

# 平顶波加速对束流纵向相空间的影响<sup>\*</sup>

李浩虎<sup>1)</sup> 王兵 张金泉 唐靖宇

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 介绍了平顶波加速技术的基本思想,并研究了在回旋加速器中,平顶波加速腔各主要参数,如其频率、电压及其稳定度等对束流纵向相空间的影响。

**关键词** 平顶波 回旋加速器 纵向相空间

## 1 引言

为了提高引出束流的品质及流强,世界上很多加速器都采用了平顶波加速技术,如日本的 RIKEN<sup>[1]</sup>、瑞士的 PSI<sup>[2]</sup>以及南非的 NAC<sup>[3]</sup>等.对于传统的加速技术,要得到能散小于  $\pm 1\%$  的引出束流,就要求束流相宽和加速过程中粒子的相移之和不超过  $\pm 10^\circ$ ,因此,对加速器的加工及安装精度的要求就非常严格,同时由于束流相宽所受到的限制,影响了加速器最终引出的束流流强.而引入了平顶波加速技术之后,对这些条件的要求都相对降低了很多,以引入一个 3 次谐波场为例,即使束流相宽和加速过程中粒子的相移之和为  $\pm 20^\circ$  时,引出束流的能散仍然能够控制在  $\pm 0.2\%$  之内.

对于 MW 级的强流回旋加速器而言,要求束流的引出效率非常高,基本上不能有损失.因此束流在引出半径处应具有足够大的圈间距,同时束团本身的径向尺寸也要尽可能的小.前者由高频腔的数量和电压所决定,后者主要取决于 Betatron 振荡的振幅、空间电荷效应的影响以及束团本身的能散. Betatron 振荡的振幅在加速过程中变化很小,空间电荷效应的影响也随着能量的提高迅速减弱<sup>[4]</sup>,而降低束团本身的能散就需要采用平顶波加速技术.

平顶波加速的基本思想就是通过改变束流回旋时所感受到的加速电压波形,以牺牲圈能量增益为

代价来减小束流的能散.其方法是在原有的高频电压上叠加一个高次谐波分量,通常采用的谐波数有 3 次和 5 次两种,可以叠加在主加速腔上,也可以采用增加额外的平顶波腔来实现.图 1 为叠加后的高频电压波形示意图,其中  $A$  的取值通常为  $1/n^2$ ,  $n$  为高次谐波的谐波数.由图可以看出,对于叠加 3 次谐波的情况,粒子所获得的能量增益较小,仅为基波加速时的 89% 左右,但其相位范围较宽,约为  $30^\circ$ ;而对于叠加 5 次谐波的情况,其粒子的能量增益较大,约为基波加速时的 96% 左右,但相位范围较窄,仅为  $20^\circ$  左右.因此,在需要束流流强较强的时候,通常采用叠加 3 次谐波的方式,而在对引出束流能散要求较高的情况时,则最好采用叠加 5 次谐波的方式.下面将以叠加 3 次谐波为例说明平顶波加速对束流能散的影响.

## 2 平顶波腔电压变化对束流能散的影响

假设  $\Delta E_i$  为第  $i$  圈时粒子的能量增益,  $q$  为粒子的电荷数,  $N_{\text{Dee}}$  为主加速腔个数,  $V_{\text{Dee}}$  为主加速腔峰值电压,  $\theta_{\text{Dee}}$  为高频腔张角,  $h_1$  为加速器的谐波数,  $h_2$  为平顶波腔相对于主加速腔的谐波数,  $A$  为主加速腔与平顶波腔的峰值电压之比,  $\Delta\theta$  为平顶波腔与主加速腔之间的相位漂移,  $\theta_i$  为粒子通过主加速腔中心线时的高频相应,如果忽略同一圈中粒子的相

2003-12-29 收稿

\* 国家自然科学基金(10075065)资助

1) E-mail: haohu.li@impcas.ac.cn

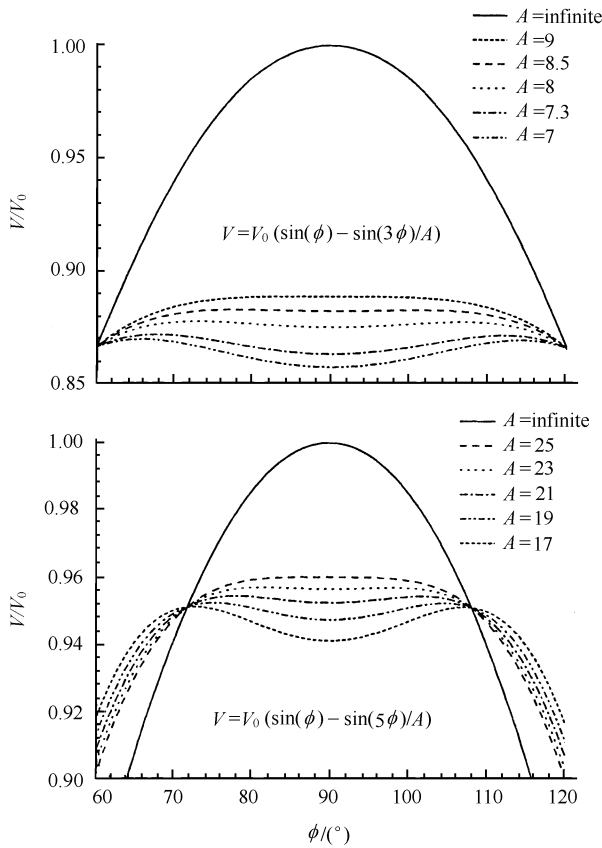


图 1 平顶波电压波形示意图

位漂移, 则可通过简单叠加得到  $\Delta E_i$  的表示式,

$$\Delta E_i = 4qN_{Dee} V_{Dee} \left( \sin \frac{h_1 \theta_{Dee}}{2} \cos \theta_i + \frac{1}{A} \sin \frac{h_2 h_1 \theta_{Dee}}{2} \cos(h_2 \theta_i + \Delta \theta) \right). \quad (1)$$

以叠加 3 次谐波 ( $h_2 = 3$ ) 的方式为例, 对于  $h_1 \theta_{Dee} = 180^\circ$ , 即峰值加速的情况下, 如果不考虑束团的相宽以及加速过程中粒子的相移, 同时平顶波腔与主加速腔之间的相位漂移也为  $0^\circ$  时,  $A = 9$  的效果最好. 而实际束团的相宽、加速过程中粒子的相移以及平顶波腔与主加速腔之间的相位漂移不可能为  $0^\circ$ , 因此  $A$  的最佳取值也就不再等于 9. 假设平顶波腔与主加速腔之间的相位漂移为  $0^\circ$ , 粒子在加速过程中最大相移为  $\pm 5^\circ$  时, 通过计算机模拟可得其最大能散  $\delta E_{max}$  与  $A$  值及束流相宽之间的关系如图 2 所示.

由图中可以看出, 对于不同相宽的束流, 其最小能散所对应的  $A$  值也不同. 例如, 对于束流相宽为  $\pm 10^\circ$  的情况下,  $A = 8.7$  时得到的束流能散最小, 约为  $\pm 0.12\%$ ; 而当相宽增加至  $\pm 15^\circ$  时, 对应的  $A = 8.4$ , 此时束流的能散约为  $\pm 0.45\%$ .

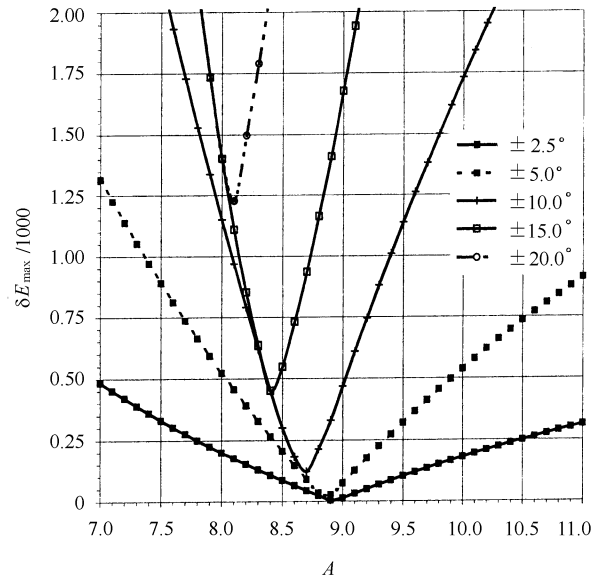


图 2 最大能散与  $A$  值及束流相宽之间的关系

### 3 强流回旋加速器中平顶波腔电压的选择

在回旋加速器中, 束流的能散将造成其径向尺寸的增加, 从而增大了单圈引出的难度, 同时也将增大引出静电偏转板的孔径, 导致其上施加的电压过高. 从上一节的结果可知, 减小束流的相宽有助于降低能散, 但对于强流回旋加速器而言, 减小相宽意味着束团纵向尺寸的减小, 空间电荷效应相应地增强, 束团的能散也随之增大. 实际上当流强很大时, 由于空间电荷效应的影响, 也很难得到相宽很小的束流. 因此在选择平顶波腔电压大小的时候, 应在满足单圈引出要求的前提下, 尽可能地增加束流的相宽.

为了得到单圈引出, 在引出半径处束流的圈间距通常选择为 1—2cm. 束流径向尺寸变化和能散之间的关系如下式(2)所示

$$\frac{\delta R}{R} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta E}{E}, \quad (2)$$

式中  $R$  为引出半径. 假设单圈引出要求束流径向尺寸增大量不超过引出圈间距的 10%, 即  $\delta R$  不大于 1—2mm, 又假设引出半径为 5m, 则可得束流能散应小于  $0.4\%$ — $0.8\%$ . 由图 2 可以得到, 对于  $0.8\%$  的能散要求, 可选择  $A = 8.1$ , 对应的接受相宽为  $\pm 20^\circ$ , 而能散要求为  $0.4\%$  时,  $A = 8.4$ , 对应的接受相宽为  $\pm 15^\circ$ .

以上的结果是在不考虑空间电荷效应影响的前

提下得出的.当流强较大时,对同样的能散要求,其接受相宽要小于上面所得到的值,相应的  $A$  值也略有变化.

### 4 平顶波腔电压及相位稳定性

当平顶波腔的电压或相位出现波动时,会改变束团的圈能量增益,增大了束流的能散,从而增大了单圈引出的难度.仍以上节的情况为例,假设束流相宽为  $\pm 10^\circ$ ,对应的  $A = 8.4$ ,且由于稳定性造成的束团径向位置变化不超过引出圈间距的 5%,则相应的能量变化应小于 0.2‰,对式(1)求微分可得

$$\frac{\Delta E^{\text{ref}}}{E^{\text{ref}}} = \frac{\langle \Delta V_{\text{FT}} \rangle}{0.88 V_{\text{Dec}}} = \frac{\langle \Delta V_{\text{FT}} \rangle}{0.88 \times 8.4 V_{\text{FT}}} = \frac{\Delta V_{\text{FT}} / \sqrt{2}}{7.4 V_{\text{FT}}} \leq 2.0 \times 10^{-4}, \quad (3)$$

其中  $E^{\text{ref}}$  为参考粒子的能量,  $\langle \Delta V_{\text{FT}} \rangle$  为平顶波腔电压漂移的平均值,  $V_{\text{Dec}}$  和  $V_{\text{FT}}$  分别为主加速腔和平顶波腔的峰值电压,  $\Delta E^{\text{ref}}$  为  $E^{\text{ref}}$  随  $V_{\text{FT}}$  的变化值.即平顶波腔电压稳定度为

$$\frac{\Delta V_{\text{FT}}}{V_{\text{FT}}} = 2.1 \times 10^{-3}, \quad (4)$$

同理可得参考粒子总能量随平顶波腔相位的变化为

$$\frac{\Delta E^{\text{ref}}}{E^{\text{ref}}} = \frac{V_{\text{Dec}} \langle \Delta \cos(3\theta + \beta) \rangle}{0.88 \times 8.4 V_{\text{Dec}}} \approx 0.41\theta \langle \Delta \beta \rangle \leq 2.0 \times 10^{-4}, \quad (5)$$

其中  $\Delta \beta$  为平顶波腔的相位漂移,由于  $\theta$  的取值范围为  $\pm 10^\circ$ ,可得平顶波腔相位稳定度为

$$\Delta \beta = 0.1^\circ. \quad (6)$$

图 3 和图 4 为计算机模拟计算的结果.由图 3 可以看出,当要求能量变化小于 0.2‰ 时,  $A$  的取值范围为 8.38—8.42 之间,对应的电压稳定度为 2.3‰,同理,可以由图 4 得到相位稳定度为  $-0.1^\circ$ — $0.2^\circ$  之间,两者都与理论计算的结果相吻合.

### 5 结论及进一步的工作

综合上面的讨论可以得出,在采用平顶波加速技术之后,引出束流的能散将大大降低.此外由于注

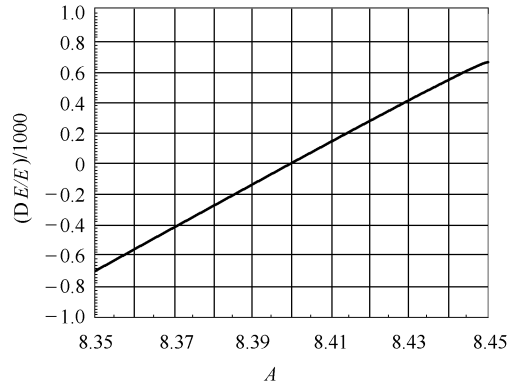


图 3 能量增益随平顶波腔电压的变化关系示意图(束流相宽为  $\pm 10^\circ$ ,  $A = 8.4$ )

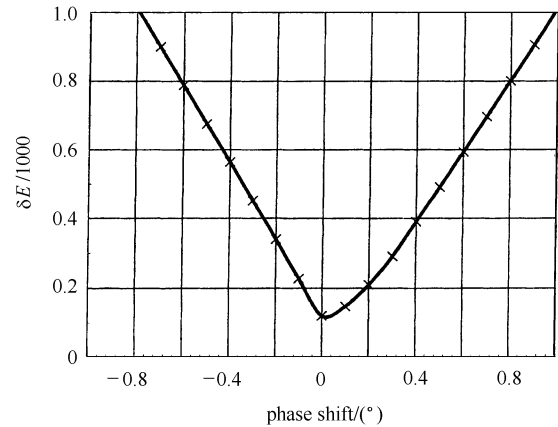


图 4 能散随平顶波腔与主加速腔之间相位漂移的变化(束流相宽为  $\pm 10^\circ$ ,  $A = 8.4$ )

入时接受相宽的增大,使得束线的设计变得相对简单了很多,尤其是聚束器的设计;同时由于平顶波加速技术的引入,对等时场垫补的要求也有所降低,即降低了加速器加工过程中的难度.

实际上,对束流能散造成影响的因素很多,如粒子经过加速间隙时传输时间因子对能量增益的影响、高频腔电压沿半径方向的非均匀分布及回旋加速器的引出系统的影响等.对于强流回旋加速器而言,空间电荷效应的影响将成为增大束流能散的最主要的因素,同时束流经过加速间隙时将对主加速腔和平顶波腔的电压造成不同的影响,这也会导致束流能散的变化.这些都将在以后的工作中加以研究.

**参考文献 (References)**

- 1 Kim J W, Goto A, Mitumoto T et al. Studies on Single Turn Extraction for a Superconducting Cyclotron. In: Luccio A, Mackay W W. 18th Biennial Particle Accelerator Conference. New York: IEEE Computer Society Press, 1999. 2268—2270
- 2 Bopp M, Fitze H, Sigg P et al. Upgrade Concepts of the PSI Accelerator RF Systems for a Projected 3mA Operation. In: Marti F. 16th International Conference on Cyclotrons and Their Applications. East Lansing: American Institute of Physics, 2001. 300—302
- 3 Celliers P J, Botha A H, Conradie J L et al. Present Status and New Developments at NAC. In: Mitaroff W A, Petit-Jean-Genaz Ch, Poole J et al. 7th European Particle Accelerator Conference-EPAC 2000. Vienna: Geneva E. P. S., 2000. 533—535
- 4 Joho W. High Intensity Problems in Cyclotrons. In: Gendreau G. 9th International Conference on Cyclotrons and Their Applications. Caen: Les Editions de Physique, 1982. 337—347

**Effect of Flat-Top Acceleration on Longitudinal Phase Space\***

LI Hao-Hu<sup>1)</sup> WANG Bing ZHANG Jin-Quan TANG Jing-Yu  
(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract** The flat-top technology is widely used to improve beam quality and raise beam current in many cyclotrons. The fundamental of the flat-top technology is described in this article, and the effects of the main parameters of the flat-top cavity, such as the frequency, the voltage and the stability, on the longitudinal phase space is discussed too.

**Key words** flat-top, cyclotron, longitudinal phase space

---

Received 29 December 2003

\* Supported by National Natural Science Foundation of China(10075065)

1)E-mail: haohu.li@impcas.ac.cn