

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.02.021

# 双端电磁气吹分段灭弧装置快速熄弧研究

李雄, 杨廷方, 周慧康, 杨文超, 冯明浩, 卓超

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410114)

**摘要:**针对现有的并联保护间隙不能主动熄灭电弧, 导致输电线路供电可靠性下降的问题, 提出一种利用工频续流流过线圈产生磁场, 通过电磁力带动活塞压缩空气, 喷射出高速气流灭弧的方法, 设计双端电磁气吹分段灭弧装置。根据磁流体动力学理论建立有限元仿真模型, 并对该装置灭弧过程进行仿真分析。结果表明: 该装置产生的灭弧气流最大速度可达 330 m/s, 从上下两端快速作用于电弧, 在高速气流作用下, 电弧逐渐变细进而打破动态平衡, 电弧弧柱温度在 3 ms 内下降到 2 000 K, 将电弧通道掐断, 从而实现“建弧无通道”的灭弧效果, 使电弧在 3 ms 内快速熄灭, 灭弧时间仅为未安装该装置前的 9%。因此, 该装置可大大缩短灭弧时间, 提高电力系统的供电可靠性。

**关键词:** 雷电; 并联保护间隙; 多物理仿真平台; 磁流体动力学理论; 工频续流; 电磁气吹

**中图分类号:** TM854

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2025)02-0229-10

## 0 引言

雷电会通过热效应和过电压效应严重影响配电网的安全运行<sup>[1-3]</sup>。雷雨天气下, 架空配电线路容易被雷电击中, 配网雷电灾害事故在电力系统中占比 70%~80%, 是线路故障的主要原因之一<sup>[4-8]</sup>。因此, 架空线路防雷对电网安全运行具有重要意义。

现有防雷体系主要分为“阻塞型”和“疏导型”, 其中“阻塞型”应用更广, 主要有安装避雷针、避雷器和降低杆塔接地电阻等<sup>[9-13]</sup>。传统“疏导型”主要为并联间隙防雷, 雷击时先击穿空气, 但不能主动灭弧, 是以跳闸率换取事故率。文献<sup>[14-17]</sup>提出一种雷电诱导固相气体灭弧的方法, 利用雷击电弧激活内部的灭弧能量团, 产生高温高压的气体作用于工频续流电弧起点, 使得工频电弧在建弧初期就被爆炸气流截断。这种方法具有多重雷击防护能力, 可以快速有效灭弧, 但是其自身的爆炸特性导致需要不断更换灭弧能量团并且装置寿命较短。文献<sup>[18]</sup>介绍了一种自脱离防雷装置, 利用电弧的焦耳热燃烧内壁材料产生高压气体灭弧。但是材料损耗明显, 需要定期添加材料或者更换设备。文献<sup>[19]</sup>介绍了一种利用线圈改变电弧所受电磁力, 减小电弧半径, 从而实现灭弧的方法。文献<sup>[20-22]</sup>设计了一种压缩电弧通道多断点灭弧的系统, 电弧进入极度压缩的灭弧管道, 在相邻灭弧室处形成气流对冲区域, 电弧急剧转弯, 电弧能量大量耗散, 使得电弧形成多个断点, 但该方法所需材料要求高。

收稿日期: 2024-07-06; 修回日期: 2024-09-30

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目“城市轨道交通引起变压器直流偏磁机理及抑制方法研究”(2022JJ30043)

文献<sup>[23-24]</sup>介绍了一种通过空气电磁炮喷射出高速气流来灭弧的方法, 但是受周围环境影响较大, 且灭弧效果不理想, 有很大可能复燃。且文献<sup>[23]</sup>指出, 在无风、常温、介质为空气的时候, 空气间隙从被击穿到恢复绝缘强度需要 36 ms。

为了获得更好的灭弧效果, 文中基于磁流体动力学原理, 设计了一种并联在绝缘子两端的双端电磁气吹分段灭弧装置。该装置能利用工频续流导通线圈带动活塞运动, 压缩两端空气, 喷射出高速气流作用于电弧两端, 带走电弧热量, 使温度降低、电流密度减小, 进而阻断建弧通道, 使得电弧完全熄灭, 提高电力系统的供电可靠性。

## 1 并联间隙电弧运动特性分析

### 1.1 间隙电弧物理模型

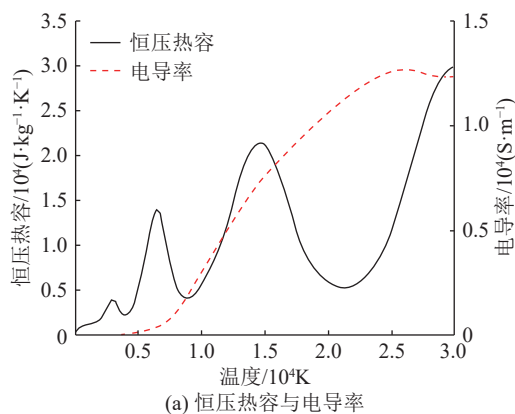
文中对仿真模型作如下假设: (1) 电弧满足局部热力学平衡的条件, 因此可以用麦克斯韦速度分布、萨哈方程、玻尔兹曼粒子能态概率分布等确定电弧的动态特性<sup>[25]</sup>。(2) 考虑电弧的热力平衡状态, 弧柱区域通过辐射消耗的功率与温度直接相关, 可用 Navier-Stokes 方程和麦克斯韦方程表达电弧等离子体的电磁场特征和流体特征<sup>[26-27]</sup>。(3) 电弧为空气电弧, 其比热容、密度、电导率等为温度的单值函数, 各参数源于文献<sup>[28-29]</sup>, 如图 1 所示。(4) 考虑重力。

由上述假设可建立仿真模型的控制方程组。

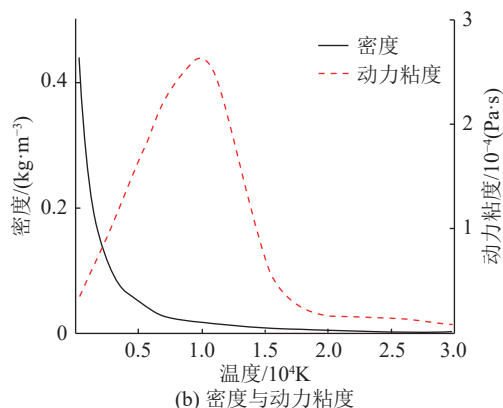
(1) 质量守恒方程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

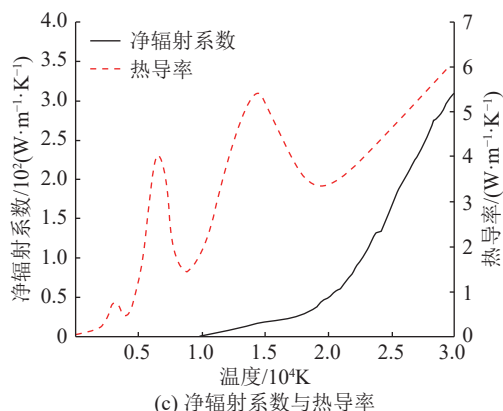
式中:  $\rho$  为空气密度;  $t$  为时间;  $\mathbf{v}$  为速度矢量。



(a) 恒压热容与电导率



(b) 密度与动力粘度



(c) 净辐射系数与热导率

图1 物理参数随温度变化情况

Fig.1 Variation of physical parameters with temperature

(2) 动量守恒方程。

$$\rho \left[ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot (\nabla \cdot \mathbf{v}) \right] = \nabla \cdot (-p\mathbf{I} + \mathbf{K}) + \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\mathbf{K} = \mu \left[ \nabla \cdot \mathbf{v} + (\nabla \cdot \mathbf{v})^T \right] - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} \quad (3)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (4)$$

式中:  $p$  为气体压力;  $\mathbf{I}$  为单位矩阵;  $\mu$  为粘滞系数;  $\mathbf{F}$  为洛伦兹力;  $\mathbf{B}$  为磁通密度;  $\mathbf{J}$  为电流密度。

(3) 能量守恒方程。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{v} \cdot \nabla T - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \quad (5)$$

$$Q = \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{5k_B T}{2q} \right) (\nabla T \cdot \mathbf{J}) + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} + Q_{\text{rad}} \quad (6)$$

式中:  $C_p$  为恒压热容;  $T$  为温度;  $k$  为热导率;  $Q$  为热

源;  $k_B$  为玻尔兹曼常数;  $q$  为电子电荷;  $\mathbf{E}$  为电场强度;  $Q_{\text{rad}}$  为辐射散热量。

(4) 气体状态方程。

$$p = \rho RT \quad (7)$$

式中:  $R$  为气体常数。

(5) 磁场方程。

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \\ \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \\ \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{H}$  为磁场强度;  $\mathbf{A}$  为磁矢势。

(6) 电流守恒方程。

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{J} = Q_{j,v} \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}_e \\ \mathbf{E} = -\nabla U \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $Q_{j,v}$  为单位体积电荷量变化率;  $\mathbf{D}$  为电位移;  $\mathbf{J}_e$  为外电流密度;  $\sigma$  为电导率;  $U$  为电势。

弧柱温度的高低和直径的大小决定了电弧的能量大小,达到动态平衡的电弧能量  $P_s$  由电弧的焦耳热提供,电弧能量的发散有辐射、对流和传导3种途径<sup>[30]</sup>。即:

$$P_s = P_f + P_d + P_c \quad (10)$$

式中:  $P_f$ 、 $P_d$ 、 $P_c$  分别为通过辐射、对流、传导散发的电弧能量。

当电弧受到外界能量作用时,电弧因能量消耗大幅增加,动态平衡被破坏,此时:

$$P_s < P_f + P_d + P_c \quad (11)$$

其中:

$$P_f = 71.6r^2 \varepsilon_f \left[ \left( \frac{T}{1000} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{1000} \right)^4 \right] \quad (12)$$

$$P_d = 0.41Vld \ln(T_h/T_0) \quad (13)$$

$$P_c = \frac{2\pi\lambda l(T_h - T_0)}{\ln(T_0/T_h)} \quad (14)$$

式中:  $r$  为弧柱半径;  $\varepsilon_f$  为弧柱发射功率;  $T_0$  为外界气体温度;  $V$  为气流速度;  $l$  为弧柱长度;  $d$  为电弧直径;  $T_h$  为弧柱温度;  $\lambda$  为导热系数。

当电弧受到外界强迫气流作用时,外界强迫气流会带走电弧热量,降低电弧温度,进而减少电弧持续时间;同时还会改变电弧形态,打破电弧能量动态平衡,加快电弧能量耗散。因此,当电弧受到外界强迫气流作用时,主要通过对流散热向外界散发能量。文献[31]指出,电弧熄灭临界温度为3000~4000 K,当电弧温度低于临界值时,空气电导率不足,工频电压难以向间隙输送能量,电弧能量的动态平衡将被打破,无法维持稳定,电弧因此熄灭。

## 1.2 工频电弧的动态特性仿真分析

基于磁流体动力学原理,在有限元仿真平台中搭建 10 kV 并联间隙电弧模型。模型中,间隙极间距离设置为 140 mm,电极材料为内置的铜,其电导率为  $5.998 \times 10^7$  S/m,相对介电常数为 1;上电极为 10 kA 线路电流终端,下电极为接地端,有限元计算区域为高 200 mm、宽 80 mm 的空气域。在  $t = 0$  ms 时设置雷击闪络,上电极注入雷电脉冲为 30 kA 的标准雷电流波形 (10/350  $\mu$ s) 的电流,其电流波形见图 2。考虑电场、磁场、流体传热和层流 4 个物理场的耦合,间隙被击穿形成电弧的过程见图 3。

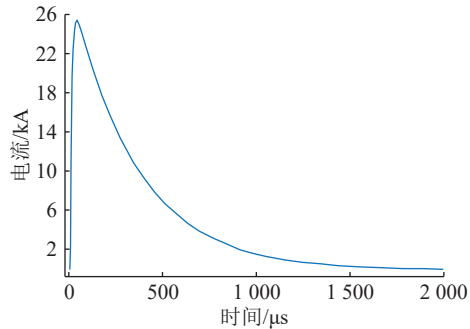


图 2 雷电流波形 (10/350  $\mu$ s)

Fig.2 Lightning current waveform (10/350  $\mu$ s)

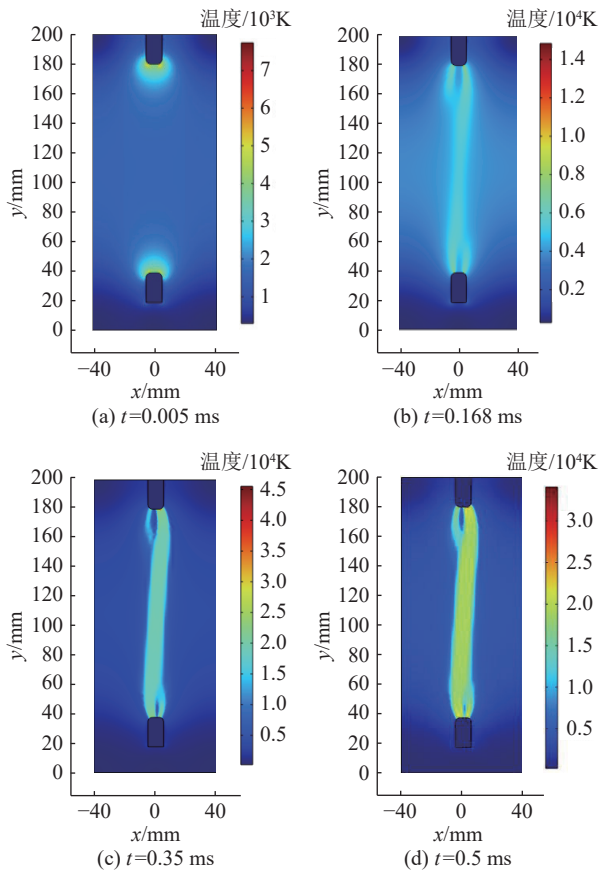


图 3 雷击建弧过程温度分布

Fig.3 Temperature distribution during lightning arc construction

$t = 0$  ms 时发生雷击闪络,如图 3(a)所示;雷电流在 0.1 ms 左右快速达到峰值击穿间隙,间隙产生导通通道将雷电流泄入大地,此时击穿间隙的温度分布如图 3(b)所示;0.35 ms 后雷电流幅值快速下降,雷电冲击结束后,工频续流维持电弧能量的补给,后续弧柱中心区域温度最大为 16 000 K,如图 3(c)所示;0.5 ms 时,随着电流值的增大,工频电弧的半径逐渐变大,并维持稳定直至下一次电流过零,其温度分布如图 3(d)所示,后续电弧温度变化如图 4 所示。

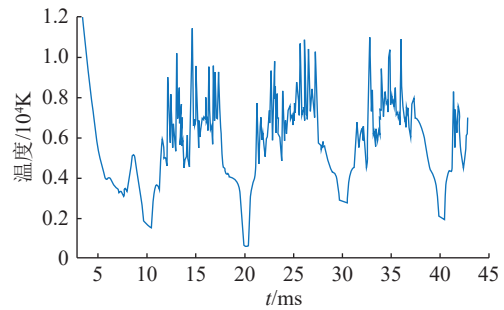


图 4 燃弧过程温度变化曲线

Fig.4 Temperature change curve of arc burning process

研究表明,当 10 kV 工频电压激励下的电弧温度低于 3 000 K 时,空气电导率不足,工频电压难以向间隙输送能量,电弧能量平衡被打破,无法维持稳定的形态,电弧很快熄灭。但从图 4 可以看出,工频续流电弧会不断重复温度过零的过程。工频能量持续注入使得电弧持续燃烧并保持高温,电弧的过零过程会使弧柱电流下降,温度也随之波动,但仍维持在较高水平,故电弧基本不可能自然熄灭,需要断路器开断以切断短路故障,并通过自动重合闸装置使得线路恢复供电。该过程有效保护了绝缘子,但牺牲了跳闸率,降低了供电的稳定性,且断路器的频繁动作将大大增加运维成本<sup>[32-33]</sup>。

## 2 双端气吹灭弧仿真建模分析

### 2.1 灭弧原理

该双端电磁气吹灭弧装置安置于线路杆塔的横担上,与绝缘子并联。双端电磁灭弧装置通过引流线将内置线圈与电极串联,雷击闪络发生后,上下电极弧隙区域产生闪络通道,后续工频电流流过弧隙闪络通道,形成短暂的接地短路,此时内置线圈流过导通电流,周围会产生环绕磁场,其磁场强度的大小  $H_1$  和线圈匝数  $N$ 、通过线圈的电流大小  $I_L$  成正比<sup>[17]</sup>,即:

$$H_1 = N \frac{I_L}{L_e} \quad (15)$$

式中:  $L_e$  为有效磁路长度, 计算见式(16)。

$$L_e = \frac{V_e}{S_e} \quad (16)$$

式中:  $V_e$  为有效体积;  $S_e$  为有效截面积。因此磁场强度大小可以表示为:

$$H_1 = N \frac{I_1 S_e}{V_e} \quad (17)$$

磁场会对放置于其中的顺磁物质产生吸引力, 根据法拉第和麦克斯韦提出的磁力线概率, 可以推导出麦克斯韦公式并进一步简化为:

$$F_S = \frac{B_s^2 s}{2\mu_0} \quad (18)$$

式中:  $F_S$  为磁力;  $B_s$  为磁极表面的磁感应强度;  $s$  为磁极的极面面积;  $\mu_0$  为真空磁导率, 一般取  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m。

考虑腔体内空气阻力的大小, 由运动学方程, 磁塞在腔体内的运动方程可表示为:

$$M \frac{dV_z}{dt} + \gamma V_z + k_p + F_q - F_z(P_z, V_z, t) = 0 \quad (19)$$

$$\frac{dP_z}{dt} - V_z = 0 \quad (20)$$

$$F_q = \frac{1}{2} C \rho S_z V_z^2 \quad (21)$$

式中:  $M$  为内置磁塞质量;  $V_z$  为磁塞运动速度;  $\gamma$  为阻尼系数;  $k_p$  为磁塞复位反制力;  $F_z$  为磁塞所受电磁力的大小;  $P_z$  为磁塞最大位移距离;  $C$  为空气阻力系数(计算中取 2);  $\rho$  初始取  $1.29$  kg/m<sup>3</sup>, 随腔内气压变化而变化;  $S_z$  为磁塞面积。

气吹装置的产气过程可以视为理想气体的绝热等熵过程, 满足理想气体状态方程:

$$pV_i = nRT \quad (22)$$

式中:  $V_i$  为气体体积;  $n$  为空气的物质的量。

气吹装置内的空气由静止到喷射过程中满足质量守恒, 根据牛顿第二定律:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = 0 \quad (23)$$

式中:  $u$  为空气流速。

压缩空气由压力能转化成动能, 在能量转化过程中忽略能量损失, 满足能量守恒定律:

$$Q_m = \int_{F_1}^{F_2} \left( g_z + \frac{u^2}{2} + e + \frac{P_m}{\rho} \right) \rho u dF_m + W_m \quad (24)$$

式中:  $Q_m$  为系统的能量变化;  $F_1$ 、 $F_2$  分别为气体初始受到的力和最终受到的力;  $g_z$  为单位质量空气的势能;  $e$  为单位质量空气的内能;  $P_m$  为气体压力;  $F_m$  为单位质量空气所受到的力;  $W_m$  为系统对外做功。

装置内的压缩空气在释放的瞬间, 内力远大

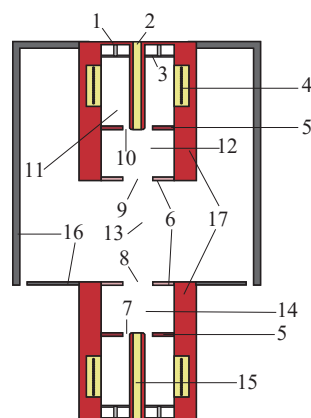
于外力, 发生喷爆现象, 整个系统的能量可以近似守恒。

$$\rho \frac{dV_m}{dt} = \rho F_v + \frac{\partial P_m}{\partial x} + \frac{\partial P_m}{\partial y} + \frac{\partial P_m}{\partial z} \quad (25)$$

式中:  $V_m$  为单位体积;  $F_v$  为单位体积所受到的力。

## 2.2 仿真模型

在有限元仿真中搭建电场、磁场、流体传热和层流 4 个物理场的耦合, 装置结构如图 5 所示。



1—弹簧; 2—高压电极; 3—活塞; 4—线圈; 5—挡板1; 6—挡板2; 7—出气口 I; 8—出气口 III; 9—出气口 IV; 10—出气口 II; 11—产气腔室; 12—灭弧 III 区; 13—灭弧 I 区; 14—灭弧 II 区; 15—接地电极; 16—外围保护结构; 17—绝缘结构。

图 5 双端电磁气吹分段灭弧装置结构

Fig.5 Structure of double-end electromagnetic air blowing segment arc extinguishing device

设置上下结构对称的灭弧装置, 上电极的活塞由弹簧拉着, 下电极的活塞由另外一组弹簧支撑, 在仿真模型中可忽略弹簧的影响, 设置弧隙距离为 150 mm, 上下电极为铜, 电导率为  $5.998 \times 10^7$  S/m, 导热系数为 400 W/(m·K), 相对介电常数为 1, 下电极为接地端。4 个出气口灭弧时将电弧分为 3 段, 使得电弧更加容易被熄灭。产气腔室为高 61 mm、半径 25 mm 的圆柱形, 其内部为 3 mm 的电极和 2 mm 的绝缘材料, 腔室出口处为 3 mm 的圆环小孔; 线圈匝数 13 匝, 每匝半径 5 mm; 活塞宽度 200 mm、高度 1.5 mm, 外部空气域和通道内部空气域流动设置为层流, 且空气温度设置为 293.15 K, 压强设置为 1 个标准大气压; 除绝缘材料外, 其他所有材料均存在电流密度; 接地电极电势设为 0, 仿真步长设为 1  $\mu$ s, 仿真时间为 4.8 ms。仿真流程见图 6。

在上下电极周围安装磁能线圈, 通过引流线将线圈与电极串联, 高压电极终端在  $t = -\infty$  时刻注入标准雷电流, 其波形如图 2 所示, 此时弧隙区域产生闪络通道, 雷电冲击结束后,  $t = 0$  时接入工频续流, 后续工频电流流过闪络通道, 形成稳定工频电

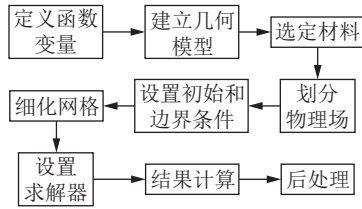


图6 仿真流程

Fig.6 Simulation flow chart

弧,造成线路短暂的接地短路,内置线圈流过导通的工频电流,2.5 ms时内置线圈产生的磁通密度分布如图7所示。

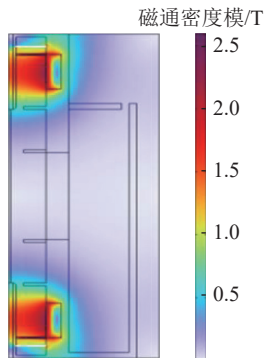
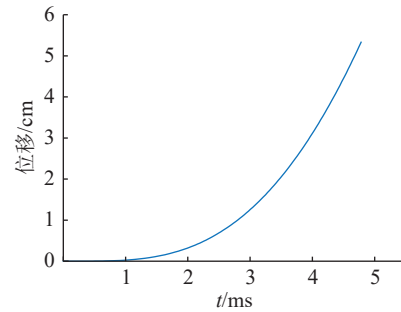


图7 线圈磁通密度分布

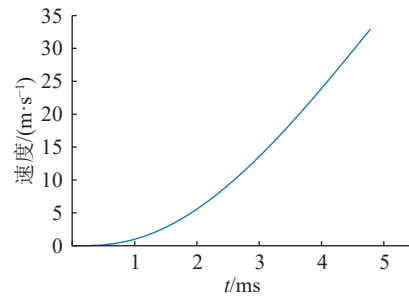
Fig.7 Coil flux density distribution

工频续流流过线圈之后,在装置内产生变化的磁场,利用电磁场产生的安培力使活塞加速移动。由于该装置采用上下对称结构,因此分析活塞的位移速度和受到电磁力大小与时间的关系时,可以只记录高电位处的活塞数据。随着时间变化,活塞会运行至顶端,被挡板1和挡板2挡住,同时,产气腔室中的气体会被活塞压缩并加速向前推进,从出气口I和II喷出。在此过程中,活塞受到的最大电磁力可达267 N,最大速度可达33 m/s。活塞的位移、速度、受到电磁力大小和时间的关系如图8所示。

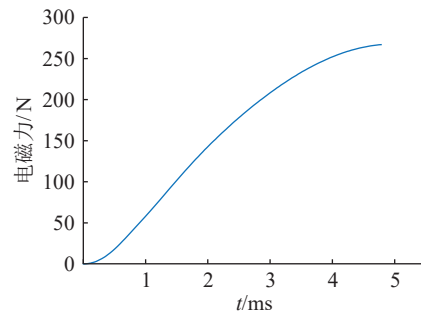
该装置的出气口速度是影响灭弧的关键,各时刻气流速度如图9所示。在0~1 ms内,活塞初速度为0,并且所受电磁力较小,因此1 ms时出气口气流速度增长缓慢,最高速度仅为9.8 m/s。在1~2 ms内,从图8可看出活塞所受电磁力有较大变化,出气口气流速度明显提高,2 ms时速度可达59 m/s。在2~3 ms内,气流分别精确作用于灭弧II区和灭弧III区,达到分段灭弧的效果,出气口处最大速度为148 m/s。在3~4 ms内,出气口速度迎来井喷式增长,达到261 m/s,经过出气口III、出气口IV之后,对电弧具有极大的对流散热,使得其能量耗散激增,电弧能量平衡被破坏。如图9(b)所示,4.6 ms时,气流速度已经达到峰值,为337 m/s。



(a) 位移与时间关系



(b) 速度与时间关系



(c) 受到的电磁力大小与时间关系

图8 不同时刻活塞位移、速度和受到电磁力大小

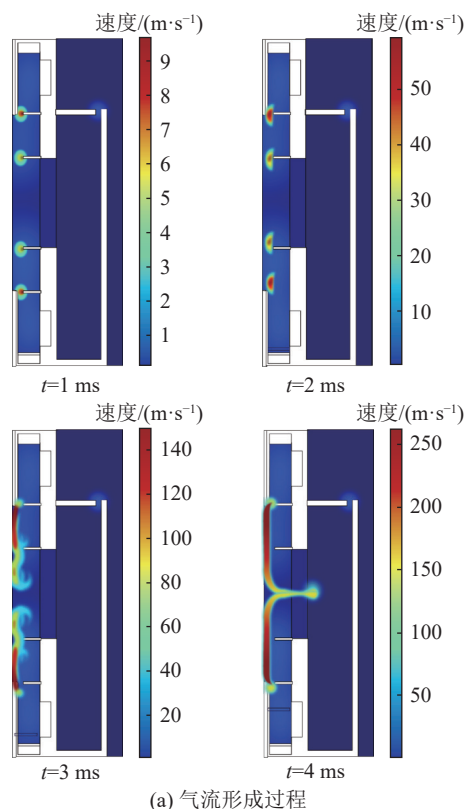
Fig.8 Piston displacement, speed and electromagnetic force at different times

### 3 仿真结果分析

#### 3.1 不同线圈匝数对灭弧效果的影响

由式(15)~式(18)可知,当线圈匝数增加时,线圈中的电流与磁场之间的相互作用也会增强,进而增大电磁力。双端电磁气吹分段灭弧装置依靠磁场产生的作用力进行“气吹式”灭弧,电磁力的大小是影响此装置灭弧效果的关键因素。因此,在仿真实验阶段采用不同的线圈匝数,对此装置进行优化。

图10为不同线圈匝数下出气口III的速度和温度随时间变化的曲线。在1~3 ms内,气体速度第一次爬升,使得电弧能量快速流失,温度也首次大幅度下降,降至4 000 K,降幅达到50%。在3~4 ms内,由于灭弧II区和灭弧III区气体开始对冲,所以,速度曲线有所下降,随着对冲结束,气流往左右发展,速度曲线又随之上升。并且在该段时间内,电



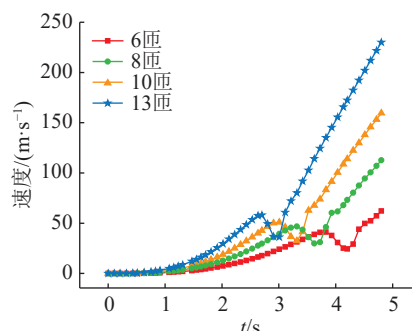
(a) 气流形成过程

图9 气流速度

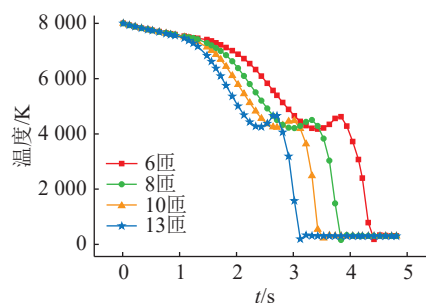
Fig.9 Airflow velocity

弧已经被高速气流分成3段,使得电弧的温度降低到无法维持电离状态的程度,温度曲线呈现断崖式下降,降幅更甚于1~3 ms时。但对于不同匝数的线圈,其磁力大小不同,直接体现在出气口Ⅲ处温度的高度和红色温度曲线斜率不同。记录不同匝数下温度曲线降至2000 K的时间,6匝时需4.25 ms,10匝时需3.29 ms,13匝时需2.91 ms。将时间和匝数作比,比较每匝收益,得到6~10匝时为0.24 ms/匝,10~13匝时为0.12 ms/匝,可见此时线圈匝数越多,对于灭弧效果的影响越小,收益越低。

表1和表2记录了不同时刻不同匝数下出气口Ⅲ的温度和速度。可知,在3.5 ms时,6匝和8匝线



(a) 速度随时间变化曲线



(b) 温度随时间变化曲线

图10 不同匝数下出气口Ⅲ速度和温度随时间变化曲线

Fig.10 Change curves of outlet III velocity and temperature with time under different turns

圈下气体速度并不快,不到36 m/s,但是13匝线圈的作用下,速度达到102.7 m/s。同时观察出气口Ⅲ的温度,已经降至300 K。由图10和表1可以看到,在3 ms之后,温度有一段回升,一是因为此时气流速度下降,降低了抑制电弧电离的能力,二是因为灭弧Ⅱ区和Ⅲ区的残余电弧经由出气口Ⅲ和Ⅳ被吹往灭弧Ⅰ区。

表1 不同时刻不同匝数下出气口Ⅲ的温度

Table 1 Temperature at outlet III at different time with different number of turns 单位: K

匝数	1.5 ms	2.5 ms	3 ms	3.5 ms
6	7 371	5 962	4 762	4 210
8	7 260	5 102	4 205	3 826
10	7 129	4 406	4 478	225
13	6 720	4 318	1 576	306

表2 不同时刻不同匝数下出气口Ⅲ的速度

Table 2 Velocity at outlet III at different time with different number of turns 单位: m·s<sup>-1</sup>

匝数	1.5 ms	2.5 ms	3 ms	3.5 ms
6	3.2	14.1	23.9	35.8
8	5.4	23.1	39.1	35.9
10	8.2	35.3	51.0	62.8
13	13.5	51.9	36.2	102.7

综上,鉴于匝数越多,灭弧效率涨幅越不明显,文中最终选取13匝线圈。

### 3.2 最终结果分析

电弧是热作用和电场作用的整体耦合,其热作用主要是热发射和热游离。在双端电磁气吹灭弧装置动作后,高速气流会逐渐形成并作用在电弧上,气流会对工频电弧产生强烈的冲击,弧柱区域温度由于强对流散热会急剧变小,弧柱半径也会减小,电弧逐渐变细,电弧能量不能维持动态平衡,电弧会逐渐熄灭,全过程如图 11 所示。

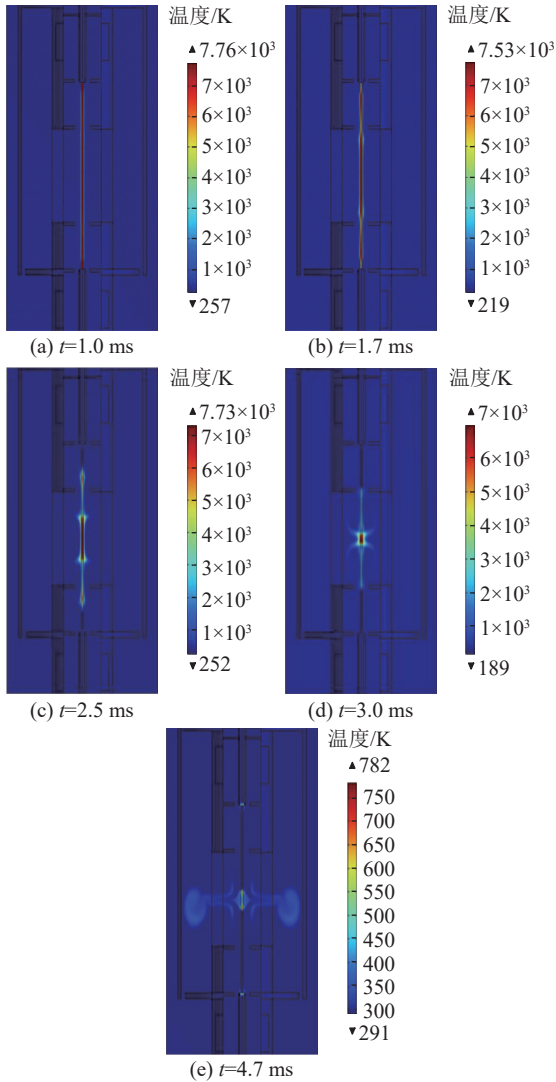


图 11 不同时刻电弧状态及温度变化  
Fig.11 The arc state and temperature variations at different time

在电弧的轴线上取 7 个节点,每个节点之间间隔 2 cm,节点 4 为电弧中点。记录下当强气流作用于工频电弧时工频电弧的全过程温度和气流的全过程速度,如图 12 和图 13 所示。

当工频电弧建立时,工频电流已经流入线圈,产生电磁场,在磁场的作用下,活塞开始运动,压缩空气。因此,装置的灭弧过程与建弧过程具有同步性。如图 11(a)所示,0~1 ms 时,由于气流仍处于发

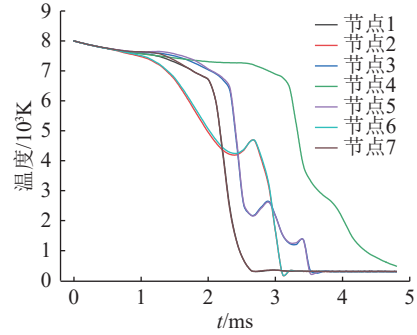


图 12 不同时刻电弧温度沿轴线变化情况  
Fig.12 The arc temperature varies along the axis at different time

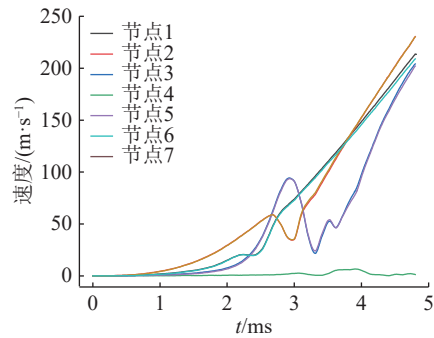


图 13 不同时刻气流速度沿轴线变化情况  
Fig.13 The airflow velocity varies along the axis at different time

展阶段,气流对电弧的影响仅限于灭弧 III 区和灭弧 II 区,作用效果非常弱。由图 13 可知,此时气流速度小于 10 m/s,气流处于萌芽期。

1~3 ms 时,由图 11(a)—(d)可明显看出,灭弧 III 区和灭弧 II 区的电弧先是被气流逐渐降低 4 个出气口的温度,减小电弧半径,进而分割成独立的 3 段,切断与灭弧 I 区的联系,达到分段灭弧的效果。

在 1.7 ms 时,由图 13 可知,速度已达 35 m/s,并且出气口 II 和出气口 I 处的电弧半径已经削减了 50%,使得灭弧 III 区和灭弧 II 区的电弧失去能量来源,断掉电弧去路,降低了灭弧难度,增加了灭弧速率。此外,由于高速气流的喷出,原先在电弧周围的低速或者静止的气流团会被带走,并被喷出的高速气流取代。这种气流替代会削弱电弧的产生和维持,进一步抑制工频电弧的热游离作用。

2.5 ms 时,灭弧 III 区和 II 区的电弧在高速气流作用下已经衰减了 75%,并且由图 12 和图 13 可知,此时出气口 III、IV 的电弧温度只有 650 K 左右,气流速度已达 53 m/s。当气流速度较高时,高速气流可以将电弧的形态拉长,减小电弧的截面积,更容易灭弧。随着电弧温度的不断降低,耦合流体

进一步扩散到外部空气中,内能降低的电弧等离子体无法维持弧柱形态,在对流最明显的部位发生断裂。

3 ms 时灭弧Ⅱ区、Ⅲ区的电弧已经熄灭 100%,只剩下灭弧Ⅰ区。由图 12 可以明显看出,气吹将近 3 ms 后,电弧温度低于 2 000 K,电弧的空间电荷密度迅速下降。因为电弧熄灭临界温度值为 3 000~4 000 K,所以在 3 ms 时,可以判定电弧熄灭。

4.8 ms 时,灭弧Ⅰ区的电弧已经全灭,只余下小部分被气流吹散的电弧残体,且温度只有 782 K。至此,电弧通道完全被抹去,没有复燃的可能,实现了“建弧无通道”。

#### 4 结论

文中主要针对并联保护间隙击穿后熄弧时间较长的问题,基于空气动力学和电磁学原理,设计了一种双端电磁气吹分段灭弧装置用于快速熄弧。利用有限元仿真软件搭建灭弧仿真模型,分析了该装置截断工频电弧的特性,验证了装置的可行性和有效性。所得结论如下:

(1) 雷电冲击电压过后,工频短路电流流过线圈,产生磁场,在强电磁力作用下,活塞加速压缩空气,在 4.8 ms 内喷射出速度可达 337 m/s 的高能高速气流作用于电弧,迅速增大其对流散热。

(2) 线圈匝数是影响灭弧效果的关键因素,同等条件下,线圈匝数越多电磁力越大,气流速度越快,对流散热越快,灭弧效果越好。鉴于匝数越多,灭弧效率涨幅越乏力,结合经济性考虑选取 13 匝线圈。

(3) 理论仿真结果表明,该灭弧装置的熄弧时间为 3 ms 左右,仅为传统保护间隙熄弧时间的 9%,极大缩短了并联间隙自熄弧时间,降低了线路跳闸率,并且没有复燃的可能,大大提高了线路的供电可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 柴辰,何一川,林敢,等.分布式光伏系统接入配电线路感应过电压特性分析[J].电瓷避雷器,2023(6):20-27.  
CHAI Chen, HE Yichuan, LIN Gan, et al. Induced overvoltage characteristics for distributed photovoltaic systems connected to distribution lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(6): 20-27.
- [2] 庞理声,丁登伟,李星,等.基于超宽频电压监测的大型水电站雷击暂态过电压分析[J].浙江电力,2024,43(2):40-48.  
PANG Lisheng, DING Dengwei, LI Xing, et al. Analysis of lightning transient voltage in large hydropower station based on ultra-wideband voltage monitoring[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(2): 40-48.
- [3] 张牧桑,冯子阳,汤昕,等.连续雷电冲击下杆塔导电混凝土基础的热效应分析[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):249-254.  
ZHANG Musang, FENG Ziyang, TANG Xin, et al. Thermal effect analysis of tower conductive concrete foundation under continuous lightning strike[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 249-254.
- [4] 王巨丰,黄上师,王熾蕾,等.架空线路用气体灭弧防雷发展综述[J].高电压技术,2021,47(9):3189-3199.  
WANG Jufeng, HUANG Shangshi, WANG Yanlei, et al. Development of gas arc-extinguishing lightning protection in overhead lines[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3189-3199.
- [5] 姜凯华.架空输电线路雷电监测与故障识别及电晕特性分析[D].重庆:重庆大学,2020.  
JIANG Kaihua. Lightning monitoring, fault identification and corona characteristics analysis of overhead transmission lines[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [6] 王延夫,汤昕,蒋凌峰,等.MOA和耦合地线配合使用的10kV架空线路防雷方法[J].电瓷避雷器,2023(5):18-27.  
WANG Yanfu, TANG Xin, JIANG Lingfeng, et al. Lightning protection method for 10 kV overhead line using MOA and coupling ground wire[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(5): 18-27.
- [7] 彭玉宾,章超,张轩瑜,等.北京地区10kV线路雷害及架空地线防雷有效性分析[J].电瓷避雷器,2024(3):24-32.  
PENG Yubin, ZHANG Chao, ZHANG Xuanyu, et al. Lightning damage and lightning protection effectiveness of overhead ground line on 10 kV lines in Beijing area[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(3): 24-32.
- [8] 杨明浩,胡上茂,姜志鹏,等.考虑全雷击过程架空配电线路防雷性能计算分析[J].电瓷避雷器,2024(2):19-26.  
YANG Minghao, HU Shangmao, JIANG Zhipeng, et al. Calculation and analysis of lightning protection performance of overhead distribution lines considering full lightning strike process[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(2): 19-26.
- [9] 陈家宏,赵淳,谷山强,等.我国电网雷电监测与防护技术现状及发展趋势[J].高电压技术,2016,42(11):3361-3375.  
CHEN Jiahong, ZHAO Chun, GU Shanqiang, et al. Present status and development trend of lightning detection and protection technology of power grid in China[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3361-3375.
- [10] 蔡斌,袁康,梁茂祺,等.基于Simulink的串联间隙避雷器雷击能量过负荷问题分析[J].电瓷避雷器,2024(3):96-104.  
CAI Bin, YUAN Kang, LIANG Maoqi, et al. Lightning strike energy overload problem of series gap arrester based on Simulink[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(3): 96-104.
- [11] 王巨丰,刘津濂,郭伟,等.绝缘子串并联保护间隙的爆裂气流灭弧方法[J].电网技术,2014,38(5):1358-1365.  
WANG Jufeng, LIU Jinlian, GUO Wei, et al. Arc-extinguishing by detonation airflow for parallel protection gap of insula-



- tor strings[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(5): 1358-1365.
- [12] 许衡, 彭波, 姜文东, 等. 500 kV 交流输电线路绝缘子并联间隙电弧运动特性[J]. *电网技术*, 2017, 41(11): 3713-3720.  
XU Heng, PENG Bo, JIANG Wendong, et al. Research of arc movement on parallel gap for lightning protection used in 500 kV AC transmission line[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(11): 3713-3720.
- [13] 李彦丞. 基于 MHD 的 35 kV 自脱离防雷装置灭弧特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.  
LI Yancheng. Research on arc extinguishing characteristics of 35 kV self-detaching lightning protection device based on MHD[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [14] 毕洁廷, 王巨丰, 王学彬. 固相灭弧装置原理下多重雷击防护过程的仿真与实验研究[J]. *高压电器*, 2022, 58(4): 108-114.  
BI Jieting, WANG Jufeng, WANG Xuebin. Simulation and experimental study on multiple lightning protection process under principle of solid phase arc extinguishing device[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(4): 108-114.
- [15] 王学彬, 王巨丰, 丰德, 等. 110 kV 固相灭弧防雷装置灭弧效果的研究[J]. *高压电器*, 2019, 55(5): 131-135.  
WANG Xuebin, WANG Jufeng, FENG De, et al. Research of arc-extinguishing effect of 110 kV fixed phase arc-extinguishing lightning protection device[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(5): 131-135.
- [16] 王巨丰, 吴东, 李国栋, 等. 爆轰气流耦合电弧的仿真与试验[J]. *高电压技术*, 2016, 42(11): 3399-3403.  
WANG Jufeng, WU Dong, LI Guodong, et al. Simulation and experiment of detonation airflow coupling arc[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(11): 3399-3403.
- [17] 谭思源, 李籽剑, 王巨丰, 等. 固相气流防雷装置熄弧工频大电流的仿真分析和试验研究[J]. *高压电器*, 2023, 59(2): 133-139.  
TAN Siyuan, LI Zijian, WANG Jufeng, et al. Simulation analysis and experimental research of power frequency high current arc extinguishing for solid-phase airflow lightning protection device[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(2): 133-139.
- [18] 谢从珍, 李彦丞, 杜岩, 等. 基于磁流体动力学的 35 kV 自脱离防雷装置灭弧仿真[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(1): 61-69.  
XIE Congzhen, LI Yancheng, DU Yan, et al. Simulation research on arc extinguishing characteristics of 35 kV self-detaching lightning protection device based on magnetohydrodynamics[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(1): 61-69.
- [19] 胡新宇, 杨廷方, 汪新秀, 等. 基于 MHD 的改进型保护间隙快速熄弧仿真[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(5): 219-224.  
HU Xinyu, YANG Tingfang, WANG Xinxiu, et al. Fast arc extinction simulation for improved protective gap based on MHD[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(5): 219-224.
- [20] 王巨丰, 吴东, 梁雪, 等. 10 kV 多间隙强气流灭弧防雷装置的仿真分析与试验研究[J]. *高电压技术*, 2016, 42(5): 1497-1502.  
WANG Jufeng, WU Dong, LIANG Xue, et al. Simulation analysis and experimental research of 10 kV multiple-chamber arc-extinguishing lightning protection device with strong airflow[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(5): 1497-1502.
- [21] 王巨丰, 吴东, 李国栋. 10 kV 多断点灭弧防雷间隙熄弧特性研究及应用[J]. *高电压技术*, 2017, 43(5): 1589-1595.  
WANG Jufeng, WU Dong, LI Guodong. Arc-extinguishing characteristics research and application of 10 kV multiple-break arc-extinguishing lightning protection gap[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(5): 1589-1595.
- [22] 吴东. 约束空间自膨胀强气流多断点截断电弧机理及试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2018.  
WU Dong. Mechanism and experimental study on multi-break-point arc interruption of self-expanding strong airflow in confined space[D]. Nanning: Guangxi University, 2018.
- [23] 罗屹豪, 杨廷方, 汪新秀, 等. 自能式空气炮保护间隙快速熄弧装置[J]. *南方电网技术*, 2022, 16(5): 71-78.  
LUO Yihao, YANG Tingfang, WANG Xinxiu, et al. Rapid arc-extinguishing device for self-charging air cannon with protective clearance[J]. *Southern Power System Technology*, 2022, 16(5): 71-78.
- [24] 周慧康, 杨廷方, 罗屹豪, 等. 基于气吹原理的一体化防雷间隙快速灭弧方法[J]. *南方电网技术*, 2023, 17(12): 119-126.  
ZHOU Huikang, YANG Tingfang, LUO Yihao, et al. Rapid arc-extinguishing method of integrated lightning protection gap based on the principle of air-blowing[J]. *Southern Power System Technology*, 2023, 17(12): 119-126.
- [25] GHORUI S, HEBERLEIN J V R, PFENDER E. Thermodynamic and transport properties of two-temperature nitrogen-oxygen plasma[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2008, 28(4): 553-582.
- [26] 向凌峰. 基于磁流体力学模型的稳态真空电弧建模与计算[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.  
XIANG Lingfeng. Modeling and calculation of steady-state vacuum arc based on magnetohydrodynamic model[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [27] 余颖, 刘亚东, 李维, 等. 配电线路针式绝缘子早期故障动态特性研究[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(1): 71-82.  
YU Ying, LIU Yadong, LI Wei, et al. Simulation and experimental research on pin insulator incipient fault dynamic characteristic in the distribution network[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(1): 71-82.
- [28] MVRMANN M, CHUSOV A, FUCHS R, et al. Modeling and simulation of the current quenching behavior of a line lightning protection device[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(10): 105203.

- [29] NAGHIZADEH-KASHANI Y, CRESSAULT Y, GLEIZES A. Net emission coefficient of air thermal plasmas[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2002, 35(22): 2925-2934.
- [30] 周勇军. 基于长间隙电弧分析的灭弧防雷间隙研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020.  
ZHOU Yongjun. Research on lightning protection gap based on long gap arc analysis[D]. Nanning: Guangxi University, 2020.
- [31] 王巨丰, 郭伟, 梁雪, 等. 爆炸气流灭弧试验与灭弧温度仿真分析[J]. *高电压技术*, 2015, 41(5): 1505-1511.  
WANG Jufeng, GUO Wei, LIANG Xue, et al. Analysis of explosion airflow arc-extinguishing test and arc-extinguishing temperature simulation[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(5): 1505-1511.
- [32] 孟伟航, 王巨丰, 黄上师, 等. 35 kV 配电线路绝缘子串与多断点灭弧防雷间隙雷电冲击绝缘配合研究[J]. *电测与仪表*, 2022, 59(5): 109-115.  
MENG Weihang, WANG Jufeng, HUANG Shangshi, et al. Lightning insulating coordination between insulator string and multiple-break arc-extinguishing lightning protection gap of 35 kV transmission line[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(5): 109-115.
- [33] 司马文霞, 谭威, 杨庆, 等. 基于热浮力-磁场力结合的并联间隙电弧运动模型[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(19): 138-145.  
SIMA Wenxia, TAN Wei, YANG Qing, et al. Long AC arc movement model for parallel gap lightning protection device with consideration of thermal buoyancy and magnetic force[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(19): 138-145.

作者简介:



李雄

李雄(1999), 男, 硕士在读, 研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: 1727572985@qq.com);  
杨廷方(1975), 男, 博士, 副教授, 通信作者, 研究方向为电气工程及电气绝缘;  
周慧康(1999), 男, 硕士在读, 研究方向为高电压与绝缘技术。

## Rapid arc extinguishing of a double-ended electromagnetic air-blast segmented arc-extinguishing device

LI Xiong, YANG Tingfang, ZHOU Huikang, YANG Wenchao, FENG Minghao, ZHUO Chao

(School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** To address the issue of decreased reliability in power transmission caused by the incapability of existing parallel protection gaps to actively extinguish arcs, a method utilizing the power-flow current flowing through coil to generate a magnetic field, and employing electromagnetic force to drive a piston to compress air and jet high-speed airflow for arc extinction is proposed. Consequently, a double-ended electromagnetic air-blast segmented arc-extinguishing device is designed. Based on the theory of magnetohydrodynamic, the theoretical model is built by using finite element simulation software, and the arc-extinction process of the device is simulated and analyzed. The results show that the arc-extinguishing airflow maximum speed is up to 330 m/s. Arc-extinguishing airflow rapidly act on the arc from the upper and lower ends, under the action of high-speed airflow, the arc gradually thinned out to break the dynamic equilibrium. The arc column temperature decreases to 2 000 K within 3 ms, and the arc channel pinch off, so as to realize the "no arc channel". The arc-extinguishing time is only 9% of the time before the installation of the device. The device can greatly shorten the arc-extinguishing time, and improve the reliability of the power supply system.

**Keywords:** thunder and lightning; parallel protection gap; multi-physics simulation platform; magnetohydrodynamic theory; power frequency continuous flow; electromagnetic air-blast

(编辑 方晶)