

辐照加速器扫描磁铁电源的研制

王相綦¹ 徐玉存¹ 冯德仁^{1,2} 郝浩¹ 裴元吉¹ 洪义麟¹

1(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

2(安徽工业大学 马鞍山 243002)

摘要 介绍了科大创新工业辐照加速器中扫描磁铁电源的研制方案,包括三角波励磁电流线性度的考虑,三角波调制器的原理以及基于单片机的控制系统和工业辐照环境下软硬件方面所采取的抗干扰措施,介绍了一种输出电流峰-峰值 20 A、扫描频率为 50 Hz 的连续三角波的工业辐照加速器扫描磁铁电源的基本原理与设计考虑。

关键词 辐照加速器,扫描,三角波,单片机

中图分类号 TL503

高能电子束对物质的生物学效应,可有效杀灭医疗卫生用品和食品载带的微生物和害虫,其物理、化学效应则可用于材料改性、新材料制备与环境保护等^[1]。同钴源辐照一样,电子束具有常温、无损伤、无残毒、环保、低能耗、运行操作简便、自动化程度高、适宜于大规模工业化生产等特点。与钴源相比,其最大优点是辐照束流集中定向,能源利用充分,辐照效率高,也无废源处理之虞。随着钴源售价的飞涨、废源处理费用的上升,电子束辐照装置具有明显的价格和经济优势。2007年,中国科学技术大学国家同步辐射实验室为科大创新公司研制一台工业辐照电子直线加速器,本文针对其扫描磁铁系统的分析,介绍了一种三角波扫描磁铁电源的研制方案。

1 扫描磁铁励磁电流

工业辐照加速器电子束束流截面为毫米量级,为使产品受电子束均匀辐照,应将束流对被辐照物表面作 X-Y 扫描,即在束流出射的二维方向上施加二极磁场。

运行速度与均匀二极磁场方向垂直时,电子受洛伦兹力作用做圆弧曲线运动。动能为 W 的电子在此磁场作用下,其偏转角 θ 决定于式(1),

$$\sin \theta = \frac{300BL}{\sqrt{W(W+2\epsilon_0)}} \quad (1)$$

其中, L 为磁铁长度, B 为磁铁硬边磁场强度。若磁铁的励磁电流为 I ,则均匀磁场的强度 $B=\lambda I$ (λ

由磁铁回路磁阻、磁铁截面积以及线圈匝数确定)。因此, θ 、 B 、 I 的关系为,

$$\frac{d\theta}{dI} = \frac{\tan \theta}{B} \frac{dB}{dI} = \frac{\tan \theta}{I} \frac{dI}{dI} \quad (2)$$

通常扫描磁场的重复频率在数十赫兹,对于近光速运动的电子,它们之间的明显差别仅在于不同时刻的偏转角度。由式(2),若扫描偏转角不大, θ 与 I 为线性关联,故可选取有线性变化特征的连续三角波电流作为励磁电流。科大创新公司辐照加速器电子束能量为 10 MeV、最大扫描角度 $\pm\pi/8$ 、扫描频率在 35~50 Hz,设计选用了峰-峰值为 20 A 的周期性的连续三角波电流为扫描磁铁的励磁电流。

2 三角波调制器原理

扫描磁铁为感性负载,由暂态电路可知,电感充放电过程在较长的一个时间段内流过电感的电流可以近似是线性上升和下降的。因此,利用电感充放电的过程也可输出以三角波变化的励磁电流。为产生正负对称的连续三角波,可采用全桥式的对称电路(图 1)。

图 1 中, $K1$ 、 $K4$ 和 $K2$ 、 $K3$ 为两对桥臂开关, R 为桥臂导通后开关的导通电阻与扫描磁铁电阻之和, L 为负载电感即扫描磁铁励磁线圈的集总电感值。两组开关的交替导通可在负载电感上获得连续的三角波励磁电流。

设两对桥臂开关的通断周期与时序逻辑如图 2 所示。标记 $K1$ 的触发脉冲适于 $K1$ 和 $K4$ 桥臂,标记 $K2$ 的触发脉冲适于 $K2$ 和 $K3$ 桥臂。图中 T 为开

关周期, Deadtime 是为防止开关的连续导通而设定的死时间, 一般为数微秒。稳态工作时, 当 K1、K4 导通而 K2、K3 断开时为一种状态, 当 K2、K3 导通而 K1、K4 断开时为另一状态, 两状态周期性交替输出稳定的连续性三角波电流。如 E-K1-L-K4-E 充电回路输出三角波的上升半周期, 则 E-K2-L-K3-E 放电回路输出三角波的下降半周期。

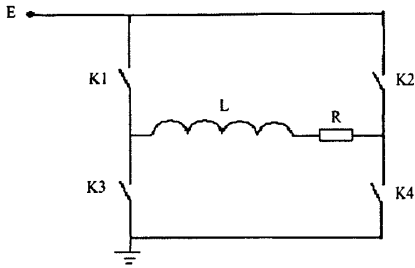


图 1 全桥式的对称电路
Fig.1 Full bridge circuit

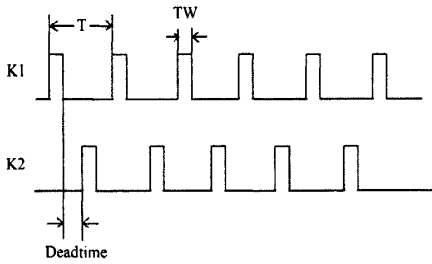
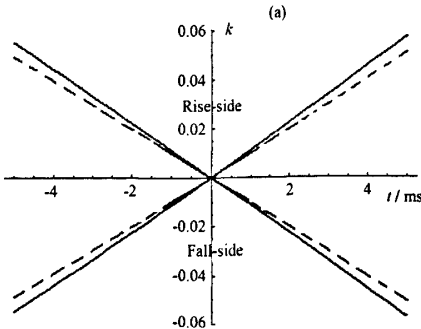


图 2 开关触发的脉冲时序
Fig.2 Pulses sequence of the trigger

对于全桥式对称电路, 描述其输出的等幅三角波电流的定解函数为:

$$i_{\pm} = f(t) = \pm \frac{u}{R} \pm \frac{u}{R} \cdot \frac{1}{\cosh\left(\frac{RT}{4L}\right)} \left(-e^{-\frac{Rt}{L}} \right),$$



式中, u 为全桥式对称电路的直流电压, 加号对应于三角波的上升半周期, 减号对应于三角波的下降半周期。时间变量 t 的起点对应半周期的始点, 其终点对应半周期的末尾点; 式中各量的量纲均采用国际单位制。

式(3)的一阶近似表达式为

$$i_{\pm} = f_1(t) = \pm \frac{u}{R_1} \pm \frac{u}{R_1} \cdot \frac{1}{\cosh\left(\frac{RT}{4L}\right)} \left(-1 + \frac{Rt}{L} \right),$$
$$\left(-\frac{T}{4} \leq t \leq \frac{T}{4} \right) \quad (4)$$

其满足线性度要求的条件,

$$\frac{Rt}{2L} \ll 1 \quad (5)$$

将式(3)称作描述全桥式对称电路输出三角波电流的原函数, 将式(4)称作描述该三角波电流的线性近似函数。为进一步了解线性近似描述偏离原函数描述的程度, 不妨研究

$$k = [f_1(t) - f(t)] / [f(t) - f(0)] \quad (6)$$

在全桥式对称电路具有不同的 R/L 值时原函数描述与线性描述偏离程度随时间的变化, 图 3(a)为 $R/L=22.5 \text{ s}^{-1}$ 和 $R/L=20 \text{ s}^{-1}$ 时此偏离程度随时间的变化曲线, 输出连续三角波励磁电流均为 10 A, 实线对应 $R/L=22.5 \text{ s}^{-1}$ 。图 3(b)用背景表示了 k 的分布, 中心位置 k 值最小, 亦即线性偏离度最小。可以发现, 较小的 R/L 值会使输出连续三角波励磁电流的原函数有较好的线性度, 在磁铁励磁线圈电感 L 固定的情况下, 应尽量减小负载回路的电阻。

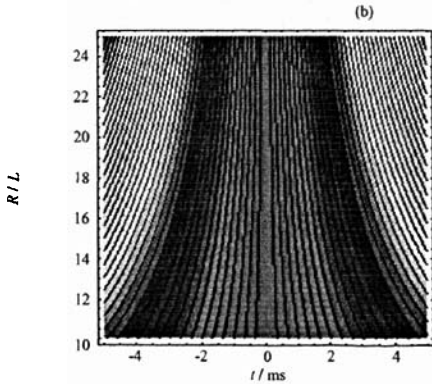


图 3 原函数与线性近似偏差的模拟
Fig.3 Simulation of deviation for original function and linear approximation

利用商业化程序进行仿真模拟计算, 当参数 $R = 0.9 \Omega$ 、 $L = 40 \text{ mH}$ 、 $f = 60 \text{ Hz}$, 得到的波形曲线如图 4 所示。可以看出, 经过大约 4 个周期后, 其波形趋于较规则的稳定的等幅振荡连续三角波电流。

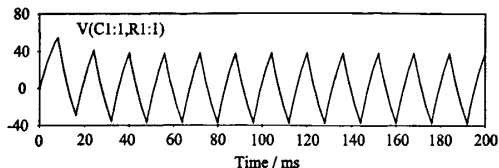


图 4 仿真模拟连续三角波电流波形

Fig.4 Simulation result of the waveform of the current

3 扫描电源系统设计

3.1 系统总体构成

系统结构框图见图 5, 设有远程控制和本地控制^[2-4]。为方便维护, 整机采用模块化结构, 包括调制控制模块、电源控制模块、电源功率模块、通信模块、束流检测模块等。

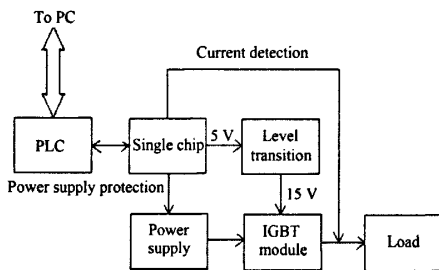


图 5 系统结构框图

Fig.5 Block diagram of the system

为了对电源、调制开关以及扫描电子束流的输出钛窗进行保护, 系统设立了过流过压检测和欠流检测电路。其中, 过流过压检测主要保护三角波扫描电源及调制器开关, 而欠流检测则主要防止扫描输出电子束过于集中, 对电子束流穿过的钛窗造成损伤。因此, 对负载电流电压进行采样, 反馈于控制系统, 一旦出现过流过压和欠流现象, 单片机停止时钟输出, 三角波调制器全桥对称电路中的开关 K1 到 K4 全部切断, 并提供报警输出。

3.2 三角波调制器的控制及抗干扰保护

由于需要系统输出提供重复频率为 50 Hz 的连续三角波, 并可通过上位机远程调控, 系统扫描频率控制由 8051 型单片机完成。设置 8051 的计数器, 输出两路频率为 50 Hz 占空比略小于 1 的时钟脉冲。占空比略小于 1, 是为了防止两个桥臂开关出现连

为桥式调制电路两个桥臂开关的驱动信号。考虑到实际安装现场附近, 有向速调管供电的一台大功率高压脉冲调制器和其它诸多电源, 电磁干扰背景强烈。为了提高系统的可靠性, 系统在设计方面作如下考虑。

(1)软件方面, 采用模块化结构。每个扫描频率为一个程序模块, 并在非程序模块的区域中以无条件跳转至程序模块起始的指令填充, 用以设立软件陷阱, 并且自上位机周期性每隔 10s 发送初始化指令。这样, 确保程序不“跑飞”。在与上位机通信中, 数据采用中位值软件滤波法, 每次取 10 个 A/D 值, 去除其中的最大值和最小值, 对剩余的 8 个值取平均, 以便去除偶然的脉冲误差。对于输出通道的干扰, 采用多次重复写命令的方式, 重复周期尽量短, 由于输出通道一般为瞬态脉冲干扰, 可能会使输出设备得到一个错误的数值, 采用这种方法后, 使得干扰信号来不及反应^[5]。

(2)硬件方面, 设立基于 555 集成电路为核心的看门狗电路, 采用低通滤波器, 防止高次谐波通过电源串入系统。系统与上位机的通信采用 PLC 模块并以光纤连接, 保证长距离的通信传输的可靠性, 对 PCB 板采取合理的设计, 采用多层 PCB 板, 电源与地线单独作为一层设计, 对于单片机系统的电路模块, 采用金属屏蔽结构, 有效地防止各种电磁干扰的串入^[6]。外接电容、晶体或陶瓷谐振器的引线尽量短。

3.3 瞬态过程的消除

由于主回路采用硬开关模式, 而且负载为感性, 因此在开关的开启和关断期间在电感上将会激起很高的感生电动势, 这个感生电动势通过 IGBT 的体内二极管和极间电容形成衰减的寄生振荡叠加在三角波上。这个过程与器件的物理特性和电路的结构都有关系, 精确地分析这一物理过程是困难的, 但试验结果显示, 自第一个振荡的上冲或下冲的峰值开始至相当于三角波峰值 5% 的余振结束, 这一过程大约为 $2 \mu\text{s}$, 因这一振荡的时间与电子枪发射束流的时间相近, 会导致束流轰击波纹管内壁, 这是十分有害的, 必须预防。因此在开关上用 RCD 阻尼吸收电路来减小这种寄生振荡。结果表明, 无开关吸收电路的衰减振荡过程约为 600 ns, 而有开关吸收电路的衰减振荡过程约为 200 ns, 作用明显。

4 结语

科大创新公司工业辐照加速器扫描磁铁电源研制成型后, 进行了实际运行测试, 其磁铁线圈负载

电感在 250 mH, 负载回路总电阻 1.4Ω 。图 6 为电源内部结构。图 7 为负载上的三角波电流波形, 其扫描频率在 50 Hz, 电感充电电压在 440 V, 蜂峰值电流在 20 A (取样电阻为 0.5Ω , 图中 1V 代表 2A), 最大线性偏离度约在 1%。

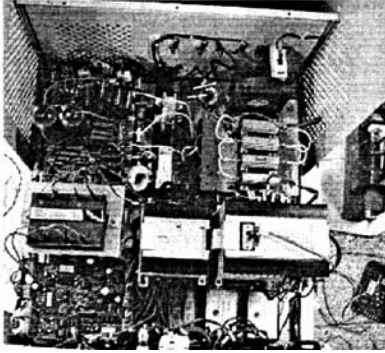


图 6 扫描磁铁电源内部结构
Fig.6 The scanning magnet power-supply

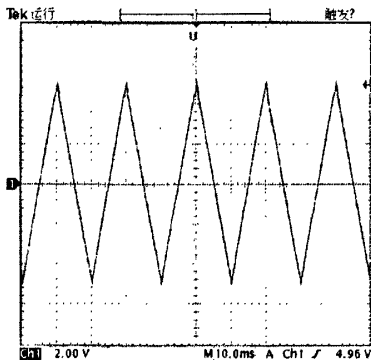


图 7 输出三角波电流波形
Fig.7 Triangle waveform of the current on load

经过测试运行表明,扫描三角波电源的可靠性、

输出励磁电流的线性度和扫描磁场的分布均达到较好的满意度。因而,采用全桥式对称电路技术对电感负载输出连续三角波电流的基本原理与设计思想,都是可行的。

参考文献

- 1 冯光耀,裴元吉,蒋道满,等.核技术,2006,29(9): 650-654
FENG Guangyao, PEI Yuanjie, JIANG Daoman, *et al.* Nuclear Techniques, 2006, 29(9): 650-654
- 2 FENG Deren, WANG Xiangqi, HAO Hao. Development of Power Supplier of Triangle Shape Current for Experiments of High Density Plasma. The First Euro-Asian Pulsed Power Conference(EAPPC'06), Chengdu, China
- 3 王相葵,冯德仁,何宁,等.中国科学技术大学学报,2007,37(1): 99-103
WANG Xiangqi, FENG Deren, HE Ning, *et al.* Journal of University of Science and Technology of China, 2007, 37(1): 99-103
- 4 Vogel V, Takata K, Chin Y H, *et al.* Solid State Klystron Modulator for JLS project. Conference record of KEK-SLAC ISG9 Meeting. Dec, 2002, KEK, Japan
- 5 董玉杰,许哈利,杜守恒.河南理工大学学报,2005,24(6): 466-470
DONG Yujie, XU Hali, DU Shouheng. Journal of Henan Polytechnic University, 2005, 24(6): 466-470
- 6 王相葵,何宁,冯德仁.核技术,2006,29(4): 241-244
WANG Xiangqi, HE Ning, FENG Deren. Nuclear Techniques. 2006, 29(4): 241-244

Design of a beam-scan power-supply for a linac irradiator

WANG Xiangqi¹ XU Yucun¹ FENG Deren^{1,2} HAO Hao¹ PEI Yuanjie¹ HONG Yining¹

¹(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

²(School of Electrical Engineering and Information of Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China)

Abstract The design of a beam-scan power-supply used in a 10 MeV linac E-beam irradiator is presented in this paper. The consideration of linear excitation current and principle of triangle wave modulator are included, control system based on single-chip and its anti-jamming scheme in industrial circumstance are introduced. A scanning magnet power-supply can produce continuous triangle waveform current, the frequency can be adjusted from 20 Hz to 50Hz in 1-Hz steps, and the peak-to-peak current is 20A.

Key words Industrial radiation accelerator, Scanning, Triangle waveform, Single-chip
CLC TL503