



中国焊接协会会员读物之六

焊接机器人 实用手册

中国焊接协会成套设备与专用机具分会
中国机械工程学会焊接学会机器人与自动化专业委员会

编 著

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS





中国焊接协会会员读物之六

焊接机器人 实用手册

中国焊接协会成套设备与专用机具分会 编著
中国机械工程学会焊接学会机器人与自动化专业委员会

制造技术智能化是机械工程技术产生重大创新突破的主要发展方向之一。智能化制造的核心是机器人的发展和应用,焊接是机械工程技术的重要内容,焊接机器人智能化技术将会引领焊接技术的发展。为此,中国焊接协会组织行业专家学者编写了这本《焊接机器人实用手册》。该手册以介绍焊接机器人为主,以用户了解和选用国内外先进焊接机器人的相关知识为切入点,编入了焊接机器人综合性理论知识和机器人焊接应用案例。同时也编入了目前国内外与焊接机器人相关的规模较大、技术先进、质量稳定的一些焊接机器人生产厂家的产品和企业信息,以方便焊接生产企业的查询和应用。

希望该手册能够为焊接生产企业以及焊接技术人员在选择和实施机器人自动化焊接过程中提供帮助,为共同推进我国焊接自动化及智能化的总体水平做出贡献。

图书在版编目(CIP)数据

焊接机器人实用手册/中国焊接协会成套设备与专用机具分会,中国机械工程学会焊接学会机器人与自动化专业委员会编著. —北京:机械工业出版社, 2014. 5

ISBN 978-7-111-46405-1

I. ①焊… II. ①中…②中… III. ①焊接机器人-技术手册
IV. ①TP242. 2-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 069090 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:何月秋 责任编辑:何月秋 王彦青 版式设计:霍永明

责任校对:陈越 陈延翔 封面设计:马精明 责任印制:乔宇
保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2014 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·16.75 印张·6 插页·305 千字

0001—4000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-46405-1

定价:58.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

策划编辑电话 (010) 88379732

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

编写委员会

专家委员会：

主 任 吴 林

副主任 陈善本

委 员 高洪明 林 涛

编委会：

主 任 宋天虎

副主任 焦向东 都 东 吴九澎

主 审 都 东

主 编 吴九澎

副主编 陈树君

编 委 于淑香 张 军 李新松 杨庆轩 彭亚萍

编 务 李 波 宋金玲

序

几十年的高速发展，奠定了我国的焊接大国地位；几代人的努力，为我国焊接行业积聚人才打下了良好的发展基础。绿色化和智能化在今后 20 年内将成为焊接行业的主要发展方向，其中焊接机器人及相关技术是这一方向的发展着力点。

目前，我国的焊接机器人产业处于蓄势待发的态势。虽然在通用的点焊、弧焊机器人领域我国与国际先进水平有一定的差距，但由于我国市场庞大，国内企业和科研院所具有自主化优势和国家的扶持等有利条件，一些特种焊接机器人，如水下焊接机器人、管道焊接机器人、专用焊接机器人等研究工作具有鲜明的特色，并达到了国际先进水平。

当今，我国的机器人行业发展具有明显的地域特征及行业特点。在地域上，机器人用户和厂家多集中在长三角、珠三角和环渤海地区；在行业上，多集中在汽车、航空航天、工程机械、能源装备等领域。然而，随着我国经济的快速发展，劳动力成本日益增加，而机器人的功能日益增强，价格却在逐步走低，诸多企业表现出应用焊接机器人的强烈需求，完整的制造体系和庞大的制造行业的转型升级将成为焊接机器人新的强有力的增长点，导致了焊接机器人的应用正在从点、线走向面，为此，我国将会迎来“机器换人”的前所未有的新局面。

为了推进行业发展，满足从业人员了解焊接机器人相关发展信息的需求，中国焊接协会组织编写了这本《焊接机器人实用手册》。该手册涵盖了焊接机器人的发展概况、机器人原理、机器人本体和外围设备、机器人焊接工艺、机器人系统集成和机器人智能化等内容，并介绍了部分机器人生产商、系统集成商的技术特点和典型案例等。

该手册内容丰富。对机器人焊接工艺、装备、控制技术以及数字化和智能化的发展都进行了较为详细的介绍，信息的受众涵盖系统集成商、机器人用户和机器人领域的科研人员。

该手册立足实用。相关的章节力求通过剖析实际案例，将机器人的使用、

开发等技术展示给读者。诸多章节都有来自作者第一手的实践材料，很多知识和观点是作者们多年工作经验的沉淀。

该手册不失先进。对焊接机器人今后的发展趋势和研究热点问题进行了阐述，并给出了焊接机器人的最新研究成果。

十年面壁图破壁，我国迅速发展的焊接机器人行业破壁在即，为此，希望此手册可以为业界提供资讯，拓展思路，为推动我国焊接机器人的持续创新发展贡献我们的智慧和力量。

中国机械工程学会 监事长



前 言

自 1959 年第一台工业机器人诞生以来，机器人技术在加工制造业领域的应用越来越广。据国际机器人联盟（IFR）统计，到 2012 年年底全球在役工业机器人总量已达 120 余万台。我国工业机器人市场也正在迎来爆发式增长，预计到 2015 年，我国机器人市场需求将达到 3.5 万台，占全球总量的 16.9%，成为规模最大的机器人市场。同时国内机器人产业化进程也在稳步推进，已有多个自主品牌工业机器人面市。

在工业机器人家族中，约有 40% 应用于焊接领域，主要工艺为点焊和弧焊。由于机器人焊接具有焊接质量稳定、生产效率高、生产计划性强等特点，在汽车制造、航空航天、压力容器、工程及重型机械、造船等领域的应用比较广泛。

近年来，随着我国经济的快速发展，劳动力成本不断增加，传统的劳动密集型经济模式已经不能适应我国发展的需要，陆续出现了用工荒现象，人口红利正在逐渐减弱或消失，越来越多的焊接加工企业开始关注能够替代人工的机器人焊接技术。

2011 年，机械工程学会编制的中国机械工程技术路线图中明确提出：今后 5~20 年机械工程技术将发生重大的创新突破，并将可能引发该领域的巨大变革，制造技术的智能化是其中的主要发展方向之一。智能化制造的核心是机器人的发展和应用，焊接是机械工程技术的重要内容，焊接机器人智能化技术将会引领焊接技术的发展。

采用机器人焊接，不是简单地把焊工换成机器人就能实现，它是一个复杂的系统工程。涉及产品设计、前后工序的匹配、焊接工艺的机器人化（符合机器人焊接自动化要求）、焊接生产计划、人员配置及培训等多方面的问题。要求企业根据产品特点及企业具备的各方面条件选取合适的焊接自动化模式。

为此，中国焊接协会组织编写了《焊接机器人实用手册》，该手册以介绍焊接机器人为主，以用户选用和了解国内外先进焊接机器人的相关知识为

切入点，编入了焊接机器人综合性理论、机器人焊接应用案例。同时也编入了目前国内外与焊接机器人相关的规模较大、技术先进、质量稳定的一些焊接机器人生产厂家的产品和企业信息。本手册第1章由邹怡蓉、都东编写，陈树君审稿；第2章由高洪明编写，都东审稿；第3章由林涛编写，都东审稿；第4章由张军编写，都东审稿；第5章由陈树君编写，都东审稿；第6章由焦向东、黄继强、周灿丰编写，都东审稿；第7章由陈华斌编写，陈善本审稿；第8章由吴九澎、李新松编写。

希望该手册能够为相关焊接技术人员在选择和实施机器人自动化焊接过程中提供帮助，为共同推进我国焊接自动化及智能化的总体水平做出贡献。

中国机械工程学会焊接分会前任理事长 **吴 侔**

目 录

序
前言

第 1 章 焊接机器人概论	1
1.1 焊接自动化与智能化	1
1.1.1 焊接自动化与智能化发展现状	1
1.1.2 自动化与智能化在焊接生产中的意义	2
1.1.3 焊接机器人技术	2
1.2 国内外焊接机器人应用概况	6
1.2.1 工业机器人与焊接机器人的发展	6
1.2.2 工业机器人行业统计数据	9
1.2.3 焊接机器人应用的典型案例	13
1.3 焊接机器人的分类	16
1.3.1 按机器人自动化技术发展程度分类	16
1.3.2 按性能指标分类	16
1.3.3 按所采用的焊接工艺方法分类	16
1.3.4 按产业模式分类	17
1.4 焊接机器人及系统特征	17
1.4.1 工业机器人的一般结构	17
1.4.2 焊接机器人的系统构成	19
1.4.3 焊接机器人应用环境及适应性要求	19
参考文献	19
第 2 章 工业机器人本体结构及其特征	22
2.1 工业机器人的基本构成	22
2.1.1 机器人本体结构形式	23
2.1.2 机器人关节驱动机构	26
2.1.3 机器人关节传动机构	28
2.1.4 机器人关节常用减速机构	29
2.2 工业机器人运动控制	34

2.2.1	位姿描述与坐标变换	34
2.2.2	工业机器人运动学	37
2.2.3	工业机器人位置控制	40
2.3	焊接机器人本体特征	45
2.3.1	焊枪电缆内置型机器人	46
2.3.2	自由度焊接机器人	46
	参考文献	48
第3章 机器人焊接系统组成		49
3.1	典型焊接机器人工作站	50
3.1.1	弧焊机器人工作站	50
3.1.2	点焊机器人工作站	52
3.2	机器人本体及控制器	53
3.2.1	ABB 机器人	54
3.2.2	Motoman 机器人	56
3.2.3	KUKA 机器人	57
3.2.4	Fanuc 机器人	58
3.3	机器人配套焊接电源	60
3.3.1	概述	60
3.3.2	弧焊电源系统	61
3.3.3	电阻焊设备	65
3.4	机器人变位机	68
3.4.1	单轴变位机	68
3.4.2	双轴变位机	68
3.4.3	三轴变位机	70
3.4.4	复合型变位机	71
3.5	机器人配套焊接工装（典型工件举例说明）	72
第4章 焊接机器人传感和控制技术		76
4.1	焊接机器人传感技术及传感器应用	76
4.1.1	旋转编码器	77
4.1.2	接近觉传感器	78
4.1.3	焊接电流和电弧电压传感器	81
4.1.4	电弧传感的焊缝跟踪	83
4.1.5	基于视觉的焊缝信息传感器	85

4.1.6 焊接熔池信息的传感 87

4.2 焊接机器人的控制技术 87

4.2.1 焊接机器人的示教技术原理及应用实例 88

4.2.2 焊接机器人离线编程技术及应用 91

4.2.3 焊接机器人的路径跟踪 93

4.3 机器人焊接质量信息化技术 97

4.3.1 基于视觉的焊接质量信息化 97

4.3.2 基于电弧传感的在线焊接质量信息化 99

参考文献 101

第5章 机器人焊接工艺..... 102

5.1 熔化极气体保护焊 102

5.1.1 熔化极气体保护焊的原理 102

5.1.2 熔化极气体保护焊的特点 102

5.1.3 熔化极气体保护焊的应用 103

5.1.4 熔化极氩弧焊的焊接参数 103

5.1.5 其他熔化极气体保护焊焊接方法 104

5.2 钨极惰性气体保护焊 124

5.2.1 TIG 焊的原理 124

5.2.2 TIG 焊的特点 124

5.2.3 TIG 焊的应用 126

5.2.4 其他 TIG 焊接技术 126

5.3 等离子弧焊 131

5.3.1 等离子弧原理 131

5.3.2 等离子弧的工作形式 131

5.3.3 等离子弧特性及用途 132

5.3.4 等离子弧焊焊接电源 134

5.3.5 等离子弧焊接 135

5.3.6 变极性等离子弧焊接 136

5.4 激光加工 138

5.4.1 激光加工的原理 138

5.4.2 激光焊的原理 139

5.4.3 激光焊接技术 140

5.4.4 激光焊的特点 142

5.5 金属的切割 143

5.5.1	火焰切割原理	143
5.5.2	等离子弧切割原理、特点及应用	144
5.5.3	激光切割原理、特点及应用	146
5.6	复合焊	150
5.6.1	激光-电弧复合焊	150
5.6.2	等离子-MIG 复合焊（同轴）	155
5.6.3	等离子-MIG/MAG 复合焊（旁轴）	157
5.7	电阻焊	159
5.7.1	电阻焊的原理与特点	159
5.7.2	电阻焊的分类	161
	参考文献	163
第 6 章 专用焊接机器人		164
6.1	简单曲面（线）焊接机器人	164
6.1.1	车间作业直线焊接机器人	164
6.1.2	现场作业直线焊接机器人	166
6.1.3	车间作业圆弧焊接机器人	168
6.1.4	现场作业圆弧焊接机器人	170
6.2	复杂曲面（线）焊接机器人	171
6.2.1	空间相贯曲面（线）焊接机器人	171
6.2.2	特殊异型曲面（线）焊接机器人	180
6.3	水下焊接机器人	182
6.3.1	水下焊接机器人的系统组成	182
6.3.2	海底管道维修水下焊接机器人案例	183
6.3.3	核电站维修水下焊接机器人案例	187
6.4	遥操作焊接机器人	192
6.4.1	遥操作焊接机器人的系统组成	192
6.4.2	海洋工程遥操作水下焊接先进机械手	193
6.4.3	核电站遥操作焊接机器人案例	196
	小结	198
	参考文献	199
第 7 章 智能化焊接机器人技术的发展		201
7.1	机器人焊接动态过程的多信息传感技术	202
7.1.1	焊接熔池动态过程视觉传感和特征提取	203

7.1.2	机器人脉冲 GTAW 电弧声信号特征提取	206
7.1.3	焊接动态过程及焊接缺陷的光谱特征提取	206
7.1.4	焊接动态过程的多信息采集及特征融合	206
7.2	弧焊机器人焊接过程知识提取及建模方法	209
7.2.1	基于粗糙集理论的铝合金 GTAW 知识模型	209
7.2.2	基于支持向量机理论的弧焊动态过程知识模型	211
7.2.3	基于混杂逻辑动态建模方法的机器人脉冲弧焊过程建模	212
7.3	机器人焊接过程智能化控制方法	213
7.4	机器人焊接智能化技术	215
7.4.1	基于电弧传感器和视觉传感器的三维焊缝跟踪系统	215
7.4.2	基于电弧传感器及视觉传感器的机器人焊接系统实时熔透状态控制	217
7.5	特殊环境智能焊接机器人系统	217
	参考文献	217
第 8 章	焊接机器人企业	220
8.1	各具特色的焊接机器人企业	220
8.1.1	北京石油化工学院光机电装备技术北京市重点实验室	220
8.1.2	杭州凯尔达机器人科技有限公司	224
8.1.3	唐山开元机器人系统有限公司	228
8.1.4	OTC	234
8.1.5	Panasonic 松下机器人——高效高品质弧焊专家	240
8.2	国内外焊接机器人企业简介	246
8.2.1	国内焊接机器人企业	246
8.2.2	国外焊接机器人企业	248
8.2.3	焊接机器人系统集成企业	251
	后记	255

第 1 章 焊接机器人概论

1.1 焊接自动化与智能化

1.1.1 焊接自动化与智能化发展现状

焊接作为与制造业密切相关的重要生产方式，随着工业生产的现代化发展逐步深入，正面临前所未有的挑战：在焊接质量、生产效率、制造成本、产品系列多样化、批量供给能力、现代化生产管理等方面，对焊接技术水平与焊接生产模式提出了新的要求，在我国乃至世界范围内均亟待发展并推广与自动化和智能化焊接相关的最新技术。国际焊接学会（IIW）将 2013 年的年会主题确定为“焊接中的自动化”（Automation in Welding），针对电弧焊、激光焊、搅拌摩擦焊等的机器人和自动化技术前沿进行探讨。

工业机器人自 20 世纪 60 年代问世以来，在自动化与智能化生产中显示了极强的生命力，并逐步成为汽车制造、零部件生产、金属加工、电子电气等多个制造领域中占据决定性地位的关键力量。

目前在全球范围内共装配有超过 120 万台的工业机器人，它们在负载能力、重复定位精度、作业范围、工作稳定性等指标上不断刷新数据纪录：例如，用于电阻点焊的 KR QUANTEC 系列 ULTRAS 型机器人在自重仅有 1120kg 的条件下就已达达到 300kg 的有效载荷，作用半径最大可达 2500mm，与此同时还保证了 $\pm 0.06\text{mm}$ 的重复定位精度；用于弧焊的 MA3100 机器人在保证 $\pm 0.15\text{mm}$ 重复定位精度的情况下能达到 3121mm 的超长作用半径；MH5S 机器人在 706mm 的作业范围下能达到 $\pm 0.02\text{mm}$ 的重复定位精度；用于激光-电子束复合精密焊接的 Staubli TX90L 型机器人在实现不规则三维焊缝焊接时能够达到 $\pm 0.035\text{mm}$ 的重复定位精度，并保证 1200mm 的作业范围。

同时，焊接任务智能规划、焊接动态过程传感与控制、焊接配套设备（焊接电源、焊枪/焊钳）等配合工业机器人的发展实现了更高层次的焊接自动化与智能化：例如，TAWERS 焊接机器人系统的焊接导航（Weld Navigation）功能能够在短时间内生成焊接任务，提供包括焊枪姿态在内的完整焊接参数；TA 1900 WGH 在多层焊作业中配备了 Thick Plate 软件实现焊道位置的自动寻找和焊缝结构的识别；Laser Pilot MTR 系统、ROBO-TRAC 系统能够在机器人焊接过程中完成实时焊缝

跟踪。

此外，焊接工作站或生产线的多机器人协作技术、极限环境下的机器人焊接技术等同样发展迅速，在人工所无法实现的高强度、高精度、复杂工序高效作业、恶劣或极限工况下施焊等方面体现出了机器人焊接的决定性优势。

1.1.2 自动化与智能化在焊接生产中的意义

工业界及学术界对自动化和智能化在焊接生产中的重要意义均有清晰明确的认识：自动化与智能化在提高效率、降低成本、改进质量、保证安全和满足高水准制造要求等方面将带来决定性的优势。美国焊接学会在其发布的行业报告《焊接工业前瞻》（Vision for Welding Industry）中阐述了截至 2020 年的战略发展目标，其中具体提出：“截至 2020 年，将通过提供工艺参数选择指导、增加自动化设备与机器人的使用、降低废品率与返修率的方式将焊接加工的平均成本降低三分之一”。

20 世纪 90 年代初期，我国曾以偏重发展专机设备作为焊接自动化理念的发展方向，因工业化水平与市场需求所限，焊接制造以面向简单结构的批量生产为主，并不追求柔性。由于适应了生产力发展水平，焊接制造行业得到了迅猛的发展，为产业升级打下了良好的基础。近年来，随着工业生产水平和市场需求的迅猛发展，国内焊接领域面临着对自动化程度、焊接质量、生产效率、制造柔性的高要求，也开始出现与发达国家类似的多种类、订单式的生产方式。焊接机器人在大批量、同位置相同轨迹重复施焊，需要保证生产流水线通畅，在焊接质量稳定性要求高的应用场合下，体现出了人工焊接无法比拟的极大优势。在焊接生产成本方面，越来越昂贵的人工费用、因质量问题造成的报废与返修、材料及能源损耗都是造成生产成本居高不下的主要原因。在生产柔性方面，当需要灵活地适用于不同形式的焊接工件时，机器人可通过编程适应不同要求的焊接作业，与面向不同任务需要使用不同设备的焊接专机相比，具有更大的优势。同时，焊接机器人的高精度、高效率与高稳定性，也从减少物耗与功耗、提高质量、降低劳动强度、改善劳动环境、减轻对稀缺的焊接技术人员依赖程度等方面降低了整体的成本，图 1-1 所示为焊接机器人典型应用之一：车身组装。

1.1.3 焊接机器人技术

焊接机器人在得到越来越广泛应用的同时，也正向更高层次的自动化与智能化方向发展，近年来不断涌现出具有代表性的机器人焊接新技术，这些技术从生产效率、精度要求、操作性、适应

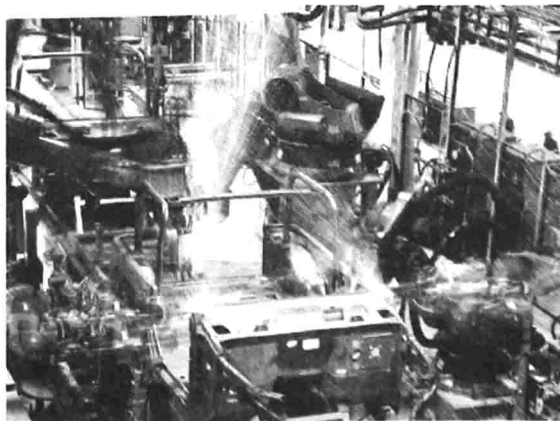


图 1-1 焊接机器人典型应用之一：车身组装

性等方面显示了焊接机器人技术的未来发展趋势，从研发完善逐渐走向推广应用。

1. 呈现智能化趋势的机器人示教再现与离线编程技术

现阶段在工业生产中大量应用的焊接机器人多为基于示教再现或离线编程的工作方式实现焊接作业，在辅助以一定传感技术的情况下能够满足自动化生产的基本需求，但其智能化程度上仍然有较大的发展空间。其智能化发展包括以下几个方面：易实现的示教、焊接路径自主规划、自动生成焊接任务工艺参数、直观易用的人机交互系统设计、借助虚拟现实等技术实现焊接工作站的离线编程等。

ROBOTIQ 研发的动态示教（Kinetiq Teaching）技术使得操作者能够随意手动牵引焊接机器人以完成示教，焊接参数能够在示教过程中通过操作盒进行确定，各轴的位置也能够在示教过程中简单易行地调整到位，如图 1-2 所示。

TAWERS 焊接机器人系统的焊接导航（Weld Navigation）功能如图 1-3 所示，能够在短时间内生成焊接任务，提供包括焊枪姿态在内的完整焊接参数，在用户选择焊接接头类型和焊件厚度后即可自动生成最优焊接参数。

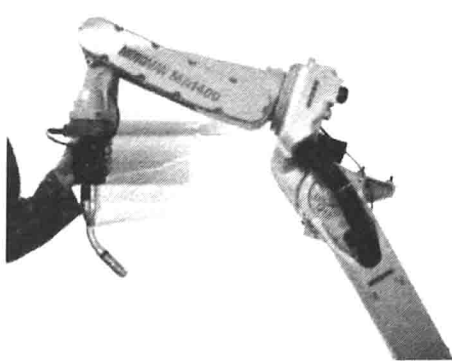


图 1-2 动态示教（Kinetiq Teaching）技术

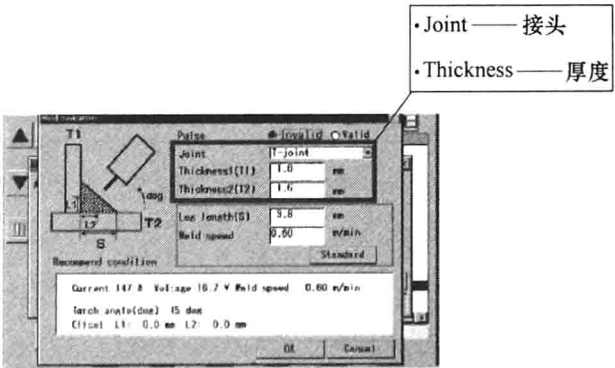


图 1-3 焊接导航（Weld Navigation）功能

ABB FlexPendant 人机交互系统以实现机器人编程与 Fronius 焊接电源的相关操作，该系统采用操纵杆和触摸屏的形式，比使用按钮与显示屏的传统示教器在操作上更直观且易于操作，并便于在操作的同时观察机器人的运动。

常见的焊接机器人离线编程软件如 ArcWeldingPowerArc、DELMIA、DTPS G3、KUKA. sim pro 以及 MotoSim EG 等，均能够完成在虚拟环境中对焊接机器人及工作站进行三维建模、离线编程、焊接过程仿真等任务。

2. 焊接过程传感与适应性控制技术

集成了一种或多种传感器的焊接机器人可以实现对环境的感知、信息提取及处理，通过视觉、触觉等感知的反馈形成一定的闭环控制，对外部环境的变化具有一定的适应力，如焊接起始位置自动寻位、焊缝自动跟踪等。更高智能程度的机器人需要能根据所获取的信息进行判断、融合、决策，对于复杂环境具有更高的适应

性，以完成更复杂的任务，这是焊接智能化的未来发展方向。

现有工业应用的焊缝自动寻位传感方式一般分为接触传感、激光点视觉传感、激光结构光视觉传感等三种类型。

FANUC 采用接触式传感方法，通过在焊丝、保护气体喷嘴或与焊枪固连的探针加安全低电压的方式，让夹持在机器人末端的焊枪向工件缓慢移动，以获取接触点的位置信息。

Motoman 机器人配备 AccuFast 激光传感器如图 1-4 所示，用激光点聚焦距离的视觉检测来替代接触式传感，在无接触的情况下实现定位。

FANUC 开发的 iRVision 视觉传感如图 1-5 所示，通过安装在焊枪侧面的光源与摄像机实现视觉传感，在焊前拍摄焊接工件图像并识别焊缝位置用于焊接路径的规划。

MetaVision、ServoRobot 等公司开发了用于机器人弧焊自动跟踪的激光结构光视觉传感器，Laser-Pilot 系统如图 1-6 所示，ROBO-FIND 系统如图 1-7 所示，能够通过图像处理的方法提取结构光畸变，可实现自动的焊缝寻位。同时，基于激光结构光的视觉传感，也是结合机器人技术进行焊前自动示教与焊缝自动跟踪的重要方法。



图 1-4 AccuFast 激光传感器

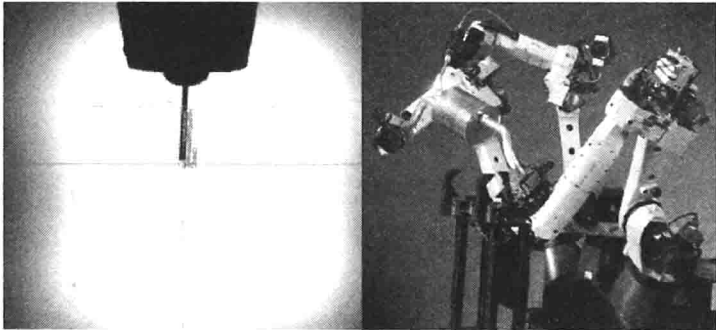


图 1-5 iRVision 视觉传感

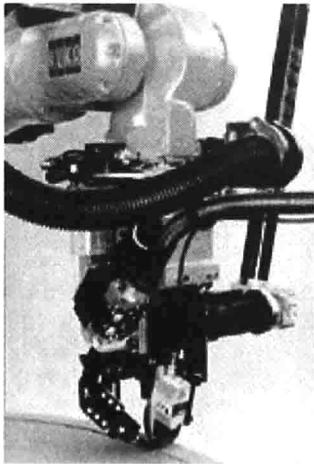


图 1-6 Laser-Pilot 系统

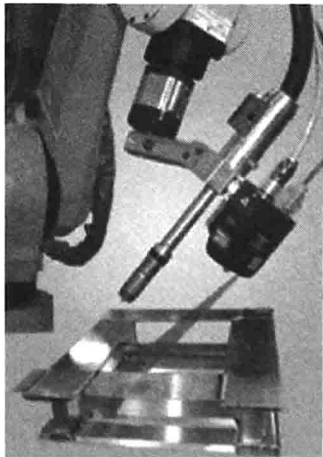


图 1-7 ROBO-FIND 系统