



焊接自动化基础

卢 本 王大麟 王飞龙 编

华中科技大学出版社

焊接自动化基础

卢 本 王大麟 王飞龙

编 著

华中工学院出版社

内 容 简 介

本书以“自动控制理论”为基础,全面地、系统地阐述了电弧焊过程自动控制的几个重要问题。首先,由焊接电弧、弧焊电源的数学模型入手,紧密结合电弧焊工艺实际由浅入深地阐明了电弧的能量控制系统与焊缝参数控制系统。再通过弧焊实例介绍了电弧焊过程的程序控制及其实用设计方法。最后介绍了电弧的运动轨迹控制系统,其中包括曲面焊缝控制系统和焊缝跟踪系统。

本书是作者在华中工学院焊接专业的教学过程中,参考了国内外最新文献资料写成的教学参考书。在选材上充分注意了内容的先进性、系统性和实用性;在编写上则尽量使叙述深入浅出,简明精炼。

本书既可作为高等院校、中等专业学校焊接专业教学用书,也可供造船、机车车辆、锅炉、化工容器、建筑、电力等部门的广大焊接工作者参考。

焊接自动化基础

卢 本 王大麟 王飞龙 编著

责任编辑 郑兆昭

*

华中工学院出版社出版

(武昌喻家山)

湖北省新华书店发行

江西省修水县印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/32 印张:10.75 字数:245,000

1985年3月第一版 1985年3月第一次印刷

印数:1—8,000

统一书号:15255—023 定价:2.20元

目 录

前言	(1)
第一章 焊接自动化的理论基础	(3)
§ 1—1 自动控制系统	(3)
§ 1—2 自动控制系统的数学模型	(6)
§ 1—3 系统的时域分析	(22)
§ 1—4 频率响应法	(32)
§ 1—5 系统的稳定性	(34)
§ 1—6 系统的调节精度	(47)
§ 1—7 改善自动控制系统品质的方法	(49)
第二章 焊接电弧的电特性和数学模型	(56)
§ 2—1 焊接电弧的静态伏安特性	(56)
§ 2—2 焊接电弧的动特性	(61)
§ 2—3 焊接电弧的动态数学模型	(69)
第三章 弧焊电源的电特性与数学模型	(82)
§ 3—1 弧焊电源的静态(稳态)外特性	(82)
§ 3—2 弧焊电源静态外特性的获得	(84)
§ 3—3 弧焊电源的动态外特性	(96)
§ 3—4 弧焊电源的瞬态响应	(101)
§ 3—5 弧焊电源瞬态响应分析法	(107)
§ 3—6 弧焊电源的传递函数	(115)
第四章 电弧能量与焊缝参数控制系统	(121)
§ 4—1 概述	(121)
§ 4—2 熔化极电弧能量参数自动调节系统	(124)

§ 4—3	非熔化极电弧能量参数自动调节系统	(148)
§ 4—4	焊缝参数控制系统	(150)
§ 4—5	“YTHF”系统分析	(162)
第五章 焊接“电源-调节器-电弧-焊缝”系统的稳定性		(180)
§ 5—1	概述	(180)
§ 5—2	“电源-非熔化极电弧”系统的静态稳定 工作点	(181)
§ 5—3	“电源-电弧”系统的动态稳定系数	(185)
§ 5—4	“电源-电弧”系统中电路元件参数对系统 稳定性的影响	(193)
§ 5—5	“电源-熔化极电弧”系统的稳定性	(200)
§ 5—6	系统稳定性理论的实际应用	(207)
第六章 固定程序控制系统与逻辑设计		(211)
§ 6—1	基本概念	(212)
§ 6—2	逻辑代数与电路	(216)
§ 6—3	单元电路的开关函数	(222)
§ 6—4	控制线路逻辑设计与中间继电器	(240)
§ 6—5	继电器触点控制的竞争现象	(251)
第七章 顺序控制器控制系统及其应用		(260)
§ 7—1	基本逻辑式顺序控制器	(261)
§ 7—2	步进式顺序控制器	(278)
§ 7—3	可编程顺序控制器	(302)
§ 7—4	顺控器系统在焊接控制中的应用和实例	(306)
第八章 焊接电弧运动轨迹控制系统		(322)
§ 8—1	曲面焊缝轨迹控制系统	(322)
§ 8—2	平面焊缝控制系统(焊缝跟踪系统)	(331)
主要参考文献		(336)

前 言

由于焊接工艺方法的特殊作业条件(高温、强光、烟尘),也由于对焊接产品的质量和生产率的要求愈来愈高,焊接自动化在整个焊接技术发展进程中占有愈来愈重要的地位。尤其在汽车、船舶、锅炉、化工容器、机车车辆制造等行业中,焊接自动化始终是工程技术人员致力研究的重要课题。

本书结合弧焊工艺实际,系统地介绍了如何运用自动控制理论来分析、解决焊接自动化中的理论与实际问题。为此,本书十分注意基本理论与联系实际两个方面并使之紧密结合,力图帮助读者掌握作定量分析和解决弧焊工艺中常规自动控制问题的方法和手段。

本书第一章扼要地介绍了经典自动控制理论的主要内容,包括自动控制系统的数学模型、传递函数、系统的结构图等基本概念,以及系统稳定性和系统的时域分析方法。介绍第一章为的是给读者自学后续章节内容打下一个基础。

本书其余各章分别阐述了弧焊自动化的几个基本理论问题:焊接电弧与弧焊电源的数学模型、电弧能量参数控制系统与焊接电弧运动轨迹控制系统的分析方法以及焊接过程程序控制系统。

本书是作者在华中工学院焊接专业的教学过程中参考了国内外最新资料编写的教学参考书。在选材上注意了内容的系统性、完整性和先进性;在阐述方法上尽量做到深入浅出、循序

渐进和简明精炼。为便于自学，对重要的公式都作了推导，未加推导的则指出了文献出处，便于读者参阅查找。

本书由卢本主编，第一章由王飞龙编写，第六、七章由王大麟编写，其余各章由卢本编写。

本书承蒙华中工学院焊接教研室杭世聪同志进行了审阅。

本书可供高等工业院校、中等专业学校焊接专业师生使用，亦可供焊接工程技术人员及有关的自动化专业技术人员参考。

由于编者水平有限，书中错误与缺点在所难免，望广大读者不吝指正。

编 者

第一章 焊接自动化的理论基础

自动控制理论是研究自动控制规律的科学。焊接自动控制是生产过程自动控制技术的一个分支，因此，它的理论基础也就是自动控制理论。

自动控制理论分为经典控制理论和现代控制理论。经典控制理论主要研究单输入、单输出系统的输出控制，它的数学工具是传递函数，它的主要方法是频率法和根轨迹法。现代控制理论研究多输入、多输出控制系统的状态控制，它的工具是矢量微分方程理论、矩阵论和集合论，它的主要方法是状态空间法。

焊接自动化过程中的自动控制系统，目前还多为单输入、单输出的线性控制系统，即使是碰到多输入、多输出的非线性系统也是将其作线性化处理，从而可以使用叠加原理按单输入、单输出系统对待。

本书介绍的焊接自动控制系统的理论基础只限于经典控制理论的一部分。为使读者阅读方便，首先将自动控制理论的基本概念和基本理论加以介绍。

§ 1—1 自动控制系统

一、自动控制系统

能够对被控对象的工作状态进行自动控制的系统称为自动

控制（或自动调节）系统。它一般由被控对象和控制装置组成。被控对象是指需要实现自动控制的元件、设备、或生产过程。控制装置是指对被控对象起作用的设备的总体。

二、控制系统的基本组成

一个自动控制系统的基本组成环节如图1.1所示。它主要包括如下几个环节：

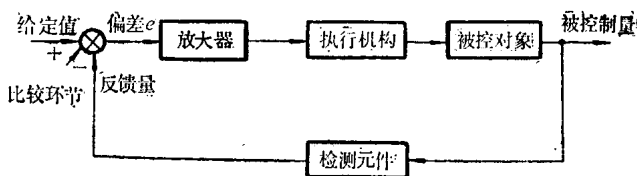


图1.1 控制系统的方框图

①测量环节 又称检测元件或传感器，它对系统输出量进行测量。例如，在焊接过程中检测电弧与焊缝（被调对象）的某一物理量（诸如电弧电压、电弧电流、焊接速度、熔深、熔宽等）的环节就是检测环节。被检测量通常就是输出量。

②比较环节 对被控制量与给定值进行代数运算，给出偏差信号的环节。

③放大环节 对偏差信号进行放大和变换，使被控对象得到一定调节作用所需偏差减小的环节。

④执行机构 根据放大后的偏差信号，对被控对象执行控制职能。它是通过改变被调对象某个物理量来完成调节动作的。调节对象的该物理量称为操作量，或调整动作量、控制量。为达到同一调节目的，被控对象的操作量可以不同。例如，在电弧电压（熔化极）自动调节系统中，为调节电弧电压可以通过调节弧长，即调节送丝速度来达到目的，也可以通过改变电路

中阻抗参数来完成同一控制要求。

⑤被控对象 指自动控制系统中需要进行控制的元件、设备或过程。在弧焊自动控制系统中，被控对象往往是焊接电弧。有时需要讨论焊缝的熔深、熔宽控制，则焊缝本身(熔池)就变为控制对象了。

三、闭环与开环系统

自动调节系统的特点在于：它是一个闭环系统，即输出的被调量和输入端之间存在着反馈关系，形成一个闭合的环路。相反，开环系统指不存在反馈关系的系统。在闭环系统中，从被控制量经检测元件到输入端的通道，称之为反馈通道；而从给定值、放大器、执行机构到被控对象的通道称为前向通道。

闭环控制系统有三个机能：

①测量被控制量；

②将测定的被控制量的值与给定的希望值进行比较；

③根据比较的结果(偏差值)对被控制量进行调整修正，而且只要有偏差存在，这种调节作用就不停止，这就是所谓“检测偏差，纠正偏差”。

四、扰动信号

一般情况下，控制系统受到两种输入信号的作用：有用信号(给定值)的作用和扰动的作用。系统的有用输入信号决定系统被控制量的变化规律，它或者保持某一定值，或者按某一函数规律变化。

扰动输入对任何控制系统都是难免的，它可以作用于系统中的任何部位。控制系统必须克服扰动作用的影响，使系统的输出按给定规律变化。

五、自动控制系统的基本类型

①自动镇定系统(定值控制系统)

系统的输入量(即给定值)是常数或者是随时间缓慢变化的,系统的任务就是在有扰动(的情况下,使输出的被控制量保持在给定的希望值上。电弧能量参数控制系统、焊缝参数控制系统都属于自动镇定系统。

②随动系统(跟踪系统)

系统的输入量是任意随时间变化的函数(事先无法预测其变化规律),系统的任务是保证输出的被控制量以一定的精度跟随输入量的变化而变化。焊缝跟踪系统就属于典型的随动系统。

③程序控制系统

系统的输入量是一个已知的时间函数,系统的任务是使输出按一定的精度随输入而变化。

在焊接过程自动化系统中,经常碰到的是以上三种类型,因此本书主要介绍这三种控制系统。

§ 1—2 自动控制系统的数学模型

一、系统的数学模型

自动控制系统的数学模型是描述系统内部各物理量之间关系的数学表达式。在稳态条件下(静态条件下)得到的数学模型称为静态数学模型。在这种情况下,变量对时间的各阶导数为零。例如焊接电弧的静态伏安特性、电源的静态输出特性(静态外特性)就属于静态模型。而系统中各变量在动态过程中的

关系用微分方程描述，称为动态数学模型。对微分方程进行拉普拉斯变换后，可转化为复频域内的代数方程，变化一下形式得到输入与输出间的传递函数，它也是系统的动态数学模型。

系统的数学模型一旦建立，整个系统的特点、性能也就确定了；也只有在建立了数学模型的基础上才能对系统进行定量的分析。因此，建立系统的数学模型是系统分析和设计的最重要的基础工作。例如，对焊接电弧能量参数控制系统来说，焊接电弧的数学模型（主要指动态模型）长期以来没有能够建立起来，是影响焊接自动控制发展的因素之一。

建立系统的数学模型主要是寻求被控对象的动态模型。因为自动控制系统的其他环节，诸如比较器环节、放大器环节、执行机构环节多属通用环节，对它们特性的研究已比较透彻。而被控对象往往属于不同专业范围，因此要求各专业人员去努力研究、建立模型。对于电弧焊接自动控制系统来说，电弧模型、熔池模型是最重要的。建立能如实地、精确而又简单地反映这两个被控对象变化规律的数学模型是广大焊接理论工作者长期以来致力的课题。

二、线性系统

所谓线性自动控制系统，就是描述其运动的微分方程是线性的。线性系统有两个特点：一个是它的齐次性，另一个是它的叠加性。

齐次性是指：如果线性系统对输入信号 $x(t)$ 的响应是 $y(t)$ （见图 1.2），即

若有 $x(t) \rightarrow y(t)$,

则 $ax(t) \rightarrow ay(t)$,

式中“ $\rightarrow$ ”表示响应。

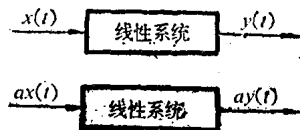


图1.2 线性系统的齐次性

叠加性是指(见图1.3):

如果 $x_1(t) \rightarrow y_1(t)$,

$x_2(t) \rightarrow y_2(t)$,

则当输入为 $x_1(t) + x_2(t)$ 时, 线性系统的响应为

$x_1(t) + x_2(t) \rightarrow y_1(t) + y_2(t)$ 。

齐次性和叠加性表明, 作用于线性系统的多个输入的总响应, 等于各个输入单独作用时产生的响应之和。

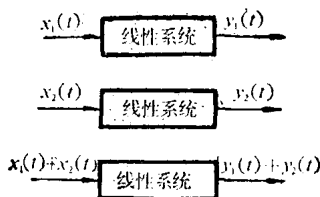


图1.3 线性系统的叠加性

当元件或系统特性为非线性方程时, 为了能按线性系统理论进行分析, 在小偏差量的情况下可将该方程线性化。将变量的非线性函数用台劳公式分解成这些变量在某工作状态附近的微增量表达式, 然后略去高于一次微增量的项, 就获得近似的线性函数。将非线性方程式中所有非线性函数都用其对应的近似线性函数代替, 就可得到近似的线性方程式。

例如, 一个变量的非线性函数为 $y = F(x)$, 线性化过程就是:

$$y = F(x) \approx F(x_0) + \left(\frac{dF}{dx} \right)_{x=x_0} \Delta x, \quad (1-1)$$

见图1.4。式(1-1)表示的是一直线方程, 它是以增量 Δx 为变量的点斜式方程。其含义就是: 用点 (x_0, y_0) 附近的直线

$F(x_0) + \left(\frac{dF}{dx} \right)_{x=x_0} \Delta x$ 代替原来的非线性函数 $F(x)$ 。这种

替代的条件是 Δx 一般不能太大, 否则就会使误差太大, 这就是自动控制理论中所谓的“小信号原理”。

我们在分析“电源-电弧”的静态稳定系数 K_{1w} 时(见第

五章),就是应用上述理论,将电源的非线性外特性函数以及电弧的非线性静特性函数均线性化后加以分析的。

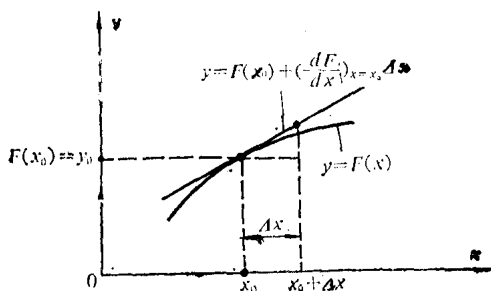


图1.4 函数 $y=F(x)$ 线性化方法

上述线性化方法的另一条件是在区间 $(x_0^-, x_0^+ + \Delta x)$ 内函数必须连续。

三、拉普拉斯变换

拉普拉斯变换是自动控制理论(经典控制理论)中的重要数学工具。拉普拉斯变换的根本任务在于把各种时间函数变换到复频域内加以研究。有时这样处理要比在时(间)域内研究系统各物理量更简单。拉普拉斯变换简称拉氏变换。

1. 拉氏变换的定义

设 $f(t)$ 是实变数 t 的函数,当 $t < 0$ 时, $f(t) = 0$,则拉氏变换定义为:

$$L[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt = F(s), \quad (1-2)$$

式中, $F(s)$ 称为 $f(t)$ 的象函数; $f(t)$ 称为 $F(s)$ 的原函数; L 表示对 $f(t)$ 进行拉氏变换。

当然,广义积分 $\int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$ 若存在, $f(t)$ 必须满足某些条件。在自动控制系统中的一些时间函数都满足这样的条件。

2. 拉氏变换的基本性质

这里，简单地推导几个常用的拉氏变换的性质。利用这些性质可使原函数的微分方程变为象函数的代数方程。

性质1（线性性质） 两个原函数之和或差的象函数等于其象函数之和或差，即如果有

$$L[f_1(t)] = F_1(s), \quad L[f_2(t)] = F_2(s), \text{ 则}$$

$$L[f_1(t) \pm f_2(t)] = F_1(s) \pm F_2(s)。$$

$$\begin{aligned} \text{证: } L[f_1(t) \pm f_2(t)] &= \int_0^{\infty} [f_1(t) \pm f_2(t)] e^{-st} dt \\ &= \int_0^{\infty} f_1(t) e^{-st} dt \pm \int_0^{\infty} f_2(t) e^{-st} dt = F_1(s) \pm F_2(s)。 \end{aligned}$$

性质2（线性性质） 原函数乘以任意常数后的象函数等于该常数乘其象函数，即如果

$$L[f_1(t)] = F_1(s), \text{ 则}$$

$$L[Af_1(t)] = AF_1(s),$$

其中A为任意常数。利用性质1即可得证。

〔例〕 求常数I的象函数。

$$\begin{aligned} \text{解 } L[I] &= \int_0^{\infty} I \cdot e^{-st} dt = I \cdot \int_0^{\infty} e^{-st} dt = -\frac{I}{s} e^{-st} \Big|_0^{\infty} \\ &= \frac{I}{s}。 \end{aligned}$$

常数的象函数经常会用到。

性质3（导数性质） 原函数的导函数 $f'(t)$ 的象函数与原函数 $f(t)$ 的象函数之间有如下关系：

$$L[f'(t)] = sF(s) - f(0),$$

式中 $f(0)$ 为原函数 $f(t)$ 在 $t=0$ 时的初始值。

证：利用定积分的分部积分公式，设 $e^{-st} = u$, $f'(t) dt = dv$

则 $du = -se^{-st} dt$, $v = f(t)$ 。由于 $\int u dv = uv - \int v du$,

$$\begin{aligned}\text{所以 } L[f'(t)] &= \int_0^{\infty} f'(t) e^{-st} dt \\ &= f(t) e^{-st} \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} f(t) (-se^{-st}) dt \\ &= -f(0) + sF(s) = sF(s) - f(0)。\end{aligned}$$

导数性质表明，拉氏变换把原函数求导的运算转变为“象函数乘 s 后减初值”的代数运算。如果 $f(0) = 0$ ，则

$$L[f'(t)] = sF(s)。$$

同理，可以证得

$$L[f^{(n)}(t)] = s^n F(s) - \sum_{k=1}^n f^{(k-1)}(0) s^{n-k}。$$

当 $f(t)$ 的各阶导数的初始值均为零时，则有

$$L[f^{(n)}(t)] = s^n F(s)。$$

性质4(积分性质) 原函数积分 $\int f(t) dt$ 的象函数与原函数的象函数之间有如下关系：

$$L\left[\int f(t) dt\right] = \frac{F(s)}{s} + \frac{1}{s} \int f(t) dt \Big|_{t=0}。$$

证：根据定义，

$$\begin{aligned}L\left[\int f(t) dt\right] &= \int_0^{\infty} \left[\int f(t) dt\right] e^{-st} dt \\ &= \left[\int f(t) dt \frac{e^{-st}}{-s}\right]_0^{\infty} + \frac{1}{s} \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \\ &= \frac{1}{s} F(s) + \frac{1}{s} \int f(t) dt \Big|_{t=0},\end{aligned}$$

式中, $\left. \int f(t) dt \right|_{t=0}$ 为 $\int f(t) dt$ 在 $t=0$ 时的初始值。

记 $\left. \int f(t) dt \right|_{t=0} = f^{-1}(0)$, 则有

$$L\left[\int f(t) dt\right] = \frac{F(s)}{s} + \frac{f^{-1}(0)}{s}.$$

当 $\left. \int f(t) dt \right|_{t=0} = 0$ 时, 则有

$$L\left[\int f(t) dt\right] = \frac{F(s)}{s}.$$

性质5(延迟性质)

$$L[f(t-t_0) \cdot 1(t-t_0)]$$

$$= e^{-st_0} F(s),$$

式中, $f(t-t_0) \cdot 1(t-t_0)$

是 $f(t)1(t)$ 延迟 t_0 后所得

的函数(见图1.5)。

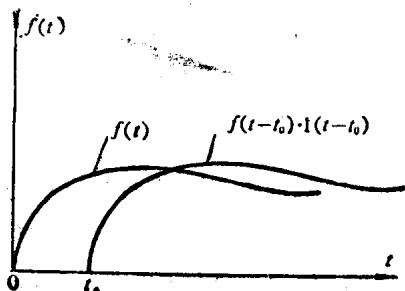


图1.5 函数 $f(t)$ 曲线与延迟曲线

$$\text{证 } L[f(t-t_0) \cdot 1(t-t_0)] = \int_0^{\infty} f(t-t_0) \cdot 1(t-t_0) e^{-st} dt,$$

$$\text{令 } t_1 = t - t_0, \text{ 则有 } L[f(t-t_0)1(t-t_0)]$$

$$= \int_{-t_0}^{\infty} f(t_1)1(t_1) e^{-s(t_1+t_0)} dt_1.$$

由于当 $t_1 < 0$ 时, $f(t_1) \cdot 1(t) = 0$, 所以积分下限可改写为0, 这样得

$$\begin{aligned} L[f(t-t_0) \cdot 1(t-t_0)] &= e^{-st_0} \int_0^{\infty} f(t_1) \cdot 1(t_1) e^{-st_1} dt_1 \\ &= e^{-st_0} F(s). \end{aligned}$$