

纸浆行业风机选型与维护策略：能耗与可靠性平衡分析

刘颖慧¹ 倪忠琦²

1. 浙江鹏翔暖通设备有限公司 浙江 绍兴 312300

2. 浙江上风高科专风实业股份有限公司 浙江 绍兴 312300

摘要：风机系统作为纸浆生产线中不可或缺的动力单元，其运行效率直接关系到企业的综合能耗水平和运营成本。然而，风机的高效运行并非孤立存在，它必须建立在系统可靠性的坚实基础之上。频繁的非计划停机不仅会打乱生产节奏、造成巨大经济损失，其启停过程本身也伴随着显著的能源浪费。因此，如何在风机的选型与全生命周期维护中，科学地平衡能耗与可靠性这两大核心指标，已成为纸浆企业实现可持续发展的关键课题。本文旨在深入剖析纸浆行业风机的应用特点与能效瓶颈，系统阐述基于系统思维的风机选型方法论，并构建一套融合预测性维护（PdM）与可靠性为中心的维护（RCM）理念的综合维护策略。通过理论分析探讨，本文论证了“以可靠性保障能效，以能效优化反哺可靠性”的协同路径，为纸浆行业风机系统的精益化管理提供了一套兼具理论深度与实践价值的解决方案。

关键词：纸浆行业；风机；选型；维护策略；能耗；可靠性；预测性维护；系统效率

引言

纸浆制造业属流程工业，生产连续、工艺复杂且能源密集。风机系统在多个关键环节广泛应用，其电能消耗占纸浆厂总用电量的30%至50%，是能耗管控重点。国家能效标准提高、电力成本攀升，使企业对风机系统能效提升需求迫切。但追求极致能效时，存在“唯效率论”误区，过度关注单台风机的最高效率点，忽略其在工艺系统中的动态匹配与长期运行稳定性。选型不当或维护缺失的高效风机，故障损失及额外能耗可能远超效率优势；稳定但低效的老旧风机，又与绿色低碳方向相悖。所以，纸浆行业风机管理需系统性思维，在全生命周期同步优化能耗与可靠性，寻求动态平衡。本文将从独特应用场景出发，探讨核心因素，提出全链条集成化策略，为行业提供参考指南。

1 纸浆行业风机应用特点与能效挑战

1.1 应用场景多样性

纸浆生产各环节对风机需求差异大。蒸煮与碱回收工段，风机要处理高温、高湿且含腐蚀性TRS气体的介质，需具备足够风量、压头，材质耐高温、耐腐蚀，常采用不锈钢或特殊涂层，这限制了高效叶轮设计，推高初始投资。洗选与漂白工段，风机多用于排除异味、水汽和少量化学气体，多为低压大流量离心或轴流风机，运行平稳，但噪音控制要求高。通风除尘系统中，风机应用广泛，从木片仓到干燥部都有大型除尘风机^[1]。其负荷波动大，长期处于高粉尘环境，粉尘积聚会破坏叶轮动平衡，引发振动、降低效率，加速轴承等部件磨损，威胁设备可靠性与能效。热风干燥等特定工艺中，风机

输送高温热风，除耐温性外，还需考虑热膨胀对设备对中精度的影响，维持运行可靠性难度大。

1.2 能效瓶颈分析

纸浆行业风机系统能效低，源于系统性不匹配。一是“大马拉小车”现象普遍。项目初期设计为应对未来产能扩张或极端工况，风机选型余量过大，实际生产中多数时间运行在远低于额定负荷状态。根据风机相似定律，功率消耗与转速三次方成正比，用传统挡板或阀门节流调节，风量需求减少20%，电机功耗仅微降5%~10%，能源浪费大。二是系统阻力特性不断改变。纸浆生产中管道结垢、滤网堵塞、阀门开度动态调整，会改变系统阻力特性，使原本匹配的风机-系统组合在低效区甚至喘振区运行，效率急剧下降。三是调控方式落后。许多老旧纸浆厂采用定速电机配合入口导叶或出口阀门调控，通过增加系统阻力控制风量，能量耗散低效，且缺乏智能控制系统精准、动态匹配风量。四是维护缺失或不到位。粉尘附着改变叶轮气动外形，轴衬磨损增大机械摩擦损耗，皮带松弛降低传动效率，这些“慢性损伤”使风机实际运行效率远低于出厂标定值，形成恶性循环。

2 基于系统思维的风机科学选型方法论

2.1 精准的工况数据采集与分析

科学选型的基石在于真实、全面、动态的工况数据。设计院或设备供应商提供的“典型工况”或“最大工况”参数往往过于粗略，难以反映生产的复杂性。纸浆企业应联合专业团队，对目标风机所在系统进行为期数周乃至数月的精细化数据监测，以获取涵盖全工况范围的关键信息。这包括系统在正常生产、开停车、不同原料配

比及不同产品规格下的最小、常用及最大风量与风压需求,精确测定气体的温度、湿度及成分(特别是腐蚀性、磨蚀性颗粒物的浓度与粒径分布),并通过实测或CFD模拟绘制出准确的系统阻力随流量变化的曲线。唯有如此,才能为后续的精准确选型提供坚实的数据支撑,避免因信息失真而导致的决策失误。

2.2 采用变频驱动(VFD)技术为核心

对于负荷变化幅度超过20%的风机系统,变频调速技术是实现能效与可靠性双赢的基石。VFD通过改变电机输入频率来直接调节风机转速,从而线性地改变风量和风压。这种方式从根本上避免了节流损失,使风机能够始终在其高效区内运行。更重要的是,VFD的软启动与软停止功能极大地降低了电机的启动电流冲击和机械应力,有效延长了电机、轴承和联轴器等关键部件的寿命,显著提升了整个系统的运行可靠性^[2]。因此,在选型阶段,不应将VFD视为一个可选的附加组件,而应将其作为风机-电机系统不可分割的核心部分进行整体协同设计。风机、电机、VFD三者必须在性能、控制逻辑和电磁兼容性(EMC)等方面高度匹配,以确保在整个宽广的调速范围内都能实现高效、稳定、可靠的运行。

2.3 风机类型与结构的针对性选择

在确定了驱动方式后,风机本体的选型同样需要紧密结合具体的应用场景。应优先选用具有先进翼型、并经过CFD气动优化的后向弯曲叶片离心风机,因为相比前向或径向叶片,其不仅效率更高、运行更稳定、噪音更低,而且对系统阻力的变化也更具适应性。针对高粉尘或强腐蚀性的恶劣环境,必须在结构设计上采取针对性措施。例如,叶轮可采用耐磨堆焊、陶瓷贴片或整体不锈钢制造,机壳内部可加装可更换的耐磨衬板,密封系统也需相应加强,以防止污染物侵入轴承箱,从而在源头上保障设备的长期可靠性。此外,还应充分考虑设备的模块化与易维护性,如选择可抽出式转子、快开式检修门等设计。虽然这些人性化的设计可能略微增加初期采购成本,但能大幅缩短后续维护所需的停机时间,从全生命周期成本(LCC)的角度审视,无疑是经济且明智的选择。

2.4 全生命周期成本(LCC)评估模型

传统的采购决策往往被设备的初始购置成本(CAPEX)所主导,而忽略了在其漫长的服役期内,运行维护成本(OPEX)才是真正的“大头”,通常占比高达70%-80%。因此,引入全生命周期成本(LCC)评估模型至关重要。该模型将风机从采购、安装、调试,到整个生命周期内的能源消耗、维护支出(包括备件、人工及计划与非计

划停机造成的生产损失),直至最终报废处置的所有成本进行量化并折现。通过LCC模型对不同选型方案进行横向对比,可以清晰地揭示出,一台初始价格较高但效率卓越、可靠性强的风机,其总拥有成本远低于一台看似廉价但低效、故障频发的设备。这种基于长期价值的量化分析,能够为管理层提供超越短期财务压力的、强有力的决策依据,引导企业做出真正有利于可持续发展的投资选择。

3 融合预测性维护与可靠性的综合维护策略

3.1 从被动维修到主动维护的范式转变

纸浆行业的风机维护模式正经历一场深刻的范式转变。传统的维护方式,无论是成本高昂且风险巨大的事后维修,还是容易陷入“过度维护”或“维护不足”困境的定期预防性维修(PM),都已难以满足现代精益生产的要求。未来的方向在于深度融合预测性维护(PdM)与以可靠性为中心的维护(RCM)的理念。PdM通过对设备状态的实时监控,实现故障的早期预警;而RCM则通过一套严谨的逻辑分析框架,确保维护资源被精准地投入到对系统可靠性影响最大的环节^[3]。二者的结合,能够构建起一个既高效又经济的主动防御体系。

3.2 构建多维度的状态监测体系

预测性维护的有效实施,依赖于一个全面、实时的状态感知网络。针对纸浆风机的复杂工况,应构建一个融合多种传感技术的立体监测体系。振动监测无疑是其中的核心,通过在轴承座安装高灵敏度的加速度传感器,持续采集振动信号,并利用频谱分析技术,可以精准识别出由不平衡、不对中、轴承早期损伤等引发的特征频率,从而实现故障的早期预警。与此同时,对轴承、电机绕组、润滑油等关键部位进行温度监控,能够捕捉到摩擦加剧或润滑失效的先兆。更为重要的是,通过安装高精度的流量计、压力变送器和电能表,实时计算风机的实际运行效率,当效率出现持续、不可逆的下降趋势时,即可判断内部存在积灰、磨损或泄漏等问题,为安排清洗或检修提供明确的量化依据。此外,定期的油液分析,通过检测润滑油中的磨损颗粒、水分和粘度变化,可以间接而有效地评估轴承、齿轮箱等封闭部件的健康状况。

3.3 实施以可靠性为中心的维护(RCM)分析

RCM是一种系统化的逻辑决断方法,其目标是确定资产在其特定运行环境下必须履行的功能、可能发生的故障、具体的故障模式、故障后果,并据此选择最有效的维护任务。对于纸浆厂的关键风机,应组织一个由工艺、设备、电气、仪表及操作人员组成的跨部门团

队, 共同开展RCM分析。首先, 清晰定义风机的功能与性能标准, 例如“在900-1200rpm范围内, 稳定提供80000-100000m³/h风量, 效率不低于75%”。接着, 系统性地识别所有可能的功能故障及其背后的故障模式与原因, 如“叶轮严重积灰”、“主轴不对中”或“润滑脂失效”等。然后, 对每一种故障后果进行评估, 区分其对安全、环保、生产运行及维修成本的影响程度。最后, 根据后果的严重性, 为每一种故障模式选择最合适的维护策略。对于那些可能导致严重安全或生产中断的故障, 应优先采用基于状态监测的PdM任务; 对于随机性强、无预警特征的故障, 则可采用定期更换策略; 而对于可以通过简单目视或手动检查发现的故障, 则安排定期检查即可。通过这一严谨的分析过程, 可以将有限的维护资源精准投向最关键的薄弱环节, 彻底告别维护工作的盲目性。

3.4 数字化平台赋能智能决策

要将上述所有状态监测数据、RCM分析成果、历史维修记录、备件库存等海量信息转化为有效的行动力, 必须依托一个统一的数字化平台, 如企业资产管理(EAM)系统或工业互联网平台。该平台不仅是数据的仓库, 更是智能决策的引擎。它能够自动对异常数据进行智能识别与关联分析, 自动生成并推送维修工单^[4]。更进一步, 利用大数据分析和机器学习算法, 平台可以基于设备的退化模型, 预测关键部件(如轴承)的剩余使用寿命(RUL), 为备件采购和维修计划提供精确的时间窗口。它还能将多个设备的维护需求进行智能排程, 并与生产计划进行协同优化, 从而最大化地减少非计划停机时间。此外, 平台还可以对同类风机的运行效率进行横

向对标, 自动识别出能效洼地, 并向操作人员推送具体的运行参数优化建议, 真正实现从“人找数”到“数找人”的智能化运维。

4 结语

纸浆行业风机系统管理是平衡的艺术, 能耗与可靠性相互依存、彼此促进, 高效运行需可靠硬件支撑, 可靠运行也要求设备处于最佳能效状态。本文提出的“以系统思维指导选型, 以数据驱动构建维护策略”框架, 为企业破解难题指明路径。其核心在于, 要摒弃短视行为, 从全生命周期成本视角审视风机投资, 重视高能效、高可靠性设备的长期价值; 积极应用变频驱动等先进技术, 将其作为现代化管理标配; 打破专业壁垒, 融合多领域知识形成管理合力。展望未来, 随着人工智能、数字孪生等前沿技术成熟, 纸浆行业风机管理将迈向更高阶智能化, 数字孪生体可模拟优化工况, AI算法能实现从“预测”到“预知”跨越, 风机系统将成为智能单元, 助力行业绿色高效生产。

参考文献

- [1]马亚运. 包装纸生产过程高耗能工段的能效优化模型与工业应用[D]. 华南理工大学, 2022. DOI:10.27151/d.cnki.ghnlu. 2022.001816.
- [2]李伟, 杨海波, 唐三军. 增加风机回水闪蒸罐优化纸机供汽系统[J]. 中华纸业, 2025, 46(12): 93-95.
- [3]任鹏, 方祥军, 韩鹰. 透平风机与纸机真空系统的匹配设计方法[J]. 中国造纸, 2024, 43(02): 165-172.
- [4]陈丽卿. 四鑫泵业: 拓创市场助力纸业节能降耗[J]. 造纸信息, 2020, (10): 110.