

重复脉冲强流电子束传输技术研究*

张永辉^{1)2)†} 马乔生¹⁾²⁾ 向 飞¹⁾ 甘延青¹⁾ 常安碧¹⁾ 刘 忠¹⁾ 周传明³⁾

¹⁾ 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

²⁾ 中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088)

³⁾ 中国工程物理研究院, 绵阳 621900)

(2004 年 11 月 18 日收到, 2004 年 12 月 16 日收到修改稿)

分析并推导出了环形强流电子束的稳定传输条件, 通过静电磁场模拟计算对 CHP01 强流电子加速器二极管引导磁场的位形分布、幅值大小及磁场电源进行了优化设计. 经实验调试及束斑测量, 表明设计的 1 秒磁场满足束流稳定传输条件, 能使电压 800kV、电流 8kA、脉冲宽度 40ns、脉冲重复频率 100Hz 的环形强流电子束稳定传输, 并已成功运用于 CHP01 强流电子加速器束流传输系统.

关键词: 束流传输, 引导磁场, 二极管, 重复脉冲, 电子束

PACC: 4180D, 2921, 2925B

1. 引 言

随着强流脉冲功率技术及高功率微波技术实用化进程的发展, 功率系统对强流电子束源的要求越来越高, 不但使其要有高的峰值功率, 更要有高的平均功率. 因此研究高功率重复脉冲强流电子束的产生和传输技术则成为发展高功率微波源的基础和关键. 而对于强流脉冲电子束的传输, 一般是利用引导磁场箍缩电子束使其无损的通过漂移管进入微波器件并进行束波互作用. 与单次脉冲引导磁场相比, 重复脉冲引导磁场的设计及强流电子束在其中的传输过程是非常复杂的, 引导磁场既要满足与重复脉冲电子束的同步条件, 又要满足束流传输的极限条件, 同时也要满足微波器件对磁场位形和电子束几何尺寸的要求. 文章结合 CHP01 重复脉冲强流电子加速器引导磁场的设计, 给出了束流稳定传输条件, 通过数值模拟对引导磁场位形分布、幅值大小等进行了优化设计, 在此基础上研制出了 1 秒螺线管磁场系统, 并进行了重复脉冲强流电子束产生与传输实验研究, 给出了二极管输出束流及其特性阻抗随引导磁场幅值的变化关系.

2. 束流稳定传输条件

根据实际应用需求, 二极管输出束流横截面一般设计为薄环形. 对于这种薄环形强流电子束的传输, 其物理过程是非常复杂的, 不可能给出精确的解析解. 有关环形电子束的产生与传输理论研究大多是在理想的极限条件下, 利用一系列简化处理进行的^[1-3].

图 1 为环形电子束的截面简图, 外加恒定轴向引导磁场 B_0 . R_i 为束内半径, $P(r)$ 为任一点处电子的运动矢量. 假定电子束轴对称均匀分布, 而且对于薄环形束满足 $h \ll R_i$, 其运动方程的相对论表述为

$$\frac{d(\gamma m_0 v)}{dt} = -|e|\hbar(E + v \times B). \quad (1)$$

在轴对称电磁场中, 若以圆柱坐标系展开上式, 有

$$\gamma(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2) = \eta E_r + \eta r\dot{\theta} B_z, \quad (2a)$$

$$\frac{\gamma}{r} \frac{d}{dt}(r^2 \dot{\theta}) = \gamma(zB_r - rB_z), \quad (2b)$$

$$\gamma \ddot{z} = \eta E_z - \eta r\dot{\theta} B_r. \quad (2c)$$

在一阶近似条件下, 电子的快速运动分量为

$$r = A \exp[i(\omega_L + \sqrt{\omega_L^2 - \omega_e^2})t]$$

* 国家高技术研究发展计划(批准号 2004AA833010)资助的课题.

† E-mail: zhyhcaep@yahoo.com.cn

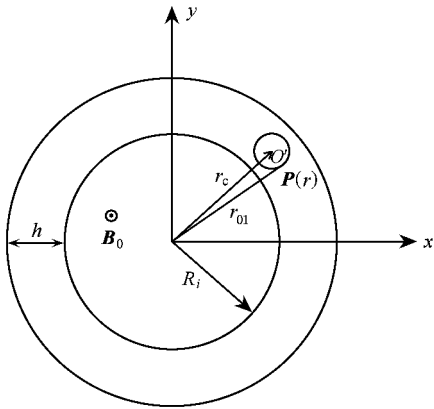


图 1 环形电子束截面简图

$$+ B \exp\left[i \left(\omega_L - \sqrt{\omega_L^2 - \omega_e^2} \right) t \right], \quad (3)$$

式中 $\omega_L = \frac{|e| B_0}{2\gamma m_0}$ 为电子运动的 Larmor 频率, ω_e

$= \left[\frac{|e|^2 n_0 (1 - \beta_z^2)}{\gamma m_0 \epsilon_0} \right]^{1/2}$ 为电子振荡频率. 可见电

子小回旋运动包括两部分:一部分是其 Larmor 回旋运动,另一部分是该运动振幅的变化. 由于电子等离子体的存在,使得单个电子的 Larmor 回旋频率降低. 只有当 $\omega_L^2 - \omega_e^2 \geq 0$ 时,电子的小回旋运动才是稳定的. 当 $\omega_L^2 \gg \omega_e^2$ 时,可以得出

$$r = A \exp\left[i \left(2\omega_L - \frac{\omega_e^2}{2\omega_L} \right) t \right] + B \exp\left(i \frac{\omega_e^2}{2\omega_L} t \right). \quad (4)$$

电子引导中心($r_c, v_{\theta c}$)的运动方程为

$$\ddot{r}_c + (\omega_L^2 - \omega_e^2) r_c + \omega_e^2 r_{01} = \frac{1}{r_c^3} \left(\frac{P_{00}}{m_0} \right)^2, \quad (5)$$

式中 $P_{00} = m_0 [r_c(0) v_{\theta c}(0) - \omega_L r_c^2(0)]$. 由(5)式可以看出,非中和束的自身电场使其膨胀,而外加轴向磁场 B_0 则使其箍缩而不致发散.

如果将外边界上电子引导中心的运动方程近似地看作电子束的外包络线方程,则有

$$\ddot{r}_{cb} + (\omega_L^2 - \omega_e^2) r_{cb} + \omega_e^2 r_{01} = \frac{1}{r_{cb}^3} \left(\frac{P_{00}}{m_0} \right)^2. \quad (6)$$

当电子束很薄时,可以得出其外平衡半径为

$$r_{cb} = (P_{00}/m_0 \omega_L)^2. \quad (7)$$

同理,如果将环形束内边界上电子引导中心的运动方程近似地看作束的内包络线方程,则有

$$\ddot{r}_{cb'} + (\omega_L^2 - \omega_e^2) r_{cb'} + \omega_e^2 r_{01} = \frac{1}{r_{cb'}^3} \left(\frac{P_{00}}{m_0} \right)^2. \quad (8)$$

由此可得出环形束的内平衡半径

$$r_{cb'} = (P_{00}/m_0 \omega_L)^2. \quad (9)$$

可见当环形束很薄时,电子束的内外平衡半径相同. 由(5)(6)(8)式可以得出环形束稳定传输的磁场条件为

$$\omega_L^2 - \omega_e^2 \geq 0, \quad (10)$$

即满足 $\left[\frac{|e| B_0}{2\gamma m_0} \right]^2 \geq \frac{|e|^2 n_0 (1 - \beta_z^2)}{\gamma m_0 \epsilon_0}$; 利用 $I =$

$n_0 e v_z S$, $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta_z^2} = 1 + \frac{|e| V_0}{m_0 c^2}$, $\beta_z = v_z/c$ 化简上式,得

$$B_0^2 \geq \frac{4m_0 I}{|e| \gamma \epsilon_0 \beta_z c S}. \quad (11)$$

对于环形电子束, $S = \pi(R_o^2 - R_i^2)$ 其中 R_i, R_o 分别为环形束内外半径;同时利用 $\eta = |e|/m_0$ 进一步简化,最后可得环形电子束稳定传输条件为

$$B_0 \geq \left[\frac{4I}{\eta \gamma \epsilon_0 \beta_z c \pi (R_o^2 - R_i^2)} \right]^{1/2}. \quad (12)$$

由(12)式可以看出,束流稳定传输所需磁场的大小随环形束厚度的增大而减小,随输出束流强度的增大而增大.

3. 引导磁场设计

3.1. 磁场位形及幅值

引导磁场的设计与阴阳极结构的设计是紧密相关的,磁场的位形分布决定着阴极电子的发射和传输. 设计中要求磁力线尽可能不与绝缘子沿面直接相交,以减小或消除回流电子对绝缘表面的轰击;同时,必须使阴极发射端面完全沉浸在磁场均匀区,而且磁场大小必须满足电子束稳定传输条件,以使电子束保持低发散度^[4,5].

实际设计中,磁场由 17 个螺线管串、并联组成,其内径都为 60mm,外径除两端各两个为 175mm 外,其余均为 166mm,每个螺线管宽 18mm,均由漆纸绝缘的截面积为 0.5mm × 6.6mm 的铜线绕制,除两端各两个为 67 匝外,其余都为 64 匝. 各线圈之间留有绝缘缝隙,利用变压器油循环冷却.

图 2 为引导磁场的磁力线与二极管阴阳极和绝缘子结构关系示意图,图 3 为螺线管电流为 900A 时磁场幅值和相对位置分布曲线. 由图示可以看出,设计的磁场位形分布很好地满足了上述要求,磁力线分布合理,磁场均匀区较宽,幅值大于临界值,满足

设计要求.

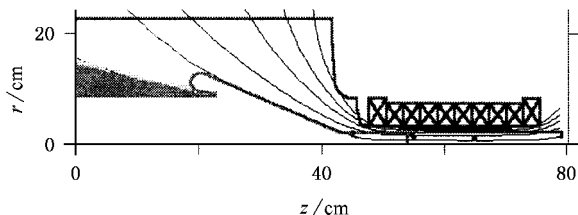


图2 引导磁场磁力线图示

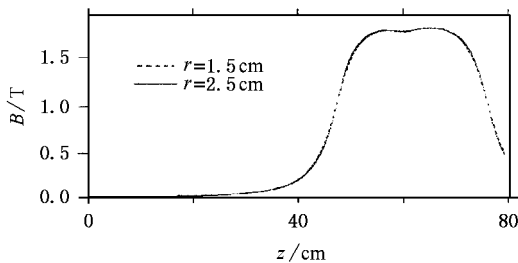


图3 磁场幅值曲线

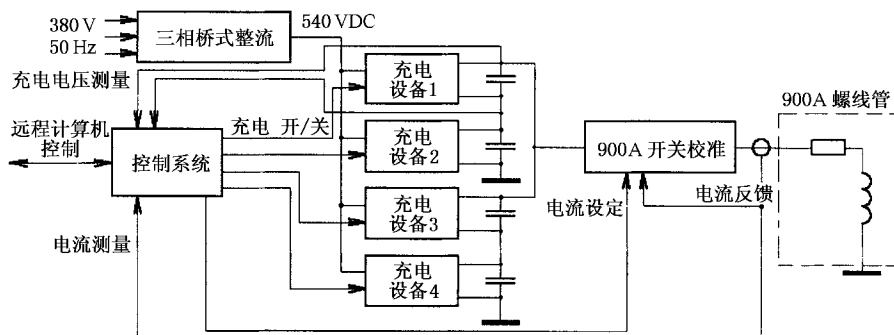


图4 磁场电源系统框图

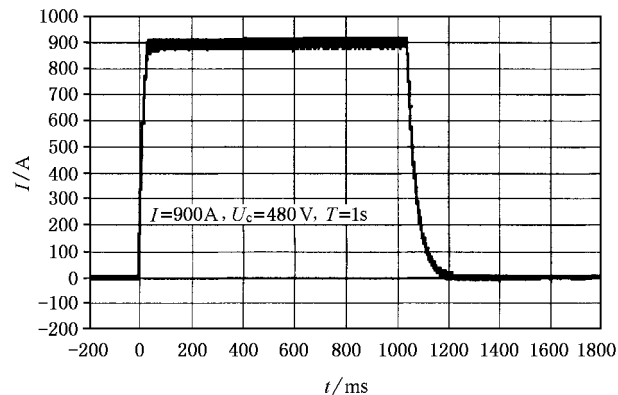


图5 磁场电源放电脉冲波形

3.2. 磁场电源

为了能稳定传输重复脉冲电子束,要求引导磁场时间宽度至少保证 1s,即做成准直流磁场.为此设计了 1s 磁场电源,其技术指标为:储能约 2.1MJ,充电时间大约 5min,放电电流最大为 900A,放电脉冲持续时间最大为 1.3s.图 4 为该电源的系统框图.

图中充电设备为四组充电电容,通过控制系统对其进行充放电,形成最高为 900A 的电流脉冲并通入负载——螺线管.负载阻抗为 0.3Ω,产生磁场强度最高可达 1.7T,脉冲持续时间最长达 1300ms,前沿陡度小于 20ms.

图 5 为典型的 1s 放电电流波形,图 6 为磁场位形分布的实测曲线,其中横坐标的起点为磁场线圈靠近二极管阳极侧的端面.由图线可以发现,磁场电源输出电流脉冲近似矩形,幅值和脉宽都达到了设计要求,螺线管大部分区域是磁场均匀区,非常有利

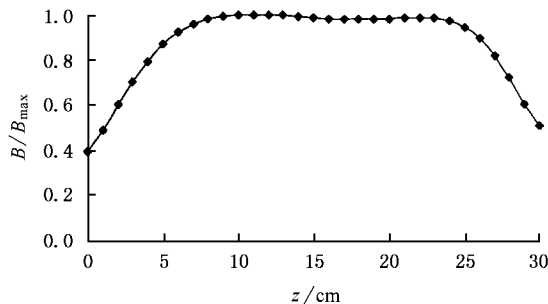


图6 1s螺线管磁场曲线

而且,阴极杆伸进螺线管约 5cm,处于磁场最大值的 80%处,阴极完全浸没在磁场中,有利于电子的发射和传输.

于电子束的传输及其在微波器件中的束波相互作用.

4. 实验研究

在理论研究及数值计算的基础上,利用设计的螺线管磁场及其电源系统进行了强流电子束的发射与传输实验研究.实验平台为 CHP01 强流电子加速器,其二极管输出电子束指标为:电压 800kV—1MV、电流 8—10kA、脉冲宽度 40ns、重复频率从单次到 100Hz 连续可调.

由 (12) 式束流稳定传输条件可以计算出 CHP01 强流电子束二极管所需的最小磁场.若取电子束环内外半径分别为 $R_i = 8.5\text{mm}$ 和 $R_o = 9.5\text{mm}$, 计算可得

$$B_0 \geq 0.75(\text{T}).$$

可见要使设计的电子束能稳定传输,所需引导

磁场的大小最小约为 0.75T.而在实际应用中,引导磁场的大小一般取为临界磁场的 2 倍以上.因此在实验中磁场电源采用如下指标:电压 470V、电流 800A,以保证螺线管磁场幅值达 1.5T 以上,运行时间保持在 1200ms.

图 7 所示为二极管以重复脉冲方式工作时的输出波形,其中(a)图中 CH1 为经时间轴压缩之后的电压波形,CH2 为经时间轴压缩之后的电流波形;(b)图中 CH1 与 CH2 分别为(a)图中 100 次电压与电流脉冲展开波形的重叠图像.图 8 为环形电子束在螺线管磁场末端的打靶图像.可见二极管以重复脉冲方式工作时束流传输非常稳定,输出波形重复性很好,通过近 30cm 的漂移段后束环发散性较小,束斑均匀稳定,很好地满足了微波器件的实验要求.

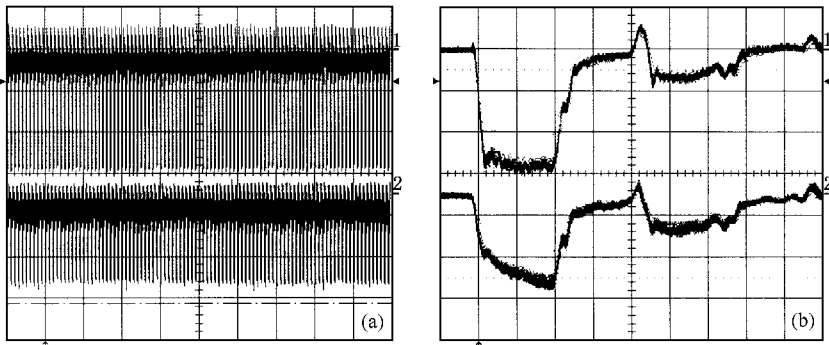


图 7 重复频率输出波形 (a)序列 (b)重叠(电压 800kV, 电流 8kA, 脉宽 40ns, 脉冲重复频率 100Hz)

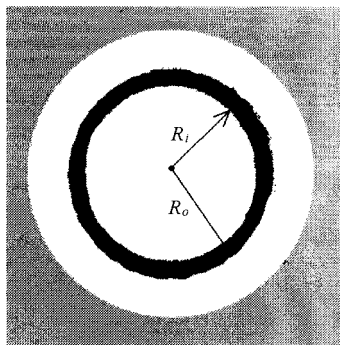


图 8 环形电子束打靶图像($R_o = 9.5\text{mm}$, $R_i = 8\text{mm}$)

图 9 为针对 50Ω 二极管进行的二极管输出束流及特性阻抗随磁场幅值的变化关系.实验过程中通过改变螺线管总电流以改变磁场强度.

由图 9 可以看出,在所加电压都为 600kV 左右时,二极管输出束流随磁场增大而有所减小并趋于稳定,即从 18kA 降至 12kA 而稳定;特性阻抗则随磁

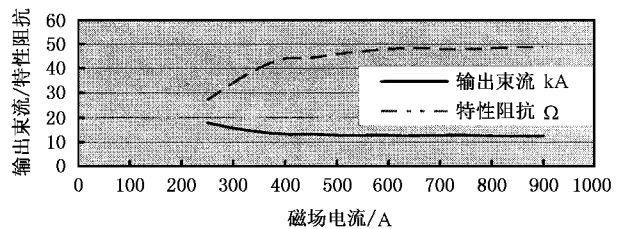


图 9 磁场强度与二极管输出束流、特性阻抗的变化关系

场的增大而增大,当磁场强度大于临界磁场时,特性阻抗也趋于稳定,即从 27Ω 升至 49Ω 而稳定.出现这种现象的主要原因是当引导磁场增大时,阴极等离子体受到较大的磁场约束力,横向膨胀速度减慢,电子发射面积相对减小,总发射电流降低,从而使二极管特性阻抗增大.当引导磁场强度大于临界磁场很多时,二极管束流发射趋于稳定,因此特性阻抗也趋于稳定.通过对各次状态下束斑的测量,发现随着引导磁场的增大,束斑环厚逐渐缩小并最终趋于稳定.

5. 结 论

通过理论分析及静电磁场计算,对 CHP01 强流电子束二极管引导磁场位形分布、幅值大小及磁场

电源系统进行了优化设计,通过实验调试并进行束斑测量,表明设计的 1s 磁场满足束流稳定传输条件,能使 CHP01 强流电子加速器稳定产生并传输 800kV/8kA/40ns/100Hz 的环形强流电子束,连续运行时间长达 1s,单次束流脉冲达到 1MV/10kA/40ns.

[1] Miller R B 1982 *Introduction to physics of intense charge particle beams* (New York)

[2] Miller R B *et al* 1980 *J. Appl. Phys.* **51** 3506

[3] Michael E J and Lester E T 1980 *J. Appl. Phys.* **51** 5212

[4] Zhang Y H *et al* 2004 *High power laser and particle beams* , **16** 1437 (in Chinese] 张永辉等 2004 强激光与粒子束 **16** 1437]

[5] Mesyats G A. 1991 *IEEE Trans. on Plasma Sci.* **19** 683

Transmission technique of repetition pulse and intense current electron-beam *

Zhang Yong-Hui¹⁾²⁾ Ma Qiao-Sheng¹⁾²⁾ Xiang Fei¹⁾ Gan Yan-Qing¹⁾
Chang An-Bi¹⁾ Liu Zhong¹⁾ Zhou Chuan-Ming³⁾

¹⁾ (Institute of Applied Electronics ,China Academy of Engineering and Physics , Mianyang 621900 , China)

²⁾ (Postgraduate Department , China Academy of Engineering and Physics , Beijing 100088 , China)

³⁾ (China Academy of Engineering and Physics , Mianyang 621900 , China)

(Received 18 November 2004 ; revised manuscript received 16 December 2004)

Abstract

The stability condition of intense annular electron beam transmission is analyzed and deduced. Based on the static electric-magnetic field simulation, the position and configuration of the guide magnetic-field and its magnitude as well as its power supply are designed. Then the experiments of repetitive rate and intense current electron-beam diode are carried out on CHP01 generator, and the image of the intense annular electron beam is measured too. The results show that the designed 1-s magnetic field satisfies to the stability condition of intense annular electron beam transmission. It can stably transmit intense current electron-beam pulse of 800kV/8kA, pulse width 40ns, repetition rate 100Hz. And now the 1-s magnetic-field system is successfully used on CHP01 accelerator.

Keywords : beam transmission , guide magnetic-field , diode , repetition rate , electron-beam

PACC : 4180D , 2921 , 2925B

* Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant No.2004AA833010).