

磁场望远镜光电接收器的机械结构及 其半导体致冷器设计与计算

吕 韵 翠

一、前 言

选择磁场望远镜接收器探测元件时(1972年),利用MOS电容结既能作光电转换又能容纳电荷积累的最新CCD在国外也才刚刚问世不久,而CCD作为器件用在天文技术上在国外也是七十年代末期。所以磁场望远镜的光电接收器选用光电倍增管作为光电转换元件在当时是必走之路而又现实可行的。由于所测磁场的最小讯号与常温下光电倍增管的暗流为同一数量级,因此,必须为降低管子靶面温度而使暗流降低,以提高其讯号暗流比。故要求致冷光电倍增管。其要求为工作温差 $\Delta T=40\sim45^{\circ}\text{C}$,致冷后的讯号暗流比 $\frac{1}{N_{\text{冷}}}=300$ 。

二、结构概述和机械结构特殊物理技术性能的实现:

从扫描焦面得到的讯号通过琥珀里透镜和第三转向棱镜后〔1〕进入EMI9658光电倍增管入射窗到靶面(件1)的局部结构见图1。致冷的光电接收器,其物理性能如电屏蔽、磁屏蔽、密气、既绝缘而导热等特殊性能要求,将在下述技术措施中得到实现:

- A. 倍增管的电屏蔽——铜制圆筒,件(3)
- B. 倍增管的磁屏蔽——玻膜合金薄套,件(5)
- C. 倍增管的径向隔热空气层(2)和隔热泡沫塑料筒,件(4)
- D. 电绝缘性好而热传导良好的冷板——铝基体阳极氧化硬膜,件(8)
- E. 绝热性好、绝缘性好、强度较高的黑色通光套——黑P.T.F.E或黑尼龙,件(10)
- F. 致冷腔两端4个密气密封圈,件(7)
- G. 入射窗防结霜雾双层玻璃结构(14)
- H. 风冷式二级环形半导体致冷器(9)

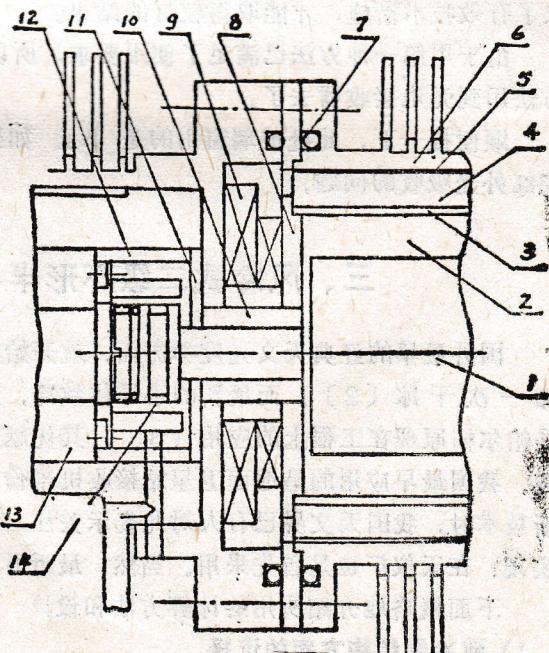


图1 光电接收器入射窗及致冷局部结构

需要说明的是，致冷光电倍增管伴随产生入射窗结霜雾的问题，这为天文观测，测量所不允许，看来此问题比较麻烦，在国外天文界也不是都解决了。如1983年11月“昆明太阳物理国际讨论会”在云台召开时，英国天文学家就谈到他们用光电倍增管致冷后虽采取了措施，但仍有结霜雾现象。当年在设计此接收器机械结构时，对此十分重视特别予以注意。准备了三种解决办法。1) 密封干燥法。2) 微电阻加热法。3) 夹层空间抽真空法。此三种方法依顺序后面的比前面麻烦复杂。为了使在一种方法失败即能有新的措施用上去，仍从技术上作了三种方法的准备。

第一种密封干燥法最简易，开始在试验室试验，没有发现明显结霜雾情况，就装到望远镜上试用，经过联调和北台天文学家试观测9个月，没有发现结霜雾和影响测量磁场。

具体的做法如下：众所周知，结霜雾有二个原因，而且要二个“原因”同时存在时才会结霜雾。1) 入射窗前的存在温差，入射窗前面接近环境温度，但稍低一些；而后面接近致冷腔温度，但稍高一些。

2) 如果入射窗是一块玻璃，又有水蒸汽或潮气，当温差达一定值时，就结雾或结霜。

防结霜结构(14)，见图1。使设计成有夹层空间的两块平面透镜，构成入射窗玻璃。在保证两镜面不变形的条件下尽可能使O形橡皮圈压紧，使夹层空间与两端不透气。而双层窗的镜框由导热率最低，膨胀系数也较低的铟康镍(Inconel)合金制成。镜框四周的另件全部都是隔热性好的塑料，尤其重要的是镜框与冷板件(8)相连接的黑色通光筒，件(10)的长度和绝热性能特别起作用。当然，整个致冷腔的密气性，保温性好，外界潮湿气仅可能少进去或不进入；以及组合件(14)布局位置都是有关系的。这样，使双层玻璃窗局部温度梯度减到最小；同时，使其在装配时夹层空间获得的最大程度干燥。水气、潮气的状态能在光电接收器工作时仍能保持。无论在结构设计，选用材料，工艺装配上都十分严格仔细，采取了有效技术措施，才能取得较好的结果。

由于用第一种方法已满足了使用要求，所以没有必要将微电阻加热或夹层空间抽真空等方法用到光电接收器去了。

顺便提一下，此处玻璃窗用的是K₉。如果是光电光度计致冷，则窗玻璃所选材料要考虑红外光吸收的问题。

三、风冷式二级环形半导体致冷器设计与计算：

国外最早的经典天文光度学方面，就开始用干冰致冷光电倍增管，天文观测者需一晚上加一次干冰〔2〕。而最新的半导体致冷，天文学家只需要操纵电钮就行了。半导体致冷是帕尔帖原理在工程上的应用〔3〕。其优越性〔3〕〔4〕决定了国外天文界对它感兴趣。我国最早应用的是地面卫星站接收机部份致冷约在70年代初。在磁场望远镜决定采用此新技术时，我国天文界已有人对此表示关注，但都因感其设计、制造工艺都较麻烦而未具体实现。在天仪厂也是首先采用。当然，最近几年我国天文台站想用它的就更多了。

下面概略地介绍所用的计算方法和设计

1) 致冷器结构方案的选择

由于EMI9658光电倍增管的阴极靶面在管子的端部，也即端窗接收。端窗接收的管子，

端面放置致冷器离阴极靶面最近，致冷效果最好。端置必须有通光孔，所以致冷器设计成环形，留出通光口径。

致冷器的散热方式乃是设计、选用半导体致冷器件的重要问题。水冷散热方式致冷效率高，带水箱的致冷电偶堆块产品型号规格较多。但望远镜都要背上贮水池，供水系统的“包袱”。根据磁场望远镜最后决定的总体布局，不带供水源，所以光电接收器致冷器采用风冷散热。而风冷式散热的器件产品规格极少，按设计要求的温差及总体布置条件，必须设计专用的，由致冷器厂协作加工。关于半导体致冷器分为Ⅰ级，Ⅱ级，多级其原理等等此处不讲，请参看〔3〕。

我们选择的是二级环形强迫通风（两台小电风扇）散热的半导体致冷器。

2) 计算方法：

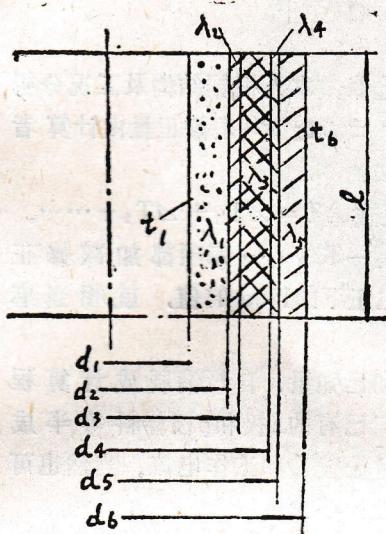


图 2

A, 简化光电接收器热力学模型，计算热负载。简化成相当于多层圆筒壁型（图2），应用M, A, 米海耶夫公式
〔5〕计算热流量 q_0 。简化计算的假设条件：

(1) 表面无辐射

(2) 无对流

(3) 只有热传导，则环境漏热 Q_0 。 $Q_0 = q_0 \cdot 1$

$$q_0 = \frac{2\pi(t_1 - t_0)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_i}{d_{i-1}}}$$

其中 l ——当量长度。

t_1 ——被冷对象温度。

t_0 ——环境温度

在此结构里， $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i$ 分别为空气、铜、泡沫塑料，玻膜合金及铝的导热系数。 d_1, d_2, \dots, d_6 为相对应层的直径。计算得的 Q_0 ，乘上一安全系数 C 就作为设计致冷器的热负载 Q 。

B, 计算致冷器各项参数：

计算出在所要求的工作温差 ΔT ，环境漏热 Q_0 ，和可供选用的直流电压 V 条件下所需的工作电流 I ，最少的电偶对数，和电偶极子的直径 d 与长度 l 。

在工程计算中，致冷对象EMI9658光电倍增管作为无热源元件处理〔3〕。也即管子本身发热与环境漏热的热传导相比可略去不计，负载主要来自环境漏热的热传导。

已知条件： Q_0 ——环境漏热（瓦）

C ——安全系数

ΔT ——致冷器工作温差（度）

V ——可供选择的直流供电电源电压一般为1.5伏，3伏，4.5伏6伏等。

电偶极子材料性能数据查表得：

$\alpha_n = \alpha_p$ ——电偶臂温差电动势（伏/度）

$\tau = \tau_n = \tau_p$ ——电偶臂的电导率（欧姆·厘米） $^{-1}$

Z——电偶极子n极p极温差材料的优价系数(1/度)

本文用电偶对的最大效率(η)公式计算〔3〕

$$\eta = \frac{T_c}{T_n - T_c} \times \frac{\sqrt{1 + \frac{1}{2}Z(T_n + T_c)} - \frac{T_n}{T_c}}{\sqrt{1 + \frac{1}{2}Z(T_n + T_c)} + 1}, \quad \eta = \frac{CQ}{IV}, \quad I = \frac{CQ}{\eta V}$$

每一对电偶极子上的电压降U

$$u = \frac{(|\alpha_n| + |\alpha_p|) \times (T_n - T_c) \times \sqrt{1 + \frac{1}{2}Z(T_n + T_c)}}{\sqrt{1 + \frac{1}{2}Z(T_n + T_c)} - 1}$$

电偶极子总的对数N

$$N = \frac{Q}{IU\eta}, \quad \frac{1}{S} = \frac{\tau}{2} \times \frac{U}{I}, \quad S = \frac{\pi}{4}d^2$$

以上公式参考文献〔6〕〔3〕。而有关项的修正值或选取由本人根据结构及工况分析确定，如热端温度 T_n 和冷端温度 T_c 的值。 $\Delta T = (T_n - T_c) \pm \Delta t$ 。 Δt 是修正量由计算者根据资料、经验、分析来确定，以上是单级致冷器的计算方法。

二级、三级以上多级致冷器计算，需将 ΔT 分配至相应级数 $\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \dots$ 。然后每一级按上述公式计算， $\Delta T_1 = T_{h1} - T_{c1}$ ， $\Delta T_2 = T_{h2} - T_{c2}$ ……每项都加减修正量(有寄生温差存在)。需计算几组对应的1和d值和不同供电电压下的1和d的值，就相当麻烦，费时间，则用计算机方便。自编计算程序见附录。

本接收器用的二级环形致冷器，选取了合适的下标变量和已知量，自行编制成计算程序，上机计算，获得一系列结果。再根据结构限制，制冷器厂已有的n极和p极棒料等半成品和制作工艺，选取最佳的电偶直径d和电偶臂长l，电偶的对数数量和工作电流。当然也可以反过来进行核算已选定的致冷器器件的总产冷量是否满足设计要求。

下面列举由计算得的结果中的某一组数据一部份。我们是根据此组数据来选定致冷器的各项参数的。见表1。

表 1

V(伏特) 可供电压	I(安培) 工作电流	N I 级 (对)	N II 级 (对)	d(毫米) 电偶臂长	l(毫米) 电偶直径
1.5	14.5	16	7	5.3	5
3	7.23	33	12	3.9	5
4.5	4.80	49	20	3.0	5
6	3.62	65	26	2.6	5

此专用致冷器由我们提供图纸、数据并加工好致冷器的铝散热壳体，由天津致冷器厂协作按图要求将电偶用环氧树脂直接粘在铝散热壳体上。根据当时该厂已有的n极和p极偶极子半成品尺寸和磨制时最小长度限制及引导线等工艺条件，用在磁场望远镜上的二级环形风冷式半导体的规格数据如下：外形见图(3)

第一级 $\phi 6 \times 7$ (毫米) 共34对

第二级 $\phi 6 \times 8$ (毫米) 共17对

供压 2—3 伏

工作电流 14—20 安培

用两台轴流或小风扇强迫通风散热。可以看出, d 和 l 都比计算值稍大, 但 $\frac{1}{s}$ 仍近似满足计算公式。所取电偶总对数比计算值大一些, 在工程上是偏安全可靠的。

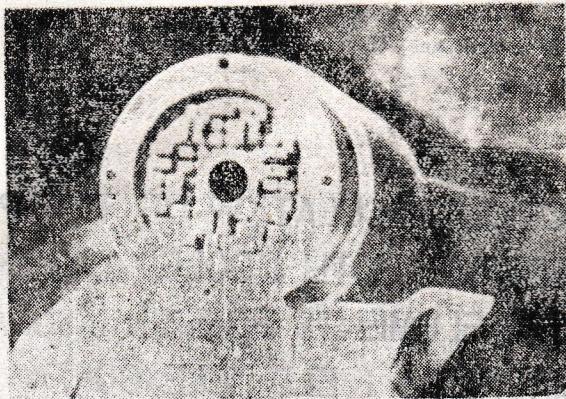


图3 二级环形风冷式半导体致冷器

对散热器的热传导也进行了工程核算, 主要是核算散热总面积及主要散热片布置合理性。由于篇幅所限, 此处不具体介绍, 从略。

四、结 果

首先, 在实验室里进行。接通致冷器开关20分钟, 就能达到工作温差 $40\sim45^{\circ}\text{C} = \Delta T$, 热端散热片温升也在规定范围内, 工况稳定, 连续通电6小时, 能保持同样温差。当南京最热的酷夏之际, 放在太阳下曝晒, 试验仍能维持上述工况。曾经准备进行讯号暗流比的测定, 但遗憾的是由于某些原因, 测量仪器工作不正常而未能进行。

装到望远镜上后, 经过几年调试, 尤其经北台天文学家试观测9个月得到结果表明: 当光电倍增管被加高压1000伏到1500伏, 讯号暗流比为 $1200\sim1500$, 而不致冷时讯号暗流比为 $40\sim50$, 即致冷的暗流降低了300倍。望远镜设计总要求讯号暗流比300, 即实测获得的讯号暗流比, 比原设计要求提高了4~5倍。这对望远镜是相当有利的, 使其具备了潜力。如果将来天文学家们在磁场定标的方法有了新的进展, 则利用望远镜光电接收器已经具有的高的讯号暗流比去提高磁场测量精度。

试观测时实测的工作温差比未装在望远镜上要低一些。其原因可能是测冷端温度的测温元件的位置有变动和总的工作环境改变, 但不能十分肯定就是这些原因。由于规定工作温差的目的是为了控制降低暗流, 提高讯号暗流比。而现在接收器实际具有的讯号暗流比已远远超过仪器设计要求, 再去寻找在望远镜上测得致冷温差比没有装在望远镜上要低一些的原因也就显得不那么重要和有实际意义了。

致冷器电路由朱保金工程师负责, 他另有专文总结和论述〔7〕刘冠群师付负责此接收

器装配，马跃东师付曾参加过此项装配工作。

参 考 文 献

- (1) 吕韵翎、刘冠群等，《太阳磁场望远镜的光电机械扫描系统》
- (2) Edited by W. A. Hiltner 《Astronomical Techniques》
- (3) 京字129部队资料，《半导体致冷》
- (4) A. φ. 约等，《温差电致冷》
- (5) M. A. 米海耶夫著，《传热学基础》
- (6) З. А. Колнко 《Термо—Электрические Охлаждающие Приборы》
- (7) 朱保金《半导体致冷电路》

THE CONSTRUCTION CACULATION OF THE PHOTO ELECTRIC DETECTOR WITH COOLER OF THERMOELECTRIC ELEMENTS FOR 35cm SOLAR MAGNETIC FIELD TELESCOPE

Lu Yunling

(Nanjing Astronomical Instrument Factory)

Abstract

The photoelectric detector was adopted a EMI 9658 photomultiplier with a cooler of thermoelectric elements. Its temperature of cathode is about 0°C and its signal-to-darkcurrent ratio has decreased to 300. So it has increased the signal-to-noise ratio of measurement. There is no frost on incident window. A good electric shield and magnetic shield are provided. The main contains as follow:

1. Construction and caculation of cooler consisted of thermoelectric elements. This cooler is ring like for through beam and placed in end surface of entrance which is 3 mm far from cathode. It consists of fifty one couples P, N semiconductive elements corresponding one-to-two ratio for two grades refrigerantion.

2. The frostless construction of incidence window.

3. The multilayer cylindric construction of housing photomultiplier is provided by brass, foamed plastics, permalloy and aluminium respectively for electric shield, magnetic shield and heat insulation.