

强流离子束发射度测量技术*

郭之虞¹⁾ 徐蓉 明建川 邹宇斌 高淑丽 赵捷 彭士香

吴文忠 钱锋 宋执中 于金祥 袁忠喜 于茂林

(北京大学重离子物理研究所, 核物理与核技术国家重点实验室 北京 100871)

摘要 强流离子束的发射度测量与弱流相比有很多需要特殊考虑之处. 介绍了北京大学先后研制的三台强流离子束发射度测量仪所采用的测量和数据处理方法, 包括本底扣除和阈值设置、强流脉冲束的测量方法、误差的主要来源及其控制与校正等.

关键词 强流 离子束 发射度 测量

1 引言

随着散裂中子源、加速器驱动洁净核能源等的发展, 强流离子束的产生、传输与加速技术也日益成为加速器技术的重要研究领域. 强流离子束发射度的测量对于控制和提高束流品质、改善束流的匹配、提高束流传输效率具有重要意义. 美国 LANL^[1]、法国 Saclay^[2]、德国 Frankfurt 大学^[3]、意大利 Catania^[4]等实验室在研制强流离子源时均进行了强流离子束的发射度测量.

北京大学重离子物理研究所近年来先后研制了三台不同类型的强流离子束发射度测量仪, 并对测量方法与数据处理方法进行了研究. HIBEMU-1 采用多缝单丝法, 曾用于中国原子能科学研究院 ECR 离子源的发射度测量^[5]. 其后研制的 HIBEMU-2 亦采用多缝单丝法, 但采用了磁传动的机械结构设计, 同时针对脉冲束设计了相应的测量程序和软件^[6]. HIBEMU-3 则是采用 Allison 原理的电扫描单缝单丝发射度测量仪^[7]. 这台发射度测量仪可以有效地避免多缝法中相邻缝束流间的叠加, 适用于束流含多种成分且各成分发射度椭圆不同的场合, 例如 LEPT 中螺线管透镜后的束流发射度测量.

与弱流发射度测量不同, 强流发射度测量中一般会有较高的束流本底, 且发射度图形的边界由于束晕效应往往不十分清晰, 故对于本底扣除和阈值设置需给予妥善处理. 强流发射度测量仪的缝板要承受数 kW 的束流功率, 故需进行充分的水冷. 为此对于多

缝方法一般需采用短缝采样, 这会引入一定的系统误差. 发射度测量一般需要在较长的时间内进行间歇采样, 因此还要考虑束流波动和束流调制的影响. 对于脉冲束的发射度测量, 还要考虑采样频率与脉冲波形的配合, 以保证采样的有效性.

2 原理与方法

强流离子束的发射度测量一般均采用缝丝法, 即用缝对束流位置进行采样, 用其后一定距离的丝对采样的束流进行散角测量. 缝丝法又可分为多缝单丝、单缝多丝、单缝单丝等不同形式. 以上几种方法中多缝单丝结构简单, 但对束流条件要求较苛刻. 单缝多丝和单缝单丝可克服上述缺点, 但单缝多丝需多路放大器同时工作, 成本高、调试复杂; 单缝单丝较单缝多丝简单, 但丝需往复扫描. Allison 等人建议在单缝单丝方法中用电偏转扫描代替机械扫描^[8], 这样可简化机械结构, 并可提高测量速度. 实际上强流发射度仪一般用后缝板及其后的法拉第杯代替测量丝, 以减小散射束流对测量的干扰.

在强流的情况下普遍采用均方根发射度,

$$\varepsilon_{rms} = \sqrt{x^2 x'^2 - xx'^2}, \quad (1)$$

此时束晕粒子对发射度有较大的贡献. 但对于束流的匹配传输而言, 一定阈值下的边界发射度图形也是十分重要的.

强流束发射度测量的本底主要来源于放大器的噪声和漂移以及晕粒子在真空管道器壁上的散射, 其均

2008 - 01 - 07 收稿

* 国家自然科学基金(10455001, 19835070)资助

1) E-mail: zhyguo@pku.edu.cn

值通常大于零. 由于束晕与本底的边界很难清楚划分, 数据处理方法的选择对于是否能得到较准确的发射度有很大影响, Stockli 等对此曾做过详细的讨论^[9].

我们采用了扣除基本本底和设置阈值相结合的方法进行数据处理. 基本本底是依据对发射度仪前缝位于束流包络之外时的测量数据进行分析处理而得到的. 在扣除基本本底后再进行阈值选择, 为此先计算出不同阈值情况下束流的归一化均方根发射度, 如图 1 所示. 其中横坐标为阈值大小, 纵坐标为归一化均方根发射度. 由图在阈值大于 0.09V 时, 发射度的变化明显趋于平缓, 故可选择这个阈值下的发射度值作为束流的归一化均方根发射度.

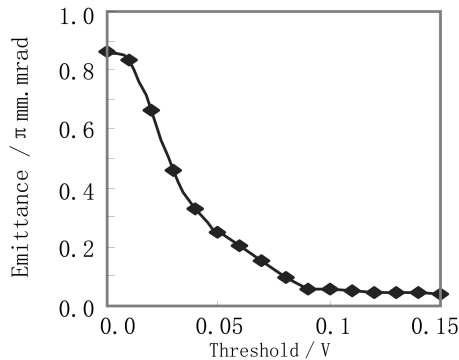


图 1 阈值与发射度关系曲线

这几台发射度仪均用 IPC 进行测量控制与数据处理, 数据处理软件具有本底扣除、阈值设置、寻峰、边界发射度与均方根发射度计算、束流空间分布图与发射度相图绘制等功能.

3 脉冲强流离子束的发射度测量

脉冲强流束的发射度测量还要注意采样点与脉冲波形的配合, 避免产生采样误差以及在多点数据合并处理时引入不应有的误差.

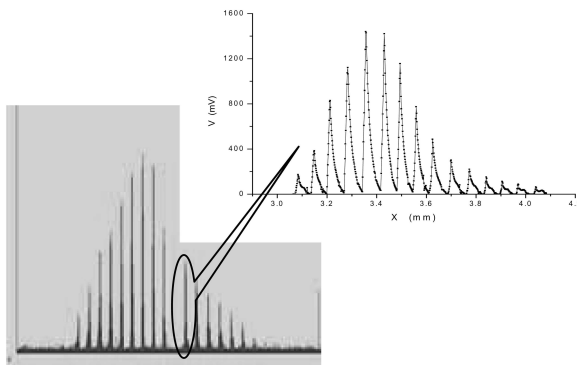


图 2 脉冲束流的发射度测量

HIBEMU-2 测量时后缝板连续扫过前缝板采样的各子束流, 对其散角分布进行采样测量. 适当放慢扫描速度、提高采样频率, 可以测量到足够多的完整

脉冲波形, 如图 2 所示. 一般一个子束流应包含 10 个以上脉冲波形, 以保证宏观峰的测量精度.

HIBEMU-3 测量时对子束流进行阶梯电压扫描使其第次通过后缝板. 束流采样使用较高的频率, 以保证在每个阶梯电压下可对多个脉冲进行采集, 且采样须在偏转电压改变达到稳定之后进行.

4 误差来源及其控制与校正

4.1 束流稳定性

缝丝法发射度测量一般需要在数十秒至数分钟的时间内进行间歇采样, 如果此期间束流有波动或存在束流调制, 则会影响发射度测量的精度. 此时应采用总束流的测量值对后缝采样的束流值进行归一, 且测量回路的时间常数不能太大.

4.2 短缝

由于缝板要进行充分冷却, 多缝单丝法用于强流束时只能使用短缝对束流进行不完全采样, 此时采样缝的长度远小于缝板处束流的直径, 使得 X 较小的粒子通过缝板的比率大大小于 X 较大的粒子的通过率, 这就相对地降低了束流中间部分发射度较小的粒子的计算权重, 而导致测量结果偏大, 所引入系统误差的大小与束分布有关^[10]. 模拟计算表明, 束流的分布越均匀时偏离量越大, 分布越向中间集中则偏离越小. 典型情况下高斯分布的测量结果偏大约 9%, 而 K-V 分布的测量结果可偏大 34%. 故使用短缝时应根据测量条件和束流分布对测量结果进行适当修正.

4.3 阈值

模拟计算还表明, 用设置阈值去除本底时, 会使所得到的发射度结果较实际情况偏小, 其偏小量亦与束流分布有关^[10]. 若取 10% 阈值, 则高斯分布的偏小量可达 6%, 而 K-V 分布的偏小量不到 1%.

5 结论

在强流离子束的发射度测量中, 对本底的处理十分重要. 采用扣除基本本底与设置阈值相结合的方法, 可以得到较为准确的结果. 对脉冲束的测量要妥善选择采样频率, 避免采集无效数据. 对于强流离子束发射度测量, 束流不稳定性、使用短缝和设置阈值都有可能引入较大的系统误差. 故测量时应进行总束流归一, 并根据束流的实际相空间分布情况, 通过模拟计算对发射度的测量值进行适当的校正. 此外, 在强流离子束发射度测量仪的设计和安装中还需注意接地与屏蔽、放大器选择等问题.

参考文献(References)

- 1 Taylor T, Mouris J. Nucl Instrum. Methods A, 1993, **336**: 1—5
- 2 Beauvais P Y et al. Proc. of Linac'96, Geneva, 1996. 205—207
- 3 Lakatos A et al. Proc. of PAC'99, New York, 1999. 1288—1290
- 4 Ciavola G et al. Proc. of Linac'02, Gyeongju, Korea, 2002. 676—678
- 5 WU W Z et al. Atomic Energy Science and Technology, 2004, **38**(Supp): 66—74 (in Chinese)
(吴文忠等. 原子能科学技术, 2004, **38**(增刊): 66—74)
- 6 MING J C et al. Nuclear Techniques, 2006, **29**(2): 105—107 (in Chinese)
- 7 XU R et al. High Power Laser and Particle Beams, 2007, **19**(7): 1216—1220 (in Chinese)
(徐蓉等. 强激光与粒子束, 2007, **19**(7): 1216—1220)
- 8 Allison P W et al. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1983, **30**(4): 2204—2206
- 9 Stockli M P et al. Accurate Estimation of the RMS Emittance from Single Current Amplifier Data. In: Production and Neutralization of Negative Ions and Beams, AIP Conference Proceedings. New York: American Institute of Physics, 2002, **639**(1): 133—159
- 10 ZOU Y B et al. Nuclear Techniques, 2004, **27**(10): 744—748 (in Chinese)
(邹宇斌等. 核技术, 2004, **27**(10): 744—748)

Measurement Techniques of High-Current Ion Beam Emittance^{*}

GUO Zhi-Yu¹⁾ XU Rong MING Jian-Chuan ZOU Yu-Bin GAO Shu-Li ZHAO Jie
 PENG Shi-Xiang WU Wen-Zhog QIAN Feng SONG Zhi-Zhong
 YU Jin-Xiang YUAN Zhong-Xi YU Mao-Lin

(State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology (Peking University), Beijing 100871, China)

Abstract One should pay attention to quite a lot of factors when the emittance of high-current ion beam is measured. The background subtraction and threshold setting, the measuring method of pulsed beam emittance, as well as the error sources in the emittance measurements and its elimination or correction are discussed based on the experience during the R&D of three emittance measurement units for high-current ion beams at Peking University.

Key words high-current, ion beam, emittance, measurements

Received 7 January 2008

* Supported by NSFC (10455001, 10605003)

1) E-mail: zhyguo@pku.edu.cn