

一种新型的能量倍增器解调谐系统

赵风利¹⁾ 赵延坪 刘晋通

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 在北京正负电子对撞机(BEPC)直线加速器工程中,参考美国 SLAC 微波脉冲压缩技术,成功地研制了能量倍增器(SLED).该装置自 1988 年运行以来,一直存在一个隐患,解调谐系统设计有问题,不能随便解谐. BEPC II 经常需要长脉冲束流,这就要求能量倍增器能够方便地进行解调谐.为此,参考日本 KEK 的资料,对目前能量倍增器解调谐系统进行了彻底的改进,完成了新的 SLED 解调谐系统的研制任务,并在加速器上成功地进行了高功率试运行.

关键词 能量倍增器 解调谐探针 磁敏传感器 可编程逻辑器件

1 引言

能量倍增器最初是美国 SLAC 研制成功的一项加速器新技术^[1],采用 SLED,可以节约大量投资,节约能源.在 BEPC 工程中,我们成功地研制了能量倍增器,在直线加速器上共使用了 13 套 SLED,其原理是将一功率较低的宽脉冲压缩得到高功率的窄脉冲,它的主要技术指标如下:每个储能腔的空载品质因数(Q_0)达到 100000,工作模式为 TE015,脉冲功率增益可达到 7dB 以上,耦合系数大约 5,能够承受输入峰值功率为 50MW.

该装置自 1988 年运行以来,工作状态稳定,故障率极少.但是,存在一个隐患,解谐后,曾经多次发生解谐探针在储能腔中而拔不出来.这十几年的运行,一直不敢轻易解谐能量倍增器,怕造成严重后果,影响加速器的运行.因此对其重要参数——能量倍增因子的测量,一直无法进行,只能通过波形和能量贡献来估算之.另外,根据 BEPC II 的要求,下一步加速器的运行,经常需要长脉冲束流,这就要求能量倍增器能够经常、方便地进行解调谐^[2].目前的解调谐系统显然难以达到这一要求.因此对能量倍增器解调谐系统重新设计和研制已是十分迫切的

事情.

该项目作为 BEPC II 直线加速器微波系统改进的一个重要课题,2000 年开始启动,2002 年完成样机的研制、鉴定,在 2002 年暑期安装到直线加速器 7# SLED 上做高功率试验,经过一年的试运行,工作良好.2003 年暑期正式开始批量生产,准备将加速器所有的 SLED 都按照新的解调谐系统进行改进.目前已完成全部元件的加工和初步调试,计划在今年完成全部 SLED 的改进任务.

2 技术方案

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如图 1 所示.它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.

2004-04-26 收稿

1) E-mail: zhaofl@mail.ihep.ac.cn

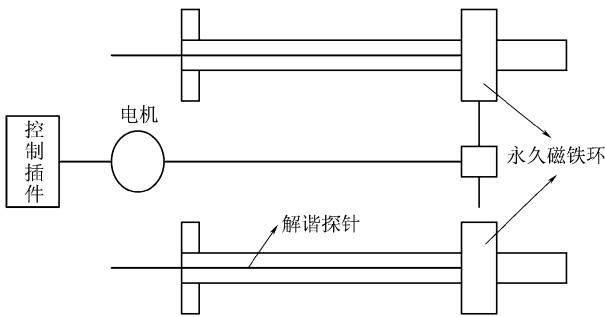


图 1 老的能量倍增器解调谐系统示意图

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如图 2 所示。用 7 组线圈套在探针的外壁, 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。

改进后的能量倍增器, 其两个储能腔的解调谐系统是独立的, 控制系统采用可编程逻辑器件 (EPLD) 实现各种时序和逻辑功能。

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。

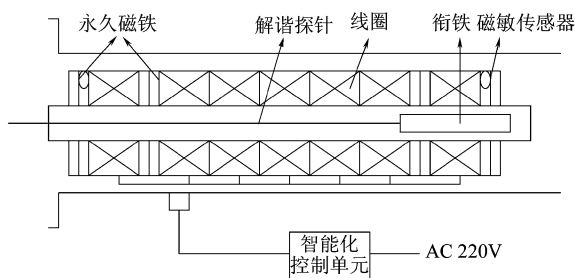


图 2 新型能量倍增器单腔解调谐系统示意图

3 运动磁场通电线圈的设计

1) 外型尺寸:

这次改进原则上不改变解谐探针及其套筒, 线圈要套在上面, 线圈行程分 7 段。

2) 绝缘等级:

线圈安装在铝壳中, 散热条件极差, 因此采用 E 级绝缘 QQ 铜漆包线, 最高使用温度 120℃。

3) 铜线直径:

原有衔铁尺寸较小, 另外电磁场力还需克服限位永磁铁的磁力, 需要线圈有尽可能高的磁感应强度, 虽然粗线在同样安匝数下有利于减少发热, 但是对于小直径线圈来讲, 不好绕制, 绕线系数较低。查电工材料手册, 线径 0.41mm 的铜线, 其电阻为 133 Ω/km(20℃), 近似折算到 75℃ 时, 其电阻为 164 Ω/km, 120℃ 时为 189Ω/km, 加漆后线圈线径为 0.47mm, 按已确定的线圈尺寸计算出可绕约 1300 匝。

4) 温升估算:

为计算方便, 把整个线圈近似看成一块紫铜计算热容量。令 W 为总热容量, 则有 $W = gcV$, 其中 g 为比重 8.9g/cm³, c 为比热 0.376J/(g·℃), V 为体积

$$V = \pi(R^2 - r^2)L, \quad r = 0.83\text{cm}, \quad R = 2\text{cm}, \\ L = 2.7\text{cm}, \quad V = 3.14 \times 3.3 \times 2.7 = 28\text{cm}^3, \\ W = 8.9 \times 0.376 \times 28 = 93.8\text{J}/^\circ\text{C}.$$

若根本不散热, 室温 35℃, 允许温升 $\Delta T = 85^\circ\text{C}$, 可吸收热量

$$Q = W\Delta T = 7973\text{J}.$$

每瓦功率合热量 1.005J/s, 通电 1s, 线圈可承受功率 7973/1.005 = 7933W。假定通电时间为 1s, 允许导线最大电阻为 22.4Ω, 电功率 = I^2R 。因此, 允许线圈最大通电电流为 18.8A。经这样计算, 选用这种导线能够完全满足要求。

5) 磁场磁感应强度 B (线圈中部): $B = \mu_0 NI/L$, 其中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, $N = 1300$, $L = 2.45\text{cm}$ (有效长度)。当 $I = 2\text{A}$ (工作值), 代入数据 $B = 1333\text{Gs}$ 当 I (最大) = 18.8A, B (最大) = 12002Gs。

4 控制系统的研制

此课题的电路部分, 能输出两组步进脉冲电流信号, 每组信号分别加在 7 个线圈上, 通过对其的时序和逻辑控制, 控制 SLED 解调谐探针的正向和反向运动, 来完成解调谐功能。

解调谐探针移动到位后, 通过装在该位置的磁敏传感器的返回信号, 来判断探针是否移动到位。

4.1 控制电路要完成的功能

- ① 对电流源电流进行控制及测量显示;
- ② 对继电器扇出电路的可编程控制;
- ③ 提供友好的用户使用界面;
- ④ 对调谐及解谐电流及加电时间进行在线修改。

4.2 工作原理

该控制系统的工作原理如图 3 所示.

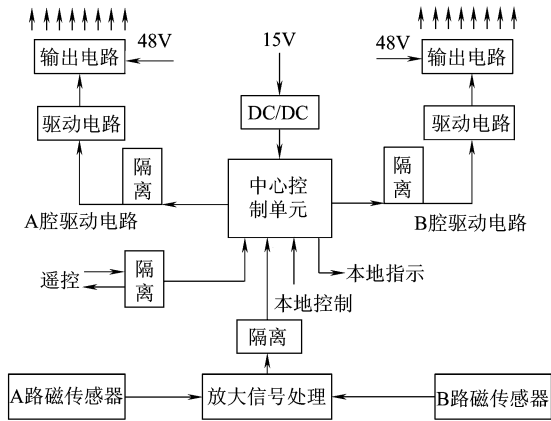


图 3 控制电路简要框图

包括 3 个模块电源. 其中 48V, 6A 电源是给 SLED 通电线圈提供脉冲电流的, 由于线圈工作电流约 2A, 考虑到浪涌电流, 故选择了 6A 的电源. $\pm 15V$ 电源为中心控制单元供电, 并由此产生 5V 电源供控制芯片工作. $\pm 12V$ 电源为磁性传感器供电.

中心控制单元是该系统的核心部分, 完成对两路解调谐探针的控制及其状态监测. 不仅能工作在本地控制状态, 而且能够工作在遥控状态. 采用 EPLD 实现各种时序和逻辑功能. 采用硬件 EPLD 与单片机相比, 可靠性高、抗干扰能力强.

控制单元与其他电路单元之间, 采用光电隔离, 与电源之间采用 DC/DC 电源隔离, 来提高抗干扰能力.

考虑到浪涌电流, 输出电路采用 10A 的继电器, 以提高可靠性、抗干扰能力.

5 高功率试验

样机安装在 BEPC 直线加速器第 7 号位能量倍增器上进行了高功率试验, 结果是令人满意的. 该解调谐系统样机在 $4\mu s$ 脉冲宽度、12.5 次重复频率下, 经过多次不同功率水平、不同解谐时间的试验, 工作一切正常, 达到各项设计指标要求, 从没有发生

探针粘住的情况. 试验结果如表 1 所示.

表 1 新型能量倍增器解调谐系统高功率试验

脉冲功率水平	解调谐状态	每次解谐时间	试验次数	结果
0	解谐	0—30 min	50—100 次	工作正常
2MW 左右	解谐	1—2 h	3 次	工作正常
8MW 左右	解谐	1—2 h	3 次	工作正常
15MW 左右	解谐	1—2 h	6 次	工作正常
15MW 左右	解谐	16 h	1 次	工作正常
15MW 左右	解谐	24 h	1 次	工作正常

同时, 对 7 # 位能量倍增器进行了能量倍增因子的测量. 首先将 7 # 位 SLED 调谐到最佳工作点, 然后测得 7 # 位功率源(包括 SLED)能量贡献 E_1 为 100MeV, 解谐 SLED, 测得 7 # 位功率源能量贡献 E_2 为 60MeV. 因此 SLED 能量倍增因子 = $E_1/E_2 = 1.66^{[3]}$.

6 结束语

经过反复多次高功率状态下的试验, 证明这套新型 SLED 解调谐系统是安全可靠的. 它比旧系统的优点是: 可以随时方便地进行 SLED 解调谐, 允许 SLED 在解谐和调谐两种状态下工作; 假如探针发生轻微的打火粘住等异常情况下, 可以通过改变通电线圈的电流, 增大线圈磁场的磁感应强度, 从而加大探针的拉力; 两储能腔是独立的两套解调谐系统(控制组合是一个), 可以十分方便地、更容易地使每个腔工作点调谐到最佳; 探针移动到位后, 由于磁敏传感器的采用, 能够给出指示信号来确定; 同时在设计新的 SLED 时, 由于新型 SLED 解调谐系统的采用, 可以将 SELD 本身的 3 只 50dB 定向耦合器减少到一只, 使得 SLED 结构变得简单, 成本也会降低.

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, 并可避免以前经常发生互相怀疑的现象.

参考文献 (References)

- 1 Farkas Z D et al. SLED: A Method for Doubling SLAC's Energy. In: Proc. 9th Int. Conf. on High Energy Accelerators, SLAC, 1974. 576
- 2 PEI Guo-Xi et al. The Preliminary Design of BEPC II Linac. Beijing, 2002. 57—82 (in Chinese)
(裴国玺等. BEPC II 直线加速器初步设计. 北京, 2002. 57—82)
- 3 Matsumoto H et al. High Power Test of a SLED system with Dual Side-Wall coupling Irises for Linear Colliders. In: KEK, National Laboratory for High Energy Physics. Japan, 1991

A New Type of Detuning System of RF Compressors (SLED)

ZHAO Feng-Li¹⁾ ZHAO Yan-Ping LIU Jin-Tong
(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract In our SLAC type of RF pulse compressor (SLED), the detuning device works not as well as expected. It happened that the detuning needles stucked to the sleeves when working at detuning mode. Due to this reason, we can not measure its energy multiplication factor. To solve the sticking problem of SLED needles, a prototype of the new SLED detuning system has been developed and it has been operated with high power successfully on BEPC Linac.

Key words SLAC energy doubler, detuning/tuning needles, MR sensor, programmable logic device