

文章编号: 1001-4322(2004)03-0377-04

CSR 电子冷却系统强流电子束包络的振荡特性*

夏国兴^{1,2}, 夏佳文³, 殷学军³, 武军霞³, 刘 伟³, 杨建成³, 赵红卫³, 魏宝文³

(1. 北京大学 重离子物理研究所,北京 100871; 2. 重离子物理教育部重点实验室,北京 100871;

3. 中国科学院 近代物理研究所,甘肃 兰州 730000)

摘 要: HIRHL-CSR 的电子冷却系统是采用强流电子束对重离子束进行冷却。在冷却段漂移管区,由于强流电子束自身的空间电荷场和螺线管磁场的作用,使得电子束的包络发生振荡。通过求解电子束的横向包络方程,研究了强流电子束包络随电子束参数和螺线管聚焦磁场的变化关系。计算结果表明:对于不同的电子束能量和磁场,电子束包络的振荡频率也不相同,在相同的条件下,磁场越强,电子束包络振荡幅度越小,电子束能量越大,其包络的振荡频率也越快。

关键词: 电子冷却; 空间电荷场; 包络方程; 强流电子束

中图分类号: TL56 **文献标识码:** A

HIRHL-CSR 是兰州重离子回旋加速器系统的升级项目,它采用电子冷却方法迅速压缩储存离子束的横向包络、发散角和纵向动量散度,从而获得高品质的重离子束流。

在冷却段螺线管区域,由于强流电子束的空间电荷效应,使得螺线管区域的电子束包络出现振荡现象,如果电子束空间电荷效应作用太强,或者磁场的聚焦作用较弱,就会出现电子打到真空壁的情形,造成电子的损失;另外,电子束包络的大幅度振荡也会造成离子束的不稳定,从而降低了冷却效率。

本文分析了 HIRHL-CSR 电子冷却系统强流电子束在螺线管中的包络方程,采用电子束密度的 K-V (Kapchinskij-Vladimiskij) 分布,计算得到了在空间电荷效应存在时电子束的包络变化大小,并研究了包络振荡特性随电子束参数以及聚焦场特性的变化。

1 强流电子束在螺线管中的包络方程

如果电子束为连续束,它的相空间可以用一个四维超椭球来描述。投影到 (x, x) 和 (y, y) 相平面的相图均为椭圆。设电子在四维超椭球中成 K-V 分布^[1],即电子均匀地分布在四维超椭球的表面上,当空间电荷效应存在时,可以得到的束流包络线方程为^[2]

$$X + k_x^2 X - \frac{2}{X + Y} - \frac{2}{X^3} = 0 \quad (1)$$

$$Y + k_y^2 Y - \frac{2}{X + Y} - \frac{2}{Y^3} = 0 \quad (2)$$

式中: X, Y 分别为束流在水平和垂直方向的均方根 (rms) 束流包络函数; $X = dX^2/dz^2, Y = dY^2/dz^2$ 分别为束流横向包络函数对束流传输方向的二次微分, z 为束流的传输方向; k_x, k_y 分别为水平和垂直方向的磁聚焦常数; x, y 分别为水平和垂直方向的发射度; ϵ 为广义的导流系数,且有

$$\epsilon = \frac{I}{2 \epsilon_0 v^3} \quad (3)$$

式中: e/m_e 为电子的荷质比; I 为电子的束流强度; ϵ_0 为真空的介电常数; v 为电子的运动速度。(1) 式和 (2) 式为 K-V 分布下电子束的包络线方程。

对于轴对称束有 $X = Y, k_x = k_y, k_x^2 = -k_y^2 = k^2$, 因此水平方向的束流包络线方程可以简化成^[3]

$$X + k_x^2 X - \frac{2}{X} - \frac{2}{X^3} = 0 \quad (4)$$

对于垂直方向也有类似的方程。

因此,在螺线管中束流的横向均方根包络线方程可以写成^[4]

* 收稿日期:2003-06-28; 修订日期:2003-09-16

作者简介:夏国兴(1973—),男,博士后,主要从事加速器束流物理和自由电子激光研究。

$$R + k^2 R - \frac{1}{R} - \frac{2}{R^3} = 0 \quad (5)$$

式中: R 表示束流在水平和垂直方向的均方根包络大小; $k^2 = (e/8m_e V) B_0^2$, V 为规范化电势, 且 $V = m_e v^2/2e$, 为电子的相对论因子。如果在束流传输中电子速度和纵向螺线管磁场 B_0 保持不变, 则聚焦常数为一个定值。由(5)式可见, 束流的包络线方程包括螺线管磁场的聚焦项、空间电荷和发射度的散焦项。

2 强流电子束在螺线管中包络的振荡特性

CSR 电子冷却系统是利用强流的冷电子束和热的重离子束在冷却段螺线管部分相互重合, 通过多次库仑碰撞使热的离子束冷却^[5], 其中电子束为连续束, 且流强达到 A 量级, 因此电子束空间电荷效应不可忽略。由于空间电荷场的散焦作用, 使得电子束在螺线管中传输时出现了包络的不稳定, 以下详细讨论电子束包络线方程的解。

由于采用冷电子束, 可以近似认为电子束的发射度很小, 并且在整个螺线管中发射度不变化, 即仅考虑强流电子束的空间电荷效应对束包络的影响, 因此可以将(5)式简化为

$$R + k^2 R - \frac{1}{R} = 0 \quad (6)$$

方程(6)为一个典型的非线性二阶微分方程, 求解时可以将方程做降阶处理, 即令 $Y = R$, 则方程(6)可以化简为

$$Y \frac{dY}{dR} + k^2 R - \frac{1}{R} = 0 \quad (7)$$

对以上方程分离变量后作不定积分有

$$Y dY = \left(\frac{1}{R} - k^2 R \right) dR \quad (8)$$

即

$$Y^2 = 2 \ln R - k^2 R^2 + C_1 \quad (9)$$

式中: C_1 为积分常数, 可由电子束初始条件给出。将 $Y = R$ 代入上式, 分离变量并积分, 得到包络随纵轴的变化关系

$$dz = \frac{dR}{\sqrt{2 \ln R - k^2 R^2 + C_1}} \quad (10)$$

式(10)即为束流包络方程的积分形式。为了求解(10)式, 可以认为在磁场约束作用足够强时, 包络函数 R 是在初始包络值 R_0 附近做小幅度振荡, 即取一个小量 x , 使得 $x = R - R_0$, 且 $x \ll R_0$, 因此有

$$\ln R = \ln [R_0 (1 + x/R_0)] = \ln R_0 + \ln (1 + x/R_0) \quad (11)$$

利用 $\ln(1 + x/R_0) \approx x/R_0 = R/R_0 - 1$, 得到

$$\ln R = R/R_0 + \ln R_0 - 1 \quad (12)$$

将(12)代入(10)式中得到

$$dz = \frac{dR}{\sqrt{-k^2 R^2 + 2 R/R_0 + (2 \ln R_0 - 2 + C_1)}} \quad (13)$$

对(13)式左右两边分别积分, 即得到

$$z = \frac{1}{k} \arcsin \frac{2k^2 R - 2/R_0}{\sqrt{(2/R_0)^2 + 4k^2(2 \ln R_0 - 2 + C_1)}} + C_2 \quad (14)$$

式中: C_2 为积分常数。解得电子束的包络方程为

$$R = (1/k^2) \left[\sin k(z - C_2) \sqrt{(2/R_0)^2 + k^2(2 \ln R_0 - 2 + C_1)} + 2/R_0 \right] \quad (15)$$

由(15)式可见, 电子束的包络方程为一振荡形式, 代入 HIRL-CSR 电子冷却系统电子束的典型参数^[6], (如表 1 所示), 利用初始电子束的参数, 即在点 $z_0 = 0$ 时, $R_0 = 0.25\text{m}$, 设初始电子束为平行束, 则 $R_0 = 0$, 即可以得到积分常数 C_1 和 C_2 的值

$$C_1 = k^2 R_0^2 - 2 \ln R_0, \quad C_2 = \gamma / 2k \tag{16}$$

将 C_1, C_2 代入(15)式就可以得到强流电子束在螺线管中传输时的完整的包络方程，

$$R = (1/k^2) [\gamma / R_0 - \cos kz \sqrt{(\gamma / R_0)^2 + k^2(k^2 R_0^2 - 2 \ln R_0)}] \tag{17}$$

表 1 HIRFL-CSR 电子冷却系统电子束典型参数

Table 1 Typical parameters of electron beam of HIRFL-CSR e-cooler

electron energy E_e /keV	10, 15	gun cathode radius r_c /cm	1.25
electron current I_e /A	3	gun perveance P /(A·V ^{-3/2})	1.1 × 10 ⁻⁶
solenoid field B /T	0.01, 0.05, 0.1	Lorentz factor	0.195, 0.237
electron beam radius R_0 /cm	2.5	relativistic velocity factor	1.019 6, 1.029 4

3 结 论

通过求解 K-V 分布下的电子束束流横向包络方程,得到了方程的解析表达式。利用 HIRFL-CSR 电子冷却系统电子枪的典型参数,计算了在不同磁场大小、不同电子束能量下电子束包络在平衡位置附近的振荡幅度大小。由图 1(a)可见,强流电子束在螺线管纵向磁场为 0.01T 时,对于能量为 10keV,电流 3A 的电子束,包络的振荡幅度很大;在磁场强度增加到 0.1T 时,包络的幅度已经压得很小,而此时的电子束包络的振荡频率加快,如图 1(b)所示;对于能量为 15keV,电流 3A 的电子束,分别计算了磁场在 0.1T 和 0.05T 两种情形下的电子束包络,如图 1(c), (d)所示。可见对于不同的电子束能量和磁场,电子束包络的振荡频率明显不同。在相同磁场条件下,对于电子束的不同能量,电子束包络的振荡频率也不相同,且能量越大,振荡频率越快。另外,从图 1 中看出,电子束包络的幅度在 HIRFL-CSR 中并不大,这主要是磁场的作用比较大的缘故。

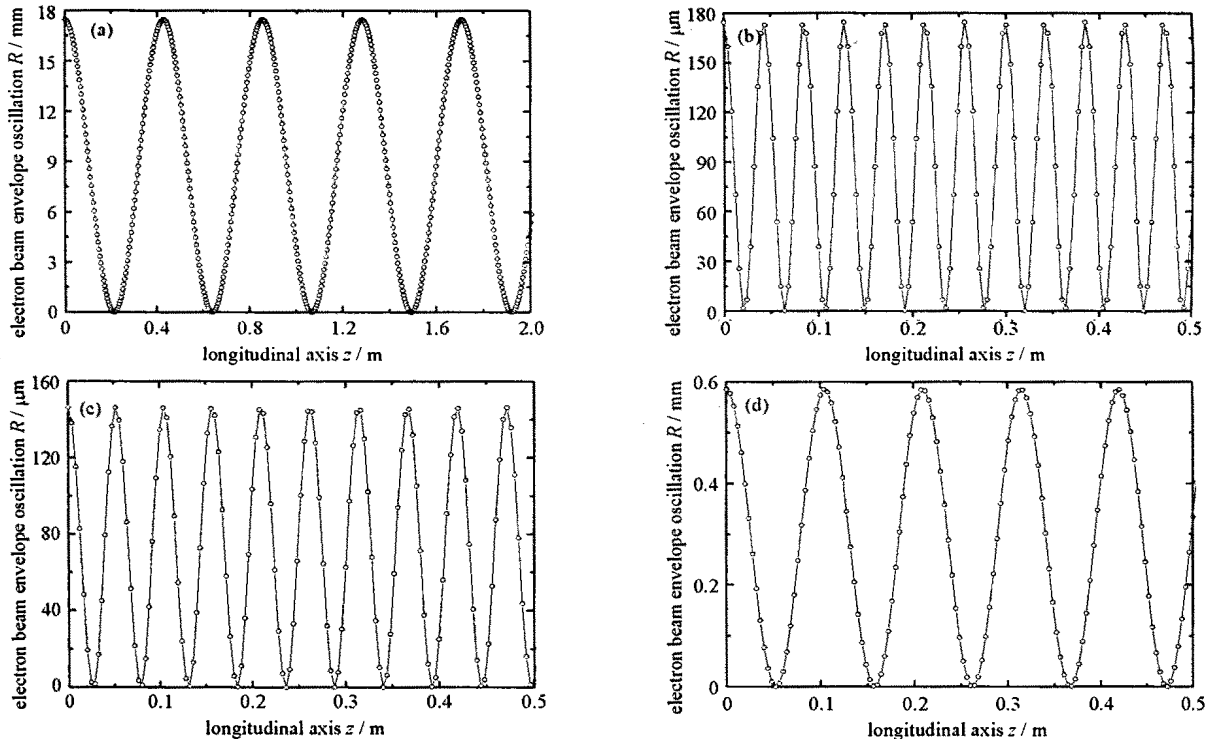


Fig. 1 Envelope oscillation of electron beam as a function of beam longitudinal axis z where $I_e = 3.0A$,

(a) $E_e = 10keV, B = 0.01T$, (b) $E_e = 10keV, B = 0.1T$, (c) $E_e = 15keV, B = 0.1T$ and (d) $E_e = 15keV, B = 0.05T$

图 1 电子束包络随纵轴的振荡

参考文献:

[1] 夏慧琴,刘纯亮. 束流传输原理[M]. 西安交通大学出版社,1991. (Xia H Q, Liu CL. Principles of beam transport. Xi 'an: Xi 'an Jiaotong University Press, 1991)

[2] Lichtenberg A J. Phase space dynamics of particles[M]. New York: John Wiley,1996.

- [3] Sun A, Qi H N, Xia G X, et al. The transfer matrices for intense beam in solenoid lens[A]. Proceedings at cyclotron and their applications[C]. Caen, France, 1998. 477—480.
- [4] 唐天同,刘纯亮. 电子束与离子束物理[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001. (Tang T T, Liu C L. Physics of electron and ion beam. Xi 'an: Xi ' an Jiaotong University Press, 2001)
- [5] Xia J W, Zhan W L, Wei B W, et al. The heavy ion cooler-storage ring project (HIRHL-CSR) at Lanzhou[J]. *Nucl Instrum and Methods in Phys Res*, 2002, **A488**: 11—25.
- [6] 饶亦农,夏佳文,原有进,等. HIRHL-CSR 电子冷却装置的电子枪设计[J]. 强激光与粒子束, 1996, **8**(1): 131—137. (Rao Y N, Xia J W, Yuan Y J, et al. Electron gun design for HIRHL-CSR electron cooler[J]. *High Power Laser and Particle Beams*. 1996, **8**(1): 131—137)

Study on the envelope oscillation of intense electron beam in CSR e-cooler system

XIA Guo-xing^{1,2}, XIA Jia-wen³, YIN Xue-jun³, WU Jun-xia³, LIU Wei³,
YANG Ji-an³, ZHAO Hong-wei³, WEI Bao-wen³

(1. *Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China;*

2. *Key Laboratory of Heavy Ion Physics, Ministry of Education, Beijing 100871, China;*

3. *Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)*

Abstract: An intense electron beam is adopted in HIRHL-CSR e-cooler system to cool down heavy ion beams. In the drift space of the cooling section, the envelope of electron beam oscillates due to space charge field and solenoidal field. By solving the transversal envelope equation, the envelope oscillation of intense electron beam is preliminarily studied. The calculation results show that in the same case, the stronger the magnetic field is, the smaller the envelope oscillation is; meanwhile, the larger the beam energy is, the larger the oscillation frequency is.

Key words: E-cooler; Space charge field; Envelope equation; Intense electron beam