

文章编号: 1001-4322(2003)04-0397-04

直线感应加速器束流崩溃不稳定性数值模拟*

张开志¹, 林郁正², 王华岑¹

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 清华大学 加速器实验室, 北京 100084)

摘要: 在理论分析的基础上,开发了直线感应加速器束流崩溃不稳定性数值模拟程序。描述了利用该程序开展的研究工作,这些研究揭示了束流崩溃不稳定性的一般规律,分析了相关参数对束流崩溃不稳定性的影响,最后提出了直线感应加速器束流崩溃不稳定性抑制方法。

关键词: 直线感应加速器; 束流崩溃不稳定性; 横向阻抗; 横向尾场; 质心横向位移; 数值模拟
中图分类号: TL50 **文献标识码:** A

直线感应加速器中的束流崩溃不稳定性(BBU)是束流脉冲与感应加速腔相互作用的结果。束流脉冲经过加速腔时将在其中激励起横向尾场,而横向尾场又将使束流质心产生横向高频振荡,这两种因素互相耦合,最终导致束流崩溃不稳定性。由于束流崩溃的过程非常复杂,采用解析分析方法得出的结论比较粗略^[1],必须采用数值模拟以及试验才能进行比较全面深入的研究。

1 数值模拟原理

将束流脉冲等分成 m 个束片,研究它们在 n 个加速腔中的运动。束流脉冲经过加速腔时,将受到加速电场,横向尾场和螺线管线圈磁场的作用,因而能量、动量和质心的横向位移都会发生变化。将加速腔分成漂移段和加速间隙两段,在漂移段只考虑轴向磁场的作用,我们假定在一个加速腔中,螺线管磁场是均匀分布的。从文献[1]中的理论分析出发,可以导出第 i 个加速腔漂移段中第 j 个束片的质心横向位移 $r_d(i, j)$ 和横向动量 $r_a(i, j)$ 的递推关系

$$r_d(i, j) = r(i-1, j) \cos(kl) + r_a(i-1, j) / [k \sin(kl)] \quad (1a)$$

$$r_a(i, j) = -r(i-1, j) k \sin(kl) + r_d(i-1, j) \cos(kl) \quad (1b)$$

式中: $k = qB/2m_0c$, q 是电荷, B 是螺线管线圈磁场; l 是加速腔长度。

与漂移段相比,加速间隙很窄,电子经过加速间隙后,可以近似认为质心横向偏移没有变化,只是能量和动量发生了变化,于是,加速间隙出口的参量可以表示为

$$r(i, j) = r_d(i, j) + r_m \quad (2a)$$

$$r_a(i, j) = r_a(i, j) + K(i, j) + r_m, \quad K(i, j) = (q/m_0c^2) \int_0^t W(t-t') I(t') r_d(i, k) dt \quad (2b)$$

(2a)式中 r_m 及(2b)式中 r_m 表示两个加速腔轴心之间的偏差,代表加速器的准直度,在程序中,它由一个随机函数表示。 $K(i, j)$ 为横向冲量; $W(t)$ 代表横向尾函数。模拟计算 $K(i, j)$ 时,将积分近似成求和

$$K(i, j) = - \frac{Z(0)}{Q} \frac{q_0^2}{m_0c^2} \sum_{k=1}^j \exp\left[-(j-k) \frac{0-t}{2Q}\right] \sin\left[(j-k) t\right] I(k) r_d(i, k) t$$

t 越小,求和就越接近积分。电子束能量的变化为 $\epsilon(i) = \epsilon(i-1) + \dots$, 即归一化的能量增益。模拟计算时需要的加速腔参数包括横向阻抗、品质因数、谐振频率和加速腔长度及加速腔数量,束流参数包括束流强度、平顶、上升前沿以及注入束质心横向位移。束流脉冲波形采用(3)式来模拟时,与实际测量的波形符合得很好。

$$I(t) = I_0 [1 - \exp(-a_1 t)] / [1 - \exp(a_2(t - t_{max}))] \quad (3)$$

式中: $a_1 = 3.5/\dots$, $a_2 = 4/\dots$, 代表上升前沿; t_{max} 为脉冲宽度。

2 束流崩溃不稳定性发展的一般规律

假定加速器由80个加速腔组成,加速腔长度为533mm。取加速腔横向阻抗为800 Ω/m ,谐振频率为350MHz,

* 收稿日期:2002-04-01; 修订日期:2002-10-15

基金项目:国防科技基础研究基金资助课题

作者简介:张开志(1970-),男,博士,助研,从事核技术及应用的研究;E-mail:kaiserzhang@hotmail.com.

品质因数为 10。在所有加速腔中,螺线管磁场都是 50mT,束流强度为 3kA,上升前沿为 25ns,平顶为 60ns,将束脉冲分成 220 个束片。注入束能量为 2MeV,质心横向位移 $r_0 = 1\text{mm}$,归一化横向动量 $r_0 = 0.01\text{rad}$ 。考虑准直误差时,磁轴偏移小于或等于 0.1mm,磁轴倾角小于或等于 1mrad。

如果没有横向尾场的影响,在加速器的不同位置,质心横向位移随时间的分布都与注入器出口处是一致的,类似一条直线;但由于电子能量在增加,而运输磁场没有增加,质心横向位移沿加速器的变化,即 Betatron 振荡幅度在不断地增长。

考虑尾场影响时,束片沿加速器仍以 Betatron 频率振荡,但随着运动距离增加,束脉冲中后部束片的横向高频振荡幅度增长率比前者显著增大,呈指数增长。大约从第 80 个束片开始,规则的 Betatron 振荡被明显的指数增长取代。而在束脉冲末端,横向高频振荡有减小的趋势。

图 1 为在这些条件下模拟计算得到的质心横向位移的三维图。

如果对质心横向高频振荡不加任何抑制措施,在加速器出口处,放大增益接近 500,束流将肯定会碰壁损失。另外,在模拟计算中发现,质心横向振荡沿时间的变化分裂成了前后两个部分,较早出现的振荡幅度较小,稍后的振荡幅度较大,随着电子束在加速器中的传输,二者的界限逐渐模糊。图 2 揭示了加速器准直误差对放大增益的影响。在本文所述的条件下,当每个加速腔准直度在 0~0.3mm 范围内时,放大增益位于线性增长区;而当加速腔准直误差超过 0.3mm 时,放大增益进入饱和区,横向振荡最大值将分布在 1700mm 附近。

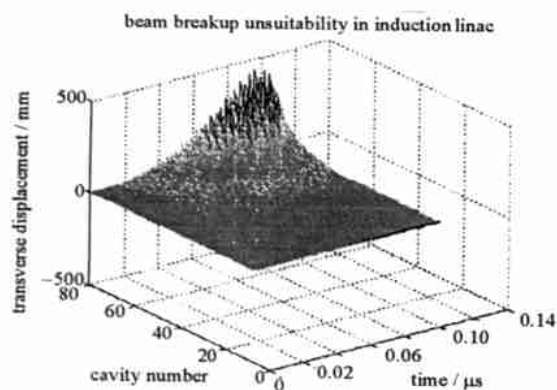


Fig. 1 Transverse motion of centroid under wake field

图 1 在尾场作用下质心横向运动的三维图

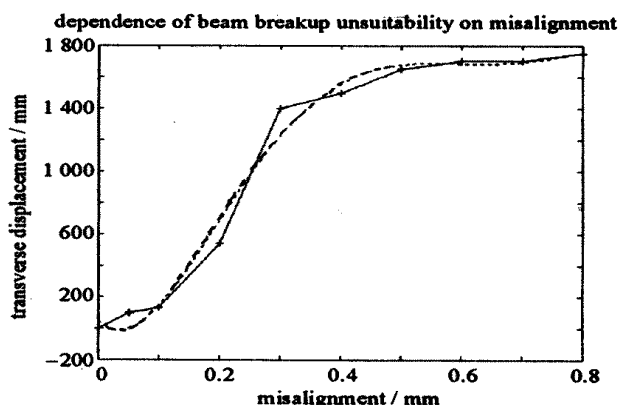


Fig. 2 Dependence of gain of BBU on disalignment

图 2 不准直度对 BBU 增益的影响

3 束流崩溃不稳定性与相关参数的关系

根据文献[1]中推导的束流崩溃不稳定性增长率

$$= \left[\frac{Z}{Q} \frac{qt_0^2 N I_0}{m_0 k c^2} \right]^{1/2} \quad (4)$$

可以得到它与相关参数的关系:(1) BBU 增长与横向阻抗 Z/Q 成正比(横向阻抗表征在束腔相互作用中加速腔的影响);(2) 与束流强度 I_0 成正比(束流越强,束腔相互作用越剧烈);(3) 与加速腔数目成正比(束流受到的作用随所经过的加速间隙数目 N 的增加而加剧)。

但有些因素的影响是数值分析无法得到的,只有采用数值模拟的办法才能给出它们对束流崩溃不稳定性增长的影响。

注入束质心横向振荡频率的影响:模拟计算显示,即使没有横向偏移,初始横向振荡的束脉冲仍将在加速腔中激励起横向尾场,并且增大横向振荡的幅度仅仅使高频振荡幅度线性增加,没有带来本质的变化,起关键作用的是初始横向振荡的频率。Betatron 运动将受到高频振荡的调制,并且振荡频率越靠近加速腔 TM_{1n0} 谐振模频率,高频振荡幅度就越大。

束流脉冲的影响:束流脉冲的影响可以分为前沿和平顶两部分。保持平顶宽度不变,上升前沿取不同值时,加速器出口处质心横向高频振荡最大幅度也不同。当上升前沿取 5,10,25,50,100ns 时,对应的放大增益系数分别为 50,23,15,1.4 和 0.15。不同上升前沿的束脉冲的频谱是不一样的,上升前沿为 5ns 的脉冲含有的谐振模频率分量比前沿为 50ns 时大得多。根据前面关于注入束横向振荡的讨论,脉冲中的谐振模频率分量将

与加速腔谐振模发生共振,如果该分量幅度较大,肯定会在加速腔中激励更强烈的谐振。尽管脉冲平顶在整体上不会影响质心横向运动,但足够长的脉冲为束心横向位移提供了足够的增长时间。而脉冲宽度是存在阈值的,因为横向位移增大到一定程度将会导致束碰壁损失。

加速梯度的影响:束流在传输过程中,通常需要较高的加速梯度,这既有经济上的意义,也有物理上的意义。图3为通过模拟计算得到的BBU增长与加速梯度的依赖关系。在漂移段中,增加的横向动量将表现为质心横向位移增加,即 $r = r l$ 。所以,其他条件保持不变,加速腔长度增加时,质心高频振荡幅度将线性地增加。加速腔加速电压增加,表现出来的就是高频振荡幅度下降。而另一方面,由前文所述, $K(i, j)$ 与 γ 成反比,即电子能量越高,经过加速间隙时受到的横向作用力越小。

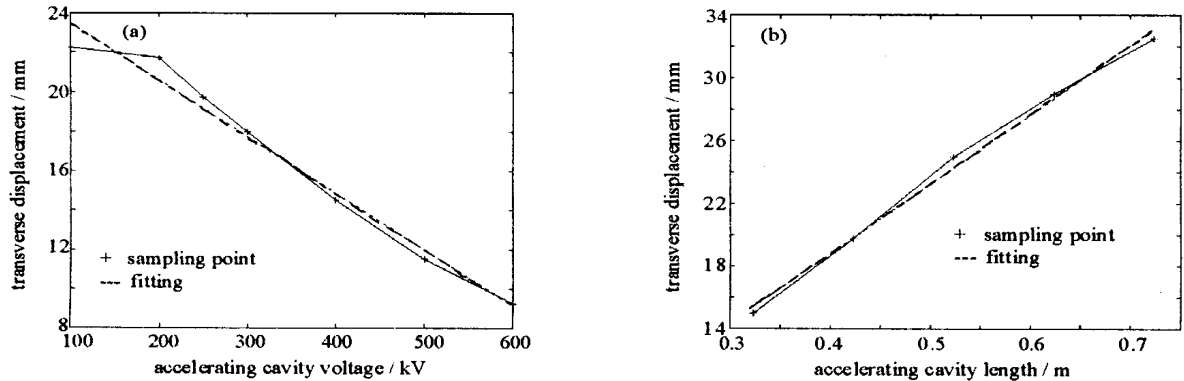


Fig. 3 Dependence of BBU gain on acceleration gradient

图3 加速梯度对束流崩溃的影响

4 束流崩溃不稳定性抑制

根据前文的讨论以及相关文献,对直线感应加速器中的束流崩溃不稳定性,可以采取以下抑制措施。

在加速器设计阶段:(1) 减小加速腔的横向阻抗;(2) 提高加速器的加速梯度;(3) 采用上升沿较长的束流脉冲;(4) 提高注入器设计水准,尽量减小注入束的质心横向偏移和横向动量;(5) 整个加速器采用结构略有差异的加速腔的组合,这也就是失谐法。

在安装调试阶段:(1) 安装时采取相应的措施以减小加速器的不准直度;(2) 在应用条件允许的前提下,减小束流强度。模拟计算显示,在其它条件不变时,将加速段中传输的束流从3kA减小到2kA后,BBU增长将从500减小到15;(3) 采用合理的磁场配置。加速段入口处磁场仍为50mT,但沿加速器磁场随能量按 $\gamma^{1/2}$ 增长。模拟计算显示,束流保持3kA不变时,BBU增长率由500减小为2。

5 结论

通过数值模拟揭示了与解析分析相同的规律,得到如下规律性的认识:(1) 注入束初始振荡的频率接近加速腔谐振频率时,振幅增长最大;(2) 横向尾场主要是在束流的脉冲前沿激励的,束流脉冲上升前沿越陡,质心横向位移增长越厉害且脉冲宽度存在阈值;(3) 随着加速腔电压提高,质心高频振荡幅度将减小;而加速腔长度增加时,质心高频振荡幅度将线性地增加。

待客观条件成熟后,将开展束流崩溃不稳定性实验研究。

参考文献:

- [1] 张开志. 直线感应加速器的束流崩溃不稳定性研究[D]. 北京:清华大学, 2000. (Zhang K Z. Study on beam breakup instability of induction Linac. Beijing: Tsinghua University, 2000)
- [2] Panofsky W K H. Asymptotic theory of beam break-up in linear accelerator[J]. *Rev of Sci Inst*, 1968, **39**(2):206—212.
- [3] Neil V K, Hall L S, Cooper R K. Further theoretical studies of the beam breakup instability[J]. *Particle Accelerators*, 1979, **9**:213—222.
- [4] 张开志, 王华岑, 章文卫, 等. 感应加速腔横向阻抗测量[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(2):219—223. (Zhang K Z, Wang H C, Zhang W W, et al. Transverse impedance measurement of induction accelerating cavity. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(2):219—223)
- [5] 施将君, 李献文. 电子束心的横向运动: Corkscrew[J]. *强激光与粒子束*, 1996, **8**(4):602—606. (Shi J J, Li X W. Transverse motion of electron beam centroid: Corkscrew. *High Power Laser and Particle Beams*, 1996, **8**(4):602—606)

Numerical simulation on beam breakup instability of linear induction accelerator

ZHANG Kai-zhi¹, LIN Yu-zheng², WANG Hua-cen¹

(1. *Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-106, Mianyang 621900, China;*

2. *Accelerator Laboratory, Tsinghua University, Beijing 100084, China)*

Abstract: A code is written to simulate BBU in induction linac according to theoretic analysis. The general form of evolution of BBU in induction linac is investigated at first, then the effect of related parameters on BBU is analyzed, for example, the alignment error, oscillation frequency of beam centroid, beam pulse shape and acceleration gradient. At last measures are put forward to damp beam breakup instability.

Key words: Linear induction accelerator; Beam breakup instability; Transverse impedance; Transverse wake field; Centroidal transverse displacement; Numerical simulation