



The Sixth Overseas Chinese Physics Association

ACCELERATOR SCHOOL

Beijing, China, July 29 - August 7, 2010

束流传输和束流操纵 (Beam Transport and Manipulation)

中国科学院高能物理研究所
唐靖宇

主要内容

- 引言
- 束流光学的基本理论
- 输运线线性光学设计的一般方法
- 横向相空间的匹配
- 纵向相空间的匹配
- 束流的多路分束
- 束晕刮除和动量分析
- 束流分布变换
- CSNS输运线设计的例子

§ 1 引言

束流传输

- 大型加速器的不同加速段之间通常需要束流输运线进行连接，将从加速器引出的束流传送到各实验终端或靶站也需要通过束流传输系统和束流分配系统来进行。
- 通常束流输运线的光学设计较环形加速器要简单一些，主要是因为束流只是一次性通过（线性光学设计）
- 没有束流加速问题
- 相空间匹配问题：横向相空间和纵向相空间中的匹配
- 空间位置安排相对来说也较环中的要轻松一些

束流操纵

- 束流至不同的后级加速器或实验站的分束
- 束晕的刮除
- 束流分布变换
- 电荷态分析和选择（特别是重离子束）

§ 2 束流光学的基本理论

束流光学与束流动力学

- 束流光学(**beam optics**): 通常是处理加速器中的束流传输段和电子显微镜(电子光学)中束流的运动规律, 一般不处理加速问题和多次循环问题, 一般也不处理高阶场不稳定性问题和束流集体不稳定性问题; 采用与几何光学类似的方法即线性矩阵方法的描述为主, 配合一些色差和像差的校正。
- 束流动力学(**beam dynamics**): 通常是处理加速器中束流的运动, 包括加速过程、各种高阶场不稳定性和集体不稳定性。在不考虑空间电荷效应和集体不稳定性的情况下, 以采用单粒子的跟踪方法为主。
- 二者之间是有交叉的, 基本原理也是相近的。

束流光学研究方法

- 描迹法
- 传输矩阵法

束流发射度、C-S不变量和刘维定理

束流发射度:

- 在相空间中包含一定粒子数比例的相椭圆面积 ($1/\pi$)。

[rms, 95%, 100%]

- 椭圆方程:

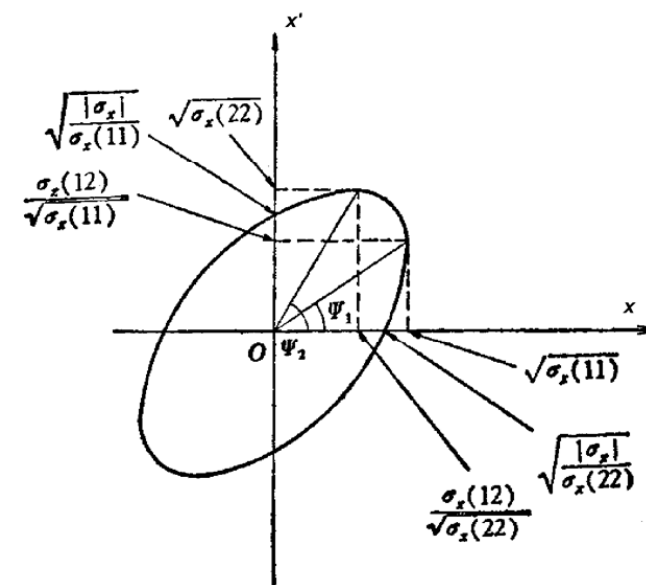
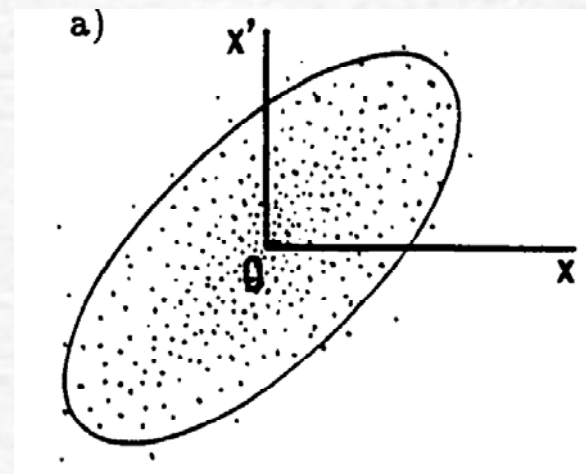
$$\sigma_x(22)x^2 - 2\sigma_x(12)xx' + \sigma_x(11)x'^2 = \varepsilon_x^2$$

束流矩阵的表示

$$\sigma_x = \begin{pmatrix} \sigma_x(11) & \sigma_x(12) \\ \sigma_x(21) & \sigma_x(22) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x \beta_x & -\varepsilon_x \alpha_x \\ -\varepsilon_x \alpha_x & \varepsilon_x \gamma_x \end{pmatrix}$$

刘维定理[横向运动中已有介绍]

- 束流发射度在由电场和磁场组成的加速器中运动时通常保持不变。



- C-S不变量

代表单个粒子的振荡能量，通常也是运动中不变的。

$$\gamma_x x^2 + 2\alpha_x x x' + \beta_x x'^2 = (\varepsilon_x) = 2I_x$$

$$\bar{I} = (1 + 2\alpha^2) \varepsilon_{rms}$$

- 束流光学的描述方法

- 描迹法：跟踪单个粒子的运动
- 传输矩阵法：将束流作为一个整体来考虑
- 6维相空间：
每个粒子除初始条件外是相同的，6N
维相空间简并为6维相空间。
3个投影相平面 (x-x', y-y', $\phi - \Delta p/p$)。

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \\ \frac{\Delta l}{p} \\ \frac{\Delta p}{p} \end{pmatrix}_f = M \begin{pmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \\ \frac{\Delta l}{p} \\ \frac{\Delta p}{p} \end{pmatrix}_i$$

常见束流传输元件的传输矩阵

- 自由漂移空间: L

- 磁四极透镜

$$k^2 = \frac{B_0}{a} \frac{1}{B\rho}$$

- 偏转磁铁

$$M = \begin{pmatrix} 1 & L & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & L/\gamma^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_Q = \begin{pmatrix} \cos kL & \frac{1}{k} \sin kL & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k \sin kL & \cos kL & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cosh kL & \frac{1}{k} \sinh kL & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k \sinh kL & \cosh kL & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & L/\gamma^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$h = 1/\rho, \quad k_x^2 = (1 - n)h^2, \quad k_y^2 = nh^2$$

磁铁本体
部分

$$M_B = \begin{pmatrix} \cos k_x L & \frac{1}{k_x} \sin k_x L & 0 & 0 & 0 & \frac{h}{k_x^2} (1 - \cos k_x L) \\ -k_x \sin k_x L & \cos k_x L & 0 & 0 & 0 & \frac{h}{k_x^2} \sin k_x L \\ 0 & 0 & \cos k_y L & \frac{1}{k_y} \sin k_y L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_y \sin k_y L & \cos k_y L & 0 & 0 \\ 0 & \frac{h}{k_x^2} \sin k_x L & \frac{h}{k_x^2} (1 - \cos k_x L) & 0 & 1 & -\frac{h^2}{k_x^3} (k_x L - \sin k_x L) + \frac{L}{\gamma^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

■ 偏转磁铁的边缘角

$$\psi = \kappa_1 \left(\frac{g}{\rho_0} \right) \left(\frac{1 + \sin 2\beta}{\cos \beta} \right) \left[1 - \kappa_1 \kappa_2 \left(\frac{g}{\rho_0} \right) \tan \beta \right]$$

$$M_{Rot} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\tan \beta}{\rho} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\tan(\beta - \psi)}{\rho} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

束流传输的一般表示

装配矩阵

- 一系列传输元件的总作用矩阵（装配矩阵）是单个元件传输矩阵的乘积（有时也称为R矩阵）：

$$M = M_n \cdots M_2 M_1$$

$$R = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} & R_{15} & R_{16} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & R_{24} & R_{25} & R_{26} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & R_{34} & R_{35} & R_{36} \\ R_{41} & R_{42} & R_{43} & R_{44} & R_{45} & R_{46} \\ R_{51} & R_{52} & R_{53} & R_{54} & R_{55} & R_{56} \\ R_{61} & R_{62} & R_{63} & R_{64} & R_{65} & R_{66} \end{pmatrix}$$

束流矩阵的变换

$$\sigma_x = M_x \sigma_{x0} M_x^T$$

$$\sigma = M \sigma_0 M^T$$

六维束流矩阵的表示

- σ 矩阵具有关于对角线的对称性
- r 矩阵又称为是关联矩阵(**beam matrix correlations**)

	x	x'	y	y'	ℓ	δ
x	σ_{11}					
x'	σ_{21}	σ_{22}				
y	σ_{31}	σ_{32}	σ_{33}			
y'	σ_{41}	σ_{42}	σ_{43}	σ_{44}		
ℓ	σ_{51}	σ_{52}	σ_{53}	σ_{54}	σ_{55}	
δ	σ_{61}	σ_{62}	σ_{63}	σ_{64}	σ_{65}	σ_{66}



			x	x'	y	y'	ℓ
x	$\sqrt{\sigma_{11}}$	MM					
x'	$\sqrt{\sigma_{22}}$	MR	r_{21}				
y	$\sqrt{\sigma_{33}}$	MM	r_{31}	r_{32}			
y'	$\sqrt{\sigma_{44}}$	MR	r_{41}	r_{42}	r_{43}		
ℓ	$\sqrt{\sigma_{55}}$	MM	r_{51}	r_{52}	r_{53}	r_{54}	
δ	$\sqrt{\sigma_{66}}$	PM	r_{61}	r_{62}	r_{63}	r_{64}	r_{65}

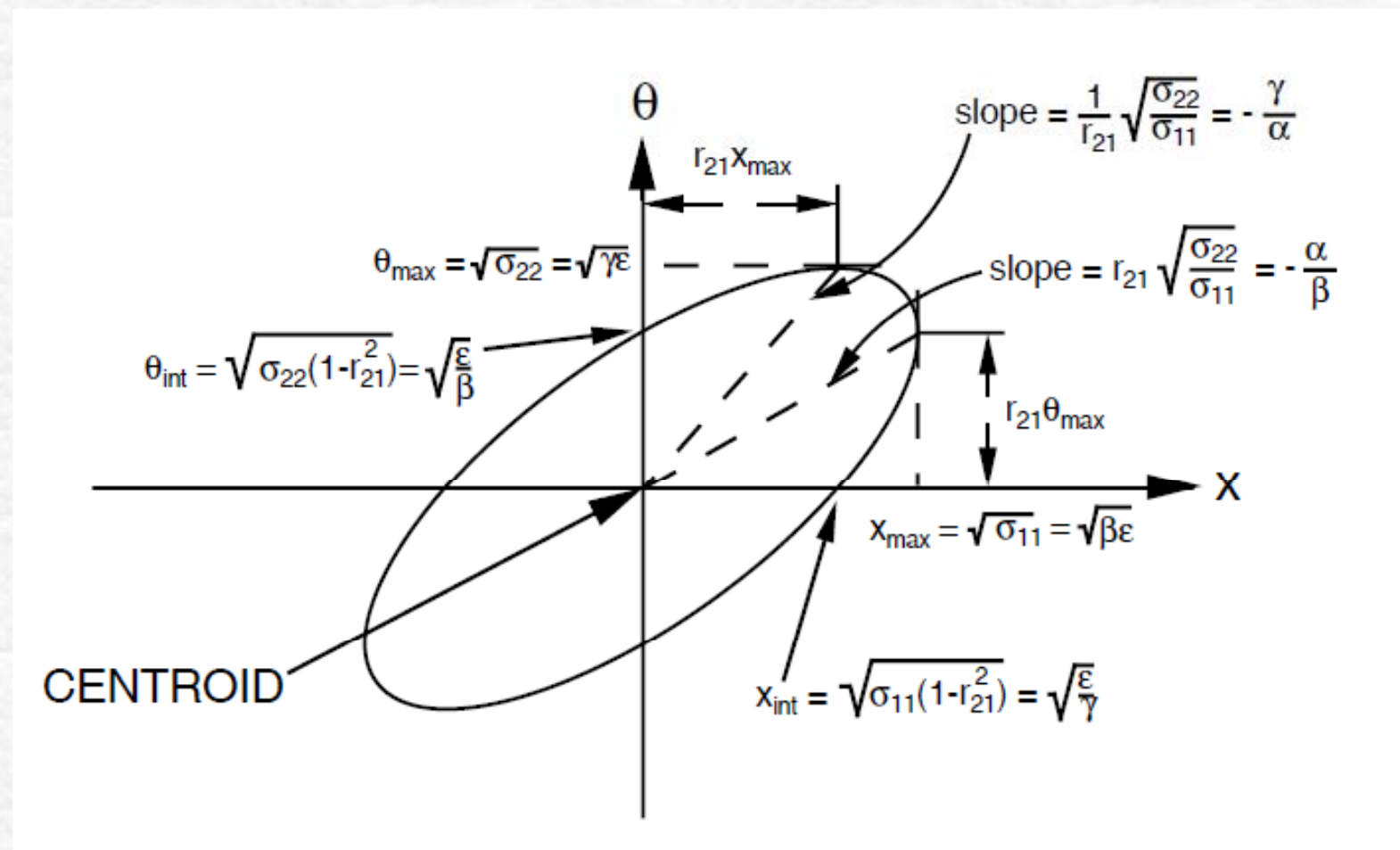
$r_{12} < 0$ 代表相椭圆是会聚的;

$r_{12} > 0$ 代表相椭圆是发散的.

$$r_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{[\sigma_{ii} \sigma_{jj}]^{1/2}} \quad |r_{ij}| \leq 1$$

$$r_{21} = r_{12} = -\frac{\alpha}{\sqrt{1 + \alpha^2}} = -\frac{\alpha}{\sqrt{\beta\gamma}}$$

匹配情况下束流矩阵与C-S参数间的关系



几个典型的传输结构

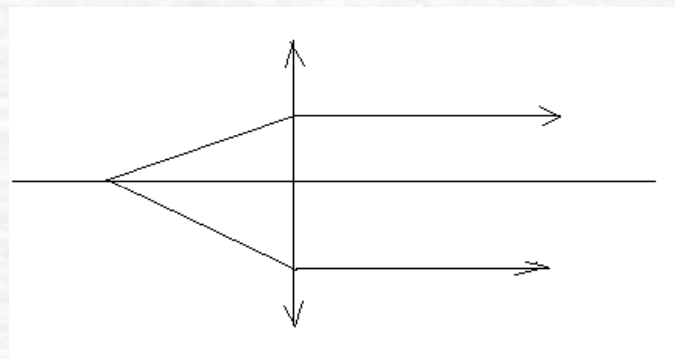
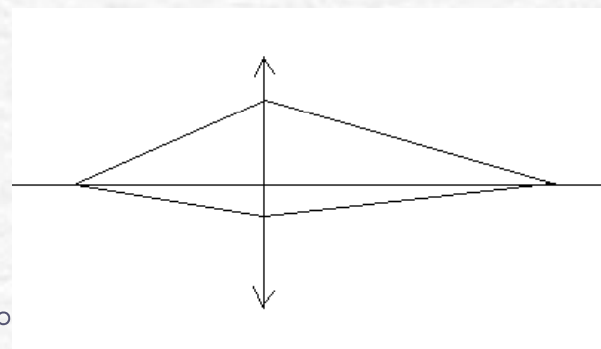
- **点到点的传输**：相当于从焦点到焦点的传输，像点处的粒子位置与在物点处的角散无关。

$$x_1 = R_{11}x_0$$

这在磁分析谱仪/动量分析方面很有用。

- **点到平行束的传输**：在物点为点束，在像点为平行束。
- **成腰**：在输运线上的一段自由漂移节中间某个位置形成最小的束流包络（相空间为正椭圆），之前为会聚束，之后为发散束。

这在很多方面有重要的应用，如进行束流测量（发射度测量、流强测量等）、放置RF腔和偏转磁铁、进行束流准直等。

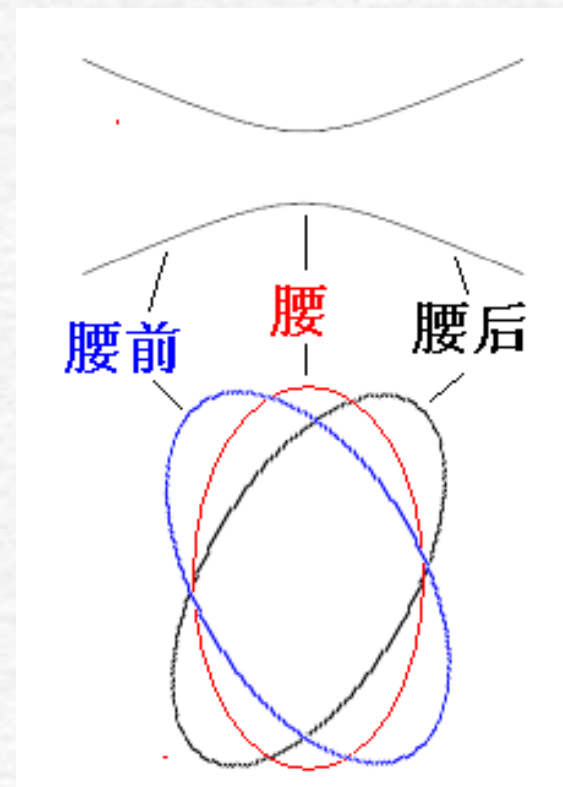


$$r_{12} = 0, \quad \alpha_x = 0$$

- **腰到腰的传输**：从一个腰过渡到另一个腰（腰的大小可以不同）
- **π 节传输**：特殊的腰到腰传输，同时满足点到点传输且腰是相等的。其传输矩阵为 I 或 $-I$

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad -I = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

π 节传输也有很好的应用，如
L.C.Teng提出的beam rotator



高阶束流传输理论

- 一般情况下，输运线的设计采用线性光学就足够了，但以下几种情况下需要采取包括高阶效应的分析：
 - 对束流品质要求比较高（如电镜）
 - 束流发射度（包括动量分散）很大，线性近似（近轴近似）条件不好，如在次级束流线上。
 - 某些利用非线性磁铁进行束流操纵的场合
- 主要的高阶效应源项
 - 色差效应：即不同的动量在磁场系统中受到的偏转不同（包括聚焦）
 - 非线性场效应：磁铁本身是不完美的，除零级场（偏转）和线性场（聚焦）以外还有更高阶场
 - 像差效应：非近轴近似[大发射度效应]
- 理论上可以对束流的二阶和三阶效应进行分析处理，如同线性矩阵方法一样，也可以采用二阶或三阶传输矩阵（通常称为T矩阵和U矩阵，与线性的R矩阵相对）来表示；更高阶数的理论分析非常困难。包括二阶以上的相空间分布很复杂，不能用单纯的相椭圆来代表，最好采用多粒子跟踪进行具体的分析。

包括三阶的传输矩阵

$$X_i(1) = \sum_j R_{ij} X_j(0) + \sum_{jk} T_{ijk} X_j(0) X_k(0) + \sum_{jkl} U_{ijkl} X_j(0) X_k(0) X_l(0)$$

二阶传输矩阵其中一项的传统表示

$$\begin{aligned} X(1) = & R_{11}X(0) + R_{12}X'(0) + R_{13}Y(0) + R_{14}Y'(0) + R_{15}l(0) + R_{16}\delta(0) \\ & + T_{111}X^2(0) + T_{112}X(0)X'(0) + T_{113}X(0)Y(0) + T_{114}X(0)Y'(0) + T_{115}X(0)l(0) + T_{116}X(0)\delta(0) \\ & + T_{121}X'(0)X(0) + T_{122}X'(0)X'(0) + T_{123}X'(0)Y(0) + T_{124}X'(0)Y'(0) + T_{125}X'(0)l(0) + T_{126}X'(0)\delta(0) \\ & + \dots \\ & + T_{161}\delta^2(0) + T_{162}\delta(0)X'(0) + T_{163}\delta(0)Y(0) + T_{164}\delta(0)Y'(0) + T_{165}\delta(0)l(0) + T_{166}\delta^2(0) \end{aligned}$$

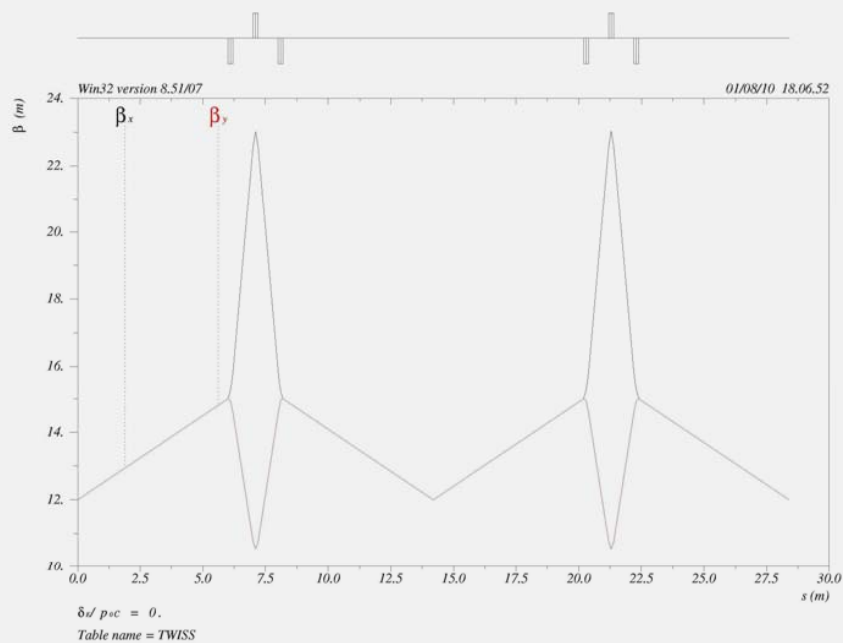
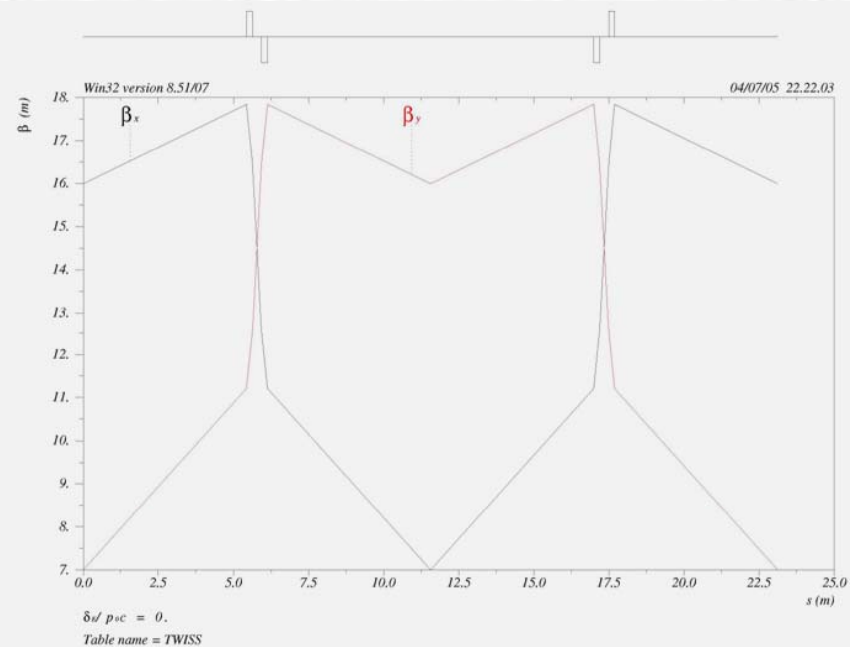
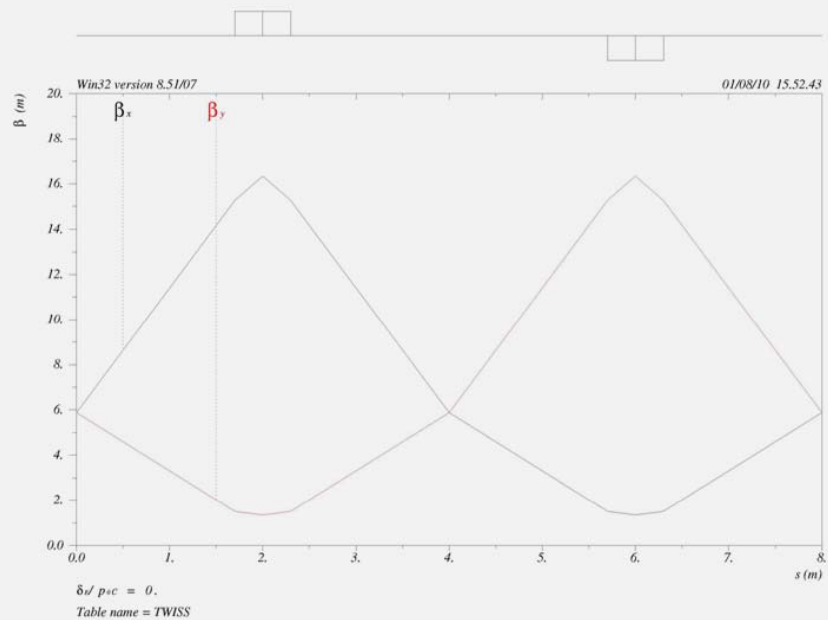
(实际情况是对一个常规的传输元件, T矩阵中有很多零项)

- 在有高阶项的情况下, 束流矩阵 (σ 矩阵) 不再代表相椭圆, 其矩阵元代表的是二次矩(second moment)的概念。

§ 3 输运线线性光学设计的一般方法

聚焦结构

- 常见的FODO、Doublet和Triplet聚焦结构都可以采用，同环和直线加速器中的情况类似，它们各有优缺点：
- **FODO结构**：适合于较长距离且没有特殊功能要求的传输，可以减小透镜的数量和强度，周期聚焦采用串联，结构稳定性也较好，轨道校正也很方便。
- **Doublet结构**：适用于形成较长的直线节和较小的双束流腰点，对有孔径限制的传输元件（如聚束器、散束器等）的情况下是很有利的，在偏转磁铁前Doublet可以有效地减小磁铁孔径和进行相空间匹配。采用Doublet聚焦单元作长距离传输也是可以的。
- **Triplet结构**：与Doublet结构类似但更均匀，在长直线节中可以得到在水平和垂直完全相同或相近的束流包络（三截面法测量束流发射度、在靶上或剥离膜上形成尺寸很小的双腰等）。作没有特殊要求的长距离传输，经济性稍差些。



左上: FODO

右上: Doublet

左下: Triplet

光学设计原则：较长和复杂的束流输运线，其光学设计一般遵循以下原则：

- 根据整个加速器装置的布局要求将输运线分为几个功能段，并粗略地安排各段的长度和确定聚焦结构；
- 分别设计各传输段如长直线段、消色散偏转段、束流切换段等，以及各传输段之间及与上游加速器、下游加速器、实验靶站的相空间匹配；
- 在不失灵活性的基础上尽可能将磁铁设计为串联供电方式，可以减少励磁电源的造价；
- 偏转磁铁的造价通常明显高于四极磁铁的造价，束流光学设计减小在偏转磁铁处的包括特别是磁铁间隙方向；
- 尽可能使束流包络不剧烈变化，即除了在特殊的位置附近（如为产生很小尺寸的双腰）不出现很大孔径的磁铁。

光学设计方法

- 束流光学在环形加速器中和在输运线上是不一样的，环是闭合的，输运线是开放的。
- 环中C-S参数是首尾相接的，通常还有超周期性，即一个环中有多个超周期，每个超周期的首尾C-S参数是相等的，采用C-S参数描述更方便。常用的设计程序是MAD。
- 输运线上，一般情况下采用束流包络来描述比较方便，也更经常采用基于束流包络和传输矩阵描述方式的设计计算程序如TRANSPORT等进行束流光学设计。
- 在输运线上横向相空间的失配远没有在环形加速器中的情况严重，一般不会发生相空间发射度的丝化和稀释。

$$\beta = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon} = \frac{a^2}{\varepsilon} \quad \gamma = \frac{\sigma_{22}}{\varepsilon} = \frac{\theta^2}{\varepsilon} \quad \alpha = -\frac{\sigma_{12}}{\varepsilon} = -r_{12}a\theta/\varepsilon \quad \beta\gamma - \alpha^2 = 1$$

多粒子跟踪方法

- 为了检验采用线性光学方法设计的输运线是否满足具体的束流分布在包括非线性场和空间电荷效应等因素情况下的要求（束流损失、终束流分布等），通常还需要进行多粒子跟踪计算。
 - 几乎在TRANSPORT程序诞生的同时，也诞生了一个孪生程序TURTLE，它们采用相同的输入格式，可以进行包括高阶场的束流跟踪计算。
 - 包括线性空间电荷效应的TRANSPORT程序或类似程序（如TRACE3D等）。
- 对于某些特殊的传输系统如次级束流线和磁谱仪等，高阶项非常重要，多粒子跟踪方法是必须的。

§ 4 横向相空间的匹配

横向匹配的参数

- 一般的横向匹配是水平和垂直相空间，4个参数；如果涉及偏转段，则有色散匹配要求，为6个参数（C-S参数或包络）：

$$(\beta_x, \alpha_x, \beta_y, \alpha_y, D_x, D'_x) \quad (X, X', Y, Y', D_x, D'_x)$$

- 每个匹配参数对应1个聚焦透镜；在设计阶段，其它参数，漂移距离和偏转磁铁的边缘角也可以参与某种程度的匹配。
- 如果水平和垂直方向是耦合的（即传输系统中螺线管、斜四极磁铁等耦合元件），则不宜采用C-S参数的匹配而应该采用全六维的束流矩阵和R矩阵匹配方式（见下一页）。

TRANSPORT或类似的程序所采用的匹配通常有两种方式：束流椭圆匹配和传输矩阵匹配

- 束流椭圆匹配：亦称为束流矩阵（ σ 矩阵）匹配，对应的参数为六维 σ 矩阵中的所有元素（如 $\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{22}$ 等），通常也采用更为直接的束流相椭圆参数如包络 a_x 、角散 θ_x 和关联矩阵 r （其中比较典型的是代表椭圆倾角的 r_{12} 和 r_{34} ）。
- 传输矩阵匹配：亦称为R矩阵匹配，与束流的初始条件无关，对应的参数R矩阵中的所有元素，如R11、R12等。
- 这二类匹配参数通常也可以混合进行，即在匹配点既可以列束流矩阵的元素也可以列R矩阵的元素。

一些程序还可以将束流矩阵的元素与C-S参数一起作为匹配参数。

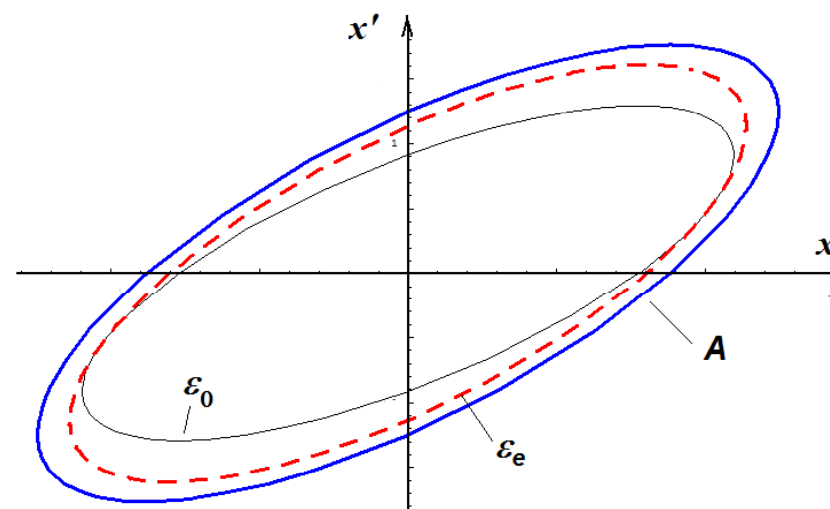
§ 4.1 横向相空间的失配

匹配是相对的，失配是绝对的

- 上游的束流条件可能与设计的情况不一致，包括抖动
- 输运线上的元件参数设置也会有偏差
- 尽管有束流诊断设备，有测量误差，而且，角散度 X 和 Y 也是很难测量的

失配的影响

- 相当于输运线等效接收度的损失，或束流等效发射度的增加



ϵ_0 、 ϵ_e 和 A 分别代表入射束流相椭圆、等效相椭圆和接收度椭圆

等效椭圆(总发射度)和失配度

$$\xi = \frac{1}{2} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2} + \left(\alpha_1 - \frac{\beta_1}{\beta_2} \alpha_2 \right)^2 \frac{\beta_2}{\beta_1} + \frac{\beta_2}{\beta_1} \right)$$

$$\frac{\mathcal{E}_{eff}}{\mathcal{E}_0} = \xi + \sqrt{\xi^2 - 1}$$

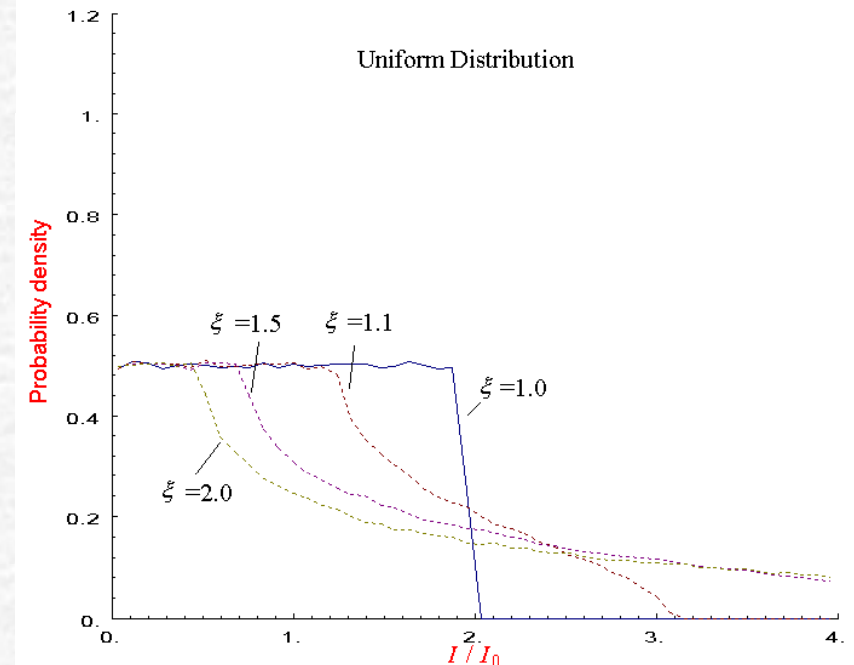
$$\frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}_0} = \xi - 1 + \sqrt{\xi^2 - 1}$$

束流对中（准直）的影响

- 同束流相空间形状的匹配类似，在匹配点发生对中误差也同样会造成等效椭圆的增加。

束流快速抖动的影响

- 位置抖动和能量抖动
- 效果同对中误差类似，但这是不能进行校正的



§ 4.2 色散的失配

纵向与横向的耦合作用

$$x = x_0 + D_x \frac{\Delta p}{p} \quad a_x = \sqrt{a_{x,0}^2 + \left(D_x \frac{\Delta p}{p} \right)^2}$$

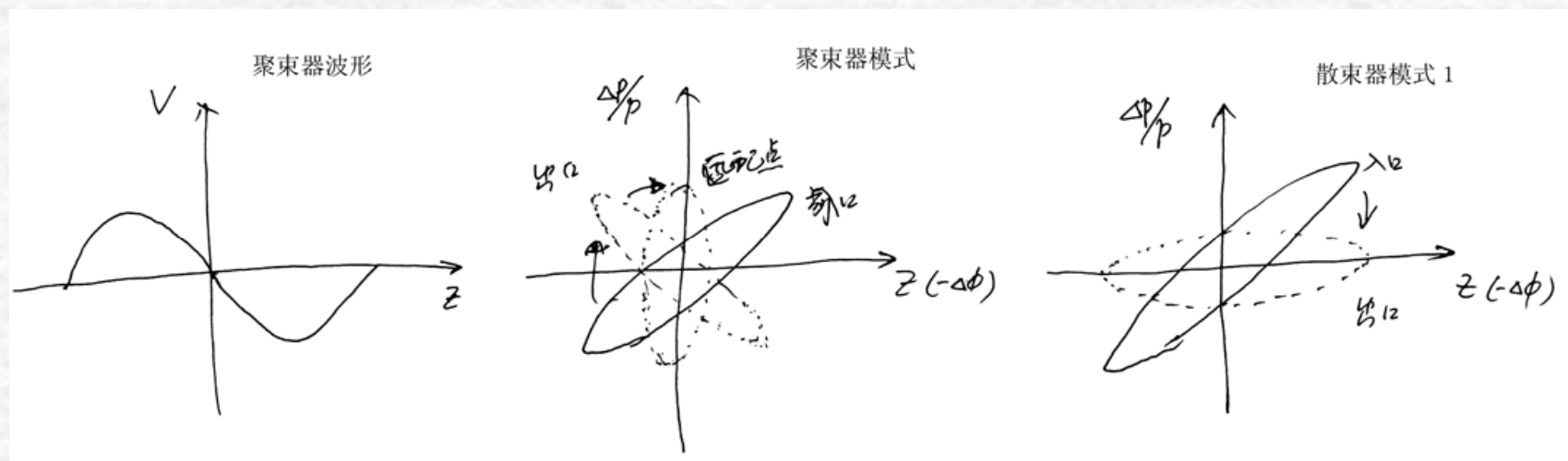
$$\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_{x,0}} = \left(1 + \frac{1}{\varepsilon_{x,0}} \left(\gamma_x D_x^2 + 2\alpha_x D_x D'_x + \beta_x D_x'^2 \right) \left(\frac{\Delta p}{p} \right)^2 \right)^{1/2}$$

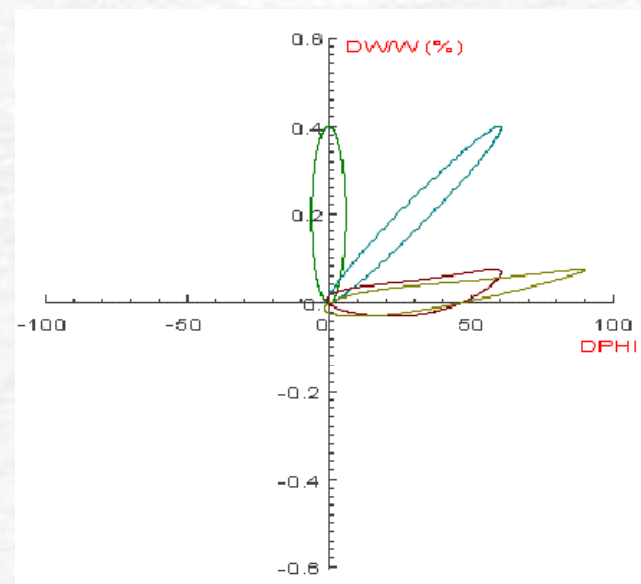
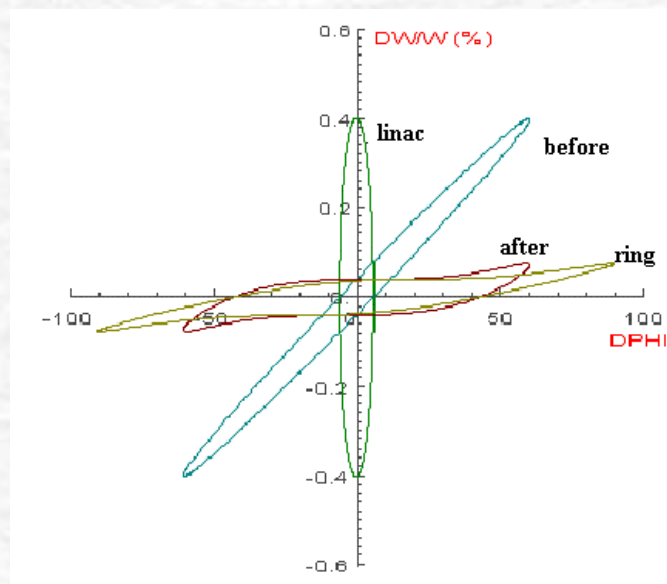
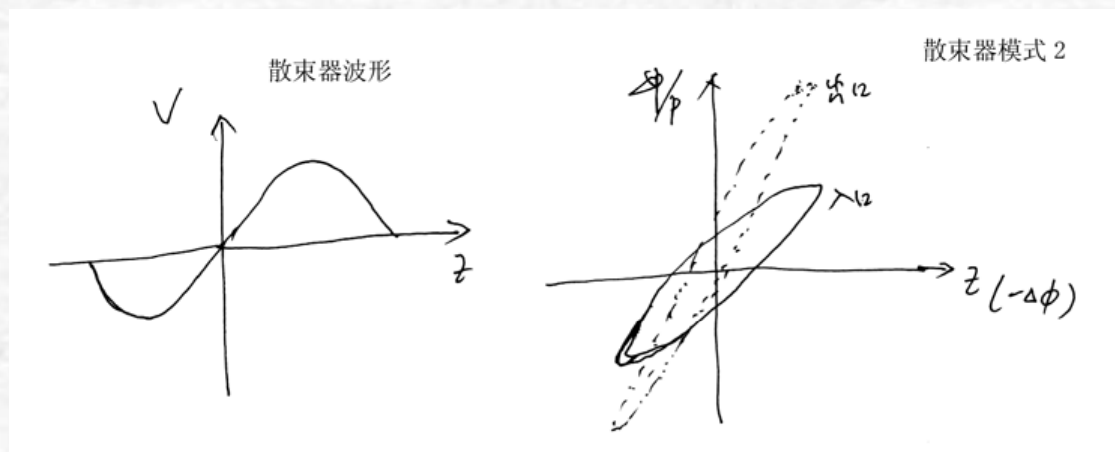
- 尽管在输运线上C-S参数和 D_x 、 D'_x 均是变化的，但该发射度的比值只在偏转磁铁中发生变化。在消色散匹配段的最后一块偏转磁铁的出口，该比值等于1，即发射度恢复到原始发射度。这也正是为什么通常情况下输运线都尽量设计为消色散的原因。
- 在匹配点发生色散失配的效果同横向发射度发生失配和对中误差的效果是一样的，也会造成类似的等效发射度增加。

§ 5 纵向相空间的匹配

纵向相空间的匹配通常是指束流动量分散和束团相宽的匹配

- 聚束器：减小束流在下一个匹配点（注入点）处的相宽。分为连续束聚束和束团聚束。
- 散束器：减小或增加束流的动量分散，或用于抑制束流动量分散的抖动。





图：散束器对动量分散和束流平均动量抖动的抑制作用
 （左：减小动量分散，代表直线加速器出口-linac、散束器入口-before、散束器出口-after、环形加速器入口-ring；右：抑制中心动量抖动）

正弦波场的非线性作用

- 当相宽很大时 ($>45^\circ$)，非线性作用明显

$$\begin{pmatrix} \Delta\phi \\ \frac{\Delta p}{p} \end{pmatrix}_f = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\chi & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\phi \\ \frac{\Delta p}{p} \end{pmatrix}_i$$

$$\chi = \frac{eV}{m_0 c^2 \beta^2} \frac{\sin(\phi_0 + \Delta\phi)}{\Delta\phi} \quad Q = \frac{2\pi}{\beta\gamma}$$

§ 6 束流的多路分束

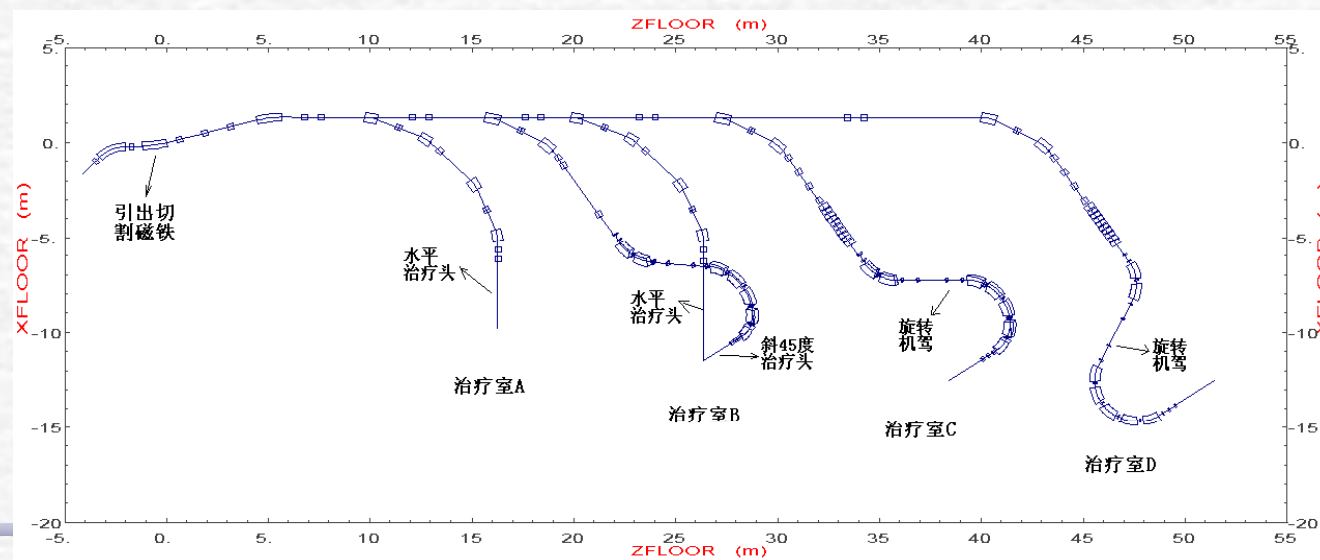
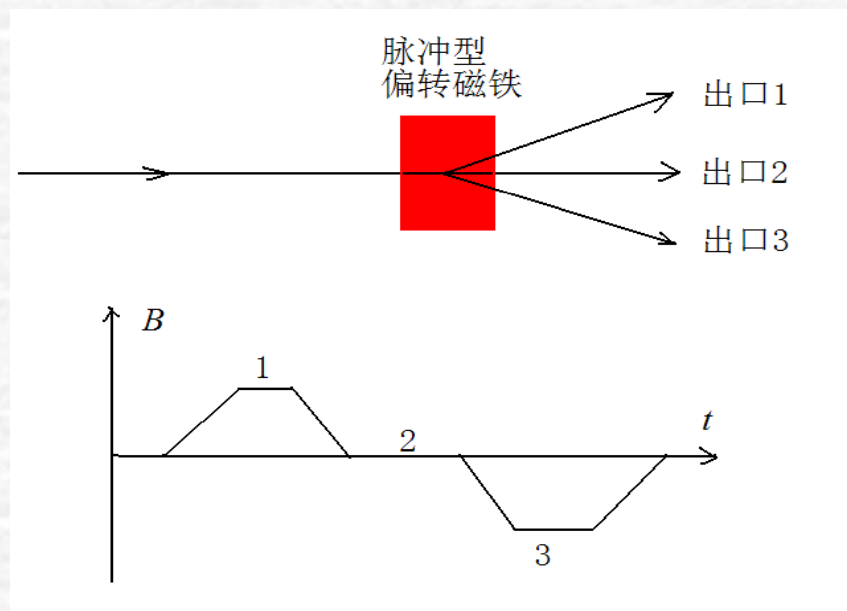
- 束流从前级加速器传输到不同的下一级加速器或不同的实验终端，就需要进行多路分束处理。
- 主要的分束方法
 - 分时分束：利用脉冲型磁铁进行束流切换（多路）
 - 切束方法：利用薄切割板将束流一劈为二
 - 不同特征或品质束流的分束：不同电荷态或不同能量
 - 其它方法：散射方法

分时分束方法

一分为二路：常见

- 普通C型磁铁（或H型磁铁）：很慢变化
- 快开关磁铁：较快变化
- 冲击磁铁：快变化

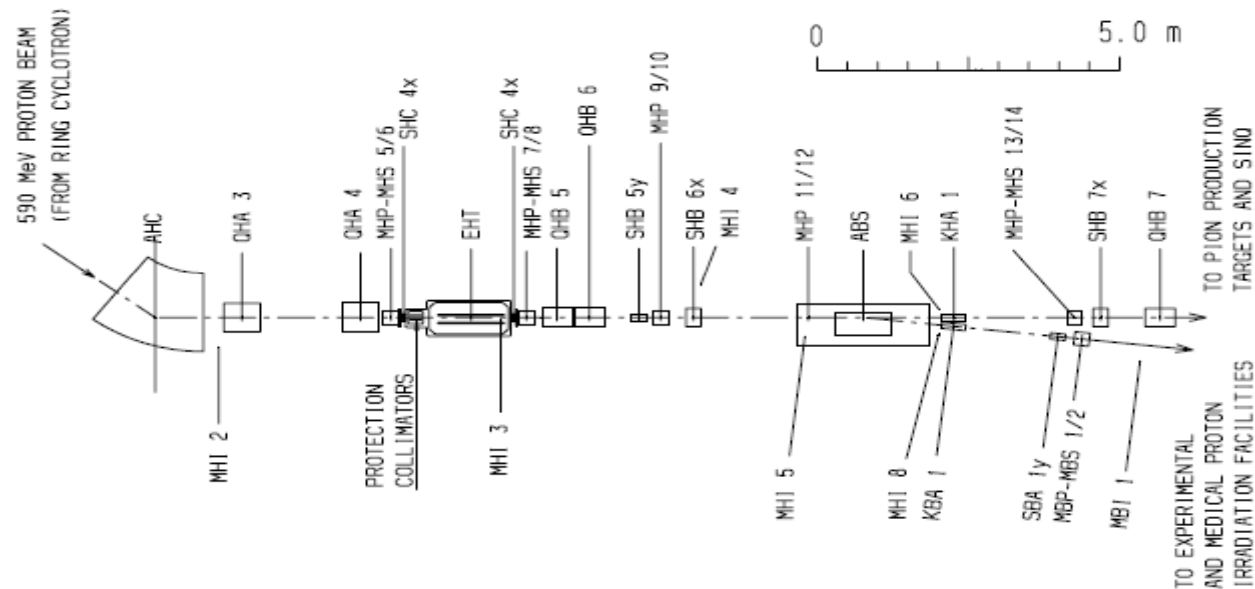
一分为多路：偶见低能时



静电偏转板分束

- 该方法经常用于圆形加速器的引出
 - 回旋加速器的多圈引出
 - 同步加速器的慢引出
- 也可以用于输运线上弱流束的分束(Beam splitting)
 - 允许较小的束流损失

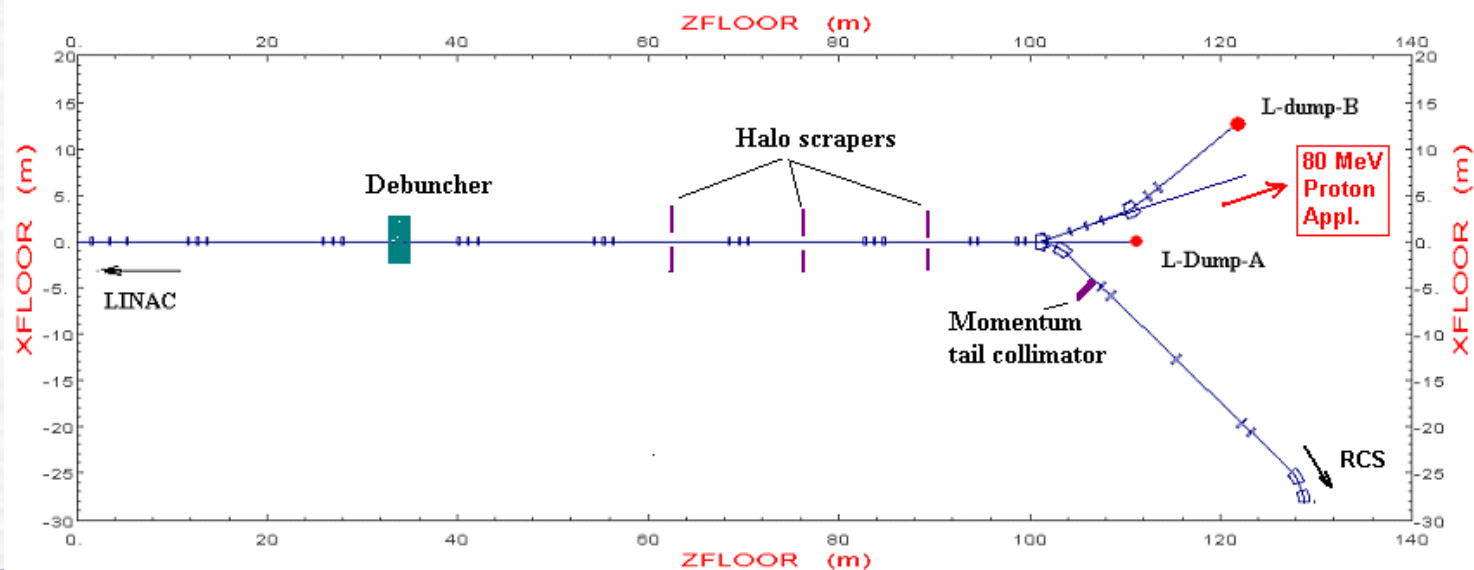
PSI: ESD
splits $20\ \mu\text{A}$
from $1.5\ \text{mA}$



剥离膜分束方法

- 针对负氢束流和重离子束流
- 部分负氢束流通过剥离膜后变为质子,在偏转磁铁处与原束流自然分离
- 重离子束通过剥离膜后改变电荷(通常有多个电荷),通过偏转磁铁时会根据电荷态偏转成不同的角度

CSNS LRBT
上部分H⁻被
转换为H⁺并
与H⁻分离



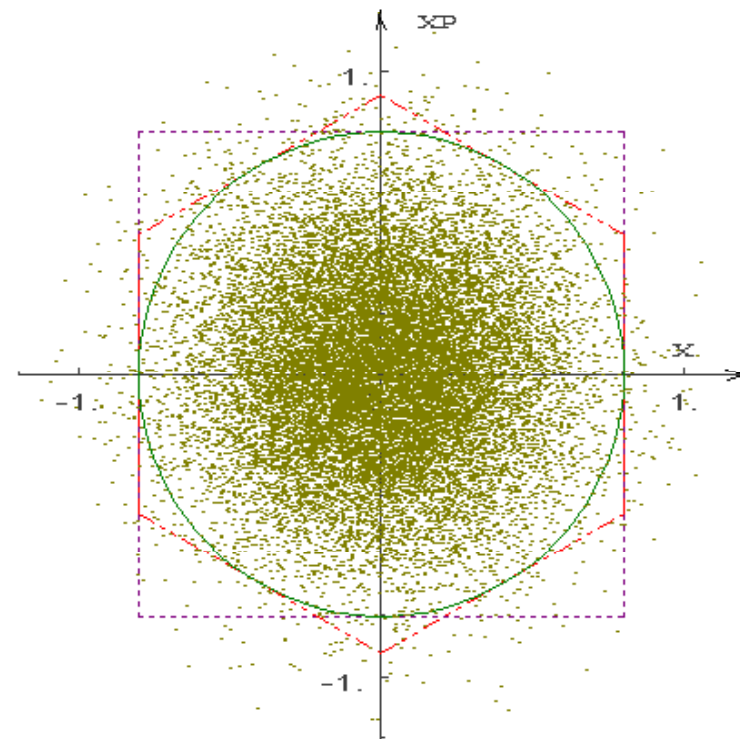
其它进行分束的方法

- 利用降能片将束流截面的一部分降能从而在下一个偏转磁铁处有不同的偏转角;
- 利用弹性散射的方法将一部分束流偏离出主线, 这
在需要引导出比总束流低几个数量级的流强情况下
可以考虑采用。

§ 7 束晕刮除和动量分析

束晕刮除

- 在注入到环中之前将束晕清除掉以减小在环中的束流损失
- 弱流和低能量情况：直接用吸收型准直器将束晕阻止
- 高能量：准直效率下降
- H-束流：可以利用剥离膜进行准直，剥离后的H⁺被吸收型准直器阻止或送至废束站，以提高准直效率或避免在运输线上阻止束流

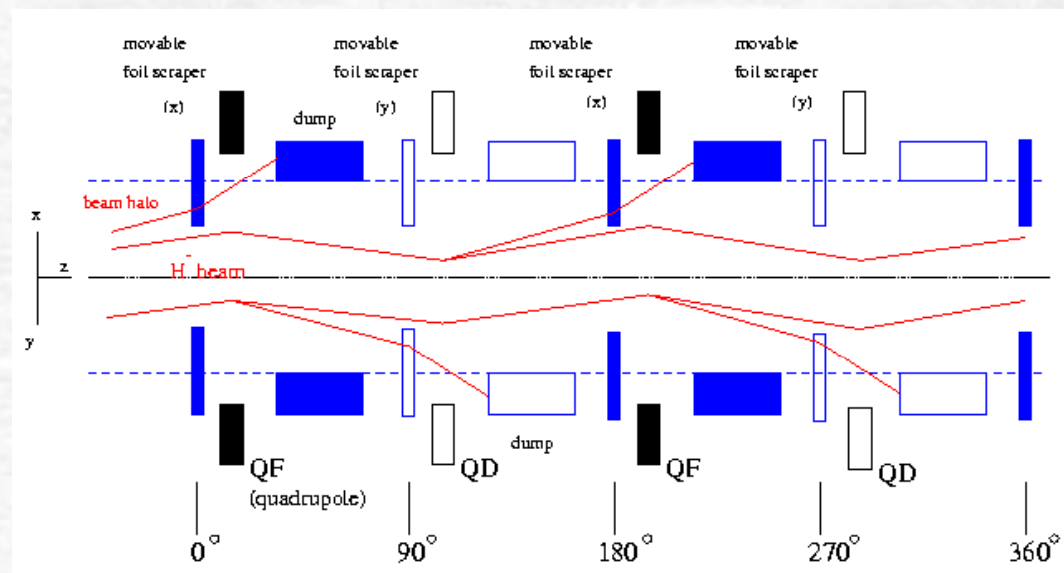


准直后的发射度

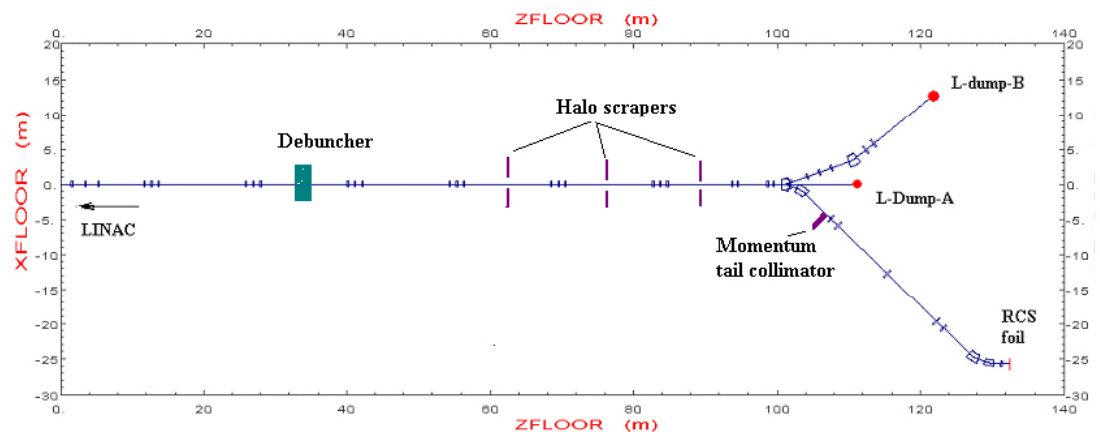
- 多位置准直：二位置或三位置

H-束流束晕的刮除法

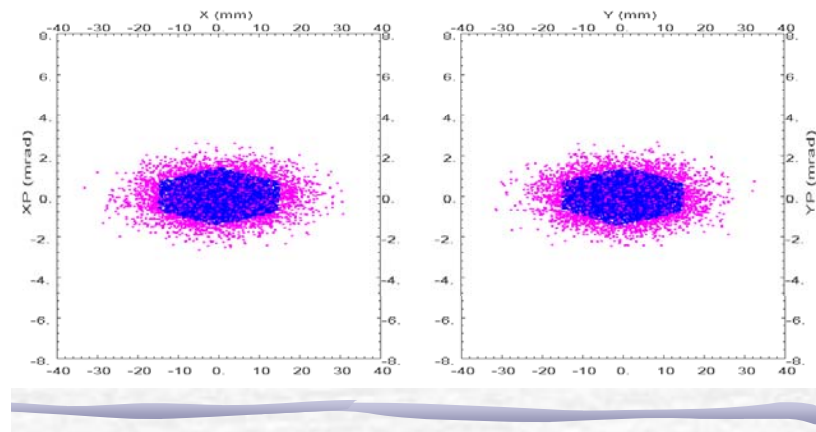
- 采用剥离膜刮束器先将束晕转换为质子束，并利用质子束与H-束在聚焦透镜或偏转磁铁中受到的不同作用来提高准直效率或避免在运输线上阻止束流



上：SNS；下：CSNS



UCPA 2010, 北京, J. Y. Tang



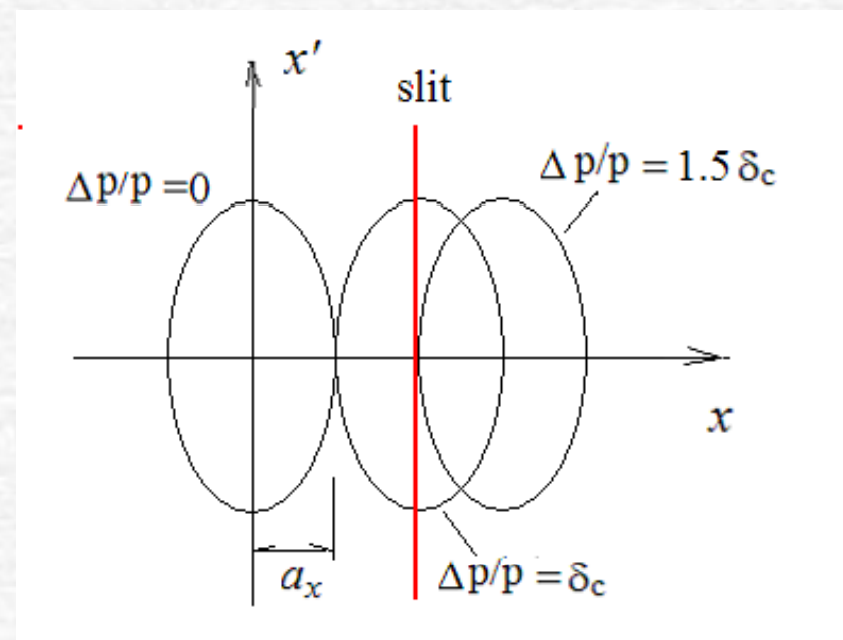
动量准直

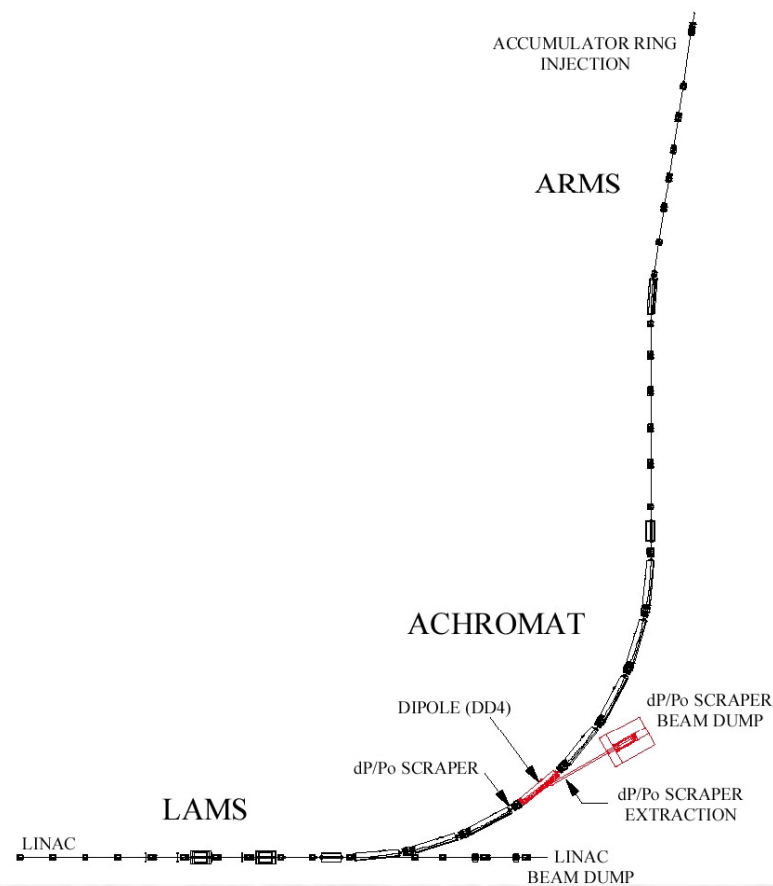
- 同横向束晕准直一样，动量准直也是清除束流中动量偏离大的粒子，尤其是直线加速器中的动量尾巴。
- 动量准直必须在偏转段色散较大的位置进行，为了得到较高的动量分辨率，要求准直器位置的水平包络也必须较小，动量分辨率满足如下的关系：

$$\delta_c = \frac{\Delta p}{p} = \frac{2a_x}{D_x}$$

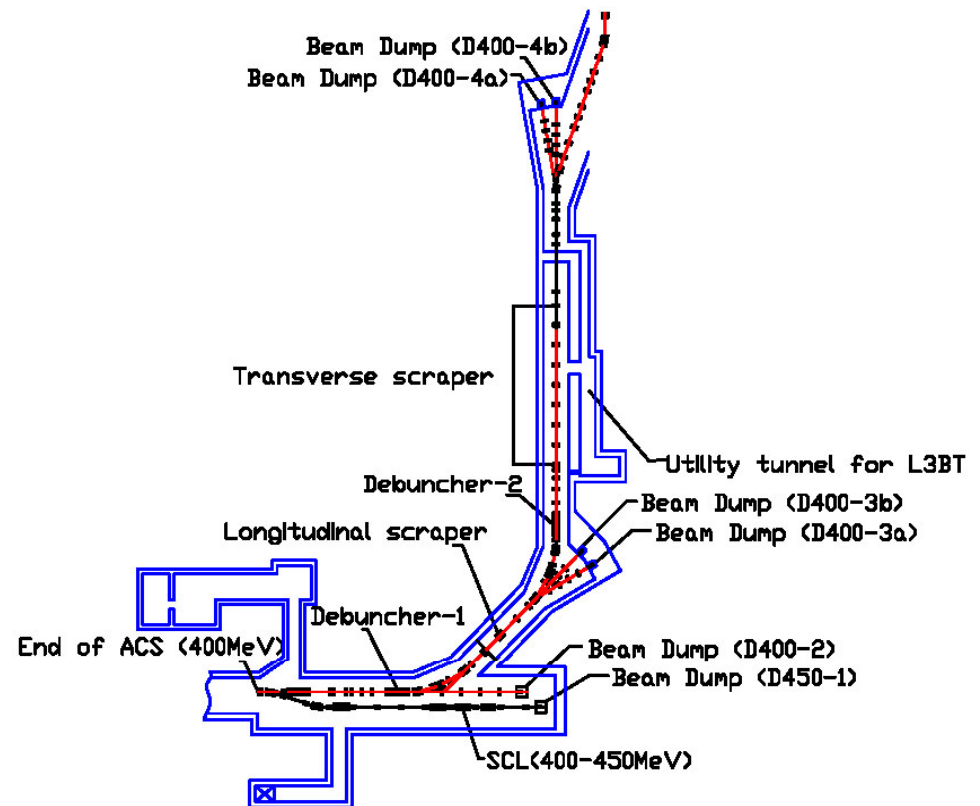
动量分析

- 进行束流中动量分散的测量





SNS动量准直



J-PARC动量准直

§ 8 束流分布变换

运输线上的非线性束流光学

- 一般情况下，运输线上只需要研究线性光学（一次性通过）
- 少数需要进行高动量分辨率和发射度很大的系统需要研究非线性传输(如次级束流线)
- 特殊用途：利用非线性磁铁进行靶上束斑分布的均匀化

靶上束斑均匀化的方法

- **扫描磁铁方法**：即在靶前用一块或二块扫描磁铁将一个较小的束斑扫描到一个较大的靶面积上，这也是目前最常用的方法，如电子束的工业应用、质子/重离子的肿瘤治疗
- **散射体展宽方法**：将束流通过特别设计的二级散射体，可以在靶平面上得到一个中间部分比较均匀的束流分布，而外围的非均匀部分利用准直器剔除掉，这是质子治疗中经常采用的方法。
- **非线性磁铁方法**：即利用非线性磁铁使束流在横向相空间中进行扭曲或剪贴从而在靶平面上形成一个比较均匀的束斑分布。

在高束流功率的情况下，特别是在束流具有明显的时间结构的情况下，单个脉冲具有很高的能量（热当量）

- 扫描方法：既因为瞬间高热量密度而难以处理也因为其时间结构不利于束流的应用。
- 散射方法：也有两个困难，一是散射造成的强辐射剂量和冷却问题，二是束流的利用率一般较低，只有不到**50%**，其余的需要利用准直器剔除掉。
- 非线性磁铁方法：有明显的优势，涉及到几乎所有的高功率质子束的应用，如散裂中子源、**ADS**、加速器生产氚等，主要是为了增加靶本身或者是质子束窗在累积的强辐射条件下的寿命。低功率束流也可以应用，可以部分代替散射方法。

■ 非线性磁铁进行分布变换的方法

- 常见模式：针对原始束流分布是高斯分布的情况，先调整线性光学增大在靶上的束斑尺寸，再利用高阶场磁铁对外围粒子作用强的特点，将它们折到束流的中心靠外部分，从而实现分布的均匀化。
 - 将束流在水平方向和垂直方向的变换分开进行（扁束流），以减小二个方向的耦合作用；
 - 在弱流情况下可采用单八极磁铁（一个方向）进行变换，不够均匀的束晕部分可以准直器切掉；
 - 在高功率情况下，需要采用标准八极磁铁+十二极磁铁的组合（需要反对称高阶场磁铁）进行变换（控制束核均匀度和束晕）；
 - 在高阶场磁铁和靶之间需要满足一定的相移关系（稍后更详细介绍）。
- 其它模式：采用阶梯场磁铁解决高能量、大发射度和非规则分布束流的均匀化。

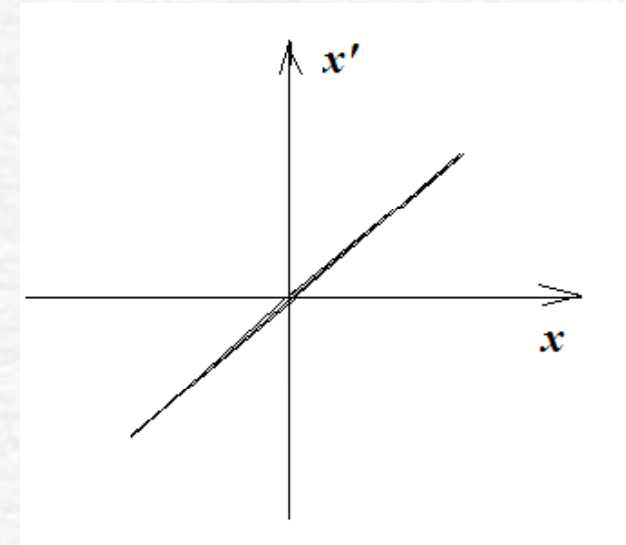
采用八极磁铁和十二极磁铁

简化为一维模型

$$x = R_{11}x_0 + R_{12}x'_m$$

$$x'_m = x'_0 + a_4x_0^3 + a_6x_0^5$$

$$\rho_2(x)dx = \rho_1(x_0)dx_0$$



- 其中 a_4 和 a_6 为八极磁铁和十二极磁铁的强度（薄透镜近似）， R_{11} 和 R_{12} 为从P0到靶的束流传输矩阵元， $\rho_1(x_0)$ 和 $\rho_2(x)$ 为在P0位置和靶位置的束流一维线密度。
- 细长椭圆近似（扁束流条件）： $x'_0 = \theta x_0$
- 对密度分布进行Taylor展开，并截断到第六阶，使密度方程两边的系数相等，就可以得到所需要的 a_4 和 a_6 值。

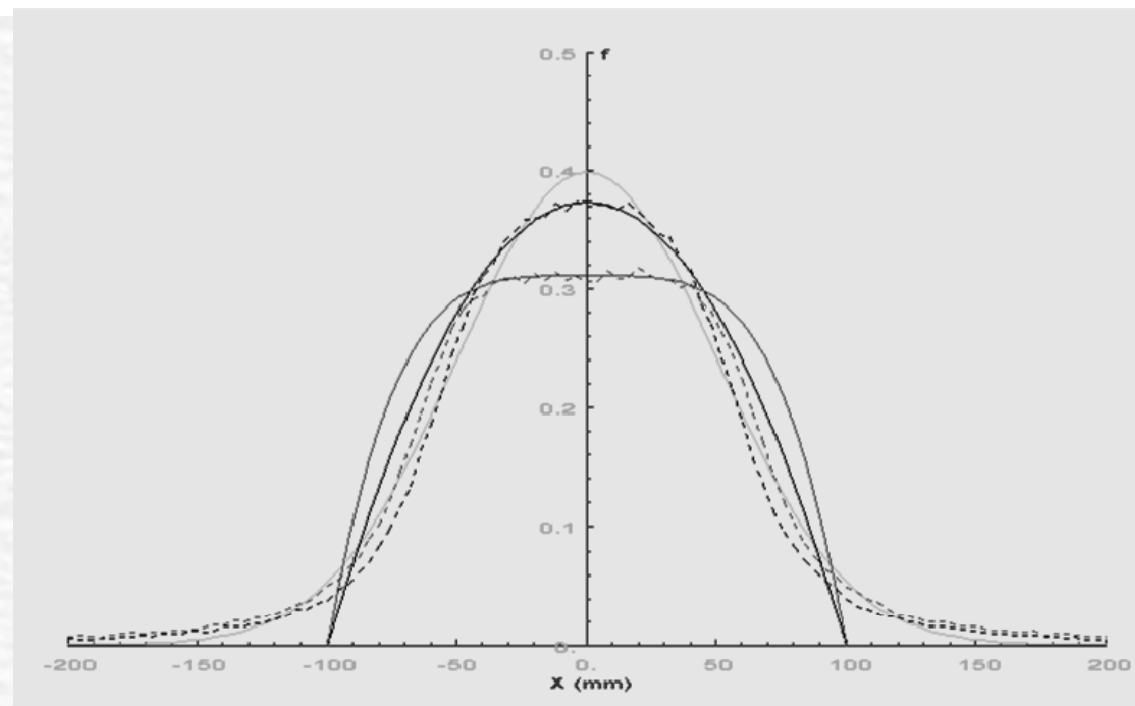
· 对不同原始高斯分布变换为抛物线或四次型分布的多级场拟合系数

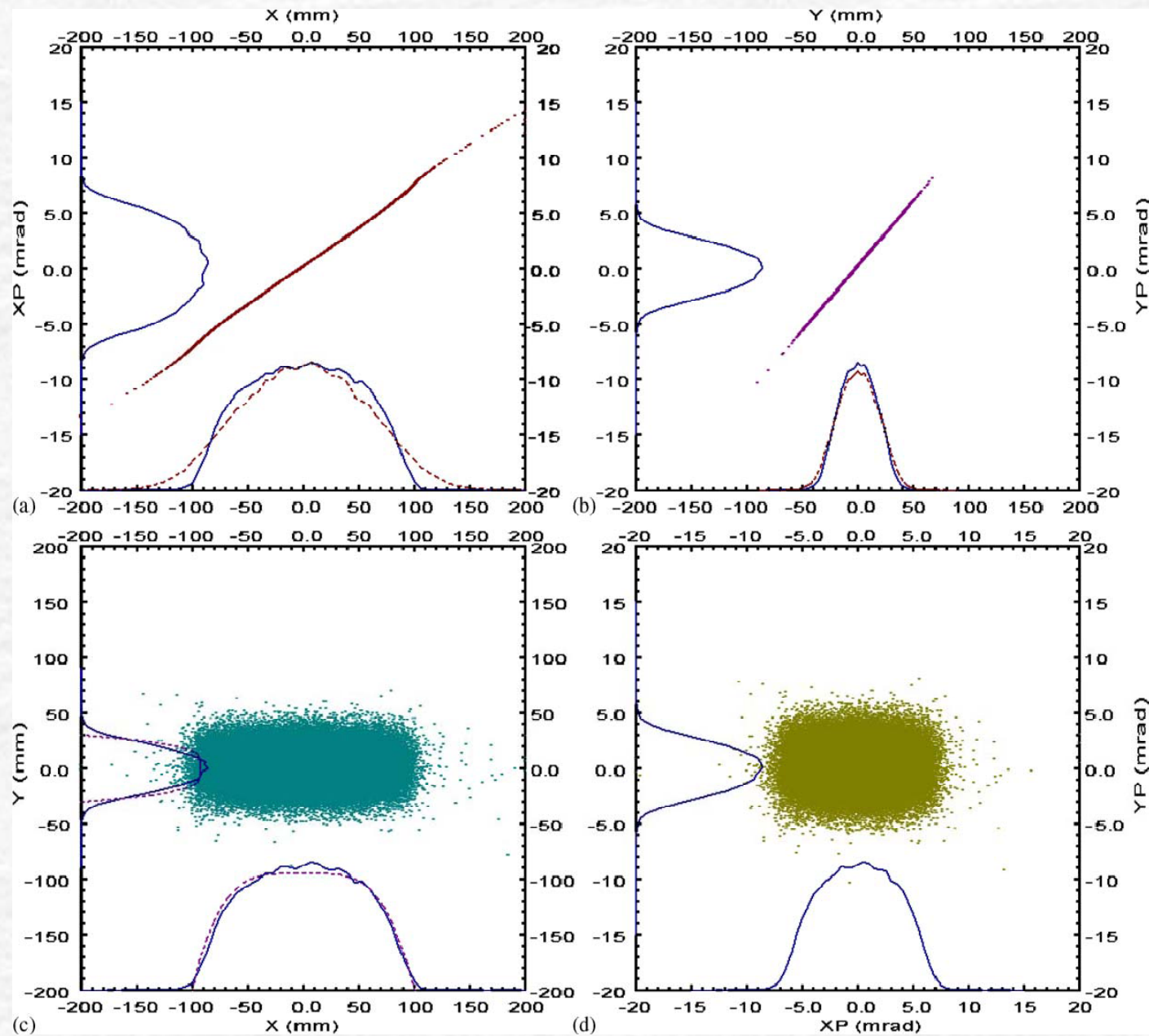
初分布	终分布	B	C	D
$\rho_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_1^2}}$	$\rho_2(x) = \frac{0.375}{\sigma_2} \left(1 - \left(\frac{x}{2\sigma_2} \right)^2 \right)$ $(-2\sigma_2 < x < 2\sigma_2)$	$\frac{1.0638\sigma_2}{\sigma_1}$	$-\frac{0.1773\sigma_2}{\sigma_1^3} - \frac{B^3}{12\sigma_2^3}$	$\frac{0.0266\sigma_2}{\sigma_1^3} - \frac{B^2C}{4\sigma_2^2}$
	$\rho_2(x) = \frac{0.3125}{\sigma_2} \left(1 - \left(\frac{x}{2\sigma_2} \right)^4 \right)$ $(-2\sigma_2 < x < 2\sigma_2)$	$\frac{1.2766\sigma_2}{\sigma_1}$	$-\frac{0.2128\sigma_2}{\sigma_1^3}$	$\frac{0.0319\sigma_2}{\sigma_1^3} + \frac{B^3}{80\sigma_2^4}$

$$B = R_{11} + R_{12}\theta$$

$$C = a_4 R_{12}$$

$$D = a_6 R_{12}$$



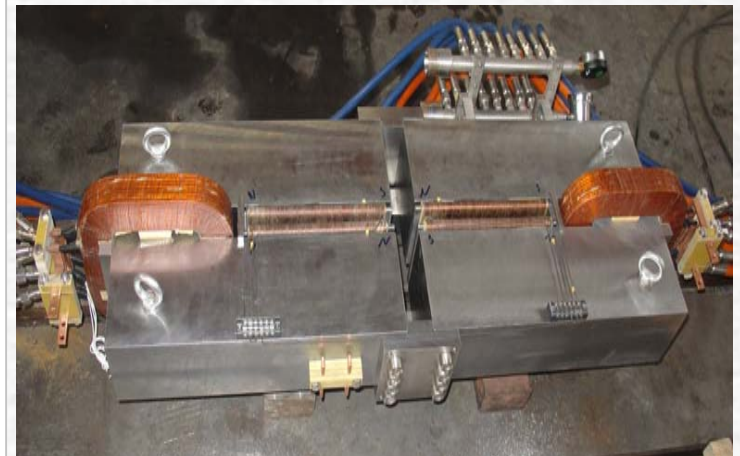
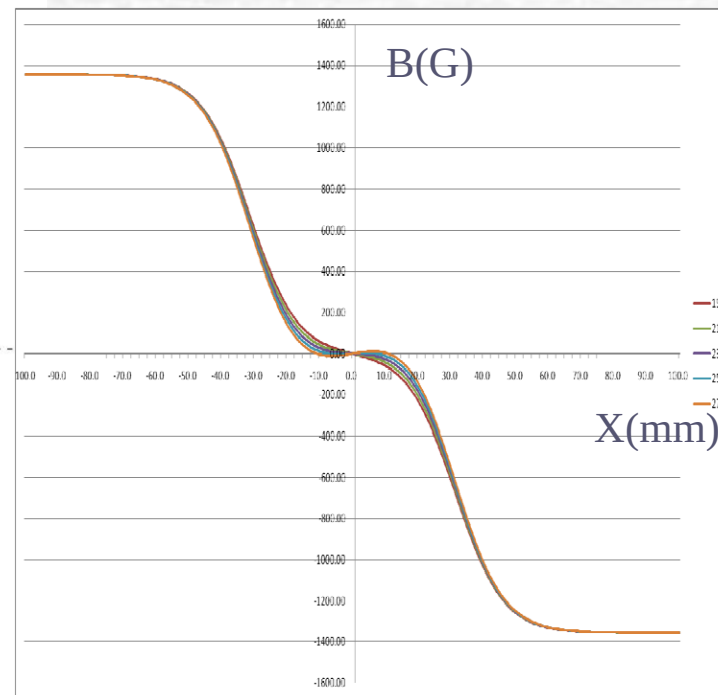
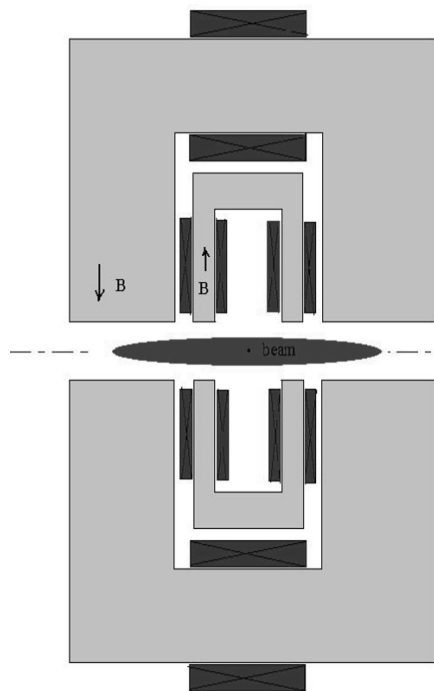


ESS LPTS
束斑均匀化

采用八极磁
铁+十二极
磁铁

采用阶梯场磁铁进行束斑均匀化

- 某些情况下（如从环引出的束流），束流发射度大、能量高并且分布不规则
 - 八极磁铁和十二极磁铁的孔径大、造价高（甚至不能制造），均匀化效果差
- 阶梯场磁铁则很好地适合这个情况



CSNS利用阶梯场磁铁进行束斑均匀化研究

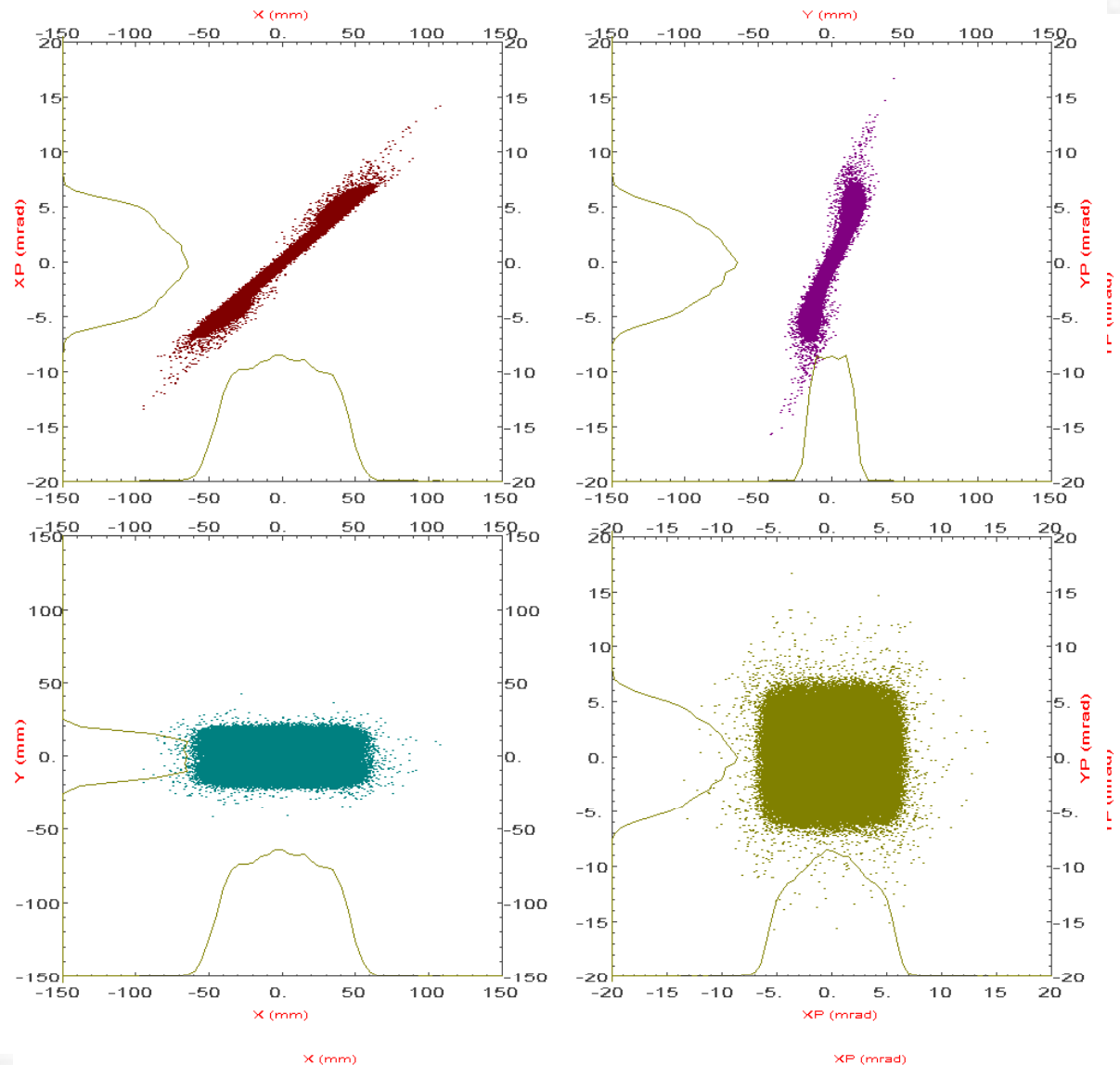
SFM处的扁平束比例:

● SFM-X: 7.8

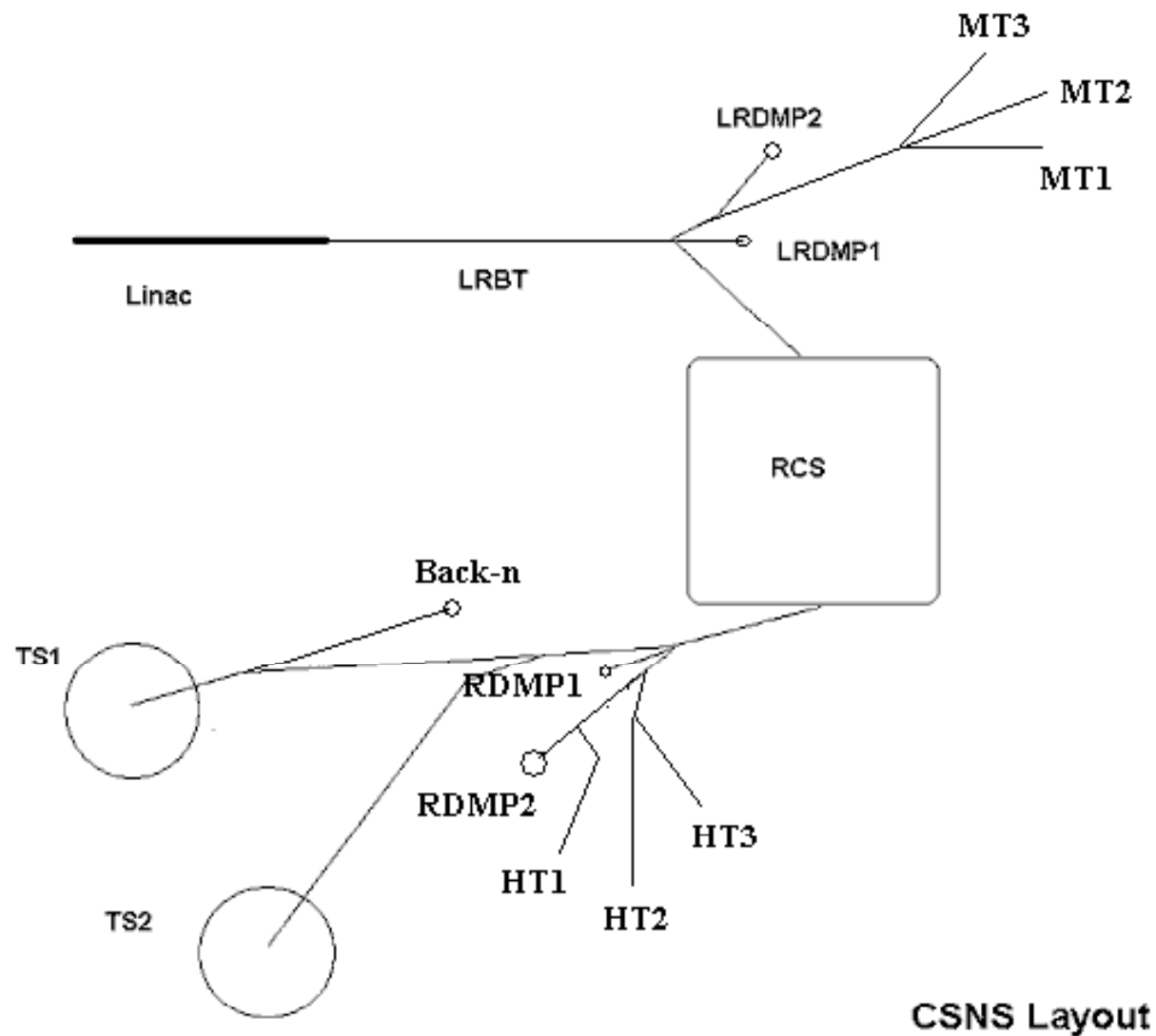
● SFM-Y: 10.6

均匀化结果
(右图)

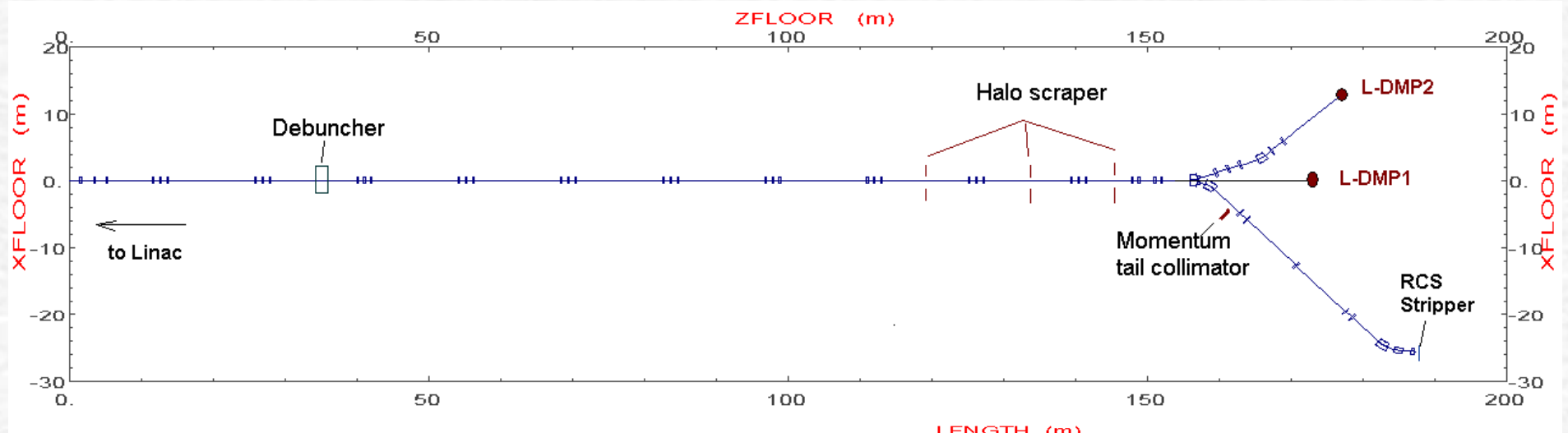
最高电流密度由
 $5.51 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 变
为 $2.52 \mu\text{A}/\text{cm}^2$



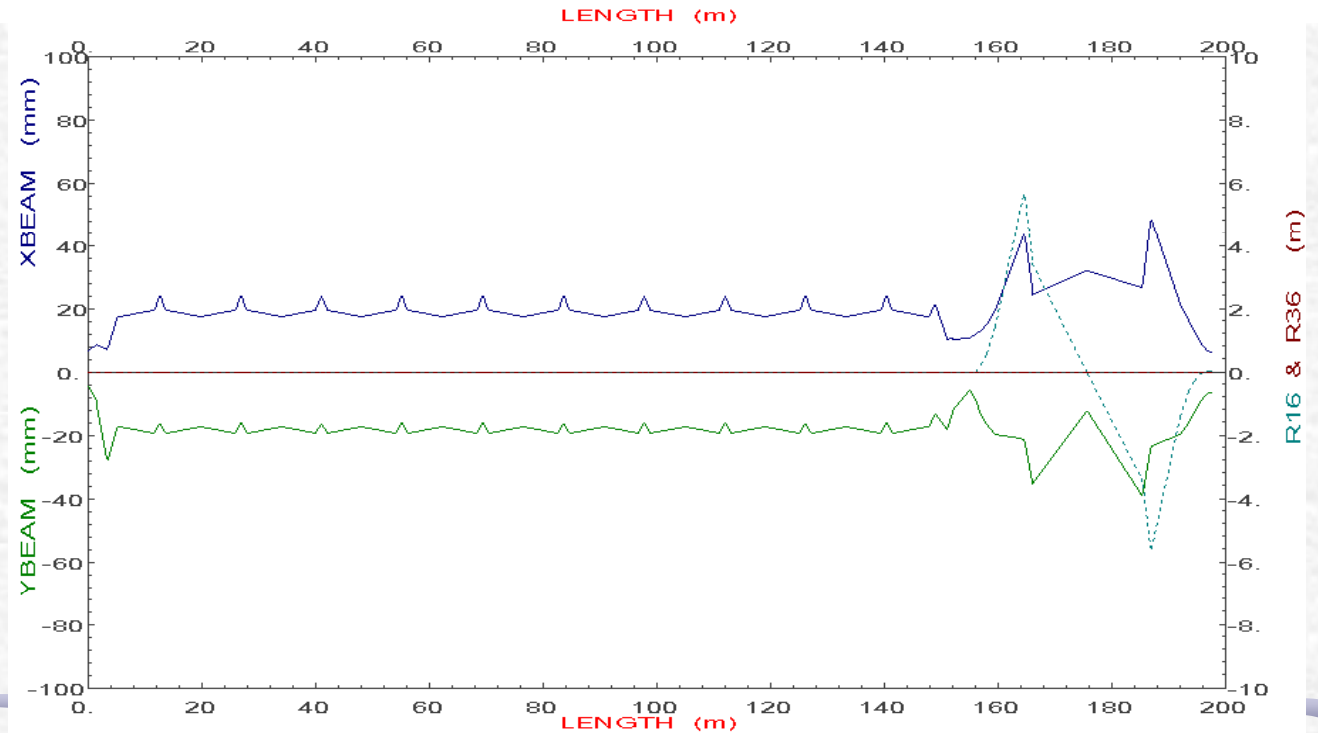
§ 9 CSNS束流输运线的设计



LRBT(Linac to RCS)



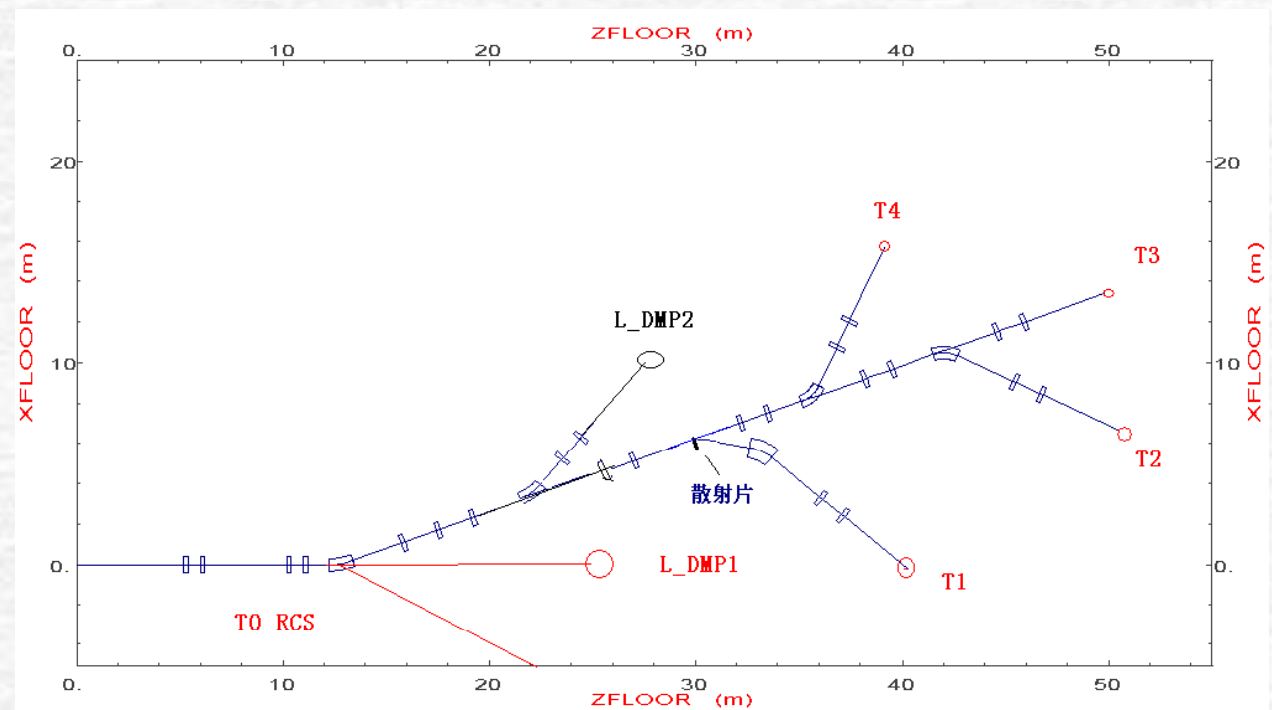
LRBT Layout and Beam Envelope



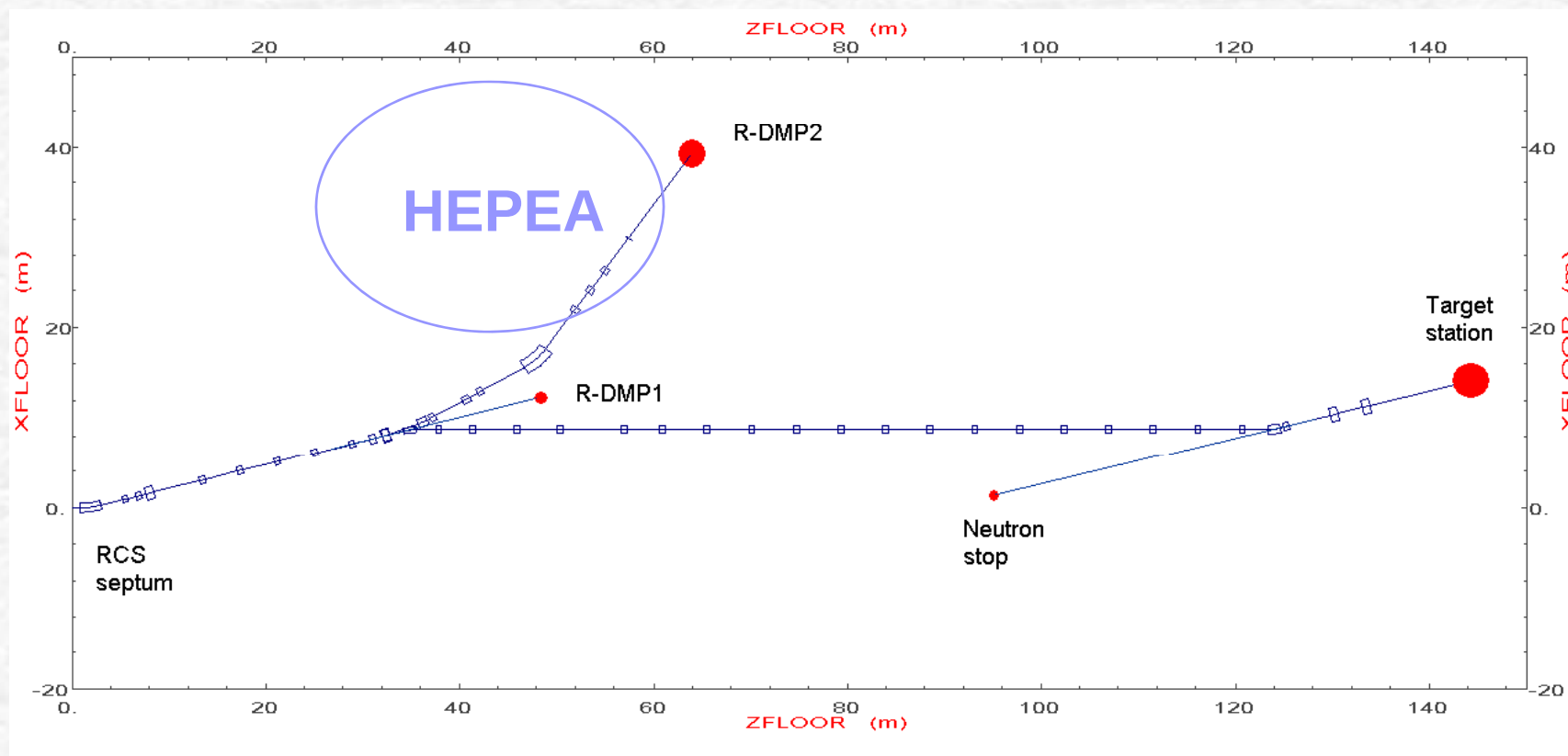
中能质子束应用区终端考虑

计划建设4个实验终端
(尚在优化中)

- T1: 空间辐射效应研究
- T2: 质子治疗
- T3: 通用辐射
- T4: 垂直束



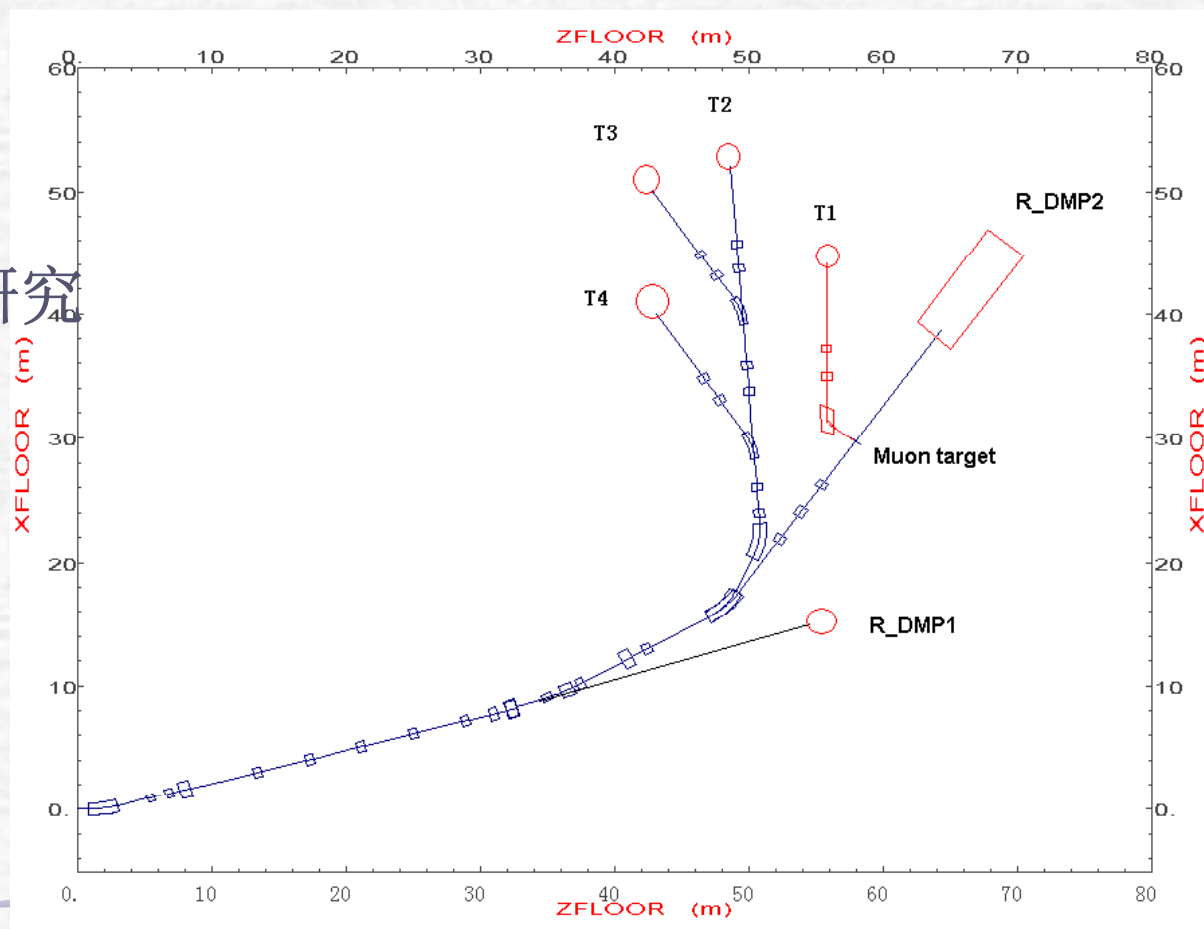
RTBT(RCS to Target)输运线和高能质子束实验区的位置



高能质子束应用区终端考虑

也计划建设4个实验终端
(尚在优化中)

- **T1:** 试验型 μ 子源
- **T2:** 云室研究
- **T3:** 质子照相
- **T4:** 空间辐射效应研究



总结

- ✦ 输运线是大型加速器装置中不可或缺的一部分
- ✦ 通常输运线的设计只需要考虑到线性光学
- ✦ 相空间匹配问题通常是输运线设计和运行的关键
- ✦ 复杂的输运线设计要特别注意各传输段或分岔段的交接面
- ✦ 高功率质子加速器的束流输运和操作是一个有挑战的研究方向
- ✦ 极弱束流的制备和传输也是很有意思的研究方向

谢谢！