

民机机头系统脉动生产线设计与仿真

黄钰琪^{1,2} 李波^{1,2*} 陈小云³ 晋江伟³ 庄期能³

- (1. 电子科技大学航空航天学院, 成都 611731;
2. 飞行器集群智能感知与协同控制四川省重点实验室, 成都 611731;
3. 中航成飞民用飞机有限责任公司, 成都 610091)

摘要: 飞机机头模块化交付要求其在结构件装配后进行系统件装配, 目前装配车间普遍采用单一固定站位模式对机头系统进行装配, 生产效率低且交付周期长。为满足日益增长的飞机机头产能需求, 以某民机机头的系统件集成装配为研究对象, 根据串并行约束划分其装配流程与站位, 确定脉动节拍, 然后基于系统化布置设计(systematic layout planning, 简称 SLP) 分析方法对脉动车间布局进行规划, 最后使用 FlexSim 软件对现有生产线与脉动生产线分布进行仿真分析, 结果表明应用脉动生产线生产效率得到显著提升, 为脉动生产线在机头系统集成装配中的具体实施提供了支持。

关键词: 脉动装配生产线; 机头系统集成; 系统布局规划; 车间布局; 车间仿真

中图分类号: V262.4

文献标识码: A

OSID:



0 引言

目前, 飞机机头的交付工作逐渐转为机头结构部分与机头系统部分整体模块化交付, 对于机头系统件装配, 目前机头装配普遍采用传统的固定站位式装配模式, 其工作量负荷大、装配周期长、生产效率低, 影响了机头产品的装配进度。脉动装配生产线(pulse assembly lines)是一种介于固定站位装配和连续移动装配之间的先进自动化生产线, 具有高度自动化和高生产效率的优势。因此, 针对飞机机头系统件的固定站位装配模式, 考虑进行站位划分并搭建脉动装配生产线, 并仿真验证其可行性。

对于脉动生产线的研究与仿真, 多项研究提出了不同的思路和方法。在飞机装配领域, 李金龙等人^[1]实现了脉动总装与脉动部装的权衡; 苒书梅等人^[2]提出了总装脉动生产线制造的总体思路; 杨锋等人^[3]对我国大型飞机的总装集成脉动生产线建设提出了可行思路。在脉动生产线的关键技术研

究中, 魏小红等人^[4]从站位布局规划等方面对航空发动机总装脉动生产线进行研究; 罗鑫等人^[5]对飞机总装脉动生产线中工艺流程的重构与生产节拍计算进行了阐述; 严金凤^[6]对飞机总装脉动生产线数字化建设中生产线建模与仿真优化进行了论述。在进一步的仿真研究中, 连宇臣等^[7]对总装脉动生产线仿真中的车间工艺布局及生产能力仿真等技术进行了论述; 朱炜等^[8]运用系统化布置设计(systematic layout planning, 简称 SLP) 方法对叉车充电器装配车间布局进行优化; Li 等^[9]使用 SLP 方法对车间进行布局, 并用 FlexSim 软件仿真验证了其有效性; Mansur 等^[10]对某公司生产车间使用 SLP 方法进行布局分析, 并使用 AnyLogic 软件仿真。脉动生产线已广泛应用于飞机、发动机总装线, 但在飞机机头复杂系统件装配上研究较少, 仅冯益铭等人^[11]结合 ECRS 分析法和 SLP 方法, 从理论出发根据五大系统进行脉动站位划分, 对机头系统集成装配脉动生产线进行了初步探索研究。

* 通信作者. E-mail: libo@uestc.edu.cn

基金项目: 四川省科技厅重大科技专项项目(2021ZDZX0005)

引用格式: 黄钰琪, 李波, 陈小云, 等. 民机机头系统脉动生产线设计与仿真[J]. 民用飞机设计与研究, 2024(3): 23-30. HUANG Y Q, LI B, CHEN X Y, et al. Design and simulation of pulsating production line for civil aircraft nose system assembly[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(3): 23-30(in Chinese).

但在实际生产中,各系统的装配工序之间存在交叉性,通过系统划分站位会造成在部分交叉工序上的工作冗余。

鉴于上述研究的重要意义,针对民机机头的产能需求,本文旨在前期理论研究^[11]基础上,梳理实际生产中五大系统的工序交叉与串并行关系,对脉动站位与车间布局进行规划,提出一套机头系统件脉动装配生产线设计方案,并使用仿真软件对现有生产线和脉动生产线进行仿真分析。通过本研究,希望为民机机头系统装配生产线的规划和仿真分析提供有益的思路和实践经验。

1 现有民机机头系统集成装配生产线分析

本节以某国产民机机头的系统部件装配生产线为对象,对其现有的车间布局与生产线装配工序进行介绍,并使用 FlexSim 软件搭建其车间模型,进行仿真分析。

1.1 固定站位装配生产线布局

根据目前某国产民机机头系统集成生产线的实际情况,该生产线采用传统的固定站位装配模式。在这种模式下,机头在车间中的位置是固定的,整个装配过程中机头的位置不发生变化,工人按照装配顺序使用工装对机头系统件进行装配填充。某民机机头系统集成装配生产线的车间布局示意图如图 1 所示,其中机头放置在中间固定位置,周围分布着暂存区、成品停放区、库房和线束整理区。

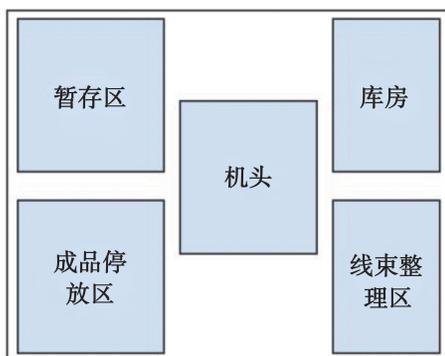


图 1 某民机机头系统集成装配生产线的车间布局示意

1.2 生产线仿真

装配生产线建模与仿真能够模拟和分析不同的生产流程,提供全面的数据和指标,对企业评估

预测生产线具有重要作用。本节基于 FlexSim 软件,建立某民机机头现有生产线模型如图 2 所示,中间 processor1 至 processor14 的部分为机头固定区域,而 processor1 至 processor14 每个处理器则代表机头系统件装配的先后各工序(工序名如表 1 所示)。根据机头系统装配当前的装配流程,每个工序对应的加工周期在处理器中设置其对应工时,仿真具体参数设置如表 1 所示。

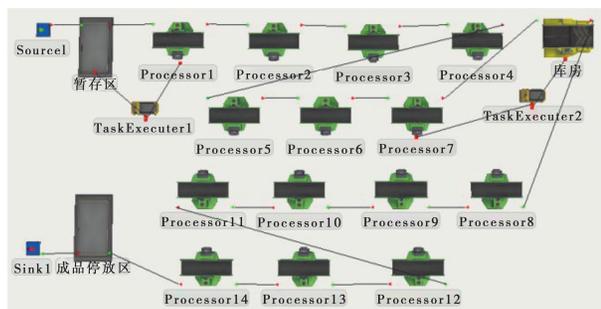


图 2 机头现有固定站位装配生产线模型

表 1 系统件装配工序与加工周期

工 序	加工周 期/h	对应 处理器
入架准备	16	Processor1
支架、接地桩装配	15	Processor2
隔音棉装配	12	Processor3
线束、管路装配	13	Processor4
电源中心与设备架填充	36	Processor5
部分端接	14	Processor6
操纵台安装	14	Processor7
前附件舱、仪表盘、电源中心	12	Processor8
右操纵台、中央操纵台端接	12	Processor9
SD141L、SD141R、下部端接	40	Processor10
其他区域端接	8	Processor11
左前设备架推入	16	Processor12
飞控、环控装配	24	Processor13
前货仓端接、出架	8	Processor14

设置仿真时间为一年,其中每周工作时长为 8 h,每月工作 21 天,同时考虑到轮班制度,共计一年有效工作时长为 2 400 h,在生产线模型末端使用吸收器模块统计仿真产量,运行仿真,最终得到产

量为8架/年。同时仿真可以得到各工序的处理器状态如图3所示。

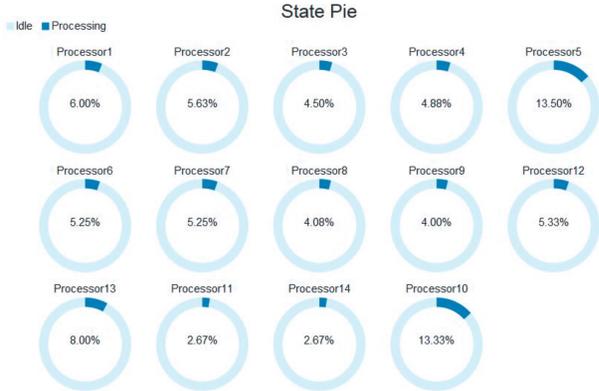


图3 现有布局下各工序对应处理器仿真状态

从图3可以看出,在生产过程的仿真模拟中,各工序空闲状态占比较多,其工作时间较少,普遍存在设备利用率不高的问题,易造成工装资源与人力资源的浪费,导致生产效率较低。此外,在单一站位装配模式下,由于每个工序只能串行装配,若某一工序生产期间发生故障,将导致整条生产线停滞,即生产线故障影响范围较大。

2 民机机头系统集成脉动生产线设计

针对现有生产线资源利用率低、故障影响范围较大的缺点,根据脉动装配生产线通过多站位并行生产提高生产效率的模式特点,在之前理论研究^[11]基础上,根据实际生产数据对民机机头系统装配的各工序交叉性进行梳理,划分脉动站位,对车间进行脉动生产线规划。本节依次从站位划分与脉动周期确定、车间布局规划两方面进行阐述。

2.1 生产线站位划分与脉动节拍确定

飞机机头系统装配分为五大系统,分别是内饰系统、液压系统、电子电气系统、飞控系统及环控系统。在之前的理论研究中按照五大系统划分脉动站位^[11],但在实际生产情况中,各系统的装配工序复杂,各系统的装配工作之间有交叉或串并行关系。如端接操作贯穿于各系统的装配之中,包含前附件舱端接、仪表板端接、电源中心端接、中央操纵台端接及机头下部端接等,若以五个系统进行站位划分,进行端接操作的工人需不断在各站位间反复操作,在端接前的准备工作与移动站位上花费的时间较为冗余,对生产效率产生一定影响。因此,本

节根据实际生产情况,梳理各系统之间装配流程,以工序作为出发点,对脉动站位进行划分,并确定脉动节拍。

基于现有生产线实际生产情况及装配经验,整理机头各系统装配工艺所涉及的装配大纲,对每本装配大纲工作周期进行评估,梳理出串行、并行的装配流程,结合装配中机头在模块化装配中工装任务的交叉、优先性,工装任务的耦合性,装配人员的分配情况等,对机头系统集成的脉动站位进行划分。

对机头系统集成装配的工序进行细化。根据装配要求,组件填充包含支架、接地桩装配、隔音棉装配与线束管路装配;系统装配包含电源中心填充、设备架填充和操纵台安装。组件填充需在系统填充之后进行,机头上部与机头下部端接应在系统与组件均完成填充后进行,机头上部与机头下部端接完成后机头才能出架并进行飞控系统与环控系统的装配。此外,端接操作贯穿于各装配工艺之中。根据上述约束确定为4个脉动站位,分别为A100-系统填充、A200-组件填充、A300-端接及A400-出架,站位具体分布及工作情况如图4所示。

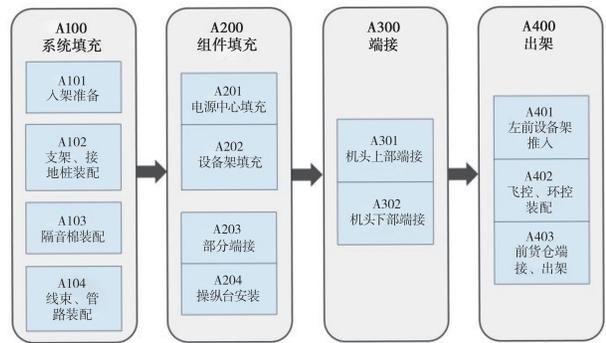


图4 站位具体分布及工作情况

各站位的装配周期及人员需求情况如表2所示。按照脉动生产线运行原理,脉动生产线的脉动周期取站位所需的最长时长,即72h,同时为各站位预留一定的缓冲时间,以确保生产计划的合理性和可靠性。基于以上原则,考虑实际生产中可能存在设备故障、人工疲劳、质量问题等波动,导致实际生产时间与计划时间有所偏差,根据实际生产情况的经验对预留周期进行评估,最终取得脉动周期为80h,即整条脉动生产线每80h向前脉动一次。

表 2 各站位的装配周期及人员需求情况

站位	名称	操作人员/个	生产周期/h
A100	系统填充	6	56
A200	组件填充	12	64
A300	端接	12	72
A400	出架	5	48

2.2 基于 SLP 的车间布局分析

车间布局是脉动装配生产线规划中不可或缺的一环,合理的车间布局能够使生产过程中的人员与物流得到最合理、最高效的安排,从而提高生产效率。本节使用 SLP 方法对民机机头脉动车间进行布局分析。

2.2.1 物流关系分析

列举上文所划分的脉动站位与车间其余区域,如表 3 所示。

表 3 脉动车间区域及其对应面积

序号	区域	面积/m ²
1	A100-系统填充	56
2	A200-组件填充	56
3	A300-端接	56
4	A400-出架	56
5	库房	42
6	线束整理区	42
7	成品停放点	120
8	暂存区	120

结合实际生产情况,对各区域之间一定时间和空间范围内物流活动的规模和水平进行分析与评估,包括货物运输时间、成本、仓储设施利用率、运输模式选择以及库存水平等方面的信息。最终按照物流密切程度等级(表 4)中的原则,绘制出物流强度关系图,如图 5 所示。

表 4 物流密切程度等级表

等级	量化值	承担的物流比例	密切程度
A	4	8	超高
E	3	5	特高
I	2	3	较大
O	1	1	一般
U	0	0	可忽略
X	-1	—	不要靠近

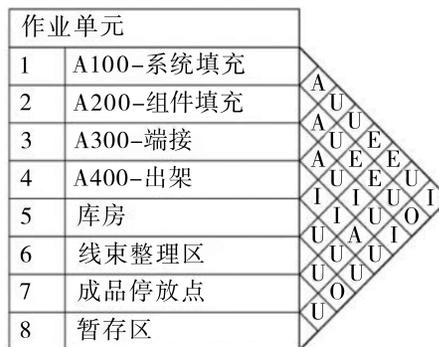


图 5 物流强关系图

基于表 4 与图 5 的对应量化值,分别求和并统计各作业单元的物流强度关系量化总值,得到综合接近程度,如表 5 所示。

表 5 综合接近程度表

作业单元	1	2	3	4	5	6	7	8
1		A/4			E/3	E/3		I/2
2	A/4		A/4		E/3	E/3		O/1
3		A/4		A/4		I/2		I/2
4			A/4		I/2	I/2	A/4	
5	E/3	E/3		I/2				
6	E/3	E/3	I/2	I/2				O/1
7				A/4				
8	I/2	O/1	I/2			O/1		
综合接近程度	12	15	12	12	8	11	4	6

2.2.2 脉动车间布局

由上文所得各作业单元的综合接近程度分数,基于得分数值越高越靠近布局中心的原则,同时结合作业单元物流强度等级,顺次安排各作业单元的位置。此外,考虑到实际车间场地的长度有限,难以将四个脉动站位按一列进行布局。因此,结合该实际情况的限制,综合得到位置关系图如图 6 所示。单元间连线的数量代表其间的物流强度等级。

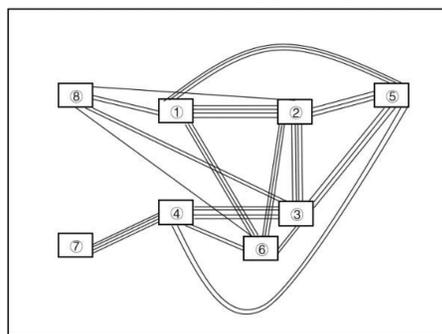


图 6 各作业单元位置关系图

根据上述分析,再结合工装平台与实际场地布局,可绘制出最终规划的民机机头系统装配脉动车间布局示意图,如图7所示。

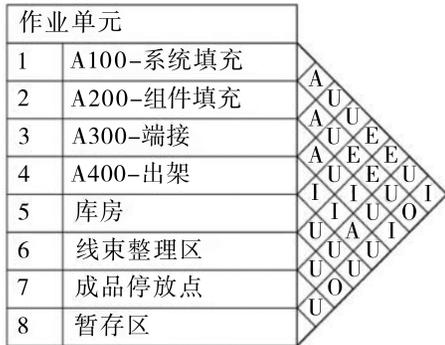


图7 民机机头系统装配脉动车间布局图

3 仿真分析

3.1 基本仿真

依据上文中的站位划分,对各站位中的并行工序进行整合,同时对串行工序依次设置加工时间,各站位具体仿真参数如表6所示。

使用FlexSim软件对脉动车间进行仿真,根据上文分析得到的脉动生产线方案,搭建车间模型如图8所示。

图8所示。

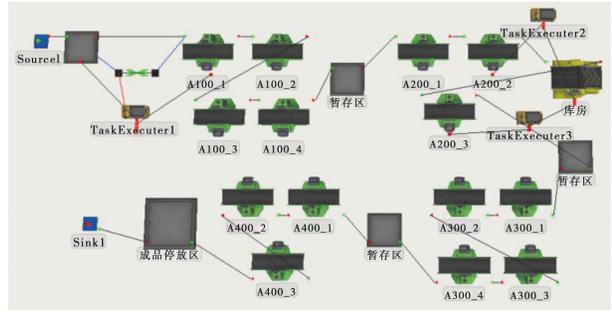


图8 脉动车间模型

对每个处理器中对应站位的工序,设置固定加工时间,根据脉动周期为80h,在每个站位后加入暂存区预留时间,使整个生产线每经过80h进行一次向前脉动,与预先分析的脉动生产线相符。

同时使用暂存区作为成品停放点,使用吸收器连接成品停放点对产量进行统计。设置仿真时间为一年(与第一部分仿真保持一致,一年工作时间为2400h),运行仿真,最终通过吸收器统计年产量,可得最终仿真结果为产量41架/年。模拟生产过程中各工序的状态如图9所示。

表6 脉动生产线各站位工序及对应处理器

作业单元	工序	对应处理器	工时/h
A100	入架准备	A100_1	16
	支架、接地桩装配	A100_2	15
	隔音棉装配	A100_3	12
	线束、管路装配	A100_4	13
A200	电源中心与设备架填充	A200_1	36
	部分端接	A200_2	14
	操纵台安装	A200_3	14
A300	前附件舱、仪表盘、电源中心	A300_1	12
	右操纵台、中央操纵台端接	A300_2	12
	SD141L、SD141R、下部端接	A300_3	40
	其他区域端接	A300_4	8
A400	左前设备架推入	A400_1	16
	飞控、环控装配	A400_2	24
	前货仓端接、出架	A400_3	8

从状态饼状图中可以看出,脉动生产线相较于现有固定单站位的装配模式,各工序的工作状态占比有了较大幅度提升,设备资源与人力资源的利用效率得到提高,生产过程中的空闲时间浪费问题得

到了有效改善。

3.2 故障仿真

在实际的生产线运作中,工装设备随着使用次数及使用时间的增加,其使用寿命与可靠性会有部

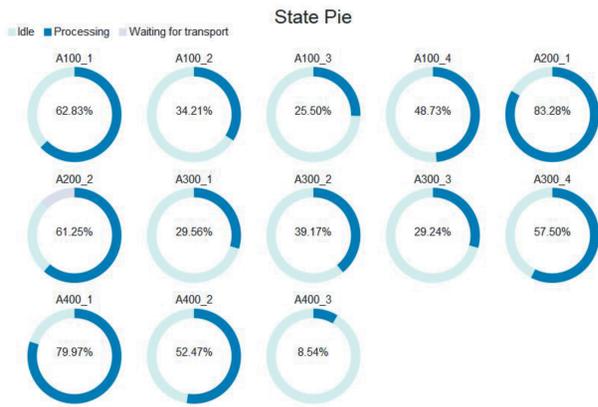


图 9 脉动布局下各处理器仿真状态

分下降,即有一定的概率发生故障。在此前提下对装配生产线进行故障仿真,能够更好地模拟脉动装配生产线在实际运作中的应用情况。威布尔分布(Weibull distribution)是工程中被广泛应用的连续性概率分布函数,尤其适用于机电类产品的磨损累计失效的分布形式。其概率密度如式(1)所示。

$$f(x; \lambda k) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(x/\lambda)^k}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, x 是随机变量, $\lambda > 0$ 是比例参数, $k > 0$ 是形状参数。

本节在 FlexSim 软件中,随机将处理器中的故障概率设为威布尔分布,以 A100 中液压油车为例,对其设置威布尔故障,如图 10 所示。

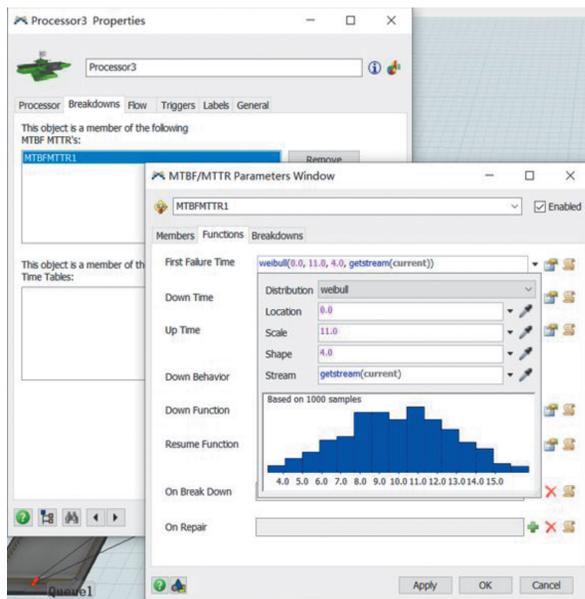


图 10 威布尔故障设置

设置仿真时间为一年,仍通过吸收器统计产量,得到产量为 40 架/年,即在故障可能发生的情况下,脉动生产线的总体生产情况受影响较小,仍能保持相对正常的生产水平。其状态如图 11 所示。

作业单元	
1	A100-系统填充
2	A200-组件填充
3	A300-端接
4	A400-出架
5	库房
6	线束整理区
7	成品停放点
8	暂存区

图 11 故障存在时各处理器仿真状态

通过观察状态表,分析可得,在粉色标记的故障时段存在的情况下,整条生产线的各工序受到的影响相对较小。从图中可以清晰地看出,故障并没有显著改变各处理器的工作情况占比,与未发生故障时相比差异较小。

3.3 故障仿真

1) 在未加入威布尔故障进行仿真的情况下,对比现有生产线与本文所规划脉动生产线的仿真结果,由于两种装配模式的车间面积不同,对其每年的单位面积产量分别进行计算,即年产量与车间面积之比,最后统计仿真结果与计算结果,如表 7 所示。

表 7 脉动生产线各站位工序及对应处理器

布局方式	占地面积/m ²	操作人员/个	年产量/架	年单位面积产量/(架/m ²)
现有布局	264	30	8	8/264(≈0.0303)
脉动布局	686	35	41	41/686(≈0.0598)

在将传统单站位划分为四站位脉动生产线后,增加了生产线的占地面积与操作人员,也占用更多的工装资源。在人力资源与设备资源充足的条件下,计算对比两种布局方式的年单位面积产量,可见脉动生产线之下的机头系统装配效率有显著提升(年产量从 0.0303 架/m² 提升至 0.0598 架/m²)。此外,即使现有布局下也是四个固定站位同时进行生产,则现有布局产量记为四个单站位布局的产量之和,即 32 架/年。对比所设计脉动生产线的年产

量,可知脉动生产线性能优于现有生产线。

2)分析易知,现有生产线在某个装配环节中发生故障后,机头系统装配的其他装配工序都将受影响而停滞,即在现有的固定单站位装配模式下,故障对整个生产过程的影响范围较大;对所提脉动生产线加入威布尔故障进行仿真分析,得到其产量为40架/年,与未加故障时产量41架/年相比,产量损失较小,故在脉动生产线模式中,故障对整个生产过程的影响范围较小,有故障发生时生产线仍能较稳定地运作。

4 结论

本文通过对某民机机头系统装配进行站位划分,并结合SLP法和场地面积进行脉动布局分析,成功设计出一个四站位、脉动周期为80h的机头系统装配脉动生产线;利用FlexSim软件搭建了该脉动生产线模型,并对其产量进行了仿真。结果显示,现有单站位生产线年产量为8架,而脉动生产线的年产量达到41架;在单位面积下,现有布局的年产量为0.0303架,脉动生产线年产量为0.0598架。此外,通过引入威布尔故障率对所提脉动生产线进行了仿真,结果显示年产量为40架。以上表明,尽管脉动生产线占用了更多的工厂面积、工装设备和操作人员,但其效率得到了显著提高,能够满足装配任务的需求,其在故障情况下所受影响也较小。因此,本文的研究结果表明,针对民机机头系统件装配,采用脉动生产线相对于现有的固定单站位布局,能够显著提高生产效率、有效降低故障的影响范围,为机头系统装配生产线提供了一种可行的优化方案。

参考文献:

- [1] 李金龙,杜宝瑞,王碧玲,等. 脉动装配生产线的应用与发展[J]. 航空制造技术, 2013(17): 58-60.
- [2] 裴书梅,杨根军,陈军. 飞机总装脉动生产线智能制造技术研究与应用[J]. 航空制造技术, 2016(16): 41-47.

- [3] 杨锋,穆志国,范军华,等. 大型飞机总装集成脉动生产线技术研究[J]. 航空制造技术, 2022,65(12): 48-55,62.
- [4] 魏小红,谈军,方红文,等. 航空发动机水平脉动总装生产线规划研究[J]. 航空制造技术, 2015(19): 8-12.
- [5] 罗鑫,阮亮. 脉动式生产线在飞机总装中的应用探索[J]. 现代制造技术与装备, 2019(7): 150-152.
- [6] 严金凤. 飞机总装脉动生产线数字化仿真与优化关键技术[J]. 航空制造技术, 2020,63(20): 54-60.
- [7] 连宇臣,徐尧,李琳,等. 航空发动机脉动式装配生产线工艺仿真关键技术研究[J]. 航空制造技术, 2020,63(增刊1): 57-63.
- [8] 朱炜,周炳海. 基于SLP方法的叉车充电器装配车间布局改善[J]. 精密制造与自动化, 2016(2): 40-43.
- [9] LI Q, LIU H D. Workshop facility layout optimization design based on SLP and FlexSim [J]. International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology, 2016,17(8).
- [10] MANSUR M, AHMAROFI A A, GUI A. Designing the re-layout of the production floor using integrated systematic layout planning (SLP) and simulation methods [J]. International Journal of Industrial Management, 2020,6(1): 151-159.
- [11] 冯益铭,姜楠,李波,等. 民机机头系统脉动装配生产线规划与车间布局设计[J]. 航空制造技术, 2022, 65(10): 104-112.

作者简介

黄钰琪 女,硕士。主要研究方向:航空宇航智能制造技术。
E-mail: 1175631620@qq.com

李波 男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:航空宇航智能制造技术。E-mail: libo@uestc.edu.cn

陈小云 男,高级工程师。主要研究方向:航空制造技术。
E-mail: chenxy@ccac.cc

晋江伟 男,工程师。主要研究方向:航空制造技术。E-mail: jinjw@avic.com

庄期能 男,高级工程师。主要研究方向:航空制造技术。
E-mail: zhuangqn@avic.com

Design and simulation of pulsating production line for civil aircraft nose system assembly

HUANG Yuqi^{1,2} LI Bo^{1,2*} CHEN Xiaoyun³ JIN Jiangwei³ ZHUANG Qineng³

- (1. School of Aeronautics and Astronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;
2. Aircraft Swarm Intelligent Sensing and Cooperative Control Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611731, China;
3. AVIC Chengfei Civil Aircraft Co., Ltd., Chengdu 610091, China)

Abstract: The modular delivery for aircraft nose requires that the assembly of system components should be assembled after the structural components have been assembled. Currently, assembly workshops commonly employ a single fixed station for the assembly of nose system components, resulting in low production efficiency and long delivery cycles. To address the production capacity requirements for aircraft nose, this study focuses on the integrated assembly of system components in a specific civil aircraft nose and divides its assembly process and stations based on serial-parallel constraints. The pulse cycle is determined, and the layout of the pulse workshop is calculated using the SLP(systematic layout planning) analysis method. The FlexSim simulation analysis was conducted to evaluate the existing production line layout and the distribution of pulsating production lines. The results show that the application of pulsating production line significantly improved production efficiency, providing support for the specific implementation of the pulsating production line in the integration assembly of the aircraft nose system.

Keywords: pulse assembly lines; integration of nose systems; systematic layout planning; workshop layout; workshop simulation

* Corresponding author. E-mail: libo@uestc.edu.cn