基于均匀电场的消雷器应用效果分析研究

汤季宇，黄亚峰

（东北电力大学电气工程学院，吉林 吉林 132012）

摘要：在自然界中，雷击是一种较为常见的灾害，每年都会造成很多的人员伤亡和设备损坏。而传统避雷针存在较多问题，如保护范围小和存在感应过电压等，现场尝试采用基于均匀电场的新型消雷器进行雷电防护，但是该装置的防护效果一直存在争议。因此利用有限元软件 COMSOL 对该装置的防护效果进行分析，建立消雷器电场仿真模型，分析其在雷云天气下的周围电场分布，并将其放电现象简化成针板电晕放电，再加入横向风的影响，最终得到不同风速下中和电荷的传递效率。通过这些研究对该装置能否有效防雷展开分析，经仿真研究考虑到该装置的使用效果与自然环境关系密切，同时有效的使用条件较为苛刻，目前须谨慎采用消雷器在现场使用。

关键词：消雷器；均匀电场；有限元法；横向风

Lightning eliminator based on uniform electric field application effect analysis

TANG Jiyu, HUANG Yafeng

(College of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: Lightning strike is a common disaster in nature, which causes many casualties and equipment damage every year. However, traditional lightning rods have many problems, such as small protection range and over-voltage induction. In the field, new lightning eliminators based on uniform electric field are tried to protect lightning, but the protection effect of this device has been controversial. Therefore, the protective effect of the device is analyzed by using the finite element software COMSOL, and the simulation model of lightning eliminator electric field is established to analyze the distribution of the electric field around the device in thundercloud weather. The discharge phenomenon is simplified as pin-plate corona discharge, and the effect of cross wind is added to get the neutralization and charge transfer efficiency at different wind speeds. Through these studies, whether the lightning protection of the device is effective or not is analyzed. The simulation study considers that the effect of the device is closely related to the natural environment, and the conditions for effective use are rather harsh. At present, the lightning eliminator should be used cautiously in the field.

Key words: stealth lightning protection; uniform electric field; finite element method; cross wind

0 引言

随着现代工业的发展和社会需求的不断提高，传统的防雷手段考虑到避雷针的保护范围问题及感应过电压对电子元件的影响，已经不能满足重要设备的防雷要求，比如有较高供电可靠性要求的发电、输电和配电等电力电子设备[1]。如今，虽然传统的防雷技术不断提高，但是雷击引发的事故数量仍然很多，促使专家学者不断研究新的防雷手段。

因此，有学者提出了隐身防雷的概念，该技术的防雷机理是当雷暴云来时，雷云电场达到空气击穿阈值，装置尖端产生电晕离子，不断向上扩散的离子与雷云电荷相互作用，使装置周围电场变得均匀，从而免遭雷击[2]。文献[3-4]用安装在高层建筑物上的铁塔消雷器来调整其针尖形状，降低针尖的畸变电场，抑制上行闪电；文献[5]通过模拟实验求得伞状导体消雷器与避雷针统一针数为35根左右时具有良好的接地功能，此时的引雷与消雷效果均接近于最佳；文献[6]以金顶庙消雷模拟实验为依据，提出了只有在特殊情况下消雷器才能消除雷击的看法；文献[7-8]用高电压技术中的成熟理论分析了隐身防雷技术的消雷效果并定性分析了影响其防雷的诸多因素，提出了进一步完善该装置的意见。

结合以上研究现状，发现关于消雷器的讨论在2000年左右较为集中，但是受限于当时的现场模拟实验的条件和计算机发展的限制，其讨论的依据主要是数学方法与现场观测[9-10]，缺少系统的仿真研究，也尚未考虑雷击环境下可能存在的横向风等环境影响因素。

针对上述问题，本文利用COMSOL有限元软件，建立了普通避雷针和消雷器装置的有限元模型，分析比较了周围的电场分布与大小，并以该装置释放的电晕电流大小作为依据，研究了无风环境下的防雷效果，并进一步分析了不同风速下该装置的防护效果，对该装置能否应用于现场的雷电防护展开分析研究。本文提出的方法为这场技术争议提供了一定的理论素材，同时加深了人们对该技术的认识，为之后消雷器的进一步发展提供依据。

1 消雷器周围电场研究

1.1 分析原理

采用 COMSOL软件中的AC/DC模块对雷云天气下的消雷器装置进行建模[11]，分析周围电场的分布与大小，它的优势在于多物理场耦合，通过求解偏微分方程实现物理现象，数值模拟结果更加形象，直观地了解新装置在防雷时的基本工作原理[12]，基本流程图如图1所示。

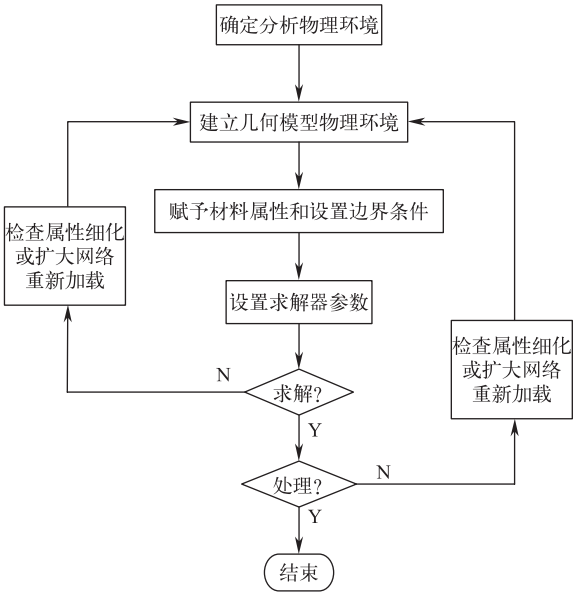

图 1 COMSOL 仿真分析流程图

Fig. 1 Flowchart of COMSOL simulation analysis

由于本文中模型的电场具有空间对称性，因此可用二维问题来处理该模型的电场，用电磁学基础方程组描述工频电场的相关问题。麦克斯韦方程组的微分形式为

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \tag{1}$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{2}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{3}$$

$$\nabla \cdot D = \rho \tag{4}$$

式中，H为辅助磁场；J为总电流密度；D为电位移；E为电场；B为磁场；ρ为自由电荷密度。

电场的本构关系采用相对介电常数，对于自由空间[13]

$$D = \varepsilon_0 E \tag{5}$$

式中，ε_0为介电常数，$\varepsilon_0 = 1/36\pi \times 10^{-9}$F/m。

为保证计算准确度，需使计算区域足够大且对区域部分加密。

在本研究中，首先在COMSOL中建立雷云与消雷器的仿真模型，设置对应的材料属性，然后添加边界条件和激励条件进行有限元网格的剖分，最后选择求解器求解并处理最终结果。

1.2 雷云模型

雷云空间方面选取Amoruso和Lattarulo提出的分层布置的带电圆盘模型来表示一般的雷云结构，包含N区和P区[14]。其中雷云空间的上层部分称为正极性雷云P区，雷云空间的下层部分是N区。占主导地位的正电荷与负电荷雷云分别用符号P和N表示。于是在COMSOL中从下至上依次建立一个圆柱体模拟负极性雷云，此圆柱体高2.5 km，半径1 km；设置终端类型电荷为－10 C；模拟主正极性雷云的圆柱体和负极性一样，设置终端类型电荷为15 C 。大地用高100 m、半径2 km的圆柱体模拟，大地的电位设置为0 V，模拟雷云的圆柱体与大地之间间隔设置为1 500 m。

通过网格划分计算，得到数据结果如图2所示。图2中显示越接近雷云，其电场强度越大。场强数值在10^8 V/m级别，符合长期雷云大气电场的监测情况[15]。

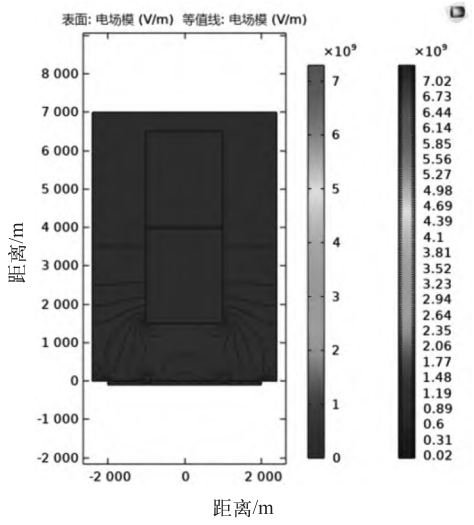

图 2 雷云模型下静电场示意图

Fig. 2 Diagram of electrostatic field under thundercloud model

1.3 消雷器装置模型

新型消雷器装置是一个多针装置，由数根金属针和底座构成，因此金属针的数量与长度对防雷的效果产生影响[16]。该装置的防雷机理是通过尖端的电晕放电，把周围极不均匀电场变为相对均匀电场，改变先导放电的轨迹方向，使得被保护的设备不受雷击或少受雷击，避免了带电设备使用传统避雷针时，雷电流通过接地线产生感应电压而损坏电子器件或破坏电器设备的绝缘，从而达到隐身防雷的目的[17]。

由于本文研究的隐身防雷装置为轴对称结构，为简化模型，采用二维计算模型简化计算，隐身防雷装置的二维示意图如图3所示，按照装置的材料属性定义仿真的模型参数，在COMSOL自带的材料库里对模型的材料参数进行选择。对模型不同部位用自由四面体和三角形进行网格剖分，优化特殊的部位，最终得到消雷器的网格和几何模型。

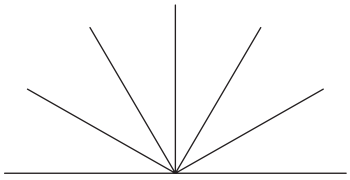

图 3 消雷器装置二维示意图

Fig. 3 Two-dimensional diagram of a lightning eliminator device

1.4 电场仿真及结果分析

根据上述方法对整体模型进行建模和计算，计算域处于空气ε_r=1中，大地设置为土壤，相对介电常数为16[18]，其余位置初始状态净电荷为0，将空气边界上的区域设置为接地状态，对所建模型使用常规校准方式剖分离散整个计算空间，通过网格划分得到结果如图4所示。

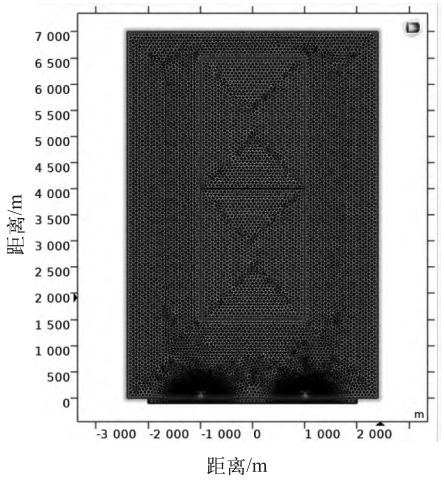

图 4 带电云层与消雷器装置网格剖分示意图

Fig. 4 Diagram of grid partitioning between charged clouds and lightning eliminators

经过 COMSOL软件进行稳态计算后，得出分别安装单个避雷针和隐身防雷装置时在雷云天气下周围电场分布，如图5和图6所示。

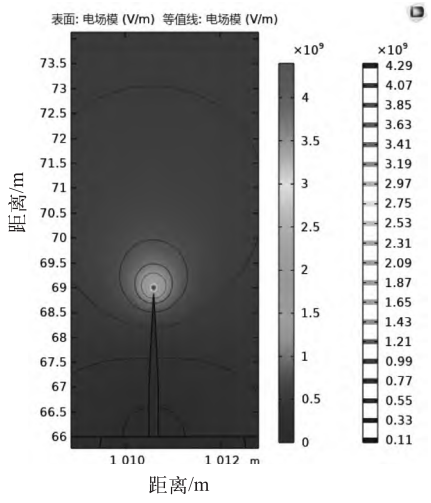

图 5　雷云模型下单个避雷针周围电场分布图

Fig. 5 Electric field distribution around a single lightning rod in thundercloud model

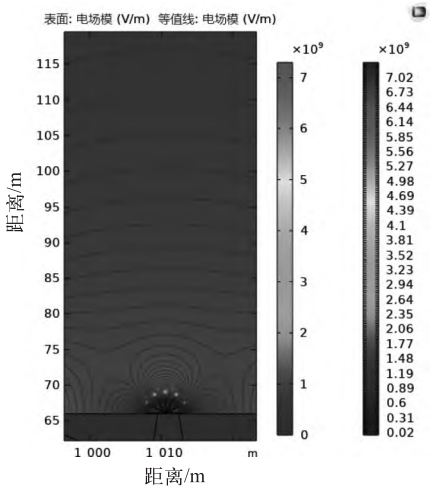

图 6　雷云模型下消雷器装置周围电场分布图

Fig. 6 Electric field distribution around lightning eliminator device under thundercloud model

由上述数值模拟结果可知，单个避雷针在雷云上方时，由于静电感应效应，避雷针周围电场发生畸变，并在避雷针顶端处形成集中的局部电场，此时避雷针针尖处附近大气电场场强最大，在远离避雷针的地方，电场强度逐渐减小且趋于稳定，导致雷云大量电荷引向避雷针，雷电流在通过接地引下线和接地装置时，容易产生感应电压或损坏被保护的物体。

图6消雷器装置周围的空间电场分布相比于单个避雷针时更加均匀，提高了雷云对装置的击穿电压，减少了应力集中，有利于抑制雷击的发生，也使雷击概率大大降低。另外，改变了金属针的长度，再次进行仿真分析，发现金属针长度对其周围电场影响很小。目前，关于该装置的避雷针长度取值并没有明确规定，在已经运行的线路中出现过加装3 m、5 m等不同长度的隐身防雷装置的情况[19]。一般来说，为使该装置能有效防雷，其伸出被保护建筑的长度应当在2 m以上，一般在2～5 m之间进行选取，最终考虑成本因素和保护效果等，本文选取金属针长度为3 m。通过和传统避雷针电场的比较，理论上该装置能够实现隐身防雷效果条件。

2　隐身防雷效果分析研究

2.1　负极性雷云体电荷密度计算分析

为了研究消雷器装置的防雷效果，需要计算针尖产生的电晕电流大小，本文采用MATLAB仿真计算雷云的部分参数。结构如图7所示。其中雷云空间分别用单层分布的带电圆盘表示，分别表示正电荷P区与负电荷N区，地面高度h_B的电荷区域是一个双层分布的偶极带电圆盘。P区和N区的体电荷密度分别用参数r_N、r_P表示，N区和P区的高度用h_N、h_P表示，偶极带电圆盘的高度用h_B表示，带电圆盘的半径用a表示。其轴向电场解析式为[20]

$$E(z)=\frac{\rho_N}{\varepsilon}\left(\frac{r_a+r_b}{2}-h_N\right)+\frac{\rho_P}{\varepsilon}\left(\frac{r_c+r_d}{2}-h_P\right)+\frac{|\rho_N|+|\rho_P|}{\varepsilon}\left(\frac{r_e+r_f}{2}-h_B\right) \tag{6}$$

$$r_a=\sqrt{a^2+(h_N-z)^2},r_b=\sqrt{a^2+(h_N+z)^2} \tag{7}$$

$$r_c=\sqrt{a^2+(h_P-z)^2},r_d=\sqrt{a^2+(h_P+z)^2} \tag{8}$$

$$r_e=\sqrt{a^2+(h_B-z)^2}\ \ r_f=\sqrt{a^2+(h_B+z)^2} \tag{9}$$

式中，ρ_P=1.9 nC/m^3，正电荷区设置电荷为30 C；ρ_N=－1.2 nC/m^3，负电荷区设置电荷为20 C；a=1 km；正极性雷云h_P高度为10 km；负极区云层

h_N离地高度为1～2 km；偶极子区h_B距地高度为4 km。

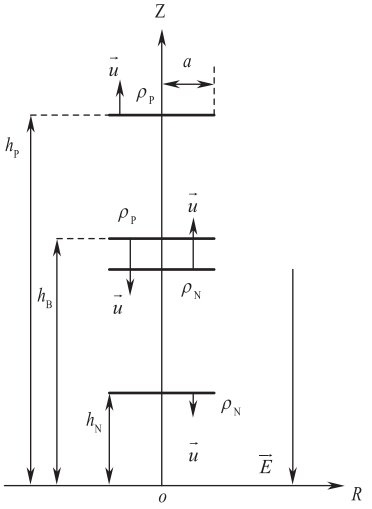

图 7　雷云空间三极带电圆盘静电模型示意图

Fig. 7 Diagram of electrostatic model of thundercloud space tripole charged disc

雷云底部高度对隐身防雷装置的防雷能力影响很大，雷云距地面高度h_N按1.5 km计算，装置要有效防雷，经中和后的负极性雷云内部场强不能大于2.5×10^5 V/m[21]，依据电场解析式，用MATLAB计算出当对地高度z在1.50～4.00 km之间变化时，此时负极性雷云体电荷密度ρ_N曲线如图8所示。

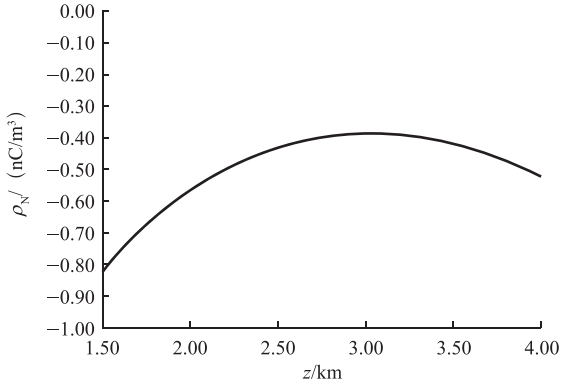

图 8　不同高度下负极性雷云体电荷密度

Fig. 8 Charge density of negative polar thundercloud at different heights

2.2　针尖单次电晕放电电量仿真计算

为了进一步得到金属针在雷云电场下的单次电晕放电量，将雷云电场下的电晕放电现象简化为针板间的电晕放电，基于前人对电晕放电的研究，采用COMSOL软件中的流体动力学模型，建立针板仿真几何模型，采用二维轴对称的方式对针尖空气电晕放电过程进行仿真研究[22]。

由此设计出针-板空气放电的计算区域如图9所示。由于电晕放电属于低温放电，设置气体温度近似为环境温度，取300 K，气体压强设置为0.1 MPa[23]。曲率半径为1 mm的针电极接地，上极板模拟空气边界，上面存在受雷云电场影响的电动势，针尖与上极板空气边界相距3 mm。要使电晕放电的脉冲电流更加平稳，应合理设置初始粒子浓度，本文在针尖电极处设置一个负离子和电子的浓度比为10∶1的粒子团，粒子团体积为$10^{13}\mathrm{m}^{-3}$，粒子按照高斯递减分布[24]，表达式为

$$N_P = N_e + N_n = N_{max}\exp(-\frac{(r-r_0)^2}{2s_0^2}-\frac{(z-z_0)^2}{2s_0^2}) \quad (10)$$

式中，N_{max}为粒子最大浓度，取$1\times10^{13}\mathrm{m}^{-3}$；$r_0$、$z_0$分别为针尖的横纵坐标；$s_0$为高斯分布域，取$s_0$=100 μm。

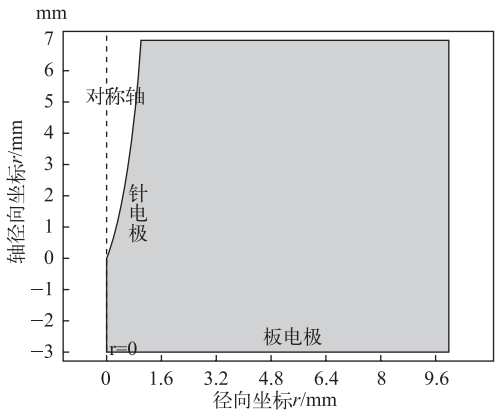

图 9　电晕放电的几何模型

Fig. 9 Geometric model of corona discharge

在粒子追踪接口中添加累加器选项[25]，累加器将粒子信息传递至粒子留驻的网格单元，用于域及边界处，在上极板处放置一个二维截面，随着时间变化记录通过截面的正离子个数，单位时间内通过导体截面的电荷量定义为电流，得到电晕放电电流如图10所示。可以看出，正极性电晕放电单次放电电流在t=0.24 μs时刻达到脉冲

电流峰值，并在t=0.8 μs时趋于稳定。由图10可知，脉冲主要分为三个阶段：电流上升阶段、电流下降阶段以及电流趋于稳定阶段。单次的电晕放电过程结束，得到一个周期内单次放电电量为4.9 nC。

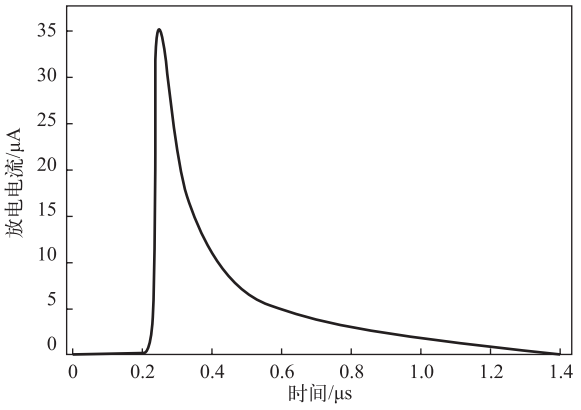

图 10　单次电晕放电离子电流

Fig. 10 Ion current of single corona discharge

由于针尖附近空气被电离后产生的正离子积聚在针尖附近形成正电荷鞘层，针极附近电场削弱，放电停止，但雷云方向仍有正离子运动，运动一段距离后正离子的屏蔽作用减弱，针尖处的电场强度再次增大，新一轮的放电开始，因此针板间放电是周期性流注放电[26]。由图10可知，一个放电周期为1.4 μs，查阅文献可知装置有效放电时间为15～20 min[27]，结合图8得出的在z=3.05 km时负极性雷云体电荷密度最小ρ_N=－0.386 nC/m^3，根据负极性雷云体积计算出此时负电荷区的电荷量为－3.03 C，需要的中和电荷量为6.39 C，因此单次电晕放电到达雷云底部的电荷量至少为9.94 nC。

2.3　横向风对中和雷云电量的影响

在平稳的大气环境条件下，隐身防雷装置向上释放正离子以缓慢的速度飘向雷云，中和其部分电荷，减少雷云向下击穿放电的机会。然而受大气环境影响，正离子不可能全部到达雷云底部参与中和雷云电量，雷雨天气下出现的大风对离子迁移可能造成影响，在大气条件下，从针尖电离产生的正离子，在电离区将做变加速运动，而在迁移区由于受到中性粒子碰撞的影响，正离子的上升速度逐渐减小至15 m/s左右[28]。考虑大气风对正离子的影响，正离子的法线方向有空间电场力的作用，风的阻力作用于切线的反方向，而在切线方向受大气风的作用，正离子的运动轨迹为向上的斜抛运动。通过查找资料可得风级风速对应表，具体见表1[29]。

表 1　风级风速对应

Tab. 1 Wind class speed correspondence

风级	名称	风速 /（m/s）
1	软风	0.3 ～ 1.5
3	微风	3.3 ～ 5.5
6	强风	10.7 ～ 13.9
9	烈风	20.7 ～ 24.4

在原有模型基础上，通过在COMSOL的碰撞选项中加入切向的速度场来模拟横向风的影响，并在雷云模型底部添加累加器，模拟在不同的大气风的作用下雷云中和电量数据的变化，如图11所示。

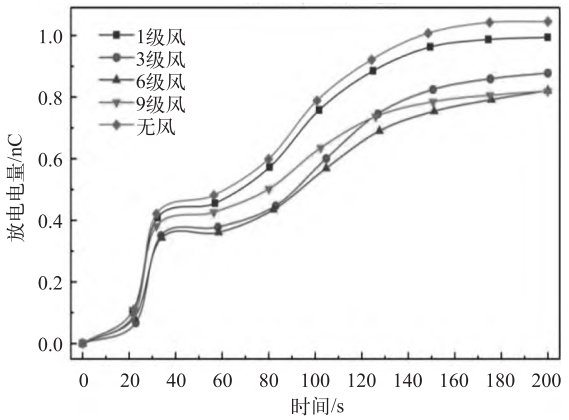

图 11　不同风级对应的中和电量

Fig. 11 Neutralization power for different wind levels

由图11可知，在无风的环境下，到达雷云底部电荷量为1.02 nC，并且发现随着风速的提升，最终到达雷云底部的电荷量越来越少。由上文可知，针尖单次电晕放电量为4.9 nC，无风环境下的电量传递效率大约为20%，通过对比中和电量与风速关系，得到不同风速下电量的传递效率见表2。电量的传递效率的表达式是不同大气风速下到达雷云底部的电荷量占针尖单次放电电量的比例。

表 2 不同风速下的电量的传递效率

Tab. 2 Power transfer efficiency at different wind speeds

风级	电量传递效率（%）
1	19.8
3	17
6	16.9
9	15.5

从表2可以看出，和无风环境下到达雷云底部的电量相比，不同风速影响的中和电荷传递效率差距并不是很大，传递效率随着大气风速的增加越来越小，在向上迁移过程中，由于电荷的碰撞和扩散作用，最终到达雷云底部电量都在20%以下，说明绝大多数中和电荷没有到达雷云底部。

2.4 隐身防雷装置作用分析

根据上文求得的单次针尖放电到达雷云底部的电荷量应为9.94 nC以上，求出在无风环境下有10根金属针（垂直向上1根，与垂直方向30°、60°和90°角各3根）的防雷装置理论上可以刚好中和雷云电荷。但是随着横向风等级的增加，装置到达雷云底部的中和电荷越来越少，需要的金属针数量也越来越多。并且在自然界中雷云高度一般较高，主放电区距离云底也有2～5 km的高度[30]，云层越高，中和雷云电荷越难实现。因此使用效果与自然因素关系紧密，隐身防雷装置并不能有效中和雷云能量，仍会在雷云中产生下行闪电。

3 结束语

本文对雷云天气情况下的消雷器装置周围电场进行了分析，并对装置放电后能否有效消散雷云能量展开了详细研究，为这场技术争议提供了一个数值仿真分析方法，弥补了人们认识的不足，得到了以下结论：

1）建立雷云与隐身防雷装置模型，通过仿真分析得出消雷器装置针尖部分的电场分布，并且与单根避雷针周围电场进行了分析比较，发现消雷器装置周围电场更加均匀，理论上有实现隐身防雷效果的条件。

2）利用分层带电圆盘模拟雷云结构，并用流体动力学模块模拟针板空气电晕放电，通过添加累加器选项，得到针尖单次电晕放电量和放电周期，最后考虑加入横向风的作用，得出自然环境下正离子传递效率在20%以下的结论，说明了大部分的中和电荷在迁移过程中并没有到达雷云底部，仿真发现该装置的使用效果与大气因素关系紧密，装置的可控性并不是很高，目前在现场使用时需要谨慎使用消雷器用于防雷保护。

参考文献

[1] 李笑怡．防雷技术在输电线路设计的应用[J]．集成电路应用，2020，37(1)：70-71．

[2] 赖超，徐婷．消雷器的原理及应用[J]．湖南有色金属，2001，24(1)：48-50．

[3] FLISOWSKI Z，SUL P．Individual assessment of the lightning hazard of building objects as a guarantee of their proper protection[J]．Electric Power Systems Research，2020，54(26)：178-185．

[4] MILLEN S，MURPHY A，CATALANOTTI G．Coupled thermal-mechanical progressive damage model with strain and heating rate effects for lightning strike damage assessment[J]．Applied Composite Materials: An International Journal for the Science and Application of Composite Materials，2019，26(7)：65-73．

[5] 解广润，陈慈萱，文习山，等．避雷针和半导体消雷器的火箭引雷试验分析[J]．高电压技术，2006，19(4)：11-12．

[6] 刘玄毅，管水龙，刘琳，等．消雷器能否消雷的分析[J]．电网技术，1997，36(5)：28-30．

[7] 吕金壮，张建明．关于消雷器的研究与改进建议[J]．高电压技术，1999，12(3)：60-63．

[8] 杜忠东，翟明翰，谭进．导体消雷器运行调查及分析[J]．高电压技术，2000，29(3)：74-76．

[9] 耿红明，罗家明．再论半导体少长针消雷器(SLE)——兼谈直击雷防护与接地[J]．建筑电气，2009，28(4)：49-51．

[10] 张景颖，张展，卜旭辉．伞状导体消雷器与避雷

针的模拟试验研究[J]．江西电力，2005，21(4)：19-20．

[11] COMSOL．COMSOL Multiphysics verson[Z]．Stock-holm，Sweden：COMSOL AB，2018．

[12] 陈情，王国志．基于COMSOL的电气化铁路接触网绝缘子电场分布仿真研究[J]．计算机与数字工程，2021，49(1)：208-212．

[13] 陈强，魏光辉．雷云荷电模型研究[J]．地球物理学进展，2010，25(5)：1617-1622．

[14] AMORUSO V，LATTARULO F．Thundercloud prestrike electrostatic modeling[J]．Journal of Electrostatics，2002，56(2)：255-276．

[15] 贺恒鑫．超/特高压输电线路雷电屏蔽性能三维先导仿真模型研究[D]．武汉：华中科技大学，2011．

[16] 郑健超．对“半导体消雷器”的评价[J]．中国电力，1998，23(1)：32-35．

[17] 黄柳宾，刘彦民，李文瀛．消雷器的发展及应用中存在的问题[J]．石油大学学报(自然科学版)，2000，12(5)：109-110．

[18] 曾彦珺，王彤，李怡，等．基于有限元法的±500 kV同塔双回线路电磁环境仿真计算[J]．电测与仪表，2017，54(17)：18-24．

[19] MILLEN，MURPHY A，CATALANOTTI G．Coupled thermal-mechanical progressive damage model with strain and heating rate effects for lightning strike damage assessment[J]．Applied Composite Materials: An International Journal for the Science and Application of Composite Materials，2019，26(7)：132-151．

[20] 李学文，孙可平，于格非．雷云静电场的模型化研究[C]．中国物理学会静电专业委员会第十三届学术年会论文集，2006：5-8．

[21] 司马文霞，范硕超，杨庆，等．雷云电场作用下长地线表面正极性辉光电晕放电的仿真研究[J]．物理学报，2015，64(10)：158-166．

[22] 艾嘉伟，徐乐平，牛海清，等．空气正极性电晕放电微观仿真及模型系数对脉冲电流特性的影响[J]．高电压技术，2021，47(12)：4377-4387．

[23] 陈冠缘，吴昊，周刚，等．负极性雷云电场下棒电极电晕放电模拟实验[J]．广东电力，2018，31(3)：92-97．

[24] 刘民，唐炬，潘成．空气中针板直流正负电晕发展过程实验研究[J]．高电压技术，2016，42(4)：1018-1027．

[25] 张龙飞．全金属多针“消雷器”基础问题研究[D]．哈尔滨：哈尔滨理工大学，2020．

[26] 何寿杰，张钊，李庆，等．针板负直流电晕放电中的脉冲等离子体特性[J]．高电压技术，2018，44(3)：870-875．

[27] 安大炜．针—板电晕放电特性及空间电荷迁移规律研究[D]．重庆：重庆大学，2017．

[28] 吴振扬．基于针环电晕放电的不同海拔条件下气体离子迁移率研究[D]．北京：华北电力大学，2015．

[29] 孟丹，陈正洪，陈城，等．基于探空风资料的大气边界层不同高度风速变化研究[J]．气象，2019，45(12)：1756-1761．

[30] 周萍．地面移动目标雷电效应分析与防护研究[D]．北京：北京邮电大学，2019．

作者简介

汤季宇（1997—），男，硕士研究生，研究方向为输电线路隐身防雷。

黄亚峰（1979—），男，副教授，博士，研究方向为可控性负荷建模与智慧用能，风电/光伏联网运行控制分析等。

（收稿日期：2023-01-06）