

快脉冲同步加速器分离作用磁铁电源的跟踪问题

徐建铭 蔡志国

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

本文提出一个解决快脉冲同步加速器分离作用磁铁电源跟踪问题的方案,分析了影响跟踪精度的主要因素,给出计算各项误差对跟踪精度的影响的公式。

由于分离作用强聚焦磁铁系统有很多优点,在快脉冲同步加速器中也开始考虑采用这种磁铁系统。采用这种磁铁系统的加速器里,弯转磁铁 b (以下简称 b 铁) 和聚焦磁铁 q (以下简称 q 铁) 分别由独立的电源供电。为了保证加速器在选定的工作点运行,在整个加速过程中, b 铁的励磁电流和 q 铁的励磁电流应当维持一定的比例关系,或者说 q 铁的电应当跟踪 b 铁电流。到目前为止,还没有发表快脉冲同步加速器分离作用磁铁电源较详细的跟踪方案。

通过分析,知道利用现在通用的快脉冲同步加速器磁铁电源,只要增加电流相位控制回路,并适当地选择磁铁谐振回路和电源回路的参数,就能满足电流跟踪要求。下面将分析影响跟踪精度的各个因素。

一、通用的快脉冲同步加速器的磁铁电源

目前通用的快脉冲同步加速器磁铁电源主要有两种:

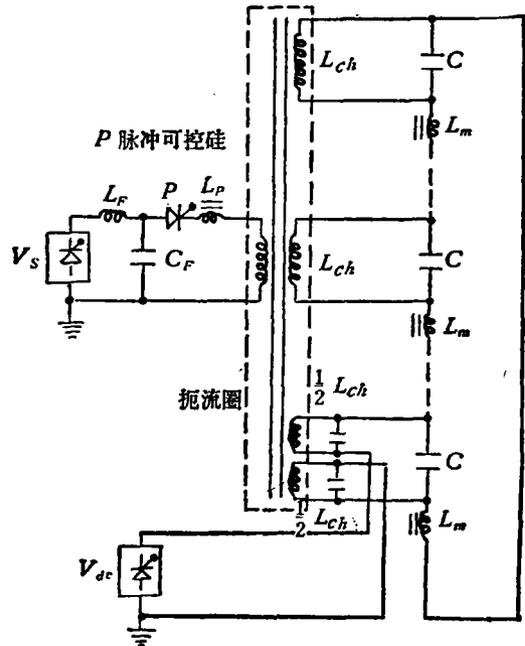


图1 采用直流电源加脉冲电源时磁铁供电回路工作原理图

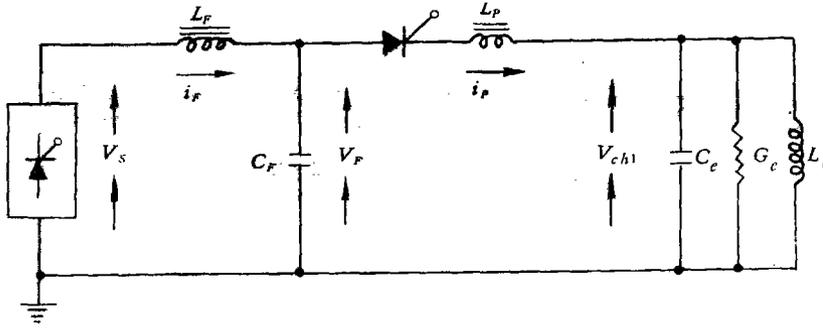


图2 脉冲电源供电迴路的等效线路

1. 直流电源加脉冲电源^[1,2]

这是目前采用最广的一种电源，图1是这种电源的工作原理图。 V_s 和 V_{ac} 都是三相桥式整流电源。 V_{ac} 连续供给能量，补充磁铁谐振回路中的直流分量损耗。 V_s 通过扼流圈 L_F 对储能电容器 C_F 充电。在磁铁励磁绕组 L_m 中的电流下降的时间间隔内，导通可控硅 P ，使 C_F 通过电感 L_p 向扼流圈 L_{ch} 的初级绕组放电，提供能量，补充交流损耗。

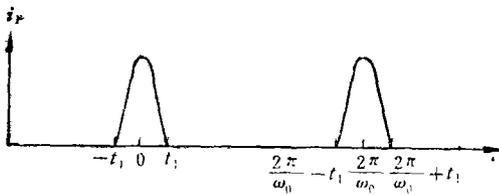


图3 脉冲电源供给的脉冲电流波形

采用这种电源的供电迴路的等效线路如图2所示。图中 L_c 、 C_c 、 G_c 分别是磁铁谐振迴路折合到扼流圈初级的等效电感，电容和电导值。 i_p 是脉冲电源向磁铁谐振迴路供给的脉冲电流。磁铁的励磁电流正比于 V_{ch1} 。图3是 i_p 的波形示意图。图中 $\frac{\omega_0}{2\pi}$ 是脉冲电源的点火频率，也就是磁铁的供电频率。

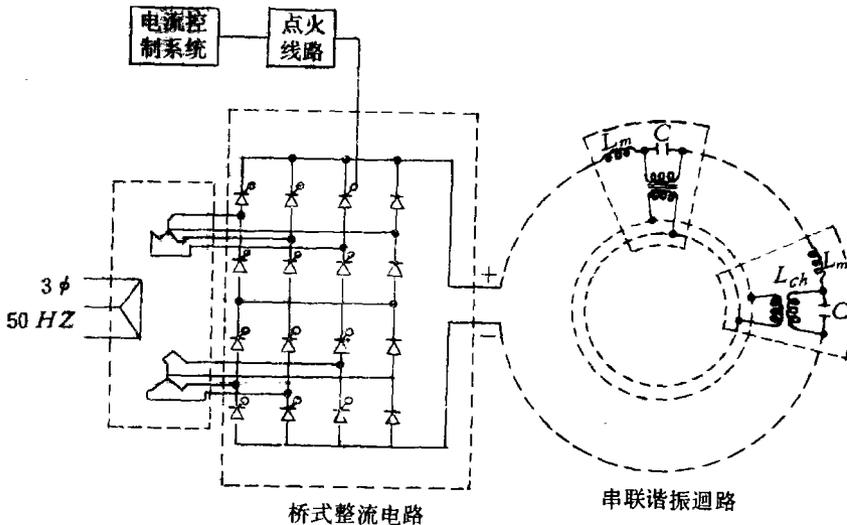


图4 偏置梯形波电源供电迴路工作原理图

2. 偏置梯形波电源^[3]

图 4 是采用这种电源的供电回路的工作原理图。显然, 这是一个串联谐振回路。点火线路产生偏置梯形波, 对可控硅的点火角进行程序控制, 使得桥式整流线路输出一个偏置梯形波电压, 如图 5 所示。梯形波的频率 $\frac{\omega_0}{2\pi}$, 就是磁铁的供电频率。

脉冲电源产生的脉冲电流和梯形波电源产生的梯形电压中, 除了频率为磁铁供电频率 $\frac{\omega_0}{2\pi}$ 的基波外, 还包含有不少谐波成分。由于磁铁谐振回路基频的品质因数 Q 值约为 40—50 或者更高, 使得在磁铁励磁电流中基波占主要成分。图 6 是磁铁励磁电流的波形。

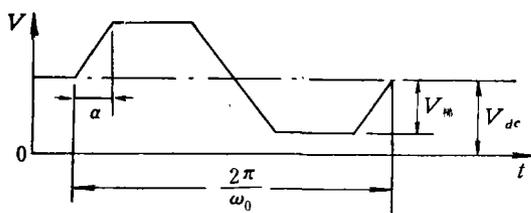


图 5 偏置梯形波电源的电压波形

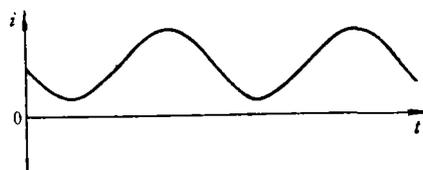


图 6 磁铁励磁电流波形

二、跟踪方案

分离作用磁铁系统的 b 铁和 a 铁可以分别由二套或三套 (如果 a 铁中的聚焦作用和散焦作用磁铁分别供电) 电源来供电。这些电源可以选用前述二种电源的任意一种, 它们的点火线路由一个信号发生器来控制, 以保证这些电源产生同一频率的电流脉冲或梯形波电压。

另外, 各套电源分别有电流幅值控制回路。目前的脉冲电源或梯形波电源, 电流最大值和最小值的控制精度已达到或超过 1×10^{-4} 。这一精度是由注入引出要求所决定, 已完全满足跟踪的要求。

为了满足电流跟踪要求, 应该在 a 铁电源中增加电流相位控制回路。利用它检测 b 铁和 a 铁的励磁电流的相位差, 控制脉冲电源可控硅的点火时间或梯形波电源的梯形波的相位, 以保证 b 铁和 a 铁的励磁电流间相位差小于一定值。在点火频率相同, 各套电源都能达到目前水平的电流幅值控制精度的条件下, 通过一定的相位控制, 便能保证励磁电流的基波满足跟踪要求。

可是, 用脉冲电源或梯形波电源时, 励磁电流里含有较大的谐波成分, 谐波幅值可达基波的百分之一左右。这些谐波成分, 不易靠自控回路来控制。应该保证电源输出波形和磁铁谐振回路参数都相似, 以使得 b 铁和 a 铁励磁电流中的谐波成分也维持需要的比例关系, 满足跟踪的要求。下面将分析各项误差对跟踪精度的影响。

三、相位及幅值误差对跟踪精度的影响

如果 b 铁的励磁电流 i_b 为:

$$i_b = I_{bd} - I_{ba} \sin \omega_0 t, \quad (1)$$

严格跟踪要求 q 铁的励磁电流 i_{qi} 为:

$$i_{qi} = I_{qd} - I_{qa} \sin \omega_0 t. \quad (2)$$

并且 $I_{qd} = KI_{bd}$, $I_{qa} = KI_{ba}$, K 为一常数. 如果 q 铁的实际励磁电流为:

$$i_q = (I_{qd} + \Delta I_{qd}) - (I_{qa} + \Delta I_{qa}) \sin(\omega_0 t + \delta). \quad (3)$$

则跟踪误差为:

$$\frac{\Delta i_q}{i_{qi}} = \frac{i_q - i_{qi}}{i_{qi}}. \quad (4)$$

设 $I_{qd} = \eta I_{qa}$, $\eta \geq 1$. 则跟踪误差为:

$$\frac{\Delta i_q}{i_{qi}} \approx \frac{\Delta I_{qd} - \Delta I_{qa} \sin \omega_0 t}{I_{qd} - I_{qa} \sin \omega_0 t} - \frac{\delta \cos \omega_0 t}{\eta - \sin \omega_0 t}. \quad (5)$$

上式中等号右侧第一项是幅值误差引起的, 目前, 幅值控制精度已达到甚至超过 1×10^{-4} , 由它引起的跟踪误差也约为 1×10^{-4} 量级, 比要求的跟踪精度至少小一个数量级, 是次要因素. 后一项是由相位误差 δ 所引起的, 是跟踪误差的主要项. 这一项的最大值发生在 $\sin \omega_0 t = \frac{1}{\eta}$ 处, 此时的最大跟踪误差是:

$$\left(\frac{\Delta i_q}{i_{qi}} \right)_{\text{最大, 相}} = \frac{\delta}{\sqrt{\eta^2 - 1}}, \quad (6)$$

它发生在 i_{qi} 的最低点附近.

以费米实验室的增强器为例, 它的 $\eta = 1.15$. 因此,

$$\left(\frac{\Delta i_q}{\Delta i_{qi}} \right)_{\text{最大, 相}} = \frac{\delta}{0.57} \quad (7)$$

假如要求入射时由相位差 δ 引起的跟踪误差不大于 2.5×10^{-3} , 则要求 $\delta \leq 1.3 \times 10^{-3}$, 或者 $\delta \leq 0.07^\circ$.

如果最大误差发生在入射之前, 考虑跟踪要求时, 就只须计算粒子入射时的 $\left(\frac{\Delta i_q}{\Delta i_{qi}} \right)$. 它等于

$$\left(\frac{\Delta i_q}{\Delta i_{qi}} \right)_{\text{入射, 相}} = \frac{\delta \cos \omega_0 t_{\text{入射}}}{\eta - \sin \omega_0 t_{\text{入射}}}. \quad (8)$$

四、谐波成分对跟踪精度的影响

脉冲电源或梯形波电源所产生的电流脉冲和梯形电压波中, 谐波分量所占的比例很大. 例如, 在一定的参数组合下, 电流脉冲 i_p 中, 二次谐波幅值接近于基波的幅值. 而在梯形电压波中, 三次谐波幅值约达基波的 20%. 尽管磁铁谐振回路的 Q 值约为 40—50, 在磁铁励磁电流中仍有较大的谐波分量. 对一个实例的计算机模拟结果表明, 脉冲电源供电时, 励磁电流中二次谐波幅值约为基波幅值的百分之一, 三次谐波约为千分之五. 允许的跟踪误差一般为 $2—5 \times 10^{-3}$, 因此谐波分量的影响不容忽视.

励磁电流中谐波分量的大小主要由二个因素决定, 即电源产生的电流脉冲或梯形电压波中谐波分量的大小, 和磁铁谐振迴路的 Q 值。电源的波形不仅决定于电源本身的参数也和磁铁迴路的参数有关。只要在设计制造中, 适当选择参数, 使这些电源产生的波形相似, 并使 b 铁和 q 铁谐振迴路的 Q 值大致相等, 就能保证两种磁铁励磁电流中谐波分量也和基波一样, 保持一定的比例关系, 满足跟踪要求。

当采用脉冲电源时, 假设 b 铁和 q 铁电源所产生的脉冲电流分别为:

$$i_{pb} = I_{pb} \left[\cos \omega_0 t + \sum_{n=2}^{\infty} a_{nb} \cos(n\omega_0 t + \delta_{nb}) \right], \quad (9)$$

$$i_{pq} = I_{pq} \left[\cos \omega_0 t + \sum_{n=2}^{\infty} a_{nq} \cos(n\omega_0 t + \delta_{nq}) \right]. \quad (10)$$

I_{pb} 和 I_{pq} 分别为 b 铁和 q 铁脉冲电源输出的电流脉冲中基波的幅值。 b 铁和 q 铁的励磁电流的交流部分为:

$$i_{b,a} = I_{ba} \left[\sin \omega_0 t + \sum_{n=2}^{\infty} a_{nb} \frac{1}{(n^2 - 1)Q_b} \sin(n\omega_0 t + \delta'_{nb}) \right], \quad (11)$$

$$i_{q,a} = I_{qa} \left[\sin \omega_0 t + \sum_{n=2}^{\infty} a_{nq} \frac{1}{(n^2 - 1)Q_q} \sin(n\omega_0 t + \delta'_{nq}) \right]. \quad (12)$$

式中 I_{ba} 和 I_{qa} 是两种磁铁励磁电流的基波幅值。本节主要讨论谐波的影响, 因此假定基波满足跟踪要求。式中 Q_b 和 Q_q 分别为:

$$Q_b = \frac{1}{\omega_0(L_e G_e)_b}, \quad Q_q = \frac{1}{\omega_0(L_e G_e)_q}. \quad (13)$$

如果

$$a_{nq} = a_{nb} + \Delta a_n, \quad (14)$$

$$Q_q = Q_b + \Delta Q, \quad (15)$$

则谐波分量引起的跟踪误差约为(设 $\delta'_{nb} \approx \delta'_{nq}$):

$$\frac{\Delta i_{nq}}{i_{qi}} \approx \frac{\frac{a_{nb}}{(n^2 - 1)Q_b} \left[\frac{\Delta a_n}{a_{nb}} - \frac{\Delta Q}{Q_b} \right] \cos n\omega_0 t}{\eta - \sin \omega_0 t}. \quad (16)$$

最大跟踪误差约为:

$$\left(\frac{\Delta i_{nq}}{i_{qi}} \right)_{\max} \approx \frac{a_{nb}}{(n^2 - 1)Q_b} \left[\frac{\Delta a_n}{a_{nb}} - \frac{\Delta Q}{Q_b} \right] A_n. \quad (17)$$

对于二次谐波, 在粒子加速区内,

$$A_2 = 4 \left[\eta - \sqrt{\eta^2 - \frac{1}{2}} \right]. \quad (18)$$

对于三次谐波, 在粒子加速区内,

$$A_3 \approx \frac{1}{\eta - (\sqrt{3}/2)}. \quad (19)$$

当采用梯形波电源时, 梯形波电压的表示式是 $V_1 \left[\cos \omega_0 t + \sum_{n=3}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t + \delta_n) \right]$.

式中 V_1 是基波的幅值。由于电源波形不同和磁铁谐振回路 Q 值的差异引起的跟踪误差约为:

$$\frac{\Delta i_{nq}}{i_{qi}} \cong \frac{a_{nb} n}{(n^2 - 1) Q_b} \left(\frac{L_{ch}}{L_m + L_{ch}} \right) \frac{\cos n \omega_0 t}{\eta - \sin \omega_0 t} \left(\frac{\Delta a_n}{a_{nb}} - \frac{\Delta Q}{Q_b} \right). \quad (20)$$

式中 $Q_b = \frac{1}{\omega_0 CR}$ (C 、 R 分别是谐振回路的电容和电阻值)。而 L_m 和 L_{ch} 分别是磁铁的电感和扼流圈的电感。通常 $L_{ch} \simeq 2L_m$ 。

在加速区内,最大跟踪误差是

$$\left(\frac{\Delta i_{nq}}{i_{qi}} \right)_{\text{最大}} \cong \frac{a_{nb} n}{(n^2 - 1) Q_b} \left(\frac{L_{ch}}{L + L_{ch}} \right) \left[\frac{\Delta a_n}{a_{nb}} - \frac{\Delta Q}{Q_b} \right] A_n. \quad (21)$$

例如,在采用脉冲电源时,主要谐波是二次谐波。设 $a_{2b} = 1$, $Q_b = 40$, $\eta = 1$, 则:

$$\left(\frac{\Delta i_{2q}}{i_{qi}} \right)_{\text{最大}} \cong \frac{1}{100} \left[\frac{\Delta a_2}{a_{2b}} - \frac{\Delta Q}{Q_b} \right]. \quad (22)$$

如果 Δa_2 及 ΔQ 引起的最大跟踪误差允许为 1×10^{-3} , 则要求

$$\frac{\Delta a_2}{a_{2b}} \leq 0.1, \quad \frac{\Delta Q}{Q_b} \leq 0.1. \quad (23)$$

在采用梯形波电源时,主要谐波是三次谐波,设 $a_{3b} = 0.2$, $Q_b = 40$, $\eta = 1$, 则:

$$\left(\frac{\Delta i_{3q}}{i_{qi}} \right)_{\text{最大}} \cong \frac{1}{120} \left[\frac{\Delta a_3}{a_{3b}} - \frac{\Delta Q}{Q_b} \right]. \quad (24)$$

在同样的允许跟踪误差下,要求

$$\frac{\Delta a_3}{a_{3b}} \leq 0.12, \quad \frac{\Delta Q}{Q_b} \leq 0.12. \quad (25)$$

五、失谐的影响

靠调节微调电容,使得磁铁谐振回路的共振频率等于电源的供电频率。当电源供电频率和磁铁谐振回路稍稍失谐时,由于幅值稳定回路和相位控制回路的作用,仍能保证基波满足跟踪要求。为此,电源的输出脉冲电流或梯形电压的幅值须增加 $2 \left(\frac{\Delta \omega}{\omega_0} Q \right)^2$ 。其中 $\Delta \omega$ 为谐振回路共振频率和 ω_0 之差。由于电源基波幅值的增大,使得谐波的幅值也按同一比例增大,相应的 Δa_n 为:

$$\frac{\Delta a_n}{a_{nb}} = 2 \left(\frac{\Delta \omega}{\omega_0} Q \right)^2. \quad (26)$$

如果 $\frac{\Delta \omega}{\omega_0} = 1 \times 10^{-3}$, $Q = 40$, 则相应的 $\frac{\Delta a_n}{a_{nb}} = 3.2 \times 10^{-3}$, 远远小于允许的 $\frac{\Delta a_n}{a_{nb}}$, 可以忽略不计。

通过上面的分析,我们知道,完成跟踪要求的关键问题是进行 a 铁电流和 b 铁电流的相位控制。在文中所举的条件下,相位允许误差约 1.25×10^{-3} 。其次,要适当选择电源回路和磁铁谐振回路的参数,以满足对电源波形和共振回路 Q 值的不甚严格的要求。

如果电流幅值和相位控制系统不是控制电流的基波分量,而是控制整个电流的最大

最小值及整个电流的相位。则由于谐波电流分量的差异,会引起新的跟踪误差。这时,应测量粒子横向振荡频率,对电流幅值及相位控制系统的工作点进行必要的修正,才能达到跟踪要求。

如果在设计加速器时,能使主要的 a 铁的励磁绕组和 b 铁励绕组串联供电,而较小的补偿用的 a 铁单独供电,以进行工作点的调节,那么补偿用的 a 铁的电流跟踪要求会比全部 a 铁独立供电降低很多,更容易完成跟踪工作。但整个加速器的磁铁系统将复杂得多。

这项工作是去年年中进行的,进行过程中曾和北京变压器厂、机械电器研究所,及本所有关同志多次讨论,提出不少有益的意见。

参 考 文 献

- [1] M. S. Livingston, Proc. CERN Symp. on High Energy Accelerators (1956), 439.
- [2] J. A. Fox, Proc. I. E. E., 112 (1965), 1107.
- [3] A. R. Donaldson and R. A. Winje, I. E. E. Transactions on Nuclear Science, NS-20 (1973), 3; 409.

THE TRACKING PROBLEM IN POWER SUPPLIES FOR SEPARATED FUNCTION MAGNET SYSTEMS OF FAST CYCLING SYNCHROTRONS

XU JIAN-MING CAI ZHI-GUO

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

In this paper, we describe a proposal for solving the tracking problem in power supplies for separated function magnet systems of fast cycling synchrotrons. Formulas for calculating the tolerances of the parameters which influence tracking accuracy are given.