

# 赛汝生产系统文献的综述、分类和研究展望\*

刘仕强<sup>1</sup>, 卞忠亮<sup>1</sup>, 殷勇<sup>2</sup>, 陈晔<sup>3</sup>

(1. 福州大学 经济与管理学院, 福州 350108; 2. 同志社大学 商学院, 日本 京都 602-8580;

3. 福州泰全工业有限公司, 福州 350119)

**摘要:**【目的】赛汝生产是一种适用于多产品类型、小批量市场需求且兼具效率与柔性的新型生产方式。目前赛汝生产是一个很年轻的领域,相关学术研究还比较滞后,理论与方法体系远不完善,许多重要问题还未解决。因此,本研究对赛汝生产进行了全面且最新的梳理,阐述了赛汝生产的研究现状和存在的问题。【方法】采用文献分析法将研究赛汝生产的论文分为5类,涵盖基础理论研究及考虑流水生产线-赛汝转换、生产时间、生产费用和生产平衡的赛汝问题,并对这些问题类型常用的目标函数、数学模型、问题所考虑的因素和求解方法等进行了详细的梳理。【结果】基于对赛汝研究的分析提出了一些该领域目前亟需解决的问题和潜在的研究机会。【结论】随着全球化进程加快以及消费者的需求日益多样化,实施赛汝生产有利于保持企业自身竞争力,相关研究有待进一步完善、深入。

**关键词:**赛汝生产;单元化生产;流水生产线-赛汝转换;文献综述;文献分类;研究机会

**中图分类号:**O224;F273

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-6693(2023)01-0001-14

随着国际市场竞争的加剧和消费者需求的改变,制造业面临的挑战正在不断升级,制造企业所处的生存环境也日益严峻。在大批量的生产计划下,企业普遍使用具有低成本、高效率特点的流水生产线。然而,流水生产线只有在产品种类少、需求量大且稳定的情况下才能充分发挥出优势。随着市场中产品类型不断增加、需求量不断下降、产品生命周期不断缩短以及需求波动性不断增强,流水生产线暴露出越来越多的弊端,它新的市场环境下出现的种种问题迫使中小批量生产企业对现有的生产模式进行改革或寻求新型生产方式。赛汝生产(Seru seisan)出现于20世纪90年代的日本,目的在于克服流水生产线的缺陷。1992年,索尼公司在拆除了一条流水生产线后,在一个摄像机工厂建造了几个小型的紧凑制造单元,索尼公司称这些小的单元为赛汝<sup>[1]</sup>。为了与欧美式传统单元生产(Cellular manufacturing, CM)相区别,赛汝生产又称为日本式单元生产或赛鲁生产。Seru为英文单词“Cell”在日语中的发音,seisan为英文单词“production”在日语中的发音。赛汝与欧美式传统CM的主要区别为:赛汝以工人中心,CM以机器中心;赛汝是在为了克服新模式下流水线的低效率和低灵活性等缺点而产生,而CM则为提升作业车间的生产效率而产生;赛汝内的设备一般较便宜、简单且易移动,CM内的设备一般较昂贵且固定;赛汝内的员工需要负责多样不同类型的任务,而CM的内员工一般仅需负责同一种类型的任务;赛汝内的生产调度基于工人的技能相似度,而CM内的生产调度基于零件和机器加工能力相似度。赛汝生产是由1个或几个工人完成一类产品的独立性高的生产方式,是一种基于流水生产线创新的生产制造方式,不仅保留了流水生产线的高生产效率,还具备能够灵活应对市场需求变化的高柔性特点,能够很好地适应多类型小批量的市场需求。因此,赛汝生产在日本的中小批量制造企业中,尤其在电子产品和精密仪器制造企业中,得到了普遍的使用。

## 1 赛汝生产的概况

### 1.1 赛汝的分类

从演化过程来看,赛汝一般可以分为分割式赛汝(Divisional Seru)、巡回式赛汝(Rotating Seru)和单人式赛

\* 收稿日期:2021-12-30 修回日期:2022-12-25 网络出版时间:2023-02-24 09:18

资助项目:国家自然科学基金(No. 71871064)

第一作者简介:刘仕强,男,教授,博士生导师,研究方向为调度理论与运用,E-mail:samsqliu@fzu.edu.cn;通信作者:殷勇,男,教授,博士,

E-mail:yyin@mail.doshisha.ac.jp

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.n.20230222.1142.004.html

汝(Yatai)这 3 类<sup>[2-4]</sup>,它们的特点见表 1。当流水生产线刚转换为成赛汝生产时,流水生产线上的专职工人要接受多种技能的交叉培训,工人掌握的技能逐渐多样化,此时多采用分割式赛汝。随着对工人持续培训,工人将掌握更多的技能,多能工逐渐成为全能工,分割式赛汝会演变为巡回式赛汝。随着一些全能工操作能力的提高以及管理职能培训工作的开展,工人的自主性和技能熟练度不断提高,部分巡回式赛汝还会演化成为单人式赛汝。Yin 等人<sup>[1]</sup>认为单人式赛汝是 3 种赛汝类型的最终演化形态,因为单人式赛汝内只有 1 个工人,所以不存在会受到其他效率低的工人影响的问题,生产灵活性更高,在生产计划制定后 1 个人即可构建 1 个赛汝进而生产一类产品。

表 1 赛汝生产系统中 3 种赛汝的特点

Tab. 1 Properties of three typical Seru production systems

	分割式	巡回式	单人式
人数	多人(大于 1 人)	多人(大于 1 人)	仅 1 人
操作任务	赛汝内的部分任务	赛汝内全部任务,负责一个产品加工的开始到结束的整个阶段	赛汝内全部任务,负责一个产品加工的开始到结束整个阶段
工人作业成熟度	较低	中等	较高
使用场景	1) 当缺少全能工时 2) 工人技能水平低	1) 工人的技能水平相同或相似 2) 系统中不缺少全能工	1) 产品类型变化大 2) 需求量少
优点	1) 操作简单 2) 从流水生产线转换后工人接受程度高、适应快	1) 可以快速应对产品需求量的改变 2) 工人生产速度和自主性提升 3) 可以有效控制产品库存	1) 能够很好满足客户的多样化需求 2) 没有工人之间的相互影响 3) 能够实现自主管理
缺点	1) 工人之间的工作量可能会不平衡 2) 加工完成时间不一致可能会产生在制品库存	1) 需经常关注工人技能水平的不平衡 2) 会对新加入的工人或速度慢的工人带来较大的心理压力	1) 无法进行高产量生产 2) 需要规章制度约束工人

1.1.1 分割式赛汝 分割式赛汝是将赛汝内的所有任务分割为不同的部分,每部分由 1 个或多个工人完成,与流水生产线生产系统相比,分割式赛汝中的每个工人要负责更多的任务,但并不需要负责该赛汝内的所有任务,这使得实施赛汝生产所进行的多能工培训相对简单。分割式赛汝的示例图见图 1,即第一个工人负责赛汝内的 4 项任务,第二个工人负责中间的 3 项任务<sup>[5-6]</sup>。分割式赛汝是赛汝生产的初级阶段,在缺少全能工或全能工培训还未完成时,分割式赛汝是实施赛汝生产的唯一可行且有效的方式。

1.1.2 巡回式赛汝 1 个巡回式赛汝通常由几个工人排成 1 条 U 型的短线,每个工人从头到尾执行赛汝内的所有任务,如图 2 所示,3 个工人均可独立完成赛汝内的所有任务。因为工作是在固定的工位完成的,所以工人要从一个工位走到下一个工位以完成产品的生产,而技能水平高的工人会因生产速度快而追赶技能水平低的工人,在一定程度上也可以帮助技能水平低的工人完成部分工作,类似于追兔子的场景,所以巡回式赛汝又称为逐兔式赛汝<sup>[5-7]</sup>。由于工人要负责赛汝内的所有任务,所以在将分割式赛汝转换为巡回式赛汝之前,每个工人都需在所有工位上进行轮换,以实现巡回式赛汝中的工人是经过完全交叉培训的前提。

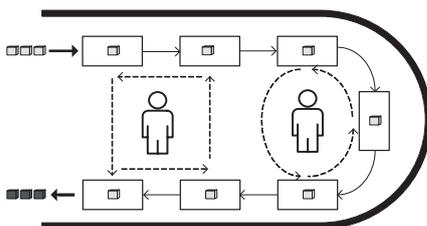


图 1 分割式赛汝示例图

Fig. 1 A sample diagram of divisional Seru

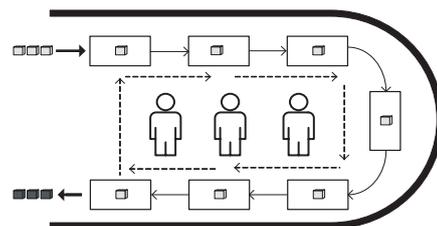


图 2 巡回式赛汝示例图

Fig. 2 A sample diagram of rotating Seru

1.1.3 单人式赛汝 单人式赛汝是由 1 个全能工独自负责 1 个赛汝内的所有任务,是一个规模较小但高度自治的单人生产系统。在单人式赛汝中,1 个工作循环即生产 1 件产品,单人式赛汝的示例图见图 3。在单人式赛汝中,工人不会受限于其他工人的工作速度,也不存在工人之间的相互影响,因此工作量平衡能够达到最高,更适合生产技术难度高、精密度要求高、高附加值的产品<sup>[8-10]</sup>。单人式赛汝能够轻松应对产品类型变化,当需要生产一类新产品时,只需构建一个具有该产品生产能力的单人式赛汝即可,而且不会对其他的赛汝造成影响,相对于分割式和巡回式赛汝更高效、更灵活。

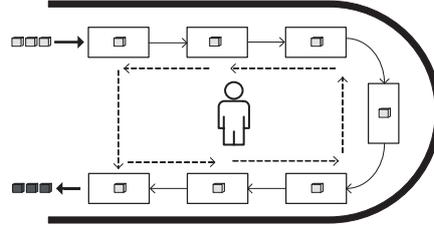


图 3 单人式赛汝示例图

Fig. 3 A sample diagram of Yatai Seru

## 1.2 基础赛汝生产系统的数学建模

赛汝生产系统是对传统流水线生产系统进行拆解转变的产物,通常评价由流水线系统转换为赛汝生产系统的性能提升的指标通常有最小化最大完工时间(Makespan, 记为  $C_{\max}$ )、总劳动时间(Total labor hours,  $t_{TLH}$ )和总拖延时间(Total tardiness, 记为  $t_{TT}$ )。如 Sun 等人<sup>[11]</sup>开发了一种结合遗传算法和蚁群算法的协同进化算法以最小化  $C_{\max}$ , Yu 等人<sup>[12-13]</sup>采用 NSGA-II 以最小化  $t_{TLH}$ ; Sun 等人<sup>[14]</sup>通过开发了一种基于遗传算法的协同进化算法以最小化  $t_{TT}$ 。

### 1.2.1 问题假设

- 1) 系统内有  $N$  种产品类型,  $W$  个工人,  $M$  个产品批次, 且每个批次的产品类型和规模已知;
- 2) 1 个产品批次只能在 1 个赛汝中完成, 即不考虑订单分割;
- 3) 不同赛汝内的工人数量可以不同, 但每个赛汝内要保证至少有 1 个工人, 且最多有  $W$  个工人;
- 4) 本文中研究的是需要全能工的巡回式赛汝和单人式赛汝;
- 5) 流水线生产系统转换为赛汝生产系统后的任务数量与工人数量一致, 即任务数量也为  $W$ 。

1.2.2 索引集  $i$  表示工人编号,  $i=1, 2, \dots, W$ ;  $j$  表示赛汝编号,  $j=1, 2, \dots, J$ ;  $n$  表示产品类型编号,  $n=1, 2, \dots, N$ ;  $m$  表示生产批次编号,  $m=1, 2, \dots, M$ ;  $k$  表示生产批次在赛汝内的加工顺序编号,  $k=1, 2, \dots, M$ 。

1.2.3 参数  $B_m$  表示生产批次  $m$  的批量;  $t_n$  表示产品类型  $n$  在原始流水线上的加工时间;  $\eta_i$  表示在赛汝内的工人所分配任务数量的上限;  $\epsilon_i$  表示工人  $i$  负责多任务时的影响系数;  $\beta_{n,i}$  表示工人  $i$  对产品类型  $n$  的每项工作的技能水平;  $t_{SCP_n}$  表示产品类型  $n$  在赛汝内的准备时间;  $t_{C_m}$  表示生产批次  $m$  的完工时间;  $t_{d_m}$  表示生产批次  $m$  的截止时间。

1.2.4 变量  $V_{m,n}$  表示二进制变量,  $V_{m,n}=1$  表示批次  $m$  的产品类型是  $n$ , 否则为 0;  $X_{i,j}$  为二进制变量,  $X_{i,j}=1$  表示工人  $i$  被分配到第  $j$  个赛汝, 否则为 0;  $Z_{m,j,k}$  为二进制变量,  $Z_{m,j,k}=1$  表示批次  $m$  在赛汝  $j$  中第  $k$  个被加工, 否则为 0。

1.2.5 目标函数和主要约束  $C_i$  为第  $i$  个工人操作多个工序的能力系数, 若分配给一个工人的任务超出他的任务上限  $\eta_i$ , 则生产时间就会增加, 见(1)式;  $t_{TC_m}$  是批次  $m$  的每个任务在赛汝中的加工时间, 产品  $n$  的生产时间被定义为在该赛汝内的工人对产品  $n$  的平均加工时间, 见(2)式;  $t_{SC_m}$  为批次  $m$  在赛汝中的准备时间, 如果批次  $m$  与单元中上一批次的产品类型相同, 则准备时间为 0; 否则为  $t_{SCP_n} V_{m,n}$ , 见(3)式;  $t_{FC_m}$  为  $m$  批次的产品在赛汝中的流通时间, 见(4)式;  $t_{FCB_m}$  为  $m$  批次在赛汝中开始准备的时间, 等于该赛汝中前序批次流通时间和准备时间的总和, 见(5)式。

$$C_i = \begin{cases} 1 + \epsilon_i (W - \eta_i), & W > \eta_i, \forall i; \\ 1, & W \leq \eta_i \end{cases} \quad (1)$$

$$t_{TC_m} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M V_{m,n} T_n \beta_{n,i} C_i X_{i,j} Z_{m,j,k} / \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M X_{i,j} Z_{m,j,k}; \quad (2)$$

$$t_{SC_m} = \begin{cases} t_{SCP_n} V_{mn}, V_{mn} = V_{m'n} = 1 \\ 0, V_{mn} = 1, V_{m'n} = 0 \end{cases}; \quad (3)$$

$$t_{FC_m} = B_m t_{TC_m} W / \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M X_{i,j} Z_{m,j,k}; \quad (4)$$

$$t_{FCB_m} = \sum_{p=1}^{m-1} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M FC_p Z_{m,j,k} Z_{p,j,(k-1)}. \quad (5)$$

(6)~(8)式是在赛汝生产系统中常用的优化目标,分别是最小化  $C_{\max}$ 、最小化  $t_{TLH}$  和最小化  $t_{TT}$ 。 $C_{\max}$  指系统内加工完最后一个产品时的时间; $t_{TLH}$  指所有产品生产完成后,系统内所分配的工人的工作用时总和; $t_{TT}$  指所有超出原定交付时间的生产批次的最终完工时间与原定交付时间之差的总和。

$$C_{\max} = \max_{1 \leq m \leq M} (t_{FCB_m} + t_{FC_m} + t_{SC_m}), \quad (6)$$

$$t_{TLH} = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^W \left( \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M t_{FC_m} X_{ij} Z_{mjk} \right), \quad (7)$$

$$t_{TT} = \sum_{m=1}^M \max\{C_m - d_m, 0\}. \quad (8)$$

赛汝生产系统内的赛汝构建约束为(9)~(11)式,保证每个赛汝至少有分配 1 个工人完成生产任务,且每个工人至多被分配到 1 个赛汝内,即不存在赛汝之间的工人移动,同时需要保证所有的可选工人都被安排进生产任务。

$$1 \leq \sum_{i=1}^W X_{ij} \leq W, \forall j; \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ij} = 1, \forall i; \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^W X_{ij} = W. \quad (11)$$

赛汝生产系统内的赛汝构建约束为(12)~(13)式,保证每个生产批次只能被分配到 1 个赛汝内,即订单分割的情况不被允许,且需要保证生产批次只能被分配到那些有工人的赛汝内。

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M Z_{mjk} = 1, \forall m, \quad (12)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^M Z_{mjk} = 0, \forall j \mid \sum_{i=1}^W X_{ij} = 0. \quad (13)$$

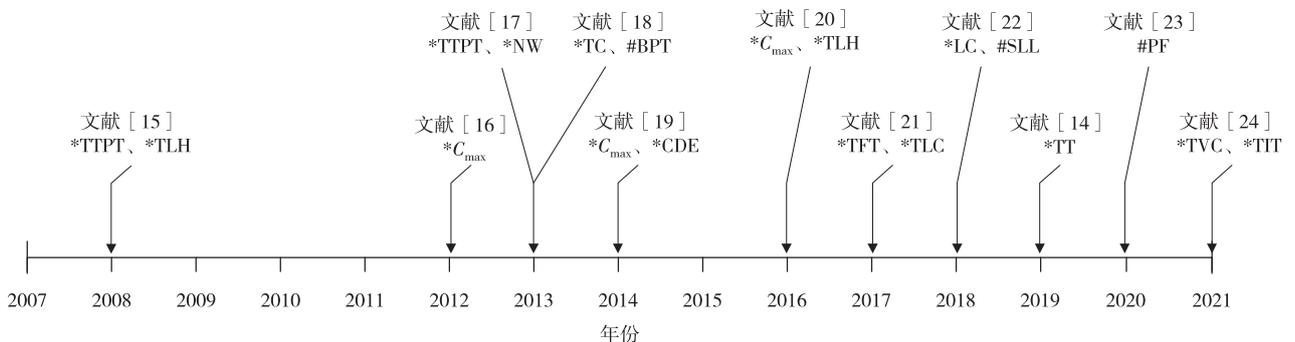
(6)式计算赛汝系统内的最大完工时间;(7)式计算赛汝系统内的总劳动时间;(8)式计算赛汝系统内的总延误时间;约束(9)式保证每个赛汝内至少需要分配 1 个工人,但不可超过全部工人数量;约束(10)式保证每个工人只能分配到 1 个赛汝内,不存在赛汝之间的工人流动;约束(11)式保证分配到所有赛汝内的工人数量之和为总工人数量;约束(12)式保证每个批次  $m$  只能被分配到 1 个赛汝内,不存在订单分割的情况;约束(13)式保证每个批次  $m$  必须被分配到至少含有 1 个工人的赛汝内。(6)式和约束(9)~(13)式被作为最小化纯赛汝生产系统种的最大完工时间的  $\min C_{\max}$  模型。(7)式和约束(9)~(13)式最小化纯赛汝生产系统种的总劳动时间的  $\min t_{TLH}$  模型。(8)式和约束(9)~(13)式最小化纯赛汝生产系统种的总延误时间  $\min t_{TT}$  模型。

### 1.3 赛汝生产研究问题的演化

根据研究问题和优化目标的不同,本文对赛汝生产近 15 年的相关文章进行了梳理。为了增加文章的简洁性和可读性,将文中出现的术语用缩写的形式进行代替,文中所有的术语缩写按首字母升序的方式呈现在表 2。图 4 是赛汝生产的研究问题演化的时间轴。如最小化  $t_{TTPT}$  和  $t_{TLH}$  的优化目标最早是在文献[15]里提出的,后续有很多学者以这两个优化目标为方向进行了其他方面的研究,如文献[12-13]。

表 2 名词术语缩写  
Tab. 2 Abbreviations of terms

缩写	英文全称及中文名称	缩写	英文全称及中文名称
BPT	balance processing time 平衡加工时间	PC	penalty cost 惩罚成本
BS	batch size 订单规模	PF	profit 利润
CDE	carbon dioxide emission 碳排放	RE	reliability 可靠性
CI	coefficient of influence 影响系数	SAA	sample average approximation 抽样平均近似法
CT	cycle time 最小化循环时间	SL	skill level 技能水平(能力系数)
CW	capacity of worker 工人能力	SLL	service level 服务水平
DD	demand 需求量	SPT	shortest processing time 最短加工时间
DT	due time 截止时间	ST	setup time 准备时间
FCFS	first come first service 先到先服务	TC	total cost 总花费
Inter-B	inter-Seru system balancing 赛汝之间平衡	TFT	total flow time 总流程时间
Intra-B	intra-Seru system balancing 赛汝内部平衡	TIT	total idle time 空闲时间
IS-WB	inter-Seru workload balance 赛汝之间的工作量平衡	TC	total cost 总花费
IT	inventory 库存	TLC	total labor cost 总劳动花费
IW-WB	inter-worker workload balance 工人之间的工作量平衡	TLH	total labor hour 总劳动时间
LC	labor cost 最小化劳动花费	TP	throughput 总产量
LS	lot splitting 订单分割	TPE	total production efficiencies 平衡总生产效率
MP	max profit 最大化利润	TT	total tardiness 总延误时间
$C_{max}$	makespan 最大完工时间	TTC	total training cost 总训练花费
MSL	max service level 最大服务水平	TTPT	total throughput time 产品总流通时间
NSGA-II	non-dominated sorted genetic algorithm 非支配排序遗传算法	TVC	total variable cost 总可变成本
NW	number of worker 工人数量	TWCT	total weighted completion time 总加权完工时间
OA	order acceptance 订单接受	UW	utilization of worker 工人利用率
P/H	pure/hybrid 纯赛汝/混合系统	WA	worker assignment 工人分配



注: \* 表示最小化, # 表示最大化, 下同

图 4 赛汝生产系统的研究问题的时间轴

Fig. 4 Timeline of research topics on Seru production systems

## 2 赛汝生产问题的分类

### 2.1 赛汝生产系统的基础理论研究

赛汝生产是市场环境变化下的产物,通过索尼公司和佳能公司实施赛汝生产带来的诸多成效可以看出赛汝

生产可以为企业带来更多效益,如通过应用赛汝生产以减少总的生产时间、生产花费、延误时间等。Yin 等人<sup>[1]</sup>通过描述佳能应用赛汝生产的成果,如使用赛汝系统后在生产花费、车间面积和二氧化碳排放量上的减少,分析了赛汝可以帮助企业提升效益的原因。Yin 等人<sup>[2]</sup>讨论了赛汝生产在电子行业的应用,通过描述索尼和佳能应用赛汝生产带来的成果,分析了赛汝生产如何提高企业的生产率、质量和灵活性。Liu 等人<sup>[3]</sup>介绍了赛汝生产的产生背景,从赛汝构建的理论基础、应用领域、生产柔性、赛汝的演化等 5 个方面对赛汝生产与欧美式单元化生产进行了全面的分析,并对赛汝系统的特点、优缺点及演化过程进行阐述。Yin 等人<sup>[4]</sup>将工业 2.0 和 4.0 背景下主要的生产系统分类为流水生产线、丰田生产系统、工作车间、单元生产和赛汝生产系统,并讨论了精益生产和赛汝生产在工业 4.0 中的潜在应用。Stecke 等人<sup>[5]</sup>介绍了赛汝生产的产生背景和发展进程,并分析了应用赛汝生产可以提高生产力、效率和灵活性的原因。Liu 等人<sup>[6]</sup>提出了赛汝生产的实现框架和一些基本原则,基于对日本制造企业实施状况和大量文献的系统分析,对赛汝生产的实现框架和步骤进行了全面的介绍。Yu 等人<sup>[7]</sup>将赛汝生产与一些流行的生产模式做了比较,并分析了目前的研究现状和未来的研究方向。Wu 等人<sup>[8]</sup>以工人的任务数量、任务时间间隔、技能水平和技能水平间隔共 4 个因素为指标,研究了分割式赛汝和巡回式赛汝中如何分配工人和任务,以最大化产品生产量和平衡工人的工作量。Kaku 等人<sup>[9]</sup>提出了在复杂生产环境下将流水生产线转化为单元制造的数学模型,并通过仿真实验揭示了影响系统性能的因素。刘晨光等人<sup>[10]</sup>总结了赛汝生产出现的背景、本质特征、与欧美式单元化生产的不同之处、实施中的优缺点和一些仍需研究的重要问题。

## 2.2 流水生产线-赛汝转换问题

流水生产线的低成本和高效率的优势在大批量、产品类型少、需求量大的情况下才能充分发挥出来,而随着市场中产品种类不断增加、需求波动不断增强、产品生命周期不断缩短,流水生产线暴露出越来越多的弊端,这导致许多企业决定将流水生产线生产系统转换为更适合加工小批量的赛汝生产系统。流水生产线转换为赛汝生产系统是一项极其复杂的工程,涉及了流水生产线的工位的重新布局、多能工的培训与分配、生产任务的分配等问题。将流水生产线转化为赛汝生产系统一般可分为两种类型,一种是仅有 1 个或几个赛汝的纯赛汝生产系统(图 5);另一种是将流水生产线转化为由多个赛汝和 1 条短的流水生产线组成的混合赛汝生产系统(图 6)。

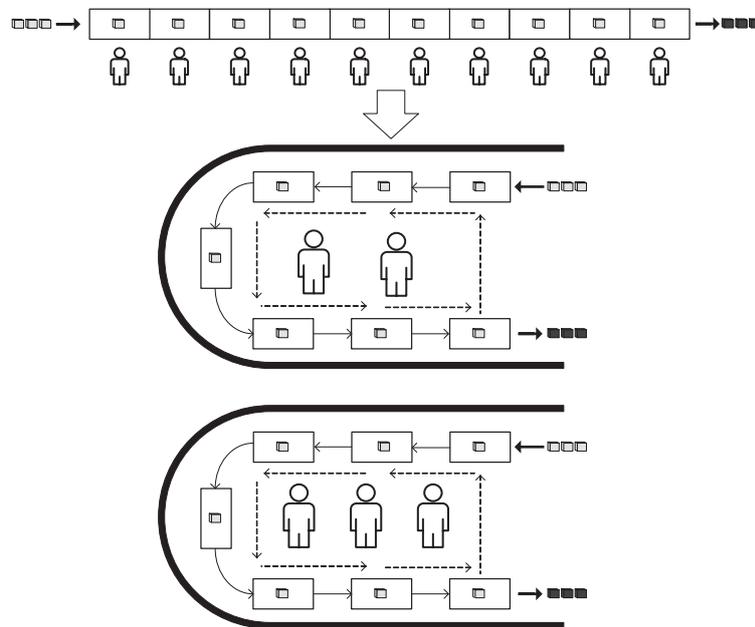


图 5 纯赛汝生产系统

Fig. 5 A pure Seru production system

大多数学者主要关注于流水生产线-纯赛汝生产系统的转换问题,如 Kaku 等人<sup>[15]</sup>和 Yu 等人<sup>[12-13]</sup>。在文献<sup>[15]</sup>中,Kaku 等人建立了第一个流水生产线-赛汝转换的分析模型,但是,仍有两个需进一步优化的问题:第一,仅使用数值仿真实验,而非多目标优化算法;第二,只确定了 1 个操作因素如何影响目标,未能揭示不同操作因素之间的相互影响关系。在 Kaku 的研究基础上,Yu 等人<sup>[12]</sup>考虑将流水生产线转换为纯赛汝生产系统,对该转

换问题的解空间、复杂度和非凸性等数学特征进行数学分析,并采用 NSGA-II 来解决该多目标优化问题。Yu 等人<sup>[13]</sup>在求解方法中进一步将局部搜索与 NSGA-II 相结合,从而获得了更精确的非支配解。Yu 等人<sup>[25]</sup>考虑工作台数量、产品类型和产品批次规模共 3 个因素,并分析了流水生产线-赛汝转换中影响系统性能提升的因素。Yu 等人<sup>[17]</sup>通过在模型中添加所有赛汝中的工人数量小于总可选工人的约束,试图解决减少赛汝系统中工人的数量但不降低生产率的目的。然而 Yu 等人<sup>[17]</sup>在同时考虑两个目标时,会出现工人数量虽然减少但最大完工时间却增加的问题。为了解决上述局限,Yu 等人<sup>[26]</sup>进一步在模型中添加赛汝生产系统的最大完工时间不大于流水生产线的最大完工时间的约束,将该双目标优化问题转换为最小化工人数量而不增加最大完工时间的问题。Yu 等人<sup>[27]</sup>比较流水生产线-赛汝转换问题在 FCFS 和 SPT 调度规则下的问题解空间复杂度、求解时间和目标函数值,最终得出结论:SPT 更适合作为流水生产线-单元转换问题的调度规则。Shao 等人<sup>[21]</sup>分析了流水生产线-赛汝转换对提高生产效率、减少总流动时间和总劳动花费的影响,并通过具体例子证明了赛汝生产系统可以提升效率并减少时间和总花费,且考虑订单分割时会有更好的效果。Sun 等人<sup>[20]</sup>以最小化最大完工时间和总劳动时间为评价指标研究了流水生产线-赛汝转换的问题,并结合不同的约束构建了 4 个常用流水生产线-赛汝转换的单目标模型。

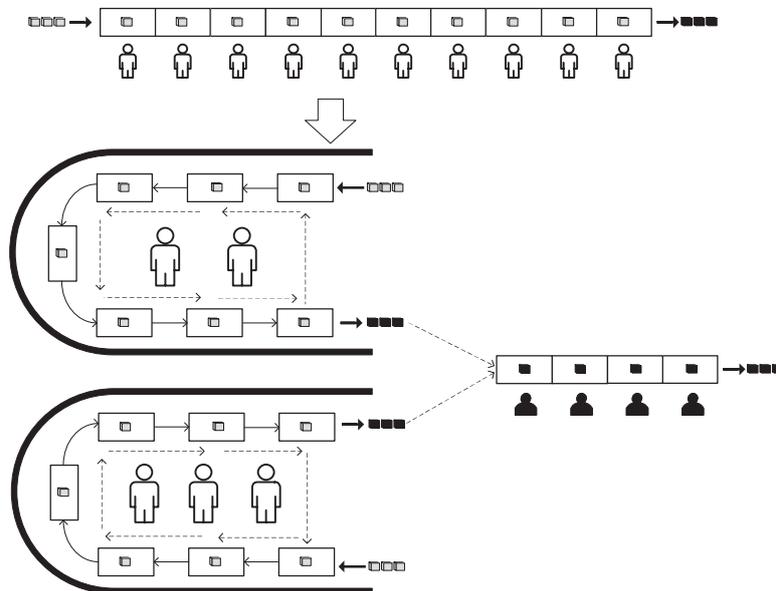


图 6 混合赛汝生产系统

Fig. 6 A hybrid Line-Seru production system

与纯赛汝生产系统相比,赛汝生产和流水生产线混合的系统更加复杂但也更有实际意义。例如,当完成某项任务的加工设备费用昂贵,若每个赛汝内均复制若干台该机器,则总成本就会增加,因此将该类设备单独留在流水生产线上是一个更好的方案。然而目前对流水生产线-赛汝混合生产系统的研究较少。根据文献可知,流水生产线-赛汝转换的分析模型最早是由 Kaku 等人<sup>[15]</sup>提出,并以最小化产品流通时间和总劳动时间为目标建立了一个双目标优化模型,该模型常用于流水生产线系统转换为赛汝生产系统的评价工具。Liu 等人<sup>[16]</sup>建立了一个流水生产线-赛汝转换的分析模型,并以最小化最大完工时间为目标建立一个分析赛汝生产单元的数量和工人的分配问题的数学模型,并将该模型应用到一个工业案例中,最终的结果表明该模型比 Kaku 等人<sup>[15]</sup>的模型更适合分析流水生产线-赛汝转换的问题。Yu 等人<sup>[28]</sup>研究了一个同时包含赛汝生产和流水生产线的混合系统,开发了几种主要的混合赛汝生产系统的模型,并分析混合系统的解空间和复杂度,提出了一个求解小规模问题的精确算法,以及一个求解大规模问题的启发式算法,Yu 认为应将具有中等技能水平的工人安排在流水线上工作,而非技能水平为最低或最高的工人。

从上述论述中,可以发现纯赛汝生产系统是大多数学者的研究方向,而对于混合赛汝系统的研究还相对较少。评价流水生产线-赛汝转换的性能主要以  $t_{TTPT}$  和  $t_{TLH}$  为评价指标,并且大多学者考虑的是巡回式和单人式这两种类型的赛汝。表 3 列出了流水生产线-赛汝转换的相关文章的研究问题和特点等因素。

表 3 流水生产线-赛汝生产系统转换的特点概括

Tab. 3 A summary of characteristics of Line-Seru conversion

文献	年份	目标	因素							赛汝类型			方法		
			ST	BS	CI	SL	LS	NW	P/H	分割式	巡回式	单人式	精确	启发式	
[15]	2009	* TTPT * TLH	✓	✓	✓	✓			✓	P、H	—	—	—	✓	
[12]	2014	* TTPT * TLH	✓	✓	✓	✓				P		✓	✓		✓
[13]	2012	* TTPT * TLH	✓	✓	✓	✓				P		✓	✓		✓
[25]	2012	* TTPT * TLH	✓	✓	✓	✓				P		✓	✓	✓	
[26]	2013	* TTPT * NW	✓	✓	✓	✓			✓	P		✓	✓	✓	
[27]	2017	* MS * NW	✓	✓	✓	✓			✓	P	—	—	—	✓	✓
[27]	2015	* TTPT * TLH	✓	✓	✓	✓				P	—	—	—	✓	
[21]	2017	* TFT * TLC		✓	✓	✓	✓			P		✓	✓	✓	
[20]	2016	* MS * TLH	✓	✓	✓	✓				P		✓	✓	—	—
[16]	2012	* MS	✓	✓	✓	✓				P、H		✓		✓	
[28]	2017	* MS * TLH	✓	✓	✓	✓			✓	H	—	—	—	✓	✓

注：“—”表示类型未知，下同

### 2.3 考虑生产时间的赛汝生产问题

生产时间是企业实现最大化利润的一个重要因素,许多企业为了实现企业利润最大化,不断寻求新型的生产方式以缩短生产时间和提高生产效率。Sun 等人<sup>[11]</sup>以最小化最大完工时间为目标,提出了一种结合遗传算法和蚁群算法的协同进化算法,其中遗传算法用于解决赛汝的构建问题,蚁群算法用于寻找最佳的订单调度问题,两种进化算法相互协作以寻求问题最优解。Sun 等人<sup>[14]</sup>还考虑了产品的交货日期这一时间因素,研究了赛汝系统相比流水生产线是否可以降低总的延误时间,并以最小化总延误时间为目标建立了一个非线性数学模型,通过将该模型分解为赛汝构建和赛汝调度两个阶段,再转换为线性模型进行求解。对于小规模问题,使用 CPLEX 对线性模型精确求解;对于大规模的问题,开发了一种协同进化算法求解。Zhang 等人<sup>[29]</sup>以最小化最大完工时间为目标研究了赛汝生产系统的调度问题,并开发了一种基于粒子群算法的方法求解该问题。Ayough 等人<sup>[30]</sup>在赛汝系统中考虑多个周期的工作轮换(每个周期赛汝中所分配的工人和待加工的产品类型都不同),研究工作轮换对总生产时间的影响,建立了关于工作轮换调度的非线性整数规划模型。由于该问题的 NP-难特性,作者提出了一种入侵杂草优化算法的启发式算法求解该问题,并指出最重要的是要确定分为多少个周期,而非工作轮换的周期越多解的质量就越高。Luo 等人<sup>[31]</sup>将考虑工人分配的赛汝调度问题构造为一个双层规划模型,上层工人分配问题以最小化总空闲时间为目标,下层工人分配问题通过找到最优订单分配以最小化最大完工时间,并提出了一种结合模拟退火和遗传算法的优化算法求解,其中模拟退火用于解决上层工人分配问题,遗传算法用于下层工人分配问题。Liu 等人<sup>[19]</sup>研究了赛汝系统的生产时间与环境绩效的问题,提出了一个考虑碳排放问题时最小化最大生产时间的数学模型,并采用 NSGA-II 算法求解该问题。张哲等人<sup>[32]</sup>以最小化最大完工时间和最小化工人空闲时间为目标,研究了赛汝生产系统中多能工的配置和订单调度的协同优化问题。孙薇等人<sup>[33]</sup>研究了在不增加劳动时间的前提下,通过将流水生产线转换为赛汝生产系统来提高生产效率,将劳动时间作为约束条件建立了以最小化产品流通时间的单目标模型,并提出了一种基于变邻域搜索的算法解决该问题。

表 4 统计了赛汝生产中关于减少生产时间的文献的目标函数、考虑的因素、文中研究的赛汝类型以及使用的方法。从统计结果可以看出大多数的文章将 TTPT、TLH 和 MS 作为优化目标;而且对于赛汝初级阶段的分割式赛汝的研究相对较少,大多研究关注的是需要全能工的巡回式和单人式赛汝。因为赛汝生产系统中的工人和订单的分配问题属于 NP-难问题,所以大多文献中使用的是启发式算法这样的近似算法而非精确算法。

### 2.4 考虑生产费用的赛汝生产问题

企业最大化利润的方式常见的有两种,一种是寻求消费者可接受的最大销售价格,另一种是降低生产花费,包括工人的雇佣和培训费用以及原材料的购买成本。已经有许多学者研究了赛汝在降低企业生产费用的表现。

如 Liu 等人<sup>[18]</sup>对该问题进行了定量研究,根据每个任务的加工时间和工人培训成本,建立了以最小化赛汝内总培训成本为优化目标的数学模型,并开发了一个基于枚举法的三阶段启发式算法求解该问题。Ying 等人<sup>[34]</sup>研究了如何优化赛汝生产系统中工人和任务的分配以最小化总成本,开发了一个结合模拟退火和迭代贪婪算法的两阶段启发式算法解决工人和任务的分配问题,该算法可在合理计算时间内得到比 Liu 等人<sup>[30]</sup>质量更高的目标函数解。Wang 等人<sup>[35]</sup>考虑了有限加工能力和交货日期条件下的赛汝生产系统的订单接受与调度问题,同时考虑了生产过程中订单分割的问题,建立了最大化净利润的数学模型,并开发一种改进的遗传算法求解该问题。Wang 等人<sup>[22]</sup>研究了赛汝生产系统在减少花费和提升服务水平上的表现,分别从赛汝的数量、不同技能水平工人的数量、工人分配和订单分配这 4 个因素进行分析。Wang 等人<sup>[24]</sup>以最小化总可变成本和最小化总空闲时间为目标建立了一个多目标模型,研究了赛汝生产系统内考虑工人分配的订单调度问题,并使用 K-means 聚类算法解决工人分配问题,使用人工蜂群算法解决订单调度问题。Wang 等人<sup>[23]</sup>研究了考虑订单接受的赛汝订单调度问题,根据每个订单的加工时间、设置时间、利润、延误罚款和交货日期建立以最大化净利润为目标的数学模型,并使用遗传算法对该问题求解。

表 4 考虑时间因素的赛汝生产系统问题的特点概括

Tab. 4 A summary of characteristics of Seru production systems considering time-dependent factors

文献	年份	目标	因素							赛汝类型			方法		
			ST	CI	SL	WA	LS	DD	DT	分割式	巡回式	单人式	精确	启发式	
[11]	2019	* $C_{max}$			✓	✓				✓	—	—	—		✓
[14]	2019	* TT		✓	✓	✓				✓	—	—	—		✓
[29]	2020	* $C_{max}$	✓		✓	✓	✓				✓	✓			✓
[30]	2020	* TFT		✓	✓	✓			✓		—	—	—		✓
[31]	2017	* $C_{max}$ * TIT	✓			✓	✓	✓			—	—	—		✓
[19]	2014	* $C_{max}$ * CDE				✓			✓	✓	—	—	—	✓	✓
[32]	2021	* $C_{max}$ * TIT	✓	✓	✓	✓	✓				—	—	—		✓
[33]	2014	* TTPT	✓	✓	✓	✓					—	—	—		✓

表 5 列出了赛汝生产中关于减少生产过程花费的文章的目标函数、考虑的因素、研究的赛汝类型和使用的方法。从统计结果和上述论述可以发现该问题主要以 TC 和 LC 为主要优化目标并使用启发式算法求解,同时有一些学者研究了赛汝中较少受到关注的分割式赛汝。

表 5 考虑费用因素的赛汝生产系统问题的特点概括

Tab. 5 A summary of characteristics of Seru production systems considering cost-dependent factors

文献	年份	目标	因素							赛汝类型			方法		
			TTC	PT	LS	PC	ST	WA	OA	分割式	巡回式	单人式	精确	启发式	
[18]	2013	* TC # BPT	✓	✓						✓		✓			✓
[34]	2017	* TC	✓	✓					✓		✓	✓			✓
[35]	2019	# PF		✓	✓	✓	✓			✓	—	—	—		✓
[22]	2018	* LC # SLL	✓	✓				✓	✓		✓	✓			✓
[24]	2021	* TVC * TIT		✓					✓		—	—	—		✓
[23]	2020	# PF		✓		✓	✓			✓	—	—	—		✓

### 2.5 考虑生产平衡的赛汝生产问题

由于订单规模以及工人技能水平差异的原因,企业在实施生产计划时,很容易导致工人或赛汝之间工作量不平衡的问题,进而使得生产不能很好地按计划完成。Yu 等人<sup>[36]</sup>研究赛汝生产系统中生产平衡的基本原理,并分析如何实施赛汝生产以提升工人和赛汝之间的工作量平衡。通过定义赛汝内部的平衡来评估工人之间的工作量平衡,定义赛汝间的平衡来评估不同赛汝之间的工作量平衡,并分析了赛汝生产系统平衡的解空间和解的

特性。Lian 等人<sup>[37]</sup>研究了多能工在赛汝生产系统内的分配问题,考虑工人的技能和熟练度差异,建立了以提升赛汝内部和赛汝之间的工人劳动力分配平衡为目标的数学模型,由于该模型是非线性的,所以作者通过引入带有辅助约束的变量将该模型转变为 0-1 线性规划模型,并提出了一种基于 NSGA-II 的启发式算法求解该问题。Zhang 等人<sup>[29]</sup>研究了不平衡赛汝生产系统的调度问题,在赛汝构建和订单分配的过程中考虑了订单分割,建立一个最小化最大完工时间的非线性规划模型,并使用聚类分析的方法将工人分配到不同的赛汝,确定每个订单的子订单的最优分配,最后使用一种基于粒子群的算法求解该问题。Zhang 等人<sup>[38]</sup>研究了赛汝生产系统内的工人分配、任务分配和订单调度的问题,建立了最大化生产平衡和最小化总完工时间的双目标非线性模型。并设计了一种聚类分析和遗传算法相结合的方法求解该问题。Han 等人<sup>[39]</sup>评估了赛汝生产系统的可靠性,假定每个工人的能力是根据给定的概率分布随机产生的而并非确定不变的,通过比较 3 种不同的赛汝结构和不同顺序的分配情况的结果,验证了赛汝可靠性高的特点。Han 等人<sup>[40]</sup>从赛汝可靠性的角度,研究了如何分配各种资源以最大化系统可靠性。根据该问题设计了一种有效的求解方法,并给出了两个实例来说明所提出的模型和求解方法。Liu 等人<sup>[18]</sup>研究赛汝生产系统中工人之间的工作量平衡和最小训练成本的问题,开发一种三阶段的启发式算法得到最佳的工人和任务分配方案。Yılmaz 等人<sup>[41]</sup>研究了赛汝之间工人移动的劳动力调度问题,并以减少工人之间的工作量不平衡和最小化最大完工时间为目标,分析了赛汝之间工人移动对完工时间和工作量平衡的影响,采用非支配排序遗传算法求解该问题。

表 6 统计了赛汝生产中在生产不平衡的文章的目标函数、考虑的因素、研究的赛汝类型和使用的方法。从统计结果和前面论述可以发现关于生产平衡主要分为赛汝内部的平衡和各个赛汝之间的平衡,该问题中工人的技能水平是一个很重要的因素,以此为基础对工人和订单进行合理安排以达到系统中最佳的平衡状态。

表 6 考虑生产平衡因素的赛汝生产系统问题的特点概括

Tab. 6 A summary of characteristics of Seru production systems considering production balancing

文献	年份	目标	因素						赛汝类型			方法	
			SL	BS	DD	ST	LS	PT	分割式	巡回式	单人式	精确	启发式
[29]	2020	* $C_{\max}$	✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓		✓
[36]	2018	# Intra-B # Inter-B	✓	✓		✓		✓	✓		✓	✓	
[37]	2018	# IS-WB # IW-WB	✓	✓	✓			✓	—	—	—		✓
[39]	2019	# RE	✓		✓			✓	✓			✓	
[41]	2019	* $C_{\max}$ # IW-WB	✓	✓	✓			✓	✓		✓		✓

### 3 关于赛汝生产研究的讨论

#### 3.1 主流的求解方法

赛汝生产系统包括赛汝构建和赛汝调度两个阶段;赛汝构建是确定赛汝生产系统中构建的赛汝数量以及每个赛汝内分配哪些工人,该问题是无序集划分问题的一种形式,这已被证明是一个 NP-难问题<sup>[11]</sup>;赛汝调度是在赛汝构建后将生产批次分配到各个赛汝内,本质是非相关平行机调度问题<sup>[42-44]</sup>,而非相关平行机调度问题也是 NP-难问题<sup>[45]</sup>。所以,赛汝生产系统同时包含两个 NP-难问题,是一个更加复杂的调度优化问题,求解的时间和空间复杂度将随着问题规模的增加呈指数级增长,一般的精确算法在求解该类问题上效率很低甚至无法求解。现存的文献大多是采用启发式算法这样的近似算法,而非精确算法来求解这类问题。用以解决赛汝生产相关问题的方法以遗传算法等启发式算法为主。如 Sun 等人<sup>[14]</sup>使用遗传算法研究了赛汝生产系统对总延误时间的影响;Wang 等人<sup>[23]</sup>使用遗传算法对赛汝生产中的订单接受问题进行了研究。由于赛汝生产系统的研究问题通常是双目标优化问题,所以遗传算法中更常用的是可以求解双目标优化问题的非支配排序遗传算法(Non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II),如 Yu 等人<sup>[25]</sup>使用 NSGA-II 对流水生产线如何转换为赛汝生产的问题进行了研究;Liu 等人<sup>[19]</sup>使用 NSGA-II 对赛汝生产系统内的完工时间和碳排放问题进行了研究;Wang 等人<sup>[22]</sup>使用 NSGA-II 结合 SAA(Sample average approximation)的方法对赛汝生产系统内的总花费和服务水平问题进行了研究;Lian 等人<sup>[37]</sup>使用 NSGA-II 对赛汝生产系统内的生产平衡问题进行了研究。

为了得到更加精确的解,一些学者尝试在解决赛汝生产的问题时结合不同算法。如 Sun 等人<sup>[11]</sup>开发了将遗传算法和蚁群算法相结合的协同进化算法,其中遗传算法用以解决赛汝构建问题,蚁群算法用以解决赛汝调度问题;Ying 等人<sup>[34]</sup>将模拟退火和迭代贪婪算法结合,其中模拟退火用以解决工人分配问题,贪婪算法解决任务分配问题;Luo 等人<sup>[31]</sup>采用模拟退火和遗传算法来解决工人分配的问题,其中模拟退火用以最小化工人的空闲时间,遗传算法用以最小化系统的完工时间;Wang 等人<sup>[24]</sup>使用聚类算法和遗传算法相结合的求解方法解决赛汝生产系统内的工人和订单调度的问题。还有一些文章使用了在解决赛汝生产相关问题时较少使用的方法,如粒子群算法<sup>[29]</sup>、TOPSIS<sup>[46]</sup>、分支定界法<sup>[37]</sup>等。由于赛汝生产系统问题所构建的模型一般为非线性的数学模型,所以除了使用常见的启发式算法进行求解之外,一些学者也会采用将数学模型线性化后再用精确算法求解。如 Lian 等人<sup>[37]</sup>通过引入一些带有辅助约束的新变量将模型转变为混合整数线性规划(Mixed integer linear programming, MILP)模型;Sun 等人<sup>[14]</sup>通过将模型分解为赛汝构建和赛汝调度两个阶段,再转换为 MILP 模型进行求解。从统计的结果来看,大多数的作者关注于如何使用遗传算法以及如何对遗传算法进行改进以求解赛汝生产的相关问题,未来研究可以尝试使用其他更高效的算法来解决赛汝生产的相关问题。Wu 等人<sup>[47]</sup>研究了混合赛汝生产系统中的最小化最大完工时间问题,将该问题分解为 3 个子问题,并根据每个子问题的问题特性开发了一种高效的协同进化算法进行求解。

### 3.2 研究展望

尽管已有越来越多的学者开始着手并深入研究赛汝生产的相关问题,但该领域仍存在许多值得研究但未研究的问题。本文基于其他学者的研究提出以下一些亟需解决的问题和未来的研究方向。

1) 分析哪些行业适合应用赛汝生产系统,以及具体适合哪种类型的赛汝是很有必要的。因为有些行业中所需的技能学习成本很高,一个工人可能只能掌握某一项或几项技能,如操作难度和精细度较高的医疗、航空等行业。

2) 混合赛汝生产系统还需进行更深入的研究。对于生产步骤较复杂的产品,还需要考虑流水生产线与赛汝之间的布局问题,如确定流水生产线在赛汝系统前部、中部或后部,流水生产线上需要设置几个工位,每个工位上分配哪项任务,以及哪些员工负责完成流水生产线上的工作。

3) 研究赛汝生产系统在不确定决策环境下的表现。大多赛汝生产的相关文章假定订单数量、产品类型、各项任务的加工时间和订单交付期是提前已知的,但实际中订单往往是在不同时间连续或随机到达的,并且可能存在取消订单、更改交货日期、工人技能水平受到影响等不确定因素,这将直接影响企业在生产过程中对工人和订单的调度决策。

4) 研究赛汝生产系统时考虑更多实际因素,如:工人的心理因素、工人之间的合作或其他行为的相互影响;工人的技能水平较低且正在接受训练时的学习和遗忘因素;工人的累计劳动时间和工作类型对工人效率的影响;工人感受到的工作满意度和公平性程度对工作积极性的影响。

5) 扩展赛汝生产系统研究的优化目标。目前大多数文献重点关注于如何最小化生产时间、生产费用以及最大化利润等更实际的生产效益问题。但还有很多较少被研究但很有价值的研究方向,如最大化工人利用率、最小化工人或机器的空闲时间、产品库存、空间使用面积、生产提前期等。

6) 开发更高效、更精确的算法以解决赛汝生产系统的相关问题。目前解决赛汝生产的问题主要依靠启发式算法,并以遗传算法为主,但算法的求解效率和精确度还有一定的提升空间,如 Wu 等人<sup>[47]</sup>将混合赛汝问题分解,并根据子问题的问题特性开发了一种新型的高效协同进化算法(Cooperative coevolution algorithm),结果表明比单独使用遗传算法得到了更优的解(求解时间更短且解更精确)。在求解赛汝问题时可以尝试使用模因算法(Memetic algorithm),该算法主要是在遗传算法的基础上根据问题特性进行领域搜索,解空间内的搜索能力更高。未来可以开发一些求解效率和精确度更高的算法或者对某些混合算法(比如将蚁群算法、禁忌搜索算法和粒子群算法的结合)进行优化以更适合求解赛汝生产系统的问题。在求解赛汝问题中也可以根据特定问题开发精确算法或使用一些较成熟精确算法,如分支定界法(Branch and bound)等。

7) 将一些比较成熟的机器调度理论,比如并行机作业车间调度问题和模型等<sup>[48-50]</sup>引入到赛汝生产系统,进行深度结合,使得赛汝生产系统能向多阶段生产系统进行扩展,从而开辟新的研究方向。

## 4 结束语

本文重点对赛汝生产的相关研究文章进行梳理,并分析了赛汝生产的研究趋势和研究重点。根据优化目标

的不同将赛汝研究问题分为 5 种类型,涵盖赛汝生产的基础理论研究以及考虑流水生产线-赛汝转换、生产时间、生产费用、生产平衡的赛汝问题,并对这些问题类型的目标函数、数学模型、问题所考虑的因素和求解方法等进行了详细的统计,系统梳理了赛汝生产的主要研究问题,为后续的相关研究提供一个指导框架。文章首先介绍了赛汝生产系统的产生背景与 3 种类型赛汝的优缺点和主要应用场景。最后通过对赛汝生产的相关文献进行系统地研究分析,阐述了目前的研究现状,并提出了目前该领域还需进一步研究的问题。

#### 参考文献:

- [1] YIN Y, KAKU I, STECKE K E. The evolution of seru production systems throughout Canon[J]. *Operations Management Education Review*, 2008, 2: 27-40.
- [2] YIN Y, STECKE K E, SWINK M, et al. Lessons from seru production on manufacturing competitively in a high cost environment[J]. *Journal of Operations Management*, 2017, 49/50/51: 67-76.
- [3] LIU C G, LIAN J, YIN Y, et al. Seru seisan-an innovation of the production management mode in Japan[J]. *Asian Journal of Technology Innovation*, 2010, 18(2): 89-113.
- [4] YIN Y, STECKE K E, LI D N. The evolution of production systems from industry 2.0 through industry 4.0[J]. *International Journal of Production Research*, 2018, 56(1/2): 848-861.
- [5] STECKE K E, YIN Y, KAKU I, et al. Seru: the organizational extension of JIT for a super-talent factory[J]. *International Journal of Strategic Decision Sciences*, 2012, 3(1): 106-119.
- [6] LIU C G, STECKE K E, LIAN J, et al. An implementation framework for seru production[J]. *International Transactions in Operational Research*, 2014, 21(1): 1-19.
- [7] YU Y, TANG J F. Review of seru production[J]. *Frontiers of Engineering Management*, 2019, 6(2): 183-192.
- [8] WU L, CHAN F T S, NIU B, et al. Cross-trained worker assignment and comparative analysis on throughput of divisional and rotating seru[J]. *Industrial Management and Data Systems*, 2018, 118(5): 1114-1136.
- [9] KAKU I, GONG J, TANG J F, et al. A mathematical model for converting conveyor assembly line to cellular manufacturing[J]. *Industrial Engineering & Management Systems*, 2008, 7(2): 160-170.
- [10] 刘晨光, 廉洁, 李文娟, 等. 日本式单元化生产: 生产方式在日本的最新发展形态[J]. *管理评论*, 2010, 22(5): 93-103.  
LIU C G, LIAN J, LI W J, et al. Seru seisan: the latest manufacturing model developed in Japan [J]. *Management Review*, 2010, 22(5): 93-103.
- [11] SUN W, WU Y T, LOU Q, et al. A cooperative coevolution algorithm for the seru production with minimizing makespan[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 5662-5670.
- [12] YU Y, TANG J F, GONG J, et al. Mathematical analysis and solutions for multi-objective line-cell conversion problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 236(2): 774-786.
- [13] YU Y, TANG J F, SUN W, et al. Combining local search into non-dominated sorting for multi-objective line-cell conversion problem[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2013, 26(4): 316-326.
- [14] SUN W, YU Y, LOU Q, et al. Reducing the total tardiness by seru production: model, exact and cooperative coevolution solutions[J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(21): 6441-6452.
- [15] KAKU I, GONG J, TANG J F, et al. Modeling and numerical analysis of line-cell conversion problems[J]. *International Journal of Production Research*, 2009, 47(8): 2055-2078.
- [16] LIU C G, LI W J, LIAN J, et al. Reconfiguration of assembly systems: from conveyor assembly line to serus[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2012, 31(3): 312-325.
- [17] YU Y, TANG J F, SUN W, et al. Reducing worker(s) by converting assembly line into a pure cell system[J]. *International Journal of Production Economics*, 2013, 145(2): 799-806.
- [18] LIU C G, YANG N, LI W J, et al. Training and assignment of multi-skilled workers for implementing seru production systems [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 69(5/6/7/8): 937-959.
- [19] LIU C G, DANG F, LI W J, et al. Production planning of multi-stage multi-option seru production systems with sustainable measures[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 105: 285-299.
- [20] SUN W, LI Q Q, HUO C H, et al. Formulations, features of solution space, and algorithms for line-pure seru system conversion [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 2016: Article ID 9748377.
- [21] SHAO L M, ZHANG Z, YIN Y. Production system performance improvement by assembly line-seru conversion[M]//XU J P, HAJIYEV A, NICKEL S, et al. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Singapore: Springer Singapore, 2017, 502:

- 1165-1180.
- [22] WANG Y, TANG J F. Cost and service-level-based model for a seru production system formation problem with uncertain demand[J]. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 2018, 27(4): 519-537.
- [23] WANG Y L, ZHANG Z, YIN Y. Workload-based order acceptance in seru production system[J]. *International Journal of Manufacturing Research*, 2020, 15(3): 234-251.
- [24] WANG Y L, ZHANG Z, YIN Y. An order scheduling problem in seru production system considering worker assignment[J]. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 2021, 37(2): 149-167.
- [25] YU Y, GONG J, TANG J F, et al. How to carry out assembly line-cell conversion? A discussion based on factor analysis of system performance improvements[J]. *International Journal of Production Research*, 2012, 50(18): 5259-5280.
- [26] YU Y, SUN W, TANG J F, et al. Line-seru conversion towards reducing worker(s) without increasing makespan: models, exact and meta-heuristic solutions[J]. *International Journal of Production Research*, 2017, 55(10): 2990-3007.
- [27] YU Y, TANG J F, YIN Y, et al. Comparison of two typical scheduling rules of line-seru conversion problem[J]. *Asian Journal of Management Science and Applications*, 2015, 2(2): 154-170.
- [28] YU Y, SUN W, TANG J F, et al. Line-hybrid seru system conversion: models, complexities, properties, solutions and insights [J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2017, 103: 282-299.
- [29] ZHANG Z, SHAO L M, YIN Y. PSO-based algorithm for solving lot splitting in unbalanced seru production system[J]. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 2020, 35(4): 433-450.
- [30] AYOUGH A, HOSSEINZADEH M, MOTAMENI A. Job rotation scheduling in the Seru system: shake enforced invasive weed optimization approach[J]. *Assembly Automation*, 2020, 40(3): 461-474.
- [31] LUO L, ZHANG Z, YIN Y. Simulated annealing and genetic algorithm based method for a bi-level seru loading problem with worker assignment in seru production systems[J]. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 2021, 17(2): 779-803.
- [32] 张哲, 王丽丽, 殷勇. 基于多能工配置的巡回式赛汝订单调度优化决策[J]. *南京理工大学学报*, 2021, 45(1): 98-104.  
ZHANG Z, WANG L L, YIN Y. Divisional seru order scheduling optimization based on multi-skilled worker assignment[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2021, 45(1): 98-104.
- [33] 孙薇, 于洋, 唐加福, 等. 以提高生产率的流水线转单元的变邻域搜索[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(12): 3040-3047.  
SUN W, YU Y, TANG J F, et al. Variable neighborhood search for line-cell conversion towards increasing productivity[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(12): 3040-3047.
- [34] YING K C, TSAI Y J. Minimising total cost for training and assigning multiskilled workers in seru production systems[J]. *International Journal of Production Research*, 2017, 55(10): 2978-2989.
- [35] WANG J, YE N N, PENG Y F. Case studies on design for seru manufacturing[J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 39: 1090-1096.
- [36] YU Y, WANG J, MA K. Seru system balancing: definition, formulation, and exact solution[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 122: 318-325.
- [37] LIAN J, LIU C G, LI W J, et al. Multi-skilled worker assignment in seru production systems considering worker heterogeneity [J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2018, 118: 366-382.
- [38] WANG Y L, ZHANG Z, YIN Y. Multi-order scheduling optimization considering product operation and worker allocation in divisional seru[J]. *International Journal of Applied Decision Sciences*, 2021, 14(1): 24-42.
- [39] HAN X Z, ZHANG Z, YIN Y. Reliability analysis for a divisional seru production system with stochastic capacity[C]//IEEE. 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, December 16-19, Dec 2018, Bangkok, Thailand. Piscataway: IEEE, 2018.
- [40] HAN X Z, ZHANG Z, YIN Y. Reliability-oriented multi-resource allocation for seru production system with stochastic capacity [J]. *International Journal of Manufacturing Research*, 2020, 15(4): 371-386.
- [41] YILMAZ Ö F. Operational strategies for seru production system: a bi-objective optimisation model and solution methods[J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(11): 3195-3219.
- [42] 王洪芳, 罗成新. 两台平行机环境下加工时间退化的可拒绝排序问题[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 32(6): 15-19.  
WANG H F, LUO C X. Parallel-machine scheduling problem with deteriorating jobs and rejection[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2015, 32(6): 15-19.
- [43] 陈鑫, 李昕昀, 谢鹏宇. 平行机最小化误工损失调度问题的粒子群算法[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 35(5): 10-16.

- CHEN X, LI X Y, XIE P Y. A particle swarm optimization algorithm for scheduling on unrelated machines with late work criterion[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2018, 35(5): 10-16.
- [44] 荣建华, 彭丽, 张玲玲, 等. 一个可中断三台可拒绝平行机半在线排序问题[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2016, 33(3): 15-19.
- RONG J H, PENG L, ZHANG L L, et al. Preemptive semi on-line scheduling on three identical machines with rejection[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2016, 33(3): 15-19.
- [45] CHARALAMBOUS C, FLESZAR K. Variable neighborhood descent for the unrelated parallel machine scheduling problem[J]. International Journal on Artificial Intelligence Tools, 2012, 21(4): 1240019.
- [46] SHAO L M, ZHANG Z, YIN Y. A bi-objective combination optimisation model for line-seru conversion based on queuing theory[J]. International Journal of Manufacturing Research, 2016, 11(4): 322-328.
- [47] WU Y T, WANG L, CHEN J F. A cooperative coevolution algorithm for complex hybrid seru-system scheduling optimization [J]. Complex & Intelligent Systems, 2021, 7(5): 2559-2576.
- [48] LIU S Q, KOZAN E. Parallel-identical-machine job-shop scheduling with different stage-dependent buffering requirements[J]. Computers and Operations Research, 2016, 74: 31-41.
- [49] LIU S Q, KOZAN E, MASOUD M, et al. Job shop scheduling with a combination of four buffering constraints[J]. International Journal of Production Research, 2018, 56(9): 3274-3293.
- [50] LIU S Q, KOZAN E. A hybrid shifting bottleneck procedure algorithm for the parallel-machine job-shop scheduling problem [J]. Journal of the Operational Research Society, 2012, 63(2): 168-182.

## Operations Research and Cybernetics

### Literature Review, Classification and Agendas on Japanese Cell (Seru) Production Systems

LIU Shiqiang<sup>1</sup>, BIAN Zhongliang<sup>1</sup>, YIN Yong<sup>2</sup>, CHEN Ye<sup>3</sup>

(1. School of Economics and Management, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. School of Business, Doshisha University, Kyoto 602-8580, Japan; 3. Fuzhou Taigene Industry Co., Ltd, Fuzhou 350119, China)

**Abstract:** [Purposes] Seru production is a new production mode suitable for multi-product types, small batch market demand, with both efficiency and flexibility. However, Seru production is still a very young field, the relevant academic research lags behind, the theory and method system is far from perfect, and many important problems have not been solved. Therefore, this study conducted a comprehensive and up-to-date review of Seru production, and expounded the research status and existing problems of Seru production. [Methods] The paper on Seru production was divided into 5 categories by the literature analysis method, which are the basic theory research, the Seru problem considering the assembly line-Seru conversion, production time, production cost and production balance. The common objective function, mathematical model, the factors considered by the problem and the solution method of the 5 kinds of problems were sorted out in detail. [Findings] Based on the analysis of Seru's research, some urgent problems and potential research opportunities in this field are put forward. [Conclusions] With the acceleration of globalization and the increasing diversification of consumer demand, the implementation of Seru production is beneficial to maintain the competitiveness of enterprises, and relevant research needs to be further improved in-depth.

**Keywords:** Seru production; cell production; assembly line-Seru conversion; literature review; literature classification; research opportunities

(责任编辑 黄 颖)