

电子束焊机电磁聚焦控制系统的优化设计

Optimal Design of Electromagnetic Focusing Lens Control System Based on EB Welding Machine

中航工业北京航空制造工程研究所高能束流重点实验室 陆幼青 韩瑞清 郭光耀 左从进

[摘要] 聚焦电流是电子束焊接过程中一个非常重要的参数,调节聚焦电流可以控制电子束焦点相对于工件的位置,从而获得较好的焊缝截面形貌。研究了一种应用混合集成电路技术实现的恒流源,以适应聚焦系统对恒流源高精度、高温稳定性及较大电流的需求,满足焊接工件在不同的工作距离下都可获得品质较好的电子束束斑。

关键词: 束斑 恒流源 磁透镜

[ABSTRACT] The focus current is a very important parameter in the electron beam welding practice. The change of focus current determines the distance between focal point and the workpiece surface, which leads to the better weld shape. Using the hybrid integrated circuit technology, a new type of constant current source with high-precision temperature stability to accommodate high accuracy and larger current demand is studied. It is found that the EB beam spot can obtain higher quality at the different focal distance.

Keywords: Beam spot Constant current source Electromagnetic focusing lens

电子枪是电子束焊机的重要组成部分,电子枪设计的好坏直接影响到电子束加工的质量。在电子枪中,电子束离开静电区,在漂移区经磁透镜聚焦后打在工件上。能否在工件上获得一个高品质的加工束斑,主要取决于静电区磁透镜的聚焦效果。图1为电磁透镜的光学图,根据电磁透镜的光学性质可得^[1]:

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

式中, u (物距),即为静电束斑到聚焦线圈中心的距离,由电子枪内部结构决定,可视作常量; v (像距),可看作聚焦线圈中心到焊接工件焊透区域中心的距离,简称工作距离; f (焦距),反映聚焦系统本质属性的特征参量。

由公式(1)明显可以看出焊接工件的工作距离完全取决于磁透镜的焦距,焦距越长,工作距离就越长。

按聚焦系统的结构特征与所相关的电学参量, f 又可表示为^[2]:

$$f = A \frac{RV_0}{(NI)^2}, \quad (2)$$

式中, V_0 为电子加速电压; R 为透镜半径; N 为激励线圈匝数(1600匝); I 为加载在线圈上的电流; A 为与透镜结构有关的比例常数。由公式(2)可知,电磁透镜是一种焦距可调的会聚透镜。减少聚焦线圈的电流,可使电磁透镜磁场强度降低、焦距变长。

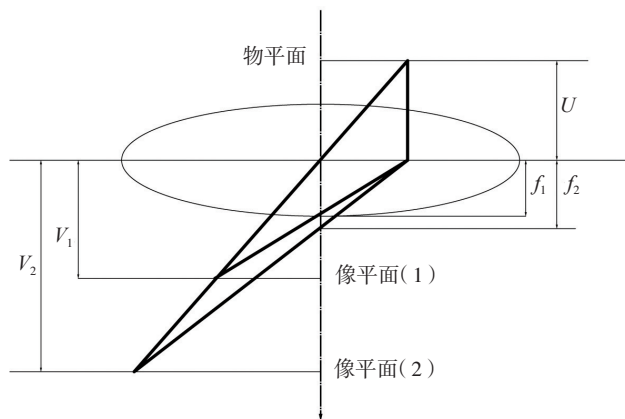


图1 电磁透镜的光学图

Fig.1 Electromagnetic lens optical image

1 聚焦电流对焊接工艺的影响

聚焦电流的大小影响电子束斑的形状,大量的电子束焊接工艺试验研究表明:聚焦电流较小时,焦点位于工件内部,束流达到工件表面时呈下焦点散焦状态,束斑直径大,能量密度小焊缝截面较为扁平;聚焦电流较大时,焦点上移,仍在工件内部,束流能量仍主要发生在工件表面,焊缝截面呈上宽下窄的“漏斗形”;聚焦电流再增大,焦点上移至工件表面附近时,束斑直径最小,能量密度最大,金属迅速熔化蒸发,发生小孔效应,焊缝截面呈“钉”形,深宽比较大;聚焦电流继续增大,焦点向工件表面上方移动,相对工件表面形成上焦点散焦焊接状态,焊缝截面轮廓又趋向扁平呈“钟罩”形^[3],如图2



图2 焊缝截面的形貌

Fig.2 Shape of fusion-solidification zone

所示。

此外,通过调节聚焦电流的大小,还可以有效抑制电子束焊接时表面出现的塌陷、缩沟、咬边等缺陷,使工艺的灵活性大大提高。

2 电磁聚焦控制系统设计

为了方便在焊接过程中得出所有工作距离的聚焦电流,应使焦点的工作距离和聚焦电流成线性关系。本聚焦线圈电路的核心设计原理是:利用晶体管放大区的恒流特性实现稳流,采用串联型稳压电路,即电路中的三极管与线圈负载是串联关系,通过比较采样电流和标准电流信号的差异来控制三极管的导通程度。当输出电流需求较大时,三极管的分压比较小;当输出电流需求较小时,三极管上就承担较多的电压。从而在线圈负

载上获得输出范围(1mA,2A)可调的电流。电路如图3所示。

采用直接耦合放大器结构虽然能够放大直流信号,但却有着难以克服的不足之处,其原因主要表现在:

(1)前后级Q点相互影响,电路的工作范围受到限制。当输入的直流电压信号从(0,10V)变化时,电压和电流都将在原有静态值的基础上产生与输入信号相对应的变化,放大电路中晶体管的静态工作点也将在原有静态工作点上下移动。当 i_{b1} 增大到一定程度,结果使型号3DA403的工作点接近饱和区,虽然有传输通路,但输入信号并不能很好地被放大。而理论上晶体管3DA403起了一个射极跟随器的作用,即输出信号与输入信号的变化方向一致,且变化幅度也大致相同,形成“跟随”现象,同时它具有把输入信号源与负载“隔离”的作用。其电压放大倍数小于1且很接近于1,又由于发射极电流比基极电流大 $(\beta+1)$ 倍,所以电路具有电流放大和功率放大性能。因此,3DA403不能处于饱和区工作。

(2)零点漂移。前一级的温漂将作为后一级的输

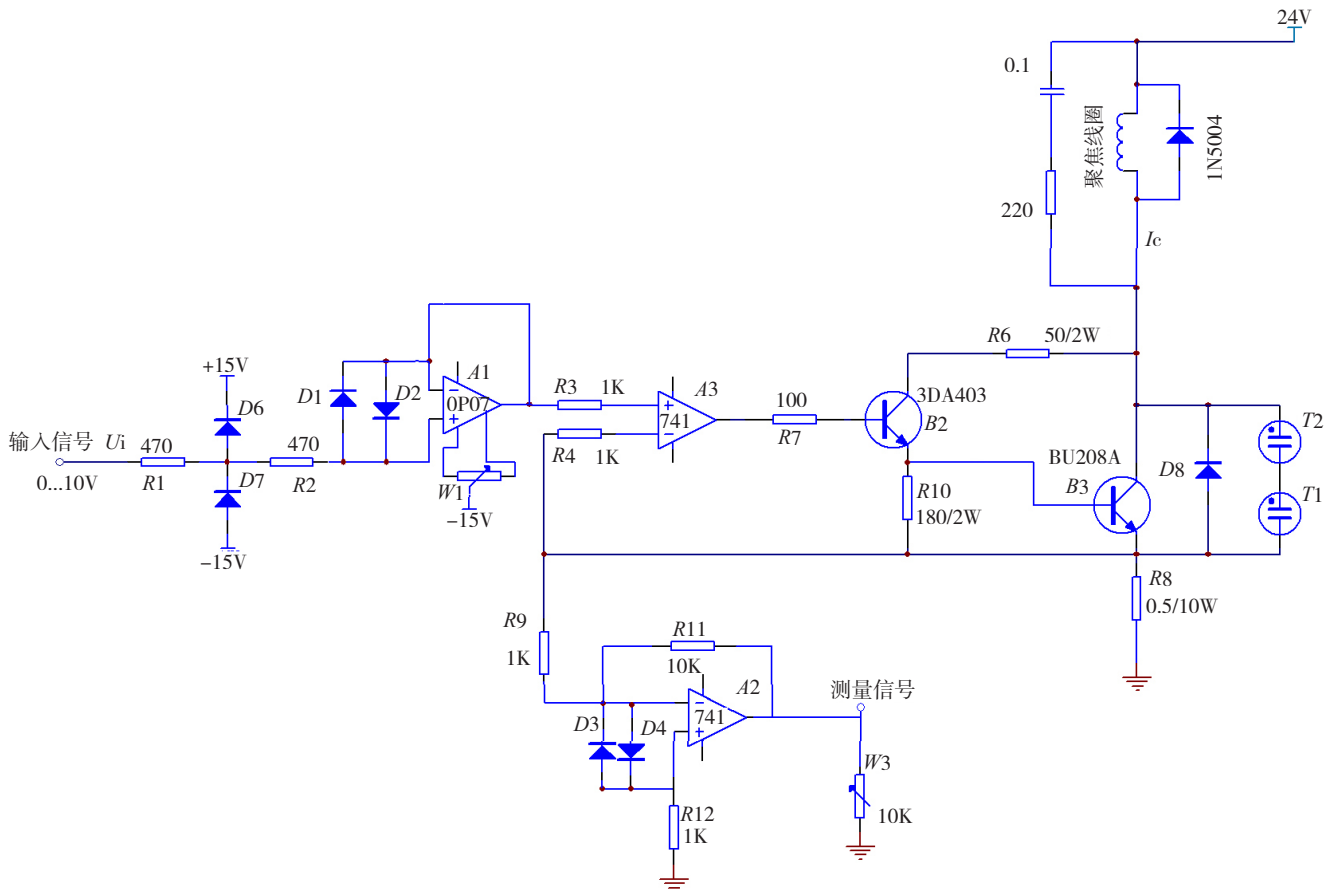


图3 聚焦线圈的控制电路

Fig.3 Fundamental diagram of constant current source

入信号,被逐级放大,导致后级饱和或截止。

当输入信号为0时(静态),输出电压会偏离原起始值而作上下波动。产生零点漂移的主要原因是:温度变化时,将引起放大器输出端产生随温度变化的电压分量,前一级输出的变化量被后面放大器逐级放大,零点漂移严重时输出端的漂移电压会掩盖有用信号。

要解决上述问题,需要对电路的控制调整部分进行改进。改进后的电路如图4所示,用TIP142代替原来的直接耦合的3DA403和BU208A。

是一个放大过程而非分压过程,因此所需电流直接由输入电流确定,比中间加晶体管再转换效率要高得多。此外,放大器受温度的影响比三极管要小大约2个量级,温度漂移也会明显降低。

3 测试分析

试验是在型号为ZD60-6A CV500L的电子束焊机上进行的,保持灯丝安装的缩进量、加速电压、电子束流和焊接速度不变,统计焊接工件的工作距离和聚焦电

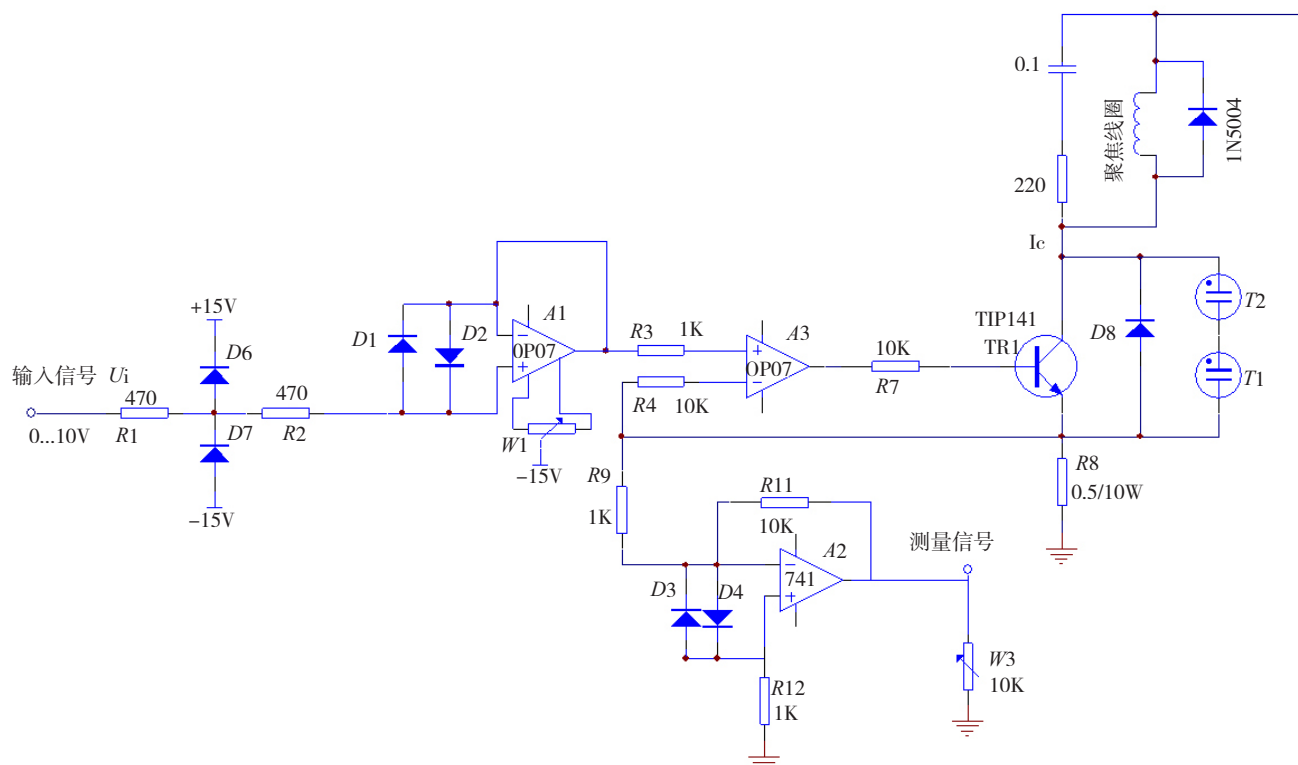


图4 改进后聚焦线圈的控制电路

Fig.4 Improved constant current source scheme

由于恒流电源的输出电流全部流过调整管,因此调整管上的功耗也很大,必须选择大功率的晶体管。由图5和图6的DC Current Gain特性输出曲线^[4-5]得知:当流经负载聚焦线圈的电流为1A时,即BU208A的 $I_c=1A$,相对应的直流共射集-基电流放大倍数 $h_{FE}=13$,这要求BU208A有较大的基极驱动电流约100mA,而通常OP放大器最大输出电流为10~20mA,所以必须通过晶体管缓冲器3DA403来增大BU208A基极驱动电流。而若采用大功率125W,集电极-发射极间反向击穿电压80V的晶体管TIP141,当输出1A电流时,仅需约几百 μA 的基极驱动电流,普通运放完全可以满足。不仅如此,理想运算放大器输入电阻为无穷大,而输出电阻为零,因此相对于多级耦合的三极管,减少一级三极管,对其线性度的保持是有利的。而电流通过放大器加载

流对应关系,发现距离电子枪出口230mm处的聚焦电流约690mA,距离电子枪出口20mm处的聚焦电流约780mA。通常电子束光斑的直径范围是0.1~1.0mm,在电子束功率一定情况下,主要取决于聚焦距离。因为电子越过磁透镜后进入无场空间,直到工件表面。既不受电场作用,也不受磁场作用,仅保持初始斜率作惯性运动^[6]。然而电子束内部存在库仑斥力,就会使电子束造成发散。所以为了获得焦点较小、穿透力更强的电子束斑,工件距离电子枪出口最好在250mm之内,而且越近越好。距离电子枪出口越近,电磁透镜的焦距越小,由公式(2)知,所需的聚焦电流就越大。因此硬件控制上确保最大聚焦电流能达到800mA以上,且给定的输入信号与加载在聚焦线圈负载上的输出信号成线性关系。

利用Minitab15回归分析,将改进前后的电路输入

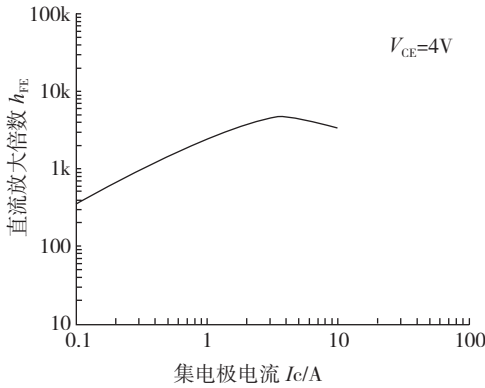


图5 TIP141直流放大倍数
Fig.5 DC current gain of TIP141

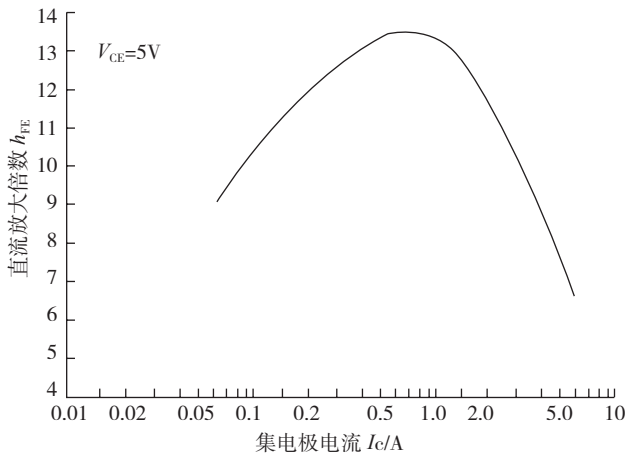


图6 BU208A直流放大倍数
Fig.6 DC current gain of BU208A

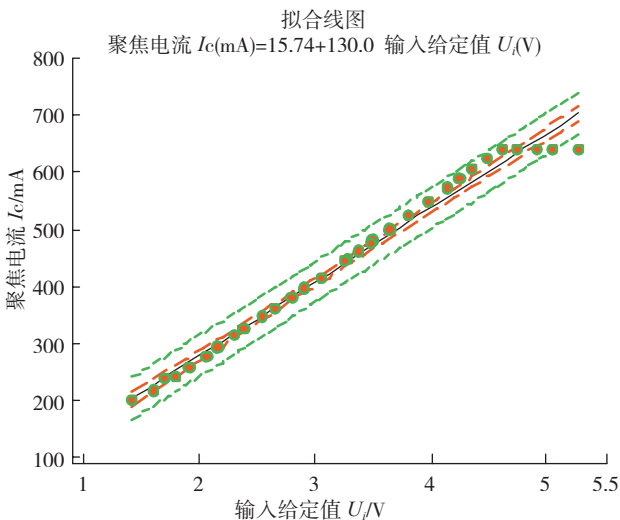


图7 改进前输入输出拟合线图
Fig.7 Regression analysis curve of the original

输出采样的数值进行拟合可得到如图7和图8所示的对应关系,明显可以看出,未改进前的电磁聚焦控制系统由于电路结构使得输出的最大聚焦电流不到700mA就接近饱和,大大限制了焊接工件的工作距离。而改进

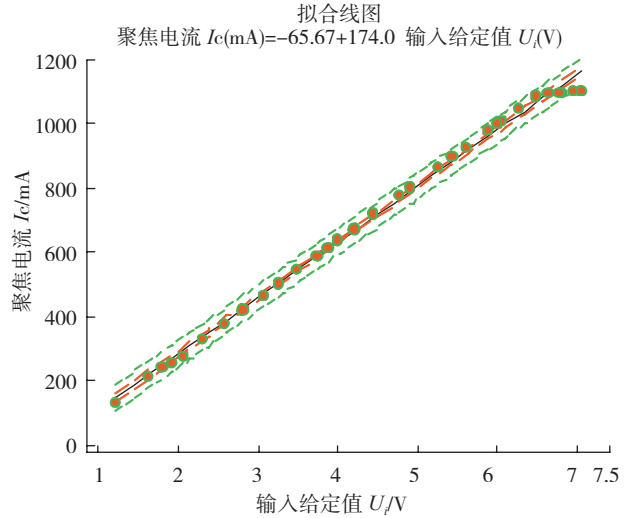


图8 改进后输入输出拟合线图
Fig.8 Regression analysis curve of the improvement

后的电路不仅提高了最大聚焦电流的裕度,而且输入输出有更为理想的线性度,满足了在不同的工作距离下,都可获得良好的聚焦性能和品质较好的电子束束斑。

参考文献

- [1] 应根裕. 电子光学. 北京: 清华大学出版社, 1984.
- [2] Schultz H. Electron beam welding, Cambridge: Abington Hall, 2003.
- [3] Fu P F, Mao Z Y, Wang Y J, et al. Shape Character of Fusion-Solidification Zone of EBW Joints for Titanium Alloy Proceedings of the 3rd International Conference on Power Beam Processing Technologies, 2010: 109-112.
- [4] TIP 140/141/142 datasheet. Fairchild semiconductor technical data[EB/OL]. <http://www.datasheet catalog.com>
- [5] BU208A datasheet. Motorola semiconductor technical data[EB/OL]. <http://www.datasheet catalog.com>
- [6] Robert W, Messler J R. The greatest story never told: EB welding on the F-14. Welding journal, 2007, 86(5): 41-47. (责编 亦非)

(上接第80页)

轴向为主振动方向,有利提高刀具的刚度和加工质量。

插铣法是非常有效的提高产品加工效率的加工方法,我公司通过推广应用插铣法加工,在难加工材料、深腔类零件的数控加工中取得了很大的成效。插铣方法有着广阔的发展前景,但现在大多数计算机CAD/CAM软件中的插铣功能还不太成熟,插铣参数积累较少,如何利用好插铣更好的提高插铣效率是未来发展的重点。

参考文献

- [1] 杨振朝,张定华,姚倡锋,等.TC11钛合金插铣加工铣削力影响参数的灵敏度分析.航空学报,2009(9):1776-1781.

(责编 深蓝)