

磁光隔离器的最佳化研究

范真元 杨义 姜子龙*

(中国科学院上海光机所)

提要: 给出了磁光隔离器的最佳化设计方法并编成计算机程序。研制成功 $\phi 120$ 毫米口径的隔离器, 实验和理论计算值相符, 误差小于 2%。

Optimization design of Faraday rotators

Fan Dianyuan, Yang Yi, Jiang Zhilong

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: In this paper some design considerations for the optimization of Faraday rotators and the program for computation are presented. A Faraday rotator with 120 mm clear aperture have been developed. The experimental data are in good agreement with the calculated ones with a deviation of less than 2%.

磁光隔离器是防止激光放大器反馈自激常用的隔离器^[1,2], 也是高功率激光器系统不可缺少的单元^[3]。为获得尽可能高的消光比和最大的正向透过率, 我们对它的最佳化设计方法和计算机程序作了研究, 对螺旋管线圈的几何结构、磁场分布、激磁电流及供电网络等参数可作出可能的最佳选择。

为考核设计公式和计算机程序的可靠性, 我们研制了口径为 $\phi 120$ 毫米的磁光隔离器, 测量值和理论值准确地相符。

磁光隔离器的设计

磁光隔离器是利用法拉第磁光效应制成的, 它由偏振器、法拉第旋转器和供电网络组成。为获得最大的消光比, 除选用优良的偏振器和磁光介质外还要对磁场线圈、激磁电

流和供电网络作出最佳设计。

1. 螺旋管的几何结构和磁场均匀性

在磁光介质占据的空间内, 磁场分布的均匀性对消光比有决定性影响。一般来说, 螺旋管线圈的长度和口径之比越大, 它产生的磁场越均匀, 但电感随之增大, 给供电网络的匹配带来困难。这对大口径隔离器的影响尤其严重。为减少电感必须减少匝数, 缩短长度。而均匀性的变坏可用附加线圈来补偿。

附加线圈对称地绕在螺旋管两端, 如图 1 所示。线圈参数的合理选择取决于磁场和电感的正确计算。我们以单个电流圈的磁场公式为基本出发点, 按文献[4], 磁场强度的轴向分量为:

收稿日期: 1982年10月13日。

* 长春光机学院毕业实习生。

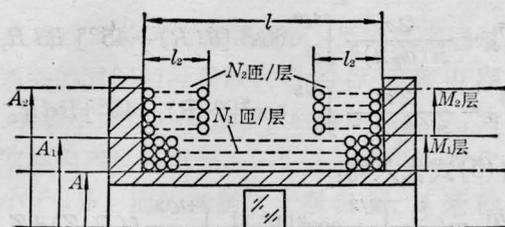


图1 螺旋管线圈的几何结构

$$H = \frac{\mu_0 I}{2\pi [(R_0 + R)^2 + (Z - Z_0)^2]^{1/2}} \times \left[K + \frac{R_0^2 - R^2 - (Z - Z_0)^2}{(R_0 - R)^2 + (Z - Z_0)^2} E \right] \quad (1)$$

式中 Z_0, R_0 是电流圈的位置和半径; Z, R 是观察点坐标; K, E 是第一类和第二类完全椭圆积分, 其参变量为 $K^2 = 4 R_0 R / [(R_0 + R)^2 + (Z - Z_0)^2]$; I 是流过线圈的电流强度; μ_0 是空气导磁率。由于磁场的角向分量对轴向传输光束的偏振没有影响, 所以不需计算。若长度单位取毫米, 电流单位取安培, 磁场单位为高斯, 则 $\mu_0 = 4\pi$ 。

对各个不同位置, 不同直径的元电流圈磁场求和, 就能得到螺旋管内任一点的总磁场强度:

$$H_{\Sigma}(R, Z) = \sum_i^{M_1} \sum_j^{N_1} H_{ij}(R_{0i}, Z_{0j}) + \sum_{i'}^{M_2} \sum_{j'}^{N_2} H_{i'j'}(R_{0i'}, Z_{0j'}) \quad (2)$$

其中 H_{ij} 是均匀密绕线圈中坐标为 R_{0i}, Z_{0j} 的元电流圈的磁场, $H_{i'j'}$ 是附加线圈中元电流圈的磁场。 M, N 分别是层数和每层的匝数。

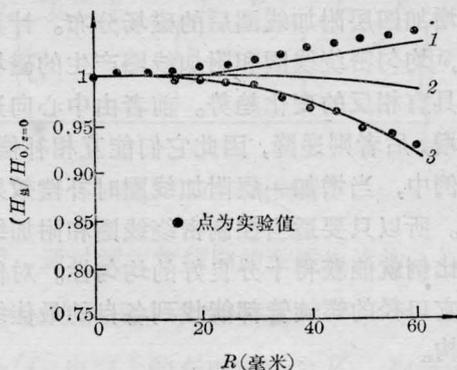
螺旋管的电感可按式算出:

$$L = 2\pi \times 10^{-7} \int_0^l \int_0^A n H_{\Sigma} R dR dZ / I \quad (3)$$

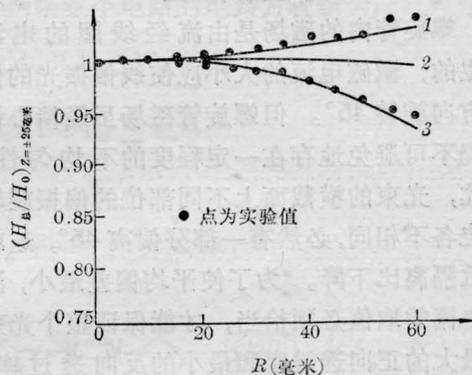
其中 l, A 分别为螺旋管的长度和半径, n 是单位长度内的线圈匝数, L 的单位为毫亨。

根据上列各式我们编制了通用的计算机程序。为便于考察不同绕制形式对磁场分布的影响, 该程序可分别输出各层线圈各自产生的和累计的磁场强度值。下面给出一个计算实例, 该实例的实验结果在本文第二部分给出。

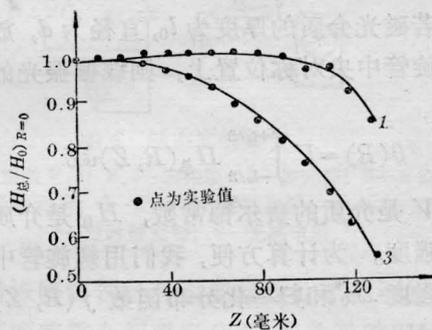
线圈结构如图1, 其中: $l=260$ 毫米,



(a) $Z=0$ 处截面磁场分布



(b) $Z=\pm 25$ 毫米处截面磁场分布



(c) $R=0$ 轴上磁场分布

图2

$A=70$ 毫米, $N_1=104$ 匝/层, $N_2=64$ 匝/层, $M_1=3$ 层, $M_2=4$ 层, 用线径为 2.44 毫米的漆包线绕制。螺旋管中 $Z=0$ 处及 $Z=\pm 25$ 毫米处横截面上和中心轴上 ($R=0$) 的磁场分布如图2。它们是以磁场强度 $H_0(R=0, Z=0)$ 归一化的。由于磁光介质的通光口径为 120 毫米, 所以 R 最大值取 60 毫米。图中曲线 1 是三层均匀密绕线圈产生的磁场分布,

曲线 2 是增加一层附加线圈后的分布, 曲线 3 是增加四层附加线圈后的磁场分布。计算表明, 均匀密绕线圈和附加线圈产生的磁场分布具有相反的变化趋势。前者由中心向边缘递增, 后者则递减, 因此它们能互相补偿。在本例中, 当增加一层附加线圈时补偿效果最好。所以只要适当控制密绕线圈和附加线圈的比例就能获得十分良好的均匀性。对任何其它口径的螺旋管都能找到各自的最佳线圈结构。

2. 最佳激磁电流的确定

螺旋管内的磁场是由流经线圈的电流产生的, 激磁电流的大小应使线偏振光的偏振方向旋转 45° 。但螺旋管磁场虽经精心设计仍不可避免地存在一定程度的不均匀性。因此, 光束的横截面上不同部位的偏振旋转角也各不相同, 必然有一部分偏离 45° , 这就导致隔离比下降。为了使平均偏差最小, 激磁电流的取值必须恰当, 才能保证整个光束有最大的正向透过率和最小的反向透过率。下面给出确定这一最佳激磁电流的方法。

若磁光介质的厚度为 l_0 , 直径为 d , 放置在螺旋管中央对称位置上, 则线偏振光的转角为:

$$\theta(R) = V \int_{-l_0/2}^{+l_0/2} H_{\text{总}}(R, Z) dZ \quad (4)$$

其中 V 是介质的费尔德常数, $H_{\text{总}}$ 是介质内磁场强度。为计算方便, 我们用螺旋管中心磁场强度 H_0 和归一化分布函数 $f(R, Z)$ 来表示 $H_{\text{总}}$:

$H_{\text{总}}(R, Z) = H_0 f(R, Z)$, 则 (4) 式可改写成:

$$\theta(R) = V H_0 \int_{-l_0/2}^{+l_0/2} f(R, Z) dZ \quad (5)$$

由于起偏器与检偏器相交成 45° , 所以光束截面上任一点的反向透过率和正向透过率分别为:

$$T_{\text{反}}(R) = \cos^2[\theta(R) + 45^\circ],$$

$$T_{\text{正}}(R) = \cos^2[\theta(R) - 45^\circ],$$

整个光束的平均透过率为:

$$\bar{T}_{\text{反}} = \frac{2\pi}{\pi(d/2)^2} \int_0^{d/2} \cos^2[\theta(R) + 45^\circ] R dR,$$

$$\bar{T}_{\text{正}} = \frac{2\pi}{\pi(d/2)^2} \int_0^{d/2} \cos^2[\theta(R) - 45^\circ] R dR.$$

将 (5) 式代入得:

$$\bar{T}_{\text{反}} = \frac{8}{d^2} \int_0^{d/2} \cos^2[V H_0 \int_{-l_0/2}^{+l_0/2} f(R, Z) dZ + 45^\circ] R dR$$

$$\bar{T}_{\text{正}} = \frac{8}{d^2} \int_0^{d/2} \cos^2[V H_0 \int_{-l_0/2}^{+l_0/2} f(R, Z) dZ - 45^\circ] R dR \quad (6)$$

为获得最好的隔离比, H_0 存在最佳值, 它使 $\bar{T}_{\text{正}}$ 和 $\bar{T}_{\text{反}}$ 同时为最大和最小。最佳 H_0 值由下式给出:

$$\frac{d\bar{T}_{\text{正}}}{dH_0} = 0, \quad \frac{d\bar{T}_{\text{反}}}{dH_0} = 0.$$

容易证明, 这两个条件对 H_0 的要求是一致的。即

$$\int_0^{d/2} \left[\int_{-l_0/2}^{+l_0/2} f(R, Z) dZ \right] \cos[2V H_0 \int_{-l_0/2}^{+l_0/2} f(R, Z) dZ] R dR = 0 \quad (7)$$

(7) 式是关于 H_0 的超越方程, 利用计算机不难求出它的解。 H_0 得出后, 最佳激磁电流由下式给出:

$$I = H_0 / \left[\frac{\mu_0 N_1 (M_1 + M_2)}{2(A_2 - A)} \right] \times \ln \frac{A_2 + \sqrt{A_2^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}}{A + \sqrt{A^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}} - \frac{\mu_0 M_2 (N_1 - N_2)}{2(A_2 - A_1)} \times \ln \frac{A_2 + \sqrt{A_2^2 + (l/2 - l_2)^2}}{A_1 + \sqrt{A_1^2 + (l/2 - l_2)^2}} \quad (8)$$

式中 H_0 单位为高斯, 长度单位为毫米, $\mu_0 = 4\pi$, 电流单位为安培。

3. 供电网络的设计

由于激磁电流的量级高达数千安培, 所以必须采用脉冲方式供电。脉冲电流的峰值应等于最佳激磁电流, 并且在峰值附近的变化要平缓以保证隔离器有足够的有效工作

区。这个工作区要能覆盖正、反向激光通过隔离器的时间间隔和放大器的氙灯放电周期。前者不大于 0.5 微秒, 后者约 1 毫秒。为有效地隔离反向激光, 0.5 微秒内电流变化要小于 1%。而为抑制放大器自振, 1 毫秒内允许的电流变化可放宽到 5%。能达到上述要求的供电网络是 LC 成形网络, 并以氙灯为开关元件, 以实现和激光脉冲的精确同步。图 3 是它的电路。

各支路的电路参数为 L_m 、 C_m 、 R_m , 支路电流为 i_m 。 L_1 、 R_1 是隔离器螺旋管的电感和

$$\begin{aligned}
 L_1 \frac{d}{dt} \left(\sum_1^n i_m \right) + \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1 dt' + K_0 \sqrt{\sum_1^n i_m} + R_1 \sum_1^n i_m &= V_0 \\
 L_2 \frac{d}{dt} \left(\sum_2^n i_m \right) + \frac{1}{C_2} \int_0^t i_2 dt' - \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1 dt' + R_2 \sum_2^n i_m &= 0 \\
 \vdots & \\
 L_n \frac{d}{dt} \left(\sum_n^n i_m \right) + \frac{1}{C_n} \int_0^t i_n dt' - \frac{1}{C_{n-1}} \int_0^t i_{n-1} dt' + R_n \sum_n^n i_m &= 0
 \end{aligned} \tag{9}$$

上列方程组可用计算机解出, 选择合适的参数就能得到所需要的放电电流。

计算表明, 对于口径小于 $\phi 70$ 毫米的隔离器, 由于螺旋管电感较小, 需要的工作电压不超过 5 千伏, 这样可以采用多级 LC 网络, 得到顶部平坦范围很宽的方波脉冲电流。而对于口径大于 $\phi 100$ 毫米的隔离器, 因螺旋管线圈电感很大, 往往需要 10 千伏以上的工作电压。为避免供电网络过于庞大应选用 1~2 级 LC 网络, 且用耐高压的引燃管作开关, 此时放电电流为钟形脉冲。虽如此, 只要保证精确的同步, 仍能满足前述要求。本文第二部分给出了一个适用于大口径隔离器的供电网络实例。

$\phi 120$ 毫米大口径磁光隔离器实验

为考核设计公式和计算机程序的可靠性, 我们研制了一台通光口径为 120 毫米的大型磁光隔离器。这种隔离器是建造兆瓦量级激光系统所必须的。实验装置如图 4 所示。

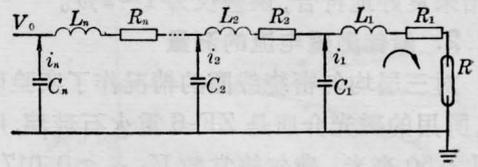


图 3 LC 供电网络

电阻。通过螺旋管线圈的激磁电流为: $I_0 = \sum_{m=1}^n i_m$ 。氙灯是非线性电阻, 可表示为: $R = K/\sqrt{I_0}$, 电容上的充电电压为 V_0 , 则该 LC 成形网络整个电路的电路方程组为:

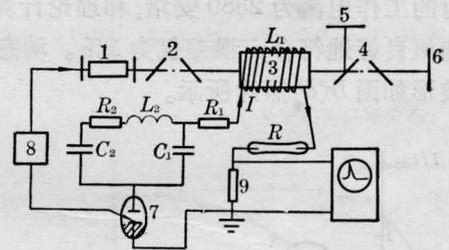


图 4 动态实验装置。

1—偏振激光源; 2、4—偏振膜; 3—旋光器; 5—S 偏振分量监测屏; 6—P 偏振分量监测屏; 7—引燃管; 8—延时触发器; 9—无感电阻。

对该隔离器各种主要参数作了仔细的测量。下面着重介绍磁场分布、最佳激磁电流、同步和覆盖区域的测量方法和实验结果。

1. 磁场分布的测量

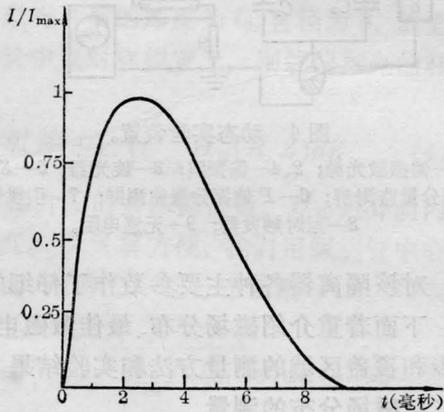
螺旋管线圈的几何结构见图 1。实验用 JWL-30 型晶体管恒流器供给恒稳电流, 用 CT-5 型高斯计探头插入螺旋管内直接测出该线圈的磁场强度沿径向和轴向的分布。我们对单纯为密绕线圈和增加四层附加线圈这两种极端情况作了测量, 结果示于图 2 中。由图可见在这两种情况下, 无论是横向分布还是轴向分布, 测量结果都和计

算结果良好地符合,误差仅为1~2%。

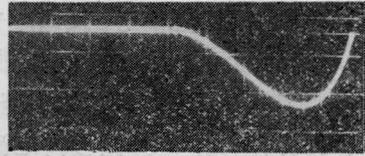
2. 最佳激磁电流的测量

对三层均匀密绕线圈的情况作了实验研究。所用的磁光介质是ZF-6重火石玻璃,厚度 $l_0=50$ 毫米,费尔德常数 $V_{1.06\mu}\approx 0.017'/$ 厘米·高斯。

根据已给出的参数,按(7)式可算出最佳的中心磁场 $H_0=31000$ 高斯,再由(8)式得到最佳激磁电流 $I=2364$ 安培。为获得此电流又可按(9)式设计二级LC网络,如图3所示。其中 $L_1=5.6$ 毫亨, $C_1=C_2$ 均为420微法, $L_2=150$ 微亨, $R_2=0.1$ 欧姆。由于 V_0 高达14千伏以上,为使电路不处于振荡状态,人为地引入阻尼电阻 $R_1=3$ 欧姆及两支串接氙灯($K_0\approx 41.2$ 欧姆·安 $^{-1/2}$)。由此计算所得放电电流波形如图5(a)。在实验上我们用一无感电阻串入回路,测得达到最大隔离比时的工作电流为2380安培,和理论计算的最佳值良好地符合,误差仅为1%。动态电流波形如图5(b)照片所示。



(a) 计算结果



(b) 实验结果(2毫秒/格,2伏/格)

图5

3. 同步和复盖区

和小口径磁光隔离器采用方波激磁电流不同,大口径隔离器只能用上述钟形脉冲电流。此时要求脉冲放电和激光发射准确同步,以保证激光在电流达到峰值时通过隔离器。实验中激光器氙灯和引燃管触发时间的抖动不大于10微秒,能满足同步精度要求。见图6照片。

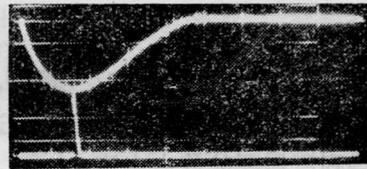


图6 激光与电流的同步

另外,测量表明,在电流峰值附近,1毫秒间隔和10微秒间隔,电流强度变化分别小于5%与1%,因此有足够的覆盖区。在此区间内隔离器能有效地隔离反向激光和抑制放大系统的自振。

参 考 文 献

- [1] K. Eidmann et al.; *J. Phys. E; Scientific Instruments*, 1972, **5**, No. 1, 56.
- [2] 林礼煌等,《激光》,1979, **6**, No. 12, 36.
- [3] W. W. Simmons; LLL Report UCRL-50021-76, 1976, p. 2~85.
- [4] Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц; “Электродинамика сплошных сред”, Гостехиздат 1957, p. 164.