ICS 67.040
CCS N 18

团 体 标 准

T/CEATEC XXXX—XXXX

母线干线系统（母线槽）稳定性与寿命加速测试方法

Stability and lifetime acceleration testing method for busbar trunking systems (busways)

（征求意见稿）

XXXX－XX－XX 发布 XXXX－XX－XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 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　测试原理 1
5　测试设备与仪器 2
6　试样要求 2
7　测试条件 2
8　测试方法 2
8.1　热老化稳定性与寿命加速测试 3
8.2　电应力稳定性与寿命加速测试 3
8.3　机械振动稳定性与寿命加速测试 3
8.4　环境耦合稳定性与寿命加速测试 4
8.5　多应力耦合加速测试 4
9　数据处理与寿命推算 4
9.1　加速系数计算 4
9.2　常态寿命推算 5
9.3　B10 寿命统计 5
10　稳定性判定规则 5
11　试验报告 5

前　言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则　第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

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专利的责任。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

母线干线系统(母线槽)稳定性与寿命加速测试方法

1 范围

本文件规定了低压母线干线系统（母线槽）稳定性与寿命加速测试的测试原理、测试设备、试样要求、测试条件、测试方法、数据处理、稳定性判定及寿命评估规则。

本文件适用于额定电压交流不超过 1000 V、直流不超过 1500 V 的封闭式母线槽、浇注式母线槽、空气式母线槽等各类低压母线干线系统的长期运行稳定性检测与使用寿命加速评估。其他特殊工况专用母线槽可参照本文件执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2423.10—2019 环境试验 第2部分：试验方法 试验Fc：振动（正弦）

GB/T 7251.1 低压成套开关设备和控制设备 第1部分：总则

GB/T 7251.6—2015 低压成套开关设备和控制设备 第6部分：母线干线系统（母线槽）

GB/T 11026.1 电气绝缘材料 耐热性 第 1 部分：老化程序和试验结果的评定

GB/T 34986 产品加速试验方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

高低温循环 high-low temperature cycle

按照设定的温度范围、升降温速率和保温时间，使试样交替处于低温和高温环境的循环试验加载方式，通过周期性热胀冷缩效应加速绝缘材料热疲劳、密封界面老化及导体连接部位的性能衰减，且不改变产品的常态失效机理。

3.2

加速应力 accelerated stress

人为施加的、不会改变母线槽失效机理，仅加快性能衰减速率的超额定工况应力，包括高温热应力、超额电流电应力、循环振动机械应力、温湿度循环环境应力等。

3.3

失效判据 failure criterion

母线槽在加速测试过程中，绝缘、导电、结构、温升等关键性能指标超出标准允许限值，判定为样品失效的临界条件。

4 测试原理

母线槽长期运行失效主要由绝缘材料热老化、导体接触电阻劣化、结构机械疲劳、环境腐蚀老化四大核心机理导致，加速测试基于失效机理不变原则，通过单一应力或多应力耦合加速方式，放大产品性能衰减规律。其中高低温循环加速通过交变温差产生的热胀冷缩应力，加速绝缘材料的疲劳开裂、密封结构的界面失效以及导体连接部位的接触劣化，其失效机理与常态运行中温度波动导致的老化过程一致，仅通过增大温度变化幅度与升降温速率来加快性能衰减速率。采用阿伦尼乌斯热老化模型、电应力

加速模型、机械疲劳累积损伤模型，采集加速试验过程中温升、绝缘电阻、接触电阻、结构变形、振动响应等关键参数变化数据，拟合性能衰减曲线，推算标准额定工况下母线槽的长期运行稳定性及有效使用寿命。

5 测试设备与仪器

所有测试设备需经计量校准合格，在有效期内使用，设备性能与精度满足本文件规定的试验方法要求即可，主要设备推荐参数如下：

a) 热老化试验箱：温度调控范围室温～200 ℃，温度均匀度≤±1 ℃，温度波动度≤±0.5 ℃，可实现恒温、温湿度循环、热循环程序控制；
b) 高低温老化试验箱:温度调控范围-55℃～200 ℃，温度均匀度≤±3 ℃，温度波动度≤±3 ℃，可实现恒温、温湿度循环、冷热循环程序控制；；
c) 大电流温升试验装置：输出电流范围交流 0～8000 A，直流 0～12000 A，电流精度≤±0.5%，可长期持续恒流加载，具备过载保护功能；
d) 绝缘电阻测试仪：测试电压 1000V DC，测量范围 0～1000 MΩ，精度≤±5%；
e) 直流电阻测试仪：测量范围 0.1 μΩ～200 mΩ，精度≤±0.2%，最小输出测试电流不小于 10 A，可精准测量导体及接头接触电阻；
f) 振动试验台：满足 GB/T 2423.10 规定的要求，可实现正弦振动、循环振动加载，加速度精度≤±0.1 m/s^2；
g) 红外热像仪：测温范围-20 ℃～300 ℃，测温精度≤±0.5 ℃，可实时采集母线槽全域温度分布及温升值；
h) 环境试验设备：可实现湿热循环、盐雾、高低温交替试验，满足加速环境老化测试要求；
i) 工频耐压与冲击耐受电压测试仪：工频输出电压 0 kV～5 kV，冲击电压输出 0 kV～12 kV，精度≤±5%，满足 GB/T 7251.1 规定的绝缘性能校验要求。

6 试样要求

6.1 试样应为全新、未投入使用、未经过老化测试的合格母线槽成品，应组装为包含 3 段标准母线节、2 套接器、1 个直角弯头、1 个插接单元的完整的产品，覆盖所有关键导电连接、结构转接与功能部件，与批量生产产品工艺、材质、规格完全一致。
6.2 试样长度小于标准安装单元长度，常规试样总长度为 0.5 m，特殊规格可按产品标准调整，每组测试试样数量不少于 3 组，用于平行试验，保证数据有效性。
6.3 试样测试前需进行预处理：在环境温度（20±5）℃、相对湿度（50±10）%条件下静置 24 h，清理表面灰尘、油污，无破损、变形、绝缘损伤等缺陷。
6.4 预处理后测试试样初始性能：记录初始绝缘电阻、工频耐压泄漏电流值，并进行冲击耐受电压试验（冲击耐受电压仅在试验前、试验后各进行 1 次），试验过程中不开展测试；初始值满足标准要求即可，可作为性能衰减对比基准）、导体直流电阻、常温温升、外观结构状态，同步按 GB/T 11026.1 规定测试绝缘材料断裂伸长率初始值，作为试验对比基准数据。

7 测试条件

7.1 基准环境条件：常规测试基准环境温度 40 ℃，相对湿度 45%～75%，无强制气流、无腐蚀性气体、无强光直射，匹配母线槽额定运行环境要求。
7.2 加速应力条件总则：所有加速应力参数设置需保证不改变母线槽常态失效机理，禁止超极限应力导致非典型失效（如瞬时击穿、机械断裂等异常损坏）。
7.3 测试工况分类：分为单应力加速测试（热加速、电应力加速、机械振动加速、环境加速）和多应力耦合加速测试，可根据测试需求单独或组合开展。

8 测试方法

8.1 高低温热老化稳定性与寿命加速测试

本测试用于评估母线槽绝缘系统、密封材料、接头辅料在极端高低温工况下的老化稳定性及寿命衰减规律，采用多温度梯度冷热交替加速老化方法，若试验装置内部尺寸无法容纳3 m总长试样，可在保证核心连接结构与部件完整的前提下，适当缩短试样总长度，或采用分段试验方式验证关键部位老化性能：

a) 应力设置：根据母线槽绝缘耐热等级设置 3 组及以上加速温度梯度，F 级绝缘设置-55 ℃～180 ℃、-55 ℃～200 ℃，B 级绝缘设置-55 ℃～140 ℃、-55 ℃～160 ℃，温度波动严格控制在±3 ℃范围内；

b) 试验流程：将预处理完成的试样平稳放置于高低温老化试验箱内，试样之间无接触、无遮挡，保证受热均匀；开启高低温老化程序，持续不间断高低温试验，每 72 h 为一个测试周期，每个周期低温 8 h 后高温 8 小时交替执行 72 h，周期结束后取出试样，在基准环境下静置恢复 2 h，开展性能检测；

c) 周期检测项目：外观检查（无开裂、变形、变色、密封脱落）、绝缘电阻测试（1000V DC 加压 1 min）、绝缘阻值变化率计算，导体电阻测试、绝缘材料断裂伸长率测试；工频耐压试验、冲击耐受电压试验仅在本项热老化试验全部结束后进行 1 次，试验过程中的周期检测不开；

d) 试验终止条件：当试样绝缘电阻降至标准限值（40 ℃/100 MΩ）以下，或出现外观老化失效缺陷时，终止该温度梯度试验，记录总老化时长。

8.2 电热应力稳定性与寿命加速测试

本测试用于模拟母线槽长期超额载流运行工况，评估导体、接头、导电接触面的电老化稳定性及寿命衰减特性：

a) 应力设置：结合母线槽产品实际载流能力，设置额定电流 1.05 倍、1.10 倍、1.15 倍三组恒流加载梯度，三组梯度分别独立开展试验，保证各梯度工况下试样均可达到温升稳定状态，环境温度维持 40 ℃基准温度，持续通电运行；

b) 试验流程：试样按实际工程安装标准固定连接，接通大电流试验装置，逐级加载至设定电流值，待温度稳定后开始计时，连续循环运行；

c) 周期检测项目：每 12 h 记录一次各部位温升值、接头接触电阻、绝缘电阻，每周期性能检测时增加绝缘阻值变化率计算，实时监测温度分布均匀性，记录温升异常、电阻突变等现象；工频耐压试验、冲击耐受电压试验仅在本项电应力试验全部结束后进行 1 次，试验过程中的周期检测不开展；

d) 试验终止条件：三组电流梯度分别独立判定失效，出现以下任一失效现象时，终止对应梯度的试验，记录有效试验时长：

   1) 试样导体最高工作温度超出对应绝缘等级的最高允许温度；
   2) 接头接触电阻较初始值突变增幅≥20%；
   3) 出现局部过热、绝缘击穿现象；
   4) 试验全部结束后补充开展工频耐压试验、冲击耐受电压试验，测试不合格则判定为试样失效。

8.3 机械振动稳定性与寿命加速测试

本测试模拟建筑振动、设备共振、运输振动等工况，评估母线槽结构连接、紧固部件、绝缘层的机械疲劳稳定性及寿命：

a) 应力设置：依据 GB/T 2423.10 标准，采用正弦循环振动，振动频率 10 Hz～500 Hz，加速度 5 m/s^2～10 m/s^2，循环振动模式，单次振动周期 30 min；

b) 试验流程：试样按实际安装方式刚性固定于振动试验台，分别开展水平、垂直双向振动测试，持续循环加载，每 10 个振动周期暂停试验，开展性能检测；

c) 周期检测项目：结构紧固性检查、接头位移量测量、绝缘电阻测试、绝缘阻值变化率计算、工频耐压试验、冲击耐受电压试验、导体导通性能测试，冲击耐受电压仅在全部振动试验结束后测试 1 次，试验过程中不开展；

d) 试验终止条件：出现螺栓松动、接头位移、壳体变形、绝缘破损、接触不良、工频耐压或冲击耐受电压不合格等机械或电气失效问题时，终止试验，记录振动循环总次数及等效运行时长。

8.4 环境耦合稳定性与寿命加速测试

本测试模拟温湿度交替、湿热老化等自然环境工况，评估母线槽整体环境适应性及长期运行寿命。

a) 应力设置：采用高低温湿热循环工况，高温阶段室温 40℃，导体温度 110 ℃、相对湿度 90%，持续 4 h；低温阶段室温-20℃，导体温度 10 ℃、相对湿度 50%，持续 4 h，8 h 为一个完整循环周期；

b) 试验流程：将试样放入湿热循环试验箱，开启自动循环程序，持续不间断试验，每 10 个循环周期开展一次全面性能检测；

c) 周期检测项目：外观腐蚀、受潮情况检查，绝缘电阻、绝缘阻值变化率计算、工频耐压试验、冲击耐受电压试验、接触电阻，冲击耐受电压试验仅在本项试验全部结束后进行 1 次；

d) 试验终止条件：试样出现绝缘受潮击穿、金属部件腐蚀、电气性能超标、工频耐压或冲击耐受电压不合格失效时，终止试验，记录循环周期数。

8.5 多应力耦合加速测试

综合模拟实际服役多应力叠加工况，同步加载1.2倍额定电流、高低温湿热循环、低频微振动应力，开展耦合加速老化测试，更贴合真实服役衰减规律，测试数据精度更高，优先用于产品定型寿命评估。

本试验采用三种应力同步施加的方式：1.2倍额定电流持续恒流加载，高低温湿热循环按本文件8.4规定的周期参数连续循环运行，低频微振动按本文件8.3规定的正弦振动参数持续施加，三种应力同时作用于试样。试验流程、周期检测项目、试验终止条件参照单应力测试对应要求执行。

9 数据处理与寿命推算

9.1 加速系数计算

9.1.1 基于阿伦尼乌斯热老化模型计算热加速系数，见式（1）。

$$K = exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T_1}\right)\right] \cdots\cdots (1)$$

式中：

K——加速系数；

E_a——材料活化能，母线槽绝缘材料取值0.8eV；

R——玻尔兹曼常数，取值8.617×10^{-5} eV/K；

T_0——基准工况热力学温度,单位为开尔文（K）；

T_1——加速工况热力学温度,单位为开尔文（K）。

电应力、机械应力加速系数依据GB/T 34986及对应行业通用加速模型计算，多应力耦合加速系数取各单应力加速系数加权修正值。

9.1.2 计算示例：以额定电压 400V 的 F 级绝缘封闭式母线槽为例，其常态额定运行下导体最高工作温度为 110 ℃，开展热老化加速试验时选取 200 ℃作为高温加速应力，代入式（1）计算热加速系数步骤如下：

a) 温度单位转换：将摄氏温度转换为热力学开尔文温度；

1) 基准工况温度，见式（2）；

2) 加速工况温度，见式（3）。

$$T_0 = 110\,℃ + 273.15 = 383.15K \cdots\cdots (2)$$

$$T_1 = 200\,℃ + 273.15 = 473.15K \cdots\cdots (3)$$

b) 计算温度倒数的差值，见式（4）；

$$\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T_1} = \approx 2.61\times10^{-3} - 2.11\times10^{-3} = 4.96\times10^{-4}K^{-1} \cdots\cdots (4)$$

c) 计算活化能与玻尔兹曼常数的比值，见式（5）；

$$\frac{E_a}{R} = \frac{0.8}{8.617\times10^{-5}} \approx 9284K \cdots\cdots (5)$$

d) 最终加速系数见式（6）。

$$K = exp(9284 \times 4.96 \times 10^{-4}) = exp(4.6) \approx 99.48 \cdots\cdots (6)$$

结果说明：200 ℃工况下的老化速率约为110 ℃工况下的99.48倍。铜质母线槽正常寿命按照50年计算，那么高温加速测试时间长度是50年*12个月/99.48=6.03个月。

9.2 常态寿命推算

根据加速试验失效时长及加速系数，推算额定工况下母线槽等效使用寿命，见式（7）。

$$L_0 = L_1 \times K \cdots\cdots (7)$$

式中：

L_0——标准额定工况等效使用寿命，单位为小时（h）；

L_1——加速试验工况试样失效时长，单位为小时（h）；

K——对应试验工况的加速系数。

9.3 B10 寿命统计

B10寿命采用威布尔分布法进行计算，具体步骤如下：

a) 数据排序：将不少于 3 组平行试样的失效时间按从小到大的顺序排列；

b) 累积失效概率计算：采用中位秩法计算每个失效时间对应的累积失效概率；

c) 分布拟合：对失效时间与累积失效概率进行二参数威布尔分布拟合，得到形状参数与尺度参数；

d) 寿命取值：从拟合的寿命分布曲线中，读取累积失效概率为 10%时对应的寿命值，即为该批次产品的 B10 寿命，作为产品标称寿命的核心依据。

10 稳定性判定规则

10.1 电气稳定性判定：加速测试全过程中，绝缘电阻始终≥100 MΩ（温度 20 ℃±5 ℃，湿度（50±10）%），接头接触电阻增幅≤10%，稳态温升符合 GB/T 7251.6 标准限值，工频耐压、冲击耐受电压符合 GB/T 7251.1 标准要求，无绝缘击穿、局部过热、漏电等问题，判定电气稳定性合格。

10.2 结构稳定性判定：振动、老化测试后，母线槽壳体无变形、开裂，连接螺栓无松动、位移，接头贴合紧密，结构完整性良好，判定结构稳定性合格。

10.3 环境稳定性判定：湿热循环老化后，无明显腐蚀、受潮、密封失效，电气性能无异常衰减，判定环境稳定性合格。

10.4 综合稳定性判定：单组试样所有测试项目均满足上述要求，判定该试样稳定性合格；平行试样合格率 100%，判定该批次产品稳定性合格。

11 试验报告

测试完成后需出具完整的稳定性与寿命加速测试报告，报告应包含以下核心内容：

a) 测试依据、产品型号规格、试样信息、测试设备校准信息；

b) 测试环境条件、加速应力参数、试验时长、循环次数；

c) 各周期性能检测原始数据、性能衰减曲线；

d) 加速系数计算过程、等效寿命推算结果、B10 寿命值；

e) 稳定性判定结果、失效分析（如有失效样品）；

f) 测试结论、试验日期、测试人员、审核人员签字盖章。