

# 像管电子光学系统线扩散函数的计算的改进

郭建<sup>1</sup>, 丁晟<sup>2</sup>

(1. 装甲兵工程学院 技术保障工程系, 北京市 100072; 2. 装甲兵工程学院 控制工程系, 北京市 100072)

**摘要:** 在各种评价像管成像质量的方法中, 调制传递函数是一种重要的评价方法。针对原有静电像管电子光学系统设计软件中子午线扩散函数计算的不足及其对调制传递函数的影响, 对子午线扩散函数的数值计算方法进行改进。对多种典型像管的数值仿真结果表明, 改进后的程序计算的子午线扩散函数更符合实际情况。

**关键词:** 静电像管; 子午调制传递函数; 子午线扩散函数

**中图分类号:** TP312      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2015)04-0333-04

## Meridian Line Spread Function Algorithm of Electrostatic Image Tube Electron Optics System

GUO Jian<sup>1</sup>, DING Sheng<sup>2</sup>

(1. Department of Technical Support Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China;

2. Department of Control Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

**Abstract:** MTF (Modulation Transfer Functions) is a key one of many methods to evaluate the image quality of image tube. In view of the calculation defect of the meridian spread function and its influence to modulation transfer function in the old designing software of electrostatic image tube electron optical system, in the paper the numerical calculation method to the meridian spread function are improved. The data simulation is carried out in different kinds of the image tube. The results show that the meridian spread function with the improved method computed play a better simulation role. And it has a positive effect to evaluate of the imaging and design the image tube.

**Key words:** electrostatic image tube, meridian modulation transfer function, meridian line spread function

## 0 引言

像管是夜视仪的核心部件。在设计、研制和生产红外/紫外/X 射线变像管、微光像增强器、微光摄像管的移像段等各种电子光学成像器件的过程中, 除考虑像管的结构和加工工艺等方面的问题外, 还要考虑像差<sup>[1]</sup>和衍射对像管成像质量的影响, 应尽量减小像差以达到更好的成像效果<sup>[2-3]</sup>。原有的静电像管电子光学系统设计软件计算子午线扩散函数时, 存在部分数值计算结果不够谐调、线扩散函数曲线出现拐点等现象。针对这一问题, 本文对原程序进行了修正和改进, 并对多种红外变像管、二电极和多电极像管进行验算。计算结果表明, 改进后程序计算的线扩散函数及调制传递函数更为谐调和符合实际。

## 1 原始程序的计算方法

对于旋转对称像管系统, 通常采用 $(z, r, y)$ 直角坐标与 $(z, \rho)$ 圆柱坐标(其中 $\vec{\rho} = r\vec{j} + y\vec{k}$ ), 并分别计算理想像面<sup>[5]</sup>(由逸出角为 $72.525^\circ$ 的电子束决定且弥散斑最小的成像面)、高斯像面(由逸出角为 $0^\circ$ 的电子束决定的成像面)和极限像面(由逸出角为 $90^\circ$ 的电子束决定的成像面)上的线扩散函数。为了简化叙述, 以下仅讨论理想像面上轴外子午线扩散函数的计算过程。

假设电子发射的角密度(即角度分布)满足朗伯分布, 初能量分布满足 Beta 分布<sup>[4]</sup>, 则从阴极面上不同物高(即阴极面上电子发射点至轴线的距离)发出、具有不同初能量的电子束, 在子午面上线扩散函数的计算过程为:

1) 设置逸出角 $\alpha$ 、方位角 $\beta$ 的取值范围和增量:  $0 < \alpha < 90^\circ$ ,  $\Delta\alpha = 90^\circ/n$ ,  $n$  为逸出角等分数;  $0 < \beta < 180^\circ$ ,  $\Delta\beta = 180^\circ/m$ ,  $m$  为方位角等分数。

2) 取初能量 $\varepsilon = \varepsilon_{\max}$ , 依次计算具有不同逸出角 $\alpha$ 和方位角 $\beta$ 的电子轨迹在理想像面上的落点 $r$ , 并得到最大值 $r_{\max}$ 和最小值 $r_{\min}$ 。

3) 对电子落点范围 $(r_{\max} - r_{\min})$ 进行 $p$ 等分, 取 $\Delta r = (r_{\max} - r_{\min})/p$ 。

4) 对逸出角 $\alpha$ 、方位角 $\beta$ 和初能量 $\varepsilon$  (范围:  $0 < \varepsilon < \varepsilon_{\max}$ , 增量:  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\max}/l$ ,  $l$  为初能量等分数) 进行循环, 重新计算电子轨迹和落点, 记录落在每个子区间 $\Delta r_i$  ( $i = 1, 2, \dots, p$ ) 内的电子数量, 将其最大值归一化为 100, 即可得到子午线扩散函数曲线 $L(x)$ 。

图 1 为原程序计算的某一像管 (阴极面有效半径为 17 mm, 电子落点范围等分数  $p = 40$ ) 理想像面上, 物高分别为 0 mm、1 mm、3 mm、5 mm、7 mm、9 mm 和 11 mm 的子午线扩散函数曲线, 横坐标为电子落点范围。

## 2 计算方法的改进

由图 1 可知, 子午线扩散函数计算存在两个问题:

①根据电子落点半径的最大值和最小值划分的平均格数计算错误, 导致曲线集中于最大值附近的部分区间内; ②不同物高的子午传递函数的最大值 (对应于主轨迹) 并不都在图形中心, 这样导致子午调制传递函数<sup>[5]</sup>计算出现误差。

分析原程序发现: 在计算子午线扩散函数 $L(x)$ 时, 由于像管电子光学系统的场分布不再具有对称性, 所以应该计算方位角  $0 < \beta < 360^\circ$  (而不仅是  $0 < \beta < 180^\circ$ ) 内的电子落点。

对于等分差值问题的出现是由于在弧矢面计算线扩散函数时, 由于只有  $y$  轴正半轴有数据, 因此将差值等分为 20 份, 但是对于子午面上的计算, 这样的设置显然是不合理的, 因为  $r$  轴正半轴和负半轴都有数据, 因此导致数据均集中在中间的 20 份内, 左右轴各 10 份, 没有电子的轨迹落到离轴较远的 10 份的, 而从上面的计算方法中可以看出, 横坐标中的格是由电子落点的  $r$  坐标确定的, 左右两侧的格分别对应着  $r$  坐标的最大值和最小值, 因此由以上分析可以得知应该有电子的落点落到离轴较远的 10 个格内, 由此可以断定这样的计算是错误的。

改进的方法是将差值等分为 40 份, 重新计算电子的落点, 由计算结果图 2 可以看出, 不同物高对应的曲线形状分布与图 1 差别不大, 但是已有数据分布到离轴较远的格内, 证明这样的改进是合理的。若将

差值等分的份数继续增大, 例如将差值等分为 60 份时, 由于计算量的增大导致计算时间大幅增加, 比较来看, 同样型号的像管差值等分为 60 份时, 程序计算线扩散函数和调制传递函数的计算时间大概是差值等分为 40 份时 4 倍左右, 但是计算结果的精度并没有明显的改进, 因此将差值等分为 40 份是比较合理的。

由图 1 和图 2 可以看出大部分计算数据的中心峰值都不在轴上, 出现这个问题的原因是绘制结果图时以最大和最小值的中点为中心绘制, 并不是以主轨迹的落点或者落点最密集的点为中心绘制的, 得出这样的图有两个缺点, 一是不方便比对不同物高对应曲线的情况, 二是会给调制传递函数计算带来误差。因此这里以主轨迹为图像的中心来绘制结果图, 改进的结果如图 3 所示。图 3 是在原始程序的基础上进行修改的, 从图 3 中可以更加明显的看出所有的数据都在靠近轴的左右各 10 个格内, 而离轴较远的 10 个格内没有任何的落点的数据, 这个结果也证明了上述结论。由图 3 可以看到所有的峰值均集中的图的中心, 这样更便于比较不同物高所得到的数据。

以上两点为在子午线扩散函数计算过程中的改进, 图 4 是将图 2 和图 3 中提出的问题共同修改后的结果, 可以看出, 图中不同物高的所对应的曲线已经基本都以轴线为中心分布, 并且在离轴较远的 10 格内也有数值, 成功地改进了上述的两个问题, 证明以上两点的改进是合理的。但是这样的改进也存在这一些不足之处, 从图 4 中可以看到, 物高为 9.00 mm 时对应的子午线扩散函数的峰值依然偏离了轴线, 由此可得主轨迹的电子轨迹计算<sup>[6-7]</sup>和落点计算还存在一定的问题, 但是大部分的计算结果还是比较精确的。这点不足将在下步工作中进行改进<sup>[8-9]</sup>。

图 5 和图 6 分别为某型四电极变倍管使用原始程序和改进后程序计算得到的计算结果曲线, 从图 5 中可以看出, 不同物高对应的曲线峰值基本上都在中心, 但是对于过于集中在靠近轴线的 20 个格内, 显然是存在问题的, 使用改进后的程序计算得到的结果曲线中可以看出这个问题得到了明显的改善。

图 7 和图 8 分别为某型一代微光管使用原始程序和改进后程序计算得到的计算结果曲线, 从图 7 中可以明显看出不同物高所对应的线扩散函数计算结果曲线的峰值比较分散, 不在中心上, 在改进后的程序中这个问题得到了很好的修正。

图 9 和图 10 分别为某型红外变像管使用原始程序和改进后程序计算得到的计算结果曲线, 在图 9 中既存在曲线峰值不在绘图中心的问题, 有存在曲线分

布集中在靠近轴线的 20 个格内的问题,其中分布较分散的是物高为 0 时计算得到的线扩散函数,即轴上线扩散函数计算结果曲线,由于在程序中轴上和轴外线扩散函数的计算公式不同,轴上线扩散函数计算公式比轴外线扩散函数计算公式更加简化,因此为节约

计算时间,采取单独计算的方式,由此可见并不存在曲线分布差值等分份数错误的问题。对于其他曲线存在的问题在图 10 中采用改进后的程序计算得到了很好的改善。

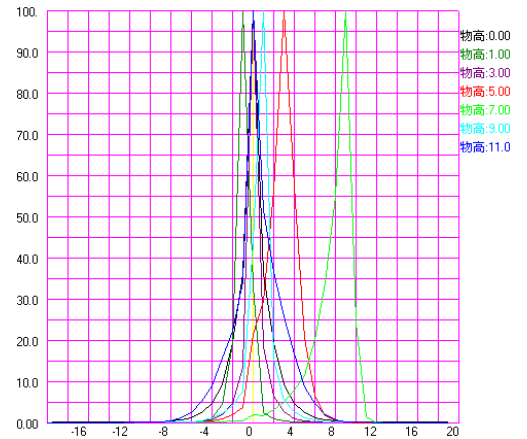


图 1 原程序计算理想面子午线扩散函数结果  
Fig.1 The ideal image meridian spread function calculation result of the original program

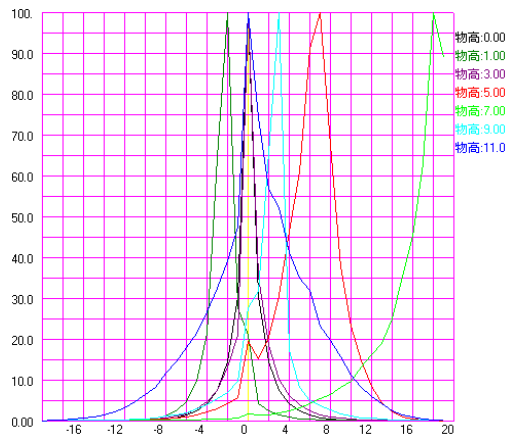


图 2 改进问题一后的计算结果  
Fig.2 The calculation result after improving the first question

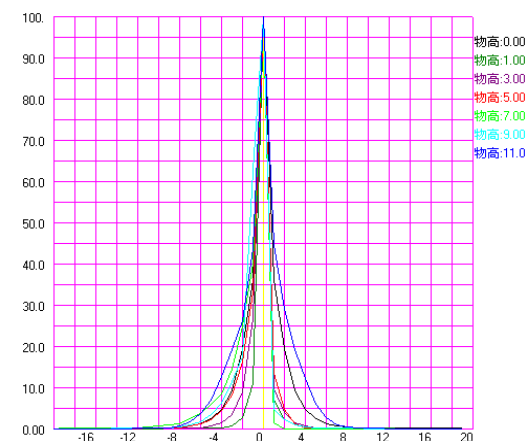


图 3 改进问题二后的计算结果  
Fig.3 The calculation result after improving the second question

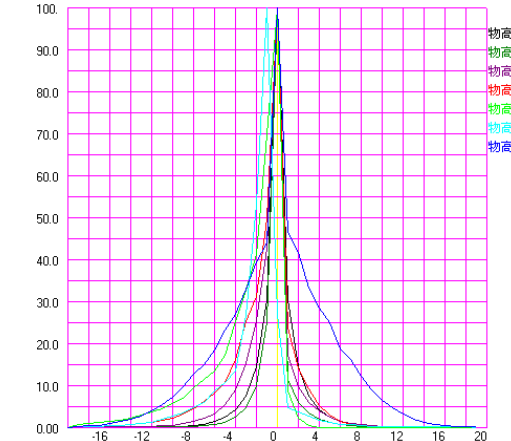


图 4 同时改进问题一和问题二后的计算结果  
Fig.4 The calculation result after improving the first and the second question

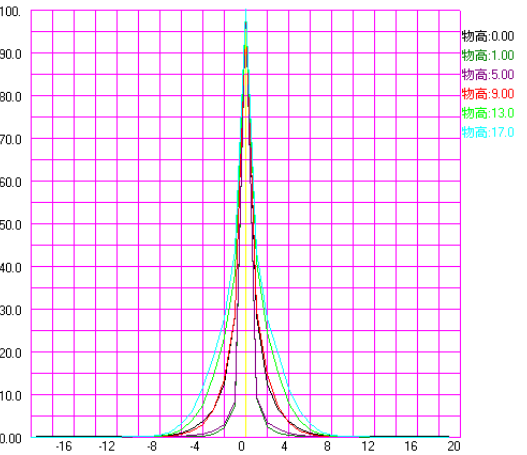


图 5 四电极变倍管使用原程序计算结果  
Fig.5 Four electrodes image converter tube calculation result using the original program

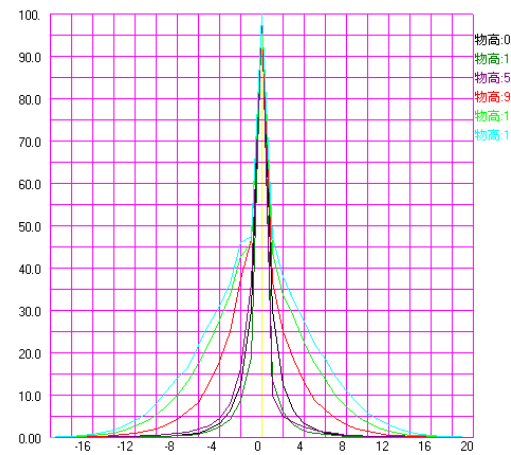


图 6 四电极变倍管使用改进后程序计算结果  
Fig.6 Four electrodes image converter tube calculation result using the improvement program

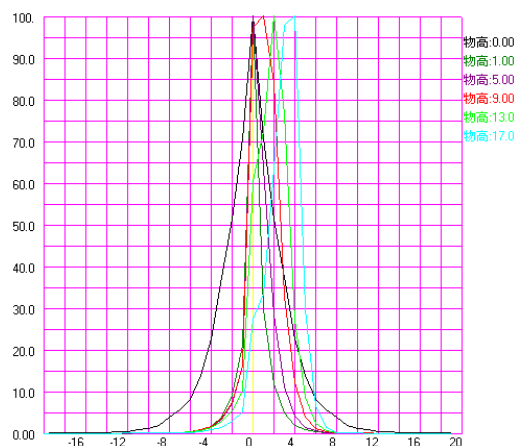


图7 一代微光管使用原程序计算结果

Fig.7 Generation shimmer tube calculation result using the original program

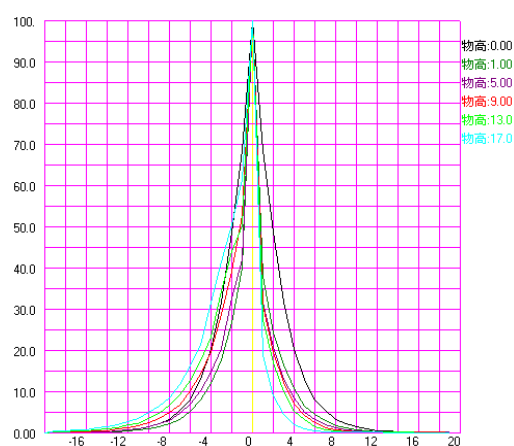


图8 一代微光管使用改进后程序计算结果

Fig.8 Generation shimmer tube calculation result using the improvement program

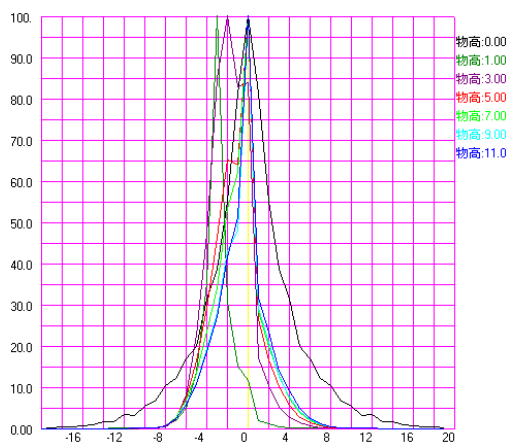


图9 红外变像管使用原程序计算结果

Fig.9 Infrared image converter tube calculation result using the original program

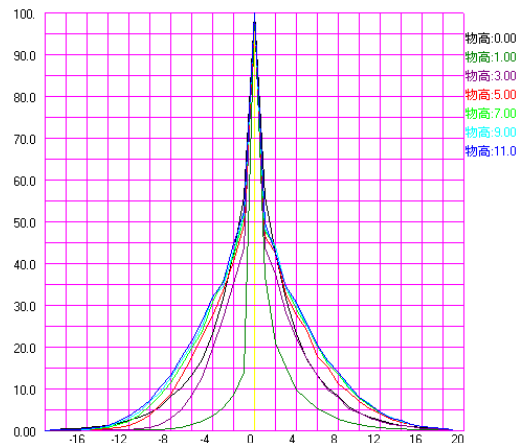


图10 红外变像管使用改进后程序计算结果

Fig.10 Infrared image converter tube calculation result using the improvement program

以上分别使用了某型四电极变倍管、某型一代微光管和某型红外变像管的原始计算程序结果与改进后的程序的计算结果相比较,可以明显看出,本文提到的两个在像管电子光学系统子午线扩散函数中存在的问题在改进后的程序计算结果中得到了很好的改进。

### 3 结束语

本文简述了子午线扩散函数的计算方法,并改进了计算的过程中存在的不足,在计算的过程中,子午线扩散函数存在格数计算不准确和计算的峰值不在轴上,绘图中心选择不合理的问题。对以上的2个问题进行了改进并做了对应的实验,实验验证了结果的合理性,在文章中还提出了子午线扩散函数计算的过程中依然存在的问题并初步分析了问题出现的原因。

### 参考文献:

- [1] 周立伟,公慧.基于渐近解的成像电子光学近轴横向像差理论及其验证[J].电子学报,2011,39(3):619-625.
- [2] 冯炽焘,郑玉才,方二伦,等.像管的设计与分析[M].北京:国防工业出版社,1993:125-130.
- [3] 华中一,顾昌鑫.电子光学[M].上海:复旦大学出版社,1991:419-422.
- [4] 周立伟,宽束电子光学[M].北京:北京理工大学出版社,1993.
- [5] 陶禹,张智谔,郭新军.像管中电子轨迹的运动方程法求解[J].红外与激光工程,2003,32(2):191-194.
- [6] 章慧贤.光学传递函数的发展及其应用[J].光学仪器,1996,18(4):28-31.
- [7] 陈自宽,翟宏琛,母国光.光电成像系统中的光学传递函数[J].光学技术,1998(1):57-41.
- [8] 张良忠,周立伟,金伟其.静电宽束曲轴二级近似轨迹的分析与计算[J].北京理工大学学报,1998,18(1):31-35.
- [9] 张良忠,金伟其,周立伟.静电像管均方根半径的计算及像质评价[J].北京理工大学学报,1998,18(3):331-335.