

# 基于 FlexSim 的制造业生产线平衡优化与仿真

高明晶

(大连东软信息学院信息与商务管理学院, 辽宁 大连 116023)

✉ gaomingjing@neusoft.edu.cn



**摘要:** 随着市场需求的不断增长,人工成本日益增高,中小型制造企业受资金、技术等因素的影响,无法及时开展生产方式的转型,在行业中的竞争力较弱。文章从中小型制造企业生产线平衡率偏低的问题着手,对 S 公司的生产线进行系统化分析,结合 FlexSim 仿真方法评估其生产线存在的问题,并提出生产线平衡优化的改进方案。对比分析仿真前后的效果数据发现,S 公司生产线的平衡率提升了 21.9 个百分点,解决了该企业生产线不平衡的问题,文章的研究有助于推进制造企业物流流程和生产工艺流程实现进一步优化。

**关键词:** 生产线;平衡优化;FlexSim;仿真

**中图分类号:** TP278 **文献标志码:** A

## Optimization and Simulation of Manufacturing Production Line Balance Based on FlexSim

GAO Mingjing

(School of Information and Business Management, Dalian Neusoft University of Information, Dalian 116023, China)

✉ gaomingjing@neusoft.edu.cn

**Abstract:** With the continuous growth of market demand and increasing labor costs, small and medium-sized manufacturing enterprises are unable to carry out the transformation of production mode in time due to the capital, the technology and other factors, and their competitiveness in the industry is weak. Starting from the problem of low balance rate of production line in small and medium-sized manufacturing enterprises, the paper proposes to systematically analyze the production line of S company, evaluate the problems of its production line with Flexsim simulation method, and propose the improvement plan for optimizing the balance of production line. Comparing and analyzing the effect data before and after the simulation, it is found that the balance rate of production line of S company has been improved by 21.9 percentage points, which solves the problem of imbalance of production line in the enterprise. The proposed research helps to furtherly optimize the logistic and production process of the manufacturing enterprises.

**Key words:** production line; balance optimization; FlexSim; simulation

### 0 引言 (Introduction)

在数字经济背景下,新一代信息技术以及人工智能技术的发展,为我国制造业的转型升级、可持续性发展带来新的机遇

与挑战<sup>[1]</sup>。然而,在新一轮科技革命大背景下,制造企业尤其是中小型制造企业面临技术创新、产品迭代、产业周期不断提速的严峻竞争形势,传统的生产经营模式和技术手段已经不能

适应企业发展的要求<sup>[2]</sup>。为保证制造业可持续发展,避免产业同构化、价值链低端化,应该对中小型制造企业给予更多的关注和帮助,使其尽快突破自身瓶颈,获得更好的社会效益和经济效益<sup>[3-4]</sup>。

随着城镇化建设的不断推进,铝合金门窗产品已经成为我国建筑门窗产品中市场份额占比较大的一个门类,高达55%<sup>[5]</sup>。然而,我国的铝合金门窗制造业因为发展时间短、入门门槛低,所以中小企业的占比偏高。很多中小企业的生产线利用率不高,无法达到规模化生产,产品收益率较低<sup>[6]</sup>。因此,本文以S公司为例,针对其生产线平衡率偏低的问题,利用仿真建模工具 FlexSim 对 S 公司的生产线布局进行重新规划,对生产线的瓶颈工序进行分析,结合研究结果提出一套适合中小企业的低成本、高效率的生产线改进方案,以期提升中小企业在行业中的竞争力和收益。

### 1 现状分析(Current situation analysis)

S 公司经营业务范围为专业承包金属门窗工程、批量定制金属门窗,生产的产品类型主要为普通铝合金门窗、断桥式铝合金门窗,以及批量定制各种尺寸的铝合金门窗。生产流程包括原材料分割、缺口切割、组装 3 个工序,共有取料、切割、冲孔、安装密封条、铣角、组角、打包 7 个步骤。

作业时间是用来核算生产线平衡率的重要数据,本文采用秒表测时法对定制门窗生产线的各工序进行测时<sup>[7]</sup>。由于 S 公司是按照订单进行分批生产,因此作业时间测定以一批产品(4 个窗框成品不包含窗户及玻璃)的成型为周期进行测量。标准时间的计算公式为<sup>[8]</sup>

$$\text{正常时间} = \text{观测时间} \times \text{评定系数} \quad (1)$$

$$\text{标准时间} = \text{正常时间} \times (1 + \text{放宽率}) \times (1 + \text{评定系数}) \quad (2)$$

对 S 公司生产线各工序的工时实测数据进行计算,计算公式如公式(1)和公式(2)所示。考虑到操作员的心理和生理因素以及机械故障等因素,对测量的时间进行放宽处理,放宽率定为 5%;评定系数采用西屋法(也称平准化法)获得,通过工作环境、作业一致性、努力度、熟练度等指标对操作员的作业状况进行等级评价<sup>[9]</sup>,并计算出相应系数,最后计算出评定系数为 1.21。标准作业时间计算结果见表 1。

表 1 标准作业时间计算结果

Tab.1 Results of standard operating time calculations

工序名称	序号	操作名称	工位 数/个	正常 时间/s	标准作业 时间/s
切割原材料	1	提取铝合金方管原材料	2	763.5	824.6
	2	将铝合金方管放至切割机	2	113.7	119.4
	3	切割铝合金方管	2	222.6	227.1
	4	取出切割好的方管	2	90.8	96.2
	5	将方管放至推车	2	320.7	343.1

续表

工序名称	序号	操作名称	工位 数/个	正常 时间/s	标准作业 时间/s
对铝合金方管 打孔	6	将放有方管的推车推至工位	6	164.6	174.4
	7	测量冲孔位置	6	591.7	633.1
	8	对方管打孔	6	487.6	497.4
	9	取下方管放至推车	6	82.3	88.0
切割铝 合金方 管斜角	10	将放有方管的推车推至工位	2	240.8	260.1
	12	将方管放到铣床上	2	234.7	246.5
	13	打开铣床开关	2	88.3	91.0
	14	切割方管斜角	2	496.1	515.9
	15	拿出方管	2	330.3	340.2
	16	将方管放至推车	2	69.0	74.5
组装铝 合金窗 框	17	将放有方管的推车推至工位	1	163.4	174.8
	18	将方管放至操作台	1	295.2	315.9
	19	提取角码	1	255.3	275.7
打包	20	提取螺丝	1	348.8	415.6
	21	用螺丝组装窗框	1	1 010.4	1 091.2
	22	用薄膜打包成品	1	179.0	179.0

根据生产线平衡率计算公式(3),计算得到 S 公司的生产线平衡率为 62.3%,平衡损失率为 37.7%,没有达到生产线平衡率的最低标准(70%),说明 S 公司的生产线存在作业时间浪费、各工序之间配合不协调等问题,生产效率有较大的提升空间。

$$\text{生产线平衡率} = \frac{\text{所有工序时间总和}}{\text{工位数} \times \text{生产节拍}} \times 100\% \quad (3)$$

本文利用 FlexSim 仿真软件对 S 公司生产线进行仿真模拟,通过分析模型运行情况,找出瓶颈工序或导致生产线平衡率低的原因。建立以 S 公司生产线实际布局为依据的 FlexSim 仿真模型,对模型中的相应数据进行分析,同时在建立模型前对其做出一些假设:不考虑机械故障,员工只负责其工作范围内的工作内容。图 1 为 S 公司生产线实际布局仿真模型。

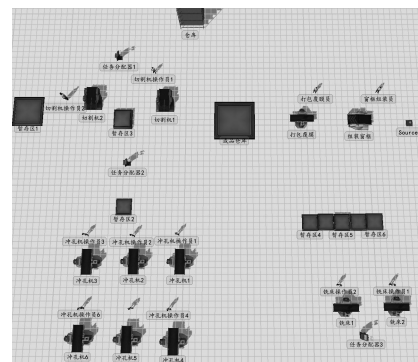


图 1 S 公司生产线实际布局仿真模型

Fig. 1 Simulation model for the actual layout of S company's production line

通过对模型的运行结果进行分析,发现 S 公司的铝合金窗生产线主要存在如下问题:生产线设备利用率低,生产线设备设施布置不合理,以及员工空载移动距离较大等。切割机操作员搬运半成品的时间占该道工序完整生产时间的 79.66%,说明设施布置不够合理;冲孔机操作员的空闲时间比率接近 70%,而冲孔工序是整条生产线中加工时间最短、作业强度最低的工序,说明存在工位浪费的情况;生产线中各工位的生产设备利用率大部分都低于 25%,冲孔工序的生产设备以及铣床设备的空闲时间比率普遍高于其他工序生产设备的空闲时间比率,但其空闲时间比率均在 70%以上;打包覆膜工序因为需要等待窗框的成品产出,故其空闲时间比率不在研究范围内;窗框组装工序的生产负荷最大,操作员的空闲时间仅占整个工序时间的 5.30%;暂存区中存在因半成品堆积而不能及时进行下一步生产工序的问题。通过数据分析发现,S 公司的生产线存在设备资源利用不充分,设备资源过剩,以及不同工位和设备之间生产负荷不平衡等问题。分析 Dashboard 记录的各类数据发现,生产线中存在瓶颈工位。针对以上问题,可以通过布局优化、生产线平衡优化解决,进而提升生产线平衡率。表 2 和表 3 为设备运行状态数据和操作员工作状态数据。

表 2 设备运行状态数据

Tab.2 Equipment operation status data

工序名称	输入/批	输出/批	平均停留时间/s	等待操作员的的时间/s	空闲时间比率/%	处理时间比率/%
切割机 1	315	313	113.00	1 121.56	30.13	11.25
切割机 2	469	468	73.07	1 240.82	33.44	14.75
冲孔机 1	102	101	75.33	1 450.60	82.73	7.81
冲孔机 2	105	105	70.12	1 297.81	82.90	8.04
冲孔机 3	109	109	68.84	1 566.78	82.65	7.93
冲孔机 4	86	86	92.75	2 132.02	83.67	8.42
冲孔机 5	87	86	87.43	1 909.29	83.17	9.51
冲孔机 6	88	88	82.18	2 020.43	82.15	9.73
铣床 1	196	196	32.56	572.69	70.84	15.06
铣床 2	195	195	29.81	1 160.26	49.21	14.37
窗框组装	130	129	99.42	0.00	0.24	50.16
打包覆膜	12	12	191.02	138.19	75.02	23.86
成品仓库	12	0	0.00	0.00	0.00	0.00

表 3 操作员工作状态数据

Tab.3 Operator's work status data

对应工序操作员	输入/批	输出/批	平均停留时间/s	空闲时间/s	空闲时间比率/%	空载行进时间/%	负载行进时间/%	操作时间比率/%
切割机操作员 1	313	313	25.57	174.33	5.13	37.34	42.07	10.25

续表

对应工序操作员	输入/批	输出/批	平均停留时间/s	空闲时间/s	空闲时间比率/%	空载行进时间/%	负载行进时间/%	操作时间比率/%
切割机操作员 2	468	467	16.36	165.94	0.92	37.89	42.02	12.38
冲孔机操作员 1	192	191	38.55	1 494.31	64.85	10.21	13.58	13.07
冲孔机操作员 2	202	202	37.59	1 669.19	65.45	10.17	13.60	12.67
冲孔机操作员 3	198	197	37.46	2 117.32	67.84	10.14	12.87	11.72
冲孔机操作员 4	187	186	44.42	1 808.48	69.16	10.14	12.84	12.13
冲孔机操作员 5	196	196	44.84	2 000.71	70.03	10.12	12.85	11.22
冲孔机操作员 6	178	178	43.84	3 208.75	70.45	10.09	12.87	10.46
铣床操作员 1	384	383	19.32	1 461.41	11.58	47.76	13.33	10.70
铣床操作员 2	399	398	18.81	545.31	12.06	47.84	13.31	10.30
打包员	12	11.26	1.00	0.00	74.71	0.98	0.32	23.72
窗框组装员	129	8.39	22.00	0.00	5.30	10.22	10.21	58.31

## 2 改进方案设计 (Improvement plan design)

### 2.1 瓶颈工位人机操作分析

基于实地调研及软件仿真模拟的结果,最终发现 3 个瓶颈工位:冲孔机工位、铣床工位、窗框组装工位,这 3 个瓶颈工位对生产线的生产效率的提升造成了很大的阻碍,并且增加了公司的生产成本;根据调研和模拟结果对冲孔机工位、铣床工位、窗框组装工位进行进一步分析,以便对生产线中的瓶颈工位设计进行改善。

#### (1) 冲孔机工位

冲孔机工位共有 6 台冲孔机,每台冲孔机都能完成打孔这一生产工序中所需的操作,根据仿真建模分析的结果可以看出,冲孔机工位的空闲时间比率是生产线所有工序中最高的,而铣床与冲孔机之间的在制品缓存区中堆积的在制品数量也是最多的,缓存区的平均等待时间为 8 026.71 s,说明铣床与冲孔机之间的加工效率不匹配,同时有 2 名冲孔机操作员空闲时间过高,空闲时间比率最高达到 70.45%,说明冲孔机工位的产能过剩,有近一半的操作员因无法分得足够的在制品而无法实现高效率生产。

#### (2) 铣床工位

冲孔机到铣床之间的距离为 24 m,是生产线中搬运距离最长的一道工序,在铣床工位的整个加工时间中,除铣床对在制品进行加工的时间外,操作员从铣床到缓存区提取在制品的

时间是整个加工时间中最长的,占整个加工时间的 47.80%,操作在生产加工过程中需要消耗大量的时间用于提取在制品,严重影响铣床工序的整体生产加工效率,降低了生产线的整体生产效率。

(3)窗框组装机位

窗框组装机位工序的平均完成时间为 13.9 min,操作员仅有 1 人,加工内容为用角码和螺丝将铝合金半成品拼接组装成铝合金窗框成品,从仿真模拟结果中可以看到,操作员进行窗框组装操作的时间占总操作时间的 58.31%,同时操作员的空闲时间仅占总工序完成时间的 5.30%,高负荷的工作量对操作员的生理和心理形成较大的压力,同时高强度和长时间的重复操作,容易使操作员感到疲劳而逐渐失去工作动力,这一问题对生产线的效率产生了很大的影响。

2.2 瓶颈工位改进方案

针对上述瓶颈工位存在的问题,依据 S 公司对生产线优化的期望,以低成本快速高效地达到生产线优化的目标,本文提出生产线瓶颈工位优化方案,优化后的生产线设备布局如图 2 所示。

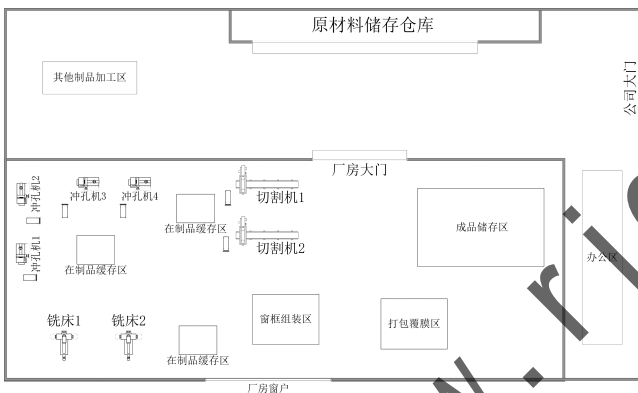


图 2 优化后的生产线布局  
Fig. 2 Optimized production line layout

首先对整个生产线的设备布局进行调整,考虑到操作员的惯用手为右手,进行生产制造时,生产线设备的摆放顺序应该为逆时针旋转,便于操作员操作设备和对在制品进行加工、搬运;将第一道工序的两台切割器调至厂房大门的左侧,相距 1.5 m 并列摆放;在制品缓存区为长 3 m、宽 2 m 的方形区域,位于切割器左侧,介于切割器与冲孔机;将第一个瓶颈工位(冲孔机工位)从厂房中间调至厂房左上侧,并将产能过剩的设备撤除两台,剩余每台冲孔机相距 1.5 m 摆放;将铣床工位的两台铣床调整至厂房左下侧的位置,同一横行相距 1.5 m 靠墙摆放,降低铣床工位操作员的物流强度,提高其生产加工效率,铣床工位的在制品缓存区调整至铣床右侧,介于铣床工位与窗框组装机位,操作区域长 2 m、宽 2 m;将窗框组装机位调整到厂房中下侧,位于切割器的对侧并靠近墙,留出足够的安全通道,整个操作区域长 6 m、宽 5 m,同时在该工位安排两位操作员;

打包覆膜工位位于厂房大门右侧,靠近窗户的位置,整个操作区面积与窗框组装机位相同,由 2 名操作员完成该道工序,同时负责将产成品搬运至成品储存区,并负责成品储存区的成品摆放及位置规划。以上为 S 公司的铝合金钢窗生产线优化方案,下文对该方案的可行性及优化效果进行仿真模拟和分析。

3 优化效果评价(Optimization effect evaluation)

优化仿真模型后,运行模型,表 4 和表 5 为生产线优化后的设备运行状态数据、操作员工作状态数据。

表 4 生产线优化后设备运行状态数据

Tab.4 Equipment operation status data after production line optimization

工序名称	输入 /批	输出 /批	平均停留时间/s	等待操作员的空闲时间/s	空闲时间比率/%	处理时间比率/%
切割机 1	911	911	19.89	144.71	38.51	40.11
切割机 2	758	757	19.17	241.58	43.63	41.02
冲孔机 1	366	365	21.55	947.19	45.02	37.52
冲孔机 2	311	310	25.41	656.51	49.33	34.85
冲孔机 3	291	291	23.83	415.79	52.76	34.12
冲孔机 4	277	276	25.12	378.79	53.62	32.91
铣床 1	485	485	25.87	2 169.08	29.91	55.14
铣床 2	503	502	24.99	1 801.88	30.03	55.74
窗框组装	460	459	38.59	5.56	0.00	100.00
打包覆膜	66	66	134.27	528.99	49.22	46.63
成品仓库	66	0	0.00	0.00	0.00	0.00

表 5 生产线优化后操作员工作状态数据

Tab.5 Work status data of operators after production line optimization

对应工序操作员	输入 /批	输出 /批	平均停留时间 /s	空闲时间 /s	空闲时间比率 /%	空载行进时间 /%	负载行进时间 /%	操作时间比率 /%
切割机操作员 1	1 128	1127	6.46	1 368.97	8.72	21.38	23.16	36.26
切割机操作员 2	961	961	6.73	1 894.16	10.14	20.45	22.35	37.87
冲孔机操作员 1	678	678	6.95	1 899.43	10.13	19.46	22.39	38.97
冲孔机操作员 2	658	658	7.03	2 410.56	13.95	19.45	22.41	36.33
冲孔机操作员 3	597	596	7.28	3 912.85	22.54	19.45	22.53	31.25
冲孔机操作员 4	555	555	7.92	5 143.22	29.27	19.43	22.66	28.33
铣床操作员 1	661	661	5.10	3 917.08	21.73	20.08	15.69	40.00

续表

对应 工序 操作员	输入 /批	输出 /批	平均停 留时间 /s	空闲 时间 /s	空闲时 间比率 /%	空载行 进时间 /%	负载行 进时间 /%	操作时 间比率 /%
铣床 操作员 2	560	560	4.49	2 685.65	15.02	15.96	11.22	51.25
窗框 组装员	257	257	13.38	5 537.91	29.01	7.96	8.55	50.04
打包员	66	66	8.15	8 600.44	43.14	3.45	2.07	47.23

对比优化后的仿真模型设备运行状态与优化前的设备运行状态数据发现,在相同的模型运行时间内,切割机工序的处理时间比率由均值 13.00% 增加至均值 40.57%,效率明显提升,切割机的空闲时间增加,在制品等待运输的时间明显减少,切割机操作员搬运原材料及半成品的时间(空载行进时间+负载行进时间)占比从均值 79.66% 下降至均值 43.67%;冲孔机工序的空闲时间比率明显下降,由均值 82.88% 下降至均值 50.18%,此工序产能过剩的现状得到一定程度的缓解;铣床操作员的物流强度显著下降,占比由 61.12% 减少到 31.61%,空闲时间比率也比较合理,铣床工位的生产率也有所提高;窗框组装员的空闲时间比率增加至 29.01%,有效降低了操作员的作业强度,缓解了操作员的工作压力;除冲孔机工位的物流强度增长外,其他工位的物流强度都有明显降低;各工序设备的加工时间均增加,相同时间内产出的铝合金窗框成品数量更多。

通过对比仿真模拟前后的数据得到以下结论:减少冲孔机设备的数量,能提升冲孔工序的整体生产效率,处理时间比率由均值 8.57% 提升至均值 34.85%;变动最大的铣床工序,其与冲孔机之间的距离由 24 m 缩小为 5.2 m,大幅度降低了操作员的物流强度,铣床工序生产效率提升了 40.72 个百分点;铣床操作员单位时间内需要处理的原材料数量增加,虽然增大了操作员的作业强度,但操作员的空闲时间分别由仿真前的 1 461.41 s 和 545.31 s 增加到仿真后的 3 917.08 s 和 2 685.65 s;整个生产线中改善效果最好的为窗框组装工序,前序工位的效率提高,使得窗框组装工序能更快地获得窗框半成品,整个工序中平均停留时间减少了 60.83 s,同时操作员的空闲时间也从几乎没有,增加到 5 537.91 s,占该工序生产时间的 29.01%,在提升生产效率的同时,大幅度降低了操作员的作业强度。

进行生产线平衡优化后,经计算生产线平衡率达到 84.2%,与优化前相比提升了 21.9 百分点,改善后的损失时间为 15.8 s。可以看出,S公司的生产线的整体生产效率有明显的提升,减少了大量时间成本的浪费。

## 4 结论(Conclusion)

本文基于 S 公司生产线的相关数据,利用 FlexSim 仿真软件对其生产线进行仿真模拟,找到生产线中存在的问题和瓶颈工位,结合造成瓶颈工序的原因,对生产线进行重新布局规划,并利用软件中数据收集功能,将优化前的数据和优化后的数据进行对比,分析生产线的优化效果并进行评价。优化后的生产线的布局更加合理,减少了作业时间的浪费和操作员不必要的移动距离。生产线平衡优化的效果主要体现在各工位效率的提高上,生产线平衡率由最初的 62.3% 提升至 84.2%,单位时间内加工生产的在制品及产成品数量增加,生产效率明显提高。本文通过对 S 公司生产线的优化,改善其生产线存在的问题,对生产线中产能过剩的工位进行调整,平衡了作业分配,也为其他同类企业开展生产线优化提供了思路。

## 参考文献(References)

- [1] 陈文玲. 2023 年中国经济将有五个“明显回升”[J]. 中国集体经济,2023(6):8-10.
- [2] 高明晶,徐扬. 供应链绿色创新系统影响机制仿真研究:基于数字化投入视角[J]. 物流科技,2023,46(8):112-116.
- [3] 张善亮,惠朋,李晔. 数字技术与中小制造企业绩效:信息共享的中介作用[J]. 科学与管理,2023,43(3):21-30.
- [4] 彭红霞. 中小企业数字化转型研究:基于 A 电机公司数字化车间案例[J]. 市场周刊,2022,35(12):5-8.
- [5] 唐昇阳,魏娟,苏海鹏. 超高层住宅铝合金门窗副框安装质量控制措施的分析[J]. 工程建设与设计,2022(18):176-178.
- [6] 郭全杰. 基于数字化工厂的铝合金门窗混流生产线仿真与优化[D]. 济南:山东大学,2015.
- [7] 贾江鸣,郭丽兵,陈建能,等. 基于遗传算法的门板成型生产线平衡优化及其试验[J]. 制造业自动化,2022,44(7):102-106.
- [8] 安冬梅. 航空标准件企业 M 公司单元生产线布局规划及仿真研究[D]. 重庆:重庆大学,2017.
- [9] 谭岐钰,张红波,高贵兵. 基于人员调度优化的混流生产线平衡改善[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(2):52-59.

## 作者简介:

高明晶(1990-),女,硕士,副教授。研究领域:制造业绿色创新,系统仿真。