

1-8-2019

## Modeling and Simulation of Connecting Rod Production Line

Yuanyuan Yan

*Department of automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

Wenhui Fan

*Department of automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

Feng Yuan

*Department of automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Modeling and Simulation of Connecting Rod Production Line

### Abstract

**Abstract:** Discrete event system simulation method is widely applied to solve various problems, and line balancing problem is also one of them. *In this paper, we use discrete event system simulation method to solve line balancing problem. Connecting rod production line is modeled by using DES.* A production line model is built and simulated in AnyLogic, the bottleneck process and the problems to be optimized are analyzed. A small program in MATLAB is used to optimize the production line, and find the optimal solution. Simulate again.

### Keywords

DES, line balancing problem, AnyLogic, modeling and simulation

### Recommended Citation

Yan Yuanyuan, Fan Wenhui, Feng Yuan. Modeling and Simulation of Connecting Rod Production Line[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(9): 3360-3365.

## 汽车连杆生产线的建模与仿真

延渊渊, 范文慧, 冯袁

(清华大学自动化系, 北京 100084)

**摘要:** 离散事件系统仿真方法被广泛应用于解决各类问题, 生产线平衡问题也是其中之一。应用离散事件系统仿真的方法对连杆生产线进行了研究, 分析了生产线的瓶颈工序、生产线平衡率以及生产线效率等问题, 提出了对生产线的优化策略。首先应用离散事件系统对连杆生产线进行建模, 其次在 AnyLogic 软件中搭建生产线模型并进行仿真, 分析其瓶颈工序及待优化问题, 然后对生产线进行优化, 找出最佳生产线的安排方案, 并再次仿真进行验证。

**关键词:** 离散事件; 生产线平衡问题; AnyLogic; 建模与仿真

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 09-3360-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201809017

## Modeling and Simulation of Connecting Rod Production Line

Yan Yuanyuan, Fan Wenhui, Feng Yuan

(Department of automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;)

**Abstract:** Discrete event system simulation method is widely applied to solve various problems, and line balancing problem is also one of them. *In this paper, we use discrete event system simulation method to solve line balancing problem. Connecting rod production line is modeled by using DES. A production line model is built and simulated in AnyLogic, the bottleneck process and the problems to be optimized are analyzed. A small program in MATLAB is used to optimize the production line, and find the optimal solution. Simulate again.*

**Keywords:** DES; line balancing problem; AnyLogic; modeling and simulation

## 引言

生产线平衡问题是随着制造业是发展而出现的问题, 是对生产的全部工序平均化, 调整作业负荷, 使各作业时间尽可能相近, 以消除作业间的不平衡效率损失、生产过剩和各种等待浪费, 提高生产线的整体效率。

随着计算机的发展, 计算机仿真的方法也被应

用于求解生产线平衡问题。计算机仿真一般利用仿真软件对生产线进行仿真, 得出生产线的瓶颈工序等系列参数, 之后对其改进。一般采用的仿真软件有 eM-Plant、Witness、Flexsim、AnyLogic 等, 采用的仿真方法有离散事件仿真和系统动力学仿真。清华大学的冯袁在其本科毕业论文中利用 AnyLogic 编程分别使用离散事件仿真和系统动力学仿真对汽车凸轮轴生产线平衡问题进行研究, 且对两种仿真方法进行了比较和总结<sup>[1]</sup>。合肥工业大学的陈诚和在其硕士论文《基于仿真优化的制造企业生产线平衡问题研究》中利用 Witness 进行了对生产线的可视化仿真, 文中使用了 Petri 网建模和系统结构重现建模对卡车消声器生产线进行了建



收稿日期: 2016-03-20 修回日期: 2016-08-30;  
基金项目: 国家自然科学基金(51575469);  
作者简介: 延渊渊(1992-), 女, 陕西绥德, 博士生, 研究方向为调度优化及计算机仿真; 范文慧(1966-), 男, 吉林松原, 博士, 教授, 博导, 研究方向为复杂系统建模与仿真等。

<http://www.china-simulation.com>

• 3360 •

模研究<sup>[2]</sup>。西南交通大学的李华利用 eM-Plant 对汽车焊接生产线进行了仿真优化研究<sup>[3]</sup>。湖南大学的张敏基于离散事件仿真利用 Plant-Simulation 软件对汽车曲轴生产线进行了仿真优化<sup>[4]</sup>。北京航空航天大学大学的邵明珠和周泓利用 Arena 进行仿真建模对数控加工流程进行优化<sup>[5]</sup>。周泓等还基于 Arena 对车间作业排毒问题进行了仿真优化, 且在其中使用了贪婪随机自适应搜索算法, 为仿真优化提供了一个新的思路<sup>[6]</sup>。

离散事件系统仿真的方法能够有效对生产线进行研究, 有效的解决生产线平衡问题。本文应用离散事件系统仿真方法对汽车连杆生产线进行了分析和研究。

## 1 生产线平衡问题

生产线平衡问题是对生产的全部工序平均化, 调整作业负荷, 使各作业时间尽可能相近, 以消除作业间的不平衡效率损失、生产过剩和各种等待浪费, 提高生产线的整体效率<sup>[2]</sup>。

生产线的节拍(Cycle time, CT)是指连续完成相同的两个产品之间的间隔时间, 即完成一个产品所需的平均时间, 所以, 节拍决定了生产速度的快慢, 节拍越长, 生产速度越慢, 反之, 节拍越短, 生产速度越快<sup>[7]</sup>。在生产线设计中, 如果给定了一个流程单位时间内必须的产出, 首先要考虑的是生产线的节拍。其计算公式如下:

$$CT = \frac{T_w}{Q}$$

式中:  $CT$  表示生产线的节拍;  $T_w$  表示计划期内有效的总工作时间;  $Q$  表示计划期内的成品数量。

生产线的瓶颈是指一个流程中生产节拍最慢的环节。瓶颈不仅限制了一个流程的产出速度, 还影响了其他环节的生产能力。可以说瓶颈是制约产出的因素, 正如同一个瓶子瓶口的大小决定了瓶中液体流出的速度。

空闲时间是指工作时间内没有执行有限工作任务的时间。当流程中各工序节拍不一致时, 瓶颈工序以外的其他工序就会产生空闲时间, 空闲时间

是对资源的浪费, 一般要尽可能的减少空闲时间。

生产线的平衡率可以用来衡量生产线的平衡性, 其计算公式如下:

$$P = \frac{\sum_{j=1}^n T_j}{m \times \max(T_i)} \times 100\%$$

对于这样一个例子, 生产中有五道工序, 用时分别为 30 s, 20 s, 60 s, 40 s, 25 s, 这样工序 3 即为生产瓶颈, 其他工序有空闲时间, 如图 1 所示。

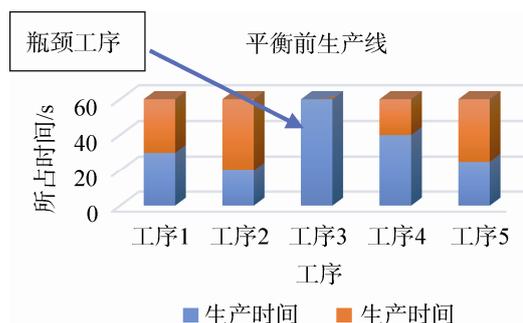


图 1 平衡前生产线时间示意图

Fig. 1 Production line time before balancing

可以看出生产线的空闲时间较多, 资源浪费较为严重, 如果将工序 3 多一台机器, 则其生产时间将变为 30 s, 平衡后生产线空闲时间将减少很多, 见图 2。

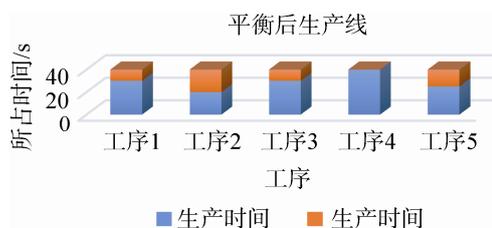


图 2 平衡后生产线时间示意图

Fig. 2 Production line time after balancing

## 2 离散事件系统仿真建模

本章对汽车连杆生产线进行的仿真, 连杆生产线的的设计图如图 3 所示。对于这条生产线, 原材料从中间上料, 进行 OP10 的粗磨之后到右边依次进行 OP20~OP70 的粗加工, 然后在回到中间的机器进行 OP80 的精磨, 之后到左边进行 OP90~OP140 的精加工, 其中工序 OP10 和 OP80 公用一台机器, 具体工序名称及用时如表 1 所示。

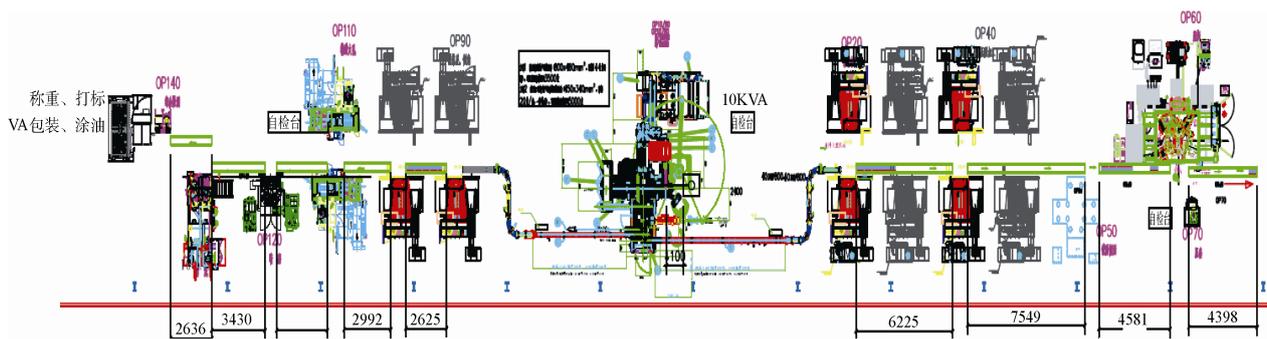


图3 汽车连杆生产线设计图

Fig. 3 Design of Connecting Rod Production Line

表1 汽车连杆生产线工序时间表

Tab. 1 Processing time of Connecting Rod Production Line

工序号	加工项目	装载时间/s	配置时间	加工时间/(s/支)	卸载时间/s
OP10	粗磨两端面	2	0	10	2
OP20	大小孔粗加工	3	0	40	2
OP30	加工螺栓孔、钻油孔	3	0	40	2
OP40	铣两侧面	3	0	15	2
OP50	去毛刺	2	0	10	2
OP60	胀断	2	0	15	2
OP70	压套	2	0	15	2
OP80	精磨两端面	2	0	10	2
OP90	倒角	2	0	40	2
OP100	半精镗大孔、铣瓦槽	2	0	40	2
OP110	精镗大小头孔	2	0	10	2
OP120	珩磨大头孔	2	0	15	2
OP130	清洗	2	0	17	2
OP140	综合检测	2	0	5	2

对于上述生产线,各工序的时序约束固定,一项加工结束后才能开始另一项加工,对于这样的生产线,很符合离散事件系统。离散事件系统中存在着临时实体与永久实体,如典型的离散事件系统——排队系统,服务台为永久实体,一直存在,并进行服务,顾客为临时实体,排队等待服务然后离开,不存在于所有时间,当临时实体到达永久实体开始服务时,永久实体的状态由空闲变为工作,当临时实体离开时,永久实体的状态又变回空闲,离散事件系统的仿真是通过事件的推进来进行的,仿真的进度是依靠事件的发展来控制的。对于如上生产线,每个工位就是永久实体,而一件件待加工的产品就是临时实体,这些产品经过一次次排队、加工最后成为成品离开生产线,整个加工过程的时间是离散的,不是连续的,故,生产线系统符合典型

的离散事件系统,可以通过离散事件系统仿真的方法进行研究。

对于上述生产线进行离散事件系统仿真建模,利用 AnyLogic 中的服务台搭建仿真模型,如图 4 所示,每个 resourcePool 代表每个工序拥有的机器数目即资源数,每个 service 是一个服务台,包含排队,每次服务需要消耗资源 1 即需要占用一台机器,当机器被占用时,后续到来的产品只能排队不能被加工,source 是上料源,可以调节其上料速度, sink 是成品库,所有完成加工的产品都储存在此。由于 OP10 和 OP80 使用同一台机器,故二者资源共享。对于每个工序的加工时间,因实际加工中具有一定的随机性,设置其加工时间服从正太分布,如图 5 所示,OP10 的加工时间服从正太分布  $N(14, 0.9)$ 。

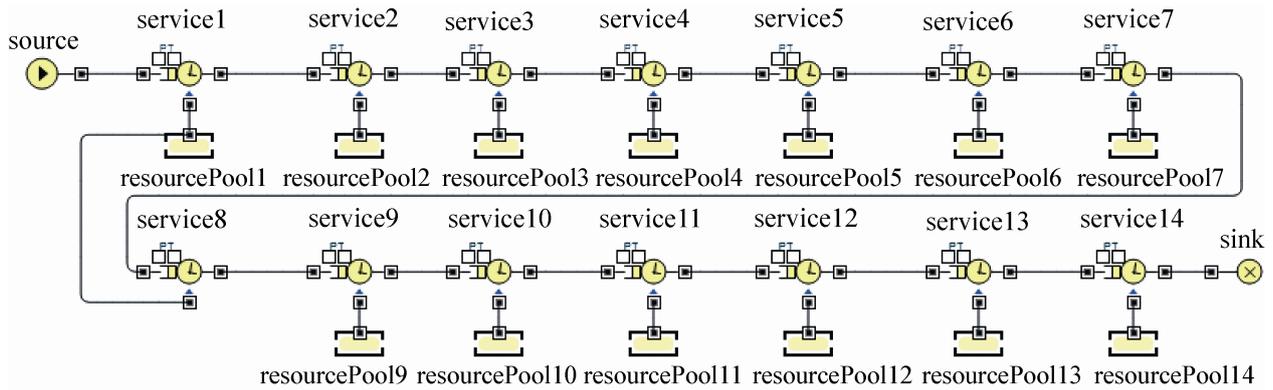


图 4 AnyLogic 仿真软件搭建的仿真模型  
Fig.4 Simulation Model using Anylogic

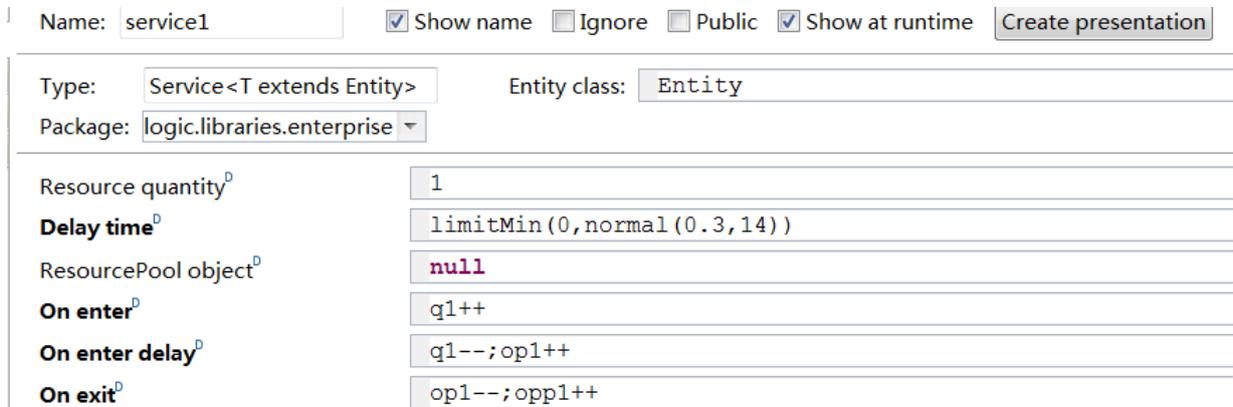


图 5 AnyLogic 仿真软件对工序 OP10 的参数设计  
Fig. 5 Parameter design of OP10 using Anylogic

On enter 等是在触发进入排队时执行的代码, 是对变量的一个计数, 在该仿真程序中有的变量, 如图 6 所示。

- v q1 v op1 v opp1 v r1
- v q2 v op2 v opp2 v r2
- v q3 v op3 v opp3 v r3
- v q4 v op4 v opp4 v r4
- v q5 v op5 v opp5 v r5
- v q6 v op6 v opp6 v r6
- v q7 v op7 v opp7 v r7
- v q8 v op8 v opp8 v r8
- v q9 v op9 v opp9 v r9
- v q10 v op10 v opp10 v r10
- v q11 v op11 v opp11 v r11
- v q12 v op12 v opp12 v r12
- v q13 v op13 v opp13 v r13
- v q14 v op14 v opp14 v r14
- v Interarrival

图 6 模型中的变量  
Fig. 6 Variables in Model

图 6 中: q1~q14 为各排队队长; op1~op14 为各工序正在加工的工件数目; opp1~opp14 为各工序已经加工号的工件数目; r1~r14 为各工序拥有的机器数目; interarrival 为上料的时间间隔。

在本章的仿真中, 对上述变量做了统计, 并使用图表的方式进行显示, 有队长图统计图和利用率统计图, 分别对个工序的队长和时间利用率进行统计及实时显示, 如图 7 所示。

另外还有在制品数量时间图, 统计每个时间正在加工的产品数量, 还有生产速率图, 显示的是每小时产出速率, 如图 8 所示。

可以发现该模型可以较好的表示汽车连杆生产线的生产过程, 且可以对过程中的数据做统计并分析。

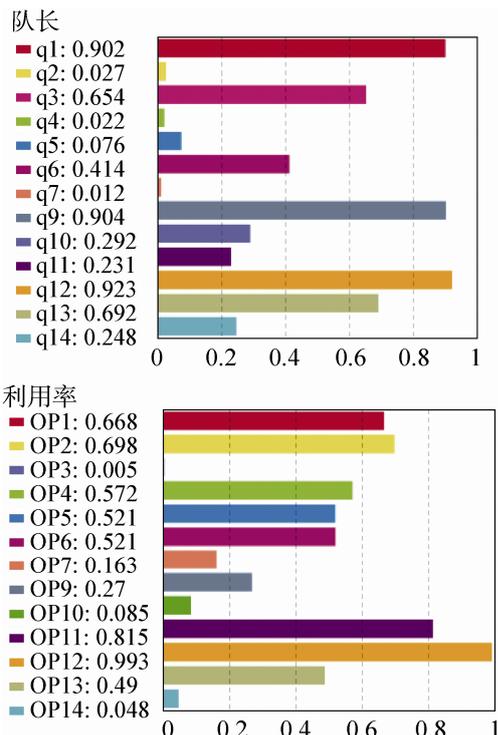


图7 模型中对队长和利用率的分析图  
Fig. 7 Analysis of captain and utilization in the model

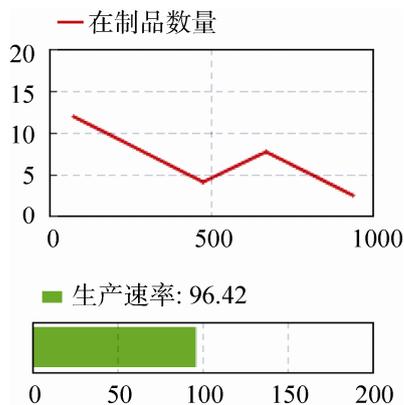


图8 模型中对在制品数量和生产速率的分析图  
Fig. 8 Analysis of the number of manufactured products and production rate in the model

### 3 仿真结果分析

首先对各工序均只有一台机器进行仿真,此时的生产瓶颈应该为 OP20、OP30、OP90 和 OP100,这四道工序均需要 45 s,此时的生产线平衡率为:

$$P = \frac{\sum_{j=1}^n T_j}{m \times \max(T_j)} \times 100\% = \frac{341}{13 \times 45} = 58.29\%$$

仿真结果统计如表 2 所示。

表 2 平衡前仿真结果统计

Tab. 2 Simulation result before balancing			
上料时间 间隔/s	生产速率/ (支/h)	排队现象	利用率
50	69	无	低, 不均衡
45	77	无	高, 不均衡
40	77	有	高, 不均衡

可见当上料间隔为 50 s 时,生产并未出现堵塞,生产过程均为出现排队现象,但利用率不是很高,总产量 193 支,生产速率为 69 支/h,可以发现其生产利用率不高,还有可扩充空间,产量还有提升空间。当将上料间隔改为 44 s 时,总产量增加,为 214 支,生产速率也提升为 77 支/h,此时无排队现象,但 OP20 的利用率以接近 100%,说明此时生产已经饱和。当再次减小上料间隔为 40 s 时,总产量依然为 214 支,生产速率为 77 支/h,但此时工序 OP20 出现严重排队现象,生产出现严重堵塞,可见生产饱和后即使减小上料间隔也无法提高产量,此时只能通过改进生产线来提高产量。

从上述数据可以发现该生产线利用率不均衡、生产线平衡率较低,有提升空间,可以通过增加机器来提高生产线平衡率,同时提高产量。我通过一个 MATLAB 的小程序计算了增加不同数量的机器,生产线平衡率和生产瓶颈工序用时的变化情况,程序中采用的策略为,每增加一台机器均增加在瓶颈处,图 9 为结果图。

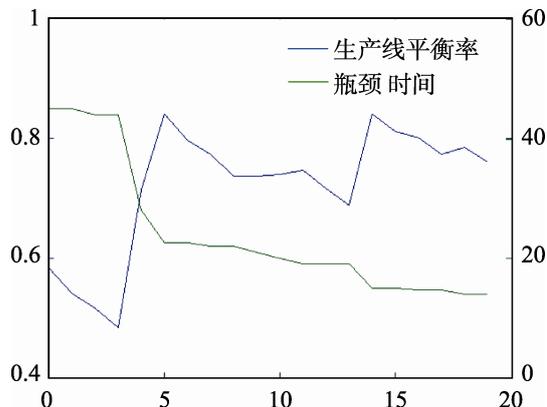


图9 MATLAB 的优化结果  
Fig. 9 Optimization Result by MATLAB

可见当增加的机器数为 5 台和 13 台时,生产

线平衡率最高, 机器数增加到 5 台以后瓶颈时间的减少也不是很明显, 且增加的机器数越多, 成本也越高, 将不很划算, 所以最佳的结果为增加机器 5 台, 分别给工序 OP10、OP20、OP30、OP90、OP100 各增加一台, 然而由于实际客观原因, OP10 不能再增加机器, 只能有一台, 故最后结果为只增加 4 台, 给工序 OP20、OP30、OP90、OP100 各增加一台, 此时的瓶颈工序为 OP10 和 OP80 公用的工序, 时间为  $14+14=28$  s, 生产线平衡率为:

$$P = \frac{\sum_{j=1}^n T_j}{m \times \max(T_j)} \times 100\% = \frac{341}{17 \times 28} = 71.64\%$$

优化后的生产线平衡率有了较大的提高, 接下来对优化后生产线进行仿真, 结果如表 3 所示。

表 3 平衡后仿真结果统计  
Tab. 3 Simulation result after balancing

上料时间 间隔/s	生产速率/ (支/h)	排队现象	利用率
30	115	无	低, 较均衡
28	123	无	高, 较均衡
20	123	有	高, 较均衡

当上料间隔为 30 s 时, 生产并未出现堵塞, 生产过程均为出现排队现象, 但利用率不是很高, 总产量 321 支, 生产速率为 115 支/h, 可以发现其生产利用率不高, 还有可扩充空间, 产量还有提升空间。当将上料间隔改为 28 s 时, 总产量增加, 为 344 支, 生产速率也提升为 123 支/h, 此时无排队现象, 但 OP10 的利用率以接近 100%, 说明此时生产已经饱和。当再次减小上料间隔为 20 s 时, 总产量依然为 344 支, 生产速率为 123 支/h, 但此时工序 OP10 出现严重排队现象, 生产出现严重堵塞, 可见生产饱和后即使减小上料间隔也无法提高产量。不过这样总的产量较未优化前生产线的产量有了较大提高, 且利用率也较为均衡, 生产线平衡率提高也较多。

## 4 结论

生产线平衡是评价生产线优劣的一个重要指标, 优化生产线的其中一个目标就是优化生产线平

衡率, 此问题就是生产线平衡问题。本文主要利用计算机仿真的方法对生产线平衡问题进行了研究, 以求得生产线的最佳优化方案。本文的主要工作内容如下:

1、对于实际汽车连杆生产线的基于离散事件系统的建模

达成了对实际汽车连杆生产线的基于离散事件系统仿真的建模, 并在 AnyLogic 中搭建了仿真模型。模型与实际生产线相符合, 可以有效的表示生产过程。

2、对于实际汽车连杆生产线的基于离散事件系统的仿真

生产线问题符合典型的离散事件系统仿真模型, 应用离散事件系统仿真对生产线进行了仿真, 统计了相关数据, 分析了其瓶颈工序, 找出了待优化点。

3、对于实际汽车连杆生产线进行优化并仿真验证

利用 MATLAB 小程序对生产线进行优化, 求出最优解, 并再次进行仿真验证。得出结果: 在一定范围内, 增加瓶颈工序的工位数量, 可以降低瓶颈时间, 也可提高生产线平衡率。

## 参考文献:

- [1] 冯袁. 汽车零部件生产线平衡建模与仿真技术[D]. 北京: 清华大学, 2012.  
Feng Yuan. Balancing Modeling and Simulation Technology of Auto Parts Production[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [2] 陈诚和. 基于仿真优化的制造企业生产线平衡问题研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.  
Chen Chenghe. Research on Line Balancing Problem of Manufacturing Enterprises Based on Simulation Optimization[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007.
- [3] 李华. 基于 eM-Plant 的汽车焊装生产线仿真与优化技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.  
Li Hua. Modeling and Simulation of Car welding Process Based on eM-Plant[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

(下转第 3376 页)

<http://www.china-simulation.com>

• 3365 •