

光学系统设计技巧(续)

郑保康

(云南北方光电仪器有限公司 昆明 650114)

(续 2007 年 No. 1)

ξ 5.2.3 微光象增强器

(一) 象增强器的基本原理和分类

(1) 基本原理

象增强器是微光观察镜系统的核心,其作用是把微弱的光图象增强到足够的亮度,以便人们用肉眼进行观察。

象增强器是一种电真空成象器件,主要由光阴极、电子光学系统和荧光屏组成。

其图象增强作用主要由三个环节完成。即外光电效应的光阴极把输入到它上面的低能辐射图象转变为电子图象;电子图象通过特定的静电场或电磁复合场而获得能量并被加速聚焦到该电子光学系统的象面上;位于电子光学系统象面的荧光屏被高速电子轰击而发出和入射图象强弱相应的被增强了的目标可见图象。

表 5 - 1 国外部分一代象增强器性能

管型	有效直径 光阴极 / 屏 (mm)	光灵敏度 (最小) ($\mu\text{A}/\text{m}$)	辐射灵敏度 $\text{mA}/\text{w}(\text{min})$		最大分辨率 (lp/mm)	MTF (%)							增益 (倍)	畸变 (最大) %	备注 EBI (Lx)
			800 (nm)	850 (nm)		7.5 lp/mm	12.5	16	20	25	50	75			
单级管	18/7	250	15	10	90($r = 10$) 100(轴)		80			58	25	9	619	6($r = 7$)	2×10^{-7} (典) 6×10^{-7} (max)
	40/13	200	13	8	95($r = 10$) 95(轴) 70($r = 20$)		80			55	20		1414	7.5 ($r = 16$)	2×10^{-7} (典) 4×10^{-7} (max)
二级级 联管	2 × 18/18	250	20	15	42(轴)min 36($r = 7$)min	75		48	35				3927	3($r = 7$)	2×10^{-7} (max)
三级级 联管	3 × 25/25	275	20	10	30(轴) 28($r = 7$)	60			20				50265	25 ($r = 100$)	2×10^{-7}
	3 × 18/18	250	20	15	37(轴)min 32($r = 7$)	70		40	25				55836	4($r = 7$)	2×10^{-7}

以上均为 S₂₅ 光阴极,P - 20 中短余辉荧光粉。

(2) 象增强器的类型

象增强器的种类很多,按工作方式分类可分为:连续工作、选通工作和变倍工作象增强器;按象管结构可分为:近贴式、倒象式、静电聚焦式和电磁复合聚焦式;按发展阶段可分为:一代级联式象增强器,二代光纤面板阴极窗带微通道板的象增强器,二代半玻璃阴极窗带微通道板的象增强器和三代负电子亲和势光阴极象增强器。目前象增强器又出现了超级倒象管(或称杂交管),用三代近贴管与一代倒象管级联构成,工作在 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{Lx}$ 极低照度下,增益达 10^5 倍。随着成像器件的发展,整机性能也随之不断改进而相应产生了一代、二代、三代等微光产品。目前三代象增强器多做成薄片管用于夜视眼镜并在逐步减轻重量和降低成本。

为了便于了解微光象增强器的性能,现将八十年代中期国外几家公司部分一代、二代和三代的象增强器性能和水平列于表 5-1, 5-2, 5-3。而将国产的象增强器性能列于表 5-4 中。

(二) 微光观察镜对象增强器的基本要求

(1) 足够的亮度增益

象增强器工作在夜间微弱光条件下,输入的光信号非常弱,这就要求象增强器有足够的亮度增益,以便把每一个探测到的光子增强到人眼可观察的程度。即入射

到光阴极面上的一个光子能在荧光屏上产生可以被肉眼视网膜记录的多个光子。

假定象增强器的光子增益为 G_n ,则入射到光阴极面上一个光子,能在荧光屏上产生 G_n 个光子,当充分暗适应的眼睛通过目镜观察时,从 G_n 个光子中捕获的光子数 n 为:

$$n = G_n \times \frac{r^2}{l^2 \rho_e^2}$$

式中 r 为暗适应瞳孔半径,通常取 3.8mm ; l 为眼的明视距离, $l = 250\text{mm}$; ρ_e 为目镜放大率。按充分暗适应的视觉阈值计算,至少要有 12 个光子被瞳孔所捕获才能在视网膜上产生一个“记录”。由此可得出象增强器的最小增益为:

$$(G_n)_{\min} = \frac{50000}{\rho_e^2} \dots\dots\dots (5-3)$$

目镜放大率 $\gamma_e \geq 7.5$ 即可满足上述要求,实际上目镜放大率为 $15 \sim 20$ 倍,这使所要求的增益值减小,如果观察者没暗适应,则该值还要增大。此外,在屏亮度较高情况下,人眼探测和识别目标的速度也较高。如果增益不够大会使象管输出屏亮度降低,以至影响系统极限分辨力。反之若增益过大也会由于象管噪声加大出现闪烁现象,而使观察效果下降。通常象增强器的增益值在几千到几万之间。但是也有一些象管的增益为几百。

表 5 - 2 国外部分二代象增强器性能

管型	有效直径/屏 (mm)	光灵敏度(最小)(μ A/1m)	辐射灵敏度(最小)(mA/w)min		分辨力 (lp/mm)	MTF(%)			信噪比 min	亮度增益	畸变(%)	电源电压(V)	备注	EBI(Lx)
			800 (nm)	850 (nm)		2.5 (lp/mm)	7.5 (lp/mm)	15 (lp/mm)						
二代倒象放大 XX1380	20/30	225	15	11	45(中心) 45($r=8$)	95	80	50	/	3000 ~ 25000	3	2.6		2×10^{-7}
二代倒象放大 XX1383	20/30	225	20	15	44(中心) 40($r=8$)	92	75	45	2.8	6000 ~ 8000	3($r=10$)	2.2 ~ 3.4	荷兰 飞利浦	2×10^{-7}
二代倒象放大 6700 - 1	20/30	225	15	10	40(中心) 40($r \neq 0$)	90	60	/	/	10000	3	/	瓦洛	2×10^{-7}
二代倒象 MX - 9644/uV	25/25	240	15	10	25(中心)	90	60	25	2.8	10000	5	2.65	瓦洛	2×10^{-7}
二代倒象 XX1500	18/18	225	20	15	32(中心)	80	60	25 (16)	2.7	10000	4	2.6	英 马拉德	2×10^{-7}
二代近贴 XX1410	18/18	240	20	12	25	86	58	20	/	7500 ~ 15000	/	2.7	英 马拉德	4×10^{-7}
二代近贴 XX1390	18/18	220	12	4	25	/	/	/	/	7500	/	/	英 马拉德	5×10^{-7}

表 5 - 3

厂 商 参 数	美国 陆军夜视实验室	法国 应用物理研究所	西德 德律风根公司
光灵敏度(μ A/1m)	一般 800 ~ 1000 最高 2000	1000 1500	1000 ~ 1400 1500
分辨力(lp/mm)	一般 26 ~ 36 最高 48	> 35	36 ~ 38
暗电流(A/cm ²)		< 10^{-5}	1×10^{-7} (Lx)
噪声因子	1.8 ~ 20 1.35		16 ~ 19 (S/N)
寿命(小时)	2000 ~ 7500		
处延工艺	MOCVD	MOCVD	LpE
外延层 结构	GaAs(衬底) ① /GaAlAs/GaAs/ ② ③ GaAlAs/GaAs ④ ⑤ 选择性腐蚀 ①⑤	Ga 同左	GaAs(衬底) ① /GaAs/GaAlAs ② ③ 选择性腐蚀 及抛光掉 ①层
视距		同样条件下,视距为二代仪器的 1.5 ~ 3 倍	

表 5-4 国产象增强器性能参数

型号	管型	有效直径 光阴极 / 屏 (mm)	光灵敏度 $\mu A/lm$ (最小)	辐射灵敏度 mA/w (最小)		等效背景照度 L_x	亮度增益 cd/Lm	中心分辨率 lp/mm (光阴极)	信噪比 (min)	MTF(%)								畸变 (%) (最大)	输入电压 DC·V (额定)	输入电流 mA (最大)
				800 (nm)	850 (nm)					2.5	7.5	12.5	16	20	25	50				
				lp/mm																
1 × Z18/7 A	一代单级	18/7	225	15	10	2×10^{-7}	5700	70(屏)	/			75			50	10	$r = 7$ 7.5	2.6	/	
1 × Z40/13 A	一代单级	40/13	200	13	8	4×10^{-7}	4500	90(屏)	/			80			55	20	$r = 16$ 7.5	2.6	/	
3 × Z18/18 F	一代级联 (三级)	18/18	225	15	10	2×10^{-7}	12700	34	/		75		35	20			$r = 7$ 4	2.6	40	
3 × Z25/25 A	一代级联 (三级)	25/25	275	20	10	2×10^{-7}	16000	30	/		60		20				$r = 10$ 8	6.75	25	
3 × Z25/25 A	一代级联 (三级)	25/25	200	10	6	5×10^{-7}	12000	20	/								$r = 10$ 10	6	/	
1 × Z18/18 W ~ 1	二代倒象	18/18	225	20	15	2×10^{-7}	10000	32	2.7	85	60		25				全直径 4	2.6	25	
1 × Z18/18 W ~ 2	二代近贴	18/18	200	15	10	5×10^{-7}	6000	25	3.5								/	2.6	/	
1 × Z25/25 W ~ 1	二代倒象	25/25	225	20	15	2×10^{-7}	10000	25	2.7								全直径 4	2.6	25	
1 × Z20/30 W ~ 1	二代倒象	20/30	225	20	15	2×10^{-7}	6000	44	2.5								$r = 6$ 4	2.6	20	
1 × Z30/30 W ~ 1	二代变倍	30/30	225	20	15	2×10^{-7}	10000	25	2.7								全直径 5	2.6	50	

(2) 低的背景噪声

象增强器会由于光阴极热发射及信号感生等因素而造成附加背景噪声,这个附加噪声是荧光屏产生一背景亮度,从而使图象的对比度恶化,严重的可能使目标信息淹没于该噪声中,假设象管荧光屏上的背景亮度为 $L'a$, 目标亮度 $L'at$, 此时图象对比度为:

$$c' = \frac{(L'at + L'a) - (Lab + L'a)}{L'at + L'a} = \frac{L'at - Lab}{L'at + L'a} = (1 + \gamma)^{-1}c \dots\dots\dots (5-4)$$

式中 Lab 为荧光屏上与目标相邻的景物象

亮度; c 为光阴极面上图象对比度; c' 为有附加背景噪声时荧光屏上图象对比度; γ 为对比度恶化系数 $\gamma = \frac{L'a}{L'at}$, $(1 + \gamma)^{-1}$ 在 0 ~ 1 之间变化,它表征图象对比度恶化程度。

低的背景噪声是象增强器的基本工作条件,为保证微光产品有良好的成象质量,要求象增强器光阴极面上对应于暗背景亮度的等效背景照度 (EBI) 值小于 $10^{-7} L_x$ 数量级。

(3) 高的响应度

高的增益和低的背景是象增强器工作

的基本条件,但象增强器的增益只能使已获得的目标信息增强而不能增加来自目标的任何信息。系统获得目标信息的大小取决于象增强器光阴极的光谱响应度。响应度包括两个方面,一是光阴极的灵敏度;二是光阴极的光谱响应与夜天空辐射光谱的匹配程度。由于无月夜空的自然微光光谱从 $0.3\mu\text{m} \sim 1.3\mu\text{m}$ 是急剧上升的,因此要求光阴极的长波响应应向近红外延伸并能有高的响应。用光阴极的辐射灵敏度表示响应度,则可表示为:

$$R = \frac{\int_0^{\infty} R_{\lambda} \Phi_{\lambda} d_{\lambda}}{\Phi} \dots\dots\dots (5-5)$$

式中: R 为光阴极的辐射灵敏度(安/瓦);

R_{λ} 为光阴极的单色辐射灵敏度(安/瓦·微米);

Φ 为入射到光阴极面的辐射通量(瓦);

$\Phi = \int_0^{\infty} \Phi_{\lambda} d_{\lambda}$, Φ_{λ} 为单色辐射通量(瓦/微米)。

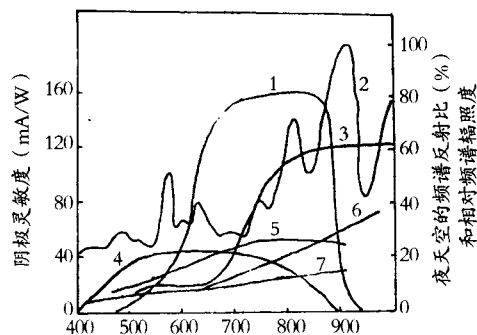


图 5-28 光阴极与夜天空和材料间响应特性

1 - GaAs 光阴极; 2 - 夜天空辐射;

3 - 绿叶; 4 - S-25 光阴极;

5 - 粘土; 6 - 绿军服; 7 - 砂子

此外,还要考虑荧光屏辐射光谱与人

眼光谱特性的匹配,多级管中前一级荧光屏辐射光谱与后一级光阴极灵敏度之间的匹配等。总之,要求匹配系数尽可能地大。图 5-28 示出了象增强器光阴极,夜天空辐射和某些材料的频谱特性,由图可以看出它们之间的响应程度。

(4) 好的调制传递特性

象增强器的调制传递特性通常用调制传递函数 MTF 来表示,它是评价象管成象清晰度的一种度量。

(5) 高的图象传递信噪比

象增强器在进行图象信息的转换和增强时,都伴随着附加噪声,象增强器产生噪声的主要因素是:输入光子噪声,光阴极量子转换噪声和暗发射噪声,微通道板的探测效率及二次倍增量子噪声,荧光屏颗粒噪声等等。图象的噪声特性用信噪比表示。信噪比被定义为象管输出亮度的平均信号值与偏离平均值的均方根噪声值之比。

$$(S/N) = \frac{S - S_0}{\sqrt{N^2 - N_0^2}} \dots\dots (5-6)$$

式中: S/N —象增强器输出信噪比;

S —有光输入时信号直流电压平均值;

S_0 —无光输入时信号直流电压平均值;

N —有光输入时噪声交流电压值;

N_0 —无光输入时噪声交流电压值。

要使象管趋于正常工作必须保证其有较高的输出信噪比。

(6) 快的时间响应

如果成象系统的响应时间比人眼的长,当输入图象运动时,则会使输出图象细节模糊。象管的时间响应特性主要由荧光屏的余辉决定。

§ 5.2.4 微光观察镜的总体设计

微光观察镜是黑夜条件下人眼的助视器。由人眼视觉性能可知,只要观察镜的输出图象亮度、对比度和视觉满足要求,人眼即可分辨。而微光系统的总体性能主要受象增强器限制,同时也与光学系统性能相关,这里我们将讨论微光观察镜系统对人眼视觉性能的改善、微光性能的基本极限、微光观察镜系统的总体考虑和系统视距估算。

(一) 系统对人眼微光下性能的改善

人眼所感受到的图象信息取决于眼瞳捕获到的光子数,人眼量子效率和积累时间,在微光观察系统中,系统所接收到的图象信息则取决于系统物镜所捕获的光子数、象增强器光阴极的量子效率和人眼积累时间。为了避免系统对运动目标的视觉损失,象增强器的积累时间应短于人眼的积累时间。

由于象增强器的增益不能增加来自目标的光子辐射,我们暂不考虑它。现假定象增强器、观察系统和人眼视觉系统的量子效率分别为 n_s 和 η_E ;积累时间分别为 τ_s 和 τ_E ,对捕获相同的光子数 $N(\lambda)$,它们的响应分别为:

$$\varphi_{es} = \tau_s \int_{\lambda} n_s(\lambda) N(\lambda) d\lambda$$

$$\varphi_{eE} = \tau_E \int_{\lambda} n_E(\lambda) N(\lambda) d\lambda$$

微光系统实际捕获的光子数取决于入射瞳孔大小,设系统入瞳半径为 P_o ,人眼入瞳半径为 P_E ,则象增强器系统捕获的光子数为入眼视觉系统捕获光子数的 $(P_o/P_E)^2$ 倍,系统对人眼提供的图象信息增益 G_s 为:

$$G_s = (P_o/P_E)^2 (\tau_s/\tau_E) \int_{\lambda} n_s(\lambda) N(\lambda) d\lambda / \int_{\lambda} n_E N(\lambda) d\lambda \dots\dots\dots (5-7)$$

人眼视觉大小取决于进入人眼视网膜单位面积上的光量,如果象增强器目视系统对人眼的视觉增益为 G_v ,可表示为:

$$G_v = G_s/\gamma^2 \dots\dots\dots (5-8)$$

式中: γ 为象增强器目视系统的视放大率,而 G_s 为系统对人眼提供的图象信息增益。

目视系统示意图如图5-29所示。由图可知

$$\gamma = \frac{f_{\text{物}}}{f_{\text{目}}} \beta$$

式中: β 为象增强器放大率。

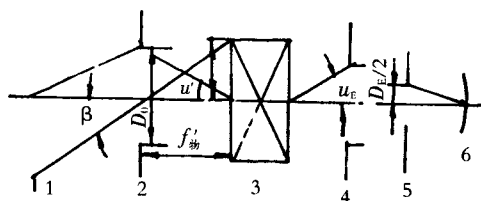


图 5-29 象增强器目视系统示意图

1-入射窗; 2-物镜入瞳; 3-象增强器;
4-目镜入瞳; 5-目镜出瞳; 6-视网膜

根据近轴完善成象条件 $f'_{\text{物}} = y/\sin u'$, y 为入射光线高度, u' 为象方孔径角,上式可写成:

$$\gamma = \beta \frac{D_o/2\sin u'}{D_E/2\sin u_E} = \beta \frac{D_o/2\sin u_E}{D_E/2\sin u'},$$

$$\text{又因, } \sin u' = [1 + 4(\frac{f'_{\text{物}}}{D_o})^2]^{-\frac{1}{2}}$$

$$\text{因此 } \gamma = \beta \frac{D_o}{D_E} [1 + 4(\frac{f'_{\text{物}}}{D_o})^2]^{-\frac{1}{2}} \sin u_E \dots\dots$$

$$\dots\dots\dots (5-9)$$

把(5-7)和(5-9)代入(5-8)式可以得到象增强器目视系统对人眼的视觉增益

为:

$$G_v = (\tau_s/\tau_E) \int_{\lambda} \eta_s(\lambda) N(\lambda) d\lambda / \int_{\lambda} \eta_E(\lambda) N(\lambda) d\lambda \times [1 + 4(\frac{f_{\text{物}}}{D_0})^2] \beta^2 \sin^2 u_E \dots\dots\dots (5-10)$$

由(5-10)式看出,象增强器观察系统对人眼提供的视觉增益大小与光阴极的量子效率,物镜的相对孔径,象增强器的积累时间和放大率及目镜的物方孔径角等参数有关。综合起来系统对人眼在微光下的视觉改善有以下几个方面:

(1) 可以比人眼更多地捕获和更有效地利用来自目标的光子。这是由于系统入瞳比人眼瞳孔大得多,捕获的光量按其倍数的平方增加,这也有利于补偿在微光条件下信噪比的降低。

(2) 利用光学系统可以增加物体的视角,这就相应提高了视距。

(3) 可以大大提高人眼的视觉增益,因为象增强器光阴极的量子效率远高于暗适应人眼的量子效率。同时也扩大了人眼的光谱响应。

(4) 可以使人眼在非暗适应情况下有更高的分辨能力。

(5) 在某些场合(如天文观察)可利用象增强器增加积累时间来提高视觉增益,这要以牺牲运动目标信息为代价。

(二) 系统微光性能的基本极限

微光观察系统的性能受三方面的限制。即光子噪声的限制、系统光学性能的限制和人眼视觉性能的限制。正确地设计和使用仪器可以使这些限制减小到最小。这三个因素都与空间分辨力相联系,又都与光度水平有关。如果用 α_o 表示系统总分辨

角, $\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n$ 为系统各部分的分辨角, $m_o m_1 m_2 \dots m_n$ 为相应的空间分辨力则它们之间的关系可用下面经验公式表示:

$$\alpha_o^2 = \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 + \dots + \alpha_n^2$$

$$\frac{1}{m_o^2} = \frac{1}{m_1^2} + \frac{1}{m_2^2} + \frac{1}{m_3^2} + \dots + \frac{1}{m_n^2} \dots\dots\dots (5-11)$$

1. 理想象增强器的极限分辨特性

在纯光子噪声限制下理想(内部无噪声)象增强器系统的极限性能由下式给出

$$\alpha_k = \frac{2(S/N)}{D \cdot c} \sqrt{\frac{(2-c)e}{L_o \tau t s}} \dots\dots\dots (5-12)$$

式中 α_k —系统受光子噪声限制的极限分辨角;

D —物镜有效口径;

c —目标对比度; e —电子电荷;

L_o —目标亮度; τ —物镜透过率;

t —系统积累时间; s —阴极的光灵敏度。

在较高输入光度下,象增强器系统的光学性能为主要限制因素,若象增强器阴极面上极限分辨力为 m ,物镜焦距为 f' ,则系统的最小光学分辨角 α_i 为:

$$\alpha_i = \frac{1}{f' m} \dots\dots\dots (5-13)$$

由(5-11)、(5-12)和(5-13)式可知,光子噪声和光学分辨力共同限制的理想系统极限分辨角为:

$$\alpha_o = (\alpha_k^2 + \alpha_i^2)^{\frac{1}{2}} = [(\frac{2(S/N)}{Dc})^2 \frac{(2-c)e}{L_o \tau t s} + (\frac{1}{f' m})^2]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (5-14)$$

由图(5-14)式确定的极限分辨角随亮度变化,相对目标亮度在 10^{-2} 以下主要受光子噪声所限制, 10^{-2} 以上的目标亮度,极限

分辨角主要受光学分辨力限制。

2. 物镜和象增强器参数对系统极限分辨力的影响

在象增强器暗噪声可以忽略的前提下,物镜和象管参数对系统极限分辨特性影响如下:目标为高对比度和高反射比($c = 1, \rho = 1$)的情况时:通过实际试验得出如下结论。

① 物镜焦距从 f' 增大到 $10f'$, 在大于星光照度 10^{-3}Lx 时,系统分辨性能得到最大改善,而低于这个光度值实际没有改善。

② 物镜直径从 D 增大到 $10D$, 在低于满月光照度 10^{-1}Lx 情况,系统分辨力得到明显改善,大于满月光改善很小。

③ 光阴极灵敏度从 s 提高到 $10s$, 在低于 10^{-2}Lx 照度范围系统分辨力得到最大改善。

④ 增加系统积累时间 t 得到与增加光灵敏度 s 类似的改善。

⑤ 提高象增强器极限分辨力 m , 在 $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{Lx}$ 目标照度范围对系统分辨力提供一般的改善。当 D, s, t 一起增加时这种改善更有意义。

用同样的方法可以分析更为实际的典型情况,即低对比($c = 0.3$)和低反射比($\rho = 0.15$):

① 增加物镜焦距仅在 10^{-2}Lx 照度以上才对系统分辨力有改善。

② 增加物镜直径对系统分辨力改善最大。

③ 提高象管光阴极灵敏度和积累时间主要改善在低于 10^{-1}Lx 照度范围且仅以平方根比例增加。

④ 提高象增强器极限分辨力仅在 D, s, t 提高的情况下才对改善系统性能有作

用,而且这种改善也仅限于 10^{-3}Lx 照度以上。

(3) 象增强器暗背景噪声对系统极限分辨特性的影响:

象增强器本身总是存在噪声,如暗噪声。由于它的存在使象管输出图象对比度恶化,分辨力下降。为此我们进一步讨论象增强器暗背景噪声对系统性能的影响。

设象增强器等效背景照度为 E_b , 由物镜象面照度公式可知对应于 E_b 值相应应在目标平面上附加一个暗背景亮度 L_b :

$$L_b = \frac{4}{\pi \tau R_A^2} E_b \quad \dots\dots\dots (5-15)$$

式中 R_A 为系统物镜相对孔径。目标亮度相当于从 L_o 变为 $L'_o = L_o + L_b$, 式中 L_o 为目标固有亮度。目标的表现对比度变为 c' , 即:

$$c' = c / (1 + \frac{L_b}{L_o}) \quad \dots\dots\dots (5-16)$$

将 L'_o 和 c' 代入(5-12)式得到有暗背景噪声的象增强器系统受光子噪声限制的极限分辨角表达式

$$\alpha'_k = \alpha_k [1 + \frac{2L_b}{L_o(2-c)}]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (5-17)$$

把(5-15)代入(5-17)式:

$$\alpha'_k = \alpha_k [1 + \frac{8E_b}{\pi L_o \tau R_A^2 (2-c)}]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (5-18)$$

由(5-18)式可知,象增强器存在暗背景噪声时,系统极限分辨角增大。为使系统性能尽可能达到光子噪声限,象增强器暗背景噪声应尽量小,为此要求:

$$\frac{8E_b}{\pi L_o \tau R_A^2 (2-c)} \ll 1$$

$$\text{或 } E_b \ll \frac{\pi L_o \tau R_A^2 (2 - c)}{8} \dots\dots\dots$$

..... (5 - 19)

由(5 - 19)式可以看到,目标亮度很高时,象增强器暗背景噪声影响很小,这时 $\alpha_k' \rightarrow \alpha_k$; 目标亮度下降时,暗背景噪声影响相应增加,以至信号被噪声淹没。为了最大限度地减小暗背景噪声影响,可采用大相对孔径物镜,若取 $R_A = 1, \tau = 0.8$, 并且假定 $c = 1$, 则 $E_b \ll \frac{L_o}{10}$ (L_o 取亚熙提作单位), 即此时象增强器等效背景照度远小于目标亮度的十分之一。

通过实际的实验可以得出,无论那个系统,在满月光照度下,等效背景照度即使增加到 10^{-5}Lx , 对系统极限分辨角的影响也很小,但在晴朗的星空和阴云夜空的低照度下则暗背景噪声对各系统性能都有很大影响。

(4) 人眼与象增强器系统的最佳匹配

在上面的讨论中相当于假定象增强器系统的鉴别特性不受人眼视觉的限制,要获得象增强器系统与人眼之间的最佳匹配,需要把两者组合起来考虑。为了便于讨论,我们分为物镜与象增强器的组合和目镜与人眼的组合。为了便于比较,把物镜与象增强器组合的极限鉴别特性表示为象增强器荧光屏上目标亮度(人眼观察目标亮度)与该组合的空间分辨力之间的关系。荧光屏上目标亮度 L_a 可表示为:

$$L_a = GEc$$

式中 G 为象增强器亮度增益; Ec 为入射到光阴极上的照度。则有:

$$Ec = \frac{\pi}{4} L_o \tau R_A^2$$

$$L_o = \frac{4}{\pi \tau R_A^2} \cdot \frac{L_a}{G} \dots\dots\dots (5 - 20)$$

在光子噪声限制下,光阴极上极限空间分辨力 Nc 为:

$$Nc = \frac{1}{2\alpha_k f'} = \frac{R_A c}{4(S/N)} \sqrt{\frac{L_o \tau t s}{(2 - c)e}} \dots\dots\dots (5 - 21)$$

由(5 - 20)和(5 - 21)式就建立了物镜象增强器组合受光子噪声限制时屏上极限空间分辨力 Na 与屏上目标象亮度之间的关系(假定电子光学系统线倍率为1)。

$$Na = \frac{c}{2(S/N)} \sqrt{\frac{L_a t s}{(2 - c)eG}} \dots\dots\dots (5 - 22)$$

实践证明,人眼视觉锐度与观察视场亮度有关,在忽略目镜光损失和象差的情况下,目镜与眼睛的组合的视觉锐度等于人眼锐度乘以目镜放大率。为了使系统的性能不受人眼限制,由实验可得,在用 $15\times$ 目镜时,在屏上目标象亮度范围内,象增强器增益必须大于 10^3 才符合要求。系统用目镜一般在 $10\times$ 以下,这就要求象增强器有较高的亮度增益。

(三) 系统的设计原则

由上可知,合适的物镜系统、象增强器和目镜系统构成的微光观察系统可改善人眼在微光下的视觉,只要该系统输出图象的亮度、对比度和分辨角能满足人眼视觉特性的要求,就能被分辨出来。视角(分辨角)由产品的总倍率决定。对比度由外界场景,光阴极的光谱响应,象管的背景及调制传递特性等决定。若象管选定则其值已客观存在,图象亮度主要取决于象管增益。物镜相对孔径取定之后,视网膜上的象面照度增益完全取决于象增强器以夜天光为

光源照射时的增益。

在进行总体设计时通常分三个步骤：根据视距要求和用途选定象增强器；根据象增强器要求选择光学系统类型；作总体性能分析。

(1) 各类象增强器的性能参数是已知的，则系统的总体性能可用光学系统来调节，而这种调节是有限的，因为它主要受象增强器限制，因此在总体设计中首先根据视距要求、用途和成本选择象管。

对 100 米左右视距的微光产品，例如车辆驾驶及头盔式眼镜等可选用单级管，这既能满足增益要求又可降低成本。车辆驾驶仪又多为潜望式，物镜焦距较长，为保证合适的视场角($30^\circ \sim 50^\circ$)要选光阴极直径较大的象管(如 40/13)；头盔眼镜小巧轻便选用小型管(18/7)；在成本不太重要时均可选用二代管。

视距在 600 ~ 1000 米的微光产品，如车长指挥镜、炮长瞄准镜、远距离侦察镜等，视距要求远，总倍率较高，物镜焦距较长，要保证视场可选用光阴极直径较大的三级级联管、二代倒象管等。

中等距离微光产品可根据具体情况相应选择象管。

(2) 微光产品对物镜和目镜的要求，已在前面谈过，这里只是从总体设计角度作简单说明。微光系统在微弱光下工作并要求有较高的象面照度，这就希望有大的相对孔径($Ec \propto (\frac{D}{f})^2$)；物镜焦距与整机放大率和分辨力有关，在总体设计时，首先根据整机的视距要求和所观察的主要目标确定放大率和分辨力，以确定物镜焦距，再根据选定的有效孔径调节相对孔径。

目镜前面是荧光屏，把屏看成朗伯光源则其中心象元经目镜进入眼瞳的光通量 $d\varphi_e$ 和屏发出的总光通量 $d\varphi_s$ 之比为：

$$\frac{d\varphi_e}{d\varphi_s} = \sin^2 \theta$$

式中 θ 为荧光屏中心象元经目镜进入眼瞳的光束对目镜的张角。若目镜焦距为 f'_e ，夜间眼瞳直径为 7mm，则

$$\frac{d\varphi_e}{d\varphi_s} = \frac{3.5^2}{f_e'^2} \dots\dots\dots (5-23)$$

即使 $f'_e = 10\text{mm}$ ，屏中心象元发出的光也只有 12% 进入眼瞳，因此要提高产品对人眼视觉增益就要靠提高象增强器增益来达到，这样也可相应降低对光学系统的要求。

(3) 微光夜视产品总体设计是依据战技术指标，提出的主要是视距和视场。例如，设计一微光夜视仪在 $1 \times 10^{-3} \text{Lx}$ 星光照度下识别 1000 米距离处高 2.25 米的坦克。产品的视场角 10° 。

首先选定象管，选 $\Phi 25\text{mm}$ 二代倒象象增强器，其分辨力 $m = 25 \text{lp/mm}$ ，要识别上述目标，临界尺寸中包含的线对数为 4，它的实际分辨角 α 为：

$$\alpha = \frac{2.25}{4 \times 1000} = 0.56 (\text{mrad})$$

$$\text{物镜焦距 } f_o' = \frac{1}{25 \times \tan \alpha}$$

$$= 71.43 (\text{mm})$$

取 $f' = 100\text{mm}$ ，如象管实际分辨力低于 25lp/mm ，可再取大一些。

所选象管光阴极有效直径为 25mm，则物镜视场 ω 为：

$$\omega = 2\alpha \text{zctan} \frac{12.5}{100} = 14^\circ$$

目镜视场等于物镜视场乘以仪器总倍率，若微光夜视仪总倍率为 $4.8\times$ ，仪器视场为

10°, 则目镜视场为 $10^\circ \times 4.8 = 48^\circ$,

目镜焦距为:

$$f_e' = \frac{100}{4.8} \times 1 = 20.8 \text{ mm},$$

为加大象面照度在体积重量不限时, 取 $\frac{D}{f}$
 $= 1$, 则物镜口径取 100mm, 为保证象管性能充分发挥, 在不影响目镜设计情况下, 可适当提高仪器的总倍率。

(四) 系统的视距估算

根据目标对成象系统的张角 α , 观察距离 l 及发现、识别和认清目标的等效条带可分辨准则来确定视距, 在不考虑大气影响情况下, 系统的视距取决于象增强器系统的极限空间分辨力。

设目标临界尺寸(最小高度或宽度)为 H , 目标到系统距离为 l , 则目标对系统张角 α 为:

$$\alpha = \frac{H}{l}$$

根据约翰逊准则, 发现、识别和认清目标所需的空频率分别为 1、4、8 线对/目标临界尺寸, 相应分辨角为:

$$\alpha = \frac{H}{nl} \quad (5-24)$$

式中 n 为发现、识别和认清目标所需空间频率。

象增强器系统所能达到的最小分辨角 α 由物镜焦距 f 和象增强器系统在光阴极上的极限分辨力 Nc 决定:

$$\alpha = \frac{1}{fNc} \quad (5-25)$$

对应目标的发现、识别和认清有:

$$\frac{H}{nl} = \frac{1}{fNc}$$

$$l = \frac{HfNc}{n} \quad (5-26)$$

由(5-24)式可粗略估算出系统的视距 l 。

若把(5-14)式的 α_0 代入(5-24)式则可得到系统各参数表达的视距估算式:

$$l = \frac{H}{n \left[\left(\frac{2(S/N)}{Dc} \right)^2 \frac{(2-c)e}{L_0 \tau t s} + \left(\frac{1}{f'm} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (5-27)$$

上面的计算式子是考虑管子的分辨力极限而没有考虑系统的调制传递函数能否被人眼所接收, 所以计算是很粗略的。

以 $A \cdot RoSe$ 理论为基础建立的探测方程, 列于下, 便于总体设计时计算。

$$f_{\text{物}}' = \frac{15L}{N \cdot A} \quad (5-28)$$

$$\alpha_2 = \frac{A}{L} \left(\frac{1}{r_{\text{识别}}^2} - \frac{1}{r_{\text{最佳}}^2} \right)^{1/2} \quad (5-29)$$

$$D = \frac{2K}{M \cdot \alpha_2 \cdot c} \sqrt{\frac{2e}{\tau \cdot t \cdot s \cdot \bar{\rho} \cdot E}} \quad (5-30)$$

式中: D —物镜有效孔径(米)

K —阈值信噪比。是一个实验数据, 如 $K = 1.9$ 。

c —景物的对比度, 如低对比取 $c = 0.35$ 。

e —电子电荷量, $e = 1.6 \times 10^{-19} Q$ 。

τ —物镜透过率。如 $\tau = 0.75$ 。

t —人眼积累时间, $t = 0.2(s)$

s —光电阴极的积分灵敏度, 如取 $2.4 \times 10^{-4} A/lm$

$\bar{\rho}$ —目标背景的平均反射率, $\bar{\rho} = (\rho_1 + \rho_2)/2$ 坦克和沙土的 $\bar{\rho} = 0.14$ 。

E —夜天空照度, 如无月星光取 $1 \times 10^{-3} Lx$ 。

M —物镜调制传递函数, 是指特征频

率下的调制传递函数,如取 $M = 50\%$ 。

$r_{\text{识别}}$ —物方的识别频率取 4,如果计算认清的视距,则 $r_{\text{认清}}$ 取 8。

$r_{\text{最佳}}$ —物方的最佳频率,如取 6,但要注意算到阴极面上时,不能接近截止频率。

N —管子中心的分辨力。

L —物距(米)

A —临界尺寸。 $A = \sqrt{\text{长} \times \text{宽}}$

这三个方程式计算的是从光度角度来衡量产品能否识别目标。还要从象质的角度来衡量观察镜能否识别目标。具体讲,低对比目标通过物镜、象境强器和目镜的传递,目镜出来的信息能否被人眼所接收。用具体的例子加以说明。

例一,设计一微光观察镜,用 18/7-F 一代微光管,1.5 倍左右,要 50 米识别人(在 $1 \times 10^{-3} \text{Lx}$ 背景照度)。

解: $\therefore f_{\text{物}} = \frac{15L}{N \cdot A} = \frac{15 \times 50}{38 \times 0.89} \approx 22$ (式中 $L = 50$ 米, $N = 38$, $A = \sqrt{1.6 \text{ 米} \times 0.5 \text{ 米}} = 0.89$ 米),从这个公式计算得到 $f_{\text{物}} = 22\text{mm}$ 即可,考虑目镜实现的可能性,取 $f_{\text{物}} = 50\text{mm}$,计算 $L = \frac{f_{\text{物}} NA}{15} = \frac{50 \times 38 \times 0.89}{15} \approx 113$ (米),实际只要 50 米即可。系统的总倍率为:

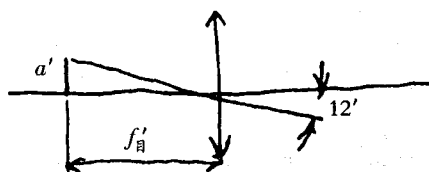
$$\Gamma = \frac{f_{\text{物}}}{f_{\text{目}}} \times \Gamma_{\text{管}}, f_{\text{目}} = \frac{f_{\text{物}}}{\Gamma} \times \Gamma_{\text{管}} = \frac{50}{1.5} \times \frac{7}{18} \approx 13\text{mm}$$

根据人眼夜视特性取人眼的特征频率为 5 周/度,即 $12'$ 考虑,

从图可知: $a' = f_{\text{目}} \text{tg} 12' = 13 \times \text{tg} 12'$

$$= 0.047,$$

$$\frac{1}{a'} = \frac{1}{0.047} = 21 \text{ 线对/mm}$$



荧光屏 21 线对/mm,对应阴极面 $21 \times \frac{7}{18}$

≈ 8 线对/mm,计算传递函数时,目镜的特征频率为 21 线对/mm,物镜的特征频率为 8 线对/mm,特征频率下的 MTF 值是多少呢?设景物的对比度(或说调制度) $M = 0.35$,查得 18/7 一代微光管 8 线对/mm 的 MTF 值为 58%,根据系统的传递函数公式有:

$$M_{\text{景}} \times MTF_{\text{物}} \times MTF_{\text{管}} \times MTF_{\text{目}} = MTF_{\text{眼}}$$

人眼能接收的 MTF 值,或说人眼的察觉阈值取 0.08,并假设 $MTF_{\text{物}} = MTF_{\text{目}}$,则可得:

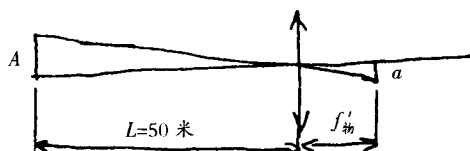
$$0.35 \times MTF_{\text{物}} \times 0.58 \times MTF_{\text{目}} = 0.08$$

$$MTF_{\text{物}} = MTF_{\text{目}} = \sqrt{\frac{0.08}{0.35 \times 0.58}} =$$

$$0.63$$

考虑物镜、目镜的制造误差,留 5% 的余量,故它们的设计值应为: $MTF_{\text{物}} = MTF_{\text{目}} = 68\%$ 。

从光度的角度出发计算物镜口径,并有可能重新调整物镜焦距,首先计算 α_2 值:



从上图可以看出, $\frac{A}{L} = \frac{a}{f_{\text{物}}}$, 我们的观察目标是人, 人的肩宽取 0.5 米, 要识别人, 则要分辨肩宽的 $\frac{1}{4}$ 即肩宽分成 4 线对。

$$\frac{0.5/4}{L} = \frac{a}{f_{\text{物}}} \quad a = \frac{0.5/4}{50} \times 50 = 0.125$$

$$\frac{1}{a} = \frac{1}{0.125} = 8 \text{ 线对/mm, 它刚好与}$$

人眼相匹配, 如果 $\frac{1}{a} > 8 \text{ 线对/mm}$, 说明与人眼特性不匹配, 应增加 $f_{\text{物}}$ 直至 $\frac{1}{a} \leq 8 \text{ 线对/mm}$ 。

$$\alpha_2 = \frac{A}{L} \left(\frac{1}{r_{\text{识别}}^2} - \frac{1}{r_{\text{最佳}}^2} \right)^{1/2} = \frac{0.89}{50} \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{8^2} \right)^{1/2} = 0.00385,$$

$$D = \frac{2K}{M\alpha_2 c} \sqrt{\frac{2e}{\tau \cdot t \cdot s \cdot \bar{\rho} \cdot E}}$$

式中的已知数如下: K 取 1.9, $M = 0.58$, $\alpha_2 = 0.00385$, c 取 0.35, $e = 1.6 \times 10^{-19}$, τ 取 0.8, 主要根据物镜的镜片多少而定, t 取 0.2, s 一般取 2.4×10^{-4} , 高性能二代管 s 达到 7×10^{-4} , $\bar{\rho}$ 是景物的平均反射率, 如坦克在沙土中, $\bar{\rho} = 0.14$, 我们取 $\bar{\rho} = 0.22$, $E = 10^{-3} \text{Lx}$ 。

$$D = \frac{2 \times 1.9}{0.58 \times 0.00385 \times 0.35} \times \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19}}{0.8 \times 0.2 \times 2.4 \times 10^{-4} \times 0.22 \times 1 \times 10^{-3}}} \approx 0.03$$

$$D = 30$$

计算结果要求物镜口径应大于 30mm,

结论:

$$f_{\text{物}} = 50 \quad \text{按} \frac{D}{f} = 1:1.4 \quad D = 36$$

$f_{\text{目}} = 13$, 目镜特征频率 21 线对/mm, 而物镜 8 线对/mm

$$MTF_{\text{物}} = MTF_{\text{目}} = 68\% \text{ (设计值)}$$

目镜的出瞳直径为 $\Phi 7\text{mm}$, 出瞳距离应达到 10mm。

例二, 设计一微光观察镜, 用二代管 $1 \times \text{Z18/18W} - 1$ 扭象象增强器, $2^\times$ 左右, 要 50 米识别人 (在 $1 \times 10^{-3} \text{Lx}$ 背景照度)。

解: 我们考虑取 $f_{\text{物}} = 50$, $f_{\text{目}} = 25$, 二代扭象管, $f_{\text{物}} = \frac{15L}{N \cdot A}$ $L = \frac{f_{\text{物}} \cdot N \cdot A}{15} = \frac{50 \times 30 \times 0.89}{15} = 89\text{m}$, 从计算知, 距离已

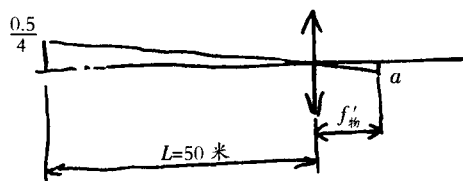
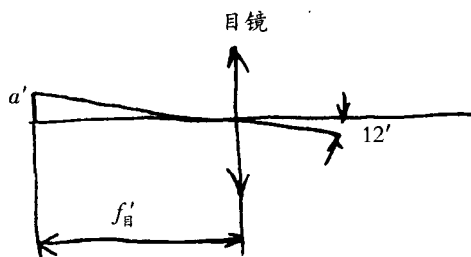
超过 50m, 式中的 $N = 30$, 这是因为这种管型的轴上分辨力不高, 只有 30 线对/mm。

人眼的夜视特性出发取人眼特征频率 5 周/度,

$$\text{tg} 12' = \frac{a'}{f_{\text{目}}} \quad a' = 25 \times \text{tg} 12' = 0.09,$$

$$\frac{1}{a'} = \frac{1}{0.09} = 11 \text{ 线对/mm, 采用 18/18}$$

二代管, $a = a'$ 所以物镜与目镜相同, 它们的特征频率为 11 线对/mm。



从图中知道要识别 0.5 米肩宽的人对对应到阴极面上的线对数为:

$$\frac{0.5}{\frac{4}{L}} = \frac{a}{f'_{\text{物}}} \quad a = \frac{0.5/4}{50} \times 50 = 0.125,$$

$$\frac{1}{a} = 8 \text{ 线对/mm}$$

计算说明阴极面的 11 线对/mm 大于识别要求的 8 线对/mm,

计算传函:

$$M_{\text{目}} \times MTF_{\text{物}} \times MTF_{\text{管}} \times MTF_{\text{目}} = MTF_{\text{眼}}, \text{设 } MTF_{\text{物}} = MTF_{\text{目}}$$

$$MTF_{\text{物}} = MTF_{\text{目}} = \sqrt{\frac{MTF_{\text{眼}}}{M_{\text{目}} \times MTF_{\text{管}}}} =$$

$$\sqrt{\frac{0.08}{0.35 \times 0.48}} = 0.69$$

$$\text{设计值的 } MTF_{\text{物}} = MTF_{\text{目}} = 0.75$$

计算 α_2 :

$$\alpha_2 = \frac{A}{L} \left(\frac{1}{r_{\text{识别}}^2} - \frac{1}{r_{\text{最佳}}^2} \right)^{1/2} = \frac{0.89}{50} \left(\frac{1}{4^2} - \right.$$

$$\left. \frac{1}{6^2} \right)^{1/2} = 0.00331$$

计算 D:

$$D = \frac{2K}{M\alpha_2 c} \sqrt{\frac{2e}{\tau \cdot t \cdot s \cdot \bar{\rho} \cdot E}} = \frac{2 \times 1.9}{0.48 \times 0.00331 \times 0.35} \times$$

$$\sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19}}{0.8 \times 0.2 \times 2.4 \times 10^{-4} \times 0.22 \times 1 \times 10^{-3}}} = 6833 \times 6.15 \times 10^{-6} = 0.042(\text{M})$$

$$\therefore D = 42\text{mm}$$

$$f'_{\text{物}} = 50, D = 42, \frac{D}{f'_{\text{物}}} = 1:1.2$$

结论:

$$f'_{\text{物}} = 50, \frac{D}{f'} = 1:1.2, D = 42$$

$f'_{\text{目}} = 25$, 目镜和物镜的特征频率均为 11 线对/mm, $MTF_{\text{物}} = MTF_{\text{目}} = 75\%$ (设计值), 目镜的出瞳直径为 $\Phi 7\text{mm}$, 出瞳距离应达到 20mm。

(未完待续)

消 息

可变形陶瓷

日本研究人员开发出一种在外力作用下变形而不断裂的陶瓷, 这一材料模仿了鲍鱼壳内侧的层状构造。

日本物质材料研究机构和东京大学的一些研究人员利用电子显微镜观测发现, 鲍鱼壳内表面的物质厚约 500 纳米, 呈现出层状结构。受到启发的研究人员将两种陶瓷原料氧化铝和氧化钛加工成厚 60 纳

米到 80 纳米的薄层, 并把经过这种加工的 10 层氧化铝和 10 层氧化钛相互交叉层叠, 制成一种新的陶瓷材料。在室温下向这种材料施加很强的力, 材料表面会向下塌陷, 但是并不会断裂。研究人员认为, 新的研究成果将有助于解决陶瓷容易断裂的老毛病。