

# 基于 CT 算法的旋转多丝靶二维束剖面测量

俞能杰<sup>1)</sup> 唐传祥 郑曙昕 李泉凤 龚克

(清华大学工程物理系加速器研究室 北京 100084)

**摘要** 介绍了一种用于低能电子束的基于 CT 算法的二维束剖面测量方法及其初步实验结果. 该束剖面测量方法首先利用多丝靶进行旋转获得不同角度下的一维束剖面信息, 然后采用 CT 算法对这些信息进行处理重建出二维束剖面. 本文对该束剖面测量方法的原理进行了详细分析, 并通过实验初步验证了该束剖面测量方法的可行性.

**关键词** CT 旋转多丝靶 束剖面 电子枪

## 1 引言

发射度是衡量加速器性能的一个至关重要的指标, 其主要决定于注入器(如电子枪)的初始发射度. 因而能准确获知注入器的初始发射度具有重要意义. 发射度的测量可以通过束剖面的测量来间接实现. 可见, 尽可能全面地获得注入器束剖面的真实信息, 是束测研究的一项重要任务. 本文提出了一种用于低能电子束的基于 CT(Computer Tomography) 算法的旋转多丝靶二维束剖面测量法, 对测量原理进行了详细介绍, 并在清华大学工程物理系加速器研究室电子枪束流测量实验台上设计了相应的实验装置对该方法进行了初步验证.

目前, 实际应用中的束剖面测量方法主要有: 荧光屏法、直接轰击法、法拉第筒阵列法和二次电子法等<sup>[1]</sup>, 而当前研究比较多的是应用于高能领域的可以取得较高时间分辨率的光学法, 如切伦科夫辐射(CR)<sup>[2]</sup>, 渡越辐射(TR)<sup>[3]</sup>等. 在常用的多丝靶法基础上, 我们提出了一种用于低能电子束的二维束剖面测量方法——基于 CT 算法的旋转多丝靶二维束剖面测量法. 该测量方法从 CT 成像原理中得到启示, 在多丝靶测量的基础上, 引入旋转机构, 对多丝靶进行旋转获得不同角度下的多组一维束剖面信

息, 然后采用 CT 算法对这些信息进行处理重建出二维束剖面分布. 其优点在于可以直观地给出束流二维横向密度分布, 与传统地多丝靶法相比, 具有较好的空间密度分布. 其缺点(也是其系统误差之一)在于用于 CT 算法重建的各个角度的一维信息获取于不同时刻的束流, 无时间分辨率可言.

## 2 测量原理

CT, 即计算机断层扫描技术, 是利用一维断层投影数据重建出二维断层图像的方法, 广泛的用于医学、天文学、工业无损检测、地质勘探等领域<sup>[4]</sup>. 其基本思想是: X 射线穿过吸收系数不同的物体后, 其强度变化是不一样的, 这个强度的变化包含有物体吸收系数分布的信息, 若能提取这些信息就可以实现对物体内部断层的成像. 投影定理和 Radon 变换给出了由一维投影数据重建二维断层图像的数学基础及基本实现方法<sup>[4]</sup>.

用多丝靶测束剖面时(见图 1), 对于低能电子束, 丝上得到的以吸收电荷电流为主. 电子束打到金属丝上, 丝上电流信号与丝上单位长度入射电荷之和成正比:

$$I = \int_L Q dl / t = \int_L q dl, \quad (1)$$

2004-07-13 收稿

1) E-mail: snj02@mails.tsinghua.edu.cn

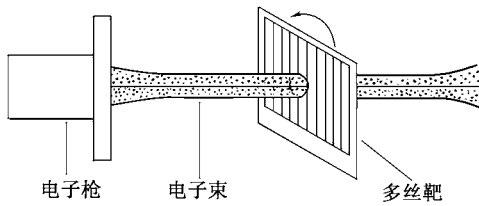


图 1 旋转多丝靶测束剖面原理图

其中  $I$  为丝上的电流,  $Q$  为单位长度入射的电荷量,  $l$  为丝的长度,  $t$  为测量时间,  $q$  为丝上单位长度单位时间内入射的电荷量。

可见丝上电流  $I$  的大小包含有束剖面的分布信息。若将束剖面类比为待测断层,金属丝类比为 X 射线,对多丝靶进行旋转,那么整个测量系统就类似一台 CT。因此,基于 CT 算法的旋转多丝靶二维束剖面测量法的测量原理如下:在一定角度下,用丝间距为  $D$  的多丝靶测得一组投影数据;然后旋转一个步进角度  $\Delta\theta$ ,测得另一组投影数据。依次类推,旋转过  $180^\circ$  后就可以得到一次重建所需的投影数据。再用 CT 算法就可以重建出二维束剖面分布。

根据投影定理,束剖面分布可以无失真重建,但实际中,  $D$  和  $\Delta\theta$  不可能做得无穷小,故重建图像分辨率决定于  $D$  和  $\Delta\theta$ 。重建图像的最高空间频率  $B = (2D)^{-1}$  [4]。基于 CT 算法的旋转多丝靶束剖面测量法,可以通过设计合适的机械机构和多丝靶使  $D$  和  $\Delta\theta$  足够小,从而令空间分辨率达到较高的要求。

### 3 测量方法模拟分析

采用基于 CT 算法的旋转多丝靶测二维束剖面,有两方面的问题需要考虑:一是电子束打的多丝靶上,产生的二次电子会对丝上信号产生影响;二是  $D$  和  $\Delta\theta$  的选择会影响束剖面的重建质量。对以上问题进行了计算机模拟分析。

#### 3.1 二次电子发射对多丝靶丝上电流信号的影响

电子束与金属丝相互作用,会产生二次电子。根据电荷守恒定律,金属丝上测得的电流  $I_w$  与入射电子、二次电子发射形成的电流  $I_0, I_{se}$  具有如下关系:

$$I_0 = I_w + I_{se} = I_w + \alpha \cdot I_0, \quad (2)$$

$$I_w = (1 - \alpha) \cdot I_0 \propto I_0,$$

其中  $\alpha$  是二次电子发射系数。从式(2)可以看出丝上吸收电流与入射电流成正比,多丝靶测量可以得

到束剖面相对分布,若能知道具体的  $\alpha$  值,就可以得到束剖面的真实分布。

但是,丝上发射的部分二次电子会被邻近丝吸收,从而影响各丝上电流信号的独立性。若把这一点考虑进去,丝上测得电流应由式(3)来表示(其中  $I_{nse}$  为丝上吸收的来自邻近丝的二次电子电流)。

$$I_w = I_0 - I_{se} + I_{nse}, \quad (3)$$

$I_{nse}$  的大小主要与丝直径  $d$  和丝间距  $D$  有关。于是建立了一个理想模型(见图 2)对此进行分析。该模型假定:入射电子束单一能量、均匀分布;多丝靶上丝为圆柱形,与入射电子束相互垂直;打到邻近丝上的二次电子全被吸收。分析的主要依据是以下两个关系式[5]:

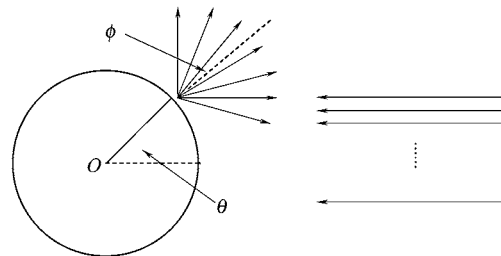


图 2 二次电子影响分析模型

(1)初级电子入射角度与二次电子发射系数之间的关系:

$$\alpha = Ae^{-B\cos\theta}, \quad (4)$$

其中  $\theta$  为初级电子束与入射表面法线之间的夹角 ( $A$  与  $B$  是决定于入射电子的能量和入射表面的常数)。  $\theta = 0$  时的  $\alpha$  为电子束垂直入射时发射系数。

(2)二次电子发射数目与二次电子发射角度之间的关系:

$$\Delta N = NP(\phi)\Delta\phi = N\cos\phi \cdot \Delta\phi, \quad (5)$$

式中  $N$  为每秒内发射出的二次电子数,  $\phi$  为二次电子与入射表面法线之间的夹角,  $P(\phi)$  为  $\phi$  角度下的二次电子角分布系数,服从余弦分布。

模拟分析时,用单根丝上吸收邻近丝的二次电子占丝上总的吸收电子的比率  $\eta$  来衡量二次电子对丝上信号独立性的影响程度,定义如下式(其中  $q_0, q_{se}, q_{nse}$  分别表示为单根丝上单位时间内入射电子数、发射的二次电子数,吸收的来自邻近丝的二次电子数):

$$\eta = \frac{I_{nse}}{I_0 - I_{se} + I_{nse}} = \frac{q_{nse}}{q_0 - q_{se} + q_{nse}}. \quad (6)$$

实验中待测电子束能量为 10keV,多丝靶上金

属丝为铜丝,其在入射电子能量为 10keV 时二次电子发射系数为 0.5<sup>[6]</sup>. 为了使分析结果接近实际,模拟时均采用上述参数.

图 3 给出了模拟的以  $d$  和  $D$  为自变量的等  $\eta$  曲线图. 从中可以看出:丝直径越小、丝间距越大,  $\eta$  就越小. 在设计多丝靶时,根据需要选定  $\eta$ ,就可以在图中初步确定  $d, D$  取值区域.

此外,在能量为 10keV 时,电子在铜介质中的平

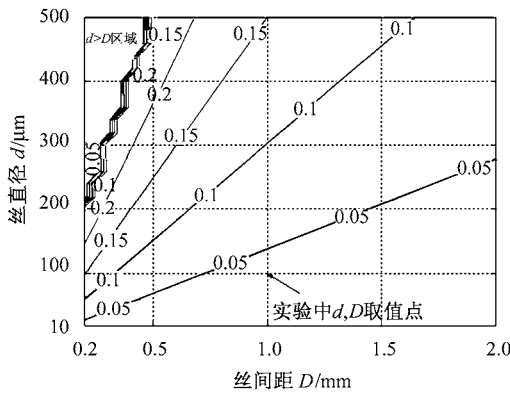


图 3 二次电子吸收与丝直径、丝间距的关系分析图  
吸收邻近丝的二次电子占丝上总的吸收电子的等比率  $\eta$  曲线图

均射程为  $0.4203\mu\text{m}^{[7]}$ . 对于直径大于等于  $10\mu\text{m}$  的丝,透射电子很少,可以不考虑.

### 3.2 束剖面模型仿真重建

旋转多丝靶的丝间距  $D$  和旋转角度步进  $\Delta\theta$  直接影响束剖面的重建质量,建立了一个高斯分布的束剖面模型,在不同参数下对其进行了仿真重建,用以分析  $D$  和  $\Delta\theta$  的影响. 这里采用的 CT 算法是滤波卷积反投影重建算法<sup>[4]</sup>.

束剖面模型依式 (7) 分布,其主要特征为:束剖面为圆形,呈高斯分布;束剖面直径:6mm;束剖面图灰度分布范围:0—1;

$$f(r) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad (7)$$

其中  $A = 3.50419, \sigma = 1.39797, r$  为束剖面径向位置.

用 CT 算法重建所得实验结果见表 1. 从中可以看出,丝间距的大小对束剖面重建的影响很明显,间距越小所重建图像的空间分辨率越高. 旋转步进对束剖面重建的影响相对要小一点,在小于  $\pi/10$  以后,对束剖面重建的就没有明显的影响了.

表 1 丝间距、旋转角度步进对重建结果的影响

旋转角度步进为 $\pi/20$ , 不同丝间距情况下重建结果			
丝间距 2mm	丝间距 1.5mm	丝间距 1mm	丝间距 0.5mm
丝间距为 0.5mm, 不同旋转角度步进情况下重建结果			
旋转步进 $\pi/5$	旋转步进 $\pi/10$	旋转步进 $\pi/20$	旋转步进 $\pi/30$

### 3.3 多丝靶设计参数的选取

在多丝靶设计参数的选取时除了需要考虑上述两方面外,还有两点需要考虑:

一是丝直径  $d$  和丝间距  $D$  的大小直接影响丝上信号的大小. 这里可以用  $K = d/D$  来表征丝上入

射总电流与待测束流总入射电流的比值,显然  $K$  不能太小,同时在满足的  $K$  要求下,应使  $d$  尽可能的大.

二是丝间距  $D$  的大小还直接影响重建图像的最高空间频率  $B = (2D)^{-1}$ . 最高空间频率越高,重建的束剖面的空间分辨率就越高,这就要求  $D$  取值

尽可能的小。

综合分析,根据实际需要,选定  $\eta$ ,  $K$  和  $B$  的范围,在图 3 中就可以找出所需的  $d$  和  $D$  的取值区域。

实验中,设计的多丝靶具体参数取值为  $\eta < 5\%$ ,  $K = 10\%$ ,  $d = 0.1\text{mm}$ ,  $D = 1\text{mm}$ ,  $\Delta\theta = \pi/20$ 。

### 4 初步实验研究

在清华大学加速器实验室的电子枪束流测量实验台上,建立了一个旋转多丝靶束剖面测量装置,对基于 CT 算法的旋转多丝靶二维束剖面测量方法进行初步实验验证。

实验装置如图 4 所示。多丝靶装在距电子枪阳极口 35mm 处,固定在一个旋转机构上,旋转机构由步进电机驱动。多丝靶信号通过前腔体上的真空信号引出口连接到用于信号处理和采集控制的信号采集接口板上,经处理后的信号送入内置于计算机的 AD 采集卡;同时还有一路脉冲信号从电子枪电源引出,连到信号采集接口板上,作为采集与控制的同步信号。整个实验过程由计算机上的控制软件来完成。

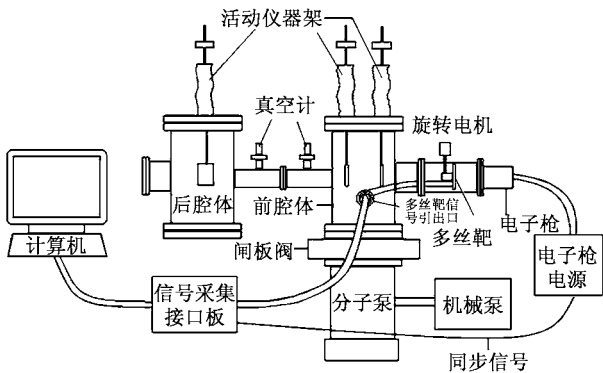


图 4 旋转多丝靶测束剖面测量实验装置示意图

实验中的多丝靶,采用直径为 0.1mm 的铜丝,间距为 1mm,测量窗口为 20mm × 20mm。AD 采集卡选用的是 ADLink 的 PCI9810,10 位 AD,最高采样频率 20MHz,实验中使用的采样率为 10MHz。

利用上述装置,初步获得了如图 5 所示的实验结果。重建图像的实际大小是 20mm × 20mm,所得束剖面直径约为 5mm。其与传统的一组一维测量所得的二维束剖面结果相比(即在垂直与水平两个位置测量,见图 6),可以得到完整的二维分布束剖面,而后者本质上只是两个不同方向一维束剖面的组合。

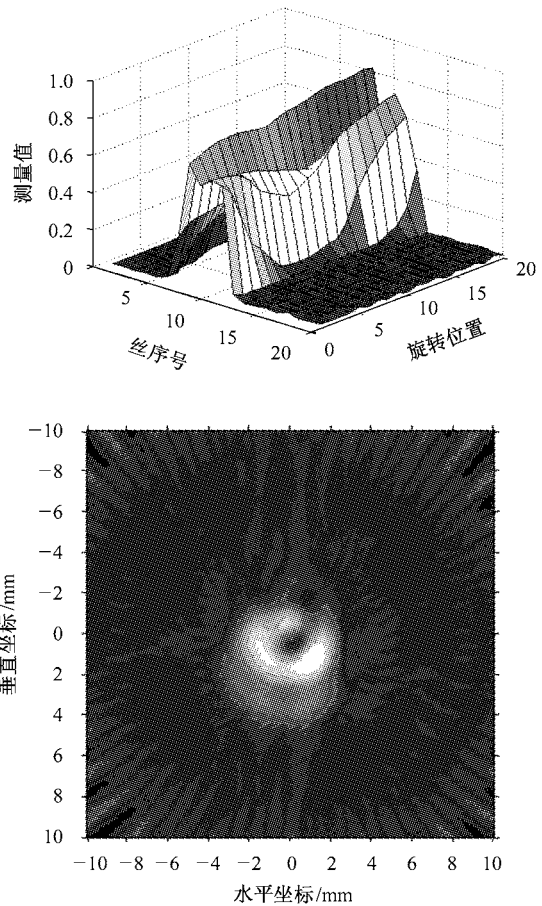


图 5 多丝靶上采集的实验数据和重建的束剖面图

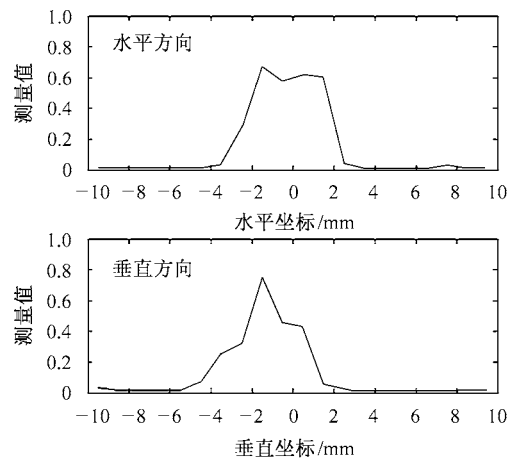


图 6 传统两组一维测量所得束剖面图

### 5 小结

本文在多丝靶法基础上,提出了一种用于低能电子束的基于 CT 算法的旋转多丝靶二维束剖面测量方法,并对此进行了初步实验研究。理论上,利用

该法测得的束剖面具有较好的空间分辨率,并有一定实用价值.初步的实验结果表明了该法的可行性及其较之与传统的两组一维测量的优越性.下一步,我们将改进实验装置,提高测量的空间分辨率,同时深入研究此种测量方法对于高能电子束束剖面

测量的可行性.

作者感谢清华大学工程物理系刘以农教授在 CT 算法方面给予的有益指导.

## 参考文献 (References)

- 1 CHEN Si-Fu, XIA Lian-Sheng, ZHANG Lin-Wen et al. High Power Laser and Particle Beams, 2003, **15**(3):279—282(in Chinese)  
(陈思富,夏连胜,章林文等.强激光与粒子束,2003, **15**(3):279—282)
- 2 CHEN Si-Fu, Ding Bo-Nan, Xia Lian-Sheng et al. High Power Laser and Particle Beams, 2002, **14**(2):317—320(in Chinese)  
(陈思富,丁伯南,夏连胜等.强激光与粒子束,2002, **14**(2):317—320)
- 3 Catravas P, Leemans W P, Esarey E et al. Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference. 1999. **3**:2111—2113
- 4 ZHUANG Tian-Ge. CT Principle and Algorithm. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1992. 31—37, 63 (in Chinese)  
(庄天戈. CT 原理与算法. 上海:上海交通大学出版社, 1992. 31—37, 63)
- 5 SHI Jiu-De. Photoelectric Tube and Electron-Multiplier Phototube. Beijing: National Defense Industry Press, 1981. 101—104(in Chinese)  
(史玖德. 光电管与光电倍增管. 北京:国防工业出版社, 1981. 101—104)
- 6 Joy D C. A Database of Electron-Solid Interactions. USA: EM Facility, University of Tennessee, and Oak Ridge National Laboratory, 2001. 45
- 7 Pages L, Bertel E, Joffre H, Sklavenitis L. Atomic Data, 1972, **4**(1):38

## 2-D Beam Profile Measurement Based on CT Algorithm with Rotating Multi-Wire Target

YU Neng-Jie<sup>1)</sup> TANG Chuan-Xiang ZHENG Shu-Xin LI Quan-Feng GONG Ke

(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** A new method for the 2-D low energy electron beam profile measurement is developed. Based on the CT(Computer Tomography) algorithm, multi sets of data about the 1-D beam profile projections are attained by rotating the multi-wire target. Then a 2-D beam profile is reconstructed from these projections with CT algorithm. The principle of this method is analyzed theoretically in detail and the initial facilities for the experiment with some results are presented.

**Key words** computer tomography, multi-wire target, beam profile, electron gun