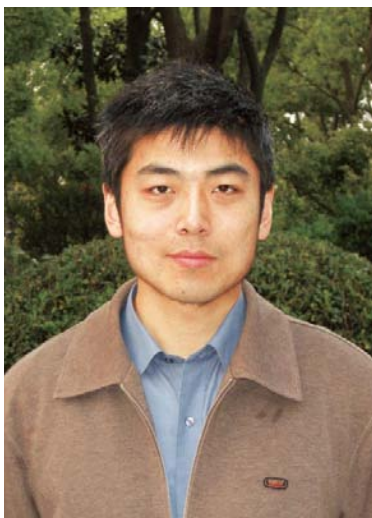


# 机器人焊接智能化技术的现状与最新发展

## Present Situation and Recent Development of Intelligent Robot Welding Technology

上海交通大学材料科学与工程学院 孔 萌 林 涛 陈善本



孔 萌  
博士, 吉林省长春市人, 主要研究方向为焊接机器人与焊接自动化。

工业机器人技术是当今世界最引人瞩目的高新产业之一。焊接过程的自动化、机器人化以及智能化已经成为焊接行业的发展趋势<sup>[1-4]</sup>。焊接机器人具有高效率、质量稳定、工作可靠且通用性强等优点,受到制造业的重视。采用机器人焊接已经成为焊接自动化、现代化的主要标志。

经过几十年的发展,机器人技术经历了3个阶段。早期的焊接机器

人由于其焊接的路径和焊接过程的规范参数是根据实际作业条件预先设置的,在焊接过程中不能根据焊接情况的变化进行实时的在线调整,缺乏“柔性”。随着计算机控制技术、人工智能技术以及网络控制技术的发展,焊接机器人也由早期的示教再现型向以智能化为核心的多传感、智能化的柔性加工单元方向发展。

人由于其焊接的路径和焊接过程的规范参数是根据实际作业条件预先设置的,在焊接过程中不能根据焊接情况的变化进行实时的在线调整,缺乏“柔性”。随着计算机控制技术、人工智能技术以及网络控制技术的发展,焊接机器人也由早期的示教再现型向以智能化为核心的多传感、智能化的柔性加工单元方向发展。

### 智能焊接机器人的关键技术

焊接机器人的智能化技术主要包括:焊接机器人对于焊接动态过程的信息传感技术,焊接机器人运动轨迹控制技术,焊接机器人遥控焊接技术,多机器人协调控制技术,焊接机器人在焊接动态过程与焊接质量的智能控制技术等几个方面<sup>[4]</sup>。为了实现焊接机器人智能化,文献[5]将现有的智能化技术集成整合,开发了基于局部自主智能焊接机器人系

统(LAIWR)。

### 焊接机器人智能化技术的研究现状

#### 1 焊接机器人传感技术

焊接机器人向智能化方向发展,增强其柔性和适应性,传感器是必不可少的。对于自主焊接来说,传感器感知外部环境的变化并通知机器人,机器人实时调整工作状态,以适应环境的变化<sup>[6]</sup>。弧焊用传感器大致可分为直接电弧式、接触式和非接触式3大类。按工作原理可分为机械、机电、电磁、电容、射流、超声、红外、光电、激光、视觉、电弧、声音等传感器。

随着最新的计算机视觉理论的发展,国内外许多研究人员对机器人视觉系统在焊接接头特征识别、焊接参数优化、焊炬位姿调整、焊接路径规划、焊缝跟踪、焊接过程熔透控制等方面的应用开展了卓有成效的研

究<sup>[7-9]</sup>。在此基础上,国内外知名焊接机器人厂家(如KUKA、GMF、Motoman和Adept等)相继开发出装备有新型视觉传感系统的机器人<sup>[10]</sup>。现阶段视觉传感器主要分为:结构光式、激光扫描式和直接拍摄电弧式3类。其中结构光式和激光扫描式属于主动视觉的方法。直接拍摄电弧式属于被动视觉的方法。

多传感器信息融合技术是近年发展起来的一门新兴技术,在焊接机器人领域有着广阔的应用前景。通过融合多个传感器提供的冗余、互补的实时信息,可以获得系统所需的更准确信息。多传感器信息融合技术目前尚处于研究阶段,国内外的相关研究还不是很成熟。

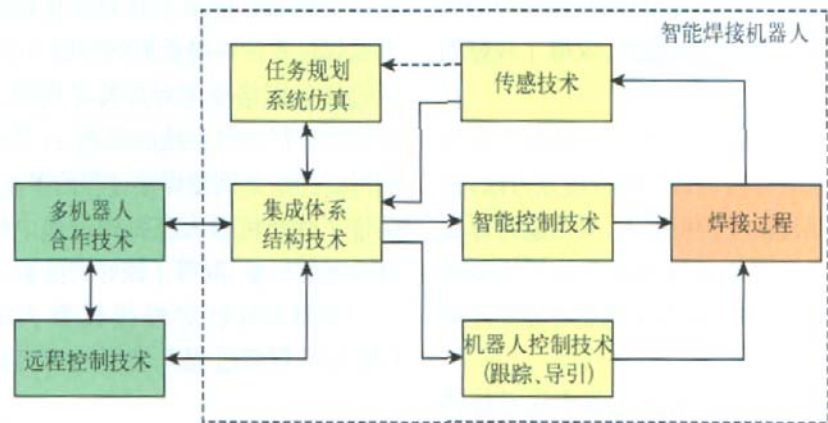
为实现对激光焊接过程中常出现的不同熔透状态的辨识,文献[11]使用多传感器采集焊接过程中的可听声、蓝紫光 and 红外辐射信号,并提取了反应熔透状态的6个信号特征,运用BP神经网络为框架构建了识别熔透状态的模式分类器。从而提供了一种有效的激光焊接质量在线检测方法。实验结果表明,识别焊接过程中熔透状态准确率在88%以上。

## 2 焊缝识别与导引技术

实施机器人焊接的首要技术之一是如何寻找并导引机器人焊枪接

近焊接的初始点,焊缝的识别与导引是焊接机器人智能化的重要组成部分。通过焊接机器人对焊接环境的感知,自主地识别焊接工件的结构形状和焊缝形式类别,对于实现机器人在焊接过程中的运动避障、自主导引

机器人的获取焊缝接头位置并对焊接机器人进行导引的方法,该方法能够通过传感系统自动地获取焊接的接头位置并计算出焊缝的轨迹信息,通过计算出的焊缝信息调整焊枪的姿态。



智能焊接机器人的关键技术组成

具有重要的意义。在现有的研究成果中,主要是通过基于视觉的方法对焊缝进行识别。

文献[12]提出了一种对于任意曲面的最佳路径获取方法,通过引入测地映射的概念对机器人的工作路径进行计算,相较于其他的方法,该方法不需要对摄像机及机器人进行标定即可获得相应的结果。将该方法应用于弧焊机器人上,完成了对弧焊机器人焊接路径的规划任务。

文献[13]论述了一种基于移动

文献[14]论述了一种空间焊缝的路径规划方法,通过双目视觉传感技术对复杂的空间焊缝的三维坐标进行了恢复。

## 3 焊缝跟踪技术

由于实际的焊接条件经常发生变化,如工件在加工、装配过程中的尺寸误差,工件受热变形等因素往往会使接头位置偏离示教好的路径,这样会造成焊接质量的下降,甚至失败,所以精确的焊缝跟踪是保证焊接质量的关键技术,是实现焊接过程自动化的重要研究方向<sup>[4]</sup>。随着近代模糊数学和神经网络的出现并成功地应用于焊缝跟踪系统,焊缝跟踪技术已经进入到智能跟踪的时代。

文献[15]中,清华大学研制了一种基于激光传感的焊缝轨迹跟踪系统,通过安装在机器人末端的摄像机构成的反馈控制系统,采用相应的算法检测出焊缝线,然后通过立体视觉技术计算出焊缝线的空间位置,从而得到焊缝轨迹的三维信息,完成焊缝的跟踪纠偏,该方法的实验结果表明,三维跟踪时的X、Y、Z方向误差小于0.3mm,取得了较好的控制效果。



列车转向架机器人焊接系统

文献 [16] 提出了一种基于模糊逻辑推理的焊缝跟踪系统。通过安装在机器人上的 CCD 装置获取焊接过程的图像,根据图像处理技术得到焊缝的边缘,采用模糊逻辑推理的控制方法对焊接的过程进行纠偏,此方法实现了对直线焊缝、曲线焊缝和折线焊缝的焊缝跟踪,取得了较好的跟踪效果。

文献 [17] 提出了一种基于遗传算法的焊接机器人路径规划方法,针对多自由度的机器人,采用遗传算法对机器人的路径和各个关节位姿进行最优规划,取得了稳定可靠的焊接结果。

文献 [18] 提出了基于视觉传感的机器人焊接焊缝三维计算和路径跟踪系统。该系统不需要对视觉传感系统进行标定就可以对未知的焊接环境进行识别,并进行焊缝信息的三维计算,实验结果表明该方法具有较高的可靠性。

文献 [19] 提出了一种基于被动视觉的焊缝实时跟踪系统。通过摄像机获取焊接过程中的焊缝图像,通过图像处理算法提取出焊缝的上下两条边缘,根据焊缝中心线和熔池中心的位置偏差,调整焊接机器人的行走轨迹。实验的结果表明该系统能够满足实际生产的精度要求。

文献 [20-21] 对具有移动和传感功能的特种机器人焊接的焊缝跟踪方法进行了详尽的阐述。

#### 4 焊缝成形质量控制方法

由于焊接过程是一个多参数相互耦合的时变非线性系统,影响焊缝成形质量的不确定因素很多,很难采用传统的控制方法对焊接过程进行控制。近些年随着模糊控制理论和神经网络控制技术及专家系统理论的发展,模拟焊工操作的智能控制方法已在焊接过程中成功应用,主要涉及到的技术包括熔池动态过程的视觉传感技术、建模与智能控制技术<sup>[22]</sup>。

文献 [23] 提出了一种模糊控制

器对焊缝成形进行控制,针对焊接过程中间隙的大小和变化的情况,实时地调整焊接过程中的焊接速度和焊接电流。在焊接机器人上实现了对钢管结构焊缝成形的模糊闭环控制,并取得了较好的控制效果。

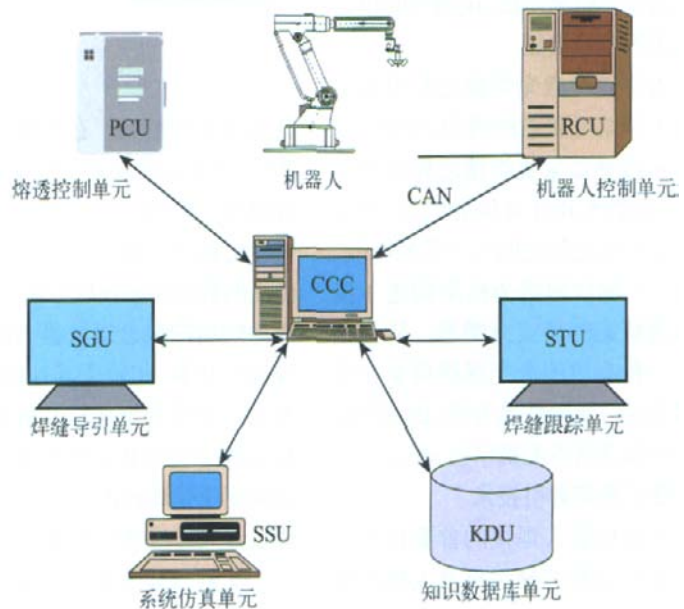
文献 [24] 提出了针对焊接机器人弧焊过程中焊缝成形的控制方法。通过神经网络模型对焊接过程的正面余高进行实时在线的预测,针对预测得到的结果调整焊接过程的参数,保证了焊接机器人在弧焊过程中焊缝成形的质量,取得了较好的结果。

文献 [25] 针对焊接机器人的 GMAW 焊接过程开发了一套自适

过程中熔池背面宽度和熔池高度同时稳定的目标。

#### 5 多机器人协调控制技术

多机器人系统是指若干个机器人通过合作与协调而完成一个任务的系统。它包含两个方面的内容,即多机器人合作和多机器人协调。当给定多机器人系统某项任务时,首先面临的问题是如何组织多个机器人去完成该任务,如何将总体任务分配给各个成员机器人,即机器人之间怎样进行有效的合作。当以某个机制确定了各自任务和关系后,问题变为如何保持机器人间的运动协调一致,即多机器人协调。



LAIWR系统硬件设计示意图

应控制系统。通过自适应的控制方法调整焊接过程中的焊接电流和焊接电压来保证焊接过程的成形质量,并对直线焊缝和曲线焊缝进行了控制实验,取得了满意的焊接结果。

文献 [26-27] 通过 CCD 摄像机对焊接熔池的图像进行采集,根据熔池表面的成像特点,开发了由熔池图像提取熔池三维形状参数的图像处理算法。在此基础上,设计了基于 Hammerstein 模型调节焊接电流和基于模糊逻辑调节送丝速度的非线性复合智能控制器,实现了保证焊接

文献 [28-29] 设计了一种复杂焊接机器人系统的 Petri Net 模型,并根据该模型开发出基于局域网络通信的软件控制系统,实现了多台机器人的协同控制。利用建立的系统模型进行了多机器人铝合金 GTAW 的悬空角焊实验。

文献 [30] 设计了一种激光焊接多智能体柔性制造加工系统 (LWFMS),在激光焊接过程中,实现了多个机器人在激光焊接过程中的协调和控制。

#### 6 遥控焊接技术

遥控焊接是为了完成空间站装配、海洋工程建设和核设施维修等极限环境中的焊接任务而提出的。遥控焊接时,操作者在远离焊接现场的安全环境中对焊接设备和焊接过程进行远程的监控和控制,与焊接机器人共同完成焊接任务。机器人的遥控操作主要集成临场感,虚拟现实和远程通信等技术。由于在焊接过程中操作复杂,同时需要对多个焊接的参数如焊枪的位姿、弧长、焊接速度进行控制。目前,国内外对遥控技术的研究成果较多,遥控焊接正朝着实用化的方向发展。

2000年,美国的Carnegie Mellon大学机器人研究所研制了一台名为POWER的四腿行走的移动平台,平台上安装有一台焊接机器人,采用“遥控+自主方式”工作,已经应用到造船行业中<sup>[31]</sup>。

文献[32]设计了一套立体视觉系统对焊接机器人的工作环境进行三维重建,并设计了相应的标定算法,实验结果显示重建的平均误差小于1mm,实现了立体视觉系统参数的分布标定。

文献[33]设计了一套弧焊

机器人工作单元Internet远程控制系系统。该系统通过采用IGRIP(Interactive Graphics Robot Instruction Program)建立了弧焊机器人工作单元空间场景的模型,通过现场摄像机,机器人的运动视频反馈给操作者的工作界面,并通过CORBA-CGI(Common Object Request Broker Architecture-Common Gateway Interface)方式实现对弧焊机器人的远程监控。通过实验证明了其控制方案的可行性和有效性。

文献[34]对机器人遥控操作的研究进展做了较为详尽的论述。

## 7 其他相关技术

机器人智能化技术覆盖的领域范围广,它融合了多个学科的研究成果。除了以上介绍的机器人智能化的几个主要发展方向外,机器人智能化技术还在焊接电源的配套设计、机器人控制器、离线编程、专家系统等



带有激光传感系统的弧焊机器人

领域研究取得了较大的进展,限于本文的篇幅,在这里不做详尽的介绍,可参考相关的文献。

## 结束语

从以上成果中可以看到,焊接机器人智能化技术已经取得了长足的进步,但同时也存在着许多问题需要解决。由于焊接是一个非线性的复杂过程,所以视觉传感以及焊接过程控制算法的稳定性和可靠性还需要不断地提高和完善。同时,多传感器信息融合、遥控焊接及智能化控制等技术也将成为未来发展的重要方向。

随着科学技术的逐步发展,焊接机器人将具有更好的对焊接环境的感知能力和适应能力。展望未来,在计算机、控制理论和人工智能等信息科学的带动下,机器人焊接技术将进入到自动化、机器人化和智能化的新阶段,具有一定规模的机械化、自动化的机器人焊接将逐步取代传统的手工焊接方法。

注:本文有参考文献34篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向编辑部索取。

(责编 金卯)



船用管系机器人焊接系统