

面向装配节点平衡的产品生产物流协调优化研究

张 正, 方志梅*, 周亚申

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 在由多个并行零件生产线和装配线组成的产品生产物流中, 各生产线的瓶颈工序制约了装配节点及其整个生产物流的平衡. 为此, 基于约束理论和 JIT(Just In Time)思想, 提出主、次瓶颈的概念及其判别方法和主瓶颈拉动次瓶颈、瓶颈前后拉动生产与平行顺序移动生产相结合的生产策略, 研究了基于负荷率的瓶颈工序负荷控制方法和主瓶颈触发次瓶颈拉式生产的时间控制方法, 使瓶颈工序利用率最大化, 各个零件到达装配节点的同步性得到改善. 算例的 SIMIO 仿真结果表明, 装配节点的在制品存量大幅度减少, 利用率提高.

关键词: 生产物流; 多瓶颈; 瓶颈负荷控制; 主次瓶颈协调; SIMIO 仿真

中图分类号: TH166

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2020) 03-0026-07

产品的生产物流一般是由多个并行的零件生产线和装配线组成, 每个零件的生产线都存在瓶颈工序, 且都不同程度地影响着装配节点的平衡和产品的产出, 造成生产系统不稳定. 因此, 面向装配节点, 对并行生产线的多个瓶颈采取负荷控制与协调运行具有现实意义.

目前, 生产物流平衡的研究主要集中在瓶颈工序的负荷控制与优化. 在瓶颈工序负荷控制方面, 如 Fernandes 等^[1]应用 WLC(Workload Control)方法对瓶颈工作中心进行工作量约束; 许一敏^[2]结合约束理论中的“鼓-缓冲-绳子”和输入输出控制思想中的漏斗模型对瓶颈工序进行在制品数量控制; Thüerer 等^[3]建立了瓶颈严重程度的仿真模型, 通过分析比较 DBR(Drum-Buffer-Rope)和 WLC 两种方法的有效性, 证明 WLC 的控制性能优于 DBR; Li 等^[4]提出初始缓冲区调整 and 任务优先级维护的方法, 减少了因瓶颈工序的停机而导致的产能损失; Hu 等^[5]提出一种动态在制品控制的方法, 保证瓶颈工序分配到更多的缓冲以及优先的调度顺序; 周宏明等^[6]提出了订单投放与瓶颈派工规则集成的车间负荷控制方法.

对于瓶颈工序的优化, Wang 等^[7]通过在瓶颈

工序和装配环节前设置缓冲区, 丘浩^[8]通过分析瓶颈工序与上下游工序生产节拍和库存的关系来确定缓冲区容量, 实现物流平衡; 范林胜等^[9]和高举红等^[10]通过增加瓶颈工序的设备和工人数、调整设备布局、合并闲置率高的工序来提高瓶颈工序的产能. 而在通过改进生产策略实现优化方面, 如蔺宇等^[11]和 Saranya 等^[12]引入看板管理, 在瓶颈工序和上游工序之间设置取货看板和生产看板, 形成拉动式的生产方式, 缓解了瓶颈工序的物料堆积; 张磊等^[13]基于瓶颈工序, 对组装线进行了生产线布局调整、流程改善和动作分析改善等综合性优化; Huang 等^[14]考虑了生产线中瓶颈因素对看板的影响, 通过优先增加瓶颈工序的看板数量和看板批量, 减少了瓶颈工序在制品到达量的变化和等待加工时间; 荆全忠等^[15]引入拉式生产系统, 实现瓶颈工序的自动化操作, 并通过增加瓶颈工序的设备和人员, 合并相邻时间过短的工序达到生产物流的平衡.

上述文献研究对象多集中于单条生产线的生产物流, 而现实企业中由于各零件并行生产线的生产时间和加工数量不同, 它们的瓶颈工序对整个产品生产物流的制约作用各不相同, 生产物流

收稿日期: 2019-10-29.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金(Y16G010004).

第一作者: 张正(1994-), 男, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 制造系统与制造模式. E-mail: 15968001682@163.com

*通信作者: 方志梅(1961-), 女, 浙江宁波人, 教授, 主要研究方向: 制造系统与制造模式. E-mail: fangzhi mei@nbu.edu.cn

平衡将更为复杂, 多条零件生产线交汇的装配节点成为其中的关键节点. 本文基于约束理论和 JIT 生产理念, 提出零件并行生产线主、次瓶颈的概念, 研究生产策略的优化和生产线之间的协调方法, 以实现装配节点及其整个产品生产物流的平衡.

1 产品生产物流装配节点的平衡策略

1.1 问题的提出

在实际生产中, 产品由多种零件组装而成, 其生产过程包括每种零件的生产环节和各零件的装配环节. 因此, 产品生产物流的结构是由多个并行零件生产线和成品装配线组成的并串联结构, 相应物流的结构如图 1 所示.

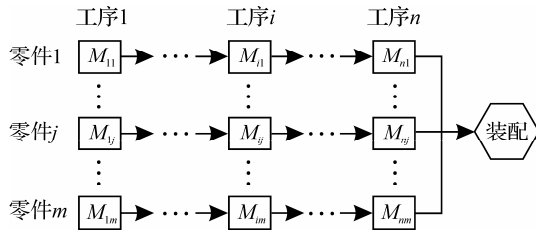


图 1 产品生产物流的结构

根据约束理论可知, 每个零件生产线都存在制约其产出量的瓶颈工序, 并且各生产线的生产时间不同, 到达装配节点的时间不一致, 造成装配节点的等待或堵塞. 可见, 产品生产物流的装配节点平衡须解决两大问题, 一是各个零件按产品装配的配比要求足量到达装配节点; 二是各个零件到达装配节点的时间差最小, 即尽可能同步到达.

1.2 装配节点平衡的协调解决方案

零件各并行生产线中的瓶颈工序对整个产品生产物流的制约能力各不相同, 应该区别控制且

相互协调. 为此提出主、次瓶颈的概念, 将制约能力最大的生产线上的瓶颈工序定义为主瓶颈, 其余生产线上的瓶颈工序则为次瓶颈.

为使装配节点获得足量的合格零件, 首先要确保各零件生产线的产出量, 而这取决于各生产线瓶颈工序的生产能力, 因此须对瓶颈工序进行负荷控制, 确保其利用率最大化. 同时, 基于 JIT 思想, 各生产线以瓶颈工序为基点, 上游采用拉动式生产, 由后工序向前工序要货, 拉动前工序生产; 下游采取平行顺序移动式生产, 由前工序推动后工序生产. 另外, 将生产计划作用于主瓶颈, 由主瓶颈控制其他次瓶颈的拉动式生产触发时间, 从而控制各零件生产线的生产进度, 使之与主瓶颈生产线保持协调, 实现各成品零件到达装配节点的同步. 图 2 即表示面向装配节点平衡的产品生产物流协调解决方案.

2 瓶颈工序及其主次关系的识别

2.1 生产线瓶颈工序识别

瓶颈工序可以根据各工序的瓶颈度进行判断. 瓶颈度通常用瓶颈指数来衡量, 瓶颈指数越大, 表示其成为瓶颈工序的可能性越大, 因此瓶颈指数最大的工序可以判定为该生产线的瓶颈工序. 根据文献[16]提出的瓶颈指数模型, 零件 j 生产线上工序 i 的瓶颈指数可表示为:

$$E_{ij} = \alpha \left(\frac{q_{ij} t_{ij}}{T_{ij}(1-\delta_{ij})} + \frac{p_{ij} t_{ij}}{T_{ij}(1-\delta_{ij}) - \Delta p_{ij}(t)} \right) + \beta f_Q(C_p) + \gamma \frac{V_{ij}}{q_{ij} z_{ij}}, \quad (1)$$

式中, q_{ij} 为实时生产数量 ($i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots$,

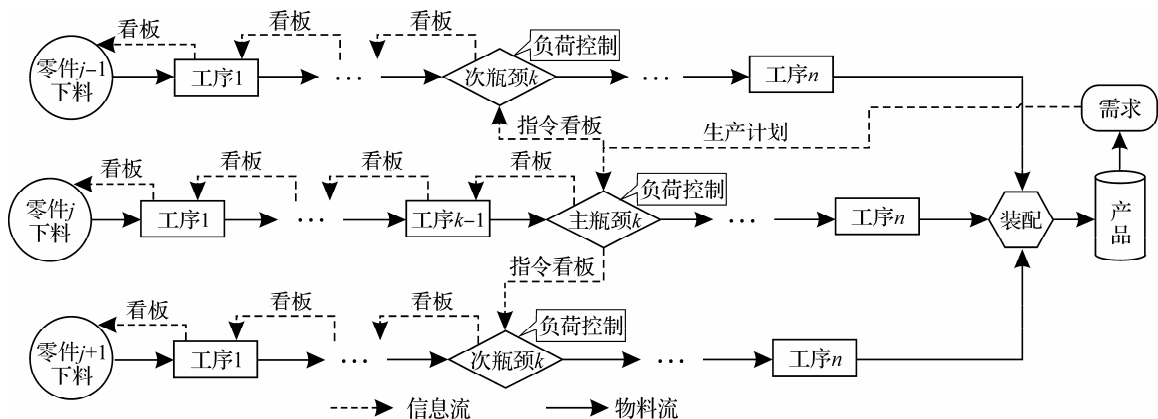


图 2 面向装配节点平衡的产品生产物流协调解决方案

m); t_{ij} 为平均单位工时; T_{ij} 为计划期内的可用生产时间; δ_{ij} 为设备故障率; p_{ij} 为报废品数量; $\Delta p_{ij}(t)$ 为该工序返修品的返修时间; $f_Q(C_p)$ 为合格产品质量特征的稳定程度; V_{ij} 为该工序前的实际等待时间; z_{ij} 为该工序前单位零件平均等待时间; α 、 β 和 γ 分别为权重系数.

2.2 并行生产线主、次瓶颈判别

2.2.1 产品生产物流装配节点平衡的影响因素

(1) 生产线零件的产出量. 对于零件 j 生产线而言, 其产出量取决于瓶颈工序 k 的产出量, 而且瓶颈工序 k 的瓶颈指数 E_{kj} 越大, 生产线成品零件的产出就越少, 供应给装配节点的零件也越少. 因此, 生产线瓶颈工序的瓶颈指数越大, 对产品装配节点平衡的影响就越大.

(2) 装配节点零件供应的及时性. 零件 j 生产线对装配节点的及时供应与两个因素有关, 一是生产时间 $T_{j,L}$ 、 $T_{j,L}$ 越长, 则零件 j 达到装配节点的时间越长; 二是装配节点对零件 j 的需求数量 s_j , 这与产品对零件 j 的需求数量相关. 如果生产时间 $T_{j,L}$ 越长, 或是需求数量 s_j 越多, 则零件 j 供应的及时率越低, 装配节点的等待时间越长, 对装配节点平衡的制约就越大.

2.2.2 装配节点影响指数

装配节点影响指数表示零件 j 生产线的瓶颈工序 k 对装配节点的影响程度, 用 $E_{kj,B}$ 表示. $E_{kj,B}$ 最大的生产线瓶颈工序为该产品生产物流的主瓶颈, 其他生产线上的瓶颈工序就是次瓶颈.

对于单个产品装配, 若对零件 j 的需求量为 s_j , 则零件 j 生产线的生产时间为 $T_{j,L} \cdot s_j$, 产品所有零件生产线生产时间的均值 $\overline{T_{j,L}}$ 算式如下:

$$\overline{T_{j,L}} = \left(\sum_{j=1}^m T_{j,L} \cdot s_j \right) / m. \quad (2)$$

根据前述装配节点平衡的影响因素分析, 装配节点影响指数可表示为:

$$E_{kj,B} = \frac{T_{j,L} \cdot s_j}{\overline{T_{j,L}}} \cdot E_{kj}, \quad (3)$$

式中, $\frac{T_{j,L} \cdot s_j}{\overline{T_{j,L}}}$ 为零件 j 生产线的供应及时率.

3 零件生产线瓶颈工序负荷控制

根据约束理论可知, 瓶颈工序的产出制约着

整个生产线的产出. 因此, 为确保生产线有足够的产出量, 就要尽可能地提高瓶颈工序的利用率, 使其负荷率接近满负荷.

负荷率与生产能力、生产负荷有关, 零件 j 生产线上瓶颈工序 k 的负荷率 η_{kj} 算式为^[16]:

$$\eta_{kj} = \frac{Q_{pkj} \cdot t_{kj}}{T_{kj}(1 - \delta_{kj})}, \quad (4)$$

式中, Q_{pkj} 表示瓶颈工序 k 前的在制品存量; t_{kj} 、 T_{kj} 、 δ_{kj} 与式(1)中含义相同, 且为确定值, 由此可得在制品量与负荷率的关系式(5)如下:

$$Q_{pkj} = \frac{\eta_{kj} \cdot T_{kj}(1 - \delta_{kj})}{t_{kj}}. \quad (5)$$

如果瓶颈工序 k 满负荷运行, 则其负荷率为 1, 对应的在制品数量算式如下:

$$Q_{pkj \max} = \frac{T_{kj}(1 - \delta_{kj})}{t_{kj}}. \quad (6)$$

当瓶颈工序 k 前的在制品存量达到与前道工序间的一个运输批量 Q_{tkj} 时, 工序须进行补货, 此时瓶颈工序 k 的负荷率最小, 算式如下:

$$\eta_{kj \min} = \frac{t_{kj}}{T_{kj}(1 - \delta_{kj})} \cdot (Q_{pkj \max} - Q_{tkj}). \quad (7)$$

据此, 瓶颈工序 k 的负荷率应控制在 $(\eta_{kj \min}, 1)$ 的区间内.

4 并行生产线主、次瓶颈间的协调控制

生产中, 主、次瓶颈所在生产线的生产时间各不相同, 为使各零件同步达到装配节点, 可利用各生产线的生产时间差, 由主瓶颈调节次瓶颈的生产进度. 假设主瓶颈生产线生产时间为 $T_{p,L}$, 次瓶颈生产线生产时间为 $T_{kj,L}$, 则其时间差算式为:

$$\Delta T_{kj,L} = T_{p,L} - T_{kj,L}, \quad (8)$$

其中, 主、次瓶颈生产线的生产时间算式为:

$$T_{p,L} = \left(\sum_{i=1}^n t_{ip} + \sum_{i=1}^{n-1} t_{ip,M} \right) \cdot s_p, \quad (9)$$

$$T_{kj,L} = \left(\sum_{i=1}^n t_{ij} + \sum_{i=1}^{n-1} t_{ij,M} \right) \cdot s_j, \quad (10)$$

式中, t_{ip} 、 t_{ij} 和 $t_{ip,M}$ 、 $t_{ij,M}$ 分别表示主瓶颈生产线、次瓶颈零件 j 生产线中的工序 i 平均单位工时和工序 i 到工序 $i+1$ 之间的运输时间; s_p 表示装配节点对主瓶颈生产线零件的需求数量.

若 $\Delta T_{kj,L} < 0$, 则次瓶颈工序相较于主瓶颈须

提前 $\Delta T_{kj,L}$ 向上游工序要货进行生产, 否则, 次瓶颈工序相较于主瓶颈延迟 $\Delta T_{kj,L}$ 向上游工序要货。

5 算例仿真分析

5.1 算例数据

某产品生产物流由3个零件生产线和1条装配线组成^[17], 如图3所示, 其中零件1生产线有4道工序—M1、M2、M3、M4, 零件2生产线有3道工序—M5、M6、M7, 零件3生产线只有1道工序—M8, 装配线有3道工序—M9、M10、M11, 装配节点M9对零件1、2、3的需求数量分别为2、1、1。生产过程中产生的返修品有专门的返修区返修。各工序的相关生产数据见表1。

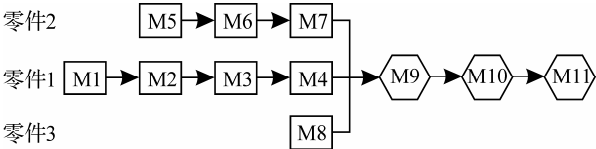


图3 产品生产物流结构图

表1 制造工序相关数据

工序	T_{ij}/min	$\delta_{ij}/\%$	$f_Q(C_p)$	t_{ij}/min	$q_{ij}/\text{个}$	$p_{ij}/\text{个}$	V_{ij}/min
M1	480	2	-	0.468	932	18	1.10
M2	480	3	1.24	0.528	898	25	1.65
M3	480	3	1.09	0.576	829	24	2.15
M4	480	4	1.31	0.300	828	33	0
M5	480	3	1.36	0.768	595	17	2.32
M6	480	2	1.02	0.648	595	12	0
M7	480	2	-	0.456	595	11	0
M8	480	3	0.93	1.074	394	12	2.33

5.2 协调优化的仿真建模

装配节点平衡的优化流程如图4所示。

5.2.1 主、次瓶颈判别

根据表1数据, 按照式(1)计算各工序的瓶颈指数, 从表2的计算结果可知, M3、M5、M8分别为3条生产线的瓶颈工序。再按照式(3)计算瓶颈工序的装配节点影响指数, 结果如表2, 可见M3为主瓶颈, M5、M8为次瓶颈。

5.2.2 建立装配节点平衡的仿真模型

借助于SIMIO仿真软件, 对图3的产品生产物流结构图建立装配节点平衡的仿真模型(图5), 图5中虚线用来区分上下2种生产物流。虚线以上是传统推动式的生产物流, 虚线以下则是采取本文

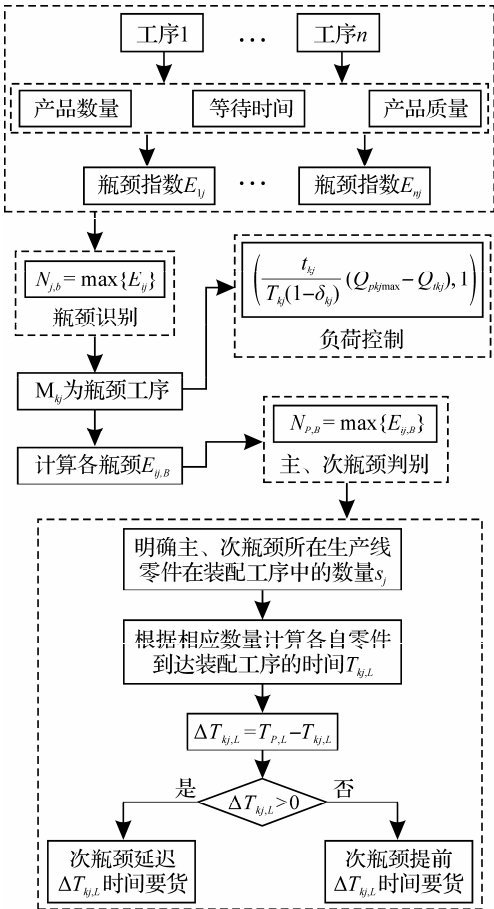


图4 装配节点平衡优化流程图

表2 各工序瓶颈指数及瓶颈工序装配节点影响指数

指数	工序			
	M1	M2	M3	M4
E_{ij}	1.709 3	1.085 2	1.796 2	0.469 4
$E_{kj,B}$	-	-	2.95	-

指数	工序			
	M5	M6	M7	M8
E_{ij}	1.174 5	0.896 3	0.567 5	1.638 0
$E_{kj,B}$	0.98	-	-	0.6

的优化解决方案的生产物流。

优化后3条生产线A1、A2、A3的瓶颈工序M3、M5、M8分别进行了负荷控制, 生产计划下达至主瓶颈工序M3, 并根据A1、A2、A3生产线的生产时间差, 控制M5和M8工序的开工时间, 在保持其他数据相同情况下, 设置订单到达表达式为 Exponential(0.56), 时间单位为分钟, 订单由Source1发出, 虚线以上的传统生产物流由各生产线的首道工序接收, 而虚线以下的优化生产物流

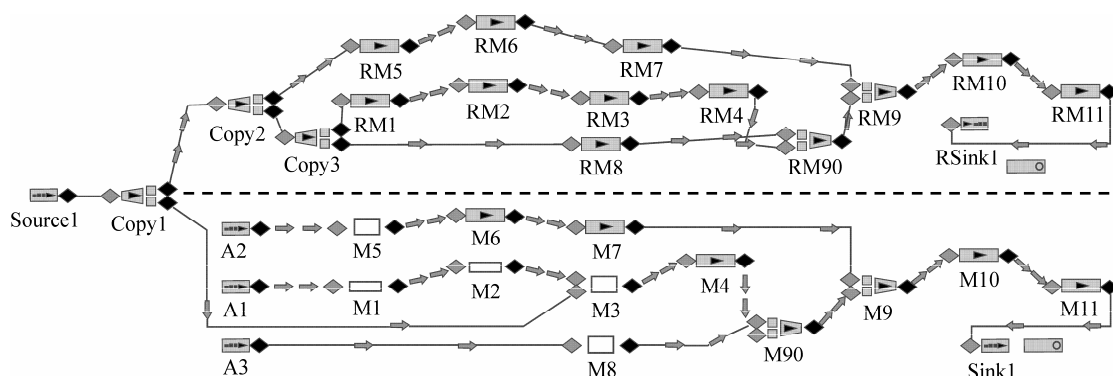


图5 仿真模拟优化图

Object Name ▲	Data Source ▲	Category ▲	Data Item ▲	Statistic ▲	Average	Minimum	Maximum	Half Width
RM9	[Resource]	Capacity	Scheduled Utilization	Percent	79.684 6	74.6890	81.2055	0.072 9
			Units Allocated	Total	409.470 0	384.000 0	417.000 0	0.375 5
	Parent Input Buffer	Content	Number in Station	Average	106.596 9	100.751 6	125.527 5	0.239 5
				maximum	211.539 0	202.000 0	238.000 0	0.371 2
RM3	[Resource]	Capacity	Scheduled Utilization	Percent	98.283 1	92.022 3	99.810 6	0.089 4
			Units Allocated	Total	820.968 0	770.000 0	836.000 0	0.748 9
	Input Buffer	Content	Number in Station	Average	14.537 1	1.892 1	36.456 8	0.486 5
				maximum	33.442 0	7.000 0	72.000 0	0.895 0
RM5	[Resource]	Capacity	Scheduled Utilization	Percent	99.875 9	98.451 8	100.000 0	0.012 6
			Units Allocated	Total	623.105 0	615.000 0	627.000 0	0.104 1
	Input Buffer	Content	Number in Station	Average	118.555 3	67.121 7	167.930 9	1.005 1
				maximum	237.044 0	157.000 0	326.000 0	1.758 5
RM8	[Resource]	Capacity	Scheduled Utilization	Percent	99.964 5	99.086 0	100.000 0	0.006 0
			Units Allocated	Total	446.819 0	442.000 0	448.000 0	0.046 7
	Input Buffer	Content	Number in Station	Average	206.377 1	155.950 2	256.593 3	1.015 4
				maximum	412.510 0	331.000 0	502.000 0	0.767 0

图6 原生产模式下装配节点及各瓶颈工序的数据图

Object Name ▲	Data Source ▲	Category ▲	Data Item ▲	Statistic ▲	Average	Minimum	Maximum	Half Width
M9	[Resource]	Capacity	Scheduled Utilization	Percent	85.817 8	80.312 0	87.615 1	0.078 6
			Units Allocated	Total	410.265 0	384.000 0	418.000 0	0.370 5
	Parent Input Buffer	Content	Number in Station	Average	4.430 4	4.375 0	4.566 4	0.001 8
				maximum	6.773 0	6.000 0	8.000 0	0.042 3
M3	[Resource]	Capacity	Scheduled Utilization	Percent	98.471 9	91.995 3	99.809 2	0.088 5
			Units Allocated	Total	822.581 0	770.000 0	837.000 0	0.741 7
	Input Buffer	Content	Number in Station	Average	9.557 7	9.112 5	10.006 6	0.012 2
				maximum	13.363 0	13.000 0	14.000 0	0.029 8
M5	[Resource]	Capacity	Scheduled Utilization	Percent	100.000 0	100.000 0	100.000 0	0.000 0
			Units Allocated	Total	416.728 0	390.000 0	424.000 0	0.375 0
	Input Buffer	Content	Number in Station	Average	4.332 6	4.318 0	4.376 3	0.000 6
				maximum	5.000 0	5.000 0	5.000 0	0.000 0
M8	[Resource]	Capacity	Scheduled Utilization	Percent	100.000 0	100.000 0	100.000 0	0.000 0
			Units Allocated	Total	412.844 0	387.000 0	421.000 0	0.371 5
	Input Buffer	Content	Number in Station	Average	4.076 6	4.057 8	4.134 9	0.000 8
				maximum	5.000 0	5.000 0	5.000 0	5.000 0

图7 优化后装配节点及各瓶颈工序的数据图

由主瓶颈工序 M3 接收。

5.3 结果分析

对模型进行 8 h 仿真, 仿真实验次数 1 000 次, 得到瓶颈工序 M3、M5、M8 和装配节点 M9 优化前后的相关结果如图 6、图 7 所示, 图中 Resource

栏的 Scheduled Utilization 项目为各工序的利用率, Parent Input Buffer 栏及 Input Buffer 栏的 Number in Station 项目为各工序前缓冲区的在制品存量。

将图 6、图 7 中的平均在制品存量和工序利用率数据进行对比, 结果如图 8 所示。

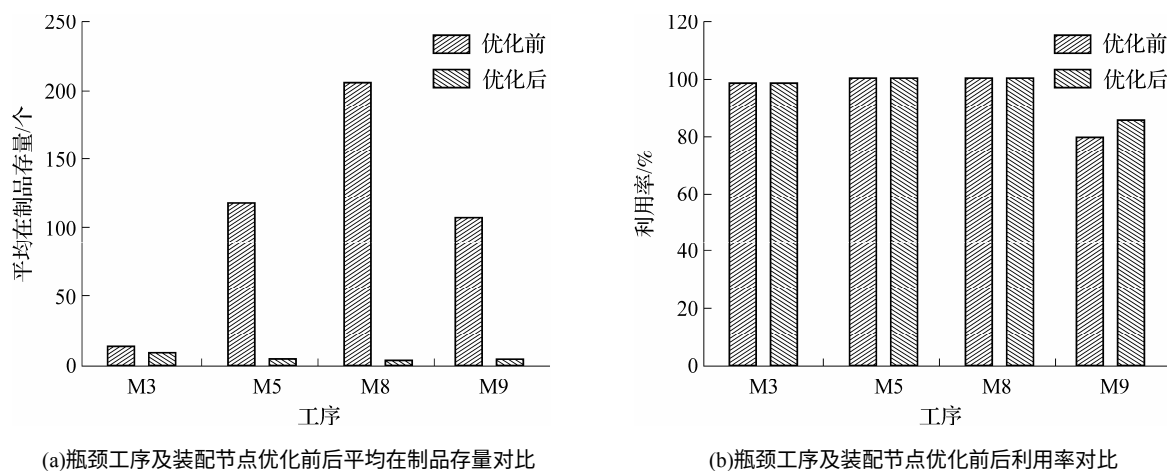


图8 优化前后数据对比图

5.3.1 平均在制品存量比较

图 8(a)显示, 优化后各生产线瓶颈工序 M3、M5、M8 的平均在制品存量为 9.6、4.3、4.1 个, 较优化前分别减少了 33.79%、96.37%、98.01%, 次瓶颈 M5、M8 前的在制品存量降幅尤为明显, 对所属生产线以及装配节点平衡的影响大为改善。

装配节点 M9 优化后的平均在制品存量仅有 4.4 个, 较优化前下降了 102.2 个, 降幅达 95.87%, 大大缓解了传统推动式生产模式下等待装配的零件堆积, 使装配节点前在制品堵塞现象明显改善。

5.3.2 工序利用率对比

由图 8(b)可知, 3 条生产线的瓶颈工序 M3、M5、M8 在优化前后均保持较高利用率, 几乎达到满负荷运行状态, 这是因为瓶颈工序负荷率最大。而 M9 工序装配节点的利用率从优化前的 79.68% 上升到 85.82%, 表明各个零件到达装配节点的同步率得到提高, 当然同步率还有改善的空间。

总体而言, 经过负荷控制、主次瓶颈协调优化后, 装配节点以及各瓶颈工序在提高利用率的同时, 大大降低了在制品存量, 提高了装配零件的准时到达率, 降低了总体库存费用, 初步达到了优化目标。

6 结语

本文针对并行生产线多瓶颈及装配节点平衡的问题, 基于装配节点平衡影响因素的分析, 提出了主、次瓶颈的概念, 并构建了装配节点影响指数模型, 用于判别并行生产线中瓶颈工序的主、次关

系; 在此基础上, 提出了瓶颈工序负荷控制以及主瓶颈拉动次瓶颈、瓶颈前后采用拉动生产与平行顺序移动生产相结合的生产策略, 研究了瓶颈工序负荷率控制、主次瓶颈协调优化的方法, 改善了各个零件到达装配节点的同步性。算例优化前后的 SIMIO 仿真数据的对比显示, 本文提出的方法在确保装配节点以及各瓶颈工序最大利用率的同时, 明显降低了在制品存量, 提高了装配零件的准时到达率, 验证了方法的有效性。

相比于以往针对瓶颈工序的相关研究, 本文提出的方法合理利用了瓶颈工序的生产能力, 防止了瓶颈工序的转移; 并实现了多条并行生产线生产进度的协调, 提高了装配节点的平衡性, 具有良好的可实施性。

参考文献:

- [1] Fernandes N O, Land M J, Carmo-Silva S. Workload control in unbalanced job shops[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(3):679-690.
- [2] 许一敏. 基于瓶颈的 BTO 供应链响应时间优化与控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [3] Thürer M, Stevenson M, Silva C, et al. Drum-buffer-rope and workload control in high-variety flow and job shops with bottlenecks: An assessment by simulation[J]. International Journal of Production Economics, 2017, 188:116-127.
- [4] Li L, Chang Q, Ni J, et al. Real time production improvement through bottleneck control[J]. International Journal of Production Research, 2009, 47(21):6145-6158.
- [5] Hu H T, Jiang Z B, Zhang H. A dynamic WIP control

- strategy for bottlenecks in a wafer fabrication system[J]. International Journal of Production Research, 2010, 48 (17):5221-5233.
- [6] 周宏明, 陈亚绒, 管在林, 等. 面向存在瓶颈的一般流水车间的集成负荷控制方法[J]. 系统工程, 2015, 33(10): 15-21.
- [7] Wang Y H, Cao J, Kong L X. Hybrid Kanban/Conwip control system simulation and optimization based on theory of constraints[C]. IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, China, Shanghai, 2009.
- [8] 丘浩. 基于 JIT 思想对汽车玻璃生产线 WIP 的控制策略[J]. 价值工程, 2014, 33(25):34-37.
- [9] 范林胜, 邓建新, 陈一辉, 等. 基于仿真的某发动机混合生产线的均衡改进[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(8):118-123.
- [10] 高举红, 陈思宇, 刘晓宇. 基于精益设计的生产能力分析 with 现场物流改善[J]. 工业工程, 2010, 13(1):90-96.
- [11] 简宇, 郭洁. 基于 JIT 的流水线生产效率提升方法研究[J]. 工业工程与管理, 2012, 17(3):124-128.
- [12] Saranya P, Fumio A. The design of Kanban system for improving bottleneck problem of multiproduct[C]. IEEE 6th International Conference on Awareness Science and Technology (iCAST), France, Paris, 2014.
- [13] 张磊, 李中原. 基于 IE 方法的组装生产线平衡研究——以 A 公司为例[J]. 工业工程, 2017, 20(3):45-52; 74.
- [14] Huang L, Gao Y, Qian F, et al. Design of a multi-product Kanban system based on bottleneck analysis[C]. The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE), Singapore, 2010.
- [15] 荆全忠, 杨晶. 基于价值流图的抽油杆生产线平衡优化研究[J]. 工业工程与管理, 2014, 19(5):18-23.
- [16] 刘金波, 张正, 方志梅. 基于瓶颈指数的生产物流瓶颈监测研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2019, 32(4):50-56.
- [17] 刘志, 蒋增强, 龚本刚. 基于两种瓶颈度的制造车间多瓶颈动态预测方法[J]. 中国机械工程, 2014, 25(14): 1910-1915.

Coordination optimization of product production logistics for assembly node balance

ZHANG Zheng, FANG Zhimei*, ZHOU Yashen

(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In product production logistics consisting of multiple parallel parts' production lines and assembly lines, the bottleneck process of each production line constrains the balance of assembly nodes and their entire production logistics. Based on the theory of constraints and JIT (Just In Time), the concept of primary and secondary bottlenecks and their identification method are proposed, together with the production strategy combining the idea of the primary bottleneck pulling the secondary bottleneck, further pulling the production, and then the parallelly sequential shifting the production. The bottleneck process load control method and the time control method of pull production triggered by the primary and secondary bottlenecks are studied to maximize the utilization of the bottleneck process and improve the synchronism of individual part's arrival to the assembly node. The simulation results in SIMIO show that the WIP (Work In Process) of the assembly node is greatly reduced and the utilization rate is improved.

Key words: production logistics; multiple bottlenecks; bottleneck load control; primary and secondary bottleneck coordination; SIMIO simulation

(责任编辑 章践立)