第 51 卷 第 5 期：2268-2273 高电压技术 Vol.51, No.5: 2268-2273
2025 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2025
**DOI**: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241684

# 直流支撑电容器圆元件膜层间压强在线测试与改进计算模型

赵子轩[1]，左强林[2]，雷乔舒[2]，葛昌晶[2]，陈　庚[1]，屠幼萍[1]
（1. 新能源电力系统全国重点实验室(华北电力大学)，北京 102206;
2. 无锡赛晶电力电容器有限公司，无锡 214100）

**摘　要**：直流支撑电容器广泛应用在柔直输电系统中，其核心元件电容器由介质薄膜卷绕加工而成，卷绕产生层间压强，且层间压强对电容器绝缘性能具有重要影响，但其测量和计算是难点，在行业内并未达成共识。该文从目前采用的圆元件内部层间压强的计算模型出发，同时采用在机测试法用半自动卷绕机对 2 层粗化膜和 2 层金属化膜的元件内部压强进行了多次实测，实测结果表明元件内部层间压强比目前的理论计算压强大 1 个数量级以上。经研究分析可知，现有的层间压强计算模型没有考虑卷绕机牵引力对膜层间压强的影响，也没有考虑元件卷绕直径变化对膜层间压强的影响。该文根据力矩平衡原理，提出了层间压强的改进计算模型，并结合实验结果，给出了计算模型中考虑元件卷绕机牵引力的的修正系数。研究结果提供了电容器圆元件内部膜层间压强分布的测量方法与理论计算的修正方法，可以为电容器卷绕工艺提供指导和建议。

**关键词**：直流支撑电容器；圆元件；层间压强；层间压强测试；层间压强计算

## Online Testing and Improved Calculation Model for Inter-layer Pressure of Circular Elements in DC-link Capacitor

ZHAO Zixuan[1], ZUO Qianglin[2], LEI Qiaoshu[2], GE Changjing[2], CHEN Geng[1], TU Youping[1]
(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China;
2. Wuxi Sunking Power Capacitor Co., Ltd., Wuxi 214100, China)

**Abstract**: DC-link capacitors are widely used in flexible DC transmission systems. The core component of these capacitors is made by winding dielectric films, which generates inter-layer pressure during the winding process. The inter-layer pressure has a significant impact on the insulation performance of capacitors, however, its measurement and calculation pose challenges and lack consensus within the industry. In this paper, based on the current calculation model of inter-layer pressure inside the circular element, the internal pressure of the element with 2 layers of coarse film and 2 layers of metallized film was measured several times by using a semi-automatic winding machine. The measured results show that the dispersion of the measured data is small and the reproducibility meets the requirements. However, the measured inter-layer pressures inside the elements are more than one order of magnitude stronger than the current theoretical calculation pressure. Through research and analysis, it is proposed that the current calculation model of interlayer pressure of circular element does not consider the influence of traction force of winding machine on the interlayer pressure, nor does it consider the influence of the change of winding diameter on the inter-layer pressure. Based on the principle of torque balance, this paper proposes an improved computational model for interlayer pressure. Additionally, incorporating experimental data, a correction factor is introduced into the computational model to account for the traction force applied during the winding process. The research provides a method for measuring the distribution of interlayer pressure between dielectric films within cylindrical capacitor components and presents a refined theoretical calculation approach. These findings offer valuable guidance and recommendations for optimizing capacitor winding processes.

**Key words**: DC-link capacitor; circular element; inter-layer pressure; test of inter-layer pressure; calculation of inter-layer pressure

基金资助项目：国家重点研发计划(2021YFB2401503；2021YFB2401504)。
Project supported by National Key R&D Program of China(2021YFB2401503, 2021YFB2401504).

## 0 引言

在柔性直流输电系统中，金属化膜电容器是柔性直流换流阀的核心器件[1-2]，随着柔性直流输电技术的发展，直流支撑电容器的应用愈加广泛，越来越受到关注[3-4]。直流支撑电容器采用多层卷绕结构，卷绕工艺会产生薄膜之间的层间压强，进而改善金属化薄膜的自愈特性、影响薄膜的击穿电压，是电容器和薄膜性能研究的重要方向之一。但电容器内部层间压强的分布情况仍然没有定论，这也是目前争议的焦点。目前直流支撑电容器为圆元件[5-7]，其层间压强由卷绕张力和相关卷绕参数来计算得到[8-10]，在此基础上文献[7]额外考虑了圆元件热定型产生的压强，推导过程类似。在现有的计算模型中，存在 2 个关键假设：(1)卷绕张力在元件卷绕过程中恒定；(2)每层膜对前一层产生的压强不变，膜层间压强适用叠加原理。彭波等人对于此计算方法进行了实测验证，但没有给出具体的测试方法，其结果表明实测值低于计算值的 20%左右[9]。文献[10]提出了一种测试方法，采用压电转换对元件内部膜层间压强进行反向测试，但这种测试方法对工程技术人员要求很高，工程实施较为困难，这是因为按照目前的全自动卷绕设备，很难在电容器芯棒上增加传感器，同时传感器本身的尺寸和保护边等会影响卷绕的过程，对压强的测量造成较大误差。

本文在此基础上，提出一种在机测试法，增加了几个关键点：(1)元件卷绕采用半自动卷绕机，更利于压力传感器的放置；(2)压力测试全程在卷绕机上进行，保证卷绕张力在线施加；(3)采取措施核定卷绕机的卷绕张力，消除卷绕机引入的误差；(4)根据模型 I 的膜层间压强的计算方法，反向推定卷绕张力，进行对比。基于此种方法提出了干式电容器层间压强的改进计算模型，与实验结果有良好的对应关系，可以为干式电容器的结构设计和卷绕张力的设置提供参考依据。

## 1 层间压强在线测试方法

### 1.1 实验装置

目前直流支撑电容器层间压强的计算方法参照式(1)，把这个计算方法定义为模型 I[11-12]。

$$P_{n-N}=\frac{2(N-n)T_{\mathrm{d}}}{b\left(r_0+2(n-1)d\right)}=\frac{\left(D-D_n\right)T_{\mathrm{d}}}{D_n db} \tag{1}$$

式中：$N$ 为薄膜的总层数；$P_{n-N}$ 为圆元件内部第 $n$ 圈膜层间压强，MPa；$T_{\mathrm{d}}$ 为卷绕张力，N；$r_0$ 为芯棒的半径，mm；$d$ 为金属化薄膜的厚度，mm；$b$ 为金属化薄膜的宽度，mm；$D$ 为元件外径，mm；$D_n$ 为圆元件第 $n$ 圈对应的直径，mm。

本文提出实验装置为元件半自动卷绕机，如图 1 所示。半自动卷绕机中有多个料轴，可选择性使用，本次实验采用的是料轴 4 和料轴 5。材料卷放置在料轴上，通过料轴，最终将 2 膜统一到收卷主轴上，形成元件的卷绕[13-14]。

设备 2 为柔性薄膜(聚偏氟乙烯，polyvinylidene fluoride，PVDF)压力传感器。柔性薄膜压力传感器是一种电阻式传感器，输出电阻随施加在传感器表面压力的增大而减小，通过特定的压力-电阻关系，可测量出压力的大小。传感器的一端为压力测试端，测试端中间区域为敏感区；另一端为压力数据读取区，如图 2 所示。传感器压力敏感区域应放置在坚固、平整的表面，在曲面或者异形面上使用，需进行参数的修正。由于元件薄膜施力面比传感器敏感区域大，且元件薄膜较薄，为避免出现压力响应小、不稳定的现象，需要在敏感区中心贴 1 个圆形软胶垫，直径略小于敏感区，面积大于敏感区面积的 60%以上[15-16]。

### 1.2 测试方法

本文提到的在机测试法采用油浸式全膜电容器用半自动卷绕机进行，通过人工控制，可以暂停卷绕进程，在不同卷绕层数放置压力传感器，再继续卷绕元件，不会对卷绕工艺造成影响。根据模型 I

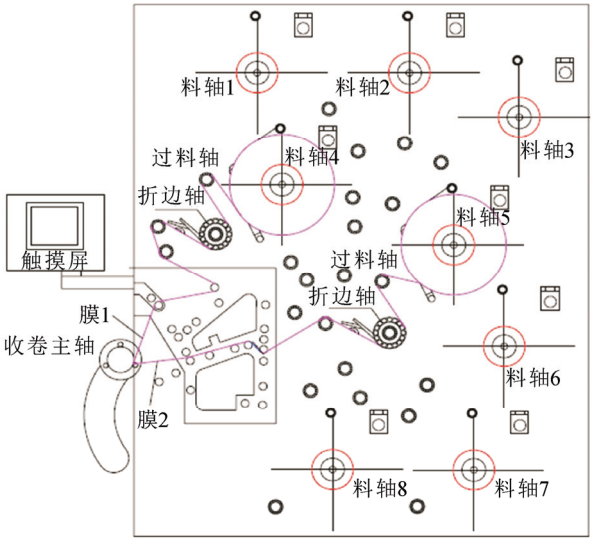



图 1 半自动卷绕机元件卷绕示意

Fig.1 Schematic diagram of component winding in semi-automatic winding machine

的膜层间压强与卷绕张力的关系，通过对比压力传感器的测量结果和模型 I 计算的膜层间压强，来确定影响因素和修正系数。同时，压力传感器需要经过标定，通过标准砝码校准传感器的读数以保证其测试结果的准确性。实验中压力传感器的放置、测量读数与通信如图 3 所示，具体的测试流程如下文所述。

1）元件卷绕张力的调节和设置。油浸式电容器的元件卷绕张力相对小，采用粗化膜测试时要额外考虑卷绕张力的选取，既要保证卷绕张力比较合适，又要兼顾金属化膜元件的卷绕要求，本文选择 5~10 N。在卷绕过程中元件卷绕张力的准确性不高，张力的数值存在波动。同时，由于油浸式电容器元件的卷绕速度只有金属化膜的 1/6 左右，控制料轴的伺服电机的惯性会影响膜层间压强的测量结果，需要校准伺服电机的功率曲线[17]。

2)压力传感器的尺寸与卷绕机芯轴直径的配合问题。压力传感器是平面状的，芯轴是圆形的，2 者的匹配存在问题，要确定压敏区折弯是否对测量结果有影响。为了降低这个因素的影响，传感器的尺寸要尽可能小，芯轴直径尽可能大。市面传统的压力传感器有效区存在保护边框，边框的厚度与电容器卷绕的薄膜近似，对传感器的受力影响极大，但压力传感器要整体放置入元件的膜层间，需要让传感器的有效区受力。故进行如下处理：一是重新定制引出线，去掉保护边框；二是增加垫片，保证传感器有效区在受控的状态下受力。由于改变了传感器原有结构，需要通过标准砝码对压力传感器进行校准。

3）元件卷绕暂停进行压强测试时，尽管材料的张力还维持，但实际上由于惯性作用，卷绕张力会缓慢变小，元件卷绕直径也在缓慢变大。因此测试时间需要缩短，以减小测量结果的偏差[18-19]。压力传感器放置后，元件卷绕一次性完成，避免中途停机。实测结果表明，中途停机会导致极大的测量偏差，即停机插入压力传感器后，已卷圈数产生的层间压强出现了大幅损失。

## 2 层间压强在线测试结果与经典计算结果

### 2.1 采用粗化膜的测试结果

根据式(1)，可以得到圆元件卷绕张力计算式为：

$$T_{\mathrm{d}}=\frac{dbD_n}{D-D_n}P_{n-N} \tag{2}$$

根据式(1)，通过卷绕张力测定可以计算出膜层间压强，对比该压强与实测值的差别，来验证或修正计算式；根据式(2)，通过实测压强可以计算得到其对应的卷绕张力，反过来验证计算式的正确性。

测试采用直径 $D_x$=78 mm 的芯轴卷绕元件，元件用 2 层膜卷绕，压力传感器放在第 $n$ 圈。粗化膜的规格是 0.015 mm×97 mm。测量结果如表 1 所示。

表 1 中，$n_0$ 为传感器放置圈数；$D_0$ 为压力传感器放置位置对应的卷绕直径；$P_{n_1}$ 为式(1)的膜层间压强计算值；$F_0$ 为压力传感器的测试压力；$S_0$ 为压力传感器的受力面积；$P_{n_0}$ 为压力传感器测试压力对应的压强；$\beta_1$ 为实测压强与理论计算压强的比值 $P_{n_0}/P_{n_1}$，也就是压强比。从表 1 可以看出，通过压力传感器的实测压强达到式(1)计算结果的 13.57~16.3 倍。其次，卷绕张力越小，压强比越大。当卷绕张力为 6 N 时，平均压强比为 15.95；当卷绕张力达到 10 N 时，平均压强比为 13.57。同时随着




图 2 柔性薄膜(PVDF)压力传感器

Fig.2 Flexible thin film(PVDF) pressure sensor

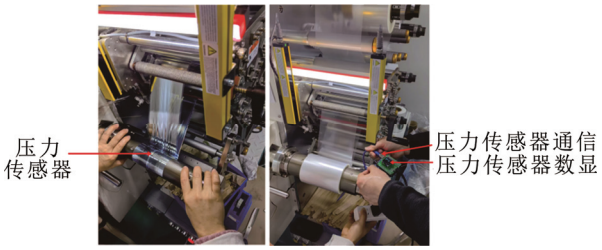



图 3 压力传感器的放置、测量读数与通信

Fig.3 Placement, measurement reading and communication of pressure sensor

表 1 粗化膜元件膜层间压强的测试结果

Table 1 Test results of interlayer pressure of roughened film elements

| $n_0$ | $D_0$/mm | $D$/mm | $T_{\mathrm{d}}$/N | $P_{n_1}$/MPa | $F_0$/N | $S_0$/mm$^2$ | $P_{n_0}$/MPa | $\beta_1$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 78.6 | 90 | 6 | 0.600 | 352.25 | 36 | 9.78 | 16.30 |
| 10 | 78.6 | 90 | 6 | 0.600 | 346.02 | 36 | 9.61 | 16.02 |
| 10 | 78.6 | 90 | 6 | 0.600 | 335.11 | 36 | 9.31 | 15.52 |
| 10 | 78.6 | 90 | 8 | 0.797 | 394.57 | 36 | 10.96 | 13.70 |
| 10 | 78.6 | 90 | 8 | 0.797 | 405.86 | 36 | 11.27 | 14.09 |
| 10 | 78.6 | 90 | 10 | 0.996 | 489.05 | 36 | 13.58 | 13.63 |
| 10 | 78.6 | 90 | 10 | 0.996 | 484.66 | 36 | 13.46 | 13.51 |
| 10 | 78.6 | 90 | 8 | 0.797 | 384.65 | 36 | 10.68 | 13.40 |
| 10 | 78.6 | 90 | 8 | 0.797 | 397.43 | 36 | 11.04 | 13.85 |

卷绕速度的增大，压强比小幅减小，在低速下，卷绕速度对压强倍数影响不大。当卷绕张力为 8 N 时，卷绕速度为 0.2 m/s 时压强比为 13.9。当卷绕速度增加到 0.5 m/s 时压强比减小到 13.62，减小幅度仅为 2%。

上述结果说明，实测的压力值稳定性很好，分散性不大。但是实测值与理论计算值存在较大偏差，说明目前的理论计算模型需要修正。

### 2.2 采用金属化膜的测试结果

金属化膜的规格为 0.005 8 mm×100 mm，卷绕张力为 5 N，其余同第 2.1 节。测试结果如表 2 所示。表 2 中压强比达到 22.17，比粗化膜的压强比增大了近 40%。进一步证明，卷绕张力越小，压强比越大。

## 3 层间压强理论计算修正

### 3.1 测试结果分析与卷绕过程建模

根据前面的膜层间压力测量结果判断，现有的元件内部膜层间压强计算模型[9]的 2 个关键假设存在不足。

1）文献没有考虑到元件在卷绕过程中卷绕张力力矩对元件内部膜层间压强的影响。随着元件直径的增大，在卷绕张力不变的情况下，其力臂不断增大，导致膜层间压力增大，如图 4 所示，图中字母定义在后文中给出[13-14]。

2）在元件卷绕过程中，卷绕张力并不是影响膜层间压强唯一因素。卷绕牵引力对元件膜层间压强的影响更直接。卷绕牵引力在克服卷绕张力形成卷绕速度的过程中，会产生一个附加应力，进而影响膜层间压强，这导致了在机测试法的元件内部膜层间压强测量结果的不可控性，需要排除由此带来的不可控因素。

### 3.2 层间压强计算修正

从第 3.1 节的实测结果来看，实测值远大于计算值。根据实测实践分析可知，元件内部膜层间压强的计算结果需要从 2 方面修正：一方面是计算模型修正；另一方面是与卷绕机的输出功率或牵引力相关的修正。卷绕机的输出功率计算式[20]为：

$$P_{\mathrm{d}} = \eta F_{\mathrm{d}} v \tag{3}$$

式中：$P_{\mathrm{d}}$ 为卷绕机的最大输出功率，W；$\eta$ 为卷绕机实际输出功率系数；$F_{\mathrm{d}}$ 为卷绕机的牵引力，N；$v$ 为与卷绕牵引力对应的卷绕速度，m/s。

式(3)中涉及到卷绕机的设计最大功率和卷绕牵引力，还包括伺服电机的馈控机制[21-22]，各个厂家和不同型号的卷绕机具有不同的控制策略，其差异需要用修正系数来解决。由式(3)可以得到：

$$F_{\mathrm{d}} = \frac{P_{\mathrm{d}}}{\eta v} = \frac{P_{\mathrm{d}}}{\eta v m_{\mathrm{T}} g} T_{\mathrm{d}} = \beta T_{\mathrm{d}} \tag{4}$$

式中：$m_{\mathrm{T}}$ 为卷绕张力等效的物体质量；$g$ 为重力加速度，$g$=9.8 m/s²；$\beta$ 为修正系数。需要注意的是，按照式(1)，用 1 层膜卷绕 2$N$ 圈和用 2 层膜卷绕 $N$ 圈，得到的膜层间压强是一样的。但实际上，用 1 层膜卷绕时实测压力的稳定性较差，因此测试元件内部膜层间压强应采用 2 层膜卷绕。

表 2 金属化膜元件膜层间压强的测试结果

Table 2 Test results of interlayer pressure of metallized film elements

| $n_0$ | $D_0$/mm | $D$/mm | $T_{\mathrm{d}}$/N | $P_{n_1}$/MPa | $F_0$/N | $S_0$/mm² | $P_{n_0}$/MPa | $\beta_1$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 78.23 | 82.64 | 5 | 0.485 | 379.42 | 36 | 10.54 | 21.74 |
| 10 | 78.23 | 82.64 | 5 | 0.485 | 397.25 | 36 | 11.03 | 22.76 |
| 10 | 78.23 | 82.64 | 5 | 0.485 | 384.05 | 36 | 10.67 | 22.01 |

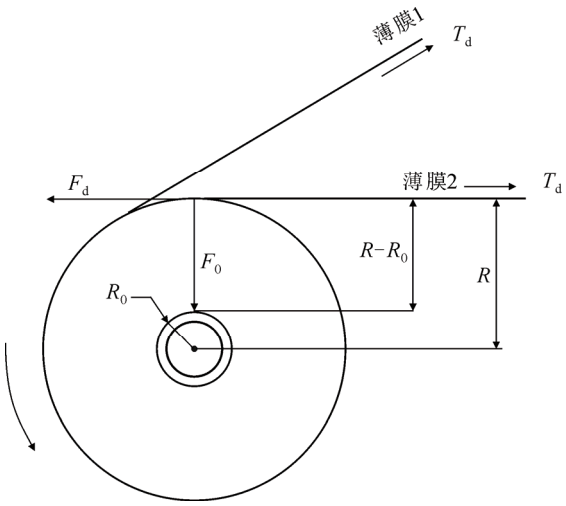



图 4 元件卷绕过程中的受力平衡示意

Fig.4 Force balance during element winding

### 3.3 张力力矩带来的影响分析

从图 4 可以看出，卷绕张力在元件上产生的力矩为 $M_1$，这个力矩会在元件内部产生一个压力 $F_0$，在进行压力测试时，假设压力传感器放在第 $n_0$ 圈，对应的元件半径为 $R_0$，则元件内部膜层间压力测试时压力 $F_0$ 的力臂为 $R-R_0$。根据图 1，这个力矩的关系[23]为：

$$M_1 = T_{\mathrm{d}} R_n = F_0 \left( R - R_0 \right) \tag{5}$$

式中：$M_1$ 为卷绕张力产生的力矩，N·m；$R_n$ 为薄膜卷绕到第 $n$ 圈对应的元件半径，mm；$n$ 为元件卷绕圈数；$R$ 为元件的最大半径；$R_0$ 为应力传感器放置

位置对应的元件半径，mm。

由式(5)可以得到：

$$F_0=\frac{R_n}{R-R_0}T_{\mathrm{d}}=\frac{D_n}{D-D_0}T_{\mathrm{d}}=\frac{R_n}{2\left(N-n_0\right)d}T_{\mathrm{d}} \tag{6}$$

根据文献[7]，对于 2 膜卷绕，卷绕张力为 $T_1$ 的圆元件的第 $n$ 圈压强为：

$$P_n=\frac{2T_1}{bR_n} \tag{7}$$

令 $T_1$=$F_0$，代入式(7)可以得到：

$$P_{n0}=\frac{2}{bR_n}\frac{R_n}{2\left(N-n_0\right)d}T_{\mathrm{d}} \tag{8}$$

由式(8)可知，第 $n_0$ 圈薄膜承受的压强取决于芯子半径、薄膜厚度、圈数和卷绕张力的影响。根据文献[7]，第 $n_0$ 圈膜受到其外($n_0$+1)~$N$ 圈膜的压强为：

$$P_{n_0-N}=\sum_{n_0+1}^{N}\frac{T_{\mathrm{d}}}{db(N-n_0)}=\frac{(N-n_0-1)T_{\mathrm{d}}}{db(N-n_0)} \tag{9}$$

考虑到 $N-n_0-1\approx N-N_0$，代入式(9)可以得到：

$$P_{n_0-N}\approx\frac{T_{\mathrm{d}}}{db} \tag{10}$$

若已知膜层间压强，则从式(10)可以得到卷绕张力为：

$$T_{\mathrm{d}}=dbP_{n_0-N} \tag{11}$$

### 3.4 层间压强修正模型验证

按照上文的计算模型修正后，代入相关数据的计算结果如表 3、4 所示。其中表 3 为粗化膜数据，与表 1 对应；表 4 为金属化膜数据，与表 2 对应。

从表 3 可以看出，在考虑卷绕张力力矩影响后，采用粗化膜卷绕的实测值与计算值的比值从原来的十几倍降低到 2 倍左右，但差距还是不小。从实测值的偏差来看，最大偏差不超过 3%，对于工程制造有较大的指导意义。同时建议在卷绕张力、薄膜规格相同的情况下，采用倍数 $\beta_2$ 的平均值作为修正系数 $\beta$。即当卷绕张力为 6 N 时，修正系数取 2.2；卷绕张力在 8~10 N 之间时，修正系数取 1.89。

从表 4 可以看出，采用金属化膜时实测元件内部膜层间压强的实测值与计算值的比值小于采用粗化膜时，说明采用厚度薄的膜对卷绕机的牵引力影响较小。建议采用 0.005 8 mm×100 mm 金属化膜的修正系数取表 4 中的平均值 $\beta$=1.25。对比表 3 和表 4 可以看出，考虑力矩平衡前粗化膜的实测压强比小于采用金属化膜的实测压强；考虑力矩平衡因素后，采用金属化膜的压强比反而更小。这应该与卷绕机的输出功率有关。需要注意的是，由于卷绕机的功率设计和馈控机制不一样，本文建议的修正系数的选取条件不一定具有普适性，在测试实施前需对卷绕机进行评估，在未来研究中需要考虑修正系数的选取问题，以增强模型的适用范围和适用性。

表 3 修正前后的数据对比(0.015 mm×97 mm 粗化膜)

Table 3 Comparison of data before and after correction (0.015 mm×97 mm roughened film)

| 设置张力 $T_{\mathrm{d}}$/N | 计算压强 $P_{n_1}$ /MPa | 反算张力 $T_{\mathrm{dx}}$/N | 计算压强 $P_{n_2}$ /MPa | 实测压强 $P_{n_0-N}$ /MPa | 压强比 $\beta_1$ | 压强比 $\beta_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 6 | 0.63 | 13.48 | 9.78 | 4.36 | 15.54 | 2.246 |
| 6 | 0.63 | 13.24 | 9.61 | 4.36 | 15.26 | 2.207 |
| 6 | 0.63 | 12.82 | 9.31 | 4.36 | 14.78 | 2.137 |
| 8 | 0.84 | 15.10 | 10.96 | 5.81 | 13.05 | 1.887 |
| 8 | 0.84 | 15.53 | 11.27 | 5.81 | 13.42 | 1.941 |
| 10 | 1.05 | 18.71 | 13.58 | 7.26 | 12.94 | 1.871 |
| 10 | 1.05 | 18.54 | 13.46 | 7.26 | 12.83 | 1.854 |

表 4 修正前后的数据对比(0.005 8 mm×100 mm 金属化膜)

Table 4 Comparison of data before and after correction (0.005 8 mm×100 mm metallized film)

| 设置张力 $T_{\mathrm{d}}$/N | 计算压强 $P_{n_1}$ /MPa | 反算张力 $T_{\mathrm{dx}}$/N | 计算压强 $P_{n_2}$ /MPa | 实测压强 $P_{n_0-N}$ /MPa | 压强比 $\beta_1$ | 压强比 $\beta_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 0.486 | 4.89 | 8.62 | 10.54 | 21.70 | 1.223 |
| 5 | 0.486 | 5.12 | 8.62 | 11.03 | 22.72 | 1.280 |
| 5 | 0.486 | 4.95 | 8.62 | 10.67 | 21.96 | 1.237 |

## 4 结论

1）本文设计并实现了直流支撑电容器的层间压强在线测试方法，采用半自动油浸式电容器元件卷绕机对粗化膜和金属化膜元件进行膜层间压力测试，结果表明，测量数据的分散性很小，且与目前直流支撑电容器圆元件的膜层间压强计算结果差别巨大，压强比在 20 倍左右。随着卷绕张力的增大，压强比减小。

2）开展了层间压强在线测试和建模分析，提出修正系数，解决了卷绕牵引力带来的问题。修正系数与卷绕张力、卷绕速度等参数有关；提出了层间压强计算的修正方法，根据力矩平衡原理推导出层间压强的计算式，实验结果表明修正后的计算模型更接近圆元件内部的实际压强分布。

3）元件卷绕机导致的牵引力和张力的差异采用修正系数来弥补。修正系数与卷绕张力和薄膜规格有关，受卷绕机的输出功率设计及伺服电机的馈

控机制影响很大，需要通过实测核准。当卷绕过程中的输出功率恒定时，可以采用本文的修正方法。

## 参考文献 References


[1] 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.

[2] 查俊伟，赵文帅，黄文杰，等. 多层结构聚合物基复合电介质材料储能特性研究进展[J]. 高电压技术，2024，50(6)：2297-2308.
ZHA Junwei, ZHAO Wenshuai, HUANG Wenjie, et al. Research progress in dielectric energy storage of polymer-based composite materials with multilayer structure[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2297-2308.

[3] 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.

[4] ZHAO Z X, CHEN G, TONG Y J, et al. Effect of temperature on condensed state structure and conductivity characteristics of micron-level biaxially oriented polypropylene films[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, 17(5): 8417-8423.

[5] 刘尚书，吴致远，仝殿杰，等. 多物理场作用下的金属化膜自愈特性试验[J]. 高电压技术，2024，50(12)：5424-5435.
LIU Shangshu, WU Zhiyuan, TONG Dianjie, et al. Experiment of self-healing properties of metallized films under multiple physical fields[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5424-5435.

[6] 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.

[7] TANDON S, FARRIS R J. Metalized polypropylene film in capacitors: characterization and the effect of interfacial pressure on the dielectric strength[J]. MRS Online Proceedings Library, 1997, 476(1): 147-153.

[8] 吴 锴，徐子航，张 琛，等. 基于电介质薄膜的器件自愈性能的研究现状[J]. 高电压技术，2024，50(6)：2283-2296.
WU Kai, XU Zihang, ZHANG Chen, et al. Research status of self-healing performance of devices based on dielectric films[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2283-2296.

[9] 彭 波. 金属化膜电容器自愈关键参数研究[D]. 武汉：华中科技大学，2010.
PENG Bo. Research on key parameters of self healing of metallized film capacitors[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2010.

[10] 李 化，林福昌，李智威，等. 一种金属化膜电容器层间压强测量方法和装置：103487177 B[P]. 2015-07-08.
LI Hua, LIN Fuchang, LI Zhiwei, et al. Method and device for measuring metallized film capacitor interlayer pressure intensity: 103487177 B[P]. 2015-07-08.

[11] 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.

[12] REUTER JR R C, ALLEN J J. Prediction of mechanical states in wound capacitors[J]. Journal of Mechanical Design, 1991, 133(1): 387-392.

[13] YAGODA H P. Resolution of a core problem in wound rolls[J]. Journal of Mechanical Design, 1980, 47(4): 847-854.

[14] ALLEN J J, REUTER R C JR. Optimization of mechanical states in wound capacitors[J]. Journal of Mechanical Design, 1991, 133(1): 393-401.

[15] 李实永，王钦若. 模糊控制在薄膜张力控制系统中的研究与应用[J]. 电气传动自动化，2001，23(5)：33-35，32.
LI Shiyong, WANG Qinruo. Research and application of fuzzy control in film tension control system[J]. Electrical Drive Automation, 2001, 23(5): 33-35, 32.

[16] 任 剑，张爱玲. 薄膜电容卷绕工艺及关键技术[J]. 电子工艺技术，2008，29(2)：102-104.
REN Jian, ZHANG Ailing. Winding technics and key technologies of film capacitors[J]. Electronics Process Technology, 2008, 29(2): 102-104.

[17] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 电气绝缘用薄膜 第 2 部分：试验方法：GB/T 13542.2—2021[S]. 北京：中国标准出版社，2021.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Plastic films for electrical purposes-part 2: methods of test: GB/T 13542.2—2021[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2021.

[18] IEC. Specification for plastic films for electrical purposes-part 2: methods of test: IEC 60674-2: 2019[S], 2019.

[19] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 塑料 薄膜和薄片 摩擦系数的测定：GB/T 10006—2021[S]. 北京：中国标准出版社，2021.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Plastics-film and sheeting-determination of the coefficients of friction: GB/T 10006—2021[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2021.

[20] ISO. Plastics-film and sheeting-determination of the coefficients of friction: ISO 8295: 1995[S], 1995.

[21] 王钦若，谢莉萍. 电容器薄膜张力推理控制系统[J]. 工业仪表与自动化装置，1999，1(1)：34-35.
WANG Qinruo, XIE Liping. Capacitor film tension inferential control system[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 1999, 1(1): 34-35.

[22] 桑叶青，杨公源. 复合材料卷绕机张力控制系统设计[J]. 仪器仪表用户，2008，15(5)：42-43.
SANG Yeqing, YANG Gongyuan. The design of the tension control of the take-up process for composite materials[J]. Instrumentation Users, 2008, 15(5): 42-43.

[23] 任 剑，靳建鼎. 薄膜卷制过程中张力控制系统的应用[J]. 电子工艺技术，2010，31(3)：172-176.
REN Jian, JIN Jianding. Application of tension control system for film winding[J]. Electronics Process Technology, 2010, 31(3): 172-176.





**赵子轩**
1996—，男，博士生
主要从事电介质材料绝缘与储能特性等研究工作
E-mail: zixuanzhao@ncepu.edu.cn

ZHAO Zixuan
Ph.D. candidate





**陈 庚**(通信作者)
1990—，男，博士，讲师
主要从事高电压绝缘技术、电介质介电特性及过电压保护等研究工作
E-mail: gengchen@ncepu.edu.cn

CHEN Geng
Ph.D.
Corresponding author


收稿日期 2024-10-19 修回日期 2025-02-28 编辑 程子丰