

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.01.011

卷绕工艺对直流支撑电容器圆元件膜层间压强的影响研究

左强林, 葛昌晶, 雷乔舒
(无锡赛晶电力电容器有限公司, 江苏 无锡 214177)

摘要: 本文从直流支撑电容器的元件卷绕工艺出发, 分析卷绕张力对圆元件膜层间压强的影响及其变化规律, 得到了膜层间最大压强与元件外径及卷绕张力应力成正比, 与芯棒直径成反比的结论; 分析了圆元件外径对卷绕张力及其应力的限制要求, 元件直增大, 要求卷绕张力减小; 分析了元件卷绕角速度和线速度的关系, 得到了角速度变化率与线速度变化率相等的结论; 典型卷绕速度随时间变化曲线表明, 元件卷绕过程存在起头区、烧膜区、加速区、稳定区、减速区和收尾区, 提出了加速区是元件卷绕工艺的关键; 分析了加速区的加速度会形成附加卷绕张力的计算方法, 提出了加速度是一个时变参数并实时影响附加张力的结论; 通过理论分析和研发过程的一些照片相互印证, 论证了元件卷绕加速区与卷绕速度稳定区的结合部, 是耐久性试验中元件击穿的集中区, 解决这个问题是直流支撑电容器的关键点。这对工程技术人员理解和解决卷绕工艺问题具有十分重要的意义。
关键词: 直流支撑电容器; 元件卷绕工艺; 膜层间压强; 卷绕张力; 卷绕速度

Study on Influence of Winding Process on Inter-layer Pressure of Cylindrical Element Film in DC-link Capacitor

ZUO Qianglin, GE Changjing, LEI Qiaoshu

(Wuxi Sun King Power Capacitor Co., Ltd., Jiangsu Wuxi 214177, China)

Abstract: Based on the winding process of DC-link capacitor in this paper, the influence of winding tension on the inter-layer pressure and its variation are analyzed. The conclusion that the maximum pressure of inter-layer is directly proportional to the outer diameter of the element and the winding tension stress and is inversely proportional to the diameter of the mandrel is obtained. The limiting requirements of the outer diameter of the circular element on the winding tension and stress are analyzed. The reduction of the winding tension is required when the diameter of the element is increased. The relationship between the winding angular and linear speed is analyzed, and the conclusion that the variation rate of the angular and linear speed is identical is obtained. The variation curve of typical winding speed with time shows that the element winding process contains starting zone, burning zone, accelerating zone, stabilizing zone, decelerating zone and finishing zone. It is proposed that the accelerating zone is the key of the winding process of the element. The calculation method that the additional winding tension can be formed by the acceleration in the accelerating zone is analyzed and the conclusion that acceleration is a time-varying parameter and affects the additional tension in real time is proposed. It is proved through the theoretical analysis and some photos of the research and development process that the joint part of the winding accelerating zone and the winding speed stability zone of the element is the concentrated zone of element breakdown in the durability test, and solving this problem is the key point of DC-link capacitor. It is of great significance for engineers and technicians to understand and solve the winding process problems.

Keywords: DC-link capacitor; winding technology; pressure of film layers; winding tension; winding speed

收稿日期: 2024-10-27

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2401504)。

0 引言

作为柔性直流输电换流阀的重要器件,直流支撑电容器的可靠性要求高、寿命要求长,需要在直流场强超过 200 kV/mm^[1-2]的条件下运行,超高的直流电场作用成为金属化膜电容器失效的关键因素^[3-4]。李志元等人研究了直流电压作用下金属化膜电容器的自愈特性及寿命预测^[5],李化等研究团队较为系统地机理层面指出自愈发生与电容器工作的电压、层间压强等因素的关联性,以及元件内部膜层间压强计算对金属化膜自愈和寿命的影响^[6-12]。元件是直流支撑电容器的核心部件,对电容器质量起决定性作用。特别是对于干式电容器,元件的膜层间没有液体介质弥补聚丙烯薄膜的电弱点,需要膜层间几乎没有空隙,元件质量的重要性更为突出。为了解决干式电容器元件膜层间空隙问题,需要增加元件膜层间压强,增加膜层间压强需要靠工艺来实现。本文的目的,就是研究卷绕工艺对元件内部膜层间压强的影响。

柔性直流输电用直流支撑电容器的元件类型分两种:一种是扁元件,与传统油浸式电容器的元件类似;另一种是圆柱形的元件,本文称之为“圆元件”。如图 1 所示。

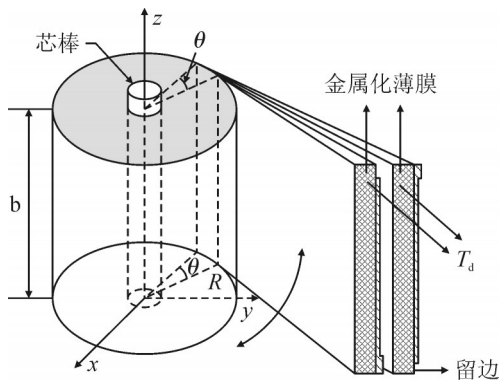


图1 圆元件示意
Fig. 1 Schematic diagram of cylindrical element

圆元件和扁元件各有利弊,其优缺点对比见表 1,可以看出,圆元件的电气稳定性好,技术难度小;扁元件的优势在于空间利用率好,散热效果好,比特性好。

表1 圆元件和扁元件的优缺点对比
Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of cylindrical and flat elements

性能指标	电气稳定性	空间利用率	工艺难度	散热效果	比特性
圆元件	优	差	易	差	差
扁元件	差	优	难	好	好

不管是圆元件还是扁元件,元件卷绕都是电容器的关键工序之一。元件的卷绕工艺参数及其配合,特别是卷绕张力的控制,对元件的质量至关重要。关于元件卷绕张力控制的研究很多,任剑^[13-14]等人研究了卷绕工艺和薄膜电容器的关键技术的关系,李实永^[15]等人研究了模糊控制在卷绕张力控制系统的应用,王钦若^[16]、桑叶青^[17]以及任剑^[18]等人的研究,都涉及到卷绕张力的控制系统的应用。但是很少涉及卷绕工艺本身对膜层间压强的影响。另一方面,彭波^[19]、孔中华^[20]等人研究了元件膜层间压强的计算,王文娟^[21-23]等人研究了包括热定型工艺对膜层间压强计算及其对元件耐久性能的影响,以及元件膜层间压强的测试方法。

本文以圆元件为研究对象,从工艺的角度,研究元件卷绕过程中,卷绕速度的馈控机制、卷绕张力及其力矩平衡、卷绕速度和卷绕加速度等因素对元件膜层间压强的影响规律,对直流支撑电容器卷绕的工艺理论进行更为深入的探究。

1 元件的卷绕张力及卷绕速度研究

1.1 元件卷绕张力对膜层间压强的影响

文献^[7-8]表明,元件膜层间压强可按式计算:

$$P_n = \sum_{k=n}^N \frac{2T_d}{bR_n} = \frac{2(N-n)T_d}{b[r_n + (n-1)2d]} = \frac{D-D_n}{bD_n} T_d \quad (1)$$

式中: P_n 为元件中第 n 圈膜层间压强, Pa; N 为元件总圈数; T_d 为卷绕张力, cN; k 为张力系数; d 为金属化膜厚度, μm ; b 为金属化膜的宽度或元件长度, mm; $D_n = d_0 + D_n$ 、 $R_n = r_0$ 分别是元件第 n 圈直径和半径, mm; d_0 、 r_0 分别是芯棒的直径和半径, mm; d 为膜厚, mm; $D = d_0$ 为元件外径, mm。

从式(1)可知,在元件靠近内圈的位置, $n=1$, 元件内部膜层间压强取得最大值 P_m , 用 P_m 代替式(1)中的 P_n 。根据式(1)可以得到

$$P_m \approx \frac{D-d_0}{d_0db} T_d = \frac{40kNd}{d_0} \quad (2)$$

根据式(2)可以得到

$$T_d = \frac{d_0}{D-d_0} P_m \text{ 或 } \sigma_T = 10k = \frac{d_0}{D-d_0} P_m \quad (3)$$

式(2)-(3)中: P_m 为元件内部膜层间的最大压强, MPa; σ_T 为卷绕张力在聚丙烯薄膜截面产生的应力, 简称张力应力, MPa。

卷绕张力的选取,要考虑聚丙烯薄膜的截面应力和金属化膜的拉伸情况,避免聚丙烯薄膜拉伤,产生电弱点。同时,金属化膜的拉伸伸长率大,会对金属化膜的镀层附着力等产生影响,需要注意。

聚丙烯薄膜的抗拉强度和断裂伸长率的要求可参考文献[15]。

对于金属化膜电容器,一般 $D \gg d_0$, 式(3)可以简化为

$$T_d \approx \frac{d_0 db}{D} P_m \text{ 或 } \sigma_T = 10k \approx \frac{d_0}{D} P_m \quad (4)$$

从式(4)可以看出,膜层间最大压强越大,卷绕张力越大;薄膜的截面积越大,卷绕张力越大;芯棒直径与元件外径之比越大,卷绕张力越大。从式(4)可以得到

$$P_m \approx \frac{D}{d_0} \sigma_T \quad (5)$$

从式(5)可以看出,如果已知薄膜的截面应力和元件外径及芯棒直径,就可以通过估算出膜层间的最大压强。

将 $d_0=9 \text{ mm}$, $d=5.8 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $b=150 \text{ mm}$ 代入式(3)得到的典型计算结果见图2。

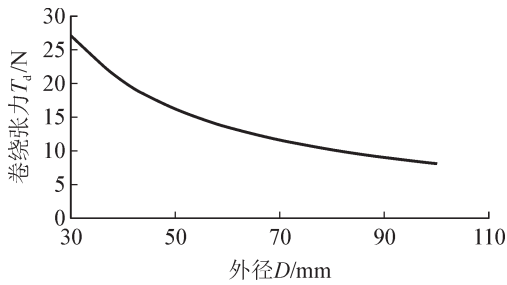


图2 元件外径与卷绕张力的关系示意
Fig. 2 Relationship schematic diagram between the external diameter of elements and the winding tension

从图2可以看出,不同元件外径对卷绕张力选取是有限制的,元件外径越大,要求卷绕张力及其张力应力要越小;反之,元件外径越小,卷绕张力就应该适当增加。另外,膜层间压强要考虑元件热定型的因素,确保元件热定型后,元件内层膜之间不出现粘连,否则会严重影响元件的电气性能,特别是自愈性能和耐久性性能。图3是元件内部膜层间压强过大,在热定型后出现膜层间粘接,这种状况应该避免。

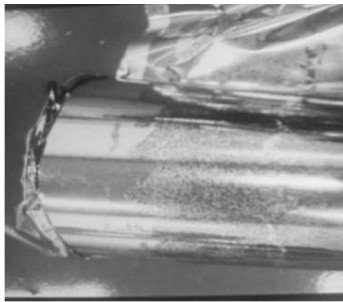


图3 膜层间压强过大导致的膜层粘接
Fig. 3 Film bonding due to excessive inter-layer pressure

1.2 元件卷绕速度的控制逻辑分析

为了保证元件膜层间压强的稳定性,元件卷绕机的卷绕线速度应在元件卷绕过程中保持恒定。元件卷绕是通过伺服电机来实现的,电机的输出功率与卷绕线速度关系为

$$F_x = \frac{P_s}{V_x} \quad (6)$$

式中: F_x 为卷绕机的牵引力; P_s 为卷绕伺服电机的输出功率; V_x 为元件卷绕的线速度,即薄膜的前进速度。

从式(6)可以看出,卷绕牵引力 F_x 与卷绕线速度 V_x 成反比。如果卷绕线速度不能保持恒定,意味着在元件卷绕过程中,卷绕牵引力 F_x 就不能恒定。张力恒定是对卷绕机的基本要求,是元件质量的根本保障。

目前国产金属化膜卷绕机的控制逻辑基本上是通过控制卷绕的角速度(即卷绕机的转速)来控制卷绕线速度,而国际上的主流卷绕机的控制逻辑是直接控制线速度,下面简单分析一下两者的差别。角速度和线速度的关系如下式

$$V_x = \frac{\pi D_n V_z}{60} = \frac{\pi(d_0 + 4nd)V_z}{60} \quad (7)$$

式中: V_z 为卷绕机的转速,转/分钟; $D_n = d_0 + 4nd$ 为元件直径,mm; n 为元件的卷绕圈数; d_0 为芯棒直径, d 为金属化薄膜的厚度。

从式(7)可以看出,通过角速度来控制线速度的影响因素很多,包括芯棒直径、卷绕圈数以及薄膜的厚度等。通过分析这些影响因素的规律,形成馈控机制,控制逻辑比较复杂,稳定性不好。如果直接控制线速度,馈控机制就简单多了,但需要先进的核心算法,这是卷绕机技术的关键。

由式(7)可以得到在设定线速度和转速 V_{x0} 下元件卷绕的平均直径为

$$D_a = \frac{60V_{x0}}{\pi V_{z0}} \quad (8)$$

从式(8)可以看出,当 $D_n < D_a$ 时,卷绕所需的线速度 $V_x < V_{x0}$, 设定的卷绕角速度可以满足卷绕要求;当 $D_n > D_a$ 时,卷绕所需的线速度 $V_x > V_{x0}$, 设定的卷绕角速度不能满足卷绕所需线速度的要求,需要调整卷绕角速度。因此卷绕参数设定的需要考虑匹配性。

根据式(7),元件第 $(n+j)$ 圈和第 n 圈的线速度分别为: $V_{x(n+j)} - V_{xn} = \pi D_{(n+j)} - \pi D_n = \pi((d_0 + 4(n+k)d) - (d_0 + 4nd))$, 即

$$\Delta V_x = V_{x(n+j)} - V_{xn} = 4\pi jd \quad (9)$$

从式(7)可以得到

$$V_z = \frac{\pi D_n}{60} V_x \quad (10)$$

卷绕机的角速度变化率应该与线速度变化率相同,即: $\Delta V_z/V_z = \Delta V_x/V_x$ 。根据式(9)可以得到: $\Delta V_z \pi D_n / 60 = \Delta V_x = 4\pi jd$ 。化简后得

$$\Delta V_z = \frac{60 \Delta V_x}{\pi D_n} = \frac{240jd}{D_n} \quad (11)$$

式(9)-(11)中: $V_{x(n+j)}$ 、 V_{xn} 分别为元件第 $(n+j)$ 圈和第 n 圈的线速度。 ΔV_x 为线速度的变化量; V_z 为卷绕机的转速,转/min; ΔV_z 为卷绕机转速的变化量; D_n 元件第 $(n+j)$ 圈对应的直径; j 为卷绕机控制回路能识别的最小带宽。

式(11)中,由于膜厚 d 的数量级为微米,元件直径 D_n 的数量级为毫米,因此元件卷绕角速度变化量很小,不容易分辨,可以在反馈电路上增加放大器。

2 元件卷绕速度—时间变化曲线带来的影响分析

2.1 元件卷绕速度曲线分析

金属化膜电容器的元件卷绕参数主要有:张力、卷绕速度、卷绕加速度和机头压辊压力等。由于金属化膜卷绕机的卷绕速度比全膜电容器的卷绕速度大得多,一般接近10倍。如果初始卷绕速度从0开始,必然涉及到加速度问题。元件的卷绕过程的典型卷绕速度变化示意图4。图4中, $t_1 \sim t_2$ 为烧膜区, $t_2 \sim t_3$ 为加速区, $t_3 \sim t_4$ 为平稳区, $t_4 \sim t_5$ 为减速区, $t_5 \sim t_6$ 为收尾区。

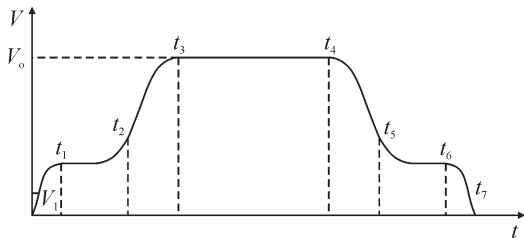


图4 元件卷绕过程中卷绕速度与时间的关系示意
Fig. 4 Relationship schematic diagram between winding speed of element and time in the winding process

由于加速区存在加速度,会产生一个附加张力,对卷绕过程中的实际卷绕张力有影响,而且加速区处于元件较内圈,膜层间压强大,对元件的耐久性能影响较大,所以本文主要研究加速区的问题,减速区的分析可以参照加速区。

为了分析方便,将加速区的起始时刻 t_2 作为计时的0点,将 a_0 记为 $[t_2, t_3]$ 区间(时长 $t_0 = t_3 - t_2$)内加速度最大值,则 $[t_2, t_3]$ 区间内任意时刻 t 的加速度 a 可以按下式计算为

$$a = \frac{a_0}{t_0}(t_0 - t) = a_0 \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) \quad (12)$$

从式(12)可以看出,在元件卷绕的加速区,卷绕加速度是一个时变量,线速度也同样是个时变量。在时刻 t 的线速度 $V = at$,可以得到在整个 $[t_2, t_3]$ 区间的卷绕线速度 V_0 和膜长 l_0 为

$$V_0 = \int_0^{t_0} a dt = \int_0^{t_0} a_0 \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) dt = \frac{a_0 t_0}{2} \quad (13)$$

$$l_0 = \int_0^{t_0} V t dt = \int_0^{t_0} a_0 \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) t dt = \frac{1}{6} a_0 t_0^2 \quad (14)$$

从式(13)可以得到

$$t_0 = 2V_0/a_0 \quad (15)$$

代入式(14)可以得到

$$l_0 = \frac{1}{6} a_0 t_0^2 = \frac{2V_0^2}{3a_0} \quad (16)$$

假设芯棒直径为 d_0 ,加速区的卷绕最大等效直径为 D_0 ,则平均卷绕直径和卷绕圈数 n 为

$$d_n = (D_0 - d_0)/2 + d_0 = \frac{D_0 + d_0}{2} \quad (17)$$

$$n = \frac{l_0}{\pi d_n} = \frac{2l_0}{\pi(D_0 + d_0)} \quad (18)$$

考虑到 $\frac{\pi}{4}(D_0^2 - d_0^2) = 2l_0 d$, 即: $2l_0 = \frac{\pi}{4d}(D_0^2 - d_0^2)$ 。

代入式(18)可以得到

$$n = \frac{2l_0}{\pi(D_0 + d_0)} = \frac{\frac{\pi}{4d}(D_0^2 - d_0^2)}{\pi(D_0 + d_0)} = \frac{D_0 - d_0}{4d} \quad (19)$$

$$D_0 = \sqrt{\frac{8l_0 d}{\pi} + d_0^2} \quad (20)$$

实际上,不同的卷绕机,卷绕的控制逻辑和馈控机制是不一样的,特别是通过控制角速度来控制卷绕速度的卷绕机。同时,卷绕机的转速也存在加速度,需要读者根据实际情况验证。表2是某款卷绕机的转速与时间的实测数据。

表2 卷绕机的卷绕速度与时间的关系
Table 2 Relationship between the winding speed and time of winding machine

卷绕速度 V, m/s	转速设置值/ V_z , rpm	转速达到的 时间/s	卷绕速度达到的 时间/s
6	3 000	2	25
8	3 000	2	35

从表2可以看出,即使设置的转数一样,卷绕速度不同,时间也相差很大。所以卷绕参数的匹配,需要读者根据卷绕机的实际情况研究确定。

2.2 元件卷绕加速区的问题分析

将式(15)代入式(12)可以得到

$$a = a_0 \left(1 - \frac{a_0}{2V_0} t \right) \quad (21)$$

从式(21)可以看出,在加速区,加速度也是一个时变参数。如果把卷绕张力等效成一个物体的重量,则应有: $T_d = m_T g$ 。在 $[t_2, t_3]$ 这个区间,卷绕张力任意时刻 t 的等效卷绕张力 T_{di} 公式为

$$T_{di} = m_T g + m_T a = T_d \left(1 + \frac{a}{g} \right) \quad (22)$$

将式(21)代入式(22)可以得到

$$T_{di} = T_d \left(1 + \frac{a_0}{g} \left(1 - \frac{a_0}{2V_0} t \right) \right) \quad (23)$$

式(22)–(23)中, T_{di} 为加速区的等效卷绕张力, cN; m_T 为卷绕张力的等效实物质量, g; g 为重力加速度, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

从式(22)–(23)可以看出,加速区的加速度和卷绕张力会随着时间增加而减小,与设定的加速度和线速度有关。

从式(21)可以看出,在加速区,加速度随着时间延长而直线减小,当 $t = t_0$ 时,加速度减小到0;加速区的等效张力大于或等于卷绕机的设定张力,而且加速度越大,附加张力的倍数就越大。随着时间延长,金属化膜受到的卷绕应力直线下降。当卷绕速度达到设定值 V_0 时,等效张力等于卷绕机的设定张力。如果匹配有问题,加速区和卷绕速度稳定区之间就可能会出现应力突变,严重时元件端面出现肉眼可见的分层,如图5所示。

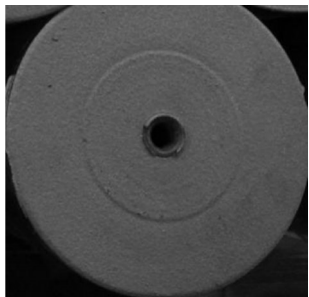


图5 元件端面的分层现象

Fig. 5 Stratification of the end face of element

如图5所示的元件在经过耐久性试验后,可能会出现严重的问题。图6是自愈失效后元件自愈失效部位的照片,自愈失效点位于加速区和稳定区的结合部位。此外,元件卷绕起始区存在烧膜和短

时间低速卷绕,也可能导致圆元件较内圈的膜层间压强比理论计算值小,需要引起关注。

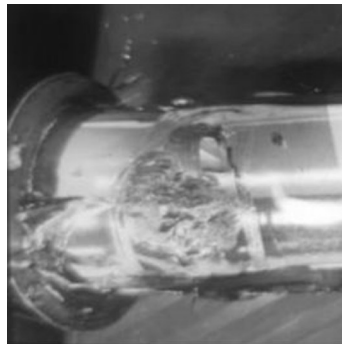


图6 耐久性试验中自愈失效后的元件

Fig. 6 Element after self-healing failure in durability test

3 结语

1) 直流支撑电容器圆柱形元件内部膜层间最大压强与元件外径与其芯棒直径之比成正比,与薄膜的截面积成反比;膜层间最大压强应予以控制,避免出现膜层间粘连。

2) 卷绕张力要考虑元件外径的制约因素,元件外径越大,卷绕张力应该越小。在卷绕张力较大的情况下,应设法减小圆元件的外径。

3) 通过调整角速度来实现线速度的卷绕机,其角速度变化率(或转速)应该与线速度变化率相同,即: $\Delta V_x / V_x = \Delta V_r / V_r$ 。

4) 根据卷绕机在元件卷绕过程中速度时间曲线,元件卷绕过程中存在加速区和减速区,这两个区域是影响元件质量的关键。

参考文献

- [1] 李婉茹. 金属化薄膜电容器用聚丙烯高场电荷输运特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [2] CHENG Lu, LIU Wenfeng, LIU Xiaowei, et al. Online degradation of biaxial-orientated polypropylene film from HVDC filter capacitors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(1): 26-33.
- [3] MAKDESSI M, SARI A, VENET P, et al. Lifetime estimation of high-temperature high-voltage polymer film capacitor based on capacitance loss[J]. Microelectronics Reliability, 2015, 55(9/10): 2012-2016.
- [4] LI Zhiwei, LI Hua, LIN Fuchang, et al. Lifetime investigation and prediction of metallized polypropylene film capacitors[J]. Microelectronics Reliability, 2013, 53(12): 1962-1967.
- [5] 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]. 高压电器, 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 Apparatus, 2023, 49(7): 2929-2937.
- [6] HEYWANG H. Physikalische und chemische Vorgänge in selbstheilenden Kunststoff-Kondensatoren[J]. Colloid and Polymer Science, 1976, 254(2): 139-147.
- [7] BELKO V O, EMEL'YANOV 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.
- [8] TORTAI J H, DENAT A, BONIFACI N. Self-healing of capacitors with metallized film technology: experimental observations and theoretical model[J]. Journal of Electrostatics, 2001, 53(2): 159-169.
- [9] 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.
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.
- [10] 章妙. 金属化膜电容器自愈特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [11] 陈耀红,林福昌,李化,等. 金属化膜电容器击穿机理及自愈模拟试验研究[C]//中国电机工程学会高电压专业委员会2009年学术年会. 2009.
- [12] SHALAH TANDON, RICHARD J, FARRIS. Metalized polypropylene film in capacitors: characterization and the effect of interfacial pressure of the dielectric strength[J]. Polymer Science and Engineering Department, 1997, 476(6): 147-153.
- [13] 任剑,张爱玲. 薄膜电容卷绕工艺与关键技术[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.
- [14] J. J. ALLEN, R. C. REUTER, JR. Optimization of mechanical states in wound capacitors[J]. Journal of Mechanical Design, 1991, 113(12): 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.
LI Shiyong, WANG Qinruo. Research and application of fuzzy control in film tension control system[J]. Electric Drive Automation, 2001, 23(5): 33-35.
- [16] 王钦若,谢莉萍. 电容器薄膜张力推理控制系统[J]. 电气设备, 1999(1): 34-35.
WANG Qinruo, XIE Liping. Capacitor film tension inferential control system[J]. Electric Drive, 1999(1): 34-35.
- [17] 桑叶青,杨公源. 复合材料卷绕机张力系统控制系统设计[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]. Instrument User, 2008, 15(5): 42-43.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 孔中华,林福昌,戴玲,等. 金属化膜电容器层间压强计算[J]. 高压电器, 2007, 43(5): 348-350.
KONG Zhonghua, LIN Fuchang, DAI Ling, et al. Calculation of the pressure intensity between layers of a metallized film capacitor[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(5): 348-350.
- [21] 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): 124-128.
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): 124-128.
- [22] 李化,林福昌. 一种金属化膜电容器层间压强测量方法和装置: CN103487177 B[Z]. 2015-07-26.
- [23] 电气绝缘用薄膜第2部分: 试验方法: GB/T 13542. 2—2021[S]. 2021.
Plastic film for electrical purposes—Part 2: Methods of test: GB/T 13542. 2—2021[S]. 2021.

作者简介:

左强林(1967—),男,正高级工程师,主要从事电力电容器设计制造工作。E-mail:zuoql@sunking-tech.com。

葛昌晶(1986—),男,工程师,长期从事电力电容器生产工艺及制造相关工作。E-mail:gcj@sunking-tech.com。

雷乔舒(1979—),女,高级工程师,主要从事电力电容器设计制造工作。E-mail:leiqs@sunking-tech。