

# 飞机结构件柔性生产系统设备 布局分析与优化\*

李 杰,夏远猛,宋智勇,帅朝林,刘大炜

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司,成都 610092)

**[摘要]** 飞机结构件加工具有科研与生产混线、小批量与大柔性等典型离散制造特征,实现全生产过程自动化难度大。提出了一套综合物流、存储、装夹的柔性生产系统方案,形成了飞机结构件柔性生产系统设备布局,对柔性生产系统中的关键物流设备(AGV和RGV)数量需求进行了分析,构建了分析RGV数量和配送时间对生产线中单台机床每天平均空置率影响的仿真算例,对结构件柔性生产线设备布局进行优化,为面向智能制造的飞机结构件柔性制造系统构建提供重要指导。

**关键词:** 飞机结构件;智能制造;柔性生产线;设备布局;物流系统

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.06.051



李 杰

工学博士,中国机械工程学会会员。2017年毕业于清华大学机械工程系,现在航空工业成飞博后工作站从事精密工程及智能制造相关技术研究,已发表学术论文14篇,其中SCI/EI收录10篇,授权发明专利12项,获中国机械工业科技进步一等奖和四川省科技进步一等奖各1项。

结构件是飞机机身的连接与承载单元,对飞行性能有重要影响。飞机结构件主要通过数控加工生产,经过几十年高速发展,我国飞机结构数控加工技术已经取得了长足进步。新一代飞机快速研制和批量生产是国家防空安全的重要保障,为实现这一目标,结构件制造面临提质和增效两大难题。柔性制造系统是实现飞机结构件智能制造的基础载体,为飞机结构件制造转型升级提供了有效途径。飞机结构件加工具有科研、生产混线,小批量、大柔性等典型特征,在构建柔性制造系统时需要从设备布局、物流运输效率、生产现场信息管控等多方面考虑,其中设备布局和物流设备规划是柔性生产线建设前期规划的重点。

目前关于探索构建航空、航天智能车间的研究颇多,大都集中于探讨

智能制造的特征、内涵以及智能制造实施的总体框架<sup>[1-2]</sup>,其中一些研究对构建柔性生产线的关键技术进行了分析<sup>[3]</sup>,特别强调了智能生产设备和自动化物流系统的重要性<sup>[4-5]</sup>,但关于智能生产设备布局以及物流设备初期规划的报道鲜见。在自动化物流系统的研究方面,学者们相对集中地研究了基于排队理论的AGV调度控制研究<sup>[6-8]</sup>,这些工作都基于生产线已经建成,AGV(Automated Guided Vehicle)数量已经配置到位,通过优化调度系统来提升系统的产能。刘建等<sup>[9]</sup>的研究表明,在既定车间自动物流系统中,AGV过多会造成交通拥堵,AGV过少会导致货物等待时间过长,这两种情况都会影响生产效率。虽然,物流系统调度控制优化有助于改善生产效率,但在柔性制造系统拓扑结构既定的情况下,

\* 基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX04002001)。

系统的产能难以发生质的飞跃。张春远等<sup>[10]</sup>通过遗传算法仿真研究了AGV配置数量与产品产量之间的关系,结果表明合理的优化AGV配置不仅可以提升效率还可以控制成本。由此可见,在柔性生产线规划设计初期,综合考虑物流设备数量和加工设备工艺布局的影响,对于柔性生产线建设效果具有举足轻重的作用。

本文将深入分析飞机结构件数控加工工艺特点,以此为基础开展飞机结构件柔性生产系统设备工艺布局分析及物流设备优化研究,为建设高效、高产的飞机结构件柔性生产线提供理论指导。

### 构建结构件柔性线的难点

飞机结构件加工工艺流程是建设柔性生产线的重要参考依据。如图1所示,飞机结构件槽腔特征复杂、繁多,通常完成单项零件的加工需要翻面或多次变换工件的装夹定位。与其他行业大批量、工序单一的生产线加工相比,用于飞机结构件加工的柔性生产线要适应一个零件的多个加工工序。零件多次装拆,长时间及多次占用柔性线装卸位,零件与托盘装卸过程人为因素影响明显,装拆时间波动大,使得加工过程管控难度增大,为构建柔性生产线带来了挑战。

其次,如图2所示,飞机结构件种类繁多,单项零件批量小甚至是单件。因而,专用工装种类多、占比大,导致在柔性生产线有限存储空间中,工装库存量大,毛坯和成品存储空间占比小,物流转运能力受限。

此外,柔性线装夹装卸货位数量较少(如图3所示,通常为1~2个,若柔性线装卸货位太多则占地面积大,会损失加工设备空间和立体库存储空间),而在飞机结构件制造过程中,由于零件加工需多次变换装夹定位或翻面,零件装夹过程时间较长时,极易出现立体库库外工装、

毛坯等待装夹,立体库库内零件、托盘等待拆卸的现象,使得零部件装拆工序成为提升柔性线生产效率的瓶颈。

### 飞机结构件柔性线布局设计

建立飞机结构件柔性生产线,设备布局设计既是基础也是核心。设备布局设计的关键在于能够充分解决飞机结构件加工流程中所面临的瓶颈问题。

(1)设置零件二级装夹模式,第1级为毛坯和工装的精细装夹,在车间集中装卸区完成;第2级为工装、毛坯的合装体与机床可交换工作台的快速装夹,在柔性生产线装卸站完成。第1级装夹完成,工装和毛坯的合装体进入立体库存储。收到车间调度命令后工装和毛坯的合装体被运输至柔性生产线的装卸站与线内可交换工作台进行快速装载并等待加工调度。单面零件加工完成后,在柔性生产线的装卸站快速拆卸零件、工装的合装体与可交换工作台。合装体返回集中装卸区拆装、翻面、再装夹形成第二面合装体,并再次等待入线与可交换工作台装载后加工。通过两级分层装夹布局模式,零件翻面装卸的工序被分割成与两个独立单面零件等效的加工流程,可以有效解决飞机结构件多次变换装夹、长时间占用柔性线装卸位、加工过程管控难度大的难题。

(2)设置线边缓存库与中央立体库相结合的零件存储管理模式。线边缓存库紧靠柔性生产线建设,用于存储毛坯(或零件)与通用工装的合装体,存储货量至少可以满足柔性生产线单个周转期的物流交换量,确保柔性线实时具备自动排产的物料。中央立体库的设置需综合考虑厂房所有柔性生产线和物流的布局,用于存放毛坯、通用工装以及成品零件,存货量需满足车间内所有设备至少一个周转期的物流交换

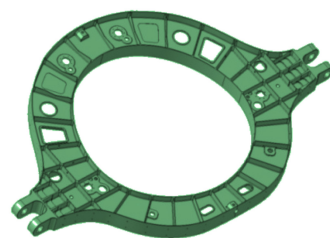


图1 典型的复杂特征飞机结构件  
Fig.1 Typical aircraft structural part with complex characteristics

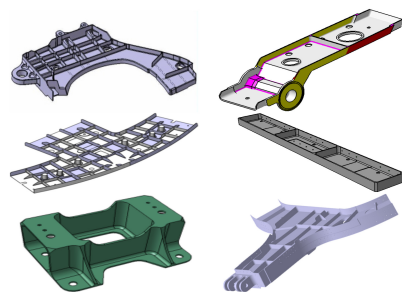


图2 种类繁多的飞机结构件  
Fig.2 A wide variety of aircraft structural parts

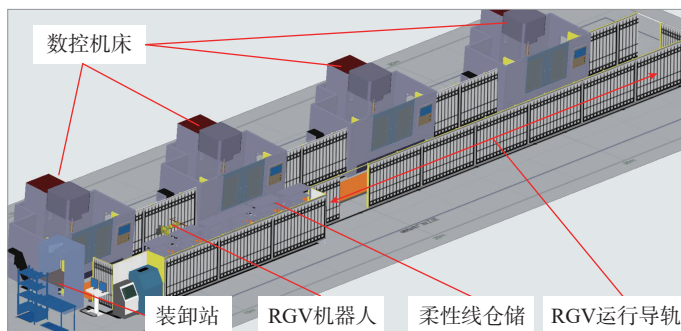


图3 柔性生产线及装载站  
Fig.3 Flexible production line and loading station

量。线边缓存库通过车间物流系统与中央立体库进行物料交换,中央立体库通过对外物流与车间外进行物料交换。二级存储模式将车间庞大的物料分层管理,一方面减轻了中央立体库的货位数量压力,另一方面提升了生产系统抗物流扰动的能力。尤其是降低了对车间 AGV 系统准时性的要求,AGV 数量及交通规则制定仅需根据每个周转期的货量规划即可,无需依赖复杂的调度优化算法。

(3)设计通用工装与可交换工作台快速装夹接口。通用工装的装夹接口分为上下两部分:上部接口依据零件的定位夹紧需求设计为精细装夹;下部接口依据通用工装在柔性线装卸站的快速装拆需求设计,采用零点定位系统实现,如图4所示。通过快速装夹接口,大大缩短了零件(或毛坯)与通用工装的合装体在柔性线装卸站的停留时间,提升了装卸站的利用率,从而解决了零部件装拆工序效率的瓶颈问题。

### 柔性生产系统工作流程

根据上述关于柔性生产系统的布局分析,可通过图5所示的柔性制造系统对飞机结构件的加工流程进行基本描述。

首先,通用工装和毛坯通过库区堆垛机由物料入口进入中央立体库分区管理。当中央立体库收到车间生产计划后,通过库区堆垛机将毛坯和通用工装运往集中装夹区进行合装。合装体再次由库区堆垛机放入中央立体库等待物流调度。当中央立体库收到柔性生产线的物料请求后,由车间物流系统将毛坯与通用工装的合装体运送到柔性生产线的装卸站。与此同时柔性生产线会通过 RGV (Rail Guided Vehicle) 从线边缓存库调度可交换工作台到装卸站,通用工装与毛坯的合装体通过零

点定位系统与可交换工作台进行快速装夹组成待加工的装载体,并由 RGV 运送到线边缓存库进行存储。线边缓存库、RGV、装卸站以及机床的加工情况都由柔性线的管控系统统一管理。管控系统会根据机床加工状态灵活地从线边缓存库调度待加工的装载体进入某台机床进行加工,加工完成后的装载体由 RGV 再次调度进入线边缓存库缓存。柔性生产线管控系统监测到装卸站空闲时,会调度加工完成的装载体到装卸站进行拆装。拆装后的可交换工作台返回到线边缓存库,而零件与通用工装的合装体则会返回到中央立体库进行储存。当立体库监测到集中装夹区有装夹空位时,库区堆垛机调度零件与通用工装的合装体到空闲装卸站进行拆卸。工装和零件再次通过库区堆垛机调入中央立体库分区管理。经过一段时间生产制造,零件在中央立体库达到一定批量,由物流统一转运交付。

除了柔性制造系统完整的装夹、存储和物流系统方案,在柔性线机床的选型和布局上还需要考虑批产和定制生产的能力。在飞机结构件柔性制造系统中,同一条生产线由同种类型的机床组成,这些机床在加工功能上彼此可替代,即使某台机床出现故障依然可以保持所加工产品具有较高的批产能力。此外,不同柔性线的机床拓扑结构和尺寸不同,在加工能力上彼此之间具有互补功能,彼此间通过物流系统灵活配合,从而确保柔性系统具有小批量定制生产能力。

### 物流设备计算及布局优化

物流系统是保障柔性生产系统物料流通的纽带,其中物流设备数量既关系到前期建设投入成本又关系后期物料流通能力和运行效率,是物流系统建设关注的重点。车间整套柔性生产系统中主要的物流设备包括车间 AGV、柔性生产线 RGV 以及

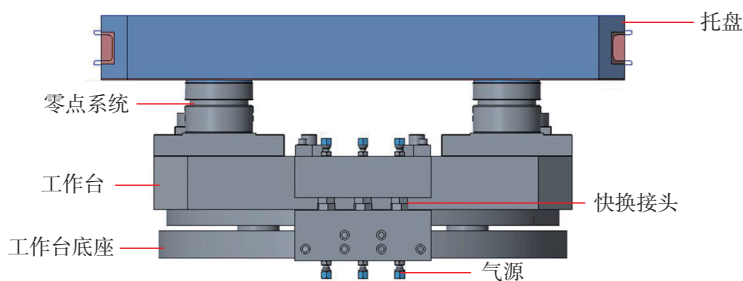


图4 工作台与通用工装快速装拆接口

Fig.4 Rapid loading and unloading interface between table and tooling

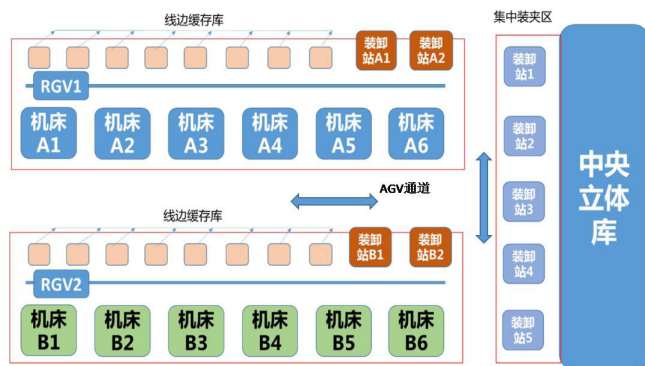


图5 飞机结构件柔性制造系统示意图

Fig.5 Sketch map of flexible production system of the aircraft structural parts

中央立体库堆垛机 3 类。由于车间柔性生产系统设置了中央立体库和线边缓存库相结合的二级缓存机制,中央立体库堆垛机和车间 AGV 没有出货节奏要求,其数量主要由中央立体库转运的货量、车间工作时间及设备运行周期决定。

设定  $t$  小时需要转运的货量为  $Q$ , 每台设备的运行周期为  $s$ , 每台设备的运输量为  $q$ , 那么堆垛机和 AGV 的数量都可以采用以下表达式进行计算:

$$n = \frac{kQs}{tq} + m \quad (1)$$

式中,  $n$  为计算所得堆垛机或 AGV 的数量,  $k$  为冗余系数( $k$  越大物流系统冗余能力越强,但成本也会增加,相应 AGV 调度复杂性增加),  $m$  为备用设备数量(根据平均维修及充电时间拟定)。

与 AGV 和立体库堆垛机不同, RGV 需要实时配合柔性生产线内机床的加工任务,柔性生产线的生产节拍由线内 RGV 的效率保证,线内 RGV 运行状态成为整个柔性生产系统顺利运行的关键。为保证柔性生产线内部具有足够的物流能力,进行 RGV 数量规划研究意义重大。为此,需通过算例仿真计算柔性生产线中不同数量加工设备对应的最佳 RGV 数量。

设定柔性生产线共需要加工  $y$  个工件, RGV 从某台机床取出加工成品并送入毛坯件过程时间为  $x$  分钟,线内共有  $w$  台机床共用一台 RGV,每件工件所需加工时间不超过  $r$  小时(任意时刻查看  $w$  台机床的剩余加工时间为 0~60min 的随机数)。该条柔性生产线设备平均空闲率可以在 Matlab 中通过以下代码算法进行仿真:

```
% 定义单次 RGV 延误时间存储器
M=zeros(1, y/w);
% 定义延误时间累加计算因子
```

```
N=ones(1, y/w);
% 定义平均每台机床需要加工零件数
for k=1:(y/w)
% 定义 w 台机床单次循环延误计时器
T=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0...];
% 生成每次查看 w 台机床随机结束时间
A=rand(w,1) × 60r;
% 对 w 台机床结束时间进行升序排序
B=sort(A);
for i = 1:(y-1)
if B(i+1)-B(i)<x
% w 台机床延误时间迭代算法
T(i+1)=x-(B(i+1)-B(i));
B(i+1)=B(i+1)+T(i+1);
else
T(i+1)=0;
end
end
% 延误时间集合
M(k)=sum(T);
end
% 平均每次循环机床耽误时间为
e=mean(M);
end;
那么单台机床的平均每天的空置率可以表达为:
```

$$\psi = \frac{e \times y}{w^2 \times 24 \times 60 \times z} \quad (2)$$

式中,  $e$  为所有机床单次查看平均空置时间,  $y$  为所需加工零件数量,  $w$  柔性线的机床数量,  $z$  为给定零件数量机床工作天数。

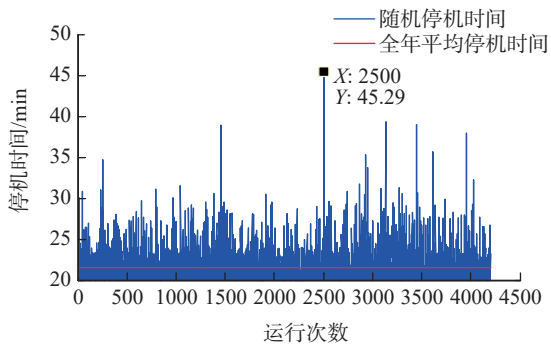
根据柔性线机床常规布局习惯,给定算例条件为:每项零件加工时间为 2h 以内随即数,每台机床每年总零件数约为 4200 件,每天工作 24h,分以下 4 种情况讨论柔性生产线机床的空置率:

(1) RGV 更换毛坯周期为 4min, 柔性生产线共有 5 台机床;(2) RGV 更换毛坯周期为 4min, 柔性生

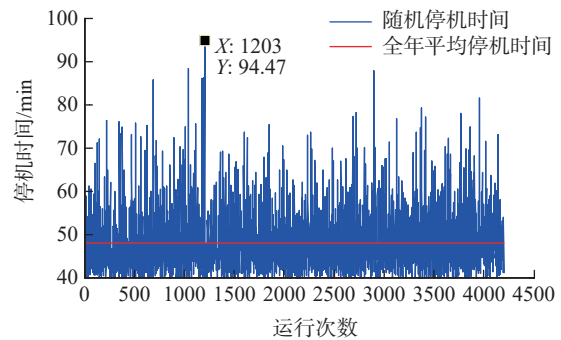
产线共有 10 台机床;(3) RGV 更换毛坯周期为 2min, 柔性生产线共有 5 台机床;(4) RGV 更换毛坯周期为 2min, 柔性生产线共 10 台机床。

根据仿真算例及式(2)可得机床在 4 种条件下空置率情况如图 6 所示。根据表 1 数据,分别对比图 6(a)与图 6(c)、6(b)与图 6(d)可知,将 RGV 运行周期减少一半,机床的空置率可大幅度降低,在 1 台 RGV 负责 5 台机床的情况下,空置率可降低 52%,在 1 台 RGV 负责 10 台机床的情况下,空置率可降低 55%。分别对比图 6(a)与图 6(b)、图 6(c)与图 6(d)可知,当 RGV 运行周期一定时,减少单台 RGV 覆盖的机床数量可以降低机床空置率,但改善效果远不如降低 RGV 运行周期明显。因此,在构建柔性生产线时,为了提升数控机床的设备利用率,第一要务是降低 RGV 的运行周期,其次是减少单台 RGV 的覆盖的运输范围。

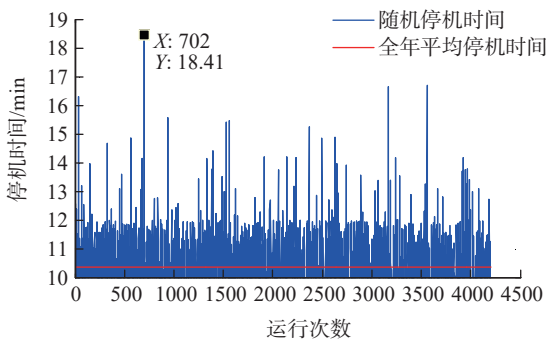
对于给定工作性能的 RGV,其最大运行速度和加速度都有限制,为了降低运行周期只能缩短 RGV 运动的路程,因此尽量压缩柔性生产线的长度是有效方法。其次,在给定长度的柔性生产线上,还可以尽量减少单台 RGV 的工作覆盖范围来提升线内设备利用率。另一方面,制造企业总期望能在有限的空间上最大化柔性线的产能和设备利用率,从而形成最大利润。综合这些因素,图 7 所示的单线-双车-双排机床布局将是柔性线最佳的方案。该方案中,柔性生产线占地空间利用率高,单台 RGV 覆盖范围得到控制,同时 RGV 在线内运行周期得到最大化压缩。图 7 所示的方案基本可以实现图 6(c)算例中 RGV 运行周期为 2min,单台 RGV 覆盖 5 台数控机床的运送任务,针对算例给定加工任务,整条柔性生产线的空置率能够被控制在 1.73%。



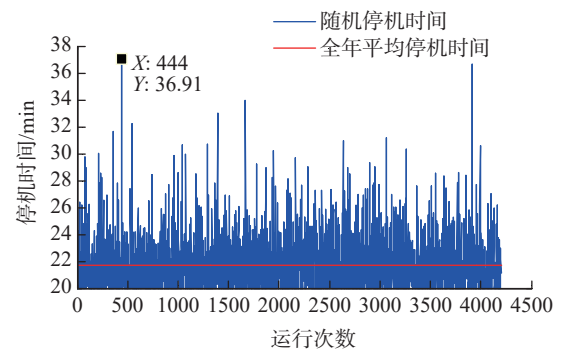
(a) RGV换料周期4min;  
5台机床最长停机时间45.29min;  
5台机床平均停机时间21.5min;  
机床平均空置率为3.6%



(b) RGV换料周期4min;  
10台机床最长停机时间94.47min;  
10台机床平均停机时间47.9min;  
机床平均空置率为4%



(c) RGV换料周期2min;  
5台机床最长停机时间18.41min;  
5台机床平均停机时间10.35min;  
机床平均空置率为1.73%



(d) RGV换料周期2min;  
10台机床最长停机时间36.91min;  
10台机床平均停机时间21.7min;  
机床平均空置率1.8%

图6 不同机床数量及RGV运行周期时机床的平均空置率

Fig.6 Average vacancy rate under different machine tools and RGV operating cycles

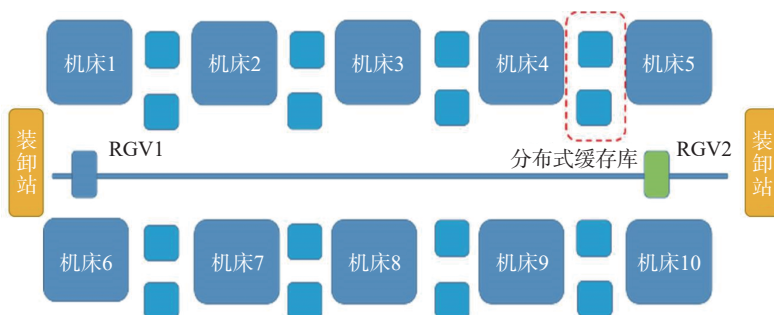


图7 最佳的柔性线布局图

Fig.7 Optimal layout of the flexible line

## 结论

本文以构建面向智能制造的飞机结构件柔性生产系统为目标,对当前飞机结构件数控加工工艺流进

行了深入分析,指出构建飞机结构件柔性制造系统的难点在于3个方面:(1)零件变换装夹,长时间占用柔性线装卸位,柔性线加工过程管控难度大;(2)工装量大,毛坯和成

品存储空间占比小,立体库物流转运能力受限;(3)零件进出和变换装夹在装卸站形成物流瓶颈。

针对上述难题,提出了二级分层装夹布局模式、线边缓存库与中央立体库相结合的零件存储管理模式及设计通用工装与可交换工作台快速装夹接口3种措施结合的解决方法。在此基础上,详细描述了柔性制造系统的工艺布局及工作流程,对物流设备工作需求进行了分析,给出了中央立体库堆垛机和车间AGV的数量基本计算方法。此外,还对柔性生产线节拍保障关键环节RGV数量和布局进行了优化研究,并提供了相应算例说明,

最终给出了柔性生产线的最佳布局方案,为面向智能制造的飞机结构件柔性制造系统构建提供重要理论指导。

### 参考文献

[1] 杜宝瑞,王勃,赵璐,等.航空智能工厂的基本特征与框架体系[J].航空制造技术,2015,58(8):26-31.

DU Baorui, WANG Bo, ZHAO Lu, et al. Basic characteristics and framework of the intelligent factory in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(8): 26-31.

[2] 单继东,王昭阳,陈贺利,等.航空发动机智能制造生产线构建技术[J].航空制造技术,2016,59(16):52-56.

SHAN Jidong, WANG Zhaoyang, CHEN Heli, et al. Building technology of intelligent manufacturing production line for aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(16): 52-56.

[3] 宋智勇,李杰,刘大炜.面向智能制造的飞机结构件数字化车间构建关键技术[J].航空制造技术,2019,62(7):25-30.

SONG Zhiyong, LI Jie, LIU Dawei. Key technologies for constructing intelligent manufacturing oriented digital workshop

of aircraft structural parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(7): 25-30.

[4] 高鑫,龚清洪,孙超.飞机结构件智能制造关键技术研究[J].制造技术与机床,2017(8):45-49.

GAO Xin, GONG Qinghong, SUN Chao. Key technologies research of intelligent manufacturing for aircraft structural parts[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2017(8): 45-49.

[5] 李慧丽.航天智能工厂建设的几点思考[J].网信军民融合,2017(3):50-54.

LI Huili. Some thoughts on the construction of aerospace intelligent factory[J]. Civil-Military Integration on Cyberspace, 2017(3): 50-54.

[6] 丁健.基于排队网络队列模糊控制的自动小车立体仓库出入库任务的分配方法[J].工业控制计算机,2014,27(7):41-44.

DING Jian. A task assignment method based on fuzzy control of queuing networks[J]. Industrial Control Computer, 2014, 27(7): 41-44.

[7] 金芳,方凯,王京林.基于排队理论的AGV调度研究[J].仪器仪表学报,2008,25(4):844-846.

JIN Fang, FANG Kai, WANG Jinglin. Research on AGV's scheduling based on

queuing theory[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 25(4): 844-846.

[8] 李雪.基于排队理论的AGV利用率控制优化[J].兰州交通大学学报,2012,31(6):91-93.

LI Xue. Utilization control optimization of AGV based on queuing theory[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2012, 31(6): 91-93.

[9] 刘建,黄奇峰,王忠东,等.基于Plant simulation的AGV运输系统仿真分析及其应用[J].现代制造工程,2013(11):13-16.

LIU Jian, HUANG Qifeng, WANG Zhongdong, et al. Simulation modeling analysis for AGVs based on plant simulation and its application[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2013(11): 13-16.

[10] 张春远,范秀敏,驹田邦久.基于仿真优化的多种类型AGV数量配置优化方法[J].中国机械工程,2011,22(14):1680-1685.

ZHANG Chunyuan, FAN Xiumin, JÜTIAN Bangjiu. Multi-types AGVs quantity configuration optimization based on simulation optimization[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(14): 1680-1685.

通讯作者:李杰,E-mail:15810158892@163.com。

## Equipment Layout Analysis and Optimization for the Flexible Production System of Aircraft Structural Parts

LI Jie, XIA Yuanmeng, SONG Zhiyong, SHUAI Chaolin, LIU Dawei  
(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

**[ABSTRACT]** The machining of aircraft structural parts is a kind of typical discrete manufacturing, which is characterized with mixture of research and production, small batch and large flexibility. Thus, it is quite difficult to realize automation for the manufacturing process of aircraft structural parts. This paper proposes a comprehensive solution to automation of aircraft structural parts manufacturing that includes logistics, storage, loading and unloading. In this solution, the layout of the equipment is discussed and the quantity of the logistics equipment (AGV, RGV) is analyzed. Besides, a simulation example is shown to analyze the average vacancy rate of a machine when the RGV quantity and delivery time in a manufacturing system is considered, which provides important directions for the construction of the aircraft structural parts oriented flexible production system.

**Keywords:** Aircraft structural parts; Intelligent manufacturing; Flexible production line; Equipment layout; Logistics system

(责编 大漠)