

# BEPC 静电分离器分路阻抗 和功率损耗研究\*

戴建枰<sup>1)</sup> 柴学东 赵振堂  
(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 通过测量 BEPC 静电分离器各主要模式的分路阻抗,分析了 BEPC 运行过程中静电分离器的高压电缆隔离层不时烧化的原因,同时对 BEPC 流强进一步提高时静电分离器中的功耗进行了计算.

**关键词** 静电分离器 分路阻抗 功率损耗

## 1 前言

静电分离器是一种腔体结构,其作用是在注入及升能过程中将正、负电子分开. 在 BEPC 储存环中,静电分离器是整环耦合阻抗的重要贡献者,另外,在运行中常发生谐振模式功率“烧化”静电分离器高压电缆接头处隔离层的现象. 因此,为降低 BEPC 储存环的耦合阻抗以缩短束团长度,以及有效控制静电分离器中谐振模功耗造成的危害,仔细研究 BEPC 静电分离器分路阻抗和功耗有着十分重要的意义.

## 2 分路阻抗的测量

BEPC 静电分离器的结构示意图如图 1 示.



图 1 BEPC 静电分离器的结构示意图

它可近似于两端短路的同轴腔. 其主要模式为 TEM 模. 各模式的谐振频率为:<sup>[1]</sup>

2000-06-22 收稿, 2000-11-28 收修改稿

国家自然科学基金资助(19875065)

1) Email: daijp@ssrc.ac.cn

$$f_k \approx k \cdot \frac{c}{2L}, \tag{1}$$

式中参数  $k$  为自然数,  $c$  为光速,  $L$  为极板的长度.

根据  $k$  的奇偶性, 我们可推断出静电分离器中各 TEM 模式场的分布:

(a)  $k$  为奇数时, 静电分离器两端电场的轴向分量方向一致, 中心处场强为“波节”点, 很弱, 如图 2 示.

(b)  $k$  为偶数时, 静电分离器两端电场的轴向分量方向相反, 中心处场强为“波峰”点, 很强, 如图 3.

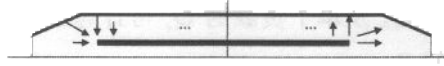


图 2  $k$  为奇数时的电场分布示意图



图 3  $k$  为偶数时的电场分布示意图

把  $L = 2.02\text{m}$ , 代入(1)式, 可得静电分离器的基模频率为  $f_1 \approx 1 \cdot \frac{c}{2L} = 74.3\text{MHz}$ . 这与测量结果  $f_1 = 71.7\text{MHz}$  接近, 而各高次模频率的测量结果与(1)式的计算结果也基本一致. 图 4 是测得各模式的透射谱, 图中横坐标为频率, 单位 MHz, 纵坐标为各模式的  $S_{21}$  参数. (因频率高于  $750\text{MHz}$  的高次模的分流分路阻抗  $R/Q$  很小, 不再给出其透射谱)

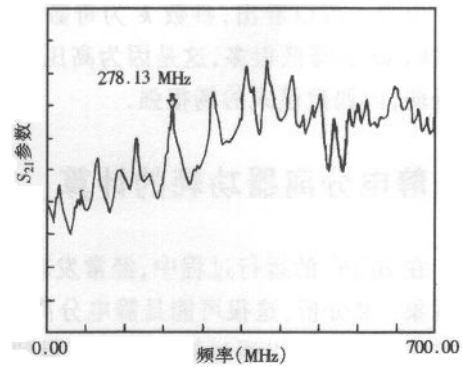


图 4 静电分离器中各模式的透射谱

为得到静电分离器中各模式的纵向分路阻抗, 我们用微扰法进行了测量. 测量装置如图 5 所示. 测量中所用的主要仪器为微机控制的 HP8753C 网络分析仪. 所选用的微扰体为笼子式的金属微扰体, 其微扰参数  $C$  由一个  $600\text{MHz}$  的铝标准腔定标而得. 测量结果如表 1 所示.

表 1 BEPC 静电分离器主要模式的参数

参数 $k$	频率 $f_k/\text{MHz}$	$R/Q(\Omega)$	$Q_0$	$Q_L$ (一个负载)	$Q_L$ (两个负载)
1	71.73	10.5	2280	2220	2163
2	144.86	6.5	2980	745	426
3	214.74	1.9	3700	3660	3621
4	281.03	8.1	3238	160	82
5	354.51	0.9	3630	3586	3543
6	428.18	6.7	2952	95	48
7	490.57	2.7	2640	2625	2610
8	552.5	30.4	1175	60	31
9	623.51	22.5	970	956	942

BEPC 实际运行中的静电分离器共接有上、下两根高压电缆线(负载). 测量时, 由于

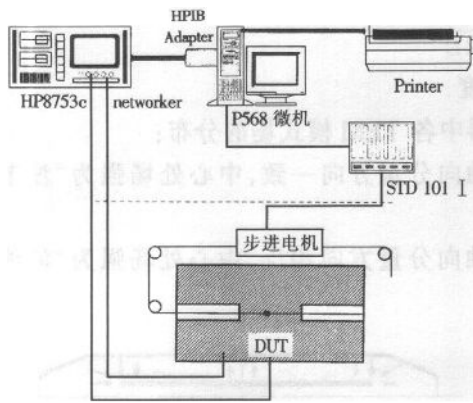


图 5 分路阻抗测量装置示意图

条件限制,我们只测了加上一根高压电缆线后静电分离器各模式的有载  $Q$  值,即表 1 中  $Q'_L$  (一个负载),其实际的  $Q_L$  值,即表 1 中  $Q_L$  (两个负载)的值是通过理论计算得到的. 计算所用的公式如下:

由  $Q_0$  及  $Q'_L$  可计算得到单个负载的  $Q_L$ :

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q'_L} - \frac{1}{Q_0}, \quad (2)$$

由  $Q_0$  及单个负载的  $Q_L$  可计算得到两个负载的  $Q_L$ :

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{2}{Q_L}. \quad (3)$$

由表 1 可以看出,参数  $k$  为奇数的模式在加高压电缆线前后  $Q$  值基本不变,而偶数模式的  $Q$  值降低很多,这是因为高压电缆的接头位于静电分离器的中心,此处奇数模式的场弱,而偶数模式的场很强.

### 3 静电分离器功耗的计算

在 BEPC 的运行过程中,经常发现静电分离器高压电缆接头处的“隔离层”发生烧化的现象. 经分析,这很可能是静电分离器中谐振模功率导致的. 束团均匀分布时,类腔体中谐振模功率可以通过解析式计算得到<sup>[2,3]</sup>,而非均匀分布时,无法用简单的解析式加以计算. 为此,我们编制了计算一般情形下类腔体中高次模功率的程序. 把 BEPC 运行过程中同步辐射模式和对撞模式下的典型参数输入所编的程序,可得到这两种模式下,静电分离器本身及分离器本身及负载的功率损耗,如表 2 所示<sup>1)</sup>. 由图 2、图 3 静电分离器的场分布可知, $k$  为偶数模式场的功率将通过高压电缆传到负载上,而  $k$  为奇数模式场的功率将留在静电分离器内.

表 2 各运行模式下静电分离器的功率损耗

运行模式	对撞模式	同步辐射模式 I	同步辐射模式 II
能量 $E/\text{GeV}$	1.548	2.2	2.2
总腔压 $V_t/\text{MV}$	1.0	0.65	0.6
束团数 $B$	1	1	60
束长 $\sigma_l/\text{cm}^*$	4.69	7.35	2.6
总流强 $I_t/\text{mA}$	50	75	110
腔体功耗 $P_c/\text{kW}$	0.024	0.120	0.002
负载功耗 $P_l/\text{kW}$	0.057	0.183	0.006

表 2 中,单束团模式下,束长值  $\sigma_l$  由 BEPC 束长之 Scaling Law 计算所得<sup>[4]</sup>

1) 戴建群“耦合阻抗与束流不稳定性研究”高能物理所博士后工作报告(1999 年)

$$\sigma_l(\text{cm}) = 0.651 \times \left( \frac{I_b(\text{mA}) \alpha_p}{E(\text{GeV}) \nu_s^2} \right)^{\frac{1}{3.49}} \quad (4)$$

式中  $I_b$  为单束团的流强,  $\alpha_p$  为动量压缩因子,  $E$  为束流能量,  $\nu_s$  为一个回旋周期粒子纵向振荡的数目. 在同步辐射模式 II, 即多束团运行模式下, 因各束团的流强很小, 所取的束长为束团的自然长度.

由以上计算可以看出, BEPC 多束团运行时, 静电分离器中的功耗很小, 而单束团运行时产生的功率较大, 并且功率主要是消耗在负载上, 即高压电缆接头处. 如这部分功率不能很好地吸收, 则长期运行时其产生的热量很可能烧化静电分离器高压电缆接头附近的隔离层.

当 BEPC 的储存束流进一步提高, 如提高到 150mA 时, 则在单束团同步模式下, 静电分离器负载的功率将为 0.562kW, 此时, 对静电分离器中的功耗应予以足够的重视.

对静电分离器各模式参数的测量是在低电平信号下测量得到的, 谐振频率及品质因数会和实际的情况有差别(分路阻抗  $R/Q$  因只和腔体形状有关, 基本没有差别), 但由于  $k$  为偶数的模式(我们最关心的模式)的品质因数很低, 该模式的谐振频率有所变化以及品质因数有所变化时, 其功率损耗变化并不大. 例如, 在同步辐射 I 这一工作模式下, 对  $k=6$  这一谐振模式, 其品质因数由 48 变为 480 时, 功率由 23.3W 变为 20.5W, 相差约 10%. 因此, 静电分离器功耗的计算是可信的.

#### 参考文献(References)

- 1 ZHOU F. GUO Z Y, WANG S H. Impedance Studies for BEPC PAC97, 1729—1731
- 2 Haebel F. RF Design-Higher Order Modes. Lecture Note in Physics No. 425, Beiglbock W et al Eds, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1992, 312—316
- 3 Wilson P. High Energy Electron Linacs: Application to Storage Ring RF Systems and Linac Collider. SLAC-PUB-2884, Feb. 1982, 35—44
- 4 Guo Z et al. Beam Instability Studies in the BEPC. EPAC2000, 1127—1129

### Shunt Impedance and Power of the BEPC DC Separator

DAI Jian-Ping<sup>1)</sup> CHAI Xue-Dong ZHAO Zhen-Tang

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

**Abstract** During the operation of BEPC, the cable isolation layer near the high voltage connector of the DC separator is often melted, which is probably caused by the power of the resonant modes. This paper presents the measurement of the shunt impedance and the calculation of the power dissipated in the separator and through the connector.

**Key words** DC separator, shunt impedance, power

Received 22 June 2000, Revised 28 November 2000

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (19875065)

1) E-mail: daijp@ssrc.ac.cn