

硕士学位论文

基于进化计算的焊接机器人系统作业规划
研究

Research on Operation Planning of Welding Robot
System Based on Evolutionary Computation

一级学科 控制科学与工程

二级学科 模式识别与智能系统

作者姓名 后国炜

指导教师 谢斌副教授

2023年5月

中图分类号 TP242.2

学校代码 10533

UDC 004.8

学位类别 学术学位

硕士学位论文

基于进化计算的焊接机器人系统作业规划 研究

Research on Operation Planning of Welding Robot System Based on Evolutionary Computation

作者姓名	后国炜
一级学科	控制科学与工程
二级学科	模式识别与智能系统
研究方向	机器人作业规划
二级培养单位	自动化学院
指导教师	谢斌副教授

论文答辩日期 2023.5.24 答辩委员会主席 王

中南大学
2023年5月

学位论文原创性声明

本人郑重声明，所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了论文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中南大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我共同工作的同志对本研究所作的贡献均已在论文中作了明确的说明。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

作者签名：石国伟 日期：2023年5月26日

学位论文授权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解中南大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许本学位论文被查阅和借阅。本人授权中南大学可以将本学位论文的全部或部分内 容编入有关数据库进行检索和公开传播，可以采用复印、缩印或其它手段保存和汇编学位论文。本人同意按《中国优秀博硕士学位论文全文数据库出版章程》规定享受相关权益。本人保证：毕业后以学位论文内容发表的论文作者单位注明中南大学；学位论文电子文档的内容和纸质学位论文的内容相一致。

延缓公开论文延缓到期后适用本授权书，涉密论文在解密后适用本授权书。

本学位论文属于：(请在以下相应方框内打“√”)

公开

延缓公开，延缓期限（__年__月__日至__年__月__日）

学位论文作者签名：石国伟
日期：2023年5月26日
(填写阿拉伯数字)

指导教师签名：谢安
日期：2023年5月26日

基于进化计算的焊接机器人系统作业规划研究

摘要：焊接是制造业的关键工序，正在朝着数字化、智能化、无人化的方向发展。由传统机器人加变位机组成的焊接机器人系统，可以带来更加高效高精的作业效果，胜任离散焊接环境、非结构化工作场景、复杂焊接工件的需求。本文以带变位机的焊接机器人系统为研究对象，以智能优化的思路来进行整个系统的作业规划。本文针对这一课题展开了深入的研究，主要内容如下：

(1)对带有变位机的焊接机器人系统进行运动学建模与分析，提出双旋变位机的船型焊姿态求解方法。本文首先对焊接机器人系统进行运动学建模与分析，确定焊缝坐标系和焊枪坐标系的定义以及相互间的转换工艺参数，并提出针对焊缝的船型焊姿态求解方法，充分发挥了变位机在处理复杂焊缝、提高焊接质量方面的作用，为后续焊接机器人系统作业规划的研究打下基础。

(2)针对焊接机器人系统作业规划中单焊缝的运动规划问题，提出了基于工艺预输入的焊枪姿态优化算法和协同运动规划策略。本文详细分析了包括工作角、行走角和自转角在内的焊接工艺对焊缝成型的影响，提出了焊接工艺预输入的概念，后续在机器人的关节空间以此焊接工艺为优化对象，以关节空间连续性、远离关节极限和避开障碍物为优化目标，提出基于 MOEA/D-DG 的焊枪姿态优化算法，实验表明算法中改进的基于迭代次数的动态邻域和高斯变异算子提高了 Pareto 最优解集分布的均匀性和收敛性，采用的种群混合初始化策略和区间搜索策略提高了算法优化连续焊缝时的效率和性能。此外还分析了焊枪相对于焊缝的运动关系，把焊缝坐标系作为纽带，将焊接机器人系统坐标系闭链打开为变位机开链和焊接机器人开链，以解耦的思路提出了焊接机器人与变位机的协同运动规划策略。

(3)针对焊接机器人系统作业规划中多焊缝的全局焊接任务规划问题，提出了焊缝间过渡路径规划算法和混合焊接任务规划算法。本文总结了 RRT 这种基于采样的路径规划算法在高维复杂场景下的优势，并分析了这类算法在处理焊接场景中凹陷区域时存在的缺陷，提出基于 BIT*-connect 的焊缝间路径规划算法，实验证明本文提出的概率扩展机制和改进的节点扩展规则在保证搜索效率的前提下提高了算法在凹陷场景下的表现。此外为解决包含焊点、有向焊缝和无向焊

缝的混合焊接任务规划问题，本文在混合粒子群基础上，针对性的提出了贪婪换向变异和换位变异两种变异算子，并且为提高初始种群的质量采用了种群最近距离初始化操作、为解决路径交叉问题提出了 2-OPT 优化策略，混合焊接任务规划实验结果证明了该算法有效性和优越性。

(4)搭建了基于 ROS 的焊接机器人系统仿真平台。焊接机器人系统仿真平台依靠 ROS 完备的第三方库和工具为焊接机器人系统的开发和算法测试提供了一个安全、高效、低成本的方法。利用该仿真平台可以对本文提出的算法进行系统测试和验证，节省了大量的时间和成本，并且能在仿真环境中直接观察算法执行状况、发现算法中潜在的问题，还有助于其他焊接机器人系统和算法开发者更快、更好地将其产品落地和算法应用。

图 39 幅，表 5 个，参考文献 59 篇

关键词：焊接机器人系统；运动规划；任务规划；智能优化算法；ROS 仿真

分类号：TP 242.2

Research on Operation Planning of Welding Robot System Based on Evolutionary Computation

Abstract: Welding is a key process in the manufacturing industry, and it is developing in the direction of digitization, intelligence, and unmanned. The welding robot system composed of traditional robots and positioners can bring more efficient and high-precision operation effects, and is competent for discrete welding environments, unstructured work scenes, and complex welding workpieces. This thesis takes the welding robot system with positioner as the research object, and uses the idea of intelligent optimization to carry out the operation planning of the whole system. This thesis conducts in-depth research on this topic, the main contents are as follows:

(1) Modeling and analysis of the kinematics of a welding robot system with a positioner are conducted, and a ship-shaped welding posture solution method for the double-rotation positioner is proposed. In this thesis, the kinematic modeling and analysis of the welding robot system are first carried out, and the definition of the weld coordinate system and the welding gun coordinate system as well as the conversion process parameters between them are determined. A ship-shaped welding posture solution method for the weld is proposed, fully leveraging the role of the positioner in handling complex welds and improving welding quality.

(2) For the motion planning problem of a single weld in the operation planning of welding robot system, an optimization algorithm for welding gun posture with pre-input welding process and a collaborative motion planning strategy were proposed. In the third chapter of this thesis, the influence of welding process, including working angle, walking angle, and self-rotation angle, on weld seam formation is analyzed in detail, and the concept of pre-input welding process is proposed. Subsequently, based on the stability of the end of the welding gun, far away from the joint limit and avoiding obstacles as the optimization objectives, an optimization algorithm for welding gun posture based on MOEA/D-DG is proposed, and the improved dynamic neighborhood based on the number of iterations and Gaussian mutation operator are used to improve the uniformity and

convergence of Pareto optimal solution set distribution. The population mixing initialization strategy and interval search strategy used in the algorithm improve the efficiency and performance of algorithm optimization when welding continuous welding points. In addition, the motion relationship between the welding gun and the weld seam is analyzed, the weld seam coordinate system is used as the link, and the welding coordinate system is opened as the positioner open chain and the welding robot open chain based on the decoupling idea, and a collaborative motion planning strategy between the welding robot and the positioner is proposed.

(3) For the global welding task planning problem of multiple welds in the operation planning of the welding robot system, an algorithm for transition path planning and a hybrid welding task planning algorithm are proposed. Firstly, this thesis summarizes the advantages of sampling-based path planning algorithms such as RRT in high-dimensional and complex scenes, and analyzes the shortcomings of such algorithms in handling concave areas in welding scenes. A BIT*-connect algorithm is proposed for welding seam path planning, and experimental results show that the proposed probability expansion mechanism and improved node expansion direction and distance improve the performance of the algorithm in concave scenes while ensuring search efficiency. In addition, there are various welding objects in actual welding tasks, including welding points and welding seams, and welding seams can be divided into directed and undirected ones. Such mixed welding sequence planning problems can be regarded as a generalized traveling salesman problem. This thesis proposes greedy direction-changing and position-changing mutation operators based on a hybrid particle swarm optimization algorithm, and uses the population nearest neighbor initialization operation to improve the quality of the initial population and the 2-OPT optimization strategy to solve the problem of path crossing. Experimental results show that the algorithm exhibits excellent performance in mixed welding task planning problems.

(4) A simulation platform for welding robot system based on ROS has been developed. The welding robot system simulation platform relies on the complete third-party library and tools of ROS to provide a safe,

efficient and low-cost method for the development and algorithm testing of the welding robot system. The simulation platform can be used to systematically test and verify the algorithm proposed in this thesis, which saves a lot of time and cost, and can directly observe the execution status of the algorithm in the simulation environment, find potential problems in the algorithm, and help other welding robots System and algorithm developers can implement their products and apply algorithms faster and better.

Key words: Welding robot system; motion planning; task planning; intelligent optimization algorithm; ROS simulation

Classification: TP242.2

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 焊接机器人系统研究现状.....	2
1.2.2 焊接机器人和变位机的协同运动规划研究现状.....	3
1.2.3 焊接机器人焊枪姿态优化研究现状.....	3
1.2.4 焊接机器人全局焊接任务规划研究现状.....	4
1.3 论文主要研究内容及组织结构.....	5
1.3.1 研究内容.....	5
1.3.2 组织结构.....	6
第 2 章 焊接机器人系统运动学建模与分析.....	8
2.1 焊接机器人系统介绍.....	8
2.2 焊接机器人运动学建模与分析.....	10
2.2.1 基于 D-H 参数法的焊接机器人运动学模型.....	10
2.2.2 焊接机器人正运动学分析.....	11
2.2.3 焊接机器人逆运动学分析.....	13
2.3 双旋变位机运动学建模与分析.....	16
2.3.1 基于 D-H 参数法建立双旋变位机模型.....	16
2.3.2 双旋变位机正运动学分析.....	17
2.4 焊缝位姿与焊枪位姿模型的建立.....	18
2.4.1 焊缝坐标系建立.....	18
2.4.2 焊枪坐标系建立.....	20
2.5 船型焊姿态及其求解.....	20
2.5.1 船型焊姿态的坐标系表示.....	21
2.5.2 船型焊姿态的求解.....	22
2.6 本章小结.....	22
第 3 章 面向焊缝的焊接机器人系统运动规划研究.....	24
3.1 焊接工艺预输入.....	24
3.1.1 焊接工艺对焊缝成形的影响分析.....	24
3.1.2 焊缝坐标系与焊枪坐标系之间的变换.....	25
3.2 焊接机器人运动学性能评价指标的建立.....	26

3.3 基于工艺预输入的焊缝焊枪姿态优化.....	28
3.3.1 焊枪姿态优化的多目标优化模型	29
3.3.2 MOEA/D-DG 算法	30
3.3.3 面向焊缝的焊枪姿态优化策略	35
3.3.4 实验结果与分析	36
3.4 焊接机器人系统的协同运动规划.....	41
3.4.1 焊接机器人系统的解耦	41
3.4.2 焊接机器人与变位机的协同运动规划	43
3.5 本章小结.....	44
第 4 章 面向多焊缝的全局焊接任务规划研究.....	46
4.1 基于 BIT*-connect 的焊缝间路径规划.....	46
4.1.1 焊缝间路径规划问题描述	46
4.1.2 RRT 系列算法	47
4.1.3 基于 BIT*-connect 的焊缝间路径规划算法	49
4.1.4 算法性能验证	51
4.2 面向最短路径的混合焊接任务规划.....	54
4.2.1 混合焊接任务规划问题描述	54
4.2.2 基于混合粒子群算法的混合焊接任务规划	56
4.2.3 实验与分析	59
4.3 本章小结.....	62
第 5 章 基于 ROS 的焊接机器人系统仿真平台.....	63
5.1 ROS 机器人操作系统.....	63
5.1.1 系统架构及核心概念	63
5.1.2 开发工具	65
5.2 焊接机器人系统模型建立.....	67
5.2.1 焊接机器人系统 URDF 生成.....	67
5.2.2 MoveIt!配置	68
5.3 焊接任务规划仿真.....	69
5.3.1 单道焊缝焊接仿真	69
5.3.1 复杂工件焊接仿真	71
5.4 本章小结.....	72
第 6 章 总结与展望.....	73

6.1 论文总结	73
6.2 研究展望	74
参考文献	76
攻读学位期间主要研究成果	81
致谢	82

插图索引

图 1-1 本文研究架构	6
图 2-1 焊接机器人实机图	9
图 2-2 双旋变位机实机图	9
图 2-3 科佩克 CB06N 焊接机器人本体结构图	10
图 2-4 D-H 参数定义	10
图 2-5 科佩克 CB06N 焊接机器人连杆坐标系	11
图 2-6 双旋变位机连杆坐标系	17
图 2-7 基坐标系与焊缝坐标系示意图	19
图 2-8 焊枪坐标系以及相关工艺参数的定义	20
图 2-9 普通焊缝位姿和船型焊位姿示意图	21
图 3-1 不同工作角与行走角对焊缝成型的影响	24
图 3-2 邻域大小随迭代次数变化	33
图 3-3 待优化焊点坐标系	37
图 3-4 帕累托结果对比图	38
图 3-5 焊缝扫描与待优化焊缝坐标系序列	39
图 3-6 焊接机器人系统坐标系封闭链	41
图 3-7 焊接机器人系统解耦原理	42
图 3-8 焊枪与焊缝运动分解	43
图 3-9 焊接机器人系统协同运动规划策略	44
图 4-1 凹陷焊接工件	48
图 4-2 算法陷入凹形陷阱	49
图 4-3 BIT*-connect 算法流程图	50
图 4-4 “H”形焊接环境	51
图 4-5 四种算法路径规划结果	53
图 4-6 四种算法的性能指标统计	53
图 4-7 焊点和焊缝作业图	54
图 4-8 2-OPT 优化示意图	58
图 4-9 混合粒子群算法流程图	59
图 4-10 混合焊接任务规划数据集	59
图 4-11 混合焊接任务规划实验结果	61
图 4-12 混合焊接任务规划问题算法收敛曲线	62
图 5-1 ROS 系统架构图	64

图 5-2 ROS 通信原理示意图	65
图 5-3 MoveIt!整体架构	66
图 5-4 焊接机器人系统模型	67
图 5-5 焊接机器人系统仿真平台	69
图 5-6 节点调用关系图	70
图 5-7 单道焊缝焊接作业仿真结果	70
图 5-8 复杂工件焊接作业仿真结果	72

表格索引

表 2-1 科佩克 CB06N 机器人 D-H 参数表	11
表 2-2 双旋变位机 D-H 参数表	17
表 3-1 单焊点焊枪姿态优化算法 HV 和 IGD 结果表	39
表 3-2 连续焊缝焊枪姿态优化结果表	40
表 4-1 混合焊接任务规划问题仿真结果表	60

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

随着《中国制造 2025》的提出以及产业升级迅猛发展,工业机器人越来越多地应用于汽车制造、焊接、运输和装卸、机械加工、喷涂等作业中^[1]。《世界机器人 2021 工业机器人报告》中指出当今全球工厂中运行的工业机器人数量达到 300 万台,同比增长 10%,根据国际机器人联合会统计,中国工业机器人数量突破历史新高,达到 94.3 万台,同比增长了 21%,其中焊接机器人发展非常迅速,其作为工业机器人核心的组成部分已广泛应用于各个板块^[2]。部署使用焊接机器人能够显著提高焊接工作效率并减少运营成本,降低对一线操作人员技能要求并改善操作人员的劳动环境,提高产品质量的稳定性及一致性,并能够推动我国经济发展转型和相关产业自动化升级改造^[3]。在“工业 4.0”与“中国制造 2025”联合展望的智能工厂未来发展趋势下,高精度,多任务,高智能化焊接机器人系统市场需求将呈跨越式上升态势^[4]。

但是机器人焊接产业高速发展过程中也随之出现了自动化程度不高、技术水平落后的问题^[5],其中绝大部分制造工厂对于焊接机器人的应用都停留在单纯的示教-再现上,故而焊接机器人对工件变化、环境改变的适应性不足^[6]。此外随着工作环境日趋非结构化以及焊接工件复杂化,传统单体焊接机器人已经越来越难胜任高效高精焊接作业的需求。给焊接机器人配备一定自由度的变位机,可以有效增大焊接系统的作业范围、提升焊接质量和效率。但变位机的引入给焊接系统带来了更多的复杂度,对整个系统的协同运动规划提出了更高的要求,如何在焊接复杂工件时对焊接机器人和变位机协同规划成为了焊接机器人系统在实际应用中面临的一大问题^[7]。并且对于复杂焊接工件其焊缝往往不止一道,且分布于不同的位姿,如想提高整个焊接作业的效率就需要对焊接工件上的所有焊缝进行全局焊接任务规划。

本文以带变位机的焊接机器人系统为研究对象,对焊接机器人系统的作业规划展开深入研究。根据焊接任务的特点,将整个焊接作业规划总结为针对单焊缝的运动规划和针对多焊缝的全局焊接任务规划,其中针对单焊缝的运动规划是在安全焊接的前提下,在焊接机器人系统的关节空间对焊枪姿态进行优化,以及焊接机器人和变位机的协同焊接规划,提高焊缝成型的质量;针对多焊缝的全局焊接任务规划是以最短焊接总路径为目标,以复杂工件中的多道焊缝为对象,优化得出最优的焊接序列,提高焊接机器人系统的作业效率。本文研究能够实现更加高效可靠的焊接机器人系统焊接作业规划,为我国焊接机器人技术的发展、制造

业的高质量发展提供支撑，对其他类型协作机器人的作业规划也有所助益，可有效提升我国在机器人领域的创新能力和核心竞争力。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 焊接机器人系统研究现状

机器人经历了近六十多年的长期发展，其发展历程可分为三阶段^[8]：第一阶段是从 1960 年至 1980 年，早期研发的机器人缺乏环境感知能力，只能简单地执行预定的动作和指令，因此主要应用于制造业，以替代重复性高且需要大量体力劳动的工作^[9]。第二阶段从 1980 年至 2015 年，机器人结合各种传感器和技术，甚至能够感知外界环境并模拟人的部分动作^[10]，这种机器人不仅在市场上大获成功，也促进了机器人技术在工业领域的应用逐渐走向成熟^[11]。第三阶段是从 2015 至今，随着各种技术的不断升级和创新，例如深度学习、大数据和 5G 等新技术的出现，感知和计算技术也得到了进一步发展^[12]，机器人在各行业中的应用不断加深，并逐渐涉足服务领域，渗透到社会、生产和生活的各个方面，同时各种技术也变得越来越智能化^[13]。

目前国内外市场上所部署的焊接机器人设备主要还停留在第一阶段焊接机器人和准第二阶段焊接机器人^[14]。这两阶段机器人要求作业时必须提前将焊接路径进行人工设定，这就导致机器人要求实际焊接场景具备较高的一致性^[15]，并且在实际焊接作业中，这类机器人无法自动调整示教轨迹，对轨迹的适应性较低，难以进行实时焊缝跟踪与轨迹控制^[16]。除此之外焊缝作为一种热成型工件，本身就存在热胀冷缩的特性，故使用传统的示教模式进行焊接时难免会存在一定的焊接误差，但智能化的焊接技术能有效地避免这类误差^{[17][18][19]}。随着近些年来国内外对于焊缝识别与跟踪技术的研究逐渐深入^{[20][21][22]}，焊接机器人可以利用大视场相机、激光雷达等传感器扫描焊接工件表面的焊缝信息，通过工件模型点云配准技术重建工件焊缝模型后，再采用特征识别算法找出焊缝点，识别出最终的三维焊缝数据，最后将焊缝位置信息传输到机器人末端最终执行焊接任务^{[23][24][25]}。

近年来，随着焊接机器人研究的深入，多焊缝复杂工件焊接的市场需求越来越大，简单焊缝及焊接工件已经无法满足现今焊接产业对焊接工件的要求，采用焊接机器人对工件进行固定焊接难以满足焊缝成型质量要求^[26]，所以随着焊接技术的不断发展，一种能使工件连续变位至最佳焊接位置的焊接配置构型应运而生，而变位机对此起着至关重要的作用^[27]。“焊接机器人+变位机”的焊接系统和单个焊接机器人最明显的区别是，前者在焊接时待焊工件的位置和姿态可灵活调节^[28]。通过调整工件的位置与姿态，使焊接机器人的可达性得到传递与扩展，

从而减少焊接机器人的可达空间需求,并且工件可变位这一特点丰富了焊接方案选择,有利于焊缝始终保持最佳焊接姿态,从而确保焊缝成型质量高^[29],因此焊接机器人产业在现阶段逐步向具有焊接机器人和变位机的焊接机器人系统发展。

1.2.2 焊接机器人和变位机的协同运动规划研究现状

随着变位机的引入,焊接系统的结构和功能逐渐丰富,焊接作业的难点转向焊接机器人和变位机的协同运动规划。引入协同运动规划算法到机器人规划和控制系统中,让原本独立的机械臂控制系统和协作控制系统之间实现协同运动,可以大幅降低投资成本,同时有助于焊接自动化系统的普及^{[30][31]}。

Gao 等^[32]针对光纤放置过程的机器人和定位器运动规划问题,将原始连续运动问题转换为离散问题,其中机器人和定位器的所有可能运动都表示为有向多层图,并使用动态规划生成时间最优的协同运动。唐荣俊等^[33]通过改进的三次埃尔米特插值法得出单旋转变位机的运动表达式,并利用焊接机器人和变位机之间的协同运动关系,采用分段直线拟合的方法得出机器人的空间运动轨迹。Zhou 等^[34]研究了没有工具夹持器的多机器人系统的协同焊接轨迹规划问题,以主从合作机器人焊接系统作为研究对象,利用解耦的思想提出了一种基于闭合运动链模型的多机器人协作轨迹规划方法,仿真结果证实这种解耦思路的有效性。Chen 等^[35]提出了一种用于焊接机器人和定位器的同步协作路径规划 (SCPP) 算法来处理复杂的空间曲线工件,并针对交叉线工件的焊接场景,添加焊枪的 Y 轴的约束来优化交叉线工件的取向信息,实验结果表明,焊接系统在整个运动中保持同步协作,没有发生干扰现象,并且在焊接交叉线工件期间焊枪的方向基本保持不变。

由上述有关研究可知,焊接机器人与变位机协同运动规划是当今焊接作业中的研究热点,运动离散化以及系统解耦的提出为协同运动规划提供了思路。但也存在一些局限处,对于复杂的工件结构,其焊缝的分布位置比较复杂,需要综合考虑如焊接姿态、工件运动方式等多种因素,协同运动规划难度较大,此外还涉及到焊接过程中的路径规划、轨迹生成等算法,算法的复杂度较高。

1.2.3 焊接机器人焊枪姿态优化研究现状

焊接机器人通过将焊接设备模块的焊枪固接在机械臂末端执行器来实现焊接作业,由于焊枪通常是一个回转体,故焊枪绕其中心对称轴进行旋转时并不会影响末端位置以及焊缝形状。国内外的研究学者开始针对此特性运用遗传算法、蚁群优化算法等相关进化算法对焊枪姿态进行优化^[36],充分利用焊枪姿态上的冗余优化空间,提高机器人运动学的性能指标,从而提升焊缝成形质量、保障安

全生产作业。

Chen 等^[37]人针对焊接机器人焊接时焊枪姿态示教耗时长等问题,提出了一种新型的焊枪姿态自动调整的 8 字形轨迹摆动焊接控制算法,算法通过人工示教的方式将焊枪的行走角度加入焊枪坐标系,调整各插值点的姿态。Liu 等^[38]为了获得最优的焊枪位姿,建立了能够描述拟合相交曲线特征的坐标系,该坐标系与理论相交曲线模型和拟合相交曲线模型相结合,给出了一种根据拟合相交曲线位置计算焊枪方位的新方法。焦嘉琛等^[39]在机器人的静态刚度模型基础上,以远离关节极限和奇异点为目标,提出了一种机器人姿态优化方法,实验结果表明这种姿态优化方法得到的最优刚度加工姿态能够提升机器人的运动性能和加工质量。Huo 等^[40]针对给定机械手主、次任务的权重调节问题,提出自适应权重调整系统取代低效率的人工调节,该方法在关节极限及奇异性规避等实验中上得到了成功运用。秦^[41]针对焊接机器人焊枪的自转角优化机器人焊接时的关节限位、灵巧性和能量变化最小指标,运用遗传算法以这三个指标为目标优化得到最优的回转角,该算法在自行车三脚架焊接场景中得到验证。

从以上相关研究可以看出,现阶段的研究基本都是针对自转角的优化,在优化过程中没有考虑到其他焊接工艺参数,并且所采用的一般为像遗传算法、模拟退火算法等单目标优化方法,优化算法的性能有待考究。

1.2.4 焊接机器人全局焊接任务规划研究现状

实际焊接工程中的焊接对象通常比较复杂,涉及到多个焊点或焊缝的焊接,因此需要对这些焊点或焊缝进行最优的规划和安排,以优化整个焊接作业任务的执行。机器人焊接任务规划的优化目标通常是焊接路径最短,并且要满足工艺约束,这是一个组合优化问题。随着进化算法的研究不断突破和广泛应用,国内外的专家学者尝试将这些智能进化算法引入到机器人焊接任务规划研究领域,以进一步提高机器人焊接任务规划的效率和精度,同时一些研究集中于开发基于数学建模和仿真的新算法,以优化焊缝排序。这些研究旨在提高整个焊接作业的效率,并满足各种焊接应用的要求。

Wang 等^[42]将点焊机器人路径规划视为旅行商问题 (TSP),并提出了双全局最优粒子群优化算法来对路径长度这一单一目标进行优化,但他将路径长度的定义为笛卡尔空间下的两两焊点间的欧氏距离,这明显不符合实际的焊接过程。顾平灿等^[43]使用改进的粒子群算法解决了搬运车架主焊工序机器人的焊接次序规划问题,但该方法同样使用了焊接对象间的欧几里得距离来代替实际距离。游海涛等^[44]则解决了多面体数控钻床在运行过程中加工路径距离最短的问题,采用相邻面几何避障地方法寻找过渡点,以确保钻头与工件内部无几何碰撞,最后使

用改进的分区自适应蚁群算法求解最短路径。Kovács 等^[45]针对远程激光焊接 (RLW) 中的集成任务排序和路径规划问题, 提出了一种贪婪的随机自适应搜索算法, 在考虑了机器人路径的情况下对焊接任务顺序进行优化。Wang 等^[46]将最短路径长度、功耗和焊接变形作为优化目标, 提出了基于事件触发策略的改进离散多目标分解算法, 优化焊缝顺序, 但该算法并没有优化焊缝间的路径, 并且在带变位机的复杂焊接系统中的表现让人怀疑。

从以上相关研究可以总结出, 现阶段对于全局焊接任务规划的研究都是针对焊点或者焊缝的单一焊接对象, 但实际的复杂工件通常涉及到多种类型的焊接对象, 既包括焊点又包括焊缝, 当前并没有针对该类焊接任务规划问题的有效解决方案。

1.3 论文主要研究内容及组织结构

1.3.1 研究内容

本研究旨在将智能化技术应用于焊接机器人系统, 以提高针对复杂工件的焊接适应性、全局焊接质量和效率。为此, 本文将对焊接机器人系统作业规划中的针对单焊缝的运动规划和针对多焊缝的全局任务规划展开深入研究, 全文的研究架构如图 1-1 所示。

首先, 本文对焊接机器人和变位机的焊接系统进行运动学分析, 提出了一种船型焊求解算法, 以保证焊接时变位机始终能将焊缝转动到最佳姿态。针对单焊缝的焊接机器人系统运动规划, 提出了基于工艺预输入的焊枪姿态优化算法和协同运动规划策略。本文分析了包括工作角、行走角和自转角在内的焊接工艺对焊缝成型的影响, 提出了焊接工艺预输入的概念, 后续以此焊接工艺为优化对象, 以焊枪末端稳定性、远离关节极限和避开障碍物为优化目标, 提出基于 MOEA/DDG 的焊枪姿态优化算法, 实验表明该算法有效提升了焊接机器人系统焊接焊缝时的效率和性能。此外还分析了焊枪相对于焊缝的运动关系, 把焊缝坐标系作为纽带, 将焊接坐标系闭链打开为变位机开链和焊接机器人开链, 以解耦的思路提出了焊接机器人与变位机的协同运动规划策略。针对多焊缝的全局焊接任务规划问题, 提出了焊缝间过渡路径规划算法和混合焊接任务规划算法。本文总结了 RRT 这种基于采样的路径规划算法在处理焊接场景中凹陷区域时存在的缺陷, 提出基于 BIT*-connect 的焊缝间路径规划算法, 实验证明该算法有效提升了在凹陷场景下的表现。此外针对包括焊点、有向焊缝和无向焊缝的混合焊接任务规划问题, 本文在混合粒子群基础上, 针对性的提出了贪婪换向变异和换位变异两种变异算子, 并且为提高初始种群的质量采用了种群最近距离初始化操作、为解决路径交叉问题提出 2-OPT 优化策略。实验结果表明该算法在混合焊接任务规划

问题上展现了优秀的性能。最后为了方便算法验证和减少调试周期，本文建立了基于 ROS 的焊接机器人系统仿真平台，对本文提出算法进行系统测试和验证，为焊接结果提供可视化指导。

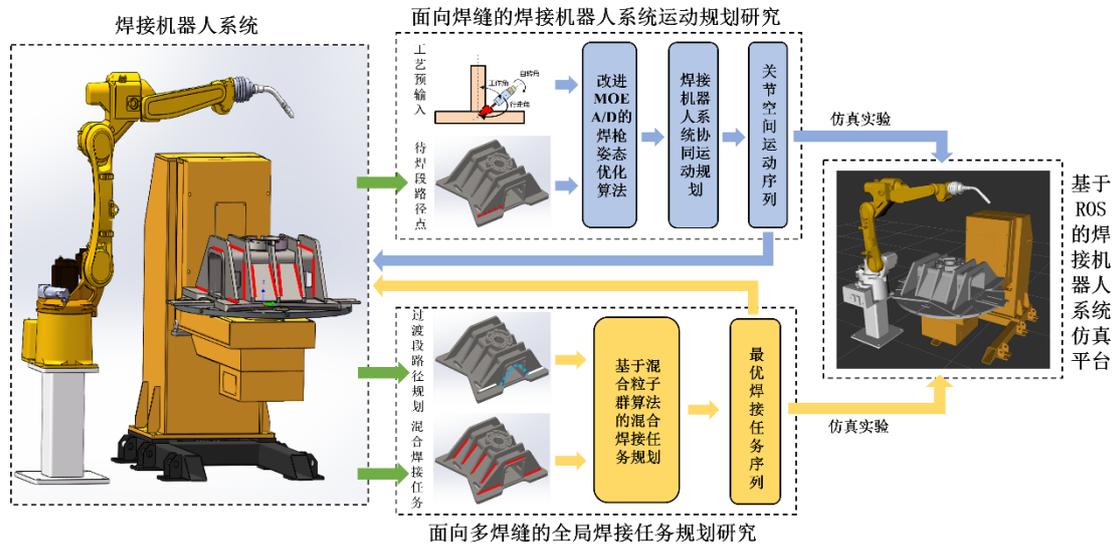


图 1-1 本文研究架构

1.3.2 组织结构

本文围绕带变位机的焊接机器人系统的作业规划进行研究，共分为六章。各章节的内容安排如下：

第一章：绪论。首先，对本文选题的背景及意义进行说明，并对国内外的相关研究情况进行分析，主要包括焊接机器人系统，焊接机器人及变位机协同运动规划、焊枪姿态优化和全局焊接任务规划等方面，最后对本文进行了总结和展望。

第二章：焊接机器人系统运动学建模与分析。本章首先介绍了焊接机器人系统的组成，为了增加焊接的灵活性和适用性，变位机被引入该系统。接着，本文利用 D-H 参数法分别对焊接机器人和变位机进行运动学建模和分析，包括正、逆运动学求解，为了便于后续的焊接规划，本文还建立了焊缝坐标系和焊枪坐标系模型。最后，为了获得最优的焊接工艺，本文对船型焊姿态进行求解，以确保焊接时焊缝在变位机转动下到达最佳的焊接姿态。

第三章：面向焊缝的焊接机器人系统运动规划研究。本章首先分析了焊接过程中工作角、行走角和自转角等焊接工艺参数对焊接质量的影响，并确定了工作角、行走角和自转角在焊缝坐标系和焊枪坐标系间的变换关系，提出焊接工艺预输入的概念，并在此基础上提出了基于工艺预输入的焊缝焊枪姿态优化算法，该算法能够通过 MOEA/D-DG 算法，同时优化焊枪末端稳定性、远离关节极限和避开障碍物等三个目标，从而实现焊接过程中最优的姿态控制。实验结果表明，

该算法具有较高的有效性和可靠性。最后，本章还运用解耦的方式将焊接机器人系统坐标系闭链打开，完成焊接机器人与变位机的协同轨迹规划，从而实现更高效、更精准的焊接操作。

第四章：面向多焊缝的全局焊接任务规划研究。本章首先介绍了路径规划问题的定义及相关基于采样的路径规划算法，分析了这类算法在焊接场景中缺陷，针对此提出了基于 BIT*-connect 的焊缝间路径规划算法，“H”形焊接环境实验结果证明了算法的有效性。由于复杂焊接工件一般包括多个焊点、无向焊缝和有向焊缝，本章还对这类混合焊接任务规划问题进行研究，提出了基于混合粒子群算法的混合焊接任务规划算法，通过引入最短距离初始化和 2-OPT 局部优化策略，显著提升了算法的求解质量和收敛速度。

第五章：基于 ROS 的焊接机器人系统仿真平台。本章在 ROS 环境下，利用 MoveIt!和 RViz 工具搭建了焊接机器人系统仿真平台，在仿真平台对前面内容的相关算法做了验证，并对最终的焊接效果进行可视化。

第六章：总结与展望。在这一章中总结了本研究工作的内容，概括了全文的主要创新点和取得的成果，分析了本文的不足之处，并提出了后续研究工作的设想。

第 2 章 焊接机器人系统运动学建模与分析

在现代制造业中,焊接技术被广泛应用于各种产业制造中,而在焊接过程中,焊接质量和效率是重要的考量因素。为了提高焊接质量和效率,配备变位机的焊接机器人系统已经成为一种先进的焊接作业配置。相比传统的单轴控制系统,带有变位机的焊接系统更加灵活,可以实现多方位的焊接,同时还能提高生产效率和产量。本章的研究旨在对配备变位机的焊接机器人系统进行建模和分析,为实现高质量、高效率的焊接提供理论基础和技术支持。具体而言,本章将对焊接机器人本体模型及其运动学分析、变位机模型以及船形焊姿态的求解进行深入研究,旨在达到最佳焊接位姿。此外,本章还将定义焊接系统工艺中的焊缝坐标系和焊枪坐标系以及两者间的转换工艺参数,为焊接机器人系统的作业规划打下基础。

2.1 焊接机器人系统介绍

焊接机器人系统是一种自动化设备,通过多轴自由度控制可以实现对焊接件的多角度焊接。焊接机器人系统有多个模块组成,包括机器人本体模块、控制模块、感知模块和焊接设备模块等^[47]。其中机器人本体模块是焊接机器人系统的核心部分,由机器人手臂、关节、传动系统等组成,机器人本体模块负责完成焊接过程中的具体动作,包括焊接枪的移动、姿态调整,任务规划等,这也是本文的主要研究内容;控制模块负责控制机器人本体模块的运动,通常包括硬件控制器和软件控制器两部分,硬件控制器主要用于机器人本体的运动控制,而软件控制器则负责实现机器人运动的算法设计和控制逻辑;感知模块是焊接机器人的“眼睛”,主要由大视场面结构光相机与激光轮廓线结构光相机组成,面结构光相机获取场景点云信息,通过工件模型点云配准技术确定工件位置,生成线结构光扫描轨迹,线结构扫描数据同机器人末端实时位置数据进行融合,重建工件焊缝处模型,再通过特征识别算法筛选兴趣点,找出焊缝点,识别出最终的三维焊缝数据,这一部分由项目组的其他研究人员负责;焊接设备模块包括焊接枪、气体保护设备、电源、电缆等多种设备,焊接枪负责完成焊接任务,气体保护设备用于保护焊接区域,电源为焊接提供所需的电能,电缆则用于传输电能和信号。

焊接机器人的机身主体一般由铝合金或钢材制成,用于支撑各种关键组件和轴部件,如图 2-1 所示,共有六个轴,每个轴都有一个关节,可以使机器人在空间内自由运动,每个关节通常由电机、减速器、传感器等组件组成,六自由度的焊接机器人可以实现多个方向上的运动,能以任意姿态到达目标焊接点。变位机则负责控制焊接工具在不同角度和方向上的移动,从而实现多角度焊接,本焊接机器人系统变位机为两个旋转关节组成的双旋变位机,如图 2-2 所示。双旋变

位机由旋转平台、固定支撑架、驱动装置等组成。其中，旋转平台是双旋变位机的核心部分，它由一对内外旋转的圆盘组成，通过控制系统控制旋转角度和速度，可以实现工件的 360 度旋转和多角度变位。固定支撑架通常是固定在旋转平台上，用于支撑工件，防止在旋转过程中发生倾斜和脱落。驱动装置负责控制旋转平台的运动和旋转方向，同时可以根据需要调整旋转速度和角度。双旋变位机的优点是灵活、高效、节省人力资源，可以实现工件在不同角度和方向上的快速转换，从而提高生产效率和产品质量，其在焊接领域应用广泛，特别是对于大型和复杂的工件处理，具有明显的优势。

焊接机器人系统中各个模块之间的关系密切，机器人本体模块的运动由控制模块控制，感知模块获取焊接工件的位置和姿态信息，控制模块依据感知模块提供的信息控制机器人本体模块完成相应的动作，最终完成精准的焊接任务。同时，焊接设备模块的工作也受到控制模块的控制，确保焊接质量符合要求。



图 2-1 焊接机器人实机图



图 2-2 双旋变位机实机图

2.2 焊接机器人运动学建模与分析

科佩克 CB06N 焊接机器人是六自由度关节型机器人，如图 2-3 所示为科佩克 CB06N 六自由度焊接机器人的结构图。科佩克 CB06N 焊接机器人共有 6 个旋转关节，它的腰部、肩部和肘部关节确定末端的位置，而腕部的三个关节则用于确定机器人末端姿态的俯仰、翻滚和偏转。

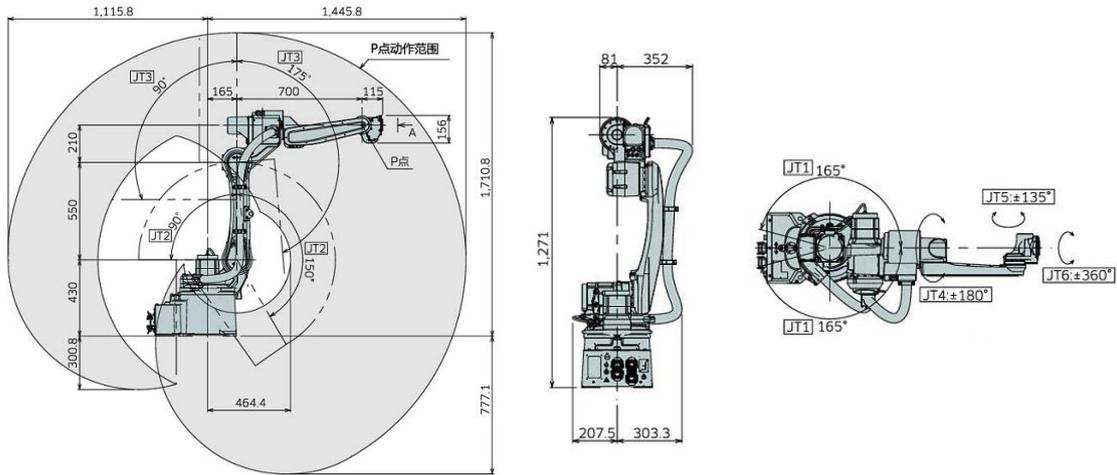


图 2-3 科佩克 CB06N 焊接机器人本体结构图

2.2.1 基于 D-H 参数法的焊接机器人运动学模型

本文采用 D-H 法来搭建焊接机器人的运动学模型，如图 2-4 所示 D-H 参数描述如下：转动关节的关节变量定义为关节角 θ_i 为 x_{i-1} 轴到 x_i 关于 z_i 的转角； x_{i-1} 轴到 x_i 沿着 z_i 轴移动的距离被定义为连杆偏置 d_i ；按右手定则 z_{i-1} 轴到 z_i 关于 x_{i-1} 轴的转角为连杆扭角 α_i ； z_{i-1} 轴到 z_i 沿着 x_{i-1} 轴移动的长度为连杆长度 a_i 。

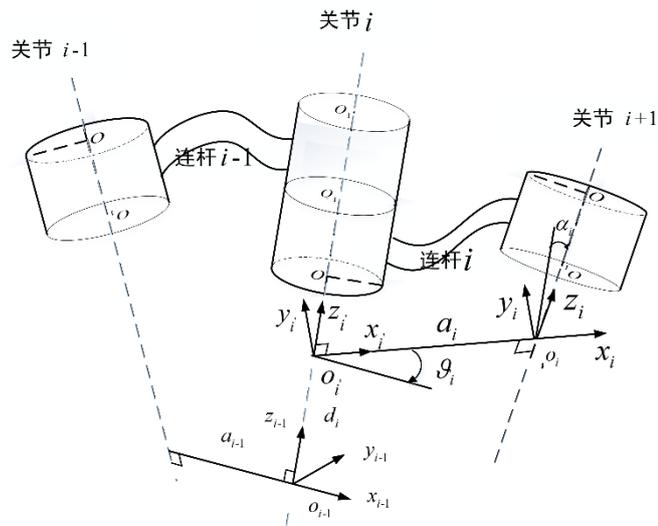


图 2-4 D-H 参数定义

根据以上连杆间 D-H 模型参数的定义，建立如图 2-5 所示的科佩克 CB06N 焊接机器人连杆坐标系，其中包括一个虚拟关节。

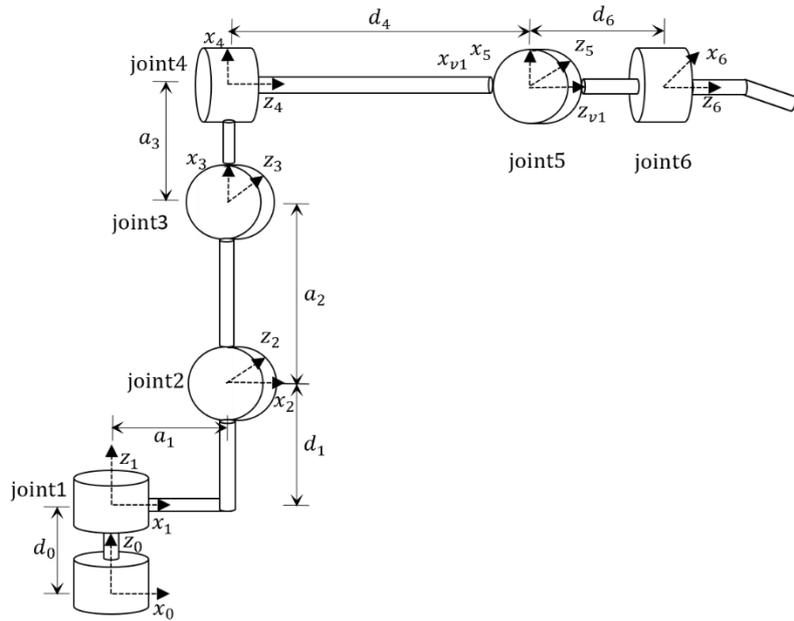


图 2-5 科佩克 CB06N 焊接机器人连杆坐标系

根据图 2-3 科佩克 CB06N 焊接机器人本体结构，再加上图 2-5 中科佩克 CB06N 焊接机器人连杆坐标系可以确定机器人的 D-H 参数，科佩克 CB06N 焊接机器人 D-H 参数表如下：

表 2-1 科佩克 CB06N 机器人 D-H 参数表

坐标系	d_i/mm	$\theta_i/^\circ$	a_i/mm	$\alpha_i/^\circ$	关节范围/ $^\circ$
0	$d_0 = 735$	0	0	0	0
1	$d_1 = 195$	θ_1	$a_1 = 165$	-90	[-165, +165]
2	0	$\theta_2 - 90$	$a_2 = 550$	0	[-90, +150]
3	0	θ_3	$a_3 = 212.5$	-90	[-175, +45]
4	$d_4 = 700$	θ_4	0	90	[-180, +180]
5	0	θ_5	0	0	[-135, +135]
v1	0	0	0	-90	0
6	$d_6 = 110$	$\theta_6 - 90$	0	0	[-360, +360]

2.2.2 焊接机器人正运动学分析

机器人正运动学就是根据已知的关节变量计算机器人末端坐标系与基坐标系之间的位姿信息。本文前面的内容已经建立焊接机器人的连杆坐标系，并且通

过坐标系的平移和旋转计算出了相邻连杆之间的坐标系转换矩阵。利用这些坐标系转换矩阵可以计算出机器人末端相对于基座坐标系的位姿。以相邻连杆坐标系 $\{i-1\}$ 和 $\{i\}$ 为例，步骤如下：

1. 将坐标系 $\{i-1\}$ 沿 z_{i-1} 轴平移 d_i 距离，使得 x_{i-1} 轴和 x_i 轴重合，平移变换即 $Trans(z_{i-1}, d_i)$ ；

2. 将坐标系 $\{i-1\}$ 沿 z_{i-1} 轴旋转 θ_i 角度，使得 x_{i-1} 轴和 x_i 轴平行，旋转变换即 $Rot(z_{i-1}, \theta_i)$ ；

3. 将坐标系 $\{i-1\}$ 沿 x_{i-1} 轴平移 a_i 距离，使得 z_{i-1} 轴和 z_i 轴共线，平移变换即 $Trans(x, a_{i-1})$ ；

4. 将坐标系 $\{i-1\}$ 绕 x_{i-1} 轴旋转 α_i 角度，使得 z_{i-1} 轴和 z_i 轴平行，旋转变换即 $Rot(x, \alpha_{i-1})$ 。

此时，连杆坐标系 $\{i-1\}$ 和连杆坐标系 $\{i\}$ 重合。经过以上旋转变换后的矩阵如下：

$$\begin{aligned} T_i^{i-1} &= Trans(z_{i-1}, d_i)Rot(z_{i-1}, \theta_i)Trans(x, a_i)Rot(x, \alpha_i) \\ &= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & a_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & a_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-1)$$

结合表 2-1 中科佩克 CB06N 机器人 D-H 参数，建立如下连杆坐标系间的齐次变换矩阵：

$$\begin{aligned} T_1^0 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & T_2^1 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & -\sin\theta_1 & a_1\cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & a_1\sin\theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ T_3^2 &= \begin{bmatrix} \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & a_2\sin\theta_2 \\ -\cos\theta_2 & \sin\theta_2 & 0 & -a_2\cos\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ T_4^3 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & 0 & -\sin\theta_3 & a_3\cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & 0 & \cos\theta_3 & a_3\sin\theta_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & T_5^4 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & \sin\theta_4 & 0 \\ \sin\theta_4 & 0 & -\cos\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ T_{v1}^5 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & -\sin\theta_5 & 0 & 0 \\ \sin\theta_5 & \cos\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$T_6^{v1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_e^6 = \begin{bmatrix} \sin\theta_6 & \cos\theta_6 & 0 & 0 \\ -\cos\theta_6 & \sin\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

因此,科佩克 CB06N 机器人末端坐标系相对于基坐标系的齐次变换矩阵为:

$$T_e^0 = T_1^0 T_2^1(\theta_1) T_3^2(\theta_2) T_4^3(\theta_3) T_5^4(\theta_4) T_{v1}^5(\theta_5) T_6^{v1} T_e^6(\theta_6) = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

其中 $[n \ o \ a]$ 为末端姿态向量, $[p_x \ p_y \ p_z]^T$ 为末端位置向量,化简后可得:

$$\begin{aligned} n_x &= S_6(C_4S_1 - C_1S_4C_{23}) - S_6(C_5(S_1S_4 - C_4C_1S_{23}) - S_5C_1C_{23}) \\ n_y &= -S_6(C_1C_4 + S_1S_5S_{23}) - C_6(C_5(C_1C_4 - C_4S_1C_{23}) + S_5S_1S_{23}) \\ n_z &= S_6S_4S_{23} - C_6(S_5C_{23} + C_4C_5S_{23}) \\ o_x &= C_6(C_4S_1 - C_1S_4C_{23}) - S_6(C_5(S_1S_4 + C_4C_1C_{23}) - S_5C_1S_{23}) \\ o_y &= -C_6(C_1C_4 + S_1S_4C_{23}) + S_6(C_5(C_1S_4 - C_4S_1C_{23}) + S_5S_1S_{23}) \\ o_z &= S_6(S_5S_{23} + C_4C_5S_{23}) + C_6S_4S_{23} \\ a_x &= -S_5(S_1S_4 + C_1C_4C_{23}) - C_1C_5S_{23} \\ a_y &= S_5(C_1S_4 - S_1C_4C_{23}) - S_1C_5S_{23} \\ a_z &= -C_5C_{23} + C_4S_5S_{23} \\ p_x &= C_1(a_1 - (d_4 + d_6C_5)S_{23} + a_2C_2 + a_3C_{23} - d_6C_4S_5C_{23}) - d_6S_1S_4S_5 \\ p_y &= S_1(a_1 - (d_4 + d_6C_5)S_{23} + a_2C_2 + a_3C_{23} - d_6C_4S_5C_{23}) + d_6C_1S_4S_5 \\ p_z &= d_0 + d_1 - (d_4 + d_6C_5)C_{23} - (a_3 - d_6C_4S_5)S_{23} \end{aligned}$$

其中 $C_i = \cos\theta_i$, $S_i = \sin\theta_i$, $C_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$, $S_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$

以上就是焊接机器人正向运动学模型的建立过程,后续进行焊接作业规划时如要进行正运动学求解,直接将当前焊接机器人的关节向量带入上式即可获得焊接机器人末端执行器相对与焊接机器人基坐标系的位姿。

2.2.3 焊接机器人逆运动学分析

机器人正运动学的逆向过程就是逆运动学,即通过机器人末端的位姿来反向计算出能使得机器人到达该位姿的关节量。随着机器人关节数量的增加,机器人

的结构会变得更加冗余，因此在某些末端位姿点上会存在多个解，同时也会出现奇异位形。本文采用解析法进行逆运动学求解，具体步骤如下：

将 $T_6^{v1^{-1}}$ 和 $T_e^{6^{-1}}$ 右乘式(2-2)，再分别将 $T_1^{0^{-1}}$ 、 $T_2^{1^{-1}}$ 和 $T_3^{2^{-1}}$ 左乘式(2-2)，可得：

$$T_4^3 T_5^4 T_{v1}^5 = T_3^{2^{-1}} T_2^{1^{-1}} T_1^{0^{-1}} T_e^0 T_6^{v1^{-1}} T_e^{6^{-1}} \quad (2-3)$$

其中式(2-3)的左侧为：

$$T_4^3 T_5^4 T_{v1}^5 = \begin{bmatrix} -S_3 S_5 + C_3 C_4 C_5 & -C_3 S_4 & -S_3 C_5 - C_3 C_4 S_5 & a_3 C_3 - d_4 S_3 \\ C_3 S_5 + S_3 C_4 C_5 & -S_3 S_4 & S_3 S_5 - C_3 C_4 S_5 & a_3 S_3 + d_4 C_3 \\ S_4 C_5 & -C_4 & S_4 S_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

式(2-3)的右侧为：

$$T_3^{2^{-1}} T_2^{1^{-1}} T_1^{0^{-1}} T_e^0 T_6^{v1^{-1}} T_e^{6^{-1}} = \begin{bmatrix} n_x' & o_x' & a_x' & p_x' \\ n_y' & o_y' & a_y' & p_y' \\ n_z' & o_z' & a_z' & p_z' \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

其中：

$$\begin{aligned} n_x' &= C_1 C_2 (n_x C_6 - o_x S_6) + S_1 C_2 (n_y C_6 - o_y S_6) - S_2 (n_z C_6 - o_z S_6) \\ n_y' &= -C_1 S_2 (n_x C_6 - o_x S_6) - S_1 S_2 (n_y C_6 - o_y S_6) - C_2 (n_z C_6 - o_z S_6) \\ n_z' &= -S_1 (n_x C_6 - o_x S_6) + C_1 (n_y C_6 - o_y S_6) \\ o_x' &= C_1 C_2 (n_x S_6 + o_x C_6) + S_1 C_2 (n_y S_6 + o_y C_6) - S_2 (n_z S_6 + o_z C_6) \\ o_y' &= -C_1 S_2 (n_x S_6 + o_x C_6) - S_1 S_2 (n_y S_6 + o_y C_6) - C_2 (n_z S_6 + o_z C_6) \\ o_z' &= -S_1 (n_x S_6 + o_x C_6) + C_1 (n_y S_6 + o_y C_6) \\ a_x' &= C_2 (a_x C_1 + a_y S_1) - a_z S_2 \\ a_y' &= -S_2 (a_x C_1 + a_y S_1) - a_z C_2 \\ a_z' &= -a_x S_1 + a_y C_1 \\ p_x' &= -a_2 + S_2 (d_0 + d_1 + d_6 a_z - p_z) + C_2 (a_1 + C_1 d_6 a_x - C_1 p_x + S_1 d_6 a_y - S_1 p_y) \\ p_y' &= S_2 (a_1 + d_6 C_1 a_x + d_6 S_1 a_y - p_x C_1 - p_y S_1) + C_2 (d_0 + d_1 + d_6 a_z - p_x) \\ p_z' &= d_6 a_x S_1 - d_6 a_y C_1 + p_y C_1 - p_x S_1 \end{aligned}$$

(1) 求解 θ_1

由式(2-4)和式(2-5)中矩阵的(3,4)处元素对应相等，可得：

$$S_1 (p_x - d_6 a_x) = C_1 (p_y - d_6 a_y) \quad (2-6)$$

故：

$$\theta_1 = \begin{cases} \text{atan2}(p_y - d_6 a_y, p_x - d_6 a_x) \\ \text{atan2}(-p_y + d_6 a_y, -p_x + d_6 a_x) \end{cases} \quad (2-7)$$

(2) 求解 θ_2

由式(2-4)和式(2-5)中矩阵的(1,4)处元素和(2,4)处元素对应相等,可得:

$$-a_2 + S_2(d_0 + d_1 + d_6 a_z - p_z) + C_2(a_1 + C_1(d_6 a_x - p_x) + S_1(d_6 a_y - p_y)) = a_3 C_3 - d_4 S_3$$

$$C_2(d_0 + d_1 + d_6 a_z - p_z) + S_2(a_1 + C_1(d_6 a_x - p_x) + S_1(d_6 a_y - p_y)) = a_3 S_3 + d_4 C_3$$

令 $a_1 + C_1(d_6 a_x - p_x) + S_1(d_6 a_y - p_y) = u$, $d_0 + d_1 + d_6 a_z - p_z = v$, 代入上式得到:

$$-a_2 - uC_2 + vS_2 = a_3 C_3 - d_4 S_3 \quad (2-8)$$

$$uS_2 + vC_2 = a_3 S_3 + d_4 C_3 \quad (2-9)$$

上式平方后相加后化简得:

$$2a_2(uC_2 - vS_2) = -a_2^2 + a_3^2 + d_4^2 - u^2 - v^2 \quad (2-10)$$

令 $w = (-a_2^2 + a_3^2 + d_4^2 - u^2 - v^2)/(2a_2\sqrt{u^2 + v^2})$, 带入化简可得:

$$\theta_2 = \text{atan2}(u, v) - \text{atan2}(w, \pm\sqrt{1 + w^2}) \quad (2-11)$$

(3) 求解 θ_3

由式(2-8)和式(2-9), 联立方程组可解的:

$$S_3 = \frac{a_3(uS_2 + vC_2) - d_4(-a_2 - uC_2 + vS_2)}{a_3^2 + d_4^2} \quad (2-12)$$

$$C_3 = \frac{d_4(uS_2 + vC_2) + a_3(-a_2 - uC_2 + vS_2)}{a_3^2 + d_4^2} \quad (2-13)$$

故可得:

$$\theta_3 = \text{atan2}(S_3, C_3) \quad (2-14)$$

(4) 求解 θ_5

由式(2-4)和式(2-5)中矩阵的(1,3)处元素和(2,3)处元素对应相等,可得:

$$-S_3 C_5 - C_3 C_4 S_5 = C_2(C_1 a_x + S_1 a_y) + S_2 a_z \quad (2-15)$$

$$S_3 C_5 - C_3 C_4 S_5 = -S_2(C_1 a_x + S_1 a_y) + C_2 a_z \quad (2-16)$$

将式(2-15)和式(2-16)两边分别乘以 C_3 和 S_3 , 再相减后化简可得:

$$C_5 = a_z(S_2 S_3 - C_2 C_3) - (C_1 a_x + S_1 a_y)(S_2 C_3 + C_2 S_3) \quad (2-17)$$

令 $h = C_5 = a_z(S_2 S_3 - C_2 C_3) - (C_1 a_x + S_1 a_y)(S_2 C_3 + C_2 S_3)$, 可得:

$$\theta_5 = \text{atan2}(\pm\sqrt{1-h^2}, h) \quad (2-18)$$

(5) 求解 θ_4

将式 (2-15) 和式 (2-16) 两边分别乘以 S_3 和 C_3 ，再相加后化简可得：

$$S_4 = \frac{(-S_1 a_x + C_1 a_y)}{S_5} \quad (2-19)$$

$$C_4 = \frac{a_z(S_2 S_3 + C_2 C_3) - (C_1 a_x + S_1 a_y)(C_2 C_3 - S_2 S_3)}{S_5} \quad (2-20)$$

故，当 $\theta_5 = 0$ 时，此时机械臂位置为奇异点，当 $\theta_5 \neq 0$ 时， $\theta_4 = \text{atan2}(S_4, C_4)$ 。

(6) 求解 θ_6

由式 (2-4) 和式 (2-5) 中矩阵的 (3,1) 处元素和 (3,2) 处元素对应相等，简化后可得：

$$S_6 = \frac{(S_1 n_x - C_1 n_y)C_4 - (S_1 o_x - C_1 o_y)S_4 C_5}{(S_1 n_x - C_1 n_y)^2 + (S_1 o_x - C_1 o_y)^2} \quad (2-21)$$

$$C_6 = \frac{(S_1 n_x - C_1 n_y)C_4 + (S_1 o_x - C_1 o_y)S_4 C_5}{(S_1 n_x - C_1 n_y)^2 + (S_1 o_x - C_1 o_y)^2} \quad (2-22)$$

故可得：

$$\theta_6 = \text{atan2}(S_6, C_6) \quad (2-23)$$

以上就是科佩克 CB06N 焊接机器人逆运动学方程的求解过程，后续进行焊接作业规划时如要进行逆运动学求解，直接将焊接机器人末端执行器相对与焊接机器人基坐标系的其次变换矩阵带入上式即可获得当前位姿下对应的焊接机器人关节向量。

2.3 双旋变位机运动学建模与分析

双旋变位机是串联型两自由度关节机器人，从图 2-2 的双旋变位机实机图可以看出双旋变位机主要由基座、腕部以及驱动装置组成，其主要包括 2 个转动关节，其中变位机末端的姿态通过腕部两个关节翻滚和偏转来确定。

2.3.1 基于 D-H 参数法建立双旋变位机模型

根据双旋变位机实机图对相邻连杆之间位置分析，建立如图 2-6 所示的连杆坐标系。

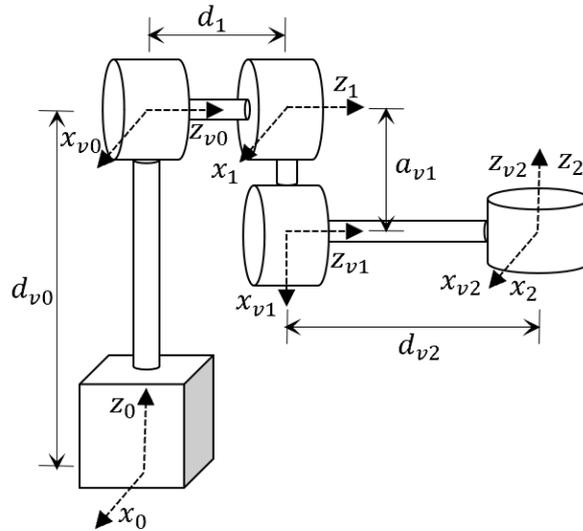


图 2-6 双旋变位机连杆坐标系

根据图 2-6 双旋变位机连杆坐标系确定其 D-H 参数，为了方便建模还填加了三个虚拟关节，双旋变位机 D-H 参数见表 2-2。

表 2-2 双旋变位机 D-H 参数表

关节	d_i/mm	$\theta_i/^\circ$	a_i/mm	$\alpha_i/^\circ$	关节范围/ $^\circ$
v0	$d_{v0} = 1110$	0	0	-90	0
1	$d_1 = 225$	0	0	0	[-180, +180]
v1	0	$\theta_1 + 90$	$a_{v1} = 363$	0	0
v2	$d_{v2} = 1009.5$	-90	0	90	0
2	0	θ_2	0	0	[-180, +180]

2.3.2 双旋变位机正运动学分析

与 2.2 节原理一致，结合表 2-2 中双旋变位机的 D-H 参数，建立如下连杆坐标系间的齐次变换矩阵：

$$T_{v0}^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_{v0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_1^{v0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{v1}^1 = \begin{bmatrix} -\sin\theta_1 & -\cos\theta_1 & 0 & -a_{v1}\sin\theta_1 \\ \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & a_{v1}\cos\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_{v2}^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_{v2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2^{v2} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 0 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

因此，变位机末端坐标系相对于基坐标系的齐次变换矩阵为：

$$T_2^0 = T_{v0}^0 T_{v1}^0 T_{v1}^1(\theta_1) T_{v2}^1 T_2^{v2}(\theta_2) = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

其中 $[n \ o \ a]$ 为双旋变位机末端姿态向量， $[p_x \ p_y \ p_z]^T$ 为双旋变位机末端位置向量，化简后可得：

$$n_x = C_1 C_2, \quad n_y = S_2, \quad n_z = -S_1 C_2;$$

$$o_x = -C_1 S_2, \quad o_y = C_2, \quad o_z = S_1 S_2;$$

$$a_x = S_1, \quad a_y = 0, \quad a_z = C_1;$$

$$p_x = -a_{v1} S_1, \quad p_y = d_1 + d_{v2}, \quad p_z = d_{v0} - a_{v1} C_1;$$

其中 $C_i = \cos\theta_i$ ， $S_i = \sin\theta_i$ 。

上述就是双旋变位机的正向运动学求解过程，后续进行焊接作业规划时如要进行正运动学求解，直接将当前双旋变位机的关节向量带入上式即可获得双旋变位机末端相对与双旋变位机基坐标系的位置和姿态信息。

2.4 焊缝位姿与焊枪位姿模型的建立

通过建立焊缝和焊枪在空间中的位姿模型，可以准确描述焊接过程中焊枪和焊缝相互间的转换关系，进而更好地控制焊枪的姿态和位置，并且通过对焊缝和焊枪的空间位姿进行定量描述，可以实现焊接路径的自动规划和优化，提高焊接效率和降低成本。故焊缝位姿和焊枪位姿模型的建立是实现焊接机器人系统作业规划的基础，对于提高焊接质量、提高焊接效率和实现自动化焊接作业具有重要意义。

2.4.1 焊缝坐标系建立

为了方便后续的规划工作，首先需要基于焊接工件和焊缝信息建立焊缝坐标系，通过定义焊缝坐标系各个坐标轴的姿态，再加上焊缝相对于基坐标系的位置信息，就可以利用齐次变换矩阵中的元素确定焊缝的倾角和转角，并进一步指导焊接工艺的选择。

如图 2-7 所示，世界坐标系一般与机器人基坐标系 $O_B X_B Y_B Z_B$ 重合，其中 Z_B 轴与重力加速度方向反相重合，竖直向上。在焊缝点 O 处，以该点为坐标系原点

建立焊缝坐标系 $O_W X_W Y_W Z_W$ ，焊缝切线方向为坐标系 X 轴，其中焊缝右侧平面 A ，焊缝左侧为平面 B ，以平面 A 与平面 B 的二等分面且垂直于 X 轴的方向为 Z 轴，建立完焊缝坐标系 X 轴和焊缝坐标系 Z 轴后，通过叉乘运算就能得到对应的 Y 轴方向。由于所有的坐标计算都是基于机器人基坐标系，所以得到的焊缝坐标系的位姿矩阵便是相对于机器人基坐标系的^[48]，具体的各个方向的方向矢量计算如下。

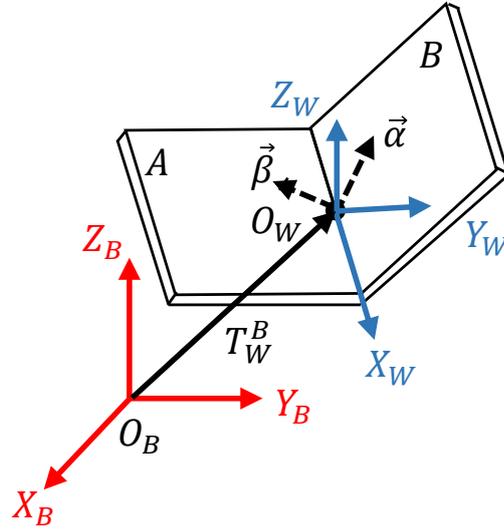


图 2-7 基坐标系与焊缝坐标系示意图

焊缝的切线方向为 X 轴方向，由于一条完整焊缝中的焊点间隔很小，故相邻两点的连线方向就可以作为切线方向：

$$\vec{n}_w = \frac{\overrightarrow{OO'}}{|\overrightarrow{OO'}|} \quad (2-25)$$

根据平面 A 与平面 B 的单位法向量 $\vec{\alpha}$ 和 $\vec{\beta}$ ，求出两个法向量的角平分线即为焊缝坐标系的 Z 轴：

$$\vec{a}_w = \frac{\vec{\alpha} + \vec{\beta}}{\|\vec{\alpha} + \vec{\beta}\|} \quad (2-26)$$

根据坐标系的右手定则，就能计算得到焊缝坐标系的 Y 轴方向向量：

$$\vec{o}_w = \vec{n}_w \times \vec{a}_w \quad (2-27)$$

综上建立的焊缝坐标系相对于基坐标系的齐次变换矩阵 T_W^B 为：

$$T_W^B = \begin{bmatrix} \vec{n}_w & \vec{o}_w & \vec{a}_w & p_w \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-28)$$

式中 p_w 为焊缝点相对于机器人基坐标系的位置向量。

2.4.2 焊枪坐标系建立

建立焊枪坐标系需要考虑位置和姿态两个方面的信息，其中位置定义以焊缝坐标系为参照，通过在焊枪坐标系 Z 轴上添加焊丝长度的偏移来确定。姿态的定义涉及到工作角、行走角和自转角三个维度的变量，这些角度的选择对焊接结果均具有一定的影响。

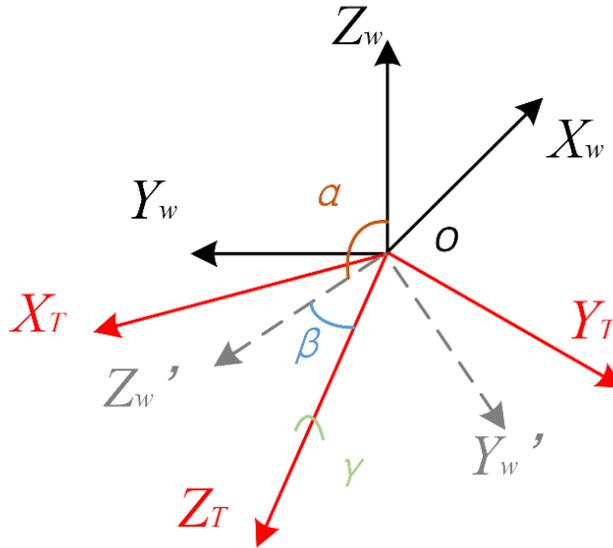


图 2-8 焊枪坐标系以及相关工艺参数的定义

如图 2-8 所示， $O_w X_w Y_w Z_w$ 为焊缝坐标系， $O_T X_T Y_T Z_T$ 为焊枪坐标系，焊枪坐标系由焊缝坐标系经过焊枪的工作角、行走角和自转角旋转变换而来，其中：

焊枪的工作角 α 定义为焊缝坐标系绕 $O_w X_w$ 轴旋转使得 Z_T 与 Z_w' 在 $O_w Y_w Z_w$ 平面投影重合的角度；

焊枪的行走角 β 定义为焊缝坐标系绕 $O_w X_w$ 轴旋转后得到的新坐标系 $O_w X_w Y_w' Z_w'$ 后，再绕 $O_w Y_w'$ 轴旋转使得 Z_w' 和 Z_T 重合的角度；

焊枪的自转角 γ 定义为绕 $O_T Z_T$ 轴旋转的角度。

2.5 船型焊姿态及其求解

在保证焊接质量的前提下，要想获得焊缝熔深和余高足够、成型均匀的焊缝，最好将焊缝置于船型焊位姿，船型焊位姿下的焊接过程具备更好的金属溶解率和焊接效率。这是因为船型焊姿态是与重力方向反向重合，可以使金属溶液向下更好地贴合，焊液不会流散且易于冷却成型，从而有助于提高焊接电流和焊接速度。为了定量描述船型焊的位姿，本研究对船型焊位姿的坐标系进行表示，并对

双旋变位机进行船型焊位姿的求解，充分利用变位机的位姿调整功能。

2.5.1 船型焊姿态的坐标系表示

处于船型焊位姿下的焊点，其焊缝切线需垂直于重力方向，并且角平分线应反向重合重力方向。施焊点处焊缝切线水平时，溶液难以流散，且角平分线反向重合时，熔池深度最深。对于复杂工件的焊接，采用船型焊接可施加更大电流以提高焊接速率，改善作业效率，并且对于该工件上的多条焊缝，通过变位机的调整都能确保获得均匀且良好的焊缝成型质量^[48]。

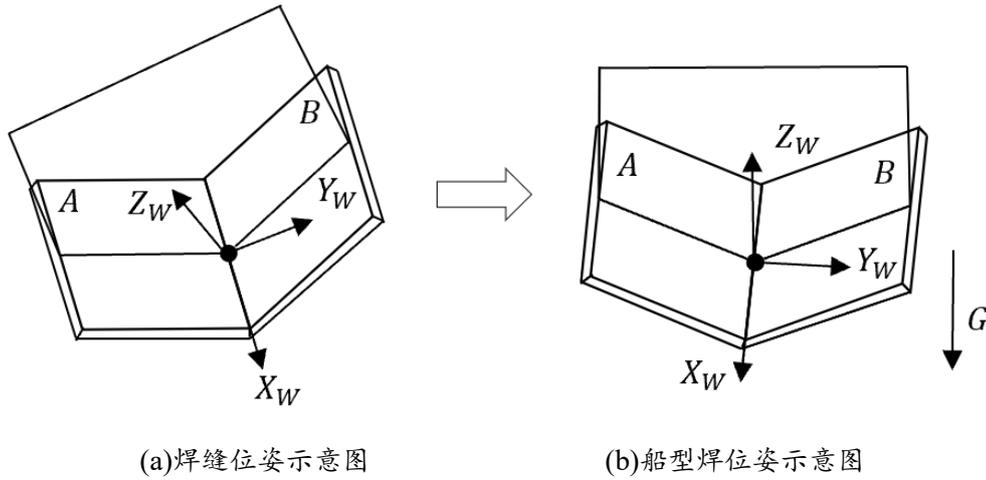


图 2-9 普通焊缝位姿和船型焊位姿示意图

如图 2-9 所示是普通焊缝位姿和船型焊位姿的关系及其坐标系表示。其中图 2-9(a)中展示了普通焊缝位姿的示意图，而图 2-9(b)是经变位机变换后的船型焊位姿的示意图，其中 G 代表重力加速度方向。船型焊位姿下焊缝坐标系在机器人基坐标系中的位姿矩阵 T_W^B 为：

$$T_W^B = \begin{bmatrix} R_W^B & P_W^B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-29)$$

其中船型焊位姿下的焊缝坐标系 Z_W 轴竖直向上并与重力加速度的方向相反，故：

$$R_W^B = \begin{bmatrix} n_x & o_x & 0 \\ n_y & o_y & 0 \\ n_z & o_z & 1 \end{bmatrix} \quad P_W^B = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (2-30)$$

矩阵 R_W^B 和 P_W^B 中的未知变量 n_x 、 n_y 、 n_z 、 o_x 、 o_y 、 o_z 、 p_x 、 p_y 、 p_z 都可通过求解变位机的正运动学方程而求得。

2.5.2 船型焊姿态的求解

在实际焊接工程中，船型焊姿态可以让焊缝深度一致且成型良好，焊件沿焊缝热量分布均匀，从而有助于提高焊接效率和质量。然而对于空间复杂的焊缝而言，单个焊接机器人的施焊无法实现整条空间焊缝的船型焊接，此时变位机的作用便体现出来，它可以实现工件在多个方向的旋转、倾斜和移动，从而实现对焊接过程的精确控制。

设焊缝坐标系相对于变位机末端坐标系的齐次变换矩阵为 T_W^E ：

$$T_W^E = \begin{bmatrix} n_x^w & o_x^w & a_x^w & p_x^w \\ n_y^w & o_y^w & a_y^w & p_y^w \\ n_z^w & o_z^w & a_z^w & p_z^w \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-31)$$

而由式(2-24)变位机的正向运动学可得变位机末端坐标系相对于基坐标系的齐次变换矩阵 T_E^B ，故焊缝坐标系在变位机基坐标系中的位姿矩阵 T_W^B ：

$$T_W^B = T_E^B T_W^E = \begin{bmatrix} n_x^B & o_x^B & a_x^B & p_x^B \\ n_y^B & o_y^B & a_y^B & p_y^B \\ n_z^B & o_z^B & a_z^B & p_z^B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-32)$$

其中：

$$\begin{aligned} a_x^B &= a_x^w \cos\theta_1 \cos\theta_2 - a_y^w \cos\theta_1 \sin\theta_2 + a_z^w \sin\theta_1 \\ a_y^B &= a_x^w \sin\theta_2 + a_y^w \cos\theta_2 \\ a_z^B &= -a_x^w \sin\theta_1 \cos\theta_2 + a_y^w \sin\theta_1 \sin\theta_2 + a_z^w \cos\theta_1 \end{aligned}$$

又由式(2-30)可得 T_W^B 矩阵Z方向上向量为 $[0 \ 0 \ 1]^T$ ，故联立方程可求出变位机关节角：

$$\begin{cases} \theta_1 = \arccos(a_z^w) \\ \theta_2 = \arctan\left(-\frac{a_y^w}{a_x^w}\right) \end{cases} \quad (2-33)$$

综上所述，对于任意焊缝坐标系相对于变位机末端坐标系的齐次变换矩阵 T_W^E ，都可以求解得到对应的变位机关节值，使得该焊缝坐标系转动到船型焊位姿。

2.6 本章小结

本章首先介绍了焊接机器人系统的组成架构，接着运用 D-H 参数法分别对科佩克 CB06N 焊接机器人和双旋变位机进行运动学建模与分析，其中包括连杆

坐标系的建立、D-H 参数表的确定、正向运动学和逆向运动学的求解。随后对焊缝坐标系和焊枪坐标系进行建模，并分析相关参数的影响。最后，对船型焊姿态进行了定义，为了充分利用变位机的自由度，将任意焊缝调整到最优的船型焊。同时还求解了船型焊姿态下的变位机关节值，从而提高焊接质量，并比传统的单轴控制系统更加灵活，可以实现多方位焊接，提高了作业质量和效率。本章为后续焊接机器人系统的作业规划打下了基础。

第3章 面向焊缝的焊接机器人系统运动规划研究

焊接机器人系统在工业生产中扮演着极为重要的角色，能够完成复杂的焊接操作，从而提高生产效率和焊接质量。焊接机器人系统在焊接作业时，末端焊枪的稳定性是决定焊缝成型质量的关键，并且还要避免焊接机器人和变位机发生碰撞，除此之外实际焊接的效果还与焊接工艺有直接关系，如何在保证焊接工艺的前提下实现无碰撞地平稳焊接是焊接规划的要点和难点。为此，本章将对焊接机器人系统的运动规划进行深入研究，主要研究内容包括焊接工艺预输入的焊枪姿态优化和焊接机器人与变位机的协同运动规划。具体而言，本章将探究如何在无碰撞的前提下实现平稳的焊接操作，并研究如何实现焊接机器人和变位机之间的协同运动规划，以提高焊缝成型质量。通过对焊接机器人系统运动规划的深入研究和分析，将为实现高质量的焊接作业提供有力的理论和技术支持。

3.1 焊接工艺预输入

3.1.1 焊接工艺对焊缝成型的影响分析

在实际工程中，焊接工程师需要深入了解焊接工艺的意义和影响，并掌握相应的调整技巧和策略，以确保焊接作业的成功和高效进行，其中工作角和行走角是焊接工艺中非常重要的两个参数。

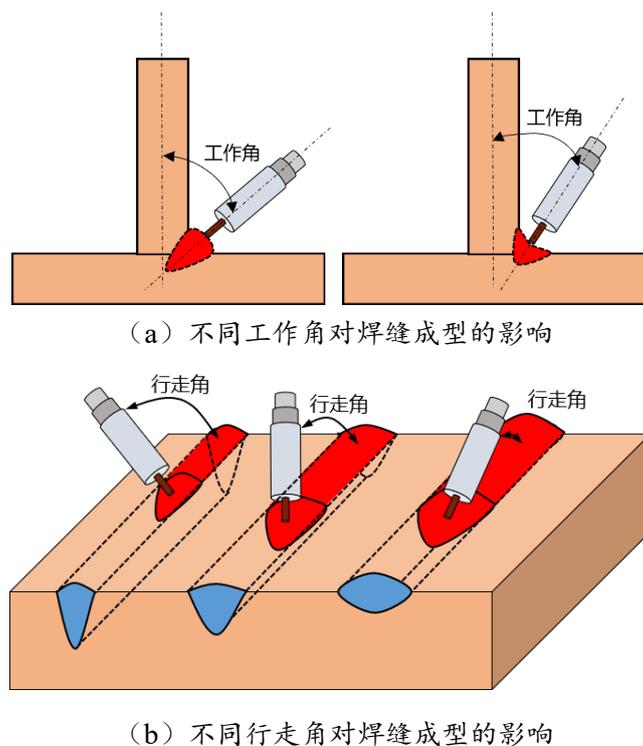


图 3-1 不同工作角与行走角对焊缝成型的影响

如图 3-1(a)所示,工作角是指焊枪与工件表面的夹角,一般情况下,工作角的大小会直接影响到焊接热输入和焊接速度。在实际工程中,工作角的选择也会受到多种因素的影响,例如焊接材料的种类、焊接板厚、焊接位置等。在进行工作角的选择时,需要充分考虑这些因素,以保证焊接质量。通常情况下,选择较小的工作角可以提高焊接速度,但是会增加焊接热输入,从而可能导致焊缝过热。选择较大的工作角可以降低焊接热输入,但是会降低焊接速度,从而增加焊接时间。如图 3-1(b)所示,行走角是指焊枪在行走时与焊缝的夹角,行走角的大小会影响到焊接速度和焊接深度。行走角的选择也会受到多种因素的影响,例如焊接速度、焊接深度、焊接位置等。在进行行走角的选择时,需要充分考虑这些因素,以保证焊接质量。通常情况下,选择较小的行走角可以提高焊接速度,但是可能会降低焊接深度,从而影响焊接质量。选择较大的行走角可以增加焊接深度,但是会降低焊接速度,从而增加焊接时间。

综上所述,工作角和行走角在实际工程中的应用和影响是非常重要的,需要根据具体情况进行合理选择和调整,以达到最佳的焊接质量和效率,通常需要根据焊接材料、板厚、焊接位置、焊接速度、焊接工艺和焊接人员的经验等选择合适的工作角和行走角。本焊接机器人系统设计一个工艺预输入的模块,经验丰富的焊接人员根据本次焊接作业的焊接材料、板材厚度和自身工作经验等预设一个期望的工作角和行走角,并确定变化阈值,后续的姿态规划算法会以期望的工作角和行走角为参考,以相关阈值为角度冗余进行搜索和优化,求解最优的焊枪姿态。

3.1.2 焊缝坐标系与焊枪坐标系之间的变换

根据 2.4 节中焊缝坐标系与焊枪坐标系的定义可以建立它们间的转换关系,这样在接收到焊接机器人系统感知模块提取到的焊缝数据信息,建立完焊缝坐标系后,就能根据焊缝坐标系和焊枪坐标系之间的旋转变换关系确定最终的焊枪坐标系。焊缝坐标系经过如下变换顺序转换为焊枪坐标系:

- 1) 焊缝坐标系绕 $O_w X_w$ 轴旋转工作角 α ;
- 2) 再绕 $O_w Y_w'$ 轴旋转行走角 β ;
- 3) 再绕 $O_w Z_w'$ 轴旋转自转角 γ ;
- 4) 沿着 $O_w Z_w'$ 轴平移 p 。

焊缝坐标系经过以上变换后得到的焊枪坐标系为:

$$T_{rt}^{pw} = Rot(X_w, \alpha)Rot(Y_w', \beta)Rot(Z_w', \gamma)Trans(Z_w', p) \quad (3-1)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\beta \cos\gamma & -\cos\beta \sin\gamma \\ \sin\alpha \sin\beta \cos\gamma - \cos\alpha \sin\gamma & \sin\alpha \sin\beta \sin\gamma - \cos\alpha \cos\gamma \\ -\cos\alpha \sin\beta \cos\gamma + \sin\alpha \sin\gamma & \cos\alpha \sin\beta \sin\gamma + \sin\alpha \cos\gamma \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\beta & p \sin\beta \\ -\sin\alpha \cos\beta & -p \sin\alpha \cos\beta \\ \cos\alpha \cos\beta & p \cos\alpha \cos\beta \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中 p 为焊缝坐标系 Z_w' 轴的平移量,在实际的焊接工程中,焊丝长度表示为焊接时焊丝伸出枪管的长度,针对不同的焊接工艺,可以自定义合适的焊丝长度。焊枪的工作角度和行进角度对焊接工艺有重要影响,它一般由经验丰富的焊接操作人员针对当前焊接材料、焊接位置等具体情况专门设置。另外,虽然焊接自转角度对焊接工艺没有直接的影响,但可以通过优化焊枪的自转角度来获得焊接作业中更优的运动性能指标。

3.2 焊接机器人运动学性能评价指标的建立

在焊接过程中,机器人的运动学性能对焊缝的成型质量和生产效率有着至关重要的影响。因此,实际在对焊接机器人运动规划时,需要结合实际工艺要求,选定合适的工作角和行走角,并对其冗余空间进行优化。通过寻找较优的运动学性能指标,例如精度、速度、平滑性、稳定性、能效比、灵活性和可靠性等,提高机器人的操作灵活性和自适应能力,进而提高生产效率和焊接质量。

通过2.2节焊接机器人运动学模型的分析可以看出,对于一个确定的焊接机器人末端的焊枪位姿会存在多个关节逆解,并且前文提出的焊接工艺预输入模块还会提供焊枪末端的工作角和行走角的冗余空间,以及自转角的冗余优化空间,即由于焊接机器人的焊枪在焊枪轴线上是旋转对称的,焊接机器人可以绕轴任意旋转。因此,本文可以利用这些冗余空间对机器人的运动学性能指标进行优化,在安全焊接的前提下提高最终的焊缝成型质量。针对实际的焊接工程需求,本文提出了以下的优化目标:

(1) 关节空间连续性指标

关节空间连续性指标是机器人运动学性能评价中的一个重要指标,用于描述机器人在关节空间中运动过程中的平滑性和稳定性。一般来说,机器人的关节空间连续性指标越高,其运动过程就越平稳、连续,从而能够提高机器人的操作精度和稳定性,减小机器人的机械振动和噪声等不良影响。关节空间连续性指标用于优化机器人的姿态规划,可以提高机器人的运动灵活性和自适应能力。在焊接任务中,由于焊缝的形状和位置通常比较复杂,因此焊接机器人需要在狭小的空

间内完成运动, 关节空间连续性指标可以保证机器人在这种复杂的空间内具有更好的稳定性和可控性, 从而提高机器人的焊接精度和效率。并且焊接机器人在运动过程中可能会产生机械振动和噪声等不良影响, 导致焊接质量下降或焊接机器人故障, 通过关节空间连续性指标的评估, 可以弱化这些不良影响并采取相应的措施, 保证机器人的运动平稳和安全。

具体而言, 关节空间连续性指标可以通过计算机器人在关节空间中运动过程中各个时刻的关节角度变化量来衡量, 为此设计如下关节空间连续性指标函数:

$$f_c(\theta) = 1 - e^{-\frac{|\theta - \theta_c|^2}{\delta_c}} \quad (3-2)$$

其中 θ 为当前机器人关节向量, θ_c 为上一时刻的机器人关节向量, δ_c 为关节空间函数的光滑度调节系数, 在调节时, 应尽量使得函数曲线变得光滑, 从而让其在搜索算法中有更好的表现。

(2) 远离障碍物指标

远离障碍物指标是指机器人路径规划中用于评估机器人是否足够远离周围障碍物的指标。在工业自动化等领域中, 机器人路径规划通常需要考虑到机器人运动过程中遇到的障碍物, 以避免机器人与周围环境发生碰撞, 从而保障工作场所的安全性。在焊接任务中, 远离障碍物指标同样具有非常重要的作用和意义。一方面, 焊接任务通常需要机器人在焊接过程中保持一定的距离, 以避免机器人与周围环境或焊件发生碰撞或烧毁。因此, 远离障碍物指标可以帮助机器人规划出安全可靠的路径, 避免机器人在执行焊接任务时与周围障碍物发生碰撞或摩擦。另一方面, 远离障碍物指标还可以影响焊接质量和效率。具体地, 如果机器人在焊接过程中与周围环境或焊件过于接近, 那么焊接质量可能会受到影响, 比如焊缝形状不规则、焊接质量不稳定等。此外, 如果机器人在执行焊接任务时需要频繁地停止或调整路径, 也会导致焊接效率降低, 从而影响整个焊接过程的时间和成本。故而在焊接任务中, 远离障碍物指标的优化也是非常重要的一项任务。

远离障碍物指标一般是通过机器人路径与周围环境障碍物之间的距离来定义的。具体地, 可以将机器人路径分为若干个离散的路径点, 然后计算每个路径点与周围障碍物之间的最小距离, 最后将这些最小距离进行加权平均得到远离障碍物指标, 为此设计如下远离障碍物指标函数:

$$f_o(\theta) = -\log(d_{min} - \delta_o) \quad (3-3)$$

其中 d_{min} 是当前状态下机械臂连杆的向量和障碍物的向量之间的最小距离, 距离值越小, 远离障碍物函数值越大。 δ_o 是调节系数, 用于调节安全阈值。

(3) 远离关节极限指标

远离关节极限指标是机器人姿态规划中的一个重要指标,它用于评估机器人的运动范围是否远离了关节极限位置。在机器人姿态规划中,机器人需要在执行任务时保持姿态连续性,同时保证机器人的运动范围不超出关节极限,这是一项非常关键的任务。在焊接任务中,机器人的关节角度范围通常是有限制的。机器人在执行任务时需要同时保证姿态的连续性和关节角度不超出规定范围,因此,远离关节极限指标在焊接任务中也是非常重要的。具体地,焊接任务需要机器人对焊缝进行精确的定位和控制。在焊接过程中,机器人需要维持良好的姿态连续性,同时避免关节角度超出规定范围。如果机器人的关节角度超出规定范围,就可能造成焊接效果不佳,影响焊接质量,甚至造成机器人失控或者机械故障等危险情况。因此,优化远离关节极限指标可以提高机器人在焊接任务中的安全性和可靠性。此外,优化远离关节极限指标还可以提高机器人的工作效率和成本效益。在焊接任务中,机器人需要完成的工作量通常比较大,如果机器人的关节角度范围受到限制,可能会导致机器人需要进行多次操作才能完成任务,从而降低工作效率。而通过优化远离关节极限指标,可以使机器人在执行任务时更加高效,降低工作成本,提高生产效率。

远离运动极限是关节空间的任务。具体的,对于 n 自由度的机器人而言,每一个关节都有其运动限制,即:

$$\theta_{i\text{ low}} < \theta_i < \theta_{i\text{ high}}, (i \in 1, 2, \dots, n) \quad (3-4)$$

通常希望关节处于安全位置时,适应度函数具有一个很小的数值,而当关节运动到离关节极限较近的位置时,函数值会迅速增大,为此设计如下远离运动极限指标函数:

$$f_l(\theta) = - \sum_{i=1}^n \sigma_l \left(\frac{1}{1 + e^{\frac{\theta_i - \theta_{i\text{ low}}}{\delta_i}}} + \frac{1}{1 + e^{\frac{\theta_{i\text{ high}} - \theta_i}{\delta_i}}} \right) \quad (3-5)$$

其中, δ_i 是阈值调节系数,可以自由调节安全阈值的数值。 σ_l 是各关节权重系数,反应了各关节数值对函数值的影响程度,一般情况下各个关节的权重系数相同。

3.3 基于工艺预输入的焊缝焊枪姿态优化

基于焊接工艺预输入的焊枪姿态优化是一种在预先输入的焊接工艺参数基础上,进一步优化得出最佳焊接姿态的算法,旨在保证焊接质量和安全性。传统

的焊接方法通常依赖于焊接工人的经验和技能,这种方法存在着主观性和不稳定性,且如何充分利用焊枪的冗余特性以追求更优的运动学指标也是一个关键问题。故研究焊接工艺预输入的焊枪姿态优化算法,对于提高焊接质量和效率具有重要的理论和实际意义。

3.3.1 焊枪姿态优化的多目标优化模型

在关节空间连续性、远离障碍物、远离关节极限这三个目标中,若要同时让所有目标保持最优,则会存在相悖情况。因此在对焊枪姿态实现最优化时,需要在满足焊接机器人所有约束的情况下,权衡全部目标实现较为均衡的全局最优。本研究定义的焊枪姿态多目标优化模型如下:

$$\begin{aligned}
 & \underset{\alpha, \beta, \gamma}{\text{minimize}} [f_c(\alpha, \beta, \gamma), f_o(\alpha, \beta, \gamma), f_l(\alpha, \beta, \gamma)] \\
 & \text{s. t. } \mathbf{T}_{rt}^b = \mathbf{T}_{pw}^b \mathbf{T}_{rt}^{pw} \\
 & \quad \theta = f^{-1}(\mathbf{T}_{rt}^b) \\
 & \quad \alpha_{ref} - \alpha_s \leq \alpha \leq \alpha_{ref} + \alpha_s \\
 & \quad \beta_{ref} - \beta_s \leq \beta \leq \beta_{ref} + \beta_s \\
 & \quad -\gamma_{max} \leq \gamma \leq \gamma_{max}
 \end{aligned} \tag{3-6}$$

1) 优化变量

工作角 α (rad), 行走角 β (rad), 自转角 γ (rad)。

2) 约束条件

焊接机器人焊接作业时焊枪坐标系满足焊缝坐标系经过焊接工艺变换后的位姿约束,即 $\mathbf{T}_{rt}^b = \mathbf{T}_{pw}^b \mathbf{T}_{rt}^{pw}$,并且关节角 θ 满足焊枪坐标系的焊接机器人逆运动学模型 $\theta = f^{-1}(\mathbf{T}_{rt}^b)$ 。此外工作角、行走角、自转角受到焊接机器人的硬件限制和焊接工艺的需求限制,需要在安全参数范围进行优化。本文提出的工艺预输入是指定工作角和行走角的参考输入,并在一定范围内变换,其中 α_{ref} , β_{ref} 分别为预输入的参考工作角和参考行走角,该参数可以由从焊接工艺专家系统中根据当前焊接的板材等输入获得,也可由焊接工人输入; α_s , β_s 分别为工作角和行走角的调整区间,参数也可以由从焊接工艺专家系统和焊接工人获得; γ_{max} 为自转角的最大范围。

3) 目标函数

根据3.2节的内容,在实际焊接工程中,焊枪末端越稳定越好,避开障碍物越远越好,远离关节极限越远越好。故本文设置以下优化目标:

$$goal \begin{cases} \min(f_c) \\ \min(f_o) \\ \min(f_i) \end{cases} \quad (3-7)$$

3.3.2 MOEA/D-DG 算法

(1) MOEA/D 原理

MOEA/D 是一种以分解思想为核心的多目标进化算法 (MOEA)，由进化计算领域的知名专家张青富教授提出^[49]。MOEA/D 区别于寻常 MOEA 求解多目标优化问题 (MOPs) 的思路，其核心思想是将一个多目标优化问题 (MOP) 分解为多个单目标优化问题 (SOP) 同时进行求解，即每个 SOP 求得的最优解必然是求得的最优解集中的一个解。MOEA/D 是一种全局寻优算法，依照“优胜劣汰，适者生存”的自然法则，同时提出了“邻域”的新概念，使种群中的个体在邻域概念基础上以“抱团”形式进行协同进化。算法首先为种群内所有个体分配权重向量，该权重向量是随机生成且分布均匀的，用以确定各子问题的邻域，子问题在确定的邻域内选择个体进行交叉变异以生成新解，并采用特定的聚合函数更新邻域内的父代个体以进行下一次循环，筛选出每一代中的最佳非支配个体作为一个最优解保留，通过不断迭代筛选出所有的最优解产生最优解集。

相对于其他 MOEA 而言，MOEA/D 引入数学规划思想，加快了接近理想点的速度，降低了算法运行的时间复杂度，提高了运算速度的同时也提高了所求 Pareto 最优解集的分布均匀性及精度，并且 MOEA/D 在处理三目标及以上 MOP 时具有更优的表现。

1) 生成权重向量

MOEA/D 算法其核心思想是把一个 MOP 分解成若干个 SOP 同时进行求解，对于这些分解后的子问题而言，它们中的每一个都与一个权重向量相对应，且向量中的坐标分别对应种群中的不同个体。MOEA/D 算法中权重向量的产生对于算法寻优尤为关键，经过实验验证得到，相对均匀分布的权重向量对应求解得到的最优解质量更高。

本文采用单纯形格子法生成空间中均匀分布的权重向量。首先确定相关参数， H 为每个目标方向上的采样个数， m 为优化目标个数， N 为种群规模也即权重向量的个数，对于权重向量 $\mathbf{V} = [v_1, v_2, \dots, v_m]$ ，则要求：

$$v_1 + v_2 + \dots + v_m = 1 \quad (3-8)$$

$$v_i \in \left\{ \frac{0}{H}, \frac{1}{H}, \dots, \frac{H}{H} \right\}, i = 1, 2, \dots, m \quad (3-9)$$

该问题即为从集合中挑出 m 各元素组成一个权重向量,使得权重向量中各元素的和为1,那么 $N = C_{H+m-1}^{m-1}$ 。

例如,假设目标个数 m 取3,参数 H 取2,则种群规模 $N = C_{H+m-1}^{m-1} = C_4^2 = 6$,则用该方法生成的6个均匀权重向量分别为:(0,0,1)、(0,1,0)、(1,0,0)、(0,1/2,1/2)、(1/2,1/2,0)和(1/2,0,1/2)。

2) 切比雪夫聚合法

MOEA/D算法的核心是分解思想,将一个MOP分解为多个SOP同时处理。在MOEA/D中,权重向量生成后需要通过计算种群中个体的欧氏距离生成邻域,后续根据邻域内的邻居个体进行解的更新。采用的聚合函数主要分为三种:加权和法(Weighted Sum Approach,简称WS)、切比雪夫分解法(Tchebycheff Approach,简称TCH)和基于惩罚的边界交叉法(Penalty-based Boundary Intersection,简称PBI)。

本文采用切比雪夫分解法,切比雪夫法中单目标优化函数的表达形式为:

$$\begin{aligned} \min g^{teh}(x|\lambda, z^*) &= \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_i(f_i(x) - z_i^*)\} \\ \text{s. t. } x &\in \Omega \end{aligned} \quad (3-10)$$

其中, $z^* = (z_1^*, \dots, z_m^*)^T$ 是参考点, $z_i^* = \min(f_i(x)|x \in \Omega)$,即 z^* 是由所有目标函数最小值组成的参考向量。其物理意义为 $\lambda_i(f_i(x) - z_i^*)$ 值越大,就说明在这个目标函数上离理想点越远。假设 $\lambda_a(f_a(x) - z_a^*)$ 是所有 $\lambda_i(f_i(x) - z_i^*)$ 中的最大值,逐渐改变 x 使得该值减小(靠近理想点)直到到达帕累托前沿(PF)上的对应点,即完成了最小化 $g^{teh}(x|\lambda, z^*)$ 的任务。

3) MOEA/D 算法框架

MOEA/D算法的核心思想是分解思想,将一个MOP通过聚合函数分解为若干个SOP再同时进行处理。计算种群内个体的权重向量之间的欧氏距离得到个体的邻域,利用所生成的邻域与子问题之间的关系对子问题进行同步优化,使种群内的个体不断逼近理想Pareto最优面。MOEA/D算法父代个体的选择、交叉生成子个体以及种群的更新均在邻域内进行,能够使良好基因在该个体的邻域内迅速共享至其他个体,极大地加强了算法的搜索效率。邻域搜索是该算法区别于其他多目标优化算法的一大特点。基本的MOEA/D算法的基本框架如下:

算法 3-1: MOEA/D

输入: 多目标优化问题;

种群规模 N ;

优化目标个数 m ;

邻域规模 T ;

输出: 外部种群 EP;

1: 初始化:

2: 设置 $EP = \emptyset$, 用于存放算法当前求出的全部 Pareto 非支配解;

3: 生成均匀分布的权重向量 $V = [v_1, v_2, \dots, v_m]$;

4: 对每个权重向量 v_i 计算它与其他向量的欧氏距离生成距离矩阵 d , 选择欧氏距离最小的 T 个作为邻近向量。则对于每个 i , 设置其邻域 $B(i) = \{b_1, b_2, \dots, b_T\}$, 那么 v_l 是 v_i 的邻近向量, 其中 $l \in B(i)$;

5: 随机初始化种群 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, 其中 $x_i \in \Omega$, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$;

6: 对种群中各个体 x_i , 计算其评价函数值 $FV^i = F(x_i)$;

7: 根据 MOP 计算初始化的理想点 $Z^* = \{z_1, z_2, \dots, z_m\}$, 满足 $z_i^* = \min f_i(x)$, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$;

8: 个体更新:

9: 基因重组: 从邻域集合 $B(i)$ 中随机选择两个个体 x_k 和 x_l , 采用特定的重组算子使父代个体 x_k 和 x_l 进行基因的交叉和变异, 生成新的子个体 x' ;

10: 根据原 MOP 的约束条件对生成的个体 x' 进行修正;

11: 对新的子个体 x' 进行函数评价, 计算 $F(x')$ 函数值;

12: 依据以下规则更新理想点 Z^* :

$$z_i^* = \begin{cases} f_i(x') & \text{if } z_i^* > f_i(x') \\ z_i^* & \text{if } z_i^* \leq f_i(x') \end{cases} \quad \text{其中 } i = 1, 2, \dots, m;$$

13: 更新邻域解: $\forall l \in B(i)$, 若满足 $g^{teh}(x'|v_l, z) \leq g^{teh}(x_l|v_l, z)$, 则执行邻域中个体的替换, 令 $x_l = x'$, $FV^l = F(x')$;

14: 更新外部种群 EP: 判断所有个体与 x' 的支配关系; 对 EP, 移除所有被 x' 支配向量, 移入所有不被 x' 支配向量;

15: 停止判断:

16: 若满足停机准则, 则输出 EP 作为 Pareto 最优解集; 不满足则跳转至个体更新进行下一次进化。

(1) 改进思路

1) 基于迭代次数的动态邻域

传统的 MOEA/D 算法中，邻域大小和邻域定义方式是在整个优化过程中固定不变的，无法适应优化过程中不同阶段的需求。为此，本文考虑使用动态邻域操作来实现邻域的动态调整，以更好地适应不同的优化状态，具体而言，可以根据算法运行的迭代次数来动态调整邻域的大小和定义方式。当算法运行迭代次数较少时，可以适当扩大邻域范围，以促进算法的全局搜索；当算法运行迭代次数较多时，可以适当缩小邻域范围，以加强局部搜索能力。可以设计各种不同的策略函数来实现邻域大小的动态调整，如指数函数、多项式函数等，以适应不同的优化问题和算法需求。

首先设定初始邻域大小，通常情况下可以根据问题的规模和复杂度来设置，在每一代的迭代过程中，根据当前的迭代次数确定对应的邻域大小。本文使用如下函数来计算邻域大小的调整量：

$$N = \left\lfloor \frac{N_{max}}{e^{k \cdot \frac{t}{t_{max}} + N_o}} \right\rfloor \quad (3-11)$$

其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整， N_{max} 为邻域的最大值， N_o 为最小邻域偏置， k 为邻域速度系数， t_{max} 为最大迭代次数， t 为当前迭代次数。当 $N_{max} = 8$ ， $N_o = 2$ ， $k = 5$ ， $t_{max} = 200$ 时，动态邻域的范围和调整趋势如图 3-2 所示。

根据计算得到的调整量更新邻域大小和范围，以便在下一次迭代中使用，直到算法结束或满足某个停止准则。这一部分对应于算法 3-2 中第 6 行。

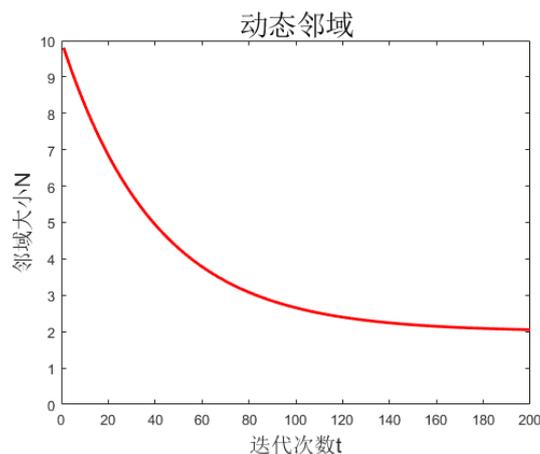


图 3-2 邻域大小随迭代次数变化

2) 高斯变异算子

高斯变异算子是一种基于概率的随机算子,可以改变种群中某些个体的基因值用于增加算法的搜索能力,提高算法的全局搜索性能。高斯变异的基本思想是在当前个体的基因值附近进行一次随机扰动,随机扰动的大小和方向均服从高斯分布,方差的大小会影响扰动的幅度,如果方差较大,扰动的幅度也会比较大,个体可能会跳出当前搜索区域进行更广泛的探索;反之,如果方差较小,扰动的幅度也会比较小,个体则更加倾向于在当前搜索区域内进行局部搜索。高斯分布具有平滑的分布特点,能够产生连续的变化,有利于保留优秀个体的优秀性质。其公式如下:

$$v_{i,j} = x_{i,j} + N(0, \sigma_j^2) \quad (3-12)$$

其中, $x_{i,j}$ 表示第 i 个个体的第 j 个决策变量的值, $v_{i,j}$ 表示变异后的值, $N(0, \sigma_j^2)$ 表示均值为 0, 方差为 σ_j^2 的正态分布随机数。 σ_j 通常被称为标准差,控制了高斯分布的分散程度,一般来说,它的值越大个体变异的程度越大。这一部分对应于算法 3-2 中第 5 行。

算法 3-2: 基于 MOEA/D-DG 的焊枪姿态优化

输入: 焊缝焊接路径点集合 Φ ; 焊接机器人系统运动学配置 Ψ ; 预输入工艺向量 T ;

输出: 焊缝焊接路径点最优焊接姿态序列;

- 1: While 所有焊点尚未规划完毕 do
 - 2: 种群混合初始化 P
 - 3: While 没有满足终止条件 do
 - 4: 选择、交叉、差分变异操作生成新个体
 - 5: 高斯变异算子随机扰动变异
 - 6: 基于迭代次数的动态邻域更新
 - 7: 确定搜索区间 S
 - 8: 将理想点与个体的目标函数值对比, 更新理想点
 - 9: 关节空间连续性、避障、远离关节极限适应度计算
 - 10: 根据切比雪夫聚合法更新邻居解
 - 11: 将所有非支配解加入外部种群, 并更新
 - 12: End while
 - 13: 选择关节空间连续性最高的个体作为该焊点最优焊接姿态
 - 14: End while
-

3.3.3 面向焊缝的焊枪姿态优化策略

针对一道完整的待焊焊缝，它包含多个连续的焊缝路径点，焊缝中每个焊接路径点都需要进行焊枪姿态优化，以实现焊接过程中的焊枪稳定性、避开障碍物和远离关节极限等目标。由于整道焊缝的所有路径点的姿态优化过程非常复杂和庞大，本文采取了两种策略来提高算法的效率和性能。第一种是种群混合初始化策略，它可以提高算法的局部搜索能力和收敛性，通过引入多种不同的种群初始化方式来促进算法的多样性和搜索能力。第二种是区间搜索策略，它可以提高算法的搜索效率，在搜索空间中定位具有更好性能的解。算法 3-2 展示了基于工艺预输入的焊枪姿态优化算法的原理流程，结合这两种策略可以显著提高 MOEA/D 算法的优化效果和速度，特别是在大规模和复杂的焊接问题中具有较好的适用性。

算法 3-3：搜索区间确定

输入：上一个焊接路径点决策变量 X ；焊接机器人运动学配置 Ψ ；初始区间 I ；

最大允许帕累托解集不饱和搜索次数 N ，帕累托解集饱和大小 M

输出：搜索区间 S

```

1: While  $I <$  两倍的全部搜索空间 do
2:     If  $I >$  全部搜索空间 then
3:          $S =$  全部搜索空间
4:     End if
5:      $k = 0$ 
6:     For  $k \leftarrow 1$  to  $N$  do
7:         焊枪姿态优化搜索
8:     End for
9:     If 帕累托解集大小  $< M$ 
10:         $I = 2 * I, S = I$ 
11:     End if
12: End while
13: 返回搜索区间  $S$ 

```

(1) 种群混合初始化策略

为了更好地利用先验信息加速焊缝的焊枪姿态优化的收敛进程，在本算法中，采用了种群混合初始化策略，使得当代种群来自两个不同的来源。具体而言，第一个来源是前一个焊缝路径点的最终种群个体，通过继承部分前一个个体的最终进化结果来增强局部搜索能力。这里的继承部分是指将前一个个体的一部分决策

变量直接继承到当前个体的决策变量中，以此作为当前个体的初始值。这样做的目的是保证新生成的个体相对于前一个个体的变化尽量小，从而有利于保持种群的收敛性。第二个来源则与传统进化算法一致，通过随机生成的方式生成一部分个体，保证算法初始个体的分散性，有利于全局收敛，避免陷入局部最优。这里需要注意的是，对于每个焊缝路径点，由于它的先验信息是已知的，因此在生成初代种群时可以根据其先验信息对决策变量进行限制。这一部分对应于算法 3-2 中第 5 行。

(2) 区间搜索策略

在可达空间进行解的搜索时，由于空间内存在非线性区域和非凸区域，需要采取一定策略进行搜索以提高搜索效率。具体而言，本文采用区间搜索策略，将搜索空间划分为若干个从小到大的区间，首先在上一个点的解附近的一定区域内进行局部搜索，以轨迹信息为指导可以让搜索更加有针对性，提高搜索效率。如果在该区间内未搜索到有效解，可以逐步扩大搜索区域，直到在整个可达区域内进行搜索，具体实现如算法 3-3 所示。这一部分对应于算法 3-2 中第 7 行。

3.3.4 实验结果与分析

为了评估基于 MOEA/D-DG 的焊枪姿态优化算法性能，本文设计了两个实验。第一个实验是针对单焊点进行的焊枪姿态优化，目的在于通过多目标优化综合评价指标对 MOEA/D-DG 算法进行性能试验，并用消融对比实验证明了算法改进部分的优越性和有效性。第二个实验是连续焊缝的焊枪姿态优化，通过对单道焊缝连续焊点的优化来测试 MOEA/D-DG 算法的性能，特别是种群混合初始化策略和区间搜索策略在连续焊点姿态优化方面的收敛速度和搜索效率的提升。这些实验的目的是验证 MOEA/D-DG 算法在焊枪姿态优化方面的有效性和实用性。

(1) 单焊点焊枪姿态优化实验

1) 焊点实验数据

本文选择如图 3-3 所示的焊点坐标系作为目标焊点位姿，其中焊接机器人初始状态如图所示，预输入的焊接工艺中参考工作角 $\alpha_{ref}=90^\circ$ ，工作角调整区间 $\alpha_s=10^\circ$ ，参考行走角 $\beta_{ref}=90^\circ$ ，行走角调整区间 $\beta_s=10^\circ$ 。

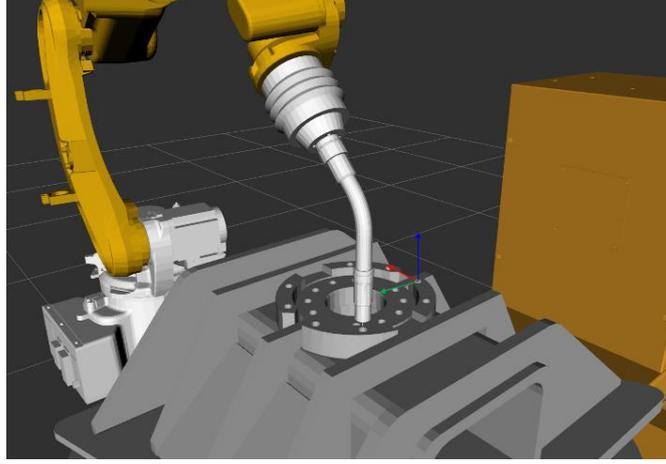


图 3-3 待优化焊点坐标系

2) 实验设置

为了验证 MOEA/D-DG 算法的性能,本文设计了实验并将本章 MOEA/D-DG 与原算法 MOEA/D、以及经典的多目标优化算法 NSGA-II^[50]进行比较,同时为了体现本文提出改进点的有效性,本文也进行了消融对比算法的实验,即 MOEA/D-WD 和 MOEA/D-WG,代表分别加入了基于迭代次数的动态邻域和高斯变异算子,其他算法的实验参数与参考文献一致。其中 MOEA/D-DG 算法参数中 k 为邻域速度系数设置为 5,最大邻域值 N_{max} 设置为 8,最小邻域偏置 N_o 设置为 2,交叉概率 CR 设置为 0.5,高斯变异的标准差 σ 设置为 [0.8,0.5,0.2]。作为对比五种算法的最大迭代次数为 200 次,种群规模为 50。

3) 评价指标

反世代距离指标 (IGD) 是评价多目标优化算法结果的一种指标。它是通过计算每个真实前沿上的点到算法求解得到的近似前沿的最短距离的平均值来衡量近似前沿的质量的,IGD 越小说明目标解的分布越接近于真实前沿,算法的收敛性与分布性越好^[51],IGD 计算如下所示:

$$IGD(S, P^*) = \frac{\sum_{x \in P^*} dist(x, S)}{P^*} \quad (3-13)$$

超体积评价指标 (HV) 是多目标优化问题中常用的一种性能评价指标,用于衡量 Pareto 前沿与参考点 $r^* = (r_1^*, r_2^*, \dots, r_m^*)$ 之间的体积大小,公式如下:

$$HV(S) = VOL(\cup_{x \in S} [f_1(x), r_1^*] \times \dots \times [f_m(x), r_m^*]) \quad (3-14)$$

式中, $VOL(\cdot)$ 表示勒贝格测度。超体积评价指标越大,说明 Pareto 前沿与参考点之间的体积越大,解集质量更高,算法的收敛性与分布性越好^[51]。

4) 结果分析

五种算法的帕累托结果对比如图 3-4 所示。从图中可以初步看出本文提出的 MOEA/D-DG 算法的帕累托集分布是均匀的，分布情况最好，原始 MOEA/D 的帕累托分布表现不如 MOEA/D-DG 算法，而 NSGA-II 算法表现最差。MOEA/D-WD 和 MOEA/D-WG 的帕累托分布介于经典 MOEA/D 算法和 MOEA/D-DG 算法之间。

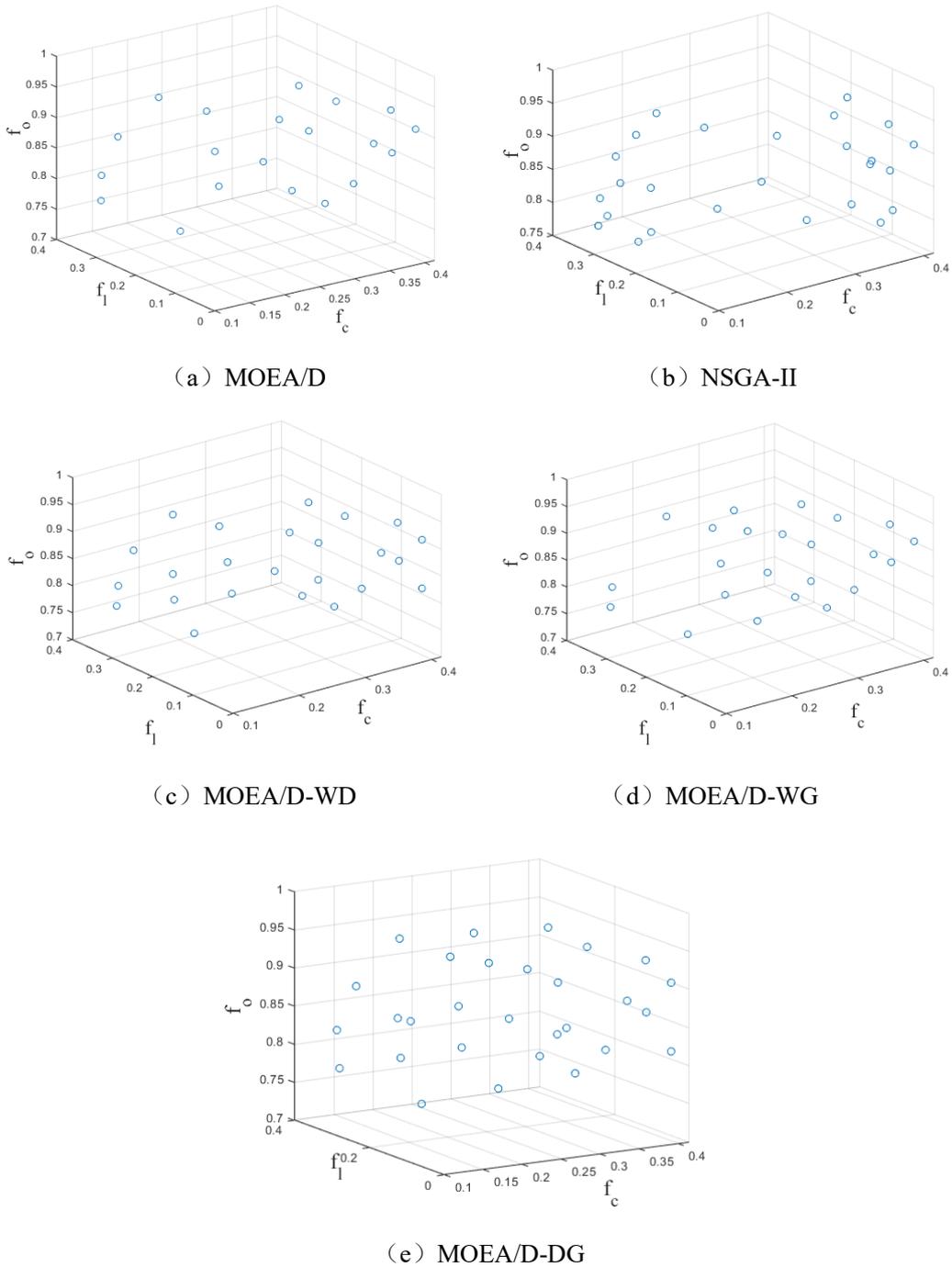


图 3-4 帕累托结果对比图

为了更加全面和准确地测试 MOEA/D-DG 的算法性能, 本文将这五个算法分别运行了 30 次。仿真实验得出的 IGD 和 HV 值如表 3-1 所示, MOEA/D-DG 获得的 IGD 除了最大值外, 最小值和平均值都比其他算法获得的 IGD 要小, 并且 MOEA/D-DG 获得的 HV 的最小值, 中位数和最大值分别为 0.3121、0.6242 和 0.9785, 均为五种算法的最优, 说明其具备更优的性能, 证明 MOEA/D-DG 具有更佳的种群多样性和收敛性, 并且分别加入了基于迭代次数的动态邻域和高斯变异算子的 MOEA/D-WD 和 MOEA/D-WG 算法与原始 MOEA/D 算法相比均具备更优的性能, 证明了这两个改进策略的有效性。

表 3-1 单焊点焊枪姿态优化算法 HV 和 IGD 结果表

算法	IGD			HV		
	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值
MOEA/D	0.012883	0.029325	0.046339	0.0426	0.4686	0.8946
NSGA-II	0.007907	0.012541	0.020111	0.2457	0.6116	0.9363
MOEA/D-WD	0.005529	0.014325	0.025124	0.1568	0.5459	0.9355
MOEA/D-WG	0.007325	0.018948	0.033575	0.1357	0.4863	0.9087
MOEA/D-DG	0.004120	0.012386	0.027821	0.3121	0.6242	0.9785

(2) 连续焊缝焊枪姿态优化实验

1) 焊缝实验数据

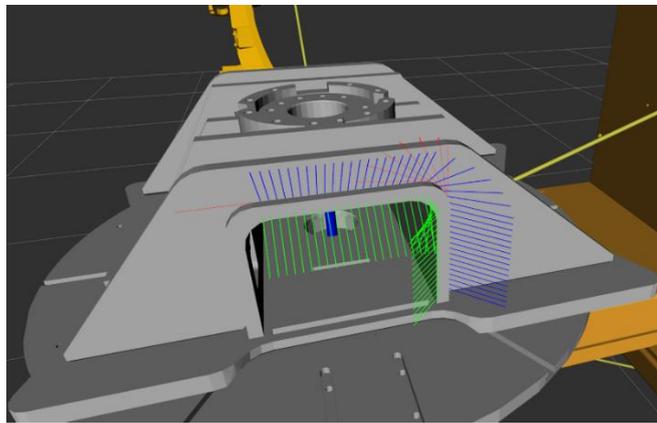


图 3-5 焊缝扫描与待优化焊缝坐标系序列

经过线激光对工件焊缝进行扫描得到焊缝坐标序列, 这些坐标数据需要进行传感器坐标系和焊缝坐标系的转换后作为本次连续焊缝焊枪姿态优化实验的数据来源。图 3-5 展示了转换后的焊缝坐标系序列, 该焊缝由 44 个焊缝路径点组成, 本文将以该焊缝为实验对象, 评估基于 MOEA/D-DG 的焊枪姿态优化算法的性能表现。其中, 焊接机器人初始状态为原点, 预输入的焊接工艺中参考工作

角 $\alpha_{ref}=45^\circ$ ，工作角调整区间 $\alpha_s=10^\circ$ ，参考行走角 $\beta_{ref}=30^\circ$ ，行走角调整区间 $\beta_s=10^\circ$ 。

2) 实验设置

为了评估 MOEA/D-DG 算法在连续焊缝上的优化效果，以及本文所提出的种群混合初始化策略和区间搜索策略的优势，本文进行了一系列实验，并将 MOEA/D-DG 算法与原始的 MOEA/D 算法和常用的多目标优化算法 NSGA-II 进行了比较。在实验中，除了迭代次数和种群规模外，各算法中的参数均根据参考文献进行设置。MOEA/D-DG 算法的参数为： k 为邻域速度系数设置为 5，最大邻域值 N_{max} 设置为 8，最小邻域偏置 N_o 设置为 2，交叉概率 CR 设置为 0.5，高斯变异的标准差 σ 设置为[0.8, 0.5, 0.2]。为了保证算法的公平性，实验将四个算法的迭代次数设置为 200 次，种群规模为 50。

3) 评价指标

本实验选择以下四个评价指标：所有焊点的平均关节空间连续性适应度值（AFC）、平均远离关节极限适应度值（AFL）、平均远离障碍物适应度值（AFO）和算法平均执行时间（AT）。以平均焊枪末端稳定性适应度值 AFC 为例，其定义如下：

$$AFC = \frac{\sum_i^N f_c(\theta_i)}{N} \quad (3-15)$$

其中 N 为总焊缝路径点数， $f_c(\theta_i)$ 为第 i 个焊缝路径点的关节空间连续性适应度值。

4) 结果分析

表 3-2 连续焊缝焊枪姿态优化结果表

算法	AFC	AFL	AFO	AT
MOEA/D	5.8618e-3	0.4532	0.7586	0.8692
NSGA-II	3.4253e-3	0.4745	0.7621	1.2475
MOEA/D-DG	2.0124e-3	0.4212	0.7387	0.2341

经过实验对比得到了如表 3-2 所示的结果。对于所有焊点的平均焊枪末端稳定性适应度值 AFC、平均远离障碍物适应度值 AFO 和平均远离关节极限适应度值 AFL，MOEA/D-DG 算法在这些适应度函数上相较于原始 MOEA/D 算法和 NSGA-II 算法均表现最优，说明基于迭代次数的动态邻域和高斯变异算子的 MOEA/D-DG 姿态优化方算法在各个目标上都取得了最优的效果。另外，MOEA/D-DG 算法在平均执行时间（AT）上也表现得更好，相较于原始 MOEA/D

算法和 NSGA-II 算法搜索更快, 说明种群混合初始化策略和区间搜索策略在连续焊点姿态优化方面大幅度提高算法的收敛速度和搜索效率。

3.4 焊接机器人系统的协同运动规划

上一节利用基于工艺预输入的焊枪姿态优化算法对单道焊缝焊接时的姿态进行了优化, 但在具体的焊接作业时需要焊接机器人系统中的焊接机器人和变位机协同运动实现。在焊接任务复杂化需求下, 单机器人工作站因其无法处理其可行域之外的焊缝, 并且无法保证复杂曲线的焊接质量, 故其局限性越来越明显。机器人与变位机协同焊接技术较好弥补了以上缺陷, 变位机通过旋转变位将待焊点依次送入最佳焊接位置, 从而降低了对焊接机器人操作可行域的要求, 获得了质量稳定的焊缝。但在焊接机器人和变位机的协同运动过程中, 各旋转轴将耦合为整体系统, 这无疑增加了协同规划的难度。

3.4.1 焊接机器人系统的解耦

如图 3-6 所示为焊接机器人系统的坐标系封闭链及其相关坐标系, 焊接机器人系统中机器人和变位机布局相互独立, 但是完成协同焊接任务时两设备密切配合, 变位机连续转换待焊点至船型焊接位置, 焊枪将追随焊缝, 不断地调整姿态使其与焊缝保持适当的夹角, 反映出变位机与焊接机器人之间存在着很大的耦合性。

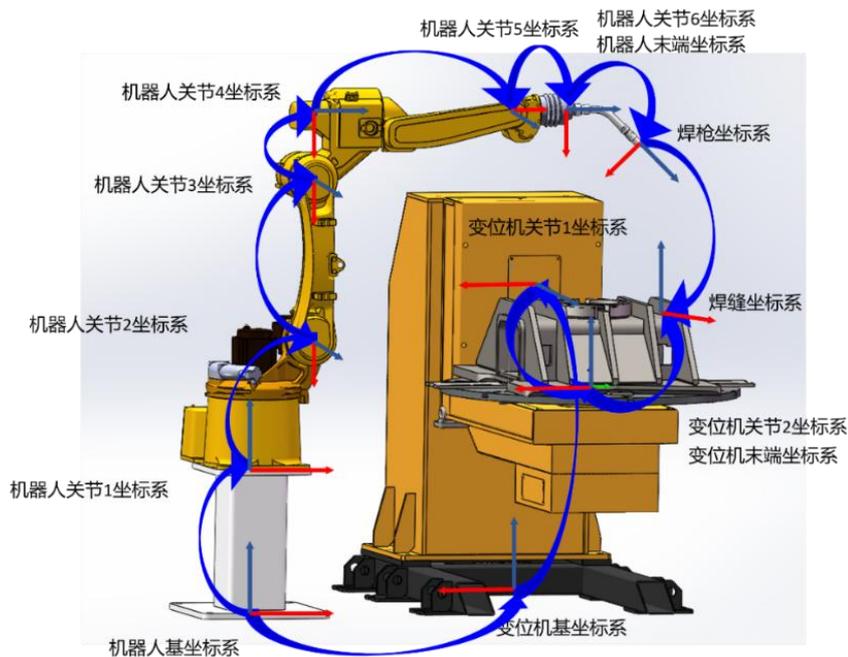


图 3-6 焊接机器人系统坐标系封闭链

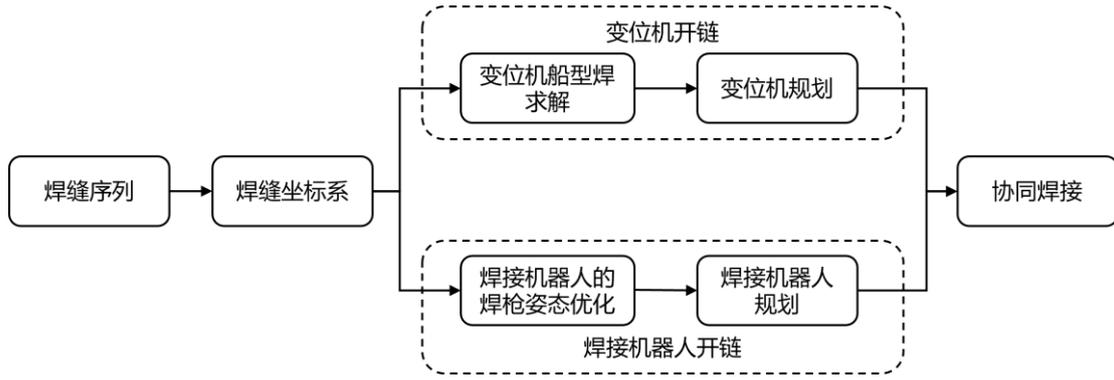


图 3-7 焊接机器人系统解耦原理

复杂空间曲线焊缝焊接，需要焊接机器人系统内焊接机器人与变位机同步协同动作。为达到协同焊接的目的，首要工作是解耦焊接机器人系统，技术原理图如图 3-7。在进行焊接机器人系统封闭链解耦时需寻找“关节”坐标系并以该坐标系作为逆解算基准，在选择这个“关节”坐标系时要求焊接全过程中该坐标系能够准确预测，焊缝坐标系较好的满足了这一条件。本研究以焊缝坐标系为纽带打开了耦合的焊接机器人系统坐标系，使焊接机器人和变位机的协同运动呈非主从关系，一边是变位机开链，一边是焊接机器人开链，进而分别对两条开链做解算，其中对于变位机开链，根据 2.5 节船型焊姿态的求解内容，变位机经过船型焊求解将焊缝轨迹点变换至船型焊状态，此时焊缝坐标系坐标变换可表示为：

$$T_{pw}^{rb} = T_{p0}^{rb} T_{p1}^{p0} T_{p2}^{p1} T_{pw}^{p2} \quad (3-16)$$

其中 T_{p0}^{rb} 为变位机基坐标系和焊接机器人基坐标系之间的坐标系变换关系，它为固定值，取决于焊接机器人系统安装时焊接机器人和双旋变位机的相互位置关系； T_{pw}^{p2} 为焊缝坐标系和变位机末端坐标系之间的坐标系变换关系，它可以通过焊接机器人系统感知模块的大视场面结构光相机与激光轮廓线结构光相机扫描后通过配准获得。

通过 3.3 节基于工艺与输入的焊枪姿态优化算法可优化得到每个焊缝轨迹点的最佳焊枪位姿，其中焊枪坐标系相对于焊缝坐标系的变换关系 T_{rt}^{pw} 由焊接工艺确定，即式 (3-1)，包括焊枪工作角、行走角和自转角，故焊枪坐标系相对于焊接机器人基坐标系 T_{rt}^{rb} ：

$$T_{rt}^{rb} = T_{pw}^{rb} T_{rt}^{pw} \quad (3-17)$$

那么对于焊接机器人开链，根据 2.2 节焊接机器人逆运动学，则有：

$$\theta = f^{-1}(T_{rt}^b) \quad (3-18)$$

这样就能在关节空间将焊接机器人规划到最佳焊接位姿，实现了焊接机器人和变位机的同步解耦，降低了协同焊接的复杂性。

3.4.2 焊接机器人与变位机的协同运动规划

(1) 焊枪相对焊缝的运动研究

船形焊位姿需要确保施焊点熔池时刻保持端平，但在实际加工空间复杂曲线焊缝时焊后所形成熔池姿态却难以维持。为确保焊点熔池时刻保持端平，需按顺序将每个待焊点转换至船型焊接位置并由焊接机器人与变位机同步进行协同动作来完成焊接任务，这一过程要求焊枪坐标系与焊缝坐标系之间的相对姿态保持固定。

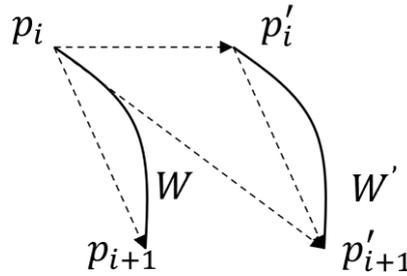


图 3-8 焊枪与焊缝运动分解

如图 3-8 所示，一段空间曲线焊缝在 k 时间点处于 W 位置，此刻焊枪在 p_i 点， Δt 时间后到达 $k + 1$ 时间点，此时焊缝被变换到 W' 位置，而焊枪处于 p'_{i+1} 点。在这段时间内焊点 p_i 的轨迹可视为弧线 $p_i p'_i$ ，焊点 p_{i+1} 的轨迹可视为弧线 $p_{i+1} p'_{i+1}$ ，焊枪端点的运动是两种运动的合成，轨迹是介于弧线 $p_i p'_i$ 和弧线 $p_{i+1} p'_{i+1}$ 之间的弧线 $p_i p'_{i+1}$ 。现假设 p_i 和 p_{i+1} 为连续相邻的焊点，在 k 时刻焊点 p_i 位于船型焊接位置，焊枪在 p_i 处焊接，然后通过极小的时间 Δt 到达 $k + 1$ 时刻，过程中变位机的两个旋转轴旋转变位使 p_{i+1} 点到达船型焊接状态，焊枪在 p'_{i+1} 点施焊，焊缝从 W 位置转换到了 W' 位置。与此同时，焊枪端点从点 p_i 运动到了点 p'_{i+1} ，向量 $\overrightarrow{p_i p_{i+1}}$ 、 $\overrightarrow{p_i p'_i}$ 和 $\overrightarrow{p_i p'_{i+1}}$ 分别是焊枪的相对位移、牵连位移和绝对位移。由图中向量关系可得：

$$\overrightarrow{p_i p'_{i+1}} = \overrightarrow{p_i p_{i+1}} + \overrightarrow{p_i p'_i} \quad (3-19)$$

当 Δt 时间足够小时，向量 $\overrightarrow{p_i p_{i+1}}$ 趋近与弧线 $p_i p_{i+1}$ ，向量 $\overrightarrow{p_i p'_i}$ 趋近与弧线 $p_i p'_i$ ，这样焊枪末端在空间中的轨迹弧线 $p_i p'_{i+1}$ 可用向量 $\overrightarrow{p_i p'_{i+1}}$ 表示，故当对复杂空间

焊缝进行离散化后,对于两个相邻焊点间的焊枪轨迹就能将实际运动曲线简化为直线轨迹。

(2) 协同运动规划策略

在实际焊接作业中,一道焊缝被离散为多个焊接路径点,每个焊接路径点都有对应的焊缝坐标系,代表一个该焊点的位姿,在机器人与变位机的协同运动中,每个焊点的位姿都会受到变位机转动前一个焊点的影响。为了解决该问题,本文提出焊接机器人系统的协同运动规划策略,如图 3-9 所示。

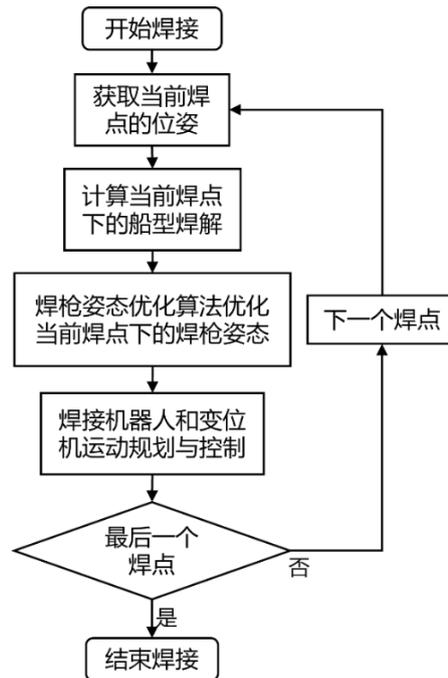


图 3-9 焊接机器人系统协同运动规划策略

以上一节焊接机器人和变位机的解耦为基础,针对每个焊点的不同位姿,利用变位机对焊点的船型焊姿态进行求解,通过变位机的正运动学求出船型焊姿态下的每个焊缝的具体位姿,即焊缝坐标系。当前焊点的焊缝位姿和已焊焊点序列作为焊接机器人焊枪姿态优化的输入,对当前焊点的姿态进行优化以确定最优焊接姿态以及焊接机器人的关节向量。在得到当前焊点下的焊接机器人和变位机的关节向量后,对整个焊接机器人系统下的焊接机器人和变位机进行关节空间的轨迹规划,完成该焊点间的焊接,若当前焊点是最后一个焊点即该条焊缝完成焊接,若不是则重复执行该策略。本文在 5.3.1 节单道焊缝焊接仿真中对该策略进行了验证。

3.5 本章小结

在对焊接机器人系统进行全自动焊接规划时,每条具体焊缝的规划都是个极

其重要的点,主要包括每条焊缝上焊枪姿态的优化以及具体焊接时变位机和焊接机器人之间的协同焊接,本章就是解决这个问题。本章首先明确了焊枪坐标系和焊缝坐标系之间的转换关系,接着分析工作角、行走角对焊缝成型的影响,提出了工艺预输入的概念,并基于此利用多目标优化算法,对焊枪平稳性、避障和远离关节极限三个目标进行优化,最后研究了焊接机器人和变位机之间的协同焊接规划,对焊接机器人和变位机解耦,并确定了协同焊接的规划策略。

第4章 面向多焊缝的全局焊接任务规划研究

在上一章节的研究中以关节空间连续性、避开障碍物和关节极限为目标，完成了对单道焊缝的姿态优化和协同运动规划，提高了焊接机器人系统的焊接质量。然而，对于复杂焊接工件其焊缝往往不止一道，且分布于不同的位姿，如想提高整个焊接作业的效率就需要对工件上的所有焊缝进行全局焊接任务规划。为了实现全局焊接任务规划首先需要规划焊缝间的过渡路径，然后在此基础上对所有焊接任务进行顺序排序，获得最优的焊接序列。故在本章中将首先探讨焊缝间的过渡路径规划，本文提出了基于 BIT*-connect 算法的焊缝间路径规划算法，用于规划不同焊缝之间的过渡路径。在此基础上，针对包括焊点、无向焊缝和有向焊缝的混合焊接任务规划问题本文还提出了面向最短路径的全局焊接任务规划算法，该方法可用来寻找最佳焊接任务序列以提高焊接机器人系统对复杂工件进行焊接时的作业效率，与此同时还能确保每一道焊缝的焊接质量。

4.1 基于 BIT*-connect 的焊缝间路径规划

为了实现全局焊接任务规划首先要做的就是规划焊缝间的过渡路径，一方面完成焊接作业时多焊缝间的过渡，另一方面焊缝间路径规划的结果作为后续焊接任务规划中焊缝间路径长度的参考。在焊接作业中，机器人需要避免与待焊接工件发生碰撞，故在进行焊接机器人的焊缝间路径规划时，确定完各条焊缝的起点和终点位置后，需要进行避障路径规划以确保焊缝之间的衔接路径安全、无碰撞。

4.1.1 焊缝间路径规划问题描述

焊缝间路径规划的目标是在考虑焊接机器人机械约束条件和障碍物的情况下，寻找一条无碰撞可行的路径从起点焊缝点到达目标焊缝点。构型空间 Q 表示焊接机器人所有可能的状态，其中 Q_{obs} 为障碍空间，该障碍空间既包括焊接机器人本体结构、变位机结构，还包括待焊接工件的结构， $Q_{free} = Q - Q_{obs}$ 表示自由空间。初始构型 q_{start} 和目标构型 q_{goal} 都属于 Q_{free} 。焊接机器人运动可以由满足机器人机械约束条件的函数 $\Pi: [0, T] \rightarrow Q_{free}$ 来表示。如果函数满足 $\Pi(0) = q_{start}$ 和 $\Pi(T) = q_{goal}$ ，则从初始构型到目标构型的无碰撞可行路径解可以由路径规划算法求得，即由 $(Q_{free}, q_{start}, q_{goal})$ 定义。

最优路径规划问题的定义是在自由空间 Q_{free} ，初始构型 $q_{start} \in Q_{free}$ 和目标构型 $q_{goal} \in Q_{free}$ 的情况下，找到一条从起点到终点的最小成本路径 Π^* ，最小成本为 $c(\Pi)$ ，即：

$$\Pi^* = \operatorname{argmin}\{c(\Pi) \mid \Pi(0) = q_{start}, \Pi(T) = q_{goal}, \forall \tau \in [0, T], \Pi(\tau) \in Q_{free}\}$$

4.1.2 RRT 系列算法

快速探索随机树 (Rapidly-Exploring Random Tree, RRT) 系列算法^[52]是一类基于树形结构的自主机器人路径规划算法。RRT 算法适用于高维、非线性等复杂环境下的路径规划问题, 对于各种不同的机器人类型和任务都有较好的适应性, 可以较快地找到可行解并收敛到最优解, 同时由于其树结构, 其搜索范围逐渐缩小, 搜索效率逐渐提高, 并且原理简单, 易于实现和改进, 可以通过引入启发式信息、树剪枝等方式来提高搜索效率。它能够在有障碍物存在的复杂环境中找到一条可行路径, 因此在机器人路径规划领域得到了广泛应用。

(1) 算法介绍

RRT 算法的基本思路是: 从起点开始构建一棵树, 树的节点代表机器人在空间中的状态, 树的边代表机器人从一个状态到另一个状态的移动。RRT 算法的关键在于随机采样空间中的状态, 将其插入到树中, 并通过优化算法寻找一个距离该状态最近的节点, 将这两个节点之间的边加入树中。这个过程不断重复, 直到找到一条连接起点和终点的路径, 最终路径可以通过回溯树来得到。

基于 RRT 算法的改进版有 RRT-connect^[53]、Informed RRT*^[54]、Batch Informed Trees (BIT*)^[55]等, 它们的目标是提高路径规划的质量、精度和效率。

1) RRT-connect 算法: RRT-connect 算法相对于 RRT 算法有以下改进之处, 首先 RRT-connect 算法使用两棵树分别搜索起点和目标点, 将路径规划问题转化为连接两棵树的问题。这种双树搜索方式可以有效地减少搜索空间, 并且可以并行地搜索两棵树, 提高搜索效率, 其次 RRT-connect 算法引入了连接策略, 尝试在两棵树中随机选取节点进行连接这种连接策略可以帮助算法快速搜索到最优路径, 并且可以保证路径是连续的和可行的。

2) Informed RRT* 算法: Informed RRT* 算法在 RRT* 算法基础上进行了改进, 该算法主要应用于求解高维空间中的路径规划。相比于传统的 RRT* 算法, Informed RRT* 算法在路径规划过程中引入了启发式信息, 以指导搜索方向, 提高搜索效率和路径质量。Informed RRT* 算法引入启发式函数来指导节点的采样和扩展, 使得搜索更加高效和准确, 采用“骨架采样”策略来生成采样点, 以此增加路径的可行性, 并且在扩展节点时, 优先考虑从起点或终点向该节点的连线上最近的点进行扩展, 以此提高搜索效率和路径质量。

3) BIT* 算法: BIT* 算法是一种基于 Informed RRT* 算法的改进算法, 主要用于解决高维空间路径规划问题。相比于 Informed RRT* 算法, BIT* 算法在路径规划过程中引入了批量处理和启发式信息, 以提高搜索效率和路径质量, BIT* 算法的改进之处主要包括引入了批量处理技术, 即将所有采样点一次性生成, 然后

通过一次优化来得到整个路径。这样可以避免一次次地搜索，提高搜索效率；引入优先级队列，对节点进行排序，使得搜索更加高效。

除此之外，像 PQ-RRT*[56]等算法都是对传统 RRT 算法的改进，旨在提高搜索效率、加速路径规划速度，同时保证搜索结果的优越性。

(2) 算法在焊接场景的缺陷

在许多实际的焊接场景中，焊接工件的结构通常更加复杂，并且待焊接工件本身可能具有许多凹陷区域，而焊缝通常存在于这些凹陷的深处，如图4-1所示，这会导致焊缝被凹陷障碍区包围，这种情况在实际的焊接工程中非常常见，比如在船的底部焊接、工程的支撑梁焊接等。

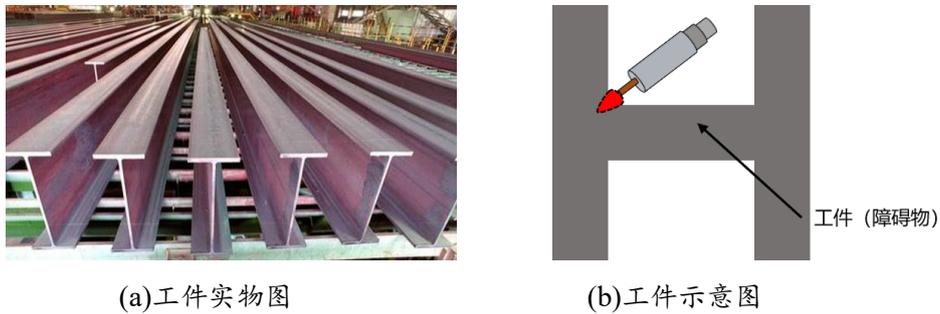


图 4-1 凹陷焊接工件

经过分析发现，一些基于改进 RRT 算法的路径规划算法（例如 BIT*）引入了启发式策略，其中一种策略是引入目标点信息。引入目标点信息意味着将目标点的位置和方向信息纳入算法，使搜索过程更朝向目标点方向进行。这些策略可以提高搜索路径的效率并提高成功率。然而，当面对凹形障碍物时，这些启发式策略的表现并不尽如人意，这是因为这些策略容易将随机树扩展到由凹形障碍物形成的陷阱中。如图 4-2 所示，例如当焊接机器人在完成上端凹陷处的焊缝后，很容易陷入工件的凹形局部陷阱中，难以高效地规划出到达下端目标焊缝的过渡路径。

综上所述，当焊接工件本身由于其结构复杂导致存在凹陷区域时，这类路径规划算法的搜索效率和路径规划质量都会变差，这就需要对算法进行改进以提高其鲁棒性和效率。

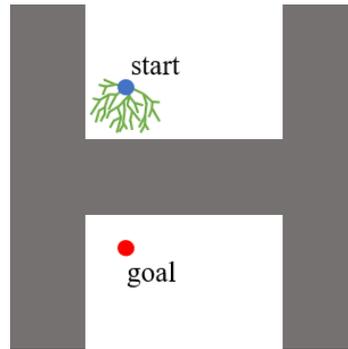


图 4-2 算法陷入凹形陷阱

4.1.3 基于 BIT*-connect 的焊缝间路径规划算法

为了满足复杂焊接场景中多道焊缝间的路径规划需求,本文提出了一种基于 BIT*-connect 的焊缝间路径规划算法,融合了 RRT-connect 算法的双树搜索连接策略和 BIT*的批量处理和启发策略,并对原始路径规划算法的改进以适应焊接场景,提出的 BIT*-connect 算法规划焊缝间的过渡路径,为后续焊接任务规划提供基础。

(1) 改进思路

经过前文的分析可以发现, RRT-connect 算法采用的双树搜索连接策略可以并行地搜索两棵树,有效地减少搜索空间,提高搜索效率,在两棵树中随机选取节点进行连接可以帮助算法快速搜索到最优路径, BIT*算法引入的批量处理和启发式信息,有效提高了解决高维空间路径规划问题时的搜索效率和路径质量,本文将这两种算法进行融合以适用于焊缝间的路径规划。但这类路径规划算法在处理凹形障碍物问题时表现不如人意,为了解决这一问题可以针对性分析得到以下的改进思路:引入类似随机扩展机制,在选择新树节点时,可以采用一定的随机性,例如引入随机采样或概率扩展机制,从而使得搜索路径更具随机性和多样性,从而更容易找到通过凹形障碍物的路径;优化路径选择策略, BIT*等算法在搜索路径时采用的贪婪策略可能导致其陷入局部最优解。为了避免这种情况,可以采用更优秀的路径选择策略,例如采用代价函数等,使得算法更加全局化和鲁棒;加强搜索树的探索能力, BIT*算法在搜索时可能会陷入某一局部区域,从而忽略其他可能更优的路径。为了解决这一问题,可以采用一些加强搜索树探索能力的方法,例如采用重启策略,引入随机扰动等。通过引入以上的改进措施,可以使得 BIT*等算法更加鲁棒和高效,在更加适用于焊接应用场景。

(2) BIT*-connect 算法

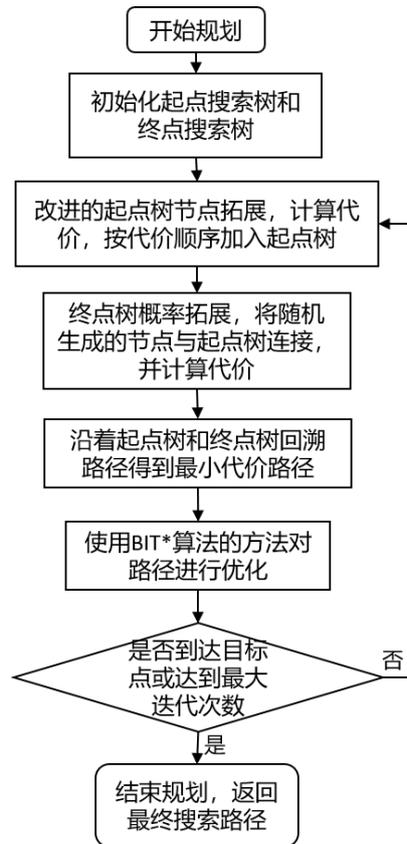


图 4-3 BIT*-connect 算法流程图

本文提出的 BIT*-connect 算法流程图如图 4-3 所示，将 RRT-connect 算法的双树搜索连接策略和 BIT* 的批量处理和启发策略进行融合，并削弱 RRT-connect 算法的贪婪策略，虽然算法依靠其贪婪策略可以再开阔的自由空间中大大加快路径搜索的进程，但另一方面就会导致其容易陷入凹形障碍区域形成的陷阱。为了在一定程度上避免算法在搜索效率上削弱，提高算法的泛化性能力，本文做出了以下改进：

1. 概率扩展机制：算法在每一次进行路径搜索时本应执行的连接函数都有一定概率不执行，转而执行拓展函数，在整个路径搜索过程中通过削弱连接函数的比重来进一步削弱算法贪婪策略的，这样还不会带来额外的计算量导致算法过于繁重；

2. 改进的节点扩展规则：假设当前在扩展树 $T1$ 中，要向 $T2$ 中添加一个新节点 x_{new} ，目标点为 x_{goal} 。在传统的 BIT* 算法中，会直接在以 $x_{nearest}$ 为中心、半径为 δ 的球形区域内随机生成新节点 x_{rand} ，然后向其最近的节点 x_{near} 进行扩展。同样为减少其贪婪程度，并增加算法探索新区域的能力，在搜索新树

节点时，引入一定的随机性，使得算法不会总是沿着同一个方向扩展节点，具体实现为可以先计算当前扩展树 T_1 中所有节点到目标点 x_{goal} 的距离，然后按照一定的权重分布，选择一部分节点作为可能的目标节点，并对这些节点进行随机扰动。具体来说，可以按照距离目标点的远近，为每个节点分配一个权重，权重越大的节点越有可能被选为目标节点。然后，在选择目标节点后，可以在以目标节点为中心、半径为 δ 的球形区域内，按照一定的概率分布，随机生成新节点 x_{rand} ，并根据随机扰动的方向和距离，将其调整为实际的新节点 x_{new} 。

4.1.4 算法性能验证

为了验证 BIT*-connect 算法的性能，本文针对焊接中常见的“H”形焊接环境对 BIT*-connect 算法、BIT*算法、Informed RRT*算法和 RRT-connect 算法进行对比实验，实验主要是测试算法在面对凹形障碍环境中避免陷入局部陷阱的能力。其中实验配置为计算机硬件配置为 Intel i5-8600 3.1GHz CPU、NVIDIA GeForce GTX 1060 6GB 显卡、6G RAM，软件配置为 Windows 10, Python 3.10。

“H”形焊接环境在实际的焊接工程中非常常见，尤其体现在船舶制造和汽车制造的场景中。为了便于展示算法执行情况，本文将工件简化为二维“H”形焊接环境，如图 4-4 所示，整个环境的范围为 30cm*50cm，其中起始焊缝点位置为(12,28)，目标焊缝点位置为(12,22)：

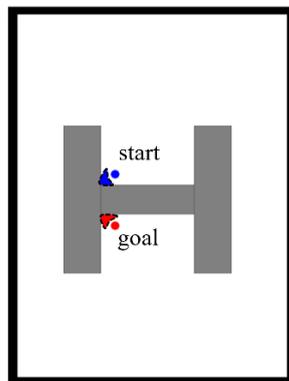


图 4-4 “H”形焊接环境

为了确保算法能够达到最佳性能，需要在保持公共参数相同的前提下，通过实验选择最优的算法参数。这些公共参数包括迭代次数为 9000，扩张步长为 0.6，选点距离阈值为 5，碰撞检测最小分割步长为 0.2，BIT*算法和 BIT*-connect 算法的采样点数为 200。

为了更好地体现四种算法的规划效果，图 4-5 展示了三分之一最大迭代次数、三分之二最大迭代次数以及最大迭代次数时的路径规划效果图。

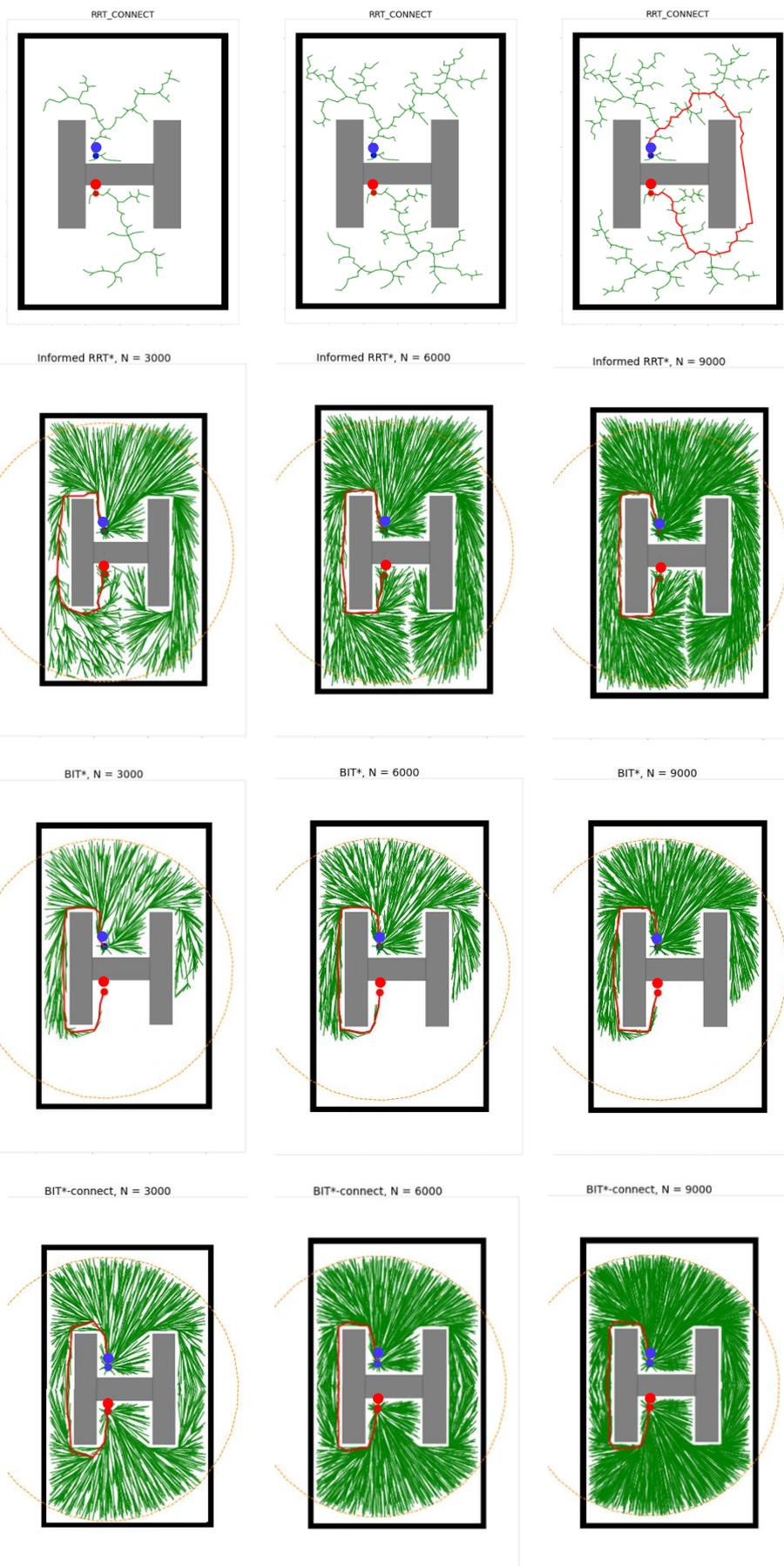


图 4-5 四种算法路径规划结果

此外四种算法的性能统计图如图 4-6 所示，其中算法运行 50 次，分别统计了四种算法的总执行时间和首次找到最后路径的耗时以及最短路径长度和首次找到一条路径的初始路径长度。

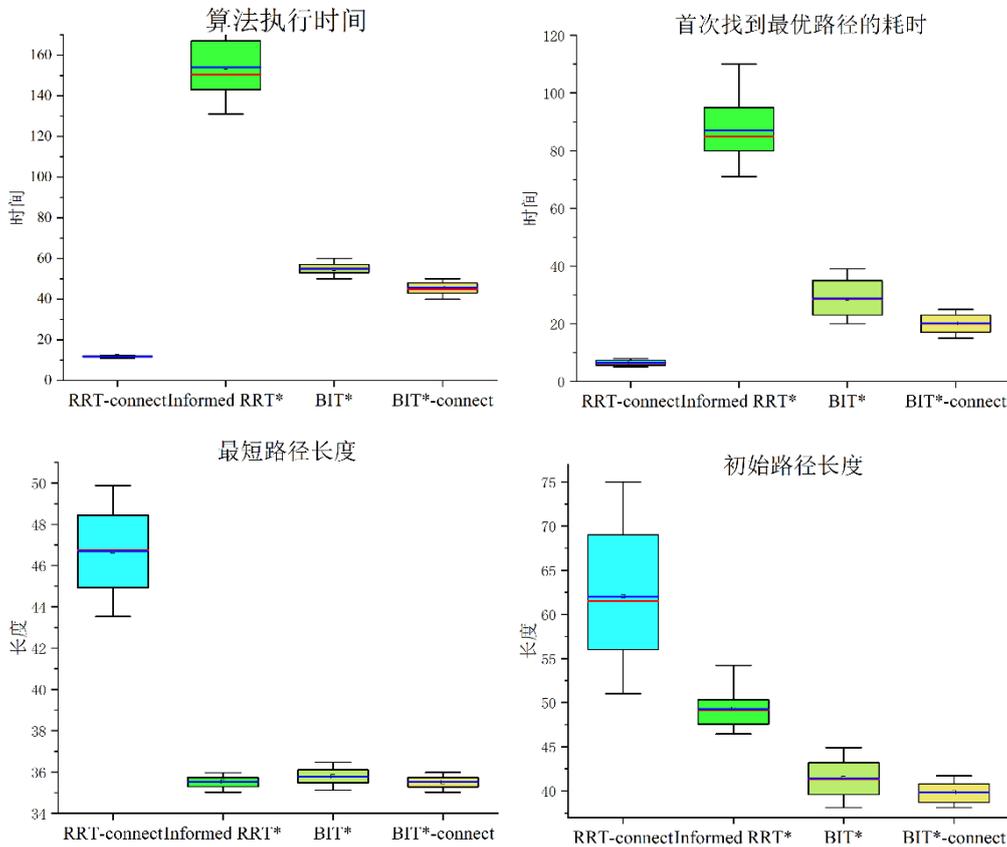


图 4-6 四种算法的性能指标统计

通过观察图 4-5 和图 4-6 可以发现四种算法都使用了采样连接方法，最终完成了从起点到终点的路径规划，但由于存在凹形障碍物，所有算法都或多或少存在陷入局部最优解的现象。其中，RRT-connect 算法由于缺乏贪婪式的启发导致规划结果过于分散，但正因如此，它面对凹形障碍物时反而不容易陷入局部最优解，且所生成的路径具有明显的锯齿状，但它依靠双向连接策略获得了最短的算法执行时间。Informed RRT* 算法引入了启发式信息以帮助找到最优路径，但在整个搜索空间中采样导致该算法过于复杂，耗时较长。BIT* 算法引入了批量处理技术，相较于 Informed RRT* 算法提高了处理效率，但仍容易陷入凹形障碍物布置的局部最优解。BIT*-connect 算法融合了 RRT-connect 算法的双树搜索连接策略和 BIT* 的批量处理和启发策略，并且引入了概率扩展机制，在凹陷区域具有更多路径选择，并且通过优化节点扩展的方向和距离，在后续路径规划中容易获

得更优的路径和更高的效率, BIT*-connect 算法将 RRT-connect 快速搜索与 BIT* 高质量搜索路径相结合以达到最佳性能。

4.2 面向最短路径的混合焊接任务规划

一个完整的焊接工件像船舶底部、建筑钢材等都有多个焊点和焊缝, 其中焊缝因为一些焊接工艺的需求还分为有焊接方向的焊缝和无焊接方向的焊缝, 根据前面的研究内容, 基于 MOEA/D-DG 的焊缝姿态优化算法可以对整条焊缝的焊接效果进行优化, 基于 BIT*-connect 的焊缝间路径规划算法能够对多条焊缝间的路径进行规划, 这时就需要对整个工件上的所有焊点和焊缝进行全局规划, 即混合焊接任务规划, 规划时以最短的总路径长度为目标, 将所有的焊点和焊缝按顺序规划出来, 这样既保证了焊接作业时每道焊缝的焊接质量, 还能获得整个焊接过程的最优效率。

4.2.1 混合焊接任务规划问题描述

一个焊接作业的混合焊接任务规划对象根据焊接方式的种类可以分为点焊和连续焊, 分别对应焊点和焊缝, 其中焊缝又可以根据不同的焊接工艺分为有焊接方向的焊缝和无焊接方向的焊缝, 下文简称有向焊缝和无向焊缝。如图 4-7 所示, 汽车内饰门板焊接就是最常见的点焊, 其中包括多个焊点, 而一般钢材的焊接通常不需要严格的焊接方向要求, 但如船底骨架的焊接通常有焊接方向的要求, 尤其是当焊接为倾斜时要求从下往上焊接, 保证焊液不会影响后续的焊接。



图 4-7 焊点和焊缝作业图

假设一个焊接任务中焊点集合 $C = (c_1, c_2, c_3, \dots, c_m)$, 其中 m 为焊点的总数, 无向焊缝集合 $W = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$, 其中 n 为无向焊缝的总数, 有向焊缝集合 $Y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_p)$, 其中 p 为有向焊缝的总数, 总焊接个数 $r = m + n + p$, 混合焊接任务规划的任务就是找到一条最优的焊接序列:

$$\pi = \{k_1, k_2, k_3, \dots, k_r\}, k_i \in \{C, W, Y\} (1 \leq i \leq r) \quad (4-1)$$

使得焊接机器人系统在该焊接任务次序下总的焊接路径长度是最短的或次短的，而焊接路径的总长度：

$$S(\pi) = \sum_{i=1}^{r-1} d(k_i, k_{i+1}) + \sum_{j=1}^n l(w_j) + \sum_{k=1}^p l(y_k) \quad (4-2)$$

其中第一项为相邻两个焊接任务之间的过渡路径长度，第二项为所有无向焊缝的长度，第三项为所有有向焊缝的长度。则该问题可以抽象为一个单目标优化问题：

$$\begin{aligned} & \min S(\pi) \\ & \text{s. t. } \pi = \{k_1, k_2, k_3, \dots, k_r\} \\ & \quad k_i \in \{C, W, Y\} (1 \leq i \leq r) \end{aligned} \quad (4-3)$$

混合焊接任务规划是一个典型的数学描述虽然简单但求解难度极高的组合优化问题，历来是运筹学中最具有挑战性的问题之一。即使在理论上可以使用枚举法解决该问题，但由于该问题所有可能的任务组合数为阶乘级别，随着焊接任务数目的增加，搜索空间呈指数增长，所以在焊接任务较多的情况下，耗费的求解会使枚举法看起来毫无实际价值可言。在这样大的搜索空间内搜索最优解并不现实，所以搜索高效的近似求解算法有一定的理论意义。现如今求解思路主要包括三个大方法：

1) 传统方法：传统的焊接任务规划方法主要基于焊接工艺和经验，根据焊接的物理特性和结构特点来进行焊接任务规划。这种方法虽然简单易行，但是缺乏科学性和可靠性，容易出现误差和偏差。

2) 数学模型方法：随着计算机技术的发展，越来越多的焊接任务规划方法开始采用数学模型来进行建模和优化。这种方法可以对复杂的结构进行分析和计算，得出最优的焊接任务顺序方案。例如，基于图论的焊接任务规划方法，通过构建焊接结构的有向图，应用最小生成树算法来求解最短路径，从而实现焊接任务的优化。

3) 人工智能方法：近年来，随着人工智能技术的快速发展，越来越多的焊接任务规划方法开始采用人工智能技术来进行优化。例如，采用粒子群算法、蚁群算法等优化算法来求解最优解，同时结合机器学习和深度学习等技术，可以更好地识别结构特征和优化目标，实现自动化的焊接任务规划。

粒子群算法^[57] (Particle Swarm Optimization, PSO) 作为一种智能优化算法，

凭借其结构简单、操作容易、运算速度快等优点,被广泛用于这类组合优化问题,为了进一步提高其性能,许多研究人员已经进行了大量的工作,如何选择适合的表达方式和操作策略,以充分利用这些优点,是将粒子群算法用于解决混合焊接任务规划问题的关键。

4.2.2 基于混合粒子群算法的混合焊接任务规划

(1) 混合焊接数据预处理

在对一条长焊缝进行连续焊接时,会因为热量堆积导致工件位置和焊缝形状发生变化,所以工程上的一般做法是将长焊缝分成多段,或者对长焊缝焊接前将焊缝进行一定间距的点焊以固定工件,确保长焊缝焊接时形变造成的焊接质量下降。故对于既包括焊点有包括焊缝的混合焊接数据,其中焊点数据就包括为了固定焊件而与焊缝重合的焊点,那么就需要预处理将这类焊点从混合焊接数据中拆分出来,对剩下的焊接数据规划完成之后,再讲这类焊点添加到对应焊缝之前进行焊接,这样就在保证焊接工艺的前提下获得最短焊接路径,既保证了焊接的质量,又提高了焊接效率。

(2) 编码方式

待焊接对象包括焊点和焊缝,焊缝又分为有向焊缝和无向焊缝,焊接序列则要考虑焊接顺序和焊接方向,因此本文使用全局焊接序列规划的双重编码。在全局焊接序列的双重编码中,焊接顺序规划采取整数编码,范围为 $[0, r]$, r 为待规划焊点和焊缝的总数量,焊接方向规划采取四进制编码,此处设置 0 为焊点, 1 为有向焊缝, 2 为无向焊缝的正向焊接, 3 为无向焊缝的负向焊接。单个焊接对象的焊缝焊接序列表示为 D_2^3 , 表示待焊接焊缝为序号 2 焊缝, 并且保持负向焊接, 本文设定负向焊接为焊缝数据输入顺序的反方向。因此, 对于一个焊接任务包括一个焊点、一条有向焊缝, 两条无向焊缝的焊接编码可以表示为 $O \rightarrow D_2^3 \rightarrow D_3^0 \rightarrow D_1^2 \rightarrow D_4^1 \rightarrow O$, 其中 O 表示焊接起点, 即机器人复位时焊枪末端坐标。

(3) 混合粒子群算法

在粒子群优化算法中, 一个种群由 m 个没有重量和体积的粒子组成, 它们在 D 维空间运动。设 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ 为第 i 个粒子($i = 1, 2, \dots, m$)的 D 维位置向量, $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 代表粒子 i 的速度, 个体最优 $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$ 代表粒子 i 当前所找到的最优位置, 全局最优 $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ 表示整个粒子群到当前为止所经历过的最优位置, 那么每次迭代过程中, 粒子根据以下公式进行更新:

$$v_i(t+1) = wv_i(t) \otimes \alpha(p_i(t) - x_i(t)) \otimes \beta(p_g(t) - x_i(t)) \quad (4-4)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, m$, t 为迭代次数, 惯性权重 w 控制了粒子的惯性。 $\alpha(p_i(t) - x_i(t))$ 表示以 α 的概率保留 $(p_i(t) - x_i(t))$ 中所有交换子; 同理 $\beta(p_g(t) - x_i(t))$ 表示以 β 的概率保留 $(p_g(t) - x_i(t))$ 中的所有交换子, \otimes 为粒子速度间的交叉操作。

粒子群算法是一种全局优化算法, 具有收敛速度快、适应性强、可以并行化等优点, 但在处理复杂问题时可能会陷入局部最优解。经过近些年的研究和发展, 很多改进版本的粒子群算法被提出, 混合粒子群算法就是其中的一个代表, 它是为了提高算法的搜索能力和精度, 主要思路是将不同的优化算法组合在一起, 从而利用各种算法的优点, 克服各自的缺点, 提高全局搜索能力。例如, 可以将遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法等多个算法进行融合, 通过不同算法之间的信息交流和相互影响, 达到更好的优化效果。

本研究利用遗传算法在处理一般离散问题时的优势, 将混合粒子群算法应用于混合焊接任务规划中, 通过对遗传算法的改进, 提高了遗传算法在焊接任务规划中的实用性。沿用式(4-4)的方式来更新粒子。并且为了增加变异的多样性, 引入了如下多种变异方式以增加后代解的质量, 本文提出了贪婪换向变异、换位变异:

1) 贪婪换向变异: 由于混合焊接任务规划包括双向焊缝, 而双向焊缝有时换个焊接方向就能获得适应度提升, 贪婪换向变异就是针对这类焊缝提出的, 具体操作时生成随机概率 r , 如果 $r \leq r_d$ 时则判断换向后的个体适应度是否有改进, 有改进则进行换向, 而如果 $r > r_d$ 则强制性进行换向以保证个体进化的多样性, 其中 r_d 为超参数, 越大表明算法贪婪性越高。该操作具备一定的贪心性质, 让算法向双向焊缝换向后适应度更高的方向进化;

2) 换位变异: 换位变异时生成随机概率 r , 如果 $r \leq r_c$ 则进行换位变异, 再随机生成两个变异位置 p_a 和 p_b , 其中 $p = [\text{rand}() * \text{Length}]$, Length 为个体长度, 交换变异位置的焊接对象, 而如果 $r > r_d$ 则不进行换位变异, 这样能提高种群的多样性。

同时, 本文采用相关策略来提高混合粒子群算法这该问题上的性能, 主要包括种群最近距离初始化和 2-OPT 优化:

1) 种群最近距离初始化: 智能优化算法的初始种群对算法求解的质量和速度至关重要, 而一般是随机生成初始种群。本文采用贪心的最短距离来生成部分种群, 具体方法为一半的初始种群为随机生成, 剩下一半种群生成初始个体时, 距离上一个焊接任务越近的焊接对象会被更大概率优先选择作为下一个焊接, 直至遍历所有焊接对象, 这样既保证了初始化种群的多样性, 又提高了初始种群的质量, 有利于加快算法迭代的收敛速度。

2)2-OPT 优化:混合焊接任务规划中很容易出现序列交叉现象,如图 4-8(a)所示,焊点 AB 之间存在序列的交叉,这会导致总的焊接序列长度增加。本文采用 2-OPT 优化来解决序列交叉问题,如图 4-8 (b)所示,通过将 AB 焊点间的焊接顺序逆转,新的焊接序列的长度明显缩短。为了降低操作的复杂性,具体操作时随机生成两个优化焊点位置,进行逆转交换后,如果新序列的适应度得到了优化,则进行个体替换,否则保留原序列。

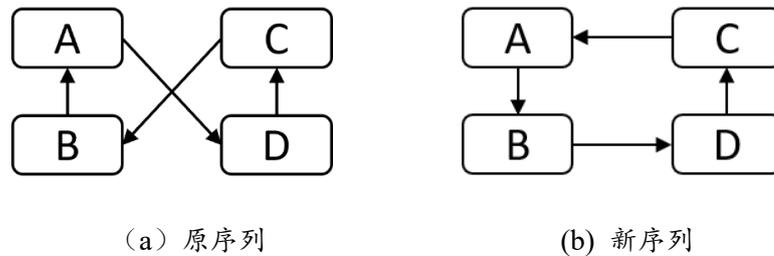


图 4-8 2-OPT 优化示意图

(4) 算法流程

在确定了算法的优化流程后,就能得到基于混合粒子群算法的混合焊接任务规划流程,如图 4-9 所示:

步骤 1 加载混合焊接数据和距离表:焊接机器人系统的感知模块输入混合焊接数据,根据基于 BIT*-connect 的焊缝间路径规划算法计算焊接数据间的路径,并生成距离表;

步骤 2 混合焊接数据预处理:将用于长焊缝固定的焊点从混合焊接数据中分离出来;

步骤 3 算法初始化、种群最近距离初始化:包括设定种群的规模、交叉编译的超参数、最大迭代次数等,以及种群的随机初始化和最近距离初始化;

步骤 4 计算粒子适应度值并确定个体最优和群体最优:查询距离表计算种群的适应度,并确定个体最优和群体最优;

步骤 5 种群进化、交叉变异:根据粒子群算法的更新原理以及利用交叉、贪婪换向变异、换位变异生成新的种群,搜索进化;

步骤 6 2-OPT 优化:对种群进行 2-OPT 优化,消除序列交叉现象,找寻更优解;

步骤 7 是否到达终止条件:判断算法是否到达终止条件,如若没到则返回步骤 4;

步骤 8 输出最优解及最短序列长度,焊接数据后处理:输出最优解及最短序列长度,并对最短序列数据进行后处理,将用于预处理时用于固定焊件的焊点数据插入到最优序列中,以输出最终的混合焊接任务规划结果。

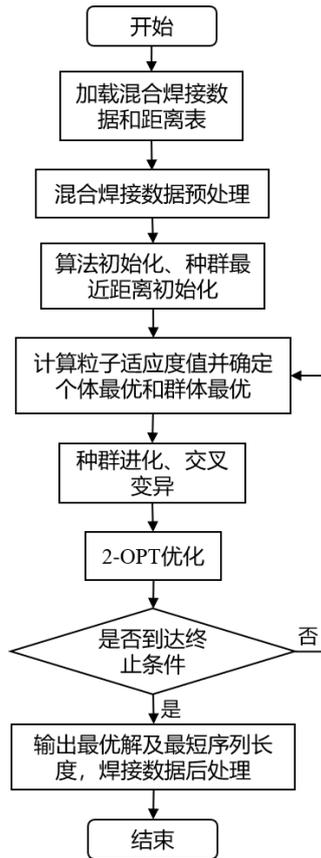


图 4-9 混合粒子群算法流程图

4.2.3 实验与分析

(1) 混合焊接任务数据集

为了验证本文提出的混合粒子群算法 (MPSO) 在混合焊接任务规划问题上的有效性, 如图 4-10 所示, 本文从待焊接工件中提取出 8 个焊点、3 个无向焊缝和 2 个有向焊缝组成混合焊接任务规划问题的数据集。其中蓝点为待焊焊点, 红线为待焊无向焊缝, 绿色箭头为待焊有向焊缝。

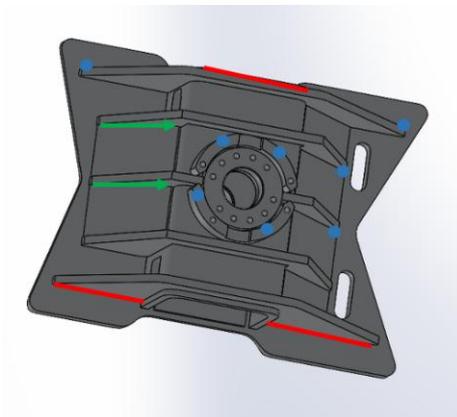


图 4-10 混合焊接任务规划数据集

(2) 实验算法和参数设置

本文选择经典的单目标优化算法如基本离散粒子群算法 (DPSO) 和蚁群算法 (ACO), 以及近些年提出单目标优化算法如樽海鞘群算法^[58] (SSA) 和蜣螂优化算法^[59] (DBO) 作为对比算法。其中算法的参数设置如下: DPSO 的个体数为 1000, 最大迭代次数为 300, 交叉概率为 0.75 ACO 的蚁群大小为 60, 重要程度因子为 1, 启发式因子为 5, 挥发因子为 0.1, 最大迭代次数为 300; SSA 的种群数量为 50, 最大迭代次数为 300, 衰减因子为 0.5, 邻域半径为 5, 初始食物数量为 100, 食物补充速度为 2; DBO 的种群数量为 50, 最大迭代次数为 300, 邻域半径为 5, 步长因子为 0.8, 收缩因子为 0.4, 离散因子和碰撞因子均为 0.5; MPSO 的个体数为 1000, 最大迭代次数为 300, 交叉概率为 0.75, 贪婪换向变异概率为 0.8, 换位变异概率为 0.5, 2-OPT 优化规模为 20%。

其中实验环境配置如下: 计算机硬件配置为 Intel i5-8600 3.1GHz CPU、NVIDIA GeForce GTX 1060 6GB 显卡、6G RAM, 软件配置为 Windows 10, MATLAB R2020a。

(3) 实验结果与分析

各算法在混合焊接任务规划上表现的统计结果如表 4-1 所示, 单位为厘米, 其中算法运行 30 次, 分别统计了每种算法最优解、最差解和平均解的路径长度, 其中平均误差的定义如下:

$$\text{平均误差} = \frac{\text{平均解} - \text{最优解}}{\text{最优解}} \times 100\% \quad (4-5)$$

其中混合焊接任务规划原始数据如图 4-11 (a) 所示, 其中绿色箭头为有向焊缝, 红色为无向焊缝, 各算法最终的任务规划结果如图 4-11 所示, 其收敛曲线如图 4-12 所示。

表 4-1 混合焊接任务规划问题仿真结果表

算法	最优解	最差解	平均解	平均误差
DPSO	45.95	49.83	47.89	4.21
DBO	48.03	50.39	49.21	2.45
SSA	42.01	43.43	42.72	1.68
ACO	72.41	85.48	78.91	8.98
MPSO	39.34	40.10	39.73	0.99

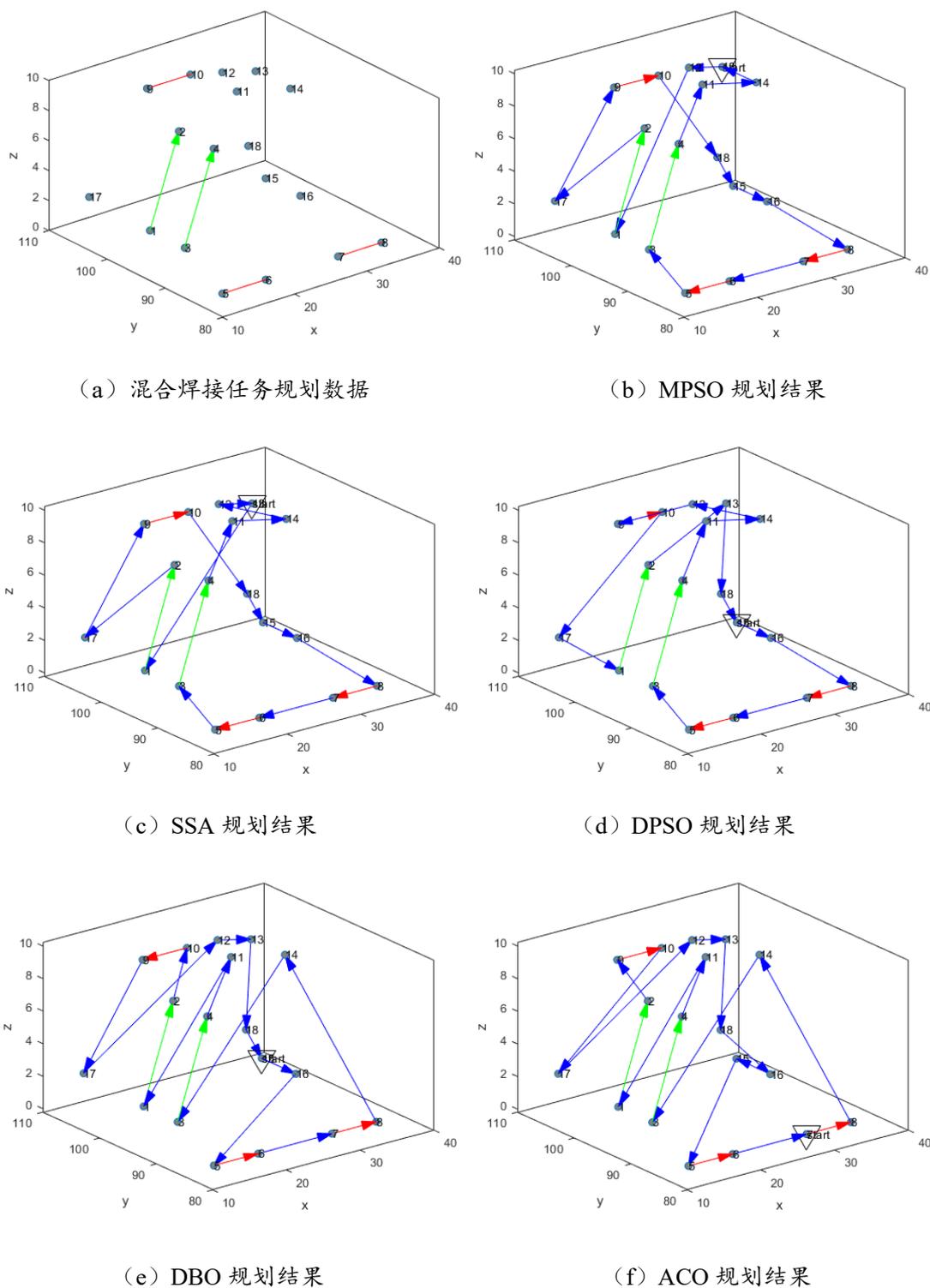


图 4-11 混合焊接任务规划实验结果

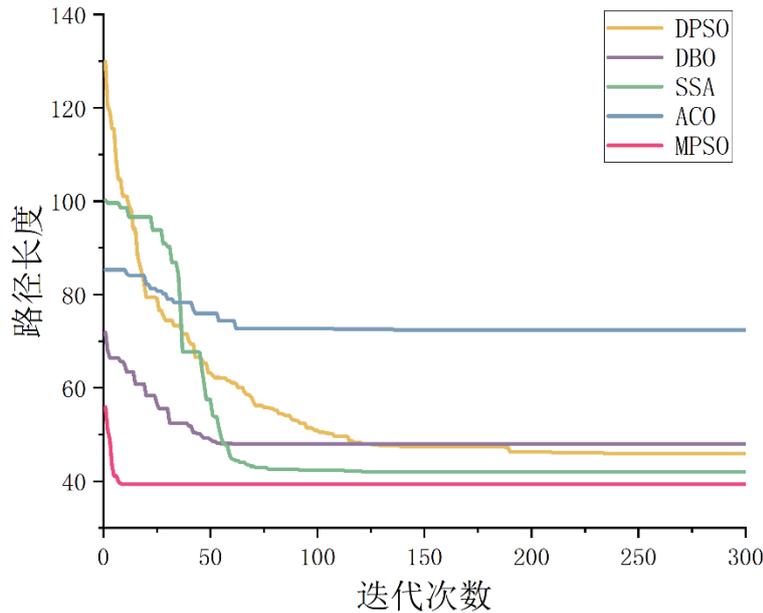


图 4-12 混合焊接任务规划问题算法收敛曲线

从各种算法在混合焊接任务规划问题上的表现来看, **MPSO** 算法无论是在焊接任务序列规划结果的质量还是算法收敛速度上都取得了最优的表现, **MPSO** 算法提出的贪婪换向变异操作这种贪心策略确保算法在双向焊缝上向更优的方向进化, 与此同时, 换位变异操作又一定程度上保证了粒子群的多样性, 避免算法陷入局部最优。种群最近距离初始化操作赋予了 **MPSO** 算法较优的粒子群初始化质量, 加快了后续进化的收敛速度和最终效果, **2-OPT** 优化在局部序列交叉上的处理也加速了混合粒子群的进化。基于混合粒子群的混合焊接任务规划算法以最短焊接总路径为目标, 以复杂工件中的多道焊缝为对象, 优化得出最优的焊接序列, 能欧显著提高焊接机器人系统的作业效率。

4.3 本章小结

本章首先针对焊缝间的过渡优化问题, 并参考了研究领域主流的基于采样的路径规划算法 **RRT** 系列算法, 提出了基于 **BIT*-connect** 的焊缝间路径规划算法, 该算法适用于焊接机器人系统这一高维复杂的场景, 并在规划时间和规划效果上具备一定优势。然后对于既包括焊点, 又包括无向和有向焊缝这一混合焊接任务输入, 提出了基于混合粒子群算法的混合焊接任务规划算法, 通过对全局焊接任务的排序规划, 获得了效率最优的焊接规划。

第 5 章 基于 ROS 的焊接机器人系统仿真平台

机器人仿真平台为机器人的开发和算法测试提供了一个安全、高效、低成本的方法,节省了大量时间和成本的同时在仿真环境中还可以发现和解决一些潜在的问题,并且依靠 ROS 的大量第三方库和工具,还便于算法和相关插件的二次开发。因此,本章搭建了基于 ROS 的焊接机器人系统仿真平台。首先对 ROS 基本框架和工作原理进行介绍,对 ROS 框架中机器人开发工具进行详细讲解,尤其是 MoveIt! 的组织结构与作用。其次在这一章中对机器人建模的流程进行了描述,主要包括机器人描述文件的生成和利用 MoveIt! 配置助手对焊机机器人系统模型进行配置。最后,联合 RViz 和 MoveIt! 对前面所研究的焊接机器人系统的运动规划与任务规划进行了仿真,给出了直观的仿真实验结果。

5.1 ROS 机器人操作系统

2007 年,ROS (Robot Operating System) 系统源于斯坦福大学人工智能实验室和 Willow Garage 公司个人机器人项目。经过多年的发展,ROS 因其众多优点受到用户的广泛拥戴,被广泛推广和使用,现已成为当下通用的机器人系统仿真和软件开发平台。

ROS 是机器人领域中广泛使用的开源操作系统之一,向用户提供硬件抽象,底层设备控制,常用函数实现,进程间通信和包管理等系列服务。另外,ROS 提供的一系列实用工具及库函数便于用户对代码的访问,编译,书写以及跨计算机运行。实际上 ROS 有点像是一种“框架”,可以大大提高机器人研发时的代码复用率。随着 ROS 版本的迭代更新,ROS 从只能在基于 Unix 的平台上运行到现在的能适用于 macOS 和 Windows。

5.1.1 系统架构及核心概念

ROS 是一种开源的、灵活的、面向机器人软件开发的操作系统,它提供了一系列软件框架、库和工具,帮助开发者快速搭建机器人系统。ROS 并不是一个真正的操作系统,它依存于 Linux 运作。如图 5-1 所示,从 ROS 架构层面将 ROS 分为三个层次:依托于 Linux 的 OS 层、实现通信的中间层和实现功能程序运行的应用层。ROS 的系统架构主要由两部分组成:ROS 运行时架构和 ROS 文件系统架构。

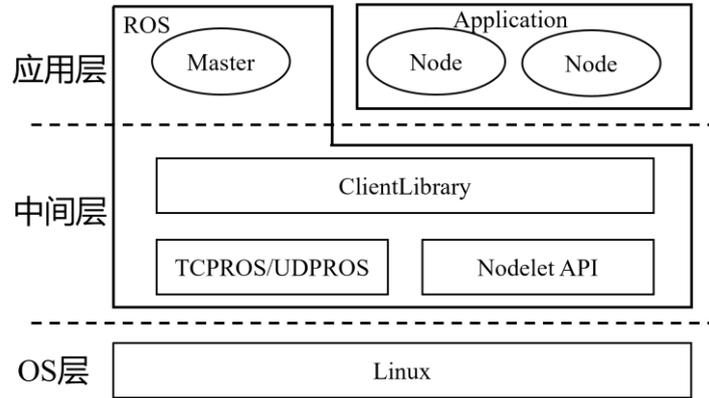


图 5-1 ROS 系统架构图

（1）ROS 运行时架构

ROS 运行时架构主要由节点（node）、话题（topic）、服务（service）和参数服务器（parameter server）组成。

1) 节点：节点是 ROS 中最基本的运行单元，它是一个独立的进程，可以执行一些特定的任务，如控制机器人关节、读取传感器数据等。节点之间通过发布和订阅话题实现信息的交互，一个节点可以同时发布和订阅多个话题；

2) 话题：话题是 ROS 中信息交互的基本单元，它类似于一个邮筒，一个节点可以发布一种类型的消息到一个话题中，另一个节点则可以订阅该话题，以接收这种类型的消息；

3) 服务：服务是 ROS 中另一种信息交互的方式，它定义了一组请求和响应的消息类型，一个节点可以提供一个服务，另一个节点可以调用该服务，以得到请求的响应结果；

4) 参数服务器：参数服务器是 ROS 中用来存储参数信息的中央存储库，可以在节点之间共享参数，参数可以在运行时动态修改。

ROS 中特殊的点对点的消息通信机制，通过构建松散耦合的模块化设计，实现了不同功能模块之间的交互和协作。这种设计思想使得开发者可以更加灵活地组合和重用现有的模块，从而快速构建出复杂的机器人系统。同时，这种松耦合架构也能够有效地提高系统的容错能力，使得机器人系统能够更加鲁棒地应对不同的环境和任务要求。ROS 中最常见的发布/订阅通信方式其原理示意图如图 5-2 所示。发布/订阅模式是指节点可以发布一个特定主题的消息，其他节点可以订阅这个主题并接收相应的消息。节点可以同时发布多个主题的消息，也可以订阅多个主题的消息。当一个节点发布了一条消息，该消息会被 ROS 主节点(Master)收到并记录下该消息的发布者和主题名称。然后，其他节点可以通过主节点来获取特定主题的消息。

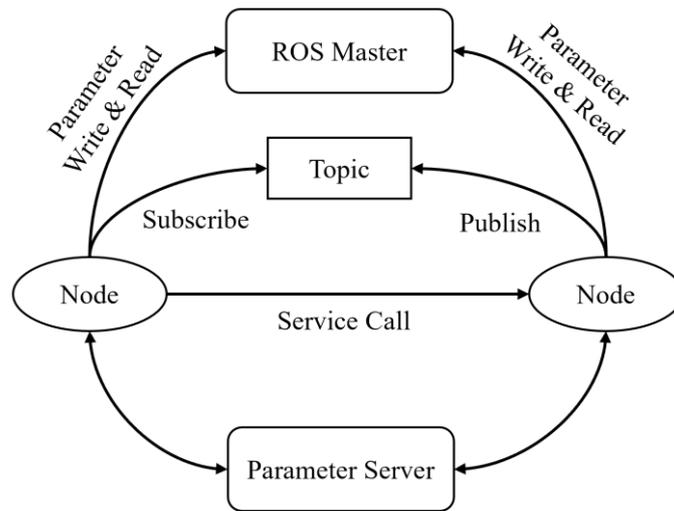


图 5-2 ROS 通信原理示意图

(2) ROS 文件系统架构

ROS 文件系统架构主要由包 (package)、堆栈 (stack) 和元件 (manifest) 组成。

1) 包: 包是 ROS 中的基本组织单元, 它包含了节点、库、配置文件和其他相关资源, 可以用来共享和重用 ROS 程序。

2) 堆栈: 堆栈是一组相关的 ROS 包的集合, 通常用来组织一些大型的 ROS 项目, 堆栈中的包可以通过依赖关系进行管理。

3) 元件: 元件是 ROS 文件系统的描述文件, 包含了 ROS 包的信息, 如名称、版本、作者、依赖关系等。

在 ROS 文件系统中, 每个包都包含一个 CMakeLists.txt 和一个 package.xml 文件, 这些文件用来描述包的信息和依赖关系。在 ROS 运行时环境中, 每个节点都有一个名称和一个话题列表, 通过发布和订阅话题, 节点之间可以进行信息交互。参数服务器则提供了一个全局的参数存储库, 可以在运行时动态修改参数值。

5.1.2 开发工具

ROS 机器人开发工具主要用于辅助开发者在 ROS 平台上进行机器人相关应用程序的编写、测试、部署等任务, 这些工具提供了丰富的功能和易用的界面, 使得机器人开发者可以更加方便、高效地进行机器人应用程序的开发和调试, 从而加速机器人技术的发展和應用。常用的一些工具有如下几个:

(1) RViz

RViz 是 ROS 中用于 3D 可视化和交互的开源工具。它能够帮助用户以 3D 形式实时显示和操作机器人、传感器和其他物体的状态，可用于 ROS 的开发、测试和可视化。RViz 提供了一种直观的方式来查看和调试机器人的姿态、传感器数据、环境地图等，它使得机器人的开发和调试更加高效和便捷。RViz 具有以下主要功能有：显示机器人模型和传感器数据、显示环境地图和路径规划结果、显示点云和激光扫描数据、提供交互式工具，如选择、平移、旋转等、支持多种三维渲染器，如 OpenGL、OGRE 等。通过 RViz，开发者可以方便地进行机器人的可视化、仿真和调试，提高开发效率。同时，RViz 也可以通过插件机制进行扩展，满足不同应用场景的需求，如机器人的自主导航、物体识别等。

(2) MoveIt!

MoveIt!是一个用于机器人运动规划、操作和控制的开源软件框架，是 ROS 的一个重要组件，能够支持各种类型的机器人和各种类型的机器人操作。它提供了一套完整的机器人运动规划工具和库，包括机器人建模、逆运动学求解、碰撞检测、轨迹规划、控制等功能。使用 MoveIt!可以简化机器人开发过程，使开发人员能够更加专注于算法和应用程序的开发。

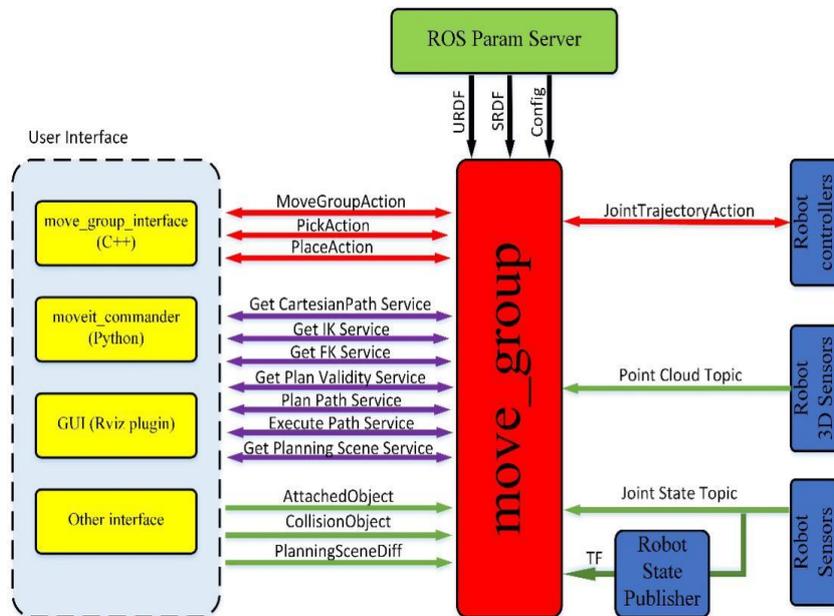


图 5-3 MoveIt!整体架构

MoveIt!整体架构如图 5-3 所示，它提供了一个 ROS 节点，它负责处理机器人的运动规划、执行和控制。它通过与机器人模型的交互来实现这些功能，包括模型的初始化、姿态设置、碰撞检测和运动规划等。此外，MoveIt!还提供了一套用户友好的可视化工具，使用户可以通过简单的拖放和设置来实现机器人的任务

规划。MoveIt!支持多种类型的机器人，包括工业机器人、服务机器人和移动机器人等。它提供了丰富的运动规划算法和工具，包括基于规划器的全局路径规划、基于启发式的局部路径规划、逆运动学求解、抓取规划、动态避障等功能。此外，MoveIt!还可以集成到其他 ROS 节点和应用程序中，以实现更广泛的应用场景。

5.2 焊接机器人系统模型建立

要想建立焊接机器人系统的仿真平台，实现机器人的三维可视化和运动仿真，以及程序的仿真与调试，焊接机器人系统模型的建立是搭建仿真平台的基础。在 ROS 系统中，统一机器人描述格式 URDF 用于描述机器人结构信息，它是一种可扩展标记语言。为建立焊接机器人系统模型，首先在 SolidWorks 绘制焊接机器人系统的三维模型，再利用相关插件生成机器人模型的 URDF 文件，最后利用 MoveIt!的配置助手配置 MoveIt!功能包。

5.2.1 焊接机器人系统 URDF 生成

通常来说 URDF 文件有两种方式来创建：一种是按照 XML 语法规则和 URDF 格式直接编写 URDF 文件；另一种就是在其他三维画图软件(如 SolidWorks)上画出机械臂的模型，再通过 ROS 提供的第三方插件将模型转化为 URDF 文件。第一种方法通过 URDF 文件中<link>标签定义机器人连杆的相关参数，<joint>标签定义机器人关节的相关参数，通过<link>标签和<joint>标签来直接编写机器人模型的相对位置姿态关系，这一过程较为复杂，且编写过程不够直观。第二种要求已有 SolidWorks 环境下的机械臂模型或者在 SolidWorks 画出整个机械臂的模型，这对画图软件熟练度的要求非常高，但是这样得到地机械臂模型外观更好，更加真实。

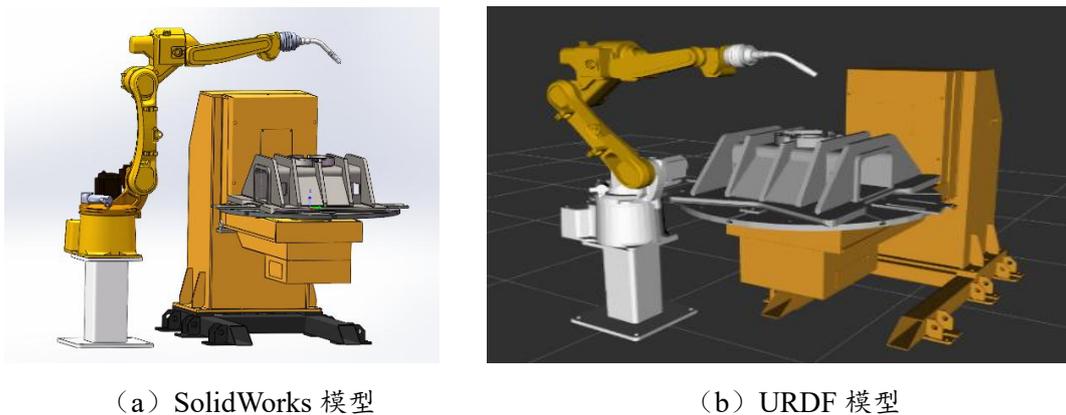


图 5-4 焊接机器人系统模型

考虑本研究有 SolidWorks 环境下的机械臂模型，图 5-4(a)所示，本文采用第

二种方法来创建机械臂的 URDF 文件。具体实施时需要在 SolidWorks 中安装插件“SolidWorks to URDF Exporter”，该插件可以将 SolidWorks 中的模型导出为 URDF 格式，在 SolidWorks 中选择需要导出的部件，在导出选项中，可以选择导出的选项，如运动学信息、惯性、碰撞检测等，值得注意的是对于每个机器人关节处要设置对应的旋转轴。

在创建完焊接机器人系统模型的 URDF 文件后，可用“check_urdf”命令对文件进行检查是否有语法错误，若出现“Successfully Parsed XML”则表明 URDF 文件无语法错误，同时还会显示出机器人所有连杆和关节的串联关系。为了显示的更形象，ROS 还提供“urdf_to_graphviz”命令，该命令可以图像化的显示出整个机械臂模型的串联关系及每个连杆和关节之间的位置和姿态关系。本文还将在 Rviz 中将前面创建的焊接机器人系统的 URDF 文件可视化出来，并编写相关的启动文件(launch)来运行 Rviz 可视化界面，如图 5-4(b)所示。

5.2.2 MoveIt!配置

MoveIt!配置助手(MoveIt! Setup Assistant)是 MoveIt!本身提供的一个图形化的用户接口，用于配置生成机器人 MoveIt!配置包，主要是生成 MoveIt 针对控制机器人关节运动的机器人描述文件(Semantic Robot Description Format，下文简称“SRDF”)。

利用配置助手生成配置文件有以下几个主要步骤：

- 1) 开始：选择之前生成的焊接机器人系统模型的 URDF 文件，创建一个新的 MoveIt!配置包；
- 2) 加载自碰撞矩阵：在加载机械臂自碰撞矩阵后，可以防止在后面的运动规划过程中焊接机器人系统的机械臂产生碰撞；
- 3) 创建运动规划组：对于整个焊接机器人系统，本文需要设置两个规划组，一个是焊接机器人的规划组 robot，以及变位机的规划组 positioner，同时还可以设置规划组的逆运动学求解算法和规划算法；
- 4) 生成配置包：指定 MoveIt!配置文件的生成位置和内容。

这样就生成了 MoveIt!配置包，通过启动 MoveIt!配置包下 demo.launch 的启动文件即可在 RViz 中可视化整个仿真环境。

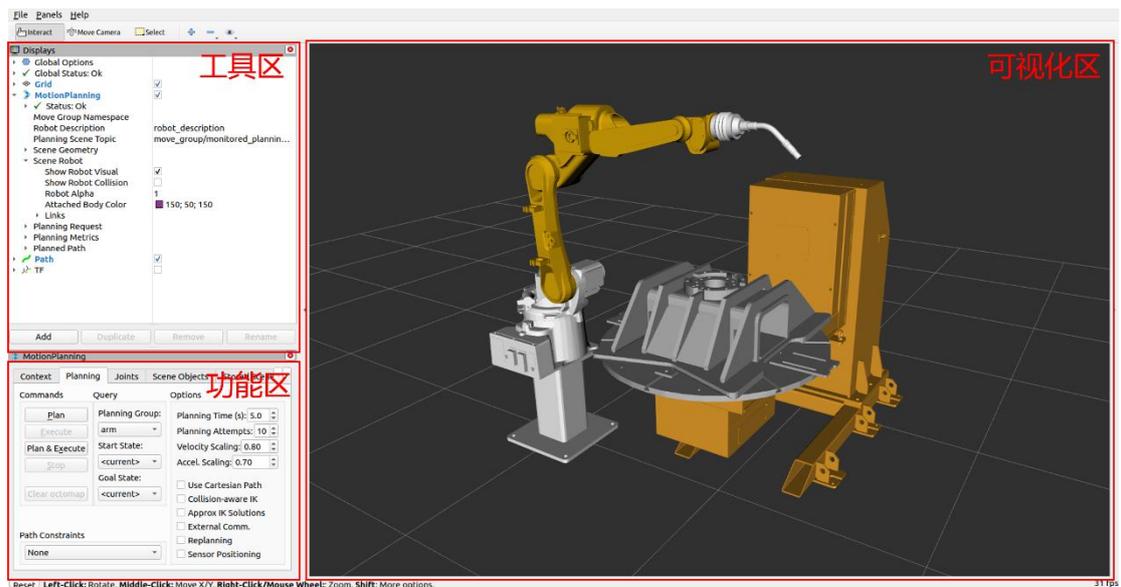


图 5-5 焊接机器人系统仿真平台

焊接机器人系统仿真平台如图 5-5 所示,其中整个仿真平台可分为三个区域,左上角为工具区域,这里可以添加和使用 RViz 提供的一些工具,如坐标转换(TF)、路径(Path)等;左下角为功能区,功能区可以设置焊接机器人系统每个关节量,还能手动规划和执行,以及添加一些场景物体加入仿真系统环境中;右边为可视化区,主要用于观察整个仿真过程。

5.3 焊接任务规划仿真

为了便于焊接仿真结果的可视化展示,本文创建了/showpath 节点,该节点订阅/robot_state_publisher 节点的/tf 消息和/joint_state_publisher 节点的/joint_state 消息,发布焊枪末端相对于焊接机器人系统基坐标系的/public_trajectory 消息和相对于焊接工件基坐标系的/local_trajectory 消息,这样 RViz 中就可以订阅焊枪末端的路径信息在可视化界面中展示。针对焊接机器人系统作业规划中单焊缝的运动规划问题和多焊缝的全局焊接任务规划问题,本节分别设计了单道焊缝焊接仿真和复杂工件焊接仿真来进行测试,其中单道焊缝焊接仿真主要验证焊接机器人系统焊接单道焊缝时的成型质量,复杂工件焊接仿真主要验证焊接机器人系统处理复杂焊接任务时的作业效率以及每道焊缝的成型质量。

5.3.1 单道焊缝焊接仿真

从工件模型中选择如图 5-7(a)所示的焊缝,该道焊缝由两道直线焊缝有一段曲线过渡段组成。在焊接仿真过程中,ROS 的节点调用关系图如图 5-6 所示,其中核心的焊接规划节点/pathplanner 主要订阅/joint_state_publisher 的节点的

/joint_state 消息、/robot_state_publisher 节点的/tf 消息和 move_group 的/status 消息，/pathplanner 节点最后规划出焊接机器人和变位机的关节空间序列，完成整道焊缝的焊接。

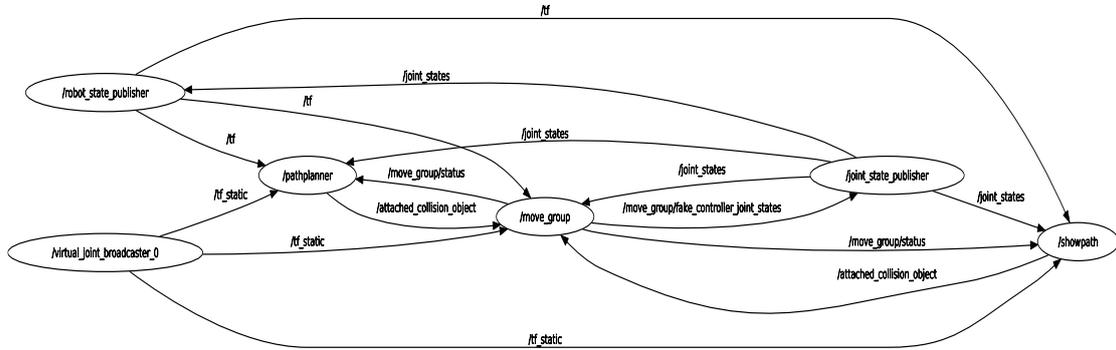


图 5-6 节点调用关系图

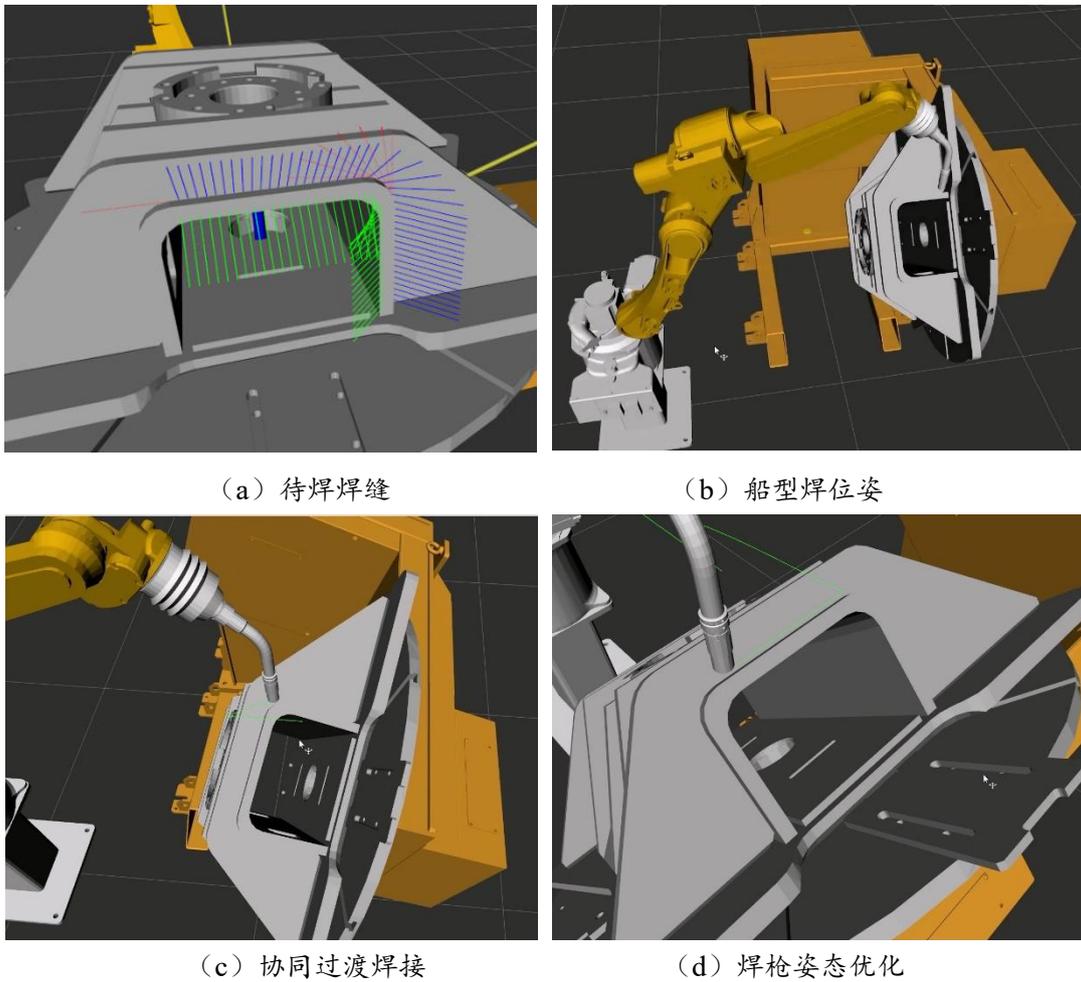


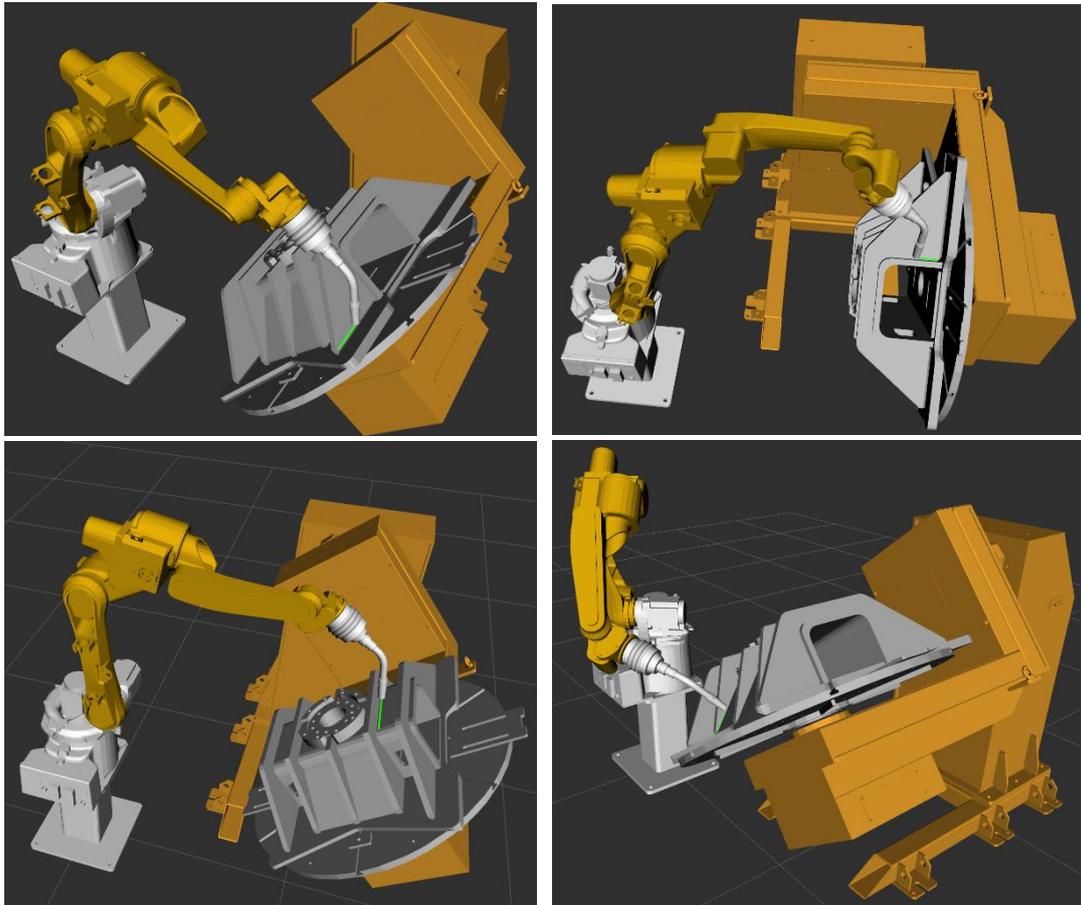
图 5-7 单道焊缝焊接作业仿真结果

从焊接仿真过程图 5-7 中可以看出，变位机首先利用焊缝的船型焊姿态求解

将焊缝调整至船型焊姿态，见图 5-7(b)，其次如图 5-7(d)所示对焊接过程中的焊枪进行优化，追求焊枪末端的连续性、远离关节极限和避开障碍物，而对于两道之间焊缝间的曲线过渡焊缝则利用本文在 3.4 节提出的协同运动规划策略对焊接机器人和双旋变位机实现协同规划，如图 5-7(c)，整个过程中焊枪末端轨迹是连续且平滑的，体现了焊枪末端的稳定性。

5.3.1 复杂工件焊接仿真

针对复杂工件的焊接仿真结果如图 5-8 所示，其中前四张图为焊接过程图，最后一张为焊接结果图。从图中可以看出，针对复杂焊接工件，焊接机器人系统充分发挥了姿态变换的作用，将处于各种位置和姿态的焊缝调整到最佳的船形焊姿态，在焊接焊缝时，利用姿态优化算法对焊枪末端稳定性、远离关节极限和避开障碍物三个目标进行优化，在保证安全焊接的基础上追求焊缝成形质量，并且面对多焊缝任务规划，基于混合粒子群的混合焊接任务规划算法会对所有的焊接任务对象，包括焊点和焊缝进行任务序列规划，最终完成该工件上所有的焊接任务，同样如图所示整个过程中焊枪末端轨迹是连续且平滑的，体现了焊枪末端的稳定性。



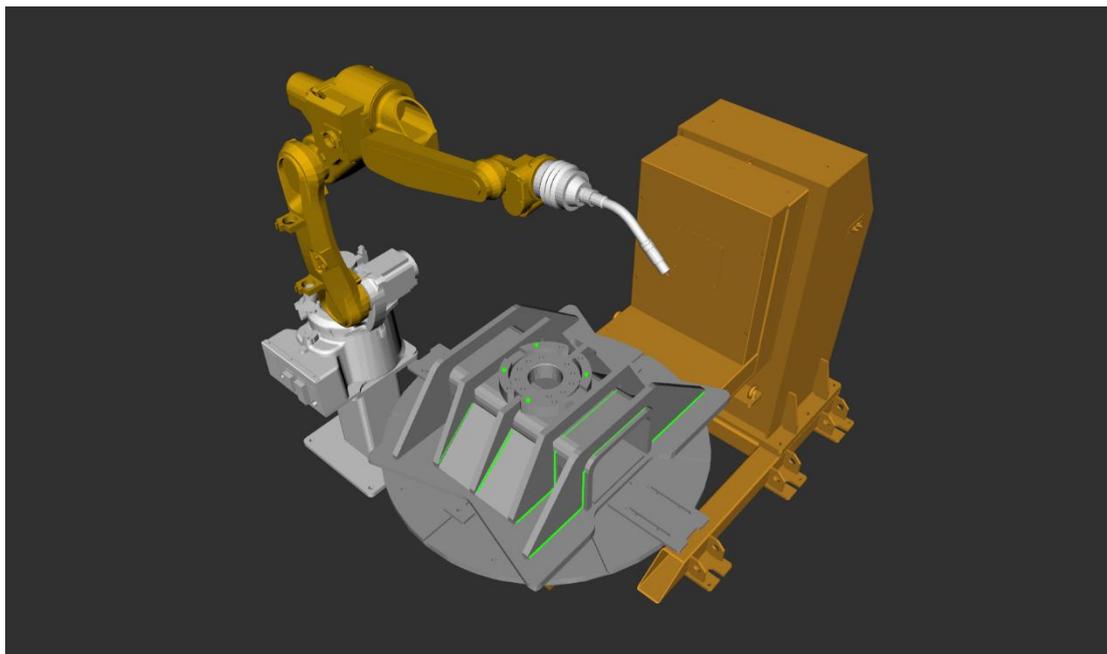


图 5-8 复杂工件焊接作业仿真结果

5.4 本章小结

本章主要介绍了基于 ROS 的焊接机器人系统仿真平台的搭建。首先对基本 ROS 框架及其工作原理进行详细描述，介绍了 ROS 框架中常见的机器人开发工具，尤其着重讲述了 MoveIt! 的组织结构与作用；其次对机器人建模的流程进行讨论，主要包括机器人描述文件生成、基于 MoveIt! 配置助手完成对焊接机器人的配置；最后，结合 RViz 和 MoveIt! 对焊接机器人系统运动规划与任务规划分别进行仿真研究，显示仿真实验可视化结果。

第 6 章 总结与展望

6.1 论文总结

焊接是制造业的关键工序，正在朝着数字化、智能化、无人化的方向发展。由传统机器人加变位机组成的焊接机器人系统，可以带来更加高效高精的作业效果，胜任离散焊接环境、非结构化工作场景、复杂焊接工件的需求。本文以带变位机的焊接机器人系统为研究对象，以智能优化的思路来进行整个系统的作业规划。本文针对这一课题展开了深入的研究，主要工作如下：

(1) 对带有变位机的焊接机器人系统进行运动学建模与分析，提出双旋变位机的船型焊姿态求解方法。本文对焊接机器人系统进行运动学建模与分析，确定了焊缝坐标系和焊枪坐标系的定义以及相互间的转换工艺参数，并提出了针对焊缝的船型焊姿态求解方法，充分发挥了变位机在处理复杂焊缝、提高焊接质量方面的作用，为后续焊接机器人系统运动规划与任务规划的研究打下基础。

(2) 针对焊接机器人系统作业规划中单焊缝的运动规划问题，提出了基于工艺预输入的焊枪姿态优化算法和协同运动规划策略。焊接机器人系统在焊接时，末端焊枪的稳定性是决定焊缝成型质量的关键，除此之外还要避免焊接机器人和变位机发生碰撞，并且实际焊接的效果还与焊接工艺有直接关系，如何在保证焊接工艺的前提下实现无碰撞地平稳焊接是焊接规划的要点和难点。本文详细分析了包括工作角、行走角和自转角在内的焊接工艺对焊缝成型的影响，提出了焊接工艺预输入的概念，后续以此焊接工艺为优化对象，以焊枪末端稳定性、远离关节极限和避开障碍物为优化目标，提出基于 MOEA/D-DG 的焊枪姿态优化算法，算法中改进的基于迭代次数的动态邻域和高斯变异算子提高了 Pareto 最优解集分布的均匀性和收敛性，采用的种群混合初始化策略和区间搜索策略有效提高了算法优化连续焊缝时的效率和性能。此外还分析了焊枪相对于焊缝的运动关系，把焊缝坐标系作为纽带，将焊接坐标系闭链打开为变位机开链和焊接机器人开链，以解耦的思路提出了焊接机器人与变位机的协同运动规划策略。

(3) 针对焊接机器人系统作业规划中多焊缝的全局焊接任务规划问题，提出了焊缝间过渡路径规划算法和混合焊接任务规划算法。首先本文总结了 RRT 这种基于采样的路径规划算法在高维复杂场景下的优势，并分析这类算法在处理焊接场景中凹陷区域时存在的缺陷，提出基于改进 BIT*-connect 的焊缝间路径规划算法，实验证明本文提出的概率扩展机制和改进的节点扩展规则在保证搜索效率的前提下提高了算法在凹陷场景下的表现。此外在实际的焊接任务中存在多种焊接对象，为解决这类包括焊点、有向焊缝和无向焊缝的混合焊接任务规划问题，本文在混合粒子群基础上，针对性的提出了贪婪换向变异和换位变异两种变异算

子,并且为提高初始种群的质量采用了种群最近距离初始化操作、为解决路径交叉问题提出 2-OPT 优化策略,实验结果表明该算法在混合焊接任务规划问题上展现了优秀的性能。

(4)搭建了基于 ROS 的焊接机器人系统仿真平台。焊接机器人系统仿真平台为焊接机器人系统的开发和算法测试提供了一个安全、高效、低成本的方法,可以便于对本文提出算法进行系统测试和验证,节省了大量的时间和成本,在仿真环境中发现和解决一些潜在的问题,同时依靠 ROS 大量的第三方库和工具还便于算法和相关插件的二次开发。该仿真平台可以帮助焊接机器人系统的开发者更快、更好地将其产品推向市场,满足用户的需求。

综上所述,根据焊接作业任务的特点,本文将焊接机器人系统作业规划分为针对单焊缝的运动规划和针对多焊缝的全局焊接任务规划,其中针对单焊缝的运动规划以安全焊接为前提,提高了焊缝成型的质量,针对多焊缝的全局焊接任务规划以最短焊接总路径为目标,提高了焊接机器人系统的作业效率。本文研究能够实现更加高效可靠的焊接机器人系统焊接规划,为我国焊接机器人技术的发展、制造业的高质量发展提供支撑,对其他类型协作机器人的运动规划也有所助益,可有效提升我国在机器人领域的创新能力和核心竞争力。

6.2 研究展望

本文对带变位机的焊接机器人系统处理复杂工件的作业规划展开研究,虽然取得了一定的研究成果,但是还存在改进的空间,未来工作可以考虑从以下几个方面入手:

(1) 本文是以解耦的思路对焊接机器人系统进行协同运动规划,未来可以尝试将焊接机器人和变位机串联起来当成一个八自由度的冗余机械臂,研究冗余机械臂的逆运动学和运动规划来实现焊接规划,对比两种思路的焊接规划的效果孰优孰劣。

(2) 对于焊缝间过渡路径的研究,除了最短路径之外,考虑到实际应用中的时间和能量消耗问题,可以进一步研究如何在保证避障的前提下,实现路径时间最短或者能量消耗最低。为此,可以探索一些新的路径规划算法或者轨迹控制方法,例如基于强化学习的路径规划等方法,从而实现更高效、更准确的焊接路径规划和控制。

(3) 在未来的研究中,可以考虑采用多目标优化算法来进行混合焊接序列规划。这样可以将多个目标同时纳入考虑,例如焊接时间、能耗、成本等,从而得到更加全面的优化结果。同时,在采用多目标优化算法时,还可以引入约束条件,例如焊缝质量、机器人运动的平滑度等,以确保所得到的解不仅能够优化目标,

还能够满足实际应用的要求。除此之外，还可以探索新的路径规划算法和轨迹控制方法，以进一步提高混合焊接过程中机器人的运动性能和焊接质量。

参考文献

- [1]王田苗,陶永.我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J].机械工程学报, 2014, 50(09): 1-13.
- [2]石林.焊接机器人系统集成应用发展现状与趋势[J].机器人技术与应用, 2016 (6): 17-21.
- [3]林尚扬,杨学勤,徐爱杰,陈华斌,林涛,赵耀邦.机器人智能化焊接技术发展综述及其在运载火箭贮箱中的应用[J].上海航天(中英文), 2021, 38(3): 8-17.
- [4]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.
- [5]Wang T M, Tao Y, Liu H. Current researches and future development trend of intelligent robot: A review[J]. International Journal of Automation and Computing, 2018, 15(5): 525-546.
- [6]聂云鹏,张培磊,庄乔乔,等.焊接机器人智能化关键技术与研究现状[J].热加工工艺, 2017 (15): 7-10.
- [7]唐创奇,孟正大.弧焊机器人与变位机协调运动的实现[J].工业控制计算机, 2008, 21(1): 47-49.
- [8]Akeel H A, Holland S W. Product and technology trends for industrial robots[C]//Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings. IEEE, 2000, 1: 696-700.
- [9]Fryman J, Matthias B. Safety of industrial robots: From conventional to collaborative applications[C]//ROBOTIK 2012; 7th German Conference on Robotics. VDE, 2012: 1-5.
- [10]Alatise M B, Hancke G P. A review on challenges of autonomous mobile robot and sensor fusion methods[J]. IEEE Access, 2020, 8: 39830-39846.
- [11]Ruishu Z, Chang Z, Weigang Z. The status and development of industrial robots[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2018, 423(1): 012051.
- [12]Li K, Zhang J, Wang L, et al. A review of the key technologies for sEMG-based human-robot interaction systems[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2020, 62: 102074.
- [13]Villagrossi E, Simoni L, Beschi M, et al. A virtual force sensor for interaction tasks with conventional industrial robots[J]. Mechatronics, 2018, 50: 78-86.

- [14]Chen S B, Lv N. Research evolution on intelligentized technologies for arc welding process[J]. Journal of manufacturing processes, 2014, 16(1): 109-122.
- [15]Kah P, Shrestha M, Hiltunen E, et al. Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications[J]. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 2015, 10(1): 1-16.
- [16]柴玉东.弧焊机器人控制系统研究[D].兰州理工大学, 2008.
- [17]Yang L, Liu Y, Peng J. Advances techniques of the structured light sensing in intelligent welding robots: a review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110: 1027-1046.
- [18]Xu F, Xu Y, Zhang H, et al. Application of sensing technology in intelligent robotic arc welding: A review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 79: 854-880.
- [19]Liu C, Wang H, Huang Y, et al. Welding seam recognition and tracking for a novel mobile welding robot based on multi-layer sensing strategy[J]. Measurement Science and Technology, 2022, 33(5): 055109.
- [20]Miao R, Gao Y, Ge L, et al. Online defect recognition of narrow overlap weld based on two-stage recognition model combining continuous wavelet transform and convolutional neural network[J]. Computers in Industry, 2019, 112: 103115.
- [21]Zou Y, Lan R. An end-to-end calibration method for welding robot laser vision systems with deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 69(7): 4270-4280.
- [22]Wang N, Zhong K, Shi X, et al. A robust weld seam recognition method under heavy noise based on structured-light vision[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 61: 101821.
- [23]Liu M, Xie J, Hao J, et al. A lightweight and accurate recognition framework for signs of X-ray weld images[J]. Computers in Industry, 2022, 135: 103559.
- [24]Ye G, Guo J, Sun Z, et al. Weld bead recognition using laser vision with model-based classification[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 52: 9-16.
- [25]Zhou X, Wang X, Gu X. Welding robot path planning problem based on discrete MOEA/D with hybrid environment selection[J]. Neural Computing and Applications, 2021, 33: 12881-12903.
- [26]Tan Y, Ouyang J, Zhang Z, et al. Path planning for spot welding robots based on improved ant colony algorithm[J]. Robotica, 2023, 41(3): 926-938.
- [27]Wang H, Huang Y, Zhang G, et al. A novel method for dense point cloud

- reconstruction and weld seam detection for tubesheet welding robot[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 163: 109346.
- [28] My C A, Bien D X, Tung B H, et al. Inverse kinematic control algorithm for a welding robot-positioner system to trace a 3D complex curve[C]//2019 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC). IEEE, 2019: 319-323.
- [29] Guan T. Research on the application of robot welding technology in modern architecture[J]. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2023, 14(2): 681-690.
- [30] Pashkevich A P, Dolgui A B, Semkin K I. Kinematic aspects of a robot-positioner system in an arc welding application[J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(6): 633-647.
- [31] Liu Y, Tian X. Robot path planning with two-axis positioner for non-ideal sphere-pipe joint welding based on laser scanning[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 105(1): 1295-1310.
- [32] Gao J, Pashkevich A, Caro S. Optimization of the robot and positioner motion in a redundant fiber placement workcell[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2017, 114: 170-189.
- [33] 唐荣俊,陈建平.通用变位机与机器人圆弧焊接的协调控制[J].*机电一体化*, 2012 (1): 48-52.
- [34] Zhou B, Xu L, Meng Z, et al. Kinematic cooperated welding trajectory planning for master-slave multi-robot systems[C]//2016 35th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2016: 6369-6374.
- [35] Chen L, Wang Z, Mo Y, et al. The Path Planning of Synchronous Cooperative Motion Control between Robot and Positioner for Complex Space Curve Processing[J]. *Electronics*, 2020, 9(11): 1917.
- [36] Echtler F, Sturm F, Kindermann K, et al. The intelligent welding gun: Augmented reality for experimental vehicle construction[M]//*Virtual and augmented reality applications in manufacturing*. Springer, London, 2004: 333-360.
- [37] Chen L, Liu G, Li S, et al. A novel 8-shape trajectory weaving welding control algorithm with auto-adjust welding torch attitude[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 120(11-12): 8377-8387.
- [38] Liu Y, Shi L, Tian X. Weld seam fitting and welding torch trajectory planning based on NURBS in intersecting curve welding[J]. *The International Journal of*

- Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95: 2457-2471.
- [39] 焦嘉琛, 田威, 石章虎. 一种基于冗余自由度的机器人姿态优化方法[J]. 航空制造技术, 2018, 61(4): 16-21.
- [40] Huo L, Baron L. The self-adaptation of weights for joint-limits and singularity avoidances of functionally redundant robotic-task[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(2): 367-376.
- [41] 秦晨. 三维激光引导的自行车三角架机器人焊接轨迹规划技术研究[D]. 东南大学, 2019.
- [42] Wang X, Shi Y, Ding D, et al. Double global optimum genetic algorithm-particle swarm optimization-based welding robot path planning[J]. Engineering Optimization, 2016, 48(2): 299-316.
- [43] 顾平灿, 徐月同. 基于 QPSO 的双机器人同步焊接路径规划研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2015(05): 78-82.
- [44] 游海涛, 罗红波, 董特, 施显阳. 分区自适应蚁群算法的多面体数控钻床加工路径优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(03): 136-141.
- [45] Kovács A. Integrated task sequencing and path planning for robotic remote laser welding[J]. International journal of production research, 2016, 54(4): 1210-1224.
- [46] Wang X, Xia Z, Zhou X, et al. Multiobjective path optimization for arc welding robot based on DMOEA/D-ET algorithm and proxy model[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-13.
- [47] 刘贝贝, 袁亮, 孔庆博, 吴金强. 6 自由度工业机器人运动轨迹优化方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(02): 11-15.
- [48] 陈志翔, 卢振洋, 殷树言, 宋永伦. 焊缝位姿及焊枪位姿的模型[J]. 机械工程学报, 2003(07): 59-62.
- [49] Zhang Q, Li H. MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition[J]. IEEE Transactions on evolutionary computation, 2007, 11(6): 712-731.
- [50] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [51] 陈铭俊. 基于 MOEA/D 的铝型材挤压工艺参数多目标优化研究[D]. 广东工业大学, 2021.
- [52] LaValle S M, Kuffner J J, Donald B R. Rapidly-exploring random trees: Progress and prospects[J]. Algorithmic and computational robotics: new directions, 2001, 5:

- 293-308.
- [53] Karaman S, Frazzoli E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning[J]. The international journal of robotics research, 2011, 30(7): 846-894.
- [54] Gammell J D, Srinivasa S S, Barfoot T D. Informed RRT: Optimal sampling-based path planning focused via direct sampling of an admissible ellipsoidal heuristic[C]//2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2014: 2997-3004.
- [55] Gammell J D, Barfoot T D, Srinivasa S S. Batch Informed Trees (BIT*): Informed asymptotically optimal anytime search[J]. The International Journal of Robotics Research, 2020, 39(5): 543-567.
- [56] Li Y, Wei W, Gao Y, et al. PQ-RRT*: An improved path planning algorithm for mobile robots[J]. Expert systems with applications, 2020, 152: 113425.
- [57] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks. IEEE, 1995, 4: 1942-1948.
- [58] Mirjalili S, Gandomi A H, Mirjalili S Z, et al. Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems[J]. Advances in engineering software, 2017, 114: 163-191.
- [59] Xue J, Shen B. Dung beetle optimizer: A new meta-heuristic algorithm for global optimization[J]. The Journal of Supercomputing, 2023, 79(7): 7305-7336.

攻读学位期间主要研究成果

一、 学术论文

[1] Di Wu, Guowei Hou, Wenjie Qiu, Bin Xie. T-IK: An Efficient Multi-Objective Evolutionary Algorithm for Analytical Inverse Kinematics of Redundant Manipulator[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(4): 8474-8481, DOI: 10.1109/LRA.2021.3108550. (Q2, IF: 3.741).

[2] 本人第一作者. 隧道喷浆机器人轨迹规划算法与仿真, 第十五届中国智能机器人大会, 大会论文集收录.

[3] 邝逸灵, 吴迪, 后国炜, 王清锋, 谢斌. 一种用于冗余机械臂解析逆运动学的多目标优化方法 [J/OL]. 机械科学与技术: 1-9[2023-04-11]. DOI:10.13433/j.cnki.1003-8728.20220296.

二、 主持和参与的科研项目

(1) 企、事业单位委托项目: 隧道自动喷浆机器人研究与开发, 2017.10-2021.6, 项目组核心成员。

(2) 企业合作横向课题: 全自动焊接机器人系统, 2021.10-至今, 项目组核心成员。

(3) 企、事业单位委托项目: 多智能体任务分配及协同感知技术研究, 2023.03-至今, 项目组组长。

三、 个人获奖情况

(1) 省部级, 第一届湖南省研究生人工智能创新大赛一等奖, 2020。

(2) 省部级, 陆军装备部“跨越险阻 2021”第四届陆上无人系统挑战赛第四名, 2021。

致谢

写到这里，意味着三年硕士和二十年求学之路即将走完，回顾过往，感慨很多、收获很多。在此，我要向所有关心、支持和帮助我的人表示最诚挚的感谢。

首先，我要感谢我的导师谢斌教授。和您初次相遇是在20年6月的夏令营期间，那也是我第一次走进中南大学，那次交谈我就被您的专业和热情所折服。非常庆幸能有缘成为您的学生，您给予了我无微不至的指导和关怀，不仅教会我专业知识，更让我领悟到了做人做事的道理，项目申报时给我们耐心指导和修改，您还会积极组织快乐有趣的团建活动。此外您还会为我们的未来生活和工作考虑，依然记得您在阿拉善给我的生日祝福，您的言传身教将伴随我一生，成为我人生路上的宝贵财富。

其次，我要感谢帮助过我的师兄们，感谢杰哥、清哥对我科研上的指导，感谢宇哥、勇哥、哲哥对我生活上的照顾，和你们一起科研娱乐的时间很开心，祝你们前途似锦；感谢吴迪师兄对我科研上的帮助，你的努力和专业令我敬佩，祝愿读博顺利，感谢铭蔚师兄对我求职和生活上的帮助，和你一起干饭娱乐总是那么开心，祝愿工作顺利，卷死他们，感谢万思远师兄的照顾，祝愿工作稳定；感谢同门旭辉和逸灵研究生三年的陪伴，我们一起入学、一起科研、一起毕业，也祝福我们未来一起变好；感谢实验室的师弟师妹们，振南、清锋、海涛、嘉明、欣玉、浩然、子清、思航，感谢你们的陪伴，祝福未来顺利。

此外，我要感谢我的家人和朋友。感谢父母的养育和支持，是你们对教育的重视造就了我，20年的求学生涯一直有你们在我身后做最坚实的后盾，在我遇到困难时给予了我鼓励和支持，没有你们的养育就没有我的今天，祝福你们身体健康，未来由我来照顾你们。感谢小马同学的陪伴，有你的每一天都很开心，未来还很长，希望我们一起努力，相互支持与守护，当思念成为一种习惯，真挚的情感便不依附于任何外物。

最后，我还想对自己说，结束求学之路并不意味了学习的结束，希望你不忘初心，牢记使命，勇于挑战，给爱你的人和你爱的人带来光芒和幸福，回报社会和祖国，为自己的事业和中华民族伟大复兴的中国梦不懈奋斗！

2023年5月16日星期三于中南大学