

# “神龙一号”加速器的BBU不稳定性分析\*

代志勇<sup>1)</sup> 张开志 章文卫 谢宇彤

(中国工程物理研究院流体物理研究所 绵阳 621900)

**摘要** “神龙一号”加速器在束流调试初期出现了严重的BBU, 该BBU是由偏心束流通过多功能腔时激励的 $TM_{110}$ 模引起的. 分别以解析分析、数值计算和实验测量等方法对多功能腔的高频特性进行分析. 几种方法得到的 $TM_{110}$ 模频率与实验结果吻合, 而横向耦合阻抗则有倍数之差, 但都证明多功能腔在 $TM_{110}$ 模式下的横向耦合阻抗过大, 是激励BBU的最主要的因素. 为此, 设计了对多功能腔其他功能不产生影响的可以轴向伸缩的网罩, 用来屏蔽多功能腔间隙. 使用网罩后效果非常显著, 实验结果表明, BBU受到抑制, 束流脉冲中的高频振荡消失.

**关键词** 多功能腔 BBU 横向耦合阻抗

## 1 引言

在各类加速器中, 直线感应加速器以其独有的特点最适合于加速器强流电子束, 可以将BBU限制的最大电流提高到千安量级. 尽管如此, 科学家们仍密切关注着直线感应加速器中的BBU问题. 1979年, V.K.Neil, L.S.Hall和R.K.Cooper以传输矩阵和有源波动方程为基础提出了一种近似理论<sup>[1]</sup>用于研究BBU, 并被广泛应用于分析已有的或新建的直线感应加速器中BBU不稳定性. 20世纪80年代中期, 美国为研究自由电子激光而在LLNL建造的ATA直线感应加速器(50MeV/10kA)运行时出现了严重的BBU现象<sup>[2]</sup>以至于无法达到预期指标. 其后, 美国的DARHT和法国的AIRIX在建造过程中更加注重控制感应加速腔的横向耦合阻抗和品质因素, 准直安装也达到高精度水平, 在调试过程中没有出现BBU现象. 我国“神龙一号”加速器在调试初期出现了BBU现象, 使我们有机会观察并研究只在文献中才了解的BBU不稳定性.

## 2 “神龙一号”的BBU

“神龙一号”直线感应加速器束流运输系统<sup>[3]</sup>的主体由注入器<sup>[4]</sup>输运段、加速段、聚焦段等3个部分组成. 数千安培的强流脉冲电子束经过二极管加速区到达注入器出口时, 电子能量达到约3.6MeV, 随后进入加速段. 加速段由18个加速节组成, 每个加速节中包

括4个加速腔<sup>[5]</sup>和一个多功能腔<sup>[6]</sup>. 在最初的调试过程中发现了束流脉冲上严重的高频振荡, 如图1所示.

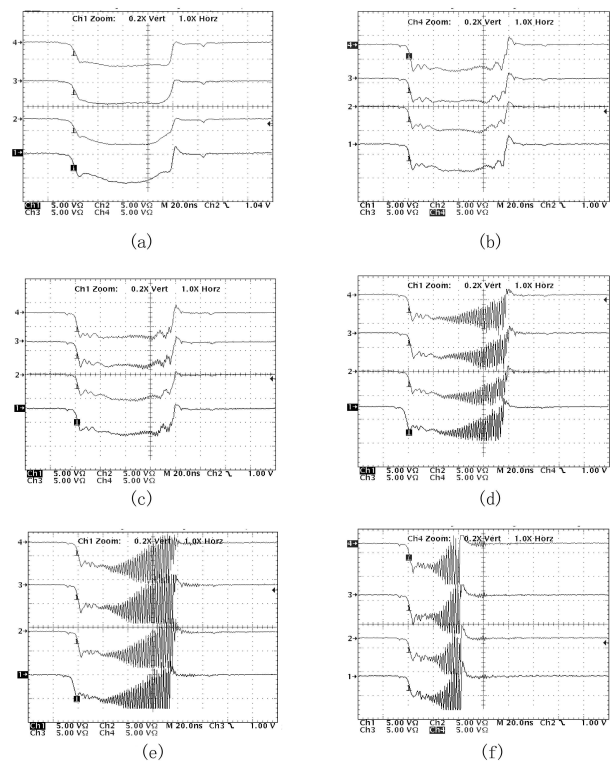


图1 束流脉冲上的高频振荡  
(a) 注入器出口; (b) 第24个腔后; (c) 第28个腔后;  
(d) 第40个腔后; (e) 第52个腔后; (f) 加速器出口.

2008 - 01 - 07 收稿

\* 国家专项基金资助

1) E-mail: dzycap@yahoo.com.cn

束流脉冲上的高频振荡具有如下特点: (1) 振荡频率约 537MHz, 发生在粒子能量被加速到较高以后, 也就是腔的数目足够多以后; (2) 发生在束流的尾部, 而且发展极其迅速; (3) 束流尾部的高频振荡被急剧放大, 致使束流尾部的电子损失而使束流宽度从最初的约 80ns 降低到不到 40ns.

随后通过以下实验过程对高频振荡的性质进行确认: 增大后加速段的输运磁场, 高频振荡的发生后移, 但加速器出口处的束流波形没有明显的改善; 降低输运流强, 高频振荡的发生不仅明显后移, 而且其振荡幅度也明显减小, 加速器出口处的束流波形的宽度也明显变宽; 调整改善阴、阳极头的对中状况后, 也对高频振荡发生后移的和振荡幅度降低具有明显的作用. 实验中还发现脉冲功率系统同步性变好也对高频振荡发生的后移和降低其振荡幅度有一定的改善作用. 以上实验现象完全符合 BBU 的变化规律. 因此我们判断它是 BBU 现象.

### 3 多功能腔的高频特性与 BBU 抑制

直线感应加速器中的 BBU 不稳定性是束流脉冲与腔相互作用的结果. 偏心的束流脉冲经过腔时在其中激励起横向尾场, 横向尾场反过来作用于束流脉冲使其产生横向高频振荡, 这两种因素互相耦合最终导致 BBU 不稳定性. 标志 BBU 增长因子的物理参数是横向耦合阻抗, 它只与腔本身有关.

束流传输出现了严重的 BBU 不稳定性, 其主要根源有两个: 其一初始束流偏心, 其二较高的 BBU 指数增长因子或者说较大的横向耦合阻抗. 在“神龙一号”加速器加速段的束流传输过程中, 只有两个对束

流传输造成影响的元件——加速腔和多功能腔. 加速腔在设计时已经充分考虑到如何降低其横向阻抗问题. 数值模拟和测试结果均表明, “神龙一号”加速器加速腔在低横向耦合阻抗方面的设计与美、法两国处于同一水平. 既然美、法两国没有出现 BBU, 由加速腔激励起 BBU 的可能性也很小, 而且 BBU 的频率与加速腔的几个可能模式的谐振频率也不一致, 那么唯一的根源在于多功能腔.

多功能腔是一种不锈钢筒状结构, 如图 2 所示. 从图 2 的结构中可以看出, 要形成束流传输的高真空环境, 必须考虑抽气的管阻, 中筒末端与下游加速腔衔接处有一个较大的间隙, 而且连通着中筒外壁与外壳之间的空腔. 在设计中, 用金属网罩屏蔽该间隙以达到降低其横向耦合阻抗的目的, 而加工遗漏了网罩, 才造成前文中所述的 BBU 现象.

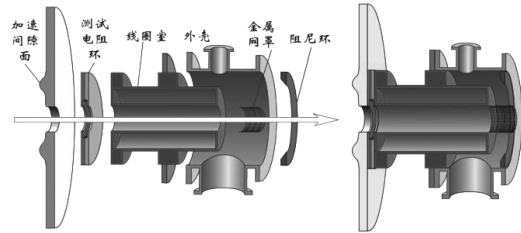


图 2 多功能腔结构示意图

将无网罩多功能腔等效为 Pill-Box 腔, 分别利用解析和数值模拟两种方法对多功能腔的谐振频率、品质因素和横向耦合阻抗进行计算, 结果如表 1 所示, 同表也列出了多功能腔加网罩前后的测量结果. 作为比较, “神龙一号”加速器加速腔的高频特性参数<sup>[7]</sup>如表 2 所示.

表 1 多功能腔的谐振频率、品质因素和横向耦合阻抗

解析分析			数值计算			测量结果				
谐振模式	$f/\text{MHz}$	$Q$	$Z_{\perp}/\Omega\text{m}^{-1}$	$f/\text{MHz}$	$Q$	$Z_{\perp}/\Omega\text{m}^{-1}$	无网罩 $f/\text{MHz}$	无网罩 $Z_{\perp}/\Omega\text{m}^{-1}$	有网罩 $f/\text{MHz}$	有网罩 $Z_{\perp}/\Omega\text{m}^{-1}$
TM <sub>110</sub>	554	13.6k	1.38M	580	1783	610k	558	3775	589	868
TM <sub>120</sub>	1015	15.8k	2.90M	1076	2554	1429k	/	/	/	/

表 2 加速腔的谐振频率、品质因素和横向耦合阻抗

模式	计算结果			测量结果	
	$f/\text{MHz}$	$Q$	$Z_{\perp}/\Omega\text{m}^{-1}$	$f/\text{MHz}$	$Z_{\perp}/\Omega\text{m}^{-1}$
TM <sub>110</sub>	291	20	710	254	454
TM <sub>120</sub>	575	27	910	/	/

不论解析分析、数值模拟或是测量结果, 无网罩多功能腔的横向耦合阻抗比加速腔大得多, 毫无疑问, 观测到的 BBU 是由多功能腔中的尾场而激励起的. 因此在间隙出用金属网罩进行屏蔽是十分必要的. 为了保证多功能腔的可维修性能, 金属网罩必须设计成轴向伸缩式. 多功能腔加上网罩后的束流传输实验表明, BBU 得到有效抑制, 其束流传输效果如图 3

所示.

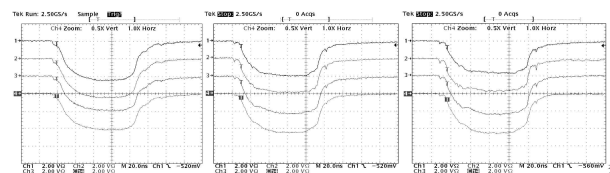


图 3 使用网罩后 BBU 消失

### 4 结论

“神龙一号”直线感应加速器在调试的初期出现了频率为 537MHz 的高频振荡, 束流损失严重, 经过一系

列验证实验, 确认了这种高频振荡就是BBU. 通过对比分析多功能腔和加速腔, 发现是由束流传输线连接枢纽的多功能腔引起的. 在此基础上从解析分析、数值模拟和实验测量等3个方面详细地研究了多功能腔的高频特性. 尽管3种方法的研究结果差别较大, 但都定性地表明了BBU是由偏心束流在多功能腔中激励

的 $TM_{110}$ 引起的. 随后设计了可以轴向伸缩的金属网罩用来屏蔽多功能腔间隙, 成功抑制了BBU.

另一方面, 去掉多功能腔的网罩, “神龙一号”加速器又为我们提供了一个研究直线感应加速器束流尾场的实验平台, 这将是今后需要深入开展的一项研究工作.

## 参考文献(References)

- 1 Neil V K, Hall L S, Cooper R K. Further Theoretical Studies of the Beam Breakup Instability. *Particle Accelerators*, 1979, **9**: 213—222
- 2 Chong Y P, Caporaso G J, Strue K W. *IEEE Transaction on Nuclear Science*, October 1985, **NS-32**(5)
- 3 DAI Zhi-Yong et al. *HEP & NP*, 2007, **31**(4): 395—399 (in Chinese)  
(代志勇等. 高能物理与核物理, 2007, **31**(4): 395—399)
- 4 DING Bo-Nan et al. *HEP & NP*, 2005, **29**(3): 119—223 (in Chinese)  
(丁伯南等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(3): 119—223)
- 5 WANG Hua-Cen et al. *High Power Laser and Particle Beams*, 1996, **8**(3): 313—319 (in Chinese)  
(王华岑等. 强激光与粒子束, 1996, **8**(3): 313—319)
- 6 DAI Zhi-Yong et al. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(10): 1334—1336 (in Chinese)  
(代志勇等. 强激光与粒子束, 2004, **16**(10): 1334—1336)
- 7 ZHANG Kai-Zhi et al. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(2): 219—223 (in Chinese)  
(张开志等. 强激光与粒子束, 2000, **12**(2): 219—223)

## BBU Instability of “Dragon-I” LIA\*

DAI Zhi-Yong<sup>1)</sup> ZHANG Kai-Zhi ZHANG Wen-Wei XIE Yu-Tong

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract** BBU (Beam breakup) instability once appeared in the early stage of “Dragon-I” LIA, which was excited by  $TM_{110}$  mode stimulated when the eccentric beam passed through the multi-functional cavity(MFC). The radio frequency characteristics of MFC were analyzed with three methods such as analytic calculation, numerical computation, and measurement. The frequency of the  $TM_{110}$  mode from these methods agreed with the experimental results, while the transverse coupling impedance was different from the experimental results by some times. The main BBU exciter was the big transverse coupling impedance of the MFC which could be concluded. A grid was designed to shield the gap of the MFC. The experiments show that the BBU was compressed and the high frequency oscillation disappeared.

**Key words** multi-functional cavity, BBU, transverse coupling impedance

Received 7 January 2008

\* Supported by Special National Foundation of China

1) E-mail: dzycap@yahoo.com.cn