



STCF注入器物理设计进展

谷端 中国科学院上海高等研究院
(代表注入器设计团队)

2024-07



主要内容

C O N T E N T S

1

任务需求分析

2

离轴注入—注入器设计

3

置换注入—注入器设计

4

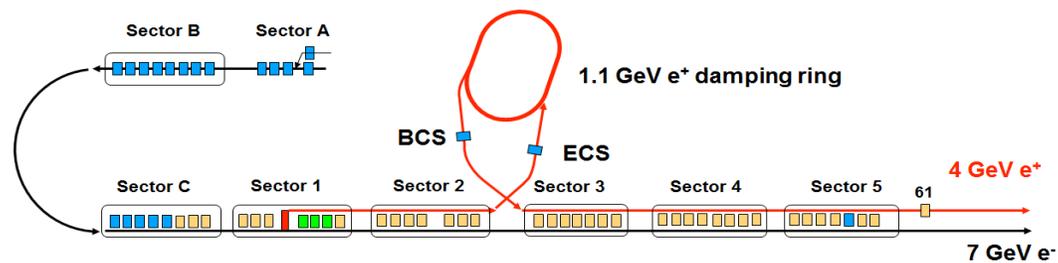
总结及展望

任务需求分析

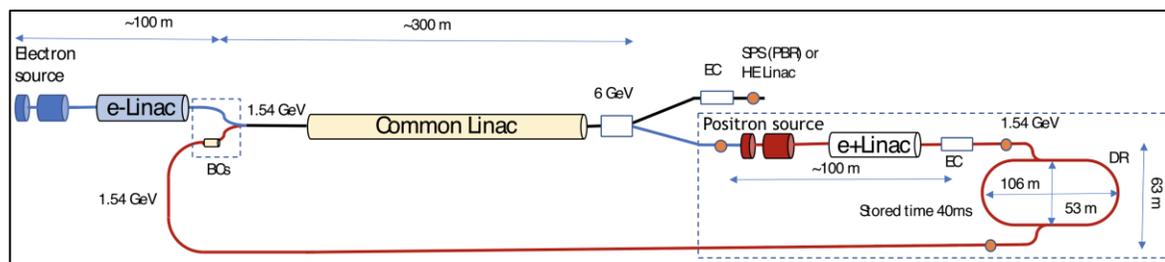
- STCF 加速器的核心物理问题是**如何实现超高亮度的对撞**
- 为了获得足够亮度，STCF 将采用：
 - Crab-Waist 对撞方案
 - 适当提高束流流强
 - **大幅度减小束流发射度** ($\sim 5 \text{ nm}\cdot\text{rad}$)
- 为了保障对撞区的高平均亮度，对撞环将采用Top-up模式进行注入，目前方案有2种：
 - 离轴注入
 - 置换注入
- 对撞环不同的注入模式，将直接决定注入器的设计和束流参数，根据项目总体要求，需分别给出两种模式对应的注入器物理设计方案

国际同类型装置调研

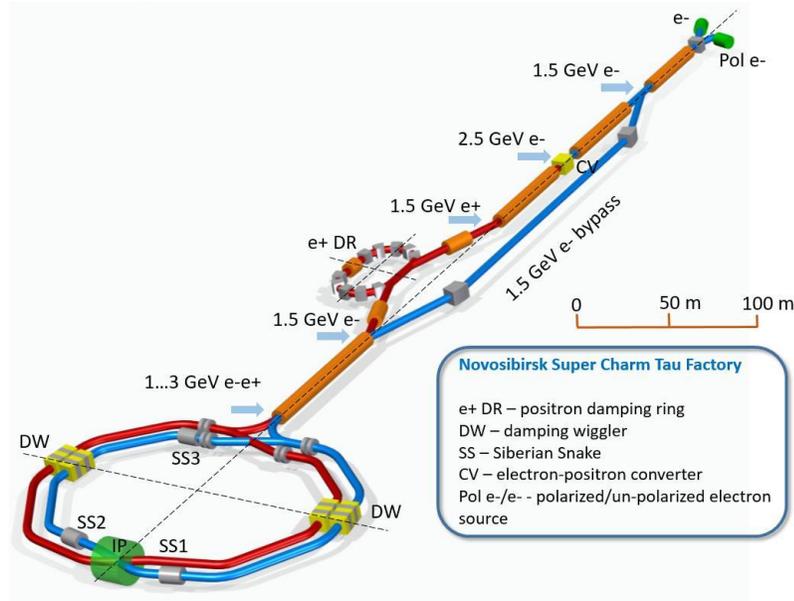
- 根据注入方式不同，大部分对撞机也主要分为离轴注入和在轴注入
- 注入所需的正电子通常采用大电荷量电子束团打靶产生
- 注入所需的电子束团一般由发射度较低的光阴极电子枪产生，如日本Super KEKB、俄罗斯SCTF等，也有使用热阴极电子枪产生后直接注入，比如FCC-ee等
- 正电子通常需要一个阻尼环来降低发射度及能散以便注入对撞环



■ 日本Super KEKB



■ 欧洲FCC-ee



■ 俄罗斯SCTF

注入器主要参数需求

- 根据调研结果和STCF装置实际需求，需分别对离轴注入和置换注入方案进行设计
- 根据对撞环的主要参数，给出了不同模式下注入器的设计参数，主要体现在电荷量、发射度等有较大差别

STCF-IJAP-Para-V0

参数	设计指标		单位
	离轴注入	置换注入	
电子枪类型	光/热阳极	热/热阳极	
注入电子束团电荷量*	1.5	8.5	nC
注入正电子束团电荷量*	1.5	8.5	nC
注入束团能量	1.0-3.5	1.0-3.5	GeV
标称能量	2.0	2.0	GeV
加速器微波频率	2998.2		MHz
注入束团几何发射度*	≤6	≤30	nm·rad
注入束团 RMS 能散*	≤0.1	≤0.3	%
注入束团 RMS 长度*	<7		mm
注入电子束团重复频率**	30	30	
注入正电子束团重复频率**	30	30	

正电子阻尼环入口发射度	≤1400	-	nm·rad
正电子阻尼环引出发射度	≤11	-	nm·rad
阻尼环高频频率	499.7		MHz
阻尼环束团个数	5		
累积环单次注入电荷量		2.5	nC
累积环注入频率		120	Hz
累积环入口发射度	-	≤1400	nm·rad
累积环引出发射度	-	≤30	nm·rad

*对撞环注入切割磁铁处。

**对应对撞环内 650 个束团

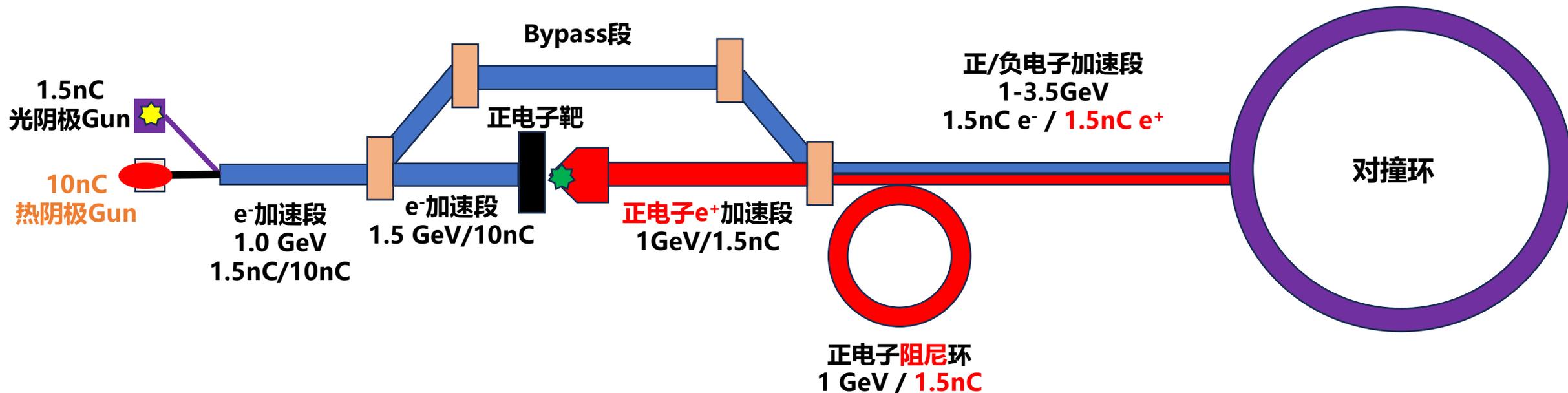
主要挑战和难点

- 注入器设计的主要挑战在于如何同时满足注入所需的束流发射度、能散和电荷量等参数
- 对于离轴注入：
 - 如何汇合双电子枪产生的两个不同电荷量、不同束长的束流，并在同一个主加速段中加速
 - 如何打靶产生足够多的正电子，并传输至对撞环中（正电子产额、收集、俘获效率）
 - 如何将打靶产生的正电子束团的发射度，降低至可接受水平（正电子阻尼环）
 - 如何保持束流在传输过程中的品质不受破坏
- 对于置换注入：
 - 如何产生足够多的电荷量（打靶的束流需大于 $8.5\text{nC} \cdot 135\text{Hz} = 1150\text{nC/s}$ ），超过目前商用功率源最大重复频率
 - 如何设计正电子累积环、是否可以省掉电子累积环
 - 如何产生高品质、适合直接注入的大电荷量电子束团
 - ...

离轴注入对应 注入器方案

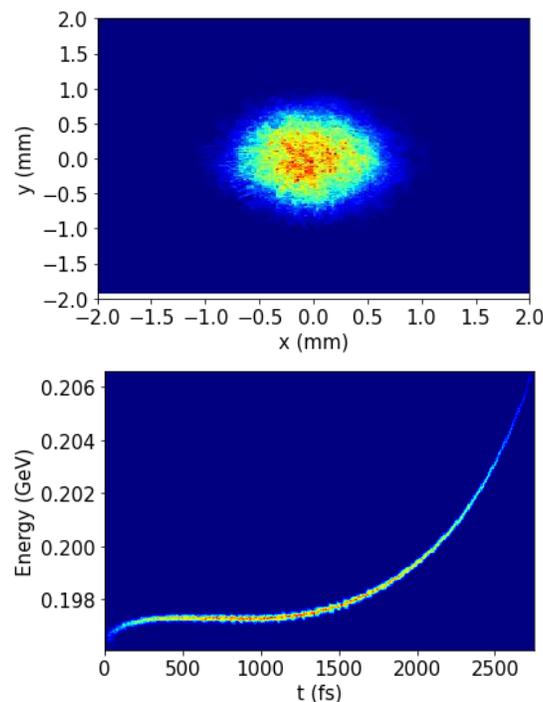
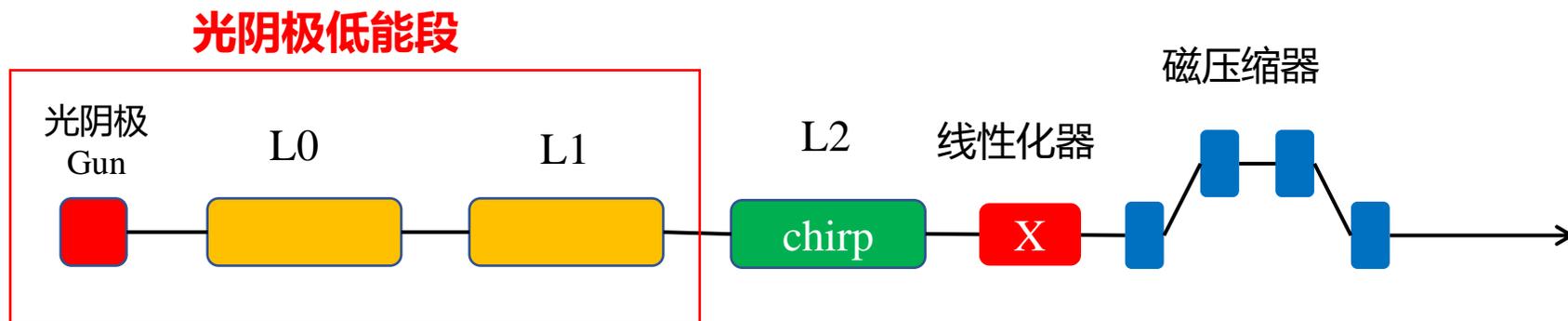
离轴注入——注入器总体设计

- 离轴注入需要注入器至少提供30Hz 1.5nC电子 + 30Hz 1.5nC正电子，以top-up方式注入至对撞环中
- 该方案对注入正负电子束流品质要求较高（发射度、能散等），可以采用**双电子枪**产生不同电荷量
- 所需**1.5nC电子**，采用光阴极电子枪产生，经过加速和纵向压缩后，经bypass段进入主加速器
- 所需**1.5nC正电子**，采用大电荷量电子打靶产生，所需~**10nC**电子束团由热阴极电子枪产生
- 由于打靶产生的正电子发射度较大，需使用阻尼环来降低发射度和能散，随后进入主加速器



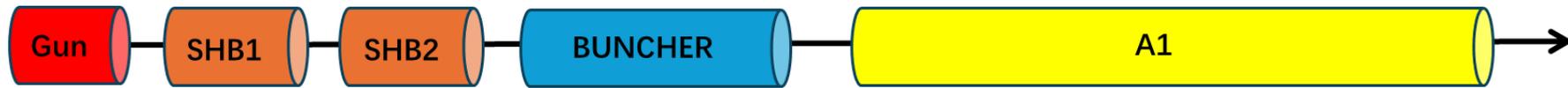
离轴注入——光阴极束线

- S波段光阴极微波电子枪，阴极梯度 $>100\text{MV/m}$ ，电子枪出口束流能量 $\sim 4\text{MeV}$
- 低能段采用2套S波段加速管L0及L1组成，加速至 120MeV
- L2由2根S波段加速管组成，使用1套功率源配合能量倍增器，可以进一步加速至 200MeV 以上，并提供chirp
- 采用了1套X波段加速管，做为线性化器，同时配合1套磁压缩器可以将束流长度压缩至 $<1\text{ps}$ （S波段 1° 相位）



离轴注入——热阴极束线

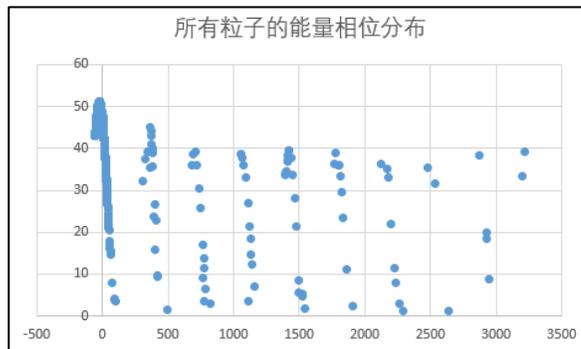
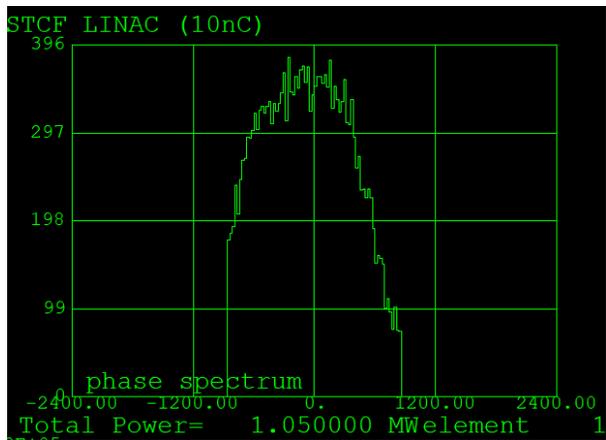
- 为了满足用于打靶产生正电子对大电荷量的需求，采用技术较为成熟的热阴极电子枪产生所需的8-10nC电子
- 热阴极低能段由热阴极电子枪、次谐波聚束器、聚束器和加速段组成，同时使用多个聚焦线圈进行发射度及束流包络控制



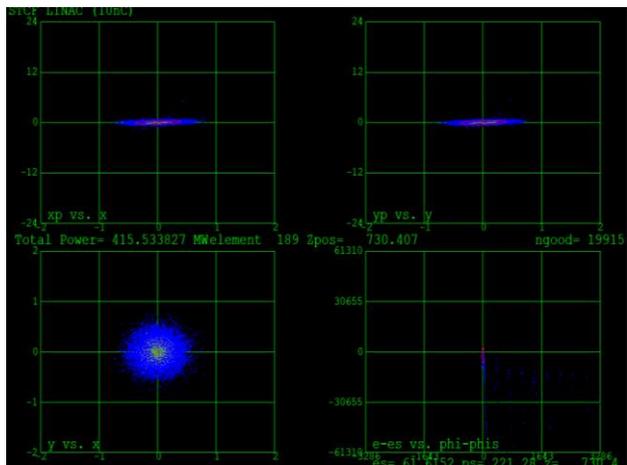
元件	型号/频率(MHz)	长度(m)	距离(m)	主要参数
E-gun	Y-796			150kV, 7A, 1.6ns, 实际测量
SOL1			0.182	
SHB1	166.551		0.667(中心)	1/18th基波, 周期为6ns, 压缩比约为3.7
SHB2	499.654		2.03(中心)	1/6th基波, 周期为2ns, 压缩比约为2.8
BUNCHER	2997.924	1.3144	2.26	基波, 周期为333.6ps, 能量增益为11MeV
ACC. Tube (A1)	2997.924	3.0667	4.10	基波, 周期为333.6ps, 能量增益为50MeV (17MV/m)

离轴注入——热阴极束线

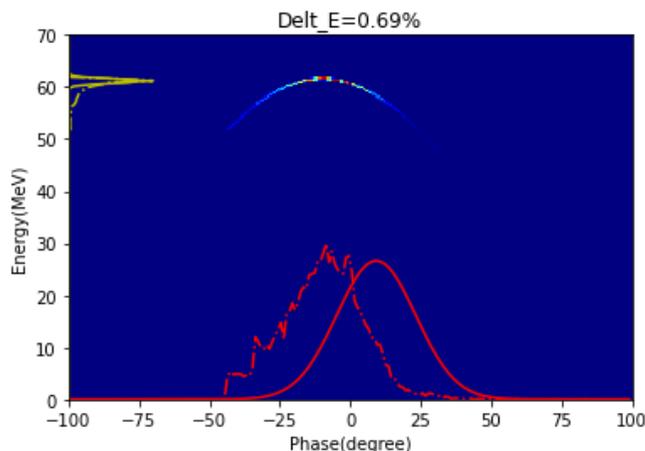
- 根据热阴极低能段模拟结果，总的俘获效率大于99%，出口电荷量 $>10\text{nC}$ （主束团），伴生束团的占比 $\sim 1\%$ ，束长较短，能量和能散较好地保持，束流参数可以满足打靶所需。



主束团	伴生1	伴生2	伴生3	伴生4	伴生5
99.11%	0.14%	0.06%	0.07%	0.04%	0.03%



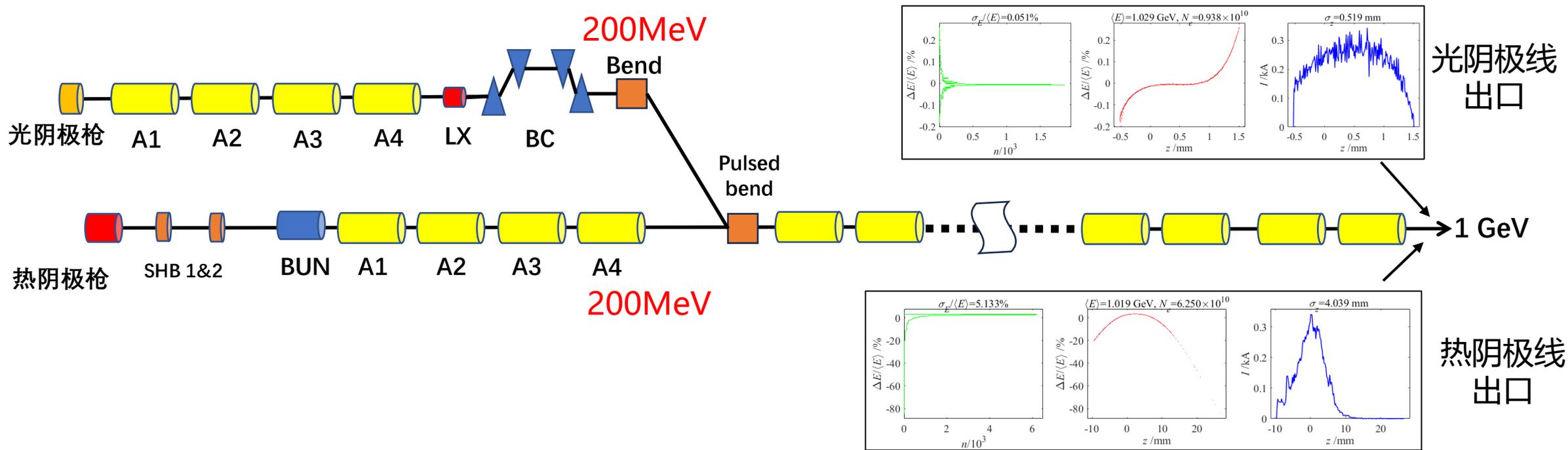
电子枪及低能段出口分布



热阴极低能段出口参数	
出口电荷量Q	10.9 nC
能量E	61.2 MeV
传输效率 η	99.6%
主束团占比 η	99.1%
能散 ΔE	0.69%
束长 σ	13.0ps
归一化发射度 ϵ	41 mm·mrad

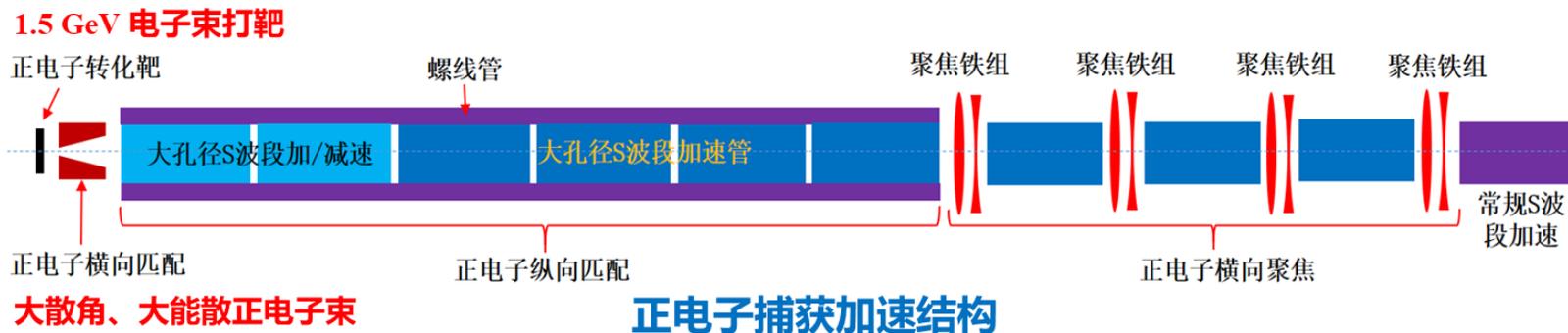
离轴注入——双电子枪汇合点选择

- 汇入点选择，考虑两个电子枪低能段如果能**尽量以相同能量汇合**，可以减少后续lattice聚焦设计的问题
- 根据综合对比，最终选择在200MeV左右汇合，可以保证注入器发射度、能散最好
- 光阴极线出口处，1.5nC下归一化发射度 $< 2 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ ，能散 $< 0.1\%$ ，满足直接注入对撞环的要求
- 热阴极线出口处，10nC下归一化发射度 $< 50 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ ，能散 $\sim 5\%$ ，满足打靶需求



离轴注入——正电子产生及加速

- 热阴极产生的束流加速至1.5GeV后，用来打靶产生正电子
- 通过优化磁号、采用大孔径加速管和优化聚焦等方法提高正电子的收集和加速效率



正电子转换靶研究

- 单晶钨打靶的理论研究
- 单晶钨打靶实验研究

理解打靶物理过程，调控正电子的散角和能散，提升正电子打靶产额。

磁号磁场位形优化

- 优化磁号磁场位形

提升正电子收集效率，优化正电子分布，方便正电子后续加速。

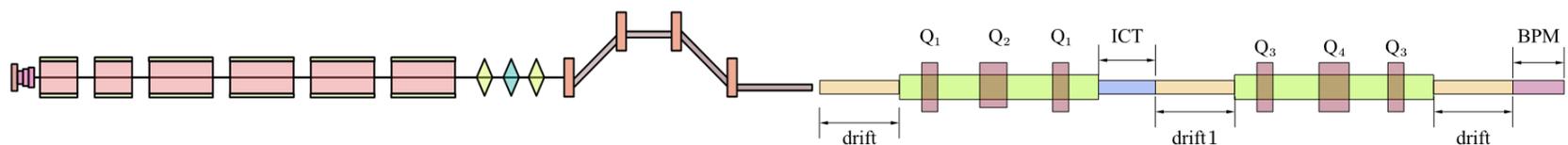
大孔径S波段加速管

- 研发大孔径S波段加速管
- 优化正电子加速效率

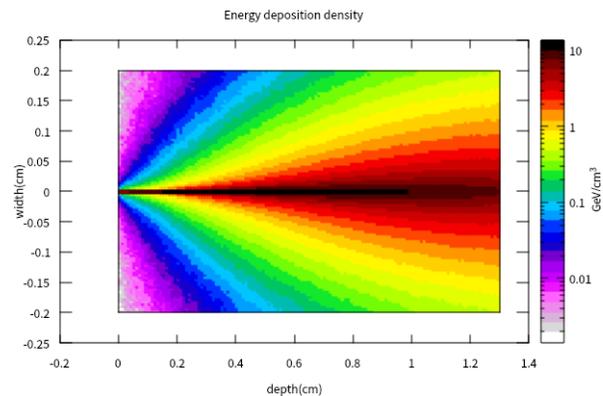
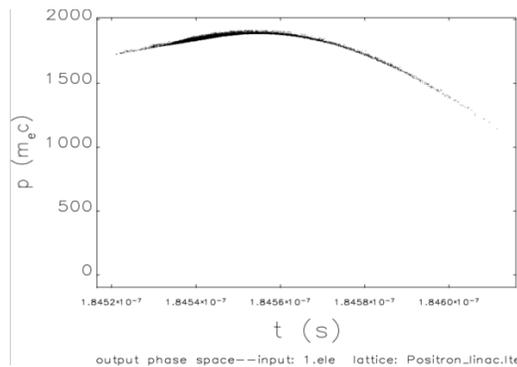
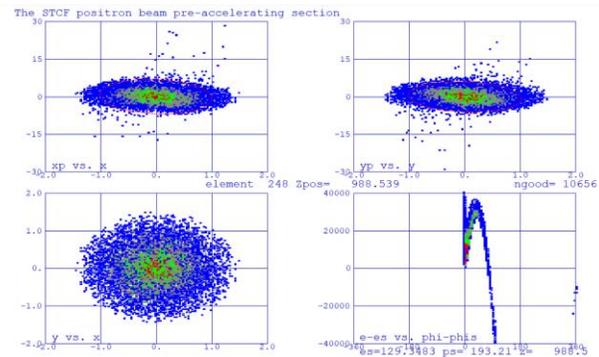
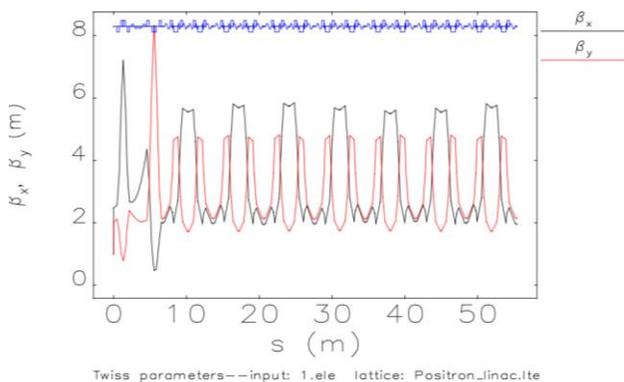
开展了粒子追踪模拟，优化加速方式，提升正电子匹配和加速效率。

离轴注入——正电子产生及加速

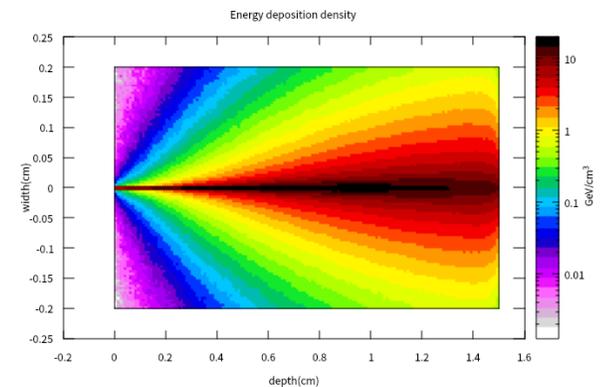
- 目前已完成200MeV正电子产生及1GeV加速段设计，正在进行至阻尼环运输段的设计
- 同时研究了不同能量、不同电子束偏心对正电子产额的影响，为阻尼环设计提供详细束流分布



• 正电子束线设计



1. 5GeV在13mm靶内的能量沉积

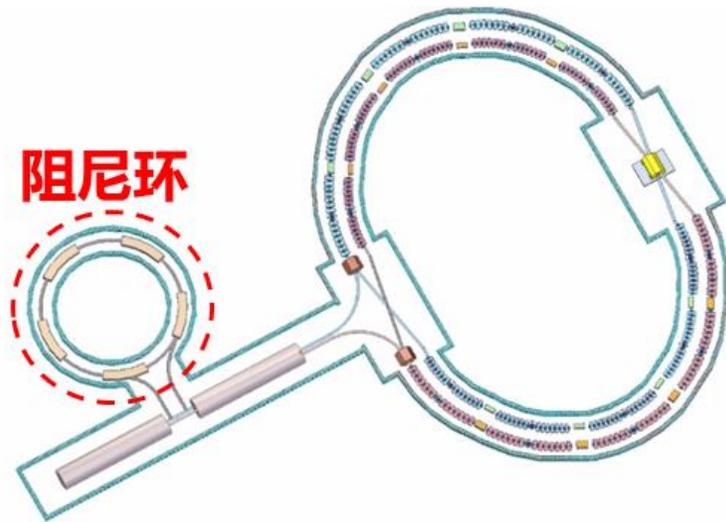


2. 2.5GeV在15mm靶内的能量沉积

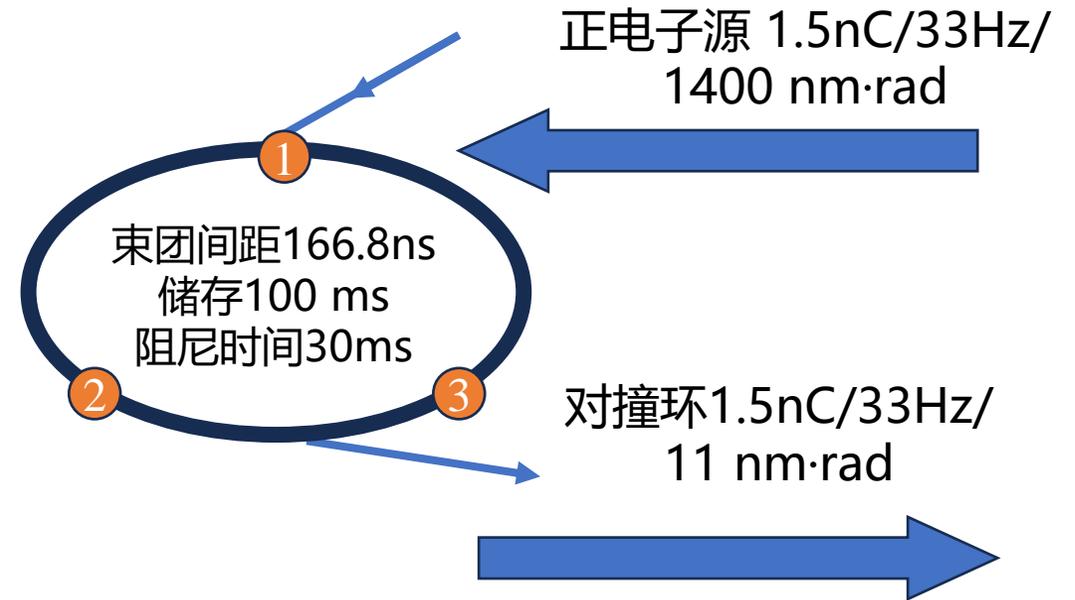
• 正电子束线lattice设计束流像空间分布

离轴注入——正电子阻尼环

- 由于打靶产生的正电子，束流发射度较大($> 1400 \text{ nm}\cdot\text{rad}$)，需要使用阻尼环，将能散和发射度降低至对撞环可接受水平($\leq 11 \text{ nm}\cdot\text{rad}$)
- 因为STCF阻尼环引出束流的发射度远低于其他装置，且需要实现较短的阻尼时间，这对光学设计带来了严峻的挑战。

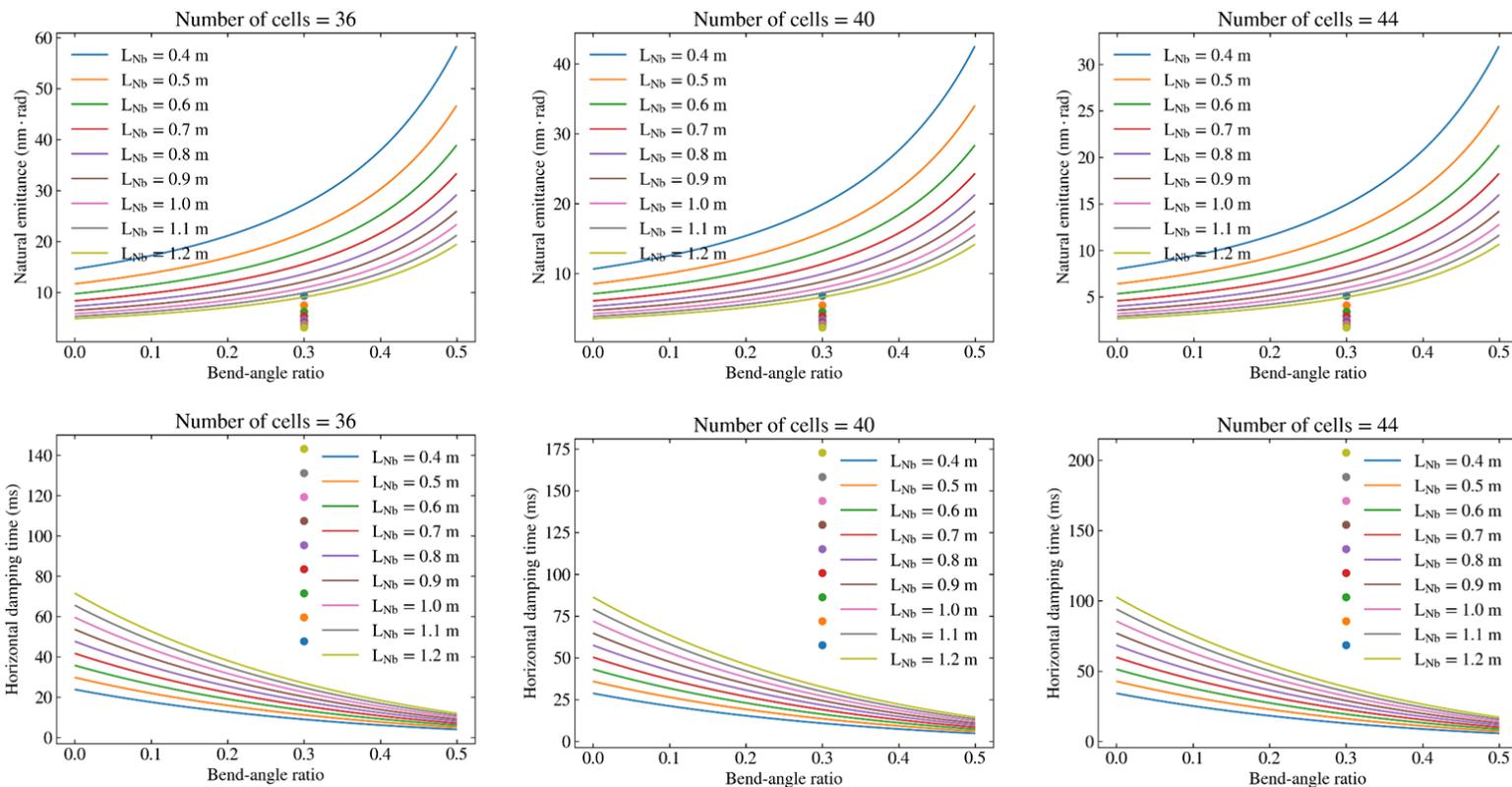


STCF 正电子阻尼环



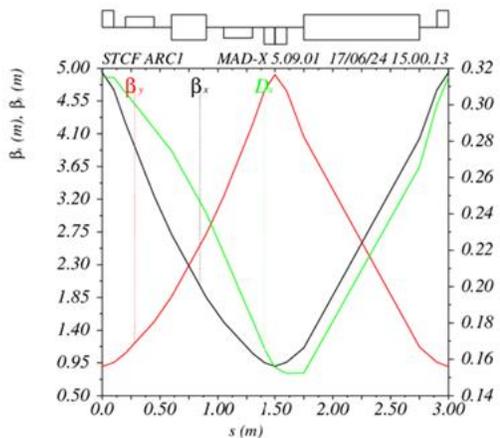
阻尼环弧区参数选择

- 阻尼环所能实现的自然发射度与阻尼时间完全由光学设计决定，小自然发射度与短阻尼时间对二极磁铁需求相反，需要综合考虑以得到最优结果。
- 常规二极铁方案虽然自然发射度较低，但是阻尼时间大于50ms。而反向二极铁方案达到目标自然发射度时，阻尼时间可以做到~30ms。最终选择40个弧区，二极磁铁1m，反向二极磁铁0.3m的方案。

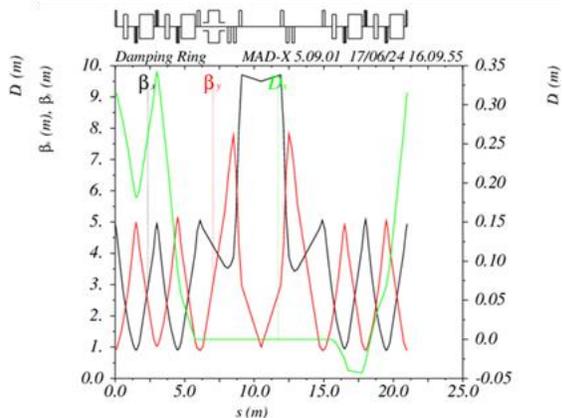


正电子阻尼环光学设计

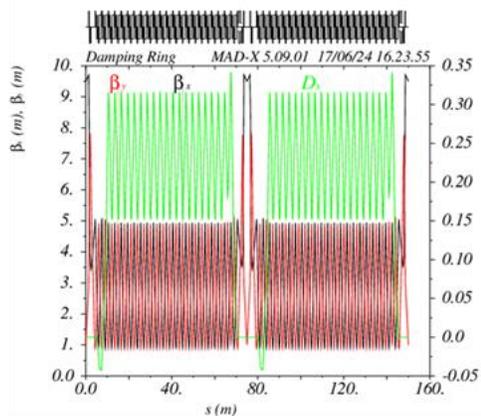
- 目前已经完成正电子阻尼环光学设计，周长150m，阻尼时间~30ms，自然发射度~8nm·rad
- 初步结果可以满足设计要求，正在优化动力学孔径等参数



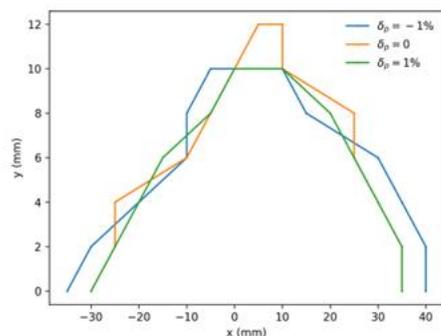
弧区FODO结构 (3m)



消色散+注引+RF (21m)



总布局 (36*3+2*21=150m)



动力学孔径

STCF 阻尼环主要参数

束流能量	1.0	GeV
周长	150	m
束团个数	3	
流强	9	mA
弯转半径	4.5	m
弯铁磁场强度	0.75	T
单圈同步辐射能量	35	KeV/turn
阻尼时间 $\tau_x/\tau_y/\tau_z$	28.8/28.6/14.2	ms
自然发射度	8.25	nm·rad
自然能散	0.031	%
动量紧缩因子	6.4e-3	
色品 x/y	-15.0/-15.3	

离轴注入——注入器方案设计进展小结

- 通过采用双电子枪设计：
 - ✓ 光阴极线出口处，1.5nC下归一化发射度 $<2 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ ，能散 $<0.1\%$ ，满足直接注入对撞环的要求
 - ✓ 热阴极线出口处，10nC下归一化发射度 $<50 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ ，能散 $\sim 5\%$ ，满足打靶需求
 - 汇合段和Bypass段：
 - ✓ 通过采用消色散结构，弯转过程中发射度增长均得到有效抑制，束流品质维持较好
 - 正电子段：
 - ✓ 已完成200MeV正电子产生及1GeV加速段设计
 - 阻尼环段：
 - ✓ 已经完成正电子阻尼环光学设计
- 总的来说注入器出口的正负电子束流完全可以满足离轴注入的要求。

置换注入对应 注入器方案

置换注入——注入器参数需求

- 若维持对撞环至少90%亮度时进行置换注入，按照目前对撞环参数，需要注入器同时提供至少**33Hz 8nC电子 + 33Hz 8 nC正电子**，该方案对注入正负电子电荷量及束流品质都要求极高，对注入器设计提出**极大挑战**
- 对于正电子，目前很难打靶产生单束团8nC的正电子，且正电子发射度较差，需要累积环实现**累积和阻尼**。
- 用于打靶产生正电子的热阴极注入器，重频可能**超过100Hz**，超过目前商用S波段高功率速调管的极限，需要考虑**双束团方案**。
- 正电子束线的布局基本固定，需要提高打靶的电子能量(>2.5GeV)，受空间限制可能需要**L型布局**

单束团剩余流强 $I_r=I/I_0$	对撞环束流寿命 τ (秒)	对所有束团(707个)均完成一次补充所需时间(秒)	累积环引出频率(Hz) 电子或正电子	累积环前直线重复频率(Hz) 正电子	*双束团方案
0.9	100	10.54	67.1	268.4	134.2
	150	15.80	44.7	178.9	89.5
	200	21.07	33.6	134.2	67.1
	300	31.61	22.4	89.5	44.7

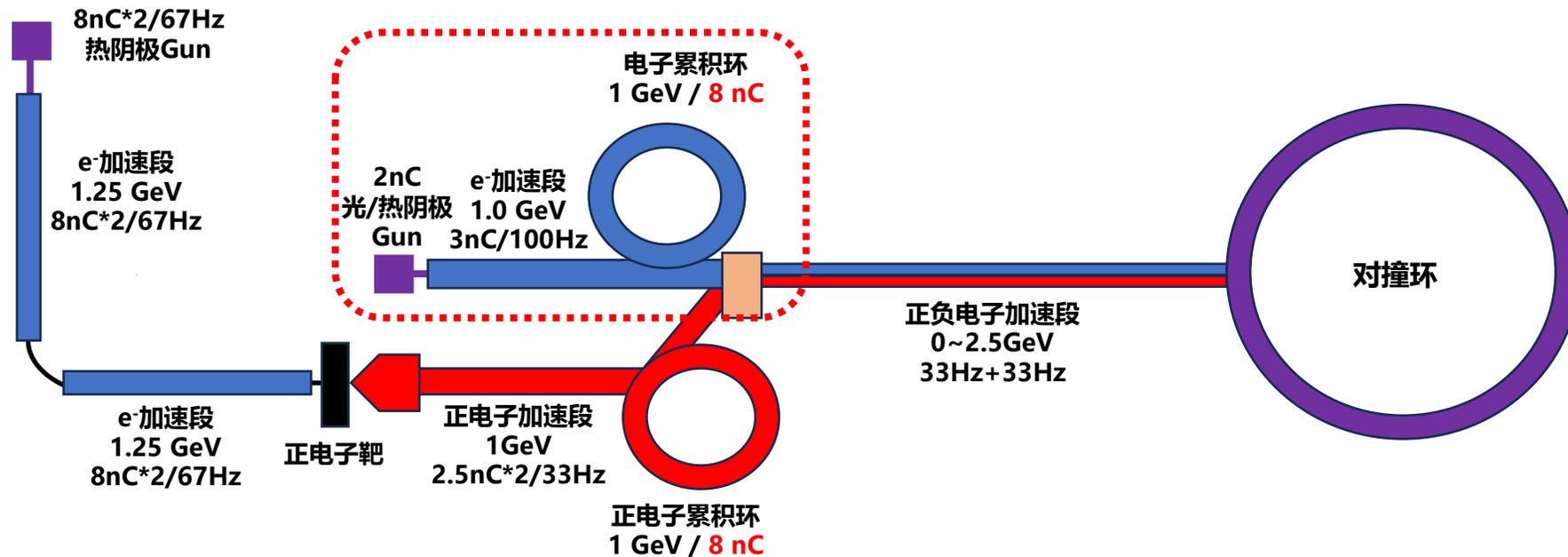
对撞环置换注入要求		
单脉冲电荷量	8	nC
束流寿命	200	s
束团个数	707	
正电子累积环单脉冲电荷量	2.5	nC
剩余流强	90	%

置换注入——注入器布局1

□ 而电子束线根据采用电子枪的不同，有3种不同的布局

① 光阴极/热阴极电子枪，产生2-3nC左右电子，通过电子累积环，累积到8nC后，注入至对撞环

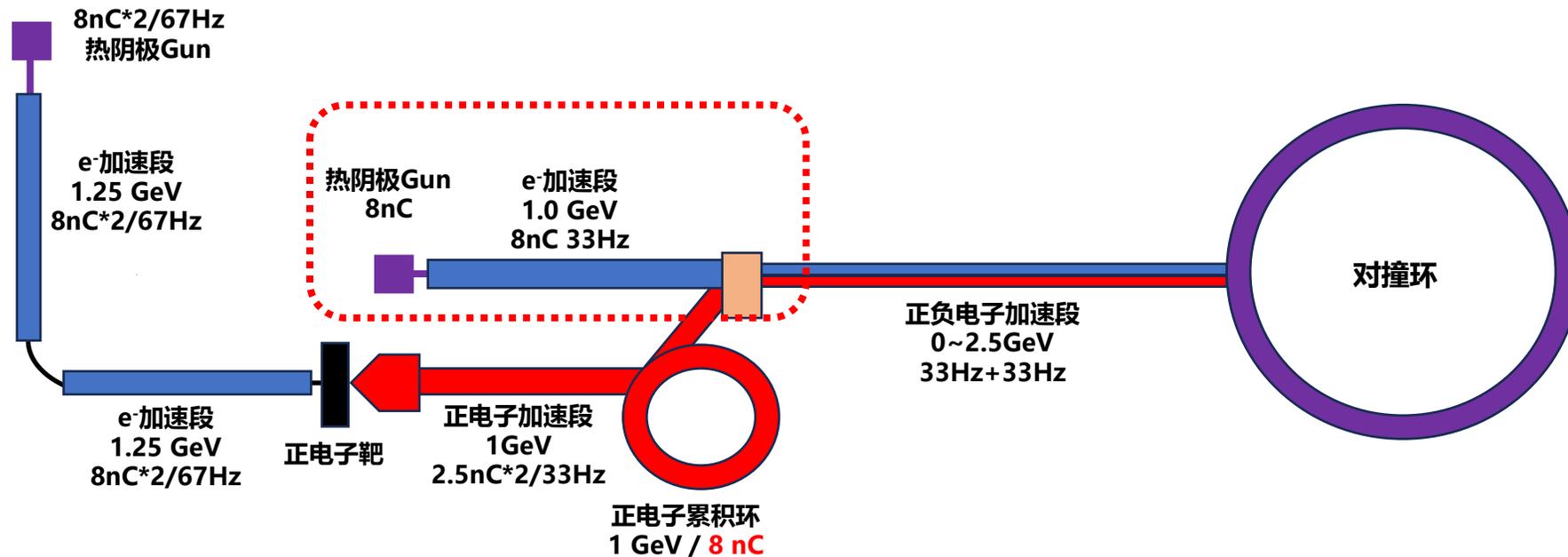
- 优点：对电子枪和功率源压力不大，技术相对成熟简单
- 缺点：需要电子累积环，造价较高，电子累积/阻尼需特殊设计



置换注入——注入器布局2

② 热阴极电子枪，产生8nC以上电子，若束流品质合格，则直接注入至对撞环

- 优点：热阴极产生大电荷量技术成熟；省去电子阻尼环，减少造价
- 缺点：热阴极产生8nC电子，束流品质（发射度、能散等）较难满足直接置换注入的要求



置换注入——注入器布局2

*胡桐宁等

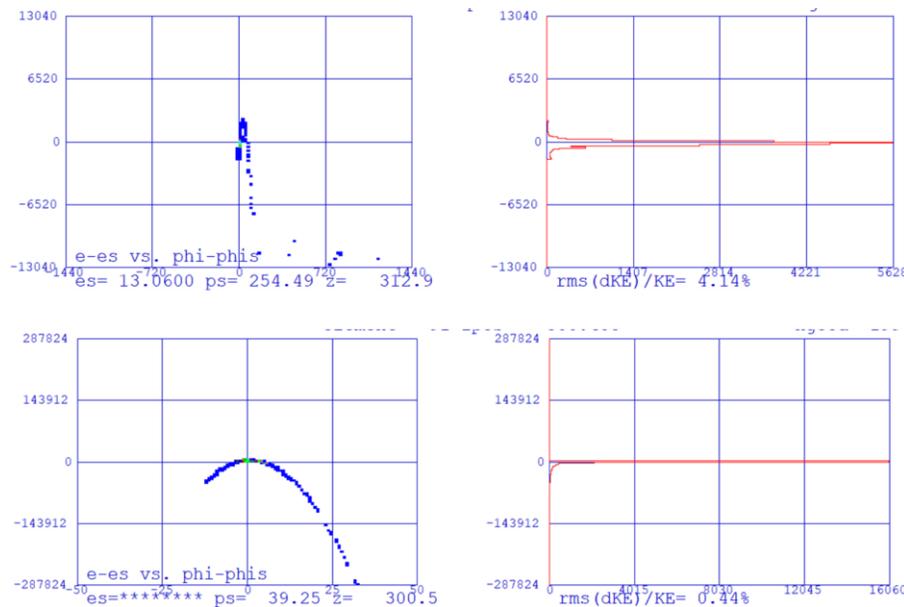
- 根据不同Buncher方案结果对比，优化后结果表明热阴极电子枪可以产生10nC下的束流
- 发射度~42 um, rms能散<0.5%，6倍σ相宽内能散~0.15%，基本满足直接注入需求

□ 置换注入（热阴极）方案加速器参数表

	频率	电压/增能
电子枪	DC	200 kV
SHB1	1/18 RF频率	100 kV
SHB2	1/6 RF频率	100 kV
TW buncher	2.998 GHz	12.8 MeV
ACC*39	2.998 GHz	51 MeV * 39

位置	能量	电荷量	能散度	束长
入口	200 keV	10 nC		1.3 ns
ACC-1	63.84 MeV	99.74%	1.61%	3.49 ps
ACC-2	113.29 MeV	99.74%	1.61%	3.50 ps
ACC-3	163.41 MeV	99.74%	1.72%	3.45 ps

发射度: 42 mm mrad



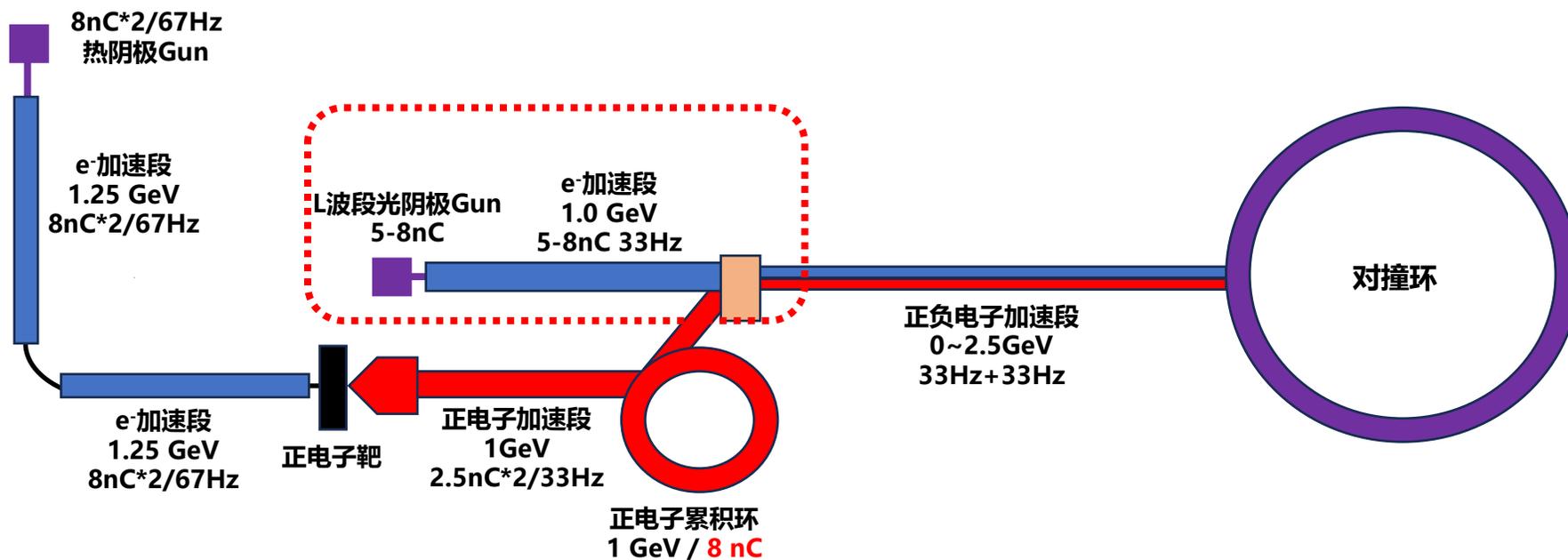
• Buncher及加速段出口粒子分布

	能量	电荷量	Rms能散	rms束长	rms发射度
主束团	2002.0 MeV	9.974 nC	0.44%	2.72 ps	45.36 mm mrad
取6倍Sigma相宽		9.745 nC	0.16%	2.19 ps	

置换注入——注入器布局3

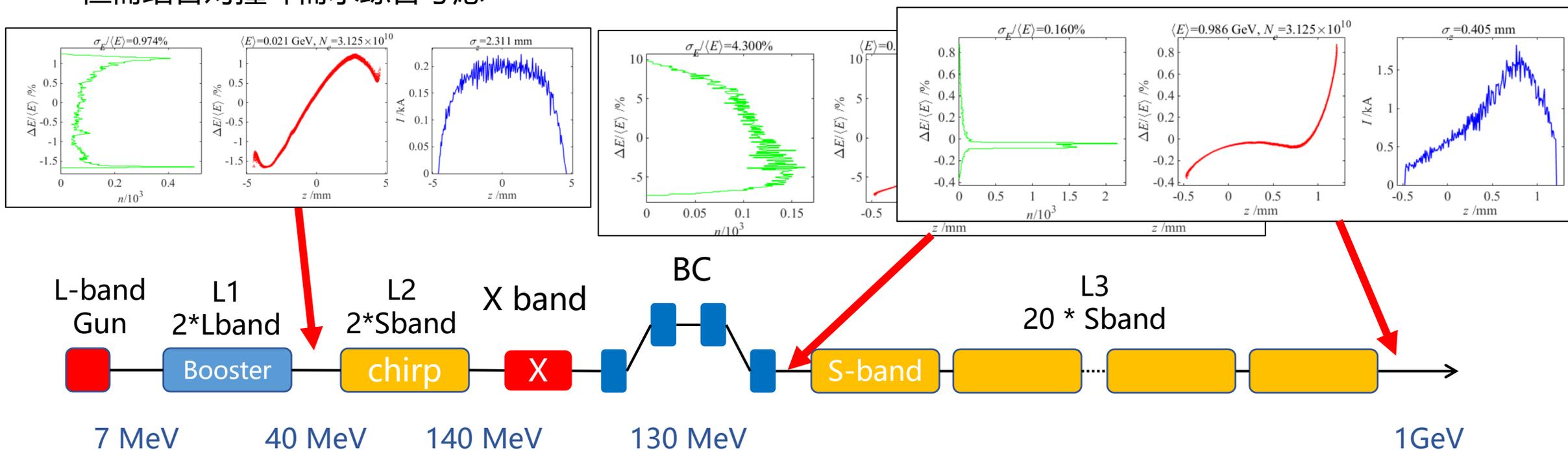
③ L波段光阴极电子枪，产生5-8nC左右电子，直接注入至对撞环

- 优点：L波段光阴极电子枪，经过国内外实验验证，可以产生 $>5\text{nC}@1\text{kHz}$ 大电荷量，技术成熟；
发射度小，能散小，可以直接用于置换注入，省去电子阻尼环，减少造价
- 缺点：半导体阴极对真空要求很高，长时间大电荷量运行有待验证



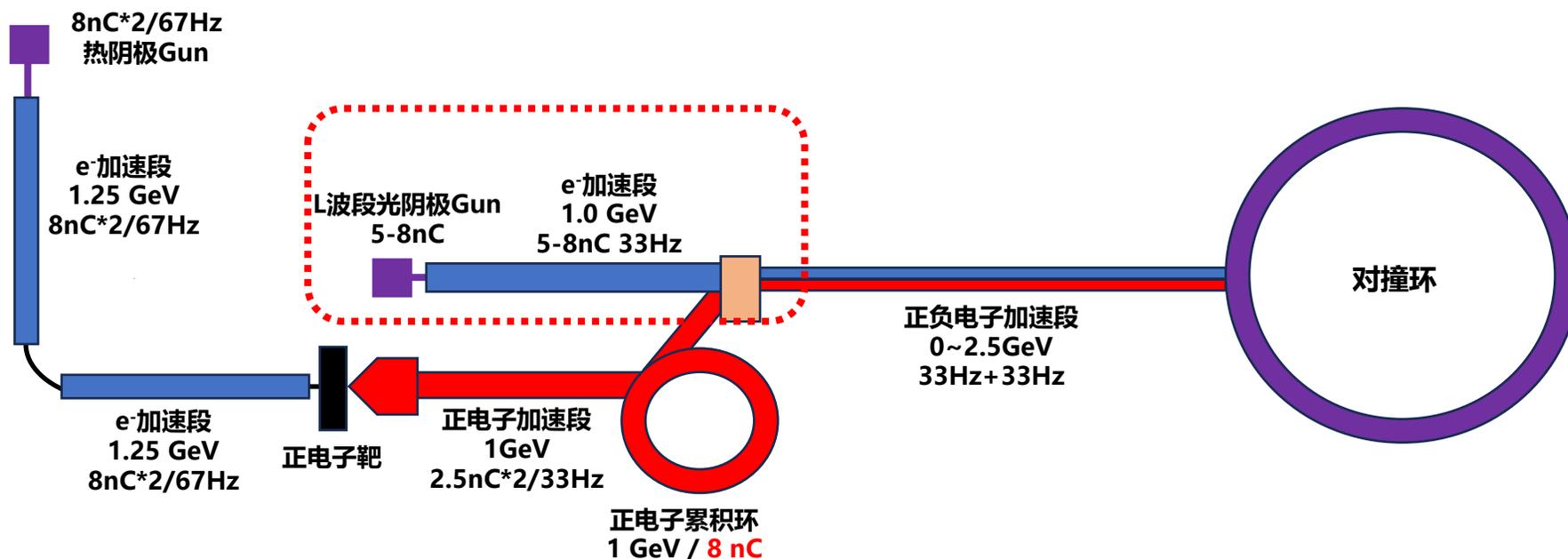
L-band注入器S2E结果

- ❑ L-band注入器，对于5nC以上电荷量，电子枪出口束长较长，需要先经过一段Lband预加速段提升能量
- ❑ 经L1和L2加速后，在约200MeV处进行压缩，束长从2mm→0.4mm（约占S波段1°）
- ❑ 加速器出口，能散约千分之1.6，发射度 $<6\ \mu\text{m}$ （指标要求小于 $30\ \mu\text{m}$ ），可以满足直接注入要求
- ❑ 相对于方案二（热阴极直接注入），本方案发射度和能散更具优势，是实现更高亮度的对撞的重要途径之一，但需结合对撞环需求综合考虑



置换注入——注入器方案设计进展小结

- 在目前商用S波段高功率速调管最高100Hz的前提下，对注入器进行了大幅升级
- 对正电子部分，将用于打靶的电子能量提高至 $>2.5\text{GeV}$ 以便提高正电子产额，同时考虑热阴极**双束团**方案以降低对功率源重复频率的要求
- 对电子部分，提出了3种方案，并进行了详细物理设计和粒子跟踪模拟，从目前结果看，考虑到工程造价和技术难度，方案2和3更具优势，下一步将与对撞环物理和硬件系统沟通以确定最终方案



总结和下一步工作计划

- STCF装置优异的性能离不开注入器提供的高品质正负电子束流，同时也为注入器设计提出了极高的要求。
- 根据对撞环设计参数的要求，注入器针对离轴注入和置换注入分别进行了方案设计。
- 对于离轴注入方案，注入器采用光阴极+热阴极的双电子枪方案，配合正电子阻尼环，完全可以满足离轴注入的要求。
- 对于置换注入方案，根据目前电子枪和功率源现状，提出了3种方案设计，并创新性的提出了L波段光阴极电子枪产生大电荷量直接注入的方案，可以省去电子累积环，从而有效降低工程造价和技术难度。
- 目前除置换注入累积环外，注入器物理方案设计已基本完成，下一步将针对双束团加速、大电荷量产生、正电子产额优化及误差分析等进行方案细化。
- 下半年将根据对撞环参数需求，固化注入器方案，并与硬件系统进行参数对接和迭代。

注入器设计团队成员

- 中国科学院近代物理研究所：原有进、常铭轩、王磊等
- 中国科学技术大学：张艾霖、裴国玺、黄瑞萱、徐欣等
- 华中科技大学：胡桐宁、陈曲珊等
- 中国科学院上海高等研究院：谷端、李烜、黄大章等

同时也对唐靖宇、罗箐以及其他兄弟单位和系统各位老师的大力帮助表示感谢！

敬请批评指正！ 谢谢！



中国科学院 上海高等研究院
SHANGHAI ADVANCED RESEARCH INSTITUTE, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



中国科学院近代物理研究所
Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China



华中科技大学 SEEE 电气与电子工程学院
School of Electrical and Electronic Engineering HUST

