

北京正负电子对撞机束团拉伸效应研究

国智元 秦庆 张闯

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1995-11-02 收稿

摘 要

本文叙述了在北京正负电子对撞机(BEPC)上,用条纹相机和频谱分析方法对束团拉伸效应的研究.由测量结果归纳出BEPC束团拉伸效应的标度规律,这一规律与理论分析有相当好的一致关系.

关键词 束团拉伸, 条纹相机, 标度规律.

1 引 言

在正负电子对撞机中,束团长度及由于强流效应引起的束团拉伸效应,对于对撞机的主要性能,特别是亮度,影响很大.因此,无论在设计、运行或研究、改进一台正负电子对撞机的工作中,都对束团拉伸效应给以很大的重视.由于高亮度是对撞机追求的重要目标,而通常采用的减小对撞点处束流包络函数的方法(Mini- β)是提高亮度的有效途径之一.根据束流包络函数和束团长度之间的制约关系,要求在允许条件下束团长度尽可能短.这对于采用200MHz高频频率的BEPC来说显得尤为重要^[1].为避免由于强流尾场引起的束团拉伸效应过于严重,设计建造中要求尽量减小束流通道与束流之间的耦合阻抗.在BEPC中,正负电子束流的能量通常在1.3GeV到2.0GeV之间,束团长度及其拉伸效应有可能限制对撞机性能和亮度提高,同时,束团拉伸效应也是束流稳定性的判据之一.根据对束团长度及其随流强增大而发生的束团拉伸效应,用不同条件下多次测量数据进行分析,拟合出“标度规律”,进而可以计算出束流稳定阈和耦合阻抗,并用以指导对于各种束流现象在理论方面的深入研究.

2 束团拉伸效应的理论分析

迄今为止已有一些理论工作分析束团拉伸效应.其中主要是势阱畸变和微波不稳定性理论.在较低束流强度之下,束团长度即是其自然长度,它由高频频率、高频电压、束流能量、储存环动量收缩因子及其他一些物理量确定.随着束流强度增大,将出现粒子纵向振荡的非相干频移和束团形状畸变(拉长或缩短)效应.这种非相干频移为^[2]:

$$\frac{\omega_s}{\omega_0} = \left[1 - \Delta \sum_p j \frac{Z_{||}(p)}{p} p^2 \sigma_0(p) \right], \quad (1)$$

式中 ω_s 是粒子纵向振荡圆频率, ω_0 是粒子旋转圆频率, $Z_{||}$ 是纵向宽带耦合阻抗, Δ 是与高频电压和束流强度有关的比例因子, p 是整数, $\sigma_0(p)$ 是相对于频率为 $p\omega_0$ 的束团中粒子纵向高斯分布标准偏差. 在电子储存环中, 势阱畸变效应不引起能量分散的改变, 从而有 $\frac{\sigma_1}{\sigma_{1_0}} = \frac{\omega_{s_0}}{\omega_s}$, 并且对于较长束团($\sigma_1 > b$)的情况下有:

$$\left(\frac{\sigma_{1_0}}{\sigma_1} \right)^2 = 1 + \delta \left(\frac{b}{\sigma_1} \right)^3, \quad (2)$$

式中 b 是束流通道的等效半径, 参数 δ 正比于 Δ , ω_{s_0} 是单粒子纵向振荡圆频率, σ_{1_0} 和 σ_1 分别表示在弱流和强流下束团中粒子纵向高斯分布标准偏差, 即束团均方根长度. 由(2)式可以看出束团长度对于流强和储存环一些参数的依赖关系.

当束流强度增大至超过某个阈值之后, 束流中粒子的能量分散也随着流强增大而增长. 这种现象被称为束流的纵向微波不稳定性. 按照 Boussard^[3] 的理论分析, 束团拉伸效应遵循如下规律:

$$\sigma_1 = \left[\frac{\sqrt{2\pi} e R^3 I_b \alpha_p}{FEv_s^2} \left| \frac{Z_{||}}{n} \right|_0 \right]^{1/3}, \quad (3)$$

式中 e 是电子电荷, R 是储存环平均半径, I_b 是单束团流强, α_p 是动量收缩因子, F 是形状因子, E 是束流能量, v_s 是粒子纵向振荡频率, $|Z_{||}/n|_0$ 是纵向低频耦合阻抗. 为方便起见, 定义 $\xi = \frac{I_b \alpha_p}{Ev_s^2}$ 为束团拉伸标度参量. 则(3)式可以写成:

$$\sigma_1 \propto \left[\xi \left| \frac{Z_{||}}{n} \right|_0 \right]^{1/3}, \quad (4)$$

即束团长度与 ξ 和纵向低频阻抗的立方根成正比.

根据 SPEAR 实验观测结果得出的纵向耦合阻抗 $Z(\omega)$ 和束团拉伸标度规律^[4], σ_1 可以表示为:

$$\sigma_1 \propto [\xi Z_0 R^3]^{1/(2+a)}, \quad (5)$$

$$Z(\omega) = 2\pi R Z_0 \omega^a, \quad (6)$$

这里 Z_0 和耦合阻抗的频率因子 a 为常数, 对于不同的电子储存环, a 依赖于各自的机器参数和特征. 由(5)式描述的束团拉伸效应规律, 包括了理论模型在分析中不可避免地忽略掉的一些实际因素, 同时也表明, 在实际束流情况中, 束团拉伸效应既包括位阱畸变效应, 也包括微波不稳定效应, 其结果是在理论与实际相互一致的方向上, 表达了束团拉伸效应与其相关参量的关系, 如(2)、(3)和(5)式表述.

最新的研究工作^[5]表明, 如果采用具有负动量收缩因子的储存环结构, 其位阱畸变效应和微波不稳定性对于束团纵向形状畸变和束团拉伸的作用都要弱得多. 这项研究为

克服束团拉伸效应提供了一个新的有希望的方法。

3 测量仪器的设置和数据获取方法

采用了两种方法来测量研究 BEPC 的束团长度和束团拉伸效应，即条纹相机和频谱分析方法。

条纹相机测量方法是直接观测束团通过偏转磁铁时产生的辐射光，置条纹相机于光束线的末端，依靠条纹相机的高时间分辨率(几个皮秒)来得到束团中粒子的纵向分布。实验装置如图 1 所示。测量中使用的条纹相机是由原子能研究院提供，测量工作也是在原子能研究院的专家协助下进行的。设备中的电缆经过了严格的时间特性定标^[6]。

用束流频谱分析方法观测束团长度，是通过比较束流频谱中的两个分量来实现的^[7]。对于均方根长度为 σ_t 的束团，其 n 次富里叶分量为：

$$V(n\omega_0) = 2V_0 \exp[-n^2 \omega_0^2 \sigma_t^2 / 2], \quad (7)$$

式中 n 是整数， $V(n\omega_0)$ 是束流在信号拾取电极上的感应电压， V_0 是感应电压的直流分量， $\sigma_t = \sigma_c \cdot c$ ， c 为光速。束团的均方根长度可以由比较两个频率分量得出：

$$\omega_0 \sigma_t = \sqrt{\frac{2}{(n_2^2 - n_1^2)} \cdot \ln \frac{V_1(n_1 \omega_0)}{V_2(n_2 \omega_0)}}, \quad (8)$$

这里， V_1 ， V_2 分别为 n_1 次和 n_2 次谐波分量，并且取 $n_2 > n_1$ 。测量装置如图 2 所示。信

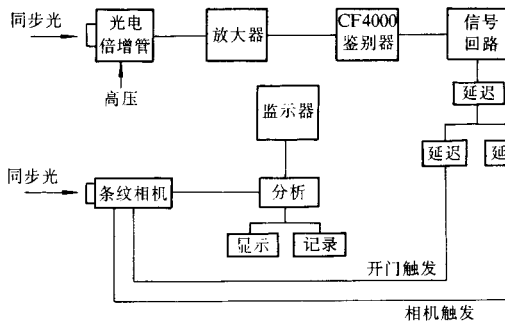


图1 条纹相机测量系统框图

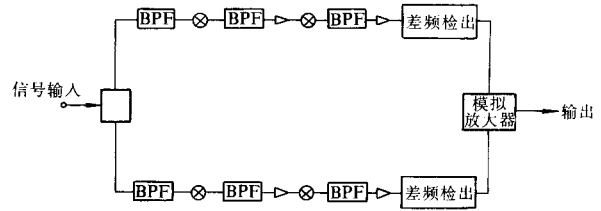


图2 频谱法测量系统框图

BPF 为带通滤波器。

号拾取电极是设置在束流通道中的 277 mm 长的条带形电极。系统的动态范围在 25dB 到 35dB 之间。这种方法的系统误差约为 10%。其主要缺陷在于它必须假定束团中的粒子保持标准的高斯分布，测量的结果是平均效应，而且需要在低流强下进行定标。由于在束流较强的情况下，束流中粒子分布会发生畸变而偏离高斯分布，在此情况下，这种测量方法可能会有较大的误差。

4 实验观测结果

4.1 测量结果的数据分析

在不同能量，不同高频电压和不同束流强度条件下，对 BEPC 束团长度和束团拉伸

效应作了详细的观测研究。近几年来，共积累了数百个有效的测量数据。

定义测量数据的均方根偏差为：

$$\delta_{(rms)} = \sqrt{\frac{\sum_i \left(\frac{\sigma_c - \sigma_i}{\sigma_i} \right)^2}{N}}, \quad (9)$$

式中 σ_c 是根据束团拉伸效应标度规律(如(10)式)计算的束团长度, σ_i 是实际测量的束团长度, N 是测量点数. 按照(9)式的定义, 条纹相机法测量的均方根偏差为 12.5%, 频谱法测量的均方根偏差为 16.1%. 偏差的来源不仅包括测量本身的系统误差和随机误差, 也包括在测量过程中束团本身有可能存在的二极、四极及多极相干振荡引起的束团长度起伏.

用条纹相机在低流强和高流强下观测到的束团中粒子纵向分布的典型情况如图 3 和图 4 所示, 图中纵座标 A 为相对幅度. 在图 5 和图 6 中, 分别给出了束流能量在 1.3GeV 和 1.55GeV, 不同高频电压 V_{rf} 条件下, 束团长度随流强增大而拉伸的测量结果. 图 7 和图 8 分别给出不同能量或不同动量收缩因子条件下, 束团长度随流强的变化. 由这些结果可见, 高频电压对束团长度和束团拉伸效应有明显的影响, 但束流能量和动量收缩因子与束团拉伸效应无明显相关性. 这是由于在 BEPC 运行范围内, 粒子纵向振荡频率几乎不随束流强度改变而变化^[8]. 在不同能量和不同高频电压条件下, 束流中粒子能量分散随流强的变化规律如图 9 所示. 从图中可见, 能量分散随流强的改变对高频电压依赖

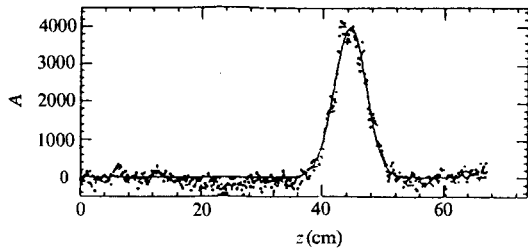


图 3 低能量下的纵向分布

$\sigma_1 = 2.6\text{cm}$

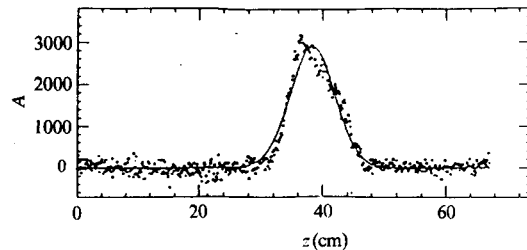


图 4 高能量下的纵向分布

$\sigma_1 = 3.63\text{cm}$

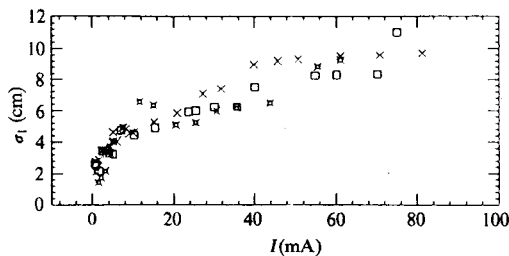


图 5 束团长度与流强关系

× $V_{rf} = 330\text{ kV}$, □ $V_{rf} = 500\text{ kV}$,
○ $V_{rf} = 700\text{ kV}$; $E = 1.3\text{ GeV}$.

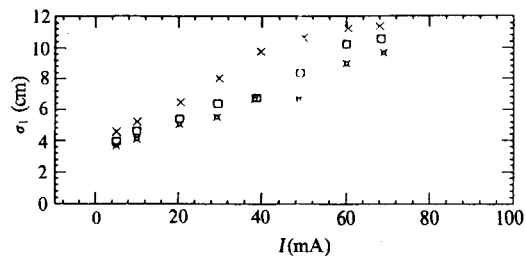


图 6 束团长度与流强关系

× $V_{rf} = 350\text{ kV}$, □ $V_{rf} = 520\text{ kV}$,
○ $V_{rf} = 650\text{ kV}$; $E = 1.55\text{ GeV}$.

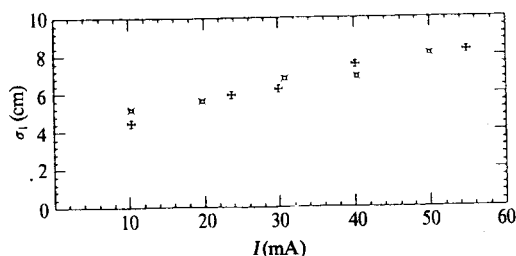
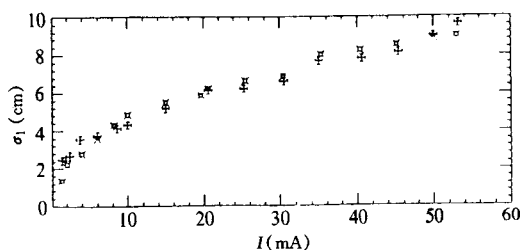


图7 不同能量下的束团拉伸效应

× $E=2.015$ GeV, + $E=1.3$ GeV; $V_{rf}=550$ kV.

图8 不同 α_p 下的束团拉伸效应

× $\alpha_p=0.014$, + $\alpha_p=0.037$; $V_{rf}=550$ kV.

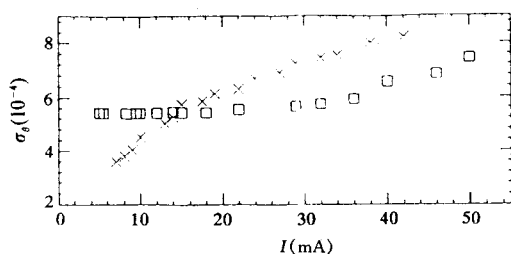


图9 能量分散与流强关系

× $E=1.3$ GeV, □ $E=2.015$ GeV.

很弱,也可以看出 BEPC 微波不稳定性的阈流强在 1.3GeV 时约为 6mA, 在 2.015GeV 时约为 15mA.

根据分析模拟计算,在势阱畸变效应作用之下,束团形状应该略微偏离高斯分布,然而从我们的测量结果中,尚不能清楚地辨别出这种变化的规律,但至少表明这一效应在 BEPC 中较弱以致于被淹没在测量误差中了.

4.2 束团拉伸效应指数比例规律

用所有测量得到的有效数据,计算束团拉伸标度参量 ξ , 并将其与束团长度的关系绘于对数坐标的图中,如图 10 所示.从而可以拟合出 BEPC 束团拉伸效应标度规律如下:

$$\sigma_1(\text{cm}) = 0.404 \left[\frac{I_b(\text{mA})\alpha_p}{E(\text{GeV})v_s^2} \right]^{1/2.80}, \quad (10)$$

关系式(10)与微波不稳定性理论分析关系式(3)接近.表明在 BEPC 中,纵向微波不稳定性对束团拉伸效应占主导作用地位.比较 SPEAR 的标度规律式(5)和(6),可以认为在较长束团($\sigma_1 > b$)情况下, BEPC 耦合阻抗的频律因子 $a=0.80$.在图 10 中标出的一些最新测量的束团长度比标度规律预示的短,这是由于 1994 年夏天拆除了储存环中两台不用的冲击磁铁,从而使全环耦合阻抗减小的结果.

由(10)式标度规律知,在 2.015GeV,

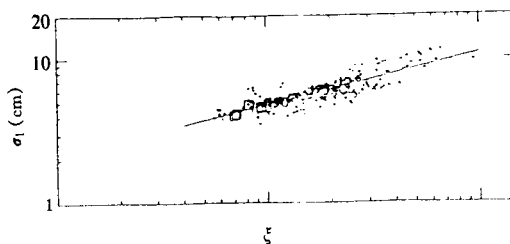


图10 束团长度的标度规律

□ 新数据.

2.0MV 高频电压条件下, 35 mA 束流的束团长度为 4.0 cm; 在 2.015 GeV, 2.4 MV 高频电压条件下, 50 mA 束流的束团长度为 4.5 cm. 由此可见, 对于 BEPC 亮度提高计划, 特别是对于 Mini- β 方案, 束团长度仍然是主要制约条件之一.

4.3 流强阈和耦合阻抗

在公式(10)中, 取束团长度 σ_1 为束团自然长度 σ_{1_0} , 则束团拉伸的流强阈可以表示为:

$$I_{th} = 13.18\alpha_p^{1.80} E^{3.80} v_s^{-0.80}, \quad (11)$$

从(11)式可见, α_p 越小, 能量越低, v_s 越高, 则束团拉伸的流强阈就越低. 由(11)式计算在注入和各种对撞能量情况下, 对应于不同高频电压的束团拉伸流强阈, 结果列于表 1. 将式(10)与式(3)比较也可以得到耦合阻抗 $|Z/n|_0 = 3.5\Omega$, 这与我们用其他方法测量得到的 BEPC 耦合阻抗值基本一致^[9].

表 1 不同能量和高频电压下的 I_{th} 值(mA) ($\alpha_p = 0.037$)

束流能量(GeV)	高频电压(MV)						
	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.4
1.300	2.76	2.25	1.97	1.70	1.45	1.29	1.20
1.550	5.81	4.72	4.12	3.57	3.03	2.70	2.51
1.840	12.10	9.75	8.49	7.35	6.24	5.56	5.17
2.015	18.30	14.40	12.50	10.80	9.15	8.15	7.57

5 结 论

束团长度和束团拉伸效应的研究是非常重要的课题, 对 BEPC 亮度提高计划有着特别重要的意义. 根据对束团长度多次精确测量, 得出了 BEPC 束团拉伸的标度规律, 并得出纵向微波不稳定性的阈流强和从另一途径计算出的耦合阻抗. 测量研究表明, 在 BEPC 上, 束流能量和储存环动量收缩因子的改变, 对于束团拉伸效应无明显影响. 进一步提高测量精确度, 有可能将测量结果与在纵向相空间的模拟计算数据进行比较, 以求进一步完善理论分析的准确性. 对于束团长度小于束流管道平均半径的短束团情况, 有待进一步研究.

作者感谢 BEPC 运行组和束流测量组刘德康、马力、叶恺荣等研究人员的合作; 特别感谢原子能研究院的支持, 他们提供了关键测量设备, 刘慰仁等研究人员参加了全部测量过程; 作者感谢方守贤院士、王书鸿研究员、CERN 专家 Rossa 和 KEK 专家 Ieiri 对本项研究的支持和友好帮助.

参 考 文 献

- [1] Z. Y. Guo, Q. Qin, G. Xu *et al.*, Proc. of *IEEE*, PAC95, 1995.
- [2] Q. Qin *et al.*, Emittance 94, Japan, 1994.
- [3] D. Boussard, CERN LABII /RF /Int. /75-2, 1975.
- [4] A. Chao, J. Gareyte, PEP Note 224, 1979.
- [5] S. X. Fang *et al.*, Microwave Instabilities in Electron Ring with Negative Momentum Compaction Factor, KEK Preprint 94-190, 1995.
- [6] 刘慰仁, 用条纹相机在 BEPC 上的束团长度测量, 原子能研究院内部报告.
- [7] T. Ieiri, Proc. of the Workshop on Advanced Beam Instrumentation, 1991.
- [8] Z. Y. Guo *et al.*, Proc. of *IEEE*, PAC 93, 1993.
- [9] G. W. Wang *et al.*, Proceedings of the Workshop on Beam Instabilities, Hefei, China, 1994.

Study of Bunch Lengthening at BEPC

Guo Zhiyuan Qin Qing Zhang Chuang

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

Received 2 November 1995

Abstract

The bunch length and its lengthening in the BEPC were measured systematically and carefully with streak camera and the method of beam spectrum analysis in recent years. The results are obtained from the measurements and the corresponding scaling law is summed in the light of the existing theoretical explanation.

Key words bunch lengthening, streak camera, scaling law.