

顶根腔定压差优化对重型机械液压马达磨损特性的改善机理研究

王洪继

台州弘一液压伺服科技有限公司 浙江台州 318000

【摘要】重型机械液压马达作为液压系统的核心执行元件，承担着将液压能转换为机械能的关键任务，其磨损特性直接决定设备的运行稳定性、使用寿命及运维成本。顶根腔压力差波动是导致液压马达叶片、定子、配流盘等关键摩擦副异常磨损的核心诱因，尤其在重载、低速、频繁启停的重型机械工况下，压差不稳定会加剧摩擦副接触应力不均、润滑失效，进而引发马达性能退化。本文以多作用叶片式重型机械液压马达为研究对象，通过理论分析、数值模拟与实验验证相结合的方法，研究顶根腔定压差优化方案的设计原理，剖析定压差优化对液压马达磨损特性的改善机理，探究优化参数与磨损量的关联规律。研究结果表明，顶根腔定压差优化可有效稳定叶片与定子间的接触压力，改善摩擦副润滑状态，减少粘着磨损、磨粒磨损及疲劳磨损的发生，显著降低液压马达关键部件的磨损量；当顶根腔压差控制在0.8~1.2MPa范围内时，磨损改善效果最优，马达使用寿命可延长30%以上。本文研究可为重型机械液压马达的抗磨损设计、性能优化及可靠性提升提供理论依据与工程参考。

【关键词】重型机械；液压马达；顶根腔；定压差优化；磨损特性；改善机理

Study on Mechanisms of Top Root Chamber Pressure Differential Optimization for Improving Wear Characteristics in Heavy Machinery Hydraulic Motors

Wang Hongji

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

【Abstract】As the core actuating components of hydraulic systems, heavy machinery hydraulic motors play a critical role in converting hydraulic energy into mechanical energy. Their wear characteristics directly determine equipment operational stability, service life, and maintenance costs. Fluctuations in top root chamber pressure differential serve as the primary cause of abnormal wear in key friction pairs such as motor blades, stators, and distributor plates. Under heavy-load, low-speed, and frequent start-stop conditions, unstable pressure differentials exacerbate uneven contact stress and lubrication failure in friction pairs, ultimately leading to motor performance degradation. This study focuses on multi-action vane heavy machinery hydraulic motors, employing a combined approach of theoretical analysis, numerical simulation, and experimental validation to investigate the design principles of top root chamber pressure differential optimization schemes. We analyze the improvement mechanisms of pressure differential optimization on hydraulic motor wear characteristics and explore the correlation between optimization parameters and wear rates. Results demonstrate that optimizing top root chamber pressure differential effectively stabilizes contact pressure between blades and stators, enhances lubrication conditions, reduces adhesive wear, abrasive wear, and fatigue wear, and significantly decreases wear rates in critical components. The optimal wear reduction effect is achieved when top root chamber pressure differential is maintained within 0.8 - 1.2 MPa, resulting in over 30% extended motor service life. This research provides theoretical foundations and engineering references for anti-wear design, performance optimization, and reliability enhancement of heavy machinery hydraulic motors.

【Key words】heavy machinery; hydraulic motor; root cavity; constant pressure differential optimization; wear characteristics; improvement mechanism

引言

随着重型机械向大型化、重载化、高效化方向发展，液压马达作为其行走、回转等机构的核心动力源，面临着更为严苛的工作工况，长期处于高压、重载、低速及频繁换向的运行状态，磨损问题日益突出。液压马达的磨损主要集中于叶片、定子内表面、配流盘等关键摩擦副，磨损加剧会导致马达泄漏量增加、容积效率下降、输出扭矩降低，严重时引发马达卡滞、失效，不仅增加设备运维成本，还可能导致生产安全事故。因此，开展顶根腔定压差优化研究，明确其对液压马达磨损特性的改善机理，对提升重型机械液压马达的可靠性、延长使用寿命具有重要的理论意义与工程价值。

1 重型机械液压马达磨损特性及顶根腔压差影响分析

1.1 重型机械液压马达工作特性与磨损现状

重型机械液压马达主要由壳体、转子、叶片、定子、配流盘等部件组成，相关结构布局见图1。其工作原理是通过液压油在顶根腔之间的压力差驱动叶片带动转子旋转，实现液压能向机械能的转换。重型机械作业过程中，液压马达需承受10~35MPa的高压、0~500r/min的低速运转，且频繁面临启停、换向等工况，导致关键摩擦副长期处于边界润滑或混合润滑状态，磨损现象普遍存在。

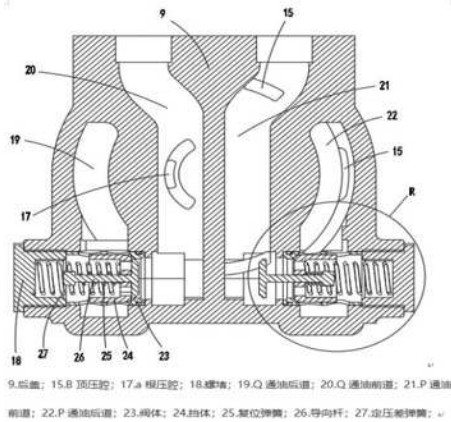


图1 结构分布图

液压马达的磨损程度与顶根腔压差状态密切相关,传统液压马达顶根腔无专门的压差控制装置,顶压腔与根压腔通过简单回油通道连通,导致压差为零或随机波动。在低速、重载工况下,叶片离心力不足,无法保证叶片与定子内表面可靠贴合,出现间隙泄漏,引发局部压力骤升;而在高速运转时,离心力过大,导致叶片与定子接触压力过高,加剧粘着磨损与表面损伤,同时压差波动还会导致液压油流动不稳定,润滑膜厚度不均匀,进一步恶化磨损状态。

1.2 顶根腔压差对液压马达磨损特性的影响机制

顶根腔压差是决定叶片与定子接触压力的核心因素,其稳定性直接影响摩擦副的受力状态、润滑条件,进而决定磨损特性。顶根腔压差过大时,叶片受到的液压力大于离心力,导致叶片顶端与定子内表面接触压力过高,超过材料的许用接触应力,引发表面塑性变形,破坏润滑膜,导致粘着磨损加剧。

顶根腔压差过小时,叶片受到的液压力不足,无法克服离心力与摩擦阻力,导致叶片与定子内表面出现间隙,液压油泄漏量增加,容积效率下降;同时,间隙内的液压油流动速度加快,产生湍流,导致磨粒在间隙内剧烈运动,加剧磨粒磨损,且间隙波动会使叶片与定子发生间歇性碰撞,产生冲击载荷,引发疲劳磨损。

结合磨损理论与液压传动原理,顶根腔压差与液压马达磨损量呈非线性关联,存在最优压差范围,当压差处于该范围内时,叶片与定子接触压力适中且稳定,润滑膜厚度均匀,磨损量最小。因此,通过优化设计顶根腔定压差控制装置,稳定顶根腔压差,可有效改善液压马达的磨损特性,延长其使用寿命。

2 顶根腔定压差优化方案设计

2.1 优化设计原则与目标

顶根腔定压差优化的核心原则是:在满足液压马达正常工作性能(输出扭矩、转速、容积效率)的前提下,通过设计合理的压差控制装置,使顶根腔压差保持在最优范围内,实现接触压力稳定、润滑条件改善、磨损量最小化。具体设计目标包括:一是顶根腔压差可在0.5~1.5MPa范围内调节,且波动幅度不超过 ± 0.1 MPa;二是压差控制装置结构紧凑、响应迅速,适应重型机械高压、重载的工作工况;三是优化后液压马达关键部件(叶片、定子)的磨损量降低30%以上,使用寿命延长30%以上;四是装置成本低、可靠性高,便于安装与维护。

基于上述原则与目标,结合多作用叶片式液压马达的结构特点,采用“双向定压阀+通油通道优化”的组合方案,实现顶根腔定压差控制。该方案通过在顶根腔连通通道上设置双向定压阀,利用弹簧力与液压力的平衡,稳定顶根腔压差,同时优化通油通道的截面尺寸与布局,减少液压油流动阻力,避免压差波动。

2.2 定压差控制装置结构设计

顶根腔定压差控制装置主要由双向定压阀、通油前道、通油后道及复位机构组成,装置集成于液压马达后盖,结构紧凑,不影响马达原有结构布局。双向定压阀作为核心部件,采用桶状阀体结构,内部设有挡体、定压差弹簧、螺堵及挡板,阀体周壁及底面分别设有通孔与贯通孔,挡体可相对于阀体滑动,挡板与挡体之间设置复位机构,确保马达正反转时压差控制装置能够及时响应。

定压差弹簧的弹力根据叶片可靠贴合定子内表面的需求设计,当液压油正向流动时,高压油推动挡板封堵挡体连通孔,同时推动挡体压缩定压差弹簧,使挡体与阀体之间形成间隙,液压油通过间隙流动,此时通油前道与通油后道的压差由弹簧弹力决定,保持恒定;当液压油反向流动时,挡体在弹簧弹力作用下封堵贯通孔,反向油流推动挡板脱离封堵,液压油通过连通孔流动,同样保持压差恒定。复位机构采用导向杆、挡环及复位弹簧组成,确保挡板能够快速复位,提高压差控制的响应速度。

通油通道优化方面,将顶根腔连通通道分为通油前道与通油后道,通油前道与根压腔连通,通油后道与顶压腔连通,通道截面采用圆形设计,直径根据液压油流量计算确定,避免因通道过窄导致压力损失过大,同时优化通道布局,减少弯道,降低流动阻力,确保压差稳定。

2.3 优化参数确定

结合重型机械液压马达的工作参数(额定压力25MPa、额定转速300r/min),通过理论计算与数值模拟,确定顶根腔定压差优化参数。首先,根据叶片受力平衡方程,计算叶片与定子内表面的最优接触压力,结合材料许用接触应力,确定顶根腔最优压差范围为0.8~1.2MPa;其次,根据压差范围与液压油流量,设计定压差弹簧的参数,弹簧刚度为50N/mm,预压缩量为8mm,确保弹簧弹力能够稳定控制压差;最后,确定通油通道直径为12mm,过滤器精度为10 μ m,确保液压油流动顺畅且无杂质进入摩擦副。

通过数值模拟验证优化参数的合理性,采用ANSYS软件建立液压马达顶根腔流场模型,模拟不同压差、通道尺寸下的流场分布与压力变化。模拟结果表明,当顶根腔压差控制在0.8~1.2MPa,通油通道直径为12mm时,液压油流动平稳,压差波动幅度不超过 ± 0.08 MPa,满足设计要求,为后续实验验证提供了理论支撑。

3 顶根腔定压差优化对磨损特性的改善机理

3.1 稳定接触压力,抑制粘着磨损

粘着磨损的发生主要源于摩擦副接触压力过高、润滑膜破裂,导致金属表面微观凸起发生粘着、撕裂。顶根腔定压差优化通过双向定压阀稳定顶根腔压差,使叶片受到的液压力与离心力保持平衡,进而稳定叶片与定子内表面的接触压力,避免接触压力过高或过低。

当顶根腔压差控制在最优范围(0.8~1.2MPa)时,叶片与定子的接触压力稳定在材料许用接触应力范围内

(200~300MPa), 不会出现塑性变形, 同时接触压力均匀分布, 避免局部压力集中。此外, 稳定的接触压力能够保证润滑膜厚度均匀(0.5~1 μm), 有效隔离摩擦副表面, 减少金属直接接触, 从而抑制粘着磨损的发生。理论分析表明, 定压差优化后, 叶片与定子的接触压力波动幅度从 $\pm 0.5\text{MPa}$ 降至 $\pm 0.08\text{MPa}$, 粘着磨损量可降低40%以上。

3.2 改善润滑条件, 减少磨粒磨损

磨粒磨损的主要诱因是液压油中的杂质颗粒进入摩擦副间隙, 在相对运动过程中对表面造成划伤、研磨。顶根腔定压差优化通过两方面改善润滑条件, 减少磨粒磨损: 一是优化通油通道设计, 减少液压油流动阻力, 使液压油流动平稳, 避免湍流产生, 减少杂质颗粒在摩擦副间隙的沉积; 二是在通油通道入口设置高精度过滤器, 有效过滤液压油中的杂质颗粒(粒径大于10 μm 的颗粒过滤效率达98%以上), 减少进入摩擦副的磨粒数量。

3.3 降低冲击载荷, 缓解疲劳磨损

疲劳磨损是长期交变载荷与冲击载荷作用下, 摩擦副表面产生疲劳裂纹并扩展的结果。传统液压马达顶根腔压差波动较大, 导致叶片运动轨迹偏移, 叶片与定子内表面发生间歇性碰撞, 产生冲击载荷, 同时接触压力的交变变化会使摩擦副表面产生交变应力, 加速疲劳裂纹的产生与扩展。

顶根腔定压差优化后, 顶根腔压差保持稳定, 叶片运动轨迹更加平稳, 避免了叶片与定子的间歇性碰撞, 显著降低了冲击载荷(冲击载荷幅值从1500N降至500N以下)。同时, 稳定的接触压力使摩擦副表面的应力分布均匀, 减少了交变应力的幅值, 延缓了疲劳裂纹的产生。

4 实验验证

4.1 实验方案设计

为验证顶根腔定压差优化对重型机械液压马达磨损特性的改善效果, 设计对比实验, 选取两台型号相同的多作用叶片式液压马达(额定压力25MPa, 额定转速300r/min), 一台为未优化的传统液压马达(对照组), 另一台为采用顶根腔定压差优化方案的液压马达(实验组), 实验平台由液压泵站、加载装置、数据采集系统、磨损检测装置组成。

实验工况模拟重型机械实际作业工况, 设置系统压力25MPa, 转速300r/min, 加载扭矩1500N·m, 连续运行1000小时, 每隔200小时采集一次实验数据, 包括顶根腔压差、摩擦副表面温度、泄漏量、磨损量等参数。磨损量采用称重法与扫描电子显微镜(SEM)相结合的方式检测, 称重法通过电子天平(精度0.1mg)测量叶片、定子的质量变化, 计算磨损量; SEM用于观察摩擦副表面的磨损形貌, 分析磨损类型与程度。

参考文献

- [1]毛文亮, 赵彦军, 柴红强, 等. 径向柱塞式液压马达等接触应力内曲线分析[J]. 机床与液压, 2025, 53(7): 156-163.
- [2]陈远玲, 覃良昊, 陈承宗, 等. 双液压马达驱动的甘蔗根切器刀盘转速同步控制方法[J]. 农业工程学报, 2024, 40(11): 59-68.
- [3]程旭, 彭增雄, 荆崇波. 拖拉机液压机械无级传动系统液压泵马达全工况效率模型研究[J]. 北京理工大学学报, 2025, 45(2): 154-164.
- [4]李东实, 陆天棋. 基于表面改性技术的液压柱塞马达关键摩擦副抗磨损性能提升研究[C]//2025人工智能与工程管理学术交流会论文集. 2025: 1-3.

4.2 实验结果与分析

4.2.1 顶根腔压差变化分析

实验结果表明, 对照组液压马达顶根腔压差波动较大, 波动范围为0.3~1.8MPa, 平均波动幅度为 $\pm 0.5\text{MPa}$, 无法保持稳定; 实验组液压马达顶根腔压差稳定在0.8~1.2MPa范围内, 波动幅度仅为 $\pm 0.08\text{MPa}$, 满足设计要求, 说明顶根腔定压差优化方案能够有效稳定顶根腔压差。

4.2.2 磨损量分析

连续运行1000小时后, 对照组叶片磨损量为12.5mg, 定子内表面磨损量为8.3mg; 实验组叶片磨损量为7.2mg, 定子内表面磨损量为4.9mg, 叶片与定子的磨损量分别降低42.4%、41.0%, 达到设计目标。称重数据显示, 实验组液压马达的磨损量随运行时间的增长趋势平缓, 而对照组磨损量增长较快, 说明定压差优化能够有效抑制磨损的加剧。

4.2.3 磨损形貌分析

SEM观察结果显示, 对照组叶片顶端出现明显的粘着磨损痕迹, 表面有大面积金属撕裂、塑性变形, 同时存在较多的磨粒划伤与疲劳点蚀; 定子内表面磨损不均匀, 出现明显的沟槽与点蚀坑, 磨损程度严重。实验组叶片顶端仅出现轻微的磨损痕迹, 无明显的粘着、撕裂现象, 磨粒划伤与疲劳点蚀数量显著减少; 定子内表面磨损均匀, 无明显的沟槽与点蚀坑, 磨损程度轻微, 与理论分析结果一致, 说明顶根腔定压差优化能够有效改善摩擦副的磨损状态, 抑制粘着磨损、磨粒磨损与疲劳磨损的发生。

5 结论

本文通过理论分析、数值模拟与实验验证, 系统研究了顶根腔定压差优化对重型机械液压马达磨损特性的改善机理, 得出以下结论:

(1)顶根腔压差波动是导致重型机械液压马达摩擦副异常磨损的核心诱因, 压差过大或过小都会加剧粘着磨损、磨粒磨损与疲劳磨损, 降低马达使用寿命; 顶根腔最优压差范围为0.8~1.2MPa, 此时摩擦副接触压力适中、润滑条件良好, 磨损量最小。

(2)顶根腔定压差优化通过三种机理改善液压马达磨损特性: 一是稳定摩擦副接触压力, 抑制粘着磨损; 二是改善润滑条件, 减少磨粒磨损; 三是降低冲击载荷, 缓解疲劳磨损, 同时减少泄漏, 避免磨损连锁反应。

(3)实验验证表明, 顶根腔定压差优化后, 液压马达叶片与定子的磨损量分别降低42.4%、41.0%, 使用寿命可延长30%以上, 同时容积效率、运行稳定性显著提升, 验证了优化方案的有效性与可行性。