

# 《光电成像原理与技术实验》

## 讲 义

王霞、裘溯

北京理工大学光电学院

光电器件是从成熟的变像管开始发展到第一代像增强器件，又发展了第二代微通道板的像增强器和第三代采用 GaAs 半导体光电阴极的像增强器作为增强器件，目前国家又开始关注超二代像增强器的发展。因为超二代像增强器具有接近三代像增强器的成像特性的优越性，分变率高，阴极灵敏度在  $800 \mu A/Lm$ 。以上的这些器件都称为像管。对于整个像管来讲，它能将较弱的光学图像转换为较强的光学图像，同时又能将某一光谱段的图像转换为另一光谱段的图像，例如变像管就是能将红外图像转换成可见光图像的像管；而像增强器是可以将微弱的可见光图像转换为较强的可见光图像。在像管中这两个过程是同时存在的。

像管工作原理：像管是以外光电效应为基础的真空成像器件。其基本组成部分包括光电阴极、电子光学系统和荧光屏，它们共同处于一个真空的金属或玻璃壳体内，变像管或像增强器的成像原理有三个基本物理过程，成像原理如图 1。

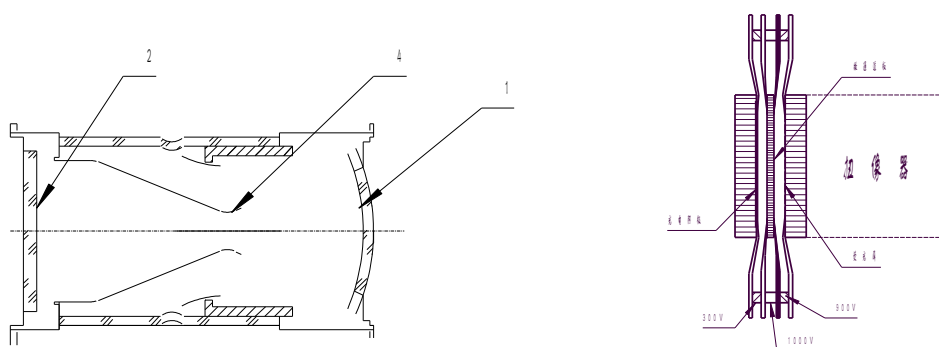


图 1 变像管和二代管像增强器原理图

三个基本组成部分各完成不同的物理过程；（请写在预习报告上）

(1) 光电阴极所完成的物理过程是将光学图像在瞬时内转换成逸出阴极的光电子图像，不同的阴极材料，对电磁波谱的不同波段敏感，例如 S-1 阴极对红外敏感，S-20 对可见光敏感等。

(2) 电子光学系统所完成的物理过程是将电子图像增强并聚焦成象到荧光屏上，即通过电子光学系统后所成的像较阴极转换出的光电子像具有更大的能量。电子光学系统使电子图像增强的作用，通常是使光电子在静电场的作用下获得加速，电子光学系统具有聚焦电子图像的作用，使电子聚焦在荧光屏上。

(3) 荧光屏所完成的物理过程，是将增强的电子图像转换成可供入眼观察或其它光电接收器敏感的光学图像。利用不同的荧光材料可获得不同光谱成分的图像。

微光像增强器的主要性能参数包括：

1. 光量子类的：光灵敏度、辐射灵敏度、亮度增一、等效背景输入照度（EBI）、输出信噪比（S/N）、亮度均匀性、调制传递函数（MTF）。
2. 几何类的：分辨力、畸变、像对准、放大率等。

像增强器性能的测试一般采用如下参数定义和公式。通过测量公式中相应的参数，再计算出对应的性能指标值。

由上所述，像管即是探测器、放大器也是成像器件。为了在低照度下，探测目标和分辨目标，辐射探测器必须具有高的量子效率和信号放大能力，才能提供高亮度以及足够的视距。探测器的质量好坏，可用像管的灵敏度、光谱响应、亮度增益、分辨力和信噪比描述探测的特性。另外，作为图像成像器件，其图像必须几何失真要小，适当的几何放大率，尽量小的亮度（能量）扩散能力，以提供足够的视角和对比，这些性能与电子光学选通的成像特性有关，是用畸变、放大率以及调制函数来描述的。

## §1 像增强器阴极灵敏度的测试

由像管的工作过程可知，图像的光谱变换必须借助于光学图像转换为电子图像才能实现。为了得到增强的可见光图像还必须完成光学图像转换为电子图像的过程。因此光电图像的转换是像管工作的基础。像管中实现光电图像转换的环节是光电阴极。而光电阴极特性的好坏决定了图像转换的质量，所以光电阴极积分灵敏度无论是在生产还是在科研中都是重要的光电参量，光电阴极灵敏度的测试是像管工艺中必不可少的工作。

### 1.1 实验目的和要求

通过本实验，了解光电成像器件—变像管和像增强器的光电阴极灵敏度的物理意义，光电阴极灵敏度的测试方法和工作原理并独立完成光电阴极灵敏度的测试。

### 1.2 测试原理

在一定色温下的光源所发射的连续光谱照射，以每入射流明的微安数（单位为  $\mu\text{A}/\text{lm}$ ）来表示光电阴极的灵敏度。

通常，辐射是由多种波长组成的，以  $\phi_\lambda$  表示在  $\lambda$  到  $\lambda+d\lambda$  的微小波长间隔内单位波长的辐射通量，称为“辐射通量的谱密度”，在  $(\lambda, \lambda+d\lambda)$  波长间隔中的辐射通量（即单色辐射通量）是  $\phi_\lambda d\lambda$ ，而包括所有波长的全部辐射通量。

$$\phi = \int_0^{\infty} \phi_\lambda d\lambda = \int_0^{\infty} \phi_m \phi(\lambda) d\lambda \quad (1-1)$$

式中： $\phi_m$  是  $\phi_\lambda$  的峰值； $\phi(\lambda)$  是  $\phi_\lambda$  对峰值  $\phi_m$  归一的相对分布，常用单位为  $\text{W}/\mu\text{m}$ 。

该辐射通量下阴极给出的全部光电流

$$i = \int_0^{\infty} \phi_m \phi(\lambda) S_m S(\lambda) d\lambda \quad (1-2)$$

式中： $S_m$  是  $S_\lambda$  的峰值； $S(\lambda)$  是  $S_\lambda$  对峰值  $S_m$  归一的相对分布，称为“相对光谱灵敏度”。

单位辐射通量所产生的光电流，称为光电阴极的积分灵敏度（ $\text{mA}/\text{W}$ ）

$$S = \frac{\int_0^{\infty} \phi_m \phi(\lambda) S_m S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \phi_m \phi(\lambda) d\lambda} = \frac{S_m \int_0^{\infty} \phi(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \phi(\lambda) d\lambda} \quad (1-3)$$

在光电阴极和相关电极之间加上所规定的直流电压，用规定的光（或辐射）均匀照射光电阴极的规定面积，分别测得输出光电流和入射通量（或辐射通量）。输出光电流与入射光通量（或辐射通量）之比，即是阴极的光电灵敏度（或辐射灵敏度）。

像管积分灵敏度是指在标准光源（色温 2856K）照射下，阴极规定面积上所产生的饱和光电流与照射到该面积上的光通量之比，即：

$$S=i/\varphi \quad (1-4)$$

式中： $i$ —光电阴极产生的饱和光电流；

$\varphi$ —照射到光电阴极面上的光通量，它表征器件光电阴极一定光谱分布的入射光响应的大小。

按照上述规定，只要测出照射到光电阴极面上的光通量  $\varphi$  对应产生的饱和光电流  $i$ ，即可求出光电阴极的积分灵敏度  $S$ 。

当发光强度为  $I_0$  的光源和被测器件阴极面之间的距离为  $l$  时，取一直径为  $D$  与像管同轴并略小于阴极面的圆孔作为光阑紧靠阴极面，则该面的光通量为：

$$\varphi = \frac{\pi D^2 I_0}{4l^2} \quad (1-5)$$

实际测试时，一般控制阴极面上的照度值在 100LX 以下，过高会使光电阴极疲劳。光电流可由小电流放大器测出。光电阴极灵敏度测试装置如图 1.1，稳流源；为了保证光源输出电流的稳定和标准光源的色温。

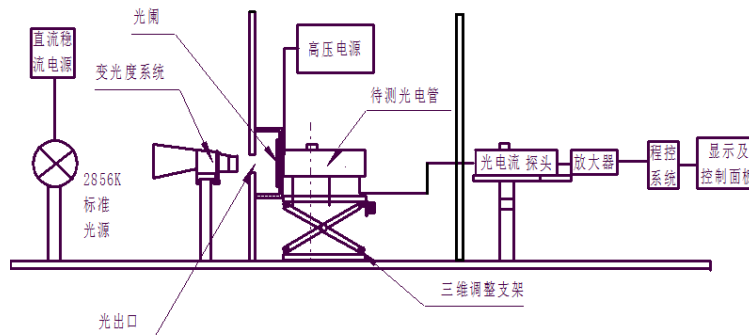


图 1.1 阴极灵敏度测试装置

任何夜视器件的积分灵敏度都是对标准光源而言的。如果光谱分布不同，即使同一器件也可测出不同的积分灵敏度，所以，光源的色温必须预先标定，得出色温为 2856K 时灯丝电流值。具体测试时必须认真监视灯丝的电流值并施加大于饱和电压的电压于像管。常见

光电阴极的积分灵敏度见表 1.1。

表 1.1 常见光电阴极积分灵敏度

代 号	光电发射材料	积分灵敏度 ( $\mu\text{A} / \text{l m}$ )
S-1	Ag-O-Cs	30-50
S-11	Cs-Sb	70-80
S-20	Na-K-Cs-Sb	150-400
S-25	Na-K-Ca-Sb	100-700
III-V 族	Ga-As	800-2000

积分灵敏度有两种表达方式；功率单位 mA/W 和光度量单位  $\mu\text{A}/\text{lm}$ 。后者测量可见光范围的光灵敏度，容易测量，使用比较广泛。

根据需要，光电灵敏度测试主要有两种：

### 1.2.1 白光灵敏度

是指光电阴极在 2856K 色温钨丝灯的直接照射下，单位辐射通量（或光通量）产生的光电流的大小。这是一般积分灵敏度通用测试，它给出了阴极积分灵敏度好坏的总概念。

表达方式：如 (2.3) 式

$$S_0 = \frac{S_m \int_0^{\infty} \phi(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \phi(\lambda) d\lambda} \quad (\text{A/W}) \quad (1-6)$$

$$S'_0 = \frac{S_m \int_0^{\infty} \phi(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{680 \int_0^{\infty} \phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (\mu\text{A}/\text{lm}) \quad (1-7)$$

多碱阴极积分灵敏度的典型数据是 2~14 mA/W（或 100~700  $\mu\text{A}/\text{l m}$ ）

### 1.2.2 红外灵敏度

为了得到与实际相关的数据，有时需测量像管的红外灵敏度，就是光电阴极在加盖标准红外滤光片时，2856 K 色温的钨丝灯作用下单位光通量所产生的光电流。光通量值仍按未加红外滤光片时之值表示。所用测试设备和方法与前述相同。红外灵敏度的测量对于银氧铯阴极的变像管尤其重要，对于向红外延伸的多碱光电阴极以及负电子亲和势阴极大有实用价值。

红外灵敏度的表达式：

$$S_{IR} = \frac{S_m \int_0^{\infty} \phi(\lambda) \tau_{\lambda} S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \phi(\lambda) d\lambda} \quad (\text{A/W}) \quad (1-8)$$

$$\text{或} \quad S'_{IR} = \frac{S_m \int_0^{\infty} \phi(\lambda) \tau_{\lambda} S(\lambda) d\lambda}{680 \int_0^{\infty} \phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (\mu\text{A}/\text{lm})$$

式中： $\tau_{\lambda}$ — 红外滤光片的透过率

$V(\lambda)$ — 视见函数

在变像管中，银氧铯阴极的红外灵敏度的典型数据是  $5 \sim 10 \mu\text{A}/\text{lm}$ 。

光电阴极的灵敏度与所接收的辐射波长有一定的依赖关系，就是说不同波长的单位辐射通量所产生的光电流不同。

在某一波长的单色辐射照射下，单位辐射通量所产生的光电流称为光电阴极的光谱灵敏度。它表征了器件光电阴极与各类辐射源其中包括前级荧光屏的光谱匹配的重要参数。实际应用中，常常需要了解光电阴极对某一特定波长的响应程度。如像增强器的检验项目中就规定了要给出波长为  $0.54, 0.8, 0.85 \mu\text{m}$  三个波段的灵敏度。

### 1.3 测试器材

1. 带有光电阴极的实验小泡、稳流源、小电流放大器、经过标定的光源、滤光片。光源；提供规定的  $2856\text{K}$  光辐射。

2. 滤光片； $0.54, 0.8, 0.85 \mu\text{m}$  的滤光片，峰值的透射比不小于  $50\%$ 。光阑；提供阴极面的规定面积。

3. 小电流放大器；为阴极指示光电流值。直流稳压电源；为阴极提供规定的电压。

### 1.4 测试步骤

为了消除环境干扰，提高测试精度，整套装置应放在一个暗箱内。光源必须经过标定，也就是首先对光源的发光强度进行标定。

#### 1.4.1 测量程序

1. 在光电阴极及相关电极之间施加  $220\text{V}$  直流电压。
2. 将光阑调整到合适的直径，计算出其面积的大小。
3. 调整稳流源电流值，使光源的色温达到  $2856\text{K}$ ，并能均匀地照射在像管的阴极面上。
4. 测量并记录下有光照时的光电流值。
5. 测量并记录下无光照时的光电流值。

#### 1.4.2 结果计算

光电灵敏度按下式计算

$$S = \frac{i_1 - i_2}{A \cdot E} \times 10^6 = \frac{i_1 - i_2}{\phi} \quad (1-9)$$

式中： $S$ — 光电灵敏度， $\mu\text{A}/\text{Lm}$ ；

$i_1$ — 有光照射时的光电流值， $\mu\text{A}$ ；

$i_2$ — 无光照射时的光电流值， $\mu\text{A}$ ；

$A$ — 光阑孔的面积， $\text{mm}^2$ ；

$E$ — 输入面上的光照度， $\text{Lx}$ ；

$\Phi$ —入射到输入面上的光通量, lm;  
辐射度按下式计算:

$$S_e = \frac{i_1 - i_2}{A \cdot E_e} \times 10^3 = \frac{i_1 - i_2}{\Phi_e} \times 10^{-3} \quad (1-10)$$

式中:  $S_e$ —辐射灵敏度, mA/W;

$i_1$ —有辐射照射时的光电流值,  $\mu\text{A}$ ;

$i_2$ —无光照射时的光电流值;

$A$ —光阑孔面积,  $\text{mm}^2$

$E_e$ —输入面上的辐射照度,  $\text{W}/\text{mm}^2$ ;

$\Phi$ —入射到输入面上的辐射通量, W。

### 1.5 实验报告

1. 叙述光电成像器件的基本工作原理和光电阴极特性参数的定义。
2. 说明光电阴极灵敏度的测试原理, 并对记录的数据进行计算和分析。

### 1.6 思考题

1. 试述光电阴极光谱灵敏度测试原理、系统组成及测试方法。

## §2 像增强器亮度增益测试

### 2.1 实验目的和要求

了解和熟悉器件亮度增益在光电成像器件中的重要意义及亮度增益的定义和亮度增益的测量方法。独立完成亮度增益的测试。

### 2.2 测试原理

用规定照度的标准光照射光电阴极，在像管输出的轴向方向上分别测出有光输入和无光输入时荧光屏的法向亮度，两者之差与入射到光阴极上的照度之比，为亮度增益，即

$$G = \frac{L_2 - L_1}{E_C} \quad (2-1)$$

1)

式中：  $G$ —光亮增益；

$L_2$ —有光输入时荧光屏的发光亮度；

$L_1$ —无光输入时荧光屏的发光亮度；

$E_C$ — 输入到光阴极面的光照度。

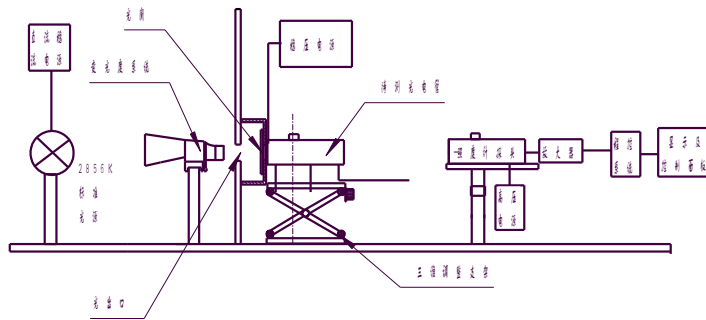


图 2.1 亮度增益原理图

该测试仪使用光照度计测量距像管荧光屏为  $l$  处产生的照度，由公式

$$L_a = \frac{E_a l^2}{\pi r_a^2} \quad (2-2)$$

求出荧光屏的轴向发光亮度。

式中：  $E_a$ —距荧光屏  $l$  处的照度 (Lx) ；

$L_a$ —荧光屏的轴向发光亮度；

$l$  — 荧光屏端面与照度计探头之间的距离；

$r_a$  — 荧光屏的有效半径。

使用时，要求  $l > 10r_a$ 。于是像管的亮度增益为

$$G = \frac{(E_a - E_{a0})l^2}{E_c \pi r_a^2} \quad (\text{cd/m}^2/\text{Lx}) \quad (2-3)$$

式中： $E_a$  — 有光输入时荧光屏  $l$  处的照度值；

$E_{a0}$  — 无光输入时荧光屏  $l$  处的照度值；

$E_c$  — 输入光阴极面处的照度值；

$L_a$  — 荧光屏的发光亮度；

$r_a$  — 荧光屏的半径；

### 2.3 测试器材

1. 被测像管；
2. 2856K 标准光源；
3. 减光器；
4. 光阑；
5. 高压电源；
6. 照度计

### 2.4 测试步骤

#### 2.4.1 测试步骤

1. 给像管加以规定的工作电压 3V，经过适当的时间，使其达到稳定的工作状态。
2. 在像管的轴线上，用规定的照度范围的光均匀地照射到输入面上，用照度计（或光度计）。
3. 测量并记录输入面上有光照射时，输出面的法向照度（或亮度）。
4. 在像管的轴线上，测量并记录输入面的照度。

#### 2.4.2 计算

像增强器的亮度增益按下式计算：

$$G = \frac{L_2 - L_1}{E} \quad (2-4)$$

式中： $G$  — 像管的亮度增益， $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}/\text{Lx}$ ；

$L_1$  — 无光照射时输出面上的法向亮度， $\text{cd}/\text{mm}^2$ ；

$L_2$  — 有光照射时输出面上的法向亮度， $\text{cd}/\text{mm}^2$ ；

$E$  — 输入面的照度， $\text{Lx}$ 。

### 2.5 实验报告

1. 叙述和说明测试像管亮度增益的重要性、测试原理和方法。
2. 将记录数据进行计算和分析。

### 2.6 思考题

1. 像增强器亮度增益受那些因素的影响？
2. 为什么光源的色温要定为 2856K，如何保证？

3. 为什么要减去无光照时的荧光屏输出亮度？

### §3 像增强其等效暗背景照度测试

#### 3.1 实验目的

通过本实验掌握和学习像管等效背景照度的物理意义、测量原理和方法。独立完成像管等效背景的测试。

#### 3.2 测试原理

等效背景照度是指为使荧光屏亮度等于暗背景亮度所需在光电阴极面上输入的照度值，即无光输入像管时，由荧光屏输出的亮度等效为光电阴极的入射照度。分别测量有规定光照和无光照时荧光屏规定面积上的法向输出亮度，用两者之差除无光照时的法向亮度，再乘以光阴极的输入照度，即为等效背景照度。即

$$E_B = \frac{E_C \pi r_a^2}{(E_a - E_{a0}) l^2} E_{a0} \quad (2-4)$$

$$E_B = \frac{1}{G} E_{a0} \quad (2-5)$$

分别测量有规定光照和无光照射时荧光屏面积上的法向输出亮度，用两者之差除无光照射时的法向亮度，再乘以光电阴极的入射照度，即是等效背景照度。

如果器件的亮度增益为  $G$ ，在光电阴极没有受光照射时，得到屏的暗背景亮度为  $L_{ab}$ ，则等效背景照度  $E_{BEI}$  为：

$$E_{BEI} = \pi L_{ab} / G \quad (Lx) \quad (3-1)$$

1)

当光电阴极面输入照度  $E$  时，测得屏的亮度为  $L_a$ ，则：

$$G = \pi (L_a - L_{ab}) / E$$

将上式合并得：

$$E_{BEI} = \frac{L_{ab}}{L_a - L_{ab}} E \quad (3-2)$$

当  $L_a = 2L_{ab}$  时光电阴极面上的输入照度在数值上等于等效背景照度。实际测量时，改变光电阴极面上的输入照度，使屏的发光亮度提高到等于暗背景亮度的两倍，这时光电阴极面上的照度就等于等效背景照度。

显然，也可以在光电阴极面上没有光照时测出  $L_{ab}$ ，然后在开启光源，使器件光电阴极面上有一个均匀的照度值  $E$ ，并测得  $L_a$ ，应用公式 (3-2) 计算等效背景照度。

等效背景照度的测试通常可在增益测试装置上进行。测试时注意被测器件应有足够的稳定时间，一般为 30 分钟左右。

等效背景照度的典型值，变像管为  $10^{-2}-10^{-3} \text{ lx}$ ，像增强器为  $10^{-5}-10^{-7} \text{ lx}$ 。

### 3.3 测试器材

1. 被测像管；
2. 2856K 标准光源；
3. 减光器；
4. 光阑；
5. 高压电源；
6. 照度计

### 3.4 测试步骤

等效背景照度的测试可以在亮度增益测试装置上进行，测试步骤如下：

1. 将像管固定在装置的测试位置上，并加以额定工作电压。在光电阴极没有辐射入射的情况下，保持 30 分钟的稳定时间。之后用光度计（或照度计）测量出无入射辐射时的荧光屏暗背景亮度  $L_{ab}$ 。

2. 然后打开光源的开关，使光电阴极面上输入均匀分布的照度值  $E$ 。并用光度计测出这时的荧光屏亮度  $L_a$ ，应用公式（3-2）调节入射照度使其  $L_a = 2 L_{ab}$ ，测出入射照度。使  $E = E_{EBI}$ ，测量出按背景照度。

3. 移去被测器件，用照度计测量并记录输入面原位置处的照度  $E$ 。测量结果按公式（3-2）计算。

### 3.5 实验报告

1. 说明暗背景产生的原因和在像管中的影响。
2. 说明等效背景照度的测试原理和方法。
3. 对所记录的数据进行计算和分析。

### 3.6 思考题

1. 使用增益测试设备测试等效背景照度时，应该先测有光照情况还是先测无光照情况下的输出照度？为什么？

## §4 成像器件放大率与畸变的测试

像管的放大率是像管成像质量的重要参数之一，放大电流的大小是由电子光学系统来决定，它主要取决于会聚区和发射区的状态。减弱场的会聚区而增强其发射区就可以在较远的位置上得到大的放大率，反之则在较近的距离上得到小的放大率。此外，阴极和阳极端面之间的距离，阴极玻壳的内径，阳极光阑孔直径等都影响像管的放大率。由于轴附近的放大率与边缘的放大率完全相等的电子光学系统是难以实现的，在焦平面上随着离中心距离增大，放大率也随着变化，因此产生了畸变使图像失真（图 4.1）。

### 4.1 实验目的和要求

学习和掌握像管放大率与畸变的物理意义、放大率和畸变的测试原理与方法。独立完成放大率与畸变的测试。

### 4.2 测试原理

光电成像器件中的放大率是指横向放大率而言，对于一个内部由电子光学透镜图像的像管来说。放大率的大小由电子透镜决定。它主要取决于会聚区和发散场的状态，减弱场的会聚区增强，其发散区就可以在较远位置上得到大的放大率，反之则在较远位置上得到小的放大率。此外，阴极和阳极端面之间的距离，阴极玻壳的内径，阳极光阑孔直径等都影响器件的放大率。而且像面上各点的放大率是不相等的。因此标志一支像管的放大率是用中心部分的数据来确定的。由于像管是回转对称的，所以按距中心的不同半径上的放大率差异来确定它的畸变。表示了随着距中心点的距离增大，放大率也增大的图形。单管典型畸变曲线如图 4.2 随着离阴极中心距离而变化的。

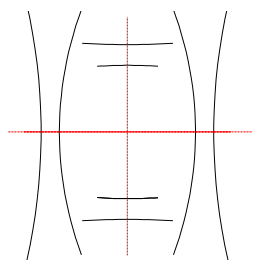


图 4.1 放大率畸变图形

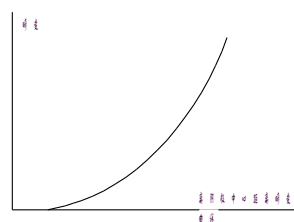


图 4.2 离阴极中心距离畸变的曲线

当像管放大率为  $M_0$ ，各点阴极面中心处输入图像的尺寸为  $r_c$ ，通常取  $r_c$  不超过 1 mm； $r_c$  图像在荧光屏上成像的尺寸为  $r_p$  时，像管放大率由下式表示：

$$M_0 = \frac{r_p}{r_c} \quad (4-1)$$

像管上半径  $r$  处的畸变  $D_r$  采用一般光学系统的定义方法。 $r_c$  不超过 1 mm 处某点的放大率为  $M_0$ ，距离中心  $r$  处的放大率为  $M_r$ ，畸变  $D_r$  为：

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/738121021067006104>