

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.03.035

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

高峰¹, 任力², 张博健², 刘志远², 闫振华¹, 张冉²

(1. 国网宁夏电力公司电力科学研究院, 银川 750002;

2. 西安交通大学电气工程学院电力设备与电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要:电磁斥力机构应用于 40.5 kV 真空断路器可以提高其开断速度,从而提高电力系统稳定性。文中选取励磁线圈匝数、储能电容量和充电电压这 3 个主要参数进行综合优化研究,旨在确定 40.5 kV 真空断路器中电磁斥力机构储能电容能量最小的参数设计方案。对 3 个试验因素设立 3 个水平,采用正交试验设计的方法安排 9 次试验,并建立有限元模型进行数值模拟试验,然后对试验结果进行回归分析和优化。研究结果表明,对于斥力盘的运动特性,充电电压影响最显著,储能电容量次之,励磁线圈匝数最弱。斥力盘运动平均速度与 3 个设计参数间的回归方程为 $\bar{v} = -10.583 + 0.071N + 0.018U + 0.169C$ 。最后,确定了参数设计方案,在充电电压 600 V,储能电容 20 mF,线圈 20 匝时,储能电容能量最小为 3.6 kJ。

关键词:真空断路器; 电磁斥力机构; 正交试验设计; 优化

Optimal Design of Storage Capacitor of Electromagnetic Repulsion Mechanism in 40.5 kV Vacuum Circuit Breaker Based on Orthogonal Test Design

GAO Feng¹, REN Li², ZHANG Bojian², LIU Zhiyuan², YAN Zhenhua¹, ZHANG Ran²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid of Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750002, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The electromagnetic repulsion mechanism can improve the opening speed of the 40.5 kV vacuum circuit breaker, thus improve the stability of whole power system. In this study, three main factors, i.e., number of coil turns, storage capacitance and charging voltage, were selected to comprehensively determine the minimum energy of storage capacitor of electromagnetic repulsion mechanism for the 40.5 kV vacuum circuit breaker. Based on the principle of orthogonal test design, three levels were set for each factor and nine tests were conducted. Then, numerical simulation tests were conducted via finite element modeling. Finally, regression analysis on the test data and optimization were performed. The results show that among the three factors, charging voltage has the most significant influence on the motion performance, storage capacitance ranks second, and number of coil turns ranks third. The regression equation of moving velocity of repulsion disk with the three factors is $\bar{v} = -10.583 + 0.071N + 0.018U + 0.169C$. Eventually, it is concluded that the energy of storage capacitor gets the minimum 3.6 kJ when charging voltage is 600 V, storage capacitance is 20 mF and number of coil turns is 20.

Key words: vacuum circuit breaker; electromagnetic repulsion mechanism; orthogonal test design; optimization

收稿日期:2016-10-12; 修回日期:2016-12-21

基金项目:国家电网指南项目(5229DK160005);国家自然科学基金(51323012,51221005)。

Project Supported by China State Grid Corporation Guidance Project(5229DK160005), National Natural Science Foundation of China(51323012,51221005).

0 引言

在 40.5 kV 及以下的配电网中,真空断路器被广泛使用^[1]。与 SF₆ 断路器相比,真空断路器在发生严重故障时现场没有污染、机械结构简单、体积小、重量轻、维护工作量小、开断后介质恢复过程快、无液化问题以及不受工作温度的影响^[2-5]。

电力系统中发生短路故障时,会引起电压暂降,可以影响到几公里甚至几十公里外负荷的正常运行^[6]。随着智能电网的建设与工业自动化的发展,基于计算机、微处理器的数字型和电力电子型负荷在系统中所占比重不断增加,它们对电压暂降非常敏感,电压暂降会造成巨大的经济损失^[7]。因此,在电力系统发生短路故障时,需要及时地开断短路电流。然而,使用传统操动机构的真空断路器其开断短路电流的时间长达几十个 ms^[8-9]。因此,亟需提高真空断路器的开断速度,使其能够在第一个半波内对短路电流可靠开断,减小短路电流对系统的冲击,缩短因系统短路而引起的电压暂降时间,提高系统的稳定性和电能质量。

电磁斥力机构由于其动作速度快、结构简单、容易实现电子控制的特点,在快速开关领域受到了广泛的关注与研究^[10-12]。文[13]利用有限元的方法,建立了用于电磁斥力机构场路耦合瞬态动力学特性分析的二维有限元模型,研究了金属斥力盘的半径、厚度和材料,励磁线圈的厚度、材料及与金属盘的初始距离,以及储能电容量等参数对电磁斥力的影响;文[14]也利用有限元的方法,建立模型对电磁斥力机构进行仿真分析,研究了线圈匝数、充电电压、放电线路电感等参数对电磁斥力的影响;文[15]还研究了斥力盘形状对斥力机构运动特性的影响。文[13-15]中都将电磁斥力机构的各个金属组件假设为刚体进行研究,而文[16]则考虑了各个组件在大斥力下的弹性形变问题,并建立斥力机构运动特性的非线性动力学数值计算模型,研究了斥力盘厚度和中间轴直径对斥力机构刚分速度的影响;文[17]则使用多种位移传感器对电磁斥力机构的运动特性进行了实测研究。

上述文献仅研究了电磁斥力机构中各个设计参数对斥力机构运动特性的影响,并没有对斥力机构外电路的储能电容进行优化设计研究。然而,对于一个目标斥力机构运动特性,各个设计参数间有大量不同数值组合方案均可满足同样的设计要求。电容器作为储能设备,其价格与容量成正比,基于成本考虑,需要在这些满足要求的组合中,选出储能电容所

需能量最小的设计方案。因此,文中的研究目标是在满足 40.5 kV 真空断路器分闸速度要求的前提下,在诸多设计方案中,对用于断路器的斥力机构的储能电容能量进行优化设计,确定使储能电容所需的能量 Q 最小的参数设计方案。文中选取线圈匝数、储能电容量和充电电压这 3 个设计参数,运用正交试验设计的方法确立试验方案,并采用有限元方法建立电磁斥力机构仿真模型进行数值模拟试验,然后对试验结果进行指标趋势分析和线性回归分析,最后利用所得回归方程进行优化,得到了在满足 40.5 kV 真空断路器分闸速度要求的前提下,使得储能电容所需要提供的能量 Q 最小的参数设计方案。

1 电磁斥力机构

1.1 工作原理

电磁斥力机构是一种新型的利用涡流原理制作的快速操动机构。基于电磁斥力机构的真空断路器结构示意图见图 1。在真空灭弧室内,动、静触头分别和输电线路两端相连接,动触头同时与斥力机构相连,斥力盘与传动杆之间刚性连接,由斥力机构带动动触头运动,实现真空断路器的分合闸操作。电磁斥力机构的工作原理图见图 2。其中储能电容 C 、开关 K 和励磁线圈组成电磁斥力机构的放电回路。

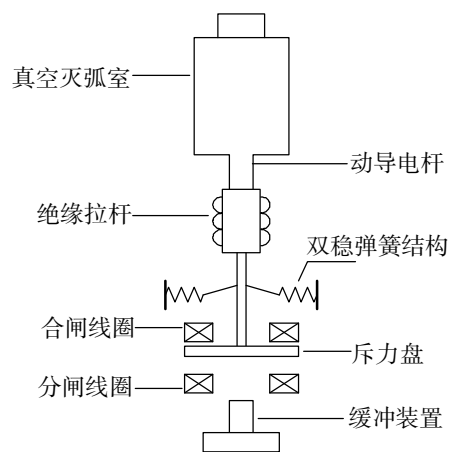


图 1 快速真空断路器结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of fast vacuum circuit breaker

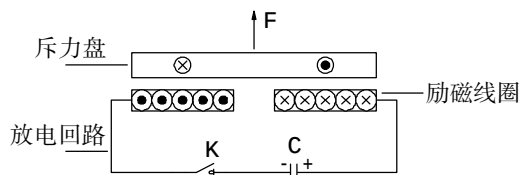


图 2 电磁斥力机构工作原理图

Fig. 2 Working principle of electromagnetic repulsion mechanism

电磁斥力机构的工作原理为:当收到监测系统发出的分(合)闸信号后,开关 K 闭合,预先已储能的

电容对分(合)闸线圈放电,产生持续几个毫秒的脉冲电流,在此脉冲电流的作用下,分(合)闸线圈周围产生了瞬态磁场,同时金属斥力盘中感应出与线圈电流方向相反的涡流,因而在线圈与斥力盘之间产生了电磁斥力,该电磁斥力推动着金属斥力盘快速运动,并通过连杆带动真空灭弧室中的动触头运动,从而实现真空断路器的快速分(合)闸操作。

1.2 数学模型

根据能量守恒定律,电磁斥力机构在工作时,电源提供的瞬态能量 dA_s 等于机构的瞬态机械功 dA 、瞬态磁场能量 dw 与瞬态热损耗 dQ 之和^[18-19],即

$$dA_s = dA + dw + dQ. \quad (1)$$

电源提供的瞬态能量为

$$dA_s = u_1 i_1 dt + u_2 i_2 dt. \quad (2)$$

式(2)中: u_1 、 u_2 分别为励磁线圈和斥力盘的电压; i_1 、 i_2 分别为励磁线圈和斥力盘的电流。

励磁线圈和斥力盘的电压 u_1 、 u_2 分别为:

$$u_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{dM_{11}}{dt}; \quad (3)$$

$$u_2 = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{dM_{11}}{dt}. \quad (4)$$

式(3)、(4)中: R_1 、 R_2 分别为励磁线圈和斥力盘的电阻; L_1 、 L_2 分别为励磁线圈和斥力盘的电感; M 为励磁线圈与斥力盘之间的互感。

励磁线圈和斥力盘间的磁场能量 w 为

$$w = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + i_1 i_2 M. \quad (5)$$

瞬态热损耗 dQ 为

$$dQ = i_1^2 R_1 dt + i_2^2 R_2 dt. \quad (6)$$

联立式(1)-(6),得到电磁斥力机构所做的瞬态机械功为

$$dA = \frac{1}{2} i_1^2 dL_1 + \frac{1}{2} i_2^2 dL_2 + i_1 i_2 dM. \quad (7)$$

L_1 、 L_2 为常数,因此电磁斥力 F 为

$$F = \frac{dA}{ds} = i_1 i_2 \frac{dM}{ds}. \quad (8)$$

式(8)中, s 为斥力盘的位移。

斥力盘的机械运动方程为

$$\begin{cases} a = \frac{F-f}{m_0} \\ v = \int a dt \\ s = \int v dt \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: a 为斥力盘加速度; v 为斥力盘的运动速度; f 为阻力; m_0 为电磁斥力机构运动部分的质量和。

1.3 仿真模型

文中利用有限元的方法,根据电磁斥力机构结构上轴对称的特点,使用 Ansys Maxwell 软件建立电磁斥力机构的二维仿真模型见图 3。图 3 中: R 为线路电阻; $L_{Winding}$ 为励磁线圈; L 为线路电感; C 为储能电容。有限元模型的相关参数见表 1。表 1 中:线圈材料为 Cu;斥力盘材料为 Al。

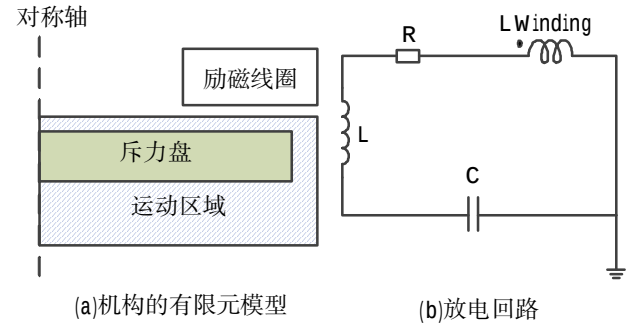


图 3 电磁斥力机构的有限元模型和放电回路

Fig. 3 Finite element model and discharge circuit of electromagnetic repulsion mechanism

表 1 模型参数

Table 1 Parameters of the model

项目	参数	项目	参数
线圈外半径 R /mm	95	斥力盘半径 R_1 /mm	100.0
线圈内半径 r /mm	58	斥力盘厚度 d /mm	15.0
线圈高度 h /mm	15	运动部分质量 m_0 /kg	7.5
行程 s /mm	22	线圈与斥力盘间隙 l /mm	2.0

2 正交试验设计

2.1 正交试验

在现实的生产和科研工作中,常常要研究多个因素在多个水平下对目标参数的影响。若有 m 个因素,每个因素有 q 个水平,则相互搭配进行全面试验的话,试验要进行 $n=q^m$ 次,这样会消耗大量的人力、物力和时间^[20]。正交试验设计是研究和处理多因素试验时安排和组织试验的一种科学方法,它利用正交表来安排试验,从全部组合中选出具有代表性的一部分进行综合处理,来反映全面试验的结果,且不进行重复的试验^[21]。

与普通的试验方法相比,正交试验法尽可能的减少了试验次数,在较少试验的基础上利用所得数据分析出能够指导实践的正确结论。正交试验法以其优越性,已经广泛应用于机械工程、岩土工程、水力工程、航空工程和医药工程等诸多领域^[22-26]。

2.2 试验因素的确定

影响电磁斥力机构运动特性的设计参数主要有斥力盘的半径、厚度、形状和材料,励磁线圈的厚度、

材料、匝数和与斥力盘的初始距离,储能电容量,充电电压,放电回路阻抗等。考虑到实际操作中的可能性和成本问题,文中取线圈匝数 N 、储能电容量 C 和充电电压 U 3 个设计参数作为试验因素。对各个参数进行归一化处理,所有参数取值范围下限为 -1 水平,中值为 0 水平,上限为 +1 水平。其因素水平编码见表 2。

表 2 因素水平编码表
Table 2 Coding of factor levels

水平	N /匝	U /V	C /mF
-1	10	500	20
0	15	550	25
+1	20	600	30

2.3 试验安排与结果

正交表具有正交性、均衡性和独立性的特点。采用正交表来安排试验,表中任意两列因素的横向各水平搭配所出现的次数相同,任一行中不同水平个数相同,同时没有完全重复的试验。对试验结果的处理中,可以了解因素对结果产生影响的程度和水平变化对结果影响的趋势等^[27]。

把线圈匝数 N 、充电电压 U 、储能电容量 C 这 3 个设计参数作为试验因素,斥力盘行程前 10 mm 的平均速度 $\bar{v}$ 作为试验指标进行正交试验设计,不考虑各个因素之间的交互作用,选用 $L_9(3^4)$ 正交表来安排试验,然后建立有限元模型进行数值模拟试验。正交试验的安排及结果见表 3。

表 3 正交试验安排及结果

试验号	N	U	C	$\bar{v}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1	-1	-1	-1	1.88
2	-1	0	0	4.75
3	-1	1	1	6.38
4	0	-1	0	4.76
5	0	0	1	5.56
6	0	1	-1	5.21
7	1	-1	1	4.93
8	1	0	-1	4.70
9	1	1	0	5.51

3 正交试验结果分析

3.1 指标趋势分析

为了定性的分析电磁斥力机构各个设计参数对其运动速度的影响,作如图 4 所示的指标趋势分析图。从图 4 中可以看出,斥力盘运动速度呈现出随着储能电容值和充电电压的增大而增大、随着线圈匝

数的增大则先增大再减小的趋势;还可以看出,储能电容量和充电电压对于斥力盘运动速度的影响相对较大,线圈匝数对于斥力盘运动速度的影响则相对较小。

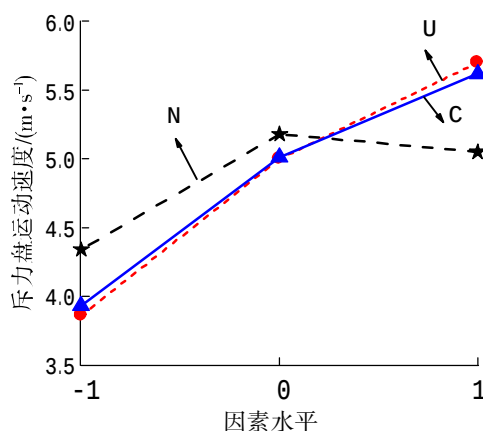


图 4 斥力盘运动速度的指标趋势分析

Fig. 4 Trend analysis of the moving velocity of repulsion disk

3.2 线性回归分析

为了更准确地分析出 3 个设计参数对斥力盘运动速度的影响及其显著程度,对斥力盘行程前 10 mm 的平均速度和电磁斥力机构的 3 个设计参数作线性回归分析。回归方程系数及其方差分析见表 4。从表 4 中可以得到,斥力盘行程前 10 mm 平均运动速度与设计参数之间的回归方程为

$$\bar{v} = -10.583 + 0.071N + 0.018U + 0.169C. \quad (10)$$

表 4 斥力盘运动速度与设计参数的回归方程系数及其方差分析结果

因素	截距	N	U	C
系数	-10.583	0.071	0.018	0.169
P 值	0.024	0.240	0.018	0.024

P 值是对结果可信水平评价的一个递减指标, P 值越大则表示对指标的显著性越低。从表 4 中各系数的 P 值可以看出,对斥力盘运动速度影响的显著程度,充电电压 U 最大,储能电容量 C 次之,线圈匝数 N 的影响最弱。其中,因素 U 、 C 的 P 值小于 0.05,表明 U 、 C 对斥力盘运动速度有着显著的影响。

4 电容能量优化

电磁斥力机构因其速度快、分合闸时间分散度低的特点适用于真空断路器,在开断短路电流时,可以实现快速开断,减少断路器分闸时间,降

低短路电流对系统设备的冲击。然而,斥力盘的运动速度不能太快,否则会对机构造成巨大的机械冲击,影响机构的机械可靠性;同时,斥力盘的运动速度也不能太慢,否则不能及时开断短路电流,系统依然会承受短路电流的冲击,同时也可能会使得电磁斥力机构分闸操作失败。

储能电容量 C 和充电电压 U 是影响电磁斥力机构运动特性的显著因素,因此,储能电容能量 Q 的选择对于电磁斥力机构而言至关重要。而在工程实际中,电容器的价格与其容量的大小呈正比。因此,设计制造电磁斥力机构时,基于成本考虑,在满足其运动特性要求的前提下,所使用到的电容器容量 Q 越小越好。

对电容器进行优化的目标函数为

$$Q = \frac{1}{2} CU^2. \quad (11)$$

在 50 Hz 的工频电网中,为了减小短路电流的冲击,要求真空断路器能在短路电流到达第 1 个半波的峰值前完成分闸操作。因此,电磁斥力机构的斥力盘需要在 2 ms 以内移动 10 mm 的距离,所以,目标函数的约束条件为

$$5 \leq \bar{v} \leq 6. \quad (12)$$

又由式(12)及因素水平范围 $N \in [10, 20]$,联立式(10)可得

$$83.805 - 0.107U \leq C \leq 93.923 - 0.107U. \quad (13)$$

根据式(13)作充电电压 U 和储能电容量 C 的关系图见图 5。图 5 中,梯形阴影区域为满足约束条件式(11)的 U 、 C 取值范围,梯形区域的 4 个顶点坐标为 A(505.167,30)、B(599.056,20)、C(600,20)、D(600,30),直线 l_1 的方程为: $C = 93.923 - 0.107U$, 直线 l_2 的方程为: $C = 83.805 - 0.107U$ 。由图 5 可知,使得目标函数值最小的 U 、 C 位于线段 AB 上,将 l_2 的方程代入式(12),可得

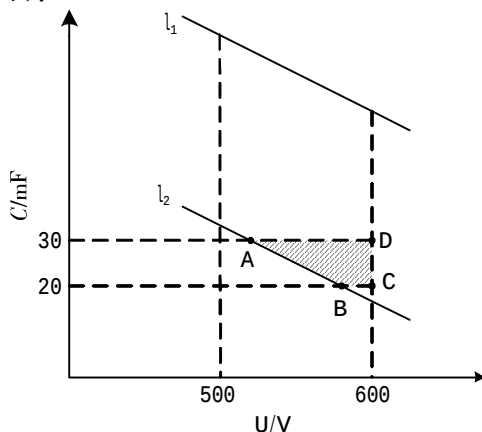


图 5 充电电压和储能电容量之间的关系

Fig. 5 Relationship between charging voltage and storage capacitance

$$Q = 41.903U^2 - 0.054U^3. \quad (14)$$

通过分析计算可知,式(14)在线段 AB 上的最小值点位于点 B(599.056,20)处, $Q_{\min} = 3.589$ kJ。考虑到在工程实际中的应用,取 $U = 600$ V, $C = 20$ mF, $N = 20$,则由式(10)得 $\bar{v} = 5.017$ m/s,满足设计要求。此时,储能电容的最小能量 $Q_{\min}$ 为 3.6 kJ。

5 结论

通过对电磁斥力机构线圈匝数、储能电容值和充电电压这 3 个主要设计参数进行正交试验设计、数值模拟试验、线性回归分析及优化,在文中的参数范围内,得到如下主要结论:

1)得到了斥力盘行程前 10 mm 的平均运动速度 $\bar{v}$ 与线圈匝数 N 、储能电容值 C 和充电电压 U 这 3 个设计参数之间的函数关系式。它们之间的回归方程为 $\bar{v} = -10.583 + 0.071N + 0.018U + 0.169C$ 。

2)储能电容量和充电电压对斥力盘的运动速度有着显著的影响。其中,充电电压最显著,储能电容量次之,线圈匝数的影响程度最弱。

3)得到了在满足 40.5 kV 真空断路器分闸速度要求的前提下,使得储能电容所需要提供的能量 Q 最小的参数设计方案。线圈匝数为 20 匝,储能电容量为 20 mF,充电电压为 600 V,储能电容最小能量为 3.6 kJ。

参考文献:

- [1] 文化宾,宋永端,邹积岩,等. 新型 126 kV 高压真空断路器的设计及开断能力试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34):198-204.
WEN Huabin, SONG Yongduan, ZOU Jiyan, et al. Test on novel design and breaking capacity for 126 kV high voltage vacuum circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34):198-204.
- [2] LIU Zhiyuan, WANG Jimei, XIU Shixin, et al. Development of high-voltage vacuum circuit breakers in China[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2007, 35(4):856-865.
- [3] 舒胜文,阮江军,黄道春. 真空断路器瞬态恢复电压与弧后电流相互作用仿真研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(1):309-316.
SHU Shengwen, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun. Interaction between the transient recovery voltage and post arc current in vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1):309-316.
- [4] SCHADECE. Physics of high-current interruption of vacuum circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33(5):1564-1575.
- [5] KAPETANOVI M. High voltage circuit breakers[M]. Sara-

- jevo: Faculty of Electrotechnical Engineering, 2011.
- [6] XIAO Xiangning, TAO Shun, BI Tianshu, et al. Study on distribution reliability considering voltage sags and acceptable indices[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2):1003-1008.
- [7] 刘旭娜, 肖先勇, 汪颖. 电压暂降严重程度及其测度、不确定性评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 644-658.
- LIU Xuna, XIAO Xianyong, WANG Ying. Voltage sag severity and its measure and uncertainty evaluation [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4):644-658.
- [8] 杨倩文. 基于新型高速斥力机构的高压真空断路器研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- YANG Qianwen. The research on high voltage vacuum circuit breaker based on a novel repulsion actuator [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [9] NIWA Y, FUNAHASHI T, YOKOKURA K, et al. Basic investigation of a high-speed vacuum circuit breaker and its vacuum arc characteristics[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(1):11-15.
- [10] LI Yan, XIA Kepeng, LIU Wanzhen, et al. Design and simulation analysis of electromagnetic repulsion mechanism [C]//IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). [S.l.]: IEEE, 2010:914-918.
- [11] 孟君. 快速斥力机构的设计与应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.
- MENG Jun. Research on structure design and application of fast repulsion mechanism[D]. Jinan: Shandong University, 2010.
- [12] HE Zhaowei, WANG Shuhong. Design of the electromagnetic repulsion mechanism and the low-inductive coil used in the resistive-type superconducting fault current limiter [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(5):1-4.
- [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] 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.
- [15] 卢彦辉, 荣命哲, 韩国辉, 等. 高速电磁斥力机构运动特性影响因素研究[J]. 高压电器, 2015, 52(8):29-34.
- LU Yanhui, RONG Mingzhe, HAN Guohui, et al. Research on the influencing factors of motion characteristics of high speed electromagnetic repulsion mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8):29-34.
- [16] 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 experimentation of motion characteristics in electromagnetic repulsion mechanism considering the elastic deformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(s1):206-212.
- [17] 武瑾, 庄劲武, 庄永华, 等. 电磁斥力机构运动特性的试验研究[J]. 海军工程大学学报, 2012, 24(6):1-5.
- WU Jin, ZHUANG Jinwu, ZHUANG Yonghua, et al. Experimental study on motion characteristic of electromagnetic repulsion mechanism[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2012, 24(6):1-5.
- [18] 毛海涛, 陆恒云. 快速电磁斥力机构的有限元分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(6):1420-1425.
- MAO Haitao, LU Hengyun. Finite element analysis of fast electromagnetic repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6):1420-1425.
- [19] 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.
- [20] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇伟, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9):52-55.
- LIU Ruijiang, ZHANG Yewang, WEN Chongwei, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9): 52-55.
- [21] 刘振学, 黄仁和, 田爱民. 实验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- LIU Zhenxue, HUANG Renhe, TIAN Aimin. Experimental design and data processing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [22] 高雄发, 施卫东, 张德胜, 等. 基于 CFD 正交试验的旋流泵优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5):101-106.
- GAO Xiongfa, SHI Weidong, ZHANG Desheng, et al. Optimization design and test of vortex pump based on CFD orthogonal test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 101-106.
- [23] 贾超, 张凯, 张强勇, 等. 基于正交试验设计的层状盐岩地下储库群多因素优化研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6):1718-1726.

- JIA Chao,ZHANG Kai,ZHANG Qiangyong,et al. Research on multi-factor optimization of underground laminated salt rock storage group based on orthogonal experimental design[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(6): 1718-1726.
- [24] 李炎隆,李守义,丁占峰,等.基于正交试验法的邓肯—张 E-B 模型参数敏感性分析研究[J]. 水利学报,2013,44(7):873-879.
- LI Yanlong,LI Shouyi,DING Zanfeng, et al. The sensitivity analysis of Duncan-Chang E-B model parameters based on the orthogonal test method[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(7):873-879.
- [25] 杨剑秋,王延荣.基于正交试验设计的空心叶片结构优化设计[J]. 航空动力学报,2011,26(2):376-384.
- YANG Jianqiu,WANG Yanrong. Structural optimization of hollow fan blade based on orthogonal experimental design [J]. Journal of Aerospace Power,2011,26(2): 376-384.
- [26] LUO H Y,WANG B,YU C G,et al. Optimization of microwave-assisted extraction of polyphenols from enteromorpha prolifera by orthogonal test[J]. Chinese Herbal Medicines,2010,2(4): 321-325.
- [27] 刘志远,郑跃胜,王仲奕,等.252 kV 真空灭弧室纵磁触头磁场分析及优化[J]. 中国电机工程学报,2008,28(15): 123-129.
- LIU Zhiyuan,ZHENG Yuesheng,WANG Zhongyi,et al. Analysis and optimization of axial magnetic field characteristics of 252 kV vacuum interrupter contacts[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(15): 123-129.
- 高峰(1982—),男,高级工程师,主要从事电力系统分析与控制工作。
- 任力(1992—),男,硕士研究生,研究方向为高电压等级真空断路器技术。
- 张博健(1991—),男,博士研究生,研究方向为高电压等级真空断路器技术。
- 刘志远(1971—),男,教授,博导,研究方向为高电压等级真空断路器技术和真空电弧理论研究。
- 闫振华(1982—),男,高级工程师,主要从事高电压技术工作。
- 张冉(1966—),男,主要从事高电压技术工作。