

# 紫外电视摄像镜头设计

张宝林 韩冬冰

(长春大学机械工程学院, 长春130022)

**摘要** 在介绍紫外与可见区兼用电视摄像镜头技术要求的基础上, 给出了该镜头的光学与机械系统设计结果, 并进行了质量分析。

**关键词:** 镜头; 象差; 紫外波段

## 1 引言

根据物理光学的理论可知, 当物质受到紫外线的照射时, 即使是很微量的物质也会因受激发而发出荧光, 可以清楚地再现肉眼看不见的轮廓。其荧光波长为比激发光波长略长一些的紫外光线。根据这一特点, 我们可以把较长时间后在可见光中消失痕迹的物体, 如体液(血迹、唾液、汗液等), 指纹, 笔迹等在紫外线的照射下, 对其发出的荧光进行接收记录, 对其轮廓和性质进行分析。紫外电视摄像系统就是较为理想的紫外光接收记录装置, 该装置的核心是紫外电视摄像镜头。

## 2 紫外电视摄像镜头的技术要求

根据用户的需要, 对紫外电视摄像镜头提出以下技术要求:

- ①透过光波段为 $200\sim 700\mu\text{m}$ , 使镜头可在近紫外和可见区两者兼用;
- ②焦距  $f' = 25\text{mm}$ , 成象倍率达到 $20\sim 25$ 倍;
- ③相对孔径为  $F = 2.5\sim 0$ (全闭合);
- ④调焦范围为 $0.3\text{mm}\sim\infty$ ; (常用 $0.3\sim 0.8\text{m}$ )
- ⑤画面尺寸为 $6.8\times 5\text{mm}^2$ ;
- ⑥联接方式为C型卡口联接;
- ⑦工作距离为 $17.53\text{mm}$ ;
- ⑧透过率      在 $360\mu\text{m}$ 时       $T_{\text{紫外}} \geq 60\%$   
                  在可见区时       $T_{\text{可见}} \geq 70\%$ ;
- ⑨目视鉴别率  $N \geq 450\text{lp/mm}$ 。

由上述技术要求可知,该镜头为一种12.7mm 较近拍摄距离、高清晰度、C型卡口联接的近紫外与可见区兼用的电视摄像镜头。

### 3 光学系统设计

光学系统的设计无非是确定系统的结构型式以及组成这个结构的光学各诸元的光学参数  $n$ ,  $R$  和  $d$ 。这里首要的是如何选择材料。

#### 3.1 光学诸元材料的选择

由于一般光学系统所用的光学玻璃在紫外波段有较强的吸收,透过率很低,不适于紫外光学系统。能在近紫外到可见区均有较好的透过性能的光学材料只有一些光学晶体,其性能列于表1。

表1 几种紫外可见区常用晶体材料性能表

序号	材料名称	光谱透过范围( $\mu$ )	密度 $g/cm^3$	溶解度 (%)	硬度 (克氏)	热胀系数 $\times 10^{-6}/度$
1	氯化钠 NaCl	0.2~25	2.165	35.7	1.5	38.95
2	氯化钾 KCl	0.2~20	1.984	34.7	7	37.4
3	氟化锂 LiF	0.1~7	2.601	0.27	99	30.01
4	氟化钙 CaF <sub>2</sub>	0.15~10	3.18	0.0016	158	18.38
5	氟化钠 NaF	0.15~12	2.79	4.22	60	33.13
6	溴化钾 KBr	0.2~40	3.13	53.48	6	37.6
7	溴化铯 CsBr	0.2~40	4.51	124.3	20	46.6
8	碘化钾 KI	0.2~33	3.13	127.5	12	40.6
9	天然石英 SiO <sub>2</sub>	0.2~4	2.648	不溶	741	7
10	熔石英 SiO <sub>2</sub>	0.2~4	2.648	不溶	741	0.2
11	尖晶石 MgO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2~5	3.62	不溶	1140	6
12	碳酸钙 CaCO <sub>3</sub>	0.15~2.5	2.711	0.0014	75~135	24.4

从表1可见,综合各种性能指标都比较理想的材料是氟化钙(CaF<sub>2</sub>)、天然石英(SiO<sub>2</sub>)、熔石英(SiO<sub>2</sub>)和尖晶石(MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),其中天然石英与熔石英相近,但天然石英光性不如熔石英好,而尖晶石的硬度太高会给加工工艺造成很大难度,故我们认为只有氟化钙和熔石英具有光谱透过率符合要求,密度适中,溶解度低、硬度较高、热胀系数较小,既具有较好的理化性能,又具有较好的工艺性能,而且这两种材料生产成熟质量稳定、价格适中,所以我们决定选择氟化钙(CaF<sub>2</sub>)和熔石英(SiO<sub>2</sub>)作为镜头的光学材料。其色散公式分列如下。

氟化钙的色散公式为

$$n^2 - 1 = \frac{F^2 \lambda^2}{\lambda^2 - G^2} + \frac{H \lambda^2}{\lambda^2 - K^2} + \frac{M \lambda^2}{\lambda^2 - N^2} \quad (1)$$

式中  $F = 0.56758888$                        $G = 0.050263605$   
 $H = 0.4710914$                           $K = 0.1003909$

$$M = 3.8484723 \quad N = 34.649040$$

熔石英的色散公式为

$$n = A + BL + CL^2 + D\lambda^2 + E\lambda^4 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{式中} \quad A &= 1.44902 & L &= \frac{1}{\lambda^2 - 0.028} \\ B &= 0.004604 & C &= -0.000381 \\ D &= -0.0025268 & E &= -0.00007722 \end{aligned}$$

根据公式(1)和(2)可以计算出氟化钙和熔石英两种材料各波长的折射率值和色散值。

### 3.2 光学系统结构

根据紫外电视摄像镜头的技术要求和选定的两种材料的色散公式,经计算机自动平衡给出下面4组6片的光学系统结构型式:

表2 紫外摄像镜头光学系统结构

序号	曲率半径 $R(\text{mm})$	厚度 $d(\text{mm})$	外径 $\varphi(\text{mm})$	材 料
1	59.86	2.80	13.0	氟化钙( $\text{CaF}_2$ )
2	-36.50	0.10	13.0	
3	12.363	3.70	11.0	氟化钙( $\text{CaF}_2$ )
4	-18.010	0.000	11.0	
5	-18.010	1.40	11.0	熔石英( $\text{SiO}_2$ )
6	23.90	1.20	10.0	
7	-23.90	2.80	10.0	氟化钙( $\text{CaF}_2$ )
8	-10.98	0.00	10.0	
9	-10.98	2.50	10.0	熔石英( $\text{SiO}_2$ )
10	11.10	1.50	8.0	
11	0.000	0.50	8.0	
12	15.070	4.60	8.0	氟化钙( $\text{CaF}_2$ )
13	12.110	0.00	8.0	

计算中,消单色象差的  $D'$  光和消色差的  $C'$  光和  $F'$  光由下式确定:

$$dn' = n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2} = n_{200} - n_{700} = n_{450}$$

$$n = \frac{1}{2}(n_{200} + n_{700})$$

$$v = \frac{\frac{1}{2}(n_{200} + n_{700}) - 1}{n_{200} - n_{700}}$$

该光学系统的参数如下:

焦距  $f' = 25.4\text{mm}$ ;

相对孔径  $F = 2.4$ ;

摄像距离  $0.3\text{m} \sim \infty$ ;

全视场像高  $y_2 = 4.263\text{mm}$ ;

视场角  $2\omega = 19^\circ 20'$ ;

后截距  $S_r = 14.719\text{mm}$ 。

光学系统示意图如图1所示。

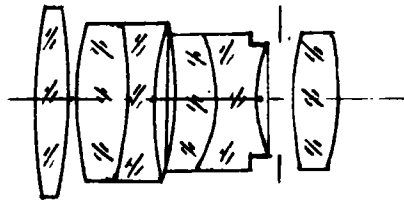


图1 光学系统示意图

## 4 象差分析

在摄影和摄像光学系统的象差平衡中,由于这种系统本身具有大视场和大孔径的特点,而使高级象差占较大比重,我们不得不采用较为复杂的结构型式和较大的精力来校正象差。一般情况下,高级象差的大小主要依赖于其结构型式及它的光学参数,结构型式一旦确定下来,高级象差就确定下来,不再变化,这时只好用可变化的初级象差去平衡高级象差。当然这种平衡是指某一孔径或某一视场而言,不可能使全孔径或全视场都得到平衡。所以,其余孔径或视场仍有剩余象差存在,其大小取决于高级象差。为了减小剩余象差的大小,总是尽量采用一种高级象差较小的结构形式。

我们这种紫外与可见区兼用的电视摄像镜头,由于光学材料的限制只有两种材料可用,无任何选择余地,而这两种材料的折射率又很接近,所以象差校正起来很困难,校正得很理想不容易,现将我们校正的初步结果介绍如下。

### 4.1 初级象差系数

经初步平衡后,我们给出了下面的初级象差系数。

表3 初级象差系数

$K$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$C_1$	$C_2$	
1	0.00152	0.00209	0.00209	0.0038	0.0038	0.0051	0.0038
2	0.04156	-0.03967	0.05128	0.0076	-0.0734	0.0137	-0.0140
3	0.02187	-0.00236	0.00030	0.0189	-0.0022	0.0159	-0.0016
4	0.01934	0.01484	-0.01156	-0.0007	-0.0084	-0.0118	0.0081
5	0.00125	-0.00340	0.01727	-0.0100	0.0811	0.024	-0.0105
6	-0.03296	0.06840	-0.06345	-0.0095	0.0033	-0.0130	0.0110
7	-0.02358	0.00802	-0.00464	-0.0011	0.0237	-0.0095	0.0049
8	-0.05934	-0.03879	-0.01723	-0.0286	-0.0107	-0.0197	-0.0077
9	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	0.02712	0.02279	0.01923	0.0168	0.0304	0.0093	0.0070
11	0.08324	-0.03934	0.00752	0.0231	-0.0071	0.0140	-0.0030

### 4.2 轴上点象差

轴上点只考虑主轴上半个子午光束的光线,其球差图(图2a)、正弦差(图2b)、波色差(图2c)、畸变(图2d)、象散(图2e)和倍率色差(图2f)各象差曲线如下。

轴上点的弥散列于表4

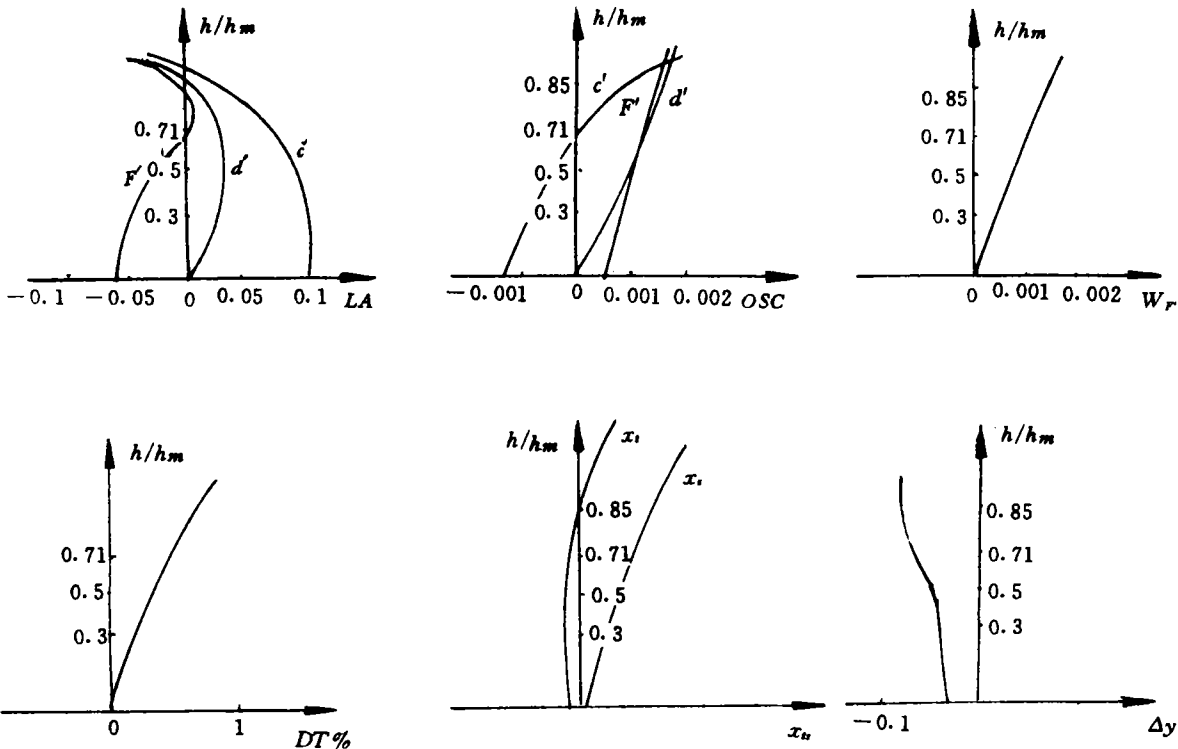


图2 轴上点象差

表4 轴上点各色光全孔径各光线高度的弥散值

$W/W_m$	TAG	# $Y_r$	TAG	# $Y_r$	TAG	# $Y_r$
1.00	0.195	0.0107	0.195	0.0107	0.195	0.0093
0.85	0.165	-0.0035	0.165	-0.0005	0.166	-0.0096
0.71	0.138	-0.0055	0.138	-0.0013	0.138	-0.0133
0.50	0.096	-0.0031	0.096	-0.0011	0.097	-0.0104
0.30	0.058	-0.0008	0.058	0.0021	0.058	-0.0059
0.00	0.000	0.0000	0.000	0.0000	0.000	0.0000

由上表知,轴上点各色光全孔径各光线高度的弥散值均不大于0.015,能满足要求。

### 4.3 轴外点象差

对于轴外点象差,我们也是以各色光各视场11种不同光线高度的象的弥散斑直径来衡量,如子午和弧矢光线各色光0.71视场各光线高度的弥散值如下。

表5 子午光线各色光0.71视场象的弥散值

$W/W_m$	TAG	# $Y_d$	TAG	# $Y_F$	TAG	# $Y_c$
1.00	0.038	0.0328	0.037	0.0386	0.038	0.0222
0.85	0.003	0.0030	0.003	0.0084	0.004	-0.0066
0.71	-0.022	-0.0024	-0.023	0.0020	-0.022	-0.0103
0.50	-0.061	-0.0025	-0.062	-0.0002	-0.061	-0.0068
0.30	-0.099	-0.0008	-0.099	-0.0006	-0.099	-0.0012
0.00	-0.156	0.0000	-0.156	-0.0026	-0.156	-0.0044
-0.30	-0.215	-0.0031	-0.215	-0.0067	-0.215	-0.0034
-0.50	-0.255	-0.0092	-0.255	-0.0116	-0.255	-0.0043
-0.71	-0.298	-0.0238	-0.298	-0.0223	-0.297	-0.0249
-0.85	-0.328	-0.0450	-0.328	-0.0384	-0.327	-0.0540
-1.00	-0.350	-0.0723	-0.350	-0.0600	-0.349	-0.0902

表6 弧矢光线各色光0.71视场象的弥散值

$W/W_m$	sin	$TAY_d$	$TAZ_d$	$TAY_F$	$TAZ_F$	$TAY_c$	$TAZ_c$
0.30	-0.0572	0.0065	-0.0061	0.0039	-0.0037	0.0110	-0.0104
0.50	-0.0954	0.0051	0.0107	0.0032	-0.0074	0.0084	-0.0168
0.71	-0.1354	0.0025	-0.0134	0.0017	-0.0105	0.0040	-0.0189
0.85	-0.1615	0.0000	-0.0093	0.0003	-0.0080	-0.0001	-0.0126
1.00	-0.1900	-0.0035	0.0000	-0.0017	0.0076	-0.0061	0.0126

从上表中可看出,子午光线中边缘光线的一些点弥散值略大,只要适当进行阑光便可将边缘光线阑掉,全部阑掉较大的弥散值。

## 5 机械系统结构

根据镜头的技术要求,对机械系统的设计主要考虑使系统具有以下几种性能:

- 1) 光学系统的光轴应与机械轴严格一致,其偏差不大于0.03,间隔偏差不大于0.04;
- 2) 光阑系统变化应达到F2.5~全封闭;
- 3) 调焦系统应能做到从0.3m~ $\infty$ ,调焦量为2.25mm;
- 4) 镜头与摄像机联接部分应做到C型卡口联接,并使工作距离保证在 $C=17.53 \pm 0.02$ mm;
- 5) 镜头各运动部分应轻松、舒适、到位,联接部分应牢固可靠,外形美观、整洁。

为满足上述这些要求,我们在设计中要求各镜座内孔同轴度偏差不大于0.01,各定位端面的垂度偏差不大于0.01,间隔圈的设计也作了必要的要求,基本保证了光学系统光轴与机械轴的一致性及其间隔的技术要求。

按单圆弧可变光阑图解法由所给的光学高度计算出光阑片的形状、尺寸和片数,并计算出相对于不同光圈数的光阑圈的转角值。同时考虑到电视摄像系统为保护摄像管的靶面而要求

光阑孔径最小仍全封闭,对光阑系统作了相应的设计。

该系统的调焦范围为 $0.3\text{m}\sim\infty$ ,其调焦量为 $2.25\text{mm}$ ,为此我们选择了导程为 $6\text{mm}$ 的6头多头螺纹结构,使其长度在近距离时螺纹配合长度也能达到螺纹总长的 $2/3$ 。

卡几座设计成 $\text{M}25.4\times 25.4\text{mm}$ 32牙的C型螺纹形式,并使镜头工作距离 $C=17.526\pm 0.02\text{mm}$ ,为确保其精度可通过调整垫圈在装配中精密修切来达到要求。

为使各运动平稳、可靠、舒适,在设计中要求螺纹与光孔互相的配合间隙和表面粗糙度有必要的精度,并要求在加工中严格保证,装配中适当涂以润滑脂以提高运动的舒适效果。

为达到提高光学系统透过率并保护晶体镜片表面的目的,在每块晶体镜片两面以 $\lambda/4-\lambda/2-\lambda/4$ 的厚度分别以 $\text{MgF}_2+\text{ZrO}_2+\text{CeF}_3$ 的材料真空镀制了宽带减反射硬膜,减反波段从 $360\mu\text{m}$ 到 $650\mu\text{m}$ ,使近紫外和可见区都有明显的增透效果。

## 6 结束语

按上述设计要求研制的样机经检测结果如下:

- 1) 焦距实测值  $f' = 25.4\text{mm}$ ;
- 2) 相对孔径  $F = 2.45\sim$ 全封闭;
- 3) 调焦范围、画幅尺寸,联接方式和工作距离都满足了技术要求;
- 4) 透过率      波长在 $360\mu\text{m}$ 处       $T_{\text{紫外}} = 69\%$   
                  波长在可见区             $T_{\text{可见}} \geq 74\%$ ;
- 5) 目视鉴别率实测值为  $N = 540\text{lp/mm}$

这些指标较好地满足了使用要求,样机在试用中取得了较好的效果。

### 参 考 文 献

- [1] 张以谟,应用光学.天津:机械工业出版社,1982

## Design of Television Camera Lens Operating in 20—700nm Band

Zhang Baoling, Han Dongbing  
(Changchun University, Machinery Engineering  
Institute, Changchun 130022)

### Abstract

This paper expounds the technology requirements of television camera lens with performance of transmitting that combines ultraviolet and visible light, and provides the design results of the lens in optecs and mechanics system, and gives quality analysis.

**Key words:** Lens, Aberration, Ultraviolet wave band