



·粒子束及加速器技术·

利用切伦科夫辐射进行电子束发散角及分布概况的测量技术研究*

江孝国, 廖树清, 王远, 李洪, 杨兴林, 张小丁, 杨国君, 魏涛

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 针对切伦科夫辐射特点, 采用厚度尽量小的石英薄片作为转换靶, 并将电子束以切伦科夫辐射角入射转换靶的形式构成一种电子束发散角分布的测量布局, 并基于焦平面成像原理, 研制了相应的电子束发散角光学测量系统。在强流脉冲直线感应加速器上完成了装置研制和测试工作, 显示了电子束发散角分布测量系统可以获得电子束一定方向上的散角分布概况, 测量结果具有一定的可信度, 具有装置结构简单、数据处理难度低及速度快等特点。

关键词: 切伦科夫辐射; 电子束发散角; 焦平面成像; 空间方位角变换

中图分类号: TL53

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220141

Study on measurement technique for electron beam divergence and its distribution based on Cherenkov Radiation

Jiang Xiaoguo, Liao Shuqing, Wang Yuan, Li Hong, Yang Xinglin,
Zhang Xiaoding, Yang Guojun, Wei Tao

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: The simulated results have shown that the direction of Cherenkov Radiation (CR) light in very thin layer can be used to measure electron beam divergence and its distribution directly. The measurement results are reliable if the parameters of devices used in the system are suited for the electron beam. This method is easy in data processing because it has no need to assume electron beam phasic space, beam divergence distribution, charge density distribution model and so on. The electron beam divergence distribution measurement system can be established by way of taking a thin enough quartz slice as the convertor and letting the electron beam incidence enter the convertor with Cherenkov radiation angle. Focus plane imaging method is required to obtain the divergence image of space distribution of electron at the same time. The beam divergence measurement technology and equipment development achieved on high current pulsed linear induction accelerator have proved that the system has the characteristics of simple structure, low difficulty and fast speed of data processing.

Key words: Cherenkov radiation, electron beam divergence, focus plane imaging method, spatial azimuth angle transform

在透明介质中, 当带电粒子的速度大于光在该介质中的速度时, 将产生一种向外的能量辐射, 这种能量辐射被称为切伦科夫辐射^[1], 它的一个最大特点是能量辐射的方向性极好, 并且这种方向性与带电粒子的运动方向相对应, 即辐射能量携带了带电粒子的方向信息。由于辐射能量方向严格地与带电粒子的运动方向相关, 利用这种辐射特性可以进行电子束发散角及其分布的测量^[2]。通过前期大量的模拟工作^[3-4], 已经对基于切伦科夫辐射原理的电子束发散角测量技术有了充分认识。本文采用厚度达到 0.1 mm 的石英片及一定的结构布局, 构成一种转换靶装置, 基于焦平面成像原理^[5]及布局要求, 研制了相应的电子束发散角光学测量系统, 完善了测量系统中关键元件性能设计, 并在强流直线感应加速器上完成了电子束发散角测量系统的测试研究。该测量系统既避开了美国

* 收稿日期: 2022-05-05; 修订日期: 2022-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11375162, 10675104)

联系方式: 江孝国, J_xg_caep@sina.com.

SANDIA 国家实验室测量方案中较高的准直及复杂调节的要求^[2], 还针对在某些测量方案中未考虑电子库仑力的影响问题^[6], 完成的相关模拟工作给出了有效的解决方案, 可以在一定程度上消除库仑力对测量结果的影响, 进一步提升了测量的准确度, 从而使得基于切伦科夫辐射原理的电子束发散角测量技术能够获得实际应用。在强流脉冲直线感应加速器上完成的一系列电子束发散角测量技术研究工作, 显示了该测量技术原理的可行性, 测量系统装置具有结构简单、适用性强的特点, 具有相应的发散角直接测量的能力, 可满足一定精度的测量要求。由于在测量时无需假设束流的相空间、电荷密度分布及模型等条件, 该测量系统具有发散角直接测量的能力, 如果采用双成像法^[7]光学测量原理并结合束斑的测量技术, 则基于上述原理可以发展成为发射度测量的一种比较直接的测量技术, 避免过多的假设及数据拟合对测量结果的影响。本文采用石英薄片作为转换靶, 基于焦平面成像原理, 研制了电子发散角光学测量系统。

1 基于切伦科夫辐射的电子束发散角测量原理

当带电粒子在透明介质中的速度大于光在该介质中的速度时, 带电粒子就会在与其运动方向成一定夹角 θ_C 的锥面内辐射出方向性极好的切伦科夫辐射, 该辐射能量只存在于这个锥面附近很小的区域 $\delta\theta$ 内^[1], 可表示为

$$\cos(\theta_C) = \frac{1}{\beta n} \quad (1)$$

式中: n 为介质折射率, β 为带电粒子的相对论因子, θ_C 称为对应的切伦科夫辐射角。

图 1 显示了一个电子 e_0 垂直入射透明介质后产生切伦科夫辐射的情况以及入射角发生一点偏移后(如电子 e_1)的辐射情况。

对于单个电子而言, 其在透明介质中产生的切伦科夫辐射能量会严格地约束在锥角为 θ_C 的锥面内。在图 1 中, 假设电子 e_0 为“散角为零”的电子, 它正入射到透明介质, 产生 $\delta\theta_0$ 的切伦科夫辐射锥面; 对于与其在入射方向上相差 θ_1 的电子 e_1 , 则产生 $\delta\theta_1$ 的切伦科夫辐射锥面。按照上述结论, 则它们的切伦科夫辐射能量分布的锥面顶角也相差 θ_1 , 因此, 在观察方向上记录切伦科夫辐射能量锥面的发散就可以了解各电子的运动方向。辐射能量的方向性极好, 使得通过测量辐射能量的方向来获取入射电子的方向成为可能; 相同运动方向的电子产生的切伦科夫辐射简单叠加, 不同方向的电子产生的切伦科夫辐射叠加则产生相应的分布, 以一定散角分布的电子束入射到介质中产生的切伦科夫辐射也形成同样的分布, 这就使得从辐射能量分布推算电子束发散角分布成为可能^[2]。

对于电子在介质中的各种作用过程造成的扩展, 文献 [4] 的模拟工作已给出了解决办法。基于上述结论及研究工作, 切伦科夫辐射可用于电子束散角及分布的测量。

2 测量技术原理及系统研制

针对物空间光线方位测量, 测量系统总体上采用一种焦平面成像的光学测量原理^[5,7]。对于能量约 20 MeV 的电子, 在石英片内的切伦科夫辐射角约为 46° , 已大于光线在介质中的全反射角。如果电子正入射石英薄片, 则产生的切伦科夫辐射光将被全反射回介质, 导致后继测量系统无法获得有效测量信号。因此, 需要将全反射的情况避免, 一种非常有用的措施是将电子以切伦科夫辐射角入射到介质中, 从而使在介质内产生的切伦科夫辐射光子几乎可以以零度或者非常小的入射角垂直出射界面, 降低介质的折射效果及产生的展览, 有利于测量数据的反演及提高测量的精度。

沿水平面内的测量系统布局及测试原理如图 2 所示, 这是有效测量剖面部分。假设电子束中“零散角”的电子 e_0 以切伦科夫角入射到石英薄片制作成的转换靶, 其产生的切伦科夫辐射则垂直出射转换靶, 以零角度进入光学测量系统中, 最后成像在焦平面中心位置 O 处, 该处像素获得的照射能量与电子束中零散角的电子数成正比。当与电子 e_0 存在散角为 θ_1 的电子入射到转换靶时, 其产生的切伦科夫辐射也将与电子 e_0 产生的切伦科夫辐射存

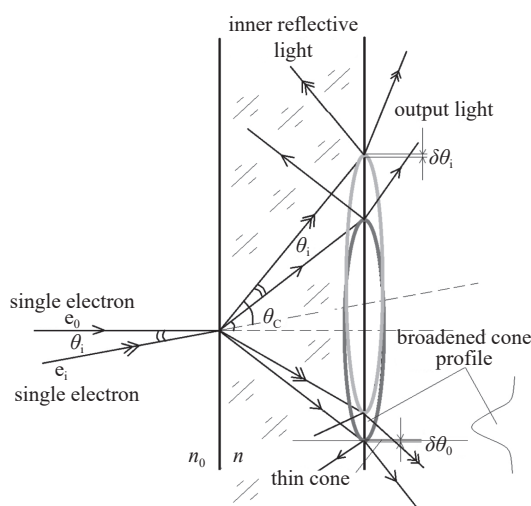


Fig. 1 Cherenkov radiation when a single electron enters a transparent medium

图 1 单电子入射到透明介质的切伦科夫辐射能量分布示意

在 θ_1 的角度偏差, 此时, 其产生的辐射则将以 θ_0 的角度射出转换靶并被后继的光学测量系统成像在焦平面上的 A 处, 同样地, A 处像素获得的照射能量与电子束中散角为 θ_1 的电子数成正比。由此可以由焦平面上的辐射能量分布推算到电子束中的电子散角及分布。

在此过程中, 需要考虑到出射界面的折射效应及出射界面的反向效应的影响。出射界面的折射效应

$$n \sin(\theta_1) = n_0 \sin(\theta_0) \quad (2)$$

出射界面的反射效应

$$R = \frac{\tan^2(\theta_0 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_0 + \theta_1)} \quad (3)$$

式中: n_0 为空气折射率, n 为石英折射率, R 为界面的反射率。如果不做严格要求, 在小角近似的情况下, 可以认为 $R=0$, 以简化计算。

焦平面的散角成像规律

$$d = f \tan \theta_0 \quad (4)$$

其中: f 为光学成像系统的焦距。因此, 由 d 可以推算出辐射光线的出射角度, 并进一步推算出靶内辐射光线的角度, 从而获得电子束散角。

切伦科夫辐射是一个宽波长的能量辐射, 模拟结果显示不同波长的辐射散角展宽是不同的^[4], 需要选取其中任意一个窄波段来进行测量才可以获得较好的测量结果。鉴于切伦科夫辐射中的短波长光线能量占据优势, 滤波片的透过波长宜选择为短波范围内的波长, 考虑到相机的光谱响应, 实际采用了 (450 ± 5) nm 的滤波片。

电子束发散角的测量系统原理及测量布局如图 3 所示。其中的散射吸收体用于吸收各种散射光线, 提高测量信号的有效对比度, 降低其对测量光线的影响。相机采用了 ICCD 相机, 并将其光敏面调节在测量镜头的后焦平面上。由于 ICCD 相机具有很快的快门速度, 使用 ICCD 相机还可以用于研究脉冲电子束的瞬态或关注时刻的性能。

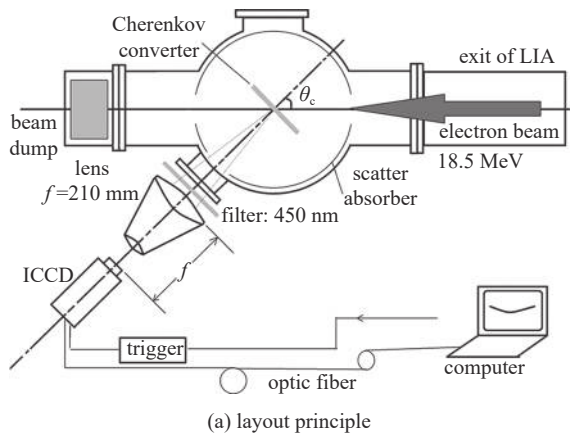


Fig. 3 Beam divergence measurement system and layout

图 3 电子束发散角测量装置布局示意图

3 测量技术的实验研究

基于图 3 所示的测量布局及系统构成, 考虑到电子束发散角的合适性(与测量系统扩展性相当), 在强流脉冲直线感应加速器的出口处进行了相关的电子束发散角测量技术的实验研究及验证。其中测量镜头的焦距为 210 mm、口径为 100 mm, 与靶的距离约 500 mm, 滤波片的透过中心波长为 450 nm, 带宽约 ± 5 nm, 采用 ICCD 相机对辐射光子分布图像进行记录, 相机的快门速度最快为 3 ns, 并可以在较大范围内进行调节, 在实验中 ICCD 相机的快门设置为 30 ns, 且同步于电子束脉冲的中间平顶部分。

针对三种厚度(0.3 mm、0.2 mm、0.1 mm)的石英薄片和一种厚度为 1.8 μm 的 Mylar 薄膜转换靶进行了研究。

在 0.1 mm 厚度的石英薄片靶上的测量获得了预期效果。图 4 是典型的测量图像及对应的电子束发散角及分布的测量结果, 图 4(a) 中的红色框是用于处理的源数据区, 按照横向累加后(短边、降低噪声)的数据曲线如图 4(b) 所示, 其中横坐标为像素, 代表了散角的信息, 可由式(4) 计算切伦科夫辐射光的方向, 从而推算电子束散角及分布。在数据处理时, 理论上需要先获得一幅具有环境光的背景图像, 将其作为扣除散射本底的图像, 但由于快门时间很短, 几乎只能获得一幅本底图像用于扣除, 而经数据处理后得到的分布曲线的方差值为 13.19 mrad, 即电子束发散角方差。

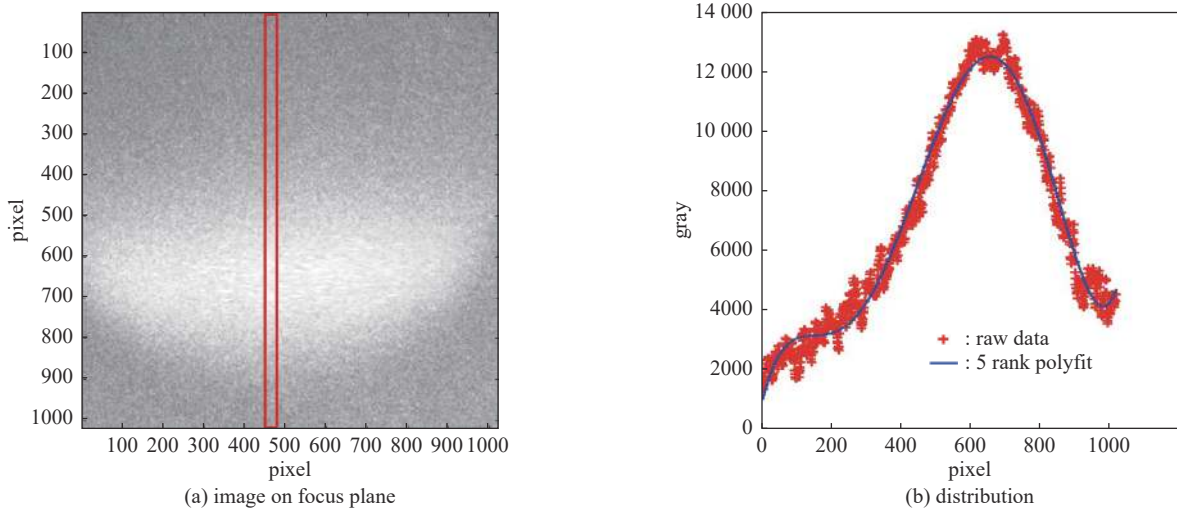


Fig. 4 Typical beam divergence measurement result

图 4 电子束发散角的典型测量结果

4 讨 论

在实验中, 发现 0.2 mm、0.3 mm 的石英薄片对电子束发散角的展宽太大, 又由于测量范围的限制 (ICCD 相机的光敏面较小) 及角度成像时调节不方便的原因, 未能进行测量布局的精细调节, 导致较大部分的分布图像超出了成像范围, 未能获得较充分有效的分布图像数据。对于 Mylar 薄膜, 实验未获取到电子束散角的明显有效测量数据, 主要原因可能有两个: 薄膜的转换效率较低及表面灰雾度没有满足镜面测量要求。转换效率较低直接导致获得的测量信号幅度降低, 而薄膜表面呈现的灰雾度现象首先直接导致切伦科夫辐射光子在表面产生严重的散射, 进而导致电子束发散的散角信息存在失真的可能性, 同时表面的散射也进一步导致测量信号幅度的降低, 这一点在利用 Mylar 薄膜进行束斑的测量验证实验中被证实: 同样的束斑在薄膜上形成的图像远大于在石英薄片上产生的束斑尺寸, 同时束斑图像的灰度幅度及图像对比度也低得多。因此, 由于薄膜的效率低及表面粗糙度未满足测量要求, 使用薄膜时未能获得电子束发散角及分布的有效实验测量结果。

测量系统的光学带宽的影响在实验中被证实: 当不采用滤波片时, 获得的图像灰度虽然相对较大, 但散角分布却比采用了滤波片的扩宽了很多, 不便于准确的电子束发散角的测量, 这个测量结果充分说明了前期模拟工作的有效性^[4]。

从测量技术的研究过程来看, 石英薄片的制作是一个比较关键的工艺环节: 除了厚度需要尽量薄之外, 还需要在表面的处理 (研磨、抛光) 及清洗上特别注意。表面的抛光需要达到较好的镜面效果, 否则, 切伦科夫辐射光子在表面的散射会导致测量信号质量的大幅下降; 而清洗时需要小心进行, 因为薄片太薄容易破碎, 同时也需要注意不要在表面上产生清洗液的残留印渍。

环境散射光线对测量的严重影响: 与像平面成像原理不同, 测量系统是基于光线方位进行测量的; 对测量而言, 任何进入系统且在有效孔径范围内的光线均为有效测量光线, 而不是只对本底信号产生影响, 可对测量结果产生直接的影响。为了避免环境散射光对发散角测量的严重影响, 尤其在强流脉冲电子束的情况下, 环境散射光是比较强烈的, 在测量靶室的设计时, 考虑了靶室环境散射光的抑制和吸收措施, 大大降低了环境散射光的影响。对比测量技术研究实验也证实了这点。

模拟结果表明: 当电子束入射角度并不严格为切伦科夫辐射角时, 只要偏差较小, 对测量信号的影响仅限于中心位置发生一定的位置偏移变化, 并不对发散角分布产生明显影响。但在实际测量中, 需要尽量保证“零散角”的

图像位置在探测器的中心区域,以获取最大的测量范围。

5 结 论

当采用合适厚度的切伦科夫转换靶时,其导致的发散角展宽与电子束本身的发散角水平相当时,基于切伦科夫辐射原理的电子束发散角的测量技术是可行的,并可以获得足够的精度。在强流直线感应加速器上进行的脉冲电子束的发散角测量实验结果证明测量技术是可行的,实验开展的其它相关方面的研究工作同时证明了先期开展的数值模拟工作的多个结论是正确的,起到了对测量技术研究的指导作用。该测量方法无需事先的电子束分布及其它参数的假设,具有测量系统结构简单、使用方便、适用性强的特点,具有一定的对电子束发散角分布概况进行测量的能力。基于该发散角的测量技术原理,采用双成像法测量系统结构、结合电子束束斑的同时测量,可以完成电子束发射度的直接测量。

参考文献:

- [1] 唐孝威. 瓦维洛夫-契连科夫辐射的应用问题[J]. 物理学报, 1961, 17(10): 482-494. (Tang Xiaowei. Applications of Vavilov-Cherenkov radiation[J]. Acta Physica Sinica, 1961, 17(10): 482-494)
- [2] Richardson R D, Platt R C, Crist C E. Beam emittance from coherent Cherenkov radiation in a solid dielectric[C]//Proceedings of International Conference on Particle Accelerators. 1993: 2456-2458.
- [3] 江孝国, 迟智军, 杜应超, 等. 电子束发散角的直接测量技术模拟研究[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 075102. (Jiang Xiaoguo, Chi Zhijun, Du Yingchao, et al. Simulation study of electron beam divergence and its distribution measurement[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 075102)
- [4] 江孝国, 迟智军, 廖树清, 等. 利用切伦科夫进行电子束发散角测量的模拟研究[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34: 054002. (Jiang Xiaoguo, Chi Zhijun, Liao Shuqing, et al. Simulation for measurement technique of electron beam divergence basing on Cherenkov radiation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34: 054002)
- [5] Le Sage G P. Time-resolved emittance characterization of an induction linac beam using optical transition radiation[R]. UCRL-ID-153254, 2002.
- [6] 谷安佳, 丁原涛, 赵夔, 等. 切伦科夫辐射“双成像法”测量电子束发射度[J]. 高能物理与核物理, 2003, 27(2): 163-168. (Gu Anjia, Ding Yuantao, Zhao Kui, et al. A new measurement of electron beam emittance with Cherenkov radiation “double imaging” method[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2003, 27(2): 163-168)
- [7] 江孝国, 董晓娜, 王远, 等. 瞬态光学渡越辐射测量系统的设计[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(9): 2147-2150. (Jiang Xiaoguo, Dong Xiaona, Wang Yuan, et al. Design of instantaneous measurement system based on optical transition radiation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(9): 2147-2150)