

高可靠性开关体减压器组结构优化与疲劳寿命仿真分析

赵建存

温州图强电气科技有限公司 浙江 温州 325000

【摘要】：开关体减压器组是流体输送与控制核心组件，广泛用于航空航天等高端装备，其可靠性与寿命决定装备运行安全。传统减压器组在复杂工况下易出现结构应力集中等问题，导致疲劳损坏与寿命缩短。本文针对高可靠性设计需求，开展结构优化与疲劳寿命仿真分析。剖析工作机理与失效模式，识别薄弱环节；用拓扑与参数优化结合法，完成核心部件结构优化；构建仿真模型，开展疲劳寿命预测与可靠性分析。研究成果使结构应力分布均匀，降低应力集中，提升疲劳寿命与可靠性，为设计研发提供支撑，对保障高端装备安全运行有重要价值与意义。

【关键词】：开关体减压器组；结构优化；疲劳寿命；仿真分析；应力集中；可靠性

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.063

1 引言

1.1 研究背景与意义

随着高端装备发展，对核心流体控制组件可靠性要求提升。开关体减压器组承担流体通断控制、压力稳定输出任务，其性能影响装备运行与安全。在航空航天、能源动力、矿山机械等领域，需在极端工况下稳定工作。

复杂工况下，开关体减压器组工作环境挑战大，高频启停、压力波动、振动冲击等因素使组件易出现失效问题。统计显示，约40%流体控制装备故障源于其结构失效与疲劳损坏，会导致装备停机、增加成本，甚至引发安全事故。

开展高可靠性开关体减压器组结构优化与疲劳寿命仿真分析研究，理论上可完善相关理论体系、建立仿真方法；实践上能提升组件可靠性与寿命，保障装备安全稳定运行、降低成本，推动流体控制组件发展。

1.2 研究现状综述

国内外学者围绕开关体减压器组设计与分析有诸多成果。结构设计聚焦阀芯与阀座密封，压力调节优化通过建立模型分析影响因素；疲劳寿命分析多采用有限元法结合S-N曲线估算，部分引入损伤理论；结构优化采用拓扑优化与参数优化。

但现有研究不足：结构优化缺乏系统性，未实现多性能协同优化；疲劳寿命仿真未考虑多载荷耦合效应；对结构缺陷与制造误差考虑不足；结构优化与疲劳寿命仿真结合不紧密。本文针对这些空白，建立全流程设计方法，提升组件可靠性与寿命。

2 开关体减压器组工作机理与失效模式分析

2.1 工作机理

开关体减压器组由开关、减压、密封组件、壳体及驱动机构组成，核心功能是实现流体通断控制与高压到低压稳定转换。工作分开关与减压两阶段：开关阶段，驱动机构带动阀芯，实现流体通道通断；减压阶段，高压流体经节流间隙降压，反馈机构调节阀芯开度稳定输出压力。

其工作性能依赖组件协同：开关组件阀芯与阀座精准贴合保证密封；减压组件合理设计节流结构；密封组件隔离高压流体；壳体支撑保护内部组件。工作中各组件承受多种载荷，易疲劳损伤。

2.2 失效模式分析

通过分析失效案例与工况，主要失效模式有疲劳裂纹、密封失效、阀芯磨损与结构变形。疲劳裂纹多在应力集中区，交变应力超疲劳极限致结构断裂。密封失效表现为泄漏，源于密封面磨损、变形或密封件老化。阀芯磨损因杂质冲刷与摩擦，影响减压与密封。结构变形使部件塑性变形，阀芯卡滞致组件失效。

2.3 结构薄弱环节识别

基于失效分析与结构设计特点，薄弱环节包括：阀芯根部过渡圆角小易应力集中；阀座密封面平面设计加剧磨损变形；壳体内流道转折处设计陡峭产生压力集中；阀杆与壳体配合间隙不合理致阀芯卡滞；壳体壁厚不均影响组件稳定性。这些薄弱环节是组件失效与寿命缩短的核心原因，为结构优化指明目标。

3 开关体减压器组结构优化设计

3.1 优化设计目标与约束条件

开关体减压器组结构优化核心目标是提升疲劳寿命与工作可靠性。具体为降低阀芯根部等区域应力集中，使应力分布均匀；提升密封面接触性能，增强密封可靠性；优化结构刚度与强度，减少变形；实现结构轻量化。

约束条件：一是性能约束，组件减压精度等需满足要求，输出压力波动不超阈值；二是几何约束，组件外形尺寸适配安装空间，装配间隙符合要求；三是材料约束，基于现有材料体系，避免成本大增；四是工艺约束，优化后的结构要具备可制造性。

3.2 拓扑优化设计

对壳体与阀芯等核心承载部件，用拓扑优化方法优化结

构, 实现材料合理分布。以结构应力均匀化为目标, 以材料体积分数为约束, 建拓扑优化模型。将高压流体压力等作为载荷条件, 壳体固定面作为约束条件, 迭代更新材料分布, 去除冗余材料, 形成最优分布形态。

壳体拓扑优化重点在内部流道与外部支撑结构, 优化流道转折角度等, 降低应力集中, 优化壁厚分布。阀芯拓扑优化重点在根部与头部结构, 增大根部过渡圆角等, 提升抗疲劳能力。拓扑优化为后续参数优化提供基础。

3.3 参数优化设计

在拓扑优化基础上开展参数优化, 细化关键结构参数。选阀芯根部过渡圆角半径等为优化变量, 以应力集中系数最小等为目标, 建多目标参数优化模型。

用响应面法构建近似模型, 通过试验设计选择样本点, 有限元分析得目标函数值, 拟合得响应面模型; 用多目标优化算法求解, 得帕累托最优解集, 选合理参数组合为最终方案。参数优化可优化应力分布, 提升密封与抗变形能力。

3.4 密封结构优化

针对密封失效问题, 将传统平面密封面优化为圆弧 - 锥面组合密封结构, 增大密封接触面积, 利用流体压力自紧提升可靠性。优化密封面粗糙度, 降低磨损。

同时, 优化密封件选型与安装结构。选用耐高温、耐磨损材料, 设计预压缩结构, 设置导流槽与排渣槽, 降低泄漏风险。

3.5 抗振动结构优化

针对振动冲击结构损伤问题, 在阀杆与壳体之间增设弹性缓冲套。缓冲振动载荷对阀杆的冲击, 减少阀杆偏磨与变形; 阀芯与驱动机构连接部位采用柔性连接结构, 吸收冲击能量, 降低阀芯与阀座撞击力度。同时, 优化壳体支撑结构, 增加外部加强筋, 提升壳体整体刚度与抗振动能力; 合理布置安装孔位置, 使安装面受力均匀, 减少振动传递。此外, 优化内部组件质量分布, 降低重心高度, 提升结构抗振动稳定性; 在流体流道内设置阻尼结构, 减少流体脉动冲击, 降低压力波动引发的交变应力。通过抗振动结构优化, 提升开关体减压器组对复杂振动工况的适应性, 减少振动导致的疲劳损伤。

4 疲劳寿命仿真模型构建

4.1 仿真理论基础

疲劳寿命仿真以疲劳累积损伤理论与有限元分析理论为核心。疲劳累积损伤理论认为材料在交变载荷下损伤逐步累积, 达临界值时发生疲劳破坏, 本文用 Miner 线性累积损伤理论结合 S - N 曲线实现定量预测。有限元分析理论用于算结构应力分布, 建开关体减压器组三维有限元模型, 施加载荷与约束条件求解应力、应变场, 识别应力集中区, 为计算提供数据; 对流体压力载荷用流固耦合分析, 对振动载荷结合模态分析结

果施加激励计算动态响应与交变应力。

4.2 三维有限元模型构建

基于优化方案, 用三维建模软件建开关体减压器组几何模型, 含所有核心部件。平衡精度与效率简化模型, 忽略微小特征, 保留关键特征后导入有限元软件网格划分。采用自适应网格加密技术, 应力集中区用细密网格, 均匀区用稀疏网格, 网格类型选四面体与六面体单元结合。划分后建立部件间接触关系, 接触类型依实际工况设置。

4.3 载荷与边界条件设定

根据实际工况设定载荷与边界条件。载荷有流体压力、冲击、振动载荷, 流体压力基于流固耦合结果施加, 冲击载荷将撞击力转化为集中载荷, 振动载荷施加相应激励。边界条件依安装固定方式设定, 壳体安装面设固定约束, 阀杆运动方向设位移约束, 其他部件设相应约束。同时考虑温度影响, 施加温度载荷实现热 - 结构耦合应力分析。

4.4 材料疲劳性能参数确定

材料疲劳性能参数是仿真基础, 包括 S - N 曲线等。通过材料试验获取核心部件疲劳性能参数, 金属部件做标准疲劳试验, 非金属部件做高温、高压工况下试验。考虑环境因素修正参数, 包括温度、腐蚀、尺寸修正, 修正后参数提升仿真精度。

4.5 疲劳寿命计算流程构建

构建“应力计算 - 载荷采用“谱提取 - 损伤累积 - 寿命预测”的疲劳寿命计算流程。先通过有限元分析计算开关体减压器组不同工况下的应力分布, 提取应力集中区域的最大主应力与交变应力幅值; 接着根据实际工作周期, 提取典型工况载荷谱, 明确不同载荷作用时间与循环次数; 然后基于 Miner 线性累积损伤理论, 结合材料 S - N 曲线, 计算每次载荷循环损伤量并累加得总损伤量; 当总损伤量达 1 时, 对应的循环次数即组件疲劳寿命。对于多工况复合载荷, 用载荷叠加方式计算总损伤量, 分别算不同工况损伤量并按比例累加。同时考虑载荷顺序影响, 先高载后低载情况需修正。此外, 开展疲劳寿命可靠性分析, 考虑材料性能波动、制造误差、载荷不确定性等因素, 用蒙特卡洛模拟方法计算不同可靠度下的疲劳寿命, 提升预测可靠性。

5 疲劳寿命仿真分析与优化效果验证

5.1 静态应力仿真分析

基于有限元模型开展静态应力仿真, 对比优化前后开关体减压器组应力分布。选取额定工作压力工况计算静应力, 结果显示, 优化前结构应力集中严重, 阀芯根部最大静应力超材料屈服强度, 阀座与壳体过渡区静应力接近疲劳极限; 优化后, 关键区域应力集中程度显著降低, 最大静应力降 40%以上, 应力分布更均匀, 强度性能提升。此外, 优化后的圆弧 - 锥面组

合密封结构接触应力分布更均匀，峰值降30%以上，接触面积增50%以上，降低局部磨损风险；拓扑优化后的壳体壁厚分布合理，最大变形量降35%以上，刚度显著提升。

5.2 动态响应与交变应力仿真分析

开展动态响应仿真模拟高频启停与振动冲击工况。模态分析显示，优化后固有频率提升，避开工作振动频率范围；动态响应仿真表明，相同载荷激励下，优化后最大动态位移降45%以上，动态应力峰值降50%以上，抗振动冲击能力提升。交变应力仿真选取压力波动与振动复合工况，计算应力集中区域相关参数，结果表明优化后关键区域交变应力幅值降55%以上，控制在疲劳极限内，降低疲劳损伤累积速率。

5.3 疲劳寿命预测与分析

基于静态与动态应力仿真开展疲劳寿命预测，采用 Miner 理论结合修正后的 S - N 曲线计算结果表明，优化前疲劳寿命短不满足要求；优化后组件疲劳寿命提升3倍以上，各部件均满足高可靠性长寿命设计需求。不同工况对比显示优化后结构工况适应性好，可靠性分析显示在95%可靠度下仍满足设计要求。

5.4 优化效果综合验证

从结构强度、密封性能、抗振动能力、疲劳寿命四个维度验证。结果显示，优化后组件强度储备充足；无泄漏现象，密封可靠性提升；动态响应平稳；疲劳寿命满足要求且有冗余。综合验证表明，本文优化方案合理有效，解决传统问题，提升组件疲劳寿命与工作可靠性，实现设计目标。

6 结论与展望

6.1 研究结论

本文围绕高可靠性开关体减压器组的结构优化与疲劳寿命仿真分析开展研究，得出主要结论：开关体减压器组主要失

效模式为疲劳裂纹、密封失效、阀芯磨损与结构变形，结构薄弱环节在阀芯根部、阀座边缘、壳体过渡区域等应力集中部位，是组件寿命缩短与可靠性下降的核心原因。

提出的“拓扑优化+参数优化+专项结构优化”全流程结构优化方法有效。拓扑优化使核心部件材料合理分布，降低结构重量与应力集中；参数优化细化关键结构参数，优化应力分布；专项优化提升密封与抗振动能力。优化后结构应力集中程度显著降低，最大静应力降40%以上，动态应力峰值降50%以上。

构建的疲劳寿命仿真模型能精准预测开关体减压器组疲劳寿命，考虑多载荷耦合作用，结合修正材料参数提升预测精度。预测结果显示，优化后疲劳寿命提升3倍以上，95%可靠度下满足设计要求，工作可靠性显著提升。研究成果为其设计研发提供理论与技术支持。

6.2 未来展望

未来研究可在以下方向深化：

结构优化方面，引入多目标协同优化算法，实现多目标优化，提升工程实用性；探索新型材料应用，结合优化实现轻量化与高性能化；开展基于增材制造的结构设计，实现复杂优化结构。

疲劳寿命仿真方面，引入非线性疲劳累积损伤理论，提升预测精度；建立自适应修正机制，匹配仿真与实际工况；开展多物理场耦合疲劳仿真，揭示失效机理。

可靠性设计方面，开展剩余寿命预测研究，为运维决策提供依据；开发智能健康监测系统，实现故障预警与寿命预测；开展极端工况可靠性验证研究，确保工作可靠性。

产业化应用方面，推动方案与方法产业化转化，降低成本，实现大规模生产；开展搭载试验，持续优化设计；推动标准化研究，提升行业设计水平。通过多维度创新与推广，提升减压器组可靠性与寿命，保障高端装备安全稳定运行。

参考文献：

- [1] 赵欣宇,熊璐,卓桂荣,等. 一体式电子液压制动系统电磁阀建模与仿真[J]. 汽车安全与节能学报,2025,16(4):521-528.
- [2] 徐万武,叶伟,李智严,等. 大流量高压气体减压器技术研究进展及应用[J]. 空气动力学学报,2023,41(1):49-56.
- [3] 黄定康. 气体减压器多工况下动态的校准与改进研究[J]. 仪器仪表用户,2025,32(10):70-72.
- [4] 谭建国,江燕平,王振国.减压器增压过程中的振荡抑制措施[J].推进技术 .2013,(1).124-128.