

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.01.008

基于 Plant Simulation 的压气机叶片型线加工 产线分析与优化

李春兴,徐健,易泰勋,王琨,吴海峰,胡诚诚

(中国东方电气集团 东方汽轮机有限公司工艺部,四川 德阳,618030)

摘要:运用专业仿真软件 Plant Simulation,根据压气机叶片型线机械加工工艺特点和物料运行流程建立生产线仿真模型,从产能、设备利用率及产线瓶颈等多方面进行仿真分析与优化。结果表明:Plant Simulation 仿真平台的仿真可以找出规划设计方案中存在的问题并验证方案的合理性。该仿真结果为型线机械加工产线的优化设计提供了可靠依据,达到了节约投资成本和缩短设计周期的目的。

关键词:Plant Simulation;规划;叶片;生产线

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)01-0040-05

Analysis and Optimization of Compressor Blade Profile Processing Line Based on Plant Simulation

LI Chunxing, XU Jian, YI Taixun, WANG Kun, WU Haifeng, HU Chengcheng

(Process Department of Dongfang Turbine Co., Ltd., China Dongfang Electric Group, Deyang 618030, China)

Abstract: Plant Simulation, the professional simulation software is applied to establish the production line simulation model according to the machining process characteristics of compressor blade profile and material operation process, and the simulation analysis and optimization are carried out from the aspects of production capacity, equipment utilization and production line bottleneck. The results show that Plant Simulation platform simulation can find out the problems in the planning and design scheme and verify the rationality of the scheme. The simulation results provide a reliable basis for the optimal design of the profile machining line and achieve the aims of saving investment costs and shortening design cycle.

Keywords: Plant Simulation; planning; leaves; production line

0 引言

生产线仿真技术是实现数字化工厂的关键技术。通过计算机软件的仿真,可以在制造生产前期,对制造过程进行评估,对制造工艺进行检验,同时也可以找出并解决出现的各类问题。相对于试运行,生产线仿真可以有效地降低成本,减少各类制造工艺不合理的问题,验证规划设计可行性,缩短产线设计周期。

随着系统仿真技术的快速发展,生产线仿真技术在我国制造业中的研究与应用也越来越多。秦德金等^[1]以多机器人分拣系统为研究对象,基于 Plant Simulation 对路径规划算法系统性能以及系统最大日分拣任务量进行了分析,确定了最佳移动机器人的数量。李慧等^[2]针对某航空发动机叶片机械加工生产线,从产能、设备利用率、缓存

区设置等多方面进行了仿真分析与优化。

对于离散制造企业,离散事件系统状态迁移发生在离散事件点上,解决离散事件问题的有效手段就是离散事件仿真技术^[3]。此次以规划设计阶段压气机(F型)叶片型线生产线为对象展开研究,基于 Plant Simulation^[4]平台建立生产线的仿真模型,从产能、设备利用率、线边缓存等方面进行产线性能评估,以此为依据对叶片型线机械加工生产线进行优化。

1 生产线初步规划

某厂叶片车间^[5]有多条生产线且加工产品杂,生产叶片种类包括用于燃汽轮机、核电汽轮机与火电汽轮机,企业抓住改革契机,聚焦叶片关键生产工序,率先规划压气机型线加工生产线。

叶片是压气机的关键零件,又是最精细、最重

基金项目:四川省重大科技专项项目(2020ZDZX0015)

第一作者简介:李春兴(1994—),男,河北任丘人,硕士研究生,研究方向为智能制造转型与产线规划设计,852519215@qq.com。

要的零件之一,是高速旋转给空气做功提高空气压力的部件。型线加工是叶片加工的重要环节,直接影响压气机增压的总效率。图 1 为某厂型线加工产线示意图,具有以下特点:

- 1) 小批量,每个机组用的叶片不一样,每一级叶片几十件到上百件;
- 2) 种类多,机型多,可以根据客户需求定制机型,新机型设计种类多,通流优化周期短。

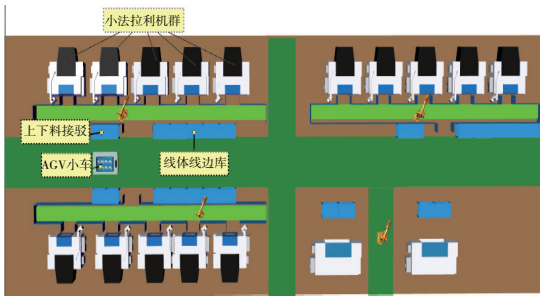


图 1 压气机叶片型线加工黑灯产线示意图

某厂产线数字化转型初步规划中,物流运行逻辑图见图 2。

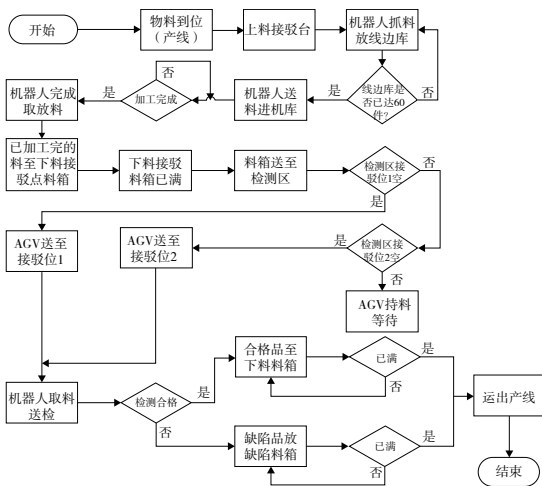


图 2 物料转运逻辑图

2 压气机叶片型线加工产线建模

2.1 边界条件与仿真目标

将覆盖全部法拉利机群的加工产品种类作为输入,构建产线机床模型和物料调度逻辑模型,关于输入数据、考察数据及规划方案指标见表 1 及表 2。

表 1 初步规划方案指标

产线名称	指标名称	指标
黑灯产线	设备利用率/%	85
黑灯产线	产能/(件/年)	60 000

表 2 仿真输入数据定量与考察数据变量

仿真输入定量	仿真变量
料箱容量/只	空托盘数量/个
取料时间/s	产能/只
机器人抓料数量/只	设备利用率
检测时间/s	最小库存/只
加工时间/s	—
合格率	—
设备数量/台	—
AGV 空托盘容量/个	—
设备品种/类	—

2.2 仿真假设

依据初步规划进行初始假设:

- 1) 设置为无限产能的输出(厂内订单连续);
- 2) 1 台机床对应一类叶片产品,压气机冲动式与反动式叶片分开仿真;
- 3) 考虑机床换模时间,每天的工作时间为 21 h,全年按照 300 d 计算;
- 4) 初始状态:创建 AGV,1 号线上料位空,1 号线下料位空托盘 1 个,线边料库存放 5 类共计 60 只叶片;
- 5) AGV 每次上料只上一种产品,AGV 托盘容量为 12 件/个;
- 6) 生产开始之前 1 号线、2 号线、3 号线下料接驳点,检测工位下料接驳点、不合格品线边库都已放置好空托盘;
- 7) 无新产品种类的加入。

2.3 压气机叶片型线加工产线模型建立

1) 叶片型线加工产线描述

某厂规划一条叶片型线无人值守机加工生产线,该线承接多种压气机小型叶片的型线机械加工任务,拟实行全天无人值守运行,采用机器人进行工序间周转及上下料,年产合格叶片数量达到 6 万件。该生产线主要承担叶片的粗铣、精铣以及三坐标检测等工序,加工工艺流程图见图 3。该生产线仿真主要关注 4 个方面:

- a) 规划产能是否合理,能否达到;
- b) 主要设备平均利用率 85%是否合理;
- c) 空托盘转运站空托盘容量;
- d) 产线稳定运行的最小库存量。

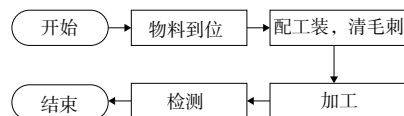


图 3 加工工艺流程图

2) 设计逻辑策略

基于图 2 物料运转策略制定仿真策略如下。

a) 初始化操作

初始化表格、变量,设置机床加工时间,在 1 号线、2 号线、3 号线的 AGV 下料接驳点放置空托盘,产生 AGV、机器人 1、机器人 2、机器人 3,并设置机器人 1、机器人 2、机器人 3 及 AGV 的初始状态,设置 AGV 的任务列表并每隔 1 s 刷新。

b) 投料策略

设置立体库模型:循环产生 15 种叶片。规划产线的年产量为 6 万件,仿真输入为 15 种压气机叶片,按照表格命令循环上料。

c) 生产过程

压气机叶片(F 级)黑灯产线主要完成加工、检测工艺流程,15 台小法拉利机床均可实现任意一种叶片的加工,2 台检测设备均可实现任意一种叶片的检测。按照 1 台机床对应一类叶片产品进行加工。

d) 物流逻辑

生产开始,AGV 从立体库下料接驳点处取满载的托盘运至 1 号线、2 号线、3 号线的上料接驳点处。编程设定后续 AGV 可能被调用的情况,即可能接受指令的情况:

I) 1 号线、2 号线、3 号线上料接驳点托盘为空,需转运空托盘至托盘库 KTP;

II) XBK1、XBK2、XBK3、...、XBK15 (XBK 为线边库)任意一个为空,需补充上料对应的叶片;

III) 1 号线、2 号线、3 号线下料接驳点托盘满载,需转运满载托盘至检测上料接驳点,并从空托盘库转运新的空托盘至相应下料接驳点;

IV) 检测工位上料接驳点托盘为空时,需转运空托盘至空托盘库 KTP;

V) 检测工位下料接驳点托盘满载时,需转运满载托盘至成品库,并空托盘库转运新的空托盘至相应下料接驳点;

VI) 检测工位不合格品线边库满容时,需转运托盘至不合格品库,并空托盘库转运新的空托盘至相应下料接驳点。

其中, I) 的优先级高于 II), IV) 的优先级高于 III), 其他的以实时任务排序为准。

e) AGV 调度

在上述需要调用 AGV 的时候,将物料转运的出发地和目的地写入 agv_table,通过 agv_table 记录 AGV 的调度任务。

f) Track 传感器控件

Track 上共设置 13 个传感器控件,都用 Sensor Method 进行控制,AGV 在传感器所在位置的动作:停止、运动、上料、下料。

3) 压气机叶片型线加工黑灯产线仿真模型的建立

仿真运行过程严格按照规划设计方案的物料加工工序运行流程,移动机器人行走速度设为 1 m/s 均速,压气机叶片装夹与卸载分别设置 30 s 与 5 s,下料设置 5 s。生产线中设置有线边库与检测单元上下料缓存区,加工完成后通过对 AGV 编程设置判断准则,即检测单元上料接驳台有空位置才运送否则持料等待。拟设三班倒制。仿真模型见图 4。具体设置如下:

a) 仿真实行三班倒制,仿真运行一年时间;

b) 打造黑灯产线,要求成品每个都检测;

c) 产品合格率按 97% 设置随机数;

d) 保证物料源充足;

e) 加工时间严格按照采集对应每种叶片的加工时间设置。

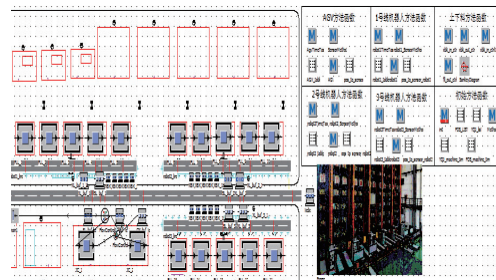


图 4 压气机叶片型线加工黑灯产线仿真模型

3 压气机(F 型)叶片型线加工产线仿真分析与优化

3.1 产能情况

如图 5 所示(本刊黑白印刷,相关疑问请咨询作者),整线日均产能为 242 件。1 号线日均产能为 102 件,2 号线日均产能为 95 件,3 号线日均产能为 85 件。则整线年产能为 $242 \times 300 = 72\ 600$ 件,高于目标产能 6 万件/年。

3.2 设备利用率

由图 6 可知 1 号线、2 号线、3 号线设备均超过了目标设备利用率 85% 的要求。

3.3 最小库存情况

通过仿真得出 3 条线日均上料数量情况(图 7),可以推测出生产线每日最小库存数量,即保证产线正常运行,库存不得小于 285 件叶片。

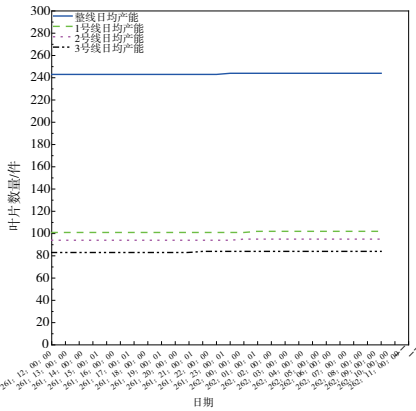


图5 各条线日均产能

线在制品量随时间变化见图9。图中黑色为3条自动产线在制品量之和,蓝色代表1号线,绿色代表2号线,紫色代表3号线。

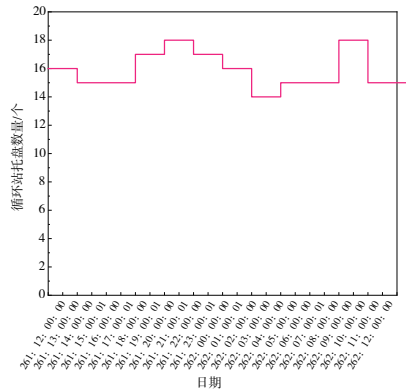
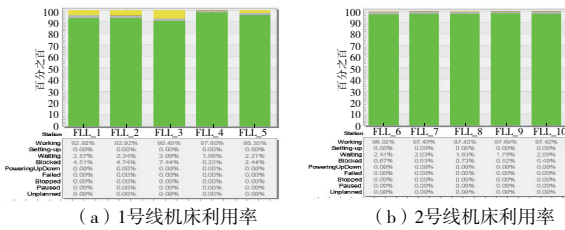


图8 空托盘数量曲线



(a) 1号线机床利用率

(b) 2号线机床利用率



(c) 3号线机床利用率

图6 3条线机床利用率

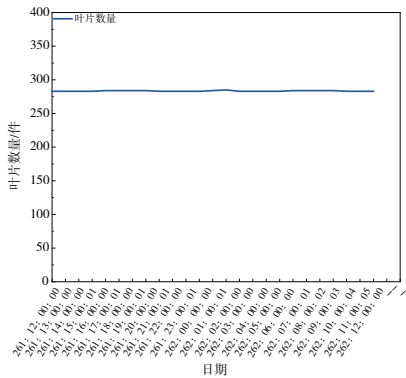


图7 3条线日均上料数量

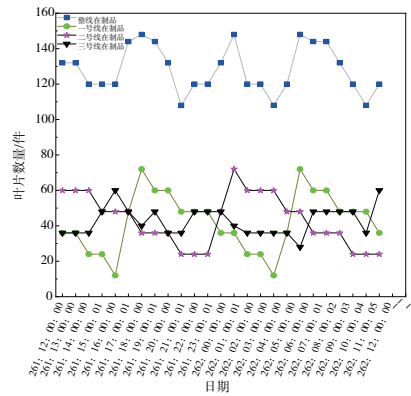


图9 3条线在制品数量

现提取的是部分日期的叶片数量,从全局来看整线及各条线在一年稳定加工中出现的频率见图10。

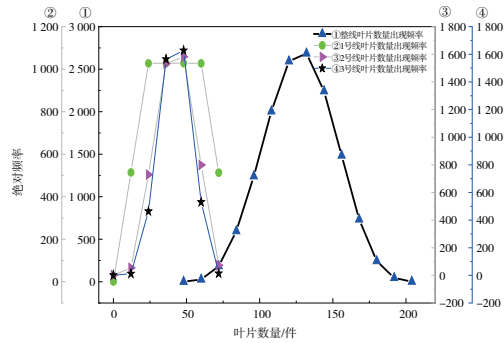


图10 各条产线整年在制品数量出现频率图

3.4 空料箱循环站容量分析

设置空料箱循环站,仿真稳定运行后,空料箱循环站数量随时间变化趋势见图8。由图可知设置循环站空托盘的数量一直小于20个。

3.5 产线瓶颈分析

一般来说,瓶颈设备的设备利用率较高,待加工的在制品堆积数量较大。1号线、2号线、3号

仿真发现检测工位待加工在制品量随时间增加的趋势,一段时间后出现严重的物料堆积,即为瓶颈工位(图11)。

3.6 规划方案优化

由上一节可知,检测单元为瓶颈工位,在模型

中增加 1 个检测工位,产能见图 12。由图可知整线日均产能为 252 件,1 号线日均产能为 102 件,2 号线日均产能为 95 件,3 号线日均产能为 85 件。年产量为: $252 \times 300 = 75\ 600$ 件;1 号、2 号、3 号的单线日产能较之前没有变化,但是整线日产能提高了 10 件,年产量提高了 3 000 件。

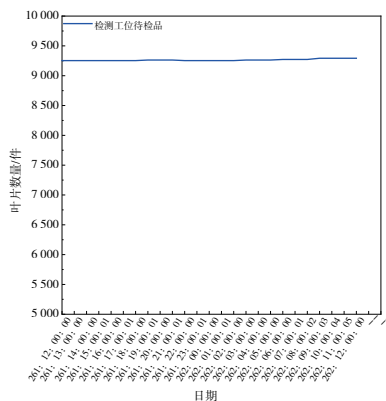


图 11 稳定后期检测工位待检品数量

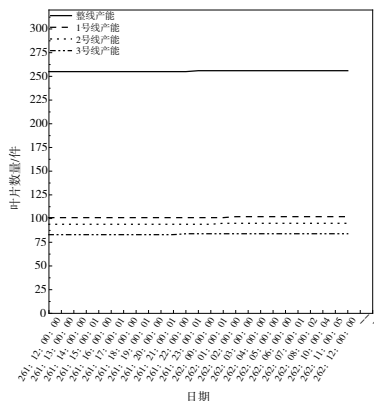


图 12 优化后的产线产能

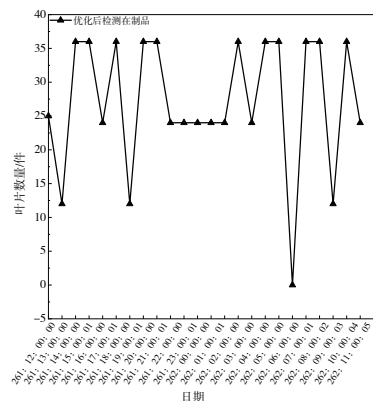


图 13 优化后检测工位在产品数量

4 结语

本文利用 Plant Simulation 构建了仿真模型,通过分析对规划阶段的生产线进行了初步优化,提高了加工生产线性能。从仿真结果来看有以下建议:

- 1) 立体库叶片数量单日最少储存量为 285 件;
- 2) 空托盘循环站的空托盘数量不小于 20 个。

基于 Plant Simulation 专业软件 1 号线、2 号线、3 号线设备利用率均为 90% 以上,高于目标 85%;按照每年 300 d, 21 h/d 进行仿真,年产能可为 7.2 万件,高于目标产能 5.25 万/年。

从改善后的结果可以看出,产能增加了,年产能可达 7.56 万件,生产线性得到了一定程度的提高。研究表明,企业在生产线规划设计阶段,通过生产线系统仿真能够有效地分析出设计方案可能存在的问题,对提高生产线设计质量和设计效率有重要意义。

图 13 为优化后检测工位在生产线运行稳定后的待检品数量变化曲线,可知,增加了一个检测工位后,待检品数量不再持续增加,而是比较平稳地处在区间 0~36 件变化,极大缩短了叶片的成品检测等待时间,使产线更加平稳运行。

参考文献:

- [1] 秦德金,周临震,肖海宁. 基于 Plant Simulation 的多机器人协作分拣系统仿真分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(10): 139-142, 146.
- [2] 李慧,孙元亮,张超. 基于 Plant Simulation 的航空发动机叶片机加生产线仿真分析与优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(7): 116-118.
- [3] TRIGUEIRO DE SOUSA W Jr, BARRA MONTEVECHI J A, DE CARVALHO MIRANDA R, et al. Discrete simulation - based optimization methods for industrial engineering problems: a systematic literature review[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 128: 526-540.
- [4] 李广振,徐志刚,任朝晖,等. 规划阶段的自动化装配线仿真与优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(2): 157-160.
- [5] 严羿,李启元,熊小聪,等. 叶片数字化工厂基础技术探索[J]. 东方汽轮机, 2021(2): 41-44.

收稿日期: 2022-07-29