

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.008

GIS 液压碟簧机构储能模块密封优化策略研究

谢益帆, 曹生辉, 李阳, 张世洪, 付强, 崔可意, 郑跃龙

(中国南方电网有限责任公司超高压输电公司大理局, 云南 大理 671014)

摘 要:随着我国电力系统 GIS 应用数量日益增多, 如何保障其内部高压断路器液压碟簧机构储能模块密封可靠性一直备受关注。分析常用密封圈的分类和特点, 研究 HMB 型液压碟簧机构储能模块密封方式; 利用 SolidWorks 软件建立储能模块中密封圈、滑环和铜轴三维模型, 通过 Ansys 软件对所建模型进行仿真分析; 基于分析结果, 给出储能模块密封优化策略。所给策略对提高储能模块密封性能、优化设计、有针对性开展运维具有一定的指导价值。

关键词: 气体绝缘; 开关设备; 液压碟簧机构; 储能模块; 密封

中图分类号: TH17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)06-0045-05

Research on Sealing Optimization Strategy for Energy Storage Module of GIS Hydraulic Disc Spring Mechanism

XIE Yifan, CAO Shenghui, LI Yang, ZHANG Shihong, FU Qiang, CUI Keyi, ZHENG Yuelong

(Dali Bureau of CSG EHV Transmission Company, Dali 671014, China)

Abstract: To address the concern of how to ensure sealing reliability of internal high-voltage circuit breaker hydraulic disc spring mechanism energy storage module along with the increasing number of GIS applications in power system, classification and characteristics of commonly used sealing rings are analyzed, and sealing method of HMB hydraulic disc spring mechanism energy storage module is studied. Three-dimensional models of sealing ring, sliding ring, and copper shaft in the energy storage module are established using SolidWorks software, and the models are simulated and analyzed using Ansys software. An sealing optimization strategy about energy storage module is proposed based on the analysis results. The given strategy has certain guiding value for improving sealing performance of energy storage modules, optimizing design, and carrying out targeted operation and maintenance.

Keywords: gas insulation; switchgear; hydraulic disc spring mechanism; energy storage module; seal

0 引言

随着特高压输电建设快速发展, 其可靠运行对保证我国电网稳定性愈发重要^[1]。然而, 超过 50% 的电网事故是由输变电设备故障和自然灾害造成^[2], 因此作为特高压输电重要组成部分的电气设备, 其可靠性一直备受关注。

在高压设备中, 气体绝缘金属封闭开关设备 (gas insulated switchgear, GIS) 以安装方便、集成度和可靠性高等优点得到了广泛应用^[3-5]。GIS 属于全封闭结构, 内部机械构件较多。据统计, 作为 GIS 主要元件之一的断路器操作机构等机械类故障占其总故障比例高达 18.1%^[6], 而解体和重新装配往往会引起更多新的缺陷^[7]。GIS 中高压断路器大都采用碟簧储能液压操动机构, 对其特性研究一直备受关注^[8-10]。文献 [11] 分析了

220 kV 断路器碟簧液压操动机构空载条件下的动态特性, 为操动机构设计提供了重要参考; 文献 [12] 研究了断路器用液压操动机构储能碟簧的可靠性; 文献 [13] 分析了 CTY-20 型液压碟簧操动机构组成和工作原理, 通过仿真分析为其性能优化提供了依据; 文献 [14] 研究了液压操动机构储能模块动密封结构, 提出了优化改进方案。截至目前, 大部分研究侧重对液压碟簧操动机构的改进优化, 而实际工程中其储能模块密封系统主要采用抗磨密封圈作为液压系统密封元件, 并配置滑环实现密封, 但对储能模块密封失效因素的仿真以及对其密封优化策略的研究还比较匮乏。

本文在分析密封圈分类与特点的基础上, 重点以 GIS 中 HMB 型液压碟簧机构储能模块为例, 通过分析其密封方式和密封圈损伤因素, 对其密封圈、滑环和往复运动铜轴受力及位移等主要元件进行仿真

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目 (超高压大生 [2023] 8 号)

第一作者简介: 谢益帆 (1992—), 男, 广西陆川人, 工程师, 研究方向为特高压直流输电变电技术和安全管理等, wlt1234@126.com。

研究,以找出密封失效薄弱环节,有针对性地提出密封优化策略,保障整个操作机构可靠运行。

1 密封圈分类与特点分析

密封圈是液压系统防止密封介质泄漏、提高

容积效率的重要元件^[15],材质多采用橡胶材料,也有橡塑组合材料,既能起到自密封效果,又能起到一定缓冲作用,其常用分类及特点如表 1 所示^[16-19]。

表 1 常用密封圈分类及特点

分类	名称	特点	应用场景
材质	NBR 丁腈橡胶	用途最广,成本最低	石油系液压油、汽油、水、硅润滑油脂、硅油等介质中
	SIL 硅橡胶	耐热、耐寒、耐电气老化,绝缘性能好,但抗拉强度差,不具耐油性	家用电器和与人体有接触的用品等
	金属橡胶	使用性能好,应用范围广,但成本高	高真空、高低温、强辐射、各种腐蚀等环境
形状	PU 聚氨酯橡胶	力学性能好,耐磨、耐高压、耐老化、耐油,但高温易水解	耐高压、耐磨损密封环节,如液压缸
	O 型密封圈	结构简单,可自密封,密封性能可靠,安装简便,成本低	石油机械气动、液压密封系统
	U 型密封圈	弹性和密封性能好	工程机械中液压缸密封
	V 型密封圈	可根据使用压力重叠数个使用,密封可靠,寿命长	高压液压设备、水压机械往复运动活塞和活塞杆密封
	Y 型密封圈	结构简单,密封性能好,摩擦阻力小,运动平稳,耐压性好	往复运动密封装置中

2 液压碟簧机构储能模块密封研究

碟形弹簧(简称碟簧)作为减振元件,可在小变形下承载较大载荷,与液压系统一起构成液压碟簧机构。该机构以碟簧作储能元件、液压油作传动介质,具有结构紧凑、力学特性稳定、输出功率大、可靠性高等优点,已被广泛应用于 GIS 断路器中^[20],其储能模块结构如图 1 所示,安装位置如图 2 所示。

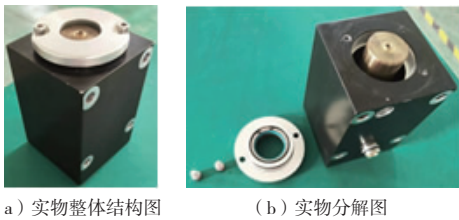


图 1 液压碟簧机构储能模块实物图

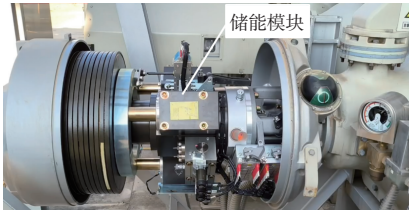


图 2 GIS 断路器液压碟簧机构储能模块安装图

HMB 型液压碟簧机构密封元件通常由填充聚四氟乙烯、酚醛树脂、润滑剂和填充剂等复合材料制成。机构运行过程中,储能模块密封圈在液压机构储能及开关分合闸动作后,均会随储能模块液压推杆运动而发生匀速或水平方向加速度位移。由于不同运动方式和储能内缸挤压产生受力不均衡并伴随铜(液压推杆材质)和铝(储能缸为铸铝材质)复合作用,在液压油浸渍下加剧密封圈老化,从而造成漏油事故发生。目前,HMB 型液压碟簧机构储能模块主要采用格莱圈作为油缸中双向密封元件,利用斯莱圈实现支承和导向作用。安装位置如图 3 所示,其中格莱圈破损将会导致密封系统漏油事故。

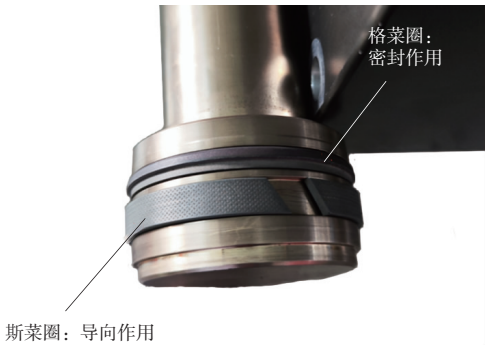


图 3 储能模块密封圈安装位置实物图

3 储能模块密封影响因素研究

3.1 模型建立

为进一步对影响 HMB 型液压碟簧机构储能模块密封的因素进行分析,找出薄弱环节以便采取优化策略,本节选取该储能模块中密封圈、滑环和铜轴元件,利用 SolidWorks 软件^[21],建立几何模型,导入 Ansys 软件进行仿真分析,所建模型如图 4 所示。

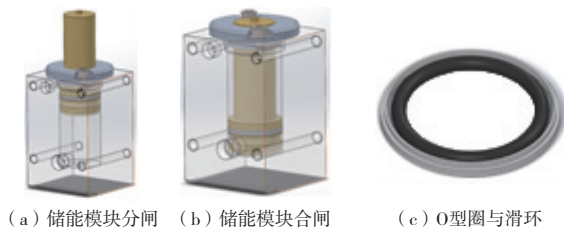


图 4 三维仿真模型图

图 4 中,密封圈主要由滑环和 O 型圈组成,前者材料为聚四氟乙烯,弹性模量为 960 MPa,泊松比为 0.4;后者材料为丁腈橡胶,弹性模量为 36 MPa,泊松比为 0.499。

3.2 参数选取

由于自由网格划分法可在平面和曲面自动生成三角形或四边形网格,与 Ansys 软件智能控制技术相结合,能够自动控制网格大小和疏密分布,因此在确保计算精度和效率的前提下,本节利用 Ansys 软件中 Mesh 模块对该储能模块和密封圈进行网格划分,选择合适的网格密度和单元类型对模型受力进行仿真。此处采用四面体单元法划分网格,铜轴水平安装,具体参数如表 2 所示。

表 2 网格划分模型参数

名称	O 型圈参数值	滑环参数值
平均单元大小/mm	1.0	1.0
单元数	32 837	15 527
节点数	50 727	29 466
网格质量最小值	0.281 75	0.272 81
网格质量最大值	0.999 98	0.999 87
平均网格质量	0.853 36	0.764 47
标准容差值	974.370 00	0.124 57

经实验,该储能模块铜轴匀速压进力 187.5 N,匀速拉出力为 220 N,考虑突发振动、

撞击等极限工况,上述数值乘以安全系数 1.2,最终在 O 型圈上表面施加 225 N 的力,下表面施加 264 N 的力。参考主要厂家 GIS 断路器分合闸时间和操作机构打压时间,仿真总时长设为 120 s,其中合闸时间 1 s,加速度经实验得到合闸时为 $0.003\ 488\ 10\ \text{mm/ms}^2$,分闸时为 $0.617\ 635\ 89\ \text{m/s}^2$ 。

3.3 结果分析

基于上述模型和参数,所得仿真结果如图 5—图 7 所示。

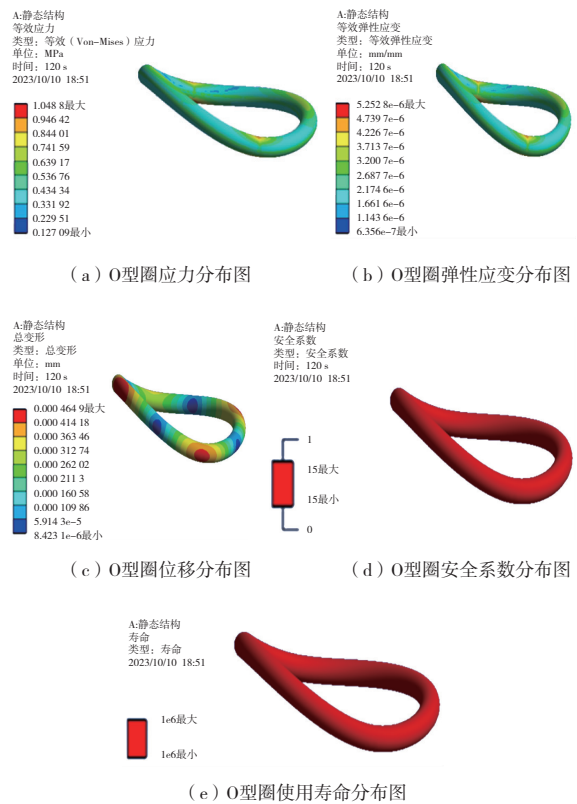


图 5 O 型圈仿真结果

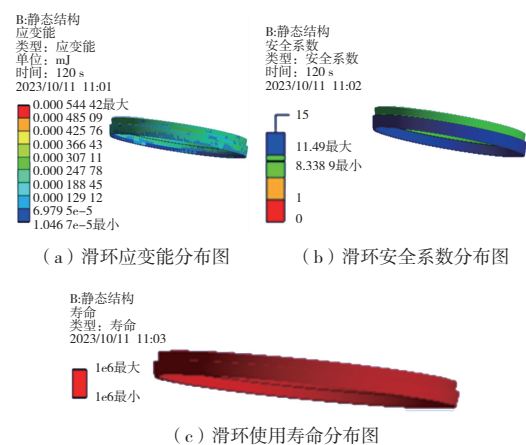


图 6 滑环仿真结果

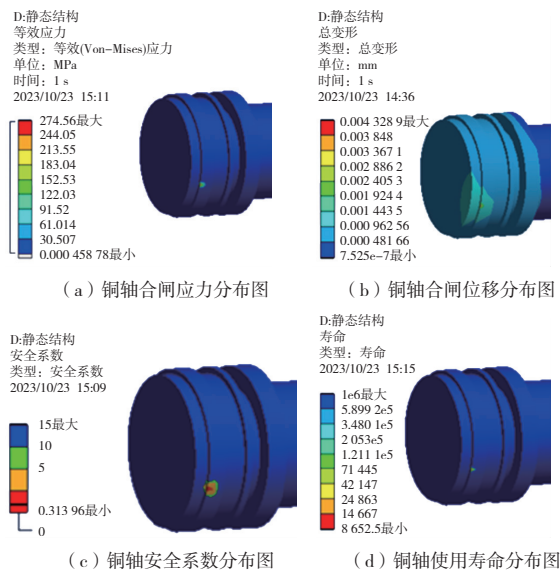


图7 铜轴仿真结果

由图5可知,O型圈应力、弹性应变、位移、安全系数、寿命最大值分别为1.048 8 MPa、5.252 8×10⁻⁶ mm、0.000 464 9 mm、15和10万次,说明O型圈不同受力会影响整体变形,但在小于最大应力时具有稳定的可靠性,完全能够满足实际工程需求。

由图6可知,滑环最大应变能可达5.444 2×10⁻⁴ mJ,在此条件下最小安全系数和最大使用寿命分别可达8.338 9、10万次,完全能够满足实际工程需求。

由图7可知,在1 s的合闸时间内,铜轴最大应力为274.56 MPa时最大位移达到0.004 328 9 mm。在水平安装状态下,当O型圈和滑环失效时铜轴特殊偏磨点安全系数仅为0.313 96,寿命仅为8 652.5次,说明铜轴特殊偏磨点主要在底端圆周,该处寿命较为薄弱,容易磨损,安全性极其不足,不满足HMB型液压碟簧机构储能模块在工业寿命使用10万次的标准,使用寿命和应力存在较大提升空间。

4 碟簧机构储能模块密封优化策略

通过上述分析,HMB型液压碟簧机构储能模块受安装方式、受力大小等因素影响较大,密封圈和滑环正常时,使用寿命可达10万次,均能满足工程需求;但不同受力会造成密封件出现不同程度弹性应变和位移,使铜轴底部四周容易磨损,影响其安全系数和使用寿命。为此,本节提出以下优化策略:

1) 密封圈采用弹性耐磨材料,增大其进入铜

轴内部的深度和与铜轴的接触面积,加强密封圈与铜轴接触面之间的结合力,减少其弹性应变和受力位移,增强密封性能;

2) 选取合适的滑环厚度,实现较大接触压力和较小启动摩擦力,以减少摩擦损耗、保障密封性能、提高使用寿命;

3) 在水平状态下,针对铜轴特殊偏磨点容易磨损,将铜轴由水平安装设计为垂直安装,使四周受力更加均匀;

4) 铜轴底部圆周进行圆弧倒角设计,容易磨损点采用硬度高的耐磨材料,且减少其表面粗糙度。

上述策略如图8所示。

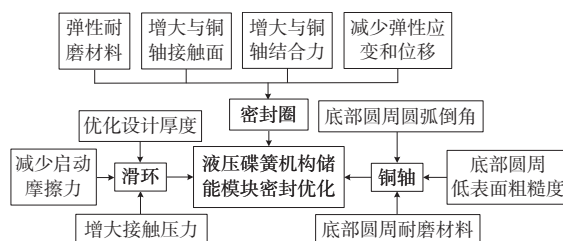


图8 液压碟簧机构储能模块密封优化示意图

5 结语

本文通过分析常用密封圈分类特点,研究了GIS断路器HMB型液压碟簧机构储能模块密封方式,构建了该模块中密封圈、滑环和铜轴仿真模型,给出了储能模块密封优化策略,主要结论如下:

1) 储能模块密封圈和滑环在不大于最大应力下,其安全系数和寿命较大,完全能够满足实际工程需求;

2) 储能模块铜轴水平安装且密封圈和滑环失效时,会造成底部圆周磨损,此问题可通过改变安装方式进行优化解决;

3) 优化密封圈、滑环和铜轴设计对提高储能模块密封性能起着十分重要的作用,任何一个元件失效都将影响液压碟簧机构的可靠性。

本文主要对影响液压碟簧机构储能模块密封的影响因素从理论方面进行仿真分析,找出其薄弱点,以便有针对性地采取优化设计措施。本文仿真分析和相关优化策略的应用验证是下一步要开展的工作。

参考文献:

[1] 黎周渝,袁新建,汪可,等. 特高压变压器油箱搭接焊缝在动态冲击载荷下的失效行为[J/OL]. 中国电机

- 工程学报. (2025-05-13) [2025-09-18]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.242552>.
- [2] 艾精文,党晓婧,吕启深,等. 基于物联网的具有全景功能的全维度设备状态监测系统研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(16):122-128.
- [3] 郝宇亮,陈家伟,李宣健楠,等. 特高压交流 GIL 气密性检测分析和试验研究[J]. 高压电器,2025,61(7):203-207,233.
- [4] 陈允,邱宁,崔博源,等. 特高压 GIS 断路器用管型绝缘拉杆的国产化研制与性能验证[J/OL]. 高电压技术, (2025-06-12) [2025-09-17]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250068>.
- [5] 周录波,田嘉鹏,王栋. 融合历史案例与监测数据的 GIS 设备智能状态评估[J]. 高压电器,2025,61(9):50-57.
- [6] 张滢滢,郝艳捧,米鸿儒,等. GIS 绝缘子固化特征与缺陷产生机理研究进展[J/OL]. 高电压技术, (2025-08-29) [2025-09-17]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250476>.
- [7] 李鹏,雷雨秋,刘宗杰,等. 基于决策树算法的断路器弹簧操动机构振动诊断技术[J]. 高压电器,2021,57(9):1-8,18.
- [8] 赵陈琛,张国钢,刘洁,等. 基于物理信息和迁移网络的高压断路器弹簧操动机构机械参数辨识及故障诊断[J/OL]. 电工技术学报, (2025-07-14) [2025-09-17]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.250521>.
- [9] 范兴明,许洪华,李涛,等. 基于 SMA-VMD 和能量熵的高压断路器故障诊断[J]. 高电压技术,2024,50(12):5248-5258.
- [10] 刘煜,刘宇,朱文才,等. 高压断路器操动机构液压阀控系统流场动态特性[J]. 液压与气动,2025,49(3):73-80.
- [11] 雷琴,王永良,李宁,等. 碟簧液压操动机构的建模与仿真[J]. 液压与气动,2015,39(1):92-95,100.
- [12] 周仙娥,史芳颖,康子雄,等. 断路器用液压操动机构储能碟簧的可靠性研究[J]. 高压电器,2015,51(1):98-104.
- [13] 刘焱,崔博源,占自涛,等. 液压碟簧操动机构机械特性仿真与试验研究[J]. 高压电器,2019,55(6):15-22,30.
- [14] 蒋龙,张润田,陈静,等. 一种液压操动机构动密封结构的优化改进[J]. 液压气动与密封,2021,41(3):66-70.
- [15] 李抒灿,陈蔚芳,李苗苗. 安装过盈量和水压对唇形密封圈密封性能的影响研究[J]. 机械制造与自动化,2023,52(4):48-51,63.
- [16] 王玺,仲健林,夏文嘉,等. 组合密封圈密封性能仿真研究[J]. 机械制造与自动化,2019,48(6):130-133.
- [17] 曹艳科,王浩先,王旭,等. 大型国产气动 Y 型密封圈在机械压力机上的应用[J]. 润滑与密封,2016,41(5):139-141,145.
- [18] 尚新胜,李梦婷,张兆想,等. 内置环形弹簧的橡胶密封性能分析及参数优化研究[J/OL]. 润滑与密封, (2025-08-20) [2025-09-17]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1260.th.20250820.1125.004>.
- [19] 卢海城,王昊杰,张荣,等. 哑铃型充气橡胶密封圈密封性能研究[J/OL]. 润滑与密封, (2025-06-30) [2025-09-17]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1260>.
- [21] 李铁,张全民,熊焱然,等. 碟簧液压机构关键部件动态特性分析[J]. 液压与气动,2025,49(8):79-88.
- [21] 张璐凡,姜薄士,张鹏启,等. 宏微运动平台导轨架模态分析及优化设计[J/OL]. 机械设计与制造, (2025-08-08) [2025-09-17]. <https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.20250808.001>.

收稿日期:2023-12-04

(上接第 39 页)

- [14] WALTER C, CRAMBERG M, YOUNG B A. The gator grapple: pedal anchoring in the American alligator (*Alligator mississippiensis*) [J]. *Amphibia-Reptilia*, 44(3):313-323.
- [15] BAIER D, TURNER M, TRAMMELL E, et al. XROMM analysis of the distal forelimb of *Alligator mississippiensis* during the high walk [J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2023, 63(Suppl.1):27-28.
- [16] COLLETT A. Ontogeny-induced shape changes in the proximal femur of the American alligator (*Alligator mississippiensis*) [C]. *SICB 2023 Annual Meeting Abstracts. Integrative and Comparative Biology*, 2023, 63(Suppl.1):354.
- [17] HUNT T. The ontogeny of visual fields in *Alligator mississippiensis* [C]. *SICB 2024 Annual Meeting Abstracts. Integrative and Comparative Biology*, 2024, 64(Suppl.1):240.
- [18] RODRIGUES J, BARTER S, DAS R. Biomechanical analysis of an alligator mandible structure [M]//Recent Advances on the Mechanical Behaviour of Materials. Cham:Springer Nature Switzerland,2024:141-151.
- [19] SWORDS A, CRAMBERG M, PARKER S, et al. Alligatorascension: climbing performance of *Alligator mississippiensis* [J]. *Amphibia-Reptilia*, 45(1):37-44.
- [20] HEDRICK T L. Software techniques for two- and three-dimensional kinematic measurements of biological and biomimetic systems [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2008,3(3):034001.

收稿日期:2024-11-05