第 51 卷 第 5 期：2219-2233 高电压技术 Vol.51, No.5: 2219-2233
2025 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241693

柔直用金属化薄膜电容器多场耦合特性及影响研究综述

张 波[1]，易承乾[1]，药育帆[1]，贾 华[2]，盖 斌[2]
（1. 清华大学电机工程与应用电子技术系，北京 100084;
2. 西安高压电器研究院股份有限公司，西安 710077）

摘 要：随着柔性直流输电技术的快速发展，作为重要配套设备之一的大容量金属化薄膜电容器在连续充放电等宽频暂态过程中，端口电流发生快速变化。导致电容器内部电流分布不均匀，影响内部多物理场分布和稳定运行。该文分析了柔直用金属化薄膜电容器面对的频率范围，介绍了电容器宽频计算模型、内部多物理场分布(电场、温度和应力)以及电流冲击对电容器性能影响的主要研究进展。发现开发性能良好的电容器不仅需要提升材料性能，还需要关注电容器分析与设计技术。最后，从设计和应用的角度对提升电容器性能的关键技术提出了展望。
关键词：金属化薄膜电容器；连续电流脉冲；多尺度计算；宽频模型；多物理场分布；性能劣化

Review on Multi-field Coupling Characteristics and Effects of Metallized Film Capacitors for Flexible DC Transmission

ZHANG Bo[1], YI Chengqian[1], YAO Yufan[1], JIA Hua[2], GAI Bin[2]
(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: With the rapid development of flexible DC transmission technology, large-capacity metallized film capacitor, as one of the important supporting devices, undergoes rapid changes in port currents during wide-frequency transient processes such as continuous charging and discharging. This leads to uneven current distribution inside the capacitor, which affects the multi-physics field distribution and stable operation. We analyzed the frequency range of metallized film capacitors for flexible DC transmission applications,and introduced the major research advances in capacitor wideband calculation models, internal multi-physical field distributions (electric field, temperature, and stress), and the effects of current surges on capacitor performance. It is found that the development of well-performing capacitors requires not only the improvement of material properties but also attention to capacitor analysis and design techniques. Finally, an outlook on key technologies to enhance the performance of capacitors was presented from both design and application perspectives.
Key words: metallized film capacitors; continuous current pulse; multiscale calculation; wideband model; multi-physics field distribution; performance deterioration

0 引言

在“双碳”目标背景下，构建新型电力系统已经成为电力行业转型发展的方向[1-4]。柔性直流输电技术是实现新能源输送和并网的关键技术，作为柔直换流阀核心部件之一的电容器，承担着支撑电压、平衡瞬时功率和滤波等重要功能[5-6]。

金属化薄膜电容器由于重量轻、结构紧凑、可自愈等优点[7-8]，被广泛使用在各类电力电子装备中[9-10]。以模块化多电平换流器(modular multilevel converter，MMC)为例，单个换流站中电容器使用数量上千台，电容器占据了换流阀子模块体积和重量的 60%以上，造价非常高昂，且电容器与电力电子开关一样，也是换流阀中失效率较高的组件，事故率仅次于电力电子开关[11-12]。除应用在电力工业外，金属化薄膜电容器也被广泛应用在高铁、电动汽车和军工等领域中。因此，金属化薄膜电容器的

基金资助项目：国家重点研发计划(2021YFB2401505)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2021YFB2401505).

性能需要重点关注[13-15]。

在柔直工况下，电容器面临着高电压、大电流、快电流变化率和高重复频率的工况，内部电磁耦合极为强烈，导致电容器内部电流分布不均匀，这种不均匀既体现在电容元件之间的电流分布上[16]，也体现在电容元件内部不同区域的电流分布上[17]。这会导致电容器内部局部区域的电场、发热和应力等集中，产生“木桶效应”，造成局部劣化加速，影响整台电容器的可靠性。

由于缺乏长期工程运维经验，应用于柔性直流输电工程的金属化薄膜电容器的诸多性能尚不清楚。近年来，随着柔直工程建设和金属化薄膜电容器国产化的加速[18-19]，柔直用电容器相关研究成为热点。目前国内外学者研究的关注点多集中在电容薄膜材料[20]和金属化蒸镀[21]上，在低频稳态下对电、热、力等物理场作用下电容元件或金属化薄膜的性能演变开展了部分基础研究[22-23]。极少从电容器设计和实际工况下运行性能的角度出发，考虑电容器内部物理场分布及其对性能的影响。然而除了提高材料性能外，研究电容器内部多场分布及影响也是高性能电容器研发的关键技术之一。

本文首先介绍了柔直用金属化薄膜电容器应用的宽频范围和电容器内部多尺度结构。然后收集整理了大量文献，总结了电容器宽频模型、内部多物理场分布以及电流冲击对电容器性能影响的主要研究进展。最后，从设计和应用的角度对提升电容器性能的关键技术提出了展望。期望能对未来金属化薄膜电容器的故障分析、性能评估和设计优化提供指导。

1 柔直用电容器频率范围与多尺度结构

1.1 宽频范围

在柔直换流阀中金属化薄膜电容器上电流的频率跨度非常广，如图 1 所示。以 MMC 为例[24]，换流阀稳定运行时，每个桥臂上的众多子模块 SM 和桥臂电感 L_0 串联，电容器上电流的频率分量主要为工频和二倍频(环流)等[25-26]。在进行型式试验或发生短路故障时，电容器会承受少数几次短路大电流冲击的作用，电容器通过短路回路上的电阻 R_1 和电感 L_1 放电，电容器上的电流往往为欠阻尼振荡波形，振荡频率为数千赫兹，峰值电流可达数百千安，重复频率通常较低[27]。在电力电子开关投切的暂态过程中，在子模块投入运行后，电容器 C_1 被串联在桥臂电路中，电容器将进行低频充电或放电，电流波形与桥臂电流波形一致。在子模块投入前，电容器上的电流为 0，投入瞬间电流迅速上升为桥臂电流，此暂态过程往往较快，可在数微秒内完成[27-29]，如图 2 所示。因此，在电力电子开关(VT_1 与 VD_1 或 VT_2 与 VD_2)投切瞬间，电容器端口电流在 0 和数千安之间快速切换，即金属化薄膜电容器长期承受着连续脉冲电流的冲击，开关动作瞬间电容器承受的电流脉冲频率可达兆赫兹量级，电容器承受的脉冲电流峰值可达数千安，子模块投切的频率通常为数百赫兹。当电容器承受连续电流脉冲作用时，电容器上的电压也将随之发生波动，如图 2 所示，在额定运行电压上还叠加了其他频率的电压，此时电容器实际运行工况较为严苛[26, 30-31]。综上可知，对大容量金属化薄膜电容器性能的研究需要考虑从工频至数兆赫兹的宽频范围。

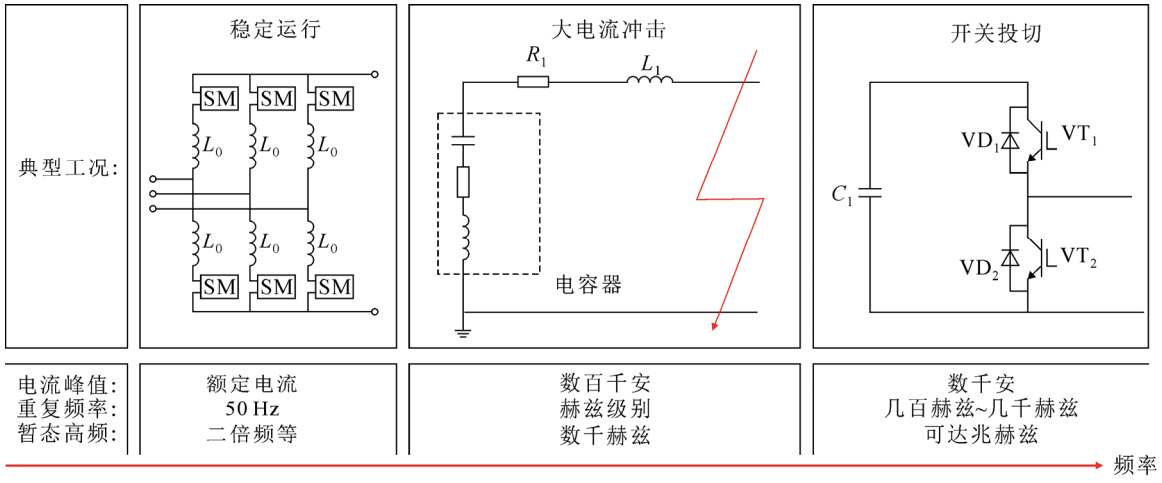


图 1 金属化薄膜电容器应用宽频范围

Fig.1 Wide frequency range for metallized film capacitor applications

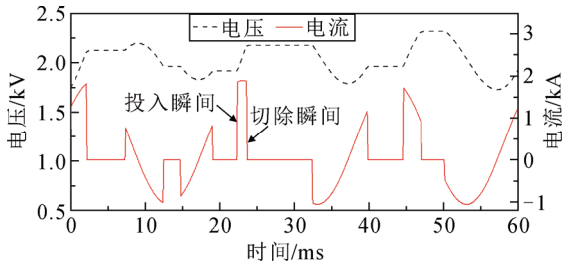


图 2　某 MMC 连续运行时电容器上电压电流波形

Fig.2　Voltage and current waveform of a metallized film capacitor in MMC during continuous operation

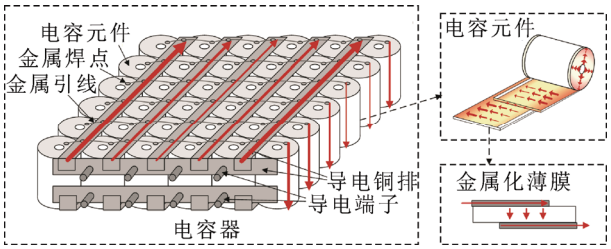


图 3　电容器内部多尺度结构与电流示意图

Fig.3　Schematic of multi-scale structure and current inside a metallized film capacitor

1.2　电容器内部多尺度结构

为满足高压和大容量(数毫法量级)的需求，1 台柔直用金属化薄膜电容器往往由数百个电容元件通过金属引线串并联焊接而成，其中每个电容元件由数千层金属化电容薄膜卷绕后端面喷金而成。电容元件与金属铜排焊接好后还需放置在金属外壳内，并浇筑绝缘介质(通常为聚氨酯)填充固化后才算完成了整台电容器的制作。

从内部结构上看，1 台大容量电容器可划分为 2 个尺度，如图 3 所示，首先是电容元件尺度(数十厘米尺度)，整台电容器的长宽约为数十厘米，单个电容元件的直径通常为几厘米。另一方面是元件内部薄膜尺度(微米尺度)，1 个电容元件由数千层金属化薄膜围绕空芯绝缘轴卷绕而成，电容薄膜的厚度在微米级，蒸镀金属层的厚度在纳米级。在脉冲电流的冲击(高频电流作用)下，电容器内部各尺度上的电流都会分布不均匀，即电容器内不同电容元件之间承受的电流存在差异，电容元件内部不同区域薄膜上承受的电流也会存在差异。

2　电容器宽频计算模型

电容器性能的劣化是由电容器实际承受的电压和电流所导致的，因此，需要在宽频范围内，从整体到内部依次研究电容器的电压和电流特性，特别是宽频计算模型。

2.1　整体等效电路模型

电容器端口的阻抗特性与内部电流分布紧密相关，是内部特性的宏观体现。通常认为电容器由等效串联电感 L_s、等效串联电容 C_s 和等效串联电阻 R_s 3 个部分串联组成[32-33]，如图 4(a)所示。此简单模型可满足低频下的需求，但是在高频下测量结果与基于此简单串联模型获得的结果相差较大。

如图 4(b)所示，文献[34-35]通过分析电介质薄膜中各部分电流的物理含义，在电容器等效电路中引入电介质无损极化支路(C_p)、有损极化支路(C_{DA} 和 R_{DA})、表示电介质泄漏电流的泄漏支路(R_p)、表示趋肤效应的支路(L_p 和 R_L)等，极大地扩展了电容器等效电路的适用频率范围。文献[36]通过测量电容器的阻抗特性发现，随着频率的增加，在某些频率下会出现阻抗值突变的点，推测这可能与内部局部区域的谐振有关。文献[37]根据宽频阻抗测量结果中的多个谐振点，修正了阻抗表达式中零极点的数目，以此为依据增添了等效电路中的支路。华中科技大学李化等学者对电容元件进行了多次脉冲放电实验，分析了电容元件不同位置等效电阻的变化情况并建立了等效电路模型[38]。清华大学团队研究发现采用图 4(b)中的等效电路可对单个电容元件在低频(<150 kHz)下的阻抗特性进行较好地描述，但不适用于高频情况，采用数据拟合的方式获得了高频下单个电容元件等效电感和等效电阻的变化情况[39]。综上可知，在高频下电容器内部的电流分布会发生变化，这将导致整台电容器的等效电感值和等效电阻值发生变化，与低频下的数值存在较大差异。

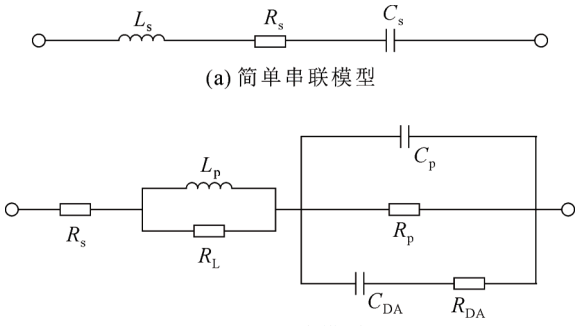


图 4　电容器等效电路图

Fig.4　Equivalent circuit diagram of a capacitor

2.2　内部电流分布计算模型

在电容元件内部电流沿径向方向分布的研究

中，Ch. Joubert 等学者将电容元件内部的蒸镀金属层和电介质薄膜视为同一种物质，把围绕绝缘芯棒卷绕而成的电容元件等效为一圈圈的同轴圆柱薄壳，忽略电容元件内部的电磁场沿轴向方向上的差异简化模型，考虑变化电流在电容元件中产生的感应电动势，获得电容元件中电流密度和磁感应强度的解析表达式，计算出考虑介质损耗和不考虑介质损耗 2 种情况下的电流密度随半径的变化趋势[40]。发现在高频下电流密度沿径向方向分布极不均匀。在此基础上还研究了金属端面上电流注入点不对称时，蒸镀金属层上感应涡流对电容元件内部沿径向方向上的电流分布的影响，如图 5 所示，并通过测量端口阻抗谱和外部感应电压等方式验证了计算结果[41]。

电容元件内部电流沿轴向方向分布的研究多基于传输线方法进行。文献忽略电容元件中电介质薄膜承受的电压和电流沿径向方向上的差异，将其简化为平板结构，考虑电介质薄膜的电容和蒸镀金属层的电阻，采用传输线方法计算了沿轴向方向的电场强度分布，发现轴向的电场强度两端大、中间最低，在高频下更加明显[37,42-44]。文献[45]考虑了单端连接和双端连接 2 种情况进行研究，发现在高频下电介质薄膜中沿轴向方向的电压和电流分布不均匀。文献[46-47]采用等效电路变换的形式获得解耦的等效电路单元，将电容元件沿轴向方向剖分为 10 小段进行等效电路求解，如图 6 所示，图中各小段参数的含义见文献[46]，结果与直接采用传输线方程求解得到的结果一致，均发现电容元件内部电流沿轴向方向不均匀。文献[48]研究了基于传输线方法计算电容元件沿轴向方向电流密度分布不均匀程度时，采用不同等效单元的差异。

清华大学团队考虑电容器内部复杂电磁耦合特性，分别建立了电容元件间电流分布等效电路模型[16]和电容元件内部电流分布 3 维计算模型[17]，如图 7 所示，并通过实验进行了验证，图中各参数具体含义及取值方法见文献[16]。基于此模型计算了电容器内暂态电流波形[49]，如图 8 所示。

为验证计算模型的准确性，通常需要与实验测量结果进行对比。但是电容元件内部的电流分布难以通过直接测量来验证，现有研究中通常测量电容元件外部的电磁场分布情况来反推内部的电流分布。国外有学者考虑电容器内部的电磁场分布[50-51]，研究了薄膜电容器等效辐射源的建模方法，搭建了

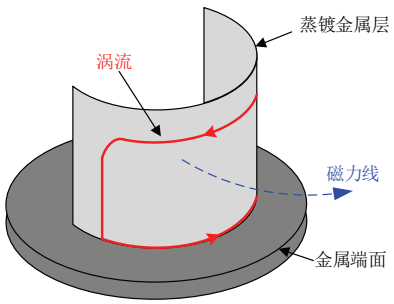


图 5 金属层上感应涡流示意图

Fig.5 Schematic diagram of induced eddy currents on a metal layer

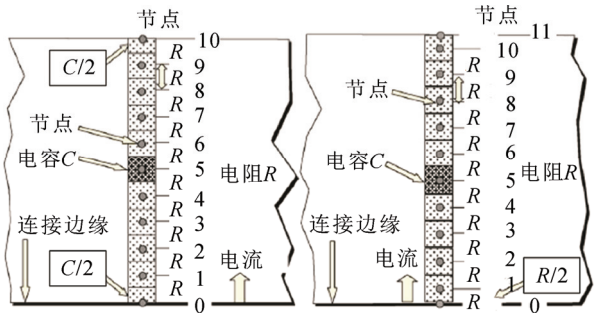


图 6 文献中计算沿轴向方向电流分布的示意图[46]

Fig.6 Schematic diagram for calculating the current distribution along the axial direction in literature[46]

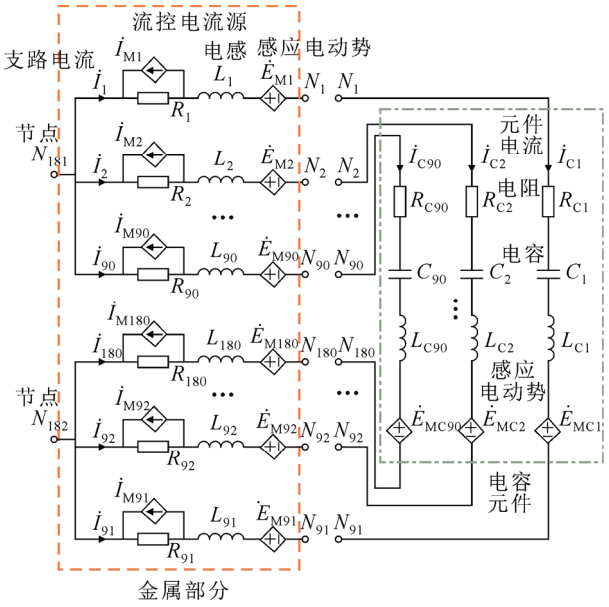


图 7 金属化薄膜电容器内部电流分布计算模型[16-17]

Fig.7 Calculation model of current distribution inside a metallized film capacitor[16-17]

由 1 台射频发生器、1 个探头、1 个定位台和 1 台用于控制和数据采集的计算机组成的测量装置，提出了一种非侵入式的电容器磁场无损方法，测量了高

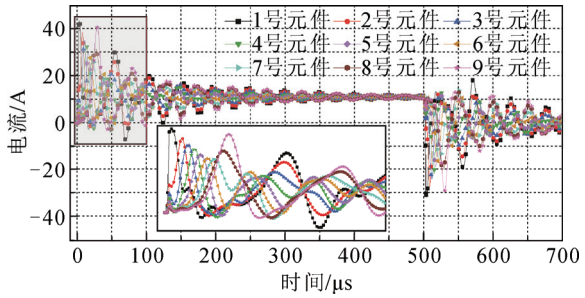


图 8　方波电流作用下第 1 列元件上的暂态电流波形[49]

Fig.8　Transient current waveforms on the first column of elements under square wave currents[49]

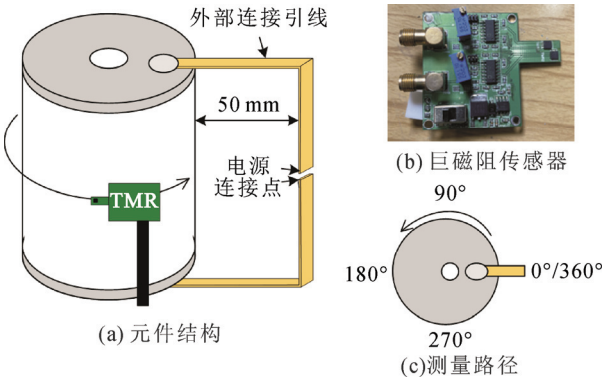


图 9　电容元件外围磁场分布测量示意图[17]

Fig.9　Schematic diagram of magnetic field distribution measurement outside a capacitor element[17]

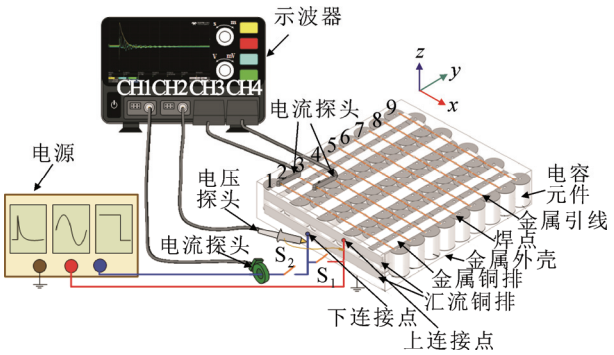


图 10　电容元件间电流分布特性测试平台示意图[16]

Fig.10　Schematic diagram of the test platform for current distribution among capacitor elements[16]

频下单个电容元件周围的磁场分布情况，并重构了电容器内部的电流密度分布，发现在某些频率附近，电容器中的电流密度变得不均匀，并在某些区域急剧增加。清华大学团队使用巨磁阻传感器(tunneling magnetoresistive sensors，TMR)[52-53]对单个电容元件外围的磁场进行了测量，如图 9 所示，与使用模型计算得到的结果对比可知，2 者的一致性验证了电容元件内部电流分布计算模型的准确性。搭建了电容元件间电流分布测试平台，如图 10 所示，测量了不同波形下元件间电流分布特性，并与模型计算结果对比验证了模型的准确性。

2.3　宽频计算模型研究小结与不足分析

综上可知，当前研究中根据物理含义采用多支路方式建立的等效电路模型，可对电容器或电容元件在一定频率范围内的阻抗特性进行较好地描述。但使用整体等效电路模型无法获得电容器或电容元件内部的电流分布特性。

针对内部电流分布，少数国外学者通过简化模型建立了可计算单个电容元件内部电流分布的模型，但只能计算沿 1 个方向(轴向或径向)上的电流分布规律。清华大学团队采用多层等效简化的方法建立了电容器内部电流计算模型。受限于算力和求解方式等，目前文献对多层卷绕结构的电容元件做了大量的等效简化，且等效方式较为简单。例如，在不同频率下均采用了相同的等效简化方式，这将影响模型计算的精度。此外，目前文献中建立的宽频计算模型中多采用固定参数，少数学者考虑了材料参数的频变特性，但均未在模型中考虑高电场和高温下材料的非线性特性。

3　电容器内多物理场分布特性

在高频电流脉冲作用下，受电容器内部电流分布不均匀的影响，电容器内部极易出现局部电场[54-55]、温度[56-58]和应力等物理场集中，影响电容器的性能。因此需要对电容器内部的物理场分布进行研究，但内部的电场、温度和应力等难以采用实验测量的方法直接获得，目前多采用计算的方法对电容器内多物理场分布进行研究。

3.1　电场

当前研究通常将电容元件内部多层卷绕结构简化为若干层平板结构进行分析。文献[59]对电力电容器的元件结构进行了分析，将电容器元件的场强分布归纳为平行均匀电场区域和电极端部等区域，采用有限元方法[60]对电容器简化模型的电场进行了计算和分析，找到了元件中最大电场强度的数值和出现的位置，对最大场强出现的区域进行了结构优化。华中科技大学的李化等学者考虑金属化薄膜卷绕过程中形成的空气间隙，以 T 型金属化膜电容器为研究对象，采用有限元方法对金属电极-电介质薄膜-空气间隙 3 结合点附近的电场分布情况进

行了计算，使用电场分布的理论解析式对电场计算结果进行了拟合，定义拟合系数为电场畸变系数来评估电场畸变程度[61]。Ch. Joubert 等学者将电容元件内部的多层卷绕结构等效为平板电容结构，通过保角变换的方法，研究了蒸镀金属电极边缘的电场情况[42]。

文献[62-63]针对脉冲电容器放电瞬间的电压特征，同时考虑电容元件内部聚丙烯薄膜和甲基硅油的介电常数和电导率对电场分布的影响，提出了基于有限元方法的放电瞬间电场分布计算方法，分析了电容元件内部界面电荷对脉冲电容器边缘电场分布的影响。文献[64]将金属化薄膜等效为 2 维壳层，研究工频下的金属化薄膜电容器内部的电场分布，发现有缺陷的蒸镀金属电极边缘电场较大。西南交通大学的吴广宁等学者考虑电容器内部可能的多种典型缺陷和包含的杂质，使用有限元方法分析了 2 维平面轴对称电场，发现内部缺陷处的电场强度可能超过介质额定工作场强，并研究了内部缺陷与局部放电的关系，如图 11 所示[65-68]。

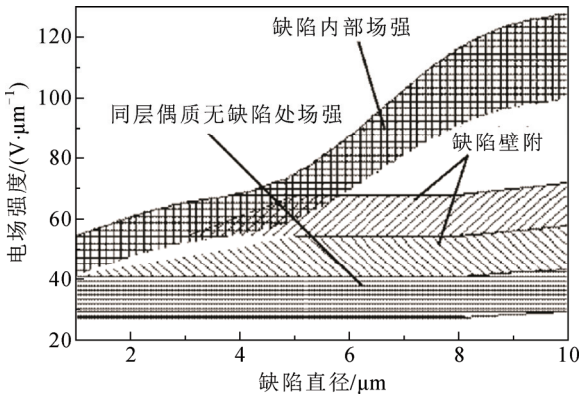


图 11 文献中缺陷直径与电场强度关系[66]

Fig.11 Defect diameter versus electric field strength in literature[66]

3.2 温度

有学者将电容元件的蒸镀金属电极与电介质薄膜等效为一种介质，建立了金属化膜电容器的温度场模型，认为损耗在元件上均匀分布，计算得到电容器的温度分布结果[69]。考虑电容元件在轴向、环向和径向上热导率的差异，研究了不同方向上热导率的计算方法，采用各向异性的热导率对电容器进行了温度分布计算，并从温升角度对电容器的结构进行优化研究[70]。

华中科技大学李化等[71]和重庆大学李辉等[72-73]学者进一步考虑了电容元件的金属损耗沿轴向的不均匀分布，如图 12 所示，认为金属层上的电流在轴向方向上呈线性分布[74]，并考虑电介质薄膜内部的电导损耗[75]和极化损耗，由此得到更准确的发热功率，计算了电容器内部温度分布并与实测结果进行了对比[76-77]。中国电科院学者研究了渐变方阻对发热功率的影响[78]，开展了不同图案下蒸镀金属层的等效串联电阻计算[79]，分析了元件直径/数量和排布方式对电容器温升的影响，通过比对不同元件摆放以及不同元件直径下的电容器温度最大值，得出元件直径和摆放并不会对电容器的温度场造成明显影响的结论[80]。此外，还有学者考虑实际工况中存在的谐波电流，研究了电流谐波对电容元件的影响，发现谐波电流会使电容器内部温度升高、加速电容

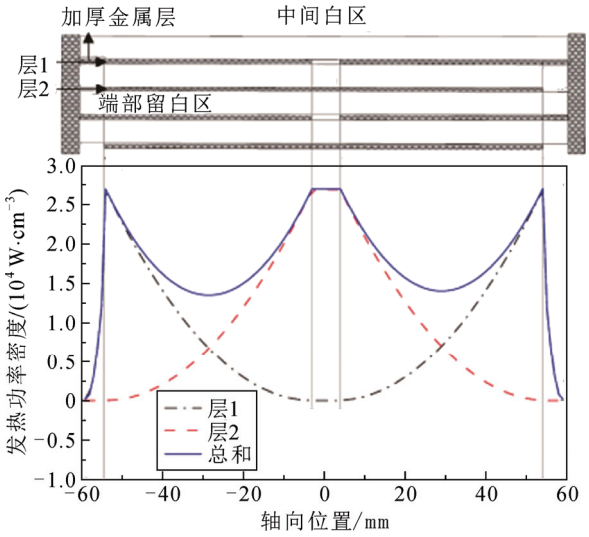


图 12 文献中元件内部沿轴向不同位置上的发热功率[71]

Fig.12 Heat generation power at different locations along the axial direction inside an element in literature[71]

器的老化[69, 81-82]。在此基础上，清华大学团队基于计算得到的连续脉冲电流作用下电容元件间电流分布结果，计算了电容器内部温度分布，如图 13 所示，发现元件间发热功率不均匀分布对电容器内温度分布有很大的影响。

3.3 应力

当蒸镀金属层的边缘或蒸镀金属层上存在空白区域时，在脉冲电流作用下，金属边缘的局部电流密度会变得比其他区域的大，如图 14(a)所示，边缘受到的瞬态应力也远比其他位置的大[83-84]，这种瞬态应力分布不均会导致蒸镀金属层从边缘位置开始撕裂。

电容元件是由金属化电介质薄膜围绕绝缘芯轴卷绕而成的，在卷绕过程中，由于薄膜的堆叠，

内层的应力将大于外层的应力。华中科技大学的李化等学者考虑卷绕过程中拉力恒定的情况，分析每层薄膜微元的径向力与压强的关系，根据压强传递原理计算并测量了电容元件内部不同层位置的压强大小，发现内层压强最大，随着位置往外层移动，压强逐渐下降且下降速度逐渐减小[85-86]。

在电容元件内部，从内层到外层是正负电极交错排列的，如图 14(b)所示。当有电容元件承受电压时，相邻极板之间会受到吸引的力，此时电容薄膜上承受的压力会增加。西安交通大学汲胜昌和祝令瑜等学者考虑电容器内部的受力特性，发现中间的极板处于动态平衡状态，整体表现为最上层和最下层的极板受到静电力产生振动[87-90]。在此基础上研究了不同频率下电容器的噪声特性，并搭建了一套基于激光测振仪的电容器外壳振动测量系统进行了实验验证。

对于整台电容器，文献[91]基于磁-结构耦合特性，计算了电容器突发短路故障时内部应力分布以及形变情况，发现电容器内部受力形变区域主要在引出铜板及其附近区域，且中部比两端大。

3.4　电容器内部多场分布研究小结与不足分析

目前针对电容器内部电、热、力分布开展了大量研究。在电场研究方面，研究通常在低频下进行，认为电容器内部所有电容元件承受的电压和电流相同，取 1 个电容元件为研究对象，简化成 2 维平面结构后开展电场分布特性研究。多关注电极边缘或存在杂质时电场的畸变情况。在温度分布研究方面，通常认为电容器内部每个元件、每个元件内部不同区域薄膜内部流过的电流均相同，考虑电容元件不同方向热导率差异，计算了电容器或电容元件内部的温度分布情况。在应力研究方面，从薄膜到电容器，在特定工况下忽略周围元件的影响，简化模型分析了电容器内部的应力大小。

尽管学界在电容器内部多物理场分布的研究上取得了很多成果，但仍存在一些不足之处。目前研究中大多未考虑柔直工况下电容器内部存在的电流不均匀分布现象，及其造成的电场、温度和应力分布不均匀。在建模计算或分析时不能简单认为各处电流相同对电容器内部结构进行简化。

另一方面，电容器内部的多物理场分布是相互耦合的，当电容器受到电流脉冲作用时，电容器内部会出现温升、局部电场集中和应力增大等现象；高温会使电容薄膜的介损和电导等增大，改变电容器内部的电流分布特性，高温产生的热膨胀会增大电容器内部的局部应力；应力过大会使电容薄膜发生形变进而影响其电气参数，会影响电容元件端部连接导致发热增加等。因此，需要考虑电容器内部电、磁、热、力等物理场的相互耦合作用，然而目前的研究仅针对单一物理场分布进行，并未耦合其他物理场的影响(或忽略众多因素进行解耦计算)。受电容器内部紧凑结构和连续电流脉冲的影响，电容器内部的物理场之间往往是高度耦合的，因此后续还需要对电容器内部多物理场耦合计算模型和分布特性开展研究。

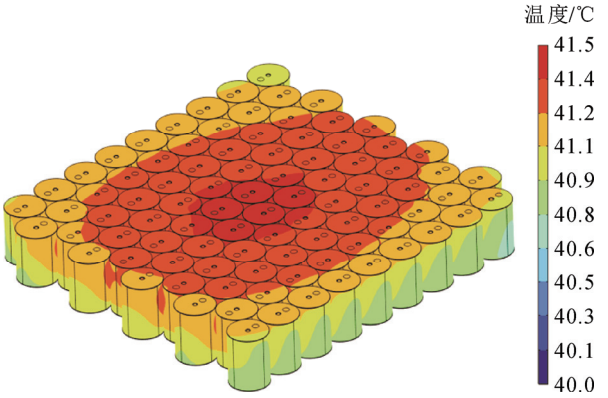
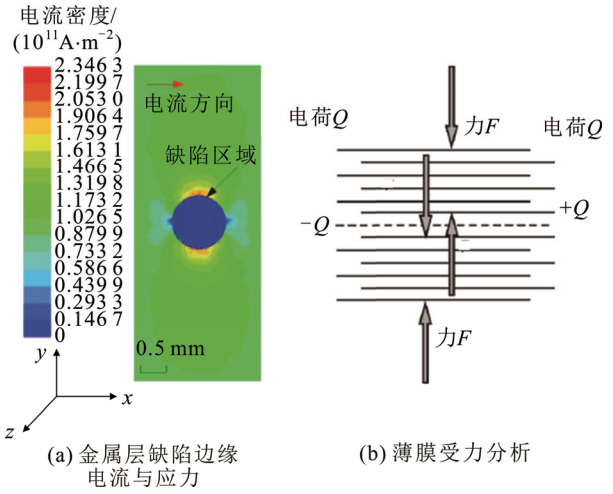


图 13　考虑电容元件间发热功率差异的电容器温度分布

Fig.13　Temperature distribution inside a capacitor considering the difference in heating power among elements



(a) 金属层缺陷边缘电流与应力　(b) 薄膜受力分析

图 14　文献中电容元件内部应力示意图[84, 87]

Fig.14　Schematic representation of internal stresses in a capacitor element in literature[84, 87]

4　电流冲击对电容器性能的影响

在连续充放电等宽频暂态过程中，柔直用金属

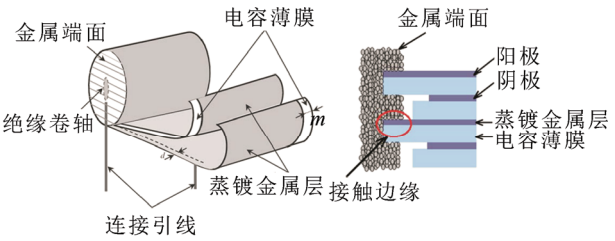
化薄膜电容器承受着连续脉冲电流的冲击，导致内部出现电、热、力等物理场局部集中，进而影响电容器的性能，因此需要研究电流冲击对电容器性能的影响。流入电容器的电流分散到各元件后，在元件内部依次流过金属端面、蒸镀金属层和电介质薄膜，然后汇聚到另一极性的蒸镀金属层和金属端面上流出元件，最后各元件上的电流汇聚流出电容器。在电流冲击作用下，电容器内部不同位置均可能发生故障。当前学者针对电容元件端部脱落、内部蒸镀金属层烧蚀与腐蚀、金属化薄膜自愈开展了研究。

4.1 端部脱落

在大电流冲击下，电容器的可靠性通常会降低[92-93]。金属端面与蒸镀金属层的连接处往往容易出现问题，如图 15 所示。文献[94]研究了峰值过载 40 倍的脉冲电流作用下金属化膜电容器端部连接的衰减特性，发现随着电流脉冲作用次数的增加，电容器的损耗逐渐增加，且损耗峰向低频区域移动。Nucci 等学者通过控制流过电容元件的脉冲电流波形，使得流过电容元件的总能量不变，改变脉冲电流的峰值对电容元件进行多次实验，发现电容元件性能的衰退与电流峰值密切相关[95-96]。认为电容元件性能的衰退与电和应力相关，与热无关，并提出了在金属端面接触部分并联一个放电间隙的等效电路模型。华中科技大学林福昌等学者通过设计类似金属化电容器的样品进行对比实验，发现电应力及电导致的机械应力对金属端面与蒸镀金属层端部之间接触的老化有不可忽略的影响，而热应力对端部接触的影响不起主要作用[97-99]。

4.2 蒸镀金属电极面积损失

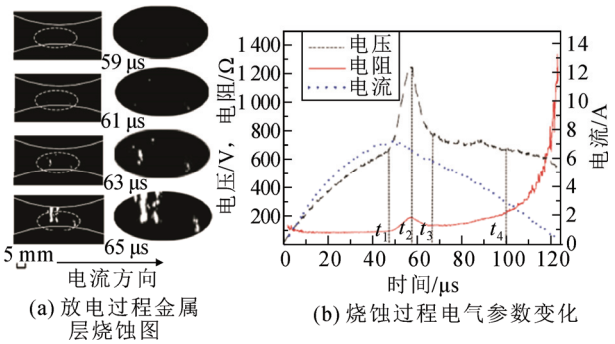
电流冲击对蒸镀金属层损伤的研究通常在一片面积较小的蒸镀金属层上进行。文献[100]发现端部接触退化主要是蒸镀金属层的退化，此类接触退化与电流脉冲的极性和接触边缘耗散的能量等有关。通过在一片蒸镀金属层上施加不同的电流密度研究发现，当蒸镀金属层上电流密度过大时可导致金属层出现裂缝并定向发展[101]；相比于磁压和热应力等因素，焦耳热和裂纹尖端的电爆炸作用[102]对金属层的断裂起到更关键的作用[103]。如图 16 所示，综合高速相机记录的放电瞬间照片和示波器记录的电压电流波形[104]，分析后发现高电流密度和高 di/dt 可能导致金属电极断裂[84]，且断裂方向垂直于电流方向，仿真分析发现金属缺陷处的电流密度[105]和电磁力较大，这可能是导致金属电极断裂的原因[83,106]。



(a) 电容元件同轴卷绕内部结构 (b) 元件端部接触示意图

图 15 电容元件端部连接示意图[100]

Fig.15 Schematic diagram of the capacitor element end connections[100]



(a) 放电过程金属层烧蚀图 (b) 烧蚀过程电气参数变化

图 16 文献中的蒸镀金属层烧蚀过程[83]

Fig.16 Ablation process of vaporized metal layers in literature[83]

当电容器上的电压或电流快速变化时，其性能将发生劣化[107-108]。在交变电压作用下，受残留的水分等影响，蒸镀金属层中的铝电极会发生腐蚀[109]。为模拟实际换流阀中的工况，有学者搭建了高压直流叠加不同含量谐波的实验平台进行研究[69, 110]，在直流叠加谐波作用下，金属化膜的击穿场强和击穿相角分布与交直流电压比例间存在显著关系[111]，且膜厚对此有较大影响[112]。金属化薄膜表面蒸镀金属层在高谐波含量作用下更容易出现电化学腐蚀，表现出“先快后慢”的交流老化特性，在腐蚀区域，氧元素聚集性存在并出现清晰轮廓，而锌元素和铝元素并未减少；此时蒸镀金属层中导电的金属(锌和铝)转化成不导电的氧化物，且通常腐蚀边缘比较规则和平整，呈现由中心向外圆形扩展的年轮状纹理[113-114]。金属化膜电容器在高压直流电场与谐波耦合作用下的加速失效，是金属化膜有效面积腐蚀损失和电容薄膜基膜性能下降的共同作用结果[114-115]。

4.3 自愈

当受到外部大电流冲击时，电容元件内部的金属化薄膜容易发生自愈，在发生自愈的暂态过程中，自愈点相当于短路，会产生较大的暂态冲击电流，

周围蒸镀金属层流过大电流极易蒸发[116]，此时电容元件内部的电流分布与正常情况存在较大差异。当发生自愈时，不仅存在外电源对自愈点的放电，还需要考虑周围电容薄膜对自愈点的放电，通常用自愈能量或自愈面积来表征自愈过程。Belko V 等学者使用电容通过 1 个动态电阻放电的等效电路模型来描述自愈过程[117-118]，将自愈过程分为初始阶段(动态电阻减小)—电弧放电阶段(保持较小动态电阻)—电弧熄灭阶段(动态电阻增大) 3 个阶段，自愈电流先快速上升达到峰值后快速下降至 0，整个过程在数微秒内完成，此过程与金属层方阻、压力和薄膜参数等密切相关[119]。李化等学者建立自愈过程热学等效模型研究发现自愈能量和自愈面积成正相关[119]。文献[120]同时考虑外电源和自愈点周围储存电荷对击穿点放电的影响，采用等效圆环法建立了自愈放电暂态计算模型，计算发现自愈能量主要来源于自愈点周围镀层上储存的能量，蒸镀金属蒸镀层的方阻越大自愈能量越小。清华大学党智敏等学者采用实验结合计算的方法研究了压力对自愈过程的影响[108]，并建立了自愈过程等效电路，研究发现压强越大自愈能量越小，电容元件内层的自愈点大小和数量均小于外层[85]。西安交通大学学者使用自愈等效电路模型研究了不同电介质材料类型对自愈过程的影响[121]，认为仅有自愈点周围一定面积内的电容提供自愈能量而非整个电容器，自愈能量并非正比于电容量，而是与介电常数有关。

文献[122]采用有限元方法，考虑从金属层到聚合物薄膜上的热流，提出了金属化薄膜电容器分段电极设计的仿真模型[123]，研究了自愈过程中电流对分割电极的破坏，优化了蒸镀金属图案[124]。文献[125]通过分析分割膜中各微单元的能量和实际蒸镀的结构特征，根据逐级的能量分析计算和安全膜的自愈原理，提出了一种新型的自动串并联高方阻金属化安全膜[126]。

4.4　电流冲击对性能影响研究小结与不足分析

目前学者针对电流冲击下，电容元件内部可能发生的端部金属脱落、蒸镀金属电极面积损失和自愈面积增大等问题开展了研究，从电、热和应力的角度对故障过程进行了分析。但当前文献中的研究对象基本为金属化薄膜或小型电容元件模型，多针对电介质材料或蒸镀金属的劣化特性开展基础研究。未考虑大容量电容器中不同元件间的相互影响，未结合电容器内部实际的不均匀多物理场分布对内部不同区域的性能演变进行分析。综上可知，当前关于电流冲击对金属化薄膜电容器性能的影响研究还不够细致。

5　总结与展望

5.1　总结

通过总结目前国内外关于电容器内部电流分布宽频计算模型、电容器内部多物理场分布和电流冲击对电容器性能影响的主要研究，得到以下结论。

1）在柔直工程中，电容器上承受电流的频率范围较宽(从工频到兆赫兹)。在电容器内部复杂电磁耦合的影响下，内部多尺度(电容元件尺度和元件内部薄膜尺度)上的电流分布都可能不均匀，需要重点关注。

2）在高频电流下，整台电容器内电容元件之间的电流分布和单个电容元件内部不同区域之间的电流分布都不均匀。受限于算力、求解方法和测量验证手段，当前仅有的少数电容器内部电流分布计算模型进行了许多简化等效，精度和应用场景受限。且模型中的参数未考虑高电场和高温下材料的非线性特性。

3）当前学者分别对电极边缘电场、电容器内部温度分布和电容器内部应力分布做了大量研究，并提出了相应的优化设计方法。但这些研究大多在低频下进行，未考虑电流分布不均匀对电容器内部局部电场、温度分布和应力分布的影响。且当前模型仅能计算单一物理场分布，无法进行多物理场耦合分析。

4）当电容器承受电流冲击时，电容元件内部可能会出现金属端部脱落、蒸镀金属电极面积损失和自愈面积变大等问题。然而目前针对这些故障的研究多在金属化薄膜上进行，重点关注电介质材料或蒸镀金属材料的性能。未考虑实际电容器结构下内部不均匀分布电流对性能的影响。

综上可知，当前研究往往忽略高频下电容器内部的不均匀电流分布，多在材料层面进行。未从电容器设计和实际工况下运行性能的角度出发，研究电容器内部物理场分布及其对性能的影响。

5.2　展望

随着计算、传感、物理和材料等学科或技术的发展，未来针对电容器的劣化分析、性能评估和设计优化等要求，需要在计算模型、传感监测、性能分析和推广应用等方面开展深入研究，主要包括以

下几点。

1）采用实验结合计算的方式，获得高电场、高温和大应力对模型计算用参数的影响规律。综合当前研究中频率对电容器参数的影响规律，建立参数耦合的电容器内部多物理场分布计算模型。为金属化薄膜电容器的应用分析和设计优化等提供计算工具。

2）开发能直接对电容器内部物理量分布进行测量的传感技术，对现有计算模型进行验证和修正。研究多种传感技术的快速信号采集和处理方法，实现对电容器内部物理场分布的在线监测。监测到的物理量既能完善计算模型中参数，又能直接为现场运维提供指导。

3）对电容器进行多工况下的长期考核后，拆解电容器测量获得内部不同区域材料的劣化特性。结合实际工况下电容器内部物理场分布情况，研究内部局部薄膜特性(击穿强度、自愈形貌、泄漏电导和介电损耗等)与宏观电容器性能(电容值、等效电阻和整体温升等)之间的关联机制，对复杂工况下金属化薄膜电容器的可靠性进行综合评价。这样不仅能对电容薄膜和蒸镀金属等从材料性能方面提出优化方法，还能对排布摆放和连接方式等产品设计方面提出优化方法。

4）拓宽金属化薄膜电容器的应用场景。金属化膜电容器除应用在柔直工程外，还可应用于电磁脉冲武器等领域，正常工作时电容器将长期承受大电流冲击(远大于柔直中正常运行的电流峰值)，但重复频率和冲击电流振荡频率比柔直下的要低。不同应用场景下电容器内部电流分布特征及影响仍需要探究。拓宽应用场景有助于扩大金属化薄膜电容器的市场需求，降低金属化薄膜电容器的生产成本，在粒料生产、拉膜、蒸镀和卷绕制造等环节上均实现技术的加速迭代，形成一套成熟的金属化薄膜电容器设计与制造方法。

参考文献 References

[1] 张智刚，康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报，2022，42(8)：2806-2818.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818.

[2] 刘吉臻，王庆华，胡 阳，等. 新型电力系统的内涵、特征及关键技术[J]. 新型电力系统，2023，1(1)：49-65.
LIU Jizhen, WANG Qinghua, HU Yang, et al. Connotation, characteristics and key technologies of new power systems[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(1): 49-65.

[3] 侯 恺，刘泽宇，贾宏杰，等. 含高比例可再生能源的电力系统运行可靠性解析评估方法综述[J]. 高电压技术，2023，49(7)：2697-2710.
HOU Kai, LIU Zeyu, JIA Hongjie, et al. Review of analytical methods for operation reliability assessment of power systems with high-penetration renewable energy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2697-2710.

[4] 盛戈皞，钱 勇，罗林根，等. 面向新型电力系统的数字化电力设备关键技术及其发展趋势[J]. 高电压技术，2023，49(5)：1765-1778.
SHENG Gehao, QIAN Yong, LUO Lingen, et al. Key technologies and development trends of digital power equipment for new type power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1765-1778.

[5] 饶 宏，周月宾，陈煜坤，等. 高压大容量柔性直流换流阀关键设计和发展趋势[J]. 电源学报，2024，22(3)：1-14.
RAO Hong, ZHOU Yuebin, CHEN Yukun, et al. Key design and development trend of high-voltage large-capacity VSC valves for HVDC[J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 1-14.

[6] 孙文宝，付娇娇，成 举，等. 换流阀在高压直流输电系统中的应用及技术展望[J]. 电气传动自动化，2023，45(5)：47-50，23.
SUN Wenbao, FU Jiaojiao, CHENG Ju, et al. Application and technology prospect of converter valve in HVDC[J]. Electric Drive Automation, 2023, 45(5): 47-50, 23.

[7] 肖 萌，陈毓妍，赵亦烁，等. 高压直流金属化薄膜电容器绝缘性能提升方法研究进展[J]. 高电压技术，2024，50(6)：2319-2331.
XIAO Meng, CHEN Yuyan, ZHAO Yishuo, et al. Research progress in improving insulation properties of HVDC metalized film capacitor[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2319-2331.

[8] 冉昭玉，刘雨杭，孟 礼，等. 换流阀高压直流电容聚丙烯材料选型关键参数与方法[J]. 高电压技术，2024，50(6)：2354-2362.
RAN Zhaoyu, LIU Yuhang, MENG Li, et al. Key parameters and methods of polypropylene material selection for HVDC capacitors in converter valves[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2354-2362.

[9] WANG H, LISERRE M, BLAABJERG F. Toward reliable power electronics: challenges, design tools, and opportunities[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2013, 7(2): 17-26.

[10] KOLAR J W, WOLBANK T M, SCHRODL M. Analytical calculation of the RMS current stress on the DC link capacitor of voltage DC link PWM converter systems[C]//Proceedings of the 1999 Ninth International Conference on Electrical Machines and Drives. Canterbury, UK: IEEE, 1999: 81-89.

[11] YAO R, LI H, LAI W, et al. Lifetime analysis of metallized polypropylene capacitors in modular multilevel converter based on finite element method[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(4): 4248-4259.

[12] 张午宇，齐 磊，张翔宇，等. 计及金属化薄膜电容器与 IGBT 模块退化过程相关性的柔直换流阀组件可靠性评估方法[J]. 电工技术学报，2024，39(14)：4508-4518.
ZHANG Wuyu, QI Lei, ZHANG Xiangyu, et al. Reliability evaluation method for VSC-HVDC valve submodules considering the correlation between the degradation process of metallized polypropylene film capacitors and IGBT modules[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(14): 4508-4518.

[13] TANG Y, RAN L, ALATISE O, et al. A model assisted testing scheme for modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 165-176.

[14] PAN W, SU J N, ZHONG Q H, et al. Reliable application of metallized film capacitor for flexible HVDC valve[C]//Proceedings of the

2022 IEEE 5th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering. Shenyang, China: IEEE, 2022: 244-249.

[15] 雷万钧，刘进军，吕高泰，等. 大容量电力电子装备关键器件及系统可靠性综合分析与评估方法综述[J]. 高电压技术，2020，46(10)：3353-3361.
LEI Wanjun, LIU Jinjun, LÜ Gaotai, et al. Review of reliability comprehensive analysis and evaluation methods for key components and system of large capacity power electronic equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3353-3361.

[16] YI C Q, ZHANG B, LI C R, 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.

[17] YI C Q, ZHANG B, LI C R, 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.

[18] 党智敏. 干式直流电容器全链条国产化关键技术探讨[J]. 电力电容器与无功补偿，2024，45(1)：1-14.
DANG Zhimin. Discussion on key technology for localization of full-chain of dry DC capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 1-14.

[19] 左强林，雷乔舒. 柔性直流输电用直流支撑电容器的关键技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿，2024，45(1)：108-115.
ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu. Study on key technology of DC-link capacitor for flexible HVDC Transmission[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 108-115.

[20] 王昕劼，黄　磊，王健涛，等. 电容器用超净聚丙烯薄膜综合性能比较[J]. 电力电容器与无功补偿，2024，45(1)：49-55.
WANG Xinjie, HUANG Lei, WANG Jiantao, et al. Comprehensive performance comparison of ultraclean polypropylene film for capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 49-55.

[21] 左强林，雷乔舒. 从物理过程分析镀层不同金属含量对金属化膜自愈能量的影响[J]. 电力电容器与无功补偿，2024，45(1)：116-120.
ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu. Analysis on influence of different metal contents of coating layer on self-healing energy of metallized film from physical process[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 116-120.

[22] 宋家乐，张添胤，朱光宇，等. 热-应力老化作用对电容器用 BOPP 薄膜绝缘性能的影响[J]. 电力电容器与无功补偿，2024，45(1)：83-87，101.
SONG Jiale, ZHANG Tianyin, ZHU Guangyu, et al. Influence of thermal-stress aging on insulation performance of BOPP film for capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 83-87, 101.

[23] 高煦轲，常曦文，仝殿杰，等. 基于分子动力学的聚丙烯电热应力老化特性分析[J]. 电力电容器与无功补偿，2024，45(1)：88-94.
GAO Xuke, CHANG Xiwen, TONG Dianjie, et al. Analysis of electrothermal stress aging characteristics of polypropylene based on molecular dynamics[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 88-94.

[24] 盖　斌，贾　华，张　腾，等. 柔性直流输电用干式直流电容器工况验证试验回路研制[J]. 电力电容器与无功补偿，2024，45(1)：169-174.
GAI Bin, JIA Hua, ZHANG Teng, et al. Research on the operating conditions verification platform of DC-link capacitor for flexible HVDC transmission[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 169-174.

[25] 夏宏鉴，陈民铀，赖　伟，等. 基于频带能量的模块化多电平换流阀中金属化薄膜电容器失效检测方法[J]. 中国电机工程学报，2021，41(22)：7782-7792.
XIA Hongjian, CHEN Minyou, LAI Wei, et al. Failure detection method for metalized polypropylene film capacitor in modular multilevel converter based on band energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22): 7782-7792.

[26] 方　田，李　化，李　征，等. 柔性直流输电中子模块电容参数设计及其寿命终结判据[J]. 电力电容器与无功补偿，2020，41(4)：57-62.
FANG Tian, LI Hua, LI Zheng, et al. Parameter design and end-of-life criterion on sub-module capacitor in flexible HVDC[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 57-62.

[27] 盖　斌，陈　炎，赵晓军，等. 直流支撑电容器杂散电感测量方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿，2021，42(5)：77-82.
GAI Bin, CHEN Yan, ZHAO Xiaojun, et al. Study on stray inductance measurement method of DC-link capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(5): 77-82.

[28] REN C P, LIU J P, WU J P, et al. Deciphering the effect of corrugated p-base on reverse blocking IGCT[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2022, 69(9): 5059-5067.

[29] YAN X, YU Z Q, QU L, et al. A novel oscillating-commutation solid-state DC breaker based on compound IGCTs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(2): 1418-1422.

[30] 姜浩宇，李　化，易博思，等. 柔性直流输电工程用电容参数研究[J]. 电力电容器与无功补偿，2020，41(1)：102-106.
JIANG Haoyu, LI Hua, YI Bosi, et al. Study on capacitor parameters of flexible HVDC transmission project[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(1): 102-106.

[31] 李恩溢，马　柯，蔡　旭. 模块化多电平变流器的子模块工况模拟测试方法[J]. 电力系统自动化，2022，46(4)：132-142.
LI Enyi, MA Ke, CAI Xu. Operating condition simulation test method for sub-modules of modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 132-142.

[32] 张　超，徐国顺. 电力电容器等效电路模型和参数辨识方法的研究[J]. 低压电器，2013(5)：10-13，19.
ZHANG Chao, XU Guoshun. Research on equivalent model and parameter identification of power capacitor[J]. Low Voltage Apparatus, 2013(5): 10-13, 19.

[33] BROWN R W, GRAY D C, HARVEY A. A classical capacitor equivalent circuit with dependent values[C]//Proceedings of the TENCON 2006—2006 IEEE Region 10 Conference. Hong Kong, China: IEEE, 2006: 1-4.

[34] MAKDESSI M, SARI A, VENET P. Modeling of metallized polymer films capacitor's impedance[C]//Proceedings of the 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, Canada: IEEE, 2012: 4048-4053.

[35] MAKDESSI M, SARI A, VENET P. Improved model of metalized film capacitors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(2): 582-593.

[36] EL-HUSSEINI M H, VENET P, AL-MAJID A, et al. Manufacturing technology effect on current pulse handling performance of metallized polypropylene film capacitors[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, 36(18): 2295-2303.

[37] SIAMI S, JOUBERT C, GLAIZE C. High frequency model for power electronics capacitors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2001, 16(2): 157-166.

[38] LI H, HUANG X, LI Z W, et al. Modeling of ESR in metallized film capacitors and its implication on pulse handling capability[J]. Microelectronics Reliability, 2015, 55(7): 1046-1053.

[39] 易承乾，李超然，张　波，等. 金属化膜电容元件宽频特性研究[J]. 电力电容器与无功补偿，2024，45(1)：164-168.
YI Chengqian, LI Chaoran, ZHANG Bo, et al. Study on broadband characterization of metallized film capacitor element[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 164-168.

[40] JOUBERT C, BÉROUAL A, ROJAT G. Magnetic field and current distribution in metallized capacitors[J]. Journal of Applied Physics, 1994, 76(9): 5288-5293.

[41] JOUBERT C, BÉROUAL A, ROJAT G. Asymmetrical current distribution in metallized film capacitors[J]. Journal of Applied Physics, 2004, 95(11): 6420-6425.

[42] 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.

[43] TALBERT T, JOUBERT C, DAUDE N, et al. High frequency model of stacked film capacitors[J]. The European Physical Journal Applied Physics, 2001, 16(2): 105-112.

[44] SULLIVAN C R, KERN A M. Capacitors with fast current switching require distributed models[C]//Proceedings of 2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference. Vancouver, Canada: IEEE, 2001: 1497-1503.

[45] EMEL'YANOV O A, IVANOV I O. Frequency dispersion of the impedance of capacitor structures with asymmetrically connected electrodes[J]. Technical Physics, 2018, 63(1): 111-115.

[46] BROWN R W. Distributed circuit modeling of multilayer capacitor parameters related to the metal film layer[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2007, 30(4): 764-773.

[47] BROWN R W. Modeling of capacitor parameters related to the metal film layer with partial edge disconnection[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2007, 30(4): 774-780.

[48] SULLIVAN C R, SUN Y Q, KERN A M. Improved distributed model for capacitors in high-performance packages[C]//Proceedings of the Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference 37th IAS Annual Meeting. Pittsburgh, USA: IEEE, 2002: 969-976.

[49] YI C Q, ZHANG B, LI C R, et al. Charge-discharge current distribution among elements in metallized film capacitors used for MMC[C]//Proceedings of 2024 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications. Berlin, Germany: IEEE, 2024: 1-4.

[50] NATIVEL E L, TALBERT T, MARTIRE T, et al. Near-field electromagnetic tomography applied to current density reconstruction in metallized capacitors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(1): 11-16.

[51] TALBERT T, NATIVEL L, MARTIRÉ T, et al. Application of inverse problems to current density reconstruction inside components[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(4): 044104.

[52] ZHAO G, HU J, OUYANG Y, et al. Tunneling magnetoresistive sensors for high-frequency corona discharge location[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(7): 4001804.

[53] ZHAO G, HU J, MA H Y, et al. Parametric reconstruction of multiple line currents based on magnetic sensor array[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2020, 56(7): 4000908.

[54] 李志元，王镜然，徐　哲，等. 直流电压作用下金属化膜电容器的自愈特性及寿命预测[J]. 高电压技术，2023，49(7)：2929-2937.
LI Zhiyuan, WANG Jingran, XU Zhe, et al. Self-healing characteristics and life prediction of metallized film capacitor under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2929-2937.

[55] 徐　哲，程　璐，刘宏博，等. 超高直流电场作用下金属化膜电容器的老化特性[J]. 绝缘材料，2023，56(5)：55-62.
XU Zhe, CHENG Lu, LIU Hongbo, et al. Ageing characteristics of metallized film capacitor under ultra-high DC field[J]. Insulating Materials, 2023, 56(5): 55-62.

[56] HE Y S, WANG F P, PAN J Y, et al. Effect of temperature on dielectric properties of metallized film capacitor[C]//Proceedings of 2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment. Chongqing, China: IEEE, 2021: 1-4.

[57] 刘宏博，程　璐，徐　哲，等. 热老化对电容器用聚丙烯薄膜结构及电学性能的影响[J]. 绝缘材料，2023，56(2)：96-103.
LIU Hongbo, CHENG Lu, XU Zhe, et al. Influence of thermal ageing on structure and electrical properties of polypropylene film for capacitors[J]. Insulating Materials, 2023, 56(2): 96-103.

[58] HE Y S, WANG F P, DU G Q, et al. Revisiting the thermal ageing on the metallised polypropylene film capacitor: from device to dielectric film[J]. High Voltage, 2023, 8(2): 305-314.

[59] 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)：15-18，33.
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, 33.

[60] LIANG Y P, WANG D M, LIU D H. Distribution and influence factors of electric field in high-voltage power capacitor[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2015, 9(6): 702-708.

[61] 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.

[62] 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 capacitior under discharge voltage[J]. High Voltage Engineering, 1995, 21(4): 14-16.

[63] 张丹丹，姚宗干. 不同电极结构脉冲电容器模型的电场计算及分析比较[J]. 高电压技术，1998，24(4)：45-47.
ZHANG Dandan, YAO Zonggan. Electrical field calculation and comparsion of impulse capacitor model with different electrode constructure[J]. High Voltage Engineering, 1998, 24(4): 45-47.

[64] OSTROWSKI J, HIPTMAIR R, FUHRMANN H. Electric 3D-imulation of metallized film capacitors[J]. COMPEL-The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2007, 26(2): 524-543.

[65] 张血琴，吴广宁，李晓华，等. 典型缺陷对高压储能电容器电场分布的影响[J]. 西南交通大学学报，2008，43(1)：14-18.
ZHANG Xueqin, WU Guangning, LI Xiaohua, et al. Effects of typical defects on electrical fields in high-voltage(storage) capacitors[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(1): 14-18.

[66] 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 Xueqin, 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.

[67] 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)：37-41，44.
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, 44.

[68] 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.

[69] MAKDESSI M, SARI A, VENET P, et al. Accelerated ageing of metallized film capacitors under high ripple currents combined with a DC voltage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2435-2444.

[70] EL-HUSSEINI M H, VENET P, ROJAT G, et al. Thermal simulation for geometric optimization of metallized polypropylene film capacitors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(3): 713-718.

[71] LI Z W, LI H, HUANG X, et al. Temperature rise of metallized film capacitors in repetitive pulse applications[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(6): 2038-2045.

[72] 郑媚媚. 金属化膜电容器失效物理建模及柔直换流阀组件可靠性评估[D]. 重庆：重庆大学，2019.
ZHENG Meimei. Failure-physics modeling of metallized film capacitor and reliability evaluation of flexible converter value module[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2019.

[73] 查鲲鹏，曹均正，郑媚媚，等. 计及金属化膜电容器失效的 MMC 换流阀组件可靠性评估[J]. 电力系统自动化，2019，43(4)：86-93.
ZHA Kunpeng, CAO Junzheng, ZHENG Meimei, et al. Reliability evaluation of MMC converter valve module considering failure mode of metallized film capacitors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 86-93.

[74] GUAN T Y, ZHAO F, FAN T, et al. The study of thin film capacitor on loss and current distribution[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 366: 012031.

[75] 赵子轩，佟宇晶，张心桐，等. 电容器用介质薄膜多物理场下电导测量实验平台[J]. 电力电容器与无功补偿，2024，45(1)：95-101.
ZHAO Zixuan, TONG Yujing, ZHANG Xintong, et al. Experimental platform for conduction measurement in multi-physical field of dielectric films used in capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 95-101.

[76] 尹　婷，严　飞，王子建，等. 高压自愈式电容器典型交流工况下温度场分析及优化设计[J]. 高电压技术，2016，42(12)：3996-4004.
YIN Ting, YAN Fei, WANG Zijian, et al. Temperature field analysis and optimization design of high-voltage self-healing capacitor at typical operating conditions in power system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3996-4004.

[77] 李　化，陈麒任，李浩原，等. 交流高压金属化膜电容器温升特性和优化设计[J]. 高压电器，2018，54(1)：1-8.
LI Hua, CHEN Qiren, LI Haoyuan, et al. Temperature rise characteristic and design optimization of AC high voltage metallized film capacitor[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1): 1-8.

[78] 李浩原，尹　婷，严　飞，等. 金属化膜电容器极板发热计算[J]. 电力电容器与无功补偿，2015，36(5)：37-40.
LI Haoyuan, YIN Ting, YAN Fei, et al. Calculation for electrode heating of metalized film capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(5): 37-40.

[79] 尹　婷，严　飞，李浩原，等. 金属化安全膜电容器 ESR 计算[J]. 电力电容器与无功补偿，2015，36(3)：41-44，48.
YIN Ting, YAN Fei, LI Haoyuan, et al. ESR calculation of metalized safe film capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(3): 41-44, 48.

[80] 何慧雯，王召盟，李晓岚，等. 自愈式电力电容器三维温度场数值分析及影响因素研究[J]. 高压电器，2017，53(4)：176-183.
HE Huiwen, WANG Zhaomeng, LI Xiaolan, et al. 3-D temperature field numerical analysis of self-healing power capacitor and its influencing factors[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(4): 176-183.

[81] 陈启明，王　端，宋耀东，等. HVDC 用干式直流滤波电容器通流性能研究[J]. 电力电容器与无功补偿，2014，35(4)：36-40，61.
CHEN Qiming, WANG Duan, SONG Yaodong, et al. Study on current carrying performance of dry-type DC filter capacitor for HVDC system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(4): 36-40, 61.

[82] 曹轩赫，胡　迪，张楚岩，等. 谐波环境下模块化多电平换流器子模块电容器的多场耦合分析及优化研究[J]. 电网技术，2024，48(10)：4367-4376.
CAO Xuanhe, HU Di, ZHANG Chuyan, et al. Multifield coupling analysis and optimization research of modular multilevel converter submodular capacitors in harmonic environment[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4367-4376.

[83] JIANG Z L, LI H, WANG B W, et al. Fracture behavior of metallized electrode for capacitor under pulsed current[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(5): 2517-2525.

[84] LI H, LI Z, LIN F C, et al. Threshold current density of metallized film under multiple current pulses[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(7): 2523-2530.

[85] PENG B, LIN F C, LI H, et al. Calculation and measurement of metalized film capacitor's inner pressure and its influence on self-healing characteristics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(5): 1612-1618.

[86] 王文娟，李　化，李智威，等. 通过电容器层间压强的增强提高电容器寿命[J]. 强激光与粒子束，2014，26(4)：045015.
WANG Wenjuan, LI Hua, LI Zhiwei, et al. Lifetime improvement of metallized film capacitors by inner pressure strengthening[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(4): 045015.

[87] 师愉航，李金宇，汲胜昌，等. 交流滤波电容器振动噪声特性及声场控制研究[J]. 电力电容器与无功补偿，2017，38(1)：65-70.
SHI Yuhang, LI Jinyu, JI Shengchang, et al. Study on vibration and noise characteristics of AC filter capacitor and acoustic field control[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(1): 65-70.

[88] WANG R, CHEN W J, ZHU L Y, et al. Modeling of acoustic emission generated by filter capacitors in HVDC converter station[J]. IEEE Access, 2019, 7: 102876-102886.

[89] ZHU L Y, GAO L, LI J Y, et al. Mass tuning reduction method for vibration and audible noise of HVDC filter capacitors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(6): 2583-2590.

[90] 熊　易，李金宇，雷晓燕，等. 电容器单元间噪声相互影响及装置声场优化措施[J]. 电力电容器与无功补偿，2022，43(4)：1-8.
XIONG Yi, LI Jinyu, LEI Xiaoyan, et al. Noise interaction between capacitor units and sound field optimization measures[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(4): 1-8.

[91] 黎　鹏，邱　雨，岳国华，等. 基于磁-结构场耦合的干式直流电容器短路特性分析[J/OL]. 高压电器，2024：1-9[2024-12-10]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1127.TM. 20240327.1509.002. html.
LI Peng, QIU Yu, YUE Guohua, et al. Analysis of short-circuit characteristic of dry-type DC capacitor based on magnetic-structure field coupling[J/OL]. High Voltage Apparatus, 2024: 1-9[2024-12-10]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1127.TM.20240327.1509.002. html.

[92] 赵建印，彭宝华，孙　权，等. 金属化膜脉冲电容器退化失效分析[J]. 高电压技术，2006，32(3)：62-64.
ZHAO Jianyin, PENG Baohua, SUN Quan, et al. Degradation failure analysis of metallized film pulse capacitors[J]. High Voltage Engi-

neering, 2006, 32(3): 62-64.

[93] 张天洋，宋祖殷，袁云华，等. 金属化聚丙烯膜脉冲电容器过载特性[J]. 国防科技大学学报，2015(2)：5-8.
ZHANG Tianyang, SONG Zuyin, YUAN Yunhua, et al. Overstress characteristics of metalized polypropylene pulse capacitor[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015(2): 5-8.

[94] BELKO V O, EMELYANOV O A, IVANOV I O, et al. Metallized film capacitors degradation under high electrodynamic load[C]//Proceedings of 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. St. Petersburg and Moscow, Russia: IEEE, 2017: 1120-1122.

[95] NUCCI C A, PIRANI S, RINALDI M. Electrode-end contact degradation of metallized polypropylene capacitors in power applications[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Tokyo, Japan: IEEE, 1991: 466-469.

[96] NUCCI C A, PIRANI S, RINALDI M. Pulse withstand capability of self-healing metalized polypropylene capacitors in power applications[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1991, 26(1): 146-155.

[97] 代　新，林福昌，李　劲，等. 金属化聚丙烯膜脉冲电容器端部接触老化研究[J]. 中国电机工程学报，2001，21(8)：51-54.
DAI Xin, LIN Fuchang, LI Jin, et al. Electrode-end contact degradation of metallized polypropylene pulse capacitors[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 51-54.

[98] 林福昌，徐智安，何　磊，等. 金属化膜电容器接触电阻的计算[J]. 高电压技术，2003，29(1)：35-36.
LIN Fuchang, XU Zhian, HE Lei, et al. Calculation of contact resistance of metallized film capacitors[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(1): 35-36.

[99] DAI X, LIN F C, YAO Z G, et al. A new method for the research of electrode-end contact degradation of metallized polypropylene pulse capacitors[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Xi'an, China: IEEE, 2000: 876-879.

[100] BELKO V, GLIVENKO D, EMELYANOV O, et al. Current pulse polarity effect on metallized film capacitors failure[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(6): 1020-1025.

[101] BONDARENKO P N, EMEL'YANOV O A. Experimental investigation of the current-induced breakage of metal-coated polymer films[J]. Technical Physics Letters, 2005, 31(7): 613-615.

[102] BELKO V, EMELYANOV O, SHEMET M. A study of nanosecond arcsurface flashover in metallized polymer films[C]//Proceedings of 2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Chenzhen, Canada: IEEE, 2013: 476-477.

[103] EMEL'YANOV O A. Local fracture of thin metallic films during electromagnetic loading[J]. Technical Physics, 2008, 53(7): 866-874.

[104] BELKO V, EMELYANOV O A, IVANOV I O. The experimental investigation and numerical simulation of self-healing in metallized film capacitors[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Dielectrics. Montpellier, France: IEEE, 2016: 613-616.

[105] BELKO V, EMELYANOV O A, IVANOV I O. Segmented electrodes electrodynamic destruction in metallized film capacitors[C]//Proceedings of 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. St. Petersburg and Moscow, Russia: IEEE, 2017: 1117-1179.

[106] LI H, WANG B W, XU Z J, et al. Experimental study on the current-carrying test of metallized electrode[C]//Proceedings of 2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference. Santa Fe, USA: IEEE, 2014: 443-445.

[107] 吴致远，王卓容，刘靖舟，等. 基于原位测量的交直流复合电压对金属化膜自愈特性影响的研究[J]. 电力电容器与无功补偿，2024，45(1)：76-82.
WU Zhiyuan, WANG Zhuorong, LIU Jingzhou, et al. Research on effects of combined AC/DC voltage on self-healing characteristics of metallized film based on in-situ measurements[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 76-82.

[108] WU Z Y, LIU S S, TONG T, et al. Theoretical and experimental studies on the self-healing properties of metallised capacitor films under multiple stresses[J]. High Voltage, 2024, 9(6): 1347-1356.

[109] TAYLOR D F. On the mechanism of aluminum corrosion in metallized film AC capacitors[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1984, EI-19(4): 288-293.

[110] ZHANG G H, LI H, LI H B, et al. Large-capacity AC superimposed DC power supply for the degradation evaluation of DC-link capacitors[J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(4): 044709.

[111] 张国豪，李　化，黄子钦，等. 交直流电压比例对金属化膜击穿特性的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿，2023，44(2)：55-60.
ZHANG Guohao, LI Hua, HUANG Ziqin, et al. Study on the effect of AC/DC voltage ratio on breakdown characteristics of metallized film[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(2): 55-60.

[112] 劳斯佳，何　樱，唐　勇，等. 交直流复合电压下温度和膜厚对金属化膜击穿特性影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿，2020，41(4)：12-17.
LAO Sijia, HE Ying, TANG Yong, et al. Study on the influence of temperature and film thickness on breakdown characteristic of metallized films under AC-DC composite voltage[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 12-17.

[113] 杜一鸣，潘　亮，祝令瑜，等. 金属化膜电容器交流和直流电压劣化特性分析[J]. 电力工程技术，2020，39(6)：151-158.
DU Yiming, PAN Liang, ZHU Lingyu, et al. AC and DC voltage degradation characteristics of metallized film capacitors[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 151-158.

[114] 程　璐，李志元，王镜然，等. 高压直流电场与谐波耦合作用下金属化膜电容器失效研究[J]. 中国电机工程学报，2023，43(22)：8955-8964.
CHENG Lu, LI Zhiyuan, WANG Jingran, et al. Mechanism study on the failure of metalized film capacitor under HVDC field superimposed harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8955-8964.

[115] LI Z Y, ZHOU Y H, WANG X G, et al. Failure mechanism of metallized film capacitors under DC field superimposed AC harmonic: from equipment to material[J]. High Voltage, 2024, 9(5): 1081-1089.

[116] 王健涛，吴致远，王昕劼，等. 金属化膜击穿与自愈性能研究[J]. 电力电容器与无功补偿，2024，45(1)：102-107.
WANG Jiantao, WU Zhiyuan, WANG Xinjie, et al. Study on breakdown and self-healing performance of metallized film[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 102-107.

[117] BELKO V O, EMELYANOV O A, IVANOV I O, et al. Self-healing processes of metallized film capacitors in overload modes-part 1: experimental observations[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(5): 1580-1587.

[118] BELKO V O, EMELYANOV O A. Self-healing processes of metallized film capacitors in overload modes-part II: theoretical and computer modeling[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(6): 1898-1905.

[119] 李　化，章　妙，林福昌，等. 金属化膜电容器自愈理论及规律研

究[J]. 电工技术学报，2012，27(9)：218-223，230.
LI Hua, ZHANG Miao, LIN Fuchang, et al. Study on theory and influence factors of self-healing in metallized film capacitors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 218-223, 230.

[120] 郭天兴. 金属化膜自愈性能的数值计算方法与自愈特性研究[C]//陕西省电网节能与电能质量技术学会 2018 年年会暨电能质量综合治理技术研讨会. 昆明：陕西省电网节能与电能质量技术学会，2018：7.
GUO Tianxing. Numerical calculation methods and self-healing characteristics of metallized film self-healing performance[C]//Proceedings of the Shaanxi Electric Power Quality and Saving Technical Society. Kunming, China: Shaanxi Electric Power Quality and Saving Technical Society, 2018: 7.

[121] 刘泳斌，张　阳，高景晖，等. 聚偏氟乙烯基金属化膜电容器自愈特性的研究[J]. 电力电容器与无功补偿，2020，41(4)：37-41，46.
LIU Yongbin, ZHANG Yang, GAO Jinghui, et al. Study on self-healing of poly vinylidene-fluoride-based metallized film capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 37-41, 46.

[122] BELKO V O, EMELYANOV O A, IVANOV I O, et al. Application of numerical simulation for metallized film capacitors electrodes design[J]. IEEE Access, 2021, 9: 80945-80952.

[123] BELKO V O, EMELYANOV O A. Self-healing in segmented metallized film capacitors: experimental and theoretical investigations for engineering design[J]. Journal of Applied Physics, 2016, 119(2): 024509.

[124] IVANOV I, GLIVENKO D, FEKLISTOV E, et al. Efficiency evaluation of electrodes segmentation patterns for metallized film capacitors[C]//Proceedings of 2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University. Riga, Latvia: IEEE, 2020: 1-5.

[125] 周　洋. 柔性直流输电用电力电子电容器关键技术研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2018.
ZHOU Yang. Research on key technologies of power capacitor applied to flexible DC transmission control[D]. Harbin, China: Harbin University of Science and Technology, 2018.

[126] 许　峰，高　鹏. 金属化安全膜防爆电容器的防爆原理及发展概况[J]. 电力电容器，2006(5)：34-38.
XU Feng, GAO Peng. Principle of explosion proof and general situation of development for metallized safety film explosion proof capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2006(5): 34-38.



张　波(通信作者)
1976—，男，博士，教授，博导
主要从事高电压工程数值计算、智能电网电磁环境和电磁兼容、输变电装备智能检测和数字孪生技术研究
E-mail: shizbcn@tsinghua.edu.cn

ZHANG Bo
Ph.D., Professor
Corresponding author



易承乾
1996—，男，博士生
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

YI Chengqian
Ph.D. candidate

收稿日期　2024-10-22　修回日期　2024-12-12　　编辑　程子丰