

文章编号: 1002-2082(2007)03-0292-05

头盔式单目微光夜视仪中光学系统的设计

尚 华, 刘 钧, 高 明, 毛翠丽, 孟立庄

(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710032)

摘 要: 为提高头盔式单目微光夜视仪中光学系统的成像质量, 并满足夜视仪结构紧凑、质量小的指标要求, 提出在微光夜视仪光学系统设计中引入高次项非球面透镜的设计方法。针对具体的头盔式微光夜视仪, 根据微光物镜、目镜系统技术参数计算理论, 确定该微光夜视仪光学系统的技术参数, 应用光学设计软件 ZEMX 上机调试, 并在光学系统设计中引入高次非球面透镜, 使物镜系统镜片数由原来的9片减少为6片, 目镜系统由原来的9片减少为7片, 简化了结构, 并提高了成像质量。设计结果表明: 在头盔式微光夜视系统中采用非球面透镜可以提高系统成像质量, 简化系统结构。

关键词: 微光夜视仪; 光学系统设计; 非球面透镜

中图分类号: TN223

文献标志码: A

Lens design in helmet-mounted LLL night-vision system

SHANG Hua, LIU Jun, GAO Ming, MAO Cui-li, MENG Li-zhuang

(School of Opto-electronical Engineering, Xi'an Technological University)

Abstract: To improve the imaging quality of the lens used in helmet-mounted low-level-light (LLL) night vision system and make the lens light in weight, small in size, compact in structure, a high order aspheric lens is designed. According to the theoretical calculation of the lens parameters specific to the helmet-mounted LLL night-vision system, lens parameters are designed to meet the demand. With the high order aspheric lens designed, the number of lenses in object lens is reduced from 9 to 6 and the number of lenses in ocular is reduced from 9 to 7. The analysis results show that the configuration of the aspheric surface for helmet-mounted LLL night-vision systems can make its lens configuration simple.

Key words: LLL night-vision system; design of optical system; aspheric surface lens

引言

头盔式单目微光夜视仪是一种装在步兵或伞兵头盔上的夜视系统。它能够帮助作战人员在低照度的夜间发现目标、观察目标, 从而在夜间作战、侦察、指挥、炮瞄等方面发挥作用, 是现代战争中不可缺少的装备。

传统的微光夜视系统大多采用球面设计。在设计过程中随着光学镜头视场和相对孔径的增大, 各

种像差的校正也更加困难。如果光学镜头全部采用球面, 那么在满足成像质量的情况下, 就必须采用更多的镜片和更加复杂的结构型式, 这将导致光学系统体积增大, 质量增加。而非球面的面形系数是由多个自由变量决定的, 有更大的自由度, 校正像差更加方便。因此, 在光学系统设计中采用非球面透镜可在保证成像质量的前提下, 减少透镜片数, 简化结构。近年来随着光学加工工艺和光学检测技

收稿日期: 2006-09-18; 修回日期: 2007-01-10

作者简介: 尚华(1977—), 女, 陕西泾阳人, 西安工业大学硕士研究生, 主要从事光学系统设计及机械结构设计。E-mail: shanghua7722@126.com

术的提高,以及计算机在光学设计方面的应用,使非球面的计算变得比较容易,所以在光学系统设计中可以适当使用非球面。

鉴于此,我们在设计微光夜视仪光学系统时,在保证光学系统光学性能和像质的前提下,采用非球面透镜可达到使系统结构简化、体积缩小、质量减小的目的。

1 微光夜视仪的原理

微光夜视仪主要由微光光学系统(包括物镜、目镜),微光像增强器和驱动电路3部分组成。其工作原理如图1所示。由目标反射的夜天空自然光进入光学系统物镜后,在像增强器的光阴极面上成像,像增强器对目标像进行光电转换、电子成像和亮度增强,并在荧光屏上显示增强的目标图像,人眼可通过目镜观察^[1]。

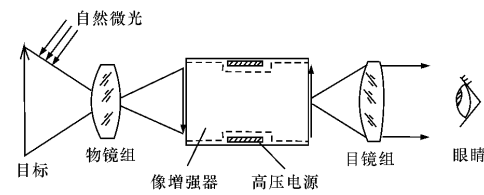


图1 微光夜视仪工作原理图

Fig. 1 Principle of LLL night-vision system

2 微光夜视仪光学系统的设计

微光夜视仪中光学系统的设计包括物镜和目镜系统的设计。设计要求如下:

- 1) 在照度为 $1 \times 10^{-3} \text{ lx}$ 时,对直立人的探测距离为 250 m,识别距离为 150 m;
- 2) 环境温度为 $-30 \text{ }^\circ\text{C} \sim +50 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 3) 整机体积小、质量小。

2.1 光学系统技术参数的确定

2.1.1 微光夜视仪的放大率

放大率是仪器系统的一个重要技术指标,它取决于作战人员需要观察的目标距离和区域场景。一般情况下,微光夜视仪的放大率越大,观察的距离就越远,但是观察的视场就越小。视场太小对作战人员来说很不利。作战人员希望通过微光夜视仪观察到的目标与没有使用仪器时看到的一样真实。因此,一般情况下系统放大率选择 $1 \times$ 。

2.1.2 物镜技术参数的计算

物镜的作用是把自然微光照射下的目标成像在位于焦平面的像增强器的光阴极面上。在夜视系

统中光学镜头设计是否合理,将对微光夜视仪成像质量起决定作用。物镜的焦距、有效口径、视场和相对孔径都是光学系统设计时所需的主要参数。下面我们对物镜的主要参数进行计算^[2]。

1) 有效口径(D)的计算

根据探测方程,光子噪声所限制的分辨率 α_2 为

$$\alpha_2 = \frac{2K}{MDC} [2e / (\tau t s \rho E)]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

由(1)式得:

$$D = \frac{2K}{M\alpha_2 C} [2e / (\tau t s \rho E)]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: D 为物镜的有效孔径; M 为物镜的调制传递函数(轴上),取 70%; C 为景物的调制度,取 0.35; e 为电子电荷量, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$; τ 为物镜透过率,取 $\tau = 0.8$; t 为积累时间, $t = 0.2 \text{ s}$; s 为光电阴极的积分灵敏度,取 $s = 6 \times 10^{-4} \text{ A/lm}$; ρ 为目标背景的平均反射率, $\rho = (\rho_1 + \rho_2) / 2$, 取 0.27; E 为夜间天空照度,取 $E = 1 \times 10^{-3} \text{ lx}$; K 为阈值信噪比,即人眼分辨目标所需的最小信噪比,与要求发现目标的概率程度和目标形状有关,取 $K = 2.2$; α_2 为光子噪声所限制的分辨率。

从(2)式可以看到,计算 D 时首先必须计算出光子噪声所限制的分辨率 α_2 , 已知

$$\alpha_2 = (\alpha_3^2 - \alpha_1^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

对于夜视系统来说,分辨率 = 目标临界尺寸 / (目标的空间频率 \times 视距), 即

$$\alpha = \frac{A}{\gamma \times L} \quad (4)$$

式中: A 为目标临界尺寸; γ 为目标的空间频率; L 为视距。

目标的空间频率 γ 取值为: $\gamma_{\text{发现}} = 1$, $\gamma_{\text{识别}} = 4$, $\gamma_{\text{分清}} = 8$, $\gamma_{\text{最佳}} = 15$, 分别对应发现、分辨、识别、分清和最佳分辨率。根据约翰逊准则: 最佳分辨率是指分清目标的概率达到 100%; 考虑上限公差的分率, 以适应军用光学仪器可靠性要求。

根据设计要求, 在 $1 \times 10^{-3} \text{ lx}$ 照度时, 对直立的人的识别距离为 150 m, 临界尺寸 $A = 2 \text{ m}$, (3) 式中 α_3 即为识别分辨率。将对应的空间频率 $\gamma_{\text{识别}} = 4$ 代入(4)式可求出 α_3 。 α_1 为像增强器调制度限制的仪器分辨率。在计算过程中, 目标空间频率取最佳分辨率对应的空间频率, 即 $\gamma_{\text{最佳}} = 15$, 同样将它代入(4)式可计算出 α_1 , 即

$$\alpha_3 = \frac{A}{L \cdot \gamma_{\text{识别}}} = \frac{2}{150 \times 4} = 3.3 \text{ mrad}$$

$$\alpha_1 = \frac{A}{L \cdot \gamma_{\text{最佳}}} = \frac{2}{150 \times 15} = 0.89 \text{ mrad}$$

再将 α_2 和 α_1 代入(3)式得

$$\alpha_2 = \frac{A}{L} \left(\frac{1}{\gamma_{\text{识别}}^2} - \frac{1}{\gamma_{\text{最佳}}^2} \right)^{\frac{1}{2}} = 3.2 \text{ mrad}$$

最后将 α_2 代入(2)式可计算出有效口径的尺寸

$$D = 19.63 \text{ mm}$$

2) 焦距(f')的计算

由像增强器调制度限制的仪器分辨率

$$\alpha_1 = \frac{1}{N \cdot f'_{\text{物}}} \quad \text{即 } f' = 1/(N \cdot \alpha_1) \quad (5)$$

其中 N 表示像增强器限制的空间频率,取 $N=42$ 。

将 $\alpha_1 = \frac{A}{L \cdot \gamma_{\text{最佳}}}$ 代入(5)式可得

$$f'_{\text{物}} = \frac{15L}{N \cdot A} = \frac{15 \times 150}{42 \times 2} \approx 25 \text{ mm}$$

3) 视场(ω)的计算

选取像增强器为超二代像增强器。超二代像增强器的通光口径即为物镜的视场光阑,可用下式计算:

$$\omega = \arctan \frac{u_{\text{光窗}}}{f'_{\text{物}}} = \arctan \frac{9}{25} = 19.8^\circ$$

其中 $u_{\text{光窗}}$ 为像增强器光阴极通光孔径。所以其物镜视场均为 $2\omega = 39.6^\circ$,取 $2\omega = 40^\circ$

4) 相对孔径(D/f')的计算

由以上计算可知,物镜有效口径 $D = 19.63 \text{ mm}$,物镜焦距 $f' = 25 \text{ mm}$,则物镜相对孔径为 $D/f' = 1/1.274$ 。

2.1.3 目镜技术参数的计算

目镜的作用是放大像增强器荧光屏上的目标像。在微光夜视仪的光学设计中,需要确定目镜的一些主要参数,如目镜焦距和出瞳直径等。这些参数是否得当,不仅影响夜视仪的体积、质量、倍率和视场,同时还影响其夜间观察的性能^[3]。

1) 焦距($f'_{\text{目}}$)

由系统的放大关系可知

$$\Gamma = -f'_{\text{物}}/f'_{\text{目}}$$

式中: Γ 为系统放大率, $\Gamma = -1^\times$; $f'_{\text{物}}$ 为物镜焦距, $f'_{\text{物}} = 25 \text{ mm}$ 。由上式计算的目镜焦距 $f'_{\text{目}} = 25 \text{ mm}$ 。

2) 视场(ω')

已知系统的放大率为 1^\times ,所以目镜视场 $2\omega' = 40^\circ$ 。

2.2 设计结果分析及像质评价

2.2.1 物镜系统的设计

1) 物镜系统光学特性

物镜系统的焦距 $f \approx 25 \text{ mm}$,视场 $2\omega = 40^\circ$,相

对孔径 $D/f \geq 1/1.27$,全视场畸变 $< 5\%$,传递函数(MTF):轴上(空间频率为 40 lp/mm) ≥ 0.62 ;轴外(空间频率为 40 lp/mm) ≥ 0.40 。

2) 初始结构的选择

夜视仪器常用的物镜有2种类型:匹兹伐型和双高斯型。当仪器的视场要求不大时,可以采用匹兹伐型物镜,其基本结构是由2个正光焦度的双透镜组成,如图2所示。这种物镜结构简单,球差和慧差校正较好,但视场加大时场曲严重,故只能用于小视场情况。

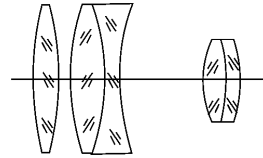


图2 匹兹伐物镜的基本结构

Fig.2 Configuration of Petzval lens

双高斯结构是微光仪器中高速透镜的最基本设计,基本结构如图3所示。这种结构比较容易在宽光谱范围修正球差,其结构属对称型,可使轴外像差自动抵消,经改进后其相对孔径可达到 $1:1$ 甚至更大,视场可达到 $40^\circ \sim 50^\circ$ 。所以,该系统采用双高斯物镜作为初始结构。其中选用的超二代像增强器的阴极面前有1个厚度为 5.6 mm ,材料为 K1 的保护玻璃。这块平板玻璃也参与了物镜系统成像,故在设计物镜系统的过程中,还要考虑平板玻璃的影响。

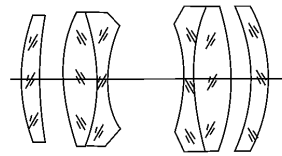


图3 双高斯物镜的基本结构

Fig.3 Configuration of double-Gauss lens

3) 结果分析及像质评价

分析此头盔式单目微光夜视仪的物镜光学特性可知,它具有大视场、大相对孔径的特点,轴上点像差很容易校正,而轴外点的像差,特别是高级像差很难校正,也很难控制^[4]。非球面具有高级像差小,产生负球差的特点,可以平衡球面生成的初级像差和高级像差,故系统设计中采用非球面透镜可以很好地校正轴外点的像差^[4]。另外,该头盔式单目微光夜视仪是装在头盔上,所以要求夜视仪体积小、质量小。由于物镜系统的长度和质量对整个

系统影响很大,因此要求物镜系统在满足像质的情况下,尽量使透镜的片数最少。由于球面只有一个参数决定面形,它校正像差的局限性很大,并使结构复杂化,因此,若采用该结构必然会增加整个系统的质量,这是我们最不希望的结果。与球面相比,非球面的面形系数由多个自由变量决定,有更大的自由度,给我们校正像差提供了更广阔的空间,可以达到减少透镜片数的目的。因此,我们在系统设计过程中采用非球面^[5]。

为了使物镜结构简单,我们采用6片镜片,其中3个采用非球面,以更好地校正畸变和光学传递函数。物镜结构如图4所示。物镜的非球面

系数及像差结果如表1和图5所示。由表1和图5可以看出,当空间频率为40 lp/mm时,系统的光学传递函数轴上为0.6,轴外为0.4,完全满足设计要求;畸变值减小为4.6%,已完全达到设计要求。

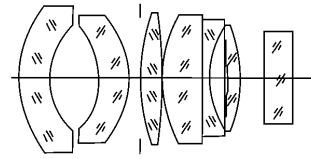


图4 非球面物镜结构

Fig. 4 Configuration of aspherical objective

表1 物镜系统的非球面系数

Table 1 Aspherical coefficients of objective

面数	k	a_1	a_2	a_3
第1个面	-0.888 646	0.000 286	0.000 005	-4.423 40E-008
第3个面	0.232 269	-0.000 165	-4.309 72E-007	2.106 609E-008
第6个面	-3.080 302			

注: k 是与二次曲面的离心率有关的系数; a_1, a_2, a_3 为高次非球面系数。

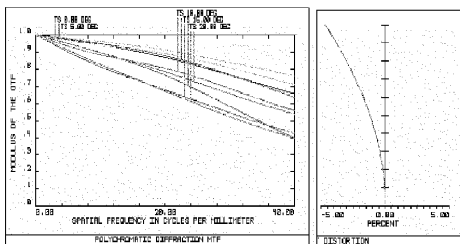


图5 非球面物镜的光学传递函数和畸变

Fig. 5 Optical transfer function and distortion of aspherical objective

2.2.2 目镜系统的设计

微光夜视仪目镜设计时要求除焦距、视场、传递函数等与物镜相同外,还要求其出瞳距不小于17 mm;由于采用超二代像增强器,其出射面光谱成分主要是以e光为主,因此可将目镜看成一个单色光成像系统,不必考虑色差。像增强器的出射面为

半径 $R=40$ mm的球面,此球面相当于目镜的像面。采用球面的目的是补偿目镜的场曲,从而简化目镜结构。经上机反复调试,最终设计的目镜结构如图6所示。

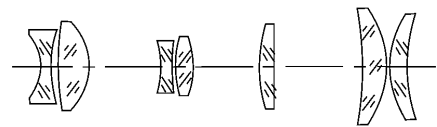


图6 目镜结构

Fig. 6 Configuration of aspherical ocular

为了使目镜系统结构简单,我们采用7片透镜,其中3个采用非球面,以更好地校正畸变和光学传递函数。目镜的非球面系数及像差结果如表2和图7所示。由表2和图7可以看出,当空间频率为40 lp/mm时,光学传递函数轴上为0.75,轴外为0.5,超过设计要求;畸变值减小为2.3%,已经达到设计要求。

表2 目镜系统的非球面系数

Table 2 Aspherical coefficients of ocular

面数	k	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
第7个面	-38.835 876	-0.010 466	0.000 112	-2.037 93E-007	-8.524 01E-009	0
第11个面	-0.607 321	0.003 409	-0.000 013	1.658 589E-008	-3.272 93E-009	6.373 135E-011
第12个面	-3.341 182	-0.008 198	0.000 016	-2.214 41E-007	1.099 397E-009	5.068 794E-011

注: k 是与二次曲面的离心率有关的系数; a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 为高次非球面系数。

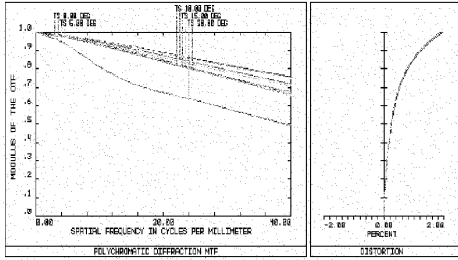


图7 目镜的光学传递函数和畸变

Fig. 7 Optical transfer function and distortion of aspherical ocular

设计实践表明,在设计非球面时力求做到高次非球面系数最小。增加高次项非球面系数的项数会给非球面的加工和检验带来很多困难,或者使加工的实物和设计曲线不一致。二次曲面检验很方便,因此笔者从工艺角度考虑采用二次曲面。本文设计物镜时遵循上述规则,系统中采用2个高次非球面和1个二次曲面。由上面的设计结果可以看出:使用非球面后,物镜及目镜系统的像质都得到了明显的提高,达到了减小整个系统体积和质量的目的。

3 结束语

根据微光光学系统技术参数计算理论,应用ZEMAX光学设计软件对上述系统上机调试,实验结果表明,设计出的头盔式单目微光夜视仪物镜、目镜光学系统满足要求,系统采用非球面减少了镜片数目,简化了结构,缩小了体积,减小了质量,使夜战人员能够机动、灵活地捕捉目标。该微光夜视仪主要用于单兵作战系统。本设计方法还可以推广到其他微光夜视仪的设计中。

参考文献:

[1] 刘红漫. 国外头盔夜视镜系统的发展概况[J]. 光电与控制, 1996, 10(2): 38-42.
LIU Hong-man. Development of foreign helmet-mounted LLL night-vision system [J]. Journal of Photoelectricity and Control, 1996, 10(2): 38-42. (in Chinese)

[2] 谭欣明. 关于微光物镜T数系列数值的确定[J]. 云光技术, 1988, 30(5): 7-13.
TAN Xin-ming. About T parameter confirmation of lens in low-light level night vision device [J]. Journal of Yunnan Optics. 1988, 30(5): 7-13. (in Chinese)

[3] 王承芯. 微光夜视仪中目镜参数的选择[J]. 应用光学, 1993, 14(1): 10-19.
WANG Cheng-xin. Selection of eyepiece in low-light-level night vision device [J]. Journal of Applied Optics, 1993, 14(1): 10-19. (in Chinese)

[4] 高明, 强西林, 陈智利, 等. 头盔式双目微光夜视仪的研究[J]. 西安工业学院学报, 2001, 21(4): 300-303.
GAO Ming, QIANG Xi-lin, CHEN Zhi-li, et al. Research of the aviator's night vision imaging system on head-binocular [J]. Journal of Xi'an Institute of Technology, 2001, 21(4): 300-303. (in Chinese)

[5] 刘钧, 尚华, 宋波. 头盔式单目微光夜视仪中非球面物镜系统的设计[J]. 应用光学, 2006, 27(4): 308-311.
LIU Jun, SHANG Hua, SONG Bo. Design of aspheric lens in helmet-mounted LLL night-vision system [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(4): 308-311. (in Chinese)

[6] 张良. 中波红外变焦距系统的光学设计[J]. 应用光学, 2006, 27(1): 33-34.
ZHANG Liang. Optical design for middle infrared zoom system [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(1): 33-34. (in Chinese)