



·粒子束及加速器技术·

用横向反馈系统对上海光源多束团不稳定性的诊断

张 宁, 赖龙伟, 袁任贤, 俞路阳

(中国科学院上海高等研究院, 上海 201204)

摘 要: 在上海光源二期升级改造过程中, 为了解和追踪由阻抗引起的多束团不稳定性变化以及升级后的横向反馈系统对这种不稳定性的抑制效果, 在机器研究中利用新反馈处理器的诊断工具记录了束流不同状态下的横向运动过程, 分析得到了最主要的横向多束团不稳定模式在束流稳态、注入瞬态以及增长-衰减过程中的变化情况, 评估了横向反馈的作用效果, 计算出该模式增长率/阻尼率以及增长率与束流的依赖关系。

关键词: 横向耦合不稳定性; 增长率/阻尼率; 横向反馈; 瞬态诊断; 上海光源

中图分类号: TL506 **文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202133.200212

Multi-bunch instability diagnostics via transverse feedback system in Shanghai Synchrotron Radiation Facility

Zhang Ning, Lai Longwei, Yuan Renxian, Yu Luyang

(Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

Abstract: For investigating and tracing the multi-bunch transverse coupled instability caused by beam impedance and evaluating the suppressive effect to the instability by the newly updated Transverse Feedback System during the upgrade process of Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) PHASE II, transverse beam motion in different states were recorded by diagnostics tool of feedback processor in the system, by which the evolution of dominate instability modes were analyzed respectively in steady-state, injection transient and growing-damping process. Growth/Damp rate as well as dependence of growth rate and beam current were calculated. Also, performance of the feedback system was evaluated. These research results provide data support for machine operation optimization.

Key words: transverse coupled instability; growth/damp rate; transverse feedback; transient diagnostics; Shanghai Synchrotron Radiation Facility

对于追求高流强、高亮度的现代同步辐射光源而言, 多束团耦合不稳定性是加速器系统运行所面临的重要问题。世界上大多数光源及类似的加速器装置都会通过反馈系统来抑制束流在横向和纵向的多束团不稳定性^[1]。因此了解这类耦合不稳定性的临界值、不稳定性与其他物理参数的依赖关系, 以及了解反馈系统的性能水平对于这类加速器装置的运行都至关重要。目前比较先进的反馈系统除了能够在整体上抑制束流的耦合不稳定性外, 还能够实现对个体束团横向及纵向运动的精确控制, 这为设计精确的束流诊断实验提供了充分的技术条件。

对于上海光源而言, 由于 RF 腔采用超导谐波腔, 纵向阻抗很小, 束流纵向不稳定性并不突出, 主要问题集中于多束团的横向耦合不稳定性。目前可以明确的是, 这种横向不稳定性最主要的影响因素是束流阻抗^[2-3]。在正在进行的上海光源二期升级改造中, 储存环要加入更多的真空插入件(扭摆器、波荡器等)以应对增加试验线站建设的需求。这些插入件的安装会改变储存环真空管道的原始设计, 增大储存环真空壁的阻抗。为了避免影响正常供光, 安装都安排在周期为半年的停机维护期间进行, 在随后的机器运行中, 储存环的总体束流阻抗都可能会有较大的变化。因此从运行的角度, 对每个运行周期的横向不稳定性进行追踪和诊断变得更为迫切。为此, 本文利用上海光源全新升级的横向反馈系统对储存环束流进行了相关诊断实验。新系统采用了 Dimtel iGp-12 反馈处理器^[4],

* 收稿日期: 2020-07-22; 修订日期: 2020-12-08

基金项目: 中国科学院青年创新促进会项目(2019290)

作者简介: 张 宁(1980—), 男, 博士, 从事加速器束流诊断研究; zhangning@zjlab.org.cn。

通信作者: 赖龙伟(1985—), 男, 副研究员, 从事加速器束流电子学研究; lailongwei@zjlab.org.cn。

除了提升束团横向不稳定性抑制裕度,还提供了逐束团数据采集和离线分析的诊断工具。利用这些工具,在实验中完成了束流稳态,不稳的模式激发/衰减瞬态以及横向反馈开环/闭环状态的测量和离线分析。以下对此项实验进行详细讨论。

1 束流横向振荡模式

在电荷量均匀填充的多束团稳态下,耦合束团横向不稳定性主要来源于束团串内部连续束团的相干运行^[5-6]。即束团串被尾场耦合后,每一个束团仍然以工作点频率进行横向振荡。但相邻束团的振荡模式会有一个固定的相位差

$$\Delta\varphi = \mu \frac{2\pi}{M} \tag{1}$$

式中: M 为储存环 bucket 数量; 对于上海光源储存环, $M=720$; μ 为振荡模式序号,用以表征束团之间具有不同相位差的情况,束流中有多少个束团,就会有多少个振荡模式。在束流频谱中,相位差 ω 可以通过束流回旋频率边带来进行寻找,即

$$\omega = p\omega_{rf} \pm (\mu + \nu)\omega_0 \tag{2}$$

式中: p 为整数, ω_{rf} 为储存环 RF 腔的高频频率, ν 是工作点小数部分, ω_0 是回旋频率。

通过逐束团数据沿时间轴做 FFT 可以得到所有横向振荡模式幅值分布。目前上海光源储存环在 TopUp 运行模式下,正常填充模式如图 1 所示。在 720 个 bucket 中,500 个填充束团分布于 4 个束团串,因此束流的振荡可以表示为 720 个振荡模式的叠加效果(空 bucket 模式不具有实际意义)。在逐束团位置数据频谱中可以看到每个横向振荡模式对应的频率及幅度如图 2 所示。

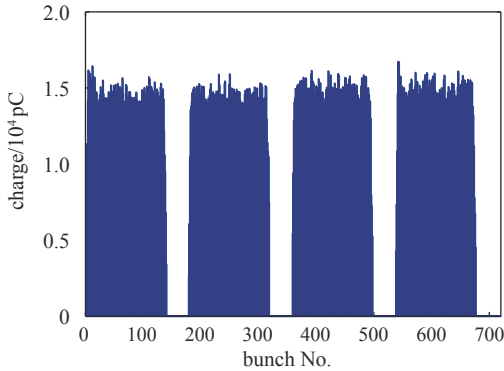


Fig. 1 Storage ring operational filling pattern in SSRF

图 1 上海光源储存环运行状态填充模式

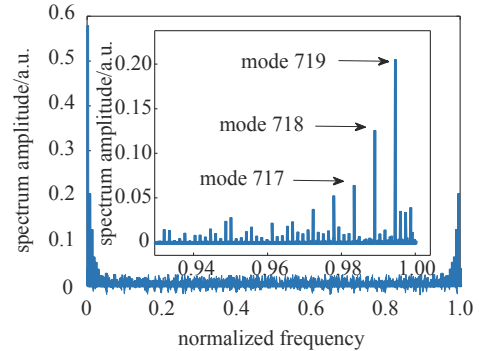


Fig. 2 Dominated beam transverse oscillation mode in normalized beam spectrum

图 2 主要束流横向振荡模式在归一化束流频谱中的分布

根据之前的工作已经得知,大概 10 个引起束流横向不稳定的模式由束流阻抗产生^[7],其中#719($N-1$, $N=720$, 为束流谐波数)模式是最主要的阻抗壁不稳定模式。而#0 模式表示相位差为 0 时束团振荡情况,实际输出波形类似单个束团的振荡被抽样,频域中对应于工作点频率。

2 逐束团位置数据的处理方法

iGp-12 反馈处理器提供的数据诊断工具能够以储存环 RF 频率(上海光源储存环 RF 频率为 499.654 MHz)同步采样 BPM 逐束团位置信号,并通过 SRAM 缓存约 20 ms 量级时间长度的数据。为了方便处理,数据在工具软件中通常被处理成如图所示的矩阵 $A_{m \times n}$ 形式,其中 m 轴为束团的序列号分布, n 轴为束团沿时间分布。由于在束流诊断中更加关注横向振幅的变化,逐束团数据通常会通过 Hilbert 变换取绝对值的方法,滤除时域波形中工作点频率的横向振荡成分,得到束团横向位置时域包络,如图 3 所示。

3 对束流横向不稳定性的诊断

对束团耦合横向不稳定性诊断最直接的方法是观测引起不稳定的振荡模式增长-阻尼过程,并计算表征束流阻抗的横向振荡模式自然增长率以及表征反馈系统对不稳定性抑制性能的阻尼率。通过束流稳态下反馈系统

ON/OFF 状态对比, 可以评估反馈系统对束流不稳定性抑制能力以及反馈增益设定的边界条件。通过对注入瞬态下反馈系统 ON/OFF 对比, 可以评估由于 kicker 参数失配(如 kicker 电流幅度、能量、相位等)引起的注入残余振荡^[8]对束流横向运动的扰动情况, 以及反馈系统对注入扰动的抑制水平。

3.1 束流稳态下横向不稳定性的测量和抑制

在流强 240 mA 下, 利用反馈系统的诊断工具分别采集了横向反馈 ON/OFF 状态, 长达 25 ms 的逐束团时域位置数据。对逐束团原始数据矩阵滤除闭轨本底后通过 Hilbert 变换得到的横向振荡包络分布以及经过沿束团快速傅里叶变换得到的逐模式分布如图 4 所示。从图中可以明显看到反馈 ON/OFF 状态横向振荡在逐束团及逐模式下的差异。

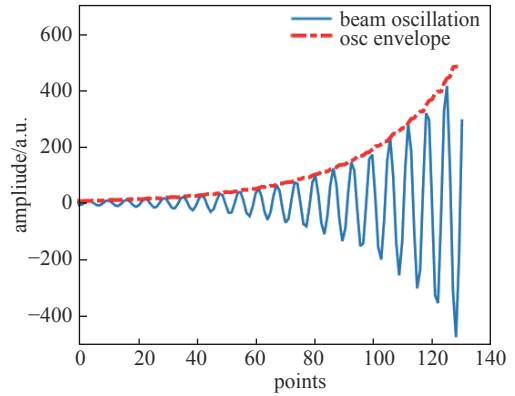


Fig. 3 Envelope of beam transverse oscillation obtained by Hilbert transform

图 3 用 Hilbert 变换得到的束流横向振荡包络。

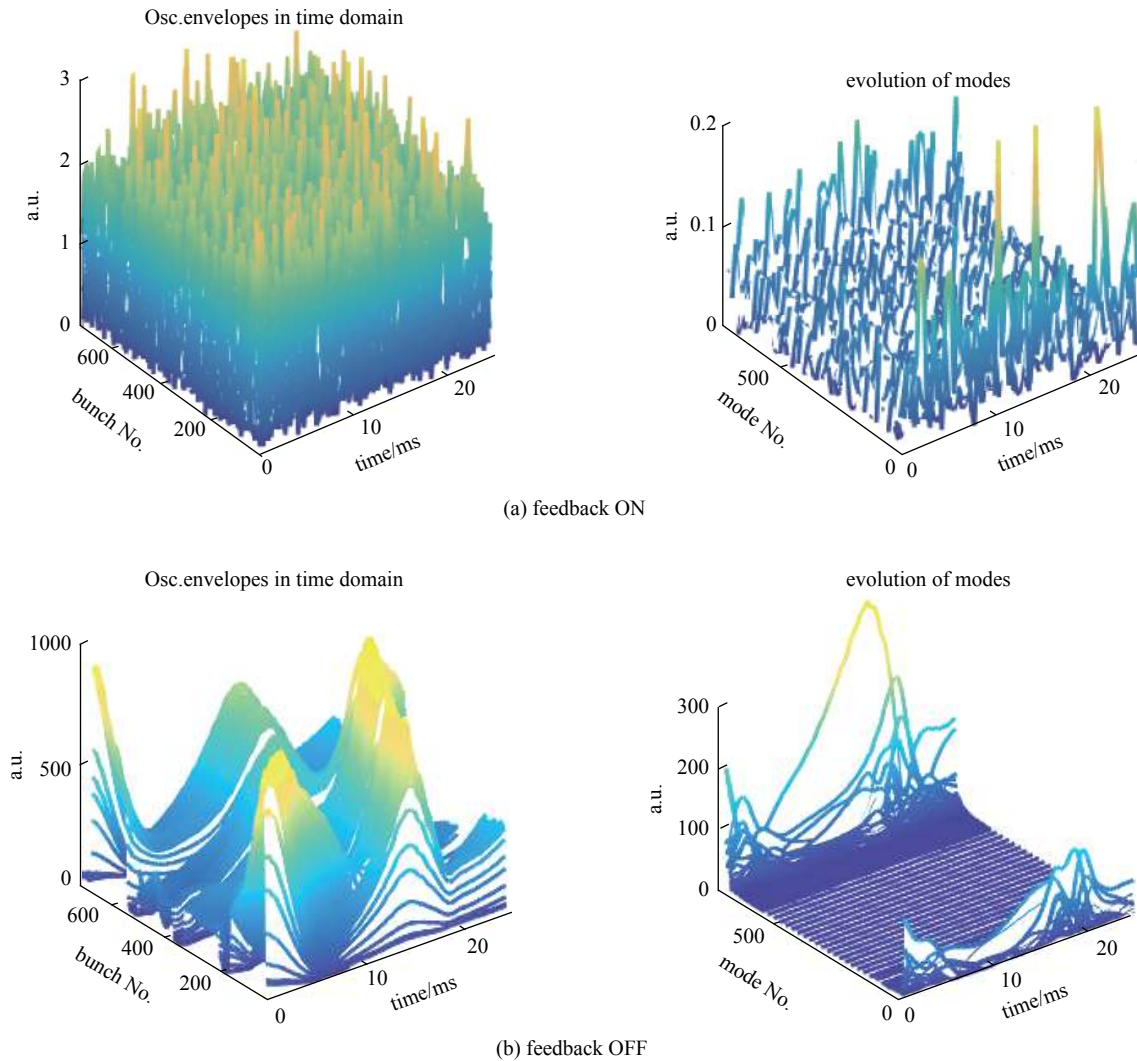


Fig. 4 Steady-state transverse oscillation amplitude distribution in bunch-by-bunch and mode-by-mode patterns with feedback ON/OFF

图 4 横向反馈 ON/OFF 下束流稳态逐束团与逐模式横向振荡分布

为了更进一步表达反馈系统的抑制效果, 可以用多圈横向位置的均方根(RMS)值以及各个不稳定模式振幅变化来分别评估逐束团和逐模式的横向不稳定性, 反馈系统 ON/OFF 下逐束团横向位置 RMS 值以及逐模式振荡幅值分布如图 5 和图 6 所示。在逐束团和逐模式分布中, 横向反馈系统都可以有效抑制横向不稳定性的振幅。

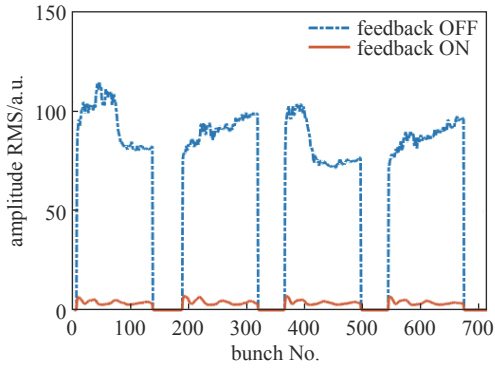


Fig. 5 Comparison of bunch-by-bunch transverse amplitude RMS with feedback system ON/OFF

图 5 反馈系统 ON/OFF 状态下逐束团横向振幅 RMS 对比

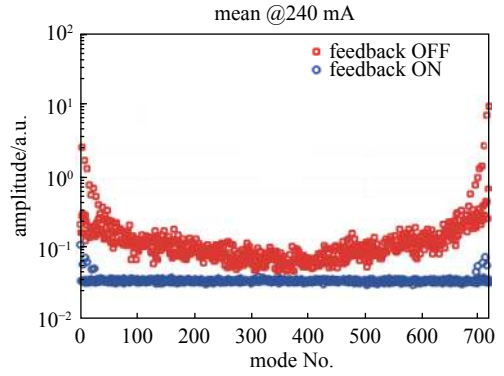


Fig. 6 Averaged mode amplitude distribution with feedback system ON/OFF

图 6 反馈系统 ON/OFF 下模式平均振幅分布

3.2 束流注入瞬态诊断

将反馈处理器的诊断模块数据采集功能的触发方式设置为外触发,并调整合理的触发延时,可以在束流注入时,获取束流横向振荡从被激励到衰减的整个变化瞬态。在横向反馈 ON/OFF 下,束流整体的注入瞬态时域振幅包络及逐模式分布如图 7 所示。

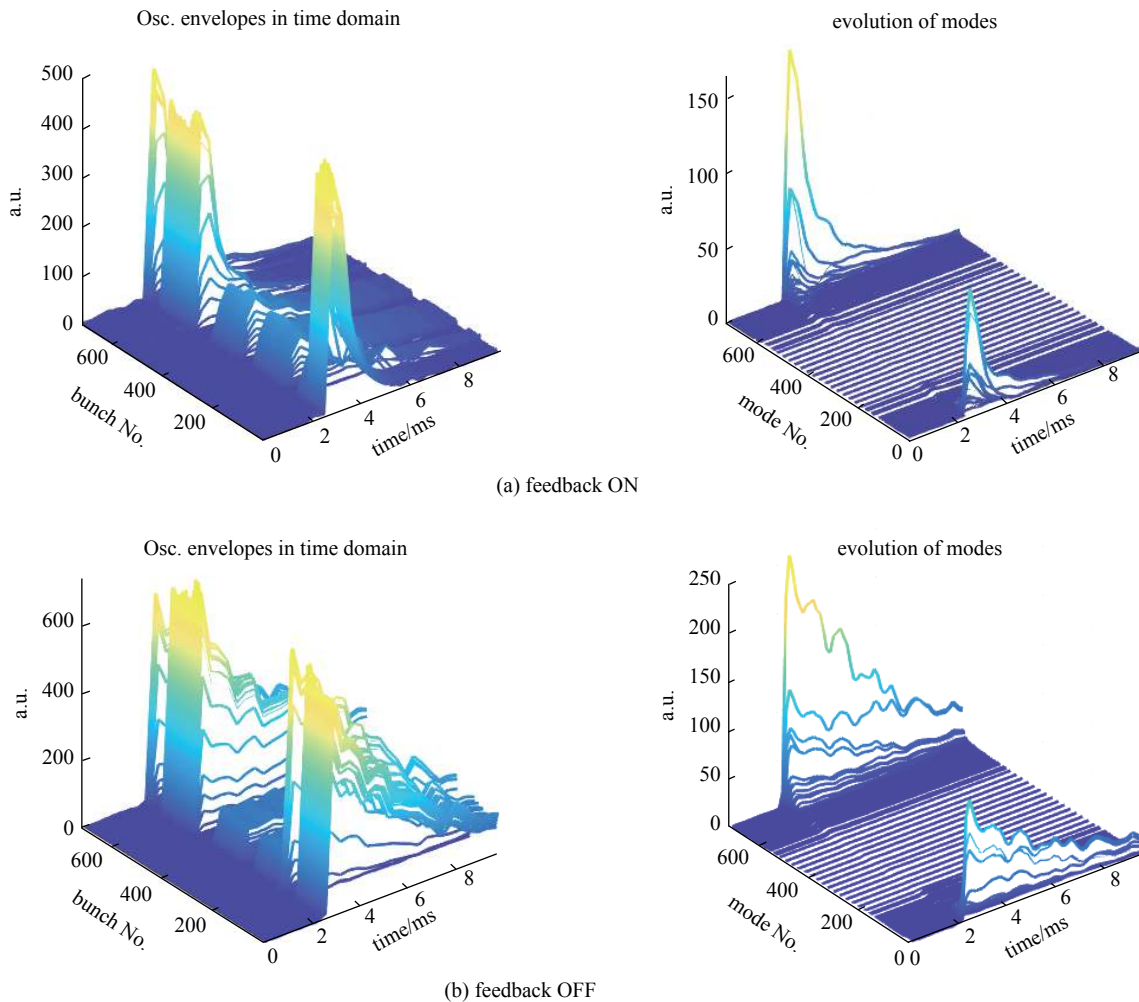


Fig. 7 Beam transverse oscillation amplitude evolution during injection transient with feedback system ON/OFF

图 7 反馈系统 ON/OFF 下束流注入瞬态横向振幅包络变化

对于注入瞬态,更关注时域中横向振荡幅值变化及阻尼时间。因此分别提取反馈系统 ON/OFF 状态下#719 模式注入瞬态幅值随时间分布对比如图 8 所示。由图可得,在横向反馈的作用下,由于束流注入被激励起的横向振

幅会更快的被抑制,且振幅明显小于反馈系统 OFF 状态。这表明反馈系统在束流注入过程中可以有效地抑制横向不稳定性。

3.3 增长率/阻尼率测量

增长率/阻尼率测量主要方法如图 9 所示^[9]。iGp-12 处理器支持运行中生成反馈信号的 FIR 滤波器系数通过精确的延时控制进行切换。其中 SET1 是可以有效抑制横向不稳定性的滤波器系数设定,SET0 是在 SET1 基础上将增益设置为 0,此时相当于反馈回路开环,横向不稳定性持续增长,当切换为 SET1 时,反馈功能恢复闭环状态,横向不稳定性被迅速抑制。Hold time 是采样开始到反馈系统开环的持续时间,此过程采集不稳定性被抑制的束流稳态噪声本底。

在测试中,横向不稳定性增长-阻尼(Grow-Damp)过程的逐束团瞬态数据会被处理器诊断工具记录,经过希尔伯特变化得到的时域包络与对逐束团数据进行 FFT 后得到的不稳定性瞬态过程如图 10 所示。图中可以直观看到在逐束团(图(a))和逐模式(图 10(b))下,图 9 所示的横向振幅逐渐增大然后被迅速阻尼的时域过程被完整地记录下来。

对于储存环中多束团横向振荡的本征模式幅度自然增长和阻尼过程都可以看成幅值逐渐增长/阻尼的正弦振荡^[10]

$$u(t) = ke^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

式中: $\frac{1}{\tau}$ 为模式的增长率/阻尼率, ω 为工作点频率, φ 为束流横向振荡初始相位, k 为比例因子。经过 Hilbert 变化后得到的幅值包络曲线可以表达为

$$u(t) = ke^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4)$$

最主要引起横向不稳定性的振荡模式 Mode 719 幅值包络曲线峰值拐点为临界点,分别以公式(4)进行拟合,可以得到此模式在流强 240 mA 时增长-阻尼率,如图 11 所示。其中增长率为 0.252 ms^{-1} ,阻尼率为 -0.5623 ms^{-1} 。

利用此方法对图 10(b)中所有具有明显增长-阻尼变化过程的模式进行测量,得到这些主要模式增长率和阻尼率分布如图 12 所示。图中所有模式的阻尼率均大于增长率,表明横向反馈系统对所有引起不稳定的振荡模式都具有很好的抑制水平,且均具有一定反馈裕度。

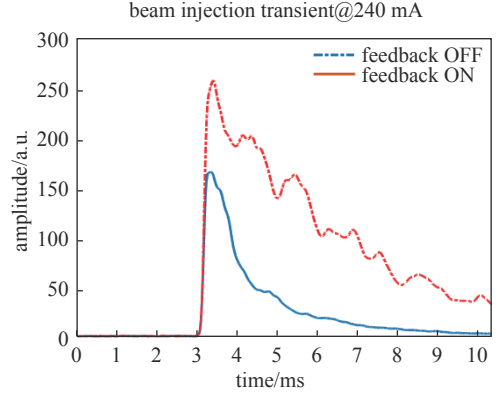


Fig. 8 Comparison of mode #719 amplitude variation during injection transient with feedback system ON/OFF

图 8 束流注入瞬态#719 模式在反馈系统 ON/OFF 下振幅变化对比

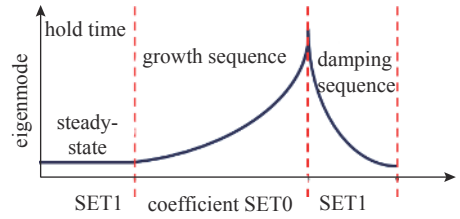


Fig. 9 Timing graph for the growth-damp measurements

图 9 增长-阻尼过程测量时序图

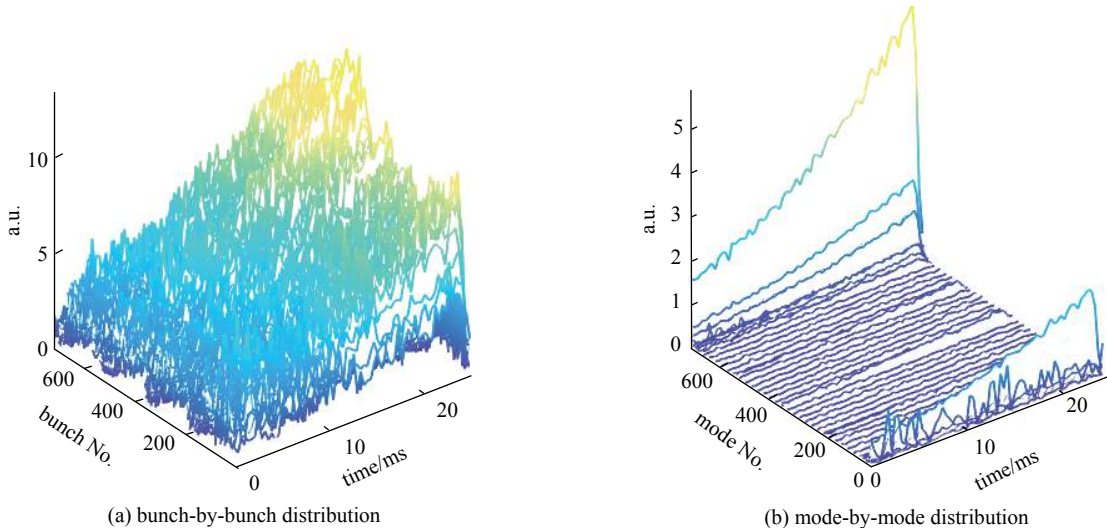


Fig. 10 Beam instability growth-damp transient distribution in bunches and modes

图 10 束流不稳定性增长-阻尼过程沿束团和模式分布

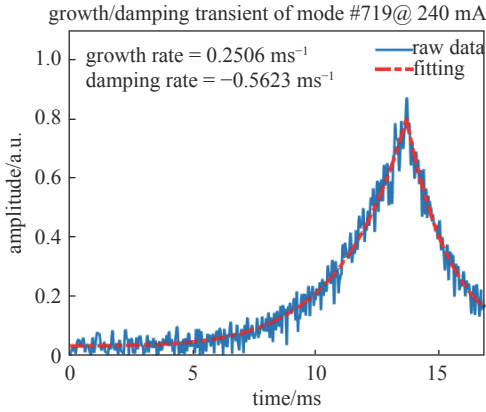


Fig. 11 Transverse coupled instability mode amplitude variation during injection transient

图 11 束流注入瞬态横向耦合不稳定模式振幅变化

在储存环中, 振荡模式的自然增长率与流强具有线性正相关性, 表达公式如下

$$\frac{1}{\tau_l} = -d_{\text{rad}} + c_l I_0 \quad (5)$$

式中: $\frac{1}{\tau_l}$ 为振荡模式的增长率; 系数 c_l 为正常数; I_0 为束流流强; $-d_{\text{rad}}$ 为储存环自然阻尼率。因此对于每一个模式都存在一个流强阈值。即高于此流强时模式增长率大于自然阻尼率, 必须通过横向反馈系统进行抑制。在运行环境下可以利用此线性关系, 只需在高于不稳定性阈值的流强范围内, 重复此模式增长率, 即可拟合公式(5), 从而得到此振荡模式高于噪声本底的临界点。对于最主要的#719 模式, 在流强 190~240 mA 变化范围内, 对公式(5)进行了拟合, 如图 13 所示^[1]。

此模式出现的束流阈值约为 50 mA, 自然阻尼率为 0.062 ms^{-1} 。当流强在设计上限 300 mA 时, 可通过拟合数据得到增长率约为 0.368 ms^{-1} , 由于反馈系统阻尼率在流强 240 mA 下为 0.5623 ms^{-1} , 高于流强在 240~300 mA 时增长率, 因此可以判定反馈系统在上海光源储存环全流强范围内, 对#719 模式均可有效抑制横向不稳定性, 且具有较高反馈裕度。

4 结 论

在束流诊断实验中, 利用升级后的横向反馈系统提供的数据采集和诊断工具, 分别对束流稳态和注入瞬态下横向振荡模式进行了测量并对反馈系统对横向不稳定性的抑制效果进行了评估。实验表明, 反馈系统在各种束流状态下都能有效地抑制横向不稳定性。通过设计增长-阻尼试验测量了主要引起横向不稳定性的振荡模式的自然增长率以及反馈系统对该模式的阻尼率。通过对增长率变化的线性拟合, 推算了主要振荡模式出现的临界条件及增长率自然阻尼特性。通过逐束团的束流诊断实验表明, 反馈系统提供的测量和诊断工具是束流研究的有力工具。在后续的束流诊断研究中, 会继续利用本文讨论的方法对束流不稳定性的变化以及反馈系统的抑制效果进行观测。得到光源二期升级改造全过程中束流阻抗变化对机器运行的影响, 为机器运行的优化提供数据支持。

致 谢 感谢上海光源运行组在束流诊断实验中提供的便利及协助。

参考文献:

- [1] Jaeschke E J, Khan S, Schneider J R, et al. Synchrotron Light Sources and free-electron lasers[M]. Switzerland: Springer Reference, 2016: 606-615.
- [2] Teytelman D. Architectures and algorithms for control and diagnostics of coupled-bunch instabilities in circular accelerators[D]. Stanford: Stanford University, 2003: 1-17.

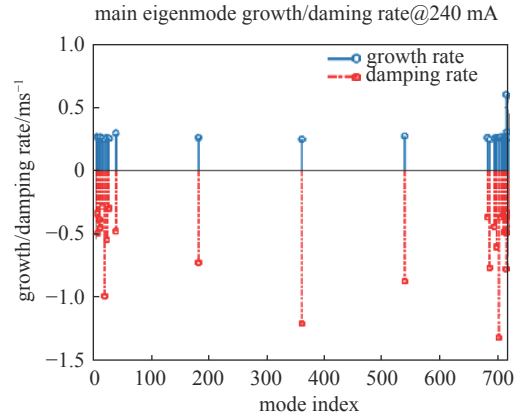


Fig. 12 Growth/Damping rate distribution for modes which showed obvious growing-damping sequence

图 12 具有明显增长-阻尼过程模式的增长率/阻尼率分布

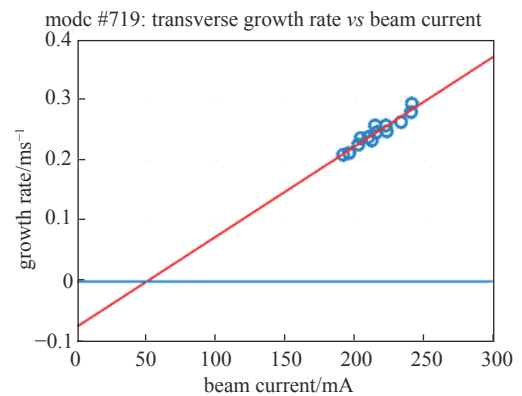


Fig. 13 Transverse growth rate linear fitting vs current for mode #719

图 13 #719 模式横向增长率线性拟合 vs 流强

- [3] Fox J, Larsen R, Prabhakar S, et al. Multi-bunch instability diagnostics via digital feedback systems at PEP-II, DA/spl Phi/NE, ALS and SPEAR[C]//Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference. 1999: 636-640.
- [4] Teytelman D. iGp12-720F signal processor technical user manual[EB/OL]. https://www.dimtel.com/_media/support/manuals/manual12_720f_screen.pdf.
- [5] 王娜, 许海生, 田赛克, 等. 高能同步辐射光源中的耦合阻抗及束流集体效应研究[J]. *原子能科学技术*, 2019, 53(9): 1601-1606. (Wang Na, Xu Haisheng, Tian Saik, et al. Study of beam coupling impedance and beam collective effect in high energy photon source[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, 53(9): 1601-1606)
- [6] 周泽然. 合肥光源数字横向逐束团反馈系统[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009: 10-20. (Zhou Zeran. HLS digital transverse bunch by bunch feedback system[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009: 10-20.)
- [7] 韩利峰. 横向反馈数字处理系统研究[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2009: 20-27. (Han Lifeng. Study of the digital transverse feedback system[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2009: 20-27)
- [8] Yang Yong, Leng Yongbin, Yan Yingbing, et al. Injection performance evaluation for SSRF storage ring[J]. *Chinese Physics C*, 2015, 39: 097003.
- [9] Peake D J, Rassool R P. Growth/damp measurements and bunch-by-bunch diagnostics on the Australian synchrotron storage ring[C]//Proceedings of PAC09. 2009: 4105-4107.
- [10] 张宁, 赖龙伟, 段立武, 等. 逐束团位置对束流横向反馈的影响分析[J]. *核技术*, 2017, 40(12): 1-5. (Zhang Ning, Lai Longwei, Duan Liwu, et al. Analysis of transverse feedback effect on beam using bunch-by-bunch position data[J]. *Nuclear Techniques*, 2017, 40(12): 1-5)
- [11] Teytelman D, Akre R, Fox J D, et al. Measurements of transverse coupled-bunch instabilities in PEP-II[C]//Proceedings of the 9th European Particle Accelerator Conference. 2004: 2834-2836.