

# 磁聚焦问题的探究

石文焘

指导教师：徐春凯

## 目录

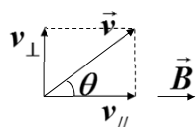
### 一、长直螺线管

- 1-1、理论推导
- 1-2、matlab模拟图像

### 二、载流圆线圈

- 2-1、理论推导
- 2-2、Matlab模拟平行电子束情形
- 2-3、参量因素分析模拟（初速度，离轴线距离）
- 2-4、发散电子束情形讨论
- 2-5、极限情况讨论

## 1-1 → 长直螺线管中电子运动的理论推导

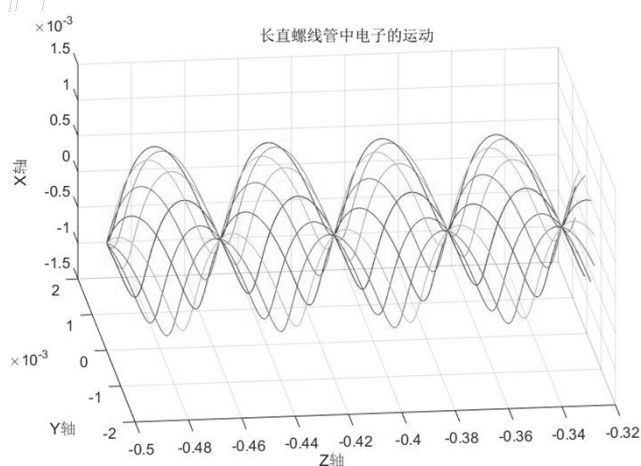


等距螺旋运动：

$$\text{螺距: } h = v_{||}T = \frac{2\pi m}{qB} v \cos \theta$$

$$\text{回旋半径: } R = \frac{mv_{\perp}}{qB} = \frac{mv}{qB} \sin \theta$$

## 1-2 → 长直螺线管中电子运动的模拟



参数:  $B=5\text{mT}$   
 电子能量:  $100\text{eV}$  ( $6 \times 10^6\text{m/s}$ )  
 发射极角:  $5^\circ$   
 发射方位角:  $0 \sim 360^\circ$   
 (间隔:  $30^\circ$ )  
 总电子数: 12  
 发射点:  $-0.5\text{m}$



理论值:  $0.043\text{m}$   
 模拟值:  $0.042\text{m}$

2-1 → 载流圆线圈磁场中电子运动理论推导

✓近轴条件推导

实际应用中，常用载流短线圈磁场进行磁聚焦，对于短线圈，横截面尺寸比线圈宽度大很多，近似看成载流圆线圈，等效电流为NI。  
(认为在距离线圈平面5R之外磁场为零，可证明这种近似误差小于0.1%)

由毕奥萨伐尔定律，半径为R线圈在轴线上产生的磁场为：

$$B_z = \frac{\mu_0 NI}{2R \times (1 + \frac{x^2}{R^2})^{3/2}}$$

在近轴条件下，粒子通过短线圈产生的薄磁透镜时Z轴速度可以近似认为相等，则可以得到粒子在通过磁透镜后获得的径向动量为：

$$P_r = -\frac{q^2 r}{4mv_z} \int_{-5R}^{5R} B_z^2 dx$$

焦距为：

$$f = r \times \frac{v_z}{v_r} = -r \times \frac{P_z}{P_r} = \frac{16m^2 v_x^2 R}{109\mu_0^2 q^2 N^2 I^2}$$

2  
-  
2  
模拟过程

2-2.1 构建磁场模型

- 利用积分函数对空间给定点的磁场进行积分
- 计算精度取决于求解步长

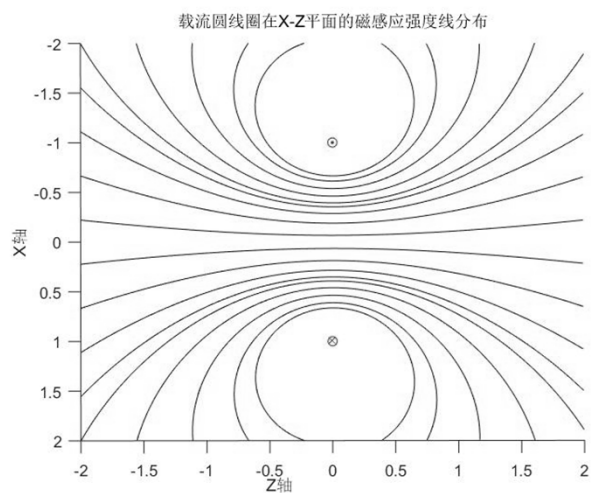
2-2.2 求解电子运动

- 利用ode45函数求每个电子运动的数值解

2-2.3 分析参数的影响

2-2.1

## 磁场构建



### 线圈参数

半径: 104mm

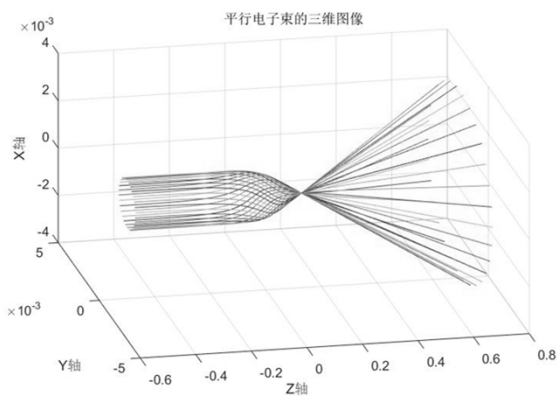
匝数: 100

电流: 1A

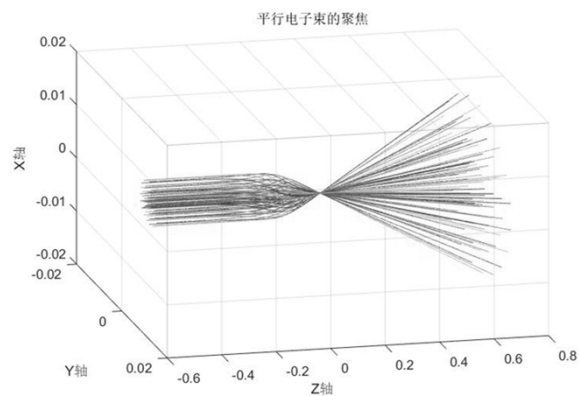
(后续模拟电子运动中磁场参数均为上述)

2-2.2

## 平行电子束的轨迹模拟



参数:  $v_z = 6 \times 10^6 \text{m/s}$  (100eV)  
 $r = 1 \text{mm}$   
 $z_0 = -0.5 \text{m}$



参数:  $v_z = 6 \times 10^6 \text{m/s}$  (100eV)  
 $r = 1 \text{mm}, 2 \text{mm}, 3 \text{mm}, 4 \text{mm}$   
 $z_0 = -0.5 \text{m}$

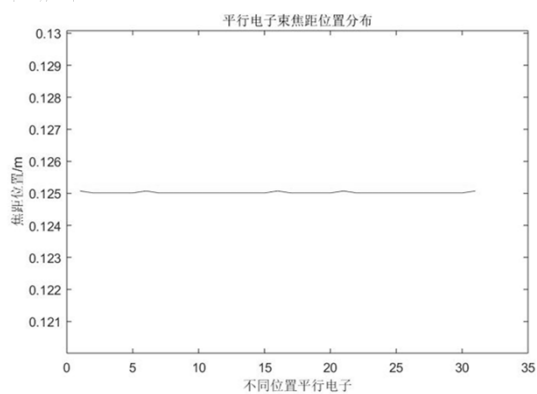
## 模拟中物理量的定义

焦距：运动过程中距离z轴最近的点的z坐标

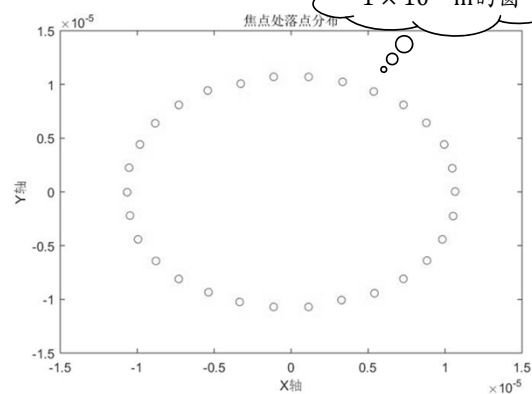
靶图像：焦平面上电子的位置分布图

像的大小：焦平面上电子位置到z轴距离

## 平行电子束焦距分布



## 平行电子束靶图像



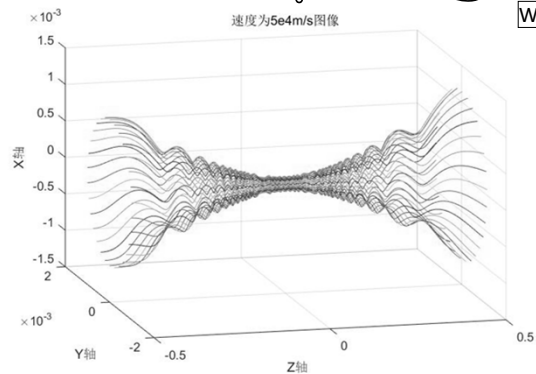
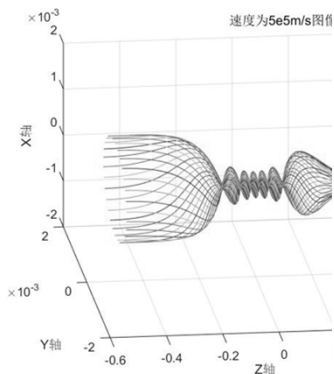
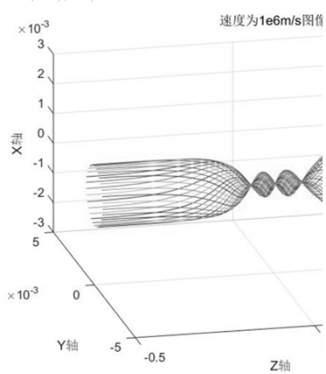
参数： $v_z = 6 \times 10^6 \text{ m/s}$  (100eV)  $z_0 = -0.5 \text{ m}$   
 发射点离轴线距离  $r = 1 \text{ mm}$ ，在 X-Y 平面上  
 每  $12^\circ$  放一个点，共 31 个发射点

2-2.3

## 电子速度对聚焦的影响

### 速度过小会怎样?

随着速度变小，  
汇聚次数增多

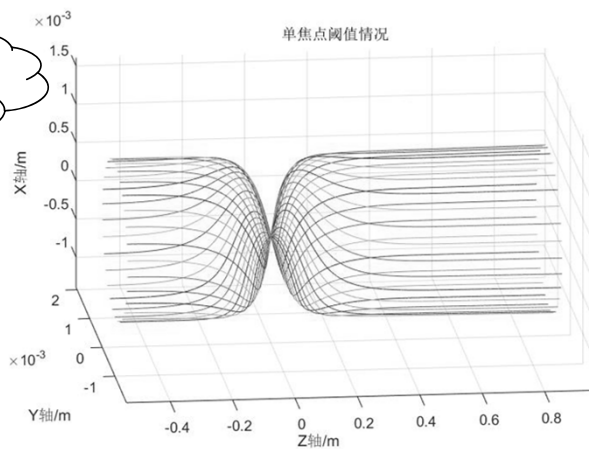


WU7

参数:  $z_0 = -0.5\text{m}$   
 发射点离轴线距离  $r = 1\text{mm}$ , 在X-Y平面上每  
 $12^\circ$ 放一个点, 共31个发射点

## 单焦点极限情况

单焦点速度阈值:  
 $2.32 \times 10^6 \text{m/s}$



平行入射聚焦在  
 原点后再平行出射

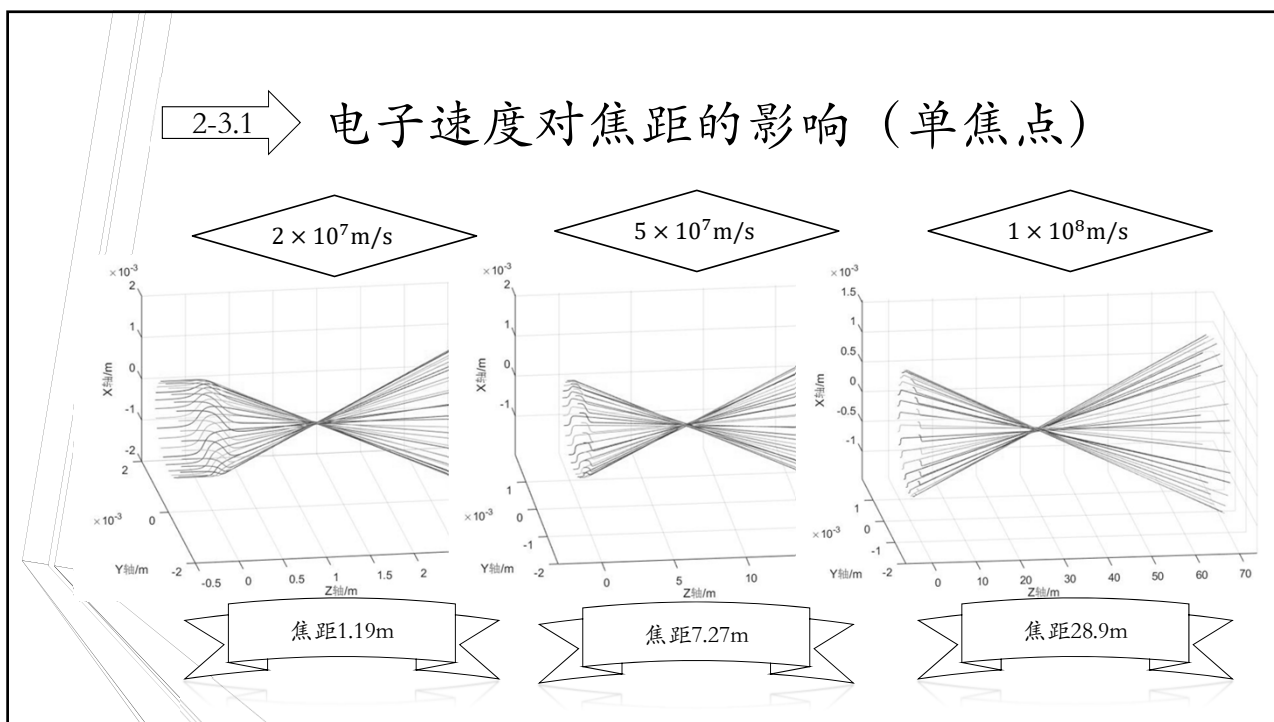
## 幻灯片 11

---

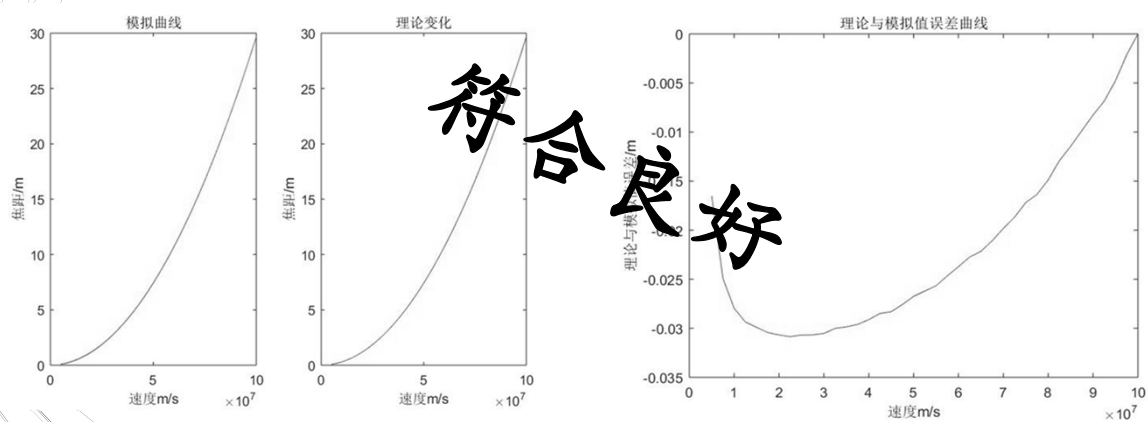
**WU7** 发射图没做出来。。

Windows User, 2018/6/21

### 2-3.1 电子速度对焦距的影响 (单焦点)



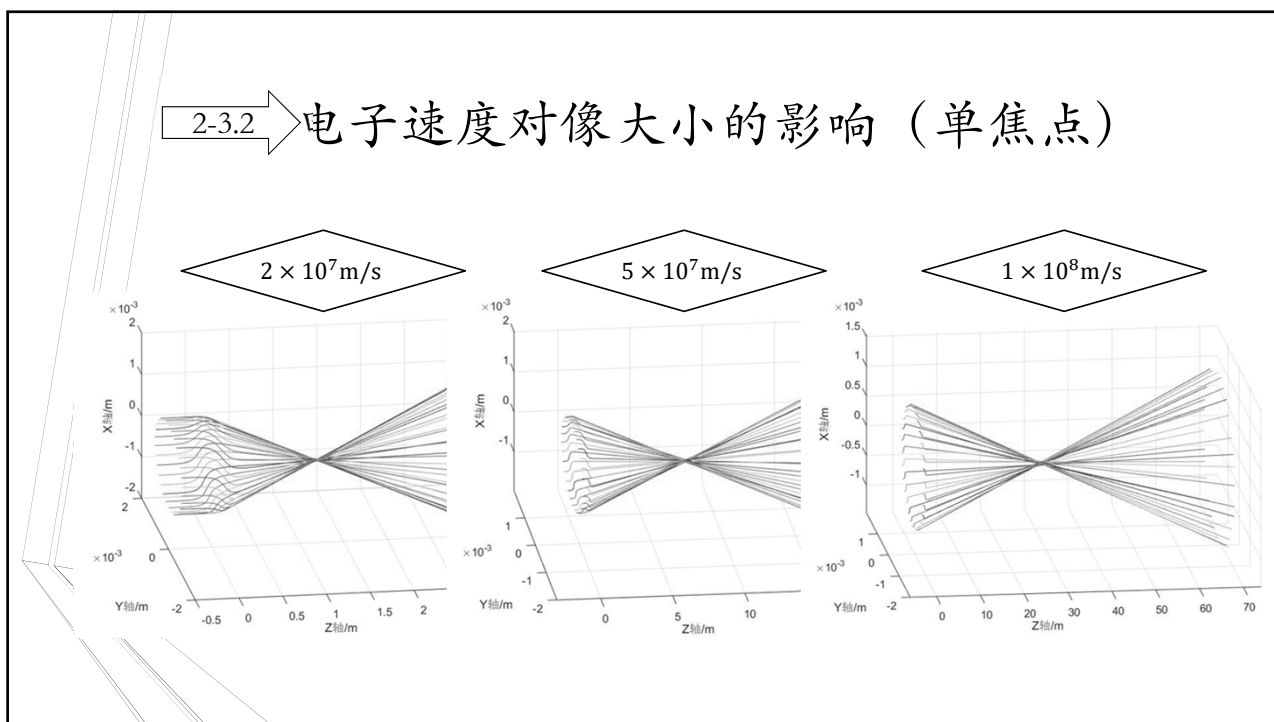
### 电子速度对焦距的影响 (单焦点)



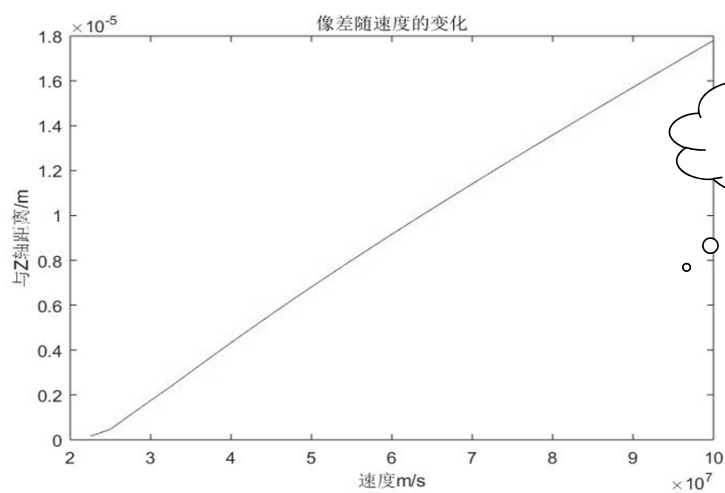
均未考虑相对论效应



### 2-3.2 电子速度对像大小的影响 (单焦点)



### 电子速度对像大小的影响

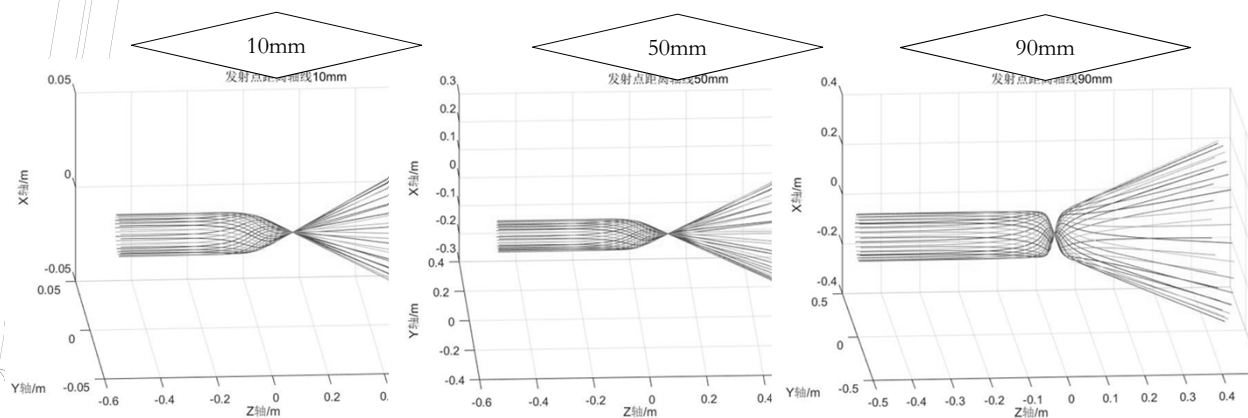


# 小结

- 一 • 在一定区间内，焦距位置随速度变化与理论预测规律一致
- 二 • 在一定区间内，速度越大，像越大。

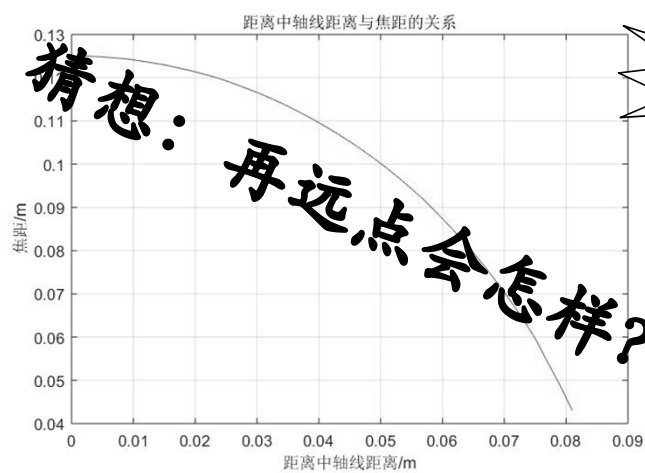
2-3.3

## 电子束大小对聚焦的影响

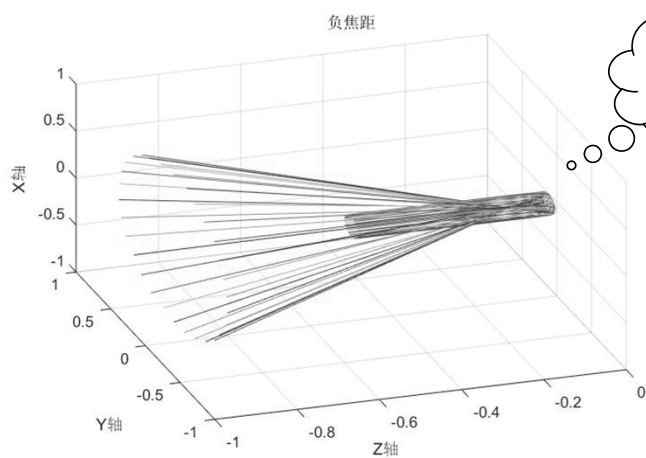


参数:  $v_z = 6 \times 10^6 \text{ m/s}$  (100eV)  $z_0 = -0.5 \text{ m}$   
在X-Y平面上每 $12^\circ$ 放一个点, 共31个发射点

## 电子束大小与焦距关系

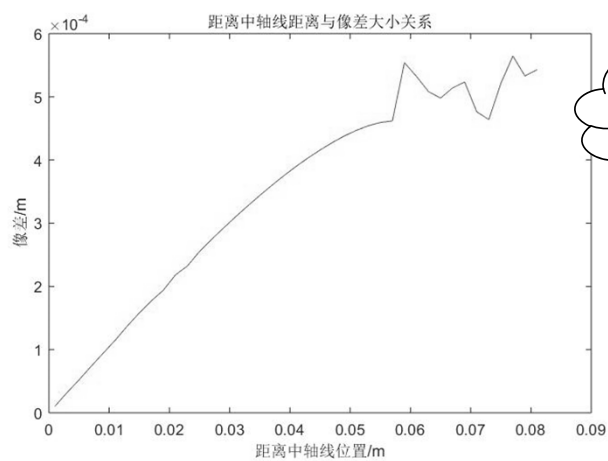


## 电子距离轴线100mm时的模拟轨迹 (线圈半径104mm)



2-3.4

## 入射电子与轴线距离对像大小的影响



入射离轴线越远  
像越大

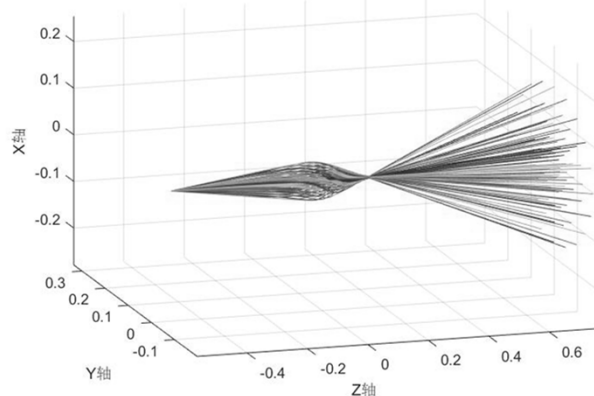
## 小结

- 一 • 在一定区间内，短线圈的汇聚作用可用近轴近似。
- 二 • 当电子距离轴线较远时，焦距与理论值会出现明显的偏差。
- 三 • 当电子距离轴线很远而十分靠近载流线圈时，会出现负焦距情况，即电子被反弹。
- 四 • 在一定区间内，入射电子离轴线越远像越大

2-4.1

## 点发射电子束的轨迹模拟

弥散角为5度时的三维图像



参数:

$$V_0 = 6 \times 10^6 \text{ m/s}$$

发射极角  $1^\circ \sim 5^\circ$  间隔  $1^\circ$ 发射方位角  $0^\circ \sim 360^\circ$ , 间隔  $30^\circ$ 

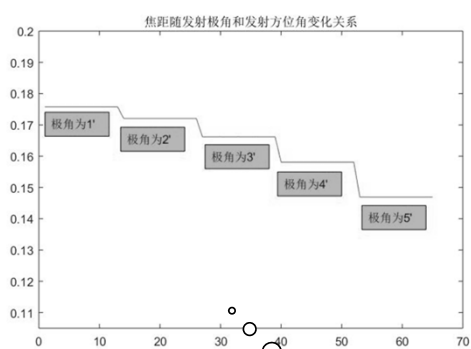
发射电子数 60

起点: -0.5m

2-4.2

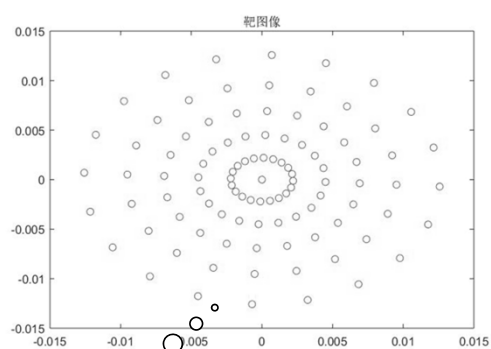
## 点发散电子束焦距和靶图像讨论

焦距随极角和方位角变化



极角越大, 焦距越小

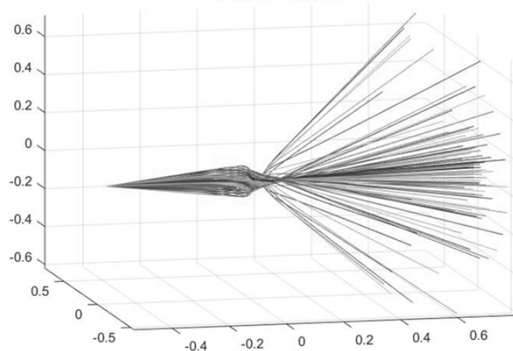
焦距处靶图像



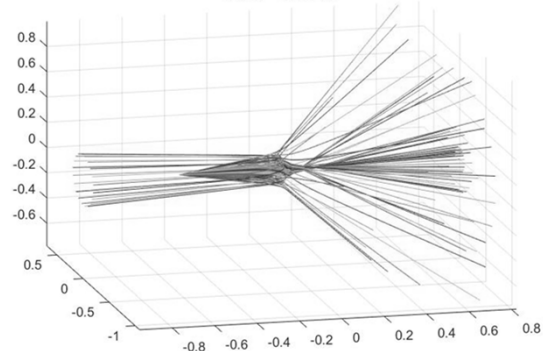
极角越大, 像越大

## 发射极角过大的情况

弥散角为10度的图像



弥散角15度的图像

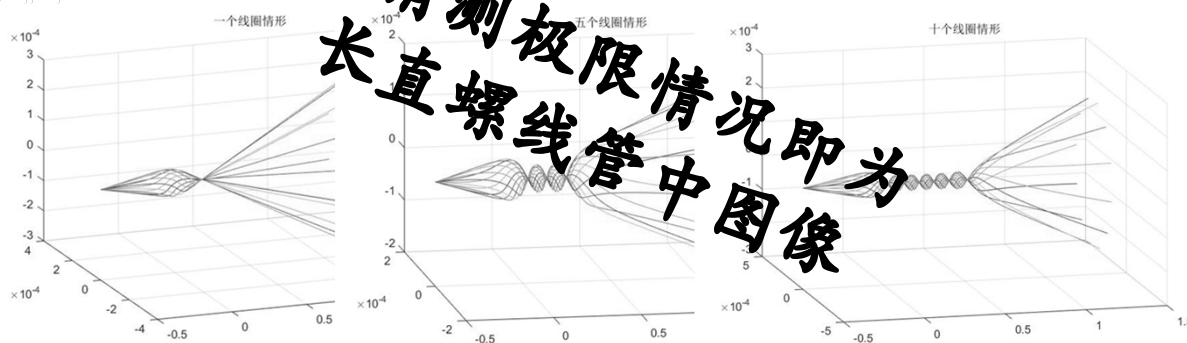


## 小结

- 一 • 对于从某点以一定弥散角发射的电子束来说，在一定的角度内有较好的汇聚作用。
- 二 • 当角度变大时，一些电子不能被汇聚
- 三 • 当角度再变大时，一些电子将被反弹。

2-5

平行电子束在多个线圈中的聚焦情况

参数:  $N=100$  电子能量:  $100\text{eV}$  线圈之间距离 $50\text{mm}$ 

## 总结

长直螺线管可对电子进行周期性聚焦

短载流线圈在一定范围内可对电子进行一次聚焦, 又称磁透镜

分析了各项参数对聚焦效果(焦距, 像大小)的影响

多线圈逼近

# 谢谢观看!

## 参考文献

- [1] 韩运侠,朱景成.磁透镜焦距的计算[J].洛阳师范学院学报,2007,(5):53-54. DOI:10.3969/j.issn.1009-4970.2007.05.017.
- [2] 廖昱博,龙井华,蔡厚智,等.双磁透镜与单磁透镜分幅变像管空间分辨特性的比较[J].红外与激光工程,2017,(5):176-181. DOI:10.3788/IRLA201746.0520002.
- [3] 王玉梅,孙庆龙.利用MATLAB分析圆环电流的磁场分布[J].长春师范学院学报(自然科学版),2010,(1):20-23. DOI:10.3969/j.issn.1008-178X-B.2010.01.008.
- [4] 徐胜男,任学智,位浩杰,等.基于MATLAB的载流圆环磁场分布的动态仿真[J].大学物理实验,2016,(3):96-102.