

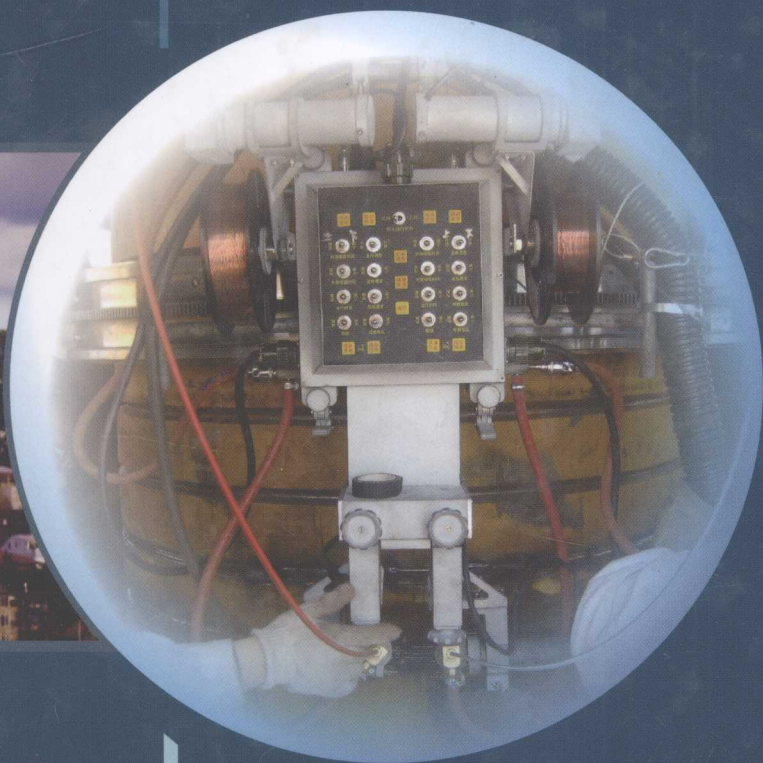


燕园科技学术文库

# 管道焊接过程

## 智能控制技术及其应用

刘立君 李冬青 著



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS



《名家·科技》出版基金资助

浙江大学宁波理工学院学术著作出版基金资助

# 管道焊接过程 智能控制技术及其应用



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

管道焊接是一种集计算机、自动控制、信息处理、机械和电气为一体的复杂材料成形加工工艺过程,主要完成各种管道的现场安装和焊接管焊接等生产任务。由于所焊接的管材、尺寸和位置等不同,焊接中电弧运动的实际位置会不断变化,因此要求焊接设备能够实时检测出焊缝的偏差和熔透情况,并调整焊接路径和焊接参数。对于这种复杂的控制过程,本书主要介绍管道焊接研究现状;焊接质量控制信息传感技术,包括焊缝图像处理方法和焊接过程控制信息语音提示技术和 MIG 焊电弧声传感技术;管道焊接过程控制硬、软件系统设计,包括管道焊接过程控制系统设计、电弧强干扰下的计算机多机通信设计、管道全位置 TLG 焊系统抗干扰设计、管道焊接过程控制系统软件设计原则、管道焊接机计算机操作平台和各执行单元计算机程序模块;焊接管温度场和应力场数值模拟,为焊接管焊接后的弯曲、扩管和卷边成形等冷加工工艺提供参考数据,为焊接管规范参数优化选择提供依据;详细阐述了管道焊接工艺技术,包括管道焊接小电流自动接触引弧工艺,管道焊接弧长调节控制,厚壁管焊接侧壁熔透工艺,基于视觉管道焊缝跟踪偏差控制,基于电弧声传感管道焊接质量控制和海上桩管自动焊接机应用。

本书是作者和他的合作者多年关于管道焊接方面科研成果的总结,实用性和工程性较强,可为从事管道焊接质量控制工程技术人员提供技术支持,也可供从事材料成形过程控制或工业控制领域机电一体化工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

管道焊接过程智能控制技术及其应用/刘立君,李冬青著. —北京:北京大学出版社,2010.2  
(燕园科技学术文库)

ISBN 978-7-301-16078-7

I. 管… II. ①刘…②李… III. 管道—焊接—智能控制—研究 IV. TG457.6-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 197565 号

书 名:管道焊接过程智能控制技术及其应用

著作责任者:刘立君 李冬青 著

责任编辑:童君鑫

标准书号:ISBN 978-7-301-16078-7/TH·0167

出版者:北京大学出版社

地 址:北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址:<http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话:邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱:pup\_6@163.com

印刷者:北京中科印刷有限公司

发 行 者:北京大学出版社

经 销 者:新华书店

720 毫米×1020 毫米 16 开本 18.5 印张 314 千字

2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷

定 价:50.00 元

---

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024

电子邮箱:fd@pup.pku.edu.cn

# 前 言

管道焊接主要包括焊接管生产焊接、油、气、水输送管道焊接和压力容器接管焊接。管道焊接技术遍布人们生活的每个角落，在石化、热交换器、石油气、化学、造船、造纸、仪表、汽车、食品医药、核电和海上平台等行业和工程中具有广泛应用。石油和天然气产业作为国民经济发展的重要基础已被世界各国所重视，随着我国国民经济的快速发展，不仅对能源的需求量越来越大，而且能源结构也发生着变化。我国的油气资源大部分分布在东北和西北地区，而消费市场绝大部分在东南沿海和中南部的大中城市地区，因此，油气产品的输送成为油气资源开发和利用的最大障碍。管道运输是突破这一障碍的最佳手段，与铁路运输相比，管道运输是运量大、更安全、更经济的油气产品输送方式。因此，我国政府已将“加强输油气管道建设，形成管道运输网”的发展战略列入了“十一五”发展规划。根据有关方面的规划，未来 10 年内，我国将建成 14 条油气输送管道，形成“两纵、两横、四枢纽、五气库”，总长超过上万公里的油气管输格局，这预示着我国即将迎来油气管道建设的高峰期。多年来，我国现场管道的焊接大多数采用手弧焊，其焊接效率低、质量差、工人劳动强度大，对焊工的焊接技能要求高。因此，发展焊接质量好、生产效率高的自动化焊接设备及其配套焊接过程智能控制技术，对提高我国管道施工建设的技术水平，适应高速发展的管道建设需求，具有重大的意义。基于以上原因，作者编写了本书。

本书是作者及其合作者从事管道焊接的科研成果的总结，书中部分成果来源于宁波市自然基金项目(2008A610031)、哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室基金项目(08003)、黑龙江省自然科学基金项目(E2007-01)、黑龙江省青年骨干教师支持项目(1153G009)、黑龙江省青年基金项目(QC01C31)、哈尔滨市科技攻关项目(0111211118-4)和哈尔滨市科技创新人才专项基金项目(2007RFQXG055)，部分来源于作者和张勇合作的国家科委中小企业创新基金项目(00C26212310970)，部分来源于作者及其学生马葆华、占小红、崔元彪、闫志峰、黄文怡、朱荣华、兰虎和温建力的科研论文成果，作者在此一并表示感谢。希望书中管道焊接相关技术为解决管道焊接质量的瓶颈技术提供一些帮助，为研发我国自主知识产权的焊接管生产线和全位置环缝自动焊接机提供一定的技术支持。

本书获得北京大学出版社《名家·科技》出版基金和浙江大学宁波理工学院学术著作出版基金的资助。哈尔滨中天焊接自动化设备有限公司张勇担任本

书主审；书中引用了许多宝贵的参考文献，在此，一并向主审和文献的作者、出版者致以深切的谢意。

由于作者学识和经验有限，书中错误与片面之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2009年10月

# 目 录

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 第 1 章 管道焊接研究现状 .....             | 1   |
| 1.1 管道焊接应用研究现状 .....             | 1   |
| 1.2 焊接过程熔透状态监控研究现状 .....         | 4   |
| 1.3 探索管道焊接质量及其视觉和听觉传感信息的意义 ..... | 11  |
| 第 2 章 焊接质量控制信息传感技术 .....         | 13  |
| 2.1 焊缝图像处理方法 .....               | 13  |
| 2.1.1 图像处理的一般算法 .....            | 13  |
| 2.1.2 焊缝图像处理软件的开发 .....          | 31  |
| 2.1.3 焊缝图像处理实例 .....             | 41  |
| 2.2 焊接过程控制信息语音提示技术 .....         | 50  |
| 2.2.1 焊接过程控制信息语音提示意义 .....       | 50  |
| 2.2.2 语音提示在管道焊接机中的应用 .....       | 51  |
| 2.2.3 焊接过程语音卡硬件设计 .....          | 53  |
| 2.2.4 焊接过程语音卡软件设计 .....          | 56  |
| 2.2.5 语音合成模块 .....               | 65  |
| 2.2.6 工作模块 .....                 | 65  |
| 2.2.7 预演模块 .....                 | 66  |
| 2.3 MIG 焊电弧声传感技术 .....           | 68  |
| 2.3.1 MIG 焊电弧声产生机理研究 .....       | 69  |
| 2.3.2 MIG 焊电弧声信号与熔透状态相关性研究 ..... | 77  |
| 2.3.3 MIG 焊电弧声信号特征提取与选择 .....    | 94  |
| 2.3.4 MIG 焊神经网络熔透状态辨识建模 .....    | 114 |
| 第 3 章 管道焊接过程控制硬件系统设计 .....       | 124 |
| 3.1 管道焊接过程控制系统设计 .....           | 124 |
| 3.1.1 管道焊接过程控制系统设计步骤 .....       | 124 |
| 3.1.2 管道焊接过程控制系统总体设计 .....       | 128 |
| 3.1.3 上位机计算机控制系统 .....           | 130 |
| 3.1.4 从机通用控制单元设计 .....           | 131 |



|              |                             |            |
|--------------|-----------------------------|------------|
| 3.1.5        | 手控盒的设计 .....                | 131        |
| 3.1.6        | 基于图像传感二维跟踪控制系统 .....        | 138        |
| 3.1.7        | 管道焊接机电动机驱动电路设计 .....        | 140        |
| 3.2          | 电弧强干扰下的计算机多机通信设计 .....      | 155        |
| 3.2.1        | 通信任务分析 .....                | 155        |
| 3.2.2        | 通信网络的硬件组成 .....             | 156        |
| 3.2.3        | 通信协议设计 .....                | 157        |
| 3.2.4        | 串行通信软件设计 .....              | 159        |
| 3.3          | 管道全位置 TIG 焊系统抗干扰设计 .....    | 167        |
| 3.3.1        | 设计抗干扰电路 .....               | 167        |
| 3.3.2        | 抑制干扰源 .....                 | 172        |
| 3.3.3        | 削弱耦合通道 .....                | 174        |
| 3.3.4        | 采用屏蔽双绞线 .....               | 175        |
| 3.3.5        | 合理布线 .....                  | 177        |
| <b>第 4 章</b> | <b>管道焊接过程控制软件系统设计 .....</b> | <b>182</b> |
| 4.1          | 管道焊接过程控制系统软件设计原则 .....      | 183        |
| 4.1.1        | 控制系统软件设计一般原则 .....          | 183        |
| 4.1.2        | 系统工程方法软件设计原则 .....          | 183        |
| 4.2          | 管道焊接机计算机操作平台 .....          | 185        |
| 4.2.1        | 管道焊接机主控计算机操作平台 .....        | 186        |
| 4.2.2        | 管道焊接数据库操作平台 .....           | 188        |
| 4.2.3        | 管道焊接故障自诊断操作平台 .....         | 194        |
| 4.2.4        | 管道设备调试软件操作平台 .....          | 197        |
| 4.2.5        | 管道焊接示教再现操作平台 .....          | 198        |
| 4.2.6        | 管道焊接实时控制操作平台 .....          | 200        |
| 4.2.7        | 焊前调整操作平台 .....              | 202        |
| 4.2.8        | 管道焊接工艺测试操作平台 .....          | 203        |
| 4.3          | 各执行单元计算机程序模块 .....          | 204        |
| 4.3.1        | 钨极和横向摆动控制模块 .....           | 205        |
| 4.3.2        | 弧长和焊接电源控制模块 .....           | 206        |
| 4.3.3        | 爬行驱动控制模块 .....              | 207        |
| 4.3.4        | 双向送丝控制模块 .....              | 208        |
| 4.3.5        | 焊接辅助和故障诊断控制模块 .....         | 209        |
| <b>第 5 章</b> | <b>焊接管温度场和应力场数值模拟 .....</b> | <b>211</b> |
| 5.1          | 激光焊应力变形有限元理论基础 .....        | 212        |

|              |                             |            |
|--------------|-----------------------------|------------|
| 5.1.1        | 焊接温度场有限元模型 .....            | 213        |
| 5.1.2        | 焊接热弹塑性有限元模型 .....           | 218        |
| 5.1.3        | 有限元分析软件 Marc 模拟焊接过程 .....   | 221        |
| 5.2          | 不锈钢管激光焊数值模拟 .....           | 224        |
| 5.2.1        | 不锈钢管激光焊温度场数值模拟 .....        | 224        |
| 5.2.2        | 不锈钢管激光焊应力应变场数值模拟 .....      | 231        |
| 5.3          | 不锈钢管激光焊试验研究 .....           | 239        |
| 5.3.1        | 不锈钢管试样焊接 .....              | 239        |
| 5.3.2        | 焊接管残余应力测量 .....             | 241        |
| <b>第 6 章</b> | <b>管道焊接工艺技术 .....</b>       | <b>245</b> |
| 6.1          | 管道焊接小电流自动接触引弧工艺 .....       | 245        |
| 6.1.1        | 小电流接触引弧原理 .....             | 245        |
| 6.1.2        | 引弧成功率的影响因素 .....            | 246        |
| 6.1.3        | 小电流接触引弧试验分析 .....           | 249        |
| 6.2          | 管道焊接弧长调节控制 .....            | 250        |
| 6.2.1        | 弧长调节系统的硬件组成 .....           | 250        |
| 6.2.2        | 弧压采样系统的设计及标定 .....          | 252        |
| 6.2.3        | 可变增益 PID 弧长调节 .....         | 253        |
| 6.3          | 厚壁管焊接侧壁熔透工艺 .....           | 256        |
| 6.3.1        | 焊前准备 .....                  | 257        |
| 6.3.2        | 摆动钨极行为分析 .....              | 257        |
| 6.3.3        | 送丝行为分析与控制 .....             | 259        |
| 6.4          | 基于视觉管道焊缝跟踪偏差控制 .....        | 260        |
| 6.4.1        | 焊缝图像传感二维跟踪硬件系统 .....        | 261        |
| 6.4.2        | 焊缝跟踪二维十字滑架偏差控制 .....        | 262        |
| 6.4.3        | 图像传感管道焊缝跟踪误差控制试验及结果分析 ..... | 264        |
| 6.5          | 基于电弧声传感管道焊接质量控制 .....       | 265        |
| 6.5.1        | 管道焊接电弧声发射采集硬件系统设计 .....     | 265        |
| 6.5.2        | 焊接电弧声发射采集软件系统设计 .....       | 272        |
| 6.5.3        | 焊接电弧声发射采集系统测试试验 .....       | 277        |
| 6.6          | 海上桩管自动焊接机应用 .....           | 281        |
| 6.6.1        | 海上桩管自动焊方法选择 .....           | 282        |
| 6.6.2        | 海上桩管自动焊接机硬件设计 .....         | 282        |
| 6.6.3        | 海上桩管自动焊接机控制系统 .....         | 284        |
| 6.6.4        | 海上桩管自动焊接机应用实例 .....         | 284        |
|              | <b>参考文献 .....</b>           | <b>286</b> |



# 第 1 章

## 管道焊接研究现状

管道焊接主要包括焊接管生产焊接、油气水输送管道焊接和压力容器接管焊接。管道焊接技术遍布人们生活的每个角落，在石化、热交换器、石油气、化学、造船、造纸、仪表、汽车、食品医药、核电和海上平台等行业和工程中具有广泛应用。由于管道输送液体或气体高危险性，以及管道本身工作在高温、高压或高腐蚀的恶劣环境下，对管道焊接质量要求非常严格，又由于管道特殊结构，只能采用单面焊双面成形技术保证焊接质量，正面焊缝要求具有良好成形，反面焊缝要求熔透和成形都要良好，使得管道自动焊接单面焊双面成形成为保证焊接质量必要条件，也成为限制管道自动焊接瓶颈技术之一。一般管道自动化焊接主要采用非熔化极气体保护焊(GTAW)，但由于其效率低，和后续多层焊(采用气体保护焊)设备切换麻烦等原因，除薄壁管(壁厚 $\leq 2\text{mm}$ )外，现在倾向用二元或三元的富氩混合气体保护焊(GMAW)实现管道焊接和后续多层焊，但由于采用 GMAW 焊接实现单面焊双面成形相对 GTAW 焊工艺复杂、控制难度大，因此成为焊接领域研究热点之一。解决好管道焊接质量关键技术，将会提高管道焊接质量和效率、增加其市场竞争力，对提高我国管道焊接的技术水平、适应高速发展的管道建设需求有重大的意义。

### 1.1 管道焊接应用研究现状

管道全位置焊接技术出现于 20 世纪 60 年代末期，美国 CRC 公司在 1964 年率先将该项技术应用于管道施工上。起初只是采用焊接小车带动焊枪行走，但焊接参数(焊接电流、电压、焊接速度等)均是手动控制。随着计算机的发展以及自动控制技术的日益完善，能够自动跟踪以及自动控制焊接参数的管道焊接设备(管道全位置自动焊机)也迅猛发展。到目前为止，生产全位置管道自动焊接设备的，除了美国 CRC 公司、CCI 公司、MAGNATECH 公司外，还有德国 VIETZ

公司, 荷兰 VERAWELED 公司, 英国 NOREAST 公司, 法国 POLYSOUDE、SERIMER DASA 公司, 以及加拿大 PROLINE 公司等。这些公司的设备虽然外形各具特点, 但控制方式不外乎是采用单片机或单板机控制焊接参数和人工调控焊接参数两种方法。有资料表明, CRC 公司生产的自动焊机已焊接了近 50000km 的管道, 遍布世界多个国家。德国 VIETZ 公司开发的 CWS 管道焊接设备, 自 1991 年投入使用以来, 已焊接管道 1200km。目前, 美国 CRC 公司和英国 NOREAST 公司生产的管道全位置自动焊机已在我国的“西气东输”工程上使用, 如图 1.1 所示。

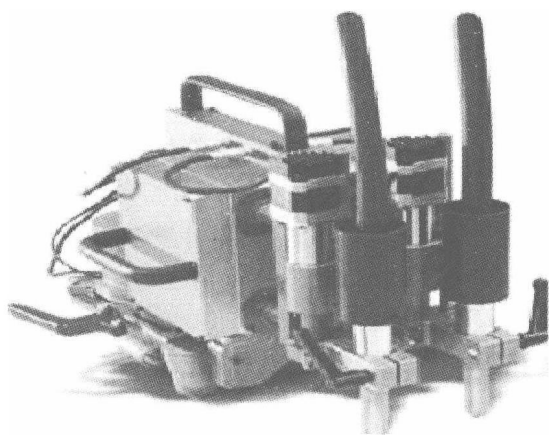


图 1.1 美国 CRC 公司生产的 P600 双焊炬管道全位置自动焊机

法国 SERIMER DASA 公司生产的 Saturnax Bug 双焊炬管道全位置自动焊机(图 1.2), 采用了风冷式焊枪、外挂推丝式送丝机构和专用的脉冲焊接电源, 计算机焊接编程控制单元和焊车运动控制单元分置, 可进行在线编程, 可完成根焊、窄间隙叠焊或宽间隙排焊口。其总体性能与 CRC 的 P500、P600 相类似。其缺点是双焊炬的摆动不能单独控制, 计算机焊接编程控制单元和焊车运动控制单元体积偏大。

国内, 清华大学潘际銮、南昌大学张华等在国内率先开发了无轨道全位置爬行式弧焊机器人系统。该系统由爬行机构、焊接系统、视觉跟踪系统以及控制系统组成, 是一种既无须轨道也无须导向的自动焊接系统。其爬行机构具有负重能力强、运动灵活等特点, 能满足机器人在大型工件上全位置爬行焊接要求。清华大学都东、陈强等人开发了长输管线环缝自动焊接装备, 该设备能根据焊接位置自动匹配焊接电流、电弧电压、焊接速度以及焊炬摆动的速度和幅度等参数, 并通过调节送丝速度实现了焊接电流的 PID 控制; 通过调整焊炬高度, 实现了电弧长度的模糊控制。该系统还具有离线编程、路径示教和记忆跟踪等功

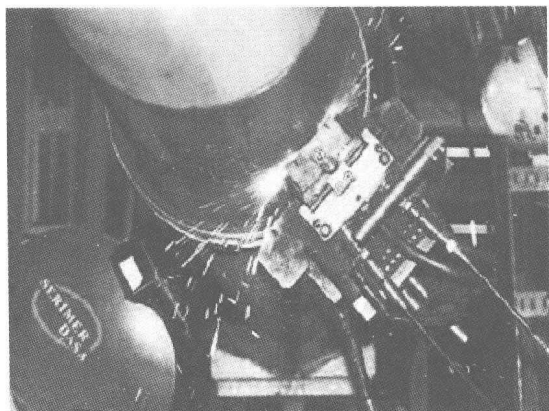


图 1.2 Saturnax Bug 双焊炬管道全位置自动焊机

能。将该系统用于非旋转管道环缝全位置焊接过程,可实现打底、填充和盖面焊接的自动控制。北京石油化工学院焦向东、蒋力培、薛龙等人研究了球罐全位置焊接机器人智能控制系统,该系统(机器人)用于球罐全位置多层自动焊接。此焊接机器人是由柔性磁轮机构直接吸附在球罐表面进行全位置自动行走与焊接,实现了无导轨自动焊接全位置焊缝与多层多道焊接的自动跟踪,已用于实际焊接生产。作者等人开发的管道全位置自动焊接操作机,解决了管道焊接生产过程中的计算机抗干扰技术,实现了双向焊接、双向送丝功能,克服了由于水、电、气等管线缠绕而存在的空转现象;在软件开发方面,根据生产实际需要,解决了管道全位置焊接生产、调试及焊接通用计算机测控软件系统规划,完成了管道全位置焊接主控计算机操作平台规划和各执行单元计算机程序模块功能合理规划。

随着焊接管在实际生活广泛应用,我国焊接管生产进入高速发展阶段,如杭州近江不锈钢管有限公司专业制造机械结构用管、流体输送用管、换热器及电热器用不锈钢管,是中国最大的汽车排气系统不锈钢管生产商;浙江久立集团是专业生产工业用不锈钢管的集团型企业,中大口径焊接钢管和小口径焊接钢管在国内占有较大份额,如图 1.3 所示,主要用于石油、化工、化学、造船、造纸、仪表、汽车、食品医药、核电、机械和海上工程等行业。但焊接管生产线都是引进日本、美国、瑞士等国家的,说明我国在管道焊接方面和国外还有较大差距,开发提高管道焊接质量辅助控制技术是我们责任;宁波镇海炼化安检公司的焊接管生产线,目前经常出现未焊透现象。主要原因是管道在运动过程中,焊缝有不规则的水平左右偏差和焊接管有变形,解决办法应根据实际生产情况,研制基于图像传感焊缝跟踪熔透控制专用系统;宁波安信煤气贮槽有限公司在 PLG 贮槽接管自动焊接系统开发遇到的接管角焊缝跟踪熔透控制问题,在行业中具有普遍性。

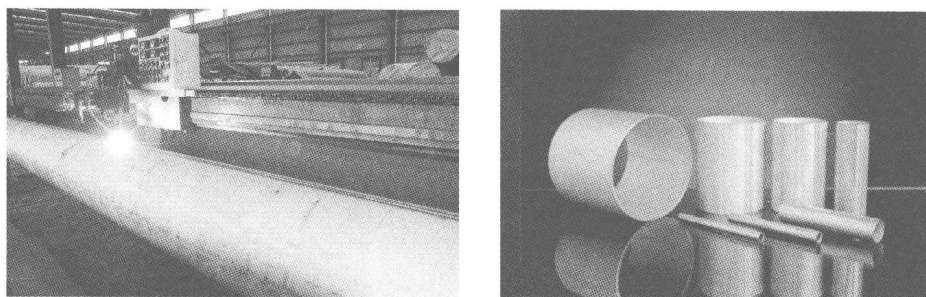


图 1.3 焊接管生产线及样品

## 1.2 焊接过程熔透状态监控研究现状

焊缝熔透状态是电弧焊及其他一切熔化焊接生产过程中最重要的焊缝几何形状及质量参数。自从 20 世纪 60 年代初美国航天工业部门首先提出焊缝熔透红外光电实时监控方法以来各国相继进行了不断的研究，至今仍是一个令人关注的课题，其核心是怎样实时监测监控熔透状态，即寻找焊缝熔透状态的相关量及其实时检测方法。综观世界各国近 40 年的探索研究，焊缝熔透状态实时监控方法主要有光电法、温度场法、熔池振荡频率法和电弧声法等。

### 1. 光电法

作为国内外研究最多，同时获得较多实际应用报道的一类焊接过程熔透状态监控方法，其主要原理是利用各种半导体光敏元件从焊缝背面或正面监测焊接熔池邻近区域的辐射场并由此间接地获取熔透状态实时监测信号。背面熔透状态监测具有监测传感器安装简单、监测信号可靠性高等优点。其不足之处在于只适合于焊件移动但电弧或焊炬固定不动的生产应用场合，对于大多数是焊件固定不动而焊炬移动的生产应用则难以采用。而正面熔透状态监测是适合于上述后一种生产应用场合的理想方法，但它难以确定简便而可靠的相关监测点位置。虽然从理论上说正面熔池周围任何一点或若干个点的温度，即辐射能量都是熔透状态的相关量，但在实时干扰条件下，寻找显函数形式的特征量即使从纯粹的热传导问题来说也是极为困难的。而实际上现在已经认识到熔池中由于电弧力、电流通过熔池时所产生的电磁收缩力以及表面张力等因素所决定的对流运动是影响熔池几何尺寸的一个更为重要的因素，因此正面监测理论建模是个极为复杂的理论和实践课题。这也是美国 WRC 于 1984 年第三次发布的当代焊接课题中，把焊接熔池动力学单独列为 12 大组中的一组的重要原因。

近十几年来,这一领域有过不少有价值的研究,但距离清晰的熔透状态控制建模仍然很遥远。如上海交通大学相关研究所及国外合作者曾对用光电或光纤光电元件从焊缝背面监测等离子弧或钨极氩弧自动焊的焊缝熔透信号及其自适应控制方法进行过系统研究,并曾在双金属锯条、不锈钢连续焊管、飞机起落架环缝、导弹壳体环角缝的熔透控制中获得成功应用。图1.4所示为等离子弧焊熔透适应控制原理图,该控制方法的关键是采用恰当传感元件连续监测焊接熔池熔透程度,并据此自动调整等离子弧焊主要能量参数——电流或速度,以获取均匀稳定的熔透质量。

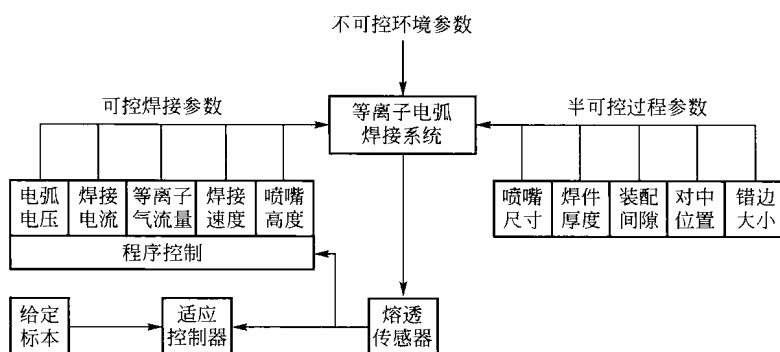


图 1.4 等离子弧焊熔透适应控制原理图

## 2. 温度场法

目前,国内外对于焊缝熔透状态监控的研究给予了足够的重视,并试图采用各种方法实现熔透状态实时控制,其中基于焊接温度场的熔透状态控制是研究的最多,也是生产实际中应用最好的一种,原因在于焊接过程熔池熔透状态总是以温度场的变化表现出来的。因此,若能直接监测焊接温度场的变化,从而达到控制熔透程度的目的是最理想的。在实际焊接过程中,由于接触式测温方法难以实现,通常是采用非接触式测温方法;而且由于实际工作条件的限制,在许多场合只能获取正面温度场信息。这样一来,利用正面温度场信息进行焊缝熔透状态控制成了焊接工作者致力于研究的重要课题。目前这方面的研究还主要局限在通过控制熔池正面后方某点温度的恒定或者是控制熔池表面热辐射量的恒定来实现整个焊缝熔透的均匀一致性。近年来,国内高等院校及有关研究结构做了不少工作,取得了一定成果,但距离实际生产应用还存在一定距离。哈尔滨工业大学李亮玉、北京工业大学陈树君、殷树言等人,应用累积原理和镜像法建立了电弧热源为高斯分布、工件为有限尺寸的三维焊接温度场解析表达式,并介绍了利用这个解析式和获取的正面温度场信息来推断熔透状态的方法,为后续基于正面温度场信息进行熔透状态的实时监控打下基础。南昌大学张华、项安等人成功研制了

螺旋管缝内焊自动跟踪与熔透控制装置,降低了工人的劳动强度,提高了生产效率和焊接质量。沈阳工业大学王蕊、邵成吉和李德元利用视觉传感对焊缝背面焊接温度场热图像进行实时监测及处理,实现了焊接过程熔透状态的有效控制,具有监测速度快、动态响应品质好等特点。上海交通大学项安和潘俊民、清华大学潘际銮等人研究了从焊接温度场中获取焊缝熔透状态信息的方法,在此基础上设计了规则自调整模糊控制器,实现了 MIG/MAG 焊的熔透状态控制,并在螺旋管缝内焊自动熔透控制中得到成功应用,解决了长期以来螺旋埋弧焊内焊熔透控制依赖人工调节的问题。图 1.5 给出了该系统工作原理框图,主要由被控对象、温度场传感器、图像卡、工控机、I/O 接口、PWM 逆变电源以及执行结构等部分组成。

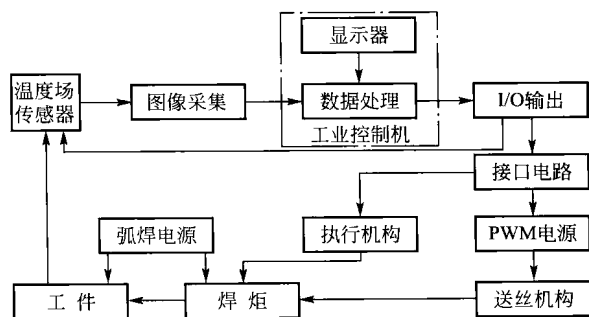


图 1.5 基于焊接温度场熔透状态控制系统工作原理框图

### 3. 熔池振荡频率法

电弧热和力作用下的焊接熔池总存在振荡,其振荡模式与熔池的几何形状、特别是焊接熔池的熔透与否紧密相关。焊接熔池中存在振荡现象是 20 世纪 70 年代开始逐渐引起人们注意的一种焊接电弧现象。最初,人们是为弄清焊缝表面波纹的均匀性及其对焊缝冶金质量影响来研究这个熔池动力学问题的。80 年代以后,人们进一步发现这一现象可以间接地用来监测熔池的熔透程度。进入 90 年代以来,美国 Vanderbilt 大学 G. E. Cook 教授、美国俄亥俄州立大学 R. W. Richardson 教授都曾以此领域研究工作作为其博士生研究论文,英国 CEBG 的 Marchwood 工程研究实验室 R. T. Deam、荷兰 Delft 工业大学材料科学和工程系 G. der Ouden 等,都对此有过专门的研究论文。这些工作表明,熔池振荡频率是振荡模式和焊缝熔透量的一个特征相关量,对其实时监测已有可能成为电弧焊熔透自适应控制的新思路和新方法。围绕怎样监测熔池振荡频率和确立频率与熔透状态的相关性,国内外已经经历了 20 年以上的研究历程。哈尔滨工业大学张九海、杨春利、王其隆等人用脉冲电流冲击熔池,使熔池产生有规律的振荡,造成弧长和电弧电压有规律的变化,监测电弧电压变化量及其变化规律,揭示了熔池振荡频率与熔

池尺寸之间有一定的对应关系。同时发现，上述规律只有在电弧静止或慢速行走时才成立。紧接着，阐述了采用熔池谐振技术进行熔透状态监控的原理，研究了其传感技术和实时控制系统(图 1.6)，利用外加同步磁场，成功地解决了电弧快速行走时熔透状态信号提取问题，并建立了较为合理的信号处理准则，找到了 TIG 焊中以熔池振荡作为信号进行焊缝熔透状态监控的新途径。

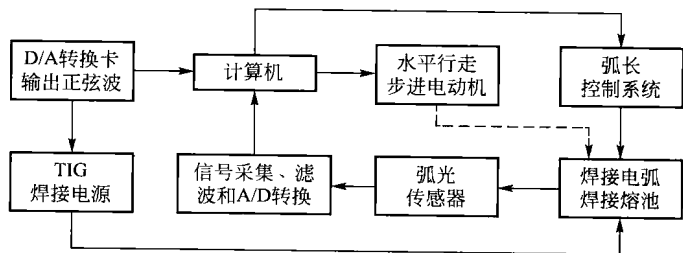


图 1.6 熔透状态控制系统工作原理图

#### 4. 电弧声法

焊接电弧声是焊接过程的伴生物之一，在实际生产中，熟练焊工往往能根据电弧声辨别熔滴过渡方式、焊接过程稳定性和飞溅大小，这说明电弧声与焊接过程具有相关性，实际电弧声所包含的信息较我们能听到的复杂，可成为用于焊接质量检测的信息源之一，但其产生机理及传播特性等许多问题还尚待研究。关于这方面，学者专家们做了大量研究，初步结果表明电弧声源于焊接电弧过程中能量水平的变化，它反映了燃弧和短路过程中空气振动的强弱程度(图 1.7)。电弧声压及其频率变化，与引起空气振动的各种因素有关，包括电弧斑点跳到、熔池形态和振荡、短路和再引弧、焊接飞溅等。但由于电弧声受焊接过程众多因素的耦合干扰作用，其产生机理、传播特性以及特征参数提取和量化等许多问题还尚待研究，因此国内外焊接电弧声的研究成果较少，以电弧声波信号为信息源的质量监测监控报道也相对较少。

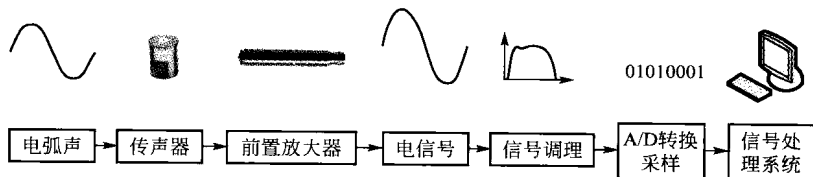


图 1.7 电弧声波信号测量流程图

早在 20 世纪 70 年代末，日本学者 Arata Yoshiaki 就对不同焊接方法的电弧声特征及其与焊接规范的关系等方面进行了研究；80 年代后期，Kashinen 和



Mueller 等提出焊接电弧的等离子体积变化会突然产生电弧声, 如果等离子体积与电弧能量成正比, 则声压为

$$S=k \frac{d(VI)}{dt}=k\left(I \frac{dV}{dt}+V \frac{dI}{dt}\right) \quad (1-1)$$

式中,  $VI$  为功率,  $V$  为电弧电压,  $I$  为电弧电流,  $k$  为常数。Ladislav 和 Jančez 等人曾研究过以 GMAW 焊接过程中的电弧声作为焊接质量在线监测的可行性。研究认为保护气体种类及焊丝的干伸长都将会对焊接电弧声产生影响。通过对焊接过程熔滴过渡所产生声音与母材微观结构变化所产生的声音进行比较发现, 由熔滴过渡引起的电弧声在整个焊接过程所产生的声音中占主导, 指出焊接电弧声的不规则变化将反应焊接过程的不稳定性, 肯定了焊接电弧声在焊接过程质量监测中的应用价值。A. F. Manz 初步研究了非熔化极、熔化极焊接、 $\text{CO}_2$  气体保护焊及电弧气爆等焊接方法的电弧声特点, 指出电弧声取决于输入电弧能量的变化。同时弧长、焊丝熔化速率、焊丝类型与尺寸、焊接电压、电流、保护气种类、焊接位置、焊接速度都将影响电弧声。澳大利亚 Saini、Floyd 等人, 在 1998 年研究了电弧声在 MAG 焊接在线质量检测中的应用, 肯定了 Manz 提出的观点, 并认为电弧声波产生于电弧能量突变。电弧、保护气及焊接设备是焊接过程中声音的主要来源, 其中与电弧相比, 保护气与设备所产生的声音远小于电弧自身所产生的声音。电弧输入能量、熔滴过渡方式和过渡速率构成了影响电弧声的三个主要因素。同时他们给出了短路过渡与喷射过渡两种过渡形式下的声波时域波形和由经典法得到的声波功率谱, 并在不同规范下作了比较, 得到了两种过渡形式下声波特征有所不同的结论, 从而为进一步分析电弧声与焊接过程的相关性奠定了实验及理论基础。

M. Cudina、Prezelj 二人以 GMAW 焊接过程中的电弧声作为研究对象, 并用其特性表征焊接过程的稳定性以及焊接质量。主要在时域范围内对焊接电流、焊接电弧声、短路过渡过程之间的对应关系进行了研究。同时建立了焊接电流与电弧声压之间的传递函数, 将焊接电流作为系统的能量输入, 焊接电弧声作为系统的能量输出, 认为电弧声波的产生与焊接电弧输入能量有关。同时他们将电弧声划分为两类: 一类为脉冲声信号; 另一类为扰动信号。脉冲声信号与电流的快速变化有关, 主要来源于电极与母材间的短路过程以及部分飞溅冲击熔池、熔化金属脱离电极、电弧的突然点燃所导致电弧周围保护气体温度的急剧上升与膨胀等, 所引起的周围气体振动。扰动信号主要来源于焊接过程中电弧的爆炸与电极、熔池的物理和几何尺寸的变化等。

国内, 兰州理工大学马跃洲、陈剑虹进行了基于电弧声信号的  $\text{CO}_2$  焊质量监控方法研究, 以短路过渡  $\text{CO}_2$  焊接过程电弧声信号为主要研究对象, 借助于现代信号分析方法, 分析了电弧声信号的时频特征及其与焊接状态的相关性。清华



大学王耀文、陈强等人对等离子弧焊接穿孔行为的声信号传感进行研究。结果表明,焊接过程中的声音信号在熔池的过渡阶段产生了较强低频振动,并与熔池的振动有关,说明声音信号的低频段分量中包含熔池穿孔状态的信息,频域分析表明,声音信号的低频段分量( $0\sim 100\text{Hz}$ ),在熔池处于不同阶段时有明显的变化,熔池处于过渡阶段时其值大,穿孔后小,未穿孔时居中。据此,设计出了声音信号的A算法,用于识别焊接过程中熔池的穿孔状态,该算法可靠性较高,为等离子弧焊接熔透质量监测及闭环控制提供了前提条件。H. P. Gu、华东理工大学刘京雷、哈尔滨工业大学陈彦宾等人,对激光焊接声信号与熔透的相关性进行了研究,发现声信号的强度和功率频谱分布与焊缝熔透具有良好的对应关系,声信号功率频谱主要集中在 $2\sim 10\text{kHz}$ 之间,并且具有明显的谱线族,随焊缝熔透的减小,声信号强度减弱,并且声信号频谱族由相对集中单一向分散多族化变化,以激光焊接过程产生的声信号特征作为传感信息,采用人工神经网络技术建立了声信号与焊缝熔透之间的关系模型。结果表明,该模型能够根据声信号特征定量地检测焊缝的熔透,为激光焊接熔透的实时检测提供一种有效的手段。

#### 5. 焊接过程熔透状态模式识别

模式识别(pattern recognition)是指对表征事物或现象的各种形式的(数值的、文字的和逻辑关系的)信息进行处理和分析,以对事物或现象进行描述、辨认、分类和解释的过程,是信息科学和人工智能的重要组成部分。焊接是一个集声、光、电、热于一体的复杂的物理、化学冶金过程,各种电弧信号(包括电弧声、弧光、焊接电流、电弧电压以及温度场等)为焊接过程熔透状态监测监控提供重要信息。利用电弧信号进行焊接过程熔透状态模式识别其目的在于获取均匀稳定的适度熔透状态,取得良好的焊缝成形质量,为下一步展开基于电弧声信号的熔透自适应监控工作提供技术支持。进行熔透状态模式识别技术路线通常为:①分析并提取信号的特征参数;②评价信号特征参数与焊接过程熔透状态之间的相关性;③构建从信号特征参数(向量)到熔透状态之间的映射模型;④通过实时信号获取熔透状态参数,进行焊接过程熔透状态的在线评价。

对电弧信号进行分析的实质是提取并利用其中包含的与熔透状态相关的有用信息,分析方法有时域分析、频域分析和时频分析等。

进行电弧信号分析时,最先接触到也是最直观的是它的时域波形。电弧信号本身就是时域信号,因而时域分析是使用最早、应用最广范围的一种分析方法。时域包括幅值域和时间域,通常用于基本参数分析、信号分割提取、预处理以及信号模式的大致分类等。这种分析方法的特点是:①表示声波信号比较直观、物理意义明确;②实现起来比较简单、运算量少;③可以得到信号的一些重要参数,如短时能量、短时平均幅度以及短时平均过零率等。通过考察焊接过程不同