

环形激光弱磁传感器误差分析*

张书练 邹大挺 冯铁菴
(清华大学仪器系)

提 要

本文从理论上分析了环形激光弱磁传感器主要误差因素并提出了若干克服这些因素的方法。这些误差因素是:大尺寸的法拉第室引入的噪声,磁光材料的费尔德常数的温度系数,塞曼效应的混入、朗缪尔效应等。

关键词: 环形激光弱磁传感器,费尔德常数,温度系数。

一、前 言

环形激光弱磁传感器能否成为一个有实用价值的仪器^[1,2],有两类问题需要解决:一是要解决磁光材料的质量问题(希望从事旋光材料研究的科学工作者注意这一问题);二是要对传感器本身进行大量的实验和理论分析。环形激光新的应用对象给它带来了许多新的课题,本文将对环形激光弱磁传感器的一些重要误差进行分析并提出一些克服这些误差因素的方法。

二、腔损耗对灵敏度的影响

环形激光弱磁传感器原理装置如图1所示。四个反射镜 M_1, M_2, M_3, M_4 组成一个矩形谐振腔,腔内有两支全同的 He-Ne 激光增益管对称置于环路两个长的对称边上 (T_1, T_2), Q 为一块 90° 石英旋光器, F 为一个很大长度的磁光材料。当空间有一个磁场 H 时 (H 在 F 内光路上的投影为 H), 环形激光左、右旋光的拍频之和可表为

$$\Delta\nu_H = \frac{2}{\pi} \frac{c}{L} V l K_v H \cos \theta = \frac{2}{\pi} \frac{c}{L} V l K_v H, \quad (1)$$

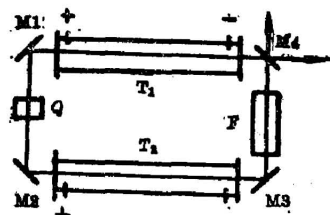


Fig. 1 Principle scheme

式中 c 为光速, L 为环形激光谐振腔长(光程), V 和 l 分别为磁光材料的费尔德常数和长度, Vl 为磁光材料在单位磁场中引起的光的偏振面旋转, K_v 为正旋光和负旋光的拍频的细分数, θ 为磁场和法拉第室 F 内光路的夹角, V 和 $\cos \theta$ 都取绝对值, (1) 式中省去了绝对值符号。

在地磁场的相对测量中,灵敏度和温度系数是测量仪器的两个重要指标。要提高灵敏度由(1)式知,就要有尽量大的拍频细分数 K_v ^[2]。而 K_v 的增加受到传感器本身光频噪声水平的限制。因此,首先要采取

收稿日期: 1986年3月27日; 收到修改稿日期: 1986年11月21日

* 本文属科学院科学基金资助项目。

措施, 消除环境温度以及塞曼效应等误差因素, 使光拍频的波动达到光子统计极限水平, 其次是减小这一光子统计极限 $\delta(\Delta\nu_H)$, 进一步提高光拍频的稳定性。

光子统计极限表示为^[3, 4]

$$\delta(\Delta\nu_H) = \frac{\sqrt{2} \Delta\nu_0}{\sqrt{\tau n_0}}, \quad (2)$$

$$\Delta\nu_0 = \frac{c}{L} \frac{\gamma}{2\pi}, \quad (3)$$

式中 n_0 为环形激光每秒输出的光子数, τ 为取样时间, $\Delta\nu_0$ 为非激活腔的线宽, γ 为包括了环路内磁光元件的吸收, 增益管窗片和石英晶体内的吸收, 和各界面上的反射, 透射损失(3)式代入(2)式得

$$\delta(\Delta\nu_H) = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \frac{\gamma}{\sqrt{n_0 \tau}} \frac{c}{L}, \quad (4)$$

显见, 为了减小 γ , 增加 n_0 , 在应用目的允许时间应加长取样时间 τ , 增加腔长 L 。但关键的问题是减小 γ , n_0 的增加受到 γ 的限制, γ 越大, 光强就越小。

下面, 我们将在 He-Ne 激光 6328 Å 波长下估计 $\delta(\Delta\nu_H)$ 的大小。

环路上共有反射面和透射面 16 个。在理想的水平下, 总反射, 透射损失能够达到 1%。在一般情况下, 这一总损失约为 2%。增益管窗片的厚度和石英晶体片总厚度为 1.7 cm, 总吸收在 0.2%~0.4% 之间, 视使用材料而定。

磁光材料的吸收是三项中最大的一项。有希望让材料的吸收系数下降到 0.003~0.004/cm 的水平, 即环形激光弱磁传感器使用 10 cm 的磁光材料时总损耗 γ 约为 0.05。

如环形激光传感器谐振腔长 $L=80$ cm。由两只增益管提供光放大使其功率输出达 1 mW (6328 Å 的光 $n_0 \approx 1.1 \times 10^{10}$), $\tau=10$ sec, 代入(4)式得 $\delta(\Delta\nu_H) \approx 0.01$ Hz 即拍频的波动为 0.01 Hz, 说明拍频细分数取 10 是可行的。

由于环形激光弱磁传感器较一般环形激光有更大插入损耗, 努力减小这一损耗, 制造吸收系数尽可能小的材料是至关重要的。

总之, 由于环形激光弱磁传感器使用了长磁光材料, 有较大的光吸收损失, 这对提高拍频细分数是不利的。但由于在一谐振腔内使用两只增益管, 仍可使拍频细分数取 10。

三、温度系数

在相对测量中, 由于环境温度的影响在通常磁传感器中存在零点漂移和比例系数的变化。环形激光弱磁传感器可望成为温度系数很小甚至完全不受环境温度影响的仪器。在绝对测量中, 也能通过一定措施加以控制。

环形激光弱磁传感器的温度系数是由它的几何比例因子的稳定性引起的。由(1)式, 几何比例因子中有三个参数和温度有关: 谐振腔长 L , 法拉第室长度 l 和费尔德常数 V 。其中费尔德常数温度系数为

$$\frac{dV}{dT} = \frac{\Delta\theta}{\Delta T} \cdot \frac{1}{l},$$

式中 l 被看成已知量, ΔT 由实验者控制, $\Delta\theta$ 是单位磁场中的法拉第旋转, 由实验测得。显

然, 这样测得的费尔德常数的温度系数实际上已包括了材料长度 l 的温度系数。所以我们不专门讨论 l 随温度的改变对传感器的影响。

将(1)式对温度 T 求偏微分并整理得

$$\delta(\Delta\nu_H) = -\Delta\nu_H \frac{dL}{L} \frac{dT}{dT} + \Delta\nu_H \frac{dV}{V} \frac{dT}{dT} \quad (5)$$

(5)式第一项是谐振腔长的温度稳定性对传感器输出的影响。令此项为 $\delta(\Delta\nu_H)_1$, 由于

$$(dL/L) = -(d\nu/\nu)$$

$$\therefore \delta(\Delta\nu_H)_1 = -\Delta\nu_H \frac{dL}{L} = \Delta\nu_H \frac{d\nu}{\nu} \quad (6)$$

现在, 环形激光的稳频精度 $(d\nu/\nu)$ 已达到 10^{-9} 的水平, 即使环形激光弱磁传感器的输出 $\Delta\nu_H$ 达到 10^8 Hz 的量级, 由频率不稳引入的误差仅为 0.1 Hz。即只要采用稳频技术, 环境温度改变不能通过改变 L 影响环形激光弱磁传感器的灵敏度和精度。

(5)式中第二项是费尔德常数的温度系数对传感器的影响。由于采用稳频之后, 由谐振腔长改变引起的误差可以忽略, (5)式可写为

$$\delta(\Delta\nu_H) = \frac{dV}{V} \frac{dT}{dT} (\Delta\nu_H) \quad \text{或} \quad \frac{\partial(\Delta\nu_H)}{\partial T} = \Delta\nu_H \frac{dV}{V} \frac{dT}{dT} \quad (7)$$

式中 (dV/dT) 即是法拉第磁光材料 V 值的温度系数。而 $(dV/V dT)$ 是法拉第磁光材料 V 值的相对温度系数, 给出温度升高 1°C (或降低 1°C) 费尔德常数的相对改变。 $[\partial(\Delta\nu_H)/\partial T]$ 即是环形激光弱磁传感器的温度系数, 给出环境温度变化 1°C , 由费尔德常数的改变引起的磁传感器输出的改变。在室温下, 对 6328 \AA , 铯玻璃的费尔德常数

$$V = 0.25' / \text{Oe} \cdot \text{cm} (0.31 \times 10^{-2} / (\text{A/m}) \cdot \text{cm}),$$

由上式得 20°C 时

$$(\partial V / \partial T) = 8.5 \text{ min} / \text{K} \cdot \text{cm} \cdot \text{T}, \quad (1/V) (\partial V / \partial T) = 3.4 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}.$$

对于抗磁材料(如火石玻璃), 它们的费尔德常数是没温度系数的^[5]。

对于顺磁玻璃, 法拉第旋转角 θ 做为磁场和温度的函数可近似表示为^[6]

$$\theta = \frac{cH}{T} \quad \text{或} \quad \frac{c}{T} = \frac{\theta}{H},$$

式中 T 为绝对温度, (c/T) 为顺磁玻璃在特定波长下的费尔德常数 V 。

相对测量中, 只测量地磁场同时不同地或同地不同时的差值, 各种分量磁传感器都有一个调零机构, 规定某地(或某时)的地磁场为零。环形激光弱磁传感器可采用磁通门磁力仪

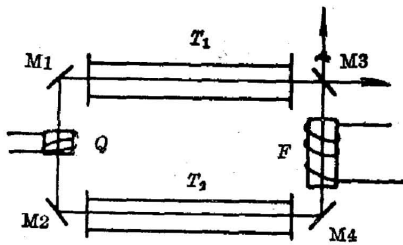


Fig. 2 Structure for relative measurement

所用的方法, 在磁光材料上加一个稳定的电流磁场和地磁场抵消, 使磁光材料传感的磁场几乎是零(如小于 100γ)、 $[\delta(\Delta\nu_H)/\partial T]$ 就是一个可忽略的量了。

考虑到闭锁效应, 环形激光输出是不能接近零的。可用图 2 的结构、克服闭锁。石英晶体和法拉第磁光材料上各套一个线圈, 分别通一稳定电流。石英晶体上的电流产生的磁场使环形激光脱离闭锁, 而磁光材料上的电流磁场和待测磁场抵消成零场。加于磁光材料上的场仅是地磁场的相对变化量。

做绝对测量时,因为环形激光弱磁传感器总的输出很大,即使灵敏度为 1γ ,测量南北地磁分量的输出也有 0.32×10^5 Hz。温度系数就很大了,宜采用温度控制的方法,比如,由于磁光材料仅为10 mm直径,长100 mm的棒,不难用冰水混合物浸泡起来(仅留出通光路径)温度系数问题就得以解决了。

四、克服塞曼效应的差动原理

在轴向磁场的的作用下,增益原子的多卜勒曲线分裂为一正旋光多卜勒曲线和一负旋光多卜勒曲线。在这两条多卜勒曲线的模牵引等效应的作用下,正旋光的频率要减小 $SFC_1\nu_B h/2$,而负旋光的频率要增加 $SFC_1\nu_B h/2$,即

$$\nu_+ \rightarrow \nu_+ - (SFC_1\nu_B h/2), \quad \nu_- \rightarrow \nu_- + (SFC_1\nu_B h/2), \quad (8)$$

式中 SFC_1 是增益管 T_1 造成的环形激光比例因子的修正系数; ν_B 是激活原子Ne的能级在单位磁场中的频率分裂, $\nu_B \doteq 3.5$ MHz/Oe (0.04 MHz/(A/m)), h 是沿增益管轴向的磁场。在图1中,待测场分量 H 和 h 是垂直的。

右旋光(或左旋光)是由一正旋光和负旋光组成,且 $\nu_+ > \nu_-$,于是

$$\Delta\nu_{\pm} = \Delta\nu_{\mp} = \nu_+ - \nu_- = \left[\frac{1}{\pi} \frac{c}{L} VU \right] H - SFC_1\nu_B h, \quad (9)$$

讨论塞曼效应时和细分数无关,上式中 K_ν 未写出。

环形激光磁传感器的输出是左旋环激光和右旋环激光的拍频之和

$$\Delta\nu_{H+h} = \Delta\nu_{\pm} + \Delta\nu_{\mp} = \left[\frac{2}{\pi} \frac{c}{L} VU \right] H - 2SFC_1\nu_B h, \quad (10)$$

和(1)式相比,此式多了一项,第二项是增益管 T_1 引入的塞曼效应拍频表达式

$$\Delta\nu_{s1} = -[2SFC_1\nu_B]h, \quad (11)$$

$SFC_1 \doteq 10^{-8}$,以增益管轴置于南北水平方向(地磁场 $h=0.32$ Oe,即 25.5 A/m)为例

$$|\Delta\nu_{s1}| \doteq 2.24 \times 10^3 \text{ Hz}$$

即,只有一支增益管放在谐振腔内时,环形激光按比例系数 $[(2c/\pi L)VU]$ 敏感了东西方向地磁场分量,又按比例系数 $2SFC_1\nu_B$ 敏感了南北方向地磁场分量。这样的磁传感器是毫无意义的。

环形激光塞曼效应对地磁场的敏感性在灵敏度和稳定性方面不如环形激光法拉第效应^[1],为了仅利用法拉第效应测磁场,应消除塞曼效应的影响。

有效的方法之一是在环形腔内引入参数相同的第二支激光增益管(同时也增加了激光增益)。于是,它们将有相同的比例因子修正系数($SFC_1=SFC_2$)。当两支增益管置于矩形环腔的相对的长边上,它们都受到同一方向的地磁场作用。由圆偏振光在磁场中可定义为正,负旋光的法则可知,一圆偏振光沿环路行进时,在第一支管内路程上为负旋光在第二管内路径上为正旋光。反之亦然又由(8)式,这一圆偏振光在一管中增加的频率

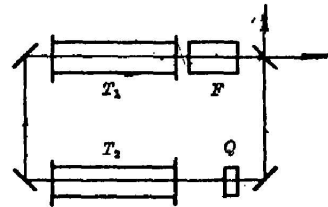


Fig. 3 Faraday cell and gain tube in the same leg

和在另一管中将被减小的频率抵消。于是塞曼效应被消除了。

两增益管参数不能全同的情况下,图3的结构也是一种方案:两支增益管放在矩形谐振腔的对边上,磁光材料也在有增益管的边上。石英晶体则放在另一有增益管的边上,在此结构下,待测磁场 H 同时穿过增益管 A_1 , 增益管 A_2 和磁光材料 O , 于是(10)式中 $H=h$, 此式可写成

$$\Delta\nu_{H+h} = \left\{ \left[\frac{2c}{\pi L} V l \right] - 2\nu_B (SFC_1 - SFC_2) \right\} H$$

即塞曼效应和法拉第磁光效应敏感同一磁场分量,即使两增益管对磁场的敏感不能完全抵消,也不至于影响环激光输出的单一分量性。

五、朗缪尔流效应的两次消除

环形激光的理论和实验都证明了,只要把 He-Ne 激光增益管做成双阳极结构,使增益管两头放电电流相反并用较高稳定度的激光电源,就能避免朗缪尔效应的影响^[3]。

环形激光弱磁传感器使用两支激光增益管,只要把它们的阴极和阳极朝向同一方向(如图1、2),就与双阳极放电有相同的抵消朗缪尔流效应的作用了。这是环形激光弱磁传感器消除朗缪尔流效应的第一个措施。

第二个措施是为了提高灵敏度,使左旋光拍频和右旋光拍频求和时完成的。

采取双阳极放电并“求和”后,朗缪尔流效应拍频可表达为(推证过程略)

$$\Delta\nu_L = (SFC_{1左} - SFC_{1右}) \frac{kv_1}{\pi} - (SFC_{2左} - SFC_{2右}) \frac{kv_2}{\pi}, \quad (12)$$

式中 $SFC_{1左}$, $SFC_{1右}$, $SFC_{2左}$, $SFC_{2右}$, 分别是增益管 T_1 , 增益管 T_2 对左、右旋光的比例因子修正系数,如 $SFC_{1左}$ 是增益管 T_1 对左旋光的系数。 v_1 , v_2 分别是管 T_1 和管 T_2 中的朗缪尔流速, k 是波数 $2\pi/\lambda_0$ 。

从(12)式可以看出:

(1) 若 $SFC_{1左} - SFC_{1右} = SFC_{2左} - SFC_{2右} = 0$, 则 $\Delta\nu_L = 0$ 。即只要左旋光和右旋光的比例因子修正系数相等,则朗缪尔流效应被完全消除。这要求选择合适的稳频工作点。

(2) 虽然 $SFC_{1左} - SFC_{1右} \neq 0$, $SFC_{2左} - SFC_{2右} \neq 0$ 但若 $(SFC_{1左} - SFC_{1右})v_1 = (SFC_{2左} - SFC_{2右})v_2$ 成立,则 $\Delta\nu_L = 0$, 即要求两增益管有相同的气体流速和增益。

在实际装置上,要完全做到两增益管流速和增益相等或左、右旋光的比例因子相同是不容易的,但接近于达到上述要求消除朗缪尔效应的影响是能够实现的。从上述理论分析看,由于多了“求和”这一方法,消除朗缪尔流的影响要比在激光陀螺中容易得多。

尽管我们的研究工作是初步的,但已证明了环形激光弱磁传感器在原理上行得通,且有着自己的特点^[8],它的各项误差也是有办法克服的,随着研究的深入,一定能创造出新的提高灵敏度的方法和消除误差的措施。

环形激光弱磁传感器的前景取决于两方面工作的进展,一是基本误差机制和消除方法的研究,二是法拉第磁光材料的改进,特别寄希望于新的费尔德常数更大(温度系数可忽

略)、吸收更小的材料产生。例如,如果有一根材料,总吸收小于3%,长度小于10cm,费尔德常数和长度的乘积接近 $10^1/\text{Oe}$ ($0.18'/(A/m)$),环形激光弱磁传感器就能较快达到 $0.01\gamma^-$ 的灵敏度水平。

本文得到金国藩教授的指导和帮助。田芊、姜亚南、李克兰同志发表了很好的意见,在此一并感谢。

参 考 文 献

- [1] 张书练等;《地球物理学报》,1986,29, No. 4 (Apr), 363~368.
- [2] 张书练等;《光学学报》,1986,6, No. 6 (Jun), 543~548.
- [3] 姜亚南;《环形激光陀螺》,(清华大学出版社,北京,1985),97~98, 223~227.
- [4] 周炳昆;《激光原理》,(国防工业出版社,1983),22~23.
- [5] Ю. В. 阿法拉谢耶夫;《磁参数测量器具》,(科学出版社,1983),260~261.
- [6] John F. Holzrichter;《Faraday Rotation of EY-1 Glass》,1972, AD:749919.
- [7] 美国专利,1975, US-4076647.
- [8] 邹大挺等;《光学学报》,待发表.

Error analysis for a ring-laser weak magnetic field sensor

ZHANG SHULIAN, ZHOU DATING AND FENG TIESUN

(Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing)

(Received 27 March 1986; revised 21 November 1986)

Abstract

The main errors of a ring-laser weak magnetic field sensor are analysed and the methods to eliminate these errors are discussed. The error introduced by temperature coefficient of verdet constant of magneto-optical materials is derived theoretically. This is the main source of error due to temperature coefficient of a ring-laser weak magnetic field sensor after low expansion cavity materials and frequency stabilization technique have been used. The error introduced by Zeeman effect is given. The Zeeman effect error results from the magnetic field sensitivity of the gain medium, and it is mixed with the magnetic field sensitivity of the Faraday magneto-optical material. By locating a gain tube in each longer arm of the rectangular cavity, the Zeeman effect can be avoided. The two gain tubes have the same parameters (such as core length, diameter, total and partial pressure, discharge current, and dimension of cathode). The influence of Langmuir gas flow effect can be elimination by beating positive and negative rotations and then adding the beats of right and left rotations.

Key Words: Ring-laser weak magnetic field sensor; Verdet constant; Temperature coefficient.