

中图分类号：TP391

UDC 分类号：627

面向动态分布式装备集群运维服务的调度 与决策方法研究

作者姓名 古秋盛

学院名称 机械与车辆学院

指导教师 胡耀光

答辩委员会主席 薛庆

申请学位 硕士研究生

学科专业 机械工程

学位授予单位 北京理工大学

论文答辩日期 2020 年 6 月 24 日

**Research on maintenance service scheduling and
decision-making for dynamic distributed equipment
clusters**

Candidate Name:	<u>Qiusheng Gu</u>
School or Department:	<u>School of Mechanics and Vehicles</u>
Faculty Mentor:	<u>Yaoguang Hu</u>
Chair, Thesis Committee:	<u>Qing Xue</u>
Degree Applied:	<u>Master's degree</u>
Major:	<u>Mechanical engineering</u>
Degree by:	<u>Beijing Institute of Technology</u>
The Date of Defence:	<u>2020-6-24</u>

面向动态分布式装备集群运维服务的调度与决策方法研究

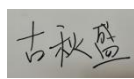
北京理工大学

研究成果声明

本人郑重声明：所提交的学位论文是我本人在指导教师的指导下进行的研究工作获得的研究成果。尽我所知，文中除特别标注和致谢的地方外，学位论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京理工大学或其它教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的合作者对此研究工作所做的任何贡献均已在学位论文中作了明确的说明并表示了谢意。

特此申明。

签名：

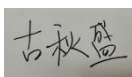


日期：2020 年 6 月 24 日

关于学位论文使用权的说明

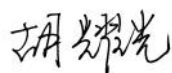
本人完全了解北京理工大学有关保管、使用学位论文的规定，其中包括：①学校有权保管、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤学校可以公布学位论文的全部或部分内容（保密学位论文在解密后遵守此规定）。

签 名：



日期：2020 年 6 月 24 日

导师签名：



日期：2020 年 6 月 24 日

摘要

本文以农机装备等动态分布式装备集群的运维服务调度为背景,通过分析农机装备作业特点以及当前运维服务网络现状,开展运维服务网络构建、多主体利益分配、运维服务商跨区协同调度等关键问题研究。

首先分析当前农机装备运维服务模式及运维服务网络现存问题,提出构建运维服务网络的关键要素。基于所提出的 12 项评级指标,利用自适应模糊推理系统进行农机运维服务网络的构建,并针对湖南省服务网络进行方法验证。

其次,针对传统运维服务调度中独立调度模型引起的服务能力不均、运维服务延滞等问题,提出基于运维服务网络的跨区协同调度模型。论证跨区协同调度的必要性,并对跨区协同调度模型进行数学建模,利用改进的粒子群算法对协同调度模型进行求解。对改进的粒子群算法与经典的启发式算法的结果进行对比,验证本文算法在启发式算法的优势。同时,用 CPLEX 构建精确求解模型,与改进的启发式算法进行数值实验对比,验证该算法与精确求解算法对比的优势。最后,用湖南省的真实数据为案例,进行协同调度模型与独立调度模型的对比,证明协同调度模型的优越性和可行性。

第三,针对动态装备集群跨区作业带来的运维服务协同调度、多主体协作过程中的利益分配等问题,分析多主体协同运维服务中利益分配问题,总结利益分配的方法,对不同利益分配方法的性能进行比较,得出适用于农机装备集群运维服务中的利益分配方法--Shapley 值法。并以 Shapley 值法对跨区协同调度中的主体,进行利益分配,以保证运维服务网络联盟的公平性和稳定性。

最后,本文设计并开发面向农机的运维服务管理系统,实现服务网络构建和运维调度模块的相关功能,主要包括服务商信息管理、服务网络构建和运维服务调度,为农机运维服务管理者提供决策支持。

本文研究依托于国家自然科学基金项目,结合农机运维服务中的实际需求,为企业提供了问题解决方案,一定程度提高了农机运维的服务交付水平。

关键词: 运维服务网络构建; 自适应神经网络; 多主体利益分配; 跨区协同调度; 粒子群算法

Abstract

Based on the operation and maintenance service scheduling of dynamic distributed equipment clusters such as agricultural machinery and equipment, this paper analyzes the operation characteristics of agricultural machinery and equipment and the current status of the operation and maintenance service network to carry out the construction of operation and maintenance service network, the distribution of multi-agent benefits, and the cross-regional operation and maintenance service providers Research on key issues such as collaborative scheduling.

Firstly, it analyzes the current agricultural machinery equipment O&M service mode and the existing problems of O&M service network, and puts forward the key elements of constructing O&M service network. Based on the 12 rating indicators proposed, an adaptive fuzzy inference system was used to construct the agricultural machinery operation and maintenance service network, and a method verification was conducted for the service network in Hunan Province.

Secondly, in view of the problems of uneven service capacity and delay of operation and maintenance services caused by the independent scheduling model in traditional operation and maintenance service scheduling, a cross-region collaborative scheduling model based on operation and maintenance service network is proposed. Demonstrated the necessity of cross-regional collaborative scheduling, and mathematically modeled the cross-regional collaborative scheduling model, using an improved particle swarm optimization algorithm to solve the cooperative scheduling model. The results of the improved particle swarm optimization algorithm and the classical heuristic algorithm are compared to verify the advantages of the proposed algorithm in the heuristic algorithm. And use CPLEX to build an accurate solution model, and compare with the improved heuristic algorithm for numerical experiments to verify the advantages of the algorithm compared with the accurate solution algorithm. Finally, using the real data of Hunan Province as a case, the collaborative

scheduling model is compared with the independent scheduling model to prove the superiority and feasibility of the collaborative scheduling model.

Thirdly, aiming at the problems of coordinated operation and maintenance service scheduling and benefit distribution in the process of multi-agent collaboration brought about by the cross-regional operation of dynamic equipment clusters, the issue of benefit distribution in multi-agent collaborative operation and maintenance services was analyzed, and the method of benefit distribution was summarized. The performance of different benefit allocation methods is compared, and the profit allocation method suitable for agricultural machinery equipment cluster operation and maintenance services--Shapley value method is obtained. And use the Shapley value method to carry out the benefit distribution to the main body in the cross-area coordinated scheduling to ensure the fairness and stability of the operation and maintenance service network alliance.

Finally, this paper designs and develops an operation and maintenance service management system for agricultural machinery, which implements the related functions of service network construction and operation and maintenance scheduling module, mainly including service provider information management, service network construction and operation and maintenance service scheduling. Service managers provide decision support.

This paper research relies on the National Natural Science Foundation project, combined with the actual needs of agricultural machinery operation and maintenance services, to provide enterprises with problem-solving solutions, to a certain extent, improve the level of agricultural machinery operation and maintenance service delivery.

Key Words: Operation and maintenance service network construction; adaptive neural network; multi-agent benefit distribution; cross-region collaborative scheduling; particle swarm optimization

第 1 章 绪论.....	8
1.1 研究背景.....	8
1.1.1 制造业服务化趋势.....	8
1.1.2 动态分布式集群装备的运维服务.....	8
1.2 研究意义.....	9
1.2.1 科学意义.....	9
1.2.2 实践意义.....	10
1.3 国内外研究现状.....	10
1.3.1 服务网络构建研究.....	10
1.3.2 运维服务调度研究.....	14
1.3.3 多主体利益分配研究.....	17
1.3.4 目前研究存在的主要不足.....	19
1.4 研究内容及结构安排.....	19
第 2 章 农机装备集群运维服务现状与决策框架.....	22
2.1 引言.....	22
2.2 农机装备运维服务模式分析.....	22
2.2.1 农机装备运维服务模式.....	22
2.2.2 农机装备运维服务网络分析.....	23
2.2.3 农机装备运维服务的业务流程.....	25
2.2.4 农机装备运维服务模式面临的主要问题.....	26
2.3 农机装备运维服务决策框架与关键技术.....	28
2.3.1 农机装备运维服务决策框架.....	28
2.3.2 运维服务决策结构及要素.....	28
2.4 面向农机装备运维服务决策的关键问题与技术路径.....	29
2.5 本章小结.....	30
第 3 章 基于自适应模糊神经方法的服务提供商选择决策.....	31
3.1 引言.....	31
3.2 服务网络构建问题概述和评估标准.....	31
3.2.1 服务网络构建问题概述.....	31
3.2.2 评估标准的定义.....	31
3.3 决策方法.....	33
3.3.1 生成备选方案和数据收集.....	34
3.3.2 专家分析.....	34
3.3.3 自适应模糊神经分类.....	35
3.3.4 最终决策.....	38
3.4 案例验证.....	38
3.4.1 应用场景.....	38

3.4.2 自适应神经网络实验结果的评估.....	41
3.4.3 讨论与比较.....	42
3.5 本章小结.....	44
第4章 基于运维服务网络的跨区协同调度研究.....	46
4.1 引言.....	46
4.2 问题背景.....	46
4.3. 问题描述和数学模型.....	47
4.3.1 问题描述.....	47
4.3.2 数学模型.....	48
4.4 算法实现.....	51
4.4.1 PSO 算法.....	52
4.4.2 粒子编码.....	52
4.4.3 算法实现过程.....	53
4.5. 案例研究.....	54
4.5.1 案例描述.....	54
4.5.2 协同服务模式下的维护决策.....	56
4.5.3 独立模式下的维修决策.....	61
4.5.5 协作模式和独立模式之间的调度结果比较.....	62
4.6 本章小结.....	63
第5章 多主体协同作业的成本分配方法研究.....	65
5.1 引言.....	65
5.2 多主体利益分配经典方法.....	65
5.2.1 Shapely 值理论.....	65
5.2.2 The nucleolus (核仁) 法.....	66
5.2.3 比例方法.....	66
5.2.4 基于可分离和不可分离成本的分配.....	67
5.3 不同利益分配方法性能比较.....	67
5.3.1 联盟稳定性和实现方法.....	67
5.3.2 不同成本分配方法适用情况.....	68
5.4 案例分析.....	69
5.4.1 根据修改后的 Shapley 值进行成本分配.....	69
5.4.2 基于 Shapley 值修改的成本分摊.....	70
5.5 本章小结.....	71
第6章 农机装备运维服务调度决策系统.....	72
6.1 引言.....	72
6.2 系统总体设计.....	72
6.2.1 系统层次结构.....	72
6.2.2 系统开发环境.....	73

6.2 功能设计及主要界面.....	75
6.2.1 系统功能设计.....	75
6.2.2 农机装备运维服务调度系统界面展示.....	76
6.3 本章小结.....	79
总结与展望.....	80
总结.....	80
展望.....	81
参考文献.....	82
攻读学位期间发表论文与研究成果清单.....	96
致谢.....	97

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

1.1.1 制造业服务化趋势

服务化 (Servitization) 的概念最初在 1988 年由 Vandermerwe 和 Rada^[1]提出, 并迅速引起广泛的关注。从全球产业发展趋势来看, 当前处于“第四次工业革命”, 世界上的主要产业大国都提出自己的工业升级之路, 无论是美国的“工业互联网”、德国的“工业 4.0”、还是中国的“中国制造 2025”, 都把制造业服务化作为战略核心之一。在中国政府层面, 《中国制造 2025》^[2]明确提出, 要加快制造与服务的协同发展, 推动商业模式创新和业态创新, 促进生产型制造向服务型制造转变。在产业层面, 信息技术的进步与应用的推广, 比如云计算、大数据、物联网、人工智能等产业的发展, 为制造业服务化提供了基础技术支撑, 让制造业服务化变为可落地、可实现。在市场层面, 随着物质生活的丰富, 消费者对产品具有更高的要求, 具有更人性化服务的产品, 在市场竞争中具有更大的竞争力。因此, 制造业服务化是产业发展的必然趋势, 也是新时代制造业更好的满足人类生活需求的必经之路。

1.1.2 动态分布式集群装备的运维服务

动态分布式集群装备是指大量的可移动装备在运作时, 各个装备在地理位置上处于分散状态并协同完成某种任务。比如, 在军事领域, 坦克装甲兵团在实施作战任务时, 大量坦克按照作战要求处于某种分布式的状态, 共同协作完成某种作战任务; 再比如航母战斗编队, 多种作战单元 (航母, 护卫舰, 潜艇等) 按照科学作战规划处于某种分布式状态, 共同完成某种作战任务。而在民用领域, 机械化农业收割团队, 包含数千辆农业收割机械, 在农忙时从南到北对农作物进行收割, 农机装备按照某种规划分布在不同的地区进行收割作业。

动态分布式集群装备的运维服务, 具有多种特性, 比如动态性、时变性、多主体协同性等特征, 具体如下:

(1) 装备集群作业具有动态性。集群装备作业任务、作业位置、作业时间、作业速度等改变, 都将直接影响装备集群的分布状态以及集群之间的协作方式。因此, 面对具有动态性的集群装备, 如何构建应急服务网络, 如何进行资源配置,

实现对集群装备维护需求的及时响应,保障集群装备的可靠运行,这也是开展面向动态分布式装备的运维服务调度研究的核心。

(2) 装备集群作业具有时变性。装备集群在不同区域的作业时长变化及集群内各装备连续作业时间和维护周期等约束,对运维服务策略提出了灵活、可变、兼容的要求。如何协调集群内不同装备的运维服务策略,实现即时性维护与预防性运维服务相结合,提升装备集群协同作业连续性,是装备集群运维服务可靠运行需要攻克的难点。

(3) 装备集群运维服务的多主体协同性。面对动态分布装备集群的运维服务需求,如何建立由多个装备制造商/服务提供商等多主体间的运维服务协调决策机制,并建立不同服务区域的运维服务资源协同调度优化模型,实现最大限度地降低运维服务成本、提高运维服务效率,是解决具有动态、时变、多主体协同特征的装备集群运维服务的关键。

动态分布式集群装备的应用背景广泛,从军事领域的无人机集群、航母编队、装甲集群作战,到民用领域的农机装备集群作业,虽然在不同的应用领域集群装备有各自的特征,但是都具备集群装备的动态性、时变性和协同性。不管应用背景如何,高效可靠的运行和运维服务是保证集群装备持续保持效用的关键所在。

1.2 研究意义

1.2.1 科学意义

当前,我国装备制造业还处在从传统制造业向服务型制造业转型的初步阶段,在运维服务中广泛存在服务资源配置不足、运维策略单一、运维调度决策机制落后等问题。针对分布式集群装备运维服务中存在的不足,本文以农机装备集群运维服务为例,提出面向动态分布式装备集群维修服务调度和决策方法研究。开展对不同服务区域的运维服务协同优化与多主体调和决策机制与算法,构建面向动态分布式环境的装备集群运维服务协同优化与调度理论,建立满足各运维服务协作主体利益最大化的智能运维服务调度系统,对丰富装备维修、维护、服务调度与协同优化理论具有重要的科学意义。

1.2.2 实践意义

在制造业服务化形成广泛共识的情况下,开展面向动态分布式装备集群的服务调度问题研究,对于提高设备制造企业运维服务能力,以及促进制造业服务化的提升,具有重要实践意义。在农机设备制造领域的运维服务决策中,主要依靠经验进行运维服务决策。本文以农机装备集群的运维服务为背景,开展面向动态分布式装备集群的运维服务调度与决策方法研究,对于促进农机装备制造企业服务水平的提升具有重要作用。本文的研究成果也能够拓展应用到汽车、武器装备等具有集群、分布式作业特征行业的产品运维与服务保障等领域,具有广泛的应用价值。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 服务网络构建研究

1.3.3.1 服务商选择研究

关于服务提供商的早期研究可以追溯到 1950 年代之前的 Goldberger^[3] 和 Gottfried^[4] 等和 1960 年代早期 Hulme^[5] 和 Bhis^[6], 他们主要侧重于供应链物流网络中供应商的选择。1990 年代后,服务提供商选择问题受到研究者的越来越多的关注,从 Chai^[7] 在 2013 年和 Aicha^[8] 在 2014 年分别做的关于服务商选择的文献综述中克制,最近十年有关服务提供商选择的研究被广泛应用于各种应用中,例如刘爱军 2019 年研究的第三方逆向物流提供商领域^[9], Paul 等人 2019 年研究的运输服务提供商领域^[10], Keskin 在 2010 年和 Kim 在 2012 年研究的备件供应商领域^{[11][12]}, Tripathi 在 2017 年云存储服务的云服务提供商^[13] 和胡耀光等人在 2019 年研究的农业运维服务提供商领域^[14]。现在,研究人员^{[7][8][15]} 已经针对供应商或服务提供商的选择问题开发了一系列评估标准和方法。总结了一些相关的参考资料,如表 1-1 所示。

作为多标准决策问题,有形和无形服务提供商的相关标准已在文献中广泛讨论。Dickson (1966) 首先通过问卷调查总结并确定了 23 个评估标准的重要性程度,包括成本,质量,交付,声誉等^[16]。然后在 1993 年,Weber 回顾了 1967 年至 1990 年发表的 74 篇研究,并对 Dickson 提出的 23 项评估标准进行了重新排

序。此后，科研人员进行了广泛的深入研究。Mortensen（2008）在选择时考虑了五个标准，即运输和交付的质量和实际程度，市场覆盖率，价格和能力^[17]。Sanjay（2007）定义了四个决定因素，例如兼容性，成本，质量和声誉，以及四个维度，例如长期关系，运营绩效，财务绩效和风险管理^[18]。胡耀光等人着眼于农业中维修服务提供者的选择问题，并从四个角度和十二个具体特征做出了最终方案^[14]。

考虑到服务提供商选择的决策方法，它们可以大致分为四类：多标准决策方法（MCDM），数学编程进度（MP），统计方法和人工智能方法（AI）。至于多标准决策方法，这是一种传统的决策方法，旨在根据多种标准从一系列备选方案中提供适当的建议^{[15][19]}。层次分析过程^[20]和分析网络过程^{[15][21]}是主要解决服务提供商选择问题的MCDM方法。此外，还开发了几种与MCDM集成的方法，例如胡耀光等人（2019）着眼于农业服务提供商的选择问题，并采用ANP和平衡计分卡的综合方法来选择最佳的服务提供商^[14]。考虑到统计方法，决策方法主要是指来自经验研究的数据或信息^{[22][23]}，其他方法，例如聚类分析^[24]和二元对数^[25]也可以应用来解决这些问题。数学编程模型由目标函数和几个约束组成。在这些问题中，动态编程^[26]和多目标编程^[27]是经常使用的方法。但是，数学编程方法很少用于做出服务提供商选择的最终决定^[28]。人工智能，例如人工神经网络^{[29][30]}是一种创新方法。定量或定性因素与人类专业知识相结合，可以通过对大数据的分析来做出选择。

表 1-1.关于服务提供商选择的若干研究摘要

编号	文献	评估标准	方法
1	Sanjay et al., 2007 ^[18]	Compatibility; cost; quality; reputation	analytic network process
2	Hakan, 2007 ^[20]	General company consideration, capabilities, quality, client relationship, labor relations	Analytic hierarchy process
3	Galankashi et al., 2016 ^[31]	Four perspectives: financial (price and quality of product); customer (service, reputation and rate of sales return); internal business (flexibility, capability, productivity); growth and learning (Competitiveness, employee)	A mixed balanced scorecard-fuzzy analytic hierarchy process approach

4	Hu et al., 2019 ^[14]	Four perspectives: financial (maintenance cost and value); customer (satisfaction from before, ongoing and after maintenance); internal business (management of operations and customer; ability of service and innovation); growth and learning (informational and organizational capital)	Integrating analytic network process and balanced score card(ANP-BSC)
5	Briggs, 2010 ^[22]	Service satisfaction, competitive intensity, market turbulence	empirical study
6	Lai, 2004 ^[24]	Service capability	Cluster analysis
7	Tasi, 2007 ^[25]	Service cost, service performance, value-added, perceived capability, company size in sale, status of goods, shipment size in weight, destinations of shipment	Binary logit
8	Chen and Hum, 2001 ^[26]	Leasing cost	Dynamic programming
9	Schitteck, 2009 ^[27]	Service cost, quality, steady relationship	Multi-objective programming
10	Efendigil, 2008 ^[29]	Confirmedfill rate, service quality, unit operation cost, capability usage, total order cycle time, integration level, increment in market share, research and development	Artificial neural network
11	Kuo, 2010 ^[30]	Long-term relationship capability, technical capability, managerial organization, quick response for requirement	Particle swarm and fuzzy neural network
12	Liu and Wang, 2009 ^[32]	26 evaluation criteria, such as price, financial considerations, experience in the similar industry, location, asset ownership, international scope, service quality and so on.	Mamdani inference method and fuzzy linear assignment approach

综上, 解决服务提供商选择问题的相关文献太多, 很少有研究集中在一定数量的服务提供商的选择和运维服务网络的设计上, 而在农机领域的研究更是缺乏。同时, 在农业维修服务网络中没有科学的方法论和合理的评价标准来选择服务提供商。因此, 定义服务提供商选择的评估标准并开发基于 AI 的方法来设计和规划实际运维服务网络至关重要。

1.3.3.2 模糊神经网络在服务网络构建中的应用

近年来, 模糊神经网络结合了模糊理论的推理能力和神经网络的联系结构, 由于其特殊的优势而成为新的研究热点^[33]。作为一种有效的方法, 模糊神经网络已被用于多种应用中, 例如医疗服务^[34]、生产调度^[35]、机器人控制^[36]、产品评估^[37]和故障诊断^[38]。

模糊神经网络可以表示为五层神经网络^{[39][40]}, 如图 1.1 所示。

第 1 层 (输入层): 输入层执行样本导入。

第 2 层 (模糊化层): 根据一组隶属函数对输入进行模糊处理。

第 3 层 (规则层): 初始规则是从样本获得的, 每个规则都成为规则层的神经元。此外, 模糊化规则与规则层之间的联系由规则层中的规则决定。

第 4 层 (去模糊化层): 对模糊输入进行去模糊化处理。

第 5 层 (输出层): 最终结果显示在输出层中。

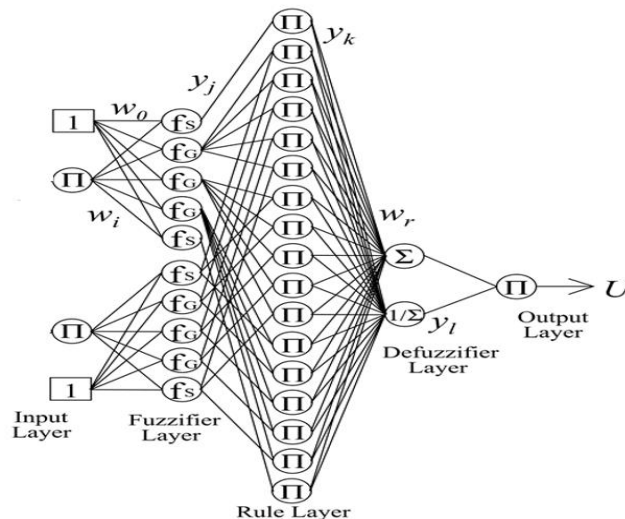


图 1.1. 模糊神经网络的架构

自适应模糊神经网络作为一种应用最广泛的方法, 将自适应技术与模糊逻辑

相结合，并已在最近的文献中得到普遍应用^{[41][42]}。应用 Takagi-Sugeno 模型以 IF-THEN 形式表达模糊规则集。与模糊神经网络不同，自适应模糊神经网络由六层组成，如图 1.2 所示。

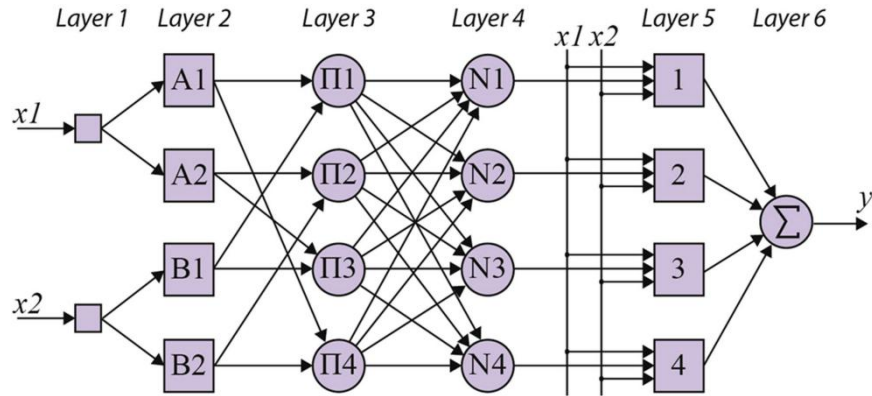


图 1.2. 自适应模糊神经网络的架构

第 1 层（输入层）：输入层负责将样本数据导入到模糊神经网络。

第 2 层（模糊化层）：选择一组隶属函数，并将输入的特征变量转换为模糊化层中的模糊变量。

第 3 层（规则层）：规则层由一组以 Takagi - Sugeno 模型表示的规则组成。

第 4 层（归一化层）：评估每个规则并执行归一化处理。

第 5 层（去模糊化层）：分析通过模糊推理系统获得的模糊值，并采用多种方法（例如最大均值法和加权平均去模糊化方法）消除模糊性。

第 6 层（输出层）：仅存在一个节点以生成输出数据。

1.3.2 运维服务调度研究

维护计划和调度是决策支持系统中最关键的决策问题之一^[43]。运维服务调度研究的文献综述主要包括两个方面：现场维护决策和车辆路线规划以及协同服务决策。根据^[44-46]，服务技术人员、备件和机械是影响运维服务交付和成本的主要资源因素。由于服务车辆的数量与执行维护的服务技术人员数量一致，因此本文仅提及服务技术人员。

1.3.2.1 现场维护计划和车辆路线计划

在服务经济不断发展的背景下，许多学者进行了有关现场维护计划研究的重

要研究,尤其是现场服务技术人员的调度。周和胡等人^[47]提出了一种基于多代理的现场服务交付决策方法,决策者可以从中获得有关容量规划和交付政策的多种建议。Manzini 等人^[48]提出了一种混合整数规划模型,以解决基于成本,可靠性和资源约束的机械的预防性维修计划问题。

从服务流程的角度来看,现场维护难题是带有时间窗口(MDVRPTW)的多站点车辆路径问题,必须考虑维护时间。MDVRPTW 是 VRP 的扩展,是 NP 硬性的。Tlili 等人^[49]使用迭代的本地搜索元启发式算法,通过运行几个不同仓库和客户规模的基准实例来解决 MDVRP。Salhi 等人^[50]使用一种改进的可变邻域搜索算法,通过使用预先设定的方案来解决 MDVRP,该方案用于对仓库之间的路线进行汇总和分解,以识别边界客户,从而有效节省了 CPU 时间。Surekha, Sumathi, S^[51]使用遗传算法(GA)获得 MDVRP 解决方案。我们知道,客户是根据与他们最近的仓库的距离进行分组,从而以独立模式进行分配的。Markov 等人^[52]开发了 MILP 模型,以解决与可回收废物收集状况有关的中间设施的车辆路线问题。有很多混合启发式算法和元启发式算法用于解决 VRPTW 问题^[53-57]。拉希内贾德^[58]研究了在考虑路线限制并需要到达该资产的旅行时间的情况下对地理分布资产进行维护计划的问题。Sazonov 等人^[59]使用多代理方法来解决 MDVRPTW 问题,该问题考虑了卡车,仓库和订单。李健等人^[60]研究了带有时间窗的多仓库车辆路径问题的新变体,其中车辆完成的仓库是灵活的。尽管已经对 MDVRP 和 MDVRPTW 进行了广泛的研究,但是在文献中很少提 MDVRPTW 考虑到维护时间的问题,因此值得探讨这一问题。

从服务提供商的角度来看,本研究着重于最大程度地降低维护成本并确保维护的可用性。徐等人^[61]研究了通信服务提供商面临的现场技术人员调度问题。该问题通过考虑技术人员的技能和服务时间窗口来解决将不同位置的一系列维护任务分配给服务技术人员的问题。建立了使用不同算法的数学模型来解决该问题。最后,确定贪婪搜索算法可以比以前提供更有效的解决方案。Tang 等人^[62]研究了分布式机械的维修计划问题,并指出了禁忌搜索算法在解决大规模问题中的优势。Dutot 等人^[63]研究了通信行业中服务人员的停机调度问题,并针对停机,优先级和固定成本等因素开发了一种有效的调度模型。关于家庭服务,Chen et al.^[64]将技术人员的经验和学习能力纳入路线规划中,并分析了体验式学习和劳动一致性对服务交付的影响。Wang 等人^[65]解决了在生产环境恶化的情况下存在

随机机器故障的情况下的主动调度问题,并提出了一种基于知识的多目标进化算法来解决该问题。Camci 等人^[66]着重于分布式机械的维护,广泛分析了械退化的影响,并认为行进时间是分布式机械维护的重要特征(与普通机械的维护不同)。Binart 等人^[67]研究了两种类型的客户的分布式机械维护和维修计划。他们的研究存在局限性,例如没有考虑协作情况下的维护计划问题,维护对象没有地理分布,仅解决了单实体资源计划问题。据我们所知,只有几篇文章介绍了此问题的某些要素。缺乏完整清楚的研究,本文提出的问题值得深入探讨。

1.3.2.2 协同服务

尽管协作维护决策在学术文章中并未引起太多关注,但是在运输,物流和供应链领域中,关于协作服务的理论研究和实践验证研究仍然很多。存在两种类型的协作服务模式:一种是横向协作,即同级别利益相关者(例如同级别制造企业和同级别服务提供者)之间的协调。另一个是纵向协调,其中在不同级别的上游制造商和下游服务提供商之间进行协作。在协作服务模式下,制造商,服务提供商和其他服务实体基于公平的利益分配机制来协调服务资源的分配,以满足客户需求,提高服务效率并降低服务成本。Krajewska 等人^[68]讨论了货运公司之间的横向合作模式,并基于合作博弈理论研究了航线规划问题。佩雷斯·伯纳乌(PérezBernabeu)等人^[69]提出了一种基于横向合作的公路运输协同运输方案,旨在实现最短的运输距离和最低的排放。戴等人^[70]研究了货运方面的承运人合作,优化联盟的运输任务并重新分配它们以最大化承运人的总收入。陆等人^[71]提出了一种在线商店的位置优化方法,该方法将基于邻域基础设施的模糊位置选择方法与模糊多准则决策方法相结合。Yilmazab^[72]研究了小型托运人在随机需求下通过联盟提高机械的利用率,确定了最优联盟策略,并提出了一种基于博弈论的利益分配机制。Guajardo 等人^[73]确定 Shapley 值是合作博弈中最常用的分配方法,并且在许多分配方法中,Shapley 值方法是唯一考虑效率,对称性,虚拟性和可加性的方法。

上述关于协同服务模式的研究主要集中在物流配送领域的车辆协同问题。尽管机械维护还涉及服务车辆的协作需求,但是它与传统的车辆协作问题不同,在传统的车辆协作问题中,还必须考虑服务技术人员的技能水平。此外,在实体协作以实现机械维护之后,必须基于服务的实施在协作实体之间分配收益。采用此

方法可确保协作联盟的稳定性和可持续性。因此，我们研究了协同维护决策和机器集群维护的利润分配机制。

1.3.3 多主体利益分配研究

不同服务商之间的协作是改善运维服务的有效方法。比如两个服务商使用同一库存位置共享固定成本。相邻服务商，在提供运维服务时，在总体成本降低的情况下进行跨区协同运维。当然，还有更多合作的可能性。所有协作中的一个关键问题是如何分摊成本或利润，而另一个问题是如何建立和管理联盟。在本章中，我们关注第一个问题。

一种简单的成本分配方法是使用比例分配，该比例分配可以基于所服务客户的数量或者提供运维服务技术人员所行驶的里程。一种更高级的方法是使用原则基于博弈论。现代博弈论始于关于两人零和博弈中混合策略均衡性的存在以及约翰·冯·诺伊曼的证明。常用的成本分配方法是所谓的 Shapley 值(Shapley, 1953)。这是一种在许多应用程序中的经典方法。

近年，有关协作式物流或者运维服务的文章数量已经有了相当可观的增长。Borm^[74] (2001)，Curie^[75] (2008)，Fiestras-Janeiro^[76] (2011) 和 Audy^[77] (2012b) 等人回顾了有关成本分配的相关文献，但在更广泛的背景下，并未完全侧重于运输或者运维服务。另一方面，Crujssen 等人^[78] (2007) 和 Perez-Bernabeu 等人^[79] (2015) 回顾了有关协作运输的文献，但仅简要提及了成本分配。本章重点考察，协同运维或者协作运输中的利益分配的主要方法的理论基础以及应用的场景。

Mario Guajardo 等人^[80]对协同运输中的利益分配问题做了系统的梳理，对协同运输文献中使用的成本分配方法进行了统计。如表 1-2 所示，经过统计常见主要包括 Shapley 值法，按比例分配法，Nucleolus (核仁) 法，基于边际成本或可分离成本和不可分离成本的方法，以及根据问题具体问题特别制定 (Ad hoc) 的分配方法。

表 1-2 协同运输文献中使用的成本分配方法

方法	文章数量	参考文献
Ad hoc ^[81-110]	30	Potters et al. (1992), Derks and Kuipers (1997), Engevall et al. (1998), Faigle et al. (1998), Hamers et al. (1999), Engevall et al. (2004), Anily and Haviv (2007), Ozener and Ergun (2008), Estevez-Fernandez et al. (2009), Agarwal and Ergun (2010), Caprara and Letchford (2010), Frisk et al. (2010), Liu et al. (2010), Audy et al. (2011), Dahl and Derigs (2011), Audy et al. (2012a), Dai and Chen (2012), Fiestras-Janeiro et al. (2012), Yilmaz and Savaseneril (2012), Cheng et al. (2013), Fiestras-Janeiro et al. (2013), Toriello and Uhan (2013), Ozener (2014), Vanovermeire and Sorensen (2014b), Dai and Chen (2015), Flisberg et al. (2015), Guajardo and R(5nnqvist (2015), Hezarkhani et al. (2015), Sun et al. (2015), Yang et al. (2015).
Shapley	23	Dror (1990) ^[111] , Engevall et al. (1998) ^[83] , Engevall et al. (2004) ^[86] , Wong et al. (2007) ^[112] , Krajewska et al. (2008) ^[113] , Agarwal and Ergun (2010) ^[90] , Cruijssen et al. (2010) ^[114] , Frisk et al. (2010) ^[92] , Liu et al. (2010) ^[93] , Massol and Tchong-Ming (2010) ^[115] , Fiestras-Janeiro et al. (2012) ^[76] , Yengin (2012) ^[116] , Cheng et al. (2013) ^[100] , Lozano et al. (2013) ^[117] , Fang and Cho (2014) ^[118] , Vanovermeire et al. (2014) ^[119] , Vanovermeire and Sorensen (2014a) ^[104] , Guajardo et al. (2015) ^[73] , Hezarkhani et al. (2015) ^[108] , Sun et al. (2015) ^[109] , Wang et al. (2015) ^[120] , Zakharov and Shchegryaev (2015) ^[121] .
Proportional	18	Fishburn and Pollak (1983) ^[122] , Dror (1990) ^[111] , Engevall et al. (2004) ^[86] , Krajewska and Kopfer (2006) ^[123] , Wong et al. (2007) ^[112] , Berger and Bierwirth (2010) ^[124] , Frisk et al. (2010) ^[92] , Liu et al. (2010) ^[93] , Massol and Tchong-Ming (2010) ^[115] , Lehoux et al. (2011) ^[125] , Audy et al. (2012a) ^[96] , Nguyen et al. (2014) ^[126] , Flisberg et al. (2015) ^[106] , Hezarkhani et al. (2015) ^[108] , Sun et al. (2015) ^[109] .
Nucleolus	12	Gotho-Lundgren et al. (1996) ^[127] , Engevall et al. (1998) ^[83] , Sakawa et al. (2001) ^[128] , Engevall et al. (2004) ^[86] , Agarwal and Ergun (2010) ^[90] , Frisk et al. (2010) ^[92] , Liu et al. (2010) ^[93] , Massol and Tchong-Ming (2010) ^[115] , Granot et al. (2011) ^[129] , Lozano et al. (2013) ^[117] , Guajardo et al. (2015) ^[130] , Hezarkhani et al. (2015) ^[108] .
Dual	8	Anupindi et al. (2001) ^[131] , Engevall et al. (2004) ^[86] , Blaser and Ram (2008) ^[132] , Agarwal and Ergun (2010) ^[90] , Frisk et al. (2010) ^[92] , Fang and Cho (2014) ^[54] .
Marginal	8	Dror (1990) ^[111] , Engevall et al. (2004) ^[86] , Frisk et al. (2010) ^[92] , Massol and Tchong-Ming (2010) ^[115] , Dahl and Derigs (2011) ^[95] , Fang and Cho (2014) ^[118] , Flisberg et al. (2015) ^[106] , Hezarkhani et al. (2015) ^[108] .
T -Value	2	Engevall et al. (1998) ^[83] , Lozano et al. (2013) ^[117]
Aumann-Shapley	1	Samet et al. (1984) ^[133]
Core centre	1	Lozano et al. (2013) ^[117]
Minmax core	1	Lozano et al. (2013) ^[117]
Disruption nucleolus	1	Massol and Tchong-Ming (2010) ^[115]
Per capita nucleolus	1	Massol and Tchong-Ming (2010) ^[115]
Modiclus	1	Guajardo et al. (2015) ^[130]
SM-nucleolus	1	Guajardo et al. (2015) ^[130]

1.3.4 目前研究存在的主要不足

解决服务提供商选择问题的相关文献很多,但是很少有研究集中在一定数量的服务提供商的选择和运维服务网络的设计上,在农业领域尤其缺乏。同时,在农业维修服务网络中没有科学的方法论和合理的评价标准来选择服务提供者。因此,定义服务提供商选择的评估标准并开发基于 AI 的方法来设计和规划实际运维服务网络至关重要。

目前对于运维服务调度的研究存在局限性,例如没有考虑协作情况下的维护计划问题、维护对象不考虑地理分布、仅解决了单实体资源计划问题。关于协同服务模式的研究主要集中在物流配送领域的车辆协同问题。尽管机械维护还涉及服务车辆的协作需求,但是它与传统的车辆协作问题不同,在传统的车辆协作问题中,还必须考虑服务技术人员的技能水平。此外,在实体协作以实现机械维护之后,必须基于服务的实施在协作实体之间分配收益。

1.4 研究内容及结构安排

结合论文的研究背景以及相关问题的国内外研究情况,本文以提高动态分布式装备集群产品的运维服务水平为目标,研究运维服务网络构建中的运维服务商的选择,构建运维服务网络,研究多主体参与的协同运维服务中的调度问题,探索在多主体参与下联盟中的利益分配机制,最终完成面向动态分布式装备集群产品的高效运维服务,提升运维资源的利用率,实现多主体协同运维在运维服务中的应用,达到动态分布式装备集群运维服务决策的智能化。本文共六章,论文的结构安排如图 1.3 所示。

第一章:绪论。本章阐述了论文的研究背景及意义,重点分析了动态分布式装备集群的特点,指出以农机装备为例的动态分布式装备集群运维服务中的服务网络构建以及协同运维服务中的关键技术问题,并分析了相关技术问题的研究现状和现有不足。最后,提炼出拟解决的关键问题,提出了本文的研究内容和组织架构。

第二章:农机装备集群运维服务现状与决策需求分析。总结了运维服务的内涵,结合中国目前农机制造企业的实际运维情况,分析了当前农机装备制造企业在运维服务中的现状,梳理了农机运维的业务流程、需求等,得出了当前农机装备运维服务交付的特征以及存在的问题,提出农机制造企业在不同阶段对运维服

务的决策内容、目标及决策主体。据此，提炼出提出拟研究解决的具体问题及技术路线。

第三章：基于自适应模糊神经方法的服务提供商选择决策。本章针对农机装备运维服务网络设计问题，重点聚焦服务网络节点中服务提供商的联合选择。基于专家知识和机器学习技术，开发了一种基于模糊神经网络的智能决策系统。首先，从定性和定量方面定义了一组服务提供商评估标准，提出了一种自适应模糊神经方法，对服务提供者群体进行分类和选择；将所提出的方法应用于解决现实世界中的问题并构建中国湖南的维修服务网络，验证了方法的有效性。

第四章：基于运维服务网络的跨区协同调度研究。本章针对传统运维服务调度中独立调度模型引起的服务能力不均，运维服务延滞的问题，提出基于运维服务网络的跨区协同调度模型。论证了跨区协同调度的必要性，并对跨区协同调度模型进行数学建模，利用了改进的粒子群算法对协同调度模型进行求解。对改进的粒子群算法与经典的启发式算法的 benchmark 进行了对比，验证本文算法在启发式算法的优势。以及用 CPLEX 构建精确求解模型，与改进的启发式算法进行数值实验对比，验证该算法与精确求解算法对比的优势。最后，用湖南省的真实数据为案例，进行协同调度模型与独立调度模型的对比，证明协同调度模型的优越性和可行性。

第五章：多主体协同作业的成本分配方法研究。为了解决协同调度研究中构建的运维服务网络联盟，在进行协同运维时出现的利益/成本分配的问题。本章分析了多主体协同运维服务中利益分配问题，总结了利益分配的方法，对不同利益分配方法的性能进行了比较，得出了适用于农机装备集群运维服务中的利益分配方法—Shapley 值法。并以 Shapley 值法对跨区协同调度中的主体，进行了利益分配，以保证运维服务网络联盟的公平性和稳定性。

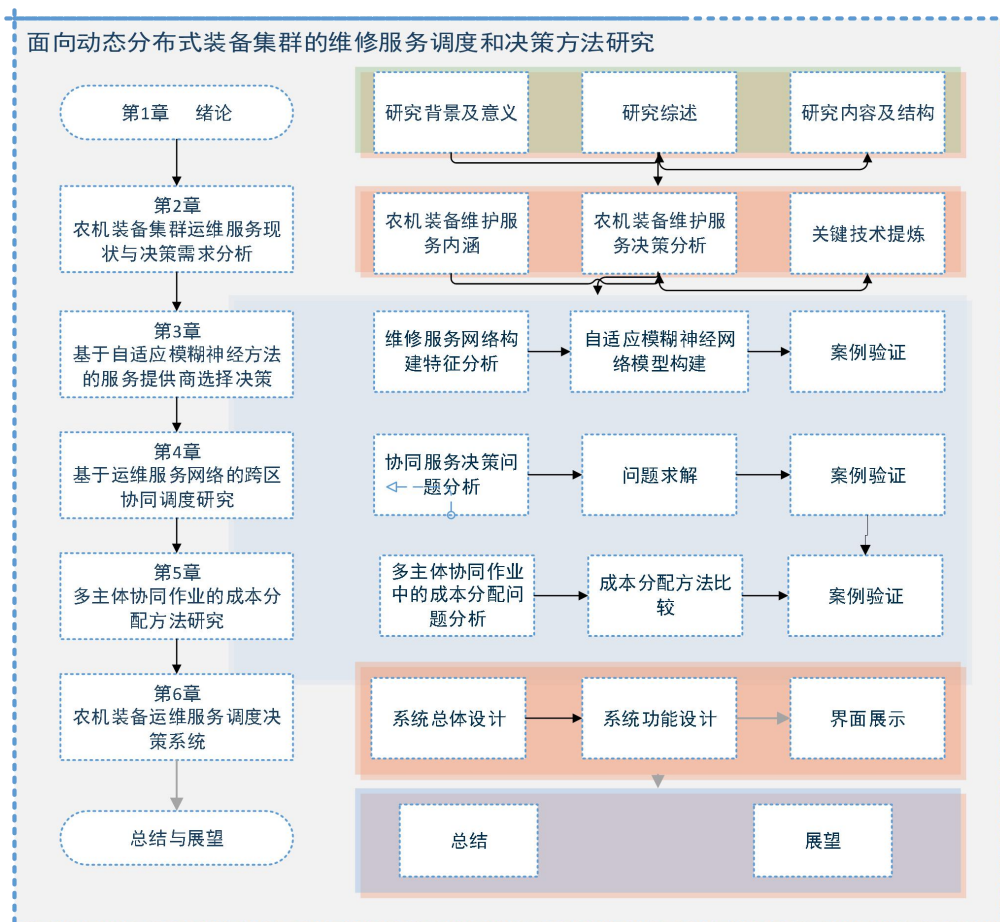


图 1.3 论文结构安排图

第六章：农机装备运维服务调度决策系统实现。本章针对前文研究的运维服务关键技术，利用 Javascript 语言和 MATLAB 混合编程技术，在 Dorado 平台上进行农机装备运维服务调度决策系统的设计与开发。该系统包括运维服务商管理、服务商选择、运维服务调度决策、基础信息管理等功能模块，为企业提供了智能运维服务决策平台。

总结和展望。本章对文章的研究内容和结论进行了总结，指出了文章的不足和未来研究的方向。

第2章 农机装备集群运维服务现状与决策框架

2.1 引言

农机装备属于典型的移动作业式装备,有着作业范围跨度大、作业时间集中、强度大等特点。面向农机装备的运维服务的实施需要协调多方的参与者,决策过程存在多个阶段。因此,总结农机运维服务的模式、服务网络的构成、服务流程、决策过程等,是开展面向动态分布式装备集群运维服务调度问题研究的基础。本章围绕农机装备运维服务的现状,剖析服务网络的构成,运维服务流程等,总结出当前运维服务调度中存在的问题,提出运维服务跨区协同调度的关键需求,并制定最终的研究思路,为后文的研究提供思路。

2.2 农机装备运维服务模式分析

2.2.1 农机装备运维服务模式

当前农机维修服务模型主要采用‘保姆式’维修服务,维修活动完全由企业提供。农机制造企业在消费者所在地委托第三方服务提供商或者自建专门的维修服务机构,形成一定结构规模的维修服务网络。农机维修服务网络主要包括农机用户、呼叫中心(农机制造商)以及维修服务提供商。运维服务过程具体可分为以下几个阶段:

(1) 用户需求上报

当农机发生故障时,农机主通过电话、终端或网络上报维修需求。

(2) 接线员需求统计

接线员根据用户描述记录需求信息,主要包括故障农机机型、故障现象、地理位置等。

(3) 管理人员实时调度

管理人员根据统计的用户需求,生成派工单并下发给各个地方服务商。

(4) 服务商执行任务派单

服务商收到维修任务后,派遣服务工程师到故障地点进行现场维修服务。维修任务完成后,将维修情况上报给呼叫中心。

(5) 客服回访

用户维修需求完成后,呼叫中心记录员电话回访用户,询问农机运行情况

用户满意度，并记录在案。

2.2.2 农机装备运维服务网络分析

装备运维服务的高效实施，需要包括制造企业、服务商和客户在内的三大主体的多个部门的合理组织、规划和协调来实现。这三大主体共同组成了装备运维服务网络，实现了装备运维服务的闭环。运维服务网络成员需要实现信息交互和组织的协同。装备运维服务网络结构如图 2.1 所示。

装备制造企业是运维服务的管理者和主导者，承担的职责如下：（1）负责运维服务网络的构建，网络成员的筛选以及运维服务网络的整体优化。比如进行服务商团队选择，进行服务资源的配置，制定服务策略等；（2）直接向客户提供运维服务，比如，当出现服务需求激增的情况，现有服务商不能及时满足客户的需求时，装备制造企业需要派出应急服务团队，向客户提供服务。另外，当农机装备出现重大故障，服务商无能力提供服务时，制造企业提供专家运维或者进行返厂维修等。（3）利用运维服务的反馈，进行企业制造设计、制造流程及制造工艺的优化，从而实现产品的设计、制造、运维的闭环。

装备运维服务中的服务商，主要作用就是帮助企业向客户提供运维服务。服务商主要从企业产品的经销商和优秀的独立第三方服务商中进行筛选，共同组成服务商联盟，向客户提供运维服务。服务商是运维服务网络中的关键节点，由制造企业对服务商进行筛选和管理、配置运维服务资源、划分服务区域、进行运维服务培训等。服务商在获得制造企业运维服务赋能之后，在保证服务质量的前提下，服务商具有一定的决策自主权。服务商向客户提供装备运维服务，并根据所服务客户的数量、质量等从制造企业中获取相应收益。因此，在服务机制的设计中，包含了驱动服务商向客户提供更高质量服务的动力。

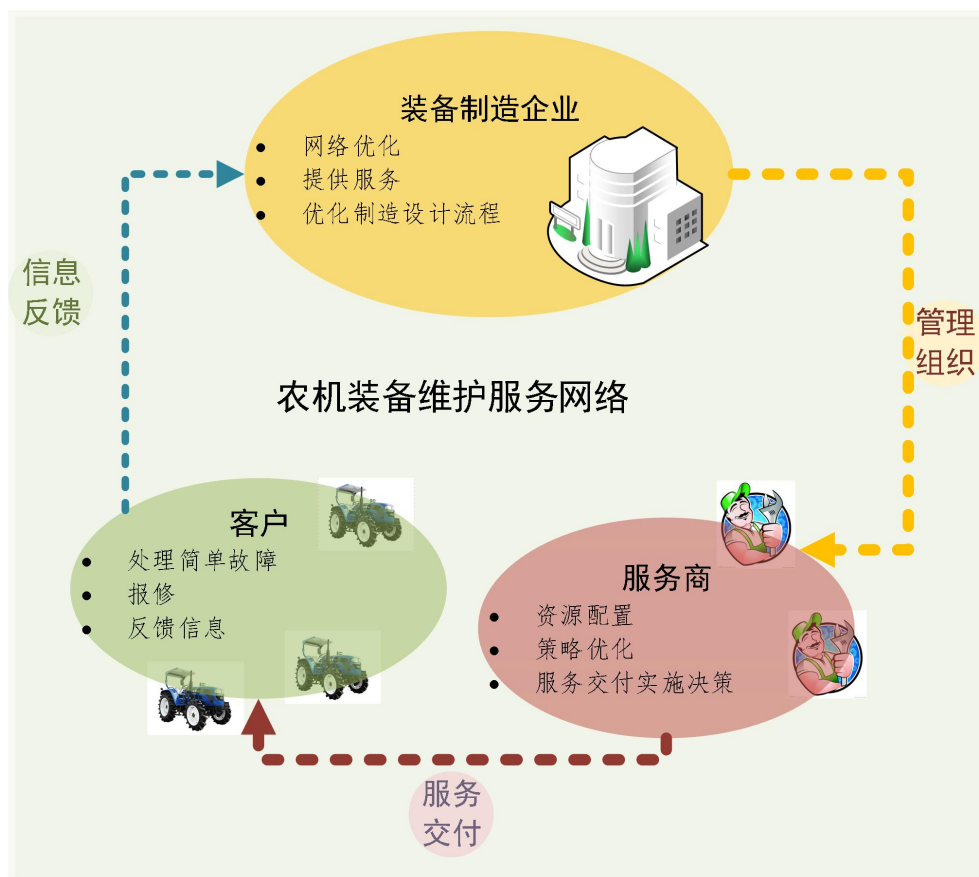


图 2.1 装备运维服务网络图

客户是农机装备的拥有者和使用者，也是制造企业运维服务的服务对象。农机装备制造企业的客户，主要包括农场主、农业生产合作社、专业农机手、或者农民。客户又分为三包期内客户和三包期外的客户。三包期内的客户具有优先获得服务的优势，在客户正常使用农机装备时出现故障产生运维服务费用，由装备制造企业承担；由于客户的违规使用造成的故障的费用由客户自行支付。三包期外的客户出现故障，当运维服务商具有服务能力富裕时，运维服务商可以向客户提供运维服务，产生的费用由客户自行支付。客户在发现装备存在异常状态后，通过专业的报修 APP（比如，曹操快修等）向运维服务商或者企业制造商进行报修，运维服务商经过故障判定之后，派出服务工程师，携带维修备件到故障现场对装备进行维修。运维服务商向客户提供服务之后，并不是运维服务的终点。制造企业还需根据运维服务商和客户的信息反馈，对信息进行汇总，研判，并将有用的结论应用到产品的设计与制造中，从而实现装备运维交付的闭环。

当然，农机装备运维服务交付还有其它的参与主体，比如备件提供商、各省

区的备件存储仓、运输商等。由于本文是从装备制造企业的角度对装备运维服务的交付进行研究，对于其它外部参与主体暂不进行讨论。

2.2.3 农机装备运维服务的业务流程

随着社会生产力水平的提高以及政府农业机械化政策的推动下，我国的农业装备制造企业得到了快速的发展，并且逐步走向国际。目前，我国农机装备规模总量持续多年保持全球第一，在役农机数量规模巨大。我国农机装备制造企业不但面临国际竞争者，同时在国内农机装备制造企业互相之间也存在竞争压力；在外面临售后运维服务能力不足的压力，在内面临价格竞争的压力。农机装备制造企业的破局之策一是要提高生产质量和效率，二是提供售后运维服务，本文主要对后者中的运维服务交付进行研究。通过为客户提供运维服务，不但能增加企业受益的渠道，还能通过专业高效的运维服务赢得客户的信任，在未来的市场竞争中可持续发展、

目前，制造企业提供的运维服务主要包括两种形式，一是远程视频诊断并且配上专业的维修保养的视频教程，二是提供现场运维服务。由于现场运维服务所占用的成本高，装备故障情况复杂，装备处于分布式状态等使得现场运维服务更加复杂，因此本文是以农机装备集群的现场运维服务作为装备运维服务的主要研究对象。

现有运维服务模式，客户在发现装备使用异常之后，根据客户自己的经验进行判断是否能够自主解决；当客户无法自行解决时，则在专业的 APP 上进行报修，装备制造企业或者运维服务商会对客户进行远程视频指导，判断装备故障，并发送对应的运维服务教程，帮助客户进行维修；在远程视频指导无法解决的情况下，企业将会把客户的需求派送到对应的服务商，由对应的服务商提供运维服务。

但是，在现有运维服务模式，经常出现服务需求激增的情况，如果对应服务商的服务能力出现不足时，客户维护需求则无法及时得到满足。针对这种现状，本文从两个方面进行研究，一是构建更加健壮的运维服务网络，即对服务商的选择和服务网络构建进行优化，不仅从单个服务商的角度进行服务商的选择，而是考虑由多个服务商共同构成的服务网络的服务能力出发，考虑多个服务商的地理位置、运维服务能力、资源配置等方方面面，对运维服务商网络进行更全面的评价，得到更优的服务商选择方案；二是基于构建的服务商联盟，研究服务商之间

的协同服务机制，即当单个服务站的服务能力不足时，企业可以安排多个服务站组成协同服务联盟，进行协同运维服务决策。图 2.2 中的虚线框内部分，代表协同运维服务机制下的协同服务决策流程。农机制造企业或者服务商将根据客户需求，进行协同运维服务决策，决策内容包括维修任务分配、路径规划、服务资源配置等，并将决策内容推送到对应服务工程师。最终，由服务工程师完成运维服务。具体流程如图 2.2 所示。

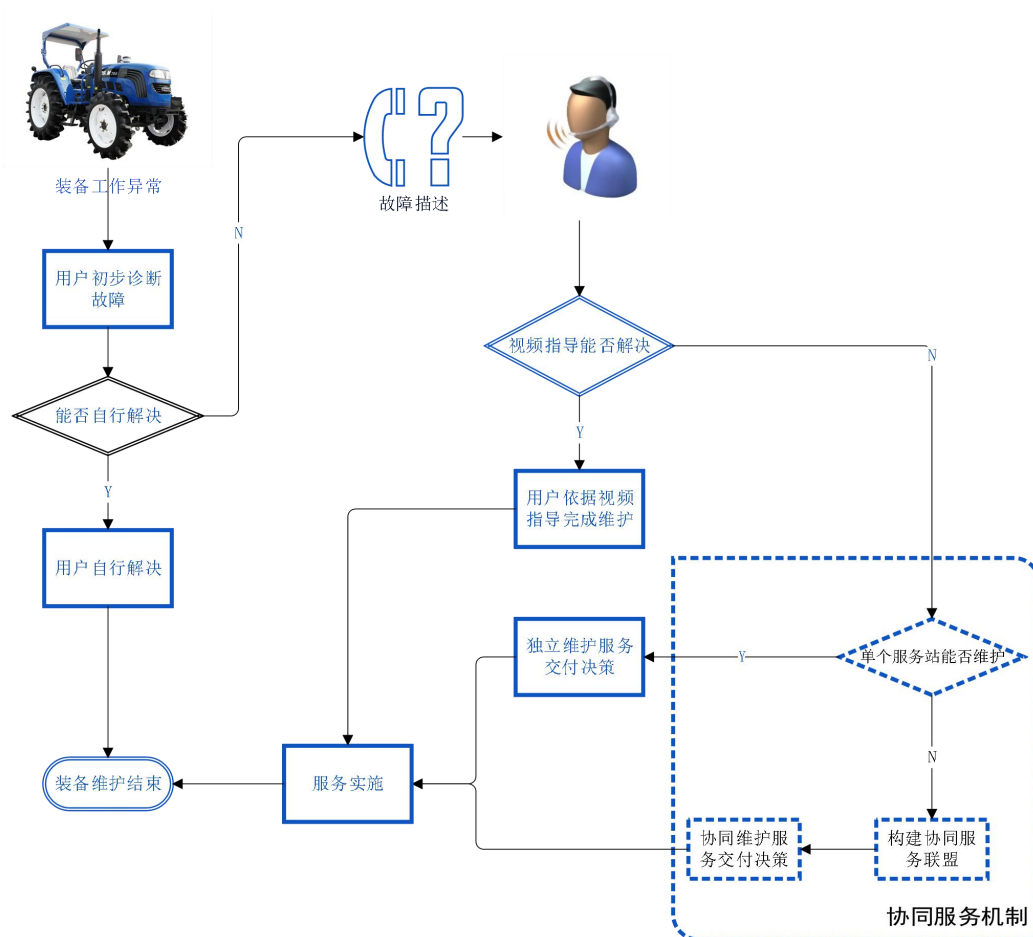


图 2.2 装备运维服务交付业务流程图

2.2.4 农机装备运维服务模式面临的主要问题

装备的运维服务的实施，需要结合装备本身的作业特点。如前文分析中指出，农机装备的作业，在作业时间上具有集中性，在作业规模上具有集群性，作业环境恶劣，在地理位置上具有动态性分布性。由于农机装备的特性，会出现农机装备故障集中爆发的情况。企业面临短期内激增的运维需求时，现有运维服务网络不能满足需求，服务能力出现不足，由此导致农业装备故障不能得到及时的维护，

进而影响农机装备的经济效益，导致农业生产损失。因此需要构建更健壮的运维服务网络。

此外，现有服务网络中的服务商，只服务自己所在区域的需求，因为需求的出现具有随机性和分布性，可能会出现区域服务能力不均衡的状态。因此，探索跨区协同调度机制，以降低突发需求造成的区域服务能力不均衡的状态。在跨区协同调度机制中，多个服务商参与进行协作，形成服务商联盟，目前的运维服务中，没有联盟成员间的利益分配机制。

综上，将农机装备运维服务中存在的主要问题总结如下：

（1）服务需求动态变化与服务网络不变的矛盾。

由于农机装备作业具有动态性、集群性、时效性和分布式的特点，导致农机运维服务的需求可能出现需求激增的情况。当前，装备制造企业对运维服务网络构建，完全是按照行政区域划分，没有考虑农机作业时的实际需求和特征。导致企业在面临运维服务激增时，不能提供有效的服务，也没有相应的应对措施。因此，在不增加运维总成本的情况下，进行服务商选择时，考虑服务商之间的协同运维的特征，构建适应与农机装备的运维服务网络模型，实现对农机运维服务需求的快速响应，是完成农机装备智能运维服务决策的前提。

（3）协同调度需求存在与协同调度机制缺乏的矛盾。

完成农机运维服务的包含的主体，分别是上层的制造企业，下层的运维服务商以及部分能在企业远程视频指导下进行自主运维服务的客户。目前，主流的制造企业在构建运维服务网络时，是按照行政区域给运维服务商指定服务范围。但是，由于农机作业的特性，农机在作业时是在逐步移动的，会从一个服务区移动到另一个服务区，由此带来不同服务区域的服务需求的不平衡，也导致了不同服务站之间工作负荷的不平衡，带来资源闲置与缺乏同时存在的现象。由此也导致了服务资源利用效率低下，顾客满意度降低和总体运维成本的增加。制造企业的运维服务中，缺乏明确的运维服务调度机制，以平衡由于农机作业特征带来的短时间内的服务需求与服务能力不匹配的情况。因此，研究和建立运维服务中的协同调度机制，提高资源的利用率，保证客户需求得到及时满足，降低运维成本具有重要意义。

（3）陈旧的利益分配模式与协同运维模式不匹配的矛盾。

在农机装备协同运维时，多个服务商形成服务商联盟，进行协同运维服务。

协作的一个重要方面是决定如何共享收益，例如成本，利润或资源。由于当前的运维服务主要以独立调度模式为主，因此缺乏一套适用于协同运维服务的多主体利益分配机制。

2.3 农机装备运维服务决策框架与关键技术

2.3.1 农机装备运维服务决策框架

为了保障农机装备运维服务有效实施所进行的一系列决策统称为农机装备运维服务决策。从前文对农机装备服务网络的组织结构以及业务流程的分析中可知，农机装备运维服务实施过程中，具有多主体参与、多阶段决策以及多层级组织的特点。为了在激烈的竞争中保证制造企业的产品优势，农机制造企业对于农机装备运维服务实施的决策具有更高的要求。装备运维服务的决策，始于客户的需求，并最终反馈到制造企业的产品设计和制造中，形成运维服务的闭环。在运维服务的实施过程中，包括了企业层级的服务网络设计、服务商选择、运维策略选择以及需要进行现场维护时，对服务工程师的调度等决策。经过完成的运维服务之后，企业在运维过程中获取的数据将作为优化产品设计、改善生产制造、精进业务流程的依据。本文研究的农机装备运维服务决策研究框架如图 2.3 所示。

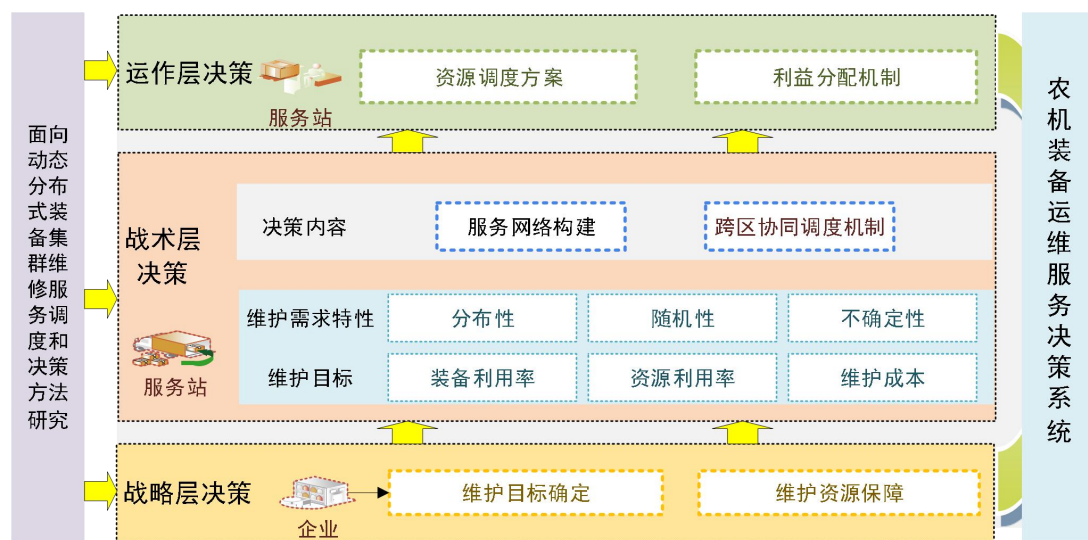


图 2.3 农机装备运维服务决策框架

2.3.2 运维服务决策结构及要素

根据决策内容和参与主体的不同，可将农机装备运维服务决策划分为战略决

策、战术决策、和运营层决策。决策等级越高，其决策内容越基础，时间跨度越长。决策层级越低，约束越多，决策问题更具体，但是时间范围更短。不同的决策主体，具有不同的决策目标，面临的约束和能掌握的基本信息也不同。

围绕本文研究的以农机装备为例的动态分布式装备集群的运维服务的服务网络结构以及服务流程分析，战略层的决策，由装备制造企业主导，进行关于服务网络构建的决策；战术层决策需要决定运维服务的服务策略以及在协同运维的模式下运维服务商之间利益分配的机制。在运作层需要确定协同运维调度的决策机制。具体决策要素分析如表 2-1 所示。

表 2-1 装备运维服务交付决策要素分析

决策 所属层级	决策问题	决策目标	决策信息	决策主体
战略层 决策	服务网络 构建	满足需求爆发期 的服务	历史维修信息；服务商地 理位置；交通网络现状等	装备制造企业
战术层 决策	多主体利益 分配机制	联盟的稳定性和 客户满意度	维护成本参数、服务客户 数量、服务里程等	服务商
运作层 决策	协同服务 交付	服务的有效实施	服务需求、服务资源、服 务成本	服务商

不同决策的决策方案也各有不同。战略层服务网络构建的决策方案是未来某个区域维修服务主体；多主体利益分配机制需要根据联盟成员数量、服务需求分布等构建利益分配模型，并能够维持联盟的稳定性以及提升服务的满意度；运作层的决策方案是运维服务的路径规划与服务需求分配结果，以及根据战术层的利益分配机制，决定协同运维情况下的利益分配结果。

2.4 面向农机装备运维服务决策的关键问题与技术路径

本文研究的以农机装备为例的动态分布式装备运维服务决策中设计到的决策内容包括构建适应农机装备作业特征的服务网络，运维服务中协同调度机制的研究，以及在协同调度情况下，多个服务商之间利益分配机制等多项技术的研究。具体研究内容与技术路径如下：

（1）基于自适应模糊神经方法的服务商选择决策

本章针对农机装备运维服务网络设计问题,重点聚焦服务网络节点中服务提供商的联合选择。基于专家知识和机器学习技术,开发一种基于模糊神经网络的智能决策系统。首先,从定性和定量方面定义了一组服务提供商评估标准,提出了一种自适应模糊神经方法,对服务提供商群体进行分类;将所提出的方法应用于解决现实世界中的问题并设计中国湖南的维修服务网络;结合实际应用的场景实验结果验证了方法的有效性。

(2) 基于运维服务网络的跨区协同调度研究

针对传统运维服务调度中独立调度模型引起的服务能力不均,运维服务延滞的问题,提出基于运维服务网络的跨区协同调度模型。论证跨区协同调度的必要性,并对跨区协同调度模型进行数学建模,利用了改进的粒子群算法对协同调度模型进行求解。对改进的粒子群算法与经典的启发式算法的 benchmark 进行对比,验证本文算法在启发式算法的优势。以及用 CPLEX 构建精确求解模型,与改进的启发式算法进行数值实验对比,验证该算法与精确求解算法对比的优势。最后,用湖南省的真实数据为案例,进行协同调度模型与独立调度模型的对比,证明协同调度模型的优越性和可行性。

(3) 多主体协同作业的成本分配方法研究

解决协同调度研究中构建的运维服务网络联盟,在进行协同运维时出现的利益/成本分配的问题。本章分析了多主体协同运维服务中利益分配问题,总结了利益分配的方法,对不同利益分配方法的性能进行了比较,得出了适用于农机装备集群运维服务的中的利益分配方法--Shapley 值法。并以 Shapley 值法对跨区协同调度中的主体,进行了利益分配,以保证运维服务网络联盟的公平性和稳定性。

2.5 本章小结

本章对现有农机装备运维服务的模式进行了分析,经过运维服务网络的构成和业务流程的梳理,总结了当前农机装备运维服务网络面临的主要问题。针对存在的问题,提出了适应农机装备特征的运维服务决策框框架,结合运维决策的结合和要素,提出了急需解决的关键问题及技术路线,为后文的研究指明了方向。

第 3 章 基于自适应模糊神经方法的服务提供商选择决策

3.1 引言

为了在繁忙的耕作季节确保农机装备运营的安全性和可靠性,建立运维服务网络变得越来越紧迫。本章旨在设计农机装备维修服务网络,重点关注网络节点中服务提供商的联合选择。基于专家经验和机器学习技术,开发了基于自适应模糊神经网络的决策系统。首先,从定性和定量方面定义了一组服务提供商评估标准。提出了一种自适应模糊神经方法,对服务提供者群体进行分类。最后,将所提出的方法应用于解决现实世界中的问题并设计中国湖南的维修服务网络。实际应用场景中的实验结果表明,该方法为运维服务系统中的决策和服务提供商选择提供了准确的结果。

3.2 服务网络构建问题概述和评估标准

3.2.1 服务网络构建问题概述

服务提供商是运维服务网络的主要节点,并与制造商和客户一起构成一个完整的运维服务网络。目前,已经在农业机械^[134]、汽车工业、军事装备和其他复杂设备中建立了维修服务网络。

以农业机械制造企业为例,制造商将在一个省份建立零件存储仓库,并负责为该地区的服务提供商提供零件。服务提供商负责为有需要的客户提供现场维修服务。此外,有故障的农业机械通常在农田运行期间发生故障,并且处于动态分布状态。更重要的是,随着农作物的成熟,农业机械和设备将从南向北移动,并将进行跨区域运营。因此,农业设备维修服务的网络布局更具挑战性。

以中国湖南省农业机械设备维修服务网络的建设为例,湖南省有 14 个城市,每个城市必须选择一个服务提供商。在每个城市,将有 3 至 5 个服务提供商替代方案。因此,维修服务网络有 314-514 种可能的解决方案。这项研究的目的是在数十亿种可能的服务提供商选择中选择更好的解决方案,供决策者选择。

3.2.2 评估标准的定义

智能决策系统的目标是确定最佳的服务提供商组,以在适当的时间在运维服

务网络中为客户提供最佳的运维服务。在评估运维服务网络中的预期服务提供商之前，必须定义一组评估标准。首先，应考虑服务提供商的绩效。良好的声誉，相关的服务设施和广泛的地域分布是提供商的附加优势。此外，提供商的服务能力也在考虑之列。高质量和低成本的服务将受到制造商和客户的青睐。类似产品的经验可确保为客户提供准确的服务，而运营绩效是反映服务提供商能力的重要指标。

此外，制造商，备件供应商，客户和服务提供商之间的关系也至关重要。制造商与服务提供商之间的长期关系有助于控制机会，低廉的服务网络建设成本和备件的物流成本有助于降低制造商的成本。与邻近服务提供商的合作有利于快速响应维护请求。更好的地域分布和提供的广泛服务也可以使制造商节省资金。

因此，考虑到这些不同的影响特征，定义了几组评估标准，并将其用于运维服务网络中的服务提供商选择。所考虑的第一部分集中在对服务提供商本身的评估上，并制定了三个评估绩效的标准：声誉，固定资产的规模和质量以及地理优势。第二部分定义为从四个方面衡量服务提供商的业务能力：运营绩效，类似产品的经验，服务成本和服务质量。最后一部分与制造商和整个服务网络有关：长期关系，与邻近服务提供商的关系，整个网络中备件的总交付成本，服务网络建设成本，地域分布和提供的服务范围。对于上述这些标准，开发了一些功能以通过评估每个区域中的服务提供商来评估整个服务网络中的服务提供商，而定义了其其他功能来评估服务网络中所有服务提供商的性能。

如表 3-2 所示，本文确定了十二个标准来评估服务提供商组的绩效。这些评估标准以定量和定性的方式描述。一些功能，例如服务成本，备件总交付成本和服务网络建设成本，都作为可测量的数量计算，而其他特征则用自然语言定性地描述。

表 3-2.评估标准的详细信息

编号	评估标准	描述
1	服务商声誉 ^[134]	服务提供者声誉在选择过程中起着至关重要的作用，是指各利益相关者对服务提供者的整体认知和评价。财务绩效、员工满意度、市场占有率、客户满意度和支持度可以用来评估服务供应商的声誉。

2	固定资产的规模和质量 ^[134]	固定资产规模与质量是指拥有优质资产(如维修服务车、库存水平、服务站规模等)的可得性,是为客户提供合适维修服务的基础。
3	地理优势 ^[17]	地理优势是指服务提供者的地理位置优势,如交通优势。它还指与最佳位置的差异(最佳位置是基于历史数据的聚类位置)。
4	运营绩效 ^[32]	服务提供者根据标准能力(如 IT 技术、统计数据报告性能、系统安全性、敏感数据的保密性、故障诊断能力、响应能力)衡量的业务性能。
5	类似产品经验 ^[22]	有类似产品经验,有类似产品经验者优先考虑。
6	服务成本 ^{[17][22][32]}	服务成本是指维修服务的总成本。成本包括物流成本、人工成本和维护成本。维修费用在本文中没有考虑,因为它对于同一服务区域内的不同服务提供者具有相同的价值。
7	服务质量 ^[32]	服务质量服务质量是指满足监管和潜在需求的服务特征。它包括准时质量,维护服务的准确性,客户投诉的纠正措施,服务速度,可靠性,持续改进,以及服务人员的结构。
8	长期关系 ^[32]	对于制造商与服务提供商之间的长期关系,应用于控制多个提供商的机会主义行为,建立互惠与风险的利益机制,有利于保证服务工作的稳定性。
9	与邻近服务供应商的关系	它是指相邻服务区之间的合作或竞争,是通过判断相邻服务区之间的位置和历史关系来确定的。
10	备件交货总成本	备品备件交货总成本:指制造商提供给各服务提供商的备品备件交货总成本。备件的成本被忽略,因为它对于相同服务区域内的所有服务提供者具有相同的价值。
11	服务网建设成本	服务网建设成本服务网建设成本包括服务人员培训成本、设备升级成本 and 信息系统建设成本等。
12	地理分布和提供的服务范围	适用于判断整个网络的地理分布和服务区域。

3.3 决策方法

本节介绍了运维服务网络设计和服务提供商选择的建议方法。决策系统的体系结构如图 3.3 所示，所提出的方法可以分为四个阶段：生成备选方案和数据收集、专家分析、分类和最终决策。每个阶段的详细信息在以下部分中进行描述。

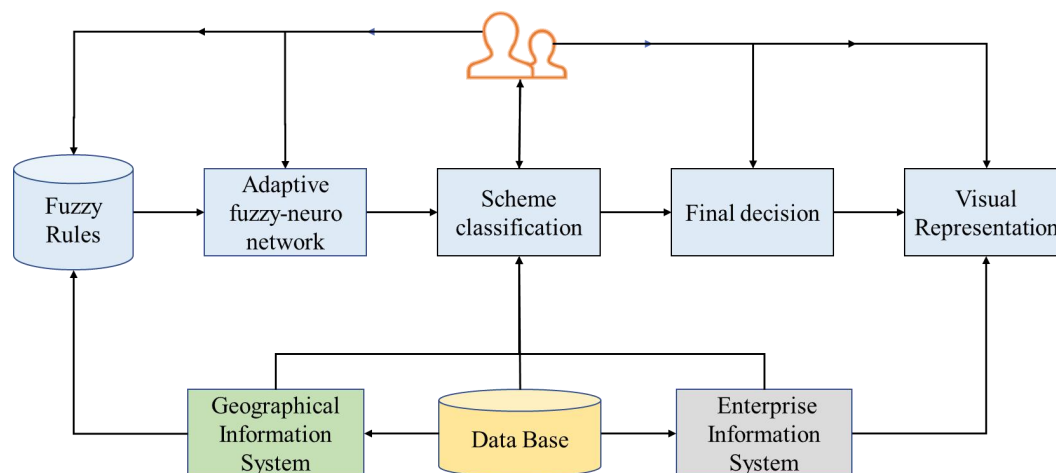


图 3.3 服务网络中提供商选择的决策方法架构

3.3.1 生成备选方案和数据收集

为了选择最佳的服务提供商组，第一步是生成一组备选方案，并确定每组服务提供商的评估标准的价值。收集的数据包括与服务提供商有关的描述性数据，运维服务网络中故障的位置和数量，地理数据以及与服务相关的成本，包括人工成本，物流成本，备件成本和服务站建设成本。作为一项复杂且耗时的任务，服务提供商通过地图，GPS，计算机记录和报告收集了各种形式的数据。

此外，每个服务区域中的可选服务提供商都可以从他们自己的企业信息系统中获得。同样，应确定评估标准的价值，以便随后进行专家分析。对于定量特征，可以根据相关数据使用几个公式来计算相应的值。但是对于定性特征，无法直接通过计算获得。因此，邀请了几位领先的专家和相关的利益相关者来确定评估标准的价值，并在以后评估每组服务提供商。公司的专家数据库邀请了领先的专家，其角色从教授到运维服务中心的经理再到现场服务经理。相关的利益相关者来自不同的技术和业务部门，例如财务，市场，计划和人事部门。

3.3.2 专家分析

为了获得培训所需的数据，请决策专家组评估运维服务网络中的每组服务提供商。要考虑多位专家和利益相关者的意见，分析每个服务提供商的信息并评估服务提供商组的绩效。对于每组服务提供商，决策组都会根据可用信息对结果进

行分析和讨论，并在所有成员之间达成共识。

3.3.3 自适应模糊神经分类

为了评估每组服务提供商的适用性，提出了基于自适应模糊神经的方法来确定每组服务提供商的排名。所开发的分类方法是集成的自适应模糊神经方法和两类分类方法，不同的评分值对应运维服务网络中服务提供商组的质量不同。

此外，在分类过程中采用了两类分类技术，其优点是评估结果以升序表示。在本文中，使用了 n 个两分类器，该方法以级联连接模式从 $i=1$ 开始获得返回值 o_i 。计算过程如下所示，这组替代项将按 n 类进行排序：

$$class = \begin{cases} 0, & \text{if } o_i = 0 \\ \dots \\ n-1, & \text{if } o_n = 0 \\ n, & \text{otherwise} \end{cases}$$

本文开发的分类器实际上是自适应模糊神经分类器，用于计算代表服务提供商组类别的排名得分。自适应模糊神经分类器将通过一组训练样本获得和改进。因此，自适应分类方法是 FIS 和神经网络的集成，下面将介绍所提出的自适应模糊神经方法。如图 3.4 所示，自适应模糊神经由 6 层组成。与上述文献中提出的模糊神经工作的实现不同，各层的详细信息如下所示。

第 1 层（输入层）：开发的自适应模糊神经方法接收一组服务提供商的评估标准。本文采用 12 条评估标准（从 i_1 到 i_{12} ），详细信息如表 3-2 所示。

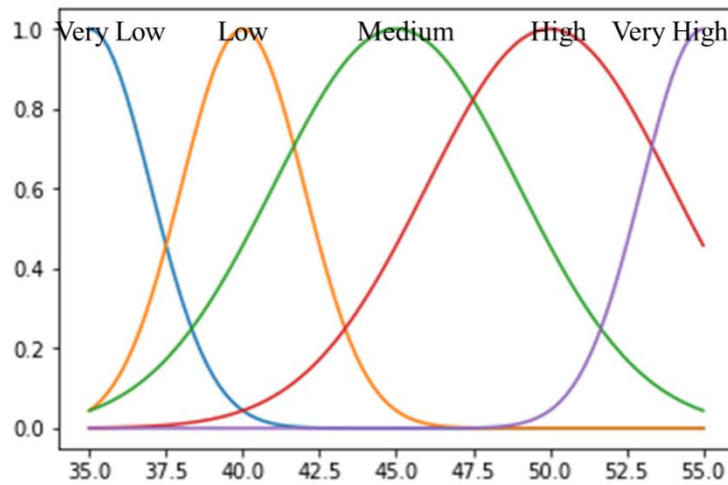


图 3.4.高斯隶属函数示例

第2层（模糊化层）：采用高斯隶属函数对输入进行模糊化。表3-3中显示了为每个准则设计的隶属函数的值，并以高斯隶属函数为例显示了准则 i_{10} （备件的总交付成本），如图3.4所示。

表3-3. 十二种评估标准的模糊化

编号	评估标准	数值范围	隶属函数
i_1	服务商声誉	[1 5]	Very Low (VL), Low (L), Medium (M), High (H), Very High (VH)
i_2	固定资产的规模和质量	[1 5]	Very Low (VL), Low (L), Medium (M), High (H), Very High (VH)
i_3	地理优势	[3 5]	Low (L), Medium (M), High (H)
i_4	运营绩效	[1 5]	Very Low (VL), Low (L), Medium (M), High (H), Very High (VH)
i_5	类似产品经验	[1 5]	Very Low (VL), Low (L), Medium (M), High (H), Very High (VH)
i_6	服务成本	[40000 400000]	Very Low (VL), Low (L), Medium (M), High (H), Very High (VH)
i_7	服务质量	[1 5]	Very Low (VL), Low (L), Medium (M), High (H), Very High (VH)
i_8	长期关系	[3 5]	Low (L), Medium (M), High (H)
i_9	与邻近服务供应商的关系	[1 5]	Very Low (VL), Low (L), Medium (M), High (H), Very High (VH)
i_{10}	备件交货总成本	[35000 55000]	Very Low (VL), Low (L), Medium (M), High (H), Very High (VH)
i_{11}	服务网建设成本	[0 80000]	Very Low (VL), Low (L), Medium (M), High (H), Very High (VH)
i_{12}	地理分布和提供的服务范围	[1 5]	Very Low (VL), Low (L), Medium (M), High (H), Very High (VH)

第3层（规则层）：决策组定义了多个规则，并将知识库中的模糊规则用于近似推理，如表3-4所示。

第4层（标准化点火强度层）：每个规则的触发强度均已标准化。

第5层（去模糊化层）：在此层中应用了加权平均去模糊化方法。

第6层（输出层）：输出浮点数据，并且输出范围在值1到 n 之间。该方法的输出将四舍五入到最接近的整数，以表示这些组的排名得分。

本文以监督的方式训练自适应模糊神经方法，并结合最小二乘估计方法和反向传播方法，对提出的 n 个两类自适应模糊神经分类器进行训练。

表 3-4 知识库中的模糊规则

编号	IF-THEN 规则
1	$IF (i_6 \rightarrow VL) \vee (i_7 \rightarrow VL) THEN (o_1 \rightarrow h_1)$
2	$IF (i_6 \rightarrow VL) \vee (i_{10} \rightarrow VL) \vee (i_{12} \rightarrow VH) THEN (o_2 \rightarrow h_2)$
3	$IF (i_6 \rightarrow VL) \vee (i_9 \rightarrow VH) \vee (i_{12} \rightarrow VH) THEN (o_3 \rightarrow h_3)$
4	$IF (i_6 \rightarrow VH) \vee (i_{10} \rightarrow VH) \vee (i_{11} \rightarrow VH) THEN (o_4 \rightarrow l_4)$
5	$IF (i_3 \rightarrow VL) \wedge (i_5 \rightarrow VL) THEN (o_5 \rightarrow l_5)$
6	$IF (i_1 \rightarrow M) \wedge (i_3 \rightarrow L) THEN (o_6 \rightarrow l_6)$
7	$IF (i_1 \rightarrow VH) \wedge (i_3 \rightarrow M) THEN (o_7 \rightarrow l_7)$
8	$IF (i_1 \rightarrow VH) \wedge (i_3 \rightarrow H) THEN (o_8 \rightarrow l_8)$
9	$IF (i_1 \rightarrow M) \wedge (i_3 \rightarrow M) THEN (o_9 \rightarrow l_9)$
10	$IF (i_1 \rightarrow VH) \wedge (i_{10} \rightarrow VH) \wedge (i_3 \rightarrow VL) THEN (o_{10} \rightarrow l_{10})$
11	$IF (i_1 \rightarrow VH) \wedge (i_{10} \rightarrow VH) \wedge (i_3 \rightarrow L) THEN (o_{11} \rightarrow l_{11})$
12	$IF (i_1 \rightarrow VH) \wedge (i_2 \rightarrow VL) \wedge (i_4 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_5 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_8 \rightarrow \neg VH) \wedge (i_9 \rightarrow VL) \wedge (i_{10} \rightarrow \neg VL) \wedge (i_{12} \rightarrow \neg VL) THEN (o_{12} \rightarrow h_{12})$
13	$IF (i_1 \rightarrow VH) \wedge (i_2 \rightarrow VL) \wedge (i_4 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_5 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_8 \rightarrow \neg VH) \wedge (i_9 \rightarrow VL) \wedge (i_{10} \rightarrow \neg VL) \wedge (i_{12} \rightarrow \neg VL) THEN (o_{13} \rightarrow h_{13})$
14	$IF (i_1 \rightarrow VH) \wedge (i_2 \rightarrow VL) \wedge (i_4 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_5 \rightarrow \neg L) \wedge (i_8 \rightarrow \neg VH) \wedge (i_9 \rightarrow VL) \wedge (i_{10} \rightarrow \neg VL) \wedge (i_{12} \rightarrow \neg VL) THEN (o_{14} \rightarrow h_{14})$
15	$IF (i_1 \rightarrow VH) \wedge (i_2 \rightarrow VL) \wedge (i_4 \rightarrow \neg L) \wedge (i_5 \rightarrow \neg L) \wedge (i_8 \rightarrow \neg VH) \wedge (i_9 \rightarrow VL) \wedge (i_{10} \rightarrow \neg VL) \wedge (i_{12} \rightarrow \neg VL) THEN (o_{15} \rightarrow h_{15})$
16	$IF (i_1 \rightarrow M) \wedge (i_2 \rightarrow VL) \wedge (i_4 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_5 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_8 \rightarrow \neg VH) \wedge (i_9 \rightarrow VL) \wedge (i_{10} \rightarrow \neg VL) \wedge (i_{12} \rightarrow \neg VL) THEN (o_{16} \rightarrow h_{16})$
17	$IF (i_1 \rightarrow M) \wedge (i_2 \rightarrow VL) \wedge (i_4 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_5 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_8 \rightarrow \neg VH) \wedge (i_9 \rightarrow VL) \wedge (i_{10} \rightarrow \neg VL) \wedge (i_{12} \rightarrow \neg VL) THEN (o_{17} \rightarrow h_{17})$
18	$IF (i_1 \rightarrow M) \wedge (i_2 \rightarrow VL) \wedge (i_4 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_5 \rightarrow \neg L) \wedge (i_8 \rightarrow \neg VH) \wedge (i_9 \rightarrow VL) \wedge (i_{10} \rightarrow \neg VL) \wedge (i_{12} \rightarrow \neg VL) THEN (o_{18} \rightarrow h_{18})$
19	$IF (i_1 \rightarrow M) \wedge (i_2 \rightarrow VL) \wedge (i_4 \rightarrow \neg L) \wedge (i_5 \rightarrow \neg L) \wedge (i_8 \rightarrow \neg VH) \wedge (i_9 \rightarrow VL) \wedge (i_{10} \rightarrow \neg VL) \wedge (i_{12} \rightarrow \neg VL) THEN (o_{19} \rightarrow h_{19})$
20	$IF (i_1 \rightarrow VH) \wedge (i_2 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_3 \rightarrow VH) \wedge (i_5 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_7 \rightarrow M) THEN (o_{20} \rightarrow h_{20})$
21	$IF (i_1 \rightarrow VL) \vee (i_2 \rightarrow VL) \vee (i_3 \rightarrow VL) \vee (i_4 \rightarrow VL) \vee (i_5 \rightarrow VL) THEN (o_{21} \rightarrow l_{21})$
22	$IF (i_1 \rightarrow VL) \vee (i_2 \rightarrow VL) \vee (i_3 \rightarrow VL) \vee (i_4 \rightarrow M) \vee (i_5 \rightarrow L) THEN (o_{22} \rightarrow l_{22})$
23	$IF (i_1 \rightarrow VH) \wedge (i_2 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_3 \rightarrow L) \wedge (i_5 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_6 \rightarrow VH) \wedge (i_9 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_{11} \rightarrow \neg L) \wedge (i_{12} \rightarrow \neg L) THEN (o_{23} \rightarrow h_{23})$
24	$IF (i_1 \rightarrow VH) \wedge (i_2 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_3 \rightarrow M) \wedge (i_5 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_6 \rightarrow VH) \wedge (i_9 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_{11} \rightarrow \neg L) \wedge (i_{12} \rightarrow \neg L) THEN (o_{24} \rightarrow h_{24})$
25	$IF (i_1 \rightarrow VH) \wedge (i_2 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_3 \rightarrow L) \wedge (i_5 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_6 \rightarrow VL) \wedge (i_9 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_{11} \rightarrow \neg L) \wedge (i_{12} \rightarrow \neg L) THEN (o_{24} \rightarrow h_{24})$
26	$IF (i_1 \rightarrow VH) \wedge (i_2 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_3 \rightarrow M) \wedge (i_5 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_6 \rightarrow VH) \wedge (i_9 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_{11} \rightarrow \neg L) \wedge (i_{12} \rightarrow \neg L) THEN (o_{24} \rightarrow h_{24})$
27	$IF (i_6 \rightarrow VH) \vee (i_7 \rightarrow VL) THEN (o_{27} \rightarrow l_{27})$

-
- 28 $IF (i_5 \rightarrow \neg VL) \vee (i_8 \rightarrow VL) \vee (i_9 \rightarrow VL) THEN (o_{28} \rightarrow l_{28})$
- 29 $IF (i_5 \rightarrow \neg VL) \vee (i_8 \rightarrow VH) \vee (i_9 \rightarrow VH) THEN (o_{29} \rightarrow h_{29})$
- 30 $IF (i_1 \rightarrow VH) \wedge (i_2 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_3 \rightarrow M) \wedge (i_7 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_8 \rightarrow VH) \wedge (i_9 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_{11} \rightarrow \neg L) \wedge (i_{12} \rightarrow \neg L) THEN (o_{30} \rightarrow h_{30})$
- 31 $IF (i_1 \rightarrow VH) \wedge (i_2 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_3 \rightarrow M) \wedge (i_7 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_8 \rightarrow H) \wedge (i_9 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_{11} \rightarrow \neg L) \wedge (i_{12} \rightarrow \neg L) THEN (o_{31} \rightarrow h_{31})$
- 32 $IF (i_1 \rightarrow VH) \wedge (i_2 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_3 \rightarrow M) \wedge (i_7 \rightarrow VL) \wedge (i_8 \rightarrow VH) \wedge (i_9 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_{11} \rightarrow \neg L) \wedge (i_{12} \rightarrow \neg L) THEN (o_{32} \rightarrow h_{32})$
- 33 $IF (i_1 \rightarrow VH) \wedge (i_2 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_3 \rightarrow M) \wedge (i_7 \rightarrow VL) \wedge (i_8 \rightarrow H) \wedge (i_9 \rightarrow \neg VL) \wedge (i_{11} \rightarrow \neg L) \wedge (i_{12} \rightarrow \neg L) THEN (o_{33} \rightarrow h_{33})$
- 34 $IF (i_6 \rightarrow VH) \wedge (i_9 \rightarrow VH) THEN (o_{34} \rightarrow l_{34})$
- 35 $IF (i_6 \rightarrow VL) \vee (i_{10} \rightarrow VL) \vee (i_{11} \rightarrow VL) THEN (o_{35} \rightarrow h_{35})$
- 36 $IF (i_6 \rightarrow VH) \vee (i_{10} \rightarrow VH) \vee (i_{11} \rightarrow VH) THEN (o_{36} \rightarrow l_{36})$
-

Note: \rightarrow means IS, \wedge means AND, \vee means OR, \neg means NOT.

3.3.4 最终决策

根据所提出的自适应模糊神经方法获得的分类结果, 将由受邀决策组对得分最高的组进行分析和评估, 并选择合适的服务提供商组。

3.4 案例验证

根据提出的评估标准和开发方法, 通过应用实例和数值算例验证了开发系统的可行性和性能。最终结果证明了该方法在实际场景中的适用性。

3.4.1 应用场景

在本部分中, 将开发的系统应用于中国农业装备制造企业的维修服务网络的设计。在该示例中, 执行了开发的选择系统以供湖南省的服务提供商选择。如图 3.5 (a) 所示, 湖南省分为 14 个服务区。在每个服务领域, 一些公司愿意成为选定的服务提供商, 并为企业用户提供运维服务。在这种情况下, 决策者必须在每个服务区域中仅选择一个服务提供商, 并在湖南省建立维修服务网络。

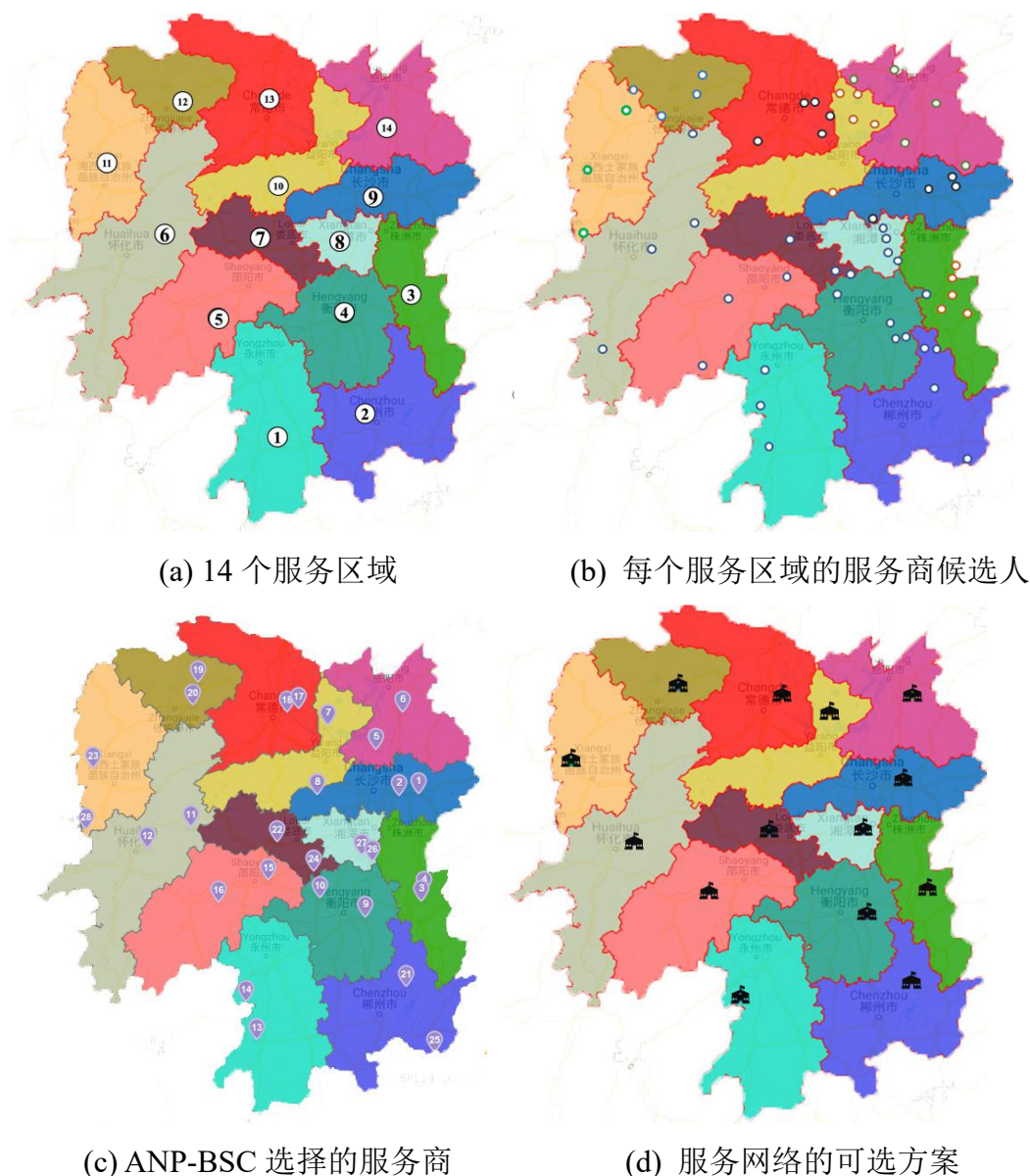


图 3.5. 产生备选方案的过程

为了获得每个服务提供商组的每个评估标准的价值,使用数据库系统挖掘提取并保存数据。在数据提取过程中,将根据可用信息分析每个服务提供商的空间数据。例如,从企业信息系统中获取农机故障的数量和位置以及该时间段的故障数据。

在之前的研究中^[134], ANP 和平衡计分卡 (BSC) 被集成并应用于评估每个服务领域中的服务提供商。因此,本文采用 ANP-BSC 在每个服务区域中选择最佳的两个服务提供商。图 3.5 (b), 图 3.5 (c) 和表 3-5 中显示了每个服务区域中的可选服务提供者。如图 3.5 (c) 所示,湖南省有十四个服务区,每个服务区有两个替代服务提供者。共有 16384 种替代方案,运维服务网络设计的一种可选

方案如图 3.5 (d) 所示。因此，为了提高所提方法的效率，随机选择 500 组作为训练数据。

表 3-5.服务提供商的详细信息

序号	单元区域	可选数量	详细信息
1	永州市	2	水口山镇，寿雁镇
2	郴州市	2	大坪镇，鲤鱼塘镇
3	株洲市	2	莲塘坳乡，酒埠江镇
4	衡阳市	2	石滩乡，洪市镇
5	怀化市	2	桥江镇，花桥镇
6	长沙市	2	淳口镇，春华镇
7	益阳市	2	草尾镇，灰山港镇
8	张家界市	2	江垭镇，阳和土家族乡
9	常德市	2	西洞庭管理区，石公桥镇
10	岳阳市	2	东塘镇，筲口镇
11	邵阳	2	桃红镇，陈家坊镇
12	湘潭	2	蛇埠镇，中路铺镇
13	湘西自治州	2	阿莱镇，道儿乡
14	娄底	2	龙塘镇，永丰镇

此外，为了提供系统所需的目标数据，邀请领先的专家和相关的利益相关者评估每组服务提供商的适用性。每个小组的质量排名得分在 1 到 5 之间：得分为 1 的小组表示非常不适合，得分为 5 的小组显示非常适合，得分为 2 代表低适用性，得分为 4 代表高适用性，得分为 3 分的组具有平均适合度。在分析过程中，所有专家都必须根据可用信息对小组的分数达成共识。表 3-6 中显示了 500 个服务提供商组的排名得分结果。

表 3-6. 500 组排名得分的结果

得分	描述	数量
1	非常不适合	47
2	较不适合	97
3	一般适合	240
4	较适合	93

3.4.2 自适应神经网络实验结果的评估

使用 500 组评估标准和相应的目标标签来训练分类器。为了评估所提方法的准确性，将分类器获得的相应标记与领先专家分析的结果进行比较。为了训练提出的分类器，本文采用了 N 折交叉验证方法。本文将 N 设置为 10，并在 Python (Python 3.7) 中开发了该方法，并在具有 Interi7、2.60GHz 处理器和 Windows10 操作系统的计算机上进行了实验测试。在每次交叉时，随机选择 90% 的训练数据并进行调整以调整隶属函数的参数，其余 10% 用于验证。训练和验证的迭代次数设置为 10。执行 500 组数据以训练分类器，总分类误差为 0.097，模糊矩阵如表 3-7 所示。

表 3-7.通过建议的方法获得的模糊矩阵

		分类输出				
		评分 1	评分 2	评分 3	评分 4	评分 5
标签	评分 1	0.042	0.006	0	0	0
	评分 2	0.006	0.121	0.012	0	0
	评分 3	0	0	0.485	0.012	0
	评分 4	0	0	0.055	0.158	0
	评分 5	0	0	0	0.006	0.097



图 3.6.湖南省最佳服务提供商群体

之后,将所有服务提供商组的评估标准导入经过训练的分类器,并且通过该方法获得的新组的排名得分为 2.12ms。基于所提出的方法获得的排名分数,由邀请决策组对排名分数为 5 的组进行分析和评估。根据第 3.2 节中定义的 12 个标准的三个评估标准(服务提供商的声誉、服务总成本、地域分布和服务范围)选择湖南省最佳服务提供商组。湖南省最优的服务提供者群体(以下简称方案 1)如图 3.6 所示,各地区选择的服务提供者如表 3-8 所示。

表 3-8.在每个区域中选择的服务提供商

序号	单元区域	服务商	序号	单元区域	服务商
1	永州市	寿雁镇	8	张家界市	阳和土家族乡
2	郴州市	鲤鱼塘镇	9	常德市	石公桥镇
3	株洲市	酒埠江镇	10	岳阳市	筲口镇
4	衡阳市	石滩乡	11	邵阳	陈家坊镇
5	怀化市	花桥镇	12	湘潭	蛇埠镇
6	长沙市	春华镇	13	湘西自治州	道儿乡
7	益阳市	草尾镇	14	娄底	永丰镇

3.4.3 讨论与比较

如图 3.6 所示, 在湖南省维修服务网络中选择的服务商更加均衡, 将评估标准与其他服务提供者群体进行比较, 选择的方案具有最低的服务成本。同时, 附近的服务提供商可以在更短的距离内提供几项运维服务。因此, 通过提出的方法, 基于 12 条评估准则成功地获得了维修服务网络中的服务提供商组, 提高了维修服务效率。

此外, 本文考虑了服务网络中服务提供商的联合选择, 并在此部分进行了一些没有协调决策策略的实验, 并进行了比较。在这些实验中, 采用 ANP-BSC^[134] 来选择每个服务区中最佳的服务提供商, 最终结果如图 3.7 和表 3-9 所示。与方案 1 进行了比较并进行了一些定量计算标准, 如表 3-10 所示。方案 2 的服务网络建设成本低于方案 1, 但服务成本和总交付成本大于方案 1。选择方案 2 中的服务提供商。固定资产越好, 则服务的建设成本就越低, 而方案 1 中的服务提供商之间存在更好的相邻关系, 因此, 其他服务提供商可以用更低的成本满足几项维护要求。

表 3-9. ANP-BSC 在每个领域获得的最佳服务提供商

编号.	服务区域	服务商	编号	服区域务	服务商
1	长沙	春华镇	8	邵阳	桃洪镇
2	株洲	酒埠江镇	9	常德	石公桥镇
3	岳阳	旗口镇	10	张家界	阳和土家族乡
4	益阳	草尾镇	11	郴州	鲤鱼塘镇
5	衡阳	冠市镇	12	湘潭	射埠镇
6	怀化	花桥镇	13	娄底	龙塘镇
7	永州	寿雁镇	14	湘西	克沙镇

注意: 方案 1 之间的差异以红色表示。

表 3-10. 方案 1 和 2 之间的比较

方案	服务成本 (元)	总交付成本 (元)	服务站建设成本 (元)
方案 1	9.20×10^6	3.75×10^4	2.14×10^5
方案 2	9.95×10^6	3.88×10^4	1.96×10^5



图 3.7. ANP-BSC 获得的最佳服务提供商组

为了验证所提出方法的准确性和效率，在其他研究中使用表 3-6 中所示的测试数据进行了几种众所周知的方法。特别是，将以下方法与所提出的方法进行了比较：不具有两类分类器的 ANFIS（以下称为 ANFIS），其他方法，表 3-11 显示了不同技术的分类精度，这些结果验证了所提方法的性能。

表 3-11. 使用不同技术的分类准确性

方法	总分类误差	分类标准差
提出的 ANFIS	0.097	0.312
ANFIS	0.145	0.382
线性贝叶斯分类器	0.105	0.325
二次贝叶斯正态分类器	0.152	0.390
K-近邻分类器	0.285	0.535
前馈神经网络	0.098	0.314

3.5 本章小结

本文重点研究了维修服务网络中服务商的选择，并提出了基于自适应模糊神

经网络的服务商选择方案。首先，本章定义了维修服务网络中进行服务商选择的十二项评估标准并开发了基于自适应模糊神经网络的方法，进行服务商网络的选择。最后，以湖南省的农机运维服务网络构建为例，选择湖南省 14 家服务提供商的最佳组合。实验结果表明，自适应模糊神经方法在维修服务网络中选择服务商是有效的。具有协同性运维服务商网络，是进行协同运维调度的基础。本章研究的服务网络的构建，为后文农机装备运维服务网络协同调度的研究和多主体利益分配，提供了基础。

第4章 基于运维服务网络的跨区协同调度研究

4.1 引言

本章针对传统运维服务调度中独立调度模型引起的服务能力不均,运维服务延滞的问题,提出基于运维服务网络的跨区协同调度模型。论证了跨区协同调度的必要性,并对跨区协同调度模型进行数学建模,利用了改进的粒子群算法对协同调度模型进行求解。对改进的粒子群算法与经典的启发式算法的 benchmark 进行了对比,验证本文算法在启发式算法的优势。以及用 CPLEX 构建精确求解模型,与改进的启发式算法进行数值实验对比,验证该算法与精确求解算法对比的优势。最后,用湖南省的真实数据为案例,进行协同调度模型与独立调度模型的对比,证明协同调度模型的优越性和可行性。

4.2 问题背景

运维服务涉及多个决策,例如确定每个服务站的服务技术人员数量,将客户需求分配给服务技术人员,以及确定维护过程的优先顺序,以便可以达到维护的主要目的。这些目标包括确保高水平的客户满意度,并最大程度地减少总的旅行和维护时间以及运营和运输成本。为了制定和实施维修计划流程,诸如车辆路径规划^[135-136]等规划方法和诸如启发式算法^[137]之类的优化方法受到了学者的越来越多的关注。

运维服务类型可以分为现场维护和定点维护。诸如拖拉机,卡车,火车,飞机,航空母舰和其他商用车辆之类的移动资产只能在指定的维护地点执行^[138]。然而,李辉等人^[139]确定,对于复杂产品,例如风力涡轮机和大型抛丸轮,现场服务在总服务中所占比例很高。现场服务的服务调度解决方案直接影响服务的可靠性和响应能力,进而影响客户满意度。维护和服务后勤支持是在资产的整个生命周期中提供高级别可用性和可靠性的基础^[138]。

农业机械的维护已被许多研究人员所忽视。实际上,维护对于确保农业机械的可用性和可靠性至关重要,因为在繁忙的农耕季节,其操作通常至关重要且具有很高的价值。制造商通常会建立中间服务站来提供维护,并根据行政区划确定每个服务提供商的服务区域^[140]。每个服务站对应于具有一定数量服务资源的特定区域,并且独立负责区域客户服务的交付。在这种情况下,服务产品可能取决

于资产（例如，拖拉机或收割机）在何处运营。独立的服务模式可以在一定程度上满足客户的服务需求。但是，由于维护活动不当，浪费了总维护成本的三分之一^[141]。因此，合理的维护计划对于维护机器以及降低运营和支持成本很重要^[142]。近年来，从各个角度对机械维护决策进行了大量研究^[143-146]。但是，在有关维护计划和决策的文献中，任务时间，类型和工期不确定的移动资产尚未得到充分解决^[138]。本章的研究主要是填补农机运维服务中运维服务计划和决策方面的空白。

4.3. 问题描述和数学模型

4.3.1 问题描述

组织决策力求找到决策问题的最佳或最令人满意的解决方案^[44]。我们考虑了分布式农业机械集群维护决策的实际情况，其中包括制造商存在多个服务站，通过共享服务请求和资源来优化协作维护交付计划，并旨在在降低成本的同时提高客户满意度。

考虑到客户的地理分布，制造商通常会提供中间服务站，以确保及时提供运维服务。每个服务站都有一定数量的服务资源，可用于特定区域内的维护交付。通常，服务资源包括具有不同技能水平的服务技术人员，服务车辆，维护工具，备件等。服务站以一天为周期安排维护资源的分配。

在独立服务模式，每个服务站都使用现有资源为该区域的客户提供运维服务。基于服务站的已知信息并考虑到资源和服务级别的限制，优化决策的目标是最大程度地降低服务成本并最大化客户满意度。但是，这种情况下的决定是基于有限的信息，不能保证整个制造企业的最大利益。此外，在独立的服务交付策略中，服务站之间经常会出现工作负载不平衡的情况，从而导致资源的大量浪费和客户满意度的同时下降。

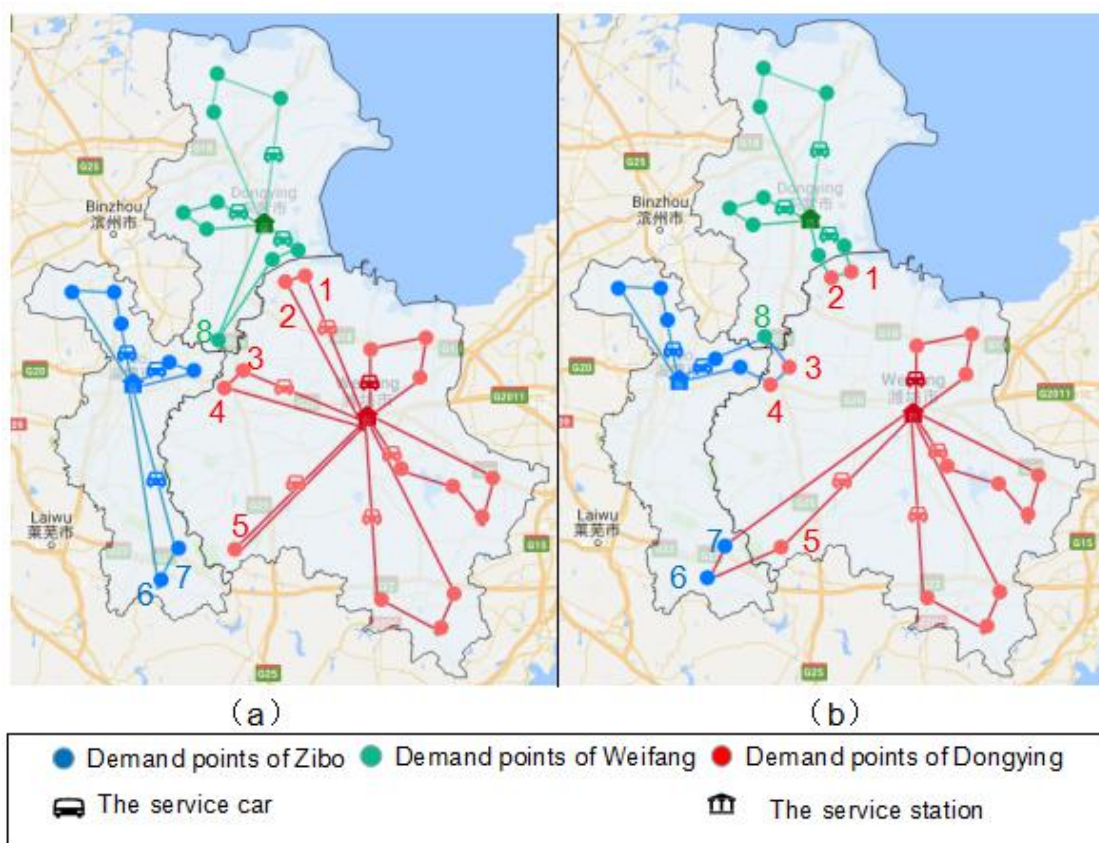


图 4.1. 不同服务站之间的协作服务示例

以地理分布的农业机械为例，图 4.1 显示了 1 号农机。在特定时间在中国潍坊，淄博和东营分布的 8 个服务站和 3 个服务站。图 4.1 (a) 显示了独立的服务模式，这意味着每个服务站只能为自己区域内的客户提供服务。

如图 4.1 (b) 所示，在协作服务模式，东营服务站为潍坊地区的农机 1 号和 2 号提供服务，潍坊的农机 3 号和 4 号为服务。淄博服务站为东营八号油站提供服务。同样，潍坊服务站为淄博的农机 6 号和 7 号提供服务。与独立服务模式相比，协作服务模式可以减少服务车辆的数量并减少总里程。

总之，在这项研究中，本文考虑了服务站之间的协作服务策略，优化了分布式机械的协作维护计划，该计划的特点是共享服务资源和来自合作区域的请求，同时考虑到诸如可用车辆数量和服务技术人员的技能水平，维护时间窗口以及维护时间等限制。此外，我们在合作服务站之间构建了利益分配机制，以确保联盟的稳定运营并最终提高其整体效率。

4.3.2 数学模型

农业机械维护交付问题的制定旨在为集群中的每个技术人员创建一系列客

户。制造商通过几个服务站为地理上分散的客户提供现场维护。每个客户可以由任何服务站的一名服务技术人员为您服务。服务技术人员乘车离开服务站，并在完成所有任务后返回其原始站。目标是在协作模式下获得最佳服务交付计划，同时要考虑固定费用，差旅费用，服务时间窗口和维护时间。

使用的符号和数学模型如下：

集合：

$I = \{1, 2, 3, \dots, m\}$ 所有服务站的集合。

$J = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 所有客户的集合。

$K = \{1, 2, 3, \dots, k\}$ 所有服务技术人员的集合。

S : $I \cup J$ 的子集

索引：

i : 服务站索引。

j : 客户索引。

k : 服务技术人员索引。

参数：

C_k : 派遣服务技术人员的固定成本 k 。

d_{ij} : 点 i 和 j 之间的距离。 $i, j \in I \cup J$ 。

SR_j : 客户 j 的技能要求。

SL_{kj} : 技术人员 k 服务客户 j 的技能水平。

$[ET_j, LT_j]$ 客户 j 的维修时间窗口。

PT_j : 基于客户的故障和历史相同的故障维修时间数据的客户 j 的标准运行时间。

WK_k : 技术人员的工作时间 k 。

$|K|$: 最大数量的维修技术人员。

C : 服务车辆的里程成本。

D : 一天中车辆的最大距离。

m : 服务站的最高数量。

n : 客户总数。

v : 车辆的行驶速度。

p_t : 惩罚功能，用于违反时间窗口。

p_s : 违反技术水平的惩罚功能。

p_d : 违反最大行驶距离的惩罚功能。

α : 代表超过最大距离限制时每公里的惩罚值。

β : 代表缺少时间窗口的单位时间惩罚值。

μ : 代表服务技术人员的技能不符合客户要求时的惩罚值。

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{technician } k \text{ moving from point } i \text{ to point } j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

变量:

a_{kj} : 车辆 k 在客户 j 处的到达时间

b_{kj} : 在客户 j 处车辆 k 的启动服务时间

Φ_k : 代表服务技术人员一天的工作强度系数。

问题的数学模型可以构造如下:

$$\min Z = \sum_{i \in I \cup J} \sum_{j \in I \cup J} \sum_{k \in K} \Phi_k C_k X_{ijk} + C \sum_{i \in I \cup J} \sum_{j \in I \cup J} \sum_{k \in K} d_{ij} X_{ijk} + P_t + P_s + P_d \quad (4-1)$$

约束:

$$\sum_{i \in I \cup J} \sum_{k \in K} X_{ijk} = 1 \quad j \in J \quad (4-2)$$

$$\sum_{j \in J} X_{ijk} = \sum_{e \in J} X_{eik} \leq 1 \quad \forall i \in I; \forall k \in K \quad (4-3)$$

$$\sum \sum X_{ijk} \leq |S| - 1 \quad \forall S \in I \cup J, 2 \leq |S| \leq n + m - 2 \quad (4-4)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} X_{ijk} = 0 \quad j \in I \quad (4-5)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} X_{ijk} \leq |K| \quad (4-6)$$

$$\Phi_k = \frac{|WT_k - 8|}{8} + 1 \quad (4-7)$$

$$4 \leq WT_K = \sum \sum X_{ijk} PT_j + \sum \sum \frac{d_{ij} X_{ijk}}{v} \leq 12 \quad k \in K \quad (4-8)$$

$$X_{ijk}(b_{ki} + PT_i + \frac{d_{ij}}{v} - a_{kj}) = 0 \quad \forall i, j \in S; k \in K \quad (4-9)$$

$$b_{kj} \geq a_{kj} \geq 0 \quad (4-10)$$

$$p_s = \sum_{j=1}^J \max(0, \mu * (SR_j - SL_{kj})) \quad (4-11)$$

$$p_d = \sum_{i \in I \cup J} \sum_{j \in I \cup J} \max(\alpha * (d_{ij} X_{ijk} - D), 0) \quad (4-12)$$

$$P_t = \beta \sum_{j \in J} \max(ET_j - T_j, 0) + \beta \sum_{j \in J} \max(T_j - LT_j, 0) \quad (4-13)$$

$$X_{ijk} \in \{0, 1\} \quad i \in I, j \in J, k \in K \quad (4-14)$$

如上所示，（4-1）是目标函数，这意味着服务成本最小，包括服务技术人员费用，服务车辆的行驶成本，违反时间窗的罚款成本，技术人员的水平以及最大行驶距离。等式（4-2）指出每个客户只能由一名技术人员服务，约束（4-3）表示每辆车都从一个仓库开始，并在同一仓库结束。约束（4-4）消除了子行程，即，它们禁止了与仓库无关的子行程。约束（4-5）表明，服务技术人员不能直接从一个服务站转到另一个服务站。等式（4-6）表明服务站派遣的技术人员数量少于服务技术人员的总数。约束（4-7）示出了代表技术人员 k 的工作安排的合理性的系数。如果技术人员 k 的工作时间为 8 小时，则系数为 1；如果技术人员 k 的工作时间少于 8 小时，将会造成人力的浪费；如果技术人员 k 的工作时间超过 8 小时，则需要增加加班成本。约束（4-8）表示技术人员 k 的工作时间限制为 4 到 12 小时。如果技术人员 k 的工作时间少于 4 小时，则通过加班工作将技术人员 k 的工作分配给另一名技术人员。约束（4-9）表示节点的访问顺序。如果车辆 k 直接从节点 i 行驶到节点 j ，则节点 j 的到达时间 a_{kj} 必须等于 $(b_{ki} + PT_i + d_{ij} / v)$ 。约束（4-10）确保车辆 k 在节点 i 处的启动服务时间晚于或等于其到达时间。约束（4-11）显示了技术人员级别违规的惩罚功能。约束（4-12）显示了违反最大行驶距离的惩罚函数。约束（4-13）显示了违反时间窗口的惩罚函数。约束（4-14）表示决策变量的范围。

4.4 算法实现

为了解决所描述的分布式和移动机械协同维护决策问题，本研究构建了一种用于协同服务交付的数学模型，并且由于研究问题的复杂性和多维 PSO（粒子群算法）编码的便利性，使用了一种改进的 PSO 解决以上数学问题。随后，使用协

作服务模式获得给定服务站的维护任务安排和优化的维护路线。

4.4.1 PSO 算法

机械维护中的服务资源调度是一个不确定的多项式（NP-hard）问题，提出了许多启发式算法来解决。遗传算法是应用最广泛的算法之一。已经证明整数编码是维护计划中最有效的编码方法^[147-148]。另外，可以通过为特定问题建立适应度函数来保证算法的可行性。另一种广泛使用的算法是 PSO^[149-152]，该算法主要用于电力系统机械的维护。该算法由 Eberhart, R. 和 Kennedy, J.^[153] 提出。与遗传算法相比，PSO 具有参数少，收敛速度快，易于实现的优点。

根据上述信息，我们首先执行粒子编码，然后再将数据放入数学模型中以设计适应度函数。随后，我们使用粒子的更新方法来应用迭代算法，并获得该问题的最优解。在协作服务交付期间，资源和服务请求在不同的服务站之间共享。我们使用协作决策方法来解决上述问题。这种方法可以从全局角度解决问题，并实现服务联盟的最低成本。

4.4.2 粒子编码

本文使用 $2n$ 维向量来表达 m 个服务站， k 个服务技术人员和 n 个客户任务的协作服务交付问题。粒子 i 的 $2n$ 维向量 X 分解为两个 n 维向量。粒子的第一维代表技术人员的编号；第二个维度代表每个客户的服务订单。每个维粒子速度矢量 V 对应于 V_r, V_t 。

为了方便说明起见，假设有四名服务技术人员；标记为 1 和 2 的那些属于服务站 A，标记为 3 和 4 的那些属于服务站 B。要求技术人员共同为十个客户（需求点）提供运维服务。假设粒子的位置向量为：

$$X = [4 \ 4 \ 1 \ 4 \ 3 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 4; 6 \ 1 \ 7 \ 4 \ 9 \ 5 \ 8 \ 3 \ 10 \ 2]$$

第一行中的数字代表技术人员的序列号。第二行中的数字表示需求点接受维护的优先级；数字越小，优先级越高。向量的列代表服务需求点的序号。表 4-1 显示了粒子的相应服务路线。

表 4-1 粒子对应的服务路径

服务站	服务工程师	路径
A	1	Station A→Point 6→Point 3→Station A
	2	Station A→Point 7→Station A

	3	Station B→ Point 8→Point 5→Station B
B	4	Station B→Point2→Point10→Point4→Point1→Point 9 →Station B

4.4.3 算法实现过程

尽管这里研究的问题是离散的，但是 PSO 是一种用于连续空间优化的方法。因此，不符合编码要求的意外粒子将出现在粒子更新过程中。因此，有必要对算法进行修改，使其适应本研究的问题。PSO 的概述如图 4.2 所示。

粒子的适应度函数等于公式（4-1）。我们将初始评估值视为粒子的历史最优值 P_{best} ，并将粒子群的当前最优值视为当前最优值 G_{best} 。

$$v(t+1) = \omega * v(t) + c1 * rand() * [P_{best}(t) - x(t)] + c2 * rand() * [G_{best}(t) - x(t)] \quad (4-15)$$

$$x(t+1) = x(t) + v(t+1) \quad (4-16)$$

等式（4-15）是粒子的速度更新公式。等式（4-16）是粒子的位置更新公式，其中 $c1$ 和 $c2$ 是加速因子，它们是正常数，是惯性权重， $x(t)$ 是粒子的当前位置。粒子的每个维都根据等式（4-15）和等式（4-16）更新。

本文解决的情况是整数情况（例如技术人员，客户等），但是在粒子更新过程中，使用了连续函数，因此将生成非整数。因此，我们在算法中使用的方法是将结果四舍五入为整数，如果结果超过生成的值且超过边界值，则我们将再次随机生成，直到结果合理为止。

Let P be the size of the PSO population.

Let $PSO[i]$ be the position of the i^{th} particle of the PSO population; this represents a candidate of the problem.

Let $fitness[i]$ be the cost function of the i^{th} particle.

Let V_p and V_t be the travel distance (or velocity) of the i^{th} particle.

$$V_p \in [-k+1, k-1] \quad V_t \in [-N+1, N-1]$$

Let G_{best} be an index to global best position.

Let $P_{best}[i]$ be the position of the local best position of the i^{th} particle.

Let $P_{bestfitness}[i]$ be the local best fitness for the best position of the i^{th} particle visited.

Step1(initialization): For each particle i in the population.

Step1.1 Initialize $PSO[i]$ randomly

Step1.2 Initialize $V[i]$ randomly

Step1.3 Evaluate $fitness[i]$ according to equation (1)

Step1.4 Initialize G_{best} with the index of the particle with the best fitness among the population

Step1.5 Initialize $P_{best}[i]$ with a copy of $PSO[i] \forall i \leq P$.

Step2: Repeat until the stopping criterion is satisfied.

Step2.1 Find G_{best} such that $G_{best} \leq fitness[i] \forall i \leq P$

Step2.2 For each particle i :

$$P_{best}[i] = PSO[i] \text{ if } fitness[i] < P_{bestfitness}[i] \forall i \leq P$$

Step2.3 For each particle i :

update $V[i]$ and $PSO[i]$ according to equation (15) and (16)

Step2.4 Evaluate $fitness[i] \forall i \leq P$ according to equation (1)

图 4.2. PSO 概述

4.5. 案例研究

4.5.1 案例描述

本节通过考虑中国湖南省的一个实际案例来分析跨区域协作服务的决策问题。在这种情况下，五个下属服务站（A，B，C，D 和 E）的 35 名技术人员被分配给同一制造商，可以为 138 个客户提供现场维护（1-138）。表 4-2 中显示了每个站点的技术员和客户编号，图 4.3 中显示了 138 个客户和 5 个服务站点的位置。图 4.3 中的小圆圈标记表示每个客户需求点的地理位置，房屋标记指示每个服务站的位置。相同颜色的点表示这些需求点由同一服务站提供服务。在这种情况下，维修技术人员行驶的总里程不得超过 600 公里。

表 4-2 每个工作站的技术员和客户编号

服务站	A	B	C	D	E
服务工程师	1-7	8-14	15-21	22-28	29-35
顾客	1-16	17-41	42-76	77-93	94-138

服务技术人员具有三个技能级别：级别 1，级别 2 和级别 3。表 4-3 中显示了每个技术人员的技能级别。

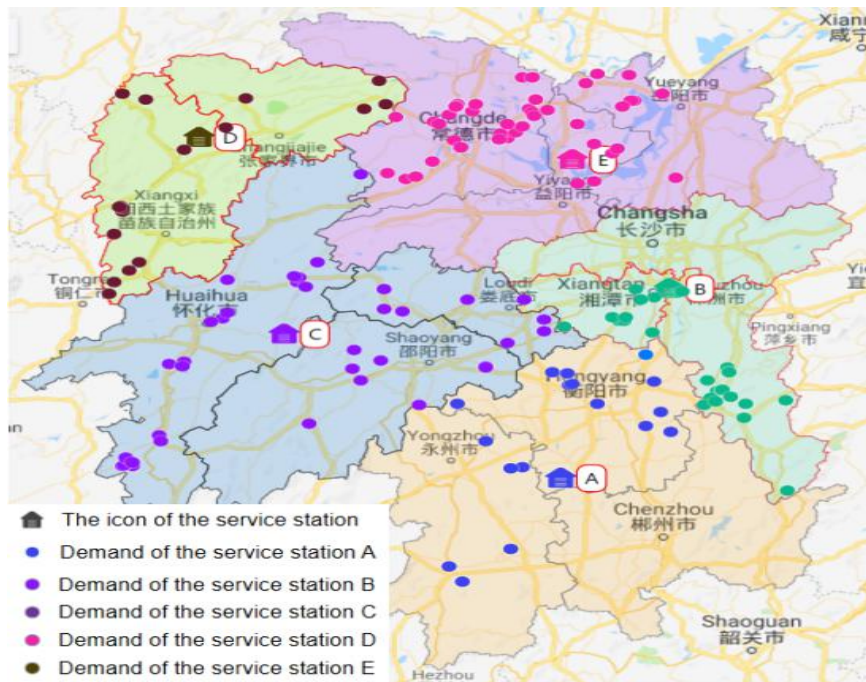


图 4.3.需求点的位置

表 4-3 各技术人员的技能水平

服务工程师	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
技能水平	1	2	3	3	2	3	2	2	2	3	3	2	3	2	2	2	1	3
服务工程师	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	
技能水平	2	3	2	2	2	3	3	2	3	2	1	2	3	3	2	3	2	

距离矩阵 $[d_{ij}]_{143 \times 143}$ 表示所有需求点与服务站之间的真实距离,如表 4-4 所示。此外,真实距离数据由百度地图计算,并且使用 Java 编写了特殊脚本,因此我们可以自动获取百度地图中的数据。在真实数据处理过程中,对一些需求点的地址进行了预处理,以确保每个城镇的地址都准确。只需几分钟即可获得 $[d_{ij}]_{143 \times 143}$ 的距离矩阵。

表 4-4 所有需求点与服务站之间的距离矩阵

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	143
1	0	126	145	202	17	35	132	132	118	140	...	369
2	126	0	70	60	131	125	234	234	219	242	...	471
3	145	70	0	22	151	144	293	313	294	301	...	559
4	202	60	22	0	207	201	283	305	283	301	...	548
5	17	131	151	207	0	201	138	138	123	146	...	375
6	35	125	144	201	0	0	138	145	131	146	...	382
7	132	234	293	283	138	0	0	119	97	45	...	350
8	132	234	313	305	138	145	119	0	20	94	...	276
9	118	219	294	283	123	131	97	20	0	72	...	297
10	140	242	301	283	146	131	45	94	72	0	...	321
...
143	369	471	559	548	375	382	350	276	297	321	...	0

从这些数据中，我们可以看到不同服务站每天提供的运维服务数量差异很大。例如，服务站 E 一天为 45 个客户提供运维服务，而服务站 A 仅提供 16 个服务。提供给客户的服务数量上的严重失衡证明了本文研究的重要性。使用粒子群算法计算具体情况，并获得服务交付计划。

4.5.2 协同服务模式下的维护决策

4.5.2.1 参数选择

根据以上信息，我们首先计算协作服务模式下的维护计划和成本。李等人^[52]显示了当粒子数是任务数的 6 到 8 倍时，搜索成功率可以达到 90% 以上。因此，我们将粒子总数 $P_{\text{size}} = 1000$ ，学习因子 $c_1=c_2=2$ ，将 T 设置为迭代，将 T_{max} 设置为最大迭代。该算法可以很容易地收敛到局部最优，但是由于所研究问题的复杂性，仍然不能确定最优解。本研究采用线性变化权重因子法。权重变化与迭代次数之间的关系如下：

$$\omega = \omega_{\max} - T * (\omega_{\max} - \omega_{\min}) / T_{\max} \quad (4-18)$$

其他参数的值如表 4-5 所示

表 4-5 相关参数值

参数	C	D	V	α	β	γ
取值	2	500km	80km/h	2	100	100

比较不同参数的结果，测试环境如表 4-6。测试结果如表 4-7。

表 4-6 测试环境

硬件环境	Intel i3 processor、2GB memory PC	
软件环境	Operating system	Windows 8
	Calculation software	MATLAB R2016a

表 4-7 不同参数条件下的优化结果

Change weight					
P _{size}	The interation	factor		Optimization	Calculation
	T_{max}	ω_{max}	ω_{min}	cost	time
1000	1000	0.90	0.05	64600	2023s
		0.85	0.10	64600	2056s
		0.80	0.15	64400	2041s
		0.70	0.25	64400	2034s
		0.60	0.35	64600	2019s
	2000	0.90	0.05	64600	4030s
		0.85	0.10	64600	4038s
		0.80	0.15	64400	4052s
		0.70	0.25	64200	4033s
		0.60	0.35	64400	4044s

	0.90	0.05	64400	10823s
	0.85	0.10	64200	10735s
	0.80	0.15	64200	10395s
5000	0.70	0.25	64200	10645s
	0.60	0.35	64200	10624s

4.5.2.2 与经典实例比较

从表 4-7 中可以看出, 当 ω_{\max} 为 0.70, ω_{\min} 为 0.25, 最大粒子迭代 $T_{\max} = 2000$ 时, 优化结果更好, 花费的时间更少。该算法的其余参数与第一部分中讨论的参数相同。PSO 算法是在 Cordeau 等人^[53]的著名示例中进行测试的, 这些示例具有最佳的解决方案(迄今为止)。该程序产生的结果以及它们与上述对应项的比较可在表 4-8 中找到。

表 4-8 PSO 算法的测试结果

序号	案例	PSO	已知最好结果	与 PSO 的差距
1	2a	1904.12	1763.07	8.00%
2	3a	2453.46	2408.42	1.87%
3	4a	3254.05	2958.23	10.00%
4	8a	2300.74	2150.22	7.00%
5	2b	1608.51	1500.48	7.20%
6	3b	2046.65	2020.58	1.29%
7	4b	2450.01	2247.72	9.00%
8	8b	1943.24	1809.35	7.40%
Average		2249.81	2107.26	6.76%

本文根据 5 个仓库和 139 个客户的情况选择 PSO 参数。示例 3a 和 3b 有 4 个仓库和 144 个客户。从表 4-8 中可以看出, 在 3a 和 3b 的情况下, 众所周知的最佳解决方案之间的差距分别为 1.87% 和 1.29%。表明 PSO 算法参数的选择和结果是有效的。

4.5.2.3 协作服务模式下的结果

通过在 MATLAB 中执行该算法, 我们得到了最佳粒子的最终迭代适应度值, 如图 4.4 所示, 图 4.5 显示了协作服务模式下的跨区域调度的路线。

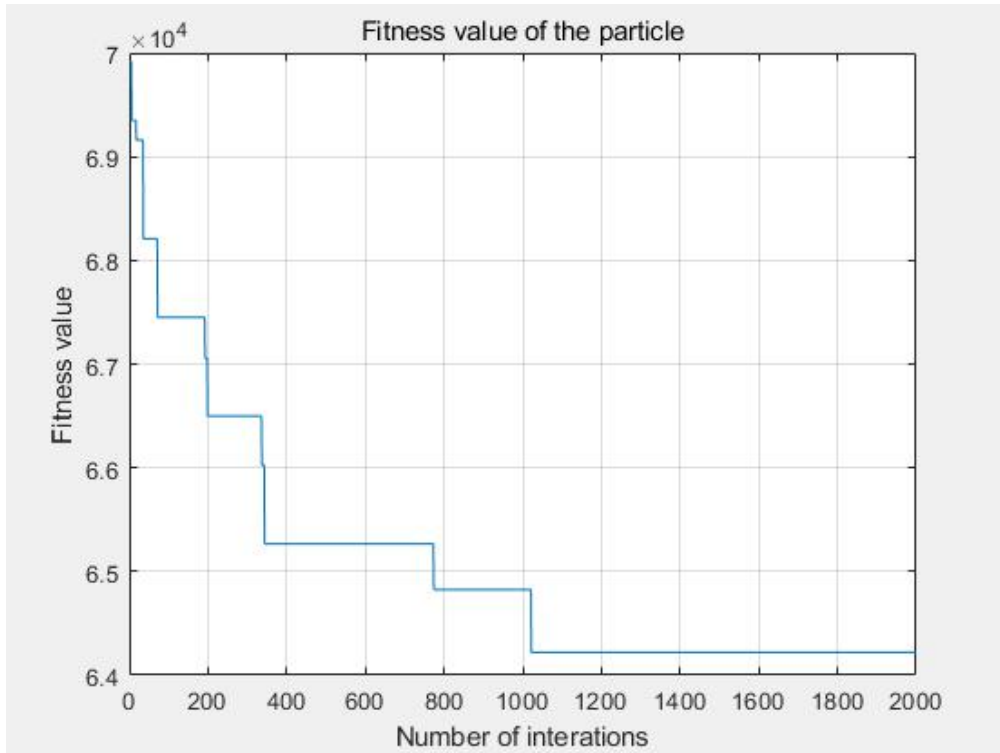


图 4.4.协作模式下最佳粒子的迭代适应度值

图 4.5 显示了协作服务模式下的跨区域调度的路线。根据最终优化的结果，总共有 8 条具有跨区域调度的路线。路线上的节点号表示服务顺序。从图 4.4 中我们可以看到，使用协作服务策略满足客户服务请求的总成本为 64,200 个单位。

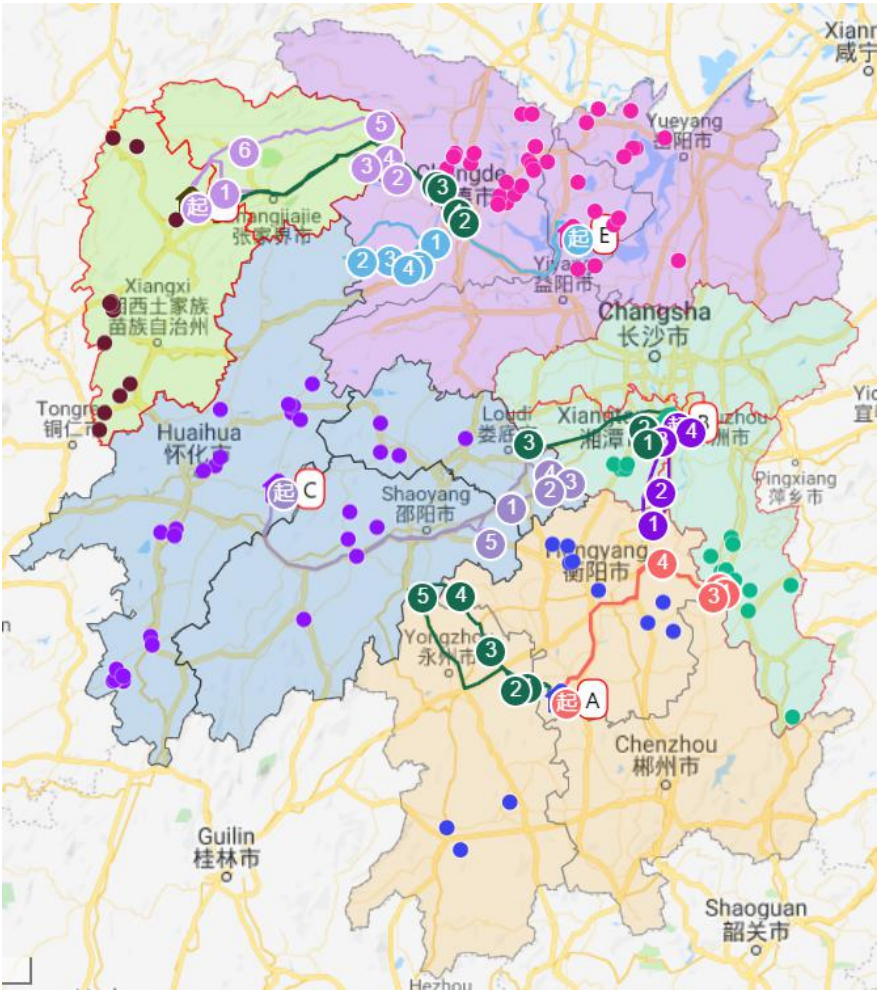


图 4.5 协作服务模式下的跨区域调度路线

4.5.2.4 与 CPLEX 对比

使用 MATLAB 实现了 PSO 启发式算法，并集成了 CPLEX 仿真优化过程。实验是在 Intel i5 处理器，2GB 内存 PC 和 Win 10 操作系统 PC 上进行的。表 4-9 中定义的符号用于评估特定问题实例的算法和 CPLEX 的性能。

表 4-9 比较中使用的符号定义

符号	描述
PSOOpt	Optimal value solved by PSO algorithm
Iter	Number of iterations
Tim	PSO calculation time
COpt	Optimal value solved by Cplex

Ctim	Cplex calculation time
CGap	$(PSO_{Opt}-CO_{Opt})/CO_{Opt} \times 100\%$

从表 4-10 中可以看出, 当 $S \times C$ 低时, CPLEX 解效果 (最优值) 要比启发式算法好, 但是启发式算法的计算效率 (解决时间) 要比 CPLEX 好。在这种情况下, 我们可以选择两种方法之一。随着 $S \times C$ 的增加 (从 20×30 到 35×100), CPLEX 和启发式算法获得的最佳值之间的差距小于 2% ($CGap < 2\%$), 但是启发式算法的求解时间为低得多。此外, 当技术人员和客户数量大于 35×120 时, CPLEX 无法在 15 小时内计算结果。因此, 在这种情况下最好选择 PSO 算法。

表 4-10 不同数量的客户 C 和服务技术人员 S 的实验结果

	$S \times C$	PSO _{Opt}	Iter	Tim(s)	CO _{Opt}	Ctim	CGap
1	5×20	1031	100	24	1001	49s	3.06%
2	10×20	2062	200	51	2007	423s	2.74%
3	10×30	3095	200	82	3023	987s	2.36%
4	20×30	6189	400	243	6111	2332s	1.29%
5	20×50	10316	400	278	10256	8972s	0.59%
6	30×50	15475	600	548	15206	12687s	1.77%
7	30×80	24761	800	812	24385	24562s	1.54%
8	35×80	33013	1000	1140	32533	39083s	1.48%
9	35×100	41267	1500	2106	40775	56478s	1.21%
10	35×120	44982	2000	2490	--	--	--
11	35×138	65484	2000	3241	--	--	--

4.5.3 独立模式下的维修决策

在独立服务模式, 每个服务站根据其服务资源对客户进行维护决策。我们将粒子数量 P_{size} 设置为需求点数量的大约 7 倍, 并将迭代次数 T_{max} 设置为 P_{size} 值的大约 3 倍。五个服务站的 P_{size} 和 T_{max} 如表 4-11 所示。

其他参数是第 4.2 节中介绍的参数。通过 MATLAB 计算得出独立模式下五个服务站的服务交付计划和服务成本。表 4-11 中还示出了独立服务模式下的每个服务站的成本, 图 7 示出了独立模式下的每个服务站的调度结果。

表 4-11 五个服务站的 P_{size} 和 T_{max} 值

Service station	A	B	C	D	E
P_{size}	120	200	225	120	300
T_{max}	400	600	700	400	1000
Cost	7200	11200	18500	7500	28500

通过将独立模式的结果与第 4.5.2 节中讨论的协作模式进行比较，协作模式的总成本计算为 64,200 个单位，这明显低于独立模式中五个服务站的 72,900 个单位的总成本。

另外，由于服务站 C 和 E 承担过多的任务负载，并且服务技术人员无法在一天之内完成分配的任务，因此适合性值将在独立的调度中受到影响，这会导致等待时间延长和客户满意度降低。服务站 A, B 和 D 都有闲置的服务资源，导致浪费。但是，协作调度可以平衡每个服务站承担的任务，为客户提供及时的服务并提高客户满意度。

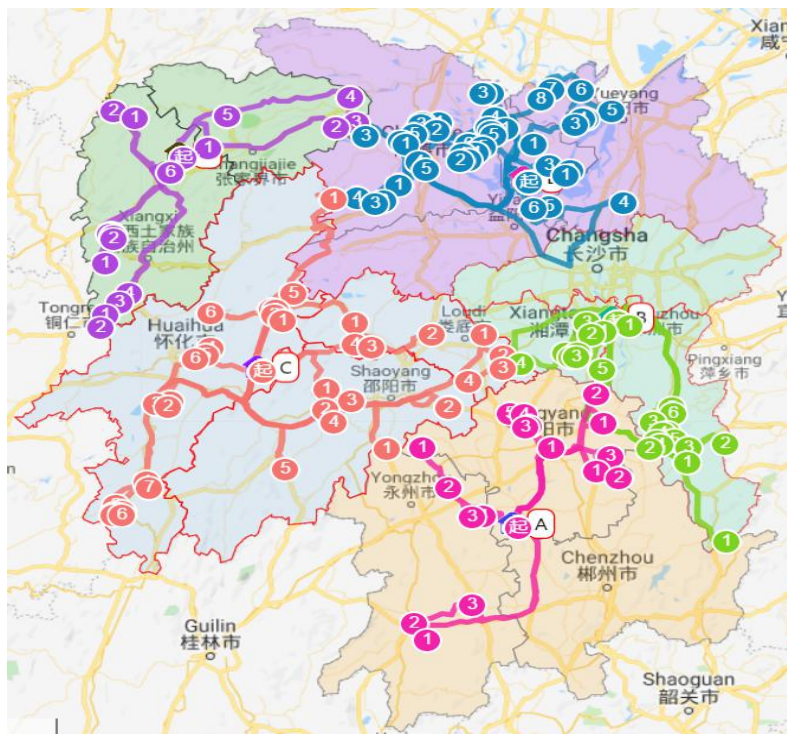


图 4.6 独立模式下每个服务站的调度结果

4.5.5 协作模式和独立模式之间的调度结果比较

表 4-12 显示了协作模式和独立模式之间的调度结果比较。

表 4-12 两种方式调度结果比较

调度模式	服务站	成本	服务里程	工程师数量	每个工程师平均服务里程	服务的顾客数量
Collaborative service mode	A	11014	1659	5	332	19
	B	12348	1860	5	372	22
	C	14245	2146	5	429	35
	D	11600	1747	5	349	22
	E	14993	2258	7	323	40
	Total	64200	9670	27	358	138
Independent service mode	A	7200	1214	5	243	16
	B	11200	1897	6	316	25
	C	18500	2656	7	379	35
	D	7500	1290	4	323	17
	E	28500	3415	7	488	45
	Total	72900	10473	29	361	138

通过协同调度，可以平衡每个站点服务技术人员的行车里程，从而减少所需服务技术人员的总数和总行驶距离。

从服务技术人员的数量和单个技术人员的平均里程的角度来看，协作模式显然要好于独立模式。

从成本的角度来看，与独立模式相比，协作模式可以节省大约 12% 的总成本。而且，对于每个站点的成本，协作模式比独立模式更加平衡。以在协作模式下存在最大成本差距的站点 A 和站点 E 为例，协作模式的成本差距为 3979，而在独立模式下的成本差距为 21300。为了保持联盟的稳定性，盟友之间的成本分配越平衡越好。协作模式为确保联盟成本分配的公平合理提供了更好的手段。

4.6 本章小结

在本章中，我们研究了在协作服务模式下的分布式农业机械集群的协作维护决策问题，并清楚地显示了分布式分布式协作调度与传统独立调度相比的特点。首先，我们为协作维护决策过程构建数学模型。然后，我们设计一个 PSO 来解

决数学模型并获得服务交付计划。结果表明，协同服务模式可以满足需求，降低联盟中服务实体的成本，并最终确保参与各方的利益。通过将协作服务模式与独立服务模式进行比较，我们证明了前者的优越性。这项研究为地理分布式机械维护提供了一种新的服务模式概念，并为制定服务交付计划提供了一种实用的方法，该方法对维护机械集群具有重要意义。

第5章 多主体协同作业的成本分配方法研究

5.1 引言

两个或多个服务商之间的跨区服务或者运输合作正成为分布式装备高效运维服务的重要方法,以更低成本或更大的灵活性来完成运维服务。为了解决协同调度研究中构建的运维服务网络联盟,在进行协同运维时出现的利益/成本分配的问题。本章分析了多主体协同运维服务中利益分配问题,总结了利益分配的方法,对不同利益分配方法的性能进行了比较,得出了适用于农机装备集群运维服务中的利益分配方法——Shapley 值法。并以 Shapley 值法对跨区协同调度中的主体,进行了利益分配,以保证运维服务网络联盟的公平性和稳定性。

5.2 多主体利益分配经典方法

5.2.1 Shapely 值理论

Shapley 值是一种解决方案概念,可为我们提供成本分配问题的独特解决方案。计算下面所述的公式表示要分配给参与者 j 的成本,并且基于以下假设:联盟是依次将参与者加入该联盟而形成的。当每个参与者进入联盟时,都会为其分配边际成本,这意味着参与者的进入会增加其进入的联盟的总成本。参与者通过此方案分配的成本取决于参与者输入的顺序。如果以完全随机的顺序输入参与者,则 Shapley 值仅是参与者的平均边际成本。分配给参与者 j 的成本的计算公式如(5-1)所示:

$$X_j = \sum_{S \subseteq N: j \in S} \left[\frac{(n-|S|)!(|S|-1)!}{n!} \right] \cdot [C(S) - C(S \setminus \{j\})] \quad \forall j \in N \quad (5-1)$$

Shapley 值基于 Shapley 在 1953 年制定的四个公理。这些公理表示,根据该解决方案概念计算的成本分配满足效率,对称性,虚拟属性和可加属性。对称性意味着,如果两个任意参与者 i 和 j 对于不包含 i 和 j 的所有联盟具有相同的边际成本,则分配给这两个参与者的成本必须相等。虚拟属性是指,如果参与者是虚拟人,从某种意义上说,他既不会帮助也不会损害他可能会加入的任何联盟,那么他的分配成本应为零。可加性表示,给定三个不同的特征成本函数 c_1, c_2

和 c_1+c_2 ，对于每个参与者，基于 c_1+c_2 分配的成本必须分别等于基于 c_1 和 c_2 的分配成本之和。对于这些公理的精确表述，我们参考了 Shapley (1953) 的研究。Shapley 价值为我们提供了独特的成本分配方法。Shapley 值是唯一满足上述四个公理的值。

5.2.2 The nucleolus (核仁) 法

Nucleolus(核仁)法最初由 Schmeidler 以利益博弈的形式定义，将成本分担博弈表示为 (N, C) 。当 X 加入联盟 S 时，联盟 S 的剩余满意度定义为 $\varepsilon(X, C, S) = C(S) - \sum X_j$ 联盟 S 的剩余满意度越大，意味着更多的节省，联盟 S 越令人满意。对于博弈 (N, C) ， X 的剩余满意度向量为 $e(x, C) = (\varepsilon(x, C, S_1), \dots, \varepsilon(x, C, S_p))$ ，其中，集合 S_i 表示在联盟 $K \setminus \{N\}$ 中，并且 $p = 2^n - 1$ 。

成本分担博弈 (N, C) 的核仁 N 的定义如等式 (5-2) 所示：

$$N = \{x \in X : \theta(e(x, C)) \geq \theta(e(y, C)) \forall y \in X\} \quad (5-2)$$

其中 $\theta(e(x, C))$ 是矢量，根据降序排列多余向量的分量得出。核仁法的特征是它是独特的，只要它是非空的，它总是属于核心。核仁的计算要比基于公式的方法复杂一些。通过核仁的计算，可以确定联盟中的成本分配，避免出现严重的不均衡情况，是成员的合理要求得到满足。以达到最大程度降低联盟的不满意度。

核仁存在并且是唯一的。核仁满足对称公理和伪公理。如果核心不为空，则核仁在核心中，即它表示稳定的成本分配。前核仁被定义为核仁，但是不需要满足个人理性。如果博弈是单调的，那么前核仁满足个人理性。如果核心是非空的，则前核仁也是稳定的。

5.2.3 比例方法

比例方法是为每个参与者 j 分配总成本 $C(N)$ 的份额 α_j ，即 $X_j = \alpha_j \cdot C(N) \quad \forall j \in N$ 。可以根据不同的标准定义份额值 α_j 。最简单的方法是

“平等主义”方法^{[111][115][124][125]}，该方法将所有参与者的成本均分，即 $X_j = C(N)/n \quad \forall j \in N$ ，定义权重 α_j 的其他一些常见标准是需求量^{[86][92][112][115][126]}和独立成本^{[96][125][106]}。

5.2.4 基于可分离和不可分离成本的分配

Tijs&Driessen 基于要分配的总成本分为两部分的事实，提出了成本分配方法：可分离成本和不可分离成本。首先基于此思想的方法向每个参与者分配他的可分离成本，然后根据给定的权重在参与者之间分配不可分离的成本。

相对于大联盟，可分离成本等于 $m_j = c(N) - c(N - \{j\})$ ，例如，在参与者 j 的边际成本中，剩下的不可分割的成本就是 $g(N) = c(N) - \sum m_j$ 。根据权重的选择，有不同的方法；最直接的两个方法是等额费用法（ECM），它分配不可替代成本平均法，以及使用权重 $W_j = c(\{j\}) - m_j$ 的替代成本避免法 ACAM，表示通过加入大联盟而不是单独运营为每个参与者做出的节省。

5.3 不同利益分配方法性能比较

由于成本分配方法种类繁多，那如何确定哪种方法“更好”。总的来说，这个问题没有确定的答案，成本分配方法的优劣取决于针对特定问题定义的绩效指标及不同问题的追求的侧重点，如联盟稳定性，客户满意度最大、总成本最小、联盟成员满意度最高等。本文主要研究跨区协同运维调度问题，因此关于成本分配重点关注联盟的稳定性和可持续性。下文将针对稳定性和可持续性进行分析。

5.3.1 联盟稳定性和实现方法

成本分配方法所需满足的主要标准是“稳定性”。在这种情况下，核心（The core）是文献中最常用的概念之一，包括 Tamir（1989）^[154]，Fang 和 Cho（2014）^[118]，Nguyen 等（2014）^[126]，Vanovermeire 和 Sorensen（2014b）^[119]，以及 Dai 和 Chen（2015）^[105]。

协作运输中还研究了核心的其它放宽约束的情况。其中包括 ε -approximation 核心，它通过放宽合理性的约束得到 ε 。另一个版本是 α -core，它在一定程度上放宽了效率约束。Flisberg 等人研究了另一个放宽约束的情况，称为“semicore”^[106]。

尽管在理论上，在稳定性方面半核比全核弱，但是它更实用，因为它只需要

计算 $2n+1$ 个联盟的特征函数值，而不是核心所需的 $2n-1$ 。Ozener 等人（2013 年）^[155]，开发了“近似稳定性评估”程序，基于子集采样并仅对这些采样子集测试联盟的稳定性。子集根据地理邻近性对样本进行抽样，以选择可能在其成员之间找到高度协同作用的联盟。Ozener（2014）报告说该程序被证明是非常有效的并大大减少了计算量^[103]。

与成本分配的稳定性有关的另一个问题是，应组成哪些联盟以及联盟形成的顺序。Wang 等人（2015）研究了这个问题的严格单调路径^[120]。Audy 等。（2012a）研究从博弈中的领先者的路径开始，并使用子博弈完美纳什均衡的解决方案来确定最终路径^[96]。Guajardo 和 Ronnqvist（2015）同时处理了成本分配问题和联盟结构问题，其核心概念不仅包括结构中属于同一联盟的参与者的内部稳定性，还包括其他联盟的参与者的内部稳定性^[105]。Guajardo 等人（2015 年）使用几种成本分配方法作为规定的规则研究此问题，并验证合理性约束是否成立或被违反^[130]。

5.3.2 不同成本分配方法适用情况

Shapley 值激励参与者更灵活更积极的参与协作。但是一般而言，Shapley 值不一定属于核心（例如运输规划中的示例，请参见 Guajardo 等人^[105]，2015）。在 Vanovermeire 和 Sorensen（2014b）中，与 Shapley 值相比，核仁和 ECM 对柔性伙伴的影响最大^[119]。当核心为非空时，核仁始终位于核心中。但是，核仁也存在一定的限制，因为它可能不满足某些理想的特性，例如 Massol 和 Tchung-Ming（2010）要求的合计中的单调性^[115]。

衍生自核仁的其他替代概念是 modiclus（由 Sudholter，1997 年引入，称为“修饰的核仁”^[156]）和 SM-核仁（Tarashnina，2011 年）。这两种方法考虑到所谓的阻断能力^[157]。Guajardo 等人（2015 年）以森林运输为例，对这些方法进行了实证研究，发现位于中心地带的玩家往往会受益于核仁，而核仁的成本要低于改良核仁或 SM 核仁^[80]。Modiclus 和 SM-nucleolus 倾向于纠正对联盟外围参与者的相对重要性。作为一个整体，更多的联盟外围参与者对于协作仍然至关重要，尽管它们彼此之间几乎没有协作的机会。

比例成本分配方法易于与从业人员沟通。但是，除了在 Nguyen 等人（2014）的研究中实验结果较好之外^[126]，没有更多的文献支撑该方法。例如，Ozener 和 Ergun（2008）发现，对于比例成本分配，在所有测试实例中，稳定性偏差的百

分比约为 25%，这表明协作稳定性存在大问题^[88]。比例成本分配方法具有大量不稳定子集和极高的最大不稳定性值。平均最大不稳定性百分比值的最大值约为 35%，并且该最大值的最大值接近 50%。在同一分析中，基于 Shapley 值成本分配方法则明显优于其他方法。

总的来说，本文在文献研究中发现，传统成本分配方法尽管出现在大量文献的数值实验中，但由于使用场景的多元和复杂，对于成本分配方法的优劣并没有形成广泛的共识。但是，Shapley 值是公认的兼顾稳定性和公平性的成本分配方法，本文后续关于多主体协同调度中的研究中，关于成本分配的方法将采用 Shapley 值。

5.4 案例分析

5.4.1 根据修改后的 Shapley 值进行成本分配

本章案例以上一章研究的协同运维调度案例为基础，在对协同调度的结果进行利益分配，具体如下。

协作服务联盟形成后，服务站共享需求和资源，并专注于旨在降低维护过程的服务成本的运维服务交付计划。利益分配是协作服务联盟稳定的关键，利益的合理分配对协作实体的积极性，促进协作水平具有重要影响。本研究中的收益分配可以转换为服务成本分配。成本分配可以通过多种方法进行评估。常用的方法之一相对简单，并且根据联盟中要分配的捐款数量或比例来执行。基于游戏的分配方法相对先进且复杂。Shapley 值由 L. S. Shapely 于 1953 年提出，旨在解决多人合作游戏的问题。由于这种方法是唯一可以考虑联盟效率，对称性和可加性的方法，因此在本研究将其用于在主要实体之间分配协作服务成本。

设 N 为协作服务参与者的集合，称为一般联盟，而 S 为 N 的子集（ $S \in N$ ）。现在将 $V(S)$ 定义为联盟的特征函数。这里，合作服务实体的联盟是合作博弈，联盟 N 中的所有非空子集 S 和 T 都是联盟。Shapley 价值成本分配给联盟每个成员的公式如下：

$$\varphi_i = \sum_{s \in N} \frac{(|S|-1)!(n-|S|)!}{n!} [V(S) - V(S - \{i\})] \quad (5-3)$$

其中 S 是包含 i 的联盟中子联盟的总数， n 是整个协作联盟中成员的数量， $V(S)$ 是每个子联盟的结果，例如子联盟的生命力值，而 $V(S-i)$ 表示联盟成

员 i 不参与该次联盟的次联盟的结果。

5.4.2 基于 Shapley 值修改的成本分摊

当使用基本的 Shapley 值分配收益时，在联盟中具有相同职位的参与者将分配相同的成本。然而，实际上，不同服务站的成本分配是一个复杂的问题，并受许多因素影响。例如，服务站的资源投入，工作量和社会环境因素都会对成本分配产生影响。在机械维护过程中，不同协作服务站的资源使用情况是不同的。因此，通过主要考虑不同服务站的资源输入来修改 Shapley 值，我们进行了合理的成本分配。

服务技术人员是机械维护过程中的关键服务资源。因此，我们将服务技术人员视为确定服务站资源输入的影响因素。第 4 章中讨论的协作服务交付计划说明，服务站 A、B、C、D 和 E 的协作机器维护过程中涉及的服务技术人员的数量是相同的。因此，对于这些服务站，我们将服务站的服务里程作为其资源投资评估指标。服务技术人员的服务里程（其中 d_a 、 d_b 、 d_c 、 d_d 和 d_e 分别是服务站 A、B、C、D 和 E 的服务里程）与总服务里程（以 d_t 表示）之比。协作服务模式下的服务被认为是服务站的资源投资。则服务站 A 的资源投资评价价值如下：

$$R_a = d_a / d_t \quad (5-4)$$

同样，服务站 B、C、D 和 E 的资源投资评估值分别为 R_b 、 R_c 、 R_d 和 R_e 。表 5-1 显示了在实际案例研究中获得的服务站 A、B、C、D 和 E 的服务里程。

表 5-1 各协作服务站的服务里程

服务站	服务里程	资源投资比例
服务站 A	2765	0.1716
服务站 B	3100	0.1923
服务站 C	3576	0.2219
服务站 D	2912	0.1807
服务站 E	3764	0.2335
协同服务联盟	16117	1

从表 5-1 中，我们可以得到服务站的资源投资评估价值矩阵， $R = \{0.1716, 0.1923, 0.2219, 0.1807, 0.2335\}$ 。服务站的成本分配校正因子 k_i 如下：

$$k_i = \frac{(|S|-1)!(n-|S|)!}{n!} - R_i \quad (5-5)$$

然后，第 i 个联盟成员的实际成本分配如下：

$$\varphi'_i = \varphi_i + k_i \varphi_i = \varphi_i (1 + k_i) \quad (5-6)$$

根据等式 (5-4)，服务站 A, B, C, D 和 E 的成本配额分别为 11014、12348、14245、11600 和 14993。

5.5 本章小结

为了解决协同调度研究中构建的运维服务网络联盟，在进行协同运维时出现的利益或者成本分配的问题。本章分析了多主体协同运维服务中利益分配问题，总结了利益分配的方法，对不同利益分配方法的性能进行了比较，得出了适用于农机装备集群运维服务的中的利益分配方法--Shapley 值法。并以 Shapley 值法对跨区协同调度中的主体，进行了利益分配，以保证运维服务网络联盟的公平性和稳定性。

第 6 章 农机装备运维服务调度决策系统

6.1 引言

基于本文提出的运维服务调度决策研究和对国内某农机制造企业的实际调研,开发了农机装备运维服务系统。本系统主要针对农机运维服务中的调度问题,主要包括服务商管理、需求管理、调度决策等多个模块。本章首先对农机装备运维服务的系统框架和总体设计方案进行描述,然后对各个模块的相关功能界面进行展示。本文开发的系统为企业提供了更智能、更节约运维服务成本的运维服务调度方案,帮助企业提高农机装备运维服务调度智能化的水平。同时,也为其它动态分布式装备集群的运维服务提供参考借鉴。

6.2 系统总体设计

该系统的使用者是装备制造企业的管理层、运维服务调度员、服务商等。该系统能帮助企业管理者对所有参与运维服务的主体进行管理,包括运维服务商、服务工程师、农机主等。并且通过在运维服务中积累的数据,比如客户需求,故障类型,解决方案、运维反馈等,进行整理挖掘,故障归因等,为制造企业的设计、制造、销售、运维等提供一手信息。

企业管理者通过对运维服务商的维修信息进行整理,可以作为服务商评价指标之一,通过历史维修信息,也可以为将来比较准确的故障预测积累数据。服务商的调度决策,主要根据客户的需求,匹配对应技能的服务工程师,配置备品备件,为客户提供服务。当出现需求激增,区域内服务商的能力不足以满足客户时,本系统也可以进行联合协同运维调度,保证整个服务网络运维成本的最小化以及客户满意度最大化。

6.2.1 系统层次结构

本系统采用 B/S 结构,整体分成三层架构,具体如图 6.1 所示。农机装备运维服务决策系统,包括界面展示层、业务逻辑层以及数据支撑层。

其中,数据支撑层提供了基础数据,比如客户信息(农机主信息、农机装备

信息等）、运维服务资源（服务工程师、服务站、备品备件等）、历史维修记录信息、保修单信息等。

系统功能实现的关键是业务逻辑层，系统的业务逻辑，业务流程，调度规则等由业务逻辑层实现。当客户发布运维服务需求时，系统会接收到客户基础信息以及装备的故障信息，运维服务人员会根据服务流程对客户的需求进行处理，远程视频诊断，指导客户自主维修或者进行调度决策派出服务工程师对客户进行现场运维。该运维服务系统的业务逻辑层，需要实现基础数据的增删改查，完成数据的收集提取运用等，并进行调度决策。

界面展示层主要作用是为用户提供人机交互友好、信息简洁有效，可视化、图片化的界面。方便用户对数据进行输入，处理、输出。人机友好的界面能有效提供工作效率。

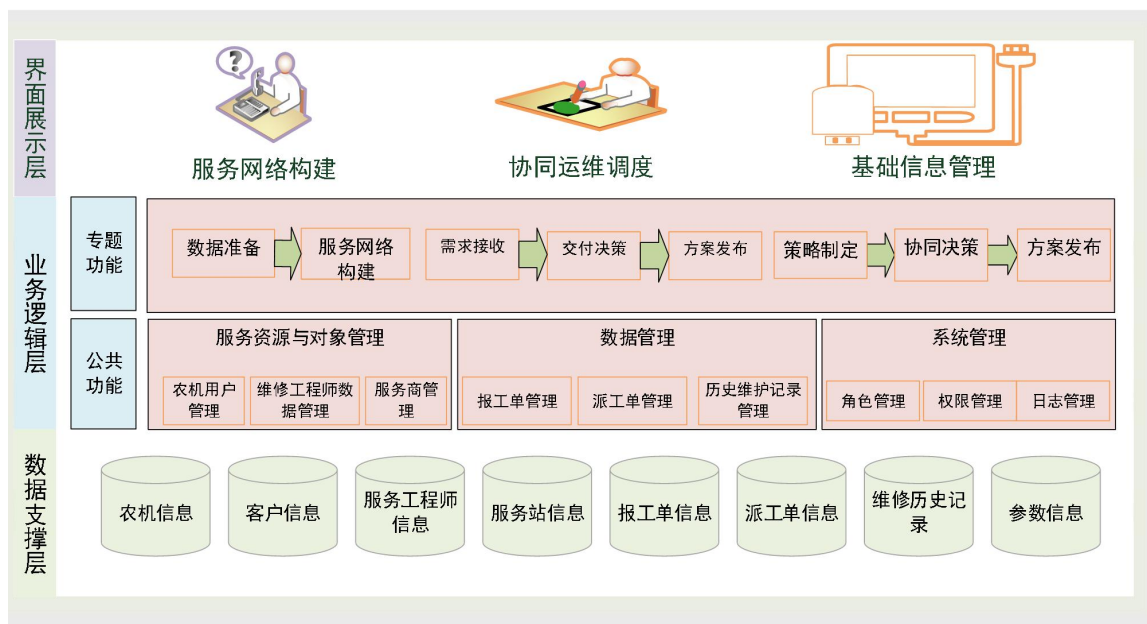


图 6.1 农机装备运维服务决策系统架构图

6.2.2 系统开发环境

(1) 开发框架

本系统采用锐道开发框架（Bstek Development Framework 简称 BDF），BDF 是一套以 Dorado 7 为前台基础，以 Spring3 为后台基础的企业应用开发框架，提

供诸如 WebService 发布与调用、数据库维护、任务调度、多数据源切换、SQL 审计、等企业应用常见的功能模块。BDF 的前后台是分离的，前后台相互脱离单独运作。BDF 以松耦合的模式进行开发，各个功能模块无依赖关系，用户可以根据自身需求添加 BDF 中相关的功能模块。图 6.2 展示了 BDF 开发的系统架构。

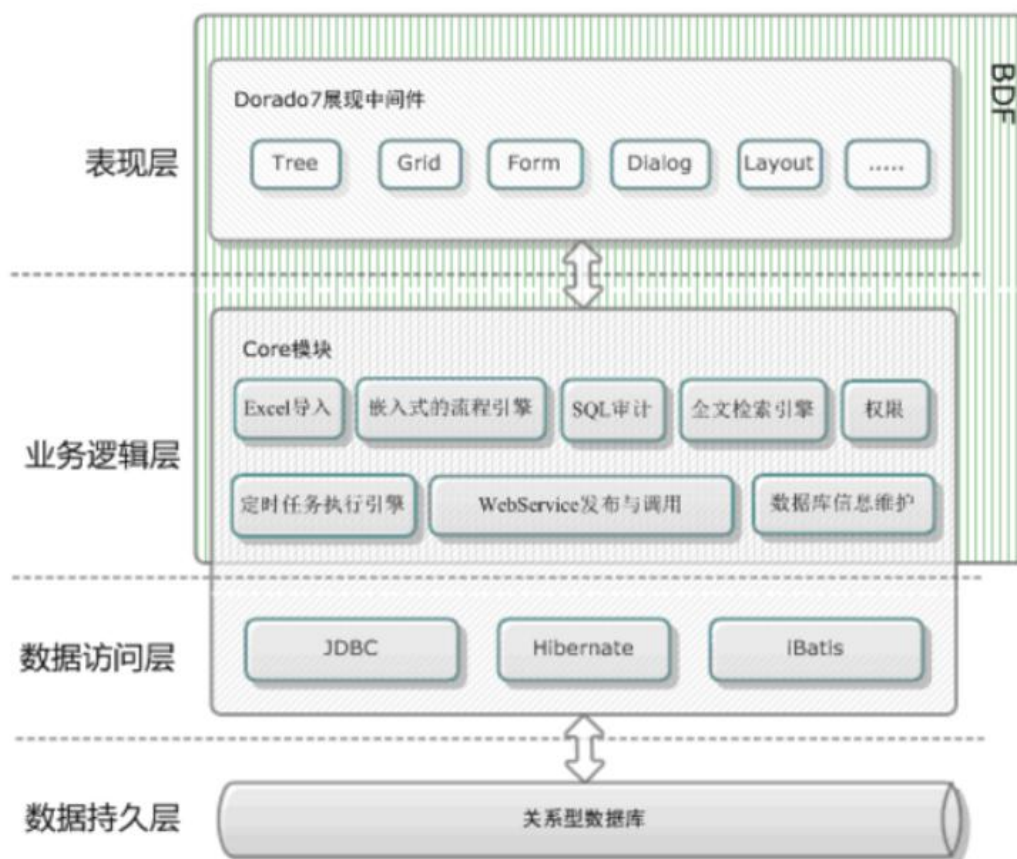


图 6.2 BDF 开发框架

(2) 开发语言

本系统前端采用 Java Script 和 JSP 相关技术，可通过 Dorado7 的相关控件实现界面展示。系统后端采用 Java 语言和 matlab 语言，matlab 实现智能算法的封装以及相关的数据处理，java 语言实现业务逻辑处理、数据持久化等功能，数据处理的结果通过“matlabcontrol.jar”工具包实现语言的相互转换。系统与数据库交互与前后端之间的交互分别采用 JDBC 技术和 Ajax 技术。

(3) 数据库

MySQL 是开源数据库，并且以简单、可靠、高效著称。同时，该数据库是关系型数据库，方便系统的开发，数据库的构建，并未软件后续的改进和优化提供了可能。因此，本系统将采用 MySQL 作为数据库。

6.2 功能设计及主要界面

6.2.1 系统功能设计

本系统功能主要包括服务网络构建（本文侧重服务商的选择）、独立运维调度系统，协同运维调度系统（包含利益分配）、基础信息管理。服务网络的构建是制造企业完成的战略层级的规划，作为企业为客户提供运维服务的抓手；独立运维调度系统，是在农闲时，运维服务商具备足够的服务能力为区域内的顾客提供服务时的调度系统；协同运维调度系统（包含利益分配），是当出现需求激增时，为了及时为客户提供更高效的运维服务时，采用的调度系统。基础信息管理包含对于服务对象的管理、系统管理、服务资源管理，主要实现的功能为对数据的增删改查的功能。系统功能模块设计如图 6.3 所示。

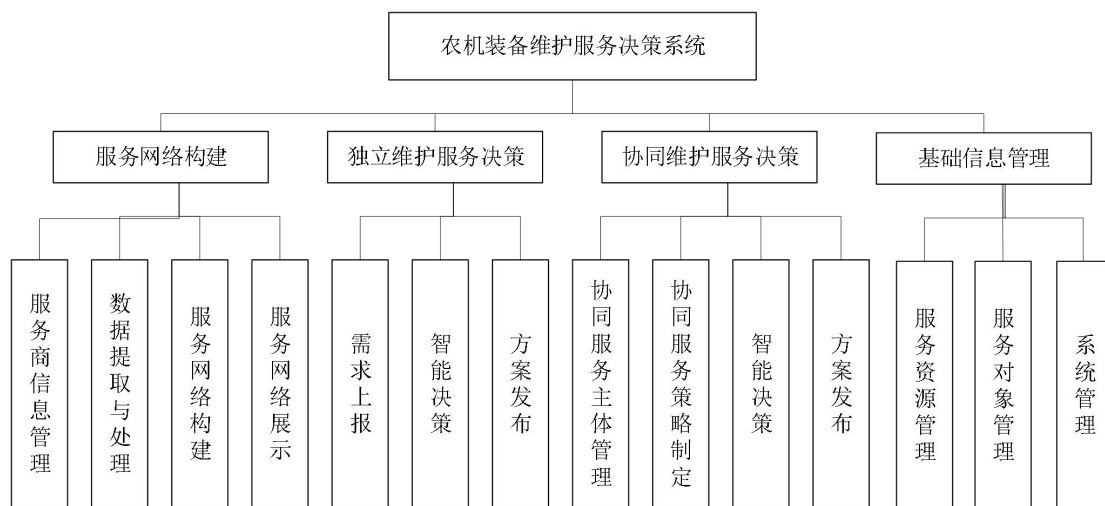


图 6.3 系统功能模块图

6.2.2 农机装备运维服务调度系统界面展示

基于本文的研究内容，本章节重点介绍运维服务调度模块相关功能及界面。运维服务调度模块主要包括服务商信息管理、独立调度和协同调度管理三个子模块。具体阐述如下：

(1) 服务商信息管理

服务商信息管理子模块主要功能为服务商信息录入和服务商评价。服务商信息管理界面如图 6.4 所示，服务商评价信息中包括服务站位置、服务能力、维修成本等多维度评价标准。该模块支持服务商信息的增删改查，添加服务商信息界面如图 6.5 所示，服务商信息添加完毕后，系统自动调用后台算法包计算当前服务商服务综合得分。管理者可根据服务综合得分对服务商进行选择。

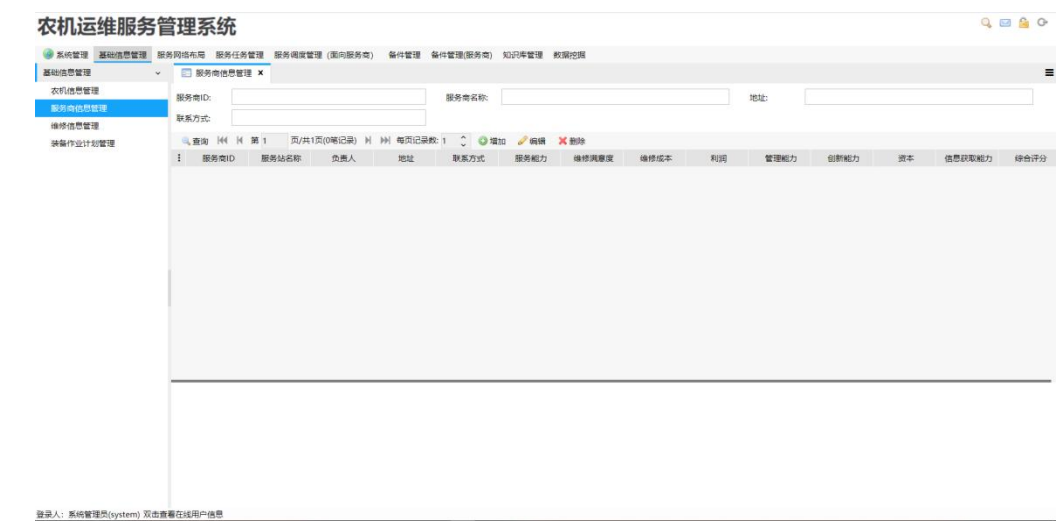


图 6.4 服务商信息管理界面

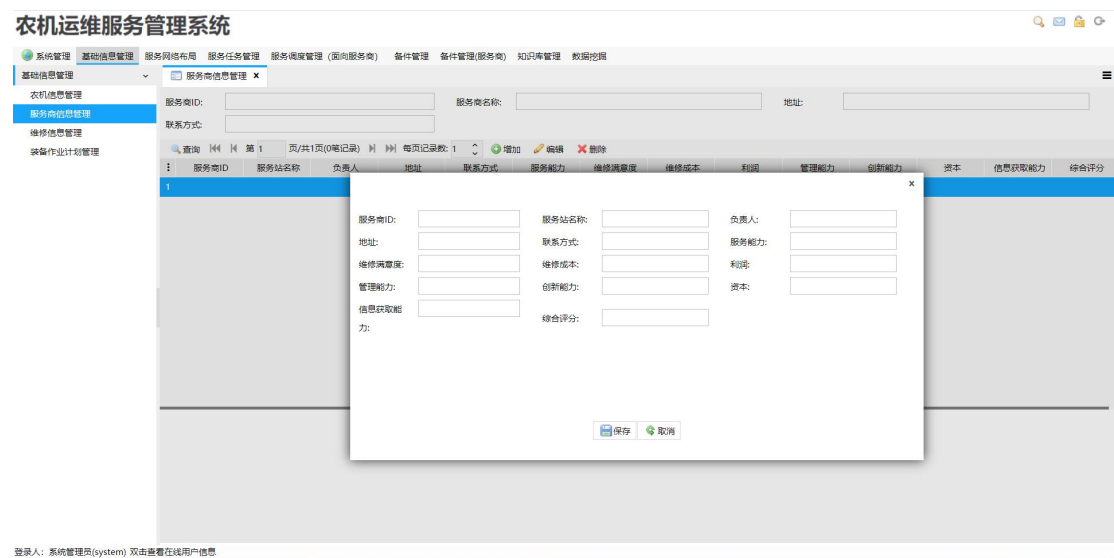


图 6.5 服务商信息增删改查

(2) 运维服务调度系统

本文研究的运维服务调度主要包括两个中情况，包括独立运维服务和协同运维服务。未完成服务的客户需求都纳入调度决策，包括当天和之前剩余未完成服务的需求。当服务商能当天独立完成本日调度需求时，则采用独立的运维调度决策方案。当出现当天不能完成客户需求时，则制造企业采取联合调度决策，成立系统运维服务联盟。决策的结果，既可以用视化地图的形式展现，也可以用传统的表格形式进行展现。展示界面需能清楚看出当前任务处于何种状态，包括计划中，派工中，报工中或者回访中。图形界面以颜色进行区分。表格会对任务状态以文字说明和归类处理的方式展现。任务状态将根据任务进度自动更新。

是否启动协同运维调度，由制造企业根据客户的需求来决定的，当某地区出现需求激增的情况时，制造企业帮助服务商构建服务网络联盟，通过协同调度的形式，更好的满足客户的运维服务需求。制造企业启动协同运维机制时，组织服务需求激增区域的服务商，构建服务联盟。服务商当接收到组织联盟的信息后，确认是否参加服务网络联盟，最终组成服务联盟。制造企业将进行协同调度，对联盟任务和资源进行整合。采用的决策方法为改进的粒子群算法，封装进协同运维服务模式中。

生成派工单。经过运维服务的调度决策后，根据决策结果生成派工单。派工单包括任务编号、故障诊断结果、维修需求点位置等关键信息。服务工程师根据

派工单的信息对客户进行服务，并对任务状态进行更新。

调整任务。不同的任务具有不同的优先级，当出现新任务或者高优先级的任务时，系统能结合当前任务的进度，对任务进行重新规划。是否将某任务纳入紧急规划的列表由调度员决定。若调度员认为该任务可延后服务或者当前服务已经超负荷时，可拒绝将任务纳入规划，此时任务将返回客户中心，由客服与客户进行沟通。当进行重新规划时，点击按钮，执行动态调度算法，产生新的派工单。

派工单发布。当完成调度之后，系统将向对应的服务商或者服务工程师发布派工单，服务工程师根据派工单的信息，对客户进行服务。

服务决策相关页面如图 6.6、图 6.7 所示。

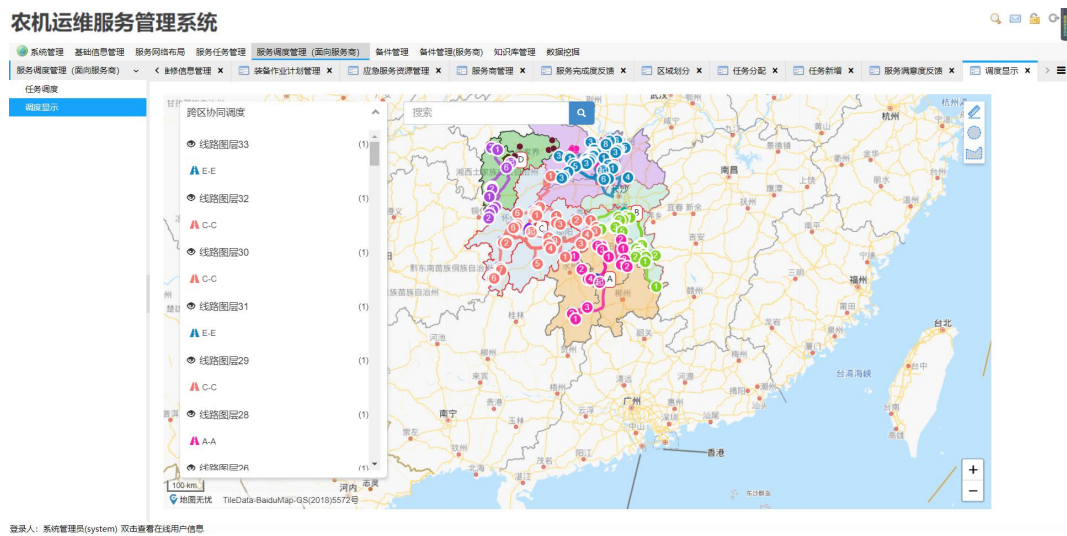


图 6.6 运维服务独立决策界面

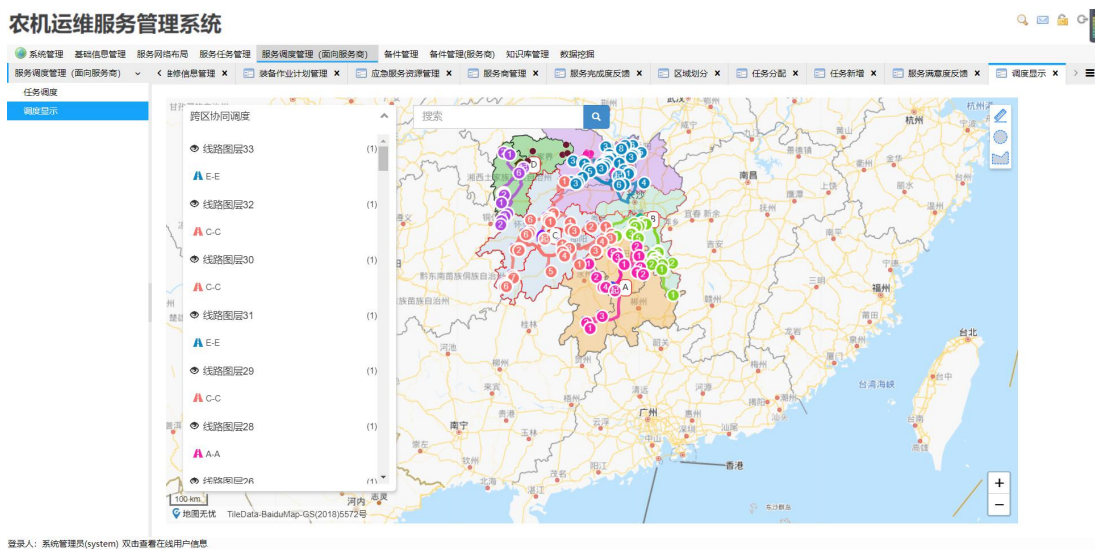


图 6.7 独立服务决策算法迭代结果界面

6.3 本章小结

本章基于本文研究成果和国内某农机装备制造企业的实际调研情况,展示了面向农机装备的运维服务管理系统的整体框架及运维服务调度模块的界面功能。实现了农机运维服务相关的业务流程操作,提升了系统智能化水平以及交互性,也为后续的理论研究的开展和农机运维服务实际应用提供了平台。

总结与展望

总结

本文按照“问题背景→需求分析→方案提出→服务网络构建→多主体利益分配→跨区协同调度→农机运维服务管理系统开发与应用”的思路开展了农机装备装备集群维修服务调度和决策方法的研究。首先针对当前农机装备运维服务运维服务模式进行了分析，总结了当前运维服务网络中存在的主要问题，并针对问题提出了研究方案以及关键技术。为保证农机装备运维服务网络的可靠性和服务的及时交付性，本文主要开展了服务网络构建、多主体利益分配和跨区协同调度三部分的研究。其核心内容总结如下：

(1) 农机装备运维服务调度和决策的问题。首先对当前农机装备运维服务模式和运维调度现状进行分析，并结合农机装备作业特点，总结当前维修服务调度中存在问题，提炼出改进现有运维服务调度中的关键问题，最终确定研究方案以及所需要的关键技术和方法。

(2) 针对运维服务网络中运维服务网络构建的问题，提出了基于自适应神经模糊推理系统服务商评价方法。首先，定义了运维服务网络中服务商的 12 个评价标准，应用专家评价收集训练数据集并通过自适应模糊神经网络进行训练分类，由此开发了基于自适应模糊神经网络服务商选择系统，为服务商选择提供了通用框架。最后通过实际应用场景的验证，证明了方法的有效性。

(3) 研究了在多主体参与形成联盟的情况下，如何对联盟的成员之间协作进行利益协调成本分配的问题，保证联盟的稳定性和公平性。研究的主要方法，是重点关注了协同运维或者协作运输中涉及利益分配的文献。梳理出相关的成本分配方法 40 多种，并描述了主要方法的理论基础以及应用的场景。

(4) 研究了在协作服务模式下的分布式农业机械集群的协作维护决策问题，并清楚地显示了分布式分布式协作调度与传统独立调度相比的特点。首先，我们为协作维护决策过程构建数学模型。然后，我们设计一个 PSO 来解决数学模型并获得服务交付计划。最后，改进的 Shapley 值方法用于在协作实体之间分配成本，以确保服务联盟的稳定性和可持续性。

综上所述，本文以解决当前农机装备运维服务调度决策中的突出问题为导向，就跨区协同调度问题展开了深入研究，提出的相关理论一定程度上促进了农

机装备运维服务调度与决策的智能化水平。

展望

本文通过调研农机装备制造企业，了解企业实际需求，对当前运维服务调度与决策方法进行分析，提出了联合调度的解决方案，对于提高农机装备运维服务调度的及时性和客户满意度、降低运维服务成本具有重要实践意义。但在研究过程中，受知识和研究时间的限制，本文针对实践问题抽象化的过程中添加了较多假设条件，忽略了实际中一些相关影响因素，未来的研究还有待拓展深入。具体如下：

（1）本文制定的服务计划基于已知的服务请求。虽然对故障预测有较多的研究，但是对于即时性的，随机性的故障需求，预测的准确性依然比较低，难以用在实际的运维服务调度中。对于具有分布式、即时性和随机性的故障需求预测的研究，仍然需要进一步的探索，包括硬件传感器的更新和算法的精进，都有待进一步的研究。

（2）由于协作服务实体的工作和社会环境因素都会影响成本分配，因此未来的研究必须扩展成本分配的计算，以确保收益的合理分配，保证服务实体之间的有效合作以及服务联盟的稳定运行。

（3）解决传统运筹学里的 NP 问题，传统采用的启发式算法进行求解，但是启发式算法中的参数，目前并无科学高效的确定方法，大多采用经验，对参数进行求解。目前，深度学习的方法，对启发式算法进行优化，再用来解决 NP 问题，可能是最新的研究方向。

参考文献

- [1] Vandermerwe S, Rada J. Servitization of business: adding value by adding services[J].European Management Journal, 1989, 6(4): 314-324.
- [2] 国务院. 中国制造 2025[J]. 2015 [2015-07-01]. [Http://news.china](http://news.china).
- [3] Goldberger, J., & Tanner, W. F. (1924). A study of the treatment and prevention of pellagra. experiments showing the value of fresh meat and of milk, the therapeutic failure of gelatin, and the preventive failure of butter and of cod-liver oil. Public Health Reports (1896-1970), 39(3), 87.
- [4] Lang, R., & Gottlieb, S. (1936). Neue wege zur oxydimetrischen bestimmung von molybdän. Zeitschrift Für Analytische Chemie, 104(1-2), 1-16.
- [5] Hulme H D. Supplier Selection and Control for Reliability[J]. IEEE Transactions on Aerospace, 1963, 1(2):564-568.
- [6] Bhise V M . Finite and infinite series of Meijer's G-function and the multiplication formula for G-function[J]. Journal of the Indian Mathematical Society, 1963, 27(8):1251-1269.
- [7] Chai J, Liu J N K, Ngai E W T. (2013). Application of decision-making techniques in supplier selection: A systematic review of literature. Expert System with Applications, 40, 3872-3885. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.12.040>
- [8] Aguezoul, Aicha. (2014). Third-party logistics selection problem: A literature review on criteria and methods. Omega, 49:69-78. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.05.009>
- [9] Liu, A., Ji, X., Lu, H., & Liu, H.. (2019). The selection of 3prls on self-service mobile recycling machine: interval-valued pythagorean hesitant fuzzy best-worst multi-criteria group decision-making. Journal of Cleaner Production.
- [10] Paul, A., Moktadir, MA., Paul, Sk.. (2019). An innovative decision-making framework for evaluating transportation service providers based on sustainable criteria. INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH.
- [11] Keskin, GA., Ilhan, S., & Ozkan, C. (2010). The fuzzy art algorithm: a categorization method for supplier evaluation and selection. Expert Systems with Applications, 37(2), 1235-1240.
- [12] Kim, DY., Wagner, SM., (2012). Supplier selection problem revisited from the perspective of product configuration. International Journal of Production Research, 50(11), 2864-2876.
- [13] Tripathi, A., Pathak, I., & Vidyarthi, D. P.. (2017). Integration of analytic network process

with service measurement index framework for cloud service provider selection. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, e41-44.

[14] Yaoguang Hu, Shasha Xiao, Jingqian Wen, Jinliang Li. (2019). An ANP-multi-criterion-based methodology to construct maintenance networks for agricultural machinery cluster in a balanced scorecard context. *Computers and Electronics in Agriculture*.158, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.031>

[15] Govindan, K., Rajendran, S., Sarkis, J., Murugesan, P. (2015). Multi criteria decision making approaches for green supplier evaluation and selection: a literature review. *Journal of Cleaner Production*, 98, 66-83. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.046>

[16] Dickson, G. W. (1966). An analysis of vendor selection systems and decision. *Journal of Purchasing*, 2(15), 1377-1382.

[17] Dirk, P. V. D., Mortensen, O., & Lemoine, O. W.. (2008). Integration between manufacturers and third-party logistics providers? *International Journal of Operations & Production Management*, 28(4), 331-359.

[18] Sanjay Jharkharia, Ravi Shankar. (2007). Selection of logistics service provider: An analytic network process (ANP) approach. *Omega*, 35(3), 274-289.

[19] You, X. Y., You, J. X., Liu, H. C., Zhen, L. (2015). Group multi-criteria supplier selection using an extended vikor method with interval 2-tuple linguistic information. *Expert Systems with Applications*, 42(4), 1906-1916.

[20] So SH, Kim JJ, Cheong KJ, Cho G. (2006). Evaluating the service quality of third-party logistics service providers using the analytic hierarchy process. *Journal of Information Systems and Technology Management* 2006;3(3):261–70.

[21] Cheng, Y. H. , & Lee, F. . (2010). Outsourcing reverse logistics of high-tech manufacturing firms by using a systematic decision-making approach: tft-lcd sector in taiwan. *Industrial Marketing Management*, 39(7), 1111-1119.

[22] Briggs E, Landry TD, Daugherty PJ. (2010). Investigating the influence of velocity performance on satisfaction with third party logistics service. *Industrial Marketing Management*, 39(4):640–9. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2009.06.004>

[23] Chu Z, Wang Q. (2012). Drivers of relationship quality in logistics outsourcing in China. *Journal of Supply Chain Management*, 48(3):78–96.

<https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2011.03259.x>

- [24] Lai, K. H. (2004). Service capability and performance of logistics service providers. *Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review*, 40(5), 0-399.
- [25] Tsai, M. C, Wen, C. H., & Chen, C. S.. (2007). Demand choices of high-tech industry for logistics service providers—an empirical case of an offshore science park in taiwan. *Industrial Marketing Management*, 36(5), 617-626.
- [26] Chen F Y , Hum S H , Sun J . Analysis of third-party warehousing contracts with commitments[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 131(3):603-610.
- [27] Schittekat P, SoRensen, S. K.. (2009). Supporting 3pl decisions in the automotive industry by generating diverse solutions to a large-scale location-routing problem. *Operations Research*, 57(5), 1058-1067.
- [28] Wu YCJ, Huang IC. (2007). Operations research practice on logistics management in Taiwan: an academic view. *European Journal of Operational Research* 2007;182(1):428–35
- [29] Efendigil, T., Semih ?nüt, & Kongar, E. . (2008). A holistic approach for selecting a third-party reverse logistics provider in the presence of vagueness. *Computers & Industrial Engineering*, 54(2), 269-287.
- [30] Kuo, R. J., Hong, S. Y., & Huang, Y. C. . (2010). Integration of particle swarm optimization-based fuzzy neural network and artificial neural network for supplier selection. *Applied Mathematical Modelling*, 34(12), 3976-3990.
- [31] Galankashi, M. R., Helmi, S. A., & Hashemzahi, P. (2016). Supplier selection in automobile industry: a mixed balanced scorecard–fuzzy AHP approach. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1): 93-100. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.01.005>
- [32] Liu, H. T., & Wang, W. K. (2009). An integrated fuzzy approach for provider evaluation and selection in third-party logistics. *Expert Systems with Applications*, 36(3), 4387-4398. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.05.030>
- [33] Musavi, N., & Keighobadi, J.. (2015). Adaptive fuzzy neuro-observer applied to low cost INS/GPS. *APPLIED SOFT COMPUTING*, 29: 82-94. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.12.024>
- [34] Kadhim, Mohammed Abbas. (2018). FNDSB: A fuzzy-neuro decision support system for back pain diagnosis. *COGNITIVE SYSTEMS RESEARCH*, 52:691-700.

- [35] Chen, T. (2009). Optimized fuzzy-neuro system for scheduling wafer fabrication. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 68(8), 680-685.
- [36] Kiguchi, K., Watanabe, K., & Fukuda, T. (2002). Generation of efficient adjustment strategies for a fuzzy-neuro force controller using genetic algorithms – application to robot force control in an unknown environment. *Information Sciences*, 145(1-2), 113-126.
[https://doi.org/10.1016/S0020-0255\(02\)00226-8](https://doi.org/10.1016/S0020-0255(02)00226-8)
- [37] Lee, V. C. S., & Sim, A. T. H.. (2004). A Hybrid Fuzzy-Neuro Model for Preference-Based Decision Analysis. *International Conference on Intelligent Data Engineering*. 3177:449-456.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-28651-6_66
- [38] Zhao, J. B. , Wang, T. , Zhang, G. , He, Z. , & Mario J. P´erez-Jim´enez. (2014). Fault diagnosis of electric power systems based on fuzzy reasoning spiking neural p systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(3), 1182-1194.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2347699>
- [39] Shihabudheen, K. V., & Pillai, G. N. (2018). Recent advances in neuro-fuzzy system: a survey. *Knowledge-Based Systems*.152, 136-162.
- [40] Han, M. F., Lin, C. T., & Chang, J. Y.. (2013). Differential evolution with local information for neuro-fuzzy systems optimization. *Knowledge-Based Systems*. 44, 78-89.
<https://doi.org/10.1016/j.knosys.2013.01.023>
- [41] Rikalovic, Aleksandar & Cosic, Ilija & Labati, Ruggero & Piuri, Vincenzo. (2018). Intelligent Decision Support System for Industrial Site Classification: A GIS-Based Hierarchical Neuro-Fuzzy Approach. *IEEE Systems Journal*. 12. 2970 - 2981. 10.1109/JSYST.2017.2697043.
- [42] Huang, M. J., Tsou, Y. L., & Lee, S. C. (2006). Integrating fuzzy data mining and fuzzy artificial neural networks for discovering implicit knowledge. *Knowledge-Based Systems*, 19(6), 396-403. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2006.04.003>
- [43] Lu, J., Han, J., Hu, Y. and Zhang, G. (2016). Multilevel decision-making: A survey. *Information Sciences*, 346–347, 463–487.
- [44]Agostino Bruzzone, & Enrico Bocca. (2012). Innovative solutions based on simulation combined with optimization techniques for maintenance service management within complex systems. *International Journal of Modeling Simulation & Scientific Computing*, 3(02).
- [45]Verma, A. K., Srividya, A., & Gaonkar, R. S. P. (2007). Maintenance and replacement interval

- optimization using possibilistic approach. *International Journal of Modelling & Simulation*, 27(2), 193-199.
- [46]Cao, J. P., Song, J. S., Guo, J., & Liu, J. P. (2007). Optimization dispatching arithmetic of equipment maintenance support resources in wartime. *Journal of System Simulation*, 19(15), 3390-3394.
- [47]Zhou, R., Hu, Y., Xiao, S., & Wen, J. (2016). A Multi-agent Based Decision –Making Approach for Field Service Delivery of IPS2. *Procedia CIRP*, 47, 228–233.
- [48]Manzini, R., Accorsi, R., Cennerazzo, T., Ferrari, E., & Maranesi, F. (2015). The scheduling of maintenance. a resource-constraints mixed integer linear programming model ☆. *Computers & Industrial Engineering*, 87(C), 561-568.
- [49]Tlili, T., Krichen, S., Drira, G., & Faiz, S. (2016). On solving the multi-depot vehicle routing problem. In *Proceedings of 3rd International Conference on Advanced Computing, Networking and Informatics* (pp. 103-108). Springer, New Delhi.
- [50]Salhi, S., Imran, A., & Wassan, N. A. (2014). The multi-depot vehicle routing problem with heterogeneous vehicle fleet: Formulation and a variable neighborhood search implementation. *Computers & Operations Research*, 52, 315-325.
- [51]Surekha, P., & Sumathi, S. (2011). Solution to multi-depot vehicle routing problem using genetic algorithms. *World Applied Programming*, 1(3), 118-131.
- [52]Markov, I., Varone, S., & Bierlaire, M. (2016). Integrating a heterogeneous fixed fleet and a flexible assignment of destination depots in the waste collection vrp with intermediate facilities. *Transportation Research Part B*, 84(5), 256-273.
- [53]Mousavipour, S., & Hojjati, S. M. H. (2014). A particle swarm optimisation for time-dependent vehicle routing problem with an efficient travel time function. *International Journal of Operational Research*, 20(1), 109-120
- [54]Cho, D. W., Lee, Y. H., Lee, T. Y., & Gen, M. (2014). An adaptive genetic algorithm for the time dependent inventory routing problem. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25(5), 1025–1042.
- [55]Vidal, T., Crainic, T. G., Gendreau, M., & Prins, C. (2013). A hybrid genetic algorithm with adaptive diversity management for a large class of vehicle routing problems with time-windows. *Computers & Operations Research*, 40(1), 475–489.

- [56]Ting, C. J., & Chen, C. H. (2013). A multiple ant colony optimization algorithm for the capacitated location routing problem. *International Journal of Production Economics*, 141(1), 34–44.
- [57]Bañó, R., Ortega, J., Gil, C., Fernández, A., & De Toro, F. (2013). A simulated annealing-based parallel multi-objective approach to vehicle routing problems with time windows. *Expert Systems with Applications*, 40(5), 1696–1707.
- [58]Rashidnejad M , Ebrahimnejad S , Safari J . A bi-objective model of preventive maintenance planning in distributed systems considering vehicle routing problem[J].*Computers&Industrial Engineering*,2018:S036083521830202.
- [59]Sazonov V V , Skobelev P O , Lada A N , et al. Application of Multiagent Technologies to Multiple Depot Vehicle Routing Problem with Time Windows[J]. *Automation and Remote Control*, 2018, 79(6):1139-1147.
- [60]Li J , Li Y , Pardalos P M . Multi-depot vehicle routing problem with time windows under shared depot resources[M]. Springer-Verlag New York, Inc. 2016.
- [61]Xu, J., & Chiu, S. Y. (2001). Effective heuristic procedures for a field technician scheduling problem. *Journal of Heuristics*, 7(5), 495-509.
- [62]Tang, H., Miller-Hooks, E., & Tomastik, R. (2007). Scheduling technicians for planned maintenance of geographically distributed equipment. *Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review*, 43(5), 591-609.
- [63]Dutot, P. F., Laugier, A., Bustos, A. M., & Telecom, F. (2010). Technicians and interventions scheduling for telecommunications.
- [64]Chen, X., Thomas, B. W., & Hewitt, M. (2016). The technician routing problem with experience-based service times ☆. *Omega*, 61, 49-61.
- [65]Wang, D. J., Liu, F., Wang, Y. Z., & Jin, Y. (2015). A knowledge-based evolutionary proactive scheduling approach in the presence of machine breakdown and deterioration effect. *Knowledge-Based Systems*, 90(C), 70-80
- [66]Camci, F. (2015). Maintenance scheduling of geographically distributed assets with prognostics information. *European Journal of Operational Research*, 245(2), 506-516.
- [67]Binart, S., Dejax, P., Gendreau, M., & Semet, F. (2016). A 2-stage method for a field service routing problem with stochastic travel and service times. *Computers & Operations Research*,

65(C), 64-75.

[68]Krajewska, M. A., Kopfer, H., Laporte, G., Ropke, S., & Zaccour, G. (2008). Horizontal cooperation among freight carriers: request allocation and profit sharing. *Journal of the Operational Research Society*, 59(11), 1483-1491.

[69]Pérez-Bernabeu, E., Juan, A. A., Faulin, J., & Barrios, B. B. (2015). Horizontal cooperation in road transportation: a case illustrating savings in distances and greenhouse gas emissions. *International Transactions in Operational Research*, 22(3), 585–606.

[70]Dai, B., & Chen, H. (2012). Profit allocation mechanisms for carrier collaboration in pickup and delivery service. *Computers & Industrial Engineering*, 62(2), 633-643.

[71]Lu, Z., Wang, S., Li, X., Yang, L., Yang, D., & Wu, D. (2012). Online shop location optimization using a fuzzy multi-criteria decision model-case study on taobao.com. *Knowledge-Based Systems*, 32(8), 76-83.

[72]Yilmazab, O. (2012). Collaboration among small shippers in a transportation market. *European Journal of Operational Research*, 218(2), 408-415.

[73]Guajardo, M., & Rönnqvist, M. (2015). A review on cost allocation methods in collaborative transportation. *International Transactions in Operational Research*, 23(3)

[74]Borm, P., Hamers, H., Hendrickx, R., 2001. Operations research games: a survey. *Top* 9, 2, 139-199. Caprara, A., Letchford, A.N., 2010. New techniques for cost sharing in combinatorial optimization games. *Mathematical Programming* 124, 1-2, 93-118.

[75]Curiel, I., 2008. Cooperative combinatorial games. In Chinchuluun, A., Pardalos, P.M., Migdalas, A., Pitsoulis, L. (eds) *Pareto Optimality, Game Theory and Equilibria*, Vol. 17. Springer, New York, pp. 131-157.

[76]Fiestras-Janeiro, M.G., Garcia-Jurado, I., Meca, A., Mosquera, M.A., 2012. Cost allocation in inventory transportation systems. *Top* 20, 2, 397-410.

[77]Audy, J.-F., Lehoux, N., D'Amours, S., Rönnqvist, M., 2012b. A framework for an efficient implementation of logistics collaborations. *International Transactions in Operational Research* 19, 5, 633-657.

[78]Crujssens, F., Dullaert, W., Fleuren, H., 2007. Horizontal cooperation in transport and logistics: a literature review. *Transportation Journal* 46, 3, 22-39.

[79]Perez-Bernabeu, E., Juan, A.A., Faulin, J., Barrios, B.B., 2015. Horizontal cooperation in road

transportation: a case illustrating savings in distances and greenhouse gas emissions. *International Transactions in Operational Research* 22, 3, 585-606.

[80]Mario, Guajardo, Mikael,. A review on cost allocation methods in collaborative transportation[J]. *International Transactions in Operational Research*, 2016.

[81]Potters, J.A., Curiel, I.J.,Tijs,S.H., 1992. Traveling salesman games. *Mathematical Programming* 53, 1-3, 199-211.

[82]Derks, J., Kuipers, J., 1997. On the core of routing games. *International Journal of Game Theory* 26, 2, 193-205.

[83]Engevall, S., Gothe-Lundgren, M., Varbrand, P., 1998. The traveling salesman game: an application of cost allocation in a gas and oil company. *Annals of Operations Research* 82, 203-218.

[84]Faigle, U., Fekete, S.P., Hochstattler, W ; , Kern, W., 1998. On approximately fair cost allocation in Euclidean TSP games. *OR Spektrum* 20, 1, 29-37.

[85]Hamers, H., Borm, P., van de Leensel, R., Tijs, S., 1999. Cost allocation in the Chinese postman problem. *European Journal of Operational Research* 118, 1, 153-163.

[86]Engevall, S., Gothe-Lundgren, M., Varbrand, P., 2004. The heterogeneous vehicle-routing game. *Transportation Science* 38, 1, 71-85.

[87]Anily, S., Haviv, M., 2007. The cost allocation problem for the first order interaction joint replenishment model. *Operations Research* 55, 2, 292-302.

[88]Ozener, O.O., Ergun, O., 2008. Allocating costs in a collaborative transportation procurement network. *Transportation Science* 42, 2, 146-165.

[89]Estevez-Fernandez, A., Borm, P., Meertens, M., Reijnierse, H., 2009. On the core of routing games with revenues. *International Journal of Game Theory* 38, 2, 291-304.

[90]Agarwal, R., Ergun, O., 2010. Network design and allocation mechanisms for carrier alliances in liner shipping. *Operations Research* 58, 6, 1726-1742.

[91]Caprara, A., Letchford, A.N., 2010. New techniques for cost sharing in combinatorial optimization games. *Mathematical Programming* 124, 1-2, 93-118.

[92]Frisk, M., Gothe-Lundgren, M., Jornsten, K., Ronnqvist, M., 2010. Cost allocation in collaborative forest transportation. *European Journal of Operational Research* 205, 2, 448-458.

[93]Liu, P., Wu, Y., Xu, N., 2010. Allocating collaborative profit in less-than-truckload carrier

- alliance. *Journal of Service Science and Management* 3, 1, 143-149.
- [94]Audy, J.-F., D'Amours, S., Rousseau, L.-M., 2011. Cost allocation in the establishment of a collaborative transportation agreement — an application in the furniture industry. *Journal of the Operational Research Society* 62, 6, 960-970.
- [95]Dahl, S., Derigs, U., 2011. Cooperative planning in express carrier networks—an empirical study on the effectiveness of a real-time decision support system. *Decision Support Systems* 51,3, 620-626.
- [96]Audy, J.-F., D'Amours, S., Ronnqvist, M., 2012a. An empirical study on coalition formation and cost/savings allocation. *International Journal of Production Economics* 136, 1, 13-27.
- [97]Dai, B., Chen, H., 2012. Profit allocation mechanisms for carrier collaboration in pickup and delivery service. *Computers & Industrial Engineering* 62, 2, 633-643.
- [98]Fiestras-Janeiro, M.G., Garcia-Jurado, I., Meca, A., Mosquera, M.A., 2012. Cost allocation in inventory transportation systems. *Top* 20, 2, 397-410.
- [99]Yilmaz, O., Savaseneril, S., 2012. Collaboration among small shippers in a transportation market. *European Journal of Operational Research* 218, 2, 408-415.
- [100]Cheng, Y., Tan, J., Lin, W.-H., 2013. Allocating the cost of empty railcar miles in a dynamic railroad network. *International Journal of Shipping and Transport Logistics* 5,3, 350-366.
- [101]Fiestras-Janeiro, M.G., Garcia-Jurado, I., Meca, A., Mosquera, M.A., 2013. A new cost allocation rule for inventory transportation systems. *Operations Research Letters* 41, 5, 449-453.
- [102]Toriello, A., Uhan, N.A., 2013. Technical note: on traveling salesman games with asymmetric costs. *Operations Research* 61,6, 1429-1434.
- [103]Ozener, O., 2014. Developing a collaborative planning framework for sustainable transportation. *Mathematical Problems in Engineering* 2014, art. ID 107102.
- [104]Vanovermeire, C., Sorensen, K., 2014a. Integration of the cost allocation in the optimization of collaborative bundling. *Transportation Research Part E* 72, 125-143.
- [105]Dai, B., Chen, H., 2015. Proportional egalitarian core solution for profit allocation games with an application to collaborative transportation planning. *European Journal of Industrial Engineering* 9, 1, 53-76.
- [106]Flisberg, P., Frisk, M., Ronnqvist, M., Guajardo, M., 2015. Potential savings and cost allocations for forest fuel transportation in Sweden: a country-wide study. *Energy* 85, 353-365.

- [107]Guajardo, M., Jornsten, K., 2015. Common mistakes in computing the nucleolus. *European Journal of Operational Research*, 241, 3, 931-935.
- [108]Hezarkhani, B., Slikker, M., van Woensel, T., 2015. A competitive solution for cooperative truckload delivery. *OR Spectrum*, DOI 10.1007/s00291-015-0394-y.
- [109]Sun, L., Rangarajan, A., Karwan, M.H., Pinto, J.M., 2015. Transportation cost allocation on a fixed route. *Computers & Industrial Engineering* 83, 61-73.
- [110]Yang, F., Yang, M., Xia, Q., Liang, L., 2015. Collaborative distribution between two logistics service providers. *International Transactions in Operational Research*, DOI: 10.1111/itor.12158.
- [111]Dror, M., 1990. Cost allocation: the traveling salesman, binpacking, and the knapsack. *Applied Mathematics and Computation* 35, 2, 191-207.
- [112]Wong, H., Van Oudheusden, D., Cattrysse, D., 2007. Cost allocation in spare parts inventory pooling. *Transportation Research Part E* 43, 4, 370-386.
- [113]Krajewska, M.A., Kopfer, H., Laporte, G., Ropke, S., Zaccour, G., 2008. Horizontal cooperation among freight carriers: request allocation and profit sharing. *Journal of the Operational Research Society* 59, 11, 1483-1491.
- [114]Cruijssen, F., Borm, P., Fleuren, H., Hamers, H., 2010. Supplier-initiated outsourcing: a methodology to exploit synergy in transportation. *European Journal of Operational Research* 207, 2, 763-774.
- [115]Massol, O., Tchung-Ming, S., 2010. Cooperation among liquefied natural gas suppliers: is rationalization the sole objective? *Energy Economics* 32, 4, 933-947.
- [116]Yengin, D., 2012. Characterizing the Shapley value in fixed-route traveling salesman problems with appointments. *International Journal of Game Theory* 41,2, 271-299.
- [117]Lozano, S., Moreno, P., Adenso-Diaz, B., Algaba, E., 2013. Cooperative game theory approach to allocating benefits of horizontal cooperation. *European Journal of Operational Research* 229, 2, 444-452.
- [118]Fang, X., Cho, S.-H., 2014. Stability and endogenous formation of inventory transshipment networks. *Operations Research* 62,6, 1316-1334.
- [119]Vanovermeire, C., Sorensen, K., van Breedam, A., Vannieuwenhuyse, B., Verstrepen, S., 2014. Horizontal logistics collaboration: decreasing costs through flexibility and an adequate cost allocation strategy. *International Journal of Logistics Research and Applications* 17, 4, 339-355.

- [120]Wang, Y., Ma, X., Xu, M., Wang, L., Wang, Y., Liu, Y.,2015.A methodology to exploit profit allocation in logisticsjoint distribution network optimization. *Mathematical Problems in Engineering* 2015, art. ID 827021.
- [121]Zakharov, V, Shchegryaev, A., 2015. Stable cooperation in dynamic vehicle routing problems. *Automation and Remote Control* 76,5,935-943.
- [122]Fishburn, P., Pollak, H., 1983. Fixed-route cost allocation. *American Mathematical Monthly* 90, 6, 366-378.
- [123]Krajewska, M.A., Kopfer, H., 2006. Collaborating freight forwarding enterprises - request allocation and profit sharing. *OR Spectrum* 28, 3, 301-317.
- [124]Berger, S., Bierwirth, C., 2010. Solutions to the request reassignment problem in collaborative carrier networks. *Transportation Research Part E* 46, 5, 627-638.
- [125]Lehoux, N., D5Amours, S., Frein, Y., Langevin, A., Penz, B., 2011. Collaboration for a two-echelon supply chain in the pulp and paper industry: the use of incentives to increase profit. *Journal of the Operational Research Society* 62, 4, 581-592.
- [126]Nguyen, C., Dessouky, M., Toriello, A., 2014. Consolidation strategies for the delivery of perishable products. *Transportation Research Part E* 69, 108-121.
- [127]Gothe-Lundgren, M., Jornsten, K., Varbrand, P., 1996. On the nucleolus of the basic vehicle routing game. *Mathematical Programming* 72, 1, 83-100.
- [128]Sakawa, M., Nishizaki, I., Uemura, Y., 2001. Fuzzy programming and profit and cost allocation for a production and transportation problem. *European Journal of Operational Research* 131, 1, 1-15.
- [129]Granot, D., Hamers, H., Kuipers, J., Maschler, M., 2011. On Chinese postman games where residents of each road pay the cost of their road. *Games and Economic Behavior* 72, 2, 427-438.
- [130]Guajardo, M., Ronnqvist, M., 2015. Operations research models for coalition structure in collaborative logistics. *European Journal of Operational Research* 240, 1, 147-159.
- [131]Anupindi, R., Bassok, Y., Zemel, E., 2001. A general framework for the study of decentralized distribution systems. *Manufacturing & Service Operations Management* 3,4, 349-368.
- [132]Blaser, M., Ram, L.S., 2008. Approximately fair cost allocation in metric traveling salesman games. *Theory of Computing Systems* 43, 1, 19-37.

- [133]Samet, D., Tauman, Y., Zang, I., 1984. An application of the Aumann-Shapley prices for cost allocation in transportation problems. *Mathematics of Operations Research* 9, 1, 25-42.
- [134]Hu Y , Xiao S , Wen J , et al. An ANP-multi-criteria-based methodology to construct maintenance networks for agricultural machinery cluster in a balanced scorecard context[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 158:1-10.
- [135]Cattaruzza, D., Absi, N., & Feillet, D. (2016). Vehicle routing problems with multiple trips. *4OR*, 14(3), 223-259.
- [136]Ho, W., Ho, G. T. S., Ji, P., & Lau, H. C. W. (2008). A hybrid genetic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21(4), 548-557.
- [137]Bochtis, D. D., Sørensen, C. G. C., & Busato, P. (2014). Advances in agricultural machinery management: a review. *Biosystems Engineering*, 126(39), 69-81.
- [138] Eruguz, A. S., Tan, T., & Houtum, G. J. V. (2017). A survey of maintenance and service logistics management: classification and research agenda from a maritime sector perspective. *Computers & Operations Research*.
- [139]Li H, Mi S, Li Q, et al. A scheduling optimization method for maintenance, repair and operations service resources of complex products[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2018(2):1-19.
- [140]Yaoguang Hu, Shasha Xiao, Jingqian Wen, Jinliang Li. An ANP-multi-criteria-based methodology to construct maintenance networks for agricultural machinery cluster in a balanced scorecard context[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 158.
- [141]Li, L., Liu, M., Shen, W., & Cheng, G. (2017). An expert knowledge-based dynamic maintenance task assignment model using discrete stress–strength interference theory. *Knowledge-Based Systems*.
- [142]Camci, F., & Chinnam, R. B. (2010). Health-state estimation and prognostics in machining processes. *IEEE Transactions on Automation Science & Engineering*, 7(3), 581-597.
- [143]Li, L., & Ni, J. (2009). Short-term decision support system for maintenance task prioritization. *International Journal of Production Economics*, 121(1), 195-202.
- [144]Medina-Oliva, G., Weber, P., & Iung, B. (2015). Industrial system knowledge formalization to aid decision making in maintenance strategies assessment. *Engineering Applications of*

Artificial Intelligence, 37, 343-360.

[145]Xiao, S., Hu, Y., Han, J., Zhou, R., & Wen, J. (2016). Bayesian networks-based association rules and knowledge reuse in maintenance decision-making of industrial product-service systems. *Procedia Cirp*, 47, 198-203.

[146]Huynh, K. T., Grall, A., & Bérenguer, C. (2017). Assessment of diagnostic and prognostic condition indices for efficient and robust maintenance decision making of systems subject to stress corrosion cracking. *Reliability Engineering & System Safety*, 159, 237-254.

[147]Wang, Y., & Handschin, E. (2000). A new genetic algorithm for preventive unit maintenance scheduling of power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 22(5), 343-348.

[148]Reihani, E., Sarikhani, A., Davodi, M., & Davodi, M. (2012). Reliability based generator maintenance scheduling using hybrid evolutionary approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 42(1), 434-439.

[149]Pereira, C. M. N. A., Lapa, C. M. F., Mol, A. C. A., & Luz, A. F. D. (2010). A particle swarm optimization (pso) approach for non-periodic preventive maintenance scheduling programming. *Progress in Nuclear Energy*, 52(8), 710-714.

[150]Alrashidi, M. R., & El-Hawary, M. E. (2009). A survey of particle swarm optimization applications in electric power systems. IEEE Press.

[151]Chalabi, N., Dahane, M., Beldjilali, B., & Neki, A. (2016). Optimisation of preventive maintenance grouping strategy for multi-component series systems. *Computers & Industrial Engineering*, 102.

[152]Han, J., Zhang, G., Hu, Y., and Lu, J. (2016) A solution to bi / tri-level programming problems using particle swarm optimization. *Information Sciences*. 370–371, 519–537.

[153]Eberhart, R., & Kennedy, J. (1995). A new optimizer using particle swarm theory.

[154]Tamir, A., 1989. On the core of a traveling salesman cost allocation game. *Operations Research Letters* 8, 1, 31-34.

[155]Ozener, O., Ergun, S., Savelsbergh, M., 2013. Allocating cost of service to customers in inventory routing. *Operations Research* 61, 1, 112-125.

[156]Sudholter, P., 1997. The modified nucleolus: properties and axiomatizations. *International Journal of Game Theory* 26, 2, 147-182.

- [157] Tarashnina, S., 2011. The simplified modified nucleolus of a cooperative TU-game. *Top* 19, 1, 150-166.

攻读学位期间发表论文与研究成果清单

学术论文:

- [1]Hu Y , **Gu Q** , Wen J , et al. A supplier selection and order allocation method for online to offline (O2O)e-commerce markets[C]// IEEE Conference on Industrial Electronics & Applications. IEEE, 2017
- [2] Ren W, Wu K, **Gu Q**, et al. Intelligent decision making for service providers selection in maintenance service network: An adaptive fuzzy-neuro approach[J]. Knowledge Based Systems, 2019.
- [3]Yaoguang Hu, **Gu Q**, et al. Collaborative maintenance decision on task assignment and vehicle routing planning. (审稿中)

致谢

三年的研究生生涯转瞬即逝，每一个读论文，建模型，改算法和写论文的日日夜夜仿佛就在我眼前，自己也逐渐在调度与决策的路上越走越远，这些都离不开各位老师、同学、家人和朋友的支持和帮助。借此论文完成之际，向一路帮助我的这些最亲爱的人们表示真诚的感谢。

首先，我要感谢我的导师胡耀光老师，胡老师在科研方向上给予了我非常多的帮助，他严谨求实的学术态度和不断进取的学术追求令我终生受益。胡老师不厌其烦的耐心指导，帮助我在科研和生活中，不断获得力量。感恩感谢胡老师的悉心教导。

其次，我也要感谢闻敬谦老师、关宇师兄、任维波师兄、周瑞师姐和肖沙沙师姐，在我入门阶段对我帮助很多，在后续的科研交流和合作中，每次交流总能带给我新的思考。同时，还要感谢同届的吴克中、卢帆、范银冬、肖熙、王玮东等同学，一起讨论交流让我不断进步。

最后，我由衷的感谢我的父母、兄弟姐妹、家人和未婚妻万翠娴，他们一直的陪伴和支持，是我度过艰难时期的坚强后盾，他们的无私的爱时常让我心中充满温暖，感到幸福。

人生是一场修行，有幸结识诸君，星辰大海的征途，期待我们再次相遇。

感谢审阅和评议本论文的各位专家老师，谢谢老师们严谨的指导和帮助。