

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.11.002

应用低温非平衡等离子体进行绝缘分析方法

许启友¹, 刘风勇¹, 谭东现²

(1. 施耐德电气(中国)有限公司, 上海 200062; 2. 上海交通大学电气工程学院, 上海 200030)

摘要: 在现有的产品绝缘设计中,一般通过求解电场及电场分析来判定设计是否合理。而现实是在一个产品设计的电场分析结果小于对应许用场强的情况下,还可能发生绝缘放电问题,同时还面临产品很多部位过设计的状态。在这里提出一种基于汤逊气体放电理论结合等离子体进行放电研究的方法,可以更加有效、明确地计算和分析得到气体放电路径,在此基础上,可以更加有针对性的去优化设计产品。

关键词: 汤逊气体放电; 等离子体; 绝缘; 放电

Insulation Analysis Method by Using Non-equilibrium Plasma at Low Temperature

XU Qiyu¹, LIU Fengyong¹, TAN Dongxian²

(1. Schneider Electric (China) Co., Ltd., Shanghai 200062, China; 2. School of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: In the current product insulation design, the design is generally judged to be reasonable by solving the electric field and electric field analysis. The reality is that when the electric field analysis results of a product design are less than the corresponding allowable field strength, insulation discharge may occur, and many parts of the product are under over-design condition. A method based on Thomson gas discharge theory and plasma is proposed. The discharge path can be calculated and analyzed more effectively and clearly. On this basis, the product can be optimized more pertinently.

Key words: Thomson gas discharge; plasma; insulation; discharge

0 引言

文中旨在提出一种新的气体放电研究方法,用于求解在气体中的放电路径,同时通过比较电子、离子的密度来进行产品设计优化,弥补目前绝缘设计中过于单一的研究方法。通过应用汤逊气体放电理论,并引入低温等离子体,结合有限元软件更好地进行产品的设计、优化^[1-8]。

等离子体物理学的复杂性对计算提出了相当高的要求,许多化学物质、反应的物理数据的获取和等离子体高度非线性是其建模的难点。直到计算能力和数值技术的进步,使得等离子体模型解除分析模型有效空间或非常简化化学的限制^[9-12]。

1 汤逊气体放电理论

此放电理论比较系统地提出了气体放电理论,阐述了放电过程。实验表明,虽然此理论有一定的局限性,但其基本过程具有普遍意义,其他放电理论可认为是基于此理论的衍生。文中将基于此放电理论进行研究。

下面对汤逊放电进行简单的介绍。

1) α 过程。代表一个电子沿着电场方向经过 1 cm 长度,平均发生的碰撞电离次数。设每次碰撞产生一个电子和一个正离子,因此 α 过程也可以描述为一个电子在单位长度内新电离出的电子数或正离子数。

2)β过程。正离子碰撞在间隙中引起的空间电离过程。由于离子的电离能力不如电子,此过程不可能具有大的影响,可以忽略不计。

3)γ过程。正离子向阴极移动,依靠其动能和位能,撞击阴极时能引起表面电离,使得阴极释放电子。同时气体空间中带电质点复合释放的光子在阴极表面引起的光电离。这两种方式都将产生更多的起始电子,称之为二次起始电子。

所以,从阴极产生的一个电子消失在阳极之前,由α过程所形成的正离子数。这些正离子部分或全部消失在阴极之前,通过γ过程又在阴极上释放一个电子,则放电能自持或表示为击穿。用方程可表示为

$$\gamma(e^{ad} - 1) = 1 \tag{1}$$

式(1)中:α、γ分别为α过程和γ过程的系数;d为电极间的距离。

2 等离子体关键参数说明

等离子体放电过程包含流体动力学、反应工程、动力学、热传递、质量传递和电磁等现象。且在不同温度、压力和离子化程度的等离子体对应不同的化学反应方程及模型。

文中研究对象为常温下放电,选用低温非平衡等离子体模型进行建模。在建模的过程中需要预先获取相应的参数用于模型计算。

2.1 等离子体化学

等离子体中发生的化学反应过程通常十分复杂,其中氩气等离子体放电是气体放电中最简单的一类,文中将基于此气体放电参数进行介绍。

1)电子碰撞反应。电子碰撞反应数据可以通过 the LXCat team 在网络直接获取,其中包含各科学家、试验团队公布的试验数据,碰撞截面是反映不同电子碰撞反应的电子能(eV)与碰撞截面数据(m²)之间的关系,不同的气体对应的碰撞截面数据是不一样的。氩气中的电子中性散射截面的数据见图1。

逐步离子化(反应5)在维持低压氩气放电过程中占据重要作用,否则放电将不能自持。激发的氩原子(反应2)通过与电子发生超弹性碰撞(反应3)而被消耗,注意弹性碰撞是不消耗电子能的(反应1)。

根据碰撞截面数据,可以通过 Boltzmann 两项近似方法,进行约化电子传递属性(还原电子扩散系数 *D_e*、还原电子迁移率 *mue*)、电子源系数 *R_e*、能量损耗 *S_{en}*、电子碰撞反应速度系数(rate coefficient、townsend coefficient)等参数计算。其中电子能分布函数常用

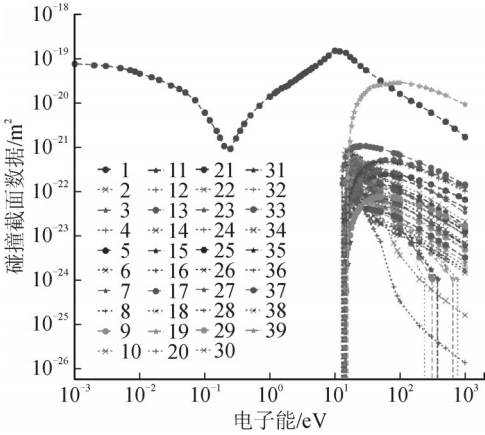


图1 氩气的电子中性散射截面

Fig. 1 Electron neutral scattering cross section of argon

Boltzmann、Maxwelliam、druyvesteyn、广义函数等进行描述,具体参考相应的资料进行选择。

根据碰撞截面数据列举主要体化学反应表达式见表1,从而建立电子碰撞反应的认识。

表1 氩气的主要体化学反应表达式

Table 1 Expression of main body chemical reaction of argon

反应	公式	类型	Δε/eV
1	e+Ar=>e+Ar	弹性	0.00
2	e+Ar=>e+Ars	激发	11.50
3	e+Ars=>e+Ar	超弹性	-11.50
4	e+Ar=>2e+Ar+	离子化	15.80
5	e+Ars=>2e+Ar+	离子化	4.24

2)体化学反应。描述的是不含电子的体化学反应见表2。

表2 不含电子的体化学反应表达式

Table 2 Expression of bulk chemical reaction without electron

反应	公式	类型	Δε/eV
6	Ars+Ars=>e+Ar+Ar+	Penning 电离	—
7	Ars+Ar=>Ar+Ar	熄灭	—

激发的氩原子受到其他中性氩原子的抑制而熄灭(反应7),两个亚稳态的氩原子反应形成中性氩原子、潘宁 (Penning) 离子化和电子(反应6)。

3)表面化学反应。是通过一系列表面化学反应来完成的,这些反应描述了物质是如何在表面上被创造或消耗的见表3。

表3 表面化学反应表达式

Table 3 Expression of surface chemical reaction

反应	公式	黏附系数
1	Ars=>Ar	1
2	Ar+=>Ar	1

当亚稳态的氩原子与壁面接触时,将有一定的

几率(粘附系数)转化为基态氩原子。此系数用于计算表面反应速度系数,对应的粘附系数值可以参考相应的专业文献来取值。

对于阴极表面需要根据金属材料进行二次发射参数设置,其中包含二次发射系数及二次电子平均能(可通过离子化反应损耗能量和有效功函数 W_f 获取,一般为“反应物的电离能—表面功函数的两倍”)。或查询文献获取相应的数值。

表面二次参数在放电是研究中非常重要的参数,为放电从非自持转变为自持的重要条件,与电极材料和表面状态相关。

2.2 约化电子迁移率及扩散系数

约化是一种数值处理手段,用于简化相应的数值在方程中的计算,使得计算过程更加简单、有效,无实际意义。

约化电子迁移率是指将电子的真实传递迁移率数值乘以背景气体的数密度。对不同的气体此数值不同,相关参考文献中可以查询,氩气在常温下一般可取 μ_{eN} 为 $1 \times 10^{25} [1/(m \cdot V \cdot s)]$ 。

同时也可以通过 Boltzmann 二项近似计算和 the LXCat team 网站查询相应的约化电子迁移率数据,见图 2^[13]。

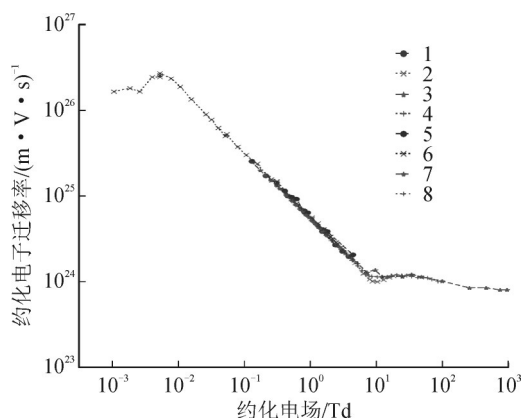


图2 氩气的约化电子迁移率

Fig. 2 Reduced electron mobility in argon

对于约化扩散系数可以通过爱因斯坦关系式计算得到

$$\frac{D_e}{\mu_e} = \frac{kT}{e} \quad (2)$$

式(2)中: D_e 、 μ_e 分别为电子扩散率和电子迁移率的系数; T 为对应粒子的温度,而不是环境温度; k 为 Boltzmann's constant; e 为单位电荷量。

当然也可以通过 Boltzmann 二项近似计算和 the LXCat team 直接查询相应的约化电子扩散系数

数据见图 3^[13]。

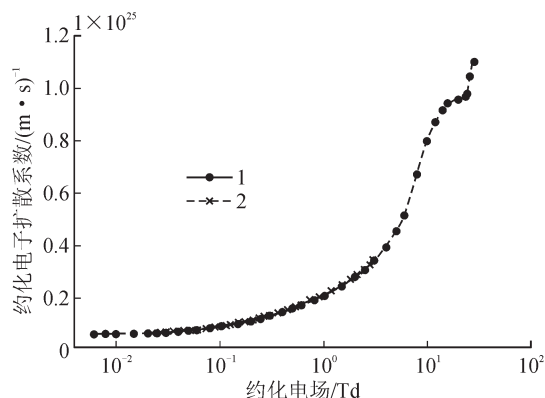


图3 氩气的约化电子扩散系数

Fig. 3 Reduced electron diffusion coefficient of argon

2.3 平均电子能函数

反应了约化电场与平均电子能的关系。一般通过 Boltzmann 二项近似及设定的电子能分布函数进行计算,但 Boltzmann 方程是一个极其复杂的积分微分方程,对其求解较为困难,常直接通过 the LXCat team 查询相应的约化电场对应的平均电子能数据见图 4^[13]。

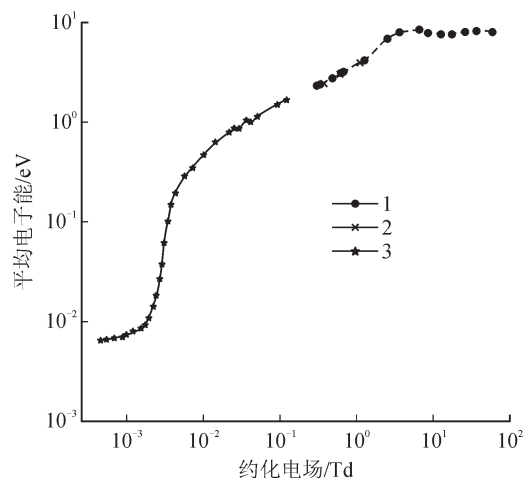


图4 氩气的平均电子能

Fig. 4 Mean electron energy of argon

此函数的调用需要在平均电子能选项中选择局部场近似,使得在等离子体计算中直接耦合约化电场与平均电子能,而避免独立电子能结合电子能分布进行平均电子能计算,极大的简化了计算过程,缩短计算时间。

3 等离子体物理场及其传输方程

等离子体模型中,使用两类方法来模拟电子、离子和中性物质的传输:动力学和流体。在动力学中,模型中的每一个物质被视为具有不同速度的粒子的集合;在流体中,使用密度和温度等宏观连续

物理量来描述^[14]。

在物质的流体描述中,必须要指定能量分布函数。对于离子和中性物质重物质来说,这通常不是一个重要的考虑因素,但对于电子来说却很重要。EEDF的选择对等离子体特性有很大的影响,通常选择 Maxwellian 为电子能分布函数。

动力学和流体的方法在低温等离子体中可以通过组合的方式进行建模,离子和中性物质重物质不考虑动力学而使用流体,相应的电子的模型通过动力学结合流体进行共同建模。这样建模可以在有效的减少计算量的同时保证计算的精度。为简化计算,也可以都采用流体的方法进行建模。

等离子体计算是一个复杂的多场耦合计算,在计算中需要应用的物理场包括静电场、电子漂移扩散、重物质传递3个物理场耦合计算。下面将对各物理场进行介绍。

3.1 电子漂移扩散方程

应用电子传输理论进行电子密度和电子能密度的瞬态计算,同时可以处理二次电子发射、热电子发射、壁面损耗等相关的边界条件计算。

在忽略电子对流的影响下,采用电子连续控制方程和平均电子能量输运方程来对电子的运动进行描述^[15]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla \cdot \Gamma_e = R_e \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla \cdot \Gamma_e + E \cdot \Gamma_e = S_{en} \quad (4)$$

$$\Gamma_e = n_e u_e = -(\mu_e \cdot E) n_e - \nabla(D_e n_e) \quad (5)$$

$$\Gamma_e = n_e u_e = -(\mu_e \cdot E) n_e - \nabla(D_e n_e) \quad (6)$$

式(3)-(6)中: Γ_e 为电子通量,一般仅定义为电场/温度、浓度引起的通量,运用已知的电子迁移率、扩散系数结合耦合的电场载荷进行计算; n_e 为气体中的电子数密度; n_e 为气体中的电子能量密度; Γ_e 为气体中的电子平均能量通量矢量; μ_e 为气体中的电子迁移率; E 为气体中的电场强度矢量; D_e 为气体中的电子扩散系数; μ_e 为气体中的电子能量迁移率; D_e 为气体中的电子能量扩散系数; R_e 为气体中的电子源系数; S_{en} 由3类碰撞反应(激发、附件和电离)组成的气体中电子能量源系数。

以上方程也可以对通量计算进行扩展,如引入流场、磁场等其他物理场进行耦合计算。

在计算过程中要特别注意电子边界条件的设置,如通量、电子密度、电子能密度等边界条件在不同的模型边界上的选择,边界的不同直接影响求解的结果。

3.2 重物质传递输运方程

应用 Maxwell-Stefan 方程进行各重物质的质量

分数计算,用于描述除电子以外的重物质的传递(中性粒子、离子、激发态物质等)。同时包含重物质本身及化学反应的综合描述,为质量平衡的求解方程。

多组分输运方程组对重物质传递描述的方程为^[15]:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t}(\omega_k) + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \omega_k = \nabla \cdot \mathbf{J}_k + R_k \quad (7)$$

$$\mathbf{J}_k = \rho \omega_k \mathbf{V}_k \quad (8)$$

$$\mathbf{V}_k = D_{k,m} \frac{\nabla \omega_k}{\omega_k} + D_{k,m} \frac{\nabla M_n}{M_n} + \frac{D_k^T}{\rho \omega_k} \frac{\nabla T}{T} - z_k \mu_{k,m} E \quad (9)$$

式(7)-(9)中: $\mathbf{u}$ 为耦合的流场流速,在一般放电研究中不考虑流场的影响;第 k 个物质的扩散速度 $\mathbf{V}_k$ 一般定义为电场/温度、浓度引起,计算中应用到的相应参数为 $\mu_{k,m}$ 、 $D_{k,m}$,分别为 k 物质混合物平均迁移率和平均扩散系数,可以通过技术文献去获取,一般离子的迁移率的数量级为 $1 \times 10^{-4} [\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})]$; ρ 为总的气体密度; ω_k 为等离子体化学反应中第 k 个粒子的质量分数; $\mathbf{J}_k$ 为气体中的扩散通量向量; R_k 为等离子体化学反应中第 k 个粒子的变化速率或称为源系数。

需要特别注意表面反应的计算和相应参数的获取。二次电子发射系数是放电研究中重要的参数,是不自持放电转变到自持放电的关键。表面反应的粘附系数的值影响着等离子体化学反应系统内重物质的平衡,关乎是否能完成求解的重要参数。相关的数值可以通过技术文献去获取。

3.3 静电场

静电场应用高斯定律进行求解为:

$$\nabla \cdot (\epsilon E) = \rho_q \quad (10)$$

$$E = -\nabla U \quad (11)$$

式(10)、(11)中, ρ_q 为空间净电荷密度。

通过含有等离子体模块的有限元软件可以进行低温等离子体放电分析,将直接调用上述的3个物理场,并在多物理场中自动相互耦合,而不用过多的人为干预,极大的简化了仿真的流程。

该模块可以用于分析一维、二维、三维等所有空间维度问题,尽管在等离子体仿真中很少进行三维模型分析。

等离子体系统由于其自身的特点,具有复杂、高度非线性特点,即使电磁场或化学物质发生微小变化都会引起等离子体放电结果发生很大的变化。

低温等离子体放电过程包含流体动力学、反应工程、动力学、热传递、质量传递和电磁等现象。此模块是用于对低温非平衡等离子体源和系统进行分析模拟的专业工具,借助它,工程师或科学家可以探究物理放电机理及放电路径或用于评估、优

化现有或未来设计的产品性能。

4 固封极柱仿真方法

此节将通过拉杆在直流电压 126 000 V 下沿面放电的实际案例,通过仿真求解电子密度云图和电流密度云图,了解等离子体放电仿真的方法和过程。

4.1 建模及参数设定

根据模型,可采用2D旋转模型用于仿真,相对于3D模型能大量地减少计算量,最后的仿真几何模型见图5,在图5中简单的标识了模型材料与载荷的状态。

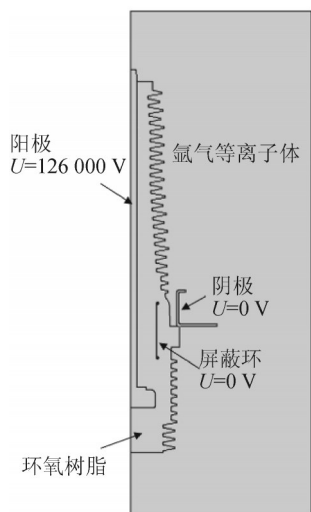


图5 几何模型及状态

Fig. 5 Geometric model and status

为了确保载荷的连续性,载荷的加载过程使用 $\tanh(1 \times 10^5 t)$ 函数见图6,保证计算初始值 0 V 与载荷 126 000 V 在空间和时间上的连续。

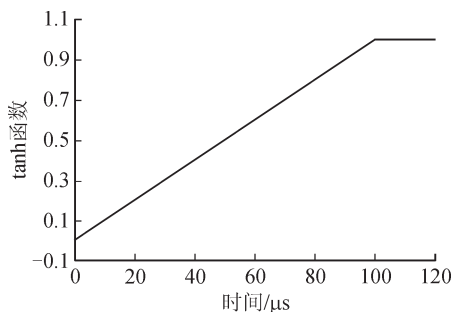


图6 载荷

Fig. 6 Load

同时,为了简化等离子体的计算量,对电子密度和能量可直接调用上述约化电子迁移率、扩散系数与平均电子能的函数数据,避免内部复杂的 Boltzmann 二项近似计算。

并且可在平均电子能选项中选择局部场近似,这样就可以直接调用约化电场与平均电子能的函数数据。通过这些简化,可以在减少计算量的同时极大地提高模型的收敛。

4.2 模型设置

由于该模型的主要目的是研究现有电场下模型的放电状态,即带电粒子密度随时间的分布。在这个思路下,可以简化为使用一个单一的电离反应来描述在氩气里带电物质的获取(表4)。

表4 氩气简化的单一电离反应

Table 4 Simplified single ionization reaction of argon

反应	公式	类型	$\Delta\epsilon/\text{eV}$
4	$\text{e} + \text{Ar} \Rightarrow 2\text{e} + \text{Ar}^+$	离子化	15.8

反应方程使用 Townsend coefficient 的稳定高于 rate coefficient,易于模型收敛,可以优先通过 Boltzmann 二项近似计算得到 Townsend coefficient 见图7,并在等离子体计算中直接调用。

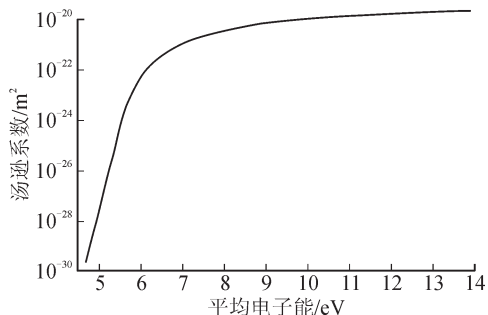


图7 反应的汤逊系数

Fig. 7 Townsend coefficient of reaction

重物质传递边界条件可以通过指定电极表面化学反应方程,并在阴极指定关键的二次发射参数见表5,此参数直接影响放电是否自持和模型是否易于收敛。

表5 电极表面化学反应及参数

Table 5 Electrode surface chemical reaction and parameters

反应	公式	黏附系数	二次发射系数	电子能/eV
阳极	$\text{Ar}^+ \Rightarrow \text{Ar}$	1	0.00	0.00
阴极	$\text{Ar}^+ \Rightarrow \text{Ar}$	1	0.25	5.80

电子漂移扩散边界条件可以通过壁边界来指定。需要注意的是在环氧面的边界上,电子的反射系数一般指定为1。

初始条件设置主要包括初始电子数密度和初始平均电子能两方面,由于此模型选用了局部场近似,所以只需要设置初始电子数密度为 $1 \times 10^{13} \text{ 1/m}^3$ 即可。

4.3 网格划分

由于等离子体区域需要在空间上解析粒子数密度,所以相对与其他物理场,等离子体需要更加密的网格见图8。

同时,等离子体与容器壁、电极等固体表面接触时,为维持正、负粒子数密度平衡,存在鞘层。鞘层为非中性区,存在强电场,电势呈下降趋势,电子

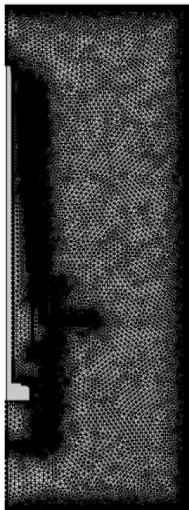


图 8 网格

Fig. 8 Mesh

能量变化也比较激烈,不具备等离子体性质。需要使用更为密的边界层网格(图9)进行此区域的划分。

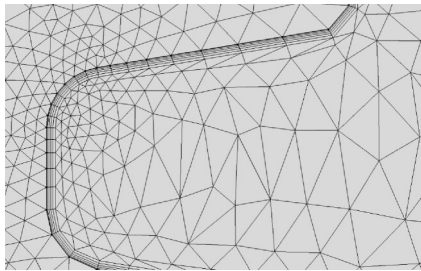


图 9 边界层网格

Fig. 9 Boundary layers mesh

4.4 仿真结果分析

在结果解读中,关注的是各粒子数密度稳定后对应的云图解析。

电子密度云图为电子密度分布图,从图中可以看到,放电位置或路径,即潜在失效部位。为产品提供优化的思路 and 方向。此模型对应的电子密度云图见图10。

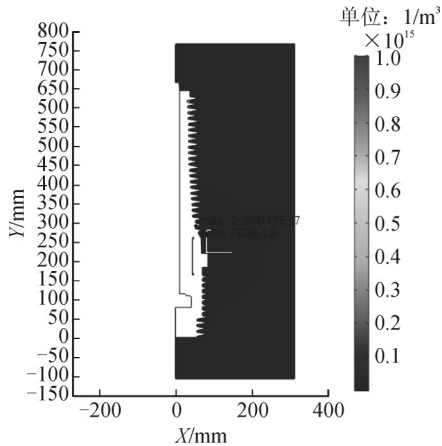


图 10 电子密度云图

Fig. 10 Plot of electron density

阴极附近局部位放大后(图11),可以明显看到电荷累积的部位,即放电区域。同时可以定量的显示对应的最大电子数密度为 $2.3605 \times 10^{17}/\text{m}^3$ 。在优化设计时用此参数进行对比,用于判断设计的优劣。

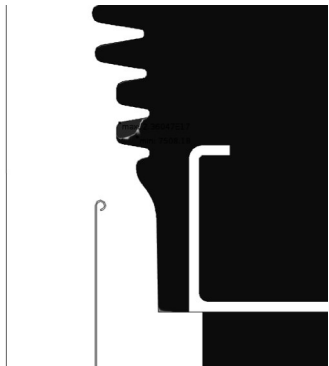


图 11 阴极附近电子密度云图

Fig. 11 Plot of electron density around cathode

电流密度云图为电流密度分布图,从图中可以确定放电电流流经的路径,在优化时可以参考此路径进行产品设计的优化。此模型的电流密度云图见图12,图12中局部放大阴极部位附近,以便观察。

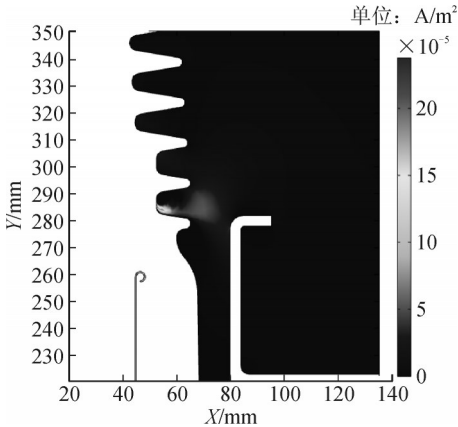


图 12 阴极附近电流密度云图

Fig. 12 Plot of current density around cathode

5 设计优化

该节将根据上述失效的测试模型和仿真结果,根据结果的分析,对设计进行优化。并将优化后的模型进行仿真与失效模型仿真结果进行对比,确认优化有效后,重新试样并实际试验测试,确认等离子体放电仿真方法在产品上的实用能力。基于此,验证等离子体放电仿真方法,在设计过程中可以进行产品的优化,减少设计时间,节约设计成本。

5.1 产品模型优化

在失效的模型中,根据电子密度云图,阴极附近的伞裙位置有大量的电荷累积。对此位置进行平滑处理后,以便减少电荷的累积而造成击穿。优化后的设计见图13。

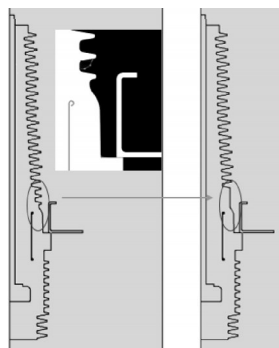


图 13 优化设计图

Fig. 13 Optimized design

5.2 新设计仿真结果

电子密度云图的阴极位置局部放大图见图14。从图14中可以考到,在此部位已无电荷累积,同时最大电子数密度降低为 $1.648\ 8 \times 10^{16}/\text{m}^3$ 。从结果显示,比较优化前的模型,优化后的模型放电的风险极大的降低。



图 14 优化后阴极附近电子密度云图

Fig. 14 Plot of electron density around cathode after optimized

电流密度云图见图15,需要注意的是其中的量级为 10^{-6} ,从图15中可以看到电流密度降低,同时电流密度的分布较之前模型也有较大的离散,而没有集中在一起,表示放电的风险有一定的降低。

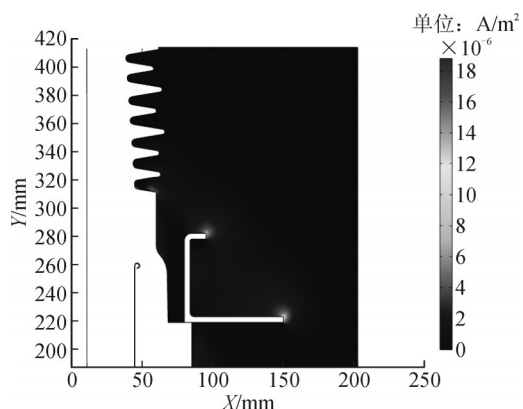


图 15 优化后阴极附近电流密度云图

Fig. 15 Plot of current density around cathode after optimized

5.3 试验验证

根据优化后的仿真结果,新设计的性能较之前有较大的提升,试样后实际测试结果对比之前设计的实验结果见图16。

原设计		
起弧	熄灭	击穿
28	20	118
新设计		
起弧	熄灭	击穿
36	36	125

图 16 优化前后实测结果对比

Fig. 16 Comparison of measured results before and after optimization

新设计方案较之前的设计有较大的提升,达到设计要求。从而通过等离子体放电仿真方法可以对产品设计进行优化,指明优化的方向,提高产品的设计速度。

6 结论

通过基于汤逊气体放电理论出发,引入低温非平衡等离子体理论及相应的有限元模块,可以准确地模拟出电荷累积部位和放电路径。有利于设计人员快速地寻找出产品薄弱点,更有针对性的去提高产品性能。

根据云图分析,可以得到放电特性的相关因素。

1)电荷累积。从图中可以得到在阴极附近伞裙位置,电子密度最大,即电荷累积在此处。表示如果出现击穿放电,对应的放电位置将出现于此。与实测放电位置结果完全相符。

2)放电路径。电流密度云图中的放电路径与实测结果的放电路径完全吻合。表示通过此方法进行相关放电路径研究具有一定的参考意义,可以为相关设计提供准确依据。

在得到相应的放电特性后,可以更有针对性的提高相应薄弱点/路径上的放电电压。根据相关文献有以下一些方法:消除电荷累积、在固体电介质表面等位面方向设置突出的棱缘为屏障、增加爬距、改变电压分布、改善电场分布、消除缝隙等等,用于提高沿面闪络电压。在此不再一一赘述。

此方法为一种新型研究绝缘的方法,由于时间有限,目前也只进行了有效的模型的实际应用。此方法可能也存在一定的局限性有待验证,但可以确定的是此方法为一种非常有意义的放电研究方向。

参考文献:

- [1] 严璋,朱德恒. 高压电绝缘技术[M]. 北京:中国电力出版社,2015.

- YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage insulation technology[M]. Beijing: China Power Press, 2015.
- [2] 施 荣, 霍 锋, 万小东, 等. 750 kV 复合横担外绝缘特性试验研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(10): 70-76.
- SHI Rong, HUO Feng, WAN Xiaodong, et al. Experimental research on external insulation of composite cross-arm for 750 kV transmission line[J]. Smart Power, 2019, 47(10): 70-76.
- [3] 袁 超, 薛永端, 梅 睿, 等. 不同接地方式下配电网绝缘监察的灵敏性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 130-137.
- YUAN Chao, XUE Yongduan, MEI Rui, et al. Sensitivity analysis of insulation monitoring of distribution network under different grounding modes[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 130-137.
- [4] 俞 胜, 梁 晖, 马恒瑞. 考虑环境因素影响的配电线路雷电绝缘防护失效概率计算[J]. 智慧电力, 2020, 48(5): 106-110.
- YU Sheng, LIANG Hui, MA Hengrui. Lightning insulation failure probability calculation of distribution line considering environmental factors[J]. Smart Power, 2020, 48(5): 106-110.
- [5] 余 欣, 张 涛, 彭向阳, 等. 110 kV 受损电缆绝缘理化性能测试与热历史分析[J]. 广东电力, 2017, 30(12): 119-123.
- YU Xin, ZHANG Tao, PENG Xiangyang, et al. Physical and chemical property test on insulation of 110 kV damaged cable and analysis on its thermal history[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(12): 119-123.
- [6] 任敬国, 辜 超, 师 伟, 等. 1 100 kV GIS 设备主回路绝缘试验电气参量估算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 103-109.
- REN Jingguo, GU Chao, SHI Wei, et al. Research on evaluation method of electric parameters of 1 100 kV GIS main circuit insulation test[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 103-109.
- [7] 王传川, 白世军, 李 毅, 等. 低温环境下电子式电流互感器激光供电情况的分析与研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 135-142.
- WANG Chuanchuan, BAI Shijun, LI Yi, et al. Analysis and research on laser power supply condition of electronic current transformer under low temperature environment[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 135-142.
- [8] 商 豪, 卢 威, 王学宗. 空气间隙绝缘试验关键参量的统计研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(11): 110-114.
- SHANG Hao, LU Wei, WANG Xuezhong. Statistical method of crucial parameters for air gap insulation test[J]. Smart Power, 2019, 47(11): 110-114.
- [9] 王宏旭, 李 源, 林海泉, 等. 低温下硅橡胶直流击穿特性变化规律研究[J]. 高压电器, 2019, 55(3): 103-108.
- WANG Hongxu, LI Yuan, LIN Haiquan, et al. Study on change regularity of DC breakdown characteristics of silicone rubber at low temperature[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3): 103-108.
- [10] 李金龙, 李修乾, 张 政, 等. 低气压SDBD等离子体体积力结构参数影响[J]. 高压电器, 2019, 55(3): 71-77.
- LI Jinlong, LI Xiuqian, ZHANG Zheng, et al. Influence of geometrical parameter of SDBD on plasma body force in low pressure air[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3): 71-77.
- [11] 孔 飞, 王思韬, 马翊洋, 等. 等离子体改性对环氧树脂材料表面电荷动态特性的影响[J]. 广东电力, 2018, 31(8): 161-166.
- KONG Fei, WANG Sitao, MA Yiyang, et al. Influence of plasma surface modification on dynamic characteristics of surface charge of epoxy resin materials[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(8): 161-166.
- [12] 邢照亮, 李 源, 彭 波, 等. 低温下氢氧化铝含量对硅橡胶沿闪特性的影响[J]. 高压电器, 2019, 55(3): 122-126.
- XING Zhaoliang, LI Yuan, PENG Bo, et al. Effect of the content of aluminum hydroxide on the flashover characteristics of silicone rubber under low temperature[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3): 122-126.
- [13] HAGELAAR G J M, PITCHFORD L C. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2005(14): 722-733.
- [14] PAHL A. Thermodynamic equilibrium of plasmas[DB/OL]. 2020-05-11. www.comsol.com/blogs © COMSOL. 1998—2016.
- [15] LITTMARCK S, SAEIDI F. Plasma Module user's guide [DB/OL]. 2020-05-11. www.comsol.com © COMSOL. 1998—2016.
- 许启友(1983—), 男, 工程师, 主要研究方向为高电压绝缘和测试技术、高压开关设计(E-mail: 383099229@qq.com)。
- 刘凤勇(1974—), 男, 工程师, 从事中高压交直流开关设备设计及运行可靠性关键技术的研究。
- 谭东现(1976—), 男, 工学博士, 高级工程师, 主要研究领域为电气设备绝缘设计、绝缘故障分析与诊断、屏蔽型固体绝缘产品设计与长期可靠性试验研究、绝缘材料可靠性试验研究等。