

分类号:

学 号: 2013105022

密 级:

单位代码: 10759

石河子大学

硕 士 学 位 论 文



播种机机架焊接机器人柔性工作站研究

学 位 申 请 人 李 西 洋

指 导 教 师 成 斌 教 授

申请学位门类级别 工 学 硕 士

学 科 、 专 业 名 称 工 业 工 程

研 究 方 向 生 产 系 统 与 集 成 技 术

所 在 学 院 机 械 电 气 工 程 学 院

中国·新疆·石河子

2016 年 5 月

Study on Seeder Rack Welding Robot Flexible Workstation

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Li xi-yang

(Industrial Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Cheng Bin

April, 2016

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：李西洋

时间：2016年5月30日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：李西洋

时间：2016年5月30日

导师签名：成斌

时间：2016年5月30日

摘要

随着农作物种类及种植模式的多样化，播种机形成了多品种小批量的生产模式。但目前播种机焊接生产主要以手工作业为主，焊接质量过多依赖于操作人员的技术水平，焊接生产过程中作业转换频繁，生产效率较低，焊接成本高。焊接机器人工作站作为一种高效的生产方式，已广泛应用于汽车、航天等领域，但尚未见成型的播种机机架焊接机器人工作站。本文针对新疆播种机机架焊接生产现状，结合播种机机架焊接工艺特点，对播种机机架焊接机器人柔性工作站进行研究，规划一套适用于不同常用型号播种机机架的焊接机器人柔性工作站方案。

本文以播种机行业的市场需求为背景，以 RT 公司生产的 2 MBJ 系列精量播种机机架为研究对象，在深入研究播种机机架结构和焊接工艺的基础上，提出焊接机器人柔性工作站方案规划的总体目标。设计了 3 种焊接机器人工作站的总体规划方案，采用层次分析法进行方案的评价选优。对选择的最优方案进行详细设计，具体包括焊接机器人工作站布局规划，焊接工作站中夹具方案的设计，机器人、变位机和龙门架式底座等具体参数的确定等。针对焊接路径规划问题，深入分析和研究焊点的空间分布和工艺要求，建立了焊接路径规划的数学模型，利用蚁群算法，通过 Matlab 软件求解出最短焊接路径。

运用 DELMIA 数字仿真软件对所规划的焊接工作站进行仿真示教，进一步分析焊接过程中的干涉碰撞，得到各型号播种机机架的焊接生产时间，并通过人机操作分析，得到工作站内各型号播种机机架焊接生产节拍为 576 s、585 s、592 s、621 s。确定工作站只需配置一名操作人员，且人员最大空闲率为 80.9%，工作站作业效率是单人作业效率的 5.28 倍，作业面积利用率提高 82.6%，以此合理分配操作人员的工作任务，最终输出离线程序。

通过对播种机机架焊接机器人柔性工作站的仿真分析，本文所规划的方案减小了生产节拍，提高了生产效率和空间利用，且符合低碳高效的经济发展要求。其结果对于农机制造企业的转型升级及其他农机产品的焊接机器人柔性工作站的研究具有较高的参考价值。

关键词：播种机机架，焊接机器人，柔性工作站，路径规划，仿真优化

Abstract

With the diversification of crop species and planting patterns, planter has formed the production mode of multispecies and small amount. But at present, the welding production of the seeding machine mainly depends on the manual operation, and the welding quality overmuch depends on the technical level of the operators. During the welding process, the operation changes frequently, which lead to the lower production efficiency and higher welding cost. As an efficient mode of production, welding robot station has been widely used in automotive, aerospace and other fields. But there has not fashioned seeding machine frame welding robot station yet. This essay, according to the present situation of welding production of Xinjiang seeding machine frame, combined with the welding process characteristics of the machine frame, studies flexible workstation of seeding machine frame welding robot. And, this essay plans a set of flexible workstation of seeding machine frame welding robot station scheme suitable for different types of commonly used machine frame.

The essay takes the market demand of seeding machine industry as the background, 2 MBJ series precision seeder produced by RT Company as the research object. Based on the in-depth study of seeder rack construction and welding technology, this essay presents the overall objectives of the project planning of the welding robot flexible workstation. This essay has designed 3 overall plans of welding robot workstation and adopted evaluating selection of AHP (analytic hierarchy process). In this essay, it has conducted a detailed design on the optimal scheme, including welding robot workstation layout planning, design of welding fixture scheme for workstation, the robot, dislodgement machine, portal frame pedestal and other specific parameters. Aiming at the welding path planning problem, this essay deeply analyzes and studies the spatial distribution and the process requirements of the solder joints, establishing the mathematical model of the welding path planning. By using ant colony algorithm and Matlab software, this essay works out the shortest welding path.

Using DELMIA digital simulation software, this essay conducts simulation teaching on the planning welding station, and further analyzes the interference and collision in the welding process, which conclude the welding production time of various models of seeding machine frame. Through the man-machine operation analysis, this essay obtains each type of machine frame welding production beat in the workstation is 576 s, 585 s, 592 s, 621 s. It is determined that workstation only need to configure one operation personnel and maximum personnel idle rate is 80.9%; workstation operating efficiency is 5.28 times than that of single operating; the utilization rate of working area improves 82.6%. Based on the above data, it can rationally allocate the tasks of the operator and finally output offline program.

Through simulation analysis on flexible workstation of seeding machine frame welding robot, the planning scheme in this essay reduces the production cycle, improves the production efficiency and space utilization and conforms to the requirements of low carbon efficient economic development. The results have high reference value for upgrading of the agricultural machinery manufacturing enterprises and the research on welding robot flexible workstation of other agricultural machinery products

Key words: seeder frame, welding robot, flexible workstation, path planning, simulation and optimization

目 录

摘要.....	I
Abstract	II
第一章 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 柔性焊接工作站系统研究现状.....	2
1.2.2 柔性焊接夹具研究现状.....	2
1.2.3 焊接路径规划研究现状.....	3
1.2.4 虚拟仿真优化研究现状.....	4
1.3 本文主要研究内容.....	5
1.4 技术路线.....	6
第二章 播种机机架焊接机器人工作站分析.....	7
2.1 播种机机架构造.....	7
2.2 播种机机架焊接现状.....	7
2.3 播种机机架焊接工艺分析.....	9
2.3.1 播种机机架焊接工艺流程.....	9
2.3.2 播种机机架焊接要求.....	10
2.3.3 焊接工艺设计.....	12
2.4 生产节拍分析.....	13
2.5 焊接机器人工作站规划的总体目标.....	13
2.6 本章小结.....	13
第三章 播种机机架焊接机器人柔性工作站设计.....	14
3.1 工作站设计方案选择.....	14
3.1.1 工作站设计方案分析.....	14
3.1.2 基于 AHP 法的工作站方案选择.....	16
3.1.3 实例分析.....	17
3.2 焊接机器人工作站结构分析.....	21
3.2.1 焊接工作站布局.....	21
3.2.2 焊接机器人工作站结构.....	22
3.3 工作站制造资源规划.....	23
3.3.1 焊接工作站夹具方案设计.....	23
3.3.2 焊接机器人选择.....	29
3.3.3 焊接变位机选择.....	31
3.3.4 机器人底座方案设计.....	32

3.4 操作人员作业时间研究.....	33
3.5 播种机机架焊接路径规划.....	37
3.5.1 焊接路径规划问题描述.....	37
3.5.2 焊接路径的数学模型.....	37
3.5.3 焊接路径的蚁群算法.....	37
3.5.4 播种机机架焊接路径规划实例.....	40
3.6 本章小结.....	43
第四章 播种机机架焊接机器人工作站仿真研究.....	44
4.1 建模与仿真平台软件背景介绍.....	44
4.2 播种机机架焊接建模仿真流程.....	44
4.3 播种机机架焊接机器人柔性工作站虚拟搭建.....	44
4.3.1 焊接机器人运动链建立.....	45
4.3.2 其它资源的运动链建立.....	45
4.4 焊接工作站仿真验证.....	46
4.4.1 工作站工艺流程制定.....	46
4.4.2 焊接机器人可达性分析.....	46
4.4.3 焊接机器人任务设定.....	48
4.4.4 焊接路径的优化.....	49
4.5 仿真结果分析.....	49
4.5.1 碰撞干涉分析.....	50
4.5.2 生产节拍确定.....	50
4.5.3 离线程序输出.....	52
4.6 设计规划方案评价.....	53
4.7 本章小结.....	54
第五章 结论与展望.....	55
5.1 结论.....	55
5.2 展望.....	55
参考文献.....	56
致 谢.....	59
攻读学位期间发表论文情况.....	60

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

2014年，新疆生产建设兵团农作物播种面积1327.85千公顷1991.78万亩，作物精量半精量播种面积1339.5万亩，占作物总播种面积的67.25%。比上年增长5.8%。其中，棉花精量播种面积778.7万亩，占棉花播种面积的74.1%^[1]。播种是农作物栽培的主要方式之一，播种机的需求量稳定增长，不同农作物及不同种植模式的要求对播种机尺寸和型号的需求不同，播种机制造企业形成了多品种、小批量的生产管理模式。目前播种机焊接生产主要以手工作业为主，焊接质量不稳定，焊接弧光和烟雾危害人体的健康，且焊接作为特殊工种，用工成本较高；焊接生产过程中作业转换频繁，工装夹具调整时间长，设备利用率和生产效率较低。如何在保证播种机机架焊接质量的可靠性和稳定性的前提下，提高焊接效率，降低焊接成本，成为播种机制造企业亟待解决的问题。

焊接机器人作为一种高效、智能化的焊接生产作业方式，可实现焊接生产效率和焊接质量的双重提高，已广泛应用于汽车、机械制造等行业。尽管焊接机器人的应用可解决生产节拍快、重复性高、焊缝一致性不高、生产环境恶劣等问题，但在实际规划过程中，由于布局规划不当以及人为因素的干扰，机器人的使用效率难以实现最大化，造成了设备生产能力的浪费。传统的焊接机器人工位规划主要是采用现场调试布局，试错生产，调整改进，示教编程等方式。采用现场调试布局、试错生产和调整改进等方式规划焊接机器人工位时，经常遇到干涉或碰撞等问题，为此需要反复修改规划方案，直至满足生产要求，耗费大量人力、时间和财力成本。而采用焊接机器人示教编程规划，工位必须停止生产，这将对焊接生产效率产生影响，且不能保障焊接路径最优化。

焊接机器人工作站设计规划时，在CATIA软件中建立焊接工作站的三维数据模型，利用数字化工厂软件DELMIA实现工作站焊接生产仿真，能够及时发现焊接生产中机器人的位姿是否正常、机器人和工件之间是否存在干涉碰撞、设备布局是否恰当等问题。根据数字化仿真结果，及时调整设计方案和焊接工艺规划，并对焊接工作站的机器人进行离线编程。通过数字化仿真分析可有效提高机器人工作站的规划效率，节约生产成本，减少人因的不良影响。

播种机属于季节性需求产品，生产周期的长短是影响企业效益的重要因素，因此播种机机架焊接实现自动化是必然趋势，本文以播种机行业的市场需求为背景，以RT公司生产的2MBJ系列精量播种机机架为研究对象，结合播种机机架结构及焊接工艺特点，通过柔性焊接夹具方案设计、焊接路径的优化以及DELMIA软件的仿真验证，规划一套焊接机器人柔性工作站方案，使其能够满足4种不同型号播种机机架边梁焊接及机架总成焊接的要求，以提高播种机机架的焊接生产效率，缩短生产周期。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 柔性焊接工作站系统研究现状

采用自动化、柔性化的焊接装备会使焊接车间的生产效率提高 2~4 倍，可改善及稳定焊接质量，降低成本^[2]。因此，近年来，柔性化焊接工作站的研究和应用越来越广泛。胡敏^[3]等人提出了基于总线技术的柔性机器人焊接工作站，工作站能够适应不同待焊件的焊接，能够焊接多种零件和适应多样化产品的要求在一套机器人系统上，机器人焊接工作站能够高度柔性化。刘冰^[4]针对汽车半壳封装式后消声器压和，研制了一套柔性焊接系统，系统主要包括气液增压系统、模具和变位机等。曹向成等^[5]设计了摩托车踏板式车架机器人焊接生产线，分别从生产线布局、设备资源和系统控制等方面对摩托车车架焊接生产线的进行了阐述，为摩托车车架的高效、高质焊接生产提供了保障。陈柳艺等^[6]基于柔性制造理念，将制造自动化的内涵扩展至智能化、柔性化与高度集成化，设计了机器人智能柔性焊接工作站，实现焊接生产线可同时兼容不同产品的开发工作和批量生产。杨京^[7]通过对原有 ABB 弧焊机器人工作站系统新增产品导致的无法连续生产问题，进行了控制系统的改造，使其满足三种焊接产品间焊接程序自动切换的要求，提升了弧焊机器人工作站柔性生产节拍，提高弧焊机器人工作站运行效率。王健强等^[8]应用 Soft PLC 和现场总线，完成了机器人柔性制造单元的控制和通信，设计和构建了自动化和柔性化的机器人工作站系统集成，大大缩短了编程研发时间，并且系统的柔性化程度进一步提高。

综上所述，焊接机器人柔性工作站可实现焊接过程的柔性化，提高焊接生产效率，保证焊接质量的稳定性，具有适应性强的特点，是现代制造业发展的趋势。但工业机械产品与农业机械产品的产品特征存在一定的差异，如零件结构、加工精度等，播种机机架主要为结构件，汽车焊接零件主要为钣金件，因此播种机机架焊接机器人柔性工作站不能照搬汽车等行业现有方案。

1.2.2 柔性焊接夹具研究现状

焊接夹具是焊接作业不可缺少的设备，对多品种小批量产品的焊接生产，要求焊接夹具具有一定的柔性，因此柔性焊接夹具的应用越来越得到重视，对减少作业辅助时间，提高焊接效率具有重要意义。柔性焊接夹具在焊接工作站的研究方面，刘极峰等^[9]以塞拉门铝镁硅合金框架的焊接作业为研究对象，针对塞拉门框架尺寸型号较多的焊接生产需求，引入弧焊机器人工作站替代传统的手工焊接，重点对塞拉门柔性焊接夹具开展了研究，实现了塞拉门铝镁硅合金框架焊接质量提升和经济实用的双目标。李积侠^[10]针对车型更新换代很快的特点，对轿车排气系统机器人焊接夹具进行了柔性化的设计，采用弧焊机器人替代焊接作业，根据轿车排气系统的结构和特性，着重介绍了轿车排气系统焊接夹具设计过程中工件总成中每个零件定位方式的选择和到整体定位方式的选择。余

建军等^[11]对焊接工装夹具在机械装备制造业中的应用进行了介绍,对模块化组合焊接工装夹具系统和计算机辅助焊接工装夹具设计系统在西方工程装备制造业中的应用进行了概述。张维官等^[12]针对我国汽车与轨道交通行业车型更新换代速度快,以及市场对产品性能要求的提高,作者对汽车与轨道交通领域柔性焊接生产线的焊接装备及焊接材料提出了要求。M. Vural 等^[13]深入研究了焊装夹具对不锈钢结构焊接冷却过程中的变形所产生的影响。KANG Hui^[14]与卡特彼勒公司合作开展了针对卡特彼勒公司大型工程机械零部件焊接工的计算机辅助工装夹具设计系统研究开发和应用工作。

组合夹具是柔性焊接夹具的重要实施方式,徐俊生等^[15]以高速列车铝合金车体型材组装焊接为研究对象,设计的焊接夹具满足其柔性化的需求。该系统完成了对高速列车车顶、车底、侧墙和平顶圆顶对接等的作业,实现了多种型号高速列车多种型材柔性化、自动化拼焊。李翔等^[16]以履带式起重机桁架臂制造中的拼焊过程为研究对象,解决了传统专用夹具出现的设计周期、准备时间长的突出问题,采用柔性化的焊接组合夹具,来提高桁架臂的组对精度,柔性焊接组合夹具非常适用于小批量、多品种的新产品生产。李光俊等^[17]采用柔性组合夹具代替专用焊接夹具,利用柔性组合夹具的通用性、可反复拆卸、可重复使用的特点,来满足现代飞机在研制阶段高精度、并实现飞机导管数字化快速制造。李欣等^[18]探究了组合夹具对焊接机器人生产系统柔性化的影响,并进一步阐述了在焊接生产系统中组合夹具的实施方法。张胜文等^[19]为解决对相似焊接管件夹具设计或同一管件焊接夹具二次设计的繁琐求解过程。在管件焊接夹具设计系统中应用基于范例的推理(CBR)技术,从工件特征和夹具特征两方面来考虑管件焊接夹具的相似性。研究结果显示,将知识算法应用于实例,可较大提升夹具设计知识的重用率。

综上所述,柔性化理念符合焊接夹具快速换装要求,但不同机械产品在结构和工艺要求上存在差异,上述的焊接夹具设计并不能适用于播种机机架。目前播种机机架焊接夹具为刚性设计,对不同型号播种机机架不能共同利用,需要重新规划。

1.2.3 焊接路径规划研究现状

焊接路径规划对焊接机器人减少生产节拍和焊接成本有重要意义^[20]。早期焊接路径规划方法有分支定界法、动态规划法和线性规划法等,早期的规划方法对于复杂问题的研究有很大局限性,近些年出现了遗传算法、神经网络、蚁群算法和粒子群算法等,并且成为研究热点^[21,22]。林巨广等^[23]应用蚁群算法对白车身底板焊接路径进行了规划,从而找出了最优的焊接路径,并与采用蚁群算法前参数进行对比,结果表明缩短了焊枪的行走路径。张春伟等^[24]以机器人空间运动最短距离为目标,对轿车白车身制造过程中机器人焊接工位焊接路径建立货郎担问题数学模型,对机器人焊接路径规划问题利用了遗传算法进行求解。王学武等^[25]以焊接机器人的焊点路径最短为研究目标,应用改进的分区域粒子群算法进行了规划,并进一步应用仿真技术验证规划方案的有效性。杨薇等^[26]

提出基于三维视觉技术采用索贝尔和拉普拉斯算法两种图像处理方法对自动化焊接机器人路径规划系统,将三维视觉技术成功的应用到复杂几何形状工件的测量与焊接。刘任平等^[27]从时间最优角度对焊接机器人路径规划,并与传统的示教-再现方式进行比较,研究表明焊接机器人的焊接效率在应用遗传算法规划后明显提高。顾平灿等^[28]针对手动液压搬运车车架双机器人同步焊接加工路径,采用量子行为粒子群优化建立双机器人同步焊接数学模型,求解了全局最优焊接路径的近似解,有效解决了搬运车车架主焊工序双机器人同步焊接问题。彭雪峰等^[29]以六轴焊接机器人系统损耗的能量最小为目标函数,运用D-H法建立了焊接机器人的运动方程,并对焊接路径采用遗传算法进行优化。王召迁等^[30]针对多品种、小批量机械产品生产响应速度慢的瓶颈问题,提出在焊接路径的规划设计中应用快速扩展随机树(RRT)算法,与传统的手工焊接相比其焊接路径规划速率和任务分配速率提升了5倍左右。胡中华等^[31]引入人工蜂群算法求解机器人路径规划问题,该算法克服了停滞行为的过早出现,且加快了收敛速度,得到全局最优解或近似解。

综上所述,针对不同产品的焊接路径规划选择合适的算法对提高机器人作业效率有重要意义,在规划播种机机架焊接路径时可以应用。

1.2.4 虚拟仿真优化研究现状

数字化工厂技术是以产品全生命周期为研究对象,在三维数字化环境中对制造过程设计的产品、资源和工艺进行仿真和优化^[32,33]。数字化工厂的出现改变了传统制造设计的方式,在虚拟环境下实现产品生命周期中的设计、加工、装配、物流和工厂布局等环节。数字化工厂技术核心是为产品全生命周期提供全数字化平台。

近年来,数字化工厂技术在西方国家和国内都得到了广泛的研究和应用。波音公司在波音777在研发过程中,应用三维模型的数字化协同研制和虚拟制造技术,使研发周期较之前缩短了2/3,且研发成本降低了50%,依据数字化工厂技术设计实施的波音777整流罩金属外壳生产线,其生产制造时间由43天缩短为现在的7天^[34]。三星重工利用数字化工厂仿真工具对造船过程进行数字化模拟仿真,每年为公司减少730万美元的开支。三一重工运用数字化工厂仿真工具建立了工厂仿真、物流仿真、装配和数控加工仿真,初步建立了数字化工厂系统,新建厂区通过仿真验证后才能投入建设,工厂仿真和物流仿真应用率达100%,充分发挥了仿真的预见能力,提高了产品的合格率,并缩短了规划和建设周期^[35]。

目前,国际上数字化工厂仿真软件开发应用较普遍的是达索公司的DELMI/Simulia、西门子公司的Technomatix和PTC公司的Ployplan^[36-38]。景武等^[39]利用数字化仿真软件DELMI进行飞机三维装配工艺设计与仿真方法的研究,从工艺组件划分、产线布局规划、装配工艺研究等方面对我国航空制造业当前装配工艺规划与设计进行了研究。陈宁等^[40]通过DELMI仿真模拟了某汽油机拆卸路径,利用DELMI的数字化制造工艺(DPM)与工艺工程师(DPE)的数据传递对发动机就行了

虚拟装配。余建国等^[41]在 DELMIA 软件中构建车用空调虚拟装配环境,通过装配过程仿真验证装配序列和装配路径的合理性。沈波^[42]以 ARJ21 飞机的中央翼组件装配仿真过程为例,通过三维数字化仿真软件 DELMIA 对中央翼装配工艺过程及人机工程仿真,可以看到 DELMIA 软件在航天航空设计、制造仿真中的广泛应用。周尔民等^[43]运用 DELMIA 软件对某型双离合变速器进行了的虚拟仿真,并且对装配仿真进行了碰撞干涉和工艺顺序分析,结果表明数字化工厂设计,缩短了设计周期和交付周期,降低了设计成本。容芷君等^[44]应用 DELMIA 的 DPM 模块对汽车装配线进行建模与仿真,按规划的工艺流程对汽车总装线模拟仿真,并对平衡率进行分析装配线,以验证规划的装配线的可行性以及装配线作业中的人因工效性。秦基伟等^[45]以结合 S11 车身侧围工艺, QH-165 型机器人为仿真对象,对汽车侧围的机器人焊接工位运用 DELMIA/Robotics 软件进行了数字化仿真,有效的降低项目设计成本,并大大缩短了项目完工时间。林巨广等^[46]应用数字化仿真软件 ROBCAD 对汽车车身焊装自动线工艺进行了规划,并分析了方案可行性,最终规划了一条轿车焊接自动化工艺规划方案。姜宇等^[47]在 MATLAB 中应用遗传算法规划了某汽车车身多达 4000-5000 个焊点路径,并在数字化仿真软件 ROBCAD 中对遗传算法规划的焊点路径进行验证,结果表明焊接生产节拍得到了较大的改善。

综上所述,提出针对新疆乃至我国播种机机架焊接生产现状,引入柔性理论和方法对播种机机架焊接机器人柔性工作站进行研究,以保障播种机焊接零件一致性,提高播种机质量,提高焊接效率。并结合计算机仿真技术对设计的柔性工作站进行建模仿真优化,降低规划成本,提高工作站规划的准确性。

1.3 本文主要研究内容

本文主要针对新疆播种机机架焊接生产中存在的生产能力不足、焊接工装调整耗时长、工人劳动强度大且效率低等问题,以 RT 公司生产的 2 MBJ 系列精量播种机机架为研究对象,通过对工作站内制造资源的规划、柔性焊接夹具的方案设计和弧焊机器人的焊接路径优化,规划一套适用于不同型号播种机机架焊接作业的机器人工作站方案。

(1) 在深入分析主播种机机架的结构和焊接工艺流程的基础上,提出焊接工作站的总体设计目标。设计 3 种播种机机架焊接机器人柔性工作站总体规划方案,并进行评价选优。对已确定的方案进行详细设计,规划焊接机器人工作站布局,确定设备的安装位置、机器人的作业空间及其它工作站辅助设备的参数确定。

(2) 设计满足常用型号播种机机架焊接生产的柔性夹具方案,确定具体焊接夹具动力、装夹形式、工装夹具柔性结构形式等内容。在上述研究的基础上,采用 MOD 法制定播种机机架总装焊接和边梁焊接上、下件的标准工时。结合数学建模、蚁群算法及 Matlab 软件,规划播种机机架焊接机器人焊接路径。

(3) 播种机机架焊接机器人工作站仿真研究。利用三维软件 CATIA 的零件创建工

作站的 3D 模型，定义焊接机器人、杠杆夹紧器和变位机旋转轴等资源的运动链。在 DELMIA 仿真软件进行虚拟现实仿真及离线编程，输出的程序可直接应用于实际的焊接机器人工作站。

1.4 技术路线

本文针对播种机机架的结构特点和焊接工艺流程，提出焊接机器人工作站方案的设计原则，采用 AHP 法对播种机机架焊接机器人工作站总体规划方案进行评价，对于已确定方案的制造资源进行详细设计，在深入研究焊点的空间分布和工艺要求的基础上，结合 TSP 问题，构建蚁群算法的焊接路径求解模型，利用 Matlab 软件得到焊接路径的最优解。通过 DELMIA 软件对所规划焊接工作站方案进行仿真示教，对机器人的可达性和碰撞干涉问题进行分析，并提出改进建议，最终得到较为合理的播种机机架焊接机器人柔性工作站规划方案。总的研究思路：调研分析→方案规划的规划原则→规划方案择优→方案具体规划→方案建模仿真。具体研究思路和技术路线如图 1-1 所示。

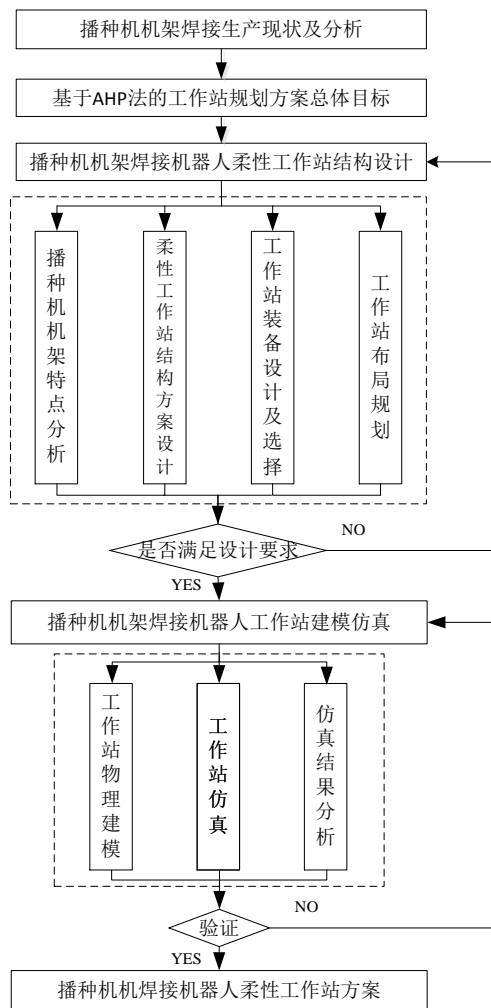


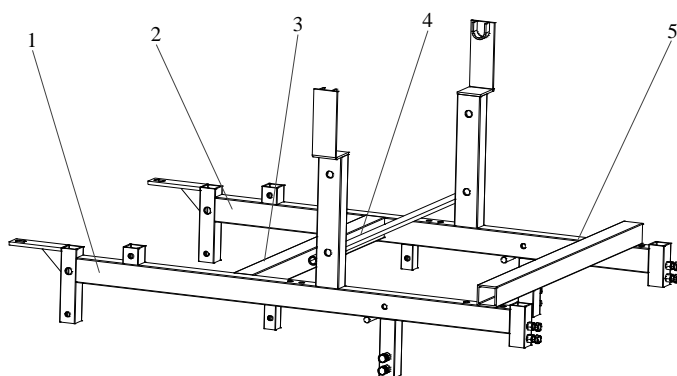
图 1-1 技术路线

Fig. 1-1 Technology Roadmap

第二章 播种机机架焊接机器人工作站分析

2.1 播种机机架构造

2 MBJ 系列精量播种机机架主要有左边梁总成、右边梁总成、前梁和后梁等部分组成（如图 2-1）。不同型号播种机由于适宜地膜宽度不同，其前梁、后梁和挡膜杆对应长度分为四种，左、右边梁总成间距分别为 750 mm、800 mm、1300 mm、2100 mm^[48]。左、右边梁总成中的四连杆竖杆总成有两种（如图 2-2）。因此要求工作站满足两种四连杆竖杆总成和四种不同型号播种机机架的焊接，不同的四连杆竖杆总成和不同型号播种机机架，虽在结构和规格上存在差异，但都采用弧焊的焊接形式。



1 右边梁总成 2 左边梁总成 3 后梁 4 挡膜杆 5 前梁

图 2-1 播种机机架结构

Fig. 2-1 The structure of seeder rack

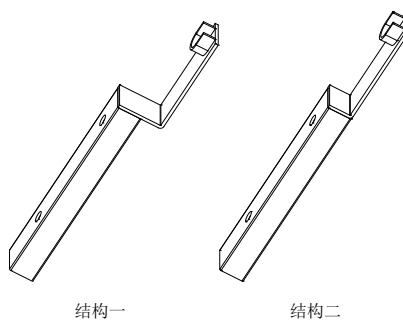


图 2-2 两种四连杆竖杆总成结构

Fig. 2.2 Assembly structure of four-link vertical rod for two types

2.2 播种机机架焊接现状

RT 公司播种机机架计划产能为 6000 台/生产季，采用单班制生产，每班 8 小时，生产期为 11 月至次年 3 月。RT 公司目前产能每年不足 2000 台，现有设备焊接生产能力达不到计划需求，且由于人工焊接随意性大，加之焊接设备十分简陋，播种机机架的焊接质量无法保证。

通过调研分析播种机机架焊接生产主要存在如下三个问题：

(1) 市场需求量大，生产能力不足

随着 RT 公司的快速发展，播种机机架的现有焊接生产能力已无法满足计划的生产需求，其他产品的焊接任务又加剧了产能不足问题。为了提升播种机机架乃至播种机整体质量，基于未来五年的播种机规划需求，建立焊接机器人工作站，并对工作站的规划设计迫在眉睫。

分析目前的播种机架焊接工时（见表 2-1），一套播种机机架实际焊接用时 50 分 42 秒，单人日产能仅为 9 套；由于人工焊接产生的飞溅和焊接的不平整，使焊接后打磨工序任务量增加，单个边梁打磨用时 6 分 44 秒，框架打磨用时 10 分 40 秒，极大的影响了播种机的生产效率。

表 2-1 播种机机架焊接工时表
Table2-1 Seeder Rack welding time

焊接项目		操作时间	人数
边梁点对	左	3'47"	单人
	右	12'46"	单人
边梁焊合	左	3'47"	单人
	右	12'46"	单人
框架点对		10'50"	双人
框架焊合		6'46"	双人
合计		50'42"	——

(2) 焊接工装柔性低，调整工装耗时较长

现有的焊接工装采用刚性设计，但对多品种小批量的生产模式，使得调整工装花费时间较长，影响工作效率。当对播种机机构创新设计或有新规格播种机投产时，会导致原有的工装夹具废弃，这不仅使投资费用和成本有所增加，还给设施的规划以及物流的安排带来不便，降低了焊接生产效率，增加了企业一次性投入资金的风险。

(3) 工人的工作强度大，质量波动性大

在实习调研与职工例会中得到焊接工人对当前的工作状况感到不满。究其原因：一是播种机机架体积较大，自动化程度低，焊接时需来回走动，搬运、装夹和翻转均为人工，目前播种机机架先点焊，在此基础上进行弧焊，多了一次搬运过程，劳动强度大；

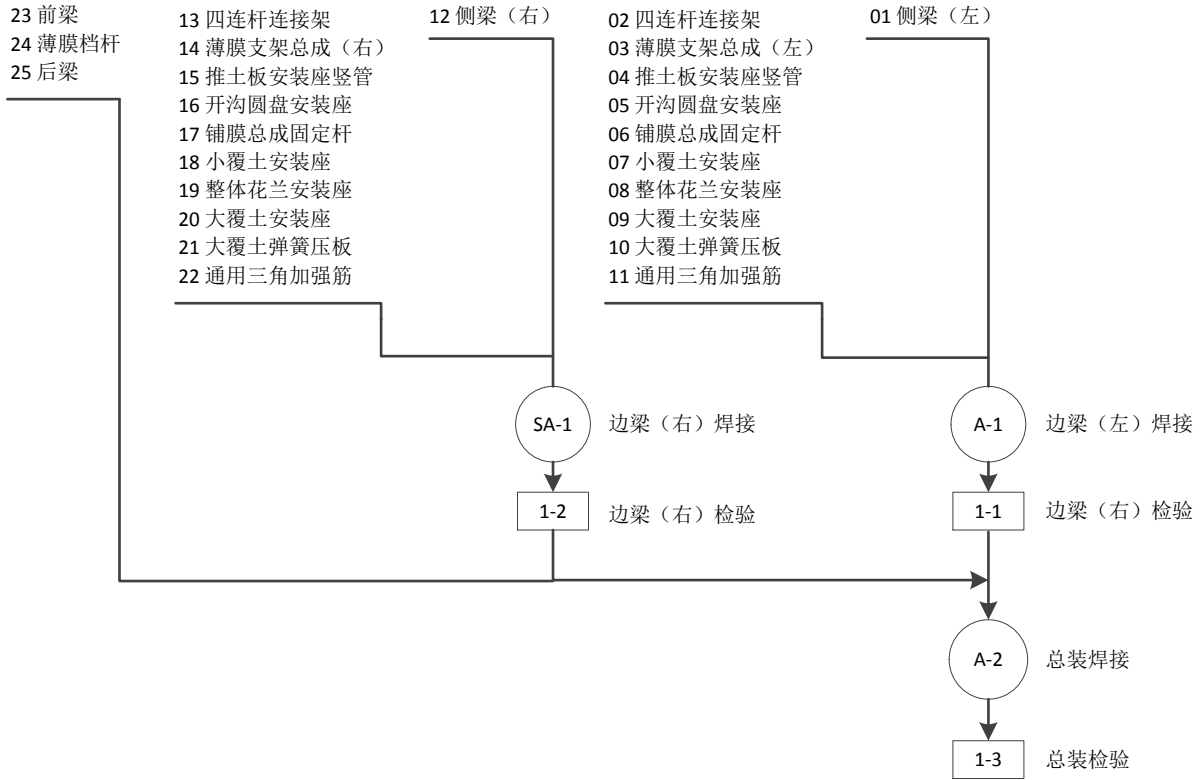


图 2-4 播种机机架焊接工艺流程图

Fig. 2-4 Seeder rack welding process flow

2.3.2 播种机机架焊接要求

播种机机架边梁的焊接，是以侧梁为基准，将薄膜支架总成、开沟圆盘安装座、小覆土安装座等焊接件与其焊接而成。播种机机架总成焊接要求，焊缝的位置及数量是以播种机机架的左边梁总成为基准面，将前梁、后梁、挡膜杆与左右边梁总成焊合。播种机机架各待焊件板厚在 $2.5\text{mm} \sim 8\text{mm}$ 范围，铺膜总成固定杆为 $\Phi 14\text{mm}$ 的实心圆钢。单条焊缝长度在 $30\text{mm} \sim 60\text{mm}$ 范围。焊缝形式主要为 I 形焊缝和角焊缝。结合焊接件焊缝的厚度和长度参数，提出播种机机架总成的焊接要求和夹具方案设计要求（见表 2-2），边梁的焊接要求和夹具方案设计要求（见表 2-3）。

表 2-2 播种机机架边梁的焊接要求
Table 2-2 Seeder rack beam welding requirements

焊接件名称	焊接件厚度 (mm)	0°焊缝长度 (mm)	180°焊缝长度 (mm)	焊接要求	夹具方案设计要求
四连杆连接架	5	40; 60; 40	60	0°焊缝为 I 形焊缝; 180°焊缝为角焊缝	限制工件自由度, 工件上表面需施加预紧力, 夹具需翻转 180°
薄膜支架总成	5	40; 60; 40	60	0°、180°焊缝均为角焊缝	限制工件自由度, 工件上表面需施加预紧力, 夹具需翻转 180°
推土板安装座竖管	4	40; 40; 40	40	0°焊缝为 I 形焊缝和角焊缝; 180°焊缝为 I 形焊缝	限制工件自由度, 工件上表面需施加预紧力, 夹具需翻转 180°
开沟圆盘安装座	4	40; 40; 40	40	0°焊缝为 I 形焊缝和角焊缝; 180°焊缝为 I 形焊缝	限制工件自由度, 工件上表面需施加预紧力, 夹具需翻转 180°
铺膜总成固定杆	Φ14	40	—	0°焊缝为角焊缝	限制工件自由度, 工件垂直面需要预紧力
小覆土安装座	3	30; 30; 30	30	0°焊缝为角焊缝; 180°焊缝为 I 形焊缝	限制工件自由度, 工件垂直面需施加预紧力, 夹具需翻转 180°
整体花兰安装座	4	40; 40; 40	40	0°焊缝为 I 形焊缝和角焊缝; 180°焊缝为 I 形焊缝	限制工件自由限制工件自由度, 工件上表面需施加预紧力, 夹具需翻转 180°
大覆土安装座	4	40; 40; 60	60	0°焊缝为 I 形焊缝和角焊缝; 180°焊缝为 I 形焊缝	限制工件自由度, 工件垂直面需施加预紧力, 夹具需翻转 180°
通用三角加强筋	8	55; 55	55; 55	0°焊缝为角焊缝; 180°焊缝为角焊缝	垂直面需要预紧力, 夹具需翻转 180°
大覆土弹簧压板	8	40	—	0°焊缝为 I 形焊缝	限制工件自由度, 工件垂直面需施加预紧力

表 2-3 播种机机架总成的焊接要求

Table 2-3 Seeder rack assembly welding requirements

焊接件名称	零件厚度 (mm)	0°焊缝长度 (mm)	180°焊缝长度 (mm)	焊接要求	夹具要求
前梁	4	40; 40	50	0°、180°焊缝均为角焊缝	限制工件自由度, 工件上表面需施加预紧力, 夹具需翻转 180°
后梁	4	50; 50; 50	50	0°焊缝为 I 形焊缝和角焊缝; 180°焊缝为角焊缝	限制工件自由度, 工件上表面需施加预紧力, 夹具需翻转 180°
挡膜杆	2.5	40	—	0°、焊缝为角焊缝	限制工件自由度, 考虑挡膜杆为圆管现状需采用 V 型定位块, 夹具需翻转 180°

2.3.3 焊接工艺设计

(1) 选择焊接方法、焊接设备

确定焊接形式, 翻转情况, 焊缝长度和厚度后, 可以选择焊接方式。气体保护焊与普通手工电弧焊、埋弧焊等相比, 在工艺适应性、焊接质量、焊接过程自动化控制、生产效率等方面有许多优点: 气保焊采用明弧焊接, 便于控制焊接过程及焊缝质量; 气保焊不需要焊剂或焊条, 省去了焊后对焊缝表面的清渣等工作; 气保焊通过焊丝连续送进, 焊接过程连续, 易于实现全自动焊接。播种机机架的焊接料厚主要为 2.5-8.0 mm, 选用 CO₂ 气体保护焊较为适宜。

(2) 确定焊接工艺参数

确定零件厚度及送丝速度等情况, 即可确定焊接工艺参数, 依据表 2-4 初选焊丝直径 $\Phi 1.0$ mm 焊丝, 初选焊接电流为 160~220 A, 初选焊接电压 20-26 V。

表 2-4 焊接参数表

Table 2-4 Welding parameter table

零件厚度 (单位: mm)	焊丝直径 (单位: mm)	焊接电流 (单位: A)	焊接电压 (单位: V)
$\delta \leq 3$	$\Phi 0.8$	120-180	18-24
$4 \leq \delta \leq 7$	$\Phi 1.0$	160-220	20-26
$8 \leq \delta \leq 25$	$\Phi 1.2$	240-320	24-32
$25 \leq \delta$	$\Phi 1.2$	250-350	25-35

2.4 生产节拍分析

生产节拍的满足是焊接机器人柔性工作站设计的目标，工作站设计需适用于多种型号 2 MBJ 系列播种机机架焊接，需首先完成播种机机架左、右边梁的焊接，再将机架整体焊接。每个工作日内操作工的换装、清理工作站等计划内停工时间为 1h，而机器故障、待料或停电等因素造成的计划外停工时间为 0.2h。则计算生产节拍：

$$C = \frac{T}{n} \quad (2-1)$$

$$T = p \times (I - t_1 - t_2) \quad (2-2)$$

$$C = \frac{p \times (I - t_1 - t_2)}{n} \quad (2-3)$$

式中： C —生产节拍，s； T —有效生产时间，s； n —计划产量，台； P —一年生产期，天； I —运作模式，h/天； t_1 —计划内停工，h； t_2 —计划外停工，h。

播种机机架年生产期为 6 个月，运作模式 $I = 8$ h/天，计划内停工 $t_1 = 1.0$ h，计划外停工 $t_2 = 0.2$ h，需完成计划产量 $n = 6000$ 套播种机机架的焊接能力，生产节拍计划为 734s。

2.5 焊接机器人工作站规划的总体目标

本文所涉及的焊接机器人工作站仅限于播种机机架的焊接任务，暂不考虑企业其他产品的焊接任务，目标是保证质量的前提下，提升产能。对播种机焊接机器人柔性工作站具体的规划目标如下：

- (1) 工作站能够满足四种不同型号播种机机架的焊接工艺要求；
- (2) 工作站内机器人操作利用最大化，夹具调整时间最小化；
- (3) 工作站内焊接机器人需有翻转装置，且焊接飞溅量小，焊缝成形好；
- (4) 工作站内各制造资源的规划合理，不发生碰撞现象，空间利用最大化；
- (5) 合理规划焊接路径，以提高生产效率；
- (6) 工作站安全可靠，经济实用。

2.6 本章小结

本章以 2MBJ 系列精量播种机机架为研究对象，针对其生产需求大，焊接工装调整耗时长、工人劳动强度大且效率低等现状，在深入分析主播种机机架的结构和焊接工艺流程的基础上，分别提出边梁和播种机机架总成的焊接要求和夹具方案设计要求，并计算得到生产节拍为 734s，提出焊接机器人工作站规划的总体目标。

第三章 播种机机架焊接机器人柔性工作站设计

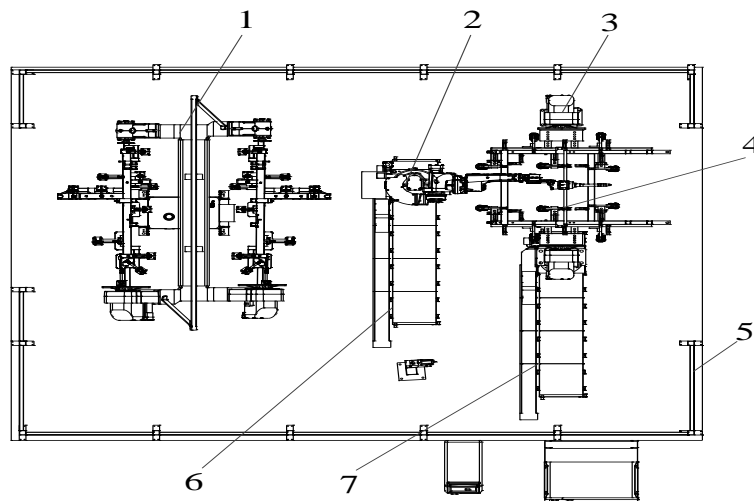
3.1 工作站设计方案选择

3.1.1 工作站设计方案分析

针对播种机架的结构特点和焊接工艺要求，建立 3 套播种机机架焊接机器人柔性工作站方案，三种方案对于焊接方式、速度和精度等参数要求相同，且配置的控制柜、焊枪、焊接电源、清枪器、焊装平台、手动式夹紧器、安全防护装置、送丝机构等设备的型号一致。

(1) 焊接机器人工作站总体总体规划方案一

焊接机器人工作站总体规划方案一（如图 3-1），工作站主要包括 2 台机器人，机器人臂长为 1.4 m，2 台单轴变位机，3 条导轨，2 套夹具。设置 1 个工位完成边梁和播种机机架总成的焊接工作，工作站在上下件时需要停止工作，占地面积为 $6.36 \times 3.05 \text{ m}^2$ 。



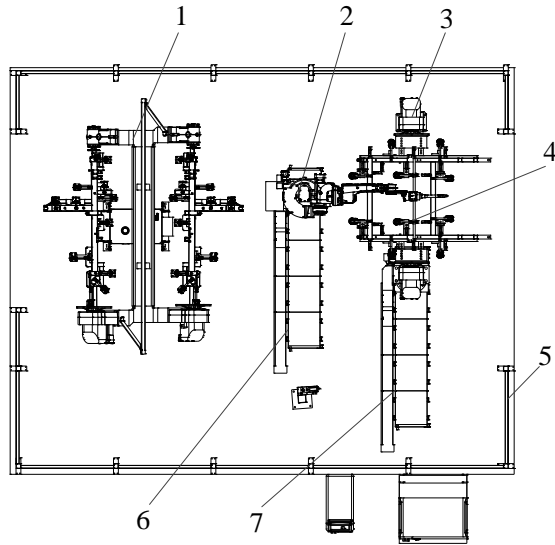
1 导轨 I 2 护栏 3 导轨 II 4 机器人 I 5 单轴变位机 I 6 单轴变位机 II 7 夹具 8 机器人 II 9 导轨 III

图 3-1 焊接机器人工作站总体规划方案一

Fig. 3-1 The first set of welding robot workstation program

(2) 焊接机器人工作站总体规划方案二

焊接机器人工作站总体规划方案二（如图 3-2），工作站主要包括 1 台机器人，机器人臂长为 1.4 m，1 台三轴变位机，1 台单轴变位机，2 条导轨，3 套夹具。设置 2 个工位分别完成边梁和播种机机架总成的焊接工作，工作站在上下件时无需停止工作，占地面积为 $5.17 \times 4.17 \text{ m}^2$ 。



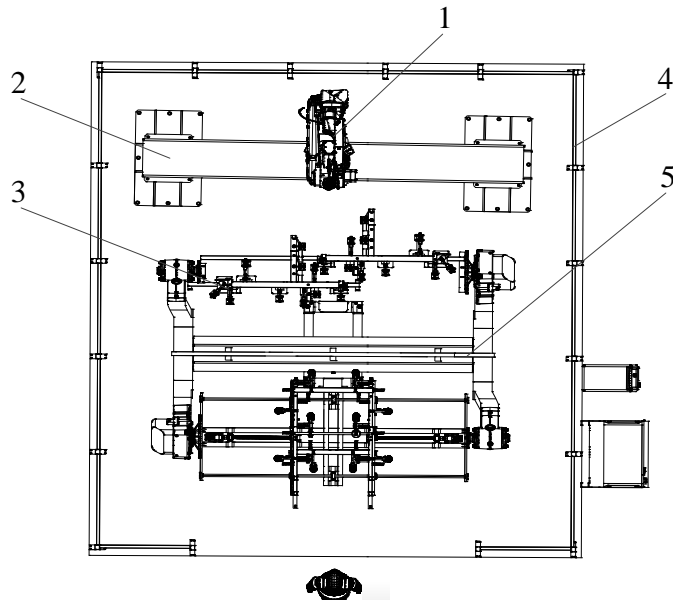
1 三轴变位机 2 机器人 3 单轴变位机 4 夹具 5 护栏 6 导轨 I 7 导轨 II

图 3-2 焊接机器人工作站总体规划方案二

Fig. 3-2 The second set of welding robot workstation program

(3) 焊接机器人工作站总体规划方案三

焊接机器人工作站总体设计方案三（如图 3-3），工作站主要包括 1 台机器人，机器人臂长为 2.0 m ，1 台三轴变位机，2 套夹具。设置 1 个工位完成装夹边梁和播种机机架总成的焊接工作，工作站在上下件时无需停止工作，占地面积为 $5.17 \times 5.17\text{ m}^2$ 。



1 机器人 2 龙门架 3 夹具 4 护栏 5 三轴变位机

图 3-3 焊接机器人工作站总体规划方案三

Fig. 3-3 The third set of welding robot workstation program

3.1.2 基于 AHP 法的工作站方案选择

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是将与决策是有关的元素分解成目标、准则、方案等层次, 在此基础之上进行定性和定量分析的决策方法。通过利用层次分析法对备选焊接机器人工作站方案进行的评价, 将得到更为科学的决策。层次分析法具体流程如下:

(1) 构建层次模型

将决策目标、决策准则和决策对象按它们之间的相互关系分为最高层、中间层和最低层, 绘出层次结构图。

(2) 构建层次结构模型各层次的判断矩阵

1) 构建基于标度值的判断矩阵

依据 AHP 原理和程序, 自上而下对各层次指标进行两两重要程度判断比较, 并引入标度表量化的判断矩阵。

表 3-1 标度值表
Table 3-1 Scale value

a_{ij}	含义
1	i 因素与 j 因素相同重要
3	i 因素与 j 因素稍微重要
5	i 因素与 j 因素明显重要
7	i 因素与 j 因素强烈重要
9	i 因素与 j 因素极端重要
2, 4, 6, 8	为上述相邻判断的中值
倒数	若因素 i 与 j 比较, 得到判断值为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$, $a_{ii} = 1$

2) 计算判断矩阵每一行元素的乘积 M_i

$$M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij} \quad i= 1, 2, \dots, n \quad (3-1)$$

3) 计算 M_i 的 n 次方根 $\bar{W}_i = \sqrt[n]{M_i}$

4) 对向量 $W = (\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n)^T$ 归一化, 得到:

$$w_i = \bar{W}_i / \sum_{i=1}^n \bar{W}_i \quad (3-2)$$

(3) 计算判断矩阵最大特征值根 λ_{\max}

$$A \cdot W = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{21} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n1} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_1 & W_1^T \\ W_2 & W_2^T \\ \dots & \dots \\ W_n & W_n^T \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \quad (3-3)$$

(4) 一致性检验

判断矩阵是决策者根据实际情况，凭借知识和以往经验构建起来，难免与实际情况存在一些误差，为辨别构建的判断矩阵与实际情况是否相符，决策者需要对构建的判断矩阵进行一致性检验。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3-4)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3-5)$$

其中， CI 为一致性检验指标， n 为阶数， RI 为平均随机一致性指标， RI (查表) 的标准值 CR 为一致性比率。当 $CR < 0.1$ 时，认为一致性检验合格，否则要调整判断矩阵，直到满足一致性检验。

表 3-2 平均随机一致性

Table 3-2 Average random consistency

指标因素个数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
值	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.51

3.1.3 实例分析

(1) 构建层次模型

构建焊接机器人工作站方案评价层次模型 (如图 3-4)，可采取以下三个准则来评价备选方案是否合理。其主要评价因素分别是工作站成本 B_1 、焊接效率 B_2 、占地面积 B_3 ，为了实现这三项子目标，有 3 个可供选择，分别是方案 C_1 、方案 C_2 、方案 C_3 。

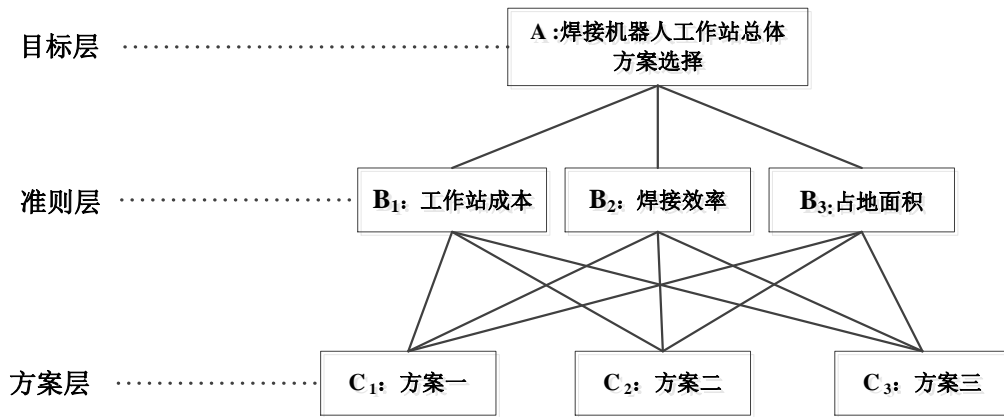


图 3-4 层次结构模型

Fig. 3-4 Hierarchy Model

(2) 建立判断矩阵

1) 建立 A-B 判断矩阵

播种机是一种季节性需求较强的农业机械，在焊接机器人工作站方案选择中，焊接生产效率比成本重要，焊接生产效率比工作站占地面积明显重要。而新疆的播种机制造企业大多属于中小型企业，工作站的投入成本比占地面积重要。因此，建立相对于焊接机器人工作站方案选择，成本、焊接效率和占地面积间相对重要性的判断矩阵（见表 3-4）。

表 3-4 A-B 判断矩阵

Table 3-4 A-B Comparison Matrix

A	B ₁	B ₂	B ₃	w_i^T
B ₁	1	1/3	3	0.2605
B ₂	3	1	5	0.6333
B ₃	1/3	1/5	1	0.1061

由公式 3-1、3-2、3-3 可得： $\lambda_{\max}=3.0765$ ，各因素的相对权重 w_i^T （见表 3-4）。

2) 建立 B₁-C 判断矩阵

三种方案中控制柜、焊枪、清枪器等设备配置一致，这些设备所投入成本的差异性较小，各工作站所需变位机、机器人及导轨价格的差异是影响工作站总成本的关键。结合主要专用设备的市场估值（见表 3-5）和章节 3.1.1 中各方案对设备的需求数量，分析可知方案二的成本最高，其次是方案一，方案三的成本最低。建立相对于成本准则，各焊接工作站方案间相对重要性的判断矩阵（见表 3-6）。

表 3-5 主要专用设备的市场价格估值

Table 3-5 Market estimates price of major special equipment

设备	单轴变位机/台	三轴变位机/台	臂长 1.4m 焊接 机器人/台	臂长 2.0m 焊接 机器人/台	2m 的导轨/个
价格 (万元)	20	30	18	20	2

表 3-6 B₁- C 判断矩阵Table 3-6 B₁- C Comparison Matrix

B ₁	C ₁	C ₂	C ₃	w _i ^T
C ₁	1	2	1/2	0.2972
C ₂	1/2	3	1/3	0.1638
C ₃	2	3	1	0.5390

由公式 3-1、3-2、3-3 可得： $\lambda_{\max}=3.0092$ ；各因素的相对权重 w_i^T （见表 3-5）。

3) 建立 B₂- C 判断矩阵

方案一使用两台机器人进行焊接作业，上料和卸料时工作站需停工等待，造成时间的浪费；方案二在两个工位上分别进行边梁和播种机机架总成的焊接，边梁体积较大，在工位间的移动耗费一定的时间；方案三同样使用机器人，但只需一个焊接工位，上料和卸料时无需停机。考虑第二章计算所得的生产节拍 734s，相对于焊接效率准则，方案一与方案三同等重要，方案一和方案三相较于方案二稍微重要，构建判断矩阵(如表 3-7)所示。

表 3-7 B₂- C 判断矩阵Table 3-7 B₂- C Comparison Matrix

B ₂	C ₁	C ₂	C ₃	w _i ^T
C ₁	1	3	1	0.4286
C ₂	1/3	1	1/3	0.1428
C ₃	1	3	1	0.4286

由公式 3-1、3-2、3-3 可得： $\lambda_{\max}=3$ ；各因素的相对权重 w_i^T （见表 3-7）。

4) 建立 B₃- C 判断矩阵

由章节 3.1.1 中各工作站的占地面积可知，方案一的占地面积最小，其次是方案二，方案三的占地面积最大。构建相对于占地面积准则，各焊接工作站方案之间相对重要性

的判断矩阵（见表 3-8）。

表 3-8 B₃- C 判断矩阵

Table 3-8 B₃- C Comparison Matrix

B ₃	C ₁	C ₂	C ₃	w _i ^T
C ₁	1	2	4	0.5571
C ₂	1/2	1	3	0.3202
C ₃	1/4	1/3	1	0.1226

由公式 3-1、3-2、3-3 可得： $\lambda_{\max}=3.0185$ ；各因素的相对权重 w_i^T（见表 3-5）。

（3）一致性检验

结合公式 3-4、3-5 和表 3-6，对所构造的 4 个判断矩阵的一致性进行检验。计算结果（见表 3-9）分析，4 个判断矩阵的 CI 值均小于 0.1，均具有满意的一致性，说明权重分配是合理的。

表 3-9 判断矩阵特征值

Table 3-9 Comparison Matrix Eigenvalue

判断矩阵	权向量 W	最大特征值 λ_{\max}	CI	RI	CR
A-B	(0.2605, 0.6333, 0.1061) ^T	3.0765	0.0382	0.58	0.0659
B ₁ -C	(0.2972, 0.1638, 0.5390) ^T	3.0092	0.0046	0.58	0.0079
B ₂ -C	(0.4286, 0.1428, 0.4286) ^T	3	0	0.58	0
B ₃ -C	(0.5571, 0.3202, 0.1226) ^T	3.0185	0.0092	0.58	0.0159

（4）层次总排序及一致性检验

求出各焊接机器人工作站总体方案对总目标的优先等级。由 A-B 判断矩阵求出三个子目标对总目标的权重，其他三个矩阵是求各焊接机器人工作站总体方案对各子目标的重要程度。可通过加权法求出各备选方案对总目标的优先等级。

$$w^i = \sum_{j=1}^n w_{ij}w_j \quad (3-6)$$

式中，wⁱ—第 i 个方案对总体目标的权重；w_{ij}—第 i 个方案对第 j 个准则的权重；w_j—第 j 个准则对总体目标的权重。

在目标 A 下，计算 C₁~ C₃ 的组合权重，对总目标进行排序，并进行一致性检验目

标总排序一致性检验：

表 3-10 焊接机器人工作站方案的选择

Table 3-10 Welding robot workstation program selection

方案	方案排序权重	排序
C ₁	0.4080	2
C ₂	0.1671	3
C ₃	0.4248	1

$$CI' = \sum_{j=1}^n w_j CI_j \quad (3-7)$$

$$RI' = \sum_{j=1}^n w_j RI_j \quad (3-8)$$

$$CR' = \sum_{j=1}^n w_j CR_j \quad (3-9)$$

式中， CI' —目标总排序的一致性指标； CI_j —对第 j 个准则的一致性指标； w_j —第 j 个准则对总体目标的权重； RI' —目标总排序的随机一致性指标； RI_j —对第 j 个准则的随机一致性指标； CR' —目标总排序的随机一致性比率； CR_j —对第 j 个准则的一致性比率。

计算可得： $CI' = 0.0022$ ； $RI' = 0.5799$ ； $CR' = 0.0038 < 0.1$ 层次总排序满足一致性要求。

通过以上计算结果，对于选择焊接工作站的方案，所考虑的三种播种机机架焊接机器人工作站的相对总目标的权重（见表 3-10）：方案 C₁ 为 0.4080；方案 C₂ 为 0.1671；方案 C₃ 为 0.4248。因此，应选择方案 C₃ 作为播种机焊接机器人工作站总体方案的设计。

3.2 焊接机器人工作站结构分析

3.2.1 焊接工作站布局

选定的播种机机架柔性工作站总体方案（如图 3-5），采用单机器人单工位设计，操作人员同一工位完成放件和取件作业。需详细规划工作站的各项资源，以达到焊接机器人生产能力利用最大化。以生产企业车间焊接区域的位置和占地面积为约束条件，综合考虑不同型号播种机机架的规格尺寸，确定工作站的结构形式，先规划焊接机器人和产品的空间位置，进而规划焊接机器人柔性工作站内其他资源的位置，以达到柔性化生产。本文所涉及的播种机机架柔性工作站在保证机器人焊接可达性和人机作业良好的前提下，尽量使工作站内各资源布局紧凑，以达到面积利用率最大。

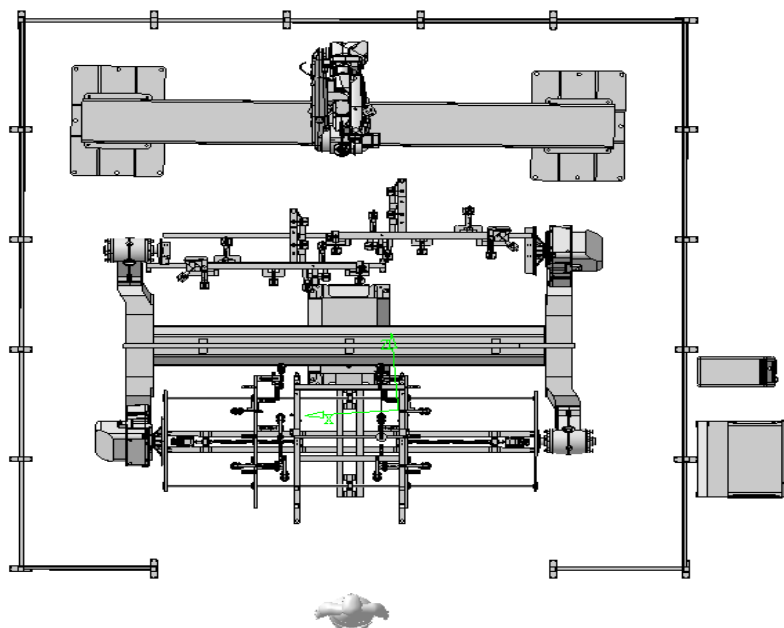


图 3-5 播种机机架柔性工作站布局图

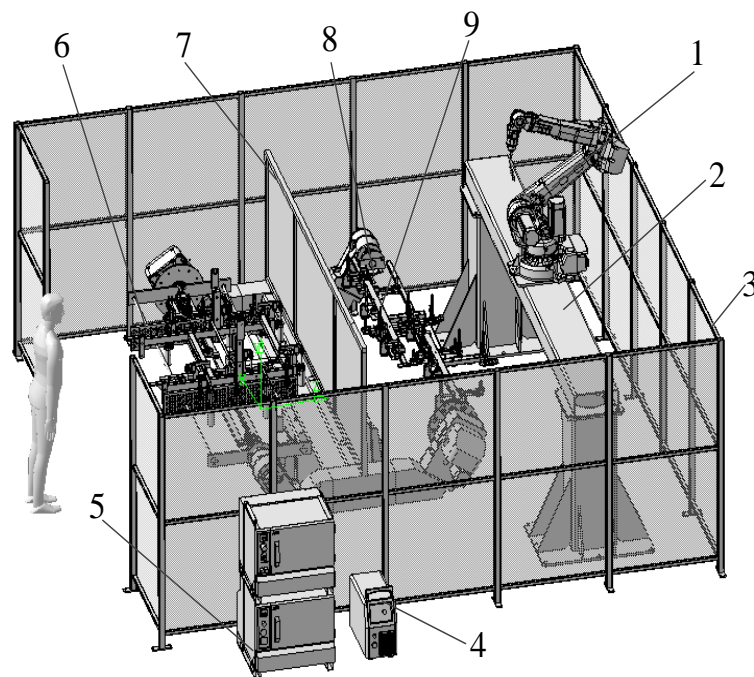
Fig. 3-5 Seeder Rack flexible workstation layout

其中，机器人安装在龙门架上，根据结构件焊接作业要求，焊接机器人工作最小作业半径不小于 1774mm；为满足同一工作站对播种机机架边梁和框架的焊接，选用三轴变位机，一侧进行播种机机架边梁装夹，另一侧进行播种机机架总成装夹；为了实现对不同型号尺寸的播种机机架进行焊接，在方案设计转产时，播种机机架总成中的左右边梁可随夹具做 X 方向自由运动范围不小于 675mm。

装夹属于较精密作业，且播种机机架尺寸较大，因此工人采用立姿作业。考虑到工人站立作业的高效舒适性，依据立姿作业工作面舒适高度标准，焊接工作台装夹工作面距地高度设计为 980mm。

3.2.2 焊接机器人工作站结构

播种机机架焊接机器人工作站的结构（如图 3-6）包括焊接机器人、焊接夹具、三轴变位机、围栏、焊接电源和控制系统等。本工作站采用单机器人单工位的作业规划方式。由于工件焊缝主要为角焊缝，且工件焊缝不集中，分布位置复杂，因此将焊接工件放在与机器人协调运动的三轴变位机上，进而对其进行焊接作业。本工作站的边梁焊接采用手动夹具，机架总装焊接采用气动夹具，当工人上件后，退回到工作安全区，按下控制器上的焊接按钮进行焊接。



1 机器人 2 机器人底座 3 围栏 4 焊接电源 5 控制柜 6 播种机边梁 7 三轴变位机
8 焊接夹具 9 播种机机架

图 3-6 机器人工作站

Fig.3-6 Welding robot workstation

总体规划播种机机架焊接在焊接工作站上的焊接作业，将左、右边梁总成组件在变位机一侧平台上装夹好→变位机沿着一轴水平旋转 180° →焊接机器人起弧作业，同时在变位机另一侧平台上装夹播种机机架总成→左、右边梁焊接完成，变位机沿着一轴水平旋转 180° ；焊接机器人起弧作业进行播种机机架总成焊接，工人进入工作站将焊接完成的左、右边梁取下，完成一个焊接循环。当焊接播种机机架型号变化时，总装变位机随着导轨移动到设定坐标点，焊接同时导轨、变位机与机器人相协调。

3.3 工作站制造资源规划

3.3.1 焊接工作站夹具方案设计

焊接夹具设计是规划生产准备的重要内容之一，是焊接工作站的重要组成部分，一套设计优良的焊接夹具对生产效率和产品质量有直接影响。焊接夹具是定位待焊件位置、防止焊接变形、保证焊接精度和产品质量的重要措施。合理的设计结构形式有利于工人的上下件工作，工件焊接位置高度距离地面为 $750-1000\text{ mm}$ ，符合人机工效学要求；焊接夹具要具有一定柔性，适用 2MBJ 系列 4 中不同播种机机架的焊接任务，且可快速可调。

设计定位元件限制工件的自由度，实现夹具的精准定位。工件在空间具有六个自由

度，即沿 x 、 y 、 z 三个直角坐标轴方向的移动自由度和绕这三个坐标轴的转动自由度。因此，要准确对工件定位，需消除这六个自由度，通常用六个定位元件来限制工件的六个自由度，其中每一个支承点限制相应的一个自由度。

(1) 播种机机架边梁焊接夹具

考虑到播种机机架边梁待焊零部件较多，待焊件主要为矩形管和板材，定位孔较少，采用手动夹具对待焊件的定位更有保障。

本套焊接夹具（如图 3-7）主要有支撑底板、垂直式铰链——杠杆夹紧器、推拉式快速水平夹紧器等构成。应用六点定位原理将工件的六个自由度全部限制在夹具中确定的位置，定位主要以支撑底板和挡铁限制。夹紧由夹紧器完成，夹紧装置采用手动快速夹紧，动作快速且维护方便。侧向夹紧采用推拉式快速水平夹紧器，垂直方向夹紧采用垂直式铰链——杠杆夹紧器，夹紧器压紧头部为平底橡胶压头，橡胶压头产生的弹性力阻碍工件的变形，防止了焊接工件上翘。

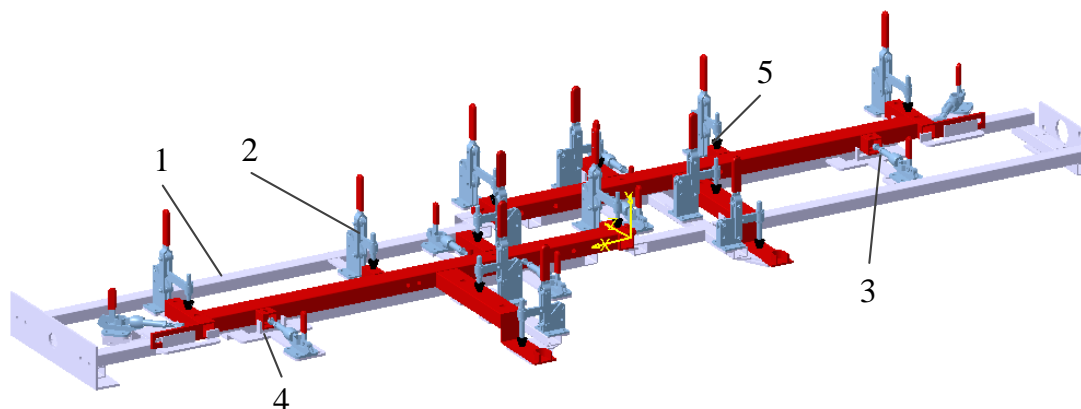


图 3-7 边梁焊接夹具方案

1 支撑底板 2 垂直式铰链-杠杆夹紧器 3 推拉式快速水平夹紧器 4 挡铁限制 5 平底橡胶压头

Fig. 3-7 Edge beam welding fixture program

四连杆竖杆总成卡具方案（如图 3-8），采用模块化的设计理念，可满足两种四连杆竖杆总成的在同一平台快速转产换装的要求。在四连杆竖杆总成结构一转换为结构二焊接作业时，将夹紧器螺栓拧开，在夹紧器下安置可拆卸定位块，并把螺栓拧紧，最后重新调整夹紧器压头至相应高度。

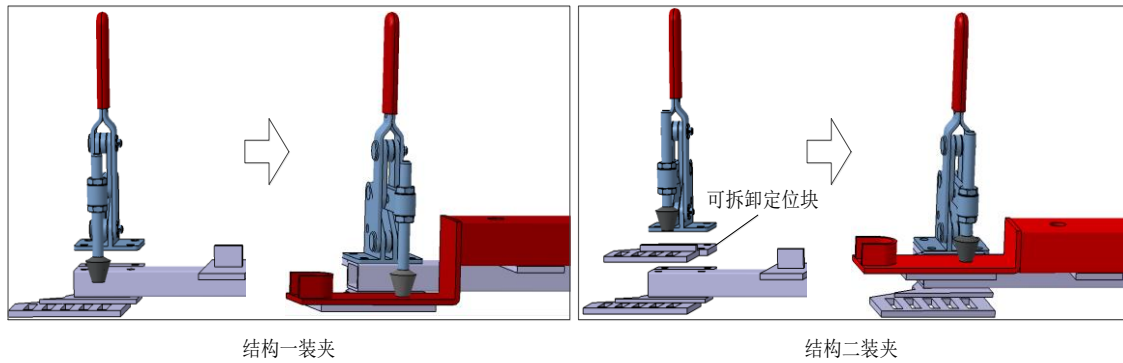
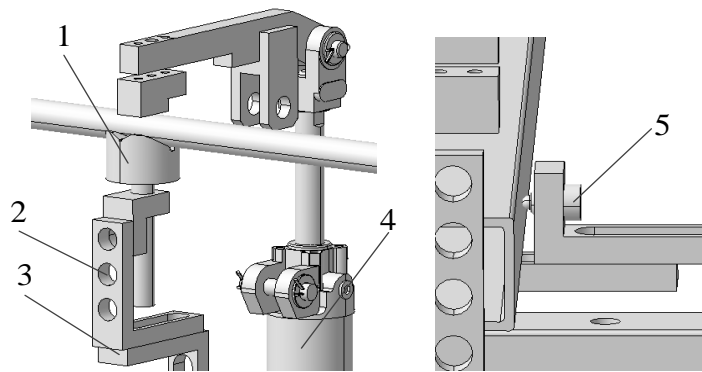


图 3-8 四连杆竖杆总成卡具方案

Fig. 3-8 Four-link vertical rod assembly clamping program

(2) 播种机机架总成焊接柔性夹具方案

播种机机架总成焊接柔性夹具采用标准化、系列化和通用化的孔隙组合式夹具（如图 3-9），可满足不同型号播种机机架总成的装夹。夹具是由基础件、支撑件、定位件和导向件等组成，挡膜杆采用 V 型定位块，边梁、前梁和后梁采用定位板，支撑件采用框式支撑座、角型连接块和伸长期。夹紧装置采用自动复位顶针和气缸，使变位机翻转时工件保持固定，并克服焊接变形。

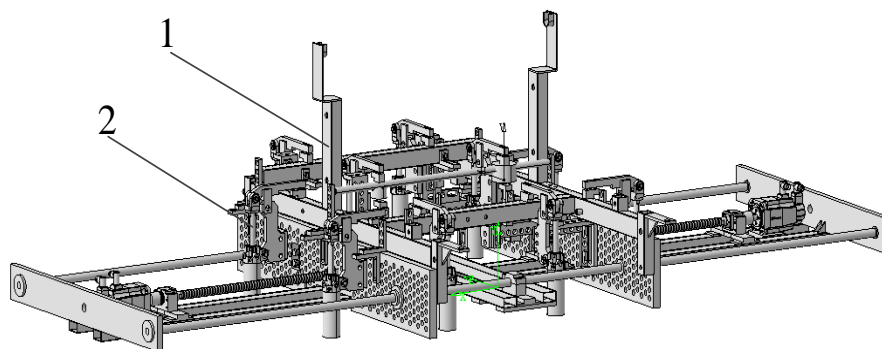


1 V 型定位块 2 孔隙组合式夹具 3 角型连接块 4 气缸 5 复位顶针

图 3-9 焊接夹具 V 型定位块和夹紧装置

Fig. 3-9 V-welding jig positioning block and clamping device

设计播种机机架边梁焊接夹具方案（如图 3-10），焊接夹具与焊接机器人控制系统相联，工人上件完成离开工作站后，气缸收到控制动作命令闭合。



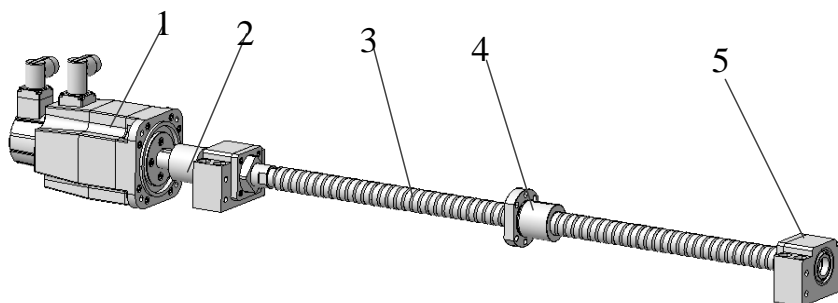
1 播种机机架 2 焊接夹具

图 3-10 播种机机架边梁焊接夹具方案

Fig. 3-10 Seeder rack beam welding fixture program

播种机机架总成焊接中的边梁夹具可沿滚珠丝杠自由移动，实现位置调节，调节范围 1350 mm，以满足不同型号播种机机架总成的焊接要求。

确定滚珠丝杠及电机（如图 3-11），实现焊接夹具精准平稳移动。根据播种机机架焊接快速转产的需求，以及焊接机器人作业的精度要求，滚珠丝杠的支承选用适用于高转速、高精度的固定——固定式。



1 电机 2 联轴器 3 丝杆 4 螺母 5 固定支承

图 3-11 滚珠丝杠和电机传动图

Fig. 3-11 Figure ball screw and motor drive

滚珠丝杠和电机的确定如下：

1) 滚珠丝杠确定

根据电机最高转速和夹具总成最大移动速度，计算滚珠丝杠副导程：

$$D = \frac{U_{\max}}{k \cdot n_{\max}} \quad (3-10)$$

D ——滚珠丝杠副导程， mm ；

U_{\max} ——夹具总成最大移动速度， m/min ；

n_{max} ——电机最高转速, r/min ;

k ——传动比。

驱动电机选择松下 MDMA152P1V, 松下 MDMA152P1V 最高转速为 $n_{max}=1500r/min$ 。因为电机与滚珠丝杠直联, $k=1$ 。夹具总成最大移动速度 $U_{max}=12.5m/min$ 。计算得到滚珠丝杠导程为 8.34 mm , 取 $D=10\text{ mm}$ 即可满足作业需求。

①当量载荷及当量转速计算

$$F_0 = \mu_0 \cdot M \cdot g + f \quad (3-11)$$

$$F_m = \frac{2F_{max} + F_{min}}{3} \quad (3-12)$$

$$n_m = \frac{n_{max} + n_m}{2} \quad (3-13)$$

式中:

F_0 ——滚珠丝杠载重时的静摩擦力, N ;

μ_0 ——滑动摩擦系数;

M ——载重质量, kg ;

g ——物体所受重力加速度, N/kg ;

f ——滑块的密封阻力, N ;

F_m ——当量载荷, N ;

n_m ——当量转速, rpm 。

滚珠丝杠载重时的静摩擦系数为取 0.006, 在 CATIA 中通过定义播种机机架总成夹具材料, 得到载重质量 $M=79.936\text{ kg}$, 如图 3-12 所示。滑块密封所受的阻力每个为 5 N , 按 2 个滑块密封计算得到滚珠丝杠载重时的静摩擦力 $F_0=14.7\text{ N}$ 。

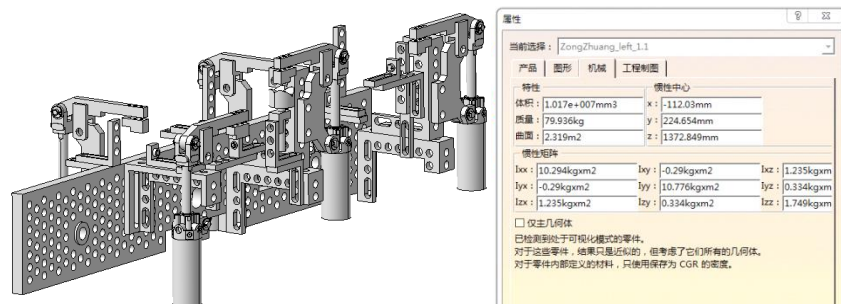


图 3-12 播种机机架总成夹具质量

Fig. 3-12 Seeder rack assembly jig quality

滚珠丝杠旋转状态时滑块做水平轴方向的往复运动，无垂直方向的切削力作用，且无冲击载荷作用，因此滚珠丝杠载重时所受阻力的主要成分为摩擦力，即如上所述，计算得到滚珠丝杠副的当量载荷 $F_m \approx F_0 = 14.7N$ ，滚珠丝杠副的当量转速为 375 rpm 。

②计算滚珠丝杠副的螺纹底 X:

$$L \approx (1.1 \sim 1.2) \cdot l + (10 \sim 14) \cdot P_h \quad (3-14)$$

$$d_{2m} \geq 0.039 \sqrt{\frac{F_o L}{1000 \delta_m}} \quad (3-15)$$

L ——滚珠螺母至滚珠丝杠固定端支承的最大距离。

已知水平方向运动的行程为 $l = 1200mm$ ，则固定支承间的最大距离为 1580 mm 。滚珠丝杠副的当量载荷 $F_0 = 14.7N$ ，滚珠丝杠采用轴向两端固定的方式，则有滚珠丝杠副的螺纹底 X $d_{2m} \geq 3.0mm$ 。

③确定滚珠丝杠副规格代号

根据丝杠的 C_{am} 、丝杠底 X $d_{2m} \geq 3.0mm$ 和基本导程 $P_h = 10 \text{ mm}$ 选择双螺母内循环式滚珠丝杠，其精度等级为 2 级，型号为 FYND6310-4。

2) 电机选择

伺服电机选择松下 NAS A4 系列 MDMA152P1V 型中惯量电机，其额定功率为 $1.5KW$ ，额定转矩为 $7.15 \text{ N} \cdot m$ ，电机惯量 JM 为 $0.00123 \text{ kg} \cdot m^2$ ，已知水平方向运动工作台质量为 79.936 kg 。

①外部负荷的转动惯量

$$J_1 = \frac{1}{2} m \cdot r^2 \quad (3-16)$$

$$J_L = J_1 + m \cdot \left(\frac{P_h}{2\pi}\right)^2 \quad (3-17)$$

$$J = J_L + J_M \quad (3-18)$$

J_1 ——丝杠的转动惯量；

J_L ——外部负荷的转动惯量；

J ——电机的转动惯量。

根据所选电机的基本参数，可以得到电机的转动惯量为 $0.02 \text{ kg} \cdot m^2$ 。

②外部负荷产生的摩擦扭矩

$$T_p = \frac{F \cdot P_h}{2\pi \cdot \eta} \times 10^{-3} \quad (3-19)$$

P_h ——滚珠丝杆副的导程；

η ——滚珠丝杆副未预紧时的效率；

F ——外加轴向载荷。

精度为 2 级时，滚珠丝杆副未预紧时的效率 $\eta=0.9$ ，外部负荷产生的摩擦扭矩 $T_p=0.19 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

③预紧力产生的摩擦扭矩

$$F_p = F_{\max} / 3 \quad (3-20)$$

$$T_D = \frac{F_p \cdot P_h}{2\pi} \cdot \frac{1-\eta^2}{\eta^2} \times 10^{-3} \quad (3-21)$$

F_p ——滚珠丝杆副间的预紧力

T_D ——预紧力产生的摩擦扭矩

由上文已知 $F_{\max}=108.2 \text{ N}$ ，得到滚珠丝杆副间的预紧力 $F_p=36.07 \text{ N}$ ，进而得到预紧力产生的摩擦扭矩 $T_D=0.013 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

④电机总扭矩

$$t = \sqrt{\frac{2v}{a}} \quad (3-22)$$

$$T_j = J \cdot \frac{2\pi(n_2 - n_1)}{60 \cdot t} \quad (3-23)$$

$$T_m = T_p + T_D + T_j + T_b \quad (3-24)$$

水平方向工作台运动速度为 $v=25 \text{ mm/s}$ ，其对应电机转速 $n_2=150 \text{ rpm}$ ，最大加速度为 $a=40 \text{ mm/s}^2$ ，工作台速度从 0 升至 25 mm/s 所需时间为 1.25 s ，当电机转速从 $n_1=0$ 升至 $n_2=150 \text{ rpm}$ 时，其负荷扭矩 $T_j=0.25 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。最后得到电机总扭矩 $T_m=0.69 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，所选择的松下 NAS A4 系列 MDMA152P1V 型中惯量电机额定扭矩为 $7.15 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，大于计算电机总扭矩 2 倍以上，所选择电机扭矩符合要求。

3.3.2 焊接机器人选择

根据 6000 套/生产期的播种机机架焊接生产纲领，按照人工 9 个/天的焊接效率至少需要四名焊接工人同时作业，一个生产期的人工支出为 14.4 万，人工成本较高；人工焊

接存在的质量问题阻碍着播种机机架产品的稳定。因此，需要采用新的焊接工艺取代当前人工焊接，目前，较广泛应用的焊接工艺方法有：机器人焊接、自动焊机焊接、悬挂点焊机焊接、固定点焊机焊接等。

播种机机架的焊缝分散在空间体内，有翻转焊接作业需要。由焊接件自身和其它资源的结构形式，进枪角度受到限制，焊枪的姿态多变，对比六轴机器人焊接、固定电焊机焊接、自动焊机焊接等适应性分析，最终选择六轴弧焊机器人，焊接机器人适用于重复性高、劳动密集生产、多品种小批量频繁作业转换的作业。

播种机机架的焊缝均需弧焊，因此选择弧焊机器人。2 MBJ 系列 4 种播种机机架中左右边梁间距最大计算，焊缝分布的区域半径为 1746 mm，并综合考虑了，所以选择的焊接机器人工作半径需大于 1746 mm，因此选用 ABB 公司的 IRB2600ID-8/2.00 型工业机器人，其作业半径为 2000 mm，有效负载为 8 kg，如图 3.13 所示为机器人工作范围及活动空间，IRB2600ID-8/2.00 型工业机器人的主要技术参数如表 3-11 和表 3-12 所示。

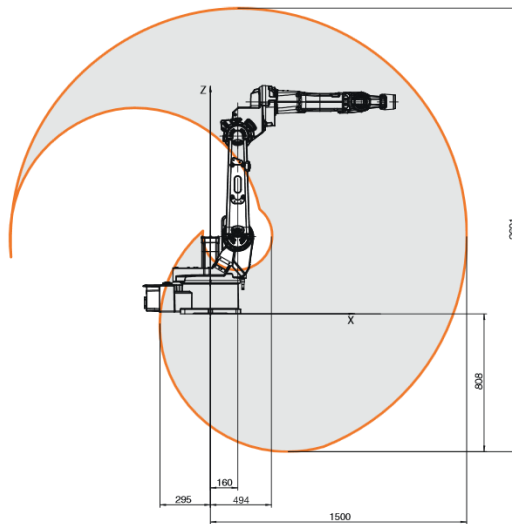


图 3-13 机器人工作范围及活动空间

Fig.3.13 Work scope and activity space of robot

表 3-11 机器人运动范围及速度限制

Table3-11 The robot movement range and the speed limitation

轴运动	工作范围		最高速度
	Lower Limit	Upper Limit	
轴 1	-180 °	+180 °	175 % s
轴 2	-95 °	+155 °	175 % s
轴 3	-180 °	+75 °	175 % s

轴 4	-175°	+175°	360 % s
轴 5	-120°	+120°	360 % s
轴 6	-400°	+400°	500 % s

表 3-12 机器人主要性能指标

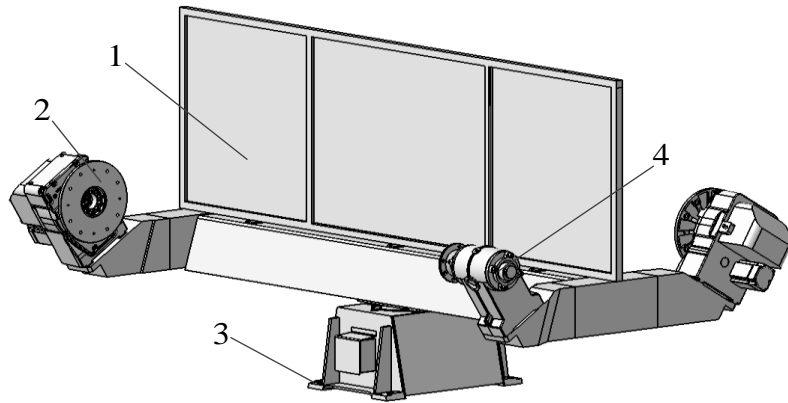
Table 3-12 Main performance indicators of robot

性能指标	数据
有效载荷	8kg
手臂载荷	15kg
到达距离	2.00m
轴 数	6
重复定位精度 (RP)	0.023~0.026mm
重复循环精度 (RT)	0.027~0.30mm
安 全	带监控, 急停和安全功能的双回路, 3 位气动装置

注: 重复定位精度 (RP) 和重复循环精度 (RT) 性能根据 ISO 9283 标准测定。

3.3.3 焊接变位机选择

为满足播种机机架不同位置的焊接要求, 实现焊接过程中将待焊件的翻转变位, 使焊接机器人获得最佳的焊接位置, 需工作站的变位机进行选择。播种机机架焊接机器人柔性工作站采用 ABB 公司的三轴变位机 (如图 3-13)。变位机的回转采用与机器人联动的交流伺服电机控制, 配合机器人在任意转动角度完成焊接动作, 转动速度随系统自动调整, 变位机可调角度范围为 $\pm 180^\circ$; 驱动精度高。选择的变位机能够使焊接机器人获得最佳的焊接姿态, 充分发挥焊接机器人的功效。



1 光屏 2 头座 3 底座 4 尾座

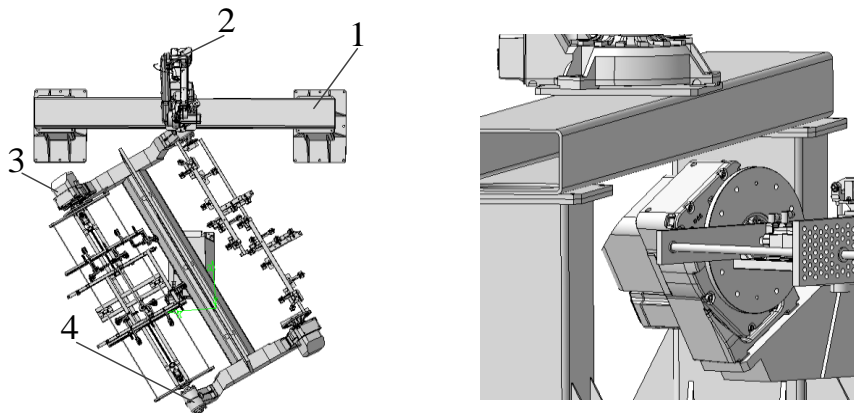
图 3-13 IRBP K 型翻转变位机

Fig. 3-13 IRBP K- type turning positioner

为减小焊接弧光和烟雾对人体的危害。使用光屏隔开水平轴间的变位机，工人和机器人分别位于两边，实现机器人焊接工作和工人装夹工件及卸料工作的同时进行。

3.3.4 机器人底座方案设计

为避免变位机旋转时与机器人底座碰撞干涉问题，并使机器人成本投入最小化，需对龙门架式底座方案进行设计（如图 3-14）。根据播种机机架柔性工作站的设计要求，需满足不同膜宽播种机机架的焊接，膜宽最长为 2100 mm，而随着焊接范围的增大，将会引起变位机旋转时与机器人底座碰撞干涉问题，从而导致对机器人臂长的要求更长，机器人选型时需要选择型号就更大，机器人的投入成本也会随之增加。将焊接机器人安装在龙门架式底座上（如图 3-14），并设计龙门架式底座横梁下底面的高度大于变位机头座的高度，使变位机旋转时，头座从龙门架式底座的横梁下穿过。此方案既满足焊接机器人的正常工作，又避免变位机旋转时出现的碰撞干涉现象，且能够实现成本最小化。



1 焊接机器人 2 龙门架底座 3 变位机头座 4 变位机尾座

图 3-14 龙门架与变位机相对位置图

Fig. 3-14 The relative position between Gantry and Positioner

3.4 操作人员作业时间研究

预置时间系统 (Predetermined Time System, PTS) 是标准时间制定的通用性技术方法, PTS 法将工人作业划分为若干个基本动作, 对基本动作时间制定标准, 形成一套对工人动作预期的时间进行评价的技术方法。通过 PTS 法, 无需使用秒表测时法即可对预定作业时间进行评价, 提高了标准时间预设的效率。PTS 法根据不同的基本动作划分方式又分为 MTA 法、WF 法、MTM 法、MOD 法等。MOD 法是澳大利亚 G.C.Heyde 博士于 1966 年提出, 他在长期而大量的实验研究基础上, 将人的作业动作划分为由共同基本动作组成的动作内容, 对工人身体的不同作业部位, 用时长短各有区别。较其他 PTS 法, MOD 法易学易用, 且实用方便。

MOD 法由 21 种基本作业动作组成, 以手指动作一次 (移动距离 2.5 cm) 的时间消耗值为标准来确定各动作的时间值。MOD 法的 21 个动作的分类及表示符号 (见表 3-13)。

表 3-13 模特法的标准动作时间表

Table 3-13 Standard action schedule based on Model method

动作内容	符号	模数	动作内容	符号	模数	
手指动作	M1	1	蹬踏动作 (单)	F3	3	
上肢 移动 动作	手腕动作	M2	2	行走动作	W5	5
	小臂动作	M3	3	目视	E2	2
	大臂动作	M4	4	矫正	R2	2
	伸直手臂的动作	M5	5	其 判断与反应	D3	3
抓握 动作	碰触、接触	G0	0	它 按下	A4	4
	简单的抓取	G1	1	旋转动作	C4	4
	复杂的抓取	G3	3	弯腰站起 (往复)	B17	17
放置 动作	简单的放置	P0	0	起身坐下 (往复)	S30	30
	复杂的放置	P2	2	附加 重量因素 (负重 因素 动作)	L1	1
	组装	P5	5			

在 MOD 法中模数对应的时间值在实际使用中受多个因素影响, 包括动作幅度、作业熟练程度和一些特定情况等。根据经验给出了模数的单位时间值 (见表 3-14)。

表 3-14 MOD 的单位时间值
Table3-14 Unit time value of the MOD

MOD 值	熟练程度	说明
1MOD=0.129 秒	正常值	能量消耗最小的动作
1MOD=0.100 秒	高效值	熟练工人的稳定动作时间值
1MOD=0.143 秒	疲劳值	包括恢复疲劳时间的 10.75% 在内的动作时间
1MOD=0.120 秒	快速值	比正常值快 7% 左右

播种机机架焊接工作站预定动作时间分析时，以操作人员上下件分别以各工位为研究对象，运用 MOD 法对操作人员的左、右手动作进行记录，绘制双手操作动作因素分析表，并进行 MOD 分析，计算 MOD 值。

选择一般熟练的正常值作为播种机机架焊接机器人工作站人员作业的时间单位，即 1 MOD=0.129 秒。由表 3-15、表 3-16 可知播种机机架总成、边梁焊接上下料 MOD 值分别为 400 MOD 和 447 MOD，即其分别对应的预定作业时间为 52 秒和 58 秒。

表 3-15 播种机机架总成焊接上下件动作因素分析表

Table 3-15 Action factors analysis of loading and unloading materials for seeder rack assembly welding

左手动作		时间			右手动作	
动作叙述	分析值	次数	MOD 值	次数	分析值	动作叙述
行走至变位机	W5	3	35	3	W5	行走至变位机
抓取框架	M4G1		5		M4G1	抓取框架
移至成品区	W5 3L1	6	48	6	W5 3L1	移至成品区
走向待存区	W5	4	20	4	W5	走向待存区
抓取边梁 1	M4G1		5		M4G1	抓取边梁 1
拿到装卡处	W5L1	6	36	6	W5L1	拿到装卡处
装入工装	M4P5		9		M4P5	装入工装
走向待存区	W5	6	30	6	W5	走向待存区
抓取边梁 2	M4G1		5		M4G1	抓取边梁 2
拿到装卡处	W5L1	6	36	6	W5L1	拿到装卡处
装入工装	M4P5		9		M4P5	装入工装
走向待存区	W5	6	30	6	W5	走向待存区
抓取前梁	M4G1		5		M4G1	抓取膜杆

返回装卡处	W5	5	25	5	W5	返回装卡处
前梁装入工装	M4P5		9		BD	等待
等待	BD		9		M4P5	膜杆装入工装
走向待存区	W5	6	30	6	W5	走向待存区
抓取后梁	M4G1		5		BD	等待
返回装卡处	W5	5	25	5	W5	返回装卡处
后梁装入工装	M4P5		9		H	持件
退出工作站	W5	3	15	3	W5	退出工作站
合计	-	-	400	-	-	-

表 3-16 播种机机架边梁焊接上下件动作因素分析表

Table 3-16 Action factors analysis of loading and unloading materials for seeder rack edge beam welding

动作叙述	左手动作 分析值	时间				右手动作 动作叙述
		次数	MOD 值	次数	分析值	
拉移动货架至工装旁	W5 2L1	6	42	6	W5 2L1	拉移动货架至工装旁
打开夹紧器	M4G1A4	9	81	9	M4G1A4	打开夹紧器
抓取边梁 1	M4G1		5		M4G1	抓取边梁 1
放置边梁 1	M4P2		6		M4P2	放置边梁 1
抓取边梁 2	M4G1		5		M4G1	抓取边梁 2
放置边梁 2	M4P2		6		M4P2	放置边梁 2
抓取大覆土安装座 1	M4G1		5		M4G1	抓取侧梁 1
大覆土安装座 1 装入工装	M4P2		6		M4P2	侧梁 1 装入工装
持件	H		8		M3G1A4	闭合夹紧器 1
持件	H		8		M3G1A4	闭合夹紧器 2
抓取大覆土弹簧压板 1	M4G1		5		M4G1	抓取通用三角加强筋 1
大覆土弹簧压板 1 装入工装	M4P2		4		M4P2	通用三角加强筋 1 装入工装
闭合夹紧器 3	M3G1A4		8		H	持件
抓取整体花兰安装座 1	M4G1		5		M4G1	抓取小覆土安装座 1

整体花兰安装座 1 装入工装	M4P2	6	M4P2	小覆土安装座 1 装入工装
闭合夹紧器 4	M3G1A4	8	H	持件
持件	H	8	M3G1A4	闭合夹紧器 5
抓取四连杆连接架 1	M4G1	5	M4G1	抓取薄膜支架总成 1
四连杆连接架 1 装入工装	M4P2	6	M4P2	薄膜支架总成 1 装入工装
持件	H	8	M3G1A4	闭合夹紧器 6
持件	H	8	M3G1A4	闭合夹紧器 7
抓取开沟圆盘安装座 1	M4G1	5	M4G1	抓取推土板安装座竖管 1
开沟圆盘安装座 1 装入工装	M4P2	6	M4P2	推土板安装座竖管 1 装入工装
持件	H	8	M3G1A4	闭合夹紧器 8
持件	H	8	M3G1A4	闭合夹紧器 9
抓取侧梁 2	M4G1	5	M4G1	抓取大覆土安装座 2
侧梁 2 装入工装	M4P2	6	M4P2	大覆土安装座 2 装入工装
持件	H	8	M3G1A4	闭合夹紧器 10
闭合夹紧器 11	M3G1A4	8	H	持件
抓取通用三角加强筋 2	M4G1	5	M4G1	抓取大覆土弹簧压板 2
通用三角加强筋 2 装入工装	M4P2	6	M4P2	大覆土弹簧压板 2 装入工装
持件	H	8	M3G1A4	闭合夹紧器 12
持件	H	8	M3G1A4	闭合夹紧器 13
抓取小覆土安装座 2	M4G1	5	M4G1	抓取整体花兰安装座 2
小覆土安装座 2 装入工装	M4P2	6	M4P2	整体花兰安装座 2 装入工装
持件	H	8	M3G1A4	闭合夹紧器 14
闭合夹紧器 15	M3G1A4	8	H	持件
抓取薄膜支架总成 2	M4G1	5	M4G1	抓取四连杆连接架 2
薄膜支架总成 2 装入工装	M4P2	6	M4P2	四连杆连接架 2 装入工装
闭合夹紧器 16	M3G1A4	8	H	持件
闭合夹紧器 17	M3G1A4	8	H	持件
抓取推土板安装座竖管 2	M4G1	5	M4G1	抓取开沟圆盘安装座 2
推土板安装座竖管 2 安装	M4P2	6	M4P2	开沟圆盘安装座 2 装入工装

持件	H	8	M3G1A4	闭合夹紧器 18	
闭合夹紧器 18	M3G1A4	8	H	持件	
移动货架至暂存区	W5 2L1	6	42	6 W5 2L1	移动货架至暂存区
合计	-	-	447	-	-

章节 2.4 中计算生产节拍时间为 734 s，播种机机架总成、边梁焊接上下料时间没有超过生产节拍时间，因此该工作站配置一名操作工人，完成上料、卸料和监控焊机机器人柔性工作站的工作。

3.5 播种机机架焊接路径规划

3.5.1 焊接路径规划问题描述

焊接路径规划是典型的旅行商问题（Traveling Salesman Problem，简称 TSP），旅行商问题是经典的 NP 难题，每历经一个焊点会留下信息素，其他蚂蚁选择下一路径时会自动选择信息素高的路径，该问题描述的是以最短的路径通过全部焊点且不得有重复 [50]。

3.5.2 焊接路径的数学模型

设焊点 i ， j 之间的距离为 d_{ij} ， t 为路径长度集合 $t = \{d_{12}, d_{23}, d_{34}, \dots, d_{ij}\}$ ， $f(t)$ 表示全部城市之间的距离倒数， $f(t)$ 越大则焊枪所走焊接路径越小，因此焊接路径优化的目标函数为：

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3-25)$$

$$f(t) = \max \left(\sum_{i,j=1}^n d_{ij} \right)^{-1} \quad (3-26)$$

约束条件：

$$\begin{cases} i < j \leq n \\ i \neq j \end{cases} \quad (3-27)$$

3.5.3 焊接路径的蚁群算法

对播种机机架焊接路径规划的旅行商问题求解可以借助启发式算法，如遗传算法、蚁群算法、神经网络等。蚁群算法是模拟蚂蚁在自然界中寻找食物过程中总是能寻找到一条最佳路径，在往来食物点和蚁巢之间。蚁群的这种行为选择方式为求解焊接路径规划问题提供了一个新的途径。蚁群算法采用分布式并行计算方式，与其他方法易于交互协作运算，且具有强的鲁棒性，是求解旅行商问题的理想方法之一。

蚁群算法在求解旅行商问题时，首先初始化蚁群，确定蚁群中蚂蚁的数量，焊缝之间的信息素坐标矩阵。设置禁忌表来记录每只蚂蚁经过的焊缝，蚂蚁在一次循环中不能重复经过已走过的焊缝。当一次循环结束后，禁忌表储存蚂蚁经过的路径和路径的长度。设置焊缝表来记录蚂蚁已访问过的焊缝和待访问的焊缝。把蚁群在本次循环中所走最小路径长度的作为本次循环的最短路径，找到最短路径的位置，即最短路径是第几只蚂蚁或哪几只蚂蚁走出来的，把第一个走出最短路径的蚂蚁在本次循环中所走的路径作为本次循环中的最优路径，同时对本次循环中蚁群所走路径的平均长度进行计算。更新信息素，至此把蚁群在本次循环中在所有路径上释放的信息素已经累加上去。禁忌表清零，为下一次循环做准备。如图 3-15 所示为蚁群算法流程图。

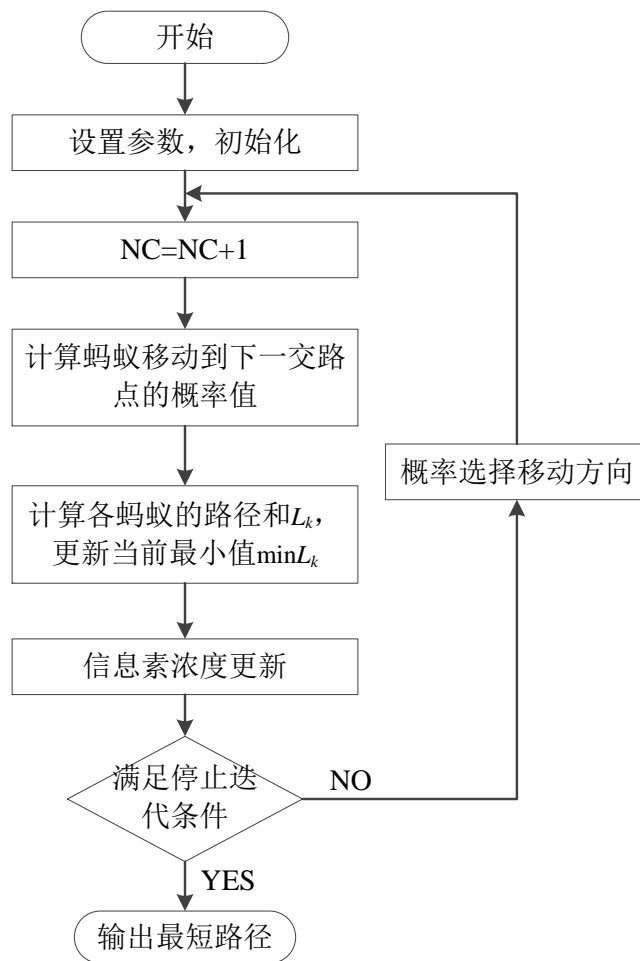


图 3-15 蚁群算法流程图

Fig. 3-15 Ant colony algorithm flowchart

(1) 初始化

初始化蚁群，因蚁群算法迭代次数超过 1000 后，仿真结果基本无差，所以设定算法迭代的次数 $Nc_max=1000$ ，在 $t=0$ 时，循环次数计数器 $NC=0$ ，设定每条路径上的

信息量初值 $\tau_{ij}(0) = C$ (c 为常数), 在 $\Delta\tau_{ij} = 0$ 将 m 只蚂蚁放在 n 个焊缝上, 为使求解模型简化, 设定 $m = n$ 。设定路径上信息素的衰减系数 $\rho = 0.5$, 蚂蚁释放的信息素量 $Q = 100$ 。在模型中 `tabu_list` 来记录蚂蚁已经走过的焊缝, 蚂蚁在本次循环中将不能再经过这些焊缝, 用 `city_remained` 表示待访问的焊缝。

变量初始化, 用 n 表示焊缝的个数, 即焊缝路径规划的规模, 用 d_{ij} 表示焊缝 i, j 之间的距离:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3-28)$$

初始化各次循环的最短路径 `routh_best`, 各次循环最短路径的长度 `length_best` 和各次循环所有路径的平均长度 `length_average`。

(2) 状态转移

初始时刻每条路径上的信息量初值 $\tau_{ij}(0) = c$ (c 为常数), 随着蚂蚁的运动, 经过 t 个时刻后, 路径 i, j 上的信息量改变为:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{当第} k \text{只蚂蚁经过} i, j \text{时} \\ 0 & \text{当不经过时} \end{cases} \quad (3-29)$$

$\Delta\tau_{ij}^k$ ——在本次循环中第 k 只蚂蚁在焊缝 i, j 上残留的信息量;

$\Delta\tau_{ij}$ ——本次循环中蚁群在焊缝 i, j 上残留的信息总量;

L_k ——本次循环中第 k 只蚂蚁的路径和。

通过焊缝 i, j 上残留的信息量, 经过 t 个时刻后, 在 `city_remained` 中搜索和选择要行走的下一个焊缝, 完成后更新 `tabu_list` 和 `city_remained`, 最终使所有的焊缝不重复的行走一次。计算第 k 只蚂蚁从焊缝 i 移动至焊缝 j 所走过路程和 L_k , 并更新最小路径。

对蚂蚁路径选择和位置转移概率的计算:

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s \in allowed_k} \tau_{is}^\alpha \eta_{is}^\beta(t)} & j \in allowed_k \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3-30)$$

p_{ij}^k ——第 k 只蚂蚁由位置 i 转移到位置 j 的概率;

$\tau_{ij}(t)$ ——在 t 时刻焊缝 i, j 之间的信息素浓度。

定义启发式因子 $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$, 表示从焊缝 i, j 之间的可见度。当 d_{ij} 越小, η_{ij} 越大,

焊缝 i, j 被选中的可能性更大。第 k 只蚂蚁在运动过程中, 根据公式 4 确定的转移概率, 确定第 k 只蚂蚁的下一步移动目标焊缝 j , 将第 k 只蚂蚁从焊缝 i 移动到焊缝 j , 并将 j 从 `city_remained` 集合中转移到集合 `tabu_list`。计算蚂蚁各次循环的最短路径 `routh_best` 和各次循环最短路径的长度 `length_best`, 并与上一周期进行比较, 对 `routh_best` 和 `length_best` 更新。

(3) 信息素浓度更新

对每条焊缝 i, j 上的信息残留量更新, 首先计算蚂蚁总数:

$$m = \sum_{i=1}^n b_i(t) \quad (3-31)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad (3-32)$$

$b_i(t)$ —— t 时刻位于焊缝 i 的蚂蚁数量;

m ——蚂蚁的数量;

n ——焊缝的数量。

蚁群的数量为 t 时刻时位于全部焊缝的蚂蚁数量之和, 对每条焊缝 i 到焊缝 j 设定蚁群的初始残留信息总量 $\Delta\tau_{ij} = 0$, 根据每次迭代的进行, 对 $\Delta\tau_{ij}$ 实时更新。

$$\Delta\tau_{ij} = \Delta\tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}^k \quad (3-33)$$

$$\tau_{ij}(t+\lambda) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad (3-34)$$

$\tau_{ij}(t+\lambda)$ —— $t+\lambda$ 时刻焊缝 i 到焊缝 j 上的信息残留量;

ρ ——信息量的保留度。

每经过一次循环, 对每条路径的信息量浓度进行一次更新, 并求出本次循环的最短路径 $\min L_k$ 。这个过程不断重复, 直到达到最大迭代次数 Nc_max 。

检查迭代次数是否达到最大迭代次数, 若 $Nc < Nc_max$, 则蚁群继续循环, 当达到最大迭代次数, 则终止循环, 输出焊接顺序和焊接最短路径。

3.5.4 播种机机架焊接路径规划实例

播种机机架的焊缝路径规划是对称 TSP 问题, 播种机机架的焊缝为直角焊缝, 且焊缝均平行或垂直于水平面, 将播种机机架焊缝投影到二维平面中, 并确定每条焊缝的起始点, 垂直于水平面的焊缝投影点均与水平面内焊缝起点或终点重合, 因此, 用二维平面内的投影点替代三维焊缝, 简化模型的求解量, 模型求解得出的焊接路径即为最短路

径顺序，简化后的焊点坐标如表 3-17、表 3-18 和表 3-19 所示。

表 3-17 播种机机架边梁 0° 位置的焊缝坐标

Table 3-17 Seam coordinates of seeder rack beam in 0 °position

焊缝序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X 轴	0	60	60	100	100	220	260	585	615	720	780	720
Y 轴	72	67	80	0	60	60	60	0	0	60	60	380
焊缝序号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
X 轴	780	890	930	1225	1225	1088	1088	1383	1423	1533	1593	1533
Y 轴	380	0	0	0	60	279	339	279	279	339	339	659
焊缝序号	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34		
X 轴	1593	1698	1728	2053	2093	2213	2213	2253	2253	2258		
Y 轴	659	279	279	339	339	279	339	359	290	351		

表 3-18 播种机机架边梁 180° 位置的焊缝坐标

Table 3-18 Seam coordinates of seeder rack beam in 180° position

焊缝序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X 轴	0	60	60	220	585	780	780	890	1125	1088	1423	1533
Y 轴	587	647	579	599	659	599	279	659	659	380	380	320
焊缝序号	13	14	15	16	17	18						
X 轴	1533	1728	2093	2213	2313	2253						
Y 轴	0	380	320	380	308	368						

表 3-19 播种机机架总成 0° 位置的焊缝坐标

Table 3-17 Seam coordinates of seeder rack assembly in 0 °position

焊缝序号	1	2	3	4	5	6	7	8
X 轴	140	140	100	100	890	890	930	930
Y 轴	100	150	330	750	100	150	330	750

将播种机机架的边梁 0° 位置和 180° 位置的焊点坐标分别代入所列焊缝蚁群算法模型，通过 Matlab 编程工具来实现蚁群优化算法，求得焊枪所走最短路径。

设置迭代次数 1000 次，蚂蚁数量为 34 只，得到播种机机架边梁 0° 位置焊接最短路径顺序（如图 3-16）排列：31 32 34 33 30 29 28 27 26 23 22 21 20 17 16 15 14 11 10 9 8 7 6 5 2 3 1 4 12 13 18 19 24 25。

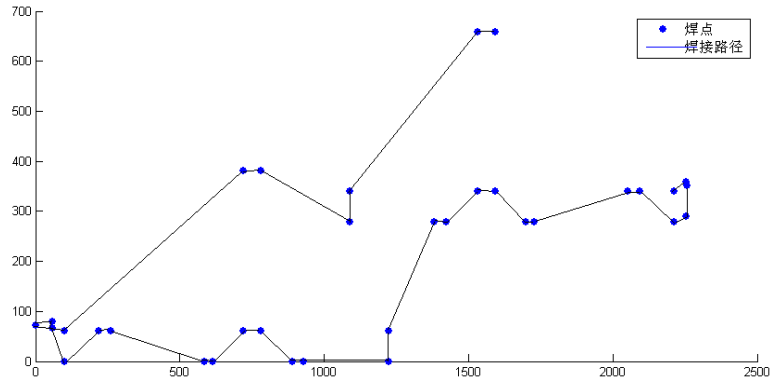


图 3-16 播种机机架边梁 0° 位置焊接最短路径

Fig. 3-16 Shortest path of seeder rack side beam welding in 0° position

设置迭代次数 1000 次，蚂蚁数量为 18 只，得到播种机机架边梁 180° 位置焊接最短路径顺序（如图 3-17）排列为：14 12 11 9 8 6 5 4 3 2 1 7 10 13 17 18 16 15。

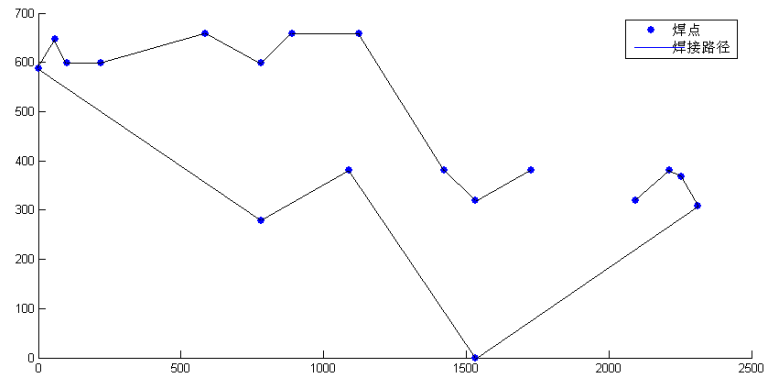


图 3-17 播种机机架边梁 180° 位置焊接最短路径

Fig. 3-17 Shortest path of seeder rack side beam welding in 180° position

设置迭代次数 1000 次，蚂蚁数量为 8 只，得到播种机机架总成 0° 位置焊接最短路径（如图 3-18）顺序排列为：8 7 6 5 1 2 3 4。

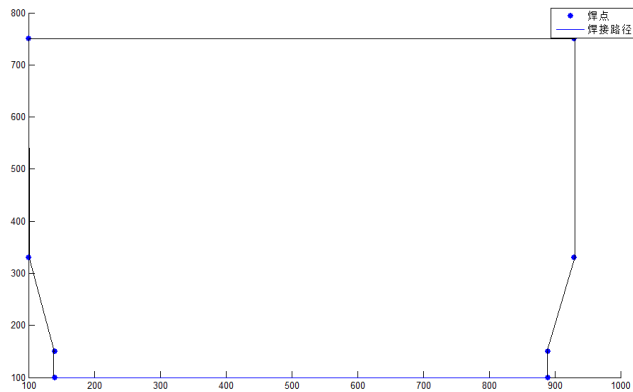


图 3-18 播种机机架总成 0° 位置焊接最短路径

Fig. 3-18 Shortest path seeder rack frame welding in 0° position

3.6 本章小结

本章针对 3 套播种机机架焊接机器人工作站总体规划方案，以工作站成本、焊接效率和占地面积为决策准则，采用 AHP 法对方案进行评价，选择方案 C₃ 为最终方案。对方案 C₃ 进行详细规划，确定工作站的结构形式，设计了播种机机架边梁和播种机机架总成的柔性工装夹具方案，合理规划了具体工作站的位置及占地面积，并计算出了夹具所涉及的滚珠丝杠和电机的具体选择参数。综合考虑播种机机架的结构、焊接工艺特点、生产效率和成本等因素，工作站采用三轴变位机，设计了龙门架式底座，以避免变位机旋转式发生的碰撞问题，选择 ABB 公司的 IRB2600ID-8/2.00 型工业机器人，并采用弧焊的焊接方式。在上述研究的基础上，确定了焊接工位配置 1 台弧焊机器人和 1 名操作工人，采用 MOD 法制定播种机机架总装焊接和边梁焊接上、下件的标准工时。最后建立焊接路径的数学模型，应用蚁群算法通过 Matlab 软件规划了播种机机架焊接机器人的焊接路径。

第四章 播种机机架焊接机器人工作站仿真研究

4.1 建模与仿真平台软件背景介绍

在焊接工作站设计中，数字化工厂仿真软件（如 DELMIA、eM-Power 等）能有效地对生产进行建模仿真，其中 DELMIA 可以在虚拟环境中实现从工艺设计到成品生产的整个流程的仿真，通过仿真模拟可发现焊接工作站设计中存在的问题^[49-53]。DELMIA 数字化仿真软件在焊接领域的应用主要体现在焊接工作站的前期工艺规划和工艺过程的仿真验证。根据虚拟焊接的特点以及虚拟焊接系统的关键技术，将焊接仿真、可达性分析等作为虚拟焊接的体系结构的重要环节。为了更好地传输和转换数据，本文使用的是达索公司旗下 CATIA 和 DELMIA 版本均是 V5R20，本文在 CATIA 三维绘图软件中建立播种机机架工作站三维模型，通过 DELMIA 数字化仿真软件进行仿真模拟。

4.2 播种机机架焊接建模仿真流程

播种机机架焊接工作站的产品和资源的建模主要运用 CATIA 软件，利用 CATIA 的零件设计模块对产品和资源的每个零件进行建模，并在装配模块下进行装配，构建三维数模。根据真实的焊接生产环境，将产品和资源的装配体模型导入到数字化仿真软件 DELMIA 中，进行工作站布局规划、运动链关联定义、焊接路径规划、工艺分析和仿真模拟。整个仿真过程需要数字化仿真软件 DELMIA 中的不同模块相互合作，分别实现不同的功能，最终完成仿真模拟过程，具体流程如图 4-1 所示。

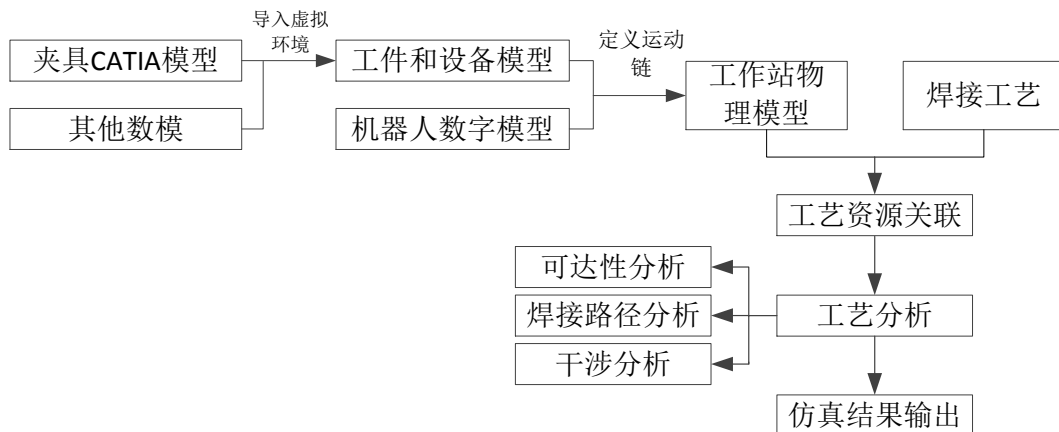


图 4-1 工作站建模仿真流程图

Fig. 4-1 Workstation modeling simulation

4.3 播种机机架焊接机器人柔性工作站虚拟搭建

工作站各种资源设计和选型后，对工作站所涉及的产品、制造资源进行三维模型建立，结合工作站布局和结构分析，对播种机机架焊接机器人柔性工作站虚拟搭建。将机器人、夹具、工件等资源装配完成后对其进行运动链定义，做好仿真模拟前的准备工作。

4.3.1 焊接机器人运动链建立

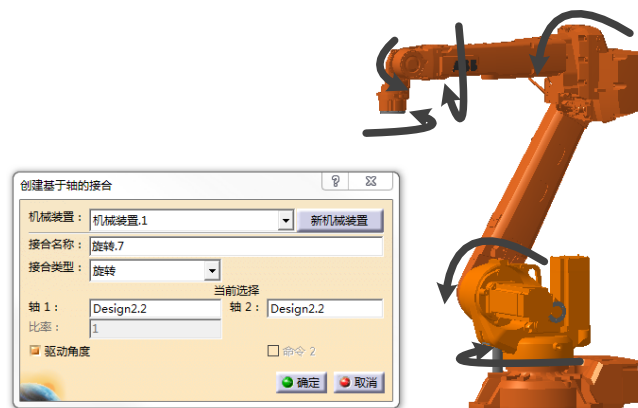


图 4-2 机器人运动链设置

Fig. 4-2 the robot kinematic chains settings

在 CATIA 中建立焊接机器人静态三维数模，并在 DELMIA/device building 模块依次对焊接机器人的六个关节进行旋转副的设置（如图 4-2），并设置基准坐标的位置。在 Travel Limits 命令下设置机器人运动范围，结合表 3-1 在 Joint/TCP speed and acceleration limits 下，限制机器人各轴运动速度，并定义其加速度。最后将设置完运动链的机器人加入的机器人库中备用。

完整的焊接机器人是由焊接机器人本体和焊枪两部分组成。根据选择的焊枪，利用 CATIA 进行建模，并在 DELMIA/device building 模块下设置 tool base 和 work base，同样调入资源库中，最后在 DELMIA/device task defination 模块将机器人和焊枪从库中调出，并利用 Set Tool 命令对其进行安装。设备安装完毕的机器人和焊钳之间显示父级和子级的关系，两个设备合并为一个整体。

4.3.2 其它资源的运动链建立

除焊接机器人运动副定义外，还需建立垂直式铰链——杠杆夹紧器、推拉式快速水平夹紧器运动链，完成播种机机架边梁的夹紧作业；建立气缸运动组件运动链，完成播种机机架总装作业；建立丝杆旋转运动链，完成不同型号播种机机架焊接装夹；建立变位机旋转轴运动链，完成变位机三轴旋转运动。利用 joint 命令设置相互关联的部件，定义运动链的约束条件，设置初始状态。

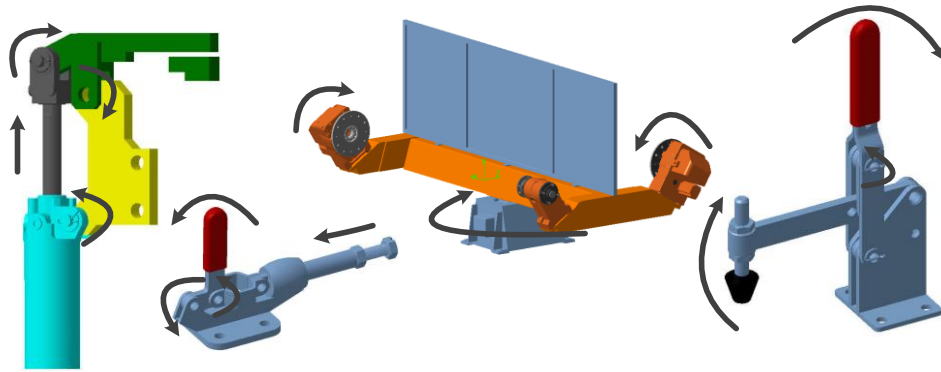


图 4-3 其它资源的运动链设置

Fig. 4-3 Kinematic chains settings of other resources

4.4 焊接工作站仿真验证

在 DELMIA 三维环境下对机器人焊接路径仿真示教，可大大减少人工现场示教机器人的工作量，降低生产成本，且提高了机器人焊接位置的精确性。利用 Device Task Definition 模块下的 Set Turn Numbers 命令，对机器人焊接轨迹进行自动示教，快速消除机器人各手臂的奇异动作。

4.4.1 工作站工艺流程制定

在完成播种机机架焊接机器人工作站各设备、人员等工艺任务设置后，运用 PERT 图排布各工序先后顺序。从工作站开始工作，用箭头顺次连接工人装夹、机器人动作、变位机翻转等工序直至工作站的下一个焊接任务（如图 4-4）。PERT 图通过清楚的形式完成整个播种机机架焊接机器人工作站生产流程排布。

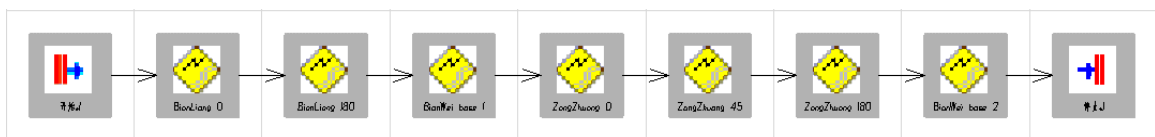


图 4-4 焊接过程的 PERT 图

Fig.4-4 PERT chart of welding activity

4.4.2 焊接机器人可达性分析

选定机器人位置后，可在 Arc Welding 模块中，运用 Robot Positioner Programming 计算命令对机器人可达性验证，通过该命令可以寻找出机器人具体不可达焊点及其位置，根据验证结果进一步调整机器人位置和变位机旋转角度，确定机器人的最佳空间位置。

如图 4-5 所示，当前位置 Operation1 焊点不可达，观察三维图中焊点的位置，将机器人位置向该焊点调整，再一次运用 Robot Positioner Programming 计算命令进行验证，直到所有焊点可达。

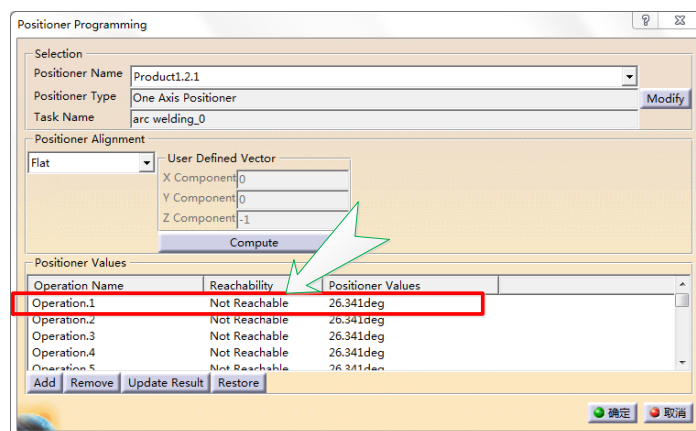


图 4-5 机器人可达性二次检测

Fig. 4-5 The secondary verification of robots reachability

也可在工作站弧焊机器人空间布局时,通过 Device Task Definition 模块的 Auto Place 命令在划定的机器人安放空间内自动搜索出机器人的可达性位置,并以不同颜色亮点显示出可达空间,完成焊接机器人的空间布局,使每个焊点都在机器人的工作区域之内,从而确定机器人安装位置是否合适。

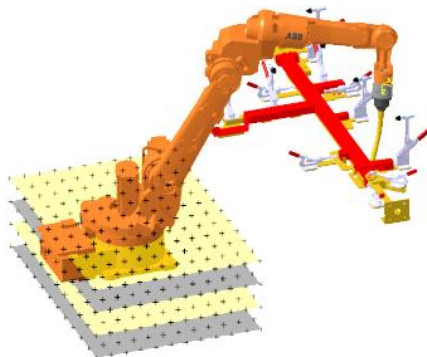


图 4-6 机器人可达区域

Fig.4-6 Reachable area of the robot

通过自动布局命令在划定区域内对播种机机架边梁和总装焊点分别进行了自动搜寻(如图 4-6),寻找到了全部焊点可达的机器人位置,从而验证所选焊接机器人臂长满足焊接生产要求,所选择位置合适。对比 Robot Positioner Programming 计算方法,Auto Place 命令操作简便,直观性强,但其运算搜索速度较慢。

在众多可达性坐标点选择时,考虑到龙门架式底座的结构,将龙门架高度由原来的 1500mm 调整为 1400mm,使龙门架在满足焊接生产要求下结构更加紧凑。

4.4.3 焊接机器人任务设定

播种机机架的焊缝是直线型断续焊缝，每段焊缝转化为多个焊点的连续动作。在 Arc Welding 模块里将播种机机架模型切换到 Design Mode 模式，通过 Create Arc Tags on curves 命令为机器人创建弧焊任务，将右侧设置的焊点添加到焊接机器人的 BianLiang_0 焊点任务集（如图 4-7）。

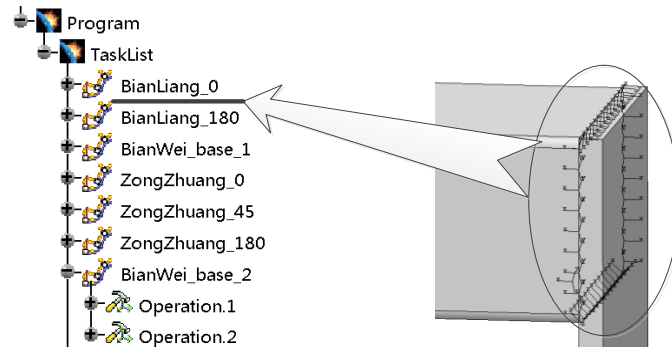


图 4-7 机器人弧焊任务创建

Fig.4-7 Establish arc welding tasks of the robot

在 Device Task Definition 模块中，将弧焊任务通过 Add Tag 命令分配给相应机器人，设定焊枪的焊接速度，调整变位机旋转角度及机器人与变位机的相对位置，使机器人焊接全部焊缝都能获得最佳的焊接进枪角度。通过 Teach device 对话框规划机器人的运动路径，并通过 Jog 对每个操作点处机器人的位姿进行调节，使机器人协调地完成焊接作业，如图 4.8 所示。最终实现数字化模拟工作站各资源真实工艺流程。

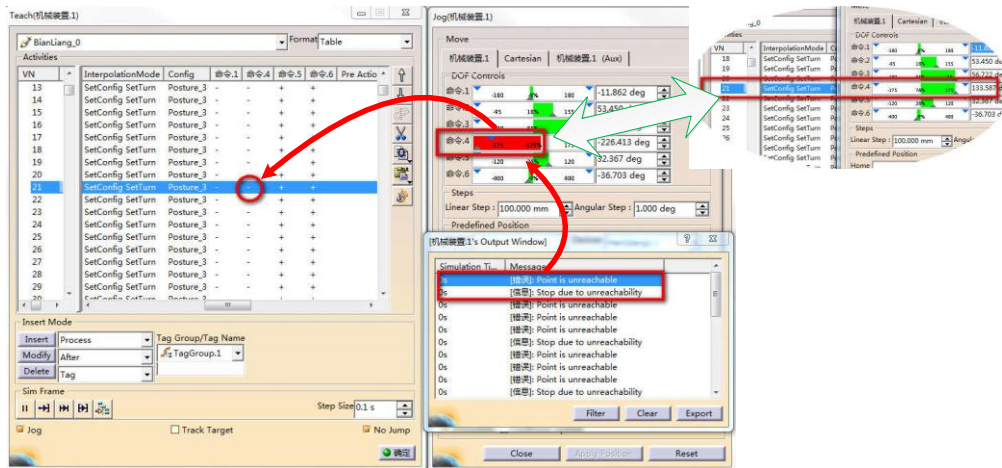


图 4-8 机器人任务

Fig.4-8 Establish tasks of the robot

弹出窗口显示在 BianLiang_0 焊点集任务中（如图 4-8），第 21 个焊点出现焊枪不可达，打开 Jog 面板看到机器人第四轴发生限位，通过在 Teach 面板中矫正机器人第四

轴角度，优化焊接机器人的姿态，调整后结果如图右上角所示，使焊接机器人动作完全符合实际生产要求。

4.4.4 焊接路径的优化

机器人焊接运动过程中，通常夹具、播种机数模与焊枪之间出现。在 DELMIA 三维环境下对机器人焊接路径仿真示教，可大大减少人工现场示教机器人的工作量，降低生产成本，且提高了机器人焊接位置的精确性。利用 Device Task Definition 模块下的 Set Turn Numbers 命令，对机器人焊接轨迹进行自动示教，速消除机器人各手臂的奇异动作（如图 4-9）。

进一步的，对自动示教修正后依然存在问题，通过 Teach 面板，调整机器人的运动路径、焊接姿势，调整焊枪进枪角度，还可对焊点进行增减进行再次编辑，协调机器人、导轨、变位机等机构的运动，避免焊接过程中各零部件出现干涉，最终实现焊接路径的最优化。

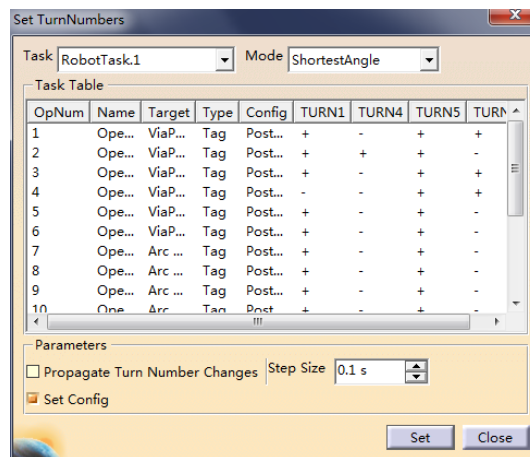


图 4-9 机器人示教

Fig.4-9 The robot teaching

播种机机架焊接机器人工作站工艺流程制定好后，可在 DELMIA 环境中方便的对工作站进行机器人焊接、夹具动作、人员动作等仿真，进而对工作站工艺进行分析，为工作站的规划、安装、调试带来便利。

4.5 仿真结果分析

播种机机架焊接机器人工作站工艺分析的任务是根据工作站三维仿真结果，分析设备布局、机器人可达性、焊接路径、干涉和人机工效等的合理性。完善并确定播种机机架焊接机器人工作站工艺后，利用甘特图比较仿真生产节拍是否满足设计要求，最终导出机器人离线程序。

4.5.1 碰撞干涉分析

在播种机机架焊接工作站三维仿真模型建立之后，需要对工作站中的机器人与工件、机器人与工装夹具、工装夹具与工件等之间进行干涉分析。在工作站仿真工作过程中，打开干涉分析功能，如图 4.10 所示。当出现干涉问题时，系统会红色预警干涉部位，通过此功能可以快速定位干涉部位，及时调整焊接机器人姿态、进枪角度、变位机旋转角度等方式来纠正焊接工作中存在的问题。干涉分析数据可生产 XML（Extensible Markup Language）报告，供相关人员方便查询。通过检测，纠正本文所研究的焊接机器人工作站仿真没有碰撞。

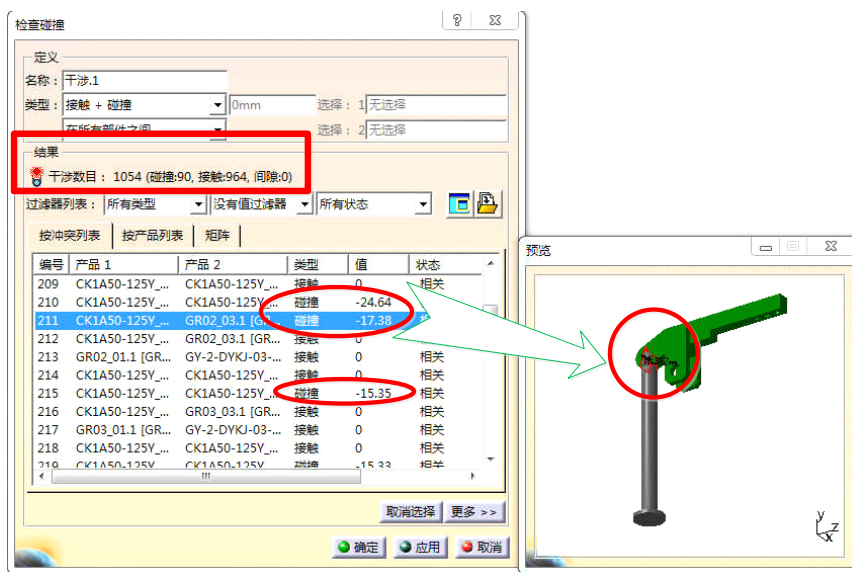


图 4-10 干涉分析

Fig.4-10 Interference analysis

由图 4-10 可知，工作站碰撞 90 处，在冲突列表中，系统将相互发生干涉的产品列出，并详细计算出碰撞的深度。通过预览窗口，显示发生碰撞的产品。根据得到的干涉数据，对工作站资源进一步优化设计和布局，直至没有干涉发生。

4.5.2 生产节拍确定

(1) 确定焊接作业时间

利用数字化仿真软件 DELMIA 进行焊接作业仿真，通过甘特图获得每个工序起始时间、先后顺序及完成一个生产周期的时间。按照规划方案，由图 4-11 可知：播种机机架焊接机器人工作站的焊接作业时间是 576 秒（如图 4-11）所示。

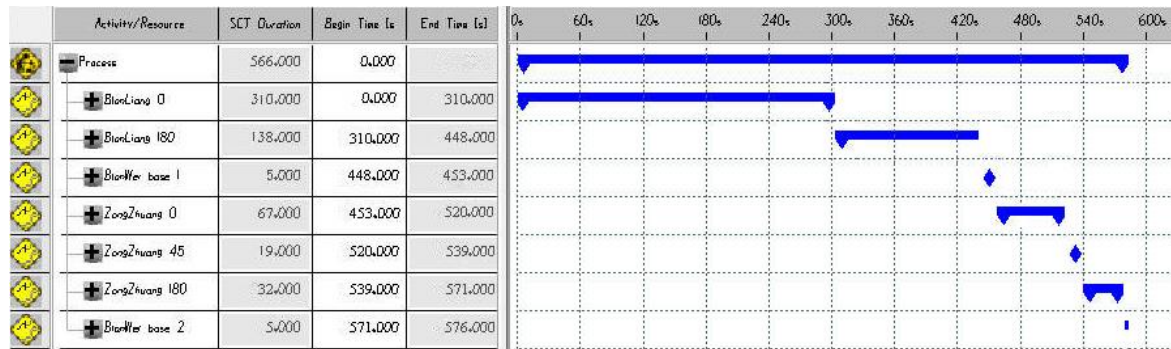


图 4-11 工作站焊接甘特图

Fig.4-11 Gantt chart of welding activity

(2) 人机操作分析

在确定焊接作业时间与操作人员预定动作时间分析后，利用人机操作图了解在一个播种机机架焊接周期内操作人员和机器的相互关系，发掘机器或工人的闲置时间，并进一步的组合、合理的安排，达到工序结构合理，提高生产率和人机利用最大化。

如图 4-12 所示，播种机机架焊接机器人柔性工作站中机器的利用率为 100%，操作人员利用率为 19.1%，工作站的焊接生产节拍为 576 秒，小于计划生产节拍 734 秒，因此工作站设计满足生产需求。对于操作人员 80.9%的空闲率，这段时间可以进行生产准备工作，或分配其他的工作任务来提高工人的利用率，使劳动力产生更大的价值。人机操作图反映了焊接机器人柔性工作站的应用可以极大的解放劳动力，工人的主要工作变成“监督”机器。

人	时间		机
播种机机架总装上下件			
空闲		60s	播种机机架边梁正面焊接
		120s	
		180s	
		240s	
		300s	
		360s	
	420s	播种机机架边梁翻转180°焊接	
播种机机架边梁上下件		480s	播种机机架总装正面焊接
空闲		540s	播种机机架总装旋转45°焊接
			播种机机架总装旋转180°焊接
统计			
	人		机
空闲时间/s	466		0
工作时间/s	110		576
周程时间/s	576		576
利用率	19.1%		100%

图 4-12 人机操作分析图

Fig.4-12 Man-machine analysis

4.5.3 离线程序输出

以上工作完成后，即可输出离线程序。进入 Robot Offline Programming 模块，点击 Create Robot Program 命令，分别机器人进行离线编程，在图 4-13 中标出矩形框内选择输出的焊接任务，输出程序的每一行记录了一个焊点和过程点的坐标信息。

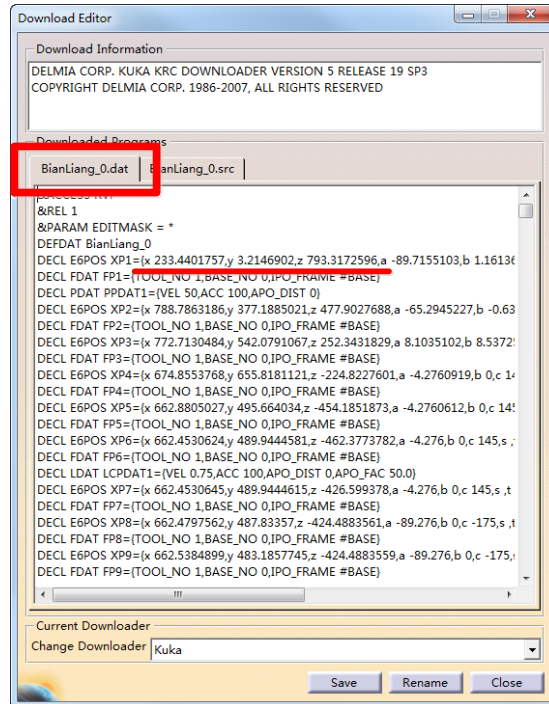


图 4-13 机器人离线程序

Fig.4-13 Robot offline Programming

输出的离线程序可直接应用于实际焊接机器人工作站，在 Current Downloader 选项栏中选择对应焊接机器人供应厂家的程序语言，并将程序导入机器人控制器中运行。离线程序的输出与传统的现场示教相比，大大减少了焊接生产的辅助时间，节约了生产成本，提高了生产准备效率，并能优化焊接过程，程序方案更具科学性。

4.6 设计规划方案评价

(1) 焊接时间

目前，RT 机械装备有限公司一套播种机机架焊接实际用时 50 分 42 秒，本文设计的播种机机架焊接机器人柔性工作站焊接用时为 9 分 36 秒，比 RT 公司实际用时节约 41 分 6 秒，6000 套播种机机架的焊接任务节约用时 4110 小时，播种机机架焊接效率的到极大提高。本文设计的播种机机架焊接机器人柔性工作站作业效率单人焊接作业效率的 5.28 倍。

(2) 场地面积

RT 机械装备有限公司播种机机架焊接工作区域长 14m，宽 11m，占地 154m²，且焊接区域工具、设备布局散乱，管线相互缠绕散布。本文通过数字化工程仿真工具得到播种机机架焊接机器人柔性工作站长 5.17m，宽 5.17m，总占地面积约 26.729m²，播种机机架焊接作业区域利用率提高 82.6%。

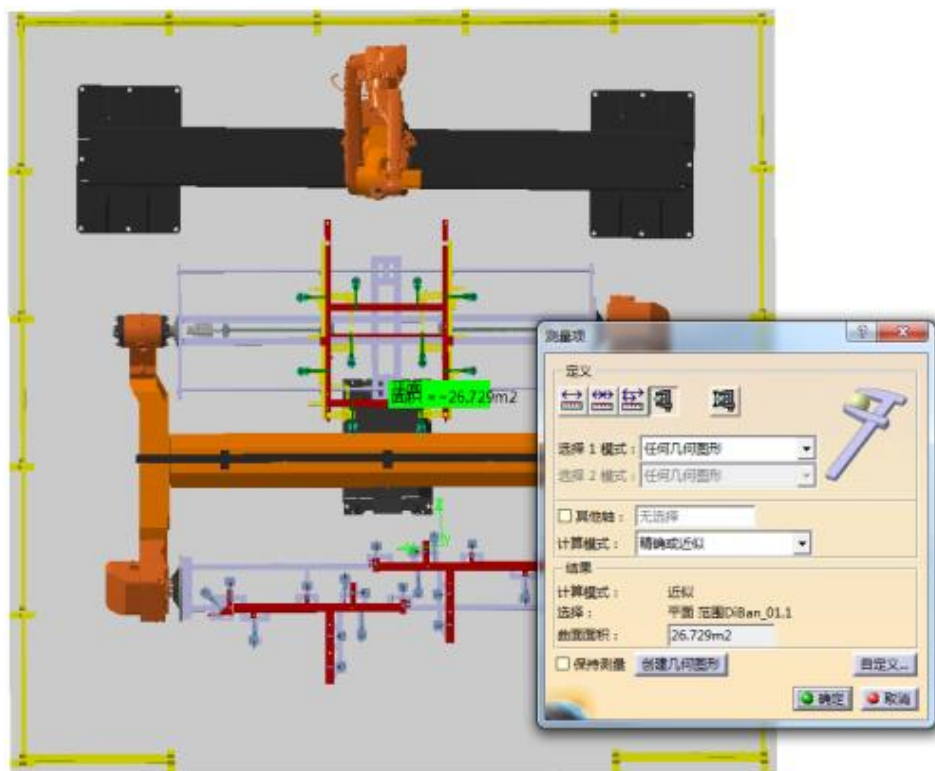


图 4-14 占地面积图

Fig. 4-14 Space occupied area

4.7 本章小结

本章在建立焊接机器人、杠杆夹紧器、气缸运动组件、丝杆及变位机旋转轴等工作站资源运动机构的基础上，应用 DELMIA 数字化工厂仿真软件对工作站进行了仿真分析，制定了工作站的工艺流程，并应用 PERT 图清楚的展示出，对仿真结果进行了优化：

(1) 运行模型输出仿真结果，得到碰撞 90 处，提出通过工作站资源进一步优化设计和布局，消除碰撞；

(2) 4 种型号播种机机架在焊接工作站中的作业时间分别为 576s、585s、592s、621s，通过人机操作分析得到机器利用率为 100%，人员最大空闲率为 80.9%，可适当为操作人员分配其它工作，使其产生更大的劳动价值；

(3) 所规划的方案完成 6000 套播种机机架的焊接任务节约用时 4110 小时；

(4) 焊接工作站的空间利用率为 82.6%。

第五章 结论与展望

5.1 结论

随着播种机向着多功能、大型化的发展,对播种机架焊接强度、焊缝质量要求更高,焊接机器人工作站的应用是解决以上问题的理想方式。播种机型号多,生产批量对要求焊接机器人工作站具有一定柔性。应用数字化仿真软件可以高效的完成对焊接机器人柔性工作站规划。本文通过对播种机机架焊接机器人柔性工作站研究,针对 2 MBJ 系列播种机架对焊接质量的较高要求,提出焊接机器人代替人工焊接方式。同时通过数字化仿真软件 DELMIA 对播种机架焊接机器人工作过程进行数字化仿真研究。

(1) 采用 AHP 法对 3 种播种机架焊接工作站总体规划方案进行评价选优。对确定的方案,从焊接所需的柔性入手,同时考虑经济性和上下件便利性,设计满足不同型号播种机架总成的孔隙组合式夹具方案,对焊接工装结构、动力形式、定位方式等规划设计,选择 ABB 公司的 IRB2600ID-8/2.00 型工业机器人。

(2) 建立了其路径规划的数学模型,并构建了蚁群算法求解模型,通过 Matlab 软件分别得到了机器人对边梁焊接和总装焊接的最短路径。

(3) 运用 DELMIA 数字化仿真软件对工作站进行仿真分析,验证规划方案的有效性。通过仿真结果,分析优化机器人可达性、焊接路径和碰撞干涉,所规划的方案完成 6000 套播种机架的焊接任务节约用时 4110 小时;4 种型号播种机架在焊接工作站中的作业时间分别为 576s、585s、592s、621s;工作站内只需一名操作工,且人员最大空闲率为 80.9%,焊接工作站的空间利用率为 82.6%,输出的离线程序可直接应用于实际焊接工作站中。

5.2 展望

本文的设计方案满足企业的实际需求,但工业工程追寻持续改进的脚步不会停止,在本文研究的基础上可以更深入和更广泛的对所涉及的相关内容进行进一步研究。现总结如下:

(1) 对人机配合因进行分析,操作人员上下件动作在 DELMIA 数字化仿真软件中模拟,并与 MOD 法得到的数据对比。考虑操作人员的舒适性,对产品和资源分布、结构形式予以研究。

(2) 物料配送分析,焊接机器人工作站作为系统的子集需要与其他资源进行联系,从系统工程角度考虑,对物料通道、配送方式、配送批次等方面对整个生产系统研究。

参考文献

- [1] 统计局, 新疆生产建设兵团 2014 年国民经济和社会发展统计公报, <http://tjj.xjbt.gov.cn/c/2015-04-29/964642.shtml>, 2015.
- [2] 刘鹏. 城际铁路客运专线桥梁伸缩装置焊接工艺研究及设备研制[D]. 天津大学, 2008.
- [3] 胡敏, 洪涛, 王勇. 基于总线技术的柔性机器人焊接工作站[J]. 电焊机, 2010, 05: 95-98.
- [4] 刘冰. 汽车半壳封装式后消声器压合弧焊机器人柔性焊接系统[J]. 电焊机, 2010, 05: 116-119.
- [5] 曹向成, 汪春华, 郑志东, 郑睿. 摩托车踏板式车架机器人焊接生产线的设计[J]. 焊接技术, 2010, 04: 53-55.
- [6] 陈柳艺, 黄洪全. 基于工业机器人智能柔性焊接工作站的设计[J]. 科技风, 2016, 01: 59.
- [7] 杨京. ABB 弧焊机器人工作站新增产品柔性生产提升[J]. 汽车实用技术, 2015, 04: 108-109.
- [8] 王健强, 李斌, 王长润. 基于 SoftPLC 和现场总线技术的点焊机器人柔性工作站系统集成[J]. 机床与液压, 2010, 15: 47-49+31.
- [9] 刘极峰, 邱胜海, 王孜凌, 龚宇锋, 卢亮. 塞拉门弧焊机器人工作站柔性焊接夹具设计[J]. 机械设计与制造, 2005, 05: 97-99.
- [10] 李积侠. 轿车排气系统机器人焊接夹具的设计要点及柔性化[J]. 电焊机, 2013, 02: 94-97.
- [11] 余建军, 任治军, 王辉. 先进焊接工装夹具及其在机械装备制造中的应用[J]. 机床与液压, 2011, 12: 115-121.
- [12] 张维官, 王颖. 柔性焊接生产线在汽车与轨道交通领域的应用[J]. 金属加工(热加工), 2013, 16: 9-15.
- [13] M. Vural, H. F., Muzafferoglu, U. C., Tapici. The effect of welding fixtures on welding distortions. *Journal of Achievements in Material and Manufacturing Engineering*, 2007, 20 (2) :1721.
- [14] WANG Hui, RONG Yi Ming (Kevin) . Case based reasoning method for computer aided welding fixture design. *Computer Aided Design*, 2008, 40 (12) :1121 — 1132.
- [15] 徐俊生, 吴志生, 刘翠荣, 胡宝成. 高速列车组焊柔性化自动焊接夹具系统设计研究[J]. 电焊机, 2011, 01: 17-19+23.
- [16] 李翔, 孙跃. 柔性焊接组合夹具在履带式起重机桁架臂制造中的应用[J]. 工程机械, 2014, 11: 60-64+9.
- [17] 李光俊, 兰勇, 孙林, 陈忠. 柔性组合夹具在飞机导管数字化快速制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2012, 09: 58-61.
- [18] 李欣, 周安. 组合夹具在焊接机器人中的应用 [J]. 金属加工(热加工), 2010, 10: 31- 33.
- [19] 张胜文, 李霞, 吴春桥. 基于范例的推理在管件焊接柔性夹具设计系统中的应用研究[J]. 中国机械工程, 2011, 09: 1071-1075.
- [20] HOLCWJ, WILLIGENBURG L G, etal. A new optimization algorithm for singular and non-singular

- digital time-optimal control of robots[C]. In: Proceedings of the 2001. IEEE International Conference on Robotics & Automation, Seoul, Korea, 2001: 21-26.
- [21] Guillaume Lavoue, Florent Dupont, Atilla Baskurt. A new CAD mesh Segmentation method based on curvature tensor analysis [J]. Computer Aided Design, 2005, 37 (10) : 975.
- [22] Garland M, Willmott A, Heckbert P. Hierarchical face clustering on polygonal surfaces[J]. ACM Symp Interactive 3D Graph, 2001 (1) : 49.
- [23] 林巨广, 陈甦欣, 戴淮初, 黄文进. 蚁群算法在白车身底板焊接路径规划中的应用[J]. 焊接学报, 2015, 01: 5-9+113.
- [24] 张春伟, 刘海江, 姜冬冬. 基于遗传算法的白车身机器人焊接路径规划[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 04:576-580+598.
- [25] 王学武, 时应盼, 顾幸生. 基于分区粒子群算法的焊接机器人路径规划[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2014, 05:95-101.
- [26] 杨薇. 基于三维视觉技术的自动化焊接机器人路径规划及实例应用[J]. 电焊机, 2015, 03: 37-42.
- [27] 刘任平, 陈赛清, 刘梅. 基于遗传算法的焊接机器人路径规划应用研究[J]. 计算机时代, 2013, 06:13-15.
- [28] 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.
- [29] 彭雪峰. 基于遗传算法的六自由度机器人焊接路径规划[J]. 自动化技术与应用, 2010, 12:1-3+8.
- [30] 王召迁, 杨建宇, 关振华, 赵海峰, David Alan Bourne, 王宛山. 多品种小批量快速智能焊接规划系统设计[J]. 中国机械工程, 2014, 07:878-881+887.
- [31] 胡中华, 赵敏. 基于人工蜂群算法的机器人路径规划[J]. 电焊机, 2009, 04:93-96. Ting Yang, Dinghua Zhang, Bing Chen, Shan Li. Research on Plant Layout and Production Line Running Simulation in Digital Factory Environment [C]. 2008 IEEE Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application, IEEE, 2008.
- [32] Mujber T, Szecsi T, Hashmi M. Virtual reality applications in manufacturing process simulation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004 (155156) :1834-1838. 数字化工厂技术在汽车制造企业布局规划中的应用研究
- [33] 邱华, 从虚拟走向现实: 三一数字化工厂驱动创新[C], 达索系统 2011 年中国论坛, 北京, 2011.
- [34] 张国军, 黄刚. 数字化工厂技术的应用现状与趋势[J]. 航空制造技术, 2013, 08:34-37.
- [35] Tecnomatix Technologies. eM-Power OLP Training Guide (Version 7.5.1). America: UGS Corp, 2006, 17 — 20.
- [36] Tecnomatix Technologies. eM-Power Spot Training Guide (Version 7.5.1). America: UGS Corp, 2006, 101 — 102.
- [37] 景武, 赵所, 刘春晓. 基于 DELMIA 的飞机三维装配工艺设计与仿真[J]. 航空制造技术, 2012, 12:80-86.
- [38] 陈宁, 解彦琦, 吕庆伦. 基于 DELMIA 的发动机装配过程可视化仿真[J]. 计算机辅助工程, 2010, 04:66-69.

- [39] 余建国, 范晓卫, 刘璐璐, 孟宪振. 基于 DELMIA 的车用空调虚拟装配过程仿真[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2012, 03:249-253.
- [40] 沈波. DELMIA 在 ARJ21 飞机中央翼装配仿真中的应用[J]. 中国制造业信息化, 2011, 11: 42-45.
- [41] 周尔民, 彭小剑, 王佳强, 邱丽艳. 基于 DELMIA 的双离合变速器装配过程可视化仿真[J]. 机械传动, 2013, 01:65-67+74.
- [42] 容芷君, 周燕学, 刘悦. 基于 DELMIA 的汽车装配线建模与仿真[J]. 物流工程与管理, 2011, 12:75-77.
- [43] 秦基伟, 章敏凤, 杨宁. 基于 DELMIA/Robotics 的白车身焊接机器人仿真应用[J]. 制造业自动化, 2012, 11:1-3+11.
- [44] 林巨广, 崔鹏, 王健强. 基于 ROBCAD 的白车身焊装自动线工艺规划技术研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 09: 1365-1369.
- [45] 姜宇, 张丽. 基于 GA 及 ROBCAD 的机器人路径规划与仿真研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015, 06: 105-108+112.
- [46] 李西洋, 成斌, 李成松, 宋海草, 张惠. 播种机机架焊接机器人柔性工作站设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016, 01:49-51+58.
- [47] 陶俐言, 王志峰, 聂清, 梁满棠. 考虑人因的单元设施布局优化设计方法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 12: 2973-2979.
- [48] 艾小祥, 俞慈君, 方强, 陈磊, 方伟, 沈立恒. 基于遗传算法的机翼壁板扫描路径优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 03:448-456.
- [49] 曹雪, 蔡鸿明, 步丰林. Semantic Driven Design Reuse for 3D Scene Modeling[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2012, 02:233-236.
- [50] 肖燕, 贾秋红, 周康渠, 李云云. 基于 Witness 的看板生产系统仿真与参数优化研究[J]. 工业工程与管理, 2012, 02: 39-44.
- [51] 李丽娟, 徐靓, 林雪竹, 孙佳慧. 基于 DELMIA 的大部件虚拟对接可视化技术研究[A]. 中国机械工程学会工业设计分会、辽宁省机械工程学会. 2013 国际工业设计研讨会暨第十八届全国工业设计学术年会论文集[C]. 中国机械工程学会工业设计分会、辽宁省机械工程学会:2013:5.

致 谢

笔执此处，文至卷尾，内心满满的感激之情，本文是在导师成斌教授的悉心指导、李成松教授关怀下完成。从论文选题、资料收集、调研实习，直至论文成型，无不倾注着二位老师的辛勤栽培，在此致以最真挚的谢意！

感谢公司提供的研究平台和数据和对本人科研的大力支持。

本文从构思之初至今，得到了陈永成老师、张立新老师、李玉林老师、赵永满老师和欧亚民老师等的指导，在此表示衷心的感谢！

研究生期间，还得到了秦金伟同学、张惠同学的帮助，在此表示衷心的感谢！感谢工业工程实验室所有师弟师妹给予的支持和帮助！

最后，对各位参加评审和答辩的老师表示感谢！


李西洋

二零一六年五月于石河子大学

攻读学位期间发表论文情况

- [1] 李西洋,成斌,李成松,宋海草,张惠. 播种机机架焊接机器人柔性工作站设计[J]. 组合机床与自动化加工技术,2016,01:49-51+58.

石河子大学硕士研究生学位论文
导师评阅表

研究生姓名	李西洋	学制	三年
专业	工业工程	研究方向	生产系统与集成技术
<p>学术评语:</p> <p>论文针对新疆播种机机架焊接生产现状, 结合播种机机架焊接工艺特点, 开展了播种机机架焊接机器人柔性工作站研究, 选题正确。</p> <p>论文以 2MBJ 系列精量播种机机架为研究对象, 提出焊接机器人柔性工作站方案规划的总体目标, 确定了总体方案和关键部件的参数; 建立了焊接路径规划的数学模型, 利用蚁群算法求解其最短焊接路径; 运用 DELMIA 对焊接工作站进行仿真优化; 分析了焊接过程中的干涉碰撞。研究结果具有一定的参考价值。</p> <p>论文研究目标明确, 技术路线可行, 结构合理, 重点突出, 图文规范。论文反映作者掌握了本学科的基本理论和专业知识, 具有独立从事科学研究工作的能力, 达到了硕士学位论文的水平, 同意进行硕士论文答辩, 同意申请硕士学位。</p> <p style="text-align: right;">指导教师签字: </p> <p style="text-align: right;">2016 年 月 日</p>			