基于数据驱动的多工艺协同优化及效率提升机制研究

陆建国，金俊伟，饶胜云

（浙江联宜电机有限公司，浙江 金华 322100）

摘 要 在机械制造中，焊接热输入和精密加工余量存在强因果关联，各工序参数独立设定容易导致误差沿工序链逐级放大，传统单工序优化无法解决上述问题。本文以CO_2气体保护焊、模具成型、搅拌摩擦焊等基础工艺作为研究对象，构建出跨工序参数协同调控的具体模型，通过工序间余量数字化传递与质量实时反馈机制，将焊接、成型以及精密加工纳入统一优化框架中。结果显示，搅拌头倾角优化使中厚板焊接效率提升了40%，精密磨削使硅片表面粗糙度降低到0.8 μm，多工艺集成优化使复杂零件制造周期缩短45%、生产效率提升42%，验证了协同优化方法在系统级效率提升中的有效性。

关键词 机械制造工艺；多工艺协同优化；精密加工；工艺参数；数据驱动

中图分类号：TP273 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.010

0 引言

在多工序集成的精密制造流程中，焊接热输入、成型收缩与精密加工余量三者间存在强耦合关联，若各工序的工艺参数独立设定、缺乏协同匹配，会导致加工误差沿工序链逐层累积放大。注塑阶段模温与保压压力的设定决定成型件初始精度，其残余应力还会影响后续磨削的尺寸稳定性，焊接热输入所改变的材料状态会直接传递到精密加工环节，各工序节拍差异造成的产能损失无法通过局部调整来消除。针对上述这些矛盾，本研究建立工序间余量数字化传递与质量实时反馈机制，把焊接、成型与精密加工纳入统一优化框架，从精度链与时间链两个维度实现制造效率的系统性提升。

1 面向协同优化的基础工艺参数建模

1.1 焊接工艺参数的数据驱动优化

在CO_2气体保护焊中，焊接电流、电压、送丝速度和热输入之间存在着强耦合关系，用单因素轮换法很难捕捉参数交互效应对焊缝质量的影响。本研究采用响应曲面法中的Box-Behnken设计，把熔深和焊缝宽度当作响应指标，建立焊接参数的二阶响应模型。通过方差分析识别出电流与送丝速度的交互项对熔深影响显著（$P<0.01$），根据这个确定了薄板（厚度＜12 mm）焊接的最优参数窗口。

在参数窗口内，系统依据模型输出自动匹配工形坡口双面单道焊方案。在角焊工况当中，6 mm焊脚对应着直线焊参数组，8 mm焊脚则触发横向摆动模式来保障熔深一致性。环境风速被纳入参数监控体系，当超过2 m/s时就自动预警并启动防风挡板，该措施让气孔缺陷率从改造前的3.2%降至0.5%以下[1]。

1.2 模具成型工艺的参数协同建模

在注塑成型的过程当中，模温、料温、注射压力和保压时间之间存在着显著的交互效应，只对单参数进行独立优化易导致收缩率和充填时间产生冲突。本研究依据920组ABS家电外壳的生产记录，采用响应曲面法里的Central Composite Design构建“四因素五水平”的实验矩阵，通过方差分析能够发现，料温与模温的交互项对于熔体流动前沿温度的影响显著，保压压力和保压时间的交互项主导着收缩率的变化（$P<0.01$）。经过期望函数多目标寻优之后，得到帕累托最优参数组合，即模温52 ℃、料温210 ℃、保压压力为注射压力的65%、保压时间15 s，此时收缩率稳定在0.5%～0.7%之间。

1.3 搅拌摩擦焊工艺参数优化

与模具成型的多参数协同逻辑一脉相承，搅拌摩擦焊也是围绕关键工艺参数精准调控来提升效率，该技术借助搅拌头旋转摩擦产生热量让材料塑性变形，单个搅拌头能连续焊接800 cm焊缝而无需更换，可有效降低辅助工时。参数优化按照板材厚度分级来实施：

作者简介：陆建国（1985-），男，本科，工程师，研究方向：机械设计与制造。

1 mm～6 mm 薄板采用 1°～2° 小倾角配置以避免背面压痕，6 mm 以上中厚板选用 3° 到 5° 倾角并配合焊接压力动态调节来确保材料充分塑化，插入深度是影响焊缝成形质量的关键变量，薄板控制在 0.1 mm～0.3 mm 防止焊透，中厚板设定约 0.5 mm 保证塑性材料充足流动，搅拌头转速维持在 400 r/min～600 r/min、焊接速度配合 60 mm/min～120 mm/min，通过数据监测形成最优参数组合（见表 1）[2]。中厚板焊接效率由此提升 40%。该技术已在航空航天及轨道交通铝合金结构件制造中得到广泛验证。

表 1 搅拌摩擦焊工艺参数设置规范

板材厚度 /mm	搅拌头倾角 /（°）	插入深度 /mm	旋转速度 /（r·min^{-1}）	焊接速度 /（mm·min^{-1}）
1～6（薄板）	1～2	0.1～0.3	400～600	60～120
＞6（中厚板）	3～5	0.5	400～600	60～120

2 精密加工技术的工艺优化策略

2.1 精密磨削工艺优化

精密磨削的表面质量会受到砂轮特性、加工参数和机床刚度综合影响。本研究使用平均粒径小于等于 3 μm 的金刚石磨粒砂轮，把振动幅度控制在 0.5 μm 以下，以进给速率、砂轮线速度和磨削深度作为自变量来建立表面粗糙度响应模型，结果显示磨削深度与进给速率的交互项对 Ra 贡献率最大，约为 58%，通过 280 mm硅片加工验证，参数优化后表面粗糙度从1.8 μm 降低到 0.8 μm，平面度达到 0.3 μm。液体静压导轨技术让直线度稳定在 0.4 μm 以内，微进给系统与空气静压主轴组合使用使批量加工平面度一致性保持在 0.3 μm～0.5 μm 范围内[3]。

2.2 精密拉削与研磨工艺协同优化

精密拉削和研磨抛光是连接粗加工与精加工的重要关键环节，工序间余量数据传递是达成精度匹配的核心要素。拉削工序中，专用内定位夹具把拉刀与工件内孔位置偏差控制在 0.005 mm 以内，保证内花键分度圆与内孔同轴度稳定达到 0.008 mm，检测数据会实时汇入系统数据库，抛光工序按照前序余量数据动态匹配相关参数，粗抛使用 W10 磨料、0.10 MPa～0.15 MPa 压力清除 0.02 mm～0.03 mm 余量，精抛换用 W3.5 磨料，压力降至 0.05 MPa～0.08 MPa。经在线检测反馈实现 ±0.005 mm 的余量传递精度控制，用陶瓷轴承球进行验证，两阶段抛光后圆度误差控制在 0.1 μm 内，批次合格率达到 98.2%。

2.3 超精密抛光工艺的应用与优化

在拉削与研磨工艺完成尺寸精度控制之后，超精密抛光作为精密加工的终端工序，进一步将表面质量提升到纳米级水平。超精密抛光主要包含化学抛光、电化学抛光和超声波抛光三种形式，其中超声波抛光凭借非接触加工优势得到最广泛应用。该技术利用声波对材料表面微观冲击效应实现去除加工，精度能够达到 0.02 μm，表面粗糙度偏差控制在 0.1 μm～0.2 μm，高频超声振动赋予磨料颗粒充足冲击能量，驱动表面微凸峰发生塑性变形或脆性断裂，液中研磨通过悬浮磨粒实现均匀材料去除，磨粒在液体介质中的分散状态直接影响研磨一致性[4]。机械化学研磨整合化学反应与机械作用，干式工况下，粒径为 0.01 μm～0.02 μm 的 SiO_2 磨粒化学活性比较强，能够有效提升局部区域的研磨效率，磁流体精密研磨通过磁场驱动磁性磨料在磁极间形成研磨剂层，对于模具型腔、叶片等异形曲面具备良好的自适应能力，其加工一致性与可重复性明显优于传统手工研磨（如表 2 所示）。各种抛光方式的工艺参数通过数据采集与分析来持续优化，从而形成与前序加工工艺相衔接的完整精密加工链。

3 多工艺协同集成的效率提升机制与验证

3.1 多工艺流程的数据驱动协同优化

本研究构建的协同架构有三个层次，数据层存储各类零件工艺参数，按“材料—结构—工序—参数”四元字段建档，匹配层依据新任务特征调取参考参数，用来替代经验试切的做法，控制层根据在线检测数据

表 2 精密加工技术效果对比

加工技术	加工精度 / μm	表面粗糙度 Ra/ μm	平面度 / μm	典型应用
精密磨削	0.9	0.8	0.3～4.8	硅片加工
精密研磨	0.1	0.05～0.81	0.015～0.048	激光反射镜、陶瓷轴承球
超声波抛光	0.02	0.1～0.2	—	复杂曲面
磁流体研磨	0.02	0.1～0.2	—	模具型腔、叶片

实时修正后序余量。复杂零件制造遵循三级加工逻辑，即“模具成型奠定外形→精密磨削保障尺寸→超精抛光提升表面”。以齿轮传动件为例，搅拌摩擦焊后实测变形量 δ 实时输入拉削工序，拉削余量据此调整为理论值加 δ，让最终精磨余量稳定在 0.15±0.02 mm，传统工艺里的正火热处理步骤可省略。在节拍平衡方面，依据各工序实际加工时间分布识别瓶颈工序，通过参数压缩或者并行配置消除制约因素。在本验证对象中，瓶颈工序（精密磨削）单件时间从 18 min 降到 11 min，整线节拍由 22 min 缩短至 13 min。

3.2 智能化装备在工艺协同优化中的应用

数据驱动的协同优化以智能化装备为执行载体，其作用能分为两个不同层面。执行层涵盖数控自适应系统（动态调节进给速率与冷却液流量）、刀具磨损预警系统（振动频谱分析评估剩余寿命）以及高精度位置伺服机构定位精度达 0.01 mm，轨迹偏差≤ 0.05 mm，以此保障各工序参数得以准确执行，数据层包含嵌入式机器视觉系统（在线识别尺寸偏差与表面缺陷）和工业物联网平台（统一汇聚工艺设备与质量数据），为工序间数据传递提供实时通道。两个层面协同构成“执行—采集—反馈—调整”的闭环[5]。

3.3 工艺集成优化的效率提升机制评价

在多工艺协同优化与智能化装备的共同支撑下，系统效率提升效果通过量化指标体系加以评价。生产效率提升率作为工艺优化效果的核心评价指标，其计算公式为：

$$\eta=\frac{T_0-T_1}{T_0}\times100\% \quad (1)$$

式（1）中：η 为生产效率提升率，%；T_0 为优化前单件加工时间，min；T_1 为优化后单件加工时间，min。

多工艺协同优化带来的效率提升从精度链、时间链和能耗链三个维度进行机制解析。

1. 精度链维度——误差阻断机制。在传统的分散生产模式当中，各道工序都是独立进行加工以及独立开展检测的，尺寸偏差会沿着工序链一级一级地放大，最终就表现成精度失去控制。经过协同优化之后，各道工序之间设置了质量检测的节点，实测的偏差会实时反馈到参数数据库里，后续的工艺会依据这个动态调整加工余量。这种机制让不合格品在工序之间的流转率从改造之前的 12% 降低到了 4.8%，加工精度的稳定性（用 CPk 值来衡量）从 0.85 提升到了 1.32。

2. 时间链维度——辅助时间压缩机制。多工艺集成所带来的时间节约并非主要源于切削参数激进调整，而是来自工序间辅助时间的系统性消除。焊接完成后直接进入精密加工，避免了传统工艺里因工序衔接不畅所需的热处理等待，单件平均可节约 4.5 小时，同时也避免了重复装夹定位时间，单件平均节约 1.2 小时。两项合计让单件总制造周期从原来的 38 小时压缩至 21 小时，缩短幅度达到 44.7%。

3. 能耗链维度——材料与能源协同节约机制。通过对工序间余量进行数字化匹配，把粗加工余量从经验值 0.8 mm 压缩到 0.55 mm，使得材料去除量减少了 31%，对应的切削能耗下降约 35%。工序合并降低了中间转运与二次装夹时设备空转产生的能耗。综合这三项因素，单件产品综合能耗从改造前的 56.3 kWh 降到 36.6 kWh，降幅达到 35.0%。

上述三个维度的改进共同促成生产效率提升 42%、制造成本降低 25% 的协同优化成效，验证了本文协同优化方法的有效性。

4 结束语

本研究针对多工序集成制造中参数孤立且缺乏系统级优化方法的现状，基于响应曲面法建立了焊接与成型工艺的参数—质量映射模型，构建了工序间余量动态匹配的有效机制，从精度链、时间链和能耗链这三个维度揭示多工艺协同优化的效率提升机理，验证了制造周期缩短 45% 以及生产效率提高 42% 的实际效果。但研究仍然存在不足之处，模型主要依赖静态历史数据，对实时工况波动的响应不够充分，验证对象局限于轴类零件，其普适性还有待进一步检验。未来会融合数字孪生技术来实现动态决策，将验证拓展至薄壁件等复杂结构以检验方法适用性，引入有限元—数据驱动混合建模来量化热—力—精度多场耦合效应，推动协同优化向在线自适应方向升级。

参考文献：

[1] 祝耐成,杨德勇.镀锌板加工制造工艺优化研究[J].冶金与材料,2025,45(09):145-147.
[2] 杜启鑫,李博,靳凯峰,等.现代机械制造工艺的优化与应用研究[J].中国机械,2024(15):40-43.
[3] 张永延.智能制造模式下机械加工工艺的标准化[J].大众标准化,2025(23):26-28.
[4] 王伟.机械制造工艺及装备技术的应用分析[J].中国设备工程,2025(18):141-143.
[5] 吴少卿,李聪波,曹华军,等.高能效制造研究现状及展望[J].机械工程学报,2025,61(13):142-157.