

引文格式: 刘敏,王大维,张旭.基于 SLP 方法的某支线客机尾锥生产线产能爬坡规划[J].航空制造技术,2022,65(3):101-107,117.
LIU Min, WANG Dawei, ZHANG Xu. Ramp up planning for tail cone production line of a regional aircraft based on SLP method[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(3): 101-107, 117.

基于 SLP 方法的某支线客机尾锥生产线产能爬坡规划

刘 敏,王大维,张 旭

(中航沈飞民用飞机有限责任公司,沈阳 110000)

[摘要] 为满足公司发展战略规划和客户交付数量增加的需求,采用系统性布局规划方法对尾锥生产线进行布局优化设计。首先,介绍了系统性布局规划(SLP)设计方法相关理论,并对尾锥生产线进行产能爬坡分析计算,包括生产线节拍平衡率计算、关键瓶颈工位识别、新增人力和关键设备分析;其次,利用物流相关图、空间关系图对尾锥生产线工装设备进行位置计算分析,获得多种不同形式的尾锥生产线布局方案;最后,按照精益生产线布置原则对上述布局方案进行讨论与评估,并通过综合评价方式确定出最佳工艺布局。

关键词: 尾锥; SLP 设计方法; 产能提升; 布局优化; 综合评价

Ramp Up Planning for Tail Cone Production Line of A Regional Aircraft Based on SLP Method

LIU Min, WANG Dawei, ZHANG Xu

(AVIC SAC Commercial Aircraft Company Ltd., Shenyang 110000, China)

[ABSTRACT] In order to meet the demands of company's strategic planning and increased customer delivery quantity, the systematic layout planning (SLP) method was used to optimize the layout of tail cone production line. Firstly, the theory of systematic layout planning method was introduced, then the ramp up of tail cone production line was analyzed and calculated, including the calculation of production line balance ratio, identification of key bottleneck stations, and analysis of manning and key equipment required. Secondly, the position calculation and analysis of the jigs in tail cone production line were conducted by using the relationship chart, spatial relationship diagram to obtain various layout schemes of tail cone production line. Finally, according to the principles of lean production line layout, the above layout schemes were discussed and evaluated, then the optimum layout was determined by comprehensive evaluation.

Keywords: Tail cone; Systematic layout planning design method; Ramp up; Layout optimization; Comprehensive evaluation

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2022.03.101

生产线布局规划就是在给定的空间内合理安排生产线上各工位及辅助设施的相对位置与面积,以确保生产线系统中物流与信息流的畅通。在当前飞机制造企业,经常面临客户订单随时变化的情况,此时需要工程师对当前已有生产线进行升级改造。研究表明,物料的搬费用占总成本的 20%~50%,而合理的工厂布局规划可使这项费用至少减少 10%~30%,车间布局是否合理不仅直接影响整个生产系统的运行,而且研究物料搬运成本的影响已成为确定生产成本的关键因素之

一^[1]。20 世纪 60 年代美国工业工程师 Richard Muther 提出了系统性布局规划(Systematic layout planning, SLP)方法,该方法是一种条理性很强、通过物流分析与作业单位关系密切程度分析相结合、求得合理布置的一套系统性布置设计方法,使得原本依靠经验的定性布局设计进入到定量计算阶段。

某型号支线客机是一款窄体、双引擎、中程喷气客机,中航沈飞民用飞机有限责任公司承担了前/中/后机身、舱门、尾锥、中央翼盒和翼身整流罩 7 个工作包产

品的装配任务^[2]。在2017年尾锥首架产品成功交付客户后,为了开通批生产线,结合首架研制过程中存在的问题,对尾锥工作包进行了综合工艺策划评审,主要针对以下3个方面:(1)核查首架研制是否存在工艺策划疏漏,包括工艺文件准确性核实、关键工艺过程控制等;(2)针对首架生产执行过程存在的问题进行改进,如工装改进、增加辅助定位器等;(3)为保证后续项目批产进行工艺优化及改进,如工具改进、装配顺序改进、工艺定额优化、零件装配状态优化等。

随着上述优化措施的实施,顺利开通了批生产线,根据MS14主进度计划,2018年尾锥需交付18架,2019年需交付66架,由于客户交付数量需求的迅速提升,要求工厂对当前生产线布局进行升级,以满足爬坡生产需求。同时基于精益生产线理念,消除当前生产现场物流搬运浪费、面积浪费,打造精益化的尾锥生产线,如图1所示。

1 SLP方法理论

在规划与布局的SLP方法中, Richard Muther将研究规划与布局问题的起点归纳为5个基本要素,分别为产品、产量、工艺路线、支持服务和时间,如图2所示,按照SLP设计规划理论,在生产线上爬坡规划过程中,分为3个阶段。

第1阶段为产能分析阶段,对产品P(Product)、产量Q(Quantity)、工艺路线R(Route)、支持服务S(Supporting service)、时间T(Time)5个要素进行收集和计算,5个要素分别解释了生产线建设过程中5个最重要的问题,即生产什么、生产多少、怎样生产、用什么支持生产、何时生产。基于上述5个要素进行物流、作业强度等分析,可以初步得到未来生产线大概轮廓。

第2阶段为方案设计阶段,将影响生产线的其他限制因素综合考虑后,通常设计3套方案供决策层评估。

第3阶段为选择阶段,由于不同的生产线布局规划侧重点不同,因此布局的评价是一个综合性的问题,没有绝对的好坏,只有相对的优势,采用综合评价表(考虑精益生产、物流、面积利用率、人因工程、未来重构性、风险应对、视觉管理等因素)对每种方案进行打分,最终评选出最优方案实施。

目前,SLP设计方法理论已经得到了国内外学者的广泛运用,并取得了一定研究成果,其中徐熔^[1]采用SLP方法的相关理论,通过对H公司机加工和装配两类生产线平衡和生产线工序进行设计,将多条生产线作为多个单元布局进行优化配置,并提出了逐年改善的创新设计。李建华等^[4]以XM煤矿企业的机加分公司车间为研究对象,通过SLP理论方法对车间的物流关系和作业单位相互关系进行分析,结合车间实际给出了2种优化方案。通过方案综合评价选出了较为合理的方案。陈传昊等^[5]以新星配送中心为例,运用SLP法针对配送中心平面布局问题进行规划设计,得到最终合理的布局方案,降低了物流成本,提高了配送中心整体效益。周润博^[6]针对某工厂生产量不足难以满足订单需求量的问题,首先按照系统布局规划的理论、方法和步骤进行研究与规划,然后通过数学建模的方式针对目标问题寻求最优解,减少了搬运距离,实现了企业生产线平衡率的提高,验证了改进后的SLP方法的有效性和可行性。Wiyaratn等^[7]以工艺流程图、物料流程图和作业相关图为基础,设计了钢铁制造企业工厂布局,显著缩短了从钢坯切割到仓库的物流距离。Patial^[8]采用工艺流程图、物流相关图和作业关系图分析,对工厂现有布局进行了

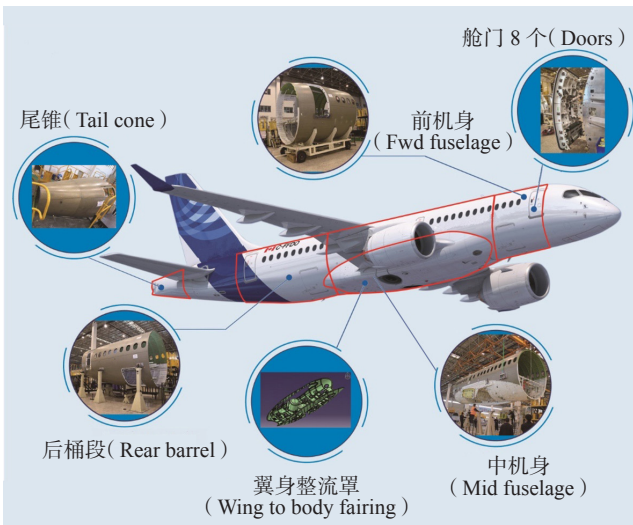


图1 某支线飞机项目
Fig.1 A regional aircraft program

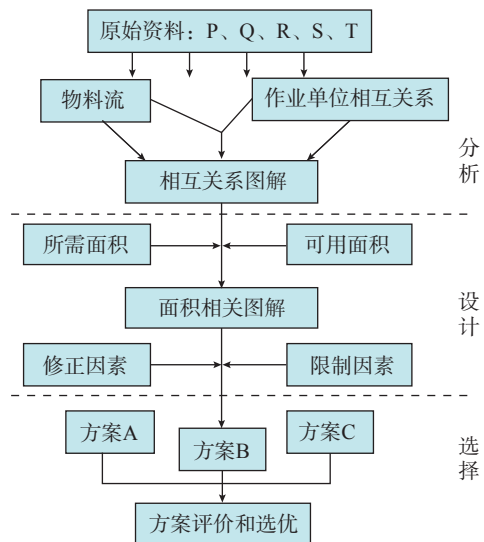


图2 SLP方法流程图
Fig.2 Flow chart of systematic layout planning method

改进,提高了工厂装配线上的面积利用率和劳动生产率。Ojaghi 等^[9]采用系统布局规划和图论两种方法构造出多个布局,通过布局效率的计算优选出最佳布局方案。

2 产能分析

2.1 原始资料收集

按照 SLP 设计方法理论,在尾锥生产线产能爬坡规划过程中首先对 P、Q、R、S、T 原始资料进行收集。

(1) 产品 P。规划目标爬坡生产线为尾锥生产线,交付产品为尾锥。

(2) 产量 Q。依据 MS14 主进度计划,每个月按照 22 个工作日计算,2018 年尾锥年产 18 架份,月产 1.5 架份,生产节拍为 15d/架,根据客户目标产量要求,规划后要求尾锥生产线具备年产 66 架份生产能力,即月产 5.5 架份。

(3) 工艺路线 R。表示工程/作业内容及其顺序,可用架次流程图、平衡线图分析关键瓶颈工位是否满足未来生产节拍要求、生产线平衡性等。此阶段需对各装配站位工作内容、最优人力、工时、占地面积等数据进行详细计算。图 3 为尾锥装配流程图,根据尾锥产品工艺分离面,将产品各组成部件按照站位进行划分,同时平衡各站位工作量,尽可能保证各个站位生产节拍相同。采用上述方法,尾锥工作包分为壁板站位→APU 罩装配站位→总装装配站位→总装补铆站位。

图 4 为尾锥架次流程图中 APU 罩右壁板装配站位部分,架次流程图显示本站位号为 CT235,工时为 a/h (涉及商业秘密,以字母 a 表示),最优操作人力为 1 人,工装占地面积(长 × 宽)为 $3m \times 1.5m$ 。

如图 5 所示,通过对当前生产线平衡图分析,APU 罩装配工位(CT310)、尾锥总装工位(CT410)、尾锥总装补铆工位(CT420)装配周期过长,为影响产能爬坡上速率关键瓶颈工位,同时从图中 5 可知过长的装配周期造成了其他工位的等待。

上述 3 个瓶颈站位均已配置最优人力,增加人力后无法提升效率,经过分析,CT310 和 CT420 工位可以通过增加效率工装方式缩短生产节拍。而 CT410 总装工位批产阶段经常出现蒙皮拼接带板与 89 框装配间隙超差问题,需制作实体垫片填充间隙,该故障发生频次高,返修周期长,严重影响装配进度。通过组织技术人员对故障原因进行分析,发现主要原因为误差累计导致现有装配方案无法满足产品装配需求,故对产品工艺分离面和装配流程进行优化,从总装工位(CT410)拆解出总装前段(CT404)和总装后段(CT406)两个前置工位,如图 6 所示,将总装装配改为总装前段和总装后段 2 个部件的对接形式,以此降低总装工位的装配误差累计,从而消除现场故障拒收。同时该改进方案将总装原有

的工作量分解到 3 个站位,将总装现有的 1 个生产节拍平均为 2 个生产节拍,降低了总装工位装配周期,提升了整个尾锥生产线平衡性,如图 7 所示,在对总装工位工作量进行拆解后,尾锥所有站位装配周期均满足未来爬坡生产节拍要求,经计算平衡率为 79.2%。

(4) 支持服务 S。依据站位工时、生产节拍、最优人力计算产能爬坡过程中配套工装、人员数量,同时组织各部门评估产能爬坡过程中相关可能风险项。参考未来尾锥装配架次流程图,以 APU 罩装配站位为例,说明

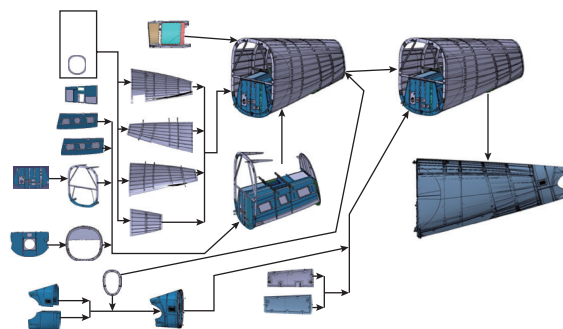


图3 尾锥装配流程图

Fig.3 Assembly flow chart of tail cone

CT235	
APU 罩右壁板装配	
工装: AJ-APU R.H. Panel	
主要工作: APU 罩右壁板整体装配,主要包括钣金腹板、机加梁和加强筋等	
工时: a/h ; 人员: 1 人	
总零件数: 20 个	
工装定位零件数: 3 个	
制孔数量: 407 个	
紧固件数量: 407 个	
占地面积: $3m \times 1.5m$	

图4 APU右壁板装配架次流程图内容

Fig.4 Details of vehicle flow chart of APU R.H. panel

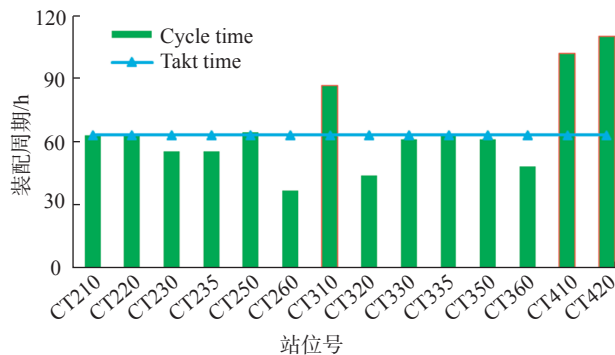


图5 当前生产线平衡图

Fig.5 Current production line balance diagram

新增工装设备计算过程。

当飞机装配进入批量生产模式后,随着装配数量不断增加,工人自身通过不断的学习,熟练度逐渐提升,装配速率越来越快,理论上工时应该逐渐递减,最后趋于

稳定,其计算公式如下^[10]:

$$y = ax^m \quad (1)$$

式中, x 为产品累计产量; y 为第 x 件产品工时; a 为第 1 件产品工时; m 为学习系数,其中 $m = \lg c / \lg 2$, c 为学习率,上述公式被称为学习曲线公式。根据飞机装配行业经验,通常取 82% 学习率,基于首架工时和学习曲线公式计算产能爬坡阶段对应架次工时,令所需工装数量为 n ,则,

$$n = \text{装配工时} / \text{节拍时间} / \text{最优人力} \quad (2)$$

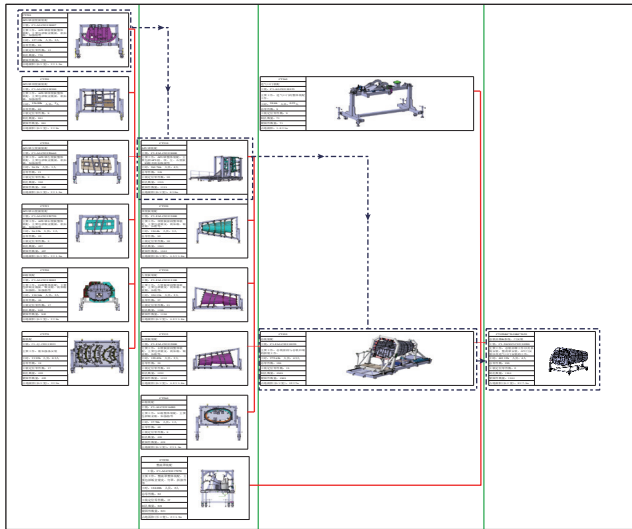
经过计算后尾锥生产线产能爬坡阶段所需工装数量如表 1 所示,以 APU 罩装配工位为例,考虑两班制后,所需工装数量为 1.4 套,因当前工装数量为 1 套,所以即使采取倒班制当前工装数量仍然不足,需增加效率工装满足爬坡生产节拍要求。其他站位分析方式相同。

综上所述,当生产节拍达 4d/架时,APU 罩装配和总装补铆工位各需增加 1 套效率工装,总装前段和后段各增加 1 套新制工装,除总装装配工位(CT410)外实行两班制,因此增加人力为 33 人,保证满足目标生产节拍要求。

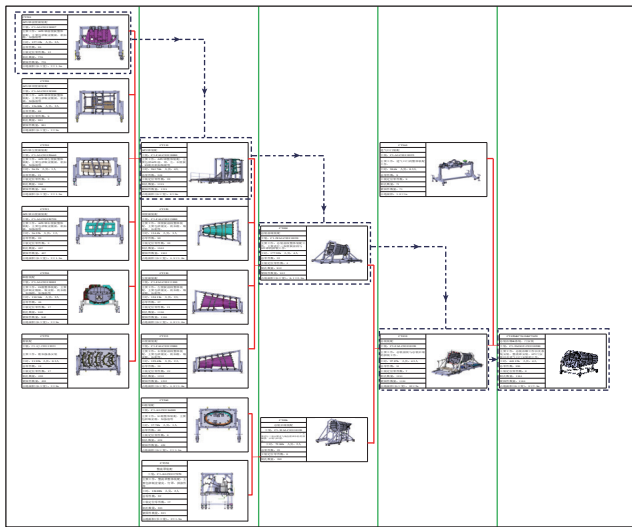
(5) 时间 T , 通常是指标准工时、生产周期、节拍、常规工作时间(天数、班次、小时数)等。在尾锥生产线爬坡规划过程中,为了提高工装使用周期,减少新增工装投入成本,考虑每天两班制,每个班次 7.5h,因此 4d/架生产节拍换算成小时为 $4 \times 7.5 \times 2 = 60\text{h}$ 。

2.2 相关图分析

在确定生产线布局形式时,除了考虑工艺流程外,还需考虑各站位节拍之间的物流情况,即通过作业单位物流相关图(穆德图)对各节拍站位进行物流相关强度分析。通常在物流强度分析中将作业单位间的物流强度划分为 A(非常重要)、E(较重要)、I(重要)、O(一般)、U(无关)5 个等级^[11]。图 8 为尾锥生产线的作业单位物流表,可以看出尾锥生产线部件组装工位主要集中于 APU 罩装配工位、总装前段工位、总装后段工位、总装补铆站位和总装站位,布局规划应首先考虑这些工位进气口门和整流罩装配工位物流强度为 O,为尾锥生产线物流强度最低等级,可以最后考虑其布置方式。



(a) 节拍拆分前



(b) 节拍拆分后

图6 尾锥生产线站位节拍拆分对比

Fig.6 Comparison of takt time separation of tail cone production line

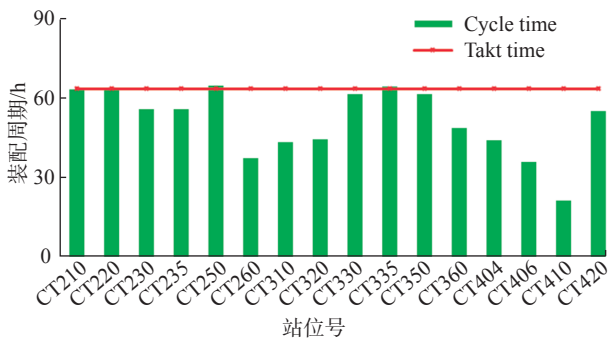


图7 改善后生产线平衡图

Fig.7 Production line balance diagram after improvement

3 布局方案设计

3.1 修正及限制因素

在产能分析阶段,已经完成瓶颈工位分析,包括所需新增工装、人力、面积需求,考虑到新建厂房投入使用以及公司规划要求等因素,未来尾锥工作包将转移至新厂房进行生产。如图 9 所示,新建部装厂房南北方向分为 3 跨,除中间一跨为两台 10t 位吊车,其余南北跨均为 5t 吊车,舱门、尾锥工作包单个产品不超过 1t,考虑吊车资源有效利用,以及未来生产线规划的灵活性,中间一跨需预留其他大质量桶段工作包使用;中央翼

盒和翼身整流罩属于复合材料工作包,需要进行集中除尘处理,新建二期厂房时在西北侧附楼预留除尘器配电柜、线缆等,因此综合考虑上述两点因素,将新建部装厂房南侧一跨用于舱门、尾锥工作包生产线布置,中间一跨用于预留其他工作包区域,北侧一跨用于复材工作包生产线布置。

3.2 空间关系分析

在确定尾锥生产线布局规划过程中,采用线型图法生成平面布置图,具体做法如下:(1)用4条平等线段表示两作业单位间的A级关系,3条平等线表示E级关系,2条I级,1条O级,U级不连线;(2)将A、E级关系的作业单位放进布置图中,同一级别的用同一长度的线段表示,A级线段最短,取一个单位,E级的长度为A级的两倍,依次类推;(3)按同样的规则布置I级关系,若作业单位较多,线段混乱,可以不画O级关系;(4)将

各个部门的面积放入布置图中,生成空间关系图。

按照线型图法,先将A、E、I、O、U关系量化为数值(A=4, E=3, I=2, O=1, U=0),表2为尾锥生产线16个作业单位的综合物流强度和按分值的排序。在排序表中分值越高,说明该工位涉及物流强度越高,即该作业单位越应靠近布置图的中心位置,越低则越往边缘。

如图10所示,根据线型图法及上述原则经过修正后得到尾锥生产线空间布置图轮廓。按上述综合物流强度排序表可知,CT310、CT404、CT406、CT410、CT420工位综合物流强度高,即APU装配工位、总装前段工位、总装后段工位、总装工位以及总装补铆工位应处于布局图核心位置,次之为壁板工位,对于CT350、CT360工位即整流罩装配和进气口门装配可放置于布局图边缘。

3.3 设计方案

将产能分析阶段的工装、设备等作业单位按照空间布置图逻辑放入目标规划区域内,在详细布局规划阶段

表1 尾锥生产线新增工装数量

Table 1 Quantity of jigs required of tail cone production line

站位	工位号	最优人力	占地面积 (L×W)/m ²	当前工装数量/套	工装需求数量 (1班制/2班制) n/套
APU罩前壁板装配	CT210	2.0	3.0×1.5	1.0	2.0/1.0
APU罩顶壁板装配	CT220	2.0	2.0×1.0	1.0	2.0/1.0
APU罩左壁板装配	CT230	1.0	3.0×1.5	1.0	1.8/0.9
APU罩右壁板装配	CT235	1.0	3.0×1.5	1.0	1.8/0.9
89框装配	CT250	2.0	3.0×2.0	1.0	2.0/1.0
91框装配	CT260	1.0	2.0×1.5	1.0	1.2/0.6
APU罩装配	CT310	3.0	6.0×6.0	1.0	2.7/1.4
顶壁板装配	CT320	3.0	4.5×1.6	1.0	1.4/0.7
左壁板装配	CT330	2.0	4.8×1.6	1.0	1.9/1.0
右壁板装配	CT335	2.0	4.8×1.6	1.0	2.0/1.0
整流罩装配	CT350	2.0	2.0×1.5	1.0	1.9/1.0
进气口门装配	CT360	0.5	1.6×1.0	1.0	1.5/0.8
总装前端装配	CT404	4.0	6.1×2.8	0.0	1.4/0.7
总装后端装配	CT406	2.0	3.5×2.0	0.0	1.1/0.6
总装装配	CT410	4.5	10×7.0	1.0	0.7/0.3
总装补铆	CT420	4.0	10×7.0	1.0	3.5/1.8

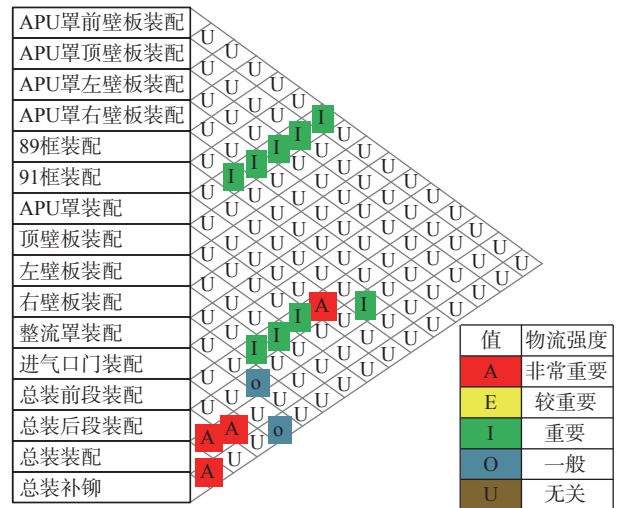


图8 尾锥生产线作业单位物流搬运成本

Fig.8 Logistics handling cost of tail cone production line

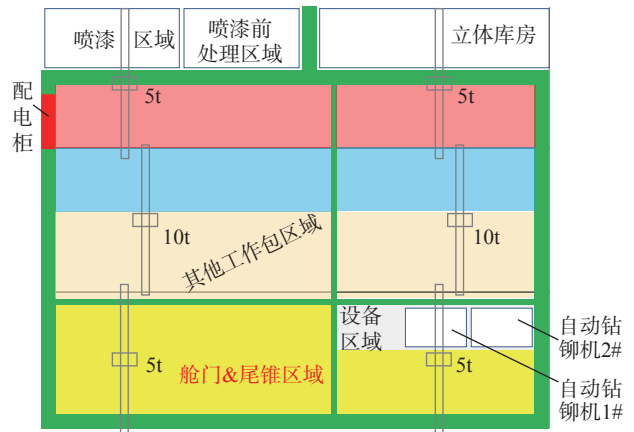


图9 尾锥生产线位置规划图

Fig.9 Location planning of tail cone production line

表2 综合物流强度排序

Table 2 Comprehensive sequence of total closeness rating

序号	站位名称	站位号	综合物流强度	排序等级
1	APU 罩前壁板装配	CT210	2	5
2	APU 罩顶壁板装配	CT220	2	5
3	APU 罩左壁板装配	CT230	2	5
4	APU 罩右壁板装配	CT235	2	5
5	89 框装配	CT250	2	5
6	91 框装配	CT260	2	5
7	APU 罩装配	CT310	14	1
8	顶壁板装配	CT320	2	5
9	左壁板装配	CT330	2	5
10	右壁板装配	CT335	2	5
11	整流罩装配	CT350	1	6
12	进气口门装配	CT360	1	6
13	总装前端装配	CT404	14	1
14	总装后端装配	CT406	7	3
15	总装装配	CT410	12	2
16	总装补铆	CT420	5	4

还需综合考虑下述生产线布局原则,并做好物流路线标识。(1)工艺要求生产对象流动顺畅,避免工序之间的交错叠加;(2)最有效地利用空间;(3)物料搬运费最少;(4)保持生产和安排的柔性;(5)适于组织结构的合理化和方便;(6)为职工提供安全、方便、舒适的作业环境。

本研究共设计 3 套布局方案进行评审,如图 11~13 所示。在评审阶段,组织包括消防安全、设备维护、工业工程、精益生产、装配工艺和生产现场相关人员,采用头脑风暴等方法对 3 种布局方案进行讨论与评估,评估过程考虑精益、物流、面积利用率、人因工程、未来重构性、风险应对和视觉管理等因素。

4 方案评价及选择

对布局方案设计阶段的 3 个方案进行对比,其中,方案 1 的优点主要表现为尾锥壁板站位 /APU 壁板站位距离下一装配站位最近,因此物流搬运成本最小,交付区域距离发运大门最近。缺点为剩余生产面积呈“L”型,不便于舱门生产线流水线布置;舱门交付区域靠近厂房内部,发运过程车辆进入厂房内,影响生产同时存在安全隐患。方案 2 的优点主要表现为尾锥生产线“U”型布局,操作工在区域内可以按照 8 字形方式行走,操作人员走动范围较小,交付区域距离发运大门最近。缺点为“U”型生产线布置占用场地面积更大,不便于交付产品的集中管理,当出现交付停滞时,需规划其他交付缓存区域;舱门交付区域靠近厂房内部,发运过程车辆进入厂房内,影响生产同时存在安全隐患。方案 3 的优点主要表现为尾锥生产线串联分布,整体生产线位于舱门生产线北侧,便于舱门生产线流水线型布局规划;考虑舱门生产线交付发运情况,将舱门交付区域和尾锥

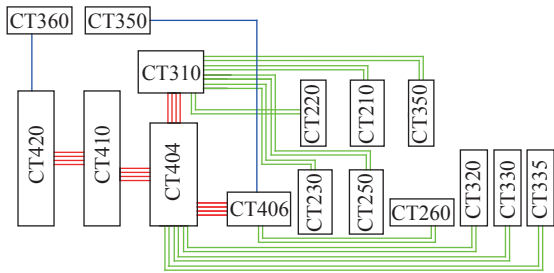


图10 尾锥生产线空间布置图

Fig.10 Space layout of tail cone production line

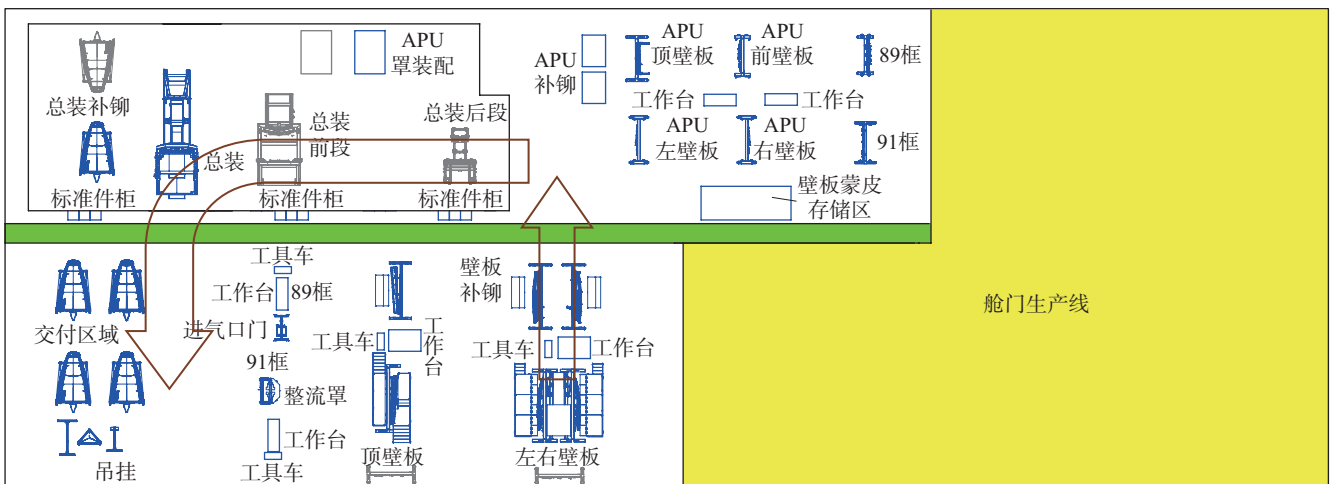


图11 尾锥生产线布局设计方案1

Fig.11 Layout 1 of tail cone production line

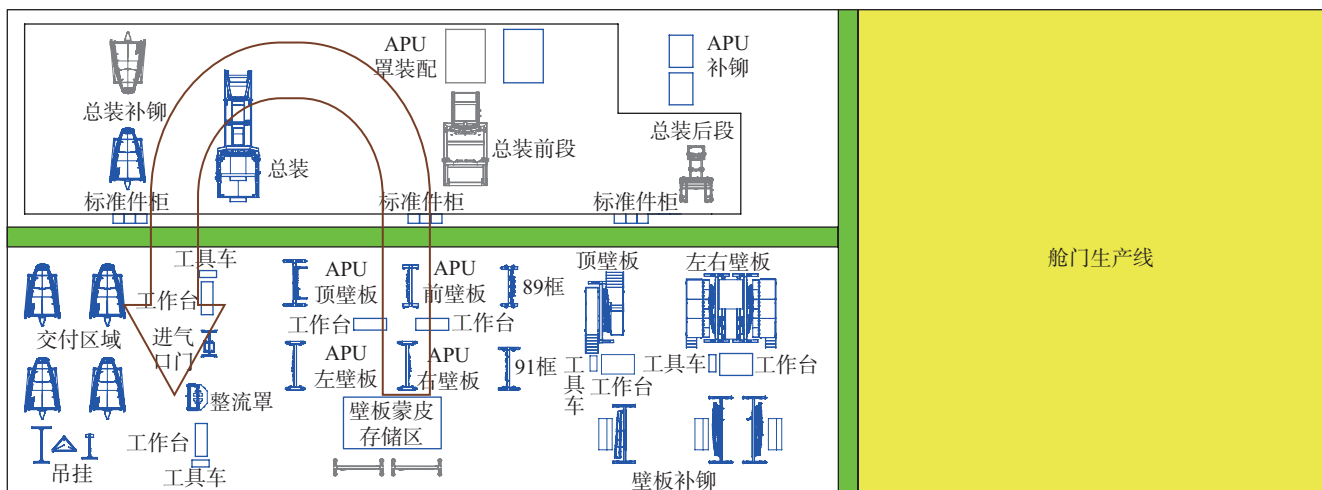


图12 尾锥生产线布局设计方案2

Fig.12 Layout 2 of tail cone production line

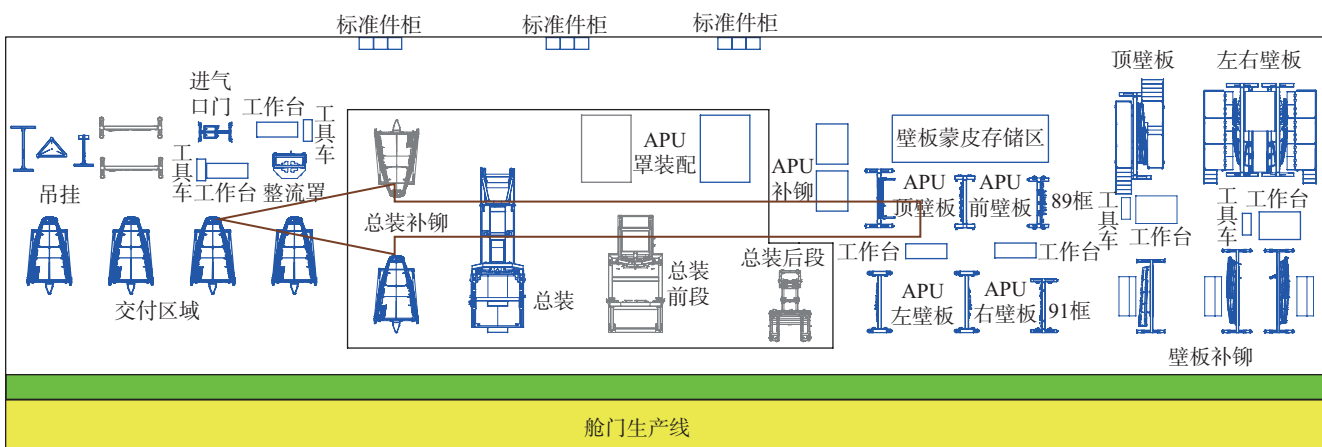


图13 尾锥生产线布局设计方案3

Fig.13 Layout 3 of tail cone production line

交付区域均布置于厂房西侧靠近大门,便于产品交付区的管理。缺点为尾锥壁板站位搬运距离较长。方案1侧重于站位间产品搬运距离最小,方案2侧重于生产线内人员走动距离小,员工工作效率高。与方案1和方案2对比,方案3更加侧重于管理方便、安全生产、风险应对。如图13所示,尽管尾锥壁板站位搬运距离较长,但是便于舱门流水线布局形式,同时舱门、尾锥交付区域集中于厂房西侧大门位置,便于交付区域的集中管理和统一协调规划。综上所述,设计方案3为统筹全局的最佳布局方案。

5 结论

本研究基于SLP方法对尾锥工作包批产后产能爬坡阶段生产线布局规划进行了详细分析,制定出满足爬坡生产需求的生产线布局方式。

(1)通过P、Q、R、S、T原始资料收集,基于目标节

拍要求,利用架次流程图、生产节拍平衡线图识别出关键瓶颈工位为APU罩装配工位、总装工位以及总装补铆工位,针对总装工位进行工作量拆分,通过增加生产节拍方式,降低总装工位生产周期,其余工位通过增加效率工装方式降低工位生产周期,提高了整体生产线平衡性,消除了瓶颈工位影响;同时依据学习曲线下降的工时、最优人力、目标节拍计算出未来爬坡过程中新增工装和人员数量。(2)依据作业单位相关图、空间关系布置图确定尾锥生产线布局方式,根据侧重点不同设计了3种不同形式的布局规划方案。(3)通过全局角度的综合评价,确定流水线型布局为尾锥最佳布局方式,满足尾锥生产线爬坡规划需求。(4)基于SLP方法的生产线规划方式,通过对布局规划过程的定量分析,提高了整个过程的科学性和合理性,为飞机制造行业生产线规划提供参考。

(下转第117页)

of Zhejiang University (Engineering Science), 2004, 38(1): 18–22.

[59] 陆俊百, 周凯, 张伯鹏. 飞行器薄壁件柔性工装定位/支承阵列优化自生成研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(19): 2369–2374, 2378.

LU Junbai, ZHOU Kai, ZHANG Bopeng. Research on optimization of location/support array of flexible tooling system for aircraft large-scale thin-wall workpiece[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(19): 2369–2374, 2378.

[60] LI Y G, LIU C Q, HAO X Z, et al. Responsive fixture design using dynamic product inspection and monitoring technologies for the precision machining of large-scale aerospace parts[J]. CIRP Annals, 2015, 64(1): 173–176.

[61] RAO V S, RAO P V M. Tool deflection compensation in peripheral milling of curved geometries[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(15): 2036–2043.

[62] IWABE H, MIZUOCHI M, YOKOYAMA K. High accurate machining of thin wall shape workpiece by end mill: Proposal of twin spindle type machining and some experiments[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, 1999, 65(632): 1719–1724.

[63] 邓耀华. 柔性件轨迹加工变形补偿预测建模方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

DENG Yaohua. Study of prediction modeling method for flexible workpiece path processing deformation compensation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.

[64] LIU C Q, LI Y G, SHEN W M. A real time machining error compensation method based on dynamic features for cutting force induced elastic deformation in flank milling[J]. Machining Science and Technology, 2018, 22(5): 766–786.

[65] 王文理, 邵坤, 罗锐, 等. 飞机大型铝合金整体壁板高速铣削加工工艺[J/OL]. 航空制造技术, [2021–6–11]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=HKGJ20210611008&uniplatform=NZKPT&v=x9urQmUji0hL9_y4mHMxZ6S4NFuaCZR-Hh0jq6iWcPxuVtMYsiVuZhdGvL9-Nq.

WANG Wenli, SHAO Kun, LUO Rui, et al. High-speed milling process of aircraft large-scale aluminium alloy integral wall panel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, [2021–6–11]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=HKGJ20210611008&uniplatform=NZKPT&v=x9urQmUji0hL9_y4mHMxZ6S4NFuaCZR-Hh0jq6iWcPxuVtMYsiVuZhdGvL9-Nq.

[66] 夏斌, 苏卫华, 黄官平. 高速切削参数优化加工技术的应用[J]. 航空制造技术, 2011, 54(S2): 68–71.

XIA Bin, SU Weihua, HUANG Guanping. Application of high-speed cutting parameter optimization process technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(S2): 68–71.

[67] 单英吉, 孙树强, 杨巍. 高速切削技术在飞机结构件加工中的应用研究[J]. 中国新技术新产品, 2016(8): 16–17.

SHAN Yingji, SUN Shuqiang, YANG Wei. Research on the application of high-speed cutting technology in the machining of aircraft structural parts[J]. New Technology & New Products of China, 2016(8): 16–17.

通讯作者: 岳彩旭, 教授, 博士, 研究方向为金属切削机理研究。

(责编 古京)

(上接第107页)

参考文献

[1] 韩昉, 刘利军, 张鸿斌. 改进SLP算法的车间设施布局优化设计[J]. 机械设计与制造, 2021(3): 297–300.

HAN Fang, LIU Lijun, ZHANG Hongbin. Optimization design of workshop facility layout based on improved SLP algorithm[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(3): 297–300.

[2] 刘敏, 王大维, 杨艳瑞, 等. 空客A220飞机舱门精益生产线规划研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(8): 50–57.

LIU Min, WANG Dawei, YANG Yanrui, et al. Lean production line planning for airbus A220 aircraft door[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(8): 50–57.

[3] 徐熔. 基于SLP方法的H公司生产线布局优化设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.

XU Rong. Optimization design of production line layout in H company based on SLP method[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.

[4] 李建华, 陈祥儒, 周鹏. 基于SLP的采掘装备壳体车间布局优化研究[J]. 价值工程, 2020, 39(11): 284–288.

LI Jianhua, CHEN Xiangru, ZHOU Peng. Research on optimization of mining equipment shell workshop layout based on SLP[J]. Value Engineering, 2020, 39(11): 284–288.

[5] 陈传昊, 冯群. 基于SLP法的配送中心平面布局规划与设计[J]. 物流科技, 2020, 43(5): 48–49, 62.

CHEN Chuanhao, FENG Qun. Layout planning and design of distribution center based on SLP[J]. Logistics Sci-Tech, 2020, 43(5): 48–49, 62.

[6] 周润博. 基于改进的SLP对HD公司生产车间的布局优化[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.

ZHOU Runbo. Layout optimization of HD production workshop based on improved SLP[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.

[7] WIYARATN W, WATANAPA A. Improvement plant layout using systematic layout planning (SLP) for increased productivity[J]. World Academy of Science, Engineering & Technology, 2010, 4(12): 1382–1386.

[8] PATIAL S B. Productivity improvement in plant by using systematic layout planning (SLP)—A case study of medium scale industry[J]. International Journal of Research in Engineering and Technology, 2014, 3(4): 770–775.

[9] OJAGHI Y, KHADEMI A, YUSOF N M, et al. Production layout optimization for small and medium scale food industry[J]. Procedia CIRP, 2015, 26: 247–251.

[10] 王尚羿, 吴德宣. 学习曲线及其回归分析[J]. 江苏大学学报(社会科学版), 1999(3): 66–69.

WANG Shangyi, WU Dexuan. Learning curve and its regression analysis[J]. Journal of Jiangsu University(Social Science Edition), 1999(3): 66–69.

[11] 蔡元君. 某汽车发动机生产线规划及仿真研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.

CAI Yuanjun. Research on the production line planning and simulation of an automobile engine[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.

通讯作者: 刘敏, 高级工程师, 主要从事飞机大部件数字化装配仿真、精益生产线规划及智慧工厂建设方面的研究。

(责编 古京)