

我所光学设计工作的发展

薛鸣球

1952年，科学院仪器馆（即现在的长春光机所部分前身）成立之初，根据光学仪器的需要，即成立了光学设计组，进行光学设计的理论研究及具体设计工作。由于承担了各方面的任务，所做工作极为广泛。举凡显微物镜、望远物镜、目镜、摄影系统、光谱仪系统、光刻系统、照明模拟系统、光学信息处理系统、投影系统等等，从简单的到近代的光学系统，都曾涉及。通过这些实际任务，不仅掌握了前人已有的理论和设计方法，而且密切结合实际的光学仪器成象理论，进一步从理论上推陈出新，在一些复杂的近代化的光学系统上有所创见。对工作中的一些成就曾总结为《光学设计理论基础》、《应用光学》二书，由科学出版社出版；与外单位合作编著《电影摄影物镜光学设计》，由工业出版社出版；另外还编著过《光学设计文集》等多种论文集；为长春光机学院编著过多种光学设计的教材和《光学设计概论》等内部使用的多种小册子。

下面将一些光学设计成就作一简单的叙述。

一、望远物镜和望远摄影物镜

结合测量仪器望远镜系统及其它方面的需要，在增大望远物镜相对孔径的问题上，进行了一系列工作，并在实际中得到应用。首先是两片胶合型物镜，适当地选择两种折射率差大，色散差大的玻璃对，不但能同时校正物镜的球差、彗差和轴向色差，而且能使残余的高级球差量尽量减小。由此得出相对孔径1:4的物镜，球差最大值不超过焦距的千分之0.6。

采取两片不胶合的透镜型式，可以进一步利用两透镜间的空气间隔，以及正负透镜相邻两面的曲率以控制高级球差。在相对孔径达1:3.3的情况下，残余球差不超过焦距的千分之0.3。

以上两种物镜的带色差都得不到很好的校正，用三片分离的物镜则可进一步校正带色差，在相对孔径达1:3时，各色光的残余球差均不超过焦距的千分之0.2。

关于减少物镜的二级光谱，用特短火石玻璃 $TF3$ 设计出四透镜组的物镜。这个设计在减小球差的问题上，仍不出双分离透镜的原则。用四个透镜则是因为选取的冕牌和火石玻璃间的色散差太小的缘故。这个物镜的相对孔径为1:3.05时，边缘球差为焦距的千分之0.17，二级光谱和带球差为焦距的千分之0.4。

对于焦距很长的望远摄影系统，二级光谱的几何值随焦距的增长而加大。在用短火石玻璃来校正二级光谱时，一方面不能完全解决此类像差的校正；同时由于系统的焦距长，要求玻璃材料有大的口径，是不合适的；加之透射式长焦距系统，仪器的尺寸也很大。基于这些考虑，设计出如图1所示的折反射系统。图中负透镜组2的二级光谱、高级球差与正透镜组4的二级光谱，高级球差相补偿，得到了高质量的设计结果。在相对孔径1:12，二级光谱接

近校正的情况下，色球差仅为焦距的千分之0.1。由于像散、场曲也可以有所补偿，因而可以有较大的线视场。

二、显微物镜和缩微光刻物镜

设计过数值孔径 $N \cdot A = 0.2$ 以下的双胶合透镜，数值孔径 $N \cdot A = 0.3$ 的李司特型物镜。在阿米西型物镜的设计中，利用前片第一面所产生的高级正球差与后两组胶合面所产生的高级负球差相抵消，从而不仅设计出数值孔径 $N \cdot A = 0.6$ 的物镜，并且设计出数值孔径 $N \cdot A = 0.74$ 的物镜。后者当工作距离为 0.7 毫米时，球差所导致的波面差尚小于十分之一波长。对于消色差油浸物镜，利用跟上述相类似的消除高级球差的原理，设计出数值孔径 $N \cdot A = 1.32$ 的油浸物镜，其球差波面差也小于八分之一波长。

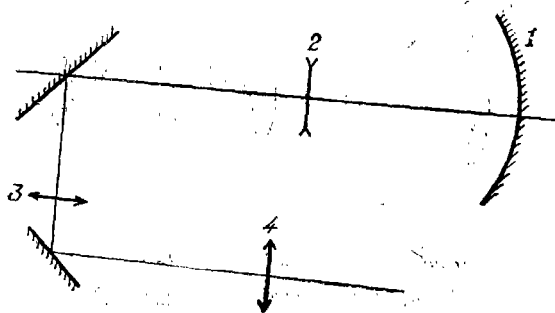


图1

引用萤石及特种玻璃来降低复消色差物镜中的二级光谱，并在设计中利用色差的分布解决色球差问题，设计出来的物镜当数值孔径 $N \cdot A = 1.3$ 时，整个可见光范围内，各色光轴上点的波像差均在十分之一波长之内。

利用两个同心反射面，在一定的物点位置可以同时消除球差和彗差，于是能做出结构很简单的物镜。这种物镜并同时具有比一般显微物镜好得多的平像场。根据这个原理，做乾镜头数值孔径可达 0.6 以上。将此同心系统和不晕半球连用，再利用两种折射率相同而色散不同的玻璃做成胶合组以校正不晕半球的色差，可得到数值孔径 $N \cdot A = 1.3$ 的油浸物镜。

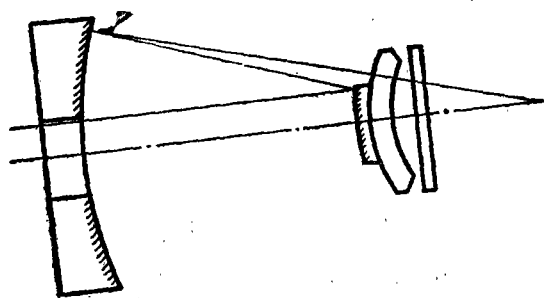


图2

为了得到长工作距离的显微物镜，必须使残余的像差减到极小，以便能相应地增加物镜的尺寸，运用在收敛光束中的消色差校正板，以抵消反射面所产生的高级负球差，并就两反射面的同心度略作调整以校正彗差，于是得到数值孔径 $N \cdot A = 0.65$ 、工作距离可达 40 毫米的复消色差平像场的物镜系统。图 2 是这个物镜的光学结构图。

在缩微光刻系统方面，设计过多种初缩和精缩的镜头。初缩的两个镜头，一个焦距 $f' = 122.61$ ，相对孔径 1:5.6，放大率 $-1/20$ 倍，视场角 $2\omega = 25^\circ$ ；另一个焦距 $f' = 51.21$ ，相对孔径 1:4.7，放大率 $-1/40$ 倍，视场角 $2\omega = 27.2^\circ$ 。结构型式是复杂化的双高斯型。成像质量在波长 $\lambda = 4950$ 埃~5600 埃以内，做到全视场内的波差小于八分之一波长。精缩镜头是由复杂化的双高斯型前面较远处加一负透镜所组成，焦距 $f' = 27$ ，相对孔径 1:1.8，放大率 $-1/10$ 倍，视场角 $2\omega = 17^\circ$ 。成像质量在线视场 3.7 毫米以内波差为十分之一波长，在线视场 5.5 毫米以内波差为五分之一波长，在全视场 7.8 毫米以内波差为四分之一波长。整个视场内的最大畸变值不超过 0.2μ 。对于波长 $\lambda = 5461$ 埃的光，空间频率为每毫米 300 对线时，在 0.5 视场以内，调制传递函数 $MTF \geq 0.5$ ；在 0.7 视场以内，调制传递函数 $MTF \geq 0.45$ ；在全视场内调制传递函数 $MTF \geq 0.35$ 。子午和弧矢的调制传递函数接近相等。用类似的光学结构型式，设计过线视场 7 毫米范围内，

空间频率每毫米 500 对线时, 调制传递函数可达 0.35 的结果。

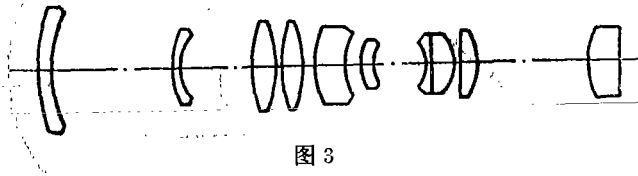


图 3

在线视场更大的要求下, 设计了一个更加复杂化的双高斯型光刻镜头, 其结构型式如图 3 所示。这个设计均采用普通玻璃。在共轭距离 600 毫米, 放大率为 $-1/5$ 倍

时, 线视场 16×16 毫米²。在波长 $\lambda = 4358 \text{ \AA}$, 空间频率为每毫米 500 对线时, 调制传递函数 *MTF* 无论轴上或轴外都接近理想值。

对于光刻显微镜也做出过多种设计。

三、目 镜

除设计了多种一般的开尔纳目镜, 对称型目镜以外, 值得提出的是为了各种目的而设计出具有特殊性能的目镜。利用正负光焦度的分离, 使像面弯曲、畸变和像散等轴外像差都得到适当的校正, 因而使它们具有优越的成像质量。将负光焦度部分接近眼瞳, 得出长工作距离目镜, 使目镜与像面间能放下光路和焦距相等的棱镜。以负透镜为场镜得出优良的实焦点目镜, 它具有视场角 60° 和相对孔径 1:4, 并且具有相当大的出瞳距离。

对于三组正透镜组成的普通广角目镜也做出多种结果。对这类目镜中采用厚透镜正负光焦度分离的方法, 设计出视场角 70° 以上的结果。

用非球面校正目镜中的像散, 曾得到过视场角 120° 的结果。

四、照相物镜

根据使用上的要求, 曾设计过一系列适用于不同要求的照相物镜。系统地研究过三片型和双高斯型照相物镜的光学性质。在电影摄影物镜、电视摄像物镜与彩色电视转像物镜、制版物镜、航空摄影物镜等方面, 设计过多种结果。

1. 双高斯型照相物镜

双高斯物镜中, 增大相对孔径的主要困难在于校正轴外负球差。我们用初级像差理论解出已校正初级像差的初始结构, 针对双高斯型物镜的缺点, 选定出一些参数所应选取的范围, 使透镜处于有利于高级像差校正的形势。根据上述这些考虑做出了相对孔径 1:3, 视场角 70° ; 相对孔径 1:2, 视场角 40° 的结果。在厚透镜中引入负胶合面, 并采用高折射率玻璃做薄透镜, 得到了相对孔径 1:1.7, 视场角 40° 的结果。在后面的薄透镜中引入与光栏反向的胶合面, 采用适当的折射率差与半径数值, 得到了相对孔径 1:1.3, 视场角 40° 的结果。为了得到相对孔径更大的照相物镜, 在原双高斯物镜的后面再增加透镜, 把透镜的第一面处于不晕位置, 第二面则近于像面, 同时再加场镜以消除畸变和场曲, 并针对高级像差的产生重新予以很好的像差平衡, 得出相对孔径 1:0.8, 视场角 40° 的物镜。

2. 照相制版物镜

在双高斯型物镜中引入非球面的胶合面, 使得轴外色球差得到了校正, 得出相对孔径 1:6, 视场角 30° , 焦距 500 毫米时色差很小的物镜。

为了更好地照相制版, 正确地反映颜色, 就需要在物镜中校正二级光谱。为此设计了

一系列的校正二级光谱而视场又比较大的制版物镜。它们的光学结构型式如图4所示。这一系列物镜共采用三种光学玻璃：LaK1、TF3、ZF3、结构型式对称。物镜的各种焦距参数如表1所列。以焦距450毫米的物镜为例，它的二级光谱是二分之一焦深，C、D、F、G各色光的球差均不超过四倍焦深，像散为二分之一焦深，子午、弧矢场曲与球差比较匹配。当使用倍率改变时，像差变化不明显。

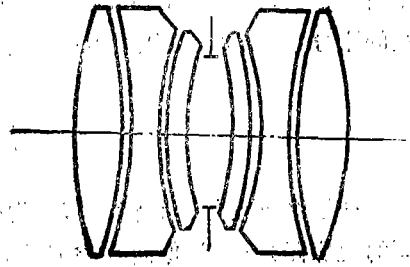


图4

表1

焦 距	相 对 孔 径	倍 率	-1 倍时幅面
180毫米	1:9	-1/10~-10X	300毫米
240毫米	1:9	"	400毫米
325毫米	1:9	"	540毫米
450毫米	1:9	"	750毫米
600毫米	1:9	"	1000毫米
750毫米	1:9	"	1200毫米
900毫米	1:9	"	1400毫米
1200毫米	1:11	"	1800毫米

3. 广角及航摄物镜

在双高斯物镜的前面加一组负透镜，适当地选取负透镜组的焦距分配、间隔以及负透镜组的角放大率，获得了相对孔径1:1.5，视场角60°的结果。

研究了特宽角的鲁萨型航摄物镜，对其高级像散及轴外球差作了仔细的分析，从而设计出相对孔径1:4，视场122°的物镜。

在提高航空摄影的比例尺时，需要降低摄影的高度或者增长光学系统的焦距。在增长光学系统的焦距时，二级光谱便成了成像质量中的突出问题。对此曾设计过用LaK类和TF类玻璃组成的半复消色差系统，得到焦距900毫米左右，相对孔径1:9质量良好的结果。

利用本征色差来校正二级光谱，可以用普通玻璃，较复杂的结构来达到目的。此种方法也就是以初级色差系数C₁作为一个变数来看待，使每个组元产生一定量的色差，而所产生色差的正负与玻璃的选择满足一定的关系，整个光学系统的二级光谱便可以减小到任意值。根据这种考虑所设计的一个结果如图5所示。材料采用普通光学玻璃ZK7、ZF2、K4、ZF7。

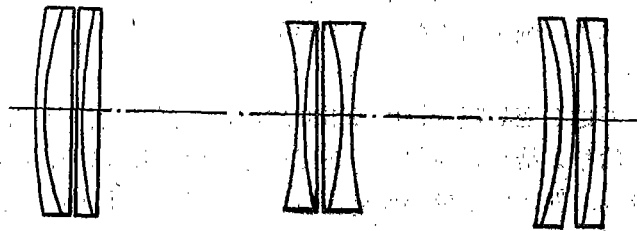


图5

在相对孔径1:7, 视场角 18° 时, C 、 D 二色光的球差不到焦距的千分之0.03, F 光的球差为焦距的千分之0.13。二级光谱接近于0。像散约为焦距的千分之0.1。

五、变焦距物镜

设计过多种变焦距物镜。有电视电影用的变焦距物镜, 也有在近距离使用的照相排字机方面的变焦距系统。从像面补偿方式看, 设计过正组补偿和负组补偿的机械补偿变焦距物镜, 也研究设计过光学补偿和双组连动式变焦距物镜。对于黑白电视, 设计过变倍比4.5倍, 焦距45~200毫米、相对孔径1:4、1吋摄像管用的变焦距物镜; 设计过变倍比6倍、焦距50~300毫米, 相对孔径1:4, $1\frac{1}{4}$ 吋摄像管用的变焦距物镜; 设计过变倍比12.5倍, 焦距80~1000毫米、相对孔径1:5.6~1:7, 1吋摄像管用的变焦距物镜; 设计过变倍比6倍、焦距500~3000毫米、相对孔径1:12~1:22、 $1\frac{1}{4}$ 吋摄像管用的变焦距物镜对于彩色电视, 设计过变倍比10倍、焦距20~200毫米、相对孔径1:2.2, $1\frac{1}{4}$ 吋摄像管用的变焦距物镜; 设计过变倍比10倍、焦距16~160毫米、相对孔径1:1.6、1吋摄像管用的变焦距物镜; 设计过变倍比6倍、焦距200~1200毫米、相对孔径1:8、 $1\frac{1}{4}$ 吋摄像管用的变焦距物镜; 设计过变倍比18倍、焦距22~400毫米、相对孔径1:1.8~1:2.3、1吋摄像管用的变焦距物镜。对于35毫米电影, 设计过变倍比10倍、焦距25~250毫米、相对孔径1:3.5的变焦距物镜; 设计过变倍比20倍、焦距25~500毫米、相对孔径1:4的变焦距物镜; 设计过变倍比6倍, 焦距20~120毫米、相对孔径1:2.8的广角变焦距物镜。20倍的电影变焦距物镜采用正组补偿方式, 其光学结构型式如图6所示。对于16毫米电影, 设计过变倍比8倍、

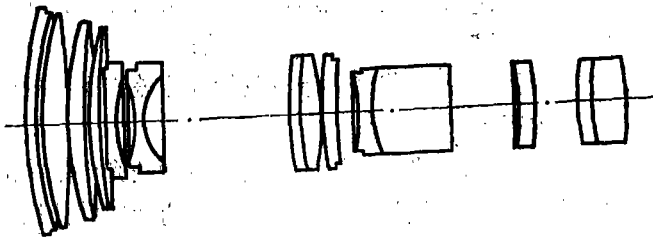


图6

焦距12.5~100毫米、相对孔径1:2.2的变焦距物镜; 设计过变倍比10倍、焦距9.5~95毫米、相对孔径1:2.2的广角变焦距物镜。

这些变焦距物镜的设计大都采用初级像差理论, 令几个焦距位置的初级像差相等, 并且在其它焦距位置时的初级像差变化不大, 求出结构的半径和玻璃组合。对于高级像差诸如外球差、彗差、色差等等, 则采用判断光线形势的方法, 选择合适的玻璃组合或使得高级像差大的半径相互匹配。

为了增大视场, 曾考虑在变焦距物镜中应用非球面, 得到过变倍比5.8倍、焦距35~200毫米、相对孔径1:3的早期结果。还曾采用在变焦过程中镜片与镜片相贴合时等价于平行平板, 而镜片与镜片分离时处于像差极小位置的概念, 得出变倍比4倍、焦距35~148毫米, 相对孔径1:2的早期结果。

对于近距离成像的变焦投影系统则设计过垂轴放大率为 $-0.4\sim-6$ 倍的照相排字机用光学系统。

六、其它光学系统

研究设计过多种光谱仪光学系统，建立了光谱仪光学系统的设计计算方法。对于非共轴光学系统光线计算编制了较完备的程序。从对爱勃脱—法斯特型平面光栅单色计的像差分析，得出了校正入射光束宽度与衍射光束宽度不等而存在残留彗差的方法。设计出两反光镜焦距比为 $1:0.9$ ，一反光镜焦距 1200 毫米，光栅尺寸 150×140 毫米²，刻线每毫米 600 条的光栅单色光计。对于波长 5461 埃一级光谱的分辨能力由于像差较好而达到 $0.6\sim 0.8$ 埃。为了增加能量，狭缝的设计高度为 120 毫米，实际可用部分约为 90 毫米左右。

对于信息处理用富里哀变换镜头，设计了焦距为 500 、 850 、 1000 毫米、相对孔径 $1:10$ ，波像差小于八分之一波长的结果。设计了多种光机式声光偏转式的汉字信息处理光学系统和激光扫描的记录光学系统。对侧视雷达的地面光学处理器，研究其高斯光学性质并做出了具体的设计结果。

分析干涉仪的要求，提出光学系统的指标，设计了多种干涉仪光学系统。

为了取得高均匀度的照明，设计了多种光学积分器，并进行了照度计算。

对于 x 光成像望远镜，提出用同轴不共焦抛物面——双曲面掠射系统代替流行的同轴共焦系统。利用不共焦引入予定量的球差，可以抵消一部分轴外球差。与像面离焦的Wolter—I型比较，在 $0\sim 15$ 弧分视场内成像质量显著改善，在 $15\sim 20$ 弧分视场内成像质量相同。

光学设计工作的理论研究方面，由波差的轴对称性导出波面结构的一般形式和各级独立的像差数，按照同一条光线可看作是物面发出的也可看作是光阑面发出的观点，求出物面像差和光阑像差间的关系。运用初级像差理论，做出一些解方程求解的结果，并对薄透镜和厚透镜列出了表示参数变化的数值表。

运用光路折射不变量，证明柱面系统六种像差中有四种与对应的同轴系统子午像差相同，另两种则表现为斜入射的光束具有不同于子午光束的像面弯曲与畸变。

曾导出像差的完整分布公式，对球差与折射率的关系列出了计算结果和表格。

利用前组初级像差引起后组光瞳坐标，物面坐标改变的观点，讨论了衍生高级单色像差及衍生高级色差。

对凹面光栅像差理论、二级光谱等做过深入的讨论，取得了较好的成果，有一些并得到实际的应用。

对光学传递函数进行过深入的多方面的研究，提出低对比分辨能力的评价指标以及一些光学系统的传递函数评价指标。

结合光学设计的需要，建立了多种光学程序，包括各种计算程序和定焦距和变焦距的像差自动平衡程序。

回顾三十年来我所光学设计工作在老一辈科学家的关心与指导下取得了可喜的成就，也为国家培养了大量的人材，但还不能说已完全满足国家的需要，达到了很高的水平。这些还需我们做出很大的努力，做出更大的贡献。

参 考 文 献

- [1] 王之江, 光学设计理论基础, 科学出版社, 1965.
 - [2] 长春光机所, 光学设计论文集, 国防工业出版社, 1964.
 - [3] 常群, 光学设计文集, 科学出版社, 1976.
 - [4] 史光辉, 光学学报, 1981第一卷, 第五期.
 - [5] 匡裕光, 光学学报, 1981第一卷, 第五期.
 - [6] 王之江, 薛鸣球, 物理学报, 1963第19卷, 第11期.
 - [7] 林大键, 薛鸣球, 物理学报, 1980第29卷, 第2期.
-