

聚丙烯薄膜表面粗糙度对电容元件内部电场特性的影响

王锐¹, 易承乾², 廖伟兴¹, 刘刚², 曹海兵¹, 姚露露², 孟森²

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518010; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663)

摘要: 高压油浸式电容器被广泛应用在无功补偿和滤波等重要场合,运行时承受较高电压,聚丙烯薄膜表面微观形貌对电容元件内部电场分布有很大影响。本文关注以往电场计算中被忽略的表面粗糙度的影响,考虑电容元件内部金属箔、绝缘油和多层聚丙烯粗化膜共存情况,建立了电容元件内部电场分布计算模型,研究了薄膜表面粗糙度对元件内部电场分布的影响:粗化薄膜表面的凸起和凹陷会导致电场畸变,并使局部电场集中;随着油缝增大,凹陷处膜和油中特征点处相对电场强度逐渐减小;表面越粗糙电场畸变程度越大;薄膜厚度对相对电场强度的影响较小;交流电场作用下,油的相对介电常数越大,电场不均匀程度越大;直流电场作用下,油的电导率越小,凸起处膜和油中的相对电场强度越大,凹陷处膜和油中的相对电场强度越小。基于本文研究结果后续可优化电容元件设计方法。

关键词: 油浸式电容器; 电容元件; 聚丙烯薄膜; 粗糙度; 电场特性

The Influence of Polypropylene Film Surface Roughness on the Internal Electric Field Characteristics of Capacitor Elements

WANG Kai¹, YI Chengqian², LIAO Weixing¹, LIU Gang², CAO Haibing¹, YAO Lulu², MENG Sen²

(1. Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518010, China;

2. Electrical Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: High-voltage oil-immersed capacitors are widely used in important applications such as reactive power compensation and filtering. They withstand high voltages during operation, and the surface micro-morphology of the polypropylene film has a significant influence on the internal electric field distribution of the capacitor element. This paper focuses on the influence of surface roughness, which has been neglected in previous electric field calculations. Considering the coexistence of metal foils, insulating oil, and roughened polypropylene films within a capacitor element, a calculation model for the internal electric field distribution is established. The influence of film surface roughness on the internal electric field distribution is studied. The protrusions and depressions on the surface of the roughened film can cause electric field distortion and lead to localized field concentration. As the oil gap increases, the relative electric field intensity at the characteristic points in the film and oil at depressions gradually decreases. The rougher the surface, the greater the electric field distortion. The influence of film thickness on the relative electric field intensity is relatively small. Under AC electric field, the higher the relative dielectric constant of oil, the larger the non-uniform degree of electric field. Under DC electric field, the lower the oil conductivity, the higher the relative field intensity in the film and oil at protrusions, and the lower the relative field intensity in the film and oil at depressions. Based on the results of this study, subsequent optimization of capacitor element design methods can be conducted.

Keywords: oil-immersed capacitor; capacitor elements; polypropylene film; film roughness; electric field characteristics

收稿日期:2026-03-20; 修回日期:2026-04-17

基金项目:南方电网公司科技项目(090000KC23110029)。

Project Supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (090000KC23110029)。

0 引言

高压油浸式电容器凭借绝缘性能优良、散热效果突出、容量密度高及适应复杂工况能力强等优势,广泛应用于电网无功补偿、电压调节、谐波抑制以及新能源发电系统并网滤波等关键环节^[1-2],是保障电力系统安全、经济、稳定运行的核心基础装备。其长期运行可靠性不仅直接决定着单台设备的服役寿命与运维成本,更对区域电网的供电连续性、电能质量水平乃至整体电网的抗扰动能力产生至关重要的影响^[3-4]。

在高压场景的实际应用中,设备的轻量化与小型化始终是核心设计诉求之一,高压油浸式电容器内部通常采用聚丙烯粗化膜作为介质,单层聚丙烯薄膜能够承受的电场强度越高,所需串联的薄膜层数就越少,在实现相同容量的前提下,电容器的体积便可显著缩减。这一诉求直接对电容元件内部的电场强度提出了严苛要求,因此,为在不超过材料本身能承受的电场极限值的前提下,实现电容器在高压工况下的稳定运行,最大化利用结构与材料性能^[5],需要先研究电容元件内部的电场分布规律。

目前有关电容元件电场的主要研究目的通常是为了计算电容器整体的发热情况^[6-7],而不关注元件内电场的具体分布。有关电容元件内部电场分布形式的研究中,通常忽略聚丙烯薄膜表面粗糙度影响,将薄膜建模成光滑表面薄膜,认为元件内部电场是平行均匀的^[8],重点关注金属电极边缘等特殊位置的电场畸变情况。一类研究采用有限元方法^[9-10],通过将整个电容元件的多层结构简化成少数几层膜结构,计算电极边缘最大场强及其畸变程度,对内部结构提出优化方法;有研究同时考虑电荷积累^[11]、内部杂质^[12]、压紧系数^[13]、内部缺陷等条件^[14-15],计算了对电容元件内部的电场分布情况。另一类研究将元件内部的多层卷绕结构等效为平板电容结构^[16],基于保角变换理论研究电极边缘最大场强畸变情况^[17]。此外,有学者针对整个电容元件^[18-21],计算了内部的电流分布和不同位置的电场强度;针对整台电容器进行了电场计算分析^[22-25]。但目前电容元件内部电场分布计算的研究中,均未考虑薄膜表面粗糙度的影响。

本文以油浸式电容元件为研究对象,考虑金属箔、绝缘油和多层聚丙烯粗化膜共存条件,建立了电容元件内部电场强度计算模型,研究了交、直流电压作用下聚丙烯薄膜表面粗糙度对电容元件内部电场特性的影响。同时,还研究了绝缘油和薄膜

参数对电场特性的影响。

1 建模方法

1.1 结构简化

本文的研究对象为高压油浸式电容元件,油浸式电容元件内部结构见图1。一台油浸式电容器内部由多个电容元件串并联组成。以图1中所示的常用结构为例,一个电容元件由金属箔电极夹3层聚丙烯粗化膜,中间浸渍有绝缘油。为了防止金属边缘毛刺产生过大的电场,金属箔电极通常会在一端采用折边结构。

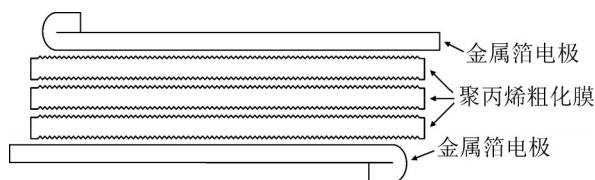


图1 油浸式电容元件内部结构
Fig. 1 Internal structure of an oil-immersed capacitor element

为方便绝缘油充分浸渍聚丙烯薄膜,薄膜表面粗糙度通常较大,使用仪器扫描薄膜表面起伏可统计轮廓算术平均偏差,获得薄膜表面粗糙度(R_a)。多层聚丙烯粗化膜叠加时,在微观层面,薄膜表面实际上是凸起部分的点接触。为了方便计算,将电极-薄膜结构进行简化,电极正对区域(未画边缘)示意图如图2所示,两层铝箔之间夹了3层粗化膜,中间填充满绝缘油,粗化膜的质量法厚度为 d_1 ,表面不规则的粗糙起伏被简化处理为半圆形凸起和凹陷,凸起和凹陷的半径为 R ,两层膜之间凸起部分间隔为 dd 。

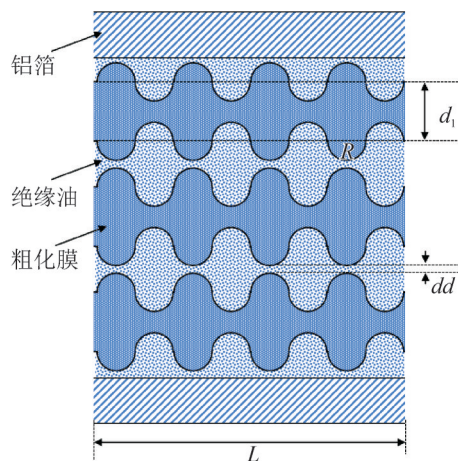


图2 电容元件内部结构简化示意图
Fig. 2 Simplified schematic diagram of the internal structure of the capacitor element

将粗化膜表面不规则起伏根据粗糙度数值进

行简化处理后,电容元件模型的几何参数即可确定。本文将在电容元件上施加交、直流电压,研究薄膜表面粗糙度对电容元件内部电场特性分布的影响。

1.2 计算方法

通常采用有限元方法对电场分布进行计算。在交流电场作用下,电介质材料中电场为静电场,其控制方程为

$$\begin{aligned}\vec{E} &= -\nabla V \\ \nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}) &= \rho_v\end{aligned}\tag{1}$$

式中: $\vec{E}$ 为电场强度; V 为电压; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_r 为材料的相对介电常数; ρ_v 为体电荷密度。

在直流电场作用下,电介质材料中电场为恒流场,其控制方程为

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{J} &= 0 \\ \vec{J} &= \sigma \vec{E} \\ \vec{E} &= -\nabla V\end{aligned}\tag{2}$$

式中, $\vec{J}$ 为电流密度。

1.3 计算用参数

基于静电场和恒流场下的控制方程,在确定各组成部分的几何参数和材料参数后,可对电极-电介质结构的电场分布进行计算。

电力电容器用聚丙烯粗化膜的粗糙度要求为 0.2~0.5,本文取 0.35 为典型值。根据薄膜表面粗糙度的定义,可计算得到本文模型中凸起和凹陷部分半圆半径 R 的典型值为 0.45 μm 。实际中电容元件的两个端面之间的距离远大于两层铝箔之间的距离(即 3 层膜的厚度),本文计算内部均匀位置的电场分布时,为消除电极边缘的影响,模型中薄膜的宽度 L 设为 400 μm ,远大于 3 层薄膜的厚度(不超过 40 μm)。

电容元件内各部分的几何与材料参数如表 1 所示,主要包含 BOPP 薄膜、金属铝箔和绝缘油的厚度、相对介电常数和电导率。

表1 各部分材料参数表
Table 1 Material parameter values for each part

对象	参数	数值
BOPP 薄膜	相对介电常数	2.2
	电导率/(S/m)	1×10^{-15}
	厚度 $d_1/\mu\text{m}$	13
铝箔	相对介电常数	1
	电导率/(S/m)	3.77×10^7
	厚度/ μm	6
绝缘油	相对介电常数	2.6
	电导率/(S/m)	3.77×10^7
	油缝间隙厚度 $dd/\mu\text{m}$	0.1

2 交流电压作用下结果

在电容元件内部极板正对且远离端部边缘的内部区域内,整体上电场线由一个极板指向另一个极板,考虑粗化膜表面粗糙不均匀的影响,不同宽度位置的电场强度将变得不再相同。计算时将高压电极的电位设为 1 kV,低压电极接地。

2.1 内部交流电场规律

在交流电压作用下,电极与粗化膜之间缝隙、两层粗化膜之间缝隙的电场分布如图 3 所示。由图中结果可看出在考虑薄膜表面的凸起和凹陷后,沿宽度 L 方向薄膜和绝缘油中的电场强度大小不再相同。在薄膜凸起处电场强度较小,特别是油中的电场强度变得很小;在薄膜凹陷处电场强度较大,特别是薄膜内部电场强度变得很大。

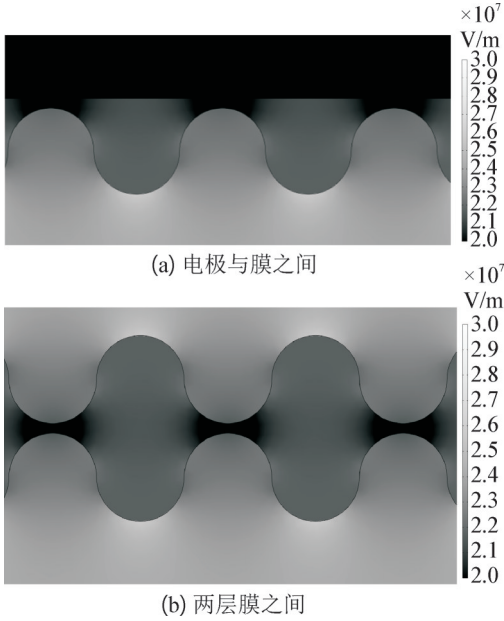


图3 交流电场作用下粗化膜缝隙处电场分布
Fig. 3 Electric field distribution at the rough film gap under AC electric field

从高压电极到低压电极之间取一条垂直线,图 4 展示了沿线不考虑表面粗糙度(平整薄膜计算时保证薄膜质量即厚度 d_1 、电极间距与粗糙薄膜相同)、垂直线经过凸起处、垂直线经过凹陷处的电场强度分布。由图中结果可知,沿厚度方向,薄膜中间的电场强度基本相同,但是在薄膜表面和油缝处差异很大。当认为薄膜表面平整时,薄膜内部、绝缘油内部的电场强度相同,油中的电场强度(20.3 kV/mm)小于薄膜中的电场强度(24.0 kV/mm),这是受两者的介电常数影响导致的。当认为薄膜表面不平整时,越靠近凹陷处的薄膜内部电场强度越大,最大值为 25.4 kV/mm,从薄膜到油的电场强度

会发生突降,但油缝中的电场强度仍然大于平整情况下油中的电场强度(此时油中最小电场强度为21.4 kV/mm)。越靠近凸起处的薄膜内部电场强度越小,最小值为21.5 kV/mm,从薄膜到油的电场强度会发生突降,油缝中的电场强度小于平整情况下油中的电场强度(此时油中最小电场强度为18.2 kV/mm)与平整薄膜相比,粗糙薄膜的凸起处,可认为薄膜厚度增加、油缝厚度减小,即薄膜电容值减小、油缝电容值增大,在交流电压作用下,串联的2个电容分压与介电常数成反比,因此会导致油缝中电场强度减小;反之会提高油缝中的电场强度。

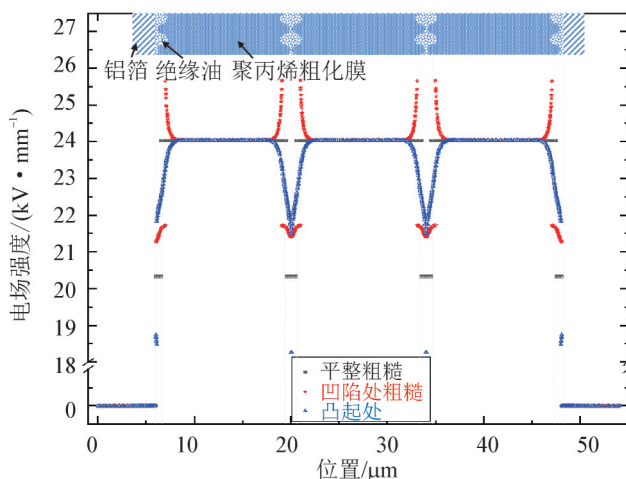
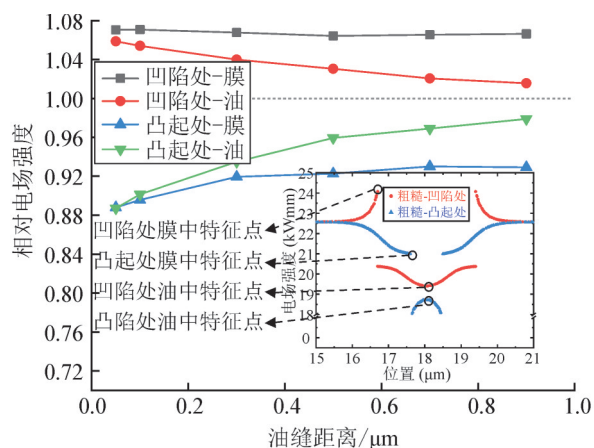


图4 交流电压作用下电极间垂直沿线的电场分布
Fig. 4 Electric field distribution along the vertical line between the electrodes under AC voltage

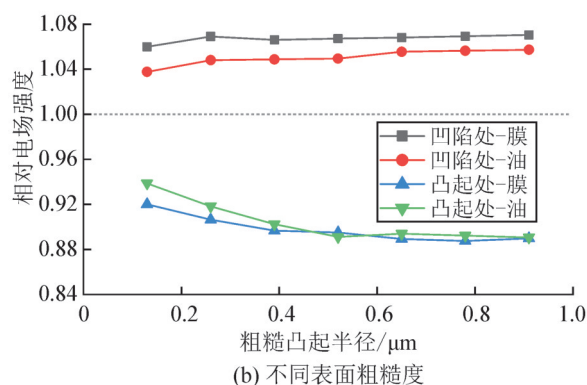
2.2 参数影响规律

聚丙烯粗化膜与绝缘油的不同参数将会影响电场分布情况。改变两层膜间油缝大小、粗化膜表面粗糙度、粗化膜质量法厚度、浸渍绝缘油的相对介电常数,薄膜和油中相对电场强度结果如图5所示。

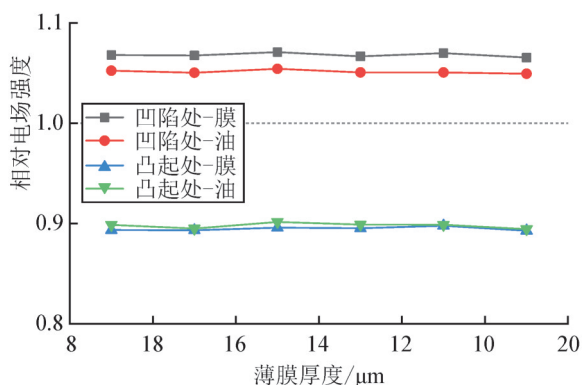
取凹陷处膜中电场最大值、凸起处膜中电场最小值、凹陷处油中最小值、凸起处油中最大值为特征点。图5(a)展示了特征点处相对电场强度(与平整薄膜情况相比)与油缝大小的关系,由图中可看出,随着油缝增大,凹陷处膜和油中的相对电场强度逐渐减小、凸起处膜和油中的相对电场强度逐渐增大,并趋向平整薄膜情况;由图5(b)可看出,随着薄膜表面粗糙度的增大,相对电场强度变得越来越不均匀,凹陷处膜和油中的相对电场强度增加,凸起处膜和油中的相对电场强度减小。由图5(c)可看出,薄膜厚度对相对电场强度的影响较小;由图5(d)可看出,绝缘油的相对介电常数对交流电场分布影响很大,油的介电常数越大,场强不均匀程度越大,凹陷处膜和油中的相对电场强度越大,凸起处膜和油中的相对电场强度越小,且变化趋势逐步变缓。



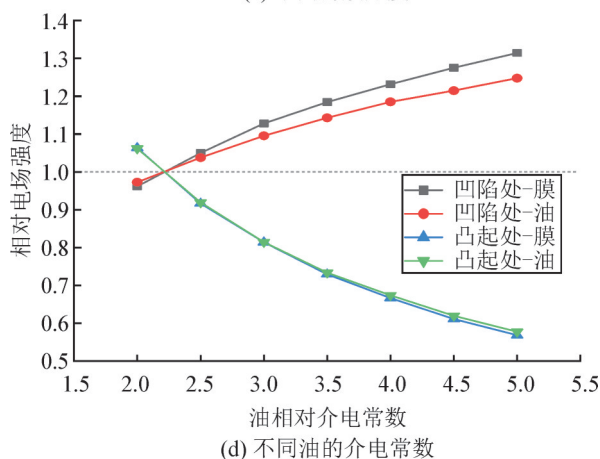
(a) 不同油缝距离



(b) 不同表面粗糙度



(c) 不同薄膜厚度



(d) 不同油的介电常数

图5 不同参数下对交流电场作用下相对电场强度影响
Fig. 5 Influence of different parameters on the relative electric field intensity under AC electric field

3 直流电压作用下结果

计算时将高压电极的电压设为直流电压,高压电极电位设为 1 kV,低压电极接地。

3.1 内部直流电场规律

在直流电压作用下,电极与粗化膜之间缝隙、两层粗化膜之间缝隙的电场分布如图 6 所示。由图 6 可看出在薄膜凸起处电场强度较小,特别是油中的电场强度变得很小;在薄膜凹陷处电场强度较大,特别是薄膜内部电场强度变得很大。

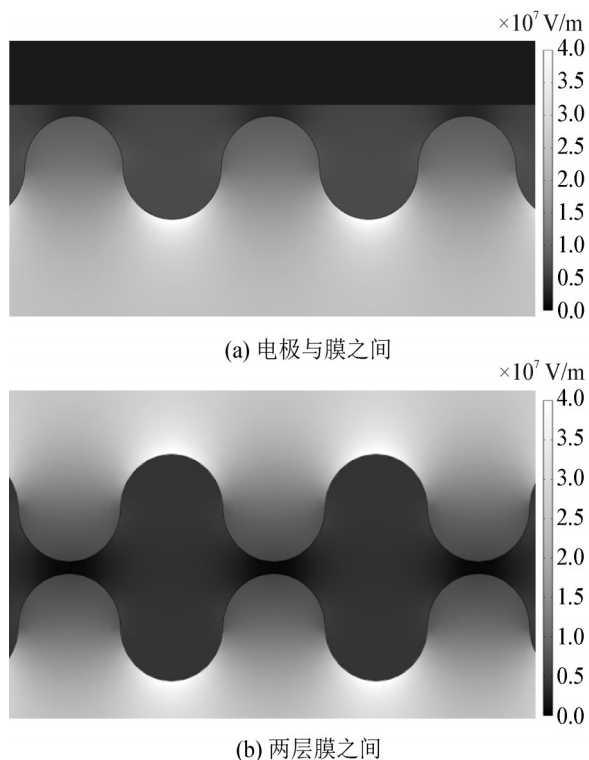
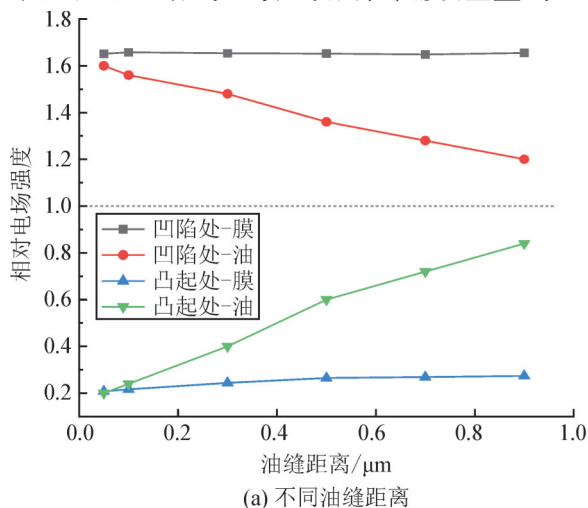


图 6 直流电场作用下粗化膜缝隙处电场分布
Fig. 6 Electric field distribution at the rough film gap under DC electric field

图 7 展示了沿线不考虑表面粗糙度、垂直线经



过凸起处、垂直线经过凹陷处的电场强度分布。由图 7 可知,沿厚度方向,薄膜内部的电场强度基本相同,但是在薄膜表面和油缝处差异很大。当认为薄膜表面平整时,薄膜内部、绝缘油内部的电场强度相同,油中的电场强度(2.54 kV/mm)小于薄膜中的电场强度(25.44 kV/mm),这是受两者的电导率影响导致的。越靠近凹陷处的薄膜内部电场强度越大,最大值为 42.14 kV/mm,从薄膜到油的电场强度会发生突降,但油缝中的电场强度仍然大于平整情况下油中的电场强度(此时油中最小电场强度为 3.91 kV/mm)。越靠近凸起处的薄膜内部电场强度越小,最小值为 5.49 kV/mm,从薄膜到油的电场强度会发生突降,油缝中的电场强度小于平整情况下油中的电场强度(此时油中最小电场强度为 0.57 kV/mm)。

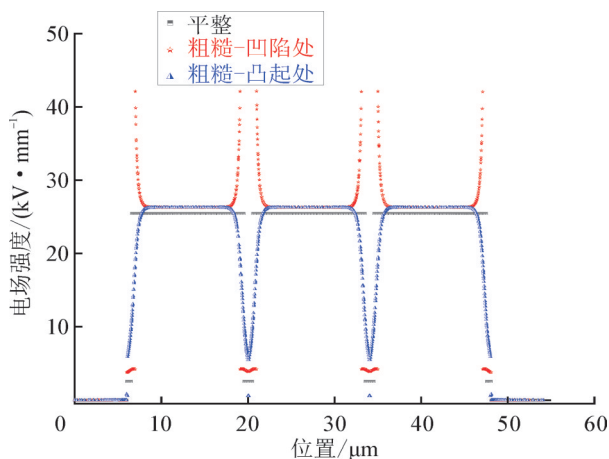
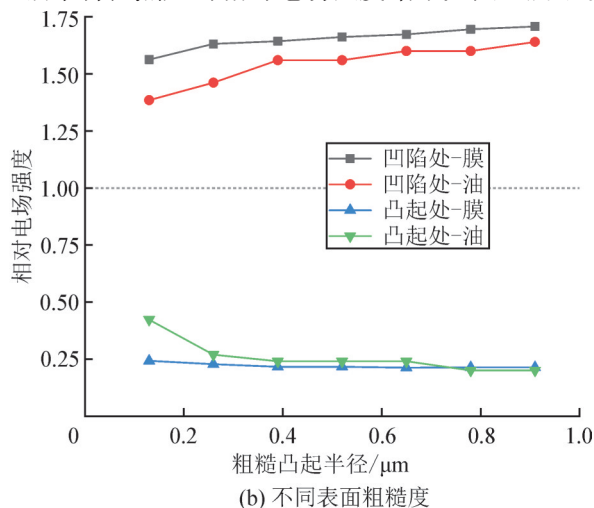


图 7 直流电压作用下电极间垂直沿线的电场分布
Fig. 7 Electric field distribution along the vertical line between the electrodes under DC voltage

3.2 参数影响规律

改变两层膜间油缝大小、粗化膜表面粗糙度、粗化膜质量法厚度、浸渍绝缘油的电导率,薄膜和油中特征点处的相对电场强度结果如图 8 所示。



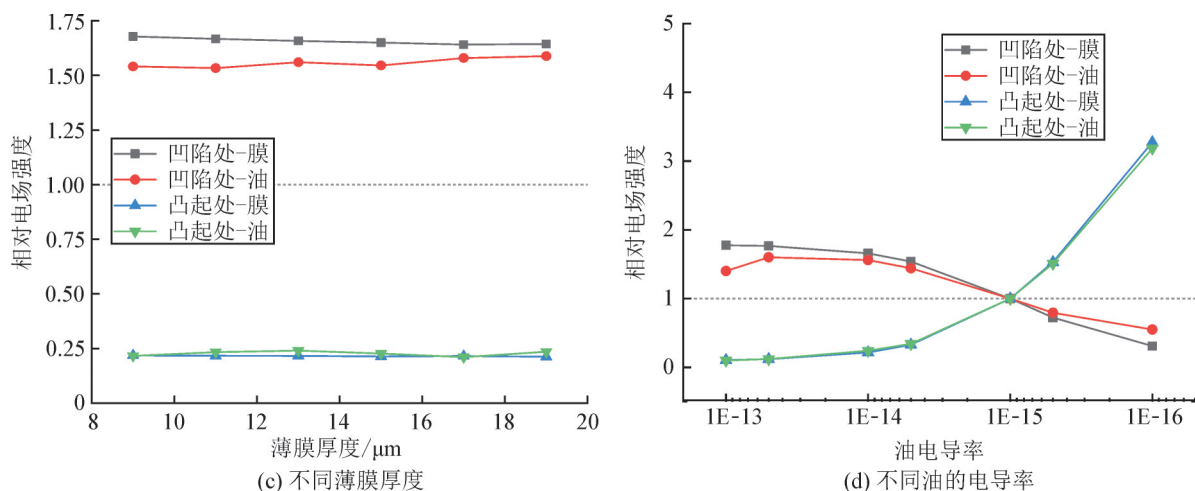


图8 不同参数下对直流电场作用下相对电场强度影响
Fig. 8 Influence of different parameters on the relative electric field intensity under DC electric field

由图8可看出,随着油缝增大,凹陷处油中的相对电场强度逐渐减小、凸起处油中的相对电场强度逐渐增大,并趋向平整薄膜情况;随着薄膜表面粗糙度的增大,相对电场强度变得越来越不均匀;薄膜厚度对相对电场强度的影响较小;绝缘油的电导率对直流电场分布影响很大,当油的电导率小于膜的电导率时,凹陷处膜和油中的相对电场强度较大,随着油中电导率的增大,凸起处膜和油中的相对电场强度变大、凹陷处膜和油中的相对电场强度变小。

4 结语

本文研究了油浸式电容元件内部金属箔、绝缘油和多层聚丙烯粗化膜共存,交、直流电压作用下聚丙烯薄膜粗糙度对电容元件内部电场强度的影响:

1)与平整薄膜相比,聚丙烯粗化薄膜表面的凸起和凹陷会畸变薄膜内部和绝缘油缝中的电场,导致局部电场集中,远超平整薄膜情况。

2)交流电场作用下,随着油缝增大,凹陷处膜和油中特征点处相对电场强度逐渐减小;薄膜表面粗糙度越大相对电场强度越不均匀;薄膜厚度对相对电场强度的影响较小;绝缘油的相对介电常数越大,场强不均匀程度越大。

3)直流电压作用下,油缝、薄膜表面粗糙度对薄膜和油中相对电场强度影响较大,薄膜厚度对相对电场强度的影响较小;绝缘油的电导率越小,凸起处膜和油中的相对电场强度越大,凹陷处膜和油中的相对电场强度越小。

基于本文研究得到的薄膜表面粗糙程度对电容元件内部电场分布影响的结果,可采用适当增大压紧系数减小油缝、合理范围内尽量减小粗化膜表

面粗糙度、选用相对介电常数小且电导率低的绝缘油等手段优化电容元件设计方法。

参考文献

- [1] 朱明轩,罗毅,杜纯钢,等. 高压滤波电容器在电力系统中的性能分析[J]. 电力设备管理, 2025(3): 279-281.
- [2] 黄润鸿,李明,刘阳,等. 换流站电力电容器塔噪声指向性的修正方法[J]. 南方电网技术, 2026, 20(5): 21-27.
HUANG Runhong, LI Ming, LIU Yang, et al. Correction method of noise directivity for power capacitor towers in converter stations [J]. Southern Power System Technology, 2026, 20(5): 21-27.
- [3] 陈力,汤霖,左中秋,等. 基于变异系数法和灰色关联度的高压并联电容器综合评价研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(5): 27-32.
CHEN Li, TANG Lin, ZUO Zhongqiu, et al. Research on comprehensive evaluation of high voltage shunt capacitor based on coefficient of variation method and grey correlation degree[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(5): 27-32.
- [4] 宋宇飞. 高压并联电容器补偿装置的元件选择及其运行分析[J]. 电工技术, 2021(9): 128-131.
SONG Yufei. Components selection and operation analysis of compensation installation of high voltage shunt capacitors[J]. Electric Engineering, 2021(9): 128-131.
- [5] 王柯,刘刚,孟森,等. 国产料聚丙烯电容膜的研发进展[J]. 高电压技术, 2025, 51(5): 2234-2245.
WANG Ke, LIU Gang, MENG Sen, et al. Research and development progress of domestic polypropylene capacitor film[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2234-2245.
- [6] 孙启明,祝令瑜,盖斌. 多谐波工况下高压并联电容器热稳定温度影响因素研究[J]. 高压电器, 2025, 61(8): 108-113.
SUN Qiming, ZHU Lingyu, GE Bin. Research on influ-

- ence factors of thermal stability temperature of high voltage shunt capacitor under multi-harmonics condition[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(8): 108-113.
- [7] 祝令瑜,孙启明,沈柯宇. 谐波相位影响的电压幅值对高压并联电容器温升特性影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(6): 27-32.
- ZHU Lingyu, SUN Qiming, SHEN Keyu. Research on the influence of voltage amplitude affected by harmonic phase on the temperature rise characteristics of high voltage shunt capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(6): 27-32.
- [8] 刘策,武胜斌,杨佩侠,等. 电力电容器元件电场强度有限元分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(4): 15-18.
- LIU Ce, WU Shengbin, YANG Peixia, et al. Finite element analysis of electric field strength on power capacitor component[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(4): 15-18.
- [9] 王佳昕,李化,王哲豪,等. 金属化膜电容器电极边缘电场畸变研究[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 29-36.
- WANG Jiaxin, LI Hua, WANG Zhehao, et al. Research on electric field distortion at the edge of metallized film capacitor electrode[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 29-36.
- [10] LIANG Y, WANG D, LIU D. Distribution and influence factors of electric field in high-voltage power capacitor[J]. IET Science Measurement & Technology, 2015, 9(6): 702-708.
- [11] 张丹丹,姚宗干. 脉冲电容器放电时边缘电场计算分析[J]. 高电压技术, 1995, 21(4): 14-16.
- ZHANG Dandan, YAO Zonggan. Calculation and analysis of the electrical field on the electrode edge of impulse capacitor under discharge voltage[J]. High Voltage Engineering, 1995, 21(4): 14-16.
- [12] 韩长伟,李晓军,马丽荣,等. 电力电容器元件内部的电场计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(6): 37-41.
- HAN Changwei, LI Xiaojun, MA Lirong, et al. Internal electric field calculation of power capacitor element[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(6): 37-41.
- [13] 王冰,唐乐天,王哲豪,等. 浸渍剂和压紧系数对全膜电容器端部电场分布的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(5): 71-76.
- WANG Bing, TANG Letian, WANG Zhehao, et al. Research on influence of impregnant and compaction coefficient on electric field distribution at the end of full film capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(5): 71-76.
- [14] 张血琴,吴广宁,曲衍宁,等. 高压储能电容器内部与油质缺陷的直流局部放电[J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 76-81.
- ZHANG Xieqin, WU Guangning, QU Yanning, et al. DCPD investigation on inner and oiliness defects of high-voltage storage capacitors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(2): 76-81.
- [15] 张建超,郭继芳,孟超. 高压电力电容器典型缺陷的静电场仿真研究[J]. 电源技术, 2009, 33(9): 787-789.
- ZHANG Jianchao, GUO Jifang, MENG Chao. Simulation study of typically defection in electrostatic field of high-voltage power capacitor[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2009, 33(9): 787-789.
- [16] 孙云娟. 平行板电容器极板间电场及电容的计算探讨[J]. 山西电子技术, 2020(5): 69-70.
- SUN Yunjuan. Calculation of electric field and capacitance between plates of parallel plate capacitor[J]. Shanxi Electronic Technology, 2020(5): 69-70.
- [17] OSTROWSKI J, HIPTMAIR R, FUHRMANN H. Electric 3D-simulation of metallized film capacitors[J]. COMPEL-The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2007, 26(2): 524-543.
- [18] JOUBERT C, BÉROUAL A, ROJAT G. Electric field and equivalent circuit in all-film capacitors[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 81(10): 6579-6584.
- [19] 张波,易承乾,药育帆,等. 柔直用金属化薄膜电容器多场耦合特性及影响研究综述[J]. 高电压技术, 2025, 51(5): 2219-2233.
- ZHANG Bo, YI Chengqian, YAO Yufan, et al. Review on multi-field coupling characteristics and effects of metallized film capacitors for flexible DC transmission[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2219-2233.
- [20] YI C, ZHANG B, LI C, et al. Transient current distribution among elements in metallized film capacitor for converter valves[J]. Journal of Physics D -Applied Physics, 2024, 57(11): 115502.
- [21] YI Chengqian, ZHANG Bo, LI Chaoran, et al. Calculation of current distribution inside the metallized film capacitor element at high frequency[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2025, 32(1): 127-135.
- [22] 蒋利军,秦华忠,熊勇,等. 特高压直流滤波器电容器组电场计算分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(3): 30-36.
- JIANG Lijun, QIN Huazhong, XIONG Yong, et al. Electric field calculation and analysis of UHV DC filter capacitor bank[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(3): 30-36.
- [23] 梅中原,史海洋,付大志. 高压电力电容器极板边缘电场

的简易计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(1): 42-50.

MEI Zhongyuan, SHI Haiyang, FU Dazhi. Simple calculation of electric-field at the foil edge in high voltage power capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(1): 42-50.

- [24] 闫澜锋, 刘刚, 刘锦宁. 有限元法分析金属杂质对电力电容器元件内部电场的影响[J]. 高压电器, 2012, 48(8): 118-122.

YAN Lanfeng, LIU Gang, LIU Jinning. Analyzing influences of metal impurities on internal electric field of power capacitors with finite element method[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8): 118-122.

- [25] 汪冬梅. 高压电力电容器物理场计算分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.

作者简介:

王锐(1983—), 男, 本科, 长期从事高电压与绝缘、无功设备等技术研究与应用。

易承乾(1996—), 男, 博士, 主要从事高电压与绝缘、多物理场仿真等技术研究。E-mail: chq-yi@163.com。

廖伟兴(1971—), 男, 本科, 主要研究方向为变电一次设备等。

刘刚(1985—), 男, 博士, 主要从事高电压与绝缘、新型电工装备等研究。

曹海兵(1988—), 男, 本科, 主要从事高压电气设备与绝缘、机械力学分析等技术研究。

姚露露(1996—), 女, 博士, 主要从事高性能电介质薄膜材料、电力电容器研究。

孟森(1996—), 男, 博士, 主要从事材料加工、薄膜电容器研发等研究。