束流光学匹配研究

（a）聚焦结构选择

在加速结构中控制并降低电子束团的发射度（即束团发散角和尺寸的乘积，单位为(mm·mrad）是加速器物理中的核心挑战之一。发射度过大会导致束团在传输过程中碰撞真空管壁、降低后续加速效率、影响聚焦和最终应用（如自由电子激光的亮度、对撞机的亮度等）。

由于该项目涉及电子束在太空环境中远距离漂移，为避免电子束到达目标区域时尺寸发散过大，因而对加速器出射电子束的横向发射度，尤其是电子束散角提出了极高要求。通常为追求较低的初始发射度，会采用光阴极电子枪作为电子源，通过入射激光引发的光电效应发射电子，其发射度水平在0.1-1mm·mrad间。但受限于驱动激光功率和量子效率，光阴极电子枪发射电荷量小，无法满足本项目脉冲电流需求。目前仅有热阴极电子枪电流发射能力满足项目需求，然而，热阴极电子枪通过加热使电子获得足够能量并克服功函数逸出，电子是被随机发射的，电子束团发射度较大，在1-10mm·mrad间，束流品质较差。热阴极电子枪发射度公式：

因此，需要在束团加速过程中对其发射度进行控制，使束团出射参数满足预期目标。在直线加速器系统中，常用电子束聚焦技术手段有两种：

1. 强聚焦元件：

使用四极磁铁系统构成一个“强聚焦 lattice”。四极磁铁对束流产生的位置相关力，可以像光学透镜一样对束团进行聚焦。通过交替排列聚焦和散焦四极磁铁（FODO结构），可以在两个平面上同时实现净聚焦，有效约束束团尺寸和发散角，常应用于中大型直线、环形加速器。但需要多个四极磁铁组合运用，需要占用较多空间并显著增重加速器总质量。

图片包含 室内, 桌子, 男人, 站

AI 生成的内容可能不正确。

图1 加速器系统中的四极磁铁

2. 空间电荷效应补偿

在电子束团能量较低时，空间电荷效应（束团内电荷的库伦排斥）是发射度增长的主因。通过在束流传输线中引入均匀聚焦通道（如螺线管磁场，它能提供轴对称的聚焦），可以部分抵消空间电荷的散焦力。从电磁场理论的角度，螺线管通电后能产生一个强大的、高度均匀的轴向磁场（）。电子进入该磁场后，其横向运动受洛伦兹力作用，使电子在横向平面作回旋运动。宏观上，束流内所有电子的回旋运动叠加，表现为整个电子束团被约束在一个很小的半径内沿螺旋线轨迹前进，磁场越强 ( 越大)，约束效果越好。

在该项目中，电子能量由0加速至20-30MeV之间，符合螺线管适用能量范围（0-50MeV）。同时，螺线管磁场轴向均匀分布，可以对X、Y方向同时聚焦，避免了四极磁铁元件需组合使用的结构复杂性。此外，由于螺线管包覆于电子枪、加速管之外，不会引入新的轴向长度，有助于改善加速器系统的结构紧凑性。

火车开在铁轨上

AI 生成的内容可能不正确。

图2 螺线管和四极铁组合应用于中大型加速器

（b）相空间旋转实现低发散角出射

电子束团可以用相空间椭圆进行描述，其横轴代表束团电子位置分布，纵轴代表束团电子角度分布，相椭圆面积即为束团二维发射度，以表征束团的尺寸、发散情况。在忽略加速结构中非线性力作用的理想情况下，相椭圆面积（发射度）守恒。尽管相椭圆面积守恒，但其形状可以改变。例如，一个“矮而胖”的相椭圆代表束团尺寸大但发散角小；而一个“高而瘦”的相椭圆则代表束团尺寸小但发散角大。这表明尽管发射度守恒，但仍可以通过适当增大束团尺寸的方式获得较小的束团散角。

而从束流光学的角度考虑，螺线管的轴向磁场使电子做螺旋运动，将导致束团相椭圆绕其中心旋转，传输矩阵可表示为：

其中Q为螺线管线圈系数,L为螺线管线圈长度，和，和分别为螺线管作用前后电子的位置和散角。

图示

AI 生成的内容可能不正确。

图3 相椭圆在螺线管磁场作用下旋转

通过合理设置螺线管位置和长度、精确调控螺线管电流，可以使电子束团在加速器出口位置刚好处于束腰状态，获得最小发散角以满足电子束远距离传输要求。此时电子束具有最大的束尺寸和最小的散角，对应图4中电子轨迹包络的最高点。

图表

AI 生成的内容可能不正确。

图4 束斑尺寸在螺线管作用下随传输距离变化

（c）极限最小散角

空间电荷效应导致的发射度增长和散焦力与成正比，而对于能量在20MeV以上的电子束团，，意味着束流在加速结构后半段和出口处发射度变化几乎不再受空间电荷效应干扰，其发射度基本被“锁定”。

假设经过螺线管聚焦，束团发射度可以被控制在较小的值，如,其束斑尺寸可接受在3mm，20MeV能量电子。此时束团最小散角的理论极限：

因此，该加速结构的理论极限最小散角应在数十微弧度，而在实际研究过程中，达到极限最小散角主要受以下因素影响：

1. 本征发射度：热阴极电子枪提供的约1-2 mm·mrad的发射度是硬基础。
2. 束流光学匹配精度：能否将束流完美地匹配到加速结构末端，使其处于一个发散角最小的“腰”点，取决于螺线管的设置精度。
3. 集体效应：主要是尾场效应。在20 MeV下，它成为扰动束流、导致发射度微增和相空间畸变的主要因素之一。
4. 制造与对齐误差：元件的加工误差和对中误差也导致实际出束散角与理论极限最小散角出现差异。

考虑到这些因素，实际系统性能通常是理想值的5-10倍。因此，将 0.2-0.3mrad 设定为预期出束散角是合理且现实的。