的快慢轴要平行放置, 这样可使经过法拉第室和光导纤维的反向传播的两束光为圆偏振光, 而从环形光路射出时为空间相互垂直的线偏振光。传感器的反馈输出回路同前, 不再重述。整个装置封装成一个整体, 其中没有任何活动部件。

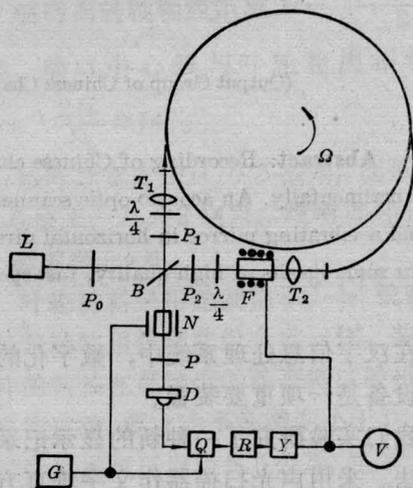


图5 结构方案简图

## 参考文献

- [1] *AW & ST*, 1973, **99**, No. 18, 60.
- [2] Robert, F. Morrison; *AD/A-001646*.
- [3] J. Bresman *et al.*; *Navigation*, 1977, **24**, No. 2.
- [4] S. Ezekiel, S. R. Balsamo; *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30**, No. 9, 478.
- [5] *Electronic Design*, 1975, **23**, No. 15, 22.
- [6] R. Ulrich, M. Johnson; *Opt. Lett.* 1979, **4**, No. 5, 152.
- [7] V. Vali, R. W. Shorthill; *Appl. Opt.*; 1976, **15**, 1099.
- [8] D. E. Thompson *et al* *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **33**, 940.