

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目



先进焊接制造技术丛书

中国焊接学会 组编



焊接机器人 及其应用

林尚扬 陈善本 李成桐 编著
吴 林 主审



机械工业出版社
China Machine Press

TP242.2

4

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

先进焊接制造技术丛书

中国焊接学会 组编

焊接机器人及其应用

林尚扬 陈善本 李成桐等 编著

吴 林 主审



机械工业出版社

本书希望能及时向国人反映国内外焊接机器人的应用状况和一些最新的研究成果和动向,以期对我国焊接机器人的应用和发展有所促进。全书分为上、下两篇:在上篇中,主要阐述了焊接机器人的基础知识,包括机器人的运动学、动力学、传感、驱动与控制等基本技术,还介绍了智能化焊接机器人的一些最新进展,如激光扫描视觉传感、离线编程、智能控制、遥控技术等。在下篇中,着重分析了工厂焊接生产自动化的目的和实施中要注意的问题,介绍了焊接机器人系统的基本配置和各种焊接机器人工作站的结构形式,还分析了这方面的最新发展,如焊接柔性制造系统和复杂的焊接机器人生产线等。

主要读者对象为希望深入了解机器人技术的工程技术人员及高校本科生、研究生和工厂及焊接机器人应用开发单位的技术人员和技术管理干部。

图书在版编目(CIP)数据

焊接机器人及其应用/林尚扬等编著. —北京:机械工业出版社, 2000
(先进焊接制造技术丛书)

ISBN 7-111-01335-2

I. 焊… II. 林… 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(2000)第 65707 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 何月秋 周国萍

封面设计:姚毅 责任印制:何全君

中国农业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

850mm×1168mm/32·11 印张·293 千字

0001—3000 册

定价:22.00 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

先进焊接制造技术丛书

编委会名单

顾问委员会成员

潘际銮 关 桥 徐滨士 林尚扬

斯重遥 田锡唐 周振丰

主 任 陈剑虹

副主任 邹增大 单 平 崔树森

委 员 王其隆 任家烈 史耀武 霍立兴

黄石生 李志远 汪建华 蒋力培

秘 书 康 龙 武 江

序

焊接作为制造业的基础工艺与技术在 20 世纪为工业经济的发展作出了重要的贡献。在人类引以为自豪的各个领域，如航空航天、核能利用、电子信息、海洋钻探、高层建筑等，都利用了焊接技术的优秀成果。

在今天，焊接作为一种传统技术又面临着 21 世纪的挑战。

一方面，材料作为 21 世纪的支柱已显示出五个方面的变化趋势，即从黑色金属向有色金属变化；从金属材料向非金属材料变化；从结构材料向功能材料变化；从多维材料向低维材料变化；从单一材料向复合材料变化。新材料的连接对焊接技术提出了更高的要求。

另一方面，先进制造技术的蓬勃发展，正从信息化、集成化、系统化、柔性化等几个方面对焊接技术的发展提出了越来越高的要求。

为了充分反映 20 世纪焊接技术的发展成果和 21 世纪对焊接技术提出的新的挑战，中国焊接学会组织了焊接行业最重要的 10 个领域中卓有成就的知名学者编写、出版了《先进焊接制造技术丛书》。同时邀请了焊接界德高望重的著名专家作为丛书编写顾问。

本丛书旨在全面介绍国内外先进焊接技术的发展现状和趋势，对我国焊接制造技术的发展起引导作用。

本丛书是高层次的普及型丛书，以知识性为主，深层次地介绍相关领域的高新技术内容和基本规律，面向广大的焊接工作者、研究人员、高等院校师生及相关领域专家。

本丛书的特点是突出“高、新”二字，有较宽的知识覆盖面，注意相关学科的渗透，有较高的收藏价值。

中国焊接学会在世纪之交以这套丛书奉献给广大的焊接工作者，是对焊接界为祖国经济腾飞及 20 世纪焊接技术的发展所作

贡献的回眸，也是焊接界对迎接 21 世纪新技术挑战的期盼。

原机械工业部技术发展基金委员会及机械工业出版社对本丛书的编辑出版提供了经济支持（97JA0401），在此一并表示深切的感谢。

丛书编委会主任

陈 剑 虹

前 言

工业机器人作为现代制造技术发展重要标志之一和新兴技术产业，已为世人所认同。并正对现代高技术产业各领域以至人们的生活产生了重要影响。

焊接制造工艺由于其工艺的复杂性、劳动强度、产品质量、批量等要求，使得焊接工艺对于自动化、机械化的要求极为迫切，实现机器人焊接代替人工操作成为几代焊接人的理想和追求的目标。

焊接机器人是工业机器人大家庭中的望族，在各国工业机器人应用比例中大约占总数的25%~50%。我国焊接机器人，的发展起步较晚，80年代以来进展较快，1985年成功研制华宇1型弧焊机器人，1987年又成功研制华宇型点焊机器人，都已初步商品化并可小批量生产，1989年我国国产机器人为主的汽车焊接生产线投入生产。目前大约有600台左右的点焊、弧焊机器人用于实际生产，标志着我国以机器人为核心的焊接自动化技术已进入实用生产阶段。

经过十几年来机器人焊接技术应用实践，国内焊接机器人应用虽已具有一定规模，但与我国焊接生产总体需求相差甚远，焊接机器人推广应用任务还十分艰巨。就推进我国机器人焊接技术应用而言，首先应是焊接机器人知识与观念的普及，调查中反映出焊接工作者对焊接机器人技术基础及应用知识有着强烈的需求。在中国焊接学会及机械工业出版社的支持下，我们组织了本书的编写。根据作者的认识和理解，本书试图以弧焊机器人为主要对象，阐述焊接机器人技术基础和应用技术以及近期的研究与发展状况，以为读者抛砖引玉。

本书分焊接机器人基础技术与应用技术上、下两篇。

上篇的主要内容为：第 1、2 章简要阐述焊接自动化与机器人焊接发展概况；第 3 章至第 5 章为焊接机器人基础，阐述机器

人运动学和动力学, 弧焊机器人传感和机器人驱动与控制技术; 第 6 章至第 9 章为较高级的焊接机器人开发、研究以及智能化技术内容, 阐述弧焊机器人接头跟踪, 焊接机器人的离线编程技术, 机器人焊接动态过程智能控制与智能化系统和机器人遥控焊接技术。本篇中相当多的内容是近期博士论文研究成果。同时也是集体劳动的结晶。陈善本教授和邱涛博士生撰写第 1、2、8 章, 张炯博士撰写第 3、6 章, 吕伟新博士撰写第 4、9 章, 孙迪生教授撰写第 5 章, 田劲松博士生撰写第 7 章。陈善本教授负责对上篇的统稿。

下篇的主要内容为: 第 10、11 章阐述焊接生产自动化实施中应注意的问题及焊接机器人系统的基本配置; 第 12 章至 14 章阐述焊接机器人工作站及其构成系统; 第 15、16 章阐述焊接柔性制造及复杂焊接机器人系统。

下篇由林尚扬院士负责编写。参加下篇编写和提供资料的还有: 李成桐高工撰写了第 16 章的 16.2 节; 上海汇众重型汽车公司邬美华高工提供了机器人工作站的许多材料; 常州林业机械有限公司唐志贵、陈锡建高工提供第 15 章的详细材料; igm 机器人系统公司北京办事处夏雷先生提供了 igm 机器人应用实例及外围设备的材料; 广州阿比泰克焊接技术有限公司刘尔斌总经理提供了焊枪清理及换枪装置的资料; 哈尔滨焊接研究所机器人及自动化室和工艺装备中心的技术人员提供了有关材料和 CAD 制图; 首钢-莫托曼机器人有限公司提供许多安川机器人的宝贵资料。这里一并表示感谢。

林尚扬院士主持了全书的编写, 哈尔滨工业大学吴林教授审阅了全书。

本书的初衷是希望能够及时向世人反映机器人焊接技术应用基本状况与一些最新研究成果和动向, 以期对我国的机器人焊接技术的普及与发展有所促进。主要读者对象为希望深入了解机器人技术的工程技术人员及高校本科学生、研究生以及工厂及机器人应用开发单位的技术人员和技术管理干部。限于编著者的学识

与阅历，书中的不当或谬误之处在所难免，真诚欢迎专家和读者赐教指正。

本书的研究工作受国家自然科学基金重点项目 No. 59635160 和项目 No.59575057 资助，藉此致谢。

编者

2000 年 3 月



林尚扬 男，1932年3月生于福建厦门。1961年毕业于哈尔滨工业大学焊接专业，1962年调入哈尔滨焊接研究所。先后从事过焊接材料、焊接工艺、焊接设备的研究，多项科研成果获机械部科技进步一等奖、国家科技进步二、三等奖和国家发明三等奖等。提倡我国焊接生产技术改造应走低成本自动化的道路，并积极推动焊接、机械、电控等多学科技术人员的协同，完成多项自动化焊接专用设备和我国首批焊接机器人工作站的设计开发。1995~1996年曾对我国焊接机器人的生产应用情况作全面的调查，摸清情况，指出问题，提出发展方向。长期以来，为我国焊接生产及自动化的发展做出了积极的贡献。他于1988年被全国总工会授予全国“五一”劳动奖章，1989年被国务院授予全国先进生产者称号，1995年被评为中国工程院院士。

目 录

序 前言

上篇 焊接机器人系统技术基础

第 1 章 绪论	1
1.1 焊接自动化发展概况	1
1.2 机器人焊接发展概况	4
第 2 章 焊接机器人概论	8
2.1 焊接机器人分类	8
2.2 焊接机器人系统组成	11
第 3 章 机器人运动学和动力学	15
3.1 刚体的位置和姿态描述及坐标变换	15
3.1.1 刚体的位置和姿态描述	15
3.1.2 坐标变换	17
3.1.3 齐次变换及其运算	18
3.1.4 变换方程	21
3.1.5 表示方位的欧拉角和 RPY 角	23
3.2 机械手的运动学	27
3.2.1 连杆的坐标系	27
3.2.2 运动学方程	29
3.2.3 求解运动学方程	34
3.3 机器人操作臂动力学	40
第 4 章 弧焊机器人传感系统	50
4.1 一般机器人传感技术	50

4.1.1	传感器的概念	50
4.1.2	传感器分类	51
4.1.3	主要传感器介绍	52
4.1.4	传感系统、智能传感器、多传感器融合	56
4.2	弧焊机器人传感技术	57
4.2.1	电弧传感方法	58
4.2.2	视觉传感方法	61
4.3	机器人焊接过程传感系统	65
4.3.1	传感系统结构	65
4.3.2	机器人与传感器的接口	65
4.3.3	跟踪信息的利用方法	66
4.3.4	跟踪概念的扩展	67
第 5 章	焊接机器人驱动与控制技术	68
5.1	对机器人传动装置的要求	68
5.2	电气驱动系统中执行机构的功率确定方法	70
5.3	机器人中的驱动电动机	74
5.3.1	直流伺服电动机	74
5.3.2	无刷电动机	76
5.4	电动机驱动方法概述	81
5.4.1	直流伺服电动机驱动	81
5.4.2	无刷电动机驱动	83
5.5	机器人位置控制技术	87
5.5.1	基于直流伺服电动机的单关节控制	88
5.5.2	基于交流伺服电动机 (AC 无刷电动机) 的关节位置 控制	94
5.5.3	轨迹插补算法	100
第 6 章	弧焊机器人接头跟踪技术	110
6.1	引言	110
6.2	激光扫描视觉传感器原理	111
6.2.1	光学三角测量原理及分析	111

6.2.2	激光扫描式视觉传感器的结构	112
6.2.3	低层信息处理	114
6.3	接头类型识别和特征参数提取	115
6.3.1	V 型坡口	115
6.3.2	搭接接头	118
6.3.3	对接接头	119
6.3.4	角接接头	122
6.4	视觉控制的弧焊机器人接头跟踪的实现	122
6.4.1	视觉控制的弧焊机器人系统结构与构成	122
6.4.2	修正方式下接头跟踪控制方法及实现	124
第 7 章	焊接机器人的 离线编程技术	131
7.1	离线编程与图形仿真技术概况	131
7.1.1	离线编程与图形仿真技术的意义	131
7.1.2	离线编程系统的组成部分	132
7.1.3	离线编程技术的发展	132
7.2	离线编程典型系统	133
7.2.1	Workspace 系统	133
7.2.2	RoboPlan 系统	134
7.2.3	WRAPS 系统	134
7.3	焊接机器人规划技术	135
7.3.1	焊接规划的概况	135
7.3.2	焊接任务规划	136
7.3.3	焊接参数规划	137
7.3.4	焊接机器人路径规划	137
7.3.5	焊接机器人轨迹规划	138
7.4	焊接机器人离线编程应用软件介绍	140
7.4.1	RAWCAD 系统应用开发	140
7.4.2	Workspace 软件	143
7.4.3	UltraArc 和 UltraSpot 软件	144

第 8 章 机器人焊接动态 过程智能控制技术	145
8.1 焊接动态过程控制问题	145
8.1.1 焊接过程控制的发展	146
8.1.2 焊接动态过程的模型化	146
8.1.3 焊接过程控制系统设计问题	148
8.2 焊接熔池动态信息提取	149
8.2.1 红外辐射信息传感	150
8.2.2 焊接区直接视觉信息传感	151
8.2.3 熔池正反面视觉传感系统	157
8.2.4 熔池正反面视觉典型图像	161
8.2.5 熔池几何特征尺寸参数的提取	162
8.3 焊接熔池动态过程的实时智能控制方案	166
8.3.1 模糊控制在焊接中的应用	167
8.3.2 神经网络控制在焊接中的应用	169
8.3.3 神经网络与模糊推理结合用于焊接过程控制	170
8.3.4 脉冲 GTAW 对接过程双变量智能控制	172
8.4 机器人焊接智能化系统	179
8.4.1 机器人焊接智能化系统技术组成	179
8.4.2 机器人焊接任务规划软件系统设计	179
8.4.3 机器人焊接传感技术	182
8.4.4 机器人运动轨迹控制实现技术 ^[89]	183
8.4.5 焊接动态过程实时智能控制器设计	186
8.4.6 机器人焊接智能化集成系统	186
第 9 章 机器人遥控焊接技术	188
9.1 遥控焊接的基本概念	188
9.2 弧焊过程中焊枪运动控制特点分析	190
9.2.1 手工焊接的特点	190
9.2.2 机器人弧焊的特点	191
9.2.3 遥控焊接的特点	192

9.3 遥控焊接的传感信息	195
9.3.1 视觉信息的传感	195
9.3.2 视觉信息的利用	197
9.3.3 焊接参数的视觉化	199
9.3.4 力觉信息的利用	200
9.4 遥控焊接的运动控制方法	201
9.4.1 自动控制与遥控示教	201
9.4.2 人工控制	202
9.4.3 自主控制	203
9.4.4 人机交互控制	204
9.4.5 人机共享控制	204
9.4.6 分布式控制	204
9.5 机器人遥控焊接系统的结构	206
9.5.1 主从系统	206
9.5.2 柔性遥控焊接系统	207
9.5.3 基于新控制方法的遥控焊接系统	207
9.5.4 遥控焊接系统的选择	210

下篇 焊接机器人的应用

第 10 章 焊接生产自动化的目的及实施中应注意的问题	212
10.1 实现焊接生产过程自动化的意义和必要性	213
10.2 实现焊接生产过程机器人化的目的	214
10.2.1 提高焊接生产效率	215
10.2.2 保持焊接参数一致及提高焊接质量稳定性	218
10.2.3 使焊接生产实现柔性自动化	219
10.2.4 改善劳动安全卫生条件	219
10.2.5 增强生产管理的计划性和可预见性	220
10.2.6 可准确预算材料的消耗量和生产成本	220
10.3 焊接自动化方式的选择 —— 适度自动化	221

10.4 实施焊接自动化技术改造应考虑的问题	223
10.4.1 零件制备质量和焊件装配精度与用好焊接机器人的 关系	224
10.4.2 工件的结构及焊接工艺的合理性与用好焊接机器人的 关系	226
10.4.3 管理人员、技术人员和操作人员的素质与用好焊接 机器人的关系	227
10.4.4 效益和效率分析与用好机器人的关系	228
10.5 投资回收期及经济效益的分析	229
第 11 章 焊接机器人系统的基本配置	231
11.1 焊接机器人的选择	231
11.2 弧焊机器人系统焊接装置的选择	234
11.2.1 熔化极气体保护焊焊接电源的种类和选择	235
11.2.2 熔化极气体保护焊送丝装置的选择	236
11.3 点焊机器人系统焊接装备的选择	239
11.3.1 一体式焊钳的种类和选择	241
11.3.2 定时器的种类	243
11.3.3 焊钳防撞措施	244
11.4 焊接机器人系统配备的外围设备的种类及胎、夹具的设计 和选择	244
11.4.1 机器人的底座和机架	244
11.4.2 工件的工作台	245
11.4.3 工件和机器人的移位及变位装置	246
11.4.4 其它辅助装置	254
11.4.5 安全围栏和排烟装置	259
11.4.6 胎、夹具的设计与选择	261
11.5 焊接机器人工程应用开发单位的选择	264
11.5.1 明确目的和范围	265
11.5.2 寻找合适的焊接机器人工程应用开发单位	265

第 12 章 简易焊接机器人工作站	267
12.1 简易焊接机器人工作站的基本组成	267
12.1.1 简易弧焊机器人工作站	267
12.1.2 简易点焊机器人工作站	268
12.2 简易弧焊机器人工作站应用的实例	268
12.2.1 一种简易弧焊机器人工作站的组成	268
12.2.2 简易弧焊机器人工作站的编程与控制	270
12.2.3 简易焊接机器人工作站所适用的产品对象	272
12.3 简易点焊机器人的应用	272
第 13 章 不同变位机与焊接机器人组合的工作站	274
13.1 回转工作台+弧焊机器人的工作站	274
13.1.1 回转工作台+弧焊机器人工作站的组成	274
13.1.2 回转工作台+弧焊机器人工作站的控制	276
13.1.3 适合用回转工作台+弧焊机器人工作站的产品	276
13.2 旋转-倾斜变位机+弧焊机器人工作站	277
13.2.1 旋转-倾斜变位机+弧焊机器人工作站的结构形式	277
13.2.2 旋转/倾斜变位机+弧焊机器人工作站的控制	278
13.2.3 旋转/倾斜变位机+弧焊机器人工作站的应用	280
13.3 翻转变位机+弧焊机器人的工作站	280
13.3.1 翻转变位机+弧焊机器人工作站的组成	280
13.3.2 翻转变位机+弧焊机器人工作站的控制	283
13.3.3 翻转变位机+弧焊机器人工作站的其它应用	284
13.4 龙门机架+弧焊机器人的工作站	286
13.4.1 龙门机架+弧焊机器人工作站的结构形式	286
13.4.2 龙门机架+弧焊机器人工作站的控制	287
13.5 滑轨+弧焊机器人的工作站	288
13.6 焊接机器人+搬运机器人的工作站	290
第 14 章 焊接机器人与周边设备作协调运动的工作站	293
14.1 弧焊机器人与周边变位设备作协调运动的必要性	293