紧凑交叉指型射频聚焦直线加速器束流动力学研究

报 告 人：杨雨瑄
单　　位：高能物理研究所东莞研究部

目录

- 研究背景与意义
- 纵向动力学设计
- 横向动力学设计

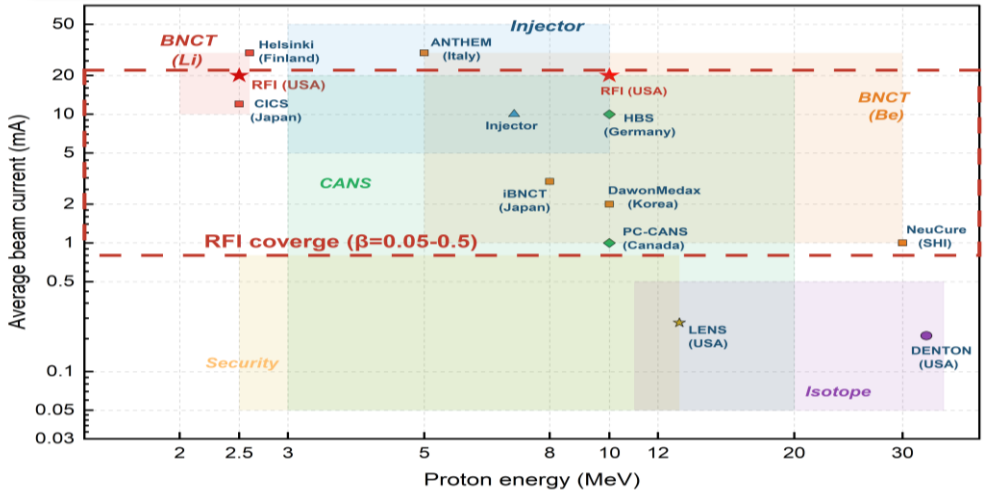
研究背景与意义

一、应用需求与方案选型

- **BNCT 硼中子俘获治疗：** AB-BNCT 规模普及要求加速器具备 **高流强、紧凑化、低成本**。
- **国土安全与无损检测：** CANS 可用于**集装箱检查、建筑缺陷检测** 等场景，对装置稳定性和可维护性要求高。
- **医用同位素生产：** PET 等应用依赖短半衰期同位素，推动加速器向 **小型化、就地化、低门槛** 发展。
- **粒子治疗注入器：** 质子/碳离子治疗前端注入器需要 **高效率、结构紧凑** 的低能加速方案。

面向上述应用，低能强流加速器需要在 流强、效率、体积与成本 之间取得更优平衡。

加速器应用能量-流强分布图



不同类型加速器关键参数对比

参数	Alvarez-DTL	IH-DTL	RFI
聚焦方式	磁四极	磁四极	RF 电四极
场模类型	TM_{010}	TE_{111}	TE_{110}
β	0.04–0.5	0.02–0.1	0.05–0.50
分路阻抗 Z (MΩ/m)	~30–40	~200–400	~200–500
工作模式	脉冲	脉冲	脉冲/连续波

- RFI 在 **β≈0.05–0.50** 区间兼具 **高分路阻抗** 与 **紧凑结构** 优势，适合面向 AB-BNCT 的低能强流应用。

研究背景与意义

二、RFI特点与工程优势

- **结构核心：** RFI 本质上是 **IH-DTL 与 RFQ 聚焦思想的结合**，利用 RF 电场同时实现 **纵向加速 + 横向聚焦**。
- **效率优势：** 在低 β 区间，RFI 的分路阻抗可达 Alvarez-DTL 的 **3–4 倍**，有利于降低射频功率需求。
- **工程优势：** RFI 具备 **无磁铁/少磁铁、结构紧凑、成本较低** 等特点，约 **10 MeV** 装置可压缩至 **3–5 m**。
- **应用适配性：** RFI 与 **BNCT、医用同位素、治疗注入器** 等场景匹配度高，是低能强流紧凑型加速器的重要候选方案。

综合来看，RFI 的核心价值在于 高效率、紧凑化 与应用适配性 的统一。

RFI 结构模型图

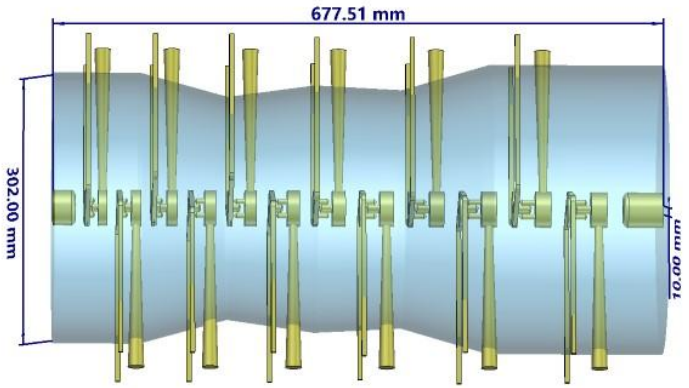


图1 RFI 结构模型示意图

IH-DTL 谐振模式示意

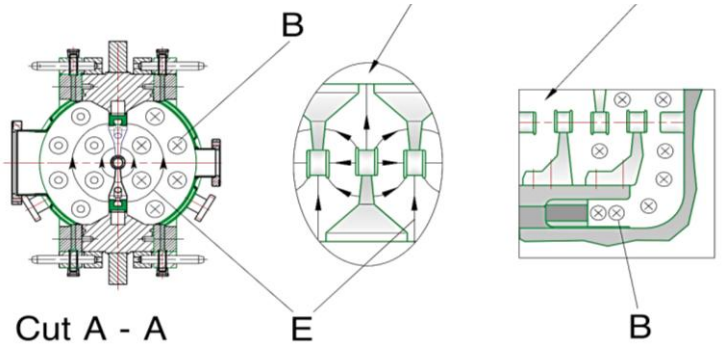


图2 IH-DTL 谐振模式示意图

Alvarez-DTL 谐振模式示意

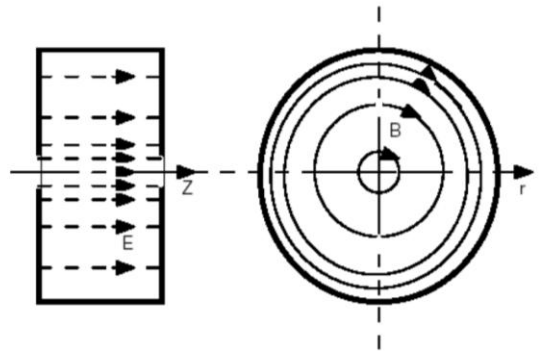


图3 Alvarez-DTL 谐振模式示意图

纵向动力学设计

一、纵向动力学设计难点

- **场分布非理想：** RFI 特殊漂移管结构使轴向加速场偏离理想间隙模型。
- **相位—能量耦合：** 粒子过隙时速度与射频相位持续变化，影响**有效能量增益与 TTF**。
- **多约束迭代：** 结构更新同时改变**谐振频率、场分布与同步条件**，需反复计算。

关键挑战：复杂电磁场与同步粒子运动相互关联，传统近似与人工调整难兼顾精度和效率。

RFI 局部电场分布

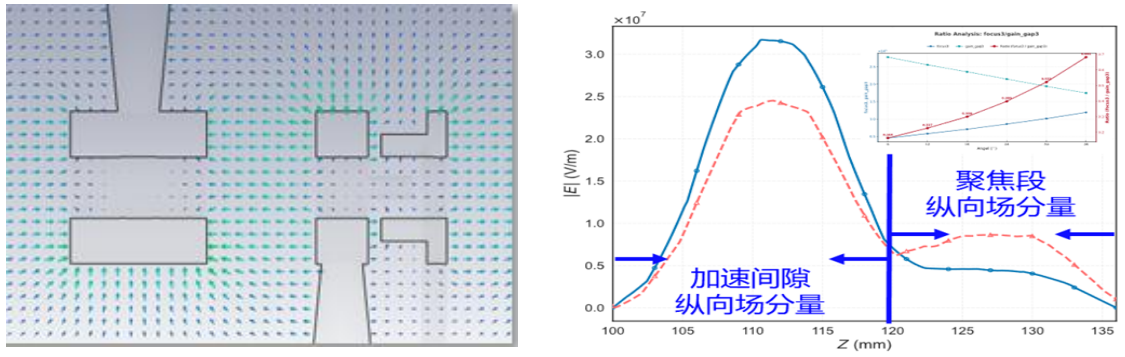


图1　RFI 电场分布

纵向误差产生与传递路径

几何结构
间隙 / 漂移管
→
轴向加速场
$E_z(z)$
→
粒子响应
$\varphi(z)$ / $W(z)$

结构偏差 → 场形偏差 → 相位 / 能量偏差

图2 纵向动力学设计难点示意

纵向动力学设计

二、基于数值场的纵向设计框架

- **数值场驱动：** CST 本征模及轴向电场求解，结合 **同步粒子数值跟踪**，减少理想场假设。
- **自动闭环迭代：** 统一 **频率校正、相位扫描、TTF 检查与参数更新**。
- **多条件收敛：** 以 **相位偏差、迭代能量变化** 判定收敛，并设置异常回退和迭代上限。

纵向动力学自动迭代计算流程

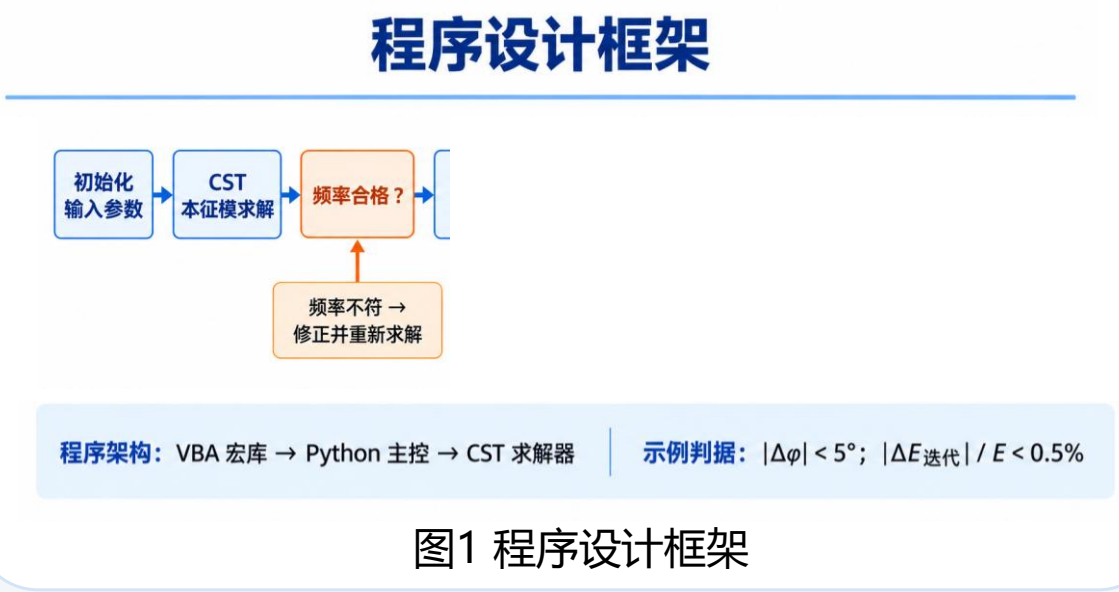


图1 程序设计框架

TTF 计算

由于粒子穿过加速间隙时射频场随时间变化，粒子在每个间隙中感受到的**有效加速电压**取决于**渡越时间**。TTF 用于表征**真实加速效应与理想静态场积分**之间的差异。

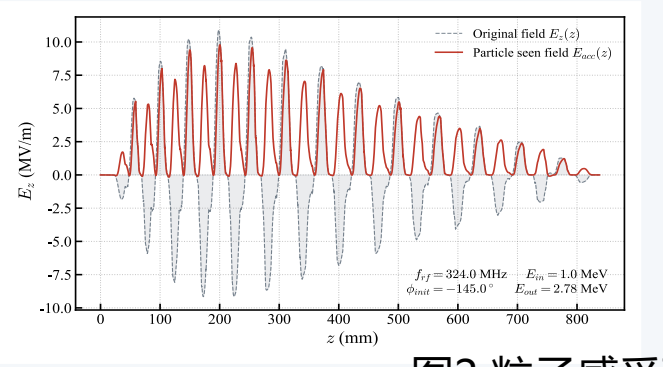


图2 粒子感受到的真实场分布

纵向动力学设计

三、纵向动力学设计结果

- **迭代收敛：** **18代**达到收敛条件，**27个**加速间隙的同步相位全部收敛至设计值 **$\pm 5°$ 以内**。
- **能量增益：** 同步粒子由 **$1MeV$** 加速至 **$2.75MeV$**，动力学计算结果与 Tracewin 结果**相互验证**。
- **高频稳定：** **第8代**后高频特性趋于稳定，**Q** 约 **1.1×104**，波动小于 1%。
- **综合指标：** TTF 收敛至 **0.75**，$E_{acc} \approx$ **$2.10MV/m$**，$Z/L \approx$ **$336\Omega/m$**，具备工程化设计效率

粒子加速结果

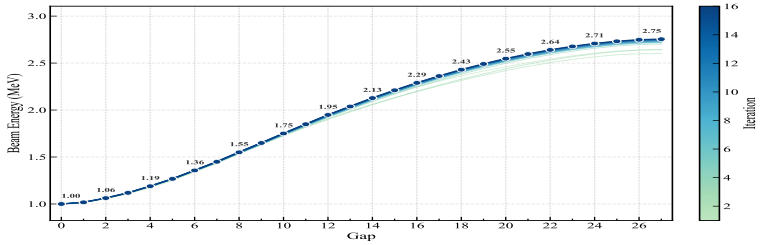


图1 迭代过程逐 gap 能量演化

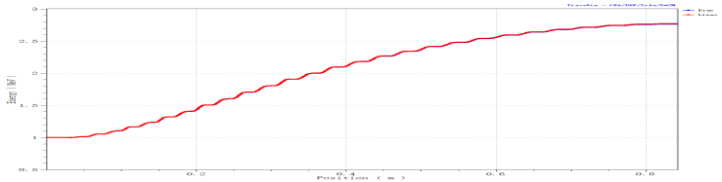


图2 Tracewin 能量计算结果

同步相位收敛结果

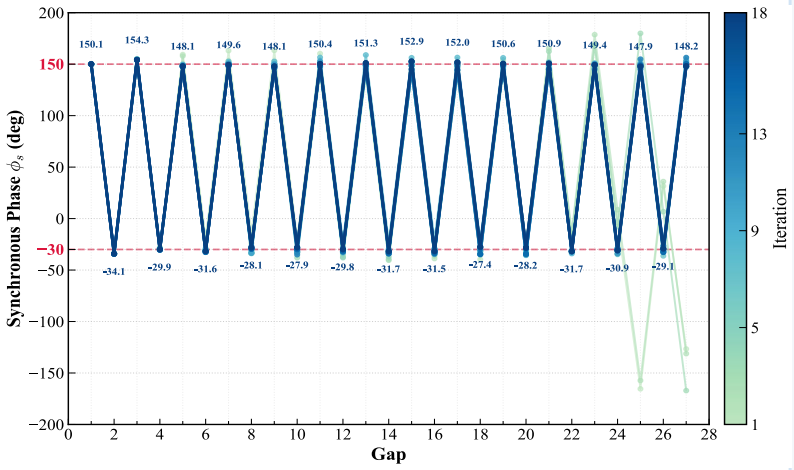
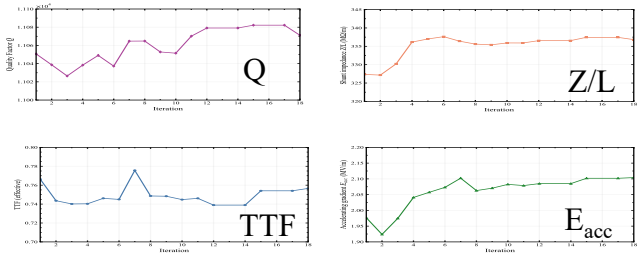


图3 迭代过程粒子到达各 gap 中心时的 RF 相位

高频与效率指标



高频特性在第8代后趋于稳定

参数	最终值
TTF	0.75
E_{acc}	2.10 MV/m
Z/L	336 MΩ/m
Q	1.11×10^4

结论： 基于数值场的纵向设计框架可稳定实现同步相位收敛，能量提升与高频参数协同优化，为 RFI 腔体工程设计提供可行路径。

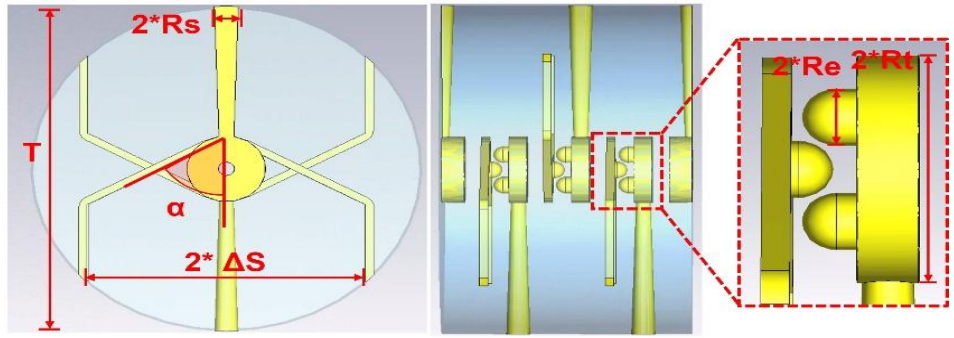
横向动力学设计

一、横向动力学设计难点

- **参数建模复杂：** 横向聚焦依赖电极几何参数 **ΔS、R** 等；几何微调会同时改变**聚焦梯度、边缘场分布**与**腔体电磁特性**。
- **相位相关聚焦：** RF 电四极聚焦具有显著**时间相关性**，聚焦强度与**同步相位紧密耦合**。
- **非线性与边缘场：** 聚焦场实际分布偏离理想四极模型，易引起**包络失配、发射度增长与传输效率下降**。

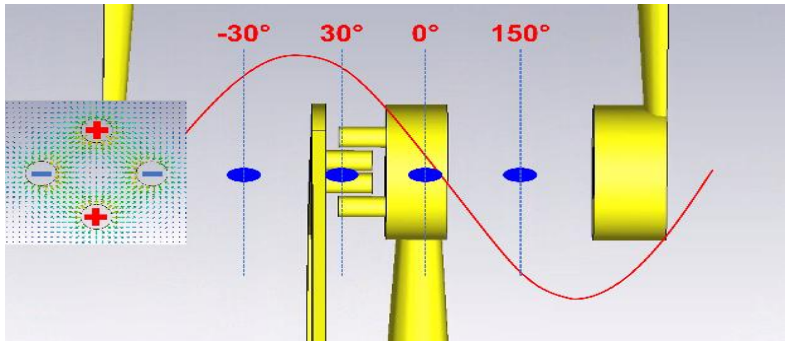
关键挑战： 结构参数、粒子相位与横向聚焦场强强耦合，传统理想四极近似与人工调参难兼顾精度、稳定性和设计效率。

横向结构参数示意



横向高频参数决定横向聚焦梯度强弱

横向聚焦场与粒子相位关系



时间相关聚焦-稳定区受限-设计与匹配更困难

横向动力学设计

二、优化参数与计算框架

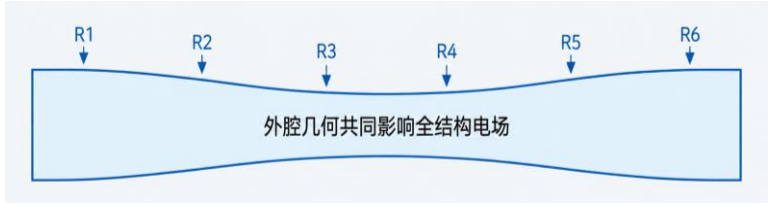
- **聚焦方式：** 聚焦段按 **FFFDDD** 周期排布。
- **计算闭环：** 几何更新 → CST 本征场求解 → 工作相位搜索 → TraceWin 追踪 → 六项验收 → 实测反馈更新。
- **参数层次：** 优先独立优化 **4 组 S**；特定条件下再引入 **共同 R 调频**。

优化计算框架

当前策略： 先冻结外腔与纵向排布，优化四组S；共同R主要用于特定条件下的调频闭合。

三、关键参数示意

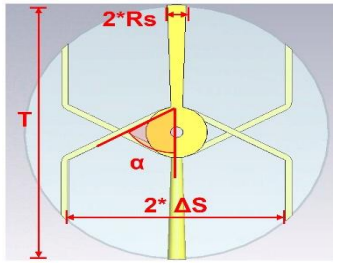
R参数



- R 为**外腔腔径参数**，影响磁通回路空间与外腔轮廓。
- 改变 R 会同时影响**谐振频率、整体场分布**及横向场强耦合。
- 由于**全局耦合性较高**，共同 R 主要用于特定条件下的**调频闭合**。

S参数





- S 改变**射频磁通耦合**，影响聚焦电极的**局部 RF 激励电压**。
- S 主要负责所在聚焦段的**局部场强调节**，对相邻结构的影响相对较小，是横向动力学优化的**主要自由度**。

横向动力学设计

- 两阶段自适应搜索共完成 127 次几何评估，最优点为 114 号腔型。
- 传输率由 90.49% 提升至 99.59%，出口能量达到 3.203MeV 本征频率为 200.469MHz。
- X/Y/Z 发射度增长降至30.16%/30.66%/32.18%，已显著逼近30%目标，但三向指标尚未同时满足严格验收条件。

图1 两阶段搜索中的主要性能改善

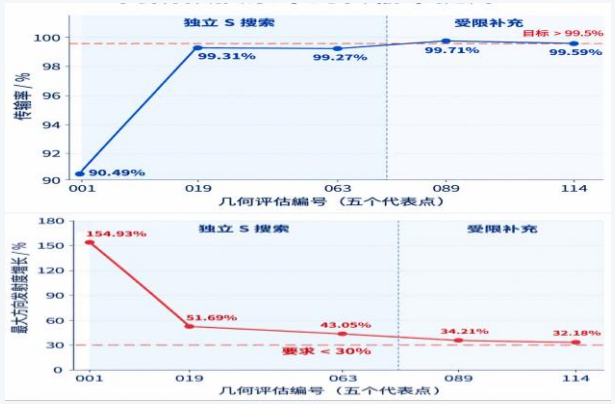


图2 入口相空间

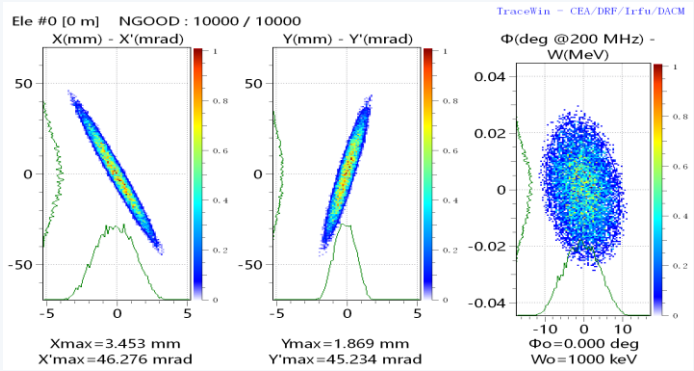


图3 出口相空间

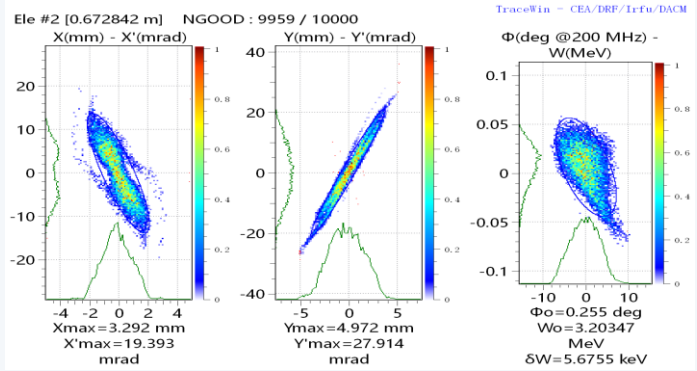


图4 三向Norm.RMS发射度演化

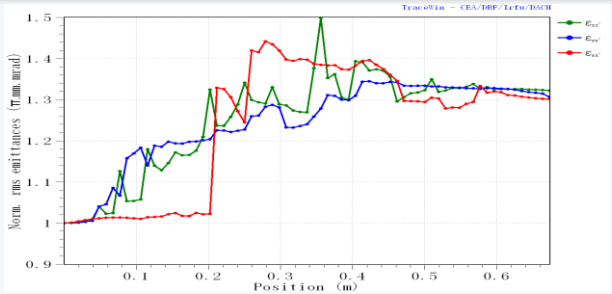
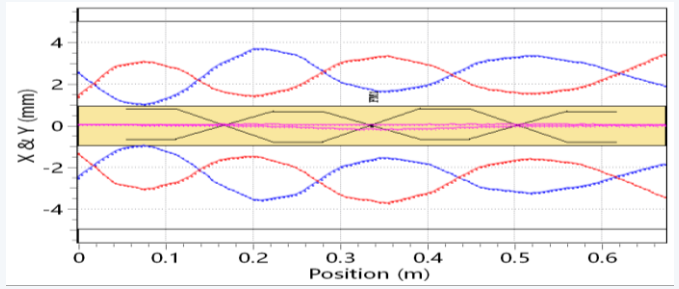
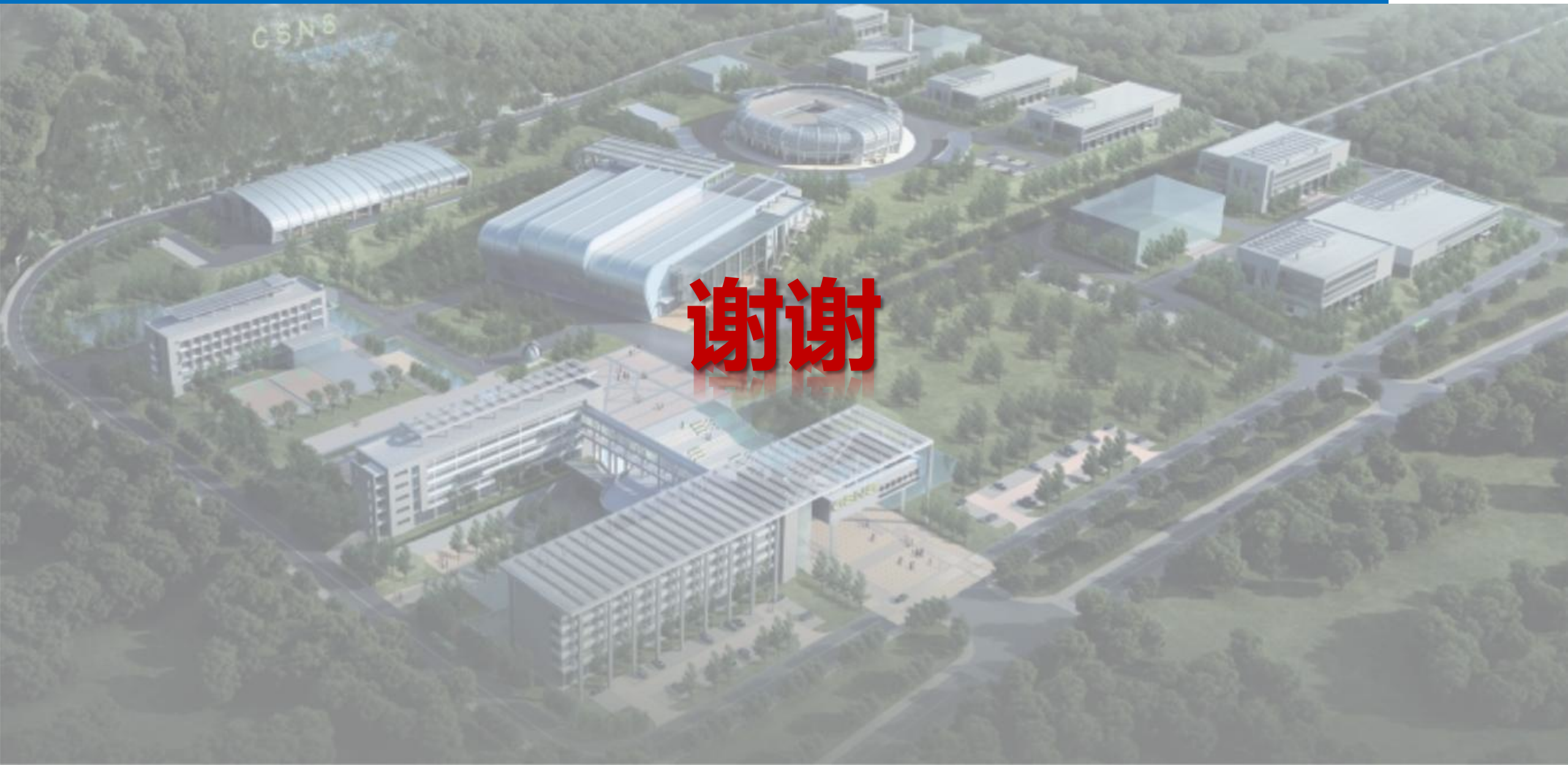


图5 束流包络



六项指标验收

指标	优化结果	要求	是否通过
传输率 T	99.59%	> 99.5%	✓
X 发射度增长 g_x	30.16%	< 30%	✗
Y 发射度增长 g_y	30.66%	< 30%	✗
Z 发射度增长 g_z	32.18%	< 30%	✗
出口能量	3.203 MeV	>= 2.85453 MeV	✓
本征频率	200.469 MHz	199 – 201 MHz	✓



谢谢