

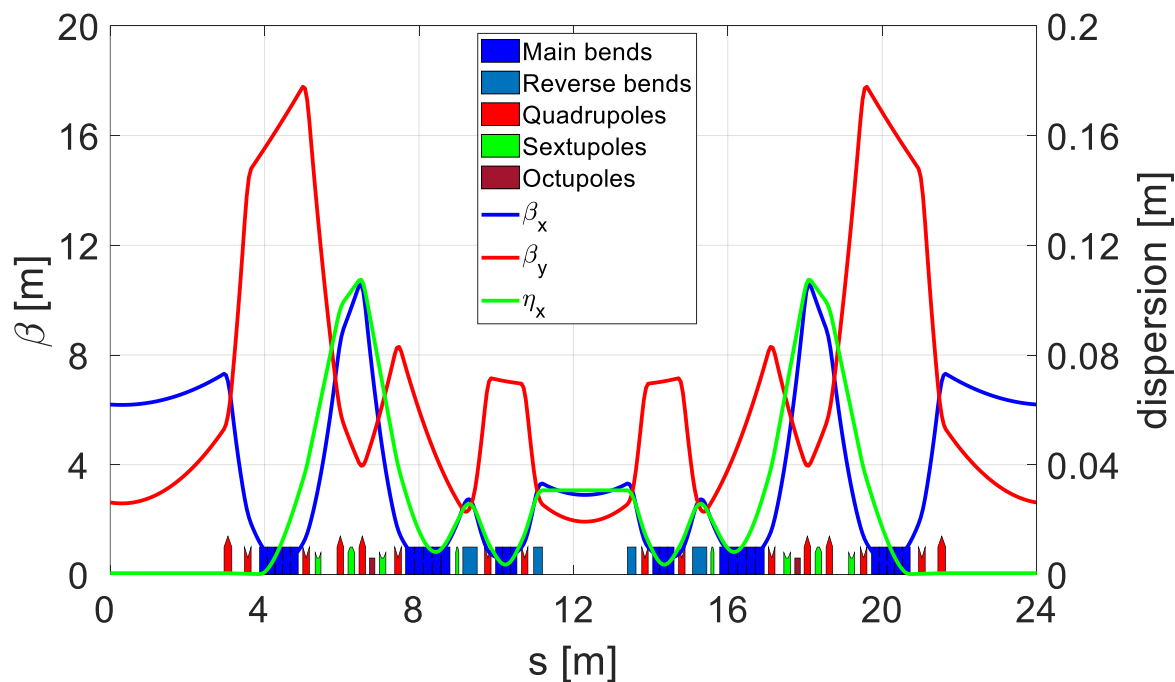
# HALF储存环束流注入物理方案设计

刘刚文

2022.08.19

# HALF储存环基本参数

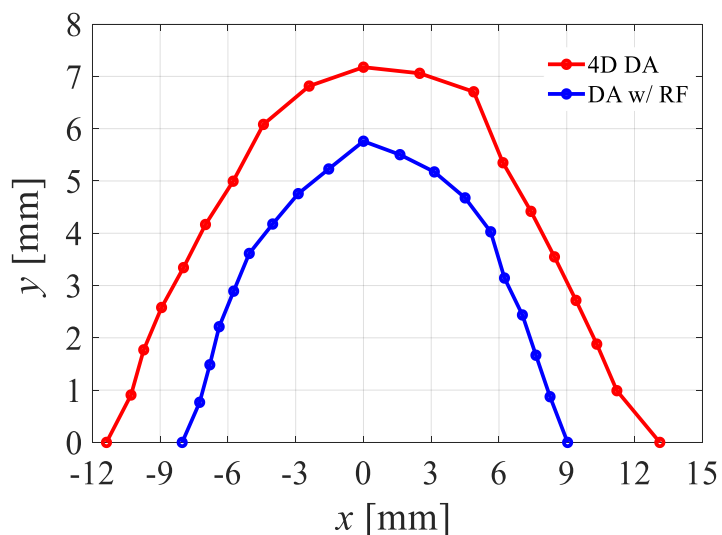
| 参数                             | 数值                    |
|--------------------------------|-----------------------|
| 能量                             | 2.2 GeV               |
| 周长                             | 479.86 m              |
| 周期数                            | 20                    |
| 自然发射度                          | 86.3 pm·rad           |
| 工作点 (H/V)                      | 48.15/17.15           |
| 自然色品 (H/V)                     | -77/-57               |
| 动量紧缩因子                         | $9.0 \times 10^{-5}$  |
| 阻尼分配数 (H/V/L)                  | 1.39/1.00/1.61        |
| 自然阻尼时间 (H/V/L)                 | 27.2/37.7/23.4 ms     |
| 单圈弯铁辐射损失                       | 186.7 keV             |
| 自然能散                           | $0.62 \times 10^{-3}$ |
| 总的绝对偏转角度                       | $442.5^\circ$         |
| 直线节数目                          | 40个 (20长+20中)         |
| 长直线节长度                         | 5.3 m                 |
| 长直线节中点处 $\beta_x/\beta_y/\eta$ | 6.18/2.59/0.0 m       |
| 中直线节长度                         | 2.2 m                 |
| 中直线节中点处 $\beta_x/\beta_y/\eta$ | 2.90/1.93/0.031 m     |
| 谐波数                            | 800 (499.8 MHz)       |



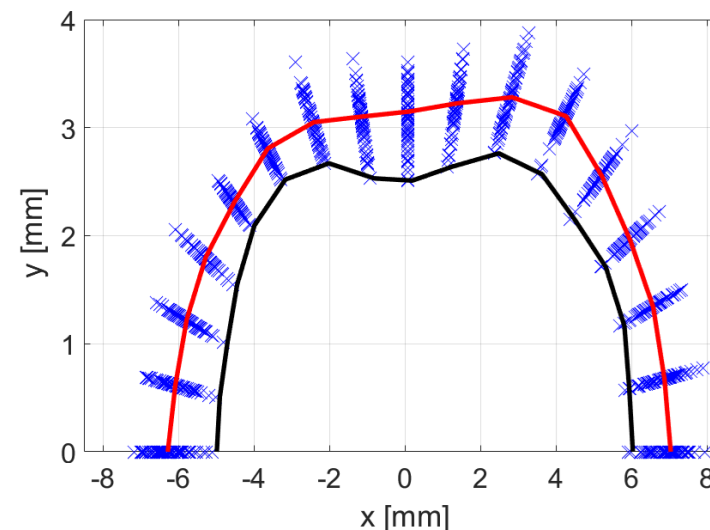
HALF储存环线性光学参数

# HALF储存环非线性动力学表现

|           | 设备种类     | 位置精度要求( $\mu\text{m}$ ) |     |     | 姿态精度要求(mrad) |     |     |
|-----------|----------|-------------------------|-----|-----|--------------|-----|-----|
|           |          | 横向                      | 高程  | 纵向  | 滚动角          | 俯仰角 | 摆动角 |
| 准直单元内精度   | 四、六、八极磁铁 | 30                      | 30  | 150 | 0.1          | 0.1 | 0.1 |
|           | 主弯铁      | 200                     | 200 | 150 | 0.1          | 0.1 | 0.1 |
| 相邻准直单元间精度 | 准直单元间    | 50                      | 50  | 200 | 0.1          | 0.1 | 0.1 |
|           | 主弯铁      | 200                     | 200 | 150 | 0.1          | 0.1 | 0.1 |



不考虑储存环误差时的动力学孔径

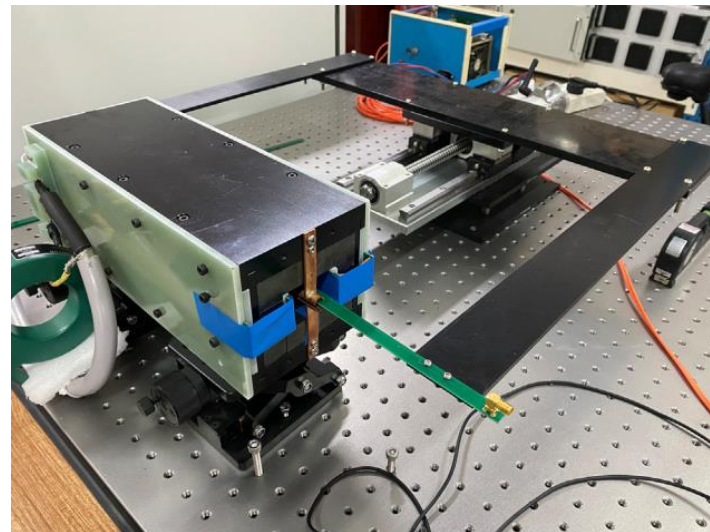
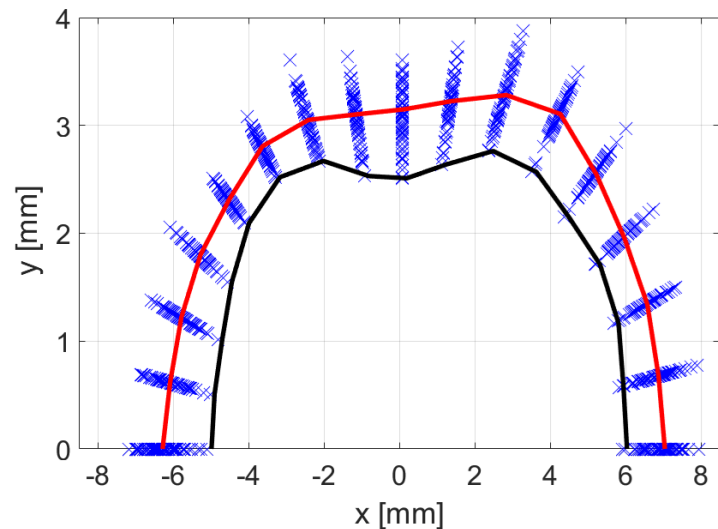


考虑全环储存环误差后的动力学孔径

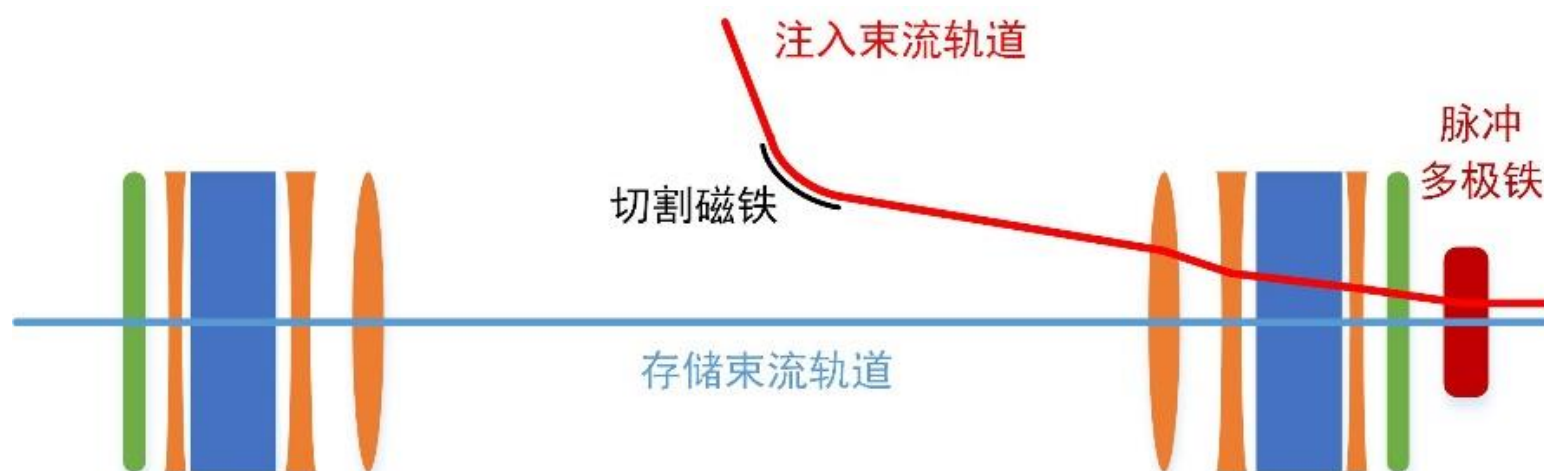
足够大的动力学孔径为束流注入方案提供了更多的选择

# 脉冲非线性磁铁注入方案

动力学孔径



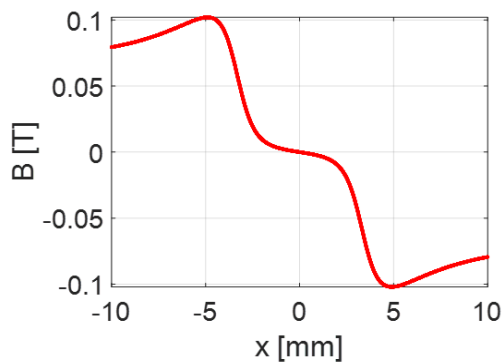
脉冲非线性磁铁



对储存束流扰动小，技术难度适中的脉冲非线性磁铁注入方案将作为HALF储存环的主要研究对象

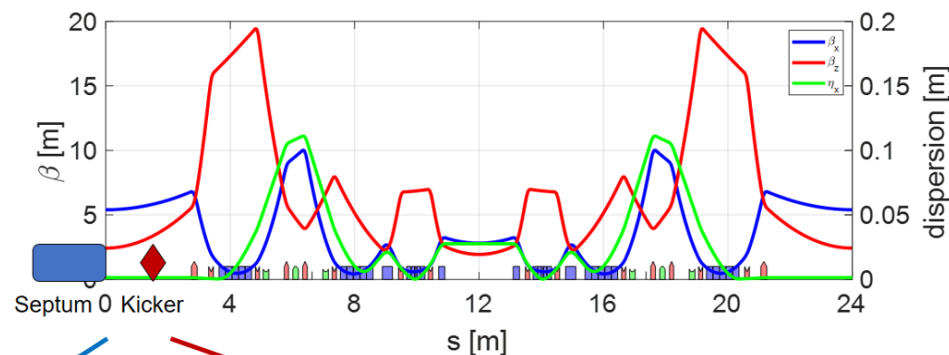
# 接受度分析方法（以环内注入方案为例）

(b) 脉冲非线性  
磁铁的场型



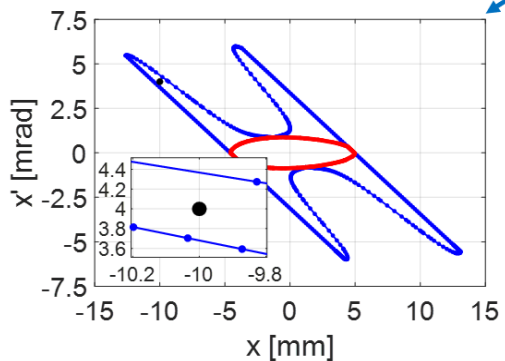
(b)

(a) 注入系统布  
局



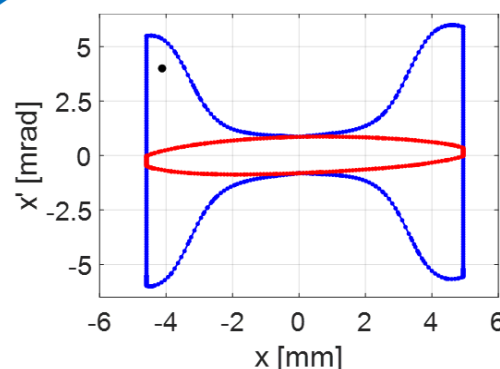
(a)

(e) 根据图 (d) 逆  
向跟踪到Septum  
出口位置处所获得  
的等效接受度相空  
间



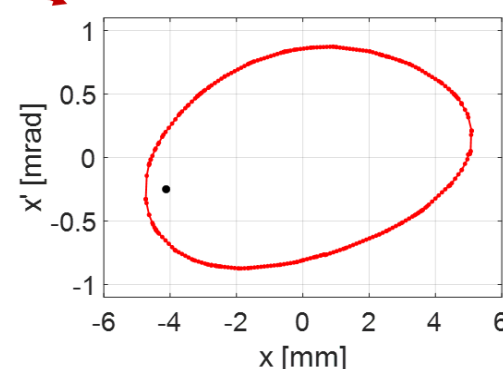
(e)

(d) Kicker出口位置处的储存环接受度相空间叠加脉冲非线性  
磁场最大“踢力”形成的kicker入口处的等效接受度



(d)

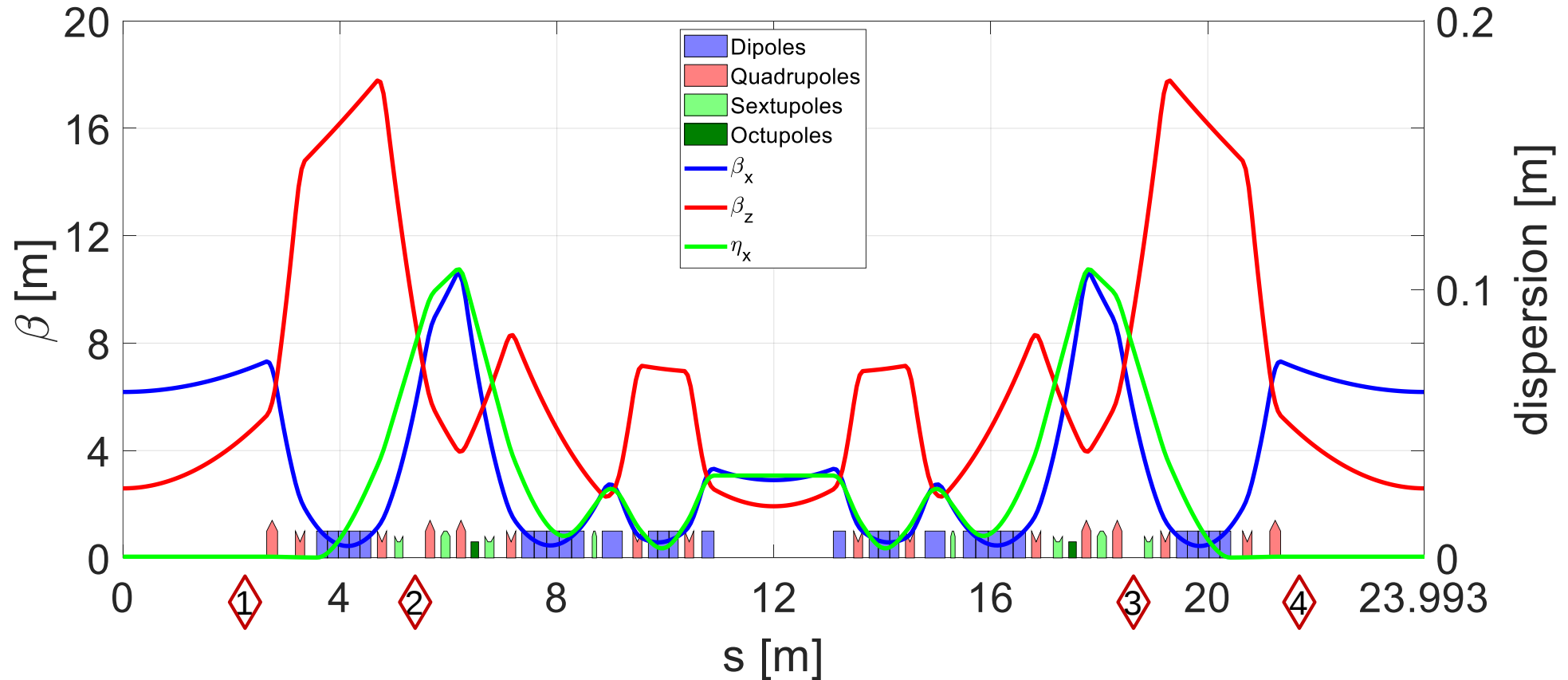
(c) Kicker出口  
位置处的储存  
环接受度相空  
间



(c)

图 (e) 所示的等效接受度相空间综合体现了储存环的接受度以及脉冲非线性磁铁的能力，结合 Septum 切割板高度的限制，可以获得注入束流在 Septum 出口处的有效接受度相空间。

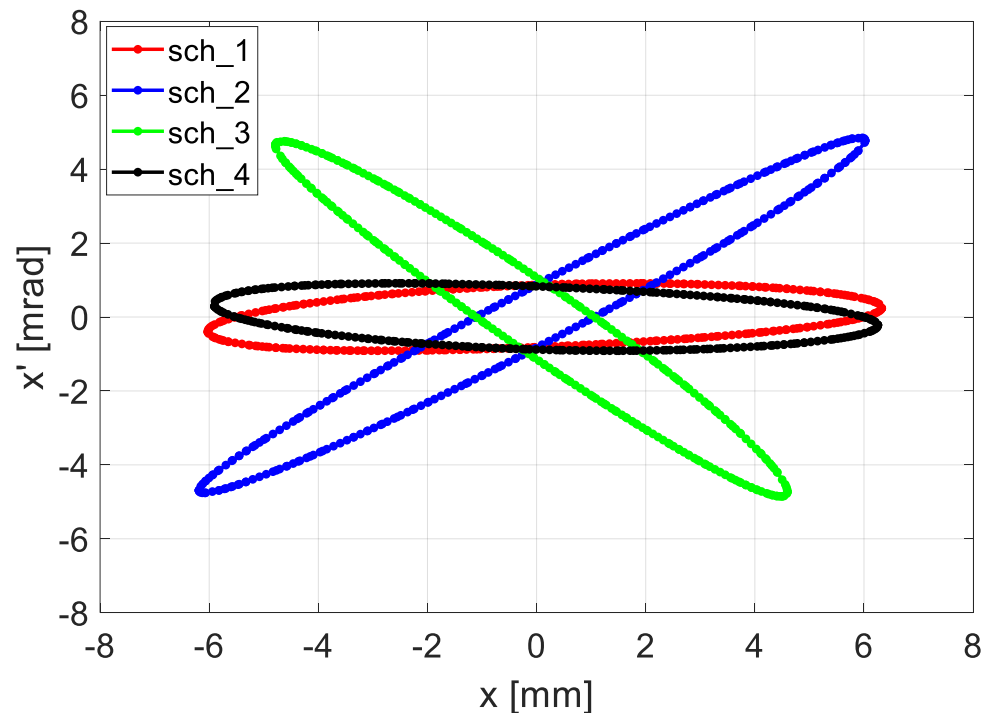
# 不同kicker位置方案



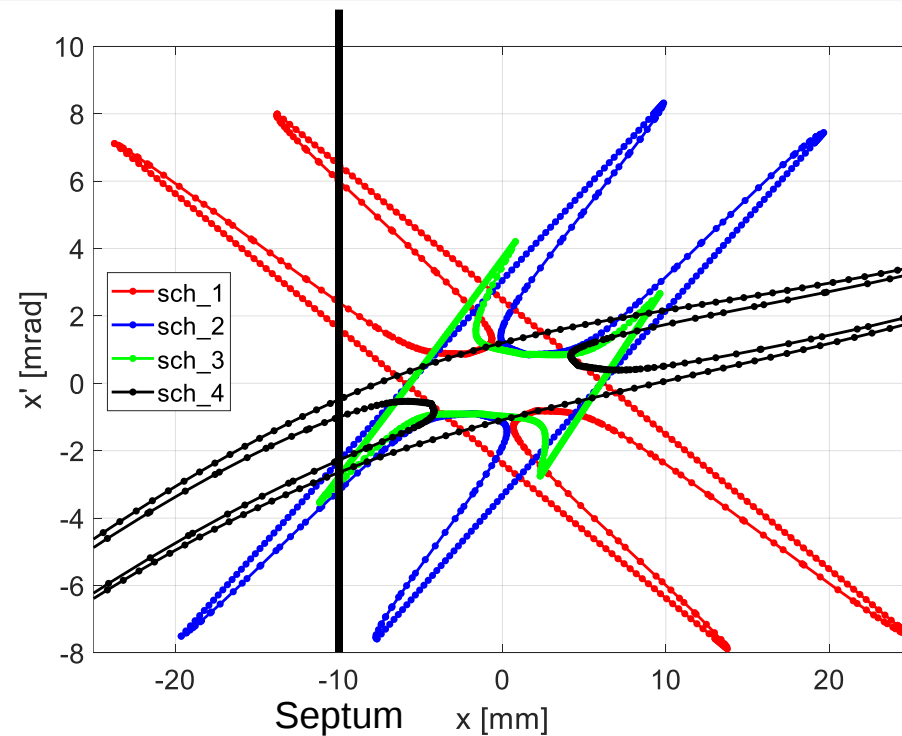
HALF 一个Cell可以安装kicker的位置如图所示：

1, 4位于长直线节；2, 3位于弯转段（安装空间41.7 cm）。

# 不同kicker位置方案的比较



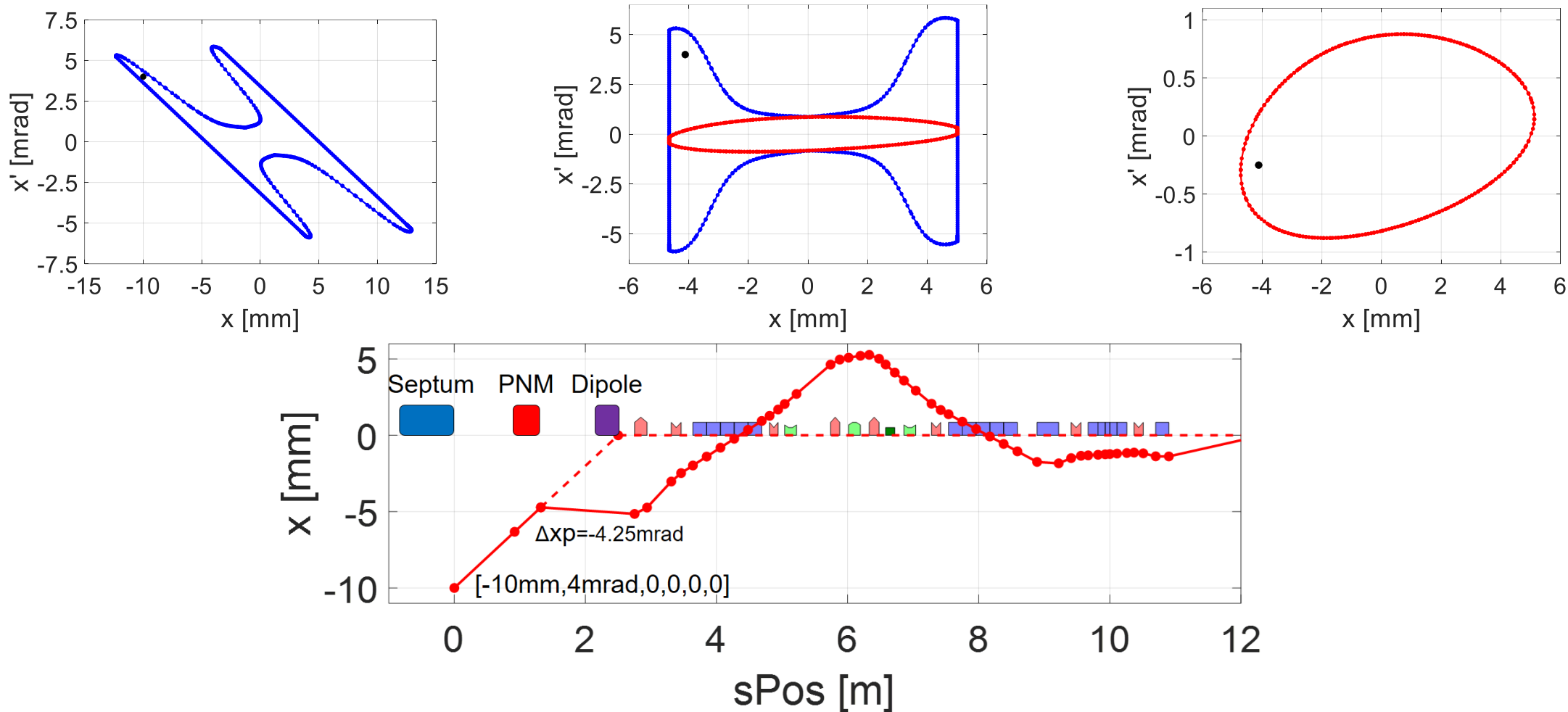
不同方案, Kicker位置处的接受度相空间



不同方案, Septum出口位置处的等效接受度相空间

- ✓ 当Septum高度大于10 mm时, 只有方案3无法实现束流的注入;
- ✓ 方案2和方案4采用环内注入时, 注入束流的入射角度为负值, 注入束流将继续偏离中心轨道, 在进去储存环弧区时很可能超过储存环的物理孔径; 即使物理孔径够大, 磁铁好场区也做不到这么大, 注入束流就无法按设想的路径运动;
- ✓ 综上分析, 方案1是最优的选择。

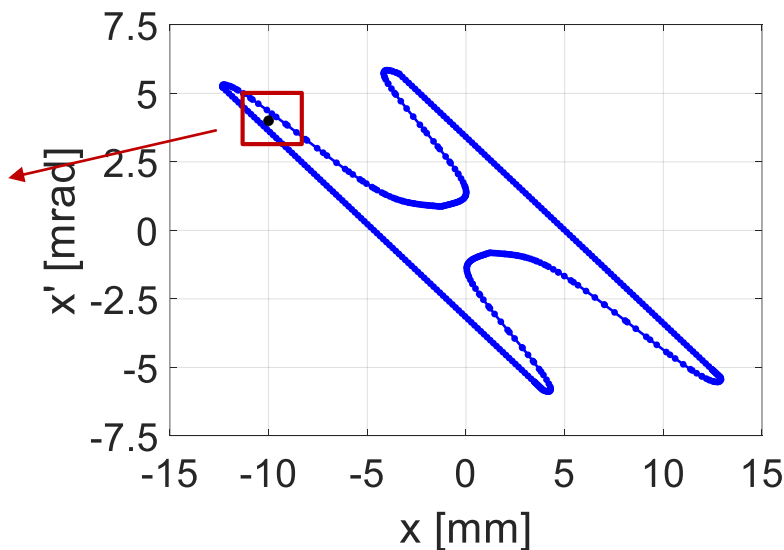
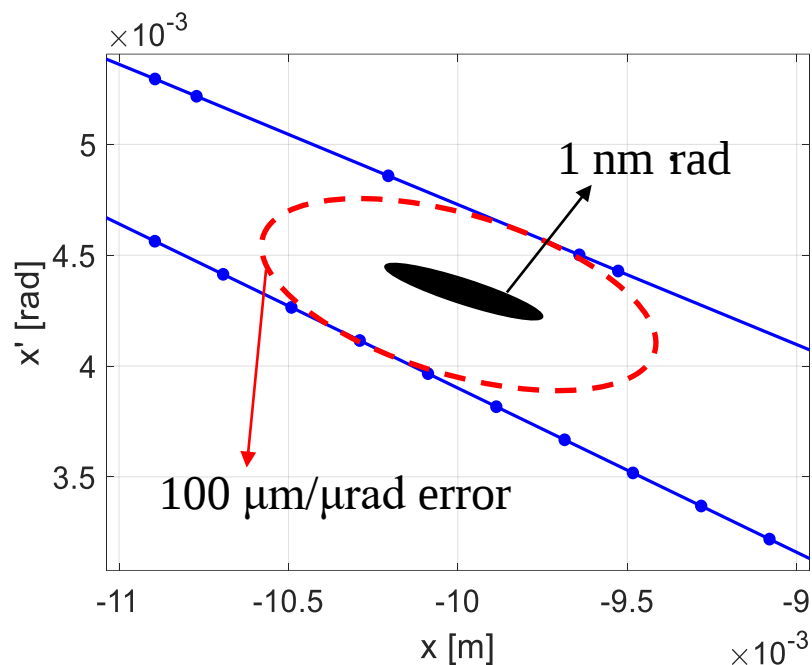
# 环内注入物理方案的初步设计



注入系统基本布局以及束流注入过程示意图

该方案同时兼顾了在轴注入方案（由Septum和Dipole组成），以实现储存环首圈注入。

# 对注入束流参数的基本要求



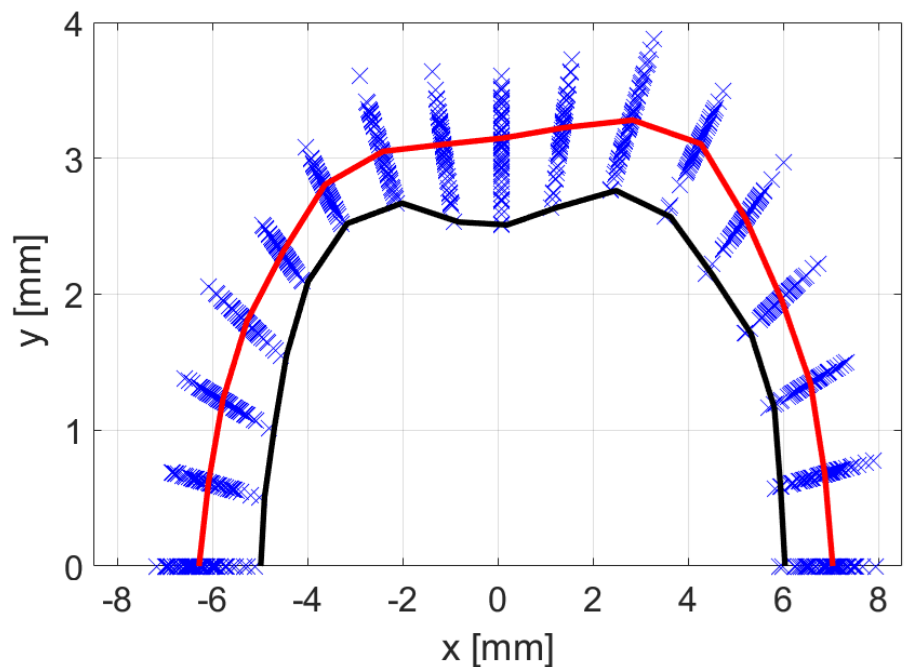
注入束流的参数要求

| 参数              | 数值                              |
|-----------------|---------------------------------|
| 注入束流发射度         | $< 1 \text{ nm}\cdot\text{rad}$ |
| 注入束流水平位置偏差(rms) | $\leq 100 \mu\text{m}$          |
| 注入束流角度偏差(rms)   | $\leq 100 \mu\text{rad}$        |
| 注入束流能量稳定性(rms)  | $\leq 0.1\%$                    |
| 注入束流能散(rms)     | $\leq 0.1\%$                    |

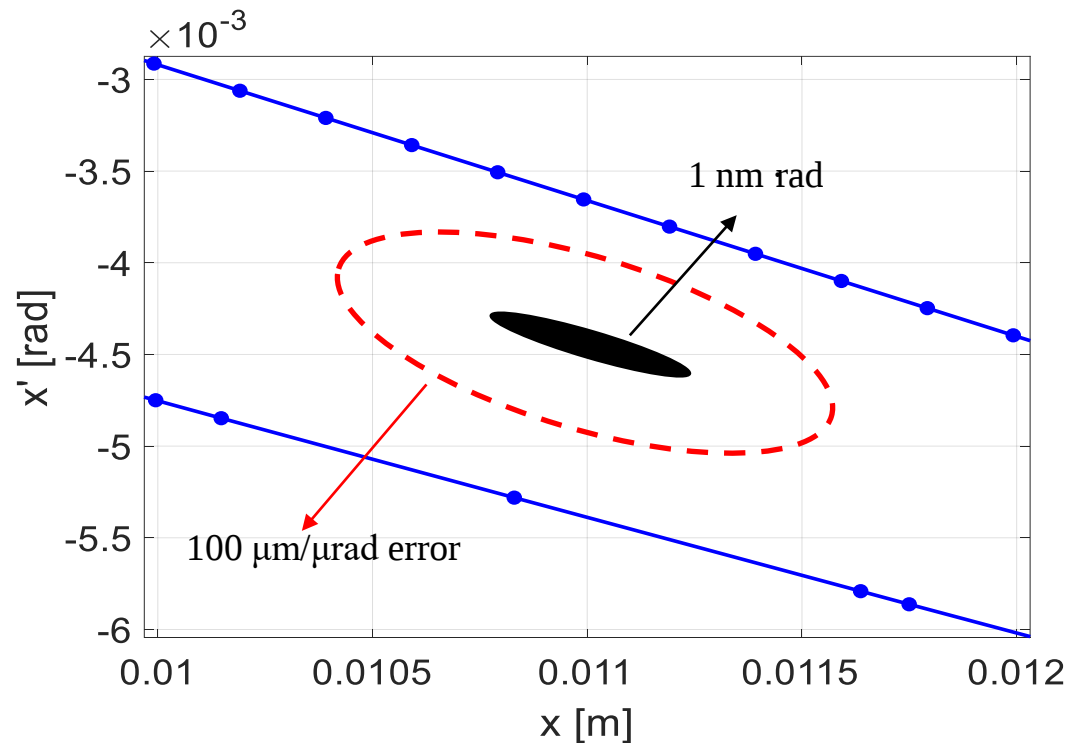
考虑注入束流误差后，注入束流的相空间分布示意图

其中黑色椭圆为注入束流的尺寸，发射度为 $1 \text{ nm}\cdot\text{rad}$ ；红色虚线区域表示当注入束流的水平位置误差为 $100 \mu\text{m}$ ，角度误差为 $100 \mu\text{rad}$ 时，注入束流的有效相空间。

# 环外注入的选择I——动力学孔径的差异



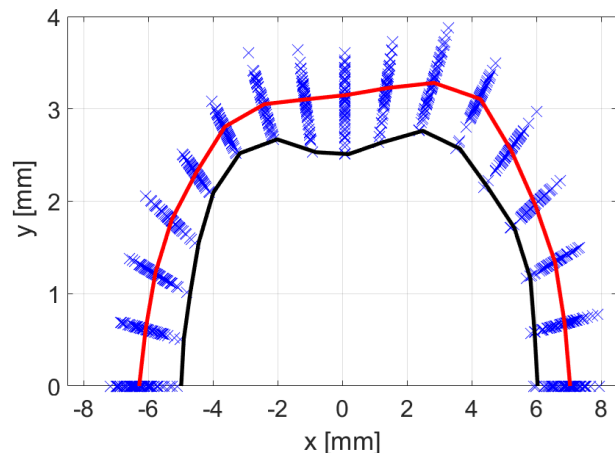
考虑全环储存环误差后的动力学孔径



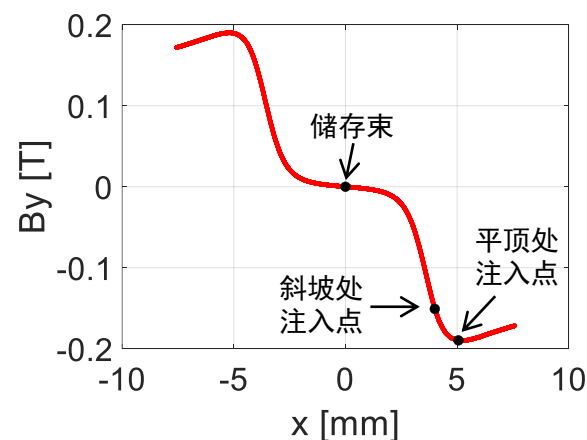
考虑注入束流误差后，注入束流的相空间分布示意图

其中蓝色线为Septum出口处的等效注入接受度；黑色椭圆表示发射度为 $1 \text{ nm} \cdot \text{rad}$ 的注入束流相空间分布；红色椭圆表示当注入束流的位置和角度误差为 $100 \mu\text{m}$ 和 $100 \mu\text{rad}$ 时，注入束流相空间分布区域。采用环外注入方案，可以充分利用 $1 \text{ mm}$ 的动力学孔径差异，获得更大的注入束流接受度，进而可以降低对注入束流发射度的要求。

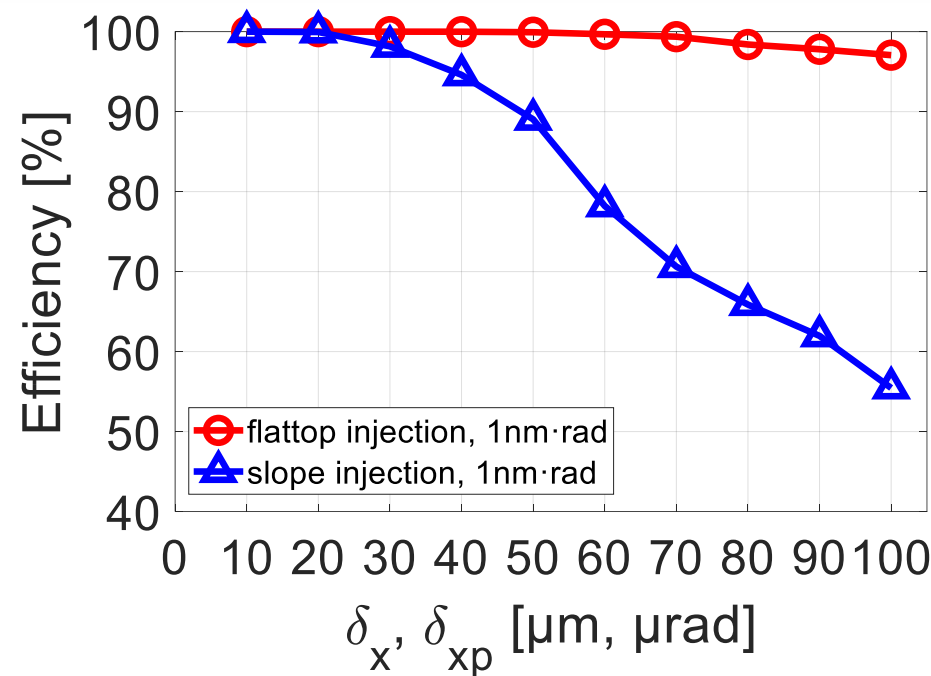
# 环外注入的选择II——斜坡处注入对注入效率的影响



考虑全环储存环误差后的动力学孔径



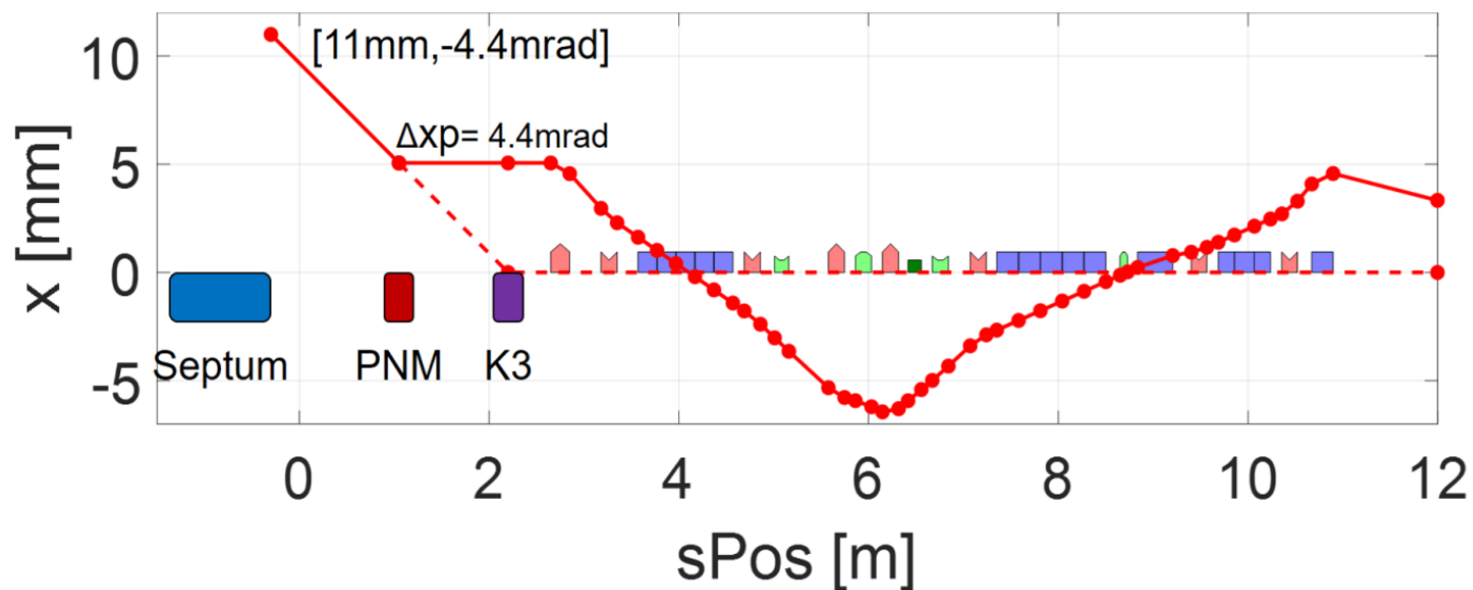
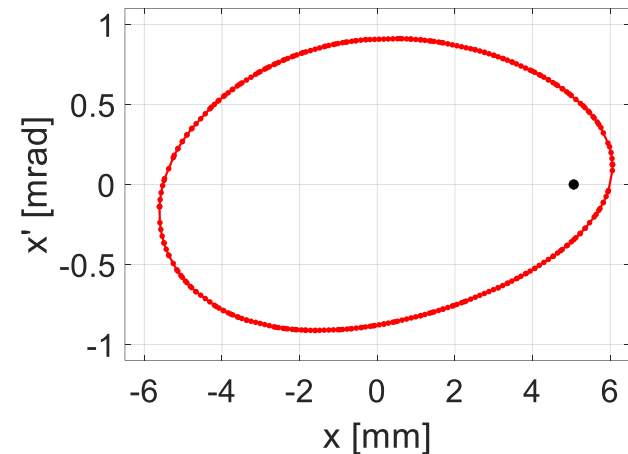
注入束流受到kicker作用时，所处的磁场位置示意图。



斜坡处注入与平顶处注入的注入效率比较

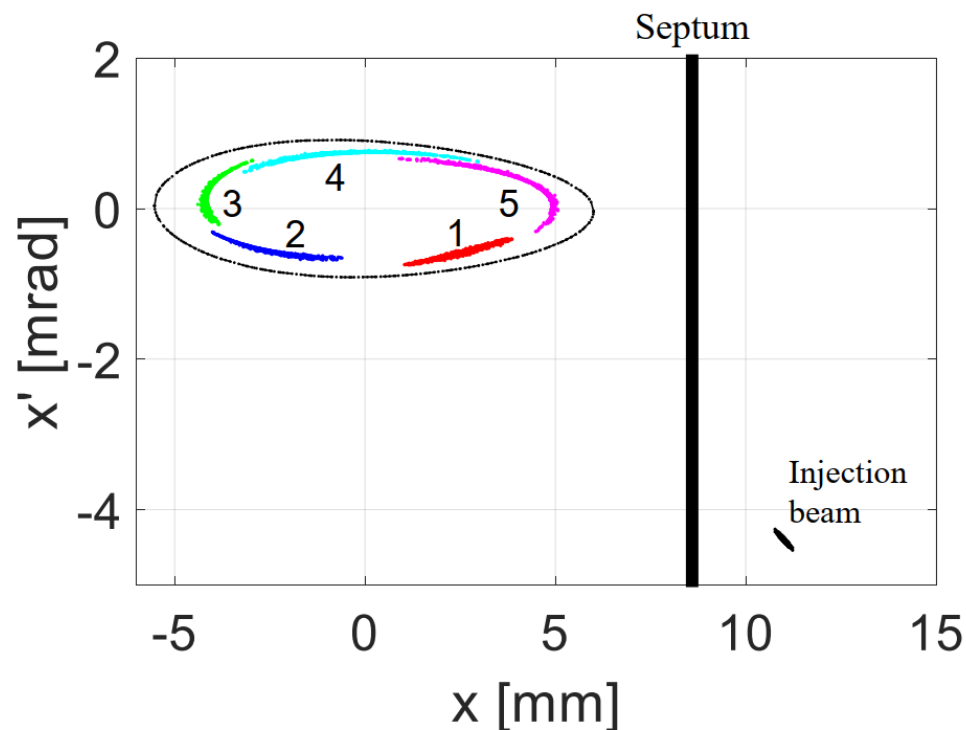
由于注入束流位置及角度误差的影响，注入束流到达kicker位置处，其所受到的非线性磁场踢力与理论设计值会有偏差。当束流处于磁场斜坡处，这个偏差将会受到磁场梯度的影响而放大，进而影响束流的注入效率。

环外注入可以在非线性磁场的平顶处注入，具有更高的误差容忍度，可以大大提高束流的注入效率。

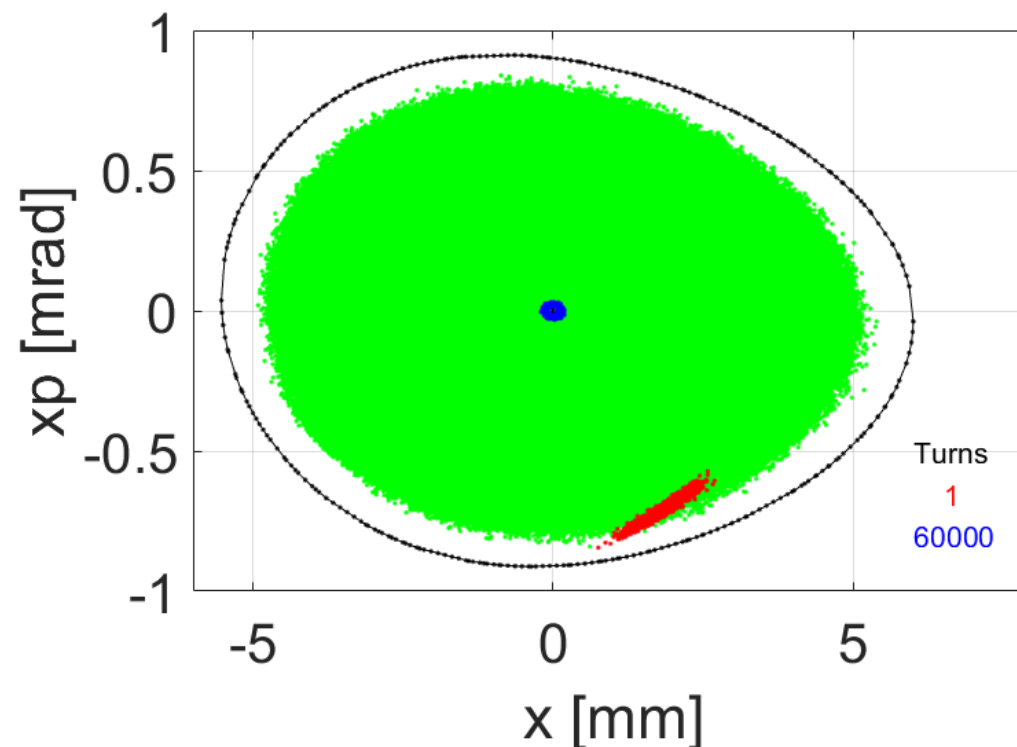


### 环外注入系统基本布局以及束流注入过程示意图

# 束流注入过程跟踪模拟分析



束流注入过程前5圈的相空间示意图



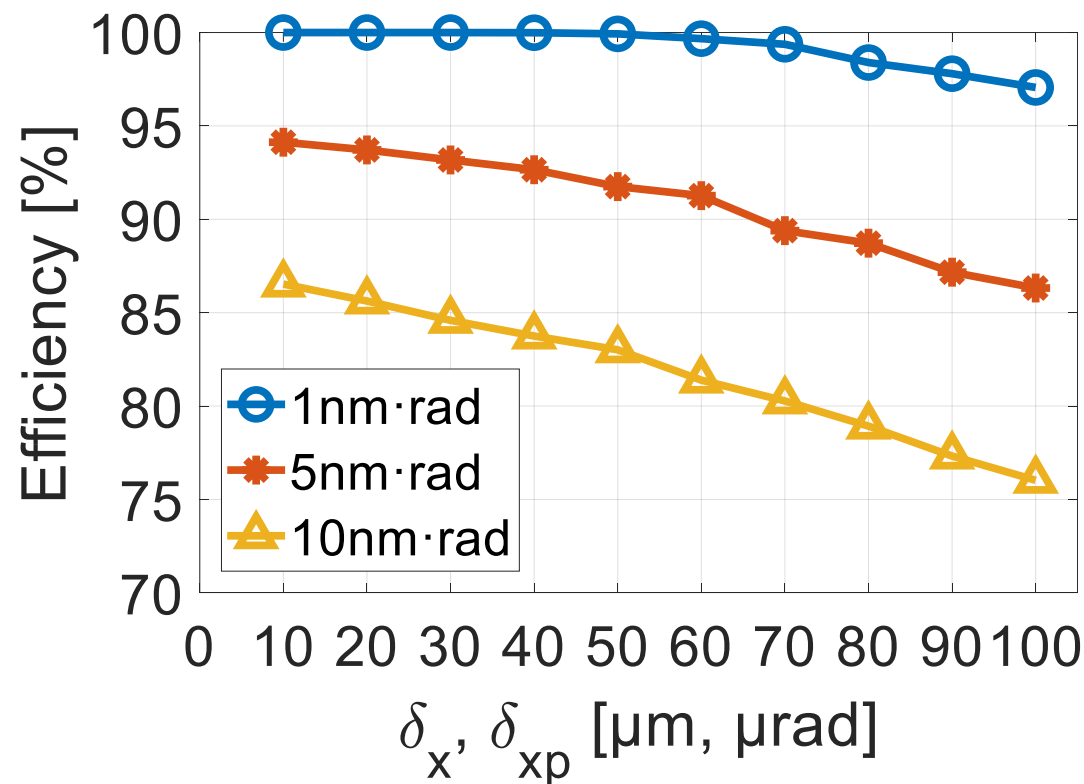
束流累积过程相空间示意图

其中：黑色椭圆为储存环的接受度相空间，数字及其对应的束团为注入过程中不同圈数的束流相空间分布。

从分析结果可以看出，只要注入束流进入到储存环的接受度中，就可以在储存环中存活，并通过辐射阻尼效应，经过约96 ms后，与储存束流融合。

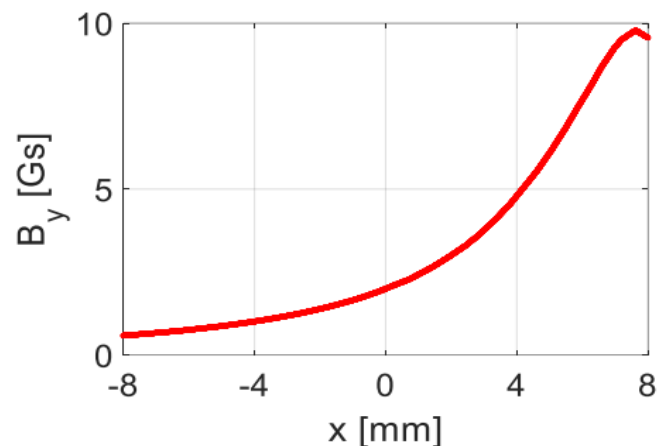
# 注入束流发射度对束流注入效率的影响

- 采用环外注入方案。设定注入束流的位置和角度偏移量分别为100  $\mu\text{m}$ 、100  $\mu\text{rad}$ 时，当注入束流发射度为1  $\text{nm}\cdot\text{rad}$ ，注入效率可达97%；当注入束流发射度为5  $\text{nm}\cdot\text{rad}$ 时，注入效率为87%；当注入束流发射度为10  $\text{nm}\cdot\text{rad}$ 时，注入效率为76%。从基本满足功能的角度来看，采用环外注入方案时，10  $\text{nm}\cdot\text{rad}$ 以下的注入束流发射度都可以满足要求。
- 但是为了实现平顶处注入，注入束流在kicker位置处的离轴距离为5 mm，而储存环的接受度只有6 mm，有效孔径只有1 mm；另外非线性磁场的平顶有一定的弧度，注入束流发射度的误差依然会影响束流的注入效率；
- 因此注入束流发射度的增加会一定程度上降低束流注入效率。

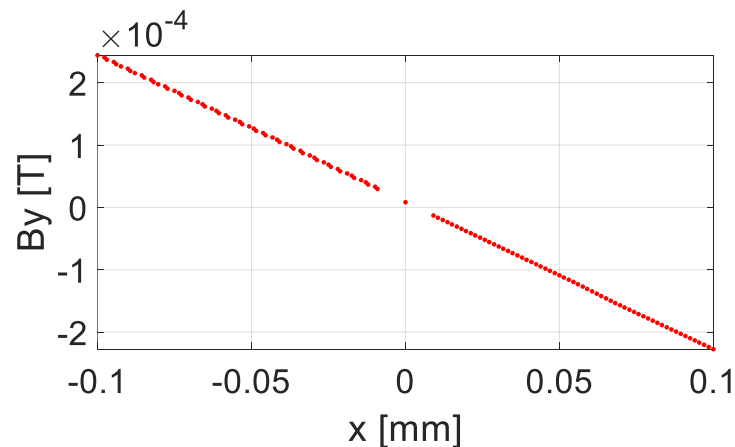


不同注入束流发射度情况下，束流的注入效率比较。

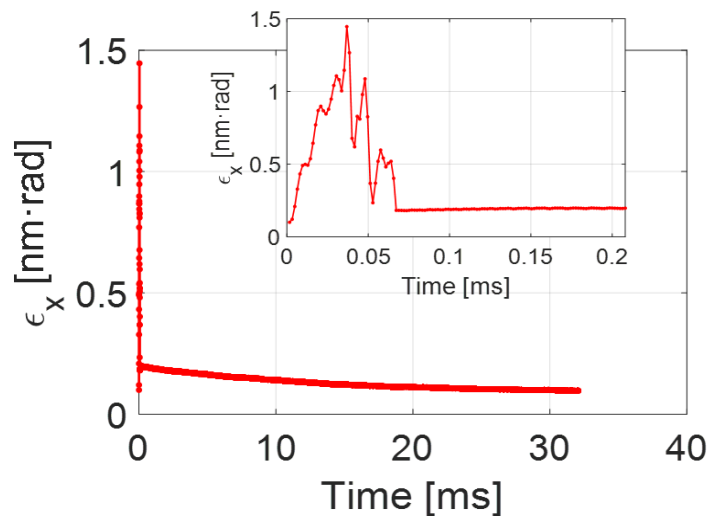
# 束流注入过程对储存束流的影响



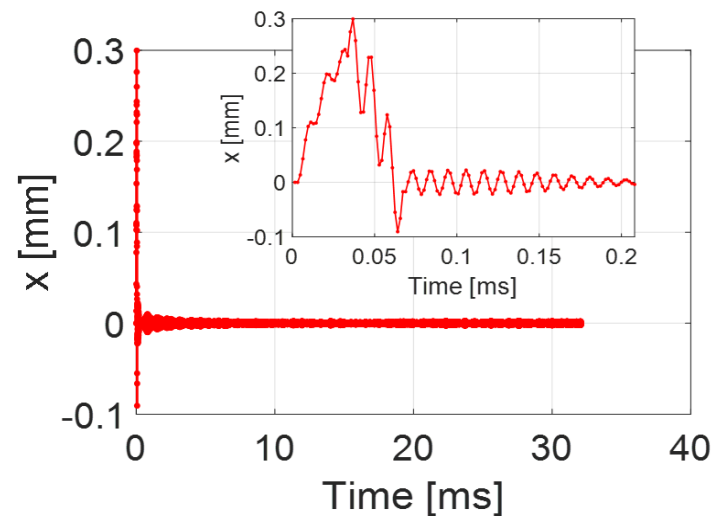
Septum的漏场



PNM中心场区



束流注入过程对储存束流发射度的影响。



束流注入过程对储存束流平均轨道的影响。

脉冲非线性磁铁注入方案影响储存束流的因素主要是：1.Septum漏场；2.PNM的中心磁场；从分析结果可以看出，束流注入过程对储存束流发射度的影响会在30 ms内恢复到理论值，而对储存束流轨道的影响将在10 ms内恢复到设计状态。

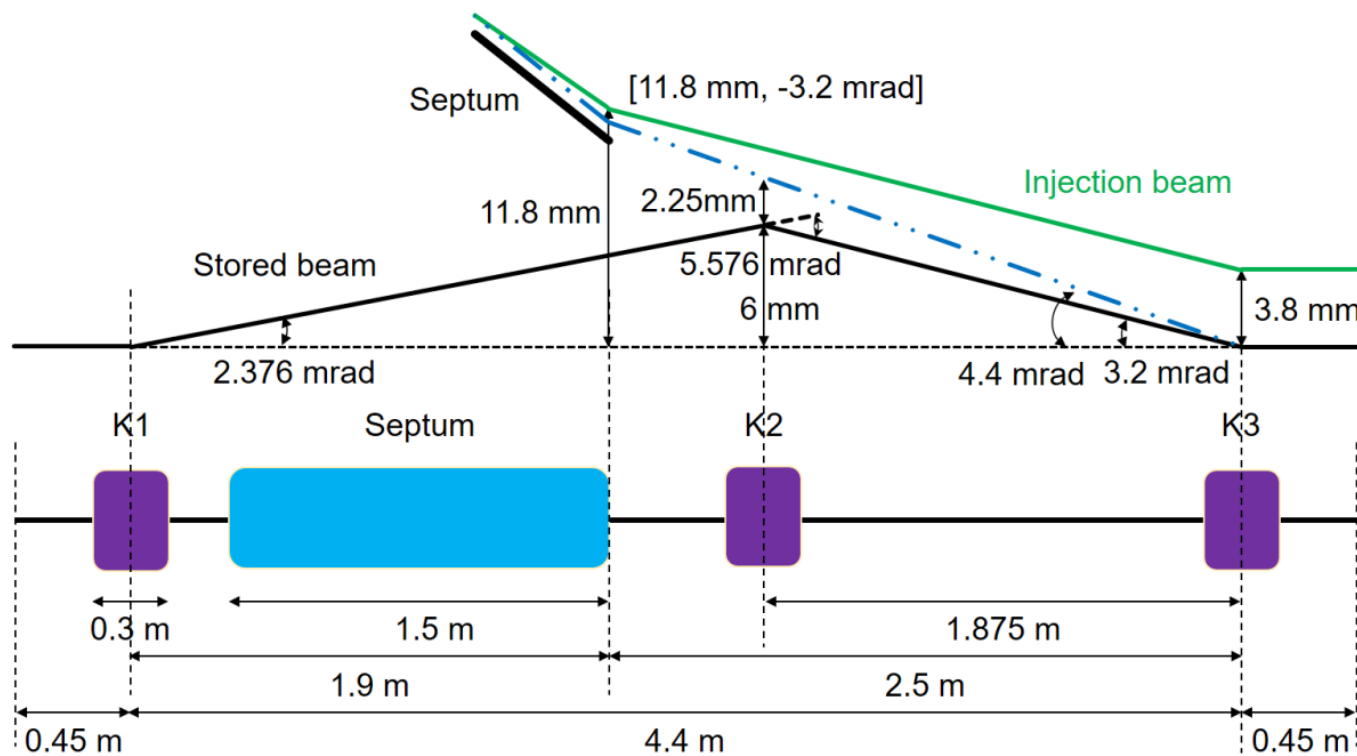
# 小结

- HALF储存环具有足够大的动力学孔径，为脉冲非线性磁铁注入方案的应用提供了可能。实验室自研的脉冲非线性磁铁为该方案的应用进一步解决了技术问题。
- HALF储存环动力学孔径在x平面正方向上要比负方向大1 mm左右，使得环外注入要比环内注入具有更大的注入接受度。而且采用环外注入方案可以实现在非线性磁场的平顶处注入，可以大大增加对注入束流误差的容忍度，进而大大提高束流的注入效率。因此HALF储存环束流注入将采用环外注入方案。
- 采用环外注入方案可以降低对注入束流发射度的要求，但是由于束流注入的有效孔径比较小（~1 mm），脉冲非线性磁铁的磁场分布达不到理想状态，注入束流发射度的增加会一定程度上减小束流的注入效率。后续我们继续优化储存环Lattice结构，增大动力学孔径。同时优化脉冲非线性磁铁的设计，在保证对储存束流低扰动以及足够高的束流注入效率的情况下，进一步降低对注入束流的参数要求。
- 脉冲非线性磁铁束流注入方案对储存束流的扰动很小，非常适合恒流运行模式。HALF储存环将采用该方案作为以后长期恒流运行的主要方案。

# 凸轨注入方案的设计

- ✓ 脉冲非线性磁铁注入方案需要6 mm的动力学孔径，而且调节自由度比较低。在储存环调试初期甚至试运行阶段，储存环各项性能指标达不到理论设计状态，此时脉冲非线性磁铁注入方案将难以满足储存环的束流注入要求。需要一套额外的束流注入方案来完成整个加速器以及光束线站的调试工作。
- ✓ 考虑到凸轨注入方案技术成熟，调节自由度比较高，因此我们额外设计了一套凸轨注入方案。

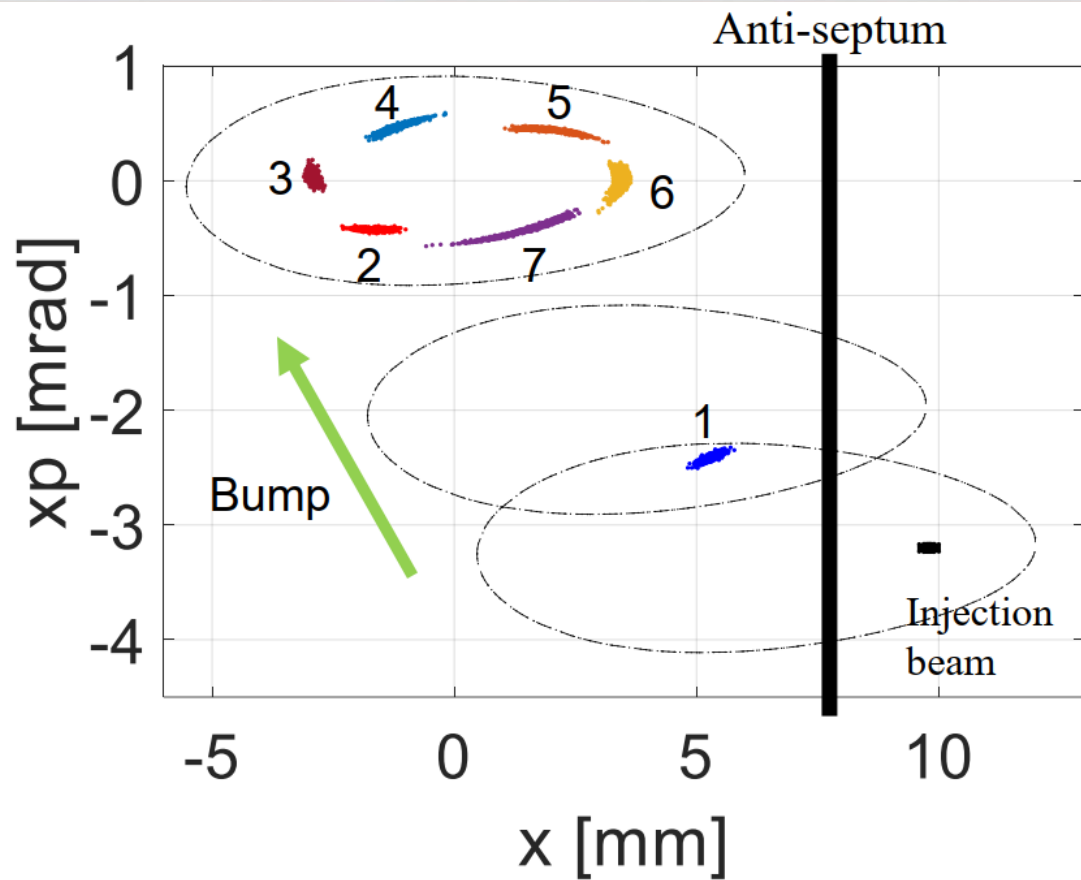
- 基于anti-septum凸轨注入方案（SLS 2.0）的设计思路。
- K2为anti-septum，采用双通道设计，只作用储存束流，而不影响注入束流。
- 该方案同时兼顾了在轴注入方案（由Septum和K3组成），可以实现储存环首圈注入，完成储存环初期调试工作。
- 其中绿色线为凸轨注入时，注入束流的运动轨迹，蓝色虚线为在轴注入时，注入束流的运动轨迹。



凸轨注入方案系统布局及关键参数示意图

# 凸轨注入过程模拟分析

- 为了保证kicker的一致性，提高局部凸轨的闭合程度，各kicker的脉冲底宽初步设定为  $5.6\ \mu\text{s}$ ，对注入束流额外影响一圈，对储存束流影响3圈。
- 凸轨注入方案由于注入束流在注入点处的离轴距离只有3.8 mm，有效注入孔径为2.2 mm，具有比较高的误差容忍度。
- 在储存环调试过程中，还可以根据储存环的实际状态，调节各kicker参数，进一步降低注入束流在注入点处的离轴距离，保证束流能够注入到储存环中，从而满足储存环的调试要求。



束流注入过程前7圈的相空间示意图

其中黑色椭圆自下而上分别为凸轨最高位置处的相空间，凸轨下降时的相空间以及储存环的相空间。

数字及其对应的束团为注入过程中不同圈数的束流相空间分布。

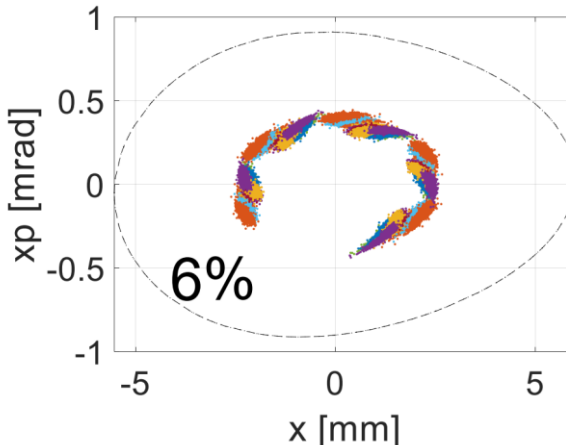
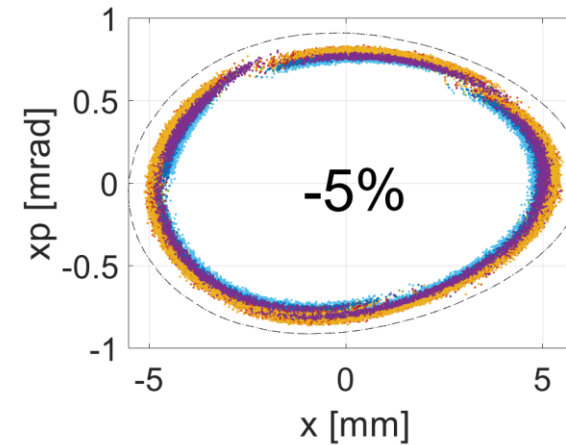
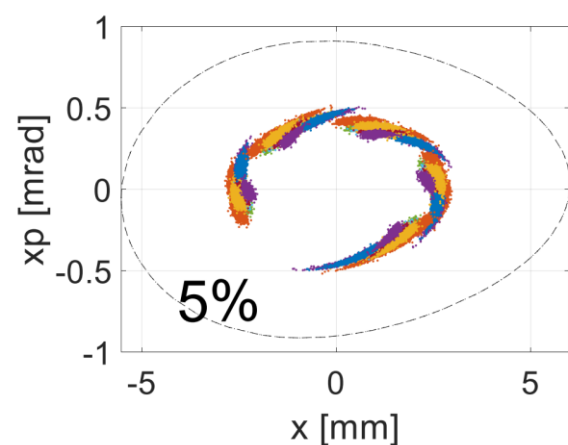
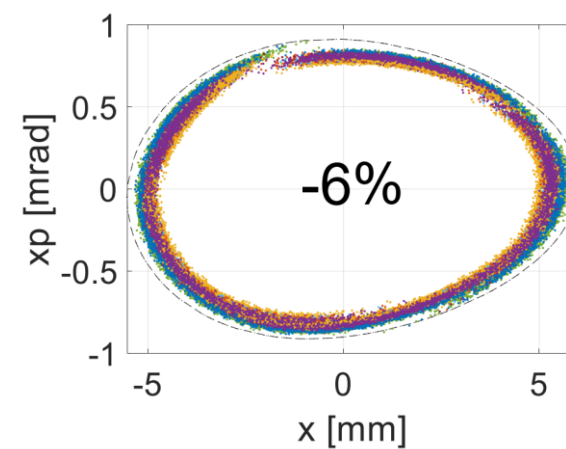
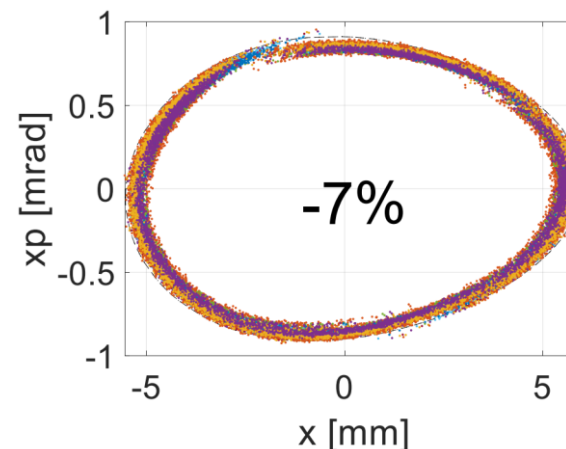
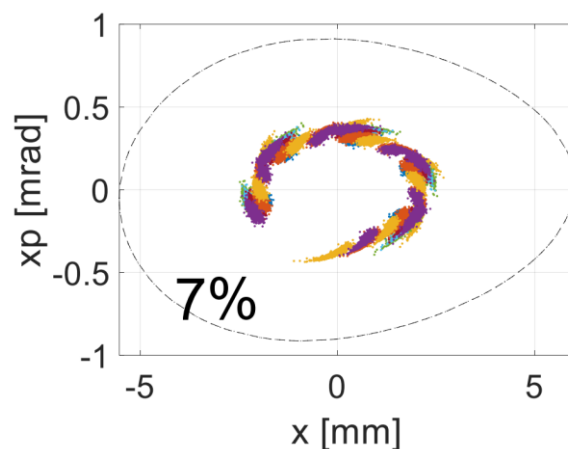
# 凸轨注入方案束流注入效率模拟分析

影响注入效率的因素包括：

- ✓ 注入束流的位置和角度误差 ( $<100\mu\text{m}/\mu\text{rad}$ ) ;
- ✓ K3的误差(非常小) ;
- ✓ 凸轨的一圈影响(残余振荡) ;
- ✓ Septum漏场的影响。

分析思路：

- ✓ 注入束流的位置误差 ( $100\mu\text{m}/\mu\text{rad}$ )
- ✓ 凸轨残余振荡幅度 ( $\pm 5\% \rightarrow \pm 7\%$ )
- ✓ Septum漏场按理论场形计算。



不同参与凸轨残余振荡幅度对束流注入效率的影响

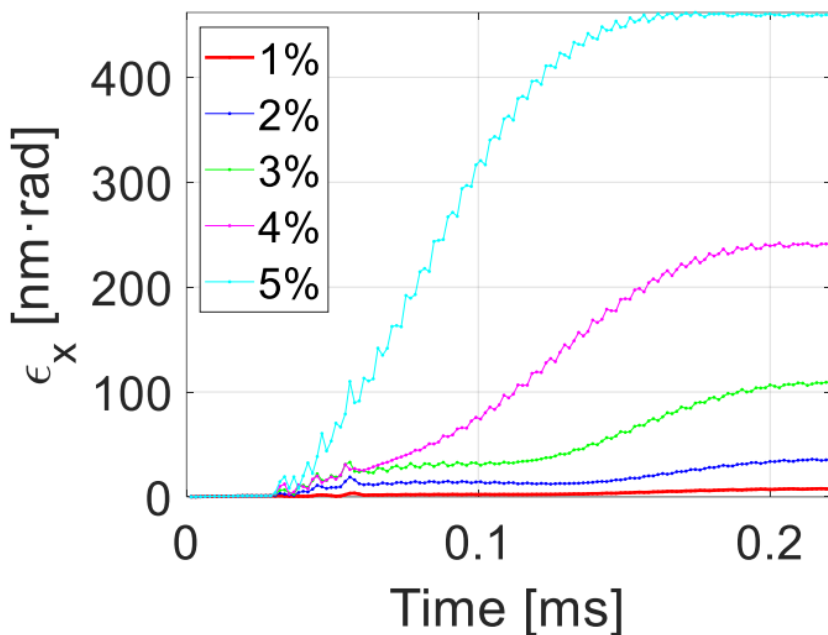
凸轨残余振荡幅度控制在 ( $\pm 5\%$ , 绝对值) 以内, 注入效率就可以达到100%。

# 凸轨注入方案对储存束流的影响

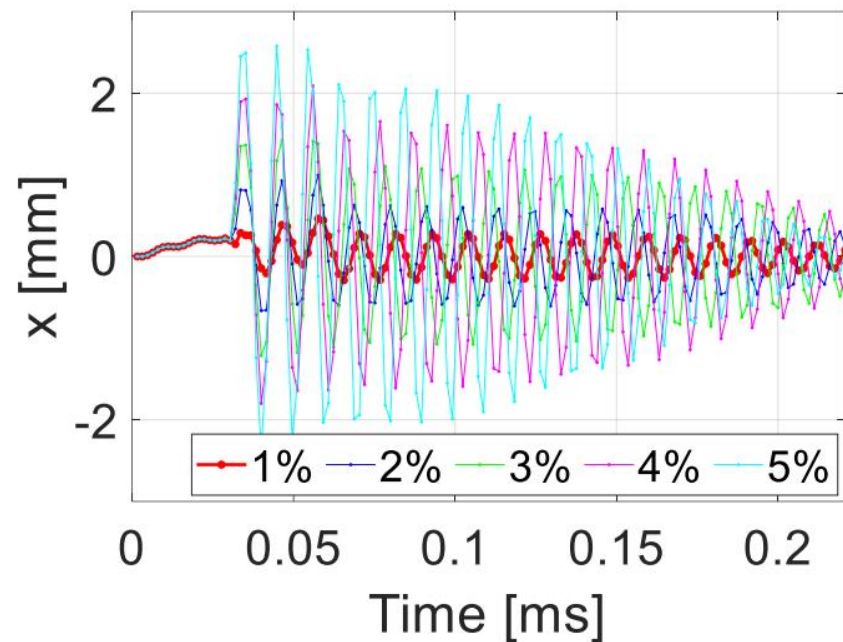
响储存束流的因素：1.Septum漏场；2.凸轨的残余振荡。

分析思路：

- ✓ 跟踪分析注入过程对储存束流的发射度和轨道的影响。
- ✓ Septum按理论漏场场形计算，凸轨残余振荡（1%→5%）。



不同凸轨残余振荡情况下，束流注入过程对储存束流发射度的影响。

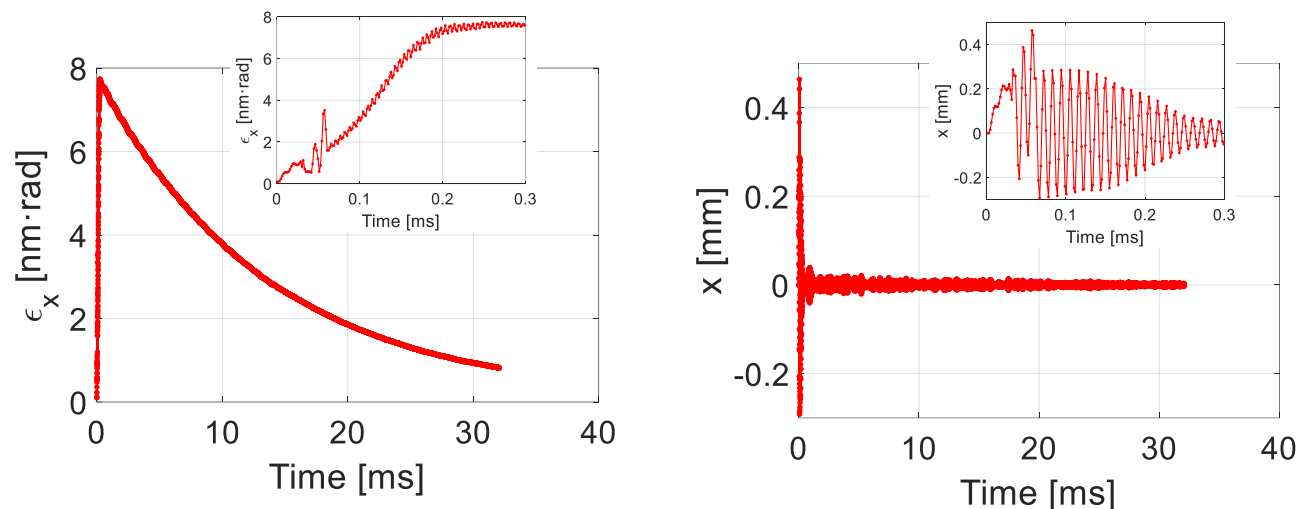


不同凸轨残余振荡情况下，束流注入过程对储存束流平均轨道的影响。

凸轨的闭合程度越差，束流注入过程对储存束流的扰动越大。

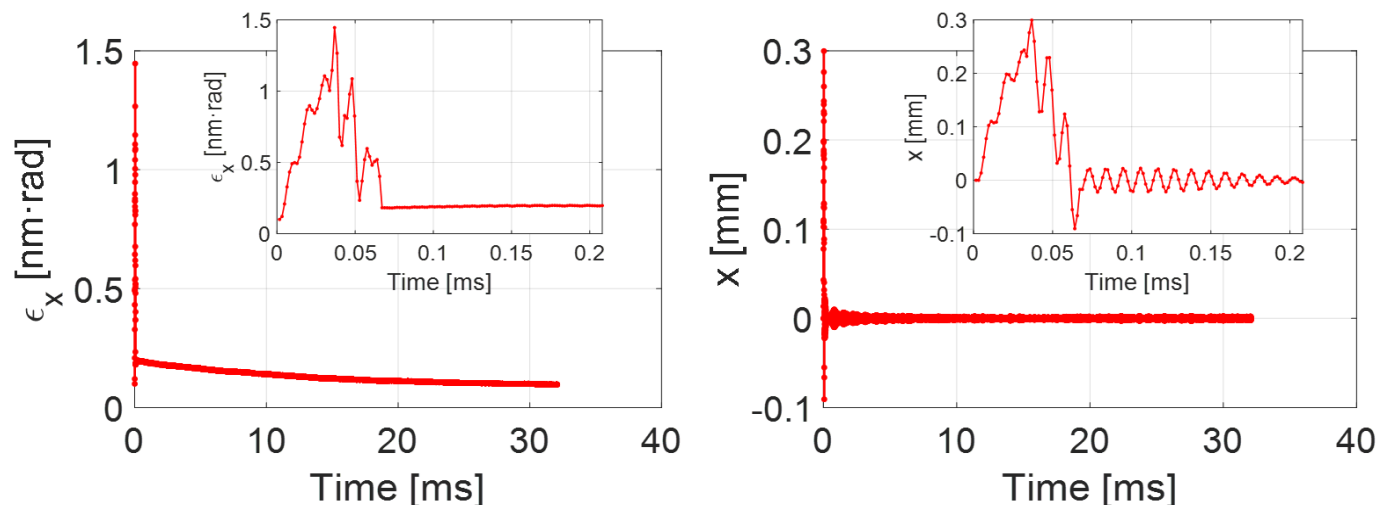
# 凸轨残余振荡为1%时，注入过程对储存束流的影响

- 凸轨注入方案的最大问题就是kicker的一致性难以做到非常高，同时还有septum漏场的影响，使得局部凸轨无法做到非常好的闭合，以目前的技术水平，凸轨残余振荡幅度能够做到1%的水平。



凸轨注入过程对储存束流发射度及平均轨道的影响。

- 从模拟分析结果可以看出，储存束流经过32 ms后，束流发射度为821 pm·rad，平均轨道的振荡幅度为5.1  $\mu\text{m}$ 。相比脉冲非线性磁铁束流注入方案，其对储存束流的扰动要大得多。



脉冲非线性磁铁注入过程对储存束流发射度及平均轨道的影响。

- 凸轨注入方案技术成熟，调节自由度高，可以满足HALF储存环调试初期以及试运行阶段的束流注入要求。
- 在凸轨注入方案中，注入束流在注入点处的有效孔径达到2.2 mm，具有非常高的误差容忍度和注入效率，而且还可以通过高自由度的调试，来实现储存环调试初期的不同状态下的束流注入。
- 凸轨注入方案对储存束流具有比较大的扰动。而HALF储存环作为衍射极限储存环，对束流轨道的稳定性要求非常高（ $\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ ），这么大束流扰动是难以接受的。因此凸轨注入方案不适合作为HALF储存环长期恒流运行的主要方案。

# HALF储存环束流注入物理方案的整体设计

## ➤ 在轴注入系统

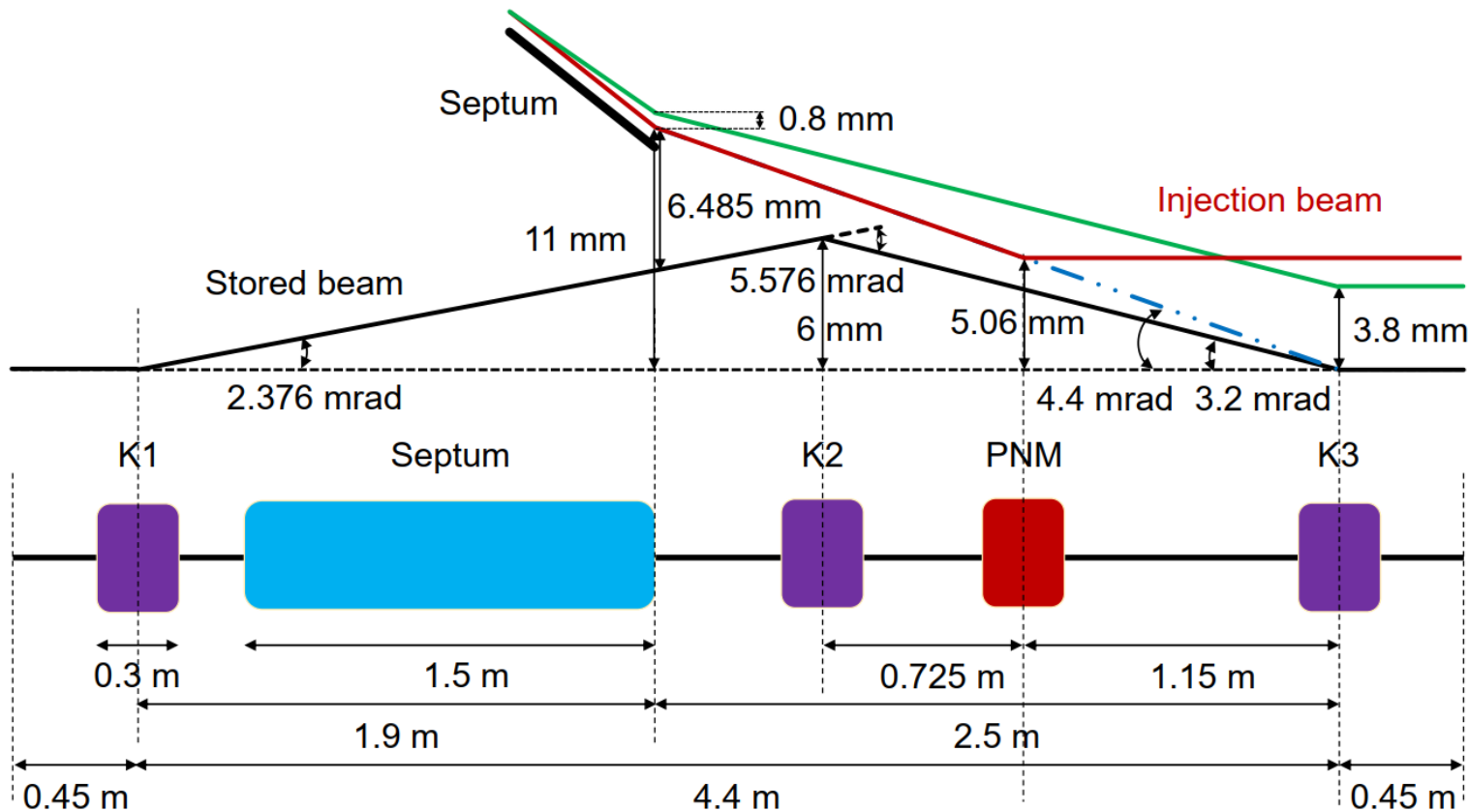
- ✓ 由Septum和K3组成，束流运动轨迹如蓝色虚线所示。
- ✓ 主要用于首圈注入和储存环初期调试。

## ➤ 凸轨注入系统

- ✓ 由Septum和K1、K2、K3组成，其中K2为anti-septum。束流运行轨迹如绿色实线所示。
- ✓ 主要用于储存环调试初期和试运行阶段的注入，进一步调试和优化加速器及光束线站的各项性能。

## ➤ 脉冲非线性磁铁注入系统

- ✓ 由Septum和PNM组成，束流运行轨迹如红色实线所示。
- ✓ 主要用于储存环长期恒流注入。



HALF储存环束流注入方案系统布局及参数示意图

- HALF储存环束流注入系统通过整合设计，以脉冲多极铁注入方案为主，同时兼顾在轴注入方案和凸轨注入方案，以应对储存环不同运行阶段的束流注入需求。
- 在储存环初期调试阶段，将采用在轴注入方案来完成储存环首圈轨迹校正、轨道校正、光学校正等一系列调试工作；在储存环试运行阶段，将采用凸轨注入方案来进一步优化储存环的性能，尽可能地使储存环的各项性能参数达到理论设计的目标；在储存环稳定运行阶段，将采用脉冲多极铁注入方案，在满足束流注入的前提下，尽可能地降低对储存束流的扰动，提高光源的稳定性。
- 通过整合设计以及一系列的跟踪模拟分析可知，多功能的束流注入系统可以满足HALF储存环各运行阶段的束流注入要求，并且具有非常高的束流注入效率以及非常小的储存束流扰动。