

纵向束流反馈冲击器模型腔的研制*

黄刚¹⁾ 陈怀璧 黄文会 童德春 林郁正

(清华大学工程物理系 北京 100084)

赵振堂

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 纵向束流反馈系统是近年来国际上迅速发展并广泛应用的抑制储存环纵向耦合束团不稳定性的方法,冲击器是其中的关键部件之一.结合 BEPC II 设计参数,研制了纵向束流反馈冲击器模型腔,并且利用同轴线法测量了该模型腔的阻抗和带宽,满足设计要求.该模型腔设计采用脊波导加载带鼻锥的 pillbox 腔体的方案,束流管道设计为 BEPC II 标准跑道形.

关键词 束流反馈系统 冲击器 储存环 束流不稳定性

1 引言

储存环多束团在运行时,束团与环上阻抗相互作用,使各个束团的运动相互耦合,形成耦合束团振荡.当阻抗满足一定条件时,耦合束团振荡的幅度会随时间增长,发生耦合束团不稳定性.

有源束流反馈系统是近年来国际上迅速发展并广泛应用的一种阻尼耦合束团不稳定性的重要方法.它是反馈控制的一般原理在束流系统中的应用.有源束流反馈系统探测储存环中的束团运动,将探测到的束团运动信号处理后形成反馈量来影响束团运动,从而起到阻尼耦合束团振荡的作用.纵向束流反馈系统中,改变束团能量的部件称为冲击器(kicker),是束流反馈系统的作用部件.

BEPC II 是 BEPC 的升级改造的对撞机,在 BEPC II 的设计流强下,耦合束团不稳定性的发生会降低束流质量.引起耦合束团不稳定性的阻抗主要来源于高频腔的高次模、电阻壁和类腔体结构等因素,辐射阻尼不足以阻尼这种不稳定性,需要采用束流反馈系统来阻尼.

本文在国际先进设计的基础上,结合 BEPC II 设计的实际需要,利用 MAFIA 等计算机模拟程序对冲击器进行了模拟计算,设计加工出了纵向反馈冲击器模型,并利用同轴线法纵向耦合阻抗测量平台测定了该冲击器模型的阻抗和带宽,满足了设计要求.

击器进行了模拟计算,设计加工出了纵向反馈冲击器模型,并利用同轴线法纵向耦合阻抗测量平台测定了该冲击器模型的阻抗和带宽,满足了设计要求.

2 反馈冲击器的设计

纵向反馈冲击器是纵向束流反馈系统中的关键部件之一,它将微波功率按适当的幅度和相位加到每个束团上,改变该束团的能量,阻尼束团的纵向振荡,是纵向束流反馈系统的作用器件.

2.1 设计要求

束流反馈系统的初步物理设计对冲击器提出的要求包括工作频率,带宽和阻抗几个方面,如表 1 所示.

表 1 纵向束流反馈系统冲击器设计要求

参数	设计要求	单位
中心频率	1.125	GHz
带宽	250	MHz
阻抗	450	Ω

冲击器的带宽由储存环中的最小束团间隔决定,对 BEPC II 而言,其高频频率为 500MHz,从而最

2002-11-20 收稿,2003-09-03 收修改稿

* 国家自然科学基金(19875065)资助

1) E-mail: huanggang@mail.tsinghua.edu.cn

小束团间隔时间为 2ns。根据采样定理,要求反馈系统的带宽不小于 250MHz。从频域上看,250MHz 的带宽可以覆盖所有二极耦合束团不稳定性的模式。为了避免反馈系统激励起新的不稳定性,将冲击器的中心频率选择为 1.125GHz。原则上,冲击器的阻抗在保证带宽的前提下,越高越好。这是因为要给予束团相同的冲击力,冲击器的阻抗越高,则所需的功率越小,整个系统成本越低。参考国际各种冲击器实际测量得到的阻抗值,提出了分流阻抗不小于 450Ω 的要求。同时,冲击器的高次模抑制问题也是一个重要问题,高次模的存在影响宽带高频功率的使用效率,同时增大储存环的宽带阻抗,有可能引起新的不稳定性。由于储存环上空间有限,实际工程要求冲击器的尺寸尽可能小。

2.2 腔型的优化设计^[1]

十余年来,国际上各大实验室分别研制了逐束团束流反馈系统的反馈冲击器(以下简称冲击器),从原理上分,可以将它们分为带状线式和腔式两类。表 2 比较了两类冲击器的特点。

表 2 两类束流反馈冲击器的特点

项 目	带状线式	腔式 ^{[2][3]}
原形结构	带状线	腔体(pillbox 或其他)
带宽	宽	窄
阻抗	较低	较高

腔式冲击器是对具有较高的分流阻抗和 R/Q 值的原型结构,利用各种方法对腔体加载,降低其 Q 值,达到冲击器设计的要求。近年来,腔式冲击器的结构主要向两个方向发展,其一为采用带鼻锥的 pillbox 作原型腔体;其二为采用与束流管道相同的形状设计冲击器内的束流管道。

早期的腔式冲击器采用的原型结构为简单的 pillbox 腔体^[2],结构比较简单,但 R/Q 不够高。为了提高其冲击器的阻抗,PLS 设计的冲击器^[4]采用了带鼻锥的 pillbox 腔体作为原型结构,设计得到了阻抗较高的冲击器。为了避免由于冲击器与束流管道形状尺寸不同引入附加过渡段,BESSY II 采用了端口与束流管道形状相同的冲击器。

BEPC II 纵向束流反馈系统冲击器设计要求采用跑道形的束流管道,同时引入鼻锥以提高冲击器阻抗值。这样,冲击器的鼻锥是围绕跑道形束流管道,对设计加工提出了更高的要求。

经过分析比较多种冲击器的优劣,结合 BEPC II 的实际情况,决定采用腔式冲击器,选用带鼻锥的

pillbox 作为原型腔体,用脊波导对腔体进行加载,降低其 Q 值,同时采用跑道型束流管道端口,以避免应用时引入过渡段。

基于腔式反馈冲击器的基本原理,参考 PLS 纵向反馈冲击器的设计^[4],我们采用分段设计的方法,设计了纵向反馈冲击器模型腔。第一步设计 pillbox 腔体及鼻锥,使其中心频率为我们选择的中心频率;第二步设计脊波导,通过设计脊的尺寸,尽量降低脊波导的截止频率,使其能够在工作频段内达到较好的传输特性;第三步设计脊波导到同轴的转换,使其具有良好的传输特性。

第一步,设计 pillbox 腔体及鼻锥。由圆柱谐振腔 TM_{010} 模式频率计算公式计算 pillbox 外径:

$$R = \frac{c}{2\pi} \frac{2.045}{f_c} = \frac{c}{2\pi} \frac{2.045}{1.125\text{GHz}} = 0.1021\text{m}.$$

第二步,设计脊波导。脊波导形状尺寸可以用 $r1, r2, r3, fai1, fai2, fai3, fai4$, 共 7 个参数来描述,如图 1,在 MAFIA 中分别改变这些参数,并且计算传输系数,寻找能够有效降低脊波导截止频率的参数。由模拟计算得到,改变 $r3$ 对截止频率的影响最大,且增大 $r3$ 可以有效的减小截止频率。但由于加工和耐压等因素的影响, $r3$ 不能距离 $r2$ 太近。参考 PLS 的设计,选用 $r2 - r3 = 7.4\text{mm}$ 。

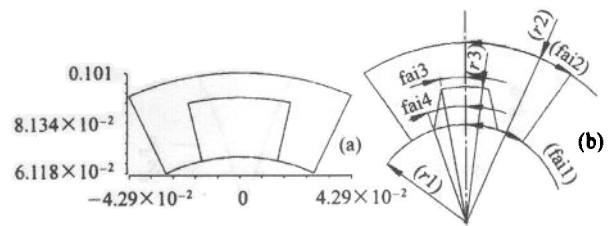


图 1 MAFIA 计算二维脊波导截止频率的模型(a)和变量定义(b)

第三步,设计脊波导到同轴的转换,使其具有良好的传输特性。利用模拟计算程序,计算带后腔的脊波导到同轴转换的结构,可以得到很好的传输特性。在 1—1.25GHz 范围内, $S_{21} > 0.95$ 。计算模型和模拟计算得到的传输特性如图 2。

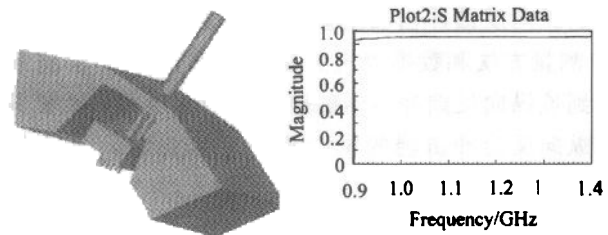


图 2 脊波导一同轴转换结构和 S_{21} 模拟计算结果

经过优化设计,冲击器的结构如图 3. 冲击器连接 8 个 N 型接头,其中一侧 4 个为反馈冲击功率馈入的端口,另外一侧连接匹配负载.

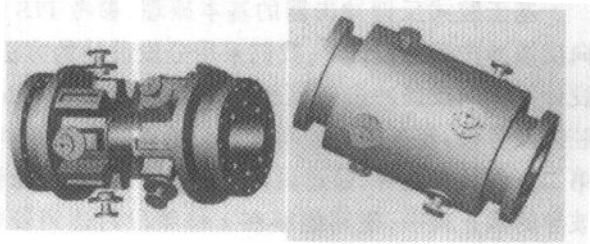


图 3 实际加工的冲击器腔结构

第四步,冲击器高次模(HOM)模拟计算.冲击器高次模分析是冲击器设计的关键之一,利用 MA-FIA 软件对冲击器的模式分布进行了模拟计算.根据计算,脊波导截止频率为 0.838GHz,束流管道的截止频率为 1.38GHz,对此频率范围内冲击器的模式进行分析.模拟计算采用 MAFIA 的 S 参数向导进行,模拟计算结果如图 4. 由计算结果可以看出,在这一频率范围内,曲线是光滑的,极值只出现在 1.15GHz 附近,该频率对应于冲击器的基模.由此判断,该冲击器在 0.838—1.38GHz 范围内只有基模.

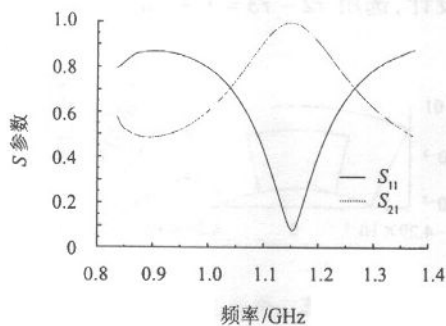


图 4 冲击器高次模分析

3 冲击器阻抗的测量

按照优化设计,加工了纵向反馈冲击器的铝模型腔.利用同轴线法阻抗测量平台,对如上设计加工的纵向反馈冲击器的阻抗进行了测量^[1,5,6],如图 5. 测量方法和数据处理方法见文献[1]. 实验测量得到该纵向反馈冲击器的阻抗如图 6 所示. 测量得到纵向反馈冲击器的中心频率为 1.13GHz,分流阻抗为 509Ω,1—1.25GHz 内最低阻抗为 108Ω. 拟合

成谐振峰后, Q 值为 11.2. 满足纵向反馈冲击器的要求.

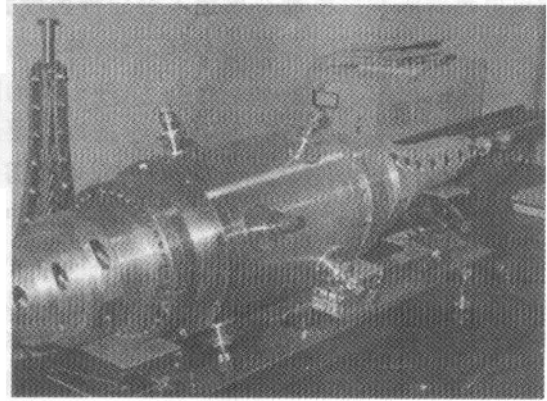


图 5 纵向反馈冲击器模型腔在阻抗测量平台上

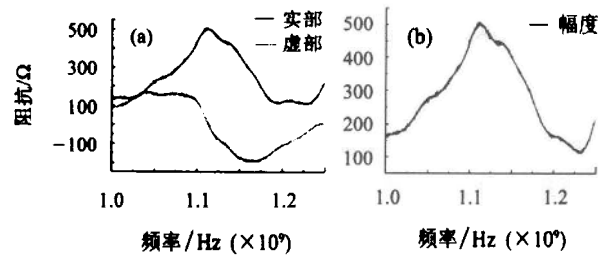


图 6 同轴线法测量纵向反馈冲击器阻抗的实部虚部(a)和幅度(b)

4 结论

纵向束流反馈系统是抑制纵向耦合束团不稳定性的有效方法,被各大实验室广泛采用,冲击器是该系统中的一个关键部件.纵向束流反馈系统设计要求冲击器是一个宽带、高阻抗的部件,这与储存环上其他部件的设计要求有很大不同.结合 BEPC II 设计中对束流反馈系统的要求,参考国际先进设计,利用计算机模拟软件,采用分段设计的方法,设计并加工了纵向束流反馈系统冲击器模型腔.该模型腔采用脊波导加载腔的结构,束流管道采用 BEPC II 上标准的跑道形管道,可以直接安装到储存环中而不需要过渡段.为提高冲击器的阻抗,在被加载的腔体上设计加工了环绕跑道形束流管道的鼻锥.经模拟计算,该冲击器在束流管道截止频率以下不存在高次模.利用同轴线法阻抗测量平台,测量了该冲击器模型腔工作模式的阻抗和带宽,满足了设计要求.

参考文献 (References)

- 1 HUANG Gang. Study of Longitudinal Coupling Impedance Measurement and Beam Feedback System, Tsinghua University Ph. D Thesis, June 2002 (in Chinese)
(黄刚. 清华大学博士论文, 纵向耦合阻抗测量及束流反馈系统的研究, 2002. 6)
- 2 Boni R, Gallo A, Ghigo A et al. Particle Accelerators, 1996, 52: 95—113
- 3 CHANG L H, LAU W K, YANG T T et al. Development of the RF Kicker for the longitudinal feedback system at SRRRC. EPAC 98 p1708
- 4 Yujong Kim, Kwon M, Huang J Y. IEEE Transactions on nuclear science. Vol 47. No.2 April 2000
- 5 HUANG Gang et al. High Energy Phys. & Nucl. Phys. .2002, 26(5): 530(in Chinese)
(黄刚等. 高能物理与核物理, 2002, 26(5): 530)
- 6 HUANG Gang, HUANG Wen-Hui. Longitudinal Broadband Impedance Measurement System by Coaxial Line Methods. PAC2001. 2060—2062

Development of a Longitudinal Feedback Cavity for the Beam Feedback System *

HUANG Gang¹⁾ CHEN Huai-Bi HUANG Wen-Hui TONG De-Chun LIN Yu-Zheng

(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

ZHAO Zhen-Tang

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

Abstract Longitudinal beam feedback system is widely used to damp coupling bunch instability. Kicker is one of the key components of the longitudinal feedback system. A prototype cavity of longitudinal feedback kicker is developed according to the parameter of BEPC II. The usage of nose cone in the kicker design increased the shunt impedance. In order to avoid the extra taper in the storage ring, the racetrack shape beam pipe is applied in the kicker. The impedance and the bandwidth of the kicker is measured by the coaxial line impedance measurement platform and the result achieved the design goals.

Key words beam feedback system, kicker, storage ring, beam instability

Received 20 November 2002, Revised 3 September 2003

* Supported by NSFC(19875065)

1) E-mail: huanggang@mail. tsinghua. edu. cn