

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.01.002

## 基于绝缘支柱组件的ZW32真空断路器防潮性能优化设计

罗翔<sup>1,2</sup>, 林一泓<sup>1</sup>, 张振宇<sup>1,2</sup>, 王健<sup>1,2</sup>, 吴涵<sup>1,2</sup>, 李衍川<sup>1,2</sup>, 谢芸<sup>3</sup>

(1. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福州 350007; 2. 福建省高供电可靠性配电技术企业重点实验室, 福州 350000;  
3. 福建中试所电力调整试验有限责任公司, 福州 350005)

**摘要:** 为了提升ZW32真空断路器的防潮性能,文中提出了一种绝缘支柱组件设计方案,它能够防止机构室内的潮湿气体向绝缘支柱内壁、绝缘拉杆外表面聚集。基于设计的绝缘支柱组件,进行了三维电场及温度场分析,研制了新型ZW32真空断路器,并进行了样机试验验证。结果表明,设计的新型ZW32真空断路器绝缘性能及其他电气性能完全满足国网要求,样机的基本外形尺寸与现行的ZW32真空断路器一致,具有一定的经济性。

**关键词:** 绝缘支柱组件; ZW32真空断路器; 防潮性能; 优化设计

### Optimization Design on Moisture Resistance Property of ZW32 Vacuum Circuit Breaker Based on Insulating Pillar Assembly

LUO Xiang<sup>1,2</sup>, LIN Yihong<sup>1</sup>, ZHANG Zhenyu<sup>1,2</sup>, WANG Jian<sup>1,2</sup>, WU Han<sup>1,2</sup>,  
LI Yanchuan<sup>1,2</sup>, XIE Yun<sup>3</sup>

(1. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350007, China; 2. Enterprise Key Laboratory of Electric Distribution Technology for High Reliable Power Supply of Fujian Province, Fuzhou 350000, China; 3. Fujian Zhongshisuo Electric Power Testing & Commissioning Co., Ltd., Fuzhou 350005, China)

**Abstract:** For enhancing the moisture resistance property of type ZW32 vacuum circuit breaker, a novel design scheme of insulating pillar assembly is proposed in this paper, which can prevent the humid gas inside the operating mechanism compartment from accumulating to the internal wall of insulating pillar and the outer surface of the insulating rod. The 3-D electric field and temperature analysis are performed on the designed insulating pillar assembly, type ZW32 vacuum circuit breaker is developed and test verification of the prototype is performed. The result shows that both insulation and other electrical performance of new ZW32 vacuum circuit breaker meet completely requirement of state grid corporation of China. The prototype has identical appearance to that of existing of type ZW32 vacuum circuit breaker and a definite economic performance.

**Key words:** insulating pillar assembly; ZW32 vacuum circuit breaker; moisture resistance property; optimization design

## 0 引言

当前中国正处于数字化转型及智能电网建设的关键时期<sup>[1-6]</sup>,近年来随着配电网及配电自动化的发展,对配电开关设备的性能要求也越来越高<sup>[7-20]</sup>。

ZW32型户外柱上真空断路器是目前12 kV配电网中使用较为广泛的户外开关设备,其采用三相支柱式,具有开断性能稳定可靠、轻便、体积小等特点。ZW32型真空断路器在实际使用过程中,机构室内的潮气或湿气会逐步沿绝缘支柱内表面及绝缘拉

收稿日期:2025-07-18; 修回日期:2025-09-25

基金项目:福建省自然科学基金杰青项目资助(2021J06038)。

Project Supported by Fujian Provincial Natural Science Foundation for Outstanding Young Researchers Project(2021J06038).

杆外表面形成水气爬电通道。

福建地处东南沿海,空气湿度大,配电设备的防潮性能直接影响着配网线路的安全稳定运行<sup>[21]</sup>。近年来,省内在运的ZW32柱上断路器已经发生多起因受潮造成的事故,严重影响了供电可靠性。由于ZW32真空断路器的机构室与支柱绝缘筒通过绝缘拉杆穿越孔相连通,可能导致机构室内的水气反而会因“烟囱”效应从穿越孔侵入到支柱绝缘筒内,并逐步在绝缘支柱内表面及绝缘拉杆外表面形成凝露或水气爬电通道,此时受潮绝缘件表面的泄漏电流增大,极易引起绝缘件表面闪络或绝缘失效,最终将导致断路器绝缘拉杆击穿或绝缘支柱击穿,见图1。



图1 支柱内部受潮情况

Fig. 1 The internal damp condition of insulating pillar

文中尝试从绝缘支柱防潮能力方面做出关键改变,在ZW32型真空断路器固有结构的基础上,设计了一种能够提高ZW32真空断路器绝缘支柱防潮性能组件,防止机构室内的潮湿气体向绝缘支柱内壁、绝缘拉杆外表面聚集。经防潮性能优化设计后的绝缘支柱组件,其电气性能、温升、机械寿命等均满足国网要求。

## 1 凝露影响机理

为进一步分析温湿度对凝露现象的影响规律,以下将从湿空气含湿量与其温度和相对湿度之间的关系进行分析<sup>[22-29]</sup>。

假设湿空气为理想气体,根据道尔顿定律

$$P_1 = P + P_g \quad (1)$$

以及理想气体状态方程

$$PV = nRT \quad (2)$$

得到

$$\frac{P_1}{P_g} = \frac{n}{n_g} \quad (3)$$

含湿量为单位质量绝干空气所带有的水气质量,其表达式为

$$H = \frac{m}{m_g} = \frac{n \cdot M}{n_g \cdot M_g} = 0.622 \frac{P_1}{P_{11} - P_1} \quad (4)$$

相对湿度可等效为湿空气中的水气分压与同温度下水的饱和蒸气压之比的百分数,其表达式为

$$\varphi = \frac{P_1}{P_s} \times 100\% \quad (5)$$

则含湿量  $H$  与相对湿度的关系为

$$H = 0.622 \frac{\varphi \cdot P_s}{P_{11} - \varphi \cdot P_s} \quad (6)$$

式(1)-(6)中: $P_1$ 、 $P$ 、 $P_g$ 分别为理想气体总压、水气分压、干空气分压; $P_{11}$ 、 $P_1$ 、 $P_{g1}$ 分别为湿空气总压(大气压)、水气分压和绝干空气分压,Pa; $n$ 、 $n_g$ 分别为水气和绝干空气摩尔数,mol; $m$ 、 $m_g$ 分别为水气和绝干空气质量,kg; $M$ 、 $M_g$ 分别为水气和绝干空气摩尔质量,kg/mol; $H$ 为湿空气含湿量,g/kg; $\varphi$ 为相对湿度; $P_s$ 为水蒸气饱和蒸气压,Pa。

根据 Antoine 方程可得水蒸气饱和蒸气压计算公式为

$$\lg P_s = A - \frac{B}{T+C} \quad (7)$$

式(7)中: $P_s$ 为水蒸气饱和蒸气压,mmHg(1 mmHg=133.28 Pa); $T$ 为环境温度,℃;由所研究温度区间和精度选取参数, $A$ 为8.107 65, $B$ 为1 750.286, $C$ 为235。由式(6)、(7)可知,含湿量  $H$  为温度  $T$  和相对湿度  $\varphi$  的函数,不同温湿度条件下的含湿量见图2。

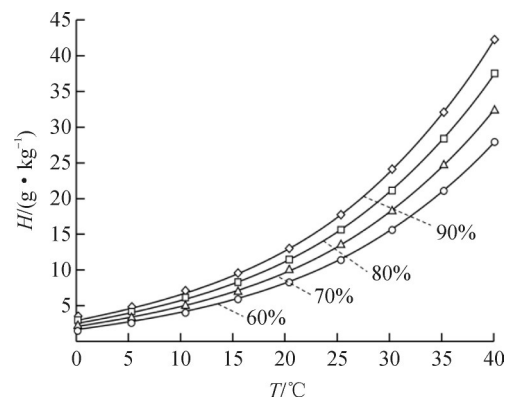


图2 含湿量曲线图

Fig. 2 The curve of moisture content

由图2可知,当相对湿度不变时,密闭空间内的温度越高,空气含湿量越大;当温度不变时,相对湿度越高,空气含湿量也越大,因此含湿量是由温度和相对湿度共同影响的。

若机构室及支柱绝缘筒组成的密闭空间内外温差保持不变时,箱体内壁、绝缘件外表面温度也不变,根据图2所示,空间内对应的饱和含湿量也就不变,此时若相对湿度增大,则空气中的水分更容易达到饱和,就易在箱体内壁、绝缘件外表面析出水分;另一方面,当相对湿度一定时,若空间内的温度升高,则空气含湿量也增大,高温空气遇到箱体内壁、绝缘件外表面时也更易形成凝露。因此,凝露现象的产生取决于密闭空间内温度和相对湿度的共同作用。若要防止绝缘支柱内凝露的产生,绝缘支

柱组件所选择的材料不仅需要阻止机构室内湿气的侵入,同时还应具有良好的耐腐蚀性及导热性。

## 2 绝缘支柱组件结构设计

为使断路器机构室内的水气或潮气不进入支柱内,并有效防止潮气聚积在支柱内壁灭弧室动端与绝缘拉杆外表面上,决定采取从绝缘拉杆、支柱与机构动作主轴间的通道进行组件封堵式设计,使绝缘支柱与机构室进行空间上的有效隔离,从而确保机构室内的潮气不会进入支柱内。从断路器的灭弧室组件与机构、主轴在分合闸轨迹上进行分析,需要密封件具备断路器行程的位移量。为保证密封件对产品分合操作无影响,密封组件的轴向位移能力需比行程多5 mm左右(保证设计上有一定冗余度)。文中分别采用了往复运动双唇无骨架轴向密封、硅橡胶波纹管式密封、金属波纹管式密封等3种设计方案,通过对比分析,最终选出了最优方案。

### 2.1 往复运动双唇无骨架轴向密封设计方案

往复运动双唇无骨架轴向密封结构是采用一种双唇橡胶密封圈,起到轴向运动时的防尘和密封的作用,见图3。在此设计方案中,双唇橡胶密封圈通常采用三元乙丙橡胶材质,与轴套配合密封,轴套与壳体套管支架焊接为一体。此设计方案套管满足IP67防护等级,可防止机构室内的潮气进入绝缘支柱内,达到使用过程中不会因绝缘支柱与绝缘拉杆受潮气影响而降低产品的绝缘能力的目的。

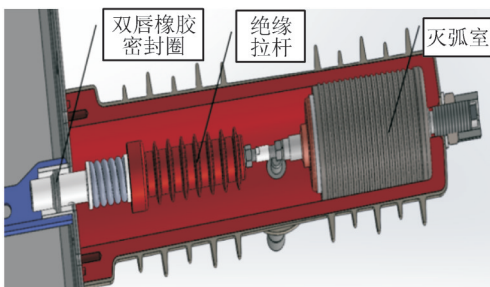


图3 轴向密封设计方案

Fig. 3 The design scheme for axial sealing

该方案虽然解决了绝缘支柱内相关组件受潮的问题,但有以下缺陷:①装配难度大。在装配过程中,绝缘拉杆的调节头与双唇橡胶密封圈固定轴套间的同心度调整相对比较困难,而且一旦绝缘拉杆调节头与双唇橡胶密封圈固定轴套同心度不符合要求,轴向运动时会产生较大的摩擦力,不但影响到支柱密封,还会影响产品的机械特性,该方案控制工艺的不确定性大。②断路器在分合闸过程中因轴向运动,动密封处可能会出现卡滞,从而影响断路器的机械特性。③配合间隙问题。一旦绝

缘支柱与机构室间存在压力差,可能会导致绝缘拉杆和双唇橡胶密封圈固定轴套之间因配合间隙而引起的潮气向支柱内壁及绝缘拉杆处的聚集。由于该设计方案工艺实施难度较大,故不采用。

### 2.2 硅橡胶波纹管密封设计方案

硅橡胶波纹管作为弹性元件,补偿、缓冲绝缘拉杆在断路器分合闸过程中的轴向位移,因为没有轴向同心度的装配要求,所以在工艺上容易实现,见图4。硅橡胶波纹管的弹性力与分合闸动作时气体流体压力会在密封端面上产生端面比压,起到密封作用。这样就封堵了断路器机构室内的潮气,有效防止其侵入到绝缘支柱内壁和绝缘拉杆的外表面。该设计方案中,波纹管采用硅橡胶材质,与绝缘拉杆的弹簧固定座一体浇注而成,绝缘拉杆的弹簧固定座采用不锈钢材质,该组件组装于断路器绝缘拉杆上,绝缘拉杆与弹簧固定座间采用三元乙丙橡胶O型密封圈密封。

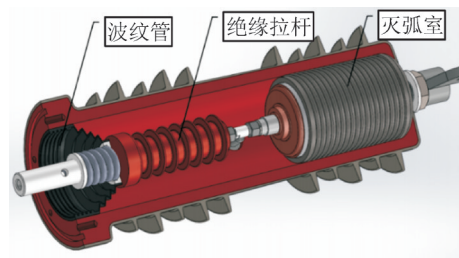


图4 硅橡胶波纹管式密封设计方案

Fig. 4 The design scheme for silicone rubber bellows sealing

该设计方案断路器支柱部分满足IP67防护等级要求,但有以下缺陷:①硅橡胶波纹管易受压破裂。当任意一相绝缘支柱出现大电流故障时,故障相所释放出来的气体压力一旦大于硅橡胶波纹管的承受压力时,硅橡胶波纹管就会发生破裂,故障相支柱内的碳化粉尘和高温气压一样会进入到机构室内,且极易破坏其他非故障相的密封组件,不能从根本上解决机构室与支柱间的密封问题,也无法有效防止单相故障向相间短路故障的发展。②故障时散热难。硅橡胶波纹管属于非金属材料,导热能力极差,当出现任意一相绝缘支柱出现大电流故障时,产生的热量不能及时散开而是聚集在故障相的绝缘支柱内,可能导致绝缘支柱爆炸,严重影响产品的安全性。③故障泄压通道工艺较难实现。虽然可以通过在软连接、出线导电杆处设计自动泄压通道,但该通道平时(无故障时)必须保证可靠关闭,工艺实现比较困难。由于该设计方案无法从根本上解决对断路器灭弧室与机构室间的隔离问题和散热问题。

### 2.3 金属波纹管密封设计方案

金属波纹管作为弹性元件补偿、缓冲绝缘拉杆在断路器分合闸过程中的轴向位移,因为没有装配

时的轴向同心度要求,所以在工艺上容易实现,见图5。金属波纹管的弹性力与分合闸动作时气体流体压力会在密封端面上产生端面比压,起到密封作用。这样就封堵了断路器机构室内的潮气,有效防止其侵入到绝缘支柱内壁和绝缘拉杆的外表面。采用不锈钢波纹管作为密封元件,可确保主轴与拉杆之间为静密封,同时也可耐受一定的气体压力,且金属波纹管具有耐高温、导热性强、耐高压、耐腐蚀、弯曲疲劳强度高。该方案的密封组件决定采用304不锈钢金属波纹管,同时在每相支柱的不锈钢波纹管法兰处分别设计了两处对称的泄压通道,可保证当支柱内部压力达到泄压值时可靠泄压,从而避免支柱爆炸。

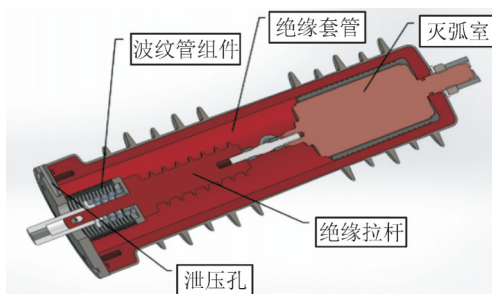


图5 金属波纹管式密封设计方案

Fig. 5 The design scheme for metal bellows sealing

### 3 压力释放方案设计

为避免在ZW32型真空断路器某相发生故障时绝缘支柱爆炸造成人员受伤或造成其它支柱受损等意外事故,在金属波纹管密封组件的设计时,还设计了能安全将绝缘支柱的内部气体压力释放的泄压阀作为泄压通道。

#### 3.1 泄压阀设计

采用金属波纹管组件将三相的绝缘支柱各自独立密封后,支柱内部虽然与外界潮气隔离,但支柱内部的湿度来源于两个方面:一是原支柱内部因运行过程中绝缘件内部释放的湿度,二是支柱型断路器产品在装配过程中残存在支柱内部的空气中的湿度,以上均可能导致断路器在运行中支柱内部出现凝露,故考虑采用了往支柱内部充入适量高纯氮气或干燥空气。最初选用硅橡胶塞的泄放组件设计的样机经试验后发现,硅橡胶塞尽管可以在支柱内部气体压力达到某值时实现泄压的功能,但是存在两个问题:①硅橡胶塞式泄压,气体释放压力不太稳定,会随着产品温度及泄压塞装配时的受挤程度不同而导致泄放压力值差异较大;②绝缘支柱一经生产完成,硅橡胶塞泄压只能起一次性的泄压作用,一旦完成了第一次泄压,硅橡胶塞即被弹出,

支柱密封失效,如果该真空断路器继续使用,已经泄压的支柱内部与大气即是连通的,所谓的防潮型支柱断路器将失去防潮的功能。为了解决硅橡胶塞作为金属波纹管组件的泄压器件所存在的问题,在原金属波纹管组件的设计基础上同时分别设置充气阀和泄压阀,见图6。

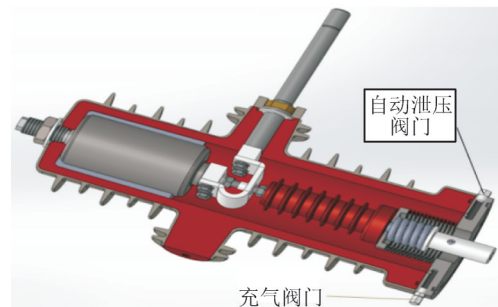


图6 设置充气阀和泄压阀设计方案

Fig. 6 The design scheme for automatic depressurization valves

#### 3.2 泄压阀试验验证

采用的不锈钢泄压阀见图7,该泄压阀的理论泄放压力为0.13~0.2 MPa。向防潮型绝缘支柱内部逐步充入压缩空气,当支柱的内部压力达到0.135 MPa时,不锈钢泄压阀开始漏气。

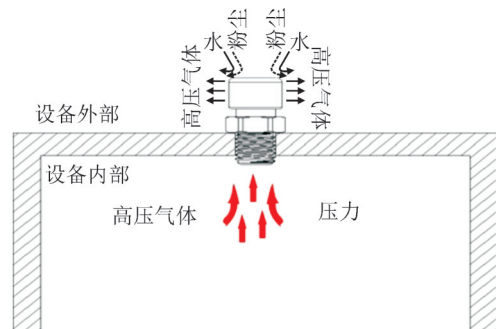


图7 泄压阀的泄压示意图

Fig. 7 The schematic diagram of depressurization valves

现场试验情况见图8。①支柱内部充气至0.135 MPa时,水中的金属泄压阀开始漏气(气泡出现)。②支柱内部充气至0.145 MPa时,水中的金属泄压阀泄压压力增大(气泡变多)。③支柱内部气体压力降至0.13 MPa时,泄压阀正常关闭(未泄压)。试验结果表明,该泄压阀可以实现当绝缘支柱内部气压上升到0.135 MPa后开始漏气,泄压完成后自动保持,可以有效避免支柱内部气压过大导致绝缘支柱爆炸事件的发生。

### 4 电场及温度场分析

上述的金属波纹管式密封组件能够防止断路器机构室内的潮气,防止其侵入到绝缘支柱内壁和绝缘

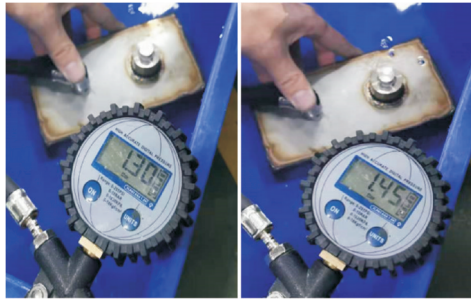


图8 泄压阀现场试验情况

Fig. 8 The field test process of depressurization valves

拉杆的外表面,将断路器支柱及机构室有效分隔。此时支柱内部将形成一个相对独立的密闭空间,绝缘拉杆作为关键绝缘件,将干燥空气或环保绝缘气体充入绝缘支柱组件内部构成干燥气体环境的绝缘结构。为验证金属波纹管密封组件对支柱内部电场及温度场的影响,文中对安装密封组件的支柱进行建模仿真,进一步分析其内部的电场及温度场分布情况。

#### 4.1 电场仿真分析

对ZW32断路器支柱内部电场的仿真,主要考虑了两种绝缘拉杆的类型,一种为环氧树脂外部包裹光滑硅橡胶套(方案1),另一种为环氧树脂外部包裹带伞裙硅橡胶套(方案2),见图9。对两种方案的ZW32断路器支柱结构进行建模,分析在工频耐受电压(42 kV)和雷电冲击耐受电压(75 kV)下的电场强度分布,仿真结果见图10、11。

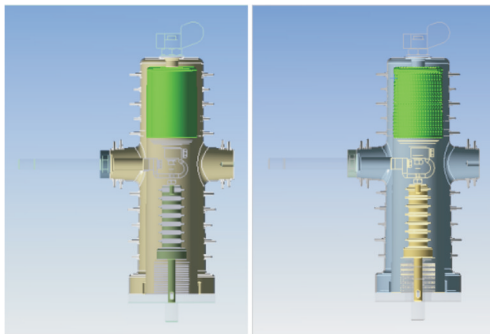


图9 两种方案建模示意图

Fig. 9 The model of two methods

从以上电场仿真可以看出,该绝缘支柱组件设计中光滑硅橡胶套包裹的环氧绝缘拉杆以及带伞裙硅橡胶套包裹的环氧绝缘拉杆的电场强度分布与原有支柱结构相比均未发生明显变化,金属波纹管密封组件附近电场强度也未发生畸变。另外电场相对集中的部位是绝缘拉杆上端与其他导体搭接部位、绝缘拉杆下部与金属波纹管接触位置,主要是由于环氧树脂、铜导体或不锈钢导体、气体三交界处易造成局部电场集中。从图10、11可知,各处的电场强度满足要求。

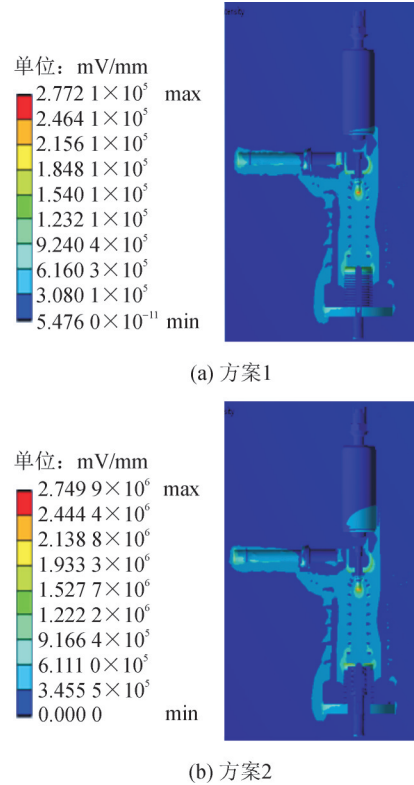


图10 两种方案42 kV工频耐受电压下的场强分布  
Fig. 10 The distribution of electric field strength of two methods in 42 kV power-frequency withstand voltage testing

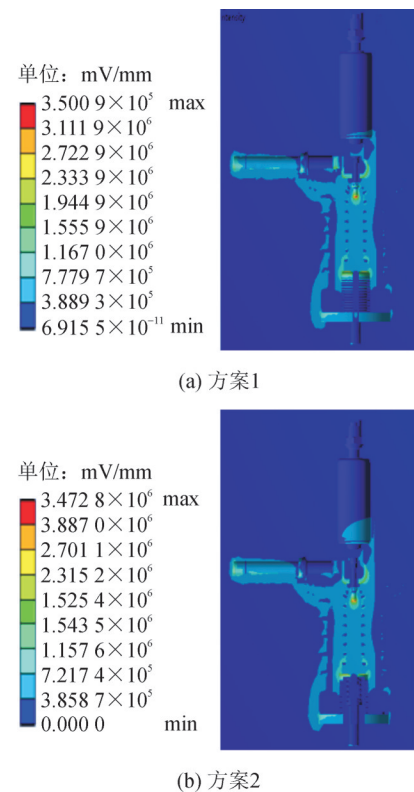


图11 两种方案75 kV雷电冲击耐受电压下的场强分布  
Fig. 11 The distribution of electric field strength of two methods in 75 kV lightning impulse testing

### 4.2 温度场仿真分析

对ZW32支柱在700 A稳定通流情况下的温度场分布进行了仿真分析,由于空气的导热系数仅有0.024 2,远远小于固体材料的导热系数,其热传导效应可以忽略不计,空气带来的热对流效应对温升具有显著影响,下文以对流散热系数的形式予以考虑。

文中采用恒定电流场及温度场联合仿真,其中恒定电流场边界条件见图12中A、B,从B处注入700 A恒定电流,从A处流出;温度场边界条件见图12中C、D、E、F,根据环境温度设C处为22℃,根据理论可以计算出D、E、F处的对流散热系数为5.4、6.5、7.5 W·(m<sup>2</sup>·℃)<sup>-1</sup>。

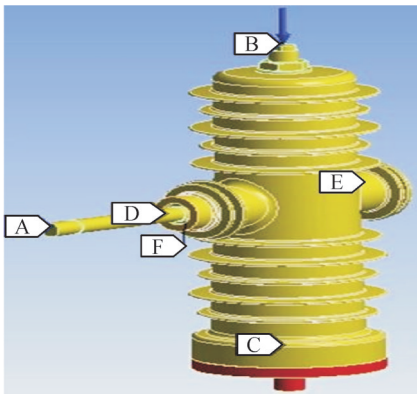


图12 恒定电流场边界条件及温度场边界条件设置  
Fig. 12 The boundary conditions setting of constant current field and temperature field

恒定电流场及温度场联合仿真结果分为两部分:一是恒定电流场,二是稳态温度场。其中恒定电流场中的电流密度分布见图13,稳态温度场中的温度分布见图14。

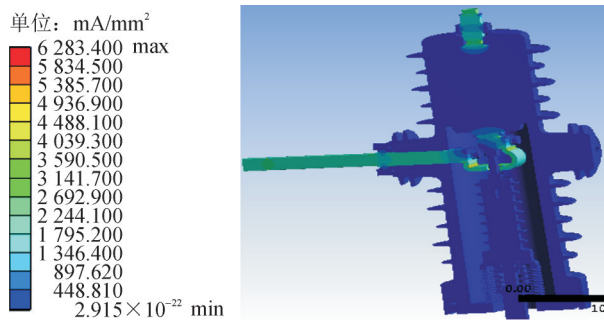


图13 恒定电流场电流密度分布  
Fig. 13 The current density distribution of constant current field

从温升分布图(温度分布减去环境温度22℃即为温升分布)可以发现:一是横向通流的母排由于通流截面积较小,其温升较高;二是真空断路器由于其通流面积较大,因此其温升较低。以上仿真结果均符合现场实际运行情况,与现场温升试验数据大致相符。

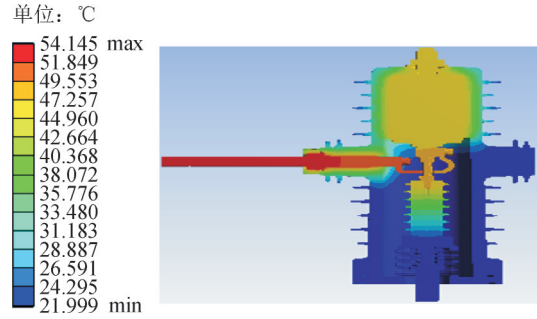


图14 稳态温度场温度分布

Fig. 14 The temperature distribution of stable temperature field

### 5 样机制造和试验验证

在金属波纹管密封组件设计方案中,波纹管采用厚度(0.19±0.05) mm的304不锈钢材质,两端分别与绝缘拉杆原有配件的弹簧固定座、法兰焊接而成,弹簧固定座与法兰为不锈钢材质。将该组件组装于断路器绝缘拉杆上,绝缘拉杆与弹簧固定座之间、金属波纹管底部法兰与断路器壳体之间均采用O形三元乙丙橡胶密封圈密封。研制的绝缘支柱组件的展示样机见图15。

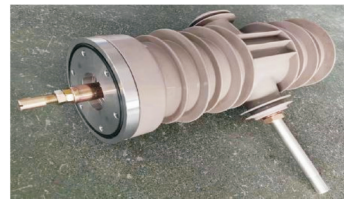


图15 绝缘支柱组件样机

Fig. 15 The prototype of multifunctional insulating pillar assembly

将一台防潮型ZW32断路器样品中的A相绝缘支柱内充入0.1 MPa的氮气后开展高低温试验,温湿度变化情况见图16。在高低温试验前后对内部为氮气的支柱和内部为普通空气(60%~65%相对湿度)支柱进行工频耐受电压试验,试验均合格。

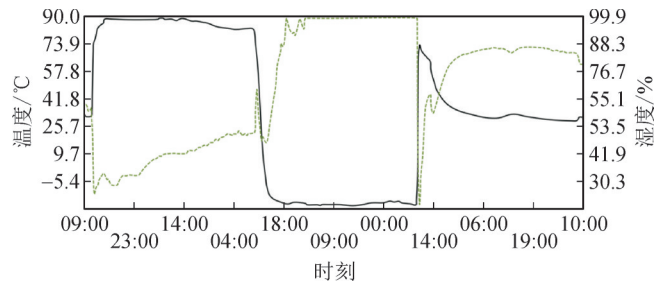


图16 高低温试验曲线图

Fig. 16 The curve of hot and cold temperature testing

基于绝缘支柱组件的ZW32真空断路器,通过了全部型式试验,其中高低温前后的绝缘试验、整

机局部放电试验、机械特性、机械寿命、温升、泄漏电流等均符合要求。样机的基本外形尺寸与现行的ZW32真空断路器一致,在推广应用方面具有一定的经济性。

## 6 结论

文中介绍了在原有ZW32真空断路器的基础上开展的防潮性能优化设计,设计了一种新型绝缘支柱组件,并分析了该组件的结构及电气性能,得到以下结论:

1)设计的金属波纹管密封组件,将断路器支柱与机构室有效分隔,能够有效防止断路器机构室内的潮气侵入到绝缘支柱内壁和绝缘拉杆的外表面。

2)当断路器任意相支柱出现内部故障产生了过大压力时,该绝缘支柱组件的下固定法兰上的两个泄压阀将会被一定压力的内部气体顶开,使绝缘支柱内的气压从泄压通道释放,避免绝缘支柱出现爆炸事故。

3)一旦某一相支柱发生了故障,需要对断路器的故障相进行维修时,只需更换故障相的支柱即可,另外两相无需更换,大大降低了断路器的维修成本,提高了检修效率。

## 参考文献:

- [1] 张 瑶,王傲寒,张 宏. 中国智能电网发展综述[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(5):180-187.  
ZHANG Yao, WANG Aohan, ZHANG Hong. Overview of smart grid development in China[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5):180-187.
- [2] 卢建刚,余志文,李世明,等. 新型数字智能电网调度中台的电能交易协调决策模块研究[J]. 电测与仪表,2025,62(9):125-133.  
LU Jiangan, YU Zhiwen, LI Shiming, et al. Research on power transaction coordination decision-making module of novel digital smart grid dispatching center[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(9):125-133.
- [3] 姚尚衡,傅晨玲,曾金灿,等. 智能电网技术创新对电力行业绿色转型的非线性影响[J]. 智慧电力,2024,52(2):1-7.  
YAO Shangheng, FU Chenling, ZENG Jincan, et al. Nonlinear impact of smart grid technology innovation on green transformation of power industry[J]. Smart Power, 2024, 52(2):1-7.
- [4] 曹志强,陈 洁. 智能电网中基于批标准化LSTM的互感器故障诊断技术[J]. 电力科学与技术学报,2023,38(6):152-158.  
CAO Zhiqiang, CHEN Jie. Online monitoring and fault diagnosis technology of transformers based on the LSTM with batch normalization[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6):152-158.
- [5] 李建泽,朱明星. 基于大数据技术的智能电网异常入侵动态检测方法[J]. 电子设计工程,2024,32(5):169-173.  
LI Jianze, ZHU Mingxing. Dynamic detection method of abnormal intrusion in smart grid based on big data technology[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(5):169-173.
- [6] 李金超,鹿世强,兰心怡,等. 计及需求响应动态特性的分布式智能电网运行优化方法研究[J]. 电网与清洁能源,2024,40(8):103-111.  
LI Jinchao, LU Shiqiang, LAN Xinyi, et al. Research on optimization of distributed smart grid operation considering dynamic characteristics of demand response[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(8):103-111.
- [7] 周文俊,郑 宇,杨 帅,等. 替代SF<sub>6</sub>的环保型绝缘气体研究进展与趋势[J]. 高压电器,2016,52(12):8-14.  
ZHOU Wenjun, ZHENG Yu, YANG Shuai, et al. Research progress and trend of SF<sub>6</sub> alternative with environment friendly insulation gas[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(12):8-14.
- [8] HYRENBACH M, ZACHE S. Alternative insulation gas for medium-voltage switchgear[C]//2016 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe (PCIC Europe). Germany:IEEE,2016:7604648.
- [9] ZHANG Boya, UZELAC N, CAO Yang. Fluoronitrile/CO<sub>2</sub> mixture as an eco-friendly alternative to SF<sub>6</sub> for medium voltage switchgears [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4):1340-1350.
- [10] 王素红,唐煜星,郭文豪,等. 考虑优先级的智能电网业务调度与资源分配方案[J]. 南方电网技术,2024,18(4):59-70.  
WANG Suhong, TANG Yuxing, GUO Wenhao, et al. Service scheduling and resource allocation scheme of smart grid considering priority[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4):59-70.
- [11] 薛 鹏,赵 谔,肖登明. N<sub>2</sub>环境下绝缘子闪络特性的试验研究[J]. 高压电器,2019,55(5):119-124.  
XUE Peng, ZHAO Su, XIAO Dengming. Experimental research on flashover characteristics of insulator with N<sub>2</sub>[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(5):119-124.
- [12] 姚尚衡,傅晨玲,曾金灿,等. 智能电网技术创新对电力行业绿色转型的非线性影响[J]. 智慧电力,2024,52(2):1-7.  
YAO Shangheng, FU Chenling, ZENG Jincan, et al. Nonlinear impact of smart grid technology innovation on green transformation of power industry[J]. Smart Power, 2024, 52(2):1-7.
- [13] 姚 琪,苏 川,杨玉静,等. 低碳背景下智能电网减排双目标调度规划方法[J]. 电网与清洁能源,2024,40(8):134-140.  
YAO Qi, SU Chuan, YANG Yujing, et al. A dual-objective scheduling planning method for smart grid emission reduction under low-carbon background[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(8):134-140.
- [14] 陈 宏,张岭乔,张宇峰,等. 基于混合粒子群优化的智能电网负荷协同调度[J]. 电子设计工程,2024,32(16):111-114.  
CHEN Hong, ZHANG Lingqiao, ZHANG Yufeng, et al. Smart grid load coordinated dispatching based on hybrid particle swarm optimization[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(16):111-114.
- [15] 李红梅,周柏杰,谭东现,等. 用于环保型C-GIS的氮气及干燥空气正极性雷电冲击特性研究[J]. 高压电器,2019,55(4):25-30.  
LI Hongmei, ZHOU Baijie, TAN Dongxian, et al. Study on positive lightning impulse characteristics of nitrogen and dry air for eco-

- friendly C-GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4):25-30.
- [16] 燕鹏飞, 杨知方, 林伟, 等. 计及多维紧急负荷调控目标的智能用电开关设备优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(22): 162-174.  
YAN Pengfei, YANG Zhifang, LIN Wei, et al. Optimal configuration of intelligent power switches considering multi-dimensional emergency load regulation objectives[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(22): 162-174.
- [17] 徐立新, 周柏杰, 谭东现. 干燥空气绝缘环网柜中的复合绝缘工频特性研究[J]. 高压电器, 2019, 55(4):52-59.  
XU Lixin, ZHOU Baijie, TAN Dongxian. Investigations on power frequency characteristics of composite insulation configuration in dry air insulated ring main unit[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4):52-59.
- [18] 史训涛, 孙健, 肖小兵, 等. 计及柔性负荷资源的分布式智能电网安全域建模[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(20):69-82.  
SHI Xuntao, SUN Jian, XIAO Xiaobing, et al. Modeling of distributed smart grid security region considering flexible load resources[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(20):69-82.
- [19] 邓虎. 12 kV 环保型环网柜与中置柜关键部件绝缘特性的研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2016.  
DENG Hu. The key component insulating properties research on environment-friendly RMU and medium voltage metal-clad switchgear[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2016.
- [20] 马玉龙, 宋胜利, 王玲, 等. 提高特高压直流运行可靠性的分接开关优化控制策略[J]. 电力建设, 2024, 45(4):37-45.  
MA Yulong, SONG Shengli, WANG Ling, et al. Optimized control strategy for less action frequency of tap changers in UHVDC[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(4): 37-45.
- [21] 梁志峰, 周皓阳, 杨明, 等. 寒潮天气下考虑风速波动差异性的风电功率概率预测方法[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(6): 106-114.  
LIANG Zhifeng, ZHOU Haoyang, YANG Ming, et al. A probabilistic forecasting method of wind power considering the variability of wind speed fluctuations under cold wave weather conditions[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(6): 106-114.
- [22] 朱斌, 殷晨波, 陶春昊, 等. 基于恒流配气方式的微气体传感器测试系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(12):2681-2687.  
ZHU Bin, YIN Chenbo, TAO Chunhao, et al. Research on the micro gas sensor test system based on constant gas-distribution method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(12):2681-2687.
- [23] 樊超, 司慧, 张天鹏, 等. 家具 VOC 检测气候舱温湿度控制系统设计与应用[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(8):112-116.  
FAN Chao, SI Hui, ZHANG Tianpeng, et al. Design and application of temperature and humidity control system for environmental chamber on the determination of VOC emission from furniture[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(8): 112-116.
- [24] 孙亚芬. 高压电路设备防凝露控制的研究[J]. 自动化技术与应用, 2009, 28(4):100-102.  
SUN Yafen. Dew-proofing method for high-voltage electrical equipment[J]. Techniques of Automation and Applications, 2009, 28(4): 100-102.
- [25] 姜毅, 周成华, 郭俊峰, 等. 智能端子箱防凝露控制器的研制与试验研究[J]. 高压电器, 2010, 46(8):59-62.  
JIANG Yi, ZHOU Chenghua, GUO Junfeng, et al. Development and researching of intelligent controller for preventing condensation in terminal box[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(8):59-62.
- [26] 刘若溪, 白宝军, 郭沁, 等. 开关柜凝露现象机理分析研究[J]. 高压电器, 2018, 54(10):80-84.  
LIU Ruoxi, BAI Baojun, GUO Qin, et al. Analysis on condensation phenomenon mechanism of switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10):80-84.
- [27] 刘云鹏, 郭佳熠, 郭沁, 等. 考虑粗糙程度影响的环网柜二次小室凝露现象研究[J]. 华北电力大学学报, 2017, 44(2):1-6.  
LIU Yunpeng, GUO Jiayi, GUO Qin, et al. Research on condensation in secondary cabinet of ring main unit considering the impact of roughness[J]. Journal of North China Electric Power University, 2017, 44(2):1-6.
- [28] 刘若溪, 郭沁, 耿江海, 等. 环网柜二次小室防凝露措施研究[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(4):154-158.  
LIU Ruoxi, GUO Qin, GENG Jianghai, et al. Research on anti-condensation measures used in ring main unit secondary cabinet[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(4): 154-158.
- [29] 潘岐泽, 杨芳, 杨志. 12 kV 高压开关柜受潮凝露机理及防治关键技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5):160-172.  
PAN Qize, YANG Fang, YANG Zhi. Discussion on mechanism of the dampness and dewing inside 12 kV high-voltage switchgear and its key control techniques[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 160-172.

罗翔(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事智能配电网技术、电力设备智能化与故障诊断技术等研究(通信作者)(E-mail: 529226249@qq.com)。

林一泓(1970—), 男, 本科, 高级技师, 主要从事高压开关设备试验、状态评价、状态检修、故障分析及技术攻关等工作(E-mail: 13860677856@163.com)。