

引用格式:岳志伟,王大伟,岳志峰,等.焊接机器人运动规划研究进展[J].有色设备,2025,39(5):15-23.

YUE Zhiwei, WANG Dawei, YUE Zhifeng, et al. Research progress in motion planning for welding robots[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(5): 15-23.

## 焊接机器人运动规划研究进展

岳志伟,王大伟,岳志峰,吕兴园

(白银有色集团有限公司,甘肃白银730900)

**[摘要]** 焊接机器人作为智能制造的主要设备之一,凭借其焊接质量高、制造成本低等优点,已在船舶、汽车、铁路等众多行业得到了广泛应用,但其运动规划在效率优化和能耗控制方面仍存在着技术瓶颈。通过系统地分析焊接机器人的关键技术,采用多维度的分析框架,分别从时间优化、能耗控制、防障碍碰撞机制及多目标协同4个维度对国内外的研究成果进行比对研究,构建了系统分类模型,希望能够为未来焊接机器人的发展提供有益的参考,推动焊接技术的不断进步和可持续发展,满足日益复杂和多样化的工业需求,助力制造业迈向更高的自动化和智能化水平。

**[关键词]** 焊接机器人;运动规划;时间优化;能耗控制;防障碍碰撞;多目标协同

**[中图分类号]** TF813; TG431

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1003-8884(2025)05-0015-09

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.05.002

### 0 引言

随着我国人口老龄化的激增,劳动成本的不断增加,导致焊接工作人员的数量锐减问题尤为突出<sup>[1]</sup>。与此同时,传统人工焊接模式存在缺陷:其焊接质量稳定性差、加工精度与生产效率受限,且作业环境常伴随焊接烟尘、弧光、电磁辐射及高强度噪声等职业健康危害因素。因此,为破解传统焊接工艺在劳动力、质量、效率与安全方面的发展瓶颈,以焊接机器人自动化作业替代传统人工模式,已成为推动相关产业转型升级的必然趋势。

自20世纪60年代以来,焊接机器人经过了3次转型。第一代焊接机器人为“示教再现型焊接机器人”,需要由用户去引导机器人进行焊接作业,其特点是太依赖于用户经验,适应性差,焊接质量普遍较低,需要进行返修,且对于复杂的工件,无法达到代替手工焊的地步,可将其归类于半自动化机器人。第二代焊接机器人为“基于离线编程的焊接机器人”,用户通过各种传感器获取相关数据信息后,可进行离线编程。但因为离线编程超过工件的生产技术要求,导致焊接质量无法

保证,也无法将各类传感技术进行融合处理,缺失了信息处理部分,其称为半智能化焊接机器人<sup>[2]</sup>。第三代焊接机器人为“智能焊接机器人”,也叫响应式服务机器人<sup>[3]</sup>,即在第二代机器人的基础上,增添了智能算法。通过先进的融合技术,进行自主编程、轨迹规划,使其能够通过深度学习,建立焊接知识数据库,可以实现自主决策和灵活运动的高级焊接机器人。

焊接机器人是指从事焊接(包括切割与热喷涂)工业机器人<sup>[4]</sup>,其在我国的汽车、建筑、船舶等领域中得到了广泛的应用<sup>[5]</sup>,但与发达国家相比,国内焊接机器人的使用密度要低于国际平均值。究其原因有两方面:①对于核心零部件的生产,目前高度依赖进口,导致生产成本较大;②焊接机器人的运动规划需要专业的技术人员进行规划,而且示教编程的难度较高,一般工作人员无法进行操作。但对于一些复杂零部件的焊接作业,焊接机器人的运动规划是必不可缺的一个环节,而合理的运动轨迹规划方法,能够提升焊枪在运动过程中的平稳性和连续性,提升焊接质量、减少能源消耗<sup>[6]</sup>。

**[收稿日期]** 2025-06-22

**[第一作者]** 岳志伟(1995—),男,甘肃会宁人,助理工程师,大学本科,主要从事电气设备检修维修工作。

## 1 焊接机器人运动规划技术概述

焊接作为制造业中高复杂度、高危险性的关键工艺环节,其自动化与智能化升级对工业发展具有战略意义。焊接机器人凭借高精度重复作业、恶劣环境适应性、工艺质量稳定性等优势,已成为汽车制造、船舶焊接、航空航天等领域的核心装备。在汽车生产线中,机器人焊接可确保车身焊点一致性,将缺陷率降低至 0.01% 以下;在船舶分段焊接中,其长时连续作业能力可提升效率 3 倍以上,同时降低人工暴露于高温、烟尘环境的风险。此外,机器人通过多轴协同与轨迹优化,能够完成复杂曲面焊接任务,突破传统人工操作的技术极限。随着工业 4.0 推进,焊接机器人进一步与数字孪生、物联网技术融合,实现工艺参数实时调控与远程监控,成为智能制造体系不可或缺的组成部分<sup>[7]</sup>。

焊接机器人运动规划作为其核心技术之一,是指在给定工件和任务的情况下,确定焊接机器人在三维空间中的运动轨迹和路径,以便完成焊接任务<sup>[8]</sup>。然而大多数情况下焊接工件,为非标准件,每一个工件具有的形状不同、焊接位置不同,所以对于一些具有复杂表面的焊接工件,需要实时调整焊枪的位姿,才能确保焊接质量。市场上生产的焊接机器人绝大部分采用六轴的串联机械臂作为机械本体,前 3 个自由度实现空间位置的定位,后 3 个自由度实现末端执行器不同的空间姿态的定位<sup>[9]</sup>。因此,焊接机器人的运动规划又称之为串联机械臂的运动规划。

串联机械臂的运动规划包括路径规划和轨迹规划。路径规划是指由一系列的连续点经过处理,去掉一些无关联、无用的点,随之生成的一条简化路径。因此,焊接机器人的路径规划问题,实质上就是在满足一定的约束条件下,找到一条最优路径,即最短的焊接路径<sup>[10]</sup>。轨迹规划不同于路径规划,更注重时间线的描述,因此,路径上的同一点,当到达时间不同时,相应的轨迹也不同。

## 2 焊接机器人路径规划技术

传统的路径规划方法,主要依赖于手工拖拽,并不能保证最短的焊接路径,且耗时长、效率低<sup>[11]</sup>。对此,针对焊接机器人路径规划效率一直低下的问题,吕文壮等<sup>[12]</sup>提出了一种改进的路径规划方法。

该方法将蚁群算法和粒子群算法交叉和融合,克服了蚁群算法搜索效率低、容易陷入局部最优的问题,并与之前的蚁群算法进行对比,改进后的算法搜索速度更快。

虽然传统的人工路径规划,可以有效减少焊接接头数量,但当焊接接头数量较大时,就会陷入局部最优。对此,尤田等<sup>[13]</sup>提出了基于 GA-PSO 算法的路径规划方法,并对 GA、PSO、GA-PAO 3 种方法的迭代速度进行了比对,如图 1 所示。该算法的迭代速度更快,搜索能力更强。

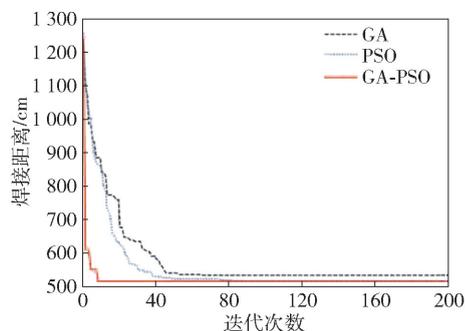


图 1 3 种算法的收敛速度曲线<sup>[13]</sup>

Fig. 1 Convergence speed curves of the three algorithms<sup>[13]</sup>

与该方法相似,掌俊玮等<sup>[14]</sup>提出的基于螺距约束和 HPSOGA 算法的路径规划方法。该方法将遗传算法和粒子群算法结合到一起,增强了机械臂搜索最短路径的能力。此外,由于焊接机器人的路径规划,大多依靠人工经验进行规划,对于后续的工作的开展,会产生诸多不便,增加了工作量。为此,金嘉琦等<sup>[15]</sup>提出了一种改进 ACO 的路径规划方法。通过 ROBCAD 的仿真试验,证明了该算法的可行性。

综上所述,焊接机器人的路径规划问题,主要以搜索能力和最短路径为目标,以蚁群算法为基础,以粒子群算法和遗传算法为优化方法,经过模拟仿真试验,最终得到最佳路径。

## 3 焊接机器人轨迹规划技术

焊接机器人的轨迹规划,根据规划空间的不同,可分为 2 种:关节空间轨迹规划和笛卡尔空间轨迹规划<sup>[16]</sup>。关节空间轨迹规划的优点在于在规划过程中不需要反复求取机械臂的逆运动学,因此计算量小、求解简单<sup>[17]</sup>,同时不会出现奇异点<sup>[18]</sup>,缺点

是只对机器人的各关节进行规划,只能得到每个关节的变化曲线,因此用户无法直接观测到末端的轨迹,适用于码垛、搬运等一些对末端轨迹精度要求较低场合。

笛卡尔空间轨迹规划在规划过程中需要不断地通过机器人逆运动学获取各关节角度。常用方法有直线插值与圆弧插值等,相较于前者,笛卡尔空间轨迹规划的最大优势在于规划的结果比较直观,能够直接得到末端的运行轨迹,因此适用于焊接、喷漆等一些对轨迹要求严格的场合。

无论是何种形式的轨迹规划,在进行规划时,均需考虑主要变量因素,如时间、能量以及无障碍碰撞等。

### 3.1 基于时间最优的轨迹规划

基于时间最优的轨迹规划,是指在满足各项约束条件下,以机械臂运动时间最段为优化目标,确定目

标轨迹。而时间最优包含 2 个层面:①以轨迹运行的时间最少为优,主要依赖于机械臂本身硬件设施,决定了所能达到时间最优的上限;②以轨迹计算的时间最少为优,主要依赖智能算法来提高计算效率。

虽然大部分的轨迹规划算法采用多项式插值法进行规划,但多项式插值法普遍存在过拟合风险高、计算复杂的缺点。因此,周哲等<sup>[19]</sup>提出了以 5-3-3-3-5 分段多项式关节插值方法(图 2),即在满足各个关节角速度和角加速度约束的条件下,通过改进萤火虫算法(VSSM-FA),计算出机械臂各关节轨迹最短运行时间,确保机械臂关节轨迹速度和加速度的连续性,进而实现对机械臂运行轨迹的时间最优化处理,并将 VSSM-FA 算法,与原始萤火虫算法、布谷鸟算法、果蝇优化算法进行对比,得到机械臂运行时间更短,该过程也更加平稳。该研究为多项式插值法提供了新的改进思路。

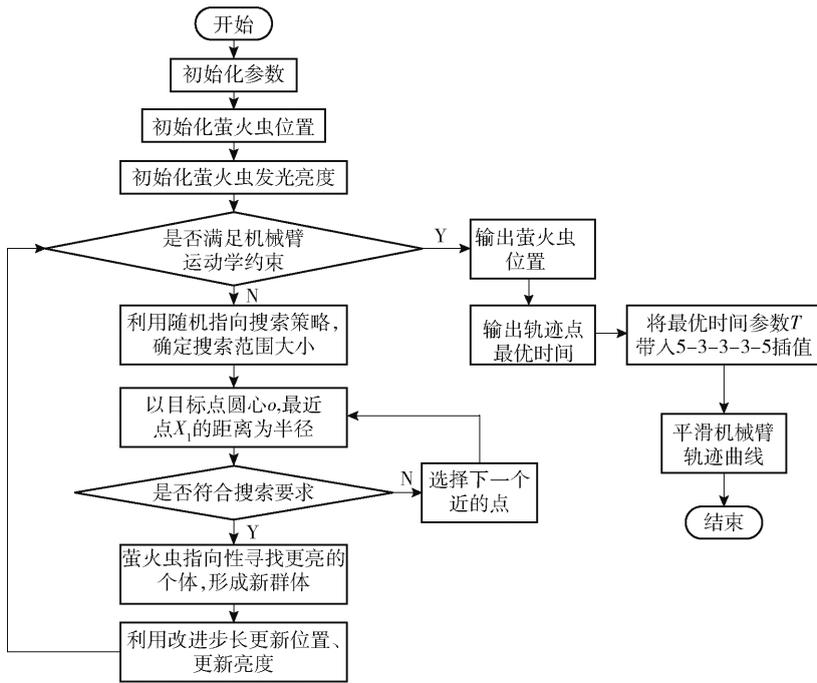


图 2 5-3-3-3-5 分段样条插值曲线最优时间平滑过程<sup>[19]</sup>

Fig. 2 Optimal time smoothing process for 5-3-3-3-5 segmented spline interpolation curves<sup>[19]</sup>

此外,刘亚楠<sup>[20]</sup>提出采用 3-5-3 组合多项式对运行轨迹进行规划,同时结合改进粒子群算法对运动轨迹进行优化,有效地缩短机械臂的运行时间;许皓<sup>[21]</sup>提出一种基于遗传算法对 3-5-3 多项式插值法进行机械臂的轨迹规划,通过遗传算法的双适应度搜索,找出了最为接近最优时间的最佳组合,同时兼

顾了运行的稳定性,从而提高机械臂从一个点到另一个点的运行时间,达到机械臂时间最优的轨迹优化;李小为等<sup>[22]</sup>提出了粒子群优化速度约束下的时间最优 3-5-3 多项式插值轨迹规划方法。通过离化得到六自由度机械臂限速运行下的最短时间,在机器人控制平台上进行实时试验,得到关节运动位置、

速度、加速度曲线,准确地实现了任意速度约束的时间最优轨迹规划。

除了以多项式插值法进行规划外,还有其他的智能算法。如殷凤健等<sup>[23]</sup>提出通过自适应遗传算法对运动轨迹进行时间最短优化,并利用罚函数解决运动学约束问题,有效减少了机械臂完成任务所需的运动时间。Benotsmane 等<sup>[24]</sup>提出了一种新的“鞭打”的方法,类似于鞭子的运动。通过与原始路径相比,该算法节省了 33% 的时间,减少了机械臂的运行周期,提高了运行效率。Kaur 等<sup>[25]</sup>提出了一种 Coyote 优化算法 (COA),并与遗传算法 (GA)、粒子群优化 (PSO)、灰狼优化 (GWO)、人工蜂群 (ABC) 优化、鲸鱼优化算法 (WOA) 等优化算法进行了对比分析,结果该算法的计算时间减少了 1.405 s。Li 等<sup>[26]</sup>提出在传统的布谷鸟搜索算法上,采用改进的初始种群生成方法和步长,建立了一种改进的布谷鸟算法。选择以总消耗时间为目标的函数,有效提升了计算效率。Zhang 等<sup>[27]</sup>提出以基于关节轨迹的时间影响作为优化指标,建立了多目标非线性方程,结合了精英遗传算法对目标进行优化,增强了个体局部寻优能力,避免精英保留遗传算法的早熟影响,从而节省计算时间。Jin 等<sup>[28]</sup>提出帐篷混沌映射和粪甲虫混合算法 (MBO) 相结合的应用程序,调用了粪甲虫算法独特的避障习惯和觅食优化思想,并将其引入混沌帐篷映射思想,防止粪甲虫算法 (DBO) 陷入局部最优,增加全局搜索的覆盖范围,计算效率提升了 30%。

综上所述,基于时间最优的轨迹规划,相关的研究方式是以分段多项式插值法为基础,以智能寻优算法为优化策略进行优化的,通过提高计算效率和寻优效率,来减少计算时间,因此,未来研究可进一步探索混合优化策略以提升动态环境的适应性,同时强化并行计算与边缘计算技术解决高自由度机械臂的实时性问题。

### 3.2 基于能量最优的轨迹规划

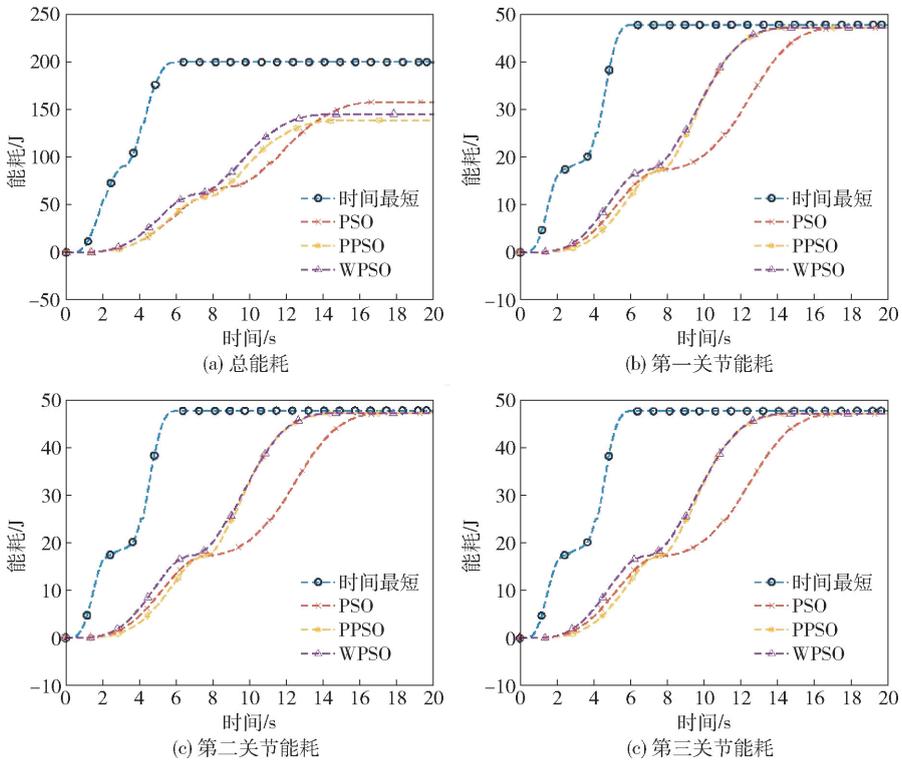
在串联机器人行业,尤其是六自由度的串联机械臂,由于机械本体结构的限制,运行速度受限,导致串联机器人不具有并联机器人的高速运行的能力,因此,对于机械臂的轨迹规划,只提升运行效率和计算效率,并不能达到最优的轨迹规划。相反,由于串联机械臂在关节处的电机,具有更高的功率和额定电流,导致其负载要远大于并联机械臂。所以,

减少机械臂能耗是轨迹规划必不可少的一环,因此,衍生了基于能量最优的轨迹规划问题。

基于能量最优的轨迹规划,即在考虑关节运动的限制下(如速度、加速度、关节扭矩等),以最小的能耗来满足所需的目标轨迹。因此,首先需了解对于串联机械臂能量表达形式,即力矩形式、电机所做的机械功形式和电机的功率消耗。其次,需要建立能量消耗的目标函数,通过联立力矩、加速度、速度等多个约束条件组成方程组,通过求解方程组,获得最优解。但是,所建立的方程组大多是非线性的,且能量消耗本身就是一个非线性动态变化的值,因此需要助智能算法获得最优解,实现能量最优的轨迹规划。对此,温琼阳等<sup>[29]</sup>提出了一种基于金字塔拓扑结构的粒子群算法来求解最佳的机械臂能耗问题,即通过利用金字塔式的拓扑结构将粒子进行排序分层,改进算法的竞争策略,从而增加种群多样性,进而引入胜利百分比来调整粒子群算法的权重系数,提高了搜索效率。结果如图 3 所示,该方法能够有效降低能耗。

此外,Nonoyama 等<sup>[30]</sup>提出将机器臂配置问题与元启发式方法相结合以节省能源消耗。通过遗传算法和粒子群优化算法等元启发式的算法对 PID 的参数进行微调,创建最佳的机械臂运行轨迹,实现机器臂节能配置。但这种方法会导致鲁棒性受限,需要频繁重调 PID 参数,基于此,Boscariol 等<sup>[31]</sup>提出利用功能冗余作为提高机械臂能源效率的工具,通过运动设计提高能效,并在末端执行器的方向进行参数化描述,结果显示最多可节省 20.8% 的能源消耗;李纯艳等<sup>[32]</sup>提出首先通过 7 次 B 样条曲线进行规划轨迹,保证轨迹规划的连续性,其次用改进的麻雀搜索算法 (ISSA) 算法求解最优能耗轨迹的时间序列,进而推导出基于能量最优的轨迹,结果表明,不仅实现轨迹的连续平滑,并且有效降低了能源消耗;Vysocky 等<sup>[33]</sup>提出通过减少非技术性的、与路径无关的运动过程中的能源消耗,使用带有 Bezier 曲线插值器的粒子群优化算法,可生成最佳轨迹,试验结果表明最佳的能耗可以节约 40%。

综上所述,以减少能耗为目标进行轨迹规划,首先需要考虑机械臂硬件配置,因为硬件决定了能耗的上限;其次在不影响运行轨迹的平滑性的前提下,需解决机械臂能耗配置问题。因此,未来的研究方向应是以解决各关节能耗配置的问题为主,通过相

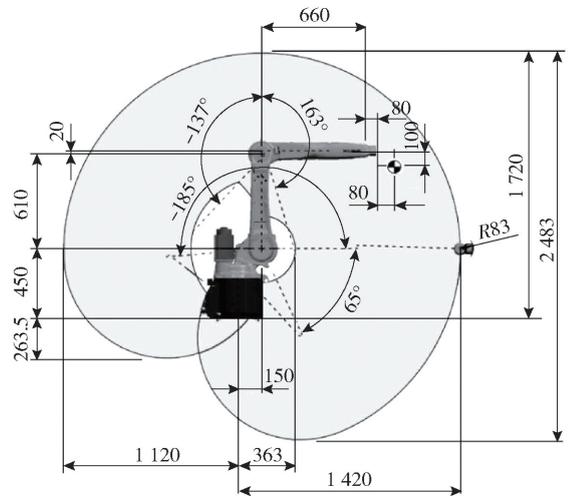
图3 总能耗及各关节能耗变化曲线<sup>[29]</sup>Fig. 3 Variation curves of total energy consumption and energy consumption of each joint<sup>[29]</sup>

关算法搜索能耗最优,实现最佳轨迹规划。

### 3.3 基于无障碍碰撞的轨迹规划

机械臂的无障碍碰撞的轨迹规划,是指机械臂根据空间环境的信息,自主规划一条从起始位置到目标位置的安全无碰撞的路径。如图4所示,在规划无障碍碰撞路径前,首先需要对机械臂的本身结构进行分析,确定机械臂所能达到的奇异点和活动空间范围<sup>[34]</sup>;其次,需要通过传感器所获得的各项数据,确定目标障碍物位置在活动空间内的位置;最后,需采用空间几何包络模型(球体包络模型、圆柱体包络模型以及长方体包络模型),进行3D仿真建模,并进行轨迹规划。对此,李广创等<sup>[35]</sup>提出将机械臂与障碍物采用包围盒模型进行简化,使用改进的RRT算法,规避了机械臂与各种障碍物的碰撞,提升了规划效率和成功率,降低了路径规划代价,可使机械臂能够以无障碍碰撞的要求到达指定位置。

考虑到机械臂运动性能和环境因素会对无障碍碰撞轨迹产生影响。因此,需要利用运动学仿真软件进行建模,并对其全部的空间点进行计算,预测能生成的各种轨迹,通过轨迹和障碍物的相互交集,去

图4 KR10 R142型工业机器人的工作空间<sup>[34]</sup>Fig. 4 The workspace of the KR10 R142 type industrial robot<sup>[34]</sup>

除有交集的部分轨迹,保留无碰撞的轨迹<sup>[36]</sup>。同时,采用智能算法,选择最优路径,得到一条安全可靠、无障碍碰撞的轨迹。对此,Chu等<sup>[37]</sup>提出通过乘数惩罚法优化无碰撞轨迹,提升对路径的预测能力,防止发生碰撞。当机械臂进入可能发生碰撞的

潜在空间时,以其对路径的期望特性进行避障优化。Tomoki 等<sup>[38]</sup>提出了使用条件生成对抗网络(CGAN)进行无障碍碰撞规划,将起始状态和目标状态与生成的潜在空间中的任意线段连接起来,生成各种避障轨迹。通过无障碍碰撞的潜在空间,使用户可根据优化条件以动态形式生成最佳路径。

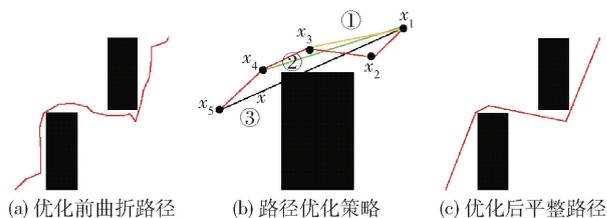


图 5 路径优化对比<sup>[36]</sup>

Fig. 5 Comparison of path optimization<sup>[36]</sup>

此外,考虑到对于大型机构设备的焊接加工等,一台焊接机械臂无法完成焊接作业,需要多台机械臂进行多机协同作业<sup>[39]</sup>。因此,在多台机械臂之间如何规划一条无障碍碰撞的路径,防止机械臂之间的相互干涉和碰撞显得尤为重要。对此,Pu 等<sup>[40]</sup>提出基于双臂机器人避障算法,即在实现双臂机器人自主避障的前提下,完成末端避障和零空间避障的多重避障任务,且具有较小的末端轨迹误差,为多机作业在终端避障和零距离避障方面提供了新的研究思路;张等<sup>[41]</sup>提出首先建立了单焊接机器人模型,将焊接任务转化为 TSP 问题,其次,将双焊机转换为 MTSP 问题,根据约束问题,可将 MTSP 问题可转化为多个 TSP 问题,从而实现多机协同的无障碍碰撞规划。此外,汤彬等<sup>[42]</sup>提出利用改进的蚁群算法和遗传算法,实现对焊接件和焊接机器人的无障碍碰撞规划;答奇等<sup>[43]</sup>提出利用机械臂的冗余特性,建立多目标函数,采用遗传算法对双机械臂进行运动轨迹,仿真结果表明,该方法具有可行性;侯仰强等<sup>[44]</sup>提出通过对影响焊缝质量及机器人运动平稳性的各项参数,建立目标函数,以多目标遗传算法进行双机器人无障碍路径规划;曹家勇等<sup>[45]</sup>提出将粒子群思想和遗传算法结合,再使用改进的蚁群算法解决路径规划问题,经 Tecnomatix 模拟试验最终得出了一条无碰撞的最优的路径。

因此,为避免多台机械臂在执行焊接等复杂任务时,相互之间的干涉和碰撞问题,未来的研究方向应以开发更加高效的算法为主,使其能够更快、更准

确地处理大规模数据,适应更加复杂的作业环境。同时须增强机械臂的深度学习能力。机械臂每次在焊接作业时,所面对的障碍物不可能完全相同,通常单一的避障路径规划不能达到普适性,所以针对此问题,需要引入机械臂的深度学习能力。对此,李广创等<sup>[35]</sup>提出采用了深度强化学习算法来解决机械臂的路径规划问题。通过使用一个 3 层的 DNN 网络,输入为机械臂的状态信息,输出为机械臂的运动关节角度,通过离线训练,机械臂能够自行训练出 1 条接近于最优的运动轨迹,能够成功地避开障碍物到达目标点。

### 3.4 基于多目标最优的轨迹规划

以时间为优化目标可缩短机械臂的时耗,以能量为优化目标可减少机械臂的能耗,但仅以单变量为优化目标,往往会顾此失彼,达不到最佳的路径规划,因此需要进行多目标轨迹规划。对此,以时间和能量为多目标优化,浦玉学等<sup>[46]</sup>提出了一种基于改进万有引力算法(IGSA)的最优轨迹规划方法,通过与标准人工蜂群算法(ABC)和标准引力搜索算法(GSA)进行比对,结果如图 6 所示,该方法运行速率更快,能耗更少;Li 等<sup>[47]</sup>提出将五次 B 样条曲线和改进的 NSGA-II 算法应用于时间和能量的多目标优化,得到了最优的轨迹规划模型,同时还改善了机械臂的运动平稳性;李等<sup>[48]</sup>提出以时间和能量最优作为目标函数,施加运动学和力矩约束,建立优化问题,进而转化为凸优化问题,再利用 MATLAB 凸优化工具箱求解得到最优轨迹,结果显示,优化后的最终轨迹,与最初轨迹相比,时间减少了 29.9%,能耗减少了 34.1%,实现时间和能耗的综合最优。

以时间和冲击为多目标优化,左等<sup>[49]</sup>提出了一

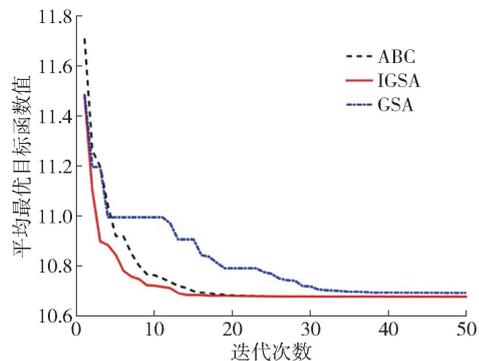


图 6 寻优曲线对比图<sup>[46]</sup>

Fig. 6 Comparison chart of optimization curves<sup>[46]</sup>

种基于改进多目标粒子群算法(MOPSO)的机械臂轨迹规划方法,其特点是利用5次B样条曲线对轨迹进行插值,保证了关节轨迹的平稳性和连续性,并通过混合策略改进的多粒子群算法获得了更好的收敛性;胡等<sup>[50]</sup>提出了一种改进的遗传算法,采用5次多项式插值法对轨迹进行插值,通过海明距离和欧式距离对遗传算法进行了改进,结果证明,改进后的算法所生成的轨迹规划的时间更少,冲击减小,平滑度更高。

以时间、能量和冲击为多目标优化,李琴等<sup>[51]</sup>提出了一种基于布谷鸟算法(CS)和非支配排序遗传算法(NSGA-Ⅱ)的混合算法(CS NSGA-Ⅱ),如图7所示。结果表明混合算法,与NSGA-Ⅱ和MOPSO算法相比,收敛速度更快,所得轨迹也更加平滑。此外,张学聪等<sup>[52]</sup>提出了一种新的多目标麻雀搜索算法(MOSSA),其特点是先利用了7次B样条插值法对轨迹进行了插值,确立了轨迹规划的模型,其次,用麻雀搜索算法对可行的轨迹进行了搜索,最后采用袋装树分类算法,对生成的轨迹进行了筛选,确定了最优轨迹。汤小红等<sup>[53]</sup>提出了带扰动的自适应粒子群算法(ADPSO),该方法先采用了5次NURBS曲线插值法来保证轨迹的平滑性,其次将粒子外推思想和粒子群算法进行了结合,增强了搜索能力,最后引入扰动,对搜索速度进行了加速。经过仿真实验证明,ADPSO对于机器人轨迹规划具有高效性。

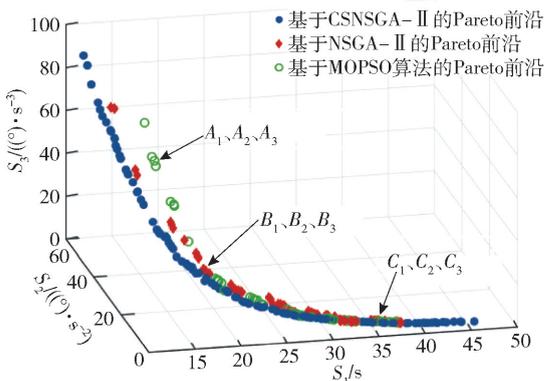


图7 基于不同算法的6R勃朗特机器人Pareto前沿分布对比<sup>[51]</sup>

Fig. 7 Comparison of Pareto front distributions for 6R Brontes robots based on different algorithms<sup>[51]</sup>

## 4 结语

针对焊接机器人在焊接复杂工件的运动规划问题,本文系统分析了国内外研究现状,并探讨了焊接机器人在时间优化、能耗控制、无障碍碰撞以及多目标协同等4个维度的技术路线。通过大量的现场测试,证明了其在复杂环境中的有效性和可靠性,为实际应用提供了理论支撑。

但随着制造业对自动化和可持续性需求的提升,对于焊接机器人的运动规划提出了更高的要求。而智能算法的复杂度高、动态适应性差,机械臂核心零部件依赖进口等问题是亟需突破的技术瓶颈,因此,未来研究方向可聚焦于以下3点。

1) 开发混合优化策略与并行计算技术,提升高自由度机械臂的实时规划能力,增强动态环境适应性。

2) 深化数字孪生、物联网与焊接机器人的融合,实现工艺参数实时调控与远程智能监控,推动工业4.0背景下的智能化升级。

3) 加强核心零部件的自主研发,突破技术壁垒,降低生产成本,同时探索基于深度学习的自主决策系统,简化操作门槛。

### [参考文献]

- [1] 霍厚志,杨朔,刘龙飞,等. 我国焊接机器人应用现状及关键技术概述[J]. 焊管,2023,46(5):1-7,28.
- [2] 霍厚志,张号,杜启恒,等. 我国焊接机器人应用现状与技术发展趋势[J]. 焊管,2017,40(2):36-42,45.
- [3] 吴海州. 焊接机器人技术发展探究[J]. 内燃机与配件,2023(20):93-95.
- [4] 黄瑞,张敬修,王鹏,等. 焊接机器人机械结构设计及运动学分析[J]. 黑龙江工业学院学报(综合版),2023,23(6):140-150.
- [5] 潘海鸿,付英东,杨一帆,等. 焊接机器人摆动轨迹加减速度规划方法[J]. 组合机床与自动化加工技术,2024(12):67-71.
- [6] 余震,任豪豪,秦庆平,等. 面向复杂空间路径的焊接机器人运动学分析与轨迹规划[J]. 武汉科技大学学报,2023,46(5):384-392.
- [7] 马佳玮,孙菁伯,迟关心,等. 基于立体视觉和YOLO深度学习框架的焊缝识别与机器人路径规划算法[J]. 焊接学报,2024,45(11):45-49.
- [8] 任红格,宋雪琪,史涛. 动态SHO-ACO的焊接机器人路径规划[J]. 机械设计与制造,2024(7):1-5.
- [9] 李大瑞,肖平,孙永久. 六轴焊接机器人关节轨迹规划

- 与仿真[J]. 东莞理工学院学报, 2023, 30(3): 120 - 124.
- [10] 聂芬, 赵志华. 基于改进果蝇算法的焊接机器人路径规划[J]. 制造技术与机床, 2021(10): 21 - 25.
- [11] 孙振博, 王明伟, 李姝, 等. 基于改进蚁群算法的焊接机器人路径优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(2): 57 - 60.
- [12] 吕文壮, 曹家勇, 党铭章, 等. 改进蚁群算法在焊接机器人路径规划中的应用[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(6): 32 - 36.
- [13] 尤田, 张威, 葛琳琳. 基于 GA-PSO 算法焊接机器人路径规划研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2018, 38(2): 85 - 89.
- [14] 掌俊玮, 张礼华, 蒋雨洋, 等. 基于螺距约束和 HPSOGA 算法的六自由度焊接机器人路径规划[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2022, 36(4): 46 - 50.
- [15] 金嘉琦, 曲晟, 王靖远. 基于改进 ACO 的机器人路径规划与仿真研究[J]. 机床与液压, 2019, 47(9): 72 - 75.
- [16] 李黎, 尚俊云, 冯艳丽, 等. 关节型工业机器人轨迹规划研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(5): 36 - 50.
- [17] 冯树先, 刘益剑, 夏慧强, 等. 焊接机器人轨迹规划与运动仿真方法[J]. 制造技术与机床, 2020(11): 61 - 65.
- [18] 刘胜, 邱志成, 张宪民. 平面 3-RRR 并联机构的自激振动实验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 24 - 30, 67.
- [19] 周哲, 欧阳勇. 六轴补漆机器人时间最优轨迹规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(6): 53 - 57.
- [20] 刘亚楠. 六轴机械臂轨迹规划与跟踪控制研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.
- [21] 许皓. 基于机器视觉的焊缝识别及轨迹规划[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- [22] 李小为, 胡立坤, 王琥. 速度约束下 PSO 的六自由度机械臂时间最优轨迹规划[J]. 智能系统学报, 2015, 10(3): 393 - 398.
- [23] 殷凤健, 梁庆华, 程旭, 等. 基于时间最优的机械臂关节空间轨迹规划算法[J]. 机械设计与研究, 2017, 33(5): 12 - 15.
- [24] Benotsmane R, Dudas L, Kovacs G. Trajectory optimization of industrial robot arms using a newly elaborated "Whip-Lashing" Method [J]. Applied Sciences-Basel, 2020, 10(23): 8666.
- [25] Kaur M, Yanumula V K, Sondhi S. Trajectory planning and inverse kinematics solution of Kuka robot using COA along with pick and place application [J]. Intelligent Service Robotics, 2024, 17(2): 289 - 302.
- [26] Liu R, Pan F. A Multi-objective trajectory planning method of the dual-arm robot for cabin docking based on the modified Cuckoo Search Algorithm [J]. Machines, 2024, 12(1): 64.
- [27] Zhang H, Zua W, Xu X, Zhu Y. Optimization control of cooperative trajectory towards dual arms based on time-varying constrained output state [J]. Complexity, 2021, 2021(1): 5338134.
- [28] Jin H, Ji H, Yan F. An effective obstacle avoidance and motion planning design for underwater telescopic arm robots based on a Tent Chaotic Dung Beetle Algorithm [J]. Electronics, 2023, 12(19): 4128.
- [29] 温琼阳, 朱学军, 李毅, 等. 基于改进粒子群算法的机械臂能耗轨迹优化[J]. 计算机应用研究, 2024, 41(6): 1649 - 1655.
- [30] Nonoyama K, Liu Z, Fujiwara T, et al. Energy-efficient robot configuration and motion planning using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization [J]. Energies, 2022, 15(6).
- [31] Boscarriol P, Caracciolo R, Richiedei D, et al. Energy optimization of functionally redundant robots through motion design [J]. Applied Sciences, 2020, 10(9): 3022.
- [32] 李纯艳, 晁永生, 陈帅, 等. 基于改进麻雀搜索算法的机器人能耗最优轨迹规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(6): 180 - 182, 187.
- [33] Vysocký A, Papřok R, Šafařík J, et al. Reduction in robotic arm energy consumption by particle swarm optimization [J]. Applied Sciences, 2020, 10(22): 8241.
- [34] 朱志伟, 李和平. 基于 MATLAB 的 KUKA 焊接机器人轨迹规划与运动学仿真[J]. 机床与液压, 2019, 47(21): 64 - 69.
- [35] 李广创, 程良伦. 基于深度强化学习的机械臂避障路径规划研究[J]. 软件工程, 2019, 22(3): 12 - 15.
- [36] 熊俊涛, 陈浩然, 姚兆葵, 等. 基于 PIB-RRTstar 的荔枝采摘机械臂运动规划方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 82 - 92.
- [37] Chu X, Hu Q, Zhang J. Path planning and collision avoidance for a multi-arm space maneuverable robot [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 54(1): 217 - 232.
- [38] Ando T, Iino H, Mori H, et al. Learning-based collision-free planning on arbitrary optimization criteria in the latent space through cGANs [J]. Advanced Robotics, 2023, 37(10): 621 - 633.
- [39] 徐群华, 林群煦, 张弓, 等. 多机器人空间轨迹规划与运动学特性研究[J]. 自动化与信息工程, 2022, 43(1): 15 - 19, 32.

- [40] Pu Q, Xu X, Zhang H, et al. The algorithm of multiple obstacle avoidance tasks for dual-arm robots [J]. IEEE Access, 2023, 11: 79190 – 79202.
- [41] 张瑞星, 李秀娟, 高唤. 双焊接机器人协同路径规划研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(6): 81 – 85.
- [42] 汤彬, 王学武, 薛立卡, 等. 双焊接机器人避障路径规划[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2017, 43(3): 417 – 424.
- [43] 答奇, 付立友. 双机器人协作管管焊接的运动规划[J]. 工业控制计算机, 2014, 27(5): 66 – 68.
- [44] 侯仰强, 王天琪, 岳建锋, 等. 基于多目标遗传算法的双机器人协调焊接路径规划[J]. 中国机械工程, 2018, 29(16): 1984 – 1989.
- [45] 曹家勇, 吴沛华, 吕文壮, 等. 汽车车身多机器人焊接路径规划和 Tecnomatix 虚拟仿真[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(5): 21 – 26, 40.
- [46] 浦玉学, 舒鹏飞, 蒋祺, 等. 工业机器人时间-能量最优轨迹规划[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(22): 86 – 89, 151.
- [47] Li X, Gu Y, Wu L, et al. Time and energy optimal trajectory planning of wheeled mobile dual-arm robot based on tip-over stability constraint [J]. Applied Sciences-Basel, 2023, 13(6): 3780.
- [48] 李雨濛. 基于动力学的工业机器人时间能量最优轨迹规划研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2022.
- [49] 左国玉, 李宓, 郑榜贵. 基于改进自适应多目标粒子群算法的机械臂最优轨迹规划方法 [J]. 实验技术与管理, 2024, 41(3): 184 – 191.
- [50] 胡杰, 李先祥, 欧道江, 等. 工业机器人时间-冲击最优轨迹规划[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2021, 39(3): 11 – 15.
- [51] 李琴, 贾英崎, 黄玉峰, 等. 一种工业机器人多目标轨迹优化算法[J]. 工程设计学报, 2022, 29(2): 187 – 195.
- [52] 张学聪, 晁永生, 李纯艳, 等. 基于机器学习的工业机器人多目标轨迹规划[J]. 现代制造工程, 2024(2): 31 – 37.
- [53] 汤小红, 龚永健, 王念娇, 等. 基于 ADPSO 算法的机械臂轨迹规划[J]. 机械传动, 2022, 46(5): 123 – 128, 166.

## Research progress in motion planning for welding robots

YUE Zhiwei, WANG Dawei, YUE Zhifeng, LV Xingyuan

(Baiyin Nonferrous Group Co., Ltd., Baiyin 730900, China)

**Abstract:** As one of the main equipment in intelligent manufacturing, welding robots have been widely used in many industries such as shipbuilding, automotive, and railways due to their high welding quality and low manufacturing costs. However, technical bottlenecks still exist in terms of efficiency optimization and energy consumption control in their motion planning. The paper systematically analyzes the key technologies of welding robots and adopts a multi-dimensional analytical framework to compare domestic and international research achievements across four dimensions: time optimization, energy consumption control, obstacle avoidance mechanisms, and multi-objective collaboration. A systematic classification model is constructed with the hope of providing valuable references for the future development of welding robots, promoting continuous progress and sustainable development in welding technology to meet increasingly complex and diversified industrial needs, and advancing the manufacturing industry toward higher levels of automation and intelligence.

**Keywords:** welding robot; motion planning; time optimization; energy consumption control; obstacle avoidance; multi-objective collaboration

