

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.08.002

电磁斥力机构优化研究综述

孙 瑞, 淡淑恒

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 为了满足高压直流断路器不断提高的需求,需要对电磁斥力机构持续优化研究。阐述了电磁斥力机构的工作原理及发展趋势,对目前提高机构驱动效率的优化方法进行了梳理总结,分析了不同优化方法的优势和不足;详细介绍了传动系统冲击应力的优化研究进展;总结了目前缓冲性能优化规律;对于长行程驱动,研究表明复合式结构具有更好前景。根据目前的优化研究现状,提出了有待解决的关键问题并指出未来可能的研究重点在激励回路的优化上。

关键词: 直流断路器; 电磁斥力机构; 优化研究

Review on Optimization Research of Electromagnetic Repulsion Mechanism

SUN Rui, DAN Shuheng

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: For meeting the continuously increasing demand of high-voltage direct current (HVDC) circuit breaker, continuous optimization research on electromagnetic repulsion mechanism is required. The working principle and development trend of the electromagnetic repulsion mechanism are described, the current optimization methods to improve the driving efficiency of the mechanism are sorted out and summarized, and the pros and cons of different optimization methods are analyzed. Moreover, the research progress on optimization of impact stress in transmission system is introduced in detail. The current buffer performance optimization pattern is summarized. The study shows that, for long-stroke drives, the composite structures have better prospects. In view of the current status of optimization research, critical unsolved issues are identified, and future research efforts are suggested to focus on the optimization of the excitation circuit.

Key words: DC circuit breaker; electromagnetic repulsion mechanism; optimization research

0 引言

随着环境恶化问题不断加剧,风电、光伏等可再生清洁能源成为主要新增电源形式。传统交流电网无法有效利用可再生能源,容易出现“弃风弃光”现象。高压直流电网能将大规模新能源电能可靠接入,实现大范围内资源优化配置,可为上述问题提供有效解决方案^[1]。但直流电网对短路故障十分敏感,产生的故障电流幅值高、增速快,比交流故障电流更难开断,对能快速切断故障电流的高压直流断路器有很大的需求。

目前机械式和混合式高压直流断路器是研究

最多的直流断路器类型^[2]。快速机械开关作为两种断路器的核心设备,要求其能在2~5 ms内快速可靠运动到有效开距。传统操作机构动作时间需要几十ms甚至上百ms,难以达到速度要求。涡流斥力机构以延迟小、速度快、结构简单等优点,能很好满足开关对快速性的要求,受到国内外学者的广泛研究。

文中首先简要介绍了电磁斥力机构的驱动原理及国内外发展历程;总结了斥力机构驱动效率、传动系统冲击应力、缓冲性能以及长行程驱动等方面优化研究的主要进展及成果,提出了有待解决的关键问题,并指出了未来可能的研究重点。

收稿日期:2026-02-07; 修回日期:2026-04-05

基金项目:国家自然科学基金项目(50577040)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50577040).

1 电磁斥力机构工作原理及发展概述

20世纪70年代,加拿大学者S. Basu和K. D. Srivastava等人基于Thomson coil(TC)概念提出了一种线圈—盘式电磁斥力机构^[3],见图1。他是由一个多匝扁平励磁线圈和斥力盘组成,充好电的电容器组向线圈放电以产生大电流,由于磁通快速变化,于斥力盘中感应出涡流,由于涡流与励磁电流反向,使得两者之间产生巨大的斥力。斥力盘与传动杆相连,在斥力作用下驱动触头动作完成故障电流切断^[4]。到20世纪90年代,德国布伦瑞克大学^[5]和日本三菱公司^[6]均完成了快速斥力机构的研制并与断路器搭配使用,切断故障电流效果显著。

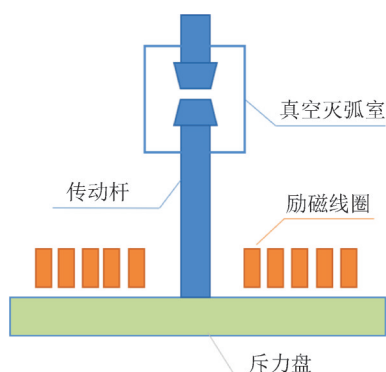


图1 线圈—盘式斥力机构

Fig. 1 Coil-disc repulsion mechanism

后来,三菱公司用可动线圈代替斥力盘,推出一种双线圈式斥力机构,见图2。由电容向两线圈放电,但释放的脉冲电流方向相反,从而在两者之间产生斥力,推动动静触头分离。由于两线圈中同时涌入脉冲,其产生的磁场能量是线圈—盘式结构的两倍,因此在达到同样的驱动效果的前提下,双线圈结构需要的能量更小^[7]。但两个线圈必须以某种方式连接,且在接线和加工方面较为复杂,不如线圈—盘式结构简单耐用,其实际应用有待进一步开发。

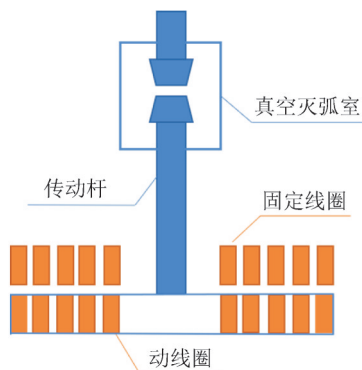


图2 双线圈式斥力机构

Fig. 2 Double-coil repulsion mechanism

近些年,中国研究人员对快速斥力机构进行了

大量地研究设计,完成了机构样机的初步研制^[8-9],并结合仿真软件建立的动态模型进行相关特性验证性研究,于2016年首次成功应用于舟山200 kV柔性直流输电工程^[10]。电磁斥力机构虽凭借高速性的优点拥有可观应用,但由于直流断路器的高要求,仍需对机构进一步研究优化。机构的涡流驱动造成的效率低下问题仍是目前优化研究的焦点问题。此外,斥力机构产生的巨大斥力对于传动系统和缓冲装置都有着巨大挑战。斥力机构如何进一步提高效率,更加经济可靠动作,甚至长行程动作,是目前研究人员优化研究的重点。

2 电磁斥力机构优化研究

目前,电磁斥力机构的优化研究工作主要包括驱动效率的优化、传动系统冲击应力优化、缓冲性能优化以及长行程驱动优化^[11]。

2.1 驱动效率的优化研究

为解决驱动过程中涉及到的多种能量场之间的耦合、组件之间相互依赖问题,研究人员主要采用有限元法^[10,12]和等效电路法^[13-15],分别以数值和解析的角度进行了研究,对机构参数设计提供了理论依据和经验性准则。为进一步提高效率,学者们在两种研究方法的基础上得出多种优化设计方法。

2.1.1 有限元法研究优化

有限元法一般通过搭建有限元电磁耦合模型对机构驱动过程进行数值求解,对各影响因素进行分析。线圈—盘式斥力机构二维瞬态模型见图3。早期学者常采用单一变量法,通过研究各结构参数和电路参数对驱动性能的影响,不断试错寻找优化途径。虽然得出了一些经验性的结论,但工作量大且没有考虑参数之间的相互作用,一些学者将粒子群优化算法^[10]、遗传算法^[16]、神经网络算法^[17]等优化算法引入到模型中,进行多参数迭代优化,得到参数最优设计区间,随后通过样机对优化后的机械开关开展动态性能测试,验证算法的有效性。

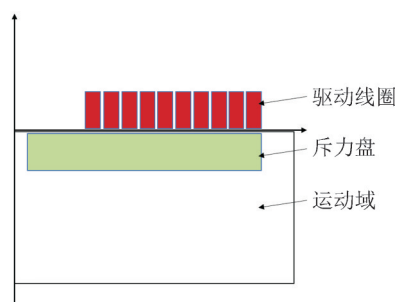


图3 斥力机构二维瞬态模型

Fig. 3 Two-dimensional transient model of repulsive mechanism

但这种引入算法的多参数优化大多只能实现局部最优,在实际应用中效果并不好。文[18]利用正交试验法对线圈匝数、电容容量、充电电压3个主要参数进行综合优化,从大量满足设计的方案中选取需要能量最小的方案,以减小经济成本。通过有限元模型进行数值模拟试验后,根据斥力盘平均速度与3个参数之间的回归方程,得到了电容能量最优参数设计。但后续没有研究在保持能量不变的情况下,电容容量和预充电电压该如何分配能量,能实现最大的驱动效率。

目前学者们通常采用瞬态模型对整个运动过程进行分析,在每次模拟时,常采用改变某一个或某几个设计参数,而保持其余参数始终是初始值的方式,没有考虑参数会在驱动过程中发生变化。而实际驱动回路类似于 LC 振荡电路,其电感会随频率和斥力盘位置发生变化。美国学者 Bruno 等提出了一种基于频率响应的新方法^[19],该方法用频率分析模型来取代固有的瞬态方程,以静止的交流问题代替瞬态问题。经过有限元模型对比验证,频率分析得到的数值与完整的瞬态模型一致。这种方法可以通过频率分析确定电路的工作频率,也可以从频率分析中计算出峰值电流和电磁力的近似值。在仿真分析时,不再对整个运动过程进行模拟,而是单独对一个设计参数施加运动过程中的主导频率,研究这一参数产生的影响。以研究导线间距为例,建立频率分析模型见图4、5。

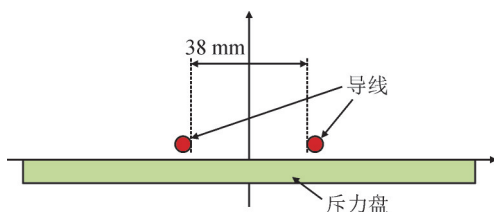


图4 两导线(相距甚远)频率分析模型

Fig. 4 Frequency analysis model of two wires(far apart)

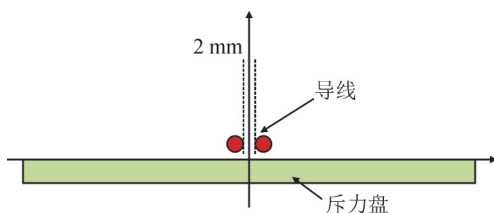


图5 两导线(紧挨着)频率分析模型

Fig. 5 Two wires(close together) frequency analysis model

斥力盘设置为无限长、无限宽的板,以便独立分析导线材料、线圈尺寸等设计参数,将电路频率施加在导线上,模拟不同间距导线出力,分析其对出力特性的影响。这种方法使得独立设计参数成为可能,有助于完善优化规律。

除参数优化外,一些学者尝试采用复合式斥力盘,如在动作过程中不发生塑性形变的“铝—钢”复合式斥力盘^[20]、将涡流集中部分改为电阻率更小的铜材料的“铜—铝”复合式斥力盘^[21],可大幅优化后动能转换效率,但这样降低了斥力盘的机械稳定性,在应对过高电磁力时难以保持结构完整。还有一些学者发现改善线圈与斥力盘之间的磁路能有效提高能量转换效率,在分析了机构磁场分布情况,得出空间漏磁大是造成机构效率低下的原因,在线圈外侧加导磁材料^[13],使用低电导率高磁导率材料、径向开槽、叠片形铁心来改善空间磁路,以增加设计复杂性为代价,提高机构出力效率^[22]。

综上所述,利用有限元法研究的优势在于借助仿真软件可方便得到机构的磁场分布和动作特性,但要想得到优化规律,需不断试错分析,对工作量要求高。

2.1.2 等效电路法研究优化

等效电路法是通过合理简化得到的等效模型,建立数学方程组,求解得到电磁力、励磁电流等变量表达式,得到参数与驱动性能之间的关系。海军工程大学将斥力机构等效为两个扁平圆盘线圈电路相互作用,等效电路模型见图6^[14]。图6中: C 为电容器电容; R_a 、 L_a 为驱动回路等效电阻和电感; R_s 、 L_s 为感应回路的等效电阻和电感; M 为两回路间的互感。但由于参数之间未实现解耦,无法提取优化参数,使得研究工作量大且效率低。

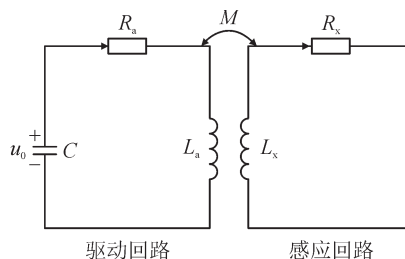


图6 等效电路模型

Fig. 6 Equivalent circuit model

华中科技大学根据线圈外形参数和放电电路参数影响机构驱动特性的方式的不同,可从理论上实现解耦,提出了一种场—路解耦的优化设计思路^[23]。它将斥力机构的运动过程解耦成场和路两个子过程,提取了场能量转化系数 K_f 的和路能量转化系数 K_r ,在进行优化时只需关注各自能量转化系数,最终综合后提出全局优化设计。考虑到实际应用中与设计要求的配合问题,天津大学温伟杰等在斥力盘等效为单匝线圈的前提下,提出了一种利用参数匹配规律进行优化的方法^[24]。作者将影响斥力机构的

多变量提炼为 K_1 、 K_2 、 K_3 3 个参量, 分别与放电时间常数、电容储能以及负载和结构参数有关。在进行机构电气参数设计时, 根据开关分闸时间决定 K_1 , 根据开关耐压行程决定 K_2 。在此基础上, 结合安全裕度, 以 K_3 最大值为目标确定结构参数。这样以参量与斥力机构参数相匹配的方式, 完成参数的综合寻优。这两种优化方法均是在等效简化的基础上, 借助解析表达式完成了优化参数的提取, 并提出了全局参数设计方法, 不足之处在于简化程度较大, 与实际过程相比存在差异。

2.2 传动系统冲击应力的优化研究

传动系统作为将电磁能转换为动能, 带动触头动作的关键部件, 是斥力机构可靠动作的重要一环。在保证快速性的同时, 如何改善传动系统受到的冲击应力是研究的重点。

在早期研究中, 学者们在建立模型时都使用的刚体模型进行计算, 忽略了运动件可能发生的弹塑性形变。海军工程大学周煜韬等将斥力作用下产生的弹性形变引入到模型中, 首次分析了斥力盘弹性形变对机构运动特性的影响^[25]。随后董润鹏等人将不均匀电磁斥力以体积载荷的形式施加在斥力盘中, 对盘内应力分布情况进行分析, 发现提高盘的厚度可有效减少应力分布, 为了保证快速性, 提出了中间厚、四周薄的非等厚斥力盘的结论^[26]。华中科技大学发现斥力盘与传动杆连接处是应力集中区域, 提出一种带有圆台和倒角的斥力盘结构, 见图 7, 有效降低了应力分布^[27]。



图 7 斥力盘结构

Fig. 7 Repulsive disk structure

此外, 还可以通过改善电磁力的角度减小应力分布。以往学者常以调整电气参数的方式选择“矮胖”型的波形^[24], 有助于延长驱动时间, 且对斥力盘产生的应力小, 利便于传动系统, 但这样牺牲了一部分快速性。清华大学提出在理想情况下, 运动件所受的电磁力波形应是一个矩形波, 峰值小, 但保持时间长^[28]。单电容器放电产生的电磁力波形类似于具有峰值的半波形状, 峰值越大, 金属板和绝缘拉杆的冲击应力越大, 这使得运动部件更容易损坏和变形。学者们尝试引入脉冲成形网络(pulse forming network, PFN)技术^[13], 通过利用放电开关的

导通时序, 使放电回路中产生所需要的脉冲电流波形, 优化情况见图 8。

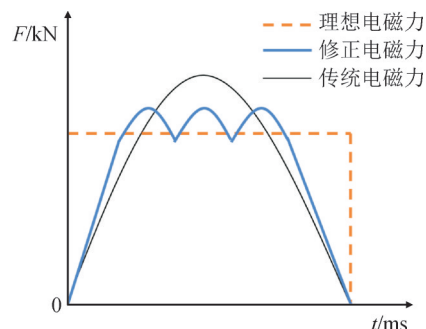


图 8 电磁力波形

Fig. 8 Electromagnetic force waveform

目前 PFN 的应用更多是将双电容器作为驱动单元, 以控制电容器间隔放电的形式, 改善电磁力波形, 其回路拓扑图见图 9。图 9 中: C_1 、 C_2 为储能电容; R 、 L 为回路中引线及电容器的电阻和电感; VD_1 、 VD_2 为续流二极管; VT_1 、 VT_2 为放电开关。文[29]通过控制放电开关导通时序, 得出多脉冲电磁斥力。研究发现在同样驱动要求下, 多脉冲电磁力对开关的冲击明显减少, 且电容耐压要求低, 在快速加速过程更慢, 慢速加速过程更快, 非常切合理想驱动。但这种激励在效率方面没有优势^[30], 且提高了对缓冲的要求及控制难度。

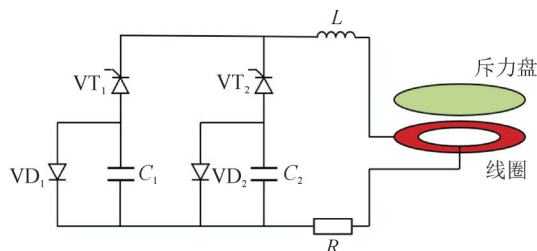


图 9 多脉冲回路拓扑图

Fig. 9 Multi-pulse loop topology

2.3 缓冲性能优化研究

缓冲装置是电磁斥力机构不可缺少的一部分, 适配出力特性的缓冲装置能大幅优化机构可靠性。缓冲不足易导致机构的损坏, 缓冲过大则导致触头发生弹跳, 甚至重合闸。通过实验证明, 在快速斥力机构中应用电磁缓冲效果最好^[31]。

电磁斥力缓冲是在机构原有基础上外加一个缓冲线圈, 在运动件行程末期通入脉冲电流, 在斥力盘上产生与驱动力相反的电磁力, 起到缓冲作用。这种缓冲方式的不足在于增加了一条缓冲回路, 需要对缓冲电流介入时间和斥力盘位置进行精准控制, 增加了开关的复杂性。学者们基于 40.5 kV 真空开关建立了电磁驱动与缓冲综合模型, 分析了缓冲回路电容容量以及缓冲电流方向、缓冲施加时

刻对缓冲效果的影响,优化规律如下:

1)缓冲电流需与驱动电流方向一致^[31]。

2)将合闸线圈充当缓冲线圈,不需要额外增加开关的部件。

3)缓冲电容器容量越大或预充电压越大,产生的缓冲力越大。

4)缓冲施加越早,斥力盘受力越弱,所需缓冲时间越长。反之,缓冲线圈与斥力盘耦合越好,产生的缓冲力越大。但若施加过晚,会使得缓冲作用时间变短,分闸末速度仍很大,因此要合理设置缓冲施加时刻^[32]。

5)改善缓冲线圈结构,使大电压通过少量匝,产生峰值且迅速的缓冲出力,拥有更好的缓冲效果,且能有效降低电容成本^[33]。

2.4 长行程驱动优化研究

随着电磁斥力机构应用于越来越高电压等级的直流断路器中,如何保证电磁斥力机构能在长开距下仍能快速动作是学者们关注的重点。线圈—盘式斥力机构由于其驱动原理限制,更多用于短行程驱动,相比之下,学者们更倾向于将双线圈结构用于大部件长行程驱动^[34]。但这种结构所产生的斥力峰值高达230 kN,会对机构造成极大冲击应力。可变的气隙长度限制了它们在长冲程时的效率。为进一步改善,郑州大学程显等提出一种螺线管和线圈盘相结合的混合式斥力机构,综合线圈式结构的快速性和螺线管式结构的持续性,适用于长行程驱动,但后续未对其进行参数优化设计和缓冲设计^[35]。河北工业大学赵智忠等提出将螺线管和双线圈相结合,并对这种新型斥力机构的结构参数和电路参数进行了仿真分析,结果表明应对双线圈式斥力机构和外螺线管同时放电且二者间隙尽可能小,这样协同配合下驱动效果最好^[36]。在长开距要求下,以往单独的斥力机构很难平衡电磁驱动力与机构结构强度之间的关系,复合式结构或许是电磁斥力机构迈向高电压等级、长开距应用的重要一步。

2.5 有待解决的关键问题

针对目前的优化研究现状,提出以下有待解决的关键问题:

1)驱动回路的放电速率很大程度上决定着系统效率,如何确定最佳的V-C组合以及线圈的几何形状和匝数是提高效率的关键。

2)目前对改善电磁力的研究较少,更小的斥力峰值对斥力盘结构强度的要求更低,结合复杂的电流控制,是否能产生额外的性能增益有待进一步研究。

3)行程取决于质量,较轻的运动件质量会使行

程快速增加,有助于缩短操作时间,如何使运动件质量最小化是优化系统性能的关键。

4)缓冲回路驱动回路类似,影响缓冲效果的是脉冲的时间、幅值、形状,而时间是影响缓冲性能最关键的因素,即缓冲线圈应在何时通过多少电流。幅值和形状由缓冲电容和电压控制,起辅助调节作用。

3 结语

电磁斥力机构因其快速性,广泛应用于高压直流断路器操动机构中,为满足断路器不断提高的需求,需要对斥力机构进行优化研究。文中介绍了斥力机构的原理及其发展概述,总结了斥力机构各方面优化进展和研究成果。在驱动效率方面,基于有限元法的优化多是优化经验的积累,基于等效电路法的优化更便于形成一般性优化设计规律;在减小冲击应力方面,一般采用优化斥力盘结构和电磁力波形两种方式;对目前得出的缓冲性能优化规律进行了总结;在长行程驱动方面,复合式斥力机构更具优势。针对目前的优化现状和不足,未来斥力机构的优化重点,除提高机构效率外,还应有激励回路的优化设计,包括驱动回路的优化和缓冲回路的优化。驱动激励决定着电磁力波形,优化回路参数及拓扑并结合电流控制,有望实现更适合机构动作的电磁出力。而缓冲优化的重点在于缓冲激励的施加时刻和大小,可靠、高效的缓冲有助于更快速斥力机构的研制。

参考文献:

- [1] 姚良忠,吴婧,王志冰,等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6007-6020.
Yao Liangzhong, Wu Jing, Wang Zhibing, et al. Analysis of the development pattern of future high-voltage DC power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020.
- [2] 何俊佳,袁召,赵文婷,等. 直流断路器技术发展综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 9-15.
He Junjia, Yuan Zhao, Zhao Wenting, et al. Review of DC circuit breaker technology development[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 9-15.
- [3] Basu S, Srivastava K D. Electromagnetic forces on a metal disk in an alternating magnetic field[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, PAS-88(8): 1281-1285.
- [4] Basu S, Srivastava K D. Analysis of a fast acting circuit breaker mechanism part I: electrical aspects[J]. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, 1972, PAS-91(3): 1197-1203.
- [5] Jungblut R, Sittig R. Hybrid high-speed DC circuit breaker using charge-storage diode[C]//1998 IEEE Industrial and Commercial

- Power Systems Technical Conference. Conference Record. Papers Presented at the 1998 Annual Meeting (Cat. No. 98CH36202), 1998:95-99.
- [6] Takeuchi T, Koyama K, Tsukima M. Electromagnetic analysis coupled with motion for high-speed circuit breakers of eddy current repulsion using the tableau approach[J]. Electrical Engineering in Japan, 2005, 152(4):8-16.
- [7] Bissal A, Magnusson J, Engdahl G. Comparison of two ultra-fast actuator concepts[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11):3315-3318.
- [8] 李庆民, 刘卫东, 徐国政, 等. 高压快速转换开关的研制[J]. 高压电器, 2003, 39(6):6-7.
Li Qingmin, Liu Weidong, Xu Guozheng, et al. Research on high voltage fast transfer switch[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(6):6-7.
- [9] 董恩源, 李博, 邹积岩. 超高速斥力机构与永磁机构的实验性能对比分析[J]. 高压电器, 2007, 43(2):125-126.
Dong Enyuan, Li Bo, Zou Jiyang. Comparison analysis of experiment performance between high-speed repulsion mechanism and permanent magnetic mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2):125-126.
- [10] 张宁, 魏晓光, 高冲, 等. 快速机械开关线圈型电磁斥力机构优化设计[J]. 电网技术, 2018, 42(8):2512-2518.
Zhang Ning, Wei Xiaoguang, Gao Chong, et al. Research on optimization design of coil type electromagnetic repulsion mechanism for fast mechanical switch[J]. Power System Technology, 2018, 42(8):2512-2518.
- [11] 何俊佳, 袁召, 经鑫, 等. 电磁斥力机构研究综述[J]. 高电压技术, 2017, 43(12):3809-3818.
He Junjia, Yuan Zhao, Jing Xin, et al. Review of research on repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12):3809-3818.
- [12] 江壮贤, 庄劲武, 王晨, 等. 基于电磁斥力原理的高速触头机构仿真分析与设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8):172-177.
Jiang Zhuangxian, Zhuang Jinwu, Wang Chen, et al. Simulation analysis and design of a high speed contact mechanism based on electro-magnetic repulsion mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(8):172-177.
- [13] 王子建, 何俊佳, 尹小根, 等. 基于电磁斥力机构的10 kV快速真空开关[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11):68-75.
Wang Zijian, He Junjia, Yin Xiaogen, et al. 10 kV high speed vacuum switch with electromagnetic repulsion mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11):68-75.
- [14] 武瑾, 庄劲武, 王晨, 等. 电磁斥力机构数学模型的简化与求解[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24):175-182.
Wu Jin, Zhuang Jinwu, Wang Chen, et al. Simplification and solution of the mathematical model to electromagnetic repulsion mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24):175-182.
- [15] 李庆民, 刘卫东, 钱家骊. 电磁推力机构的一种分析方法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(2):20-24.
Li Qingmin, Liu Weidong, Qian Jiali. An analytical method for electromagnetic repulsion mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2):20-24.
- [16] 骆明峰, 陈为. 基于遗传算法的涡流斥力机构优化设计研究[J]. 电器与能效管理技术, 2015(16):1-5.
Luo Mingfeng, Chen Wei. Design and optimization research of eddy current repulsion driver based on genetic algorithm[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(16):1-5.
- [17] 孟洲恬, 淡淑恒. 基于有限元和神经网络方法的电磁斥力机构结构优化设计[J]. 高压电器, 2021, 57(6):196-202.
Meng Zhoutian, Dan Shuheng. Structural optimization design of electromagnetic repulsive mechanism with finite element method and neural network method[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6):196-202.
- [18] 高峰, 任力, 张博健, 等. 基于正交试验设计的40.5 kV真空断路器电磁斥力机构储能电容优化设计研究[J]. 高压电器, 2017, 53(3):223-229.
Gao Feng, Ren Li, Zhang Bojian, et al. Optimal design of storage capacitor of electromagnetic repulsion mechanism in 40.5 kV vacuum circuit breaker based on orthogonal test design[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3):223-229.
- [19] Lequesne B, Holp T, Schmalz S C, et al. Frequency-domain analysis and design of thomson-coil actuators[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(2):1765-1774.
- [20] 胡鑫凯, 庄劲武, 董润鹏, 等. 电磁斥力机构样机效率优化[J]. 高电压技术, 2020, 46(3):996-1003.
Hu Xinkai, Zhuang Jinwu, Dong Runpeng, et al. Efficiency optimization of electromagnetic repulsion mechanism prototype[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3):996-1003.
- [21] 张修雅, 袁召, 陈立学, 等. 电磁斥力机构能量转换效率分析[J]. 电网技术, 2019, 43(5):1849-1855.
Zhang Xiuya, Yuan Zhao, Chen Lixue, et al. Study of energy conversion efficiency of electromagnetic repulsion mechanism[J]. Power System Technology, 2019, 43(5):1849-1855.
- [22] 黎小林, 朱哲晓, 陈名, 等. 导磁材料对电磁斥力机构出力效率的影响[J]. 高电压技术, 2020, 46(2):586-593.
Li Xiaolin, Zhu Zhexiao, Chen Ming, et al. Influences of soft magnetic materials on power efficiency of electromagnetic repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2):586-593.
- [23] 袁召, 喻新林, 魏晓光, 等. 线圈型电磁斥力机构综合优化[J]. 高电压技术, 2015, 41(12):4207-4212.
Yuan Zhao, Yu Xinlin, Wei Xiaoguang, et al. High voltage engineering[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12):4207-4212.
- [24] 温伟杰, 李斌, 李博通, 等. 电磁斥力机构的参数匹配与优化设计[J]. 电工技术学报, 2018, 33(17):4102-4112.
Wen Weijie, Li Bin, Li Botong, et al. Parameters matching and optimal design of the electromagnetic repulsion mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(17):4102-4112.
- [25] 周煜韬, 戚连锁, 庄劲武, 等. 考虑弹性变形的电磁斥力机构运动特性分析及实验[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(s1):206-212.
Zhou Yutao, Qi Liansuo, Zhuang Jinwu, et al. Analysis and experiment on motion characteristics of electromagnetic repulsion mechanism considering elastic deformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(s1):206-212.

- [26] 董润鹏, 庄劲武, 袁志方, 等. 电磁斥力机构的弹塑性形变分析与实验[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 7080-7088.
Dong Runpeng, Zhuang Jinwu, Yuan Zhifang, et al. Elastoplastic deformation analysis and experiment of electromagnetic repulsion mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 7080-7088.
- [27] 朱哲晓, 袁 召, 陈立学, 等. 电磁斥力机构结构应力分析与优化设计[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2692-2699.
Zhu Zhexiao, Yuan Zhao, Chen Lixue, et al. Structural stress analysis and optimization design of electromagnetic repulsion mechanism [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2692-2699.
- [28] Zhou Yannan, Huang Yulong, Wen Weijie, et al. Research on a novel drive unit of fast mechanical switch with modular double capacitors[J]. The Journal of Engineering, 2019(17): 4345-4348.
- [29] 喻新林. 考虑反力特性配合的电磁斥力机构驱动力设计研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
Yu Xinlin. Research on driving force design of electromagnetic repulsion mechanism considering reaction force characteristic cooperation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [30] Vilchis-rodriguez D, Shuttleworth R, Smith A C, et al. Performance of high-power thomson coil actuator excited by a current pulse train [J]. The Journal of Engineering, 2019(17): 3937-3941.
- [31] 温伟杰, 李 斌, 李博通, 等. 基于双向电磁斥力机构的高压快速开关缓冲特性研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(7): 1449-1458.
Wen Weijie, Li Bin, Li Botong, et al. Research on the buffering characteristics of high voltage fast mechanical switch based on bi-directional electromagnetic repulsion mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(7): 1449-1458.
- [32] 张 宁, 陈龙龙, 丁 骁, 等. 基于涡流感应原理的快速机械开关电磁缓冲影响因素研究[J]. 高压电器, 2021, 57(11): 66-75.
Zhang Ning, Chen Longlong, Ding Xiao, et al. Research on electromagnetic buffering influence factor of fast mechanical switch based on eddy current induction principle[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(11): 66-75.
- [33] 姚文彬, 熊萍萍, 孙珂珂, 等. 高压快速机械开关斥力线圈缓冲特性研究[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 85-93.
Yao Wenbin, Xiong Pingping, Sun Keke, et al. Research on buffer characteristics of repulsion coil of high voltage fast mechanical switch[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 85-93.
- [34] 张 力, 阮江军, 黄道春, 等. 双盘式线圈结构快速斥力机构设计与运动特性仿真研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 255-264.
Zhang Li, Ruan Jiangjun, Huang Daochun, et al. Study on the design and movement characteristics simulation of a fast repulsion mechanism based on double-coil structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 255-264.
- [35] 程 显, 赵海洋, 葛国伟, 等. 基于螺线管和线圈盘的新型混合式斥力机构分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(14): 2997-3006.
Cheng Xian, Zhao Haiyang, Ge Guowei, et al. Analysis of novel hybrid repulsion mechanism based on solenoid and coil disk[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(14): 2997-3006.
- [36] 赵智忠, 刘 阳, 陈 海, 等. 双线圈和螺线管复合式电磁斥力机构运动特性分析[J]. 高电压技术, 2023, 49(4): 1455-1465.
Zhao Zhizhong, Liu Yang, Chen Hai, et al. Analysis of motion characteristics of double-coil and solenoid composite electromagnetic repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1455-1465.

孙 瑞(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压直流断路器(通信作者)(E-mail: sunruiea@163. com)。

淡淑恒(1969—), 女, 教授, 硕士生导师, 研究方向为新型电气设备的机理研究及研制、电场和磁场的计算分析等(E-mail: danshuheng@shiep. edu. cn)