

doi: 10.19920/j.cnki.jmsc.2023.02.001

# SERU 系统构建的理论框架<sup>①</sup>

唐加福<sup>1</sup>, 任玉红<sup>1\*</sup>, 殷勇<sup>2</sup>

(1. 东北财经大学管理科学与工程学院, 大连 116025;

2. 日本同志社大学商学院, 京都 602-8580, 日本)

**摘要:** 不断加剧的内、外部制造环境变化, 迫使制造业的竞争逐渐从效率和质量转向对制造环境的响应能力, 这促进了 SERU 生产方式的出现与发展. SERU 系统构建是实现 SERU 生产方式的关键环节, 也是 SERU 系统运作管理要解决的核心决策问题, 由此引起了学术界的广泛关注. 本文基于现有文献与企业实践, 探讨 SERU 系统构建决策的基础性问题, 包括 SERU 系统构建决策的影响因素、现实场景和决策内容、性能评价指标和构建策略; 从系统构建决策的层次角度, 将 SERU 系统构建分为 SERU 系统的结构设计和能力设计, 分别对应 SERU 系统的结构柔性和重组柔性, 并重点阐述了结构设计和能力设计决策的适用场景、内容和评价指标; 建立了 SERU 系统构建的基本理论框架, 并利用该框架讨论了若干重要的未来研究方向. 该理论框架有助于系统地理解 SERU 系统构建, 为构建和优化 SERU 系统提供理论基础和建模框架, 也为企业构建 SERU 生产线提供指导和参考.

**关键词:** SERU 生产方式; 柔性生产; 系统构建; 结构设计; 能力设计

**中图分类号:** C935 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2023)02-0001-14

## 0 引言

近年来, 信息技术与人工智能技术的飞速发展、顾客需求的多样化和产品生命周期的缩短, 导致制造企业的内外部环境发生了巨大变化, 企业生产过程及管理出现了高度的不确定性<sup>[1,2]</sup>, 制造企业不得不寻求既有效率又有柔性的生产组织管理方式, 以提升应对不确定性的能力<sup>[3,4]</sup>. 在这种背景下, 佳能和索尼等日本企业探索性地提出了日本式单元生产方式, 简称 SERU 生产方式, 它被认为是兼具效率和柔性的管理方式<sup>[5,6]</sup>.

SERU 生产方式源自于 20 世纪 90 年代日本制造企业的生产现场, 与当时日本所处的市场环境和独特的企业文化息息相关<sup>[7,8]</sup>, 特别是日本

独特的以人为本的企业文化和工人的多技能化水平, 使得该生产方式广泛应用于索尼、佳能、富士通、NEC 等并取得了很好的实际效果<sup>[5,6,9,10]</sup>. 近年来中国一些制造企业已经开始实施 SERU 生产方式, 特别是在珠三角、长三角和青岛、大连的机械与电子装配企业, 如迈瑞医疗、欣旺达、富士康、海信等, 并取得了较好的改善效果<sup>[10-12]</sup>.

SERU 生产方式是基于多技能化工人和简单、易移动的设备等柔性资源, 通过对人员、设备和产品的合理组织来实现高效率和高柔性的一种面向装配生产系统的新型生产组织模式. SERU 生产方式由流水装配线经分割转化而来, 采用可移动的工作台、简单的设备和手工工具取代了流水装配线上的传送带和专用的自动化机器设备,

① 收稿日期: 2021-08-04; 修订日期: 2021-09-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72293563; 71831003).

通讯作者: 任玉红(1990—), 女, 新疆吐鲁番人, 博士生. Email: 78465346@qq.com

使其能够快速、频繁地进行建造、改装、拆除和重建,克服了流水线生产的刚性,有效应对市场需求环境的变化<sup>[5,7]</sup>。Seru 是指一个装配单元,是 SE-RU 系统最基本的组织单位,每个 Seru 由一个或几个多能工组成,每个多能工负责一种或多种产品从开始到结束的所有操作。为便于区分,研究中小写的 Seru 指装配单元(组织形态),大写的 SE-RU 指生产方式或生产系统。这里的 Seru 与基于成组技术的单元制造(Cell Manufacturing, CM)中的 Cell 中文均称为“单元”,但它们有着本质的区别<sup>[7,8]</sup>,主要表现在以下几个方面:1) 应用领域不同, Seru 特指装配单元,面向以手工装配作业为主的装配过程,而 Cell 面向以机加工作业为主的加工过程;2) 构建方式不同, Seru 是以人为中心的制造组织,主要以人为中心构建单元,而 Cell 是以昂贵的机器设备为中心,设备是构建的核心要素;3) 追求目标不同, Seru 是为了克服流水装配线的刚性,目标是寻求柔性,而 Cell 是为了提高面向工艺专业化车间的作业效率,目标是追求效率。SERU 系统是以人为中心的制造组织,实质上是一种可重构的装配系统,主要表现在 SERU 系统能够根据外部市场需求变化对 Seru 进行重新配置,从而实现了对多品种小批量、变品种变批量市场需求环境的有效应对,即 SERU 系统具有高柔性特征。SERU 生产方式是经流水线向单元装配系统转化而来,即流水线拆分成单元装配线,兼顾了丰田生产方式(Toyota production system, TPS)的柔性和流水线生产方式(Flow-line)的高效率<sup>[5,9]</sup>。尽管如此, SERU 生产方式与 TPS、Flow-line、CM 在适用范围、生产环境、组织形式、管理模式等方面既有其独特性,也各有其优势和不足,系统性的总结参见综述性论文<sup>[6]</sup>、专著<sup>[7]</sup>等。SE-RU 生产方式主要适用于附加值高、生命周期短、更新换代快的机械电子产品,以手工装配作业为主、简单便宜设备、多能工比例较大、人工成本较高的装配生产环境<sup>[7,8]</sup>。

正是因为 SERU 生产方式的广泛应用与成功实践,引起了运筹与管理科学领域国内外学者的高度关注。学者们分别从不同角度对 SERU 生产

方式进行了深入的探索,主要聚焦于 SERU 生产方式的实施场景与条件<sup>[10,15]</sup>、成功的应用案例和运行机制分析<sup>[10,12,15]</sup>、流水线向 SERU 生产方式转化(简称 LINE-SERU 转化)<sup>[16-22]</sup>、SERU 系统构建<sup>[18,19,23,29]</sup>与 SERU 系统调度<sup>[23,25]</sup>、SERU 系统的性能评价等<sup>[8,11,14,20,21]</sup>。从研究方法的角度,主要采用企业访谈与问卷<sup>[9,10,14]</sup>、实证研究<sup>[14,15]</sup>、案例研究<sup>[10,12,15]</sup>、仿真分析<sup>[8]</sup>、数理建模<sup>[6,16,18,19,22,28,30]</sup>。以上这些研究分析了 SERU 生产方式的适用场景、优势与不足,报道了企业实施 SERU 生产方式的收益与好处,也探讨了系统运行的使能机制和成功案例的影响因素,分析了 LINE-SERU 转化的方式以及如何转化的优化模型<sup>[18,21,22,24,25,30]</sup>。对于中国企业实施 SERU 方式以及对中国情景的适应性方面,研究人员通过现场调研、问卷调查、比较分析和案例分析解析了 SERU 生产方式在中国制造企业中的适用性与实践意义<sup>[11,14]</sup>。文献[11]通过案例讨论了中国企业与日本企业在实施 SERU 生产方式上的异同;文献[12,13]研究认为,国内企业的团队协作活动、工人自治性和敬业度的培养,有助于多能工的培养和多能工作用的发挥。Liu 等<sup>[14]</sup>对 357 家中国制造企业的调研数据的实证分析发现:团队协作活动对 SERU 系统性能和柔性有很好的效果;同时发现,影响企业实施效率最重要的生产要素是具有多技能化的人和以人为中心的企业人力资源文化<sup>[14]</sup>。与日本企业对比而言,中国企业实施 SERU 生产方式具有以下特征<sup>[11,13]</sup>:1) 在人力资源文化方面,国内企业大都以短期劳务外包为主,工人变动比较频繁,流动性大,而日本企业秉持以人为本的企业文化实行终身雇佣制;2) 在生产要素方面,中国企业很少注重多技能化的培训,工人多数是单一技能,日本企业注重培训,工人多技能化水平高;3) 在实施范围和成熟度方面,中国企业属于初级阶段,以分割式 Seru 为主;日本企业已处于成熟阶段,主要采用单人式 Seru;4) 中国企业的团队协作活动对多能工的培养及多能工在企业里的作用发挥有很好的效果。这些中国情景的特征不仅影响了 SERU 生产方式的实施效率和

效果,也影响 SERU 生产方式下的运营管理,包括 SERU 系统构建和系统调度,本研究主要关注于 SERU 系统构建问题。

SERU 系统构建是实现 SERU 生产方式的关键环节,也是 SERU 系统运作管理要解决的核心决策问题,对于企业提升运营绩效起着重要作用。由于产品组合多样及需求量动态变化等因素的存在,实践中的 SERU 系统构建极富有挑战性。尽管对 SERU 系统构建和调度问题的研究取得了一些成果<sup>[18,19,23,30]</sup>,但这些研究仅针对特定的场景,建立该问题的优化模型并提出求解方法,多数围绕运作层面展开,没有系统性地分析 SERU 系统构建问题的影响因素、决策内容、可能的优化问题及其分类、性能评价指标,更没有提供一个分析的理论框架。

研究作为国家自然科学基金重点国际合作项目的资助成果,基于文献和中国企业实践,系统地总结了 SERU 系统构建决策的基础性问题,包括 SERU 系统构建决策的影响因素、SERU 系统构建的现实场景和构建内容、SERU 系统构建的性能评价指标和构建策略,旨在为 SERU 系统构建提供一个基本理论框架。该理论框架从决策层次角度,将 SERU 系统构建分为 SERU 系统的结构设计和能力设计,分别对应 SERU 系统的结构柔性和重组柔性。该框架结合中国企业实践,分析了 SERU 系统构建的现实场景,包括 LINE-SERU 转化场景(L-S)、新建 SERU 场景(N-S)和 SERU-SERU 调整场景(S-S),探讨了不同场景下的 SERU 系统构建问题。基于此框架,重点分析和总结了 SERU 系统结构设计和能力设计的决策输入、决策内容及评价指标和进一步研究的问题。该研究有助于深化和系统地理解 SERU 系统构建决策问题,为构建和优化 SERU 系统提供理论基础和建模框架,也为企业构建 SERU 生产线提供指导和参考。

## 1 SERU 系统构建的研究框架

SERU 系统构建是实现 SERU 生产方式的关

键环节,也是 SERU 系统运作管理要解决的核心决策问题。SERU 系统构建(SERU System Formation)指通过对人员、设备和产品的组织获得满足特定管理目标的 SERU 系统的管理活动<sup>[6]</sup>,其本质是一类不确定条件下的资源组合优化问题。SERU 系统构建决策的输入是产品类型、需求量以及工人的多技能化程度,决策内容包括构建单元的数量、工人-Seru 的指派及产品-Seru(或任务-Seru)的分配,目标是在某种既定的性能指标上实现特定的管理目标<sup>[7]</sup>。在总结现有研究中特定场景的单元构建问题、组成要素及其模型的基础上,经过对文献中优化指标和影响因素的系统梳理以及作者对企业实践的思考,考虑系统类型、现实场景等因素的影响,从系统的角度提出 SERU 生产系统构建问题的研究框架如图 1 所示。本节从 SERU 系统类型、影响因素、现实场景的角度进行系统总结。

### 1.1 SERU 系统类型

SERU 系统构建决策中首先要考虑的问题就是构建一个什么样的 SERU 系统,即 SERU 系统的组织形态的问题。SERU 系统的组织形态是由 Seru 的组织形态决定的,按照工人组织方式的不同,Seru 有三种基本类型<sup>[5,7]</sup>:分割式 Seru(Divisional Seru)、巡回式 Seru(Rotating Seru)和单人式 Seru(Yatai)。分割式 Seru 是通过将工序按照流动方向分割成若干个工作块而形成,每个工作块由原流水装配线上多道工序组成,每个工作块由 1 名工人负责,工人是多能工,所以它是由流水线转化为 SERU 系统的初级形式。巡回式 Seru 同样也由多名工人组成,但每名工人独立完成产品的全部装配任务,工人按照一定顺序随着产品装配工序位置移动,所以也被形象地称为逐兔式 Seru,要求工人是全能工。单人式 Seru 可以看成是由一名工人独立负责的巡回式 Seru,它是 SERU 生产方式最高级的形式,也是最简单的形态<sup>[8]</sup>。

根据 SERU 系统中是否有流水线,SERU 系统可分为纯 SERU 系统(PSS)和混合流水线 SERU 系统(HSS)<sup>[8]</sup>。PSS 是指只含有装配单元而不

含流水线的 SERU 系统,包括纯分割式 SERU 系统、纯巡回式 SERU 系统、纯单人式 SERU 系统和复合 SERU 系统(CSS),其中前三种系统中只含有一种基本 Seru 类型,如纯分割式 SERU 系统是指系统中只含有分割式 Seru 的系统 CSS 中至少含有两种 Seru 类型. HSS 是指既含有一种或多种基本 Seru 类型也包含一部分流水线的 SERU 系统. SERU 系统类型对 SERU 系统构建的影响主要体现在 Seru 内部分配,包括工序的划分、工人-工序的指派. 选择哪种 SERU 系统类型主要由产

品的工序特点及企业内部环境决定,例如,如果不同产品间几个工序相似,或者几个工序需要相同的设备而这些设备较昂贵,这时 HSS 是不错的选择. 如果产品工序较复杂,零部件组装工序较多,这时可以考虑构建 CSS. 如果企业工人技能水平不高,或者工人流动性较大,这时可以考虑构建分割式 SERU 系统. 如果工人均是全能工且设备较昂贵时,此时考虑构建巡回式 SERU 系统;如果工人是全能工且设备低廉,单人式 SERU 系统是最好的选择.

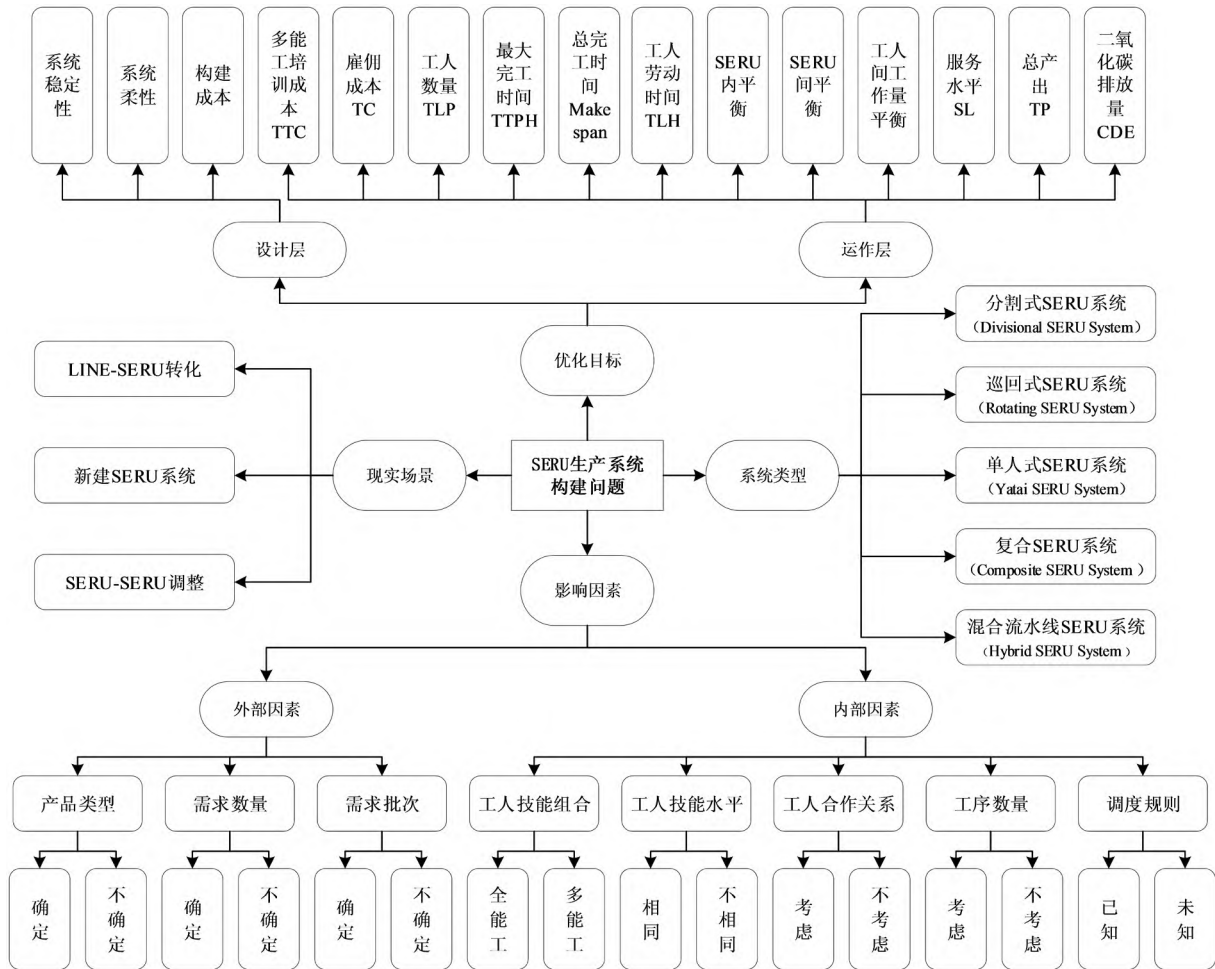


图1 SERU 系统构建的研究框架

Fig. 1 Framework of research on SERU system formation

对不同类型的 SERU 系统, SERU 系统构建决策的重点有所不同. 分割式 SERU 系统构建决策的重点是动态调整 Seru 间的任务分配以及 Seru 内的平衡性,即确定加工工序的分配. 巡回式 SERU 系统由于工人掌握产品的全部操作,无需

考虑工序划分问题,工人分配遵循效率相近原则. 在构建单人式 SERU 系统时,由于单元数量等于人员数量,决策重点是工人效率与加工任务(产品)的组合分配. 因此,相对于其他两种系统,单人式 SERU 系统构建决策要简单很多. CSS 由主

体单元和一个或者多个辅助单元组成,其构建决策不但要关注主体单元还要关注辅助单元,决策重点是主体单元与辅助单元间工序的分配及工人分配。HSS 决策的重点是确定哪些工序留在流水线上,以及单元间工人分配。现有研究聚焦于巡回式 SERU 系统的构建,也有一些学者研究了混合流水线 SERU 系统的构建<sup>[16,18]</sup>,对分割式 SERU 系统及复合 SERU 系统构建决策的研究还较缺乏。

## 1.2 SERU 系统构建的影响因素

SERU 系统构建的影响因素主要包括外部因素和内部因素,其中外部因素主要指市场因素,包括产品类型、批次大小和批次数量;内部因素是指来自于企业内部的要素,包括工人技能组合、技能熟练程度、工人间合作关系、工序的数量及调度规则等。外部因素方面,研究工作聚焦于面向特定生产任务的 SERU 系统构建,即生产任务的批次和数量、产品种类、到达的顺序已知前提下的 SERU 系统构建问题<sup>[17,20,22,23,27,31]</sup>。事实上,由于时间范围大,产品需求信息不确定,确定性的产品信息很难给出;即使能够获得,由于市场需求波动的存在,SERU 系统构建也很难“一劳永逸”地满足多种需求场景。对此,有些学者提出了考虑随机需求的相对稳定的 SERU 系统构建问题<sup>[27,28]</sup>。

在内部因素方面,现有研究重点考虑了工人的技能因素<sup>[16,26,28,31,32]</sup>,主要聚焦于工人是全能工的假设前提,即工人均是掌握了全部产品生产技能的全能工,工人的不同质性主要体现在技能熟练水平的差异。事实上,由于交叉培训需投入大量的人力和财力,再加上产品生命周期短、产品种类繁多、工人流动性大,企业很难满足全能工的假设条件;另一方面,对于中国企业来说仍处于 SERU 生产的初级阶段,尚不能满足全能工的前提。可见,全能工的假设前提脱离了企业管理实际,难以在管理实践中应用。另一个内部因素是工人合作关系,一些学者证明了工人间合作关系差异较大时,考虑工人间合作关系的 SERU 系统构建会得到更好的结果<sup>[29]</sup>。工序是影响 SERU 系统构建的另一个因素,其主要源于 SERU 系统类型,巡回式 SERU 系统构建无需考虑工序因素,大大简化

了问题,受到学者们的普遍关注;工序因素是分割式 SERU 系统构建考虑的重点,现有研究还较缺乏<sup>[6]</sup>。此外,SERU 系统调度也是一个内部因素,为了简化问题,大多数研究都是在给定调度规则(如 FCFS 或 SPT 规则)下进行的 SERU 系统构建<sup>[23]</sup>,但这样得到的构建方案并不是全局最优,为此一些学者考虑了 SERU 系统构建与调度的联合优化,并证明在这种情况下能够得到更好的构建方案<sup>[23,25,33]</sup>。

## 1.3 SERU 系统构建的现实场景

SERU 系统构建的现实场景是指面向实践的 SERU 系统构建发生的背景环境,它反映了 SERU 系统构建问题的实施条件,即 SERU 系统从何而来。在生产实践中,SERU 系统主要有 3 种现实场景:1) 由流水装配线改造为 SERU 系统,简称为 LINE-SERU 转化(L-S);2) 新建 SERU 系统(N-S);3) 对现有 SERU 系统进行调整形成新的 SERU 系统,简称为 SERU-SERU 调整(S-S)。许多学者认为 SERU 生产方式是为了克服流水装配线生产方式的刚性,由流水装配线转化而来,这个过程被称为 LINE-SERU 转化<sup>[16,22,28,30]</sup>。L-S 场景下的 SERU 系统构建问题,主要解决如何将流水装配线拆分为 Seru 的问题,其特点是工人是流水装配线时期的工人,是掌握一项或者少数几项技能的单能工或多能工。但为了简化问题,大多数文献均基于工人是全能工的假设前提,少数文献考虑了 L-S 场景下基于多能工的 SERU 系统构建问题<sup>[26,32]</sup>。

实际生产中,SERU 系统还可能来源于新建,即并非从其他生产方式转化而来,这种场景被称为新建 SERU 系统(N-S)。新建 SERU 系统场景是 SERU 系统构建的重要现实来源,N-S 场景下的 SERU 系统构建问题侧重于解决如何构建 SERU 系统及工人需掌握哪些技能,需要多少。相对于其他现实场景,N-S 场景下的 SERU 系统构建决策的输入信息更少,决策难度也相应更大。目前的 SERU 系统构建研究较少面向新建 SERU 场景,文献[31]虽然考虑了此场景,但未能体现出该场景下 SERU 系统构建问题的特点<sup>[31]</sup>。

由于需求不确定性和资源有限约束的存在,实践中 SERU 系统可能来源于现有的 SERU 系

统,即SERU系统是由SERU系统经调整转化而来,这种场景被称为SERU-SERU调整场景(S-S)。S-S场景下的SERU系统构建问题,主要关注如何在尽量少的改变现有SERU系统的前提下重新配置生产能力以满足新的市场需求,该场景下工人来源于现有SERU系统,因而是多能工或全能工。由于不确定性的存在,实践中不可能构建出一个“万能”的SERU系统,使其满足任意需求。也就是说,S-S调整场景是SERU系统运作中必然要面对的现实场景。

从以上分析可以看出,明确区分SERU系统构建的现实场景,对于寻求更合理的SERU系统构建方案具有重要意义。目前的SERU系统构建问题过于聚焦于LINE-SERU转化场景,不利于深入理解企业SERU系统构建实践,需要从更广泛的现实场景视角深入研究SERU系统构建问题。

## 2 SERU系统构建问题的分类

考虑到系统构建决策问题本身的逻辑关系和生产管理系统设计与运营的两类重要问题,研究从SERU系统构建的决策层次视角,将SERU系统构建分为结构设计和能力设计两类决策问题。这两类决策问题对应的决策层次、发生场景、决策输入、决策内容、评价指标和构建策略如图2所示。其中,结构设计是策略层的SERU系统构建,目的是在随机分布需求场景下获得一个具有柔性、相对稳定的“静态”SERU结构,使其能够应对“动态”变化的市场需求;主要对应两种现实场

景:L-S和N-S。能力设计是运作层面的SERU系统构建决策,是通过对现有Seru中的人员、设备和产品进行重新配置,来满足特定生产任务的过程。由于内、外部环境不确定性的存在,实践中的SERU系统很难满足所有的需求场景,当现有SERU系统无法满足特定生产任务时,触发能力设计;主要适用于S-S场景,也可用于L-S和N-S场景下能力的重新配置,但这两种场景不能体现出能力设计对现有SERU系统的“继承性”。一般情况下,在实施SERU生产方式的过程中,先发生结构设计,当现有SERU系统结构无法满足特定的生产任务时触发能力设计;换句话说,能力设计是在现有SERU系统基础上进行的能力调整。

SERU系统的结构设计和能力设计具有不同的特点,主要表现在以下几个方面:1)决策输入不同,结构设计无法获知具体的生产任务,只能根据历史订单数据获得产品的需求分布特点作为决策输入信息,而能力设计能够获得具体的生产任务信息,包括产品种类、批次大小和批次数量输入的是更加具体的生产任务;2)关注重点不同,结构设计更加关注如何根据产品的需求分布特征构建一个相对稳定而又具有柔性的SERU系统,即结构设计侧重于设计层评价指标,而能力设计更加关注如何对现有SERU系统进行调整,使其能够快速响应特定生产任务,即能力设计更加关注运作层评价指标。结构设计和能力设计是SERU系统构建在不同决策阶段的表现形式,它们在决策输入、决策内容和评价指标方面都有着本质的区别,如表1和图2所示。

表1 SERU系统结构与能力设计的比较

Table 1 Comparison of SERU system structure design and capacity design

项目		结构设计	能力设计
相同点	决策内容相同	1. Seru的数量;	
		2. 产品-Seru的分配关系;	
		3. 工人-Seru的配置	
不同点	决策阶段不同	策略决策阶段	运作决策阶段
	决策依据不同	期望环境变化(产品需求)	特定的环境变化(生产任务)
	现实场景不同	主要发生在L-S场景和N-S场景下	主要发生在S-S场景下,但有时也会发生在L-S场景和N-S场景
	形成过程不同	从无到有的过程	从一种SERU系统配置状态转化为另一种SERU系统配置状态的过程

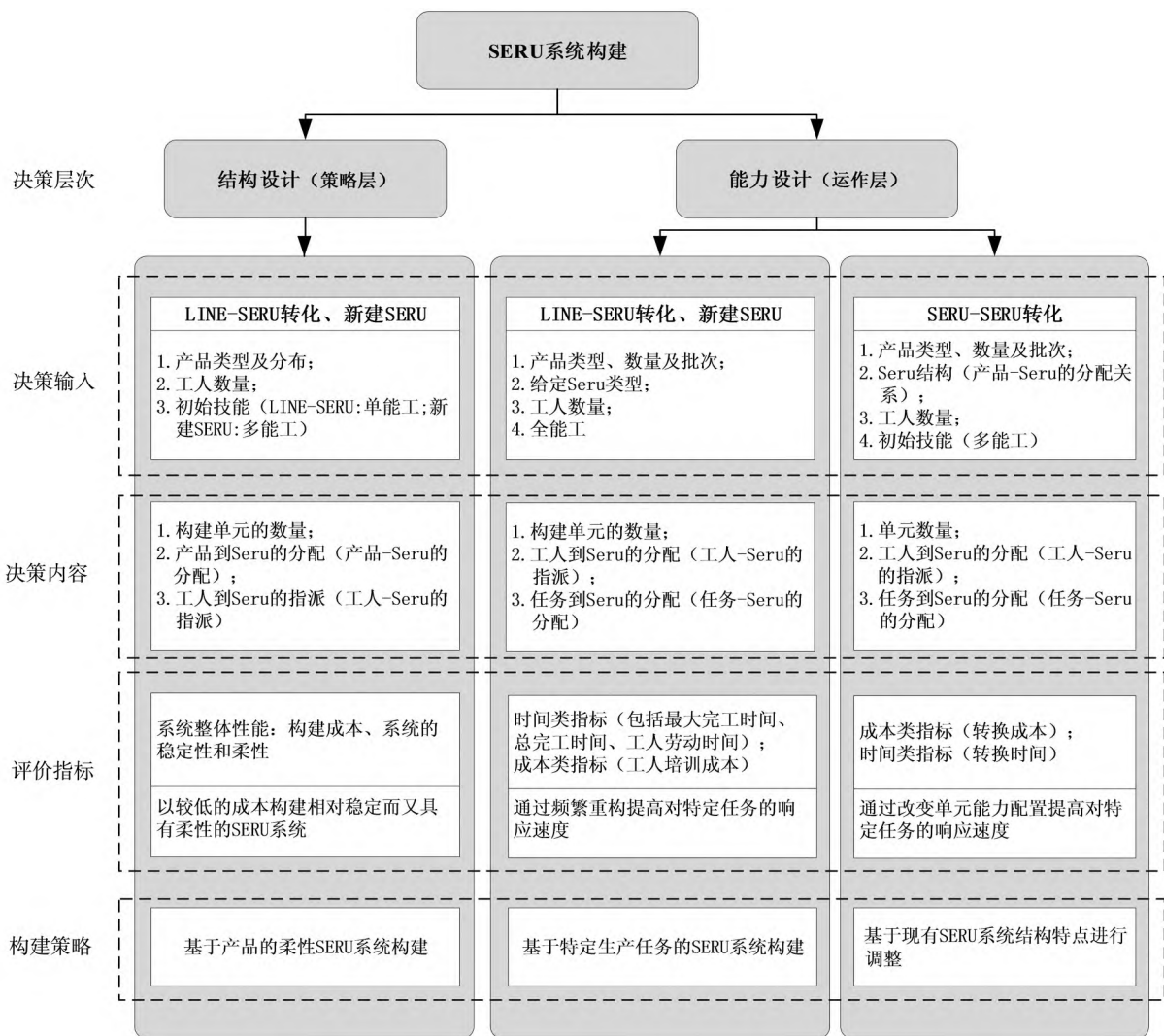


图 2 SERU 系统构建决策的建模框架

Fig. 2 Framework of SERU system formation decision-making

### 3 SERU 系统结构设计与评价指标

SERU 系统结构设计 (System Structure Design, SSD) 指在由流水线生产模式转换为 SERU 系统 (L-S) 或新建 SERU 系统 (N-S) 的初期, 企业根据预测的市场需求, 通过对人员、设备和产品的组织获得满足特定管理目标的系统结构的过程<sup>[6]</sup>. SERU 系统结构设计是实施 SERU 生产方式的第一步, 是确定 SERU 系统结构的过程, 其目标是构建一个“平均”意义上的 SERU 系统, 能够以相对稳定的系统结构满足大多数的需求场景, 即形成结构柔性. 这里说的结构柔性主要表现在产品与单元形成的网络结构对波动需求的包容性

上, 或者说是系统结构对市场需求变化体现出的稳定性和坚固程度.

#### 3.1 SERU 系统结构设计的决策内容

SERU 系统结构设计的目的是获得一个具有柔性的“静态”结构, 能够应对“动态”变化的市场需求. 为此, SERU 系统的结构设计决策不仅要确定构建单元的数量、工人在 Seru 间的指派 (工人-Seru) 和产品在 Seru 间的分配 (产品-Seru), 还需要确定单元内 Seru 组织形态 (Seru 类型)、Seru 布局形状、工序划分以及工人在工序间的指派 (工人-工序)<sup>[8]</sup>. 如图 3 所示, 这些决策既包括系统级决策内容: 构建单元的数量、工人-Seru 的指派和产品-Seru 的分配; 也有单元级决策: Seru 的大小 (Seru 内人数)、形状、组织形态、工序划分以及

工人在工序间的指派. 当然, 具体的决策内容要根据 SERU 系统的类型确定, 例如对于混合流水线 SERU 系统而言, 系统级决策不仅要考虑构建多少个 Seru, 还需考虑工序分配问题, 即流水线上保留哪些工序, 以及哪些 Seru 共享一个短流水线等内容. 对于复合 SERU 系统, 结构设计需考虑采用哪些 Seru 类型复合的方式, 每种 Seru 负责哪些工序等内容; 对于纯巡回式 SERU 系统而言, 只需确

定构建单元的数量, 各单元中人员的数量及人员的简单分配(效率相近原则), 单元级决策不必考虑工序的分配问题. 对于单人式 SERU 系统而言, 由于工人数量就是单元的数量, 系统级设计只需考虑构建单元的数量, 单元级设计只需考虑工人效率与产品的组合分配. 正因为巡回式 SERU 系统设计不必考虑单元内的设计, 大大简化了问题, 现有研究聚焦于巡回式 SERU 系统的构建.

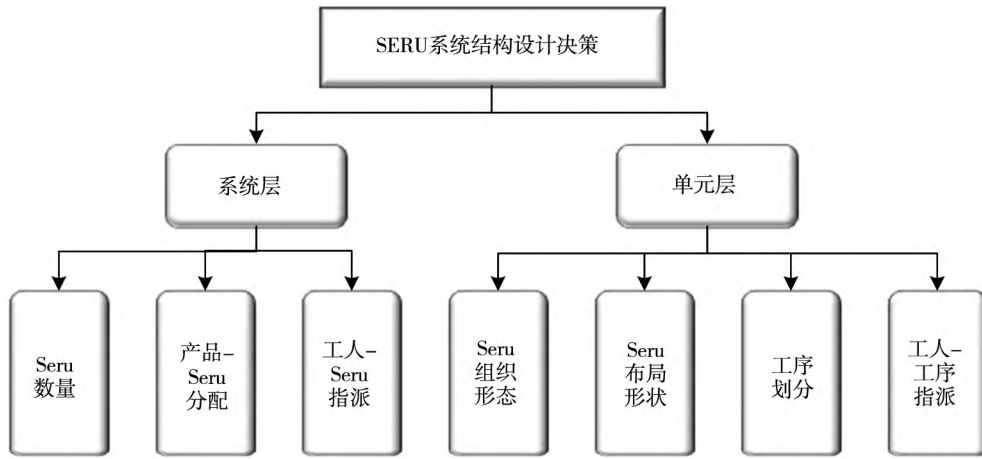


图3 SERU系统结构设计的决策内容

Fig. 3 Decision-making content of SERU system structure design

### 3.2 SERU 系统结构类型

SERU 系统结构设计的目的是形成具有一定柔性的 SERU 系统结构. 从实现柔性程度的角度, SERU 系统结构分为三种基本类型: 单一柔性 SERU 系统结构、全柔性 SERU 系统结构和部分柔性 SERU 系统结构.

单一柔性 SERU 系统结构是指每个 Seru 能且仅能生产唯一一种产品类型, 每种产品类型都对应特定一个 Seru 生产, Seru 与产品之间是“一对一”的关系. 这种结构设计简单, Seru 数等于产品种类数, 但这种结构对需求变化表现出绝对刚性, 实践中企业很少采用这种结构.

全柔性 SERU 系统结构, 每个 Seru 均能生产系统中全部产品类型, 每种产品都能在任意 Seru 中生产, Seru 与产品是“全对全”的关系. 显然, 这种结构具有完全柔性, 能灵活应对需求变化, 是企业希望实现的柔性结构. 但是实现这种结构有两个重要前提: 一是工人必须是掌握所有产品大部分或者全部操作的多能工或者全能工; 二是所有

单元均需配置生产全部产品类型的设备. 换句话说, 全柔性 SERU 系统需较高的成本投入; 因而这种结构在实际生产中应用的较少.

部分柔性 SERU 系统结构是指系统中每个单元都能生产多种产品类型, 每种产品都对应多个单元能够生产, 即 Seru 与产品之间是“多对多”的关系. 与前两种结构相比, 这种结构不仅克服了单一柔性结构的绝对刚性, 还避免了全柔性结构的高成本投入, 并且如果结构设计合理, 部分柔性结构还能获得与全柔性结构相同或接近的柔性, 如链式结构<sup>[34]</sup>, 被证明可以获得与全柔性相同的柔性.

从以上分析可以看出, 由于不确定性的存在, 实践中的 SERU 系统需具备一定的柔性, 因而单一柔性 SERU 系统结构很少被采用; 同时, 全柔性 SERU 系统结构虽然能够实现完全柔性, 但需较高的成本投入, 因而企业也只能望而却步. 实际生产中, 企业最常采用部分柔性 SERU 系统结构, 结构设计的目的正是获得一个符合要求的部分柔性



SERU 系统结构. 目前, SERU 系统构建的研究仅聚焦于全柔性 SERU 系统<sup>[17, 27]</sup>而缺乏对部分柔性 SERU 系统的关注.

### 3.3 SERU 系统结构设计的评价指标

正如前文所述, SERU 系统结构设计更加关注系统的整体性能, 即设计层评价指标. 设计层评价指标反映了 SERU 系统在未来某段时间的整体性能, 体现了企业实施 SERU 系统的主要动机. 许多学者提出, 企业实施 SERU 生产方式最重要的驱动力是其高柔性的特征<sup>[5, 10, 15]</sup>, 可见柔性应是 SERU 系统结构设计重要评价指标. 另一方面, SERU 系统作为一种可重构系统, 系统稳定性也应是其关注的重要指标. 此外, 成本是任何企业最为关注的指标, 结构设计关注的成本既包括构建成本(工作台、机器设备等), 也包括柔性投资成本(即为获得柔性需要进行的技术升级、新设备的引进或多能工的培养而投资的成本). 目前, 大量研究仅聚焦于 SERU 系统对特定生产任务的响应能力, 这种“只顾眼前”的评价方式使系统在应对特定生产任务时性能良好, 面对其他生产任务时性能较差, 也就是说评价缺乏系统性和整体性.

## 4 SERU 系统能力设计与评价指标

SERU 系统能力设计 (System Capacity Design, SCD) 也称为能力重组, 是指在运作阶段, 由

于环境不确定性的存在, 现有 SERU 系统无法满足特定的生产任务, 对给定 Seru 中的人员、设备和产品重新配置的管理活动. SERU 系统能力设计的目的是通过动态配置 SERU 系统能力, 使其具有随需求变化不断获得再生的能力, 即重组柔性, 主要表现在 SERU 系统根据需求变化动态重构的能力. 换句话说, SERU 系统能力设计使得系统具有“以动治动”的能力, 即以“动”态变化的能力配置, 响应“动态”变化的市场需求的能力.

### 4.1 SERU 系统能力重组方式

能力重组方式的选择是 SERU 系统能力设计的关键, 主要包括四种基本能力重组方式: 1) 增加或减少工人 ( $W+$ ,  $W-$ ) 这种方式能够有效应对需求量的增加或减少; 2) 产品-Seru 的重新分配 (PS) 这种方式多用于品种增加或减少的需求场景; 3) 工人-Seru 的重新指派 (WS) 这种方式是指通过调整工人-Seru 的分配方式来响应需求的变化, 可用于应对多种场景, 如当需求量变化时, 可通过调整工人-Seru 的指派来重新分配生产能力, 从而匹配需求; 4) 增加或减少 Seru ( $S+$ ,  $S-$ ) 这种方式适用于需求量变化幅度较大的场景. 按照重组难易程度由易到难依次为 ( $W+$ ,  $W-$ )、(PS)、(WS) 和 ( $S+$ ,  $S-$ ). 市场需求变化包括品种和数量两个维度, 分别有不变、增加、减少三种情况, 形成 9 种市场需求场景. 应对这 9 种场景的 SERU 系统能力重组方式, 如表 2 所示.

表 2 不同需求场景下的 SERU 系统能力重组方式

Table 2 SERU system capability reorganization under different demand scenarios

品种	需求量不变	需求量增加	需求量减少
品种不变	无需重组	增加工人或增加 Seru	减少工人或减少 Seru
品种增加	1. 产品-Seru 的重新分配; 2. 增加 Seru + 工人-Seru 的重新指派.	1. 增加工人 + 工人-Seru 的重新指派; 2. 增加工人 + 产品-Seru 的重新分配; 3. 增加工人 + 增加 Seru + 产品-Seru 的重新分配 + 工人-Seru 的重新指派.	1. 减少工人 + 产品-Seru 的重新分配; 2. 减少 Seru + 产品-Seru 的重新分配 + 工人-Seru 的重新指派.
品种减少	1. 工人-Seru 的重新指派; 2. 减少 Seru + 工人-Seru 的重新指派.	1. 增加工人 + 工人-Seru 的重新指派; 2. 增加工人 + 减少 Seru + 工人-Seru 的重新指派.	1. 减少工人 2. 减少工人 + 产品-Seru 的重新分配; 3. 减少工人 + 工人-Seru 的重新指派; 4. 减少工人 + 减少 Seru + 产品-Seru 的重新分配 + 工人-Seru 的重新指派.

### 4.2 SERU 系统能力设计的决策内容

SERU 系统能力设计的本质特点是针对特定生产任务(包括产品种类、数量和批次)的能力配置过程,包括人员及技能的配置、任务-单元的分配、人员-单元的分配以及单元内工序的分配以及人员-工序的分配,如图4所示,包括系统级决策和单元级决策。系统级能力设计决策内容包括:确定所需单元的数量、单元间任务的分配(任务-Seru的分配)和单元间工人的分配(工人-Seru的分配);单元级能力设计决策包括 Seru 的组织形态、Seru 布局、工序划分及工人-工序的重新指派。当然,对于巡回式 Seru 和单人式 Seru 的能力设计无需考虑工序的重新划分和工人-工序的重新指派,并且对于单人式 Seru 而言增加工人就意味着增加 Seru,所以无需考虑在哪些单元增加工人的问题。实践中, SERU 系统能力设计决策的首要环节是重组方式的选择,选择的依据是具体的需求变化特点。如果某种需求变化有多种重组方式可选择,优先选择难度低的重组方式;如果需要同时使用多种重组方式,优先选择难度低的方

式组合进行能力设计。例如,当产品间需求量波动时,既可通过调整产品-Seru 分配(PS)将生产任务均匀分配到单元中,也可根据生产任务量的变化在单元间重新配置生产能力,即工人-Seru 的重新指派(WS)。这两种重组策略的本质均是生产能力的重新配置,但它们的重组难度是不同的。相对于产品-Seru 重新分配(PS)策略,工人-Seru 重新指派(WS)策略不仅更新了工人的生产任务还会破坏工人间的合作关系,从而影响整体作业效率,因此后者的难度高于前者;所以在其他条件不变的情况下,应该优先选择产品-Seru 重新分配策略(PS)。当需求变化更加复杂,如产品种类和需求量同时增加,这时可通过组合策略来响应:1)增加工人+PS的组合策略(CS1) 2)增加工人+WS的组合策略(CS2) 3)增加工人+增加 Seru + PS + WS 策略。这些策略的本质是用增加工人来满足需求总量的增加,用其他策略满足产品种类的增加。显然,这些组合策略的难度是不同的,根据上文的分析可以看出组合策略 CS1 的重组难度最低,所以应该优先选它进行能力重组。

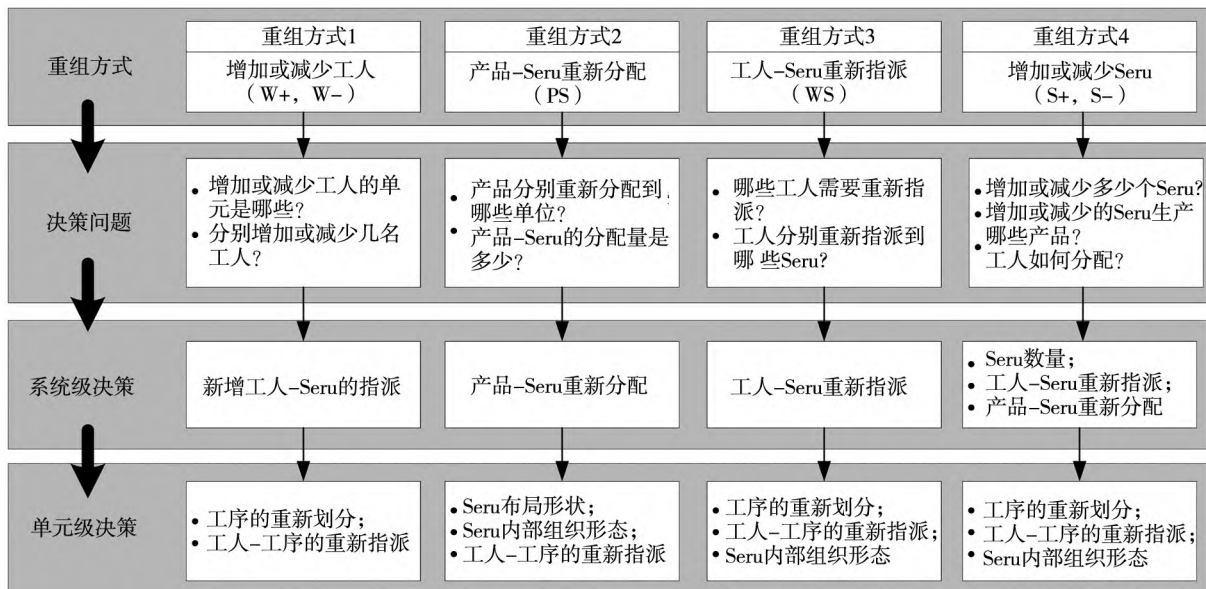


图4 SERU 系统能力设计的决策内容

Fig. 4 Decision-making content of SERU system capacity design

### 4.3 SERU 系统能力设计的评价指标

作为运作层的 SERU 系统构建,能力设计更加侧重以较低的调整代价,获得快速响应特定生产任务的能力,即系统的敏捷性,评价指标侧重于

运营层面的性能指标。现有研究主要聚焦于以运作层评价指标为优化目标的 SERU 系统构建,包括时间类指标、成本类指标、平衡性指标、可持续性指标等。时间类指标是通过测度系统对特定任

务的反应时间来评价系统的性能,包括最大完工时间<sup>[19,21,22,24,25,33,35]</sup>、总完工时间<sup>[17,32]</sup>、工人劳动时间<sup>[17,21,22,25,33]</sup>等指标;成本类指标是通过测度完成特定生产任务所需的工人培训成本<sup>[26,32]</sup>、工人的雇佣成本<sup>[22,27]</sup>、零部件周转成本<sup>[20]</sup>等;平衡性指标包括 Seru 间与 Seru 内平衡<sup>[30]</sup>、Seru 间与 Seru 内工作量平衡<sup>[30]</sup>、其他指标包括系统服务水平<sup>[23,27]</sup>、环境绩效指标<sup>[36]</sup>等。显然,这些指标是用于度量在给定系统构建下完成特定任务所需要的时间、成本、各 Seru 间或 Seru 内的能力(工作量)的均衡和资源利用率、系统的服务水平、能源消耗指标等,反映了系统的运营能力和资源配置效率。

## 5 未来研究展望

研究基于企业实践和文献综述构建了一个初步的 SERU 系统构建理论框架。基于这一框架,重点从现实场景、决策层次、SERU 系统类型和评价指标 4 个角度提出未来的研究问题。

第一,从现实场景角度,可以聚焦 S-S 调整场景下的 SERU 系统构建问题。根据特定的生产任务兼顾 SERU 系统的整体性能,如何对 SERU 系统进行能力设计?考虑动态能力对 SERU 系统应对动态变化市场需求的作用,探究动态能力如何影响 SERU 系统性能。

第二,从决策层次的角度,重点研究:1) 非全能工下的能力设计问题,决策构建单元数量、工人-单元分配,产品-单元分配;2) S-S 场景下的能力设计问题,基于现有 SERU 系统应该如何进行能力再分配才能使系统以最少的调整代价满足特定需求;3) 基于产品需求特点,考虑工人技能、单元数量及需求波动因素对 SERU 系统结构设计的影响,如何对 SERU 系统进行结构优化设计?4) 结构设计和能力设计的柔性形成机制及对 SERU 系统柔性的贡献。

第三,从 SERU 系统类型角度,进一步研究分割式 SERU 系统与复合 SERU 系统构建问题。分割式 SERU 系统构建在巡回式 SERU 系统构建问

题的基础上还需考虑工序划分问题,增加了工人-工序分配,难度相对较大。但分割式 SERU 系统是实施 SERU 生产方式必然要经历的阶段,所以分割式 SERU 系统构建问题值得进一步探索和重点关注:1) 不同现实场景下,分割式 SERU 系统的构建优化问题,如何划分工序,如何分配工人到工序,分割式 SERU 系统构建的影响因素有哪些;2) 不同策略层分割式 SERU 系统构建优化问题,如:策略层分割式 SERU 系统构建决策中单元的人数(或者技能组合)分配、运作层决策中任务在单元间的分配以及各单元工序的划分(人员与工序的分配组合);3) 复合 SERU 系统构建值得进一步探索。

第四,从评价指标角度,进一步探索 SERU 系统设计层评价指标。现有关于 SERU 系统构建的研究聚焦于运作层评价指标,但与运作层评价指标不同,设计层评价指标更加关注系统的整体性能,它是 SERU 系统结构设计的评价标准,因此值得进一步探索。对于 SERU 生产方式而言,柔性是其最重要的特征,但目前很少有文献从理论上研究 SERU 系统的柔性。未来研究可以关注如下问题:1) SERU 系统柔性形成机制及其内在机理研究;2) 柔性是一个多维概念,如何量化 SERU 系统柔性;3) 在策略层如何构建高柔性 SERU 系统,在运作层如何构建高重组柔性 SERU 系统。

## 6 结束语

SERU 生产是一种兼具效率和柔性的新型组织管理方式,其能有效应对不断加剧的制造环境变化。SERU 系统构建是实现 SERU 生产方式的关键环节,对 SERU 系统性能具有重要作用。然而,以往的大量研究聚焦于工人是全能工的假设前提和面向特定生产任务的运作层 SERU 系统构建,过于简化和聚焦,缺乏对现实中广泛存在的构建场景的考虑,导致学术研究与企业实践较为严重脱节。研究基于现有研究与企业实践,探讨 SERU 系统构建决策的基础性问题,包括 SERU 系统构建问题中 SERU 系统类型、影响因素、现实场

景、评价指标和构建策略,建立 SERU 系统构建基本理论框架. 该理论框架系统地分析了不同阶段的 SERU 系统的构建问题,不仅适用于工人均是全能工的成熟阶段的 SERU 系统构建,也能适用于工人是多能工的初级阶段的 SERU 系统构建;同时该框架结合中国企业实践,分析了 SERU 系统构建的现实场景,包括 LINE-SERU 转化场景(L-S)、新建 SERU 场景(N-S)和 SERU-SERU 调整场景(S-S),探讨了不同场景下的 SERU 系统构建问题;从决策层次的角度,识别出 SERU 系统结

构设计和能力设计两种核心构建方式,分别探讨了它们的决策内容、评价指标和设计方式. 从现实场景、决策层次、SERU 系统类型和评价指标等多角度分析了 SERU 系统构建问题,不仅在理论上为 SERU 系统构建决策问题的建模提供基本框架,也为企业实施 SERU 生产方式过程中如何针对不同现实场景构建合适的 SERU 生产系统提供了理论依据,更为处于 SERU 生产方式初级阶段的中国制造企业具有重要的借鉴和指导作用.

### 参考文献:

- [1] 丁 珈,万国华. 企业生产计划与调度的实践研究述评——社会技术系统视角[J]. 管理科学学报,2020,23(12): 110-123.  
Ding Jia, Wan Guohua. Review of researches on practice-based production planning and scheduling: A social-technical systems perspective[J]. Journal of Management Sciences in China, 2020, 23(12): 110-123. (in Chinese)
- [2] 孙新波,钱 雨,张明超,等. 大数据驱动企业供应链敏捷性的实现机理研究[J]. 管理世界,2019,(9): 133-152.  
Sun Xinbo, Qian Yu, Zhang Mingchao, et al. A study on the implementation mechanism of enterprise supply chain agility driven by big data[J]. Management World, 2019, (9): 133-152. (in Chinese)
- [3] 陈春花,朱 丽,钟 皓,等. 中国企业数字化生存管理实践视角的创新研究[J]. 管理科学学报,2019,22(10): 1-8.  
Chen Chunhua, Zhu Li, Zhong Hao, et al. Practical innovation of Chinese enterprises from “digital survival” view[J]. Journal of Management Sciences in China, 2019, 22(10): 1-8. (in Chinese)
- [4] 代文强,左永恒,孙朝苑,等. Make-to-Order 模式下多产品占线生产策略研究[J]. 管理科学学报,2020,23(8): 101-108.  
Dai Wenqiang, Zuo Yongheng, Sun Zhaoyuan, et al. Multiproduct online production strategy in a Make-to-Order system [J]. Journal of Management Sciences in China, 2020, 23(8): 101-108. (in Chinese)
- [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] Yu Y, Tang J F. Review of seru production [J]. Frontiers of Engineering Management, 2019, 1(6): 183-192.
- [7] 于 洋,唐加福. SERU 生产方式[M]. 北京: 科学出版社,2018.  
Yu Yang, Tang Jiafu. SERU Production Method [M]. Beijing: Science Press, 2018. (in Chinese)
- [8] 唐加福,任玉红,于 洋,等. 赛汝(SERU)生产与经典生产方式的比较与仿真分析[J]. 南开管理评论,2021,24(2): 126-134.  
Tang Jiafu, Ren Yuhong, Yu Yang, et al. Simulation and comparison analysis of SERU production with typical production modes [J]. Nankai Business Review, 2021, 24(2): 126-134. (in Chinese)
- [9] 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 Chenguang, Lian Jie, Li Wenjuan, et al. Seru seisan: The latest manufacturing model developed in Japan [J]. Business Review, 2010, 22(5): 93-103. (in Chinese)
- [10] Yin Y, Kaku I, Stecke K E. The evolution of Seru production systems throughout Canon [J]. Operations Management Education Review, 2008, 2(1): 27-40.
- [11] 任玉红,唐加福,肖争喜,等. LINE-SERU 转化的评价分析——以某医疗制造企业实施 SERU 为例[J]. 系统工程

- 理论与实践, 2021, 41(2): 442–454.
- Ren Yuhong, Tang Jiafu, Xiao Zhengxi, et al. Evaluation and analysis of LINE-SERU conversion: Taking the implementation of SERU in a medical manufacturing enterprise for example [J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2021, 41(2): 442–454. (in Chinese)
- [12] 王晓晶, 任玉红, 殷勇. 赛汝生产有效运行机制: 基于华录松下案例研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2021, 41(2): 455–464.
- Wang Xiaojing, Ren Yuhong, Yin Yong. The mechanism of effective operation on SERU production: Case studies on Hualu Panasonic [J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2021, 41(2): 455–464. (in Chinese)
- [13] 刘畅, 李珍, 殷勇, 等. 团队型文化对赛汝(SERU)生产及运营绩效的影响: 中国制造业的实证分析 [J]. *系统工程理论与实践*, 2021, 41(2): 431–442.
- Liu Chang, Li Zhen, Yin Yong, et al. The impact of group culture on SERU production and operational performance: An empirical analysis in Chinese manufacturing firms [J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2021, 41(2): 431–442. (in Chinese)
- [14] Liu C, Li Z, Tang J F, et al. How SERU production systems improves manufacturing flexibility and firm performances: An empirical study in China [J]. *Annals of Operations Research*, 2022, 316(1): 529–554.
- [15] 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(1): 67–76.
- [16] Kaku I, Murase Y, Yin Y. A study on human-task-related performances in converting conveyor assembly line to cellular manufacturing [J]. *European Journal of Industrial Engineering*, 2008, 2(1): 17–34.
- [17] 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.
- [18] Yu Y, Sun W, Tang J F, et al. Line-hybrid seru system conversion: Models, complexities, properties, solutions and insights [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, (103): 282–299.
- [19] 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.
- [20] Gong J, Li Q, Tang J F. Improving Performance of Parts Storage Through Line-Cell Conversion [C]. *Guilin: 2009 Chinese Control and Decision Conference*, 2009: 3010–3014.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 于洋, 李晓龙, 崔思国. 赛汝生产系统构建与调度的研究进展 [J]. *系统工程理论与实践*, 2021, 41(2): 465–474
- Yu Yang, Li Xiaolong, Cui Siguo. Research agenda and prospect on the formation and scheduling of Seru production system [J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2021, 41(2): 465–474. (in Chinese)
- [24] 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.
- [25] Yu Y, Wang S H, Tang J F, et al. Complexity of LINE-SERU conversion for different scheduling rules and two improved exact algorithms for the multi-objective optimization [J]. *Springer Plus*, 2016, 5(1): 1–26.
- [26] Ying K C, Tsai Y Z. Minimising total cost for training and assigning multi-skilled workers in Seru production systems [J]. *International Journal of Production Research*, 2017, 55(10): 2978–2989.
- [27] 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 & Systems Engineering*, 2018, 27(4): 519–537.
- [28] Wang Y, Tang J F. Optimized skill configuration for the Seru production system under an uncertain demand [J]. *Annals of Operations Research*, 2022, 316(1): 445–465.
- [29] 王晔, 唐加福. 考虑工人合作关系的单元装配系统构建方法 [J]. *控制与决策*, 2020, 35(2): 453–460.
- Wang Ye, Tang Jiafu. Seru production system formation considering cooperation of workers [J]. *Control and Decision*,

- 2020, 35(2): 453–460. (in Chinese)
- [30] Yu Y, Wang J W, Ma K, et al. Seru system balancing: Definition, formulation, and exact solution[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, (122): 318–325.
- [31] Lian J, Liu C G, Li W J, et al. Multi-skilled worker assignment in Seru production systems considering worker heterogeneity[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, (118): 366–382.
- [32] Liu C G, Yang N, Li W J, et al. Training and assignment of multi-skilled workers for implementing Seru production system[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 69(5–8): 937–959.
- [33] Wu Y T, Wang L, Chen J F. A cooperative coevolution algorithm for complex hybrid Seru-system scheduling optimization[J]. *Complex & Intelligent Systems*, 2021, (6): 1–18.
- [34] Jordan W C, Graves S C. Principles on the benefits of manufacturing process flexibility[J]. *Management Science*, 1995, 41(4): 577–594.
- [35] Yu Y, Sun W, Tang J F, et al. Line-Seru conversion towards reducing worker(s) without increasing make-span: Models, exact and meta-heuristic solutions[J]. *International Journal of Production Research*, 2017, 55(10): 2990–3007.
- [36] Liu C G, Dang F, Li W J, et al. Production planning of multistage multi-option Seru production systems with sustainable measures[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, (105): 285–299.

## Theoretical framework of SERU system formation

TANG Jia-fu<sup>1</sup>, REN Yu-hong<sup>1\*</sup>, YIN Yong<sup>2</sup>

1. School of Management Science and Engineering, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, China;
2. Graduate School of Business, Doshisha University, Karasuma-Imadegawa, Kyoto 602-8580, Japan

**Abstract:** The ever-increasing internal and external manufacturing environment have forced the competition between manufacturing industries to gradually shift from efficiency and quality to responsiveness, which has promoted the emergence and development of SERU production mode. SERU system formation is a key link in the implementation of SERU production, and a core decision-making problem to be addressed in operation and management of the SERU system, which has attracted widespread attention from the academic community. Based on the existing literature and corporate practices, the paper discusses the basic issues of SERU system formation, including the influencing factors of SERU system formation decision-making, realistic scenarios and decision content, performance evaluation and its construction strategies. From the perspective of decision-making levels, SERU system construction is divided into structural design and capacity design, corresponding to structural flexibility and reconfiguration flexibility of the SERU system respectively. The application scenarios, contents and evaluation indexes for the structural flexibility and reconfiguration flexibility decisions are investigated in detail. The theoretical framework of SERU system construction is established, and several important future research directions are discussed. This theoretical framework helps to understand SERU system construction systematically, provides theoretical basis and modeling framework for building and optimizing SERU system, and also provides guidance and reference for enterprises to build SERU production line.

**Key words:** SERU production mode; flexible production; system formation; structure design; capacity design