

油田地面泵选型设计中的能效提升与成本优化策略

田书斌 (中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257026)

摘要: 离心泵流量稳定, 适应性广, 但在不同的工作条件和介质条件下, 其能耗性能和能耗存在明显差别。在油田地面工程中, 离心泵是油田地面集输和注水等系统中的关键设备, 其工作效率的高低, 直接关系到油田的整体能耗消耗, 而泵选型的合理性直接影响到整个油田的整个寿命周期内的投资。针对目前我国油田设备选择过程中存在的能耗提高和费用调控问题, 达到两者的协调发展的问题, 通过对其能源效率的关键要素和全寿命周期费用组成进行深入研究, 并深入探讨能源效率和费用的相互依存关系。

关键词: 油田地面系统; 离心泵; 选型设计; 能效提升; 成本优化; 全生命周期

中图分类号: TE933.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 008-0070-03

Energy Efficiency Enhancement and Cost Optimization Strategies in the Selection Design of Oilfield Surface Pumps

Tian Shubin (Sinopec Petroleum Engineering Corporation, Dongying Shandong 257026, China)

Abstract: The centrifugal pump has stable flow, and wide adaptability. However, under different working conditions and medium conditions, its energy consumption performance and energy consumption show significant differences. In the oilfield, the centrifugal pump is a key energy device in the oilfield's ground gathering and transportation and water injection systems. The efficiency of the centrifugal pump directly affects the overall energy consumption of the oilfield, and the rationality of its selection also directly relates to the investment throughout the entire life cycle of the entire oilfield. In response to the current problems of energy consumption increase and cost regulation in the selection of water treatment equipment for oilfield use in China, to achieve the coordinated development of both, taking a typical petrochemical enterprise in China as an example, through in-depth research on the key elements of energy efficiency and the composition of the full life cycle cost, and in-depth discussion of the interdependence of energy efficiency and cost.

Keywords: Oilfield surface system; Centrifugal pump; Selection design; Energy efficiency improvement; Cost optimization; Full life cycle

当前我国油气田开发中, 针对传统的“重初采成本轻全寿命成本”, 以及“重单项指标达标, 轻能效与成本的协调”等问题, 一些油田由于泵选型不合理, 致使其长时间工作在低效率条件下, 不但能耗消耗大, 而且还会加重设备损耗, 提高维护和更新费用, 严重影响了油田的综合经济效益。

在油田地面工程中离心泵选型设计的过程中, 如何平衡节能和降低造价, 解决两者的冲突, 使设备寿命期内的收益最大, 是目前油田地面工程中亟待解决的一个重要问题。

1 油田地面泵能效与成本影响因素分析

1.1 能效影响因素

叶片形状、进出口角度、叶片数和叶片直径等都是离心泵高效运行的关键参数, 相比于前弯叶轮, 后弯叶片的水力性能更好, 工作更稳定, 更适合油田大流量、中低扬程的使用要求; 适当地设置叶轮进水口, 可以减小叶轮内部流体的涡动损失, 从而减小其能耗。流道的流道设计和密封结构的密封性能直接关系到能源利用率, 大的表面粗糙度容易引起沿程摩阻损耗, 而密封的磨蚀又会引起体积渗漏, 从而降低系统的能

量利用率。系统的操作和设计参数之间的匹配性是决定系统能源效率的一个重要因素, 由于离心泵有额定工作状态, 如果实际工作中的流量和扬程与额定值有偏差, 就会使泵的效率降低。在油田地面开采过程中, 由于采油周期的存在, 造成了采油过程中扬程的变动, 使得其不同的工作条件下很容易出现异常情况。如离心泵的实际排量低于设计值, 离心泵叶轮内部的逆流就会加重, 离心泵效率会降低 10%~30%; 随着离心泵的实际扬程超过了设计值, 离心泵偏离最佳工况区间, 能耗消耗也会随之增大, 与此同时, 泵的损耗也会越来越大, 从而使能源效率变得更低^[1]。

1.2 成本构成分析

离心泵采购、运输、安装和调试所需的总投入, 其关键在于采购设备。材料、规格和精度不同的离心泵的采购价格有很大的差别, 比如抗腐蚀性能好的不锈钢离心泵, 其购买的价格比一般的离心泵贵 30%~40%, 而高效率的离心泵则比一般的离心泵的采购成本高 20%~30%。由于设备重量、安装难度、配套管线和配件等因素的关系, 大流量高扬程离心泵的基础浇筑、管线对接和精密调整等工程造价高, 在初期投入

中的 15–25% 左右。设备运行费用是指在整个寿命周期中，使用电力生产所需的费用，其计算方法是：设备运行费用 = 年工作时间 * 真实轴力 * 电价格，在整个寿命周期中所占的比重最大，一般占整个寿命周期总费用的 40%–60%。离心泵的生产运行费用与离心泵的能量效率有很大的关系，离心泵效率下降 1%，每年的能耗消耗就会上升 1–1.2%。在油田中，大部分的离心泵都是 24h 不间断连续运转的，这种情况下如果长时间不工作，能耗消耗和费用就会大大增加，这已经严重影响了石油企业的经济效益^[2]。

1.3 能效 - 成本矛盾关系

提高泵效率通常会导致初期的投入费用增大。为了提高泵的效率，需要选择高精度的叶轮，优化流道结构，使用高质量的密封和抗磨损的材料，从而增加了泵的采购费用。如与常规离心泵相比，采用高效率离心泵，其初投资可提高 20%，而设备运行费用却可节省 10%–15%。如果油田只注重短期初期的投资，而选用廉价的常规离心泵，虽然可以降低初期的费用，但是在长时间的使用过程中，其设备运行费用和维修费用都会提高，从而造成整个寿命的费用增长。如果泵选型设计工况大于实际运行工况，选择超过实际要求的高效离心泵，就会引起泵设备能耗过剩，初期的投入也会增加，而且还不能使泵的使用能力得到最大程度的利用，从而造成不必要的经济损失^[3]。

2 能效提升与成本优化的选型设计策略

2.1 基于多目标优化的泵型选择方法

制约因素是油井的开采条件和设备特性，如流量范围、扬程要求、介质特性（粘度、含砂量、腐蚀性）、工作环境（温度、海拔）和设施布置等。如在油田采出过程中，需要用到与其最大产油量相适应的流体流动要求，并与之相适应；在设计过程中要考虑到相应的地层压强，而且要结合到含沙和腐蚀的特点。充分考虑离心泵的气蚀、轴功率和转速等性能指标与配套的电机和管道的匹配程度，以保证机组的平稳运转。以离心泵寿命费用最低作为优化的优化目标，将离心泵效率最大作为优化目标，把初始投资成本、运行能耗成本、维修维护费用、报废处置费用都包括在一个目标函数中，把容积效率、水力效率和机械效率的合成数值加到了目标函数中。选择基于多个指标的加权分配方法，根据各指标的相对重要程度来决定各指标的权重^[4]。

2.2 参数匹配与运行优化策略

根据现场实际情况，对离心泵叶轮、泵壳等关键零件进行了设计和设计，针对大流量、中低扬程的石油开采条件，采用后弯曲浆叶，通过合理的导

叶进、排气角（入射角一般为 18–25°，出射角 25–35°），增大导叶数目（6–8 个），减小反流和旋涡损失，提高了水力效率。针对高扬程小流量的离心泵，在增加泵的直径和速度的前提下，采用增加泵的直径或者增加泵的速度来达到泵的扬程要求，并防止由于泵的出力过大而造成的能耗消耗增加。针对设备材质，选用合理的设备材质，所使用设备材质主要是抗磨的合金材料，对于耐腐蚀性的材料则选择不锈钢材质，以减小零件的磨损和腐蚀，有效的缩减维修费用^[5]。

管道的阻力损耗对离心泵的运行效率有很大的影响，因此需要对其进行合理的管道结构设计，以降低其阻力。管道口径的选择要考虑管道直径，要防止管道直径过小引起速度过快和阻力损失过大，管道口径过大又会加大管道的建设费用，需要进行水力分析，寻找管道口径和费用之间的平衡点；对管道布置进行了合理的布置，尽量减少弯头和阀门的数目，以防止管道的急剧膨胀或收缩，从而减小了管道的部分阻力损耗；加装必需的调节阀和单向阀，以阻止液体回流，保证管线的平稳运转，降低离心泵启动和停止时的震动，提高设备的使用年限。

2.3 基于数字孪生的实时监测与参数自适应调整

以离心泵设计图、性能参数和操作参数为基础，利用 3D 造型方法对其进行几何二元建模，精确地还原出叶轮、泵壳、密封件等零件的结构特性。采用流体力学仿真和有限元分析方法，建立流体力学仿真与有限元分析相结合的方法，实现对离心泵内部介质流动状态、各部件受力状态和能量效率的影响。通过集成传感器数据、运行历史数据和维修记录等数据，建立多传感器数据的“双生子”模型，为系统运行状态的在线监控和最优调节提供数据支持。利用数据界面，将实物器件和虚拟器件进行实时的数据交换，保证了所建立的器件能够准确地反应器件的工作状况。通过对叶轮、泵轴、密封腔、轴承等重要部位安装振动传感器、温度传感器、压力传感器和流量传感器，对其工作参数（转速、流量、扬程、轴功率、温度、振动幅度等）进行在线监测，并将其传送到“数字化孪生”系统中。该方法利用系统的实时信息，对系统的工作状况进行动态调整，并将其与真实工况进行比较，从而辨识出系统的能量效率异常和隐患。如在离心泵转速降低超过 5% 的情况下，对离心泵的能量效率提出了报警；一旦发现轴承温升超出临界值，或者出现异常的振幅，就有可能产生隐患，进行维护报警，并对其发展态势和影响程度进行预估，从而降低因意外事故造成的停产和高昂的维护费用^[6]。

将实时监测数据、工况波动情况和能耗 - 费用等

多目标信息相融合,构建最优操作参数调节策略,利用变频调速系统、自控阀门等,对其进行动态调节。比如,在油田采出过程中,采用数值双生子的方法对其进行模拟和计算,从而得到最佳的速度,在保证高效率的前提下,对其进行变频调速。在不同的地质条件下,根据不同的地质条件,对离心泵的扬程和速度进行相应的调节,从而达到了泵的动态最优。构建基于数值双胞胎的数值仿真方法,实现对各运行状态下能源效率和费用的动态预测,指导企业制定合理的生产规划和维修保养方案。

3 全生命周期成本管控措施

从设备全寿命周期角度考虑,对其进行全过程的费用控制,对各个环节的费用进行最优配置,在保证设备效率的前提下,达到“选择最优-运行管控-维修优化-报废处理”的闭环管理。在工程建设中,工程造价控制的关键在于如何实现初期投入和长期投入的均衡。根据多指标优选的结果,选出性能价格比最佳的离心泵,而不是追求低价或高配置。在采购环节上采用集中采购和招标采购的方法,将采购的费用降下来,并对设备的质量和售后服务进行详细的规定,提供定期的巡检等服务,以降低后期的维修费用。要严格审核供应商的资格,要选择技术水平高,加工能力强的企业,保证设备质量,减少由于设备质量问题而造成的附加费用^[7]。

生产运行费用控制以能耗消耗与费用最优为中心,通过与数字孪生监控相结合的方式,达到对生产运行的精细控制。构建系统的能耗消耗统计与分析系统,对各运行状态下的能耗消耗进行实时监控,将各运行状态下的能耗消耗情况进行比较,找出能耗消耗的异同点,并对其进行合理的调节。采用变频调速和智能控制等节能手段,使操作过程随工作状态的改变而不断地调节操作参数,降低了能耗浪费。要强化管道的维修保养,对管道内的泥沙和污垢进行经常性的清洗,检查管道的密封情况,以减小管道的阻力损耗渗漏,从而达到节约能耗和费用的目的。制定生产作业指导书,使员工的工作行为标准化,防止由于人为因素造成的生产效率低下或出现事故而造成不必要的经济损失。

为了减少维修费用,在维修过程中采取了以预防为主,故障维修为辅的方法。在此基础上对叶片、轴承等易损件的检测、维护和更换,防止由微小问题演变成重大问题,降低设备检修成本和停工损失。如依据密封的磨损规则,对其进行周期性的更换,以防止由于密封损坏而引起的流体渗漏和效率降低;依据离心泵的运行状况,对离心泵的运行状况进行维修或替

换,保证离心泵的平稳运行。制定维修费用计算系统,对维修费用、人工费用、配件费用等进行统计,对维修计划进行最优选择,降低不需要的维修费用。强化对维修工人的技术训练,改善设备的故障检测和检修效率,减少停工期,减少维修费用。在废旧处理过程中,费用控制侧重于环境保护和资源循环。在到达服役年限或者出现不可修理的情况下,应制订出一套合理的处理方法,以防止环境污染和资源的浪费。对废旧离心泵的电机和轴承等可再生零件进行检查和拆卸,使其满足重复使用要求的零件可以在同类设备上上进行维修,减少零件采购费用。通过对整个寿命周期内的成本资料进行归纳和剖析,为以后的设备选择和成本控制提供可资借鉴的经验^[8]。

4 结束语

基于多目标优化的选型方法的能够平衡能效与初始投资,数字孪生技术的应用实现了离心泵运行状态的实时监测与参数自适应调整,全生命周期成本管控体系则确保了各环节成本的优化分配,三者有机结合,为油田地面离心泵选型设计与运行管理提供了完整的解决方案。工程经验表明,通过科学的选型设计与成本管控,可使离心泵泵效提升10%-15%,全生命周期成本降低15%-20%,显著提升油田生产的经济性与绿色性。

参考文献:

- [1] 宫涛,杨建华,于海波,等.基于无源射频标签的离心泵多频故障特征检测[J/OL].仪器仪表学报,2026(1):1-11.
- [2] 徐铁柱,罗旋,赵彦琦,等.离心泵系统中磁力耦合器振动传递特性试验研究[J].船电技术,2026,46(01):19-22+28.
- [3] 石琳琳.油田离心泵常见故障原因分析及维修维护[J].中国设备工程,2026(01):152-154.
- [4] 杨雨蒙.离心泵振动异常原因的机理分析与控制措施[J].今日制造与升级,2025(12):169-171.
- [5] 姜立伟,杜方成,刘永平.离心泵叶轮静平衡调试关键点控制技术[J].今日制造与升级,2025(12):154-156.
- [6] 李建民,程海鹏,王滨,等.多级离心泵平衡盘磨损原因分析与解决方案[J].离心泵技术,2025(06):47-50.
- [7] 赵志强,周宏伟,孙振华.油田注水泵全生命周期成本建模与敏感因素分析[J].石油工程建设,2023,49(3):65-70.
- [8] 高阳,李军,唐晓东.油田集输系统泵组配置与变频运行综合节能研究[J].石油石化节能,2023,13(6):1-6.