

基于超二代像增强器的微光夜视仪设计*

邹永星^{1,2}, 周仁魁¹, 杨松龄²

(1.中科院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710068; 2.武警工程学院, 陕西 西安 710086)

摘要: 提出了一种设计手持式微光夜视仪的思路, 选择了高质量的超二代像增强器, 设计了性能优良的光学系统, 进行了精细的像差校正, 实现了 Gen II+ 像增强器、光学系统和人眼的光谱匹配。在 10^{-3} lx 照度下, 对人视距提高到 350~400 m, 对车辆视距达到 700~900 m。

关键词: 微光夜视仪; 像增强器; 光学设计; 像差; 光谱匹配; 视距

中图分类号: TN223 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2005)06-0446-03

Study of Night Vision Instrument at Low Light Level Based on Gen II+ Image Intensifier

ZOU Yong-xing^{1,2}, ZHOU Ren-kui¹, YANG Song-ling², SUN Rong-hai²

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Shanxi xi'an 710068, China;

2. Engineering College of Armed Police Force, Shanxi xi'an, 710086, China)

Abstract: A new design method of night vision instrument at low light level is put forward. The excellent image intensifier is selected, optical system with excellent performance is designed. The spectrum match among image intensifier of Gen II+, optical system and eyes is carried out, and correction of aberration has been carefully implemented. Examination results show that the vision distance of the night vision instrument can reach up to 350~400 m and 700~900 m for person and vehicle, respectively at 10^{-3} lx.

Key words: night vision instrument at low light level; image intensifier; optical design; aberration; spectrum match; vision distance

引言

微光夜视仪是一种利用光增强技术的光电成像系统, 利用它可以拓展人眼对微弱光图像的探测能力, 因而在各领域尤其是在军事上得到迅速发展和广泛应用^[1]。国内同类产品较多, 但由于器件的限制和设计水平, 技战术指标不高。本文提出一种设计方法, 在物镜口径为 76 mm 的条件下, 可在 10^{-3} lx 照度下, 对人视距提高到 350~400 m, 对车辆视距为 700~900 m。为达到设计要求, 采取了如下措施: 1) 采用高灵敏、高增益、高信噪比、高分辨率的像增强器, 选用超二代像增强器; 2) 设计高质量的光学系统, 物镜分辨率高, 系统的倍率大; 3) 实现夜天光、光学系统、像增强器之间光谱的匹配。响应的峰值接近在一定光谱范围内, 并且向红外波段延伸, 以充分利用夜天光。同时为适应严寒地区使用, 增加外接电源, 并采用模块化设计, 便于使用、调校和维护。

1 像增强器的选择

像增强器是系统的核心部件, 其将微弱的光辐射图像通过光电成像系统进行光量子放大, 并转换为人眼可见的光学图像^[2]。像增强器的性能参数是实现技术指标可靠保证, 也是设计光学系统必不可少的原始参数, 在总体设计中根据视距要求、用途和成本选择像增强器^[3]。微光目标夜视仪要求在 10^{-3} lx 照度下, 在 350~400 m 距离上识别人, 在 700~900 m 距离上识别车辆, 要求像增强器增益高, 分辨率高, 光阴极灵敏度高, 体积小, 而且要具有防强光性能。根据最优化准则, 选用了超二代像增强器 XX2040。XX2040 的综合性能高于国内外同

* 收稿日期: 2004-12-14

类产品。其高增益，高分辨率以及良好的信噪比特性保证了观察视距的实现。图 1 比较了 XX2040 与同类产品的 MTF 传输特性^[4]。

从图 1 可以看出，由于 XX2040 离子壁垒薄膜的弥散作用，DEP XX2040 的 MTF 特性要优于 Omnibus 同类产品的 MTF 特性。

2 物镜设计

微光物镜是一种高质量的光学系统，在像增强器确定之后，它的成像质量直接关系到夜视距离。微光物镜的基本特点是大口径、长焦距、大相对孔径，在体积允许的范围，尽量提高夜视系统的倍率。通过对各种型式的物镜对比分析，最终选取了匹兹伐尔型物镜。它的优点是相对孔径大、分辨率高、传递函数高^[5]。

根据约翰逊准则，要识别一个目标，所需的空间鉴别频率至少为 $N=4$ ，而微光下人眼的分辨角为 $2'$ ，故可用式： $\arctan(Z/RN) \geq 2'$ ，来初步估计微光夜视距离 R 。当目标为人员时，目标尺寸 Z 规划为 1m， $N=4$ ，视距 $R=350$ m 和 $R=400$ m，分辨角 α 分别为 $2.46'$ 和 $2.15'$ 。理论计算说明，要求识别人时，视距 $R=350 \sim 400$ m 的目标是可实现的。

根据以上视距确定物镜的口径 D 和焦距 F ，由于：

$$R = F \cdot A_k \cdot Z / N \tag{1}$$

$$L = 10^{-6} F_o \cdot F_s \cdot F_i \tag{2}$$

式中： $F_o = F^2 / (TD^2 M_0^2 M_m^2)$ 为光学系数因子； $F_s = A_k^2 / (C_s^2 r)$ 为景物因子； $F_i = f / (st M_i^2)$ 为像增强器因子； R 为夜视距离 (m)； L 为照度 (lx)； F 为物镜焦距 (mm)； D 为物镜的口径 (mm)； Z 为目标的尺寸 (m)，规划为 1m； N 为条纹图像的线对数，识别取值 4； T 为物镜透过率； C_s 为条纹对比度； r 为图形平均反射率； f 为像增强器的噪声功率因子； s 为像增强器光电阴极灵敏度； t 为系统积累时间； M_0 为 A_k 频率处物镜的传递函数； M_m 为 A_k 频率处目镜的传递函数； M_i 为 A_k 频率处像增强器的传递函数； A_k 为在像增强器输入窗口上条纹图像的空间频率。

利用式(1)(2)，先确定评价频率 A_k ，根据目前超二代像增强器的技术水平，令 $C_s=0.3$ ， $T=0.8$ ， $r=0.3$ ， $t=0.2$ ， $s=700$ ， $f=3$ ，则：

$$A_k = 31.75 D \cdot M_0 \cdot M_m \cdot M_i / F \tag{3}$$

根据对仪器外形尺寸的限制，取 $D=76$ mm，又根据微光物镜的特点，取 $F=1.42D=108$ mm，得 $A_k=12.96$ ，对应的 $M_i=0.83$ ，有：

$$M_0 \cdot M_m = 0.492 \tag{4}$$

取 $M_m=0.73$ ， $M_0=0.7$ 。实际上，目标尺寸一般大于 1m，由此出发得到的 M_m ， M_0 更小。因此，设计中微光物镜的口径 D 和焦距 F 分别取为 76mm 和 108mm，即可达到设计要求。

目镜的主要参数为：焦距 $f=20$ mm，出瞳直径 8mm，出瞳距离 22mm，视度调节范围 $\pm 5D$ 。

3 像差的校正与光谱的匹配

3.1 像差校正

在像差校正过程中，采用了 SOD88 光学设计软件，并合理地控制相关像差。在设计中主要控制以下几种像差：1) 球差：它主要关系到镜头的分辨率。除利用弯曲各透镜的半径，改变曲率之外，还采用调整空气间隙的方法来校正高级球差，以提高分辨率；2) 场曲：微光物镜要求有很小的场曲，采用合理的光焦度分配方法来控制，还采用厚透镜消场曲的方法来控制；3) 色差：主要采用不同的阿贝数玻璃的组合。玻璃的选取，不仅为消色差，而且也消球差有直接关系。根据经验，一般正透镜选用高折射率、高色散的玻璃组合；负透镜选用高折射率、低色散的玻璃组合；4) 轴外场曲：除合理的光焦度分配外，还适当利用入瞳位置的选取来校正；5) 宽光束子午慧差：选用合理的入瞳位置。

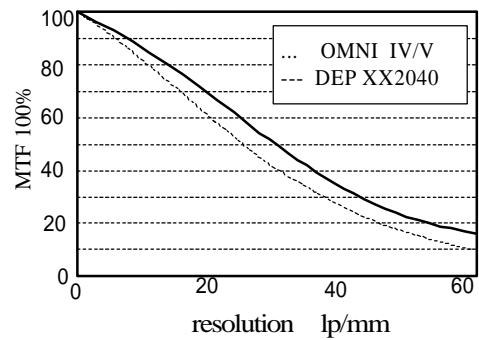


图 1 MTF 值的比较

Fig.1 A comparison of MTFs

使用光学设计软件, 对物镜系统的像差进行了计算, 表 1 列出了几种主要的像差: 球差 dL , 慧差 S_C , 畸变 dY_z , 子午场曲 X_t , 弧矢场曲 X_s , 垂轴色差 D_{Yab} 。对其分别取不同视场的 5 点进行计算, 计算结果单位为 mm。

通过对以上像差的精细校正, 物镜质量有明显提高, 分辨率为 100lp/mm。整个光学系统的焦距, 主要由各透镜的光焦度合理组合。

3.2 光谱的匹配

设计中, 分别确定人眼、像增强器的响应波段, 夜天光光谱的分布特性, 并尽量使之相匹配, 以充分发挥像增强器的功能和物镜的性能, 从而提高夜视距离。像增强器的光谱响应范围为 $0.38\sim 0.86\ \mu\text{m}$, 夜天光中晴朗星光的光谱为 $0.6\sim 1.2\ \mu\text{m}$, 满月光为 $0.4\sim 1.25\ \mu\text{m}$ 。光学系统设计的光谱响应范围为 $0.5893\sim 0.863\ \mu\text{m}$, 在此波段容易校正色差。选取的色差校正范围是 $0.5893\sim 0.863\ \mu\text{m}$ 。

4 结论

设计的微光夜视仪, 在 10^{-3}lx 照度下, 实现了对人视距 $370\sim 400\text{m}$, 对车辆视距 $700\sim 900\text{m}$, 达到了指标要求。在环境条件 Env.Condition, 温度 25°C , 相对湿度 60% 时, 以 GJB851-90 为试验依据, 检测到像增强器的分辨率为 0.25 mrad, 不准确度为 4%。国内同类产品的分辨率为 0.5 mrad 左右。并进行了温度试验和振动试验, 结果都符合标准。

参 考 文 献

- [1] 向世明, 倪国强. 光电子成像器件原理[M]. 北京: 国防工业出版社. 1999.
- [2] 张敬贤, 李玉丹, 金伟其. 微光与红外成像技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社. 1995.
- [3] 骆冠平, 何开远, 王志宏, 田金生, 袁晓鹏. 二代微光像增强器的发展与应用[J]. 红外技术. 2000, 22(2): 7~10.
- [4] Niles Thomas. System performance advances of 18 mm and 16 mm subminiature image intensifier sensors[A]. *Image Intensifiers and Applications II, Proceedings of SPIE*[C]. 2000, 4128: 54~64.
- [5] 李士贤. 光学设计手册[M]. 北京: 北京理工大学出版社. 1996.

作者简介: 邹永星 (1978—), 男, 江西新干人, 现为中科院西安光学精密机械研究所光学工程专业在读研究生, 研究兴趣为微光夜视技术和图像处理等。

表 1 物镜系统的像差

Table 1 Aberration of object lens system

像差 视场	dL	S_C	dY_z	X_t	X_s	D_{Yab}
10°	0.00044	0.00107	0.03949	0.04206	0.08521	0.04477
8.5°	0.00708	0.00144	0.02352	0.04144	0.06488	0.03714
7.7°	0.00214	0.00127	0.01322	0.03468	0.04668	0.03030
5°	0.00785	0.00075	0.00455	0.02064	0.02432	0.02097
0	0.00469	0.00029	0.00097	0.00818	0.00898	0.01241