

# 埋弧自动焊系统建模与控制方案设计<sup>①</sup>

周霞, 何建忠, 陈付

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 针对目前尚未有精确描述埋弧焊系统的数学模型而难以达到理想控制目标的现状, 对埋弧自动焊系统按照机理建模的方法建立数学模型, 分别建立了焊丝电压降子模型、熔滴电压降子模型和电弧电压降模型三个子模型, 作为埋弧焊系统中控制电弧的理论依据, 并进一步根据所建立的模型提出了相应的变速送丝控制方案, 经过控制系统的仿真验证了控制方案可以维持埋弧焊过程中送丝速度变化和焊接电弧之间的稳定性。

**关键词:** 埋弧自动焊系统; 数学建模; 压降子模型; 变速送丝控制方案; 稳定性

## Modeling and Control Scheme Design of Automatic Submerged Arc Welding System

ZHOU Xia, HE Jian-Zhong, CHEN Fu

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In allusion to the current situation that there is not yet mathematic model of describing the submerged arc welding system accurately, the mathematical model is established on the basis of mechanism modeling. Welding wire voltage drop son model, molten drop voltage son model and electric arc voltage drop son moder are established, which are regarded as the theoretical basis of the submerged arc welding system to control electric arc. And the corresponding variable speed wire control scheme is proposed according to the established model. By the control system simulation, it proves that the control scheme can maintain the stability between the wire feeding speed change and welding electric arc in the submerged arc welding process.

**Key words:** automatic submerged arc welding system; mathematical modeling; voltage drop son moder; variable speed wire control scheme; stability

埋弧焊作为焊接工艺中应用最主要的焊接方法之一, 以其焊接电流大、焊接效率高、安全性好等优点, 越来越广泛地应用于国民经济的各个行业, 如航空航天、轮船、轨道交通、化工等<sup>[1]</sup>. 但迄今为止, 尚未有针对埋弧焊建立理想的模型, 而在不了解系统模型的情况下, 又难以达到理想的控制目标<sup>[2]</sup>.

从电弧能量(焊接电流和电弧电压)的角度出发, 以焊接电流或电弧电压作为给定量和控制目标, 对焊接过程进行控制, 属于电弧能量控制系统. 与焊缝跟踪系统相比, 电弧能量控制系统的成本较低, 因为不需要使用负责且价格昂贵的电弧传感器装置. 但是由于早期数字技术的发展起步叫模拟技术要晚, 在模拟

控制系统占主导地位的年代, 电弧能量控制系统并没有得到很好的发展, 而所获得的控制目标仍然有很大的提升空间. 现在, 数字控制系统已经全速发展起来, 大量高速微处理器不断涌现, 这又使得电弧能量控制系统重新成为人们研究的热点.

国外对电弧能量控制系统研究得最活跃的是日本和美国. 美国的 Kang M J 和 Rhee S 提出了基于电压反馈的调节送丝速度模型. 日本的 Tusek 和 Janez 提出了基于电流反馈的控制模型. 无论是电压反馈模型还是电流反馈模型, 其本质都是通过对接过程中电弧的特性(电弧电压、电弧电流以及电弧长度等)的研究, 建立反馈系统, 保证电弧燃烧时的功率没有太大波动,

① 基金项目:上海市科委 2010 年度创新资金(1006H171900)

收稿时间:2012-07-28;收到修改稿时间:2012-09-06

从而保证焊接质量<sup>[3]</sup>。

本文采用电弧能量控制系统, 根据埋弧焊工艺机理, 建立了埋弧焊系统的整体模型, 并对模型各个组成部分的子模型进行分析, 最终得出了影响电弧电压的因素, 得到了电弧电压的表达式. 针对表达式, 选择具有垂直陡降外特性的弧焊电源, 从而给出了通过变速送丝稳定电弧电压的控制方案, 代替了传统的匀速送丝方式, 提高了系统的抗干扰性能. 重点解决了埋弧焊系统中有史以来的送丝速度和焊接电弧稳定之间的关系. 针对送丝电机, 建立了送丝速度和电弧电压之间的数学关系式, 采用电弧电压和电枢电压作为反馈量, 调节送丝速度, 以维持电弧的稳定. 在理论分析之后, 使用 Matlab 对控制系统进行仿真实验, 得到了预期的控制要求.

### 1 系统概述

埋弧焊系统是一个涉及多个变量的非线性系统, 其中包括焊接电流、电弧电压和焊丝进给速度等变量.

埋弧焊系统由焊接电源、系统控制箱、送丝电机和装置、焊接行走小车等组成. 当引弧成功之后, 整个埋弧焊系统即形成一个“弧焊电源 → 焊丝 → 电弧 → 待焊接工件 → 回到弧焊电源”的电流回路, 如图 1 所示<sup>[4]</sup>.

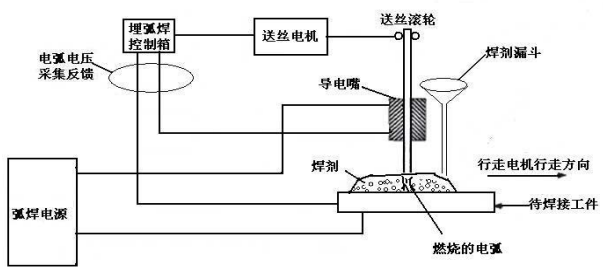


图 1 埋弧焊系统结构图

### 2 埋弧焊系统建模

#### 2.1 整体模型

在焊接过程中, 弧焊电源、焊接回路电缆、焊丝、熔滴、电弧构成闭合回路, 该闭合回路的等效电路可以用图 2 直观地表示.

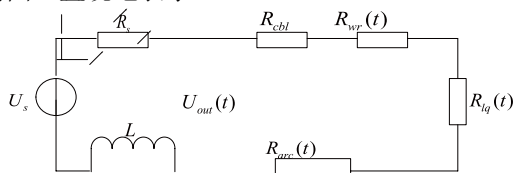


图 2 埋弧焊系统整体模型等效电路图

根据基尔霍夫电压定律(KVL)可得式(1):

$$U_{cbl} + U_{wr}(t) + U_{lq}(t) + U_{arc}(t) = U_{out}(t) \quad (1)$$

其中,  $U_{cbl}$  是埋弧焊系统回路中, 电缆总电阻两端的电压降;  $U_{wr}(t)$  是导电嘴前端外部固态焊丝两端的电压降;  $U_{lq}(t)$  是焊丝半固态和液态熔滴的电压降;  $U_{arc}(t)$  是电弧两端的电压降, 即通常所说的电弧电压;  $U_{out}(t)$  是弧焊电源输出的电压.

#### 2.2 焊丝电压降子模型

根据欧姆定律, 伸出导电嘴焊丝的压降  $U_{wr}(t)$  的计算公式是:

$$U_{wr}(t) = i_{wr}(t) \cdot R_{wr}(t) \quad (2)$$

焊丝电阻  $R_{wr}(t)$  的计算方法是<sup>[5]</sup>:

$$R_{wr}(t) = \rho_{wr} \cdot l_{wr}(t) / S_{wr} \quad (3)$$

综合可得到伸出导电嘴焊丝的电压降<sup>[6]</sup>:

$$U_{wr}(t) = \alpha i_{arc}(t) \frac{1}{S_{wr}} \left[ \frac{1}{3} a l_{wr}(t)^3 + \frac{1}{2} b l_{wr}(t)^2 + (c + \frac{\alpha}{\beta}) l_{wr}(t) \right] \quad (4)$$

其中,  $i_{arc}(t)$  是焊接回路中的电流, 简称焊接电流;  $R_{wr}(t)$  是焊丝电阻;  $\rho_{wr}$  是焊丝电阻率;  $l_{wr}(t)$  是焊丝干伸长的长度;  $S_{wr}$  是焊丝的横截面积, 选定焊丝之后,  $S_{wr}$  即为一个常数;  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  均为与焊丝干伸出长度有关的常数.

#### 2.3 熔滴电压降子模型

焊枪高度  $H$ 、焊丝长度  $l_{wr}(t)$ 、熔滴长度  $l_{lq}(t)$ 、电弧长度  $l_{arc}(t)$  之间的关系<sup>[7]</sup>, 如图 3 所示.

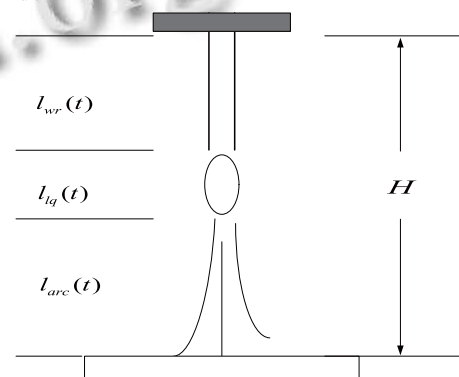


图 3 焊丝长度、熔滴长度和电弧长度的关系

由图 3 可知,

$$H = l_{wr}(t) + l_{lq}(t) + l_{arc}(t) \quad (5)$$

根据欧姆定律以及能量有关定律, 综合可得到熔滴电压降为:

$$\begin{aligned}
 U_{lq}(t) &= i_{arc}(t) \rho_{lq} \frac{(\overline{l_{lq}(t)})^2}{\beta_V V_{sol}(t)} \\
 &= \rho_{lq} \frac{\varphi^2 (H - l_{wr})^2 K_0 \Delta T}{\pi r_{wr}^2 \beta_V t [\eta_1 U_{arc}(t) + \eta_2 U_{wr}(t)]}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

式中， $\rho_{lq}$  是熔滴的电阻率； $\overline{l_{lq}(t)}$  是熔滴在过渡周期  $T_{lq}$  内的时间权重长度； $T_{lq}$  是熔滴过渡的总时间；熔滴是由焊丝熔化得到的，其体积膨胀的系数记为  $\beta_V$ ， $\beta_V$  对于选定材质的焊丝是常量； $V_{sol}(t)$  表示焊丝尚未熔化时的体积；设  $\varphi$  是熔滴在滴落过程中的时间权重长度系数； $K_0$  是常数； $\Delta T$  是焊丝熔化前和熔化后的温度差值； $R_{wr}$  表示焊丝横截面的半径，针对特定焊丝， $R_{wr}$  是一个常数； $\eta_1$  是电弧熔化焊丝的热效系数， $\eta_2$  是电阻热熔化焊丝的热效系数。

结论：由式(6)可知，当其他参数不变时，熔滴电压降和焊接电流并没有直接关系， $U_{lq}(t)$  与电弧电压、焊丝干伸长以及干伸长的电压降  $U_{wr}(t)$  有关。

### 2.4 电弧电压降模型

由式(1)可得电弧电压降  $U_{arc}(t)$  模型为：

$$U_{arc}(t) = U_{out}(t) - U_{cbl} - U_{wr}(t) - U_{lq}(t) \tag{7}$$

埋弧焊系统模型的电压降分布曲线<sup>[8]</sup>，如图 4 所示。

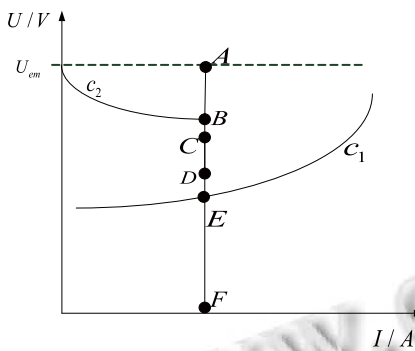


图 4 埋弧焊系统模型电压降分布

在图 4 中， $U_{em}$  为弧焊电源的空载电压；曲线  $c_1$  是弧焊工艺中电弧静特性曲线；曲线  $c_2$  是弧焊电源外特性曲线，以获得稳定的焊接电流。这样焊接回路中的电流  $i_{arc}(t)$  就成了一个常量  $I_{arc}$  (3)。点 B 是弧焊电源的工作点；点 E 是电弧稳定燃烧的工作点；线段 AB 表示电源内部电阻和电感的电压降；线段 BC 表示焊接回路中的电缆电压降，是一个常量；线段 CD 表示导电嘴之外的焊丝电压降；线段 DE 是熔滴电压降；线段 EF 就是电弧两端的电压，即  $U_{EF} = U_{arc}(t)$ 。

## 3 控制方案设计

本论文针对埋弧焊系统，采用具有垂直陡降外特性的电源供电，通过调节送丝电机的送丝速度  $v_{wf}(t)$  来维持电弧电压稳定的控制方案。

综合可以推导出电机的电枢电压  $U_{mot}(t)$  和弧长变化  $dU_{arc}(t)/dt$  之间的关系式如下：

$$U_{mot}(t) = \frac{V}{k} - \frac{1}{k\lambda_1 I_{arc}} - \frac{dU_{arc}(t)}{dt} \tag{8}$$

式中，由于初始送丝速度  $V$ ，比例系数  $k$ 、 $\lambda_1$  以及电弧电流  $I_{arc}$  都是常数，只有电弧电压  $U_{arc}(t)$  和电机电压  $U_{mot}(t)$  是变量，因此式(8)反映了电枢电压和电弧电压之间的一一映射关系。这也是本论文在设计埋弧焊控制系统控制时的重要理论依据。

## 4 控制系统仿真

### 4.1 调速仿真结果

根据上述调速系统的建模和系统参数设置，对该系统进行仿真<sup>[9-12]</sup>，仿真结果如图 5 所示。

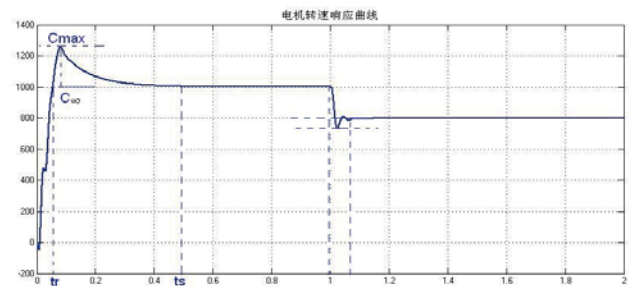


图 5 系统动态性能分析

根据仿真结果对送丝电机调速系统主要动态性能指标的分析：

#### 1) 上升时间 $t_r$

上升时间是指在阶跃响应过程中，输出量从零开始，第一次上升到稳态值所经历的时间。从仿真结果可以看出，该控制方案得出的系统上升时间  $t_r$  约为 0.05s，所以系统响应的快速性良好。

#### 2) 超调量 $\sigma$

超调量是指在阶跃响应过程中，输出量超出稳态值的最大值与稳态值之比。即：

$$\sigma \% = \frac{C_{max} - C_{\infty}}{C_{\infty}} \times 100 \%$$

从图 5 中可以看出，该系统的超调量约为：

$$\frac{1250 - 1000}{1000} \times 100 \% = 25 \%$$

### 3) 调节时间 $t_s$

调节时间是指在阶跃响应过程中, 输出衰减到与稳态值之差进入  $\pm 5\%$  或  $\pm 2\%$  的允许范围内所需要的最小时间. 由仿真结果可知, 该系统的调节时间小于 0.5s.

### 4) 系统无往复振荡.

当在 1s 的时刻, 要求转速改变时, 系统能够迅速过度. 图 5 中, 过度过程调节时间较快, 超调小, 且无往复振荡.

综上所述, 以给定转速为控制目标, 以电枢电压作为反馈量, 采用 SVPWM 调压方法, 可以得到良好的电机转速控制系统. 该调速系统响应快、超调小并且没有往复振荡. 该调速方案就是本论文用于送丝电机的调速方法.

## 4.2 弧压反馈仿真结果

将电弧电压作为反馈量, 引入调速系统, 使得转速跟随电弧电压的变化, 维持电弧电压的稳定. 对整个调速系统进行 Matlab 仿真, 仿真结果如图 6 所示. 通过仿真可知, 该变速送丝方案可以消除偏差, 维持电弧稳定.

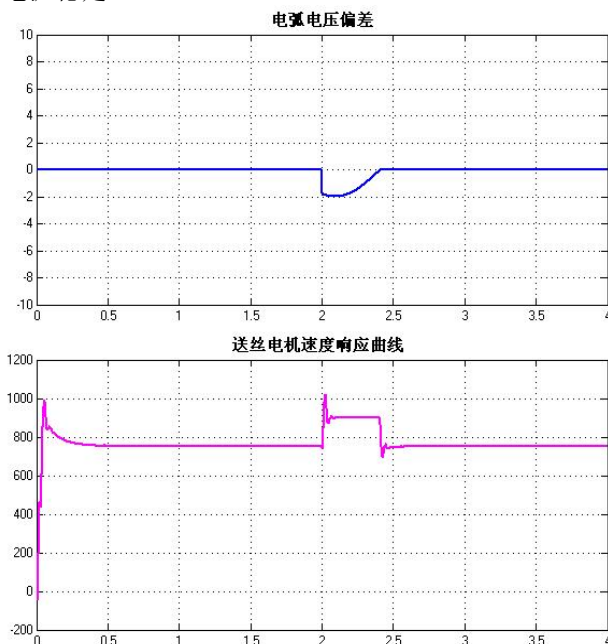


图 6 变速送丝消除电弧电压偏差仿真曲线

## 5 结语

本文对埋弧焊系统的机理进行了深入分析, 建立

了送丝速度(直流电机电枢电压)和电弧电压变化率之间的关系. 实现了以弧压偏差为反馈, 通过调节送丝电机电枢电压(即调节了送丝速度), 来维持电弧稳定的控制方案.

本文针对埋弧焊控制系统的模型, 使用 Matlab/Simulink 工件搭建了系统的仿真模型. 对于送丝系统, 采用 SVPWM 技术调压和电枢电压反馈的调速控制方案, 通过仿真, 可以得到良好的调速曲线. 通过仿真还可以看出, 使用变速送丝方案, 可以及时消除弧压偏差, 从而维持了焊接过程功率的稳定.

## 参考文献

- 1 刘远祥, 王斌. 自动焊管机控制系统设计与开发. 食品与机械, 2011, 8(28): 54-58.
- 2 Schreiber D, Cambrini L, Biber J. Online visual quality inspection for weld seams. Advanced Manufacturing Technology, 2009, 25(42): 497-504.
- 3 林范军, 徐东, 武文华. 埋弧自动焊焊接系统. CN102179607A, 2011.
- 4 吴开源, 黄石生. 基于 DSP 的 GMAW\_P 焊数字化控制系统. 焊接学报, 2007, 28(11): 41-44.
- 5 Dhas J, Kumanan S. Weld quality prediction of submerged arc welding process using a function replacing hybrid system. Advances in Production Engineering & Management, 2010, 1(5): 5-12.
- 6 刘超英. 自动埋弧焊接过程的电弧控制方程与热学分析. 焊接学报, 2007, 28(11): 22-24.
- 7 林宏旺. 基于观测器与前馈的送丝机模糊 PI 速度控制. 焊接学报, 2010, 31(1): 85-88.
- 8 洪乃刚. 电力电子、电机控制系统的建模和仿真. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- 9 黄忠霖, 黄京. 电力电子技术的 MATLAB 实践. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- 10 周渊深. 交直流调速系统与 MATLAB 仿真. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- 11 黄有锐, 曲立国. PID 控制器参数整定与实现. 北京: 科学出版社, 2010.
- 12 马建伟, 李银侠. 满意 PID 控制设计理论与方法. 北京: 科学出版社, 2010.