



# 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—  
Part 12: Loading guide for dry-type power transformers

(IEC 60076-12:2008, MOD)

杭州高电  
专业高试铸典范

Professional high voltage test

高压测量仪器智造 | 电力试验工程服务

2013-12-17 发布

2014-04-09 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布  
中国国家标准化管理委员会

## 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
4 超铭牌额定值负载运行的影响 .....	2
4.1 概述 .....	2
4.2 一般后果 .....	2
4.3 短期急救负载的影响和危害 .....	2
4.4 长期急救负载的影响 .....	2
5 老化和变压器绝缘寿命 .....	3
5.1 概述 .....	3
5.2 寿命 .....	3
5.3 稳定连续负载和温度间的关系 .....	4
5.4 热老化率 .....	4
5.5 寿命损失 .....	4
5.6 稳态下的热点温度 .....	5
5.7 假定的热点系数 .....	5
5.8 在不同的环境温度和负载条件下的热点温升 .....	5
5.9 负载公式 .....	5
5.10 绕组时间常数的确定 .....	6
5.11 根据经验常数确定绕组时间常数 .....	7
5.12 负载能力计算 .....	7
6 限制 .....	9
6.1 电流和温度限制 .....	9
6.2 其他限制 .....	9
附录 A (资料性附录) 老化率 .....	10
A.1 负载能力 .....	10
A.2 分子结构 .....	10
A.3 参考文献 .....	13
附录 B (资料性附录) 三种负载模式下的寿命损失示例 .....	14
B.1 例一:恒定温度下的负载 .....	14
B.2 例二:持续时间为 $t_1$ 的负载电流 $I_1$ 和紧接着持续时间为 $t_2$ 的负载电流 $I_2$ .....	14
B.3 例三:变化的负载电流 .....	17
附录 C (资料性附录) 符号表 .....	21
C.1 符号表 .....	21
参考文献 .....	23

## 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 and 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”、“术语和定义”章节，并将原“符号”章调整为附录 C；
- 标准适用范围增加强迫风冷干式变压器，并增加了“强迫风冷”冷却方式下干式变压器热点温升的计算方法；
- 增加了变压器超铭牌运行危险的说明；
- 明确了假定老化引起的绝缘失效是变压器寿命终结的原因、假定老化率随温度的变化符合阿伦尼乌斯定律，并进一步假定绝缘系统温度每增加 6 K，老化率加倍；
- 增加了铜和铝导体绕组时间常数的计算方法和试验方法。在计算方法中，采用了不同于以往经验的绕组材料比热容数据；
- 增加了依据经验常数确定时间常数的方法；
- 正文中删除了选择负载曲线的实例；
- 增加户外环境条件以及外壳对变压器运行影响的说明；
- 增加附录 A“老化率”。该附录对固体绝缘材料的老化率和“热量”的关系进行了介绍，并介绍了基于阿伦尼乌斯定律的耐热特性分析；
- 增加附录 B：“三种负载模式下的寿命损失示例”。

本部分使用重新起草法修改采用 IEC 60076-12:2008《电力变压器 第 12 部分：干式电力变压器负载导则》。

本部分与 IEC 60076-12:2008 的技术性差异及其原因如下：

- 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值  $24.5 \text{ W} \cdot \text{min}/(\text{K} \cdot \text{kg})$  和  $0.408 \text{ W} \cdot \text{h}/(\text{K} \cdot \text{kg})$  分别用符号 C1 和 C2 代替,同时增加了对 C1 和 C2 的说明,并用“注 2:在 IEC 60076-12:2008 中,C1 为  $24.5 \text{ W} \cdot \text{min}/(\text{K} \cdot \text{kg})$ ,C2 为  $0.408 \text{ W} \cdot \text{h}/(\text{K} \cdot \text{kg})$ ”代替 IEC 标准的“注 2:绕组也可以使用其他绝缘材料和环氧材料。对此类变压器,相应的比热值  $24.5 \text{ W} \cdot \text{min}/(\text{K} \cdot \text{kg})$  或  $0.408 \text{ W} \cdot \text{h}/(\text{K} \cdot \text{kg})$  可用制造方的经验数据来代替”。

为便于使用,本部分对 IEC 60076-12:2008 还做了下列编辑性修改:

- 引言中,增加了“为便于使用,本部分在附录 B 中给出了三种负载模式下的寿命损失计算示例,并在附录 C 中给出了符号表”;
- 对表 3 的格式进行了调整;
- 删除表 B.2 中最右侧 4 列的内容;
- 附录 C 中增加了符号 C1 和 C2。

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。

本部分由中国电器工业协会提出。

本部分由全国变压器标准化技术委员会(SAC/TC 44)归口。

本部分起草单位:沈阳变压器研究院股份有限公司、顺特电气设备有限公司、吉林省电力科学研究院、明珠电气有限公司、新华都特种电气股份有限公司、卧龙电气集团北京华泰变压器有限公司、中电电气集团有限公司、广州骏发电气有限公司、保定天威顺达变压器有限公司、广东海鸿变压器有限公司、中铁电气化局集团保定铁道变压器有限公司、天津市特变电工变压器有限公司。

本部分主要起草人:张显忠、刘燕、肖勋、敖明、蔡定国、石肃、何宝振、梁伟、樊建平、李占元、郭献清、由振忠、赵文忠。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为:

- GB/T 17211—1998。

## 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。应注意的是,GB 1094.11 指的是绕组平均温升,而本部分主要指热点温度,且该值只做指导用。

本部分给出了一些数学模型,用来判断不同负载在不同的冷却介质温度下和该负载随时间周期变化或瞬时性变化的结果。该模型提供了变压器运行温度的计算方法,尤其是绕组热点温度。热点温度用于评估在特定时间段内的寿命损失。

本部分依据温度的计算结果或者测量结果推荐了允许的负载限值。这些推荐值涉及不同的负载情况——连续负载、短期和长期急救负载。附录 A 就老化规律进行了解释。

为便于使用,本部分在附录 B 中给出了三种负载模式下的寿命损失计算示例,并在附录 C 中给出了符号表。

# 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件。凡是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 1094.11 电力变压器 第 11 部分:干式变压器(GB 1094.11—2007,IEC 60076-11:2004,MOD)

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 11026.1—2003,IEC 60216-1:2001,IDT)

GB/T 18494.1—2001 变流变压器 第 1 部分:工业用变流变压器(IEC 61378-1:1997,IDT)

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

**长期急救负载 long-time emergency loading**

由于系统中某些设备长时间退出运行而引起的一种负载方式,在变压器达到一个新的、较高的稳态温度之前,这些设备不会重新投入运行。

#### 3.2

**短期急救负载 short-time emergency loading**

由于系统中发生了一个或多个事故,严重干扰了系统的正常负载分配,从而产生的暂态(小于绕组的一个时间常数)严重过负载。

#### 3.3

**热点 hot-spot**

若无另行规定,“热点”指各绕组中的最热点。

#### 3.4

**相对热老化率 relative thermal ageing rate**

在给定的热点温度下,与参考热点温度下的绝缘老化率相比,变压器的绝缘老化呈降低或加快的速率。

#### 3.5

**变压器绝缘寿命 transformer insulation life time**

从绝缘起始状态(即通常认为绝缘是新的)到正常运行中由于热老化、绝缘场强、短路应力或机械位移而导致电气故障危险高发的最终状态之间的全部时间。

### 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

正常预期寿命值通常是以设计的环境温度和额定运行条件下的连续工况为基础的。当负载超过铭牌额定值和/或环境温度高于规定环境温度时,变压器将承受一定程度的风险,并且老化加速。本部分的目的是要确认这些危险,并指导变压器在限定条件下如何进行超铭牌额定值负载运行。

### 4.2 一般后果

变压器超铭牌额定值负载运行后果如下:

- 绕组、端子、引线、分接开关和绝缘的温度升高,且能达到不可接受的水平;
- 带外壳产品对过载更加敏感,会导致绝缘系统温度达到不可接受的水平;
- 导致由于电流和温度增加而引起的过早失效的风险。这种风险可能是一种短时效应,也可能来自多年的绝缘老化的累积效应。

注:过载的另一个结果是变压器的压降增加。

### 4.3 短期急救负载的影响和危害

超过规定限值的短期急救负载的主要危害如下:

- 由于温度升高而产生的巨大机械应力,可能达到引起环氧浇注变压器绝缘开裂到不可接受的程度;
- 短时和重复性过载电流导致绕组受到机械损伤;
- 在环境温度超过规定值情况下短时和重复性电流导致绕组受到机械损伤;
- 在更高的温度下,机械特性的劣化会降低抗短路能力;
- 由于温度升高而降低绝缘强度。

因此规定,最大的过载电流不允许超过额定电流的50%。

当过载超过50%时,有必要与制造方协商,以评估该过载的后果。在任何情况下,此类过载时间应尽可能短。

### 4.4 长期急救负载的影响

长期急救负载的影响如下:

- 在较高的温度时,导体绝缘的机械及绝缘性能的累积热老化效应会加速。如果这种热老化达到一定程度,则会减少变压器的寿命,特别是当设备遭受系统短路电流时;
- 其他绝缘材料以及结构件和导体在高温时也会加速老化;
- 老化率及寿命损失的计算规则是以负载为基础的。

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,这意味着当传热停止,温度下降时,材料也不会恢复到最初的分子结构。绝缘系统温度会在制造方提供的文件中说明并标在铭牌上。假定老化造成的绝缘材料性能失效是变压器寿命终结的原因之一。

进一步假定老化率随温度的变化符合阿伦尼乌斯(Arrhenius)定律。有关进一步的背景信息见附录 A。阿伦尼乌斯定律中的两个常数在理想情况下可以用耐热试验来确定。当得不到这样的试验数据时,本部分提供了估算的常数,它是以下列假定为基础通过计算得出的:

- 温度增加 6 K,老化率加倍。6 K 对整个绕组而言是估计值,该值与绕组使用的特定材料性能有关;
- 当按照 GB/T 11026.1 进行整体电气绝缘系统(EIS)的耐热试验,得到另一个老化率加倍的值时,宜使用该值;
- 绝缘材料性能失效是变压器寿命终结的原因。

5.2 寿命

在恒定的热点温度  $T$  (单位为 K) 下,变压器的预期寿命  $L$  按下式计算:

$$L = a \times e^{\frac{b}{T}} \dots\dots\dots(1)$$

该公式也可以表示为:

$$L = a \times \exp\left(\frac{b}{T}\right) \dots\dots\dots(2)$$

尽管任何时间单位都适用于上述公式,但本导则中用小时。表 1 给出了用于不同绝缘系统温度下常数  $a$  的值,以 h 为单位。

表 1 寿命公式中的常数

绝缘系统温度 $T_I$ (耐热等级)	常数		绕组额定热点温度 $\theta_{HS,r}$
	$a$	$b$	
℃	h	K	℃
105(A)	3.10E-14	15 900	95
120(E)	5.48E-15	17 212	110
130(B)	1.72E-15	18 115	120
155(F)	9.60E-17	20 475	145
180(H)	5.35E-18	22 979	170
200	5.31E-19	25 086	190
220	5.26E-20	27 285	210

注 1: 不应该机械地理解按本公式计算的预期寿命。在按本公式计算的理论寿命到达后, 变压器承受过电压和系统短路引起的过电流的能力与新变压器相比肯定要变弱。如果不出现过电压和过电流, 则变压器还可以稳定地运行许多年。采取措施避免短路和安装足够的过压保护装置可以延长变压器的寿命。

注 2: 下列方程式用于确定绕组额定热点温度中的常数  $a$  和  $b$ :

$$\ln(180\ 000) = \frac{b}{\theta_{HS,r} + 273} + \ln(a)$$

$$\ln(90\ 000) = \frac{b}{\theta_{HS,r} + 6 + 273} + \ln(a)$$

表 1 是按每 6 K 老化率加倍计算的。

注 3: 大多数电力变压器在实际寿命中的运行负荷远低于满负荷, 因为热点温度如果低于额定值 6°C, 则寿命损失速率减半, 所以典型变压器的实际寿命大于 20 年。表 1 中的常数是基于 180 000 h、半差 6 K 得来的。

### 5.3 稳定连续负载和温度间的关系

绕组的稳态热力学热点温度  $T$ (K) 表示为:

$$T = 273 + \theta_a + \Delta\theta_{HSn} \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中:

$\theta_a$  ——环境温度(°C);

$\Delta\theta_{HSn}$  ——所考虑负载下绕组热点对环境的温升(K)。

注意环境温度可能与负载无关, 但也可能是负载的函数:

$$\theta_a = f(\text{电流}) \quad \dots\dots\dots(4)$$

该函数可能随场所不同而变化。在对老化率及寿命损失估算时, 有必要了解特定场所的环境温度与负载的相互关系。可通过在特定场所的试验来确定二者间的关系。如果没有这方面的资料, 则进行不同温度下(如: 10 °C ~ 40 °C)的等效计算可得到老化率和寿命损失之间的关系。

本部分给出的公式将涡流损耗作为绕组的电阻损耗处理。试验数据表明, 由这些公式计算的寿命损失比预期的高。如果有谐波电流存在, 则过载时增加的涡流损耗需要按照 GB/T 18494.1—2001 的附录 A 中的方法考虑。

### 5.4 热老化率

实际上, 变压器的正常寿命不低于 180 000 h。公式(5)中使用 180 000 h 作为保守的参考值, 来表示老化率  $k$ (h/h), 即在恒定热点温度  $T$ (K) 下运行每小时损失的寿命小时数:

$$k = 180\ 000 \times a^{-1} \times \exp\left(\frac{-b}{T}\right) \quad \dots\dots\dots(5)$$

在恒定热点温度  $T$ (K) 时的相对老化率百分数  $k_r$ (%), 表示为 180 000 h 寿命运行  $t$  小时后的寿命百分数(%), 按下式计算:

$$k_r = 100 \times t \times a^{-1} \times \exp\left(\frac{-b}{T}\right) \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中:

$t$  ——时间;

$a, b$  ——见表 1。

### 5.5 寿命损失

在恒定热点温度  $T$ (K) 下, 一段时间  $t$ (h) 内的寿命损失  $L_c$ (h) 按公式(7)计算:

$$L_c = t \times 180\ 000 \times a^{-1} \times \exp\left(\frac{-b}{T}\right) \quad \dots\dots\dots(7)$$

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  $^{\circ}\text{C}$ 。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。

### 5.7 假定的热点系数

在下面的考虑中，假定热点系数  $Z$  是 1.25：

$$\Delta\theta_{HS,r} = Z \times \Delta\theta_{wr} \dots\dots\dots(8)$$

式中：

$\Delta\theta_{HS,r}$  ——热点温升(K)；

$\Delta\theta_{wr}$  ——额定负载下绕组平均温升(K)。

### 5.8 在不同的环境温度和负载条件下的热点温升

计算寿命损失要求的基本值是热点温度。为此，有必要知道在每个负载条件和环境温度下的热点温升。

$$\Delta\theta_{HSn} = Z \times \Delta\theta_{wr} \times I_n^q \dots\dots\dots(9)$$

式中：

$\Delta\theta_{HSn}$  ——给定负载下绕组热点温升；

$I_n$  ——给定负载率；

$q$  ——自然冷却(AN)取 1.6，强迫风冷(AF)取 2；

$Z$  ——假定为 1.25。

$\Delta\theta_{wr}$  尽可能采用试验值，以限制与系数  $Z$  的有效性和与  $q$  值相关的不确定性。经验表明， $q$  和  $Z$  在不同变压器及不同的运行负载条件下取不同的值。

注：对某种绕组结构， $\Delta\theta_{wr}$  只能通过变压器样机、模型来确定。

### 5.9 负载公式

#### 5.9.1 连续负载

热点温度  $\theta_{HS}$  作为稳定条件下负载的函数，用下式计算：

$$\theta_{HS} = \theta_a + \Delta\theta_{HS} \dots\dots\dots(10)$$

对于自然冷却方式：

$$\Delta\theta_{HS} = \Delta\theta_{HS,r} [I]^{2m} \dots\dots\dots(11)$$

对于强迫风冷方式：

$$\Delta\theta_{HS} = \Delta\theta_{HS,r} \cdot (I^2 C_T)^x \dots\dots\dots(12)$$

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

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(°C)(用于式(11)中的自然冷却运行的变压器测试值与用于式(12)的强迫风冷运行的变压器测试值可能不同);
- $I$ ——负载率(负载电流与额定电流的比值);
- $C_T$ ——电阻温度修正系数;
- $m$ ——经验常数,等于 0.8(在没有试验数据情况下的建议值);
- $\theta_a$ ——环境温度(°C);
- $\theta_{HS}$ ——给定负载率  $I$  下的热点温度(°C);
- $T_K$ ——导体的温度常数,铝为 225,铜为 235;
- $X$ ——强迫风冷经验常数,等于 1(在没有试验数据情况下的建议值)。

试验数据表明,由上面公式算出的热点温度值偏保守。

自然冷却运行的指数  $m=0.8$  和强迫风冷运行的指数  $X=1$  是从自然冷却和强迫风冷传热的相互关系中导出的。试验证明,式(13)给出的电阻温度修正系数在预测强迫风冷运行时由于高损耗而产生的热点温升是需要的。

式(11)和式(12)忽略了绕组中的涡流损耗,涡流损耗与温度呈反向变化。除非有谐波电流存在,涡流损耗通常很低,公式结果偏于保守。

式(11)和式(12)均需要叠代计算。即使不考虑涡流损耗,由于使用了推荐的指数,加上考虑到强迫风冷运行条件下电阻随温度变化,因此也会导致热点温升计算结果偏于保守。如果有谐波电流存在的话,则过载期间增加的涡流损耗可能要依据 GB/T 18494.1—2001 的附录 A 进行考虑。

### 5.9.2 暂态负载

暂态过负载时的热点温升用下列公式确定:

$$\Delta\theta_t = (\Delta\theta_U - \Delta\theta_i) [1 - \exp^{-\frac{t}{\tau}}] + \Delta\theta_i \dots\dots\dots (14)$$

$$\theta_{HS} = \Delta\theta_t + \theta_a \dots\dots\dots (15)$$

式中:

- $\Delta\theta_i$ ——某负载率  $I_n$  开始时的起始热点温升(K);
- $\Delta\theta_t$ ——负载变化  $t$  时间后的热点温升(K);
- $\Delta\theta_U$ ——负载率  $I_n$  不发生变化情况下的最终热点温升(K);
- $t$ ——时间(min);
- $\tau$ ——给定负载下绕组的时间常数(min);
- $\theta_{HS}$ ——热点温度(°C);
- $\theta_a$ ——环境温度(°C)。

## 5.10 绕组时间常数的确定

### 5.10.1 概述

变压器时间常数的概念基于假设一个单一热源为一个受热体供热,而这个受热体的温升和输入的热量呈指数关系。时间常数定义为当负载发生变化时,其温升达到超过环境温度的稳定值的 63.2% 所需的时间。通常在五倍时间常数后达到稳态。因公开的试验数据表明高压和低压绕组的时间常数可能不同,因此,不同负载下的热点温度计算应分别进行。两个绕组的绝缘系统温度等级也可能不同。

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  $\tau_R$  为:

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

式中:

$\tau_R$ ——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);

$\theta_e$ ——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。

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

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  $m \neq 1$ ,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。

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

### 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  $I_i$  下的初始热点温升,可用公式(11)算出,计算如下:

$$\Delta\theta_i = \Delta\theta_{HS,r} [I_i]^{2m} \dots\dots\dots(19)$$

式中:

$I_i$ ——初始负载率(负载电流与额定电流比值)。

从表 2 中选择一个热点温度  $\theta_{HS}$  限值。用公式(10)确定在对应的环境温度下  $t$  时刻的允许热点温升。

表 2 绕组最高热点温度

绝缘系统温度(GB 1094.11) ℃	绕组最高热点温度 ℃
105 (A)	130
120 (E)	145
130 (B)	155
155 (F)	180
180 (H)	205
200	225
220	245

当热点温度超过表 2 给出的绕组最高热点温度时,计算寿命是不实际的,因为绕组材料可能发生变化。变压器负载导致的温度如果超过表 2 的限值,会使变压器处于在不可预测的短时间内出现故障的风险中。

$$\theta_{HS} = \theta_a + \Delta\theta_{HS} \dots\dots\dots(20)$$

式中:

$\theta_{HS}$ ——热点温度(℃);

$\Delta\theta_{HS}$ ——热点温升(K);

$\theta_a$ ——环境温度(℃)。

$$\Delta\theta_t = \Delta\theta_{HS} - \theta_a \dots\dots\dots(21)$$

式中:

$\Delta\theta_t$ ——负载变化后  $t$  时刻的热点温升(K)。

用公式(14)确定的最终的热点温升:

$$\Delta\theta_U = \left[ \frac{\Delta\theta_t - \Delta\theta_i}{1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)} \right] + \Delta\theta_i \dots\dots\dots(22)$$

式中:

$\Delta\theta_U$ ——最终热点温升(K)。

从 5.10 可得到时间常数  $\tau$ 。选择一个时间  $t$ ,作为负载持续时间,代入上述公式中。从公式(11)可知,对应的过载可如下得到:

$$I_U = \left( \frac{\Delta\theta_U}{\Delta\theta_{HS,r}} \right)^{\frac{1}{2m}} \dots\dots\dots(23)$$

式中:

$I_U$ ——最终负载率;

时间常数的确定也是一个叠代的过程。

## 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/°C	最大电流(p.u.)	最高热点温度/°C
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

注 1: 温度和电流的限值不是同时有效。可以将电流限制为比表中的值小,以满足温度限值要求。相反,可以将温度限制为比表中规定值小以满足电流限值要求。

注 2: 计算表明,在表中的最高热点温度下,一台新变压器的寿命只有几千小时。

### 6.2 其他限制

#### 6.2.1 金属结构件的漏磁场

随着电流的增加漏磁场也增加,这能导致金属结构件温度过高,从而限制过载。负载电流、热点温度及绕组和端子外的其他金属结构件的温度均不宜超过表 3 的限值。应该注意,当热点温度超过表 3 所列的最高温度时,绝缘系统特性显著降低,远小于变压器绝缘耐受最小值水平。

#### 6.2.2 附件和其他

除了绕组外,变压器的其他部件,如:套管、电缆接头、分接变换装置、分接开关、温度测量装置、避雷器和引线也可限制在 1.5 倍额定电流下运行。

#### 6.2.3 带外壳的变压器

当变压器有外壳时,过载情况下的寿命损失更大。

变压器在户内运行时,额定热点温升计算需考虑外壳的影响进行修正。

#### 6.2.4 户外环境条件

很多户外场所,阳光直射可急剧增加变压器的温度,超过额定电流运行时,应加以考虑。

风可改善变压器的散热效果,但它是不可预测的自然现象,因此不列入考虑范围。

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品不同,干式变压器大量使用了不同的绝缘材料。

### A.2 分子结构

#### A.2.1 概述

固体绝缘材料具有通用的分子结构,都是由较小的分子链组合成的长链。链上可能还有分支、六角形的环以及链间交联。

图 A.1 表示的是环氧分子结构。

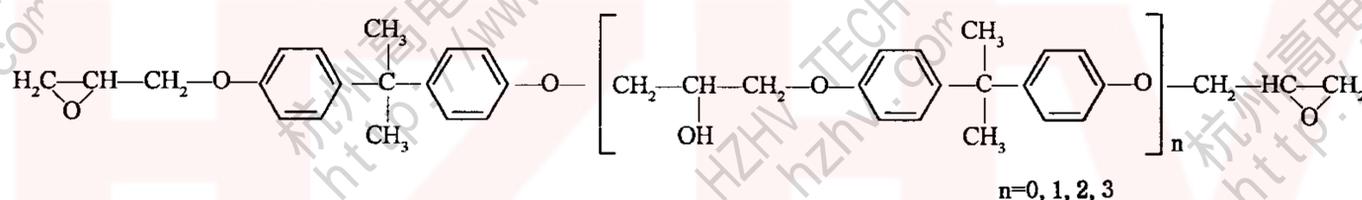


图 A.1 环氧分子结构

分子是运动的,在固体材料中,这些运动有振动的特点。当绕组导体中由损耗产生的热量(或其他热源)传到绝缘材料时,热能便在材料中转化为动能。由于动能增加,分子的振动便加快,振幅便加大,换一句话说,就是更剧烈。当它们之间的相互碰撞增加后,分子断裂成小分子的几率增加了。热量提供给材料的这类化学过程被称为吸热过程。

#### A.2.2 氧化

其他的反应机理也有可能存在,如:氧化。

化学反应的速率和温度有关,因而它也取决于传到绝缘材料的热量的多少。

绝缘材料不断发展,以实现在应用中的最佳性能。材料吸热过程中分子结构的改变也导致材料重要特性的变化,如:机械强度和绝缘强度、耐热冲击性能、密封性能。通常这些特性会下降。这些特性的下降速率可能是不相同的。“老化”一词通常用于表述这个化学过程,及与之相随的不同材料特性的下降。

#### A.2.3 长期耐热性能

##### A.2.3.1 概述

温度指数(TI)和半差(HIC)是两个术语,用于表征绝缘材料或绝缘系统的长期耐热特性。TI是从一定时间的长期耐热性关系得出的摄氏温度(°C)的数值。在GB/T 11026.1中这个时间是20 000 h。但原则上也可以规定其他时间。HIC是开氏温度的数值,表示在温度等于TI时取得的终点时间的一

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:

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

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  $8.314 \times 10^{-3} \text{kJmol}^{-1} \text{K}^{-1}$ 。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  $\text{kJmol}^{-1}$ 。

$A$  和  $k$  的基本单位是秒分之一( $\text{s}^{-1}$ ),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:

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

$1/k$  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:

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

式中:

- $h = 1/k$ ;
- $a = 1/A$ ;
- $b = E_a/R$ 。

等号两边取自然对数:

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

### 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  $170^\circ\text{C}$ 、 $160^\circ\text{C}$ 、 $150^\circ\text{C}$  和  $140^\circ\text{C}$ 。

试验中,有必要确定材料性能的终点(如:交流击穿电压)。终点可以确定为最小的绝对值(如:用  $\text{kV/mm}$ )或试验开始前的性能的百分比剩余值。标准中对某些材料和性能的这样的终点给出了建议,但不是所有的。GB/T 11026.1 提出了对某些材料性能的建议。其他情况下,终点的确定应该由材料供需双方协商。

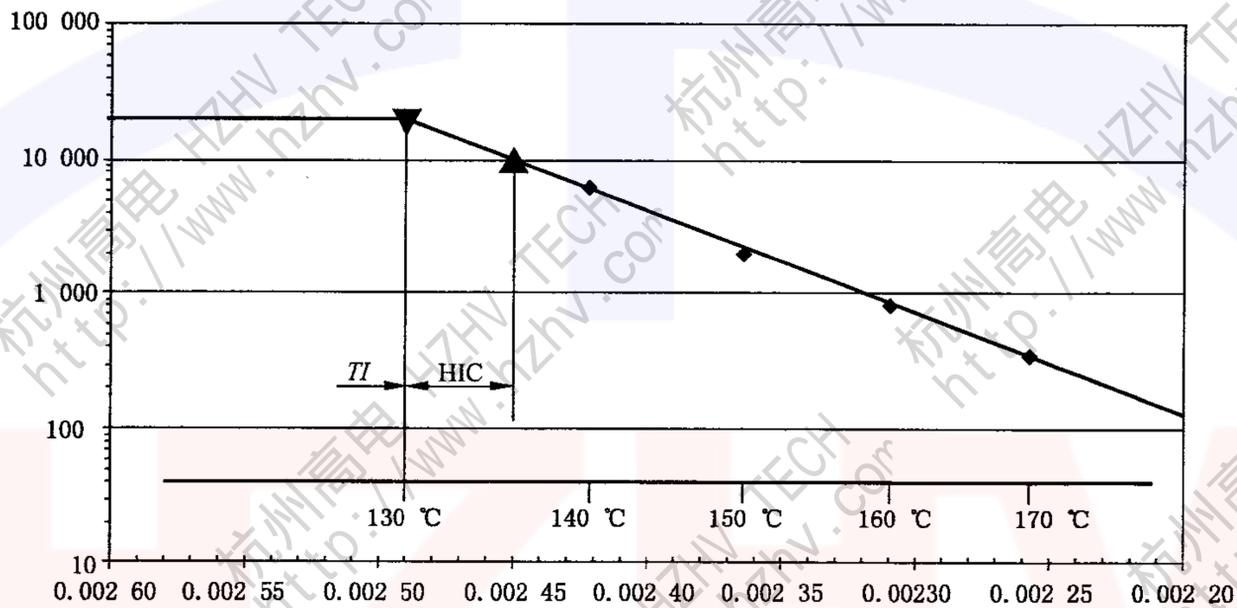
如:50%剩余值可能被确定为绝缘材料的寿命终点。但也不能理解得太机械。在标准中,规定的终

点主要是常规性的,而不是功能性的。材料的劣化是渐进的。终点并不代表变压器在“生”与“死”间有明显的界限。达到终点仅意味着特定材料的性能已经降低到其初始值的某一百分比,与新变压器相比,变压器的安全裕度和运行可靠性已经降低了。就电气性能而言,如果没有严重过电压发生,则变压器还能正常运行许多年。

同样地,如果没有电力系统中因短路产生的大的过电流,那么尽管机械性能已经下降了,但变压器仍会运行良好。

在图 A.2 中,根据耐热试验,四个点表示了不同温度 170 °C、160 °C、150 °C 和 140 °C 到终点所需的时间(小时)。沿四个点划一条回归线并延长与 20 000 h 坐标相交。交点处的温度为 130 °C。

因此,该材料特定性能的  $TI$  就是 130 °C。进一步说,回归线显示,温度增加大约 5 °C,在 10 000 h 后,材料会达到终点。半差 HIC 就是 5。



说明:

纵坐标轴——时间(对数坐标, h);

横坐标轴——热力学温度值的倒数(线性坐标,  $K^{-1}$ );

附加温度轴——摄氏度(非线性坐标, °C);

▼ —— 20 000 h 的估算温度;

▲ —— 10 000 h 的估算温度;

$TI$  —— 温度指数;

HIC —— 半差。

图 A.2 耐热图

因为不同的材料特性有不同的老化率,因此有必要为一个材料或者相同的材料给出几个温度指数和寿命减半周期。

详细的试验描述见 GB/T 11026.1~GB/T 11026.6 及 IEC 60216-5 和 IEC 60216-6。图 A.2 显示的是简化了的理想图形,恰好用来说明原理。实际上从材料样品上得到的结果会有一些的离散性,一部分是由于材料的变化引起的,一部分是由于测量的不确定性引起的。

在 GB/T 11026.3 中提供了从大量的试验数据中计算耐热性的详细说明,包括以统计学试验验证的有效性。如果材料中包含大量的无机成分,则可能就会明显的偏离。

本负载导则基于阿伦尼乌斯定律。

变压器绕组中的温度是不同的。绕组中某些区域的温度要高于其他区域。高温区材料的劣化速率最高。这些区域将首先到达寿命终点,并决定了整台变压器的运行可靠性。

变压器绕组的热点温度与平均温度之间的关系因设计不同而不同。计算热点温度的公式是通用的,并可能会有不确定性,这使得对变压器寿命损失的预测也有一定的不确定性。制造方应为其特殊设

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

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 11026.1—2003, IEC 60216-1:2001, IDT)

GB/T 11026.2 确定电气绝缘材料耐热性的导则 第2部分:试验判断标准的选择(GB/T 11026.2—2000, IEC 60216-2:1990, IDT)

GB/T 11026.3 电气绝缘材料 耐热性 第3部分:计算耐热特征参数的规程(GB/T 11026.3—2006, IEC 60216-3:2002, IDT)

GB/T 11026.4 确定电气绝缘材料耐热性的导则 第4部分:老化烘箱 单室烘箱(GB/T 11026.4—1999, IEC 60216-4-1:1990, IDT)

GB/T 11026.5 电气绝缘材料耐热性 第5部分:老化烘箱 温度达 300 °C 的精密烘箱(GB/T 11026.5—2010, IEC 60216-4-2:2000, IDT)

GB/T 11026.6 电气绝缘材料耐热性 第6部分:老化烘箱 多室烘箱(GB/T 11026.6—2010, IEC 60216-4-3:2000, IDT)

IEC 60216-5 电气绝缘材料 耐热性 第5部分 确定一种绝缘材料的相对耐热性指标(RTE) (Electrical insulating materials—Thermal endurance properties—Part 5: Determination of relative thermal endurance index (RTE) of an insulating material)

IEC 60216-6 电气绝缘材料 耐热性 第6部分 用固定时间法确定绝缘材料的耐热性指标(TI 和 RTE) (Electrical insulating materials—Thermal endurance properties—Part 6: Determination of thermal endurance indices (TI and RTE) of an insulating material using the fixed time frame method)

## 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 °C = 常数
绝缘系统温度：	130 °C (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：

$a = 1.72E-15$ h,  $b = 18\ 115$ 。

根据公式(5)计算老化率：

$k = 180\ 000 \times (1.72E-15)^{-1} \times \exp(-18\ 115/428) = 43.48$

这意味着每小时损失 43.48 h 寿命。

负载时间为 168 h, 在此温度下一周时间内的寿命损失为：

$43.48 \times 168 = 7\ 305$  h 寿命。

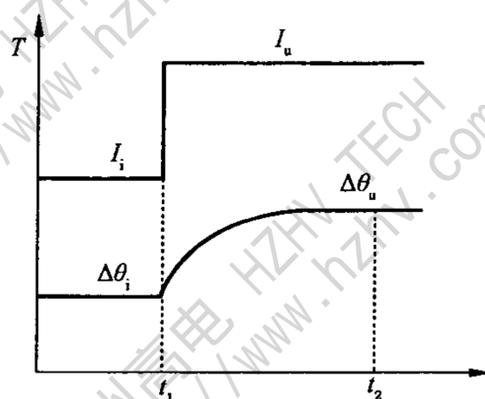
在额定热点温度为 120 °C 时的预计寿命是 180 000 h。热点温度为 155 °C 时一周的寿命损失占到变压器总预计寿命的：

$100 \times 7\ 305 / 180\ 000 = 4.06(\%)$

B.2 例二：持续时间为  $t_1$  的负载电流  $I_1$  和紧接着持续时间为  $t_2$  的负载电流  $I_2$ 。

## B.2.1 概述

当负载电流突然从  $I_1$  变为  $I_2$  时, 绕组热点温度按照指数函数[公式(14)]从初始温升  $\Delta\theta_1$  变为  $\Delta\theta_2$ , 如图 B.1 所示：



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

$I_i = 0.8$  p.u., 持续时间  $t_1 = 10$  h,  $I_i$  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:  $\tau_R = 0.5$  h;

环境温度:  $30$  °C, 恒定(与负载电流无关);

绝缘系统温度:  $155$  °C;

时间为 0 时绕组起始热点温度为  $\Delta\theta_{HSi}$ ;

额定电流下绕组平均温升  $\Delta\theta_{wr} = 80$  K;

自然冷却运行。

### B.2.3 计算

用公式(9)计算  $\Delta\theta_{HSi}$  和  $\Delta\theta_{HSu}$ :

$$\Delta\theta_{HSi} = 1.25 \times 80 \times 80 \times 0.8^{1.6} = 70 \text{ K};$$

$$\Delta\theta_{HSu} = 1.25 \times 80 \times 1.2^{1.6} = 134 \text{ K};$$

$$\Delta\theta_{HS,r} = 1.25 \times 80 = 100 \text{ K};$$

用公式(18)计算绕组热点温度从 70 K 变到 134 K 的时间常数:

$$\tau = 0.5 \times \frac{\frac{134}{100} - \frac{70}{100}}{\left(\frac{134}{100}\right)^{1.25} - \left(\frac{70}{100}\right)^{1.25}} = 0.399$$

用公式(14)计算从  $\Delta\theta_{HSi}$  变到  $\Delta\theta_{HSu}$  中间的任何时刻  $t$  时的  $\Delta\theta_{HS}$ :

$$\Delta\theta_{HS} = 70 + (134 - 70) \times [1 - \exp(-t/0.399)].$$

老化率随  $\Delta\theta_{HS}$  增加持续增大。见图 B.2。

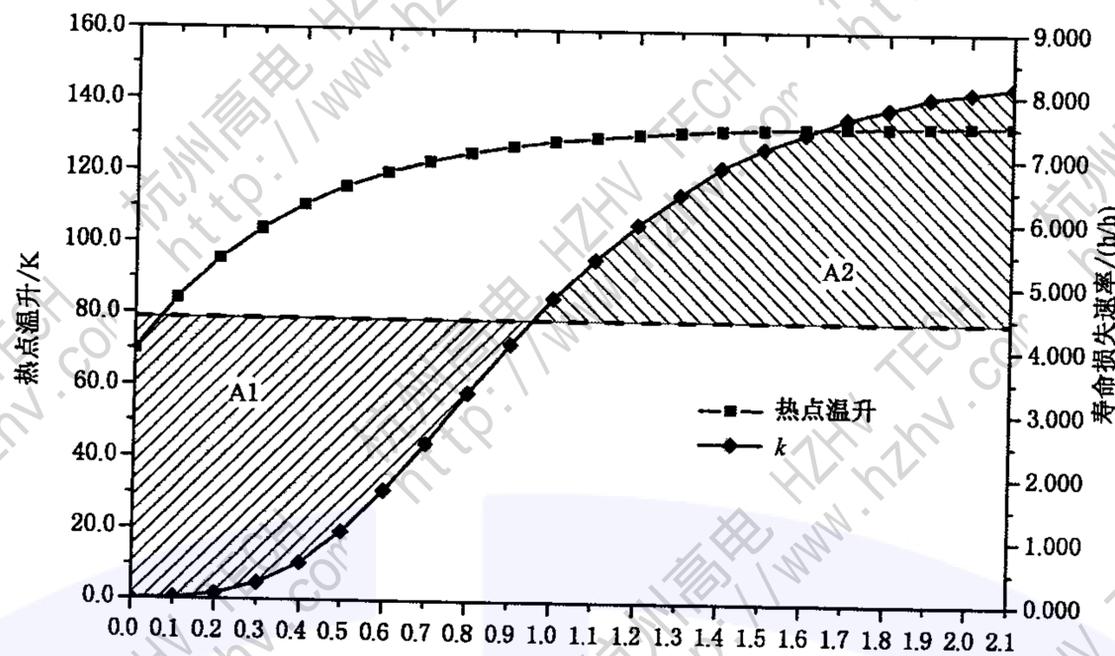
当  $t \approx 5 \times \tau = 5 \times 0.399 = 1.995$  h, 即 2 h 时,  $\Delta\theta_{HS} \approx \Delta\theta_{HSu}$ 。

为计算从  $\Delta\theta_{HSi}$  变到  $\Delta\theta_{HSu}$  这段暂态时间的寿命损失, 将热点温升  $\Delta\theta_{HS}$ 、热力学温度  $T$  和老化率  $k$  列在表 B.1 中, 时间区间是  $t - t_1 = 0 \sim 2$  h。

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 $L_c$ [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
0.4	110.5	413.5	0.587	0.058 7
0.5	115.7	418.7	1.085	0.108 5
0.6	119.8	422.8	1.743	0.174 3
0.7	122.9	425.9	2.480	0.248 0
0.8	125.4	428.4	3.283	0.328 3
0.9	127.3	430.3	4.054	0.405 4
1.0	128.8	431.8	4.783	0.478 3
1.1	129.9	432.9	5.396	0.539 6
1.2	130.8	433.8	5.952	0.595 2
1.3	131.5	434.5	6.422	0.642 2
1.4	132.1	435.1	6.853	0.685 3
1.5	132.5	435.5	7.156	0.715 6
1.6	132.8	435.8	7.392	0.739 2
1.7	133.1	436.1	7.634	0.763 4
1.8	133.3	436.3	7.800	0.780 0
1.9	133.5	436.5	7.970	0.797 0
2.0	133.6	436.6	8.056	0.805 6
2.1	133.7	436.7	8.143	0.814 3
				总寿命损失: $L_c = 9.715 7$

$\Delta\theta_{HS}$  和  $k$  对  $t$  的关系见图 B.2。



说明：  
 横坐标轴 ——  $t_1$  以后的时间(h)；  
 纵坐标轴 —— 左：热点温升(K)；  
                   右：寿命损失速率  $k$  (h/h)；  
 上部曲线 —— 热点温升(K)；  
 下部曲线 —— 对应热点温升的寿命损失速率。

图 B.2 热点温升和寿命损失

热点温升从  $\Delta\theta_{HSi}$  到  $\Delta\theta_{HSu}$  的 2 h 变化过程的寿命损失可以用  $k$  曲线下面的面积来表示。有几个方法来估算这个区域。一个简单的方法是画一条穿过图表的水平虚线。这条线的纵坐标使得用眼睛就能够看出区域 A1 和 A2 的面积相等。区域 A1 的边界是左边的纵轴、水平线以及  $k$  曲线。区域 A2 的边界是右边的纵轴、水平线以及  $k$  曲线。读取右轴的纵坐标值,  $k$  曲线下部区域的面积就等于纵坐标值和横轴右侧终点值的乘积。因此：

$$5.0 \times 2 = 10(\text{h})$$

这意味着在这 2 h 内热点温升从 70 K 变到 134 K, 其寿命损失为 10 h。

除此外, 还有热点温升为 70 K 时的 10 h 以及热点温升为 134 K 时的  $10 - 2 = 8$  h 的寿命损失。这两段时间的寿命损失可以按公式(7)计算如下：

$$L_{C1} = 180\,000 \times 10 \times (9.60\text{E}-17)^{-1} \times \exp[-20\,475/(273+100)] = 0.03 \text{ h}$$

$$L_{C2} = 180\,000 \times 8 \times (9.60\text{E}-17)^{-1} \times \exp[-20\,475/(273+164)] = 67.28 \text{ h}$$

它们分别是 0.03 h 和 67.28 h。

在 20 h 内总的寿命损失为：

$$0.03 + 9.71 + 67.28 = 77.02 \text{ h}.$$

确定曲线下部面积的其他方法有数学积分法、矩形法、梯形法或辛普森定律。

$k$  曲线具有的形状可以用一个多项式来描述, 这易于进行积分以得到曲线下部面积的大小。采用这种方法, 如果计算的步距为 0.01 h, 则寿命损失为 8.54 h。

### B.3 例三: 变化的负载电流

#### B.3.1 假设

在 24 h 周期中, 负载电流在 0.7 p.u. 和 1.2 p.u. 间变化。

绕组的额定时间常数  $\tau_R=0.5$  h。  
 环境温度:30 °C, 恒定(与负载电流无关)。  
 绝缘系统温度:180 °C。  
 额定电流下绕组平均温升  $\Delta\theta_{wr}=100$  K。  
 自然冷却运行。

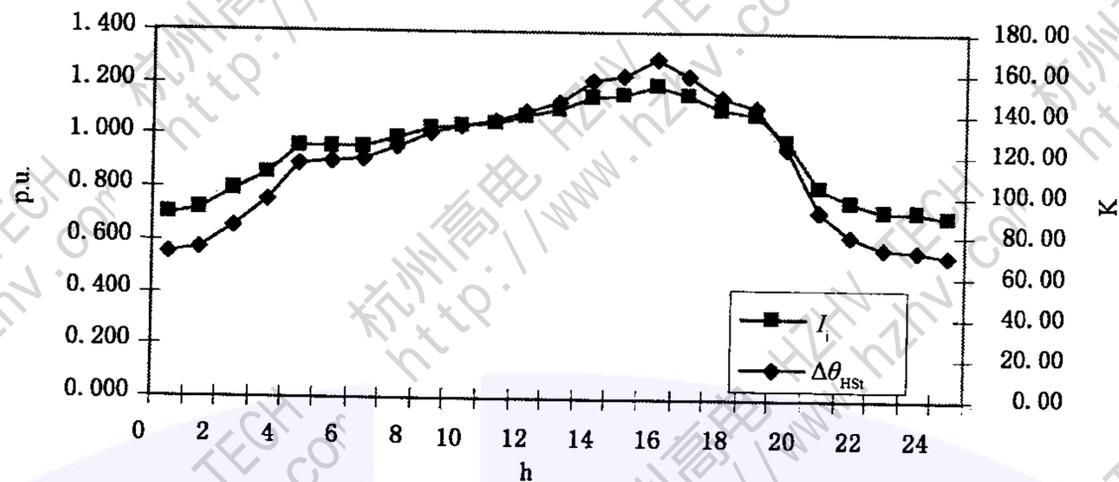
**B.3.2 计算**

负载周期见表 B.2 左边两列以及图 B.3。负载电流每小时记录一次。  
 为计算 24 h 周期内的寿命损失, 将热点温升  $\Delta\theta_{HS}$ 、热力学温度  $T$  和老化率  $k$  在表 B.2 中列出。

**表 B.2 变化负载的寿命损失计算**

时间 h	负载率 p.u.	最终热点温升 公式(9) K	时间常数 公式(18) h	热点温升 公式(14) K	热力学温度 公式(3) K	老化率 $k$ 公式(5) h/h
0	0.700	70.64	—	70.64	373.6	0.000
1	0.722	74.23	0.458	73.82	376.8	0.000
2	0.788	85.38	0.448	84.14	387.1	0.001
3	0.859	98.02	0.432	96.64	399.6	0.004
4	0.956	116.32	0.416	114.54	417.5	0.042
5	0.957	116.51	0.407	116.34	419.3	0.054
6	0.962	117.49	0.407	117.39	420.4	0.061
7	0.991	123.20	0.404	122.72	425.7	0.122
8	1.029	130.85	0.398	130.19	433.2	0.309
9	1.044	133.92	0.394	133.62	436.6	0.468
10	1.054	135.97	0.392	135.79	438.8	0.607
11	1.080	141.38	0.390	140.95	444.0	1.116
12	1.104	146.44	0.386	146.03	449.0	2.004
13	1.152	156.76	0.381	155.98	459.0	6.079
14	1.163	159.16	0.377	158.94	461.9	8.375
15	1.200	167.34	0.374	166.76	469.8	19.176
16	1.159	158.29	0.374	158.87	461.9	8.317
17	1.109	147.50	0.380	148.32	451.3	2.600
18	1.087	142.85	0.385	143.26	446.3	1.459
19	0.982	121.42	0.395	123.15	426.2	0.128
20	0.810	89.22	0.418	92.32	395.3	0.002
21	0.751	79.06	0.442	80.43	383.4	0.000
22	0.720	73.90	0.452	74.62	377.6	0.000
23	0.719	73.74	0.456	73.82	376.8	0.000
24	0.700	70.64	0.459	71.00	374.0	0.000

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(标么值)；

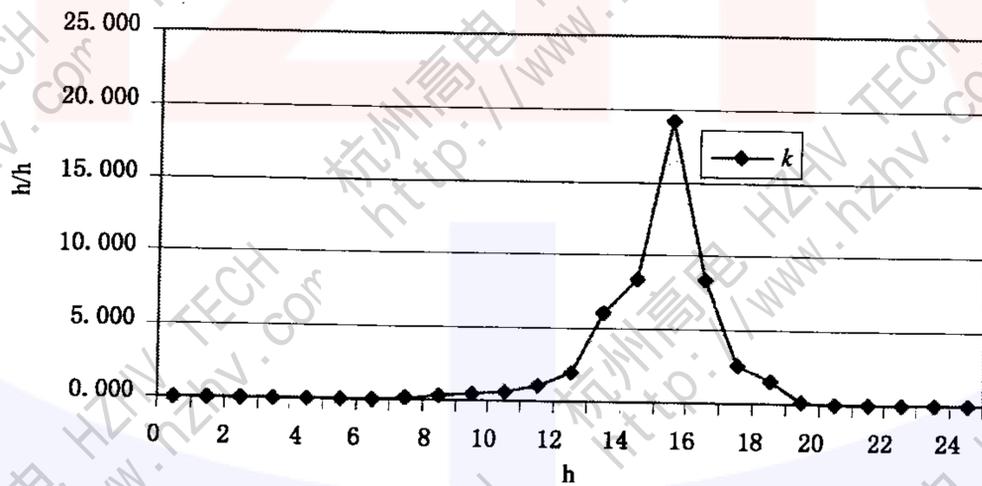
右：绕组热点温升(K)；

■——与左侧纵坐标轴对应的负载电流, \$I\_1\$；

◆——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。周期内的寿命损失为曲线下部的面积。



说明：

横坐标轴——时间(h)；

纵坐标轴——老化率(h/h)。

图 B.4 老化率与时间的关系

曲线下部面积可用辛普森公式积分求出：

$$\int_a^b f(t)dt = \frac{b-a}{6n} \times (y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + 2y_4 + \dots + 4y_{2n-1} + y_{2n})$$

式中的 \$2n\$ 为从 \$a\$ 到 \$b\$ 的等分数。

在前面例子中, \$2n=24\$ (\$n=12\$), 纵坐标 \$y\_0, y\_1, y\_2\$ 等是 \$k\$ 值, \$b=24, a=0\$。

表 B.3 就得以建立了：

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	$k \times$ 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  
 $L_e = 53.78$

图 B.4 曲线下的面积等于:

$$\frac{24}{6 \times 12} \times 161.34 = 53.78 \text{ (h)}$$

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
$k_r$	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
$L$	寿命	h	5.2
$L_c$	以热点温度 $T$ (k) 运行 $t$ (h) 的寿命损失	h	5.5
$m$	经验常数, 等于 0.8	—	5.9.1
$P_r$	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	5.10.2
$q$	在给定负载下计算热点温升的经验常数	—	5.8
$t$	时间	min	5.9.2
$T$	热点热力学温度	K	5.2
$TI$	温度指数	℃	5.2
$T_K$	导体的温度常数, 铝为 225, 铜为 235	—	5.9.1
$X$	用于强迫风冷的经验常数, 等于 1(在没有试验数据情况下的建议值)	—	5.9.1
$Z$	假设热点温度系数, 等于 1.25	—	5.7/5.8
$\theta_a$	环境温度	℃	5.3/5.9.1/ 5.9.2/5.12
$\theta_c$	空载时铁心对绕组热点温升的影响	K	5.10.2

表 C.1 (续)

符号	意义	单位	章条号
$\theta_{HS}$	给定条件(负载 $I$ 、环境温度……)下的热点温度	℃	5.6/5.9.1/ 5.9.2/5.12
$\theta_{HS,r}$	额定负载下,绕组计算或测量的额定热点温度	℃	5.2/5.9.1
$\Delta\theta_{HS}$	给定负载下的热点温升	K	5.9.1/5.12
$\Delta\theta_{HS,r}$	所考虑负载下绕组热点对环境的温升	K	5.7
$\Delta\theta_{HSn}$	给定负载下的绕组热点温升	K	5.3/5.8
$\Delta\theta_i$	某负载率 $I_n$ 开始时的起始热点温升	K	5.9.2
$\Delta\theta_t$	负载变化 $t$ 时间后的热点温升	K	5.9.2/5.12
$\Delta\theta_U$	负载 $I_U$ 持续直到热点温升稳定时的最终热点温升	K	5.9.2/5.12
$\Delta\theta_{wr}$	额定负载下的绕组平均温升	K	5.7
$\tau$	给定负载下绕组的时间常数	min	5.9.2
$\tau_R$	额定负载下绕组的时间常数	min	5.10.2

参 考 文 献

- [1] GB 1094.1 电力变压器 第1部分:总则
  - [2] GB 1094.2 电力变压器 第2部分:温升
- 



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](http://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

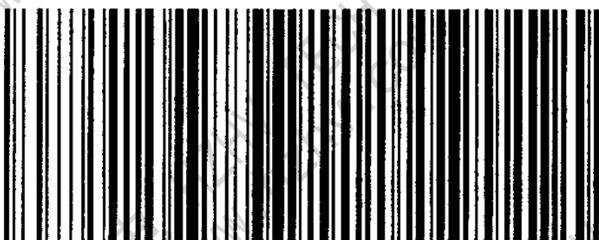
\*

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

如有印装差错 由本社发行中心调换  
版权专有 侵权必究  
举报电话:(010)68510107



GB/T 1094.12-2013