

先进制造技术丛书

# 智能化焊接技术

INTELLIGENT TECHNOLOGIES  
FOR WEILDING

吴林 陈善本 等编著

国防工业出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

智能化焊接技术/吴林等编著. —北京:国防工业出版社, 2000.8

(先进制造技术丛书)

ISBN 7-118-02299-3

I. 智... II. 吴... III. 人工智能 - 应用 - 焊接  
IV. TG409

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 05283 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

三河市腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 9½ 233 千字

2000 年 8 月第 1 版 2000 年 8 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1500 册 定价: 20.00 元

---

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

96/Hc3/08

## 致 读 者

**本书由国防科技图书出版基金资助出版。**

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金**

**评审委员会**

## 国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎

秘书长 崔士义

委 员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成  
(以姓氏笔划为序)

刘 仁 朱森元 朵英贤 宋家树

杨星豪 吴有生 何庆芝 何国伟

何新贵 张立同 张汝果 张均武

张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安

侯正明 莫梧生 崔尔杰

## 《先进制造技术丛书》编委会名单

|     |     |                         |
|-----|-----|-------------------------|
| 顾 问 | 师昌绪 | 中国工程院院士,中国科学院院士、主席团顾问   |
| 主 任 | 胡壮麒 | 中国科学院金属研究所学术委员会主任,工程院院士 |
| 副主任 | 张立同 | 西北工业大学教授,工程院院士          |
|     | 徐滨士 | 装甲兵工程学院教授,工程院院士         |
|     | 雷廷权 | 哈尔滨工业大学教授,工程院院士         |
|     | 艾 兴 | 山东工业大学教授,工程院院士          |
|     | 周 济 | 华中理工大学校长,工程院院士          |
| 委 员 | 赵连城 | 哈尔滨工业大学教授,博士生导师         |
|     | 曾松岩 | 哈尔滨工业大学教授,博士生导师         |
|     | 黄树槐 | 华中理工大学教授,博士生导师          |
|     | 李庆春 | 哈尔滨工业大学教授,博士生导师         |
|     | 田锡唐 | 哈尔滨工业大学教授,博士生导师         |
|     | 王仲仁 | 哈尔滨工业大学教授,博士生导师         |
|     | 董 申 | 哈尔滨工业大学教授,博士生导师         |
|     | 吴复兴 | 北京 625 所科学技术委员会主任,研究员   |
|     | 方洪渊 | 哈尔滨工业大学材料学院副院长,博士生导师    |
|     |     | 师                       |
| 秘 书 | 王桂伟 | 哈尔滨工业大学材料学院教学秘书         |

## 序

制造业是我国国民经济的支柱产业,其增加值约占我国国内生产总值(GDP)的 40% 以上,振兴制造业是启动我国经济新高潮的杠杆,日本和美国的经验均可资借鉴,而先进制造技术是振兴制造业的系统工程中的重要组成部分之一。

先进制造技术(AMT—Advanced Manufacturing Technology)作为一个专有名词提出始于 20 世纪 80 年代末期,当时美国根据本国制造业面临的挑战与机遇,以及存在的问题进行了深刻反省,同时为了加强制造业的竞争能力和促进国民经济增长而提出先进制造技术新概念。从技术进步角度看,以计算机为中心的新一代信息技术的发展,全面推进了制造技术的飞跃发展,在不断汲取其他相关领域新技术的基础上,使创新贯穿于制造全过程,并使技术与管理相结合,不断推出新的制造模式,推动人类生产活动不断进步。

先进制造技术这一名词一经提出,立即获得世界各国的积极响应,将制造技术的发展推向新的高潮,经过 20 多年的努力,先进制造技术由于专业和学科间不断渗透、交叉、融合,技术日趋系统化、集成化,已发展成为集机械、电子、信息、材料和管理技术为一体的新兴交叉学科,可以称之为“制造工程”。

先进制造技术的核心和基础是优质、高效、低耗、清洁、无污染工艺,它是由传统的制造工艺发展起来的,并与计算机、信息、自动化、新材料及现代管理技术实现了局部或系统集成,以实现优质、高效、低耗、无污染和灵活生产,实现可持续发展。

未来先进制造技术的发展趋势是精密化、柔性化、智能化与集成化。首先设计技术不断现代化,突出反映在数值模拟与仿真以

及虚拟现实技术和产品建模理论等方面。成形制造技术向精密成形或近净成形方向发展,包括精密铸造、精密塑性成形和精密连接技术等。加工制造技术向超精密、超高速及发展新一代制造装备的方向发展。随着激光、电子束、离子束、分子束等新能源或其载体的引入,新型的高密度特种加工方法以及复合工艺不断发展,以至设计、材料应用、加工制造等专业学科界限日渐淡化,逐步趋向一体化。由于工艺模拟技术的迅速发展,也使工艺逐渐发展为工程科学。虚拟现实技术在制造业中获得日益广泛的应用。

为了适应世界知识经济时代的来临,促进先进制造技术在我国的发展,并为这一领域的科技人员提供必要的参考书,我们特地组织编写了本套《先进制造技术丛书》,希望它的出版有助于推动先进制造技术的快速进步,为我国的经济发展和国防现代化服务。

《先进制造技术丛书》编委会

2000年2月23日

## 前 言

由于焊接制造工艺具有多学科综合技术的特点,使得焊接技术能够更多更快地融入最新科学技术的成就而具有时代发展的特征。众所周知,焊接学科自诞生的半个世纪以来,一直受到诸学科最新发展的直接导引,尤其是受材料、信息学科新技术的影响,不仅导致了数十种焊接新工艺的问世,而且也使得焊接工艺操作正经历着从手工焊到自动焊,自动化、柔性化到智能化的过渡。焊接自动化、机器人化以及智能化已成为公认的发展趋势。智能化焊接技术已成为焊接界科学工作者研究的新热点。

根据作者的认识和理解,就目前研究层次和技术水平而言,智能化焊接正处在人工智能技术与焊接工艺的应用结合阶段。本书所撰著的内容应属这一范畴。

本书的绪论部分简要叙述了焊接自动化技术的发展和智能化焊接研究的概况;第二章至第四章以脉冲 GTAW 为主要对象阐述了焊接动态过程检测与建模的智能化技术及其智能控制方法,如焊接动态过程的模糊控制方法和人工神经网络控制方法;第五章阐述焊接工艺专家系统设计技术;第六章以点焊为主说明焊接质量监测与分析的智能化方法;第七章至第十章阐述机器人焊接智能化系统、机器人焊接焊缝跟踪技术、极限环境下的遥控焊接技术以及焊接柔性化技术。上述内容基本上可以反映国内外焊接智能化技术发展的现阶段水平。

本书内容大多是吴林教授和陈善本教授近期指导的博士论文的研究成果,同时也是集体劳动的结晶。吴林教授主持了本书的编撰,陈善本教授编撰第一至第四章并对全书统稿。参加本书编著的作者还有魏艳红博士(第五章)、张忠典博士(第六章)、邱涛博

士(第七章)、张炯博士(第八章)、吕伟新博士(第九章)、汪云涛博士(第十章)。赵冬斌博士、高洪明老师、研究生张勇、徐晨明等参与了部分图表编辑。钢铁博士、张广军老师、李利群老师提供了部分材料。林尚扬院士提供了第十章部分材料并审阅了全书,雷廷权院士审阅了全书的初稿并给予了修改建议,在此一并致谢。

编写本书的初衷就是及时反映焊接智能化技术研究的一些最新成果和动向,以期对焊接新技术的发展有所促进。不当或谬误之处欢迎专家和读者赐教指正。

本书的研究工作主要受国家自然科学基金重点项目 No.59635160 和面上项目 No.59575057 支持,本书出版由国防科技图书出版基金资助,谨向国家自然科学基金委员会和国防工业出版社表示衷心的感谢!

编 者

1999 年 12 月 31 日

## 内 容 简 介

本书介绍模糊控制、人工神经网络、专家系统、机器人规划、计算机视觉等人工智能技术在焊接中的应用。首先以脉冲 GTAW 动态过程为基本对象介绍智能化方法在焊接过程检测、建模与控制中的应用;然后介绍焊接工艺专家系统设计、机器人焊接智能化系统,焊接质量的监测与分析的智能化方法。最后介绍遥控焊接和焊接柔性制造技术的发展概况。

This book presents a primary direction on the artificial intelligence techniques, such as fuzzy control, artificial neural networks, expert system, welding robotic planning, computer vision and so on, and its application in the welding technology and process. First, based on the pulsed GTAW dynamic process, it is shown the intelligent methodology application of sensing, modeling and control of the welding process; and then, the book presents the designs of the welding technique expert system, the intelligent system of robotic welding, intelligent monitoring and analysis of welding quality; and last, the developing status on telecontrol welding and flexible welding manufacture technology is briefly introduced in the book.

# 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| <b>第一章 绪论</b>                   | 1  |
| 1.1 焊接自动化技术发展                   | 1  |
| 1.2 智能控制在焊接过程中的应用途径             | 4  |
| 1.3 人工智能技术及其在焊接过程中的应用           | 8  |
| <b>第二章 焊接过程检测与建模的智能化技术</b>      | 11 |
| 2.1 焊接过程传感技术                    | 11 |
| 2.1.1 红外辐射传感                    | 12 |
| 2.1.2 焊接区直接视觉传感                 | 14 |
| 2.2 脉冲 GTAW 熔池视觉传感              | 21 |
| 2.2.1 脉冲 GTAW 熔池视觉传感器硬件系统       | 21 |
| 2.2.2 熔池正反面视觉图像同时同幅传感光路系统       | 22 |
| 2.3 脉冲 GTAW 熔池视觉传感实验设计          | 26 |
| 2.3.1 熔池正反面视觉传感系统初步实验           | 26 |
| 2.3.2 熔池正反面视觉图像成像机理分析           | 30 |
| 2.4 熔池图像实时处理算法                  | 33 |
| 2.4.1 熔池图像的预处理                  | 33 |
| 2.4.2 熔池几何特征尺寸参数的提取             | 37 |
| 2.5 脉冲 GTAW 平板堆焊熔池尺寸神经网络动态模型的建立 | 43 |
| 2.5.1 熔池尺寸神经网络动态模型激励信号的选择       | 44 |
| 2.5.2 熔池尺寸神经网络动态模型训练样本的获取       | 44 |
| <b>第三章 焊接过程的模糊控制方法</b>          | 54 |
| 3.1 模糊控制系统设计                    | 54 |
| 3.1.1 模糊系统结构                    | 54 |
| 3.1.2 基本模糊控制器设计                 | 56 |

|                                          |            |
|------------------------------------------|------------|
| 3.1.3 适应性模糊控制器设计 .....                   | 63         |
| 3.2 模糊推理与控制在焊接过程中的应用 .....               | 71         |
| 3.2.1 脉冲 GTAW 对接过程模糊控制规则的提取 .....        | 71         |
| 3.2.2 脉冲 GTAW 平板堆焊模糊逻辑控制 .....           | 75         |
| 3.3 脉冲 GTAW 动态过程模糊神经网络控制方法 .....         | 83         |
| 3.3.1 脉冲 GTAW 熔宽自学习模糊神经网络控制系统方案 .....    | 83         |
| 3.3.2 模糊神经网络控制器的自学习算法 .....              | 85         |
| 3.3.3 控制方案的仿真实验结果 .....                  | 87         |
| <b>第四章 焊接过程的人工神经网络控制方法 .....</b>         | <b>91</b>  |
| 4.1 人工神经网络控制方案 .....                     | 91         |
| 4.2 脉冲 GTAW 平板堆焊神经元自学习 PSD 控制 .....      | 94         |
| 4.2.1 脉冲 GTAW 单神经元自学习 PSD 控制系统 .....     | 94         |
| 4.2.2 脉冲 GTAW 平板堆焊神经元自学习 PSD 控制器设计 ..... | 95         |
| 4.2.3 脉冲 GTAW 平板堆焊神经元自学习 PSD 控制器仿真 ..... | 97         |
| 4.2.4 脉冲 GTAW 平板堆焊神经元自学习 PSD 控制实验 .....  | 100        |
| 4.3 脉冲 GTAW 对接过程单变量自学习模糊神经网络控制 .....     | 101        |
| 4.3.1 脉冲 GTAW 对接过程模糊神经网络控制器设计 .....      | 101        |
| 4.3.2 脉冲 GTAW 对接过程模糊神经网络控制仿真 .....       | 109        |
| 4.3.3 脉冲 GTAW 对接过程模糊神经网络控制实验 .....       | 110        |
| 4.4 脉冲 GTAW 直接神经网络自学习控制方法 .....          | 119        |
| 4.4.1 不确定性对象神经网络自学习控制方案 .....            | 119        |
| 4.4.2 神经网络控制器的自学习算法 .....                | 120        |
| 4.4.3 控制方案的试验结果 .....                    | 121        |
| 4.5 三种控制器控制性能比较 .....                    | 123        |
| <b>第五章 焊接工艺设计专家系统 .....</b>              | <b>125</b> |
| 5.1 专家系统及其在焊接中的应用状况 .....                | 125        |
| 5.1.1 专家系统原理 .....                       | 125        |
| 5.1.2 焊接专家系统的发展状况 .....                  | 129        |
| 5.2 焊接工艺设计专家系统的设计 .....                  | 132        |
| 5.2.1 操作平台及语言的选择 .....                   | 132        |
| 5.2.2 知识获取及知识库维护 .....                   | 134        |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 5.2.3 推理机制及工艺设计过程             | 139        |
| 5.2.4 设计结果维护                  | 143        |
| 5.3 专家系统开发工具设计                | 143        |
| 5.3.1 总体结构设计                  | 144        |
| 5.3.2 事实库维护                   | 145        |
| 5.3.3 知识库维护                   | 146        |
| 5.3.4 目标库维护                   | 147        |
| 5.3.5 推理机设计                   | 147        |
| 5.3.6 输出结果界面设计                | 147        |
| <b>第六章 焊接质量监测与检测智能化方法</b>     | <b>149</b> |
| 6.1 点焊质量监测与控制技术的研究进展          | 149        |
| 6.2 点焊质量动态监测模型的建立             | 151        |
| 6.2.1 点焊过程中监测信息的选取            | 151        |
| 6.2.2 获取样本数据的焊接规范的设计          | 153        |
| 6.2.3 回归模型的建立                 | 157        |
| 6.2.4 动态电阻多个特征量与点焊质量之间的神经网络模型 | 162        |
| 6.3 点焊质量监测模型性能的评价及对比          | 164        |
| 6.3.1 误差分布的正态性检验              | 168        |
| 6.3.2 误差分布的均值一致性检验            | 169        |
| 6.3.3 误差分布标准偏差的显著性检验          | 169        |
| 6.3.4 模型测量误差的统计表示             | 170        |
| 6.4 基于模糊规则的点焊质量综合评判           | 171        |
| 6.4.1 点焊质量的模糊综合评判             | 171        |
| 6.4.2 软件编程                    | 175        |
| 6.5 人工智能的点焊质量多参量综合监测系统        | 176        |
| 6.5.1 监测系统的构成及原理              | 176        |
| 6.5.2 监测系统的性能                 | 178        |
| 6.6 基于神经网络的智能化超声缺陷模式识别与诊断     | 182        |
| 6.6.1 实验系统与方法                 | 183        |
| 6.6.2 特征评价与最佳特征子集             | 184        |

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| 6.6.3 基于神经网络理论的缺陷模式分类器  | 186        |
| 6.6.4 识别与诊断结果分析         | 188        |
| 6.6.5 超声检测信息的融合处理       | 188        |
| <b>第七章 机器人焊接智能化系统</b>   | <b>191</b> |
| 7.1 智能化系统的结构            | 191        |
| 7.2 机器人焊接智能化系统技术组成      | 194        |
| 7.2.1 机器人焊接任务规划软件系统设计   | 195        |
| 7.2.2 机器人焊接传感技术         | 198        |
| 7.2.3 机器人运动轨迹控制实现技术     | 200        |
| 7.2.4 焊接动态过程实时智能控制器设计   | 203        |
| 7.3 机器人焊接智能化复杂系统控制与优化技术 | 205        |
| <b>第八章 弧焊机器人接头跟踪技术</b>  | <b>207</b> |
| 8.1 视觉传感方法              | 208        |
| 8.2 电弧传感方法              | 211        |
| 8.3 激光扫描视觉传感器原理         | 215        |
| 8.3.1 光学三角测量原理及分析       | 215        |
| 8.3.2 激光扫描式视觉传感器的结构     | 216        |
| 8.3.3 低层信息处理            | 218        |
| 8.4 接头类型识别和特征参数提取       | 218        |
| 8.4.1 V型接头              | 219        |
| 8.4.2 搭接接头              | 222        |
| 8.4.3 对接接头              | 222        |
| 8.4.4 角接接头              | 225        |
| 8.5 视觉控制的弧焊机器人接头跟踪的实现   | 226        |
| 8.5.1 视觉控制的弧焊机器人系统结构与构成 | 226        |
| 8.5.2 修正方式下接头跟踪控制方法及实现  | 227        |
| <b>第九章 机器人遥控焊接技术</b>    | <b>234</b> |
| 9.1 遥控焊接的基本概念           | 234        |
| 9.2 弧焊过程中焊枪运动控制特点分析     | 236        |
| 9.2.1 手工焊接的特点           | 236        |
| 9.2.2 机器人弧焊的特点          | 237        |
| 9.2.3 遥控焊接的特点           | 238        |

|                                           |            |
|-------------------------------------------|------------|
| 9.3 遥控焊接的传感信息 .....                       | 241        |
| 9.3.1 视觉信息的传感 .....                       | 241        |
| 9.3.2 视觉信息的利用 .....                       | 243        |
| 9.3.3 焊接参数的视觉化 .....                      | 245        |
| 9.3.4 力觉信息的利用 .....                       | 246        |
| 9.4 遥控焊接的运动控制方法 .....                     | 247        |
| 9.4.1 自动控制与遥控示教 .....                     | 247        |
| 9.4.2 人工控制 .....                          | 248        |
| 9.4.3 自主控制 .....                          | 249        |
| 9.4.4 人机交互控制 .....                        | 249        |
| 9.4.5 人机共享控制 .....                        | 250        |
| 9.4.6 分布式控制 .....                         | 250        |
| 9.5 机器人遥控焊接系统的结构 .....                    | 252        |
| 9.5.1 主从系统 .....                          | 252        |
| 9.5.2 柔性遥控焊接系统 .....                      | 253        |
| 9.5.3 基于新控制方法的遥控焊接系统 .....                | 254        |
| 9.5.4 遥控焊接系统的选择 .....                     | 256        |
| <b>第十章 焊接产品柔性加工单元 WFMC 及系统 FMS .....</b>  | <b>258</b> |
| 10.1 柔性制造系统(FMS)和加工单元(FMC)的<br>一般特性 ..... | 258        |
| 10.2 焊接机器人 FMC .....                      | 261        |
| 10.3 焊接柔性生产系统(WFMS) .....                 | 264        |
| 10.3.1 焊接柔性生产系统的基本组成 .....                | 264        |
| 10.3.2 焊接柔性生产系统的生产特点及其基本要求 .....          | 266        |
| 参考文献 .....                                | 268        |

# Contents

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1 Introduction</b>                                                             | 1  |
| 1.1 Development of automatic welding technology                                   | 1  |
| 1.2 Intelligent control application in the welding process                        | 4  |
| 1.3 Artificial intelligence application in the welding process                    | 8  |
| <b>2 Intelligent techniques for sensing and modeling of welding process</b>       | 11 |
| 2.1 Sensing techniques for welding process                                        | 11 |
| 2.1.1 Sensing of infrared radiation from the welding region                       | 12 |
| 2.1.2 Immediate vision sensing of the welding region                              | 14 |
| 2.2 Vision sensing of the pulsed GTAW pool                                        | 21 |
| 2.2.1 Hardware systems of vision sensor for the pulsed GTAW pool                  | 21 |
| 2.2.2 Light line systems of vision image sensing of the face-back weld pool       | 22 |
| 2.3 Experiment design of vision sensing of the pulsed GTAW pool                   | 26 |
| 2.3.1 Preliminary experiment on the vision sensing systems of face-back weld pool | 26 |
| 2.3.2 Principle analysis of vision image of the face-back weld pool               | 30 |
| 2.4 Real-time processing algorithms for the weld pool image                       | 33 |
| 2.4.1 Pretreatment of the weld pool image                                         | 33 |