ICS 29.180
CCS K 41

中华人民共和国国家标准

GB/T 1094.11—2022
代替 GB/T 1094.11—2007

电力变压器　第11部分：干式变压器

Power transformers—Part 11: Dry-type transformers

（IEC 60076-11:2018,MOD）

2022-03-09 发布　　2022-10-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会　发布

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 …… 2
4　运行条件 …… 2
5　额定值和一般要求 …… 5
6　分接 …… 8
7　联结组 …… 8
8　承受短路的能力 …… 8
9　铭牌 …… 8
10　温升限值 …… 9
11　绝缘水平 …… 11
12　气候、环境和燃烧性能等级 …… 12
13　抗震性能 …… 14
14　试验 …… 14
15　偏差 …… 31
16　防止直接接触的保护 …… 31
17　外壳防护等级 …… 31
18　接地端子 …… 31
19　询价和订货时需要的信息 …… 31
20　安装与安全 …… 31
附录 A(资料性)　本文件与 IEC 60076-11:2018 的结构变化情况 …… 32
附录 B(资料性)　本文件与 IEC 60076-11:2018 的技术性差异及其原因 …… 34
附录 C(规范性)　变压器在自然通风室内的冷却 …… 36
附录 D(规范性)　用于评估无外壳户外变压器的环境试验 …… 38
附录 E(规范性)　抗震性能及抗震试验 …… 41
附录 F(规范性)　不同参考温度和/或绕组材料的损耗计算 …… 45
附录 G(资料性)　变压器的安装与安全 …… 47
参考文献 …… 49

图 1　单相变压器局部放电试验的基本测量线路 …… 16
图 2　三相变压器局部放电试验的基本测量线路 …… 17

图 3　局部放电例行试验的施加电压方式 …… 17
图 4　单相相互负载法示例 …… 20
图 5　三相相互负载法示例 …… 20
图 6　局部放电特殊试验的施加电压方式 …… 21
图 7　试验箱 …… 27
图 8　试验箱细节 …… 28
图 C.1　在自然通风室内的散热 …… 36
图 D.1　盐雾多参数老化周期 …… 39

表 1　字母代号 …… 7
表 2　绕组温升限值 …… 10
表 3　绝缘水平 …… 11
表 4　外施耐受电压水平修正系数 …… 12
表 5　试验顺序 …… 14
表 6　气候等级特性 …… 22
表 7　环境等级 …… 24
表 8　试验箱的尺寸 …… 26
表 A.1　本文件与 IEC 60076-11:2018 章条编号对照情况 …… 32
表 A.2　本文件与 IEC 60076-11:2018 图表编号对照情况 …… 33
表 B.1　本文件与 IEC 60076-11:2018 的技术性差异及其原因 …… 34
表 D.1　户外环境等级 …… 38
表 E.1　近似加速度水平和地震等级 …… 42
表 E.2　地面加速度水平(AG) …… 42
表 E.3　推荐的超高系数(K) …… 43
表 E.4　方向系数(D) …… 43

前　言

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

本文件为GB/T 1094《电力变压器》的第11部分。GB/T 1094已经发布了以下部分：

——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电力变压器；

——第15部分：充气式电力变压器；

——第16部分：风力发电用变压器；

——第18部分：频率响应测量；

——第23部分：直流偏磁抑制装置。

本文件代替GB/T 1094.11—2007《电力变压器　第11部分：干式变压器》，与GB/T 1094.11—2007相比，除结构调整和编辑性修改外，主要技术变化如下：

——将设备最高电压的适用范围增加到72.5 kV(见第1章，2007年版的第1章)；

——对规范性引用文件进行了调整(见第2章，2007年版的第2章)；

——对使用条件进行了完善和增补(见第4章，2007年版的第4章)；

——对额定容量和冷却方式标志进行了修改和完善(见第5章，2007年版的第8章和第10章)；

——对铭牌标志的内容进行了完善和增补(见第9章，2007年版的第9章)；

——对变压器温升限值的海拔修正进行了修改(见第10章，2007年版的第11章)；

——增加了U_m为72.5 kV变压器的绝缘水平，同时对各电压等级变压器外施耐受电压的海拔校正进行了修改(见第11章)；

——对气候、环境和燃烧性能等级的有关要求进行了完善和增补(见第12章，2007年版的第13章)；

——增加了抗震特性(见第13章)；

——对试验项目及试验方法进行了完善和增补(见第14章，2007年版的第14章～28章)。

本文件使用重新起草法修改采用IEC 60076-11:2018《电力变压器　第11部分：干式变压器》。

本文件与IEC 60076-11:2018相比在结构上有较多调整，附录A中列出了本文件与IEC 60076-11:2018的章条图表编号对照一览表。

本文件与IEC 60076-11:2018相比存在技术性差异，这些差异所涉及的条款已通过在其外侧页边空白位置的垂直单线(|)进行了标识，附录B中给出了相应技术性差异及其原因的一览表。

本文件还做了下列编辑性修改：

——将IEC原文4.2的g)项内容更正为本文件4.2.6中注的内容；

——9.1的g)项中增加了“注：当各绕组的耐热等级相同时，可只标注一个绕组”；

——表3中增加了“注：如果用户另有要求，则U_m为40.5kV的绝缘水平也可按外施耐受电压为80 kV、系列Ⅰ的雷电全波冲击耐受电压为170 kV、系列Ⅱ的雷电全波冲击耐受电压为200 kV选取，但需要在订货合同中注明。”；

——将14.3.2.2.2公式中的$K1$调整为K_1；将14.3.2.3公式中的I_N调整为I_r，$\Delta\theta_N$调整为$\Delta\theta_r$；

——将IEC原文14.4.5.1(本文件14.4.4.1)中所提及的第13章更正为第12章；

——将IEC原文14.4.6.7(本文件14.4.5.7)中所提及的14.4更正为14.4.5.5；

——将14.4.8中所提及的第15章更正为14.2，并对列项形式进行了调整；

——将附录D中的θ_r改为θ_{rpa}，θ_0改为θ_{0pa}；

——参考文献中删除了ISO 12944(所有部分)。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电器工业协会提出。

本文件由全国变压器标准化技术委员会(SAC/TC 44)归口。

本文件起草单位：沈阳变压器研究院股份有限公司、顺特电气设备有限公司、上海沪光变压器有限公司、明珠电气股份有限公司、正泰电气股份有限公司、广州中车骏发电气有限公司、中国电力科学研究院有限公司、卧龙电气集团北京华泰变压器有限公司、海南金盘智能科技股份有限公司、海南威特电气集团有限公司、海鸿电气有限公司、浙江德通变压器有限公司、保定天威顺达变压器有限公司、广东康德威电气股份有限公司、天津市特变电工变压器有限公司、镇江天力变压器有限公司、特变电工智能电气有限责任公司、沈阳中变电气有限责任公司、特变电工湖南电气有限公司、山东电力设备有限公司、新华都特种电气股份有限公司、吴江变压器有限公司、浙江江山变压器股份有限公司、成来电气科技有限公司、卧龙电气银川变压器有限公司、山东达驰驰翔电气有限公司、重庆望变电气(集团)股份有限公司、华翔翔能科技股份有限公司、广东中鹏电气有限公司、西安西电变压器有限责任公司。

本文件主要起草人：章忠国、李霞、张显忠、龙晔、蔡定国、仲照龙、樊建平、付超、何宝振、吕祥鹏、任晓红、雷涌、朱燕春、梁庆宁、钱国锋、秦金立、王文光、赵文忠、李云、房玉杰、田贵书、欧强、薛继印、宗宝峰、林灿华、姜振军、郑国培、鲁玮、陈玉国、程云怒、黄志文、陈剑飞、任甄。

本文件所代替文件的历次版本发布情况为：

——1986年首次发布为GB 6450—1986，2007年第一次修订为GB/T 1094.11—2007；

——本次为第二次修订。

引　言

电力变压器标准的制定，是为了给电力变压器建立一套最佳的评价准则，为电力变压器从生产材料选择、产品设计、产品生产、产品检验、产品选用及运行维护等方面所需的注意事项提供指导。GB/T 1094旨在确立适用于电力变压器的设计、制造、试验方法、运行维护等方面的遵循原则和相关规则，拟由14个部分构成。

——第1部分：总则。目的在于确立适用于各类电力变压器设计制造和生产试验等所需要遵循的总体原则和相关规则。

——第2部分：液浸式变压器的温升。目的在于确立适用于各类液浸式电力变压器有关温升方面的技术要求和试验方法。

——第3部分：绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙。目的在于确立适用于各类液浸式电力变压器有关绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙方面的技术要求和绝缘试验方法。

——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。目的在于确立适用于各类电力变压器和电抗器有关雷电冲击试验和操作冲击试验方面的技术要求和试验方法。

——第5部分：承受短路的能力。目的在于确立适用于各类电力变压器有关承受短路能力方面的技术要求和承受短路能力试验方法。

——第6部分：电抗器。目的在于确立适用于各类电抗器的技术要求和试验要求。

——第7部分：油浸式电力变压器负载导则。目的在于对各类油浸式电力变压器有关带负载运行时提供指导。

——第10部分：声级测定。目的在于确立适用于各类电力变压器和电抗器有关声级方面的技术要求和声级测定试验方法。

——第10.1部分：声级测定 应用导则。目的在于对各类电力变压器和电抗器有关声级测定方面提供指导。

——第11部分：干式变压器。目的在于确立适用于各类干式电力变压器的技术要求和试验要求。

——第12部分：干式电力变压器负载导则。目的在于对各类干式电力变压器有关带负载运行时提供指导。

——第14部分：采用高温绝缘材料的液浸式电力变压器。目的在于确立适用于各类采用高温绝缘材料的液浸式变压器的技术要求和试验要求。

——第15部分：充气式电力变压器。目的在于确立适用于各类充气式电力变压器的技术要求和试验要求。

——第16部分：风力发电用变压器。目的在于确立适用于各类风力发电用变压器的技术要求和试验要求。

——第18部分：频率响应测量。目的在于确立适用于各类电力变压器有关频率响应方面的技术要求和频率响应测量试验方法。

——第23部分：直流偏磁抑制装置。目的在于确立适用于各类直流偏磁抑制装置的技术要求和试验要求。

GB/T 1094通过14个部分明确了各类电力变压器和电抗器等产品的技术要求和试验要求，给出了具体的试验程序、试验方法及运行指导。通过确立各类产品明确的范围、术语、技术要求和试验方法等，让生产者、使用者及相关试验人员能够更加清晰、准确地进行操作，从而设计、制造高质量的产品，更好地促进贸易、交流和技术合作，并为我国电网的正常运行提供保障。

电力变压器　第11部分：干式变压器

1　范围

本文件规定了干式变压器的术语和定义、运行条件、额定值和一般要求、分接、联结组、承受短路的能力、铭牌、温升限值、绝缘水平、气候、环境和燃烧性能等级、抗震特性、试验、偏差、防止直接接触的保护、外壳防护等级、接地端子、询价和订货所需要的信息以及安装和安全方面等。

本文件适用于设备最高电压为72.5 kV及以下，且至少有一个绕组的电压高于1.1 kV的干式电力变压器（包括自耦变压器，以下简称变压器）。

本文件不适用于：

——充气干式变压器（当所充气体不是空气时）；

——额定容量小于5 kVA的单相变压器；

——额定容量小于15 kVA的多相变压器；

——互感器；

——起动变压器；

——试验变压器；

——电机车牵引变压器；

——防爆矿用变压器；

——电焊变压器；

——调压变压器；

——侧重考虑安全的小型电力变压器。

当上述变压器或其他专用变压器没有相应标准时，本文件可以全部或部分适用。

2　规范性引用文件

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

GB/T 311.1　绝缘配合　第1部分：定义、原则和规则（GB/T 311.1—2012，IEC 60071-1：2006，MOD）

GB/T 311.2　绝缘配合　第2部分：使用导则（GB/T 311.2—2013，IEC 60071-2：1996，MOD）

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

GB/T 1094.2　电力变压器　第2部分：液浸式变压器的温升（GB/T 1094.2—2013，IEC 60076-2：2011，MOD）

GB/T 1094.3—2017　电力变压器　第3部分：绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙（IEC 60076-3：2013，MOD）

GB/T 1094.5　电力变压器　第5部分：承受短路的能力（GB/T 1094.5—2008，IEC 60076-5：2006，MOD）

GB/T 1094.10　电力变压器　第10部分：声级测定（GB/T 1094.10—2003，IEC 60076-10：2001，MOD）

GB/T 1094.12—2013 电力变压器 第12部分:干式电力变压器负载导则(IEC 60076-12:2008,MOD)

GB/T 2424.25 电工电子产品环境试验 第3部分:试验导则 地震试验方法(GB/T 2424.25—2000,IEC 60068-3-3:1991)

GB/T 2900.95 电工术语 变压器、调压器和电抗器(GB/T 2900.95—2015,IEC 60050-421:1990,NEQ)

GB/T 4208 外壳防护等级(IP代码)(GB/T 4208—2017,IEC 60529:2013,IDT)

GB/T 4797.7—2008 电工电子产品环境条件分类 自然环境条件 地震振动和冲击(IEC 60721-2-6:1990,IDT)

GB/T 4798.4 电工电子产品应用环境条件 第4部分:无气候防护场所固定使用(GB/T 4798.4—2007,IEC 60721-3-4:1995 and Amd 1:1996,MOD)

GB/T 7354 高电压试验技术 局部放电测量(GB/T 7354—2018,IEC 60270:2000,MOD)

GB/T 11021 电气绝缘 耐热性和表示方法(GB/T 11021—2014,IEC 60085:2007,IDT)

GB/T 17467 高压/低压预装式变电站(GB/T 17467—2020, IEC 62271—202:2014,MOD)

GB/T 18380.31 电缆和光缆在火焰条件下的燃烧试验 第31部分:垂直安装的成束电线电缆火焰垂直蔓延试验 试验装置(GB/T 18380.31—2008,IEC 60332-3-10:2000,IDT)

GB/T 18494.1 变流变压器 第1部分:工业用变流变压器(GB/T 18494.1—2014 ,IEC 61378-1:2011,MOD)

GB/T 26218.1 污秽条件下使用的高压绝缘子的选择和尺寸确定 第1部分:定义、信息和一般原则(GB/T 26218.1—2010,IEC/TS 60815-1:2008,MOD)

GB/T 30790.6 色漆和清漆 防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护 第6部分:实验室性能测试方法(GB/T 30790.6—2014,ISO 12944-6:1998,MOD)

3 术语和定义

GB/T 2900.95界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

干式变压器 dry-type transformer

磁路和绕组均不浸于绝缘液体中的变压器。

3.2

全封闭干式变压器 totally enclosed dry-type transformer

置于无压力的密封外壳内,通过内部空气循环进行冷却,且内部空气与外界无交换的变压器。

3.3

封闭干式变压器 enclosed dry-type transformer

置于通风的外壳内,通过外部空气循环进行冷却的变压器。

3.4

非封闭干式变压器 non-enclosed dry-type transformer

不带防护外壳,通过空气自然循环或强迫空气循环进行冷却的变压器。

4 运行条件

4.1 概述

只要本文件中在某处引用了GB/T 1094.1,则GB/T 1094.1中的要求便适用于该处的内容。

4.2 正常使用条件

4.2.1 海拔

海拔按 GB/T 1094.1 的规定。

4.2.2 冷却空气和冷却水温度

冷却空气和冷却水温度按 GB/T 1094.1 的规定。

对于水冷变压器，如果水的温度与 GB/T 1094.1 和 GB/T 1094.2 所规定的不同，则应由供、需双方协商确定水的参数(温度、水流量等)。

除了水以外的液体也可以作为冷却介质，但该液体的技术数据应由供、需双方协商确定。

4.2.3 电源电压波形

正弦电源电压总谐波含量不超过 5%，偶次谐波含量不超过 1%。

当电源中存在的谐波电压的大小和频率超过这些限值时，用户应说明。

制造方应考虑到这些谐波带来的附加铁芯损耗，并考虑铁芯的饱和。

4.2.4 负载电流谐波含量

在询价阶段，用户应说明负载中产生的各次谐波电流的大小和频率。

制造方在计算绕组温升时应考虑由谐波电流引起的附加损耗，并考虑其对变压器其他金属部件的影响。

制造方应计算附加损耗，按照 GB/T 18494.1 的方法或供、需双方协商确定的如有限元分析的方法。

如果负载电流中的总谐波电流含量超过 5%，则应通过增加温升试验的试验电流来考虑这些谐波电流产生的附加损耗。按照 14.3.2 进行试验时，相应的温升不应超出表 2 的规定值。

4.2.5 三相电源电压的对称

三相电源电压的对称按 GB/T 1094.1。

4.2.6 安装环境

本文件定义的环境的特定分类如下：

a) 气候条件；
b) 湿度和污秽；
c) 燃烧性能；
d) 地震扰动；
e) 按照 GB/T 4798.4，包含以下定义的环境条件：
   1) 生物学条件 4B1；
   2) 化学活性物质 4C2；
   3) 机械活性物质 4S3；
   4) 机械条件 4M4。

注：对于拟安装在户内的变压器，上述环境条件中可能某些不适用。

4.2.7 涌流

如果有要求，则用户应在询价阶段给出系统涌流限值(最大值、持续时间)。

4.2.8 励磁频次

如果励磁频次超过 24 次/年，则供需双方应在协议中规定励磁频次。

4.2.9 防水及其他液体

变压器的安装场所应避免滴水、溅水和被水或其他液体淹没。

4.2.10 变压器周围的特殊电气和环境条件

GB/T 1094.3 推荐了安装的导电部件与变压器带电部件之间的最小距离。

当被雨水、盐水或其他导电液体浸湿时，由绝缘材料制成的安装部件的任何部分都能导电。变压器周围的局部放电会降低空气的介电强度。因此，这些安装部件与变压器的带电部分之间的距离至少应满足 GB/T 1094.3 的值。

减小安装的导电部件与变压器带电部分之间的距离需由供、需双方协商确定。

4.2.11 振动水平

设计变压器时应考虑变压器安装地点的结构振动，并应特别考虑传递到接线端子的应力。

用户应在询价阶段明确振动频谱，如果进行振动试验，则相关程序应在询价阶段由供、需双方协商确定。

4.2.12 防腐蚀

根据安装类型，用户宜根据 GB/T 30790.2 选择一种防腐等级，或由供、需双方协商确定。

4.2.13 维护

用户应按照制造方使用说明书对变压器进行维护，尤其要定期清洁，避免变压器上有积尘和污秽。

4.3 特殊使用条件

用户应在询价时提出未列入 4.2 正常使用条件中的任何使用条件，这些条件示例如下：

——环境温度的上限或下限超过了 4.2 的规定；
——通风受限；
——海拔超出 4.2 的规定；
——有害性烟雾和烟气；
——水蒸气；
——湿度超过 4.2 的规定；
——滴水；
——盐雾；
——导电性污染物；
——过量的和有腐蚀性的灰尘；
——负载电流中谐波含量超出 4.2 的规定；
——电源电压波形畸变超出 4.2 的规定；
——快速瞬变过电压峰值超出 11.1 的规定；
——修正相关功率因数和限制涌流的电容器投入方式；
——叠加的直流(DC)电流；
——要求在设计中进行特殊考虑的地震条件；

——巨大的机械冲击和振动；
——5.3 中未包括的运输和贮存条件；
——太阳辐射；
——励磁频次超过 24 次/年；
——频繁短路；
——电压与频率的比值超出 GB/T 1094.1 的规定值；
——不与发电机连接且低压侧无保护的馈电式发电机升压变压器；
——根据安装类别考虑防腐，宜按 GB/T 30790.2 选择防腐等级或与制造方协商确定；
——发电机变压器甩负载条件情况比 GB/T 1094.1 的规定更严酷。

变压器在这些非正常使用条件下运行时的技术规范应由供、需双方达成共识。

对于在 4.2 列出的正常使用条件之外的运行条件(如冷却空气温度高或海拔高于 1 000 m)下工作的变压器，其有关额定值和试验方面的补充要求见 10.2 和 10.3。

4.4 电磁兼容(EMC)

就产生电磁干扰和抗电磁干扰而言，变压器应被看成是无源元件。

5 额定值和一般要求

5.1 概述

制造方应规定出变压器的各种额定值并应将它们标志在铭牌上，见第 9 章。这些额定值应能使变压器在一次电压等于额定电压且电源频率为额定频率的稳定负载条件下输出额定电流，且温升不会超过第 10 章所规定的限值。

5.2 额定容量

5.2.1 概述

额定容量是指在连续负载下的值。它是负载损耗、温升及短路阻抗的保证值和测试值的依据。

注：双绕组变压器只有一个额定容量，且两个绕组的额定容量相同。当变压器一次绕组施加额定电压并通过额定电流时，变压器两个绕组承受了相应的额定容量。

额定容量是与连续负载工况相对应的。然而，符合本文件的变压器，能够在过负载下运行，有关其过负载运行的导则，见 GB/T 1094.12。

5.2.2 采用风机或换热器冷却时

应规定变压器每个绕组的额定容量并将其标志在铭牌上。额定容量是指在连续负载下的值。它是负载损耗及温升的保证值和测试值的依据。

如果在不同情况下指定不同的视在功率值，例如采用不同的冷却方式，则这些值中的最高值为额定容量。

当变压器使用风机或换热器冷却时，其不带风机或换热器运行时的标称额定容量应由供、需双方协商确定。

5.2.3 防护等级 IP00 的变压器(不带外壳)

应规定无外壳变压器每个绕组的额定容量，并将其标志在铭牌上，标志的额定容量应为不带外壳状态下的容量。

5.2.4 带外壳的变压器

本条规定了带外壳变压器的额定容量和带电部件与外壳间的距离，按下列两种情况：

a) 变压器安装在外壳内，带外壳做试验，然后整体交付至现场：
   1) 如果带电部件与外壳之间的距离不满足 GB/T 1094.3 的要求，则其距离应由制造方确定，例行试验中带外壳进行绝缘试验；
   2) 如果带电部件与外壳之间的距离满足 GB/T 1094.3 的要求，则进行例行绝缘试验带或不带外壳均可；
   3) 由于运输原因，可将外壳拆散，复装后带电部件与拆散外壳之间的距离应满足 GB/T 1094.3的要求；
   4) 不应降低额定容量；
b) 变压器和外壳分开交付或先后交付至现场：
   1) 有两种方法可以确定外壳的散热性能：
      ——按 GB/T 17467 确定降低的容量，外壳级别应由外壳制造商(或总包销售商)确定；
      ——外壳通风面积按附录 C 计算；
   2) 带电部件与外壳之间的距离应满足 GB/T 1094.3 的要求；
   3) 外壳上应装有铭牌，外壳的制造商或总包销售商负责确定带外壳变压器的额定容量。

5.2.5 额定容量优先值

变压器额定容量优先值应符合 GB/T 1094.1 的规定。

5.2.6 高于额定容量的负载

高于额定容量的负载应符合 GB/T 1094.12 和 GB/T 1094.1 的规定。

5.3 运输和贮存

5.3.1 运输限制

如果对运输尺寸或重量有限制，则应在询价时提出。

如果还有其他特殊要求，则也应同时提出。

5.3.2 运输加速度

变压器应设计和制造成能在各个方向上承受至少 3 g 的持续加速度(在竖直方向的重力加速度除外)而无损坏。

如果制造方不负责运输，且运输中的加速度可能超过 3 g，则在询价时应对加速度和发生的频度进行规定。如果用户规定了更高的加速度，则制造方应在设计中予以考虑，并且应对运输和包装提出一些建议。

如果变压器拟作为移动式应用，则应在询价时说明。

注：大型变压器运输过程中通常使用撞击或冲击记录仪。

5.3.3 运输和贮存的温度及环境条件

所有变压器应能在环境温度低至－25 ℃时适于运输和贮存。

对于其他环境温度的运输和贮存条件见 12.1。

在运输和贮存过程中，变压器应防污、防水等。

5.4 额定电压和额定频率

5.4.1 额定电压

额定电压按 GB/T 1094.1 的规定。

5.4.2 额定频率

额定频率按 GB/T 1094.1 的规定。

5.5 高于额定电压的运行

高于额定电压的运行按 GB/T 1094.1 的规定。

注 1：本要求并不是正常运行条件。这种情况下铁芯损耗的增加会产生不利影响，除非这种运行的持续时间是受限的。这种情况仅限于比较少见的且运行时间有限的场合，如急救负载或极端峰值负载。

注 2：欠励磁不会使额定电流增大。

5.6 设备最高电压 U_m 和绝缘试验水平

如用户无另行规定，则线路端子的 U_m 值（设备最高电压）应取表 3 中等于或略大于每个绕组的额定电压的值。

如用户无另行规定，则绝缘试验水平应取与表 3 给出的 U_m 对应的最高值。

5.7 冷却方式的标志

5.7.1 概述

用户应指定冷却介质（空气或水）。

如果用户对冷却方式或冷却设备有特殊要求，则应在询价阶段说明。

5.7.2 标志代号

变压器应按所采用的冷却方式进行标志。与各种冷却方式相关联的字母代号如表 1 所示。

表 1 字母代号

冷却介质及循环		字母代号
冷却介质类型	空气	A
	水	W
循环种类	自然循环	N
	强迫循环	F

5.7.3 字母代号的排列

变压器的每一种冷却方式（制造方所规定的变压器各额定容量是按冷却方式确定的）均应用两个字母代号进行标志，其典型标志如下：

——当变压器被设计成自然空气循环时，其标志代号为 AN；

——当变压器被设计成在采用自然空气循环时达到一定容量，而同时采用辅助强迫空气循环可达到更大容量运行时，其标志代号为 AN/AF；

——当变压器被设计成水冷热交换器强迫循环时，其标志代号为 AFWF；

——当变压器被设计成线圈内带强迫水循环时，其标志代号为 WF。

5.8 额定条件下的温升保证值

变压器的设计应符合用户在询价阶段所提出的运行条件（谐波含量、环境温度等）。

温升保证值应考虑到由谐波（如果有）引起的附加损耗，这会增加绕组和结构/框架部件中的涡流损耗和杂散损耗。

如果在设计阶段没有规定谐波，但实际运行的负载电流包含谐波，则可能需要降低变压器的负载或改善冷却效果，以防止变压器温升超出限值。

5.9 询价阶段所需的其他信息

变压器的类型应由用户指定，例如独立绕组变压器、自耦变压器或串联变压器。

5.10 声级水平

声级水平按 GB/T 1094.1 的规定。

5.11 部件和材料

除用户同意或另有规定外，变压器结构中使用的所有零部件和材料应符合已有的相关标准的要求。

6 分接

GB/T 1094.1 的要求适用于无励磁分接开关（DETC）和有载分接开关（OLTC）。

对于无励磁调压变压器，分接范围的优先值如下：

——±2.5%或±5%（3 个分接位置）；

——±5%（5 个分接位置，每级为 2.5%）。

对于无励磁调压变压器，分接的选择可采用连接片或无励磁分接开关来实现。

7 联结组

变压器的联结按照 GB/T 1094.1 的规定。如果用户无其他规定，则联结组标号宜采用 Dyn11。中性点的连接应能承载额定相电流。

8 承受短路的能力

变压器应能满足 GB/T 1094.5 的要求。如果用户要求通过试验来验证是否满足，则该试验项目应在订货合同中明确规定。

9 铭牌

9.1 固定于变压器上的铭牌

每台变压器均应装有铭牌，铭牌的材料应不受气候影响，并应固定在明显可见的位置。铭牌上所标志的内容应永久保持清晰（可采用蚀刻、雕刻、打印或光化学处理等方式）。下述各项内容应标志在铭牌上：

a) 干式变压器；
b) 本文件编号；
c) 制造方名称和变压器装配所在地(国家、城镇)；
d) 出厂序号；
e) 制造年月；
f) 产品型号；
g) 每个绕组绝缘系统对应的耐热等级(按照 GB/T 11021 可用温度或字母，或二者的组合表示)，第一个耐热等级代表高压绕组，第二个耐热等级代表低压绕组。当超过两个绕组时，耐热等级应按照从高压绕组到低压绕组的顺序依次排列；

注：当各绕组的耐热等级相同时，可只标注一个绕组。

h) 相数；
i) 额定容量；
j) 每种冷却系统的视在功率；
k) 额定频率；
l) 额定电压，包括各分接电压(如果有)；
m) 每种冷却方式下的额定电流；
n) 联结组标号；
o) 在额定电流及相应参考温度下的短路阻抗；
p) 冷却方式；
q) 总质量；
r) 每个绕组的绝缘水平，按照 GB/T 1094.3 的方法标志；
s) 防护等级；
t) 环境等级；
u) 气候等级；
v) 燃烧性能等级；
w) 地震等级或地板加速度(如果有)；
x) 最高海拔(如果超过 1 000 m)；
y) 每个绕组的温升限值(当不同于表 2 中的保证值时)。

9.2 固定于变压器外壳上的铭牌

如果变压器带外壳，则铭牌装于外壳上。每台变压器外壳均应装有铭牌，铭牌的材料应不受气候影响，并应固定在明显可见的位置。铭牌上应标出的各项内容见 9.1。所标志的内容应永久保持清晰(可采用蚀刻、雕刻、打印或光化学处理等方式)。

10 温升限值

10.1 正常温升限值

按正常运行条件设计的变压器，当按 14.3.2 进行试验时，其每个绕组的平均温升均不应超过表 2 中所列出的相应限值。

对于风冷或水冷的变压器，绕组平均温升是指绕组平均温度与冷却设备入口处的冷却水或冷却空气的温度的差值。

当绕组绝缘系统中某处的温度是最大值时，则称此温度为热点温度。热点温度不应超过 GB/T 1094.12—2013 的表 2 中规定的绕组最高热点温度值。热点温度虽可测量，但为实用可通过

GB/T 1094.12—2013 的 5.8 中给出的 Z 值、q 值和式(9)计算其近似值。

作为绝缘材料的各部件可以分开使用，也可以组合使用，只要它们各自的温度不超过表 2 第一栏所给出的相应绝缘系统温度。

铁芯、金属构件及其邻近处材料的温度不应对变压器任何部分造成损坏。

表 2 绕组温升限值

绝缘系统耐热等级(见注 1)	额定电流下的绕组平均温升限值(见注 2) K
105 级(A)	60
120 级(E)	75
130 级(B)	80
155 级(F)	100
180 级(H)	125
200 级(N)	135
220 级(R)	150
250 级 (见注 3)	175
注 1：有关温度等级的字母见 GB/T 11021。 注 2：温升测量按 14.3.2 进行。 注 3：耐热等级超过 250 的可按 25 间隔递增的方式表示。 注 4：表中的值所对应的正常环境温度按 GB/T 1094.1。	

本文件认为变压器不同部件的运行温度，是外部冷却介质温度(冷却空气或冷却水)与变压器该部件温升的总和。

10.2 为较高冷却介质温度或特殊冷却介质条件设计的变压器的温升限值降低

当变压器是按下列运行条件设计的，即冷却空气温度超过 4.2 所规定的各最大值中的某一个时，则变压器的温升限值应按超过的数值降低，并应将其修约到最接近的整数值，单位为 K。

如果现场条件可能会使冷却介质受限，或产生高的环境介质温度，则用户应予以阐明。

10.3 高海拔处的温升修正

当所设计的变压器是在海拔超过 1 000 m 处运行，而其试验却在正常海拔处进行时，如果制造方与用户间无另外协议，则表 2 中所给出的温升限值应根据运行地点的海拔超过 1 000 m 的部分，以每 100 m为一级，按下列数值相应降低：

——对于自冷式变压器：0.5%；

——对于风冷式变压器：1%。

如果变压器的试验是在海拔高于 1 000 m 处进行，而安装现场的海拔却低于 1 000 m 时，则温升限值要作相应的逆修正。

经海拔修正后的温升限值，应修约到最接近的整数值，单位为 K。

11 绝缘水平

11.1 概述

绝缘水平应符合表3的规定。

表3 绝缘水平

单位为千伏

系统标称电压（方均根值）	设备最高电压 U_m（方均根值）	外施耐受电压 AV（方均根值）	雷电全波冲击耐受电压（峰值）	
			系列Ⅰ	系列Ⅱ
≤1	≤1.1	3	—	—
3	3.6	10	20	40
6	7.2	20	40	60
10	12	35	60	75
15	17.5	38	75	95
20	24	50	95	125
35	40.5	70	145	170
66	72.5	140	250	325

注：如果用户另有要求，则 U_m 为40.5 kV的绝缘水平也可按外施耐受电压为80 kV、系列Ⅰ的雷电全波冲击耐受电压为170 kV、系列Ⅱ的雷电全波冲击耐受电压为200 kV选取，但需要在订货合同中注明。

应按变压器遭受雷击过电压和操作过电压的程度、系统中性点的接地方式以及过电压保护装置的类型（如果采用）来选择系列Ⅰ或系列Ⅱ的耐受电压值，按照GB/T 311.1和GB/T 311.2的规定。

注：可能会发生这样的情况，某些分接电压值略高于某个 U_m 标准值，但绕组将要接入的系统的最高电压在这个 U_m 标准值以内。那么可根据实际情况确定绝缘要求，这个标准值可作为变压器的 U_m 值，而不是最接近的更高值。

示例：

U_r=23.8 kV（分接范围为±5%）宜适用 U_m 为24 kV的绝缘水平。

U_r=11.8 kV（分接范围为±5%）宜适用 U_m 为12 kV的绝缘水平。

11.2 用于高海拔处的变压器

空气的介电强度随海拔的升高而减小。当规定变压器在海拔为1 000 m以上的高度运行时，设计应考虑到空气介电强度的降低。

当变压器被规定在海拔为1 000 m～4 500 m运行，但试验在另一个海拔处进行时，应按照表4对试验电压进行校正。此校正只适用于外施耐压试验，而不适用于其他绝缘试验。

在进行外施耐压试验时，试验电压值应乘以系数 T_{cf}（试验地点海拔修正系数与安装地点海拔修正系数的比值）。

表 4　外施耐受电压水平修正系数

海拔 m	安装地点海拔修正系数	试验地点海拔修正系数
<1 000	1.0	1.0
1 200	0.98	0.98
1 500	0.95	0.95
1 800	0.92	0.92
2 100	0.89	0.89
2 400	0.86	0.86
2 700	0.83	0.83
3 000	0.80	0.80
3 600	0.75	0.75
4 200	0.70	0.70
4 500	0.67	0.67

当海拔超过 4 500 m 时，绝缘水平应由供、需双方协商确定。

对于表 4 中未列出的海拔，可以通过对表 4 中数据进行插值法计算。

12　气候、环境和燃烧性能等级

12.1　气候等级

规定以下几种气候等级：

C1 级：变压器适合在不低于－5 ℃的环境温度下运行，但其运输和贮存时的环境温度可低至－25 ℃。

C2 级：变压器适合于在低至－25 ℃的环境温度下运行、运输和贮存。

C3 级：变压器适用于在－40 ℃的环境温度下运输和贮存，在－25 ℃的环境温度下运行。

C4 级：变压器适用于在－50 ℃的环境温度下运输和贮存，在－40 ℃的环境温度下运行。

C5 级：变压器适用于在－60 ℃的环境温度下运输和贮存，在－50 ℃的环境温度下运行。

Cxy 级：变压器适用于在－X ℃的环境温度下运输和贮存，在－Y ℃的环境温度下运行。

Cxy 级的定义应由用户与制造方协商确定，制造方提供运输和贮存温度(X)及运行温度(Y)。

变压器在经过 14.4.3 所述程序进行的特殊试验后，应表明其符合 C1 级、C2 级、C3 级、C4 级或 C5 级的要求。

如果变压器符合某一气候等级，则也应被视为符合严酷程度较轻的等级。

12.2　环境等级

12.2.1　带或不带外壳的户内变压器和带外壳的户外变压器

变压器的环境条件是指湿度、凝露、污秽和环境温度。在贮存和运行中，应防止水或其他导电物质滴落在线圈和导电部件表面。

根据湿度、凝露和污秽的程度，对没有特别外部保护措施的变压器，规定了五种不同的环境类别：

E0 级：变压器上没有凝露，且污秽可以被忽略。对于清洁、干燥的户内式安装，通常可以达到这一等级。

E1 级：变压器上偶尔有凝露（如：当变压器无励磁时），可能会出现有限的污秽。

E2 级：变压器上经常有凝露或轻度污秽，或两者同时都有。

注 1：变压器可直接接触的环境，例如：

——非工业区和配有供热设备的低密度居住区；

——低密度工业区或住宅区且经常有刮风和/或降雨的地区；

——农业区；

——山区。

以上地区至少离海洋 15 km，不直接受海风影响。

E3 级：变压器上经常有凝露或中度污秽，或两者同时都有。

注 2：变压器可直接接触的环境，例如：

——不产生特殊污染烟尘的工业区，和/或配有供热设备的中等密度居住区；

——经常刮风和/或降雨的高密度居住区和/或工业区；

——受海风影响，但不是太靠近海岸（至少几公里远的地区）。

E4 级：变压器上经常有凝露或重度污秽，或两者同时都有。

注 3：变压器可直接接触的环境，例如：

——产生污染的高密度工业区或配有高密度供热设备的大城市城郊地区；

——近海或经受相对强劲海风的地区。

变压器在经过按 14.4.4 所述程序进行的特殊试验后，应表明其符合 E1 级、E2 级、E3 级或 E4 级的要求。

如果变压器符合某一环境等级，则也应被视为符合严酷程度较轻的等级。

对于更高的凝露以及更严重的污染水平，供、需双方需协商提供合适的防护外壳。

注 4：变压器可直接接触的环境，例如：

——靠近工业区，会受到导电粉尘和能产生特别厚的导电性积尘的工业烟气的影响；

——靠近海岸，暴露于盐雾或来自海洋的强风和污秽风的地区；

——沙漠地区，长期不下雨，暴露在携带沙子和盐的强风中，并经常凝露。

12.2.2 户外用无外壳变压器

此类变压器的环境条件是指湿度、凝露、污秽、环境温度和太阳紫外线辐射（UV）。

变压器可安装在室外，没有外壳（IP00），并能经受雨、雪或冰雹。

E-0-1 级：农村或低污秽地区。

E-0-2 级：市区、工业区或中度污秽地区。

E-0-3 级：沿海地区或重度污秽地区。

变压器在经过按附录 D 所述程序进行的特殊试验后，应表明其能符合 E-0-1 级、E-0-2 级、E-0-3 级的要求。

如果变压器符合某一环境等级，则也应被视为符合严重度较轻的等级。

12.3 燃烧性能等级

规定以下两种燃烧性能等级：

F0 级：无需特别考虑火灾危险。除变压器设计中固有的特性外，不采取特殊的措施来限制其可燃性。不过，应使其在燃烧时所逸出的有毒物质和不透明烟雾降至最低程度。

F1 级：变压器易遭受火灾危险，要求限制其可燃性。应使其在燃烧时所逸出的有毒物质和不透明

烟雾降至最低程度。

变压器在经过 14.4.5 所述程序进行的特殊试验后，应表明其能符合 F1 级的要求。

12.4 气候、环境和燃烧性能等级的试验准则

当变压器被宣称符合某一气候、环境和燃烧性能等级组合时，应按表 5 给出的试验顺序，在一台变压器上进行这些相应的试验，以验证其是否符合所宣称的相应等级要求。可在整台变压器或根据单个试验要求在变压器部件上进行气候、环境和燃烧性能试验。

由于判定值（温度、烟度限值等）受发热量和试验室限制，因此燃烧试验的最大额定容量为 1 000 kVA，设备最高电压为 12 kV 或 24 kV。

宣称符合这些等级的变压器，其生产应与样机变压器使用相同的设计概念、标准、原材料和生产工艺。样机变压器应来自标准化的生产，并应与其他任何变压器一样，可用于电网供电。

制造方应能向用户出示通过了气候、环境和燃烧性能组合试验的变压器的图纸、原材料清单，以及该变压器的例行试验报告。等效判定依据见相关条款。

对于额定容量大于 1 000 kVA 或设备最高电压超过 24 kV 的变压器，只有当制造方持有根据表 5 描述的针对额定容量为 1 000 kVA 且设备最高电压为 24 kV 的变压器的完整试验顺序的证书时，气候试验和环境试验才有效，见 14.4.3.4 及 14.4.4.3。

表 5 试验顺序

等级			气候	环境		燃烧	
试验		条款	C1、C2、C3、C4、C5、Cxy	E0	E1、E2、E3、E4、E-0-1、E-0-2、E-0-3	F0	F1
1	气候试验	14.4.3	进行	—	—	—	—
2	环境试验	14.4.4 附录 D	—	不进行	进行	—	—
3	燃烧试验	14.4.5	—	—	—	不进行	进行

变压器应按表 5 的试验顺序分别在对应的试验室完成试验。

13 抗震性能

抗震性能按附录 E 的规定。

14 试验

14.1 试验的一般要求

新变压器应按本文件的要求进行例行试验。

已运行过的变压器，可按本文件的规定进行试验，但绝缘试验施加电压值宜降至原来新变压器的 80%。

试验应由制造方进行，或在认可的试验室进行，供、需双方在投标阶段另有协议时除外。

变压器在进行例行试验时，其温度应与试验场所的温度接近。

试验应在相关附件安装好后的完整变压器上进行。

带分接的绕组应在主分接上进行试验，但有关试验条款另有规定或供、需双方另有协议时除外。

除绝缘试验外，变压器其他所有特性的试验均以额定条件为基础，但有关试验条款另有规定时除外。

14.2 例行试验

14.2.1 绕组电阻测量

本试验按 GB/T 1094.1—2013 中 11.2 的规定。

14.2.2 电压比测量和联结组标号检定

本试验按 GB/T 1094.1—2013 中 11.3 的规定。

14.2.3 短路阻抗和负载损耗测量

本试验按 GB/T 1094.1—2013 中 11.4 的规定。

带分接变压器的短路阻抗和负载损耗测量应在主分接下进行。其他分接测量和超过 5%的极限分接测量对于每个设计都是必需的，如需作为例行试验，可在询价时明确。

短路阻抗和负载损耗的参考温度应等于表 2 中第 2 栏给出的绕组平均温升限值再加上 20 ℃。

如果绕组平均温升限值与表 2 不同，则短路阻抗和负载损耗的参考温度应按绕组平均温升限值加上由用户提供的外部冷却介质的年平均温度。

如果冷却介质的三个温度中有一个发生改变（见 4.2），而另外两个温度用户没有规定，则冷却介质的另外两个温度应相应地改变（见下面的示例）。

当变压器有不同的绕组温升限值时，计算 I^2R 损耗的参考温度应是各自绕组的温升限值加上 20 ℃，或加上由用户给出的外部冷却介质的年平均温度，这两个温度取更高值计算。用来计算所有其他损耗的参考温度应是绕组温升的平均值加上 20 ℃或加上由用户给出的外部冷却介质的年平均温度，这两个温度取更高值计算。如果绕组材质不同和/或参考温度不同，则按照附录 F 计算附加损耗时应采用平均值，并用做铭牌和技术文件的参考温度。

示例 1：

如果外部冷却介质的某时最高温度是 50 ℃，则最热月份的月平均温度将变成 40 ℃，而年平均温度是 30 ℃。

如果最热月份的月平均值是 35 ℃，则外部冷却介质的某时最高温度为 45 ℃，而年平均温度是 25 ℃。

示例 2：

高压的绝缘耐热等级是 180，温升限值是 125 K。

低压的耐热等级是 155，温升限值是 100 K。

对于高压，I^2R 按照参考温度 145 ℃计算。

对于低压，I^2R 按照参考温度 120 ℃计算。

附加损耗用平均温升(125＋100)/2 ＝112.5＋20＝132.5(℃)来计算。

14.2.4 空载损耗和空载电流测量

本试验按 GB/T 1094.1—2013 中 11.5 的规定。

14.2.5 外施耐压试验(AV)

本试验按 GB/T 1094.3—2017 中第 10 章的规定。

试验电压应与本文件的表 3 和 11.2 中要求的变压器绝缘水平一致。

全试验电压应施加于被试绕组与接地的其余绕组、铁芯、框架和变压器外壳之间，施加电压时间为 60 s。

14.2.6 感应耐压试验(IVW)

本试验按 GB/T 1094.3—2017 中 11.2 的规定。

试验电压应等于两倍的额定电压。

当试验频率不超过两倍额定频率时,试验时间应为 60 s。当试验频率超过两倍额定频率时,其试验时间应为:

$$120\times\frac{\text{额定频率}}{\text{试验频率}}\text{(s)},\text{但不少于 15 s}$$

14.2.7 局部放电测量

14.2.7.1 概述

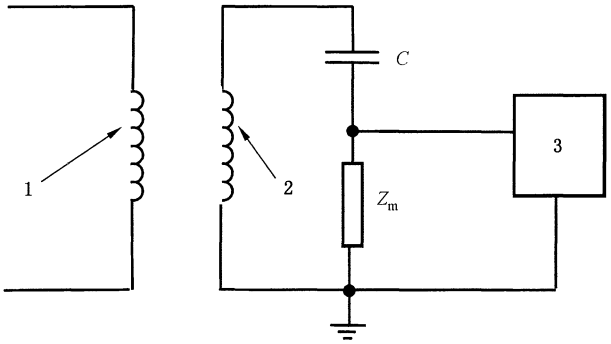
所有变压器均应进行局部放电测量。测量应按 GB/T 7354 和 GB/T 1094.3—2017 的附录 F 进行。

局部放电测量应在 $U_m \geqslant 3.6$ kV 的绕组上进行。

14.2.7.2 基本测量线路(仅为典型线路)

局部放电试验的基本测量线路见图 1 和图 2。

图 1 和图 2 中 C 表示一台电压额定值适当的无局部放电的高压电容器(其电容值与校准发生器的电容 C_a 相比应足够大)。该电容器与测量阻抗 Z_m 串联,且与每个被试高压绕组端子相连接。



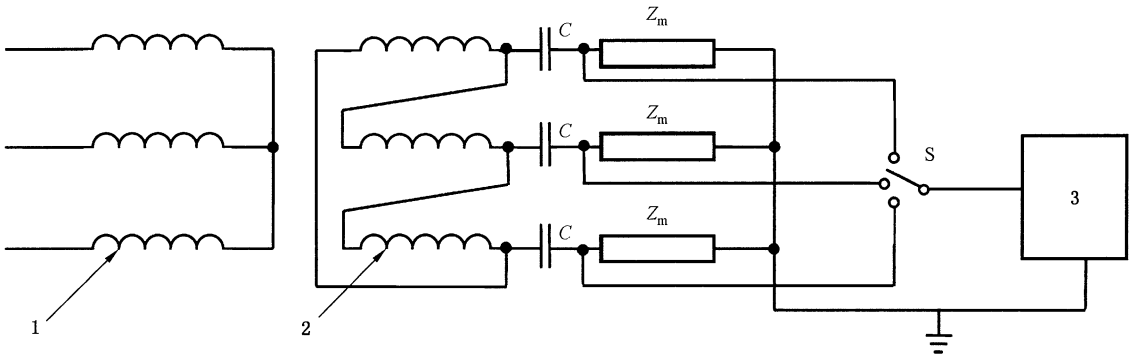
标引序号说明:

1——低压绕组;

2——高压绕组;

3——测量仪器。

图 1 单相变压器局部放电试验的基本测量线路



标引序号和符号说明：

1——低压绕组；

2——高压绕组，D结或Y结；

3——测量仪器；

S——转换开关。

图 2　三相变压器局部放电试验的基本测量线路

14.2.7.3　测量线路的校准

在绕组内部和测量线路中，均会出现放电脉冲的衰减现象。校准按照GB/T 1094.3—2017中附录F的规定进行，将一台标准的校准发生器产生的模拟放电脉冲施加到变压器高压绕组端子上。为了方便，可使校准发生器的重复频率与变压器试验时所用电源频率的每半周中有一个脉冲相当。

14.2.7.4　电压施加方式

局部放电测量应在所有绝缘试验项目完成后进行。根据变压器是单相还是三相结构，来决定其低压绕组是由单相电源还是三相电源供电。试验电压波形应尽可能是正弦波，且试验频率应适当的比额定频率高些，以免试验期间励磁电流过大。三相变压器试验程序按14.2.7.5，单相变压器试验程序按14.2.7.6。

14.2.7.5　三相变压器

本试验应在所有变压器上进行。施加电压方式见图3。

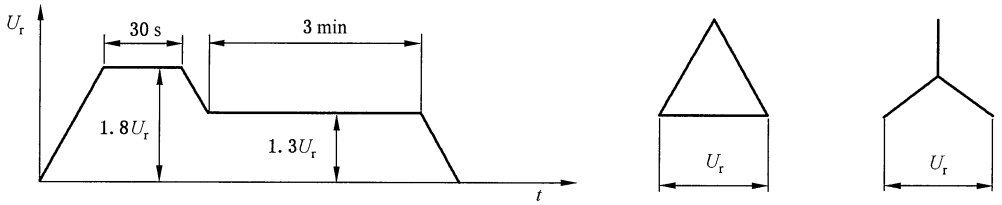


图 3　局部放电例行试验的施加电压方式

相间预加电压为1.8 U_r（U_r为额定电压），加压时间为30 s。然后不中断电源，将相间电压降至1.3U_r，保持3 min，在此期间应进行局部放电测量。

14.2.7.6　单相变压器

对于单相变压器，U_r应视实际情况，为线间电压或线与中性点间电压。施加电压方式按三相变

压器。

对于由三台单相变压器组成的三相变压器，其试验要求应与三相变压器相同。

14.2.7.7 局部放电接受水平

局部放电水平的最大值为 10 pC。

应对装有附件（如避雷器）的变压器进行特殊考虑。无局部放电意味着局部放电测量值小于 10 pC。

14.3 型式试验

14.3.1 雷电全波冲击试验（LI）

如果无其他特别规定，则本试验按 GB/T 1094.3 的规定。

如果分接范围不超过±5%且额定容量不大于 2 500 kVA，则雷电冲击试验应在变压器的主分接进行。

当分接范围超过±5%或额定容量大于 2 500 kVA，除非另有规定，否则试验应在变压器的两个极限分接和主分接进行，在三相变压器的每相或三相组变压器的每台单相变压器上的每个分接进行。

变压器的试验电压水平应按表 3 的规定。

冲击试验采用的波形应为 1.2×(1±30%)μs / 50×(1±20%)μs。

试验电压应是负极性的，每个线端上的试验顺序为：一次在 50%～70%全电压的参考冲击，随后进行三次全电压的冲击。

供、需双方在询价阶段协商确定是否进行正极性电压下的特殊试验。

如果用户在询价阶段要求按 GB/T 1094.3 进行雷电截波冲击试验（LIC），则该试验电压值应与表 3 中给出的雷电全波冲击试验电压峰值相同。

注：变压器在进行雷电冲击试验时，可能会引起空气中的电容性局部放电，但它并不对绝缘产生危害。此局部放电会使示伤电流波形发生变化，但此时的电压波形只有微小变化甚至不发生变化。考虑到上述说明，示伤电流波形有轻微的畸变不能作为拒绝该产品的理由。

14.3.2 温升试验

14.3.2.1 概述

如果无其他特别规定，则本试验按 GB/T 1094.2 的规定。

对于分接范围不超过±5%且额定容量不超过 2 500 kVA 的变压器，温升限值适用于额定电压对应的主分接。

对于分接范围超过±5%或额定容量大于 2 500 kVA 的变压器，温升限值适用于适当分接容量下的最小分接电压。分接电压和分接电流应由供、需双方协商确定。

注 1：在不同分接下负载损耗是不同的。当指定是变磁通调压时，空载损耗也是不同的。

三相变压器的温升试验应使用三相电源进行。

如果在正常运行条件下负载电流中含有谐波，则与损耗等效的电流值应由供、需双方按 4.2 确定。

绕组温升可通过电阻法或叠加法来确定。为确定平均绕组温升，应测量冷却空气或冷却设备入口处水的温度。

对于三相变压器，其电阻测量应在中间相和一个边相绕组的线端之间进行。

注 2：当测量温升时，建议测量靠近绕组引线根部的绕组电阻。

环境温度和变压器传感器（如果有）的测量点位置，无论是作为参考还是最终测量，均应相同。

14.3.2.2 施加负载的方法

14.3.2.2.1 概述

除非在询价阶段用户特别规定，制造方可以从下列几种方法中任选其一：

——模拟负载法；

——相互负载法；

——直接负载法。

这些方法适用于非封闭、封闭或全封闭的干式自冷、风冷或水冷变压器。

14.3.2.2.2 模拟负载法

温升值是通过短路试验(提供负载损耗)和空载试验(提供空载损耗)的组合来确定的。

绕组短路试验应是在一个绕组通过额定电流而另一个绕组短路下进行的，且持续到绕组和铁芯温度都达到稳态时为止，见 14.3.2.4。

在额定频率和额定电压下的空载试验，应持续到绕组和铁芯温度都达到稳定时为止，见 14.3.2.4，然后测量各绕组的温升 $\Delta\theta_e$。

试验步骤按下列两步进行，对顺序无要求：

——进行绕组短路试验，直到铁芯和绕组温度达到稳定为止；

——进行空载试验，直到铁芯和绕组温度达到稳定为止。

在绕组通过额定电流和铁芯为额定励磁的情况下，每个绕组的总温升 $\Delta\theta_c'$用式(1)来计算：

$$\Delta\theta_c' = \Delta\theta_c\left[1+\left(\frac{\Delta\theta_e}{\Delta\theta_c}\right)^{\frac{1}{K_1}}\right]^{K_1} \qquad \cdots\cdots(1)$$

式中：

$\Delta\theta_c'$——绕组总温升；

$\Delta\theta_c$ ——短路试验下的绕组温升；

$\Delta\theta_e$ ——空载试验下的绕组温升；

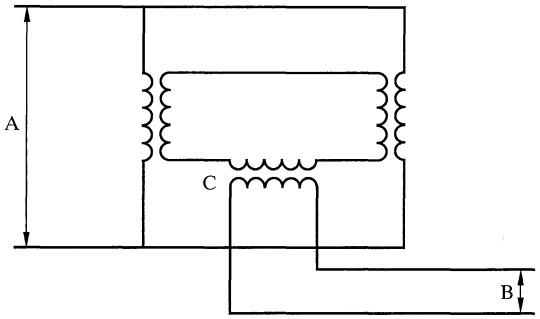
K_1 ——对于自冷式为 0.8，对于风冷式为 0.9。

14.3.2.2.3 相互负载法

如果有两台合适的变压器，且试验室具有必需的试验设备时，则适合采用本方法。

将两台变压器并联连接，其中一台为被试变压器，且最好是对这两台变压器的内部绕组以被试变压器的额定电压进行励磁。利用两台变压器的电压比不同或另输入某一电压的方法，使被试变压器绕组中通过额定电流，直到铁芯和绕组温度达到稳定时为止，见图 4 和图 5。

注：如果在绕组通过试验电流之前，先对铁芯励磁一段时间(最好不少于 12 h)，则可缩短试验时间。



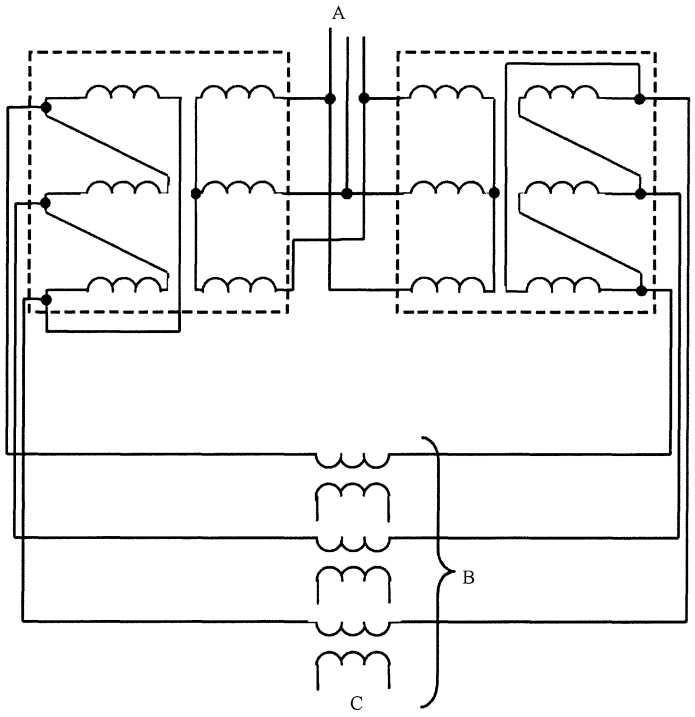
标引符号说明：

A——供产生空载损耗的额定频率的电压源；

B——供产生负载损耗的额定频率的额定电流源；

C——增压变压器。

图 4　单相相互负载法示例



标引符号说明：

A——供产生空载损耗的额定频率的电压源；

B——供产生负载损耗的额定频率的额定电流源；

C——增压变压器。

图 5　三相相互负载法示例

14.3.2.2.4　直接负载法

由于试验室功率限制，因此本方法仅适用于小变压器。

将变压器的一个绕组，最好是内部绕组，在额定电压下励磁，另一个绕组连接适当的负载，以使两个绕组都通过额定电流。

14.3.2.3 降低电流下的绕组温升校正

当输入的试验电流 I_t 低于额定电流 I_N，但不低于 $90\%I_N$ 时，待铁芯和绕组温度均达到稳定后，应用电阻法测得绕组温升 $\Delta\theta_t$，并按式(2)将其校正到额定负载下的温升 $\Delta\theta_N$：

$$\Delta\theta_r = \Delta\theta_t \left[\frac{I_r}{I_t}\right]^q \quad \cdots\cdots(2)$$

式中：

$\Delta\theta_r$ ——额定负载下的绕组温升；

$\Delta\theta_t$ ——试验电流下的绕组温升；

I_r ——额定电流；

I_t ——试验电流。

q 的取值为：

——对于自冷式(AN)变压器为 1.6，对于风冷式(AF)变压器为 1.8；

——对于其他冷却系统，q 值应由供、需双方协商确定。

14.3.2.4 稳态条件的确定

当温升值趋于稳定，即每小时的温升变化值不超过 1K 时，则认为温升已达到最终值。

为了确定已达到稳定温升时的条件，应将热电偶或温度计置于变压器的上铁轭中心处且尽可能紧靠低压绕组顶部处的导体上。对于三相变压器，此测量应在中间的芯柱上进行。

对于其他特殊情况，稳态条件的确定应由供、需双方协商确定。

14.3.3 声级测定

本试验按 GB/T 1094.10 的规定。

注：声级保证值基于自由场条件，现场需注意由于坚硬的建筑物墙面、地面和天花板的反射，会使声级水平明显增加。

14.4 特殊试验

14.4.1 单相对地故障条件下变压器的局部放电测量

本特殊试验针对连接到中性点绝缘系统或中性点通过高阻抗接地系统，且能在单相对地故障条件下继续运行的变压器进行。本试验只有在用户要求时进行。

本试验是在一个线端接地时，先施加相间预加电压 $1.3\,U_r$。加压时间为 30 s，然后不中断直接将相间电压降至 U_r，保持 3 min，在此期间应进行局部放电测量(见图 6)。此后依次将另一个线端接地，重复进行本试验。

所有其他准则按 14.2.7。

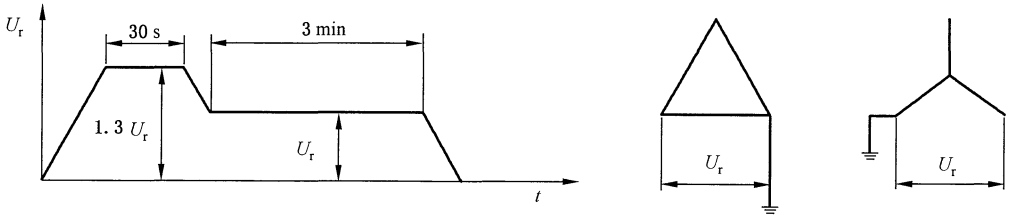


图 6 局部放电特殊试验的施加电压方式

14.4.2 短路承受能力试验

如无其他规定，本试验按 GB/T 1094.5 的规定。

14.4.3 气候试验

14.4.3.1 试验程序

本试验用于确定变压器对气候等级的符合性。

气候试验分为两个阶段：

——贮存试验阶段；

——通电试验阶段。

对于每一个气候等级，这些试验阶段的环境温度按表 6 的规定。

表 6 气候等级特性

气候等级	贮存环境温度(SAT) ℃	通电环境温度(EAT) ℃
C1	−25	−5
C2	−25	−25
C3	−40	−25
C4	−50	−40
C5	−60	−50
Cxy	$-X$	$-Y$

14.4.3.2 试验方法

试验应在一台不带外壳(如果有)的完整变压器上进行，被试变压器应置于试验箱内。

试验箱内的环境温度至少应由三个测量点来确定，测量点应距试品外表面 0.1 m 处，高度在试品 1/2 位置处，取各测量点读数的平均值作为空气温度参考值。

根据供、需双方的协议，气候试验可以在所有从铁芯上移出的线圈上进行，并应在重新装配好被试线圈的变压器上进行最后的绝缘检查。

试验程序如下。

a) 将试验箱内的空气温度在 8 h 内逐渐降到贮存环境温度(SAT)，偏差±3 ℃，然后至少保持 12 h，直到达到稳定状态(每小时温度变化小于 1 K)。

b) 此后将试验箱内的空气温度在约 4 h 内逐渐上升到通电环境温度(EAT)，偏差± 3 ℃，并至少保持 12 h，直到达到稳定状态。如果通电环境温度和贮存环境温度相同，则该步骤省略。

c) 然后对被试绕组(封闭于固体绝缘内如浇注线圈或者真空浸渍敞开绕组)施加两倍额定电流以进行热冲击试验。应维持此电流直到被试绕组的实测平均温度等于表 2 中给出的绕组平均温升限值加上 40 ℃(正常使用条件下的最高环境温度)。如果 12 h 后被试绕组的实测平均温度没有达到该温度限值，则该试验也可认为是完成了。绕组达到的平均温度根据电阻变化值来确定。可选择下述方法之一来进行热冲击试验。

1) 直流电源试验法

热冲击试验是通过在被试绕组上施加指定的直流电流进行。对于多相变压器，应对所有

相线圈串联施加测试电流。

注 1：为使各相线圈串联在一起，可能需要拆除绕组连接。

试验过程中对绕组平均温度的监测，可直接用测量试验电流和相应电压降的伏安法来进行。

2） 交流电源试验法

热冲击试验通过在被试绕组上施加指定的交流电流进行，此时，其余绕组短路。对于多相变压器，宜采用对称电流系统来进行本试验。试验过程中对绕组平均温度的监测，宜采用将直流测量电流叠加到交流试验电流上的方法或其他等效的方法来进行。

非被试线圈可允许过热。

3） 另一种交流电源试验法

在一个绕组短路的情况下，对变压器施加两倍额定电流。通过固定在绕组顶部和底部附近表面处的温度传感器的读数，来监测每个绕组的温度。温度传感器要通过一种校准试验来进行校准，此校准试验是在实际热冲击试验前的正常环境温度下，通过施加两倍额定电流来进行的。

传感器的校准是通过将传感器的读数与根据绕组电阻值的变化所测定的绕组温升进行比较来实现的。这样，传感器的读数与表 2 中所给出的绕组平均温升限值加上 40 ℃的值相对应。应在从低环境温度开始的试验中，读取同一传感器的读数。

非被试线圈可允许过热。

注 2：由于变压器各部分的热瞬态特性不同，故要注意防止某些线圈出现过热现象。

d） 热冲击试验后，应将变压器温度恢复到 25 ℃±10 ℃。

14.4.3.3 试验准则

热冲击试验结束后，应对被试变压器进行绝缘例行试验(外施耐压试验和感应耐压试验)，但应根据绕组的绝缘水平将施加的试验电压值降为标准规定值的 80%。

此外，应对被试变压器进行例行局部放电测量。但试验电压应不超过降低的感应耐压试验的试验电压(160%的额定电压值)，所测得的局部放电量应不大于例行试验中的规定值。

经外观检查，绕组应无可见的异常现象，如裂缝或开裂。

14.4.3.4 试验有效性

在参考被试变压器上得到的气候试验结果，对下列其他变压器也有效：

——有相同或者更低的电流密度(A/mm^2)；

——有相同或者更低的高压绕组设备最高电压；

——当高压绕组设备最高电压超过 24 kV 或者变压器额定容量超过 1 000 kVA 时，气候试验的有效性由供、需双方协商确定(通过计算或者试验)。

变压器应与参考被试变压器有以下相同的准则：

——设计概念和设计原则相同(如绕组是否被固体绝缘封闭、绕组类型、防护等级等)；

——原材料相同；

——制造工艺相同；

——相同或者更低的绕组平均温升。

14.4.4 环境试验

14.4.4.1 概述

本试验用于确定变压器是否符合第 12 章所规定的环境等级。

如果无其他规定，则本试验应在一台包括附件(如果与试验有关)在内的装配完整的变压器上进行。变压器及其配件应是新的、清洁的且未经过任何附加表面处理的。

14.4.4.2 E1、E2、E3、E4 环境等级的试验程序

14.4.4.2.1 概述

本试验程序包含针对所有环境等级(见表 7)的凝露试验和之后针对 E2、E3、E4 环境等级的湿渗透试验。

表 7 环境等级

等级	电导率范围 S/m	凝露试验湿度值	湿渗透试验
E1	0.1～0.3	>93%	不进行
E2	0.5～1.5	>93%	进行
E3	3.6～4.0	>95%	进行
E4	5.6～6.0	>95%	进行

14.4.4.2.2 凝露试验的试验程序

对于凝露试验，变压器应放在温度和湿度都可以控制的试验箱内。试验程序如下：

——试验箱的容积为沿变压器外围划线所构成的长方体体积的至少五倍，变压器任一部位到箱壁、箱顶、喷嘴和温度传感器之间的距离应不小于变压器带电部件之间的最小相间距离，且不小于 150 mm；

——机械式雾化器的放置应避免将水雾直接喷到变压器上；

——试验箱内的空气温度应能确保在变压器上出现凝露，试验开始时，变压器表面的温度应至少比试验箱内温度低 10 K；

——试验箱内的湿度应在 1 h 内增大至表 7 规定的值，并一直保持在该湿度值以上，这可通过定期或者连续地对适量的水进行雾化来实现；

——变压器在无励磁状态下，在相对湿度符合表 7 规定的空气中放置至少 2 h；

——试验过程中，储水池的温度应比试验箱内的温度高 8 K～10 K；

——不应有水从箱顶滴落到被试变压器上；

——水的电导率应在表 7 所规定的范围内。

14.4.4.2.3 凝露试验的试验准则

应在凝露试验停止喷雾后的 5 min 内，对仍在试验箱内的变压器进行如下的感应电压试验。

——对于绕组拟接到直接接地的电力系统或者经低阻抗接地的电力系统的变压器，应在 1.1 倍额定电压下励磁 15 min。

——对于拟接到中性点不接地系统或者经高阻抗接地的电力系统中的变压器，应连续承受三次且每次为 5 min 的感应电压试验。试验时每个高压端子应依次接地，在其他端子与地之间施加 1.1 倍额定电压。三相试验也可用单相试验来代替，此时，应将两个不接地相的端子连接在一起。这三次感应电压试验的间隔应少于 3 min。

如果上述两个感应电压试验都要进行，则应先进行不直接接地系统或者经高阻抗接地电力系统的

变压器试验。

在施加电压过程中，应无电压击穿和闪络现象发生，且外观检查应无严重的放电痕迹（绝缘表面没有无法抹去的碳化或者侵蚀痕迹）。

14.4.4.2.4 湿渗透试验的试验程序

对于湿渗透试验：

——在湿渗透试验开始时，变压器应为干燥状态，但不要使用擦拭的方法来消除凝露试验中遗留的凝露；

注：变压器可在气候试验箱内干燥。

——变压器应在无励磁状态下置于气候试验箱内 144 h；

——试验箱内的温度应保持为 50 ℃±3 ℃，相对湿度应保持为 90%±5%。

14.4.4.2.5 湿渗透试验的试验准则

在湿渗透试验结束后 3 h 之内，将变压器置于正常环境条件中，应对变压器进行外施耐压试验和感应耐压试验，但施加的试验电压值应降到标准值的 80%。

在施加电压过程中，应无电压击穿和闪络现象发生，且外观检查应无严重的放电痕迹（绝缘表面没有无法抹去的碳化或者侵蚀痕迹）。

14.4.4.3 试验有效性

在参考测试变压器上得到的环境试验结果，对于高压绕组有相同或更低的设备最高电压且相同或更低的额定电压的变压器也有效。

当高压设备最高电压超过 24 kV 或者额定容量超过 1 000 kVA 时，环境试验的有效性由供、需双方协商确定（通过计算或者试验）。

变压器应与参考被试变压器有以下相同的准则：

——设计概念和设计原则相同；

——原材料相同；

——制造工艺相同。

14.4.5 燃烧性能试验

14.4.5.1 概述

为使变压器的性能最佳，有必要使其在燃烧时所逸出的有毒物质和不透明烟雾降至最低程度。因此，要避免使用含有卤化物的材料。应按照以下所述检测所逸出的腐蚀性及有害性气体，此外，变压器在外部发生火灾时不应明显助燃。燃烧性能应按照 14.4.5.2 的试验程序进行评估。

应从变压器上提取少量可燃性材料，用以检测其在燃烧时所逸出的腐蚀性及有害性气体。

原则上，该试验将能检测出下述这些成分的出现，即：氯化氢（HCl）、氰化氢（HCN）、溴化氢（HBr）、氟化氢（HF）、二氧化硫（SO_2）和甲醛（HCHO）。

逸出气体可接受的限值应符合国家法规的要求（如果有）。

14.4.5.2 F1 级变压器的燃烧性能试验

14.4.5.2.1 试品

本试验应在变压器一个完整的相上进行，完整的相应包括高压（HV）线圈、低压（LV）线圈、铁芯柱和绝缘件，但不包括外壳。供试验用的铁芯柱也可以用与原铁芯柱尺寸及热特性类似的材料来代替。

不应考虑铁轭，将低压引线在该线圈上、下两端面处切去。

被试变压器的圆形线圈外径或非圆形线圈的最大横向尺寸应介于 400 mm～500 mm。给定了最小尺寸是为了保证试验期间线圈的发热量。

14.4.5.2.2 试验的有效性

在一台变压器上得到的燃烧试验结果，对基于同一设计准则的其他不同变压器（额定容量、电压等）也有效。这些相同的设计准则为：

——设计概念相似（如：绕组是否被固体绝缘封闭、绕组类型、防护等级等）；

——绝缘耐热等级相同；

——主要的绝缘材料相同；

——浇注体系或浸渍体系的配方和组分相同。

14.4.5.3 试验设施（试验箱）

试验箱应基于 GB/T 18380.31（与电缆有关）的描述，如图 7 和图 8 所示。箱壁应使用厚度为 1.5 mm～2.0 mm 的耐热钢板制成，隔热，以使传热系数近似于 0.7 W/(m² · K)。如果可能，则还宜装一个耐火窗。试验箱的尺寸见表 8。

表 8 试验箱的尺寸

单位为毫米

A[a]	B		C	D	E	F		直径 G	直径 H
	最小	最大				最小	最大		
9 000	3 500	4 000	2 000	1 000	600	1 500	2 000	500	500
J	最小 K	直径 L	M	N	P	Q	R	S	T
300	400	350	800	400	800	500	900	400	1 200
U	V	W	X	Y	Z	AA	AB[b]	AC[b]	
500	175	300	30	40	20	50	1 000	1 000	

[a] 近似高度。

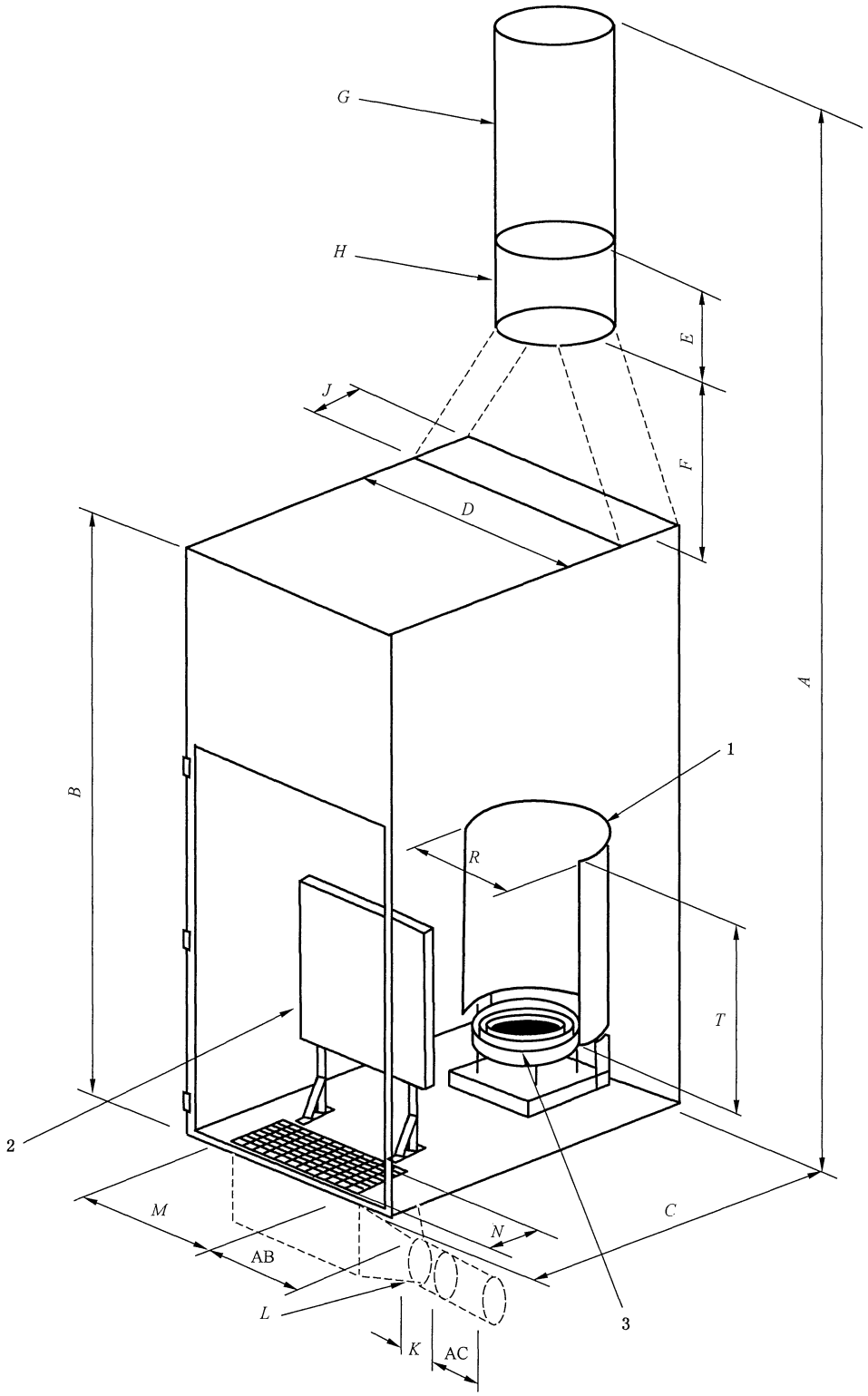
[b] 最小尺寸。

试验箱应装有一个内径约为 500 mm 的烟囱和一个内径约为 350 mm 的进气管道。试验箱的进气口与烟囱的出气口之间的高度差约为 9 m。外界空气从试验箱底部的网栅（400×800）mm² 进入箱内，然后通过一个面积约为 0.3 m² 的出气口进入烟囱。

烟囱内应有一段直径为 500 mm，且长度至少为 600 mm 的测量段，它的低端应高于试验箱顶部 1.5 m～2 m。

进气管道内应有一段直径为 350 mm，且长度至少为 400 mm 的测量段，测量段一端距试验箱进气口处的距离至少为 1 m，其另一端与进气管道的进气口之间的距离也至少为 1 m。

如果不采用强迫气流，则应在进气口处安装一个调节阀，这样气流可以随温度而变，就像自然烟囱效应一样。试验箱宜如此安装，以至于风对进气量的影响可以被忽略。



标引序号说明：

1——金属屏；

2——辐射板；

3——酒精容器。

注：A～Z 的尺寸及 AA～AC 的尺寸见表 8。

图 7　试验箱

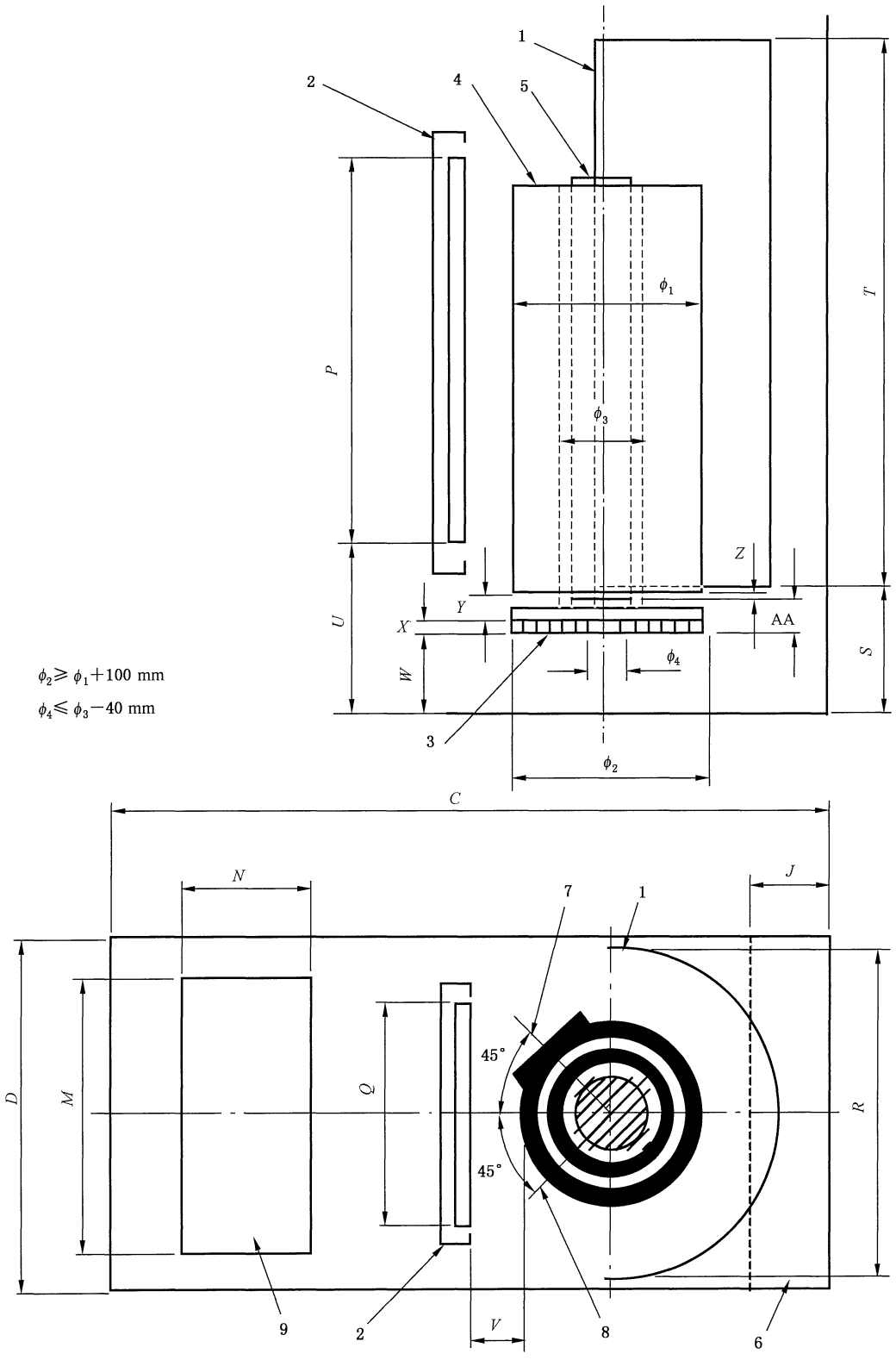

1
2
4
5
ϕ_1
T
P
ϕ_3
Z
Y
U
X
AA
W
ϕ_4
S
3
ϕ_2
$\phi_2 \geqslant \phi_1 + 100$ mm
$\phi_4 \leqslant \phi_3 - 40$ mm
C
N
J
7
1
45°
D
M
Q
R
45°
9
2
V
8
6

图 8　试验箱细节

标引序号说明：

1——金属屏；

2——辐射板；

3——酒精容器；

4——线圈；

5——铁芯；

6——出气口；

7——试品端子位置；

8——测量传感器；

9——进气口。

注：A～Z 的尺寸及 AA～AC 的尺寸见表 8。

图 8　试验箱细节（续）

14.4.5.4　火源(见图 7)

主要热源为容器内燃烧的酒精(热量值为 27 MJ/kg)，该容器可以被若干个同心环分割得更小。该容器的外径应比变压器外线圈的外径大至少 100 mm，其内径应比变压器内线圈的内径小至少 40 mm。

容器内酒精的起始液面应为 30 mm±1 mm，燃烧时间大约为 20 min。

第二个热源为一个垂直放置的电热辐射板，其高度约为 800 mm，宽度约为 500 mm，是由 24 kW 的发热电阻元件制成的，并配有一个可调电源，以使辐射板的温度保持在 750 ℃± 5 ℃。应测量辐射板顶部和底部的温度且平均温度应用作辐射板的规范温度。在辐射板的对面，应放有一个直径为 900 mm、高度为 1.2m 的半圆筒形金属屏。

14.4.5.5　待测参量

应使用热电偶或等效装置来测量下列温度：

——进气口；

——出气口；

——辐射板顶部和底部；

——低压线圈顶部表面(可选)；

——高压线圈顶部表面(可选)；

——铁芯柱或其模拟件的底部和顶部(可选)；

——铁芯和低压线圈间的中部气道(可选)；

——高、低压线圈间的中部气道(可选)。

注 1：测量传感器在试品上的置放位置如图 8 所示。

其他待测的特性及参数如下：

——测量段内可见光的传输，该测量应沿着穿过烟雾的光学通路进行，其长度至少应为 500 mm；

注 2：设透光率为 X，实际光学路径长度为 p(单位为 m)，则换算到 1 m 长光学路径的透光率为：$\tau = X^{1/p}$。

——进气口的空气流量；

——烟囱内的气体流量(可选)。

14.4.5.6　不带试品时试验箱的准备程序

应在对 24 kW 辐射板持续通电至少 40 min 后设置好试验箱。

应在稳定状态下，将进气段内测得的空气流量调节到在 20 ℃时为 0.21×(1±15%)m^3/s。当试验装置以自然气流为基础时，其流量可通过调节阀或等效的装置来调节。而当试验装置采用强迫气流时，

其流量可通过风扇系统来调节。

这个风扇系统应是自由转动的，并能在测试后期产生更强的气流。调节阀的使用比风扇系统更优。

辐射板的位置、调节阀的设置和风机系统的使用(如果有)应在准备过程和测试时保持一样，且应在测试过程中保持不变。

注：为了得到稳定条件下的空气流量，可能需要多次调节。

14.4.5.7 试验方法

试品应按下列条件置于如图 8 所示的试验箱中：

——外线圈表面与辐射板间的距离约为 175 mm，辐射板的位置应与准备阶段放置的位置一致；

——容器内酒精的起始液面应低于变压器线圈底面约 40 mm；

注：在某些情况下，供需双方需根据试品的设计进行协商。

——试品应与试验箱轴线同心放置，并且其中心线与试验箱后壁之间距离为 500 mm；

——半圆筒形金属屏应置于辐射板的对面，且应与试品及试验箱轴线同心，这样可与侧壁及后壁间的距离相等，即距离侧壁及后壁均为 50 mm；

——试验开始时，试验箱内部、入口处空气及试品的温度均应在 15 ℃～30 ℃；

——容器内的酒精应在试验即将开始前注入(实际在试验前 5 min 内注入)。

当酒精刚点燃且辐射板(24 kW)同时通电时，试验开始。40 min 后，将辐射板电源切断。应从试验开始后对 14.4.5.5 所列参量进行记录，记录时间至少 60 min 或为整个试验期间。

试验前及试验后，均应称出试品的质量，称量的准确度为±0.5% 或更高。代表材料铁芯柱和带绝缘部分的线圈可以分别称重。

14.4.5.8 试验报告

试验报告应包含下列信息：

a) 材料样品的试验结果(如果用户要求)；

b) 可燃烧材料的总计算质量、热能值(如果可能)及试品质量的测量值；

c) 试验箱的准备过程结果(空气流量、测量段内的温度、调节阀或抽气系统的调节量等)；

d) 对试验方法的全面说明，包括酒精燃烧时间和通电加热时间；

e) 试验时可燃烧材料的质量损失(准确度为±10%)及释放热量(MJ)的计算值(如果可能)；

f) 整个试验过程的温度记录值，从试验开始起(酒精点燃时开始)，每隔 2 min 或更短的时间记录一次；

g) 整个试验过程中，在测量段内传输的可见光的连续记录值(%)；

h) 在整个试验过程中，每隔 2 min 或更短时间测量的进气口的空气流量(m^3/s)；

i) 试验过程中试品上可见的燃烧状态；

j) 试验箱的相关文件，包括试验箱设置、气流调节方法、试验箱和试品的精确尺寸。

14.4.5.9 试验准则

如果试品满足下列要求，则认为试验合格：

a) 在整个试验过程中，在烟囱内的测量段中的气体对周围环境温度的温升不超过 420 K；

b) 辐射板断电后 5 min(即试验开始后的 45 min)，在烟囱内的测量段中的气体对周围环境温度的温升应不超过 140 K，每隔 10 min 测得的温度趋势应为线性和下降的，允许忽略趋势线上下的瞬态温度读数；

c) 试验开始后 60 min，在烟囱内的测量段中的气体温升应不超过 80 K，该准则与火焰是否可见无关；

d) 在试验开始后的 20 min～60 min 期间，测量段中透光率(换算到 1 m 长的穿过烟雾的光学路径)的算术平均值应不低于 20%。

注：根据 14.4.5.9 进行的温度测量通常会导致 10%的误差。

14.4.6 非晶合金铁芯变压器的特殊试验

非晶合金铁芯变压器应使用已知材料或者在开发中的材料制造。

为了确保这些变压器的可靠性，安装到电网前，制造方应能够通过下述任何一种方法证明其变压器的长期可靠性：

——短路承受能力试验；

——提供类似变压器的短路承受能力试验报告(详见 GB/T 1094.5 的规定)。

GB/T 1094.5 中关于变压器之间的类似性鉴别准则及有关吸取的容量、轴向力和短路时的绕组应力的规定应适用于判定试验的有效性。

试验程序按 GB/T 1094.1、GB/T 1094.3 和 GB/T 1094.5 的规定，并特别考虑以下要求。

——按 14.2 规定的所有例行试验，包括 100%标准试验电压下的绝缘试验均应复试。此阶段也应进行雷电冲击试验。

除 GB/T 1094.5 的判定准则外，空载损耗在短路试验前、后的测量值相差不应超过 12%。该测量应在同一试验室进行。

15 偏差

偏差应按 GB/T 1094.1 的规定。

16 防止直接接触的保护

当变压器因其结构特点不能防止直接接触时，应按国家法规提供一块可见的标牌(警告牌或特殊标志)，以提示变压器有危险不得靠近。

17 外壳防护等级

变压器外壳应根据变压器安装场所的位置和环境条件来进行设计，外壳防护等级应按 GB/T 4208 的规定。

18 接地端子

变压器应有一个接地端子用于连接保护导体，所有裸露不带电的导电金属构件应通过结构或者其他方式接地。

19 询价和订货时需要的信息

询价和订货时需要的信息参见 GB/T 1094.1—2013 的附录 D。

20 安装与安全

变压器的安装与安全方面的信息见附录 G。

附 录 A
（资料性）
本文件与 IEC 60076-11:2018 的结构变化情况

本文件与 IEC 60076-11:2018 相比在结构上有适当调整，具体章条编号对照情况见表 A.1，图表编号对照情况见表 A.2。

表 A.1 本文件与 IEC 60076-11:2018 章条编号对照情况

本文件章条编号	对应的 IEC 60076-11:2018 章条编号
4.2.1～4.2.6	4.2 中的 a)项～f)项
—	g)项
4.2.7～4.2.13	4.2 中的 h)项～n)项
4.3	5.3
4.4	4.3
5.3	5.4
5.4	5.5
5.5	5.6
5.6	5.7
5.7	5.8
5.8	5.9
5.9	5.10
5.10	5.11
5.11	5.12
14.3.3	14.4.2
14.4.2	14.4.3
14.4.3	14.4.4
14.4.4	14.4.5
14.4.4.1	14.4.5.1
14.4.4.2.1～14.4.4.2.5	14.4.5.2
14.4.4.3	14.4.5.3
14.4.5	14.4.6
—	14.4.6.3.1
14.4.6	14.4.8
20	—

表 A.1　本文件与 IEC 60076-11:2018 章条编号对照情况（续）

本文件章条编号	对应的 IEC 60076-11:2018 章条编号
附录 A	—
附录 B	—
附录 D	附录 B
附录 E	—
E.1	13.1 和 13.2
E.2	14.4.7
附录 F	附录 D
附录 G	附录 A

表 A.2　本文件与 IEC 60076-11:2018 图表编号对照情况

本文件图表编号	对应的 IEC 60076-11:2018 图表编号
表 6～表 8	表 10～表 12
表 D.1	表 B.1
表 E.1～表 E.4	表 6～表 9

附 录 B
（资料性）
本文件与 IEC 60076-11:2018 的技术性差异及其原因

表 B.1 给出了本文件与 IEC 60076-11:2018 的技术性差异及其原因。

表 B.1 本文件与 IEC 60076-11:2018 的技术性差异及其原因

本文件章条编号	技术性差异	原因
1	增加了本文件所规范的主要技术内容	完善标准技术内容
2	关于规范性引用文件，本文件做了具有技术性差异的调整，调整的情况集中反映在第 2 章“规范性引用文件”中，具体调整如下： a) 用修改采用国际标准的 GB/T 311.1 代替了 IEC 60071-1、GB/T 311.2 代替了 IEC 60071-2、GB/T 1094.1—2013 代替了 IEC 60076-1:2011、GB/T 1094.2 代替了 IEC 60076-2、GB/T 1094.3—2017 代替了 IEC 60076-3:2013、GB/T 1094.5 代替了 IEC 60076-5、GB/T 1094.10 代替了 IEC 60076-10、GB/T 1094.12—2013 代替了 IEC 60076-12:2008、GB/T 4798.4 代替了 IEC 60721-3-4、GB/T 7354 代替了 IEC 60270、GB/T 17467 代替了 IEC 62271—202、GB/T 18494.1 代替了 IEC 61378-1、GB/T 26218.1 代替了 IEC TS 60815-1、GB/T 30790.6 代替了 ISO 12944-6； b) 增加引用了 GB/T 2900.95； c) 用 GB/T 4797.7—2008 代替 IEC 60721-2-6:1990，并将其从参考文献调整为规范性引用文件	符合我国实际情况
3	术语的引导语中增加对 GB/T 2900.95 的引用	符合我国实际情况
4.2.2	将第三段内容由注调整为正文	符合我国实际情况
4.2.10	将第三段内容由注调整为正文	符合我国实际情况
5.6	删除了 IEC 标准第 3 段的内容	符合我国实际情况
6	分接范围的优先值中增加了± 2.5(3 个分接位置)	符合我国实际情况
7	对优先采用的联结组标号进行了修改	符合我国实际情况
9.1	增加了“f)产品型号”	符合我国实际情况

表 B.1　本文件与 IEC 60076-11:2018 的技术性差异及其原因（续）

本文件章条编号	技术性差异	原因
11.1	将表 3 中 U_m 为 12 kV 所对应的外施耐受电压由 28 kV 改为了 35 kV;U_m 为 40.5 kV 所对应的外施耐受电压由 80 kV 改为了 70 kV,系列Ⅰ的雷电全部冲击耐受电压由 170 kV 改为了 145 kV、系列Ⅱ的雷电全部冲击耐受电压由 200 kV 改为了 170 kV;删除了 U_m 为 36 kV(对应的外施耐受电压为 70 kV、系列Ⅰ的雷电全部冲击耐受电压为 145 kV、系列Ⅱ的雷电全部冲击耐受电压为 170 kV)和 U_m 为 52 kV(对应的外施耐受电压为 95 kV、系列Ⅰ的雷电全部冲击耐受电压为 200 kV、系列Ⅱ的雷电全部冲击耐受电压为 250 kV)的绝缘水平。 正文中删除了“一些国家使用不同的设备最高电压 U_m 值,这些值一般都接近表 3 的值,例如 25 kV 等。此时,如果额定电压不超过所选 U_m 值,应根据表 3 中最接近的 U_m 值确定绝缘水平”	符合我国实际情况
14.3.3	将 IEC 原文中 14.4.2 的声级测定由特殊试验调整为型式试验	符合我国实际情况
附录 D	将 IEC 原文的附录 D 由资料性附录修改为规范性附录	完善标准技术内容
E.1.1	将 IEC 原文 13.1 中的地面加速度水平由 2 m/s^2 或约 0.2 g 改为 3 m/s^2 或约 0.3 g	符合我国实际情况

附 录 C
（规范性）
变压器在自然通风室内的冷却

C.1 假设

由于房间采用自然空气循环降温，因此，表示强制空气循环散热量的 Q_{AF}(kW)见式(C.1)：

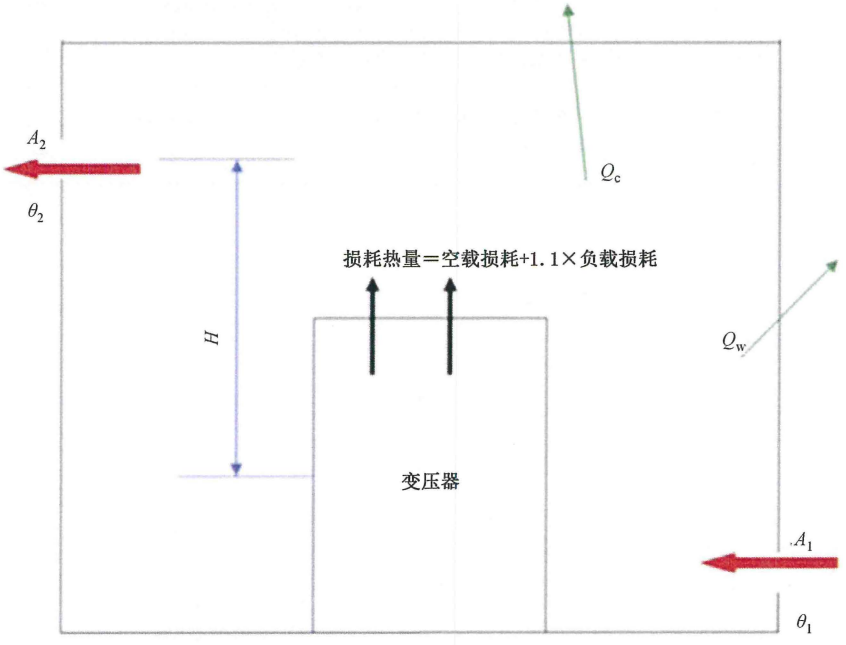
$$Q_{AF}=0 \quad \cdots\cdots(C.1)$$

表示通过天花板和墙壁散发的损耗热量 Q_c(kW)、Q_w(kW)见式(C.2)：

$$\left.\begin{aligned} Q_c &= 0 \\ Q_w &= 0 \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(C.2)$$

如果负载电流中存在谐波，则应特殊考虑。

通过天花板和墙壁的散热量一般较低，散热量取决于墙壁和天花板材料的传热系数、天花板和墙壁的表面积，以及室内与室外的温差，见图 C.1。



标引符号说明：

A_1 ——进风口有效截面积，单位为平方米(m^2)；

A_2 ——出风口有效截面积，单位为平方米(m^2)；

θ_1、θ_2 ——进风口和出风口处的空气温度，单位为摄氏度(℃)；

H ——出口表面中部和变压器中部的高度差，单位为米(m)；

Q_c、Q_w ——通过天花板和墙壁散发的热量，单位为千瓦(kW)。

图 C.1 在自然通风室内的散热

C.2 用于计算通风的数据

变压器产生的损耗在室内排散，本章给出了损耗的计算，见式(C.3)和式(C.4)。

$$\Delta\theta_a=\theta_2-\theta_1\approx 15 \quad \cdots\cdots(C.3)$$

$$HL = NLL + 1.1 \times LL \quad \cdots\cdots (C.4)$$

式中：

$\Delta\theta_a$ ——空气温升，单位为开尔文(K)；

HL ——变压器在室内的热量损耗，单位为千瓦(kW)；

NLL——变压器空载损耗，单位为千瓦(kW)；

LL ——变压器在基准温度下的额定负载损耗，单位为千瓦(kW)。

注：上述 15 K 是制造方的一般经验值。

C.3 输出

变压器所产生的损耗应散出室外。本附录提供了进风口面积的计算，见式(C.5)～式(C.9)。

$$A_2/A_1 > 1.1(\text{至少 } 10\% \text{ 或更大}) \quad \cdots\cdots (C.5)$$

$$Q_{tot} = Q_{nac} + Q_{wc} + Q_{AF} \quad \cdots\cdots (C.6)$$

$$Q_{nac} = 0.1 \times A_1 \times \sqrt{H \times \Delta\theta_a{}^3} \quad \cdots\cdots (C.7)$$

$$Q_{wc} = Q_w + Q_c = 0(\text{见假设}) \quad \cdots\cdots (C.8)$$

$$HL = Q_{nac} + Q_{wc} \quad \cdots\cdots (C.9)$$

式中：

Q_{tot}——变压器室的总散热量，单位为千瓦(kW)；

Q_{nac}——自然空气循环散发的热量，单位为千瓦(kW)；

Q_{wc}——墙壁和天花板吸收的热量，单位为千瓦(kW)；

Q_{AF}——强迫风冷的散热量，单位为千瓦(kW)。该值为 0(见假设)。

为了确保室内通风良好，所需进风口截面积 A_1(m^2)用式(C.10)计算：

$$A_1 = \frac{HL}{0.1\sqrt{H \times \Delta\theta_a{}^3}} \quad \cdots\cdots (C.10)$$

出风口截面积 A_2 的计算见式(C.5)。

C.4 1 000 kVA 变压器的计算实例

本实例未考虑谐波。

HLL=2.3 kW

LL=11 kW

室内损耗热量 HL 计算如下：HL= NLL+1.1×LL=2.3 + 1.1×11=14.4(kW)

H= 4.6 m

最终得到：

$$A_1 = \frac{14.4}{0.1 \times \sqrt{4.6 \times 15^3}} = 1.155(m^2)$$

有效进风口截面积应至少为 1.155 m^2，以保证变压器在自然通风室内的有效冷却。

计算出风口截面积 A_2：

最小的 A_2=1.1×1.155 = 1.271(m^2)

在自然通风室内安装的变压器温升的升高值大约为进风口与出风口的温差的一半(见 GB/T 17467)。

附 录 D
（规范性）
用于评估无外壳户外变压器的环境试验

D.1 概述

试验包括两部分：

——在盐雾箱内和强烈紫外线辐照下，对一次和二次绕组施加电压进行试验，试验条件有严格的规定，试验允许在加速条件下通过短时间试验得到结果；

——对变压器铁芯和结构件进行耐腐蚀试验。

推荐将变压器安装在要求的户外环境条件下，持续通电一年以检验其可靠性。现场试验的可靠性判据在本附录中给出。

表 D.1 给出了 D.2～D.4 所述试验的试验参数。

表 D.1 户外环境等级

试验	E-O-1	E-O-2	E-O-3
盐雾和紫外线箱试验	25 周期/300 h	50 周期/600 h	100 周期/1 200 h
铁芯和夹件涂层试验(GB/T 30790.6，耐久性级别“高”)	C2	C4	C5-M
现场试验(GB/T 26218.1)	轻	中等	很重

D.2 盐雾和紫外线箱试验

D.2.1 试验描述

试验在一个低压绕组和一个高压绕组上进行，应将两个绕组集成为一个线圈或像变压器的安装方式一样作为两个独立的线圈装配好。如果线圈有分接，则应按与变压器一样的方式准备。线圈应是全新的、清洁的，绝缘部件没有任何额外的表面处理。

这些绕组应置于一个温度可控的试验箱内。试验箱的容积至少为沿线圈外围划线所构成的长方体体积的五倍。线圈任一部分到箱壁、箱顶和喷嘴之间的距离应不小于变压器带电部件之间的最小相间距离，且不小于 150 mm。

对高压绕组持续施加电压，验证绕组可承受一个多参数的环境试验。试验箱应能使线圈经受到盐雾(2 h)、清洁雾(4 h)、紫外线辐照(4 h)和冷却(2 h)阶段的一个试验周期，一个周期的总时间为 12 h。

周期时间和各阶段时间相对 24 h 的日周期进行加速了。盐雾阶段模拟风从海岸或其他导电污染源带来盐雾的时段，清洁雾模拟夜晚凝露时段。紫外线辐照时的温度增加一方面模拟太阳辐照，另一方面模拟因日间负荷增加引起的升温。冷却阶段则模拟静夜负荷降低的时段。

在施加盐雾和清洁雾时，雾的水汽量应超过 1 L/(h · m^3)，液滴大小应接近 50 μm。

试验箱内雾的分布应大致均匀。

紫外线辐照期间箱内温度应在 50 ℃～100 ℃。冷却阶段和盐雾阶段箱内温度应在 2 h 内降至室温。

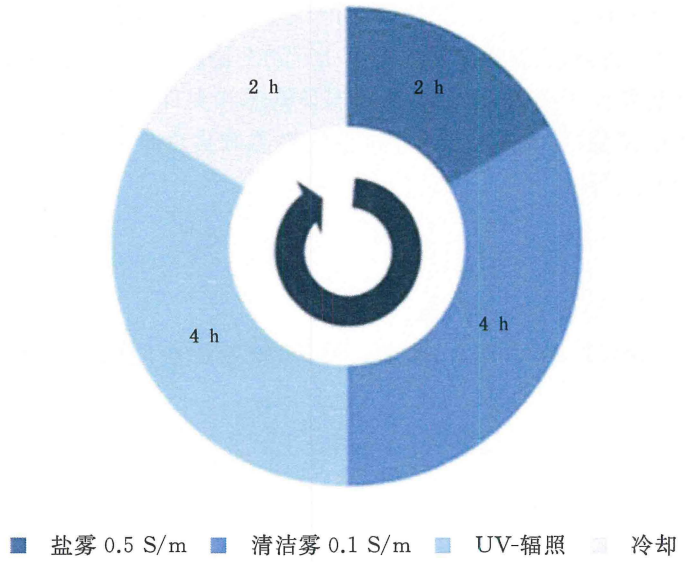


图 D.1　盐雾多参数老化周期

试验按顺时针顺序：4 h 紫外线辐照，2 h 冷却，2 h 盐雾，4 h 清洁雾。整个周期内持续施加电压。
根据表 D.1 中 E-O 等级的不同，执行一定数量的周期数/持续时间。
用于制造盐雾的喷射水的导电率应不小于 0.5 S/m(NaCl)。
用于制造清洁雾的喷射水的导电率应约为 0.1 S/m(NaCl)。
试验期间紫外线灯应放置在绕组的两边(绕组分接和连接部分的正面和背面)。
绕组的正面应与对立面紫外线灯的轴线成 20°。
紫外线灯光谱应能代表太阳紫外线光谱(范围在 280 nm～340 nm)。
绕组正面和背面各自的紫外线灯总功率应不低于 1 200 W。
紫外线灯与绕组表面的距离宜不超过 1 m。
低压绕组应短接并接地。
高压绕组应短接，并施加 1.1 倍的额定相对地电压。
绕组应放置在接地板上，在绕组与接地板之间应有线圈支撑绝缘体，就像变压器装配一样。
在所有试验周期的所有时段，都应对绕组施加电压。

D.2.2　合格判据

施加电压期间无闪络发生，且目视检查无以下情况：
——任何放电痕迹；
——超过 2 mm 深的蚀坑；
——表面外观的任何显著变化(变色、隆起、脱落等)。

D.3　铁芯和夹件涂层试验

D.3.1　试验描述

铁芯和夹件防护体系应保证经受防腐蚀试验，试验条件如下：
——试验应在与变压器使用的质量和厚度均相同的铁芯片样品上进行，样片叠厚至少为 50 mm，片宽至少为 150 mm，片长至少为 500 mm，样品包含铁芯螺栓和相应的压紧结构件；
——防护体系在铁芯样片上的应用方式与完整变压器相同；
——夹件的防护方式也与完整变压器设计相同；

——测试程序应符合 GB/T 30790.6 的规定，对于不同的 E-O 等级，应满足表 D.1 中指定的腐蚀性等级的最低要求，供、需双方可依据 GB/T 30790.2 协商确定更高的腐蚀性等级；

——由于铁芯在励磁条件下振动，因此一定要保证铁芯和夹件的涂层可以承受之；

——如果不进行现场试验(见 D.4)，则本章描述的铁芯和夹件试验应在铁芯激励 1.5T(特斯拉)～1.7T(特斯拉)时进行。

D.3.2 合格判据

夹件防护应遵循 GB/T 30790.6 的规定。

铁芯片防护应遵循 GB/T 30790.6 的规定。另外，铁芯片中间的表面不准许出现腐蚀(距边缘 5 mm范围除外)。

D.4 现场试验

D.4.1 试验描述

建议在完整变压器上进行至少一年的现场试验。变压器及其附件应是全新的、清洁的，且绝缘部件未进行任何额外的表面处理。试验时段内不应进行清洁和维护。变压器应放置在白天大部分时间可受到太阳辐射的地方。变压器的旁边和上方不应放置任何非变压器组成部分的额外遮阳或屋顶结构。建议在具有户外电气设备测试资质的测试场所进行测试。

变压器在试验场地至少通电一年时间，根据额定电压施加电压，可不带负载。

户外测试场所的环境应至少符合表 D.1 中按照 GB/T 26218.1 规定的不同 E-O 等级的现场污秽度等级。

D.4.2 合格判据

如果在此期间没有闪络和变压器故障，则测试通过。

线圈表面应无爬电痕迹和蚀坑。

附 录 E
（规范性）
抗震性能及抗震试验

E.1 抗震特性

E.1.1 概述

变压器需要特别考虑受地震干扰的运行环境。

如果地面加速度水平(AG)大于或等于 3 m/s^2 或约 0.3 g，则变压器在设计时需要特别考虑，用户应将安装区域和地震条件告知制造方。

变压器应通过试验或根据已试验过的参考变压器进行计算，判定是否符合抗震要求。

本附录给出了一般抗震性能等级，说明变压器的抗震能力。

为了评估变压器的抗震性能，应定义一个具有代表性的地面加速度谱。

对变压器进行抗震评估的最合适的地面加速度谱的选定，宜包括：

——相关地理区域的地面加速度定义；

——根据计划安装位置的一些特定参数(如土壤类型、支撑件的质量和弹性、刚度、阻尼等)对地面加速度的调整。

如果无法获得确定特定地面加速度谱的详细信息，则应按照 GB/T 2424.25，采用一般震级分类法。

如果可以获得确定特定地面加速度谱的详细信息，则应按照 GB/T 2424.25，由供、需双方协商确定采用特定震级分类法。

E.1.2 一般震级分类法

E.1.2.1 概述

在一般震级分类法中，有两种方法能确定所应用的响应谱：

——标准幅值法：当没有关于变压器安装位置和支承结构特性的资料时，见 E.1.2.2；

——计算幅值法：当有足够的关于变压器的安装位置和支承结构特性的资料时，见 E.1.2.3。

E.1.2.2 标准幅值法

当没有关于变压器安装位置和支承结构特征信息的情况下，允许使用该方法对变压器的地震等级进行鉴定。

用户应根据实际应用场合明确地震等级要求。

应采用简化的 4 步法，根据不同地震带确定震级，或直接选择表 E.1 中的地震等级。

步骤 1：应按照 GB/T 4797.7—2008 中图 5 识别确定地震活动的相关区域。

步骤 2：根据有关地震区域，应从 GB/T 4797.7—2008 的表 1 中获得一个近似的加速度水平。

步骤 3：根据表 E.1 所示的近似加速度水平确定相关的地震等级。

步骤 4：选择表 E.1 中的地板垂直和水平加速度用于试验结果的计算。

表 E.1 近似加速度水平和地震等级

近似加速度 m/s^2	地震等级（性能水平）	地板加速度 Af m/s^2	
		水平分量	垂直分量
2	S-Ⅰ	6	3
3	S-Ⅱ	9	4.5
5	S-Ⅲ	15	7.5
注：近似加速度水平不包括未知因素，如超高结构、方向、阻尼等，因此它们与地板加速度不同。			

用户应根据实际应用场合明确地震等级要求。

E.1.2.3 计算幅值法

在了解变压器安装位置和支承结构特征信息的情况下，允许使用该方法对变压器的震级进行鉴定。该方法基于 GB/T 2424.25。

此时，性能等级对应的地板加速度（Af_x、Af_y、Af_z）见式（E.1）～式（E.3）：

$$Af_x = AG \times K \times D_x \quad \cdots\cdots (E.1)$$

$$Af_y = AG \times K \times D_y \quad \cdots\cdots (E.2)$$

$$Af_z = AG \times K \times D_z \quad \cdots\cdots (E.3)$$

式中：

AG ——地面加速度水平（见表 E.2）；

K ——超高系数（见表 E.3）；

D ——方向系数（见表 E.4）；

Af ——地板加速度。

震级计算时需考虑上述分量。

试验和计算时以计算的 Af 值为依据，用户有责任确定最适合的加速度水平。

表 E.2 地面加速度水平（AG）

地面加速度符号	地震描述				
	概况	AG m/s^2	仅供参考		
			里氏等级	统一建筑代码区	地震烈度 MSK
AG2	轻至中强地震	2	＜5.5	Ⅰ～Ⅱ	＜Ⅷ
AG3	中强至强地震	3	5.5～7.0	Ⅲ	Ⅷ～Ⅸ
AG5	强至强强地震	5	＞7.0	Ⅳ	＞Ⅸ

表 E.3 推荐的超高系数(K)

系数 K	应用
1.0	安装在刚度基础或刚性结构上的样品
1.5	与建筑物刚性连接的装置
2.0	与建筑物刚性连接的硬结构上的装置
3.0	与建筑物连接的低刚性结构上的装置

表 E.4 方向系数(D)

振动轴	系数 D	限制说明
水平轴线,D_x	$D_x=1$	—
水平轴线,D_y	$D_y=1$	—
垂直轴线,D_z	$D_z=0.5$	用于规定的垂直位置
垂直轴线,D_z	$D_z=1$	安装位置未规定时[a]
[a] 重力效应不影响样品性能时,需进行三次试验。对样品三个主轴线中的每一个轴线依次在垂直平面上进行试验。每一试验情况的方向系数为:$D_x=1$,$D_y=1$,$D_z=0.5$。		

示例:

考虑 K 系数,如果应用在"与建筑物刚性连接的硬结构上的装置",则在最恶劣的情况下,它的性能等级会达到:

$Af_x=AG\times K\times D_x=2\ m/s^2\times 2\times 1=4\ m/s^2$

$Af_y=AG\times K\times D_y=2\ m/s^2\times 2\times 1=4\ m/s^2$

$Af_z=AG\times K\times D_z=2\ m/s^2\times 2\times 0.5=2\ m/s^2$

注: $1\ m/s^2=0.1\ g$。

E.2 抗震试验

E.2.1 试验的有效性

本试验确定变压器是否符合 E.1 所定义的抗震等级。本试验为特殊试验。

在一台变压器上得到的抗震等级试验结果,对基于相同的机械结构和某些设计准则的其他变压器也有效。这些设计准则如下:

——设计概念相似(如绕组类型、外壳等);

——相同的机械结构(相同的夹件、相同的支撑架、线圈支撑物、至少相同数量和类型的紧固点等);

——变压器的质量不超过已试验变压器质量的−30% ～+15%;

——在所有轴向上具有相似的比例尺寸(± 10%);

——部件间的连接具有相同的结构强度(例如铁芯固定支撑、框架部分的连接、出线端子等)。

如果没有满足上述准则,则可由供、需双方协商,按制造方提供的或其他标准给出的方法通过分析法或有限元分析计算来确定。

对于试验有效性的扩展参见 IEEE 693。

E.2.2 试验步骤、试验方法以及试验准则

试验步骤和试验方法由供、需双方协商确定,可参照 GB/T 2424.25 的规定。

应对变压器进行检查，并对比试验前、后铁芯和绕组的状态，尽可能发现明显的缺陷，例如导线位置的变化、位移等。尽管通过了例行试验，但这些可能会危及变压器的安全运行。

应重复所有的例行试验，包括在80%规定值下的绝缘试验(见表3)。如果有规定，雷电冲击试验也应在此阶段进行。

为了确定变压器通过了抗震试验，需要满足以下条件：

——例行试验复试合格，而且如果要求做雷电冲击试验，则试验也要通过；

——检查时没发现诸如铁芯片的移位，线圈、连接件或支承结构的变形等严重到可能会危及变压器安全运行的缺陷；

——绝缘试验后未发现放电的痕迹；

——试验后评估每相的短路阻抗欧姆值与试验前相比变化不超过1%，根据用户与制造方的协商，此差值最高不可超过3%。

附 录 F
（规范性）
不同参考温度和/或绕组材料的损耗计算

符号：

下标 1 ——冷态绕组电阻测量；

下标 2 ——负载损耗测量的条件；

下标 r ——在“参考温度”时的条件；

下标 A、B ——系统名称；

R ——电阻；

θ ——绕组温度，单位为℃；

P ——负载损耗；

I ——确定损耗而规定的负载电流（额定电流、分接电流、其他某一特定负载下的规定值）；

P_a ——附加损耗；

ϑ_0 ——材料常数（铜为 235，铝为 225）。

绕组电阻测量在 θ_1 温度下进行，测量电阻值为 R_1。

负载损耗在绕组平均温度 θ_2 下测量，对应指定电流 I 下测量的损耗为 P_2。此损耗包括“电阻损耗”I^2R_2 和“附加损耗”，P_{a2}，见式(F.1)和式(F.2)：

$$R_2 = R_1 \frac{\vartheta_0 + \theta_2}{\vartheta_0 + \theta_1} \qquad \cdots\cdots(\text{F.1})$$

$\sum I^2R_2$ 是所有绕组直流电阻损耗之和。

$$P_{a2} = P_2 - \sum I^2R_2 \qquad \cdots\cdots(\text{F.2})$$

在参考温度 θ_r 下，绕组电阻是 R_r，附加损耗是 P_{ar}，总负载损耗是 P_r，见式(F.1)～式(F.5)：

$$R_r = R_1 \frac{\vartheta_0 + \theta_r}{\vartheta_0 + \theta_1} \qquad \cdots\cdots(\text{F.3})$$

$$P_{ar} = P_{a2} \frac{\vartheta_0 + \theta_2}{\vartheta_0 + \theta_r} \qquad \cdots\cdots(\text{F.4})$$

最后：

$$P_r = \sum I^2R_r + P_{ar} \qquad \cdots\cdots(\text{F.5})$$

14.2.3 进一步描述了变压器系统的参考温度可以是不同的，因此在校正时需要考虑不同的材料和参考温度。在计算附加损耗 P_{ar} 时使用平均参考温度 θ_{rpa}。另外，也需要考虑材料常数平均值 θ_{0pa}，见式(F.6)和式(F.7)：

$$\theta_{rpa} = \frac{\theta_{rA} + \theta_{rB}}{2} \qquad \cdots\cdots(\text{F.6})$$

$$\vartheta_{0pa} = \frac{\vartheta_{0A} + \vartheta_{0B}}{2} \qquad \cdots\cdots(\text{F.7})$$

示例 1：

对于所有系统都按 120 ℃参考温度的环氧树脂浇注变压器来说，根据不同材料，计算公式如下：

$R_r = R_1 \frac{235+120}{235+\theta_1}$（铜）　　$R_r = R_1 \frac{225+120}{225+\theta_1}$（铝）

$R_r = R_1 \frac{355}{235+\theta_1}$（铜）　　$R_r = R_1 \frac{345}{225+\theta_1}$（铝）

$P_{ar} = P_{a2} \frac{235+\theta_2}{120+235}$（铜）　　$P_{ar} = P_{a2} \frac{225+\theta_2}{120+225}$（铝）

$$P_{ar}=P_{a2}\frac{235+\theta_2}{355}\text{(铜)} \qquad P_{ar}=P_{a2}\frac{225+\theta_2}{345}\text{(铝)}$$

最后：

$$P_r=\sum I^2R_r+P_{ar}$$

示例 2：

具有以下参数的环氧树脂浇注变压器：

系统 A(例如高压)	系统 B(例如低压)
耐热等级：F	耐热等级：H
平均绕组温升：100 K	平均绕组温升：125 K
参考温度：120 ℃	参考温度：145 ℃
材料：铝	材料：铜

对温度 θ_1 时测量的电阻和温度 θ_2 时测量的损耗进行校正：

$$R_{2A}=R_{1A}\frac{\vartheta_{0A}+\theta_2}{\vartheta_{0A}+\theta_1} \qquad R_{2B}=R_{1B}\frac{\vartheta_{0B}+\theta_2}{\vartheta_{0B}+\theta_1}$$

$$P_{a2}=P_2-(I^2R_{2A}+I^2R_{2B})$$

在特定参考温度 θ_r 下的绕组电阻 R_r：

$$R_{rA}=R_1\frac{225+120}{225+\theta_1}=R_1\frac{345}{225+\theta_1} \qquad R_{rB}=R_1\frac{235+145}{235+\theta_1}=R_1\frac{380}{235+\theta_1}$$

在折中参考温度 θ_r 下的附加损耗：

$$\theta_{rpa}=\frac{120+145}{2}=132.5$$

$$\vartheta_{0pa}=\frac{225+235}{2}=230$$

$$P_{ar}=P_{a2}\frac{\vartheta_{0pa}+\theta_2}{\vartheta_{0pa}+\theta_{rpa}}=P_{a2}\frac{230+\theta_2}{230+132.5}=P_{a2}\frac{230+\theta_2}{362.5}$$

最后：

$$P_r=(I^2R_{2A}+I^2R_{2B})+P_{ar}$$

附 录 G
（资料性）
变压器的安装与安全

G.1 使用说明书

制造方(特别是向指定用户供应样机产品的制造方)宜向用户提供有关产品的使用说明书,该说明书包括安装要求、运输要求、起吊、维护和运行等方面的内容。除非合同另有规定,提前向用户提供使用说明书是一种好的做法,因为这将使用户能对安装的正确性进行检查。此外,如果合适,还可对组织运输和起吊所采取的步骤进行检查。

G.2 设备与安全

G.2.1 概述

变压器使用中的安全,可以从各方面来考虑:

a) 变压器自身的安全,以避免因其内部故障带来危险;

b) 安装中需采取的安全措施,以防止意外事故发生;

c) 限制外部事故的影响。

提高上述 b)和 c)安全性的步骤由国家法律法规规定。

需遵守国家标准对安装要求的规定。

G.2.2～G.2.4 给出了供、需双方需采取的措施的示例,以保证可以接受的安全程度。

G.2.2 变压器自身的安全

如果满足本文件的规定,则表明变压器具有防止内部出现危险故障所需的可靠性。对于主要组件,则宜符合相关的标准。宜遵守制造方关于变压器负载能力的规定,负载导则按 GB/T 1094.12。

可能需要注意以下几个特殊方面:

——绝缘水平和绝缘试验;

——由保证损耗和试验测得损耗所产生的最大热量;

——运行中的最高温度;

——使用说明书中宜强调变压器及其附件和保护装置的系统性维护;

——使用说明书宜给出有关维护条件的指导;

——在有火灾(内部或外部)危险的场合使用 F1 级变压器。

G.2.3 注意事项

防范措施在国家法律法规和国家标准中规定。

设计人员宜考虑下述尚不详尽的事项:

——变压器室的通风冷却系统是否足以使环境空气温度低于规定的最高温度限值;

——对由系统或雷电引起的瞬变过电压,是否具有足够的保护能力;

——过电流保护及变压器内部短路承受能力;

——变压器的其他保护(温度指示装置上的触点等)和设备中的其他保护(继电器、熔断器等);

——变压器自身起火或其他原因起火的风险、后果及防范;

——严禁接近,以免接触带电部分或高温部件,并在发生故障时限制在场人员接近;

——对设备外部的噪声进行抑制；
——是否需要控制母线或电缆产生的磁场；
——防止环境空气污染的规定；
——防止气体产生和聚积；
——禁止保护外壳的通风受阻；
——在提供给用户的使用说明书中规定电气设备室需要足够的通风量。

G.2.4 设备设计

设计人员宜做好如下事项：
——具备足够的通风能力，以使变压器周围的空气温度低于4.2给出的上限值，供、需双方另有协议时除外；
——具有足够的措施，以使环境空气温度高于4.2给出的下限值，另有规定时除外；
——对各种瞬态过电压进行充分的保护；

注：当断路器在励磁电流过零时进行切断会产生瞬态过电压。这种瞬变现象在单断路器动作期间，常常会重复出现几次，从而使过电压峰值逐步上升。

——在过电流值相当大时，要有一台装置或一个系统能立即切断变压器电源；
——要使变压器不受附近热源的影响；
——有可燃烟雾和气体的最小保留空间；
——为了安全，采取禁止接近的措施；
——如有必要，要抑制安装设备外部的噪声；
——要对设备外的磁场（主要由连接线或母线所产生的）辐射进行抑制，其主要抑制方法为：在设施内部设置磁屏蔽，或使其与磁场源之间距离足够大。

参 考 文 献

[1] GB/T 30790.2 色漆和清漆 防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护 第2部分:环境分类
[2] IEEE 693 IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations