

文章编号: 1007-4627(2015)03-0296-05

实验环Betatron振荡随机冷却的模拟

胡雪静^{1,2}, 原有进¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 随机冷却是一种基于带宽反馈系统对束流振荡进行衰减的冷却方法, 更适合冷却较大发射度和动量分散的次级粒子束, 与电子冷却互补, 可以得到更高质量的束流。兰州重离子研究装置(HIRFL)目前处于冷却存储环的实验环随机冷却系统的设计和建造阶段。通过对横向Betatron振荡的模拟, 得到了提高系统带宽、增加探测器(Pick-up)和冲击器(Kicker)的个数、降低系统噪声温度等对缩短冷却时间和减小冷却平衡值的重要作用。同时, 分析了较大的动量分散或较大的放大器增益对Betatron振荡冷却过程产生的加热现象。

关键词: 随机冷却; Betatron振荡; 冷却时间; 冷却平衡值

中图分类号: O572.21⁺¹ **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.03.296

1 引言

束流冷却的目的是在没有粒子损失的情况下减小束流尺寸以及能量分散, 从而提高束流的密度^[1]。束流温度和束流冷却的概念来源于气体动力学。假设储存环中有一团束流, 粒子将会围绕束团中心而振荡, 而且振荡的速度越大, 束流温度就越高, 束团的尺寸也就越大。束流冷却就是减小粒子振荡的幅度, 从而也就降低了束流的温度。

同电子冷却^[2]相比, 随机冷却更适合冷却较大发射度和动量分散的束流^[3]。兰州重离子研究装置(Heavy Ion Research Facility in Lanzhou)对于重离子物理研究发挥了巨大作用。随机冷却对于得到更高质量的束流具有非常重要的作用, 因此在重离子研究装置上设计和建造随机冷却系统具有重大意义^[4]。

随机冷却对于Betatron振荡的冷却机制^[5]如图1所示。位于上游的探测器(Pick-up)探测到粒子的水平或垂直位移偏差, 然后这一误差信号经过放大器后作用到下游的冲击器(Kicker)处, 使冲击器对该粒子作用一个与该位置误差信号成比例的角度改变。一般情况下, 探测器和冲击器之间的相移是四分之一波长的奇数倍 $(2n+1) \cdot 90^\circ (n=0, 1, 2, \dots)$ 。以单粒子模型为例, 如果探测器在粒子振幅的峰值处探测到其位移误差, 那么冲击器将在粒子振幅为零的地方对其进行角度校正, 如果校正踢力合适, 那么粒子从此将沿着理想轨道运动,

这样就能达到完全校正, 当然这是非常理想的情况, 如图2(a)所示。其他非理想的情况如图2(b)所示, 如果探测器在粒子振荡非波峰的位置处探测到粒子位移误差信号, 那么冲击器也将在粒子振幅的非零处对其进行校正, 此时, 粒子只能得到部分校正, 并没有被冷却到理想轨道上。粒子需要重复这一过程, 直到从此沿理想轨道运动。因此, 粒子需要经过多圈才能被完全冷却, 这是随机冷却系统中最常见的情形。还有一种情形, 则完全无法将束流冷却, 如图2(c)所示, 探测器探测不到粒子的位移的误差信号, 因此也就无法在冲击器处对其进行角度校正。实际设计和建造中应避免此种情况的发生。

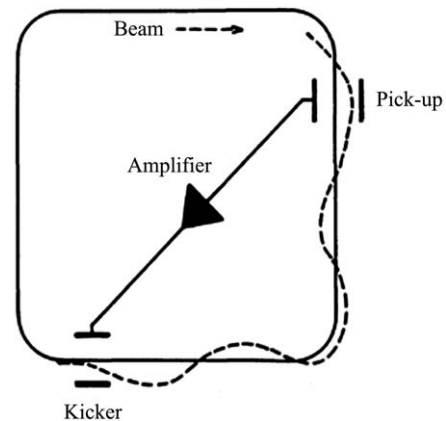


图1 Betatron振荡随机冷却原理

收稿日期: 2014-08-25; 修改日期: 2014-10-23

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体(11221064); 国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(2014CB845500)

作者简介: 胡雪静(1986-), 女, 河南安阳人, 学生, 博士, 从事加速器物理研究; E-mail: huxuejing@impcas.ac.cn。

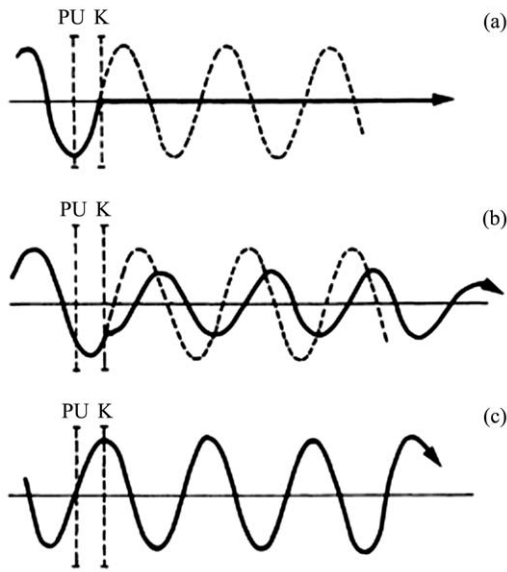


图 2 Betatron振荡相位的重要性

对于多粒子系统，探测器每次探测到一团粒子的平均位移，在冲击器处对这一团粒子进行整体校正。将每个这样的一团粒子称之为一个样本，且总的粒子平均分配给每个样本。假设系统带宽恒定，那么样本的数量不变^[5]。如果粒子总数较多，分配给每个样本的粒子数就越多，那么冷却系统对样本中的每个粒子的作用效率就越小，所以冷却时间也就越长。反之，如果总的粒子数较少，那么每个样本内的粒子就越少，冷却系统对样本内每个粒子的作用效率就越大，冷却率也就越大。即使粒子总数很少，使得每个样本内只有一个粒子，那么单粒子模型仍然成立。因此，随机冷却对较少的粒子数有较高的冷却率和较短的冷却时间。

此外，随机冷却一个重要的特征是，粒子与其产生的校正信号必须同时到达冲击器处，才能达到同步校正。实际上，由于校正信号经过电子学系统后被延迟，因此粒子要经过一圈或几圈后才能和校正信号同时到达冲击器。所以，实际处理过程中，仍需要使用延迟线来保持粒子和校正信号的同步性。

2 随机冷却理论基础

随机冷却系统的冷却率方程^[5]为

$$\frac{1}{\tau} = \frac{W}{N} [2g(1 - \tilde{M}^{-2}) - g^2(M + U)] \quad (1)$$

其中： W 为系统带宽； N 为束流粒子数； U 为信噪比； \tilde{M} 和 M 分别为从冲击器到探测器以及从探测器到冲击器的混合因子^[6]； g 为系统增益^[7]。

$$M^{-1} = \frac{\Delta T_{kp}}{T_0} = \frac{2WT_{kp}\eta_{kp}\Delta p}{p} \quad (2)$$

$$\tilde{M}^{-1} = \frac{\Delta T_{pk}}{T_0} \approx \frac{2WT_{pk}\eta_{pk}\Delta p}{p} \quad (3)$$

$$g = \frac{(qe)^2 f_0 c \beta \alpha N}{\sqrt{2\pi A E} f_m h} \frac{n Z_p^2}{Z_c} G \quad (4)$$

其中： q 为粒子电荷态； e 为单位电荷； f_0 是回旋频率； c 是光速； β 是探测器和冲击器处的 β 函数的几何平均值； α 是探测器和冲击器电路中的电压衰减系数； N 是粒子数； n 是探测器或冲击器的个数； Z_p 是探测器的传输阻抗； A 为质量数； E 是粒子的总能量； f_m 是系统工作频率的中心值； h 是探测器半孔径高度； Z_c 是信号传输线的特性阻抗； G 为放大器增益。

3 随机冷却Betatron振荡模拟

实验环Betatron振荡的随机冷却模拟参数如表1所列。水平方向发射度在0.8 s的时候就冷却到了平衡值，但是随着冷却的继续，水平方向在3.2 s的时候开始出现加热现象，如图3(a)所示。出现这种现象的原因是，尽管在0.8 s的时候，水平方向的发射度值达到最小。但是这个时刻的纵向动量分散的值很大(3.5×10^{-3})，因此，较大的混合效应造成了水平方向发射度的增长。冷却过程中的混合因子如图4所示。一般地，从冲击器到探测器的混合因子 M 越小(混合因子越小，混合就越大)，从探测器到冲击器的混合因子 \tilde{M} 越大(混合因子越大，混合就越小)，冷却率就越大。

表 1 Betatron振荡模拟参数

物理量	参数值
能量	380 MeV/u
粒子种类	$^{132}\text{Sn}^{50+}$
粒子数	10^5
带宽	500 MHz
$(\Delta p/p)_0$	5×10^{-3}
$(\Delta p/p)_f$	5×10^{-4}
ϵ_{H0}	$50 \times 10^{-6} (\pi\text{m}\cdot\text{rad})$
ϵ_{V0}	$50 \times 10^{-6} (\pi\text{m}\cdot\text{rad})$
水平 β_{PU} /水平 β_{KI}	15.0 m/11.0 m
垂直 β_{PU} /垂直 β_{KI}	7.6 m/7.0 m
色散 D_{PU}	7.5 m
噪声温度	40 K
水平增益 G	130 dB
垂直增益 G	130 dB
探测器/冲击器个数	1/1
滑相因子	0.18
储存环周长	128.8 m

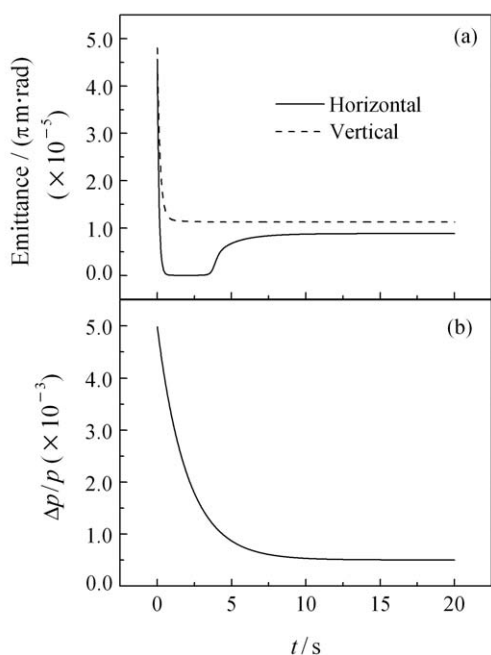


图 3 随机冷却演化过程
(a)横向发射度变化; (b)纵向动量分散变化。

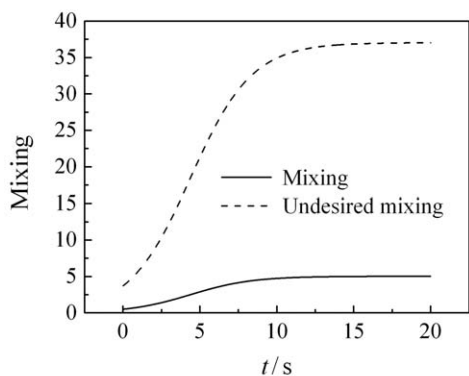


图 4 冷却过程中的混合因子(M -mixing; \tilde{M} -undesired mixing)

如果设置较小的初始动量分散,那么,这种加热效应就可以得到缓解,如图 5 所示。Betatron 振荡冷却过程的动量分散不同,横向发射度的冷却平衡值也不同,如表 2 所列。结果表明, Betatron 振荡过程中的动量分散越大,横向发射度的冷却平衡值就越小。

表 2 动量分散对横向冷却平衡值的影响

$(\Delta p/p)_0 \sim (\Delta p/p)_f$	$(\epsilon_x)_{eq}/(\pi m \cdot rad)$	$(\epsilon_y)_{eq}/(\pi m \cdot rad)$
$5 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-4}$	8.85×10^{-6}	1.13×10^{-5}
$5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-5}$	10.03×10^{-6}	1.14×10^{-5}
$5 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-6}$	13.52×10^{-6}	1.34×10^{-5}

尽管较大的动量分散可能会造成 Betatron 振荡冷却过程中的加热现象,但是较大的动量分散有利于增强

冲击器到探测器之间的粒子的混合,冷却也就越充分,冷却平衡值就越小。因此, Betatron 振荡冷却的实际过程中需要平衡动量分散对冷却过程和结果的影响。

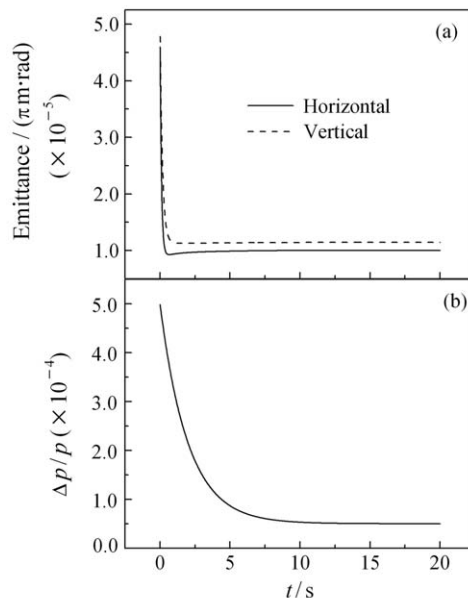


图 5 随机冷却演化过程(改变动量分散)
(a)横向发射度变化; (b)纵向动量分散变化。

当然,造成 Betatron 振荡过程中的加热现象也可能由其他因素造成,比如放大器的增益。如表 1 所列,以上结果的条件是水平和垂直方向的放大器增益都为 130 dB。如果将此放大器增益从 130 降为 110 dB,结果如图 6 所示。

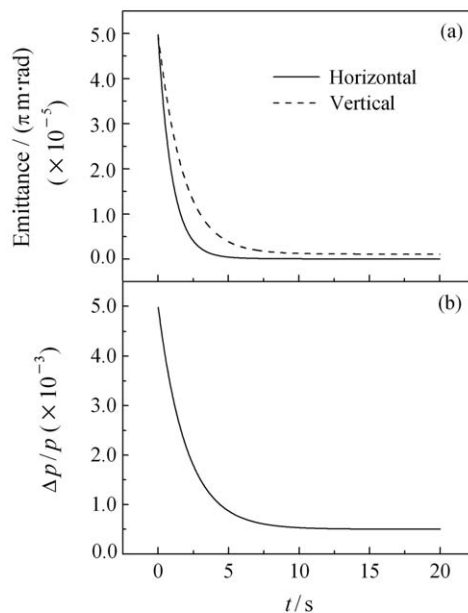


图 6 随机冷却演化过程(改变放大器增益)
(a)横向发射度变化; (b)纵向动量分散变化。

系统带宽对 Betatron 冷却结果的影响如图 7 所示。结果表明，如果系统的频率带宽较大，那么冷却时间较短，但冷却结果差别不大。如果系统的频率带宽相同，但是选择不同的最低和最高频率，冷却结果也有差别。如表 3 所列(放大器增益 110 dB)，较高频率的系统的冷却时间较短，但冷却平衡值较差。

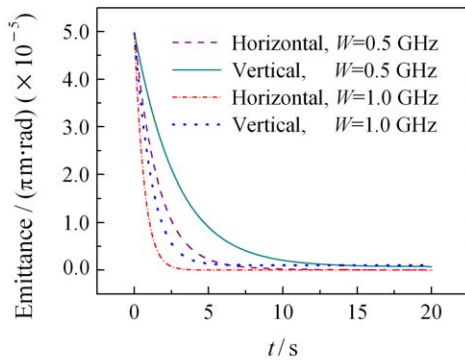


图 7 (在线彩图) 系统带宽对冷却的影响(放大器增益为 110 dB)

改变噪声温度也会对冷却产生影响，如图 8 所示，较低的噪声温度有利于得到较好的冷却结果和冷却时间，因为较低的噪声温度，有利于得到较高的信噪比。

如果冷却系统的探测器和冲击器的个数发生改变，那么冷却结果也不同。如图 9 所示，较多的探测器或冲击器的个数，有利于得到较短的冷却时间，但最终的

冷却平衡值相同。

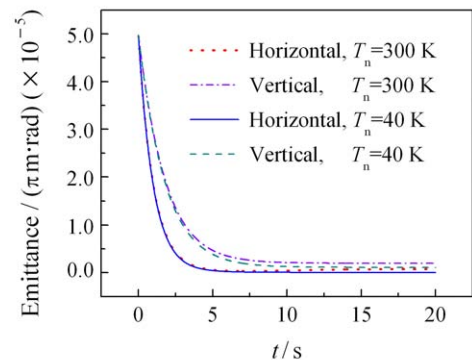


图 8 (在线彩图) 噪声温度对冷却的影响(放大器增益为 110 dB)

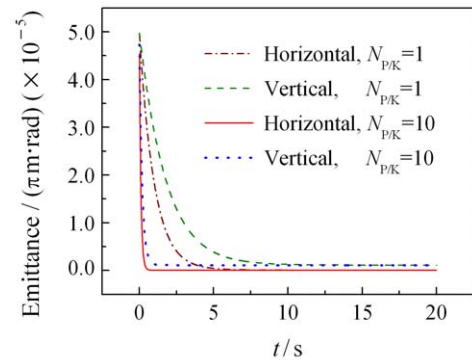


图 9 (在线彩图) 探测器和冲击器个数对冷却的影响(放大器增益为 110 dB)

表 3 系统最低和最高频率对横向冷却平衡值的影响

$f_{min} \sim f_{max}/\text{Hz}$	τ_x/s	τ_y/s	$(\epsilon_x)_{eq}/(\pi \text{ m} \cdot \text{rad})$	$(\epsilon_y)_{eq}/(\pi \text{ m} \cdot \text{rad})$
$0.2 \times 10^9 \sim 0.7 \times 10^9$	1.61	2.93	1.54×10^{-8}	7.32×10^{-7}
$0.5 \times 10^9 \sim 0.1 \times 10^9$	1.01	1.86	4.54×10^{-8}	11.26×10^{-7}
$0.7 \times 10^9 \sim 1.2 \times 10^9$	0.83	1.53	21.35×10^{-8}	13.87×10^{-7}

4 结论

本文通过对 Betatron 振荡随机冷却的模拟，明确了纵向的动量分散对横向随机冷却过程和结果的影响。结果表明，Betatron 冷却过程中，纵向动量分散越大，最终的横向发射度的冷却平衡值就越小。但是，较高的动量分散会产生较大的混合效应，因此可能会导致冷却过程中出现加热现象。当然，造成冷却过程中的加热现象还可能由其它原因造成，如放大器增益过大等。

较高的系统带宽和较多的探测器和冲击器个数，有利于得到较短的冷却时间，但是对最终的冷却结果无影响。带宽相同的情况下，较高频率的系统的冷却时间较短，但冷却结果较差。较低的噪声温度提高了系统的信噪比，因此可以得到较好的冷却时间和冷却结果。

因此，实际运行过程中，应适度调整放大器的增益，适当选择系统工作频率，在允许的范围内尽可能地提高系统带宽，增加探测器和冲击器个数以及降低冷却系统的噪声温度，从而得到较优的冷却时间和冷却结果。

参考文献：

- [1] CASPERS F, MÖHL D. European Physical Journal H, 2012, **36**: 601.
- [2] RAO Yinong. Electron Cooling in HIRFL-CSR[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 1997. (in Chinese)
(饶亦农. HIRFL-CSR电子冷却[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 1997.)
- [3] WU Junxia. Research on CSR stochastic cooling[D].

- Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
(武军霞. CSR随机冷却研究[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2005.)
- [4] WU Junxia, ZHANG Yong, LI Min, *et al.* Proceedings of COOL'11, Alushta, Ukraine, 2011[C]. Joint Accelerator Conferences Website, 2011: 64.
- [5] MÖHL D. STOCHASTIC COOLING FOR BEGINNERS [EB/OL]. [2014-08-16]. <http://cds.cern.ch/record/863007/files/p97.pdf>.
- [6] MÖHL D. Nucl Instr Meth, 1997, **391**: 164.
- [7] GOLDBERG D A. Particle Accelerator Conference, 1989[C]. Chicago: Proceedings of the IEEE, 1989, **1**: 642.

Simulation of Betatron Stochastic Cooling on Experimental Cooling Storage Ring

HU Xuejing^{1,2}, YUAN Youjin¹

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Stochastic cooling, based on a feedback system, aims at damping the oscillation of particles. Stochastic cooling is more suitable to cool secondary beam with larger size and momentum spread, and it is therefore can be complemented with electron cooling, in order to obtain beam of higher quality. Stochastic cooling system is being designed and constructed on the experimental Cooling Storage Ring of HIRFL. By simulation of Betatron stochastic cooling, it is obtained that the importance for shortening the cooling time and reducing cooling equilibrium by improving bandwidth, increasing the numbers of pickup and kicker, and decreasing the system noises. Meanwhile, the heating during the cooling process caused by larger momentum spread or larger gain of amplifier is analyzed.

Key words: stochastic cooling; betatron oscillation; cooling time; cooling equilibrium

Received date: 25 Aug. 2014; **Revised date:** 23 Oct. 2014

Foundation item: Innovation Community of National Natural Science Foundation of China(11221064); National Basic Research Program of China (973 Program)(2014CB845500)

1) E-mail: huxuejing@impcas.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>