

基于机器人三维模拟仿真的 焊接生产线柔性主拼技术研究*

张瑞海^{1,2}, 王淑营¹

(1. 西南交通大学 CADI 工程中心, 成都 610031; 2. 四川成焊宝玛焊接装备工程有限公司, 成都 610031)

摘要: 为满足生产线柔性设计需求, 对柔性焊接生产线解决方案的难点进行了分析, 提出了基于机器人三维模拟仿真的生产线柔性主拼技术方案, 建立了机器人负载边界模型和基于负载边界模型的机器人选型及快换装置选型方案, 提出了网格式夹具设计方法, 以白车身柔性焊装生产线为例, 建立了面向柔性的网格式夹具设计方案以及网格式装配检测及应力分析, 并对面向柔性主拼中的离线编程技术及三维仿真中的项目权限管理和工作站模拟仿真工作流程进行了分析。该方案在某汽车厂 NL-1&NL-2 两个车型项目生产线的设计中应用焊接生产线上进行了应用验证, 能满足两车型生产线柔性主拼的需求。

关键词: 机器人; 三维模拟仿真; 柔性主拼; 离线编程

中图分类号: TP391.73

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2014)02-0435-05

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2014.02.027

Research on welding production line splicing flexibility technology based on robot 3D simulation technology

ZHANG Rui-hai^{1,2}, WANG Shu-ying¹

(1. CADI Engineering Center, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Sichuan CBWEE BMI Welding Equipment Engineering Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: This paper presented a production line splicing flexibility technology based on robot 3D simulation technology scheme and set up a robot load boundary model after analyzed the difficulties of the flexible welding line solution. According to the design demand of grid-style flexible fixture from the robot load, it set up the robot selection and quick change device selection scheme based on load boundary model. It presented the design method for flexible grid-style fixture and set up the corresponding scheme and test and stress analysis of grid-style assembly with white body flexible welding production line for example. It researched the off-line programming technology oriented flexible splicing and analyzed the project authorization management and workstation simulation workflow in 3D simulation of robot. It validated the scheme in welding production line in the project production line of the two models (NL-1&NL-2) in an automobile factory and meet the demand that the two vehicle production line splicing flexibility.

Key words: robot; 3D simulation; body flexor; off-line programming

0 引言

柔性制造系统(flexible manufacturing system, FMS)是1967年诞生于英国的一种高效率的对产品和市场变化快速响应的先进生产系统^[1]。近年来随着机器人技术的运用与发展, 基于机器人三维模拟仿真的生产线柔性主拼技术逐渐成为柔性制造系统的重要研究方向之一, 并在飞机、汽车装配生产线的设计上得到了越来越多的应用。

国外对工业机器人三维模拟仿真技术的研究起步较早^[2,3], 相关技术研究和系统的开发可追溯至1982年, 主要以机器人的离线编程和三维仿真技术为主。在离线编程方面, 已形成了一些成熟的CAD软件包, 如美国的UOBMS、英国的SAMMIE、以色列的ROBCAD等, 另外, 德国、日本也开发了相

应的机器人离线编程系统^[4,5]。在机器人三维仿真技术方面, 不同的机器人厂商商业针对自己生产的机器人推出了相应的仿真软件, 如瑞典ABB提供的ROBDSIU、FAUNC提供的ROBOGUIDE、MOTOMAN提供MOTOSIMEG等。然而这些众多版本的机器人仿真与离线编程系统中多数的软件都是针对某一种特定的机器人模型进行仿真。现在应用比较广泛的主要是由以色列Tecnomatix公司推出的ROBCAD机器人计算机辅助设计及仿真系统。我国的机器人三维模拟仿真技术研究起步都比较晚, 在理论研究和实践技术方面取得了一些成果。例如文献[6]将计算机技术、控制技术等与焊接工艺相结合, 提出智能化焊接技术, 并对焊接过程的智能建模方法、焊接过程动态智能控制方法进行了研究; 文献[7]针对飞机数字化装配中对机器人高效完成铝合金切削加工需求, 提出了一种工业机器人轻切削作业的微机编程原理和实现方法; 文献[8]针对

收稿日期: 2013-04-22; **修回日期:** 2013-06-14 **基金项目:** 国家科技支持计划课题(2012BAF10B08); 制造业产业链协同与信息化支持技术省重点实验室开放项目(2013-001)

作者简介: 张瑞海(1974-), 男, 主任工程师, 硕士, 主要研究方向为汽车焊接生产线和机器人仿真技术; 王淑营(1974-), 女, 研究员, 博士, 主要研究方向为CAD系统设计与关键技术(w_shuying@126.com)。

自动化焊接领域示教编程的不足,提出了自主开发并无缝集成几何造型内核的弧焊机器人工作站离线编程系统——WROB-CAM;文献[9]针对示教编程方式在中小批量生产及复杂任务中的不足,提出了基于 PC 交互式三维可视化离线编程和动态仿真系统,研究了机器人运动轨迹的自动规划编程和三维仿真方法。这些研究大多针对机器人的自动离线编程的实现,基本上还处于理论和技术探索阶段。在汽车焊接仿真领域,目前大部分是应用国外产品,并且在应用上也处于起步阶段。

在基于机器人的车身主拼柔性解决方案方面,目前汽车发达国家有很强的专业公司服务于各大汽车厂,主要公司有 COMAU、KUKA、EDAG、ABB 等,也有部分汽车厂的设备制造厂仅服务于本汽车公司内部的企业,如丰田汽车、法国标致雪铁龙等。全球汽车厂主要采用的汽车车身柔性焊接生产线有意大利的 COMAU 的 OpenRoboGate、德国 KUKA 的 KUKAFraming、ABB 和法国标致雪铁龙的 BodyFlexor 和 GeoFlexor、丰田的 GBL 系统、日产的 IBS 系统等。生产线设计上具有自主知识产权的柔性生产线解决方案较少,在设计中大多靠经验,缺乏可供参考的理论和标准的指导。

本文以汽车白车身焊接柔性生产线设计为背景,对装配生产线柔性设计过程中与机器人相关的柔性生产线夹具、机器人快速切换装置以及机器人仿真模拟和离线编程技术进行研究,探索一套在汽车焊接生产线设计中可供参考的基于机器人三维仿真技术的生产线柔性主拼设计技术方案和实施方案。

1 柔性生产线设计的技术难点分析

1.1 机器人及快换装置选型技术

机器人是柔性制造系统的基础之一,但是机器人有一定的限制,一台没有安装工具快换装置的机器人仅能装备一个末端执行器,且被限制在一个应用中。例如,一台仅装备一个焊枪的机器人受焊枪几何尺寸的限制,不能完成其他类似材料的抓举工作。采用机器人工具快换装置,可以克服这些限制,使得机器人有能力交换不同功能的末端执行器实现不同功能,因此单个机器人能够在制造和装配过程中交换使用不同的末端执行器以增加柔性,被广泛应用于自动点焊、弧焊、材料抓举、冲压、检测、卷边、装配、材料去除、毛刺清理、包装等操作,具有生产线更换快速、有效降低停工时间等多种优势。目前在工具快换装置设计中的技术难题是机器人的选型问题。如何根据工作环境及负载要求,选取合适的机器人是快换装置设计中必须解决的问题。

1.2 网格式夹具设计与实现技术

柔性焊接生产线的装夹系统与常规夹具设计有很大区别,除了要满足正常的工装定位夹紧的要求外,还要满足刚性和机器人的运动学需求以及夹具本身的运输安装需求。采用网格式夹具可以将整体较大的夹具分解成几个独立的操作单元,在保证产品品质的前提下充分实现柔性功能。网格式夹具在具备基本传统夹具所有功能的前提下还应包括以下特点:a)网格式夹具作为对整体夹具的拆分设计,减轻了整个夹具的重量,便于机器人的搬运;b)可以根据不同型号产品需求进行夹具组合和拆分,不同型号的产品使用不同的夹具组合,最后组合成一个完整的整体。网格式夹具设计的难点是根据产品特点确定柔性网格分块单元,实现网格单元的装配干涉检查与网

格式夹具应力分析、结构位移及变形分析,保证分解组合后的网格夹具各部分协调工作,以满足实际应用需求。

1.3 离线编程技术

机器人是一种可编程的机械装置,以指令的方式控制其工作,因此在使用前就必须对其进行编程。按照机器人实际应用的方式可分为示教编程方式和离线编程方式两种。示教编程就是在实际生产环境中,工艺人员指定机器人到待加工的位置,并记录下机器人的关节角度等几何数据,然后再重复利用这些数据实现机器人运动的再现,主要应用于服务机器人。对于工业机器人,当作业任务复杂多变时,示教编程将无法胜任。离线编程(off-line programming, OLP)技术是在没有实际机器人参与的计算机环境下进行机器人运动轨迹规划、修改、仿真、测试并进行机器人程序设计的一种技术,离线编程在不占用机器人作业时间的情况下,采用机器人编程语言实现作业编程。目前国内外离线编程软件提供商主要包括 ROBCAD 和 DELMIA 两大阵营,产品相对成熟。离线编程应用的难点在于其编程及操作过程中项目权限及各成员任务的管理及流程的监控。

2 基于机器人负载边界模型的机器人及快换装置选择

2.1 机器人负载边界模型的构建

在设计不同焊接柔性生产线时,使用的机器人类型虽然有所不同,但对机器人的选用应考虑以下几个方面:a)应选择与自动生产线工艺结构相匹配的机器人;b)根据能保证接头焊点焊接质量和产生效率高的焊接工艺,选择不同的机器人末端轴承载力;c)选择操作范围和技术性能参数能满足工件施焊位置的机器人。

1) 机器人基本性能参数指标

机器人选型时,首先应建立机器人的基本性能参数指标模型,包括到达距离、承载能力、重心以及手腕最大转矩。以 ABB 大功率机器人 7600 系列机器人为例,其各产品基本性能指标如表 1 所示。首先需根据机器人工作环境要求,筛选出满足基本指标性能要求的机器人。

表 1 ABB 大功率机器人 7600 系列机器人的基本性能参数

机器人版本	到达距离/m	承重能力/kg	重心/mm	手腕最大转矩/Nm
IRB 7600-500	2.55	500	360	3010
IRB 7600-400	2.55	400	512	3010
IRB 7600-340	2.80	340	360	2750
IRB 7600-325	3.10	325	360	2680
IRB 7600-150	3.50	150	360	1880
IRB 7600-150 (loaded with 100 kg)				1660

2) 机器人负载分析

机器人负载范围内不同重心的设计位置对抓取重量的要求不一样,在设计初期要根据基本的参数进行初步范围的确定。可用机器人专业负载软件如 RobLoad 设计选取的不同负载曲线描述,根据负载曲线进行机器人的负载分析。以 ABB 大功率机器人 7600 系列机器人选型为例,其负载曲线如图 1 所示。

3) 机器人载荷边界限制条件

根据机器人承受扭矩,可得到机器人载荷边界条件(图 2):

$$L \times G < \text{手腕最大转矩} \quad (1)$$

以 ABB 大功率机器人 7600 系列 IRB 7600-500(机器人负重 500 kg,臂长 2.55 m)机器人选型为例, $L \times G < 3010$,根据曲线图分析,可获得机器人抓举的网格式柔性夹具需要具备的基本参数如下:

a) 网格式柔性夹具的重量最好控制在 400 kg 左右,这时机器人有比较好的负重性能;

b) 网格式柔性夹具的重心 Z 轴根据重量要符合曲线要求,400 kg 的重量重心 Z 方向不要超过 450 mm;

c) 网格式柔性夹具的重心 XY 平面的距离 L 要控制在 300 mm 以内。

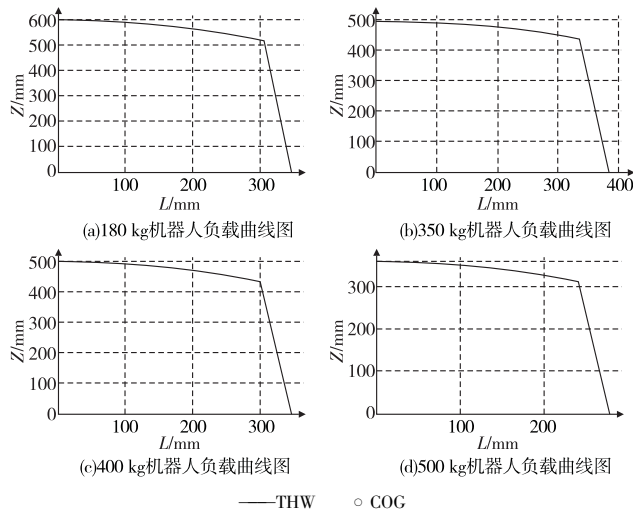


图1 ABB 重载机器人负载曲线图

2.2 基于负载边界模型的快换装置选型

根据机器人工具快换装置的载荷状态给出网格式柔性夹具设计的边界条件如图3所示。

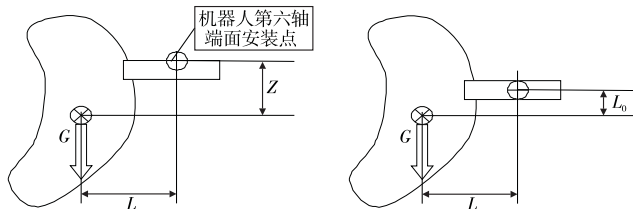


图2 机器人载荷边界限制条件

图3 机器人工具快换装置边界限制

根据机器人工具快换装置承受允许力矩得

$$L \times G < \text{静态 } X, Y \text{ 轴方向允许力矩} \quad (2)$$

$$L_0 \times G < \text{静态 } Z \text{ 轴方向允许力矩} \quad (3)$$

以 ABB 大功率机器人 7600 系列 IRB 7600-500(机器人负重 500 kg, 臂长 2.55 m) 机器人选型为例,按照机器人负载曲线建议的负载 400 kg 计算,由式(1)~(3)得 $L_0 < 0.76$, $L < 0.86$ 。综上,设计机器人网格式夹具的边界条件初步拟定为以下条件:a) 重量 400 kg 左右;b) 机器人重心 L_0 向偏移小于 0.76 m;c) 机器人重心 L 向偏移小于 0.86 m。

参照前面由机器人负载曲线建议的 Z 值和 L 值,确定满足机器人负载曲线值的选用值可以满足机器人工具快换装置的需求。

3 车身焊接生产线网格式夹具设计

3.1 白车身焊装主拼夹具设计特点分析

焊接夹具的设计是一门经验性很强的综合性技术,在设计时要确定生产纲领,熟悉产品结构,了解变形特点,把握制件及装配精度,通晓工艺要求。只有做到这些,才能对焊接夹具进行全方位的设计。

1) 白车身焊装主拼夹具的结构特点

传统汽车白车身焊装夹具体积庞大,结构复杂。车身总装夹具具有三个装配基准:底板、左侧围和右侧围,在它们的平面上都加工有基准槽和坐标线,定位夹紧组合单元按各自的基准槽进行装配、检测,最后将三大部分组合成一套完整的夹具。

2) 白车身焊装主拼夹具的定位特点

汽车白车身焊装主拼夹具大都通过冲压件的曲面外型、在曲面上经过整形的平台、拉伸和压弯成型的台阶、经过修边的窗口和外部边缘、装配用孔和工艺孔进行定位,这就在很大程度上决定了它的定位元件形状比较特殊,很少能用标准元件。为了保证在设计和检测的基准一致性,汽车白车身焊装主拼夹具的定位基准在设计时要充分考虑沿用各分装部件的主定位基准。白车身下部总成的定位基准要和白车身下部总成保持一致,左、右侧围的定位基准要从侧围成型工位保持一致。局部位置为了解决焊接的可见性问题,焊接上一个工位遗留的焊点可以变更辅助定位加紧点,主定位点不能变更。定位机构尽可能要简洁可调整、易维护、易检测。

3) 白车身焊装主拼夹具夹紧特点

车身冲压件装配后多使用电阻焊接,工件不受扭转力矩,当工件的重力与点焊时加压方向一致时,焊接压力足以克服工件的弹性变形,并能保持准确的装配位置与定位基准贴合,此时可以省去夹紧机构。焊接通常在两个工件间进行,夹紧点一般都比较少,电阻焊是一种高效焊接工艺,为减少装卸工人的辅助时间,夹紧应采用高效快速装置和多点联动机构。

3.2 面向柔性的网格式夹具设计方案

根据车身结构和成型定位点分析,改变以往常规的夹具侧围整体夹具形式,以白车身侧围的 B 柱为分界,把汽车车身夹具分割为左右前后四个网格式夹具。四个网格式夹具通过安装在地板夹具上的八个快速定位锁紧机构,以及左右网格夹具上的左右锁紧机构、上下左右由机器人抓举进行快速装配定位锁紧,形成围绕整个车身紧密的刚体。机器人装配完成后松开夹具,抓举焊枪进行车身焊接。这种方式更具有柔性。很多同一平台的轿车车身 B 柱前部几乎没什么变化,更换 B 柱后面的夹具部分就可以切换不同的车型,使得同平台的夹具结构更经济,成本更低。网格式结构整体尺寸很小,刚性好,能提高车身总成的整体精度,提高焊接工艺性,实现全自动化焊接。

整个网格式夹具设计成五部分,如图4所示。下部工装夹具和锁紧机构,主要是针对地板定位和对上部工装的锁紧定位;上部工装夹具 1 分为左右对称两部分,主要是对车身后门洞、前车窗和前横梁的成型定位夹紧;上部工装夹具 2 分为左右对称两部分,主要是对车身后门洞、后门和后横梁部位的定位夹紧;升降滚床用于将白车身抬升和在工位间传输;滑橇是汽车白车身在滚床传输上的载体。

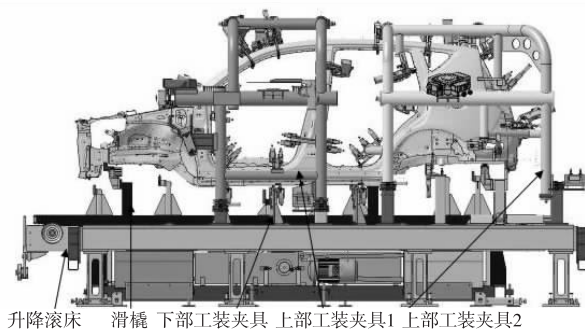


图4 总拼成型工位数字样机简图

将下部工装定义为 A,上部工装 1 定义为 B,上部工装 2 定义为 C。比如,在设计车型 A 的夹具时,下部工装定义为网格 A1,上部工装 1 定义为网格 B1L 和 B1R,上部工装 2 定义为网格 C1L 和 C1R,则车型 A 的网格式夹具组合为:A1 + B1L + B1R + C1L + C1R。

新增同平台车型 B 时,下部工装基本可以保持,局部位置采用车型切换即可;上部工装可以完全新设计,整个网格式夹具组合为:A1' + B2L + B2R + C2L + C2R。

如果两种车型的 B 柱以前部分完全相同这可能出现如下组合:A1' + B1L + B1R + C2L + C2R。

采用此种拆分方式主要基于以下几点:a) 当今汽车整车开发和生产制造商同一平台的不同款式的汽车在设计时一般都遵循一个原则,汽车底部的定位方式和定位点保持一致,产品侧围 B 柱以前的部分产品基本保持一致;b) 此种拆分可以基本保证每个上部工装的定位夹紧单元数量基本相等,重量基本设计在 450 kg 左右,满足基本常用机器人符合需求;c) 存放位置和锁紧位置比较合理。

3.3 网格式装配检测及应力分析

虚拟装配是利用虚拟装配技术在计算机上将三维模型装配到一起,这样可避免物理原型的应用,也可对零部件进行间隙和干涉检验,减少样品差错率。目前许多商品化的三维 CAD 软件(如 CATIA 等)均提供了虚拟装配功能,并集成了有限元分析模块,可对网格式装配检测及应力分析提供有力的工具。

4 基于离线编程平台的柔性主拼工位机器人系统模拟

机器人离线编程是以 CAD 和图形仿真技术为基础的技术。CAD 技术用于在计算机中建立机器人工作单元的几何模型,为离线编程提供虚拟的编程环境。图形仿真用于检验离线编程的正确性,包括用图形动态显示编程结果和进行碰撞检测等。一个完整的机器人柔性主拼工作站是包含了汽车白车身的成型夹具、传输设备、焊接机器人、机器人焊枪、焊枪修磨器、机器人安装设备、夹具库、控制系统、防护系统等设备的复杂系统。该系统必须经过认真、详细的模拟仿真和自动化的详细设计才能实现自动化。

4.1 模拟仿真机器人工作站的构建

目前国内外离线编程软件提供商主要包括 ROBCAD 和 DELMIA 两大阵营,可根据需要选择对应的离线编程软件构建模拟仿真机器人工作站。并且在仿真过程中,需要建立一个完整严密的平台组织结构和成员权限的管理机制。项目负责人承接设计项目后要建立文件体系结构 library 和 project,对组员给出设计权限以及目标任务、接口设计输入,审核设计输出。组员按照项目负责人要求建立文件体系,管理数据结构,输出符合要求的设计文件,如图 5 所示。

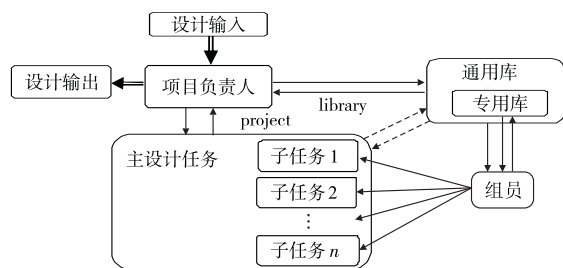


图5 仿真工作的组织结构以及任务权限图

4.2 模拟仿真的工作流程以及问题处理机制

设计模拟仿真机器人工作站要按照一定的工作流程工作,每一个工作流程要与公司内部和外公司的联系接口作详细的交流和确认工作。每个设计人员要认真执行这个流程。对仿真设计工程师来说,重要的工作是通过基本的仿真模拟提供对项目设计者最有用工作信息。机器人工作站模拟仿真工作流程如下:

a) 确立机器人焊枪的基本模型信息,将技术要求(机器人负载信息和焊枪参数)提供给焊枪专业厂家,焊枪专业厂家将 3D/2D 详细设计返回后进行详细的仿真检查。

b) 将机器人夹具的基本信息提供给机械设计工程师作详细设计,设计完成的 3D/2D 返回后进行详细的仿真检查。

c) 焊枪或者端式器的存放位置及空间,给出基本的设计信息。

d) 给出控制柜的存放位置,校核电缆长度。

e) 编制合理的机器人工作路径。

f) 按照上述信息设计完成的 3D 资料替换设计初始用的基本模型,进行详细的校核和验证,对局部位置进行修改,完成正式设计。

g) 设备具体位置给工程开发部,细化平面布置图。

h) 输出模拟结果。首先要按照要求输出具有现场调试指导意义的仿真录像,然后根据要求将完成的仿真录像和 OLP 的程序提交现机器人调试工程师。

i) 对非常复杂的工位流程图给出详细的设计,便于电器工程师使用。

5 应用实例

5.1 某汽车厂 NL-1 & NL-2 车型柔性主拼方案

本文提出的基于机器人模拟仿真技术的柔性车身主拼焊接方案已在某汽车厂 NL-1 & NL-2 两个车型项目生产线的设计中应用,如图 6 所示。采取软件模拟和现场实际工位调试的方法来验证研究结果的正确性和可靠性。在该项目中,地板定位对两个车型来说只有在后地板区域有一组定位不一样,在 X 方向有 170 mm 的距离。根据这种情况,将地板定位夹具做成两个车型共用的方式进行设计,在同一个平台上进行平移切换。

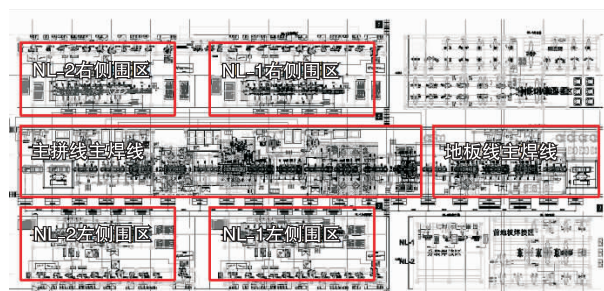


图6 某车型 NL-1 & NL-2 项目两车共线平面布置图

NL-1 & NL-2 两款车型的区别在外形上来说,侧围的变化是最大的。每个车型的侧围或多或少都存在区别于其他车型的地方,侧围的定位夹具也因此而不同。本次设计的车型车身长,车顶高,因此夹具也相应较大。针对两种车型侧围的定位点作详细分析后发现这两款车的中立柱(包含中立柱)与以前的定位点完全一致,车体数据也相差不大。基于这种分析,在

设计侧围定位夹具时将车身侧围夹具分成两部分,前部设计成一个共用夹具,后部两种车型分别用各自的定位夹具,对不同车型进行切换。

5.2 应用效果分析

通过系统集成完成的 NL-1 & NL-2 项目两车共线项目柔性主拼夹具系统如图 7 所示,共采用六个机器人,六个网格式机器人夹具,共完成两种车型的焊接,其中实现焊接节拍 220 S。在 NL-1 & NL-2 多车型柔性主拼工位仿真模拟的实现中,采用 ROBCAD 仿真软件将在 CATIA 中设计的各项设备通过 ROBCAD 的数据转换功能,将数据转换成 .co 数据。按照仿真模拟流程和最初的平面规划进行仿真设计,在保证所有机器人的可达性前提下确定机器人最终的安装位置。通过设计项目的开发和设计,将机器人仿真平台模拟产生的程序通过离线编程技术导出,导入真实机器人并直接应用于实际生产。



图7 NL-1 & NL-2 机器人柔性主拼系统图

6 结束语

在轿车车身柔性混线焊接生产线中主拼成型工位是非常关键的,世界各大汽车焊接设备供应上在该领域都提出了各自的成熟技术和产品。本文对机器人的运动范围和边界负载曲

线进行了研究,总结了在车身总拼设计柔性夹具过程中,利用规划机器人和快速连接件的情况下,给出了详细的边界设计条件。以汽车白车身焊接柔性主拼为例,提出了采用网格式夹具设计方法,建立了面向柔性的网格式夹具设计方案,对面向柔性主拼中的离线编程技术进行了研究。提出的解决方案在某汽车厂 NL-1 & NL-2 两款车型混线焊接设计中得到了应用。

参考文献:

- [1] 赵显阳. 白车身装焊夹具的设计及点焊机器人的焊接仿真[D]. 成都:电子科技大学,2007.
- [2] MADSEN O, SORENSEN C B. A system for complex robotic welding [J]. *Industry Robot*, 2002, 29(2):127-131.
- [3] OLSSON T, ROBERTSSON A, JOHANSSON R. Flexible force control for accurate low-cost robot drilling [C]//Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2007:4770-4775.
- [4] WU Hua-peng, HANDROOS H, PESSI P, *et al.* Development and control towards a parallel water hydraulic weld/cut robot for machining processes in ITER vacuum vessel [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2005, 75-79:625-631.
- [5] XU Jia-zhong, YOU Bo, LI Zhong-cai, *et al.* Design and development on robot workstation for water-jet cutting [C]//Proc of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. 2006:7905-7909.
- [6] 陈善本,林涛,陈文杰,等. 智能化焊接制造工程的概念与技术 [J]. *焊接学报*, 2004, 25(6):124-128.
- [7] 刘楚辉,姚宝国,柯映林. 工业机器人切削加工离线编程研究 [J]. *浙江大学学报:工学版*, 2010, 44(3):426-431, 439.
- [8] 刘永,杨静宇. 弧焊机器人工作站离线编程系统—WROBCAM [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 17(1):190-194.
- [9] 唐新华, DREWS P. 机器人三维可视化离线编程和仿真系统 [J]. *焊接学报*, 2005, 26(2):64-68.
- [10] 陈康,郑纬民. 云计算:系统实例与研究现状 [J]. *软件学报*, 2009, 20(5):1337-1348.
- [11] ARMSTRUST M, FOX A, GRIFFITH R, *et al.* A view of cloud computing [J]. *Communications of the ACM*, 2010, 53(4):50-58.
- [12] 周茜,于炯. 云计算下基于信任的防御系统模型 [J]. *计算机应用*, 2011, 31(6):1531-1535.
- [13] 饶翔,王怀民,陈振邦,等. 云计算系统中基于伴随状态追踪的故障检测机制 [J]. *计算机学报*, 2012, 35(5):856-869.
- [14] 王永剑,裴翔,李涛,等. Nova-BFT:一种支持多种故障类型的副本状态机协议 [J]. *计算机研究与发展*, 2011, 48(7):1134-1145.
- [15] 王媛,王意洁,邓瑞鹏,等. 云计算环境下的容错并行 Skyline 查询算法研究 [J]. *计算机科学与探索*, 2012, 5(9):804-813.
- [16] 邓鹏,李枚毅,何诚. Namenode 单点故障解决方案研究 [J]. *计算机工程*, 2012, 38(21):40-44.
- [17] AMALDI E, KANN V. On the approximability of minimizing nonzero variables or unsatisfied relations in linear systems [J]. *Theoretical Computer Science*, 1998, 209(12):237-260.
- [18] FU S. Performance metric selection for autonomic anomaly detection on cloud computing systems [C]//Proc of IEEE Global Communications Conference. 2011:1-5.
- [19] CHANDOLA V, BANERJEE A, KUMAR V. Anomaly detection: a survey [J]. *ACM Computing Surveys*, 2009, 41(3):151-158.
- [20] SCHÖLKOPF B, PLATT J C, SHAWE-TAYLOR J C, *et al.* Estimating the support of a high-dimensional distribution [J]. *Neural Computation*, 2001, 13(7):1443-1471.
- [21] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization [M]. [S. l.]: Cambridge University Press, 2004.
- [22] HAN J, KAMBER M. Data mining: concepts and techniques [M]. 3rd ed. [S. l.]: Morgan Kaufmann, 2011.
- [23] Sysstat [EB/OL]. <http://sebastien.godard.pagesperso.orange.fr/>.
- [24] ZHANG Yan-ming, HOU Xin-wen, XIANG Shi-ming, *et al.* Subspace regularization: a new semi-supervised learning method [C]//Proc of European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. 2009:586-601.
- [25] ZHU X, GHAMRANI Z, LAFFERTY J. Semi-supervised learning using Gaussian fields and harmonic functions [C]//Proc of International Conference on Machine Learning. 2003:912-920.
- [26] BELKIN M, NIYOGI P, SINDHWANI V. Manifold regularization: a geometric framework for learning from labeled and unlabeled examples [J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2006, 20(7):2399-2434.
- [27] GUAN Qiang, ZHANG Zi-ming, FU Song. Ensemble of Bayesian predictors and decision trees for proactive failure management in cloud computing systems [J]. *Journal of Communications*, 2012, 7(1):52-61.

(上接第 430 页)

参考文献: