

doi: 10.7690/bgzdh.2020.09.017

一种基于 Em-Plant 的生产线多层次仿真建模方法

徐曼菲¹, 康林², 邱枫¹, 刘治红¹

(1. 中国兵器装备集团自动化研究所智能制造研发中心, 四川 绵阳 621000;

2. 中国人民解放军陆军装备部驻重庆地区代表局驻广元地区军代室, 四川 广元 628017)

摘要: 为解决军工生产线建设缺乏合理物流线布局和生产策略, 使得无法量化地评估生产系统优劣的问题, 介绍一种基于 Em-Plant 的生产线多层次仿真建模方法。建立包含零件源、加工中心、立体库和充电区等模块化、多层次的嵌套建模单元, 在此基础上设计物流控制调度策略, 并通过仿真模型验证。结果表明: 该方法能实现建模的易用性和灵活性的统一, 在实际投产之前就生产制造系统作出快速布局和合理规划, 已成功运用于某型弹部件生产线。

关键词: 生产线; Em-Plant; 仿真建模; 物料配送

中图分类号: TP15 **文献标志码:** A

A Multilevel Simulation Modeling Method for Production Line Based on Em-Plant

Xu Manfei¹, Kang Lin², Qiu Feng¹, Liu Zhihong¹

(1. Research & Development Center of Intelligent Manufacturing Technology,

Automation Research Institute of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China;

2. PLA Presentation Office in Guangyuan District, PLA Representation Bureau of

General Equipment Department in Guangyuan, Guangyuan 628017, China)

Abstract: Because lack of reasonable logistics line layout and production strategy for the construction of military production lines, it is impossible to evaluate the advantages and disadvantages of production system quantitatively. For solving this problem, introduce a multilevel simulation modeling method for production line based on Em-Plant. Set up modular and multilevel nested modeling units including parts source, machining center, stereo library and charging area, on this basis, logistics control and scheduling strategy is designed and verified by simulation model. The results show that the method can achieve the uniformity of easy use and flexibility of modeling. Before the actual production, the production system is quickly laid out and rationally planned. It has been successfully applied to the production line of certain type ammunition parts production line.

Keywords: production line; Em-Plant; simulation modeling; material delivery

0 引言

生产线数字化与智能化建设是我国传统制造企业实施创新驱动发展、价值创造战略的基本途径^[1]。数字化与智能化已成为制造业变革核心, 加速推进生产要素、资源要素、技术要素与制造业的融合, 催生出新思想、新模式、新业态, 推动制造业模式和企业形态结构转型升级势在必行^[2]。

虚拟制造技术是企业智能化生产线建设的重要组成部分和实施数字化工厂的必经环节。借助于生产线仿真软件, 基于虚拟现实方法, 根据工艺设备参数和工艺流程建立计算机仿真系统, 对其模拟来达到研究实际系统或尚未建立的系统, 已被众多制造业所接纳^[3]。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^[4]。Aneta Konczaka 等^[5]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; Mason 等^[6]利用 Arena 仿真软件对汽车企业供应链建立了包括库存管理在内的仿真模型, 分析了供应过程中存在的问题和运送瓶颈; Tao J H 等^[7]以降低船舶在港停留时间和车辆空驶时间为目标, 运用离散事件仿真方法, 对集装箱码头的车辆调度问题进行了研究; 李晗等^[8]在 Any Logic 软件中搭建了汽车连杆生产线仿真系统, 分析了原材料的上线间隔、加工机器数量等因素对平衡率及稳定性的影响, 改善了连杆生产线的生产性能; 郭慧^[9]基于 WITNESS 建立了

收稿日期: 2020-05-20; 修回日期: 2020-06-03

基金项目: 国防基础科研计划“十三五”项目(JCKY2016209B009)

作者简介: 徐曼菲(1991—), 女, 重庆人, 硕士, 助理工程师, 从事数字化管控、生产线仿真研究。E-mail: 925819758@qq.com。

单订单的生产系统仿真模型，通过运行数据的分析并反复调试验证模型获得设施布局的最优方案；张河利等^[10]运用 Em-Plant 系统仿真软件构建风塔生产模型并模拟线上的制造过程，通过改进车间工艺布局进行仿真优化和优化结果分析，为改进实际风塔生产线提供较为理想的生产方案。由此可见，虚拟制造技术日益成为制造生产企业解决和分析问题的重要工具。

笔者以某军工企业在建生产线为依托，基于 Em-Plant 生产仿真软件，通过对弹部件生产线的工艺布局及各设备、仓储等对象之间的逻辑关系描述，确定配送系统的输入、输出各项数据以及描述系统各部分之间的关系数据，并将设备、物流车辆、仓库、物料通道等对象实体化，可动态配置包含各种设备的加工时间、故障率等属性，建立弹部件生产线的仿真系统模型，不仅可实现军工行业从产品、生产线到车间的虚拟转化，而且使企业能够在规划阶段合理配置设备布局和资源，有效优化生产组织模式，从而提高整线的可靠性和成功率，大幅度降低设计到生产制造的不确定性。

1 方案概述

以某军工企业的弹部件生产线为例，该企业主要生产 2 款产品，有相似的加工工艺，在某些工艺上有特殊的加工设备。弹部件生产线的布局如图 1 所示。

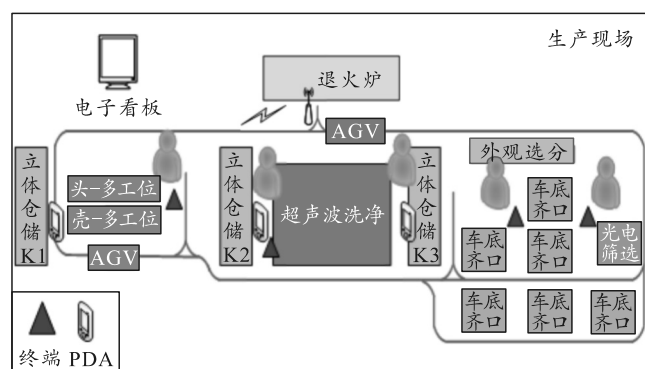


图 1 弹部件生产线布局

该生产线主要由不同的加工中心和立体库组成，各工序间零件的传递通过调度 AGV 来实现搬运。仿真建模需要获得不同生产计划情况下的调度结果，其中包括 AGV 执行运送任务时所服务的加工单元序列等，最终实现制造系统中工件加工顺序和 AGV 任务执行路径的优化。工艺流程主要分为以下 6 个阶段：

1) 立库 1→多工位。

确认立库 1 有料箱后下达任务，AGV 小车到立库 1 辊道自动对接，完毕后辊道停止，RFID 读写头读取料箱芯片信息合格后辊道启动，将料箱运至 AGV 辊道，称重数据上传控制台，同时车载显示器显示数据；根据物流调度系统，装载物料 AGV 移动到多工位自动对接，辊道启动将料箱运至多工位辊道，辊道停止后开始下料，结束任务就近待命，开始下个工作循环。

2) 多工位→立库 2。

多工位去箱加工完毕，人工装置满箱后，人工上料至多工位辊道，AGV 小车到多工位辊道自动对接上料，上料完毕辊道停止，AGV 根据物流调度系统移动到立库 2 自动对接，将料箱运至立库 2 辊道，进入立库 2。

3) 立库 2→超声波洗净→立库 3。

料箱通过立库 2 辊道自动对接超声波洗净(按箱洗)，洗净完毕后立库 3 辊道开启，直接通过立库 3 辊道进入立库 3，AGV 根据物流调度系统，移动到立库 3 辊道自动对接，AGV 辊道启动，料箱上料至 AGV。

4) 立库 3→车底齐口。

AGV 运行至车底齐口辊道，自动对接上料，辊道停止后人工搬运至车底齐口去箱，加工结束任务就近待命。

5) 车底齐口→线边缓存区。

车底齐口加工完毕满箱后，人工搬运至车底齐口辊道，AGV 根据物流调度系统，移动到车底齐口工位辊道，自动对接辊道启动，料箱运至 AGV 辊道上，辊道停止后，AGV 运至车底齐口线边缓存区。

6) 线边缓存区→光电检测。

AGV 根据物流调度系统，移到线边缓存区，人工下料至 AGV 辊道，AGV 运至光电检测辊道，自动对接上料完毕后，辊道停止，人工取料箱给设备下料，搬至光电检测去箱检测，AGV 根据物流调度系统，移动到车底齐口工位辊道，自动对接辊道启动，料箱运至 AGV 辊道上后辊道停止，AGV 运至车底齐口线边缓存区。

2 仿真建模设计思路

2.1 整体架构设计

根据实际生产系统特点，将仿真模型分为基础数据模块(BaseData)、生产线模拟仿真模块(各工位模型框架和立体库模型框架)、AGV 参数模块和

AGV 调度模块。基础数据模块为整个仿真模型的建立提供数据支持，并实现仿真模型参数化设置，主要包含各加工工序的基础数据。由数据模块中的数据，产生生产过程模块的参数设定，并通过 AGV 调度模块对生产过程模块中的设备信息进行读取识别。最后也在数据模块中，生产过程模块中的输出信息实现了记录和展示。基础数据模块通过对机器利用率、在制品量、缓冲区数量等数据的统计，帮助企业对车间生产方案做出决策。仿真整体架构设计如图 2 所示。

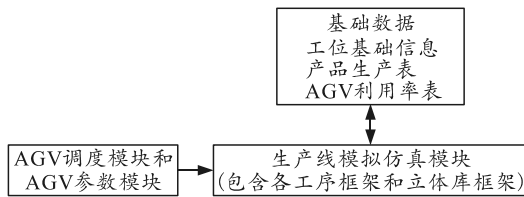


图 2 仿真整体架构设计

2.2 仿真要素抽象化

根据工艺流程，在生产线布局图上将各工艺和物流对象用仿真模型表示，同时根据 Plant Simulation 的对象，将各加工中心以框架进行抽象，并为整个模型抽象出数据模型，如 AGV 的速度参数、工位和设备信息的汇总、AGV 的任务调度中心等。主要包括：1) 班组管理，主要采用控件 ShiftCalendar，利用该控件进行车间对日常工作时间的设定，主要包含班次时间、日程表、资源以及用户自定义；2) 加工工时、设备故障率(Availability)和平均修复时间(MTTR)以及产品合格率等，具体基础数据采用 SingleProc 对象进行创建；3) 立体库，工序间 3 个库存区 K1、K2 和 K3，需要针对最大库存量进行设置；4) 线边暂存区，物料经 AGV 小车配送至线边储位；5) 物流车辆配送路径，通过 Track 进行搭建。其次，需采集仿真过程产生的数据，作为决策的参考，数据主要包括：① 零件 A 产量(初始值为零)；② 各设备处于加工、堵塞、空闲、故障、等待等状态的占有率；③ 缓存区的在制品数量，本次采用 Chart 进行创建。

2.3 物料配送

物料的流转根据生产线已有的工艺流程来决定下一个加工单元，各加工单元之间物料的转运通过 AGV 来实现，当原料到达后读取零件名称，同时执行 AGV 调度，派遣无作业任务的 AGV 前往叫位点，装载成功后运送至目的地。据此，可建立该条生产线作业的物料配送仿真流程如图 3 所示。

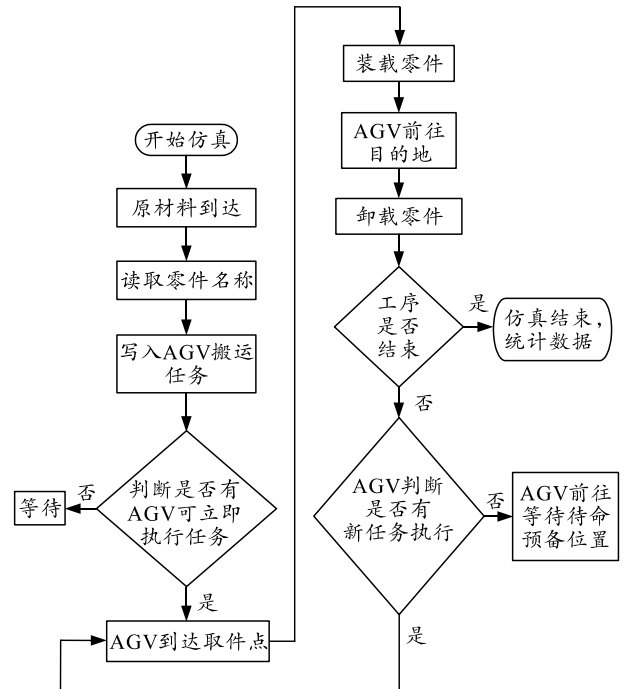


图 3 弹部件生产线物料配送仿真流程

2.4 系统初始化设计

主界面设计 dialog 对象搭建运行模型、停止、重置、仿真速度和快速运行模型 5 个参数控件，在自定义方法 Call back 中编辑相应的呼叫字符段 Callback argument 以及需要执行的功能代码，即可完成初始化初始配置。系统初始化工作流程如图 4 所示。

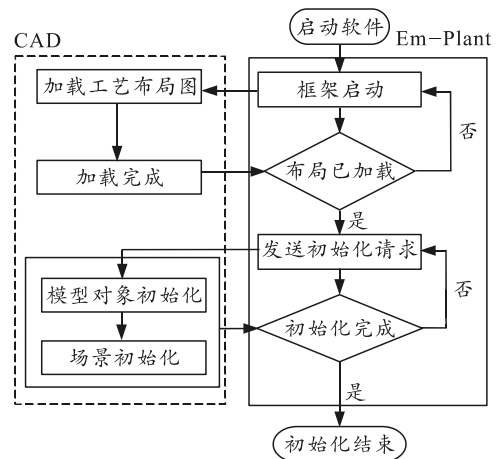


图 4 初始化流程

3 仿真模型实现

多层次结构建模可充分结合各基本对象模型特点，实现模型的统一管理和精细控制，使之相对单一模型具备更高度的灵活性和易用性。此次主要根据工艺流程，针对立体库、加工中心和零件源分别进行模型设计与实现。

3.1 零件源模型实现

由工艺流程阶段 1 可知：本次物料由料箱进行承载，需要设计 2 个基本对象，采用 MUs 中的 Entity 与 Container 对象分别进行物料和料箱的创建，料箱中由于数量不是间隔产生，采用 TableFile 控件创建一个产品源数据表 ProductList，使之可以作为 Entity 中批次生成数据源；物料与料箱在本次中作为一整体出库 K1，因此，需采用 Assembly 控件将 Entity 与 Container 进行装配才可实现。装配表按照规定配料数量 $X:1$ 进行设置，装配时间采用 Variable 进行创建，以便在初始化进行调用，装配模式采用附加 MU 形式可直观显示一体化装载对象；零件源初始化采用 Method 控件进行创建，实现功能主要有基本对象班组时间调用及装配控件启停控制；由于有空周转箱回收，因此，在框架内增加一个入口的 Interface，供外部的空周转箱输入；零件源的输出不是无限制的，需结合班次进行设计，采用 ShiftCalendar 设置班次为 8:00—17:00，其中 12:00—13:00 为休息时间，且设定每周 5 个工作日，2 个休息日。零件源多层次仿真模型如图 5 所示。

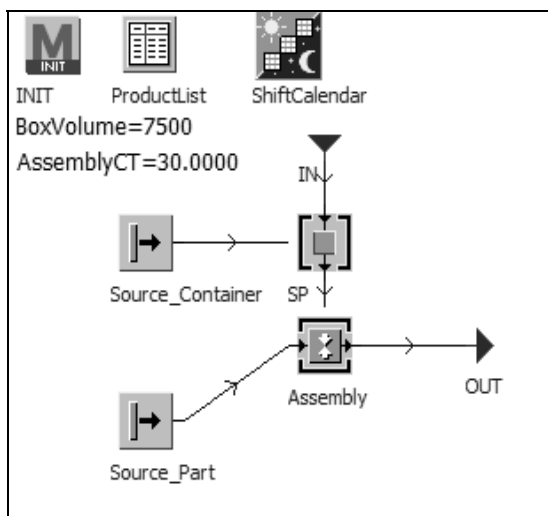


图 5 零件源多层次仿真模型

3.2 立体库模型实现

由工艺阶段 1—3 可知，本次生产线主要涉及 3 个立体库的搭建，而 3 个立体库又可分为 2 类：1) 无初始零件源的立体库 K1；2) 有零件源的立体库 K2 与 K3。由于立体库 K1 直接对接外部零件源框架，只需采用 buffer 控件进行创建即可；而立体库 K2、K3 涉及到初始化库存问题，需要调用零件源框架作为整体进行创建，同时也需配置班次表，结合 Method 方法进行初始化赋值；采用 Chart 视图工具

将输入通道设置为 buffer.numMU 统计实时库存量，监视是否满仓，避免堵塞。K2 与 K3 立体库仿真模型如图 6 所示。

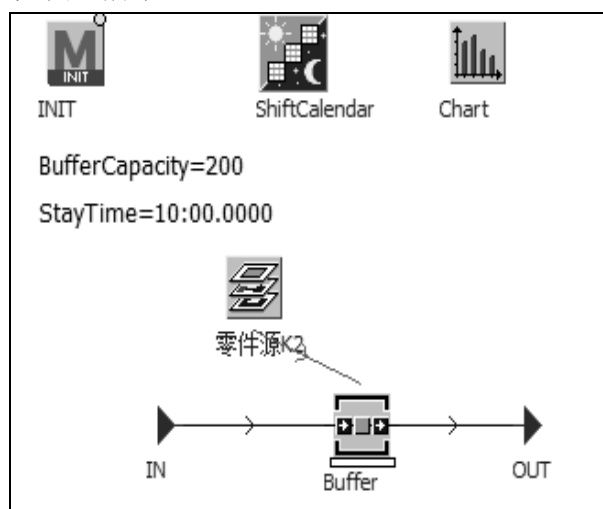


图 6 立体库仿真模型

3.3 加工中心模型实现

由工艺流程可知，某型弹部件生产线主要包括弹头加工工位、超声波洗净工位、车底齐口工位和光电检测工位 4 种。根据加工特点可将其分为 2 类：1) 弹头加工工位、车底齐口均为双工位；2) 超声波洗净工位和光电检测工位，均按 4 箱一组进行加工。因此，根据其生产特点分别进行仿真模型构建。

3.3.1 弹头加工工位

弹头加工工位流程可分解为：1) 来料后人工去箱，即拆卸过程，故采用 DismantleStation 对象进行该动作的实现；2) 拆卸完毕后进入双工位加工前需要分流，故选取 FlowControl 对象创建；3) 分流后涉及物料在多工位加工过程即输出，此过程需采用 3 个 SingleProc 对象，其中 2 个作为加工双工位，1 个作为输出工位。在初始化工程中同样采用 Method 进行创建，主要针对在初始化时从外部的数据框架里读取工位信息（节拍、故障率、产品合格率等），通过 Method 创建的 Init 赋值到该工位框架的 CT、StationNum、Availability、MTTR 等变量。在双工位加工过程中，根据用户需求，设计了进出口的制品数量控制策略，通过 EnCtrl 与 ExCtrl 作为 SP1 与 SP2 的输入与输出控制策略，并通过 Variable 对象创建 WIP 变量进行监视，同时采用 Chart 对加工工位在制品数量 WIP 进行视图趋势显示，仿真模型如图 7 所示。车底齐口工位与此类似，均为双工位加工，此处不再重复阐述。

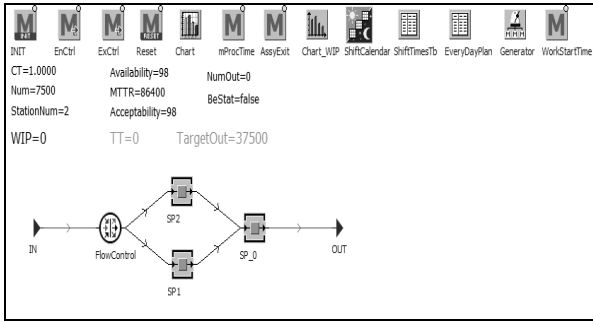


图 7 弹头加工工位仿真模型

3.3.2 超声波洗净工位

由于超声洗净过程按 4 个整箱到齐后进行清洗，因此，采用 Buffer 作为短暂缓存区控制 4 箱凑齐后进行倒箱前等待；物料凑齐后，来料先进行倒箱，清洗时的装箱量由变量 Num_wash 来决定，并可更改，初步设置为 10 000；变量 TT 监视 2 个工位连续产出 2 个产品的间隔时间；清洗时间服从正态分布，建立正态分布统计方法 z_normal (1,CT_Assume,SigmaTime)作为 SP1-SP4 的处理时间调用公式；4 个 SingleProc 对象同样设置 EnCtrl 与 ExCtrl 出入口控制策略以便统计在制品数量；复位控制策略 Reset 实现对 TT 间隔时间的初始化；Chart 记录 4 个工位的工作、空闲、等待和阻塞等状态并以柱状图形式显示。超声波洗净工位仿真模型如图 8 所示。

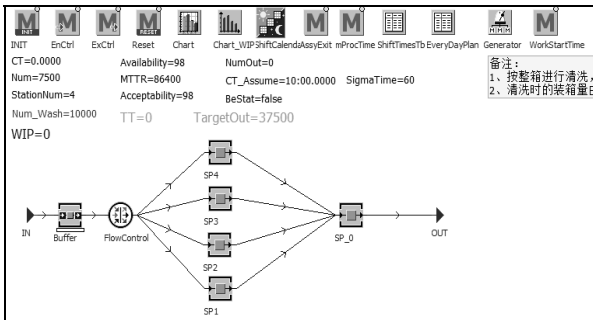


图 8 超声波洗净工位仿真模型

3.4 AGV 轨道模型实现

除了相应的立体库和各加工中心的框架设计，还需搭建 AGV 的运行轨道和特定位置上的传感器，按照 CAD 图上的尺寸长度进行定义，运行轨道采用 Track 进行创建，在 AGV 装货和卸货的位置增加触发传感器(在 Track 上添加)。入口设置为前端触发，并选择有目标对象，触发的方法选择 AGV 调度控制里的 MovePart，在 Layout 背景图上对应的辊道位置添加 Line 对象，为连接 AGV 与加工中心，以实现装卸转运。在出件的辊道出口添加 AGV 调度控制中的方法 InputOrder，同时将需求 AGV 的任务写入 OrderList 数据表中，入口的方法是从类对象里继承过来。星形区域为所添加的传感器感应位置。在生产系统布局图和工艺流程单元建模基础上，最终生产线仿真建模如图 9 所示。

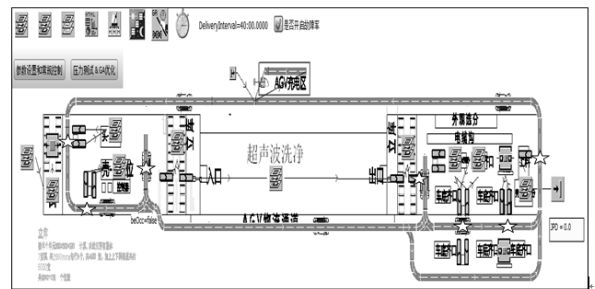


图 9 弹部件生产线仿真模型

4 仿真结果分析

通过模拟运行 30 d 后，从仿真模型中可提取每日产量，总产出 134 箱，平均每天产出 4.47 箱。针对某型弹部件所建立的多层次结构模型，通过生产系统仿真模拟，在实际投产之前，生产制造系统就作出快速布局和合理规划，支撑军用研制车间生产策略和方案作出科学决策。每日产量仿真结果统计如图 10 所示。

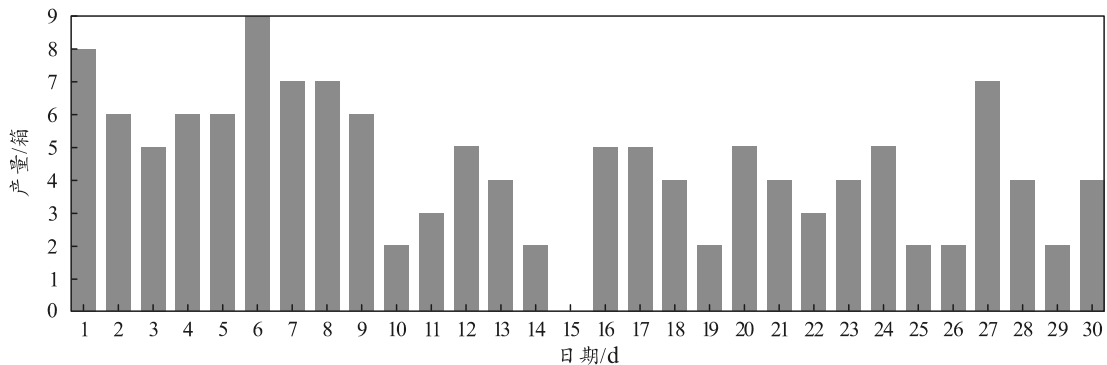


图 10 每日产量仿真结果统计

会产生共振, 满足模态设计要求。其次通过强度分析计算得出工作时凸轮齿端的最大应变极小, 仅有 1.5619×10^{-3} mm, 最大应力为 261.03 MPa, 远小于材料的屈服强度 785 MPa, 表明在工作过程中凸轮齿端不存在塑性变形, 且弹性变形很小, 故凸轮满足强度要求, 可以安全工作。

参考文献:

- [1] 孟宝. 电磁振动给料机的应用[J]. 现代制造技术与装备, 2018(12): 143-144.
- [2] 魏莉, 崔波. 螺杆分装机与气流分装机在粉针生产中的对比应用[J]. 黑龙江医药, 2000, 13(1): 15-16.
- [3] 李健白, 母佳庆, 孙阳, 等. S7-300PLC 自动卧式螺旋装药机控制系统[J]. 兵工自动化, 2017, 36(7): 86-90.

(上接第 84 页)

5 结束语

笔者基于 Em-Plant 生产线仿真软件搭建了多层次嵌套的单元模型, 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。提出的一种基于 Em-Plant 的生产线多层次仿真建模方法, 充分结合了实际军用生产线的复杂性和特殊性, 为此类包含立体库、加工中心、零件源等生产线设施单元仿真模型的设计提供了一定参考, 进而可为军工行业制造流程优化设计、智能调度、物流调控和布局规划等方面得到广泛应用奠定基础。

参考文献:

- [1] 徐曼菲, 吴跃, 邱枫. 面向军工行业数字化生产线建模仿真与优化技术[J]. 兵工自动化, 2019, 38(2): 35-40.
- [2] 赵波. 深入推进智能制造向纵深发展 推动制造业高质量转型[J]. 智慧中国, 2019(Z1): 78-80.
- [3] 张思展. 虚拟制造技术在汽车装配工艺中的应用探讨[J]. 现代制造技术与装备, 2019(5): 163-164.

- [4] 李锦, 黄权, 李全俊. 双计量板高效加药机的创新设计[J]. 兵器装备工程学报, 2011, 32(9): 10-12.
- [5] 刘成颖, 谭锋, 王立平, 等. 面向机床整机动态性能的立柱结构优化设计研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(3): 161-168.
- [6] 邱林, 宋爱平, 彭云, 等. 渐开线弧齿圆柱齿轮有限元模态分析[J]. 机械, 2016, 43(10): 6-10.
- [7] 焦云多, 曾晓华, 陈洋, 等. 大当量 DNAN 基熔铸炸药装药质量控制方法[J]. 兵工自动化, 2019, 38(8): 23-26.
- [8] 安文柱, 刘二强, 王鹤峰. 40Cr 钢离子渗氮与提高模具耐磨性研究[J]. 科技创新与生产力, 2008(7): 65-66, 69.
- [9] 陈爱荣. 表面热处理对 40Cr 凸轮摩擦磨损性能的影响[J]. 热加工工艺, 2009, 38(24): 175-176.

- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] MASON S J, MAURICIO R P, FARRIS J A, et al. Integrating the warehousing and transportation functions of the supply chain[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2003, 39(2): 141-159.
- [7] TAO J H, QIU Y Z. A simulation optimization method for vehicles dispatching among multiple container terminals[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(7): 3742-3750.
- [8] 李晗, 范文慧, 冯袁, 等. 基于系统动力学的汽车连杆生产线建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(9): 3351-3359.
- [9] 郭慧. 基于仿真技术的多品种小批量生产线优化研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2018.
- [10] 张河利, 罗玖强, 陈思毅. 基于 eM-Plant 海上风塔塔体制造过程的仿真与优化[J]. 钦州学院学报, 2019, 34(3): 13-18.