

ICS 29.200

CCS K 42

CES

团 体 标 准

T/CES XXXXX—XXXX

柔性直流电容器用金属化薄膜电气性能  
评价方法

Evaluation method for electrical performance of metalized film used in  
VSC-HVDC capacitors

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国电工技术学会发布



## 目 次

前言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 评价对象和评价指标 .....	5
4.1 评价对象 .....	5
4.2 基本性能要求 .....	5
4.3 评价方法 .....	6
4.3.1 50 点电极法威布尔分析 .....	7
4.3.2 50 点电极法标准方差分析 .....	7
4.3.3 结晶度 .....	7
4.3.4 空间电荷 .....	7
4.3.5 灰分 .....	7
4.3.6 金属层附着力 .....	7
4.3.7 电弱点 .....	8
4.3.8 表面沟槽深度 .....	8
4.4 评价指标 .....	8
5 试验方法 .....	9
5.1 常温 50 点电极法 .....	9
5.2 高温 (85℃) 50 点电极法 .....	9
5.3 结晶度 .....	9
5.4 空间电荷 .....	9
5.5 灰分 .....	10
5.6 金属层附着力 .....	10
5.7 电弱点 .....	10
5.8 表面沟槽深度 .....	10
附录 A (资料性) 50 点电极法 .....	11
附录 B (资料性) 50 点电极法威布尔图及标准方差分析评价示例 .....	12
参考文献 .....	16

## 前　　言

本文件按照 GB/T1.1—2020《标准化工作导则 第1部分 标准的结构与编写》给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中国电工技术学会提出。

本文件由中国电工技术学会标准工作委员会电力电容器工作组归口。

本文件起草单位：无锡赛晶电力电容器有限公司、清华大学、西安高压电器研究院股份有限公司、同济大学、嘉善赛晶电容器有限公司、南洋华诚科技有限公司、四川东方绝缘材料股份有限公司、广东迈特斐薄膜科技有限公司、华北电力大学、大东南万象科技有限公司。

本文件主要起草人：左强林、雷乔舒、党智敏、邓光昭、郑飞虎、高扬、严浩、钟少龙、陆为民、蔡俊、石永辉、姚成椿、王璁、黄剑鹏、张永豪、陈炎、尤鸿梵、陈庚。

本文件为首次发布。

# 柔性直流电容器用金属化薄膜电气性能评价方法

## 1 范围

本文件规定了柔性直流输电直流电容器用金属化塑料薄膜的电气性能评价对象、评价指标和评价方法。

本文件适用于对柔性直流输电直流电容器用金属化塑料薄膜的电气性能进行评价。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本文件。

GB/T 9345.1-2008 塑料 灰分的测定 第1部分：通用方法

GB/T 13542.1-2009 电气绝缘用薄膜 第1部分：定义和一般要求

GB/T 13542.2-2021 电气绝缘用薄膜 第2部分：试验方法

GB/T 13542.3 电气绝缘用薄膜 第3部分 电容器用双轴定向聚丙烯薄膜

GB/T 17702-2021 电力电子电容器

GB/T 19466.3 塑料 差示扫描量热法（DSC）第3部分：熔融和结晶温度及热焓的测定

GB/T 24123-2009 电容器用金属化薄膜

GB/T 34987-2017 威布尔分析

JY/T 0587-2020 多晶体X射线衍射方法通则

SJ/T 10464-2015 电容器用金属化聚丙烯薄膜

JB/T 12927-2016 固体绝缘材料中空间电荷分布的电声脉冲测试方法

JB/T 12928-2016 固体绝缘材料中空间电荷分布的压力波测试方法

## 3 术语和定义

GB/T 13542.1-2009、GB/T 24123-2009、GB/T 34987-2017界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**基膜 base film**

电容器用的能在其表面蒸镀一层极薄金属层的塑料薄膜。

[来源：GB/T 24123-2009，3.1]

### 3.2

**金属化薄膜 metallized film**

将高纯铝或锌在高真空状态下熔化、蒸发、沉淀到基膜上，在基膜表面形成一层极薄的金属层后的塑料薄膜。

[来源: GB/T 24123-2009, 3.2]

### 3.3

#### 留边 margin

在实际制造电容器过程中,为了满足设计需求,将金属化薄膜的单侧、双侧或中间部分遮蔽以形成无金属镀层的绝缘区域(空白条带),称为留边。留边的宽度称为留边量。

注:典型内串膜结构示例如图1所示。

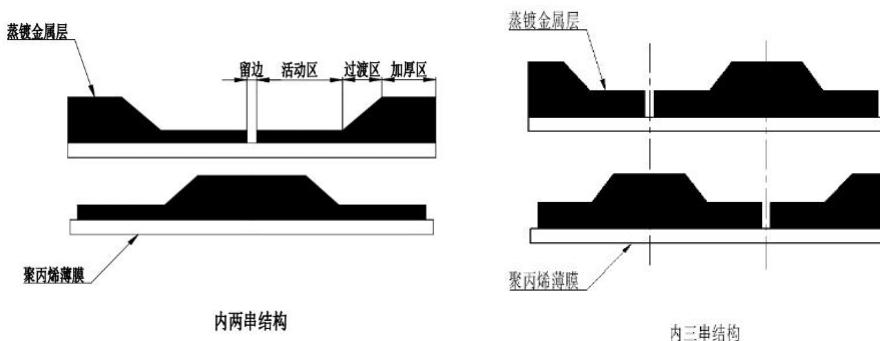


图1 内串膜结构示例

[来源: GB/T 24123-2009, 3.4, 有修改]

### 3.4

#### 方块电阻 square resistance

金属化薄膜上的金属层在单位正方形面积的电阻值称为方块电阻,通常用 $\Omega/\square$ 表示,在电容器中,方块电阻常用于表征金属镀层的厚度的电阻特性。

注:方块电阻测量不受薄膜面积的影响。在将方块电阻转换为镀层厚度时,需要考虑金属元素的含量以及金属镀层表面的氧化情况。

[来源: GB/T 24123-2009, 3.5, 有修改]

### 3.5

#### 活动区 active area

金属化薄膜镀层中方阻较大、较均匀的部分称为活动区。活动区是自愈发生最频繁的区域,也可以看作是“自愈有效区”。

注:活动区沿膜宽度方向分布。活动区之外还有镀层加厚区、过渡区和留边等,见图1内两串膜结构示意。

### 3.6

#### 非活动区 inactive area

金属化薄膜中基膜表面有金属镀层但不是活动区的部分称为非活动区。非活动区包括加厚区和过渡区,见图1内两串膜结构示意。

### 3.7

#### 隔离金属化设计 segmented metallization design

通过电介质上的金属层图案设计，使金属层的一小部分在局部短路或击穿的情况下能被隔离，以便在损失微小电容值的情况下能恢复单元的全部功能。

[来源：GB/T 17702-2021，3.13.3]

### 3.8

#### 双参数威布尔方程 weibull equation

双参数威布尔分布是一种常用的统计方法，本文件中用于分析材料在电场作用下的击穿强度。它的累积分布函数见式（1）。

$$P(E) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{E}{E_b}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

式中：

$P(E)$ —击穿失效的累积概率

$E$ —施加的电场强度；

$E_b$ —特征击穿强度，对应 63.2% 的累积失效概率

$\beta$ —形状参数，评估数据的分散性

[来源：GB/T 34987-2017，5.1，有修改]

#### 3.8.1

##### 特征击穿强度 $E_b$ characteristic field strength $E_b$

原式中指预期 63.2% 的样品失效的时间，本文件中指特征场强，即预期 63.2% 击穿概率的击穿场强。

[来源：GB/T 34987-2017，5.1，有修改]

#### 3.8.2

##### 形状参数 $\beta$ shape parameter $\beta$

原式中指瞬时失效率随时间的变化率，本文件中指瞬时失效率随场强的变化率。

[来源：GB/T 34987-2017，5.1，有修改]

#### 3.8.3

##### 较弱离群点数 weak outlier points

有时，95% 置信区间的数据集会存在少量低值由于某种原因实际上不是该数据集的成员，这种数据点被称为较弱离群点，如图 2 所示。这些点对数据分析很重要，因此需要调查数据记录、测试记录、仪器校正等工程因素，进而确认这些极端散点产生的原因。如无法使用非材料本身因素将其排除，应将其视为较弱的缺陷点。

本文件中指薄膜 50 点法试验中导致低值的非材料本身因素，如薄膜褶皱、加压设备故障、取样造成薄膜表面损伤等。

[来源：GB/T 34987-2017，8.4，有修改]

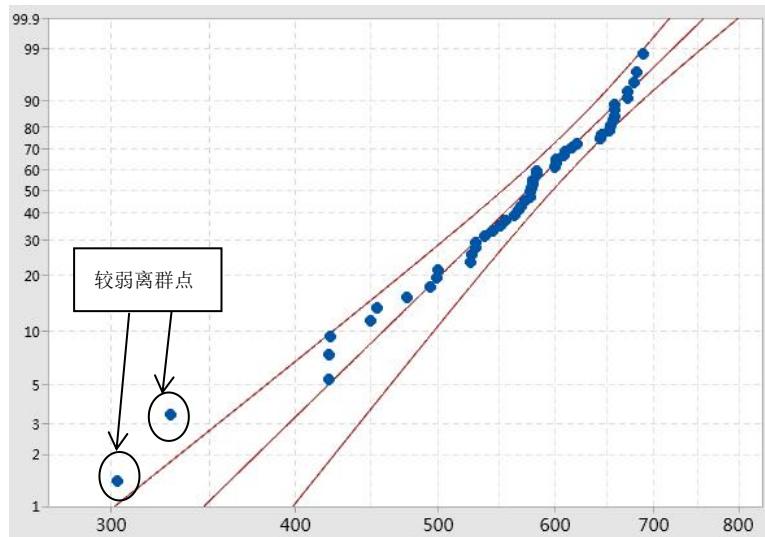


图 2 较弱离群点示意图

## 3.9

**标准方差分析 analysis of variance**

本文件以 2 倍测量数据的标准方差界限为依据，凡超过此界限的数据点，判定为异常值筛出并单独分析。

## 3.9.1

**标准方差倍数**

用于评定数据点是否为异常值。计算方法用式（3）表示。

$$F(X) = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \quad (3)$$

式中： $\sigma$ 为标准方差； $X_i$ 为 50 点法试验各数据点（ $i=1, 2, \dots, 50$ ）； $\bar{X}$ 为平均值。

## 3.9.2

**异常值**

当某一数据点的标准方差的绝对值倍数 $>2$ 时，判定该数据点为异常值。

## 3.10

**结晶度 crystallinity**

结晶度用来表示聚合物中结晶区域所占的比例。

注：结晶是聚合物分子链的一种有序排列方式，一般结晶度越高，分子链排列越规则，因此熔点也越高。聚丙烯的结晶形态主要分为 $\alpha$  晶和 $\beta$  晶两种。

## 3.11

**空间电荷 space charge**

在高电场作用下，经由电极向介质内发射并聚集的电荷。

## 3.11.1

**空间电荷的测量 measurement of space charge**

空间电荷特性的测量主要分为两类：一是测量电荷的时空分布特性，二是测量电荷的能级分布。

## 3.11.2

**空间电荷时空分布特性测量** measurement of spatiotemporal distribution characteristics of space charges

空间电荷的主要测量方法有热脉冲法, 压力波法和电声脉冲法, 其中热脉冲法具有亚微米空间分辨率, 适用于微米厚度介质薄膜中电荷分布的测量。

## 3.12

**等规度** isotacticity

聚丙烯分子链上第三个碳原子在同一侧的数量与第三个碳原子的总数的百分数。

## 4 评价对象和评价方法

## 4.1 评价对象

柔性直流输电直流电容器用金属化薄膜, 其基膜质量密度法厚度为  $4.5 \mu\text{m}$ 、 $4.8 \mu\text{m}$ 、 $5.8 \mu\text{m}$ 、 $6.8 \mu\text{m}$ 、 $7.8 \mu\text{m}$ 、 $8.8 \mu\text{m}$ 、 $9.8 \mu\text{m}$ 。其他标称厚度也可参考本文件。

## 4.2 基本性能要求

膜卷尺寸符合 GB/T 24123-2009 第 5.2.1 条要求, 基膜基本性能指标符合表 1 的要求, 金属化膜指标符合表 2 的要求。

表 1 柔性直流输电直流电容器用基膜性能要求

序号	性能	单位	要求	
1	标称厚度	$\mu\text{m}$	4~6	6.1~10
2	厚度允许偏差	$\mu\text{m}$	批个别值 $\pm 0.2$ 批平均值 $\pm 0.1$	
3	拉伸强度	纵向	$\geq 140$	
		横向		
4	断裂伸长率	纵向	$\geq 100$	
		横向		
5	表面湿润张力	$\text{mN/m}$	$36\sim 40$	

6	介质损耗因数 ( $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , $48 \sim 62\text{Hz}$ )		/	$\leq 3 \times 10^{-4}$	
7	体积电阻率 ( $23 \pm 2^\circ\text{C}$ )		$\Omega \cdot \text{m}$	$\geq 1.0 \times 10^{15}$	
8	相对介电常数 ( $23 \pm 2^\circ\text{C}$ $48 \sim 62\text{Hz}$ )		/	$2.2 \pm 0.2$	
9	直流介电强度	均值	$\text{V}/\mu\text{m}$	$\geq 520$	$\geq 550$
注：基膜所用粒料的等规度应 $\geq 98\%$ 。					

表 2 柔性直流输电直流电容器用金属化薄膜性能要求

序号	性能		单位	要求	
1	标称厚度		$\mu\text{m}$	$4 \sim 6$	
2	抗拉强度	纵向	$\text{N}/\text{mm}^2$	$\geq 140$	
		横向		$\geq 230$	
3	断裂伸长率	纵向	%	$\geq 100$	
		横向	%	$\geq 40$	
4	热收缩率 ( $120^\circ\text{C}$ , 15 分钟)	纵向	%	$\leq 5$	$\leq 4$
		横向		$\leq 1$	
5	直流介电强度	均值	$\text{V}/\mu\text{m}$	$\geq 520$	$\geq 550$
6	方块 电 阻	锌铝、 铝	加厚区	$\Omega/\square$	2~5 且实测值与设计值偏差不大于 30%
			活动区		$\geq 30$ 且实测值与设计值偏差不大于 20%
注：表中第 4 项建议薄膜厂家提供热收缩率的温度曲线。表中第 6 项所示方块电阻为柔性直流电容器用金属化薄膜的优选值，该指标可由供需双方商定，如用户有要求也可采用其他设计如过渡区等。					

#### 4.3 评价方法

#### 4.3.1 50 点电极法威布尔分析

完成 50 点电极法试验（参见附录 A）后，将试验所得的 50 个击穿场强数据按 GB/T 34987—2017 绘制成威布尔图进行分析评价，其特征场强、形状参数应满足 4.4 条表 3 的要求。

#### 4.3.2 50 点电极法标准方差分析

完成 50 点电极法试验（参见附录 A）后，将试验所得的 50 个击穿场强数据通过计算得到其算术平均值和标准方差，计算各数据点与算术平均值的偏差后将其换算成标准方差的倍数。以 2 倍测量列的标准方差界限为依据，凡超过此界限的数据点就可判定其为异常值。异常值如无法使用非材料本身因素将其排除，应将其视为较弱的缺陷点并记录其数量，数量应符合 4.4 条表 3 要求。

#### 4.3.3 结晶度

柔性直流输电直流电容器用金属化薄膜的基膜结晶度可采用差示扫描量热法或 X 射线衍射法进行测试评价，应符合 4.4 条表 3 要求。

#### 4.3.4 空间电荷

在高电场作用下，电荷经由电极向介质内部发射并积累，积累的电荷为单极性或双极性共存的情况。单极性积累的情况下，介质内最高电场可以出现在异极性电极界面处；双极性积累的情况下，介质内最高电场出现在正负电荷交界区域。

薄膜内空间电荷分布测量适宜的方法为热脉冲法，测量条件是额定工作电场（ $\pm 20\%$ ）下，连续监测 2–24 小时，实验温度设定为 25°C, 60°C, 90°C。

空间电荷的积累和分布与介质-电极界面，介质内部电荷属性，外界实验参数有关，积累的电荷密度随样品呈现巨大差异，因此不宜作为材料电气属性的直接依据。空间电荷的积累形成的电场畸变，会直接影响介质薄膜的视在击穿场强。

界定空间电荷对电气性能影响的推荐参数是双参数威布尔击穿的形状参数，推荐按照上述步骤检测空间电荷或进行高电场预电压处理后进行击穿实验，如威布尔击穿形状参数减小 20–40% 可视为电荷注入显著而影响介质击穿的判断依据。

#### 4.3.5 灰分

柔性直流输电直流电容器用金属化膜的基膜应使用超净聚丙烯粒料制备，灰分应符合 4.4 条表 3 要求。

#### 4.3.6 金属层附着力

试验方法按本文件 5.6 条进行，试验后金属层应无明显脱落现象，同时测量粘贴后的薄膜方阻值应符合 4.4 条表 3 要求。

#### 4.3.7 电弱点

试验电压（直流）为  $300 \text{ V}/\mu\text{m}$  试样厚度，试验后计算每平方米弱点数应符合 4.4 条表 3 要求。

#### 4.3.8 表面沟槽深度

使用高倍电子扫描显微镜观察薄膜表面沟槽的微观情况,计算可观察部分部位结晶环的最深与最浅的极差距离即表面最大沟槽深度,该值应符合4.4条表3要求。

#### 4.4 评价指标

受评价的薄膜指标应满足表3的要求。

表3 薄膜评价指标要求

序号	项目		单位	要求值
1	50点电极法(常温)	特征场强	V/ $\mu\text{m}$	$\geq 560$
		形状参数	—	$\geq 8$
		较弱离群点数/异常值	个	$\leq 2$
	50点电极法(85℃)	特征场强	V/ $\mu\text{m}$	$\geq 450$
		形状参数	—	$\geq 8$
		较弱离群点数/异常值	个	$\leq 4$
2	结晶度	DSC 差示扫描量热法	%	$\geq 45$
		XRD X射线衍射法		$\geq 60$
3	灰分		ppm	$\leq 20$
4	金属层附着力	纯铝膜	—	粘贴后的方阻小于粘贴前方阻的1.4倍
		锌铝膜和高方阻锌加厚铝膜	—	粘贴后的方阻小于粘贴前方阻的3倍
5	电弱点	300V/ $\mu\text{m}$	$\text{mm}^2$	$\leq 1$
6	表面沟槽深度		$\mu\text{m}$	$\leq$ 试样厚度的20%

### 5 试验方法

#### 5.1 常温50点电极法

常温 50 点电极法试验参照行录 A，在进行 50 点法测试前应对薄膜的方阻进行测试以确认方阻无异常，避免镀层氧化对击穿电压产生影响。

## 5.2 高温（85℃）50 点电极法

高温 50 点电极法测试步骤：

- a) 测试条件：将薄膜材料、电极、绝缘胶放入烘箱，进行热平衡（85℃）；
- b) 提前开启鼓风烘箱，设置 85℃，待烘箱温度升至 85℃后开始测试；
- c) 将薄膜样品平铺在提前升温好的铺有铝箔的绝缘垫上，共计测试 50 个点的击穿电压；
- d) 测试过程中烘箱的显示温度应在设定温度±2.5℃的范围，如果显示温度超出此温度范围，则需要等待温度达到要求范围内，并等待温度稳定后再进行测试；
- e) 每次将测试完成的样品取出后，需关闭烘箱待温度重新恢复到设定温度并稳定后才能重新放置样品加热；
- f) 试验结束后计算薄膜的高温击穿场强。

注：如进行其他温度的 50 点电极法，变更烘箱设置温度即可，其他试验方法不变。

## 5.3 结晶度测试方法

聚丙烯薄膜的结晶度可以通过两种方法进行测试，一是差示扫描量热仪即 DSC 方法，按标准 GB/T 19466.3-2004 进行测试，二是 X 射线衍射仪即 XRD 方法，按标准 JY/T 0587-2020 进行测试。

DSC 方法结晶度定义：聚丙烯薄膜样品升温熔融吸收的热焓与标准聚丙烯熔融热焓的比值。

使用 DSC 差示扫描量热仪分析聚丙烯薄膜样品的热性能后，可通过式(4)计算得到样品的结晶度。

$$X_c = \frac{\Delta H_f}{\Delta H} \quad (4)$$

式中： $X_c$  为结晶度； $\Delta H_f$  为样品熔融热焓值； $\Delta H$  为标准聚丙烯熔融热焓值即 209J/g；

XRD 方法结晶度定义：聚丙烯薄膜内部结晶区域占晶体和无定形区域总体积的百分比为结晶度。

使用 XRD 测的聚丙烯薄膜的衍射峰曲线图后，可通过式(5)计算得到样品的结晶度。

$$X_c = \frac{S_c}{S_a + S_c} \quad (5)$$

式中： $X_c$  为结晶度； $S_c$  为结晶区域的衍射峰面积； $S_a$  为无定形区域的衍射峰面积；

## 5.4 空间电荷测试方法

采用热脉冲法，通过瞬时激光脉冲作用于被测介质膜的靶电极转化为瞬时热脉冲，瞬时热脉冲经由电极沿厚度方向向介质内部传导形成对空间电荷的热扰动，热扰动导致的空间电荷微小位移将导致外接电路位移电流的变化，通过探测并解卷积分析位移电流可推断介质薄膜内的空间电荷时空分布特性。

## 5.5 灰分

灰分测试按照 GB/T 9345.1-2008 标准要求进行。

## 5.6 金属层附着力

检测仪器：粘结强度 2N/cm<sup>2</sup>~10 N/cm<sup>2</sup> 的胶带、灯箱、目测。

检测方法：取足够长度的试样，将试样金属面向上平铺在检验台上并固定，将胶带均匀的、平整的粘贴在试样的金属层上，粘贴长度不小于 5cm，粘贴时用 4~5N 的力使胶带与金属层完全贴合，然后将

胶带平稳匀速地垂直撕下。

### 5.7 电弱点

电弱点测试方法按 GB/T 13542.2-2021 第 22 章节要求进行。

### 5.8 表面沟槽深度

使用电子显微镜观看薄膜表面微观情况, 计算可观测到的结晶环的最深与最浅位置的极差即为表面沟槽深度。

附录 A  
(资料性)  
50 点电极法

#### A. 1 试样

取不小于  $450\text{mm} \times 650\text{mm}$  长方形试样两张，当宽度小于  $450\text{mm}$  时，可取若干张，以保证能做 50 个击穿点。试样要保持清洁、平整、无折皱、无损伤。

#### A. 2 电极

上电极为直径  $25\text{mm}$ ，倒角半径为  $2.5\text{mm}$ ，高度  $120\text{mm}$  的黄铜柱形电极，工作粗糙度  $R_a$  小于  $1.25 \mu\text{m}$ 。

在平台上铺一张厚约  $3\text{mm}$  的橡皮，其邵氏硬度为 60 度~70 度，在橡皮上铺一张退火铝箔作为下电极。电极工作面应平整、光滑、无伤痕。

#### A. 3 击穿装置

高压试验变电器的容量应保证次级额定电流不小于  $0.1\text{A}$ ，直流电源的电压脉动系数不应超过 5%，保护电阻为  $0.2 \Omega /V \sim 0.5 \Omega /V$ ，调压器应能均匀调节电压，过电流继电器应有足够的灵敏度以使试样击穿时在  $0.1\text{s}$  内切断电源，动作电流应选择适当值，避免发生击穿后不动作或未击穿而产生误动作，电压测量误差不超过 4%。

#### A. 4 试验步骤

采用单层试样试验，将试样置于上下电极间，采用连续升压法，其升压速度为  $0.2\text{kV}/\text{s} \sim 1.0\text{kV}/\text{s}$ ，均匀等距离测量 50 点，读取试样击穿电压值，并测量其厚度。

#### A. 5 试验结果

将 50 个击穿电压值除以试样厚度以计算击穿场强，得到用于威布尔分析和标准方差分析用的原始数据。

附录 B  
(资料性)  
50 点电极法威布尔图及标准方差分析评价示例

### B.1 用电子数据表进行威布尔分析算例

本文件附录 B 以某批次  $5.8 \mu\text{m}$  厚金属化膜（活动区金属层方阻  $35\text{--}85 \Omega$ ）50 点电极法击穿场强数据作为算例进行分析。使用电子数据表进行威布尔分析适合绘制出不带置信区间的威布尔图用于确定威布尔分布的形状参数  $\beta$  和特征场强  $\eta$  的值，算例计算使用秩回归方法进行威布尔参数估计。算例计算过程和结果见表 B.1。

表 B.1 威布尔分析电子数据表算例

A	B	C	D	E
数据序号 i	击穿场强 E(升序排列)	中位秩 $F = \frac{i - 0.3}{50 + 0.4}$	$X = \ln E$	$Y = \ln \left( \ln \left( \frac{1}{1 - F} \right) \right)$
计算式	/	$= (A_{1-50} - 0.3) / 50.4$	$= \text{LN}(B_{1-50})$	$= \text{LN}(\text{LN}(1 / (1 - C_{1-50})))$
1	422	1.39%	6.05	-4.27
2	422	3.37%	6.05	-3.37
3	433	5.36%	6.07	-2.90
4	454	7.34%	6.12	-2.57
5	472	9.33%	6.16	-2.32
6	476	11.31%	6.17	-2.12
7	478	13.29%	6.17	-1.95
8	487	15.28%	6.19	-1.80
9	513	17.26%	6.24	-1.66
10	517	19.25%	6.25	-1.54
11	528	21.23%	6.27	-1.43
12	537	23.21%	6.29	-1.33
13	537	25.20%	6.29	-1.24
14	541	27.18%	6.29	-1.15
15	546	29.17%	6.30	-1.06
16	548	31.15%	6.31	-0.99
17	563	33.13%	6.33	-0.91
18	572	35.12%	6.35	-0.84
19	578	37.10%	6.36	-0.77
20	580	39.09%	6.36	-0.70
21	583	41.07%	6.37	-0.64
22	585	43.06%	6.37	-0.57
23	585	45.04%	6.37	-0.51
24	585	47.02%	6.37	-0.45
25	589	49.01%	6.38	-0.40
26	602	50.99%	6.40	-0.34

A	B	C	D	E
数据序号 i	击穿场强 E(升序排列)	中位秩 $F = \frac{i - 0.3}{50 + 0.4}$	X = ln E	$Y = \ln \left( \ln \left( \frac{1}{1 - F} \right) \right)$
计算式	/	= (A <sub>1-50</sub> - 0.3) / 50.4	=LN(B <sub>1-50</sub> )	=LN(LN(1/(1-C <sub>1-50</sub> )))
27	602	52.98%	6.40	-0.28
28	607	54.96%	6.41	-0.23
29	611	56.94%	6.42	-0.17
30	622	58.93%	6.43	-0.12
31	635	60.91%	6.45	-0.06
32	636	62.90%	6.46	-0.01
33	639	64.88%	6.46	0.05
34	640	66.87%	6.46	0.10
35	646	68.85%	6.47	0.15
36	646	70.83%	6.47	0.21
37	648	72.82%	6.47	0.26
38	648	74.80%	6.47	0.32
39	657	76.79%	6.49	0.38
40	670	78.77%	6.51	0.44
41	674	80.75%	6.51	0.50
42	678	82.74%	6.52	0.56
43	679	84.72%	6.52	0.63
44	679	86.71%	6.52	0.70
45	683	88.69%	6.53	0.78
46	690	90.67%	6.54	0.86
47	704	92.66%	6.56	0.96
48	717	94.64%	6.58	1.07
49	741	96.63%	6.61	1.22
50	752	98.61%	6.62	1.45
回归方程		$\ln(E) = \left(\frac{1}{\beta}\right) \ln(-\ln(1 - F(E))) + \ln(\eta)$		
计算式 形状参数 $\beta$ (F1)		=SLOPE(E1:E50, D1:D50)		8.2638
计算式 回归方程尾数 (F2)		=INTERCEPT(E1:E50, D1:D50)		-53.239
计算式 特征场强 $\eta$ (F3)		=EXP(-F2/F1)		628
计算得到回归方程				Y=8.2638X-53.239

表 B. 1 中有灰色背景的两列作为绘制散点图的 X、Y 轴输入数据。绘图类型是散点图，不带连接线。作完散点图后再选择向散点图中增添回归拟合直线，并把回归方程标在图中。结果图形见图 B. 1.

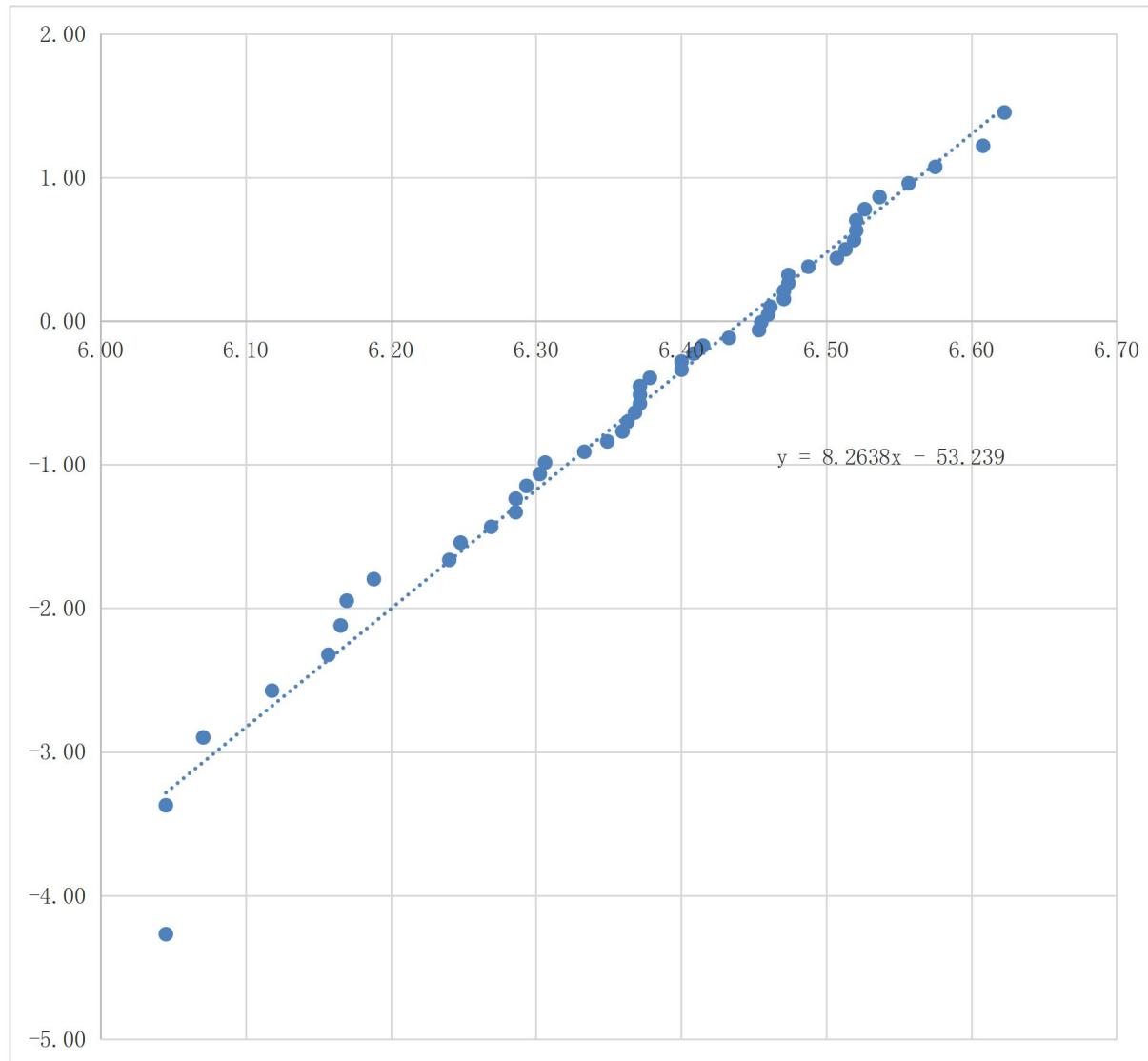


图 B. 1 绘制的威布尔图

## B. 2 用电子数据表进行标准方差分析算例

下例子以两倍标准方差为限筛选 50 点法试验数据中的异常低值，运用电子数据表进行算例计算过程和结果见表 B. 2。

表 B. 2 标准方差分析电子数据表算例

计算得到该组 50 点电极法击穿场强均值为 578V/ $\mu$ m、标准方差为 88V/ $\mu$ m。		
A	B	C
数据序号 i	击穿场强 E	标准方差倍数 $\sigma$
计算式	/	$= (B_{i-50} - 578) / 88$
1	668	1.03
2	668	1.03
3	663	0.97
4	652	0.84

计算得到该组 50 点电极法击穿场强均值为 578V/ μm、标准方差为 88V/ μm。		
A	B	C
数据序号 i	击穿场强 E	标准方差倍数 $\sigma$
计算式	/	$=(B_{1-50}-578)/88$
5	647	0.84
.....		
46	469	-1.23
47	454	-1.40
48	439	-1.58
49	248	-3.74
50	235	-3.89

注：表 B. 2 击穿场强数据列为降序排列，将中间部分非异常值数据略去。

如表 B. 2 中背景标灰两处标准方差倍数  $\sigma < -2$ ，判定该两数据点为异常值（248、235V/ μm）即异常值个数为 2 个。

## 参 考 文 献

- [1] 张敏, 袁辉. 拉依达(PauTa)准则与异常值剔除[J]. 郑州工业大学学报, 1997, (01):87-91.
  - [2] Qin, S., Ho, J., Rabuffi, M., Borelli, G., Jow, T.R. Implications of the anisotropic thermal conductivity of capacitor windings[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011(1):27.
  - [3] 郑飞虎, 张治文. 绝缘电介质薄膜中空间电荷分布测量技术的研究进展[J]. 高电压技术, 2020, 46(07):2460-2470. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20190742
  - [4] 张治文, 潘佳萍, 雷清泉等. 固体绝缘介质中的空间电荷效应及应用[J]. 科学通报, 2021, 66(Z2):3695-3711.
-