

潜油电泵配套设计优化与经济效益提升策略

张文姬（胜利油田胜利泵业有限责任公司，山东 东营 257000）

摘要：随着石油和天然气资源的逐渐枯竭，深井和高温高压井的开采变得越来越普遍，潜油电泵（ESP）在油田生产中的关键地位逐渐上升。潜油电泵的配套设计优化不仅关系到设备的性能与稳定性，还直接影响到油田的经济效益。本文主要探讨了潜油电泵配套设计优化的策略，通过科学选型、参数优化、系统适配性分析等方面，提高潜油电泵的工作效率与经济效益。本文还进一步分析了设计优化如何通过降低能耗、减少运维成本和延长设备寿命来提升油田的整体经济效益。

关键词：潜油电泵；配套设计优化；经济效益；选型优化

中图分类号：TE933.3 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-5167（2025）016-0112-03

Optimization of Electric Submersible Pump (ESP) Supporting Design and Strategies for Enhancing Economic Benefits

Zhang Wenji (Shengli Oilfield Shengli Pump Industry Co., Ltd., Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: As oil and gas resources gradually deplete, the exploitation of deep wells and high-temperature, high-pressure wells has become increasingly common, elevating the critical role of Electric Submersible Pumps (ESP) in oilfield production. The optimization of ESP supporting design not only affects the performance and stability of the equipment but also directly impacts the economic benefits of oilfields. This paper primarily explores strategies for optimizing ESP supporting design, including scientific selection, parameter optimization, and system compatibility analysis, to improve the operational efficiency and economic benefits of ESPs. Furthermore, it analyzes how design optimization can enhance the overall economic benefits of oilfields by reducing energy consumption, lowering maintenance costs, and extending equipment lifespan.

Keywords: Electric Submersible Pump (ESP); Supporting design optimization; Economic benefits; Selection optimization

潜油电泵（ESP）作为油井深层采油的重要设备，在油田的生产过程中发挥着不可替代的作用。随着井下环境的复杂性不断增加，如何优化潜油电泵的设计，以适应不同工况需求，成为提高油田生产效率和经济效益的关键。潜油电泵配套设计的优化不仅仅是对电泵本身的技术优化，还涉及到电泵与井下条件、其他采油设备的综合适配，以达到高效、稳定和经济的采油效果。因此，本文将深入讨论潜油电泵配套设计优化的技术策略，包括如何根据油井工况合理选型、优化系统集成、提高能效以及降低运营成本等方面。同时，本文还将探讨如何通过智能化与自动化系统的引入，提高设备的自主运行能力和智能管理水平，从而推动经济效益的提升。

1 潜油电泵基础知识与工作原理

潜油电泵（ESP, Electrical Submersible Pump）是一种用于油井深层采油的高效电动抽油装置，通常安装在井下，通过电机驱动泵体内的叶轮工作，完成对于油气的抽取过程。潜油电泵主要由电机、泵体、密封系统、导流系统以及电缆等组成，每个部分相辅相成，共同推动设备在高温高压的井下环境中长期稳定运行^[1]。

潜油电泵的工作原理本质就是电能转化为机械能的过程，电机通过电源接收到的电能，驱动转轴旋转。电机的旋转轴与泵体叶轮连接，电机旋转产生的机械能传递给泵体。电机带动叶轮旋转，叶轮在转动过程中通过离心力将井下的油液加速。油液被推动并流过导叶，在导叶的引导下沿泵体向上流动。经过叶轮加速后的油液通过泵的出口管道被输送至地面。在理论应用中，潜油电泵通常能够连续运行多年，特别适合于石油和天然气等井下采油作业。它的优点包括较高的自动化程度，能够在无人值守的情况下高效工作；较小的占地空间，使其能够适应复杂的井下环境；以及较为简单的操作维护流程，便于现场维护人员对其进行操作和故障排除^[2]。然而，潜油电泵在实际应用中由于高温、高压、强腐蚀、沙粒污染等井下环境的挑战。例如，在一些高温高压井下，电机的过热问题可能会导致设备故障；而在含有腐蚀性气体（如硫化氢）和固体颗粒的井液中，潜油电泵的密封和耐腐蚀能力也往往容易百密一疏。

因此，潜油电泵的配套设计就需要针对这些极端环境进行相应的优化，确保电泵在高压、复杂液体条件下仍能稳定高效运行。这就要求我们对电机、泵

体、密封系统以及导流系统都要进行针对性的设计与优化,才能充分提升其适应能力并延长电泵的使用寿命。

2 潜油电泵配套设计的影响因素

潜油电泵的配套设计优化必须考虑多种因素,尤其是油井的工况、生产需求与系统适配性等,确保电泵能够在高效稳定的状态下运行。

2.1 油井工况对配套设计的影响

油井的井下温度、压力、腐蚀性介质以及固体颗粒对潜油电泵的设计有重要影响。例如,高温高压井中,电机和泵体的散热问题尤为关键,而腐蚀性气体(如硫化氢)则需要选用具有高抗腐蚀性的材料。

2.2 生产需求与设备选型

根据不同油田的产能需求,选择合适的潜油电泵至关重要。产量较高的油井需要高流量、大功率的电泵,而低产油井则需考虑流量、扬程的优化配比,以实现能源的有效利用。

2.3 系统适配性分析

潜油电泵的配套设计不仅要与井下环境相匹配,还要与油田其他采油设备(如地面泵、管道系统等)进行综合适配,确保整体系统的运行效率和稳定性。

3 潜油电泵配套设计优化策略

潜油电泵的设计优化是提升设备性能、降低能耗、延长使用寿命并确保其长期稳定运行的关键。通过科学的选型、精确的参数优化、系统集成、材料的合理选择、效率提升与智能化系统的引入,能够显著提高潜油电泵的工作效率,降低油田的运营成本,最终推动经济效益的提升。

3.1 科学选型与参数优化

潜油电泵的科学选型是确保其性能最佳的基础,选型时需综合考虑井下环境、油液特性及油田生产需求等多个因素。关键参数如泵型、功率、流量和扬程的精确优化,能有效提高运行效率,减少能源浪费。对于高温高压环境(如温度超过 150°C 、压力超过 30MPa),电机和泵体必须具有较强的耐高温、耐压能力。高粘度油液(如粘度超过 100cp)通常需要大流量泵体以保证充足流体输送,而含气量高的油液要求采用特殊设计的电泵,以减少气体积聚。电机功率必须与井下条件匹配,过大或过小的功率都会导致能效降低和能源浪费。通过对井下工况(如井深、流体特性、产量等)进行详细计算,可以确保电泵功率和流量的最佳匹配,从而提升工作效率。扬程和流量的选择需根据油田生产需求优化,合理的扬程能确保泵体长期稳定运行,而适当的流量优化则防止泵体超负荷运行。使用数值模拟技术(如CFD和FEM)可以

进一步优化泵体、叶轮和电机设计,从而最小化能量损失和提高效率。

3.2 系统集成与适配性优化

潜油电泵的设计不仅涉及单一部件,还需确保各个部件如泵体、电机、密封系统和导流系统的系统集成与优化。电机与泵体的匹配至关重要,电机的功率(通常范围为 50kW 到 3000kW)、转速(一般为 1500rpm 到 3600rpm)和扭矩与泵体的叶轮设计(例如叶轮直径从 200mm 到 1000mm 不等)必须相协调,以确保高效运行并避免能效损失。电机的功率和转速需要根据井深(如 1000m 到 3000m)和流体流动的要求精确选择,确保在不同的工作条件下获得最佳性能。密封系统的设计必须与泵体和电机的配合相适应,尤其在高压(如压力可达 30MPa)或腐蚀性液体的环境下,优化密封系统能提升电机的长期稳定性,减少因密封失效导致的停机和维护成本。对于井下含硫、含氯的腐蚀性液体,密封材料通常采用氟橡胶或碳化硅,确保长期可靠运行。此外,系统集成优化确保泵体、电机、密封系统和导流系统等部件的协同工作,优化设计能够降低振动(通常要求振动幅度小于 0.5mm/s)、提高稳定性并减少故障率。通过综合考虑电机与泵体的匹配、密封系统的耐压耐腐蚀能力和各部件的高效协作,确保潜油电泵在复杂井下工况下的长期高效运行。

3.3 材料与耐久性优化

井下环境的复杂性要求潜油电泵具备较强的耐高温、耐腐蚀和耐磨损性能,因此材料选择在提升潜油电泵的耐久性方面至关重要。常见的耐高温材料,如钼合金和高温不锈钢,能够承受超过 150°C 的高温,并在长时间的高温环境中保持其机械强度和抗腐蚀性。电机和泵体的外壳通常采用这些合金,以确保在井下高温高压环境下的稳定运行,避免过热导致的效率下降或故障。在面对腐蚀性液体(如含硫化氢、氯化物和二氧化碳的井液)时,潜油电泵的关键部件(如泵体、密封系统和电机外壳)需要使用耐腐蚀性材料,如氟塑料、镍基合金等。这些材料能够在恶劣的化学环境下长期耐受腐蚀。此外,泵体表面常采用陶瓷涂层或碳化钨涂层,这些涂层能有效增加设备的耐腐蚀能力,延长设备的使用寿命,并降低因腐蚀导致的停机风险。井液中的固体颗粒(如沙粒)对潜油电泵的叶轮、泵体内衬等部件造成磨损。因此,选用硬质合金或耐磨合金钢作为叶轮和泵体的材料,能够有效提升设备的耐磨损性,减少因磨损引起的故障频率。通常,泵体内衬的耐磨材料要求硬度达到 $60\text{--}70\text{HRC}$,以应对高含沙量的液体环境。通过合理选材与优化设计,能够显著提升潜油电泵在极端井下条件下的可靠

性和使用寿命,降低运营成本。

3.4 效率提升与能耗控制

效率提升和能耗控制是潜油电泵设计的关键策略,通过优化电机与泵体设计,可以显著提升能源转换效率。在实际作业中,采用高效的永磁同步电机(PMSM)代替传统的异步电机,能够在较低的能耗下提供更高的功率密度,提升系统整体效率。PMSM电机的效率通常能达到95%以上,相比之下,传统异步电机效率较低,约为85%~90%。此外,泵体的流体动力学设计也至关重要,通过减少流动中的能量损失,例如优化叶轮形状和泵壳的流道设计,能够减少流动阻力并提高泵体效率。根据CFD分析,优化叶轮的角度和流道几何形状能够减少5%~10%的能量损失。另一方面,智能调节技术也是能效控制的重要手段,通过变频控制系统,电机的转速可以根据井下实时生产需求自动调节,确保电泵始终工作在最优能效区间。电机的转速范围通常可以调节至1500rpm至3600rpm之间,通过精确调节,可以避免过高或过低的负载,从而降低不必要的能源消耗。

3.5 智能化与自动化提升

智能化与自动化技术在潜油电泵配套设计中的应用,可以显著提升设备的自适应能力、运行效率,并减少人工干预,让潜油电泵能够在复杂井下工况中持续高效运行。其中,智能监控系统可以通过传感器实时采集电泵的运行数据(如电流、电压、温度、振动等),并通过云平台进行数据分析和处理。例如,温度传感器能够实时监控电机温度,确保温度不会超过设定阈值(如85℃),以避免因过热导致的电机损坏。系统能够在检测到异常数据时发出预警,并自动调节电泵状态,避免设备故障造成的生产停滞。自动化控制系统可以通过对电泵的泵速、阀门控制和启停操作进行精确调节。例如,通过变频驱动(VFD)技术,电机转速可以在1500rpm至3600rpm之间调节,以适应不同井下流体条件,实现流量和扬程的自动优化,避免过载或能效损失。

4 经济效益提升策略

潜油电泵的配套设计优化不仅仅是为了提升其工作效率与性能,更重要的是通过设计与技术优化,在确保设备长时间稳定运行的同时,显著降低油田的运营成本,最终提升整体经济效益。

4.1 成本效益分析

潜油电泵的设计优化需要通过对初期投资、运营成本和维护成本的全面分析来进行成本效益评估。在优化设计时,尽管在设备初期可能需要投入更多资金用于高效电机、耐腐蚀材料和智能控制系统等,但从

长远来看,这些技术和材料的投入能够显著降低设备的维护频率和故障停机时间,从而减少了因停机产生的生产损失。例如,采用耐高温和耐腐蚀材料的潜油电泵在面对高温高压井下环境时,能够减少因腐蚀导致的设备更换和维护成本,降低长期运营费用。此外,通过科学选型和参数优化,确保电泵的功率与井下实际条件相匹配,也可以避免能源浪费,减少了作业的电力成本。

4.2 能源节约与运营成本降低

能源消耗在潜油电泵的运营中占据重要比例,因此,优化设计以提高能效,是降低运营成本的关键。我们通过采用高效电机(如永磁同步电机,PMSM)替代传统异步电机,可以在较低的能耗下提供更高的功率密度,提高系统的整体效率。PMSM电机的效率可达到95%以上,较传统异步电机效率提高10%~15%。此外,通过优化泵体设计(如改进叶轮的形状和流道设计),也可以减少液体流动过程中的能量损失,进一步提高整体系统的能效。采用变频控制技术(VFD),根据井下环境的实时需求自动调节电机的转速和功率输出,确保电泵始终工作在最优能效区间。这种智能化的调节方式能在低负荷时减少能源浪费,同时,在高负荷时提供足够的动力输出,进一步降低电力消耗。

4.3 维修与维护优化

潜油电泵的长期稳定运行有赖于设备的高可靠性,而设备的维修和维护成本则是影响油田经济效益的重要因素。优化设计能显著提高电泵的可靠性,减少设备故障的发生,从而降低因故障停机带来的生产损失。通过选用耐高温、耐腐蚀和耐磨损的材料,减少设备的磨损和腐蚀,可以延长潜油电泵的使用寿命,减少对零部件的频繁更换。例如,采用钼合金和耐磨合金钢等材料,可有效延长泵体、叶轮和轴承的使用寿命,避免因磨损过度导致的频繁维修。此外,智能化的监控系统能够实时监控设备的运行状态,通过对关键部件(如电机温度、振动、负载等)进行监测,及时预警潜在的故障,提前进行维护,避免设备发生重大故障。这种预测性维护方式能够减少停机时间并提高生产效率。综合来看,通过提高设备的可靠性和预防性维护,潜油电泵的维修和维护成本可以显著降低,油田的整体运营成本也可以得到有效控制。

参考文献:

- [1] 涂东.潜油电泵油井优化配套设计方法[J].设备管理与维修,2021,(07):138-139.
- [2] 朴永哲.提高潜油电泵机组抗砂蚀性能的途径[J].机械工程师,2017,(09):110+112.