

高频噪声对上海光源储存环束流品质的影响

冀锐敏^{1,2} 田顺强^{1,2} 后 接^{1,2} 陈光玲^{1,2} 刘桂民¹

1 (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 为了向用户提供高品质的同步辐射光, 储存环束流应具有好的性能。储存环高频噪声的存在会影响到束流品质。本文基于 DKW 理论, 研究了高频幅度噪声与相位噪声对束流能散度的影响, 并分析了束团长度拉伸效应, 以及对小间隙插入件 U27 上微聚焦光束品质的影响。模拟结果显示, 位相噪声对束流品质以及辐射光品质的影响比较显著, 且阶次越高的辐射光受高频噪声的影响越大。

关键词 上海光源储存环, 高频噪声, DKW 理论, 束团长度, 能散, 辐射光通量

中图分类号 O572.21*1

上海光源最终将建有六十多条光束线和上百个实验站^[1,2]。许多实验均需亮度高和分辨率好的同步辐射光。同步辐射光的性能与束流品质直接相关, 储存环束流能散增大、束团长度拉伸、发射度增大, 都会影响光束的亮度以及时间和空间分辨率^[3]。

引起储存环束流能散和束团长度增大的原因与阻抗^[4]和低频噪声等有关。上世纪 80 年代, Dôme^[5]和 Krinsky^[6]等分别基于扩散理论计算了纵向运动中的高频噪声的扰动。1998 年, 美国 Advanced Light Source (ALS) 的红外辐射光不稳定, 抑制高频位相噪声后, 红外光束线的信噪比得以提高^[7,8]。

上海光源光束线设计中用到了 9 次以上高次谐波, 而束流品质恶化对阶次越高的同步辐射谐波的影响会越大, 所以对束流稳定性要求非常高。本文基于 Dôme, Krinsky 和 Wang 的研究方法(DKW 理论), 研究了含高频噪声的纵向运动随时间的演化, 计算了束流能散度和束团长度的具体变化, 并应用 SPECTRUM 程序^[9]计算了插入件 U27 上微聚焦光束高次谐波辐射的通量密度与通量的变化。

1 DKW 理论

在考虑高频噪声的前提下, 单电子的纵向运动方程可以写为^[5]:

$$P_{n+1} - P_n = -K_0(1 + a_n) \sin \varphi_n \quad (1)$$

$$\phi_{n+1} - \phi_n = P_{n+1} + \varphi_{n+1} - \varphi_n \quad (2)$$

式中, $P = 2\pi h m (\Delta p_n / p_s)$, $K_0 = \Omega^2 T_0^2$, Ω 为小振幅振荡频率, T_0 是回旋周期。 E_s 、 p_s 、 ω_s 、 Φ_s 分别为同步粒子的能量、动量、振荡频率、通过加速腔时的位相。 Φ 、 P 表示任意粒子相对于同步粒子的位相、动量。 φ_n 、 a_n 分别表示粒子第 n 次经过高频加速腔时候遇到的位相噪声与幅度噪声。

以时间为自变量时, 我们考虑的时间尺度远大于回旋周期 T_0 。定义 $P = P_n / T_0$, 就可以得到 Φ 、 P 、随时间 t 变化的近似微分关系^[5]:

$$\dot{\Phi} = P + \psi(t) \quad (3)$$

$$\dot{P} = -\Omega^2(1 + a(t)) \sin(\varphi) \quad (4)$$

相关系数 $\Omega = [2\pi h m (\text{eV} / p_s, v_s)] / T_0$ 。

由正则共轭变量(P , Φ)可以变换出另一对正则共轭变量(J , θ), 称为作用量-角变量。无高频噪声扰动时, 即当 $a=0$, $\psi=0$ 时, 作用量 $J = (1/2\pi) \oint P d\Phi$ 是守恒的。有噪声扰动的情况下, Dôme 和 Krinsky 等^[5,6]假设作用量 J 随时间演化的过程是马克夫扩散过程, 即粒子分布函数 $\rho(J, t)$ 满足的一维虎克-普朗克方程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial J} \left[D(J) \frac{\partial \rho}{\partial J} \right] \quad (5)$$

分开考虑高频位相、幅度噪声的作用, 扩散系数 $D(J)$ 可以拆分为 $D_\phi(J)$ 、 $D_a(J)$ 。本文考虑的噪声均为均值为零的高斯白噪声, 扩散系数最终可写为^[5]:

$$D_a^{\text{white}} = 4 \sum_{m=2,4,\dots}^{\infty} \frac{(m\omega_s)^4}{\sin h^2(mv)} S_a$$

$$= \frac{32}{\pi^2} \Omega^4 S_a k^4 K(k) B_1(k) \quad (6)$$

$$D_\phi^{\text{white}} = 4 \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{(m\omega_s)^4}{\cos h^2(mv)} S_\phi$$

$$= \frac{8}{\pi^2} \Omega^4 S_\phi k^2 K(k) [B(k) - 4k^2 B_1(k)] \quad (7)$$

S_a 、 S_ϕ 分别为幅度、位相噪声的谱密度。参数 J 、 $\omega_s(J)$ 、 $v(J)$ 可由中间变量 $k(0 \leq k < 1)$ 表示, $J = (8\Omega k^2 \pi)$ $B(k)$, $\omega_s = \Omega(\pi/2K(k))$, $v = \pi/2K(1-k)^{1/2}/K(k)$, $K(k)$ 是第一类椭圆完全积分。其中

$$B(k) = \int_0^{\pi/2} \cos^2 x dx / \sqrt{1 - k^2 \sin^2 x}$$

$$B_1(k) = \int_0^{\pi/2} \sin^2 x \cos^2 x \sqrt{1 - k^2 \sin^2 x} dx$$

2 扩散系数与束流分布

上文的扩散系数为变量, 扩散方程并无具体的解析解, 故用模拟计算求解虎克-普朗克方程。

首先分两步计算了扩散系数, 先计算 $D(k)$ 和 $J(k)$, 再得出 $D(J)$ 。本文考虑的边界条件为, 粒子到达最大边界后会丢失, 且中心处无新粒子产生。初始分布 $\rho_0(J)$ 取决于 (P, Φ) 坐标中粒子的初始分布。粒子在 (P, Φ) 坐标中作小振幅的纵向振荡, 且初始分布为高斯分布。则粒子在作用量-角变量空间中的初始分布为^[5]:

$$\rho(J, 0) = e^{-J/u} / u, u = \Omega(2h\pi\sigma_1 / C_0)^2 \quad (8)$$

式中, σ_1 是束团长度, Ω 为纵向小振幅振荡频率。因为考虑的时间尺度远大于回旋周期 T_0 , 所以采用的时间步长为回旋周期。本文计算了即 5000 个回旋周期, 约两个纵向阻尼时间后的粒子的分布。

图 1、图 2 为不同大小的高频噪声引起的扩散系数 $D(x)$ 。扩散系数随着噪声的增大而增大, 最大边界处的扩散系数更加明显, 但由于粒子的分布形态, 中心处的扩散作用更大一些。对比图 1、图 2, 相位噪声引起的扩散系数更大一些, 尤其是在中心处。原因是理论推导扩散系数时, 幅度噪声仅取了偶数项, 而位相噪声取了奇数项, 如式(6)和式(7)所示。

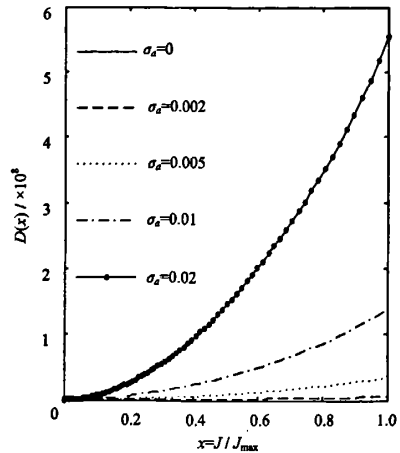


图 1 高频位相噪声引起的扩散系数
Fig.1 Diffusion coefficients for RF phase

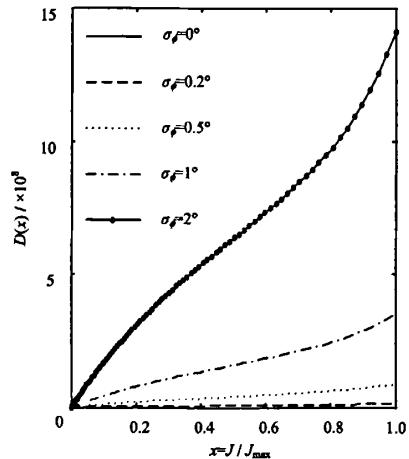


图 2 高频幅度噪声引起的扩散
Fig.2 Diffusion coefficients for RF amplitude

图 3、图 4 分别为在图 1、图 2 所示的扩散系数作用下的粒子分布。由图 1 和图 2 可见, 中心处的扩散系数为 0, 靠近中心处的扩散系数也很小, 所以在以上噪声作用下, 粒子分布的变化并不是很大。图 3 中各噪声作用后的束团长度为 4 mm、4.1 mm、4.4 mm、5.5 mm 和 9 mm, 能散为 1‰、1.025‰、1.1‰、1.375‰和 2.25‰。图 4 对应的束团长度均为 4 mm, 能散度均为 1‰。以上差异的原因是由于粒子主要集中在中心区域, 且当粒子接近最大边界处时已经丢失。所以靠近中心处的扩散系数越大, 粒子分布的变化就越大。

以上结果显示, 位相噪声对束团尺寸、束流能散的影响会更大。

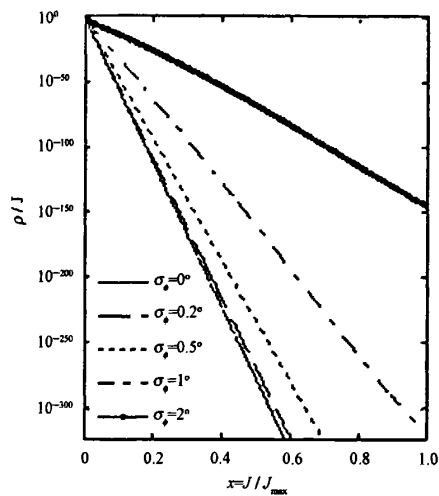


图 3 高频幅度噪声对束流分布的影响
Fig 3 Beam distribution under the influence of RF

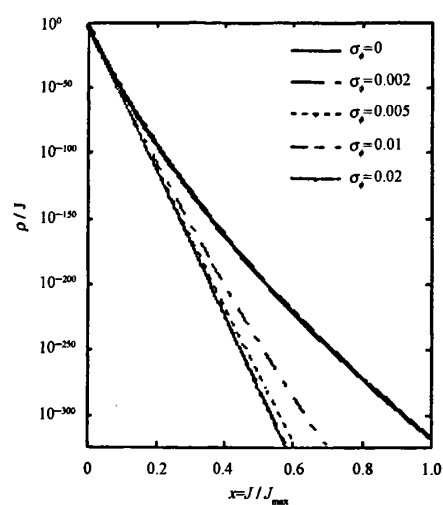


图 4 高频位相噪声对束流分布的影响
Fig 4 Beam distribution under the influence of RF

3 光束品质

为进一步了解高频噪声对光束线品质的影响，本文采用 SPring-8 计算光束线品质的程序 SPECTRUM，计算了上海光源插入件 U27 上微聚焦这条光束线的光通量密度与光通量的变化。

此处，主要计算了各种位相噪声对距离光源 30 m 处 1 mm×1 mm 的方孔接收到的 7 次、5 次辐射谐波光通量的变化，如表 1 所示。与距离光源 30 m 处 x、y 轴上±1 mm 范围内的 7 次辐射谐波通亮密度的变化，如表 2 所示。

表 1 离光源 30 m, 1 mm×1 mm 狭缝处通量的变化
Table 1 Concrete changes of flux at a slit 1 mm×1 mm, 30 m from source according to RF phase noises

高频噪声 RF phase noise	0°	0.2°	0.5°	1°	2°
7 次谐波 7 th harmonic	1.282	1.268	1.229	1.096	0.7942
百分比 Percentage	100%	98.91%	95.87%	85.49%	61.95%
5 次谐波 5 th harmonic	9.223	9.152	8.936	8.129	5.952
百分比 Percentage	100%	99.23%	96.89%	88.14%	64.53%

表 2 7 次谐波在 x、y 轴上通量密度的变化
Table 2 Concrete changes of flux of 7th harmonic at x, y axis according to RF phase noises

高频噪声 RF phase noise	0°	0.2°	0.5°	1°	2°
y 轴光通量密度 Density on y axis	1.379	1.361	1.308	1.132	0.726
百分比 Percentage	100%	98.69%	94.86%	82.09%	52.65%
x 轴光通量密度 Density on x axis	1.370	1.353	1.301	1.126	0.726
百分比 Percentage	100%	98.76%	94.96%	82.19%	52.98%

表 1 中，狭缝处的 7 次谐波光通量的单位是 10¹² photons/(s·1%*B·W*)⁻¹，5 次谐波光通量的单位为 10¹¹ photons/(s·1%*B·W*)⁻¹。

表 2 中，x、y 轴上光通量密度的单位均为 10¹⁵ photons/mm⁻² (s·1%*B·W*)⁻¹。根据以上结果，可见当高频位相噪声大于 1° 后插入件 U27 微聚焦这条光束线的辐射光通量或通亮密度的变化已经非常明显。

4 结论

计算结果表明，对于高频幅度噪声与同等百分比大小的高频位相噪声，位相噪声对束团尺寸及束流能散的影响会更大。同时表明，阶次越高的插入件谐波辐射强度受高频噪声的影响越大。

辐射强度随时间的变化会给相关实验带来一定的困难。进行纳米微机电系 (Micro-Electro Me-

chanical Systems, MEMS)系统和半导体器件的集成电路(Integrate circuit, IC)纳米光刻时,为了在曝光面上形成均匀的扫描常需要对扫描速度等进行控制。辐射强度比较大的抖动则会使得这种操作更为艰难。

目前上海光源尚未建成,设计中提出的要求为高频位相噪声小于 1° , 幅度噪声小于 1%。根据计算结果,大于 1° 的位相噪声会引起比较大的光通量降低,而小于 0.5° 的位相噪声引起光通量降低很小。所以,小于 1%幅度噪声、小于 0.5° 的位相噪声引起的上海光源插入件 U27 上光束线高次谐波辐射强度抖动很小。

参考文献

- 1 XU Hongjie, ZHAO Zhentang. AIP Conference Proceedings, 2007, 879: 54–57
- 2 LIU Guimin, DAI Zhimin, LI Haohu, *et al.* High Energy Phys Nucl Phys, 2006, 30(z1): 144–146
- 3 WANG Shuhong, PEI Guoxi, SUN Yaolin. High Energy Phys Nucl Phys, 2006, 30(z1): 150–152
- 4 ZHAO Zhentang, JIANG Bochong. High Energy Phys Nucl Phys, 2004, 28(11): 1209–1213
- 5 Dôme G. CERN Report, 1987, (87-03): 370–401
- 6 Krinsky S, Wang J M. Part Accel, 1982, 12: 107–112
- 7 Tom Scarvie, Nord Andresen. Infrared Phys Technol, 2004, 45: 403–408
- 8 Byrd J M. Proc PAC, 1999, 1806–1808
- 9 Takashi Tanaka, Hideo Kitamura. J Synchrotron Rad, 2001, 8: 1221–1228

RF noise effects on beam in SSRF storage ring

JI Ruimin^{1,2} TIAN Shunqiang^{1,2} HOU Jie^{1,2} CHEN Guangling^{1,2} LIU Guimin¹

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

2 (Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) is a medium energy third generation light source under construction. For providing high quality radiations to the users, it is a must to have high quality beam, which will be affected by RF noise in the storage. In this paper, effects of the RF phase noise and amplitude noise, and increase of the bunch length, on the beam energy spread of SSRF storage ring are investigated based on the DKW theory. The micro-focus radiation flux and flux density, which is delivered from insertion device U27, are particularly calculated with SPECTRUM. The results reveal that RF phase noise conduct greater influence on radiation compared with RF amplitude noise and the higher mode of radiation suffers more.

Key words SSRF storage ring, RF noise, DKW theory, Bunch length, Energy spread, Photon flux

CLC O572.21*1