

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.026

# 基于 Plant Simulation 的丝杆生产线仿真建模与优化

王明宇<sup>1a</sup>, 朱松青<sup>1a</sup>, 韩亚丽<sup>1a</sup>, 许慈<sup>2</sup>, 刘树青<sup>1b</sup>

(1. 南京工程学院 a. 机械工程学院; b. 工业中心, 江苏 南京 211167;

2. 南京康尼机电股份有限公司, 江苏 南京 210038)

**摘要:** 为了提高轨道车辆门系统丝杆部件的生产效率, 基于 Plant Simulation 软件构建丝杆生产线仿真模型, 优化丝杆工艺流程和产线布局。通过对不同工艺布局方案进行仿真, 对比分析各方案的设备利用率和总加工时间, 并引入设备故障率变量, 分析不同方案对故障的适应能力。揭示生产过程中的瓶颈环节, 并合理增加瓶颈环节的加工设备。有效提高了产线的生产效率, 缩短了生产周期。

**关键词:** 轨道交通; 丝杆生产线; 仿真建模; 工艺布局; 生产效率

**中图分类号:** TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)02-0135-06

## Simulation Modelling and Optimization of Screw Production Line Based on Plant Simulation

WANG Mingyu<sup>1a</sup>, ZHU Songqing<sup>1a</sup>, HAN Yali<sup>1a</sup>, XU Ci<sup>2</sup>, LIU Shuqing<sup>1b</sup>

(1. a. School of Mechanical Engineering; b. Industrial Center, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. Nanjing Kangni Mechanical and Electrical Co., Ltd., Nanjing 210038, China)

**Abstract:** In response to the growing production requirements for components of the door system in rail transit vehicles, the simulation model of the production line of the screw was established based on Plant Simulation software to optimize the screw process flow and production line layout. Through the simulation of different process layout schemes, the equipment utilization rate and total processing time of each scheme were compared and analyzed, and the adaptability of different schemes to failures was analyzed by introducing equipment failure rate variables. The bottleneck link in the production process was revealed, and the processing equipment in the bottleneck link was reasonably increased, which effectively improve the productivity of the production line and shortens the production cycle.

**Keywords:** rail transit; screw production line; simulation modelling; process layout; production efficiency

## 0 引言

随着国内外城市轨道交通的迅猛发展, 轨道车辆门作为轨道交通的基础部件, 其生产制造需要应对市场需求变化快、生产效率不足等挑战<sup>[1]</sup>。丝杆作为轨道车辆门系统的重要传动零件, 因其加工工序多、工艺复杂、精度要求高, 一直是机械加工领域中的难点<sup>[2]</sup>。生产线工艺建模和仿真技术是对生产线进行分析、试验、诊断、评价的最经济、最安全的一种方法, 尤其在分析复杂程度高的生产系统时, 其几乎是唯一的途径<sup>[3]</sup>。已经有众多研究者通过仿真, 对生产线进行规划、设计及优化。麻娟等<sup>[4]</sup>提出了步进巡回式装配线的新概念, 基于 Witness 仿真平台建立传统装配线和步进

巡回式装配线仿真模型, 在不同工况下仿真运行, 深入分析最优运行规律。徐曼菲等<sup>[5]</sup>研究了一种基于 eM-Plant 的生产线多层次仿真建模方法, 将生产线分解为模块化仿真单元, 便于管理控制, 并成功应用于实际项目中, 为其提供了合理物流线布局和生产策略。王森森<sup>[6]</sup>利用 Plant Simulation 仿真软件建立仿真模型并导入生产数据对整个卡车生产系统进行仿真模拟, 找出装配线中瓶颈环节, 提出优化改进方案并辅以遗传算法为企业库存决策提供方法支持。李春兴等<sup>[7]</sup>基于 Plant Simulation 对用于压气机叶片型线加工的产线进行了分析和优化。通过以上研究可以看出, 仿真模型可以作为分析生产线优化方案的重要工具。但现有研究中很少将设备故障率放入假设, 限制

**基金项目:** 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX23—1178)

**第一作者简介:** 王明宇(1999—), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 研究方向为智能制造装备与数字孪生技术的应用, 381524303@qq.com。

了仿真的适用性和模拟优化效果。本文对比实际生产线和优化方案的生产布局及生产效率,同时找出瓶颈环节,深入分析仿真结果,合理优化方案,并且将设备故障率纳入仿真假设进行分析。

## 1 生产线概述

### 1.1 产品参数与工艺流程

轨道交通某客室门丝杆的产品参数如表 1 所示。

表 1 丝杆产品参数

参数	取值范围
质量 $m/\text{kg}$	$\leq 20$
长度 $L/\text{mm}$	1 000~2 500
外径/mm	$\phi 20 \pm 0.025$ $\phi 22 \pm 0.025$
底径/mm	$\phi 13_{-0.3}^0$

丝杆加工工艺流程如图 1 所示。工序 1,加工端面,打中心孔,通过激光打标机在丝杆外圆上打上对应标记。工序 2,加工锁闭端。工序 3,粗铣左旋螺杆。工序 4,精铣左旋螺杆。工序 5,粗铣右旋螺杆,工序 6,精铣右旋螺杆。工序 7,车螺纹和轴承台阶,加工键槽。工序 8,进行抛光。其中工序 1—工序 7 采用自动上下料装置,上下料总时间可以控制在 45 s 以内。

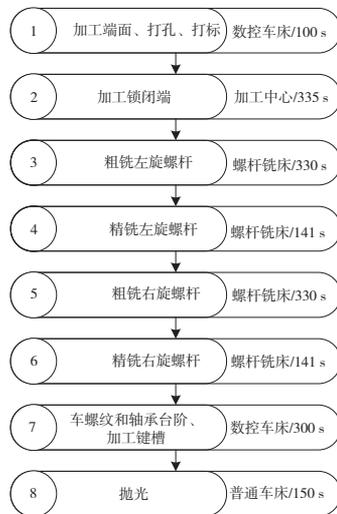


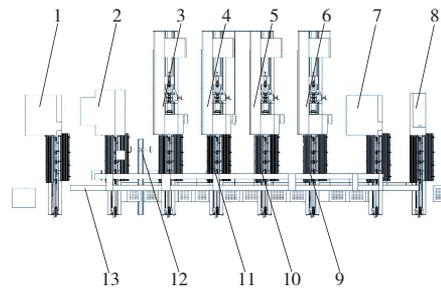
图 1 丝杆加工工艺流程

### 1.2 生产节拍与产线布局

该项目最大产能需求为 100 根/d,按照现有丝杆自动生产线方案,不改变原有丝杆生产组织模式和加工工艺,按计划中的日平均有效时间来设计,采用 1 天 2 班工作制,单个产品的循环时间

为 9 min。

如图 2 所示,在初步方案中,丝杆生产线采用串行加工的方式,按照图 1 所示的流程,丝杆依次通过 8 个工位,从左到右分别是数控车床 1、加工中心 2、螺杆铣床 3—6(分别处理粗铣和精铣)、数控车床 7 和普通车床 8;激光打标机 13 在加工开始的时候给丝杆毛坯打上对应标记,位置位于丝杆左、右螺旋之间,内容为生产日期,批次号等;传送桁架 12 和机械手 11 组合进行各工位之间的物料运输;自动上下料装置 10 将运输的物料自动检测定位夹紧,进行加工;每台机床都配置物料库 9 用来放置完成该工序的工件。



1、7—数控车床;2—加工中心;3、4、5、6—螺杆铣床;  
8—普通车床;9—物料库;10—自动上下料装置;  
11—机械手;12—传送桁架;13—激光打标机。

图 2 车间布局图

## 2 生产线仿真建模方法与假设

本文基于 Plant Simulation 仿真软件平台开展建模仿真。Plant Simulation 是由 eM-Plant 发展而来,用 C++ 实现关于生产、物流和工程仿真的典型离散事件仿真软件。支持层次化、参数化建模,具有面向对象、可编程控制等特点<sup>[8]</sup>。

### 2.1 仿真建模方法

丝杆加工生产线的建模可以分成 6 个步骤,如图 3 所示。首先参照产品参数设定好数据表,包含物料表、丝杆加工时间表等,用于仿真中物料调用和仿真结果的记录;其次导入生产线机床模型来替换 Plant Simulation 库元件中的工位模型,用于三维建模时复现 1:1 的丝杆加工车间;然后在二维建模中根据车间布局图布置模型元件并进行逻辑连接;接着对工艺设备、缓冲区等的加工时间以及故障等参数进行设定,并对进出控制策略进行编程;然后创建三维车间模型,在 3D 属性中添加姿态和加工动画,并通过控制策略进行调用;最后为三维车间模型添加车间墙壁等细节,设定各项仿真变化参数实时显示。



图3 仿真建模步骤流程图

在初始方案中,材料的流动方向和工序是固定的串行流程,但是为了方便模型优化修改,将进出口策略和控制策略以 Method 的形式放置于模型内。本文采用 SimTalk 语言编写 Method,编写的 Method 如表 2 所示。

表 2 仿真模型中方法及其功能

Method 种类	主要功能
单工序料库分流策略	控制物料流动节奏、按工序优先级运输加工
单工序动画选择策略	根据当前加工工序选择加工动画
机床出口策略	采集加工完成时间,修改物料工序属性
机械手工序识别策略	根据物料工序属性分配加工工序
模型基础策略	仿真结束显示结果,仿真重置删除上一次仿真表格

丝杆加工车间三维物理模型如图 4 所示。在仿真模型中,产品物料从物料源 Source\_Part 处生成,根据 Method 控制按工艺流程通过各加工工位,不断更新物料属性,最后被物料终结 Drain 收纳。同时为了实时反映仿真情况,监控各工位运行状态,设置用户接口显示模块和图表模块,将重要参数作为全局变量提取到框架中实时查看,从而达到数字化工厂生产线实时监控系统的类似效果。

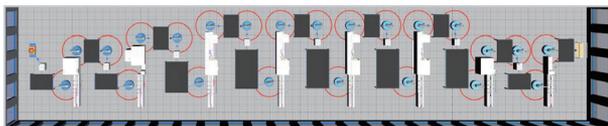


图4 丝杆加工车间三维仿真模型

## 2.2 问题描述与建模假设

建模完成后,对丝杆产线的运行进行仿真,仿真输入为丝杆加工工序表、丝杆物料表、工艺设备表、初步方案图等。仿真的目的在于优化丝杆生产节拍,根据工序任务分配情况使生产布局更加合理。

由于各工序使用的设备种类不同,为提高设备的利用率,根据以下原则进行优化。

1)不同工序之间的加工时间相差较大,且多道工序使用同一种类机床,应尽可能将相同种类机床放置于同一区域进行加工,提高产线的生产效率。

2)不同工序占用同一种类机床需保证工序之间优先顺序不变,每台机床都尽快投入生产。

3)从工位资源利用率、各工序完成时间等方面绘图进行比较,保证资源利用平滑,找出瓶颈环节,优化生产线工艺布局方案。

为了增加仿真的可靠性,根据车间的实际运行数据,基于如下假设条件进行仿真。

1)根据企业的产能节拍需求,丝杆组扣除正常损耗时间,每天按两班制每班工作 8 h,仿真运算考虑准备时间对最终结果的影响。

2)以满足丝杆的年产量要求为目标,生产排程问题简化为平均分配丝杆产量需求,即物料按数量可调方式设置,按 100 根/d 进行仿真。

3)相同机床将加工不同工序,不同工序之间切换之前机床会回到初始位置,不会产生额外时间。

4)实际生产中机械手和传送带绑定运行,完成物料不同机床之间的运输,仿真模型用多段传送带和多个机械手等效。由于传送带长度较传送桁架要长得多,所以将传送带速度统一设置为 2 m/s,机械手运送工件切换位置每次 1 s。

5)正常生产中,机床与机床之间的运输环节只运输一种工件,传送工件时需确保上一件已经进入下一道工序加工中。

## 3 仿真试验及结果分析

### 3.1 初步仿真

在保持机床数量不变的情况下,改变设备布局和工序流程进行仿真,分别对两种方案下的设备资源统计信息、各工序加工完成时间、批次完成时间和设备故障影响进行对比和评估。

如图 5 所示,S 表示物料源(Source),1—8 为

按图 2 车间布局图对应序号的 8 台机床, D 为物料终结(Drain)。图 5(a) 方案 1 为原工序流程逻辑方案图,各设备串行连接,实际车间生产线呈现直线型布局,三维建模图如图 4 所示。图 5(b) 方案 2 是根据工艺流程优化,将同类机床并联,按工序先后顺序再进行串联,整体呈现树状连接,三维建模如图 6 所示。

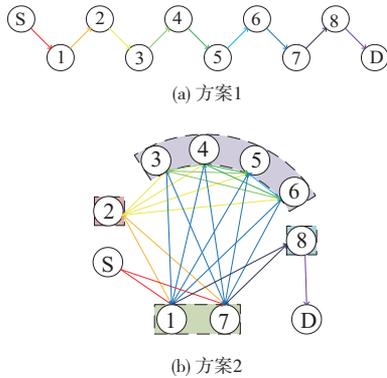


图 5 加工工序流程逻辑方案图

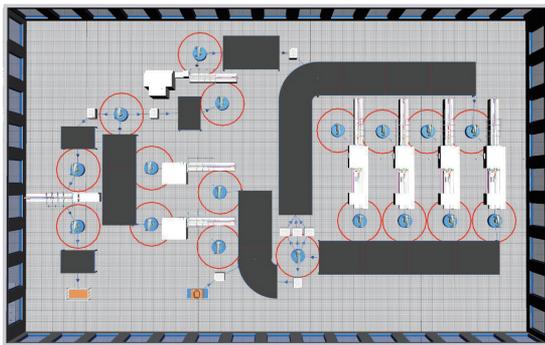


图 6 方案 2 丝杆加工生产线三维仿真模型

1) 设备资源统计信息

设备资源统计信息是生产线利用情况的重要指标,通过多次仿真对设备资源利用率进行分析,如图 7 所示。

从图 7(a) 可见,方案 1 中的数控车床①由于工序加工时间较短很快就完成工作进入等待状态;加工中心②、螺杆铣床③和⑤以及数控车床⑦由于工序加工时间较长,工作时间占比超过 90%,机床负载较高,会花费更多能源,相比之下螺杆铣床④和⑥以及普通车床⑧抛光的工序加工时间较短,工作时间占比不足 50%,设备利用率低,大部分时间都在等候其他工序完成;从图 7(b) 所示方案 2 的仿真结果可见,数控车床①与螺杆铣床④的工作占比得到确实提升,但数控车床⑦、螺杆铣床⑤和螺杆铣床⑥的占比降低

且超出预期,初步推测出现瓶颈环节,影响整体利用率的提升。

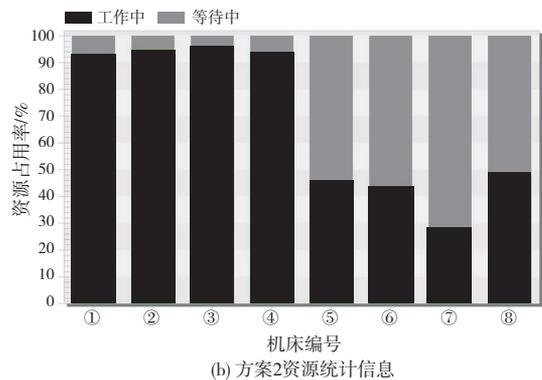
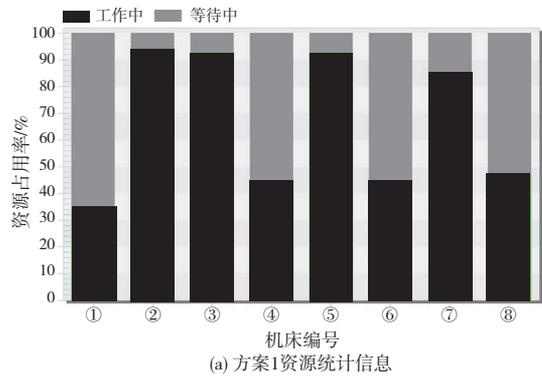


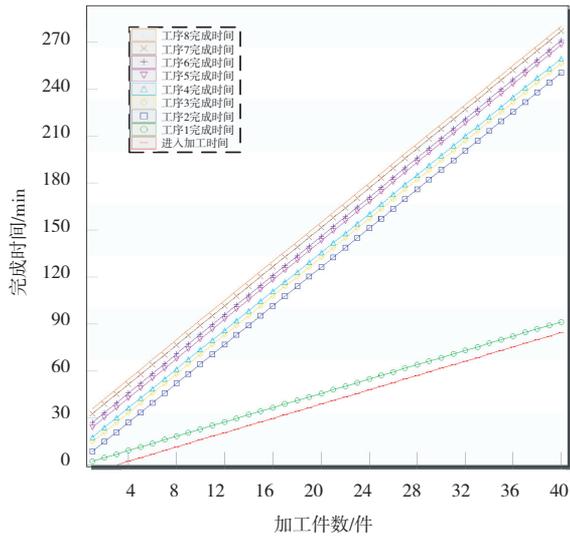
图 7 设备资源统计信息柱形图

2) 各工序加工完成时间与总加工时间

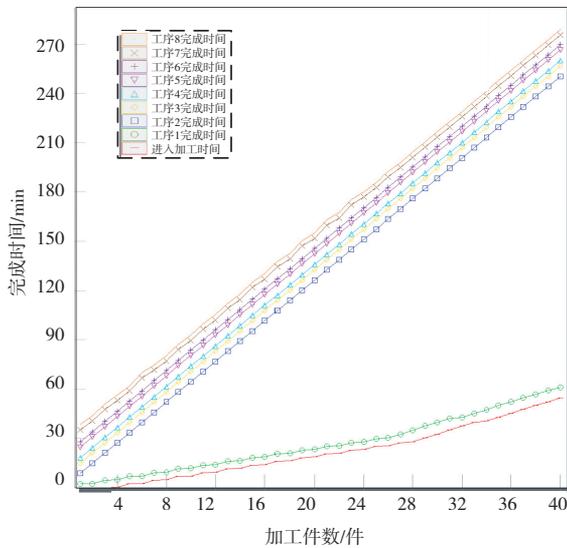
总加工时间是生产线加工效率的主要指标,可以明显看出方案对优化生产效率的效果;从各工序加工完成时间可以清晰找出瓶颈环节,如图 8 所示。

从图 8 中可看出工序 1—工序 2 之间的完成时间随丝杆数量的增加逐渐被拉长,方案 2 在 28 件之前完成增长时间较缓,但是也不可避免增加完成时间;从之前的工序流程也不难看出,工序 2 加工时间相比前道工序和后道工序来说都较长,尤其是工序 1 的加工时间仅为工序 2 的 1/3。启动实时仿真进行观察,发现大量物料堆积在工序 1 之后的物料库中,方案 1 最大堆积达到 63 件,方案 2 最大堆积更是达到 70 件,物料均在等待加工中心中物料的工序 2 加工完成,形成瓶颈环节。

如表 3 所示,方案 2 仅在总加工时间上少用 0.8%的时间,虽然有瓶颈环节存在影响优化效果,但是修改工艺流程逻辑确实对生产效率有提升效果。



(a) 方案1各工序加工完成时间



(b) 方案2各工序加工完成时间

图 8 各工序加工完成时间折线图

表 3 两种方案仿真结果对照表

仿真结果	方案 1	方案 2
最低资源利用率/%	34.32	28.11
总加工时间/min	655.63	650.52

### 3) 设备故障率影响

此时对各机床添加故障率,由于现实情况更为复杂,这里仅设置 5% 的错误率,每次发生错误后将耗时 1 min 进行改正。

如表 4 所示,这时方案 2 总加工用时少花费 4.2% 的时间,提高了资源利用率,方案 2 在设备故障时有更好的冗余性,可以将因故障等待的时间分担到并联的机床中,因此对故障导致意外停

机的适应能力更强。

表 4 两种方案添加故障率后仿真结果对照表

仿真结果	方案 1	方案 2
最低资源利用率/%	31.84	41.16
总加工时间/min	706.57	677.05

### 3.2 排除瓶颈环节仿真

为了消除产线的瓶颈环节,多布置一台加工中心,如图 9 中的②'所示,与②形成并行工位进行工序 2 的加工,方案 3 工艺流程逻辑如图 9 所示,设备布局如图 10 所示。

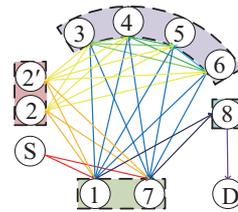


图 9 方案 3 加工工序流程逻辑图

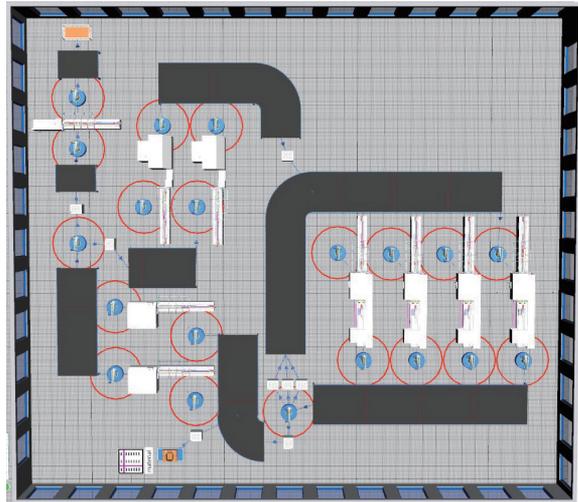


图 10 方案 3 丝杆加工生产线三维仿真模型

同样对其资源统计信息及各工序加工时间进行仿真,如图 11 所示。

从图 11(a)可以看出加工中心并行工位成功分散了资源占用,各工位的资源占用率得到了有效的提升;从图 11(b)可以看出丝杆加工生产线的瓶颈现象得到较大缓解。

如表 5 所示,这里方案 3 在无故障率的影响下少花费 24.1% 的时间,可以看出瓶颈环节被解除后,工艺流程逻辑和工厂布局优化达到了近 1/4 的提升,同时大幅度提高了最低资源利用率,使

整个生产线机床等待时间进一步缩短;这里添加机床故障概率之后,少花费 26.1%的时间,但是最低资源利用率略有降低,再次印证并联同种类机床对实际故障率有更好的适应能力。

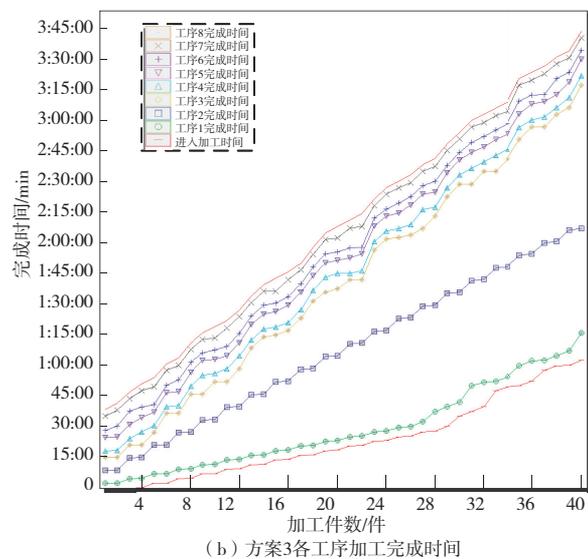
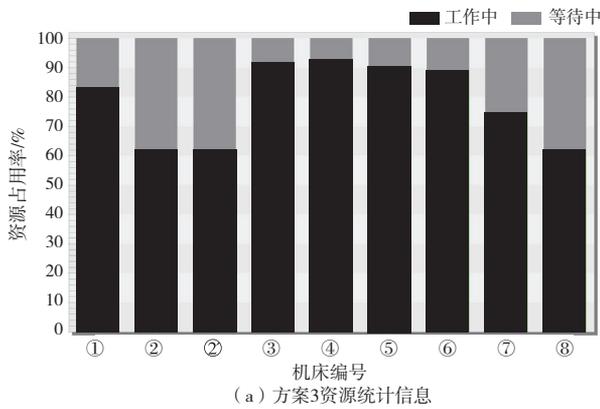


图 11 方案 3 仿真结果图

表 5 3 种方案添加故障率仿真结果表

仿真结果		方案 1	方案 2	方案 3
最低资源利用率/%	无故障率	34.32	28.11	61.95
	有故障率	31.84	41.16	59.18
总加工时间/min	无故障率	655.63	650.52	498.40
	有故障率	706.57	677.05	521.03

## 4 结语

以提高丝杆生产线的资源利用率和缩短生产周期为目标,采用仿真技术对工艺流程和布局进行了系统的优化研究,基于现有的丝杆工艺流程和生产线布局构建了生产线仿真模型。通过对不同工艺布局方案的模拟实验和深入分析,识别出生产过程中的关键瓶颈环节并引入设备故障率的变量,验证不同方案对故障率的适应能力,有效优化了丝杆生产线的运作,显著提升了整体的生产效率。本研究的成果可为轨道交通门系统丝杆生产线的工艺改进和决策支持提供坚实的科学依据。同时,本研究所采用的仿真技术和优化策略,对类似生产线的优化工作也具有重要的参考价值 and 启示意义。

## 参考文献:

- [1] TAO F, QI Q L. Make more digital twins[J]. Nature, 2019, 573: 490-491.
- [2] 王友斌,王慧,位云成,等. 轨道车辆门系统丝杆无人化生产技术研究[J]. 中国设备工程, 2021(21): 38-39.
- [3] 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.
- [4] 麻娟,刘俨后,楚满福,等. 基于 Witness 的步进巡回式装配线建模与仿真分析[J]. 现代制造工程, 2019(7): 23-29.
- [5] 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, 93.
- [6] 王森森. 基于 Plant-Simulation 的卡车生产系统仿真建模及优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [7] 李春兴,徐健,易泰勋,等. 基于 Plant Simulation 的压气机叶片型线加工产线分析与优化[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(1): 40-44.
- [8] 施於人,邓易元,蒋维. eM-Plant 仿真技术教程[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

收稿日期: 2024-06-17