机械加工全过程质量管控难点及优化路径研究

苏江平　莫卫江
西安法士特汽车传动有限公司　陕西　西安　710077

摘　要：机械加工质量管控是制造企业实现高品质交付的核心保障，其管控范围已从单一的工序检验延伸至涵盖工艺设计、毛坯入厂、加工过程、检验检测及装配使用的全链条。然而，由于机械加工涉及的工序环节多、影响因素杂、波动来源广，全过程质量管控面临诸多系统性难点。本文从全过程管控的视角出发，系统梳理机械加工质量形成的全链条环节，深入分析各环节在标准衔接、过程稳定性、检测有效性及信息闭环等方面的突出难点，并从工艺源头控制、过程动态监控、检测体系完善、数据驱动改进等维度提出系统化的优化路径。研究表明，全过程质量管控的核心在于构建以数据为纽带、以预防为导向的闭环控制体系，实现从“检验把关”到“过程预防”、从“事后处置”到“源头治理”的根本转变。

关键词：机械加工；全过程质量管控；过程控制；检测体系

引言

机械加工是制造业基石，其质量直接决定产品性能与可靠性。随着航空航天追求微米级公差、汽车零部件强调高Cpk值，质量管控重要性空前提升。然而，加工过程复杂，从毛坯到成品历经多道工序，受设备、刀具、材料、参数等多变量共同作用，微小波动易产生累积影响。传统“终检把关”模式虽在单件小批量时代有效，但在当前高效率、大批量、高精度环境下局限凸显：检验滞后导致返工成本高、问题追溯难、过程波动信息缺失。鉴于质量问题往往在最终检验时才暴露，造成资源浪费，亟需突破传统困局。全过程视角的引入和质量管控思维的升级，实现从“事后检验”向“事前预防、事中控制”转变，已成为提升制造水平、保障产品质量的必然选择。

1 机械加工全过程质量管控的内涵与环节构成

1.1 全过程质量管控的概念界定

机械加工全过程质量管控，是指从产品工艺设计、原材料和毛坯准备、加工过程实施、中间及最终检验，到成品装配及使用反馈的全链条质量活动管理。它不是简单地将各环节的质量控制措施进行叠加，而是在识别各环节之间质量传递规律的基础上，建立统一的标准体系、信息共享机制和闭环改进流程，使每一环节的输出质量成为下一环节的输入保障，形成“上道工序为下道工序负责”的质量责任传递链。

1.2 质量形成与管控的完整链条

机械加工质量形成贯穿五大环节，构成闭环系统。工艺设计与准备是源头，确定方法、工序及参数等，约70%的质量问题根源可追溯至此。毛坯与原材料阶段中，铸锻件或棒料的组织均匀性、缺陷及余量分布直接决定加工稳定性。加工实施阶段涵盖粗、半精及精加工，质量在切削中逐步显现，受设备精度、刀具磨损、参数偏差、装夹变形及环境影响。检验检测阶段通过量具和检测设备判定结果，其有效性决定质量判断可靠性[1]。装配与使用反馈阶段则是最终验证，零件配合表现与实际性能发挥不仅检验质量，更作为持续改进的信息来源。这五个环节首尾相连、相互作用，共同保障产品质量，任何一环的波动均可能影响最终结果，需全链条协同管控以确保制造品质。

1.3 全过程管控的基本特征

系统性—— 各环节之间不是孤立的，前序的质量状态会传递和累积到后续，必须从系统层面进行统筹管控，而非分段割裂地抓质量。预防性—— 高质量不是靠检验出来的，而是在工艺设计和过程控制中“制造”出来的，管控重心须前置。动态性—— 加工过程中刀具磨损、机床热变形、材料批次差异等因素持续变化，质量管控需要具备动态感知和自适应调整的能力。数据依赖性—— 质量状态需要用数据描述，质量问题的诊断需要数据支持，质量改进的效果需要数据验证，数据是全过程管控的语言基础。

2 机械加工全过程质量管控的主要难点

2.1 工艺设计阶段的先天不足

常见问题表现为：工艺方案编制时对后续加工中的质量风险缺乏系统识别，未进行失效模式与影响分析（FMEA），导致潜在的质量隐患在设计阶段未被预控。切削参数的选择多依据经验或手册推荐值，缺乏针对本企业设备状态和刀具条件的优化验证，导致初加工阶段

的尺寸稳定性差。定位基准和装夹方式的设计若未充分考虑加工变形，则在精加工后释放残余应力引起尺寸超差。更为隐蔽的问题是，工艺设计人员与现场操作人员之间缺乏有效的反馈通道，现场积累的加工经验和质量案例很少能反哺工艺设计的持续优化，使同样的问题在新的工艺方案中反复出现。

2.2 过程稳定性的维持困难

设备方面，主轴轴承磨损、导轨精度下降、液压系统压力波动等隐性退化，使设备精度在两次检定之间处于“不可知”状态，加工尺寸呈现缓慢漂移。刀具方面，刀具磨损导致的切削力变化和加工尺寸偏移是持续性的干扰源，而操作人员对刀具更换时机的判断多依赖经验，缺乏精准的磨损监测手段，刀具寿命的离散性使加工质量出现波动断点[2]。材料方面，不同批次的毛坯硬度、加工硬化倾向和残余应力状态的差异，对加工过程施加不可控的外部扰动，若工艺参数不能随材料状态调整，则过程失控不可避免。此外，环境温度变化对大尺寸精密零件的影响不容忽视，昼夜间温差可导致毫米级长度的热胀冷缩偏差。

2.3 检测体系的有效性不足

在检测手段层面，大批量生产现场大量依赖通用量具进行手动测量，测量效率低、数据记录分散，检测频次无法覆盖过程波动的完整周期；对复杂曲面和深孔等难测部位，往往简化检测方法或放弃检测，造成质量盲区。在检测策略层面，首件检验与末件检验之间缺乏中间过程的系统监控，质量控制依靠“两头卡、中间放”，过程中间的质量漂移无法被及时发现。在数据处理层面，检测数据以合格/不合格的二元判定为主，大量有价值的测量数值未被充分利用，过程的微小偏移趋势被“合格”的判定所掩盖，直到超差时才被察觉，此时已产生批量废品。

2.4 质量信息传递的断层与碎片化

全过程质量管控要求质量信息在各环节之间顺畅流动，但现实中信息孤岛广泛存在。工艺设计部门产生的质量控制计划（关键尺寸、特殊特性、控制方法）传递到现场时，往往只保留了图纸和技术要求，质量控制的原始意图被简化，现场人员难以理解每个尺寸背后的功能意义。现场加工产生的实际数据（实测值、刀具更换记录、设备异常停机）分散在纸质检验记录、设备日志和操作者记忆之中，无法形成结构化的数据集反馈给工艺和质量管理部门。当出现质量问题时，信息追溯需要跨越多部门、多表格、多人员，耗时耗力且容易遗漏关键线索。信息传递的断层使质量管控从“全链条”退化为“各自为战”。

2.5 持续改进的驱动力不足

全过程质量管控的最后一环—— 持续改进—— 在多数企业中尚未形成制度化运行。质量问题处理多止于“纠正”，即对当前超差件进行返工或报废，而对问题的根本原因缺乏系统分析；即便偶尔进行了深度分析，提出的纠正措施也往往是“加强培训”“加强检验”等笼统要求，难以落地执行和验证效果。质量改进活动多表现为项目式的“运动”，尚未内化为日常管理的组成部分。缺乏持续改进的闭环，使同类质量缺陷在同一车间内反复发生，质量控制水平长期在低位徘徊。

3 全过程质量管控的优化路径

3.1 工艺源头：推行面向质量的设计与工艺FMEA

从源头提升质量，须将质量管控前移至工艺设计阶段。推行工艺失效模式与影响分析（PFMEA），在设计阶段即系统识别各工序可能的质量失效模式（如尺寸超差、表面粗糙度不达标、位置度偏移），评估其严重度、发生频度和可探测度，确定高风险项并优先制定预防措施。将PFMEA的输出（关键控制点、特殊特性清单、控制方法）作为工艺文件的组成部分，向现场操作和检验人员交底。同时，通过切削试验优化切削参数，在设备能力范围内寻找质量稳定性最优的切削速度-进给量组合，而非仅凭经验取保守值[3]。建立工艺设计变更的评审流程，任何涉及质量风险的变更必须经过质量和技术部门联合评估，防止“经验主义”的随意调整。

3.2 过程控制：实施统计过程控制与自适应补偿

解决过程稳定性难题的关键在于让过程状态“可视化”和“可控化”。推行统计过程控制（SPC）—— 对关键尺寸特性，在每道工序设定合理的抽样频次和样本量，实时采集测量数据并绘制控制图（X-R图或X-S图），设置控制界限，当出现超出控制界限的异常点或连续7点同侧等判异规则时，立即触发原因分析。同时，对切削加工中可预见的漂移源（如刀具磨损、热变形）建立补偿模型—— 通过对刀具寿命周期内加工尺寸的变化规律进行标定，在数控程序中设置定期补偿量，使加工尺寸在被调整后始终稳定在目标值附近。对于设备精度退化，制定并执行定期的设备能力指数（Cmk）验证计划，确保设备在投入生产前和运行期间持续满足精度要求。

3.3 检测体系：从“合格判定”到“过程监控”的功能升级

检测体系优化的核心是赋予其过程监控的能力。在检测手段上，对大批量生产的关键工序配备在线检测量

具或量仪，实现加工后的自动测量和反馈，缩短测量周期，将检测点前移至工序内部。对高精度尺寸，配置气动电子塞规、电感测微仪等专用量具，减少人为读数误差。在检测策略上，将“首检+巡检+末检”的三段式模式升级为“首检+定频SPC巡检+末检”的动态模式，巡检频率根据过程能力指数动态调整——过程能力充足时降低频次，过程能力不足时加密监控。更重要的是，将检测数据的记录方式从“合格/不合格”二元记录提升为“实测值”数值记录，使每一个数据点都成为后续分析的信息素材。在检测数据管理上，推行数字化采集，使用数据采集仪或数显量具的蓝牙模块，将测量数据自动传输至质量数据库，消除人工抄录的误差和时间延迟。

3.4 信息闭环：构建全过程质量数据追溯平台

打破信息孤岛的关键在于建立一个统一的质量数据平台。该平台贯穿工艺设计（质量标准和控制计划）、生产执行（实测数据、刀具信息、设备状态）和检验检测（测量结果、不合格处理）全过程，以零件批号和工序号为索引，将所有质量相关数据关联至具体零件和工序。当出现质量问题时，可在平台上快速完成信息追溯——追溯到该批次零件的设备参数、刀具批次、操作人员和检测记录，大幅缩短原因分析的时间[4]。同时，平台具备统计分析和预警功能，自动计算各工序的过程能力指数，识别质量趋势的早期劣化信号并推送预警。此外，系统支持质量改进措施的闭环管理——措施下达、实施、验证和效果评估均在平台上留痕，确保改进不流于形式。

3.5 持续改进：建立问题驱动的PDCA长效机制

持续改进不应是临时性的质量运动，而应固化为日常管理的制度性安排。建立“每日质量晨会”制度，利用15~20分钟时间回顾前一日出现的质量异常（超差件数、不合格率、客户反馈），确定当日的质量关注重点。对每一件不合格品，执行“3×5Why”分析法——连续追问五次“为什么”，从直接原因追溯到管理原因和系统原因，并据此制定纠正措施。每季度召开质量改进评审会，汇总该季度所有质量问题的模式类型、原因类别和改进措施完成情况，识别高频问题模式，将其转化为专项改进课题，由专人负责推进，在下季度评审时验证效果。将质量改进的参与度和成效纳入各岗位的绩效考核，形成“发现问题—分析原因—制定措施—实施改进—效果验证—标准固化”的完整循环。

结束语

机械加工全过程质量管控是一项复杂的系统工程。本文剖析了从工艺设计、过程加工到检验检测及信息反馈的全链条难点，揭示了标准衔接断裂、过程稳定性不足、检测功能滞后及信息闭环缺失等核心痛点。对此，提出了涵盖工艺源头控制至SPC监控、检测升级至信息平台建设、PDCA机制至全员素养提升的优化路径，构建了相互支撑的改进体系。其核心逻辑在于：将管控重心由“末端检验”前移至“源头预防”，实现信息从“片段分散”向“全程贯通”转变，推动改进活动从“被动响应”升级为“主动驱动”。这一长期优化工作的成效，取决于企业将质量视为战略而非成本的认知高度。只有制度、技术、数据与人四要素协同发力，才能构筑牢固的全过程质量防线，全面提升制造水平。

参考文献

[1]王先逵,张磊,李明.机械加工质量全过程控制理论与方法研究[J].机械工程学报,2022,58(14):1-12.

[2]刘飞,陈思,赵岩.基于SPC的机械加工过程质量监控与异常诊断[J].中国机械工程,2023,34(8):945-953.

[3]杨建国,孙涛,周明.机械加工质量数据追溯系统架构设计与实施[J].制造业自动化,2024,46(5):122-128.

[4]赵永强,王芳,刘洋.工艺FMEA在机械加工质量预防中的应用研究[J].质量管理,2023(11):45-51.