



基于 WITNESS 的电爆装置装配生产线产能优化仿真

刘义鹏 周 末 张小英 龚 读 谢章龙 周 浩

(四川航天川南火工技术有限公司, 泸州 646000)



摘要: 根据电爆装置装配生产线基本资源配置和工艺布局, 结合生产线工艺过程需求, 基于 WITNESS 平台依次进行了生产线概念模型和详细模型创建和仿真分析, 找出了电爆装置装配生产线产能制约因素。在此基础上, 结合工房暂存条件, 通过试验设计法 (DOE) 仿真分析, 找出了现行生产线产能最优方案, 并针对生产线存在的产能制约因素提出了优化方向。

关键词: 电爆装置; 装配; 产能; 仿真

Simulation of Electric-explosive Device Assembly Line's Capacity Analysis Optimization Based on WITNESS

Liu Yipeng Zhou Mo Zhang Xiaoying Gong Du Xie Zhanglong Zhou Hao

(Sichuan Aerospace Chuannan Initiating Explosive Technology Limited, Luzhou 646000)

Abstract: According to the basic resource allocation and process layout of the electric-explosive device assembly line, combined with the process requirements of the production line, the conceptual model and detailed model simulation analysis were carried out on WITNESS. The production capacity constraints of the assembly line of electric-explosive device were found out. Combined with the temporary conditions of the workshop, the optimum scheme of production line capacity is put forward through the simulation analysis of the Design of Experiments (DOE), and the optimum measures are proposed considering the production line capacity constraints.

Key words: electric-explosive device; assembly; production capacity; simulation

1 引言

电爆装置类产品是各类火工装置或系统的初始起爆源, 被广泛应用于航空、航天以及武器型号等领域, 具有“多类型、小批量、多批次”的研制特点。近年来, 随着国内航空、航天和武器行业快速发展, 电爆装置研制任务量剧增, 在此背景下, 针对两类典型装配结构的电爆装置建立了装配生产线。根据电爆装置研制特点和高安全生产需求, 生产线总体架构采用了柔性单元式布局, 生产线含多个相对独立制造单元, 在生产线上产品以固定批量在制造单元间流转完成连续生产。

WITNESS 仿真软件是由英国 Lanner 公司开发的具有强大功能的计算机仿真软件, 它主要适用于离散时间系统的仿真研究。现如今 WITNESS 软件已被广泛用于公司的工厂布局优化和发动机生产线流程优化、生产物流系统的规划等多个领域^[1]。可以在 WITNESS 仿真软件实现系统结构重现的基础上, 对生产系统的整个过程进行仿真, 更加清楚地了解生产过程中存在的问题, 找出流程中的瓶颈工序, 及时地做出相应的调整方案, 解决生产线平衡问题, 优化工艺流程及生产系统^[2~4]。

为提高生产线相关资源利用率, 扩大电爆装置装配生产线产品产出, 本文基于 WITNESS 软件平台,

作者简介: 刘义鹏 (1987), 工程师, 机械设计制造及其自动化专业; 研究方向: 航天

火工品产能优化分析。

收稿日期: 2019-06-20

拟通过仿真分析找出影响生产线产能的各因素，综合产能影响因素仿真分析找出现行生产线产能最优方案，并对生产线存在的产能制约因素提出优化方向。

2 仿真流程

以生产线工艺布局为基础，结合线内资源配置、性能参数、工艺流程和物流路线等要素建立整体生产仿真模型。先以当前的工房布局 CAD 图导入 WITNESS 软件中作为布局背景，然后依次读入流程数据、参数关联、物料供应及物流转运设定，仿真流程为模型初始化并读入流程数据→模块化区域内部参数关联→计划投料进入模型→模型运行完成加工和转运→成品输出模型统计结果。

表 1 典型产品 DB-1 工艺流程与节拍数据

序号	产品	组件	工序号	工序名称	工步号	操作工位编号	操作工位名称	节拍（min/发）	对应房间
1	DB-1	1-0	1	装前准备	1.1	刻字	刻字	2880	工房外协作
2	DB-1	1-0	1	装前准备	1.2	4109	清洗	0.12	清洗间
3	DB-1	1-0	1	装前准备	1.3	4108	烘干	60	焊接间

表 2 典型产品 DB-2 工艺流程与节拍数据

序号	产品	组件	工序号	工序名称	工步号	操作工位编号	操作工位名称	节拍（min/发）	对应房间
1	DB-2	11-0	1	装前准备	1.1	刻字	刻字	2880	工房外协作
2	DB-2	11-0	1	装前准备	1.2	4109	清洗	0.333	清洗间
3	DB-2	11-0	1	装前准备	1.3	4108	烘干	60	焊接间

4 概念模型创建与分析

4.1 概念模型创建

为找出生产线产能的一个基线，首先创建生产线概念模型。概念模型只考虑产品工艺流程，忽略物流转运、人力资源配置等因素的影响，其创建过程涉及工艺流程、节拍数据和初始布局 3 个要素，模型创建过程中按以下原则处理：

- a. 假定物流转运能力无限，需要转运的物料在瞬间就能到达指定位置；
- b. 假定人力资源充足，所有装配环节均有足够的人力配置，只要有需要便可执行装配；
- c. 假定生产线内部暂存区足够大，足够容纳所有产品暂存。

概念模型创建时，先将典型产品 DB-1、DB-2 工艺流程与节拍数据保存至 Excel 文件中，软件平台通过读取 Excel 文件将数据导入仿真模型，导入的数据驱动产品在工艺布局的各工位间流动，并将节拍数据对应

3 详细模型建模与分析

3.1 电爆装置装配生产线工艺布局

电爆装置装配涉及药剂和零组件两类物料流转，根据生产线工房单间直线排列条件，生产线工艺布局中，两类物料采用分区域流转，药剂库和零组件库分别位于工房两端，各制造单元根据装配流程依序设置，装配过程中非带药和带药半成品分别往中间流转靠拢。

3.2 典型产品工艺流程

针对电爆装置 2 类装配结构，分别选取典型产品 DB-1 和 DB-2 工艺流程进行仿真分析，DB-1、DB-2 工艺流程分别包含 144、98 个工艺步骤，分别见表 1（节选）、表 2（节选）。

输入相应的工位（设备或操作者）。

4.2 仿真结果设置

运行概念模型一定时间，得到生产线产能基线与生产资源状态基线等仿真结果，并输出至自定义的 Excel 中。自定义的 Excel 仿真结果涉及产品结果、缓存区结果和设备结果 3 方面内容，具体包含以下数据项：

- a. 产品结果含产品类型、批量、加工时间、产出间隔、产出批次数量和产出产品数量等数据；
- b. 缓冲区结果含零件进入数量、输出零件数量、当前零件数量、最大排队队长、最小排队队长、平均排队时间、平均排队队长、最小排队时间和最大排队时间等数据；
- c. 设备结果含空闲时间率、繁忙时间率、堵塞时间率、调整时间率、故障时间率和等待工人修复率等数据。

4.3 概念模型仿真分析

参照电爆装置实际生产时间安排，模型运行前按以下要求设定基础数据：a.每天 8h 工作制；b.模型运

行时间 365d; c.生产批量 10 发至 300 发, 按 10 为步长变化; d.批次投产时间间隔 20min 至 480min, 按 20 为步长变化。

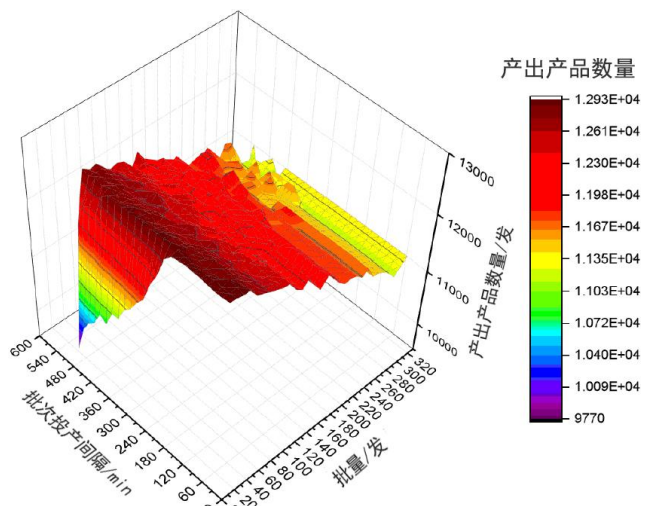


图 1 产出产品数量 Vs.投产时间间隔 Vs.批量

批量与投产时间间隔组成 720 个参数组合, 以批量、批次投产时间间隔为自变量, 以产出产品数量为响应变量的响应面结果见图 1。

从图 1 可以看出, 在批量较小时, 投产时间间隔变化对产出产品数量具有强烈的影响, 投产时间间隔越小, 产出产品越多; 当批量较大时, 投产时间间隔变化对产出产品的变化基本无影响。批量较小时, 频繁投料能保证生产线原料供应充足, 避免原料供应不足造成设备或工人等待, 使产品产出下降, 当批量增大到一定程度, 原料大量供应超过了设备或工人的处理能力, 已不能带来产品产量提升。

4.3.1 产品结果

在 365d、8h 工作制的概念模型运行完成后, 系统输出的产品结果见表 3 (节选)。

表 3 产品结果统计

序号	批次序号	产品类型	批量	进入系统时刻	输出系统时刻	加工时间	产出间隔
1	2	DB-2	30	60	40854.99	40794.99	0
2	3	DB-2	30	120	40894.98	40774.98	39.99
3	5	DB-2	30	240	40934.97	40694.97	39.99

对比概念模型 720 个产品结果, 在 8h 工作制条件下, 365d 时间内, 每隔 60min 投产一批原料, 每批批量 30 发产品, 生产线最多能够完成 12930 发产品, 共 431 个批次。

4.3.2 缓存区结果

在 365d、8h 工作制的概念模型运行完成后, 系统输出缓存区结果见图 2。

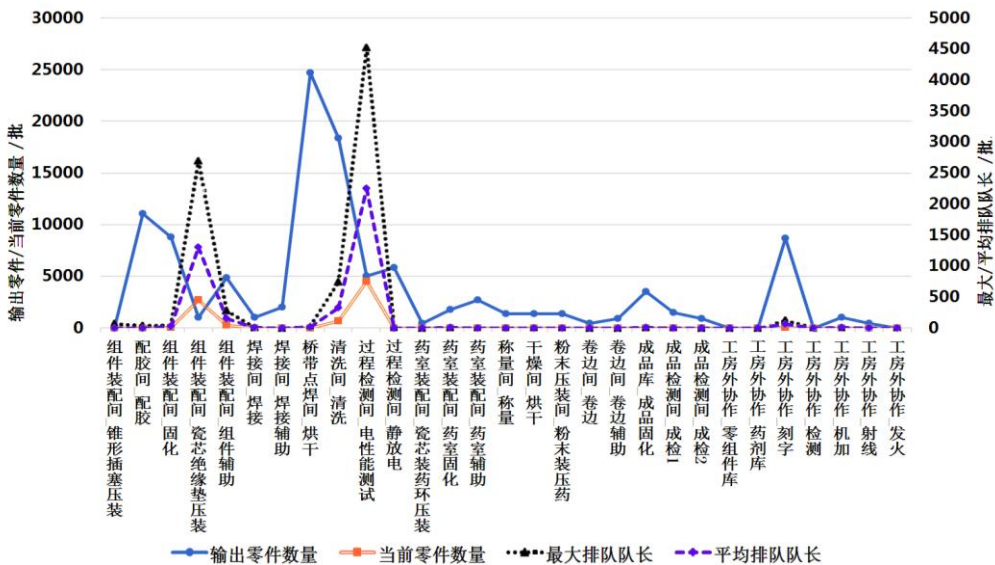


图 2 缓存区结果

从图 2 可以看出, 电性能测试设备的专用存储区中, 最大的排队队长已经达到了 4527 批, 初步分析电

性能测试设备是生产线的瓶颈环节。

4.3.3 设备结果

在 365d、8h 工作制的概念模型运行完成后，系统输出设备结果见图 3。

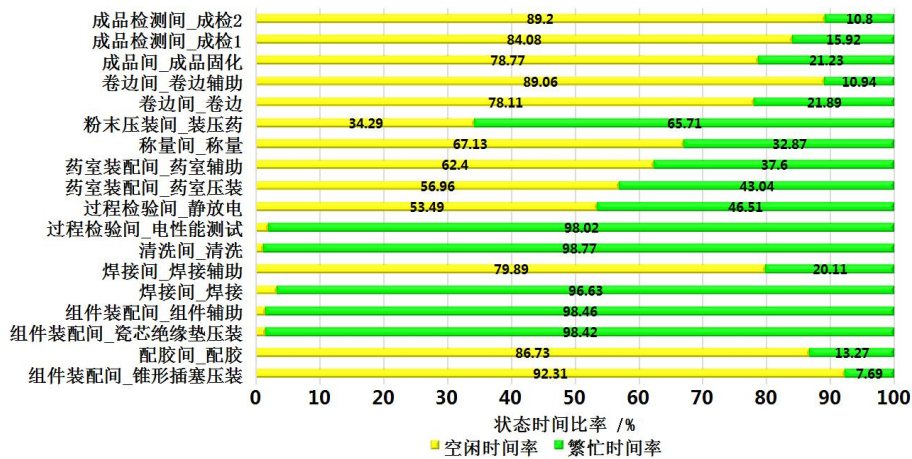


图 3 设备结果

从图 3 可以看出，电性能测试设备、清洗、组件辅助、点焊设备、瓷芯绝缘垫压装设备在整个仿真的时间中，繁忙率均达到了 95%以上，有可能成为制约整个生产线能力的环节。

5 详细模型创建与分析

5.1 详细模型创建

实际生产过程中，产品需要调用人工或传送带等物流资源在工房不同工位间流转。人工搬运产品时存在人力资源不足使设备等待的情况，人工参与设备操作，可能导致物料不能及时到达，使设备等待物料，

造成设备资源浪费。
鉴于以上原因，为保证仿真结果的准确性，需要在概念模型基础上通过增加生产实际约束，如物流转运规则、实际物流路径和人员配置等因素，创建生产线详细模型。

5.1.1 产品物流流程

基于产品 DB-1、DB-2 工艺流程，结合生产线布局中工位设置，DB-1、DB-2 装配过程分别包含 87、56 个物料转运步骤。按照 DB-1、DB-2 物流转运步骤，通过沿着工房内部人工搬运通道或传送带流转，形成了 26 条物流路径，具体情况见表 4（节选）。

表 4 产品 DB-1 物流路径

序号	物流路径	涉及的物流转运步骤（对应物流序号）	转运方式	路径长度
1	工房外协作↔清洗间	1/22（DB-1）、1/12（DB-2）	人工通过路径搬运	22
2	工房外协作↔焊接间	67（DB-1）、11（DB-2）	人工通过路径搬运	15
3	工房外协作↔成品检测间	11/21/65/66/87（DB-1）、56（DB-2）	人工通过路径搬运	8

5.1.2 工人资源配置

工人资源	数量/人	工人资源负责区域
成品检验	2	成品检测间：2 个工位，全过程人工操作
过程检验	1	过程检验间：2 个工位，人工上下料
粉末烘干、称量	1	干燥间：1 个工位，人工上下料 称量间：1 个工位，人工上下料
组件装配	3	组件装配间：4 个工位，人工上下料及辅助操作
焊接	1	焊接间：2 个工位，人工上下料及辅助操作
药室装配	1	药室装配间：3 个工位，人工上下料及辅助操作
粉末压装、卷边	2	卷边间：2 个工位，人工上下料及辅助操作 粉末压装间：1 个工位，人工上下料及辅助操作

根据设备操作需求及产品装配需求，初步进行了工人资源配置，见表 5。

5.1.3 班次定义

根据企业生产常规时间安排，设备运行和工人上班时间按以下要求进行定义：

- a. 上午 8:00 至 12:00 上班，12:00 至 14:00 休息，14:00 至 18:00 上班，18:00 至 8:00 休息；
- b. 每周按周一至周五 5 个工作日计算，周六周日休息，不考虑法定假日，每年 52 周，共计 260 个工作日；
- c. 设备与人员只有上班时间装配产品，其他时间

即使零件到达，也会因为设备与人员不是上班时间而等待。

5.2 详细模型仿真结果设置

通过在概念模型中增加物流、工人与班次定义形成了生产线详细模型，其仿真结果在概念模型基础上增加物流路径结果和工人资源结果 2 方面内容，其数据具体设定如下：

- a. 物流路径结果含产品及工人进入路径数量 1 个数据项，模型中按照批次转运，每次转运一批产品；
- b. 工人资源结果含繁忙时间率、空闲时间率、开始任务数量、结束任务数量和任务平均耗费时间 5 个数据项。

5.3 详细模型仿真分析

仿真过程设置模型运行时间为 365d，按照概念模型的产能分析得到的结果，设置批量为 30 个，投料时间间隔为 60min。

对于人工通过路径搬运的运输速度参照成年男性常速步行速度取值为 4.2km/h，传送带输送速度取值为 0.5m/s。

5.3.1 产品仿真结果

通过详细模型仿真，在 365d 时间内，生产线共完成了 406 批 12180 发产品生产，第一批产品在第 40331.77min 完成加工（约 28d），系统输出的单批次产品最大加工时间 408857min、最小值 40057min，具体情况见图 4。

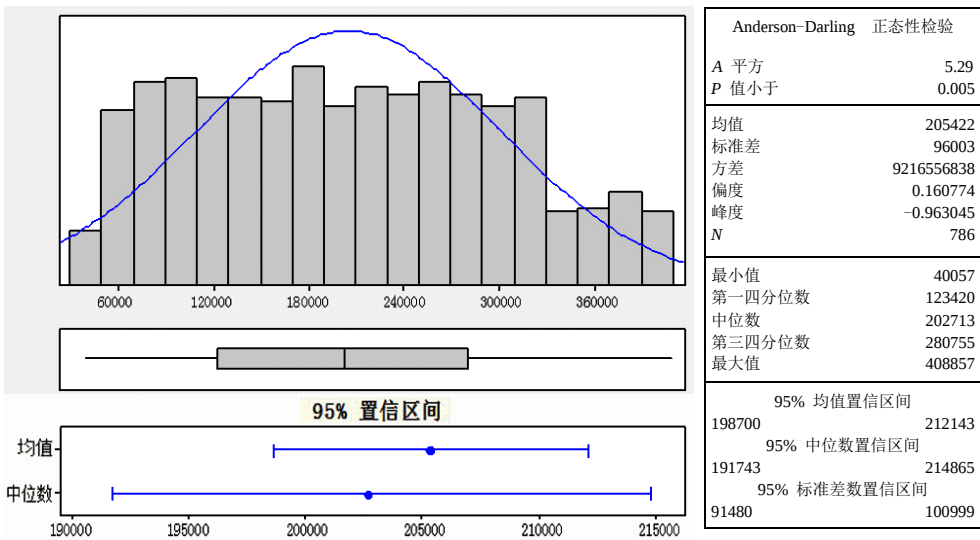


图 4 加工时间汇总

从图 4 可以看出，不同批次产品实际加工时间分布较为均匀，其均值 205422min，约 142.65d。从工艺流程上定义的节拍数据和仿真结果来看，DB-1 的总加工时间为 31963.943min，DB-2 的共加工时间为

20207.404min，产品在系统内部经历了长时间的等待。

5.3.2 缓存区仿真结果

通过详细模型仿真，系统输出的缓冲区仿真结果见图 5。

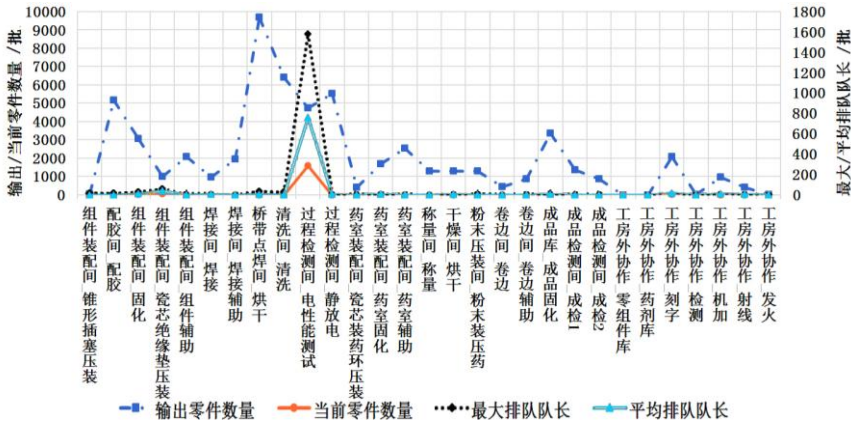


图 5 缓存区仿真结果

从图 5 可以看出, 生产线中焊接间内烘干工序在仿真中输出产品最多, 批次数达到 9692 批, 产品在电性能测试缓存区中排队长度最长达到 1583 批次。电性能测试设备生产能力不足以及及时消化上游工序传递给它的待加工半成品, 造成了半成品长时间等待, 加权

平均等待时间达 62986.6min, 电性能测试环节是制约生产线产能提升的主要工序。

5.3.3 设备仿真结果

通过详细模型仿真, 系统输出的设备仿真结果见图 6。

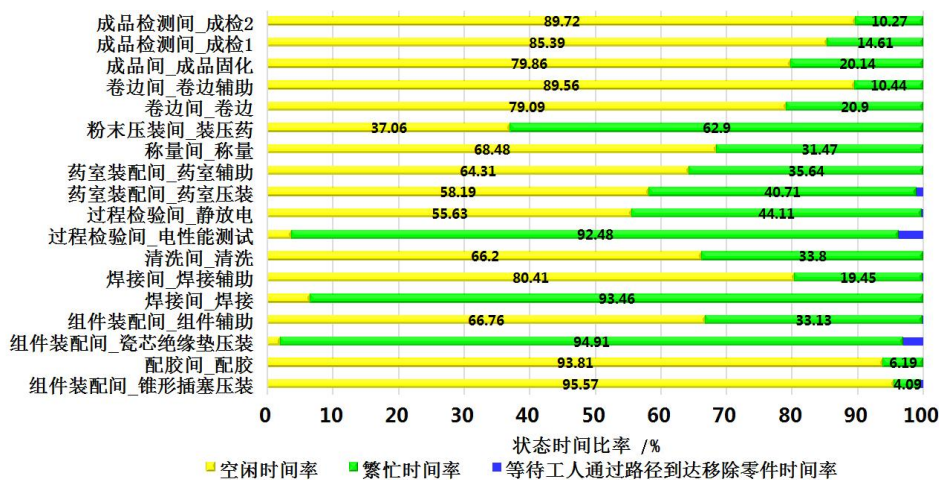


图 6 设备仿真结果

从图 6 可以看出, 生产线内部设备利用极不平衡, 电性能测试设备、焊接设备和瓷芯绝缘垫压装设备利用率均超过 90% 以上, 基本已达到了各自的极限能力, 这 3 个设备制约了生产线产能提升, 是生产线产能产

出的瓶颈工序。

5.3.4 物流路径仿真结果

通过详细模型仿真, 系统输出的物流路径仿真结果见图 7。

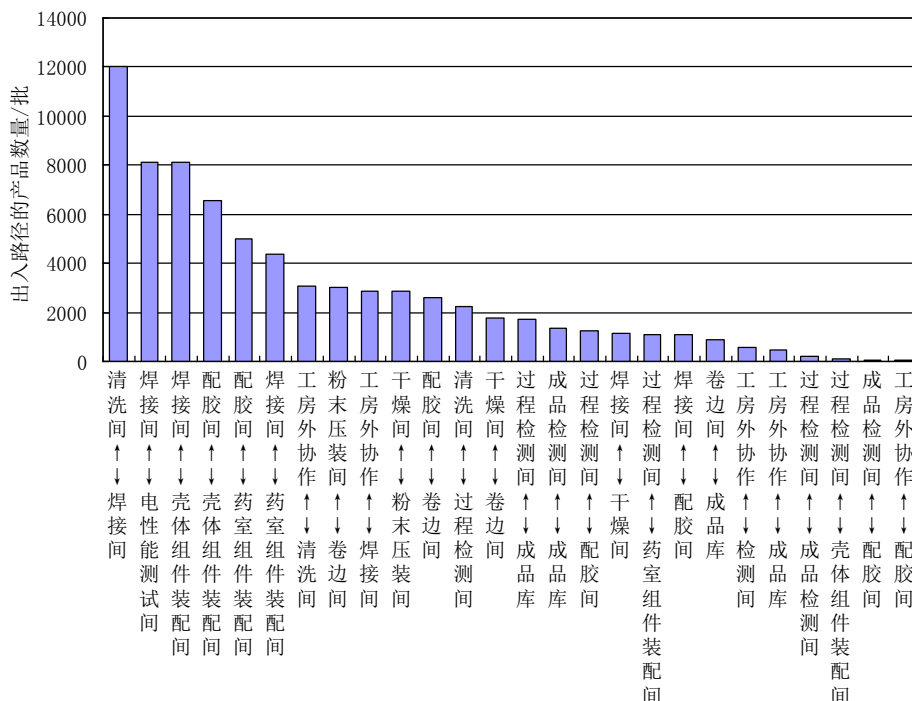


图 7 物流路径仿真结果

从图 7 可以看出, 生产线内部物流路径利用极不平衡, 不同物流路径的物流强度差异相差极大, 物流

路径使用频次最多和最少相差近 300 倍。

5.3.5 工人资源仿真结果

通过详细模型仿真，工人繁忙率均在 50%以下，工人资源配置是足够且稍显富余的。电性能测试、焊

接和组件装配这几个环节工人完成的任务量最多，焊接工人完成的任务量远远大于其他环节，成品检测平均任务完成时间最长，约 4.95min，具体情况见图 8。

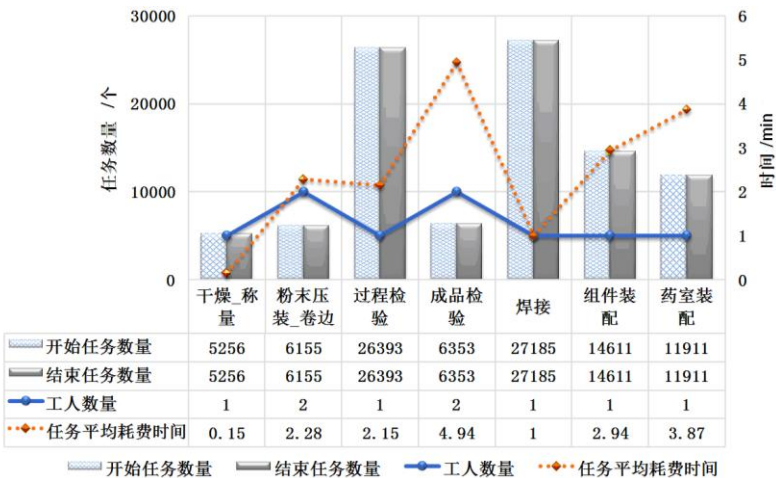


图 8 工人资源仿真结果

卷边、成品检测均配备了 2 个人，而其工作任务量不足最大任务量（焊接任务量 27207）的 50%，工作任务不饱满，工人资源配置可以各减少 1 人。

6 产能优化分析

6.1 仿真试验设计

生产线概念模型和详细模型仿真均未考虑工房内部产品暂存，按前述仿真结果和工房条件，工房难以满足上 1000 批次半成品暂存。因此，拟通过详细模型的仿真试验设计，找到产能与库存需求的平衡点，并通过仿真模型的输出结果，得到各个缓存区的具体库存要求。

基于详细仿真模型，以每类产品投产比例、批量、设备加工优先级和批次投料间隔为变量，设计了 750 组仿真试验，具体设置如下：

a. 产品 DB-1、DB-2 批量设计分别按集合{20, 40, 60, 80, 100}离散取值；

b. 产品 DB-1 与 DB-2 投产比例设计按集合{(10%, 90%), (20%, 80%), (30%, 70%), (40%, 60%), (50%, 50%)}

c. 设备加工优先级设计为三种，优先级代号分别为(2, 3, 4)，代号 2 表示“先到先服务”即设备加工最先等待的产品，代号 3 表示“优先加工 DB-1”，代号 4 表示“优先加工 DB-2”；

d. 考虑到实际生产操作便利性，分半天与 1d 投料，则批次投料间隔为集合{240, 480}，单位为 min；

e. 根据详细模型仿真第一批成品约 28d 完成加工的结果，把原定 365 个自然天仿真时间延长为 395 个自然天，以 395 个自然天的仿真结果代表实际 365d 正常生产的情况，每天按照 8h 工作制设定。

6.2 优化方案筛选

通过对排列组合形成的 750 种仿真方案进行批量仿真试验，不同的仿真方案组合均输出上述的响应输出评价结果，见表 6（节选）。

表 6 详细模型 DOE 试验结果

序号	DB-1 批量	DB-2 批量	投产间隔	DB-1 投产比例	DB-2 投产比例	优先级	产出产品 数量	产出批次	投入批次	在制批次	设备繁忙率	工人繁忙率	缓存区 最大容量
1	20	20	480	50	50	2	5160	258	284	26	250.81	58.24	121
2	20	40	480	50	50	2	7840	258	284	26	351.12	82.11	138
3	20	60	480	50	50	2	10380	255	284	29	448.98	105.4	157

在 750 个试验结果中，依次以产能数值（取范围值）、“产出产品批次”与“投入批次”的比值和

产出产品数量为标准进行方案删选,得出最优方案为:

- a. DB-1 产品批量为 40 发，DB-2 产品批量为 60 发；
- b. 每天（480min 折合 8h）投产一批；
- c. DB-1 与 DB-2 的比例为 1:9；
- d. 加工优先级为 4，即优先加工 DB-2；
- e. 年产能 12780 发/a。

6.3 优化方案运行结果

通过将最优方案的相关数据带入仿真模型进行分析,输出仿真结果电性能测试设备、焊接设备和瓷芯绝缘垫压装设备繁忙时间率均达到了 90%以上,说明电性能测试设备、焊接设备和瓷芯绝缘垫压装设备是生产线瓶颈工序,生产线优化时建议增加设备资源数量或提高单台设备效率提高生产线产能。

电性能测试设备繁忙时间率 91.37%，其专用缓存区的最大排队长度最长，达到 57 批次，相对详细模型仿真排队长度 1583 批次来看，缓冲区排队长度减小 96.4%，在生产线产品年产出相当的情况下，产品生产过程暂存需求大幅度降低。

在保证产能相近的前提下，优化方案的物流流量为详细模型仿真的 15%左右，以更小的物流当量达到同样的有效产出，可以使得现场不至于过于繁忙，减少了搬运次数，使得生产系统更加有序。

7 结束语

综上所述，通过基于 WITNESS 平台仿真分析，找出了电爆装置装配生产线产能制约因素，结合试验设计法 (DOE)，找出了生产线产能最优方案，针对生产线存在的产能制约因素提出了优化方向，具体内容如下：

- a. 典型产品 DB-1、DB-2 在 1:9 投产比例下, DB-1、DB-2 分别按 40 发、60 发批量投产, 每天 (480min 折合 8h) 投产一批的情况下, 生产线优化产能可达 12780 发/a;

- b. 现行生产线中，电性能测试设备、焊接设备和瓷芯绝缘垫压装设备是制约电爆装置产能提升的主要环节，可以通过增加设备资源或提高单台设备效率的方式优化生产线以提高生产线产能。

参考文献

- 1 王建华, 黄贤凤. 生产物流系统建模与仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016
- 2 朱炳华, 吕冬梅. 基于 WITNESS 的生产物流系统仿真与优化[J]. 机械工程师, 2006, 135(3): 135~137
- 3 李琴, 刘海东. 某生产系统基于 WITNESS 的仿真与优化[J]. 现代制造工程, 2016(9): 91~95
- 4 任贵选, 李梦群. 基于 WITNESS 的产品生产物流系统仿真优化研究[J]. 沿海企业与科技, 2016(2): 23~26

(上接第 62 页)

种场源的不同干扰,若要精确测定探头位置的磁场强度,探头的同点性成为检测精度的重要因素。磁通门磁强计对于近源场点磁矩强度、方位、距离的精确测定,探头结构的同点性是关键因素之一,多芯式检测装置,偏心磁芯组合模型结构是一种常用最优的设计方式。本文针对几种偏心结构的基本模式,就磁场强度的检测读值与实际场强的偏差系数与磁芯长度,偏心距,场源矩系数值,不同磁芯间方位、距离等的关系作了详细的分析与计算,可为相关科研人员在磁通门磁强计探头的设计研究中提供有益参考和帮助。

参考文献

- 1 周斌. 萤火一号火星探测器磁通门磁强计高精度标定技术[J]. 上海航天,

- 2013, 30(4): 179~182
- 2 刘楠楠. 反馈磁场均匀性对磁通门磁强计的影响分析[J]. 空间科学学报, 2015, 35(2): 211~216
- 3 赵凯华, 陈熙. 电磁学(上、下)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985: 221~229
- 4 郭硕鸿. 电动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997: 65~75
- 5 谷超豪. 数学物理方程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 80~90
- 6 Moskowitz & Lynch. Magnetostatic measurement of spacecraft magnetic dipole moment[R]. IEEE Trans, Aerospace, 1993(2): 2~10
- 7 Eichhorn W L. Magnetic dipole moment determination by near-field analysis [R]. NASA, TND-6685, 1997(11): 23~27
- 8 吴卫权. GB/T 32307 航天器磁性评估和控制方法[S]. 2015: 25~28
- 9 袁楠. GB 3102.5 电学和磁学的量和单位[S]. 1993: 9~10