

## 专题综述

CO<sub>2</sub> 焊短路过渡过程控制策略及实施方案探讨(二)

王伟, 曹阳, 朱六妹

(华中科技大学焊接研究所, 湖北武汉 430074)

**摘要:**在分析 CO<sub>2</sub> 焊飞溅产生及焊缝成形机理的基础上, 从非电器因素和电器因素 2 个角度出发, 探讨了 CO<sub>2</sub> 焊短路过渡过程控制的策略、原理及特点, 提出了恒频短路过渡智能控制方法的实施方案, 该方案能有效抑制飞溅, 改善焊缝成型, 并具有控制简单、易于实现等特点, 对逆变式 CO<sub>2</sub> 气保焊机的研制具有一定的参考作用。

**关键词:**CO<sub>2</sub> 焊短路过渡; 控制策略; 实施方案; 精细波形控制; 恒频短路过渡

**中图分类号:** TG434.5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-2303(2001)04-0003-06

The controlling tactics and implementing method in the CO<sub>2</sub> short-circuit arc welding process(part 2)

WANG Wei, CAO Yang, ZHU Liu-mei

(Welding Research Institute, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** This article analyzes the reasons of large spatter and bad bead forming of CO<sub>2</sub> short-circuit arc welding. From the basic of Non-electrical and electrical factors, it discusses varied controlling tactics in the CO<sub>2</sub> short-circuit arc welding process and presents the implementing method of intelligent control of constant transfer frequency. This method can well reduce the spatter, improve the bead form and be easy to control and manipulate. It might be valuable for the developing of CO<sub>2</sub> inverter power source.

**Key words:** CO<sub>2</sub> short-circuit arc welding; controlling tactics; implementing method; precise waveform controlling; constant transfer controlling

(上接第 3 期)

## e. 熔滴过大防止阶段

当电压降至  $u_L$  后, 电弧在  $u_L$  下进行恒压控制, 则会引引起熔滴整形阶段后期电流的增大, 因此当电流以斜率  $S_i$  下降至  $i_L$  后, 即对电弧实行  $i_L$  恒流控制, 抑制电流的继续增大, 从而防止熔滴过分长大。熔滴整形阶段和熔滴过大防止阶段总的最大持续时间为  $t_L$ , 若短路在这之前发生, 则熔滴过大防止阶段可自动缩短甚至消失。

## f. 熔滴短路促进阶段

电弧产生后经过时间  $t_h + t_L$ , 形成了熔滴, 若此时尚未发生熔滴短路, 则电流降至最小值  $i_m$ , 从而促进熔滴短路的发生, 再重复上述过程<sup>[1,12]</sup>。

## (4) 表面张力过渡(STT)控制

表面张力过渡(STT)控制是精细波形控制中最

具代表性的一种。波形如图 7 所示。

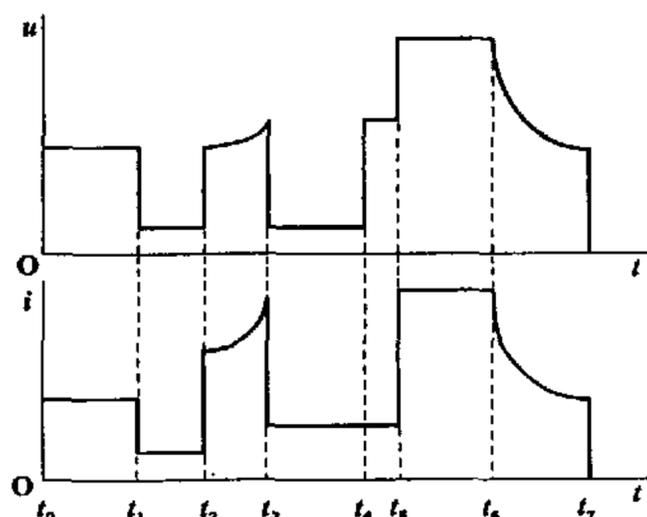


图 7 表面张力过渡(STT)波控法电流电压波形图

该电源的熔滴过渡精分为 7 段:

a. 基值电流段( $t_0 \sim t_1$ ): 电流在熔滴发生短路前处于较低的平稳状态(约为 50~100 A), 该电流保

收稿日期: 2001-01-12

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目

作者简介: 王伟(1946-), 男, 湖北武汉人, 副教授, 主要从事焊接过程控制及焊接设备的开发与研究工作。

证熔滴在表面张力作用下形成近乎球状,既不会凝固,也不会过分长大而脱落。

b. 小桥形成段( $t_1 \sim t_2$ ):焊丝送进,熔滴发生短路(在基值电流下),电压检测器检测出短路发生,为进一步促进熔滴与熔池的接触和“润湿”作用,电流立即降至 10 A 左右,持续约 0.75 ms( $t_1 \sim t_2$ ),使熔滴与熔池形成稳固的短路桥。

c. 颈缩段( $t_2 \sim t_3$ ):小桥形成后,电流以双曲线状迅速上升,使短路桥产生颈缩力,同时计算电压的变化率  $du/dt$ (注意,此时高温下的液态钢电阻率很高,所以电压不为零)。

d. 能量减少段( $t_3 \sim t_4$ ):当  $du/dt$  达到某一确定值时,说明熔断即将发生,电流在几个  $\mu s$  内降至 50 A,使短路液桥依靠表面张力熔断并过渡到熔池中。 $t_4$  表示熔断发生时刻。

e. 脱离熔池段( $t_4 \sim t_5$ ):熔断发生后,燃弧电流(50 A)维持一段时间( $t_4 \sim t_5$ ),这样可以减小燃弧时对熔池的冲击,使焊丝平稳脱离熔池。

f. 等离子助推段( $t_5 \sim t_6$ ):过渡完成,燃弧( $t_5$  时刻)之后,电流上升至 450 A 左右——对  $\phi 1.2$  mm, 5 m/min,  $\varphi(CO_2) = 100\%$  的气保焊,时间约为 1~2 ms,以增加电弧的燃烧功率,有利于改善焊缝成形。

g. 回复阶段:在该段中电流衰减到基值,为下一个周期做准备。

另外,STT 技术的另一个重要且全新的特点是焊接电流与送丝速度无关,因而可以在大幅度减少飞溅和烟尘的同时更好地控制热量的输入,得到合适的熔深和完整的背面成形<sup>[7,12,20,21]</sup>。

(5)智能控制

焊接电弧有非线性、时变性,难以建立精确的数学模型。而智能控制通过神经网络、专家系统、模糊控制等技术无需建立精确的模型而实现最佳控制。以下便为一个典型例子,其电流波形见图 8。

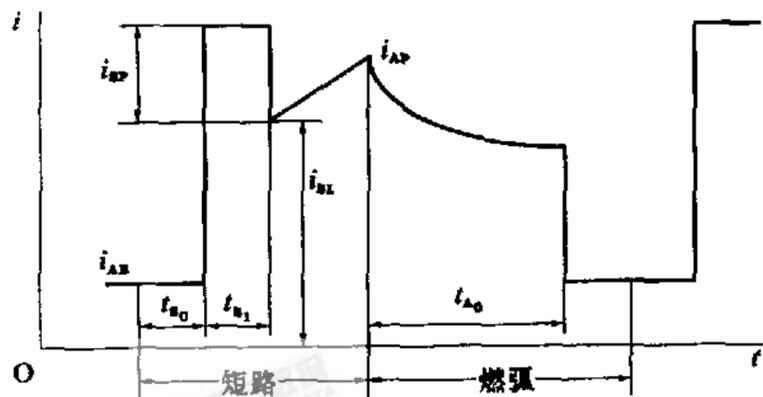


图 8 智能控制电流波形图

图中有 7 个可控参数,其中短路峰值电流  $i_{SP}$ 、短路峰值电流持续时间  $t_{S1}$ 、电弧燃烧时间  $t_{A0}$ 、电弧重燃时刻的电流  $i_{AP}$ 、基值电流  $i_{AB}$  等 5 个参数是通过智能控制来实现预制及控制的。这些参数值的确定需经过大量的工艺试验得到他们相对于飞溅量最小的优化值,然后将最优值存于 CPU 中,实际控制中由智能控制器根据这些值确定动态控制过程。

最优值的确定建立在大量工艺试验的基础上。以短路峰值电流持续时间  $t_{S1}$  为例,实验中在一定条件下进行焊接,使  $t_{S1}$  在 0~6 ms 内变化,相应地记下所产生的飞溅量,于是可绘出两者的关系曲线。图 9 便是在  $\varphi(CO_2) = 100\%$  的保护气体、 $\phi 1.2$  mm 焊丝、250 A 焊接电流、28 V 电弧电压、50 cm/min 焊速条件下  $t_{S1}$  与飞溅量的关系,可见此时  $t_{S1}$  的最佳值为 4 ms。

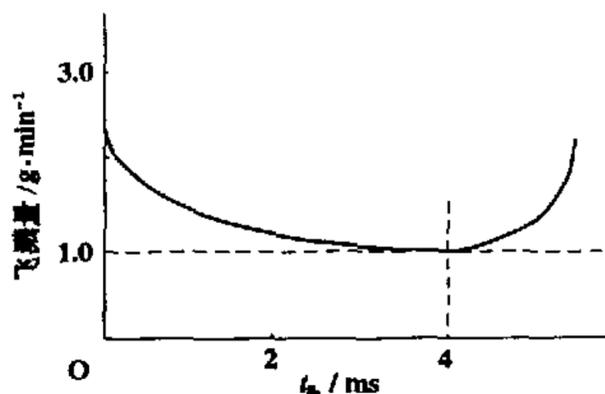


图 9  $t_{S1}$  与飞溅量对应关系曲线图

在 65~350 A 短路电流范围内,做一系列类似实验,便可整理出  $t_{S1}$  与短路电流(在一定焊丝直径下)的关系。类似的,也可以得到其余 4 个参数的最优值,将它们存入 CPU,以提供智能控制器进行最优参数控制。为简化操作,使用者只需设定保护气类型、焊丝直径及焊接电流,智能控制器可决定与电流对应的焊接电压(可调),并根据所设定的 5 个参数的最优值对焊接过程进行智能控制<sup>[22]</sup>。

3.2.4 恒频短路过渡控制

与脉动送丝控制及电源输出特性控制作用于短路过渡全过程不同,恒频短路过渡控制侧重于对熔滴短路过渡频率加以控制。因为  $CO_2$  短路过渡焊接时,熔滴过渡频率常被作为评价焊接质量及过程稳定性的重要指标<sup>[8-10]</sup>。如能控制熔滴以恒定频率过渡,可获得以下效果:

(1)送丝速度确定时,恒定过渡频率可控制熔滴尺寸及弧长处于相对合理的大小,使熔滴尺寸及弧长在扰动出现时有较大的变化裕量,有利于焊接过

程的稳定。

(2)调节目标频率可控制熔滴尺寸及弧长的大小,适应对焊缝成形、焊速、焊接位置等不同工艺控制的要求。

(3)恒定的过渡频率使得焊缝上波纹均匀,成形美观,有利于提高接头质量。影响熔滴过渡频率因素很多,主要包括电弧电压、送丝速度、焊丝直径、电源动特性等<sup>[23]</sup>。

目前,实现恒频短路过渡的控制方案主要有如下2类:

(1) 控制电弧电压实现恒频短路过渡

有学者利用电弧电压与短路频率的单峰关系,结合 IGBT 逆变电源高响应速度及单片机控制速度快、精度高等特点提出了模糊控制调节电弧电压,实现短路过渡频率恒定的方法。其系统框图见图 10。

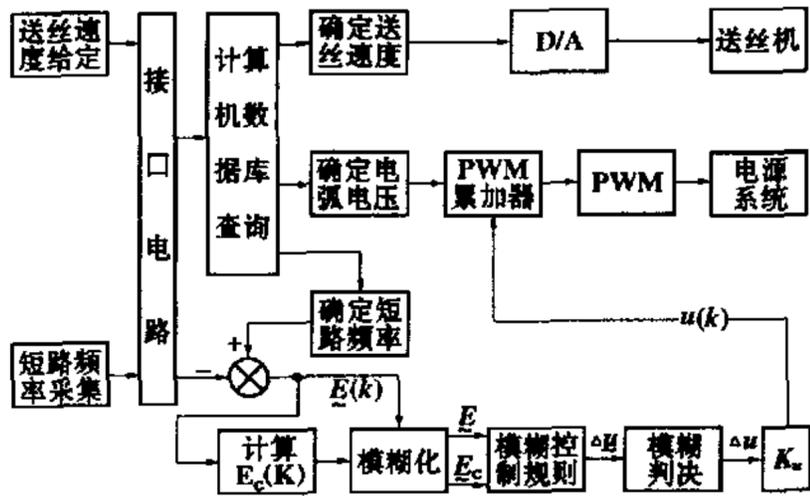


图 10 恒频短路过渡模糊控制系统框图

该方案主要依靠模糊控制理论,在焊接过程中实时检测短路过渡频率,在线调整电弧电压给定值,以保证在一定条件下使短路频率恒定不变。同时,此方案也实现了基于送丝速度给定的电弧电压、短路频率一元化调节,电源系统则采用 IGBT 逆变弧焊电源恒流控制系统<sup>[24~29,50]</sup>。

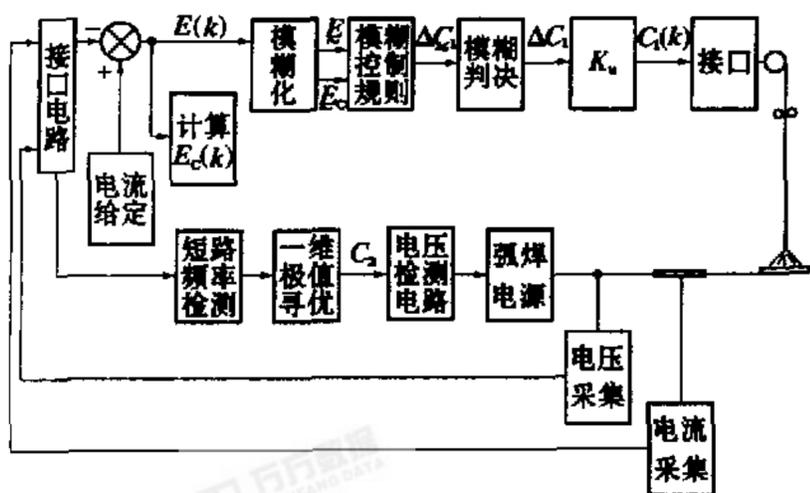


图 11 恒频短路过渡自寻优控制系统框图

也有学者提出了通过模糊控制器来恒定焊接电流,在焊接电流不变的条件下,利用电弧电压与短路频率呈单峰状,对电弧电压采用一维极值点优选法自寻优,使焊接电流和焊接电压实现以最高短路过渡频率为目标的最佳匹配<sup>[34,35]</sup>。其系统框图见图 11。

(2) 控制燃弧大电流脉冲时间实现恒频短路过渡

此种思想认为短路过渡频率的变化主要是由燃弧时间的变化引起的。在燃弧期间,燃弧大电流及其维持时间的变化将引起熔滴尺寸的变化,从而改变燃弧时间,最终决定熔滴过渡频率<sup>[36]</sup>。

有学者提出了通过短路过渡中期的电源输出阻抗实时检测焊丝干伸长,采用前馈控制来补偿干伸长电阻热对过渡频率影响的方法。并利用单片机建立焊丝干伸长前馈—过渡周期负反馈恒频短路过渡控制系统。其系统构成图见图 12。

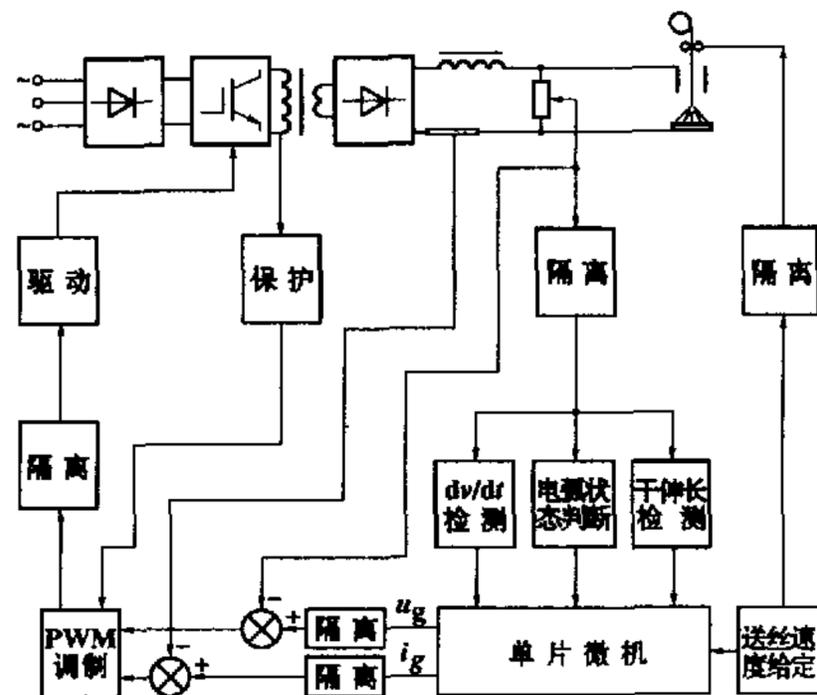


图 12 焊丝干伸长前馈—过渡周期负反馈恒频短路过渡控制系统框图

短路过渡焊接时,焊丝干伸长的电阻热对焊丝熔化及熔滴形成的影响明显。在检测出焊丝干伸长长度的基础上,适当调整燃弧大电流时间,可以在熔滴与熔池短路前控制熔滴尺寸大小,从而达到恒定短路过渡频率的目的<sup>[23]</sup>。

也有学者成功地实现了波控 CO<sub>2</sub> 焊接方法的恒频过渡及基于送丝速度给定的波控参数一元化调节。单片机控制系统在准确检测熔滴短路与缩颈破断时刻的基础上,控制焊机输出如图 13 所示的焊接电流波形,实现对熔滴过渡过程的有效控制。并

实时检测出熔滴的短路过渡频率,与设定的目标频率进行比较,通过调整  $t_1 \sim t_2$  的大小,实现恒频短路过渡<sup>[37,38]</sup>。

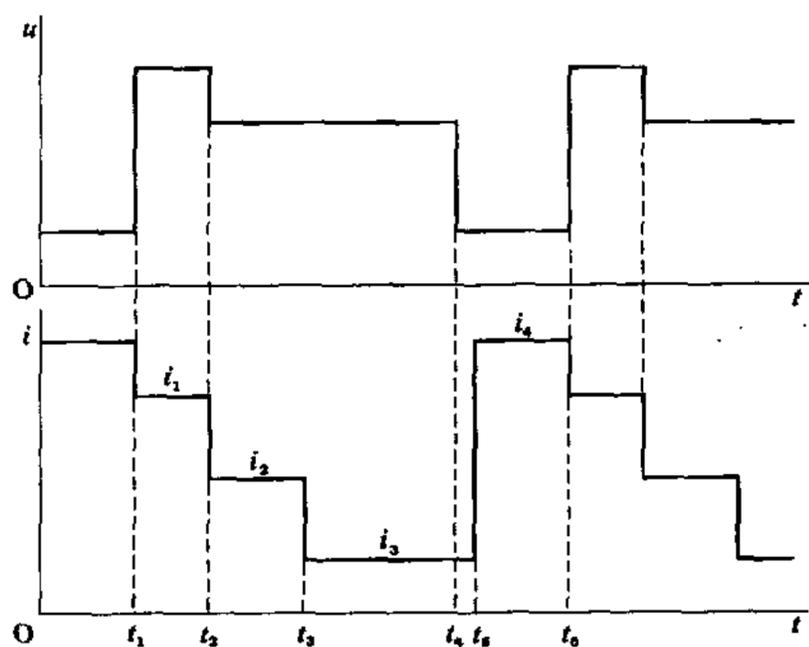


图 13 焊接电流、电弧电压波形

#### 4 CO<sub>2</sub> 焊短路过渡过程的控制实施方案

CO<sub>2</sub> 焊接以其独特的优势在自动化生产中发挥了越来越重要的作用。随着电力电子技术、微机控制技术的不断发展及控制思想的深化,CO<sub>2</sub> 焊电源向高响应、精细化、实用智能化的方向发展,根据目前国内研究动态,总结出一种很有研发前景的 CO<sub>2</sub> 智能控制恒频短路过渡逆变电源的实施方案。

##### 4.1 对熔滴过渡频率作用的正确认识

短路过渡焊接时,熔滴过渡频率  $f$  通常被作为评价焊接过程稳定性和焊接质量的重要指标<sup>[8-10]</sup>。不少文献认为熔滴过渡频率  $f$  越高,则熔滴越细小,焊缝成形越好。通过实验发现,有时  $f$  很高,但飞溅却很大,并且随着熔滴过渡频率的提高,焊缝成形反而变差。这主要是因为  $f$  的提高虽然使得熔滴细小,焊缝表面光滑,但往往导致燃弧时间与短路时间之比  $t_{ON}/t_{OFF}$  变小,从而电弧功率减小,焊缝成形变差。因此,  $f$  的设置须兼顾飞溅和焊缝成形。实践表明,对于  $\phi 1.2$  mm 焊丝,  $f$  应以 60 ~ 80 Hz 为宜<sup>[36]</sup>。

##### 4.2 焊接电流、电弧电压波形设计方案

根据以上思想,设计出的电流电压波形如图 14 所示。

(1) 短路开始前 ( $t_0 \sim t_1$ ): 维持基值电流  $i_0$ , 促进焊丝熔化成球状。

(2) 短路初期 ( $t_1 \sim t_2$ ): 为抑制瞬时短路,在检测熔滴短路后电流立即降到  $i_1$ , 维持数  $\mu s$  以使熔滴

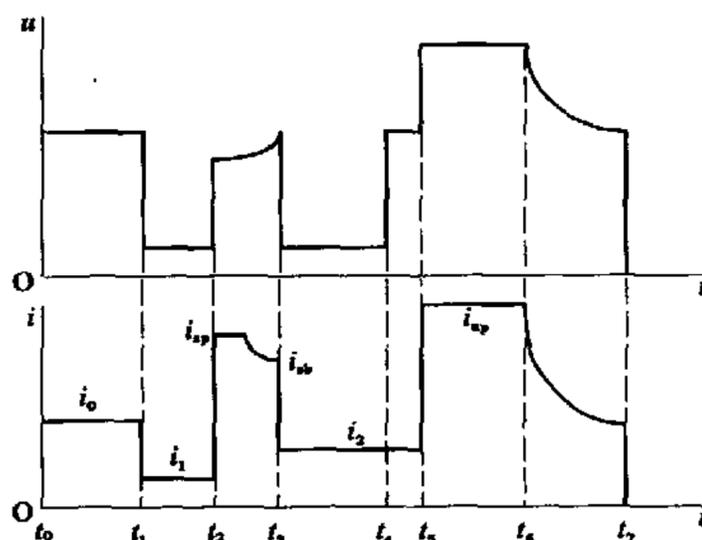


图 14 电流电压波形图

与熔池在较小的电流下接触并顺利铺展。

(3) 短路中期 ( $t_2 \sim t_3$ ): 为促进液桥收缩,减小短路时间,保证熔滴顺利过渡,当液桥在熔池表面有所铺展后,迅速提高流过液桥的电流  $i_{ap}$ , 针对不同焊接规范设定  $i_{sb}$  值,能控制短路液桥的收缩速度<sup>[18]</sup>。

(4) 短路末期 ( $t_3 \sim t_4$ ): 检测到液桥颈缩后至即将破断时,将电流降到  $i_2$ , 使缩颈液桥在小电流下依靠表面张力破断。

(5) 短路结束 ( $t_4 \sim t_7$ ):

a.  $t_4$  时刻代表熔断发生,电弧重燃。

b.  $t_4$  时刻后仍要维持 ( $t_4 \sim t_5$ ) 一段时间的小电流 ( $i_2$ ), 避免重新燃弧对熔池的强烈冲击。

c. 燃弧期间,燃弧大电流脉冲的变化将引起熔滴尺寸的变化,从而改变了燃弧时间  $t_{ap}$  ( $t_5 \sim t_6$ ), 影响了熔滴过渡频率。由于  $i_{ap}$  的值是预先设定的,它的改变会影响电弧的稳定性,故拟通过智能控制  $t_{ap}$  来调节燃弧时间,实现恒频短路过渡。

d.  $t_6 \sim t_7$  段电流逐渐降至基值,为下一个周期做准备<sup>[8,17,18]</sup>。

##### 4.3 恒频短路智能控制的软件设计思想

在设计智能控制系统中,将熔滴过渡频率的反馈值  $f_w$  与给定值  $f_g$  比较,计算  $E$  的变化率  $E_c$ , 并送入模糊控制器进行模糊运算。选取  $E$  作为输入语言变量,燃弧大电流时间校正量  $\Delta t_{ap}$  作为输出语言变量。通过大量工艺试验,确定语言变量  $E$ 、 $\Delta t$  的论域  $M$  及它们的隶属度赋值表,将实际控制策略归纳后,组成模糊控制规则表,再根据这 2 种表应用模糊推理合成规则进行运算,采用最大隶属度法得到模糊控制查询表。将查询表中的  $\Delta t$  乘以量化因子  $K_u$  便得到实际的控制量  $\Delta t_{ap}$ <sup>[36]</sup>。

即  $\Delta t_{ap} = \Delta t_{ap} \cdot K_u$  (单位:ms)。

#### 4.4 恒频短路过渡智能控制系统硬件设计

以 80C196KC 单片机为控制核心, 包括送丝速度和焊丝直径输入及各项参数显示、电弧电压和焊接电流采样、D/A 转换、送丝控制以及短路频率检测电路等部分。其系统框图如图 15 所示。

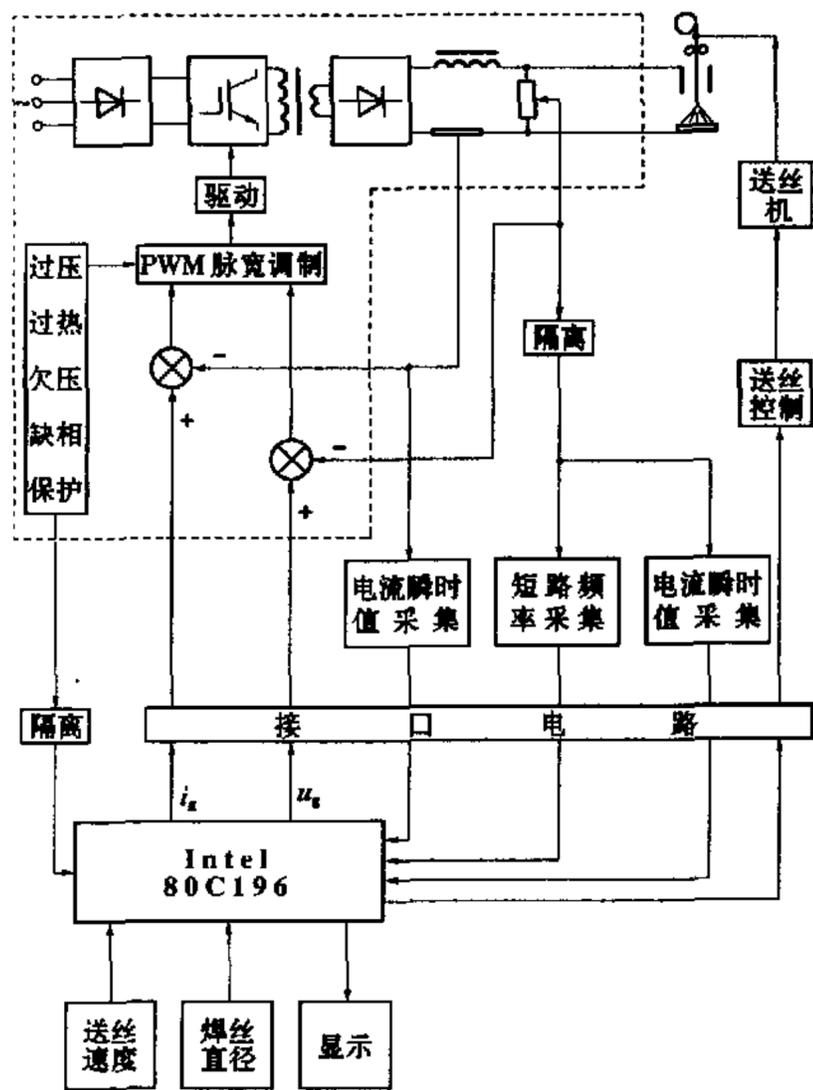


图 15 恒频短路过渡智能控制系统硬件系统框图

此系统为双闭环结构, 内环(虚线框内)为采用焊接电流、电弧电压负反馈控制的电源系统, 并实现对逆变器的驱动, 过压、过热、欠压、缺相等保护功能。外环为以 80C196KC 单片机为核心的智能控制系统, 主要实现 2 个功能: 一是提供对焊丝直径的选择和送丝速度的调节; 二是根据实时采集的送丝速度、电流瞬时值和电压瞬时值, 来实现短路—燃弧判断、短路—燃弧趋势(缩颈)判断, 并根据实时检测的短路过渡频率, 通过模糊控制算法, 实现对电压给定值  $U_g$  和电流给定值  $i_g$  的修正。此外, 在焊接过程中, 为获得合适的参数配合, 采用了一元化调节方式。在已知焊丝直径的情况下, 只要给定送丝速度, 通过查表, 确定相应的焊接电流、电弧电压波形参数和最佳短路频率。在单片机准确检测熔滴短路与颈缩破断时刻的基础上, 控制焊机输出所要求的焊接电流波形, 并通过智能控制实现恒频短路过渡<sup>[23, 25, 37, 38]</sup>。

#### 5 结束语

本文分析了  $CO_2$  焊焊缝成形及飞溅产生的原因, 从非电器因素和电器因素出发, 探讨了  $CO_2$  焊短路过渡过程的控制策略。其中, 非电器因素包括对焊接材料及送丝方式等的控制; 电器因素则包括传统的控制方式、电源外特性控制(双阶梯型外特性、复合外特性、三维外特性控制)、精细波形控制(能量控制、脉冲波形自适应控制、STTV 波形控制、智能控制)及恒频短路过渡控制。

在此基础上, 总结了一种过程控制的实施方案, 指出可以通过智能控制的方法实现波控的恒频短路过渡控制, 此方案控制灵活, 易于实现, 能有效抑制飞溅, 改善焊缝成形。

我们认为以上方案是目前一种比较有效可行的控制方法, 但是, 要真正实现无飞溅、成形美观的  $CO_2$  短路过渡焊接, 还必须从根本上改变电源的动态性能, 找出制约动态性能提高的主要环节, 并对其进行变结构控制, 才能彻底改善其动特性。为此, 必须采用新的信号处理方法, 例如功率谱分析、频率分布图、小波分析法等。其中小波分析可用于信号处理的多方面, 例如滤波、时域频域分析。将实时采集来的电压电流、信号进行小波包分解, 并将处理过的信号划分到不同的频带上, 然后对某一频带内的信号进行自回归谱分析, 找出感兴趣的特征信号, 从而开拓出新的控制方式<sup>[40, 41, 47~49]</sup>。

#### 参考文献

- [1] 张军红等.  $CO_2$  焊波形控制方法的发展现状[J]. 电焊机, 1999, 29(1): 5-8.
- [2] 区智明. 逆变弧焊机的现状和发展[J]. 电焊机, 2000, 30(7): 9-12.
- [3] 张人豪.  $CO_2$  焊焊接电弧的控制[J]. 焊接, 1992, (11): 8-10.
- [4] 殷树言等. 波形控制的  $CO_2$  焊接[J]. 焊接, 1987, (8): 1-5.
- [5] 殷树言. 从不同的控制方式中探索短路过渡  $CO_2$  焊接的飞溅问题[J]. 焊接学报, 1986, 7(12): 187-192.
- [6] 邓黎丽等.  $CO_2$  气体保护焊短路过渡过程的控制技术[J]. 焊接技术, 1999, (6): 39-42.
- [7] 程韬波等.  $CO_2$  焊波形控制方法的发展现状[J]. 焊接技术, 1998, (2): 39-40.
- [8] 姜焕中. 电弧焊电渣焊[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988. 25-29.
- [9] 殷树言, 张九海. 气体保护焊工艺[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1988. 50-60.

- [10] 胡特生. 电弧焊[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994. 63-69.
- [11] 徐继达译, 孙子建校. 在 CO<sub>2</sub> 焊接中限制“小桥”爆炸能量的方法[J]. 国外焊接, 1981, (1): 17-20.
- [12] 何德孚等. 焊接与连接工程学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1998.
- [13] 朱志明, 张人豪. 新型 CO<sub>2</sub> 焊接方法的研究[J]. 电焊机, 1994, 24(6): 12-15.
- [14] 朱志明, 张人豪. 恒流 CO<sub>2</sub> 焊接的熔滴过渡形式及其参数的研究[J]. 电焊机, 1997, 27(2): 36-39.
- [15] 胡小建. 单片机实现逆变式 CO<sub>2</sub> 气保焊电源双阶梯恒流外特性系统的研究[J]. 电焊机, 1999, 29(6): 10-12.
- [16] 韩赞东, 都东, 张前, 张人豪. 焊接电弧的三维外特性控制研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(4): 35-37.
- [17] 郭大勇等. CO<sub>2</sub> 短路过渡过程检测及应用[J]. 焊接, 1998, (7): 12-15.
- [18] 郭大勇等. 短路过渡 CO<sub>2</sub> 焊熔滴过渡过程控制[J]. 焊接, 1999, (9): 10-14.
- [19] Dr. - Ing. Lutz. Process control in the arcing and short-circuit phases during metal-arc active gas build-up melting under carbon dioxide[J]. Welding and Cutting, 1994, (2): 2-6.
- [20] 张富巨. 表面张力过渡的波形分析[J]. 武汉水利电力大学学报, 1998, 31(2): 79-81.
- [21] EK Stava. The surface-tension-transfer power source: A new low-spatter arc welding machine [J]. Welding Journal, 1993, 12(1): 25-29.
- [22] T. J. NACEY. Fourth-generation inverters add artificial intelligence to the control of GMA welding[J]. Welding Journal, 1996, (5): 31-38.
- [23] 吴文楷等. 自适应恒频短路过渡焊接过程的控制系统[J]. 焊接学报, 1999, 20(4): 244-247.
- [24] 殷树言. 新型逆变式焊接电源的设计思想[J]. 电焊机, 2000, 30(7): 3-8.
- [25] 赵举东等. CO<sub>2</sub> 逆变弧焊电源短路模糊控制问题的研究[J]. 电力电子技术, 1997, (3): 14-17.
- [26] Masao Vshio. Recent advances in welding power systems for automated welding[J]. Welding in the world, 1994, 34: 185-191.
- [27] T. Mita. Automatic setting of arc voltage using fuzzy logic [J], Welding Review International, 1996, (11): 130-132.
- [28] 陈强, 潘际銮, 大马健司. 焊接过程的模糊控制[J]. 机械工程学报, 1995, 31(4): 12-14.
- [29] Mitat. Spatter reduction-power source considerations[J]. Journal of Welding Society, 1990, (8): 12-16.
- [30] Q. L. WANG. Arc light sensing of droplet transfer and its analysis in pulsed GMAW Process [J]. Welding Research Supplement, 1997, (12): 458-469.
- [31] S. K. CHOI. Dynamic simulation of metal transfer in GMAW-part2: short-circuit transfer mode[J]. Welding Research Supplement, 1998, (1): 45-48.
- [32] Quinn T. P. Electrode extension model for gas metal arc welding[J]. Welding Journal, 1994, (10): 10-12.
- [33] I. S Pin chuck. Stabilization of transfer and methods of reducing the spattering of metal in CO<sub>2</sub> Welding with a short arc [J]. Welding Research Abroad, 1982, (5): 33-35.
- [34] 王雅生. 细丝 CO<sub>2</sub> 自动焊机的单片机智能控制系统[J]. 电焊机, 2000, 30(10): 7-10.
- [35] 王雅生. 可消除网路电压对 CO<sub>2</sub> 焊电弧电压的模糊控制系统研究[J]. 电焊机, 2000, 30(5): 24-26.
- [36] 韩赞东等. CO<sub>2</sub> 焊接过程熔滴过渡频率的 Fuzzy/PID 控制[J]. 焊接学报, 2000, 21(3): 21-26.
- [37] 朱志明等. MC68HC11 单片机控制恒频短路过渡逆变式 CO<sub>2</sub> 焊机的研究[J]. 电焊机, 1999, 29(8): 8-10.
- [38] 丁京柱等. 双闭环单片机波控逆变 CO<sub>2</sub> 焊机系统[J]. 焊接学报, 2000, 21(9): 48-52.
- [39] 潘雪峰等. IGBT 逆变式波形控制 CO<sub>2</sub> 弧焊电源的研究[J]. 电焊机, 1996, 26(6): 16-18.
- [40] 黄石生等. 新型智能控制技术在 CO<sub>2</sub> 焊电源系统中的应用[J]. 焊接, 1999, (12): 4-7.
- [41] 吴文楷等. 弧焊逆变电源动态性能的提高及其对短路过渡焊接过程的影响[J]. 焊接学报, 1999, 20(6): 90-95.
- [42] H. YAMAMOTO. Improved current control makes inverters the power sources of choice [J]. Welding Journal, 1997, (1): 47-50.
- [43] Dennis Klingman. Learning to use new GTAW technology [J]. Welding Journal, 1998, (9): 41-45.
- [44] S. B. Zhang and Y. m. Zhang. A power source prototype provides multiple functions [J]. Welding Journal, 1998, (9): 45-48.
- [45] Terry Byrd. Inverter power source: AN efficient alternative [J]. Welding Journal, 1993, (1): 37-39.
- [46] Marv Schiedermyer. Improving the reliability of inverter-based welding machines [J]. Welding Journal, 1997, (1): 51-55.
- [47] 朱六妹等. CO<sub>2</sub> 焊熔滴过渡特征的分析研究[J]. 电焊机, 2000, 30(1): 18-21.
- [48] Elliott K. Stava. New inverter arc welding power source features lincoln wave form control technology [J]. Manufacturing Strategies, 1996, 6(3): 17-20.
- [49] 王新之等. 用可饱和电感提高逆变电源动态特性的研究[J]. 电力电子技术, 1998, (2): 26-28.
- [50] 王伟, 朱六妹. 焊接电弧电压模糊模型的相关辨识 [J]. 电工技术学报, 1998, (2): 59-62.