

像管的设计与分析

冯炽焘 郑玉才

编著

方二伦 董昆林

国防工业出版社

PDG

前 言

像管包括变像管、像增强器和微光电视摄像管的增强段，是夜视仪器的核心部件。它不仅用于近红外夜视仪、微光夜视仪及微光电视，进行夜间侦察、监视、驾驶和瞄准，而且在红外及紫外显微观察、航天航海、天文观测、遥感技术、高速摄影、 x 射线像增强等许多技术领域，在国防、公安、科研、工业和医疗等许多部门都有着广泛的应用。

像管作为一种光电成像器件，可以使用静电聚焦或电磁聚焦的系统。通常，电磁聚焦型的像管具有分辨率高的特点，但结构和供电装置较为复杂，并且体积大、重量重、功耗大、稳压要求高。静电聚焦型的像管则具有结构简单、使用方便、体积小、重量轻等优点，常用的近红外变像管、第一代和第二代倒像式微光像增强器都属于这种类型。本书讨论的就是这种静电聚焦型像管，并且涉及夜视仪整机的工作原理和技术性能。书中系统地阐述了静电聚焦宽束电子光学成像系统的理论；对静电场、电子轨迹、成像参量与像差、电子光学传递函数的计算机辅助分析设计方法，作了较为详尽的描述；并介绍了由此而产生的若干经验公式、管型设计的发展进化、具体要求、步骤和方法；最后给出 15 种管型的计算结果数据、图表和曲线。

本书是将电子光学基本原理与数值计算方法和电子计算机应用相结合的产物，是我们 20 多年从事这方面研究工作的经验总结。在原兵器工业部的领导与支持下，根据工作任务的要求，为了解决自行设计和研制各种新型像管的问题，我们曾先后与北京工业学院等单位协作，逐步克服了理论分析、数值计算与程序设计等难关，分析国内外已有的管型、开展自行设

计新管型的工作,现在都已经达到了预期的目的。为了推广这一套基本理论和方法,原兵器工业部曾经于1975年在南京举办全国性的短训班。像管电子光学系统分析设计通用程序及自行设计的管型,曾于1978年分别荣获全国科学大会成果奖。此后,又相继在DJS-6、DJS-8、TQ-16、进口SIEMENS-7760大型机及IBM-PC/XT微型机上,编制成功多个更完善的像管分析设计通用程序。至今,使用这一套理论、方法和程序计算过的管型已达50多种;自行设计并批量生产的新管型将近10种。当然,这里面有许多专家教授的指导,有兄弟单位同志的协作,以及许多工程技术人员和工人的贡献。

本书共分三篇。其中第一篇,像管设计与分析的基本理论和方法,由昆明物理所冯炽焄、董昆林撰稿;第二篇,像管的参量分析与设计方法,由公安部第一研究所郑玉才撰稿;第三篇,实际管型的计算与分析,最先由西安204所方二伦和昆明物理所董昆林于1981年计算了将近40种管型,近两年又经昆明物理所董昆林等筛选复算,将其中有代表性的15种管型整理定稿,说明由冯炽焄、郑玉才撰写。

在我们多年的工作及本书的编写过程中,曾得到北京工业学院周立伟、浙江大学沈庆垓的指导与帮助,从而提高了这一工作的理论水平。此外,沈庆垓、电子工业部55所殷维钧和黄东昌、华东工学院吴永贵和方如章、昆明物理所李炽和伍明达对本书第一、三篇进行了审阅;北京工业学院周立伟和邹异松、298厂田金生对本书第二篇进行审阅并提出宝贵意见,在此一并致以衷心感谢。

由于我们水平有限,书中不当之处在所难免,敬请批评指正。

编著者

目 录

主要符号表	1
-------------	---

第 一 篇

像管设计与分析的基本理论和方法

第一章 像管与夜视仪的总体分析	8
1.1 像管及其整机	8
1.2 像管的特性参数	10
1.3 夜视仪器整机的总体性能	20
1.4 夜视仪性能的综合分析——探测方程的建立和视距的计算	33
1.5 像管的设计与分析问题的综述	47
第二章 静电场的计算与分析	51
2.1 静电场的基本方程	51
2.2 拉普拉斯方程与有限差分方程	55
2.3 边界数据的输入和边界点参数的确定	59
2.4 超松弛迭代法计算网格点电位分布	63
2.5 最佳超松弛因子的自动选求	65
2.6 非封闭边界的处理与初值的给出	66
2.7 计算误差与子区间迭代技术	68
2.8 等位线与电力线的计算	75
2.9 任意点的电位及其偏导数的计算	78
2.10 近轴区、近阴极区和近阳极区的特殊计算处理	82
2.11 系统轴上电位的分析	88

2.12 计算电位场分布的其它方法	92
第三章 电子轨迹的计算分析	103
3.1 电子运动微分方程	104
3.2 电子轨迹微分方程	109
3.3 傍轴和近轴轨迹方程	111
3.4 轴外曲轴轨迹微分方程	114
3.5 电子轨迹的数值计算方法	121
3.6 电子轨迹起步的计算	130
3.7 电子轨迹落点的计算	133
第四章 电子光学成像参量和像差的确定	138
4.1 静电阴极透镜的近轴成像和像差的基本理论	138
4.2 静电阴极透镜的轴外像差和三级几何像差	148
4.3 各种几何像差的单因素分析	159
4.4 对各种像差的综合评述	164
4.5 实际确定电子光学成像参量和各种像差的方法—— 轨迹追迹法	166
第五章 电子光学传递函数和像质评定	172
5.1 光学与电子光学成像系统的像质评定	172
5.2 光电子发射的角度和能量分布	183
5.3 轴上点调制传递函数的计算	187
5.4 轴外点电子光学传递函数的计算	191
5.5 用像差方程衍算电子轨迹落点的方法	193
5.6 整管的 OTF 计算和像质评定	199
5.7 有关像管像质评定的补充论述	204
第六章 像管电子光学系统及管型设计的进化	213
6.1 二电极定焦型像管	213
6.2 三电极调焦、选通型像管	219
6.3 校畸变和连续变倍型像管	221
6.4 一个设计的实例	225

6.5 整管总体设计的考虑	229
参考资料	232

第 二 篇

像管的参量分析、作图成像与设计方法

第七章 像管参量的统计分析和经验公式	236
7.1 像管的基本类型与结构参数	236
7.2 像管的结构特征参数与物像关系	238
7.3 像管结构参量对成像的影响	244
7.4 三电极像管调焦特性的统计分析	254
第八章 像管电子透镜的基本关系式与作图成像	258
8.1 电子透镜的基本关系式与作图成像	258
8.2 实际像管的成像关系式与作图成像	264
第九章 像管的设计要求、步骤与方法	272
9.1 像管的基本参数及其与设计的关系	272
9.2 微光夜视仪与微光电视对像管的要求	284
9.3 像管的结构与工艺对设计的要求	290
9.4 像管设计中总的考虑	294
9.5 二电极像管的设计步骤	296
9.6 计算前的准备与上机计算的说明	299
9.7 上机计算的几个阶段	302
9.8 焦深与公差的规定	308
9.9 关于像质的若干问题	313
9.10 三电极像管的设计	323
9.11 四电极变倍管的设计	328
参考资料	337

第 三 篇

实际管型的计算与分析

第十章 红外变像管	346
10.1 1° ϕ 25/20 红外变像管	346
10.2 2° ϕ 25/20 红外变像管	352
10.3 3° ϕ 40/40 选通型红外变像管	357
第十一章 第一代微光像增强器	363
11.1 4° ϕ 25/25 像增强器	363
11.2 5° ϕ 40/13 像增强器	368
第十二章 第二代微光像增强器	374
12.1 6° ϕ 18/18 第二代微光像增强器	374
12.2 7° ϕ 25/25 第二代微光像增强器	379
12.3 8° ϕ 20/30 第二代微光像增强器	384
12.4 9° ϕ 20/30 第二代微光像增强器	389
12.5 10° ϕ 50/40 第二代微光像增强器	394
第十三章 其它特殊管型	400
13.1 11°九英寸 X 射线像增强器	400
13.2 12° ϕ 25/125 放大显示管	405
13.3 13° ϕ 25/125 放大显示管	410
13.4 14° ϕ 40/28 变倍型像管	415
13.5 15° ϕ 40/32 多功能像管	425

主要符号表

代号	名 称	单 位	备 注
A	像质评定参数		对应于 $f = 0 \sim 100c/mm$, MTF 曲线下的面积
A_1, A_2	五点差分格式网格点		
A_3, A_4	电位计算的加权因数		
A_e, A_i	阴极、荧光屏的有效面积		
ABC	自动亮度控制		或自动增益控制 AGC
B	亮度	cd/m^2	单位投影面积上的发光强度
C	调制对比度 (简称为对比度)		C_i, C_o 分别表示输入、输出图像的对比度
CTF	对比传递函数		
C	光速		
D	① 物镜有效孔径	mm	
	② 阴极筒内径	mm	
D_e	阴极面有效直径	mm	
D_i	荧光屏有效直径	mm	
D_r	畸变		$D_r = [(M_r - M_o) / M_o] \times 100\%$
$\vec{D}$	电通量密度矢量		
$D(f)$	复数形式的传递函数		自变量 f 表示空间频率
d	阳极孔内径	mm	
d_e, d_i	阴极和屏上弥散圆的直径	mm	
E	① - 照度	lx	
	② 电场强度	V/mm	
EBI	等效背景照度	lx	
E_e	阴极面照度, 面板照度	lx	
E_o	阴极面中心电场强度	V/mm	

9010231

(续)

代号	名 称	单 位	备 注
E_s	轴外点的阴极面电场强度	V/mm	
E_t	目标照度	lx	也称为“景物照度”
ETF	电子光学传递函数		
e	电子电荷	C	
F_p, F_q	子午、弧矢场曲	mm	由“曲径轨迹”确定
F_{p0}	由 F_p 、 F_q 确定的像散	mm	$F_{p0} = F_p - F_q$
F_t, F_l	子午、弧矢场曲	mm	由“实际轨迹”确定
F_{tl}	由 F_t 、 F_l 确定的像散	mm	$F_{tl} = F_t - F_l$
F	物镜的 F 数 ($F = f/D$)		有时也用 $Q = D/f$, 称为相对孔径
F_1, F_2	物方、像方焦点		
$\vec{F}_3, \vec{F}_5$	与三级、五级像差相对应 的非齐次项		
f_1, f_2	物方、像方焦距	mm	
f	空间频率	c/mm	
f_c	空间频率常数	c/mm	
f_m	空间频率的特定值	c/mm	通常取 $MTF = 5\%$ 所 对应的空间频率
G	无量纲增益		屏出射度/阴极面照度
G_R	亮度增益 ($G_R = G/\pi$)	cd·m ⁻² /lx	屏亮度/阴极面照度
G_q	光通量增益		输出光通量/输入光通量
H	①用作下标, 表示近红外 参量		例如用 τ_H 表示滤光片的 近红外透过率
	②主平面		
H_1, H_2	物方、像方主平面		
h	①目标尺寸	m	
	②网格步长	mm	
I	①发光强度	cd	点光源在单位立体角中 辐射的光通量
	②光电流	A	
K	①像管结构特征参数		
	②点视效能	lm/W	旧称发光效率

(续)

代号	名 称	单 位	备 注
K_s	信噪比阈值		$(S/N)_{min}$
K_c	对比恶化系数		
L	距离	m	
LSF	线扩展函数		
l	光学长度	mm	阴极面中心到靶或屏
M	放大率		
M_0	中心放大率		
M_s	轴外放大率		
MOB	最大输出亮度	cd/m ²	
MIE	最大输入照度	lx	
MCP	微道板		
MTF	调制传递函数		MTF(f)在公式中简记为 $T(f)$
m	电子质量	kg	
N	分辨率	lp/mm	
NA	数值孔径		
N_c, N_t	在阴极面上和目标上定义 的分辨率	lp/mm	讨论视距时也用 lp/mm 为单位
N_i	电位计算迭代次数		
N_s	荧光屏上的分辨率	lp/mm	
N_{TV}	电视分辨率	TVL	每帧高度上能分辨的电 视线总数
NEA	负电子亲和势		
n	MTF的特征指数		
n_a	网格点总数		
n_i	参加迭代的网格点数		
OTF	光学传递函数		
P	① 功率 ② 每秒每流明的光子数	W	
PSF	点扩散函数		
PTF	相位传递函数		PTF(f)在公式中简 记为 $\theta(f)$
p	物距	mm	

代号	名 称	单 位	备 注
q	①像距	mm	
	②电荷量	C	
R	光出射度	lx/m^2	
R_a	阳极头曲率半径	mm	
R_c	阴极面曲率半径	mm	
$\bar{R}_c$	阴极面等效曲率半径	mm	
R_L	视距	m	
R_f	荧光屏曲率半径	mm	
r_a	阳极孔半径	mm	
r_{oa}, r_i	物高、像高	mm	也用 r_1 、 r_2 或 r_c 、 r_f
r_{ef}	阴极面有效半径	mm	
S	光电阴极积分灵敏度	$\mu\text{A}/\text{lm}$	
S_λ	光电阴极光谱灵敏度	mA/W	
SIT	硅增强靶摄像管		
S/N	信噪比		也用 SNR
T	绝对温度	K	
t	系统的积累时间	s	也用 Δt
t, m, g	极限、最佳、高斯像面		
V	电位、电压	V	
V_n	规范化电位	V	$V_n = V + e$
V_a	阳极电位	V	
V_c	阴极电位	V	通常取 $V_c = 0$
V_g	调焦极电位	V	也称栅极电位、栅压
V_f	屏极电位	V	简称屏电位
$\bar{W}$	子午非对称像差	mm	以纵向像差形式表示
$\bar{W}$	子午投影畸变	mm	以横向像差形式表示
W_s, W_t	弧矢、子午彗差	mm	以横向像差形式表示
x	形式参量		用于公差计算表
x_1, x_2	焦距距、焦像距	mm	
y	条纹目标的高宽比		
z_0, z_f	物点、像点的 z 坐标	mm	z_f 确定像面位置
z_{F1}, z_{F2}	物方、像方焦点的 z 坐标	mm	

(续)

代号	名 称	单 位	备 注
z_{H1}, z_{H2}	物方、像方主点的 z 坐标	mm	
z_x	轨迹交轴点的 z 坐标	mm	
$\bar{z}$	轴上电位分布曲线拐点的 z 坐标	mm	
(z, r)	子午面上点的坐标		
(x, y, z)	点的直角坐标		轴对称系统用 (z, r, y)
$(z, \vec{\rho})$	矢量形式的圆柱坐标		$\vec{\rho} = \vec{r} + \vec{k} y$
(z, r, θ)	点的圆柱坐标		
$(z, \alpha, 0)$	点的球面坐标		
α	①电子逸出角, 初角度 ②仪器的角分辨率	(°) (')或 mrad	也称分辨角
α_λ	光谱转换系数		
β	方位角	(°)	
$\beta_{m,n}$	Beta分布函数		光电子发射的初电位分布函数
γ	角放大率		
Δx	参量 x 的改变量		单位与 x 相同
Δl	光学长度的改变量	mm	
$\Delta l / \Delta x$	光学长度对于参量 x 的变化率		
δ	电极壁厚	mm	
δ_e, δ_i	在阴极面上和像面上定义 的色球差	mm ⁻¹	数值上等于弥散圆直径 的倒数
ϵ	介电常数	F/m	ϵ_0 表示真空的介电常数
ε	初电位	V	与电子发射初速相对应的 加速电位
$\varepsilon_m, \varepsilon_p$	初电位的最大值和最可几 值	V	ε_m 即 ε_{max}
$\varepsilon_r, \varepsilon_z$	初电位的径向和轴向分量	V	$\varepsilon_r = \varepsilon \cdot \sin^2 \alpha$ $\varepsilon_z = \varepsilon \cdot \cos^2 \alpha$
η	电子的荷质比	C/kg	$\eta = e/m$

(续)

代号	名 称	单 位	备 注
θ	① 视角	mr	或称为“目标张角”(毫弧度)
	② 阳极锥体半角	(°)	
λ	波长	nm	
ξ	归一化的初电位		$\xi = e/e_m$
ρ	① 空间电荷密度	C/m ³	
	② 向量圆柱坐标的径向分量		$\rho = \sqrt{z^2 + r^2}$
σ	电荷面密度	C/m ²	
σ_c	电位迭代计算相对残差的平均值		
σ_m	电位迭代计算相对残差的最大值		
τ_0, τ_L	厚度为 1 m 和 L_m 的大气透过率		
τ_b	物镜的透过率		
τ_e	目镜的透过率		
τ_h	眼的透过率		
ϕ	① 光通量	lm	
	② 轴上电位	V	
ϕ_a, ϕ_r	阴极面上输入的和屏上输出的 L 光通量	lm	也用 ϕ_i, ϕ_o
ϕ_m	眼睛所接收的光通量	lm	
φ	网格点电位值	V	
ψ	主轨迹与 z 轴的夹角	rad	
Ω	立体角	sr	
ω	仪器的半视场角	(°)	
ω_m	最佳超松弛因子		

附注:

1. 光电阴极面常简称为阴极面;

2. 在有的数据表中, 当某一参量 x_i 的数据全为负值时, 为简便计, 常统一给出“ $-x_i$ ”为正值, 例如 $-r_i$ 、 $-E_p$ 、 $-M_o$ 、 $-M_r$ 等。

第 一 篇

像管设计与分析的基本理论和方法

本篇共六章。第一章论述像管及夜视整机的工作原理, 光电特性及成像参量, 整机的总体性能, 以及像管电子光学系统计算机辅助分析设计的方法和步骤。第二章论述静电场的计算分析, 除了对有限差分网格法作系统的阐述之外, 还对计算电位场分布的其它方法, 作了必要的说明。第三章论述电子轨迹的计算分析, 针对宽束成像系统的分析与设计, 特别对轴外曲轴轨迹与空间实际轨迹的计算, 作了较详细的介绍。第四章论述电子光学成像参量及像差的确定。第五章论述电子光学传递函数和像管的像质评定, 对轨迹落点的衍算、整管 OTF 的计算和用指数函数快速计算 MTF 的方法, 作了详细的介绍。最后在第六章中, 对静电像管电子光学系统及管型设计的发展与进化, 作了系统的论述。

第 一 章

像管与夜视仪的总体分析

本章首先对像管及夜视整机的工作原理、像管的特性参量，以及夜视仪的总体性能作必要的阐述；在此基础上，对主、被动夜视仪视距计算的问题作较详细的讨论。最后，对像管电子光学系统的计算机辅助分析设计的问题作综合的说明。

1.1 像管及其整机

1. 变像管及像增强器

一般地说，外光电效应的像管（包括各种变像管、像增强器、微光摄像管的移像段），是一种利用弱流宽电子束作为工作物质的光电成像器件。其作用主要是：①转换——将某一波段的辐射图像，转换为另一波段的图像，例如将近红外线、近紫外线或 x 射线等不可见辐射的图像，转变为可见光的图像；②增强图像的亮度。通常，将用于实现波段转换的像管称为变像管（Image converter），而将用于微光增强的像管称为像增强器（Image intensifier）。但严格说来，两种功能往往不能截然分开，而是兼而有之。并且，变像管和像增强器的结构和工作原理基本上是相同的，故可以统称为光电像管或者简称为像管（Image tube）。

2. 主动式和被动式的夜视仪

如图 1-1 所示是使用单级变像管的主动式夜视仪的示意图。仪器工作时，用近红外光源照射被观察的目标物，目标反射的近红外辐射图像，通过光学物镜投射到像管的光电阴极面上。阴极受照射后，各点发射出与照度成正比的电子，将输入的辐射图像转变为电子像。然后，通过电子光学系

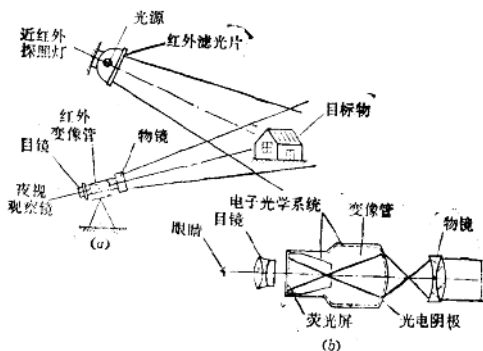


图1-1 主动式夜视仪

(a) 工作原理说明；(b) 仪器所用的红外变像管和光学系统。

统，则使阴极上各点发射的电子加速和聚焦，并打到荧光屏相对应的像点上。最后，借助于屏上荧光物质的受激发光，其上各点的亮度将与对应的入射电流密度成比例，这就将电子像再转变为人眼可见的光像。观察者通过目镜，就可以看到目标物在荧光屏上的图像。

红外夜视仪需要配备一具近红外光源，主动照射被观察的目标物，故称为主动式夜视仪。使用微光像增强器的各种

夜间观察、瞄准和驾驶仪，由于本身具有较高的增益，可以不用人工光源，直接观察微光下的景物，故称为被动式夜视仪。

1.2 像管的特性参数

1. 光谱特性

像管中，光电阴极对输入辐射的响应，荧光屏的发光，在光谱上都是有选择性的，这就构成像管的光谱特性。

光电阴极的光谱响应，是指它发射光电子的能力随入射波长的变化关系。光电流与对应的入射光通量(或者光能量)之比定义为“光电阴极的灵敏度”。如果入射光是单色的，则称为“单色灵敏度”或者“光谱灵敏度”，而如果入射光在某一波段范围内，则称为相应波段内的“积分灵敏度”。

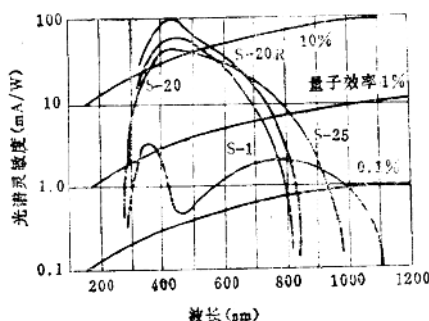


图1-2 几种常用光电阴极的光谱响应曲线

图 1-2 绘出几种常用光电阴极的光谱响应曲线，并将它们典型的性能参数，给出在表 1-1 之中。在图 1-2 中，还同