

航空发动机喷杆精益单元仿真技术验证与研究

李湘胜¹, 安鲁陵¹, 王建荣², 王涛²

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016; 2. 中国航发贵州黎阳航空动力有限公司, 贵阳 550014)

摘要: 根据航空发动机喷杆精益单元的运行需求, 提出了一种仿真分析精益单元单批次数量的方法。利用 Plant Simulation 仿真软件, 通过适当简化喷杆精益单元实际运行的环境因素, 对精益单元的工艺布局、各个工序设备与缓存站等进行了仿真建模与模拟分析, 研究了不同批次数量下的仿真数据, 优选出喷杆精益单元单批次数量为 60 件/次, 验证了当前单批次数量下设备瓶颈和年加工时间的符合性, 并直观显示了精益单元的每个工作流程和每一工序物流方向, 为喷杆精益单元生产计划排产和物料配送策略提供了理论依据和指导。

关键词: 航空发动机; 喷杆; 精益单元; 布局仿真; Plant Simulation

Simulation Technology Verification and Research on Lean Unit of Spray Rod of Aero-engine

Li Xiangsheng, An Luling, Wang Jianrong, Wang Tao

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. AECC GuiZhou LiYang Aviation Power CO., LTD, Guiyang 550014, China)

Abstract: According to the operation requirements of lean unit of spray rod of Aero-engine, a method for analyzing the number of single batch of lean unit based on simulation was proposed. Using plant simulation software, by appropriately simplifying environmental factors of lean unit of spray rod actual operation, the process layout, equipment of each process, buffer station of lean unit are analyzed by simulation modeling and simulating, studying the simulation data of different batches, selecting preferably the number of single batch of lean unit of spray rod that is 60 piece per batch, verifying the compliance of equipment bottleneck and processing time per year under the current number of single batch, and visually displaying each workflow and logistics direction of each process of lean unit, it is convenient to provide theoretical basis and guidance for production plan sequence and logistics distribution strategy of lean unit of spray rod.

Keywords: Aero-engine; spray rod; lean unit; layout simulation; plant simulation

引言

精益单元生产方式作为精益生产的重要模块，是一种适用于多品种、小批量订单环境的柔性生产管理方式，实现提高生产效率、平衡率以及满足客户定制化、个性化需求的系统平衡^[1]。面对当前航空发动机产品多品种小批量的生产方式，采用精益模式进行工艺布局不但能减少物流距离、降低库存，而且具有灵活性好、适应力强、以及良好的沟通及信息流动等诸多优势。机械加工精益单元中生产计划排产、设备布局和物流策略的优劣将直接影响整个生产成本的高低^[2]，而现在各类仿真技术已广泛应用到航空制造业领域中，通过利用虚拟仿真技术验证机械加工精益单元中设备布局和物流策略的设计方案合理性，可以有效缩短生产周期、降低生产成本和提高生产效率等。到目前为止，已有众多研究者应用虚拟仿真软件开展数字化生产线布局、设计以及仿真等问题开展研究。孙智超^[3]、崔晶^[4]等利用 Plant Simulation 对产品生产线工艺流程及布局建立了系统的仿真模型，通过仿真评估量化分析、论证，从而指导生产线的规划设计和生产计划调整。张智^[5]等对产品的 2 种生产线布局方案进行了仿真研究和分析，找出了生产线的运行瓶颈，并提出了优化物流配送策略等方案。徐曼菲^[6]等以军工企业弹部件生产线为对象，研究了多层次嵌套式的单元模型仿真，由单元模型构建的整线模型能够完整地与实际生产线进行一一映射，具备了高度的逼真性和完备性。徐贵等^[7]建立了基于转向架轮对涂装线实际生产工艺的仿真模型，确定了涂装线在生产过程中存在的瓶颈问题，消除了瓶颈问题，提高了生产线的产能。在国外已经出现各种商业化的集成建模与仿真平台，如 Flexsim、Auto Mod、Arena 等，直接采用仿真方法对生产系统进行分析已经相当普遍^[8]。Aneta Konczaka 等^[9]探索了 Micro Cyclone、Flexsim 和 Any Logic 3 个可用的仿真软件，分别使用仿真软件模拟生产过程，通过改变组合构成和生产计划，提高了生产线的整体效率。PETER^[10]等从产品生产线布局方面，通过优化设备排布相关参数、车间布置相关参数等解决产能提升问题。由此可见，通过使用仿真软件能够提前对生产线或精益单元的生产产能、设备布局、生产计划和生产瓶颈等进行分析研究，使企业能够在规划阶段合理配置设备布局和生产资源，大幅降低规划到建设实施的不确定性，提高生产效率和降低建设成本，也可以加快生产线、精益单元在制造企业的快速推广应用。

本文主要结合某企业燃烧车间喷杆零件精益生产单元的建设实施项目进行基于 Plant Simulation 软件的仿真技术验证与研究。由于喷杆精益单元方案设计阶段得出的工艺布局方案和生产流程未进行仿真模拟，其工件的单批次加工数量缺乏有效的数据分析，精益单元的年生产产能和负载分析图无法得到仿真实验验证。因此，通过运用仿真技术对精益单元的设备布局、加工流程及生产计划等进行仿真，模拟精益单元的每一步工作流程和每一工序的物流方向，研究精益单元在不同批次数量下的仿真运行情况，优选出的每个工序单批次加工数量，达到产品最佳的年生产产能，验证精益单元的负载能力，并以此设计制造相应的托盘工装，有效优化生产组织模式与资源，降低建设成本，提高精益单元的可靠性和成功率。

1 喷杆精益单元设计方案

喷杆是接在燃油总管上负责燃油在加力燃烧室中输运和雾化的组件，决定着燃油浓度分布，直接影响加力燃烧室的台架性能和空中特性^[11]，其微小孔的孔径、孔长等因素将直接影响发动机的工作性能。一般来说，微小孔是指直径不大于 1mm 的小孔，其中直径在 0.3~1mm 的孔被称为小孔，直径小于 0.3mm 的孔被称为微孔^[12]。微小孔的加工方法主要有钻削、电火花打孔、激光等，本文研究的喷杆微小孔主要采用钻削加工和电火花加工的方式，零件示意图见下图 1。

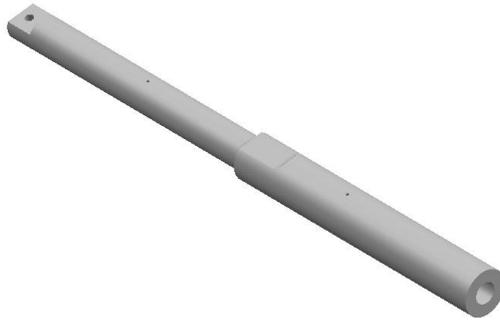


图 1 喷杆零件示意图

喷杆精益单元方案设计时应用精益方法进行了典型零件选取、现状分析、瓶颈工序、生产线平衡等分析，得出了喷杆精益单元的工艺布局方案。根据喷杆精益单元的设计方案，通过梳理喷杆精益单元典型件、工艺流程、工艺设备、年生产任务纲领、工序时间、工艺布局等信息，为仿真分析精益单元工艺布局提供数据来源。

1.1 喷杆工艺信息

按照工艺成组化技术进行产品族分类，根据喷杆件相似性、工艺技术特点，确定分为 A 类喷杆、B 类喷杆、C 类喷杆共三种典型件。喷杆典型件涉及的工艺流程主要为：前置工序（焊接）→车削加工→磨削加工→钻孔与铣削→电火花打孔→流量试验→方向试验→包装入库。涉及的主要工艺设备有：数控排式车床（排车）、无心磨床、钻铣中心、电火花小孔机、普通车床（普车）、台式钻床（台钻）、喷杆流量试验器、喷射方向试验器。三种典型件的年生产任务纲领大约为 A 类喷杆 5680 件，B 类喷杆 4080 件，C 类喷杆 480 件。

1.2 喷杆工序时间

喷杆精益单元进行方案设计时主要针对机加与试验设备的工艺布局进行了调整与设备瓶颈分析，因此针对焊接、清洗、打毛刺、荧光检测、中间检验等工序进行了简化，统一为前置工序（焊接）和辅助工序（清洗、打毛刺、荧光检测、中间检验等），并将其准备工序时间和加工工序时间分别进行了统一合并计算，主要凸显机加和试验设备对应的单件平均准备时间和单件平均加工时间。经梳理，三种喷杆典型件的机加与试验工艺设备对应的单件平均准备时间和单件平均加工时间如下表 1。

表 1 三种典型喷杆件机加与试验工艺设备对应的时间表

喷杆典型件	工序名称	工艺设备	单件平均准备时间 (min)	单件平均加工时间 (min)
A 类喷杆	前置工序	-	43	22
	车焊缝	普车	2	2
	辅助工序	-	17	8.5
	车/平端面	普车	4	2
	辅助工序	-	1	1
	钻孔	台钻	2	3
	辅助工序	-	3	2
	电脉冲打孔	电火花小孔机	3	5
	辅助工序	-	1	0.5
	喷杆流量分布试验	喷杆流量试验器	3	5
	包装入库	-	1	0.5
B 类喷杆	前置工序	-	22	11.5
	车加工	排车	2	1
	辅助工序	-	1	1
	平端面	排车	2	2
	磨外圆	无心磨床	2	3
	辅助工序	-	1	1
	铣加工	钻铣中心	2	2
	辅助工序	-	1	1
	钻孔	钻铣中心	2	3
	辅助工序	-	6	3.5

喷杆典型件	工序名称	工艺设备	单件平均准备时间 (min)	单件平均加工时间 (min)
C类喷杆	钻孔	电火花小孔机	3	5
	辅助工序	-	2	1.5
	流量试验	喷杆流量试验器	3	5
	喷射方向试验	喷射方向试验器	3	7
	包装入库	-	2	1.5
	前置工序	-	30	16
	车焊瘤	排车	2	2
	磨外圆	无心磨床	2	3
	辅助工序	-	1	0.5
	车/平端面	排车	4	4
	辅助工序	-	1	1
	铣扁与槽	钻铣中心	6	4
	辅助工序	-	3	2
	钻孔	电火花小孔机	3	5
	辅助工序	-	1	1
	流量试验	喷杆流量试验器	3	5
包装入库	-	3	1.5	

1.3 喷杆精益单元工艺布局方案

根据喷杆精益单元的设计方案，通过生产线平衡率计算、设备需求计算、从至表等精益方法确定了喷杆机加间的工艺布局方案，其中工艺设备包含排车 3 台、钻铣中心 2 台、无心磨床 2 台、电火花小孔机 2 台、喷射流量试验器 2 台、喷射方向试验器 1 台。由于考虑到试验器和无心磨床设备的特殊环境要求，工厂 A 类喷杆件任务量的逐年减少，保持现有无心磨床、台钻、喷杆试验器的安装位置不变。喷杆精益单元的具体工艺布局图如下图 2：

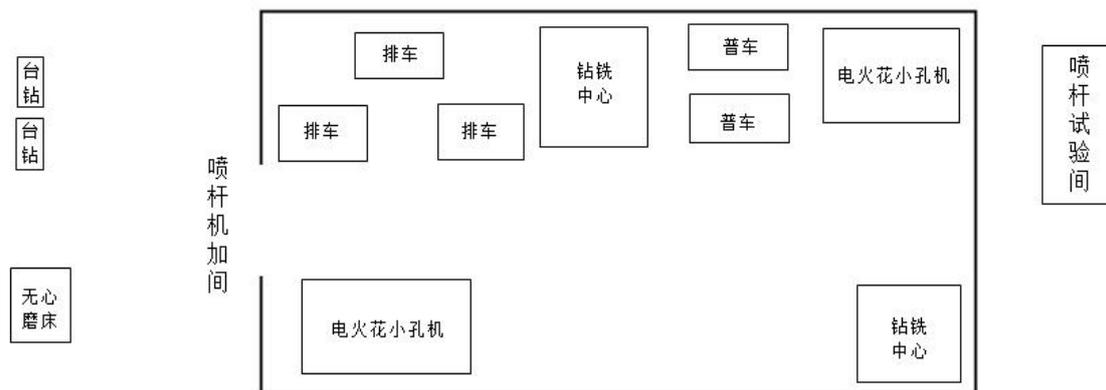


图 2 喷杆精益单元工艺布局图

2 精益单元工艺布局仿真

2.1 基本假设

在喷杆精益单元中，设备之间物流量受产品品种、批量、加工工序、机床占用空间和作业环境等多种因素的影响，是一个十分复杂的问题，为了将单元平面布局进行建模处理与仿真分析，则需对研究的问题作适当的简化，主要约定如下：

(1) 精益单元内的工艺设备忽略其形状与尺寸，都将其视为同类型的工件加工站模型，通过设定不同的命名与参数来区分。

(2) 前置工序和辅助工序统一列入相同的仿真层级进行管理，模拟为工件经过一段加工时间处理过程的输入输出。

(3) 目前工件在现场设备之间的转运暂不存在拥堵与瓶颈，将每批工件的转运时间平均设定为 2 分钟，每批工件从当前设备加工完成后等待 2 分钟直接转入下一道工序。

2.2 模型搭建

按照喷杆精益单元的工艺布局在 Plant Simulation 仿真软件进行 2D 模型搭建。首先将排车、无心磨床、钻铣中心、电火花小孔机、普车、台钻、喷杆流量试验器、喷射方向试验器等按照设备数量进行 2D 虚拟建模，并在每台设备模型前插入缓存站（Buffer），相当于工件进入机床时的工装托盘，用于存放加工前的工件，在设备模型后插入仓储站（Store），相当于每个工件加工完成后临时需放入的托盘，并设置缓存站和仓储站的容量参数；然后插入表文件模块，设置三种典型喷杆件的工序名称、工件准备时间、工件加工时间；最后嵌入前置工序和辅助工序的仿真内部层级，用于模拟工件来料后的前置工序与辅助工序的加工流程。喷杆精益单元工艺布局仿真平面图如下图 3：

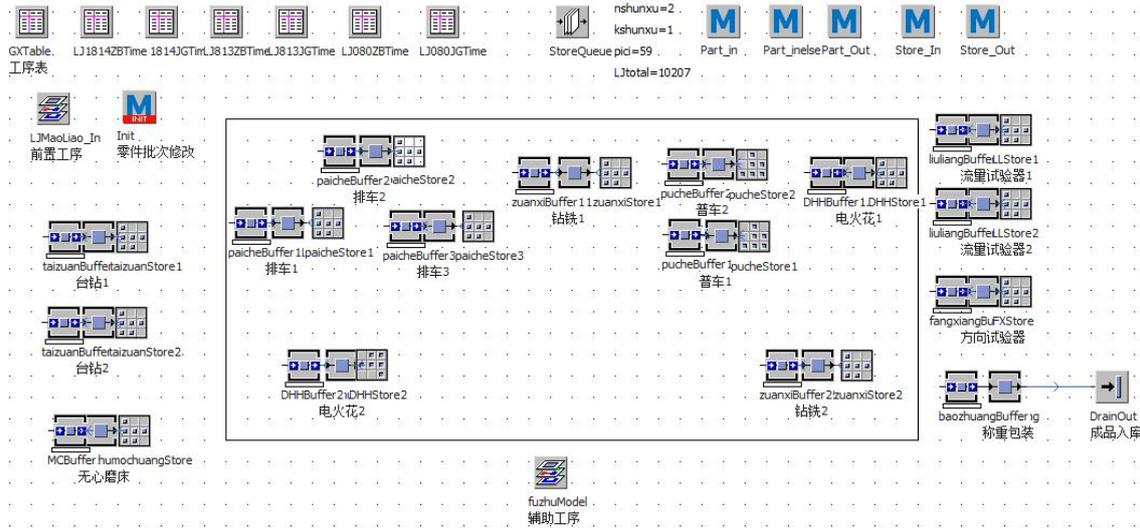


图 3 精益单元工艺布局仿真模型图

2.3 逻辑编程与调试

插入“M”编程模块，编辑逻辑与程序语言，分别指定三种工件从毛坯入料到成品出库的每一步流向，设定工件在设备之间的流动次序与判断条件，逐步验证工作流程的正确性并仿真调试，最终实现零件单件与多件加工的模拟仿真。

(1) 设置年任务量与每批次数量

在初始 Init 编程模块中设置三种典型件的任务量，并规定每批次工件的加工数量，部分编程语言如下：

```

var i,j,k,x,y,z :integer
pici :=60 //修改每批次零件数量，只需修改此处
i :=4080 //设置B类喷杆任务量
j :=5680 //设置A类喷杆任务量
k :=480 //设置C类喷杆任务量
x :=i mod pici
y :=j mod pici
z :=k mod pici
if x < pici/2
    i := (i div pici)*pici
else
    i := ((i div pici)+1)*pici
end
if y < pici/2
    j := (j div pici)*pici
else
    j := ((j div pici)+1)*pici
end
if z < pici/2
    k := (k div pici)*pici
else
    k := ((k div pici)+1)*pici
end

```

图 4 年任务量与每批次数量设定编程模块图

(2) 设置进出口、变量控制程序

在编程模块中编写工件的加工时间和准备时间的控制程序，并设置工件按照既定的工艺流程流转至下一个工序的设备缓存站。部分编程语言如下：

```
switch @.name //识别典型件名称
case "A_part"
  ?.proctime := .Models.Model.A_partJGTime[@.Route_UP, "LJ_1814"] //引用典型件当前工序的加工时间
  ?.Setuptime := .Models.Model.A_partZBTime[@.Route_UP, "LJ_1814"] //引用典型件当前工序的准备时间
  if @.Route_UP < 18
    @.Route_UP := @.Route_UP + 1 //设定工件转入下一工序
  end
end

Now_Store := .Models.Model.StoreQueue.pop
while i < pici+1 //设定逐个工件转移参数
  Now_lingjian := Now_Store.cont
  if Next_Rout = "paiche"
    Next_Machine := str_to_obj(".Models.Model.paicheBuffer"+to_str(n)) //设定下一工序的设备名称
    Now_lingjian.move(Next_Machine) //将工件转入下一个设备
  end
end
```

工件进入设置程序示例

工件转出设置程序示例

图 5 设置进出口、变量控制程序图

(3) 程序关联与编程调试

将对应的工件转入、转出程序填入到每个设备模型的“Controls”参数栏中，完成工件进入设备模型后的触发以及工件的加工控制与移出。根据三种典型喷杆件的详细加工流程与已搭建的模型之间的逻辑程序控制，指定工件从毛料到成品入库的每一步流向，通过控制“EventController”来实现编程模块的仿真调试，及时对报错信息进行修改，逐步验证工作流程的正确性，最终打通工件加工的整个工作流程并与实际的生产流程一致。仿真运行调试完成后，通过修改每批次的工件加工数量，实现工件不同批次下的加工运行仿真，分别记录相应的仿真数据结果，为仿真分析与验证做好数据准备。

3 仿真效果与分析验证

3.1 每批次工件数量

根据已搭建的仿真模型与仿真结果，通过修改每批次零件数量，分别设定为 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100、150、200、250、300，在不考虑每道工序其他不确定等待时间、工件运输时间平均化等理想化连续无故障运行的前提下，记录喷杆精益单元仿真完成后三种典型件全年任务量的加工时间，画出每批次数量与仿真加工时间的曲线图，可以看出仿真加工时间与每批次工件数量呈先微弱减小再持续增加的趋势，随着工件每批次加工的数量逐渐增加，喷杆精益单元仿真加工时间越长，而当每批次数量在 40-70 件之间时，其精益单元仿真模型运行时间相对较少。因此，当喷杆精益单元的工件每批次加工数量 40-70 件，其产品的生产效率较高，通过与企业现场实际加工情况进行分析，初步选择了喷杆精益单元的工件每批次加工数量为 60 件。

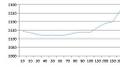


图 6 每批次数量与仿真加工时间曲线图

3.2 设备负载分析

运用 Plant Simulation 软件自带的设备负载分析功能，通过设定每批次工件数量为 60 件，不考虑喷杆前置工序准备与加工时间较长的影响，模拟连续无故障且仿真运行后，得出排车、普车、无心磨床、台钻、钻铣中心、电火花小孔机、流量试验器、方向试验器的设备负载率仿真结果（见下图 6），可以看出各台加工设备的设备负载率在 50%左右，且各台设备的负载率比较均衡，其中普通车床、电火花小孔机、喷杆流量试验器这三类设备负载率稍微较高，设备工作时间稍微较长，后续随着喷杆生产任务量的增加应优先加强该类设备的维护。

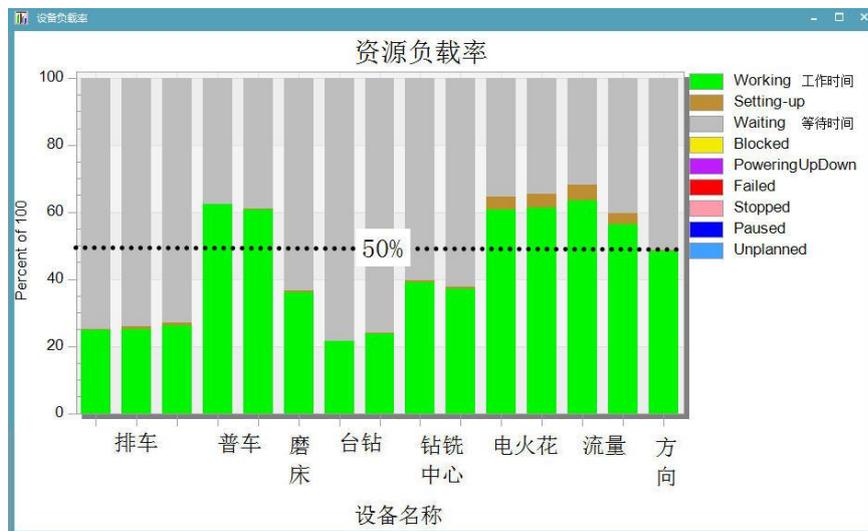


图 7 精益单元设备负载率

3.3 年加工时间

通过设置三种典型件的年产量（A 类喷杆 5680 件，B 类喷杆 4080 件，C 类喷杆 480 件），设置每批次工件数量为 60 件，在模拟连续无故障仿真完成所有工件成品入库后，得出完成全年任务量的加工时间为 $88 \times 24 + 7 + 53 / 60 = 2119.88$ 小时，见下图 7。按每天有效工作时间 8 小时换算，即完成喷杆典型件的全年生产任务需 $2119.88 \div 8 = 265$ 天，与全年规定工作日 250 天基本相符，可以满足喷杆全年生产任务的需求。

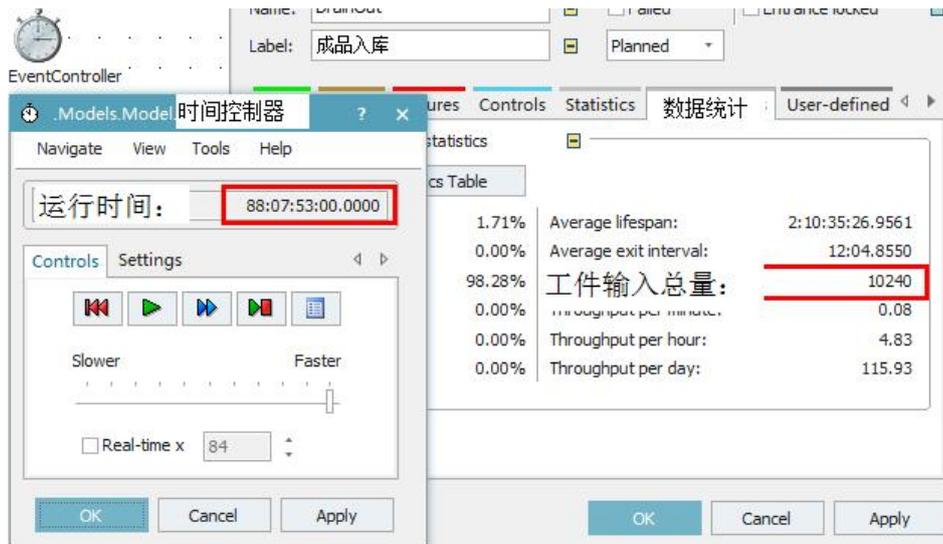


图 8 三种典型件的年加工仿真时间示意图

4 结束语

1) 根据实际的工艺数据和当前的精益单元工艺布局方案建立系统的仿真模型，再用仿真软件，在模型上进行仿真分析与验证，可以逼近真实生产过程的主要特性。

2) 通过虚拟仿真技术的应用，可以从全局或局部视角清晰直观地显示航空发动机喷杆精益单元的生产工作流程以及工件每一工序的物流方向。

3) 本文结果表明，采用仿真软件对精益单元工艺布局方案的工艺流程、设备布局、生产物流及设备瓶颈做仿真模拟，具有直观、方便、经济、快捷、结合实际程度较高等优点，优选了喷杆精益单元的每批次工件数量为 60 件，并验证了设备负载和年加工时间的合理性，可以为后期其他精益单元的推广建设与仿真验证提供了一定的参考价值。

参考文献

- [1] 荣丽伟. 精益生产方式之单元生产在机械制造工厂的应用研究[J]. 现代制造技术与装备, 2016, (10): 50 - 52.
- [2] 李慧, 季江宇, 张超. 基于 Plant Simulation 的机械加工单元设备布局研究[J]. 机电工程技术, 2018, 47(6):96 - 100.
- [3] 孙智超, 高长水. 基于 Plant Simulation 的汽车生产线仿真技术研究[J]. 信息技术, 2014, 43(6):161 - 164.
- [4] 崔晶, 李慧. 基于 Plant Simulation 的航空复合材料生产线工艺布局仿真建模及评估[J]. 航空制造技术, 2019, 62(4):56 - 62.
- [5] 张智, 李雨繁, 徐双霞. 基于 Plant Simulation 的产品生产线布局仿真研究[J]. 计算机与网络, 2019, 45(7):68 - 70.
- [6] 徐曼菲, 康林, 邱枫, 等. 一种基于 Em-Plant 的生产线多层次仿真建模方法[J]. 兵工自动化, 2020, 39(9):80 - 84.
- [7] 徐贲, 宋小欣, 付建林, 等. 基于 Plant Simulation 的涂装线传送带容量的优化配置研究[J]. 机械, 2020, 47(7): 22 - 27.
- [8] 王克. 超高压变压器混流生产线作业调度建模与仿真优化[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [9] KONCZAK A, PASLAWSKI J. Decision Support in Production Planning of Precast Concrete Slabs Based on Simulation and Learning from Examples[J]. Procedia Engineering, 2015, 122(23): 81 - 87.
- [10] PETER M, FREDBY J, KLAS E, et al. A novel tool for optimization and verification of layout and human logistics in digital factories[J]. Procedia Cirp, 2018, 1(72): 545 - 550.
- [11] 熊溢威, 李锋, 高伟伟, 等. 直射式喷嘴流动特性的数值和试验研究[J]. 航空发动机, 2016, 42(6):68 - 74.
- [12] 秦毅, 张谭, 赵世迁, 等. 喷油杆微小孔的流量特性试验研究[J]. 航空精密制造技术, 2011, 47(6):56 - 58.

作者简介：

李湘胜，大学本科，工程师，主管技术员。主要从事公司数字化生产线规划建设、工艺布局仿真、技术改造及国家重点型号条件建设项目技术论证等工作。联系方式：18285300162，邮箱：xslilove@163.com

