

# 飞机移动装配线总体设计模式 探索与实践

杨文<sup>1</sup>, 耿俊浩<sup>2</sup>

(1. 中航西飞民用飞机有限责任公司, 西安 710089;

2. 西北工业大学机电学院, 西安 710072)

**[摘要]** 针对我国各型飞机种类及数量需求快速增长、飞机制造企业迫切需要新建或改建装配线的实际需求, 总结形成一种飞机移动装配线总体设计模式, 给出其总体框架、目标要素、主要流程及建设内容, 可供飞机总装、部装、维修以及其他类似产品的移动装配线建设参考, 该模式已应用于某型国产飞机移动装配线建设, 取得了良好效果, 验证了该模式的有效性。

**关键词:** 飞机装配; 移动式装配线; 总体设计; 精益生产; 智能制造

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.20.032



杨文

高级工程师, 主要研究方向为飞机大部件装配协调、飞机数字化装配及仿真、飞机装配生产线规划等。

随着我国社会经济的快速发展和当前国际国防形式的不确定性变化, 我国各型军机、客机、通用飞机等

产品的种类及数量需求快速增长, 飞机制造企业迫切需要尽快新建或改建相应的飞机部装或总装生产线, 同时所建装配线必须满足低成本、高效率、高质量、人性化、可持续发展的生产要求。当前, 移动式装配已经成为飞机装配生产的主要模式, 精益生产是生产制造企业的基本要求, 新工业革命环境下各种数字化、自动化飞机装配技术与系统发展迅速<sup>[1-2]</sup>。如何在飞机装配生产线中充分考虑移动装配模式特点、满足精益生产要求、发挥新兴智能技术优势, 是飞机装配生产线建设必须要考虑的关键因素。因此, 如何采用合理、恰当的系统化模式, 支持精益化、智能化的飞机装配线总体设计, 已成为飞机制造企业普遍关注的一个重要议题<sup>[3]</sup>。

20 世纪末, 衍生自丰田生产方式的精益生产思想推动波音公司提出了移动式飞机装配方式, 取得了巨

大成功。由于移动式飞机装配方式能够大幅缩短飞机装配周期、降低生产成本, 近年来, 多数飞机制造企业和大部分机型的总装生产采用了移动式装配模式。目前, 移动式装配模式正在从总装向部装、从装配向维修、从飞机向卫星等其他产品延伸<sup>[4]</sup>。我国飞机制造企业在飞机总装生产中也已经建成多条飞机移动装配线, 如西飞公司的飞豹和运 20 装配线、陕飞公司的运 9 装配线、成飞公司歼 10 装配线、洪都航空 L15 “猎鹰” 装配线等。目前, 我国飞机制造企业正在根据型号生产的迫切需求大力建设新舟 700、ARJ 21、C919 等型号的部装和总装移动装配线<sup>[2,5]</sup>。

在移动装配线建设过程中, 各飞机制造企业依据自身生产情况和型号特点, 兼收并蓄其他企业成功经验, 消化吸收装配线专业建设厂商建议, 采用多种方式、从不同方面对装

配线进行总体设计<sup>[6-9]</sup>。但是由于目前尚未形成系统化的总体设计模式,在设计过程中难免出现关键要素缺失、规划流程不畅、建设内容错位等情况,影响装配线设计效果。因此,本文总结生产线建设经验、借鉴其他企业成功案例,总结形成一种较为系统化的飞机移动装配线总体设计模式,以期为我国飞机制造企业开展装配线设计工作、提升产线设计效率和质量提供助力。

## 飞机移动装配线总体设计模式框架和目标要素

### 1 基于系统工程的总体设计框架

飞机移动装配线设计是飞机工业化生命周期的一个重要阶段。由

于飞机最终成本的80%在飞机概念设计阶段已被确定,30%的最终成本由装配作业确定,因此装配线的规划应该在飞机生命周期的概念设计阶段启动,并与飞机的生命周期后续阶段并行,通过并行工程的方式尽量降低最终生产成本,缩短生产周期。

飞机移动装配线设计的实质是将飞机的设计信息转化为集成化的物理装配过程,通过能量流、信息流、控制流和物理连接等要素实现飞机部组件的安装和测试,从而产出符合用户需求、系统功能、部件结构和组件特性的飞机产品。因此,飞机移动装配线设计是一个复杂的集成与验证系统工程,需要从生命周期、产品层级、运行过程等不同维度进行。为

描述飞机移动装配线设计的总体框架,本文应用系统工程方法和相关理论<sup>[6]</sup>,建立能够嵌入飞机研制生命周期、面向飞机不同层级构成、支持从安装到测试过程的需求-功能-结构-连接(Requirement-Function-Structure-Connection, RFSC)模型,用于指导逐级细化设计过程,其框架如图1所示。

RFSC是贯穿产线设计周期、贯通设计层次和关联运行过程的核心要素。从生命周期维度来看,飞机移动装配线设计既涉及到整个飞机研制生命周期的多个环节,又具有自己的生命周期及其阶段。飞机移动装配线设计起始于飞机研制生命周期的立项批复阶段,结束于总装生产阶

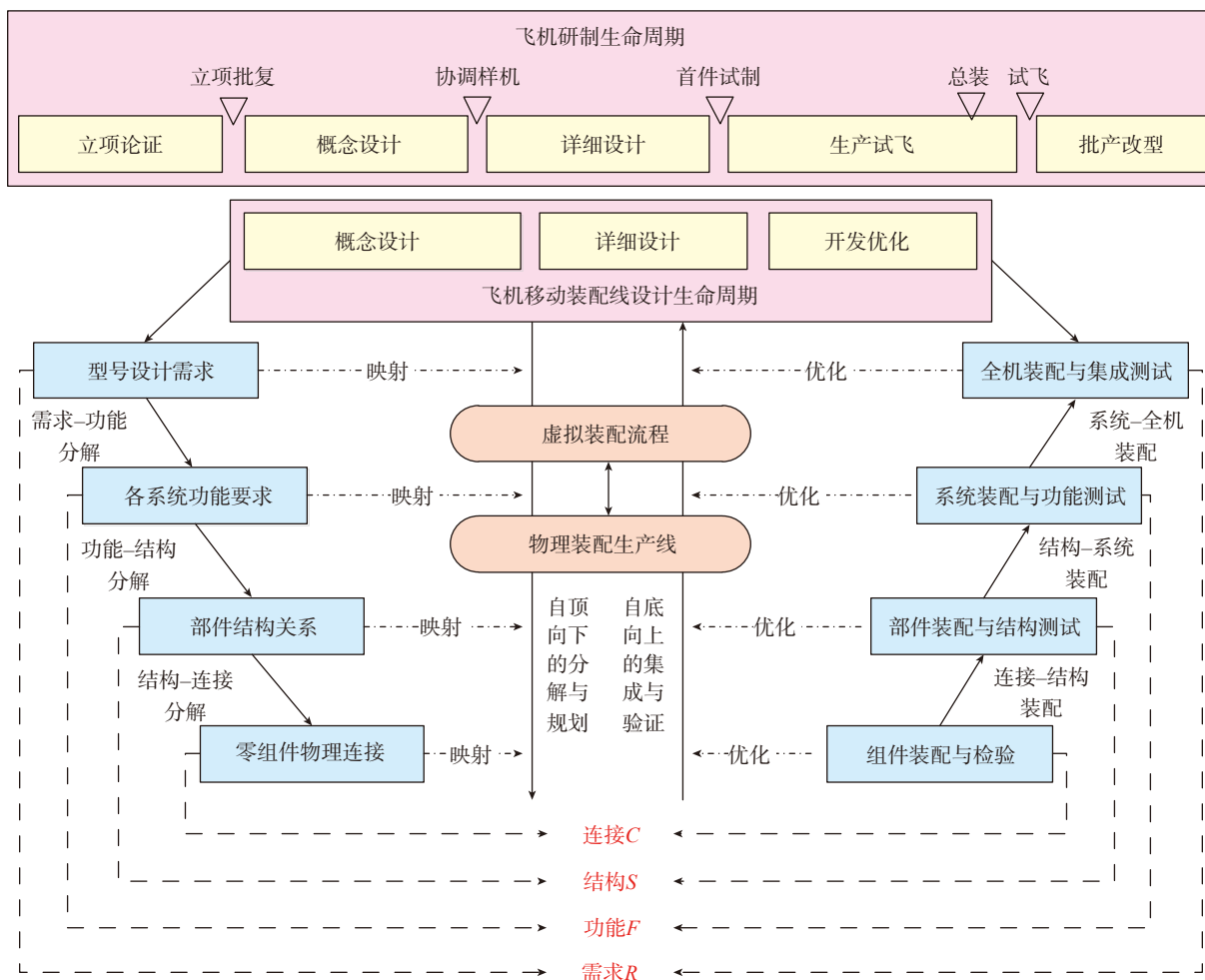


图1 基于系统工程的飞机移动装配线总体设计模式框架

Fig.1 Framework of overall design mode for aircraft mobile assembly line based on system engineering

段,其自身也分解为概念设计、详细设计和开发优化3个阶段,设计需求是其概念设计支撑,系统功能是其详细设计依据,部件结构和零件装配关系是其装配资源开发部署的基础。从产品层级维度来看,飞机移动装配线设计总体目标起始于整机的型号设计需求,然后依据需求-功能分解逐步细化至各大部件及系统件功能,之后通过功能-结构分解和结构-连接分解,细化至部件、段件、零组件的结构和配合关系,RFSC既是产线总体布局规划、部件装配区域或部件对接及系统件装配站位以及工位设计的依据,也是设计约束。从运行过程维度来讲,飞机移动装配线设计源自概念设计阶段,基于设计需求采用自顶向下的分解与规划方式,通过虚拟装配的方式,实现详细设计;在开发优化阶段,基于零部件以及组件装配结构域关系,通过自底向上的集成与验证方式,逐步通过硬件的安装、调试和优化,完成整个产线的建设工作。

## 2 基于五化一体的设计目标要素

飞机移动装配线设计时,应依据社会技术发展现状、企业自身情况、产品特点、生产需求、未来发展规划等确定设计目标要素,并确定设计原则。一般来讲,当前规划飞机装配线时,应以移动式生产为基本模式,确保质量、成本和周期,在此基础上关注以下5个相互独立又有所关联的基本目标要素:精益化、智能化、柔性化、协同化、人本化,并基于基本要素细化二级目标要素。

对于精益化来讲,其核心是消除一切不必要的库存、等待等浪费,同时确保每一个操作都达到有效输出,这个需要构建精益化生产体系来保障。对于智能化来讲,其关键在于引入各种先进的自动化装配、检测等装备,并建立以信息物理系统为基础的数字化生产管控集成系统。对于柔性化来讲,其关键在于通过渐进式设计、柔性工装等方式实现产能的逐步

爬坡,并支持多种改进型号的混流生产。对于协同化来讲,其关键在于能够支持“主制造商-供应商”合作模式,能够接入供应商运抵部件,支持企业内部各大部件的对接以及全机总装协同工作。对于人本化来讲,其关键在于充分考虑人工作业时的作业过程与作业装备的工效学,以及车间安全防护措施和设施,如图2所示。

## 飞机移动装配线总体设计过程及建设内容

### 1 基本流程

移动式飞机装配是依据装配过程和技术要求在移动的装配站位上,应用各种装配资源,使用配套的零组件和辅料,按照一定的生产节拍,遵循生产计划和作业规范,装配和测试完成符合质量、成本、效率要求的飞机产品的生产过程。

因此,飞机移动装配线设计是一个复杂的系统工程,应该在总体设计框架的约束下,依据设计目标要素,按照总体设计思路逐步开展相应的设计工作,规划并确定生产过程中涉

及的各个构成部分,并不断迭代优化直至产线定型,其主要设计流程如图3所示。

启动飞机移动装配线设计流程需要首先明确设计输入和目标以及相应的约束条件,如产品模型、产能要求、工作日规定等。由于需要和产品设计并行开展工作,因此可以根据产品设计结果迭代进行并逐步细化。飞机移动装配线设计一般需要开展产品工艺分析与方案、装配流程分析与规划、产能分析与厂房布局、装配资源选用与配置、部件交付与物流配送、节拍分析与生产线平衡、标准化与生产线管控等方面的分析、规划和定义,经过仿真分析和反馈优化后在相应的阶段形成对应的产出物,如优化后的装配流程、满足生产要求的车间布局、高效精准的物流配送体系等。但这几个阶段和相应的产出物并不是孤立的,它们之间存在很强的耦合性和联动性。因此在产线设计时要兼顾不同阶段和内容,但无论是哪个阶段或内容,在设计时都应该充分考虑设计目标要素并满足要素需求。

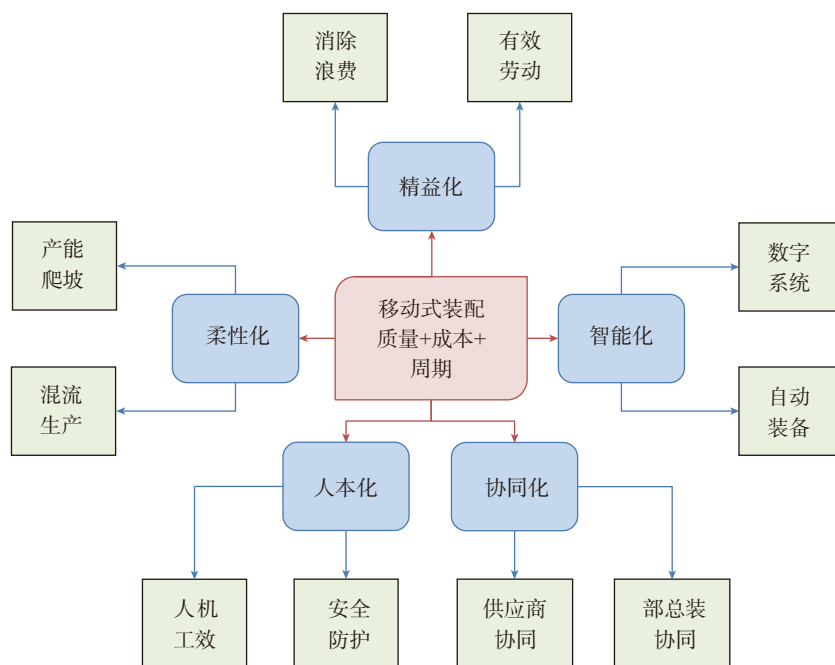


图2 飞机移动装配线总体设计目标要素

Fig.2 Target elements of overall design for aircraft mobile assembly line

## 2 主要内容

### 2.1 产品工艺分析与方案

开展产品工艺分析并确定工艺方案是开展装配线总体设计的首要前提工作。其工作内容是依据产品图样、数模及其技术要求,结合工厂生产技术基础和工艺技术水平,确定研制或批生产计划、互换协调原则、工艺装备的选择/设计/制造原则、零部件交付状态确定原则、新技术/新材料/新工艺的试验规则以及各种新标准的贯彻原则,形成工艺总方案和装配协调方案。所形成的工艺分离面、装配单元、定位基准和方法、协调方法、工装需求等内容是装配线

设计的重要影响因素。

### 2.2 装配流程分析与规划

装配流程是生产线规划的基本依据。装配流程的规划可以分为两个方面:一是通过装配仿真软件等工具,依据制造分离面划分和“装配-部件对接-系统装配-集成-测试-交付”流程的基本原则,对装配流程进行设计;二是依据装配经验,利用价值流图和工作量描述表对装配工序进行多轮迭代优化分析,从而形成精益化的装配流程,如图3和图4所示。

### 2.3 产能分析与厂房布局

根据飞机装配流程、产能需求

和整体工作量,采用(系统布局设计, Systematic Layout Planning, SLP)方法进行布局设计,采用DMAIC方法和产线平衡分析表进行产能的分析和平衡,从而确定站位数和各站位功能,并结合厂房实际情况合理优化工艺布局和功能区,实现生产线总体规划,尤其是要明确部件对接区域与总装区域不同站位之间的物流关系,同时为产品、装备、物料及人员等装配资源和电源、网络、空调、压缩空气等辅助资源的定置和配置预留位置。

### 2.4 装配资源选用与配置

装配资源主要包括工装、刀量

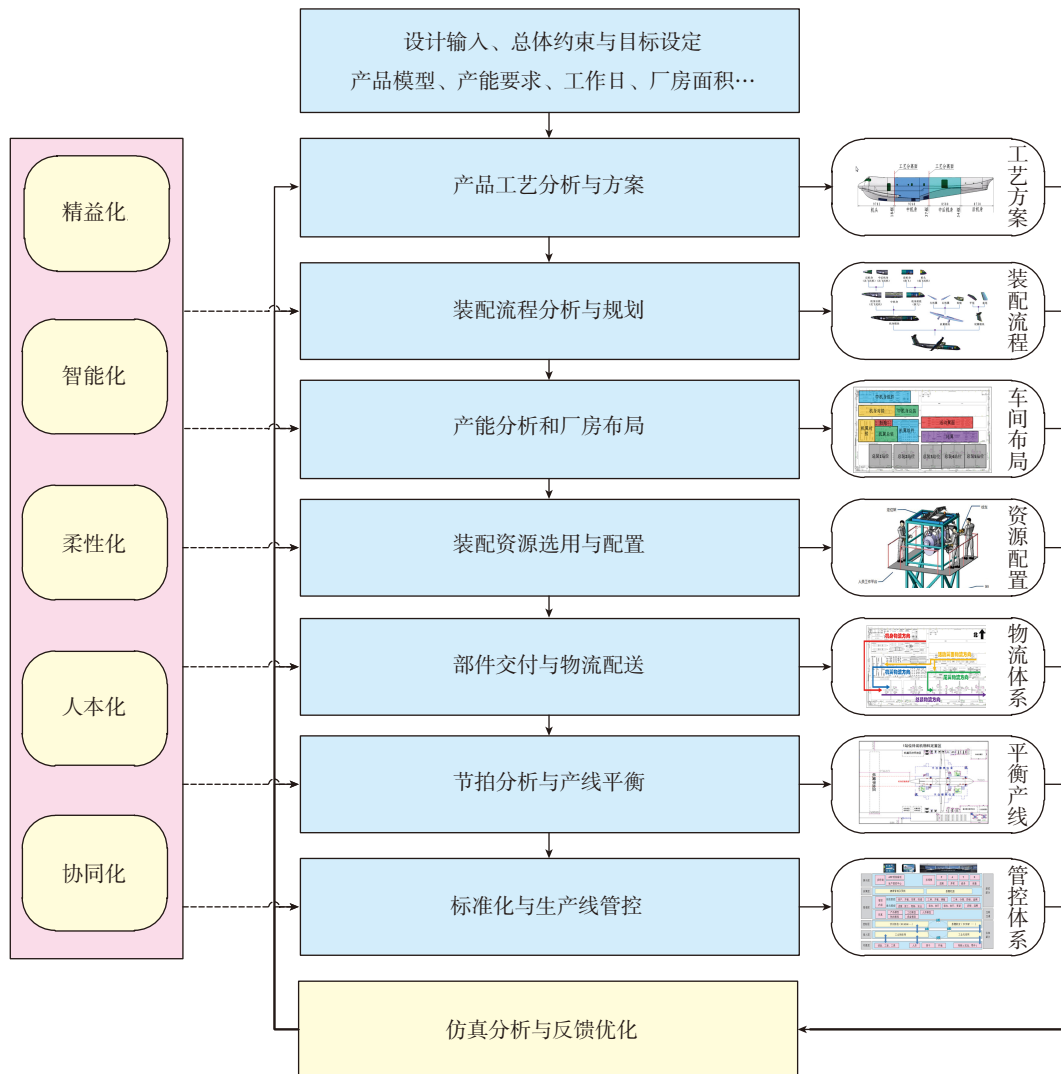


图3 飞机移动装配线总体设计基本流程

Fig.3 Main workflow of overall design for aircraft mobile assembly line

具、工具、设备和人力等方面,其选用和配置要兼顾先进性、实用性和成本控制。工装、设备等关键资源的选用应结合技术发展趋势和智能化建设原则,优先选择自动化、数字化、柔性化资源,如基于数字化调姿、智能AGV、自动安装、自动检测和在线检测、数字化测量等技术资源。人员配备应从技能和数量两个方面考虑,同时充分考虑人机功效,尤其要注意资源选配要为以后的产能爬坡和混流生产奠定基础。与产能分析和厂房布局阶段一样,均可以采用工厂规划系统等工具开展可视化设计工作。

### 2.5 部件交付与物流配送

物流配套和配送是移动生产的必要条件,是实现精益生产的关键要素。物流要充分考虑部件供应商交付部件、零部件和辅助材料、整机的流转要求。在此基础上建立供给线,能够准备好完全成套件并按指定架次、在指定时间、按规定路线、配送到

指定地点,不允许零件、工具、辅料等的分别配送。建立零件、标准件、成品件等物料的配送制度,并配置合理数量的物流配送车及零组件存放托架,从而形成完整的物流配套和配送体系。这一阶段可以采用物流仿真系统等工具开展可视化设计工作。

### 2.6 节拍分析与产线平衡

装配线的逻辑和物理结构初步设计完成后,需要根据客户需求建立生产节拍,同时要能够为未来的产能爬坡预留足够的缓冲。装配线各环节要在移动过程中保持动态协同或同步,既要能做到按照站位、天和班次平衡产能,也要能够依据生产计划做到全机乃至多机种的均衡交付,保证企业内部和外部供应链的均衡生产。产线平衡需要明确和采集计算所需信息,可以使用产线分析系统等工具辅助计算,依据计算结果不断迭代调整各参数直至满足要求。

### 2.7 标准化与生产线管控

为保证准时、无故障生产,必须建立标准化和数字化相结合的作业与生产管控体系与系统,其关键在于作业过程的标准化、作业流程单元化、生产过程无故障化、现场作业可视化、生产管控数字化。需要依据上述关键要素,建立标准化的作业操作规范、管理流程和具备采集、分析、监控等能力的生产计划、现场可视化与过程管控系统,实现信息传递的实时化和管理的可视化,使得需求、供应、作业执行都在可控状态下进行。这一阶段应和航空工业 AOS 建设以及企业信息化建设结合起来考虑。

### 2.8 仿真分析和反馈优化

在上述建设过程中,每个步骤都可以借助相应的工具进行仿真分析,也可以针对最终结果进行全面或某一要素的仿真分析,依据分析结果对初始设计进行优化和完善。在产线试运行期间也应该依据运行结果持续对产线进行优化和完善,最终形成

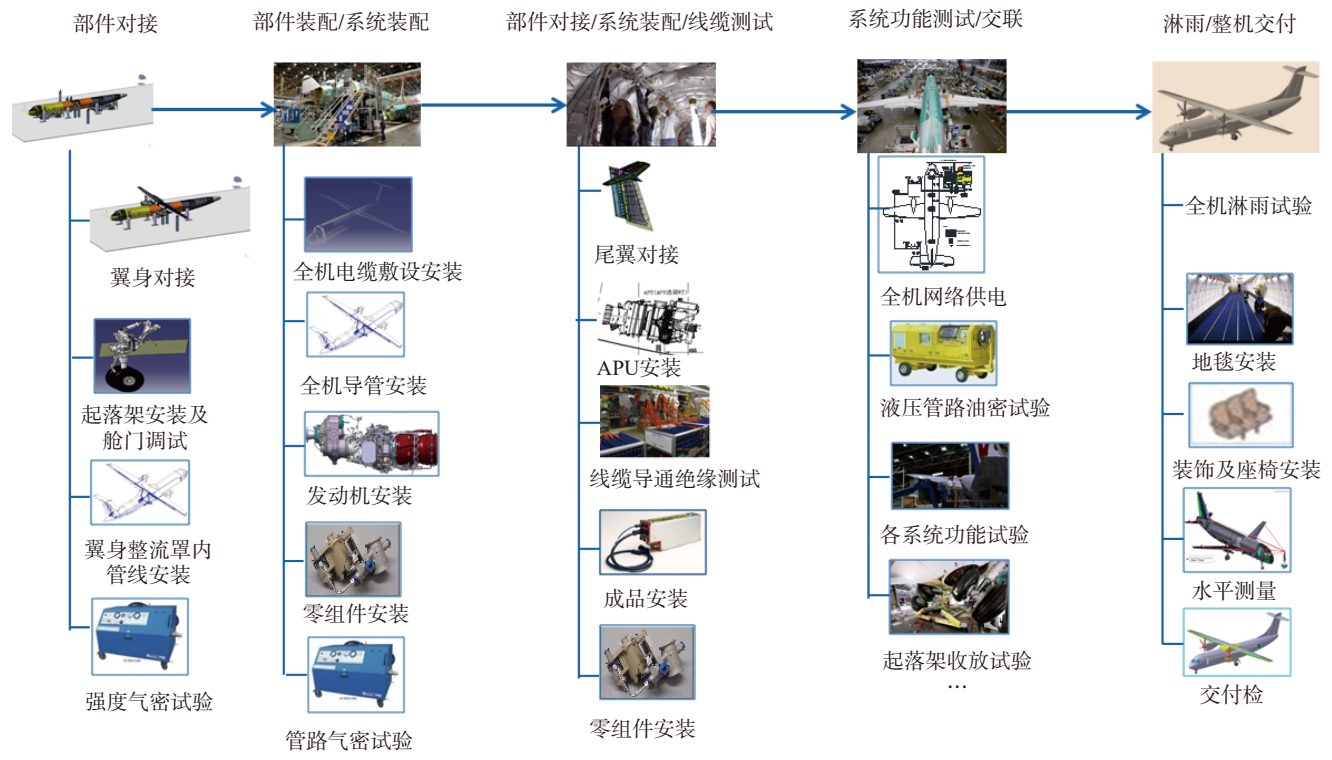


图4 某型飞机装配流程

Fig.4 Assembly process of an aircraft

满足生产需求和目标要素的飞机移动装配线。

## 某国产飞机移动装配线设计实践

依据上述飞机移动装配线设计模式总体框架和目标要素,采用该方法的设计流程及设计内容要求,针对承担的某国产飞机生产任务,设计了该机型的总装配移动装配线,如图5~8所示。目前该装配线已经投产,生产指标满足设计要求,运行状态良好,其主要设计内容如下所述。

### 1 装配流程分析与规划

依据产品数模和不同部件的协作生产情况,规划了该型号的装配

流程,充分考虑了来自不同供应商的部件及其装配以及总装之间的协同。

### 2 产能分析与厂房布局

装配线按照全年250个工作日,每天单班7.5h,年产若干架飞机的产能进行规划,确定了部装装配区和总装装配区。总装站位划分为5个,主要完成翼身对接、尾翼对接以及飞机系统装配与试验工作。

### 3 装配资源选用与配置

装配资源的选用也充分考虑了生产能力的柔性,能够在同一产线中装配标准型、缩短型两种型号,大部件对接实现自动化,大量采用自动制孔、自动钻铆技术,实现发动机、起落

架数字化安装,以及线缆集成检测自动化、全机系统自动化测试和飞机、装配平台的精准移动。

### 4 部件交付与物流配送

充分考虑各部件供应商交付部件的物流运输,合理设计部件装配与总装站位之间的物流关系。同时基于完全配套和单件流原则,实现辅助工装集成管理、工装附件按站位形迹管理、零件现场配送、标准件开架管理、工具按站位配置管理等构成的配套与配送体系。

### 5 节拍分析与产线平衡

生产节拍按照最低年产6架,可逐步爬坡至年产若干架并最终达到在此基础上再翻倍的生产节奏进行

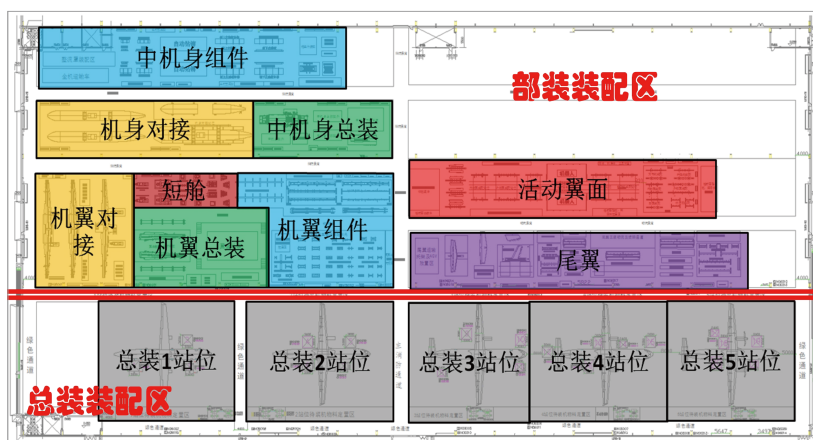


图5 某型飞机移动装配线布局

Fig.5 Layout of mobile assembly line for an aircraft

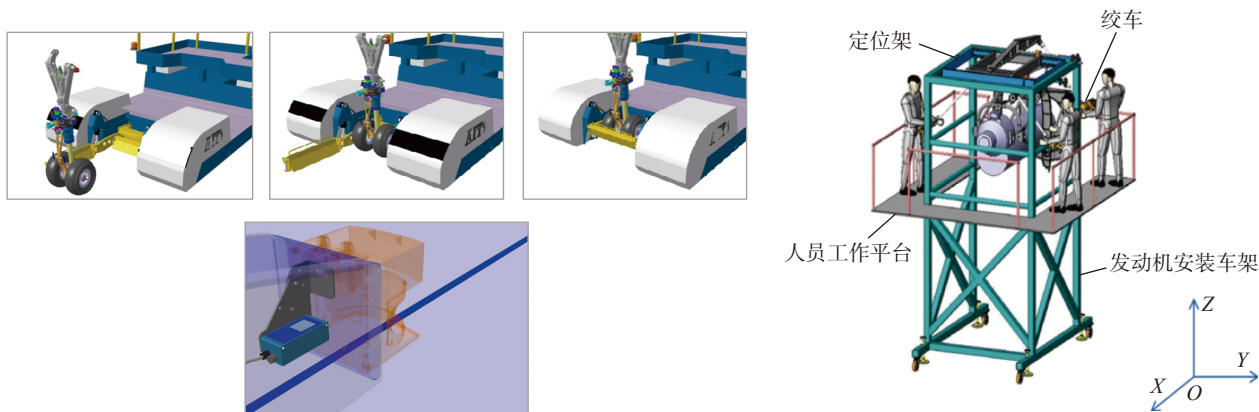


图6 智能AGV和智能安装车选用

Fig.6 Selection of smart AGV and smart installation vehicle

计算,确定每架次生产周期。在此基础上进行每站位的产能分析,确定站位装配周期及所需要的工位数,并逐步迭代、调整平衡每个站位的产能,与生产节拍协调。

### 6 标准化与生产线管控

通过分析生产过程中的计划、人、物料、质量、工艺、设备、工装、能源等要素,规划、设计和开发了智能化管控系统,该系统主要包括3个方面的功能:一是生产过程可控;二是生产状态可视;三是物料配送精准,

能够支撑节拍式生产过程。

### 结论与展望

本文基于型号建设任务需求,借鉴已有移动装配线建设经验,总结形成了一种飞机移动装配线总体设计模式,基于该模式建立了能够嵌入飞机研制生命周期、面向飞机不同层级构成、支持从安装到测试过程的RFSC总体设计框架,确定了精益化、智能化、柔性化、协同化、人本化五位一体的总体设计目标要素,并形成了飞机移动装配线总体设计流程及其对应的建设内容及方法。将所形成的设计模式应用于某型国产飞机移动装配线建设中,实现了该型飞机总装生产预定目标,有力支撑了型号的快速、高质量生产。研究成果可以为飞机制造企业开展飞机移动式总装线建设工作提供参考,对飞机部装、维修和其他类

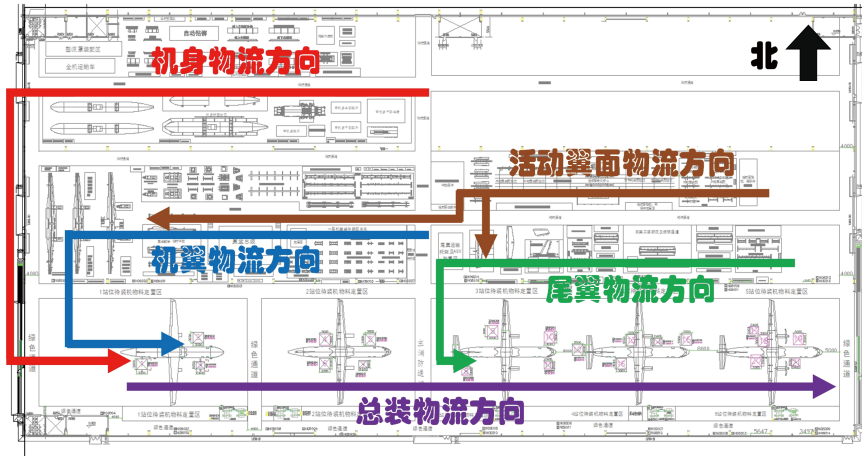


图7 某型飞机移动装配线物流  
Fig.7 Logistics of mobile assembly line for an aircraft

机身前段接收站位工艺流程及产能分析计算												
机身对接		关键工艺装备			工作类型	站位周期分析				站位产能容量		
序号	工作内容	工装	工具	运输工具	手工或站位	紧固件数量	工序所需时间 [min]	平行操作组数	操作周期 (min)	人员数量	工序人员·时间容量	备注/估算 (零件数量等内容)
1	接收检查				手工		120	2	60	2	120	
2	机身前段排故				手工		240	1	240	4	960	四人一组
3	工艺地板的安装				手工		30	2	15	2	30	
4	驾驶舱线缆敷设、导通及液压系统支架导管安装、清洗、试验				手工		2760	4	690	4	2760	
5	特设舱系统安装及灭火系统支架安装				手工		600	2	300	4	1200	两人一组
6	前货门、登机门安装调试	舱门吊挂 登机门举升 托架		行车	手工		2880	2	1440	4	5760	两人一组
7	雷达支架安装				手工		240	4	60	4	240	
8	下架运输	前机身吊挂		行车	手工		30	2	15	2	30	
合计						0	6900		2820		11100	
站位有效工作负荷 (分钟)									2820			
站位装配周期 (分钟)									3318		工厂综合效率OEE=0.85	
站位装配周期 (小时)									55.3 h			
站位班次模型周期						78h/AC		0.7		所需的工位数		
年产量24架,定义的工位数								1		工位		

图8 装配站位产能分析实例  
Fig.8 Instance of capacity analysis for assembly station

似产品的移动装配线建设也有一定借鉴意义。

随着智能制造技术的迅猛发展,人工智能、数字孪生、自主机器人、增强现实等使能技术将会逐步应用于飞机装配线<sup>[2,4,10-11]</sup>,由更加智能的制造装备、更加智能的管控系统和智能得到强化的作业人员构成的人机协同智能装配系统将会是未来的发展趋势。因此,飞机移动装配线总体设计模式也应该积极融入这些新元素,同时应尽快研制飞机移动装配线总体设计集成系统,使其设计更加精确和全面,从而更好地推动我国航空工业智能制造升级转型。

### 参考文献

- [1] 张晓梅. 基于模型的航空脉动装配生产线关键数字化技术研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(4): 74-81.
- ZHANG Xiaomei. Research on key digital technology of aircraft pulsation assembly production line based on model[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(4): 74-81.
- [2] 杨国荣, 来云峰, 解安生, 等. 新舟飞机智能化精益生产线构建技术研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(12): 24-30.
- YANG Guorong, LAI Yunfeng, XIE Ansheng, et al. Research on construction technology of intelligent lean production line of MA aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(12): 24-30.
- [3] GÓMEZ A, RÍOS J, MAS F, et al. Method and software application to assist in the conceptual design of aircraft final assembly lines[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2016, 40: 37-53.
- [4] WECKENBORG C, KIECKHÄFER K, MÜLLER C, et al. Balancing of assembly lines with collaborative robots[J]. Business Research, 2020, 13(1): 93-132.
- [5] 巴晓甫, 赵安安, 郝巨, 等. 模块化柔性飞机装配生产线设计[J]. 航空制造技术, 2018, 61(9): 72-77.
- BA Xiaofu, ZHAO Anan, HAO Ju, et al. Design of modular flexible aircraft assembly line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(9): 72-77.
- [6] LI T, LOCKETT H, LAWSON C. Using requirement-functional-logical-physical models to support early assembly process planning for complex aircraft systems integration[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2020, 54: 242-257.
- [7] MAS F, RÍOS J, GÓMEZ A, et al. Knowledge-based application to define aircraft final assembly lines at the industrialisation conceptual design phase[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2016, 29(6): 677-691.
- [8] 孙元亮, 张超. 基于物联网的飞机移动总装生产线管理关键技术[J]. 航空制造技术, 2019, 62(8): 30-37, 60.
- SUN Yuanliang, ZHANG Chao. Key technology of aircraft moving assembly line management based on internet of things[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(8): 30-37, 60.
- [9] 李勇, 郑朔昉. 民用飞机研制阶段划分若干问题探析[J]. 航空标准化与质量, 2008(3): 8-13.
- LI Yong, ZHENG Shuofang. Discussion on the division of civil aircraft development stages[J]. Aeronautics Standardization & Quality, 2008(3): 8-13.
- [10] TANG J M, ZHU W D, BI Y B. A computer vision-based navigation and localization method for station-moving aircraft transport platform with dual cameras[J]. Sensors, 2020, 20(1): 1-17.
- [11] 唐健钧, 叶波, 耿俊浩. 飞机装配作业AR智能引导技术探索与实践[J]. 航空制造技术, 2019, 62(8): 22-27.
- TANG Jianjun, YE Bo, GENG Junhao. Exploration and practice of aircraft assembly AR intelligent pilot technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(8): 22-27.

通讯作者: 耿俊浩, 副教授、博士, 研究方向为航空数字化制造与智能制造、飞机数字化装配工艺等, E-mail: gengjunhao@nwpu.edu.cn.

## Exploration and Practice of Overall Design Mode of Aircraft Mobile Assembly Line

YANG Wen<sup>1</sup>, GENG Junhao<sup>2</sup>

(1. AVIC XAC Commercial Aircraft Co., Ltd., Xi'an 710089, China;

2. College of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**[ABSTRACT]** In order to meet requirements of the rapid growth of types and amount of aircrafts in China, and building assembly lines of aircraft manufacturing enterprises, this paper proposed a overall design mode of aircraft mobile assembly line, and gave its overall framework, target elements, main process and construction content. This mode can be used as a reference for the construction of mobile assembly line of aircraft assembly, maintenance and other similar products. The mode has been applied to the mobile assembly line construction of a domestic aircraft, and achieved good results, which shows the effectiveness of the mode.

**Keywords:** Aircraft assembly; Mobile assembly line; Overall design; Lean production; Intelligent manufacturing

(责编 古系)