

基于非线性电导材料和COMSOL-MATLAB 联合仿真的电缆接头场强分布优化研究

罗智奕, 詹威鹏, 陈腾彪, 胡力广, 吕启深

(深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518001)

摘要: 以 110 kV 电缆接头为例, 提出采用非线性电导绝缘材料替代固定电导材料, 实现材料参数关于空间的自匹配, 进而实现对电缆接头局部高场强的抑制作用。仿真结果发现, 应力锥采用非线性电导材料与采用固定电导时电缆接头场强分布几乎一致, 而电缆绝缘采用非线性电导材料情况下对局部场强集中抑制效果较为明显。为获取最佳非线性参数, 建立电缆接头 COMSOL-MATLAB 联合仿真模型, 通过有限元仿真和数值计算结合的方法分析电缆接头内部场强分布随参数变化的情况, 并基于遗传算法实现快速寻优。结果表明, 当线性系数、非线性系数分别为 $3.850\ 1 \times 10^{-12}$ 和 $3.209\ 6 \times 10^{-6}$ 时效果最优, 此时最大场强为 5.931 5 kV/mm, 对应的场强畸变因子为 13.72%。选取合适的非线性电导材料作为电缆绝缘材料, 对于均匀电缆接头内部场强有较好效果, 为发展高电压等级电缆附件提供了思路。

关键词: 110 kV 电缆接头; 非线性电导; 均匀电场; 联合仿真; 遗传算法

Optimal study of electric field strength for cable joint based on nonlinear conductivity material and COMSOL-MATLAB co-simulation

LUO Zhiyi, ZHAN Weipeng, CHEN Tengbiao, HU Liguang, LV Qishen

(Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518001, China)

Abstract: Taking 110 kV cable joint as an example, the approach that replacing the fixed conductivity materials by non-linear conductivity insulating materials is proposed, which is expected to control the high local electric field strength by regulating the materials performance with space. The initial physics simulation results show that the effect of making the electric field strength distribution uniform is more obvious using nonlinear materials for cable insulation than using nonlinear materials for stress cone. In order to obtain the best non-linear parameters, a COMSOL&MATLAB simulation model of the cable joint is established. The field strength distribution of the cable joint is analyzed by means of combining finite element simulation and numerical calculation. Moreover, genetic algorithm is taken to realize rapid optimization. The co-simulation results show that the optimization stops when linear factor reaches $3.850\ 1 \times 10^{-12}$ and nonlinear factor reaches $3.209\ 6 \times 10^{-6}$, while the maximum electric field strength and the distortion factor of field strength are 5.931 5 kV/mm and 13.72% respectively. In conclusion, selecting suitable nonlinear conductivity material has a better effect on the uniform electric field strength distribution of the cable joint, which provides an feasible approach for the development of high-voltage cable accessories.

Key words: 110 kV cable joint; nonlinenar conductivity; uniform electric field; co-simulation; genetic algorithm

0 引言

近年来,随着城市用电负荷持续增长和对海上风电清洁能源的应用需求,对电缆系统输电能力的要求越来越高,电缆系统等级随之向高电压等级发展,也由此产生绝缘设计、材料制造等方面的问题^[1-3]。由于电缆到电缆接头难以实现完美接续,加之电缆系统运行环境普遍较为恶劣,电缆接头往往存在内部场强集中等问题,使其成为电缆系统中故障发生率最高的部件,对电网安全可靠持续运行产生不利影响。如何改善电缆接头整体电场分布均匀程度,有效缓和局部高电场强度集中,进而降低高压电缆附件设计、制造和运维时难度和成本,是当前电缆系统相关研究者密切关注的问题^[4-5]。

早期研究者主要基于绝缘结构优化设计控制电缆接头内部场强分布,通过设计应力锥去曲面曲线、优化电极形状尺寸及添加均压结构等方法改善电缆接头内部局部场强集中程度^[6-7]。文献[8]通过研究柔性直流电缆XLPE主绝缘和应力锥三元乙丙橡胶绝缘材料的电阻率配合关系,结合应力锥绝缘电场求解表达式,提出附件应力锥曲面设计方法。文献[9]开发出一种新的GIS内锥插拔式快速接头,利用有限元仿真软件对接头应力锥、屏蔽电极和附件材料性能参数的配合进行了优化设计。文献[10]提出趋于一体化的插接式电缆接头方案,通过预制三相插接头,缩短施工时间和降低安装风险。然而这些方法在缓和绝缘设备局部高电场强度的同时,也明显增加了设备制造的复杂度和困难度,效果往往也并不显著。

研究者另考虑非线性材料,即采用聚合物基非线性绝缘介质实现材料参数与外加电场关联。非线性材料通常是指通过在聚合物基体中掺杂非线性无机填料或弱离子导电高分子填料,制成电导率或介电常数随场强变化的聚合物基复合材料。其中,非线性电导材料多用于直流系统,非线性介电材料多用于交流系统。相关研究表明,选用场致增强型非线性材料可以较为有效地均匀

分布电场强度^[11-13]。在较低场强下,非线性复合电导材料保持较小的电导率或介电常数,泄漏电流相对较小,与绝缘材料类似;而在高电场作用下,非线性复合材料电导率或介电常数随电场呈指数增长,可以实现对高场强的抑制作用,进而有效均匀分布电场。

相比于改变绝缘结构设计,采用非线性材料与现有电缆系统更为兼容。在电缆接头中采用非线性复合绝缘材料替代固定电导/介电材料,可以实现材料参数关于空间的自匹配,从而改善局部场强集中。然而如何调控非线性材料特性,如何选取最优参数仍亟待研究。本文以110 kV直流电缆接头为例,基于非线性电导材料建立了COMSOL-MATLAB联合仿真模型,结合遗传算法对相关系数进行寻优,详细分析了非线性电导材料对电缆接头内部场强分布的改善作用和机理。

1 电缆接头结构和非线性绝缘材料

1.1 110 kV 电缆接头结构

根据110 kV电缆接头实际几何模型,采用二维轴对称模型对其进行仿真分析,电缆接头结构如图1所示。电缆接头结构由电缆本体、压接管、屏蔽层、应力锥和接头绝缘等部分组成。

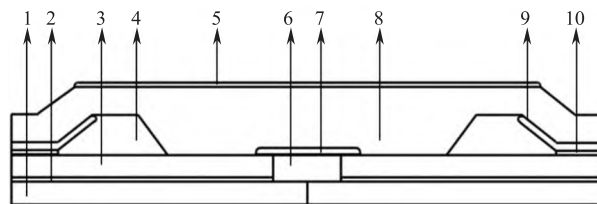


图1 110 kV 电缆接头结构示意图

Fig. 1 Structure of 110 kV cable joint

1—导体 2—导体屏蔽 3—XLPE绝缘 4—应力锥绝缘 5—外屏蔽
6—压接管 7—压接屏蔽 8—中间接头绝缘 9—应力锥导体
10—绝缘屏蔽

为便于表示中间接头各结构,图1并未按照实际比例绘制。电缆接头内部结构实际几何参数及对应材料性能参数如下表所示,选用800 mm²截面积导体,对应半径为15.96 mm。因导体不

存在相对介电常数，其相对介电常数设为较大值即可（本文中取10 000）。

表 110 kV 电缆接头几何结构及材料性能参数
Tab. Geometrical parameters and materials parameters of 110 kV cable joint

结构	厚度/mm	相对介电常数	电导率/(S/m)
电缆铜导体	15.96	10 000	5.998×10^7
导体屏蔽	0.5	50	10
XLPE 绝缘	16	2.3	10^{-15} 或 $\sigma=f(E)$
绝缘屏蔽	2.5	50	10
中间接头硅橡胶绝缘	-	4.3	10^{-12}
应力锥绝缘	-	4.3	10^{-12} 或 $\sigma=f(E)$
应力锥导体	-	10 000	5.998×10^7
压接管		10 000	5.998×10^7
压接屏蔽	2	50	10
外屏蔽	2	50	10

1.2 非线性电导材料

电介质材料伏安特性一般可表示为

$$I=AU^B \tag{1}$$

式中， I 为电流； U 为电压； A 、 B 为相关系数。

当 $B=1$ 时，电流 I 与电压 U 呈线性相关，电介质电导率为常数；当 $B \neq 1$ 时，电介质为非线性电导材料，其电导率随电场强度变化而变化，可表示为

$$\sigma=\alpha e^{\beta E} \tag{2}$$

式中， σ 为电导率； E 为电场强度； α 为线性系数； β 为非线性系数。

相关研究表明，选用场致增强型（即 α 、 β 均为正值）非线性电导材料，可以较为有效地均匀电场强度分布。图2给出了 α 、 β 取不同参数时非线性导电材料的电导特性。可以发现，在较低场强下，线性系数 α 影响更为明显；而在高场强下，非线性系数 β 占主导作用，较大的 β 会导致高场强下材料电导率急速增加。而根据前述分析，较小或较大的电导率都会对电缆接头场强分布产生不利影响，因此需要对系数进行寻优。

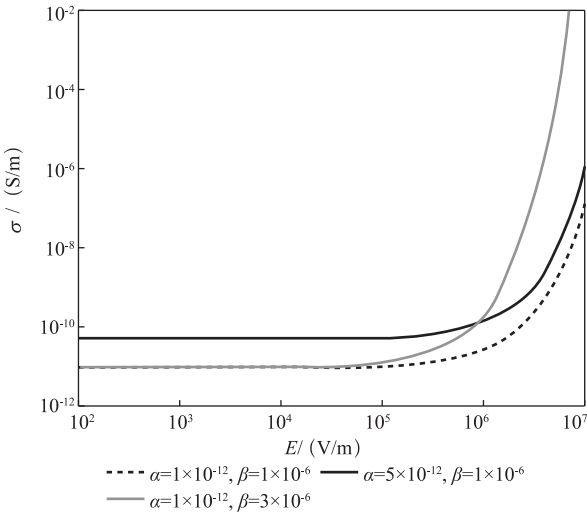


图2 非线性电导特性

Fig. 2 Conductance characteristic of nonlinear conductivity materials

2 仿真分析

2.1 联合仿真

为选取合适的线性和非线性系数，采用COMSOL-MATLAB联合仿真方法，结合遗传算法进行求解，如图3所示。首先基于MATLAB遗传算法生成设计变量 α 、 β ，并传递设计变量到多物理场仿真软件COMSOL中，通过有限元仿真计算得到目标函数，并返回目标函数到MATLAB中进行下一次迭代。

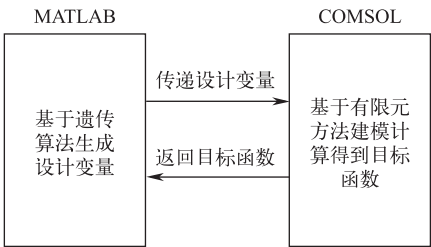


图3 COMSOL-MATLAB 联合仿真流程

Fig. 3 The process of COMSOL-MATLAB co-simulation

为了更清晰反映电场分布均匀程度，定义场强畸变因子 F 如下

$$F=\left|\frac{E_{\max}-U/d}{U/d}\right|\times 100\% \tag{3}$$

式中， $E_{\max}$ 为绝缘层中出现的最大场强值； U 为外加电压幅值； d 为绝缘层厚度。

值得注意的是，由于电场强度 E 并非 COMSOL 内置函数，实际运算时需根据麦克斯韦方程组将 E 表示为电动势梯度，即

$$E = -\sqrt{\left(\frac{dV}{dr}\right)^2 + \left(\frac{dV}{dz}\right)^2} \quad (4)$$

式中， V 为电动势； r 、 z 分别为二维轴对称坐标系横坐标与纵坐标。

此外，由于电场强度 E 表示为关于空间坐标的函数，在基于有限元法求解偏微分方程时，电动势 V 初始值同样也需要设置为关于空间的函数。

2.2 遗传算法

基于遗传算法的优化框图如图4所示。

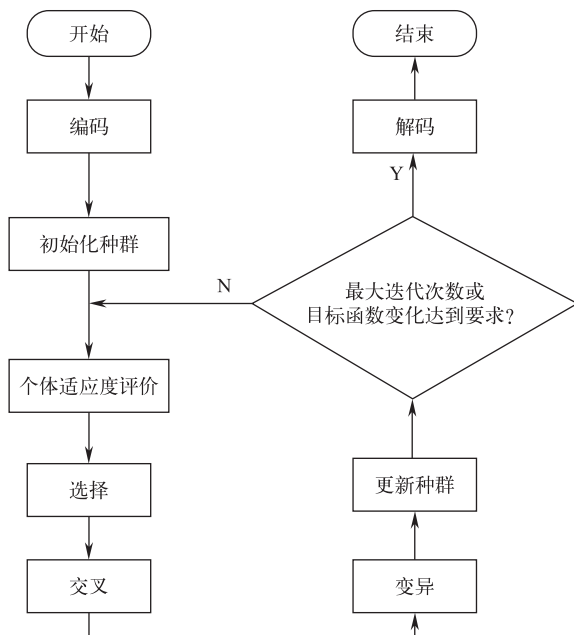


图4 基于遗传算法优化非线性系数

Fig. 4 Optimizing the nonlinear coefficient based on genetic algorithm

遗传迭代过程主要包含以下过程^[14]。

(1) 编码、解码

在进行遗传操作前，采用二进制编码对解空间（约束空间）的可行解进行编码，并随即产生若干可行解。可行解的编码称为染色体，每一位称为基因。在遗传迭代完成后进行解码，解码过程为编码逆过程。

(2) 适应度评价

优化目标是使畸变因子 F 最小，以线性系数 α 、非线性系数 β 为优化自变量，设立隶属度函数如下

$$\begin{aligned} \min \quad & F(\alpha, \beta) \\ \text{s.t.} \quad & \alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max} \\ & \beta_{\min} < \beta < \beta_{\max} \end{aligned} \quad (5)$$

式中， $F(\alpha, \beta)$ 表示当线性系数 α 、非线性系数 β 取特定数值时对应的场强畸变因子； $\alpha_{\max}$ 、 $\alpha_{\min}$ 分别为 α 的上下限； $\beta_{\max}$ 、 $\beta_{\min}$ 分别为 β 的上限、下限。

(3) 更新种群

对种群中个体适应度进行评价后，采用轮盘赌方式，从当前种群中保留适应度函数较高的个体，淘汰适应度函数较低的个体。种群中第 i 个个体 x_i 被选中的概率为

$$P(x_i) = F(x_i) / \sum F(x_i) \quad (6)$$

式中， $F(x_i)$ 为第 i 个个体的适应度。

随后，随机选择个体进行交叉（随机选择两个染色体作为父代染色体，随机选定一个或多个交叉点位交叉基因）、变异（随机改变染色体编码中某些点位的值）操作得到新的种群，以增加基因多样性，避免陷入局部最优。

2.3 仿真结果分析

首先考虑仅应力锥绝缘采用非线性电导材料，对固定电导情况和随机选取 α 、 β （ $\alpha = 1.6 \times 10^{-12}$ ， $\beta = 5 \times 10^{-6}$ ）时的非线性电导情况进行仿真分析，两种模型对应的电位等势线和电场强度分布分别如图5、图6所示。可以发现，两种模型的仿真结果几乎没有区别，场强均集中在电缆XLPE绝缘内部及压接管与接头绝缘接触部分。应力锥绝缘选用固定电导情况下最大场强为8.402 4 kV/mm，对应的场强畸变因子 F 为22.22%；选用非线性材料情况下（ $\alpha = 1.6 \times 10^{-12}$ ， $\beta = 5 \times 10^{-6}$ ）最高场强为8.404 5 kV/mm，对应的场强畸变因子 F 为22.25%。此时采用遗传算法对最佳系数进行寻优并没有意义，考虑对电缆主绝缘采用非线性电导材料。

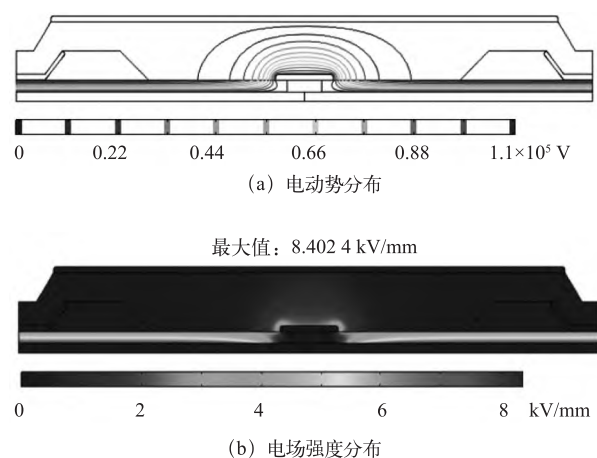


图5 固定电导情况下电缆接头内部电动势及场强分布
Fig. 5 Electric potential and electric field strength distribution of cable joint when stress cone insulation is fixed conductive material

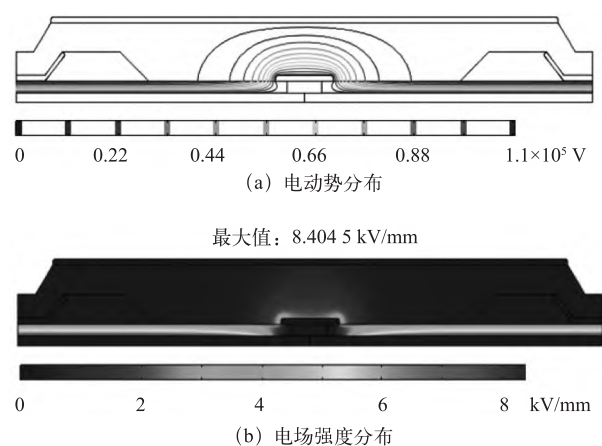


图6 应力锥材料为非线性电导材料($\alpha=1.6 \times 10^{-12}$, $\beta=5 \times 10^{-6}$)情况下电缆接头内部电动势及场强分布
Fig. 6 Electric potential and electric field strength distribution of cable joint when stress cone insulation is nonlinear conductive material

基于上述分析, 电缆主绝缘设置为非线性电导材料, 应力锥绝缘设置为固定电导材料。采用遗传算法对110 kV电缆接头进行COMSOL-MATLAB电场联合仿真。综合考虑求解准确度和计算效率, 种群规模设置为20, 迭代次数设置为3代。迭代结果如图7所示。可以发现, 在经历1次迭代后即趋近于收敛, 对应的 α 、 β 分别为 3.8501×10^{-12} 和 3.2096×10^{-6} 。此时最大场强 $E_{\max}$ 为5.9315 kV/mm, 对应的场强畸变因子 F 降低至13.72%。

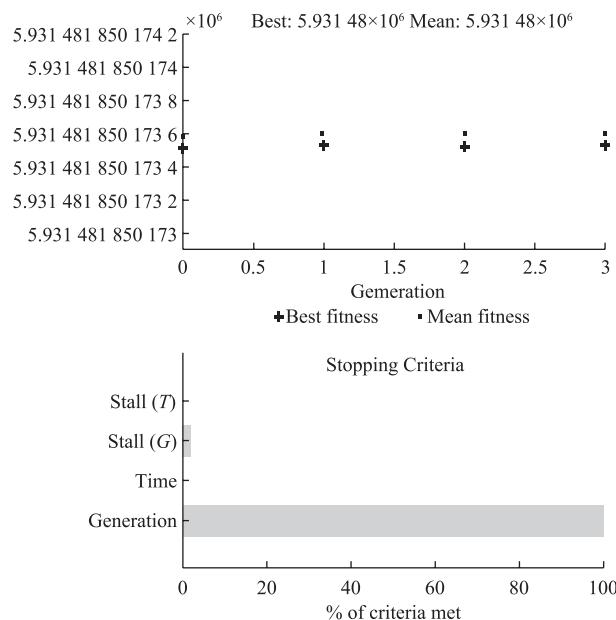


图7 电缆绝缘为非线性电导材料时遗传算法迭代结果
Fig. 7 Iterative results of genetic algorithm when cable insulation is nonlinear conductive material

电缆接头内部电动势及场强分布如图8所示, 可以发现, 与固定电导情况下和仅应力锥选用非线性电导材料情况下不同, 电缆绝缘选用非线性电导材料情况下电缆接头内部等势线间隔更为分散, 原本集中于电缆绝缘中的场强分散到应力锥绝缘和中间接头绝缘中, 有效抑制了场强畸变。

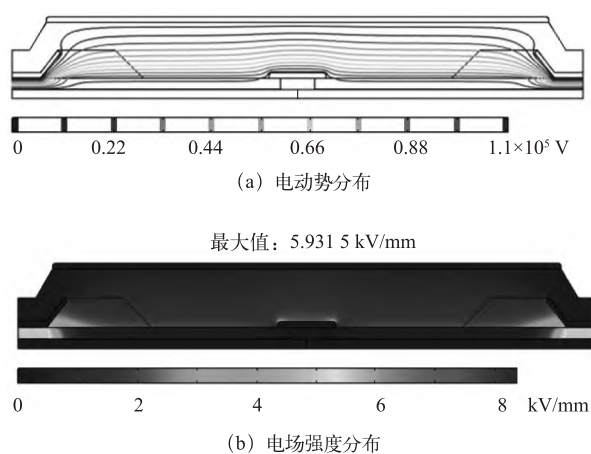


图8 电缆绝缘为非线性电导材料情况下电缆接头内部电势及场强分布
Fig. 8 Electric potential and electric field strength distribution of cable joint when cable insulation is nonlinear conductive material

3 结束语

1) 针对高压电缆接头场强集中问题, 提出采用场强增强型非线性电导材料替代固定电导材料均匀电缆接头内部场强。

2) 仿真结果表明, 仅应力锥绝缘部分采用非线性电导材料对抑制电缆接头内部场强几乎没有效果; 而电缆绝缘采用非线性电导材料时对均匀场强有较好效果, 可考虑开发非线性电导电缆绝缘材料或在电缆接头绝缘连接处采用非线性电导材料进行接续。

3) 通过COMSOL-MATLAB联合仿真方法, 结合遗传算法, 求解了最佳线性系数和非线性系数, 最大场强由 $8.402\ 4\ \text{kV/mm}$ 下降至 $5.931\ 5\ \text{kV/mm}$, 场强畸变因子由22.22%下降至13.72%左右。

4) 该方法同样适用于其他电力设备优化问题, 只需针对实际场景设定特定的隶属度函数进行寻优, 相比于传统试错方法可节省大量寻优时间。

参考文献

- [1] 张翀, 查俊伟, 王思蛟, 等. 高压直流电缆绝缘材料的发展与展望[J]. 绝缘材料, 2016, 49(2): 1-9.
- [2] 谭振龙, 张伶俐, 陈希, 等. 远海大容量机组海上风电集电系统技术经济研究[J]. 电气应用, 2021, 40(6): 64-71.
- [3] JIN R S, HOU P, YANG G Y, et al. Cable routing optimization for offshore wind power plants via wind scenarios considering power loss cost model[J]. Applied Energy, 2019, 254: 113719.
- [4] YE H Y, FECHNER T, LEI X Z, et al. Review on HVDC cable terminations[J]. High voltage, 2018, 3(2): 79-89.
- [5] 曹俊平, 蒋愉宽, 王少华, 等. XLPE电力电缆接头缺陷检测关键技术分析与展望[J]. 高压电器,

2018, 54(7): 87-97.

- [6] 仇炜, 崔江静, 黄顺涛, 等. 基于多物理场耦合的高压电缆接头防爆装置端头部位结构的优化设计[J]. 电气应用, 2019, 38(4): 86-92.
- [7] 尚康良, 曹均正, 赵志斌, 等. 320 kV XLPE高压直流电缆接头附件仿真分析和结构优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 2018-2024.
- [8] 朱智恩, 陈龙啸, 杨黎明, 等. 柔性直流电缆附件应力锥设计研究[J]. 绝缘材料, 2019, 52(6): 86-91.
- [9] 樊友平, 武利会, 康李一, 等. 110 kV XLPE电缆GIS内锥插拔式快速中间接头的设计[J]. 高电压技术, 2016, 42(2): 485-495.
- [10] 姚睿丰, 胡冉, 黄炜昭, 等. 10 kV三相电缆插拔式中间接头结构设计与仿真分析[J]. 绝缘材料, 2019, 52(9): 85-89.
- [11] 刘晨阳, 郑晓泉, 别成亮. 掺杂ZnO/环氧树脂基体的制备及其非线性电导改性研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(12): 24-30.
- [12] 胡军, 赵孝磊, 杨霄, 等. 非线性电导材料应力锥改善电缆终端电场强度分布[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 398-404.
- [13] LI J, DU B X, KONG X X, et al. Nonlinear conductivity and interface charge behaviors between LDPE and EPDM/SiC composite for HVDC cable accessory[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1566-1573.
- [14] KATOCH S, CHAUHAN S S, KUMAR V. A review on genetic algorithm: past, present, and future[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(5): 8091-8126.

作者简介

罗智奕(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为高压电缆运行管理。

(收稿日期: 2021-08-24)