液力耦合器在生产水泵系统中的节能应用与优化研究

程 崛

（中国石油化工股份有限公司安庆分公司，安徽 安庆 246001）

摘 要 在工业生产领域，水泵系统应用占比高、耗能总量大，然而传统流量调控手段存在明显能源损耗，导致系统整体运行能效偏低，开展针对性节能改造已成为行业刚需。本研究聚焦液力耦合器在水泵系统中的节能应用，分析设备传动特性与水泵负载的适配关系，提炼核心节能机制，结合工程实际制定优化方案，通过现场实测验证应用效果，以期为工业水泵系统节能改造提供技术参考。

关键词 液力耦合器；生产水泵系统；充液率；设备参数匹配；冷却系统

中图分类号：TH137.331 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.025

0 引言

水泵系统贯穿各类工业生产流程，传统节流调节不仅加剧电能浪费，还会加快设备构件磨损，增加日常运维成本，阻碍生产环节绿色高效推进。当前工业领域节能降耗政策持续推进，挖掘水泵系统节能空间、优化运行调控模式成为重要研究方向。液力耦合器具备柔性传动、无级调速优势，与水泵负载特性高度契合，深入研究其应用与优化路径，能够弥补现有系统运行短板，完善节能改造实操方案，推动工业通用设备能效提档，助力工业领域低碳发展。

1 液力耦合器工作原理及水泵系统适配特性

1.1 液力耦合器核心传动特性

液力耦合器属于液体介质柔性传动设备，核心构件涵盖泵轮、涡轮、密闭工作腔及勺管调节组件，泵轮与驱动电机同轴固连，涡轮与水泵负载同轴对接，二者合围形成环形密闭工作腔，腔内充填液压油完成能量传递。电机通电运行后，同步带动泵轮旋转，泵轮叶片搅动腔内工作液，将机械能转化为液体动能与压力能，高速液流冲击涡轮叶片，推动涡轮同步旋转，再将液体能量转化为机械能，最终驱动水泵负载运转。液力耦合器转速调节依托工作腔充液率调整实现，通过勺管机构调控腔内液体充注量，改变泵轮与涡轮间液体动量矩传递效率，进而调控涡轮输出转速。充液率升高，泵轮涡轮能量传递强度提升，涡轮转速趋近泵轮转速；充液率降低，能量传递转差率增大，涡轮输出转速同步下调。

1.2 水泵系统负载特性

工业生产用离心泵、轴流泵等叶片式水泵，归属典型平方转矩负载，运行规律严格遵循叶片泵相似定律。水泵流量与转速呈正比，扬程与转速平方呈正比，轴功率与转速三次方呈正比，转速下调时，轴功率呈三次方速率快速衰减，这一特性为水泵转速调节节能提供核心理论支撑。工业水泵系统设计选型，均以生产最大工况需求为基准，同步预留 10%～30% 性能余量，保障极端工况供水稳定性。此类设计导致水泵实际运行阶段，多数时间处于非额定工况，需依据生产需求实时调控供水流量与压力[1]。传统流量调控采用阀门节流模式，通过关小水泵出口阀门，增加管路系统阻力，改变管路特性曲线实现流量调控。

2 生产水泵系统能耗现状及液力耦合器节能机理

2.1 生产水泵系统能耗痛点

水泵系统为工业生产领域应用范围最广的通用机械设备，耗电量占工业总耗电量 20% 以上，是工业节能改造核心攻坚对象。国内多数工业企业水泵系统仍沿用传统阀门节流调控模式，系统运行效率偏低，能源浪费问题突出。行业统计数据显示，国内工业水泵系统平均运行效率不足 60%，远低于国际 80% 的先进运行标准，节能改造空间极大。

2.2 液力耦合器核心节能机理

液力耦合器应用于水泵系统的节能效益，核心源于转速调节替代节流调控，消除节流损耗，同时依托柔性传动实现多维度能耗优化。转速调控替代节流调控，

作者简介：程崛（1988-），女，本科，工程师，研究方向：设备管理。

根除管路节流损耗。液力耦合器通过转速调整实现流量调控，水泵出口阀门保持全开，管路阻力系数恒定，无额外节流损耗。依据水泵相似定律，水泵流量降至额定流量50%时，转速调控模式下水泵轴功率仅为额定功率12.5%，节流调控模式下轴功率仍超额定功率60%，节能效果突出[2]。柔性启动弱化冲击能耗，提升电机运行效率。液力耦合器可实现电机空载启动，电机启动完成后，逐步提升工作腔充液率，缓慢带动水泵负载升速，启停过程平稳无冲击，电机启动电流控制在额定电流2倍以内，大幅压缩启动阶段电能损耗，同时规避大电流对电机绕组的冲击，延长电机使用寿命。

3 液力耦合器水泵系统节能应用实测分析

以某化工企业生产供水系统单台水泵为研究载体，实施改造与实测分析，验证液力耦合器节能实效。该水泵型号为14SA-10，额定流量1 080 m^3/h，额定扬程48 m，配套三相异步电机额定功率200 kW，额定转速1 480 r/min。系统原采用出口阀门节流调控，长期处于非额定工况，能耗浪费严重。对系统加装限矩型液力耦合器完成改造，搭建专项测试平台，连续72 h稳定监测不同流量工况下，节流调控与液力耦合器转速调控的运行参数，获取精准能耗数据，测试结果见表1。

表1 不同流量工况下水泵系统运行能耗参数对比

工况流量占比/%	额定转速下水泵轴功率/kW	节流调节水泵轴功率/kW	液力耦合器调节水泵轴功率/kW	系统节电率/%
100	198.00	198.00	196.50	0.76
90	144.34	158.60	118.20	25.47
80	101.59	142.80	76.80	44.96
70	70.06	127.10	49.80	60.82
60	46.65	111.30	30.20	72.87
50	30.62	95.60	17.80	81.38

实测数据显示，额定流量工况下，液力耦合器调控与节流调控能耗基本持平，节电率偏低。主要原因在于额定工况下液力耦合器转差率极低，传动效率接近99%，无额外传动损耗，且水泵出口阀门全开，无节流损失，两种调控模式能耗差值极小。伴随工况流量降低，液力耦合器调控节电率快速攀升，流量降至额定流量50%时，系统节电率达81.38%，节能效果极为显著。实测结果与水泵相似定律理论计算高度契合，充分证实液力耦合器在水泵变工况运行中的节能优势[3]。

4 液力耦合器水泵系统优化策略

4.1 充液率优化匹配

充液率是决定液力耦合器传动效率与转速调节范围的核心参数，充液率匹配精度直接决定系统节能水平。为明确充液率对设备运行性能的影响，对改造后液力耦合器开展不同充液率下的性能测试，采集稳定运行状态下各项参数，测试结果见表2。

表2 液力耦合器不同充液率下的运行性能参数

充液率/%	泵轮转速/r·min^{-1}	涡轮转速/r·min^{-1}	转差率/%	传动效率/%	系统总效率/%
20	2 900	870	70.00	28.20	22.10
30	2 900	1 450	50.00	48.50	41.30
40	2 900	1 885	35.00	63.20	57.40
50	2 900	2 175	25.00	74.30	69.20
60	2 900	2 465	15.00	84.60	79.10
70	2 900	2 697	7.00	92.40	87.30
80	2 900	2 813	3.00	96.20	91.50

测试数据表明，充液率最优匹配区间为50%～80%，该区间内液力耦合器传动效率超74%，系统总效率超69%，可兼顾转速调节范围与传动效率，实现节能效益最大化。实际运行阶段，需依据生产工况流量需求，在最优充液率区间内精准调控，严禁充液率低于50%运行。充液率低于50%时，液力耦合器转差率突破25%，传动效率快速下滑，转差功率转化热量激增，不仅压缩系统节能空间，还会引发工作液温度骤升，出现汽化、黏度下降问题，干扰设备稳定运行[4]。

4.2 设备参数匹配优化

液力耦合器与电机、水泵的参数匹配度，直接决定系统运行稳定性与节能效果。设备选型阶段，液力耦合器额定传递功率需与电机水泵额定功率精准适配，取值控制在电机额定功率1.05倍～1.1倍，既避免功率冗余造成的能耗浪费，又保障极端工况下能量传递能力充足。针对水泵平方转矩负载特性，需选用专用限矩型液力耦合器，泵轮与涡轮叶片倾角控制在30°～45°，提升低转速工况传动效率，减少能量传递过程中的冲击与回流损耗。同步开展水泵叶轮参数优化，依据生产系统实际最大工况需求，对水泵叶轮实施切削改造，消除选型余量过大引发的无效能耗，使水泵额定工况与生产最大需求工况完全契合，确保水泵多数运行时段处于自身高效率区间，进一步提高系统整体节能水平。

4.3 冷却系统结构优化

在液力耦合器运行过程中，转差功率全部转化为热量，提高工作液温度，工作液温度直接影响介质黏度与传动性能，进而决定系统传动效率与运行稳定性。实施冷却系统优化改造，采用强制水冷系统替换原有自然冷却系统，在液力耦合器工作油路加装板式换热

器，以循环冷却水作为冷却介质，同步加装温度传感器与流量调节阀，依据工作液实时温度自动调节冷却水流量，将工作液温度稳定控制在 40 ℃～ 70 ℃最优区间。优化后冷却系统，可覆盖全工况实现稳定散热，杜绝工作液高温汽化、黏度下降问题，保障液力耦合器低转速工况下维持稳定传动效率，强化系统节能效果与运行稳定性。

4.4 运行控制策略优化

传统人工调节模式存在调控滞后、精度偏低的缺陷，无法匹配生产工况实时变化实现水泵转速精准调控，导致系统长期偏离最优工况运行，弱化节能效果。针对该问题，推行基于工况需求的闭环自动控制策略，在供水管网关键节点加装压力传感器与流量传感器，实时采集管网运行参数，将采集数据与生产设定值对比，通过 PLC 控制器运算处理后，输出控制信号至液力耦合器勺管执行机构，自动调控工作腔充液率，完成水泵转速精准闭环调节。同时，闭环控制系统可实现多台水泵协同运行管控，依据管网总需求，自动调控水泵运行台数与单台转速，达成多泵系统整体节能优化目标。

5 优化方案运行效果及经济性验证

将上述优化方案全面应用于该化工企业循环冷却水泵系统，完成整体改造后，开展为期 12 个月的连续运行监测，记录系统优化前后月耗电量，核算节电量与节电收益，电费单价按 0.65 元 /kWh 计算，全年运行数据见表 3。

全年运行监测数据核算，优化后水泵系统全年累计耗电量 250 003 kWh，较优化前 513 740 kWh，全年累计节电量 263 737 kWh，综合节电率达 51.34%，全年累计节电收益 171 429.05 元，改造投入成本可在 10 个月内全部回收，经济效益突出。除核心节能效益外，优化后系统运行优势显著[5]。电机启动电流由原有额定电流 6 倍～ 7 倍，降至 1.5 倍～ 2 倍，大幅弱化启动冲击对电网及设备的影响。电机与水泵轴承密封件磨损量大幅减少，设备平均无故障运行时间由 1 800 h 提升至 4 500 h，全年运维成本降低 62%。同时，系统流量与压力调节精度大幅提升，可精准适配生产工况动态变化，强化整体生产系统运行稳定性，具有大范围推广应用价值。

表 3 优化前后水泵系统全年运行参数对比

运行月份	优化前月耗电量 /kWh	优化后月耗电量 /kWh	月节电量 /kWh	月节电收益 / 元
1	45 200	22 148	23 052	14 983.80
2	40 680	19 526	21 154	13 750.10
3	42 360	20 756	21 604	14 042.60
4	39 800	18 706	21 094	13 711.10
5	38 600	17 756	20 844	13 548.60
6	41 200	19 364	21 836	14 193.40
7	46 800	23 868	22 932	14 905.80
8	47 500	24 225	23 275	15 128.75
9	43 200	21 168	22 032	14 320.80
10	42 800	20 972	21 828	14 188.20
11	41 000	19 680	21 320	13 858.00
12	44 600	21 854	22 746	14 784.90

6 结束语

本研究理清液力耦合器在生产水泵系统中的应用原理与节能核心优势，通过充液率匹配、设备参数适配、冷却结构升级、控制策略优化四项措施，解决实际运行中的各类技术问题，全面提升系统整体能效与长期运行稳定性。研究成果经工程实测验证，具备较强经济性与落地实用性，可适配多数工业水泵系统节能改造场景。未来可结合智能调控技术进一步优化升级，持续释放节能潜力，也为同类工业流体输送设备节能优化提供可复制的实践经验。

参考文献：

[1] 王东旭,刘剑,庞开宇,等.高压变频器在燕山湖发电公司 2 号机给水泵组改造上的应用分析 [J].变频器世界,2023,26(04):91-97.

[2] 李永强 . 永磁耦合器在矿用破碎机系统中的技改实践 [J]. 中国设备工程 ,2024(19):140-141.

[3] 马云生,姚海嘉,刘丽敏.高压变频器在火电厂电动给水泵节能改造中的应用 [J].变频器世界,2025,28(10):96-100.

[4] 黄思林,唐昊,王善同,等 .330MW 机组电动给水泵变频改造及电液并存调速控制策略研究 [J]. 广东电力 ,2023,36(02):143-150.

[5] 张赛 . 永磁调速器的研究进展及结构分析 [J]. 煤矿机械 ,2025,46(09):142-144.