此标准由武汉华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

ICS 29.180
K 41

中华人民共和国国家标准

GB 1094.2—2013
代替 GB 1094.2—1996

电力变压器
第2部分：液浸式变压器的温升

Power transformers—
Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers

(IEC 60076-2:2011, MOD)

2013-12-17 发布　　2014-12-14 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会　发布

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

目　次

前言 …… I
1　范围 …… 1
2　规范性引用文件 …… 1
3　术语和定义 …… 1
4　冷却方式 …… 3
5　正常冷却条件 …… 4
6　温升限值 …… 4
7　温升试验 …… 7
附录 A（资料性附录）　用溶解气体分析法探测局部过热 …… 14
附录 B（资料性附录）　液浸式变压器温升试验技术 …… 17
附录 C（资料性附录）　用油箱内顶层液体温度确定 OFAF 和 OFWF 冷却变压器的热点温升 …… 23
附录 D（资料性附录）　绕组热点温升估算方法 …… 24
附录 E（资料性附录）　用光纤传感器监测绕组热点温度 …… 27
参考文献 …… 31

图 B.1　采用两个独立直流电源（每个绕组各一个）的低阻值绕组变压器的推荐测量电路 …… 18
图 B.2　采用一个直流电源（两个绕组共用）的另一种推荐测量电路 …… 19
图 B.3　断开电源后的绕组平均温度变化 …… 19
图 B.4　用拟合曲线 $\theta_w(t)=A_0-kt+g\times e^{-t/T_w}$ 外推出的冷却曲线 …… 22
图 D.1　ON 冷却系统的温升模型 …… 24
图 D.2　作为额定容量和导线宽度（W）函数的 Q 系数值 …… 25
图 D.3　饼式绕组中典型的液体流动路径 …… 26
图 E.1　光纤传感器在心式变压器饼式绕组上的应用 …… 28
图 E.2　光纤传感器在心式变压器换位导线上的应用 …… 29
图 E.3　光纤传感器在绕组垫块上的应用 …… 29
图 E.4　光纤传感器在壳式变压器高压绕组上的应用 …… 30

表 1　温升限值 …… 5
表 2　特殊运行条件下推荐的温升限值修正值 …… 6
表 3　温升试验结果修正指数 …… 13
表 A.1　油中溶解气体最小可检测值 S_D …… 15
表 A.2　温升试验时许可的气体增长率 …… 15
表 B.1　温升测量用变量表 …… 20
表 B.2　冷却曲线计算数据表示例 …… 21
表 C.1　某些特定变压器用常规温升试验数据结合计算得出的绕组热点温升值及用光纤传感器直接测量的绕组热点温升值 …… 23
表 E.1　建议的三相双绕组变压器传感器的最少数量 …… 27
表 E.2　建议的单相变压器传感器的最少数量 …… 27

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

前　言

本部分的第4章、第5章和第6章为强制性的，其余为推荐性的。

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2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 1094.2—1996《电力变压器　第2部分：温升》，与GB 1094.2—1996相比，主要技术变化如下：

——本部分只适用于液浸式变压器；

——标准名称改为“液浸式变压器的温升”；

——给出了与温升有关的术语和定义；

——绕组平均温升由上一版的65 K，改为ON及OF冷却方式的为65 K，OD冷却方式的为70 K；

——使用了热点温升限值参数；

——明确规定了温升试验时环境温度的测量方法；

——改进了温升试验方法；

——规定了温升试验时，试验场地的冷却空气温度宜介于5 ℃与变压器设计所依据的最高环境温度之间；

——给出了电源断开瞬间绕组平均温升的计算公式；

——增加了绕组热点温度的修正系数；

——详细介绍了ON和OD冷却下的热点温升的模型；

——介绍了电阻测量电路；

——详细介绍了温度曲线数值外推法计算过程；

——介绍了直接测量绕组热点温度时传感器的安装方法。

本部分使用重新起草法修改采用IEC 60076-2:2011《电力变压器　第2部分：液浸式变压器的温升》。

本部分与IEC 60076-2:2011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 1094.1代替了

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

IEC 60076-1；

——为适应我国的气候条件，在表 2 中增加了年平均温度为 15 ℃、月平均温度为 25 ℃和最高温度为 35 ℃时对温升限值的修正值；

——为符合我国的实际情况，在 7.2.1 第 1 段中，将进行温升试验时试验场地的最低空气温度由 10 ℃ 改为 5 ℃；

——为符合实际情况，将式(B.2)中的 $\theta_{om}(t)=A_0(1-kt)$ 修改为 $\theta_{om}(t)=A_0-kt$，将图 B.3 中的 $A_0(1-kt)$ 修改为 A_0-kt。

本部分还做了下列编辑性修改：

——将 7.3.3 的内容按产品不同分成了 7.3.3.1 和 7.3.3.2；

——将 IEC 60076-2:2011 中的附录 A、附录 B、附录 C 和附录 D 改为附录 C、附录 D、附录 B 和附录 A；

——将图 B.1 和图 B.2 中的标识 1 U、1 V 和 1 W 用 A、B 和 C 替换；2 U、2 V 和 2 W 用 a、b 和 c 替换；1N 用 N 替换；

——将式(B.1)、式(B.3)、式(B.12)、式(B.13)和图 B.4 中的 B 修改为 g；

——将 B.3 中温升测量用变量表作为表 B.1，将原表 B.1 作为表 B.2。

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、国家变压器质量监督检验中心、国网电力科学研究院、保定天威保变电气股份有限公司、特变电工沈阳变压器集团有限公司、西安西电变压器有限责任公司、华东电网有限公司、吉林省电力科学研究院、特变电工衡阳变压器有限公司、顺特电气设备有限公司、明珠电气有限公司、卧龙电气集团北京华泰变压器有限公司、广东钜龙电力设备有限公司、吴江变压器厂有限公司、中国电力科学研究院、中电电气(江苏)股份有限公司、广州骏发电气有限公司、卧龙电气银川变压器有限公司、新华都特种电气股份有限公司。

本部分主要起草人：张显忠、章忠国、李世成、任晓红、胡振忠、安振、李洪秀、韩晓东、姜益民、敖明、孙树波、李霞、蔡定国、何宝振、王文光、林灿华、韩筛根、徐子宏、樊建平、鲁玮、邓旭峰。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为：

——GB 1094.2—1985、GB 1094.2—1996。

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

电力变压器
第2部分：液浸式变压器的温升

1 范围

GB 1094 的本部分适用于液浸式变压器。本部分规定了变压器冷却方式的标志、变压器温升限值及温升试验方法。

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 1094.1 电力变压器 第1部分：总则（GB 1094.1—2013，IEC 60076-1：2011，MOD）

GB/T 13499—2002 电力变压器应用导则（idt IEC 60076-8：1997）

IEC 60085：2007 电气绝缘 耐热性评估及说明（Electrical insulation—Thermal evaluation and designation）

IEC 61181：2007 矿物油浸渍式电气设备 电气设备工厂试验溶解气体分析（DGA）的应用[Mineral oil-filled electrical equipment—Application of dissolved gas analysis (DGA) to factory tests on electrical equipment]

IEC 指南 115：2007 不确定度测量在电工领域合格性评定中的应用（Application of uncertainty of measurement to conformity assessment activities in the electrotechnical sector）

3 术语和定义

GB 1094.1 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

外部冷却介质 external cooling medium

变压器液体循环冷却系统外部的带走变压器损耗产生热量的介质（空气或水）。

3.2

内部冷却介质 internal cooling medium

与变压器绕组或其他部件接触的液体，通过它们将损耗产生的热量传给中间或外部冷却介质。

注：液体可以是矿物油或其他天然及合成液体。

3.3

温升 temperature rise

所考虑部件（部位）的温度（例如：绕组平均温度）与外部冷却介质的温度之差。

3.4

顶层液体温度 top-liquid temperature

θ_o

油箱顶部（冷却回路顶部）的绝缘液体温度。

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

3.5

顶层液体温升　top-liquid temperature rise

$\Delta\theta_o$

顶层液体温度与外部冷却介质温度之差。

3.6

底部液体温度　bottom-liquid temperature

θ_b

绕组底部位置或冷却液体入口处的绝缘液体温度。

3.7

底部液体温升　bottom-liquid temperature rise

$\Delta\theta_b$

底部液体温度与外部冷却介质温度之差。

3.8

液体平均温度　average liquid temperature

θ_{om}

顶层液体温度与底部液体温度的平均值。

3.9

液体平均温升　average liquid temperature rise

$\Delta\theta_{om}$

液体平均温度与外部冷却介质温度之差

3.10

绕组平均温度　average winding temperature

θ_w

在温升试验后期通过测量绕组直流电阻确定的温度值。

3.11

绕组平均温升　average winding temperature rise

$\Delta\theta_w$

绕组平均温度与外部冷却介质温度之差。

3.12

绕组平均温度梯度　average winding gradient

g

绕组平均温度与绝缘液体平均温度之差。

3.13

绕组热点温度　hot-spot winding temperature

θ_h

与固体绝缘或绝缘液体接触的绕组导体最热点的温度。

3.14

绕组热点温升　hot-spot winding temperature rise

$\Delta\theta_h$

绕组热点温度与外部冷却介质温度之差。

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

3.15

热点系数　hot-spot factor

H

无量纲系数，用于估算由于附加损耗增加以及液体流动不合理而导致的绕组局部温度梯度的增加。

注：系数 H 是两个系数 Q 和 S 的积(见 3.16 和 3.17)。

3.16

系数　factor

Q

无量纲系数，用于估算由于局部附加损耗增加而导致的绕组平均温度梯度的增加。

3.17

系数　factor

S

无量纲系数，用于估算由于液体流动不合理而导致的绕组局部平均温度梯度的增加。

3.18

热改性纸　thermally upgraded paper

一种经过化学方法改善而降低纸的降解率的纤维纸。

如果将一种纸放入密封管中，在 110 ℃下经过 65 000 h 或在式(1)给出的时间/温度组合后还能保持 50%的抗拉强度，则称其为热改性纸。

$$t = 65\ 000 \times e^{\left(\frac{15\ 000}{\theta_h+273} - \frac{15\ 000}{110+273}\right)} \qquad \cdots\cdots(1)$$

式中：

t——时间，单位为小时(h)。

注 1：可通过部分去除形成水的物质或用稳定剂等物质抑制水的生成来降低老化影响。

注 2：可选用的试验方法以氮含量为基准，见 GB/T 1094.7。

4　冷却方式

4.1　标志符号

变压器应按其冷却方式进行标志。对于液浸式变压器，其冷却方式采用下面四个字母进行标志。

第一个字母(代表内部冷却介质)：

——O：矿物油或燃点不大于 300 ℃的合成绝缘液体；

——K：燃点大于 300 ℃的绝缘液体；

——L：燃点不可测出的绝缘液体。

第二个字母(代表内部冷却介质的循环方式)：

——N：流经冷却设备和绕组内部的液体流动是自然的热对流循环；

——F：冷却设备中的液体流动是强迫循环，流经绕组内部的液体流动是热对流循环；

——D：冷却设备中的液体流动是强迫循环，且至少在主要绕组内部的液体流动是强迫导向循环。

第三个字母(代表外部冷却介质)：

——A：空气；

——W：水。

第四个字母(代表外部冷却介质的循环方式)：

——N：自然对流；

——F：强迫循环(风扇、泵等)。

注 1：本部分中，K 类和 L 类绝缘液体的使用只是从环保和安全的角度来考虑的。

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

注2：在强迫导向液体循环(第二个字母为D)变压器中，流经主要绕组的液体流量是由泵决定的，原则上不是由负载决定的。流经冷却设备的一小部分液体流量，可以有控制地导向流过铁心和主要绕组外的其他部分，以使其得到冷却。调压绕组和/或其他容量较小的绕组也可以采用非导向液体循环。

在强迫非导向液体循环(第二个字母为F)变压器中，流经所有绕组的液体流量是随负载变化的，与冷却设备的泵的流量没有直接关系。

4.2 具有多种冷却方式的变压器

一台变压器可规定有几种不同的冷却方式。此时，在说明书和铭牌上应给出不同冷却方式下的容量值，以便在采用某一冷却方式及所规定的容量下运行时，变压器温升不会超过限值，见GB 1094.1。

在最大冷却能力下的容量值就是变压器(或多绕组变压器某个绕组，见GB 1094.1)的额定容量，不同的冷却方式按冷却能力增大的次序排列。

举例如下：

——ONAN/ONAF：变压器装有一组风扇，在大负载时，风扇可投入运行。在这两种冷却方式下，液体流动均按热对流方式循环；

——ONAN/OFAF：变压器装有油泵和风扇类冷却设备，也规定了在自然冷却方式下(例如：辅助电源出现故障或容量不足的情况下)降低的容量。

5 正常冷却条件

5.1 空气冷却方式变压器

电力变压器正常环境温度限值见GB 1094.1。

考虑到正常温升的要求，变压器安装场所的温度不宜超过：

——任何时刻：40 ℃；

——最热月平均：30 ℃；

——年平均：20 ℃。

注：平均温度由下列气象数据得出(见GB 1094.1)：

——月平均温度：某一月份中，日最高温度的平均数与日最低温度的平均数之和的一半的多年统计值；

——年平均温度：全年中，各月平均温度之和的1/12。

5.2 水冷却方式变压器

水冷却方式变压器的正常冷却条件为冷却器入水口处的冷却水温度在任何时候均不应高于25℃或年平均温度不应高于20 ℃。

如果运行时的水温超过上述值，则应规定较低的温升(见GB 1094.1)。

6 温升限值

6.1 概述

温升的要求应按下述不同的选择来规定：

——在额定容量下连续运行时的一组要求(见6.2)；

——如果规定了负载周期，应明确给出与此有关的一组附加要求(见6.4)。

注：此附加的一组要求主要用于系统中的大型变压器，因其在急救负载下的运行情况需要特别注意。一般不宜用于中、小型变压器。

本部分假定，变压器各部位的运行温度是外部冷却介质(周围的环境空气或冷却水)温度与该部位

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

温升之和。

如无另行规定，则正常温升限值适用。有其他规定时，温升限值应按 6.3 修正。

温升限值不允许有正偏差。

6.2 额定容量下的温升限值

对于分接范围不超过±5%，且额定容量不超过 2 500 kVA(单相 833 kVA)的变压器，温升限值适用于与额定电压对应的主分接(见 GB 1094.1)。

对于分接范围超过±5%或额定容量大于 2 500 kVA 的变压器，在适当的分接容量、分接电压和分接电流下，温升限值对所有分接都适用。

注 1：不同分接下的负载损耗是不同的，且当规定了是变磁通调压时，空载损耗也是不同的。

注 2：对于独立绕组变压器来说，其最大负载损耗的分接一般是具有最大电流的分接。

注 3：对于带分接的自耦变压器来说，具有最大负载损耗的分接取决于分接的布置。

对于多绕组变压器，当一个绕组的额定容量等于其余绕组的额定容量之和时，其温升要求是指所有绕组均同时在各自额定负载下的。如果情况不是这样，则应选定一种或多种特定的负载组合，并相应地规定其温升限值。

在变压器的两个或多个绕组部分是上下排列的情况下，如果它们的尺寸和额定值相同，则绕组温升限值适用于两个绕组测量值的平均值。

表 1 给出的温升限值适用于具有 IEC 60085:2007 规定的绝缘系统温度为 105 ℃的固体绝缘，且绝缘液体为矿物油或燃点不大于 300 ℃的合成液体(冷却方式的第一个字母为 O)的变压器。

这些限值是指在额定容量下连续运行，且外部冷却介质年平均温度为 20 ℃时的稳态条件下的值。

如果制造方与用户间无另行规定，则表 1 给出的温升限值对牛皮纸和改性纸(也参见 GB/T 1094.7)均适用。

表 1 温升限值

要　求	温升限值 K
顶层绝缘液体	60
绕组平均(用电组法测量)： ——ON 及 OF 冷却方式 ——OD 冷却方式	 65 70
绕组热点	78

对于铁心、裸露的电气连接线、电磁屏蔽及油箱上的结构件，均不规定温升限值，但仍要求其温升不能过高，以免使与其相邻的部件受到热损坏或使绝缘液体过度老化。

注 4：某些设计中，为了满足绕组热点温升限值，可能要求顶层绝缘液体或绕组平均温升低于表 1 中的规定值。

注 5：确定绕组热点温升的方法见 7.10。

注 6：对于浸入矿物油中的大型电力变压器，温升试验中进行油中溶解气体分析(DGA)可作为查找异常过热的手段(参见附录 A)。

注 7：对于大型电力变压器，油箱和油箱盖的温升可用红外摄像机检查。

对于大量用螺栓连接的电阻特别小的绕组(例如：一些电炉变压器的低压绕组)，用电阻法来测量绕组平均温升可能很困难，且测量不确定度较大。此时，经过制造方与用户协商，绕组温升要求可以仅限于热点温升，此热点温升应通过直接测量来得到。

对于采用高温绝缘系统或浸入难燃液体(冷却方式的第一个字母为 K 或 L)的变压器的温升限值，

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

按照协议执行。

6.3 特殊冷却条件下修正的要求

6.3.1 概述

如果拟安装场所的运行条件不符合第5章给出的正常冷却条件，则变压器温升限值应按以下给出的规则修正。

6.3.2 空气冷却方式变压器

如果安装场所的外部冷却介质的温度有一项或多项超出5.1给出的正常值，那么表1给出的所有温升限值应按超出的数值予以修正，并应修约到最接近温度的整数值(K)。

表2为推荐的环境温度参考值及相应的温升限值修正值。

表2 特殊运行条件下推荐的温升限值修正值

环境温度 ℃			温升限值修正值 K[a]
年平均	月平均	最高	
15	25	35	+5
20	30	40	0
25	35	45	−5
30	40	50	−10
35	45	55	−15
[a] 相对于表1的值。			

注1：对于环境温度低于表2的情况没有给出规定。如用户无另行规定，则表1的温升限值适用。

注2：表2所列值可以用插值法求得。

如果安装场所的海拔高于1 000 m，而试验场所的海拔低于1 000 m时，则试验时允许的温升限值应按如下的规定降低：

——对于自冷式(冷却方式标志的后两位字母为AN)变压器，顶层液体温升、绕组平均温升和绕组热点温升限值应按安装场所的海拔高于1 000 m的部分，每增加400 m时降低1 K；

——对于风冷式(冷却方式标志的后两位字母为AF)变压器，则应按安装场所的海拔高于1 000 m的部分，每增加250 m时降低1 K。

如果试验场所的海拔高于1 000 m，而安装场所的海拔低于1 000 m时，则应做相应的逆修正。

因海拔而做的温升修正值，均应修约到最接近温度的整数值。

因冷却介质温度高或安装场所海拔高而将变压器的规定温升限值降低时，均应标志在铭牌上(见GB 1094.1)。

注3：当标准变压器拟用于高海拔地区时，其容量的降低值，可以用相应的冷却条件及额定条件下的温升限值计算。

6.3.3 水冷却方式变压器

如果安装现场的冷却水的最高温度和/或年平均温度超过5.2的值，则所有规定的温升限值均应按超出的数值予以降低，并应修约到最接近温度的整数值(K)。

注：以上给出的规则不适用于水温低于正常值的情况。此时，需要制造方与用户进行协商。

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

不同的环境温度或海拔对油箱冷却的影响应不考虑。

6.4 规定负载周期下的温升

由制造方与用户协商确定温升限值的保证值和/或规定与负载周期运行相关的特殊试验(参见GB/T 1094.7)。

7 温升试验

7.1 概述

本章阐述了在工厂试验时确定温度和温升的程序，以及用等效试验程序代替运行负载的方法。

温升试验时，变压器应装有其保护装置(例如：气体继电器)，应记录试验时保护装置出现的任何现象，并进行调查、分析。

如果变压器具有多个额定容量值(例如：有两种或多种冷却方式)，则原则上温升试验应在每个额定容量下进行，但经制造方与用户协议，试验的数量可以减少。

7.2 冷却介质温度

7.2.1 环境温度

进行温升试验，试验场地的冷却空气温度宜介于5 ℃与变压器设计所依据的最高环境温度之间。

当试验场地的温度不在上述温度范围内时，对试验结果的解释应得到制造方与用户的认可。

应至少采用4个传感器，并取其读数的平均值来确定环境温度，以对试验结果进行评估。

注：在对大型变压器进行试验时，为减少不确定度对读数平均值的影响，传感器的数量宜达到6个。

每隔一定时间(例如：每10 min)记录读数，或采用自动连续记录。

对于ONAN变压器，其周围的环境温度传感器应放置在冷却表面高度约一半的位置处。

传感器应沿油箱四周分布，距油箱和冷却表面约2 m的距离，避免直接受热辐射的影响。

对于强迫风冷变压器，温度传感器应放置在距冷却器进风口处约0.5 m的位置。

如果独立的冷却设备放置在距变压器油箱至少3 m处，则冷却设备周围的环境温度应按照上面的方法测量。

应注意热空气的再循环，变压器宜放置在适当的位置，以尽量减少空气阻力，提供稳定的环境条件。

宜采取措施，以减小冷却空气温度的变化，特别是在试验后期接近稳定状态时，宜采取适当的措施，防止由空气湍流而引起剧烈的温度变化(例如：为温度传感器配备时间常数与变压器时间常数近似的适当的吸热容器)。

7.2.2 冷却水温度

温升试验时，冷却水的温度宜介于5 ℃与变压器设计的最高冷却水温度之间。

当试验场地的冷却水温度不在上述温度范围内时，对试验结果的解释应得到制造方与用户的认可。

温度应在冷却器入口处测量。温度和流量应定期(例如：每10 min)测量，或使用自动连续记录仪。

应采取措施，减少试验期间冷却水流量和温度的变化。

7.3 温升的试验方法

7.3.1 概述

测定稳态温升的标准方法是采用短路接线的等效试验法(见7.3.2)。

在特殊情况下，也可以按协议对适当的负载施加额定电压和额定电流。这主要适用于额定容量较

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

小的变压器。

也可按协议采用“相互负载法”。这种方法是选用两台变压器并联连接，其中一台是被试变压器，对被试变压器施加额定电压励磁。通过两台变压器不同的电压比，或采用另外输入电压的方法使被试变压器绕组内流过额定电流。

7.3.2 双绕组变压器的短路试验法

试验时，不是同时施加额定电压和额定电流，而是施加由计算得出的总损耗。总损耗的值可由已测出的空载损耗和参考温度下的负载损耗(见 GB 1094.1)之和得到。

试验的目的：

——测定在稳态条件及总损耗下的顶层液体温升和液体平均温升；

——测定在额定电流及按上述测定的液体平均温升下的绕组平均温升；

——测定在额定电流及按上述测定的顶层液体温升下的绕组热点温升。

为达到上述目的，试验分两个阶段进行：

——施加总损耗(试验第一阶段)

当施加对应于变压器最大总损耗的试验电流时(见 GB 1094.1)，可以测定顶层液体温升和液体平均温升。由于试验电流比额定电流大(因为施加了总损耗)，因而绕组温升将相应地增高。试验中，要监测顶层液体和冷却介质的温度，试验需持续进行，直到液体的温升稳定为止。

当顶层液体温升的变化率小于 1 K/h，并至少维持 3 h 时，本试验阶段可以结束。如果每隔一定时间记录离散的温度值，则取最后 1 h 内读数的平均值作为试验的结果；若使用自动连续记录装置，则取最后 1 h 内的平均值。

——施加额定电流(试验第二阶段)

顶层液体温升测定之后，应立即将试验电流降至额定电流继续试验。持续 1 h，在此期间应至少每间隔 5 min 记录一次顶层液体、绕组热点(如果测量)和外部冷却介质温度，并连续记录。施加额定电流 1 h 结束时，应迅速切断电源和打开短路接线，测量两个绕组的电阻(参见 7.8 和附录 B)；或在不切断电源的情况下，采用叠加法(即在绕组的负载电流上叠加一低值直流电流的方法)测量绕组直流电阻。

根据绕组电阻值变化，并考虑电流降到额定电流时液体温度的降低以及外部冷却介质温度的变化来确定变压器两绕组的平均温度。

如果提供了直接测量绕组热点温度的方法，则相应的温升便可用断开连线前的最高热点温度读数值及按 7.10.3 确定的修正值(因为在电流降到额定电流时液体温度会降低)来得出。

通过协商，试验的两个阶段可合成为一个程序，即施加一个介于负载损耗和总损耗之间的功率。顶层液体温升、液体平均温升和绕组温升应按 7.13 的修正规则确定。试验时施加的功率应至少为总损耗的 80%。

7.3.3 特殊情况下变压器试验的补充

7.3.3.1 分接范围大于±5%或额定容量大于 2 500 kVA 的双绕组变压器

如无另行规定，则其温升试验是在最大电流分接(见 GB 1094.1)下进行，且在试验的第二阶段施加的电流是该分接的电流(见 7.3.2)。

在试验第一阶段(见 7.3.2)中施加的总损耗，应等于任一分接(对应于分接位置)上总损耗的最大值。此分接往往是(但不总是)最大电流分接。此试验阶段测定最大顶层液体温升值。在计算最大电流分接下的绕组温升时，所用的液体平均温升与该分接的总损耗相对应。若用其他数据，则应对从试验的第一阶段中获得的数值重新计算。

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

7.3.3.2 多绕组变压器

如果一个绕组的额定容量等于其余绕组的额定容量之和，则试验第一阶段所施加的总损耗应与所有绕组额定容量(或分接容量)相对应。

如果存在着多组规定的负载组合时，则测定液体温升应在产生最大总损耗的情况下进行。

绕组高于液体的温升值，应在该绕组通过额定电流时求得。

测定绕组对于冷却介质的温升时，相关负载下的液体温升，应根据所施加的总损耗按照 7.13 进行修正，每个绕组高于液体的温升值也要进行修正。

多绕组变压器的损耗按 GB/T 13499—2002 的规定进行重新计算。

测定液体温升可以选用以下任一方式施加总损耗：

——尽可能接近实际负载的方式，对某一绕组施加与总损耗对应的电流，将其余绕组同时短接或接适当的阻抗；

——近似的方式，某些绕组不短路或不闭合(例如：如果某绕组额定容量较低，且损耗只占总损耗的一小部分，则可将此绕组开路)，提高其他相关绕组的电流，直到获得所需的总损耗。

如果由于试验设备的限制，上述两种方式都不完全适用时，则可协商将损耗降低到基准值的 80%，然后按照 7.13 进行修正。

多种组合冷却方式变压器的温升试验方法，应在招标阶段提出，并达成一致。

对于多铁心变压器，当绕组没有外部引出线时，其温升试验方法宜在订货时达成一致。可采用附加的试验套管进行试验。

7.4 液体温度的测定

7.4.1 顶层液体温度

顶层液体温度 θ_o 通常用一个或多个浸入油箱内顶层液体中的温度传感器或箱盖上的传感器座中的温度传感器测定。

传感器座数量推荐如下：

——额定容量不小于 100 MVA： 3 个；

——额定容量从 20 MVA 至小于 100 MVA： 2 个；

——额定容量小于 20 MVA： 1 个。

传感器座宜尽可能设置在可代表对应绕组的顶层液体温度的位置。

如果传感器座数量大于 1，则应用传感器读数的平均值作为温度值。

注 1：受设计影响，在箱体顶部不同部位的液体温度可能不同。箱盖上的传感器座可能会受到涡流的影响。

注 2：在强迫液体循环变压器中，冷却设备中的液体是绕组中和绕组外液体的混合液流，在油箱的不同部位或各个联管的液体温度可能并不一致。有关强迫液体循环变压器顶层液体温度的意义参见附录 C。

经制造方与用户协商，可以认为箱盖上传感器座上的显示温度与冷却设备入口的液体温度的平均值为顶层液体温度。

对 2 组冷却器或 3 组片式散热器及以上的集中导油布置方式的进出油管应采用内植入方法测温。

注 3：冷却设备入口处的液体温度应通过设置在联管中心的传感器测量。

7.4.2 底部液体温度和液体平均温度

“底部液体”是指从底部进入绕组的液体。实际上，其温度是用从冷却设备回到油箱内的液体的温度来表示的。

底部液体温度(θ_b)是由装置在冷却器或散热器回到油箱中的联管处的温度传感器测定的。如果装有几组冷却器，则应使用多个温度传感器，并用其平均值作为底部液体温度(联管处的液体温度测量方

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

法按 7.4.1)。

注 1：如果通过泵来强迫液体循环，则返回液联管处的液流可能会出现湍流；如果通过散热器自然循环，则主要出现层流。这些现象对于测定液体联管处的液体温度来说是很重要的。

液体平均温度原则上是绕组内的冷却液体的平均温度。

液体平均温度(θ_{om})用于计算绕组平均温度梯度及某个温升试验结果的修正(见 7.13)。

液体平均温度为：

$$\theta_{om}=\frac{\theta_o+\theta_b}{2}$$

注 2：对于 2 500 kVA 及以下，具有平滑箱壁、波纹箱壁或散热管直接焊到箱壁上的液浸自冷式(ONAN)变压器，其高于环境温度的液体平均温升可取顶层液体温升的 80%。

7.5 顶层液体温升、液体平均温升和底部液体温升的确定

顶层液体温升($\Delta\theta_o$)应由两个温度之差决定，一个是在施加总损耗的试验阶段结束时测得的顶层液体温度(θ_o)，一个是在施加总损耗的试验阶段结束时的外部冷却介质温度(θ_a)，即：

$$\Delta\theta_o=\theta_o-\theta_a$$

液体平均温升($\Delta\theta_{om}$)应由按 7.4.2 计算的液体平均温度(θ_{om})和外部冷却介质温度(θ_a)之差确定，即：

$$\Delta\theta_{om}=\theta_{om}-\theta_a$$

底部液体温升($\Delta\theta_{ob}$)应由按 7.4.2 计算的底部液体温度(θ_b)与外部冷却介质温度(θ_a)之差确定，即：

$$\Delta\theta_{ob}=\theta_b-\theta_a$$

注：液体温度为施加总损耗试验阶段最后 1 h 读数的平均值。

7.6 绕组平均温度确定

绕组平均温度是通过测量绕组电阻确定的。

对于三相变压器，其电阻测量通常应包含中间相绕组。

对于星结或低电压且大电流绕组，测量应在线路端子间进行，以便将中性点引线从试验回路中排除。

变压器应在稳定的环境温度下，进行参考量(R_1、θ_1)的测量(见 GB 1094.1)。

断开电源后，测得电阻为 R_2，外推到断开电源瞬间，则可得到温度 θ_2 值为：

$$\theta_2=\frac{R_2}{R_1}(235+\theta_1)-235 \quad (\text{对于铜})$$

$$\theta_2=\frac{R_2}{R_1}(225+\theta_1)-225 \quad (\text{对于铝})$$

式中：

θ_2——电源断开瞬间的绕组平均温度。

公式中，温度的单位为℃。

注：对于特大型变压器的低压绕组，宜特别注意电源断开后电阻测量时的金属触头间可能产生的热电偶电动势。

7.7 电源断开瞬间的绕组电阻测定

电源断开瞬间的绕组电阻(R_2)应按下述方法确定：

在切断电源和断开短路接线后，立即将待测电阻的绕组两端接入直流测量电路。

因为当绕组开始冷却时，绕组电阻随时间发生变化，故测量时间应足够长，以便允许用外推法推算出电源切断瞬间的绕组温度。

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

由于绕组的电气时间常数(L/R)较大，因而只有经过一段延时后，才能测得准确的电阻值。

可通过尽可能减少断开试验线路与接通电阻测量电路的时间，及合理选择电路参数以减少电气时间常数的方式来减少延迟时间。

电阻测定时，冷却设备最好保持不变。如果升温时泵在运行，则在电阻测量时泵也宜保持运行。

推荐的详细测量方法参见附录 B。

7.8 电源断开瞬间绕组平均温升的确定

绕组平均温度应按 7.6 规定采用电源断开瞬间的电阻值确定。

在施加额定电流的 1 h 结束时刻，液体平均温度已从总损耗下的温度下降，故绕组平均温度值应加上液体平均温度的下降值。

修正的绕组平均温升 $\Delta\theta_w$ 为：

$$\Delta\theta_w = \theta_2 + \Delta\theta_{ofm} - \theta_a$$

式中：

θ_2 ——电源断开瞬间的绕组平均温度；

$\Delta\theta_{ofm}$ ——在额定电流下 1 h 试验期间的液体平均温度的降低值；

θ_a ——施加总损耗试验结束时的外部冷却介质温度。

推荐的详细的测量方法参见附录 B。

注：多绕组变压器的试验方法应由制造方与用户商定。

7.9 绕组平均温度对液体平均温度梯度的确定

绕组平均温度对液体平均温度梯度(g)应采用未修正的绕组平均温度(θ_2)与电源断开瞬间的液体平均温度(θ_{om})之差决定，梯度 g 为：

$$g = \theta_2 - \theta_{om}$$

7.10 绕组热点温升的确定

7.10.1 概述

对于额定容量不小于 20/3(MVA/相)的变压器，绕组热点温升应以温升试验结果为基础，采用制造方与用户同意的方法通过计算确定。

作为特殊试验，如果制造方与用户同意，则绕组热点温升也可以通过直接测量得到。

对于额定容量小于 20/3(MVA/相)的变压器，绕组热点温升既不需直接测量也不需计算。通常认为绕组平均温升也足以满足热点温升要求。

对于特别重要或有特殊运行条件(例如：核电站或大容量自循环等)的变压器，由于要求更严格，因此绕组热点温升可以通过计算和直接测量，并对两种结果进行比较来确定。

对于自耦变压器，其温升限值参考等效容量的双绕组变压器的温升限值。

7.10.2 通过计算确定

制造方应向用户提交一份关于热点位置及其温升估算值的研究报告。该研究应根据：

——不直接测量热点温度的温升试验结果；

——有关确定附加损耗分布的漏磁场方面的资料；

——附加损耗较大的绕组内部绝缘液体循环模式的资料。

注：原则上，绕组热点温升的评估可以从设计阶段开始，但宜注意该过程隐含的不确定度。

对于每相额定容量介于 20/3(MVA/相)与 100/3(MVA/相)之间且短路阻抗不大于 14%的变压

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

器，制造方与用户之间也可以按协议用简单方法计算绕组热点温升(也参见附录 D)。

7.10.3 温升试验时直接测量

应将一定数量的温度传感器(例如：光纤传感器)安装在绕组内部被认为是最热点的位置。

注 1：通常认为热点在绕组顶部，但建议通过设计评审来确定正确位置；

注 2：建议用光纤传感器，安装方法参见附录 E。

当同一绕组上使用了多个传感器时，其中最大读数值应作为绕组热点温度。

热点温升($\Delta\theta_h$)计算如下：

$$\Delta\theta_h = \theta_h + \Delta\theta_{of} - \theta_a$$

式中：

θ_h ——电源断开瞬间的温度；

$\Delta\theta_{of}$ ——在额定电流下 1 h 试验期间的顶层液体温度的降低值；

θ_a ——施加总损耗试验结束时的外部冷却介质温度。

注 3：上述方法也可用于由于绕组电阻非常低而不能用电阻法测绕组平均温升时(因为此时受不确定度影响很大)的热点温升测量(见 6.2)。

7.11 影响温升试验结果的不确定度

温升试验的结果会受到与试验方法和仪器有关的一些不确定度的影响。在试验报告中应将这些对温升有影响的不确定度给出评估。

注：不确定度评估不宜用来说明是否符合温升限值，仅提供相关信息。

有关评估不确定度的一般准则，见 IEC 指南 115 及参考文献[8][1]。通常建议给出 95%置信度的扩展不确定度。

7.12 油中溶解气体分析

对于大型矿物油浸渍式变压器，附加漏磁影响是潜在的风险因素。油中溶解气体的色谱分析可用来判断可能发生的局部过热现象。

如果制造方与用户协商同意，宜分别在温升试验前、后各进行一次气体分析。

附录 A 给出了 DGA 详细的试验方法和试验结果的评判准则。

7.13 修正

试验中，如果不能施加规定的总损耗或电流时，则其测试结果应按下列规定进行修正。修正的有效范围是：施加的总损耗与规定的总损耗之差在±20%之内；施加的电流与规定的电流之差在±10%之内。

通过协商，也可扩大修正的适用范围。但施加的总损耗不应低于规定的总损耗的 70%，施加的电流不应低于规定的电流的 85%。

施加总损耗结束时高于外部冷却介质的液体温升应乘以：

$$\left[\frac{\text{总损耗}}{\text{试验损耗}}\right]^x$$

电源断开瞬间，高于液体平均温度的绕组平均温升应乘以：

$$\left[\frac{\text{额定电流}}{\text{试验电流}}\right]^y$$

电源断开瞬间，高于顶层液体温度的绕组热点温升应乘以：

1) 方括号内的数字指参考文献序号。

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

$$\left[\frac{\text{额定电流}}{\text{试验电流}}\right]^{z}$$

按照变压器的类型和冷却方式，表 3 给出了上述的指数。

使用表 3 中给出的指数进行的修正是保守的，仅适用于在上述有效修正范围内的稳定状态下的温升试验报告。

表 3　温升试验结果修正指数

修正指数	配电变压器	中、大型电力变压器			
	冷却方式标志为 ONAN	冷却方式标志为 ONAN	冷却方式标志为 ONAF	冷却方式标志的前两个字母为 OF	冷却方式标志的前两个字母为 OD
顶层液体 x	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0
绕组平均 y	1.6	1.6	1.6	1.6	2.0
绕组梯度 z	—	1.6	1.6	1.6	2.0
注：表中的配电变压器是指额定容量不大于 2 500 kVA 的变压器。					

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

附 录 A
（资料性附录）
用溶解气体分析法探测局部过热

A.1 概述

对于浸于矿物油中的电力变压器，在其温升试验前、后分别抽取其油样进行油中溶解气体分析（DGA），有可能判断因漏磁效应、冷却油循环不畅、载流引线接线处松动或焊接不良引起的局部发热问题。

温升试验时油中溶解气体分析法是根据某些有机绝缘材料（纸和油）在高温下会释放出某些气体的原理而确立的。这些不同的气体组分可用来表征所用绝缘材料的状况，它们的浓度和产气率与所发生的现象的危险性相关联。

如果制造方与用户协商同意，则 DGA 可用作温升试验结果判定的特定工具。分析宜按照 IEC 61181:2007，用高精度色谱法进行。

原则上，建议下列产品采用 DGA：

a) 额定容量不小于 100 MVA 的独立绕组三相变压器；

b) 额定容量不小于 33 MVA 的独立绕组单相变压器；

c) 双绕组等值额定容量与 a)和 b)相同的自耦变压器；

d) 额定容量小于上述情况，但漏磁通和/或漏磁场强度与上述情况相近的变压器。

A.2 温升试验持续时间

为了正确判断色谱分析的结果，温升试验应在总损耗下进行。在温升试验时，顶层油的温升宜维持在预估最终温升值 80%以上至少 8 h。

在降低总损耗（见 7.12）下进行的 DGA 失去意义，所以不建议这样做。

对于有多种冷却方式的变压器，DGA 宜仅在具有最大冷却能力下进行。

A.3 取油样

取油样宜按照 IEC 60567 进行，宜采取措施预防氧化。

第一次取油样宜恰好在变压器温升试验开始前进行，对强油循环系统至少在循环 2 h 以后进行。第二次取油样最好在温升试验结束接近 24 h 进行。

A.4 DGA 结果分析

按上述要求所取的油样，宜尽快进行分析，在任何情况下，不应迟于 3 d。建议分析要在同一个试验室进行，以减小影响试验的不确定度。

对 DGA 结果分析，建议以所谓的“最大分析分布”为基础，它是可以预料的在同一时间同一地点取得的样品间的分布情况，包括样品的可变性、抽取过程和分析。

最大分析分布 $S_A(X)$，可以认为是可监测的气体数量最小值 $S_D(X)$和相应的气体在温升试验前在油中溶解数量$(X)_1$ 的函数。X 是以百万分之一表示的气体（体积）浓度。

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

$$S_A(X)=0.1(X)_1+2S_D(X)$$

表 A.1 给出了按照 IEC 61181 规定的工厂试验的油中溶解气体的最小可检测值。

表 A.1 油中溶解气体最小可检测值 S_D

气体	S_D μL/L
CO_2	10
CO	5
H_2	2
CH_4	0.1
C_2H_6	0.1
C_2H_4	0.1
C_2H_2	0.1

温升试验中的气体分析评估准则，是以某些气体的增长率和相关的固定许可限值为基础的。

原则上，许可限值应由制造方与用户协商确定。

或者，如检查结果超出参考文献[9、10]给出的最大分析分布值，则建议参照表 A.2 的两组系列值进行判断。

表 A.2 温升试验时许可的气体增长率

混合物	气体增长率 μL/(L·h)	
	系列Ⅰ	系列Ⅱ
$\frac{1}{t}\times[(C_2H_2)_2-(C_2H_2)_1]$	$<S_A$	$<S_A$
$\frac{1}{t}\times[(CO)_2-(CO)_1]$	<5	<25
$\frac{1}{t}\times[(CO_2)_2-(CO_2)_1]$	<20	<100
$\frac{1}{t}\times\{[(H_2)_2-(H_2)_1]+[(CH_4)_2-(CH_4)_1]+[(C_2H_4)_2-(C_2H_4)_1]+[(C_2H_6)_2-(C_2H_6)_1]\}$	<2	<5

注 1：下标 1 和 2 表示试验前、后的浓度。

注 2：t 为顶层油温升至少达到 80%稳态最终值的时间。

如果温升试验前、后通过气体分析得出的气体增长率满足第一系列的要求，则可以得出变压器没有局部过热的结论。

然而，如果所有试验值低于第二系列，但一个或多个值高于第一系列，则存在局部过热的可能。在这种情况下，建议运行时，变压器应定期取油样进行气体分析。

如果一个或多个数值高于第二系列，则存在热故障的可能性就很大了，因此宜开始进一步研究过热的原因。

建议采取任何进一步的修整措施前，重新进行最后的分析。

此外，温升试验也可以重新开始并持续更长时间。

油中碳氢气体的增长率可以用于作为油中有局部过热的附加证据，见 GB/T 7252 给出的关系式：

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

$$R=\frac{\Delta C m_{o}}{\rho \Delta t}$$

式中：

R ——产气率，单位为毫升每小时(mL/h)；

ΔC ——气体浓度变化，单位为微升每升(μL/L)；

m_{o} ——油质量，单位为千克(kg)；

ρ ——油密度，单位为千克每立方米(kg/m^3)；

Δt ——试验持续时间，单位为小时(h)。

所得的数据直接与局部过热现象有关，与油箱中油的多少无关。

烃类气体的增长率和气体限值应由制造方与用户在签合同时协商解决。

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

附 录 B
（资料性附录）
液浸式变压器温升试验技术

B.1 电源断开后绕组电阻测量

B.1.1 绕组电阻测量时冷却设备的设定

冷却设备最好保持电源断开前施加电流时的冷却方式。在这种状态下，可从冷却曲线中得到绕组和液体的暂态热特性。

注 1：通常情况下，在冷却曲线法测量时，冷却设备的运行状态对电源断开瞬间的热电阻外推值只有轻微影响。只有冷却曲线的末段受冷却设备设置的影响。

注 2：OD 冷却的变压器，在电源断开后冷却方式不宜改变。

B.1.2 绕组电阻测量程序

温升试验结束时绕组的温度通常按 7.7 的方法通过测量电阻确定。

绕组电阻测量是在试验电源断开后，并将绕组接到测量用的直流电源时开始的。

由于绕组温度和电阻是随时间变化的，因此如何外推到电源断开瞬间的值便是个难题。外推过程在 B.2 中讨论。

电阻测量宜在绕组接到测量装置后尽快进行。开始时，在测量电流稳定之前，由于绕组中感应压降的影响，最初的读数不可靠。必要的稳定时间可通过下列方法减少：

——使铁心饱和，以便将有效电感值下降到与短路电感同一数量级的值；

——采用恒流电源、电子式稳定电源或带有一个大的附加串联电阻器的大容量畜电池。

使铁心饱和意味着在铁心内建立一定量的磁通，以减少延迟，实际可以减少到几秒钟。

被试的一对绕组中的两个绕组既可以分别接到两个独立的直流电源，也可以将两个绕组串联后接到一个公共直流电源。两种情况下，都宜使电流方向与铁心饱和趋势相一致。

即使在不利的条件下，饱和后直流电路的电气时间常数也可以降到几秒钟数量级。1 K 的温差约相应于 1/300 的电阻差，它作为指数衰减的误差，与 5 倍～6 倍电气时间常数的延时时间相对应。因而，一般情况下，在达到饱和后不到 1 min 时间内，即可测得有用的电阻值。

大型升压变压器的低压绕组电阻测量非常容易受到残余的感应电动势的影响，这一点，甚至在直流电流达到稳定时也如此。此感应电动势叠加在电阻电压上（在毫伏范围内），视其极性，会使电阻值增大或减小。通过在冷却曲线初始阶段看，当电阻曲线由高端或某些情况下由低端开始时，此影响很容易区分出来。对大型变压器来说，当使直流电流流过高压绕组的所有线匝时，就可能得到最好的结果（见图 B.1 和图 B.2 所示）。在极端情况下，如果绕组电阻接近或低于 1 mΩ，则合理的电阻值应在直流电流稳定后 1 min 或 2 min 后得到。

此外还要注意到连接的操作时间及直流电流的稳定时间。

得到第一个有用的电阻值的时间取决于铁心的尺寸。

建议从电源断开到测得第一个有效热电阻的时间不宜超过：

——额定容量小于 100 MVA 的变压器：2 min；

——额定容量不小于 100 MVA 至小于 500 MVA 的变压器：3 min；

——额定容量不小于 500 MVA 的变压器：4 min。

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

冷却曲线的时间长度最好至少为绕组热时间常数的 2 倍，以便提供绕组和液体的暂态热性能。随变压器特性及试验方法的不同，时间可以改变。

中型变压器 20 min、大型变压器 30 min 的冷却曲线时长是合适的。

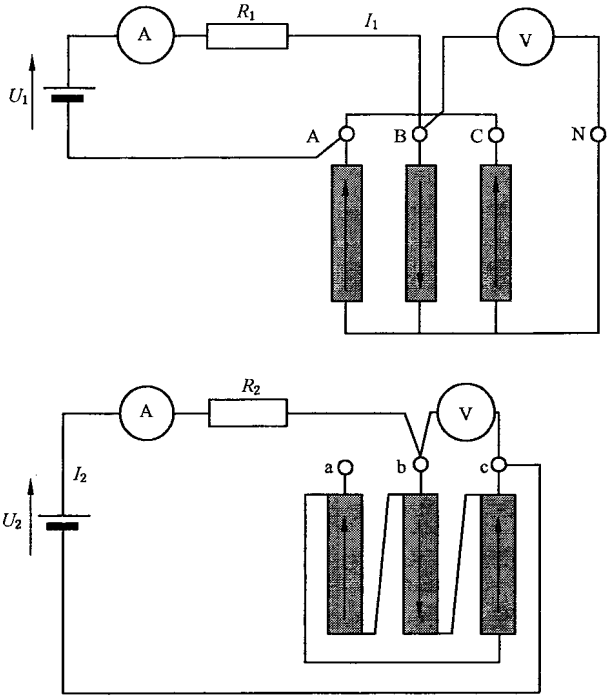
图 B.1 和图 B.2 给出了测量具有低阻值绕组变压器的冷却曲线的电路图。

配电变压器的星结或曲折联结的低压绕组（例如：400 V 绕组）的电阻，宜在两相的端子间测量，而不在相的端子与中性点端子间测量。

还可以采用其他方法，但需制造方与用户协商同意：

——取用一个开路绕组上电压的电感分量（此开路绕组不是直流回路的一部分）来修正被测绕组上的电压（此方法对于大型升压变压器不推荐）；

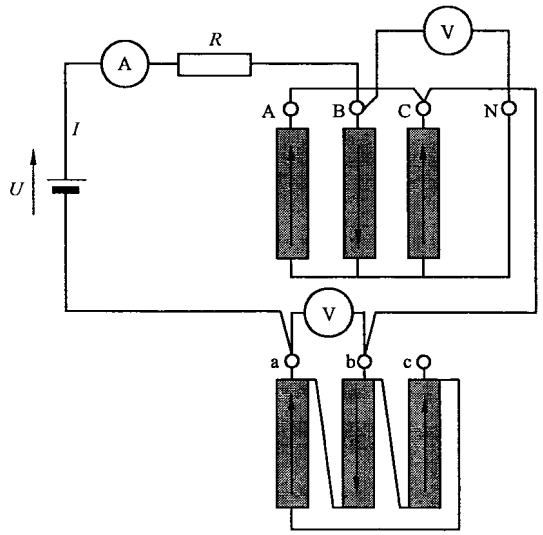
——当一个绕组具有两个并联且平衡良好的“半线圈”时，可以将直流电流接入其中一个“半线圈”，而从另一个“半线圈”返回，这种方法允许对电阻进行监测，原则上不存在电感的影响，甚至在变压器施加交流时，也可进行测量。



注：电阻 R_1 和 R_2 用于加速消除暂态过程。

图 B.1　采用两个独立直流电源（每个绕组各一个）的低阻值绕组变压器的推荐测量电路

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。



注：R 为用于加速消除暂态过程的附加电阻。

图 B.2　采用一个直流电源(两个绕组共用)的另一种推荐测量电路

B.2　电源断开瞬间绕组温度外推法

B.1 中讨论了测量电阻用的直流电源电路和到电感效应消失时的延迟。

用于测量的仪器可以是人工读数的或自动记录的，模拟式的或数字式的。在一段时间内应读取相当数量的离散值，这是作为外推到电源断开瞬间值所必需的。

外推法的第一步是按 7.6 规定，将电阻值变化变为温度值变化。

图 B.3 绘出了绕组温度曲线图。从该图可看出在开始几分钟内，绕组温度下降相当快，然后便缓慢地下降。

对于液体温度时间常数非常大的变压器(主要指额定容量比较小的自冷变压器)，可以假定其液体温度变化渐近线是一条水平线。

在大多数情况下，特别是指强迫液体循环冷却的大型变压器，且试验电源断开后要求冷却装置仍在运行，可能有必要找出一条下降的渐近线，在该渐近线上叠加有初始变化较快的部分。

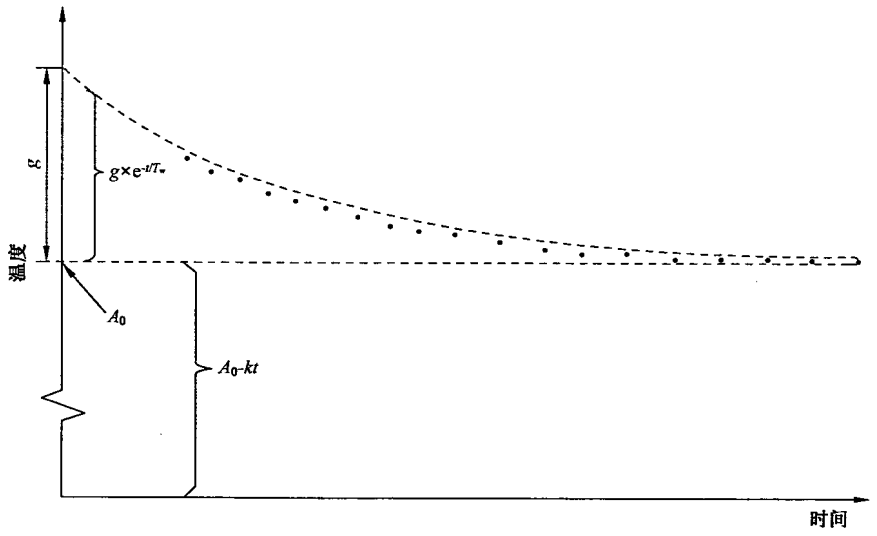


图 B.3　断开电源后的绕组平均温度变化

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

绕组平均温度曲线[$\theta_w(t)$]随时间 t 的衰减可表示如下：

$$\theta_w(t)=\theta_{om}(t)+g\times e^{-t/T_w} \qquad \cdots\cdots(B.1)$$

式中：

$\theta_{om}(t)$——估计的液体平均温度(采用缓慢下降的函数)；

g ——电源断开瞬间绕组对液体的温度梯度；

T_w ——估计的绕组对液体冷却按指数衰减的时间常数。

式(B.1)中的第一项[$\theta_{om}(t)$]，可以是常数的、线性变化的或指数衰减的，其表达式分别为：

$$\theta_{om}(t)=A_0 \qquad \theta_{om}(t)=A_0-kt \qquad \theta_{om}(t)=A_0e^{-t/T_0} \qquad \cdots\cdots(B.2)$$

式中：

T_0——估计的液体时间常数。

其外推的估算值为：

$$\theta_w(t=0)=A_0+g \qquad \cdots\cdots(B.3)$$

该值对应于电源断开瞬间的绕组平均温度。

B.3 冷却(下降)曲线的数值外推法

冷却曲线的外推过程采用计算机程序来进行，以使这组温度读数数值拟合成一个解析函数。

下面叙述的计算程序，可以使一组等时间间隔的温升测量值拟合成一个解析函数。

此方法的优点是能较好并客观地估算绕组平均温度值。

此方法是基于假定顶层液体温度按线性方式下降的：

$$\theta_{om}(t)=A_0-kt$$

温升测量用变量表见表 B.1。

表 B.1 温升测量用变量表

符号	涵 义
t_{max}	冷却曲线测量的时间(本例中为 20 min)
Δt	时间增量(本例中为 1 min)
i	时间间隔下标号
n	有效测量的总数与 1 的差($n=n_{val_meas}-1$)
θ_{om_start}	电源断开瞬间测量的液体平均温度
θ_{om_end}	冷却曲线终点处测量的液体平均温度
$\theta_{wm}(i)$	i 时刻测量的绕组平均温度(按 7.6 以测量的热电阻得出)
k	顶层液体温度在冷却曲线起点和终点间的差与试验持续时间的商(本例中 $k=0.15$ K/min)
υ	有效系数(0 或 1)

按表 B.2 的计算值：

计算程序如下：

涂阴影的栏应填上测量值或参数。

将测量(即按 7.6 从热电阻导出)的绕组平均温度值插入到表 B.2 中的 $\theta_{wm}(i)$栏中。

某些情况下，电源断开后起始阶段的某些测量值与以后的值不协调，这些值应去掉，以得到合理的外推法曲线。被采用的有效值用 $\theta_{wval}(i)=\upsilon\times\theta_{wm}(i)$表示。

修正后的绕组温度：

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

$$\theta_{wcor}(i)=\theta_{wval}(i)+kt \quad \cdots\cdots(B.4)$$

修正并确认的绕组温度的相邻有效值之差：

$$\Delta\theta_w(i)=\theta_w(i)-\theta_w(i-1) \quad \cdots\cdots(B.5)$$

修正并确认的绕组温度的相邻有效值之差的和的绝对值：

$$S_a=|\sum[\Delta\theta_w(i)]| \quad \cdots\cdots(B.6)$$

修正并确认的绕组温度的有效值的和的绝对值：

$$S_b=|\sum\theta_w(i)| \quad \cdots\cdots(B.7)$$

修正并确认的绕组温度的有效值与修正并确认的绕组温度的相邻有效值之差的积的和的绝对值：

$$S_c=|\sum[\theta_w(i)\Delta\theta_w(i)]| \quad \cdots\cdots(B.8)$$

修正并确认的绕组温度的有效值的平方和：

$$S_d=\sum[\theta_w(i)]^2 \quad \cdots\cdots(B.9)$$

辅助变量：

$$t_e=(nS_c-S_b\times S_a)/(nS_d-S_b^2)$$

$$t_c=(S_dS_a-S_b\times S_c)/(nS_d-S_b^2) \quad \cdots\cdots(B.10)$$

绕组时间常数：

$$T_w=\Delta t/\ln(1+t_e) \quad \cdots\cdots(B.11)$$

常数 A_0 和 g：

$$S_e=\sum e^{(-i/T_w)}$$

$$A_0=-t_c/t_e$$

$$g=(S_b-n\times A_0)/S_e \quad \cdots\cdots(B.12)$$

电源断开瞬间的绕组平均温度：

$$\theta_w(t=0)=A_0+g \quad \cdots\cdots(B.13)$$

此结果用于按 7.9 确定绕组平均温度对液体平均温度的梯度。

外推结果的有效性：

如果制造方与用户协商同意，则上述外推结果的有效值，可在不计入第一个实测值下通过本程序重复地得到。由此所得的结果与前一次所得的结果的差异不宜超过±0.5 K。如果差异超出，则可再排除一个测量值，然后重复地进行。通过将表 B.2 的 υ 栏中的 1 替换为 0，可进行重复计算。

在上述例子中，第一个测量点之所以不计入，是由于第一个计算值与第二个计算值之间的差异已超过+0.5 K 了。

表 B.2　冷却曲线计算数据表示例

图例：待写数据

时间增量	$\Delta t=$	1	min		
电源断开瞬间的液体平均温度	$\theta_{om_start}=$	56	℃	估计的绕组时间常数	$T_w=$ 5.1 min
冷却曲线终点处的液体平均温度	$\theta_{om_end}=$	53	℃	估计的液体平均温度	$A_0=$ 56.1 ℃
液体温度斜率	$k=$	0.15	k/min	估计的绕组对液体温度梯度	$g=$ 11.0 K
				电源断开瞬间的绕组平均温度	$\theta_{wo}=$ 67.1 ℃

辅助变量：

$t_c=-12.183\ 6$

$t_e=0.217\ 176$

	n	S_b	S_a	S_c	S_d	S_e
和的绝对值	18	1 042.95	7.2	429.6	60 488	3.02

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

表 B.2（续）

时间 min	$\theta_{om}(i)=A_0-kt$	$\theta_{wm}(i)$ 测量值	$\theta_{wval}(i)$	$\theta_{wcor}(i)$	υ (0/1)	$\theta_w(i)$ 修正并确认的	$\Delta\theta_w(i)$ 见式(C.5)	$\theta_w(i)\times\Delta\theta_w(i)$	$[\theta_w(i)]^2$	$e^{(-i/T_w)}$	$\theta_w(i)$ 计算值
0	56.1	0.0		0.0							67.1
1	55.9	66.4		66.6	0	0.0	0	0.0	0	0	65.0
2	55.8	63.4	63.4	63.7	1	0.0	0	0.0	0	0	63.2
3	55.6	62.0	62.0	62.5	1	62.5	−1.25	−78.1	3 900	0.554 5	61.7
4	55.5	60.7	60.7	61.3	1	61.3	−1.15	−70.5	3 758	0.455 6	60.5
5	55.3	59.2	59.2	60.0	1	60.0	−1.35	−80.9	3 594	0.374 3	59.5
6	55.2	58.7	58.7	59.6	1	59.6	−0.35	−20.9	3 552	0.307 5	58.6
7	55.0	57.9	57.9	59.0	1	59.0	−0.65	−38.3	3 475	0.252 7	57.8
8	54.9	57.2	57.2	58.4	1	58.4	−0.55	−32.1	3 411	0.207 6	57.2
9	54.7	56.7	56.7	58.1	1	58.1	−0.35	−20.3	3 370	0.170 5	56.6
10	54.6	56.2	56.2	57.7	1	57.7	−0.35	−20.2	3 329	0.140 1	56.1
11	54.4	55.8	55.8	57.5	1	57.5	−0.25	−14.4	3 301	0.115 1	55.7
12	54.3	55.3	55.3	57.1	1	57.1	−0.35	−20.0	3 260	0.094 6	55.3
13	54.1	54.8	54.8	56.8	1	56.8	−0.35	−19.9	3 221	0.077 7	55.0
14	54.0	54.5	54.5	56.6	1	56.6	−0.15	−8.5	3 204	0.063 8	54.7
15	53.8	54.2	54.2	56.5	1	56.5	−0.15	−8.5	3 187	0.052 4	54.4
16	53.7	54.0	54.0	56.4	1	56.4	−0.05	−2.8	3 181	0.043 1	54.2
17	53.5	53.9	53.9	56.5	1	56.5	0.05	2.8	3 187	0.035 4	53.9
18	53.4	53.7	53.7	56.4	1	56.4	−0.05	−2.8	3 181	0.029 1	53.7
19	53.2	53.6	53.6	56.5	1	56.5	0.05	2.8	3 187	0.023 9	53.5
20	53.1	53.5	53.5	56.5	1	56.5	0.05	2.8	3 192	0.019 6	53.3

注 1：标有“测量值”的绕组温度值为直接利用绕组电阻变化得到的。

注 2：A_0 值[代表 $\theta_{om}(i)$]为电源断开瞬间液体平均温度估计值。一般地，此值不同于在温升试验时按 7.4.2 得到的液体平均温度。

注 3：冷却曲线上液体平均温度的下降可以从顶层液体温度下降得到。

用拟合曲线 $\theta_w(t)=A_0-kt+g\times e^{-t/T_w}$ 外推出的冷却曲线见图 B.4。

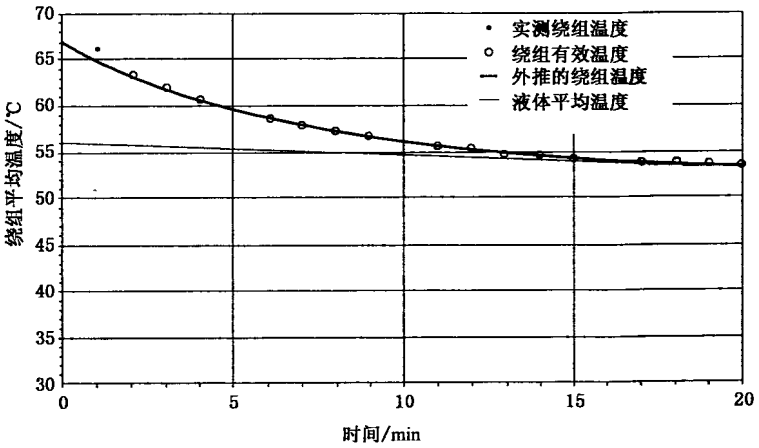


图 B.4　用拟合曲线 $\theta_w(t)=A_0-kt+g\times e^{-t/T_w}$ 外推出的冷却曲线

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

附 录 C
（资料性附录）
用油箱内顶层液体温度确定 OFAF 和 OFWF 冷却变压器的热点温升

绕组热点相对于环境空气或冷却水的温升通常以油箱内的顶层液体温升为基准，按下式确定：

$$\Delta\theta_h = \Delta\theta_o + H \times g$$

式中：

$\Delta\theta_o$——油箱内顶层液体温升；

H ——热点系数；

g ——绕组对油平均温度梯度。

从严格的学术观点来看，上述公式是不准确的，因为绕组内部油道顶部的液体温度比油箱中的混合液体温度要高得多。在 ON 冷却变压器中，这个不准确度认为还可以接受，因为通过绕组的液体流量在稳态下原则上等于通过散热器的流量。一般来说，对真正 OD 冷却的变压器来说也是这样的，这时只有很小的泄漏或受控的放出少量的液体到油箱的自由空间。然而，在 OF 冷却变压器中，情况就不同了，少量的从绕组内部油道流出的液体以紊流方式与在绕组外部循环的经过“绕组外部—冷却器—绕组外部”的主要液体流混合。

现在的问题是：温升试验时测得的油箱内的这个混合的顶层液体温度是否可以用来确定绕组热点温度？或绕组热点温度值是否应以绕组顶部排出的热的液体为基准？

对上述问题的回答要以某些 OFAF 冷却变压器的试验结果为基准，这里绕组热点温度直接用光纤传感器测量。所选择的变压器代表了不同容量及液体在绕组中不同循环方式（轴向及曲折流动）的变压器。测得的结果见表 C.1。

实测的热点温升取在每个绕组上放置的 8 个光纤传感器中的最大值。

在某些选定的试验装置上，曾尝试过测量油道内液体的温度。但此种测量看起来既不实际又很困难，因为油道内液体温度随油道不同变化很大。

结论：

根据表 C.1 给出的相近的绕组热点温升的计算值和测量值，建议用油箱顶层液体温度来计算绕组热点温升。

表 C.1 某些特定变压器用常规温升试验数据结合计算得出的绕组热点温升值及用光纤传感器直接测量的绕组热点温升值

额定容量 MVA	冷却方式/ 绕组内液体 循环方式	温升试验时测量值 K		绕组热点温升 K	
		$\Delta\theta_o$	g[a]	计算值	测量值
230 三相	OFAF/曲折	40.6	14.5(LV) 15.0(HV)	59.3 63.6	57.1 60.9
605 三相	OFAF/曲折	35.2	11.7(LV) 23.0(HV)	58.7 67.9	56.5 65.3
1 000 三相	OFAF/轴向	36.1	21.9(HV)	71.4	68.9
133 单相	OFAF/轴向	37.3	21.1(LV)	69.4	70.1

[a] (LV)表示低压绕组；(HV)表示高压绕组。

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

附 录 D
（资料性附录）
绕组热点温升估算方法

D.1 概述

热点是绕组绝缘系统中任何部位的最高温度，并假定它代表了变压器的热极限状态。

如果绕组热点温升不是直接测得的，则其值可以通过温升试验结果，或利用设计数据或类似产品的试验结果进行估算。

应当区分自然循环液体冷却系统（冷却方式标志的前两个字母为 ON）以及强迫循环液体冷却系统（冷却方式标志的前两个字母为 OF 或 OD）。

本附录给出了心式和壳式变压器的规则。

D.2 符号表

采用的符号见第 3 章。

D.3 自然循环和强迫导向循环冷却系统的数学模型

D.3.1 心式变压器

对于具有同心圆绕组环绕心柱规则布置的变压器，绕组热点温升可以根据温升试验结果通过计算得到（假定绕组出口处液体温度就是顶层液体温度，见 7.4.1，且液体平均温度等于顶层液体温度与绕组底部液体温度的平均值）。

假定变压器绕组内部液体的温升沿绕组高度呈线性增高。

绕组损耗产生的热量从绕组向液体传递，这就要求绕组与其周围的液体之间存在温差。假设此温差除绕组端部外在任何高度都是相同的。

从图 D.1 的曲线所见，绕组温升和液体温升表现为两条平行线。

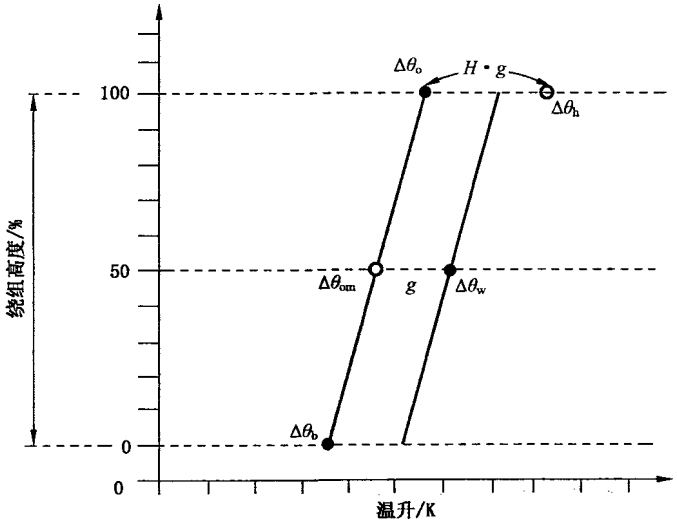


图 D.1 ON 冷却系统的温升模型

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

热点温升可用下式确定：

$$\Delta\theta_h = \Delta\theta_o + H \times g$$

绕组和液体之间的平均温度梯度(g)用绕组平均温升($\Delta\theta_w$)与液体平均温升($\Delta\theta_{om}$)之差表示。

由于以下原因，可以假设热点位于绕组顶部：

——漏磁偏移而使附加损耗集中；

——绕组顶部油道变化。

因此，对于每一个绕组，其热点系数($H=QS$)均取决于下述情况：

——系数 Q 与附加损耗有关，它取决于(绕组顶部)因漏磁集中产生的漏磁损耗与绕组平均漏磁损耗之比；

——系数 S 与绕组内部液体冷却路径的冷却效率有关。

对于不同的变压器绕组，系数 Q 是一个独立的系数。它与绕组的结构特征有关，且可用漏磁场方面的知识(例如：采用有限元法)来估算。

对于容量不超过 150 MVA(单个相为 50 MVA)、频率为 50 Hz、短路阻抗为 10%～14%的饼式或层式绕组的心式三相变压器，图 D.2 的曲线可用做参考。在曲线中，系数 Q 是额定容量及导线厚度的函数，是用计算机程序算出的大量情况的平均值，并经过了试验数据的验证。

注 1：对于环氧树脂粘合的导线，其厚度指的是裸导线的厚度。

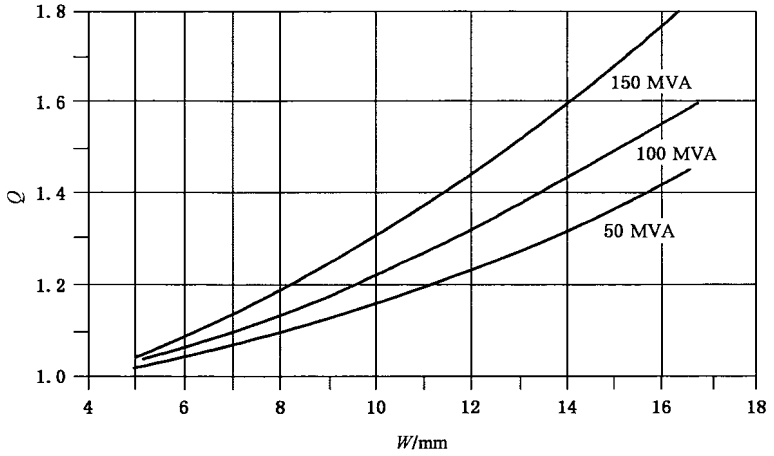


图 D.2　作为额定容量和导线宽度(W)函数的 Q 系数值

至于系数 S 的估算，原则上与液体冷却路径的冷却效率有关，应对每个指定绕组顶部的液体路径进行求解。

对于不带挡油板而只有纵向油道的饼式和层式绕组，假定 $S=1$。

对于带有挡油板的饼式绕组，问题更显得重要，因为系数随油道结构而不同。

当绕组内部沿轴向液流分布不均匀时，S 系数通常大于 1。此情况可能是某种电气结构的原因。

图 D.3 示出一些带有挡油板但没有附加轴向油道的绕组的典型液体路径示例，对挡油板不均匀分布的不同的液体路径，宜认为有不同的 S 系数。

图 D.3a)表示系数 $S=1$ 的路径。

图 D.3b)表示没有最后一个内部挡油板的布置，液体可从上部幅向油道流出($S=1.1$)。

图 D.3c)表示第一饼与静电环间的油道太窄，以至于液体不能正确流动($S=1.1$)。

图 D.3d)表示缺少挡油板的布置，同时第一饼与静电环间的油道受到限制($S=1.2$)。

在所示的例子和其他类似情况中，上述结构会使导线和匝绝缘出现局部过热现象。

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

对最后两个挡油板的相对位置要特别注意，否则会影响最后一个幅向油道的液体流动。

注 2：特定绕组布置的 S 系数的更准确的估算可以由制造方给出。

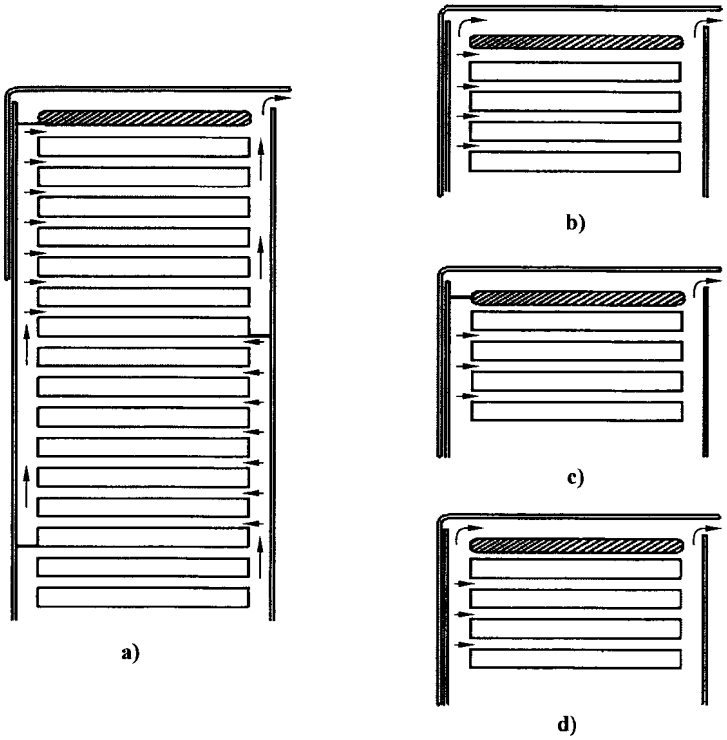


图 D.3　饼式绕组中典型的液体流动路径

还要注意的是，只有在绕组顶部的系数 Q 取最大值时，绕组某些区域的系数 Q 和 S 才可假定取最大值。

注 3：饼式绕组的顶部和底部可以采用换位导线，以减少局部涡流损耗。

D.3.2　壳式变压器

尽管壳式变压器的绕组布置和结构不同于心式变压器，但图 D.1 给出的热学模型在考虑到下列因素的情况下仍可概念性地接受。

壳式变压器中通常采用多股导线，根据漏磁分布，每个线圈的导线尺寸可以不同，这样就可以明显地减少各个线圈的涡流损耗。

因为系数 H 受导线影响极大，因此用于热点计算的系数宜由制造方与用户在设计阶段达成共识。

D.4　强迫液体循环冷却系统的数学模型

对于具有强迫液体循环的变压器（冷却方式标志的前两个字母为 OF），顶层液体温度和液体平均温度的概念是不明确的，故不能用在油箱外部测量的方法来确定（参见附录 C）

原则上，由于热特性取决于不同轴向油道间的液体流量分配，所以认为在每个绕组内部冷却油道的出口处进行液体温度的直接测量是正确的。

只有在用温升试验的结果，通过计算方式来估算绕组热点温升时，才可以用与自然液体循环冷却相同的模型。

进入绕组处的液体温度（底部液体温度）可以按与自然液体循环冷却相同的方式来确定。

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

附 录 E
（资料性附录）
用光纤传感器监测绕组热点温度

E.1 概述

试验应满足下列规定：

监测绕组热点温度的光纤传感器宜按如下要求安装。

由于传感器和光纤本身是易碎的，所以在制造和使用中要特别注意不要使其受到危险的机械应力和振动。

传感器在安装前应进行全量程校核。

E.2 传感器数量

使用传感器的最少数量要根据变压器的特性来决定。

对于三相双绕组变压器，数量取决于额定容量（如果有两种或两种以上的冷却方式，则取最大值），传感器数量参照表 E.1。

按制造方与用户协议，也可以采用不同的布置方式。但由于传感器和光纤都是易碎的，所以在决定数量时，要考虑到绕组在工厂制造和在不同运行情况下发生损坏的风险。

表 E.1 建议的三相双绕组变压器传感器的最少数量

额定容量 S_r MVA	冷却系统	安装的数量及相				
		总数	在中间相		在每个边相	
			高压绕组	低压绕组	高压绕组	低压绕组
$S_r \geqslant 100$	所有冷却系统	8	2	2	1	1
$10 \leqslant S_r < 100$	冷却方式标志的前两个字母为 ON 或 OF	6	1	1	1	1
	冷却方式标志的前两个字母为 OD	8	2	2	1	1

对于单相变压器，建议的最少传感器数量参照表 E.2。

表 E.2 建议的单相变压器传感器的最少数量

额定容量 S_r MVA	冷却系统	传感器数量		
		总数	高压绕组	低压绕组
$S_r \geqslant 50$	所有冷却系统	4	2	2

对于绕组多于两个的变压器，安装传感器的数量由制造方与用户商定，但总原则是相同的。

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

E.3 传感器的安装

传感器的安装方法随绕组特性的不同而变化。

传感器宜放在预计的热点区域(即绕组的上端部)，尽可能直接接触绕组导体的绝缘。

注：传感器也可放置在其他有代表性的区域，通过测量来辅助验证变压器的设计。

对于具有同心圆式绕组的变压器，如果在饼间或匝间有水平垫块，则传感器宜装在垫块内。图 E.1 和图 E.2 示出了可能的饼式绕组中传感器的布置。

传感器宜放在垫块中间，如图 E.3 所示。为避免读数误差，宜消除传感器头部的液体流动，可通过减小开槽的尺寸和/或封闭其进口来完成。

对于在饼间或匝间没有水平垫块的绕组(例如：圆筒式或类似的绕组)，传感器宜安装在匝间，装在适当的压板条内。

当采用换位导线(CTC)时，如果传感器安装时的机械损坏的风险很高，则可采用其他安装方法。

图 E.4 示出了如何在壳式变压器上安装传感器。考虑到绕组的特性，也可采用其他的安装方法。

在任何情况下，宜注意避免传感器局部接触冷却液体，以免其显示会受到大的影响。

E.4 光缆的安装

光纤传感器采用穿过油箱壁和油箱盖的光缆与测量仪器相连接。

原则上，光缆不会干扰电场。但由于光缆在操作时可能会受到污染，故宜采取措施，以免沿光缆的最小爬电距离不符合要求。

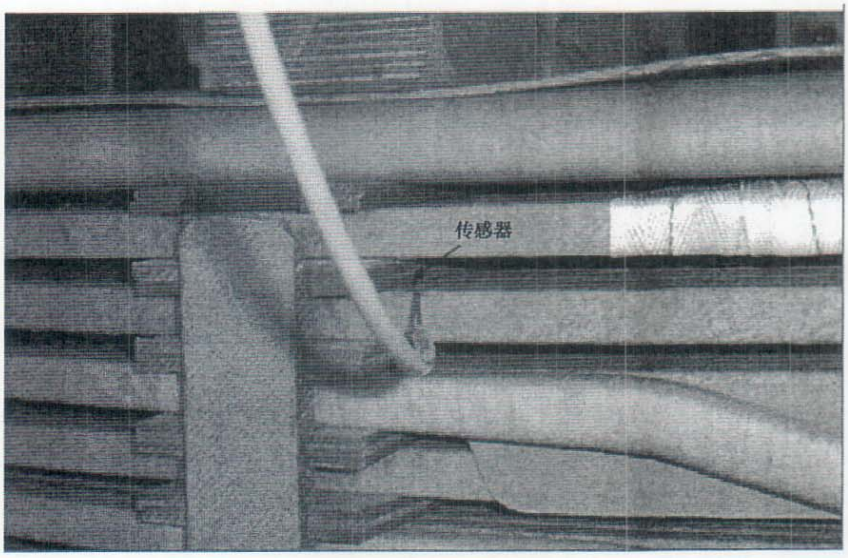


图 E.1 光纤传感器在心式变压器饼式绕组上的应用

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

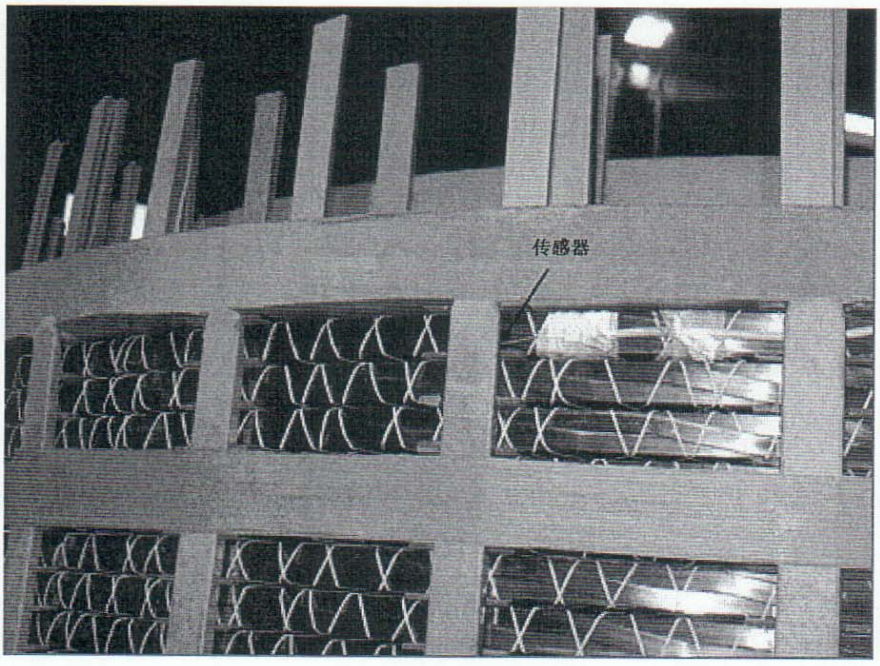


图 E.2　光纤传感器在心式变压器换位导线上的应用

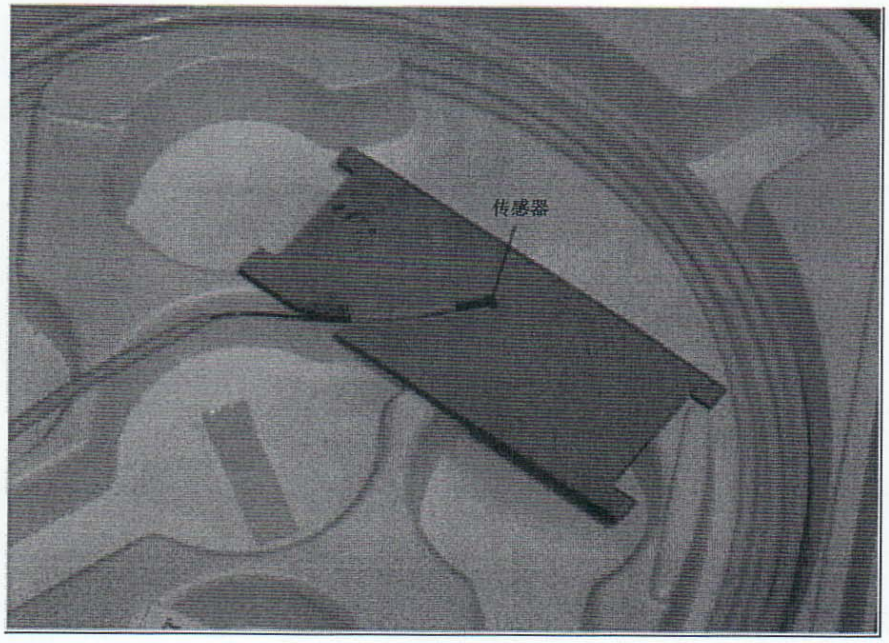


图 E.3　光纤传感器在绕组垫块上的应用

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

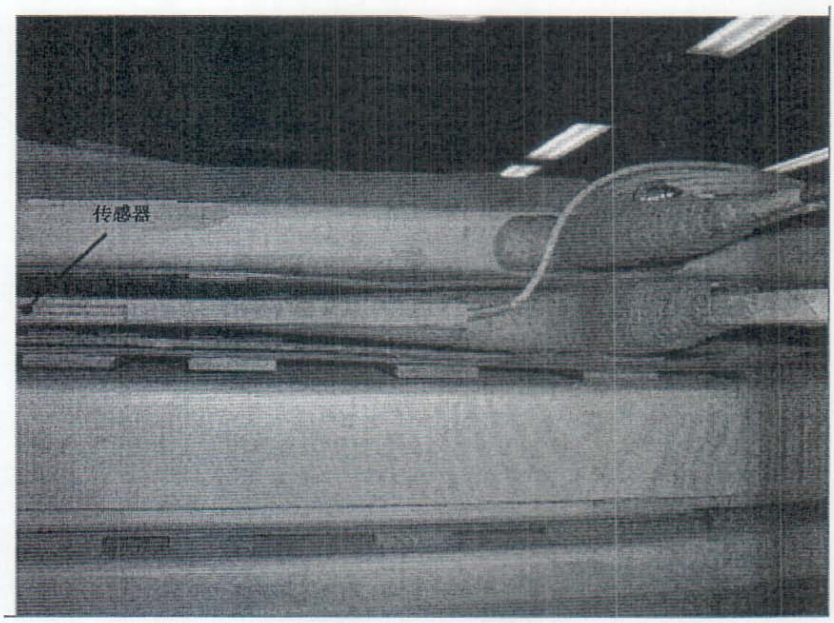


图 E.4　光纤传感器在壳式变压器高压绕组上的应用

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

参 考 文 献

[1] GB/T 1094.7—2008 电力变压器 第7部分:油浸式电力变压器负载导则

[2] GB 2536—2011 电工流体 变压器和开关用的未使用过的矿物绝缘油

[3] GB/T 7252—2001 变压器油中溶解气体分析和判断导则

[4] IEC 60567:2005 Oil-filled electrical equipment—Sampling of gases and of oil for analysis of free and dissolved gases—Guidance

[5] IEC 60836:2005 Specifications for unused silicone insulating liquids for electrotechnical purposes

[6] IEC 61099:2010 Insulating liquids—Specifications for unused synthetic organic esters for electrical purposes

[7] IEEE C57.91:1995 IEEE Guide for loading mineral-oil-immersed transformers

[8] CLC/TR 50462:2008 Rules for the determination of uncertainties in the measurement of the losses on power transformers and reactors

[9] CIGRE WG 06-ST 12:1982 Final report concerning the temperature rise test on oilimmersed transformers with analysis of gases dissolved in oil

[10] CIGRE WG 12.09:1994 Dissolved-gas analysis during heat-run tests on power transformers

此标准由武汉鑫华福电力设备有限公司转载，我公司可以提供此标准中涉及的所有测试仪器仪表设备。
咨询电话：400-034-8088，网站：www.cepee.cn。

GB 1094.2—2013

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
电力变压器
第 2 部分：液浸式变压器的温升
GB 1094.2—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 2.25 字数 62 千字
2014 年 3 月第一版 2014 年 3 月第一次印刷
*
书号：155066·1-48377

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 1094.2-2013