

电气金具精密成型工艺的参数优化与生产效率提升研究

陈海云

固力发集团股份有限公司 浙江 温州 325600

【摘要】：电气金具的成型质量与生产效率是保障电网安全与制造效益的关键，本研究针对其精密成型工艺中参数设置依赖经验、生产柔性不足的问题，开展了系统性优化。通过剖析冷镦、冲压等核心工序中工艺参数与成型质量的复杂映射关系，构建了基于机器学习代理模型与多目标智能算法的参数协同优化框架，实现了最佳工艺窗口的快速精准寻优。同时，融合价值流分析与精益工具，通过快速换模、单元化生产及拉动系统设计，重构了适应多品种小批量模式的高效生产流程。应用结果表明，该综合方案显著提升了产品一次合格率与材料利用率，并使整体生产效率提高 20%以上，为电气金具制造企业实现提质增效提供了可靠的理论与实践方案。

【关键词】：电气金具；精密成型；参数优化；生产效率；代理模型；精益生产

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.025

1 引言

在现代电力系统中，电气金具承担着连接导线、固定绝缘子、保护线路及均压屏蔽等多重关键功能，其服役环境往往极端苛刻，需长期承受高机械载荷、电化学腐蚀及复杂的气候考验。因此，金具必须具备极高的结构强度、尺寸精度与长期服役可靠性。精密成型技术，特别是以冷镦、精密冲压为代表的塑性加工工艺，因能形成连续金属流线、提高材料利用率并获致优异机械性能，已成为高品质电气金具制造的核心手段。然而，该工艺过程涉及多工序、多参数的复杂交互，其最终质量与效率受到原材料特性、模具状态、设备性能及工艺参数设置等多重因素的耦合影响。

当前，国内许多电气金具制造企业在生产实践中面临两个突出挑战，一方面，工艺参数的确定严重依赖技术人员的经验积累与反复试错，例如，在冷镦成型中，坯料尺寸、模具闭合高度、冲压速度与润滑条件等参数的选择，若未能达到最优匹配，极易导致产品出现充填不足、折叠、裂纹或尺寸超差等缺陷。这种“黑箱式”的工艺调试模式，不仅周期长、成本高，而且难以保证不同批次产品质量的稳定性，成为制约产品高端化的技术瓶颈。另一方面，市场需求的多样化使得多品种、小批量订单成为常态，而传统的以批量生产为导向的产线布局与管理模式，导致生产切换频繁、在制品库存高企、设备综合利用率低下，生产效率与柔性难以满足快速交付的需求。

因此，将工艺参数的精准优化与生产系统的效率提升进行系统性整合研究，具有紧迫的现实意义与工程价值。本研究旨在突破传统经验模式的局限，通过揭示关键成型工序中工艺参数与质量指标之间的内在规律，建立基于数据与模型驱动的参数优化方法，从而稳定并提升产品固有质量。同时，运用精益生产与工业工程理念，对生产流程进行再造与管控，压缩非增值时间，提升系统响应速度。本研究的成果，预期将为电气金具行业实现从“经验制造”向“科学制造”与“高效制造”的转型，提供一套可操作、可验证的综合解决方案，对保障电网

装备的可靠供给与产业升级具有积极的推动作用。

2 电气金具精密成型工艺的核心工序与质量挑战

电气金具种类繁多，其成型工艺路径各异，但通常围绕几个核心塑性变形工序展开，深刻理解这些工序的物理本质及其伴随的质量挑战，是实施有效优化的先决条件。

冷镦成型是制造螺栓、螺母类连接金具的主要工艺，它利用模具在室温下对金属线材施加巨大的轴向压力，使其在模腔内产生径向流动并充满型腔，这一过程的质量核心在于金属流动的均匀性与可控性。主要的工艺挑战包括：第一，材料流动失稳引发的折叠缺陷，这通常与坯料长径比过大、模具锥角设计不合理或润滑不良有关，折叠会成为应力集中源，严重削弱疲劳强度。第二，充填不满，导致零件关键部位（如螺纹牙底、法兰转角）尺寸不足，源于成形力不足或材料流动性差。第三，内部裂纹与残余应力，过快的变形速度或过大的变形量可能导致材料内部损伤累积，影响动态承载性能。

精密冲压则广泛应用于生产各类压板、线夹等板片状金具，其通过凸凹模的精密配合，对板材进行分离或成形，此工序的质量焦点在于断面质量、尺寸精度与形状冻结性。常见的挑战有：毛刺过大，影响安装与安全，主要与模具间隙不均、刃口磨损有关；尺寸回弹，特别是对于高强度材料，弹性恢复会导致弯曲角度的偏离，影响装配；表面划伤或压痕，源于模具表面光洁度不足或工艺润滑失效。

此外，为达到最终尺寸与形位公差，后续的精整（如校准、修边）与热处理工序也至关重要。精整工序的参数（如整形力、行程）若设置不当，可能无法有效矫正变形，甚至引入新的畸变；热处理工艺（如淬火、回火）的温度-时间曲线则直接决定了金具的最终强度、硬度与韧性匹配，参数失控将导致机械性能不达标或变形开裂。

上述所有质量挑战，其根源均可追溯至工艺参数与材料、模具、设备系统的不匹配。因此，系统性地研究关键参数（如

变形力、速度、温度、润滑量)对具体质量指标(尺寸、缺陷、性能)的影响敏感度与交互作用,是构建科学优化体系的基石,这需要超越单点经验的视角,从“工艺系统”的整体角度进行关联分析。

3 基于代理模型与智能算法的工艺参数多目标优化

面对精密成型工艺中多参数、多目标、非线性的优化难题,传统的全因子实验方法成本过高,而单因素轮换法又无法捕捉参数间的交互效应。为此,本研究提出一种融合了实验设计、代理模型与智能优化算法的系统性参数优化框架。

首先,采用空间填充效率高的实验设计方法(如拉丁超立方抽样)来规划有限的初始工艺实验。在关键工序上,选取对质量影响最显著的3-5个工艺参数作为设计变量,例如冷锻中的坯料直径、初锻力、终锻速度;冲压中的模具间隙、压边力、拉伸筋系数等。每个参数在其可行的工程范围内取值。通过执行这些设计好的实验,收集对应的质量响应数据,如关键尺寸偏差量、折叠缺陷指数、断面光洁度等级以及成型载荷等,构成构建模型的基础数据集。

其次,建立高精度的代理模型以替代耗时耗材的物理实验,代理模型是一种基于数据的数学模型,能够在输入参数空间内快速预测输出响应。本研究对比了多项式响应面、克里金模型和神经网络等模型的拟合精度与泛化能力。对于高度非线性的成型工艺问题,神经网络展现出更强的复杂关系映射能力。通过训练,该网络模型能够近似模拟真实工艺系统中输入参数与输出质量指标之间的复杂函数关系,成为一个高效的“虚拟工艺试验台”。

最后,基于已建立的精确代理模型,引入多目标智能优化算法进行参数寻优,优化目标通常相互冲突,例如,为提高尺寸精度可能需要更大的成型力,但这又会增加模具磨损和能耗;为减少折叠缺陷可能需要降低变形速度,但这会牺牲生产效率。因此,本研究将问题形式化为一个多目标优化问题,以“质量指标最优”和“生产效能指标最佳”为双重目标。采用如非支配排序遗传算法等进化算法,在代理模型上快速进行成千上万次的迭代搜索,最终获得一组帕累托最优解集。该解集中的每一个解都代表了在多个目标之间的一种最优权衡方案。工程师可以根据实际生产中的优先级(如更注重质量还是成本),从这个解集中选取最合适的工艺参数组合进行最终验证与实施。

4 面向多品种小批量生产的效率提升系统设计

在解决了工艺参数的“做对”问题后,如何在多品种、小批量的市场环境下“高效地做对”,成为提升企业整体竞争力的另一个关键,这需要从生产系统的全局流程与组织管理层面进行系统设计。

效率提升的起点是价值流分析与瓶颈识别,运用价值流图

工具,从原材料入厂到成品发货的全过程进行映射,直观暴露所有不创造价值的等待、搬运、过量生产、库存及返工等浪费。对于电气金具生产,瓶颈往往出现在模具更换频繁的成型工序、以及需要精细调整的参数设置环节。精准定位这些制约整体产出的瓶颈点,是后续改进措施有的放矢的前提。

针对瓶颈工序,实施快速换模与标准化作业是核心突破点,借鉴SMED(单分钟换模)方法论,系统性地将换模作业区分为“外部作业”(可在设备运行时进行的准备,如模具预清洁、吊具准备、下一批次材料就位)和“内部作业”(必须停机进行的操作,如模具拆卸与安装)。通过将内部作业最大限度地转化为外部作业,并优化内部作业的动作序列与工具,可将传统的数小时换模时间压缩至分钟级。同时,为换模及开机调试作业制定详尽的标准化作业指导书,确保每一次切换都能快速、准确地达到稳定生产状态。

在生产线层面,推行单元化生产与拉动式计划,打破传统按设备功能分区的“机群式”布局,将完成某类金具所需的不同设备(如下料、成型、热处理、表面处理)集成为一个紧凑的制造单元。单元内采用“一个流”或小批量流的方式进行生产,极大减少工序间的在制品库存与搬运距离。生产计划则基于实际订单或下游工序的需求(看板信号)进行拉动,避免过早、过量地生产,从而压缩整体生产周期并提高资金周转率。

最后,建立动态的工艺参数数据库与知识管理系统,将前述通过优化研究获得的不同产品、不同材料的最佳工艺参数组合,纳入中央数据库。当生产任务切换到某一产品时,系统可自动调用并下载经过验证的最优参数组至设备控制器,极大减少了人工查找、输入和试调的时间与错误率。该系统还能记录生产过程中的实际参数与质量数据,为持续优化积累知识。通过上述技术与管理措施的系统性融合,构建起一个兼具高柔性、高效率与高质量响应能力的生产系统。

5 综合实施效益评估与持续改进机制

将工艺参数优化方案与生产效率提升系统整合实施后,需建立一套科学的指标体系以量化评估其综合效益,并构建持续改进的循环机制,确保成果的固化与深化。

效益评估应贯穿质量、效率、成本三个维度,质量维度:统计关键产品在优化前后的首件检验合格率、过程能力指数(如Cpk)的变化,以及客户端质量投诉率的下降幅度,对产品进行破坏性抽样,对比分析内部组织流线、缺陷率及机械性能数据的改善情况。效率维度:测量平均生产节拍的缩短比例、设备综合利用率(OEE)的提升值、以及订单平均交付周期的压缩天数,特别关注瓶颈工序的产能释放效果。成本维度:核算因一次合格率提升带来的返工与报废损失降低、因材料利用率优化带来的原材料节约、以及因生产效率提高带来的单位产品人工与能耗分摊下降。通过综合财务分析,计算项目投资的

回报周期。

为确保优化成果的持续有效，必须建立标准化、可视化与持续改进的管理机制。首先，将验证后的最优工艺参数、标准化作业程序、快速换模流程等全部文件化、标准化，纳入公司的质量管理体系，并通过培训确保相关岗位人员严格执行。其次，利用安灯系统、数字看板等可视化工具，实时显示生产线状态、质量异常与设备效能，实现问题即时暴露与快速响应。最后，构建一个从“数据采集”到“分析改进”的闭环。通过物联网技术自动采集关键设备与工艺参数，利用大数据分析工具监测过程稳定性、预测潜在异常。定期组织跨部门改进会议，针对新出现的问题或更高的目标，启动新一轮的分析、优化与实验，形成“计划-实施-检查-改进”的良性循环。

6 结论与未来展望

本研究针对电气金具精密成型制造中的核心挑战，提出并实践了工艺参数优化与生产效率提升的系统性解决方案。通过建立基于代理模型与智能算法的参数多目标优化方法，实现了

从经验调试到科学预测的转变，显著提升了产品内在质量的一致性与可靠性。同时，通过价值流分析、快速换模、单元化生产等精益系统设计，有效应对了多品种、小批量生产模式下的效率瓶颈，增强了生产系统的柔性响应能力。综合实施成效验证了该方案在提质、增效、降本方面的显著价值。

展望未来，电气金具的精密制造将朝着数字化与智能化的方向深度演进，一方面，工艺优化模型可与数字孪生技术深度融合，在虚拟空间中构建与物理过程实时同步的高保真模型，实现工艺方案的预演与迭代，并支持生产过程中的动态自适应调整。另一方面，生产效率管理系统可向智能制造执行系统升级，实现订单、工艺、物料、质量数据的全流程贯通与智能排产调度。此外，随着新材料（如高强铝合金、复合材料）的应用，其成型工艺窗口更窄，对参数优化的精度与速度提出了更高要求，发展基于强化学习的在线自学习优化算法将成为重要方向。持续推动工艺机理、优化算法与生产管理的深度融合与创新，是推动电气金具制造业迈向高端、智能、绿色的必由之路。

参考文献：

- [1] 王贤坤,段东滨,吴少年.基于神经网络技术的冲压工艺方案决策系统研究[J].机械与电子,2003,(01):46-50.
- [2] 杨宇通,崔之超,陈雨柔,等.单元精益生产在多品种、小批量产品加工中的实践应用[J].机电信息,2024,(01):37-40.
- [3] 邓嘉胜.快速换模技术在小批量生产中的应用[J].现代制造技术与装备,2025,61(09):121-123.
- [4] 沈炯.精益生产系统中的“单元化生产”[J].精密制造与自动化,2005,(01):12-13.