

耐辐照多节潜望镜光学设计

刘宏波

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 本文对最近研制成功的耐辐照多节潜望镜光学系统的设计工作进行了论述。给出了总体光路安排和初始参数计算。着重对光学系统的像差特性进行了分析, 针对其特殊性。给出了像差平衡方案。绘制了像差曲线, 给出了潜望镜光学系统的测试结果。

关键词: 耐辐照; 潜望镜; 多节

1 引言

为适应我国核工业发展的需要, 急需研制与其配套使用的仪器和检测设备, 而辐照多节潜望镜就是作为一种专用的大型光学检测设备而研制的。

根据实际使用情况, 潜望镜应能对核设备中封闭室内的情况观察; 管沟内积水坑是否有积水; 排管是否有裂缝; 整个封闭室四壁有无裂缝, 渗漏等, 分辨率要求 $\leq 0.1\text{mm}$, 纵向观察深度 11m 。光学透镜要采用耐辐照玻璃材料, 上述是潜望镜光学系统设计的依据。

2 潜望镜光学性能

该潜望镜已验收并通过鉴定, 经有关质检部门对潜望镜光学系统检测, 结果如下:

1. 耐辐照累积吸收剂量 $10^4\text{Gy} \cdot 24\text{h}$ 。
2. 可组合装配成四种潜望长度, 并能上下伸缩(10~810)mm。转像系统通光口径 $\Phi 40\text{mm}$ 。四种潜望长度光学系统尺寸;(3194—3994)mm;(4527—5327)mm;(5860—6660)mm;(7193—7993)mm。
3. 视场角, 14°
4. 观察物距, (350—3500)mm。
5. 系统入瞳及出瞳: $D_{\text{入}} 5.75\text{mm}$, $D_{\text{出}} 2.16\text{mm}$ 。
- 6 分辨率、线视场、放大倍率, 见表1。

表 1

物距(mm)	分辨率(mm)	线视场(mm)	倍率
350	0.02	90	1.8
3500	0.06	900	0.25

3 原理及外型尺寸计算

本系统采用目镜调焦方式,潜望镜对不同物距的物体成像,其像面位置是变化的,移动目镜使像面与目镜的前焦面重合,达到观察物体的目的。

耐辐照多节潜望光学系统外型尺寸如图 1 所示,图中给出了潜望镜全部四种组合的潜望长度。如图 1(d),1,8 是平面反射镜,2 是物镜,3,4,5 是三节可拆装的转像系统,6 是带有两块防辐玻璃,且其平行光路可自由伸缩(10—810)mm 的转像系统,7 是传像转像系统,9 是目镜,10 是观察者。

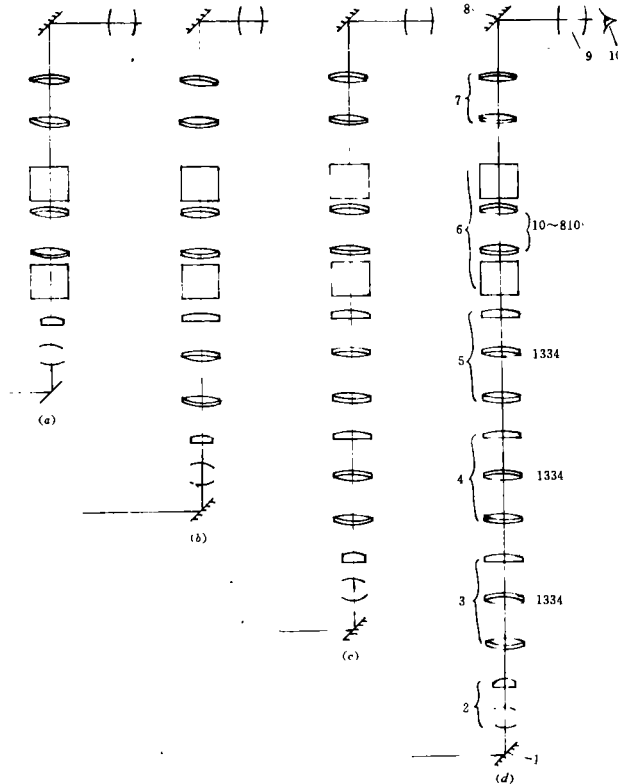


图 1

光路最长 8m,最短 3.2m。3,4,5 节转像系统可任意组合,使潜望镜形成不同的潜望深度,如图 1 中(a),(b),(c)所示。为扩大潜望镜纵向观察范围,设计转像系统 6 的平行光路可上下伸缩(10—810)mm,为观察者免受核辐射照射,转像系统 6 的光路中安放两块长 150mm 的防辐玻璃。

系统入瞳的确定,基于两方面的考虑,一是像面上的照度,另一方面是系统的分辨率要求。潜望镜通常使用环境下的照明条件,可视像面上所需的照度调节。因此,系统入瞳的确定侧重

于系统的分辨率要求。设计物镜组相对口径 $D/f' = 1/14$, $f' = 80.48\text{mm}$, 得入瞳 $D5.75\text{mm}$, 故系统理论分辨率 σ , 由下式求得:

$$\sigma = \frac{1.22\lambda}{D/f'} = 0.01(\text{mm})$$

实际系统分辨率与像差有密切关系, 所以低于理论分辨率。设计出瞳 $D' 2.16\text{mm}$, 由公式 $T = D/D'$ 得系统的视放大倍率 $T = 2.6$ 。

4 系统的像差设计

经高斯光学确定的潜望镜外形尺寸, 对具体的像差校正工作的难易有重大影响, 但经仔细的分析和计算确定之后, 光学系统能否实现预期的成像质量, 最重要且难点在于系统的像差优化设计。因此, 在作具体的像差平衡工作前, 着重分析一下该潜望镜光学系统的特性是十分必要的, 有利于设计工作的顺利进行。

首先潜望镜光学系统中所用光学玻璃材料必须是耐辐射的。由于某种原因, 总体要求耐辐射光学玻璃只允许采用两种, 总长 8m 的光学系统, 两种光学玻璃材料, 这一限制对系统的像差平衡工作和带来困难, 其次系统应具备四种潜望长度, 如图 1 所示, 并且能上下伸缩 ($10-810$) mm 。物距从 350mm 变化到 3500mm 。潜望镜极限使用状态多达 16 种。要确保在各种使用状态下的成像质量。再就是系统光路长, 通光口径有限, 视场较大, 加之系统中有可上下运动部分, 引起光瞳位置不确定, 影响轴外光束的渐晕。

以上的分析说明, 该潜望镜光学系统的像差设计完全不同于典型光学系统像差设计。众多的约束条件, 要求我们必须从多方面入手。从物镜、转像系统的结构型式的确定到系统的像差优化平衡设计方法。

4.1 转像系统形式的确定

应用转像系统的目的是为了把筒长加长, 形成给定的潜望高度。转像系统结构形式取决于它所承担的孔径和视场。根据潜望镜外形尺寸计算结果, 转像系统采用两组双胶合透镜构成, 放大倍率 $\beta = -1$, 如图 2 所示, 两透镜选用同样的结构, 光瞳位于两透镜组对称位置上, 由于结构上完全对称, 物像满足 $\beta = -1$ 的要求。因此, 这种形式的转像系统不产生垂轴像差, 即彗差, 畸变和倍率色差为零。轴向像差, 球差和色差可由胶合透镜组单独校正。重点保证轴上及近

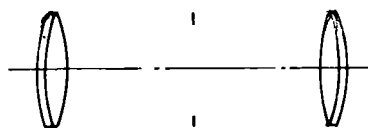


图 2

轴区域的成像质量。根据关系式: $d = 2(1-k)f'$, 其中 d 是两透镜组间隔, k 是轴外光束的渐晕系数, 像散本可依赖两透镜组间的距离变化得以校正⁽²⁾, 但由 k 和 f' 决定的间隔 d 是一定值, 故系统不能校正像散。又由于系统的正负光焦度没有分开, 也不能校正场曲。以上是一节转像系统像面上的像差情况, 五节这种形式的转像系统串联, 像面上的像差由一节转像系统像差情况推知, 垂轴像差, 即彗差, 畸变和倍率色差很小, 但轴向像差, 球差和色差虽经过单组校正, 但由于系统的累积效应, 平衡状态已被破坏, 仍需再次校正。这种累积效应对系统无法校正的像散和场曲影响更大, 须进行平衡。

4.2 物镜形式的确定

通过上述对系统中的五级转像系统像差的分析, 可以看出, 由于系统视场较大, 它的轴外

像差的平衡,明显变得突出了。物镜要和目镜、透镜式转像系统配合使用。因此,在设计物镜时应当考虑到和其它部分的像差补偿问题。一般典型的望远物镜结构,由于视场比较小,一般都不校正对应像高 y' 的二次方以上的各种单色像差和垂轴色差^[1]。因此,其结构形式都比较简单。若在满足系统视场要求的前提下,使其结构形式复杂化,使其具备校正轴外像差的能力。但对耐辐照潜望镜光学系统来说,由于耐辐射光学材料的限制,用结构形式复杂化来加强校正轴外像差的方法并不适用。五级转像系统串联,重点需要平衡的像差是轴向像差,即球差、色差、像散和场曲。垂轴像差很小,只需不要再大就可以了。因此,要求物镜具有校正轴上和轴外像差的能力。选用三片型照像物镜,如图3所示。它有八个变数,即六个半径和两个间隔,在满足焦距要求后,还有七个变数,正好能校正全部七种像差。

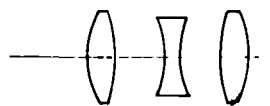


图3

4.3 像差平衡方案

系统极限使用状态多达16种,最佳的像差平衡状态,就是使在16种极限使用状态下的像面上的像差都平衡在允差之内。分析和设计表明,若对图1中(b)或(c)潜望长度的光学系统,选定一合适的物距和系统的上下伸缩量,在此状态下进行像差平衡,达到,球差、色差、正弦差处于校正状态,垂轴色差给定一小量,目的是为了平衡其他使用状态下的垂轴色差数量。像散和场曲的平衡状态,完全取决于其他使用状态像散和场曲的数量,即此处二像差平衡状态,应使其他状态下的像散和场曲在其公差之内。设计表明,在系统无法校正场曲的情况下,采用用像散来平衡场曲的方法,因为根据公式:

$$x_i' = (3A_3 + A_4)l'y'^2; x_s(A_3 + A_4)l'y'^2'$$

由于 A_4 不能校正,若让系统校正像散($A_3=0$),则:

$$x_i' = x_s' = x' = x_p' = A_4l'y'^2'$$

式中 x_p' 为平均场曲

$$\text{若使 } x_i' = 0; \text{ 则有: } x_i' = (3A_3 + A_4)l'y'^2 = 0$$

$$\text{即 } A_3 = -\frac{1}{3}A_4$$

$$\text{此时 } x_i' = 0; x_s' = \frac{2}{3}x_p' \quad x' = \frac{1}{3}x_p'$$

可见 x_i' , x_s' 和 x' 都大大减小了。这十分有利于其他使用状态下的像散和场曲状况。最后的结果表明,各使用状态下像散和场曲的数量基本上都在允差之内,各别情况全视场时略超允差。

图4给出了系统最长、最短时,物距为350mm,和3500mm时,系统在上下伸缩量10,800mm时,共计8种使用状态下的像差曲线。可以看出,系统最长和最短时像散和场曲符号正好相反,最长是一消像散状态,最短是用像散平衡场曲状态。系统的二级光谱较大,无法校正。系统最长时二级光谱为 1.2λ 。

图5给出了上述8种使用状态下 $1.0\omega, 0.85\omega, 0.7\omega$ 子午光束的垂轴像差曲线。从图中也可看出不同视场光束的通过情况。

利用目镜来补偿的物镜中无法校正的像散和垂轴色差。但由图4知,系统最长和最短时场曲反号,故无论补偿那一种状态另一个势必增大,现有平衡状态是较好的,垂轴色差的情况也是如此,因此,在设计目镜时,应使其校正后的剩余像差达到最小。

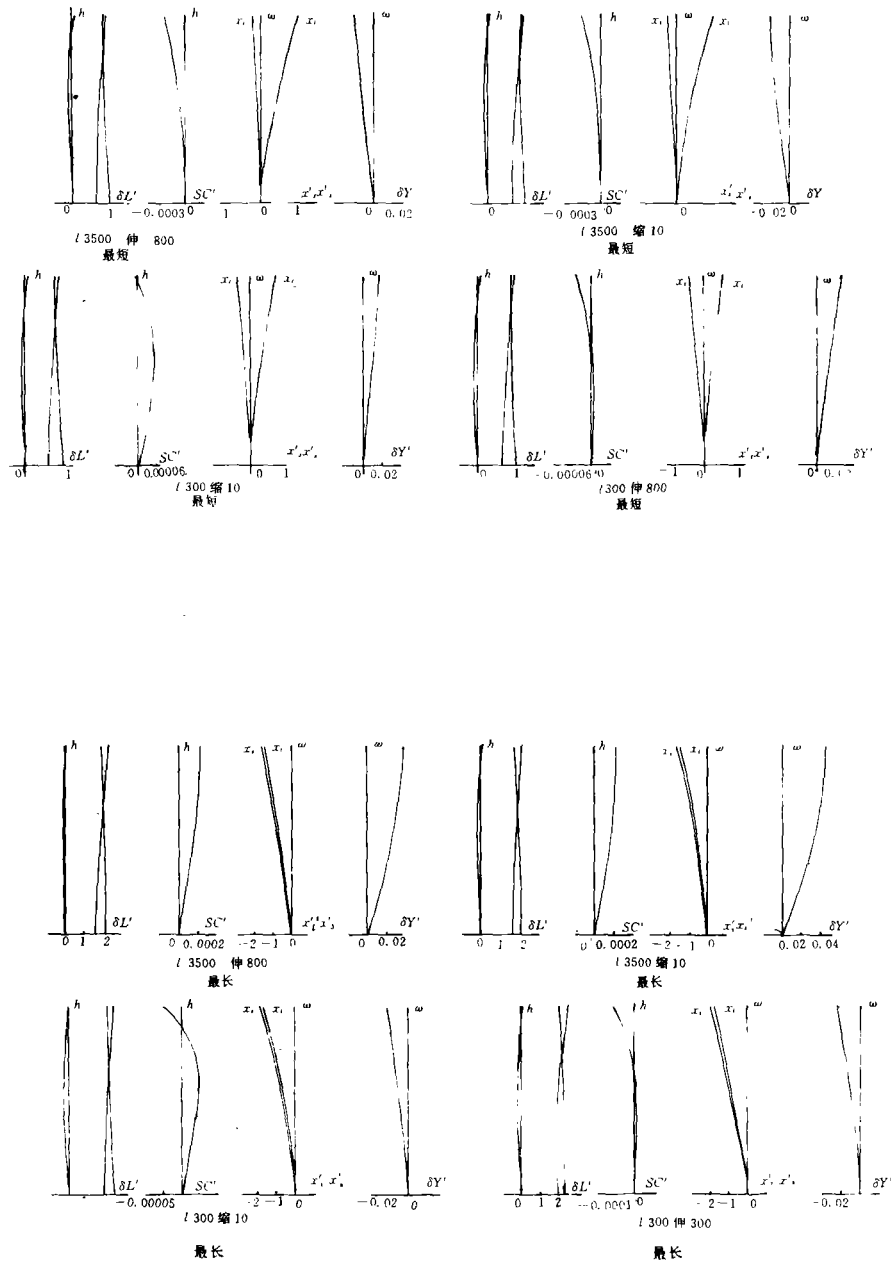


图 4

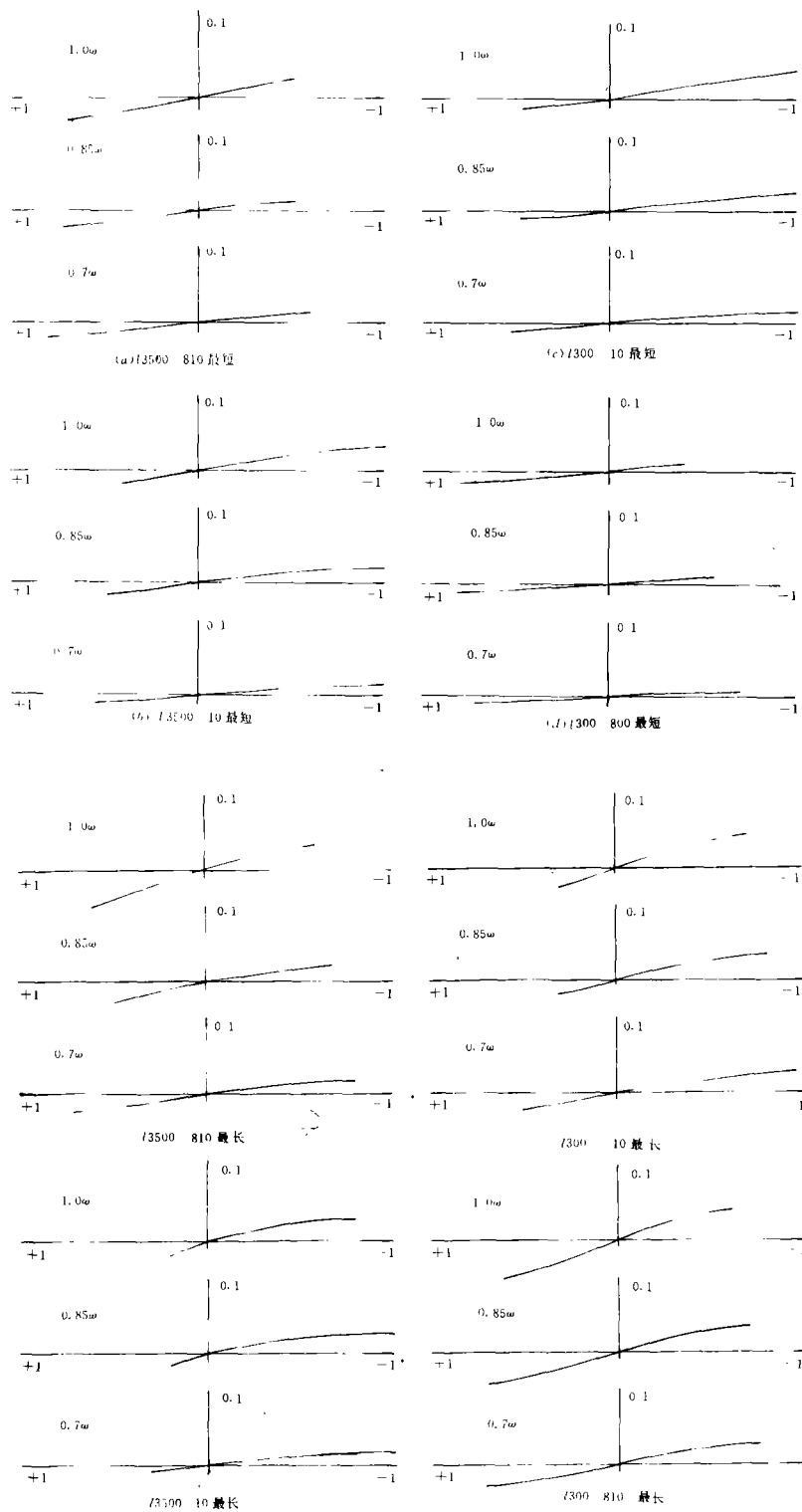


图 5

5 结 束 语

实践证明,按上述光学设计方案设计的耐辐照多节潜望镜光学系统,其各项性能指标均优于给定的技术指标。设计方案是可行的。

参 考 文 献

- [1] 袁旭沧,《光学设计》.北京理工大学出版社,1988
- [2] 张以谟,《应用光学》上下册.机械工业出版社,1982
- [3] 王之江,《光学设计理论基础》.科学出版社,1985
- [4] 郑道敏,舰船光学,1990年(3):13

Optical Design of Multistage Periscope with Performance of Anti-Nuclear Radiation

Liu Hongbo

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)*

Abstract

This paper describes optical design of Multistage periscope with performance of Anti-nuclear radiation, which is developed successly recently. Overall light path arranging and initial parameter calculating are given; The aberration properties of optical system are investigated; The aberration balancing method and aberration curves is also given. Finally, the results of the periscope optical system is tested.

Key words: Antti-nuclear radiation, Periscope, Multistage