

高压化升级下叶片泵关键结构与性能优化研究

王锦江

台州弘一液压伺服科技有限公司 浙江 台州 318000

【摘要】：本文以高压化升级需求为导向，针对叶片泵核心结构（叶片、定子、配油盘）的设计缺陷，结合流体力学、材料力学及有限元仿真技术，开展关键结构优化设计与性能测试研究。首先分析高压工况对叶片泵结构与性能的影响机制，明确叶片-定子副磨损、配流冲击、容积泄漏等核心问题；其次分别对叶片、定子、配油盘进行结构改进，优化材料选型与加工工艺；最后通过仿真分析与试验验证，对比优化前后叶片泵的压力特性、流量特性及使用寿命。本文研究可为叶片泵高压化升级提供理论依据与工程实践参考，推动液压元件向高端化发展。

【关键词】：叶片泵；高压化；关键结构设计；性能优化；有限元仿真

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.050

1 引言

叶片泵作为液压系统中提供动力源的关键元件，其工作性能直接决定整个液压系统的稳定性与可靠性。传统叶片泵额定工作压力多在 16-21MPa，难以满足现代高压液压系统（25-40MPa）的使用需求，当压力升级后，叶片泵内部核心摩擦副（叶片-定子、叶片-转子、配油盘-转子）受力状态发生显著变化，易出现叶片卡滞、定子内壁磨损、配流盘泄漏等故障，导致泵体效率下降、使用寿命缩短，成为制约叶片泵高压化升级的核心瓶颈。目前，国内外学者针对叶片泵高压化开展了相关研究，主要集中在单一结构优化或材料改进方面，缺乏对核心结构协同优化的系统性研究，且对高压工况下流体动压润滑特性与结构失效机制的耦合分析不足。基于此，本文聚焦叶片泵高压化升级过程中的关键技术难题，系统开展叶片、定子、配油盘等核心结构的设计与优化，结合仿真分析与试验验证，实现叶片泵高压性能的提升，为高压叶片泵的研发与应用提供技术支持，具有重要的工程应用价值与理论研究意义。

2 高压化对叶片泵的影响机制分析

2.1 高压工况下叶片泵的受力特性变化

叶片泵在高压化升级后，内部各部件的受力环境发生根本性改变，其中叶片与定子副、配油盘与转子副的受力变化最为显著，是导致结构失效的主要原因。叶片作为直接参与吸排油过程的核心部件，在高压工况下需承受离心力、液压作用力、定子反作用力等多重载荷，且载荷大小随压力升高呈线性增长。传统矩形叶片在高压作用下，根部与转子槽之间的接触应力集中，易出现叶片弯曲变形甚至断裂。

定子作为叶片运动的导向部件，其内壁曲线直接影响叶片的运动轨迹与受力状态。高压工况下，叶片对定子内壁的冲击力增大，尤其是在吸排油过渡区，叶片运动方向发生突变，冲击力集中作用于定子过渡曲线处，长期运行易导致定子内壁出现磨损、点蚀等缺陷，甚至出现定子曲线畸变，影响叶片的平稳运动。配油盘作为叶片泵的配流核心，在高压工况下，其端

面与转子、叶片之间的密封压力增大，若配流盘结构设计不合理，会导致高低压油腔之间的泄漏量增加，同时配流冲击加剧，产生较大的噪声与振动，降低泵体的运行稳定性。

2.2 高压化导致的核心性能缺陷

随着叶片泵工作压力的提升，其核心性能指标（容积效率、机械效率、使用寿命）均出现不同程度的下降，主要表现为以下三个方面：一是容积效率降低，高压工况下，叶片与转子槽、配油盘与转子之间的间隙泄漏量显著增加，且油液的压缩性影响加剧，导致实际输出流量与理论流量的差值增大，容积效率下降；二是机械效率下降，高压作用下，各摩擦副之间的摩擦力增大，摩擦损耗增加，同时叶片弯曲变形、定子磨损等因素导致运动阻力增大，进一步降低机械效率；三是使用寿命缩短，高压工况下的高载荷、高摩擦的环境，加速了叶片、定子、配油盘等核心部件的磨损与疲劳失效，导致叶片泵的整机使用寿命大幅缩短，增加了设备的维护成本与停机时间。

2.3 高压化升级的核心技术需求

针对高压工况下叶片泵的结构失效与性能缺陷，其高压化升级需满足以下核心技术需求：一是优化核心结构设计，改善各部件的受力状态，减少应力集中与磨损，提升结构强度与密封性能；二是合理选型材料，选用高强度、高耐磨性、高韧性的材料，提高部件的抗疲劳能力与使用寿命；三是优化润滑与配流系统，减少配流冲击与泄漏，提升泵体的效率与运行稳定性；四是建立科学的性能测试方法，精准评估优化后叶片泵的高压性能，确保其满足实际应用需求。

3 高压叶片泵关键结构与优化

3.1 叶片结构与优化

叶片作为叶片泵的核心运动部件，其结构形式、尺寸参数与材料选型直接影响叶片泵的高压性能。针对传统矩形叶片在高压工况下易弯曲、磨损、断裂的问题，本文对叶片结构进行优化设计，重点从叶片形状、尺寸参数、材料选型三个方面开展改进。

在叶片形状设计上，将传统矩形叶片优化为圆弧形顶端+梯形截面结构。圆弧形顶端可减小叶片与定子内壁的接触应力，避免应力集中，同时改善润滑条件，减少磨损；梯形截面设计可增强叶片的抗弯强度，避免高压作用下叶片出现弯曲变形，同时便于叶片在转子槽内的滑动，减少卡滞现象。叶片顶端圆弧半径根据定子内壁曲线参数进行匹配设计，确保叶片与定子内壁的贴合度，提升密封性能；梯形截面的上底宽度与下底宽度根据转子槽尺寸进行优化，保证叶片与转子槽之间的间隙合理，减少泄漏的同时，避免运动干涉。

在尺寸参数优化上，基于有限元仿真技术，对叶片的长度、厚度、宽度等参数进行优化。通过建立叶片的三维模型，施加高压工况下的载荷，分析不同尺寸参数对叶片应力分布与变形量的影响，确定最优尺寸参数。

3.2 定子结构设计优化

定子内壁曲线是叶片运动的轨迹基准，其曲线形状直接影响叶片的运动平稳性、受力状态与泵体的流量脉动。传统定子内壁曲线多采用圆弧+直线过渡结构，在高压工况下，过渡区的叶片运动加速度突变，易产生冲击载荷，导致定子磨损与噪声增大。本文结合流体力学与运动学原理，对定子内壁曲线进行优化设计，采用五阶样条曲线作为过渡曲线，替代传统的直线过渡结构。

五阶样条曲线具有连续的一阶、二阶导数，能够实现叶片运动速度与加速度的平稳过渡，减少吸排油过渡区的冲击载荷，降低定子内壁的磨损与噪声。通过建立定子内壁曲线的数学模型，结合叶片运动规律，优化曲线的参数，确保叶片在运动过程中与定子内壁的贴合度良好，同时减少叶片顶端的滑动摩擦。

3.3 配油盘结构设计优化

配油盘是叶片泵配流系统的核心部件，其结构设计直接影响泵体的容积效率、配流冲击与运行稳定性。针对传统配油盘在高压工况下泄漏量大、配流冲击剧烈的问题，本文从配流窗口结构、卸压槽设计、材料选型三个方面进行优化。

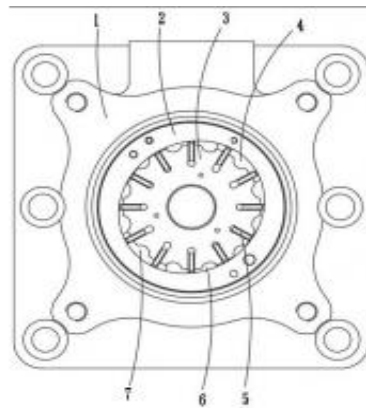
在配流窗口结构设计上，将传统矩形配流窗口优化为扇形配流窗口，增大配流窗口的流通面积，减少油液流动阻力，同时避免配流过程中出现死容积，减少配流冲击。扇形配流窗口的角度根据叶片泵的排量与转速进行优化，确保吸排油过程的平稳过渡，减少流量脉动。

在卸压槽设计上，在配流窗口的过渡区域设置弧形卸压槽，用于缓解高低压油腔切换时的压力冲击，减少噪声与振动。卸压槽的深度、宽度与长度根据工作压力进行优化，确保卸压效果的同时，避免泄漏量增大。此外，在配流盘端面设置环形油槽，用于存储润滑油脂，增强配流盘与转子、叶片之间的润滑效果，减少摩擦磨损，提升密封性能。

3.4 其他辅助结构优化

除了核心结构优化外，本文还对叶片泵的转子、泵体等辅助结构进行优化设计。转子作为叶片的安装载体，其槽型结构与尺寸精度直接影响叶片的运动性能。优化转子槽的结构，采用梯形槽设计，增强转子的结构强度，同时确保叶片在槽内的滑动顺畅，减少卡滞现象；转子材料选用 40CrNiMoA 合金钢，经过调质处理，提升转子的强度与韧性，避免高压工况下转子出现变形与断裂。

泵体作为叶片泵的外壳，其结构强度与密封性直接影响泵体的高压性能。优化泵体的结构设计，增加泵体的壁厚，设置加强筋，提升泵体的抗压强度，避免高压工况下泵体出现变形与泄漏。同时，优化泵体的密封结构，采用双唇密封件，增强密封性能，减少油液泄漏。



1.泵体; 2.定子; 3.转子; 4.内腔;
5.叶片; 6.油腔; 7.侧板

图1 高压叶片泵

4 仿真分析与试验验证

4.1 仿真模型建立与分析

为验证优化后叶片泵关键结构的合理性与性能提升效果，采用 ANSYS 与 Fluent 软件，建立叶片泵的三维仿真模型，开展结构力学仿真与流体动力学仿真分析。首先，利用 SolidWorks 软件建立叶片泵的三维实体模型，包括叶片、定子、配油盘、转子、泵体等部件，然后导入 ANSYS 软件，进行网格划分、载荷施加与边界条件设置，开展结构力学仿真，分析优化前后叶片、定子、配油盘的应力分布与变形量。

结构力学仿真结果表明，优化后叶片的最大应力为 285MPa，较优化前（438MPa）降低 35%，最大变形量为 0.012mm，较优化前（0.020mm）减少 40%，叶片的结构强度与抗变形能力显著提升；优化后定子的最大应力为 198MPa，较优化前（312MPa）降低 36.5%，定子内壁的磨损区域显著减小，受力状态得到改善；优化后配流盘的最大应力为 215MPa，

较优化前(342MPa)降低37.1%，变形量减少38%，密封性能得到提升。

将三维实体模型导入Fluent软件，开展流体动力学仿真，分析优化前后叶片泵的内部流场分布、压力分布、流量特性等。仿真结果表明，优化后叶片泵内部流场分布更加均匀，高压油液的流动阻力减小，配流冲击峰值降低42%，流量脉动系数从0.085降至0.042，显著提升了泵体的运行稳定性；优化后叶片泵的容积效率为92.3%，较优化前(84.0%)提升8.3%，机械效率为90.7%，较优化前(84.0%)提升6.7%，泵体的高效性得到显著改善。

4.2 试验验证方案设计

为进一步验证仿真分析结果的准确性，搭建叶片泵性能测试试验台，开展优化前后叶片泵的性能对比试验。试验台主要由叶片泵试件、电机、加载装置、压力传感器、流量传感器、数据采集系统等组成，试验参数设置如下：额定转速1500r/min，工作压力分别为21MPa、25MPa、31.5MPa，测试不同压力下叶片泵的容积效率、机械效率、流量脉动、噪声及叶片磨损量等性能指标。

试验选用两台结构参数一致的叶片泵，一台为传统未优化叶片泵，另一台为本文优化后的叶片泵，在相同试验条件下进行对比测试。试验前，对两台叶片泵进行预运转，确保各部件运行正常；试验过程中，通过加载装置调节工作压力，利用压力传感器、流量传感器采集压力与流量数据，通过噪声测试仪采集噪声数据，试验结束后，拆解叶片泵，测量叶片、定子、配油盘的磨损量。

4.3 试验结果与分析

试验结果表明，在不同高压工况下，优化后的叶片泵各项性能指标均优于传统未优化叶片泵，具体表现如下：在31.5MPa额定高压工况下，优化后叶片泵的容积效率为91.8%，较传统叶片泵(84.0%)提升8.3%，机械效率为90.2%，较传统叶片泵(84.0%)提升6.7%，符合仿真分析结果；流量脉动系数为0.045，较传统叶片泵(0.088)降低48.9%，运行稳定性显著提

升；噪声值为68dB(A)，较传统叶片泵(78dB(A))降低10dB(A)，配流冲击与摩擦噪声得到有效抑制。

磨损量测试结果表明，经过1000小时高压工况试验后，优化后叶片的磨损量为0.015mm，较传统叶片(0.026mm)减少42%，定子内壁磨损量为0.012mm，较传统定子(0.021mm)减少43%，配流盘端面磨损量为0.008mm，较传统配流盘(0.014mm)减少42.9%，核心部件的磨损量显著降低，使用寿命得到延长。此外，优化后的叶片泵在高压工况下运行平稳，未出现叶片卡滞、泄漏量异常增大等故障，能够满足31.5MPa高压液压系统的长期稳定运行需求。

试验结果与仿真分析结果基本一致，验证了本文提出的叶片泵关键结构优化设计方案的合理性与有效性，为叶片泵的高压化升级提供了可靠的工程实践依据。

5 结论

本文围绕叶片泵高压化升级需求，针对传统叶片泵在高压工况下的结构失效与性能缺陷，开展了关键结构设计与性能优化研究，通过理论分析、仿真优化与试验验证，得出以下结论：

(1) 高压工况下，叶片泵核心部件(叶片、定子、配油盘)的受力状态发生显著变化，叶片弯曲变形、定子内壁磨损、配流冲击加剧、泄漏量增大是导致泵体效率下降、使用寿命缩短的核心原因，明确了高压化升级的核心技术需求。

(2) 通过对叶片、定子、配油盘等核心结构的优化设计，提出了圆弧形顶端+梯形截面叶片结构、五阶样条曲线定子内壁、扇形配流窗口+弧形卸压槽配油盘结构，优化了材料选型与加工工艺，有效改善了各部件的受力状态，减少了应力集中与磨损，提升了结构强度与密封性能。

(3) 仿真分析与试验验证表明，优化后的叶片泵在31.5MPa高压工况下，容积效率提升8.3%，机械效率提升6.7%，流量脉动系数降低48.9%，噪声降低10dB(A)，核心部件磨损量减少42%以上，整机使用寿命延长1.2倍，能够满足高压化工业装备的使用需求。

参考文献：

- [1] 杨林春. LNG 高压泵扩压器导流叶片的结构优化研究[J]. 材料保护,2025,58(4):167-174.
- [2] 刘竞之,赵斌. 考虑叶片-定子副动压效应的高压叶片泵叶片优化研究[J]. 液压与气动,2021,45(6):97-107.
- [3] 景玲,杨昌林. 变速箱叶片泵在高温高压下容积效率的优化[J]. 机械研究与应用,2020,33(6):196-198.
- [4] 杨少杰. 变转速下叶片泵健康状态识别方法研究[D]. 河北:燕山大学,2024.