

C₄F₇N/CO₂ 混合气体在高压断路器中熄弧特性分析

徐胜民¹, 庚振新¹, 崔兆轩¹, 兰新生², 夏亚龙², 张佳³, 徐燕强⁴, 潘飞⁴

(1. 沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 3. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730070; 4. 国网四川省电力公司资阳供电公司, 四川 资阳 641300)

摘要:基于磁流体力学理论,对C₄F₇N/CO₂混合气体和SF₆气体的断路器在40 kA短路电流情况下的熄弧特性进行仿真计算,分析两种不同气体的温度特性、灭弧室气体压强。结果表明:相同气压下,9% C₄F₇N/91% CO₂混合气体在燃弧过程中产生的气体压强要比SF₆气体产生的压强小,混合气体断路器的燃弧过程中9% C₄F₇N/91% CO₂混合气体熄灭电弧能力相对于SF₆气体更弱些;对比电弧等离子体的径向温度,在SF₆气体的断路器中,其电弧等离子体的径向温度相较于9% C₄F₇N/91% CO₂混合气体的断路器更高。而在燃弧过程中,相较于SF₆气体下的电弧半径,混合气体下的电弧半径更大。当混合气体充气压强提升至0.8 MPa时,温度梯度得到提升,缩减了电弧半径,可有效地扩大径向冷却的作用,使电弧熄灭加速,断路器的熄弧性能能够进一步被提升。

关键词:高压断路器; SF₆替代气体; C₄F₇N/CO₂混合气体; 熄弧性能; 灭弧室

中图分类号: TM 561 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)04-0042-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240406

Analysis on Arc-extinguishing Characteristics of C₄F₇N/CO₂ Gas Mixture in High-voltage Circuit Breaker

XU Shengmin¹, GENG Zhenxin¹, CUI Zhaoxuan¹, LAN Xinsheng², XIA Yalong²,
ZHANG Jia³, XU Yanqiang⁴, PAN Fei⁴

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. State Grid Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou 730070, Gansu, China; 4. State Grid Ziyang Electric Power Supply Company, Ziyang 641300, Sichuan, China)

Abstract: Based on the theory of magnetohydrodynamics, the arc-extinguishing characteristics of C₄F₇N/CO₂ mixed gas circuit breaker and SF₆ circuit breaker are simulated and computed under 40 kA short-circuit current, and the thermal properties of two gases and the gas pressure in arc-extinguishing chamber are analyzed. The results show that the gas pressure generated by 9% C₄F₇N/91% CO₂ gas mixture during arcing process is smaller than that generated by SF₆ gas under the same air pressure, and the arc-extinguishing ability of 9% C₄F₇N/91% CO₂ gas mixture during arcing process of mixed gas circuit breaker is weaker than that of SF₆ gas. And the radial temperature of SF₆ circuit breaker is higher than that of 9% C₄F₇N/91% CO₂ mixed gas circuit breaker, and the arc radius generated during arcing process of 9% C₄F₇N/91% CO₂ gas mixture is larger than that of SF₆ gas. When the gas charging pressure of gas mixture is increased to 0.8 MPa, the temperature gradient is improved, the arc radius is reduced, which can efficiently enhance the radial cooling effect, accelerate the extinguishing of arc, and ultimately boost the arc-extinguishing ability of circuit breaker.

Key words: high-voltage circuit breaker; SF₆ alternative gas; C₄F₇N/CO₂ gas mixture; arc-extinguishing characteristics; arc-extinguishing chamber

0 引言

SF₆的全球变暖值(global warming potential, GWP)大约为CO₂的2.39万倍^[1-2],属于温室气体。为了响应国家提出的“双碳”目标,电力行业开展了SF₆替代气体的相关研究工作。C₄F₇N有着良好的环保特性,同时该气体的绝缘性能也十分优异。在被发现的较短时间内便实现了商业上的应用,其产品发展迅速。C₄F₇N的GWP为2200,其液化温度偏高为-4.7℃(在标准大气压下)^[3]。为降低混合气体液化温度,满足实际工况需求,通常选择混入CO₂等缓冲气体使用^[4-6]。

在绝缘性能方面,相同条件下的纯C₄F₇N气体绝缘能力大约为SF₆的2倍。与缓冲气体混合后,含量为4%和6% C₄F₇N的混合气体所对应的绝缘性能分别能达到纯SF₆气体的82.6%和86.5%^[7]。文献[8-9]研究结果表明了在相同气压下的条件下,含量为10% C₄F₇N时,其绝缘强度可达到SF₆的90%。

综上所述,在高压开关技术的创新进程中,C₄F₇N/CO₂混合气体作为一种新型环保绝缘材料已被作为灭弧介质,应用于高性能开关设备之中。为此,深入探究在C₄F₇N/CO₂混合气体填充的断路器开断燃弧过程中的电弧行为特性和机理至关重要,这为开发新型环保型高压开关设备提供了理论支撑。

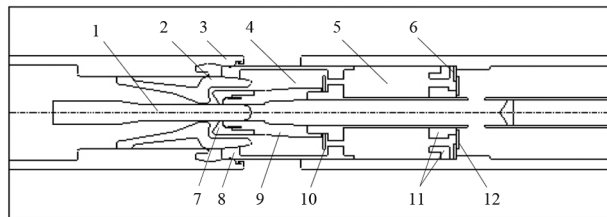
下面将开展9% C₄F₇N/91% CO₂混合气体状态下的断路器熄弧性能的研究,对9% C₄F₇N/91% CO₂混合气体下断路器开断进行仿真计算,得出其弧区温度和灭弧室压强等参数的变化趋势,揭示9% C₄F₇N/91% CO₂混合气体对电弧温度的特性规律以及对气压与气流特性的影响。

1 仿真模型

1.1 断路器灭弧室结构与电弧模型

断路器模型取自一台电压等级为40.5 kV断路器样机,其断路器灭弧室简化结构如图1所示,主要包含压气缸、膨胀室、动弧触头、静弧触头、大喷口和小喷口等关键部分。图2是该断路器操动机构的速度与行程曲线图,其中断路器的动弧触头等部件的总行程是80 mm,超程为25 mm;断路器的开距为55 mm,开断时间为110 ms。仿真计算时,断路器灭弧室以

及电弧等离子体都具有轴对称的特点,因此采用二维轴对称的方式建立模型。



1—静弧触头 2—大喷口 3—静主触头 4—膨胀室 5—压气缸
6—单向阀回气阀 7—小喷口 8—动主触头 9—动弧触头
10—单向阀 11—活塞 12—泄压阀

图1 断路器灭弧室简化计算模型

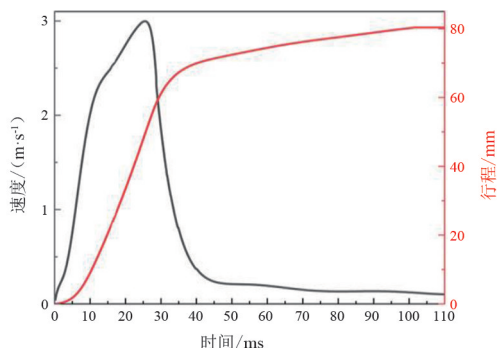


图2 断路器速度与行程曲线

1.2 电弧模型

通常在断路器的开断过程中,电弧等离子体的出现是难以避免的。电弧等离子体的燃弧是一个十分复杂的物理化学过程,下面基于磁流体动力学(magneto hydro dynamics, MHD)理论,假设短路大电流开断过程状态下,电弧等离子体处于局部热力学平衡态,并采用二维MHD电弧模型来进行电弧仿真的研究。

使用改进后的纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程描述气体流动,如式(1)所示。该方程为质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程以及电流连续性方程的综合表现形式^[10-11]。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho\phi V) - \nabla \cdot (\Gamma_{\phi} \nabla \phi) = S_{\phi} \quad (1)$$

式中: ϕ 为待求量; ρ 为气体密度; V 为速度矢量; Γ_{ϕ} 为扩散系数; S_{ϕ} 为源项。

为求解式(1),还需引入气体状态方程,如式(2)所示。该方程描绘了气体密度随温度 T 和压强 P 变化的曲线关系。

$$\rho = f(P, T) \quad (2)$$

在灭弧室气体燃弧的仿真中,使用半经验辐射传输模型作为辐射模型。该模型假设最大温度 T_{\max} 分布在对称轴线上,且为单调径向伴随电弧半径单

调递减。电弧等离子体的核心区域是等温线从中心轴线到 $0.83T_{\max}$ 的温度区域,只向外辐射能量。该区域的净辐射损失依据净辐射系数计算,而净辐射系数与温度、压强及电弧等离子半径有关。等温线处于 $0.83T_{\max}$ 到 4000 K 的温度区域定义为辐射吸收区,该区内只吸收能量。等温线处在 4000 K 之下的区域不辐射也不吸收电弧能量^[12]。

2 仿真结果和讨论

下面对 9% C_4F_7N /91% CO_2 混合气体断路器和 SF_6 气体断路器的熄弧性能进行仿真计算对比。仿真设置初始参数设置:充气压强为 0.6 MPa;初始温度为 300 K;断路器开断短路电流为 40 kA;频率为 50 Hz;初始相角为 $\pi/2$;燃弧过程的时间为 15 ms。

2.1 灭弧室温度

图 3 和图 4 分别给出了 0.6 MPa 下 9% C_4F_7N /91% CO_2 混合气体燃弧过程的灭弧室温度云图和 SF_6 气体燃弧过程的灭弧室温度云图。

断路器动弧触头与静弧触头在刚分离时,电弧出现在动静弧触头之间使此区域的温度升高。从图 3(a) 和图 4(a) 可看出此阶段 SF_6 气体断路器的电弧温度要比 9% C_4F_7N /91% CO_2 混合气体的高,但此时由于弧触头间隙比较小,因此两种气体下的电弧形态差异并不明显。

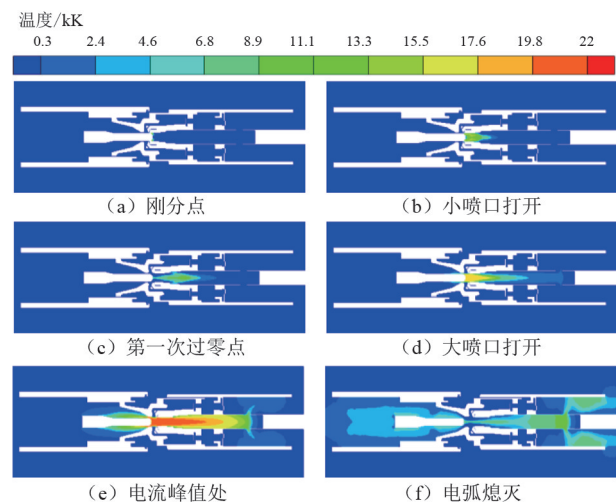


图 3 9% C_4F_7N /91% CO_2 混合气体燃弧过程灭弧室温度云图

小喷口未打开之前,灭弧室的气吹作用不够显著,此刻电弧能量的耗散主要路径是通过电弧等离子体内部产生的辐射损失以及与电弧周围低温气体

进行能量交换。对比图 3(b) 及图 4(b) 可见, SF_6 气体形成的电弧区域相较于 9% C_4F_7N /91% CO_2 混合气体环境下的电弧要小。

在电流第一次过零点时,电弧等离子体并未完全消散,由于大喷口未打开,灭弧室内充斥着大量高温等离子体未得到充分扩散。电流第一次零点之后的极短时间之内,灭弧室内触头间隙充满了等离子体,有热击穿导致电弧重燃的现象。

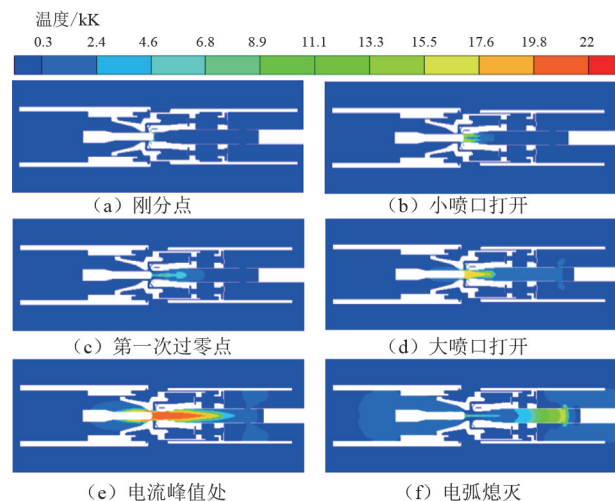


图 4 SF_6 气体燃弧过程灭弧室温度云图

断路器动弧触头与静弧触头在持续运动的情况下,灭弧室的大喷口打开,静弧触头处于即将离开大喷口的状态,此时静弧触头对喷口喉部的堵塞消失。在图 3(d) 和图 4(d) 能够看出温度较高的气体从喷口位置溢出,此刻 9% C_4F_7N /91% CO_2 混合气体情况下电弧等离子体的扩散效果要优于 SF_6 气体。

在图 3(e) 和图 4(e) 可以观察到,当电流达到最大值时,电弧贯穿气流通道的,此时膨胀室内的气体吸热效率得到了增强。

在灭弧室内电弧消散时,电流将逐步减小直到为 0。电弧在此时并未吸收能量,电弧消散时刻大喷口的位置打开。在灭弧室内压缩气体的气吹作用下,电弧耗散功率提高,加速灭弧室内弧道温度下降,直至最终电弧消散。

2.2 灭弧室压强

图 5 和图 6 为两种不同气体燃弧过程中的压强分布云图。

由图 5(a) 和图 6(a) 中能够观察到在灭弧室的动弧触头区域内,两种不同气体产生的压强存在区别,同时灭弧室内电弧温度在扩散过程中也呈现出差异性。由图 5(b) 和图 6(b) 也能够观察到电流第

一次过零点时,两种不同气体在燃弧过程中产生的压强差不大,此时对灭弧室电弧的气吹作用比较弱。由图 5(c)和图 6(c)可以观察到电流达到峰值时,两种气体都形成了较大的气体压强差,此时在相当大的气吹作用下弧柱的径向温度梯度呈现出比较大的变化。当断路器处于熄弧时刻,灭弧室中大喷口下游与触头内部腔体存在较大压强差,气吹作用加强,电弧能量在此时才能被有效消散。

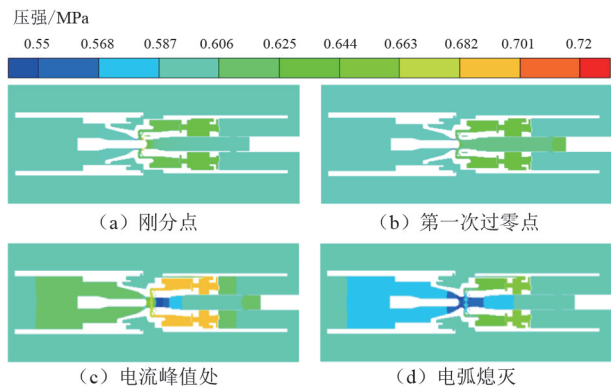


图 5 9% C₄F₇N/91% CO₂ 气体燃弧过程灭弧室压强云图

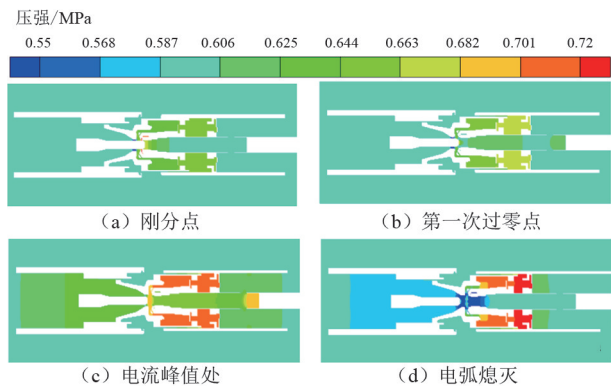


图 6 SF₆ 气体燃弧过程灭弧室压强云图

图 7 和图 8 所示为 0.6 MPa 下燃弧过程中压气缸、膨胀室与大喷口下游的压强差值曲线图。在燃弧初始阶段,灭弧室内气体温度迅速上升,使得触头间的气体压强持续增大,从而在压气缸、膨胀室与大喷口下游区域之间形成逐渐增大的负压差。由于膨胀室位于更靠近电弧的位置,因此其压强波动幅度比较明显。在电流第一次过零点时,随着电流过零后出现电弧重燃的过程,压强差曲线再次呈现出明显的负向陡峭上升趋势。在电弧进入稳定的燃烧状态时,对大喷口下游气体的流动有阻碍,加剧压强差值的增大,并且在电弧熄灭的瞬间达到最大压强差值。在断路器开断过程中,9% C₄F₇N/91% CO₂ 混

合气体 SF₆ 气体断路器的压气缸、膨胀室与大喷口下游区域所产生的压强差要低于 SF₆ 气体时的压强差水平。

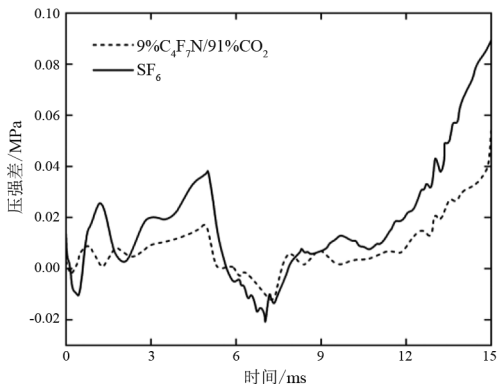


图 7 压气缸与大喷口下游的压强差值曲线

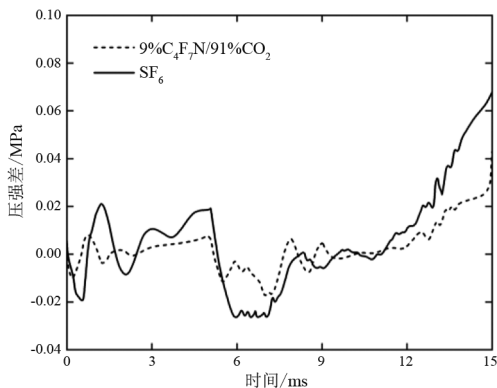


图 8 膨胀室与大喷口下游的压强差值曲线

SF₆ 气体和 9% C₄F₇N/91% CO₂ 混合气体在不同温度范围内的特征有所不同,尤其体现在它们对电弧热传导性能的反应上,这一性能可以通过气体密度与定压比热容的乘积 (ρC_p) 来进行量化描述^[13]。图 9 为 0.6 MPa 压强下 SF₆ 气体和 9% C₄F₇N/91% CO₂ 混合气体的 ρC_p 值随温度变化曲线。从图 9 可以看出,在 300 K 至 5000 K 的温度区间内,温度变化对气体内部微观运动有明显影响,且 SF₆ 气体表现出相对较低的 ρC_p 值特性。这一特点使得电弧在冷却过程中温度下降更为迅速。在电弧区域边缘, SF₆ 形成的低温气流能更有效地消耗热量,并且能增强电弧熄灭过程中的冷却效率,加速电弧熄灭。

图 10 和图 11 所示为两种气体在不同压强下,当电流处于峰值时,距离喷口上游的喷口喉部 3 mm 处的径向温度分布的变化。可以看出,在断路器的燃弧过程中,纯 SF₆ 气体的径向温度梯度要大于混合气体,9% C₄F₇N/91% CO₂ 混合气体下的电弧半径比 SF₆ 气体大。将断路器灭弧室初始压强提高

至 0.8 MPa,能够有效提升混合气体下的温度梯度。同时提升断路器的初始充气压强能够有效地减小混合气体的电弧半径。电弧半径的减小,其对应的径向冷却效果也将得到增强,而径向冷却作用的加强也能够让电弧等离子体的冷却时间常数减小,从而提高断路器的熄弧性能。

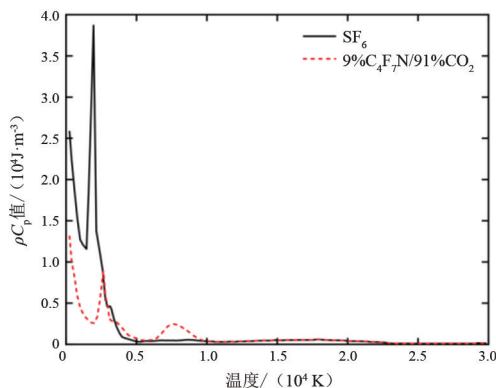


图 9 0.6 MPa 气压下 ρC_p 值的变化曲线

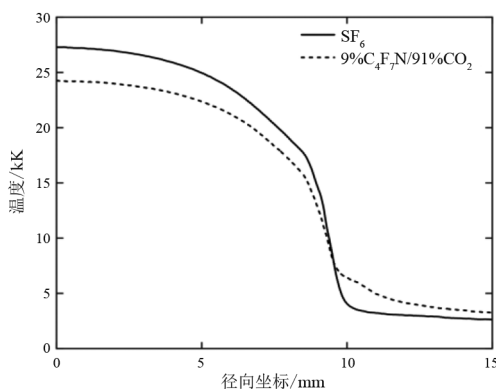


图 10 0.6 MPa 径向温度分布

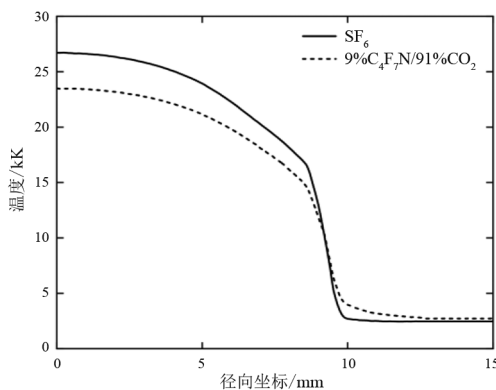


图 11 0.8 MPa 径向温度分布

3 结 论

上面对断路器灭弧室结构设计进行了气流场和温度场的仿真计算分析,对比 SF_6 气体断路器及 9% $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/91\%\text{CO}_2$ 混合气体断路器,得出以下结论:

1) 在断路器开断过程中,9% $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/91\%\text{CO}_2$ 混合气体下的压气缸、膨胀室与大喷口下游压强差低于 SF_6 气体;充入 9% $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/91\%\text{CO}_2$ 混合气体断路器的气吹作用弱于 SF_6 气体,对应熄弧能力也要弱于 SF_6 气体。可以通过改造灭弧室内部结构来提升混合气体断路器在开断过程中的灭弧室气体压强,以增强其熄弧性能。

2) 在径向温度梯度对比中,9% $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/91\%\text{CO}_2$ 混合气体的径向温度梯度要小于纯 SF_6 气体,混合气体的电弧半径大于 SF_6 的电弧半径。将充气压强从 0.6 MPa 增大为 0.8 MPa 时,可以有效提高 9% $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/91\%\text{CO}_2$ 混合气体断路器燃弧过程的温度梯度,减小电弧半径,提升径向冷却效果,加速电弧熄灭,使断路器的熄弧性能能够进一步被提升。

参考文献

- [1] 林莘.现代高压电器技术[M].北京:机械工业出版社,2011:5-8.
- [2] 李兴文,赵虎. SF_6 替代气体的研究进展综述[J].高电压技术,2016,42(6):1695-1701.
- [3] 廖瑞金,杜永永,李剑,等.新型环保绝缘气体的研究进展[J].智能电网,2015,3(12):1118-1124.
- [4] 黄若栋,黄慧红,傅明利,等.新型环保气体在 35 kV 断路器中灭弧性能的仿真与实验研究[J].高压电器,2021,57(3):54-59.
- [5] PU Y J, TANG F, ZHANG B Y, et al. Study of the arc interruption performance of SF_6 alternative gases in load switch[C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Sep.6-10,2020,Beijing,China. IEEE,2020:1-5.
- [6] 宋佳洁,李晓昂,吕玉芳,等.电场不均匀度对 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ 混合气体雷电冲击放电特性的影响[J].高电压技术,2020,46(4):1372-1378.
- [7] 张博雅,周然,郝迈,等. $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 混合气体在 40.5 kV 断路器中的应用研究:(一)燃弧特性仿真与灭弧性能评估[J].中国电机工程学报,2022,42(23):8750-8762.
- [8] KIEFFEL Y,BIQUEZ F,PONCHON P,et al. SF_6 alternative development for high voltage switchgears[C]//Power & Energy Society General Meeting, July 26-30,2015,Denver.CO,USA. IEEE,2015:379-383.
- [9] LEE W Y,JUN J U,OH H S,et al. Comparison of the interrupting capability of gas circuit breaker according to SF_6 , g^3 , and CO_2/O_2 mixture[J].Energies,2020,13(23):6388.

3) 采用 ROC 曲线和 AUC 值对所建 DJIV 模型效果进行了验证,其 AUC 值为 0.816 5,表明 DJIV 模型评价精度较高。

参考文献

- [1] 程永锋,丁士君,赵斌滨,等.输变电工程滑坡灾害危险和风险性评估方法研究[J].中国农村水利水电,2015(6):148-152.
- [2] 陈满,陈龙,张世殊,等.川藏联网输变电路工程地质灾害发育规律与特征研究[C]//2016年全国工程地质学术年会论文集.成都:中国地质学会工程地质专业委员会,2016:1464-1470.
- [3] 王学良,刘海洋,王瑞琪,等.山区输变电工程崩塌(滚石)灾害识别与预测方法[J].工程地质学报,2018,26(1):172-178.
- [4] 刘静.基于 RS 与 GIS 的川藏联网工程沿线地质灾害危险性评价[D].北京:中国地质大学,2018.
- [5] 许冲,戴福初,姚鑫,等. GIS 支持下基于层次分析法的汶川地震区滑坡易发性评价[J].岩石力学与工程学报,2009,28(S2):3978-3985.
- [6] LEE S W, KIM G, YUNE C Y, et al. Development of landslide-risk assessment model for mountainous regions in Eastern Korea[J]. Disaster Advances, 2013,6(6):70-79.
- [7] REGMI A D, DEVKOTA K C, YOSHIDA K, et al. Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014,7(2):725-742.
- [8] 焦伟之,张明,谢鑫鹏,等.基于 GIS 与加权信息量模型的城镇地质灾害易发性评价——以大新镇为例[J].安全与环境工程,2022,29(4):119-128.
- [9] 黄发明,殷坤龙,蒋水华,等.基于聚类分析和支持向量机的滑坡易发性评价[J].岩石力学与工程学报,

2018,37(1):156-167.

- [10] 孟晓捷,张新社,曾庆铭,等.基于加权信息量法的黄土滑坡易发性评价——以 1:5 万天水市麦积幅为例[J].西北地质,2022,55(2):249-259.
- [11] 杜国梁,杨志华,袁颖,等.基于逻辑回归-信息量的川藏交通廊道滑坡易发性评价[J].水文地质工程地质,2021,48(5):102-111.
- [12] 樊芷吟,荀晓峰,秦明月,等.基于信息量模型与 Logistic 回归模型耦合的地质灾害易发性评价[J].工程地质学报,2018,26(2):340-347.
- [13] 杜谦,范文,李凯,等.二元 Logistic 回归和信息量模型在地质灾害分区中的应用[J].灾害学,2017,32(2):220-226.
- [14] 周萍,邓辉张,文江,等.基于信息量模型和机器学习方法的滑坡易发性评价研究——以四川理县为例[J].地理科学,2022,42(9):1665-1675.
- [15] 王国卫,李明波,蒋明光,等.基于加权信息量模型的湖南省麻阳县地质灾害危险性评价与区划[J].地质与资源,2020,29(3):266-272.
- [16] 白永健,铁永波,倪化勇,等.鲜水河流域地质灾害时空分布规律及孕灾环境研究[J].灾害学,2014,29(4):69-75.
- [17] 隋刚,郝兵元,彭林.利用高程标准差表达地形起伏程度的数据分析[J].太原理工大学学报,2010,41(4):381-384.
- [18] 张彩霞,杨勤科,李锐.基于 DEM 的地形湿度指数及其应用研究进展[J].地理科学进展,2005(6):116-123.
- [19] 李军,周成虎.基于栅格 GIS 滑坡风险评价方法中格网大小选取分析[J].遥感学报,2003(2):86-92.

作者简介:

范荣全(1964),男,教授级高级工程师,硕士,从事电工程理论与新技术研究。

(收稿日期:2023-11-21)

(上接第 46 页)

- [10] SMEETS R, VAN EDR SLUIS L, KAPETANOVIC M, et al. Switching in electrical transmission and distribution systems[M]. United Kingdom: Wiley, 2015.
- [11] 姜仁卓,何柏娜,颀雅迪,等.双能式 SF₆ 高压断路器灭弧室结构设计及熄弧特性仿真研究[J].高电压技术,2020,46(6):2040-2048.
- [12] JIANG R Z, HE B N, XIE Y D, et al. Structural design of arc extinguisher for dual-energy SF₆ high voltage circuit breaker and simulation research of its arc-extinguishing characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2020,

46(6):2040-2048.

- [13] 郭煜敬,张豪,张权,等. N₂、CO₂ 和 SF₆ 喷口电弧电流开断能力的比较分析[J].高压电器,2016,52(12):31-40.

作者简介:

徐胜民(1997),男,硕士研究生,研究方向为气体绝缘;
庚振新(1983),男,博士,副教授,研究方向为高压电器及气体绝缘;
崔兆轩(1995),男,博士研究生,研究方向为气体绝缘。

(收稿日期:2024-03-29)