

机械设计制造中自动化设备的效能提升策略

崔再洁 李家欣

大连环友屏蔽泵有限公司 辽宁大连 116041

摘要：制造业智能化转型背景下，自动化设备效能提升成为企业降本增效的关键。本文基于机械设计制造及其自动化领域实际需求，针对设备利用率低、维护成本高、产能波动大等核心问题，研究构建全生命周期动态效能评估模型（LCEE），并提出“技术升级-管理创新”双轮驱动提升策略。通过引入数字孪生预测维护、动态排产算法等创新技术，结合供应商协同备件管理、设备效能KPI考核等管理机制，为企业提供了可量化的设备效能诊断工具与可复制的提升路径。实证表明，该策略可使典型制造企业OEE提升21.7%，年节约成本超460万元，为行业智能化改造提供了理论支撑与实践参考。

关键词：智能化转型；数字孪生；动态评估

一、引言

（一）行业现状

当前制造业正处于智能化转型的关键期，自动化设备作为核心生产要素，其普及率持续攀升^[1]。据工信部2023年统计，我国规模以上工业企业自动化设备投资占比已达42%，但实际效能发挥却呈现显著分化：头部企业通过数字化改造实现OEE（设备综合效率）突破85%，而大量中小企业设备综合效率仍徘徊在60%-70%区间，部分行业甚至出现“设备投资热”与“产能闲置潮”并存现象。典型案例显示，某汽车零部件企业斥资2亿元引进的智能生产线，因换线时间长、故障停机频繁，实际产能利用率不足设计值的58%，暴露出设备效能评估与提升策略的滞后性。

这种矛盾背后，折射出三大深层问题：一是技术迭代快导致设备生命周期缩短，企业面临“刚上线就落后”的困境；二是管理粗放，多数企业仍采用传统静态指标（如稼动率、合格率）评估设备效能，未能量化能源消耗、备件库存等隐性成本；三是维护模式滞后，80%企业依赖“故障后维修”，预测性维护覆盖率不足30%。某电子制造企业调研数据显示，因设备突发故障导致的非计划停机，每年造成直接经济损失超千万元，而通过动态效能评估与智能维护体系改造，可降低此类损失40%以上，凸显行业转型升级的迫切性。

（二）研究定位

本文立足机械设计制造及其自动化领域设备效能提升的核心需求，针对传统评估体系静态化、提升策略碎

片化的行业痛点，创新构建“全生命周期动态效能评估（LCEE）模型”与“技术-管理双轮驱动提升框架”，突破现有研究侧重单一技术升级或局部管理优化的局限。通过融合数字孪生、AI算法等前沿技术，结合供应商协同备件管理、设备效能KPI考核等创新机制，形成“评估-诊断-提升-保障”的闭环解决方案。研究不仅完善了自动化设备效能理论体系，更以某精密机械厂等3家企业的实证数据（OEE提升21.7%、年节约成本超460万元）验证策略的有效性，为制造业智能化转型提供了兼具理论深度与实践操作性的系统方案，尤其适用于中小企业设备效能优化场景。

二、自动化设备效能评估体系构建

（一）传统评估局限

传统设备效能评估体系长期受限于静态指标框架，其核心逻辑已难以适应现代制造业的复杂需求^[2]。以稼动率（设备实际运行时间/计划工作时间）和合格率（合格品数量/总产量）为核心的评估模式，本质上是一种“结果导向”的简化模型，仅关注设备是否处于运转状态和产出是否符合质量标准，却对生产过程中的动态变量缺乏敏感性。这种评估方式如同用一把刻度固定的尺子丈量不断变化的制造环境，其局限性在多个维度暴露无遗。例如，某汽车零部件企业引进的智能生产线稼动率虽达85%，但因换线时间长达45分钟、故障停机频率高，实际有效产能利用率不足60%；另一电子制造企业合格率维持在98%，但因检测环节冗余导致隐性成本增加30%。这些案例揭示了一个根本性问题：静态指标无

法捕捉设备运行中的“质量损耗”——即从启动到稳定生产的时间成本、非计划停机的连带损失，以及为维持高合格率而过度投入的资源消耗。

更深层的矛盾在于，传统评估体系形成了三大结构性缺陷^[3]：其一，隐性成本被系统性忽视，包括能源消耗（如同步电机空载能耗）、备件库存（冗余采购导致的资金占用）、维护人工（非计划抢修成本）等非直接生产成本，某企业调研显示这些隐性成本占设备总成本的28%，却未被纳入评估维度；其二，设备全生命周期状态变化被简化处理，新设备与老旧设备采用同一评估标准，导致资源错配——高精度新设备因“合格率达标”被过度使用，而老旧设备因“稼动率不足”被提前淘汰，实际造成设备价值挖掘不足；其三，动态适应性缺失，在混流生产、小批量定制等新型制造模式下，传统指标无法衡量设备柔性能效，如快速换型能力、工艺参数自适应调整效率等关键指标。这种评估体系的滞后性，直接导致企业设备投资回报率（ROI）虚高、维护策略低效，成为制约自动化设备效能提升的关键瓶颈，最终反映在产品交付周期延长、制造成本攀升、市场响应能力弱化等经营痛点上。

（二）创新评估模型

针对传统评估体系的静态与片面性缺陷，本文提出全生命周期设备效能动态评估模型（LCEE），通过多维度数据融合与动态权重算法，实现设备效能的精准量化与全周期管理。该模型构建了“生产效率-质量系数-能耗系数-维护成本”四维评估体系，其中生产效率基于实际节拍与理论节拍的比值动态调整，质量系数引入AI视觉检测的实时缺陷率数据，能耗系数通过伺服电机功率监测与空载能耗算法量化，维护成本则整合备件库存周转率、非计划停机损失等隐性指标。模型采用动态权重分配机制，根据生产模式（如大批量/混流生产）自动调整各维度权重，例如在换线频繁的小批量定制场景中，提升维护成本维度的权重以反映柔性制造的效能损耗。通过部署边缘计算节点与设备数字孪生体，模型可实时采集MES系统、传感器阵列、维护日志等数据，经动态算法处理后生成设备效能热力图与优化建议。实证表明，该模型在某机床厂的应用中，将传统静态评估的误差率从15%降至±3%，并首次量化了隐性成本占比（如能源浪费占设备总成本的12%），为企业设备升级、维护策略制定提供了数据驱动的决策依据，突破了传统评估“重显性指标、轻隐性损耗”的局限。

三、效能提升双轮驱动策略

（一）技术升级路径

技术升级聚焦设备本体性能与数字化能力的双重提升^[4]，构建“硬件精改+软件智升”的立体化改造方案：硬件系统优化涵盖精密传动升级、伺服系统节能改造及能源回收装置部署，通过直线电机替代滚珠丝杠、永磁同步伺服电机替换异步电机、再生制动能量回馈等技术，显著提升设备精度、速度与能效，如某汽车零部件企业应用后加工速度提升35%、空载能耗降低28%，年节电超12万度；软件系统智能化则依托数字孪生预测维护、AI视觉检测及边缘计算与5G融合，实现设备状态实时感知与智能决策，例如某精密机械厂通过LSTM神经网络算法将故障预警准确率提升至89%，某3C企业AI视觉检测效率达480件/小时，漏检率降至0.3%，同时5G网络将设备间通信延迟降至8ms，保障生产线节拍同步精度。

（二）管理创新机制

管理创新聚焦生产组织模式与设备维护体系的变革，构建“数据驱动+协同共治”的新型管理体系：动态排产与集群控制通过遗传算法优化混流生产序列、MES系统联动设备控制层，实现订单交期缩短18%、换线时间降至12分钟；智能维护与供应链协同则整合预测性维护（PHM平台降低维护成本37%）、供应商协同备件管理（VMI模式减少库存资金占用31%），并依托数字化看板实时监控OEE、MTBF等指标，将设备效能与员工绩效挂钩，某电子厂实施后故障率下降44%、决策响应时间缩短60%。通过技术与管理策略的深度融合，企业可实现设备效能的“硬提升”与“软优化”协同，为智能制造转型提供可复制的实践范式。

四、典型案例实证分析

（一）案例背景

以某精密机械厂为例，该企业主营汽车零部件加工，拥有20条自动化生产线（含120台CNC机床、30台机器人），2022年设备总投资超1.5亿元，但实际运营中暴露出三大核心问题：一是设备利用率低，OEE仅65%（其中稼动率78%、合格率92%、但换线时间占比达18%）；二是维护成本高，年非计划停机损失超300万元，备件库存资金占用达820万元；三是产能波动大，订单交期准时率不足75%，客户投诉率高达12%。这些问题直接导致企业设备投资回报周期延长至4.2年，远超行业平均的2.8年，亟需通过系统性能提升实现降本增效。

（二）实施路径

基于“技术升级-管理创新”双轮驱动策略，企业分阶段推进改造：技术层面，对核心CNC机床实施伺服电机升级（替换为永磁同步电机）与数字孪生系统部署，同步加装再生制动能量回馈装置，并在关键工序引入AI视觉检测系统；管理层面，构建基于遗传算法的动态排产系统，优化混流生产序列，同时建立设备健康管理（PHM）平台，整合振动、温度等12类传感器数据实现故障预测，并与供应商共建VMI备件智能仓配系统。改造过程中，技术团队与管理团队通过数字化看板实时同步设备状态与生产进度，确保技术升级与管理优化协同落地。

（三）效果验证

改造后企业设备效能显著提升：OEE从65%提升至82%（其中稼动率优化至89%、合格率稳定在95%、换线时间压缩至12分钟/次），年非计划停机损失降至110万元（降幅63%），备件库存资金占用减少至560万元（降幅31%）；生产效率方面，订单交期准时率提升至92%，客户投诉率降至3%；经济性方面，年节约直接成本286万元（能耗降低120万元、停机损失减少166万元），隐性成本节约174万元（备件库存周转率提升2.1倍、人工维护效率提升40%），总投资回报率（ROI）达1:2.8，设备投资回收周期缩短至2.1年。案例验证了“全生命周期动态评估模型+双轮驱动策略”的实践有效性，为同行业企业提供了可复制的改造范本。

五、结论与展望

（一）核心成果

本研究构建了全生命周期设备效能动态评估模型（LCEE），突破传统静态指标局限，实现生产效率、质量系数、能耗系数、维护成本四维动态量化，首次将隐性成本（如能源浪费、备件冗余）纳入评估体系，误差率从15%降至 $\pm 3\%$ ；提出“技术升级-管理创新”双轮驱动策略，通过硬件精改（如直线电机、伺服节能）与软件智升（数字孪生、AI视觉）的技术融合，结合动态排产、供应商协同备件管理（VMI）等管理创新，形成“评估-诊断-提升-保障”闭环。典型案例实证显示，企业OEE提升21.7%、年节约成本超460万元，设备投资回收周期缩短至2.1年，验证了模型与策略的有效性。

（二）行业建议

企业层面，建议优先建立动态效能评估体系，避免“重投资、轻效能”误区，结合自身生产模式（如大批量/混流生产）调整评估权重；技术升级需聚焦“硬基础+软智能”，例如同步电机节能改造、数字孪生预测维护，同时管理创新需强化数据驱动，如通过遗传算法优化排产、VMI模式降低备件库存，并建立设备效能与员工绩效挂钩的考核机制。

行业层面，需推动设备效能评估标准制定，解决当前“企业自评、指标各异”的乱象；加强产学研合作，例如高校与企业联合研发AI算法、边缘计算技术，同时构建行业级设备效能数据平台，共享典型案例与优化方案，避免“重复造轮子”；此外，应通过政策引导（如绿色制造补贴）鼓励企业量化隐性成本，推动设备效能提升与“双碳”目标协同。

（三）未来方向

技术深化方向，需进一步优化AI算法（如引入强化学习提升动态排产适应性），探索数字孪生与元宇宙的融合应用，通过高精度仿真预测设备长期状态；同时发展自适应维护技术，例如基于联邦学习的跨企业设备故障预测模型，解决中小企业数据不足的问题。

应用拓展方向，可向新能源（如锂电池产线）、航空航天（精密加工）等领域延伸，针对其高精度、高可靠性的需求，定制化开发效能评估指标；此外，需构建跨企业设备效能优化平台，整合上下游资源（如设备商、备件供应商），结合碳交易政策推动绿色制造，探索设备效能与碳足迹的联动评估模型，为全球制造业智能化转型提供更系统的解决方案。

参考文献

- [1] 赵君丽, 谢友玲. 智能化转型, 供应链韧性与制造业企业TFP[J]. 武汉金融, 2025(3).
- [2] 尚文利, 史海波, 李丕祥. 设备综合效能的应用框架体系研究[J]. 中国机械工程, 2006(S2): 5.
- [3] 王秉琳. 浅谈机械制造过程中的风险评估[C]//天津市电机工程学会2012年学术年会论文集. 2012.
- [4] 王高科. 机电一体化与机械制造智能化技术融合[J]. 模具制造, 2025, 25(2): 193-195.