

机械工业出版社出版基金资助项目

# 智能化

陈善本 林 涛等 编著

## 焊接机器人技术

机械工业出版社出版基金资助项目

# 智能化焊接机器人技术

陈善本 林 涛等 编著

吴 林 主审



机械工业出版社

本书介绍与智能化焊接机器人关键技术研究进展的相关内容:涉及焊接机器人视觉传感的焊接环境、初始焊接位置识别与自主导引;基于直接视觉传感的焊缝跟踪;焊接熔池区视觉传感、熔池图像处理与特征提取;焊接动态过程知识提取与建模;机器人焊接熔池动态过程及其焊缝成形智能控制;智能化焊接柔性加工单元/系统(WFMC/S)集成、Petri网建模优化调度;机器人焊接柔性制造系统的多智能体协调控制;基于网络的焊接机器人远程控制技术,以及智能化焊接机器人关键技术的一部分应用实例介绍等。本书可供高等院校焊接自动化、工业机器人、机电一体化、工业过程控制、材料加工工程等专业领域的教师、研究生和高年级学生的研究与教学参考之用,也可供有关科研院所、企业从事相关领域研究和技术开发人员参考之用。

### 图书在版编目(CIP)数据

智能化焊接机器人技术/陈善本等编著. —北京:机械工业出版社, 2006.1  
ISBN 7-111-18022-4

I. 智… II. 陈… III. 焊接机器人—基本知识  
IV. TP242.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 144216 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:李建秀

责任编辑:李建秀 版式设计:冉晓华 责任校对:姚培新

封面设计:陈沛 责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2006 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm  $1/16$ ·19.75 印张·485 千字

0 001—4 000 册

定价:38.00 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) 68326294

封面无防伪标均为盗版

# 前言

传统的焊接工艺实施主要依靠手工操作和人工经验,具有环境恶劣、劳动强度高、生产效率低、产品质量不稳定的特点,难以实现高精度的焊接要求。随着计算机与自动化技术的渗透,已经由传统的手工作业逐步发展成一定规模的机械化、自动化以及机器人焊接制造。由于焊接机器人具有高效率、质量稳定、通用性强、工作可靠的优点,受到人们越来越多的重视。在焊接生产中采用机器人技术,可以提高生产率、改善劳动条件、稳定和保证焊接质量、实现小批量产品的焊接自动化。采用机器人焊接已成为焊接自动化技术现代化的主要标志。

目前,国内外大量应用的焊接机器人系统,从整体上看基本都属于示教再现型的焊接机器人。这类焊接机器人对焊接作业条件的稳定性要求严格,焊接过程中缺乏“柔性”和适应性,表现出明显的缺点。为了克服机器人焊接过程中各种不确定性因素对焊接质量的影响,提高机器人作业的智能化水平和工作的可靠性,研究探索智能化焊接机器人的关键技术已成为必需。为了改进示教再现型焊接机器人的适应功能,需要从模仿焊工观察感觉、思考决策、以及协调操作等人工智能行为入手,研究智能焊接机器人的关键技术,并发展智能型的焊接机器人,推进机器人焊接的智能化水平提高,这便是本书写作及其研究工作的初衷。

本书的内容基本上是陈善本教授近期指导的博士论文的研究工作,书中主要涉及到陈文杰、王兵、王建军、朴泳杰、朱振友、李来平、邱涛、李金泉和郭振民等的博士论文资料,郎玉友的硕士论文以及相应的引文资料。本书力图反映近几年其研究小组在智能化焊接机器人技术领域研究工作的进展状况。根据作者的认识和理解,就目前研究层次和技术水平而言,智能化焊接机器人技术与系统正处在人工智能与焊接工艺的应用结合阶段,因此本书所反映的内容应属这一范畴。同时,本书也是集体劳动的结晶。陈善本教授主持了本书的编写,撰写了第1、第2、第9章和结束语并统稿全书。参加本书编著的作者还有林涛副教授(第14章及部分章节校对和图表编辑);陈希章博士(第3章第1、3、4节、第4章第1、3、4节、第5章);朱振友博士(第3章第2节和第4章第2节);周律博士(第6章);樊重建博士(第7章第1~3和第6、7节);李来平博士(第7章第4、5节);黎文航博士(第8章);陈文杰博士(第10、13章);马国红博士(第11章);朴泳杰博士(第12章);杜全管博士、吕凤琳博士和杨列峰硕士参与了前期写作计划的部分章节撰写。

本书的初衷就是希望能够及时向世人反映智能化焊接机器人技术研究的一些最新进展,以期对焊接智能化技术的发展有所促进。就智能焊接机器人相关的理论与技术实现来说,尚有很多相关的问题需要深入研究,本书的写作目的主要在于抛砖引玉,希望借以推动这一方向研究的深入。书中不当或谬误之处欢迎专家和读者不吝赐教指正。

潘际奎院士对本书的研究工作以及成书给予了热情的关怀,林尚扬院士审阅了本书的提纲,吴林教授对本书的撰写给予了热情的鼓励和建议,籍此一并表示衷心的感谢!

本书的研究工作主要受上海市科委重点项目(021111116)支持和国家自然科学基金重点项目(No.59635160)和面上项目(No.60474036)支持,以及教育部博士点基金的支持,在此一并致谢!

著者

# 目 录

## 前言

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 第1章 绪论 .....                         | 1  |
| 1.1 智能机器人的技术范畴 .....                 | 1  |
| 1.1.1 机器人的分类 .....                   | 2  |
| 1.1.2 智能机器人技术的研究领域 .....             | 3  |
| 1.2 焊接机器人与机器人焊接技术的发展现状 .....         | 4  |
| 1.2.1 焊接机器人的分类 .....                 | 5  |
| 1.2.2 目前焊接机器人的特点 .....               | 6  |
| 1.3 机器人焊接智能化技术范畴 .....               | 7  |
| 1.4 焊接机器人智能化的主要问题 .....              | 7  |
| 1.4.1 智能机器人体系结构 .....                | 8  |
| 1.4.2 机器人焊接任务自主规划与离线编程 .....         | 9  |
| 1.4.3 焊接机器人初始焊位视觉识别与焊缝跟踪 .....       | 10 |
| 1.4.4 机器人焊接熔池动态过程的视觉传感、建模与智能控制 ..... | 11 |
| 1.4.5 智能化机器人焊接柔性制造单元/系统 .....        | 13 |
| 1.4.6 焊接机器人系统网络化与远程控制 .....          | 14 |
| 参考文献 .....                           | 15 |
| 第2章 智能焊接机器人的系统构成 .....               | 19 |
| 2.1 引言 .....                         | 19 |
| 2.2 智能焊接机器人的基本功能 .....               | 19 |
| 2.3 智能焊接机器人的主要子系统功能 .....            | 20 |
| 2.3.1 基于视觉传感的初始焊位识别与导引子系统 .....      | 20 |
| 2.3.2 基于视觉传感的焊缝跟踪子系统 .....           | 21 |
| 2.3.3 基于视觉传感的焊缝熔透实时控制子系统 .....       | 22 |
| 2.3.4 焊接机器人离线编程与仿真子系统 .....          | 22 |
| 2.3.5 机器人焊接知识库子系统 .....              | 22 |
| 2.4 智能焊接机器人系统的分层递阶智能结构 .....         | 23 |
| 2.5 智能焊接机器人系统的硬件构成 .....             | 25 |
| 2.6 智能焊接机器人系统的软件构成 .....             | 26 |
| 2.7 本章小结 .....                       | 27 |

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| 参考文献                              | 28        |
| <b>第 3 章 机器人焊接的初始焊接位置的视觉识别</b>    | <b>29</b> |
| 3.1 引言                            | 29        |
| 3.2 模板匹配法初始焊接位置的视觉识别              | 30        |
| 3.2.1 模板匹配的基本原理                   | 30        |
| 3.2.2 焊缝区域的识别                     | 32        |
| 3.2.3 动态变区域模板匹配                   | 34        |
| 3.2.4 数字图像处理技术                    | 37        |
| 3.2.5 初始焊接位置的确定                   | 37        |
| 3.3 图像特征跟踪算法研究                    | 39        |
| 3.3.1 图像特征定义及其跟踪算法研究概述            | 40        |
| 3.3.2 一种改进的 SSD 图像特征跟踪算法          | 43        |
| 3.3.3 图像特征跟踪算法实验                  | 45        |
| 3.4 本章小结                          | 46        |
| 参考文献                              | 47        |
| <b>第 4 章 基于视觉信息的机器人焊接初始焊接位置导引</b> | <b>48</b> |
| 4.1 引言                            | 48        |
| 4.2 基于主动单目立体视觉初始焊接位置的导引           | 48        |
| 4.2.1 视觉系统的标定                     | 48        |
| 4.2.2 焊接机器人的手眼关系标定                | 53        |
| 4.2.3 焊接机器人的立体视觉模型                | 54        |
| 4.2.4 初始焊接位置的空间定位                 | 56        |
| 4.2.5 初始焊接位置的导引                   | 58        |
| 4.3 基于视觉伺服的初始焊接位置导引               | 62        |
| 4.3.1 动态估算图像雅可比矩阵的无标定视觉伺服控制方法     | 62        |
| 4.3.2 最大条件数法对无标定视觉伺服控制方法的改进       | 64        |
| 4.3.3 初始焊位导引控制算法的系统实验验证           | 68        |
| 4.4 本章小结                          | 79        |
| 参考文献                              | 79        |
| <b>第 5 章 焊接工件与焊缝曲线的视觉识别计算</b>     | <b>81</b> |
| 5.1 引言                            | 81        |
| 5.2 焊缝边缘特征提取                      | 82        |
| 5.2.1 基于 Zernike 矩亚像素边缘提取的改进算法    | 82        |
| 5.2.2 基于 Zernike 矩的直线提取算法         | 88        |
| 5.2.3 焊缝边缘提取系统的设计                 | 89        |
| 5.3 弧焊机器人手眼关系标定和摄像机标定             | 91        |

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 5.3.1 摄像机光心的标定 .....                 | 91         |
| 5.3.2 弧焊机器人手眼关系的标定 .....             | 92         |
| 5.3.3 标定实验 .....                     | 93         |
| 5.4 弧焊机器人立体视觉模型分析 .....              | 94         |
| 5.4.1 模型的几何原理 .....                  | 95         |
| 5.4.2 模型的可视范围 .....                  | 96         |
| 5.4.3 模型误差 .....                     | 98         |
| 5.5 获取焊缝空间位置信息的匹配算法 .....            | 99         |
| 5.5.1 直线的整体匹配技术 .....                | 99         |
| 5.5.2 基于极线的立体匹配 .....                | 101        |
| 5.5.3 匹配方法 .....                     | 102        |
| 5.6 获取焊缝空间位置信息实验 .....               | 104        |
| 5.6.1 弧焊机器人焊缝空间位置信息获取系统硬件组成 .....    | 104        |
| 5.6.2 实验结果 .....                     | 105        |
| 5.7 本章小结 .....                       | 108        |
| 参考文献 .....                           | 109        |
| <b>第6章 基于视觉信息的机器人焊接的自主焊缝跟踪 .....</b> | <b>110</b> |
| 6.1 引言 .....                         | 110        |
| 6.1.1 焊缝跟踪过程中使用的传感器 .....            | 110        |
| 6.1.2 机器人视觉焊缝跟踪发展现状 .....            | 112        |
| 6.2 机器视觉及其图像处理方法 .....               | 113        |
| 6.3 LAIWR 系统伺服双目视觉传感器设计 .....        | 114        |
| 6.4 非起弧条件下的焊缝轨迹规划和摄像机的取像位置规划 .....   | 116        |
| 6.4.1 试验装置及焊缝轨迹规划方法 .....            | 116        |
| 6.4.2 焊缝图像处理的基本过程 .....              | 117        |
| 6.4.3 标定和特征提取 .....                  | 118        |
| 6.4.4 机器人的控制策略 .....                 | 120        |
| 6.4.5 焊缝轨迹规划和摄像机取像角度规划的试验结果 .....    | 123        |
| 6.5 起弧条件下焊缝视觉跟踪 .....                | 124        |
| 6.6 本章小结 .....                       | 126        |
| 参考文献 .....                           | 126        |
| <b>第7章 机器人焊接过程熔池动态特征参数的提取 .....</b>  | <b>128</b> |
| 7.1 引言 .....                         | 128        |
| 7.2 焊接熔池动态过程视觉传感系统设计 .....           | 130        |
| 7.2.1 熔池正反面视觉传感光路系统 .....            | 130        |
| 7.2.2 熔池正反面同时同幅图像获取 .....            | 131        |
| 7.2.3 熔池正反面典型图像 .....                | 134        |

|                                           |            |
|-------------------------------------------|------------|
| 7.3 铝合金脉冲 GTAW 熔池二维视觉信息提取 .....           | 134        |
| 7.3.1 熔池图像分类 .....                        | 135        |
| 7.3.2 铝合金 GTAW 熔池图像数据特征分析 .....           | 136        |
| 7.3.3 非退化图像处理 .....                       | 136        |
| 7.3.4 退化图像复原 .....                        | 139        |
| 7.3.5 完整的图像处理流程 .....                     | 140        |
| 7.4 脉冲 GTAW 熔池表面三维信息提取 .....              | 141        |
| 7.4.1 从阴影恢复形状方法的比较 .....                  | 141        |
| 7.4.2 熔池表面反射图建模 .....                     | 142        |
| 7.4.3 反射图方程的求解 .....                      | 146        |
| 7.5 熔池表面高度的计算及验证 .....                    | 152        |
| 7.5.1 低碳钢典型熔池表面高度计算结果及试验验证 .....          | 153        |
| 7.5.2 不锈钢典型熔池表面高度计算结果及试验验证 .....          | 156        |
| 7.5.3 铝合金典型熔池表面高度计算结果及试验验证 .....          | 159        |
| 7.6 智能机器人铝合金脉冲 GTAW 过程熔池图像传感与特征参数提取 ..... | 163        |
| 7.6.1 智能机器人系统中图像获取与处理 .....               | 163        |
| 7.6.2 观测方向变化对熔池特征参数获取的影响 .....            | 164        |
| 7.7 本章小结 .....                            | 165        |
| 参考文献 .....                                | 166        |
| <b>第 8 章 弧焊熔池动态过程的知识建模方法 .....</b>        | <b>167</b> |
| 8.1 引言 .....                              | 167        |
| 8.2 基于粗糙集理论的知识建模方法 .....                  | 168        |
| 8.2.1 知识模型的概念 .....                       | 168        |
| 8.2.2 粗糙集建模方法的主要步骤 .....                  | 169        |
| 8.2.3 粗糙集建模方法的关键算法 .....                  | 175        |
| 8.3 开环系统铝合金脉冲 TIG 焊动态过程建模 .....           | 178        |
| 8.3.1 焊接知识模型的获得 .....                     | 178        |
| 8.3.2 焊接知识模型的验证 .....                     | 180        |
| 8.4 闭环系统铝合金脉冲 TIG 焊动态过程建模 .....           | 182        |
| 8.4.1 PID 控制器作用下的知识建模 .....               | 182        |
| 8.4.2 最小方差自适应控制器作用下的知识建模 .....            | 185        |
| 8.4.3 开环和闭环情况下的知识模型比较 .....               | 187        |
| 8.5 本章小结 .....                            | 187        |
| 参考文献 .....                                | 188        |
| <b>第 9 章 机器人焊接熔池动态特征的实时控制方法 .....</b>     | <b>189</b> |
| 9.1 引言 .....                              | 189        |
| 9.2 焊接熔池动态过程与焊缝成形的实时控制方法 .....            | 189        |

|                                                 |            |
|-------------------------------------------------|------------|
| 9.2.1 焊接熔池动态过程的模糊控制方法 .....                     | 189        |
| 9.2.2 焊接熔池动态过程的人工神经网络控制方法 .....                 | 190        |
| 9.2.3 焊接熔池动态过程的专家系统等多种控制方法结合应用 .....            | 190        |
| 9.3 铝合金脉冲 GTAW 熔池动态过程与焊缝成形实时控制 .....            | 191        |
| 9.3.1 铝合金脉冲 GTAW 焊接过程时变模型在线辨识 .....             | 191        |
| 9.3.2 铝合金脉冲 GTAW 背面熔宽 PID 控制 .....              | 192        |
| 9.3.3 铝合金脉冲 GTAW 焊接动态过程自适应控制 .....              | 197        |
| 9.4 基于视觉传感的机器人焊接熔池与焊缝成形实时控制 .....               | 205        |
| 9.4.1 基于视觉传感的机器人焊接过程控制系统 .....                  | 205        |
| 9.4.2 机器人焊接动态过程控制方案 .....                       | 208        |
| 9.4.3 机器人脉冲 GTAW 熔池动态过程实时控制验证试验 .....           | 211        |
| 9.5 本章小结 .....                                  | 216        |
| 参考文献 .....                                      | 216        |
| <b>第 10 章 智能化焊接机器人系统集成与通信管理 .....</b>           | <b>219</b> |
| 10.1 引言 .....                                   | 219        |
| 10.2 智能化焊接机器人系统集成 .....                         | 219        |
| 10.2.1 焊接加工过程信息流特征描述 .....                      | 220        |
| 10.2.2 系统集成通信的硬件实现 .....                        | 221        |
| 10.2.3 系统集成通信规范定义及流程 .....                      | 221        |
| 10.2.4 基于分级递阶结构的智能化焊接机器人系统集成 .....              | 229        |
| 10.3 中央监控管理平台 .....                             | 229        |
| 10.4 系统集成控制实验 .....                             | 232        |
| 10.4.1 实验工艺条件 .....                             | 232        |
| 10.4.2 智能化焊接机器人初始焊接位置引导实验 .....                 | 232        |
| 10.4.3 智能化焊接机器人焊缝视觉自动跟踪实验 .....                 | 232        |
| 10.4.4 自适应神经网络——PID 熔透控制实验 .....                | 233        |
| 10.5 本章小结 .....                                 | 233        |
| 参考文献 .....                                      | 233        |
| <b>第 11 章 智能焊接机器人柔性加工系统的 Petri 网建模与控制 .....</b> | <b>234</b> |
| 11.1 引言 .....                                   | 234        |
| 11.2 柔性制造系统 Petri 网模型的基本概念 .....                | 235        |
| 11.2.1 Petri 网简介 .....                          | 235        |
| 11.2.2 Petri 网定义 .....                          | 235        |
| 11.3 智能焊接机器人柔性加工单元 WFCM 的 WAPN 模型 .....         | 236        |
| 11.3.1 智能焊接机器人柔性加工单元特点 .....                    | 236        |
| 11.3.2 WFCM 自动 Petri 网建模 .....                  | 237        |
| 11.4 局部自主智能焊接机器人系统的 WTCPN 模型 .....              | 243        |

|                                                 |            |
|-------------------------------------------------|------------|
| 11.4.1 硬件系统 .....                               | 243        |
| 11.4.2 系统 WTCPN 模型 .....                        | 244        |
| 11.4.3 模型性能分析 .....                             | 246        |
| 11.5 基于 Petri 网模型的 WFCM 和 LAIWR 系统的调度与控制 .....  | 248        |
| 11.5.1 智能化焊接弧焊机器人单元 WFCM 系统模型的调度控制 .....        | 248        |
| 11.5.2 局部自主智能焊接机器人系统 LAIWR 的调度控制 .....          | 248        |
| 11.5.3 基于 LAIWR 为核心的三机器人 PN 模型及控制 .....         | 250        |
| 11.6 WTCPN 模型系统和 MTCPN 模型系统仿真 .....             | 253        |
| 11.7 本章小结 .....                                 | 254        |
| 参考文献 .....                                      | 255        |
| <b>第 12 章 焊接柔性制造系统的多智能体协调控制 .....</b>           | <b>257</b> |
| 12.1 引言 .....                                   | 257        |
| 12.2 多智能体系统及其协调协作技术 .....                       | 257        |
| 12.2.1 智能体与多智能体系统 .....                         | 257        |
| 12.2.2 智能体模型及多智能体系统结构 .....                     | 258        |
| 12.2.3 多智能体的协作 .....                            | 260        |
| 12.2.4 多智能体的联合意图 .....                          | 261        |
| 12.2.5 基于时间约束联合意图的协作模型 .....                    | 261        |
| 12.2.6 多智能体技术在柔性制造系统中的应用 .....                  | 262        |
| 12.3 基于多智能体协作技术的焊接柔性制造单元系统 .....                | 262        |
| 12.3.1 焊接柔性制造单元焊接生产过程的任务描述 .....                | 262        |
| 12.3.2 焊接柔性制造单元多智能体控制系统的结构 .....                | 264        |
| 12.3.3 焊接柔性制造单元多智能体协作任务规划及分配过程 .....            | 267        |
| 12.3.4 焊接柔性制造单元多智能体协作任务求解过程 .....               | 267        |
| 12.3.5 焊接柔性制造单元多智能体监控系统的实现 .....                | 269        |
| 12.4 基于多智能体系统的焊接柔性制造单元系统的实现 .....               | 273        |
| 12.4.1 基于多智能体协作控制的激光焊缝跟踪控制 .....                | 274        |
| 12.4.2 基于多智能体协作控制的焊接熔池熔透控制 .....                | 274        |
| 12.4.3 基于多智能体协作控制的多机器人协调运动轨迹控制 .....            | 276        |
| 12.5 本章小结 .....                                 | 276        |
| 参考文献 .....                                      | 277        |
| <b>第 13 章 基于网络的机器人焊接系统远程控制技术 .....</b>          | <b>279</b> |
| 13.1 引言 .....                                   | 279        |
| 13.2 基于 CORBA-CGI 的 LAIWR 机器人远程控制 .....         | 279        |
| 13.2.1 基于 CORBA-CGI 的 LAIWR 远程控制的原理 .....       | 279        |
| 13.2.2 基于 CORBA-CGI 的 LAIWR 机器人远程控制硬件系统配置 ..... | 279        |
| 13.2.3 基于 CORBA-CGI 的 LAIWR 远程控制软件系统结构及开发 ..... | 281        |

|                                                       |            |
|-------------------------------------------------------|------------|
| 13.3 基于 CLI-IGRIP-IWRSVR 的 LAIWR 远程控制 .....           | 283        |
| 13.3.1 基于 CLI-IGRIP-IWRSVR 的 LAIWR 远程控制原理 .....       | 283        |
| 13.3.2 基于 CLI-IGRIP-IWRSVR 的 LAIWR 远程控制硬件系统配置 .....   | 285        |
| 13.3.3 基于 CLI-IGRIP-IWRSVR 的 LAIWR 远程控制运动通道组件开发 ..... | 285        |
| 13.4 焊接机器人远程控制实验 .....                                | 287        |
| 13.5 远程控制方法的多机器人系统扩展 .....                            | 289        |
| 13.6 网络传输时延特性的分析及解决办法 .....                           | 291        |
| 13.6.1 延时及其不确定性产生的原因分析 .....                          | 291        |
| 13.6.2 减少时延和提高实时性的措施 .....                            | 291        |
| 13.7 两种远程控制方法的比较 .....                                | 292        |
| 13.8 焊接机器人远程监控管理功能 .....                              | 293        |
| 13.9 本章小结 .....                                       | 293        |
| 参考文献 .....                                            | 293        |
| <b>第 14 章 智能化焊接机器人关键技术应用实例 .....</b>                  | <b>295</b> |
| 14.1 引言 .....                                         | 295        |
| 14.2 背景和需求 .....                                      | 295        |
| 14.3 应用实例 .....                                       | 297        |
| 14.4 应用前景 .....                                       | 301        |
| 参考文献 .....                                            | 301        |
| <b>结束语 .....</b>                                      | <b>302</b> |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 智能机器人的技术范畴

智能机器人的发展史可以追溯到 20 世纪 20 年代, 1920 年捷克作家 Karel Capek 出版了一本科幻小说《Rossum's Universal Robots》, 书中叙述了一家公司发明并制造了一批形状像人类的机器, 能听命于人并代替人的日常劳动, 这些机器竟然能像人一样富有感情。Karel Capek 为这些人造劳动者取名为捷克语 Robota, 意为“苦力”或“劳役”, 英语 Robot 一词由此产生。依据各类科学幻想作品“人形机器”的概念, 中国大陆科技界将 Robot 一词翻译为“机器人”以至流行。

人形 Robot 的产生充分表明了人类对先进生产工具的创造性想象和追求。人们期望创造出能实现人的肢体、感官以及智能功能, 并能自主地完成人类某些工作的通用、灵活的机器。因此出现了机器人学与机器人技术的研究领域<sup>[1~8]</sup>。

1960 年美国研制出了第一台机器人, 命名为“Unimate”(意为“万能自动”)机器人, 后又出现了型号为“Versatran”(意为“多才多艺”)机器人。这两种型号的机器人以“示教再现”的方式在汽车生产线上成功地代替工人进行传送、焊接、喷漆等作业, 机器人在工业生产中表现出来的效益、可靠性、灵活性为世人瞩目。迄今机器人已达上百种, 已从起初的制造业扩展到军事、服务、娱乐等各行各业, 作业范围延伸到水下、空间、越野、核环境、救灾以及恐怖环境等, 已逐步实践着人们对机器人取代人类从事精确、疲劳、危险的劳作的理念和计划<sup>[3~11]</sup>。

机器人已被公认为是现代科学技术的典型代表之一。20 世纪 70 年代以来, 工业机器人的成功应用推动了机器人技术与机器人产业蓬勃发展。根据近几年一个世界机器人的数量统计报告<sup>[11]</sup>: 到 2000 年底, 工业机器人的累计销售总数约为 120 万台, 除去早期投入使用的机器人退役后, 2000 年底全世界实际在役的工业机器人数量约为 75 万台。2000 年装备机器人约 98700 台, 预测 2001~2004 年每年装机数量约在 10~13 万之间, 2004 年底全世界在役的工业机器人总数预计约为 100 万台。日本机器人约占世界的 40%, 美国约占 14%, 德国约占 14%, 意大利约占 6%, 法国约占 3%, 整个欧洲约占 31%。除了工业机器人, 还有各类专用机器人、服务与娱乐机器人等出现。据 2000 年底的统计: 全世界约装备了 3000 台水下机器人, 2200 台施工机器人, 1500 台医疗机器人, 400 台清洁机器人, 600 台挤奶机器人, 其他机器人 1400 台。

在人类现代化生产、生活中, 已出现了各种类型的机器人参与, 但目前的机器人与原本初衷的“Robot”含义尚出入很大。现行的工业机器人不过是柔性机械手, 既不具备人的外形, 也尚不具有完备的人的肢体运动功能, 对于人的智能的模拟更是简单有限, 它们的特点仍是像机器一样, 长于重复简单、乏味的动作而顺从人的意志而不知疲倦。在服务、军事及更广泛的领域, 机器人的产品可能根本不去模拟人而是模拟动物的形状与功能。预计在近

10年中专用机器人和服务机器人将有大幅度的增长,各类新型的机器人也必将采用越来越多的智能化技术。柔性化与智能化将是未来机器人追求的主要目标。这也代表着人类发展机器人技术的初衷<sup>[1,3,8,12]</sup>。

### 1.1.1 机器人的分类

目前在工业产业、军事、服务、娱乐等领域有各种形式的机器人,可以根据机器人结构形式、功能、环境和行业的不同有各种分类标准和形式<sup>[26,34]</sup>。

对工业机器人,基本上可以根据机器人的结构、运动与控制方式分类。

(1) 按结构坐标系特点来分,工业机器人可分为以下几类:

1) 直角坐标型。直角坐标型机器人的结构和控制方案与机床类似,其到达空间位置的三个运动( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ )是由直线运动构成,运动方向互相垂直,其末端操作器的姿态调节由附加的旋转机构实现。这种形式的机器人优点是运动学模型简单,各轴线位移分辨率在操作容积内任一点上均为恒定,控制精度容易提高;缺点是机构较庞大,工作空间小,操作灵活性较差。简易和专用焊接机器人常采用这种形式。

2) 圆柱坐标型。圆柱坐标型机器人在基座水平转台上装有立柱,水平臂可沿立柱作上下运动并可在水平方向伸缩。这种结构方案的优点是末端操作器可获得较高速度,缺点是末端操作器外伸离开立柱轴心愈远,其线位移分辨率愈低。

3) 球坐标型。球坐标型机器人采用同一分辨率的码盘检测角位移时,伸缩关节的线位移分辨率恒定,但转动关节反映在末端操作器上的线位移分辨率则是个变量,增加了控制系统的复杂性。与圆柱坐标结构相比较,这种结构形式更为灵活。

4) 全关节型。全关节型机器人的结构类似人的腰部和手部,其位置和姿态全部由旋转运动实现。其特点是机构紧凑,灵活性好,占地面积小,工作空间大,可获得较高的末端操作器线速度;其缺点是运动学模型复杂,高精度控制难度大,空间线位移分辨率取决于机器人手臂的位姿。目前焊接机器人大多采用全关节型的结构形式。

特种机器人的运动形式多种多样,如爬行、飞行与潜水型机器人等。

(2) 根据受控运动方式,工业机器人可分为以下几类:

1) 点位控制(PTP)型。机器人受控运动方式为自一个点位目标移向另一个点位目标,只在目标点上完成操作。要求机器人在目标点上有足够的定位精度,相邻目标点间的运动方式之一是各关节驱动机以最快的速度趋近终点,各关节视其转角大小不同而到达终点有先有后;另一种运动方式是各关节同时趋近终点,由于各关节运动时间相同,所以角位移大的运动速度较高。点位控制型机器人主要用于点焊作业。

2) 连续轨迹控制(CP)型。机器人各关节同时作受控运动,使机器人终端按预期的轨迹和速度运动,为此各关节控制系统需要实时获取驱动机的角位移和角速度信号。连续控制主要用于弧焊机器人。

(3) 按驱动方式分,焊接机器人可分为以下几类:

1) 气压驱动。气压驱动机器人使用压力通常在 $0.4 \sim 0.6\text{MPa}$ ,最高可达 $1\text{MPa}$ 。气压驱动的主要优点是气源方便(一般工厂都由压缩空气站供应压缩空气),驱动系统具有缓冲作用,结构简单,成本低,易于保养;主要缺点是功率质量比小,装置体积大,定位精度不高。气压驱动机器人适用于易燃、易爆和灰尘大的场合。

2) 液压驱动。液压驱动机器人系统的功率质量比大, 驱动平稳, 且系统的固有效率高、快速性好, 同时液压驱动调速比较简单, 能在很大范围内实现无级调速; 其主要缺点是易漏油, 这不仅影响工作稳定性与定位精度, 而且污染环境, 液压系统需配备压力源及复杂的管路系统, 因而成本也较高。液压驱动多用于要求输出力较大、运动速度较低的场合。

3) 电气驱动。电气驱动机器人是利用各种电动机产生的力或转矩, 直接或经过减速机构去驱动负载, 以获得要求的机器人运动。由于具有易于控制, 运动精度高, 使用方便, 成本低廉, 驱动效率高, 不污染环境的诸多优点, 电气驱动是最普遍、应用最多的驱动方式。电气驱动又可细分为步进电动机驱动、直流电动机驱动、无刷直流电动机驱动和交流伺服电动机驱动等多种方式。后者有着最大的转矩质量比, 由于没有电刷, 其可靠性极高, 几乎不需任何维护。20 世纪 90 年代后生产的机器人大多采用这种驱动方式。

(4) 根据机器人的用途、对象又可划分为:

1) 工业机器人。包括点焊机器人、弧焊机器人、装配机器人、搬运机器人、喷漆机器人、机器人等。

2) 服务机器人、娱乐机器人、导游机器人、运动机器人、医用机器人、农业机器人、军用机器人。

3) 特种环境机器人。如空间、核环境和水下机器人等。

(5) 现代机器人从技术角度可以作如下划分:

1) 第一代“示教再现”型工业机器人。“示教再现”型工业机器人是将作业的各种操作要求通过示教盒或示教手柄等手段, 教给机器人完成一次, 机器人则将示教的动作要求记忆到存贮器后, 再让机器人根据指令重复再现示教时的动作。如果更换任务, 则需要重新示教。这种机器人特点是具有存贮记忆示教并高精度机械多次重复动作的功能。因此, 目前在工业生产中示教再现型工业机器人具有广泛的应用。

2) 第二代基于某种传感信息的离线编程机器人。利用某种传感器获得的环境和作业信息进行机器人编程, 以改善示教再现型机器人的对环境适应能力。

3) 第三代智能机器人: 基于各种传感器能感知环境、通过高级智能计算能自主决策和灵活运动的类似人的思维与动作的高级机器人。

关于智能机器人的定义目前并无严格统一的文字定义表述。一般来说, 我们可以认同智能机器人的含义是指具有一定类似人类感知、思考、决策以及自主执行任务的机器的概念, 并不影响我们对智能机器人技术的研究和探讨。

### 1.1.2 智能机器人技术的研究领域

随着机器人技术的发展, 人们期望机器人能够在更多的领域取代人的工作。智能机器人面临的环境通常是未知的、复杂的和变化的, 智能机器人要完成的任务也越来越复杂和困难。对于智能机器人理论和技术研究的方法: 模仿人类行为进化的演化移动机器人; 根据行为准则的行为分析机器人。未来智能机器人的发展取决于如何增强机器人对外部环境变化的适应能力, 要求机器人具有信息获取、数据处理、知识积累、学习与判断能力。要求智能机器人一般具有一定的感觉、学习、思维、决策、控制、操作与运动等功能。机器人应该具有多重传感器, 对图像、声音以至文字、语言具有识别和输出功能, 实现人机对话, 具有收集信息、自主决策、规划任务以及控制执行功能。

目前智能机器人的技术范畴大致包括如下一些方向<sup>[3~8,12~19]</sup>：

- 1) 智能机器人的结构与形式设计。
- 2) 环境识别与视觉等感觉的智能传感技术。
- 3) 语音识别与人机交互技术、智能人机接口。
- 4) 导航与定位、路径与任务规划、虚拟现实与仿真技术。
- 5) 自主导引与柔性运动智能控制技术。
- 6) 多机器人的协调作业与智能控制技术。
- 7) 针对作业过程的智能机器人控制技术。
- 8) 机器学习、优化决策等智能控制软计算方法。
- 9) 智能机器人系统集成与制造技术。
- 10) 机器人网络化与远程控制技术。

智能机器人的关键技术是人工智能。随着科学技术的不断发展，根据智能机器人的工作环境、功能要求，智能机器人的技术领域范畴也会有相应的深化。

## 1.2 焊接机器人与机器人焊接技术的发展现状

随着先进制造技术的发展，实现焊接产品制造的自动化、柔性化与智能化已成为必然趋势<sup>[19~30]</sup>。目前，采用机器人焊接已成为焊接自动化技术现代化的主要标志。焊接机器人由于具有通用性强、工作可靠的优点，受到人们越来越多的重视。在焊接生产中采用机器人技术，可以提高生产率、改善劳动条件、稳定和保证焊接质量、实现小批量产品的焊接自动化。

焊接机器人突破了焊接刚性自动化的传统方式，开拓了一种柔性自动化生产方式。刚性自动化设备通常都是专用的，只适用于中、大批量产品的自动化生产，因而在中、小批量产品的焊接生产中，手工焊仍是主要的焊接方式，而焊接机器人使小批量产品自动化焊接生产成为可能。比如目前大量应用的示教再现型机器人，完成一项焊接任务只需要人给它做一次示教，随后其即可精确地再现示教的每一步操作。如果机器人去做另一项工作，无须改变任何硬件，只要对它再做一次示教即可。因此，在一条焊接机器人生产线上，可同时自动生产若干种焊件。

从 20 世纪 60 年代诞生和发展到现在，焊接机器人的研究经历了三个阶段，即示教再现阶段、离线编程阶段和自主编程阶段。随着计算机控制技术的不断进步，使焊接机器人由单一的单机示教再现型向多传感、智能化的柔性加工单元（系统）方向发展。

目前，国内外大量应用的弧焊机器人系统从整体上看基本都属于示教再现型的焊接机器人。由于焊接路径和焊接参数是根据实际作业条件预先设置的，在焊接时缺少外部信息传感和实时调整控制的功能，这类弧焊机器人对焊接作业条件的稳定性要求严格，焊接过程中缺乏“柔性”和适应性，表现出明显的缺点。在实际焊接过程中，焊接条件是经常变化的，如加工和装配上的误差会造成焊缝位置和尺寸的变化，焊接过程中工件受热及散热条件改变会造成焊道变形和熔透不均。为了克服机器人焊接过程中各种不确定性因素对焊接质量的影响，提高机器人作业的智能化水平和工作的可靠性，要求弧焊机器人系统不仅能实现空间焊缝的自动实时跟踪，而且还能实现焊接参数的在线调整和焊缝质量的实时控制，即所谓的焊

接机器人焊接过程的自主化和智能化。

譬如,模仿焊工观察操作的行为,通过采用视觉传感方式,将初始焊位导引、焊缝跟踪及焊接熔池的熔透实时控制结合起来,可以完成诸如焊前的初始焊接位置寻找、导引,焊接过程中的焊缝跟踪及熔透的传感及控制等功能,使焊接机器人的智能化水平得到较大的提高,这对于焊接机器人智能化发展及应用具有一定的现实意义。同时,具有一定智能功能的机器人系统将推动焊接机器人的网络化远程制造和监控技术的发展。

### 1.2.1 焊接机器人的分类

焊接机器人是一个机电一体化的设备,可以按用途、结构、受控运动方式、驱动方法等观点对其进行分类。

按用途来分,焊接机器人可分为以下两类:

(1) 弧焊机器人 由于弧焊工艺早已在诸多行业中得到普及,弧焊机器人在通用机械、金属结构等许多行业中得到广泛运用。弧焊机器人是包括各种电弧焊附属装置在内的焊接系统,而不只是一台以规划的速度和姿态携带焊枪移动的单机,因而对其性能有着特殊的要求。在弧焊作业中,焊枪应跟踪工件的焊道运动,并不断填充金属形成焊缝。因此运动过程中速度的稳定性和轨迹精度是两项重要的指标。一般情况下,焊接速度约取  $5 \sim 50\text{mm/s}$ , 轨迹精度约为  $\pm 0.2 \sim 0.5\text{mm}$ 。由于焊枪的姿态对焊缝质量也有一定影响,应此希望在跟踪焊道的同时,焊枪姿态的可调范围尽量大。其他一些基本性能要求如下:

- 1) 设定焊接条件(电流、电压、速度等)。
- 2) 摆动功能。
- 3) 坡口填充功能。
- 4) 焊接异常功能检测。
- 5) 焊接传感器(起始焊点检测、焊道跟踪)的接口功能。

对于不同的焊接工件、工艺和质量要求,弧焊机器人在焊接过程中的控制可能相当复杂,因此也是智能化技术应用的主要对象。

(2) 点焊机器人 汽车工业是点焊机器人系统一个典型的应用领域,在装配每台汽车车体时,大约 60% 的焊点是由机器人完成。最初,点焊机器人只用于增强焊作业(已以拼接好的工件上增加焊点),后来为了保证拼接精度,又让机器人完成定位焊作业。这样,点焊机器人逐渐被要求有更全的作业性能,具体来说有:

- 1) 安装面积小,工作空间大。
- 2) 快速完成小节距的多点定位(例如每  $0.3 \sim 0.4\text{s}$  移动  $30 \sim 50\text{mm}$  节距后定位)。
- 3) 定位精度高( $\pm 0.25\text{mm}$ ),以确保焊接质量。
- 4) 持重大( $500 \sim 1000\text{N}$ ),以便携带内装变压器的焊钳。
- 5) 内存容量大,示教简单,节省工时。
- 6) 点焊速度与生产线速度相匹配,同时安全可靠性好。

由于点焊机器人的运动轨迹、焊接过程相对简单,本书不作深入探讨。在后续章节中,如无特别说明,本书智能化技术均是针对弧焊机器人展开的。

从广义上讲,目前的各类焊接专机都可纳入焊接机器人的分类,如果从焊接机器人的运动形式、工作空间、工作环境、控制方式、焊接工艺等类别划分,焊接机器人将会有很多变

种,如爬行、轨道、管道焊接机器人,结构空间与自由空间焊接机器人等等<sup>[22,28,30,45,45]</sup>。本书将着重针对目前工业现场广泛应用的机构空间中六自由度关节式弧焊机器人的智能化与控制技术展开。

### 1.2.2 目前焊接机器人的特点

一般认为,采用机器人焊接的主要优点如下:

- 1) 稳定和提高焊接质量,保证其均一性。
- 2) 提高劳动生产率,一天可 24h 连续生产。
- 3) 改善工人劳动条件,可在有害环境场工作。
- 4) 降低对工人操作技术的要求。
- 5) 缩短产品改型换代的准备周期,减少相应的设备投资。
- 6) 可实现小批量产品的焊接自动化。

7) 可用于在空间站建设、核能设备维修、深水焊接等极限条件下完成人工难以进行的焊接作业。

- 8) 为焊接柔性生产线提供技术基础。

从焊接机器人诞生和发展到现在,焊接机器人可大致分为三代:

第一代是指基于示教再现工作方式的焊接机器人,由于其具有操作简便、不需要环境模型、示教时可修正机械结构带来的误差等特点,在焊接生产中得到大量使用。

第二代是指基于一定传感器信息的离线编程焊接机器人,得益于焊接传感器技术和离线编程技术的不断改进,这类机器人现已进入应用研究的阶段。

第三代是指装有多种传感器,接收作业指令后能根据客观环境自行编程的高度适应性智能焊接机器人,由于人工智能技术的发展相对滞后,这一代机器人正处于试验研究阶段。

随着计算机与信息控制技术的不断进步和渗透,使焊接机器人由单一的示教再现型向多传感、智能化方向发展将成为焊接先进制造技术的水平标志。

目前,国内外已有大量的焊接机器人系统应用于各类自动化生产线上,据不完全统计,目前中国大陆已有 3000 台左右的焊接机器人分布于各大中城市的汽车、摩托车、工程机械等制造业,其中大约 55% 左右为弧焊机器人,45% 左右为点焊机器人,已建成相当数量的机器人焊接柔性生产线和机器人焊接工作站。这些焊接机器人系统从整体上看基本都属于第一代的任务示教再现型,功能较为单一,工作前要求操作者通过示教盒控制机器人各关节的运动,采用逐点示教的方式来实现焊枪空间位姿的定位和记录。由于焊接路径和焊接参数是根据实际作业条件预先设置的,在焊接时缺少外部信息传感和实时调整控制的功能,这类焊接机器人对作业条件的稳定性要求严格,焊接时缺乏“柔性”,表现出下述明显缺点:

- 1) 不具备适应焊接对象和任务变化的能力。
- 2) 对复杂形状的焊缝编程效率低,占用大量生产时间。
- 3) 不能对焊接动态过程实时检测控制,无法满足对复杂焊件的高质量和高精度焊接要求。

无论是现代制造技术发展趋势的推动,还是焊接产品制造的生产实际需求,都对焊接机器人技术性能提出了智能化水平的期望和要求。