

BEPC II 直线加速器微波系统

赵风利 侯汨 赵延坪 刘晋通 张敬如 周耀祥 韩大威

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 BEPC II 直线加速器微波系统要求的技术指标比旧系统有了大幅度的提高,为此老系统的许多部件需要重新研制和改造. 本文首先介绍了关键部件的改造研制情况,它包括能量倍增器、加速管、大功率波导阀门、大功率干负载及其中功率和高功率波导衰减/移相器;其次简要介绍了微波系统高功率运行情况.

关键词 微波系统 能量倍增器 加速管 大功率波导阀门 大功率干负载 波导衰减/移相器 高功率运行

1 引言

BEPC 直线加速器微波系统主要有微波激励系统、16路高功率微波波导传输系统、13台能量倍增器、56根加速结构、聚束系统和微波监控系统部分组成. 该系统最初是为了满足HK-1大功率速调管30MW脉冲功率的需要而设计的. 因此,在当初设计时,虽然有的波导元件可以承受较高的微波功率,但是有的波导元件承受功率较低. 所以,对整个波导系统而言,其设计指标是能够承受30MW的脉冲功率. BEPC II 直线加速器要求能够提供的正负电子能量从1.3GeV提高到1.89GeV,要达到这个指标并且能够长期稳定地运行,要求微波系统的技术指标有了大幅度的提高,比如能够承受60MW脉冲功率,重复频率从12.5提高到50次,脉冲宽度从 $3\mu\text{s}$ 增加到 $4\mu\text{s}$,还有,高功率波导传输系统的VSWR、插入损耗、相长度的要求等指标,也相应有所提高. 这就向微波系统提出了更高的要求,因此,部分波导元件需要重新研制或改造,如加速管,高功率干负载,波导-同轴定向耦合器,波导阀门,高功率和中功率波导衰减/移相器. 另外,经过十几年的高功率运行,由于打火或放电,有的波导元件内表面已被损坏,需要重新更换.

2 能量倍增器解调谐系统的改造

2.1 老的解调谐系统存在的缺陷

能量倍增器老的解调谐系统结构是靠永久磁铁环的移动来带动真空室里解谐探针的运动,根据使用情况,存在3个明显的不足. 第一,永久磁铁环的磁场强度(约1000Gs)是不变的;第二,两个永久磁铁环是靠一个电机来控制移动的,由于两个磁铁环有一定的距离,其微小的不平衡就会产生一个较大的扭力矩,使磁铁环的运动发生困难;第三,它的机械结构设计存在不合理的地方,在探针附近,容易造成微波打火和放电,从而将探针粘住.

2.2 新型的能量倍增器解调谐系统

新型的能量倍增器解调谐系统结构是用7组线圈套在探针的外壁(见图1),探针的两端各用一组永久磁铁环,起固定探针的作用. 通过对线圈依次加电,带动探针的移动. 而且通过线圈电流的增加,使磁感应强度增加,这样可保证在异常情况下,能量倍增器解调谐系统的可靠性.

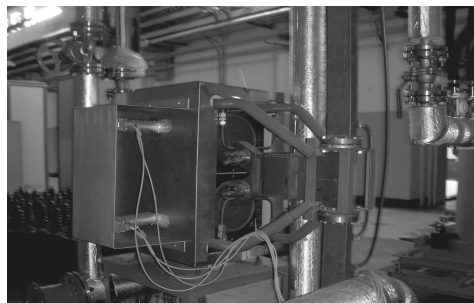


图1 能量倍增器高功率运行中

由于解谐探针处在真空套筒的内部, 需要判断探针是否运动到位, 采用磁敏传感器固定在解谐探针的两端, 根据探测到的磁感应强度的变化来判断探针是否运动到位.

根据探针的机械结构, 存在微波打火、放电, 造成探针和陶瓷管粘住的可能性, 对此也做了改进.

2.3 意义

该装置的研制成功, 对 BEPC II 直线加速器具有重要的意义. 首先, 通过能量倍增因子的测量, 可以对 SLED 工作状态好坏有一个基本的判断; 其次, 当加速器需要运行在长脉冲束流状态时, 只要在较短的时间内, 改变所有的 SLED 工作模式为解谐状态下就可以实现; 最后, 通过解谐 SLED, 测试能量贡献来更准确地获得大功率速调管的输出功率, 解决了用功率计测试脉冲功率误差大的问题.

3 大功率微波波导传输系统的改进

3.1 大功率波导阀门的研制

大功率波导真空阀门是 BEPC II 直线加速器微波系统重点的改进项目, 作为微波大功率传输和真空密封双重功能的超高真空微波器件, 机械结构比较复杂, 制造工艺难度大. 目前已经成功完成 16 台的研制工作, 有 15 台已在去年运行加速器上, 大功率运行工作状态良好 (见图 2).

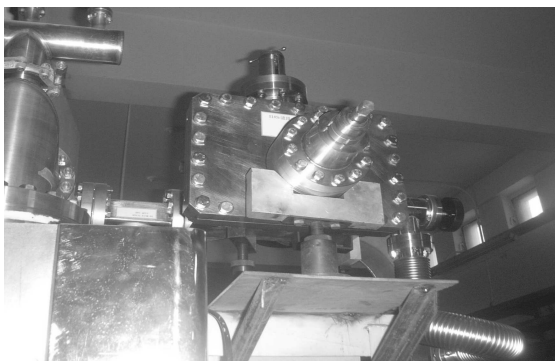


图 2 大功率波导阀门在加速器上大功率波导真空阀门微波测试

中心频率: 2856MHz, 带宽: 100MHz, 输入驻波比: 1.02—1.04, 插入损耗: <0.2dB, 脉冲功率: 80MW (4 μ s, 50PPS), 真空漏率: $\leq 2 \times 10^{-10}$ Torr-L/s.

波导真空阀门与普通真空阀门的不同之处, 在于要求它在运行时能无损耗传送微波大功率, 在关闭时能很好地起到真空隔离作用, 保证整个加速器系统的

真空不变.

设计的基本思路是, 第一要能承受尽可能高的微波功率, 宽频带, 低损耗; 第二能够频繁使用, 寿命要长. 据此, 选择了 H 面弯波导组合成的 U 形波导结构. U 形波导被分成上下两部分, 可开可合, 正常连接时可传送微波, 需要真空隔离时则拉开波导的连接法兰, 插入带有氟橡胶密封圈的真空密封插板, 达到真空密封隔断目的.

在使用前, 需对所有的波导阀门进行详细的微波测试, 并且在谐振环上做了高功率实验. 根据测试结果显示, 所有的波导阀门具有良好的微波性能, 达到设计要求.

3.2 大功率干负载

作为微波系统中关键部件——大功率干负载 (见图 3), 用于吸收直线加速器加速管尾端的剩余功率. 老式的干负载只能承受较低的功率, 需要全部更换. 从日本进口 10 只, 安装在前面 8 根加速管上.

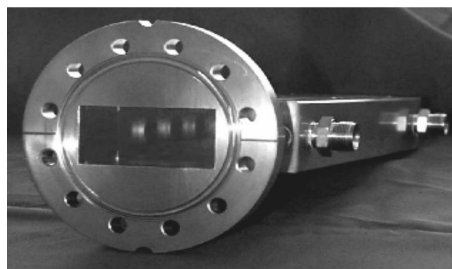


图 3 大功率干负载照片

另外, 该型大功率干负载微波性能很好, 能够吸收较大的微波功率, 体积也小, 从日本进口了大功率干负载的关键材料 Beta-SiC 粉, 并用 HFSS 完成了大功率干负载结构的电磁场模拟计算 (见图 4), 正投入力量联合生产厂家进行研制.

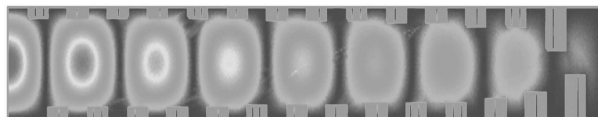


图 4 大功率干负载电磁场模拟计算

3.3 波导系统安装和测量

对 K1-K4 大功率波导传输系统进行了清洗、更换水管和翻新, 并对部分不合格的元件进行了更换, 对所有的波导元件进行了测试, 对整个波导系统进行了测试和相长度的调配, 达到了比较好的指标 (见表 1). 研制了 32 只新的波导-同轴定向耦合器, 用于监测速调管的输出功率和微波系统的反射功率.

表 1 K2 高功率波导传输系统的微波测试

K2 高功率波导传输系统	BEPC	BEPC II
VSWR	1.3	1.046
插入损耗/dB	1#支路1.4 2#支路1.5 3#支路1.7 4#支路1.8	1#支路0.2 2#支路0.5 3#支路0.4 4#支路0.3
相长度/(°)(包括加速管)	1#支路相长度110 2#支路相长度102 3#支路相长度108 4#支路相长度106	1#支路相长度 调前-115, 调后-207.1 2#支路相长度 调前-137, 调后-207.3 3#支路相长度 调前-160, 调后-208.9 4#支路相长度 调前-176, 调后-208.7

4 新加速管的研制

根据 BEPC II 设计要求, 改进后为提高 e^+ 的产额, 打靶前 e^- 的能量将从 150MeV 提高到 250MeV; 2# 速调管的输出功率将从 30MW 提高到 50MW 左右, 现低于 18MW; 打靶前、后的加速梯度将从目前低于 10MeV/m 升高到 20MeV/m 左右. 由于加速管的吸收负载处理不善, 使这个区段打靶前后的 8 根加速管受到污染而不能满负荷功率输入. 因此, 为了满足 BEPC II 正电子产额的设计要求, 决定将直线加速器正电子靶前、后的 8 根加速管彻底更换. 在安装前, 完成了 4 根新加速管高功率微波老练, 脉冲功率全部达到 25MW, 同时, 第 4 根新加速管采用了能量倍增器, 使得进入到加速管的脉冲峰值功率达到 100MW 以上, 加速管承受的最大加速梯度达 25MV/m 左右.

加速管电性能测试指标:

工作频率: 2856.00 ± 0.01 MHz;

输入输出 VSWR: ≤ 1.08 ;

带宽 (VSWR ≤ 1.2): ≥ 4 MHz;

衰减: 5 dB;

腔间相移误差: $\leq 20 \pm 2^\circ$ RF.

5 聚束系统的改进

聚束系统包括预聚束器、聚束器、A0 加速管、预聚束器微波传输系统和聚束器微波传输系统. 直线加速器的束流能散度与聚束系统输出电子束团的相位宽度成正比. 老式的波导衰减器有一个重大的缺陷, 当调节衰减器时, 在微波馈入功率水平发生变化的同时, 其相位也在变化. 另外, 它的微波调节的控制为手动调节, 十分落后, 活塞的机械传动经常发生卡死现象, 故障率较高. 因此在以往的加速器运行调束工作中, 要得到聚束系统最佳的功率和相位点, 即费时间, 又很困难. 为了解决这些问题, 我们研制了两种新型

结构的中/高功率波导衰减器和移相器. S 波段中功率波导衰减器和移相器的微波性能的测试见表 2, 达到了设计要求, S 波段高功率波导衰减器和移相器微波参数和测试结果同表 2 基本一样 (见图 5). 该设备的使用, 可以十分方便和快速地得到聚束系统工作的最佳功率点和相位点, 很容易得到束流的最佳品质, 极大地方便了运行、调束人员的工作.

表 2 S 波段中功率波导衰减器和移相器

	设计值	测试值
工作频率	2856MHz	2856MHz
波导功率分配器	1) VSWR < 1.05 2) 不平衡度 0.2dB 3) 方向性 26dB	1) VSWR < 1.038 2) 不平衡度 0.05dB 3) 方向性 29dB
VSWR	< 1.2	1.2
衰减可调范围	0—25dB	0—35dB
移相可调范围	0°—360°	0°—360°
衰减范围为 0—20dB 时 相位变化量	$\pm 2^\circ$	$\pm 2^\circ$
移相 360° 时衰减变化量	0.3dB	0.2dB



图 5 S 波段高功率波导衰减器和移相器

6 BEPC II 直线加速器微波系统高功率运行

自 2004 年 11 月起, BEPC II 直线加速器开机, 波导系统经过半个多月的微波功率老练, 16 路波导系统顺利通过 30MW 以上的微波功率老练 (见表 3), 重复

频率50次, 脉冲宽度为4 μ s, 经过半年多的高功率运行, 微波系统达到了BEPC II 要求的设计指标.

表3 微波系统功率运行参数

号位	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#	13#	14#	15#	16#
入射功率/MW	33	40	20	24	21	23	39	37	44	40	41	49	41	39	22	0
反射功率/MW	0.8	1.6	1.2	0.3	0.2	0.3	1.4	0.9	0.7	1.1	0.4	1.1	0.8	1.2	0.8	0

参考文献(References)

- ZHAO Feng-Li, HOU Mi et al. Microwave System for BEPC II-Linac (in Chinese) (赵风利, 侯汭等. 直线加速器微波系统的改进, IHEP-BEPC II)
- OHSAWA S et al. High-Power Hybrid Attenuator & Phase-Shifter Systems. Japan: KEK, National Laboratory for High Energy Physics. 1990
- ZHAO Feng-Li et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2004, **28**(11): 1127 (in Chinese) (赵风利等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(11): 1127)
- ZHOU Shu et al. Development Report for BEPC-Linac, 1989 (in Chinese) (周述等. BEPC注入器研制报告, 1989)
- Matsumoto H et al. Experience on the High Power SiC Mrowave Dummy-Load Using SiC Absorber. Japan: KEK, National Laboratory for High Energy Physics. 1999

Microwave System for BEPC II-Linac

ZHAO Feng-Li HOU Mi ZHAO Yan-Ping LIU Jin-Tong
ZHANG Jing-Ru ZHOU Yao-Xiang HAN Da-Wei

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Specifications of microwave system for BEPC II-Linac were enhanced by a wide margin in comparison with those of the microwave system for BEPC-Linac. For this reason many RF components must be developed and improved. This paper introduces the developments of SLED detuning system, accelerating section, high power waveguide valve, high power dummy-load, and medium & high power waveguide attenuator/phase shifters. High power operation of the microwave system has been carried out.

Key words microwave system, energy doubler, accelerating section, high power waveguide valve, high power dummy-load, waveguide attenuator/phase shifters, high power operation