

静电聚焦像管电子光学参量经验公式

李 集 川

摘要：本文以两极式静电聚焦像管（变像管、像增强器）为例，从同心球理论出发，推导电子光学参量关系式，并根据实际电子光学系统进行修正，得出表达参量 L 、 P 、 Q 和 M 的经验公式。最后举例说明该公式在实际电子光学设计中的应用价值。

引 言

静电聚焦的变像管、像增强器，以及各种微光电视摄像管（如 SEC、SEM）的移像段的电子光学系统，均属于大物面、宽电子束聚焦成像系统。其作用是将光电阴极上的光学图像转换成屏上（或靶上）的电子图像。

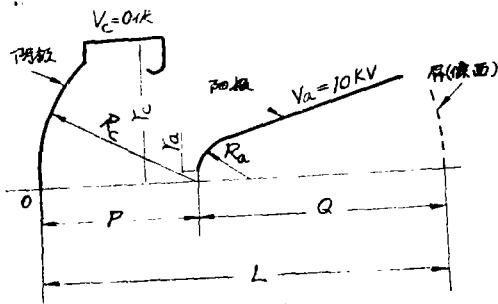


图1 两极式静电聚焦像管电子光学系统

图1 绘出这种电子光学系统的示意图。其基本参量有：

- L —光电阴极到像面距离（即到屏或靶距离）；
- P —光阴极面到阳极顶端距离；
- Q —阳极顶端到像面距离，显然 $L = P + Q$ ；
- M —电子光学放大率，且 $M = r_i / r_o$ ，其中 r_i 和 r_o 分别为屏上像高和阴极面上物高。并定义当 $r_o = 1$ 毫米时，求得放

大率 $M = \frac{r_i}{1} = M_o$ 。为中心放大率。本文在公式中出现的放大率均指中心放大率 M_o 。

此外，图1 还给出主要电子光学几何尺寸：

- R_c —光电阴极球面半径；
- r_o —阴极圆筒半径，且 $D_o = 2r_o$ ；
- r_i —阳极孔半径；
- R_a —阳极头外球面半径，且 $D_a = 2R_a$ 。

具有特定几何形状的电极、及特定的极间距离，各电极又加以适当电压，就形成确定的电场分布，组成电子光学系统。而电子光学参量 L 、 P 、 Q 和 M ，正是该系统的函数。

一、 L 、 P 、 M 的一般表达式

如果把图1 所示的电子光学系统，近似看成如图2 所示的短透镜系统，并近似认为，透镜主平面恰好位于阳极顶端所处的平面上（实际并非如此简单），那么 P 和 Q 正是该系统的物距和像距。

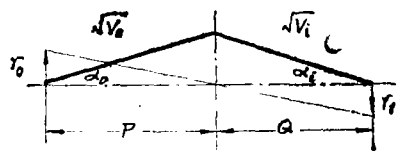


图2 短透镜电子光学系统

众所周知, 阴极透镜普遍遵守拉格朗日-亥姆霍茨定律^{[1][2][4]}

$$r_o \alpha_o \sqrt{V_o} = r_i \alpha_i \sqrt{V_i} \quad (1)$$

或

$$r_i / r_o = \sqrt{\frac{V_o}{V_i}} \cdot \frac{\alpha_o}{\alpha_i} \quad (2)$$

式中 V_o 、 V_i 分别为物方和像方空间电位, 而 $\sqrt{\frac{V_o}{V_i}}$ 为两方折射率之比; α_o 和 α_i 为轴

上射线在物方和在像方与 Z 轴夹角 (如图 2 所示)。从图 2 中简单几何关系得到

$$\frac{\alpha_o}{\alpha_i} \approx \frac{Q}{P} \quad (3)$$

将 $r_i / r_o = M$, 代入 (2) 后得

$$L = P + Q = P + \sqrt{\frac{V_i}{V_o}} \cdot P \cdot M \quad (4)$$

(4) 式中 $\sqrt{\frac{V_i}{V_o}}$ 是像方与物方折射率

之比。对给定电子光学系统, 如能知道比值 $\sqrt{\frac{V_i}{V_o}}$, 那么从 (4) 式可看出电子光学参

量之间关系。事实上, 这个比值取决于电子光学结构, 对特定电子光学结构而言这比值是一个常数。为此令 $\sqrt{\frac{V_i}{V_o}} = K$, 我们把 K

称作结构常数。于是 (4) 式可简化为

$$L = P + K \cdot P \cdot M \quad (5)$$

这就是表达静电聚焦像管电子光学参量关系的一般表达式, 显然当 P 一定时, L 和 M 呈线性关系。

二、理想同心球系统结构常数推导

为研究实际像管电子光学系统参量关系, 首先推导理想同心球系统的结构常数。图 3 绘出理想同心球系统示意图。

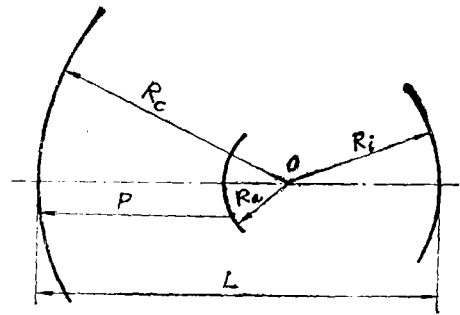


图 3 同心球电子光学系统

对同心球系统, 文献^[3]给出

$$R_i = R_o \cdot \frac{n}{n-2} \quad (6)$$

$$M = R_i / R_o = \frac{1}{n-2} \quad (7)$$

式中 $n = R_o / R_i$, 由图 3 看出

$$P = R_o - R_i = R_o (n-1) \quad (8)$$

于是 $L = P + Q$

$$= P + R_o + R_i$$

$$= P + R_o \left(1 + \frac{n}{n-2}\right)$$

$$= P + R_o (n-1) \cdot \frac{2}{n-2}$$

$$= P + 2 \cdot P \cdot M \quad (9)$$

比较 (9) 式和 (5) 式, 可知, 对理想同心球系统, 结构常数 $K = 2$ 。同样对带阳极孔的同心球系统, 文献^[3]给出像面位置及放大率为

$$S = \frac{6(n-1)}{n-4} \cdot R_o \quad (10)$$

$$M = \frac{3}{n-4} \quad (11)$$

这里 S 是从阳极顶端算起的像面位置 (即 $S = Q$), 因此 $L = P + S$

$$= P + \frac{6(n-1)}{n-4} \cdot R_o$$

$$= P + 2 \cdot P \cdot M。$$

结果与 (9) 式完全相同。于是我们得到一个重要结论: 对同心球系统 (包括带阳极孔的

同心球系统) 其折射率之比—结构常数 $K = 2$ 。它同样表达了像方焦距 f_2 与物方焦距 f_1 之比:

$$K = \sqrt{\frac{V_2}{V_0}} = \frac{f_2}{f_1} = 2 \quad (12)$$

这一结论与文献^[4]是一致的。

三、实际电子光学系统结构常数

比较图 1 和图 3, 可看出实际电子光学系统与理想同心球系统至少存在以下三点差异: 第一, 实际电子光学系统, 在阴极阳极间的有限空间, 仅是同心球系统的一部分空间; 第二, 阳极必须开孔, 以通过电子射线; 第三, 阳极头球面与阴极球面并不同心, 而是偏心, 即 $P \neq R_c - R_a$ 。因此, 实际系统结构常数 $K < 2$ ^[4]。为了对结构常数 K 进行修正, 以适用于实际系统, 引入一个与结构有关的修正系数 β (小于 1 的正数)。且令

$$K = 2 \cdot (1 - 2\beta) \quad (13)$$

式中 β 表征实际系统对理想同心球系统在结构上的偏离程度。考虑到实际系统与同心球系统的前两点差别, 显然阳极头球面直径 $D_a (= 2R_a)$ 和阳极孔半径 r_a 越大, 实际系统偏离同心球系统越严重; 而阴极圆筒直径 $D_c (= 2r_c)$ 和阴极球面半径越大, 则实际系统偏离同心球系统就越小。于是给出修正系数

$$\beta = \frac{D_a \cdot r_a}{D_c \cdot R_c} \quad (14)$$

对于第三点差别, 则要根据实际系统是 $R_c > P$ 和 $R_c \leq P$ 两种情况分别处理。

i $R_c > P$ 时, 把(13)式直接代入(5)

$$L = P + 2 \cdot P \cdot M \cdot (1 - 2\beta) \quad (15)$$

对锥形阳极, 因 $D_a \cdot r_a \ll D_c \cdot R_c$, $\beta \approx 0$, 则

$$L = P + 2 \cdot P \cdot M, \text{ 与同心球系统相}$$

同。

ii $R_c \leq P$ 时, 对多数光学纤维面板结构像管, 为校正边缘像差, 往往取 $R_c \leq P$, 使阴极球面球心落在阳极出口前面。经验表明, 这时如以 $P + R_c = 2P$ 代入 (15) 式, 算得结果, 令人满意。于是有

$$L = P + (P + R_c) \cdot M \quad (16)$$

同样对锥形阳极

$$L = P + (P + R_c) \cdot M \quad (17)$$

将(15)·(16)和(17)各式与(5)式进行比较, 可得出不同情况下结构常数计算公式

$$R_c > P \text{ 时, 非锥阳极 } K = 2 - 4\beta \quad (18-a)$$

$$\text{锥形阳极 } K = 2 \quad (18-b)$$

$R_c \leq P$ 时, 非锥阳极

$$K = \frac{(P + R_c)(1 - 2\beta)}{P} \quad (18-c)$$

$$\text{锥形阳极 } K = 1 + \frac{R_c}{P} \quad (18d)$$

为使用方便起见, 图 4 给出在不同 K 值时, $L/P = f(M)$ 的关系。对给定系统, 当由(18)式算出 K 值后, 可从图 4 相应曲线查出 L/P 与 M 关系。

上述讨论, 仅给出 L/P 与 M 关系, 要完全确定电子光学参量 $L \cdot P \cdot M$ 之间定量关系, 尚须研究 P 与 M 的关系。

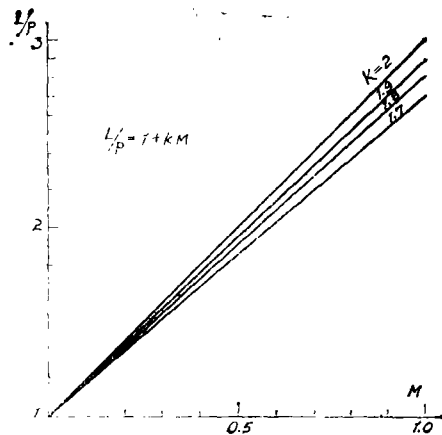


图 4 对不同的 K 值 L/P 与 M 的关系

四、实际电子光学系统 P 与 M 的关系

仍从同心球理论出发, 将(7)、(8)两

$$\text{式联立得 } M = \frac{R_s}{P - R_s} \quad (19)$$

$$\text{或 } P = \frac{R_s}{M} + R_s = \left(\frac{1}{M} + 1\right) \cdot R_s \quad (20)$$

(19)、(20)表达了同心球系统 M、P 及 R_s 之间关系。而对实际系统, 因与同心球存在差异, 因而实际系统的 P 值, 通常总要比由(20)式算出来的更大些。为此把(20)式中的“1”换成另一个修正系数 α , 于是有

$$P = \left(\frac{1}{M} + \alpha\right) \cdot R_s \quad (21)$$

$$M = \frac{R_s}{P - \alpha \cdot R_s} \quad (22)$$

对同心球系统 $\alpha = 1$, 对实际电子光学系统 $\alpha > 1$ 。

在上述表达式中, P 与 M 的关系是以阳极头球面半径 R_s 为参量的, 而对实际系统 R_s 值往往不易给出准确值 (如锥阳极、平顶阳极等), 因而引入较大误差。这里通过与实际系统更为接近的带阳极孔的同心球系统, 导出所谓等效阳极球面半径 \tilde{R}_s 概念, 代替(22)式中的 R_s , 由(8)、(11)两式

$$M = \frac{3 R_s}{P - 3 R_s} \quad (23)$$

取实际系统等效阳极球面半径为带阳极孔的同心球系统的阳极半径:

$$\tilde{R}_s = R_s = \frac{1}{3} \frac{P \cdot M}{1 + M} \quad (24)$$

于是对任意已知系统, 当知道 P、M 后, 就能算出等效阳极半径 \tilde{R}_s 来, 不受管子具体结构限制。经验表明, 对实际多数系统, M 与 \tilde{R}_s 的关系要比(22)式表达的关系变化更快些, 因此, 在(22)式上乘以 1.2, 并用等

效阳极半径 \tilde{R}_s 代替 R_s , 就有

$$M = \frac{1.2 \tilde{R}_s}{P - \alpha \tilde{R}_s} \quad (25)$$

$$\text{而 } \alpha \cdot \tilde{R}_s = P - \frac{1.2 \cdot \tilde{R}_s}{M} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} P &= \left(\alpha + \frac{1.2}{M}\right) \cdot \tilde{R}_s \\ &= \alpha \cdot \tilde{R}_s + \frac{1.2}{M} \cdot \tilde{R}_s \end{aligned} \quad (27)$$

这样, 对于任意一个已知系统, 当事先知道一组 P 与 M 值后, (实际经常碰到这种情况), 便可从(24)式算出 \tilde{R}_s 来, 由(26)式算出 $\alpha \cdot \tilde{R}_s$ 来, 再由(25)或(27)算出 $M = f(P)$ 的单调函数关系。

为观察 M 和 P 的关系明显起见, 把(25)、(26)和(27)分别写成

$$M = \frac{1.2}{P/\tilde{R}_s - \alpha} \quad (28)$$

$$\alpha = P/\tilde{R}_s - 1.2/M \quad (29)$$

$$P/\tilde{R}_s = 1.2/M + \alpha \quad (30)$$

分析(28)式, 可知 M 与 P/\tilde{R}_s 成反比关系。图 5 绘出以 α 为参量的 $M = f(P/\tilde{R}_s)$ 的一组曲线。当 $\alpha = 1$ 时对应同心球系统, 而 $\alpha > 1$ 则对应实际系统。显然随 α 的增大, 曲线向右移动, 即相同的 P/\tilde{R}_s 值时, α 越大, M 也越大。

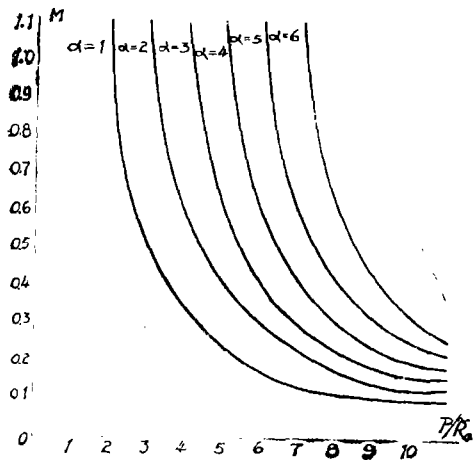


图 5 对不同的 α 值 M 与 P/\tilde{R}_s 关系

五、经验公式的应用

下面举例说明经验公式如何应用。

1. 计算像面位置

已知某二极式像增强器， $P = 19.5$ 毫米， $M = 0.74$ ， $r_s = 2$ 毫米， $D_s = 9.4$ 毫米， $R_c = 30.5$ 毫米， $D_c = 32$ 毫米，求像面位置。

因为已知 $R_c > P$ ，选 (14) 式算 $\beta \approx 0.02$ ，再由 (15) 计算 $L = 47.2$ 毫米。电子计算机求解电子运动方程计算结果 $L = 47.98$ 毫米。

又知某光纤板结构三极式像管 $P = 31$ 毫米， $R_c = 26.36$ 毫米， $M = 5.1$ ，锥形阳极，求像面位置。

因 $R_c < P$ ，又是锥形阳极 ($\beta \approx 0$)，选用 (17) 式算得 $L = 323.5$ 毫米，实际尺寸为 324.6毫米。

2. 估算 L/P 值，算 P 值，为电子计算机首次计算提供方案数据。

如要设计纤维面板结构的二极式变像管，拟采用锥形阳极， $M = 1$ ， $R_c \approx 0.9P$ ，要求 $L \leq 55$ 毫米，问首次计算，取 P 等于多少合适。

由于方案选定 $R_c < P$ ，且为锥形阳极，故可直接从 (18-a) 算出 $K = 1.9$ 。再由 (5) 式算出 $P = 19$ 毫米。于是作为计算机首次计算方案可取 $P = 19$ 毫米。当然此问题也可在算出 K 值后直接从图 4 查出 P 值来。

3. 对已知管型，要改动某个参量，可不必用电子计算机重新计算，而直接用经验公式进行计算，为实验样管提供依据。

如已知某二极式像管，原 $M = 0.78$ ， $P = 28$ 毫米， $L = 69.08$ 毫米， $R_s = 5$ 毫米， $R_c = 26$ 毫米；现在由于工作需要改 $M = 0.72$ ，那么新管子极间距离 P ，和像面位置 L 是多少？

这类问题是经常碰到的，要改变一个参量，又不想改动电极尺寸，调整极间距离 P

是最简单有效的方法。对此问题，可先由 (24) 算出 $\tilde{R}_s = 4.09$ 毫米，再由 (26) 算 $\alpha \cdot \tilde{R}_s = 21.708$ 毫米，由 (27) 算出改动后极间距离 $P = 28.524$ 毫米；因已知 $R_c < P$ ，又是非锥形阳极，故由 (16) 算 $1 - 2\beta = \frac{L - P}{(P + R_c) \cdot M} = 0.975$ 这样将新求出的 P 、 M 和 $1 - 2\beta$ 值代入 (16) 就算出改动后像面位置 $L = 66.81$ 毫米；而电子计算机计算结果为 $P = 28.5$ 毫米； $L = 66.7$ 毫米。此问题也可由 (24) 和 (30) 先求出 \tilde{R}_s 和 α 值，再利用图 5 查出 P 值；利用 (18-C) 求出 K ，由图 4 查出 L 值。

4. 对已知电子光学系统，求 M 与 P 及 L 与 P 的关系，进而求得变化率 $\frac{\Delta M}{\Delta P}$ 、

$$\frac{\Delta L}{\Delta P}。$$

如已知某纤维面板结构二极式像管，当 $P = 27$ 毫米时， $M = 0.92$ ， $L = 74.13$ 毫米，且 $R_s = 5$ 毫米， $R_c = 26$ 毫米，现在要求 M 和 L 随 P 值如何变化。

先由 (24) 求 $\tilde{R}_s = 4.3$ 毫米，由 (26) $\alpha \cdot \tilde{R}_s = 21.4$ 毫米，由 (16)， $(1 - 2\beta) = 0.966$ 。当取不同 P 值时分别代入 (25) 和 (16) 两式，可算出不同 P 值对应的 M 及 L 值。其计算结果列入下表，并给出如图 6 所示的曲线。在表中同时给出由电子计算机求解运动方程之计算结果，用以进行比较。

在求得上述各值后，可进一步算出

对给定系统，不同的 P 值对应的 M 及 L

P	25	26	27	28	28.5	29	30
$P - \alpha R_s$	3.6	4.6	5.6	6.6	7.1	7.6	8.6
M	1.43	1.12	0.92	0.782	0.727	0.679	0.6
M^*		1.11	0.92	0.782	0.72	0.677	
L	96.5	82.16	74.13	68.82	66.76	65.08	62.48
L^*		81.18	74.13	69.08	66.67	65.8	

* 用电子计算机计算结果。

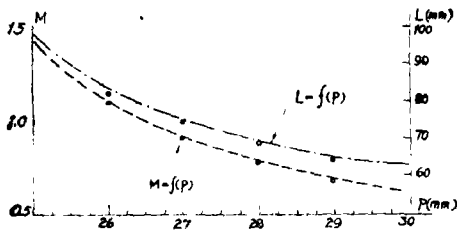


图6 对给定系统M、L与P的关系

$\frac{\Delta M}{\Delta P}$, $\frac{\Delta L}{\Delta P}$, 为像管装架提供合理公差。

综上所述, 现将各公式的应用和计算步骤归纳如下:

1. 求像面位置L

(1) $\beta = \frac{D_c \cdot r_c}{D_c \cdot R_c}$ (锥阳极取 $\beta = 0$) (14)

(2) L: 当 $R_c > P$ 时, $L = P + \frac{2 \cdot P \cdot M}{1 - 2\beta}$ (15)

(锥阳极) $L = P + 2 \cdot P \cdot M$ (9)

当 $R_c \leq P$ 时, $L = P + \frac{(P + R_c) \cdot M}{1 - 2\beta}$ (16)

(锥阳极) $L = P + (P + R_c) \cdot M$ (17)

2. 估算P

(1) 求 β 同 (1-11);

(2) 求K: 当 $R_c > P$ 时, $K = 2 - 4\beta$ (18-a)
(锥阳极) $K = 2$ (18-b)

当 $R_c \leq P$ 时, $K = \frac{(P + R_c)(1 - 2\beta)}{P}$ (18-c)

(锥阳极) $K = 1 + \frac{R_c}{P}$ (18-d)

(3) $P = \frac{L}{1 + KM}$ (或由图4查得) (5)

3. 改变旧管放大率M, 求新管 P、L

(1) $\tilde{R}_c = \frac{1}{3} \frac{P \cdot M}{1 + M}$ (24)

(2) $\alpha \cdot \tilde{R}_c = P - \frac{1.2}{M} \cdot \tilde{R}_c$ (26)

(3) $P' = \alpha \cdot \tilde{R}_c + \frac{1.2}{M'} \cdot \tilde{R}_c$ (27)

(4) L' 同1各步, 式中带“'”记号表示改动后新的参量。

4. 求已知管 M、L 与 P 关系。

(1) 给定 P 求 L, 同 3-(1)(2)(4) 各步;

(2) $M = \frac{1.2 \tilde{R}_c}{P - \alpha \tilde{R}_c}$ (25)

结 语

本文导出之经验公式, 形式简单, 便于从事像管设计工作者记忆和使用。作者对手头现有管型进行多次试算, 证明上述经验公式与实际尺寸或用电子计算机求解电子轨迹比较, 具有一定的准确程度。对实际像管设计和为电子计算机提供初始数据, 均有实用价值。

就理论而言, 像管电子光学参量之间的关系取决于电位分布, 不能用一个简单的数学公式来表达。本文提出的经验公式是在一定假设条件下, 得到的半经验公式。因而它的正确性和应用范围都有较大的局限性 (如不适用平面阴极, 双圆筒结构的阴极透镜)。但对常见近似于同心球结构的像管, 确有相当广泛地实用价值。

参 考 文 献

- 1 成都电讯工程学院:《电子光学》人民教育出版社1961。
- 2 Л. А. Жигарев: «Электронно-лучевые приборы»1965。
- 3 P. Schagen, H. Bruining and J. C. Francken: «Philips, Res. Rep» Vol. 7(1952)
- 4 北京工学院:《夜视器件的电子光学》1977。