

反磁回路技术诊断2MeV注入器出口处束包络半径*

牟凡¹⁾ 刘承俊 夏连胜 江孝国 张篁 王远 潘海峰

(中国工程物理研究院流体物理研究所 绵阳 621900)

摘要 反磁回路(Diamagnetic loop,DML)诊断强流脉冲电子束半径的技术是一种可在线诊断的技术. 这种诊断技术与其他方法(如三梯度法)相配合可以同时在线诊断强流脉冲电子束的发射度、束包络斜率等参数. 介绍了反磁回路诊断电子束时间分辨均方根半径的原理, 并建立了相应的装置, 通过标定给出了定标系数. 利用反磁回路诊断装置测量了2MeV直线感应型注入器出口处双脉冲强流电子束包络的均方根半径分别为6.84mm和5.63mm, 和用分幅相机同步测量的结果具有较好的一致性.

关键词 反磁回路 电子束半径 磁矩

1 引言

强流脉冲电子束传输过程中, 电子束半径的诊断以及通过这种诊断再推得其他束参数(如发射度、束包络斜率等)对于加速器的调试运行以及各种应用都是至关重要的. 为此, 发展了多种成熟的诊断技术, 如切伦科夫辐射法、光学渡越辐射法等. 但这些方法基本上都是利用物质与电子束直接相互作用产生的效应来诊断束半径的, 因而无法实现束的在线诊断. 反磁回路诊断技术最早是W.E.Nexsen^[1]提出的, 近几年才开始应用^[2, 3]. 它利用一个环绕电子束并与其同轴的单匝或几匝的磁感应线圈(即反磁回路)通过电磁感应测量该电子束的磁矩, 从而在某些易于满足的条件下推得该电子束的均方根半径, 因此这种诊断技术是一种可在线诊断的技术. 反磁回路诊断技术与其他方法(如三梯度法)相配合还可以同时在线诊断强流脉冲电子束的发射度、束包络斜率等参数.

2 基本原理

反磁回路诊断技术通过测量电子束在传输过程中产生的磁矩来诊断束半径. 磁矩的定义是绕圈运动的电流乘以绕圈的面积. 直线感应加速器中, 强流脉冲电子束在轴对称螺线管磁场中沿轴向传输时, 由于存

在沿束横截面分布的方位角束流分量, 因此电子束具有一定的磁矩, 其方向是轴向的, 大小可表示为^[2]

$$M_r(t) = \frac{1}{4} \frac{e}{\gamma m \beta c} B_z \int_0^{I_z} r^2 dI_z = \frac{1}{4} \frac{e}{\gamma m \beta c} B_z R_{\text{rms}}^2 I_z, \quad (1)$$

e 为电子电荷, m 为电子静止质量, γ 为相对论因子, β 为相对速度, c 为光速, B_z 为轴向输运磁场, I_z 为电子束的轴向束流分量, R_{rms} 为电子束的均方根半径, R_{rms} 的定义为

$$R_{\text{rms}}^2 = \frac{1}{I_z} \int_0^{I_z} r^2 dI_z. \quad (2)$$

式(1)给出了轴对称磁场中强流脉冲电子束均方根半径同其磁矩的计算公式关系, 通过测量磁矩和 B_z , I_z , γ 就可求得均方根半径.

反磁回路, 实际上就是单匝或者几匝的圆形磁感应线圈. 当在某一轴向位置 z 处环绕电子束并与其同轴放置一个反磁回路时, 该电子束磁矩随时间的变化在反磁回路中产生的感应电压为

$$\varepsilon(t) = K^{-1} \frac{dM_r(z)}{dt}. \quad (3)$$

对(3)式积分可求得在 t 时刻的磁矩为

$$M_r(t) = k \int \varepsilon(t) dt. \quad (4)$$

上式中, k 是表征反磁回路同电子束磁矩之间电磁耦

* 国防科技基础研究基金资助
1) E-mail: mufanxo@263.net

合的常数, 通过实验进行标定.

实际得到的电子束的磁矩除了 $M_r(t)$, 还有发射电子束的阴极面磁通量不为零时产生的磁矩和电子束质心偏轴且速度方向与轴倾斜产生的磁矩, 这两项可通过调节反向磁场线圈使阴极面磁通量足够小和将束质心的偏轴和倾斜控制在很小的范围使其对测量的影响可忽略.

另外, (3) 式和 (4) 式的推导都是以无边界系统为基础的. 实际上, 电子束是在金属束管道内传输的, 束管道壁将会感生出与束前进方向相反的电荷流, 此电荷流也会产生一定的磁矩, 带来了误差. 实际诊断中, 通过选择合适的反磁回路半径以及反磁回路标定采用模拟实际情况的方法能比较好地解决这一问题.

3 反磁回路设计及定标

从上一节的基本原理看出, 由测量的磁矩求束半径时, 需要知道同一轴向位置 z 处的束流强度. 因此, 反磁回路采用与电阻环束流和束位置探头^[4]一体化的设计. 图1是反磁回路探头设计示意图. 反磁回路是

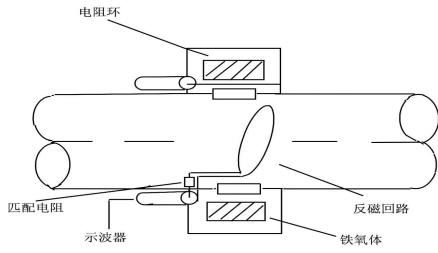


图1 反磁回路探头设计图

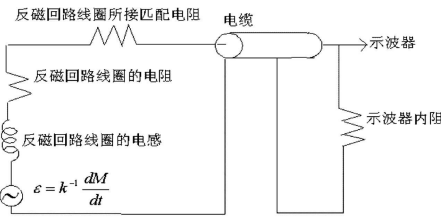


图2 反磁回路诊断等效线路

单匝的圆形线圈, 用直径1.12mm的漆包铜线绕在一绝缘体圆环的内表面(半径是72.5mm), 该圆环固定在电阻环探头内表面, 且与电阻环、束管道及束质心同轴. 反磁回路两端通过引线与固定在电阻环探头上的真空电缆座相连, 经电缆将信号送入示波器. 与电缆座芯线相连的引线内串有50Ω的匹配电阻. 测量的等效线路如图2所示. 由该等效线路可求得:

$$\varepsilon(t) = L \frac{di}{dt} + iR + V(t), \quad (5)$$

$$i = \frac{V(t)}{R1}. \quad (6)$$

上式中, $\varepsilon = k^{-1} \frac{dM}{dt}$ 是反磁回路信号电压, L 是反磁回路电感, $V(t)$ 是在数字示波器上得到的测量电压, 示波器的输入电阻 $R1$ 也是50Ω. 由以上两式可以解出

$$\varepsilon(t) = \frac{L}{R1} \frac{dV(t)}{dt} + 2V(t). \quad (7)$$

对(7)式积分推得计算磁矩的公式为

$$M(t) = k \left[\frac{L}{R1} V(t) + 2 \int_{-\infty}^t V(t') dt' \right]. \quad (8)$$

标定利用置于束管道内的密绕螺线管线圈通以电流作为模拟束流, 该模拟束流产生的磁矩为

$$M = NI\pi r_a^2. \quad (9)$$

N 是线圈的匝数, $I(t)$ 是模拟束流, $r_a(t)$ 是螺线管线圈的半径, 即模拟束的半径. 将(9)式代入(8)式, 可得

$$NI\pi r_a^2 = k \left[\frac{L}{R1} V(t) + 2 \int_{-\infty}^t V(t') dt' \right]. \quad (10)$$

标定实验, 采用固定 r_a , 改变 N 和 I 进行多次实验的方法, 利用(10)式可求得 N 或 I 与 $\left[\frac{L}{R1} V(t) + 2 \int_{-\infty}^t V(t') dt' \right]$ 的变化曲线, 通过拟合即可标定 k 值.

图3给出了 k 值随标定模拟束半径的变化曲线. k 值是一个相当好的常数, 模拟束的半径从5.89mm至30.83mm, 最大变化值不超过3%. k 值随标定模拟束半径增大稍有增大的原因, 如前面分析, 是反磁回路诊断方法本身的误差导致的. 将反磁回路放置在远离束箍缩的地方且尽量靠近外磁场的峰值区, 选择反磁回路半径仅比待测束半径大2cm左右, 均可以减小误差, 提高精度.

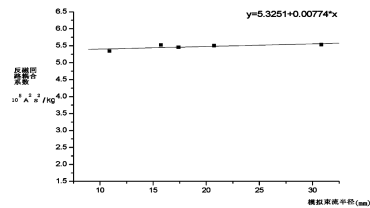


图3 反磁回路耦合系数标定曲线

4 在2MeV注入器出口处的诊断实验

将标定好的反磁回路诊断装置放在2MeV注入器出口处进行束包络半径诊断.

2MeV 注入器产生的是双脉冲, 反磁回路诊断装置放置在束心阳极杆末端, 分幅相机测量位置在反磁回路诊断装置之后约 35cm 的位置. 在实验中, 计算公式为

$$k \int \varepsilon(t) dt = \frac{1}{4} \frac{e}{\gamma m \beta c} B_z R_{\text{rms}}^2 I_z. \quad (11)$$

将实验中得到的波形及数据, 代入 (11) 式, 得到 2MeV 注入器出口处的束包络半径如图 4 所示. 并利用分幅相机测量得到的结果加以验证.

实验中, 注入器末端 (即反磁回路诊断位置处) 的调节磁场的轴向大小约 $1.28 \times 10^{-2} \text{T}$, 束流大小约 912A, 经过多次实验得到的得到的随时间分辨的束包络半径波形如图 4 所示: 第 1 个脉冲期间束包络均方根半径为 $(6.84 \pm 0.48) \text{mm}$; 第 2 个脉冲期间束包络均方根半径为 $(5.63 \pm 0.34) \text{mm}$.

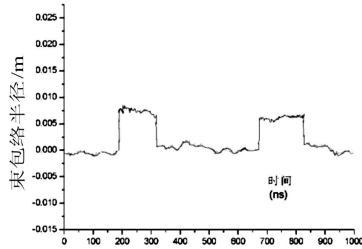


图 4 2MeV 注入器出口的双脉冲束包络半径

分幅相机所采用的时间间隔是 20ns, 测到的 1 个脉冲期间的 4 幅图像如图 5 所示, 由分幅相机得到的图像进行处理拟合得到的结果为: 第 1 个脉冲束包络半径为 $(6.33 \pm 0.51) \text{mm}$; 第 2 个脉冲束包络半径为 $(5.22 \pm 0.39) \text{mm}$, 因为分幅相机测量位置与反磁回路诊断位置相差了 35cm, 所以将反磁回路诊断的结果代入包络方程, 可以解出在分幅相机测量位置束半径的理论解, 与实际测量结果相差约 5%, 说明反磁回路诊断与分幅相机测量的结果较为吻合.

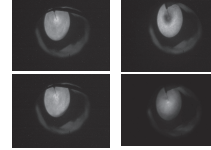


图 5 分幅相机测到的第一个脉冲期间的图像

5 结束语

以上的理论分析和实验结果表明, 经过标定后的反磁回路诊断装置完全可以用于实际的强流脉冲电子束半径诊断, 诊断结果较为理想.

参考文献 (References)

- 1 Nexsen W E. A Non-Interfering Beam Radius Diagnostic. In: UCRL-JC-108211, 1991
- 2 Nexsen W E, Scarpetti R D, Zentler J. Reconstruction of FXR Beam Conditions. In: Proceeding of 2001 Particle Accelerator Conference, USA, Chicago, 2001
- 3 Thomas J T et al. Study of a Non-Intrusive Electron Beam Radius Diagnostic. In: Proceeding of 1997 Particle Accelerator Conference, Canada, 1997
- 4 XIE Y T, DAI Z Y, HAN Q. High Power Laser and Particle Beams, 2000, **14**(1): 151—153 (in Chinese)
(谢宇彤, 代志勇, 韩青. 强激光与粒子束, 2000, **14**(1): 151—153)

Diamagnetic Loop Diagnoses the 2MeV Injector Beam Radius*

MU Fan¹⁾ LIU Cheng-Jun XIA Lian-Sheng JIANG Xiao-Guo ZHANG Huang

WANG Yuan PAN Hai-Feng

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract The technology of diamagnetic loop (DML) diagnosing intense pulse beam radius is a kind of on-line diagnostics. The technologies can diagnose beam emittance and obliquity on-line cooperating with other technologies such as three gradients method. In this paper, we introduce the theory of diamagnetic loop, design and calibrate diamagnetic loop device. And we diagnose the double pulse electron beams radius generated by the 2MeV injector. By the DML, the double beams radii are 6.84mm and 5.63mm, which are accordant with the results of a frame camera.

Key words diamagnetic loop(DML), beam radius, magnetic moment

*Support by Fund of Basic Research for Defense Technology

1) E-mail: mufanxo@263.net