

北京质子直线加速器中的高频控制系统

质子直线加速器是把加速腔中高频电场的能量转化为在电场中运动的带电粒子、质子的能量,从而使质子得到加速的巨大装置。由于环境温度的变化,束流负载效应、幅度与相位的耦合效应等因素,被加速后的质子束流达不到预定目的。为了得到符合要求的质子束流,在加速器中设有高频控制系统,以把各种干扰造成的有害影响降低到容许程度。高频控制系统包括频率控制系统、幅度控制系统和相位控制系统。

北京质子直线加速器具有两个聚束腔和一个加速腔。其中,一个聚束腔的频率为 402.5MHz, 其他两个腔的频率为 201.25MHz。三个腔的功率分别为 20KW, 50KW 和 5MW。每个腔都设置有相应的电场幅度控制系统、电场相位控制系统和腔频率控制系统 [见图 (1)]。

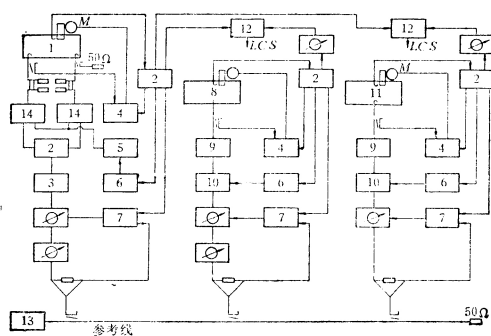


图 1

1. 加速腔 2. 分功器 3. RF 放大器 4. 频率控制器
5. 调制器 6. 幅度控制器 7. 相位控制器 8. 聚束腔2#
9. 高频功率源 10. 电控衰减器 11. 聚束腔1#
12. 腔间显示 13. 晶振源 14. TH116

一、电场幅度控制系统

1. 电场幅度控制系统的作用: 质子束流在加速过程中,有许多因素引起束流损失,如加速器各部件的制造安装公差、聚焦磁场电流的稳定度、离子源流强波动、电场相位及幅度公差、加速腔温度和频率稳定度等。在加速器设计时,根据束流损失的限度和各种情况的综合考虑,确定各方面的允许公差。据束流动力学计算,可以确定电场的相位公差和幅度公差。BPL 加速器电场相位公差和电场幅度公差分别是 $\pm 1^\circ$ 和 $\pm 1\%$ 。要保证束流稳定加速,必须要求电场幅度及相位维持不变。然而在加速器运行过程中,束流负载效

应、高频功率源子稳定、腔失谐等都会引起加速腔电场幅度发生变化,其中,束流负载效应影响最大。

束流如何影响电场幅度和相位呢?

高频功率馈进加速腔以后,在加速腔漂移管之间建立起高频电场,当质子束团飞到间隙电场中时就会受到加速(吸取功率从而得到能量)。同时质子在电场中感应一个和束流方向相反的反应场,此时加速腔中的电场为原电场 E_0 和感应场 E_b 的矢量和 E 。

图(2)是加速器运行在 10 MeV 能量、60mA 束流时的电场波形。这波形的凹槽部份就是束流负载的影响。束流强度越大、束流负载的影响就越大。束流负载效应等引起的电场幅度变化,若不加以控制,这将引起质子束流的大量损失,当质子能量较大时,粒子损失在腔壁上将会产生不允许的放射性,同时也得不到预定

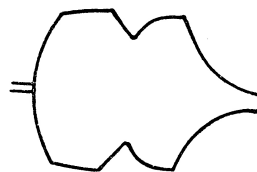


图 2

的流强。加速器的能散度也将受到影响。要想提高加速器性能(如流强、能散度等)必须在每个加速腔的高频系统中设置电场幅度控制系统。

2. 电场幅度控制系统的组成及工作原理: 加速腔电场幅度控制系统由高频检波器、参考源、误差检测及放大器、高压调制器、高频功率源、前馈电路等组成。聚束腔电场幅度控制系统与加速腔的基本相同,所不同的是执行元件不同。聚束腔电场幅度控制系统的执行元件是 PIN 电控衰减器,而加速腔电场幅度控制系统的执行元件是高压调制器(如图(1)所示)。这是一个典型的反馈——前馈控制系统。

以加速腔的幅控系统为例来讨论幅控系统的控制作用。[参看图(3)]。

幅控系统开环的情况: 当幅控系统开环(即幅控

环不工作)并且没有束流时,腔电场检波波形的顶部非常平滑。束流注入以后,由于束流吸收能量,致使电场在束流期间下降。束流越

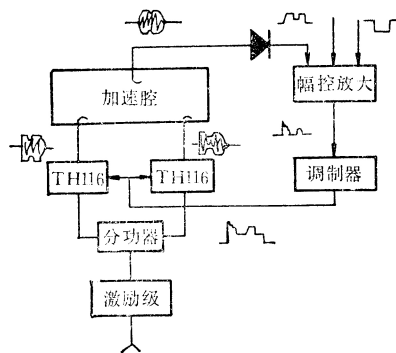


图 3

量,电场下降越多.

在上述情况下,将幅控系统闭环(即幅控系统投入工作).由束流造成的加速腔电场的下降立即得到补偿,基本上恢复到原来的电平.其自动控制过程是:从加速腔中耦合出 201.25MHz 的电场信号,经检波后得到视频脉冲,然后得此脉冲放大并与参考脉冲进行比较,得到电场误差信号 ΔE , ΔE 经放大后送到高压调制器,于是调制器的输出电压在束流脉冲期间增高.调制器的输出电压就是末级高频功率放大器的电源,因此在束流脉冲期间末级高频功率放大器的输出功率也增加,从而输入到腔的功率也增加.这样,幅控系统闭环后,在束流期间的电场就被恢复到原来值[图(4)].

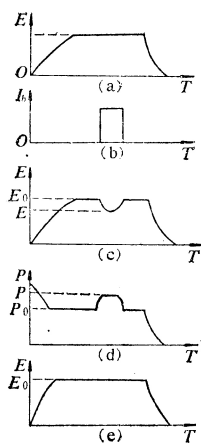


图 4

幅控系统的作用,除自动补偿束流等各种干扰因素所造成的电场变化以外,还可以改善高频功率源的性能,节省高频功率,提高电场脉冲的有效宽度.图(5)为加速器运行在 60 mA 时的波形.图(5)(a)是具有幅控系统时,腔电场高频包络波形;图(5)(b)是相应时刻末级功率放大器的输出波形.图(2)是没有幅控系统时的波形.将图(2)和图(5)比较后可看到幅控系统的效果是很明显的.

二、电场相位控制系统

1. 影响加速场相位的因素: (1) 束流负载效应是影响电场相位的主要因素. 当束流进入加速电场后,带电束团在电场中吸收能量,同时感应出一个和束团方向相反的感应场,此时腔中的总电场为原来的激励

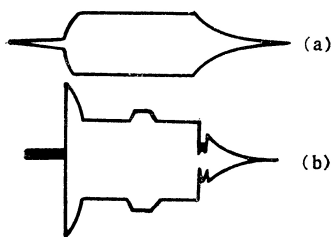


图 5

电场和束团感应电场的向量和.

$\Delta\theta$ 就是束流负载引起的相移.

在 10MeV 加速腔中,束流为 100mA 时,电场相位变化大约是 10 度.

(2) 加速腔温度影响: 由于环境温度变化,高频功率变化等,加速腔的体积会发生变化,从而引起加速腔谐振频率的变化.加速腔谐振频率的相对变化与腔体温度的变化基本上成正比.

加速腔谐振频率的变化,就产生了失谐.失谐不仅使加速电场幅度下降,同时引起功率源电流与加速电场之间的相位变化.

(3) 回路噪声: 高频系统中的回路噪声会引起加速腔电场相位抖动.回路噪声引起的相位抖动遵循高斯分布规律.从图(6)可以看出,大的相位抖动出现的几率小;小的相位抖动出现的几率大.

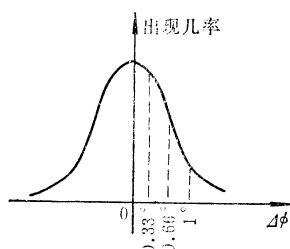


图 6

(4) 电场幅度控制系统的耦合效应: 在电场幅度控制系统的控制过程中,主要是改变末级功率放大管的阳极电压,而阳极电压改变时,将引起末级管阴极和阳极之间电子的渡越时间变化.也就体现为输出高频信号相位的变化.所以,电场幅度控制系统在控制过程中会引起高频相位发生变化.

2. 电场相位控制系统的组成及工作原理: 电场相位控制系统的作用主要是消除束流负载效应等所造成的相位偏移,将电场相位锁定在参考相位上,从而提高加速器性能.

相位控制系统主要由鉴相器、相位误差放大器、电控移相器、高频功率源和前馈电路等组成.见图(7).

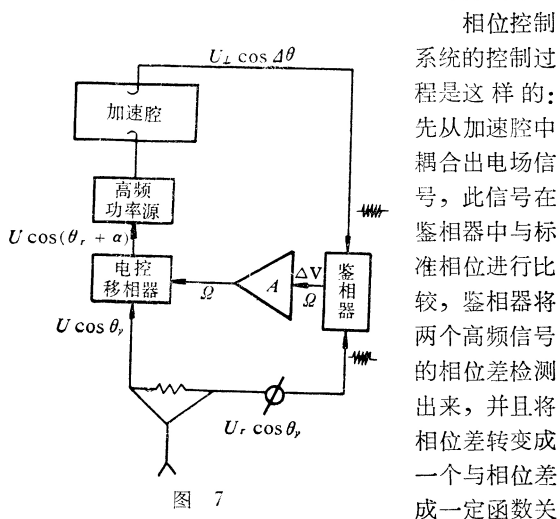


图 7

系统的控制过程是这样的: 先从加速腔中耦合出电场信号,此信号在鉴相器中与标准相位进行比较,鉴相器将两个高频信号的相位差检测出来,并且将相位差转变成一个与相位差成一定函数关系的电压信号 V_x . V_x 经放大器放大以后,去改变电控移相器的偏压,通过移相器的高频信号的相位随其偏压变化而变化[见图(7)],最后达到相位误差趋近于 0.

三、频率控制系统

北京质子直线加速器中的频率控制系统指的是加速腔谐振频率自动控制系统,它的作用是使加速腔的谐振频率在加速器运行过程中维持不变.

1. 为什么要维持加速腔的谐振频率不变呢? 在加速器运行时,在巨大的加速腔中充满了高频信号功率(频率固定为 201.25 MHz),带电粒子(质子)就是靠这

种高频信号功率获得能量而被加速的。如果腔体的谐振频率偏离 201.25MHz 的信号源频率很远(称为失谐),则高频信号功率就不能被送入到加速腔中去,粒子就不能被加速,也就是说加速器不能工作。这象收音机中的中频放大级的 LC 谐振回路一样,当其 LC 回路的谐振频率远离中频信号的频率 465KHz 时,中频放大器就不能工作。另外,腔体失谐即使不十分厉害,也会使加速腔中高频电场的相位发生变化,从而增大了被加速了的粒子之间能量的差异(即增加了能散度),这是所不希望的。

2. 温度对腔体频率的影响 北京质子直线加速器的恒温水的水温控制系统设计指标为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内。虽然水温变化看起来不大,但它所造成的加速腔的失谐也是不容忽视的。因为即使这点失谐,它所造成的加速腔内高频电场的相位变化就会使被加速后的粒子的能散度加大到不能容许的程度。根据加速器的总体要求,加速腔中的高频电场的相位变化不允许超过 1 度。但是,恒温水的水温只要变化 $1/15^{\circ}\text{C}$ 时,就会造成加速腔中高频电场 1 度的相位变化。由于恒温水的水温只控制在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内,所以,光靠水温控制系统是不能满足要求的,必须设有加速腔频率自动控制系统,才能共同把腔体频率的变化控制在要求的范围以内。

3. 频控系统是如何控制腔体频率使之不变的呢! 频控系统首先把表征腔失谐的相位变化变换成所需要的电压变化信号,去控制和推动一个步进电机。步进电机与调节高频加速腔频率的调谐器装联在一起,共同安装在加速腔中部的腔壁上。调谐器类似一个铜制的活塞,由电机带动,它可以伸入到腔体内部深些或者浅些,以使腔体频率发生变化,从而使腔体频率恢复到原来预定的频率值,即 201.25MHz。

下面较详细地谈谈加速腔谐振频率控制系统的基本工作原理。

首先,由加速腔在某时刻的谐振频率和要求的 201.25MHz 频率的差,也就是频率误差信号 f_e 。根据频率误差和相位误差成正比的公式:

$$\phi_e = k_1 f_e \quad (\text{其中 } k_1 \text{ 为常数})$$

可以知道相应于频率误差(即腔频率失谐) f_e 的相位误差 ϕ_e 的值。我们应用一种叫做鉴相器的部件,把相位误差 ϕ_e 转换为电压误差信号。电压误差信号与相位误差信号是成正比的,即 $V_e = k_2 \phi_e$ (k_2 为常数)。这样,鉴相器就把加速腔失谐状况的信息转换为便于处理和使用的电压信号 V_e 了。

由于送到加速腔的高频信号不是连续波,而是脉冲调制的高频信号(每秒 1—12.5 个脉冲),送入到鉴相器去的高频信号也是脉冲调制的。这样,由于 ϕ_e 是脉冲形式的,鉴相器的输出电压信号 V_e 自然也是脉冲形式的。当 $V_e > 0$ 时,脉冲为正,当 $V_e < 0$ 时,脉冲为负, $V_e = 0$ 时, V_e 的脉冲幅度也为零。但是,控制电

机转动方向需要直流信号,所以需要把脉冲信号 V_e 经放大后转换成直流信号。把脉冲信号变成直流信号的任务是由“采样保持电路”来完成的。

转换成直流(或变化很慢)的误差信号,送入到“误差检测电路”。误差检测电路根据其输入的误差信号的极性和大小而输出不同的控制信号以使步进电机做相应运转。假如电机正转时,使调谐器向腔内运动,加速腔的谐振频率就增加;则当电机反转时,调谐器就向腔外运动,腔的谐振频率降低。这样,经过适当的选择和调整,就可以在由于腔体温度变化使腔体谐振频率增高时,调谐器向外运动,从而使腔体谐振频率下降,趋向所要求的数值。反之也一样。

这里只是讲了加速腔频率控制系统的基本工作原理,实际的系统要比所讲的内容复杂得多。

(清义 明慧)