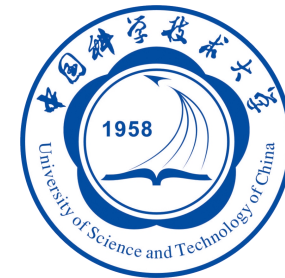




超级陶粲装置
Super Tau-Charm Facility



STCF 对撞环误差分析与校正

鲍健聪, 中国科学技术大学

西安, 20260701



1. 误差分析

2. 校正模拟

3. 总结展望

准直误差对闭合轨道的影响

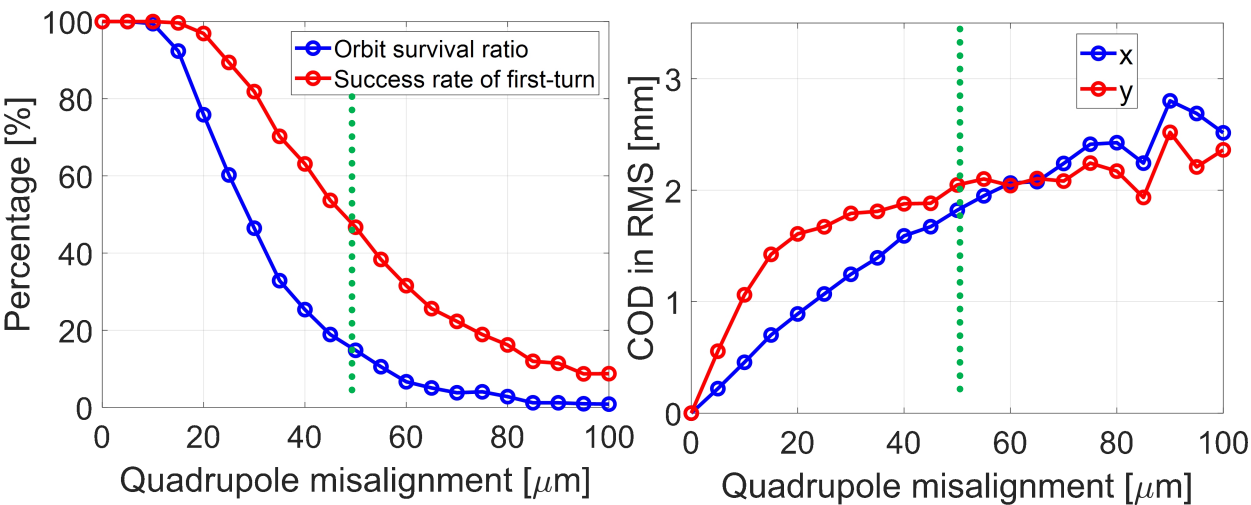
- 四极磁铁的准直误差是主要的误差源
- 其中，最主要的误差来源是 **FFT 四极磁铁的准直误差**，这是因为其大 β_y 和大磁场梯度
- 垂直准直误差影响较水平方向更为突出

FFT doublets 的 RMS 准直误差水平需要控制在 **30 μm** 以内.

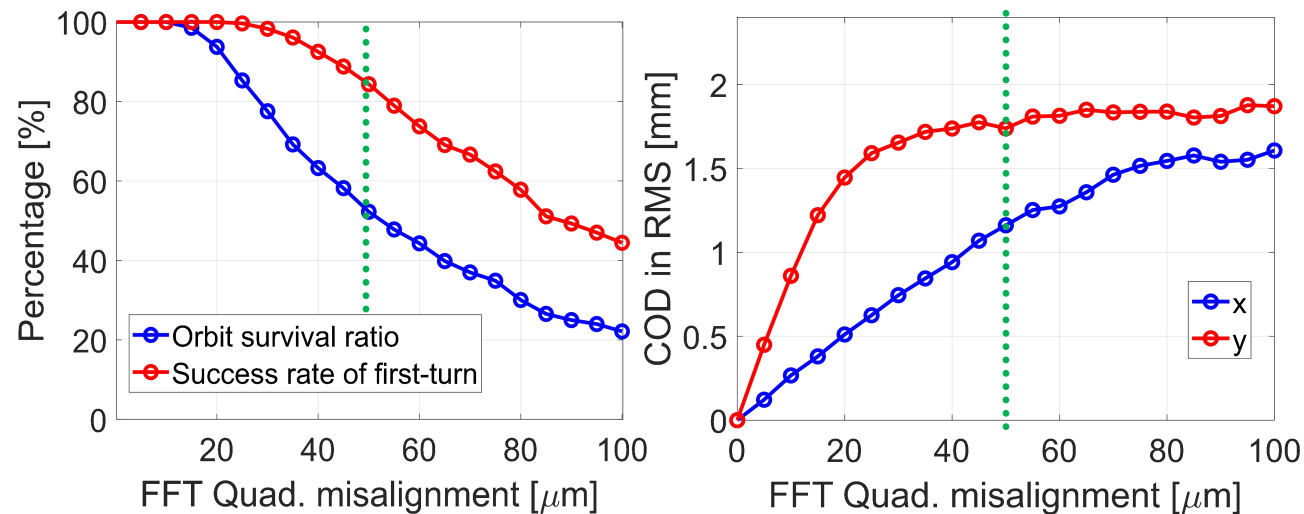
$$\Delta\theta_x = \int K \cdot \Delta x ds$$

$$\Delta\theta_y = \int K \cdot \Delta y ds$$

$$x_{COD}(s) = \frac{\sqrt{\beta_x(s)}}{2 \sin(\pi v_x)} \sum_{i=1}^N \Delta\theta_x(s_i) \cdot \sqrt{\beta_x(s_i)} \cdot \cos(\Delta\varphi_x - \pi v_x)$$



所有四极磁铁均加入随机准直误差



只有FFT四极磁铁均加入随机准直误差

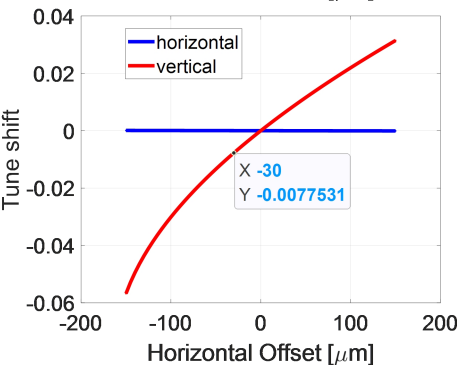
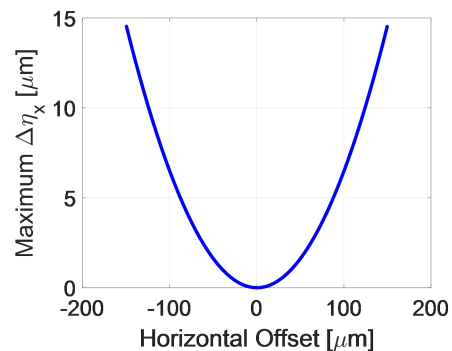
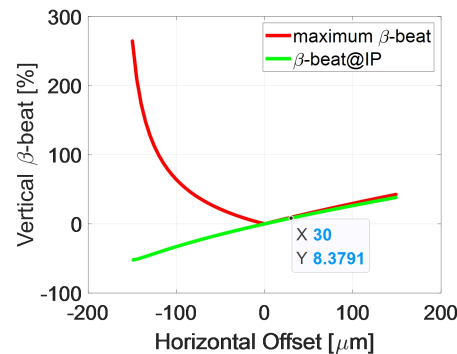
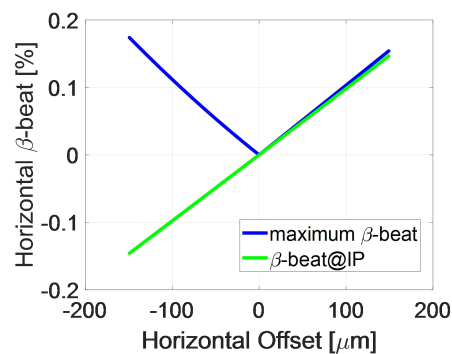
◆ 六极磁铁的准直误差会显著影响 β 、 η 和耦合

- 水平准直误差引入正四极磁场，导致 β -beat, $\Delta\eta_x$ 和工作点移动 $\frac{\Delta\beta}{\beta}|_{max} = \frac{\beta_d \int k ds}{2\sin(2\pi\nu)}$ $\Delta\nu = -\frac{\beta}{4\pi} \int k ds$
- 垂直准直误差引入斜四极磁场，导致 $\Delta\eta_y$ 和耦合 $C = \frac{1}{2\pi} \int_0^L K_{sq}(s) \sqrt{\beta_x(s)\beta_y(s)} \times e^{i[\phi_x(s)-\phi_y(s)-\frac{2\pi s}{L}\Delta]} ds = |C| e^{i\phi_c}$
- IR 处的六极磁铁具有 **高 β 和色散**，对准直误差敏感 $\kappa = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = \frac{|C|^2}{2\Delta^2 + |C|^2}$ $\eta_y \propto \eta_x \cdot \sqrt{\beta_y}$

◆ Crab 六极磁铁水平准直误差的影响

- Crab 六极磁铁的 β_y 较大 (~ 900 m V4.3 lattice)
- > 大 β_y -beat 和工作点移动. **$30 \mu\text{m}$ offset $\sim 8.4\%$ β_y -beat**
- 类似地，对于大 β_x 和 η_x 的 S1CCX，水平准直误差将引起较大的 β_x -beat 和 $\Delta\eta_x$ ；对于大 β_y 和 η_x 的 S1CCY 处，垂直准直误差导致大 $\Delta\eta_y$ 和耦合。

对撞区和弧区六极磁铁准直误差的 RMS 值需要分别控制在 **$30 \mu\text{m}$** 和 **$50 \mu\text{m}$** 以内



◆ STCF 对撞环的误差水平设置

RMS value, Cut-off @ 2.5σ

Component	Horizontal (μm)	Vertical (μm)	Longitudinal (μm)	Rotation (mrad)	Main Field Error
Dipole	100	100	100	0.1	0.02%
Quadrupole	50	50	100	0.1	0.02%
FFT Doublet	30	30	100	0.1	0.02%
Arc/IR Sextupole	50 / 30	50 / 30	100	0.1	0.02%

◆ 后续模拟中使用的 BPM 误差如下：

BPM offset (before BBA)	BPM offset (after BBA)	BPM noise (TBT)	BPM noise (Closed Orbit)	BPM gain	BPM roll
300 μm	20 μm	1 μm	0.1 μm	5%	0.1 mrad



1. 误差分析

2. 校正模拟

3. 总结展望

◆ BPM、校正磁铁和斜四极磁铁的布局

- **BPM:** 几乎每个四极磁铁旁均会放置 BPM;
- **校正磁铁:** 聚焦四极磁铁旁放置 CORx, 散焦四极磁铁旁放置 CORy, 六极磁铁旁放置 CORx 和 CORy (以 2 GeV lattice 为准);
- **斜四极磁铁:** 部分六极磁铁绑斜四极磁铁线圈, 部分四极磁铁旁放置斜四极磁铁;
- 每个环总计有 401 个 BPM, 266 个 CORx, 255 个 CORy 和 94 个斜四极磁铁(V5 lattice).

◆ 校正流程和方法

- 首圈轨迹校正: SVD + 轨迹响应矩阵
- 全环轨道和色散校正: SVD + Dispersion Free Steering (DFS);
- IP点轨道和色散校正: SVD with weight factor;
- 光学耦合校正: Linear optics from closed orbits (LOCO);
- β_y^* 校正: K-modulation;
- 根据需要可迭代上述校正流程.

斜四极磁铁数量较 V4.3 减少69个

$$\mathbf{R}\vec{\theta} + \vec{d} = 0$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} (1 - \alpha)\mathbf{A} \\ \alpha\mathbf{B} \end{pmatrix}, \quad \vec{d} = \begin{pmatrix} (1 - \alpha)\vec{u} \\ \alpha\vec{D}_u \end{pmatrix}$$

后续展示 1 GeV 的校正模拟

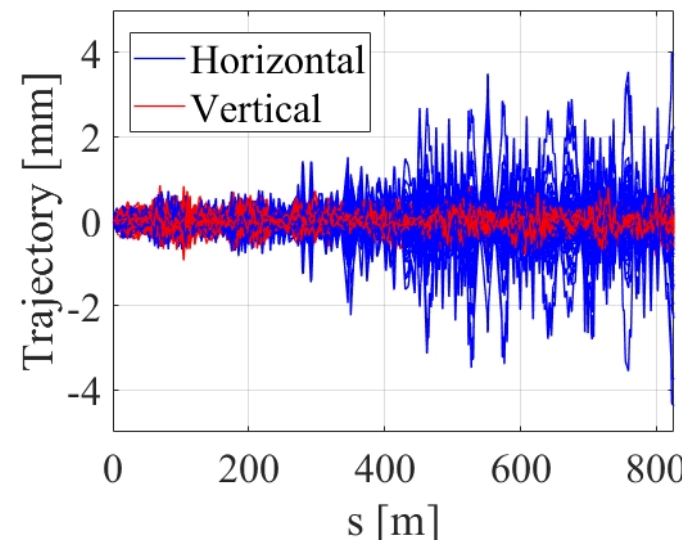
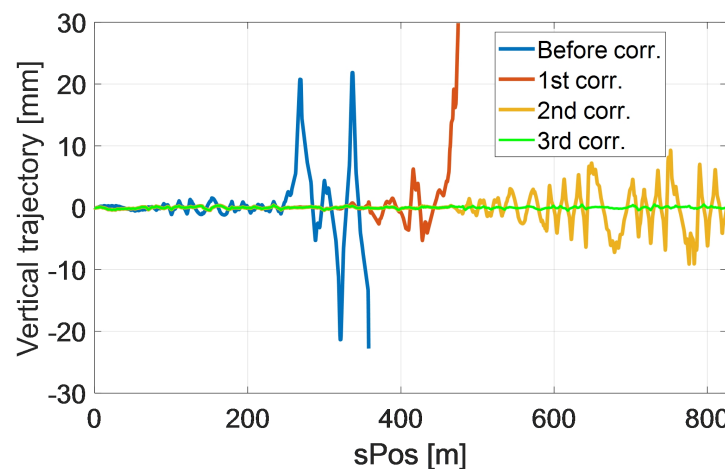
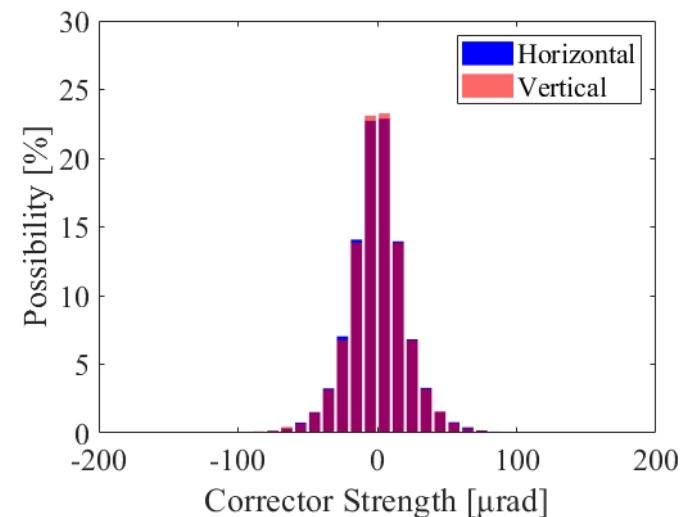
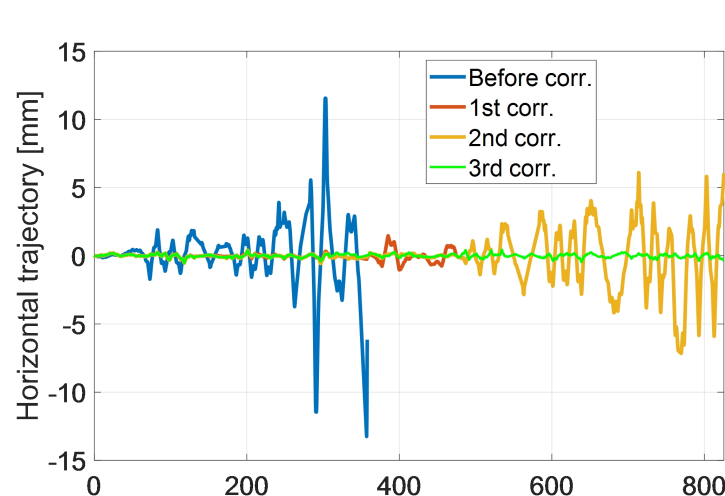
关闭六极磁铁; Knobs: 校正磁铁

轨迹响应矩阵 + SVD

$$\theta_n = -R^{-1}X_m;$$

选取 ~25% 的奇异值来进行轨迹校正

- 粒子主要损失在 FFT 四极磁铁处;
- 完成首圈需要2~4次迭代;
- 经过校正, $\theta < 0.23$ mrad;
- 首圈轨迹 < 4.5 mm.

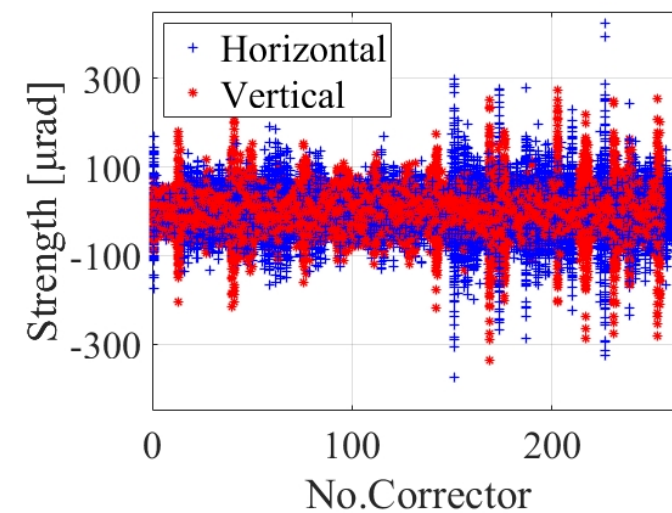
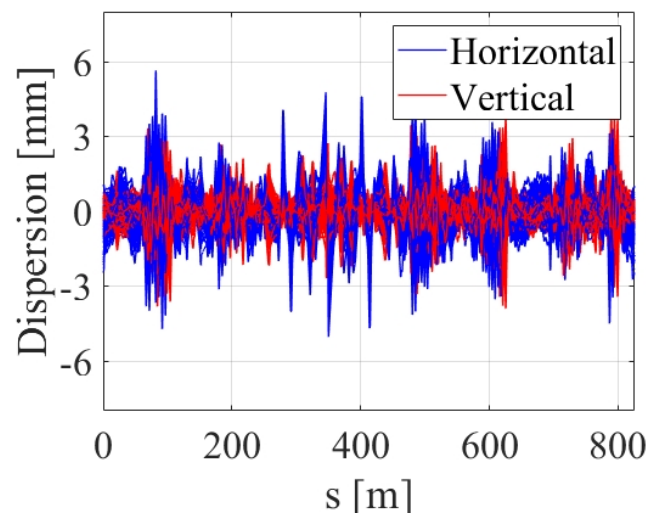
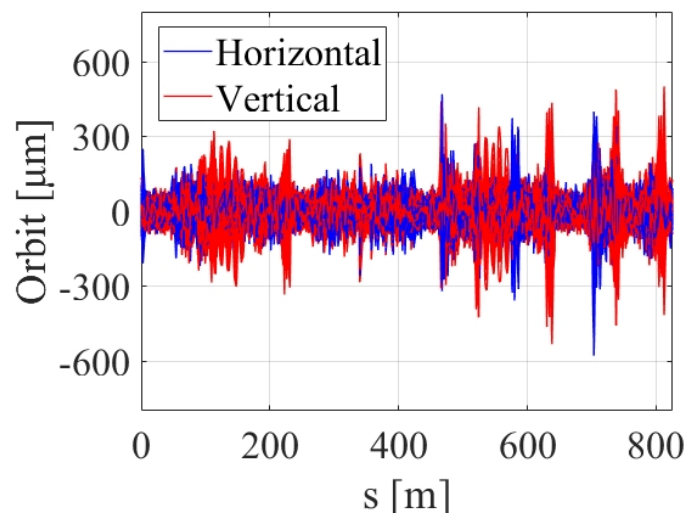


打开六极磁铁; Knobs: 校正磁铁; $\mathbf{R}\vec{\theta} + \vec{d} = 0$ $\mathbf{R} = \begin{pmatrix} (1-\alpha)\mathbf{A} \\ \alpha\mathbf{B} \end{pmatrix}$, $\vec{d} = \begin{pmatrix} (1-\alpha)\vec{u} \\ \alpha\vec{D}_u \end{pmatrix}$

SVD + DFS, with $\alpha=0.1$

- Hor./Ver. orbit $\sim 43/65 \mu\text{m}$ in RMS;
- $\Delta\eta < 6 \text{ mm}$;
- $\theta < 0.45 \text{ mrad}$.

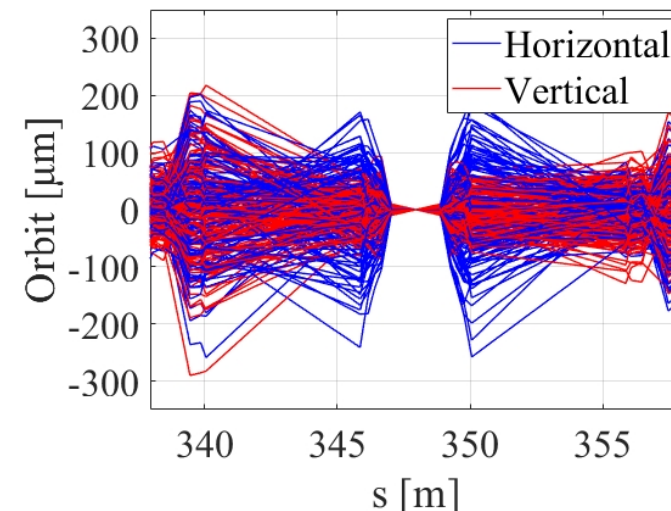
COD	Before Corr. (mm)	After Corr. (μm)	$\Delta\eta$	Before Corr. (m)	After Corr. (mm)
X, MAX	4.4	579	X, MAX	0.18	5.6
Y, MAX	3.4	533	Y, MAX	0.46	3.9
X, RMS	0.34	43	X, RMS	0.02	0.69
Y, RMS	0.23	65	Y, RMS	0.03	0.45



带权重 DFS + SVD

$$\theta = - (wR)^{-1} w d \quad \text{with } w_{IP}=1000$$

- $COD@IP < 0.1 \mu m$ in RMS, 小于 σ_y (346 nm) 的 10%;
- $\Delta\eta_y@IP < 5 \mu m$, 对亮度的影响较小;
- 校正效果取决于八电极 BPM 和亮度监测器是否正常工作, 实际运行时若八电极BPM不工作, 则使用局部凸轨来控制IP处轨道.



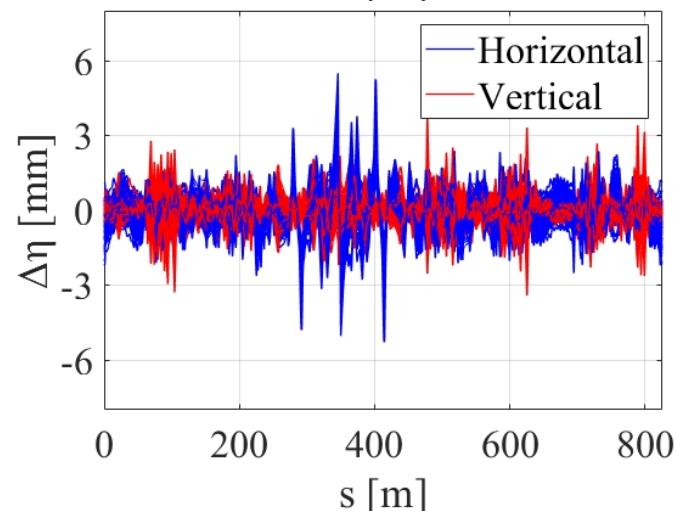
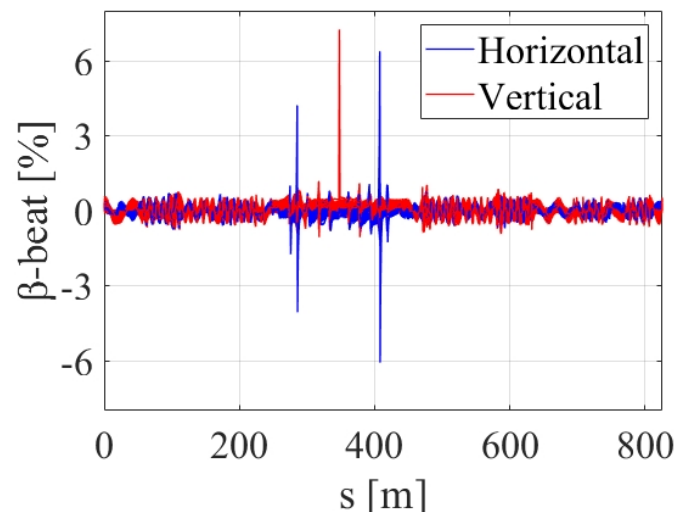
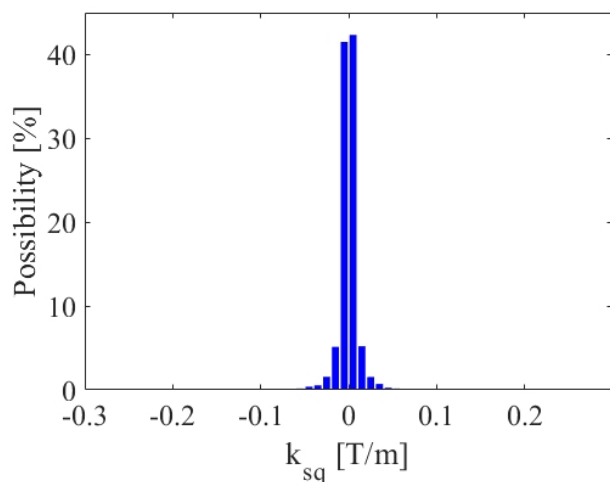
Orbit@IP	Before Corr. (μm)	After Corr. (nm)	Without OctoPos (μm)
X, MAX	73	207	64
Y, MAX	97	45	75
X, RMS	22	51	22
Y, RMS	35	17	25

$\Delta\eta@IP$	Before Corr. (mm)	After Corr. (μm)	Without OctoPos (mm)
X, MAX	3.7	8.7	47
Y, MAX	1.3	2.0	305
X, RMS	1.6	2.7	16
Y, RMS	0.6	0.7	117

LOCO 方法 Knobs: 四极磁铁和斜四极磁铁强度.

$$M = \begin{pmatrix} R_{xx} & R_{xy} \\ R_{yx} & R_{yy} \end{pmatrix}$$

- β -beat < 1% in RMS;
- 耦合率 $\sim 0.1\%$;
- $k_{sq} < 0.2$ T/m.



After Correction	Global	@IP
Hor./Ver. orbit, MAX (μm)	622/549	0.74/0.12
Hor./Ver. orbit, RMS (μm)	100/65	0.32/0.05
Hor./Ver. dispersion deviation, MAX (mm)	5.5/3.7	0.49/0.05
Hor./Ver. dispersion deviation, RMS (mm)	0.61/0.37	0.16/0.02
Hor./Ver. β -beat, MAX (%)	6.4/7.3	0.28/7.25 1/ 61 (2 GeV)
Hor./Ver. β -beat, RMS (%)	0.2/0.2	0.12/1.50 0.3/ 13 (2 GeV)
Hor./Ver. tune shift, MAX ($\times 10^{-3}$)	0.2/0.3	
Coupling ratio, MAX (%)	0.1	

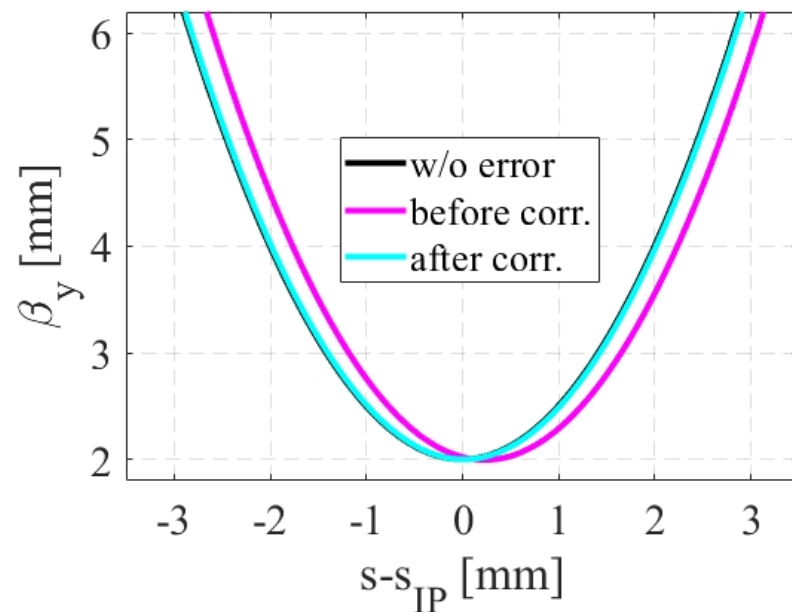
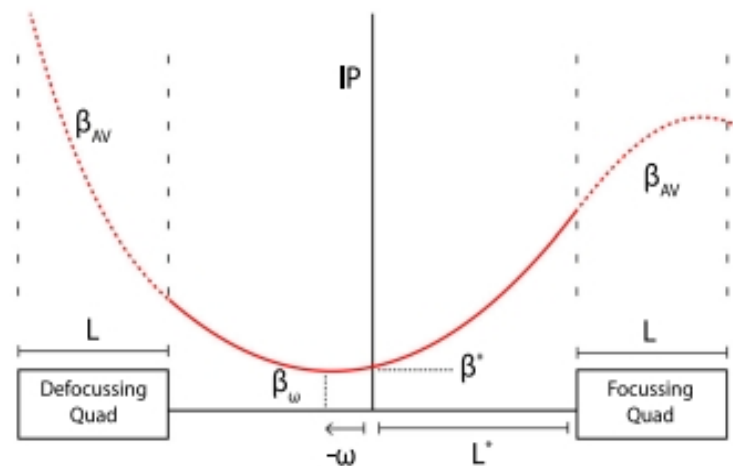
K-modulation Knobs: IP 点附近三对四极磁铁的强度

- ❑ 测量 FFT doublets 的 $\overline{\beta_y}$ ——K-modulation;
- ❑ 反推该误差种子的 β_y^* ——传输矩阵;
- ❑ 使用 IP 附近的四极磁铁校正 β_y^* .

➤ $\beta_y\text{-beat@IP} < 1\%$.

- 为防止全局 β -beat 受影响, 需对四极磁铁 knobs 以外的 β 函数进行测量与约束;
- 工作点测量精度、电源纹波等因素均会影响校正效果.

$\beta\text{-beat@IP}$	RMS (%)	MAX (%)
Before Corr. x/y	0.12/1.50	0.28/7.25
After Corr. x/y	0.11/0.12	0.30/0.43



* Carlier F, Tomás R. Accuracy and feasibility of the β^* measurement for LHC and high luminosity LHC using k modulation. Physical Review Accelerators and Beams, 2017, 20(1): 011005

◆ 不同能点的校正结果统计

- IP点处的 COD 能够降低到亚微米量级，亮度恢复效果较好;
- 工作点移动基本上在容忍范围内.

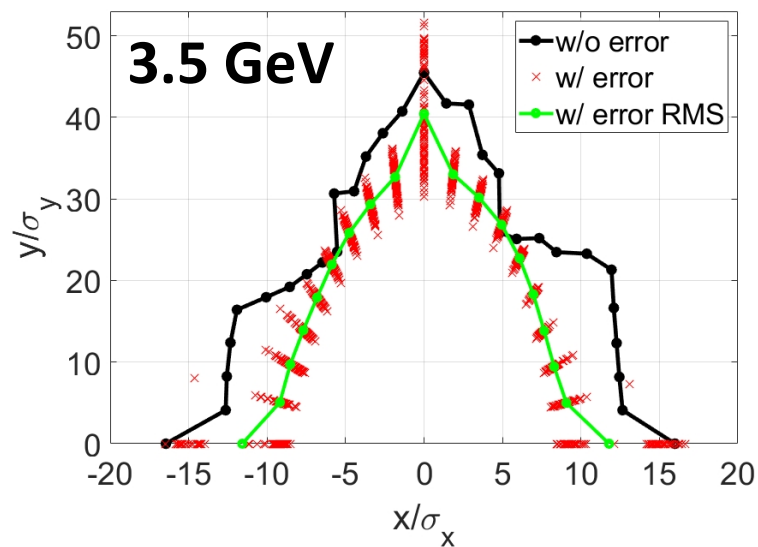
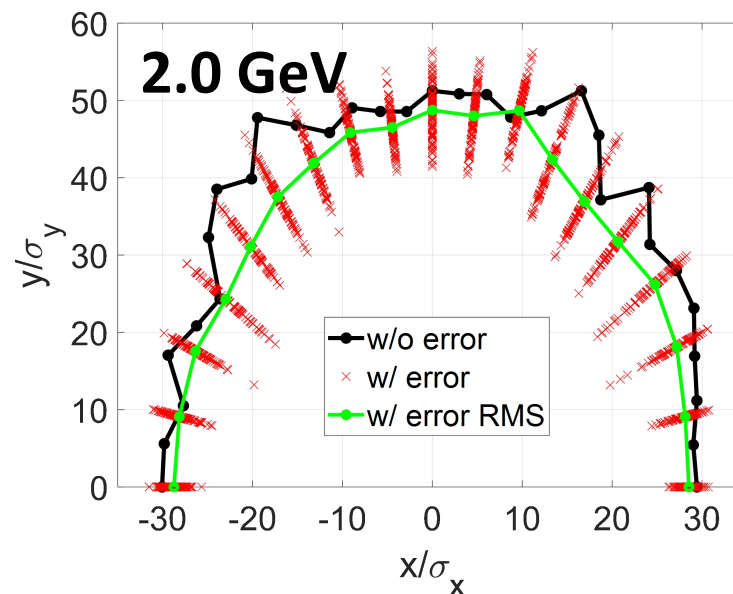
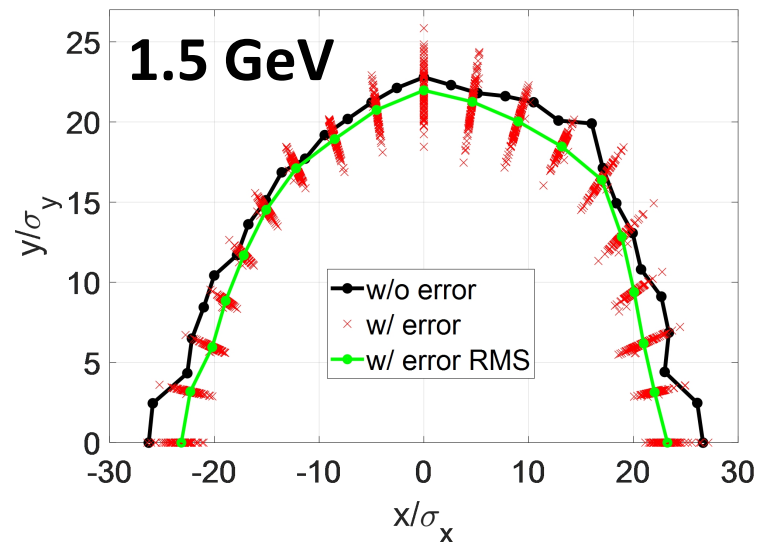
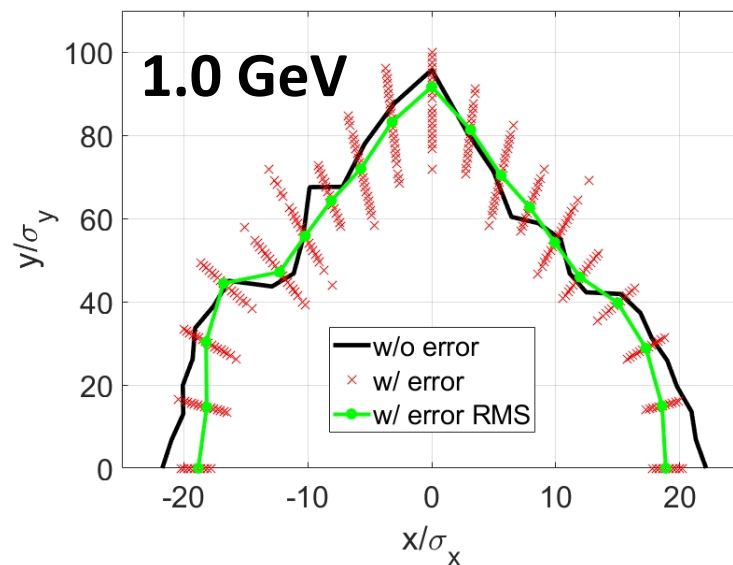
$$\frac{\Delta L}{L_0} = \exp\left(-\frac{\Delta x^2}{4\Sigma_x^2} - \frac{\Delta y^2}{4\Sigma_y^2}\right)$$

$$\Sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2 + (\sigma_z\phi_c)^2}, \Sigma_y = \sigma_y.$$

Energy	1 GeV		1.5 GeV		2 GeV		3.5 GeV	
After Correction	Global	@IP	Global	@IP	Global	@IP	Global	@IP
Hor./Ver. orbit, MAX (μm)	588/548	0.42/0.14	552/542	0.55/0.11	498/552	0.56/0.12	491/587	0.77/0.12
Hor./Ver. orbit, RMS (μm)	45/65	0.17/0.05	53/79	0.19/0.04	53/68	0.22/0.04	51/57	0.27/0.04
Hor./Ver. dispersion deviation, MAX (mm)	5.5/3.7	0.49/0.05	5.6/3.2	0.41/0.05	5.6/6.6	0.69/0.06	4.3/2.9	0.44/0.06
Hor./Ver. dispersion deviation, RMS (mm)	0.61/0.37	0.16/0.02	0.66/0.40	0.15/0.02	0.66/0.46	0.22/0.02	0.54/0.34	0.17/0.02
Hor./Ver. β-beat, MAX (%)	6.5/1.2	0.3/0.4	3.4/1.4	0.3/0.6	6.3/8.9	1.2/6.0	1.7/1.3	0.2/0.6
Hor./Ver. β-beat, RMS (%)	0.2/0.2	0.1/0.1	0.2/0.1	0.2/0.1	0.3/0.8	0.4/1.4	0.1/0.1	0.1/0.1
Hor./Ver. tune shift, MAX (× 10 ⁻³)	0.2/0.2		0.3/0.3		0.6/1.7		0.1/0.2	

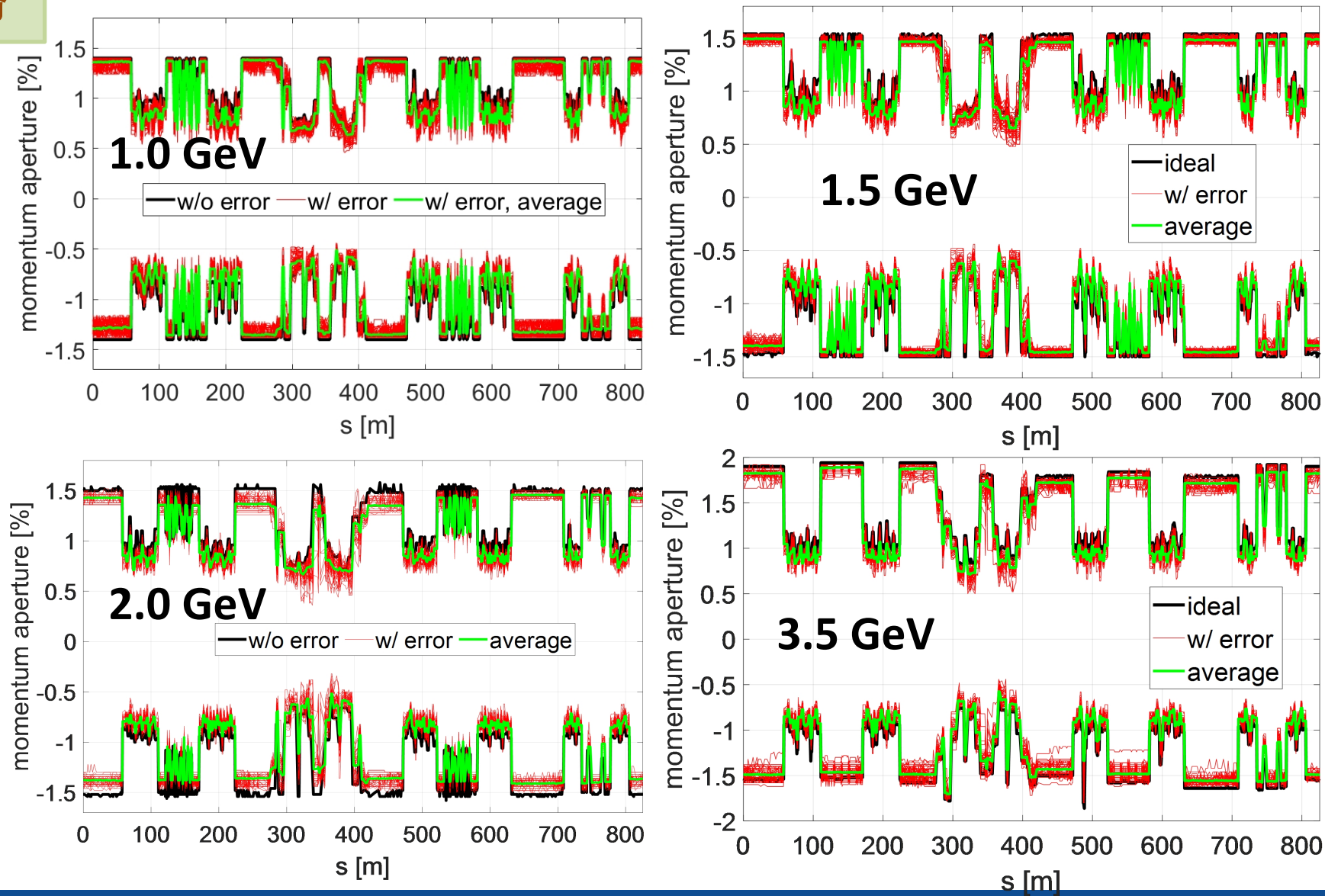
◆ 不同能点的DA

DA 能够较好地恢复



◆ LMA和 Touschek 寿命

能量	理想 lattice	误差种子 平均值
1 GeV	272 s	191 s
1.5 GeV	361 s	279 s
2 GeV	350 s	257 s
3.5 GeV	3.03 h	2.48 h





1. 误差分析

2. 校正模拟

3. 总结展望

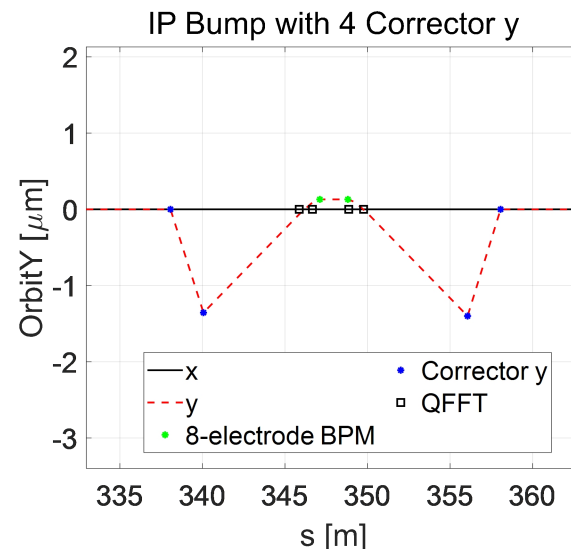
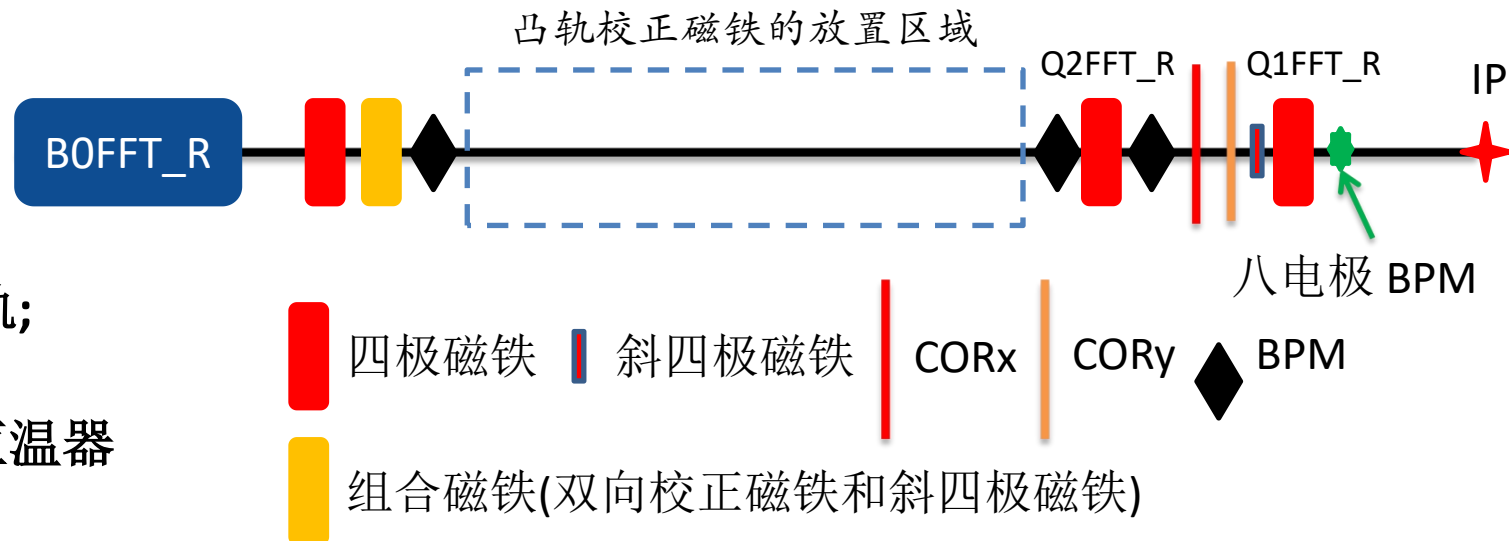
八电极 BPM 无法正常工作时:

- IP 点处的闭轨畸变
—> **Beam-beam deflection** 和 **亮度扫描**;
- IP 点处的轨道抖动—>建立局部凸轨;

目前考虑将凸轨校正磁铁放置在低温恒温器以外的区域.

30 nm (RMS) 四极磁铁振动导致的轨道抖动

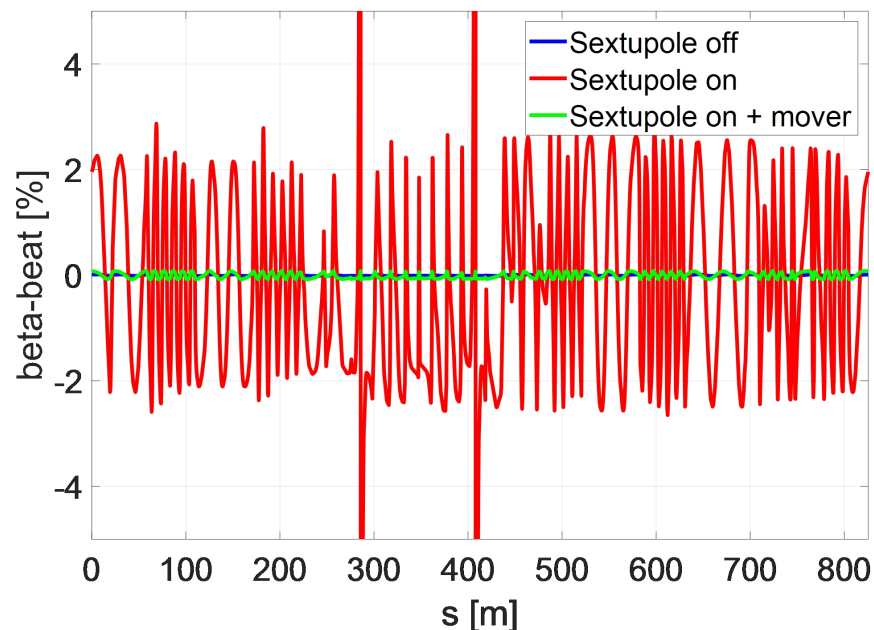
Position	Orbit amplification factor (x/y)	Orbit jitter (RMS) (x/y) (μm)	Orbit jitter (MAX) (x/y) (μm)
IP	3.7/1.3	0.11/0.039	0.42/0.13
Q1FFT_L	46.9/481.7	1.4/14.5	4.9/45.6
S1CCX_L	179.8/55.4	5.4/1.7	18.7/5.2
S1CCY_L	29.9/479.8	0.9/14.4	31.1/45.3
CrabSext_L	25.9/455.2	0.78/13.7	25.1/45.0



局部凸轨高度 ~ 130 nm;
校正子强度 ~ 1 μrad ;
最大闭轨偏差 ~ 1.5 μm .

在垂直方向建立局部凸轨的一个实例

六极磁铁 mover 可降低 β -beat、耦合，以及四极磁铁和斜四极磁铁 knobs 的强度。



六极磁铁 mover 的影响：

1、关闭六极磁铁，四极磁铁随机水平偏移 Δx

—> $\text{COD} \sim 100 \mu\text{m}, \beta\text{-beat} \approx 0\%$ $\frac{B_x}{B\rho} = b_1 y_0 + b_1 y$

2、打开六极磁铁 —> ΔCOD 较小， β -beat 显著改变

3、使用 mover， β -beat 大幅度减小

考虑到 mover 的作用，需要采用新的校正流程，流程为：

- ❑ 首圈轨迹校正，关闭六极磁铁；
- ❑ 四极磁铁 BBA，轨道和色散校正 (DFS) 和 光学耦合校正 (LOCO)，**关闭六极磁铁**；
- ❑ **打开六极磁铁**；进行六极磁铁 BBA，并用 mover 将六极磁铁磁铁中心移动到束流轨道上；
- ❑ 重复光学耦合校正 (LOCO).....

- 四极磁铁的准直误差，尤其是 FFT 四极铁，对闭轨的影响最为显著；
- 对撞区六极磁铁的准直误差对 β 、色散及耦合均有较大影响；
- 给出了 STCF 对撞环的误差水平设置，并完成了 BPM、校正磁铁和斜四极磁铁的布局；
- 对首圈传输、闭轨、 β 、色散及耦合进行了校正，尤其是对 IP 点处参数的校正。校正后，DA 得到良好恢复，Touschek 寿命恢复了 70% ~ 80%。

下一步工作：

- 继续优化 BPM, 校正磁铁和斜四极磁铁的布局，考虑 girder 的准直误差；
- 考虑 mover，并采用新的校正流程进行校正；
- 继续研究 IP 处的轨道校正流程和方法。

谢谢