

变频技术在通用机电设备节能改造中的应用

郑玉华

河南理工大学 河南 焦作 454002

【摘要】工业风机、水泵、空压机、注塑机是应用最广泛的通用机电设备，传统工频配套阀门、挡板节流调节工况，设备常年满速运转，大量电能损耗在节流环节，能耗浪费严重。在双碳节能政策导向下，变频调速改造成为机电设备降能耗、降运维成本的主流技改方案。本文依托某综合制造厂区四类通用机电设备变频技改项目，简述变频调速基本原理与节能机理，针对风机、循环水泵、螺杆空压机、注塑液压泵四类设备开展针对性变频改造设计，通过改造前后连续 12 个月实测数据对比，量化节电、维保、设备损耗改善效果。实测结果：风机平均节电 47.8%、循环水泵节电 41.3%、空压机节电 32.6%、注塑机节电 22.7%；设备年均维修费用整体下降 65.4%，电机故障频次降幅超 60%，全部改造项目平均投资回收期 1.62 年。总结变频改造选型、参数整定、谐波治理落地要点，为中小制造企业通用机电设备节能技改提供实操参考。

【关键词】变频技术；通用机电设备；节能改造；风机水泵；软启动；能耗管控

1 引言

我国工业通用异步电机保有量庞大，风机、泵类、空压机三类流体负载设备耗电量占工业总用电量 30% 以上，该类设备普遍采用工频定速运行，依靠挡板、闸阀节流实现流量管控，节流损耗占设备输入功率 30%~55%，属于高耗能典型设备。传统工频直接启动冲击电流可达额定电流 5~7 倍，频繁冲击造成电机绕组、轴承、传动部件加速老化，设备年均维保费用居高不下。

伴随工业节能降耗政策落地，变频调速依托无级调速、软启动、功率因数提升、按需输出功率四大技术优势，逐步替代老旧节流调节模式。变频技术依托电力电子整流逆变原理，通过改变供电频率调节电机转速，遵循流体负载功率与转速三次方成正比 ($P \propto n^3$) 特性，低负荷工况下可大幅削减无用功耗，是投入低、落地快、收益稳定的节能技改手段。

本文以某机械加工厂区在用 22 台通用机电设备为改造对象，包含除尘风机 6 台、循环冷却水泵 8 台、螺杆空压机 4 台、注塑成型机 4 台，统计改造前全年能耗数据，分品类定制变频改造方案，跟踪改造后整年运行参数，从节电收益、设备运维、生产稳定性多维度开展效果分析。

2 变频调速技术原理与节能机理

2.1 变频系统基本工作原理

变频器由整流单元、滤波回路、逆变模块、主控 CPU、驱动回路组成，工频 50Hz 交流电经整流变为直流电，经电容滤波后，通过 IGBT 功率器件逆变输出 0~50Hz 可调交流电，依靠改变输出电源频率实现异步电机转速连续调节，实现 0~ 额定转速无级变速。控制系统分为开环 V/F 控制、闭环 PID 反

馈控制、矢量控制，风机水泵等变流量负载选用 PID 闭环控制，依靠压力、流量传感器实时采集工况参数，变频器自动修正输出频率，精准匹配负载实时需求。

2.2 四大节能机理

(1) 消除节流损耗（核心节能）：原阀门 / 挡板节流时电机全速运转，多余能量以压力损耗形式浪费；变频依靠降转速调节流量，取消节流部件，从源头消除节流无用功耗。

(2) 变负载按需供能：风机水泵遵循 $(P \propto n^3)$ ，流量降至 70% 额定值时，转速同步下降，轴功率仅剩额定 34.3%，节电优势突出。

(3) 软启动降低启动能耗：变频器软启动将启动电流控制在额定电流以内，杜绝工频大电流冲击带来的瞬时功耗，同时降低电机机械冲击损耗。

(4) 提升系统功率因数：工频空载 / 轻载工况电机功率因数仅 0.6~0.7，变频运行后功率因数提升至 0.93~0.98，降低电网无功损耗，减少变压器与线路无功电费扣费。

3 改造设备原始工况与能耗现状

改造厂区设备均投用 5~8 年，全部工频直接启动、节流调控，全年连续运行（年运行时长 7920h），优化前全年用电、故障、维保数据如表 1 所示。

表 1 变频改造前厂区四类设备全年运行统计(22 台合计)

设备类型	台数	单台额定功率(kW)	年总耗电量(万 kWh)	年均故障次数	年度维保费用(万元)
除尘引风机	6	55	172.3	42	6.86
循环冷却水泵	8	37	169.7	51	7.23
螺杆空压机	4	75	198.5	29	5.92
注塑液压定量泵	4	45	116.2	36	4.17
汇总	22	-	656.7	158	24.18

3.1 各类设备原有能耗弊病

(1) 除尘风机：车间粉尘随产能波动，夜间低产风量需求仅额定 55%，挡板开度常年 50% 左右，45% 以上电能损耗在挡板节流，工频启停冲击频繁，风机轴承年均更换 2~3 次。

(2) 冷却循环水泵：季节温差造成冷却水用量波动，夏季满负荷、冬季负荷降至 60%，闸阀长期小开度节流，管网压差损耗严重，泵体气蚀频发。

(3) 螺杆空压机：用气间歇波动大，传统加载 / 卸载控制，空载卸载阶段电机仍全速运转，空载功耗占额定功率 35% 左右，无效耗电占比偏高。

(4) 注塑定量泵：成型周期分为合模、注射、保压、冷却，保压阶段负载骤降，定量泵持续全排量溢流泄压，溢流损耗占整机耗电 25% 以上。

4 分品类变频节能改造实施方案

结合不同负载工况特性，差异化选用变频器型号、控制方案、配套传感元件，同步完善谐波抑制、散热、控制柜配套改造。

4.1 除尘风机变频改造

采用 PID 闭环恒负压控制，炉膛负压传感器实时采集烟道负压，设定负压阈值 $\pm 50\text{Pa}$ ，负压偏高自动升频提转速、负压偏低降频减风量；选用通用 V/F 型低压变频器，取消原入口挡板，挡板全开，依靠转速调节风量；加装输入电抗器抑制谐波，规避变频器谐波干扰车间仪表线路。

4.2 冷却水泵变频改造

管网末端加装压力变送器，设定供水压力 0.32MPa 恒压闭环控制，用水量下降、管网压力升高时自动降低水泵转速，多台水泵配置变频工频互投切换，单台变频优先调速、富余负荷工频备用，避免小流量多泵空载运行。

4.3 螺杆空压机变频改造

保留原有压力储气罐，高低压压力设定 $0.72\sim 0.8\text{MPa}$ ，压力低于下限升频提转速、高于上限降频减负载，取消频繁加载卸载动作；选用矢量型变频器，适配空压机重载启动特性，减少卸载空载功耗。

4.4 注塑机液压泵变频改造

采集液压系统油压信号，成型保压阶段油压达标后变频器降频低速运行，取消溢流阀持续泄压损耗；采用转矩矢量控制，满足瞬时高压注射瞬间提速需求，兼顾工艺稳定性与节能。

表 2 各品类变频改造配套配置清单

设备品类	控制方式	配套传感元件	辅助改造内容
除尘风机	负压闭环 PID	烟道负压变送器	拆除入口挡板、加装进线电抗器
冷却水泵	管网恒压 PID	压力变送器	工频变频自动切换回路
螺杆空压机	储气罐压力闭环	压力传感器	卸载电磁阀优化联锁
注塑液压泵	油压随动矢量控制	液压压力传感器	溢流阀全开，取消持续溢流

5 改造后实测能耗与效益数据分析

改造完成后连续 12 个月不间断抄表统计用电量、故障频次、维保支出，电价统一按 0.65元/kWh 核算节电收益，改造前后关键指标对比如表 3。

5.1 节电效益核算

项目变频器、控制柜、传感器、辅材、施工安装总投入 98.2 万元，年节约电费 158.36 万元，扣除变频器年均维护成本 2.5 万元，年净收益 155.86 万元，静态投资回收期： $98.2\div 155.86\approx 0.63$ 年，考虑设备分期投入、税费折算综合回收期 1.62 年，远低于行业 2~3 年回收期标准。

5.2 设备运维改善分析

(1) 故障大幅下降：软启动消除电机工频启动冲击，电机轴承、绕组、联轴器冲击损耗锐减，全年总故障由 158 次降至 45 次，降幅 71.5%；风机泵体无节流憋压，气蚀、管路振动故障同步减少。

(2) 维保成本压缩：年度整体维保费用由 24.18 万元降至 8.45 万元，降幅 65.4%，主要节省轴承、密封件、电机维修、阀门备件采购费用。

(3) 附加收益：变频优化运行工况，车间电网无功损耗下降，厂区月度无功罚款全部消除，年额外节省无功电费 3.7 万元。

5.3 分项工况运行说明

冬季冷却水泵低负荷（60% 额定流量）时段，水泵运行频率降至 32Hz，轴功率仅额定 26%，该时段单台水泵单日节电超

表 3 变频改造前后全年能耗及运维数据对比

设备类型	改造前年耗电(万 kWh)	改造后年耗电(万 kWh)	综合节电率	年节电费用(万元)	年均故障次数	改造后维保费用(万元)
除尘引风机	172.3	89.9	47.8%	53.56	11	2.12
冷却水泵	169.7	99.7	41.3%	45.50	15	2.47
螺杆空压机	198.5	133.7	32.6%	42.11	9	1.95
注塑液压泵	116.2	89.9	22.7%	17.19	10	1.91
合计	656.7	413.2	37.1%	158.36	45	8.45

320 度；注塑机保压阶段变频器降至 25Hz 低速运行，彻底杜绝定量泵溢流发热损耗，同时液压油温下降 8~10℃，延长液压油使用寿命。

6 变频改造落地常见问题与优化对策

6.1 谐波干扰问题

问题：变频器逆变产生谐波，干扰周边传感器、PLC 仪表、弱电控制系统，造成数据漂移；对策：大功率设备加装输入 / 输出电抗器、EMC 滤波端子，变频器动力电缆与控制信号线分槽敷设，接地端子单独可靠接地，谐波畸变率控制在 5% 以内。

6.2 低频过热（普通异步电机）

问题：普通自扇冷电机长期低于 30Hz 低频运行，自带风扇风量不足，电机温升超标；对策：长期低频工况改造加装独立外置散热风机，或更换变频专用电机，常规工况限定最低运行频率不低于 25Hz。

6.3 PID 参数整定不合理，系统震荡

问题：压力、负压闭环参数 P/I/D 设置粗放，出现频率频繁上下波动、管网压力震荡；对策：现场分步整定比例系数、积分时间，大惯性风机加大积分时长，水泵缩短响应周期，避免超调震荡。

6.4 多泵并联变频分配失衡

问题：多台循环水泵共用管网，单台变频其余工频易出现抢水、空转；对策：设置变频优先轮换运行逻辑，轮换周期 24h，负荷抬升逐级投入工频泵，负荷下降逐级退出工频泵。

7 变频改造通用优化选型与设计要点

7.1 按负载类型匹配变频器

(1) 风机、水泵平方转矩负载：经济型 V/F 通用变频器，性价比高；

(2) 空压机、注塑机重载启动负载：矢量变频器，满足瞬时大转矩启动需求；

(3) 高压大功率风机水泵：选用高压变频装置，减少降压变压损耗。

参考文献：

- [1] 张建军. 变频调速技术在风机水泵节能改造中的应用研究 [J]. 机电工程, 2022, 39 (05): 621-626.
- [2] 王磊. 空压机变频节能改造原理与工程实例分析 [J]. 通用机械, 2023 (07): 78-82.
- [3] 刘军伟. 注塑机定量泵变频改造节能机理与参数优化 [J]. 制造业自动化, 2024, 46 (03): 139-142.
- [4] 赵博文. 工业变频系统谐波产生机理与抑制方案研究 [J]. 电气应用, 2023, 42 (09): 56-60.
- [5] 陈刚. 恒压供水系统变频节能改造实践与效益测算 [J]. 水泵技术, 2022 (04): 45-49.
- [6] 黄晓东. 双碳背景下通用电机变频节能改造技术指南 [J]. 节能技术, 2025, 43 (01): 89-93.

7.2 变频配套工艺优化

改造同步优化管路、风道，清理管路结垢、风道积灰，降低系统固有阻力，同等工况下进一步提升节电率 3%~6%；老旧破损闸阀、挡板同步拆除，消除额外管路阻力。

7.3 后期运维管理要点

建立变频器月度点检制度：检查散热风道、模块温度、接线端子紧固度，每年除尘保养一次功率模块；依托变频器自带运行数据记录功能，定期导出负荷曲线，动态微调运行参数，持续优化节能空间。

8 现存不足与后续升级方向

(1) 智能化升级：后续对接厂区能源管理系统，依托物联网远程采集各设备用电、频率数据，根据全厂产能排班自动化设备启停与变频运行区间，实现全厂机电设备集群智能节能管控。

(2) 高效电机匹配：老旧高损耗 Y 系列电机在二次技改中替换为 YE4 超高效变频专用电机，配合变频调速可再提升节电 8%~12%。

(3) 余热回收联动：空压机变频余热回收系统改造，利用空压机散热余热供给厂区采暖、热水，实现电能多级利用。

9 结论

通用机电设备工频节流运行模式存在大量无效能耗，变频改造依靠调速机理从根源削减节流损耗，兼具节电、延寿、降维保多重收益。经厂区 22 台设备实测验证，风机水泵类平方转矩负载节电可达 40%~50%，空压机、注塑机变负载设备节电 22%~33%，项目投资回收期短、落地风险低，适配国内绝大多数制造企业节能技改需求。

变频改造不能仅单一加装变频器，需结合设备工艺、管路工况、负载波动特性优化控制逻辑与配套辅件，做好谐波治理、参数整定、后期常态化点检，才能最大化发挥变频节能潜力。在工业绿色低碳发展趋势下，变频技术仍是通用机电设备节能改造最成熟、应用最广泛的核心技术。