

# 基于 Plant Simulation 的发动机主轴智能锻造生产车间 设计及仿真优化

黄亚星, 袁秀志, 于克勤, 甘志超

(中国航空工业集团公司北京长城航空测控技术研究所, 北京 100176)

**摘要:** 随着智能化的发展, 当前智能车间的改造与实施已经成为制造业推动智能制造转型的重要途径。为了探索智能化车间对提高航空发动机主轴锻造生产水平的益处, 以某型号航空发动机低压涡轮轴为对象, 研究主轴自由锻过程中的工艺, 设计发动机主轴智能锻造生产车间。基于 Plant Simulation 构建锻造设备布局模型, 对车间的生产情况进行仿真分析, 优化生产系统的瓶颈和节拍干涉。根据仿真优化的有效性, 对现有产线进行智能化升级, 使得工艺等待时间降低了 30%, 生产效率提高了 20%, 锻件合格率提高了 15%。

**关键词:** 智能车间; 低压涡轮轴; 自由锻; 节拍; Plant Simulation

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.07.008

**中图分类号:** TP278      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 07-0053-07

## Design and simulation optimization on intelligent forging production workshop for engine main shaft based on Plant Simulation

Huang Yaxing, Yuan Xiuzhi, Yu Keqin, Gan Zhichao

(AVIC Beijing Changcheng Aeronautic Measurement and Control Technology Research Institute, Beijing 100176, China)

**Abstract:** With the development of intelligence, the transformation and implementation of current intelligence workshops has become an important way for the manufacturing industry to promote the transformation of intelligence manufacturing. In order to explore the benefits of intelligent workshop for improving the forging production level of aero-engine main shaft, for the low-pressure turbine shaft of an aero-engine, the process of main shaft free forging was studied, and the intelligent forging production workshop of engine main shaft was designed. Then, the forging equipment layout model was built based on Plant Simulation, and the production situation of the workshop was simulated and analyzed to optimize the bottleneck and beat interference of the production system. Furthermore, according to the effectiveness of simulation optimization, the existing production line was intelligently upgraded. The results show that the process waiting time is reduced by 30%, the production efficiency is improved by 20%, and the qualification rate of forgings is increased by 15%.

**Key words:** intelligent workshop; low pressure turbine shaft; free forging; beat; Plant Simulation

航空航天企业的智能化制造及工厂的建立面临着系列的挑战, 加强智能化制造、提高产品制造水平、降低生产成本成为航天航空企业所追求的目标<sup>[1]</sup>。在智能化工厂建立的过程中需要多项技术的融合、先进设备的布局, 一个合理的布局及生产分析能够为智能化工厂生产的效率及后期的柔性化改造起到关键作用<sup>[2-3]</sup>。

发动机是所有现代航空装备的心脏, 其发展强烈依赖于材料及其制造技术的进步, 性能和可靠性

主要是由转动部件决定, 而主轴是发动机中最为重要的转动部件之一, 它的主要功能是支撑转动零件和传递扭矩。低压涡轮轴是安装在航空发动机涡轮机转子上的核心关键轴件, 属于典型的细长型锻件, 主要制造工艺流程为: 原材料复验→下料→自由锻制坯→机加→胎模锻成形→热处理→理化→超声波探伤→腐蚀→终检, 所涉及的热加工设备包括加热电炉、快锻机、热模锻压力机等。除此之外, 从坯料进入生产线到完成整个锻造工艺过程中, 还涉及到大量的物流转移及其他辅机设备<sup>[4-5]</sup>。

因此, 生产设备的合理布局对提升军工锻造工艺、装备和生产车间的技术水平, 实现发动机主轴

收稿日期: 2021-07-16; 修订日期: 2021-10-19

基金项目: 装备预先研究项目 (41423010706)

作者简介: 黄亚星 (1994-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: 735932889@qq.com

锻造的自动化、数字化和智能化具有重要意义。本文针对发动机低压涡轮轴自动化锻造的特点与需求,合理布局设计智能锻造生产车间。

## 1 车间物流简介

为解决发动机主轴锻造生产过程中出现的生产劳动强度大、物流活动与生产工艺流程同步化问题,以及为增强生产强度及生产柔性,进行物流系统分析设计。在生产过程中主要物流过程分为:加热、运输、锻压、检测。主要设备包括:加热炉、有轨运输车、锻压机、锻压机器人、操作机、检测机器人。

整个物流系统如图 1 所示。锻件在加热炉中根据工艺进行加热,加热完成后锻件由有轨运输车运输至锻压机进行锻压,锻压操作包括两种情况:(1)当锻件质量大于 150 kg 时,中控室下达命令开启操作机,锻件将由操作机夹持锻件并根据工艺进行锻压;(2)当锻件质量小于 150 kg 时,中控室下达命令开启锻压机器人,锻件将由锻压机器人夹持并根据工艺进行锻压。锻压过程中,检测机器人根据检测流程进行锻件尺寸、缺陷等质量检测,最后,经过操作机或者锻压机器人锻压完成的锻件均由有轨运输车运输至存储区,在物流传递过程中所有信息将同步传入中控室进行信息处理。

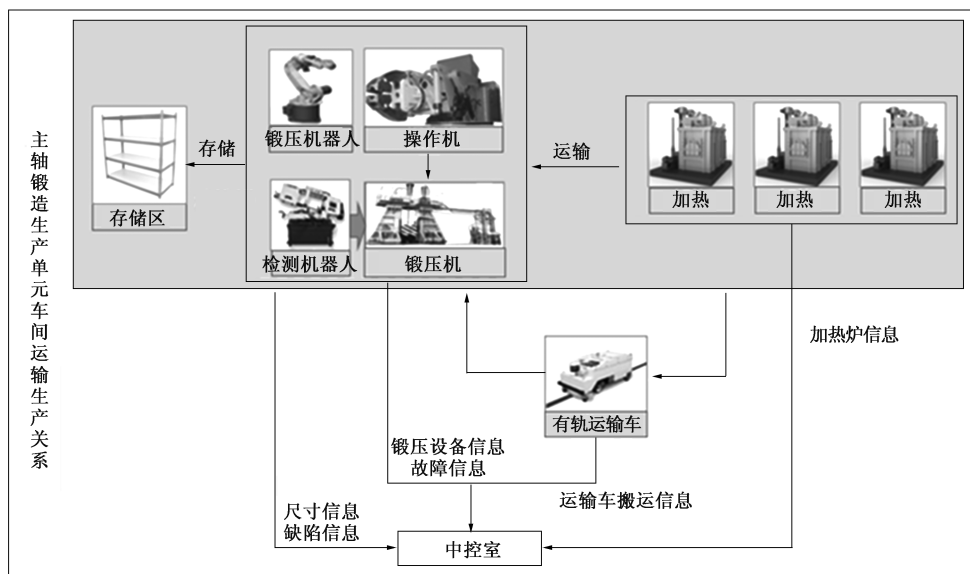


图 1 车间物流系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of workshop logistics system

## 2 车间总体布局设计及流程分析

### 2.1 三维建模及总体布局分析

考虑主轴锻造生产车间布局规划多约束、多变量、非线性的特点,建立锻压机、机器人、操作机、加热炉等三维运动模型,研究设备空间位置、操作机及机器人运动轨迹、锻件运输路径和锻造过程等多维数据对物理布局的影响,应用 Plant Simulation 构建锻造生产车间设备布局模型,进行车间总体布局<sup>[6-9]</sup>。

进行车间重点问题布局的分析,主要包括车间物流分析、测量方案布局分析、检测距离情况分析、检测机器人测量末端连接分析等。采用 1:1 的模型

进行车间建模,车间布局三维模型图如图 2 所示。

### 2.2 工作流程分析

智能锻造单元系统的工作流程如图 3 所示。生产班组接到锻造任务后,将此锻件的信息输入到智能控制系统,智能控制系统根据此信息载入锻件数据,并执行锻造工艺过程的仿真及优化运算,并通过访问锻造工艺专家库,确定最优锻造工艺参数。

小于 150 kg 的锻件由锻压机器人执行锻造任务。控制系统命令操作机退后,留出锻压机器人的操作空间,锻压机器人自主到达指定位置进行准备,智控系统校准锻压机器人的原点,试运行锻压机器人和末端执行器,使其达到待命状态。

如果锻件重量超过 150 kg,则由操作机执行锻造任务。锻压机器人回到周转区,留出操作机的运

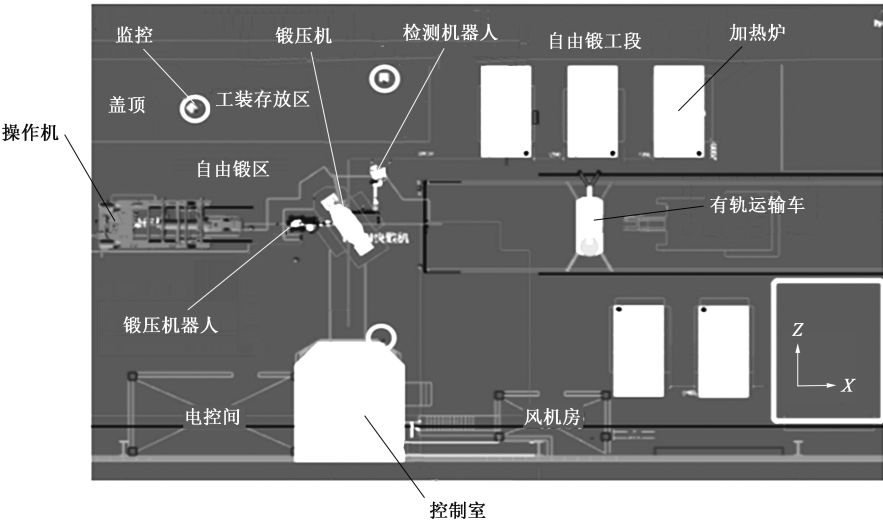


图 2 车间总体布局三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of overall workshop layout

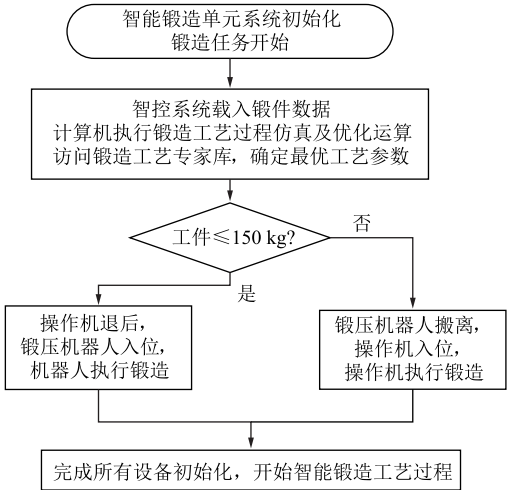


图 3 智能锻造单元系统的工作流程

Fig. 3 Work flow of intelligent forging unit system

行通道, 智能控制系统校准和试运行操作机, 使其达到待命状态。无论是由锻压机器人还是操作机执行锻造任务, 检测机器人始终参与工作, 智能控制系统会在每次锻造过程开始之前校准和试运行检测机器人及其携带的温度和位置/尺寸传感器, 使其达到待命状态。

### 3 仿真分析及节拍优化

在研究主轴锻造生产车间设备布局的基础上, 需考虑航空发动机主轴锻件品种多、批量小、质量一致性要求高、制坯环节工步多、物料周转路线长、锻造温度窗口窄等特点。研究锻造生产车间机器人与锻压机、操作机与锻压机、机器人与运输设备等各模

块的协作过程和生产节拍, 研究整个系统的锻造过程和生产节拍, 优化主轴锻造生产车间的物流节拍。

#### 3.1 建模规则及逻辑

模型建立: 根据现场布局图和时间参数进行建模<sup>[10-11]</sup>, 模型主要对加热炉、机械手臂及有轨运输车进行编程。生产系统的仿真模型如图 4 所示, 模型与设备名称对照表如表 1 所示。

加热炉编程规则: 当加热炉空的时候会调用有轨运输车来运输锻件, 当有多个加热炉空时有轨运输车会调整搬运状态进行上料, 当加热炉锻件加热完成, 会调整有轨运输车状态, 使有轨运输车首先运输加热完成的锻件。

机械手臂编程规则: 对机器人手臂和操作机的运动设置不同的姿态节点以及不同的运动位置进行编程。仿真出不同方案下的情况, 完成锻件的夹取以及搬运等工作。

有轨运输车编程规则: 给有轨运输车设置多个状态进行锻件的搬运。当有轨运输车将锻件运输至锻压机时, 有轨运输车会在锻压机前等待, 待锻件加工完后首先运输加工完成的锻件, 然后运输加热完成的锻件。

#### 3.2 建立生产系统模型并仿真优化

应用 Plant Simulation 建立生产系统仿真模型, 通过对模型运行数据的分析, 进行生产节拍的仿真<sup>[12-13]</sup>。对车间的生产情况进行仿真, 分为两种情况进行分析 (锻件质量大于 150 kg 和小于 150 kg), 分析生产的节拍并提出建议, 优化生产系统的瓶颈和节拍干涉。

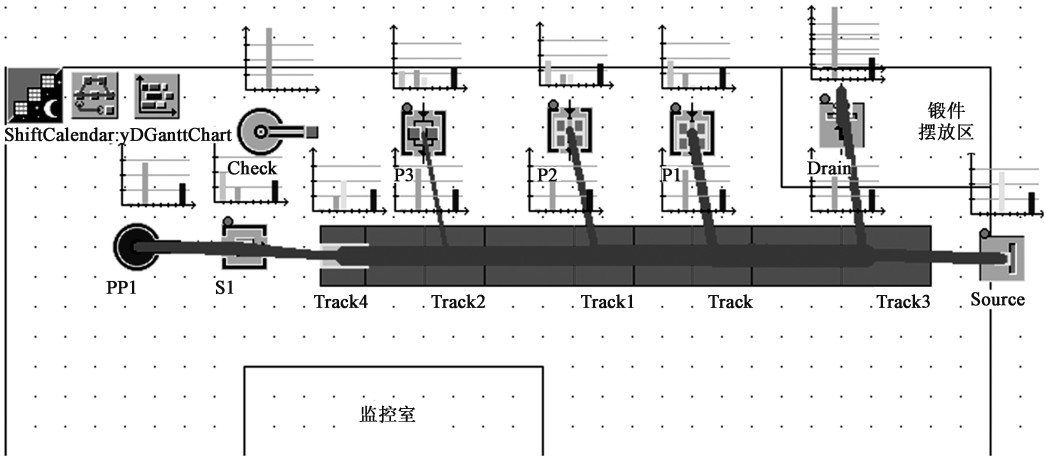


图 4 生产系统仿真模型  
Fig. 4 Simulation model of production system

表 1 模型与设备名称对照表

Table 1 Comparison table of model and equipment name

符号	设备名称
PP1	锻压机器人/操作机
P1/P2/P3	加热炉 1/2/3
S1	锻压机
Source	料源
Drain	储存区
Track	轨道
Check	检测机器人

分别对两种情况下的生产节拍、产能变化进行仿真分析，得到具体的仿真结果如图 5~图 8 所示。其中，图 5、图 6 分别为质量小于 150 kg 的锻件在

优化前后的生产节拍甘特图及产能曲线图；图 7、图 8 为质量大于 150 kg 的锻件在优化前后的生产节拍甘特图及产能曲线图。

从图 5 中可以看出优化后的生产线上的 3 个加热炉的生产节拍稳定；由图 6 可以分析得出未优化前生产线的整体加工迟滞，不能满足生产闭环，易造成锻件在产线的堆积，优化后的产线生产节拍稳定，能够在两个班次内将零件生产形成闭环，能够较好地完成生产。同理，由图 7、图 8 可以看出，优化后生产节拍稳定并能够完成生产闭环。

3.3 仿真结果分析

通过对两种生产情况的分析可知，仿真优化的瓶颈在于锻压的时间，每个锻件的锻压时间过长将

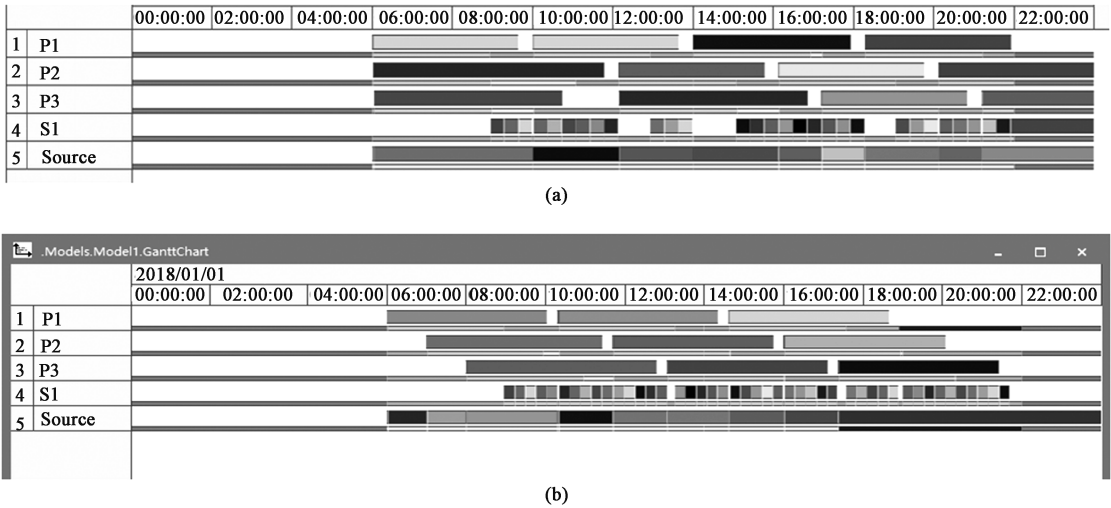


图 5 质量小于 150 kg 的锻件在优化前后的生产节拍  
(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 5 Production beat for forgings with mass less than 150 kg before and after optimization  
(a) Before optimization (b) After optimization



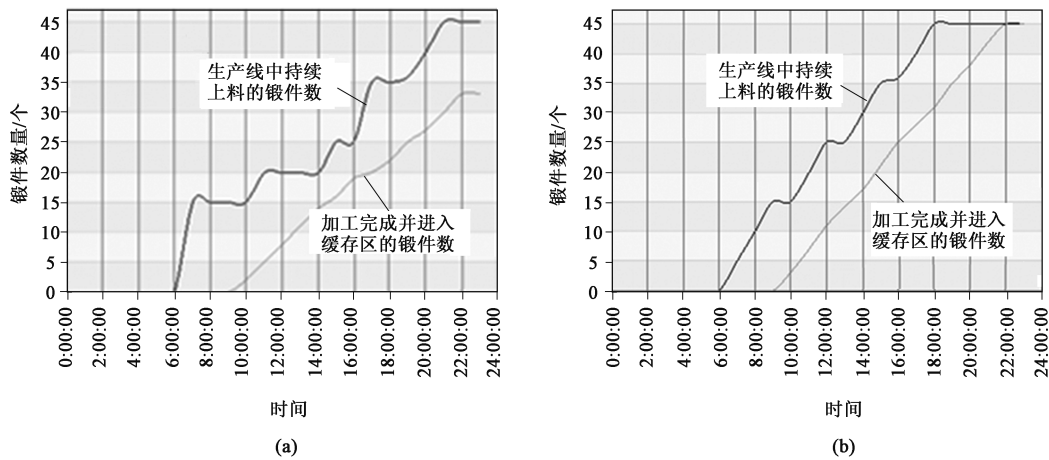


图 6 质量小于 150 kg 的锻件在优化前后的产能变化  
(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 6 Production capacity changes for forgings with mass less than 150 kg before and after optimization  
(a) Before optimization (b) After optimization

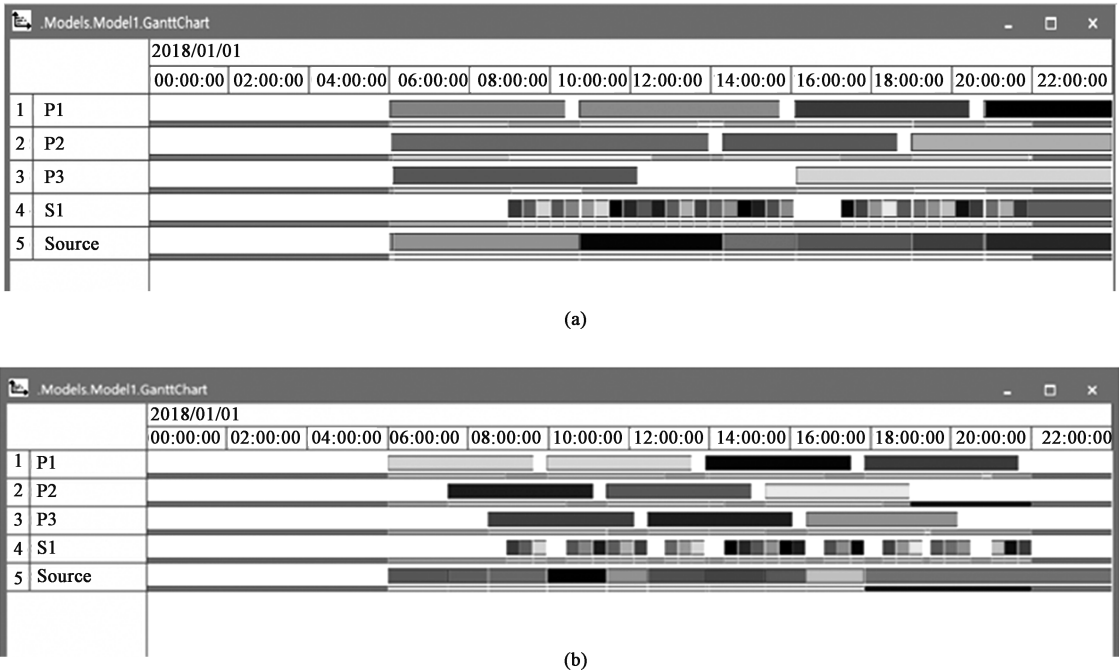


图 7 质量大于 150 kg 的锻件在优化前后的生产节拍  
(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 7 Production beat for forgings with mass more than 150 kg before and after optimization  
(a) Before optimization (b) After optimization

导致工件在加热炉中的等待时间过长。根据质量小于 150 kg 锻件的生产状况可知，锻件的锻压时间为 15 min，当每个加热炉中第 5 个锻件开始锻压时，其他锻件已经超过了最大延长保温时间，已经为不合格锻件，所以，需要从根本上减少每批次的锻件数量，以保证每个加热炉内锻件能够在有效的加热时间内进行锻压；同理，质量大于 150 kg 锻件的

锻压时间为 20 min，从仿真的结果可以看到，第 4 个锻件在加热炉中已经超时。因此两种情况均说明了锻件的锻压时间为生产线的瓶颈，提出了减少每批次的锻件数量，同时增加每炉之间的放件间隔的方法。根据以上仿真分析以及车间排班和实际效果，得到适合该车间的建议生产节拍，具体的建议如表 2 所示。

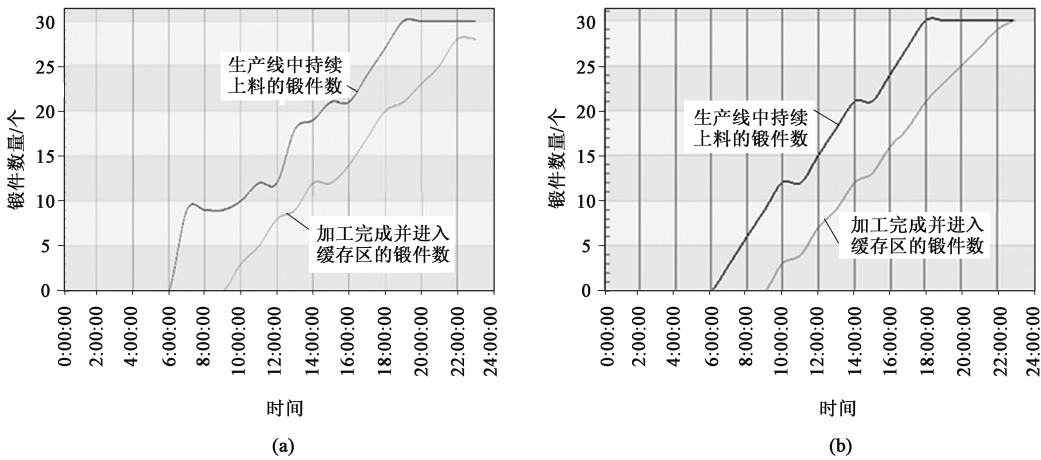


图 8 质量大于 150 kg 的锻件在优化前后的产能

(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 8 Production capacity changes for forgings with mass more than 150 kg before and after optimization

(a) Before optimization (b) After optimization

表 2 仿真优化结果建议

Table 2 Recommendations for simulation optimization results

锻件质量/kg	加热炉数量/ 个	每批次锻件 数量/个	每炉锻件 数量/个	每炉上料时间 间隔/h	建议班次	建议每天截止上料时间
小于 150	3	15	5	1	6 : 00 : 00—14 : 00 : 00	17 : 30 : 00
大于 150	3	9	3	1	14 : 00 : 00—22 : 00 : 00	18 : 00 : 00

4 结语

本文通过对不同的设备建立三维模型，提出一种车间布局设计方案。应用 Plant Simulation 对不同情况下的生产节拍进行仿真分析并得出了优化方案，设计最优的节拍方案并保证了锻件的生产质量。基于优化结果改造原有的智能锻造生产车间，工艺等待时间降低了 30%，生产效率提高了 20%，锻件合格率提高了 15%。

参考文献：

[1] 周玮. 航天产品总装车间生产效率仿真及优化研究 [D]. 武汉：华中科技大学，2019.  
Zhou W. Research on the Simulation-based Productivity Analysis and Optimization of Aerospace Product Assembly Workshop [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.

[2] 杨振泰，黎向锋，张立果，等. 基于 Plant Simulation 的柔性作业车间仿真研究 [J]. 机械制造与自动化，2020，49 (3)：87-89，122.  
Yang Z T, Li X F, Zhang L G, et al. Research on flexible workshop simulation based on plant simulation [J]. Machinery Manufacturing and Automation, 2020, 49 (3)：87-89，122.

[3] 陈昆仑. 基于仿真技术的制造车间布局优化研究 [D]. 武汉：武汉理工大学，2014.

Chen K L. Research on Workshop Layout Optimization Based on Simulation Technology [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.

[4] 徐祥龙. 步进梁式自动化锻造的难点与对策 [J]. 锻压技术，2021，46 (9)：55-66，111.  
Xu X L. Difficulties and countermeasures of stepper beam automatic forging [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (9)：55-66，111.

[5] 贺小毛，崔磊，翟月雯，等. 自动化锻造生产线实时数据采集和分析系统 [J]. 锻压技术，2021，46 (2)：14-18.  
He X M, Cui L, Zhai Y W, et al. Real-time data acquisition and analysis system of automated forging production line [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (2)：14-18.

[6] 于佳乔，张孜毅，李岩. 基于 Plant Simulation 的车间调度优化仿真 [J]. 长春工业大学学报，2021，42 (1)：53-58.  
Yu J Q, Zhang Z Y, Li Y. Research on optimization of job shop scheduling optimization simulation [J]. Journal of Changchun University of Technology, 2021, 42 (1)：53-58.

[7] 李爱平，郭海涛. 基于 Plant Simulation 仿真的汽车装配生产系统返修调度分析 [J]. 中国工程机械学报，2018，16 (1)：74-80.  
Li A P, Guo H T. Rework schedule analysis of automobile assembly production system based on Plant Simulation [J]. Chinese Journal of Engineering Machinery, 2018, 16 (1)：74-80.

[8] 方忠民. 基于 Plant Simulation 的离散生产系统仿真文献综述 [J]. 物流工程与管理，2018，40 (11)：76-79.

(下转第 94 页)