

CSRm 随机冷却初步设计*

武军霞^{1,1)} 夏佳文¹ 杨建成¹ 周雪梅^{1,2} 刘伟^{1,2} 周俊^{1,2} 冒立军^{1,2} 刘勇¹

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 根据实际情况对兰州重离子加速器冷却储存环主环随机冷却做了初步设计和优化, 用冷却方程对主环随机冷却做了详细的数值模拟计算. 研究表明, 随机冷却对主环束流冷却速度很快, 冷却效果很好. 通过对电子冷却和随机冷却的比较, 提出主环的束流冷却采用电子冷却和随机冷却相结合的办法, 这样可以加快冷却速度, 得到更高流强、更好品质的束流.

关键词 随机冷却 冷却率 冷却时间

1 CSRm 随机冷却的重要性

兰州重离子加速器冷却储存环主环^[1](CSRm)是一个集束流累积、冷却、加速和内靶实验于一体的多功能环. 从兰州重离子加速器(HIRFL)注入到CSRm的束流在环中的储存寿命大于15s, 而束流累积时间为10s, 因此有足够的时间作束流累积. 累积过程中要采用束流冷却, 压缩已注入束流的相空间, 从而为随后注入束流留出空间, 最终获得高流强. 另外, CSRm还拟采用剥离注入, 此时束流纵向发射度很大, 必须对束流纵向相空间进行冷却, 以提高束流品质.

与电子冷却相比, 随机冷却对离子数少、发射度大、动量分散大、能量较高的热束流有较大的冷却力和较好的冷却效果. 在CSRm上采用随机冷却, 可以提高初级束的累积速度和累积强度, 进一步改善束流品质; 而且还可用于内靶实验中能量为2.0—2.8GeV的质子束的冷却.

另外由于CSR将采用Schottky诊断^[2], 这也为随机冷却创造了条件, 对Schottky诊断升级后就可以成为一个随机冷却系统, 如CERN的LEAR/LEIR^[3].

2 CSRm 随机冷却初步设计

根据CSRm实际情况, 如环的Lattice参数、元件

分布和现有Schottky诊断装置以及经费等, 对CSRm随机冷却做了初步设计, 如图1所示. 由于环上空间的限制, 所以将随机冷却系统的探测器和冲击器设备安放在四极铁和二极铁里, 且二极铁长度近3m, 这样可以放足够多的冲击器和探测器.

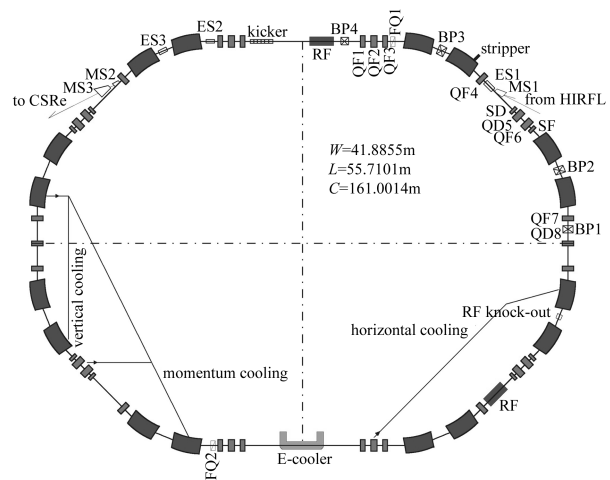


图 1 CSRm 随机冷却布置图

这些设备处的 Twiss 参数及束流包络见表 1, 其中 L 为器件在环上位置, A_x 和 A_y 分别为水平、垂直方向束流半包络, ϕ_x 和 ϕ_y 分别为水平、垂直方向真空室半孔径, L_{pk} 和 θ 分别为从探测器到冲击器的距离和 Betatron 振荡相位差. 这里计算束流半包络时, 取横向发射度和动量分散 ($\pm 3\sigma$) 分别为 $\epsilon_x = 200\pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$,

2005 - 05 - 17 收稿, 2006 - 03 - 30 收修改稿

* 国家杰出青年科学基金(10325522)资助

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

$\varepsilon_y = 40\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 和 $\Delta p/p = 0.15\%$, 二极铁中闭轨畸变在 x 和 y 方向分别为 15mm 和 8mm, 四极铁中闭轨畸变均为 18mm. 一般情况下要求束流包络 (98%) 距

离探测器或冲击器极板 2—3mm, 这样可以避免极板成为束流刮削器, 从表 1 可以看出目前的设计满足此条件.

表 1 CSRm 随机冷却系统处的 twiss 参数及束流包络

	水平方向		垂直方向		Palmer 冷却	
	探测器	冲击器	探测器	冲击器	探测器	冲击器
L/m	31.6—34.5	3.8—6.8	84.3—87.3	73.7—76.7	65.3—67.2	51.0—54.0
β_x/m	15.6—10.2	5.0—8.6	5.0—8.6	5.0—8.6	2.7—10.0	10.0—12.5
β_y/m	15.8—27.3	3.4—6.9	5.4—6.9	5.4—6.9	10.0—15.0	9.9—13.5
D_x/m	0	-0.4—-1.9	-0.4—-1.9	-0.4—-1.9	3.6—5.3	0—0.6
A_x/mm	63.2—73.9	53.6—46.2	53.6—46.2	46.2—53.6	46.7—71.1	59.3—65.1
ϕ_x/mm	90	78	78	78	90	78
A_y/mm	43.2—51.0	22.7—24.6	24.6—22.7	22.7—24.6	38.0—53.2	27.9—31.2
ϕ_y/mm	55	30.5	30.5	30.5	55	30.5
L_{pk}/m		27.7		11		13
$\theta/(\circ)$		76		67.68		

CSRm 横向随机冷却系统的探测和冲击设备暂时考虑用条形电极探测器^[4] 和同类型的冲击器, 水平和垂直系统中的探测器和冲击器个数均为 10, 极板长度为 30cm. 虽然条形电极探测器的校准往往比其他位置探测器复杂, 但是由于其结构简单, 在中频范围有高输出电平, 及较高的位置分辨率(接近于 $1\mu\text{m}$) 和时间分辨率, 并且在 CSR Schottky 诊断系统中也采用此设备.

由于纵向 Palmer 冷却的信噪比差, 动量分散大, 因此带宽不能取太大, 而频率低时条形电极探测器的极板会较长, 但是受空间限制不可能放很多的探测器, 这样导致冷却时间很长, 因此将采用狭缝探测器和冲击器^[5]. 探测器和冲击器计划分别用两个舱 (tank), 每个舱的长度为 1m, 有 50 个矩形狭缝. 探测器和冲击器

个数分别为 100 个.

3 CSRm 随机冷却电子学系统

CSRm 随机冷却系统主要由探测器、信号合成器、放大器、传输线、滤波器、功率分配器和冲击器组成, 如图 2 所示. 其中, 探测器和冲击器的设计是最重要的, 这两者决定信号的获取、信噪比的好坏以及对误差的校正效果. 信号合成器、功率分配器、前放和主放要求在系统带宽内有很好的稳定性和可靠性、良好的线性动态范围和低的噪声. CSRm 随机冷却系统的放大器采用固体 A 类放大器. 信号传输线选用 50Ω 的同轴电缆, 其具有宽的带宽和极好的噪声抑制特性.

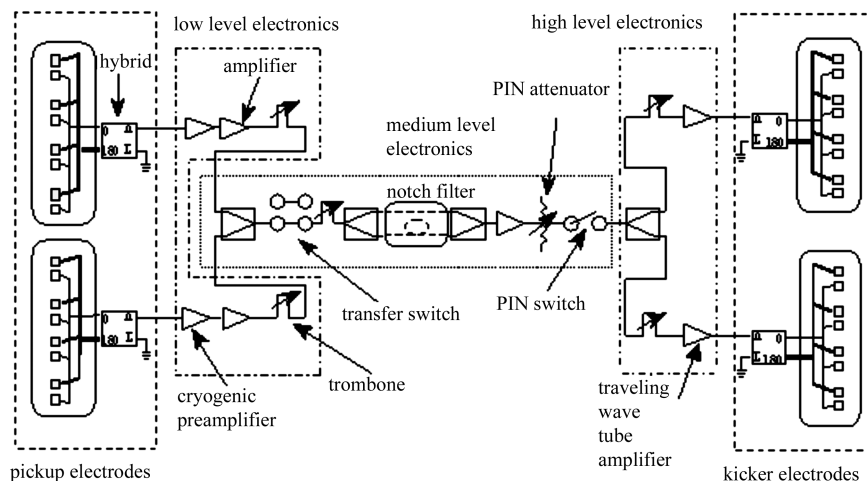


图 2 CSRm 随机冷却电子学系统

4 CSRm 冷却系统的计算和优化

4.1 冷却系统的限制因素

随机冷却系统的冷却率方程^[6]为

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

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

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

其中 N 为离子数, W 为冷却系统带宽, g 为增益, M 为从冲击器到探测器的混合因子, \tilde{M} 为从探测器到冲击器的混合因子, U 为噪信比, Z 为离子的带电荷数.

当取最佳增益 $g_0 = \frac{1 - \tilde{M}^{-2}}{M + U/Z^2}$ 时, 冷却率有最大值

$$\frac{1}{\tau_0} = \frac{W}{N} \left(\frac{(1 - \tilde{M}^{-2})^2}{M + U/Z^2} \right), \quad (4)$$

其中 W , M , U 和 \tilde{M} 由冷却系统特性、环的参数、束流参数以及它们之间的相互影响决定. 提高随机冷却性能将从这些参数的优化入手, 具体考虑如下^[7]:

1) 带宽的限制: 从式(1)和(4)可以看出, 带宽越宽, 冷却率越高. 但是带宽不能无限宽, 因为: 第一, 当频率高于微波截止频率时, 真空管开始传输微波模式(CSRm 四极铁和二极铁里微波传输的截止频率分别为 830 和 960MHz), 加入微波吸收材料会增加技术难度. 第二, 一个运动电荷产生的场所能到达的横向距离约为 $\Delta x \approx c\gamma/\omega$ (γ 为相对论因子), 当频率 ω 太大时, 电荷产生的场不能完全到达极板, 因此带宽受制于探测器或冲击器灵敏度的降低. 第三, 由冷却方程可以看出, 从探测器到冲击器的混合因子 \tilde{M} 必须大于 1, 否则将是加热, 因此最大频率有一极值. 动

能越大, 动量分散越小, 由混合因子限制的最大频率将越大. 当 CSRm 中的束流动量分散大于 0.15%, 动能小于 20MeV 时, 由混合因子限制的最大频率 (557—800MHz) 将小于束流管道微波截止频率, 其余情况都大于微波截止频率. 第四, 随机冷却系统频率还受 Schottky 带的限制, 如槽形滤波冷却要求 Schottky 带在系统带通内是分离的. 第五, 随机冷却系统的频率也受放大器等原件的限制, 随机冷却系统严格要求放大器等原件在带宽内幅度和相位响应稳定, 如果带宽太宽, 其稳定性很难保持.

2) 混合因子的选择: 混合因子是非常重要的参数, 随机冷却的发展与它紧密相关. 从式(2)和(3)可以看出, 环的性质 (η)、冷却系统的带宽 (W) 和束流特性 ($\Delta p/p$) 都包含到混合因子中. 当然, 从探测器到冲击器的混合越小越好, 从冲击器到探测器的混合越充分越好. 冷却环路的设计要综合考虑两因子, 通常取 2—5 之间.

3) 信噪比 $1/U$: 信噪比越好, 冷却效果越好. 信噪比在很大程度上决定于放大器和探测器技术.

4.2 CSRm 横向随机冷却

在设计中要根据具体情况、具体离子对冷却系统进行优化, 使取一定带宽时有最小冷却时间, 最好的冷却效果. 表 2 是对 O^{7+} , Xe^{48+} , U^{72+} 3 种离子经计算优化后所得的参数, 其中束流从水平发射度为 $200\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 冷却到 $30\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、垂直发射度为 $40\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 冷却到 $10\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$. 表 3 为水平和垂直方向总冷却时间随发射度的变化, 其中 t_o 和 t_r 分别表示最佳和实际冷却时间, 斜体表示系统工作在功率限定状态^[8]. 计算时所用参数如下: 探测器阻抗 $Z_p = 25\Omega/\text{cm}$, 冷却系统电压吸收系数 $\alpha = 0.8$, 输出功率 $P_{\text{out}} = 3\text{kW}$, 噪声温度 $T_n = 100\text{K}$, 外部信号传输线特性阻抗 $Z_c = 50\Omega$.

表 2 CSRm 水平方向束流总的冷却时间随发射度的变化

ion	N	$E_k/(\text{MeV}/u)$	W/MHz	$\Delta p/p(\%)$	M	\tilde{M}	T_c/ms
O^{7+}	1.0×10^8	10	10-250	0.15	1	2.23	1000
Xe^{48+}	1.0×10^7	20	10-360	0.15	1	2.22	250
U^{72+}	1.0×10^6	10	10-250	0.15	1	2.23	100

表 3 水平和垂直方向总冷却时间与冷却到相应发射度的关系

发射度	水平方向					垂直方向				
	O^{7+}		Xe^{48+}		U^{72+}	O^{7+}		Xe^{48+}		U^{72+}
	t_o/ms	t_r/ms	t_o^*/ms	t_r^*/ms	t_r/ms	t_o/ms	t_r/ms	t_o^*/ms	t_r^*/ms	t_r/ms
200	0	0	0	0	0	40	0	0	0	0
130	304	20	50	3.0	18	30	228	13	14	5
50	998	62	132	9.8	46	20	560	31	32	11
30	1360	84	164	13.4	58	10	1168	59	61	20

当冷却系统取上述参数时,从表3可以看出,水平和垂直冷却系统对 O^{7+} 离子始终工作在最佳状态,对 Xe^{48+} 和 U^{72} 在水平方向始终工作在功率限定状态,在垂直方向对 U^{72+} 离子始终工作在功率限定状态,对 Xe^{48+} 刚开始工作在功率限定状态,当冷却到 $33\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 时系统工作在非功率限定状态.对功率限定情况,可以通过增大放大器功率,降低输入噪声功率,增加探测器个数或阻抗来改善.另外,可以加入滤波器,将Betatron边带间的噪声滤掉,但是此方法只适用于信噪比差、带电荷数少的粒子或质子,而当 $U \gg 1$ 时无作用.

由于CSRm多次多圈注入时横向随机冷却时间应小于注入循环周期(1000ms),而 O^{7+} 束冷却时间太长,在1000ms内只能将束流冷却到水平发射度为 $50\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、垂直发射度为 $15\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$.但是在CSRm注入累积过程中采用电子冷却和随机冷却相结合的方法,先用随机冷却粗冷,然后用电子冷却精细冷却,这样可以加快冷却速度.因为随机冷却特别对热束流有效,刚开始冷却时信噪比好,冷却速度快,随着冷却的进行,束流偏差减小,信噪比变差,冷却速度减慢.而电子冷却随着冷却的进行,粒子的发射度和动量散度随时间逐渐变小,粒子和电子的速度差异逐渐减小,冷却力逐渐变大,冷却效果增加.

图3是将能量为 $10\text{MeV}/u$ 的 O^{7+} 束流从水平发射度为 $125\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 冷却到 $20\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 的过程中随机冷却和电子冷却^[9]的比较.可以看出,当离子数为 1.0×10^7 和 1.0×10^6 时,随机冷却时间小于电子冷却时间,离子数为 1.0×10^8 时,刚开始二者冷却速度基本相同,但稍后电子冷却速度显著大于随机冷却,但是可以推断当发射度大于 $125\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 时,随机冷却应该快于电子冷却.因此,将随机冷却用于大发射度、大带电荷数、离子数少的热束流的冷却更有效,与电子冷却互补可以达到很好的冷却效果.

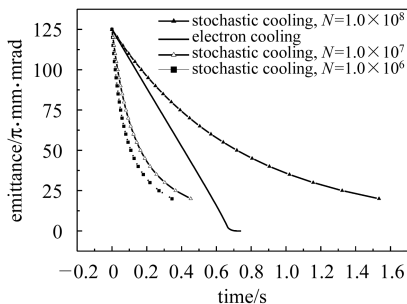


图3 随机冷却与电子冷却的比较

4.3 CSRm纵向随机冷却

HIRFL-CSRm在剥离注入时束流动量散度会很大,必须对束流冷却,以便得到高品质束流.CSRm纵向随机冷却拟先采用Palmer冷却^[10]将束流动量分散从0.6%冷却到0.15%,然后再用槽形滤波冷却^[11]使之达到0.01%的要求.

这里对注入能量为 $10\text{MeV}/u$,离子数为 1.0×10^8 的 C^{4+} 束进行了计算,如果在每一时刻都保持取最佳增益,计算表明将束流从动量分散为0.6%冷却到0.15%,带宽取 $10\text{--}200\text{MHz}$ 时Palmer冷却时间最小,为1.2s,如图4(a)所示.然后再用槽形滤波冷却进一步冷却,带宽为 $100\text{--}550\text{MHz}$ 时可以将束流在不到0.6s的时间内从动量分散为0.15%冷却到0.01%,如图4(b)所示.即纵向随机冷却可以在1.8s内将 C^{4+} 束从动量分散为0.6%冷却到0.01%,可见冷却速度是比较快的,如果离子数减少,冷却速度将更快.计算时所用参数如下:探测器阻抗 $Z_p = 25\Omega/\text{cm}$,冷却系统电压吸收系数 $\alpha_p = 0.8$,输出功率 $P_{\text{out}} = 3\text{kW}$,信号传输线特性阻抗 $Z_c = 50\Omega$,噪声温度 $T_n = 50\text{K}$.这里噪声取 50K ,是因为Palmer冷却信噪比差,对探测器和前放须进行冷却处理.经计算得知整个冷却过程工作在非功率限定状态.

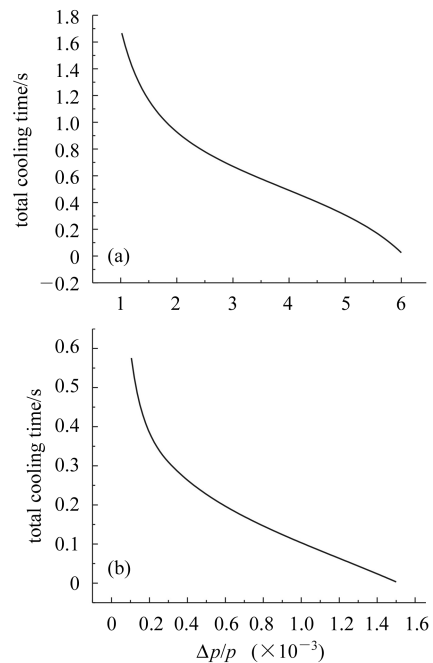


图4 (a)Palmer和(b)槽形滤波冷却总冷却时间随动量散度的变化

5 总结

本文对拟在 HIRFL-CSRm 上建造的随机冷却进行了设计和计算. 计算表明, 随机冷却对 HIRFL-CSRm 多次多圈注入时横向相空间的减小和剥离注入时纵向相空间的减小都起到了很好的冷却效果. 但当离子数较多时, 随机冷却时间将较长, 如果将随机冷却和电子冷却相结合, 冷却速度会很快, 这样可以在

环中注入更多粒子, 使流强提高, 并可得到更好的束流品质.

当然, 这里所讨论的是理想情况, 实际中往往做不到, 这是因为放大器等元件经常优化在一个倍频内; 另外当一个冷却系统设计完毕后, 其带宽不能任意改变; 且系统常常工作在功率限定状态, 不可能时刻都工作在最佳状态. 通常将兼顾各方面的因素, 选取合适带宽及各参数以取得最好的冷却效果.

参考文献(References)

- 1 XIA J W, ZHAN W L, WEI B W et al. Nucl. Instrum. Methods, 2002, **A488**: 11
- 2 Boussard D. Schottky Noise and Beam Transfer Function Diagnostics: CERN-95-06. 1995. 749
- 3 Caspers F. Techniques of Stochastic Cooling: CERN-PS-2001-017-RF. 2001. 16
- 4 Goldberg D A, Lambertson G R. AIP Conf. Proc. 1992, **249**: 537
- 5 Marriner John. Theory, Technology and Technique of Stochastic Cooling: FERMILAB-Conf-93. 308
- 6 Mohl D. CERN Report, 1995, **95-06**: 587
- 7 Mohl D. Nucl. Instrum. Methods, 1997, **A391**: 164—171
- 8 Goldberg D A, Lambertson G R. Coping with Power-limited Transverse Stochastic Cooling Systems: LBL-25924, 1989
- 9 XIA Guo-Xing. Investigation of Space Charge Effect of Electron Beam in CSR E-Cooler. Doctoral thesis, Institute of Modern Physics, CAS, 2003(in Chinese)
(夏国兴. CSR 电子冷却中电子束的空间电荷效应研究, 博士论文, 中国科学院近代物理研究所, 2003)
- 10 WU Jun-Xia, XIA Jia-Wen, YANG Jian-Cheng et al. HEP & NP, 2004, **28**(4): 437(in Chinese)
(武军霞, 夏佳文, 杨建成等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(4): 437)
- 11 WU Jun-Xia, XIA Jia-Wen, YANG Jian-Cheng et al. High Power Laser and Particle Beams, 2004, **16**(1): 125(in Chinese)
(武军霞, 夏佳文, 杨建成等. 强激光与粒子束, 2004, **16**(1): 125)

Primary Design of Stochastic Cooling in CSRm*

WU Jun-Xia^{1,1)} XIA Jia-Wen¹ YANG Jian-Cheng¹ ZHOU Xue-Mei^{1,2} LIU Wei^{1,2}
ZHOU Jun^{1,2} MAO Li-Jun^{1,2} LIU Yong¹

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

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

Abstract Based on several facts of CSRm, such as the layout of the ring, the lattice parameters, existing Schottky noise diagnosis equipment and fund, the primary stochastic cooling design of CSRm has been carried out. The optimum cooling time and the optimum cooling bandwidth are obtained through simulation using the cooling function. The results indicate that the stochastic cooling is quite a powerful cooling method for CSRm. The comparison of the cooling effects of stochastic cooling and electron cooling in CSR are also presented. We can conclude that the combination of the two cooling methods on CSRm will improve the beam cooling rate and quality beam greatly.

Key words stochastic cooling, cooling rate, cooling time

Received 17 May 2005, Revised 30 March 2006

* Supported by National Science Funds for Distinguished Young Scholars(10325522)

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