

# 大型结构件多机器人焊接协调 及智能化技术概况

## Overview of Multi-Robot Welding Coordination and Intelligent Technology for Large-Scale Structure

上海海工装备高效智能焊接制造工程技术研究中心  
上海振华重工(集团)股份有限公司焊接所

张华军  
蔡春波 陆汉忠



张华军

高级工程师,上海振华重工焊接研究所所长,主要从事焊接机器人自动化焊接技术,发表论文近40余篇。

众所周知,航空航天装备结构件复杂,大而薄,焊缝多为空间曲线焊缝。保证焊接质量、提高效率,是推动航空航天装备制造水平的关键。在生产效率和产品质量并举的今天,单一机器人已不能很好地胜任现代制造业的要求,在开放体系结构的软硬件基础之上,如何实现多机器人的

在生产效率和产品质量并举的今天,单一机器人已不能很好地胜任现代制造业的要求,在开放体系结构的软硬件基础之上,如何实现多机器人的协调运动控制就成为焊接机器人柔性加工的研究重点之一。多机器人协调工作方式可以有效地提高生产力并增强实现复杂任务的通用性。

协调运动控制就成为焊接机器人柔性加工的研究重点之一。多机器人协调工作方式可以有效地提高生产力并增强实现复杂任务的通用性。一般而言,多机器人工作环境包括两类协调操作:紧协调操作和松协调操作。紧协调操作是指在同一工作空间里,多机器人操作手共同处理同一物体;松协调操作是指在同一工作空间里,每个机器人独立地完成各自任务。

### 多焊接机器人协调控制

一般地,可将工业机器人系统协调分为<sup>[1-2]</sup>:每个机器人在共享工作空间内独立执行各自的任务和所有

机器人协调完成一项给定的任务两大类。多机器人协调操作具有以下特点<sup>[3]</sup>:

(1)两机械手抓住同一物体或构成特定形位关系后,双臂形成一个封闭式运动链,两个操作臂之间的运动必须满足一定的运动约束关系。

(2)双臂协调的动力学比单臂更为复杂,双臂协调作业时的两个动力学方程可组合成单一的动力学方程,但维数的增加及相互耦合的关系使求解困难。

(3)双臂协调的控制结构比单臂的复杂,要实现不同机械臂间的协调运动控制,必须在机器人原控制系统之上增加协调控制级。

由于机器人双臂协调控制的复杂性与困难性,近年来,国内外学者对其进行了大量研究,主要工作集中在载荷分配、运动分解、避碰轨迹规划、闭链运动学和动力学模型及协调控制策略等方面<sup>[4-5]</sup>。

### 协调运动控制约束条件

多机器人协调的运动约束条件是焊接机器人协调控制研究的基础, Y.F.Zheng, J.Y.S.Luh<sup>[6]</sup>在这方面作了较突出的工作,其将两个机器人分为主动机器人和从动机器人,主动机器人的关节位移、速度和加速度根据运动规划预先给定,而从动机器人的对应值则通过机器人系统的主从关系来确定,并且首次推导出两个机器人在特定工作条件下末端执行器的位姿齐次约束方程,进而又将这一结果扩展到关节速度、加速度和广义力的约束方程<sup>[7]</sup>。Hong Suh等<sup>[8]</sup>对双臂协调机器人系统中一个机器人刚性地抓住物体的一端,另一个机器人在抓住物体的另一端时可沿被抓物体表面相对移动的情况进行了运动学研究,得到了从动机器人的广义解。毛祖铁<sup>[9]</sup>用回转变换张量的方法推导出两个机器人相对位姿保持不变,但两机器人同时有运动,以及两机器人均有运动,且其中一个机器人相对另一个机器人有相对运动规律两种情况下的运动学协调条件。杨成梧等<sup>[10]</sup>针对双臂协调机器人两手同时抓持同一物体运动时的结构与工作特点,由主手的运动状态推导出从手在其自身坐标系中的运动状态。汤宇松等<sup>[11]</sup>以空间复杂边缘跟踪任务为对象,基于矢量方程的方法在笛卡尔空间内提出了利用机器人双手协调解决此类问题的基本策略方法,为弧焊机器人系统协调控制研究提供了良好的借鉴。

### 协调运动控制

进行机器人系统双臂协调运动

控制时,主要有3种控制方案,即位置—位置控制、位置—力控制及动力学控制<sup>[12]</sup>。位置—位置控制是机器人双臂协调研究过程中首先发展起来的一种控制方法, C.O.Alford<sup>[13]</sup>在位置控制方式下,控制主动机器人按预先规划的轨迹运动,而从动机器人则沿着由主动机器人轨迹导出的轨迹运动,实现了主从机器人间的协调运动。位置—位置控制时,由于每个机器人的依从性差,在刚性连接条件下运动位置误差将产生内应力,因而这种方法只适用于低速运动和非刚性连接的运动。为了克服上述不足,人们提出了位置—力控制,即主动机器人作为位置控制,沿预先规划的轨迹运动,而从动机器人为力控制,利用腕部的力传感器所获得的力信息跟随主动机器人进行反馈运动控制。M.Uchiyama<sup>[14]</sup>在定义工作空间坐标和引入关节空间向量的基础上,推导出双臂机器人的运动学和静力学公式,成功地应用了混合位置—力控制。为保证机器人运动的精确性和良好的动态响应,研究人员在机器人双臂协调运动的研究中提出了动力学控制方案,应用非线性变换方法研究了双臂协调时两个机器人操纵单一物体

的动力学混合控制算法,并把物体间的内力作为一个控制量来消除,只考虑物体位置时的逆动力学冗余问题,取得较好的控制效果。

系统采用集散控制,双面双机器人采用主从协调控制策略<sup>[15]</sup>, Motoman 机器人为主手(正面), KUKA 机器人为从手(背面),建立该系统协调运动的算法模型,根据主手焊枪末端位置和姿态,以工件基准路径平面为对称面,经过运动学坐标变换,推导出背面从手机器人工具末端的运动路径点,从而控制从手跟随主手协调运动,实现了双面双弧焊机器人焊接。图1为多机器人协作焊接系统试验平台。

另外,文献[16]研究了3机器人协调系统搬运/操作大型物体到期望的位置/姿态过程中的轨迹规划和控制策略问题。采用“Master-and-Two-slave Robot”的操作模式实现对工件的协调搬运。

在机器人弧焊领域,从简化运算量的角度出发,提出了基于位置的弧焊机器人与变位机的协调运动控制算法。一种基于用户坐标系的双机器人焊接系统<sup>[17-18]</sup>,分别在工件上建立用户坐标系,在用户坐标系进行位姿转换,此模型不需要机器人本身运

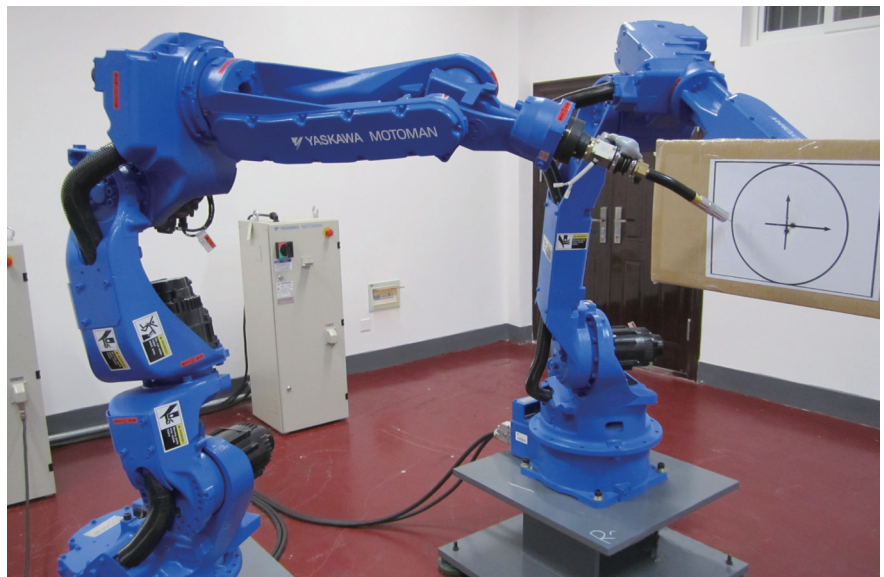


图1 多机器人协作焊接系统试验平台

动模型即可实现双机器人的协调运动。

### 多机器人智能化焊接

在工业应用中,多机器人协调系统多采用集中式控制,由一个中央控制单元对整个系统进行规划和决策。单个机器人只拥有很少的自主性或无自主性。每个机器人收集到的数据都发送给控制中心,然后由控制中心为所有的机器人制订动作。由于所有机器人的运动都由控制中心来控制,所以多机器人的协调与冲突问题比较容易解决。

现代化焊接工厂已向数字化、信息化、自动化、集成化、柔性化和智能化方法发展,尤其在航空航天大型空间曲线结构件,焊接变形影响,焊缝轨迹复杂,需要多个机器人、变位机共同作业,必须需要外部的传感系统,以及机器人仿真系统、焊接变形模拟系统等辅助下,才能实现大型构件的机器人智能化焊接。

谭民等<sup>[19]</sup>介绍了一个用于环缝焊接的多机器人平台,它由12台机器人承托船体,由一台焊接操作机来实施焊接。采用一台主控工业计算机(IPC)作为上层控制单元,负责船体模块的姿态控制、逆运动学、机器人轨迹规划、输入设定及系统状态的显示等工作。王宗伟等<sup>[20]</sup>介绍了双弧焊机器人在摩托车车架附件组焊中的应用情况,采用主从协调控制完成焊接作业,主机器人控制器接收来自主机器人、从机器人、夹具、滑台和工件的信号,协调它们之间的动作。

多智能体系统(MAS)就是研究在一定的网络环境,各个分散的、相对独立的智能子系统之间通过合作,共同完成一个或多个控制作业任务的技术。MAS适合于对于多机器人的协调问题,目前对于这一系统的研究比较多。

马国红等<sup>[21]</sup>利用Petri网理论对多台机器人焊接系统进行了建模,根

据系统的特点设计了基于局域网络通信的软件控制系统,实现系统的全局调度,通过试验实现系统各个机器人协调动作,未发生动作干涉。

邱涛<sup>[22]</sup>采用基于Petri网模型的离散控制与计算机程序实现的接口方法,将WAPN的token调度控制特性融入到焊接柔性加工单元传感控制信息与状态信息的流向控制算法中,建立了较为完善的焊接柔性加工单元中央监控软件平台的信息处理机制与实现方法。

上海交通大学设计了一个焊接柔性制造单元多智能体系统WFMC<sup>[23]</sup>,此系统由3台工业机器人,两个焊接过程监控传感器以及焊接电源组成,所有硬件资源均通过以太网和TCP/IP协议进行连接。设计者把这个系统分为了系统管理智能体、焊接机器人智能体、搬运机器人智能体、传感器智能体、焊接电源智能体几个功能模块,并实现了各模块点对点的通信,各个功能模块通过合作实现了3个机器人协调完成指定任务。

合肥工业大学开发的一种双机协调机器人弧焊的控制系统<sup>[24]</sup>,该系统运用多智能体Multiagent系统理论思想,把整个系统划分为机器人作业模块、焊接控制模块、变位机伺服控制模块、状态监控模块、本地操作模块、网络与接口模块,实现了双机器人协调焊接。

王慧等<sup>[25]</sup>以基于TCP/IP协议的以太网作为多机器人系统的通信网络结构,采用C/S的方式实现了多机器人之间的通信。

在多机器人协调控制策略的研究上,“集中”控制成本低、实现容易,是企业比较容易接受的控制方案,但是这种系统只能适应于小规划的多机器人系统。智能体控制理论使机器人单体更具有独立性,系统各部分能够通过通信网络解决相互协调的问题,鲁棒性强,但智能化控制系统复杂,实现起来相对困难。

### 结论及展望

对大型结构件实现机器人自动化焊接,尤其针对航空航天复杂结构件,对人的依赖性高。如果机器人具有人的感官和智能学习等能力,也就是具有智能化技术。只有机器人具有智能化制造技术才能保证大型复杂结构件的焊接质量稳定性。

应该大力发展多机器人协作、智能化传感技术、智能化控制技术和数字化信息化技术,为航空航天复杂结构件实现机器人智能制造提供有力支撑。

### 参考文献

- [1] Henrich D, Cheng, X. Fast Distance Computation for On-line Collision Detection with Multi-arm Robots. Proc Int. Conf. On Robotics and Automation. Nice, France, 1992: 2514-2519
- [2] Koivo A J., Bekey, G A. Report of workshop on coordinated multiple robot manipulators: planning, control and applications. IEEE J. Robotics Automat, 1988, 4(1): 91-93
- [3] 熊有伦. 机器人学. 北京:机械工业出版社,1993: 54-58.
- [4] 王越超,谈大龙. 协作机器人学的研究现状与发展. 机器人,1998, 20(1): 69-75.
- [5] 王越超,谈大龙. 多智能体机器人系统的研究进展. 中国第五届机器人学术会议论文集. 哈尔滨工业大学出版社,1998: 17-23.
- [6] Zheng Y F, Luh J Y S. joint torques for two coordinated moving robots. Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1986: 1375-1380.
- [7] Luh J Y S, Zheng Y F. Constrained Relations Between Two Coordinated Industrial Robots for Motion Control. International Journal of Robotics Research, 1987, 6(3): 60-70.
- [8] Hong Suh, Kang Shin G. Coordination of dual robot arms using kinematic Redundancy. Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1988: 504-509.
- [9] 毛祖铁. 两协调运动机器人的运动学研究. 机器人,1989, 3(5): 53-55.

本文共有参考文献25篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 亿霖)