

特大相对孔径X-射线物镜设计

黄营生 李淑兰

特大相对孔径物镜常常用于微光夜视，X线工业探伤和医用电视等，观察低照度景物的仪器上。一般医用X线诊断机，由于荧光屏的亮度很低，需要在暗室进行，而且所用X线剂量较大，医生长期受X线的伤害，因而造成职业病的很多。为改变这种状况，国外普遍采用了电视技术，把X线荧光屏上的图象，通过电视系统，转换到电视屏上来显示。这样即可以摆脱暗室观察，又可实现隔室操作。但国外通常是采用X线影象增强器与氧化铅 摄象管 串联，来实现电视观察，其工作原理如图1

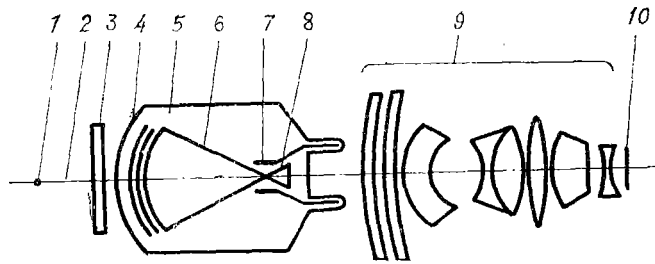


图1

- ①X-射线发射管球 ②X-射线 ③物体 ④输入荧光屏 ⑤光电表面
⑥电子束 ⑦阳极 ⑧输出荧光屏 ⑨物镜 ⑩象面

我们所设计的X-射线医用电视的工作原理与国外不同，我们没有用象增强器的方案。而是让X-射线穿透人体投射在荧光屏上；激发出可见光，由X-射线物镜直接接收荧光屏上的图象。由于荧光屏亮度很低，因此要求一个特大相对孔径物镜，将X线医用电视荧光屏上的低亮度透视图象，聚焦成象在电视摄象管的光电阳极面上，来实现电视观察。物镜相对孔径越大，整机灵敏度越高，所需X线剂量越低。

根据使用要求，我们设计了物面为10吋和14吋荧光屏的物镜，其参数如：

- 物面画幅 $\phi = 10$ 吋或14吋
物 距 $l = -600$, 或 -950 毫米
成象尺寸 $\phi = 1$ 吋
相对孔径 $D/f = 1/0.75$

接收器为二次电子电导管或硅靶管，其表面是个半径 $r = 60$ 毫米的球壳，光电阴极面在管壁内，由此要求设计的这个镜头是一个特大相对孔径，象面应该成为凸曲面，成象在介质中，而且要求物镜产生一定的畸变和负场曲与二次电子电导管的畸变和面形相匹配。

结构形式的选择：

因为要求这个物镜为一个特大相对孔径的物镜，其视场约为 $2W = 30^\circ$ 左右。在要求大

孔径时人们往往就会想到 *planar* 型, 因为它是利用结构的对称性自动消除系统的不对称性象差。这样不仅成象质量较好, 而且设计工作也简化了许多, 重点是校正轴向象差。所以许多中等焦距, 大相对孔径、中等视场的摄影物镜常采用对称型结构。*planar* 型物镜一般情况下相对孔径可达到1/2以上, 视场为 $40^\circ \sim 50^\circ$ 左右。限制提高其相对孔径及视场的主要原因是轴外高级负球差和高级正像散之间存在着矛盾。因为我们要求的相对孔径达到1/0.75, 为扩大相对孔径, 引入一个近不晕半球, 它使相对孔径接近提高到该物镜所用玻璃材料的折射率 N^2 倍。为此我们采用了 *planar* 型复杂化的结构如图 2。

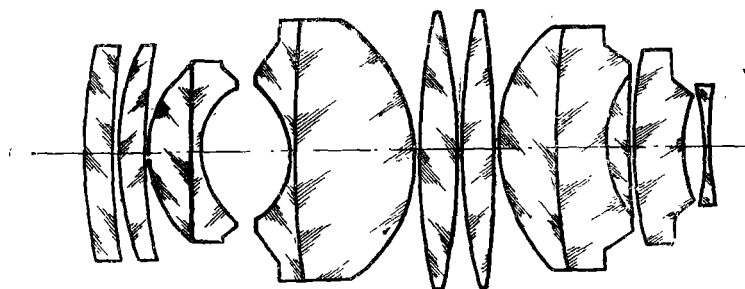


图 2 系统图

因为不晕条件为: $u_1' = I_1$

$$u_1 = I_1'$$

根据折射定理 $N_{\text{空}} u_1' I = N_{\text{玻}} I'$

$$\therefore N_{\text{空}} u_1' = N_{\text{玻}} u_1$$

$$\text{则 } u_1' = u_1 \cdot N_{\text{玻}} / N_{\text{空气}}$$

光线通过第一面不晕面时, 数值孔径增大 $N_{\text{玻}}$ 倍, 当光线由第二面平面出射时有

$$I_{\text{平}} = -u_1'$$

$$u'_{\text{平}} = -I'_{\text{平}}$$

$$I'_{\text{平}} = I_{\text{平}} \cdot N_{\text{玻}} / N_{\text{空}}$$

$$u'_{\text{平}} = u_1' \cdot N_{\text{玻}} / N_{\text{空}}$$

$$u'_{\text{平}} = u_1 \cdot N^2_{\text{玻}}$$

其中 $N_{\text{空}}$ 为空气折射率, $N_{\text{玻}}$ 为介质折射率。

这样光线通过一个不晕球以后使得其偏角增大了 N^2 倍, 当 $N = 1.5 \sim 1.6$ 时, 原来相对孔径为1/2的系统可以达到1/0.8左右。

像面弯曲的配合:

由于接收器二次电子导管或硅靶增强管的前面是个 $r = 60$ 毫米的凸形面, 荧光屏上的图象经物镜成象在摄像管光电阴极表面上, 即图象是成在一个凸形曲面上, 而且是在介质中, 因此为了成象清晰就必须使象成弯曲象面与阴极面重合, 在光学设计中就是要求像面有一个相当阴极面曲面的负场曲来匹配。因为接收器表面曲率半径 $r = 60$ 毫米当接收器为 1 吋时, 半像高 $H = 10$ 毫米时

$$\text{其矢高为 } Xp = r - \sqrt{r^2 - h^2} \approx 1$$

$$\text{而负场曲 } Xp = -\frac{S_N}{2u'^2}$$

$$\text{当相对孔径 } D/f = 1/0.75$$

$$u = 0.67 \text{ 吋}$$

$$S_{IV} \doteq -0.9$$

由此可以看出为了使像面与阴极表面一致，要求物镜除了本身消除 S_{IV} 以外，还要产生相当大的负场曲来与之匹配，在整个系统的后面加入负透镜，几乎接近场镜，使产生一定量的负 S_{IV} ，但是对整个系统而言，由于后面加入了一比较大的负光焦度，为使系统达到一定的焦距，前面正光焦度就必须相应的增加，各种象差也是相应的增加了，这使整个系统的象差平衡造成了更大的困难，阴极表面所产生的象差，也由物镜整体考虑消除。

光学系统的成象平面，一般取近轴光线与光轴交点的垂直平面作为参考面，各个不同相对孔径和不同视场的光线对此平面的差异，就是各种象差，而且由于成象多半是在空气中，因此都是取空气的折射率 $N = 1$ 。

在此系统中物体成象在接收器的球形阴极表面内即介质中。因此，其成象参考面，就是这个球形曲面而其 $N \doteq 1$ 各条轴外光线相对应的参考面如图 3：

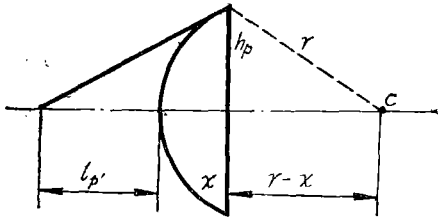


图3 $l_p' - x = l_{p'} - [r - \sqrt{r^2 - h_p^2}]$

l_p' 表示轴外光线与光轴的交点到参考象面顶点的距离。

r 参考面的半径。

h_p 轴外光线的高度。

根据上式求出各个视场的参考点来。我所编了曲面自动设计和空间光线程序，其参考面是为任意球面或平面，其计算数据是对应给定面形的象差。

象差校正情况：

这个结构前面的双高斯型所剩余的象差仍然是轴外高级负球差和正象散，自然由于厚透镜后面有两个正透镜来共同负担正光焦度，因而正球差减少了，光阑两边凹面上要求所需要与之匹配的负球差小了一些，负球差的高级成分也就相应的小了一些，虽然整个象差情况好了一点，但也并不能得到满意的校正。可是近不晕半球却产生了很大的高级正球差，而 l_p 角在这几个面上都不大，所以产生的正象散不大。最后的负透镜，产生的负球差相对来说不算大，却产生了可喜的高级负象散。这样整个系统的象差依靠前后组的互相平衡和匹配，得到了校正。但为了使象差校正得更好，将近不晕半球分离成二片。这时轴上球差完全得到校正，其高级球差甚至已经反号。此系统的视场为中等，约为 30° 左右。由于厚透镜前后都用二个正透镜负担偏角。它对轴外宽光束象差的校正是有利的。设计结果轴外象差也是比较好的。

由于这个系统的相对孔径特别大，因而校正象差时多数为正负高级量，甚至是衍生量互相匹配和平衡，因此剩余量仍然是高级量，轴外下光的情况表现得比较明显。

弧矢象差在大相对孔径物镜中，影响是很大的，而且它无法利用光阑的办法遮拦掉一部分成象不好的光线，我们设计时是注意利用细光束象散的校正状态，和轴外球差的校正，来匹配弧矢象差和子午象差的校正的。而且对于小视场和大视场的象差校正做了兼顾平衡。

由于接收器本身存在负畸变，为了消除影象的失真，此镜头设计成 5% 的正畸变与之匹配。色差按 D 线消单色象差、 C 、 F 线消色差。系统象差见曲线图 4：

机械外壳采用修配法结构，基本上分为两大组，后组又分几个光学组元装在不同镜框里，前后组用导向面及螺纹联接，每个镜框粗加工时内孔外圆都留余量在 0.3 毫米左右，装校时修切内孔与外圆，保证每个光学组元的同心度。如果系统存在偏心差，在视场中心就会

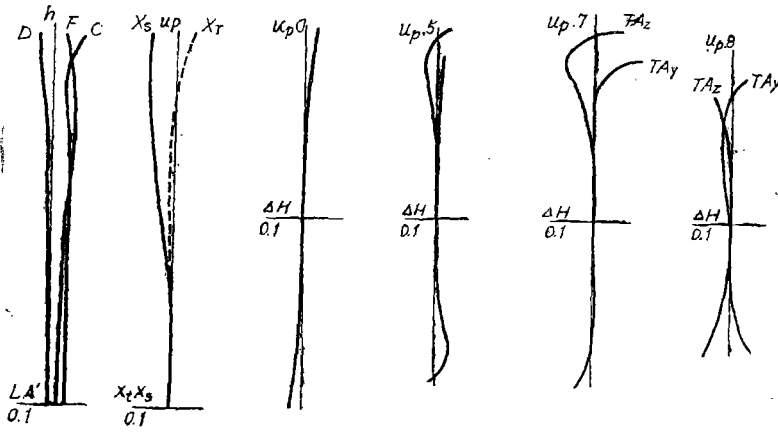


图4 光学系统象差曲线

发生慧差。所以在系统的最后一环设有调整机构、加以补偿，消除中心慧差。另外为了保证另件加工后不变形，对比较薄的镜框在粗加工后都进行时效处理。

在这项工作中尤英奇、翁志成两位同志也做了许多工作，并提出过宝贵的意见。

参 考 文 献

- [1] 王之江；光学设计理论基础，科学出版社，1965年。
- [2] Rodenstock, Technical Data Sheet, Special Purpose X-Ray Objectives.
- [3] Shimadzu, Image Amplifiers. CA531—900C
- [4] E.Glotzel, New Developments in Photographic Objectives in Optical Instruments and Techniques. Edited by J. Home Diekson. 407—419.