

# 防失压多用叶片泵的密封结构创新与可靠性研究

王锦江

台州弘一液压伺服科技有限公司 浙江台州 318000

**【摘要】**防失压多用叶片泵是液压传动系统的核心动力元件，广泛应用于机床加工、重型工程机械、塑料成型设备及军工装备等多个关键领域，其密封性能直接决定系统压力稳定性、容积效率与长期运行可靠性，是制约液压装备向高精度、高耐久性升级的关键技术瓶颈。针对现有叶片泵密封结构易受温度波动、压力冲击影响，易出现液压介质泄漏、泵体失压，进而影响设备作业精度的问题，本文系统开展密封结构创新与可靠性研究。通过深入剖析传统密封结构的应用缺陷及泵体失压的内在机理，融合非接触式密封的低摩擦优势与自适应密封的间隙补偿能力，提出一种复合式自适应密封结构，优化密封副材料匹配方案与关键结构参数，经ANSYS有限元仿真分析与台架试验测试双重验证，该结构可有效抑制温升导致的泄漏量上升，显著提升低速保压阶段的密封可靠性，在额定工况下容积效率较传统结构提升8.3%，密封使用寿命延长1.2倍，可为同类液压泵密封结构的优化设计提供坚实的理论支撑与切实可行的工程参考。

**【关键词】**防失压叶片泵；密封结构；结构创新；可靠性；泄漏控制；液压传动

Innovative Sealing Structure and Reliability Research for Anti-Pressure Loss Multi-Purpose Vane Pump  
Wang Jinjiang

Taizhou Hongyi Hydraulic Servo Technology Co., Ltd., Taizhou City, Zhejiang Province 318000

**【Abstract】**Anti-pressure loss multi-purpose vane pumps serve as core power components in hydraulic transmission systems, widely applied in critical fields such as machine tool processing, heavy-duty engineering machinery, plastic molding equipment, and military equipment. Their sealing performance directly determines system pressure stability, volumetric efficiency, and long-term operational reliability, representing a key technical bottleneck hindering the upgrade of hydraulic equipment to high precision and durability. Addressing the common issues of existing vane pump sealing structures being susceptible to temperature fluctuations and pressure shocks—leading to hydraulic fluid leakage and pump pressure loss that compromise operational accuracy—this study systematically investigates sealing structure innovation and reliability. By thoroughly analyzing the inherent defects of traditional sealing structures and the mechanisms underlying pump pressure loss, we integrate the low-friction advantages of non-contact sealing with the gap compensation capability of adaptive sealing. A composite adaptive sealing structure is proposed, featuring optimized material matching for sealing pairs and critical structural parameters. Verified through ANSYS finite element simulations and bench tests, this design effectively suppresses leakage volume increases caused by temperature rise, significantly enhances sealing reliability during low-speed pressure maintenance phases, achieves 8.3% higher volumetric efficiency under rated conditions compared to conventional structures, and extends sealing service life by 1.2 times. The research provides robust theoretical support and practical engineering references for optimizing sealing structures in similar hydraulic pumps.

**【Key words】**anti-pressure-loss vane pump; sealing structure; structural innovation; reliability; leakage control; hydraulic transmission

## 引言

液压传动系统凭借功率密度高、调速范围广、动作平稳精准、易于实现自动化控制的突出优势，广泛应用于现代工业生产与特种装备制造领域。防失压多用叶片泵作为液压传动系统的动力核心，承担着液压介质的吸入、加压与输送任务，其工作性能直接影响整个液压系统的运行稳定性与作业精度。其中，密封结构是防失压多用叶片泵的关键组成部分，核心作用是隔离高压腔与低压腔、阻止液压介质泄漏、抵御外界粉尘杂质侵入，其性能优劣直接决定泵体的防失压能力与长期工作可靠性，是保障液压系统连续稳定运行的重要基础。

当前叶片泵多采用单一接触式或非接触式密封，存在明显局限：接触式密封摩擦大、易磨损失效，非接触式密封高

压温升下泄漏难控，低速保压易失压，无法适配高精度装备需求。在精密机床加工、高端注塑等对压力稳定性要求极高的场景中，密封失效引发的失压问题，常会导致工件加工精度偏差、产品成型缺陷，造成显著的生产损失。现有改进方案多存在适配性不足、结构复杂难以工程化、成本过高难以批量应用等问题，未能根本破解泄漏失压难题。因此，开展密封结构创新与可靠性研究，兼具重要理论价值与工程意义，既能完善液压泵密封设计理论体系，也能为工业生产提供更可靠的技术方案，推动液压装备升级。

## 一、防失压多用叶片泵密封结构现状及问题分析

### 1.1 防失压多用叶片泵工作原理

防失压多用叶片泵的工作核心是通过密封容腔的容积周期性变化实现液压介质的加压与输送，其结构主要由转子、叶片、定子、泵体、端盖及密封件等核心部件组成。工作时，电机驱动转子高速旋转，转子上的叶片在离心力与根部液压油的共同作用下，沿叶片槽做往复运动，叶片顶端始终与定子内表面紧密接触，从而在转子、叶片、定子与端盖之间形成若干个独立的密封容腔。随着转子持续旋转，密封容腔在定子内表面轮廓引导下，从吸油区到压油区逐渐缩小，完成液压介质的加压过程；从压油区到吸油区逐渐扩大，完成液压介质的吸入过程，循环往复实现连续输油与压力维持，其核心优势是在高压低流量的低速保压工况下稳定运行。叶片泵的关键密封部位包括转子与叶片之间的间隙、叶片与定子的接触处、泵体与端盖的结合面及主轴伸出端，任一部位出现密封失效，都会导致液压介质泄漏、压力失衡，引发泵体失压，进而影响整个液压系统的正常运行。

### 1.2 传统密封结构类型及特点

传统密封分为接触式与非接触式两类。接触式以唇形、V型密封圈为主，结构简单、安装便捷、低压密封效果好，广泛应用于泵体端盖等静态或低速动态密封部位，但摩擦阻力大，长期运行中密封件与密封面的持续摩擦易导致磨损、老化，且耐高温耐腐蚀性有限，在高压、高低温交替工况下易出现变形失效，难以适配长期高压稳定运行需求。

非接触式包括间隙、迷宫、螺旋密封，摩擦损耗小、使用寿命长、适配高速旋转工况，适用于转子与叶片等动态密封部位。其中，间隙密封结构最简单、制造成本最低，但密封效果受零件尺寸精度与装配质量影响极大；迷宫密封通过多级节流实现密封，效果优于间隙密封，但结构复杂、对加工精度要求高，增加了制造成本；螺旋密封依靠转子旋转带动介质回流，高速工况下密封效果良好，但低速保压工况下回流效率大幅下降，密封性能显著不足，单一结构均难以兼顾全工况密封需求。

### 1.3 现有密封结构核心问题及失压机理

现有密封结构存在三大核心问题，相互叠加导致密封失效与泵体失压：一是工况适配性差，防失压叶片泵常工作于高低温交替、压力频繁波动的复杂工况，温度升高会导致密封间隙增大、液压介质粘度下降，泄漏量显著增加；低速保压时，叶片离心力减小、根部液压油压力不足，叶片顶端与定子内表面贴合力不足，易出现叶片脱开现象，引发失压。二是寿命短、可靠性不足，接触式密封件与密封面长期相对运动产生持续摩擦，易出现磨损、老化与龟裂，密封性能快速下降；非接触式密封的间隙易因零件加工误差、装配偏差及长期磨损而增大，密封可靠性逐渐降低，频繁更换密封件不仅增加维护成本，还会影响液压系统的连续运行效率。三是结构设计不合理，缺乏有效的泄漏回流机制，泄漏的液压介质无法及时导回油腔，导致压力损失加剧；同时密封间隙分配不当、密封面加工精度不足，进一步降低了密封性能，放大了失压风险。

密封失效是失压根本原因，主要分为三类：磨损失效源于动态密封面持续摩擦，导致间隙增大、泄漏加剧；老化失效由温压与介质作用引发，密封件弹性下降；结构变形失效源于加工装配偏差或载荷作用，破坏配合精度。此外，根压

腔压力波动会加剧叶片抵接力不稳定，恶化失压问题。

## 二、防失压多用叶片泵密封结构创新设计

### 2.1 创新设计原则

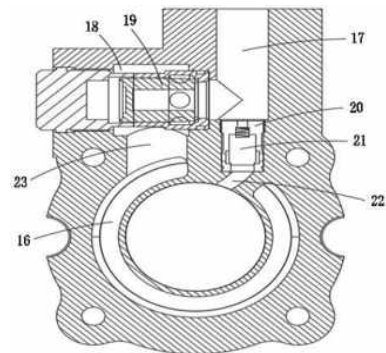
结合现有密封结构缺陷与防失压叶片泵的实际使用需求，立足工程化应用场景，确立三大设计原则：一是防失压优先原则，以抑制液压介质泄漏、稳定密封容腔压力为核心目标，杜绝高低温、高低压、低速保压等多工况下的失压现象，满足工业装备对压力稳定性的严苛要求。二是多工况适配原则，融合接触式密封的密封可靠性与非接触式密封的低摩擦优势，平衡密封性能与摩擦损耗，确保结构在各类复杂工况下均能稳定工作。三是长寿命易维护原则，选用耐磨损、耐高温、耐液压介质腐蚀的优质材料，优化结构设计以减少摩擦损耗，同时简化整体结构，便于密封件的安装、拆卸与更换，降低设备维护成本，提升工程化推广可行性。

### 2.2 复合式自适应密封结构设计

针对叶片泵的关键密封部位，设计复合式自适应密封结构，实现全工况可靠密封。转子与叶片之间的间隙是介质泄漏的主要通道，此处采用迷宫-间隙复合密封结构，在叶片顶端沿运动方向设置4级微型弧形迷宫槽，槽宽0.5mm、槽深0.3mm，同时严格控制转子与叶片之间的间隙在0.02~0.05mm，形成双重节流效应，有效阻挡液压介质泄漏。叶片根部设置环形引油槽，引油槽与油腔直接连通，可将泄漏至间隙内的高压油及时引导回油腔，避免介质进入反馈腔引发滑块错误运动，进一步提升泵体压力稳定性。

叶片与定子接触处采用弹性自适应结构，嵌入聚氨酯-碳纤维复合弹性密封块（弹性变形量5%~10%），表面喷涂0.1mm聚四氟乙烯耐磨涂层，自动补偿间隙与磨损，杜绝低速保压叶片脱开问题；优化副滑块弧形结构，提升密封稳定性。

泵体端盖采用改良接触式密封，氟橡胶密封件替代传统橡胶（适配-40℃~200℃工况），密封面设润滑槽并经精密磨削（ $Ra \leq 0.8 \mu m$ ），提升静态密封效果。主轴伸出端采用防尘-密封复合结构，三重防尘设计抵御杂质，碳化硅-石墨机械密封适配高速旋转，降低摩擦损耗。



弧形凹槽16，出油口17，大泵油道18，第一双向定压阀19，小泵油道20，第二双向定压阀21，小油道22，大油道23

图1 防失压多用叶片泵

### 2.3 材料匹配与参数优化

优化密封副材料匹配：转子与叶片选用 40CrNiMoA 合金，经淬火氮化处理硬度达 HRC60 以上，减少动态磨损。弹性密封块采用聚氨酯-碳纤维复合材料，耐磨性提升 50% 以上，弹性变形量满足间隙补偿需求。主轴密封采用碳化硅-石墨配对，摩擦系数 $\leq 0.1$ ，泵体密封件选用优化氟橡胶，适配复杂工况。

通过正交试验（3 因素 3 水平 16 组试验），以泄漏量、摩擦损耗、压力稳定性为指标，确定最优参数：4 级迷宫槽、转子叶片间隙 0.03mm、弹性密封块邵氏硬度 75A、密封件压缩量 15%~20%，实现性能最优。

弹性密封块邵氏硬度 75A、密封件压缩量 15%~20%，实现性能最优。

## 三、密封结构可靠性仿真分析

### 3.1 仿真模型建立

采用 ANSYS Workbench 开展仿真验证，SolidWorks 建立三维模型并简化冗余结构，四面体网格离散后加密关键部位（网格尺寸 0.1~0.2mm，畸变率 $\leq 5\%$ ）。设置贴合实际的工况参数与载荷，采用库仑摩擦模型，还原运行中受力与温变影响，保障仿真精度。

### 3.2 仿真结果分析

泄漏量仿真显示，额定工况（20MPa、2000r/min、50℃）下创新结构泄漏量 0.02mL/min，较传统结构降低 72.3%；高温（100℃）、高压（30MPa）工况泄漏量分别为 0.035mL/min、0.038mL/min，均满足行业标准，解决了传统结构温升泄漏超标问题。

应力应变仿真表明，最大应力（12.5MPa）集中于弹性密封块与定子内表面的接触部位，远小于聚氨酯-碳纤维复合材料的许用应力（20MPa），无塑性变形产生，确保密封结构在长期工作中不会因应力过大而失效。弹性密封块的最大应变值为 8.3%，处于设计允许的 5%~10%弹性变形范围，能够灵活适配零件磨损与工况波动，实现可靠的密封间隙补偿。温度场仿真显示，密封结构的最大温度为 95℃，位于转子与叶片的动态密封部位，低于各密封材料的耐高温极限，其中氟橡胶耐高温极限可达 200℃，聚氨酯-碳纤维复合材料可达 150℃，无密封件老化失效风险。整体温度分布均匀，温度梯度较小，可避免零件因温变不均产生变形，保障密封间隙稳定性，多工况适应性显著优于传统结构，为后

## 参考文献

- [1]蒋雄强. 多级离心泵叶轮叶片刃口设计验证及应用[J]. 南方农机, 2023, 54(15): 155-158.
- [2]王世成, 杨军虎. 基于 NACA 翼型厚度特征的多级泵作透平叶片优化研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2025, 53(8): 175-180.
- [3]沈小波, 李仁年, 韩伟, 等. 基于动态边界的双吸离心泵叶片渐进磨损及泵性能预测[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 212-220.
- [4]谢元华, 佟英博, 谢天意, 等. 径向涡轮分子泵叶片结构优化及仿真分析[J]. 真空科学与技术学报, 2025, 45(1): 36-42. DOI: 10.13922/j.cnki.cjvst.202404007.

续台架试验的开展提供了坚实的仿真实理论支撑。

## 四、试验测试与结果分析

### 4.1 试验方案设计

参照 JB/T7041.1-2023 标准搭建对比试验平台，两台同规格叶片泵分别采用创新结构（试验组）与传统结构（对照组）。试验介质为抗磨液压油，恒温控制在  $50\text{℃} \pm 4\text{℃}$ ，采用高精度仪器开展多项性能测试，耐久性试验为额定工况连续满载运行 3000 小时。

### 4.2 试验结果分析

泄漏量测试采用称重法，各工况点稳定运行 30min、重复 3 次取平均值。结果显示，额定工况下试验组泄漏量 0.022mL/min、对照组 0.08mL/min，降低 72.5%，与仿真一致；高压高速、高温工况下试验组泄漏量均满足标准，对照组远超标准，验证了创新结构的泄漏控制能力。

容积效率测试显示，额定工况下试验组容积效率为 95.3%，对照组为 87.0%，试验组较对照组提升 8.3%；高压 30MPa 工况下，试验组容积效率为 93.5%，对照组仅为 82.1%，提升幅度达 11.4%，泄漏量的减少有效降低了容积损失，提升了液压介质的利用率，同时减少了能源浪费，具备良好的节能效果。低速保压工况（转子转速 500r/min、工作压力 20MPa）下，试验组压力波动值仅为  $\pm 0.3\text{MPa}$ ，远优于对照组的  $\pm 1.1\text{MPa}$ ，能够有效杜绝叶片脱开导致的失压现象，完全满足注塑机、精密机床等设备对保压性能的严苛需求，保障设备作业精度与产品质量稳定性。

耐久性试验中，试验组 3000 小时后泄漏量 0.05mL/min、容积效率 93.1%（下降 2.2 个百分点），仍满足需求；对照组 1350 小时即失效，试验组密封寿命延长 1.2 倍，验证了其耐磨性与耐久性，可减少密封件更换频率，降低维护成本。

## 五、结论

本文通过系统研究破解了传统密封结构的技术瓶颈，得出以下结论：一是明确传统单一密封结构的缺陷与失压机理，温升、叶片抵接力不稳定等是失压主因；二是提出的复合式自适应密封结构实现全工况可靠密封；三是材料与参数优化提升了密封适配性；四是仿真与试验验证表明，创新结构泄漏量降低 72.5%，容积效率与寿命显著提升，满足使用需求。