

doi: 10.7690/bgzd.2025.07.019

# 多品种混线生产下微组装质量层次评估方法

刘云峰<sup>1</sup>, 张晏铭<sup>2</sup>, 李 亮<sup>1</sup>

(1. 火箭军某军事代表室, 成都 610052; 2. 中国电子科技集团公司第二十九研究所, 成都 610036)

**摘要:** 为解决射频微波产品离散制造中产品种类多和变批量混线生产模式下过程质量评估存在的问题, 提出一种工艺质量层次综合评估方法。在对生产过程质量数据聚类基础上, 结合层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)构建了工艺质量评估架构和瓶颈度评估算法, 并对模型和算法在不同品种、批量和混线离散制造模式等多种约束条件下的性质进行讨论。以微波射频产品的微组装工艺质量数据为案例, 对该评估方法进行应用验证。结果表明, 该评估模型表现出较好的工艺过程质量评估能力。

**关键词:** 电子装备; 质量数据; 多品种混线; 瓶颈识别; 层次分析法

**中图分类号:** TB114.37 **文献标志码:** A

## A Hierarchical Evaluation Method for Micro-assembly Quality Under Multi-variety Mixed-line Production

Liu Yunfeng<sup>1</sup>, Zhang Yanming<sup>2</sup>, Li Liang<sup>1</sup>

(1. Military Representative Office of Rocket Force, Chengdu 610052, China;

2. No.29 Research Institute of CETC, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of process quality evaluation in the discrete manufacturing of RF and microwave products under the multi-type and variable batch mixed production mode, a comprehensive evaluation method of process quality level was proposed. Based on the clustering of production process quality data, the process quality evaluation framework and the bottleneck degree evaluation algorithm were constructed by combining the analytic hierarchy process (AHP), and the properties of the model and the algorithm under various constraints such as different varieties, batch and mixed-line discrete manufacturing modes were discussed. Taking the micro-assembly process quality data of microwave and radio frequency products as an example, the evaluation method was verified. The results show that the evaluation model has a good ability to evaluate the process quality.

**Keywords:** electronic equipment; quality data; multi-variety mixed line; bottleneck identification; AHP

### 0 引言

近年来, 装备采购体制改革、国防工业格局调整以及“武器装备信息化、信息装备武器化”的深入推进, 促使微波射频类产品得到广泛运用。该类产品采用了射频电路设计、天线设计、信号处理、微波电路集成等多项技术。其生产过程质量是质量体系的关键环节, 质量跟踪、分析与管理对于质量保障至关重要<sup>[1]</sup>, 当前针对生产过程质量分析方法研究应用多聚焦于规模化生产场景。陈瑞启等<sup>[2]</sup>针对设计数据种类繁多、迭代频繁、工艺性审查数据专业和种类复杂等设计工艺性审查难点问题, 提出基于规则的设计工艺审查技术。而工艺过程失效模式及影响分析(process failure mode and effects analysis, PFMEA)仍然是最为广泛的应用工具, 它采用风险顺序系数和工序能力指数来评估工艺质量

和稳定性<sup>[3-5]</sup>。PFMEA 作为一种标准化的分析方法, 广泛应用于航空航天、机械、半导体、软件和医疗等行业的产品设计、制造和服务过程的质量控制<sup>[6-9]</sup>。PFMEA 技术的关键在于工艺失效模式的准确识别与风险评估<sup>[10]</sup>。由于自动化生产线对流程控制较为完善, 工艺失效模式相对稳定, 因此 PFMEA 技术更侧重于风险评估。研究者们提出了多种改进方法, 如考虑产品重要性、质量和成本等多方面因素的 Interval 2 型模糊集和 FBWM 集成 PFMEA 方法<sup>[11]</sup>, 考虑模糊语境和失效模式关联性的模糊关联 FMEA 方法<sup>[12]</sup>, 以及基于多专家评估的多种评估值表述方式等<sup>[13-15]</sup>。然而, 这些研究多局限于特定产品的某工艺过程, 缺乏泛用性。

航天领域微波射频产品离散制造模式下的多维度质量评估面临多重难题, 在制造特征维度, 产线

收稿日期: 2024-09-10; 修回日期: 2024-10-20

基金项目: 装备技术基础项目(212EP42001)

第一作者: 刘云峰(1974—), 男, 四川人, 博士。

需同时处理数百种产品类型，单批次生产规模波动大，混线生产导致工艺参数频繁切换；在工艺复杂度维度，典型微波组件包含 30 余种异构部件，涉及数十道核心工序，不同产品在不同工序上质量特性波动巨大，且工艺参数随产品调整变化，使得传统方法难以有效识别质量瓶颈工序。为此，笔者结合工序生产任务、工序良率、多品种产品工艺流程等特征，构建了一种基于生产过程质量数据聚类 and 层次分析法的工艺质量评估架构和瓶颈度评估算法，能够自适应反映多品种混线生产模式下不同品种、批量及混线下工序质量水平。

## 1 射频微波产品质量数据处理

### 1.1 微波产品生产模式

射频微波产品生产流程和物料存在不良模式各异，质量信息密度低，分析困难等问题。

1) 产品具有典型的分层级特点。不同层级产品存在工艺路线重叠。微模块级产品功能结构简单，工艺流程较短；微组件级产品功能结构复杂，工艺流程繁琐。

2) 不同层级尺寸和物料差异显著。微模块在毫米级，物料涉及载板、芯片，材料脆、硬；微组件在厘米级，物料涉及连接器、金属腔体、焊料等。

### 1.2 微波产品质量特征信息聚类

为增强数据信息密度，通过构建聚类特征向量进行相似聚类，本文中构建的特征向量如表 1 所示。

表 1 产品不良聚类分析输入输出数据格式

输入向量				输出标称
产品工序	工序特征	故障模式	故障原因	产品类别

表 1 所示产品特征信息的字符型数据，采用聚类分析中  $K$  均值算法<sup>[16]</sup>，并采用凝聚度作为目标函数衡量聚类效果。凝聚度表示为：

$$\text{Total Cohesion} = \sum_{i=1}^K \sum_{x \in C_i} \cos(\mathbf{x}, \mathbf{c}_i) \quad (1)$$

## 2 工艺质量层次评估模型

### 2.1 基于层次分析的评估模型

基于层次分析法的工艺质量综合评估模型如图 1 所示，分为 4 个层次，包括目标层、准则层、方案层、预处理层。其中，目标层是质量瓶颈工序。准则层包含 4 个维度的因子。此外，在产品质量信息聚类基础上，综合考虑各工序数、各型号产品数、各工序不良数。

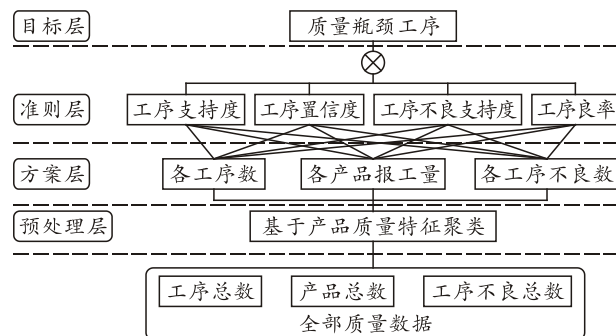


图 1 工艺质量评估模型层次架构

### 2.2 工序质量准则层维度因子

1) 在工艺质量综合评估中，某工序在所有产品型号和所有工序中出现的比率，表征工序覆盖情况，定义为工序支持度。工序支持度表示为：

$$S_X = \frac{N(X)}{N} \times 100\% \quad (2)$$

式中  $0 \leq S_X \leq 1$ ，且  $\sum S_X = 1$ ， $S_X$  越接近 1，则该工序越通用；在单一产品或单一工序下， $S_X = 1$ 。

$N = \sum_{b=1}^B \sum_{p=1}^{P_b} (\sigma_{bp})$ ，表示所有工序在所有产品中出现的

总数； $N(X) = \sum_{b=1}^B \sum_{p=1}^{P_b} (\sigma_{bp} \cdot \sigma_X)$ ，表示工序  $X$  在所有产品中出现的次数； $B$  为产品总数； $P_b$  为聚类后的  $b$  类产品的工序总数； $\sigma_{bp}$  为 1，表示  $b$  产品的  $p$  工序计数标志； $\sigma_X$  为工序标志权重项，当  $b$  产品中有工序  $X$  时取 1，无则取 0。

2) 某工序  $X$  报工的产品量与产线总报工量之比，表征工序对产线影响情况，定义为工序置信度。工序置信度表示为：

$$C_X = \frac{\sum_{b=1}^B \sum_{p=1}^{P_b} (\sigma_{bp} \cdot \sigma_X \cdot N_b)}{\sum_{b=1}^B \sum_{p=1}^{P_b} (\sigma_{bp} \cdot N_b)} \times 100\% \quad (3)$$

式中  $0 \leq C_X \leq 1$ ，且  $\sum C_X = 1$ ，某工序的  $C_X$  越接近 1，则该工序影响越大；当且仅当产线只有一种工序或一种产品时， $C_X = 1$ 。 $N_b$  为聚类后的  $b$  类产品报工数量；其余参数同  $S_X$  中的定义。

3) 工序  $X$  发生的质量问题在所有工序问题中的占比，表征工序不良显著情况，定义为工序不良支持度。工序不良支持度表示为：

$$S_{PX} = \frac{P(X)}{P} \times 100\% \quad (4)$$

式中  $0 \leq S_{PX} \leq 1$ ，且  $\sum S_{PX} = 1$ ，单一工序时， $S_{PX} = 1$ 。

$S_{PX}$  越接近 1，则工序问题越突出。

$P = \sum_{b=1}^B \sum_{p=1}^{P_b} \sum_{k=1}^{N_b} (\sigma_{bp} \cdot \sigma_{pk})$  为工序不良总数； $P(X) =$

$\sum_{b=1}^B \sum_{p=1}^{P_b} \sum_{k=1}^{N_b} (\sigma_{bp} \cdot \sigma_{pk} \cdot \sigma_{Xp})$  为  $X$  工序不良数。 $\sigma_{pk}$  为产品不

良标志权重项，在  $p$  工序出现  $k$  产品不良时取 1，否则取 0； $\sigma_{Xp}$  为工序不良标志权重项， $X$  工序出现不良时取 1，无则取 0；其余参数与  $C_X$  中参数一致。

4) 一段时间内  $X$  工序的质量问题数与  $X$  工序的产品报工总量的比值定义为工序不良率，其表示为：

$$P_{RX} = \frac{P(X)}{\sum_{b=1}^B \sum_{p=1}^{P_b} (\sigma_{bp} \cdot \sigma_{Xp} \cdot N_b)} \times 100\% \quad (5)$$

式中工序不良率  $P_{RX}$  值域为  $0 \leq P_{RX} \leq 1$ 。

## 2.3 工序质量目标层瓶颈度评估

根据质量损失模型中质量提升费效比指数关系<sup>[17]</sup>，提出目标层表征工序质量瓶颈度的综合评估指标  $P_{QX}$ ，综合评估指标表示为：

$$P_{QX} = \log_{10}(S_X \cdot C_X \cdot S_{PX} \cdot P_{RX} + 1 / e^{S_X \cdot C_X \cdot S_{PX} \cdot P_{RX}}) \quad (6)$$

具有如下性质：

1)  $0 \leq P_{QX} \leq 8$ ，该值越大则提升该工序质量的效果越显著，反之则暂不优化；

2) 当产线仅有 1 个工序， $S_X$ 、 $C_X$ 、 $S_{PX}$  均等于 1， $P_{QX}$  表征整体质量水平；

3) 在单一产品生产模式下， $S_X = C_X = 1/P_b$ ， $P_{QX}$  表征单一产品某工序不良率；

4) 在各型产品数相等情况下， $S_X = C_X$ ， $P_{QX}$  表征大批量生产模式下工艺质量。

## 3 基于综合评估模型的应用验证

以近两年生产的各型微波产品历史质量数据为例，分别对微组件和微模块产品进行测算验证，结果如表 2—3 所示。 $P_{QX}$  从高到低依次是微隙焊、粘接、清理等；而  $P_{RX}$  较高的则是固定、微隙焊等。

表 2 微组件级微波产品生产工序质量特性评估 %

工序	支持度 $S_X$	置信度 $C_X$	不良支持度 $S_{PX}$	不良率 $P_{RX}$	质量特性 $P_{QX}$
粘接	11.30	10.80	17.60	0.67	3.16
钳装	8.20	6.90	5.40	0.32	1.99
清理	7.60	8.10	6.70	0.34	2.15
微隙焊	5.60	6.00	30.80	2.02	3.32
热声焊	2.00	4.30	7.40	0.72	1.67
固定	0.01	0.01	10.90	4.34	0

表 3 微模块级微波产品生产工序质量特性评估 %

工序	支持度 $S_X$	置信度 $C_X$	不良支持度 $S_{PX}$	不良率 $P_{RX}$	质量特性 $P_{QX}$
热声焊	11.4	13.6	58.2	1.38	4.10
共晶	10.4	7.6	14.2	0.58	2.81
粘接	8.9	8.0	13.2	0.51	2.68
涂合金	0	0	0	1.05	0

微波产品工序质量指标对比如图 2 所示。

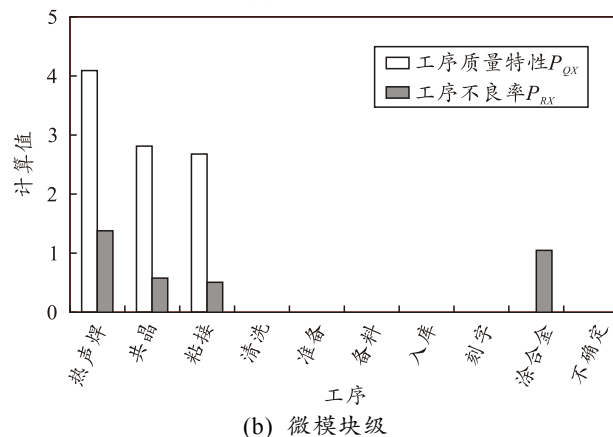
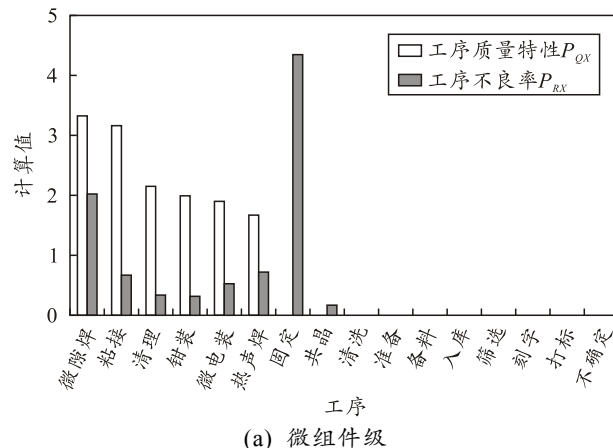


图 2 微波产品工序质量指标柱图对比

由图 2(a)可见： $P_{RX}$  高的工序，其  $P_{QX}$  不一定高；反之亦然。故，根据  $P_{QX}$  将“粘接”作为需质量提升的瓶颈工序，成效将更显著。

由图 2(b)可见：应将“热声焊”作为瓶颈工序，而非  $P_{RX}$  较高的“涂合金”工序。

## 4 结论

通过验证对比可知：笔者提出的工艺质量层次评估模型融合了产品实际生产信息、工序与产品关系、产线历史状态、质量改进费效比等信息，实现了从质量提升综合成效角度对瓶颈工序的识别。准则层的维度因子均具有物理解释意义，各因子具有较好的生产场景约束条件适应性。