

JB

中华人民共和国机械行业标准

JB/T 7785—1995

低压电机绝缘结构寿命快速试验评定方法 (步进应力法)

1995-10-09 发布

1996-10-01 实施

中华人民共和国机械工业部 发布

低压电机绝缘结构寿命快速试验评定方法 (步进应力法)

JB/T 7785—1995

1 主题内容与适用范围

本标准规定了低压电机定子绕组绝缘结构寿命的快速试验评定方法。该方法采用整机作试样，以温度步进方式达到快速试验目的，获得绝缘结构平均寿命的极大似然估计值。

本标准适用于运行在一般条件下各种耐热等级的三相、单相低压电机，其寿命服从对数正态分布，以被试绝缘结构与参照(基准)绝缘结构在同一试验中进行对比作出相对评定。

2 引用标准

GB 755 旋转电机 基本技术要求
JB/DQ 3205 低压电机绝缘结构寿命整机评定试验方法

3 术语和符号

3.1 正反转

试样电机在加速试验中，以一定时间节拍，按照“通电运行→停电滑行→倒相通电反转→停电滑行”形式运转，称作正反转，亦称为逆转起动运行。

3.2 温度步进加速寿命试验：

规定一组高于正常工作温度的试验温度水平—— $T_1 < T_2 < T_3 < \dots < T_L$ ，和一组相应的试验时间—— $\tau_1 > \tau_2 > \tau_3 > \dots > \tau_L$ 。试样电机先在 T_1 温度下试验 τ_1 小时，然后，将未失效的电机在温度水平提高到 T_2 条件下继续进行试验到 τ_2 小时……。这样，不断地把未失效的电机按步进方式提高温度水平(按 $T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow T_3 \rightarrow \dots \rightarrow T_L$ 顺序)进行试验，直至所有电机失效为止。

3.3 符号

a ——加速方程的截距；
 \hat{a} ——加速方程截距的估计值；
 b ——加速方程的斜率；
 \hat{b} ——加速方程斜率的估计值；
 μ ——寿命的对数均值；
 $\hat{\mu}$ ——对数均值的估计值；
 σ ——寿命的对数标准差；
 $\hat{\sigma}$ ——对数标准差的估计值；
 σ^2 ——寿命的对数方差；
 $\hat{\sigma}^2$ ——对数方差的估计值；
 T_0 ——额定条件下工作温度水平，K；
 $E(T_0)$ ——额定条件下电机的平均寿命，h；
 $\hat{E}(T_0)$ ——额定条件下电机平均寿命的估计值，h；

n ——试样台数；

T ——绝对温度，K；

l ——温度水平个数；

T_i ——第 i 个温度水平， $i=1, 2, \dots, l$ ；

t_{ij} ——第 i 个温度水平下第 j 个试样失效时间(从温度升到 T_i 时开始计算)，h；

τ_i ——第 i 个温度水平 T_i 下持续试验时间，h；

\hat{t}_{ij} ——温度水平 T_i 下失效时间 t_{ij} 折算到温度水平为 T_i 的换算寿命，h；

$\hat{\tau}_{ij}$ —— t_{ij} 对 b 的导数；

L ——恒定应力(温度)作用下电机绝缘结构寿命，h；

n_i ——试样在第 i 个温度水平 T_i 的持续试验时间 τ_i 内发生的失效数；

Θ ——以摄氏温度表示的试验温度水平，℃；

Θ_i ——第 i 步试验温度水平，℃；

E, B, F, H, C——绝缘结构的不同耐热等级标号，分别表示工作温度为 120, 130, 155, 180, 大于 180℃。

4 试样

4.1 要求

试样应是完整的电机，应按产品设计图样和实际生产工艺制造。为满足加速试验的需要，在不影响绝缘结构评定的条件下允许试样电机作局部改动。例如：更改引出线，埋入热电偶，除掉风扇、风罩等，所有改动内容应作记录。

4.2 数量

试样数量不少于 10 台。

4.3 筛选

电机在投试前应作筛选试验，具体参照 JB/DQ 3205 中 1.3 条。

5 温度水平和持续时间

5.1 温度水平

一个完整的温度步进加速寿命试验，其温度水平应不少于 4 个。要求最高温度水平和最低温度水平之间有一定的间隔，最低温度水平应不高于电机耐热等级温度加 20℃，最高温度水平应不高于电机耐热等级温度加 90℃。

5.2 温度水平间隔

合理安排温度水平间隔可以提高试验评定的准确性。温度水平间隔的安排应尽量满足下述表达式：

$$1/T_1 - 1/T_2 = 1/T_2 - 1/T_3 = \dots = 1/T_{i-1} - 1/T_i = \dots = 1/T_{L-1} - 1/T_L \quad (1)$$

式中 $T_1, T_2, T_3, \dots, T_i, \dots, T_L$ 分别为 1, 2, 3, ..., L 个温度水平，且：

$$T_1 < T_2 < T_3 < \dots < T_i < \dots < T_L$$

5.3 持续时间

各温度水平下的试验持续时间按排如下：

温度水平 T_1 下的试验持续时间为 τ_1 ；

温度水平 T_2 下的试验持续时间为 τ_2 ；

温度水平 T_3 下的试验持续时间为 τ_3 ；

.....；

温度水平 T_L 下的试验持续时间为 τ_L 。

且： $\tau_1 \geq \tau_2 \geq \tau_3 \geq \dots \geq \tau_L$

上述 L 个持续时间 ($\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_L$) 由下述原则加以确定:

- a) 在各温度水平 T_i 下的试验持续时间 τ_i 内, 试样经受的老化量大致相同, $i=1, 2, 3, \dots, L$;
- b) 对于一个全新的绝缘结构, 可以先用 1—2 台试样电机在超过常规老化试验高温点的温度水平下作极端试验, 初步估计新绝缘结构能经受的老化量;
- c) 应保证绝缘结构大部分老化 (70% 以上老化量) 发生在常规老化试验高温点的温度水平以下;
- d) 加速试验的升温时间计入该温度水平下的试验持续时间, 周期试验结束后的降温时间不计入该温度水平下的试验持续时间;
- e) 如果试验进行到最高温度水平结束时样机失效数还未达到规定的需要量, 允许将试样电机在最高温度水平继续进行试验直至有 80% 试样数量失效但不得少于 10 台。

6 失效判据

试样电机绕组绝缘结构的匝间、相间、对地三个部位中, 任一部位发生击穿, 导致电机不能按规定要求运转, 则判为失效。

7 试验条件

7.1 加热和控温

电机正反转 (或起动—停机) 时的起动电流使绕组温度升高。当在规定的起动次数下达不到加速试验温度时, 可在电机的保温罩内设置一个辅助热源, 以满足加速试验温度应力水平。升温速度应参考电机实际升温速度, 电机实际升温速度在试验前予以规定。

试验温度以绕组平均温度为准, 按 GB 755 用电阻法测量。试验温度的控制精度: 在 180℃ 及以下, 要求不超过 $\pm 2^\circ\text{C}$; 大于 180℃, 不超过 $\pm 3^\circ\text{C}$ 。

试验过程中, 电机内热流方向应符合实际运行情况。

对不同的绝缘结构进行步进加速试验, 其初始最低试验温度水平 θ_1 和步进间隔 $\Delta(1/T)$ 推荐值见表 1。

表 1 耐热等级——最低试验温度水平 θ_1 及有关参数推荐表

耐热等级	E	B	F	H	C
工作温度	120	130	155	180	>180
最低试验温度水平 θ_1 /℃	140	150	175	200	>210
θ_2 /℃ ¹⁾	150	160	185	210	>220
温度步进间隔 $\Delta(1/T) \times 10^{-5}$ / ²⁾	5.72	5.46	4.87	4.30	—
注:					
1) 第一次步进到第二个温度水平 θ_2 条件下进行加速试验的试验温度 (℃)。					
2) 第一个温度水平 T_1 和第二个温度水平 T_2 (绝对温度) 的倒数之差, 其量纲为 1/K。					

7.2 其它施加条件

7.2.1 电压

电压按额定值施加, 控制精度不超过额定值的 $\pm 10\%$ 范围。采用中心点接地的电源系统, 试样电机的外壳必须接地, 使电机绝缘结构各部位受到规定的电压作用。

7.2.2 机械应力

机械应力包括电机起动时产生的机械冲击; 起动和正常运转时的电磁应力; 升温和降温时的热冲击。为使机械应力施加条件均匀一致, 试样电机应以相同方式安装在标准试验台架上, 合理的逆转起动次数和间隔时间推荐值如表 2。

表 2 试验速度——正反转节拍对照表

步进温度水平 $^{\circ}\text{C}$	Θ_1	Θ_2	Θ_3	Θ_4	Θ_5	Θ_6	Θ_7
每小时起动次数	45	90	100	360	720	1440	2880
逆转间隔时间 _s	16	8	4	2	1	0.50	0.25

7.2.3 受潮

样机绝缘结构应充分暴露在受潮试验环境中，绕组上应有可见凝露。

受潮试验条件为：相对湿度 95%~100%；

温 度 $40 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ；

时 间 48 h。

8 试验程序

8.1 准备

- 外观检查；
- 相电流的平衡检查；
- 绝缘电阻测定(包括相间、对地)；
- 试验台架接地系统检查；
- 绕组直流电阻测量(同时记录温度)。

8.2 安装

试样电机按结构形式完整地安装在试验架上，但允许拆除风扇、风罩。

8.3 加速试验

按照第 7 章规定的试验条件，对试样电机进行周期性步进温度加速寿命试验，步进程序安排如下：

第一个温度水平下作周期性的正反转热老化试验(到规定的步进持续试验时间)→第二个温度水平下作周期性的正反转热老化试验(到规定的步进持续试验时间)→第三个温度水平下作周期性的正反转热老化试验→……→试验结束。

各步进温度水平下的正反转热老化周期性试验程序安排如下：

- 多相电机：正反转热老化→受潮→诊断试验→下一周期下反转热老化试验→……
- 单相电机：“起动——停转”热老化→受潮→诊断试验→下一周期“起动——停转”热老化→……

8.4 诊断试验：

- 定时测量试验温度变化和电机相电流的平衡变化并作记录；
- 每周期受潮结束后，应在 15 min 内将试样电机施加额定电压并运行 1 min、作诊断检查。

8.5 终止试验

按第 8.3 条试验程序进行周期性温度步进加速试验，按第 5.3 条 e 项直至试样电机发生足够失效为止。

9 试验数据

试验数据的采集过程如下：

把 n 台试样电机在温度水平 T_1 下投入试验。如有 n_1 台试样电机发生失效，其失效时间分别为 $t_{11}, t_{12}, \dots, t_{1n_1}$ ；历时 τ_1 后把温度提高到 T_2 ，并对剩下的 $n - n_1$ 台试样电机继续进行试验，历时 τ_2 有 n_2 台试样电机发生失效，其失效时间分别为 $t_{21}, t_{22}, \dots, t_{2n_2}$ 。经 τ_2 后把试验温度水平提高到 T_3 ，……，如此一直试验至试验温度提高到 T_L 。把未失效的 $n - n_1 - n_2 - \dots - n_{L-1}$ 台电机继续试验，直至试验结束。

上述温度水平 T_i ，失效时间 t_{ij} ，步进持续时间 τ_i ，失效数 n_i 以图 1 示意。

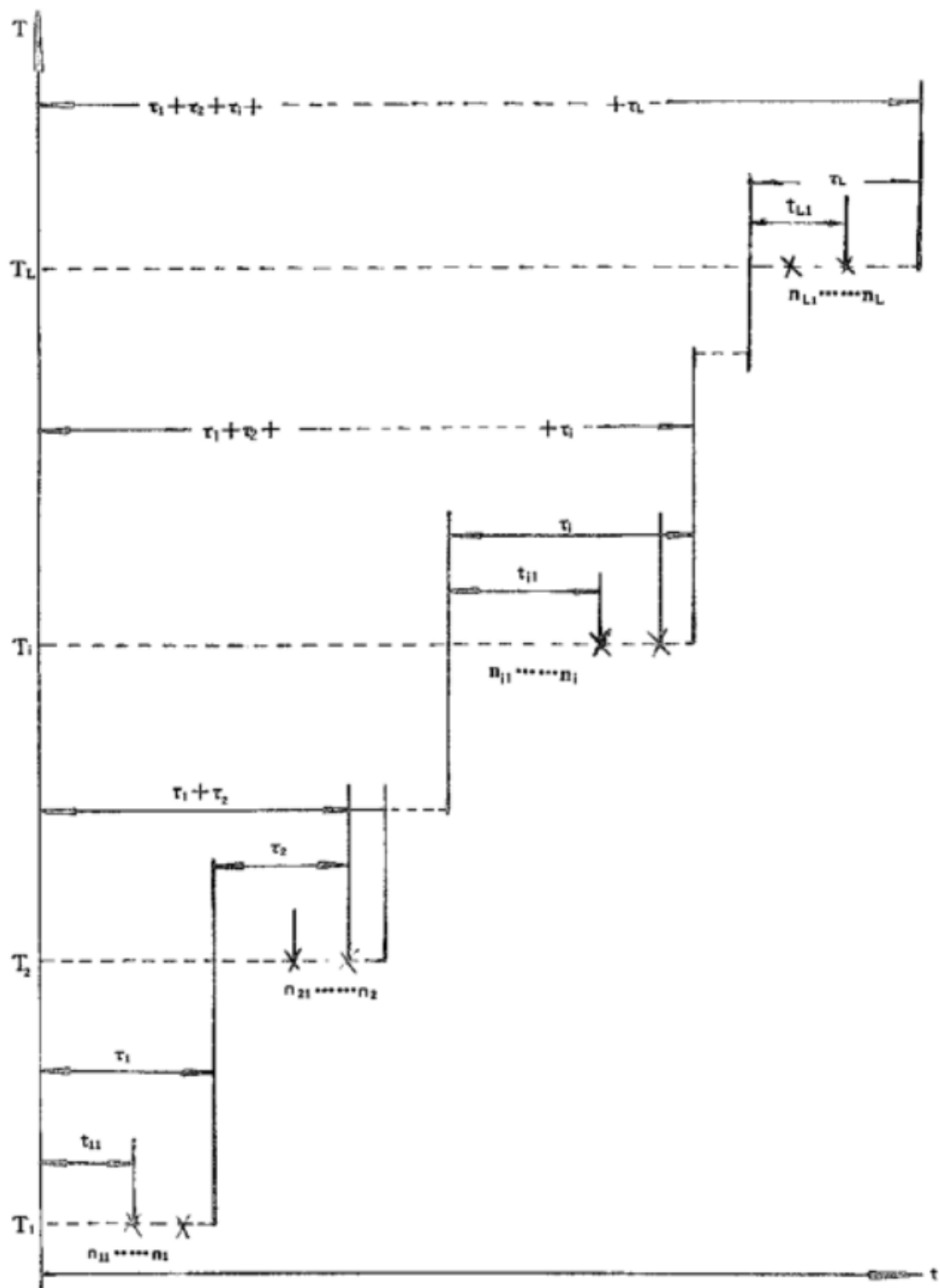


图 1 温度步进加速试验数据关系示意图

10 寿命试验数据的处理

10.1 加速方程

试样电机绝缘结构的加速寿命方程为：

$$\mu = b/T + a \dots\dots\dots (2)$$

式中： μ ——寿命对数均值；
b——加速方程斜率；
a——加速方程截距。

10.2 数据整理

把各温度水平得到的失效时间按从小到大顺序填入表 3。

表 3 失效时间汇总表

温度水平 $^{\circ}\text{C}$	失 效 时 间 t_{ij}
T_1	$t_{11} \leq t_{12} \leq \dots \leq t_{1K} \leq \dots \leq t_{1n_1}$
T_2	$t_{21} \leq t_{22} \leq \dots \leq t_{2K} \leq \dots \leq t_{2n_2}$
T_K	$t_{K1} \leq t_{K2} \leq \dots \leq t_{KK} \leq \dots \leq t_{Kn_K}$
T_L	$t_{L1} \leq t_{L2} \leq \dots \leq t_{LK} \leq \dots \leq t_{Ln_L}$

10.3 不同温度水平下失效时间的折算

将各温度水平 T_1 、 T_2 …… T_1 …… T_L 下失效时间 t_{ij} 折算到温度水平 T_1 下的寿命记为 \tilde{t}_{ij} 。折算关系如下：

在温度水平 T_1 下：

$$\begin{aligned}\tilde{t}_{ij} &= t_{ij} \\ j &= 1, 2, \dots, n_1\end{aligned}$$

在温度水平 T_2 下：

$$\begin{aligned}\tilde{t}_{2j} &= \tau_1 \cdot \exp(b \cdot (1/T_2 - 1/T_1)) + t_{2j} \\ j &= 1, 2, \dots, n_2\end{aligned}$$

在温度水平 T_3 下：

$$\begin{aligned}\tilde{t}_{3j} &= \tau_1 \cdot \exp(b \cdot (1/T_3 - 1/T_1)) + \tau_2 \cdot \exp(b \cdot (1/T_3 - 1/T_2)) + t_{3j} \\ j &= 1, 2, \dots, n_3\end{aligned}$$

……

一般，在温度水平 T_i 下：

$$\begin{aligned}\tilde{t}_{ij} &= \sum_{K=1}^{i-1} \tau_K \cdot \exp(b \cdot (1/T_i - 1/T_K)) + t_{ij} \\ i &= 1, 2, \dots, L \\ j &= 1, 2, \dots, n_L\end{aligned}$$

10.4 折算时间的导数

失效时间 t_{ij} ，折算到温度水平 T_i 下的寿命为 \tilde{t}_{ij} ，对寿命方程中斜率 b 的导数为 \tilde{t}_{ij}' ：

$$\begin{aligned}\tilde{t}_{ij}' &= \sum_{K=1}^{i-1} \tau_K \cdot (1/T_i - 1/T_K) \cdot \exp(b \cdot (1/T_i - 1/T_K)) \\ i &= 1, 2, \dots, L \\ j &= 1, 2, \dots, n_L\end{aligned}$$

10.5 加速方程中斜率 b 的估计值 \hat{b} ：

加速方程中斜率 b 的估计值 \hat{b} 由下列方程求解后获得：

$$\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{n_i} (\tilde{t}_{ij}' / \tilde{t}_{ij}) + M(t, T, b) = 0 \quad (3)$$

其中：

$$M(t, T, b) = \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{n_i} [(\ln \tilde{t}_{ij} - \overline{\ln t}) - b(1/T_i - \bar{\psi})][\tilde{t}_{ij}' / \tilde{t}_{ij} - 1/T_i]}{1/n \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{n_i} [(\ln \tilde{t}_{ij} - \overline{\ln t}) - b(1/T_i - \bar{\psi})]^2}$$

式中： $n = n_1 + n_2 + \dots + n_L$ ；

$$\bar{\psi} = [\sum_{i=1}^L (n_i / T_i)] / n$$

$$\overline{\ln t} = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{n_i} \ln \tilde{t}_{ij} / n$$

10.6 加速方程形距 a 的估计

加速方程截距 a 的估计值 \hat{a} 由下式求得：

$$\hat{a} = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^n \ln \tilde{t}_{ij} - \hat{b} \bar{\psi} / n \quad (4)$$

10.7 寿命对数方差 σ^2 的估计

寿命对数方差 σ^2 的估计值 $\hat{\sigma}^2$ 由下式求得：

$$\hat{\sigma}^2 = 1/n \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^n [(\ln \tilde{t}_{ij} - \overline{\ln t}) - \hat{b}(1/T_i - \bar{\psi})]^2 \quad (5)$$

10.8 寿命对数标准差 σ 的估计

寿命对数标准差 σ 的估计值 $\hat{\sigma}$ 由下式求得：

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\hat{\sigma}^2} \quad (6)$$

10.9 寿命对数均值 μ 的估计

寿命对数均值 μ 的估计值 $\hat{\mu}$ 由下式求得：

$$\hat{\mu} = \hat{a} + \hat{b}/T \quad (7)$$

10.10 正常工作温度水平 T_0 下平均寿命 $E(t)$ 的估计

正常工作温度水平 T_0 下平均寿命 $E(t)$ 的估计值 $\hat{E}(t)$ 为：

$$\hat{E}(t) = \exp(\hat{\mu}_0 + \hat{\sigma}^2/2) \quad (8)$$

11 试验报告

试验报告应包括下列内容：

- a) 试验目的；
- b) 失效判据；
- c) 试验样品的说明；
- d) 确定步进应力水平和试验条件的依据；
- e) 试验设备的型号和精度；
- f) 整理试验数据并求出寿命方程斜率和截距的估计— \hat{a} , \hat{b} ；
- g) 试验的分析(包括分布参数的估计和检验)；
- h) 试验结论。

附录 A

应用举例

(参考件)

A1 试验目的

为评定某绝缘结构能否用于一般用途的 F 级小型异步电动机,按本标准对该绝缘结构作整机快速寿命试验评定。

A2 失效判据

按本标准第 6 章。

A3 试验样机及说明

按本标准第 1 章,以被试绝缘结构和参照(基准)绝缘结构在同一试验中进行,对比作相对评定。样机数量各为 10 台。

参照绝缘结构(B 级)组成如下:

电磁线: QZ—2/II 高强度聚酯漆包圆铜线,规格为 $\varnothing 0.8\text{ mm}$;

槽绝缘: CJ 6630 聚酯纤维聚酯薄膜复合箔,厚度: 0.22 mm ;

相绝缘: CJ 6630 聚酯纤维聚酯薄膜复合箔,厚度: 0.22 mm ;

绝缘漆: 三聚氰氨改性醇酸树脂有溶剂浸渍漆;

工艺: 二次浸烘绝缘处理;

绑扎带: 无碱玻璃纱编织带,厚度 0.15 mm ;

槽楔: 3240<环氧—酚醛—玻璃布>层压板,厚度 2.00 mm 。

绝缘结构的部份次要组份更改如下:

引出线: F46 绝缘电缆,截面积 1.5 mm^2 ;

套管: 硅有机玻璃丝编织漆管,极间用 $\varnothing 1.5\text{ mm}$,引线处用 $\varnothing 3\text{ mm}$ 。

被试绝缘结构(F 级)组成如下:

电磁线: QZY—2/180THEIC 改性聚酯亚胺漆包圆铜线, $\varnothing 0.8\text{ mm}$;

槽绝缘: CJ 6630(II) 聚酯纤维聚酯薄膜复合箔,厚度: 0.22 mm ;

相绝缘: CJ 6630(II) 聚酯纤维聚酯薄膜复合箔,厚度: 0.22 mm ;

绝缘漆: CJ 1145 不饱和聚酯酰亚胺无溶剂浸渍漆;

工艺: 一次浸烘绝缘处理;

绑扎带: R 型夹纱柔软聚酯无纺带,厚度 0.15 mm ;

槽楔: 3240<环氧—酚醛—玻璃布>层压板,厚度 2.00 mm 。

绝缘结构的部份次要组份更改如下:

引出线: F46 绝缘电缆,截面积 1.5 mm^2 ;

套管: 硅有机玻璃丝编织漆管,极间用 $\varnothing 1.5\text{ mm}$,引线处用 $\varnothing 3\text{ mm}$ 。

试样采用 Y 系列中心高 90 mm 4 极(长铁芯)规格电机,由 $\times\times$ 电机厂按实际生产工艺制备。试样电机某些部件如下改动:

a) 去除风叶、风罩;

b) 轴承润滑脂改为高温润滑脂。

参照绝缘结构试样电机编号为: B—1、B—2、B—3、B—4、B—5、B—6、B—7、B—8、B—9、B—10。

被试验后结构试样电机编号为: F—1、F—2、F—3、F—4、F—5、F—6、F—7、F—8、F—9、F—10。

A4 步进应力水平和试验条件的确定

参照绝缘结构的步进应力水平按已往试验结果加以确定。

被试绝缘结构的步进应力水平根据极端试验结果加以确定。极端试验系先用 1 台样机在 230℃(超过 F 级热老化高温点 220℃)条件下进行的探索性试验,其结果可获得被试绝缘结构老化量的初步估计,同时可用以确定步进应力试验条件。

每批试样电机分二组,一组投入步进应力快速试验,另一组投入恒定应力试验。确定的试验条件和对应样机编号详见 A6 条。

A5 试验设备

采用“WZK—01 电机正反转控制装置”和“DWC—10 电机温升测量装置”。

A6 试验数据处理及计算

各试验数据及对应试验条件列于表 A1、表 A2、表 A3、表 A4。

表 A1 整机快速试验条件和数据(B—1—B—5)

序 号	第一步	第二步	第三步	第四步	第五步	第六步	第七步
应 力 1/k	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
节 拍 次/h	45	90	180	360	720	1440	2880
	每步相应试验时间 h						
B—1	1538.5	864	432	288	144	72.5	21
B—2	1538.5	864	432	288	144	72.5	22
B—3	1538.5	864	432	288	144	72.5	23
B—4	1370.5	864	432	288	144	72.5	24
B—5	1538.5	864	432	288	144	72.5	25
注: X1—1/423K; X2—1/433K; X3—1/444K; X4—1/455K; X5—1/466K; X6—1/478K; X7—1/491K							

表 A2 整机快速试验条件和数据(B—6—B—10)

应 力	X6—1/443K
节 拍	180 次/h
	相应试验时间 h
B—6	2340
B—7	2688
B—8	2880
B—9	3456
B—10	3648

表 A3 整机快速试验条件和数据(F—1—F—5)

序 号	第一步	第二步	第三步	第四步	第五步	第六步	第七步
应 力 1/K	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
节 拍 次/h	45	90	180	360	720	1440	2880
	每步相应试验时间 h						
F—1	1632	864	480	264	144	72	16
F—2	1632	864	480	264	144	72	18
F—3	1632	864	480	264	144	72	20
F—4	1632	864	480	264	144	72	22
F—5	1632	864	480	264	144	72	24
注：X1—1/448K；X2—1/458K；X3—1/469K；X4—1/479K；X5—1/491K；X6—1/503K；X7—1/516K							

表 A4 整机快速试验条件和数据(F—6—F—10)

应 力	X _F —1/468K
节 拍	180 次/h
	相应试验时间 h
F—6	2304
F—7	2688
F—8	3264
F—9	3456
F—10	3648

按本标准第 10 章规定分别计算基准绝缘结构和被试绝缘结构 \hat{b} 、 \hat{a} 、 $\hat{\sigma}^2$ 、 $\hat{\sigma}$ 、 $\hat{E}(T_0)$ 的估计值。
参照绝缘结构：

$$\begin{aligned}\hat{b}_{\text{参}} &= 11768 \\ \hat{a}_{\text{参}} &= -18.523 \\ \hat{\sigma}_{\text{参}}^2 &= 0.01564 \\ \hat{\sigma}_{\text{参}} &= 0.1251 \\ \hat{\mu}_{\text{参}} &= 10.6788 \\ \hat{E}_{\text{参}}(t_{130}) &= 43768 \text{ h}\end{aligned}$$

被试绝缘结构：

$$\begin{aligned}\hat{b}_{\text{试}} &= 13855 \\ \hat{a}_{\text{试}} &= -21.538 \\ \hat{\sigma}_{\text{试}}^2 &= 0.01738 \\ \hat{\sigma}_{\text{试}} &= 0.2588 \\ \hat{\mu}_{\text{试}} &= 10.8340 \\ \hat{E}_{\text{试}}(t_{135}) &= 51162 \text{ h}\end{aligned}$$

A7 相对评定

参照绝缘结构额定工作温度(130℃、423 K)F的平均寿命估计为43768 h,当作被试绝缘结构平均寿命估计值,则从本标准10.9条和10.10条中可算出此时被试绝缘结构的相对工作温度为430 K(157℃),此值大于F级耐热性的额定工作温度(155℃),因此被试绝缘结构的耐热性可达到F级耐热性要求。

A8 试验分析

汇总试样电机失效模式,并作相对比较。

A9 结论

被试绝缘结构和Y系列B级绝缘结构相比较,达到了F级耐热性要求。

附录 B

对数正态分布场合下步进加速试验的数据处理

(参考件)

B1 步进加速试验

小型低压电机绝缘结构的寿命,一般采用恒定应力加速寿命试验方法,见 JB/DQ 3205。对于一种低压电机平均寿命达 35000 h,按恒定应力加速试验方法需近二年时间,时间长耗费大。采用频进应力加速寿命试验可缩短时间。

步进加速试验是从一批产品中任取 n 个在温度水平 T_1 (一般高于产品的额定温度 T_0) 下工作,直到 τ_1 时结束,共有 n_1 个失效,其失效时间为 $t_{11} < t_{12} < \dots < t_{1n_1}$ 。然后把温度提高到 T_2 ,余下的 $n - n_1$ 个样品在 T_2 下工作 τ_2 时间后,有 n_2 个失效,其失效时间为 $t_{21} < t_{22} < \dots < t_{2n_2}$ 。再把温度提高到 T_3 ,……,如此继续,直到在温度 T_L 下,余下 $n - n_1 - n_2 - \dots - n_{L-1}$ 个样品全部失效为止,其失效时间为 $t_{L1} < t_{L2} < \dots < t_{Ln_L}$, ($n_1 + n_2 + \dots + n_L = n$)。在试验中应注意在温度 T_i 下失效产品的失效时间 t_{ij} ($i=2, \dots, L, j=1, 2, \dots, n_i$) 不是产品的真实寿命,因为此产品在前面温度 T_K 下已工作了 τ_K 时间, $K=1, 2, \dots, i-1$,只有第一步在温度 T_1 下样品的失效时间 $t_{11} < t_{12} < \dots < t_{1n_1}$ 才是样品的真实寿命。但 $\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_{i-1} + t_{ij}$, $j=1, 2, \dots, n_i$ 也是样品的寿命,因为它们是在不同温度水平 T_1, T_2, \dots, T_{i-1} 下的试验时间,而产品的寿命是指在某一个温度下的试验时间。为了获得试验中每一个样品的实际寿命,应将在不同温度 T_K , $K=1, 2, \dots, i-1$ 下的试验时间 τ_K , $K=1, 2, \dots, i-1$,折算到温度 T_i 下的试验时间,然后都加到 t_{ij} 上去,才能得到在温度 T_i 下,第 j 个样品的实际寿命 t_{ij} ($i=2, \dots, L, j=1, 2, \dots, n_i$)。

为了进行不同温度下的时间折算,对步进加速试验的模型要作一些必要的假设。

B2 基本假设

数据处理方法是在以下四个—基本假设下进行的。

B2.1 在温度不同水平 T_i 下,产品的寿命 t_i 服从对数正态分布,其分布密度函数为:

$$P_i(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_i^2}(\ln t - \mu_i)^2\right] \quad (B1)$$

$$t > 0, i=0, 1, 2, 3, \dots, L$$

其中 μ_i, σ_i 是未知参数, μ_i 为对数均值, σ_i 为对数标准差。当 $i=0$ 时,表示产品的额定温度水平 T_0 下的对数正态分布。

B2.2 在不同温度水平 T_i ($i=1, 2, \dots, L$) 下,产品失效机理相同,这表明寿命分布中的对数标准差 σ_i 保持不变,即

$$\sigma_0 = \sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_L$$

B2.3 寿命的对数均值 μ 与温度 T 之间有如下关系

$$\mu = a + b/T \quad (B2)$$

此式称为加速方程。

B2.4 产品的剩余寿命仅依赖于当时已累积失效部分和当时的应力条件,而与累积方式无关。利用这一假设可以对试验数据进行时间折算。

B3 时间折算

根据假设 B2.4,在温度水平 T_i 下产品工作 τ_i 时间的累积失效概率 $F_i(\tau_i)$ 应等于该产品在温度 T_j 下工作 τ_j 时间的累积失效概率 $F_j(\tau_j)$,即

$$F_i(\tau_i) = F_j(\tau_j) \quad (B3)$$

对数正态分布的分布函数为

$$F(t) = \Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right) \quad (B4)$$

其中 $\Phi(X)$ 是标准正态分布的分布函数, 它是单调增函数由 (B3), (B4)

$$\Phi\left(\frac{\ln \tau_i - \mu_i}{\sigma_i}\right) = \Phi\left(\frac{\ln \tau_{ij} - \mu_j}{\sigma_j}\right) \quad \text{..... (B5)}$$

由 $\Phi(X)$ 的单调性, 由上式得

$$\frac{\ln \tau_i - \mu_i}{\sigma_i} = \frac{\ln \tau_{ij} - \mu_j}{\sigma_j}$$

根据假设 B2.2, $\sigma_i = \sigma_j$ 有

$$\ln \frac{\tau_{ij}}{\tau_i} = \mu_j - \mu_i \quad \text{..... (B6)}$$

根据假设 B2.3, 则有

$$\mu_j - \mu_i = (a + b/T_j) - (a + b/T_i) = b\left(\frac{1}{T_j} - \frac{1}{T_i}\right) \quad \text{..... (B7)}$$

综合上述, 可得时间折算公式,

$$\bar{t}_{ij} = \tau_i \exp\left[b\left(\frac{1}{T_j} - \frac{1}{T_i}\right)\right] \quad \text{..... (B8)}$$

其意义是在温度 T_i 下工作 τ_i 时间, 相当于在温度 T_j 下工作 $\tau_i \cdot \exp\left[b\left(\frac{1}{T_j} - \frac{1}{T_i}\right)\right]$ 时间, 即:

如在温度 T_i 下工作 τ_i 时间, 相当于在温度 T_i 下工作 $\tau_i \cdot \exp\left[b\left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_i}\right)\right]$ 时间。

在温度 T_2 下工作 τ_2 时间, 相当于在温度 T_i 下工作 $\tau_2 \cdot \exp\left[b\left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_2}\right)\right]$ 时间。

假如一个产品在温度 T_i 下工作 τ_i 小时没有失效, 温度上升到 T_2 时, 工作 τ_2 小时仍没失效……, 在温度提高到 T_{i-1} 下工作 τ_{i-1} 小时也没失效, 而在温度提高到 T_i 时工作 t_{ij} 小时后失效 ($t_{ij} < \tau_i$), 则这个产品相当于在温度 T_i 下工作时间为

$$\bar{t}_{ij} = \sum_{k=1}^{i-1} \tau_k \exp\left[b\left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_k}\right)\right] + t_{ij} \quad \text{..... (B9)}$$

$i=1, 2, 3, \dots, L; j=1, 2, 3, \dots, n_i$

n_i 是在温度 T_i 下失效产品个数。

B4 未知参数 a, b, σ 的极大似然估计

要利用加速方程 (B2) 估计产品在正常温度 T_0 下的对数均值 μ_0 , 及正常温度 T_0 下对数标准差 σ_0 , 可以用折算所得的试验数据 (B9) 求 a, b, σ 的极大似然估计。

根据在温度 T_1 下有 n_1 个失效数据 $\bar{t}_{11} < \bar{t}_{12} < \dots < \bar{t}_{1n_1}$, 在温度 T_2 下有 n_2 个失效数据 $\bar{t}_{21} < \bar{t}_{22} < \dots < \bar{t}_{2n_2}$, 在温度 T_L 下有 n_L 个失效数据 $\bar{t}_{L1} < \bar{t}_{L2} < \dots < \bar{t}_{Ln_L}$, 可以写出求 a, b, σ 的极大似然估计的似然函数

$$\begin{aligned} L(a, b, \sigma) &= \prod_{i=1}^L \frac{1}{\pi} \prod_{j=1}^{n_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(\ln \bar{t}_{ij} - a - b/T_i)^2\right] \\ &= \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\right)^n \sigma^{-n} \prod_{i=1}^L \frac{1}{\pi} \prod_{j=1}^{n_i} \frac{1}{\bar{t}_{ij}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{n_i} (\ln \bar{t}_{ij} - a - b/T_i)^2\right] \end{aligned}$$

似然函数 $L(a, b, \sigma)$ 的对数 $l(a, b, \sigma) = \ln L(a, b, \sigma)$ 称为对数似然函数, 公式如下:

$$l(a, b, \sigma) = -n \ln \sqrt{2\pi} - n \ln \sigma - \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{n_i} \ln \bar{t}_{ij} - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{n_i} (\ln \bar{t}_{ij} - a - b/T_i)^2 \quad \text{..... (B10)}$$

所谓 a, b, σ 的极大似然估计, 就是要求这样的 $\hat{a}, \hat{b}, \hat{\sigma}$, 使得 $l(\hat{a}, \hat{b}, \hat{\sigma})$ 达到最大, 可以利用微分法求 $\hat{a}, \hat{b}, \hat{\sigma}$ 。在求 $l(a, b, \sigma)$ 的微分时, 特别在注意 \bar{t}_{ij} 是 b 的函数, 即

$$\bar{t}_{ij} = t_{ij}(b) = \sum_{k=1}^{i-1} \tau_k \exp\left[b\left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_k}\right)\right] + t_{ij}$$

为此先将它关于 b 求导

$$\bar{t}_{ij}' = \bar{t}_{ij}'(b) = \sum_{k=1}^{i-1} \tau_k \left\{ \exp \left[b \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_k} \right) \right] \right\} \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_k} \right) \quad \text{..... (B11)}$$

为求 a, b, σ 的极大似然估计, 首先将 $l(a, b, \sigma)$ 对 a 求导, 并令其为零, 得第一个似然方程

$$\begin{aligned} \frac{2l(a, b, \sigma)}{2a} &= \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{n_i} 2(\ln \bar{t}_{ij} - a - b/T_i) = 0 \\ \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{n_i} \ln \bar{t}_{ij} - na - b \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{n_i} \frac{1}{T_i} &= 0 \\ \hat{a} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{n_i} \ln \bar{t}_{ij} - b \sum_{i=1}^L \frac{n_i}{n T_i} = \bar{\ln t} - b \bar{\psi} \quad \text{..... (B12)} \end{aligned}$$

其中 $\bar{\ln t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{n_i} \ln \bar{t}_{ij}$, $\bar{\psi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{n_i} \frac{1}{T_i}$

(B12)式表明 a 的极大似然估计还依赖于 b 。

其次将 $l(a, b, \sigma)$ 对 σ 求导, 并令其为零, 得第二个似然方程

$$\begin{aligned} \frac{2l(a, b, \sigma)}{2\sigma} &= -\frac{n}{\sigma} + \frac{1}{\sigma^3} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{n_i} (\ln \bar{t}_{ij} - a - b/T_i)^2 = 0 \\ \hat{\sigma}^2 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{n_i} (\ln \bar{t}_{ij} - a - b/T_i)^2 \quad \text{..... (B13)} \end{aligned}$$

此式表明, σ^2 的极大似然估计依赖于 b 。最后将 $l(a, b, \sigma)$ 对 b 进行求导, 并令其为零, 可得第三个似然方程

$$\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{n_i} \frac{\bar{t}_{ij}'(b)}{\bar{t}_{ij}(b)} + \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{n_i} [\ln \bar{t}_{ij}(b) - a - \frac{b}{T_i}] \left(\frac{\bar{t}_{ij}'(b)}{\bar{t}_{ij}(b)} - \frac{1}{T_i} \right) = 0$$

将(B12), (B13)式代入上式, 并令

$$M(t, T, b) = \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{n_i} [(\ln \bar{t}_{ij}(b) - \bar{\ln t}) - b(\frac{1}{T_i} - \bar{\psi})] (\frac{\bar{t}_{ij}'(b)}{\bar{t}_{ij}(b)} - \frac{1}{T_i})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{n_i} [(\ln \bar{t}_{ij}(b) - \bar{\ln t}) - b(\frac{1}{T_i} - \bar{\psi})]^2} \quad \text{..... (B14)}$$

则得只含一个未知参数 b 的超越方程:

$$\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{n_i} \bar{t}_{ij}'(b) / \bar{t}_{ij}(b) + M(t, T, b) = 0 \quad \text{..... (B15)}$$

从此方程解出 \hat{b} , 即为 b 的极大似然估计, 再把它代入(B12), (B13), 即得 a, σ^2 的极大似然估计 $\hat{a}, \hat{\sigma}^2$, 方程(B15)的解可在计算机上用二分法方法解得。

B5 可靠性指标的估计

有了加速方程(B2)中二个系数 a, b 及对数标准差 σ 的极大似然估计, 就可求得产品在额定应力条件下各种可靠指标的估计, 设产品额定工作温度为 T_0 , 由公式(B2)可得 T_0 下 μ 的估计。

$$\hat{\mu}_0 = \hat{a} + \hat{b}/T_0 \quad \text{..... (B16)}$$

而额定温度 T_0 下平均寿命, 可靠寿命的估计分别为

$$\hat{E}(t) = \exp(\hat{\mu}_0 + \hat{\sigma}^2/2) \quad \text{..... (B17)}$$

$$\hat{t}_R = \exp(\hat{\mu}_0 + \hat{\sigma}_0 \mu_{1-R}) \quad \text{..... (B18)}$$

式中 μ_{1-R} 是标准正态分布 $N(0, 1)$ 的 $1-R$ 分位数, 可查表。

高温 T_i 时额定温度 T_0 的加速系数估计为

$$\hat{\tau}_{T_i-T_0} = \exp[\hat{b} \cdot (\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_i})] \quad \text{..... (B19)}$$

附加说明:

本标准由机械工业部上海电器科学研究所提出归口。

本标准由机械工业部上海电器科学研究所负责起草。

本标准主要起草人 杨士特

中 华 人 民 共 和 国
机 械 行 业 标 准
低压电机绝缘结构寿命快速试验评定方法
(步进应力法)

JB/T 7785—1995

★

机械科学研究院出版发行
机械科学研究院印刷
(北京首体南路2号 邮编 100044)

★

开本 880×1230 1/16 印张 X/X 字数 XXX,XXX
19XX 年 XX 月第 X 版 19XX 年 XX 月第 X 印刷
印数 1—XXX 定价 XXX.XX 元
编号 XX—XXX

机械工业标准服务网: <http://www.JB.ac.cn>