

数字控制弧焊逆变电源系统的 MATLAB 仿真研究

卢振洋, 刘 嘉, 王伟明, 冯曰海, 殷树言
(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100022)

摘 要: 在研究逆变技术和 DSP 应用技术的基础上, 提出了数字控制弧焊逆变电源系统的实现方式, 并应用 MATLAB 的电源模块集和定点模块集建立了该电源系统的 Simulink 仿真模型, 对弧焊逆变器的工作过程、定点控制器的算法执行过程以及电源系统的总体特性进行了仿真研究。实验结果表明, 该模型准确, 仿真结果可靠。

关键词: 全数字控制; DSP; 数字定点模型; MATLAB 仿真; 弧焊逆变电源

中图分类号: TG 434.4

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2003)03-0264-05

数字控制的弧焊逆变电源是未来焊接电源的主要发展方向之一。在数字控制弧焊逆变电源系统的开发中, 面临着与模拟控制条件下不同的任务和挑战。为了研究数字控制的特点及其应用于弧焊逆变电源控制时系统的总体性能, 作者采用 MATLAB 软件的图形化编程与仿真工具 Simulink 建立了弧焊逆变电源主电路及其数字控制系统的定点仿真模型, 研究了数字控制的弧焊逆变电源系统的外特性和动特性。

1 数字控制弧焊逆变电源系统仿真模型的建立

常用的 Pspice、Orcad、Protel、Saber 等仿真软件可以很好地完成对电子电路的建模和仿真任务。然而对于数字算法的研究却办法不多; 为此, 作者尝试在 Simulink 环境下应用不同模块库分别对数字控制器和弧焊逆变器进行建模, 并且通过本文设计的 AD 采样子系统和 PWM 子系统将这两部分模型有机地联系起来, 构成完整的数字控制弧焊逆变电源系统模型, 如图 1 所示。

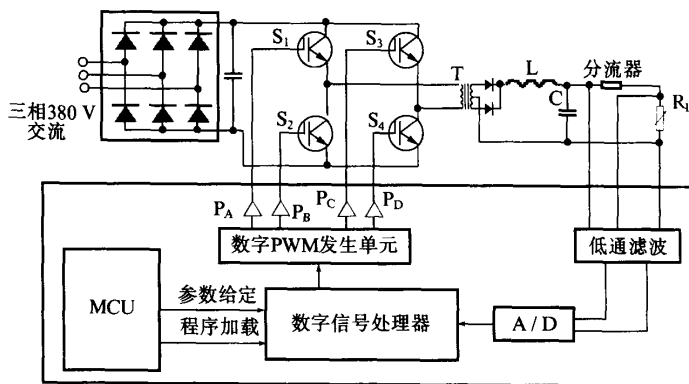


图1 数字控制弧焊逆变电源系统框图

1.1 数字控制弧焊逆变电源系统组成

图 1 中, 输入为三相 380 V 交流电, 经过整流—滤波—逆变—中频变压—整流输出到负载 R_L 。逆变器

收稿日期: 2003-08-05。

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目 (3032004)。

作者简介: 卢振洋 (1957-), 男, 教授。

工作频率为 20 kHz, 其工作所需的 PWM 脉冲信号由数字控制回路中的数字 PWM 发生单元提供。

数字控制电路主要由 3 个功能模块组成: ①微控制器 (MCU) 部分负责弧焊逆变电源系统的通讯与事件管理。通讯包括主控制板、前面板和送丝机控制器的通讯; 事件管理包括数字信号处理单元的程序载入、启动和停止等, 以及焊接状态查询和过流、过热、欠压等异常现象发生时的保护处理。②数字信号处理单元是进行弧焊工艺过程控制的核心, 由数字信号处理器 (DSP)、A/D 转换器、信号的低通滤波器等组成。③数字 PWM 发生单元, 负责接收数字信号处理单元的指令并产生相应占空比的 PWM 信号^[1]。

1.2 弧焊逆变器仿真模型的建立

本文在 Simulink 环境下采用电源系统模块集 (simpowersystems) 建立了全桥式弧焊逆变器的仿真模型, 如图 2 所示。图 2 中“ d ”为常数, 代表 PWM 信号发生单元所接收到的占空比指令。PWM 在接收到该指令后会产生两路频率为 20 kHz, 相位相差 180° 的 PWM 信号来驱动全桥式逆变器 (bridge) 工作。在 bridge 子系统中包含了一个 540 V 的直流电压源和一个由 4 个 IGBT 构成的全桥电路。bridge 有 3 个信号输出端: m 为 IGBT 上的电流与电压信号的测量输出端, 输出到示波器; A 和 B 分别接于全桥两个桥臂的中点, 输出到主变压器 MainTR 的原边。MainTR 为中频变压器模型, 在系统模型中的作用是传输能量, 变比为 8:1; MainTR 的副边接有两个二极管 D_1 和 D_2 , 构成一全波整流器, 整流器的输出经过电感 L 和电容 C 输出到负载电阻 R_L 和 R_{L1} ; 电流测量单元和电压测量单元的测量结果分别输出到示波器 1 和示波器 2, 在进行闭环控制系统仿真时也可以输出到控制系统的信号采样环节。模型中负载电阻 R_L 和 R_{L1} 通过一理想开关 Ideal Switch 并联, R_L 用来表示正常焊接时电弧的等效电阻, R_{L1} 则用来仿真焊接短路时的回路等效电阻。Ideal Switch 受控于阶跃信号发生器, 仿真过程中可以设定阶跃信号发生器在某一时刻发出 0 到 1 的阶跃变化。Ideal Switch 导通, 回路的阻性负载由 R_L 跳变到 R_L 、 R_{L1} 并联。

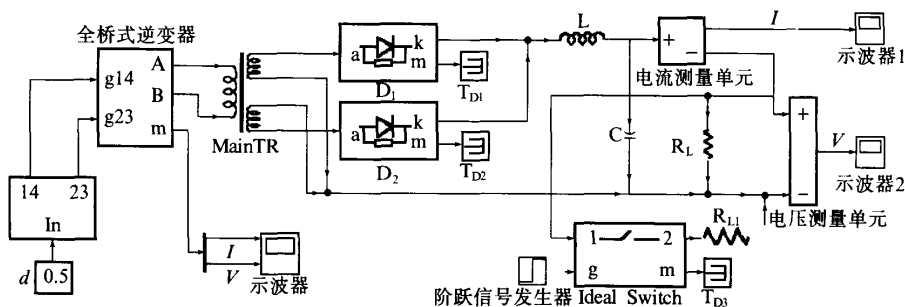


图2 弧焊逆变电源主电路Simulink模型

图2中采用了由阻性负载 R_L 、 R_{L1} 和理想开关 Ideal Switch 构成一个最简单的电阻网络, 可以模拟焊接短路过程。在实际的弧焊工艺中电弧负载的变化要复杂的多, 显然图2给出的负载模型是很难模拟这一过程的, 但是可以按照本文的模式, 通过开关和电阻构成一个等效阻抗可控的网络, 这样就可以在本文的基础上仿真研究弧焊工艺及其控制过程了。

1.3 数字控制器仿真模型的建立

与理想的离散系统分析不同, 实际的数字控制器在各种微控制器硬件上运行时采用的二进制数据的长度有限, 其所能表示的数据范围也是有限的。通常在数字控制器上运行的是定点运算, 数据长度、小数点的位置、舍入方式以及运算中数据溢出的处理方式等对于系统的控制效果影响重大。为此, 作者采用 Simulink 环境下的定点模块集建立了弧焊逆变电源数字控制器的仿真模型, 如图3所示。

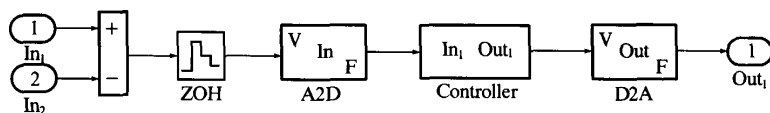


图3 数字控制器Simulink仿真模型

图3中输入端 In_1 与给定的电流或电压信号相连接, 电流或电压的信号给定通常可以采用常数, 为了模拟实际焊接工艺中电流或电压的变化也可以设计一个波形发生器; 输入端 In_2 接电流或电压的反馈信号(图2中的电流测量单元或电压测量单元的输出); 零阶保持器 ZOH 和模拟-数字转换环节 A2D 组成了模拟到数字的接口, 这里 A2D 是一个数据类型转换单元, 负责把 Simulink 运算所采用的双精度数据转换为定点数据; D2A 的作用与 A2D 的作用刚好相反, 即完成定点数到双精度数据的转换; 在 A2D 和 D2A 之间的控制器 Controller 为本文设计的子系统, 用来模拟数字控制软件在定点处理器上的运行情况. 考虑到本文未对控制算法进行深入的研究, 所采用的只是通用数字 PID 控制算法, Controller 子系统的细节就不介绍了.

2 仿真研究

在数字控制弧焊逆变电源系统 Simulink 仿真模型的基础上, 对弧焊逆变器、数字控制器以及由这两部分组成的数字控制弧焊逆变电源系统分别进行了仿真研究.

2.1 弧焊逆变器的仿真

在建立图2所示的弧焊逆变器仿真模型的基础上, 设定逆变器的占空比为固定值, 回路负载设定为 $0.2\ \Omega$, 仿真计算得到了如图4所示的 IGBT 上的电流与电压波形. 此时, 占空比为恒定值, 因此负载上的电流和电压也为恒定值.

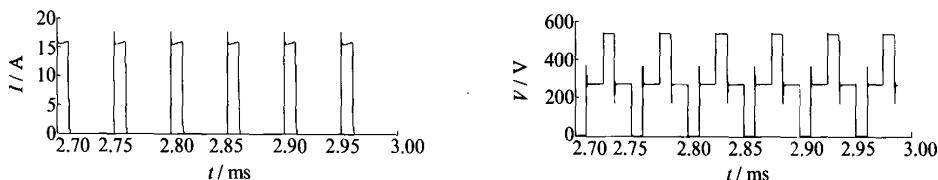


图4 全桥式弧焊逆变器IGBT上的电流、电压仿真波形

2.2 数字控制器的仿真

为了仿真数字控制器进行定点运算的工作状态, 将图3所示的数字控制器模型闭环到图2的弧焊逆变器模型中, 构成完整的数字控制弧焊逆变电源仿真模型.

通常数字控制器的仿真目的在于: 确定定点运算的数据类型、数据范围、舍入方式以及数据的溢出处理方式, 并依据仿真结果选择符合系统要求的数字控制芯片. 然而, 作者在进行仿真研究之前已经选定了数字控制芯片, 仿真则用来验证芯片选择的合理性, 并为控制软件编程提供辅助信息.

本文应用 ADI 公司的 16 定点 DSP 作为控制软件运行的硬件载体, 大多数操作数采用 2 的补码表示(符号数和 1.15 格式的小数), 也采用无符号数或者简单的二进制字符串. 该 DSP 具有 3 个运算单元: ①算术/逻辑单元(ALU), 支持加、减、取负、增 1、减 1、取绝对值等算术功能, 逻辑功能则包括与、或、异或和非; ②乘法/累加器(MAC), 提供乘法、带累加乘法、带累减乘法、饱和及清零等功能; ③桶形移位器(barrel shifter), 移位功能包括算术移位、逻辑移位和规格化^[2]. ADI 公司的 16 定点 DSP 在运算出现溢出或下溢时 ALU 和 MAC 的处理方式是不同的. ALU 可以通过模式状态寄存器的设置进入饱和模式和溢出锁存模式, 在饱和模式下, ALU 的结果寄存器 AR 的内容被自动设置为最大正值或最小负值. 在溢出锁存模式下, 溢出标志位 AV 被设置为 1, 并保持到被指令清除. 而 MAC 对溢出的饱和处理则是在一连串的乘/加操作后通过一条指令来完成的, 由于 MAC 的结果寄存器 MR 有 40 位, 符号位扩展寄存器 MR_2 有 8 位, 因此在发生 255 次溢出之前 MR_2 的最高位是不会溢出的, 也就不会影响饱和处理的结果. 关于舍入方式, 该 DSP 有两种模式: 无偏差舍入和有偏差舍入. 有偏差舍入即对 MR 的低 16 位 MR_0 的最高位加 1, 进位与 MR 的中间 16 位 MR_1 相加. 无偏差舍入操作则首先检查 MR_0 是否为 0X8000, 如果是则判断 MR_1 的奇

偶性, MR_i 为偶数则 MR_i 加 1, 产生向上的舍入误差, MR_i 为奇数则不变, 产生向下的舍入误差. 如果 MR_0 不是 0X8000, 无偏差舍入的操作与有偏差舍入的操作相同. 无偏差舍入消除了传统有偏差舍入方法在 MR_0 位于中间值 (0X8000) 时总是产生的向上舍入误差.

根据以上的介绍, 本文应用的 DSP 在执行控制软件中操作数为 16 位 (系统的 ADC 为 12 位), ALU 的结果为 16 位, MAC 的结果为 40 位, 输出到数字 PWM 的数据为 10 位^[1], 溢出处理方式饱和处理, 舍入方式选择无偏差舍入模式. 图 3 中子系统 Controller 的定点运算环节应据此设置. 因此, 在数字控制芯片确定的情况下定点数字控制器的仿真主要是确定各控制环节的数据范围 (scale). 仿真过程如下^[3]: 1) 在 MATLAB 环境下, 把所有定点模块的数据类型改变为双精度数据类型 (通过 MATLAB 命令), 设定负载或电流、电压给定信号在最大的极限范围内发生变化, 对所建立的数字控制弧焊逆变系统进行仿真计算. 把仿真中每个数字环节的最大和最小值存储到 MATLAB 的工作存储区间. 2) 数字环节根据仿真结果自动改变为适合的定点数据类型 (通过 MATLAB 命令). 3) 重新进行仿真计算, 校验数字控制器是否满足系统要求.

2.3 数字控制弧焊逆变电源系统仿真

在前面仿真中, 对逆变器模型和数字控制器模型分别进行了测试和调整. 在此基础上, 作者对数字控制弧焊逆变电源的外特性、动特性进行了仿真研究, 校验设计的控制算法能否满足弧焊逆变电源在控制精度、动态响应特性等方面的需要.

2.3.1 电源恒流外特性仿真 设定电流给定为 100 A, 取负载电流作为数字控制器的反馈信号, 使数字控制弧焊逆变电源工作在恒流模式下. 改变负载电阻值进行仿真计算, 得到的电流和电压稳态值如表 1 所示. 根据表 1 的数据, 得出电源的恒流外特性曲线如图 5 所示.

表1 恒流外特性仿真结果										
物理量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R/Ω	10.00	5.00	2.00	1.00	0.70	0.50	0.40	0.05	0.02	0.01
I/A	6.20	11.50	25.90	48.30	67.20	92.00	100.00	100.00	125.00	154.00
V/V	62.00	57.50	51.70	48.30	47.00	46.00	40.00	5.00	2.50	1.54

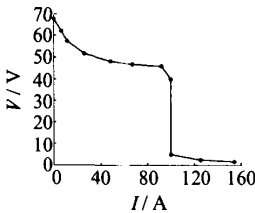


图5 仿真得到的恒流外特性曲线

2.3.2 电源动特性仿真 本文设计的电源动特性仿真为: 设定负载电阻 0.13 Ω (根据实际的负载箱可以承受 210 A 时的负载电阻值设定, 此时负载电阻为 1 Ω 、0.4 Ω 、0.25 Ω 并联), 在仿真开始时设定电流为 50 A, 仿真结果进入稳态后电流设定值发生 50~150 A 的阶跃变化. 仿真得到的电流动态变化过程见图 6.

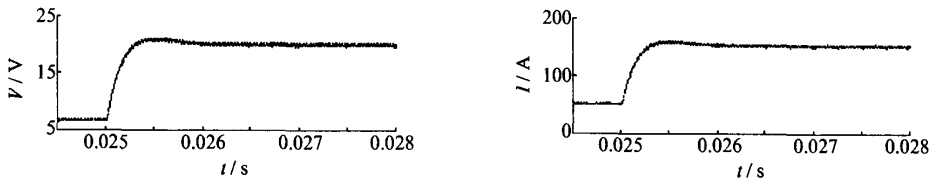


图6 恒流控制时电流从50~150 A过渡过程的仿真结果曲线

3 实验验证

作者在实际的数字控制弧焊逆变电源中参照定点控制器的仿真结果编写了控制软件, 进行了外特性和动特性实验. 恒流外特性实验的数据如表 2 所示, 负载电阻 0.13 Ω 时实测的 50~150 A 过渡过程如图 7 所示. 图中, 横坐标表示时间, 单位是每格 1 ms; 纵坐标为被测信号的幅值, 上面一条曲线为电压, 单位是每格 5 V, 下面一条曲线为电流, 单位是每格 100 A.

表2 恒流外特性实验结果

物理量	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I/A	0.0	28.0	82.0	97.8	97.8	97.9	97.9	97.9	97.9
V/V	67.5	54.4	50.1	42.4	29.6	26.1	19.4	15.5	9.5

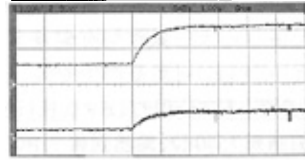


图7 恒流控制时电流从50~150 A 过渡过程的实测曲线

4 结 论

作者应用电源系统模块集和定点模块集在 MATLAB 环境下进行了数字控制弧焊逆变电源系统的建模,首次实现了主电路和数字控制器在同一环境的仿真研究,仿真结果与实验结果的对比表明:

1) 本文的建模和仿真研究,模型准确,仿真结果可靠,有效地预测了数字控制弧焊逆变电源的工作过程,对数字控制弧焊逆变电源设计与开发可以起到指导作用。

2) 应用 MATLAB 电源系统模块集建立的弧焊逆变器模型仿真再现了其实际工作过程,对于研究主电路参数与电源系统性能的关系及主电路参数优化有重要的指导意义。

3) 应用建立的数字控制定点模型模拟了 DSP 中控制软件的执行过程,在数据类型选择、数据范围选择、溢出处理和进位方式等方面为控制软件的编写提供了参考依据。通过该仿真加快了控制算法的设计和 control 软件的编写进程。

参考文献:

- [1] 丁京柱, 王伟明, 刘嘉, 等. 数字弧焊逆变电源 PWM 芯片的 VHDL 语言设计[J]. 焊接学报, 2002, 23(6): 47-50.
- [2] 吴敏源, 金伟正, 胡志雄, 等. ADSP 系列数字信号处理器原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [3] 陈桂明, 张明照, 戚红鱼, 等. 应用 MATLAB 建模与仿真[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

Simulation of Digital Controlled Arc Welding Inverter System With MATLAB

LU Zhen-yang, LIU Jia, WANG Wei-ming, FENG Yue-hai, YIN Shu-yan

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology,
Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: A design of digital controlled arc welding inverter system is presented on the basis of studying inverter technique and DSP application technique, in addition, the MATLAB sim-powersystems and fix-point blockset are used to build the simulink model of the power supply system. The simulation system studies the work process of arc welding inverter, the operation process of the algorithm executive system of fix-point controller and the integral characteristics of power supply system. The experimental results have validated the developed simulation model, and this simulation study can accelerate the process of design and development in the coming days.

Key words: full digital control; DSP; digital fix-point model; MATLAB simulation; arc welding inverter