

doi: 10.3969/j.issn.1007-7375.230253

基于合同网协议的 RMS 设备层跨厂流通方法

邵良杉, 郭 旭

(辽宁工程技术大学 工商管理学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘要: 研究可重构制造系统下设备层元素进行跨厂区流通的可行方式, 利用低通信次数, 优化不同厂区之间的设备流通交换, 以达到缩短交换爬升时间。结合前期研究和目前已有理论, 创新性地构建了一套基于合同网协议的可重构制造系统中设备层跨厂区流通交换的运作框架, 将决策属性集和指标优先权重判断引入模型中, 经过归一化数据集对建立的合同网协议流通系统框架进行运算, 验证其方法的可行性。结果证实, 以 ID3 为最佳应答投标者所组成的跨厂域区组可以在框架下运作。所提方法适用于在我国现有物质条件的基础上进行重构设备的网状系统流通运行, 将设备作为系统元素进行广泛的重构流通交换, 以达到工业层面面对需求的快速应答和极强的可塑性。

关键词: 可重构制造系统; 合同网协议; 设备层流通; 跨厂域区组; 智能制造

中图分类号: F424.1; TH16

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2024)06-0115-10

A Cross-plant Circulation Method for Reconfigurable Manufacturing Systems at the Equipment Level Based on the Contract Network Protocol

SHAO Liangshan, GUO Xu

(College of Business Administration, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: This study explores feasible methods for cross-plant circulation of equipment-level elements in reconfigurable manufacturing systems (RMS). The method aims to optimize the equipment circulation and exchange between different plants by minimizing communication occurrences, thereby reducing exchange ramp-up time. Combining our previous research and existing theories, an operational framework is established for cross-plant circulation and exchange at the equipment level in RMS based on the contractual network protocol. Decision attribute sets and priority weight assessments of indicators are incorporated into the model. The established framework is tested using a normalized dataset in RMS based on contractual network protocol, by which the feasibility is verified. Results confirm that the cross-plant group consisting of ID3 as the optimal response bidder can operate within the framework. This indicates that the proposed method is suitable for the circulation of a network system for reconfiguring equipment based on the current material conditions in our country. It enables broad equipment circulation and exchange, facilitating rapid industrial-level responses to the demand and high adaptability.

Key words: reconfigurable manufacturing system; contract network protocol; circulation at the equipment level; cross-plant group; intelligent manufacturing

可重构制造系统 (reconfigurable manufacturing system, RMS) 是介于专用制造系统和柔性制造系统的一种新兴制造系统, 在保留较多生产功能和产品种类数的同时, 通过设备和系统的可重构性来有

效反馈市场迅速变化的需求, 还可以通过增加或减少设备来实现产量的扩大和精益生产。同时 RMS 中的设备和机床等模块在接口允许的情况下可以在同一产线或不同产线进行交换, 其对新市场需求的

收稿日期: 2023-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (71771111)

作者简介: 邵良杉 (1961—), 男, 辽宁省人, 教授, 博士, 主要研究方向为管理系统工程、管理信息系统、大数据应用。

Email: renzipeixin@outlook.com

驱动有良好的敏捷性。为了实现更快的响应速度,系统内部一般存在复杂且高效的计划,调度和决策算法与 RMS 具有协同制造和资源共享的特性^[1]。在供需中断的情况下,可以迅速对市场进行重构系统和设备响应,进而使其在不可抗力(如公共卫生危机)下,保持稳定生产,满足需求,甚至将利益损失降至最低。这也是近年来全球产业布局,工业 4.0 和中国制造 2025 中比较重要的一环^[2-5]。设备层跨厂流通将原厂中的设备资产,包括但不限于机床、加工模块、配件、设备耗材等视为设备层要素,对其他企业组织隶属工厂进行重构交换。就目前情况看,这项技术的全面应用是企业向高附加值制造转型的不可多得的机会,但相关研究尚处于起步阶段,没有系统性的框架和协议支持^[6-9]。

由于 RMS 的特殊性,在重构过程中设备层面有较多支撑技术和理论以保证系统的稳定运行,例如,马蓄等^[10]探讨模块化设计在复合型机床中的应用;马紫阳等^[11]对可移动机床的研究;基于 ARM、COM、实时 Linux 等可重构数控系统的研发;对故障机床的诊断等。但只要涉及设备层面不同厂区产线之间的调度,设备就会产生不同厂区之间一定范围内的移动运输,设备的交换对策就成为不可避免且极其重要的问题^[12]。

关于 RMS 重组过程中设备或模块等要素流动的问题,Epureanu 等^[13]通过研究密歇根州的主要汽车公司和供应商,给出两个组网,使其产生模块和需求等交换,并通过定义多个要素,给出重构模型(manufacturing system reconfiguration, MSR)和生产网重构模型(production network reconfiguration, PNR),研究迭代算法来确定爬坡时间和可重构容量。一部分工作在柔性制造系统(flexible manufacturing systems, FMS),被认为是可重构制造系统的前身)中应用到了经典 Petri 网(PNs)。随着研究的深入,无动态结构的 PNs 也被用在 RMS 内;随后也出现了一些利用高水平 PNs(具有动态结构)到 RMS 中的研究;同时也有利用粒子网络、 S^4 PN 网络等进行模型建立的研究^[14]。Koren 等^[15]将数字孪生和 RMS 研究结合的要素进行仿真研究。合同网协议(contract net protocol, CNP)是 Smith^[16]提出的一种基于谈判的分布式求解框架中的协商方法,最早用于分布式传感器系统。CNP 在近年来的工业系统中获得成功的应用。姜继娇等^[17]构建引入权重的异地分布式团队开发任务分配模型,提高了敏捷开

发的效率。王文博等^[18]通过对合同网中的不同目标添加友好度因子、信任度因子等对网进行限制和优化以达到智能合同网协议。但上述涉及 RMS 设备层要素流动研究的目标大多是以单厂或以供应商和公司双目标进行,在系统的微观层面与不同工厂之间的协调相似,其最终意义也就仅仅局限在某一两个工厂在一个时间段内发生的设备交换活动。

RMS 设备层跨厂区流通交换的研究存在如下缺陷。1) 宏观设备层流通交换没有建立,生产制造系统模式落后。由于目前国内 RMS 厂区要素流通尚处于实践的空白阶段,两个厂区设备的流通交换往往仅存在于相同母公司下的一两个制造商代工厂之间,几乎不涉及公司外的设备,如此方式方法的流通效率无从谈起,进而导致提升生产率的导向方法大多以降低机器的空闲率为主。这样不仅造成用工成本陡增,还面临市场供应急剧增加的情况,这种生产方式十分依赖供应商对市场的决策判断,因为专用制造系统不能灵活响应市场需求,如果错误判断市场的方向,就会滞销,进而导致压缩利润空间甚至亏损。2) 划定范围内的目标厂区组数量少且聚类性不明显。假定将全国范围的厂区组看作是一个一级系统,以行政区级作为划分,某个工业开发区作为市级区属单位下的一个组,即为五级系统,系统内的设备层进行有效流转。范围内的工厂个数越多,其流转效率就越高,因为可供选择的数量和种类越多,同时由于运输成本的限制,地区的聚类性就必须有所考虑。而 CNP 的方法多应用在工业生产的任务开发和团队管理中,在 RMS 方面还没有涉及,但因其具有可向数据计算端的拓展性,所以将其作为这个流通交换系统的指导方法是极其合适的。

为此,本文尝试将合同网协议引入 RMS 设备层跨厂区的流通中,在 CNP 中对招投标双方等要素实施优化,建立信息对称共享的设备流通模型,利用低通信次数,优化不同厂区之间的设备流通交换,以达到缩短爬升时间的目标。

1 基于 CNP 的 RMS 设备层跨厂区流通方法

1.1 设备层重构流通方式

设备层重构是指可重构设备通过添加、移除或者对设备内的功能模块进行更换,使其在新的条件、物料、生产能力和功能下具有能够响应市场需

求的能力。这种重构涉及厂区设备的流通交换运输问题, 这方面的研究在具体实施方法层面尚处在空白阶段。一般而言, 在厂区或者某个工厂车间需要对市场响应做出设备重构时, 都会向能实现特定功能的设备供应商提出采购订单, 有些工厂也会向上级所属部门或公司进行设备的借调, 设备流通发生在供应商和工厂以及相同部门或者母公司的下属两个工厂之间, 构成传统的点线流通模式, 如图1所示。

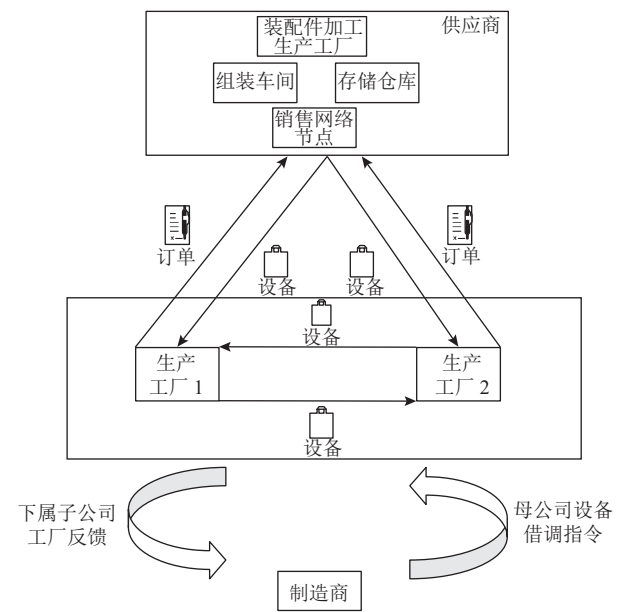


图1 传统工厂设备层流通交换模式

Figure 1 Traditional mode of equipment-level circulation and exchange in factories

设备的重构需求发起后, 传统的解决方法非常简单, 流程如图2所示。

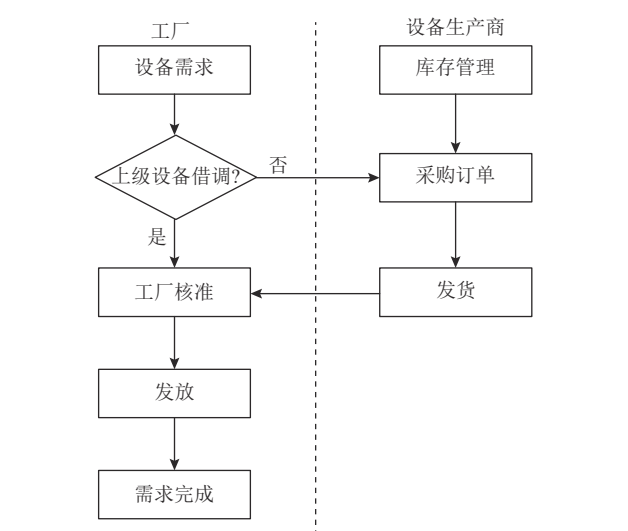


图2 传统设备重构方法流程

Figure 2 Flowchart of conventional equipment reconfiguration

1.2 基于 CNP 的制造系统控制

CNP 最早由 Smith^[16]于 1980 年提出, 由多个结点共同组成网, 结点之间可以互相传递信息。结点在传统 CNP 中以 3 类性质存在: 1) 管理者, 负责任务的分配, 但有些研究将其改进, 增加任务的区域性广播^[17]; 2) 投标者, 拥有完成所发布任务的能力属性的结点; 3) 中标者, 管理者经过分析决策后将任务打包派发的接受主体, 具有可以完成任务的前置条件且符合管理者的预期。

CNP 在制造系统控制中的主体流程如下所示。

- 1) 假设阶段需求改变或增加时, 新任务通过管理者向系统进行发布, 订单 (任务) 的信息同时发布, 即订单的招标公告。
- 2) 在接收到广播的各个潜在投标者结点检查自身资源, 并确认有没有在限定条件下具备完成任务的能力。如果有, 则向管理者进行投标操作; 如果没有, 则对任务广播进行忽略操作。
- 3) 管理者对所有投标信息进行评估, 从中选择最合适的一个投标者进行中标确认, 并将订单和投标者进行核对。
- 4) 接收到中标信息的投标者经过分析, 再次权衡, 选择签订订单或拒绝订单。若是第 1 种情况, 则执行的同时, 完成一次任务操作; 若是第 2 种情况, 则管理者重新对除了上一次中标者之外的信息进行评估, 并在之后再一次发布任务广播, 以匹配新的中标者来完成本次任务。

1.3 基于 CNP 的设备跨厂 (区域) 流通过程

为了使设备 (或模块) 在厂区间进行要素流动, 将一部分具备重构能力且设备具有兼容性的工厂作为结点, 进行组织划定, 成为一个整体。后续的操作执行均由整体内部产生, 暂不讨论系统外部的情况。其流通过程如下。

步骤 1 服务器初始化。

被划定的区域中心的服务器在上个任务结束和下一个任务开始前, 对现有工厂的设备信息进行一轮评估, 为后续步骤给予预处理上的支持。

步骤 2 建立设备数据库。

划定的工厂实时向中心服务器共享设备和生产的数据, 包括占用和空闲情况、订单信息、物料信息、生产加工周期和日程、预期空闲设备等。方便服务器采集相关数据并实时做出更新。

步骤 3 重构设备发起。

当单个工厂对产线中的一个或多个设备发出重构请求时,该厂会将设备需求日期、数量、型号、配件模块(如机床的刀头等)、接口等信息打包发送给中央服务器进行后续操作。

步骤 4 发布问询。

等效于传统 CNP 的任务发布,中央服务器将工厂的打包数据对除发起工厂之外的其他工厂进行发送且同时做出匹配。

步骤 5 投标。

除发起重构的工厂外的其余工厂,在接收到服务器的信息后与自身的生产信息进行匹配,在符合未来生产计划的情况下进行决策。例如,接收信息的工厂具有发起方需要的单个或多个设备,且该设备在未来一定时间内处于空闲状态,没有加工任务,而发起方的时间需求恰好小于该设备再次投入的空窗时期,在理论上该设备就具备了完成任务的能力。所以,经过决策,向中央服务器进行投标操作。

步骤 6 中标。

在接收所有投标者的数据之后,服务器经过对数据处理,选择各项综合最优的一个工厂进行中标处理,对该工厂发送中标信息,同时对其余工厂发送流标信息。

步骤 7 握手。

在与发起设备重构方和中标方进行确认后,服务器将中标方的信息和接口发送给发起方,发起方和中标方进行握手执行操作,两方均进行设备的信息确认和运输方式、交接方式、订单确认等操作,中标工厂在中途实时与服务器进行维持状态,以确保重构中止的可行。

步骤 8 反馈数据。

在任务结束后,双方将完成数据反馈到中央服务器的储存系统内,以方便下一轮的评估。

过程示意图如图 3 所示。

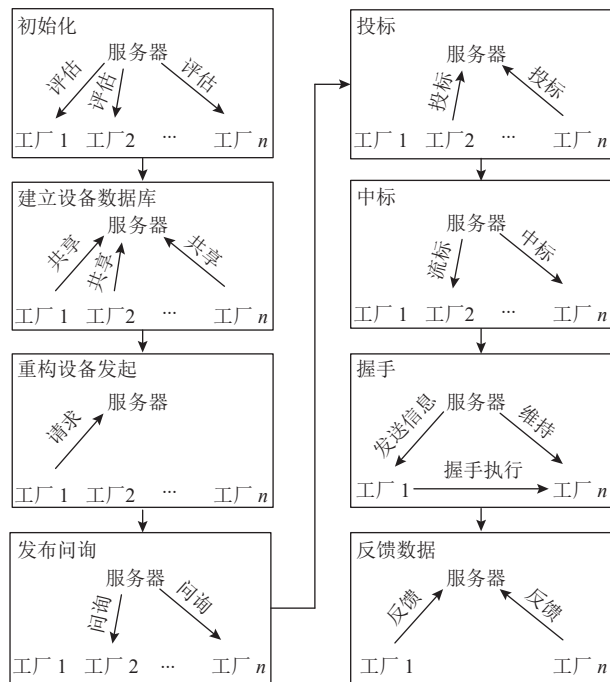


图 3 基于 CNP 的设备跨厂流通过程

Figure 3 CNP-based equipment circulation process across plants

属性参考,分别是厂区地理位置、可兼容空闲设备数量、工厂规模、时间因素、历史中标情况(排名不分先后)。由属性集产生的运算结果会直接影响最后的中标决策。对于并发的投标,按照需求的时间紧迫程度进行排序,如果时间紧迫度相同,则实施随机选取。

投标者部分是发起重构请求的主体,在本系统环境中主体限定在工厂层面,对于划定范围内的投标者,其数据只与本区域的厂区进行共享,对来自区域外的数据不纳入本系统,其设备也只与本区域的其他工厂进行设备重构,不参与系统外部环境的设备交换。

中标者部分是响应 RMS 重构发起方的主体,其约束条件与投标者相同,同时在订单任务结束阶段将数据反馈至中央服务器。

2) 系统目标。

RMS 设备跨域流动的主要目标是通过 CNP 给出一个跨域交换兼容设备的快速重构方法,以此来缩短 RMS 重构过程的爬升(斜升)时间,提高交换效能,快速响应市场需求中止或需求改变。

2.2 模型构建

2.2.1 潜在投标者建模

因本文中,所有工厂均同时具备投标和中标的功能属性,所以在文中区域范围内将工厂抽象为一

2 设备流通模型

2.1 系统分析

1) 系统要素。

RMS 设备流通系统由以下 3 部分组成。

中央服务器部分是系统的核心组成,负责评估、任务发放、模型求解、接收投标信息、发送中标信息等,该部分设有一个便于求得中标最优解的决策属性集。该集决策属性集内包括 5 个量化的指

个要素, 要素区分两个状态: Element_sub , 即工厂处于重构投标发起状态记为0; Element_bidder , 即工厂处于投标状态记为1。又有 Element_j 为第 j 个工厂, 如该厂是潜在最优决策中标者则记为2, 不可投标状态记为-1, 故可以组成状态矩阵 $\mathbf{S}^{1 \times J}$ 为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} E_1 & E_2 & E_3 & \cdots & E_j \end{bmatrix}. \quad (1)$$

定义一个五元组决策属性集 $A = (P, N, S, T, H)$ 。决策属性集中各变量定义如下。

1) P 为厂区地理位置距离重构发起物理地址的距离, 在设备重组过程中物流运输所占的比重较为重要, 路程的长短直接影响重构完成的实际时间。

2) N 为可兼容重构发起方所需要设备型号通用设备的数量, 该数量有两个层面的意义。(1) 投标能力。若 $N_v \geq N_a$, 则该厂具备投标能力, 可进行后续投标操作。其中, N_v 为该厂可兼容设备数量; N_a 为任务发起方所需设备数量。(2) N_v 越大, 则对该厂执行投标操作后正常生产运转的影响越小。如果后续因某些原因导致空闲设备需要立刻投入使用, 则投标后剩余的空闲设备可以继续提供生产需要。

3) S 为工厂规模, 通常情况下以产值进行加权赋值, 规模越大, 可兼容设备的数值可能性就越大。考虑后续对供应链的影响, 所以将工厂规模纳入决策集中。

4) T 为时间因素, 具体指重构发起方对设备所需的时间限定, 根据潜在投标方的生产计划进行给定。若 $T_a \geq T_f$, 则该潜在投标工厂具备投标能力。其中, T_a 为重构方需要时间限定; T_f 为可产生所需空闲设备的生产结束时间。

5) H 为历史中标情况, 相对于任务发起的工厂而言, 若历史中标次数较多, 则说明投标者与现阶段生产线内设备的兼容性较高且履约能力较强。

区域内有 i 个工厂, 所以每个属性都有相应的工厂映射, 故可得出一个决策属性矩阵 $\mathbf{D}^{i \times 5}$ 为

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} p_1 & n_1 & s_1 & t_1 & h_1 \\ p_2 & n_2 & s_2 & t_2 & h_2 \\ p_3 & n_3 & s_3 & t_3 & h_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_i & n_i & s_i & t_i & h_i \end{bmatrix}. \quad (2)$$

2.2.2 流通效能函数

1) 判断函数。

对于一个发起重构的工厂来说, 从服务器的潜

在投标者信息中, 可兼容设备数量和时间因素是两个优先级别最高的属性。如果 $(N_v < N_a) \vee (T_a < T_f)$, 则工厂不具备投标资格, 后续自然不作讨论, 所以有判断函数 ϕ 为

$$\phi = TN. \quad (3)$$

s.t.

$$N = \begin{cases} 0, & N_v < N_a; \\ 1, & N_v \geq N_a. \end{cases}$$

$$T = \begin{cases} 0, & T_a < T_f; \\ 1, & T_a \geq T_f. \end{cases}$$

2) 爬升函数。

对爬升时间有显著影响的因素主要是运输。设备的装卸作业和调试等问题是因工厂而异的, 重要度相较于运输要低, 所以将运输作为爬升函数的主要研究对象^[19]。投标者相较于重构发起方的地理位置远近是最为重要的因素。定义属性集内函数 P 为

$$P = \alpha_1 (1 - f_p) = 1 - \frac{p_i - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}}. \quad (4)$$

其中, α_1 为关于运输地理相对位置在效能函数中的权重; f_p 为关于流通中地理位置维度的决策属性值; p_i 为本次重构中潜在投标者与任务发起工厂的直线地理距离; $p_{\min}$ 为在该任务发起工厂的固有群组内任意两个定点工厂地理直线距离中最短的一组; $p_{\max}$ 为在该任务发起工厂的固有群组内任意两个定点工厂地理直线距离中最长的一组, 据此函数得出的爬升函数的数值越大, 其潜在所需爬升时间越小, 流通效能越高。

3) 兼容优度函数。

由工厂规模、历史中标情况和可兼容设备数量组成, 函数 λ 为

$$\lambda = S \cdot H \cdot N = \alpha_2 f_s \cdot \alpha_3 f_h \cdot \alpha_4 f_n. \quad (5)$$

其中, α 为不同的指标在效能函数中的不同权重; f 为不同指标在决策属性集不同维度下归一化后的决策属性值。兼容设备指标由于对后续投标工厂生产存在实际意义的影响, 故除判断函数外, 使其进入兼容优度的参考范围中。综上, λ 越大, 流通效能越高, 方案结论越优。

4) 目标效能函数。

式 (3)~(5) 共同组成目标流通效能函数 E 。

$$E = \phi(P + \lambda). \quad (6)$$

目标效能函数是决策属性集各个维度的综合，将每属性实现数据化具象，以此提供给中央服务器进行集中处理，得出重构的选择。 ϕ 由判断函数构成，为了保证中央服务器在接受到厂区数据库的误报时，可以进行输入数据二次验证，将关键性指标没有达到要求的进行逻辑排除， P 与 λ 则使用的是后期归一化处理后的数据，所以不需要加权平均。

2.3 设备流通条件约束

1) 每个潜在投标者均具备投标能力，即满足

$$T = N = 1。 \tag{7}$$

每个非潜在投标者均不具备投标能力，即满足

$$T \vee N = 0。 \tag{8}$$

2) 爬升约束。

区域内流通组成工厂数量不可能低于2，否则不具备流通必要性。为保证算式有意义，最大地理间隔位置与最小地理间隔位置不能相同，即

$$\begin{cases} i \geqslant 3; \\ p_{\max} \neq p_{\min}。 \end{cases} \tag{9}$$

3) 权重约束。

$$\sum_{i=1}^4 \alpha_i = 1。 \tag{10}$$

如果遇到某一组或两组函数相同但其他情况不同的条件，服务器则对该一组或多组数据进行返回，并按照下文指标权重进行重新计算和提交表格处理。如果遇到所有指标相同则由服务器根据目标总数生成一个随机数并按照结果进行调用。

3 实例分析

在区域内跨厂区设备流通的背景下，将某地10个精细化工生产制造企业作为数据采集对象，组成具有合同网协议的RMS可重构型工厂，编号为id_1~10，默认工厂间同意签署CNP且设备间均为共享，只对中央服务器的调度做出选择和执行命令。

3.1 参数设置

各厂区相对地理位置距离如表1所示；各厂区可互相兼容设备数量如表2所示；各厂区产值规模如表3所示；时间许可甘特图如图4所示；历史中标情况如表4所示。表2和表4中“—”代表所述元素无实际测量意义。厂区相对地理位置为真实数据，其余为假设数据集。

表 1 厂区相对地理位置

Table 1 Relative geographic locations of the plants km										
id	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	8.88	6.55	6.82	7.01	8.70	7.31	8.94	9.36	8.79
2		0	9.36	12.79	12.99	10.56	14.29	11.62	12.67	13.71
3			0	4.09	4.24	2.22	6.08	2.65	3.54	4.48
4				0	0.16	4.84	2.03	4.09	3.60	2.06
5					0	4.96	1.86	4.02	3.74	2.05
6						0	6.82	1.15	2.29	4.28
7							0	5.98	5.42	3.27
8								0	1.16	3.19
9									0	2.29
10										0

表 2 各厂区可互相兼容设备数量

Table 2 Number of inter-compatible equipment in each plant 台										
id	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	—	15	12	13	14	14	15	20	11	7
2		—	6	11	19	10	5	10	10	11
3			—	21	7	22	22	22	11	13
4				—	5	7	5	6	9	3
5					—	11	16	12	11	11
6						—	12	12	12	10
7							—	11	15	12
8								—	17	15
9									—	10
10										—

表 3 厂区规模

Table 3 Plant scale	
id	产值/(亿元·年 ⁻¹)
1	281.11
2	269.03
3	337.59
4	220.01
5	263.71
6	260.11
7	263.89
8	262.91
9	271.32
10	261.33

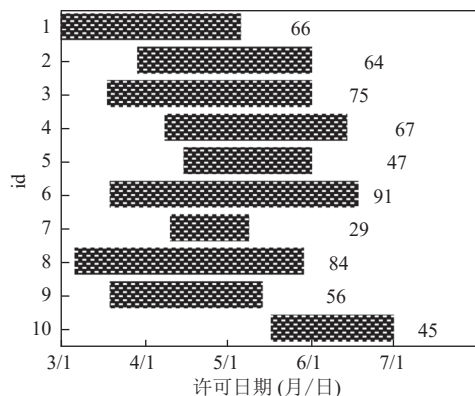


图 4 时间许可甘特图

Figure 4 Gantt chart of time permission

表 4 历史中标情况

Table 4 Historical results of winning bids[illegible]

3.2 实例计算过程

3.2.1 潜在投标决策属性归一化

由于潜在投标者的决策属性值为一相对参数,故需要将表 1~4 的参数进行归一化处理,以解决不同参数量纲之间的可比性。观察发现,各项数据的最大值和最小值相对较为稳定,所以选择离差标准化方法进行归一处理。转换函数为

$$y_i = \frac{x_i - \min_{1 \leq j \leq n} (x_j)}{\max_{1 \leq i \leq n} (x_i) - \min_{1 \leq i \leq n} (x_i)} \circ \quad (11)$$

将数据代入式(11)处理后,结果如表5~表8所示。表6和表8中“—”代表所述元素无实测测量意义。

3.2.2 指标权重系数的确定

对于模型的流通效能判定,服务器中各个决策维度重要度不同,为了使计算得出的效能数据更好地趋近于现实中决策的最优方案,必须给各个二级元素进行加权。采用模糊层次分析法(fuzzy analytic

hierarchy process, FAHP) 进行加权计算。

1) 建立模糊判断矩阵。

通过任意两个元素之间的对比，表达方式为元素对其上层指标的重要度，采用表9的标度方法进行标度，得到互补判断矩阵 $\mathbf{R}=(r_{ij})_{n \times n}$ ， $i, j=1, 2, \cdots, n$ 。矩阵中 $r_{ii}=0.5$ ，表示元素与其自身相比同等重要，而 $r_{ij} \in (x, y]$, $x < y$ 则表示与 x 相比 y 元素更为重要。

2) 权重计算。

$\mathbf{R} = (r_{ij})_{n \times n}$, $i, j = 1, 2, \dots, n$ 为模糊判断矩阵, $\mathbf{W} = (W_1, W_2, \dots, W_i, \dots, W_n)$ 为 $\mathbf{R}$ 的权重向量, 用式 (12) 求解权重。

$$W_i = \frac{\sum_{r,j=1}^n r_{ij} + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)}。 \quad (12)$$

其中, $\mathbf{w}_i$ 为因素 r_i 的权重向量。

3) 一致性检验。

为保证经过计算得出的权重具备可靠性，需要

表 5 相对地理位置属性归一化处理结果

[illegible]

表 6 厂区兼容设备属性归一化处理结果

[illegible]

表 7 厂区规模属性归一化处理结果

Table 7 Normalized results of plant scales

id	结果
1	0.52
2	0.42
3	1.00
4	0
5	0.37
6	0.34
7	0.37
8	0.36
9	0.44
10	0.35

表 8 历史中标属性归一化处理结果

Table 8 Normalized results of the number of historical winning bids

id	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	—	0.66	0.42	0.46	0.61	0.52	0.51	0.81	0.35	0.21
2		—	0.03	0.30	0.76	0.31	0.14	0.38	0.38	0.39
3			—	0.88	0.18	0.94	1.00	0.92	0.46	0.53
4				—	0.07	0.22	0.10	0.11	0.32	0
5					—	0.41	0.54	0.40	0.36	0.39
6						—	0.40	0.49	0.52	0.33
7							—	0.37	0.61	0.47
8								—	0.69	0.47
9									—	0.28
10										—

表 9 重要度标度法

Table 9 Importance mesurement

标度	定义	说明
0.5	同等重要	两因素相比较，同等重要
0.6	稍微重要	两因素相比较，一因素稍微重要
0.7	明显重要	两因素相比较，一因素明显重要
0.8	重要得多	两因素相比较，一因素重要得多
0.9	极端重要	两因素相比较，一因素极端重要
0.1, 0.2, 0.3, 0.4	反比较	若因素 r_i 与因素 r_j 相比较得到判断 r_{ij} ， 则因素 r_j 与因素 r_i 相比较得到判断为 $r_{ji} = 1 - r_{ij}$

经过一致性检验。

相容性指标定义如下。若 A 和 B 为模糊判断矩

阵，令

$$I(A,B)=\frac{1}{n^2}FC(A,B),\tag{13}$$

则称 $I(A,B)$ 为 A 和 B 的相容性指标。

特征矩阵 W^* 定义如下。若矩阵 $A=(a_{ij})_{n\times n}$ 为模糊判断矩阵， $W^*=(w_1,w_2,\cdots,w_n)^T$ 是 A 的权重向量，其中， $\sum_{i=1}^n w_i=1,w_i\geqslant 0,i\in N$ 。令 $w_{ij}=\frac{w_i}{w_i+w_j},\forall i,j\in N$ ，则称 $W^*=(w_{ij})_{n\times n}$ 为 A 的特征矩阵。

计算判断矩阵与其特征矩阵相容性指标，如式 (14) 所示。

$$I(A,B)=\frac{1}{n^2}\sum_{i,j=1}^1|a_{ij}+b_{ji}-1|.\tag{14}$$

其中， $A=(a_{ij})_{n\times n}$ ； $B=(b_{ij})_{n\times n}$ ； $W^*=(w_{ij})_{n\times n}$ ； $w_{ij}=\frac{w_i}{w_i+w_j},\forall i,j\in N$ 。

现将评估意见代入矩阵，得出特征矩阵为

$$W^*=\begin{bmatrix} 0.5000 & 0.6101 & 0.5625 & 0.5217 \\ 0.3899 & 0.5000 & 0.4511 & 0.4108 \\ 0.4375 & 0.5489 & 0.5000 & 0.4590 \\ 0.4783 & 0.5892 & 0.5410 & 0.5000 \end{bmatrix}.\tag{15}$$

计算得指标权重，如表 10 所示。

表 10 指标权重

Table 10 Indicator weights

α_1	α_2	α_3	α_4
0.300 0	0.191 7	0.233 3	0.275 0

经过一致性检验，结果为 $0.090\ 8<1$ ，一致性检验通过。

3.2.3 竞标效能计算

在设备重构发起时，发起方 id1 所需的使用时间为 42 d，开始和结束时间分别为 4 月 20 日和 6 月 1 日。根据许可时间甘特图，得出各厂的潜在许可时间状态和不同兼容设备状态，如表 11 所示。将表 10 计算所得的权重信息代入式 (4) 与式 (5)，并结合式 (6) 效能函数模型与归一化后的决策属性集计算，得到潜在投标数据，如表 12 所示。表 12 中“—”代表所述元素无实测测量意义。

根据计算，id3 为基于 CNP 的 RMS 设备跨厂区流通发起方的最佳应答投标者。如果该厂参与投标，则服务器应首先与其进行握手；如果该次流通

表 11 投标许可判断表

Table 11 Assessment of bidding permission		
id	T	N
1	0	1
2	1	0
3	1	1
4	1	1
5	1	1
6	1	1
7	0	1
8	0	1
9	0	0
10	0	0

表 12 潜在投标者数据

Table 12 Data of potential bidders									
id 1	id 2	id 3	id 4	id 5	id 6	id 7	id 8	id 9	id 10
—	—	0.583 936	0.412 068	0.528 742	0.465 994	—	—	—	—

进行完成，则流通效能最大。状态矩阵 S 见式 (16)。

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 2 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}.$$

(16)

4 结论

本研究采用文献研究归纳法和模拟法，结合合同网协议、RMS 设备层交换相关理论背景、FAHP 等分析方法，构建基于 CNP 的 RMS 设备层跨厂区流通方法和流通效能模型，解决了在 RMS 跨厂区进行重构的方法理论和协议空白。特别是在流通交换设备对象选择上的多属性指标最优决策，解决了重构发起方和投标方的双向效能最优问题和地区范围内数据信息共享平台的问题。中央服务器保留区域内，各厂作为潜在投标者的决策属性集，按照特定周期进行数据更新，设备重构发起方则根据模型在中央服务器中进行实时比较筛选，得出选择重构设备的流通和交换对象。该方法和模型适用于多种不同行业领域内的大中小型加工生产设备重构设备层流通交换。随着未来 RMS 设备模块和接口协议进入高速发展期，分布式厂区的设备重构流通需求爆发式增加，该方法和模型的敏捷性和科学性将得到进一步验证，其优势也将被大大体现。

本文有一定的局限性。具体而言在于设计这个

设备层流通协议框架的最初想法是能够充分利用公有制经济主体，将设备这种资产在国家层面的投入下进行市场流转，并向可重构的制造系统进行高端转型。在这个过程中由于不需要没有意义地购入重复设备，将可以使大多数企业降低用于购买设备的资金，从而进一步降低负债风险。然而，这个想法要想实施落地，需要国家主导进行 RMS 设备的基础构型设计。这是本文无法做到的。

另一方面，从本文的架构出发，未来的研究方向可以在一定程度上加入成本或价格等经济因素的分析，也可以在基础设施建设方面对于可重构运输进行研究。

参考文献:

[1] MORGAN J, HALTON M, QIAO Y S, et al. Industry 4.0 smart reconfigurable manufacturing machines[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 59: 481-506.

[2] LI X, BAYRAK A E, EPUREANU B I, et al. Real-time teaming of multiple reconfigurable manufacturing systems[J]. *CIRP Annals*, 2018, 67(1): 437-440.

[3] EPUREANU B I, LI X, NASSEHI A, et al. Self-repair of smart manufacturing systems by deep reinforcement learning[J]. *CIRP Annals*, 2020, 69(1): 421-424.

[4] MA A, NASSEHI A, SNIDER C. Anarchic manufacturing[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(8): 2514-2530.

[5] Kádár B, EGRI P, PEDONE G, et al. Smart, simulation-based resource sharing in federated production networks[J]. *CIRP Annals*, 2018, 67(1): 503-506.

[6] PANSARE R, YADAV G, NAGARE M R. Reconfigurable manufacturing system: a systematic bibliometric analysis and future research agenda[J]. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2022, 33(3): 543-574.

[7] TOUCKIA J K. Integrating the digital twin concept into the evaluation of reconfigurable manufacturing systems (RMS) : literature review and research trend[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 126(3): 875-889.

[8] HAN S, CHANG T, HONG Y, et al. Reconfiguration decision-making of IoT based reconfigurable manufacturing systems[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2020, 10(14): 4807.

[9] MILISAVLJEVIC-SYED J, LI J, XIA H. Realisation of responsive and sustainable reconfigurable manufacturing systems[J]. *International Journal of Production Research*, 2023, 62(8): 2725-2746.

[10] 马嵩, 李嵩松, 丁宾, 等. 模块化设计在复合型机床设计中的应用[J]. *世界制造技术与装备市场*, 2023(1): 45-47.

MA Qiang, LI Songsong, DING Bin, et al. Application of modular design in the design of composite machine tools[J]. *World*

- Market for Manufacturing Technology and Equipment, 2023(1): 45-47.
- [11] 马紫阳, 刘海涛, 韩潇, 等. 大型法兰加工工艺及可移动式机床设计[J]. *航空精密制造技术*, 2022, 58(5): 12-20.
MA Ziyang, LIU Haitao, HAN Xiao, et al. Process of large flange machining and design of movable machine tool[J]. *Aerospace Precision Manufacturing Technology*, 2022, 58(5): 12-20.
- [12] 赵道致, 王忠帅. 云制造模式下多服务组合结构的资源分配[J]. *工业工程*, 2019, 22(1): 1-10.
ZHAO Daozhi, WANG Zhongshuai. Resource allocation of multi-service portfolio structure in cloud manufacturing model[J]. *Industrial Engineering*, 2019, 22(1): 1-10.
- [13] EPUREANU B I, LI X Y, NASSEHI A, et al. An agile production network enabled by reconfigurable manufacturing systems[J]. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 2021, 70(1): 403-406.
- [14] BORTOLINI M, GALIZIA F G, MORA C. Reconfigurable manufacturing systems: literature review and research trend[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2018, 49: 93-106.
- [15] KOREN Y, GU X, GUO W. Reconfigurable manufacturing systems: principles, design, and future trends[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2018, 13(2): 121-136.
- [16] SMITH G R. The contract net protocol: high-level communication and control in a distributed problem solver[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1980, C-29(12): 1104-1113.
- [17] 姜继娇, 杨晓, 殷茗. 基于合同网协议的异地分布式敏捷开发多团队间任务分配分析[J]. *科技管理研究*, 2019, 39(3): 218-224.
JIANG Jijiao, YANG Xiao, YIN Ming. Analysis of task allocation among multiple teams for offsite distributed agile development based on contract network protocol[J]. *Science and Technology Management Research*, 2019, 39(3): 218-224.
- [18] 王文博, 郑文艳, 赵丽敏. 智能合同网协议的 CPN 实现[J]. *计算机系统应用*, 2020, 29(8): 280-283.
WANG Wenbo, ZHENG Wenyan, ZHAO Limin. CPN implementation of smart contract network protocol[J]. *Computer System Applications*, 2020, 29(8): 280-283.
- [19] ŠKERLIČ S, MUHA R. The importance of systems for controlling logistics costs in the supply chain: a case study from the Slovenian automotive industry[J]. *Promet-Traffic & Transportation*, 2016, 28(3): 299-310.
- (责任编辑: 郑穗华)
-
- (上接第 69 页)
- [23] 刘万琳, 张静文, 刘婉君. 带有资源柔性约束的 max-NPV 分布式多项目调度问题[J]. *运筹与管理*, 2021, 30(8): 37-43.
LIU Wanlin, ZHANG Jingwen, LIU Wanjun. Max-NPV distributed multi-project scheduling problem with resource flexibility constraints[J]. *Operations Research and Management*, 2021, 30(8): 37-43.
- [24] BLAZEWICZ J, LENSTRA J K, RINNOOY K A H G. Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity[J]. *Discrete Applied Mathematics*, 1983, 5(1): 11-24.
- [25] PELLERIN R, PERRIER N, BERTHAUT F. A survey of hybrid metaheuristics for the resource-constrained project scheduling problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 280(2): 395-416.
- [26] MIKA M, WALIGÓRA G, WęGLARZ J. Tabu search for multi-mode resource-constrained project scheduling with schedule-dependent setup times[J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 187(3): 1238-1250.
- [27] KOLISCH R, SPRECHER A, DREXL A. Characterization and generation of a general class of resource-constrained project scheduling problems[J]. *Management Science*, 1995, 41(10): 1693-1703.
- (责任编辑: 郑穗华)