

农机社群制造：面向中小型制造商的多主体协同制造模式

王乃卉¹ 郑焕霄¹ 陈祈祈² 赵之恒^{2,3} 王一甲¹ 黄国全^{2,3}

(1. 东北农业大学农业装备与能源工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 香港理工大学先进制造研究院, 香港 999077;
3. 香港理工大学工业及系统工程学系, 香港 999077)

摘要：针对中小型农机制造商制造能力分散、跨企业协作组织弱以及订单响应不足等问题，提出一种面向中小型农机制造商的社群制造组织模式。通过界定农机社群制造的概念内涵与运行特征，构建涵盖制造资源数字化建模、订单驱动社群构建与协同执行交付的体系框架，并从信息流、资金流与制造过程协同等方面阐述关键运行机制。在此基础上，提出面向多任务域的制造资源综合评价与社群筛选方法，为订单驱动下的资源组合与社群选择提供决策依据。以果园用窄轮距多功能拖拉机制造为典型场景，对配件、装配、检测和物流资源的社群构建与筛选过程进行分析，验证了所提方法的可行性与工程适用性。

关键词：农机制造；社群制造；多主体协同；订单驱动；资源数字化建模

中图分类号：S233.9 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-1298(2026)15-0235-13

OSID:



Social Manufacturing for Agricultural Machinery: A Multi-actor Collaborative Manufacturing Paradigm for Small and Medium-sized Manufacturers

Wang Naihui¹ Zheng Huanxiao¹ Chen Qiqi² Zhao Zhiheng^{2,3} Wang Yijia¹ Huang Guoquan^{2,3}

(1. College of Agricultural Equipment and Energy Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Advanced Manufacturing Research Institute, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China
3. Department of Industrial and Systems Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract: Aiming to address the issues of dispersed manufacturing capabilities, weak cross-enterprise collaboration, and insufficient order responsiveness among small and medium-sized agricultural machinery manufacturers, a community-based manufacturing organizational mode oriented to such manufacturers was proposed. By clarifying the conceptual connotation and operational characteristics of agricultural machinery social manufacturing, a systematic framework was established that integrated digital modeling of manufacturing resources, order-driven community formation, and collaborative execution and delivery. The key operational mechanisms were further elaborated from the perspectives of information flow, capital flow, and coordination of manufacturing processes. On this basis, a comprehensive evaluation and community selection method for manufacturing resources in multi-task environments was developed, providing decision support for resource combination and community selection under order-driven production. Furthermore, the proposed mode contributed to improving resource utilization efficiency, enhancing manufacturing flexibility, and strengthening the responsiveness of agricultural machinery production systems to customized and small-batch orders. Taking the manufacturing of a narrow-track multifunctional orchard tractor as a representative scenario, the community construction and screening processes for component, assembly, inspection, and logistics resources were analyzed, thereby verifying the feasibility and engineering applicability of the proposed method.

Key words: agricultural machinery manufacturing; social manufacturing; multi-agent collaboration; order-driven production; digital resource modeling

收稿日期: 2026-02-16 修回日期: 2026-02-26

基金项目: 香港创新及科技基金项目 (PRP/007/25LI)

作者简介: 王乃卉 (1995—), 女, 副教授, 博士, 主要从事农业机械制造研究, E-mail: wangnaihui@neau.edu.cn

通信作者: 王一甲 (1995—), 男, 教授, 博士, 主要从事智能农业装备研究, E-mail: yijia@neau.edu.cn

0 引言

2024 年中国制造业增加值占全球约 30%，至此，中国制造业已连续 15 年位居全球第一，继续保持世界制造业第一大国地位。但我国农业机械制造业至今仍存在的核心技术落后、国产农机难以适应地形和复杂作业环境等诸多亟需改善的问题，导致我国农机制造业在全球竞争中呈现颓势。据农业农村部发布的公报，2024 年我国农作物耕种收综合机械化率为 75.64%，农业机械化率最高的黑龙江省维持在 99% 以上。从上述数据可以彰显出我国农机制造业的重要战略地位和广阔的发展前景。

国内关于农机制造模式的研究，主要围绕农机装备制造企业的企业主导型离散生产组织方式、柔性装配产线结构以及封闭或半封闭的制造系统形态等方面展开^[1-4]。国外关于农机制造模式的研究主要从复杂装备制造系统与装配系统组织的视角展开：一方面，围绕多品种与配置差异条件下的混流装配^[5]；另一方面，针对需求波动与产品迭代带来的系统变更需求，提出可重构制造系统等面向变化的制造系统形态^[6]。综合来看，现有国内外关于农机制造模式的研究，主要以单一制造企业或装配系统为研究边界。然而，在农机产品配件类型多且专用性强、装配依赖度高、跨区域供应普遍的背景下，仅依靠企业内部制造系统优化，难以实现对分散制造资源的高效组织与灵活重构。因此，农机制造领域有必要从制造资源组织层面引入针对分散资源的社群制造理念，探索面向农机制造特点的多主体协同制造模式。

社群制造 (Social manufacturing) 是一种面向分散制造资源的新型制造组织模式，其核心思想是通过网络化平台将具有不同制造能力的主体组织为相对自治、可协同的制造社群，从而实现制造资源的共享与协同利用^[7-11]。近年来，研究者已在增材制造协同生产、共享工厂/共享制造生产节点、云制造平台化任务匹配，以及 CPSS 框架下的数据驱动制造系统等多个制造领域开展社群化探索^[12-17]，并在消费品大规模定制等场景出现应用型研究^[18-20]。尽管社群制造研究已在通用制造场景形成一定基础，但针对农机制造这一具有产品结构复杂、多品种小批量、装配依赖度高等特征的领域，相关研究仍存在明显空白。

农业机械制造作为典型的复杂装备制造领域，其制造过程长期面临生产组织柔性不足、制造资源利用效率不高等问题。现有针对农机制造领域的生产组织方式研究大多以单一企业或单一装配系统为

研究边界，将协同问题更多理解为企业内部的工序协同或供应链上下游的静态配套关系，而忽略了从“跨企业、跨地域分散制造资源的动态组织与协同执行”这种社群制造角度展开研究。随着农业装备个性化需求和小批量定制趋势的增强，传统以单一制造企业为核心、依赖封闭或半封闭制造系统的农机制造模式，已难以有效应对需求波动与制造任务复杂化带来的问题。因此，探索突破企业边界的制造资源组织新模式，对于提升农机制造系统整体柔性与响应能力具有重要理论意义与工程价值。基于此，本文以农机制造场景为研究对象，围绕社群制造模式在农机制造中的适用性问题，构建面向农机制造特点的社群制造体系框架，并对其运行机制与组织特征进行分析。通过该研究，期望为农机制造模式创新提供理论支撑，并为复杂装备制造领域的多主体协同制造实践提供参考。

1 中小型农机制造企业的瓶颈分析

我国农机装备制造业已形成较为完整的产业链条^[21]，但在多品种小批量、区域与季节波动显著、装配依赖度高等行业特征约束下，中小型农机制造商的制造组织能力与市场响应能力仍存在明显不足。相较于大型企业具备较完整的产线体系与供应链控制力，中小企业普遍呈现“资源分散、能力有限、订单不稳定、协作依赖强”的结构性特征：一方面需要通过外协补齐零部件加工、装配、检测与物流等环节能力，另一方面又缺乏稳定、高效的跨主体协同组织方式，导致资源利用效率、交付可靠性与柔性响应能力难以同步提升。从制造组织与产业运行视角看，面向中小型农机制造商的关键问题主要体现在以下方面。

(1)能力链条不完整，外协依赖强且协同成本高

中小企业通常难以在企业内部覆盖配件加工、总装、检测与仓配等全链条能力，制造活动高度依赖外部供应商与服务商。由于缺少面向订单全过程的协同规则与过程联动机制，信息传递滞后、进度难同步、质量责任界面不清等问题频发，制造过程易出现等待、返工与交付延误。

(2)订单波动显著，齐套供给与装配节拍难以协同

农机制造需求受区域作业窗口与季节性影响明显，中小企业在订单高峰期易出现产能挤压、关键件短缺与节拍失衡；在淡季又面临产能闲置与成本摊薄压力。传统以单企业为中心的组织方式难以在跨主体范围内实现齐套供给、节拍协同与过程可视化

控制,导致计划与执行偏差扩大、交付稳定性下降。

(3)制造组织封闭,柔性扩展与风险分担能力不足

中小型农机制造企业的生产组织通常围绕企业边界内资源展开,协作方式以临时外协、分段委托为主,缺少面向订单的跨主体协同组织与过程联动控制手段。当订单结构发生变化或出现紧急插单时,企业难以在短时间内补齐关键工序产能与配套能力,容易形成“关键环节拥塞—工序等待—交付延误”的连锁反应;当质量波动、返工返修或物流异常发生时,也缺乏可快速切换替代资源与重构任务路径的机制,导致风险在“供应—装配—检测—交付”链条中累积并放大,进一步削弱交付可靠性与系统柔性。

综上,中小型农机制造企业在“能力链条不完整—订单波动显著—组织方式封闭”的叠加约束下,难以仅依靠企业内部改造实现柔性提升与交付保障,因此,亟需构建面向社会化制造资源的农机社群制造模式,以实现制造能力的跨主体组织与订单驱动的动态协同。

2 农机社群制造

2.1 农机社群制造的概念界定

农机社群制造是指在整合农机装备制造领域分散资源的基础上,依托信息-物理-社会融合的网络环境,将零部件供应、装配、检测与物流仓储等主体组织为具有协同关系的制造社群,实现农机装备及关键部件制造的多主体协同与动态组织。该模式面向农机产品结构复杂、多品种小批量、装配依赖度高及区域季节性需求显著等特征,通过资源社群化组织与信息共享,促进加工、装配、检测与物流等环节协同运行。在该模式下,制造资源以社群形式自组织协作,任务按需求驱动在多主体间动态配置,并在收益分配与协作规则约束下完成面向特定需求的制造活动。该模式依托大数据、物联网、RFID 与信息物理系统(CPS)等技术,对资源状态、能力信息与任务执行进行感知与协调,支撑资源-需求匹配、过程协同与系统动态重构。

2.2 农机社群制造的体系架构

农机社群制造体系以农机产业链的社会化资源为基础,以订单驱动的社群化生产系统为核心,通过信息-物理-社交互联实现跨主体、跨组织的协同制造。图 1 所示模型将该体系划分为以下 5 个层级。

(1)农机制造社会化资源层:该层是农机社群制造体系的物质基础,由分散在农机产业链各环节的制造资源构成,具有地域分散、隶属多样与能力差

异显著等特征,难以在传统单企业制造系统内统一调度与高效利用。为支撑社群制造运行,需要对异构资源进行统一信息建模与数字化封装,通过标准化接口接入网络平台,实现资源在线登记、发布与可发现。

(2)农机制造能力表征层:面向已接入资源,利用 CPS 与传感感知对其物理状态、工艺能力与运行行为进行实时采集与映射,将资源由“设备/企业实体”抽象为边界清晰的制造服务单元。通过能力标签与能力卡片统一表达加工、装配、检测与物流等能力,并描述产能规模、质量水平、交付能力及历史履约等关键属性。

(3)农机制造能力社区层:在能力抽象基础上进一步组织资源。该层依据能力类型、工艺特征、产品方向及历史协作信息,将能力相近、协同性强的服务节点聚合为不同制造能力社区,并通过网络实现信息共享与协同连接,形成松耦合但具备协作潜力的资源集合,为跨企业、跨区域协同提供结构化支撑。

(4)订单驱动制造社群层:以具体订单为触发,围绕机型配置、数量规模与交付周期等需求,从多个能力社区中筛选节点,动态构建面向订单的农机制造社群。系统综合考虑能力匹配、负载状态、可靠性、地域适配、履约信誉与协同关系,并结合成本约束选择最优社群与任务组合方案,实现“订单-能力-社群”的动态映射,支撑多品种、小批量与定制化制造。

(5)农机制造执行与交付层:该层直接面向业务运行,涵盖订单解析、任务分解、制造执行、状态监控与交付完成全过程。农机服务平台作为协调节点生成任务方案,驱动各节点按节拍完成配件制造、装配、检测与交付;同时通过信息流与资金流协同,实现状态实时反馈、结果动态更新以及费用结算与信誉/能力更新,形成制造执行与协同控制闭环。

该农机社群制造体系通过对分散制造资源的数字化接入与能力抽象,实现制造能力的社群化组织,并在订单驱动下动态构建面向具体需求的制造协同组织,最终完成制造任务的协同执行与交付控制。

2.3 农机社群制造的关键运行机制

2.3.1 信息流和资金流运行机制

图 2 中构建了农机社群制造模式下的信息流和资金流两类通道机制,展示了农机用户、农机服务平台及多类服务商之间的协同关系。信息与资金流通机制是农机社群制造中实现多主体协同运行的关键支撑,用于协调订单需求、制造任务与费用结算过程,保障制造活动有序执行与交付可靠性。

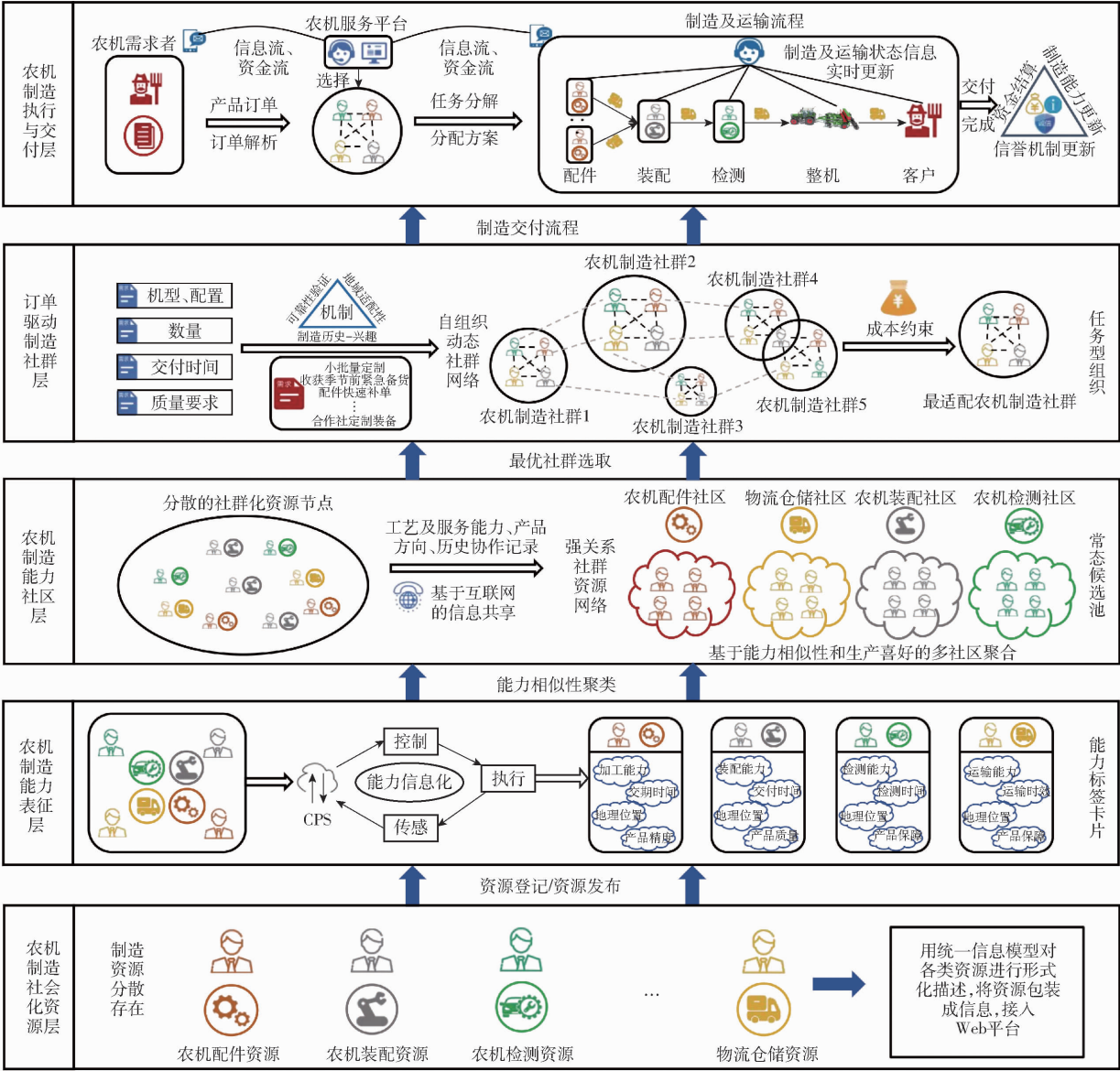


图1 农机社群制造模式体系架构图

Fig. 1 Overall architecture of agricultural machinery social manufacturing system

在农机社群制造模式下,信息与资金流通机制围绕农机订单需求展开,以农机服务平台为核心,实现需求传递、任务协调与费用结算的统一管理。一方面,通过信息流实现订单需求解析、制造任务分解以及制造状态的实时反馈,保障多类制造服务主体之间的信息对称与协同一致;另一方面,通过资金流将订单费用与制造任务执行过程相绑定,形成与履约状态相关联的结算与约束机制。信息流与资金流的协同运行,使制造过程从传统线性推进方式转变为可监控、可反馈、可调节的动态协同过程,为农机社群制造的稳定运行提供制度保障。其具体运行机制如下:

(1)需求解析与任务分解机制:该机制是信息流运行的起点,以农机订单为输入,对机型配置、数量规模、交付周期及质量要求等信息进行结构化解析,并将整机制造需求分解为配件供应、装配、检测

与物流等可执行任务单元。通过明确任务边界与协同关系,为后续服务主体选择与任务调度提供依据,降低多主体协同不确定性。

(2)任务计价与费用拆分机制:该机制是资金流运行的基础,依据任务分解结果将整机订单费用拆分为与各类制造任务对应的费用单元,并明确各制造服务主体的收益结构。通过建立任务级费用映射,使资金流与制造执行过程一一对应,为后续基于履约状态的结算与约束提供支撑。

(3)履约触发式结算机制:该机制将资金支付与任务执行状态绑定。制造服务主体完成任务并满足质量与交付要求后触发阶段性结算;若出现延误或返工,则结算相应延迟或调整。通过引入履约条件约束,避免资金与制造行为脱节,强化协同执行约束。

(4)制造服务商信用机制:该机制将资金支付

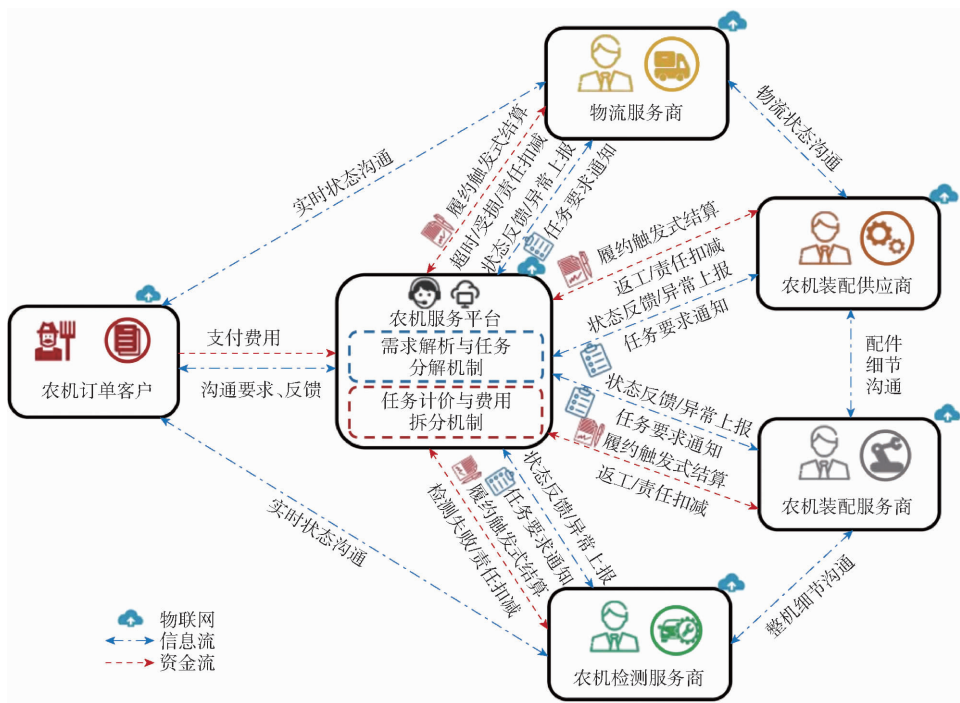


图 2 信息、资金流通机制图

Fig. 2 Information and capital flow mechanism

与任务执行状态绑定。制造服务主体完成任务并满足质量与交付要求后触发阶段性结算；若出现延误或返工，则结算相应延迟或调整。通过引入履约条件约束，避免资金与制造行为脱节，强化协同执行约束。

如图 3 所示，农机社群制造中各制造模块完成任务后，由后项模块进行履约验收，并以验收结果作为资金结算与信用更新的触发条件。系统根据履约程度划分为完全履约、部分履约与未履约 3 种情形，分别对应全额结算与信用提升、比例结算与信用调整以及结算暂停与信用惩罚。通过将履约结果和资金与信用机制联动，实现对多主体协同行为的动态约束与激励，保障制造过程的稳定运行。

2.3.2 物资流与制造过程协同机制

物资流与制造过程协同机制主要用于保障农机社群制造中配件供应、装配执行、质量检测与整机交

付等环节的有序衔接，其核心在于通过物资状态感知、制造进度反馈与过程联动控制，实现分散制造节点之间的节拍协同与闭环运行。具体包括物资流通道机制、物料齐套与节拍协同机制以及检测放行与物流触发机制。

(1)物资流通道机制：物资流与制造过程协同机制是农机社群制造中保障多主体制造活动有序衔接的重要支撑。如图 4 所示，该机制以制造执行过程为主线，在农机服务平台与制造节点协同控制下，实现农机配件供应、装配执行、检测验证与整机交付等环节的协调运行。通过对物料状态与制造进度的实时感知，将分散的制造与物流活动纳入统一的过程控制框架，避免因物料缺失或节拍失衡导致的制造中断。同时，结合检测结果对后续物流活动进行联动控制，使农机制造过程由传统串行推进转变为可感知、可反馈、可调节的协同运行过程。

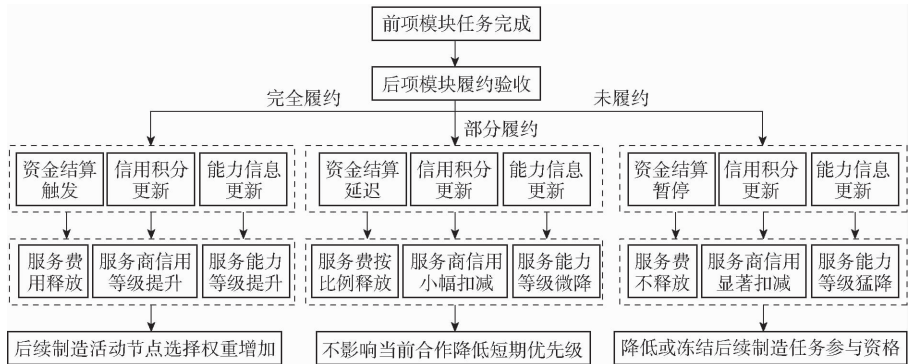


图 3 履约验收驱动的资金结算与信用反馈机制示意图

Fig. 3 Contract fulfillment-driven payment settlement and credit feedback mechanism

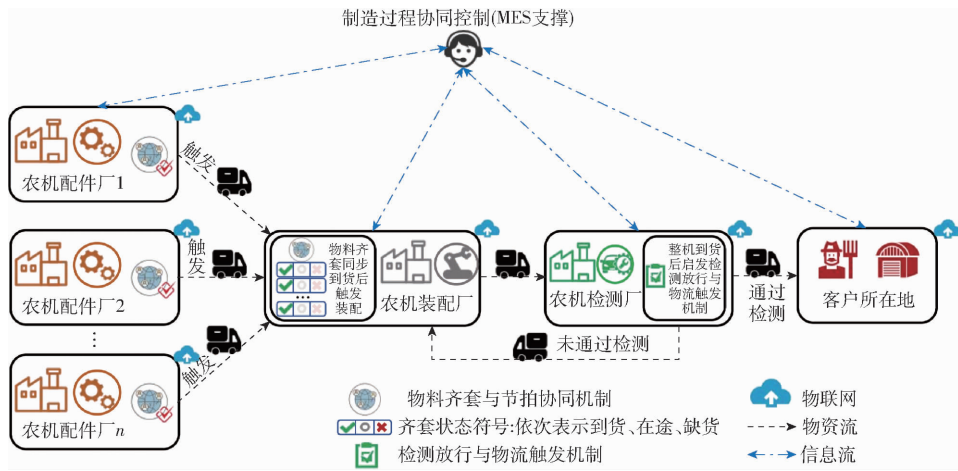


图4 物资流通机制图

Fig.4 Material flow coordination mechanism

(2)物料齐套与节拍协同机制:物料齐套与节拍协同机制用于协调多来源农机配件供应与装配过程之间的关系。该机制通过对关键零部件到位状态进行监控,在满足装配齐套条件后释放装配任务,避免因物料缺失导致装配等待或返工。同时,结合装配节拍与在制品状态,对配件供应节奏进行动态调整,实现物料供应与装配执行的节拍匹配,从而提升装配环节的连续性与稳定性,保障农机制造过程按计划推进。

考虑一个由 n 个农机配件供应节点与 1 个农机装配节点构成的装配制造场景。装配对象为某型号农机,其装配过程依赖于多类关键配件的齐套供给。对此,为了确定最优装配节拍协同计划所建立的模型为

$$\begin{cases} \min Z = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^v \left| \sum_{i=1}^n q_{ikt} - D_{kt} \right| \\ \text{s. t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^n q_{ikt} \geq D_{kt} & (\forall k, t) \\ \sum_{i=1}^n q_{ikt} \leq D_{kt} + \Delta_{kt} & (\forall k, t) \\ \sum_{k=1}^v r_k D_{kt} \leq C_t & (\forall t) \\ 0 \leq q_{ikt} \leq C_{Capikt} & (\forall i, k, t) \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中 q_{ikt} ——第 i 个农机配件厂在窗口 t 向装配环节交付的第 k 类配件数量,件
 D_{kt} ——装配窗口 t 下装配对配件 k 的需求量,件
 C_t ——窗口 t 装配可用总负载,min
 C_{Capikt} ——第 i 个配件供应节点在窗口 t 内对第 k 类配件的最大供给能力,件
 r_k ——配件 k 的单位装配负载,min/件
 Z ——各装配窗口各类配件供需之间绝对偏差之和

Δ_{kt} ——允许的材料超前到货余量,件
 T ——总装配时间窗口数
 v ——关键配件种类数

式(1)模型以最小化配件实际到货量与装配需求量之间的偏差为目标,通过对多类关键配件的供给节奏进行统一协调,避免因到货不足或超前过量引发的装配等待与在制品积压。第 1 个和第 2 个约束分别保证装配窗口内关键配件的齐套可行性与合理的到货冗余区间;第 3 个约束通过引入单位配件装配负载,将多类配件需求统一映射为装配负载需求,从而确保装配计划不超过装配节点的可执行能力;最后一个约束刻画了各配件供应节点的供给能力限制。该模型为装配节点提供了可直接执行的物料齐套与节拍协同决策依据。

(3)检测放行与物流触发机制:该机制用于衔接农机制造与物流交付。产品装配完成后须经检测验证,检测结果作为触发物流运输的依据:仅当满足质量与功能要求并完成放行,物流任务才被激活;若检测不合格,则将结果反馈至农机服务平台,由平台协调将整机返回装配环节返工,避免不合格产品进入交付流程。该机制通过检测结果与物流执行联动,强化质量约束,保障交付可靠性与一致性。

2.4 农机社群制造的关键实现方法

2.4.1 制造资源数字孪生建模与能力接口化方法

如图 5 所示,该架构描述了农机制造资源从物理层到平台层的统一信息建模、数字化封装与服务化接入过程。底层以农机配件生产、整机装配、农机检测与物流运输等资源为对象,统一建模其身份与静态属性、能力特征、运行状态及服务属性,形成标准化资源描述。基于生产状态、质量状态与物流状态等感知手段,对资源运行状态与过程信息进行实时采集;采集数据经适配与语义映射后与能力模型绑定,完成资源数字化封装,形成包含能力、状态、价

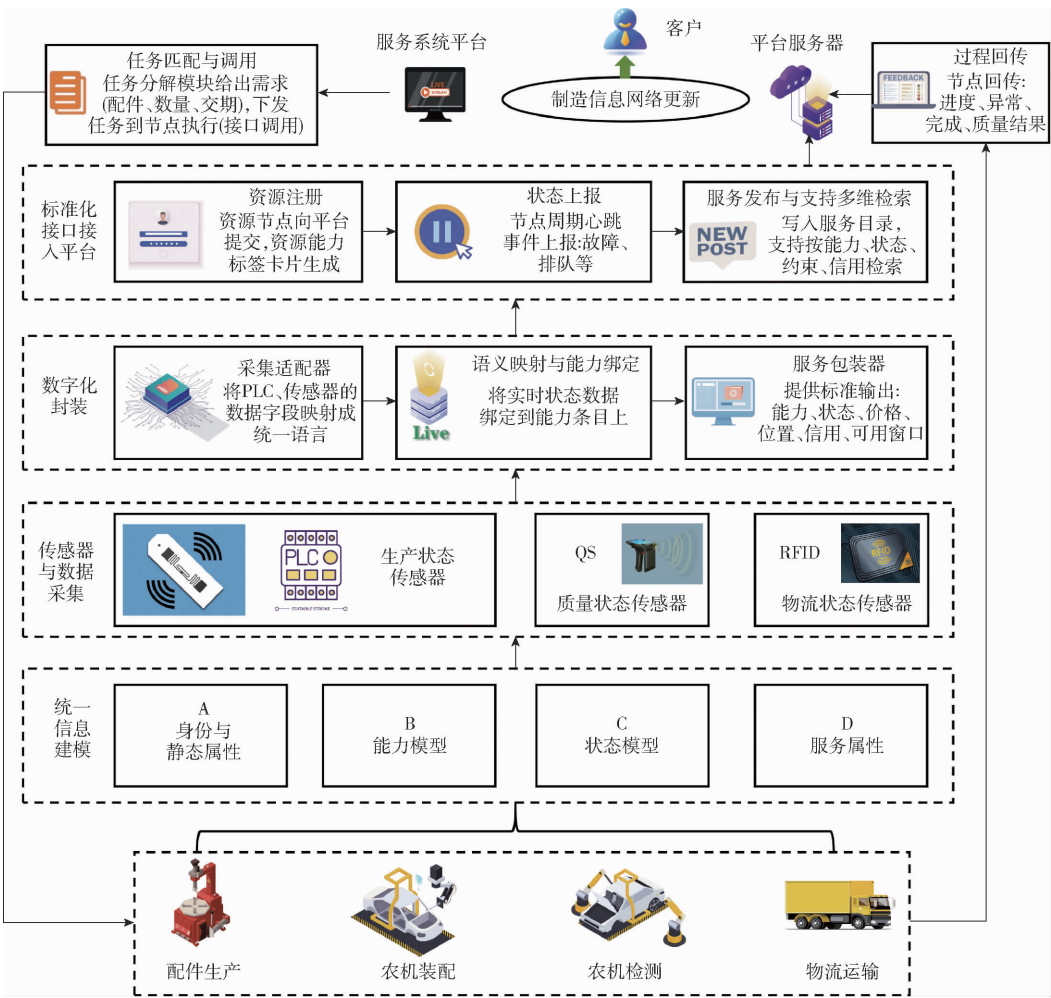


图 5 面向农机社群制造的资源数字化建模与服务化接入架构图

Fig. 5 Digital modeling and service-oriented access architecture of manufacturing resources for agricultural machinery social manufacturing

格、位置与可用窗口等信息的服务单元。封装后的服务通过标准接口接入平台,实现在线注册、状态上报与服务发布,支撑平台侧检索与任务匹配^[22-23]。上层由服务系统完成任务分解、节点调用与过程协同,并对制造过程状态、异常及质量结果进行实时反馈,形成“感知—封装—发布—调用—反馈”的闭环运行机制,为农机社群制造的多主体协同与动态组织提供数字化基础。

表 1 中总结了农机制造资源统一信息建模中的关键字段及其来源,从身份、能力、状态与服务 4 个

表 1 统一信息模型关键字段示意表

Tab.1 Key fields of unified information model

信息类别	关键字段	信息来源
身份信息	资源标识/资源类型/所属主体/地理位置	资源注册与申报
能力信息	工艺能力/作业范围/产能水平/能力约束	工艺配置与产线参数
状态信息	可用状态/当前负载/排队时间	传感器/PLC/MES
服务信息	服务等级协议/定价规则/信用等级	平台规则与历史记录

维度对制造资源进行结构化描述。通过对核心信息要素的标准化定义,为制造资源的数字化封装、在线发布与服务化调用提供统一的数据基础与语义支撑。

2.4.2 基于多维能力评分模型的制造资源选择和弱社群构建

面向农机社群制造任务的资源组织需求,构建多维综合评价框架^[24-25]。利用该评价模型进行后续候选资源的筛选、社群的构建与优化决策。

(1) 农机制造资源选择

为综合刻画农机制造资源在社群制造任务中的适配程度,构建涵盖制造能力与环境协同约束的综合评价模型,模型中涵盖的维度指标如表 2 所示。通过对各评价维度进行无量纲化处理,并引入权重向量反映其相对重要性,实现制造资源适配性的统一量化表征。

各评价指标的原始数据在量纲与取值范围上存在差异。为消除不同单位和尺度对综合评价结果的影响,本文在构建评价矩阵前对各指标进行无量纲

化处理,将其统一映射至 $[0,1]$ 区间,从而保证不同维度指标在综合评分中的可比性。

表 2 制造资源的维度指标

Tab.2 Manufacturing process-resource requirement mapping

维度	维度类型	含义
p	制造能力维度	加工/生产能力
s	制造能力维度	规模与柔性
t	制造能力维度	交付与节拍
q	制造能力维度	质量与可靠性
r	制造能力维度	响应与协同
g	环境与协同约束维度	地理位置距离
l	环境与协同约束维度	物流可达性
k	环境与协同约束维度	历史信誉

无量纲化处理:设第 x 个维度的原始指标值为 $c_i^{(x)}$,其无量纲化结果为 $\hat{c}_i^{(x)}$ 。根据指标属性分2类处理:对于效益型指标(如产能/柔性、质量稳定性、响应能力、信用评分等),采用“值越大越优”的正向归一化方式,使得原始值越大对应的无量纲化得分越接近1;对于成本型指标(如地理距离、物流时延、排队时间、风险成本等),采用“值越小越优”的逆向归一化方式,使得原始值越小对应的无量纲化得分越接近1。经过上述处理后,各指标均具有一致的评价方向与可比性,可用于后续权重加权与综合得分计算。

对所有候选制造资源节点构建无量纲化综合评价矩阵

$$S = \begin{bmatrix} \hat{c}_1^{(p)} & \hat{c}_1^{(s)} & \hat{c}_1^{(t)} & \hat{c}_1^{(q)} & \hat{c}_1^{(r)} & \hat{c}_1^{(g)} & \hat{c}_1^{(l)} & \hat{c}_1^{(k)} \\ \hat{c}_2^{(p)} & \hat{c}_2^{(s)} & \hat{c}_2^{(t)} & \hat{c}_2^{(q)} & \hat{c}_2^{(r)} & \hat{c}_2^{(g)} & \hat{c}_2^{(l)} & \hat{c}_2^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hat{c}_n^{(p)} & \hat{c}_n^{(s)} & \hat{c}_n^{(t)} & \hat{c}_n^{(q)} & \hat{c}_n^{(r)} & \hat{c}_n^{(g)} & \hat{c}_n^{(l)} & \hat{c}_n^{(k)} \end{bmatrix}$$

(2)

S 的行表示候选制造资源节点, $i=1,\cdots,n$;列表示评价维度(能力与约束综合维度); $\hat{c}_i^{(j)}$ (j 为 p,s,t,g,r,g,l,k)表示经无量纲化处理后的评价得分,统一映射到 $[0,1]$ 。

为反映不同评价维度在农机制造任务中的重要性差异,引入权重向量: $w=[w^{(p)}\ w^{(s)}\ w^{(t)}\ w^{(q)}\ w^{(r)}\ w^{(g)}\ w^{(l)}\ w^{(k)}]^T$,各维度的权重可根据订单类型决定,看订单是否属于紧急备货或小批量定制类等特殊类型而调整权重,或由客户打分决定。最终生成的综合评分 Φ_i 模型为

$$\Phi_i = \sum_{j \in D} w^{(j)} \hat{c}_i^{(j)}$$

(3)

其中 D 为评价维度集合, $D=\{p,s,t,q,r,g,l,k\}$ 。

所构建的综合评价模型将制造能力、交付稳定性、质量可靠性以及区位与协同等因素统一映射为可比的适配度指标,有效避免单一能力评价的片面性。该模型为农机社群制造中资源筛选与组合提供了量化依据,可作为后续社群构建与优化决策的重要基础,提升多主体协同制造的稳定性与可实施性。

(2)弱社群构建

在农机制造多品种小批量、装配依赖度高且需求波动显著的条件下,制造主体之间不再以长期固定供应链关系为前提,而是围绕具体订单任务临时形成的、基于能力互补与任务契合的弱关系社群。与传统稳定供应链中的固定合作关系不同,该社群具有“任务驱动、松耦合、可重构”的特征,成员在完成订单后可解散或重组。在多主体协同制造场景中,仅依赖静态制造能力评价难以将单个资源节点组合成弱社群关系。为此,本文在基础能力评价的基础上,引入生产历史匹配度与生产兴趣因素,将弱关系社群的“任务驱动协同倾向”转换为可量化指标,如表3所示,并与前述能力评价结果共同构成社群构建与筛选的输入,构建面向弱关系社群的多维综合评价模型。

表 3 资源组成弱社群的维度指标

Tab.3 Dimension indicators for weak community formation

维度	维度类型	含义
h	环境与协同约束维度	生产历史匹配度
u	环境与协同约束维度	生产兴趣

生产历史匹配度:反映节点对相似订单的经验积累与工艺契合程度。定义当前订单特征向量(或特征集合)为 $\mathbf{x}_{ord}$,节点 i 的历史订单集合为 Ω_i 。定义节点在历史订单中与当前订单最接近的相似度为其历史匹配度得分 $\hat{S}_i^{(h)}$, $\text{Sim}(\cdot) \in [0,1]$ 为相似度函数,值越大表示节点的历史制造经验与当前订单特征越一致,则有

$$\hat{S}_i^{(h)} = \max_{o \in \Omega_i} \text{Sim}(\mathbf{x}_{ord}, \mathbf{x}_o)$$

(4)

式中 $\mathbf{x}_o$ ——节点 i 的历史订单 o 的特征向量

生产兴趣:反映节点在平台环境下对该类任务的主动参与程度及偏好匹配水平。为刻画节点对该类任务的主动参与程度与偏好倾向,引入主动接单/报价频次与偏好匹配度。计算式为

$$\hat{S}_i^{(u)} = \alpha_u \widetilde{BidFreq_i} + (1 - \alpha_u) \widetilde{PrefMatch_i}$$

$(0 \leq \alpha_u \leq 1)$

(5)

式中 $\widetilde{BidFreq_i}$ ——类似任务的主动接单/报价频次(统计窗口内)

$\widehat{PrefMatch}_i$ ——偏好匹配度（例如工艺类型、批量区间、利润区间、交付周期偏好等的匹配结果）

$\tilde{S}_i^{(u)}$ ——节点 i 的生产兴趣/接单意愿得分

α_u ——节点主动接单/报价频次相对于偏好匹配指标的重要性权重系数

所有维度先无量纲化到 $[0,1]$ ，记为 $\tilde{c}_i^{(j)}$ 。则节点 i 的综合评分 $\bar{\Phi}_i$ 定义为

$$\begin{cases} \bar{\Phi}_i = (1 - \eta) \sum_{j \in D} w^{(j)} \tilde{c}_i^{(j)} + \eta(\lambda_h \tilde{S}_i^{(h)} + \lambda_u \tilde{S}_i^{(u)}) \\ \text{s. t. } \begin{cases} \sum_{j \in D} w^{(j)} = 1 & (w^{(j)} \geq 0) \\ \lambda_h + \lambda_u = 1 & (\lambda_h u \geq 0, \lambda_u \geq 0) \\ 0 \leq \eta \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

式中 η ——“历史 + 兴趣”总体权重占比

λ_h ——生产历史匹配度权重，衡量历史订单相似经验在增强评分中的重要程度

λ_u ——生产兴趣权重，衡量节点主动接单意愿或偏好匹配程度在增强评分中的重要程度

设第 m 个候选社群为 G_m （包含该订单所需的配件、装配、检测、物流等资源节点），定义社群综合评分 Ψ_m 为

$$\begin{cases} \Psi_m = \sum_{i \in G_m} \alpha_i \bar{\Phi}_i \\ \text{s. t. } \begin{cases} \alpha_i \geq 0 \\ \sum_{i \in G_m} \alpha_i = 1 \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

式中 α_i ——社群内节点重要度（关键件供应商权重大于一般件，装配节点权重通常更大）

通过将制造能力、环境约束与生产历史、兴趣偏好进行统一建模，所构建的弱社群综合评分模型能够刻画节点与订单之间的隐性适配关系，为后续社群筛选与成本优化提供更具判别力的决策依据。

2.4.3 成本约束下的最优制造社群选择

基于前述多维综合评价模型，社群综合得分 Ψ_m 已将制造能力、质量可靠性、交付与节拍、区位与协同、制造历史及兴趣等因素统一映射为可比的适配度指标。因此，在社群选择的优化阶段不再引入交期相关变量，而是以成本预算约束为核心，对评分相近的候选社群进行成本筛选，从而获得经济可行且综合适配度最优的社群选择方案。

(1) 候选集构建

先按 Ψ_m 从高到低排序，在每类任务中选取得

分相近的前 M 个候选节点构成候选集。

$$\begin{cases} \Psi_m = \sum_{i \in G_m} \alpha_i \bar{\Phi}_i & (D = \{p, s, t, q, r, g, l, k, h, u\}) \\ \Psi_m^* = \max_{m \in I} \Psi_m \\ I^{cond} = \{m \in I \mid \Psi_m \geq \Psi_m^* - \varepsilon, c_m^{(j)} \geq \theta^{(j)}, \forall j \in D\} \end{cases} \quad (8)$$

式中 I ——同类制造社群集合

$c_m^{(j)}$ ——社群 m 在维度 j 上的无量纲化得分

$w^{(j)}$ ——维度 j 的权重

Ψ_m^* ——同类资源中的最优综合评分（由已知数据直接计算得到的常数）

ε ——评分近似阈值

$\theta^{(j)}$ ——维度 j 的阈值

I^{cond} ——满足评分近似且八维均达标的弱社群集合

(2) 候选集内的成本最小化选择模型

在综合评分筛选得到候选弱社群的基础上，为进一步体现经济性约束，引入候选集内的成本 F 最小化选择模型，以实现适配性满足条件下的最优资源决策，模型为

$$\begin{cases} \min F = \sum_{m \in I^{cond}} F_m y_m \\ \text{s. t. } \begin{cases} \sum_{m \in I^{cond}} y_m = 1 \\ y_m \in \{0, 1\} & (\forall m \in I^{cond}) \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

式中 F_m ——第 m 个社群的执行成本（制造费用、服务报价及相关物流费用等）

y_m ——0-1 决策变量，若选择第 m 个社群，则 $y_m = 1$ ，否则为 0

$\sum y_m = 1$ 可保证最终仅选择一个资源节点。

该模型通过在评分近似且各维度达标的候选集中选取成本最低的资源节点，实现了适配性与经济性的有效平衡，为农机社群制造资源的最终确定提供了清晰、可操作的决策依据。

2.5 农机社群制造模式与传统制造模式的对比分析

传统农机制造模式以单一制造企业为核心组织单元，制造活动主要在企业内部完成，外部协作以稳定的供应链关系为主。相比之下，农机社群制造是依靠跨企业、跨地域分散制造资源的动态组织与协同执行。为更直观地体现两类模式差异，本文从生产组织方式、资源可见性、协同关系形态以及效率、成本、响应速度等关键指标进行对比，结果见表 4。

3 面向果园用窄轮距多功能拖拉机的社群制造典型场景分析

果园场景常用的窄轮距多功能拖拉机具有结构

配置多样、装配依赖度高及小批量定制需求突出的特点。其在轮距形式、动力输出、液压配置及配套机具接口等方面存在多种可选方案,导致制造过程呈现多配件、多工序协同的特征。该类农机在传统集中制造模式下组织效率较低,而通过社群制造方式对配件供应、装配与检测资源进行动态组织,更有利于支撑其定制化与小批量生产需求。

表 4 两种制造模式的关键指标对比

Tab.4 Comparison of key indicators between two manufacturing modes

对比维度	传统农机制造模式	农机社群制造模式
交付稳定性	易受单点资源瓶颈影响,跨环节联动弱	通过社群重组提高鲁棒性,减少单点失效影响
生产效率	装配等待、齐套不稳、在制品波动较明显	强调齐套与节拍协同,降低等待与停滞,提高连续性
制造成本	显性成本可控,隐性协同成本与延期成本难控	制造执行成本可优化,平台机制降低沟通与试错成本
响应速度	订单变更响应慢,跨企业协同周期长	任务级重构与快速匹配,缩短响应时间与决策周期
质量控制	质量数据分散,追溯链条不完整	状态和质量数据在线上报,便于追溯与一致性控制

3.1 制造结构与资源需求分析

表 5 从系统平台视角对农机制造过程中涉及的配件、装配、检测与物流资源进行了归类与抽象,重点刻画不同类型配件在能力、状态与协同复杂度上的差异,为后续基于能力评估的资源匹配与制造社

群构建提供数据基础。

表 5 工序-资源需求
Tab.5 Process-resource demand

制造环节	代表性工序	资源类型	平台侧关键数据需求
配件	结构件与传动件	制造资源	产能上限、节拍、良率、在制品数量
配件	液压元件与管路	制造资源	交期承诺、批次信息、压力等级
配件	电气与控制部件	制造资源	配置清单、接口兼容性、测试状态
配件	标准件与易耗件	制造资源	库存余量、安全库存、补货周期
配件	定制与适配件	制造资源	订单绑定关系、交期、适配状态
装配	整机装配执行	装配资源	当前负载、可用节拍、装配完成状态
检测	整机功能与安全检测	检测资源	检测项目覆盖、检测结果、放行状态
物流	成品配送与交付	物流资源	库位状态、发运时间窗、配送状态

3.2 社群构建与协同制造过程

在完成农机制造资源的统一建模与数据采集基础上,系统平台进一步围绕订单需求与资源能力开展制造社群构建与商务社交组织。社群构建的目标在于将分散的制造、装配、检测与物流资源组织为面向具体订单的协同制造单元,而商务社交机制则为多主体协作提供持续交互、信任建立与关系演化的支撑环境。

如表 6 所示,资源节点权重由客户打分所得。

表 6 8 个维度的权重

Tab.6 Weight settings of eight evaluation dimensions

资源节点	维度 p	维度 s	维度 t	维度 q	维度 r	维度 g	维度 l	维度 k
结构件与传动件	0.15	0.10	0.13	0.12	0.20	0.15	0.08	0.07
液压元件与管路	0.10	0.09	0.14	0.15	0.18	0.16	0.09	0.09
电气与控制部件	0.15	0.10	0.15	0.15	0.10	0.12	0.10	0.13
标准件与易耗件	0.11	0.14	0.13	0.09	0.18	0.12	0.15	0.08
定制与适配件	0.10	0.10	0.20	0.15	0.15	0.12	0.08	0.10
整机装配执行	0.15	0.10	0.10	0.10	0.15	0.20	0.05	0.15
整机功能与安全检测	0.10	0.15	0.14	0.17	0.09	0.11	0.08	0.16
成品配送与交付	0.15	0.10	0.15	0.10	0.14	0.10	0.16	0.10

3.2.1 社群构建与筛选

如图 6 所示,平台以农机订单需求发布为起点,依次完成候选资源收敛、硬约束过滤与能力评价。首先依据机型配置、配件清单、交付周期与质量要求,从资源池筛选具备基本匹配能力的候选节点;随后引入可制造性、稳定交付与协同等硬约束,剔除不满足条件的节点;最后对剩余资源进行多维综合评分,形成面向订单的最优制造社群并输出至任务分

解与调度模块,同时保留备选节点,以提升动态调整过程的鲁棒性与稳定性。

经过初步硬筛选,每类资源节点挑选出 3 个最优供应商进行多维综合评价,得分如表 7 所示。

弱社群综合评分:取值 $\eta = 0.25, \lambda_h = 0.6, \lambda_u = 0.4, \theta = 0.71, F_1 = 92$ 万元, $F_2 = 84$ 万元, $F_3 = 91$ 万元。为增强社群构建过程对实际协作意愿的刻画能力,引入历史匹配度与接单意愿,并计算增强项,如

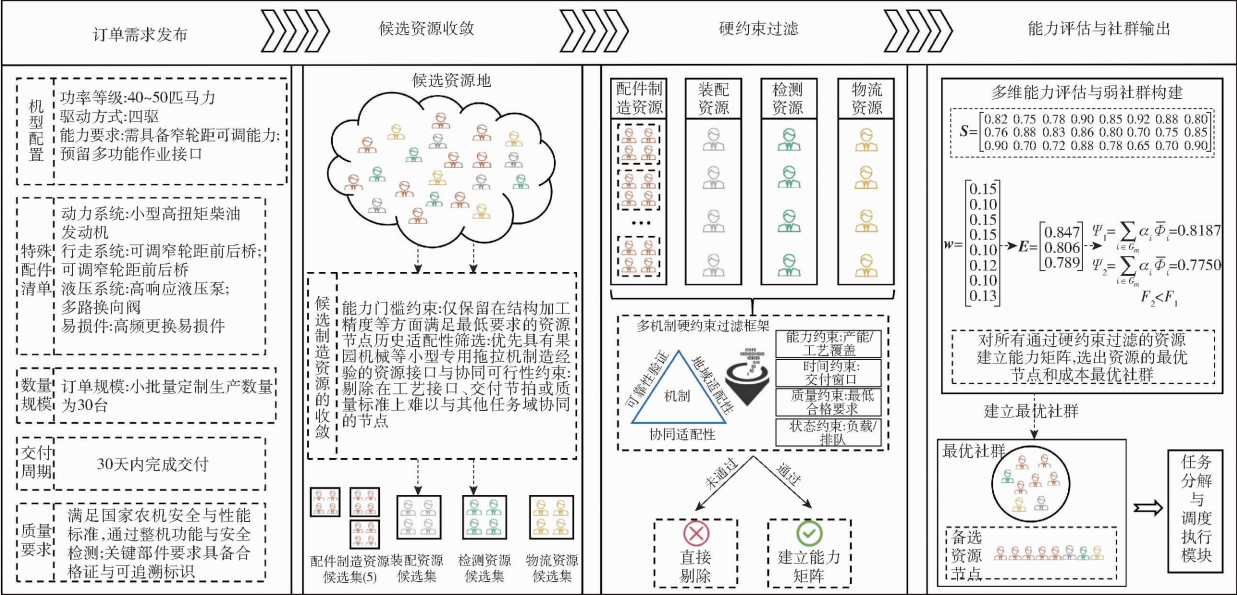


图 6 面向订单的农机社群构建流程与资源筛选机制框架

Fig. 6 Order-oriented community construction and resource screening framework

表 7 供应商多维综合评价

Tab. 7 Multi-dimensional comprehensive evaluation results of candidate suppliers

资源节点	供应商 A	供应商 B	供应商 C
结构与传动件	0. 831	0. 788	0. 819
液压元件与管路	0. 757	0. 816	0. 767
电气与控制部件	0. 788	0. 781	0. 847
标准件与易耗件	0. 712	0. 683	0. 717
定制与适配件	0. 752	0. 824	0. 761
整机装配执行	0. 848	0. 815	0. 812
整机功能与安全检测	0. 776	0. 772	0. 859
成品配送与交付	0. 744	0. 828	0. 791

表 8 所示。

表 8 供应商历史匹配度与接单意愿得分及增强项计算

Tab. 8 Supplier history matching and bidding willingness scores with enhancement term

供应商	$\bar{S}_i^{(h)}$	$\bar{S}_i^{(u)}$	$\lambda_h \bar{S}_i^{(h)} + \lambda_u \bar{S}_i^{(u)}$
A	0. 850	0. 725	0. 800
B	0. 800	0. 700	0. 760
C	0. 750	0. 675	0. 720

在各任务域候选供应商 8 维能力评价基础上，融合历史匹配度与接单意愿后的增强综合得分，见表 9，用于后续社群构建与筛选。

如表 10 所示，基于 3 个目标构建了 3 个制造社群。

由于阈值 θ 取值为 0. 71，社群 3 的标准件与易耗件供应商不符合要求，因此，社群 3 不进入后续综合评分。任务域的权重向量 $\alpha = [0. 18 \quad 0. 12 \quad 0. 10 \quad 0. 06 \quad 0. 12 \quad 0. 20 \quad 0. 15 \quad 0. 07]$ ，则有

表 9 供应商 10 维度综合评价得分

Tab. 9 Comprehensive evaluation of suppliers based on ten dimensions

资源节点	供应商 A	供应商 B	供应商 C
结构与传动件	0. 823	0. 781	0. 794
液压元件与管路	0. 768	0. 802	0. 755
电气与控制部件	0. 791	0. 776	0. 815
标准件与易耗件	0. 734	0. 702	0. 718
定制与适配件	0. 764	0. 808	0. 751
整机装配执行	0. 836	0. 801	0. 789
整机功能与安全检测	0. 782	0. 769	0. 824
成品配送与交付	0. 758	0. 811	0. 773

表 10 社群构建方案

Tab. 10 Community construction schemes

社群	结构	液压	电气	标准	定制	装配	检测	配送
社群 1 (性能优先)	A	B	C	A	B	A	C	B
社群 2 (均衡降本)	C	A	A	C	A	B	A	A
社群 3 (快速交付)	B	C	B	B	C	C	B	C

$$\Psi_1 = \sum_{i \in G_m} \alpha_i \bar{\Phi}_i = 0. 818 \, 7 \tag{10}$$

$$\Psi_2 = \sum_{i \in G_m} \alpha_i \bar{\Phi}_i = 0. 775 \, 0 \tag{11}$$

$$F_2 < F_1 \tag{12}$$

由成本最小化模型选择社群 2 为服务社群。综上，通过将多任务域节点综合评分聚合为弱社群整体评价指标，实现了对候选社群协同能力的量化比较，为后续在可行社群集合中引入成本约束与优化决策提供了明确、可计算的上游筛选结果。

3. 2. 2 物料齐套与节拍协同

在完成社群筛选并确定协同制造主体后，需进一步从装配执行层面考虑关键物料的齐套供给

与装配节拍约束,避免因配件到货不同步或装配负载失衡导致的计划延误与效率损失。物料供应以 5 类关键配件供应节点为对象,相关基础信息见表 11。

表 11 资源节点信息表

Tab. 11 Logistics and location information of key component suppliers

节点	地理位置	配件类型	距离/km	运输时效/ d	单批可运 套数
$i=1$	H 市	结构传动	480	2	20
$i=2$	S 市	液压管路	920	4	18
$i=3$	T 市	电气控制	1350	6	16
$i=4$	J 市	标准易耗	210	1	40
$i=5$	N 市	定制适配	760	3	15

5 类关键配件需求(单位:套/台)按“每台 1 套”处理,则有

$$D_{k1}=30 \quad (k=1,2,3,4,5)$$

(13)

允许提前到货冗余(防缺料)

$$\Delta_{k1}=3 \quad (k=1,2,3,4,5)$$

(14)

齐套约束(每类配件)

$$30 \leq q_{ik1} \leq 33$$

(15)

窗口最晚交付 30 d,留出装配与检测时间 10 d,则最晚到货截止时间为

$$T_{arr}=30-10=20 \text{ d}$$

(16)

如果设下单日为第 0 天,则要求

$$L_i \leq 20 \quad (\forall i)$$

(17)

每台拖拉机在装配节点 A 上,对应 5 类配件关联的单位装配负载(min/套)为

$$\begin{cases} r_1=18 \\ r_2=12 \\ r_3=10 \\ r_4=6 \\ r_5=22 \end{cases}$$

(18)

则窗口内装配负载需求(30 台)的时间为

$$\sum_{k=1}^5 r_k D_{k1}=30(18+12+10+6+22)=$$
$$30 \times 68=2\,040 \text{ min}$$

(19)

装配节点可提供的最大总装配时间为 2 400 min,满足装配负载需求。为满足物料齐套要求,批次 A、B 运输时间如表 12、13 所示。

为保证各批次关键配件满足装配齐套要求,建立约束

表 12 配件批次 A 运输时间表

Tab. 12 Transportation schedule of component batch A

配件厂	配件类型	批量/ 套	运输时效/ d	发运日	到货日
$i=1$ (H 市)	结构传动	15	2	第 8 天	第 10 天
$i=2$ (S 市)	液压管路	15	4	第 6 天	第 10 天
$i=3$ (T 市)	电气控制	15	6	第 4 天	第 10 天
$i=4$ (J 市)	标准易耗	30	1	第 9 天	第 10 天
$i=5$ (N 市)	定制适配	15	3	第 7 天	第 10 天

表 13 配件批次 B 运输时间表

Tab. 13 Transportation schedule of component batch B

配件厂	配件类型	批量/ 套	运输时 效/d	发运日	到货日
$i=1$ (H 市)	结构传动	15	2	第 18 天	第 20 天
$i=2$ (S 市)	液压管路	15	4	第 16 天	第 20 天
$i=3$ (T 市)	电气控制	15	6	第 14 天	第 20 天
$i=5$ (N 市)	定制适配	15	3	第 17 天	第 20 天

$$\sum_i q_{ik}^{(b)} \geq 15 \quad (\forall k \in \{1, \cdots, 5\})$$

(20)

其中 $b \in \{A, B\}$,齐套条件成立后装配开始。

通过引入齐套时间窗与装配负载统一约束模型,实现了配件到货节奏与装配节拍的协同匹配,保证装配节点在满足交付期限的同时维持稳定负载,为社群制造的可执行性提供了关键支撑。

4 结束语

本文围绕农机社群制造场景下多主体协同组织与资源优化配置问题,构建了面向多任务域的制造资源数字化建模与综合评价方法,系统提出了“单一资源综合评分-弱社群综合评价-成本最优社群选择”的分层决策框架。在此基础上,进一步引入生产历史匹配度与生产兴趣等行为性因素,增强了社群构建过程对实际协作意愿与协同稳定性的刻画能力。

结合果园用窄轮距多功能拖拉机的典型制造场景,从制造结构与资源需求出发,完成了社群构建、筛选与优化的全过程分析,并通过物料齐套与节拍协同机制验证了所建模型在交付约束下的可执行性。研究表明,该方法能够在保证制造适配性的同时兼顾经济性与组织鲁棒性,为农机社群制造资源配置与协同决策提供了一种具有工程可操作性的理论支撑与方法参考。

参 考 文 献

[1] 何俊儒,周小波,王利,等.农业机械创新体系研究进展与热点比较[J].农业工程,2024,14(12):5-13.

He Junru, Zhou Xiaobo, Wang Li, et al. Research progress and hotspot comparison of agricultural machinery innovation system

- [J]. *Agricultural Engineering*, 2024, 14(12): 5–13. (in Chinese)
- [2] 丁传信. 智能机械设计与制造技术在农机制造及优化中的应用研究[J]. *南方农机*, 2025, 56(22): 192–194, 198.
- [3] 王博, 毛罕平, 王亚娜, 等. 多维度农机多机协同技术采纳影响因素与作用机制研究[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(1): 45–53.
Wang Bo, Mao Hanping, Wang Ya'na, et al. Influencing factors and mechanism of multi-dimensional agricultural machinery collaborative technologies adoption[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(1): 45–53. (in Chinese)
- [4] 倪昕东, 陈度, 王书茂, 等. 基于数字车间的联合收获机制造品质终检系统研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(12): 166–174.
Ni Xindong, Chen Du, Wang Shumao, et al. End-of-line inspection system of combine harvester manufacturing quality based on digital workshop[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(12): 166–174. (in Chinese)
- [5] Huchzermeier A, Kuhn H. The fendt varioTakt: revolutionizing mixed-model assembly line production[J]. *INFORMS Journal on Applied Analytics*, 2020, 20(3): 141–153.
- [6] Koren Y, Heisel U, Jovane F, et al. Reconfigurable manufacturing systems[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1999, 48(2): 527–540.
- [7] 江平宇, 丁凯, 冷杰武. 社群化制造: 驱动力、研究现状与趋势[J]. *工业工程*, 2016, 19(1): 1–9.
Jiang Pingyu, Ding Kai, Leng Jiewu. Social manufacturing: drivers, research status, and trends[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2016, 19(1): 1–9. (in Chinese)
- [8] 江平宇, 丁凯. 基于多维度演化模型的制造模式社群化趋势分析[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(9): 2245–2255.
Jiang Pingyu, Ding Kai. Socialization trend analysis of manufacturing mode based on multi-dimensional evolution model[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 22(9): 2245–2255. (in Chinese)
- [9] 江平宇, 冷杰武, 丁凯. 社群化制造模式的边界效应分析与界定[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(4): 829–837.
Jiang Pingyu, Leng Jiewu, Ding Kai. Analyzing and delimiting overlapping concept boundaries of social manufacturing[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(4): 829–837. (in Chinese)
- [10] Xiong G, Tamir T S, Shen Z, et al. A survey on social manufacturing: a paradigm shift for smart prosumers[J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2022, 10(5): 2504–2522.
- [11] Hamalainen M, Karjalainen J. Social manufacturing: when the maker movement meets interfirm production networks[J]. *Business Horizons*, 2017, 60(6): 795–805.
- [12] 杨伟东, 蔡子行, 孟德状, 等. 基于增材制造的数字孪生研究进展[J]. *机械设计与研究*, 2026, 42(1): 96–102.
- [13] 江平宇. 面向工业互联网的社群化制造模式及 3D 打印测试床研发[J]. *中国科学: 科学技术*, 2022, 52(1): 88–103.
Jiang Pingyu. Research and development of social manufacturing model and 3D printing testbed for industrial internet[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2022, 52(1): 88–103. (in Chinese)
- [14] 刘电霆, 尚磊, 代宣军, 等. 社群化制造中众包物流任务分配模型与优化求解[J]. *制造业自动化*, 2024, 46(6): 36–41.
Liu Dianting, Shang Lei, Dai Xuanjun, et al. Modeling and optimal solving crowd sourced logistics tasks allocation in the context of social manufacturing[J]. *Manufacturing Automation*, 2024, 46(6): 36–41. (in Chinese)
- [15] 刘颖. 面向社群制造的云边协同订单分配方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- [16] 江平宇, 杨茂林, 李卫东, 等. 集体智慧研究综述及其社群化制造应用探索[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(15): 1852–1865.
Jiang Pingyu, Yang Maolin, Li Weidong, et al. CI literature review and its application exploration in social manufacturing[J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(15): 1852–1865. (in Chinese)
- [17] 朱高宏. 社群化制造中加工众包任务调度问题研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2024.
- [18] Hirscher A L, Niinimäki K, Armstrong C M J. Social manufacturing in the fashion sector: new value creation through alternative design strategies? [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 4544–4554.
- [19] Ghobakhloo M, Masood F, Simon O, et al. Adaptive social manufacturing: a human-centric, resilient, and sustainable framework for advancing Industry 5.0[J]. *International Journal of Production Research*, 2026, 64(3): 1127–1160.
- [20] Jourabchi A P, Pedrammehr S, Pakzad S, et al. Generative artificial intelligence in adaptive social manufacturing: a pathway to achieving industry 5.0 sustainability goals[J]. *Processes*, 2025, 13(4): 1174.
- [21] 中国农业机械工业协会. 中国农业机械工业年鉴 2024[M]. 北京: 机械工业出版社, 2024.
- [22] Nasirahmadi A, Hensel O. Toward the next generation of digitalization in agriculture based on digital twin paradigm[J]. *Sensors*, 2022, 22(2): 498.
- [23] 王博, 孙德政, 刘理想. 基于智能制造农机自动化控制装置的设计研究[J]. *河北农机*, 2024(23): 13–15.
- [24] 刘世豪, 杜彦斌, 姚克恒, 等. 面向智能制造的数控机床多目标优选法研究[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(3): 396–404.
Liu Shihao, Du Yanbin, Yao Keheng, et al. Multi-objective optimum seeking method of intelligent manufacturing oriented CNC machine tool[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3): 396–404. (in Chinese)
- [25] 孙爱红, 熊宗慧, 何志琪. JIT 供应链模式下农机制造零件供应商仿真匹配研究[J]. *中国农机化学报*, 2025, 46(5): 291–300.
Sun Aihong, Xiong Zonghui, He Zhiqi. Simulation matching research on agricultural machinery manufacturing parts suppliers under JIT supply chain model[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2025, 46(5): 291–300. (in Chinese)