

# 基于 PIC 单片机的电子束高频扫描系统\*

## High-Frequency Scanning System for Electron Beam Based on PIC

中航工业北京航空工程制造研究所 苗志飞 左从进 许海鹰 付鹏飞  
北京航空航天大学 张伟

**[摘要]** 采用特殊的电路拓扑结构设计了一种基于 PIC 单片机的高频扫描系统,提高了多束流电子束焊接过程中的束流扫描频率,实现了电流的高频快变换脉冲电流的输出,输出脉冲频率最高可达 30kHz,脉冲占空比连续可调,试验结果表明所设计的扫描系统能够满足多束流电子束焊接的需要。

**关键词:** 多束流 高频扫描 电子束焊接

**[ABSTRACT]** A new power source system based on PIC microchip is proposed, which adopts a special circuit topology. Based on the above techniques, the frequency of the EBW is enhanced and the fast current converting and high-frequency fast-convert pulse is achieved, the frequency can be adjusted from 1kHz to 30kHz. The test results proof that the high frequency output current quantity can meet the need of multi-beam EBW perfectly.

**Keywords:** Multi-beam High-frequency scanning EBW

多束流电子束焊接技术在航空制造、汽车生产以及航天、舰船制造等领域有着广阔的应用空间。多束流电子束焊接技术是指通过电子束的高频扫描及对束流的分时控制,使单束电子束形成“2束”、“3束”、“多束”效应。其中 1 束用于电子束焊接,其他束流用于局部热处理,从而在一次真空条件下实现材料构件的电子束焊接和热处理复合加工。多束流电子束焊接技术能够更好地控制焊接过程中的应力和变形,降低焊接热裂倾向。因而多束流焊接技术常用于一些难熔金属材料、异种材料的焊接中<sup>[1]</sup>。

国外已在汽车制造和表面工程中广泛使用多束流电子束焊接技术,产品质量和加工效率明显提高<sup>[2]</sup>。近年来,国内的多束流电子束焊接技术也不断发展,但整体水平还处于起步阶段,这与国内电子束焊接设备研制水平还比较落后有关。国外的电子束扫描设备束流扫描频率目前最高可达 100kHz,而国内的电子束扫描频率一般都在 1kHz 以下,而且存在一定的拖尾现象。而

束流扫描频率低和扫描线圈电流上升下降沿斜率不高是造成拖尾现象的直接原因。

为提高电子束多束流焊接中束流扫描频率和线圈电流的上升下降沿的斜率,提出了一种新型高频扫描系统。系统基于 PIC 单片机的软硬件控制系统采用特殊的电路拓扑结构,实现了偏转线圈电流的高频快变换输出,输出脉冲频率在 1~30kHz 范围内连续可调。这将为多束流电子束焊接预热和焊后热处理的工艺研究奠定技术基础。

### 1 偏转系统工作原理

具有一定速度的电子束垂直射入磁场后会受到洛伦兹力的作用而发生偏转,控制电子束偏转的磁场由通过线圈的电流及其结构决定。要实现电子束的快速偏转,需要偏转线圈产生能够快速响应电流变化的磁场。磁场的大小和方向由线圈中电流的大小和方向决定,而磁场分布情况则由线圈的结构决定。

当电子枪发射出的电子束垂直通过上述磁场时,发生偏转如图 1 所示(其中  $R$  为电子在磁场  $B$  中的偏转半径),只要线圈尺寸一定,就能建立电子束偏转位置  $L$  同线圈磁场  $B$  之间的关系:

$$L \approx \sin \theta \times H = H \times \sqrt{\frac{e}{2m}} \times \frac{Bh}{\sqrt{E_a}} \quad (1)$$

式中,  $m$ 、 $e$  分别为电子的质量和电量;  $E_a$  为加速电压;  $\theta$

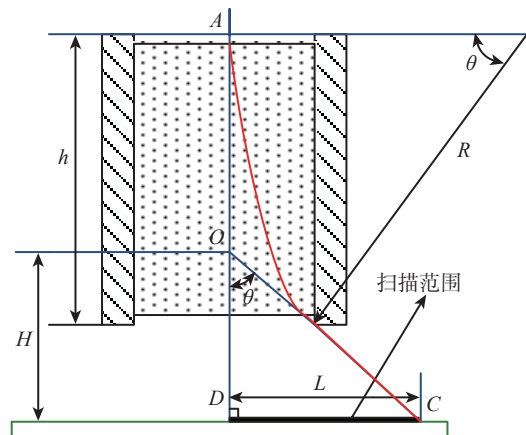


图1 电子束偏转原理示意图

Fig.1 Diagram of electron beam deflection

\* 高能束流加工技术国防科技重点实验室重大专项(KZ1002304114)资助。

为偏转角度;  $h$  为磁场宽度;  $H$  为偏转中心到焊件的距离。对于特定型号的电子束焊机,  $E_a$ 、 $\theta$ 、 $H$ 、 $h$  均为定值。

根据全电流定理和磁路欧姆定理可得磁场  $B$  与线圈中电流的关系式<sup>[3]</sup>:

$$NI = \frac{B_x \pi a}{k \mu_0 \sin(\alpha + \beta)}, \quad (2)$$

式中,  $I$  为电流强度;  $N$  为线圈的匝数;  $B_x$  为  $X$  向线圈的磁感应强度;  $k$  为线圈的形状因子;  $\alpha$  和  $\beta$  分别是为高度方向和水平方向的半张角;  $a$  为线圈的内径;  $\mu_0$  为真空中的磁导率。

通过公式(1)、(2)可以推导出电子束偏转位置  $L$  同线圈电流  $I$  之间的对应关系:

$$L = Hh \times \frac{Nk\mu \sin(\alpha + \beta)}{a\pi\sqrt{E_a}} \times \sqrt{\frac{e}{m}} \times I, \quad (3)$$

由式(3)可知,当线圈中的电流  $I$  按一定规律变化时,线圈所形成磁场的大小和方向也随之变化,电子束偏转位置  $L$  也随之变化,电子束就能按要求快速扫描。因此,可以通过控制线圈中电流的变化来控制线圈磁场的变化,进而控制电子束的扫描轨迹。

## 2 扫描系统硬件设计

### 2.1 电流切换电路及其驱动电路

为了实现上升沿,下降沿陡峭的脉冲电流,设计了如图2所示的电流切换电路。

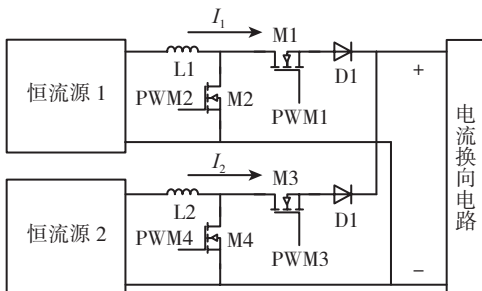


图2 电流切换电路拓扑  
Fig.2 Topology of current switching circuit

通过4个功率开关对恒流源输出电流进行快速切换,从而提高电流的上升下降速率。恒流源为一闭环控制逆变电源,电路拓扑包括全桥整流滤波电路、IGBT 逆变主电路、高频变压器、二次整流滤波电路和反馈控制电路。

工作时,同一时刻只能有一路恒流源输出。当恒流源1输出时恒流源2关闭,恒流源2输出时恒流源1关闭。当开关管  $M1$  关闭,  $M2$  导通时,恒流源1电流构成闭合回路,输出关闭,但是电流维持恒定的设定值  $I_1$ ; 开关管  $M1$  导通,  $M2$  关闭,恒流源1可快速输出设定电

流。恒流源2工作原理同恒流源1相同。当  $M1$ 、 $M4$  导通,  $M2$ 、 $M3$  关断时,恒流源输出电流为  $I_1$ ; 电流切换时,  $M1$ 、 $M4$  关断,  $M2$ 、 $M3$  导通,此时恒流源2导通,恒流源1关断,输出电流为  $I_2$ 。通过该电路快速切断电流输出提高电流变换速率<sup>[4]</sup>。本电路也可拓展为实现3路或者更多路电流切换的电路,限于篇幅在此不再赘述。

开关管的控制信号从单片机输出后经过隔离电路将信号传给驱动电路,驱动电路将控制信号放大后再去驱动开关管。驱动电路如图3所示。经过光电隔离后的控制信号通过三极管转化为低电平为0V和高电平为+12V的信号,然后通过IR2100驱动芯片将控制信号转化为能够驱动开关管的驱动信号。

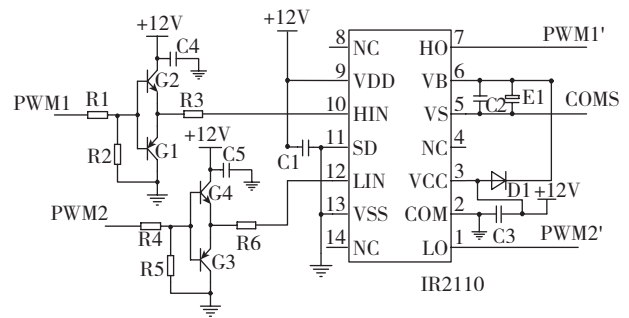


图3 驱动电路结构  
Fig.3 Topology of drive circuit

### 2.2 电流换向电路及其驱动电路

多束流扫描只有实现线圈电流方向的快速变化才能达到在焊缝方向的焊接及热处理的复合加工工艺或者是在与焊接垂直方向上的局部热处理。提出的复合型全桥电路实现了扫描线圈中电流方向的切换。图4所示为电流换向电路拓扑结构。

当多束流焊接方向沿焊道方向时,采用  $X$  线圈实现多束流偏转。此时,扫描线圈接在  $X$ -coil 和  $COM$ -coil 之间,管子  $Q1$ 、 $Q2$ 、 $Q5$ 、 $Q6$  交替导通,实现电流在  $X$  方

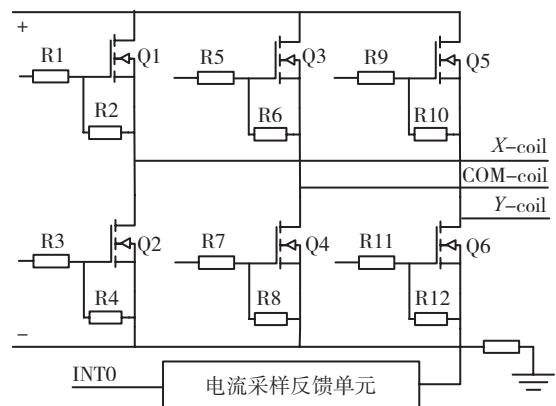


图4 换向电路拓扑结构  
Fig.4 Topology of inverter circuits

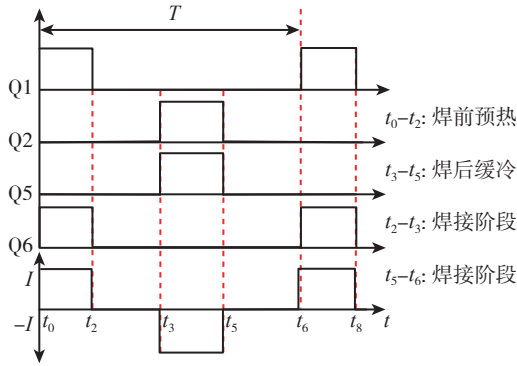


图5 管子导通时序和对应电流方向示意图

Fig.5 Diagram of tube turn-on timing and corresponding current direction

向上的扫描。Q1、Q6 导通，Q2、Q5 关断时，规定电流方向为正，束流偏向焊接熔池的前面，实现焊前预热的束流偏转；当 Q1、Q6 关断，Q2、Q5 导通时，束流向后偏转，实现了焊后热处理；当管子全部关断，无电流输出，束流无偏转通过线圈<sup>[5-6]</sup>。

图 5 所示是 3 束流时线圈 X 方向管子的导通时序及其对应的电流方向和多束流焊接工艺的阶段示意图。

当采用 Y 方向电流时，束流在焊接垂直方向扫描，用于局部热处理。此时，线圈接在 Y-coil 和 COM-coil 之间，Q3、Q6 导通，Q4、Q5 关断，电子束停留在焊道左边，偏转角度由电流大小决定，电流持续时间决定了束流的驻留时间。同理当 Q4、Q5 导通，Q3、Q6 关断时，电子束流停留在焊道右边；所有管子关闭时，束流无偏转，停留在焊道中间。

电流换向电路的驱动电路原理与电流切换电路的相同。电流采样电路通过霍尔传感器采集电流信号，防止过流。

### 2.3 单片机外围电路及隔离电路

控制芯片采用 Microchip 公司生产的 PIC18F458，单片机通过其外围接口电路对束流的各个参数进行设定，同时把控制信号传给驱动电路和保护电路。外围电路包括系统时钟电路、供电电路、D/A 转换接口电路、外部控制功能接口电路、脉冲切换 PWM 输出电路。单片机的供电电源和输出信号均是 +5V，设定电路是外部电压为 +12V，所以必须在单片机内外电源之间进行隔离。隔离电路如图 6 所示。

## 3 扫描系统软件设计

根据设定的电子束扫描频率，可以确定输出电流换向电路的换向频率；给定的焊缝数量，可以确定使用几个恒流源；根据给定的偏转角度，可以确定所用恒流源最大输出幅值；根据给定的偏转角度的驻留时间，确定

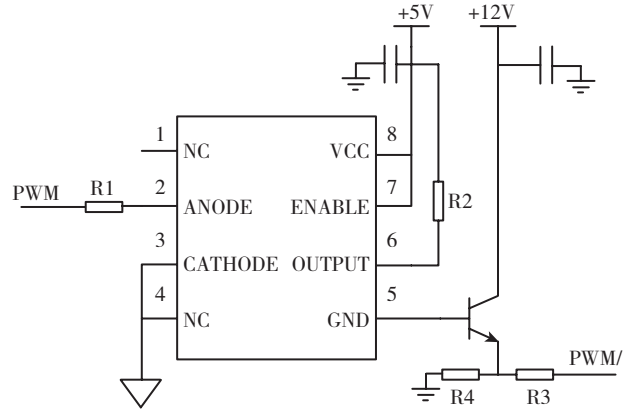


图6 隔离电路

Fig.6 Insulated circuit

不同偏转角度在扫描周期中的占空比等。因此，可根据所设计电路拓扑结构的特点，将程序分为控制恒流源工作模式的子程序、恒流源切换电路的控制子程序、换向电路的控制子程序、参数给定及工作状态显示子程序、各种保护功能子程序。程序流程图如图 7 所示。

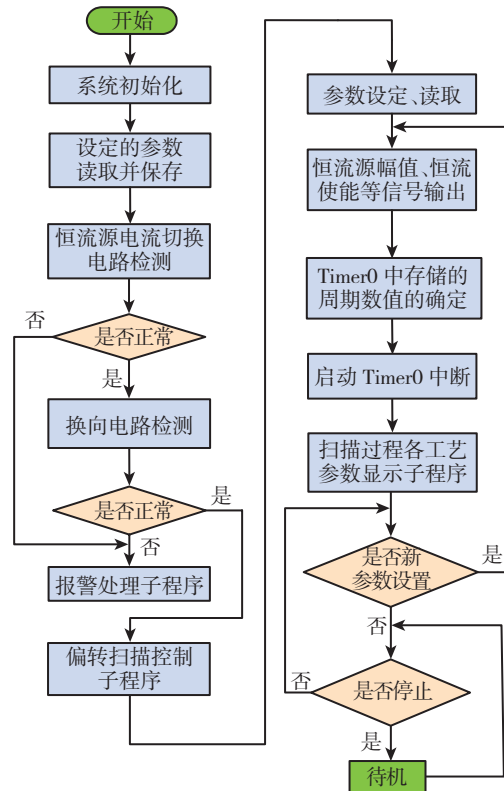


图7 软件设计流程图

Fig.7 Flow chat of software design

### 3.1 控制信号 PWM 的产生

单片机通过程序控制整个系统的工作，通过端口输出高低电平控制电路开关的通断。利用 PIC 单片机内部定时器 TMRO 的中断程序产生 PWM 信号，通过周期

性赋给端口 PORTB、PORTD 高低电位从而实现输出所需的 PWM 波形。周期长度通过控制字 TMR0L 中的值决定,当 TMR0L 中的值从设定增加到 FF,再跳变到 00 时产生一个中断实现输出电平的转换。然后不断的循环这个中断,实现控制 PWM 的输出。

为了更好地控制每个管子的时序,对每个周期分成几段进行编号,把每个时间段作为一个定时周期。程序运行时,在定时器溢出中断程序中导通时间段相应的管子,每个时间段导通时序和编号一致,这样每个周期里需要控制的管子就有一组相对应的值,导通时的高电平对应值是 1,关断时的值为 0,所以只需要在相应的中断里将其所对应的数值赋给端口控制寄存器即可。例如,某个周期需要导通管子 2、5,关断管子 1、6,就将 2、5 对应的寄存器值赋 1,管子 1、6 置 0,所对应的寄存器的值

为 0100100B,这样既保证了对每个周期时间的准确控制又保证了每个管子导通时序的正确性。

### 3.2 电子束扫描参数的设定

扫描参数是通过 AD 采样实现的。通过电位器调节单片机的模拟输入量实现对各个参数的设定。模拟电压 0~12V 对应单片机模拟输入的 0~5V,对应单片机内部数字量的 0~1023。因此任意大小的频率设定值与面板显示电压对应起来,通过算法确定设定值。

AD 转换结果为 10 位数字量保存在两个字节中,通过双浮点运算将模拟输入电压值对应的数字量转换为对定时器低字节寄存器 TMR0L 的给定值,从而实现对输出频率和驻留时间的精确控制<sup>[7-8]</sup>。

## 4 试验结果与分析

图 8(a)是采用宇波模块 CH25-NP 采集的线圈电流波形,波形 1 是驱动信号,波形 2 是扫描线圈电流的采样值,换算成实际电流值为 5A,电流频率 30kHz,电流上升率和下降率完全满足高频扫描线圈需要。图 8(b)是双束流焊接 TC4 时的采用高速相机所拍的弧光照片,图 8(c)是单束流和双束流在焊接材料 TC4 时形成的焊缝对比,可以看出双束流焊接形成的焊缝质量相对于相同参数下的单束流焊缝明显改善。

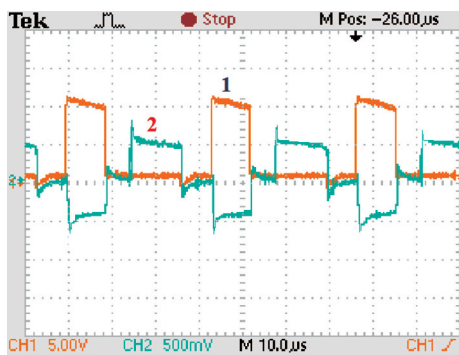
## 5 结论

基于 PIC 单片机,采用新型电路拓扑结构的高频扫描系统,不但可提高电流变化速率和电流切换速度,而且实现了最高频率 30kHz 脉冲电流输出,这将为研究更高频率的电子束扫描加工技术奠定基础。

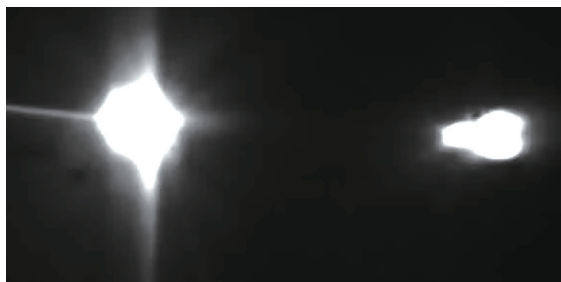
### 参考文献

- [1] 李少青,王学东,张毓新,等.基于可编程控制的扫描电子束加工技术.焊接学报.2005,26(7):60-62.
- [2] Uwe C, James B. Fast beam deflection and beam quality—keys to economic high quality electron beam applications//Proceedings of the 3rd international conference on power beam processing technologies. 2010: 125-129.
- [3] 李发海,朱东起.电机学(第3版).北京:科学出版社,2001.
- [4] 齐铂金,许海鹰,黄松涛,等.超音脉冲 TIG 焊电源拓扑及电弧焊适用性.北京航空航天大学学报,2009,35(1):61-64,112.
- [5] 吴爱国,李际涛.DC-DC 变换器控制方法研究现状.电力电子技术,1999(2):75-78.
- [6] 王志君.开关功率变换器及其控制策略研究[D].秦皇岛:燕山大学,2007.
- [7] 刘和平,刘林,余红欣,等.PIC18 单片机原理及接口程序设计.北京:北京航空航天大学出版社,2004.
- [8] 武锋,陈新建,盛春华.PIC 系列单片机开发应用实践.北京:北京航空航天大学出版社,2004.

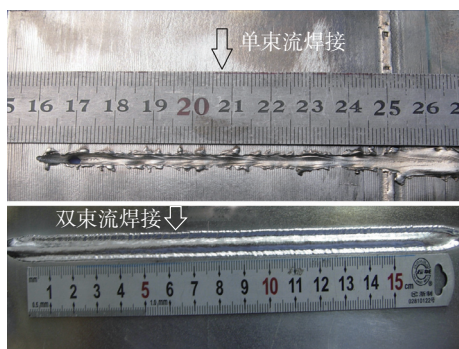
(责编 良辰)



(a) 30kHz 时 3 束流扫描线圈中电流波形及其驱动波形



(b) 双束流电子束焊接下束流弧光照片



(c) 单束流焊缝与双束流焊缝对比

图8 试验结果

Fig.8 Experiment results