

模块化柔性飞机装配生产线设计

巴晓甫,赵安安,郝 巨,王守川,杨亚鹏

(航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司,西安 710089)

[摘要] 针对传统飞机装配生产线自动化程度和效能低的问题,研究设计了一条模块化柔性飞机装配生产线。将传统的部装生产线和总装生产线规划为一条装配生产线,根据装配流程和就近布置原则对总装区、部装区、组装区进行模块化分区,并对装配生产线中的装配工装、制孔设备和工作平台等进行模块化设计,设置通用的移动接口和能源信息接口。通过对飞机装配生产线效能分析得出:在不大幅增加建设成本的基础上,模块化柔性飞机装配生产线中装备利用率大幅提升,整体自动化程度显著提高,装配周期明显缩短。

关键词: 模块化; 柔性; 飞机装配生产线; 装配流程; 就近布置; 效能

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.09.072



巴晓甫

硕士,高级工程师,研究方向为飞机数字化装配技术。

飞机装配生产线是根据飞机产品数据和装配工艺总方案,将飞机从零件装配成组件,从组件装配成部件,从部件装配成全机的装配流水线。飞机装配生产线以一个个的装配站位串联而成,每个装配站位都包括装配和加工两部分工作,装配工作

包括产品的定位、压紧、检测、调姿、分解、再定位等工序;加工工作包括产品的制孔、镗窝、涂胶、送钉、连接等工序。

为了提高飞机装配生产线的效能,采用自动化装配技术比人工操作具有更大的优势^[1]。近年来,以国际上两大飞机制造公司——波音公司和空客公司为代表的航空制造企业,大力发展数字化装配技术,大量采用了数字化柔性装配工装^[2-5]。波音公司最先尝试并探讨了改变传统装配方法的途径,首先利用共用孔定位减少工装,之后广泛采用了自动化装配站,实现柔性化装配,最终形成移动生产线,使飞机装配技术发生了革命性的变化^[6]。波音 787 客机装配生产线采用了 IGPS 测量系统,一次固定装配标定后,该测量系统就可以无限次数地使用,并可以为多台装配站位同时使用^[7]。洛克希德·马丁公司采用一种 U 型装配生产线,使得 F-22 的装配周期由 16 个月缩短为 12 个月^[8]。空客公司在 A380、A400M 和 A350 等大型飞机的装配中,通过采用先进柔性工装和夹具,以及创新的柔性装配理念,并且揭示

了柔性装配的一些最新发展方向,通过并行运动机械装配 PKM 和可重配置工装 ART 的研制和应用,显著提高了装配效率^[9]。

国内飞机装配生产线中装配和加工对应着大量的固定式工装和手工制孔工作,工人在工装型架上完成飞机零部件的定位和压紧后,进行手工制孔、镗窝、铆接等工作。从整体上看,国内在飞机装配柔性工装的研究应用上仍处于起步阶段,柔性工装的研制和应用缺乏规范和指导,能够成功应用的柔性工装数量较少,不能形成规模,特别是在飞机组件级、段(部)级装配中,更是缺乏深入的研究应用^[10-12]。近年来,随着数字化装配工装和自动钻铆机、制孔机器人在飞机装配生产线的应用推广,国内几大飞机主机厂都采购了专门针对飞机某一部件而将装配工装和加工设备于一体的集成式装配加工系统,如西飞公司的 ARJ21 机翼装配生产线、C919 机翼装配生产线等。但通过这几年的应用实践来看,发现存在不少问题,一是由于飞机产量低的原因,造成很多昂贵的专用型装配加工系统多数时间都处于闲置状态,装配加

工系统利用率低；二是由于只有少数重要的飞机部件才配套数字化装配加工系统,造成飞机装配生产线中自动制孔的数量相对于全机的制孔数量的比例很低,手工装配和制孔占比非常高,飞机装配生产线的整体自动化程度仍然很低,因而出现了需要提高装配加工系统自动化程度而生产线上的装配制孔设备又常常处于闲置的不合理现象。这就提出了一个直接且亟待解决的问题,在后续机型装配生产线研制中,如何既提高装配加工系统的利用率又提高自动装配加工在全机装配加工的占比,使飞机装配生产线的应用效能得以大幅提升。

本文设计的模块化柔性飞机生产线,将飞机生产线中装配工装、加工设备、工作平台、AGV车等结构进行模块化设计,同时也将装配流程进行模块化设计,目的是解决制约效能提升的瓶颈,提升飞机装配生产线上各个站点的使用效能。

飞机装配生产线流程

飞机装配生产线流程包括组件装配流程、部件装配流程和总装配流程3个部分。

1 组件装配流程

组件装配将来自零件车间的蒙皮、长桁、肋、复材壁板、机加框、交点零件、梁等散件装配成组件,组件装配工装的数量特别多,根据飞机的结构特点,有的机型的组件装配工装数量多达300~400百台,图1所示为某飞机机身壁板组件和机翼前缘组件的装配流程。

2 部件装配流程

部件装配将来自组件装配站位的壁板组件、舱门组件、天窗组件、框组件、梁组件、前缘组件、后缘组件、盒段组件等装配成部件,部件装配流程包括前机身部件装配流程、中机身部件装配流程、后机身部件装配流程、机翼盒段装配流程、尾翼装配流

程等,如图2所示为某飞机中机身部件和机翼翼盒部件的装配流程。

3 总装配流程

总装配一般分为多个站位,第1站位为大部件站位,将来自部件装配的机头部件、机身部件、后体部件、机翼部件、平尾部件、垂尾部件等装配成全机,如图3所示。

第2、3站位分别为系统件安装

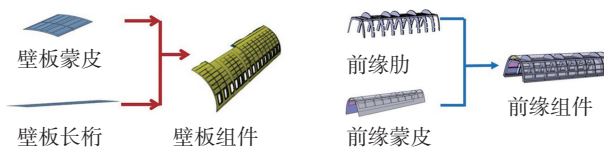


图1 组件装配流程

Fig.1 Components assembly process

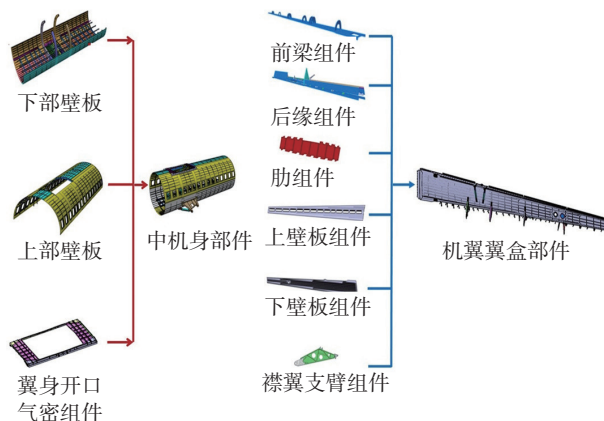


图2 部件装配流程

Fig.2 Parts assembly process

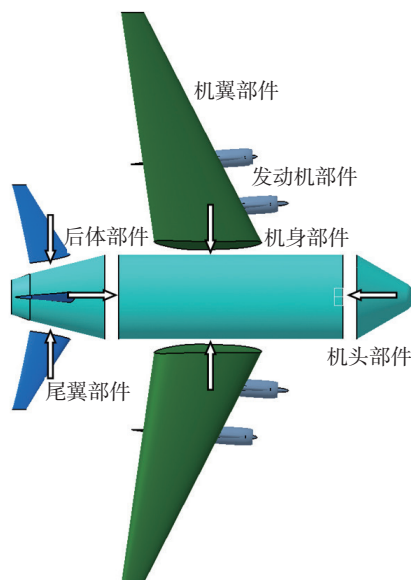


图3 总装配中大部件对接

Fig.3 Joint of large parts in final assembly

站位和系统件检测站位,第4站位为试验交付站位,第4站位后,飞机将进入试飞站试飞,如图4所示。

飞机装配生产线组成

飞机装配生产线组成主要包括厂房、装配工装、加工设备、测量设备、工作平台、运输车、能源设施等,如图5所示。

根据飞机型号数据和装配工艺总方案,规划厂房尺寸、吊车参数、通道宽度、跨数与跨宽、地面平整度、地面承载力、进出口大门等要素;规划装配工装中组件装配工装、部件装配工装、总装配工装、架外补铆工装、临时放置架的结构形式和几何尺寸;根据装配站位技术要求,规划加工设备的形式,可选择机床式制孔设备、机器人式制孔设备、柔性轨式制孔设备、爬行式制孔设备等不同类型;根据装配站位要求和制孔设备特点,规划工作平台结构形式和移动方案;根据移动方案和接口形式,规划移动车的形式,可选择麦轮式移动车、舵轮式移动车、牵引式移动车、手推式移动车等。综合考虑厂房、装配工装、制孔设备、工作平台、移动运输车等方案后,规划能源柱布局方案,能源柱包括压缩空气设施、吸尘设施、厂房空调设施、机载空调设施、配电设施、弱电设施等,图6所示为飞机装配生产线组成框图。

模块化柔性飞机装配生产线设计

1 厂房模块化规划

将组件装配、部件装配和总装配集中在一个厂房内,进行集约化、模块化规划和管控。

根据零件—组件—部件—总装—试飞这一流程,根据总装后就近进入试飞跑道的原则,可以确定厂房内最佳的总装配站位,然后根据流水线原则,依次倒排和确定最佳的部件装配站位和组件装配站位。

总装配生产线在大部件对接后,主起落架和前起落架都已安装到位,此时飞机向后一个站位移动时就依靠自身起落架轮组进行移动,因此,总装配生产线的各个站位一般都成一直线进行排列。

在部装生产线规划上,为了使各个部件就近转站进入总装的大部件对接站位,需要将部件装配站位规划

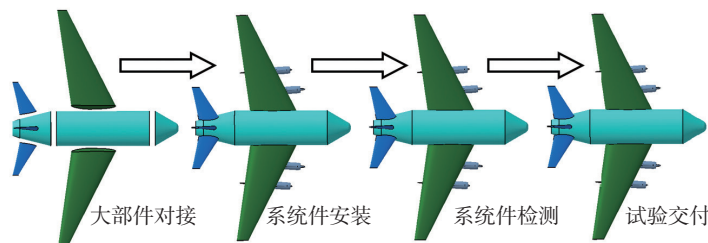


图4 总装配4个站位流程
Fig.4 Four stations of final assembly

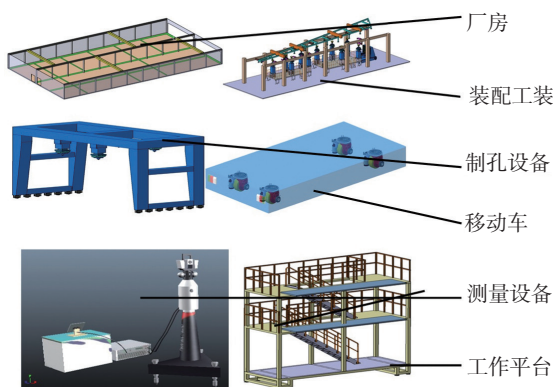


图5 飞机装配生产线结构示意图
Fig.5 Structure of aircraft assembly line

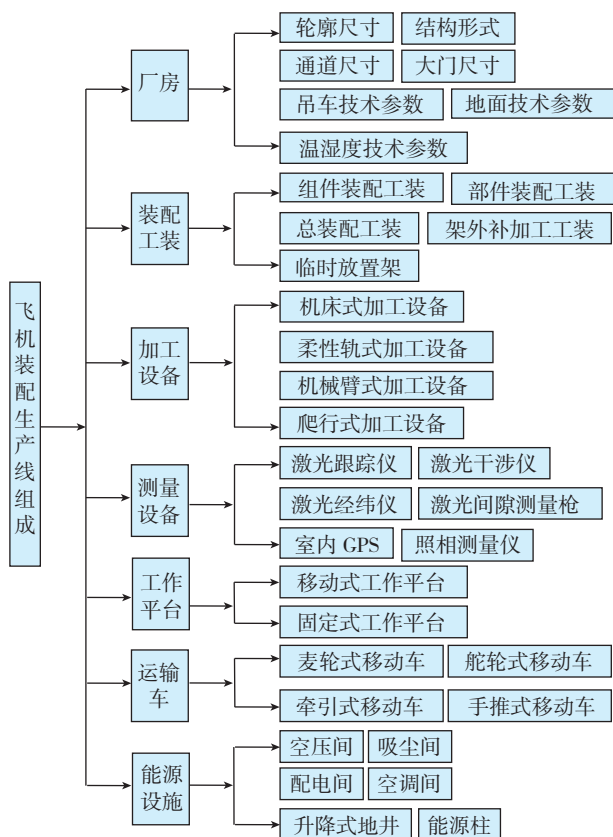


图6 飞机装配生产线组成框图
Fig.6 Composition block diagram of aircraft assembly line

在通道旁边,并尽可能地靠近总装的大部件对接站。

组件装配生产线一般根据机头、机身、机翼、尾翼等飞机结构的分类进行集中规划,即机身组件装配生产线集中在一个区域,机翼组件装配生产线也集中在一个区域等。

按照上述厂房模块化规划原则设计的厂房规划如图7所示。

2 模块化设计

2.1 移动接口模块化

装配工装是指在飞机产品从组件到部件装配以及总装配过程中,用以控制其几何外形和空间位置关系的具有定位功能的工艺装备。装配工装主要由骨架定位器、外形定位器、压紧器、框架、辅助装置等结构组成。传统装配工装一般都是专用型装备,其框架通过地脚螺栓与地基进行永久连接,一次安装好后,就不再分离和移动。

装配工装模块化是基于装配工装可移动、可再重复定位,不与地面进行永久连接等要求,将装配生产线中所有工装的移动接口设计成通用性接口的设计思路。

装配工装的移动形式很多,如AGV车背负移动、牵引车抱轮移动、导轨移动等。其中,AGV车背负移动相对其他移动方式的优点有:AGV车具有全向移动功能,可横行竖跑,无需设置转弯半径,能节省厂房空间;AGV车移动无需破坏地面,可保持整个厂房的平整度。

为了使AGV车能适用飞机装配生产线中所有工装的背负移动,需要对装配工装中移动接口和AGV车的长、宽、高进行协调设计。通用AGV车的尺寸为: W (宽)=2.0m, L (长)=5.0m, H (高)=0.45~0.65m,如图8所示。综合考察所有装配工装的尺寸大小,找出一个最优的接口尺寸: w (宽) ≥ 2.2 m, h (高)=0.55m,长度不限。使得对于小型工装,单台AGV车就可以背负移动,对于大型

工装,通过多台AGV车共同背负,通过联组运动进行移动。工装要移动时,AGV车高度降至最低0.45m,运动至工装接口底部,然后将AGV车高度升至0.65m,使工装下表面离地0.1m,AGV车背负工装移动到加工中心进行制孔等工序。

2.2 能源信息接口模块化

能源接口包括压缩空气接口、真空吸尘接口、电源接口、网络接口等,传统装配工装固定不动,这些接口也是连接好后就不会拆卸。装配工装都可移动后,能源信息接口就必须可拆卸,为了使这些接口在整个生产线都是通用的,就必须对接口进行模块化、标准化设计。

如图9所示,装配工装上通过内置方式集成了通用的压缩空气、真空吸尘、电源、网络等接口。

2.3 地面定位接口模块化

可移动装配工装移动到某个目标位置后,由于工装坐标系的位姿发生了变化,需要重新建立可移动装配工装坐标系与测量系统坐标系、加工设备坐标系的转换关系,每一次装配工装的移动都需要重新标定一次坐标转换关系,该过程时间长、效率低。

综合考察所有装配工装的尺寸大小、刚度分布、质量分布、载荷分布等,找出一个最佳支撑点的公约数,装配工装框架底部按公约数的倍数设置支撑点(公接头),在地面相关位置也按公约数的倍数设置支撑点(母接头),并将这些支撑点作为生产线全局坐标系中的标定点,只要可移动装配工装的公接头与地面的母接头配合后,就能快速识别可移动装配工装坐标系相对于生产线全局坐标



图7 厂房模块化规划
Fig.7 Plant modular planning

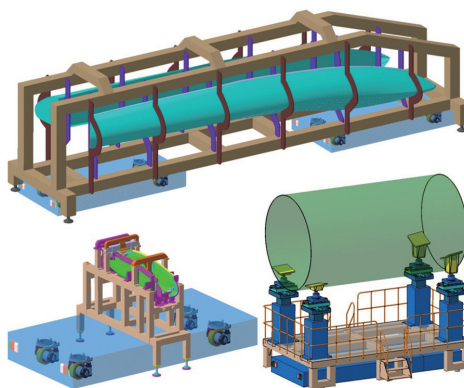


图8 移动接口模块化
Fig.8 Mobile interface modularity

系的位姿关系,找坐标系转换的效率和精度都非常高。在一些高精度的场合,如果需要更高的位姿精度,只需要用增强测量系统进行局部的二次校准就可以实现。通用支撑点按 $2.5\text{m} \times 2.5\text{m}$ 的间隔在厂房地面和可移动装配工装框架底面进行布局,如图10所示。

2.4 工作平台模块化

工作平台广泛应用于飞机产品的装配、测量、制孔、连接、检验、试验等过程中,一般都是围着产品和装配工装四周进行布置,是工人工作可达性和方便性所必需的辅助装置。工作平台可分移动式平台和固定式平台两种,为了便于模块化设计和移动,采用可移动式工作平台。

可移动式工作平台进行模块化设计,应用时根据需要进行组合,避让时拆成小模块移开。模块化的工作平台,不仅工作平台的制造工艺性好,避免了大尺寸结构的焊接,而且使用工艺性也好。

可移动工作平台的形式与可移动装配工装一样,有多种形式,为了使前文所采用AGV车同样适用于工作平台,设计工作平台的接口尺寸为: w (宽) $\geq 2.2\text{m}$, h (高) $=0.55\text{m}$,长度不限。使得对于小型工作平台,单台AGV车就可以背负移动,对于大型平台,通过多台AGV车共同背负,通过联组运动进行移动。可移动工作平台形式如图11所示。

模块化柔性飞机装配生产线效能分析

1 厂房效能分析

进行模块化、集约化规划的厂房,将传统的部装生产线厂房和总装生产线厂房合二为一,只有一条装配生产线,厂房占地面积明显减少,厂房配套设施(压空间、配电间、吸尘间等)由之前要采购两套变为采购一套,成本减少,某型机装配生产线不同方案厂房效能对比见表1所示。

基于AGV车转站的移动方式节省传统生产线厂房过大转弯半径所占的场地,节省厂房占地面积。

2 制孔设备效能分析

在加工设备数量相同的前提下,传统装配生产线的加工设备为专用型装备,仅针对单一部件进行制孔,大部分时间都处于闲置状态,而在模

块化柔性装配生产线的制孔设备,对所有产品都能实现制孔,闲置率将显著降低,某型机装配生产线不同方案制孔设备效能对比见表2所示。

3 AGV车效能分析

由于每台装配工装都需要移动转站,AGV车将和加工设备一样,不会出现过大闲置率的问题,利用率将

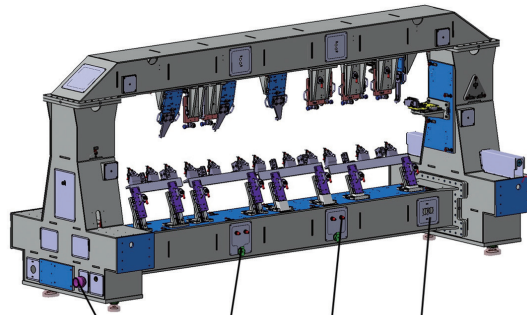


图9 能源信息接口模块化

Fig.9 Energy and information interface modularity

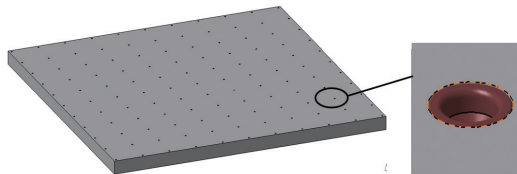


图10 地面定位接口模块化

Fig.10 Ground position interface modularity

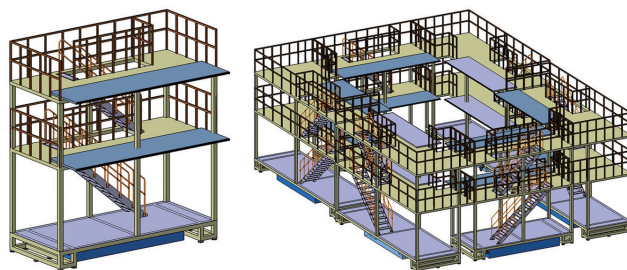


图11 工作平台模块化及其组合

Fig.11 Work platform modularity and its combination

表1 厂房效能对比表

效能因素	某型飞机装配生产线形式	
	模块化柔性飞机装配生产线	传统部总装分离式装配生产线
厂房占地面积 / m^2	42000	68000
厂房配套设施数量 / 套	1	2
移动车转弯半径 / m	5	10

表2 制孔设备效能对比表

效能因素	某型飞机装配生产线形式	
	模块化柔性飞机装配生产线	传统部总装分离式装配生产线
适用产品种类	178	10
自动化制孔率/%	≥ 60	≤ 20

显著提高。

结论

按照模块化柔性方式设计的飞机装配生产线,厂房占地面积比传统装配生产线占地面积少,加工设备和AGV车利用率高,自动化装配率和加工率高,是一条集约化、精益化显著的装配流水线,对缩短装配周期和提高生产线整体效能非常有利。

参考文献

[1] 许国康. 大型飞机自动化装配技术[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 734-740.

XU Guokang. Automatic assembly technology for large aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 734-740.

[2] ESSER M, VETTE M. Reconfigurable handling systems as an enabler for large components in mass customized production[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2013, 24(5): 977-990.

[3] MCKEOWN C, WEBB P. A reactive reconfigurable tool for aerospace structures[J].

Assembly Automation, 2011, 3(4): 334-343.

[4] JAYAWEEERA N, WEBB P. Adaptive robotic assembly of compliant aero-structure components[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2007, 23(2): 180-194.

[5] MILLAR A, KIHLMAN H. Reconfigurable flexible tooling for aerospace wing assembly[C]//Proceedings of the SAE 2009 Aerotech Congress and Exhibition. Seattle, 2009.

[6] 任晓华. 新型飞机自动化装配技术[J]. 航空制造技术, 2005, 48(12): 32-35.

REN Xiaohua. Technology of new aircraft automation assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005, 48(12): 32-35.

[7] 于勇, 陶剑, 范玉青. 波音787飞机装配技术及其装配过程[J]. 航空制造技术, 2009, 52(14): 46-47.

YU Yong, TAO Jian, FAN Yuqing. Assembly technology and process of Boeing 787 jet[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(14): 46-47.

[8] 任晓华. 洛克希德·马丁公司的F-22战斗机装配生产线[J]. 航空制造技术, 2006, 49(8): 36-38.

REN Xiaohua. Lockheed Martin's

F-22 fighter assembly line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006, 49(8): 36-38.

[9] 刘亚威, 任晓华. 空客大型飞机的柔性装配[J]. 国防制造技术, 2013(2): 32-35.

LIU Yawei, REN Xiaohua. Flexible assembly of large airbus aircraft[J]. Defense Manufacturing Technology, 2013(2): 32-35.

[10] 陈昌伟, 胡国清, 张冬至. 飞机数字化柔性工装技术研究[J]. 中国制造业信息化, 2009, 38(9): 21-24.

CHEN Changwei, HU Guoqing, ZHANG Dongzhi. Research on digital flexible assembly technology for aircraft[J]. Manufacturing Information Engineering of China, 2009, 38(9): 21-24.

[11] 王亮, 李东升. 飞机数字化装配柔性工装技术体系研究[J]. 航空制造技术, 2012, 55(7): 34-38.

WANG Liang, LI Dongsheng. Flexible tooling technology system for aircraft digital assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(7): 34-38.

[12] 张卫红, 罗小桃, 王振培, 等. 飞机装配工装结构分析与优化技术[J]. 航空制造技术, 2009, 52(25): 40-43.

ZHANG Weihong, LUO Xiaotao, WANG Zhenpei, et al. Structural analysis and optimization technique of aircraft assembly fixture[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(25): 40-43.

通讯作者: 巴晓甫, 硕士、高级工程师, 研究方向为飞机数字化装配技术, E-mail: baxiaofu@aliyun.com.

Design of Modular Flexible Aircraft Assembly Line

BA Xiaofu, ZHAO Anan, HAO Ju, WANG Shouchuan, YANG Yapeng

(AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Company LTD., Xi'an 710089, China)

[ABSTRACT] Aiming at the problem of low automation and low efficiency of traditional aircraft assembly line, a modular flexible aircraft assembly line is designed. Plan the traditional parts assembly line and general assembly line as an assembly line. Modularize the general assembly area, the component assembly area and the parts assembly area according to the assembly process and the nearly layout principle. Design of assembly tooling, hole equipment and working platform of assembly line is modular. Set up common mobile interface and energy information interface. Through the analysis of the efficiency of the aircraft assembly line, it is concluded that: On the basis of not increase the construction cost significantly, the equipment utilization rate of the modular flexible aircraft assembly line has been greatly improved, the overall automation degree has been significantly improved, and the assembly cycle has been significantly shortened.

Keywords: Modularity; Flexibility; Aircraft assembly line; Assembly process; Nearly layout; Efficiency and capacity

(责编 大漠)