ICS 29.180
K 41

中华人民共和国国家标准

GB/T 1094.12—2013
代替 GB/T 17211—1998

电力变压器
第12部分：干式电力变压器负载导则

Power transformers—

目　次

前言 …… Ⅲ
引言 …… Ⅴ
1　范围 …… 1
2　规范性引用文件 …… 1
3　术语和定义 …… 1

前　言

GB 1094《电力变压器》目前包含了下列几部分：

——第 1 部分：总则；

——第 2 部分：液浸式变压器的温升；

——第 3 部分：绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙；

——第 4 部分：电力变压器和电抗器的雷电冲击和操作冲击试验导则；

——第 5 部分：承受短路的能力；

——第 6 部分：电抗器；

——第 7 部分：油浸式电力变压器负载导则；

——第 10 部分：声级测定；

——第 10.1 部分：声级测定 应用导则；

——第 11 部分：干式变压器；

——第 12 部分：干式电力变压器负载导则；

——第 14 部分：采用高温绝缘材料的液浸式变压器的设计和应用；

——第 16 部分：风力发电用变压器。

本部分为 GB 1094 的第 12 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

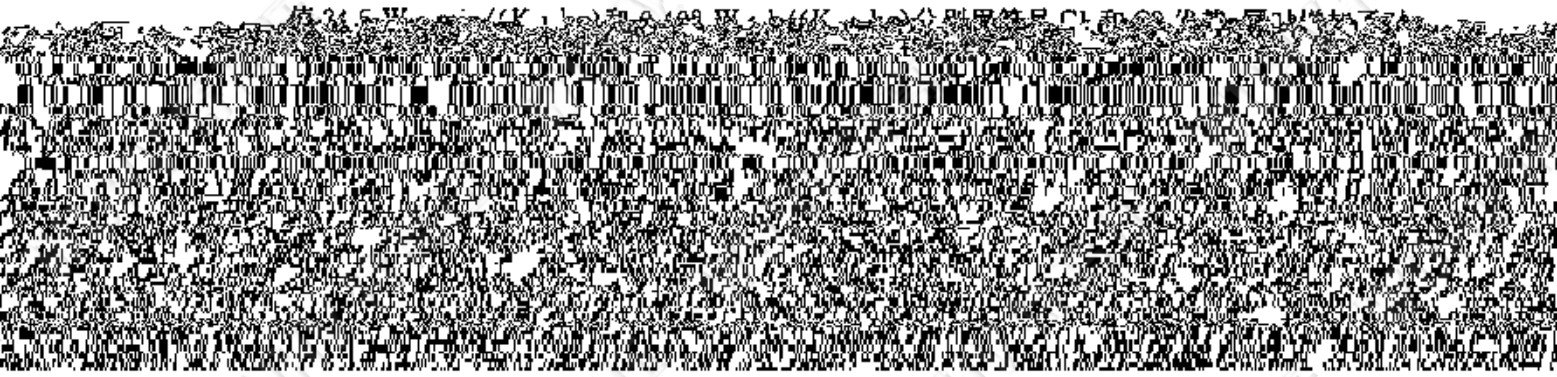
本部分代替 GB/T 17211—1998《干式电力变压器负载导则》。GB/T 17211—1998 对应的 IEC 标准代号为 IEC 60905:1987。由于 IEC 有关电力变压器的标准代号现均调整为 IEC 60076 系列，为了与 IEC 的标准代号相协调且使用方便，本次修订也将标准代号按新 IEC 标准系列进行了调整。

本部分与 GB/T 17211—1998 相比，主要技术变化如下：

按照 GB/T 1.1—2009 的规定，对标准结构进行了调整，其中，增加了“规范性引用文件”“术

——为适应我国的技术条件，在规范性引用文件中用修改采用国际标准的 GB 1094.11 代替 IEC 60076-11；

——为符合我国的实际情况，在 5.10.2 中，将绕组的有效热容量计算公式中环氧材料的比热容数



引　言

本部分从运行温度和热老化的观点提供了干式电力变压器的规范和负载导则。它给出了超铭牌额定值负载导致的后果，并为设计人员选择新设备的恰当额定参数和负载条件提供了指导。

GB 1094.11是合同的基础，包含了干式电力变压器在连续负载下的温升值的要求和温升试验。[illegible]

电力变压器
第12部分：干式电力变压器负载导则

1 范围

GB 1094的本部分适用于GB 1094.11规定范围内的干式变压器。本部分提供了干式变压器绝缘老化率和寿命损失的估算方法，该方法把变压器绝缘的老化率和寿命损失表示为变压器的运行温度、时间和负载的函数。

注：对于风力发电用变压器、电炉变压器、电焊机用变压器等特殊用途的变压器，制造方应参照相关特定负载曲线。

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

3.6

自然风冷　AN cooling

自然通风冷却的方式。

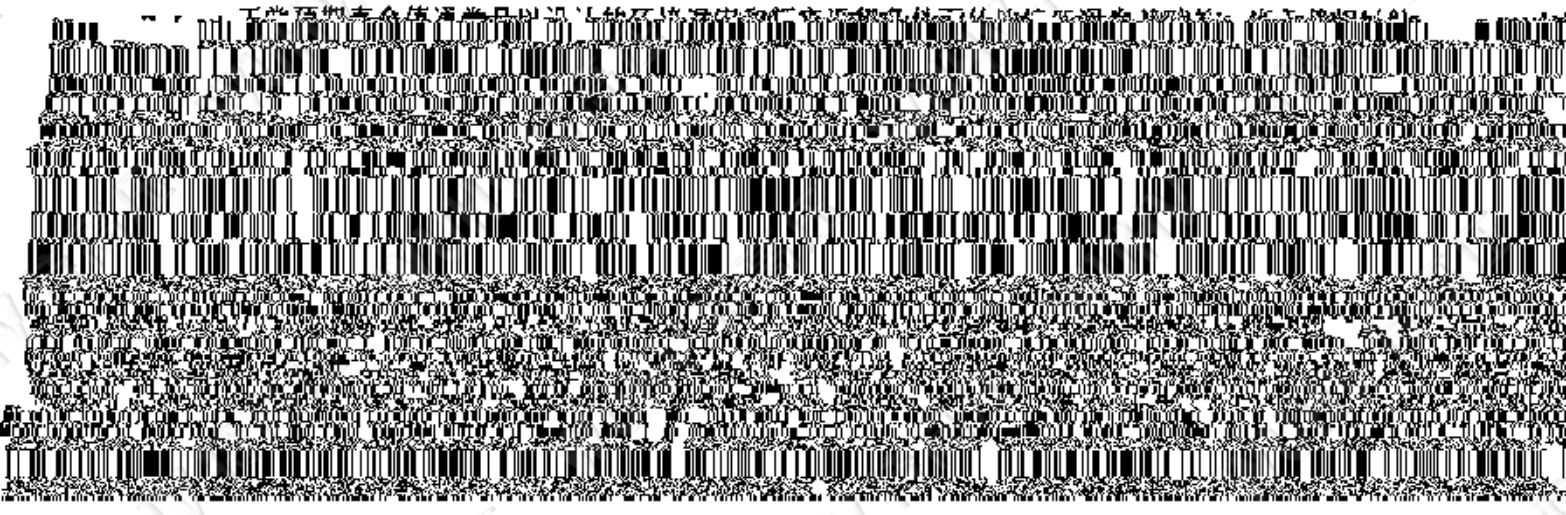
3.7

强迫风冷　AF cooling

通过风机冷却来提高变压器额定容量的冷却方法。

4　超铭牌额定值负载运行的影响

4.1　概述



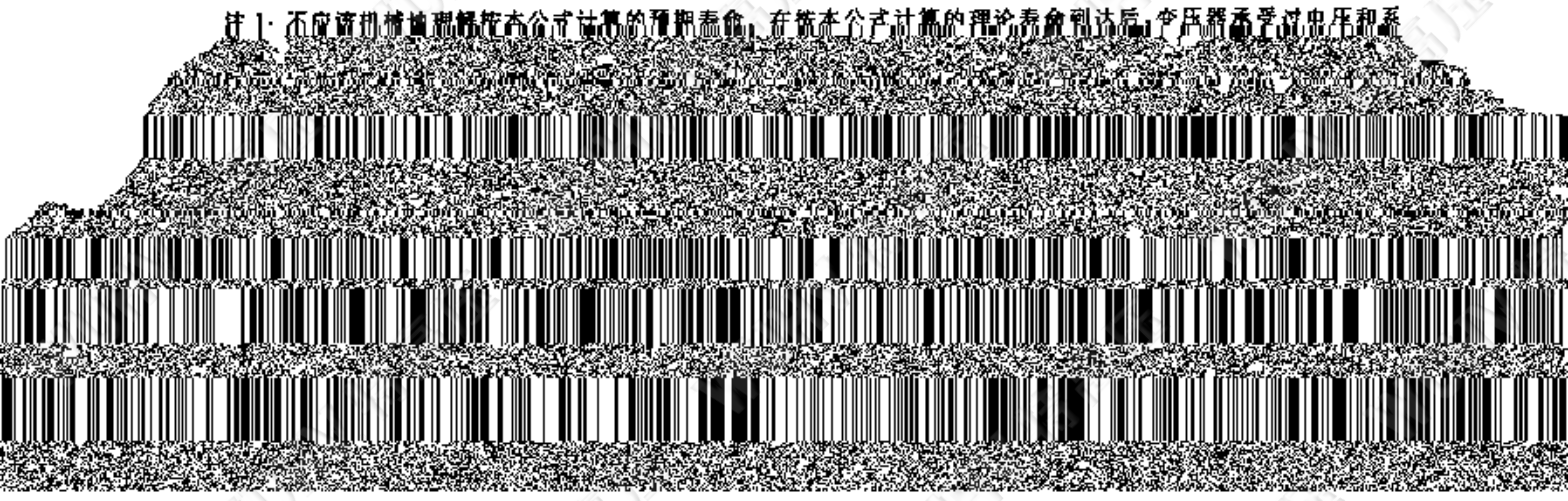
5 老化和变压器绝缘寿命

5.1 概述

经验表明，变压器的正常寿命为几十年，但难以对其进行更加准确的规定。即使是完全相同的变压器，由于它们的运行条件各异，因此每台变压器的寿命也是不相同的。除极少数情况外，变压器很少在整个寿命周期内在100%额定电流下运行。其他对温升有影响的因素，如：冷却不充分、谐波、过励磁和/或在GB 1094.11中描述的非正常条件都会影响变压器的寿命。

当主要由变压器的损耗产生的热量传递到绝缘系统时，化学过程便开始了。这个过程改变组成绝缘系统的材料的分子结构，传递给系统的热量越多，老化率越大。这个过程是累积的且不可逆的，注意

注 1：不应该把根据规定寿命计算的预期寿命，在该寿命计算的理论寿命到达后，变压器承受过电压和系



式中：

t ——时间；

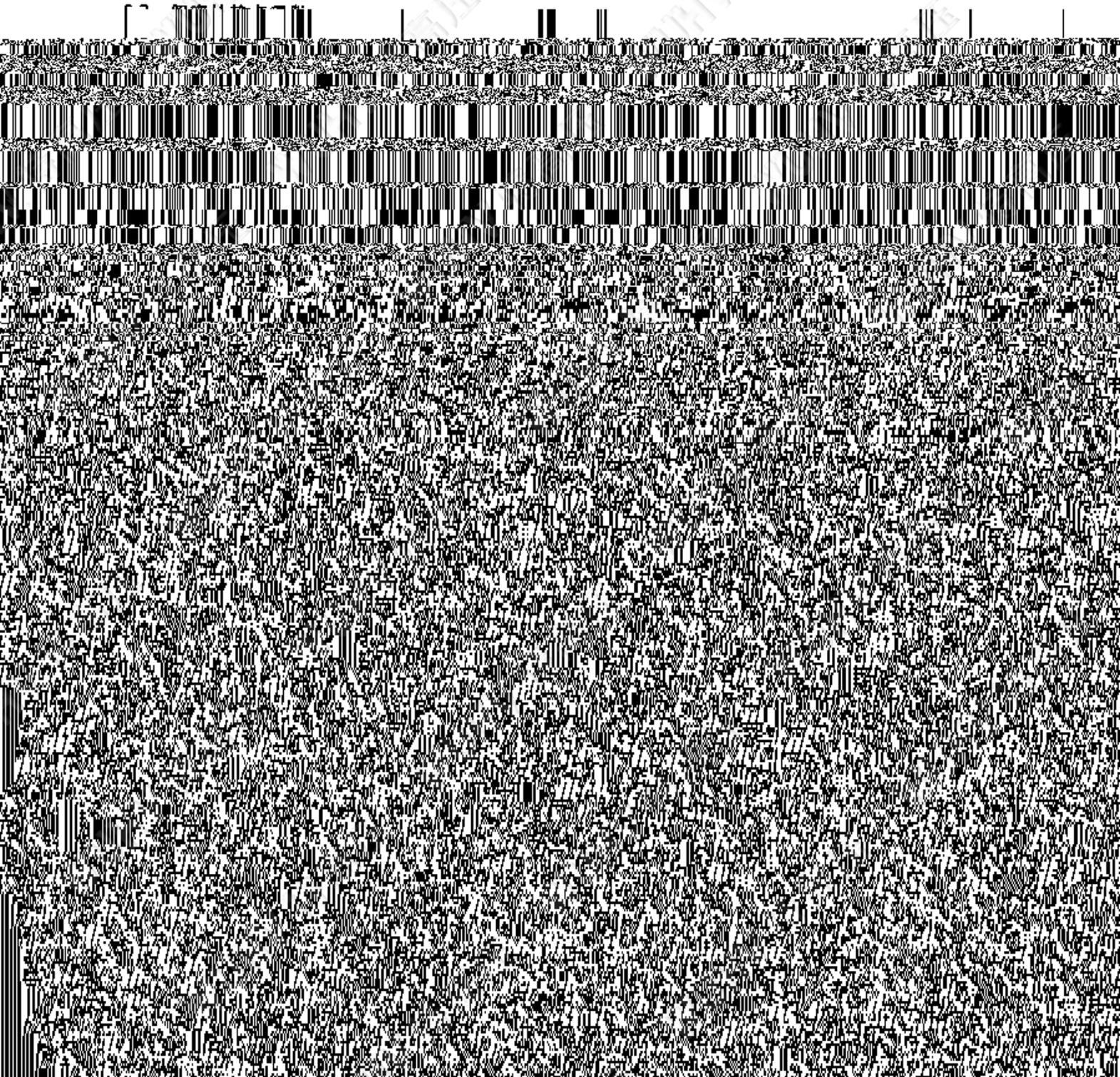
a、b ——见表 1。

5.6 稳态下的热点温度

对大多数运行中的变压器来说，很难准确地知道绕组内部的热点温度。对大多数此类变压器，热点温度能通过计算来估计。

本部分计算方法中的 $\theta_{HS,r}$ 为额定条件（额定电流、额定环境温度、额定电压、额定频率）下的热点温度，单位为 ℃。它可以用计算或测量的方法得到。

注：目前没有确定热点温度的标准试验方法，如果制造方能用试验来证明其他热点温度值，则制造方可以用这些值来计算变压器寿命损失。



$$C_T = \frac{T_K + \theta_{HS}}{T_K + \theta_{HS,r}} \qquad \cdots\cdots(13)$$

式中：

$\Delta\theta_{HS}$——给定负载下的热点温升(K)；

$\theta_{HS,r}$——额定负载下的额定或者测试的热点温度(℃)(用于式(11)中的自然冷却运行的变压器测

试等与用于式(12)的强迫风冷运行的变压器测试等)。

时间常数可以通过计算或者是在变压器上进行试验获得，具体由供需双方协商确定。

5.10.2 时间常数计算方法

额定负载下绕组的时间常数 τ_R 为：

$$\tau_R = \frac{C(\Delta\theta_{HS,r} - \theta_e)}{P_r} \qquad \cdots\cdots(16)$$

式中：

τ_R 额定负载下变压器的时间常数(min)；

C ——绕组的有效热容量(W·min/K)；

=[15.0×铝导线质量(kg)]+(C_1×环氧材料及其他绕组绝缘质量(kg))，或

=(6.42×铜导线质量(kg))+(C_1×环氧材料及其他绕组绝缘质量(kg))；

或

C ——绕组的有效热容量(W·h/K)；

=(0.25×铝导线质量(kg))+(C_2×环氧材料及其他绕组绝缘质量(kg))，或

=(0.107×铜导线质量(kg))+(C_2×环氧材料及其他绕组绝缘质量(kg))；

C_1 ——为环氧材料及其他绕组绝缘材料的比热容，单位为 W·min/(K·kg)；

C_2——为环氧材料及其他绕组绝缘材料的比热容，单位为 W·h/(K·kg)；

P_r——额定负载和额定温升下的绕组总损耗(电阻损耗+涡流损耗)(W)；

$\Delta\theta_{HS,r}$——额定负载下的热点温升(K)；

θ_e——空载时铁心对绕组热点温升的影响。其值应是下面给出的值或变压器温升试验时制造方的测量值：

=5 K，对于外侧绕组(通常为高压绕组)；

=25 K；对于内侧绕组(通常为不超过 1 kV 的低压绕组)。

注 1：上述的铁心影响值基于制造方的经验；

注 2：在 IEC 60076-12:2008 中，C_1 为 24.5 W·min/(K·kg)，C_2 为 0.408 W·h/(K·kg)。

5.10.3 时间常数的测试方法

时间常数可以通过在温升试验中获得的热电阻冷却曲线估算。

5.11 根据经验常数确定绕组时间常数

当温升变化时，根据经验常数 m，时间常数也发生变化。

$$\tau_R = \frac{C(\Delta\theta_{HS,r} - \theta_e)}{P_r} \qquad \cdots\cdots(17)$$

如果 $m=1$，则公式(17)对任何负载及任何起始温度都正确。如果 $m\neq1$，则任何负载和任何起始温度的加热或冷却循环的时间常数用公式(18)得出。

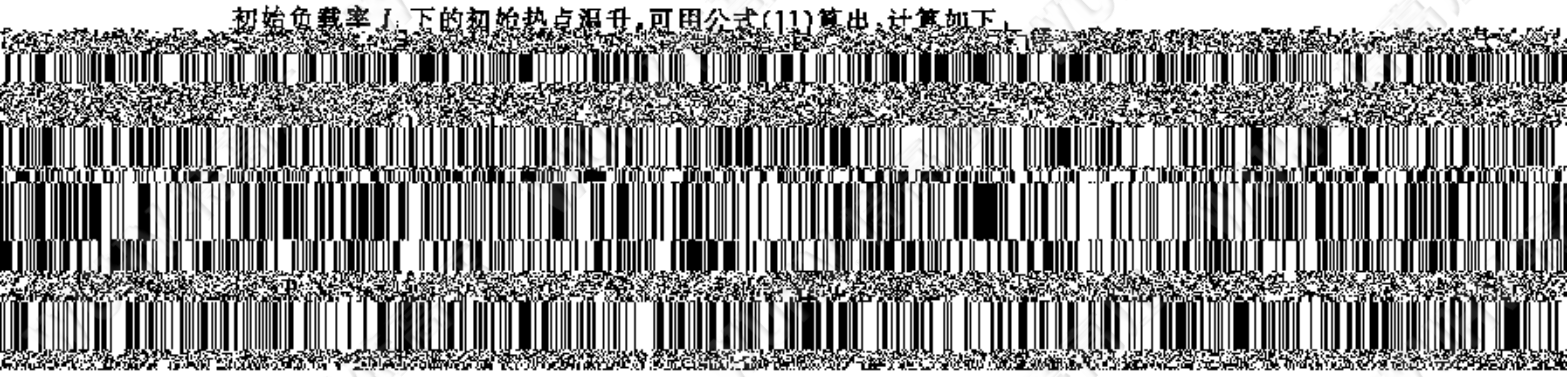
$$\tau = \tau_R \frac{\left(\frac{\Delta\theta_U}{\Delta\theta_{HS,r}}\right) - \left(\frac{\Delta\theta_i}{\Delta\theta_{HS,r}}\right)}{\left(\frac{\Delta\theta_U}{\Delta\theta_{HS,r}}\right)^{\frac{1}{m}} - \left(\frac{\Delta\theta_i}{\Delta\theta_{HS,r}}\right)^{\frac{1}{m}}} \qquad \cdots\cdots(18)$$

5.12 负载能力计算

公式(10)～公式(18)宜用于确定在一个负载周期中的热点温度，也宜用于确定短时或连续负载导

致的达到表1中给出的最大值或达到任何其他限值的温度值。

初始负载率 I_1 下的初始热点温升，可用公式(11)算出，计算如下：



6 限制

6.1 电流和温度限制

当负载超过铭牌额定值时，绕组热点温度不应超过表3所列的限值，并且还要考虑4.3和5.12的特殊限制。

电流的幅值要限定到1.5倍额定电流，特别是当负载周期短，且为重复性负载时，以避免在绕组上产生机械损伤。当电流值超过1.5倍额定电流时，在询价阶段就应该指出，并由供需双方协商一致。对于所有其他类型的负载周期，电流值要限定到1.5倍额定电流。

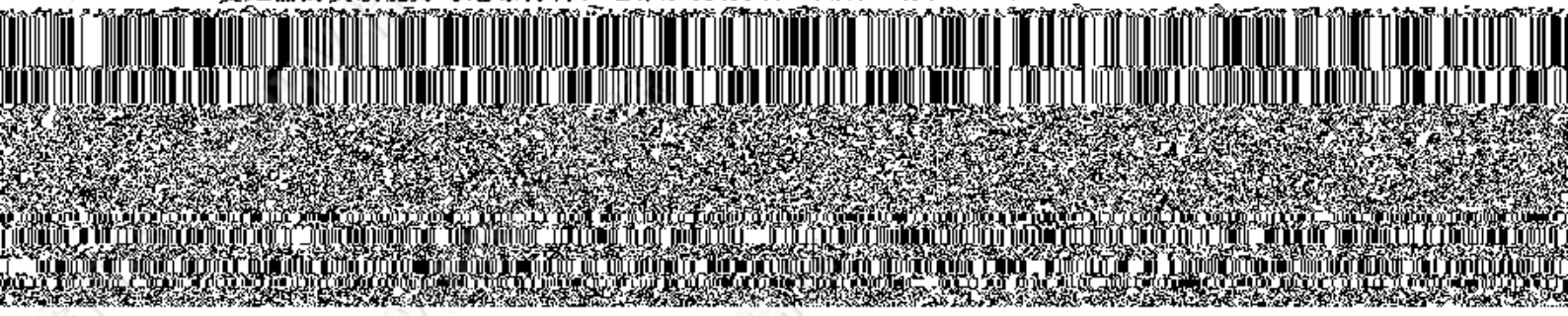
表3 超铭牌额定值负载时的电流和温度限值

绝缘系统温度/℃	最大电流(p.u.)	最高热点温度/℃
105(A)	1.5	130
120(E)	1.5	145
130(B)	1.5	155
155(F)	1.5	180
180(H)	1.5	205
200	1.5	225
220	1.5	245

附 录 A
（资料性附录）
老化率

A.1 负载能力

变压器的负载能力与绝缘材料和绝缘系统有关。与油浸式变压器的主要固体绝缘材料是纤维素产



半到终点时的温度间隔数值。见图 A.2。

TI 和 HIC 是在提高温度的加速老化试验时得到的，而试验方法则是基于阿伦尼乌斯定律的有效性。

A.2.3.2 阿伦尼乌斯定律

化学和物理学家阿伦尼乌斯（1903 年诺贝尔化学奖得主）提出了下列化学反应速度与温度的一般关系：

$$k = A \times e^{-\left(\frac{E_a}{RT}\right)} \qquad \cdots\cdots (A.1)$$

式中：

k ——反应速度系数；

A ——常数；

E_a ——和规定材料相关的活化能；

R ——通用气体常数；

T ——开氏温度(K)；

e ——自然对数的底(2.718 28…)。

公式(A.1)叫作阿伦尼乌斯定律。

R 的值为 $8.314\times10^{-3}\text{kJmol}^{-1}\text{K}^{-1}$。活化能 E_a 是所涉及材料发生反应所需的能量总和，假定 E_a 不随温度变化。E_a 的单位是 kJmol^{-1}。

A 和 k 的基本单位是秒分之一(s^{-1})，适当时也可用其他时间单位，如：小时。k 表示在材料或材料组合中化学反应的快慢程度。

公式(A.1)的倒数为：

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{A} \times e^{\frac{E_a}{RT}} \qquad \cdots\cdots (A.2)$$

$1/k$ 的单位是秒(s)，它显示化学反应进行到某阶段已用的时间。

公式(A.2)还可以写作：

$$h = a \times e^{\frac{b}{T}} \qquad \cdots\cdots (A.3)$$

式中：

$h=1/k$；

$a=1/A$；

$b=E_a/R$。

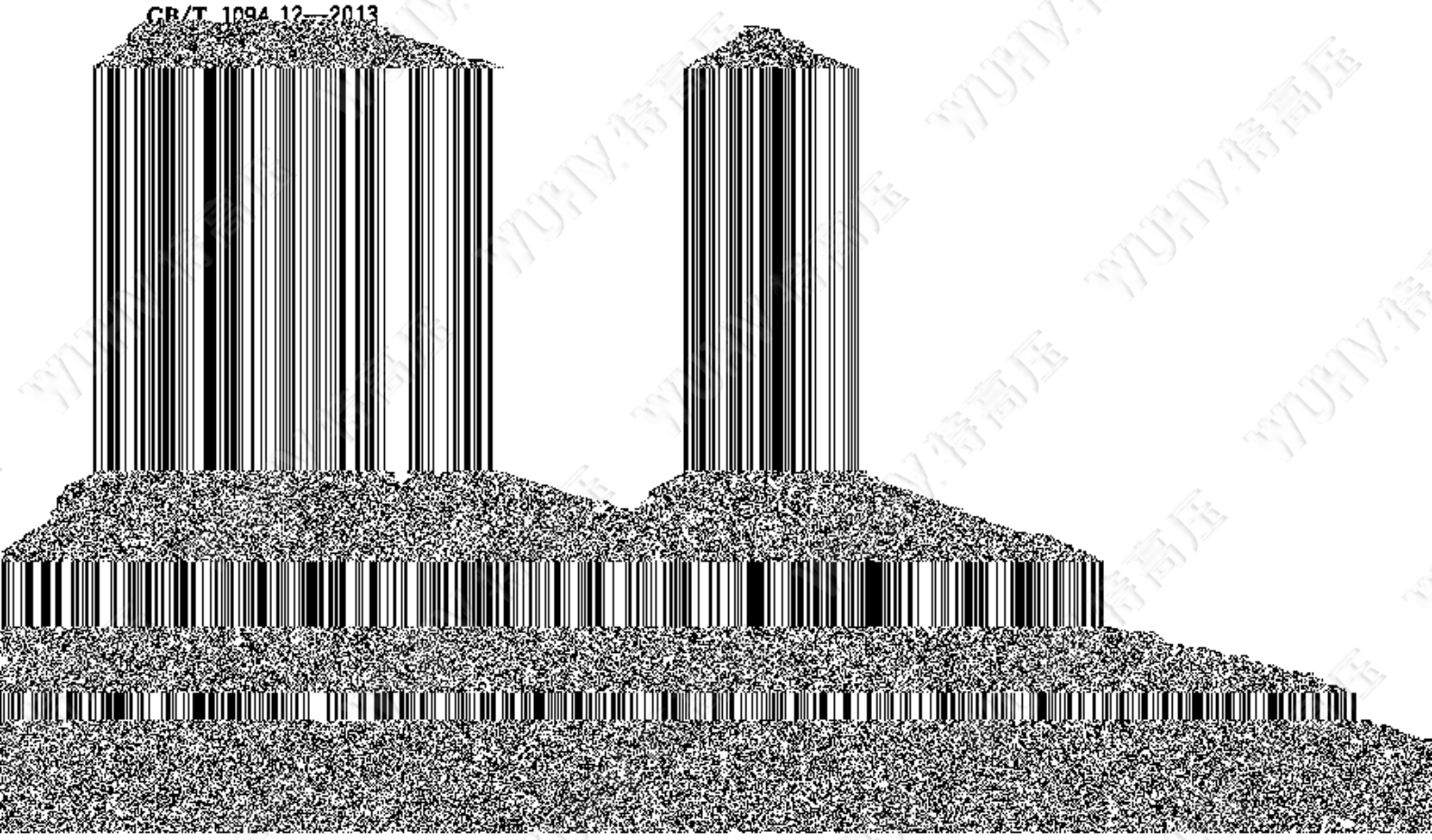
等号两边取自然对数：

$$\ln h = \ln a + b \times (1/T) \qquad \cdots\cdots (A.4)$$

A.2.3.3 耐热图

将 $\ln h$ 和 $1/T$ 对应的值标在平面直角坐标系上，这些点可以拟合为一条直线上。这个图叫作耐热图。如图 A.2。

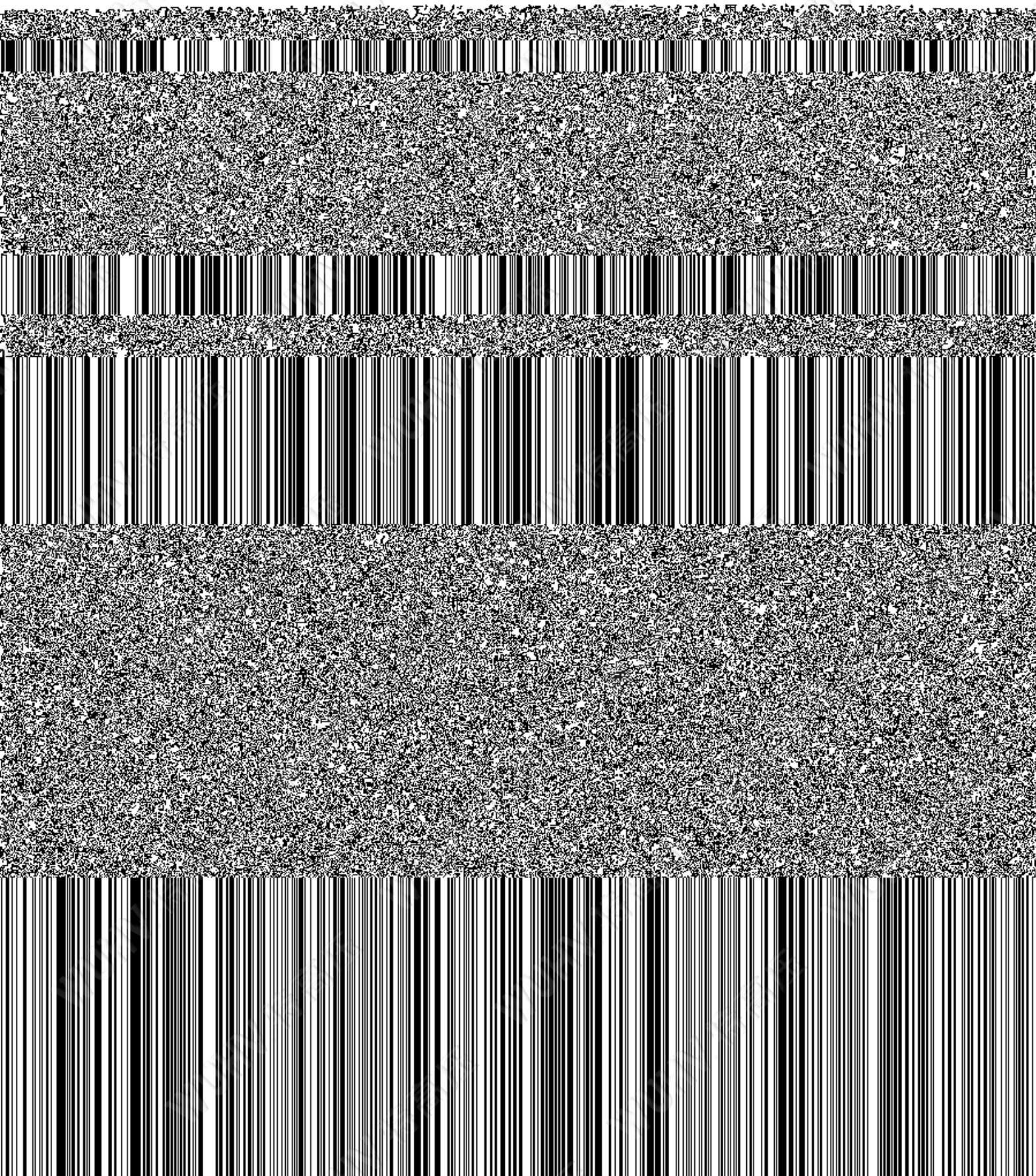
试验在比预期温度指数(*TI*)更高的温度下进行。在图 A.2 例子中，试验在四个不同的温度下进行，即 170 ℃、160 ℃、150 ℃和 140 ℃。



计的热点温度提供更准确的信息。

当评价变压器负载能力时，环境温度受到负载的影响的因素应加以考虑。

A.3 参考文献



附 录 B
（资料性附录）
三种负载模式下的寿命损失示例

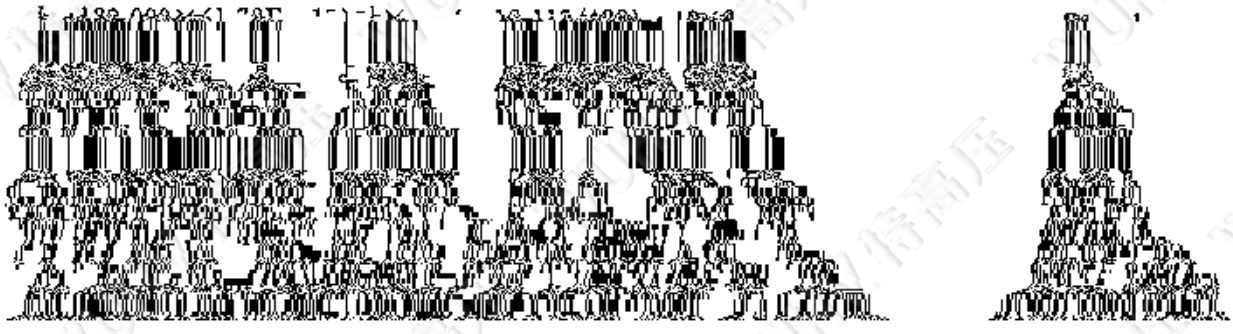
B.1 例一：恒定温度下的负载

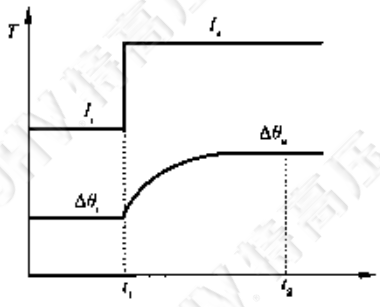
B.1.1 假设

热点对环境的温升：125 K
环境温度：30 ℃ ＝常数
绝缘系统温度：130 ℃(B级)
负载时间：1 周＝ 168 h

B.1.2 计算

根据公式(3)：
热点热力学温度＝273＋30＋125＝428 K。
由表 1，系数 a 和 b 为：
a＝1.72E−15h，b＝18 115。
根据公式(5)计算老化率：





说明：

横坐标轴——时间；

纵坐标轴——上部曲线：起始和最终负载；

下部曲线：对环境的温升。

图 B.1 阶跃变化的负载曲线

B.2.2 假设

I_1=0.8 p.u.，持续时间 t_1=10 h，I_1 为初始负载；

I_U=1.2 p.u.，持续时间 t_2=10 h，I_U 为最终负载；

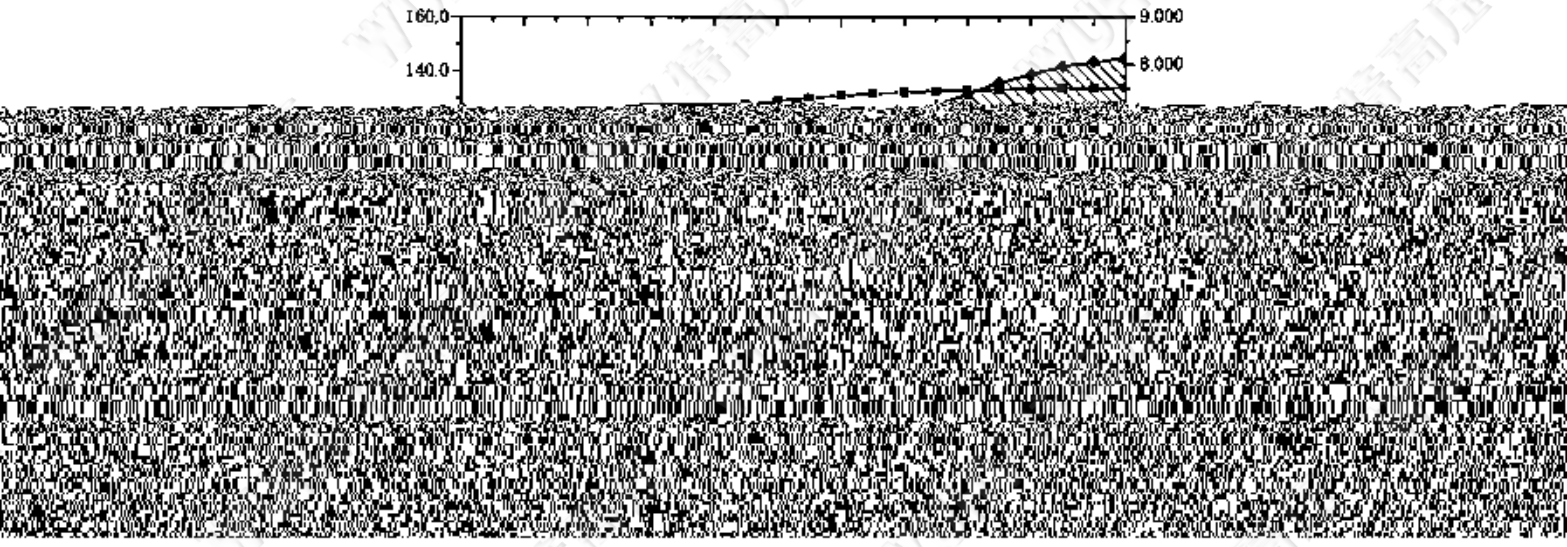
绕组的额定时间常数：τ_R=0.5 h；

环境温度：30 ℃，恒定(与负载电流无关)；

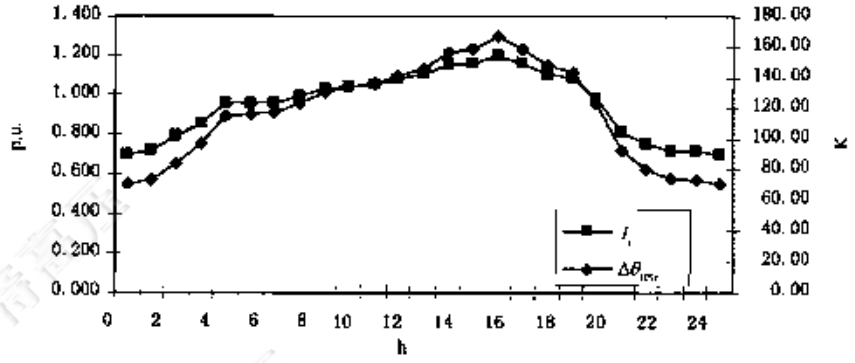
绝缘系统温度：155 ℃；

表 B.1 寿命损失计算

时间 t h	热点温升 $\Delta\theta_{HS}$ [公式(14)] K	热力学温度 T [公式(3)] K	老化率 k [公式(5)] h/h	寿命损失 L_t [公式(7)] h
0	70.0	373.0	0.003	0.000 0
0.1	84.2	387.2	0.020	0.002 0
0.2	95.2	398.2	0.088	0.008 8
0.3	103.8	406.8	0.260	0.026 0
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]


160.0
140.0
9.000
8.000

注意时间常数在负载周期内有所变化。



说明：

横坐标轴——时间(h)；

纵坐标轴——左：负载电流(标幺值)；

θ_t：绕组热点温升(K)；

——与左侧纵坐标轴对应的负载电流，I_t；

——与右侧纵坐标轴对应的绕组热点温升(K)。

图 B.3　负载电流和绕组热点温升

图 B.4 曲线显示老化率在 24 h 周期内随时间的变化。周期内的老化相当于曲线下部的面积。

WUHV.特高压

表 B.3 寿命损失计算

时间 h	寿命损失速率 k 公式(7) h/h	系数	k×系数 h
0	0.000	1	0.000
1	0.000	4	0.000
2	0.001	2	0.002
3	0.004	4	0.016
4	0.042	2	0.084
5	0.054	4	0.216
6	0.061	2	0.122
7	0.122	4	0.488
8	0.309	2	0.618
9	0.468	4	1.872
10	0.607	2	1.214
11	1.116	4	4.464
12	2.004	2	4.008
13	6.079	4	24.316
14	8.375	2	16.750
15	19.176	4	76.704
16	8.317	2	16.634
17	2.600	4	10.400
18	1.459	2	2.918
19	0.128	4	0.512
20	0.002	2	0.004
21	0.000	4	0.000
22	0.000	2	0.000
23	0.000	4	0.000
24	0.000	2	0.000

合计:161.34

L_c=53.78

图 B.4 曲线下的面积等于:

$$\frac{24}{6\times12}\times161.34=53.78\ (\text{h})$$

这意味着在给定的 24 h 负载周期中,损失了 180 000 h 总寿命中的 53.78 h,占总寿命的 0.0299%。

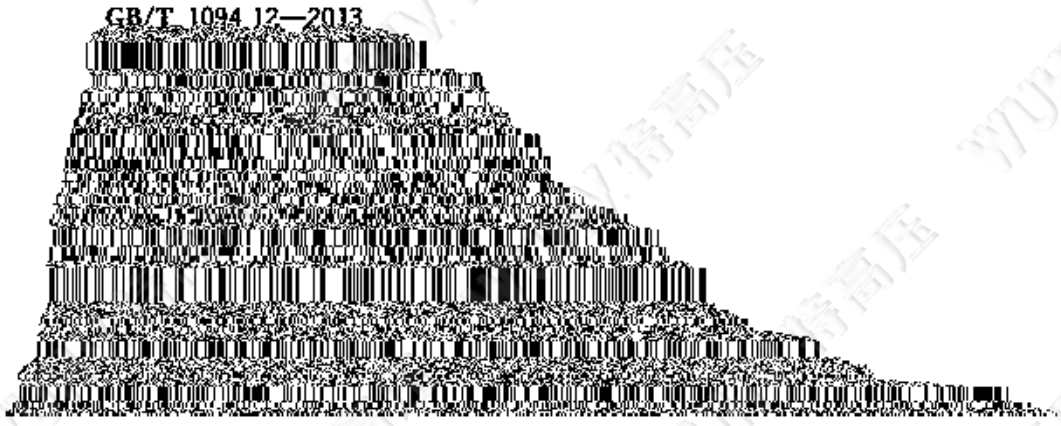
附 录 C
（资料性附录）
符号表

C.1 符号表

符号表见表 C.1。

表 C.1 符号表

符号	意义	单位	章条号
a	阿伦尼乌斯定律常数	h	5.2
b	阿伦尼乌斯定律常数	K	5.2
C	绕组的有效热容量	W·min/K 或 W·h/K	5.10.2
C_1	环氧材料及其他绕组绝缘材料的比热容	W·min/(K·kg)	5.10.2
C_2	为环氧材料及其他绕组绝缘材料的比热容	W·h/(K·kg)	5.10.2
C_T	电阻温度修正系数	—	5.9.1
I	负载率	—	5.9.1
I_i	初始负载率	—	5.12
I_n	给定负载率	—	5.8
I_u	最终负载率	—	5.12
k	老化率，给定温度下每小时运行时间的寿命损失小时数	h/h	5.4
k_t	相对老化率，恒定热点热力学温度 T(K)及时间 t 下，相对于180 000 h的寿命损失百分数	%	5.4



中华人民共和国
国家标准
电力变压器
第12部分：干式电力变压器负载导则
GB/T 1094.12—2013
*
中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100013)
北京市西城区三里河北街16号(100045)
网址 www.spc.net.cn
总编室：(010)64275323 发行中心：(010)51780235
读者服务部：(010)68523946
中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销
*
开本 880×1230 1/16 印张 2 字数 48千字
2014年3月第一版 2014年3月第一次印刷
*
书号：155066·1-48313 定价 30.00元

如有印装差错 由本社发行中心调换