

神龙一号加速器束参数测量

杨国君¹⁾ 张卓 陈思富 徐铁铮 牟凡 李劲 江孝国

(中国工程物理研究院流体物理研究所 绵阳 621900)

摘要 文章全面介绍了在神龙一号直线感应加速器的研制过程中,发展的一系列束参数测量手段. 光测方面,介绍了利用光学渡越辐射和切伦柯夫辐射测量束剖面、发射度、能散度的工作;电测方面,介绍了利用电阻环、磁探针、纽扣电极方法测量束位置和强度,以及利用返磁回路方法测量束流均方根半径的工作. 这些工作极大地提高了束流测量的水平.

关键词 直线感应加速器 束流测量 发射度 光学渡越辐射

1 引言

直线感应加速器广泛应用于重粒子聚变、闪光X照相、自由电子激光等领域. 束流参数的准确测量,对加速器技术的研究起着十分重要的作用. 在神龙一号加速器的研制过程中,发展了一系列的测量手段. 这些工作使得束流诊断的水平得到了极大的提高. 由于直线感应加速器的流强很大,一般是kA量级,且单次工作,脉冲长度约100ns,故其束参数测量工作和一般高能加速器有很大的不同. 本文将对此进行介绍.

2 束剖面测量

2.1 光学方法

测量的布局如图1所示. 利用一块直径80mm,厚0.5mm的石英玻璃作为辐射转换靶. 产生的渡越辐射

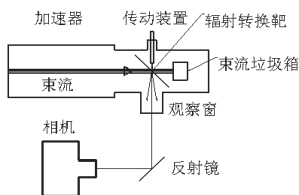


图1 束剖面测量布局

或切伦柯夫辐射经反射镜传到相机. 积分测量使用普通CCD相机, 时间分辨测量使用扫描相机和分幅相机. 由于束流流强很大, 需要克服强干扰、靶破坏等

许多困难. 图2是利用分幅相机和切伦柯夫辐射测得束流在某时刻的束剖面图像.

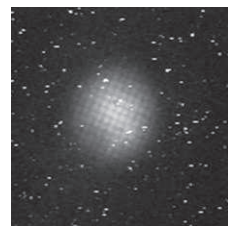


图2 束剖面测量结果

对实验结果分析可知,束剖面在神龙一号加速器出口近似成高斯分布,而在3.5MeV注入器出口近似成kV分布.

2.2 返磁回路方法

当束流在轴向磁场中沿螺旋线前进时,就会产生一个磁矩,这个磁矩与轴向磁场、束流的流强和均方根半径这3个因素相关^[1]:

$$M_r(z) = \frac{1}{4} \frac{e}{\gamma m_0 \beta c} B_z r^2 I. \quad (1)$$

实际应用中,磁矩在与管道同心的单匝测量线圈产生感生电压,利用这个电压可以得到磁矩. 再测得流强和轴向磁场,就可以计算得到束流的均方根半径. 此方法属于电测方法,便于实时在线的测量,适合作加速器的常规监测手段. 如果与下面介绍的修正三梯度方法相结合,还可以在线测量束流发射度. 目前正在进行实用化的工作.

1) E-mail: ygj00@mails.tsinghua.edu.cn

3 发射度测量

发射度是束流的一个重要参数,但其测量十分困难.在加速器研制过程中发展了以下几种方法.

3.1 修正三梯度方法

修正三梯度方法利用了束流的包络方程^[2]:

$$\tilde{r}'' + k^2 \tilde{r} - \frac{K}{2\tilde{r}} - \frac{\tilde{\varepsilon}_r^2}{\beta^2 \gamma^2 \tilde{r}^3} = 0. \quad (2)$$

测量示意图如图3所示.在不同螺线管线圈电流的情况下,测量某固定位置的束半径.在测得多组数据后,利用(2)式进行拟合,求得发射度.

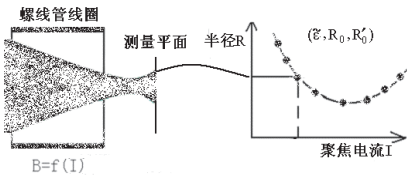


图 3 修正三梯度方法测量示意图

多次实验测得,3.5MeV注入器出口束流发射度约 $1100\pi\cdot\text{mm}\cdot\text{mrad}$,而20MeV出口束流发射度约 $2100\pi\cdot\text{mm}\cdot\text{mrad}$.

3.2 渡越辐射方法

发射度在束腰处的表达式如下:

$$\varepsilon_n = 4\beta\gamma\alpha x x'. \quad (3)$$

只要在束腰处测得了束半径和发散角,就能计算出发射度.发散角的测量是难点,对此可以利用渡越辐射的角分布特性.单个电子产生的渡越辐射的角分布成弥散的空心锥, $1/\gamma$ 角度位置强度最大,如图4.辐射相对强度随角度变化的曲线具有双峰形状,如图5所示.

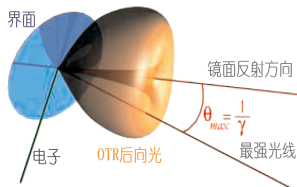


图 4 渡越辐射发光示意图

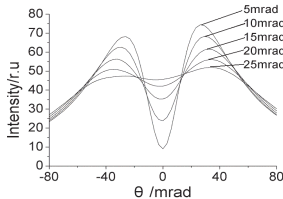


图 5 发散角对角分布的影响

束流的发散角会使角分布的双峰形状模糊.图5给出了20MeV电子束在不同发散角情况下的辐射角分布曲线.可见,如果实验测得了角分布的形状,就可以反推束流的发散角.另外渡越辐射的偏振特性

是“径向偏振”,故可以使用偏振器以测量不同方向的发散角.图6给出了角分布测量的布局示意图.图7是利用分幅相机测得的一幅角分布图案.

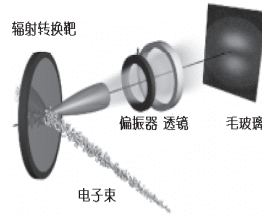


图 6 角分布测量示意图

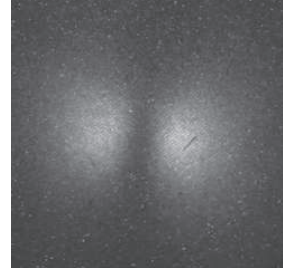


图 7 角分布测量结果图

多次实验测得,20MeV出口束流的发射度约 $2300\pi\cdot\text{mm}\cdot\text{mrad}$.

3.3 胡椒屏方法

胡椒屏方法是一种传统的发射度测量方法.多次实验测得,3.5MeV注入器出口束流发射度约 $1100\pi\cdot\text{mm}\cdot\text{mrad}$.

4 能散度测量

在注入器出口,利用了一台 90° 偏转的磁分析器进行能散度测量,如图8所示^[3].束流被石墨狭缝准直后,通过漂移管DT1进入分析磁铁.漂移管DT2的末端,放置一片石英玻璃.用扫描相机记录石英玻璃产生的切伦柯夫辐射.图9给出了注入器出口某次实验的结果.处理得到能散度在60ns范围内为 $\pm 2.2\%$.

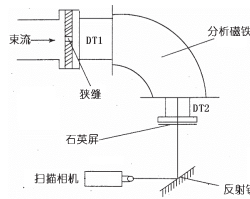


图 8 能散测量布局图

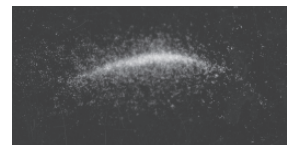


图 9 3.5MeV注入器能散度测量图像

5 束位置和束流强度测量

5.1 电阻环方法

电阻环又称壁电流探测器,它主要利用了束流在输运管道内传输时在管壁上产生的反方向的表面电流.如电阻环由 n 个阻值为 Z 的电阻并联而成,则每个电阻两端的电压为^[4]

$$V(\varphi) = -\frac{ZI}{n} \frac{\rho^2 - 1}{\rho^2 - 2\rho\cos(\varphi - \theta) + 1}. \quad (4)$$

式中 ρ 为束相对偏心(偏心量与管道半径的比值), ρ 和 θ 决定束位置. 理论上只要测得 3 个角度上的电压, 就可以计算束流的偏心及流强. 实际上为了计算方便, 一般都在 4 个或 8 个对称的位置上测量电压. 电阻环方法便于实时在线的测量, 是加速器目前主要的常规监测手段之一, 加速器上共有数十个电阻环, 可以监测各个不同位置的束流情况.

5.2 磁探针方法

这种方法利用很小的螺线管线圈(即磁探针)插入到束管道中, 测量该位置上的变化磁场. 当线圈所在位置磁场发生变化时, 线圈两端将产生一个感应电动势, 信号积分以后就可以求得磁感应强度. 在输运管道壁附近, 磁场为^[5]

$$B_\theta(\varphi) = -\frac{\mu_0 I}{2\pi R} \frac{\rho^2 - 1}{\rho^2 - 2\rho\cos(\varphi - \theta) + 1}. \quad (5)$$

(5)式与(4)式是一致的, 故同样在 4 个或 8 个对称位置设置磁探针, 就可以测量束位置及流强. 与电阻环方法相比, 磁探针方法的优点在于频响很高, 可以测量

直线感应加速器中的高频横向振荡, 而电阻环方法对此无能为力.

5.3 纽扣电极方法

高能加速器上纽扣电极型的 BPM 很常用, 我们探索了其在强流的直线感应加速器上的应用.

从模拟束流的实验结果看, 此方法完全可以应用在强流脉冲束上, 并且它对强流束位置偏心的线性响应范围较大. 目前实用化的工作正在开展中.

6 结论

本文全面介绍了在神龙一号直线感应加速器研制过程中开展的束流测量工作. 电测方面, 提高了电阻环探头的精度, 并对磁探针、纽扣电极、返磁回路等方法进行了系统研究. 光测方面, 从无到有, 开展了切伦柯夫辐射和光学渡越辐射的研究, 并利用这两种辐射成功地对束剖面、发射度、能散度进行了测量. 这些工作极大地提高了束流测量的水平, 为加速器顺利达到设计指标作出了贡献.

参考文献(References)

- 1 Nexsen W E, Scarpetti R D, Zentler J. Reconstruction of FXR Beam Conditions. Proceeding of 2001 Particle Accelerator Conference, USA, Chicago
- 2 DAI Zhi-Yong. Study on Mechanism and Suppressive Means of Emittance Growth of Linear Induction Accelerators: [Dissertation of Doctor's Degree]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2004(in Chinese)
(代志勇. 直线感应加速器束流发射度增长与抑制研究: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004)
- 3 DENG Jian-Jun, CHEN Si-Fu, CHANG Li-Hua et al. High Power Laser and Particle Beam, 2003, **15**(7): 705—707(in Chinese)
- (邓建军, 陈思富, 畅理华等. 强激光与粒子束, 2003, **15**(7): 705—707)
- 4 DAI Guang-Sen, LIU Cheng-Jun, DING Bo-Nan. High Power Laser and Particle Beam, 1996, **8**(2): 187—193(in Chinese)
(戴光森, 刘承俊, 丁伯南. 强激光与粒子束, 1996, **8**(2): 187—193)
- 5 LI Jin. Study on B-Dot Used in Measurement of Nano-second Beam Pulse: [Dissertation of Master's Degree]. Mianyang: Chinese Academy of Engineering Physics, 2000(in Chinese)
(李劲. 用于测量纳秒级束流脉冲的 B-Dot 研究: [硕士学位论文]. 绵阳: 中国工程物理研究院研究生部, 2000)

Beam Measurement of the Dragon-I Linear Induction Accelerator

YANG Guo-Jun¹⁾ ZHANG Zhuo CHEN Si-Fu XU Tie-Zheng MU Fan LI Jin JIANG Xiao-Guo
(Institute of Fluid Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract In this paper the studies on the beam measurements developed during the construction of the Dragon-I linear induction accelerator are described. The measurements of the beam profile, emittance and energy spread using Cerenkov radiation and transition radiation are presented. The measurements of the beam position, intensity and root-means-square radius using resistive wall, B-Dot, D-Dot and diamagnetic loops are also presented.

Key words linear induction accelerator, beam measurement, emittance, optical transition radiation

1) E-mail: ygj00@mails.tsinghua.edu.cn