

# 基于“人机数法环”协同模型的卷烟设备综合效率系统化提升研究

马俊 周雪萍 龚占鹏 刘宗强

红塔烟草(集团)有限责任公司昭通卷烟厂 云南 昭通 657000

**【摘要】**：设备综合效率(Overall Equipment Effectiveness, OEE)是衡量制造系统运行效能的核心指标。本文针对“以销定产”政策下卷烟工厂存在的设备产能结构性失衡、新设备效能释放不足、人员技能断层及管理考核升级等系统性问题，创新构建并实施了“人机数法环”(Human-Machine-Data-Method-Environment, HMDME)协同管理模型。该模型以人才梯队化培养为基础、设备全生命周期健康管理为支撑、数据智能决策为驱动、柔性生产调度优化为枢纽、标准化现场闭环治理为保障，形成五维联动、闭环迭代的系统提升机制。不仅验证了HMDME模型的有效性，更形成了一套可落地、可复制的设备效能系统化提升路径，为卷烟及其他离散制造企业的精益化与智能化转型提供了系统的解决方案与工程实践参考。

**【关键词】**：设备综合效率；人机数法环；预测性维护；数据驱动决策；生产调度

DOI:10.12417/2705-0998.25.24.004

## 1 引言

在全球制造业迈向智能化与柔性化的大背景下，设备综合效率(OEE)已成为评估企业制造能力、资源利用水平与核心竞争力的关键量化指标。OEE通过综合考量设备的可用率、性能效率与产品合格率，精准揭示制造环节中的时间浪费、速度损失与质量缺陷。卷烟工厂在“以销定产”的政策框架下，生产活动必须紧密跟随市场需求的动态波动，这对生产系统的设备稳定性、生产组织的快速响应能力及资源配置的灵活性提出了前所未有的挑战。

孙磊等<sup>[1]</sup>分析了烟草行业设备管理现状，进而给出依托数字化的精益设备管理效率模式，最后分析了烟草行业精益设备创新管理模式；黄昌敏等<sup>[2]</sup>提出一种改进麻雀搜索算法的卷烟厂设备数字化生产调度方法；韩双全<sup>[3]</sup>以设备综合效率分析方法为主，结合工序能力指数(CP)，重点分析制丝设备的六大损失以及相应的对策，以下分析对构建企业良好的生产运营机制、降低生产成本提高效率、增强企业市场竞争力将起到重要作用。

某卷烟厂的生产过程中，其制造系统面临多维度、交织性的复杂挑战：产能与需求的结构错配，市场需求持续向硬包卷烟倾斜，而工厂原有设备配置中软包产能占比过高，导致硬包生产线长期处于超负荷运行状态，设备磨损加剧、故障频发；反观软包设备，则利用率低下，造成固定资产闲置与资源浪费。同时，新引进的高速包装机组，因操作维保规程不完善、人员技能转换滞后、设备-工艺磨合不充分等原因，实际运行效率远低于设计理论值，且故障后的恢复与调试周期过长。同时伴随大量经验丰富的技术骨干陆续退休，青年员工已成为生产主力。然而，其在处理复杂机电故障、进行精密调整与实施预防性维护方面的实践经验与系统性知识储备显著不足，“人”与“机”的技术代差日益凸显。

上述问题并非孤立存在，而是相互关联、彼此耦合，构成了一个复杂的系统性问题网络。传统的、聚焦于单一环节的改进措施(如单纯进行设备改造或开展短期培训)往往收效有限，有必要引入系统工程思维，采用多要素协同、闭环优化的整体方法论。

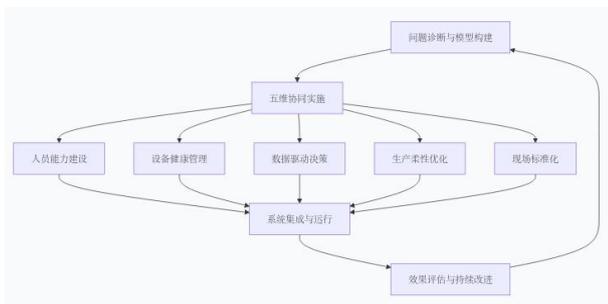
本研究借鉴质量管理中的“人机料法环”根因分析框架，结合现代卷烟制造的技术特征与管理需求，创新性地提出“人机数法环”(HMDME)协同管理模型。该模型的核心内涵在于：

人(Human)：聚焦“能力构建与知识传承”，打造结构化、制度化的技能发展与培训体系。机(Machine)：聚焦“全生命周期健康管理”，推动维护策略从被动维修向预防性、预测性维护转型。数(Data)：聚焦“智能感知与决策支持”，构建数据采集、治理、分析与可视化应用的数据价值链。法(Method)：聚焦“流程优化与资源调度”，通过生产组织模式与调度算法的创新，提升系统整体协同效率。环(Environment)：聚焦“标准化与可持续治理”，营造规范、有序、高效的现场运行环境。

通过进一步阐述HMDME模型的构建逻辑、具体实施路径、关键技术支持及综合应用效果，提供一套经过实践验证的、系统化的设备综合效率提升解决方案。

## 2 HMDME协同模型构建与系统化实施路径

为系统解决前述复杂问题，遵循“问题诊断-模型构建-协同实施-评估优化”的逻辑闭环，形成了如图所示的技术路线。



### 2.1 以“人”为本：构建“三层级、双通道”技能发展体系

针对人员技能的系统性短板，构建了覆盖全员、聚焦骨干、依托专家的分层培养体系，并建立“技能认证”与“知识贡献”双通道发展模式。开发模块化、多媒体化的标准培训课程包，实施“日学-周练-月考”的常态化机制，并将认证结果与上岗资格、星级评定强关联。推行“OJT 岗位进阶地图”，员工从掌握单一机型向具备跨机型操作能力发展，实现技能等级与薪酬待遇的线性联动；采用“项目制”管理，围绕诸如“ZB48A 包装机卡烟故障率降低 30%”等具体生产难题开展技术攻关。

依托省级“大师工作室”，系统性开展隐性知识显性化工作。组织高级技师、技术能手系统梳理关键设备（如 PROTOS 系列卷接机、GDX 系列包装机）的维修诀窍、精度调整方法和典型故障处理逻辑，编制成《核心维修技术标准》与《典型案例决策树》。确保核心技艺的稳定传承，有效化解技术断层风险。

### 2.2 以“机”为基：建立“预防为主、预测为辅”的设备全生命周期健康管理体

转变被动式维修观念，建立覆盖设备选型、安装、使用、维护直至报废的全过程健康管理闭环。推行“进站式”周期性深度保养，高速卷包设备设计“计划性进站保养”模式。制定详尽的《深度保养作业指导书》，明确保养周期、项目清单（如清洁、检查、调整、更换、润滑）、技术标准与验收规程。利用计划停机窗口，对搓板总成、商标纸输送系统、真空管路等关键功能单元进行系统性解体、检测与性能恢复，并记录关键尺寸（如搓板间隙、鼓轮同心度）的量化数据，建立设备性能基线。

开展基于数据归因的“靶向性”效率攻关。针对 OEE 持续偏低的特定设备，成立由设备、工艺、质量人员组成的跨职能攻关小组。运用 5Why、因果矩阵等分析工具，深挖效率损失的根本原因。例如，通过分析发现，某机型商标纸输送通道的曲面设计存在局部负压不足的缺陷，导致纸张输送稳定性差。随即实施针对性改造（优化风路设计、增加辅助导轨），并同步修订《日常点检保养表》，将相关部位的检查频次和标准升级。最终形成《效率提升标准化作业包》，推广至同型号所有设备。

构建设备电子健康档案与预测性维护模型。利用工厂制造执行系统（MES）和设备管理系统（EAM），为每台重点设备创建独立的电子健康档案。档案集成安装调试数据、历次保养记录、维修工单、备件更换历史及运行参数日志。初步构建基于时间序列分析的易损件剩余使用寿命预测模型，为制定精准的预防性更换计划提供数据支撑，推动维护模式从事后维修、定期保养向预测性维护演进。

### 2.3 以“数”为脉：打造“实时感知、智能分析”的数据驱动决策平台

基于工业物联网（IIoT）技术，通过加装传感器与改造设备控制器通讯接口，实现对主要设备运行状态、工艺参数、故障代码的毫秒级采集。开发部署车间级“设备 OEE 实时作战看板”系统，数据通过大屏幕和移动端 APP 进行多终端可视化展示。系统采用“红（停机）、黄（降速/预警）、绿（正常运行）”三色动态管理，并设置阈值自动告警，使生产异常在分钟级内被识别和响应。

利用 Python 等工具对积累的历史故障数据库进行数据挖掘。不仅进行基本的频率分析，更运用关联规则分析探索故障与设备型号、生产班次、环境温度、上游来料批次等多维度因素之间的隐性关联。通过聚类分析对故障模式进行分类，识别出共性技术问题（如特定季节因空气湿度变化导致的胶粘度异常）或管理漏洞（如夜班保养质量系统性下滑），为制定根治措施提供精准方向。

通过打破制丝生产“按固定周期批量投料”的传统模式，开发“制丝-卷包联动柔性投料系统”。该系统以卷包车间的生产序列（含牌号切换计划）、在制品（WIP）库存实时数据为输入，基于有限产能排程（FCS）算法，动态逆向推导出制丝、烘丝、加香等前道工序的最佳投料时间、批次大小与工艺路径。此方法在保证卷包连续供料的同时，为前道设备创造了更多、更灵活的“保养时间窗口”，实现了生产与维护的高效协同。

### 2.4 以“法”为纲：实施“柔性协同、动态优化”的生产组织与调度方法

打破制丝生产“按固定周期批量投料”的传统模式，开发“制丝-卷包联动柔性投料系统”。该系统以卷包车间的生产序列（含牌号切换计划）、在制品（WIP）库存实时数据为输入，基于有限产能排程（FCS）算法，动态逆向推导出制丝、烘丝、加香等前道工序的最佳投料时间、批次大小与工艺路径。此方法在保证卷包连续供料的同时，为前道设备创造了更多、更灵活的“保养时间窗口”，实现了生产与维护的高效协同。

### 2.5 以“环”为界：建立“标准可视、闭环考核”的现场标准化治理体系

全面推行“可视化标准作业”：将复杂的文字版《设备清洁保养标准》转化为一系列图文并茂、步骤清晰的“可视化作

业指导卡（VI）”。标注关键点，明确清洁程度、使用工具、作业顺序、安全要点及标准工时，实现“所见即所得”，极大降低误操作风险；建立健全“操作工每班自查、班组长每日巡查、设备员每周专查、管理部门每月联查”的四级检查网络。开发移动端点检 APP，实现检查计划自动推送、现场问题拍照上传、整改任务在线分配与进度跟踪。检查结果直接关联至班组及个人的月度绩效奖金计算模型。对重复性发生的问题，系统自动触发“异常升级”流程，由更高层级管理者介入进行根因分析与督办，形成“计划-执行-检查-行动（PDCA）”的强闭环管理。

### 3 实施效果的综合评估与分析

经过为期一年的系统性实施与迭代，HMDME 模型在试点工厂取得了全面、量化的显著成效。

表 1 核心运营指标改善对比

指标维度	实施前(基准期)	实施后(评估期)	改善幅度
车间综合 OEE	76.54%	80.30%	提升 3.76%
ZB48A 包装机台时产量	11.05 箱/小时	11.81 箱/小时	提升 6.97%
硬包高速设备平均效率	74.21%	82.56%	提升 8.35%
故障致断料次数(季度)	高发	降低 78%	显著下降

生产过程整体 OEE 在实施后呈现稳健上升并逐渐收敛于

高位的趋势。这得益于预防性维护减少了突发故障，以及人员技能提升保障了操作与调整的一致性。

培养了一批能跨软硬包机型操作的“多能工”与具备初步故障诊断能力的“准技术员”，人力资源弹性显著增强，为应对生产波动提供了坚实保障；管理会议决策依据从“大概、感觉”转向“看板、报表、分析模型”。建立了一套从“数据采集→问题识别→根因分析→措施制定→效果验证”的标准化问题解决流程，管理行为趋于理性化和结构化。实现了企业核心知识从个体经验到组织资产的转化，为持续自主改善奠定了坚实基础。

### 4 结论与展望

系统性协同是破解复杂制造效率瓶颈的关键。HMDME 模型将人员、设备、数据、方法、环境五个维度视为有机整体，通过建立清晰的协同与反馈机制，有效解决了单一维度改进的局限性。HMDME 模型是一套行之有效的管理操作系统，它不仅提供了系统思维框架，更通过“三层级培养”、“深度保养清单”、“数据决策平台”、“柔性调度算法”、“闭环考核体系”等具体、可操作的抓手，将管理理念转化为一线行动，具备极强的工程落地性。未来还可集成更多高维状态监测数据，引入更先进的机器学习算法（如深度学习、迁移学习），构建精度更高的设备健康预测（PHM）模型，最终实现从“预测性维护”到“主动性运维”的跨越。

“人机数法环”（HMDME）协同模型源于卷烟生产制造的具体实践，但其蕴含的系统工程方法论与模块化实施策略，对于任何致力于通过系统化改进提升设备效能与制造竞争力的工业企业，均具有普遍的借鉴意义与广阔的推广应用前景。

### 参考文献：

- [1] 孙磊,邱浩峰.浅谈提高烟草行业精益设备管理效率的创新与实践[J].科技尚品,2017(7):144,206.
- [2] 黄昌敏,叶敏,黄勃.基于设备综合效率 OEE 理论的卷烟厂设备数字化能力提升研究[J].自动化与仪器仪表,2025(10):282-286.
- [3] 韩双全.论制丝设备综合效率与设备损失对策[J].科技资讯,2011(19):134-134.DOI:10.3969/j.issn.1672-3791.2011.19.096.
- [4] 刘军.烟草企业设备精细化管理体系构建与实施[J].设备管理与维修,2023,(12):28-30.