

# 会议纪要

STCF 加速器物理系统与高频系统讨论会 2026 年 04 月 01 日

---

会议形式：腾讯会议

时间：2026 年 04 月 01 日 9:00-10:30

参会人员：

- 线上参加：唐靖宇、邹野、韦业龙、何天龙、廖文豪、王成哲、孙立、周昊、李航洲
  - 主持人：邹野
- 记录和纪要整理：周昊/李航洲



## 讨论主题和内容：

邹野：最近发布了第五版参数，今天讨论的问题有两个，一个是高频腔的摆放位置，看具体的空间需求；另一个方面是关于高次模抑制的最新结果讨论。随后对高频相关的参数做了基本情况介绍，详见 V5 版参数，总体来说对相 V4 调整较小。

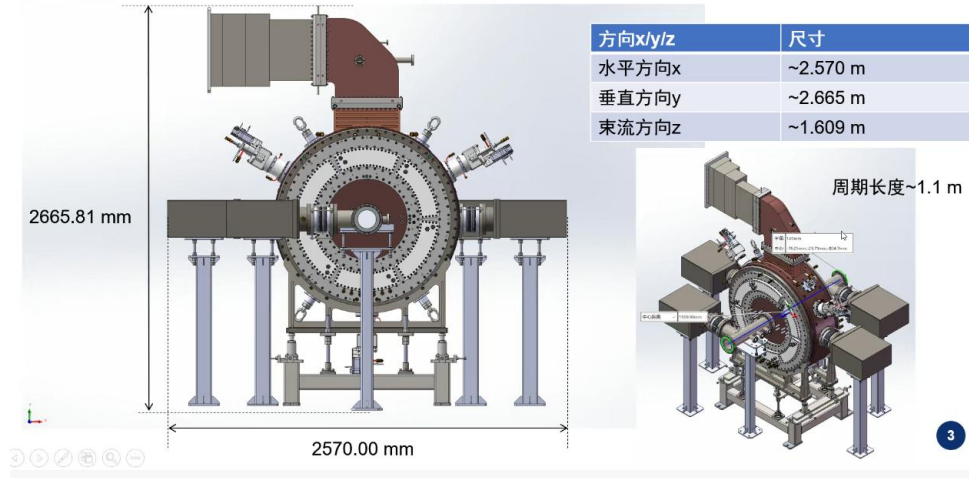
廖文豪：首先介绍了非线性准直段所空余的长直线节空间，预留了 15m 漂移节用于放高频腔

邹野：高频腔的摆放位置对 beta 函数有没有要求。

王成哲：这个受高次模抑制方面影响，beta 越小阈值越高。

何天龙：高频腔所在位置建议没有色散。

王成哲：介绍了高频腔最新设计进展情况，首先展示了高频腔总装配图，多腔连接周期长度在 1.1 m 左右，随后与其他装置的高频腔对比情况做了介绍。



参数	Nano Terasu	备注	STCF	备注
束流流强	400 mA	@2.998 GeV	2 A	@3.5 GeV
每圈最大辐射损耗	1.25 MeV	0.62 MeV在弯铁	1.477 MeV	
频率	508.76 MHz		499.7 MHz	
需要的腔压	3.3 MV	可以使Touschek寿命>5 h	6 MV	
R/Q	113 Ω		83.3 Ω	为了降低纵向阻抗
Q0	60300理论		61500理论	
有效分路阻抗 Ra	6.8 MΩ	120 kW可以提供0.9 MV腔压, 4个腔可以提供3.6 MV腔压, 总共需要480 kW射频功率	5.0 MΩ	50 kW 提供 0.5 MV腔压, 对于6 MV则需要12个腔, 保持冗余, 则15个腔

老炼到了135 kW

邹野：我们环上暂时没有谐波腔的设置考虑。腔的水平方向尺寸建议进行优化。

王成哲：3.5GeV 最少要 12 个腔，为了保持冗余设置 15 个腔。

Main Parameters of the Collider Rings (Ver. 4.3)				
Parameters	Units	Value	Value	Value
Beam energy, E	GeV	2	1	1.5
Circumference, C	m	960.321		
Crossing angle, 2θ	mrاد	60		
L*	m	0.9		
Relative gamma		3913.9	1956.9	2935.4
Revolution period, T <sub>0</sub>	ms	2.87		
Revolution frequency, f <sub>0</sub>	kHz	348.47		
Ratio, ε <sub>y</sub> /ε <sub>x</sub>		1%	15%	10%
Hor. emittance [SR], ε <sub>x</sub>	nm	8.79	2.20	4.94
Hor. emittance [DW, IBS], ε <sub>x</sub>	nm	4.63	5.42	3.82
Ver. Emittance [SR], ε <sub>y</sub>	pm	87.9	330	494
Ver. emittance [DW, IBS], ε <sub>y</sub>	pm	46.3	813	382
Hor. beta function at IP, β <sub>x</sub>	mm	60		
Ver. beta function at IP, β <sub>y</sub>	mm	0.8		
Hor. beam size at IP, σ <sub>x</sub>	μm	16.67	18.03	15.14
Ver. beam size at IP, σ <sub>y</sub>	μm	0.19	0.81	0.55
Betatron tunes, ν <sub>x</sub> /ν <sub>y</sub>		30.54/34.58		

Parameters	Units	Value	Value	Value
Mom. compaction factor, α <sub>s</sub>	10 <sup>-4</sup>	13.49	12.63	13.24
Energy spread [DW, IBS], α <sub>e</sub>	10 <sup>-4</sup>	7.82	6.18	6.93
Beam current, I	A	2	1.1	1.7
Bunch filling ratio			48%	
Bunch spacing, τ <sub>b</sub>	ns		4.0	
Single-bunch charge	nC	8.34	6.59	7.09
SR power per beam (Total)	MW	1.09	0.12	0.45
Trans. damping time, τ <sub>x</sub> , τ <sub>y</sub>	ms	21	54	32
RF frequency, f <sub>RF</sub>	MHz	499.7		
RF voltage, V <sub>RF</sub>	MV	2.5	0.75	1.2
Bunch length (0.1σ, IBS), l <sub>b</sub>	mm	8.7	9.5	10.0
Piwiński angle, Φ <sub>piw</sub>	rad	15.66	15.74	19.84
Ver. beam-beam parameter		0.095	0.0223	0.033
Touschek lifetime (Elegant)	s	304	264	294
Luminosity, L	cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	9.4E+34	6.2E+33	2.1E+34

假定每个腔的腔压0.5 MV，则4种情况下分别需要至少2/3/5/12个腔。

韦业龙：选用和日本相类似的泵的时候可以把两个腔之间的距离缩到 1m 以内，考虑以五个为一组划分。

何天龙：由于目前高频腔摆放较近，腔腔之间可能需要考虑高次模吸收器放置问

题，和单腔模拟情况存在差异，需要同时模拟一下多腔的情况。

邹野：在束管上也要考虑加高次模吸收器，不能光在腔上加高次模吸收器，目前放置空间只是初步考虑，lattice 会做 15-18m 预留空间的多个版本。

何天龙：STCF 运行能量范围很广，需要针对不同能量考虑耦合系数及放置运行问题。

韦业龙：一种方案是在每个上设置导轨滑轮，不同情况下控制在线腔数；另一个方案是 15 个腔同时在线提供不同的腔压和功率。两种情况后续需要细致对比考虑。

何天龙：希望每个腔提供的腔压和功率相接近，需要考虑不同能点腔的调谐能力问题。

韦业龙：通过步进电机就可以调节腔的耦合度。初步考虑 15 个腔同时在线，该情况最为省心，但在线时每个腔都会激励高次模，需要进一步研究。

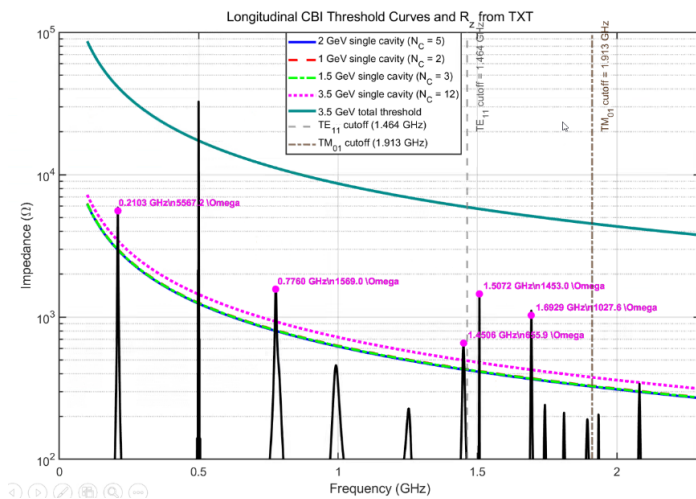
何天龙：再提高单个腔的腔压，需要考虑功率耦合器是否扛得住，再提减少腔数的问题。

邹野：后续可以考虑提高腔压，TDR 撰写时暂不考虑该情况。

王成哲：需要了解 x 方向的腔所占空间问题受正负电子束间距离的问题，看腔的水平尺寸还有没有优化空间。

何天龙：高次模还需要做细致研究评估，相关实测工作也需要做规划测试。

## 高次模吸收分析-纵向模



更新了V5版参数的CBI阈值

序号	频率 / GHz	阻抗Ω
TM010	0.2103	5567.2
TM021	0.7760	1569.0
TM041~	1.4506	655.9
TM051	1.5072	1453.0
TM032~	1.6929	1027.6

更新了V5版参数的CBI阈值，单腔阈值均满足，多个腔情况有超限，但最终可能多个腔的频点不会完全重合

王成哲：从高次模抑制方面看，多个频点完全重合的情况下纵向模式会有阈值超过限制的情况，横向则没有。

# 预计测试方式

日本测试结果

**Table 4**  
Comparison of resonant frequencies and Q-values for certain modes in the cavity without and with 12 HOM dampers.

mode	Frequency [MHz]	Q without a HOM damper	Q with HOM dampers
TM020	508.3	59,300	59,100
TM010	222.7	5000	320
TM110	363.8	10,400	320
TE111	573.4	2000	40
TM011	586.4	1100	a
TM120	658.8	3100	50
TM111	669.4	2600	a
TE121	746.0	14,200	280
TM030	768.0	700	a

<sup>a</sup> Not to be identified.

可以测几个特定模式的Q值，比较有寄生模式无吸收器的Q值，估计高次模的抑制效率

我们的仿真结果（有吸收器）

序号	频率 / GHz	阻抗Ω	Q
TM010	0.2103	5567.2	33.16
TM021	0.7760	1569.0	53.67
TM041~	1.4506	655.9	60.32
TM051	1.5072	1453.0	
TM032~	1.6929	1027.6	

## Compact HOM-damping structure of a beam-accelerating TM020 mode rf cavity

王成哲：目前再腔上的 Q 抑制已经做的比较充分了，进一步抑制则需要靠反馈系统提供，阻尼器热问题则在可控范围内。

何天龙：实际情况不同腔频点确实会存在差别，比模拟的最坏情况要好，可以用蒙特卡洛统计学方法做相关评估。

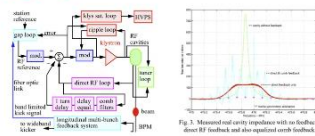
邹野：如果冗余腔均在线，是需要考虑 15 个腔的高次模影响，还需要详细计算。

何天龙：对束腔作用近期研究进展做了汇报，对 STCF 的关键是 RF 腔加速模驱动的纵向耦合束团不稳定性，实际设置时会采取 RF 腔负向失谐，天然阻尼模 0，但可能激励模-1，-2...。随后介绍了现有抑制方案的调研情况。

# 现有抑制方案调研

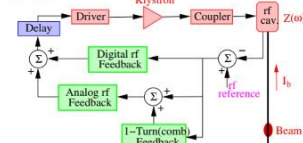
- 直接RF反馈+一圈延迟反馈（DRFB+OTFB）：PEP-II, LHC, CEPC

### PEP-II



P. Baudrenghien, et al., PRAB 20, 011004 (2017).

### LHC



P. Corredoura, Proc. PAC' 99, 118-122 (1999)

### CEPC



H. Zhu, et al., Radiat. Detect. Technol. Methods 7, 210 (2023).

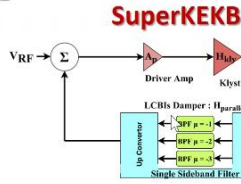
- 专用的LCBI-Damper: KEKB, SuperKEKB

低R/Q的超导腔

45 Ω per cavity

甚至更低R/Q的ARES腔

7.5 Ω per cavity



K. Hirose, et al., NIMA 953, 163007 (2020)

何天龙：对-1 模没反馈的情况做了相关计算，其增长率显著超过辐射阻尼率，仅靠 TM020 腔，仍不足以保证稳定。初步考虑使用基于 I/Q 的 PI 反馈，当 PI 控制器选择一个合适的参数，如比例增益  $K_p=1$ ，回路延迟约为半个周期，闭环响应呈现类似 notch filter，其可以抑制-1，-3 模式，但-2 模式会增长。

针对不同能量做了相关计算，目前来看稳定区域较宽参数鲁棒性良好。

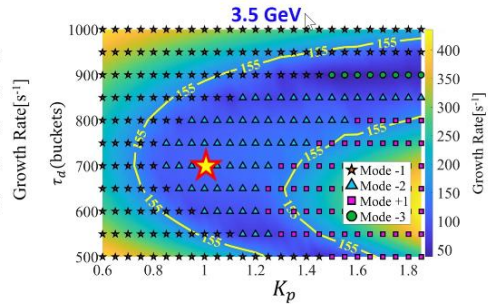
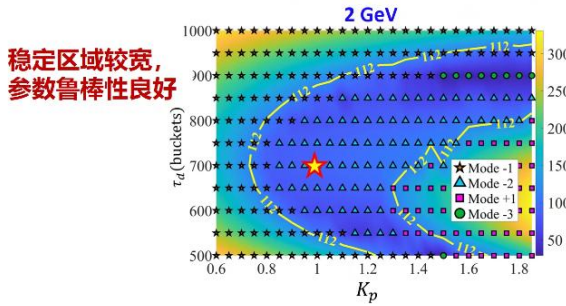
## STABLE: $K_p = 1, \tau_d \approx T_0/2$

能量	最快增长模式	Tracking增长率	辐射阻尼率	结论
1.5 GeV	-2	$40s^{-1}$	$75s^{-1}$	稳定
2 GeV	-2	$88s^{-1}$	$112s^{-1}$	稳定
3.5 GeV	-2	$116s^{-1}$	$155s^{-1}$	稳定

**最不稳定模式的转变**

无反馈  $\mu = -1$   $\rightarrow$  PI 反馈后  $\mu = -2$

主导耦合模式从  $\mu = -1$  转移到  $\mu = -2$ , 但其增长率已低于辐射阻尼率

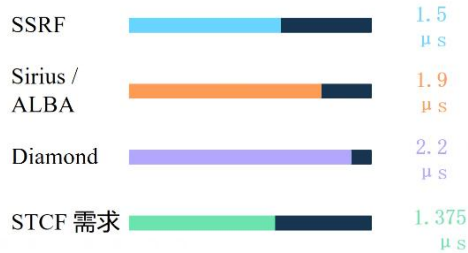


何天龙：但如果 PI 参数选取不当(大  $K_p$ , 大延迟)，反馈环路本身可能先失稳，GM 大于 6db 会更稳健。随后对瞬态束流效应做了研究，发现均匀填充优化的参数可以直接应用于真实填充场景。并对半圈延迟的可行性做了讨论。

## 半圈延迟是可实现

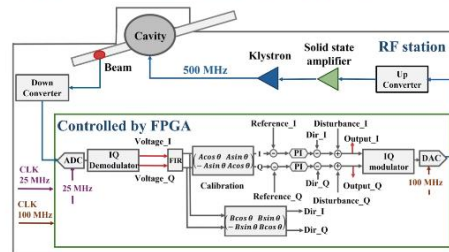
STCF 周长  $\approx 825$  m  $\rightarrow$  周期  $T_0 \approx 2.75$   $\mu s$   $\rightarrow$  半圈延迟  $T_0/2 \approx 1.375$   $\mu s$

**与现有装置的 LLRF 反馈环路延迟对比**



- 现代数字 LLRF 总环路延迟通常在 1-2  $\mu s$  量级;
- 1.375  $\mu s$  延迟对环路设计提出一定的要求;
- STCF 具有适当的延迟裕度。

半圈延迟是可行的，但需要精心设计



- 高采样率、低滤波阶数、控制反馈算法时长
- 功率源靠近 RF 腔，减小传输时间

[1] Y. B. Zhao, et al., Chin. Phys. C 32, 758 (2008).  
 [2] M. B. Alves, F. H. de Sá, PRAB 26, 094402 (2023).  
 [3] A. Salom, et al., Proc. IPAC' 17, THPAB134 (2017).

何天龙：而环路稳定边界取决于总的延迟；采样+滤波操作会占用延迟预算，目前来看 STCF 无需增加 DRFB 或 one-turn-delay 等复杂反馈系统。后续需要和周泽然老师进一步讨论。

韦业龙：现在是五个腔为一组，每组腔之间会有闸板阀。

唐靖宇：后续需要考虑双馈的情况以及横向空间占用问题。

下次会议时间：预计在五月中旬