

飞机智能装配单元构建技术研究*

李西宁¹, 蒋博¹, 支劲伟¹, 王守川²

(1. 西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072;

2. 中航飞机技术装备设计所, 西安 710089)

[摘要] 智能装配单元是实现飞机智能装配的基本生产单元,可以有效提高飞机装配质量。结合智能制造的理念,提出了飞机智能装配单元的组成和内涵;研究了飞机智能装配过程中实现状态感知、实时分析、自主决策、精准执行的关键技术;并构建了面向飞机壁板组件的智能装配单元。

关键词: 状态感知; 实时分析; 自主决策; 智能装配单元; 飞机壁板

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.01/02.062



李西宁

博士、副教授,研究方向为装配与连接技术、板料成形技术,主持和参加国家“863”计划、国防基础科研、科技支撑计划等项目 20 余项。

《中国制造 2025》中提到“基于 CPS 的智能装备、智能工厂等智能制造正引领制造方式变革,计划以推进智能制造为主攻方向”,将智能制造作为实现从制造大国向制造强国转变的重要推手,实现信息化和工业化的深度融合。航空制造业处于制造业的顶端,产品高度复杂、技术密集度极高。波音、洛克希德·马丁等世界先进航空制造企业在实施新的战略规划时,都高度重视智能制造技术的研究与应用,认为其代表着航空工业未来的发展方向。国内航空企业在产品研制过程中,由数字化、精益化、自动化生产逐渐实现智能化^[1-2],但仍然存在一些问题,如数字化、自动化装备对周围环境等状态感知有限;生产人员、设备、物料等管理自动化程度不一,未实现集中管控等,都严重影响了产品装配精度和生产效率。随着飞机型号的不断推陈出新,其性能、功能要求也越来越高,因而对制造精度等也提出了新的需求。

随着智能制造技术的发展^[3-5],对飞机装配过程状态感知、实时分析、自主决策和精准执行是提高飞机

装配质量和效率的有效途径。与传统装配技术不同,飞机智能装配技术基于信息物理融合系统,通过应用智能技术,完成飞机装配过程的智能化。本文结合智能制造技术发展,规划了飞机智能装配单元,对实现状态感知、实时分析、自主决策、精准执行的智能特征的关键技术进行研究,并构建面向飞机壁板的智能装配单元,以期为提高飞机装配精度提供技术基础。

国内外智能制造技术应用现状

智能制造已经成为制造业未来发展的全新驱动因素。智能制造是在现代传感技术、网络技术、自动化技术和人工智能的基础上,通过感知、人机交互、建模和仿真形成决策;通过执行和反馈,实现产品设计过程、制造过程、企业管理及服务的智能化^[6]。而实现智能制造的必备条件是实现制造装备的智能化、制造单元的智能化,进而形成智能工厂。智能制造装备是一种具有预测、感知、分析、决策、控制功能的工艺装备,是在

* 基金项目: 陕西省科技统筹创新工程项目 (2016KTCQ01-50); 装备预研共用技术项目 (41423010202)。

装备数字化基础上的一种更先进、更能提高装配效率和装配精度的装备。

1990年,日本首先提出智能制造系统(IMS)的国际合作计划,其目的是克服柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统(CIMS)的局限性,开发出能使人 and 智能设备都不受生产操作和国界限制,且能彼此合作的高技术生产系统^[7]。美国曾在2012年启动了“先进制造业国家战略计划”,并提出“再工业化”的思路。其中提出要发展包括先进生产技术平台、先进制造工艺与设计以及数据基础设施等先进数字化制造技术,其核心是通过信息技术来重塑工业格局,激活传统产业。相比而言,德国则是在2013年4月举办的汉诺威工业博览会上正式推出“工业4.0”,这被称为以智能制造为主导的第四次工业革命,旨在通过信息流与实物流的深度融合建立一种新的生产方式。其实质就是信息物理系统CPS(Cyber Physical System),它通过人机交互接口实现和物理进程的交互,使物理系统具有计算、通信、精确控制、远程协作和自治功能^[8-10]。CPS的结构是通过网络将具备感知和控制等功能的物理层智能单元映射在对应的网络节点上,再通过应用层的人机交互实现对智能单元的控制。随着《中国制造2025》的提出,国内各机械制造业也在不断地采用新技术,包括3D打印、云计算、大数据、物联网等。例如,以生产混凝土机械和挖掘机为主的三一重工集团,已经实现物联网、大数据的大规模应用,实现了对全球设备的识别、定位、跟踪、监控、诊断处理和企业管理^[11]。

欧美国家在智能制造技术研究与应用于领先地位。这些先进国家在飞机制造方面,无论是组件装配、部件装配,还是在总装配生产线的方面,都有智能制造技术的应用。相比而言,国内航空制造企业,近20年来虽然陆续引入了数字化加工设备、数

字化检测设备、设计仿真软件、PDM系统、ERP系统以及先进的生产和质量管理理念等,智能传感器、射频识别技术、智能机器人、信息智能处理等智能技术已在飞机装配中得到初步应用,但是智能化技术水平与国际先进航空制造企业相比仍有较大差距。产品研制周期长、成本高、工厂产能有限、产品质量不稳定是国内飞机制造业普遍存在的问题。而飞机制造不同于其他机械制造行业,尤其是在飞机装配过程中,由于产品尺寸大、形状复杂、零件及连接件数量多,其劳动量占飞机制造总劳动量的一半甚至更多^[12],飞机装配过程直接决定了飞机装配质量。针对上述问题,在数字化技术广泛应用的基础上,构建飞机智能装配单元,感知和识别装配过程中产品和环境等信息,通过自主性地分析和决策装配中的问题,最终实现飞机的精准装配,不仅可以提高产品质量,还能够为智能工厂构建提供技术条件。

飞机智能装配单元构成

飞机智能装配单元是在统一管

控的基础上,以具有状态感知、实时分析、自主决策、精准执行等特征的智能工装为核心,集成物料管理系统的先进生产单元。智能装配单元是能够实现操作人员在正确时间、地点对正确的产品进行准确装配的综合系统,其具体构成如图1所示。

由图1可知,智能装配单元可分为状态感知模块、实时分析模块、自主决策模块、精准执行模块、定位夹紧模块、物料管理模块和综合管理模块共7部分,其中每个模块的内涵如下:

(1) 状态感知模块。

状态感知模块实现对周围环境和装配工装、产品等状态的实时感知。通过在装配单元中布置各类传感器,构建基于CPS的状态感知环境,实现对所需信息(如温度、载荷、位移、产品状态等)的有效采集,并对采集的多源、异构数据进行处理和融合,为实现实时分析提供有效信息。

(2) 实时分析模块。

实时分析模块以感知信息为基础,实现对工装、产品状态等的分析。对飞机装配单元而言,主要通过基于

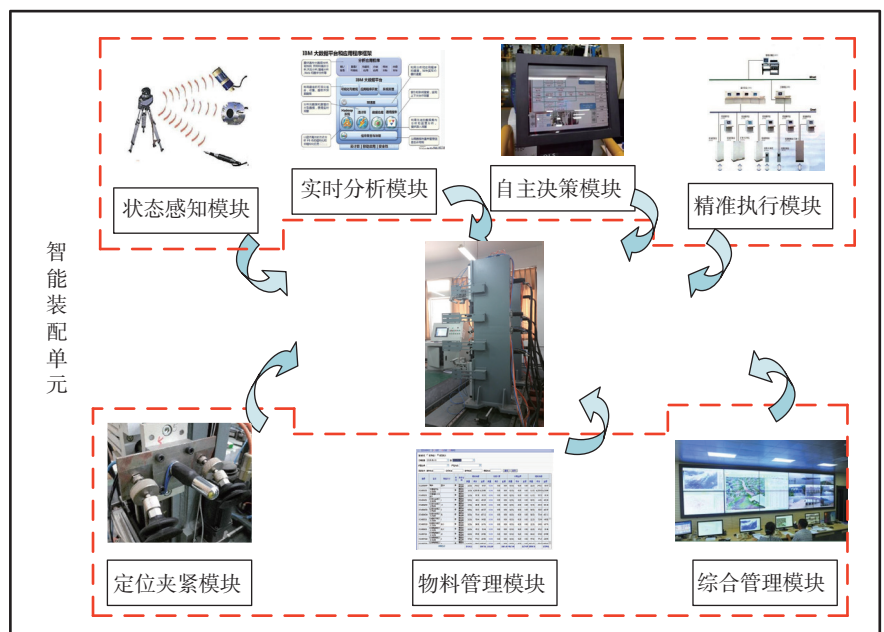


图1 智能装配单元构成

Fig.1 Composition of the intelligent assembly unit

感知数据的工装定位状态及其影响因素分析,给出实现产品精确装配的工装定位夹紧状态。

(3) 自主决策模块。

基于实时分析给出的调整要求(由实际状态和理想状态对比),通过自主决策方法,给出精准执行所要完成的决策指令。

(4) 精准执行模块。

智能工装在接收系统决策指令后,控制工装定位器的精准移动,达到对产品精确定位的目的。精准执行模块所需执行的操作是提高装配效率和装配精度、简化人工操作、保证装配过程的重要体现。

(5) 定位夹紧模块。

定位夹紧模块作为智能工装执行的末端,负责对装配对象进行定位和夹紧,限制产品在装配过程中的变形,使得装配后的产品满足制造准确度的要求。

(6) 物料管理模块。

物料管理模块实现物料、工具等的准时化配送,是实现飞机智能装配的必备条件。通过实时获取物料仓储信息、在途信息等,实现对物料的选择、移动及配送等操作的全面控制和管理。

(7) 综合管理模块。

综合管理模块是装配单元的“管控中心”,监控和管理在智能装配单元中的产品装配过程。除了在装配过程中对子单元的分工和管理,还需要对突发的状况进行及时处理,从而保证了装配单元的持续性健康工作。

飞机智能装配单元关键技术研究

为了构建飞机智能装配单元,并进行工程应用,需要研究的相关技术如图2所示,其中关键技术包括:状态感知模型构建技术、定位误差模型构建技术、定位器全局路径决策技术及多定位器变增益交叉耦合控制技术

1 状态感知模型构建技术

通过数据融合把从各种传感器(温度传感器、力传感器、位移传感器、点云数据传感器等)采集来的感知信息(温度、力、位移、坐标等)综合起来,进而确定产品装配过程的状态感知模型,并利用模型重构的方法对装配工装与装配对象的实时状态予以直观呈现,如图3所示。首先,对通过多个传感器采集到的信息进行预处理;然后,对预处理后的多个传感器信号分类,根据感知对象的不同,对分类后的多传感器数据进行汇集;接着对同一类型状态影响要素通过数据融合的方法进行综合(如为更准

确地得到装配对象当前位姿,可对装配对象上能反映位姿的特征点进行测量,或对定位点位置进行测量,也可对各定位器所受不同载荷进行测量,通过对于同一目标的多角度感知及数据融合可以获得对于装配对象位姿一致性的描述);综合后状态影响要素及状态的集合即为所需的系统状态感知模型;最后,利用感知获得的状态影响要素,通过模型重构的方式实现工装和装配对象的直观展示。在智能装配单元中,其状态感知模型(SP-Model)的具体形式可表示为 SP-Model={ 定位器位移,装配环境温度,装配工装所受载荷,装配对象

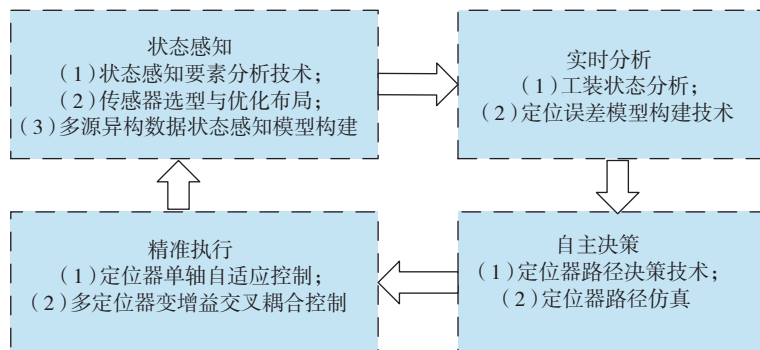


图2 飞机智能装配单元关键技术
Fig.2 Key technology of aircraft intelligent assembly unit

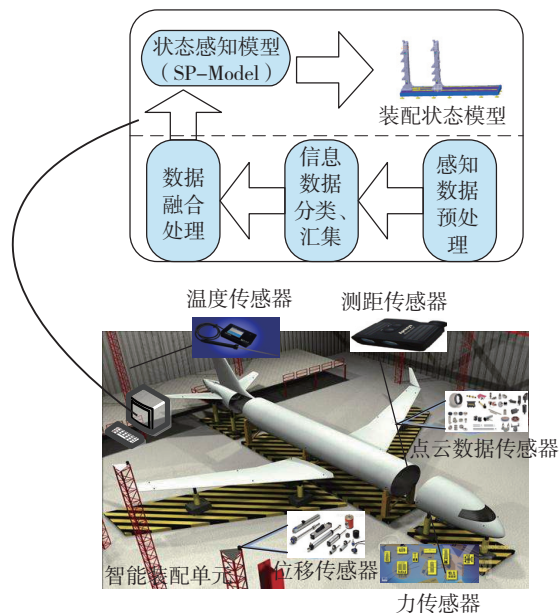


图3 多源异构数据的状态感知模型构建
Fig.3 State-aware model construction of multi-source heterogeneous data

位姿等}。

2 定位误差模型构建技术

实时分析的主要内容是基于感知数据,建立当前状态下工装的定位误差模型。由于飞机装配工装定位误差问题是一个包含多种因素的多输入输出非线性问题,利用运动学与力学等的机理建模方法难以获得能够描述任意装配工装定位误差的通用模型。因此,本文采用基于参数估计和系统辨识理论的误差建模方法:通过人工神经网络辨识方法充分逼近任意复杂的连续非线性关系,最终建立飞机装配工装定位误差模型,具体方法如图4所示(其中, w 为SLFN(单隐藏层前馈神经网络)模型的输入层与隐含的连接权值; v 为SLFN模型的隐含层与输出层和输入层的连接权值; b 为SLFN模型的隐含层的阈值)。首先,依据产品装配生产过程中不同条件下收集与存储的工装状态数据,将所存储的数据用作SLFN建模的数据样本集,装配过程的次数越多所带来的数据样本集越庞大,根据获取产品装配目标状态的目的,选择合适的神经网络类型;然后,对所有样本数据正向运行一次并反向传播修改连接权值一次,成为一次训练,这样的训练需要反复地进行下去直至获得合适的映射关系;最后,基于ELM(极限学习机算法)可求解模型参数,进而获得工装的定位误差模型。

3 定位器全局路径决策技术

依据感知的状态信息,以及实时分析确定的工装定位目标状态,决策系统应实现对于多定位器在空间中移动路径的决策。对于这种决策问题,可将定位器经过的路径点所构成的序列作为决策变量,以定位器路径最短为目标函数建立路径优化模型。采用基于蚁群优化算法求解模型(见图5),当满足终止条件时,输出的计算结果即为决策出多定位器全局路径的规划方案。并以路径规划方案

形成决策指令,指引工装控制系统的精准执行。

4 多定位器变增益交叉耦合控制技术

精准执行是基于决策指令实现多定位器协调运动的过程。对于多轴联动的定位器运动机构,可采用交叉耦合控制技术进行。依据交叉耦合控制原理(见图6,其中 E_x 、 E_y 、 E_z 为位置误差向量在 X 、 Y 、 Z 轴的分量, U_x 、 U_y 、 U_z 为控制器对 X 、 Y 、 Z 轴的输出指令)及分析得到的定位误差模型,将计算所得的误差按照被控对象的运动关系分别补偿到各运动轴的误差补偿器中,即误差分配控制器。工

装上的多个定位器可在 x 、 y 、 z 3个方向上运动,依据三轴定位器的结构位置关系,建立定位器运动学模型。交叉耦合控制依据本模型,通过协调三轴运动并进行补偿,最后根据各运动轴在运行过程中的反馈信息,对轮廓误差模型增益值进行实时修正,以得到最佳的误差补偿值,并将其反馈给各运动轴,实现对运动误差及时补偿,达到精准执行的目的。

飞机壁板组件智能装配单元构建

本文以立柱式数字化柔性工装为基础,通过布置所需传感器,初步

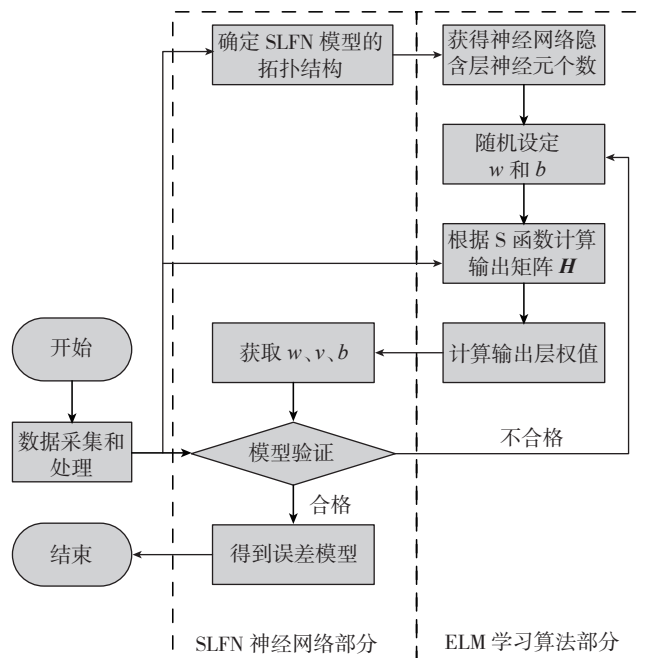


图4 基于ELM的装配工装误差模型

Fig.4 ELM-based error model of assembly tooling

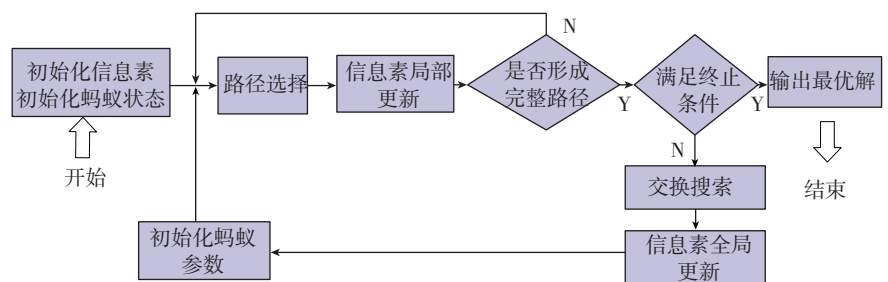


图5 基于蚁群优化算法求解过程

Fig.5 Solving process based on ant colony optimization algorithm

构建了面向飞机壁板装配的智能单元。

立柱式数字化柔性工装主要包括基座模块、立柱模块、蒙皮边界定

位夹紧模块、蒙皮表面定位夹紧模块,如图7所示。工装采用“N-2-1”原则定位壁板,即壁板内表面由多个蒙皮内形定位点进行定位,壁板下侧

水平边界由2个定位点进行定位,壁板竖直边界由1个定位点进行定位。通过数字伺服控制系统调整定位器的布局,形成不同的吸附点阵,可以满足不同壁板的装配要求,实现工装“一架多用”的功能。

通过分析影响壁板装配精度的关键因素,选择温度和载荷作为主要的感知信息源,通过布置温度传感器和载荷传感器等(图8中在定位柱以及立柱后端的合理位置布置传感器,对装配过程中的载荷信息进行采集),在对壁板装配过程中的温度、载荷、产品几何状态感知的基础上,通过定位误差及其影响因素分析,在定位调整决策指令引导下,实现了壁板的精确定位,如图9所示。

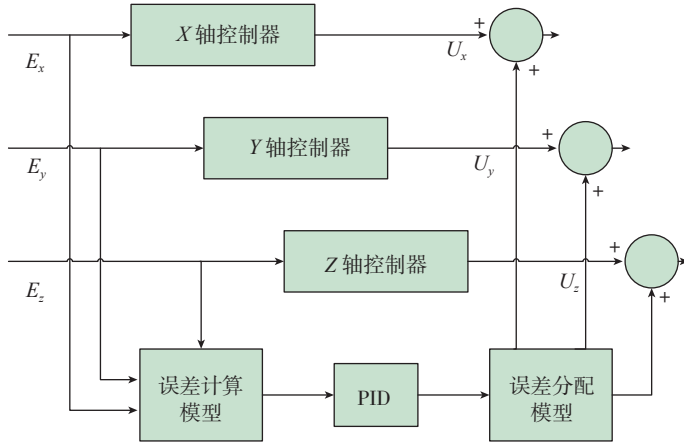


图6 交叉耦合控制原理
Fig.6 Principle of cross coupling control

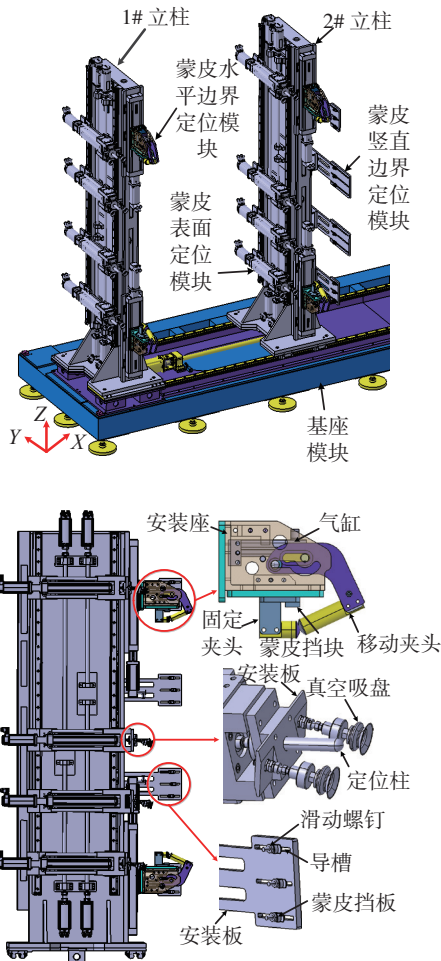


图7 立柱式数字化柔性工装
Fig.7 Column-type digital flexible tooling

结论

本文结合智能制造的理念,提出了智能装配单元的内涵及其实现关键技术,并以此为依据初步构建了飞机壁板智能装配单元。从国内航空制造业整体情况来看,智能技术已在飞机装配中得到一定应用,但与国际先进航空制造业相比仍有较大差距。

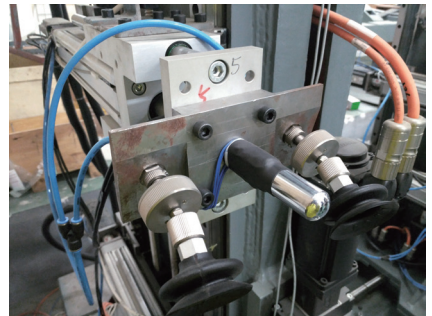


图8 载荷传感器布置
Fig.8 Load sensor arrangement

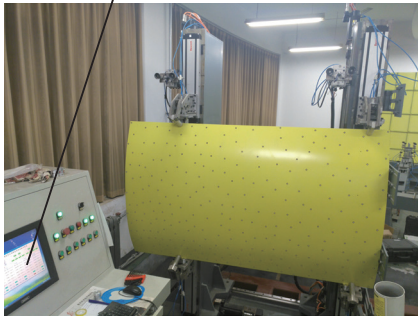
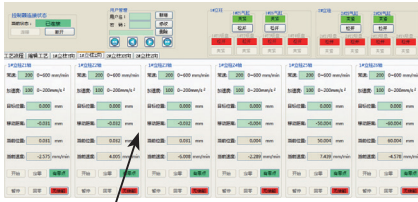


图9 飞机壁板智能装配单元
Fig.9 Intelligent assembly unit of aircraft panel

在《中国制造 2025》战略的引领与推动下,应积极开展智能技术研究,并结合型号研制进行应用与推广,在有效提升产品质量和生产效率的同时,促进我国飞机装配技术水平不断提高。

参考文献

- [1] 牛润军. 飞机智能化装配技术研究[J]. 新技术新工艺, 2016(10): 50–52.
NIU Runjun. Research on intelligent assembly technology of aircraft[J]. New Technology & New Process, 2016(10): 50–52.
[2] 王焱, 王湘念. 智能制造的基础、组成及发展途径[J]. 航空制造技术, 2015,

58(13): 32–37.

WANG Yan, WANG Xiangnian. Foundation, composition and development ways of intelligent manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(13): 32–37.

[3] 谭建荣, 刘达新, 刘振宇, 等. 从数字制造到智能制造的关键技术途径研究[J]. 中国工程科学, 2017, 19(3): 39–44.

TAN Jianrong, LIU Daxin, LIU Zhenyu, et al. Research on key technical approaches for the transition from digital manufacturing to intelligent manufacturing[J]. Engineering Sciences, 2017, 19(3): 39–44.

[4] 周佳军, 姚锡凡, 刘敏, 等. 几种新兴智能制造模式研究评述[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(3): 624–635.

ZHOU Jiajun, YAO Xifan, LIU Min, et al. State-of-art review on new emerging intelligent manufacturing paradigms[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(3): 624–635.

[5] 孔繁宇, 吕德刚. 智能制造关键问题研究[J]. 交通科技与经济, 2017, 19(4): 73–76.

KONG Fanyu, LÜ Degang. Research on key technologies of intelligent manufacturing[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2017, 19(4): 73–76.

[6] 刘世磊. 三一重工: 打造中国本土工业物联网开放平台[J]. 中国工业评论, 2016(8): 84–88.

LIU Shilei. Sany Heavy Industry: build China's domestic industrial networking platform open platform[J]. China Industry Review, 2016(8): 84–88.

[7] 王仲奇, 杨元. 飞机装配的数字化与智能化[J]. 航空制造技术, 2016, 59(5): 36–41.

WANG Zhongqi, YANG Yuan. Digitization

and intellectuality of aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(5): 36–41.

[8] 宋利康, 郑堂介, 黄少华, 等. 飞机装配智能制造体系构建及关键技术[J]. 航空制造技术, 2015, 58(13): 40–45, 50.

SONG Likang, ZHENG Tangjie, HUANG Shaohua, et al. Aircraft intelligent assembly manufacture system construction and its key technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(13): 40–45, 50.

[9] 刘辛军, 谢福贵, 汪劲松. 当前中国机构学面临的机遇[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 2–12.

LIU Xinjun, XIE Fugui, WANG Jinsong. Current opportunities in the field of mechanisms in China[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 2–12.

[10] DOYLE F. The impact of control technology[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2011, 31(5): 26–27.

[11] 傅建中. 智能制造装备的发展现状与趋势[J]. 机电工程, 2014, 31(8): 959–962.

FU Jianzhong. Development status and trend of intelligent manufacturing equipment[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(8): 959–962.

[12] 何瑾. 智能制造装备业, 万亿市场蓝图初现[J]. 科技智囊, 2013(8): 38–40.

HE Jin. Intelligent manufacturing equipment industry, trillion market blueprint for the beginning[J]. Science and Technology Think Tank, 2013(8): 38–40.

通讯作者: 李西宁, E-mail: lixining@nwpu.edu.cn。

Construction Technology of Intelligent Assembly Unit for Aircraft

LI Xining¹, JIANG Bo¹, ZHI Shaowei¹, WANG Shouchuan²

(1. Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Tooling Design Institute of China Aviaion Aricraft Corporation, Xi'an 710089, China)

[ABSTRACT] Intelligent assembly unit is the basic production unit of intelligent assembly, which can effectively improve the quality of aircraft assembly. Based on the concept of intelligent manufacturing, the connotation and composition of the intelligent assembly unit of aircraft are put forward. Then the key technologies to realize the state perception, real-time analysis, decision-making, precision implementation of the aircraft intelligent assembly process are researched. Finally, the intelligent assembly unit for aircraft panel is constructed.

Keywords: State perception; Real-time analysis; Decision-making; Intelligent assembly unit; Aircraft panel

(责编 逸飞)