



## 紧凑型强流重离子CH型漂移管直线加速器动力学设计

孔启宇 殷学军 杜衡 李钟汕 李小妮 刘政 原有进 夏佳文

### Dynamics Design on a Compact High Intensity Heavy-ion CH-DTL

KONG Qiyu, YIN Xuejun, DU Heng, LI Zhongshan, LI Xiaoni, LIU Zheng, YUAN Youjin, XIA Jiawen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022052>

#### 引用格式:

孔启宇, 殷学军, 杜衡, 李钟汕, 李小妮, 刘政, 原有进, 夏佳文. 紧凑型强流重离子CH型漂移管直线加速器动力学设计[J]. *原子核物理评论*, 2023, 40(3):362–369. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022052

KONG Qiyu, YIN Xuejun, DU Heng, LI Zhongshan, LI Xiaoni, LIU Zheng, YUAN Youjin, XIA Jiawen. Dynamics Design on a Compact High Intensity Heavy-ion CH-DTL[J]. *Nuclear Physics Review*, 2023, 40(3):362–369. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022052

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 重离子治癌装置4 MeV/u IH型漂移管直线注入器的动力学设计

Design of a 4 MeV/u IH-DTL Injector for Cancer Therapy

原子核物理评论. 2018, 35(1): 34–39 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.01.034>

#### IH型漂移管直线加速器的束流动力学研究 (英文)

Beam Dynamics Study of the IH-DTL New Injector for HIRFL-CSR

原子核物理评论. 2017, 34(2): 170–176 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.02.170>

#### 基于D-T紧凑型中子源的快中子照相准直屏蔽体设计及中子束特性模拟研究

BSA Design and Simulation of the Beam Characteristic for the Fast Neutron Radiography Based on a Compact Neutron Generator

原子核物理评论. 2017, 34(4): 762–767 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.04.762>

#### 重离子治癌加速器束诊探测器运动控制系统设计

Design and Development of Motion Control System for Heavy Ion Medical Machine Beam Diagnostics Detector

原子核物理评论. 2019, 36(4): 433–440 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.433>

#### ECR源低能强流高电荷态离子束四维发射度测量仪的研制

Development of a Four-dimensional Emittance Meter for the Diagnostics of High Intensity Highly Charged Ion Beam From an Electron Cyclotron Resonance Ion Source

原子核物理评论. 2019, 36(3): 313–321 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.03.313>

#### 重离子治癌引出BUMP电源控制器设计

Design of Controller for Extraction BUMP Power Supplies in Medical Heavy-ion Facility

原子核物理评论. 2021, 38(2): 153–158 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2020080>

文章编号: 1007-4627(2023)03-0362-08

## 紧凑型强流重离子CH型漂移管直线加速器动力学设计

孔启宇<sup>1,2,3</sup>, 殷学军<sup>1,2,3,†</sup>, 杜衡<sup>1,3,†</sup>, 李钟汕<sup>1,3</sup>, 李小妮<sup>1,3</sup>, 刘政<sup>1,3,4</sup>, 原有进<sup>1,2,3</sup>, 夏佳文<sup>1,2,3</sup>

- 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
- 中国科学院大学, 北京 100049;
- 惠州离子科学研究中心, 广东 惠州 516003;
- 兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000

**摘要:** 基于KONUS动力学设计理论, 完成了一台工作在脉冲模式的紧凑型常温交叉杆型漂移管直线加速器(CH-DTL)的束流动力学设计, 并对关键问题进行了深入研究。该脉冲直线加速器工作频率选为325 MHz, 内含29个加速间隙, 动力学长度为1.3 m, 可以将 $^{12}\text{C}^{5+}$ 重离子束流能量由1 MeV/u提高至4 MeV/u。对有利于提高装置紧凑性的基本参数, 如工作频率、加速电压、 $K_p$ 值等进行了理论分析和研究。动力学模拟结果显示, 粒子在DTL段传输效率大于99%, 输出束团相宽约为 $20^\circ$ , 能量分散小于 $\pm 1\%$ 。

**关键词:** DTL; 紧凑型强流重离子; KONUS动力学设计

**中图分类号:** O571.53

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.40.2022052

### 0 引言

直线加速器作为重要的射频加速结构, 因其优秀的束流品质、较高的加速效率、注入引出结构简单等优点, 得到了迅猛发展, 并在各领域的应用中发挥着越来越重要的作用<sup>[1]</sup>。应用需求的增加也对加速器装置的紧凑性和束流品质提出了更高的要求。为了推动重离子直线加速器在各领域应用的发展, 中国科学院近代物理研究所研制了一批面向实际应用的小型化紧凑型重离子直线加速器, 如: 分离扇回旋加速器的直线注入器(SSC-Linac)、哈尔滨工业大学空间环境地面模拟装置的300 MeV质子重离子加速器直线注入器, 以及多用途重离子束直线加速器(HI-Linac)等。上述装置或已成功运行或正在调试。虽然上述装置工作频率和应用目标不同, 但是它们的共同特点是束流相对论因子( $\beta$ )小于0.1, 均采用了射频四极场加速器(RFQ)+漂移管直线加速器(DTL)的加速器方案, 其中DTL段均采用了一字交叉型横电模(IH)型结构。IH型DTL作为H-mode结构类别中的一种重要类型, 具有较高的有效分路阻抗, 功率转换效率高, 可以实现较高的加速梯度等诸多优点。

但上述直线注入器在紧凑性方面还存在很大的优化空间。因此, 结合此前重离子直线加速器的研制经验以

及应用需求, 本文提出了一种结构更加紧凑加速梯度更高的重离子直线加速器系统设计方案。该直线加速器运行在脉冲模式下, 主要由电子回旋共振(ECR)离子源、四翼型射频四极场加速器(4-vane RFQ)、十字交叉杆型漂移管直线加速器(CH-DTL)以及束流传输线组成。其中, DTL段的动力学设计采用了KONUS(复合零度结构, Kombinierte Null Grad Struktur)方案, 该方案零度同步相位加速的优点与紧凑型的设计目标实现了完美结合<sup>[2-3]</sup>。本文以DTL段的束流动力学设计为主要研究内容, 从参数选择与优化作为研究的切入点, 详细介绍动力学设计过程中的优化思路, 使用多粒子跟踪模拟程序BEAMPATH<sup>[4]</sup>对动力学设计的可靠性进行了验证。

### 1 主要设计参数选择

本工作的研究难点在于要满足紧凑型设计的前提下, 既要实现粒子能量由入口处的1 MeV/u提高到4 MeV/u; 同时又要保证出口束流具有尽可能小的能散以满足同步环的注入要求; 还要有较高的束流传输效率, 尽可能地减少束流损失来满足辐射防护的要求。因此, 关键参数的选择极为重要。

收稿日期: 2022-04-05; 修改日期: 2022-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11375243); 广东省引进创新创业团队计划资助项目(2016ZT06G373)

作者简介: 孔启宇(1994-), 男, 山东济宁人, 博士研究生, 从事加速器物理研究; E-mail: qiyukong@impcas.ac.cn

† 通信作者: 殷学军, E-mail: yinxj@impcas.ac.cn; 杜衡, E-mail: duheng@impcas.ac.cn

(1) 工作频率的选择

对于常温直线加速器，腔体的品质因数  $Q$  反映了在腔体消耗同样功耗条件下，所建立电场的能力，其具体表达式如下：

$$Q = \frac{\omega U}{P}, \quad (1)$$

其中： $\omega = 2\pi f$  为角频率； $U$  为腔体储能； $P$  为功率损耗。腔体单位长度的有效分路阻抗  $ZT^2$  有

$$ZT^2 = \frac{(E_0 T)^2 L}{P}, \quad (2)$$

其中： $E_0$  为加速间隙轴向电场； $T$  为渡越时间因子； $L$  为腔体长度。那么  $(ZT^2)/Q$  表示了射频结构建立期望电场的能力，且与腔体运行频率成正比。因此，提高频率有利于得到更高的能量转换效率。另外，工作频率提高时，加速单元  $\beta\lambda/2$  也会缩短，有助于提高装置紧凑性。

但工作频率提高的同时也会带来一系列问题，比如高频率导致腔体体积减小、加工难度提高、RFQ 接受度减小 [5] 等。可见，腔体工作频率是需要综合多种因素后的折中选择。根据已经建成的 HI-Linac 实际情况，国内现有的实际加工能力和现实中紧凑型要求，并参考国际同类型加速器的工作频率，将工作频率选择为 325 MHz。

(2) 腔体  $K_p$  值的选择

在 20 世纪 50 年代，Kilpatrick [6] 根据实验数据分析了射频击穿的原因，并定义了高频运行时无击穿现象发生的条件，Kilpatrick 的实验结果由 Boyd [7] 整理成一个公式表示，如下所示：

$$f(\text{MHz}) = 1.64 E_k^2 e^{-8.5/E_k}. \quad (3)$$

其中： $f$  为高频频率； $E_k$  为 Kilpatrick Limit，单位是 MV/m。根据公式可以得出谐振频率与  $E_k$  的关系曲线，如图 1 所示。对于我们选定的工作频率 325 MHz，计算得到对应的  $E_k \approx 17.86$  MV/m。进一步利用这个方程来

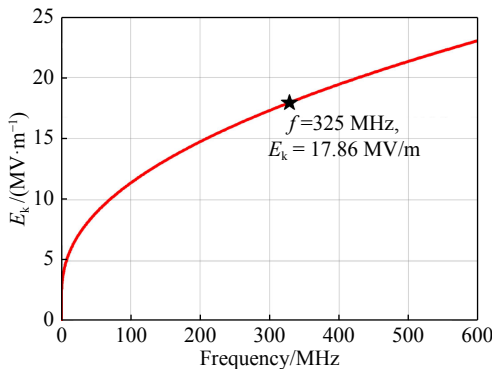


图 1 实验中击穿电压与电压高频频率的函数关系图(在线彩图)

估算击穿限值  $E_s$  如下：

$$E_s = K_p E_k, \quad (4)$$

通常来说， $K_p$  值选取在 1 和 2 之间，但对于脉冲机器可以适当调高。文献 [8] 中对腔体  $K_p$  值的极限测试结果，低占空比的脉冲直线加速器的  $K_p$  值选在 2.2 是较为安全的 [8]。

## 2 CH-DTL 动力学设计及优化

### 2.1 KONUS 束流动力学

在 20 世纪 80 年代末，德国法兰克福大学的 Ratzinger 等 [9] 提出了一种可同时实现横向与纵向稳定传输的漂移管直线加速器动力学方案，KONUS(Kombinierte Null grad Structure) 束流动力学。一个完整的 KONUS [10] 动力学周期主要由三部分组成：(1) 零度同步相位加速段；(2) 横向聚焦段；(3) 纵向聚束匹配段。如图 2 所示。

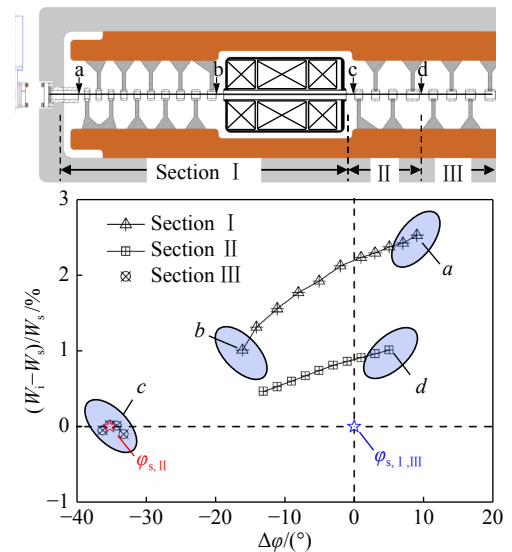


图 2 KONUS 束流动力学原理示意图(在线彩图)

图 2 详细分析了束流在 KONUS 周期内的完整运动。首先，以  $0^\circ$  加速段 Section I 中的位置  $a$  作为起点，束团的相位位于结构定义的同步粒子相位  $\phi_{s,I}$  的右侧。在 Section I 内，束团将会不断向负相位滑相，同时由于束团经历的电场小于同步粒子，二者间的能量差距会逐渐减小。随着加速间隙(加速间隙位于两相邻漂移管之间，后文简称 gap)数量的增加，束团受到明显的非线性力的作用，导致发射度增大，须在此之前结束 Section I。束团在 Section I 中运动时，高频场对束团存在横向散焦效果，当束流横向尺寸增长到一定程度时，必须要通过  $b-c$  段的聚焦元件对包络进行约束。Section II 为负同

步相位纵向聚束段，该段中束团相位与结构定义的同步粒子相位  $\varphi_{s,II}$  重合。经过纵向和横向匹配后，束团进入下一  $0^\circ$  加速段 Section III，此时结构定义的同步相位为  $\varphi_{s,III}$ 。束流在一个完整 KONUS 周期内，按照前后顺序将依次经过主加速段、横向聚焦段、纵向聚束匹配段，便可以实现低发射度增长的高梯度加速。

### 2.2 动力学设计程序 LORASR

针对 KONUS 束流动力学理论，法兰克福大学开发了专用的 LORASR 模拟程序<sup>[11]</sup>。该程序可以对多种类型结构的漂移管直线加速器进行束流传输模拟，但其主要的模拟对象是基于 KONUS 的漂移管直线加速器。程序根据同步能量、同步相位、有效电压等一系列输入参数生成相应的加速结构，并基于给定的初始束流分布模

拟在加速结构中的传输<sup>[12-13]</sup>。目前已经成功应用于多个加速器装置的物理设计，如：德国的 GSI-HLI<sup>[14]</sup>，欧洲的 CERN Linac3<sup>[15]</sup>，中国科学院近代物理研究所的 SSC-Linac<sup>[16]</sup>，哈尔滨工业大学的 SESRI-Linac<sup>[17]</sup> 和 HI-Linac，其可靠性已通过束流实验得到了验证。

### 2.3 动力学设计及优化

在本方案中，RFQ 出口法兰内表面设定为 DTL 动力学设计起点。如图 3 为 RFQ 出口处的束流相空间分布，其主要参数如表 1 所列。其中： $\epsilon_{n,rms}$  为束流归一化均方根发射度， $\alpha$  和  $\beta$  为束流 Twiss 参数。由于 RFQ 出口束流直接注入 DTL，该组相空间参数被作为动力学设计的输入条件。束流横向相空间归一化均方根发射度约为  $0.18 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ ， $X$  方向为散焦， $Y$  方向为聚焦。

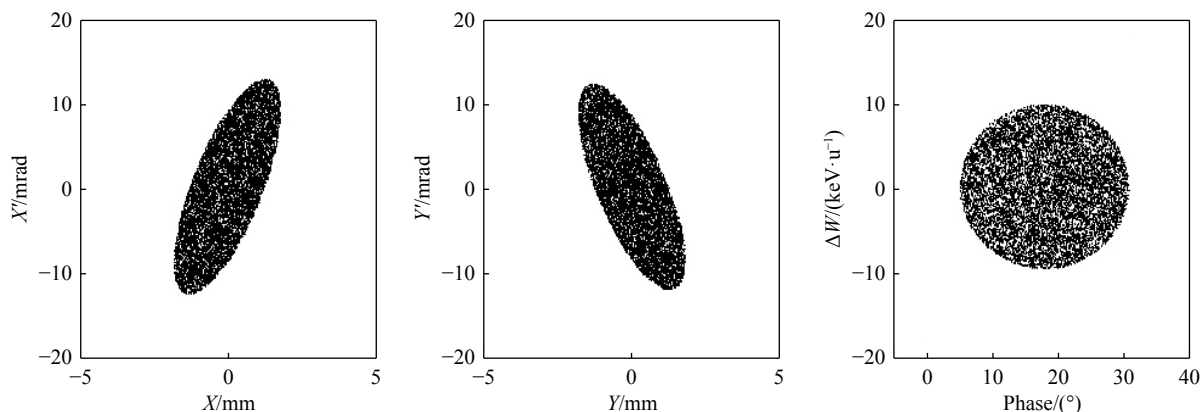


图 3 RFQ 出口处束流相空间分布

表 1 RFQ 出口处束流相空间参数

参数	值
$\epsilon_{x,n,rms}$	$0.18 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$
$\alpha_x$	-1
$\beta_x$	$0.2 \text{ mm/mrad}$
$\epsilon_{y,n,rms}$	$0.17 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$
$\alpha_y$	0.98
$\beta_y$	$0.2 \text{ mm/mrad}$
$\epsilon_{z,n,rms}$	$31.2 \pi \text{deg} \cdot \text{keV/u}$
$\alpha_z$	0
$\beta_z$	$1.33 \text{ deg}/(\text{keV/u})$

由于初始束流在  $X$  方向为散焦，包络进入 DTL 即开始增大。为避免束流损失在漂移管内壁，需针对包络变化确定第一段加速段中 gap 数量。通过模拟第一段加速段 gap 数量变化对束流包络和传输效率的影响，如图 4 所示，确定在第一段加速段设置 10 个 gap，其同步相位均为  $0^\circ$ 。

第一段加速段出口处的  $X$  方向相空间分布如图 5 所

示，束团出现了丝化现象，发射度也存在一定程度的增长。

图 6 给出了 gap 电场分布。通过分析发现，gap 电场的  $Z$  向和径向分量在 gap 中的分布是不均匀的，且越远离轴线其不均匀性越明显，那么束团径向分布就会导致束团内粒子感受到不同强度的  $Z$  向和径向电场分量，且横向尺寸越大，电场强度差别也就越大。

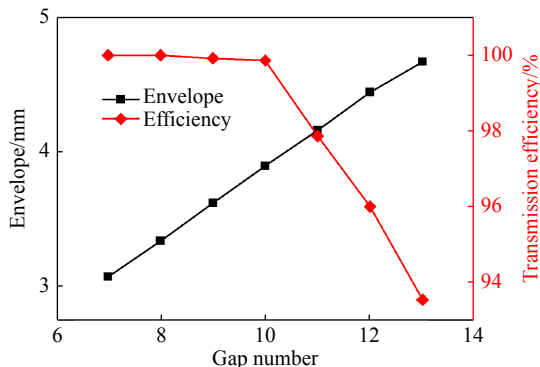


图 4 第一段加速段中间隙数量对束流最大包络和传输效率的影响(在线彩图)

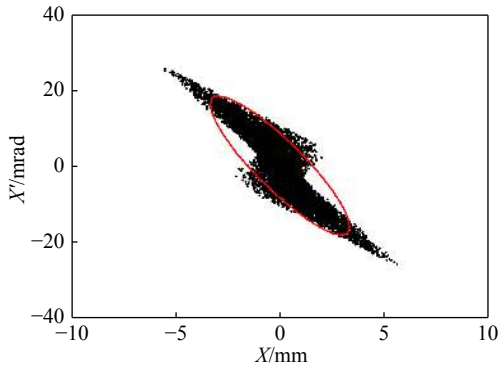


图 5 在经过第一段零度加速段后的束流 X 方向相空间分布 (在线彩图)

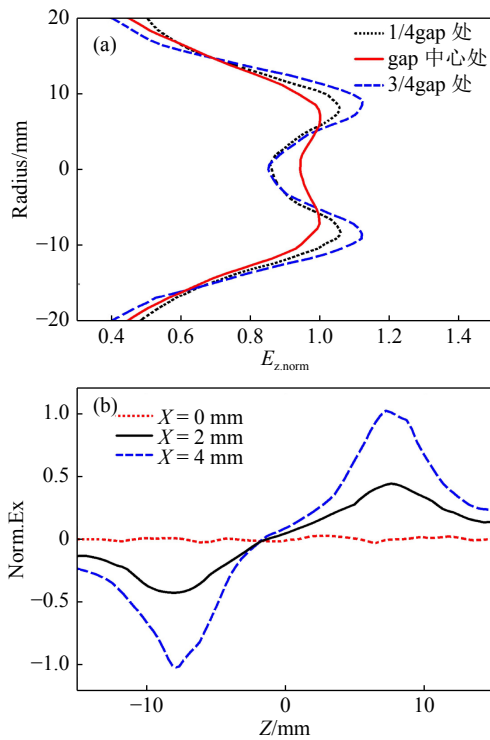


图 6 (a) Z 向电场分量在 1/4gap 处、gap 中心及 3/4gap 处的径向分布; (b) X 向电场分量在轴线、远离轴线 X=2 mm 及远离轴线 X=4 mm 处的纵向分布 (在线彩图)

根据此前的横向包络分析，束流在 X 方向为散焦，包络会不断增大，束团内部的粒子也会感受到差别更大的 Z 向和径向电场分量，从而导致出口处的束团出现丝化。初始束团的非对称分布给束团的横向和纵向运动带来了明显影响，但是束流的传输效率并未受到影响，发射度的增长也还在控制范围，因此可以继续后续的物理设计。

在束流横向包络即将增大至接近漂移管内壁时，束流应进入横向聚焦段进行横向匹配。在本文设计中设置了三组四极透镜将束团重新匹配为对称束，三组四极透镜物理参数如表 2 所列。该段漂移管内半径调整为 9 mm，确保束流与内壁间有足够裕量。横向聚焦段结束后束流

便将进入负同步相位纵向聚束段，应设置合适的漂移管长度，使束流在进入纵向聚束段第一个 gap 中心时，高频电场恰好处于设计的聚束相位。该段距离可以通过以下公式计算得到：

$$L_{\text{shift}} = \frac{180^\circ + \Delta\varphi}{180^\circ} \times \frac{\beta\lambda}{2}, \quad (5)$$

其中： $\Delta\varphi$  是漂移段前后 gap 中心的高频相位差； $\frac{\beta\lambda}{2}$  则是加速单元长度； $\beta$  为零度同步相位加速段出口处的粒子相对论速度。

表 2 三组内置四极透镜物理参数

磁铁编号	磁场梯度/(T·m <sup>-1</sup> )	有效长度/mm	孔径/mm
Q1	53	80	18
Q2	77	110	18
Q3	80	70	18

在横向聚焦段后，通常会设置负同步相位纵向聚束段 [参见图 2 的 (c)~(d)]。该段的主要作用是利用负同步相位将纵向发散的束团进行纵向聚束，再注入零度同步相位加速段。聚束单元的个数不宜过多，否则影响加速效率。通过优化，本文确定设置 3 个负同步相位的聚束单元。在结束了纵向聚束段后，束团将进入一段较长的零度同步相位加速段，可将束团能量加速至 4 MeV/u。

各加速间隙的有效加速电压也是优化过程中需重点考虑的 [18]，应尽可能地使各加速间隙轴上最大电场趋于一致，能量增益达到最大。图 7 为动力学设计所用到的腔体各 gap 有效电压及轴上最大电场。

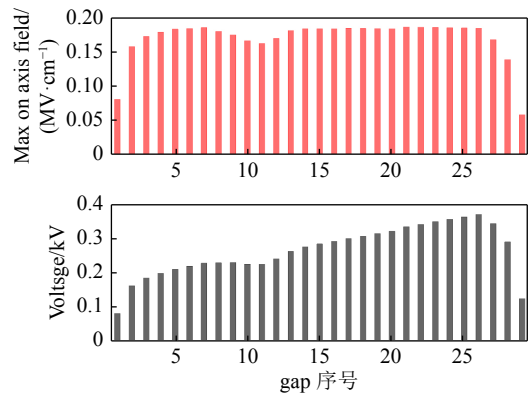


图 7 动力学设计中各 gap 所用到的加速电压，以及对应的各 gap 最大轴上电场强度 (在线彩图)

粒子在通过 gap 时，由于电场随时间发生变化，粒子的能量增益需引入渡越时间因子 TTF 进行修正。渡越时间因子 TTF 与粒子能量、电场分布、漂移管结构相关。通过对各加速单元的 gap 与漂移管长度比以及漂移管内径参数的优化后，全局渡越时间因子 TTF 如图 8 所示，整体的 TTF 维持在 0.80~0.84 之间，分布较为均匀。

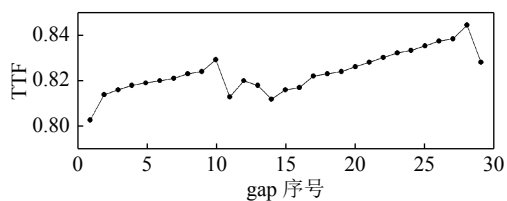


图 8 动力学设计中各加速间隙的 TTF 设计值

### 2.4 动力学设计总结

基于上述研究，本文完成了 CH-DTL 的动力学设计。该重离子直线加速器主要参数如表 3 所列。

束团 90% 粒子的横向包络演化如图 9 所示，束流与漂移管内壁间留有充足裕量。DTL 段出口处设置了三台四极透镜，可以很容易地将束团匹配至正常尺寸，同时实现了粒子传输效率大于 99% 的设计目标。

束流在出口处的横向相空间分布如图 10 所示，束流相空间参数如表 4 所列。

由于 gap 中非线性高频聚焦和散焦力的存在，在 X 方向相空间存在畸变，X 方向发射度在进入 DTL 后出现急剧增长，在 600 mm 后又出现下降；Y 方向发射度未发生明显增长；Z 方向发射度则呈持续上升趋势。各方向发射度变化如图 11 所示。

装置	参数	数值
RFQ	工作频率	325 MHz
	设计离子	$^{12}\text{C}^{5+}$
	设计流强	200 eμA
	高频结构类型	四翼型(4-vane)
	注入能量	8 keV/u
DTL	引出能量	1 MeV/u
	传输效率	>90%
	高频结构类型	交叉杆型(CH)
	动力学方案	KONUS
	注入能量	1 MeV/u
DTL	引出能量	4 MeV/u
	引出束流能散	±0.3%
	传输效率	>90%

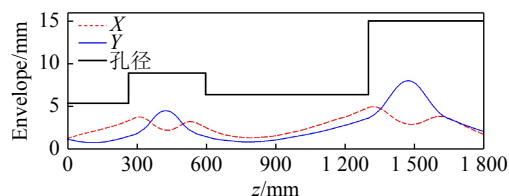


图 9 动力学设计中 90% 粒子的横向包络演化及孔径变化 (在线彩图)

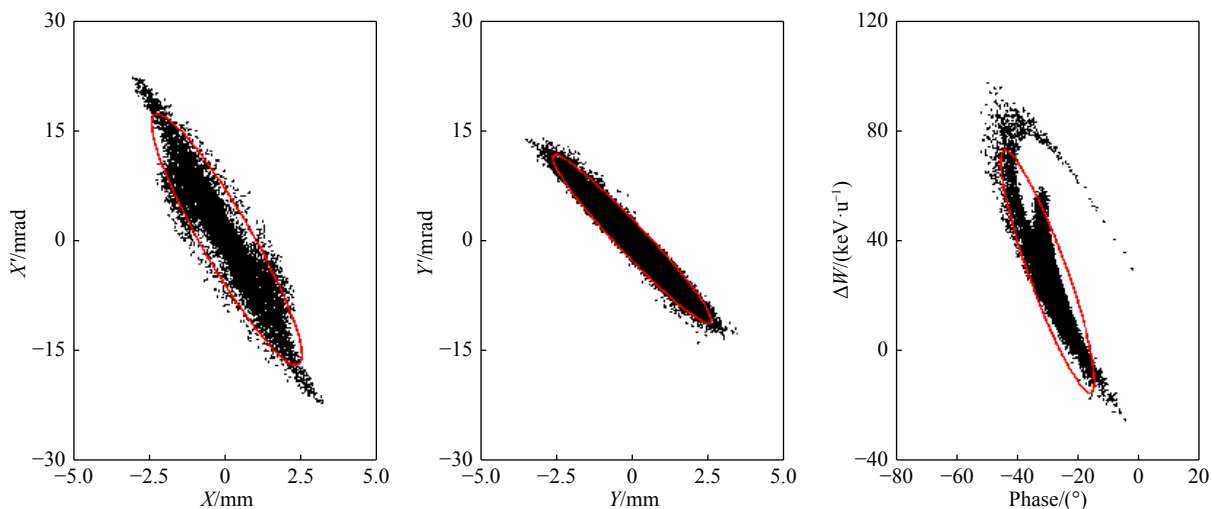


图 10 动力学设计中出口处束流相空间分布图 (在线彩图)

表 4 动力学设计中出口处束流相空间参数

参数	值
$\epsilon_{x,n,rms}$	0.31 πmm·mrad
$\alpha_x$	2.02
$\beta_x$	0.14 mm/mrad
$\epsilon_{y,n,rms}$	0.18 πmm·mrad
$\alpha_y$	2.42
$\beta_y$	0.14 mm/mrad
$\epsilon_{z,n,rms}$	68.48 πdeg·keV/u
$\alpha_z$	1.95
$\beta_z$	0.72 deg/(keV/u)

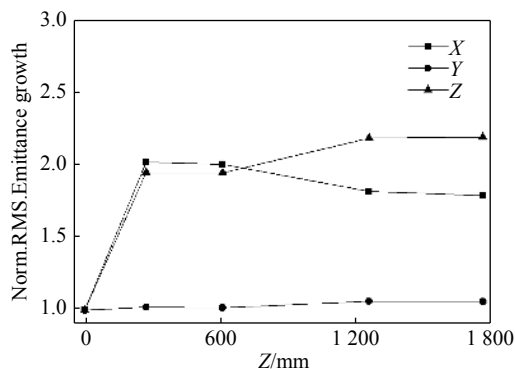


图 11 动力学设计中归一化 RMS 发射度增长

如图 12 为束流在纵向的相宽、能散包络演化。可以看到，束团的同步相位经过了两次跳相过程，分别发生在横向聚焦段出口和聚束段出口。在加速过程中，束团的相位是一直在由正同步相位滑相至负同步相位。束团出口处相位宽度约为 20°，能量分散小于 ±1%。

图 13 为设计中束团中心的演化过程，整体分布较

为合理。

根据以上设计，DTL 段动力学长度仅为 1.3 m，其结构示意图如图 14 所示，可以将粒子从 1 MeV/u 加速到 4 MeV/u，束流传输效率 >99%。相较于同样能量段的 HI-Linac 中 DTL 段动力学长度缩短约 60%<sup>[19]</sup>，实现了紧凑高效的设计目标。

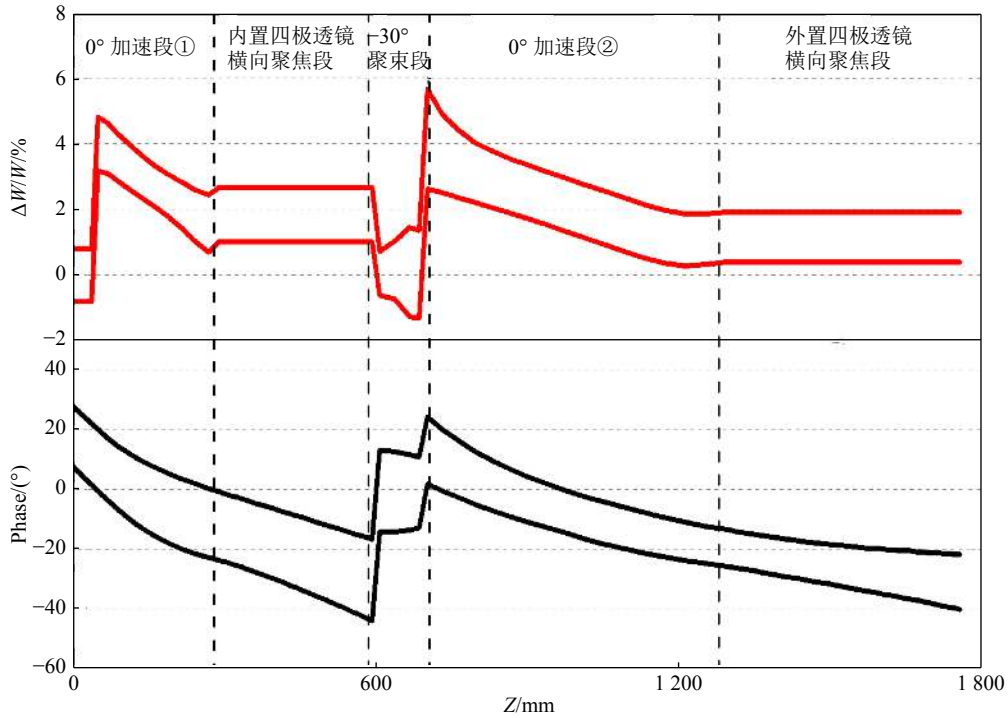


图 12 动力学设计中束团能量分散和相宽演化图(在线彩图)

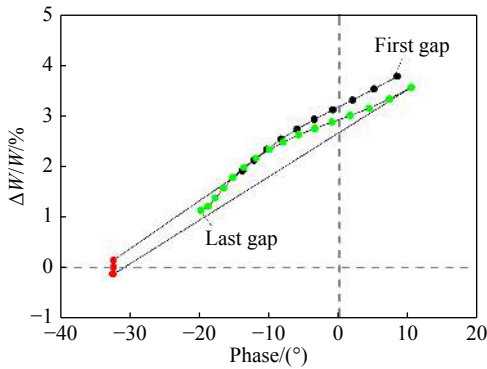


图 13 动力学设计中束团中心演化图(在线彩图)

其中：黑色数据点为第一段零度同步相位加速段，红色数据点为负同步相位聚束段，绿色数据点为第二段零度同步相位加速段。

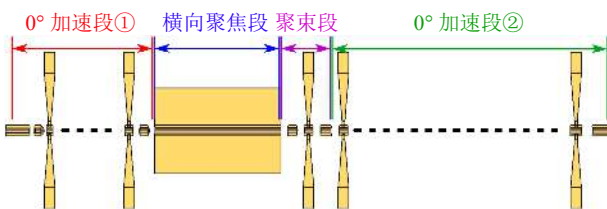


图 14 结构示意图(在线彩图)

### 3 PIC 模拟分析

为了更加全面地掌握束流在加速器中的运动情况，研究该设计方案的可靠性，本文将上述动力学优化设计结果，包括漂移管结构参数、gap 间隙长度、加速电场、四极透镜强度以及束团初始分布等，导入动力学模拟程序 BEAMPATH 中进行 PCI 多粒子跟踪模拟。得到了包括束流的横向包络、相宽能散、传输效率在内的重要结果。

图 15 为 BEAMPATH 模拟得到的束流横向包络，其整体变化趋势与 LORASR 程序得到的动力学模拟结果相同。束流与内壁间有较大裕量，整体孔径设置较为

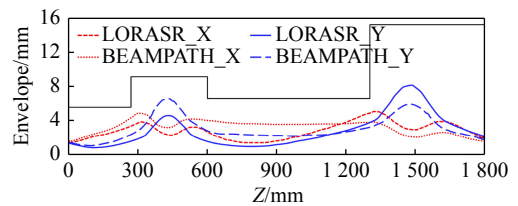


图 15 多粒子跟踪模拟得到的束团横向包络演化过程(在线彩图)

合理。同时，出口处的三台四极透镜配置  $\phi 30$  mm 内径的真空管道便可以满足动力学要求。

图 16 为束流相宽与能散的演化，在纵向聚束段，束团的相宽有明显的降低，与此同时，束团的能散必定会增大。但随后的零度加速段对能散的接受度非常大，不会对后续传输造成影响，且随着束团的传输，其能散逐渐降低，至 DTL 出口处其能散降至约  $\pm 1\%$ 。

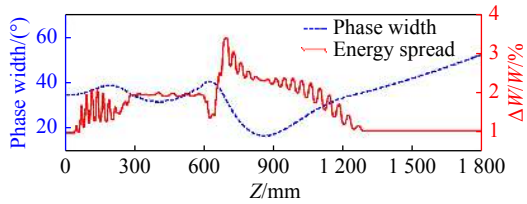


图 16 多粒子跟踪模拟得到的束团相位宽度和能散演化过程(在线彩图)

图 17 为束团在三个相空间中的发射度增长。同 LORASR 模拟结果相似，束团在 X, Z 向的发射度增长要大于 Y 方向，且发射度增长主要发生在第一段加速段内，主要是由于在紧凑型设计中，与 RFQ 出口束流的匹配能力有限造成的。此后发射度基本未发生明显增长。

束团能量的演化如图 18 所示。DTL 出口处的能量

略高于 4 MeV/u，DTL 出口束流的能量可以通过微调电压和相位在小范围内进行调节，这也给动力学设计降低了难度。

经过最后三个四极透镜后，其束团的相空间分布如图 19 所示。通过 BEAMPATH 模拟程序的验证，可以看到利用 LORASR 设计得到的 DTL 动力学设计方案是非常可靠的。

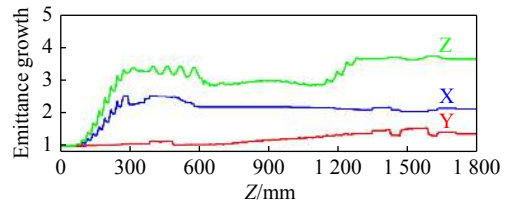


图 17 多粒子跟踪模拟得到的束团传输过程中的发射度归一化变化(在线彩图)

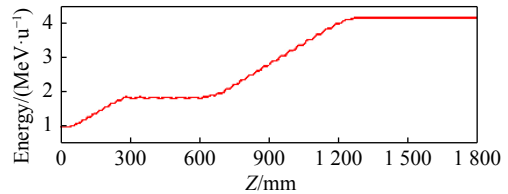


图 18 多粒子跟踪模拟得到的束团能量变化(在线彩图)

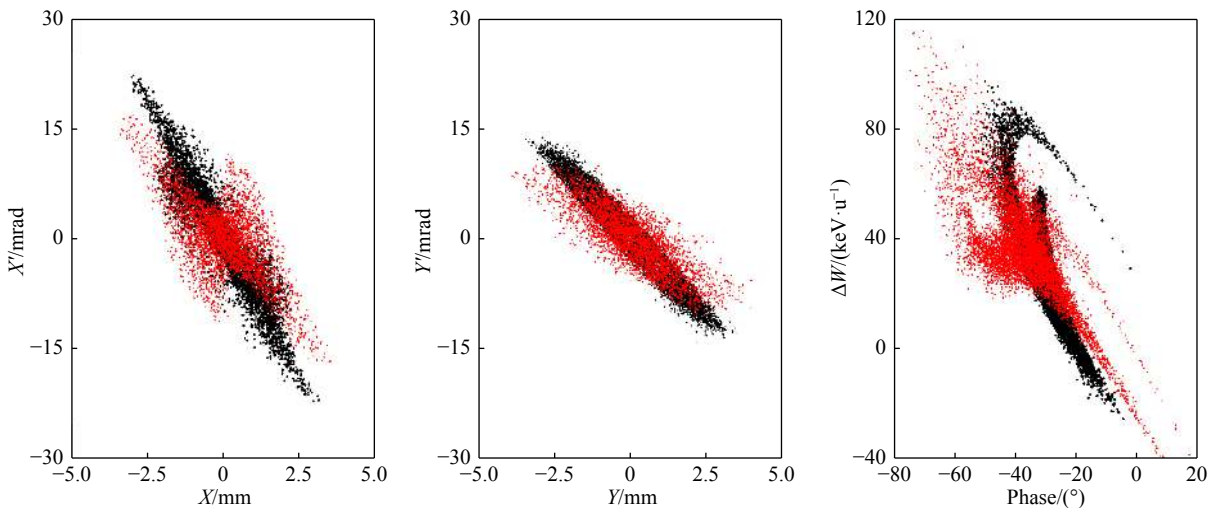


图 19 多粒子跟踪模拟得到的出口处束流相空间分布对比(在线彩图)  
其中：红色粒子为 BEAMPATH 模拟结果，黑色为 LORASR 模拟结果。

### 4 结论

本文完成了 325 MHz CH-DTL 加速器束流动力学总体设计。以关键动力学参数选择为起点，详细分析了各参数的选取依据。采用了 KONUS 动力学设计方案完成了主体设计，其中包含两段零度相位加速段，一段负同步相位聚束段和一段横向聚焦段。动力学设计结果显示，在动力学长度约为 1.3 m 内就可以将粒子能量由 1 MeV/u

加速至 4 MeV/u，传输效率大于 99%。相较于 HI-Li-anc 中 IH-DTL 的动力学长度缩短约 60%。有效地提高了装置的紧凑性。

### 参考文献：

[1] KARZMARK C J. *Medical Physics*, 1984, 11(2): 105.  
 [2] LEE Y, HAHN G, KIM E S, et al. Design Study and Multi-particle Tracking Simulation of the IH-DTL with KONUS Beam Dynamics



- for KHIMA Project[C]//International Particle Accelerator Conference: Number 7 Proc. of International Particle Accelerator Conference (IPAC'16), May 8-13, 2016, Busan, Korea. Switzerland: JACoW Publishing, 2016: 3299.
- [3] DU H, KONG Q, LI Z, et al. RF Design and Cold Model Measurement of an IH-DTL for Himm Injector[C]//Linear Accelerator Conference: Number 29 Proc. 29th Linear Accelerator Conference (LINAC'18), September 16-21, 2018, Beijing, China. Switzerland: JACoW Publishing, 2019: 329.
- [4] BATYGIN Y K. *Nucl Instr and Meth A*, 2005, 539(3): 455.
- [5] WANG Kedong. Theoretical and Experimental Study on Compact Heavyion RFQ Linac, IMP, CAS, 2019. (in Chinese)  
(王科栋. 紧凑型重离子射频四极场直线加速器的理论设计与研究[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2019.)
- [6] KILPATRICK W D. *Review of Scientific Instruments*, 1957, 28(10): 824.
- [7] BOYDT J. Kilpatrick's Criterion[Z]. 1982.
- [8] LI Zhongshan. Theoretical Design and Experimental Studies of Heavy Ion Radiofrequency Quadrupole Linacs[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)  
(李钟汕. 重离子射频四极场直线加速器的物理设计与实验研究[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2017.)
- [9] RATZINGER U. A Low Beta rf Linac-structure of the ih-type with Improved Radial Acceptance[C]//Proceedings of the 1988 Linear Accelerator Conference, October 3-7, 1988, Williamsburg, Virginia, USA. Switzerland: JACoW Publishing, 1989.
- [10] QIAO Jian, YIN Xuejun, YUAN Youjin, et al. *Nuclear Physics Review*, 2017, 34(2): 170. (in Chinese)  
(乔舰, 殷学军, 原有进, 等. *原子核物理评论*, 2017, 34(2): 170.)
- [11] TIEDE R, CLEMENTE G, MINAEV S, et al. LORASR Code Development[EB/OL].[2022-03-16].<https://cds.cern.ch/record/1078929>.
- [12] TANG R, XING Q, ZHENG S, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2019, 920: 50.
- [13] ZHAO L, PANG J, HE X, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2016, 806: 75.
- [14] RATZINGER U, HÄHNEL H, TIEDE R, et al. *Phys Rev Accel Beams*, 2019, 22: 114801.
- [15] ANGERT N, BLEUEL W, GAISER H, et al. The ih Linac of the Cern Lead Injector[Z]. 1994.
- [16] DU Heng. Design and Experiment Study of IH-DTL Linac[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)  
(杜衡. IH-DTL 直线加速器的设计及实验研究[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2017.)
- [17] JIANG H P, LIU J L, HAO H F, et al. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1350(1): 012081.
- [18] LIU J, LI H, LU Y, et al. *International Journal of Modern Physics A*, 2018, 33(11): 1850062.
- [19] DU Heng, YUAN Youjin, YIN Xuejun, et al. *Nuclear Physics Review*, 2018, 35(1): 034.  
(杜衡, 原有进, 殷学军, 等. *原子核物理评论*, 2018, 35(1): 034.)

## Dynamics Design on a Compact High Intensity Heavy-ion CH-DTL

KONG Qiyu<sup>1,2,3</sup>, YIN Xuejun<sup>1,2,3,†</sup>, DU Heng<sup>1,3,†</sup>, LI Zhongshan<sup>1,3</sup>, LI Xiaoni<sup>1,3</sup>, LIU Zheng<sup>1,3,4</sup>,  
YUAN Youjin<sup>1,2,3</sup>, XIA Jiawen<sup>1,2,3</sup>

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Huizhou Research Center of Ion Science, Huizhou 516003, Guangdong, China;

4. Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In this paper, based on the KONUS dynamics theory, the beam dynamics design of a compact room-temperature cross-bar drift tube linear accelerator(CH-DTL) operating in pulsed mode is completed, and the key issues are carefully investigated. This DTL operates at 325 MHz, contains 29 acceleration gaps, and has a dynamics length of 1.3 m. It can accelerate  $^{12}\text{C}^{5+}$  heavy ion beam energy from 1 to 4 MeV/u. The essential parameters that contribute to the compactness of the device, such as operating frequency, voltage, and  $K_p$  value, are analyzed and studied theoretically. The simulation results show that the transmission efficiency in the DTL section is greater than 99%, the phase width of the output bunch is about  $20^\circ$ , and the energy spread is less than  $\pm 1\%$ .

**Key words:** DTL; compact high-intensity heavy ion beam; KONUS dynamics design

Received date: 05 Apr. 2022; Revised date: 02 Jun. 2022

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11375243); Guangdong Innovative and Entrepreneurial Research Team Program, China(2016ZT06G373)

† Corresponding author: YIN Xuejun, E-mail: [yinxj@impcas.ac.cn](mailto:yinxj@impcas.ac.cn); DU Heng, E-mail: [duheng@impcas.ac.cn](mailto:duheng@impcas.ac.cn)