

# BEPC II BPM 模拟研究

袁任贤<sup>1)</sup> 岳军会 曹建设 马力

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 基于减少光电子的要求, BEPC II 真空管道采用 antechamber 结构, TE 模截止频率可能低于 BPM 信号处理频率 500MHz. 本文主要模拟研究 TE<sub>10</sub> 模对位置测量的影响, 发现 TE<sub>10</sub> 模截止频率低于 500MHz 时, 将带来束流位置测量误差 10.1μm; 改变狭缝长度, 在 TE<sub>10</sub> 模截止频率高于 500MHz 时, 测量误差将在可以接受的范围内. 同时, 模拟研究了 BPM 尾场对束流的影响, 计算了相应尾场阻抗.

**关键词** BPM TE<sub>10</sub> 模 截止频率 尾场 阻抗

## 1 引言

由于电子云的影响, BEPC II 采用的真空管道的结构形如图 1, 从减少光电子的角度出发, 希望狭缝的长度较长, 但将导致 TE<sub>10</sub> 模截止频率降低, 可能带来较大的束流位置测量误差. 为此, 需要得到一个既能满足屏蔽光电子要求, 同时也不致带来太大位置测量误差的狭缝长度. 此外, 由于狭缝及 BPM 电极的存在, 将产生束流尾场, 导致束流运动不稳定性, 希望设计出的 BPM 尾场阻抗在可以接受的范围内. 因此最后对综合考虑屏蔽光电子及位置测量要求后设计的 BPM 进行了阻抗计算.

## 2 BEPC II antechamber TE 模对束流位置测量的影响

为了使 500MHz 的 TE<sub>10</sub> 模在真空管道中能传输, 以便研究较坏的情况下 TE<sub>10</sub> 模对位置测量的影响, 加大了 antechamber 狭缝的长度至 0.2m, 此时各高次模的截止频率及其在 500MHz 时的传输参数见表 1. TE<sub>10</sub> 模在 500MHz 时为传输模, 对位置测量有较大影响, 而其他模此时均为衰减模, 认为对测量的影响可以不予考虑. 图 1 为 BPM 处真空管道的横截面; 为

了保证电磁波在开放边界无反射, 相应的边界条件设为波导边界, 同时导入预先计算的波导传输特性; 真空管壁可以认为是理想导体, 相应边界条件为理想电边界.

表 1 antechamber 高次模参数

$n$	$f_{cut}/\text{GHz}$	$\text{Alpha}/\text{m}^{-1}$	$\text{Beta}/\text{m}^{-1}$
1	0.4162	0.0	5.801
2	1.023	18.70	0.0
3	1.521	30.12	0.0
4	1.878	37.93	0.0
5	2.445	50.16	0.0
6	2.976	61.50	0.0
7	3.340	69.20	0.0
8	3.848	79.96	0.0
9	4.353	90.63	0.0
10	4.740	98.80	0.0

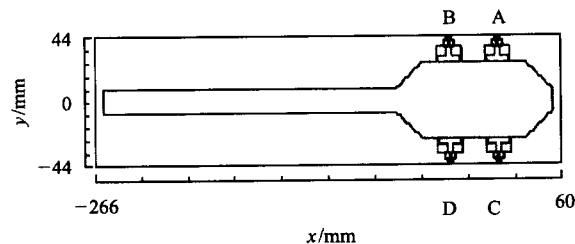


图 1 BPM 横向结构

2003-09-30 收稿, 2003-12-11 收修改稿

1) E-mail: yuanrx@mail.ihep.ac.cn

计算时束流位置偏移(1cm, 1cm), 激励源为单位电流(高斯脉冲, 60dB 带宽 11.823GHz), 用 MAFIA 程序进行了计算, 图 2—5 为此时 TE<sub>10</sub> 模及 BPM 电极输出的幅度振荡曲线及相应幅频曲线<sup>[1]</sup>.

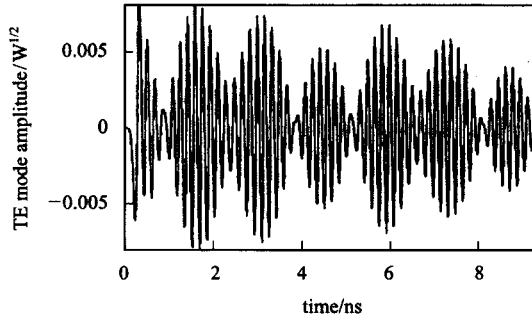


图 2 TE<sub>10</sub> 模幅度振荡曲线

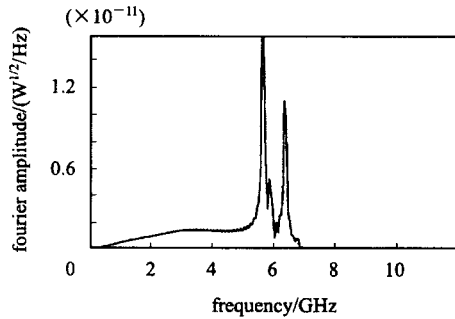


图 3 TE<sub>10</sub> 模幅频曲线

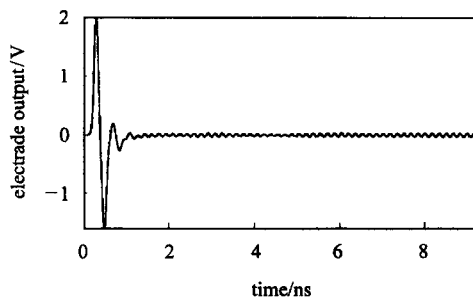


图 4 BPM 电极出口电压

BPM 信号处理电子学带宽 20MHz, 则 500MHz, 20M 带宽内功率

$$p = \Delta f \cdot |F(f_0)|^2 \cdot q^2 / 2\pi \cdot \sigma_i^2 \cdot t_b, \quad (1)$$

其中  $q$  为束团所带电荷量,  $t_b$  为束团间隔,  $\sigma_i$  为束团长度. 考虑到影响功率的因素中只有 500MHz 时的幅度不一样. 定义归一化功率

$$p/k = |F(f_0)|^2, \quad (2)$$

其中

$$k = \Delta f \cdot q^2 / 2\pi \sigma_i^2 \cdot t_b. \quad (3)$$

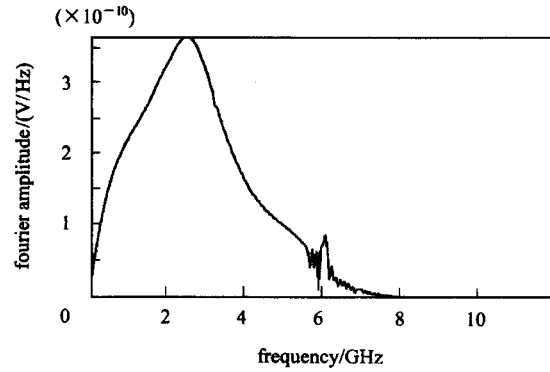


图 5 BPM 电极出口电压幅频曲线

则 TE<sub>10</sub> 模此带宽内的归一化功率为  $2.28 \times 10^{-26}$ , A, B, C, D 四电极输出此带宽内的归一化束流功率为  $4.682 \times 10^{-22}$ ,  $3.395 \times 10^{-23}$ ,  $4.306 \times 10^{-23}$ ,  $1.28 \times 10^{-23}$ . BEPC II 情况下,  $q = 4.85 \times 10^{10} e$ ,  $t_b = 8\text{ns}$ ,  $\sigma_i = 0.05\text{ns}$ . 则 TE<sub>10</sub> 模功率  $P = 0.219\mu\text{W}$ . 电极 A 输出功率  $4498\mu\text{W}$ , 电极 B 输出功率  $326\mu\text{W}$ , 电极 C 输出功率  $414\mu\text{W}$ , 电极 D 输出功率  $123\mu\text{W}$ ; 相应电压输出  $474\text{mV}$ ,  $127\text{mV}$ ,  $143\text{mV}$ ,  $78\text{mV}$ .

又 TE 模具有确定的电场分布, 而影响 BPM 探头输出的主要为  $y$  方向电场. 在两维情况下用 E 模块计算了 TE<sub>10</sub> 模的电场分布(见图 6). TE<sub>10</sub> 模电场主要集中于狭缝内. 用 T3 模块计算 500MHz 的 TE<sub>10</sub> 模幅度到四探头 A, B, C, D 的传输系数分别为  $2.0 \times 10^{-3}$ ,  $3.75 \times 10^{-3}$ ,  $2.0 \times 10^{-3}$ ,  $3.75 \times 10^{-3}$ , 相应功率传输系数分别为  $4.0 \times 10^{-6}$ ,  $1.406 \times 10^{-5}$ ,  $4.0 \times 10^{-6}$ ,  $1.406 \times 10^{-5}$ .



图 6 TE<sub>10</sub> 模电场分布

500MHz 的 TE<sub>10</sub> 模在 BPM 段真空管道处为传输模, 该段管道长 3m. 对矩形波导, TE<sub>10</sub> 模导体衰减常数为<sup>[2]</sup>

$$\alpha_c = P_L / 2P_{TE_{10}}, \quad (4)$$

则

$$\alpha_c = \frac{R_s}{b \cdot \eta} \cdot$$

$$\left(1 + 2 \cdot \frac{b}{a} \cdot \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2\right)^{-1/2}, \quad (5)$$

其中  $P_L$  为 TE<sub>10</sub> 模在单位长度波导上的功率损耗;  $P_{TE}$  为此时 TE<sub>10</sub> 模的输入功率, 则可以认为 TE<sub>10</sub> 模经

过  $1/\alpha_c$  的距离即完全衰减掉. 另  $R_s$  为波导壁单位面积的表面电阻,  $\eta$  为真空阻抗,  $a$  为矩形波导的宽边,  $b$  为窄边长度.

考虑到电磁场主要集中于狭缝区间,  $b$  应该取狭缝高度 0.015m; 对  $TE_{10}$  模,  $a$  可能介于两种情况之间: 一是真空盒全宽度, 一是  $1/2$  截止波长, 分别为 0.312m 和 0.360m. 按两种情况计算的衰减常数分别为  $5.047 \times 10^{-3}$  和  $2.432 \times 10^{-3}$ , 相应的衰减长度分别为 198m 和 411m. 如 500MHz 的  $TE_{10}$  模在该段真空盒两端边界处反射系数约为 1, 则影响垂直位置测量的  $TE_{10}$  模功率将通过 BPM 66 到 137 次左右, 取中位值 102. 在 BEPC II 情况下,  $TE_{10}$  模 102 次通过 BPM 处耦合进 A, B, C, D 四电极的功率分别为  $8.94 \times 10^{-5} \mu\text{W}$ ,  $3.14 \times 10^{-4} \mu\text{W}$ ,  $8.94 \times 10^{-5} \mu\text{W}$ ,

$3.14 \times 10^{-4} \mu\text{W}$ , 相应电压输出 0.0669mV, 0.125mV, 0.0669mV, 0.125mV.

$TE_{10}$  模电场  $y$  分量的方向在上、下管壁处始终一致, 而束流电场  $y$  分量的方向在上、下管壁处相反. 相当于束流电场相位不变, 而  $TE_{10}$  模以一定的频率振荡, 相对束流电场的相差为  $\omega t + \Phi_0$ , 初相位  $\Phi_0$  在同一水平面一致, 在电极 A, B 与 C, D 间则相差  $\pi/2$ . 假定任意电极反映束流位置信息的平均功率为  $P_B$ , TE 模平均功率为  $PT$ ; 则 BPM 输出电压  $UB, UT$  相应为  $PB^{1/2}$ ,  $PT^{1/2} \cos(\omega t + \Phi_0)$ . 考虑计算束流位置的归一化方法<sup>[3]</sup>, 计算水平位置时, 上下相对探头求和, 结果是消除  $TE_{10}$  模影响; 计算垂直位置时, 上下相对探头相减, 结果是放大了  $TE_{10}$  模影响.

$$y_{\text{Mea}} = S_Y \frac{(UB_A + UB_B - UB_C - UB_D) + (UT_A + UT_B - UT_C - UT_D)}{U_A + U_B + U_C + U_D}. \quad (6)$$

由于 TE 模功率远小于束流位置信号功率, 则有

$$y_{\text{Mea}} = y_R + \frac{2y_R(UT_A + UT_B)}{UB_A + UB_B - UB_C - UB_D}. \quad (7)$$

故  $TE_{10}$  模导致的位置测量误差为

$$\sigma = \frac{2 \cdot (PT_A^{1/2} + PT_B^{1/2}) \cdot y_R}{PB_A^{1/2} + PB_B^{1/2} - PB_C^{1/2} - PB_D^{1/2}}. \quad (8)$$

则  $TE_{10}$  模导致的位置测量误差为  $10.1 \mu\text{m}$ , 而 BEPC II 束流位置测量系统重复测量精度设计在  $10 \mu\text{m}$  以内; 显然  $TE_{10}$  模导致的位置测量误差超出了可能的误差分配范围. 因此改变真空盒狭缝长度, 以提高  $TE_{10}$  模截止频率在 500MHz 以上; 此时, 500MHz  $TE_{10}$  模为衰减模, 只能在真空盒里传播很短一段距离, 导致的位置测量误差将有可能在可以接受的范围內.

BEPC II BPM 处真空盒狭缝长度最终设计为 75mm, 此时  $TE_{10}$  模的截止频率为 868.8MHz, 500MHz 时为衰减模, 传播常数  $\alpha = 14.89\text{m}^{-1}$ . 在同等条件下进行了相应计算, 束流位置信号功率几乎不变, 电极 A, B, C, D 输出功率分别为  $4498 \mu\text{W}$ ,  $326 \mu\text{W}$ ,  $414 \mu\text{W}$ ,  $123 \mu\text{W}$ ; 相应电压输出 474mV, 127mV, 143mV, 78mV. 500MHz 的  $TE_{10}$  模此带宽内的归一化功率为  $5.91 \times 10^{-26}$ , 到四电极 A, B, C, D 的幅度传输系数分别为  $2.88 \times 10^{-3}$ ,  $4.74 \times 10^{-3}$ ,  $2.88 \times 10^{-3}$ ,  $4.74 \times 10^{-3}$ , 相应功率传输系数为  $8.29 \times 10^{-6}$ ,  $2.25 \times 10^{-5}$ ,  $8.29 \times 10^{-6}$ ,  $2.25 \times 10^{-5}$ . 此时

$TE_{10}$  模在 3m 长的真空盒里将衰减到输入幅度的  $4.0 \times 10^{-20}$  倍, 可以认为  $TE_{10}$  模功率在真空盒里为单次通过, 通过 BPM 处耦合进电极 A, B, C, D 的  $TE_{10}$  功率分别为  $4.71 \times 10^{-6} \mu\text{W}$ ,  $1.28 \times 10^{-5} \mu\text{W}$ ,  $4.71 \times 10^{-6} \mu\text{W}$ ,  $1.28 \times 10^{-5} \mu\text{W}$ ; 相应电压输出 0.0153mV, 0.0253mV, 0.0153mV, 0.0253mV. 此时  $TE_{10}$  模导致的位置测量误差为  $2.1 \mu\text{m}$ , 在可以接受的误差范围内.

### 3 尾场对束流的影响

运动速度可与光速比拟的带电束流通过光滑且理想导电的真空管道时将不产生尾场, 也就是说束流与真空管道的相互作用只发生在束流所在的横截面內. 但若束流通过具有不连续结构的真空管道或不完全导电的真空管道时, 束流将会损失能量在该段管道上, 同时, 在束流通过的后方将产生尾场. 产生尾场的束流在损失能量的同时, 运动将受到扰动; 同时, 后面通过的束流将受到该尾场作用力, 运动也将受到扰动. 尾场分为横向尾场及纵向尾场, 分别带来束流的横向运动不稳定性及纵向运动不稳定性. 尾场在时域的表达形式是尾场函数, 尾场函数的 Fourier 变换即是尾场阻抗. 一般的, 可用尾场阻抗来衡量真空结构的尾场性质.

综合考虑 TE 模带来的测量误差及光电子云影响, BEPC II 采用的 antechamber 结构形如图 1, 但狭

缝长度为 75mm; 此时,  $TE_{10}$  的截止频率 868.8MHz, TE 模带来的测量误差为  $2.1\mu\text{m}$ , 在可以接受的范围内, 但纵向尾场对束流运动的影响需要考虑, 用 Mafiasoft 软件模拟计算了尾场阻抗及束流能量损失<sup>[4]</sup>. 由于对称性, 模拟计算时只用了结构的上半部分.

选择激励源为总电量 1pC 的高斯分布束团, 半高宽  $\sigma_z = 1.5\text{cm}$ , 总长度  $10\sigma_z$ . 图 7 是模拟所得的纵向尾场势, 横坐标为自然坐标, 原点为理想的束团首粒子, 正方向与束团运动方向相反.

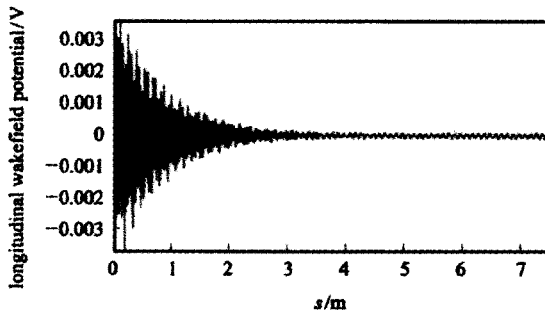


图 7 束团通过 BPM 时产生的纵向尾场势

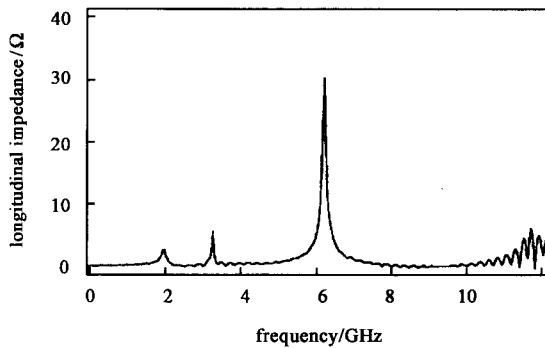


图 8 纵向尾场阻抗幅频特性

由于束团为高斯分布, 计算所得的尾场势为所有粒子形成的尾场势的叠加. 即

$$U_w(z) = \int_0^{10\sigma_z} q(v) \cdot w(z-v) dv, \quad (9)$$

其中  $w(z)$  为尾场函数,  $q(z)$  为束团电荷分布函数

$$q(z) = Q_0 / \sqrt{2\pi} \cdot \sigma_z \cdot \exp\left(-\frac{(z-5\sigma_z)^2}{2\sigma_z^2}\right),$$

$$0 < z < 10\sigma_z, \quad q(z) = 0, \quad \text{else}. \quad (10)$$

由于积分限外的  $q(z)$  为零, 该积分可外推到无穷区间, 所以尾场势为束团电荷分布与尾场函数的卷积, 相应的在频域有

$$U_w(w) = q(w) \cdot Z(w). \quad (11)$$

图 8 为纵向尾场阻抗, 很明显, 6.4GHz 处有一阻抗为  $30\Omega$  的峰, 其  $Q$  值远大于 1, 为典型的窄带阻

抗, 与这一谐振峰对应的振荡模式应为 BPM 电极处同轴线结构的  $TE_{11}$  模, 其截止频率 5.96GHz, 相应特性阻抗  $7.5\Omega$ . 由于 BPM 电极耦合的束流能量最终通过特性阻抗为  $50\Omega$  的同轴线输出, 若某处结构的特性阻抗不匹配, 能量将在该界面处反射, 形成纵向尾场阻抗峰值. 但对尾场阻抗峰值的形成、频率漂移及影响强度的因素需要进一步的研究. 同时, 由纵向尾场势可以得到低频宽带阻抗, 如为纯电感,  $L = 0.026\text{nH}$ , 相应宽带阻抗  $|Z/n| = 2.06 \times 10^{-4}\Omega$ . 在 BEPC II 的情况下, 一共有 68 个 BPM, 则总电感  $1.768\text{nH}$ , 宽带阻抗  $0.014\Omega$ .

在束团内部, 自然坐标系里横坐标为  $z$  的粒子通过该段结构时将等效于在一总电势为  $U(z)$  的电场里运动, 将损失或者获得能量, 则束团总能量变化

$$\Delta E = \int_0^{10\sigma_z} q(z) \cdot U_w(z) \cdot dz. \quad (12)$$

定义能量损失参数:

$$k = \Delta E / Q^2. \quad (13)$$

积分后求得能量损失参数为  $9.211 \times 10^{-4} \text{V/pC}$ . 在 BEPC II 的情况下, 单束团粒子数  $N = 4.85 \times 10^{10}$ , 束团间隔 2.4m, 则束团在单个 BPM 处损失的功率为 6.95W.

## 4 结论

用 Mafiasoft 软件对 BEPC II 所用的 BPM 进行了模拟研究, 主要讨论了 TE 模对束流位置测量的影响, 发现在 antechamber 结构狭缝长度 0.2m,  $TE_{10}$  模截止频率低于信号处理频率 500MHz 的情况下, 将带来束流位置测量误差  $10.1\mu\text{m}$ ; 改变狭缝长度到 0.075m,  $TE_{10}$  模截止频率高于 500MHz 时, 带来的测量误差  $2.1\mu\text{m}$ , 在可以接受的范围内. 同时, 讨论了尾场对束流的影响, 对 BEPC II 现在设计的 antechamber 结构 BPM, 窄带阻抗约  $30\Omega$ , 峰值频率 6.4GHz, 对应 BPM 电极处同轴线结构的  $TE_{11}$  模截止频率 5.96GHz; 单个 BPM 电感  $L = 0.026\text{nH}$ , 相应宽带阻抗  $2.06 \times 10^{-4}\Omega$ . 在 BEPC II 的情况下, 68 个 BPM 总电感  $1.768\text{nH}$ , 宽带阻抗  $0.014\Omega$ . 同时, 对单个 BPM, 在束团长度 1.5cm 情况下, 能量损失参数为  $9.211 \times 10^{-4} \text{V/pC}$ ; 在 BEPC II 设计参数下, 束团将损失功率 6.95W.

感谢中国科学院高能物理研究所加速器中心王九庆老师在研究过程中的热情帮助.

## 参考文献 (References)

- 1 Corlett J, Ng C-K, Smith S-R. Effect of TE Mode Power on the PEP II LER BPM System. In: Proc. of PAC97. Vancouver: 1997. 2116—2118
- 2 LIAO Cheng-En. Basis of Microwave Technology. Xi'an: Publisher of Xidian University, 2001. 74(in Chinese)  
(廖承恩. 微波技术基础. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001. 74)
- 3 MA Li, SHI Ping, YE Kai-Rong. HEP & NP, 1998, 22(5):475—480 (in Chinese)  
(马力, 石平, 叶恺容. 高能物理与核物理, 1998, 22(5):475—480)
- 4 Ng C-K, Weiland T, Martin D et al. Simulation of PEP-II Beam Position Monitors. In: Proc. of PAC95. Dallas: 1995. 2485—2487

## Simulation of BEPC II's BPM

YUAN Ren-Xian<sup>1)</sup> YUE Jun-Hui CAO Jian-She MA Li

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

**Abstract** Considering the effect of photoelectron, BEPC II's beam position monitor (BPM) uses antechamber structure. The cut-off frequency of TE mode is maybe lower than the BPM signal processing frequency 500MHz. The power of TE mode will result in beam position measurement error. With monitoring the antechamber's TE mode power amplitude and calculating the transmission of TE mode power to BPM's electrodes, we can calculate the error of position measurement caused by TE mode. We found that the error is beyond the acceptance when the cut-off frequency of TE<sub>10</sub> mode is lower than 500MHz. By changing the slot length, the cut-off frequency is higher than 500MHz and the error could be accepted. At last the effect of the wakefield to the beam has been simulated and the longitudinal impedance of wakefield has been calculated.

**Key words** BPM, TE<sub>10</sub> mode, TE cut-off frequency, wakefield, impedance