立式螺杆泵性能检测装置研制

迟阿惠[1]　嵇丽霞[2]

1. 山东寿光市坤隆石油机械股份有限公司；2. 共达电声股份有限公司

摘要：螺杆泵作为高效稳定的机械采油设备，广泛应用于低渗透、稠油及高含砂油井。为全面评估其在不同工况下的性能，本文基于螺杆泵采油理论，系统设计了一套集驱动头、采油井系统与测控系统于一体的试验台。通过参数计算、传动与结构优化、强度校核及高精度测控设计，提升了试验台的稳定性和可靠性。结合密封、防砂、防气入及加热保温方案，优化了系统适应性与运行效率，实现了采油过程的实时监测与智能调节，为螺杆泵性能提升与采油技术改进提供了有力支持。

关键词：螺杆泵；试验台；驱动头设计；采油井系统；测控系统

在复杂油井条件下，螺杆泵因其适应性强、运行稳定，成为机械采油的关键设备，但仍面临能耗高、磨损快等问题，亟需通过科学试验进行性能优化。本文针对现有试验装置存在的不足，设计了一套高适应性、高精度的螺杆泵试验台，旨在为螺杆泵采油技术的优化与应用提供技术支撑。

1　螺杆泵采油基础理论及试验台总体设计

1.1　螺杆泵采油基础理论

螺杆泵作为一种典型的容积式输送设备，其工作原理是通过转子的螺旋运动与定子之间的啮合，在定子内形成密封腔体，随着转子的连续旋转，密封腔体沿泵轴方向匀速推进，将井下原油不断输送至地面，实现稳定的液体提升，如图 1 所示。其基本结构主要由转子、定子、轴承、密封系统及联轴器等组成，转子通常为钢制螺旋状，定子则内衬弹性材料，两者配合完成流体输送。

螺杆泵采油系统由地面驱动装置、传动系统、井口装置、螺杆泵本体及配套的控制与监测设备构成，保障了井下采油作业的连续性与安全性。地面驱动装置通过抽油杆或空心杆传递动力至井下泵体，井口装置则实现密封与防喷功能，电控柜与在线监测系统则负责运行状态的实时监测与调节[1]。螺杆泵的主要性能参数包括排量、扬程、转速、轴功率、泵效与容积效率等，这些参数不仅反映了泵的输送能力与能耗水平，也是螺杆泵选型设计与现场优化运行的重要依据。

1.2　螺杆泵试验台总体设计

螺杆泵试验台的总体设计需紧密结合试验井的现场环境特点，包括空间受限、地质条件复杂及安全管理要求，确保设计方案具备良好的适应性与可操作性。在此基础上，试验台方案设计应重点解决设备安装稳固性、试验工况模拟的准确性与操作维护的便捷性，合理布局地面驱动、传动系统、监测设备等关键部件，保证试验过程安全高效、数据真实可靠。同时，针对螺杆泵频繁的维护与性能检测需求，拆装装置方案设计尤为重要，应实现螺杆泵泵体及其关键零部件的快速拆装与高效更换，降低人工操作强度，提高作业效率与安全性。通过结合现场环境、优化方案布局与完善拆装设计，螺杆泵试验台能够全面满足实际工况下的测试与维护需求，为后

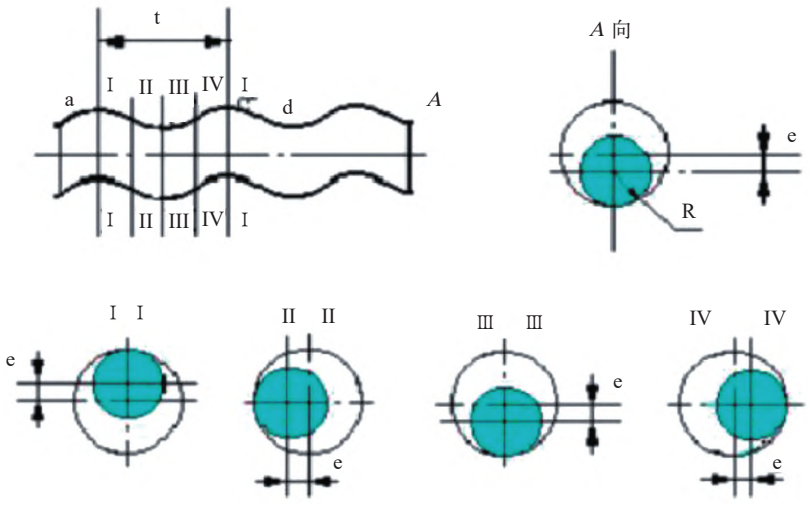

图 1　螺杆泵原理图

续采油技术优化提供有力支撑。

2 螺杆泵试验台驱动头设计

2.1 齿轮减速箱结构设计及强度校核

齿轮减速箱（见图 2）设计首先选定齿轮模数、齿数和宽度，计算分度圆直径。齿轮强度校核以弯曲应力为重点，确保齿根弯曲应力不超过材料许用应力。接触疲劳校核基于 Hertz 接触应力，保证齿面接触应力安全。轴承寿命计算及润滑设计保障传动系统长期可靠[2]。减速箱箱体通过有限元分析校核刚度和热散，防止变形影响齿轮啮合精度，确保传动效率和耐久性。整体设计实现结构紧凑、强度高、运行稳定。

2.2 电动机座设计

电动机座设计需兼顾承载力和刚度，保证电动机及减速箱的稳固安装。基于电动机和减速箱尺寸进行结构布局，采用有限元分析计算受力情况，最大应力控制在材料屈服强度的 80% 以内，确保安全裕度。结构刚度必须满足振动控制要求，设计橡胶减振垫降低振动传递，提升设备寿命。安装面要求高平整度与同轴度，误差控制在 0.05 mm 以内，保证传动系统的精准对接。电动机座还设计调整机构，方便现场安装、调试和维护，提升系统整体可靠性和实用性。

3 试验台采油井系统设计

3.1 井口装置设计

井口装置是试验台采油井系统中连接地面与井下的重要设备，主要负责承受套管、油管的重量及井内流体的压力，同时实现对井内流体的封闭与控制。本系统井口装置设计充分考虑了试验工况下的承载能力与密封性能，选用了具备高强度、高密封性的阀门、法兰（见图 3）及采油树结构，保证在高温、高压环境下的稳定运行。为满足不同试验需求，井口装置设计了可调节接口与多功能测试通道，便于连接各种监测与控制设备。同时，结合操作安全性，优化了井口阀门的布局与操作方式，降低了人工操作风险，提升了试验效率。整体设计在保证设备安全、可靠的前提下，兼顾了安装、维护的便捷性，满足了试验台采油井多工况、多参数的测试需求。

3.2 井下装置设计

井下装置是实现原油开采、流体输送与动态监测的关键部件，直接影响采油井系统的运行效果与试验数据的准确性。本系统井下装置设计基于实际工况需求，选用了高强度防腐蚀材料制造油管、抽油杆等核心部件，提升了整体耐压、耐磨及抗腐蚀能力[3]。

同时，配置了防砂、防气入装置，避免井下杂质对设备运行与数据采集的干扰，保障采油过程的稳定性与数据的可靠性。井下传感器与信号传输单元的布局也进行了优化，确保各项参数（如温度、压力、流量）实时、准确传输至地面系统。此外，为适应不同深度与工况条件，井下装置设计具备模块化与可

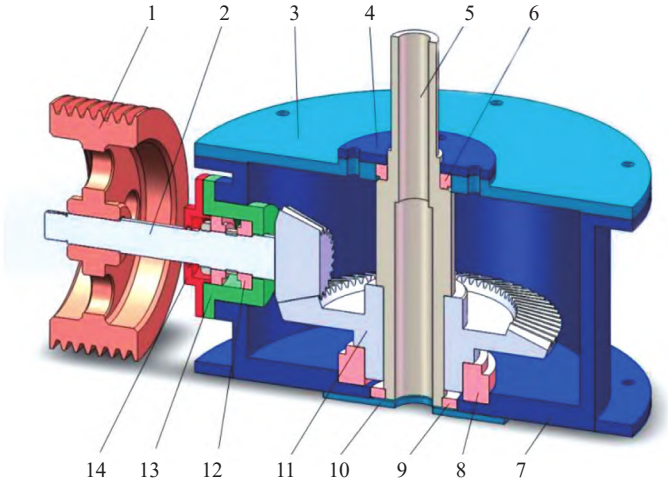

图 2 齿轮减速箱三维结构图

1- 大带轮；2- 齿轮轴；3- 减速箱盖；4- 上端轴承压盖；5- 输出轴；6- 上端轴承；7- 箱体；8- 承重轴承；9- 扶正轴承；10- 下端轴承压盖；11- 大齿轮；12- 齿轮轴轴承；13- 轴承座；14- 轴承压盖

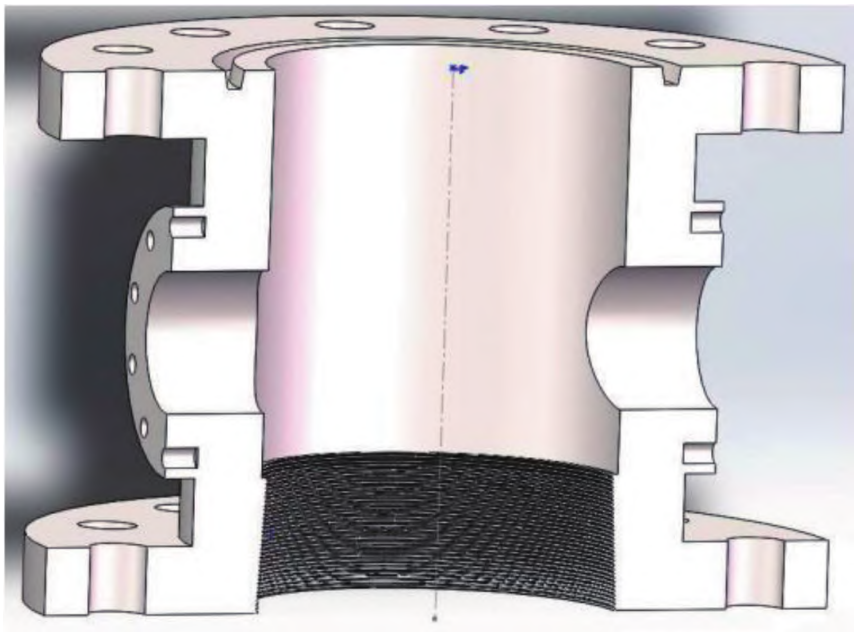

图 3 套管法兰图

调节特性，便于快速更换与灵活组合，满足多样化试验需求，提升了整体系统的适应性与可维护性。

3.3 油液加热系统设计

油液加热系统在试验台采油井中起到提升原油流动性、降低黏度及保证采油效率的重要作用。结合试验台应用特点，本系统加热装置采用电加热与保温一体化设计，确保加热效率与热量利用率的同时，降低能耗。

系统通过自动温控装置精准调节油液温度，保证不同工况下原油在管道内的流动顺畅，避免因低温导致的结蜡、凝固等问题影响试验效果。加热系统管路采用高效保温材料包覆，减少热量散失，提高整体热能利用率。此外，系统具备多点温度监测与异常报警功能，确保运行过程中的安全性与可控性。设计过程中充分考虑了设备的可维护性与操作便捷性，便于后期检修与调整，保障了采油井系统在各种试验环境下的稳定高效运行。

4 试验台测控系统设计

4.1 硬件设计

本试验台测控系统的硬件部分（见图 4）由控制主机、数据采集模块、执行机构、人机交互界面及电源保护系统构成。控制主机作为核心单元，采用高性能嵌入式工控机，具备强大的数据处理与多任务并行能力，保障系统运行的高效与稳定。

数据采集模块通过高精度压力、温湿度与流量传感器，实现对混凝土透气性状态的实时、精准监测，确保数据的准确性与可靠性。执行机构基于步进电动机与电磁阀组合，能够根据控制指令灵活调节透气性参数，响应速度快、调节精度高。人机交互界面采用 7 寸触控液晶屏，支持图形化显示与多级菜单操作，提升了系统的易用性与直观性。

同时，系统配备稳压电源、防雷击与短路保护装置，确保设备在复杂工况下依然具备良好的抗干扰能力与安全保障，满足长期连续运行的试验需求。

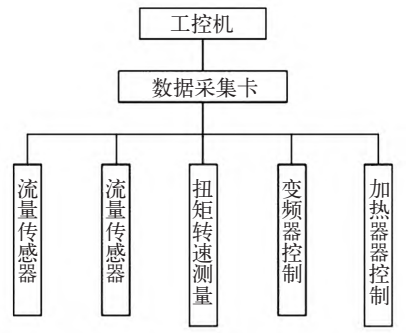

图 4 硬件系统组成图

4.2 软件设计

软件部分采用模块化设计，涵盖数据采集与处理、控制算法、人机交互、数据存储与安全容错等核心功能，确保系统运行的灵活性与可扩展性。数据采集模块通过高频采样与滤波算法，有效抑制环境噪声干扰，保障采集数据的实时性与精度。

控制算法结合专利原理，针对不同混凝土材料的透气性特性，实现动态自适应调节与闭环反馈控制，确保调节过程的高精度与一致性。人机交互模块支持实时数据显示、参数设定、状态监测与异常报警等功能，并具备远程监控与维护能力，提升了系统的智能化水平与运维便捷性。

数据存储模块采用本地与云端双备份机制，支持批次管理与自动报表生成，方便后续数据分析与追溯。同时，软件设计中引入多重容错与安全策略，如断电保护、数据自恢复与权限管理，保障系统在各类突发情况下依然具备良好的鲁棒性与可靠性 [4]。

本试验台测控系统通过硬件与软件的深度融合，实现了混凝土透气性参数的高效调控与精准测量。硬件部分依托高性能嵌入式工控机、精密传感器、智能执行机构与人性化交互界面，构建了稳定、可靠、灵活的物理支撑平台，确保系统在复杂工况下的连续性与安全性。软件部分则通过模块化设计，融合自适应控制算法、智能数据处理与多层次安全策略，实现了测控系统的智能化与自动化，显著提升了操作便捷性与数据分析能力。整体设计不仅保障了试验过程的高效与精准，还具备良好的可扩展性与维护性，为后续相关材料性能测试与工艺优化提供了强有力的技术支撑，推动专利技术在实际应用中的转化与落地。

5 结论

本文围绕螺杆泵采油技术，系统性地开展了试验台的总体设计与关键部件优化，包括基础理论分析、驱动头设计、采油井系统设计与测控系统集成。通过针对性设计与优化，试验台具备了良好的适应性、可靠性与可操作性，能够有效模拟实际工况，满足螺杆泵性能测试与技术验证的需求。同时，测控系统的智能化与高精度保障了数据采集与分析的准确性，为后续螺杆泵采油技术的优化与推广应用提供了有力支撑。

未来，随着新材料与智能控制技术的发展，试验台的性能与功能将持续优化，进一步助力油田开采技术的高效与可持续发展。

参考文献：

[1] 屈文涛，王家宁．采油螺杆泵流场建模与仿真分析 [J]. 广东化工，2023, 50 (05): 133-135+158.

[2] 黄勇淇．采油螺杆泵密封与摩擦学特性研究 [D]. 沈阳：沈阳工业大学，2022.

[3] 张迪．长轴立式螺杆泵异常振动分析及对策 [J]. 石油和化工设备，2022, 25 (05): 24-26.

[4] 隋小龙．立式螺杆泵性能测试系统研制 [D]. 青岛：中国石油大学（华东），2020.