

文章编号: 1001-3806(2008)04-0406-04

波形控制功率负反馈 YAG 激光焊接机的设计

牛增强^{1,2}, 彭文达^{2*}, 牛憨笨²

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 西安 710068; 2 深圳大学 光电子学研究所, 深圳 518060)

摘要: 为了提高激光焊接机激光输出的能量稳定度, 采用了在输出端加激光功率检测装置并将其实时信号反馈到控制端, 形成一个闭环控制系统的控制方法, 进一步提出了在激光功率负反馈信号中加入相位补偿信号以达到提高激光能量控制精度的目的。同时, 在激光焊接机软件设计上加入了激光能量波形控制功能, 以拓宽激光焊接加工的应用领域。与传统的激光电流负反馈的能量波动为 8% 以上相比, 采用功率负反馈可使激光能量波动控制在 3% 以内。实验结果表明, 选择激光功率波形, 可以改善焊接质量。

关键词: 激光技术; 功率负反馈; 相位补偿; 激光能量; 激光焊接; 任意波形控制

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A

Design of YAG laser welders controlled with pulse wave shaping and laser power feedback

NIU Zeng-qiang^{1,2}, PENG Wen-da², NIU Han-ben²

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China; 2. Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: In order to improve the stability of the output power of the laser welder, a rear optical detector was installed to feedback the output laser power signal to the control unit, making a closed loop control system. Also, a phase compensation signal was added to the laser power signal to increase the control accuracy. In addition, the control function of pulse wave shaping was used to extend the application of the laser welder. Experiments showed that the laser power fluctuation was less than 3%. Compared with 8% laser power fluctuation of the traditional laser welder, the control accuracy was improved greatly. The actual welding experiment has verified that the welding quality can be improved by changing the waveform of the laser power.

Key words: laser technique; power feedback; phase compensating; laser energy; laser welding; pulse-shaping control

引 言

近些年来, 伴随着电子产品的小型化, Nd YAG 激光精密焊接加工技术得到了广泛的应用。焊接当中激光功率的稳定性是决定产品良品率的关键指标, 是工业化大批量生产过程中经常监控的重要参量。

传统的 Nd YAG 激光焊接机大都采用电流负反馈的方式, 由于放电电流并不能实时准确地反映激光功率的变化, 因此, 其输出功率的稳定性较差。这种焊接机激光输出功率不稳定的主要原因有以下 3 个方面: (1) 长时间使用时抽运用氙灯的老化使激光器电光转换效率降低, 导致激光输出功率降低; (2) 激光焊接机工作过程中的聚光腔温度的变化引起的激光功率的波

动; (3) 激光谐振腔的机械不稳定性。

目前, 有关激光功率负反馈技术在气体激光器和半导体激光器方面的应用已经有许多报道^[1-4], 而有关 Nd YAG 激光焊接机的研究大多数则主要集中在实时检测方面, 也就是检测 Nd YAG 激光与物质相互作用过程中工作区产生的声、光、电、热等效应上^[5-10], 而对检测到的信号如何用来进行输出 Nd YAG 激光功率及输出时间的控制却只有很少的报道^[11-12]。

本文中所述 Nd YAG 激光焊接机的基本思路是在 Nd YAG 激光输出光路上, 加一个激光功率检测器, 然后将功率检测器检测到的激光功率波形实时地反馈到控制信号输入端, 形成一个闭环控制系统, 并使系统具备高速、高精度的控制特性。这样较好地解决了焊接机激光输出功率的不稳定性问题, 同时, 在焊接机控制软件设计上加入了激光功率波形设置功能, 进一步拓展了激光焊接机的应用领域。

1 激光焊接机的组成及工作原理

作者简介: 牛增强 (1964-), 男, 工程师, 博士研究生, 主要从事自动控制及信号处理方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: pwd@szu.edu.cn

收稿日期: 2007-05-29; 收到修改稿日期: 2007-08-24

1.1 波形控制功率负反馈 YAG 激光焊接机的组成

图 1 所示为波形控制 YAG 激光焊接机的基本组成框图,其电源充电系统和放电系统全部采用开关电源

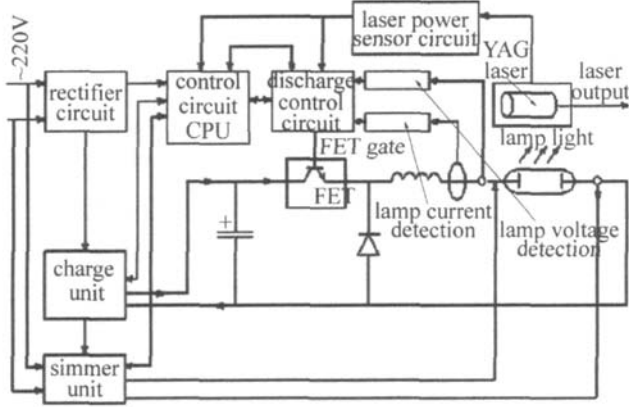


Fig 1 Schematic block diagram of power feedback YAG laser system 源原理设计。充放电电源开关频率均为 50kHz(一般焊接机电源系统的开关频率为 20kHz),控制周期为 20μs,具有控制速度高、精度高和效率高的特点。

1.2 功率检测取样

激光焊接机的功率检测取样可以有两种取样点,一种为尾镜取样^[1]:激光谐振腔的尾镜采用了低透射率的介质膜全反镜,利用该尾镜的微弱透射光进行功率采样。另一种为输出端取样:在光路输出端耦合进入光纤前端的 45°全反射镜后面加入激光功率取样装置。尾镜取样的优点是控制简单,缺点是后级的能量波动未能反映在反馈系统中;输出端取样改善了尾镜取样的缺点,但要求光学器件结构及性能非常稳定,否则会因控制失灵烧坏电源系统。本设计中采用了尾镜取样,尾镜反射率为 99.9%。

功率检测系统利用全反射镜极小的一部分漏光来激发检测器中的 Si PN 光电二极管,光电二极管将激光能量信号转化为与之成比例的电信号来检测激光输出能量的波形及大小,通常功率负反馈激光焊接机同时具备功率负反馈和电流负反馈两种控制方式。实际应用时,在系统整个光路调整安装完成后,利用电流负反馈功能对激光能量检测器进行校准,以单脉冲输出最大能量为校准点,调整激光能量检测器中的调整电位器,使得能量检测器的输出显示与能量计的显示相一致。

1.3 放电控制系统的电路设计

1.3.1 放电系统的基本原理 放电系统的基本原理是开关放电,即把 CPU 给出的所设定的激光能量波形与实际检测出的激光能量波形进行比较放大,然后进行脉宽调制(pulse-width modulation, PWM)控制,确定 IGBT 脉冲门信号的占空比,用这个脉冲门信号来控制 IGBT 或 FET 等大功率器件的开关,即通过控制流过抽运灯管电流的大小,进而控制激光输出能量的大小^[11-12]。

采用激光功率负反馈控制方式从原理上消除了电流负反馈时输出功率不稳定的 3 个主要因素,使控制精度大大提高,但由于激光输出波形与 CPU 设定波形相比有一定的时间延迟,而且整个控制系统工作在大功率开关电源产生的高频电噪声环境当中。为了提高控制精度又能使整个闭环反馈系统稳定工作,对大功率器件的门信号作适当运算处理并作为相位补偿信号与实际输出的激光功率信号叠加在一起,然后进行 PWM 控制,控制系统原理图如图 2 所示。图中 $H_1(s)$

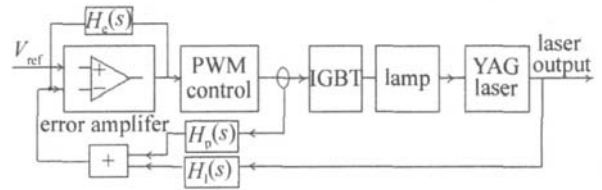


Fig 2 Laser discharge unit

为激光功率探测器的传递函数,它是一个与激光输出功率成正比的线性函数,其线性度主要由探测器前面的衰减镜片和探测器参数决定。影响功率负反馈控制精度及稳定性的主要因素有以下两个参量:相位补偿信号传递函数 $H_p(s)$ 和比较放大器传递函数 $H_c(s)$ 。下面分别说明这两个传递函数的设计方法。

1.3.2 相位补偿电路设计 相位补偿电路采用了图 3

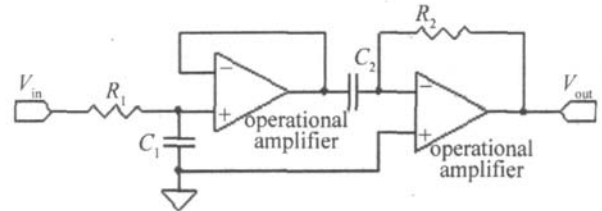


Fig 3 Phase compensating circuit schematic

的原理电路,其传递函数 $H_p(s)$ 为:

$$H_p(s) = sC_2R_2 / (1 + sC_1R_1) \quad (1)$$

式中, $s = j\omega$, ω 为信号的角频率, R, C 分别为电阻和电容。 C_1R_1 的选取原则是:

$$C_1R_1 \geq 3/f \quad (2)$$

式中, f 为放电电路的开关频率。

实验中可取 $C_2 = 10000\mu F$, 根据实际系统的噪声环境实验选取 R_2 , R_2 越小, 能量稳定度越高, 但系统抗干扰能力越差。

1.3.3 比较放大器电路设计 误差放大器选用了图 4

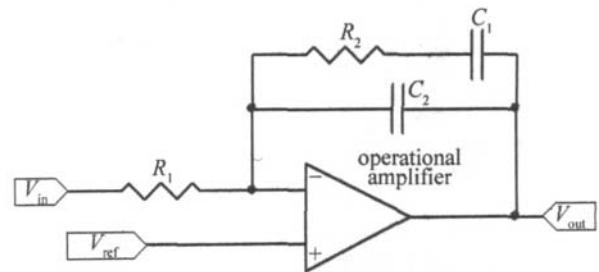


Fig 4 Error amplifier circuit schematic

所示的电路形式,其传递函数 $H_e(s)$ 为:

$$H_e(s) = \frac{1 + sR_2C_1}{sR_1(C_1 + C_2) [1 + sR_2C_1C_2 / (C_1 + C_2)]} \quad (3)$$

取 $C_2 \ll C_1$, 则得:

$$H_e(s) = \frac{1 + sR_2C_1}{sR_1(C_1 + C_2)(1 + sR_2C_2)} \quad (4)$$

令: $F_{p0} = \frac{1}{2\pi R_1(C_1 + C_2)}$, $F_p = \frac{1}{2\pi R_2C_2}$, $F_z = \frac{1}{2\pi R_2C_1}$ 。
 式中, F_{p0} , F_p , F_z 分别为初始极点频率、极点频率和零点频率。

为了保持系统稳定工作,在(4)式开环增益 0dB 处的剪切频率 F_{c0} 取为放电电路开关频率 50kHz 的 1/5, 即 10kHz。

采用 Venable 方法, 选定比率 $K = F_{c0} / F_z = F_p / F_{c0}$, (4) 式电路在剪切频率 F_{c0} 处的相位总滞后为^[13]:

$$\theta_{\text{tot, lag}} = 270^\circ - \tan^{-1} K + \tan^{-1} \frac{1}{K} \quad (5)$$

选取(4)式在平坦区域的放大倍数为 20dB, $K = 5$, 可以求得(4)式的实际传递函数为:

$$H_e(s) = \frac{1 + 2s \times 10^{-4}}{s \times 2 \times 1 \times 10^{-5} (1 + s \times 10^{-5})} \quad (6)$$

而此时通过误差放大器的相位滞后为 202° 。

2 实验测试结果

根据以上所述原理研制出了国内首台任意波形控制功率负反馈 YAG 激光焊接机。该样机整机的性能测试结果如下。

2.1 单次输出时的能量波动

单次输出时的能量波动按下述方式测试计算: 每设定一个激光输出能量值测 20 次, 计算其平均值并以此作为本设定激光输出能量近似真值, 分别找出本测试点的最大输出值和最小输出值, 再求取其中的最大相对误差作为本测试点的能量波动。在激光输出能量值为 1J~15J 范围内设置多个测试点进行测试, 结果显示, 单次激光输出时的能量波动均小于 3%。能量波动测试的部分结果如图 5 所示。

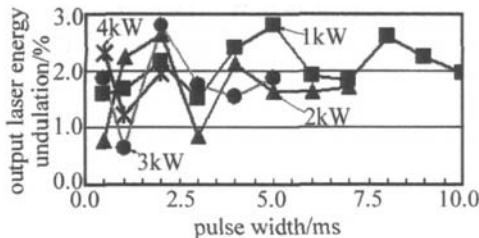


Fig 5 Single shot laser output stability

2.2 连续输出时的能量波动

图 6 表示焊接机连续工作时, 实时激光功率负反

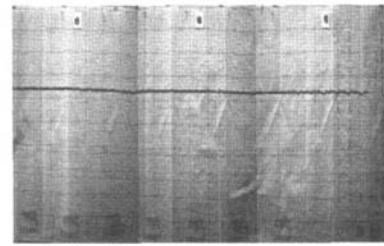


Fig 6 Quasi-continuously laser output stability

馈时激光能量波动。工作条件为: 激光峰值功率 2kW, 脉冲宽度 3ms, 工作频率 2Hz, 输出能量 $6J \times 2 = 12J$, 连续工作时间 8h。从多通道记录仪打印的结果中可以看出: 在 8h 的连续工作时间内激光能量的最大相对误差不超过 3%。

2.3 功率上升时间的改善

图 7 为激光输出激光能量峰值功率为 4kW 的方波时, 输出能量波形与大功率开关器件门信号的实测波形图, 从门信号打开到激光能量到达设定值的上升

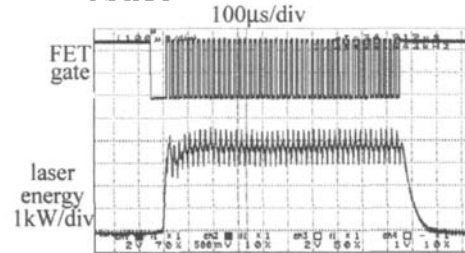


Fig 7 Laser output rise-time with power feedback

时间为 $80\mu s$ (传统的激光焊接机一般在 $150\mu s$ 以上), 并且不会出现脉冲峰值过冲。

3 应用

图 8 及图 9 分别是材质为镍片的光通讯器件在激光输出能量相同但波形不同的焊接波形及焊接效果图, 对比可以看出, 采用方波功率波形进行焊接时, 焊

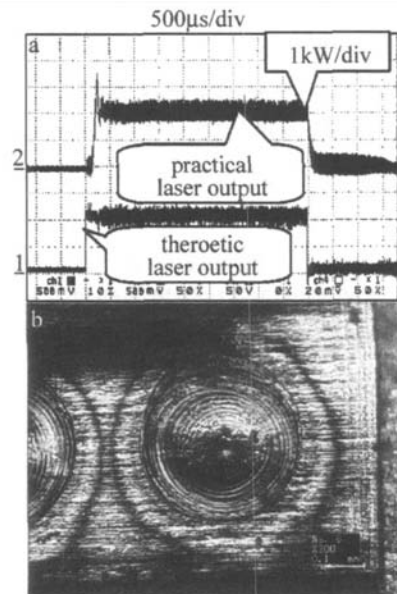


Fig 8 Square laser power wave and its laser welding spot photograph

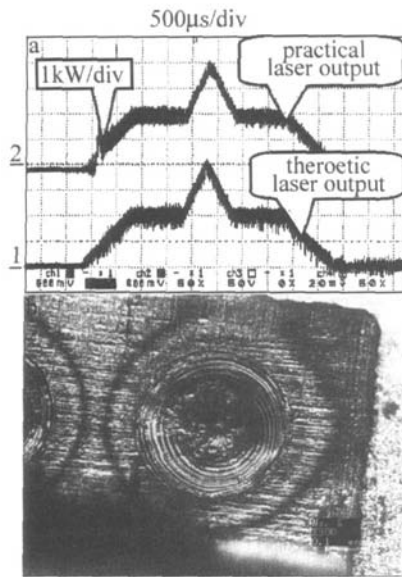


Fig 9 Laser power wave and its laser welding spot photograph

斑上凸,采用图 9 所示激光功率波形焊接时,光斑下凹。图 8 中的光斑上凸的主要原因是由于采用方波焊接当中焊接部位温度急剧上升,小孔中的动力学因素使得焊盘底部形成气泡,两层金属表面不能紧密接触,而采用图 9 中的波形进行焊接时,激光功率经过了缓慢上升—急剧增大—急剧下降—缓慢减小的过程,焊接部位底部的温度也经过了缓慢上升的过程,使焊盘底部很难形成气泡,又由于此后的激光功率急剧增大,使焊点熔深加深,激光功率的缓慢减小过程又使焊点逐渐冷却,这种穿透焊接的效果光斑下凹,焊接深度大、强度高。这样达到了比较理想的焊接效果。

4 小 结

采用本文中所述的激光功率负反馈放电控制技术制作而成的 Nd YAG 激光焊接机,可以在任意时刻、当脉宽大于 1ms 时,实验机的单发和准连续能量控制精度均在 3% 以内,大大提高了焊接机的能量控制精度;同时,采用本技术进行控制时,输出峰值功率在 4kW

时,上升时间可以控制在 80μs 左右,而且不出现峰值脉冲过冲;波形控制焊接实例说明,与传统的单一激光功率波形的焊接效果相比,波形控制激光焊接可以极大地改善焊接效果,提高焊接质量。

参 考 文 献

- [1] PENG D F, WANG Y Q, LI B. Real-time power measurement and control system of high power CO₂ lasers [J]. Laser Technology, 2006, 30 (5): 483-485 (in Chinese).
- [2] XU X F, HU X D. The power steadiness and control technology of semiconductor laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30 (6): 761-763 (in Chinese).
- [3] HE W, JIANG H. The power steadiness and control technology of semiconductor laser [J]. Meteorological Hydrological and Marine Instrument, 2004, 1 (1): 68-71 (in Chinese).
- [4] LIU J, HE CH Y, LI J R. Power detection and control system for high power CO₂ laser [J]. Laser Technology, 2003, 27 (6): 588-590 (in Chinese).
- [5] ZENG H, ZHOU Z D, CHEN Y P, *et al* The progress of in-process monitoring and quality control of laser welding [J]. Laser Journal, 2000, 21 (1): 2-5 (in Chinese).
- [6] HARAN F M, HAN D P, PETERS C, *et al* Real-time focus control in laser welding [J]. Measurement Science & Technology, 1996, 7 (8): 1095-1098.
- [7] ZENG H, ZHOU Z D, CHEN Y P, *et al* Real time in-process monitoring of laser welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28 (3): 284-288 (in Chinese).
- [8] BERND H, JOERG S, FERD NAND V A. Process diagnostics in laser beam welding using capacitive distance sensor systems [J]. Schweißen & Schneiden (Welding & Cutting), 1997, 49 (4): E59-61.
- [9] NAVA-RUDIGER E, HOULOTM. Integration of real time quality control systems in a welding process [J]. Journal of Laser Application, 1997, 9 (2): 95-102.
- [10] WANG Y Q, AN CH W, GAO Sh Zh, *et al* A Monitor for real-time measurements of laser power and modes [J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26 (1): 26-30 (in Chinese).
- [11] NIU Z Q, KAWAMURA K. Laser processing apparatus: Japan, 308428 [P]. 2001-11-02.
- [12] SUTO K. Laser processing apparatus: Japan, 197288 [P]. 1987-08-31.
- [13] ABRAHAM I P. Switching power supply design [M]. 2nd ed Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 299-305 (in Chinese).
- [7] HAO Sh M, NIE Z R, YANG J C, *et al* La-Mo film cathode preparation and analysis in situ [C]//Proceedings of the 5th International Vacuum Electron Sources Conference Beijing: Chinese Institute of Electronics, 2004: 204-205 (in Chinese).
- [8] AO Y H, HU Sh L, LONG H, *et al* Study on pulsed deposition technology [J]. Laser Technology, 2003, 27 (5): 453-459 (in Chinese).
- [9] YANG J C, NIE Z R, XIX L, *et al* Emission ability of La-Sc-Mo cathode [J]. Applied Surface Science, 2004, 229 (1): 51-55.

(上接第 359 页)