

基于 DEMATEL-EWM 二维云模型的装备 生产过程质量评估

赵润泽^{1,3}, 连光耀², 程中华¹, 高铁路¹, 路瑜亮³, 陈正虎³, 张宇^{1,2}

(1. 陆军工程大学石家庄校区, 石家庄 050003;

2. 中国人民解放军 32181 部队, 西安 710032;

3. 陆军装备部驻石家庄地区第三军事代表室, 石家庄 050003)

摘要: 监督装备生产过程并保证其正常运行是用户监督代表的重要职责, 也是保障装备性能的重要基础, 由于生产过程中的不确定性因素众多, 导致监督代表往往难以对其做出精准、客观的质量评估; 为提高装备生产过程质量评估精度, 强化生产过程质量监督力度, 首先通过对问题场景和问题因素的客观分析, 构建质量评估指标, 根据生产过程质量监督的定义将承制单位自查符合度和监督代表检查满意度两个维度作为评估各指标的基础变量; 采用决策实验室法和熵权法分别确定指标的主、客观权重, 并引入距离函数概念最终确定各级指标的组合同权重; 通过专家评判计算得到云特征值从而建立二维云模型, 绘制二维云图初步判定质量等级, 计算贴近期精确判定结果; 以某型军用柴油发动机装配过程进行实例分析, 满足全面客观评估柴油发动机装配过程质量的要求, 验证了所提方法的有效性和可行性。

关键词: 装备生产过程; 质量评估; 决策实验室法; 熵权法; 二维云模型; 柴油发动机

Quality Assessment of Equipment Production Process Based on DEMATEL-EWM 2D Cloud Model

ZHAO Runze^{1,3}, LIAN Guangyao², CHENG Zhonghua¹, GAO Tielu¹, LU Yuliang³,
CHEN Zhenghu³, ZHANG Yu^{1,2}

(1. Shijiazhuang Campus of Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China;

2. No. 32181 Unit of PLA, Xi'an 710032, China; 3. The Third Military Representative Office,

The Army Equipment Department in Shijiazhuang, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Supervising the production process of equipment and ensuring its normal operation is an important responsibility of user supervision representatives, and also an important basis for guaranteeing the performance of equipment. Due to the numerous uncertainties in the production process, it is often difficult for supervision representatives to make accurate and objective quality assessment of it. In order to improve the precision of the quality assessment of the equipment production process and strengthen the quality supervision of the production process, firstly, the quality assessment indexes are constructed by objectively analyzing the problematic scenarios and problematic factors, and the two dimensions of the self-inspection conformity of the contracting unit and the inspection satisfaction of the supervisory representative are taken as the basic variables for assessing the indexes according to the definition of the quality supervision of the production process. Decision laboratory method and entropy weight method are used to determine the subjective and objective weights of the indicators respectively, and the concept of distance function is introduced to finalize the combined weights of indicators at all levels. The cloud eigenvalue is obtained through expert judgment calculation to establish a two-dimensional cloud model, the two-dimensional cloud map is drawn to determine the quality level initially, and the proximity is calculated to determine the results accurately. A certain military diesel engine assembly process is analyzed as an example, which meets the requirements of comprehensive and objective assessment of the quality of diesel engine assembly process and verifies the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Keywords: equipment production process; quality assessment; decision laboratory method; entropy weight method; two-dimensional cloud model; diesel engine

收稿日期: 2024-09-18; 修回日期: 2024-10-16。

基金项目: 国家自然科学基金(71871219)。

作者简介: 赵润泽(1994-), 男, 硕士研究生, 工程师。

通讯作者: 程中华(1972-), 男, 博士, 教授。

引用格式: 赵润泽, 连光耀, 程中华, 等. 基于 DEMATEL-EWM 二维云模型的装备生产过程质量评估[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(12): 270-279.

0 引言

装备生产过程质量评估是确保武器系统性能的关键, 通过科学定量分析, 建立有效的指标和评估模型, 以精准、客观地评估生产质量^[1]。装备生产过程质量监督与管理主要依靠用户监督代表通过专人、专机、专管的工作模式进行^[2]。目前, 监督代表派驻方式发生了巨大变化, 远离了装备承制单位, 对于装备生产过程的质量评估主要通过质量管理体系监督和质量问题分析处理为抓手开展, 未建立科学有效的指标与评估模型。同时装备生产过程有许多潜在的问题和不确定因素, 导致监督代表往往难以对其做出精准、客观的质量评估, 如果不能及时发现隐藏的问题并应对, 将会严重影响装备生产过程质量, 不利于装备事业长期可持续发展。

当前, 针对装备的质量评估的相关研究多集中于装备自身质量检验评估以及风险评估等领域, 如朱常安等^[3]针对雷达系统的功能特性和评估需求, 对某型雷达的质量状态进行了模糊综合评判, 对雷达系统操作应用和维修保障具有一定的参考价值。孙希彤等人^[4]针对武器电子系统质量评估过程中客观性不强、实用度较差的问题, 提出基于 DSmT 改进权值的 TOPSIS 质量评估方法, 通过实例证明该方法对系统的质量评估更加准确。安进等人^[5]研究装备质量评估中指标优化、权重确定、评估方法选取等问题, 提出改进证据推理 (ER) 方法进行通用特性指标的评估, 通过算例验证所提出方法的有效性和优越性。匡小平等人^[6]为提高后勤机动装备成品检验的质量, 利用 BP 神经网络构建质量评估模型, 对后勤机动装备成品检验质量进行评估。通过实例分析验证, 证明本模型预测的准确度高、模拟效果较好。Wang 等人^[7]提出了一种集成概率犹豫模糊集质量函数部署 (PHFS-QFD) 和灰色聚类的复杂装备质量风险评估新框架, 增强开发阶段的风险识别能力, 提高风险控制效率, 克服了与数据稀缺相关的挑战并简化了复杂系统的评估。

针对生产过程质量评估的相关研究多集中民用领域, 如郭霄汉等人^[8]为提升打叶复烤均质化生产过程的稳定性, 采用层次分析法结合专家经验用于评估实际生产质量, 进而查找过程质量的薄弱环节, 有针对性的调节对应环节的参数, 提高生产的工艺质量。周昭程等人^[9]以广东省人造板产品为例, 结合质量监督抽查数据, 分析人造板产品生产过程质量控制存在的风险, 对人造板产品生产质量进行了综合评判, 为政府监管提供依据。张倩茹等人^[10]对中药饮片生产进程中的质量进行评估, 控制其影响因素, 在中药饮片生产过程中进行评估能够明显提高中药饮片的质量, 值得在实际生产中推广应用。张健^[11]为解决在疫苗生产过程中存在的质量问题, 以质量风险评估工具 FMEA/FMECA 作为质量风险评估与控制方案的理论基础, 并将其应用到疫苗生产各主要环节的质量分析评估和控制中, 建立了适用于疫苗生产过程的质量风险评估与控制方法。Zhong 等人^[12]利用模糊贝叶斯网络 (FBN) 理论对建筑预制钢结构

构件生产阶段的质量风险进行概率分析, 提供了一种科学的风险评估工具, 旨在解决钢结构部件制造中常见的质量控制挑战, 对于提高行业内的整体生产水平和质量具有重大影响。Duong 等人^[13]提出了一种同时考虑产品路径和生产批次来计算产品质量指标或惩罚指标的方法, 来解决制造业所面临的控制制造过程生产质量的问题。

针对装备生产过程质量评估的研究总体来说相对较少, 李正映等人^[14]结合装备生产过程质量监督工作实际, 提出基于风险识别的装备生产过程质量监督模式, 针对不同装备质量监督模式进行风险因素分析和风险分类, 为后续风险管理研究提供理论支撑。王肖等人^[15]针对徐州装备制造业的协同创新问题, 对该企业在生产零部件过程中存在的质量问题运用 C4.5 决策树进行数据挖掘, 实现对该公司生产过程的质量管理。丁敬海等人^[16]结合装备研制生产质量管理与监督工作实际, 推进装备质量工作联合管理, 分析质量管理监督工作重点和增强质量管理监督效能的有关问题。

通过对上述相关文献的综述可以看出, 尽管目前针对装备生产过程阶段的质量评估的研究已较为深入, 但是依然存在如下问题: 首先是评价指标的选取和构建方面分析不够深入全面, 缺乏客观性和科学性; 其次是指标赋权偏向主观和随机; 最后是评价模型的评判标准较为单一片面。

针对上述问题, 本文提出了基于 DEMATEL-EWM 二维云模型的装备生产过程质量评估方法, 通过对问题场景和问题因素的客观分析, 构建出质量评估指标, 根据生产过程质量监督的定义将承制单位自查符合度和监督代表检查满意度两个维度作为评估各指标的基础变量。采用决策实验室法 (DEMATEL, decision making trial and evaluation laboratory) 和熵权法 (EWM, entropy weight method) 分别确定指标的主、客观权重, 并引入距离函数概念最终确定各级指标的组合权重, 降低权重计算的主观性和随机性。建立二维云模得到云特征值, 绘制二维云图初步判定质量等级, 计算贴近度精确判定结果。以某型军用柴油发动机装配过程为例, 验证了所提方法的有效性。

1 装备生产过程质量评估指标与基础变量

建立评估指标是实现质量远程评估的前提和基础。通过科学合理地选取和设计评估指标, 可以全面地反映装备生产过程的质量状况, 以衡量和判断质量问题的存在和程度。评估指标的建立是一个复杂而重要的过程, 需要综合考虑多种因素, 通过科学合理的构建和不断地改进, 可以为质量远程评估提供一个可靠、有效的评估指标, 为质量控制和改进提供准确的依据。

1.1 装备生产过程问题场景

装备生产过程质量评估的首要环节就是指标的构建, 选择评价指标时, 为避免出现准确性差、主观性强的问题, 根据装备生产过程质量监督内容集, 结合装备生产过程阶段性的特点, 通过调查研究确定了装备生产过程的 8 个问题场景, 以及可能存在的 29 个问题因素和具体内容, 以此作为评价指标选取的重要依据。下面只进行部分展示, 见表 1。

表 1 装备生产过程问题场景

问题场景	问题因素	具体内容
领导管理	风险管控不到位	风险评估制度不完善,风险管理机制不健全,对生产过程内外部因素和相关方及其要求识别不全,应对风险的措施效果不好
	领导作用发挥不好	领导层未完全履行管理承诺,对合同甲方、监督代表和交付部队要求不够重视,对装备生产所需的资源支持力度不够
生产人员	相关人员流动大	装备生产相关人员离职、转岗频繁,人员能力素质不稳定,岗位职责不明确
	生产班组能力欠缺	生产班组内专业技术人员队伍数量少、结构不合理,业务培训和持证上岗落实不到位
设备设施	生产设备设施管理不完善	设备设施管理制度落实效果不好,设备设施台账与实际有出入,设备设施维修保养计划落实效果不好,过程运行环境控制不满足要求
	生产设备设施生产效率低下	设备设施的性能、精度、数量和配置不满足装备生产要求,生产设备设施利用率不均衡,存在闲置、过度使用情况,部分设备设施可靠性不高,经常需要修理
测量、分析和改进	质量管理体系内部审核不规范	审核程序不正规
	不合格品控制不满足要求	不合格品处置不符合规定
技术文件管理	人员管理意识不强	文件管理出现漏洞,制度落实不到位
	技术状态管理不严	技术状态标识不清、控制不严、记实不详
生产管理	设备使用不当	使用人员未按规定使用装备
	生产工艺不稳定	工艺评审不全面,工艺存在缺陷
外购管理	原材料器材供应出现短缺	合格供方开发不全面,缺乏可替代供方,或者缺乏适度的供方竞争
	供方管理不规范	对供方评价不充分
外部环境	自然环境	自然灾害或其他非人为因素的变化
	出现安全问题	应急预案准备、设备设施检查不足,导致生产过程中可能会引发的安全事故影响生产

1.2 评价指标构建

在装备生产过程相关问题场景的基础上,经过研究分析和广泛征求专家意见,形成装备生产过程问题因素集,通过讨论对问题因素集进行筛选,最终整合形成由 3 个一级指标以及对应的 12 个二级指标的装备生产过程质量评估模型,如图 1 所示。

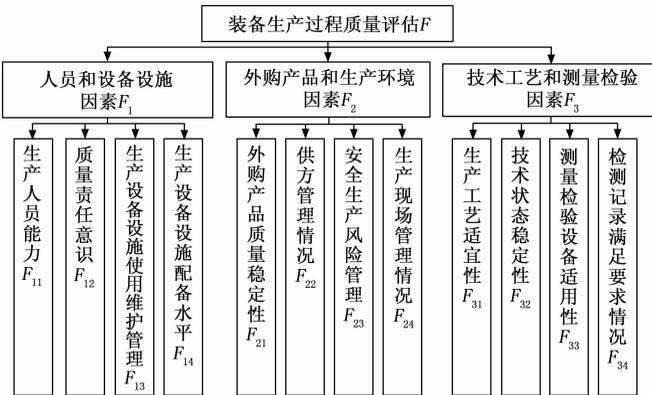


图 1 质量评估模型

1.2.1 人员和设备设施因素

生产人员能力是指生产班组内专业技能人员数量、结构和稳定性,业务培训和持证上岗落实情况;质量责任意识生产相关人员对质量管理的重视程度,质量知识和技能培训效果,对质量标准和要求的理解程度;生产设备设施使用维护管理是生产设备设施管理制度落实情况,设备使用情况,设备设施维修保养计划落实情况。生产设备设施配备水平是生产设备设施的性能、精度、数量和配置情况。

1.2.2 外购产品和生产环境因素

外购产品质量稳定性是指采购过程控制情况,入厂复检是否落实;供方管理情况是充分了解市场开发考察新供方,严格落实年度供方评价,相同外购产品供方合理竞争;安全生产风险管理是安全生产风险管理包括识别、评估和控制潜在风险,确保生产过程中的安全与合规;生产现场管理情况是生产现场管理情况包括设备维护、环境卫生、人员培训和操作规范,确保生产效率和安全。

1.2.3 技术工艺和测量检验因素

生产工艺适宜性是指落实工艺评审情况,工艺总体方案、工艺规范、工艺规程等工艺文件满足产品设计要求和相关标准的规定;技术状态稳定性是编制的技术状态管理计划合理性,技术状态标识、控制、记实、验证与审核等技术状态管理活动是否有效^[17];测量检验设备适用性是测量检验设备适用性评估包括设备精度、稳定性、功能范围和与标准的兼容性,确保其在实际应用中的有效性;检测记录满足要求情况是指检测记录满足要求情况包括数据完整性、准确性和符合标准规范的程度,确保检测过程的合规性。

1.3 装备生产过程质量评估基础变量

根据装备生产过程质量评估的定义可知,生产过程质量主要由承制单位自查符合度和监督代表检查满意度这两个方面的总体反映。

承制单位的自查符合度是指装备生产单位对其生产流程是否符合预设的质量标准和要求的自我检验和评估。这种检查通常包括对生产线上的设备、材料、工艺流程、操

作规程等的全方位审查, 自查符合度高的单位能够在生产过程中及时发现并解决问题, 从而保证装备的质量。自检结果不仅可作为承制单位自我改进的依据, 同时也向监督代表展示了单位对质量控制的重视程度。

监督代表检查满意度是指用户实际派驻的监督代表人对承制单位的装备生产过程进行现场检验后, 对其生产质量、管理水平和服务态度等方面所给出的评价。监督代表作为装备生产的监督者和检验者, 其检查重点通常包括生产现场的环境卫生、员工的操作规范性、产品质量控制的有无漏洞等。监督代表的检查结果能够直接体现出装备生产过程中的问题, 同时也是对承制单位生产和管理水平的重要反映。监督代表满意度的提升意味着承制单位的装备生产过程更加规范和有序, 能够更好地满足装备的需求。因此, 选择承制单位自查符合度和监督代表检查满意度作为装备生产过程质量评估的基础变量, 从两个维度综合评估更为全面。

2 基于 DEMATEL-EWM 组合赋权的装备生产过程质量评估指标

采用 DEMATEL 法和 EWM 法分别确定质量评估指标的主、客观权重, 并引入距离函数概念最终确定各级指标的组合同权重, 可以有效降低权重计算的主观性和随机性, 提高指标赋权的科学性。

2.1 DEMATEL 法主观权重确定

决策实验室分析法 (DEMATEL) 是系统科学的一种方法论, 对于分析系统要素之间的关联关系、重要程度以及相互影响的程度十分有效^[18]。

2.1.1 确定初始影响矩阵 O

邀请 10 位装备采购领域、装备科研领域、质量评估领域专家运用德尔菲法对各风险因素之间的关系进行评价, 专家评价语义标度如表 2 所示, 将各因素之间的相关性进行判断, 得到初始影响矩阵 O 。需要注意的是, 本步骤的评价是有向评价, 即因素 A 对因素 B 的影响和因素 B 对因素 A 的影响是两个不同的标度, 且同一因素的相互影响为 0。

表 2 专家评价语义标度表

语义变量	没有影响	较小影响	一般影响	较强影响	强烈影响
标度	0	1	2	3	4

2.1.2 计算综合影响矩阵 T

将初始影响矩阵 O 进行规范化处理, 得到规范化矩阵 N :

$$N = \frac{O}{\max(\sum_{j=1}^n o_{ij})}, (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

其中: i 为矩阵中横向第 i 个影响因素, j 为矩阵中纵向第 j 个影响因素, o_{ij} 为初始影响矩阵 O 中的元素, n 为因素个数。

由于不同因素之间存在直接影响关系和间接影响关系, 语义标度评价的是因素之间的直接影响关系, 间接影响关

系也应考虑在内, 式 (2) 表示因素之间增加的间接影响, 因此利用式 (2) 来计算综合影响矩阵 T :

$$T = N(I - N)^{-1} \quad (2)$$

2.1.3 计算各问题因素影响度和被影响度

按照式 (3) 和式 (4) 分别计算各问题因素的影响度 D_i 和被影响度 C_i , 其中, 影响度 D_i 是因素对应的行之和, 被影响度 C_i 因素对应的列之和。

$$D_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

$$C_i = \sum_{j=1}^n t_{ji} (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

其中: t_{ij} 为综合影响矩阵 T 中元素。

2.1.4 中心度 M_i 和原因度 R_i

按照式 (5) 和式 (6) 分别计算各因素的中心度 M_i 和原因度 R_i , 其中, 中心度 M_i 是影响度 D_i 与被影响度 C_i 之和, 原因度 R_i 是影响度 D_i 与被影响度 C_i 之差。若 $R_i > 0$, 表示该风险因素对其他因素影响大。

$$M_i = D_i + C_i \quad (5)$$

$$R_i = D_i - C_i \quad (6)$$

2.1.5 计算主观权重, 表达式为:

$$\alpha_i = \frac{\sqrt{M_i^2 + R_i^2}}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{M_i^2 + R_i^2})} \quad (7)$$

2.2 EWM 法客观权重确定

熵权法 (EWM) 是一种客观赋权方法, 利用信息熵来计算指标权重的方法, 广泛应用于多指标综合评价中。

2.2.1 数据标准化

由于不同指标的量纲和范围可能不同, 需要对原始数据进行标准化处理。常用的标准化方法包括极差标准化和 Z-score 标准化。

2.2.2 计算各指标的信息熵

对于标准化后的数据, 计算每个指标的熵值。公式为:

$$E_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (8)$$

其中: m 为样本数, p_{ij} 为第 i 个指标在第 j 个样本中的比例。

2.2.3 确定客观权重

根据每个指标的熵值, 计算每个指标的信息熵的差异性, 即熵权。公式为:

$$\beta_i = \frac{E_i - \min(E)}{\sum_{j=1}^n [E_i - \min(E)]} \quad (9)$$

其中: $\min(E)$ 是所有指标熵值中的最小值, n 为指标总数, β_i 是第 i 个指标的权重。

2.3 组合权重

为提高质量评价的科学性, 本文引入距离函数的概念, 通过线性加权反映敏感性因素, 突出 α_i 和 β_i 之间的差异, 从而确定各指标的组合同权重。

基于距离函数的组合同权重表达式为:

表 2 评价指标权重

标度	装备生产过程质量等级描述	符合度描述	满意度描述	质量等级量化区间	标准云数字特征
I	优秀, 远远超出预期	完全符合	非常满意	[0, 2)	(0, 1.030, 0.5236)
II	良好, 在大多数方面均达到	高度符合	满意	[2, 4)	(3.09, 0.6367, 0.3236)
III	一般	基本符合	一般	[4, 6)	(5, 0.3935, 0.2)
IV	待改进	部分符合	不满意	[6, 8)	(6.91, 0.6367, 0.3236)
V	不合格	不符合	非常不满意	[8, 10]	(10, 1.030, 0.5236)

$$[\mu - (1 - \mu)]^2 = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \beta_i)^2 \right] \quad (10)$$

$$w_i = \mu \alpha_i + (1 - \mu) \beta_i \quad (11)$$

其中: μ 为权重分配系数, w_i 为各指标的组权重值。

3 基于二维云模型的装备生产过程质量评估

二维云模型是一维云模型的延伸, 由两个一维云模型组合得到^[19], 从承制单位自查符合度和监督代表检查满意度两个维度对装备生产过程质量进行评估, 并通过可视化的方式输出评估结果。

3.1 二维综合质量云

质量云是为衡量装备生产过程的质量等级, 针对各个指标的承制单位自查符合度和监督代表检查满意度进行量化的综合表征, 通过邀请相关领域专家以 10 分制分别从承制单位自查符合度和监督代表检查满意度两个方面对各项指标打分, 规定分值精度为 0.1。每个承制单位自查符合度和监督代表检查满意度分值分别形成一个云滴, 组成该指标的符合度云和满意度云, 统称为二维质量云。

各个指标的符合度云和满意度云计算公式如下:

$$\begin{cases} E_x = \frac{1}{q} \sum_{k=1}^q x_k \\ E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{q} \sum_{k=1}^q |x_k - E_x| \\ H_e = \sqrt{|S^2 - E_n^2|} \\ S^2 = \frac{1}{q-1} \sum_{k=1}^q (x_k - E_x)^2 \end{cases} \quad (12)$$

其中: E_x 为样本期望; E_n 为熵; H_e 为超熵; x_k 为第 k 个专家打分值; S^2 为样本方差; q 为专家数。

3.2 二维标准云

利用各个质量等级构建 5 个二维标准云, 分别用优秀 (I 级)、良好 (II 级)、一般 (III 级)、待改进 (IV 级) 和不合格 (V 级) 来表示, 用 L_j^{\max} 和 L_j^{\min} 表示区间的上界值和下界值, 考虑到专家评分习惯, 采用改进黄金分割法确定 5 个标准云特征值^[20], 标准云的数据特征计算为:

$$\begin{cases} E_{x_{n-2}} = L_j^{\min} \\ E_{x_{n-1}} = E_{x_n} - 0.382(E_{x_n} - L_j^{\min}) \\ E_{x_0} = \frac{L_j^{\max} - L_j^{\min}}{2} \\ E_{x_{n+1}} = E_{x_0} + 0.382(L_j^{\max} - E_{x_0}) \\ E_{x_{n+2}} = L_j^{\max} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} E_{n_{-1}} = E_{n_{-1}} = \frac{0.382(L_j^{\max} - L_j^{\min})}{6} \\ E_{n_0} = 0.618E_{n_{-1}} \\ E_{n_{-2}} = E_{n_{-2}} = \frac{E_{n_{-1}}}{0.618} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} H_{e_{n-1}} = H_{e_{n+1}} = \frac{H_{e_n}}{0.618} \\ H_{e_{n-2}} = H_{e_{n+2}} = \frac{H_{e_{n+1}}}{0.618} \end{cases} \quad (15)$$

式中: E_{x_n} 、 E_n 、 H_e 分别为标准云中间的期望、熵、超熵, $E_{x_{n-1}}$ 、 $E_{x_{n-2}}$ 、 $E_{n_{-1}}$ 、 $E_{n_{-2}}$ 、 $H_{e_{n-1}}$ 、 $H_{e_{n-2}}$ 分别为标准云左侧的期望、熵、超熵; $E_{x_{n+1}}$ 、 $E_{x_{n+2}}$ 、 $E_{n_{+1}}$ 、 $E_{n_{+2}}$ 、 $H_{e_{n+1}}$ 、 $H_{e_{n+2}}$ 分别为标准云右侧的期望、熵、超熵。

假设论域 $[L_j^{\min}, L_j^{\max}]$ 取值为 $[0, 10]$, H_{e_n} 取值 0.2。二维标准云具体数值如表 2 所示。

3.3 质量标准云图

将二维质量云和标准云的特征值输入 Matlab 正向云发生器^[21], 得到二者云图, 通过对比质量云和标准云之间的图形分布位置, 确定装备生产过程质量等级。装备生产过程质量评估标准云图如图 2 和图 3 所示。

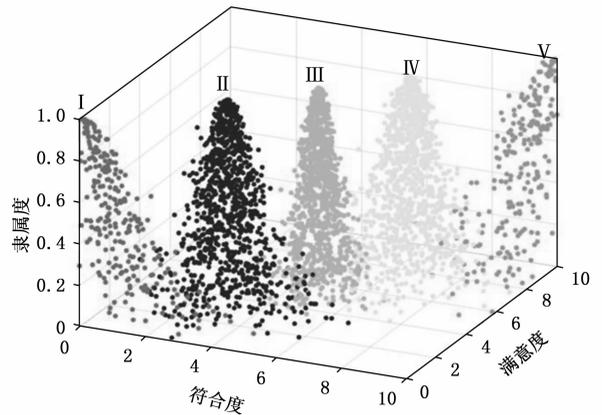


图 2 装备生产过程质量评估标准云图

3.4 贴近度

由于综合风险云图和标准云图有一定相似性, 三维视图观察可能存在视觉误差。为更准确地确定质量等级, 使用贴近度来反映二者之间的贴近程度。贴近度越大, 说明待评估的质量云图与标准云等级越接近。贴近度计算公式如下:

$$N = \frac{1}{\sqrt{(E_x - \bar{E}_x)^2 + (E_y - \bar{E}_y)^2}} \quad (16)$$

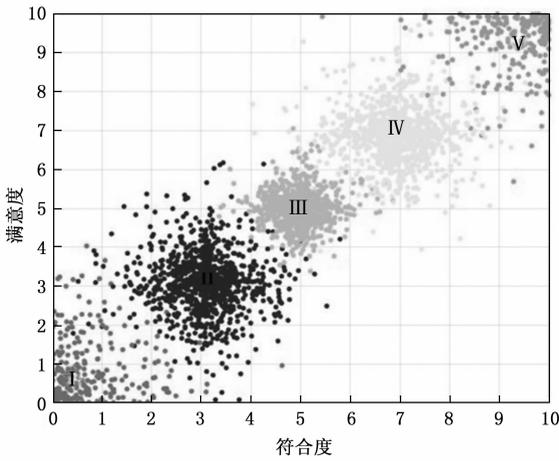


图 3 装备生产过程质量评估标准云俯视图

式中, N 为贴近度; E_x 、 E_y 分别为综合风险云两个基础变量期望值; \bar{E}_x 、 \bar{E}_y 分别为标准云两个基础变量期望值。

4 实例分析

下面以某工厂军用柴油发动机生产过程中的装配过程为例。按照职能定位、工作方法、信息管理和合同监管工作要求, 针对装配过程质量评估开展系统研究。

4.1 柴油发动机装配过程介绍

柴油发动机装配直接影响发动机的性能、效率和可靠性, 精确的装配确保了各个部件的配合度和密封性, 避免了潜在的泄漏和故障, 从而提高发动机的运行稳定性, 以某型柴油发动机为例, 具体技术指标见表 3。

表 3 柴油发动机技术指标

项目	指标	项目	指标
工作循环	四冲程	单缸容积	1.984
混合气系统	直喷增压中冷	气缸容积	15.874
缸盖排列	V 型 90°夹角	压缩比	16.5
旋向	面向飞轮逆时针旋转	最大扭矩	760 NM
气缸数	8	发动机转速	1 500~2 100
发火顺序	A1 B4A4B1 B3A3B2A2	发动机最低转速	550
发火间隔	90°	机油耗率	小于燃油耗的 0.3%
缸径/冲程	132×145	发动机重量	1 060

柴油发动机在实际的装配过程中, 存在很多不确定性因素, 严重影响着柴油发动机装配过程质量, 因此, 对柴油发动机装配过程的质量进行评估具有一定的现实意义和典型性。

4.2 权重计算

据前文所构建的装备生产过程质量评估指标以及 DEMATEL 法运算规则, 邀请 10 位装备采购领域、装备科研领域、质量评估领域专家运用德尔菲法对各指标之间的关系进行评价, 进而对柴油发动机装配过程运用 DEMATEL 法进行主观赋权计算。

初始影响矩阵 O 如表 4 所示。

表 4 初始影响矩阵示意图

	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{14}	F_{21}	F_{22}	F_{23}	F_{24}	F_{31}	F_{32}	F_{33}	F_{34}
F_{11}	0	2	2	0	2	1	0	1	2	0	0	2
F_{12}	4	0	3	0	2	3	2	3	1	1	0	3
F_{13}	1	1	0	1	0	0	3	2	0	1	0	0
F_{14}	1	0	0	0	0	0	2	3	4	1	0	0
F_{21}	0	1	0	0	0	3	0	0	1	1	0	1
F_{22}	1	1	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0
F_{23}	1	2	2	1	0	0	0	4	1	1	1	1
F_{24}	1	2	4	2	0	0	3	0	2	1	1	0
F_{31}	1	0	0	1	1	0	0	1	0	4	0	0
F_{32}	0	1	0	0	1	0	1	1	3	0	2	0
F_{33}	1	1	2	2	2	1	1	1	0	0	0	3
F_{34}	2	2	0	0	3	3	1	0	1	2	1	0

中心度和原因度散点如图 4 所示。

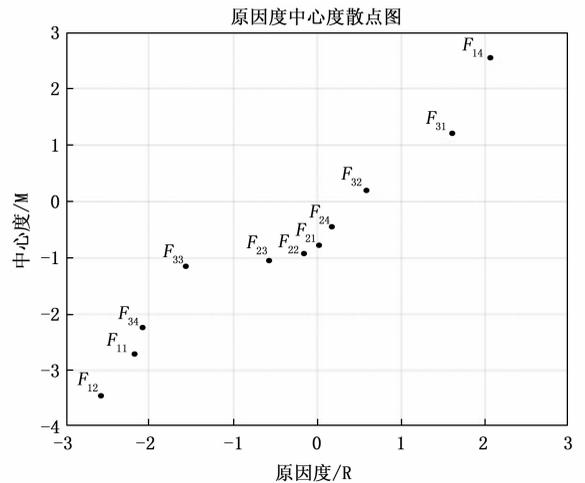


图 4 中心度和原因度散点图

而后根据前文所提 EWM 法客观赋权和组合赋权的相关公式, 最终求解得到所有指标的权重, 如表 5 所示。

二级评价指标的权重分布如图 6 所示。

从权重分布可以看出, DEMATEL 法主观权重、EWM 法客观权重以及组合权重三者的分布较为吻合, 且组合权重分布大致处于主观权重和客观权重之间, 进一步验证了本文所提权重计算方法的科学性。

4.3 质量云数字特征

根据前文所构建的指标, 从人员和设备设施因素、外购产品和生产环境因素、技术工艺和测量检验因素 3 个一级指标和 12 个二级指标对柴油发电机装配过程进行质量评估。通过专家对各指标的承制单位自查符合度和监督代表检查满意度进行打分, 规定打分值满分为 10 分, 分值越高表明该指标概率或程度越大。前期已根据相关领域专家意见确定装备生产过程质量评估指标权重, 应用前文公式确定综合质量云特征值、一级指标云特征值和二级指标云特征值的数字特征, 结果如表 6 所示。

表 5 评价指标权重

1 级指标	权重			2 级指标	权重		
	DEMATEL 法权重	EWM 法权重	组合权重		DEMATEL 法权重	EWM 法权重	组合权重
F_1	0.521	0.498 4	0.510 2	F_{11}	0.150 7	0.134 5	0.143 0
				F_{12}	0.186 9	0.176 4	0.181 9
				F_{13}	0.040 9	0.063 2	0.051 5
				F_{14}	0.142 5	0.124 3	0.133 8
F_2	0.146 8	0.215 1	0.179 3	F_{21}	0.033 9	0.054 1	0.043 6
				F_{22}	0.039 6	0.047 4	0.043 3
				F_{23}	0.052 2	0.070 4	0.060 8
				F_{24}	0.021 1	0.043 2	0.031 7
F_3	0.332 2	0.286 5	0.310 3	F_{31}	0.087 6	0.062 3	0.075 6
				F_{32}	0.026 7	0.043 1	0.034 5
				F_{33}	0.084 6	0.077 7	0.081 3
				F_{34}	0.133 3	0.103 4	0.119 0

表 6 质量云数字特征

综合质量云特征值			一级指标云特征值			二级指标云特征值		
项目	符合度	满意度	指标	符合度	满意度	指标	符合度	满意度
F	(5.939,0.632, 0.352)	(6.274,0.593, 0.384)	F_1	(7.086,0.719, 0.385)	(7.197,0.727, 0.402)	F_{11}	(7.456,0.763, 0.321)	(7.453,0.658, 0.395)
						F_{12}	(8.115,0.907, 0.310)	(8.423,1.117, 0.313)
						F_{13}	(7.522,0.693, 0.396)	(7.534,0.761, 0.285)
						F_{14}	(6.553,0.822, 0.282)	(8.395,0.892, 0.421)
			F_2	(5.043,0.521, 0.271)	(5.226,0.513, 0.263)	F_{21}	(5.432,0.614, 0.122)	(5.797,0.527, 0.151)
						F_{22}	(6.246,0.505, 0.253)	(6.223,0.517, 0.235)
						F_{23}	(6.088,0.514, 0.215)	(6.156,0.546, 0.248)
						F_{24}	(5.607,0.562, 0.226)	(5.972,0.488, 0.255)
			F_3	(6.146,0.599, 0.342)	(6.012,0.586, 0.287)	F_{31}	(6.332,0.608, 0.388)	(6.435,0.601, 0.326)
						F_{32}	(6.784,0.552, 0.2565)	(6.812,0.622, 0.349)
						F_{33}	(7.684,0.652, 0.356)	(6.784,0.552, 0.156)
						F_{34}	(6.784,0.552, 0.226)	(6.694,0.592, 0.356)

4.4 绘制综合质量云图

将表 2 标准云特征值和表 6 综合质量云特征值输入 Matlab 正向云发生器, 得到标准云和综合质量云的对比图, 如图 7 图 8 所示。由图可知, 某型军用柴油发动机装配过程综合质量云介于 III 和 IV 级标准风险云之间, 距离 IV 级更近, 初步判定柴油发动机装配过程质量等级为 IV 级, 质量有待改进。

为了进一步反映指标层面的具体风险对综合风险影响

的大小, 将一级指标云特征值分别输入 Matlab 正向云发生器, 结合标准云绘制各一级指标云对比图, 如图 9~14 所示。

由图可知, 人员和设备设施因素基本与 IV 级重合; 外购产品和生产环境因素位于 III 和 IV 之间, 更接近于 III 级; 技术工艺和测量检验因素位于 III 和 IV 之间, 介于两级中间位置。说明人员和设备设施质量问题最大, 技术工艺和测

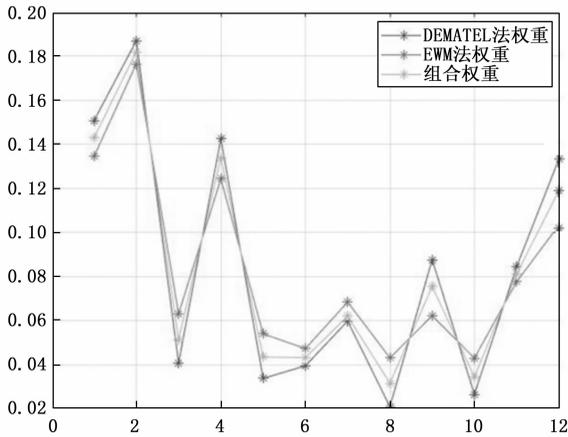


图 6 权重分布

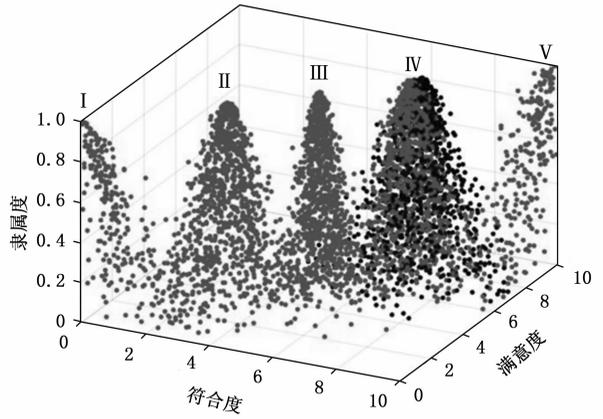


图 9 人员和设备设施因素指标云图

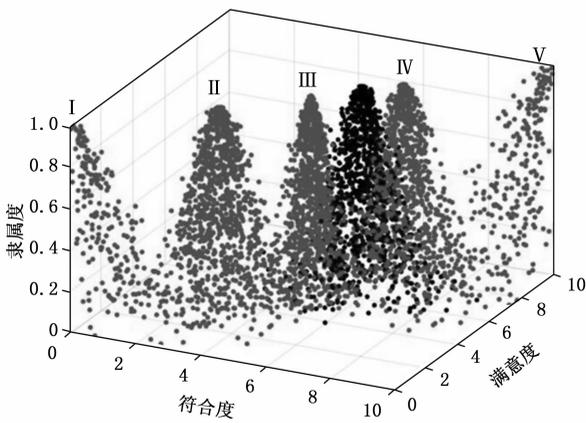


图 7 综合质量云图

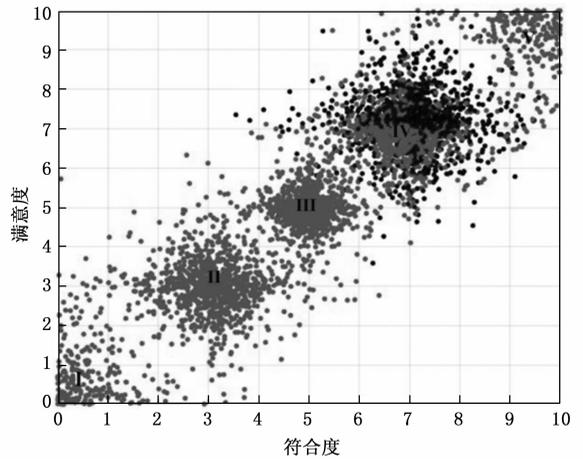


图 10 人员和设备设施因素指标云俯视图

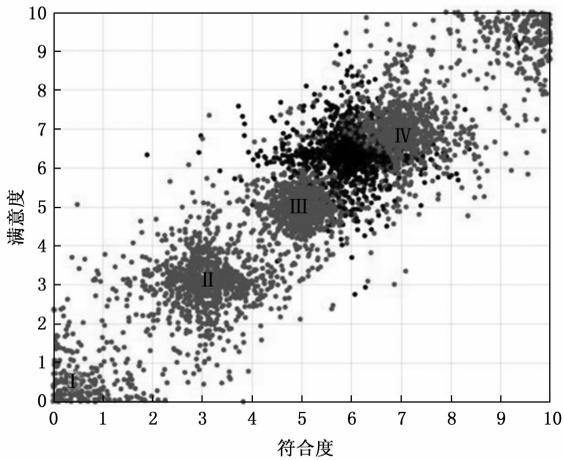


图 8 综合质量云图俯视图

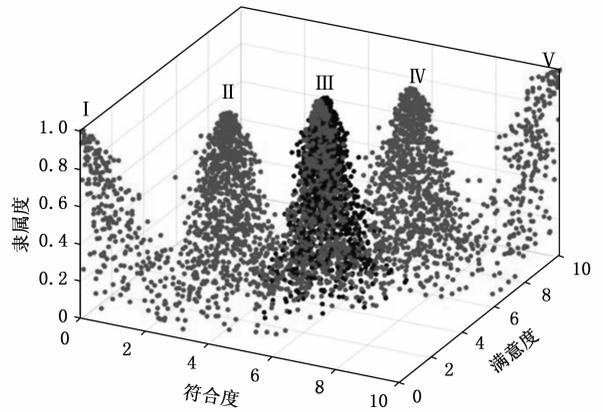


图 11 外购产品和生产环境因素指标云图

量检验次之, 外购产品和生产环境最小。

4.5 计算贴近度

通过式 (16) 计算综合质量云贴近度, 进一步确定柴油发动机装配过程质量等级。综合质量云与 5 个标准云的贴近度分别用 N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 表示: $N_1=0.1158$;

$N_2=0.2341$; $N_3=0.6318$; $N_4=0.8615$; $N_5=0.1814$ 。

贴近度计算结果排序: $N_4 > N_3 > N_2 > N_5 > N_1$, 与 IV 级标准云贴近度最大。因此, 最终确定某型军用柴油发动机装配过程质量属于待改进级别, 需要高度重视装配过程的质量问题, 或限期进行整改, 或暂缓装配, 待调整人员设备等相关因素后再继续装配过程。

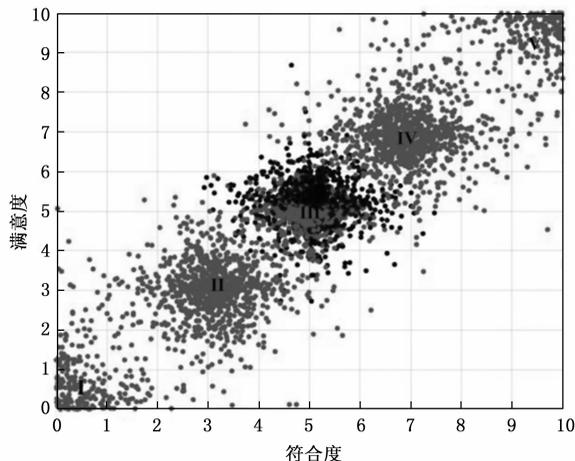


图 12 外购产品和生产环境因素指标云俯视图

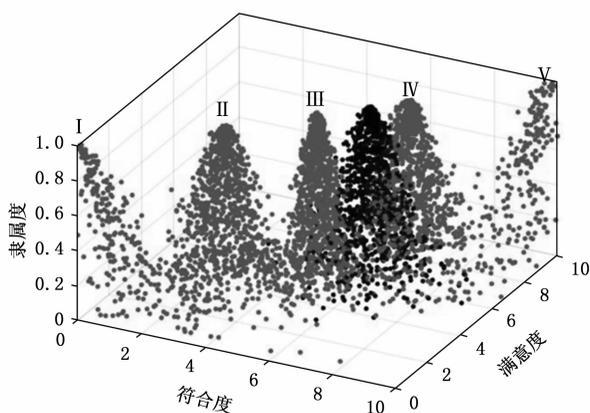


图 13 技术工艺和测量检验因素指标云图

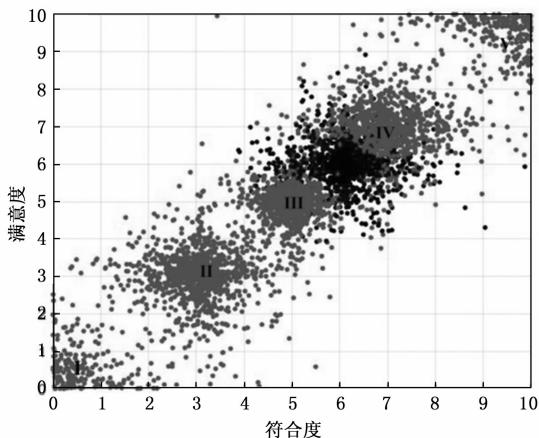


图 14 技术工艺和测量检验因素指标云俯视图

5 结束语

本文提出基于 DEMATEL-EWM 二维云模型的装备生产过程质量评估方法,对比现有方法的优势之处如下:

1) 基于装备生产过程特点,在总结装备生产过程相关问题场景的基础上,构建了 3 个一级指标和 12 个二级指标

的装备生产过程评估指标。

2) 运用 DEMATEL 法和 EWM 法分别计算各评估指标基础变量的主、客观权重,并引入距离函数组合赋权,降低权重计算的主观性和随机性。

3) 以承制单位自查符合度和监督代表检查满意度作为装备生产过程质量评估的基础变量,构建装备科研项目费用风险的二维云模型,能够更为全面、客观地反映出装备生产过程特征。

本文通过以某型军用柴油发动机为例开展质量评估分析,充分验证了基于 MATEL-EWM 二维云模型在装备生产过程质量评估方面的有效性和可行性,可以作为有效解决装备生产过程质量评估中的高度模糊性问题的有效方法,同时可为其他同类装备项目提供参考依据。

参考文献:

- [1] 总装备部综合计划部. 装备质量监督与检验验收 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [2] 李泽西, 孟 晨, 王 成. 基于本体的装备质量监督与管理信息共享技术与应用研究综述 [J]. 飞航导弹, 2019 (5): 73-78.
- [3] 朱常安, 胡文华, 郭宝峰, 等. 基于熵权法和组合隶属函数的雷达质量评估方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (6): 302-307.
- [4] 孙希彤, 刘秋生, 王乐军. 基于改进权值和 TOPSIS 质量评估方法 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (1): 228-231.
- [5] 安 进, 徐廷学, 曾 翔, 等. 组合赋权下的装备质量状态信息融合评估方法 [J]. 控制与决策, 2018, 33 (9): 1693-1698.
- [6] 匡小平, 杨冰峰, 张 尧. 后勤机动装备成品检验质量评估 [J]. 军事交通学院学报, 2018, 20 (1): 37-41.
- [7] WANG H, WANG D, WANG P. A novel quality risk evaluation framework for complex equipment development integrating PHFS-QFD and grey clustering [J]. Grey Systems: Theory and Application, 2024, 14 (1): 144-159.
- [8] 郭霄汉, 唐朝华, 陈壮宇, 等. 基于层次分析法的打叶复烤生产过程质量评估 [J]. 中国设备工程, 2022 (20): 129-131.
- [9] 周昭程, 柯锡旭, 谢美好, 等. 浅议人造板产品生产过程质量控制点的风险识别与对策 [J]. 中国人造板, 2019, 26 (5): 30-33.
- [10] 张倩茹, 李安平. 中药饮片生产过程中的风险评估对其质量影响研究 [J]. 亚太传统医药, 2017, 13 (7): 158-159.
- [11] 张 健. 疫苗生产过程的质量风险评估与控制 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [12] ZHONG C, PENG J. Quality risk assessment of prefabricated steel structural components during production using fuzzy Bayesian networks [J]. Buildings, 2024, 14 (6): 1624.
- [13] DUONG L T, TRAVE-MASSUYES L, SUBIAS A, et al. Assessing product quality from the production process logs [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117: 1615-1631.

- [14] 李正映, 张桦, 高速铁路, 等. 基于风险识别的装备生产过程质量监督模式研究 [J]. 项目管理技术, 2019, 17 (9): 132-136.
- [15] 王肖, 曹雅, 赵红梅. 基于 C4.5 决策树的装备制造业协同创新问题研究——基于生产过程质量管理提升的视角 [J]. 内燃机与配件, 2019 (6): 186-188.
- [16] 丁敬海, 郭传友. 装备研制生产过程中质量管理与监督工作研究 [J]. 设备管理与维修, 2017 (19): 9-10.
- [17] 刘欢欢, 韩叶, 牛永琛. 基于 GJB 3206B 的武器装备技术状态管理研究 [J]. 航空标准化与质量, 2023 (s1): 176-179.
- [18] 戴俊. 大型公共建筑工程总承包项目造价管理绩效评价研究 [D]. 南京: 东南大学, 2022.
- [19] SUN H, ZHU M, DAI Y, et al. Dynamic risk early warning

(上接第 256 页)

接收信号低信噪比下的漏帧率和错帧率。经仿真分析, 本算法在系统符号速率低, 大多普勒频偏和变化率下, 保证了误码率指标要求。解决了现有方法速度、精度无法兼顾的问题, 验证了算法的可行性, 有较强的工程实用价值。

鉴于本系统设计的传输数据速率较低, 若可选取更高的数据速率, 抵抗的最大频偏会显著增加, 可作为后续改进方向之一。

参考文献:

- [1] ZHANG Z. Spectral and time-frequency analysis [J]. EEG Signal Processing and Feature Extraction, 2019: 89-116.
- [2] 宋可桢, 王冲. 高动态大多普勒猝发信号的 3 种捕获方法性能分析 [J]. 数字通信世界, 2021 (8): 97-98.
- [3] 肖跃, 王永兵, 陈昊, 等. 一种卫星移动通信系统的时频同步方法及装置 [P]. 江苏: CN115103436A, 2022-09-23.
- [4] 都文杰, 荆文芳, 陈校非, 等. 低轨卫星高动态信号捕获算法研究 [J]. 时间频率学报, 2023, 46 (2): 150-160.
- [5] 唐高亚. 高动态卫星通信时频同步技术研究 with FPGA 实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2022.
- [6] 张贺鑫, 雷文礼, 王雨婷. 基于 CPCI 总线的航天器通信信号设备故障检测系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (2): 1-4.
- [7] CLASSEN F, MEYER H. Frequency synchronization algorithms for OFDM systems suitable for communication over frequency selective fading channels [C] //Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC). IEEE, 1994: 1655-1659.
- [8] KAY S. A fast and accurate single frequency estimator [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1989, 37 (12): 1987-1990.
- [9] FITZ M P. Planar filtered techniques for burst mode carrier synchronization [C] //IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM91: Countdown to the New Millennium. Conference Record. IEEE, 1991: 365-369.
- [10] LUISE M, REGGIANNINI R. Carrier frequency recovery in all-digital modems for burst-mode transmissions [J]. IEEE

- system for tunnel construction based on two-dimensional cloud model [J]. Expert Systems with Applications, 2024, 255: 124799.
- [20] 李敬强, 樊天辰, 周妍汝, 等. 基于云模型的民航监察员队伍能力综合评价 [J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48 (12): 2425-2433.
- [21] 李海文, 鲍学英. 基于动态权重一二维云模型的青藏高原交通工程高地温隧道施工风险评估 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2022, 55 (10): 1010-1018.
- [22] SUN Y N, CHEN Q L, HU J H, et al. An integrated CRN-SVR approach for the quality consistency improvement in a diesel engine assembly process [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2024, 37 (9): 1126-1141.
- [11] LI M, CHENG Y, WANG X, et al. A synchronization acquisition algorithm for wireless communication system in high dynamic environment [C] //2017 IEEE 17th International Conference on Communication Technology (ICCT). IEEE, 2017: 1407-1411.
- [12] 龚超, 张邦宁, 郭道省. 基于 FFT 的快速高精度载波参数联合估计算法 [J]. 电子学报, 2010, 38 (4): 766-770.
- [13] 刘洋. 基于前向结构的高动态突发信号载波同步算法 [J]. 电讯技术, 2017, 57 (5): 580-585.
- [14] 田甜. 卫星突发信号载波同步技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [15] TIAN L, YI F C, WEI J. An algorithm for Doppler shift and Doppler rate estimation based on 11 symbols [C] //Proceedings of 2012 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet). Yichang, IEEE, 2012: 1626-1629.
- [16] 刘洋. 导频辅助的突发信号多普勒频偏及变化率联合估计 [J]. 电讯技术, 2024, 64 (7): 1115-1122.
- [17] LEE Y, CHOI J P. Performance evaluation of high-frequency mobile satellite communications [J]. IEEE Access, 2019, 7: 49077-49087.
- [18] IBNKAHLA M, RAHMAN Q M, SULYMAN A I, et al. High-speed satellite mobile communications: technologies and challenges [J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92 (2): 312-339.
- [19] 丁亚南, 庞文镇, 张艳君, 等. GMR-1 卫星移动通信系统中融合波束覆盖的动态信道分配算法 [J]. 移动通信, 2020, 44 (9): 40-43.
- [20] 童业平, 桂振文. 一种卫星移动通信中的频率同步算法 [C] //第十七届卫星通信学术年会论文集, 2021: 281-288.
- [21] WANG J, JIANG C, KUANG L. High-mobility satellite-UAV communications: challenges, solutions, and future research trends [J]. IEEE Communications Magazine, 2022, 60 (5): 38-43.