

对北京正负电子对撞机阻抗的研究

周 峰

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘 要 比较全面地研究了北京正负电子对撞机(BEPC)的耦合阻抗并试图从降低耦合阻抗的角度来探讨压缩 BEPC 束长的可能性。

关键词 尾场 耦合阻抗 束长拉伸

1 引言

束流与环境的相互作用在频域和时域上分别由耦合阻抗和尾场来表示,两者通过傅里叶变换进行转换,耦合阻抗是分析微波不稳定性和耦合束团不稳定性的关键参数.本文着重研究了北京正负电子对撞机(BEPC)几个重要部件,如高频腔、波纹管小腔、静电分离器 and 冲击磁铁等的阻抗和俘获模.最后模拟计算了 BEPC 束长拉伸,并与实验结果进行了比较.

2 BEPC 全环的尾场

BEPC 环的尾场主要来自于高频腔、静电分离器、冲击磁铁、波纹管两端的小腔、真空法兰、真空阀门、各类波纹管和对撞区等¹⁾. 在 1995 年,我们屏蔽了 40 对小腔中的 33 对后,全环的尾场和阻抗均已降低.图 1 比较了 1995 年改进前和改进后的 BEPC 全环的尾场,表 1 给出了 BEPC 真空盒部件的有效电感量和损失因子.从表中可看出,屏蔽 33 对弧区波纹管两端的小腔后,有效低频电感量降低了约 360nH.

我们还研究了 BEPC 改进前和改进后的损失因子随束团长度的关系,改进前,损失因子 k_1 与束长的关系可表示为:

$$k_1 = 35(\sigma(\text{cm}))^{-1.45} \text{V/pC}, \quad (1)$$

1995 年改进后, BEPC 损失因子与束长的关系可表示为:

1997-08-14收稿,1997-11-24收修改稿

1) 周峰. “阻抗基础理论和其应用的研究”. 博士论文. 中国科学院高能物理研究所. 北京, 1997

表1 改进前和改进后的阻抗和损失因子的分配(其中括号内的数为改进后的值)

	电感量 (nH)	损失因子 (V/pC)
高频腔	—	1.01
波纹管的小腔	350(61.4)	1.7(0.30)
冲击磁铁	40	0.146
静电分离器	38	0.15
对撞区	28.1(0)	0.14(0)
法兰	31.8	0.205
真空阀门(1)	12.7	0.028
真空阀门(2)	38.2	0.189
各类波纹管	63.7	0.019
总量	602.5(313.9)	3.6(2.2)

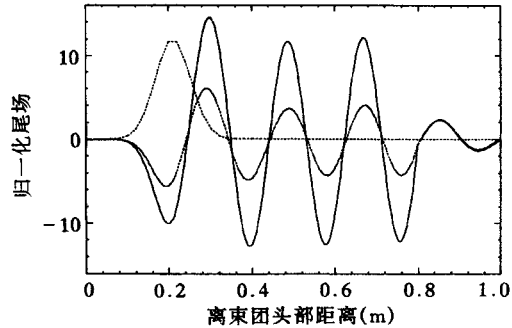


图1 BEPC改进前和改进后的尾场

——束团分布; ——屏蔽前; ——屏蔽后.

$$k_1 = 23.3(\sigma(\text{cm}))^{-1.51} \text{ V/pC}. \quad (2)$$

2.1 高频腔

高频腔的阻抗问题是一个比较复杂的问题,对长束长来说,腔的阻抗呈电感性的;可是对短束长来说,它又呈电容性的.因此,在研究高频腔的阻抗时,首先需要仔细判断其尾场是电感、电容抑或电阻型的,然后,可确定它的拉伸情况.

我们研究了 BEPC 腔的尾场如图 2 所示,从图上可知,其尾场呈电容性.当束长为 4.2cm 时,其损失因子为 0.2524V/pC;利用 BEPC 高频腔的尾场格林函数来模拟腔的束长拉伸或压缩情况.图 3 比较了 BEPC 1 个腔与 4 个腔的束长随流强的拉伸或压缩情况.从模拟计算中可知,4 个 BEPC 高频腔的尾场比 1 个腔的尾场更能压缩束长,尽管压缩幅度较小.但是实际的束腔相互作用非常复杂,因此一般在建造时均采用尽可能少量的腔数^[1].

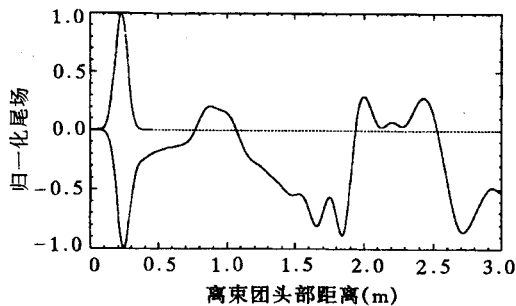


图2 BEPC腔的尾场

——束团分布; ——纵向尾场.

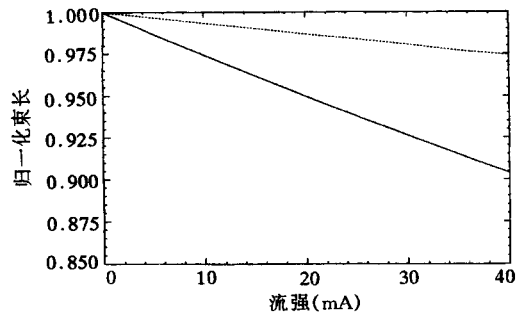


图3 腔尾场的束长压缩情况

-----1个腔; ——4个腔.

2.2 波纹管两端小腔

在 BEPC 所有弧区波纹管两端均有约 2cm 的小腔, BEPC 有 40 对这样的弧区波纹管,

因此共有 80 个这样的小腔. 在 1994 年, 我们用温度探头紧贴在不同位置的波纹管小腔及其它真空部件的外表面上, 然后来观察它们的发热情况, 结果是波纹管的小腔平均温升在 10°C 左右, 而其它部件在强流条件下, 温升只有 $1\text{--}2^{\circ}\text{C}$. 可见, 它的高次模功率损耗较大. 我们还用三维程序 MAFIA 研究了两小腔的尾场, 如图 4 所示, 对 BEPC 约 $4.5\text{--}5.5\text{cm}$ 的束长, 波纹管两小腔的尾场呈电感型的, 其有效电感量为 11.1nH . 其损失因子 $k_1 = 0.0425\text{V/pC}$, 在流强 $I = 45\text{mA}$ 时, 对应的功率损耗为 70W . 在频域上还研究了小腔的透射谱, 发现小腔内含有 1.66GHz 的 TM-like 模. 同样测得了屏蔽小腔后的透射谱, 可知 1.66GHz 模已消失. 同时在 1996 年测量了在强流条件下, 屏蔽波纹管小腔后的温升只有 0.3°C , 而在同样条件下, 高频腔的高次模抑制器的温升约为 6°C . 从上述的分析中可知, 屏蔽波纹管小腔后的阻抗已降低了.

2.3 静电分离器

BEPC 静电分离器的电流板有两米长, 而束长又相对较短, 那么对一个静电分离器数值模拟时, 将需要的网格数会很大, 计算机耗费的机时将会很长, 但束团在电流板之间运动, 与束团一起运动的电磁场不会发生变化, 因此其尾场与电流板长度无关. 表 2 给出了损失因子随电流板长度的变化关系, 可见, 长度从 10cm 变化到 100cm , 其损失因子几乎没有变化. 我们还研究了损失因子随电流板宽度的变化, 模拟计算表明, 电流板宽度越长, 则其损失因子也越大, 如图 5 所示. 这也可以定性地来解释, 当电流板宽度越宽, 那么产生的感应电荷会越多, 相应的损失因子也就越大.

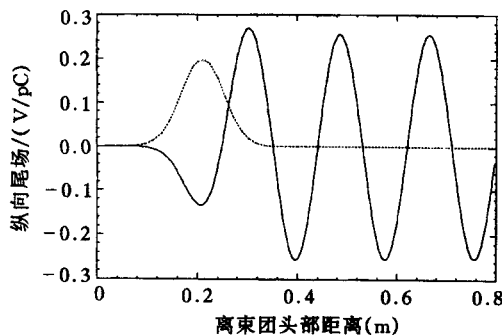


图 4 两小腔的尾场

——纵向往尾场; - - - -束团分布.

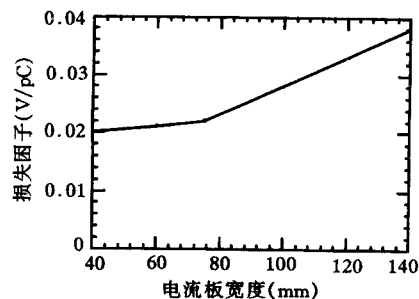


图 5 损失因子随电流板宽度的关系

同样, 也研究了静电分离器的俘获模. 图 6 为其透射谱, 从谱上可看到, 当频率小于 1GHz 时, 有若干个俘获模, 而且模的频率按一定的规律变化. 实际上, 可将整个静电分离器等效为传输线, 其内导体为平行电流板, 外导体为外面的大真空箱. 则传输线的共振波长可由下式来估计: $n \cdot \frac{\lambda}{2} = L$, 这里 λ 为模的波长, L 为电流板的长度. 对 BEPC 静电分离器, 长为 2m , 则其最低的共振模频率为 71MHz , 这与测量结果是一致的. 利用微扰方法测得这些模的最大场强在电流板端部附近, 并测得了一个端部的分路阻抗. 上述测量结果是在不联接负载情况下获得的. 我们还研究了在联接电流板负载的情况下模的频谱. 当

接上负载后,发现一些模被抑制了,而且被抑制模的频率很有规律,其透射谱如图7所示.

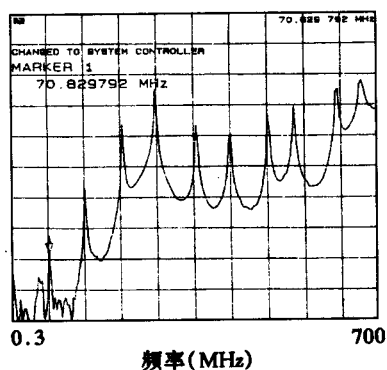


图6 静电分离器的透射谱

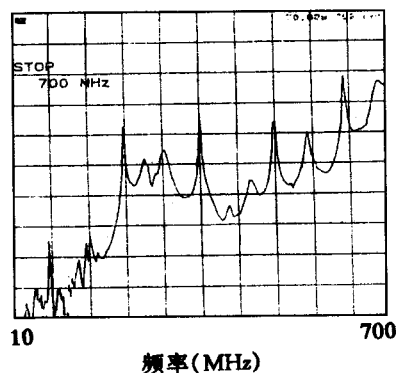


图7 连接负载后的透射谱

根据图6和7所示的谱,可推测奇次模和偶次模的场分布,下面以 $n=1$ 和 $n=2$ 的模为例来分析其场分布,其它模的场分布均可类推.当 $n=1$ 时,在联接负载处,场比较弱,因此与负载的耦合也较弱;当 $n=2$ 时,在联接负载处,场比较强,则与负载的耦合就较强,因此一些模就被抑制了.从这些场图中,可知 n 为奇数时,整个静电分离器的分路阻抗为

$$\frac{R}{Q} \approx \left(\frac{R}{Q}\right)_1 + \left(\frac{R}{Q}\right)_2; \quad (3)$$

当 n 为偶数时,整个静电分离器的分路阻抗为

$$\frac{R}{Q} \approx \left(\frac{R}{Q}\right)_1 - \left(\frac{R}{Q}\right)_2 \approx 0, \quad (4)$$

其中 $\left(\frac{R}{Q}\right)_1$ 和 $\left(\frac{R}{Q}\right)_2$ 分别为静电分离器两端的分路阻抗.

表2 MAFIA和ABCI计算得到的损失因子

电流板长度(mm)	ABCI	MAFIA
100	0.017	0.036
400	0.018	0.0363
1000	0.0163	0.037

表3 损失因子的比较

σ_1 / cm	$k_1 / (\text{V/pC})$	$k_2 / (\text{V/pC})$
1	0.6	3×10^{-3}
3	6.98×10^{-2}	8.8×10^{-4}

(k_1 和 k_2 分别为BEPC kicker和缝型kicker的损失因子)

2.4 冲击磁铁

冲击磁铁也是 BEPC 阻抗的主要来源,从阻抗的角度看,这种注入冲击磁铁已被淘汰,因为在新一代加速器中其阻抗占的份额较大.1995年设计了一种新的缝型冲击磁铁模型^[2],缝型冲击磁铁从原理上讲,是利用真空管道本身经过优化设计的金属条作为电流板,在束流轴两边的两个平行电流板成一个电感线圈,两个电流板之间的6个条与地相

连,这一点是与现在 BEPC 冲击磁铁最大的不同点. 由于是跑道型束流管道,中心金属条离运动束流最近,因而从定性上看,它减少了低频阻抗. 用 MAFIA 模拟了缝型冲击磁铁与 BEPC 冲击磁铁的尾场,可得缝型冲击磁铁的尾场比 BEPC 冲击磁铁的尾场低两个量级. 它们的损失因子比较,如表 3 所示. 我们还对缝型冲击磁铁的阻抗作了解析计算,其电感量为 0.06nH ,这与用 MAFIA 模拟得出的结果是比较符合的.

3 BEPC 束长拉伸模拟

1995 年夏天, BEPC 为了实现 Mini-Beta 方案,屏蔽了 33 对波纹管两边约 2cm 的小腔. 从上面阻抗的研究中,屏蔽后的阻抗和尾场已经减少了. 但通过束流测量,在我们所需要的流强 $I = 35\text{mA}$ ($E = 2.0\text{GeV}$) 下,从测量数据看,并未观察到束长明显缩短. 这里主要利用 Oide + Yokoya(O + Y)方法^[2]来模拟 BEPC 改进前和改进后在 2.0GeV 和 $V_{\text{rf}} = 2\text{MV}$ 时的束长拉伸,模拟结果表明改进后的束长应压缩约 10% . 但在测量中,并未观察到束长缩短. 我们认为主要被仪器测量误差所覆盖. 在模拟中还可看到,若进一步屏蔽小腔、冲击磁铁和波纹管,能压缩束长,如表 4 所示. 当然,这还需要用实验来验证. 上述的计算结果只是表明了进一步改进的方向,定量结果并不完全可信,因为该程序是建立在 Vlasov 方程基础上来求解本征模;而严格的解应从 Fokker-Planck 方程来求得. 利用 O + Y 方法在求解阈值是较可信的,但在阈值以上,采用一个类似 Scaling 方法,即通过增大能散来求解稳态解的方法是有局限性的. 在强流理论方面,有待作进一步研究.

表4 束长模拟值

(单位: cm)

	屏蔽40对小腔+4个kicker	屏蔽40对小腔+4个kicker+所有波管
$I = 2\text{mA}$	2.65	2.65
5	2.65	2.65
10	2.70	2.66
15	2.73	2.67
20	2.76	2.68
25	2.80	2.70
30	2.85	2.73
33	3.02	2.75
35	3.17	2.76

4 结束语

本文研究了 BEPC 各个重点部件,如高频腔、波纹管小腔、静电分离器和冲击磁铁的阻抗及其俘获模,并对 BEPC 改进前和改进后的束长拉伸作了数值模拟,模拟值基本与测量结果相符.

作者感谢王书鸿、国智元研究员和王光伟副教授的鼓励.

参 考 文 献

- [1] Zhou F et al. Impedance study for the BEPC, PAC'97, Canada, 1997
- [2] Oide K et al. KEK Preprint 90-10, 1990

Study of BEPC Impedance

Zhou Feng

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract The impedance of Beijing Electron positron Collider (BEPC) is studied in detail, and the possibility of suppressing bunch lengthening in BEPC is discussed in the view of decreasing the coupling impedance.

Key words wakefield, coupling impedance, bunch lengthening