

本书共分 5 篇, 15 章。第 1 篇“弧焊动态过程”是利用控制论的原理, 对弧焊电源和弧焊过程的动态行为及其对工艺的影响作定量的描述。第 2 篇“焊接电弧的控制”描述如何利用现代电子科学的新技术, 开发控制焊接电弧的新方法。第 3 篇为“电弧传感器及焊接自动跟踪系统”, 该章运用了控制论的理论提出了传感器的物理数学模型, 对电弧传感器的信息进行了详细分析, 提出了采用空间变换的方法处理数据。本篇最后还描述了作者所创造的高速旋转传感器, 以及利用它所开发的两种典型自动跟踪焊机。第 4 篇“焊接温度场适时检测及其应用”描述了热图像比色法测量焊接温度场的新方法, 实验证明这种方法简捷、方便、数据可靠、速度很快, 可以在焊接过程中直接检测, 实行适时控制。第 5 篇“弧焊机器人路径自动规划”叙述了利用三维摄像系统识别焊缝自动进行规划的设计, 综述了焊缝三维识别的方法与实验结果, 并运用这种方法设计了弧焊机器人的硬件和软件, 在实验室中进行了实际焊接。本篇提出了将机器人运用于工地、大结构、水下及极限工作条件下的发展方向及途径。

本书主要读者对象是焊接科学及其相关领域的专家、研究人员、工程技术人员、教师及研究生和大学本科生。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代弧焊控制/潘际銮著. —北京: 机械工业出版社, 2000.6

ISBN 7-111-08087-4

I. 现… II. 潘… III. 电弧焊-基本知识 IV. TG444

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 28445 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 武 江

封面设计: 姚 毅 责任印制: 何全君

北京机工印刷厂印刷 • 新华书店北京发行所发行

2000 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm1/16 • 29.25 印张 • 5 插页 • 710 千字

0 001—3000 册

定价: 58.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

前 言

焊接在机械制造工业中是一门新兴的科学技术，它只有一百多年的历史，但近代工业的发展离开焊接是无法完成的。最典型的例子是核电站工程，系统非常庞大，而密封的要求又极严格，离开焊接别无其他方法可以完成，其他工业中许多产品与此类似。我国在解放以前焊接技术基本是处于空白状态。建国初期实行第一个五年计划时，迫切需要发展焊接技术，因此工业部门、研究单位和高等学校都把它放在了重要的地位。在开始阶段，主要工程是苏联援助的 156 项，但是我国焊接工艺和焊接材料工业，都落后于建设的需要。根据这种形势，在 50~60 年代中，作者主要的研究精力放在焊接冶金和焊接工艺上，对于焊接过程中出现的主要矛盾热裂纹问题，进行了大量的研究。70 年代后，我国焊接材料工业、焊接设备工业得到了比较充分的发展，焊接技术中的主要矛盾转化为自动化问题。由于焊接工艺过程的复杂性，自动化过程很难实现。例如合金钢罐体必须在预热 $100\sim 200^{\circ}\text{C}$ 温度下焊接，为了要焊接罐体内部焊缝，工人只好穿上全身浇湿的石棉工作服钻进封闭的罐体工作，即使如此，每位工人也只能坚持 20 多分钟，工人用轮流工作方式完成任务。这一状况，严重地影响了焊接质量和工人身体健康。即便在一些条件较好、产量较大的产品制造过程中，例如在焊接管道生产线中，虽然已经实现了机械化流水线生产，但是由于自动化程度不够，焊接电弧对中常常发生偏差，导致未焊透，造成相当大比例的废品，使国家经济蒙受重大损失。

随着形势的发展，70 年代初开始，作者将研究精力转向焊接过程自动化。研究工作的主要技术路线有两点：一是利用现代科学理论，对弧焊过程进行定量的分析和描述，摆脱过去经验式定性分析问题的局面，对焊接过程的本质进行深入的解析；二是利用现代科学技术的最新成就，从各方面发展焊接自动化所需要的技术，以求实现焊接过程的较理想的自动化目的。两者之间互相补充又互相促进。研究工作的重点是抓住解决焊接过程自动化的关键问题，逐个深入，在深入的基础上力图全面综合。这本著作比较全面地叙述了作者在上述方向中所取得的理论和实际成果，我相信这本书的出版不仅会对当前焊接工程的自动化工作起直接推动作用，而且会对其今后发展起指导作用。

本书共分 5 篇，15 章。第 1 篇“弧焊动态过程”是利用控制论的原理，对弧焊电源和弧焊过程的动态行为及其对工艺的影响作定量的描述。第 2 篇“焊接电弧的控制”描述如何利用现代电子科学的新技术，开发控制焊接电弧的新方法。所介绍的控制电弧的方法、思路独特新颖，效果显著，是国内外至今尚无报道的系统性的重大成果。这些方法为发展焊接新设备、新工艺指出了方向，提供了重要的手段。第 3 篇为“电弧传感器及焊接自动跟踪系统”。电弧传感器是弧焊自动跟踪技术中最有前途的传感器。作者在本篇中运用控制论的理论率先提出传感器的物理数学模型，可使人们对电弧传感器的本质和现象得到清晰的认识。接着对电弧传感器的信息进行了详细分析，提出了采用空间

变换的方法处理数据，可以大大提高信息处理的可靠性与精度。最后还描述了作者所创造的高速旋转传感器，以及利用它所开发的两种典型自动跟踪焊机。第4篇“焊接温度场适时检测及其应用”描述作者所提出的热图像比色法测量焊接温度场的新方法。实验证明这种方法简捷、方便，数据可靠，速度很快，可以在焊接过程中直接检测，实行适时控制。它在国内外亦属于首创，目前尚无类似技术报道。第5篇“弧焊机器人路径自动规划”叙述了利用三维摄像系统识别焊缝，自动进行规划的设想，综述了焊缝三维识别的方法与实验结果，并运用这种方法设计了弧焊机器人的硬件和软件，在实验室中进行了实际焊接。本篇提出了将机器人运用于工地、大结构、水下及极限工作条件下的发展方向及途径。

这5篇内容所叙述的是几个专题，有一定的独立性，但是它们又都是围绕弧焊过程自动化这个中心而发展的，因此可以把它们看成是一个整体技术或学科。各篇章内所描述的内容都是焊接科学研究的前沿领域和作者所完成的成果。但是作者描述时又注重每个专题的系统性、科学性以及它们之间的关联，所以是一本系统性的科学论著。

作者所进行的研究工作全部都是在清华大学焊接教研组全体同仁和20多年来所指导的博士生共同合作下完成的。他们不仅很好地配合完成了各项国家课题和横向合作任务，而且做出了许多创造性的发展。本书的取材除了作者本人和同仁们已发表或未发表的论文、报告外，主要还有博士生的学位论文内容，对于他们为此而做的贡献表示衷心的感谢。

本书工作量很大，本人学术工作和行政工作又甚繁重，因此在编写此书时，我的妻子，北京大学教授李世豫为我整理初稿和参考资料，付出了大量的劳动，没有她的协助，我是难以完成此项工作的，特此向她表示真诚的感激之情。

在写作这本书时南昌大学的几位同仁还协助做了大量具体工作，徐丽萍做校对工作，熊力和胡新庐打印稿件，整理图表和曲线，对他们的辛勤劳动，一并表示深切的谢意。

潘际奎

1999年12月于南昌大学

第 1 篇

弧 焊 动 态 过 程

第 1 章 常用弧焊方法动态过程的理论分析

1.1 引言

电弧焊接法自发明以来,已有 100 多年的应用历史,然而对这种方法的物理过程却缺乏系统的理论分析,现有文献中只有关于它的静态过程的定性描述,对于它的动态过程则几乎没有科学的分析。作者运用自动控制理论,将电弧焊过程视为一个控制系统,将电弧焊过程的各个环节写成运动方程,对这些方程进行拉氏变换,综合各环节的拉氏变换式,从而求得整个系统动态过程的互动关系以及动态过程的数学表达式^[1、2]。运用这些理论,可以深入地了解弧焊过程的物理本质;分析各种干扰所造成的弧长稳态偏差和动态偏差;分析各种参数对弧长恢复过程的影响;提供改进系统性能的方向和方法^[3、4、5]。

为简化分析问题起见,在以下讨论中,做了三条假定:第一假定熔化过程是均匀的;第二假定焊炬工件距离不变;第三忽略焊丝伸出长度对负载电压及熔化速度的影响。这些假设对本章所讨论目的,并无影响。但是在讨论其他问题时,不能任意采取这些假定。例如在研究电弧传感器时,后两个假定所涉及的因素变成了研究的主要参数,因此不能采用。在第 8 章对此将作详细描述。

常用电弧焊接方法,可以分为两大类:一类是等速送丝的弧长自发调节系统;另一类是弧压反馈控制送丝速度的均匀调节系统。以下分别对这两类系统进行分析。前者简称为等速送丝电弧控制系统;后者简称为均匀调节电弧控制系统。所谓电弧控制系统,包括焊接过程中对电弧有影响的全部机械、电气及其他元件。图 1-1 表示了电弧焊过程的物理模型。

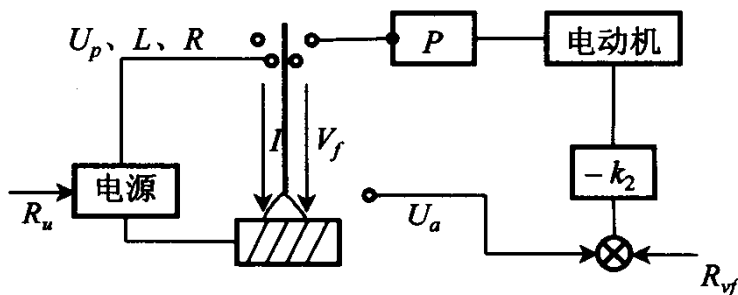


图 1-1 电弧焊物理模型

1.2 等速送丝电弧控制系统

所谓等速送丝电弧控制系统是指焊接过程中送丝速度不变,弧长调节作用是通过弧长变化引起的电流变化来实现的电弧控制系统。根据焊丝的熔化是连续及忽略焊丝伸出

长度的假设, 焊接过程可用以下运动方程进行描述。

焊接回路电压方程:

$$U_p = L \frac{di}{dt} + Ri + U_a \quad (1-1)$$

式中 U_p —— 焊机输出端电压;

L —— 焊接回路电感;

R —— 焊接回路电阻;

i —— 焊接电流瞬时值;

U_a —— 电弧电压。

电弧电压方程:

$$U_a = k_a L_a + k_p I + U_c \quad (1-2)$$

式中 L_a —— 弧长;

I —— 焊接电流有效值;

k_a 、 k_p 、 U_c —— 电弧参数。

焊丝熔化速度方程:

$$V_m = k_m I \quad (1-3)$$

式中 V_m —— 焊丝熔化速度;

k_m —— 焊丝熔化系数。

弧长方程:

$$V_m - V_f = \frac{dL_a}{dt} \quad (1-4)$$

式中 V_f —— 送丝速度。

焊机特性方程:

$$U_p = (R_u + k_1 I) k_0 \quad (1-5)$$

式中 R_u —— 焊接电源电压给定参考量;

k_0 —— 焊接电源放大系数;

k_1 —— 电流反馈系数。

将上述运动方程进行拉氏变换, 并将各环节按物理关系联接, 则可得控制系统的结构框图, 如图 1-2。

根据图 1-2, 可以得到该控制系统的传递函数:

$$\frac{L_a(s)}{R_u(s)} = \frac{k_0 k_m}{Ls^2 + (R + k_p - k_1 k_0)s + k_a k_m} \quad (1-6)$$

由式 (1-5) 可知, k_1 、 k_0 为电源外特性斜率。若 $k_1 < 0$, 电源输出为下降外特性; $k_1 = 0$ 时, 电源输出为水平外特性; $k_1 > 0$ 时, 电源输出为上升外特性。电源外特性斜率可以通过 k_1 来调节, 令 $k_1 k_0 = k$, 则:

$$\frac{L_a(s)}{R_u(s)} = \frac{k_0 k_m}{Ls^2 + (R + k_p - k)s + k_a k_m} \quad (1-7)$$

当 $k > R + k_p$ 时, 系统不稳定, 电流和弧长都没有稳态值;

当 $k = R + k_p$ 时, 系统处于临界稳定状态;

当 $k < R + k_p$ 时, 系统是稳定的。

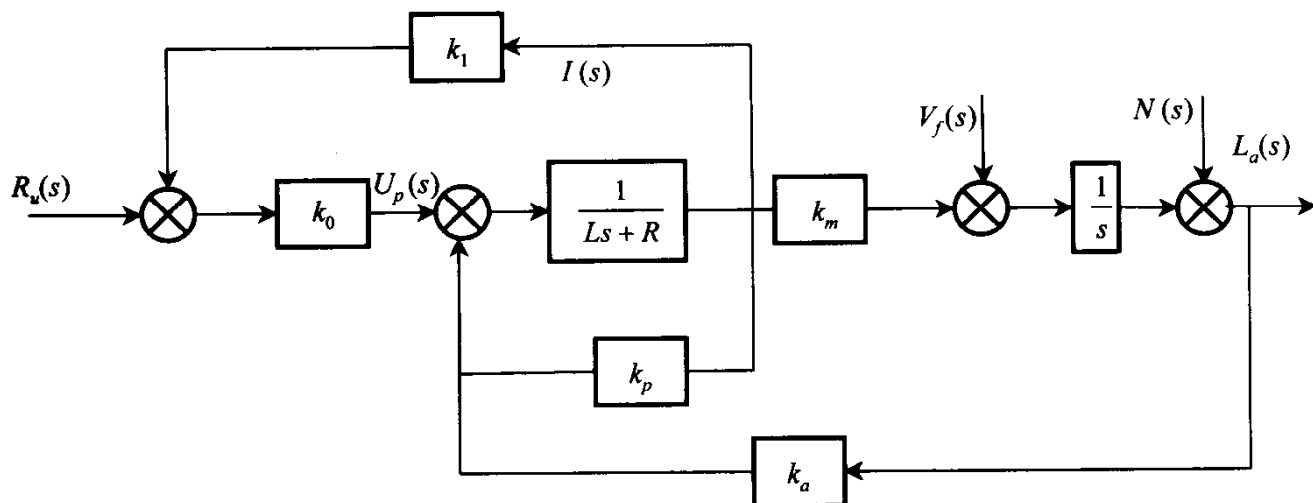


图 1-2 等速送丝电弧控制系统控制框图

传统的等速送丝电弧控制系统, 电源外特性斜率 $k \leq 0$, 都属于 $k < R + k_p$ 范围, 所以都是稳定的。从物理意义上来说, R 使焊机输出外特性下降, R 越大, 下降斜率越大; k_p 则代表电弧外特性上升情况, k_p 越大则电弧外特性随电流增大而上升, 斜率增大。 k 值表示焊机正反馈强度, 亦即外特性上升斜率大小。 k 值等于 $R + k_p$ 意味着焊机正反馈强度不仅抵消了 R 的下降作用, 而且使外特性上升斜率达到与电弧外特性的斜率大小一样。亦即焊机外特性与电弧外特性平行, 因而电弧处于不确定状态, 亦即系统处于临界稳定状态。同理: 当 $k > R + k_p$ 时, 意味着焊机外特性斜率大于电弧外特性, 因而电弧不稳定, 电弧工作点将按一定规律运动, 具体情况将在第 5 章中进行讨论。当 $k < R + k_p$ 时, 意味焊机外特性斜率小于电弧外特性, 因而电弧可以稳定燃烧。

根据式 (1-7), 该系统的动态品质参数为

阻尼比:

$$\zeta = \frac{R + k_p - k}{2\sqrt{Lk_a k_m}} \quad (1-8)$$

无阻尼自振频率:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_a k_m}{L}} \quad (1-9)$$

阻尼振荡频率:

$$\omega_d = \frac{\sqrt{4Lk_a k_m - (R + k_p - k)^2}}{2L} \quad (1-10)$$

衰减系数:

$$\sigma = \zeta \omega_n = \frac{R + k_p - k}{2L} \quad (1-11)$$

当 $k < R + k_p - 2\sqrt{Lk_a k_m}$ 时, $\zeta > 1$, 系统处于过阻尼状态;

当 $k = R + k_p - 2\sqrt{Lk_a k_m}$ 时, $\zeta = 1$, 系统处于临界阻尼状态;

当 $R + k_p - 2\sqrt{Lk_a k_m} < k < R + k_p$ 时, $0 < \zeta < 1$, 系统处于欠阻尼状态。

目前生产中应用的等速送丝电弧控制系统一般都处于过阻尼状态。表 1-1 所示为部分焊接情况下的有关参量。

表 1-1 第一类焊接电弧控制系统瞬态响应有关参量

No	材料	焊丝直径/mm	$k_m^{①}$	ζ	δ	ω_n	$\sqrt{\zeta^2 - 1}$
1	铝	1.2	0.68	1.16	115	99	0.59
2	铝	1.6	0.366	1.58	115	72.7	0.70
3	铝	2.4	0.165	2.35	115	48.8	2.13
4	钢	1.6	0.25	1.85	115	62.1	1.56
5	不锈钢	1.2	0.49	1.36	115	83.3	0.92

① 取自试验数据。

1.2.1 弧长自调节性能

在电弧焊过程中, 有各种因素对它产生干扰, 使弧长发生变化。弧长受到干扰后是否能迅速恢复, 是否能恢复到原有的水平, 决定焊接过程的稳定性和质量。干扰的因素主要有三种: 电网电压的波动; 送丝速度的干扰; 工件与导电嘴间距离的变化。其中电网的波动在现代化焊接技术中均可通过改进焊接电源来克服。因此下面分别对后两种干扰下, 电弧长度的变化和系统的响应进行分析。当送丝速度变化时, 根据图 1-2, 可以得到送丝速度干扰与弧长变化之间的关系为

$$\frac{L_a(s)}{V_f(s)} = \frac{-(Ls + R + k_p - k)}{Ls^2 + (R + k_p - k)s + k_a k_m} \quad (1-12)$$

若送丝速度的干扰是幅值为 ΔV_f 的阶跃输入, 即

$$V_f(s) = \frac{\Delta V_f}{s} \quad (1-13)$$

系统的弧长对上述干扰的响应为

$$L_a(s) = -\frac{(Ls + R + k_p - k)\Delta V_f}{[Ls^2 + (R + k_p - k)s + k_a k_m]s} \quad (1-14)$$

根据终值定理, 可以计算出弧长在上述干扰下的稳态偏差:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} L_a(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sL_a(s) = -\frac{R + k_p - k}{k_a k_m} \Delta V_f \quad (1-15)$$

式(1-15)表明, 在送丝速度干扰下稳态偏差不等于0, 即电弧不能恢复到原来的长度。式中负号表明随着送丝速度的增加, 弧长减小。该式还表明, 在同样的送丝速度干扰下, 电源外特性斜率越大(在稳定的范围内)弧长变化量越小; 而且弧长的变化量还跟焊丝材料直径以及焊接回路和电源内阻有关。若采用平特性($k=0$)电源和直径为1.2mm的钢焊丝($k_m=0.43$, $k_a=0.716$, $k_p=0.0245$), 回路和电源电阻 $15\text{m}\Omega$, 代入式(2-15), 弧长的稳态偏差为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} L_a(t) = -0.128 \Delta V_f \quad (1-16)$$

送丝速度每增加 1mm/s (0.06m/min) 弧长就减少 0.28mm 。由于送丝速度的干扰, 弧长不能恢复, 当干扰较大时, 弧长大幅度变化会使焊接过程无法进行。因此这种系统对送丝速度干扰的适应性较差。根据图1-2, 还可以得到弧长干扰 $N(s)$ 对系统的影响:

$$\frac{L_a(s)}{N(s)} = \frac{(Ls + R + k_p - k)s}{Ls^2 + (R + k_p - k)s + k_a k_m} \quad (1-17)$$

如果弧长干扰是幅值为 N 的阶跃干扰, 即 $N(s) = N/s$, 则在此干扰下, 弧长的偏差为

$$L_a(s) = \frac{(Ls + R + k_p - k)N}{Ls^2 + (R + k_p - k)s + k_a k_m} \quad (1-18)$$

弧长的稳态偏差为

$$L_a(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} sL_a(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{(Ls + R + k_p - k)Ns}{Ls^2 + (R + k_p - k)s + k_a k_m} = 0 \quad (1-19)$$

根据上式结果可知, 弧长稳态偏差为0, 即在这种干扰下弧长最终能够恢复。

为了分析弧长在上述干扰下弧长瞬时变化情况, 对式(1-18)进行拉氏反变换, 得

$$L_a(t) = \frac{s_2 N}{s_2 - s_1} e^{-s_1 t} + \frac{s_1 N}{s_1 - s_2} e^{-s_2 t} \quad (1-20)$$

式中

$$s_1 = \frac{(R + k_p - k) + \sqrt{(R + k_p - k)^2 - 4Lk_a k_m}}{2L}$$

$$s_2 = \frac{(R + k_p - k) - \sqrt{(R + k_p - k)^2 - 4Lk_a k_m}}{2L}$$

若 $\zeta \gg 1$, 即 $(R+k_p-k)^2 \gg 4Lk_a k_m$ 则 s_1 很大, $s_1 \gg s_2$ 式 (1-20) 中的第一项可以忽略, 这时式 (1-20) 可以简化为

$$L_a(t) = N e^{-s_2 t} \quad (1-21)$$

根据式 (1-20) 可以计算出弧长恢复过程中的瞬时偏差量。采用计算机进行模拟计算, 设电源和电弧参数为

$$k = 0, \quad R = 23.5 \text{ m}\Omega, \quad L = 10 \mu\text{H}, \quad k_a = 0.716 \text{ V/mm},$$

$$k_p = 0.0245 \text{ V/A}, \quad N = -3 \text{ mm}, \quad k_m = 0.43 \text{ mm/A} \cdot \text{s}$$

干扰出现前 $L_a = 6.5 \text{ mm}$, $I = 153 \text{ A}$, 则根据式 (1-20) 计算出的弧长瞬时偏差变化情况如图 1-3 所示。

从图 1-3 中可以看出, 在初始阶段焊接瞬时电流较大, 弧长恢复速度较快。随着弧长的恢复, 电流增量减小, 弧长恢复速度也逐渐减小。弧长恢复到不同程度所需的时间以及焊接电流值的变化如表 1-2 所示。从表中可知, 当弧长由于干扰由 6.5 mm 减小到 3.5 mm 时, 电流瞬时值要增加到 198 A , 弧长要恢复到干扰量的 95% 需要 485 ms 时间。

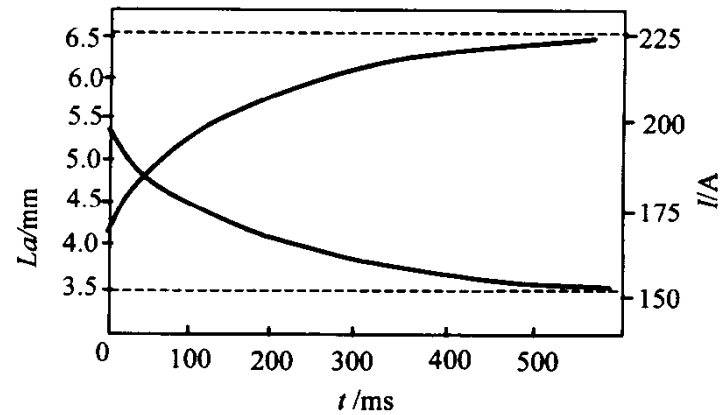


图 1-3 等速送丝电弧控制系统对弧长干扰的响应

表 1-2 弧长恢复速度以及焊接电流值的变化

L_a/mm	3.5	4.00	4.47	5.01	5.55	6.09	6.36	6.5
I/A	198	189	183	175	167	159	155	153
t/ms	0	32.5	60.9	109.4	180.5	313	485	∞
$\Delta L_a/\text{mm}$	-3	-2.44	-2.03	-1.49	-0.95	-0.41	-0.14	0

根据上面分析可知, 等速送丝电弧控制系统的动态性能跟 k 、 R 、 L 、 k_p 、 k_a 、 k_m 等参数有关, 下面讨论系统的主要参数对系统性能的影响以及这种系统的适用范围。

1.2.2 系统主要参数对动态性能的影响

1. 电源外特性斜率的影响

从式 (1-8) 可知, 电源外特性斜率的变化会引起系统阻尼比 ζ 的变化。

对于直径为 1.2 mm 钢焊丝, 若电弧和回路参数 $k_a = 0.716$ 、 $k_p = 0.0245$ 、 $R = 19 \text{ m}\Omega$ 、 $L = 0.3 \text{ mH}$, 当采用不同的外特性斜率时, 系统阻尼的变化如表 1-3 所示。从表中可以看出, 随着电源外特性的斜率增加, 阻尼比减小。但当电源外特性斜率较大时, ζ 值太小会使过渡过程的超调量增加, 一般认为当 ζ 值为 0.7 时, 系统处于最佳状态。这时相应的电源外特性的最佳斜率为

$$k = R + k_p - 2\zeta\sqrt{Lk_a k_m} = R + k_p - 1.4\sqrt{Lk_a k_m} \quad (1-22)$$

从表 1-3 中可以看出, 电源外特性在上述条件下的最佳斜率为 $k=0.03\text{V/A}$ 。所以, 选择缓升电源外特性可以使系统由过阻尼状态变为欠阻尼状态, 加速系统的动态响应。

表 1-3 不同外特性斜率下的阻尼比

k	-0.1	-0.01	0	0.019	0.03	0.04
ζ	7.74	2.78	2.26	1.27	0.70	0.18

2. 焊接回路参数影响

电感值包括了焊接回路电感和焊接电源内部的漏感。电感值较大时, 会使系统进入欠阻尼状态, 超调量增加。若 ζ 值和超调量不变, 电感值的增加会使 ω_n 值减小, 过渡过程调整时间增加。从式 (1-11) 可知, 过渡过程的衰减系数与 L 值成反比。可见电感值的增加对提高系统的动态品质是不利的。相反, 根据式 (1-8), L 值减小, 可以在 ζ 值不变的情况下增加电源外特性斜率。这不仅可以进一步增大衰减系数, 缩短调整时间。而且根据式 (1-15), 由于外特性斜率的增加可以减少送丝速度干扰对弧长的影响。可见, 电感值的增加对系统的性能的改善是不利的 (但在短路过渡焊接时, 需要适当的电感值来限制短路电流的增长率和减少飞溅)。

回路电阻虽然也对系统的动态和静态性能产生影响, 但是由于焊接电流较大, 应该尽量减少回路电阻, 以减少不必要的能量损耗。

3. 焊丝直径以及电弧参数的影响

对于常用的等速送丝电弧控制系统, 由于电源外特性斜率 $k \leq 0$, 系统处于过阻尼状态。当焊丝直径较细时, k_a 、 k_m 值较大。尤其是熔化系数 k_m , 它跟焊丝直径的平方成反比。因此采用较细的焊丝时, ζ 值较小, ω_n 值较大。与粗丝比较, 系统有较好的动态响应, 电弧自调作用强, 遇到弧长干扰时, 恢复时间短。而且根据式 (1-15), 焊丝越细, 送丝速度干扰对弧长的影响就越小。所以这种控制系统采用细丝焊时的性能要比粗丝焊的性能好。但是, 如果通过提高电源外特性斜率来改善系统的动态品质, 尤其是采用复合的阶梯形外特性对电弧进行控制, 这种电弧控制系统完全可以用于粗丝焊接。

这种控制方法的最大缺点在于焊接规范的稳定性的改善和弧长自调节作用的提高是矛盾的。因为电弧的自调节作用是靠焊接电流的变化而获得的。自调节作用越强, 电流变化越大, 溶滴过渡的稳定性和电弧燃烧的连续性就越差。这个矛盾在 MIG 电弧焊中尤其突出。

1.3 均匀调节电弧控制系统

均匀调节系统是通过改变送丝速度来调整弧长, 送丝电动机一般为电枢控制式直流电动机, 因此它的运动方程可表达如下:

$$E_a = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + k_4 \frac{d\theta}{dt} \quad (1-23)$$

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + f \frac{d\theta}{dt} = k_3 i_a \quad (1-24)$$

$$V_f = p \frac{d\theta}{dt} \quad (1-25)$$

式中 E_a —— 电枢电压;
 L_a —— 电枢绕组电感;
 R_a —— 电枢绕组电阻;
 i_a —— 电枢电流;
 J —— 电动机及机械负载折算到电动机轴上转动惯量;
 f —— 电动机及机械负载折算到电动机轴上的粘性摩擦因素;
 θ —— 电动机轴的角位移;
 V_f —— 送丝速度;
 k_3, k_4, p —— 常数。

通过拉氏变换, 电动机控制结构图如图 1-4 所示。

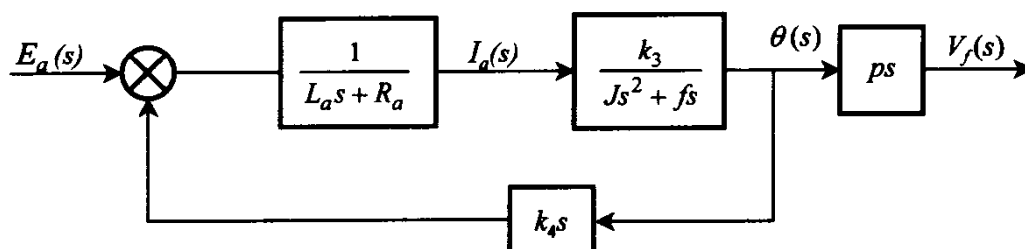


图 1-4 送丝机构的控制框图

根据图 1-4, 可求得其传递函数如下式:

$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{k_3}{s[L_a J s^2 + (L_a f + R_a J)s + R_a f + k_3 k_4]} \quad (1-26)$$

若忽略电动机电枢的电感 L_a , 则

$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{k_3}{s(R_a J s + R_a f + k_3 k_4)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \quad (1-27)$$

其中送丝机构的增益系数

$$K_m = \frac{k_3}{R_a f + k_3 k_4} \quad (1-28)$$

送丝机构的时间常数

$$T_m = \frac{R_a J}{R_a f + k_3 k_4} \quad (1-29)$$

因此，送丝机构的传递函数可简化为

$$\frac{V_f(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m p}{T_m s + 1} \quad (1-30)$$

假设焊接电源为恒流源，并忽略焊丝外伸长度对熔化系数的影响，均匀调节系统的控制框图可简化为图 1-5。

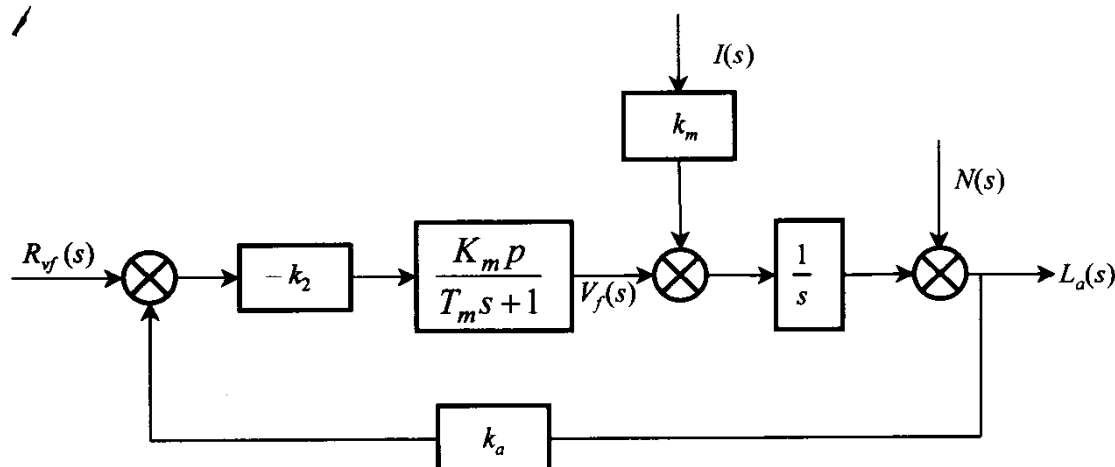


图 1-5 均匀调节系统的控制框图

图中 $R_{vf}(s)$ 为控制送丝电动机的给定电位， k_2 为电动机电路的开环放大倍数。根据图 1-5，该系统的传递函数为

$$\frac{L_a(s)}{R_{vf}(s)} = \frac{k_2 K_m p}{T_m s^2 + s + k_2 K_m p k_a} \quad (1-31)$$

$$\zeta = \frac{1}{2\sqrt{k_2 K_m p k_a T_m}} \quad (1-32)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_2 K_m p k_a}{T_m}} \quad (1-33)$$

$$\omega_d = \frac{\sqrt{4k_2 K_m p k_a T_m - 1}}{2T_m} \approx \sqrt{\frac{k_2 K_m p k_a}{T_m}} \quad (1-34)$$

$$\sigma = \zeta \omega_n = \frac{1}{2T_m} \quad (1-35)$$

在一般情况下， $k_2 K_m p k_a T_m > 1$ ， $0 < \zeta < 1$ ，所以常用的均匀调节系统通常处于欠阻尼状态。下面讨论主要参数对系统性能的影响。

1.3.1 送丝机构时间常数的影响

系统的动态性能 ζ 、 ω_n 、 ω_d 、 σ 等受送丝机构的时间常数 T_m 的影响。若 T_m 增大, 阻尼比 ζ 减小, 超调量增加, 容易引起振荡。而且 T_m 增大会使 ω_n 、 ω_d 和 σ 减小, 调整时间增加, 系统动态品质下降。相反, 若 T_m 减小可以提高系统的动态品质, 或者在相同的动态品质下增加开环增益, 获得更高的控制精度。为了减小送丝机构的时间常数 T_m , 首先根据式(1-29)选择时间常数小的电动机和合理设计机械传动部分。减小转动惯量 J , 增加摩擦因素 f 都可以减小送丝机构的时间常数。此外还可以在送丝电动机的控制电路中引入送丝速度负反馈, 并加入适当的校正环节和电动机制动措施, 便可以大大减小送丝机构的时间常数。

1.3.2 焊丝直径的影响

焊丝直径减小时, 弧柱直径变小, k_a 值增加, 阻尼比 ζ 减小, 系统超调增加, 甚至会出现振荡。所以常用的均匀调节系统, 由于其时间常数较大, 只能用于粗丝焊接。但是从式(1-32)中可以看出, 如果送丝机构的时间常数 T_m 能够大幅度减小, 那么在保证 ζ 值不变的条件下 k_a 值可以大幅度增加, 可以使用的焊丝直径将大大减小, ω_n 、 ω_d 和 σ 将大为增加, 系统的动态品质将得到较大的改善。可见, 以往认为均匀调节系统只适用于粗丝焊接和对动态品质要求不高的焊接方法是有条件的。如果能够大幅度减小送丝机构的时间常数, 均匀调节系统完全可以胜任细丝焊接, 这一点在目前自动控制技术发展的水平下是可以实现的。

1.4 均匀调节和自发调节共同作用下的电弧控制系统

在实际生产应用中, 均匀调节系统采用的电源外特性往往不是垂直陡降的, 在均匀调节作用产生的同时, 电弧的自发调节作用也同时存在。因此, 分析两种调节作用共同作用的电弧控制系统具有现实的意义。此外, 在实际生产中总是以其中一种调节作用为主。在同一系统中, 这两种调节作用相互作用如何; 是否可以在同一系统中两种作用都很强等问题是本节将要讨论的内容。

综合以上两节所述内容, 两种调节作用共同作用下的电弧控制系统可用图 1-6 表示。

从图 1-6 中可以看出, 该系统为多回路交叉作用的反馈系统。它的信号图如图 1-7 所示。利用 Mason 增益公式求得该系统的闭环传递函数为

$$\frac{L_a(s)}{R_{vf}(s)} = \frac{k_2 K_m p (Ls + R + k_p - k)}{LT_m s^3 + [(R + k_p - k)T_m + L]s^2 + (R + k_p - k + k_a k_m T_m + k_2 K_m p k_a L)s + k_2 K_m p k_a (R - k) + k_a k_m} \quad (1-36)$$

若忽略焊接回路的电感, 系统的传递函数可简化为

$$\frac{L_a(s)}{R_{vf}(s)} = \frac{k_2 K_m p (R + k_p - k)}{(R + k_p - k)T_m s^2 + (R + k_p - k + k_a k_m T_m)s + k_2 K_m p k_a (R - k) + k_a k_m} \quad (1-37)$$

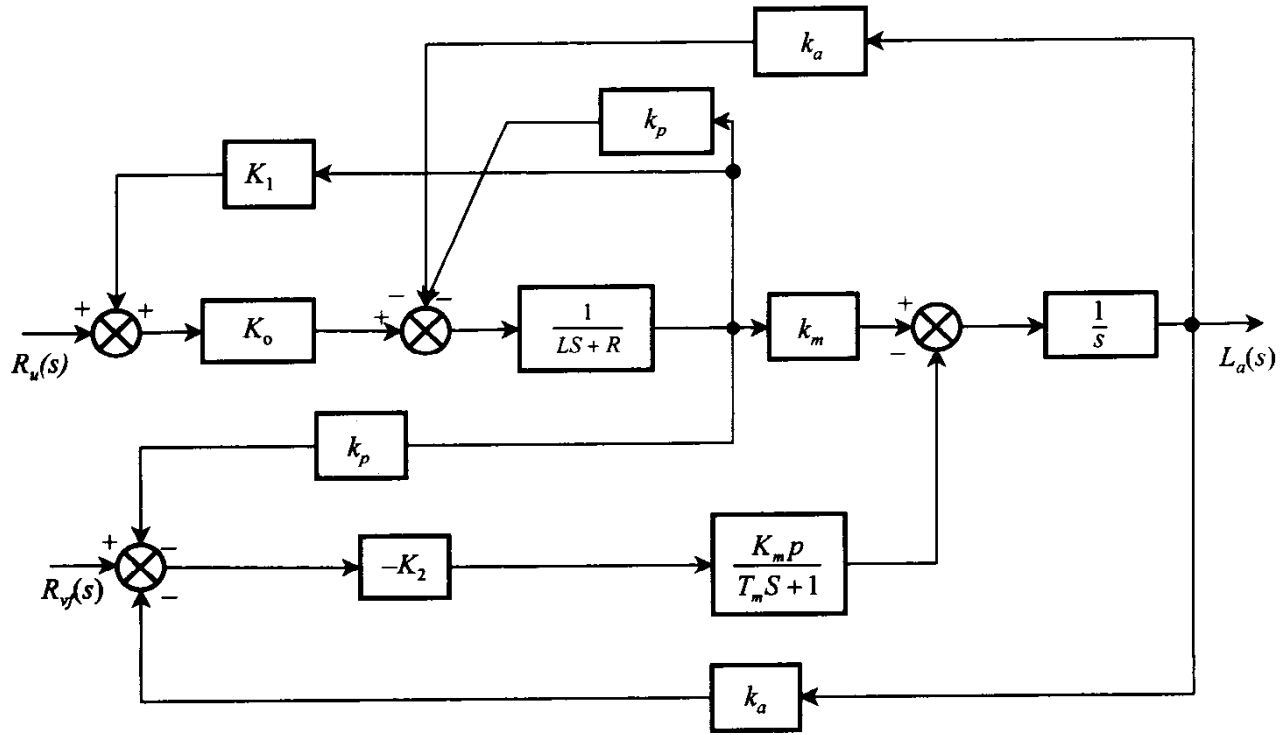


图 1-6 两种调节作用共同作用下的电弧控制系统

系统的劳斯阵列为

s^2	$(R + k_p - k)T_m$	$k_2 K_m p k_a (R - k) + k_a k_m$
s^1	$R + k_p - k + k_a k_m T_m$	0
s^0	$k_2 K_m p k_a (R - k) + k_a k_m$	

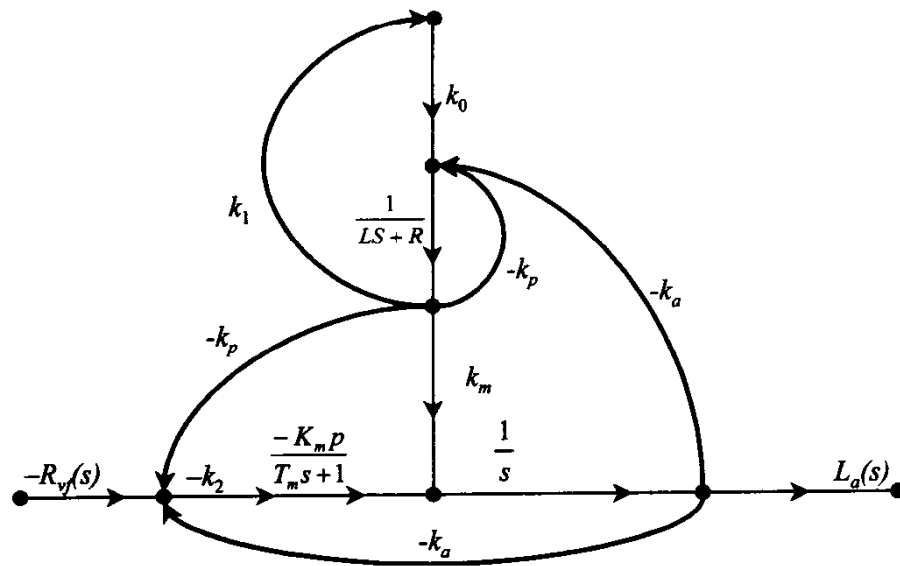


图 1-7 两种调节共同作用下的电弧控制系统信号流图

根据劳斯稳定判断, 该系统稳定的条件为

$$\begin{cases} k < R + k_p & (1) \\ k_2 K_m p k_a (R - k) + k_a k_m > 0 & (2) \end{cases} \quad (1-38)$$

稳定条件式(1-38)有它的物理含义,条件(1)是为了保证自发调节系统的稳定,使电弧静特性与电源外特性有一个稳定的交点。除此之外还要满足条件(2),才能保证系统的稳定。

当 $k \leq R$ 时,条件(1)和(2)同时能满足系统是稳定的;

当 $R < k < R + k_p$ 时,条件(2)可改写为

$$k_2 K_m p k_a < \frac{k_a k_m}{k - R} \quad (1-39)$$

式(1-39)的右边表示电弧每变化单位长度时熔化速度的变化量,左边表示电弧每变化单位长度时送丝速度的变化量。所以条件(2)的物理含义是:如果电源外特性斜率为 $R < k < R + k_p$,弧长变化时引起熔化速度的变化量必须大于送丝速度的变化量,系统才稳定。其原因在于当 $R < k < R + k_p$ 时,弧长增加,反馈电压反而减少,均匀调节系统已变为正反馈系统。而自发调节系统仍为负反馈系统。由于两种作用共同作用,若要综合作用稳定,自发调节的负反馈作用必须大于均匀调节的正反馈作用。因此,要使该系统具有稳定的电源外特性斜率,必须满足下列条件:

$$k < R + \frac{k_m}{k_2 K_m p} \quad (1-40)$$

由上面分析可知,外特性斜率的变化不但会改变自发调节系统的动态品质,而且还可以改变均匀调节系统的动态品质,甚至反馈的性质。下面分析在稳定的条件下,两种调节作用的相互作用。

当 $k < R$ 时,两种系统都处于负反馈状态,根据式(1-37)可以得到该系统的下列动态参数:

$$\zeta = \frac{R + k_p - k + k_a k_m T_m}{2\sqrt{(R + k_p - k)T_m[k_2 K_m p k_a (R - k) + k_a k_m]}} \quad (1-41)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_2 K_m p k_a (R - k) + k_a k_m}{(R + k_p - k)T_m}} = \sqrt{\frac{k_2 K_m p k_a}{T_m} + \frac{k_a k_m - k_2 K_m p k_a k_p}{(k_p + R - k)T_m}} \quad (1-42)$$

通常 ζ 值根据允许的最大超调量来确定,而系统的调整时间由无阻尼自振频率 ω_n 决定。根据上面的式(1-42),当 $k_2 K_m p k_a k_p < k_a k_m$,即均匀调节作用较弱,自发调节作用较强时,外特性斜率的增加会使 ω_n 增大,调整时间减小,系统动态品质较好,但当 $k_2 K_m p k_a k_p > k_a k_m$ 时,即均匀调节作用比自发调节作用强时,外特性斜率的增加反而会使 ω_n 减小,调整时间增加,动态品质变差。因此,无法选择合适的电源外特性斜率,使两种调节作用都处于较强的状态。所以生产中常用的电弧控制系统总是选择其中一种调节作用或者以其中一种调节作用为主。

在一般文献中,定性地描述了两控制系统的条件和要求,即等速送丝系统中应采用水平外特性,以获得较大的电流变化和自调节性能;在均匀调节系统中,应采用陡降外特性,以获得较高的弧压反馈量和均匀调节性能。本节对上述两种系统做了定量的科学分析。