

电子储存环同步工作点精确测量和应用

周逸媚¹ 许兴懿² 冷用斌^{1,2}

1(中国科学院上海高等研究院 上海 201210)

2(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 同步工作点的精确测量对于束流纵向动力学研究和束流稳定性提高都有着非常重要的意义。上海同步辐射光源搭建了一套逐束团三维位置诊断系统,可用于实时监测同步工作点。对比传统测量方法,该方法主要关注的是注入瞬态过程,不需要对高频腔压进行调制,在正常供光模式下即可实现同步工作点的高精度测量,不会干扰用户实验;重点观测补注电荷的纵向相位振荡,根据数学模型拟合出多个纵向参数,包括同步工作点。测量结果表明:上海光源同步工作点为0.007 3,拟合精度为95%;通过公式计算得到的储存环动量紧缩因子为 4×10^{-4} 。

关键词 上海光源, 同步工作点, 逐束团三维位置诊断系统, 补注电荷, 相位振荡

中图分类号 TL594

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.090103

Precise measurement and application of synchrotron tune at storage ring

ZHOU Yimei¹ XU Xingyi² LENG Yongbin^{1,2}

1(Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

2(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract [Background] The precise measurement of the synchrotron tune is of great significance for the study of beam longitudinal dynamics and the improvement of beam stability. In 2020, a bunch-by-bunch 3D position diagnosis system to measure the transverse position and longitudinal phase was built at Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF), it can also be used to monitor synchrotron tunes in real time. Compared with the traditional measurement method, the advantage of this method is that it does not need to modulate the RF cavity pressure. [Purpose] This study aims to achieve high-precision measurement of synchrotron tune in the normal operating mode without disturbing the user's experiments. [Methods] The phase oscillation of the refilled charge during the injection transient was extracted to effectively remove the interference of the RF system and the crosstalk between bunches. Correlation coefficient was used to obtain the bunch phase refilled with charge. Then, multiple longitudinal parameters, including the synchrotron tune, were fitted by mathematical model. [Results] The measurement results show that the synchrotron tune of SSRF is 0.007 3, and the fitting accuracy is 95%. The momentum compaction factor of storage ring directly calculated by the formula is 4×10^{-4} . [Conclusions] The bunch-by-bunch 3D position diagnosis system and refilled charge extraction algorithm provide a favorable tool for realizing high-precision measurement of synchrotron tune.

国家"万人计划"科技创业领军人才项目资助

第一作者: 周逸媚, 女, 1992年出生, 2020年于中国科学院大学获博士学位, 研究领域为加速器束流诊断相关研究

通信作者: 冷用斌, E-mail: lengyongbin@sinap.ac.cn

收稿日期: 2021-04-22, 修回日期: 2021-05-28

Supported by the Ten Thousand Talent Program, China

First author: ZHOU Yimei, female, born in 1992, graduated from University of Chinese Academy of Sciences with a doctoral degree in 2020, focusing on beam instrumentation

Corresponding author: LENG Yongbin, E-mail: lengyongbin@sinap.ac.cn

Received date: 2021-04-22, revised date: 2021-05-28

Key words SSRF, Synchrotron tune, Bunch-by-bunch 3D position diagnosis system, Refilled charge, Phase oscillation

在电子储存环中,同步工作点(也称为纵向工作点)是一个非常重要的参数,它定义为束团沿纵向平衡轨道作同步振荡时,绕环运动一圈所做振荡的周期数,同时它也可以表示为同步振荡频率和回旋频率的比值^[1]。同步工作点对于束流纵向动力学的研究有着重要意义,它与储存环动量压缩因子和色散函数等纵向参数也有着非常密切的关系。如若能够精确地测量和控制同步工作点,将有利于束流轨道的优化、束流稳定性的提高和束流寿命的提高。

通常情况下,同步振荡频率是纵向振荡的固有频率,在测量过程中不需要加外部激励,只需要对射频腔压的幅度进行调制,激发束流的纵向相干振荡,然后再利用频谱仪直接观测束流信号的频谱就可以得到^[2-4]。因此,常规的工作点测量方法都需要特殊的机器研究时间,且系统复杂,耗时长。对于上海光源来说,超导高频系统(Superconducting Radio Frequency System)的应用使得束流运行更加稳定,纵向振荡更加小,因此,很难从束流频谱中直接观测同步工作点。另外,由于需要保证用户的正常供光时间,所以很难提供机器研究时间用于同步工作点的测量。

目前,上海光源的超导高频系统还存在着高压功率源(High Voltage Power Supplies, HVPS)噪声耦合到束流输出信号中的现象^[5]。造成这种现象的主要原因是高压功率源输出模块使用脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)技术,当束流负载很大时,上海光源的低电平高频(Low Level Radio Frequency, LLRF)系统无法完全抑制这些干扰信号(包括低频电源信号、PWM调制信号、瞬态束流负载噪声及其数字混叠信号),于是它就会耦合到束流的纵向运动中去。上海光源红外线站的光通量测量实验已经检测出束流带有PWM调制信号频率,且随着电荷量增大,干扰信号也增大。这种来自束流的干扰信号会降低同步辐射光的品质,给用户束流实验结果带来不确定因素,同时也为同步工作点的测量带来了困难。

本文将提供一种基于逐束团三维位置诊断系统的同步工作点实时监测方法,该方法主要利用了注入瞬态过程这一特殊研究窗口^[6-7]。上海光源每5~10 min补注一次小电荷,期间它与原储存电荷发生融合,造成束团扰动。这个补注电荷遵从严格的同步衰减振荡,因此只需要将它剥离出来,再根据同步振荡公式拟合就可以获取所需的多个纵向参数,包

括同步工作点^[8]。该方法的优点是系统搭建简单,在日常供光模式下就可以测量同步工作点,无需对高频腔压进行调制,而且每5 min注入过程都可以测量一次,方便束测人员对该参数的实时监测和束流纵向不稳定性发生时的评估。表1列举了上海光源一些重要参数。

表1 上海光源重要参数
Table 1 Parameters of SSRF

参数 Parameter	值 Value
能量 Energy E / GeV	3.5
总电流 Current I_0 / mA	220
谐波数 Harmonics h	720
射频腔压 RF voltage V_{RF} / MV	4
射频频率 RF frequency f_{RF} / MHz	499.654
回旋频率 Revolution frequency f_c / kHz	694

1 基本测量原理

根据自动稳相原理,当粒子围绕同步粒子作相振荡运动的时候,粒子是稳定的^[9]。而一般情况下,粒子进入高频腔就会产生相移,非同步粒子的纵向位置差 z_d 和动量相对偏差 δ 表示为:

$$\begin{aligned} z_d &= z - z_s \\ \delta &= \frac{p - p_0}{p_0} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: z 和 p 代表粒子的相位和动量; z_s 和 p_0 代表同步粒子的相位和动量。因此在加速器的优化和控制中,需要监测粒子的相位振荡过程。当粒子做小振幅纵向振荡时,它围绕同步粒子作稳定相运动的解为^[10]:

$$z_d = z_m e^{-\alpha_s t} \cos(\sqrt{\Omega^2 - \alpha_s^2} t + \varphi_0) \quad (2)$$

式中: z_m 为相位振荡最大幅值; φ_0 为初始振荡相位。由式(2)可知,同步相位振荡是一种典型的阻尼振荡; Ω 是同步振荡频率; α_s 是有阻尼时振幅随时间呈指数函数下降的衰减率,其倒数为纵向阻尼时间常数 τ_s ,参量 Ω 和 α_s 都属于全体粒子的共性。

通常会用纵向工作点(v_s)来形容粒子共同的振荡频率,代表粒子绕环运动一圈的振荡周期数,定义为纵向的一圈振荡相移对 2π 的归一化值,也可用粒子纵向振荡频率 f_s 与回旋频率 f_c 的比值表示,是一个无量纲正数。

$$v_s = \frac{\phi(L)}{2\pi} = \frac{f_s}{f_c} \quad (3)$$

粒子的纵向振荡是一个缓慢振荡过程,通常需要上千圈(几ms)才能完成一个周期。

根据粒子相振荡方程推导,同步振荡频率还可以下公式表示^[11-12]:

$$v_s = \sqrt{\frac{ehV_{RF}\alpha_c[1 - (U_{rad}/eV_{RF})^2]^{1/2}}{2\pi E_0}} \quad (4)$$

式中: E_0 为粒子能量; h 为谐波数;由于 $U_{rad} \ll eV_{RF}$,通常可以暂时忽略辐射损失,那么从式(4)可以看出,同步工作点主要与动量紧缩因子(α_c)和射频腔压(V_{RF})有关。传统的同步工作点测量,通常采用调制射频腔压的幅度,激发束流纵向振荡的方式,进行频谱测量。反之,如果能够精确测量 v_s 值,就可以反推出 V_{RF} 等加速器参数实际值,从而更加清晰地了解束流纵向运动情况。

动量紧缩因子(α_c)也是环形加速器中一个非常重要的参数,它将横向与纵向运动特性联系起来了。定义为整体轨道长度 L (射频频率)的变化与粒子动量变化的比值:

$$\alpha_c = \frac{\Delta L/L}{\Delta p/p} = -\frac{\Delta f_{RF}/f_{RF}}{\Delta p/p} \quad (5)$$

一般情况下,动量紧缩因子的测量非常不方便,需要大大改变粒子能量,诸如使用自旋共振退极化的方式来测量能量和高频腔频率的变化^[13-14]。此

外,在日常加速器工作中,轨道长度也易受到外界温度的影响而发生变化,从而造成动量紧缩因子和同步工作点的变化。然而根据式(4),动量紧缩因子可写成:

$$\alpha_c = \frac{2\pi E_0 v_s^2}{ehV_{RF}} \quad (6)$$

从式(6)中可以看出,动量紧缩因子与同步工作点和高频腔压直接相关。如果已知加速器运行状态,在精确测定同步工作点后可通过式(6)直接计算出动量紧缩因子。

2 逐束团三维位置诊断系统简介

上海光源开发了一套逐束团三维位置诊断系统,如图1所示。系统主要由硬件和软件两部分构成,硬件包括纽扣电极、高采样率宽带示波器(20 GS·s⁻¹, 6 GHz)和等相同轴电缆等,软件主要是由相关函数矢量法、补注电荷提取算法以及算数拟合法等组成的软件包。由于纽扣探头拾取的信号中已经包含了束团电荷量、横向位置和纵向相位等重要信息,因此可用示波器直接采集纽扣电极信号,既降低了模拟前端带来的噪声,又减少了束团间串扰和反射信号的干扰^[15-16]。

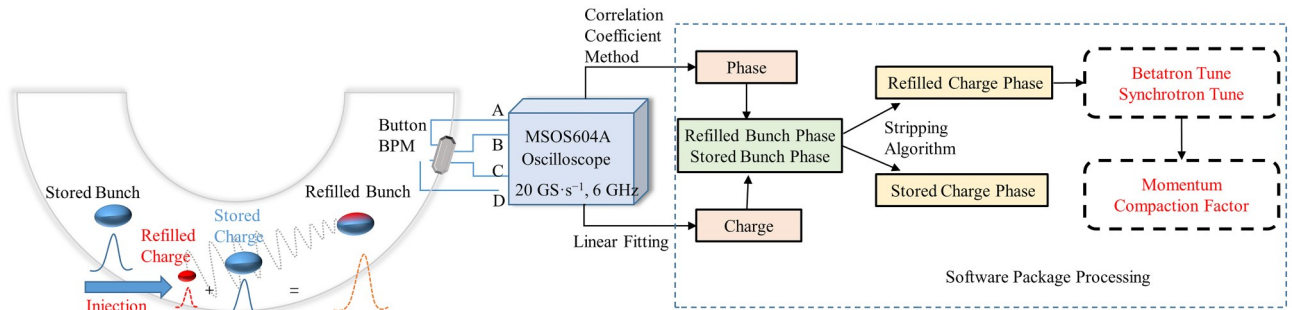


图1 上海光源逐束团三维位置诊断系统框图
Fig.1 The diagram of SSRF bunch-by-bunch 3D position diagnosis system

在正常供光模式(top-up 模式)下,上海光源储存环全环共填充720个束团。逐束团三维位置诊断系统在一次采集后就可以监测到每一个束团7000多圈的数据,而每一圈的每个束团都能获得40个采样点。由于示波器采样率不是储存环射频频率的整数倍,因此对于同一个束团不同圈的数据在时间轴上有相位差^[17]。可利用多圈数据拼接的方式实现束团等效响应函数的构建,再通过实测数据与响应函数之间的矢量匹配来获取逐束团逐圈的相位和幅度信息^[18]。

同步工作点表现的是所有束团的共性行为,想

要在正常供光模式下实现同步工作点的测量是很困难的。而基于这套逐束团三维位置诊断系统就可以在注入瞬态过程中捕捉纵向相位同步振荡过程,从而利用算数拟合的方式获取多个束流纵向参数,包括同步工作点。在上海光源top-up 模式下,为了补充束流运行中损失的能量,每5~10 min补注一次小电荷束团。如图1所示,在这个过程中,补注电荷围绕原有的储存电荷振荡,在短时间内发生融合,融合后称该束团为补注束团。从补注束团的相位频谱中也很难以分辨出同步工作点,因此需要剔除其中储存电荷部分。而采用补注电荷提取算法,就是基于储

存电荷与注入前储存束团的运动行为相似这一假设上,从原始信号中剥离储存电荷信号,公式表现为:

$$V_i = k_s Q_s + C_i \quad (7)$$

$$V_j = k_s Q_s + k_r Q_r + C_j \quad (8)$$

式中: V_i 、 V_j 分别为储存束团和补注束团的原始信号,其中储存电荷和补注电荷的信号大小 ($k_s Q_s$, $k_r Q_r$) 与电荷量 Q_s 、 Q_r 相关。在实验中,可认为高频系统的干扰信号对于储存束团和补注束团的影响是相同的 ($C_i = C_j$),则两式相减即可扣除干扰和储存电荷信号。

事实证明,提取出来的补注电荷相位信息符合同步振荡公式,根据算数拟合就可以直接获取同步工作点,此外通过公式计算也可以得到动量紧缩因子这一重要储存环参数。

3 束流实验及结果

束流实验在上海光源正常供光模式下进行,利用示波器的触发模式,捕捉注入瞬态过程。图2为全环720个束团top-up填充模式,注入前后电荷量分别由注入前200圈数据和注入后稳定200圈数据的平均值计算获得。从图2中可以明显看到,补注束团的位置,电荷量差值即为补注电荷,约为20 pC。基于逐束团三维位置诊断系统的相关函数矢量法可以实现逐束团相位的高精度测量,分辨率好于0.2 ps。图3为其中一组注入后束团相位的实验结果,从图3中可以看到,储存束团自身存在着纵向振荡,而补注束团只能看到补注电荷与储存电荷融合后的结果。观测储存束团频率,如图4所示,可以看到明显的横向工作点(0.20,0.33),但由于受到高频系统干扰信号的影响,耦合到纵向振荡中的频率(0.009、0.011)掩盖了纵向工作点,所以一般情况下很难从储存束团频谱中直接分辨出纵向工作点。

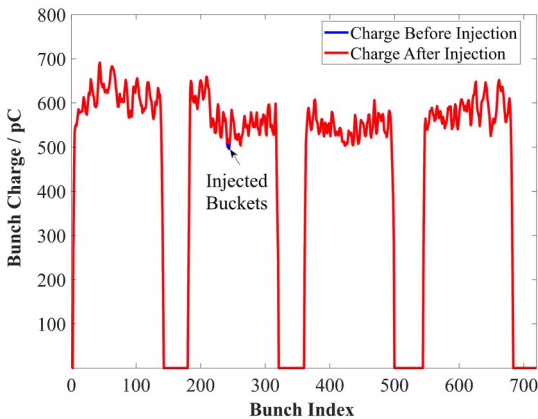


图2 上海光源top-up填充模式下注入前后电荷量
Fig.2 Bunch charge before and after injection in top-up filling mode of SSRF

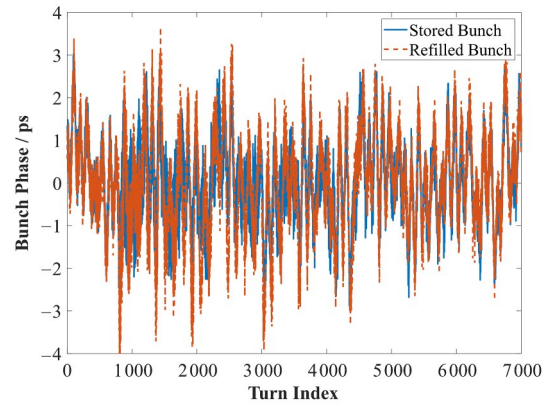


图3 储存束团与补注束团相位振荡波形
Fig.3 Phase oscillation waveform of stored bunch and refilled bunch

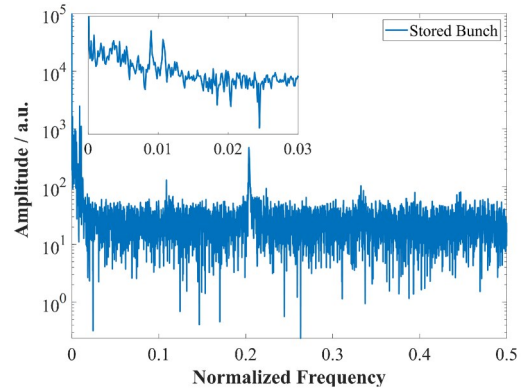


图4 储存束团相位归一化频谱
Fig.4 Normalized frequency spectrum of stored bunch

要想获得储存环纵向工作点,必须从补注束团中剥离出补注电荷相位。根据纵向相位理论,补注电荷应该表现为同步衰减振荡。基于逐束团三维位置诊断系统足够高的幅度和相位提取精度,可考虑从采样的原始信号中提取补注电荷信号,如何从补注束团中扣除储存电荷相位和位置的影响是测量的难点。假设注入的储存电荷与靠近补注位置的储存束团信号波形一致,可直接将两信号相减,获得补注电荷原始信号,虽然信号幅度较小,但在最初的一千圈中补注电荷晃动在百皮秒量级,依然可以根据相关函数矢量法进行补注电荷的等效响应函数构建和模式匹配。在图5中,可见实测补注电荷逐圈相位满足明显的同步衰减振荡,利用式(2)进行算数拟合,得到多个重要的同步振荡参数,如最大相位振荡振幅(151.2 ps)、初始振荡相位(2.6 rad)、纵向阻尼时间常数(1950圈 $\approx$ 2.8 ms)、同步振荡频率($\frac{0.046}{2\pi} = 0.0073$),拟合精度为95%。观察补注电荷相位的归一化频谱,如图6所示,可以看到明显的纵向工作点(0.0073),与公式拟合结果相吻合。因此,同步工作

点的测量可通过补注电荷纵向相位振荡的拟合直接获得。

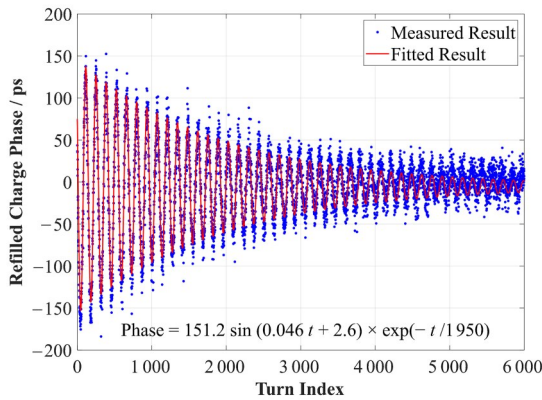


图5 补注电荷实测逐圈相位与拟合结果
Fig.5 Measured turn-by-turn phase and fitting results of refilled charge

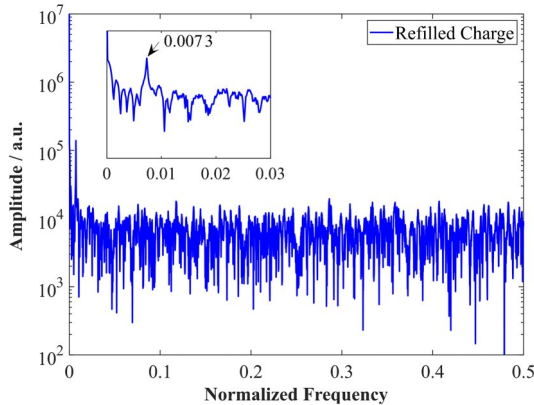


图6 补注电荷相位归一化频谱
Fig.6 Normalized frequency spectrum of refilled charge

同步工作点的精确测量对于储存环动量紧缩因子的计算十分重要,根据式(6)可知,此次测量中动量紧缩因子结果为 4×10^{-4} ,该值与上海光源设计值相近^[19],主要的误差来源于上述同步工作点的拟合误差。

4 结语

上海光源逐束团三维位置诊断系统的搭建实现了正常供光模式下储存环同步工作点的实时监测,避免了复杂的射频腔压调制和冗长的机器研究时间。该系统主要依赖于高精度的数据采集设备(20 GHz 高采样宽带示波器),以及新开发的软件包(包括相关函数矢量法、补注电荷提取算法和算数拟合法)。目前,实验完成了注入瞬态过程中补注电荷和储存电荷的分离,并从补注电荷的相位振荡中提取了多个纵向参数,同步工作点的测量结果为0.0073,精度为95%。在已知机器运行状态下,同步

工作点的精确测量提供了上海光源储存环动量紧缩因子直接计算获得的可能性,结果为 4×10^{-4} 。

致谢 感谢上海光源束测组其他同事对此项工作所做的支持和贡献。

参考文献

- 1 孙葆根. 加速器中束流诊断技术[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2014.
SUN Baogen. Beam diagnosis technology in accelerator [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2014.
- 2 孙葆根, 何多慧, 高云峰, 等. 合肥光源的工作点测量系统[J]. 核技术, 2001, 24(1): 47 - 51.
SUN Baogen, HE Duohui, GAO Yunfeng, *et al.* Tune measurement system for HLS[J]. Nuclear Techniques, 2001, 24(1): 47 - 51.
- 3 Wang M H, Sato Y, Lee S Y. First experimental test of emittance measurement using the quadrupole-mode transfer function[C]. Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference, Portland, OR, USA. IEEE, 2003: 3240 - 3242. DOI: 10.1109/PAC.2003.1289874.
- 4 马力, 曹建社, 汪林. BEPC 储存环束流振荡频率测量[J]. 高能物理与核物理, 2000, 24(8): 770 - 774.
MA Li, CAO Jianshe, WANG Lin. Tune measurements in the BEPC storage ring[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2000, 24(8): 770 - 774.
- 5 Xia Y Y, Zhao Z T, Zhao Y B, *et al.* Transfer function measurement for the SSRF SRF system[J]. Nuclear Science and Techniques, 2019, 30(6): 101. DOI: 10.1007/s41365-019-0612-4.
- 6 Jiang B C, Lin G Q, Wang B L, *et al.* Multi-bunch injection for SSRF storage ring[J]. Nuclear Science and Techniques, 2015, 26(5): 050101. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.26.050101.
- 7 周逸媚, 冷用斌, 张宁, 等. 电子储存环注入过程中补注电荷的三维位置信息提取[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(11): 2238 - 2244. DOI: 10.7538/yzk.2019.youxian.0867.
ZHOU Yimei, LENG Yongbin, ZHANG Ning, *et al.* 3D position information extraction of refilled charge during injection process of electron storage ring[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, 54(11): 2238 - 2244. DOI: 10.7538/yzk.2019.youxian.0867.
- 8 Zhou Y M, Chen Z C, Gao B, *et al.* Bunch-by-bunch phase study of the transient state during injection[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and

- Associated Equipment, 2020, **955**: 163273. DOI: 10.1016/j.nima.2019.163273.
- 9 裴元吉, 王相綦. 加速器物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2012.
PEI Yuanji, WANG Xiangqi. Accelerator physics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2012.
 - 10 刘祖平. 环形加速器粒子纵向动力学简介[R]. 合肥: 中国科学技术大学, International Organization of Chinese Physicists and Astronomers (OCPA), 2014.
LIU Zuping. The basics of particle longitudinal dynamics in circular accelerators[R]. Hefei: University of Science and Technology of China, International Organization of Chinese Physicists and Astronomers (OCPA), 2014.
 - 11 Wiedemann H. Particle accelerator physics[M]. Springer, 2015.
 - 12 Jaeschke E J, Khan S, Schneider J R, *et al.* Synchrotron light sources and free-electron lasers: accelerator physics, instrumentation and science applications[M]. Springer, 2016.
 - 13 Muller A S, Kalefa A B, Birkel I, *et al.* Momentum compaction factor and nonlinear dispersion at the ANKA storage ring[C]. Proceedings of 7th European Particle Accelerator Conference, Lucerne, Switzerland, 2004.
 - 14 Muller A S, Birkel I, Huttel E, *et al.* Energy calibration of the ANKA storage ring[C]. Proceedings of 7th European Particle Accelerator Conference, Lucerne, Switzerland, 2004.
 - 15 周逸媚, 冷用斌, 许兴懿, 等. 储存环逐束团相位测量系统信号处理算法优化[J]. 强激光与粒子束, 2020, **32**(7): 103 - 108. DOI: 10.11884/HPLPB202032.200033.
ZHOU Yimei, LENG Yongbin, XU Xingyi, *et al.* Signal processing algorithm optimization of bunch-by-bunch phase measurement system for storage ring[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, **32**(7): 103 - 108. DOI: 10.11884/HPLPB202032.200033.
 - 16 Zhou Y M, Chen H J, Cao S S, *et al.* Bunch-by-bunch longitudinal phase monitor at SSRF[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, **29**(8): 113. DOI: 10.1007/s41365-018-0445-6.
 - 17 Yang Y, Leng Y B, Yan Y B, *et al.* Development of the bunch-by-bunch beam position acquisition system based on BEEcube[J]. Nuclear Science and Techniques, 2016, **27**(2): 47. DOI: 10.1007/s41365-016-0035-4.
 - 18 Xu X Y, Leng Y B, Zhou Y M, *et al.* Bunch-by-bunch three-dimensional position and charge measurement in a storage ring[J]. Physical Review Accelerators and Beams, 2021, **24**(3): 032802. DOI: 10.1103/physrevaccelbeams.24.032802.
 - 19 Wang X, Tian S Q, Liu G M, *et al.* Low-alpha optics design for SSRF[J]. Nuclear Science and Techniques, 2010, **21**(3): 134 - 140. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.21.134-140.