

# 滤光器恒温过程分析

顾震雷

太阳磁场望远镜功能之一是测量太阳活动区的视向速度，要求该仪器所用的双折射滤光器中心区域恒温稳定度至少达到 $\pm 0.005^\circ\text{C}$ 。因为温度的任何漂动，将引起透过带位移，直接影响视向速度的测量精度。因此，努力提高滤光器的恒温稳定度是很有必要的。

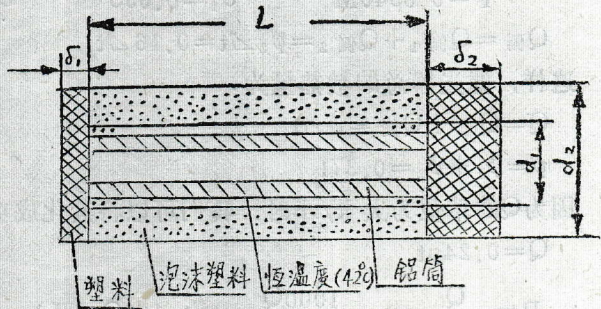
众所周知，滤光器的恒温稳定度主要决定于三个因素：

1. 滤光器自身保温状况。
2. 温度检测元件的灵敏度和重复性。
3. 温度控制器的灵敏度，稳定性。

我们根据以上原则，来考察滤光器的恒温设计。

## 一、滤光器保温

磁场望远镜双折射滤光工作腔体内工作温度设置在 $42^\circ\text{C}$ 附近，此值一旦确定，就要求长期恒定在该温度上。滤光器腔体通过其外部保温层，自然地向外界散发热量。保温层的设计应尽量减小由于外界温度变化而引起的散热量波动，以减轻对温度控制器的要求，提高恒温精度。我们用散热系数 $\psi$ （大卡/小时·度）来表示某一滤光器的保温性能，它可通过计算或实测得到。下面，先进行估算。滤光器被简化成如图〈一〉：



图一 滤光器简图

可以把保温层看成是二块平板型和一个圆筒型结构所组成，圆筒型散热公式为：

$$Q_{\text{圆}} = \frac{\pi L(t_x - t_y)}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}} \quad \dots(1)$$

- 其中：L：筒长（米）  
 $d_1$ ：保温层内径（米）  
 $d_2$ ：保温层外径（米）  
 $t_y$ ：外界空气温度（度）  
 $\alpha$ ：泡沫塑料对空气散热系数（4大卡/米<sup>2</sup>·时·度）  
 $\lambda$ ：泡沫塑料的导热系数（0.05大卡/米·时·度）

在公式〈1〉中：设 $t_x - t_y = \Delta t$



$$\psi_1 = \frac{\pi L}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}$$

$$\text{则: } Q_{\text{圆}} = \psi_1 \Delta t \quad \dots (2)$$

代入已知值:  $L = 0.478^{\text{M}}$

$$d_1 = 0.116^{\text{M}}$$

$$d_2 = 0.210^{\text{M}}$$

可算得  $\psi_1 = 0.211$

$$\dots (3)$$

侧向散热公式可用:

$$Q_{\text{侧}} = \frac{F \Delta t}{\frac{1}{\alpha_3} + \frac{\delta}{\lambda_3}} \quad \dots (4)$$

其中:  $\alpha_3$ : 塑料对空气散热系数 (4 大卡/米<sup>2</sup>·时·度)

$\lambda_3$ : 塑料的导热系数 (0.25 大卡/米·时·度)

$\delta$ : 塑料厚

F: 塑料侧面积

为简化计算, 我们可设定贴紧恒温器一面为均匀的 (恒温) 温度, 而忽略温度梯度, 这在工程计算上是允许的。

代入已知值:

$$F = 0.0346 \text{M}^2 \quad \delta_1 = 0.035^{\text{M}} \quad \delta_2 = 0.060^{\text{M}}$$

$$Q_{\text{侧}} = Q_{\text{侧}1} + Q_{\text{侧}2} = \psi_2 \Delta t = 0.16 \Delta t \quad \dots (5)$$

这样, 滤光器总的散热量为:

$$Q = Q_{\text{圆}} + Q_{\text{侧}} = \psi \Delta t \quad \dots (6)$$

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 = 0.371 \quad \dots (7)$$

因为 Q 的单位为大卡/小时, 我们可以将其化成功率:

$$Q = 0.24 \text{pt}$$

$$P = \frac{Q}{0.24 \text{t}} = \frac{1000Q}{0.24 \times 60 \times 60} = 1.158Q \text{ (瓦)} \quad \dots (8)$$

这样, 我们就可以利用公式 (6) (8) 计算。当设定恒温温度为 42℃ 时, 在不同外界温度下, 滤光器的耗热量和需要补充的功率:

表一 不同外界温度下的散热量

ty(℃)	Δt(℃)	Q(大卡)	P 瓦	ty	Δt	Q	P
-15	57	21.15	24.49	15	27	10.02	11.60
-10	52	19.29	22.34	20	22	8.16	9.45
-5	47	17.44	20.19	25	17	6.31	7.30
0	42	15.58	18.04	30	12	4.45	5.16
5	37	13.73	15.90	35	7	2.60	3.01
10	32	11.87	13.75	40	2	0.74	0.86



从表（一）看出，由于外界温度变化，引起了滤光器散热量变化，从而要求恒温调节器提供相应热量，以维持热平衡。对恒温调节器的要求是：在不同的外界温度下不仅能维持热平衡，而且要保证滤光器内恒温层温度维持在要求温度的误差范围之内。

## 二、加温电桥及加热控制

### 1. 加热和检测电桥：

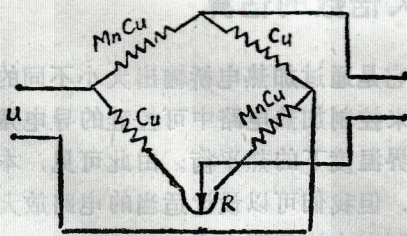
目前所知的滤光器，其加热和温度检测方式分为二类，一类是加温和检测在同一电桥内完成，即电桥既是加温元件，又是测温元件。另一类是加热导线和测温元件分开，这样，可以选择更灵敏的检测元件，以取得需要调节的误差信息。我们选择的是上述第一种方式，其优点除了结构简单、价格便宜，性能稳定以外，其独特的优点是调节灵敏、快速、无滞后；精度也比较高。

加热和检测电桥的结构见图（二）该电桥采用双线无感绕法，密绕于被加温的铝合金圆筒外层，电阻R起温度微调作用，电桥的四个臂由两种材料组成，漆包锰铜丝（电阻温度系数很小的（约 $10 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ ）并阻值稳定，作为基准臂。高强度漆包铜导线的电阻温度系数 $\alpha_0 = 0.00425$ 作为感温臂。漆包锰铜丝阻值取30欧，铜导线的阻值在 $42^{\circ}\text{C}$ 时，其阻值为30欧。

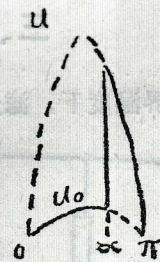
### 2. 加温控制过程：

加在电桥上的电压有两个，一个是检测温度用的电压，也称辅助加热电压 $u_0$ ；另一个是加热电压 $u$ ；在本装置中， $u_0 = 10$ 伏半波， $u = 80$ 伏半波。当一个周期开始时， $u_0$ 首先加入电桥，电桥的不平衡信号 $\Delta u$ ，就反映了由电桥组成的恒温层温度， $\Delta u$ 经电路放大，形成触发脉冲开启可控硅，加入加热电压 $u$ ，此时 $u_0$ 自动关闭，当加热电压 $u$ 过零时，一个周期结束。待第二个周期时，如上重复。电路将平衡在加热和散热量相同时。

由于有辅助加热电压 $u_0$ ，因此，该滤光器正常工作的最高外界环境温度可依据式（6）和式（8）求得。



图（二） 加热和检测电桥



图三，电桥加热波形

$u_0$ 的加热功率为：

$$P = \frac{1}{2} \times \frac{u_0^2}{r} = \frac{1}{2} \times \frac{10^2}{30} = 1.667 \text{瓦}$$

因为： $P = 1.158 \psi \Delta t$

$r$ ...电桥总阻值



$$\text{所以: } \Delta t = \frac{P}{1.158\psi} = \frac{1.667}{1.158 \times 0.371} = 3.9$$

$$\therefore t_1 = t_2 - 3.9 = 42 - 3.9 = 38^\circ\text{C}$$

即滤光器正常工作的最高外界环境温度为38℃。

我们依据表一，可以计算当外界温度为-15℃到38℃时，分别对应的可控硅导电角。

当 $t_1 = -15^\circ\text{C}$ 时，要求加热功率P为24.49瓦，当 $t_2 = 38^\circ\text{C}$ 时，要求P为1.718瓦。

因为电桥加热波型如图三。设可控硅在 $\alpha$ 时导电。这时，加在电桥上功率可以用下式来表示：

$$P = \frac{\frac{1}{\omega} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} (u - u_0) \sin \omega t \, d\omega t}{\frac{1}{\omega} \int_0^{\pi} \sqrt{2} u \sin \omega t \, d\omega t} \times \frac{u^2}{r} \times \frac{1}{2} + \frac{u_0^2}{2r} =$$

$$= \frac{70 \left[ -\cos \omega t \right]_{\alpha}^{\pi}}{80 \left[ -\cos \omega t \right]_0^{\pi}} \times \frac{80^2}{2 \times 30} + \frac{10^2}{2 \times 30} = (1 + \cos \alpha) \times 46.67 + 1.67$$

$$\text{即 } \cos \alpha = \frac{P - 1.67}{46.67} - 1$$

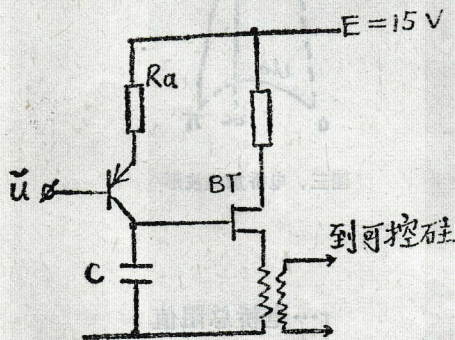
这样，我们就计算出如表（二）结果，其中 $t$ 表示对应 $\alpha$ 的触发时刻

表二、不同外界温度下的导电角

$t_1$ (度)	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	38
P(瓦)	24.49	22.34	20.19	18.04	15.90	13.75	11.60	9.45	7.30	5.16	3.01	1.72
$\alpha$ (度)	120.7	123.9	127.1	130.5	134	137.8	141.9	146.4	151.6	157.7	166.2	177.3
$t^{\circ}$	6.71	6.88	7.06	7.25	7.44	7.66	7.88	8.13	8.42	8.76	9.23	9.85

### 三、控制电路放大倍数的估算

在不同的外界温度下，滤光器的热耗不同，它是通过加热电桥输出大小不同的温度误差信号，来控制加热电路中可控硅的导电角，以达到新的外界温度下的热平衡。由此可见，本电路是有差调节，但我们可以设计适当的电路放大倍数，把误差控制在允许范围之内。



(图四) 末级触发电路

设该滤光器在-15℃到+38℃之间工作，并要求加热电桥的恒温层温度波动不大于 $\frac{1}{200}^\circ\text{C}$ ，以此

我们来计算控制电路的放大倍数。

控制电路的末级电路如图四，变压器输出脉冲去触发加热电路中的可控硅。



设BT管的分压比 $\eta=0.7$   
 则峰点电压近似为:

$$u_p = 0.7E = 0.7 \times 15 = 10.5 \text{ 伏}$$

亦即当电容C充电到 $u_c = 10.5$ 伏时, BT输出触发脉冲。

从图四知, 当 $\tilde{u}$ 为正弦电压时, 对C的充电电流也为正弦, 电流的大小决定于 $u$ 的大小及 $R_a$ 值大小, 而集电极电压变化基本无影响。正弦电流在电容C上产生的电容电压为:

$$u_c = \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad \dots (9)$$

当外界温度为 $38^\circ\text{C}$ 时, 从表四知, 要求导电角 $\alpha_a = 177.3^\circ$ , 而当外界温度为 $-15^\circ\text{C}$ 时, 要求导电角 $\alpha_b = 120.7^\circ$

计算(9)式

$$\begin{aligned} u_c &= \frac{1}{C\omega} \int_0^\alpha I_m \sin\omega t d\omega t \\ &= \frac{I_m}{C\omega} \left[ -\cos\omega t \right]_0^\alpha \end{aligned}$$

$$\text{即: } I_m = \frac{u_c \cdot C \cdot \omega}{1 - \cos\alpha} \quad \dots (10)$$

分别代入已知值:

$$38^\circ\text{C时, } I_{ma} = \frac{10.5 \times 0.1 \times 10^{-6} \cdot 2\pi \times 50}{1 - \cos 177.3^\circ} = 0.165 \text{ A}$$

$$\bar{U}_a = I_{ma} \cdot R_a = 0.842 \text{ V} \quad \dots (11)$$

$$-15^\circ\text{C时, } I_{mb} = \frac{10.5 \times 0.1 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 50}{1 - \cos 120.7^\circ} = 0.218 \text{ A}$$

$$\bar{U}_b = I_{mb} \cdot R_a = 1.112 \text{ V} \quad \dots (12)$$

设控制电路放大倍数为K, 则要求加热电桥输出:

$$38^\circ\text{C时: } \Delta U_a = \frac{\bar{U}_a}{K}$$

$$-15^\circ\text{C时: } \Delta U_b = \frac{\bar{U}_b}{K}$$

在电桥中, 当同种材料的对臂阻值相对时, 误差信号可用下式求得:

$$\Delta u = u_0 \left( \frac{R_{M_{Cu}} - R_{Cu}}{R_{M_{Cu}} + R_{Cu}} \right) \doteq u_0 \frac{R_{M_{Cu}} - R_{Cu}}{2R_{M_{Cu}}} \quad \dots (12)$$

$$\text{则: } R_{Cu} = R_{M_{Cu}} - \frac{2R_{M_{Cu}}}{u_0} \Delta u \quad \dots (13)$$

上式中 $R_{Cu}$ 为对应某一温度时铜电阻值。当外界为 $38^\circ\text{C}$ 和 $-15^\circ\text{C}$ 时, 阻值分别为:



$$R_{a.c.u} = R_{M.n.c.u} - \frac{2R_{M.n.c.u}}{u_0} \cdot \frac{\bar{U}_a}{\sqrt{2}K} \quad \dots (15)$$

$$R_{b.c.u} = R_{M.n.c.u} - \frac{2R_{M.n.c.u}}{u_0} \cdot \frac{\bar{U}_b}{\sqrt{2}K} \quad \dots (16)$$

式(15) - (16)得:

$$R_{a.c.u} - R_{b.c.u} = \frac{2R_{M.n.c.u} \cdot C_u}{\sqrt{2}K u_0} (\bar{u}_b - \bar{u}_a) \quad \dots (17)$$

因为要求在38℃和-15℃时, 恒温层极限温差为 $\frac{1}{200}$ ℃, 因此:

$$R_{a.c.u} - R_{b.c.u} = 30 \times 0.00425 \times \frac{1}{200} = 0.000637$$

将已知代入(17)式, 并把放大倍数K提出得:

$$\begin{aligned} K &= \frac{2R_{M.n.c.u}}{\sqrt{2}U_0(R_{a.c.u} - R_{b.c.u})} (\bar{u}_b - \bar{u}_a) = \\ &= \frac{2 \times 30}{\sqrt{2} \times 10 \times 0.000637} (1.112 - 0.842) = \\ &= 1800 \end{aligned}$$

所以, 当控制电路放大倍数  $K \geq 1800$  时, 就能满足该滤光器的使用要求。

#### 四、电路介绍

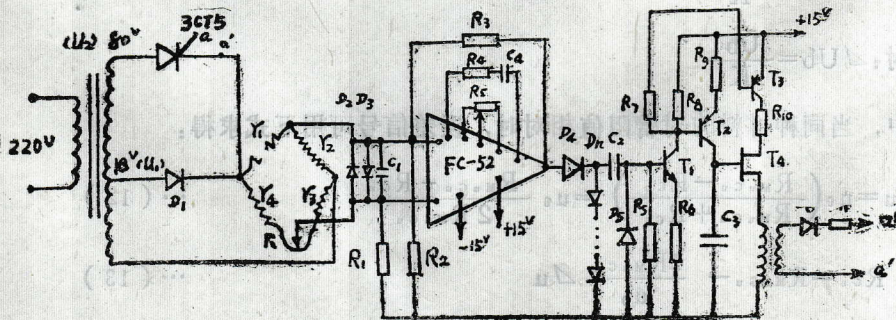
本电路作为高精度的恒温控制电路(见图五), 具有以下特点:

1, 采用半波检温和半波加温, 这样, 一方面可以提高电路的调节效率, 另一方面, 使相敏判温电路非常简单。

2, 由于采用半波工作, 使电路中的电容器有足够的放电恢复时间, 避免可能产生的信号积累误差, 这样, 不仅使电路的调节功能灵敏快速, 而且提高了调节精度。

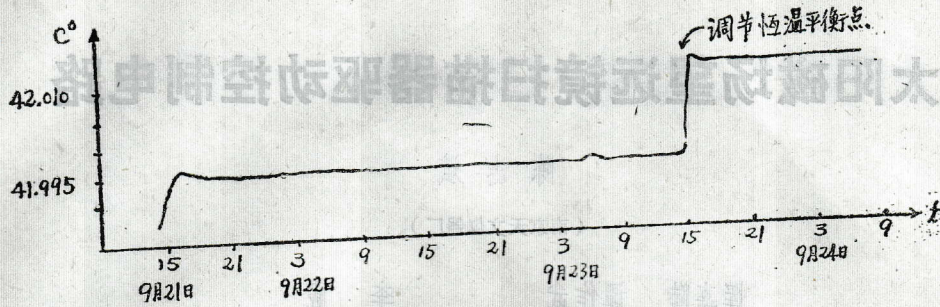
3, 利用检测电桥测得的误差信号, 控制图(五)中的 $T_3$ 管, 并使 $T_4$ 管和50周同步。

由于采取了以上措施, 使本电路具有结构简单, 工作可靠, 调节精度高的特点。



图五, 恒温电路原理图





图六 滤光器恒温精度测试记录

### 五、恒温精度测试

本滤光器配有上海医用仪器厂生产的L型精密温度计，刻度格值为  $\frac{1}{100}^{\circ}\text{C}$ ，配以读数显微镜读测，用以测量滤光器园筒中间的温度调节精度。我们于82年9月21日下午开机，进行连续工作并进行定时测读温度数据，到24日上午关机，数据证明，本滤光器恒温稳定度已达到  $\frac{1}{1000}^{\circ}\text{C}$ 。

时间	温度	读数	修正	实际
9月21日 15:00	41.995	41.995	0.000	41.995
9月21日 21:00	42.010	42.010	0.000	42.010
9月22日 03:00	42.010	42.010	0.000	42.010
9月22日 09:00	42.010	42.010	0.000	42.010
9月22日 15:00	42.010	42.010	0.000	42.010
9月22日 21:00	42.010	42.010	0.000	42.010
9月23日 03:00	42.010	42.010	0.000	42.010
9月23日 09:00	42.010	42.010	0.000	42.010
9月23日 15:00	42.010	42.010	0.000	42.010
9月23日 21:00	42.010	42.010	0.000	42.010
9月24日 03:00	42.010	42.010	0.000	42.010
9月24日 09:00	42.010	42.010	0.000	42.010