ORABO

中华人民共和国国家标准

GB/T 9327—2008
代替 GB/T 9327.1—1988,GB/T 9327.2—1988 等

额定电压 35 kV(U_m=40.5 kV)及以下电力电缆导体用压接式和机械式连接金具　试验方法和要求

Compression and mechanical connectors for power cables for rated voltages up to 35 kV(U_m=40.5 kV)—Test methods and requirements

(IEC 61238-1:2003,MOD)

2008-12-31 发布　　2009-11-01 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

+86 400-860-0988
https://www.terminalblock.net

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　符号 …… 2
5　概述 …… 3
6　电气试验 …… 4
7　机械试验 …… 8
8　试验报告 …… 8
附录 A（规范性附录）　均流器及制作 …… 14
附录 B（规范性附录）　测量方法 …… 16
附录 C（资料性附录）　提高测量精确度的建议 …… 17
附录 D（资料性附录）　确定短路电流值 …… 18
附录 E（规范性附录）　计算方法 …… 19
附录 F（资料性附录）　计算方法的解释 …… 23
附录 G（资料性附录）　温度变化曲线图的解释 …… 35
附录 H（资料性附录）　关于电气连接金具评估试验结果统计方法的解释 …… 36
参考文献 …… 38

前　言

本标准修改采用 IEC 61238-1:2003《额定电压 30 kV(U_m=36 kV)电力电缆用压接和机械连接金具　第 1 部分:试验方法和要求》(第 2 版,英文版)。

本标准根据 IEC 61238-1:2003 重新起草,其章条编号和 IEC 61238-1:2003 完全一致。

在采用 IEC 61238-1:2003 时,本标准作了一些修改。有关技术性差异已编入正文并在它们所涉及的条款的空白处用垂直单线标识。主要技术性差异和解释如下:

——考虑到我国电网国情,本标准将电压适用范围延伸到了 35 kV(U_m=40.5 kV)。

为便于使用,本标准作了下列编辑性修改:

——用小数点“.”代替作为小数点的逗号“,”;

——删除 IEC 61238-1:2003 的引言。

本标准代替 GB/T 9327.1—1988《电缆导体压缩和机械连接接头试验方法　总则》、GB/T 9327.2—1988《电缆导体压缩和机械连接接头试验方法　直流电阻试验方法》、GB/T 9327.3—1988《电缆导体压缩和机械连接接头试验方法　短路试验方法》、GB/T 9327.4—1988《电缆导体压缩和机械连接接头试验方法　热循环试验方法》和 GB/T 9327.5—1988《电缆导体压缩和机械连接接头试验方法　抗拉强度试验方法》。

本标准与 GB/T 9327—1988 相比,主要变化如下:

——接头种类由 A、B、C 三类减为 A、B 两类(GB/T 9327.4—1988 的附录 B,本版第 1 章);

——热循环次数由 250 次、500 次、1 000 次统一规定为 1 000 次(GB/T 9327.4—1988 的表 3,本版 6.3.3);

——短路试验由 3 次增加到 6 次(GB/T 9327.4—1988 的表 3,本版 6.3.4、表 2);

——电气试验中取消了初始电阻比率要求;初始离散度和平均离散度要求由 0.15(压接式)、0.3(机械)统一规定为 0.3(GB/T 9327.1—1988 的表 A1 和表 A3,本版表 2);

——机械性能由抗拉强度试验改为拉力试验(GB/T 9327.1—1988 的表 A4,本版表 3);

——增加了关于提高测量精确度的建议(本版的附录 C);

——增加了短路电流的测量(本版的附录 D);

——增加了计算方法(本版的附录 E);

——增加了计算方法的解释(本版的附录 F);

——增加了温度变化曲线图的解释(本版的附录 G);

——增加了关于电气连接金具评估试验结果统计方法的解释(本版的附录 H);

——增加了 IEC 61238-1 的参考文献(本版的参考文献);

——取消了 1988 版分 5 个部分的编排方式。

本标准的附录 A、附录 B 和附录 E 为规范性附录;附录 C、附录 D、附录 F、附录 G 和附录 H 为资料性附录。

本标准由中国电器工业协会提出。

本标准由全国电线电缆标准化技术委员会(SAC/TC 213)归口。

本标准起草单位:上海电缆研究所、永固集团股份有限公司。

本标准主要起草人:顾荣荣、葛光明、郑革、郑晓权、陈钧法、张智勇、马瞻。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为:

——GB/T 9327.1—1988,GB/T 9327.2—1988,GB/T 9327.3—1988,GB/T 9327.4—1988,GB/T 9327.5—1988。

额定电压 35 kV(U_m=40.5 kV)及以下电力电缆导体用压接式和机械式连接金具　试验方法和要求

1　范围

本标准适用于额定电压 35 kV(U_m=40.5 kV)及以下电力电缆导体用压接式和机械式连接金具，例如适用于直埋电缆或安装在建筑物内的电缆。这些电缆为：

a)　符合 GB/T 3956—2008 标准的导体，铜芯导体截面积为 10 mm^2 以上，铝芯导体截面积为 16 mm^2 以上。

b)　导体的最高连续运行温度不超过 90 ℃。

本标准不适用于架空导体上的连接金具，该连接金具有特殊机械要求，需专门设计。本标准也不适用于具有滑动连接的可分离连接金具或多芯连接金具(即滑环连接金具)。

虽然无法准确地确定所有应用的使用条件，但还是可以将连接金具分成两大类：

——A 类：A 类连接金具适用于能承受相对较长时间和较大强度的短路电流作用的配电或工业网络。因此，A 类连接金具可在大多数环境下使用。

——B 类：B 类连接金具适用于装有保护装置(例如快熔保险装置)且能将过载负荷或短路电流迅速排除的网络。

根据连接金具应用的不同，连接金具进行下列试验：

——A 类：热循环和短路试验。

——B 类：仅做热循环试验。

本标准的目的是确定适用于电力电缆铜或铝导体用压接式或机械式连接金具型式试验的方法和要求。

以前，对该类产品的认可是依据使用性能达到国家标准或规范的基础上进行的。本标准的出版并不否定已有的认可。然而，根据早期标准或规范认可产品不能声明符合本标准，除非这些产品经过特别的试验。

产品获得认可后，无须重新进行试验，除非连接金具的材料、设计或生产流程发生了变化，且这些变化可能会影响到连接金具的特性。

2　规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB/T 2900.10—2001　电工术语　电缆(idt IEC 60050(461):1984)

GB/T 3956—2008　电缆的导体(IEC 60228:2004，IDT)

GB/T 21223—2007　老化试验数据统计分析导则　建立在正态分布的试验结果的平均值基础上的方法(IEC 60493-1:1974，IDT)

3　术语和定义

GB/T 2900.10—2001 确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

导体连接金具　connector(of cable)

将导体与某个设备的端子或将两根或两根以上的导体连接起来的一个金属装置。

3.2

直通连接金具　through connector

用来连接两根导体以延续其长度用的连接金具。

3.3

分支连接金具　branch connector

连接分支导体与主干线导体用的连接金具。

3.4

接线端子　(terminal) lug

连接电缆导体与其他电气设备用的连接金具。

3.5

接线端子连接板　palm (of terminal lug)

接线端子中用来连接电气设备部分。

3.6

接线端子、连接金具的圆管　barrel(of terminal lug, of connector, etc.)

被连接导体插入接线端子、连接金具的一部分。

3.7

基准导体　reference conductor

在试验回路中用来确定基准温度和基准电阻的一段无接头的裸导体或剥去绝缘层的导体。

3.8

均流器　equalizer

在试验回路中能使绞合导体每根导体间电流分布均匀又能用作电势测量点的接头或扎线。

3.9

压接式连接　compression jointing

通过使用专用工具将连接金具与导体可靠连接的一种方法。该方法能够使连接金具与导体产生永久变形。

3.10

机械式连接　mechanical jointing

借助于螺钉或螺栓或其他方式使连接金具与导体可靠连接的一种方法。

3.11

中值连接金具　median connector

在试验回路第一次热循环中，所记录的6个连接金具的温度中第三个较高温度的连接金具即为中值连接金具。

3.12

绝缘穿刺连接器　insulation piercing connector (IPC)

通过金属齿穿透电缆线芯绝缘与导体电气接触的连接器。

4　符号

A——导体的标称截面积；

D——连接金具电阻比率变化量；

I——在电阻测量过程中，通过连接金具的直流电流；

I_{rms}——等值短路电流有效值；
I_N——维持基准导体平衡温度的交流电流；
I_r——在电阻测量过程中通过基准导体的直流电流；
k——连接金具的电阻比率：连接金具的电阻与等效长度基准导体的电阻的比率；
l_a，l_b，l_j——分别表示连接金具两端与测量点之间的导体长度；
l_r——测量点之间的基准导体长度；
t_1——加热时间；
t_2——连接金具和基准导体冷却到不大于 35 ℃所需的时间；
U——当电流 I 通过时，测量点之间的电位差；
U_r——当电流 I_r 流通时，基准导体上两个测量点之间的电位差；
α——在 20 ℃时，电阻的温度系数；
β——连接金具电阻比率在试验周期内的平均离散度；
δ——连接金具电阻比率的初始离散度；
λ——电阻比率比值：连接金具电阻比率对其初始电阻比率的变化量；
θ——连接金具的温度；
θ_{max}——整个试验期间被记录下来的连接金具最高温度；
θ_R——第一个热循环中所确定的基准导体的温度；
θ_{ref}——在测得 θ_{max} 的同时测得的基准导体温度。

注：下标可用于标识连接金具的序号值，见附录 F。

5 概述

5.1 导体

在试验报告中应包括下列信息：

——导体的材料；
——标称截面积、尺寸和形状。建议给出实际截面积；
——导体的类型，即实心或绞合。如果是绞合导体，则应将所知的或者可以通过检测确认的所有导体的具体结构信息反映在报告里面，如：

- 紧压型；
- 非紧压型；
- 柔性等级（第 5 种和第 6 种，按 GB/T 3956—2008）；
- 绞合的数量和排列；
- 如适用的话，镀层类型；
- 如适用的话，浸渍类型、阻水等；
- 近似的硬度指标，如退火、半硬、硬；
- 对于绝缘穿刺连接器，绝缘的材料和厚度。

5.2 连接金具和工具

在试验报告中应包括下列信息：

——所使用的组装工艺；
——工具、模具及必要的配件；
——螺栓、螺母、垫圈、扭矩等；
——如适用的话，接触表面的处理；
——连接金具的类型、识别编码以及其他任何标识；
——对于绝缘穿刺连接器，绝缘的类型和运行温度。

+86 400-860-0988
https://www.terminalblock.net

5.3 认可范围

总的来说，对同一个类型连接金具/导体组合所做的试验，只能适用于该类型的连接金具。然而，为了限制试验次数，允许下列情况：

——同时适用于圆形绞合导体和整圆扇形绞合导体的连接金具，如果通过了圆形紧压导体上的试验，则同时认可这两种类型的导体；

——覆盖一定导体截面积范围的连接金具，如果通过了最小和最大导体截面积上的试验，则认可该截面积范围(见注 2)；

——如果直通连接金具可连接两个不同截面积、形状或材料的导体，且制造工艺技术及连接金具圆管部分已分别在每个截面积上试验通过，则无需附加试验。如果未经试验，对双金属的直通连接金具需进行附加试验。附加试验中，两种导体中温度较高的导体作为基准导体；

——如果生产商能够明确地证明，其一个系列连接金具都是根据通用的和相关的设计标准进行设计，那么只要通过该系列中最大、最小以及两个中等大小的连接金具试验，则认可该系列。

示例 1：如果一个系列的连接金具只有 5 种规格，那么仅需对最大和最小规格以及代表性中等规格的连接金具进行试验。

示例 2：如果一个系列的连接金具只有不多于 4 种规格，那么仅需对最大和最小规格的连接金具进行试验。

——对于宽范围连接金具，应对适用于最大和最小截面积导体的连接金具试验。

——PVC 绝缘的绝缘穿刺连接器通过了在较低温度下进行的热循环和短路试验，则仅认可绝缘是 PVC 的该种连接金具。

——通过干式导体上的连接金具试验，则认可该连接金具可用于同种类型浸渍纸绝缘电缆导体。

——如果连接金具的设计为一端或两端适用一定截面积范围，且不同截面积采用通用的压紧或压接连接，则依据第 7 章的规定，应在最大和最小截面积的导体上进行机械试验。

注 1：相关的设计标准包括：

- 接头压接处理；
- 接触螺丝或压接件的数量；
- 接触螺丝或压接件每单位面积的挤压力；
- 连接金具材料用量与导体的材料用量的比值。

注 2：不同阻水类型能够影响连接金具的性能。

6 电气试验

6.1 安装

在试验回路中，具有同一截面积的所有导体应该使用相同的连续的线芯。

对每个系列的试验来说，根据生产商的安装说明书在裸导体或在已剥去绝缘的导体上安装 6 个连接金具，与基准导体一起构成试验回路。

对于绞合导体，在不同绞合单线上测量点之间电位会使电阻测量产生误差。因此应使用均流器(见附录 A)来解决这个问题，确保基准导体和连接金具均流器测量点之间的电流分布均匀。

如果试验绝缘穿刺连接器，则绝缘穿刺连接器内的导体应绝缘，且连接器外至少保留导体绝缘 100 mm。试验回路还应包含有绝缘的基准导体。如果绝缘穿刺连接器是根据 B 类进行试验的，那么无需使用裸基准导体。

安装试验回路的区域内应空气静止，其周围的环境温度应为 15 ℃～30 ℃。

在绝缘穿刺连接器的组装过程中，环境温度应为(23±3)℃。

如果是实心导体，电位测量点应尽可能地靠近连接金具，以便能够使 l_a 和 l_b 接近零。

试验回路可为任意形状放置，其布置不应受地板、墙面以及屋顶的影响。

试验回路应易于拆开，以便于进行短路试验(仅对 A 类连接金具)。从温度测量的角度考虑，连接

拆开工艺不应影响测量。

试验过程中，连接金具的螺栓或螺丝不允许重新拧紧。

6.1.1 直通连接金具和接线端子

试验回路如图1，图中注明了所用的尺寸。

如果要试验接线端子，可按照生产商的要求，用螺栓将接线端子连接板与连接排连接在一起。连接排的尺寸、厚度以及材质应与接线端子的连接板相同。

为获得6.3规定的温度，可能需要调整连接排的热特性，如果不用连接排，也可以将接线端子连接板相互连接，然后对接线端子进行试验。有争议时，应使用连接排的方法。

对于要求评估包括螺栓连接的接线端子连接板性能的试验，连接排端部所用材料、尺寸及表面镀层应与接线端子的连接板一致。

6.1.2 分支连接金具

当分支连接金具的分支导体截面积与主导体的截面积相等或接近时，主导体和分支导体之间可视为直通连接金具，采用直通连接金具的试验方法。对于其他情况，试验回路如图2所示。如果出于连接金具类型的原因而要将主导体切断，那么作为直通连接金具的那部分连接金具也应进行试验。

6.2 测量

6.2.1 电阻测量

在整个试验过程中，需在不同阶段对电阻进行测量，见6.3规定。

电阻的测量需在稳定的温度条件下进行，包括试验回路温度和试验场地的温度。环境温度应为15 ℃～30 ℃。

测量电阻推荐的方法为：在不升高温度的情况下，连接金具和基准导体上通以直流电流(热循环电流的10%)，然后测量规定电位点之间的电位差。电位差和直流电流的比值即为相应点之间的电阻。

注：为了提高电阻测量的精度，建议在整个试验过程中使用同样的直流电流。

根据图2安装的分支导体中，应在测量电位差的金具部分通以全部测量电流。因此在安装过程中，应该提供开关或断开点。

热电势会影响低电阻的测量准确性(约为10 μΩ)。如果对测量到的电阻有疑问，可进行两次电阻测量，第一次数据读取后，让测量电流反向，然后进行第二次读取。两次读取的数据的平均值就是实际电阻。

电位点的位置见图3和附录B。此外，需对图3和附录B中所示的各种长度进行测量，确保获得真实的连接金具电阻。进行电阻测量时，应记录连接金具和基准导体的温度。为了能够直接比较，将电阻值修正至20 ℃时的电阻。同时也在附录B中提供了关于所推荐方法的相关信息。在热循环试验过程中，应该在这些位置进行温度测量。

电阻间接读取时要求：

电压测量的精度应不低于±0.5%或±10 μV，取精度较高值；

电流测量的精度应不低于±0.5%或±0.1 A，取精度较高值。

电阻直接读取时要求：

当计量仪器根据认证的标准电阻进行校准后，电阻测量的精度应不低于±1%或±0.5 μΩ，取精度较高值。

6.2.2 温度测量

在整个试验中，需在不同阶段对温度进行测量，见6.3规定。

在图3中所指定的位置对连接金具和基准导体的温度进行测量。推荐采用热电偶的温度测量方法。温度读数精确为±2 K。

6.3 热循环试验

应用交流电进行热循环试验。

6.3.1 第一次热循环

第一次热循环的目的是确定基准导体的温度。该温度会在后续循环中使用；而且还可以确认中值连接金具。

a) 非绝缘穿刺连接器的直通连接金具和接线端子

电流通过试验回路，将基准导体升温到 120 ℃且处于稳定状态。

稳定状态是指基准导体和连接金具在 15 min 内，其温度变化不超过±2 K。

如果中值连接金具的温度（见 3.11）大于或等于 100 ℃，那么在其后续热循环中，基准导体的温度将取为 120 ℃。如果中值连接金具温度小于 100 ℃，那么应增加回路电流，直到中值连接金具温度达到 100 ℃的平衡状态，其前提是基准导体的温度不超过 140 ℃。当基准导体的温度达到了 140 ℃时，如果中值连接金具的温度仍然没有到达 100 ℃，那么在该温度状态下进行试验。测量得到的基准导体温度 θ_R 可以用在后续的热循环中（120 ℃≤θ_R≤140 ℃）。处于平衡温度的电流 I_N 应记录在试验报告中。

注 1：如果接线端子试验使用连接排，那么应测量连接排（与接线端子连接板相连）中点的温度。该温度应该等于基准导体的温度 θ_R，误差为±5 K。

b) 非绝缘穿刺连接器的分支连接金具

如果需用到图 2 所示的电路，让电流通过试验回路，将主基准导体和三根分支基准导体的温度提高到 120 ℃的平衡状态。为了能够达到这个温度，应该通过电流注入或阻抗控制方法对三根分支导体中的电流进行调整。如果中值连接金具的温度（见 3.11）不低于 100 ℃，那么后续热循环中，基准导体的温度为 120 ℃。如果中值连接金具温度小于 100 ℃，那么应增加回路中的电流，直到中值连接金具的温度达到 100 ℃的平衡状态，其前提是基准导体的温度不得超过 140 ℃。有必要在该阶段以及在整个试验过程中的所有区间内，调整单个分支导体内的电流，以确保每个分支的基准导体温度与主基准导体温度一样。测量得到的主基准导体和分支基准导体温度 θ_R 可用于后续的热循环中（120 ℃≤θ_R≤140 ℃）。温度平衡时主导体和分支导体内的电流 I_N 应记录在试验报告中。

c) 绝缘穿刺连接器

绝缘穿刺连接器的试验过程中，需使用图 1 或图 2 中所示的相同试验回路；不过也有例外，那就是在试验回路中添加有绝缘的基准导体。在循环过程中，中值连接金具的温度应比导体在正常运行下的最高温度要高 10 K。不过，应该对循环的电流进行限制，以便处于平衡温度的绝缘基准导体，其温度不会比导体在正常运行下的最高温度还要高 10 K～15 K。如果使用的是分支连接金具，那么有必要在整个试验过程中的所有区间内，调整单个分支导体内的电流，以确保每个分支的基准导体温度与主基准温度一致。当处于平衡温度时，主线和分支导体内的电流 I_N 应记录在试验报告中。

注 2：如果连接金具在使用过程中，其达到的温度比导体在正常运行下的最高温度要高出很多，那么经生产商和用户的协商之后，有必要对试验回路的高温状态进行附加测试。宜通过热绝缘体的应用，使试验回路的温度额外增加。

6.3.2 第二次热循环

第二次热循环的目的是确定热循环的持续时间和温度曲线图。此时间和温度曲线将会在所有的后续热循环中用到。电流通过回路，直到主基准导体的温度达到 6.3.1 中所确定的 θ_R 为止，误差为 $^{+6}_{0}$K，中值连接金具的温度在 10 min 内，其温度变化不超过 2 K。

增大电流可以用来缩短加热时间。增大电流的持续时间见表 1。此后，电流应该降低或被调节到维持基准导体平衡温度的交流电流 I_N。必要时，可以利用多次循环以确定第二次热循环。

基准导体的温度是一个控制参数，在热循环过程中应保持温度曲线稳定。通过控制周围环境温度的方式，使它不会影响基准导体温度曲线的形状。

表 1 增大电流最短的加热时间

导体标称截面积 A/mm²	铝 铜	16≤A≤50 10≤A≤35	50<A≤150 35<A≤95	150<A≤630 95<A≤400	A>630 A>400
时间/min		5	10	15	20

基准导体温度在时间(t_1)内的加热变化曲线见图 4,且需记录在试验报告中,供后续循环使用。t_1之后是冷却时间段 t_2,该时间段后,所有连接金具和基准导体冷却到 35 ℃以下。

有必要的话,可在后续热循环中调整 t_2,以确保能够获得所需的温度状况。

如果采用加速冷却,则限于使用环境温度的空气且作用于整个试验回路。

一个热循环周期的完整时间为 t_1+t_2(见图 4)。

6.3.3 后续热循环

总热循环次数为 1 000 次(见 6.3.2 规定)。经热循环的冷却时间段之后,按照 6.2 规定应记录每个连接金具和每根基准导体的电阻和温度。在循环过程中先测量每个连接金具的最高温度,然后再测量电阻。

在下列循环中进行测量:

A 类	B 类
0(第一次热循环之前,见 6.3.1)	0(第一次热循环之前,见 6.3.1)
200,短路之前	250
200,短路之后	每隔 75 次循环
250	(共进行 12 次测量)
每隔 75 次循环	
(共进行 14 次测量)	

允许±10 次循环误差。

6.3.4 短路试验(仅 A 类连接金具)

200 次热循环后,要进行 6 次短路试验。

短路电流值的确定:要求试验的短路电流能够将裸基准导体从不小于 35 ℃的温度增加到 250 ℃~270 ℃。

不过,对绝缘穿刺连接器来说,应限制短路电流值,使绝缘基准导体的温度不超过绝缘允许的最高温度。

注 1:短路电流可以根据 IEC 60949:1988 第 3 章规定进行计算;也可以根据本标准的附录 D 确定。如果实际导体的截面积已经确认,后一种方法可以用来选择电流,还能够获得所需的温升范围。

短路试验中的最高温度,时间和近似电流值或实际电流值和时间都应记录在试验报告中。

短路试验中,最大的电流为 25 kA 的持续时间应为$(1^{+0.5}_{-0.1})$s。如果需要的短路电流超过这个电流值,电流为25 kA~45 kA时持续时间可延长至≤5 s。

每次短路试验后,试验回路应冷却至≤35 ℃。

注 2:对于大截面导体,导体温度预热到 90 ℃。对截面积超过 630 mm² 的铜导体或 1 000 mm² 的铝导体,上述参数(45 kA 和 5 s)不足以让导体温度达到 250 ℃。

如 6.1 所述,这些试验中试验回路可拆开成几个部分。由于短路试验仅考核大电流的热效应,为降低电磁力的作用推荐使用同轴导体。试验的布置应记录。

注 3:应注意,在安装、运输和装卸过程中的弯曲或震动状况都可能产生影响试样接触电阻的机械力,应尽量避免。为了试验的重现性,如固定接线端子至试验设备上力矩,这样的机械操作宜由相关方协商确定。

注 4:对于特殊应用场合,可采用其他短路条件。

注 5:对于分支连接金具,基准导体是与分支连接金具相连的部分。

6.4 试验结果评估

单个连接金具的电阻比率 k 是一种评估连接金具的通用方法,适用于本标准的所有截面积的连接金具,下列参数按附录 E 进行计算:

a) 连接金具的电阻比率 k，对 6.3.3 所列所有测量间隔，按 E.2 对 6 个连接金具逐一进行计算；

b) 初始离散度 δ，6 个初始 k 值之间的初始离散度，根据第 0 次热循环中测得初始值 k，按 E.3 进行计算；

c) 平均离散度 β，6 个 k 值之间的平均离散度，根据最后 11 次测量间隔的平均值，按 E.4 进行计算；

d) 6 个连接金具中每个电阻比率变化量 D，按 E.5 逐个计算。D 随测量间隔的最后 11 个测量电阻的平均值 k 而变化；

e) 电阻比率比值 λ 按 E.6 进行计算；

f) 每个连接金具的最高温度 θ_{max} 按 E.7 进行记录。

6.5 要求

6 个连接金具应满足的要求见表 2。如果 6 个连接金具中的一个连接金具无法满足表中的一个或多个要求，允许重新进行试验。在这种情况下，所有 6 个新的连接金具都应满足要求。

如果一个以上连接金具无法满足表中的一个或多个要求，不允许重新试验且该类型的连接金具被判为不符合本标准。

表 2 电气试验要求

参数	标识	文本参考	最大值
初始离散度	δ	E.3	0.30
平均离散度	β	E.4	0.30
电阻比率变化量	D	E.5	0.15
电阻比率比值	λ	E.6	2.0
最高温度	θ_{max}	E.7	θ_{ref}
注：本表给定的数据是根据经验所得。			

7 机械试验

机械试验目的是确保与电力电缆导体相连的连接金具具有可接受的机械强度。

注：机械拉力与连接金具的电气质量无关。

7.1 方法

机械试验中所使用的 3 个连接金具应该与电气试验中所使用的连接金具是一样的。根据 6.1 中的电气试验规定安装这些连接金具。两个连接金具之间或连接金具与张力试验工具钳之间的导体长度应≥500 mm。负荷速率不得超过 10 N/(s·mm²)，总负荷如表 3 中所规定的值。要求该拉力值下保持 1 min。

适用于不同截面积导体的连接金具进行试验时，不同的连接金具均需根据表 3 试验。

表 3 机械试验拉力的要求

导体材料	张力/N
铝	$40\times A^a$；最大 20 000
铜	$60\times A^a$；最大 20 000
[a] A=标称截面积(mm²)。	

7.2 要求

在试验中不应发生滑动。

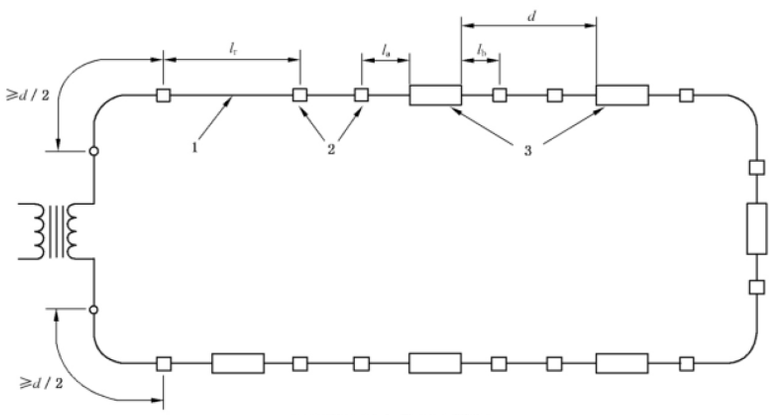
8 试验报告

试验报告应包括下列几个部分：

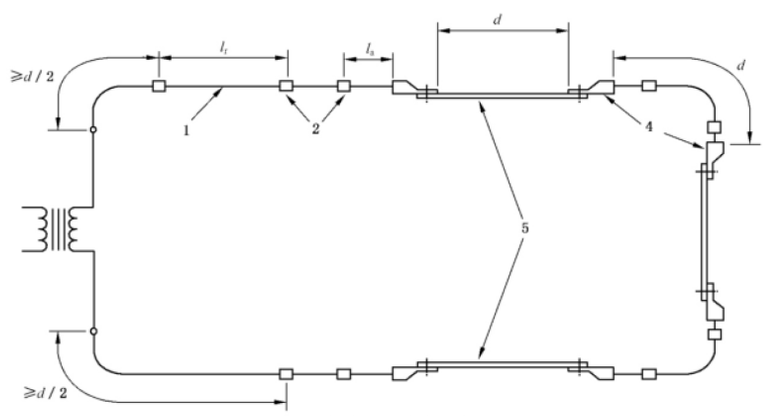
——连接金具的类别(见第 1 章)；

——所使用的导体(见 5.1)；
——连接金具和工具(见 5.2)；
——安装(见 6.1.1 示例)；
——温度达到平衡状态时的电流(见 6.3.1)；
——A 类连接金具的短路参数(见 6.3.4)；
——电气试验结果；
——机械试验结果。

注：建议在试验报告中附上连接金具电阻比率 k 与循环次数的曲线图、温度与循环次数的曲线图以及温度分布曲线图。



a) 直通连接金具试验回路



b) 接线端子试验回路

$d \geqslant 80\sqrt{A}$或 500 mm，取其中较大者

A 是相应导体截面积，mm^2

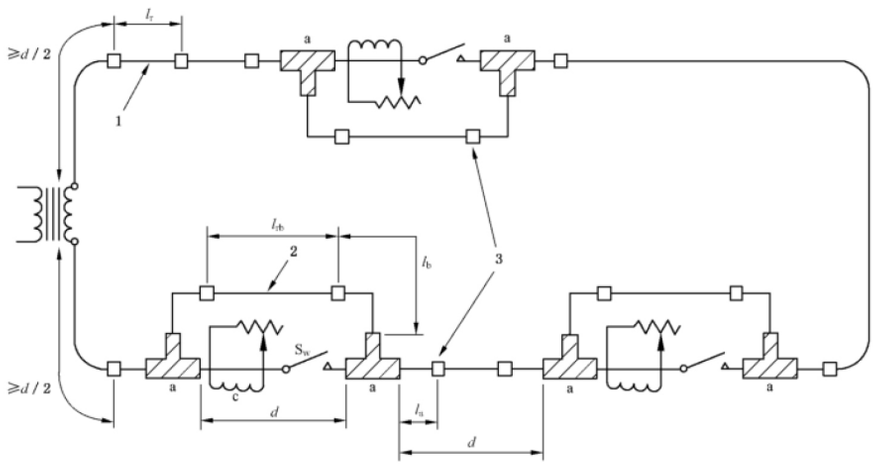
$l_r \geqslant l_a + l_b + l_j$($l_j$ 见图 3)

对于绞合导体：

l_a，$l_b \approx 15\sqrt{A}$或 150 mm，取其中较大者

1——基准导体；
2——均流器(绞合导体用)；
3——直通连接金具；
4——接线端子；
5——连接排。

图 1　直通连接金具和接线端子典型试验回路



$d \geqslant 80\sqrt{A}$或 500 mm，取其中较大者

A 是相应导体截面积，mm^2

l_r、$l_{cb} \geqslant d$

对于绞合导体：

l_a、$l_b \approx 15\sqrt{A}$或 150 mm，取其中较大者

1——主导体基准导线；

2——分支基准导线；

3——均流器(绞合导体用)；

a——分支连接金具；

c——电流控制；

S_w——开关(用于分支电阻的测量)。

注：对于 IPC 的 l_a、l_b 如有需要可以加长。

图 2　分支连接金具的典型试验回路

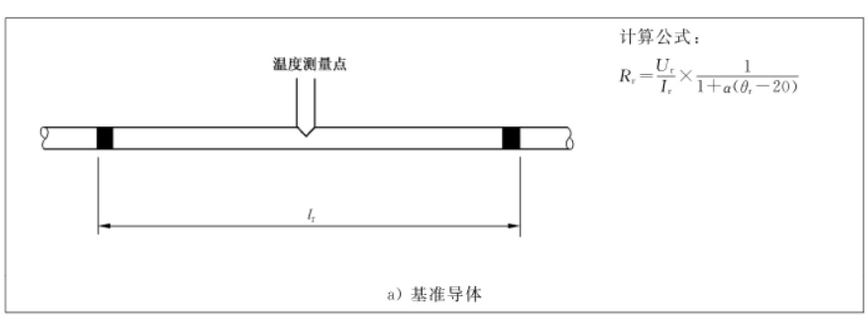
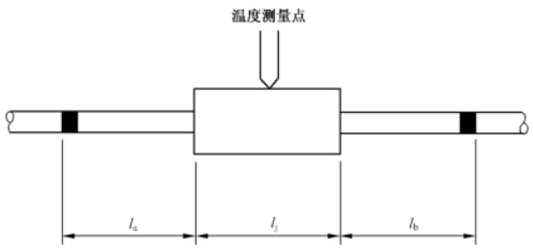


图 3　电阻测量的典型例子



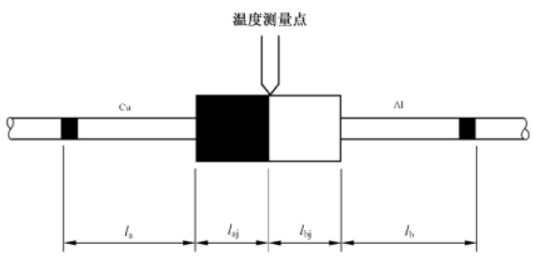
计算公式：

$$R_j = R - R_r \times \frac{(l_a + l_b)}{l_r}$$

$$K = \frac{R_j}{R_r} \times \frac{l_r}{l_j}$$

基准导体：主导体

b）直通连接金具



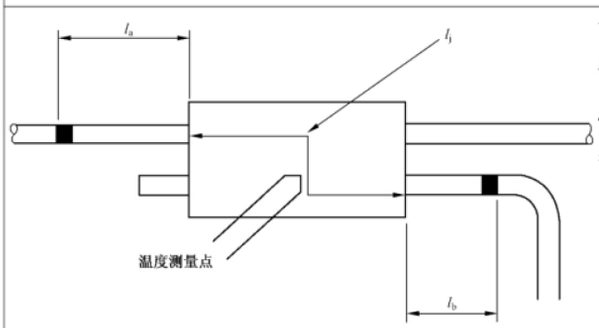
计算公式：

$$R_j = R - \left[\frac{R_r Cu}{l_r Cu} \times l_a + \frac{R_r Al}{l_r Al} \times l_b\right]$$

$$k = \frac{R_j}{\frac{R_r Cu}{l_r Cu} \times l_{aj} + \frac{R_r Al}{l_r Al} \times l_{bj}}$$

基准导体：铜和铝导体

c）双金属直通连接金具



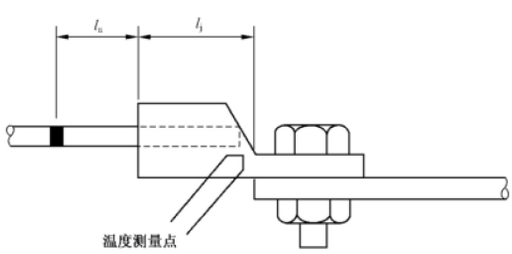
计算公式：

$$R_j = R - \left\{\frac{R_{r\,main}}{l_{r\,main}} \times l_a + \frac{R_{r\,branch}}{l_{r\,branch}} \times l_b\right\}$$

$$k = \frac{R_j}{R_{r\,branch}} \times \frac{l_{r\,branch}}{l_j}$$

基准导体：主导体和分支导体

d）分支连接金具



计算公式：

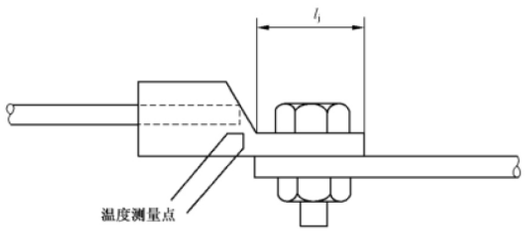
$$R_j = R - R_r \times \frac{l_a}{l_r}$$

$$k = \frac{R_j}{R_r} \times \frac{l_r}{l_j}$$

基准导体：主导体

e）接线端子的圆管

图 3（续）



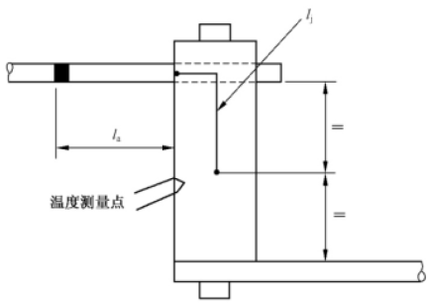
计算公式：

$R_j = R$

$k = \frac{R_j}{R_r} \times \frac{l_r}{l_j}$

基准导体：主导体

f）接线端子连接板



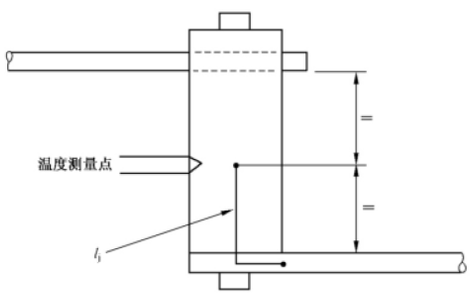
计算公式：

$R_j = R - R_r \times \frac{l_a}{l_r}$

$k = \frac{R_j}{R_r} \times \frac{l_r}{l_j}$

基准导体：主导体

g）机械连接金具与导体连接



计算公式：

$R_j = R$

$k = \frac{R_j}{R_r} \times \frac{l_r}{l_j}$

基准导体：主导体

h）机械连接接头与端子排相连

图 3（续）

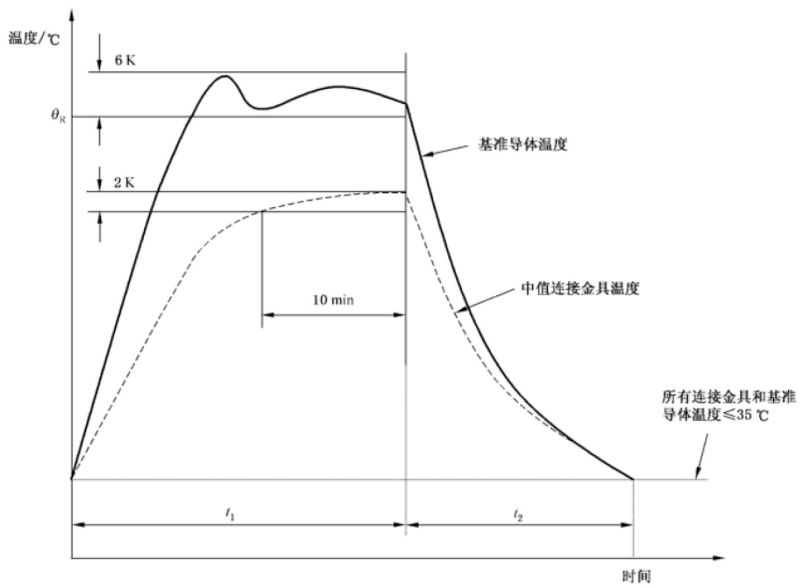

温度/℃
6 K
θ_R
2 K
基准导体温度
10 min
中值连接金具温度
所有连接金具和基准导体温度≤35 ℃
t_1
t_2
时间

图 4　第二次热循环

附 录 A
（规范性附录）
均流器及制作

对于绞合导体，测量点处绞线的单线之间的电位可能导致电阻测量时产生误差。

可以采用焊接或钎焊均流器克服这个问题，以确保通过基准导体的电流均匀分布。推荐使用焊接均流器方法，以确保测量可靠。

只要其能提供有效结果而且不影响连接金具或基准导体的温度，其他方法也可以使用。

A.1 铜导体

铜导体需要的专用工具包括：

——银焊料；

——支撑夹具；

——冷却板；

——加热设备。

切割导体使端面与轴心垂直，将导体焊接端切成如图 A.1。然后清理端面，并将其对接好置于支架上。用银焊料焊接端面，为确保焊接区域的机械性能不受影响，该区域焊接时必须进行足够的冷却。

A.2 绞合铝导体（图 A.1）

铝导体需要的器材包括：

——钨惰性气体保护（TIG）焊接设备或金属惰性气体保护（MIG）焊接设备；

——焊接支架；

——焊条 A5（1100）、焊条 A5（1050）或等效物。

切割导体使端面与轴心垂直，将导体焊接端切成如图 A.1。然后清理端面，使用熔接气炬将其熔化（对于截面积大于 95 mm^2 的电缆，先熔化其外围，然后添加焊料至中心以完成斜面）。斜面长度 a 和导体间距 b 的大小如下（见表 A.1）：

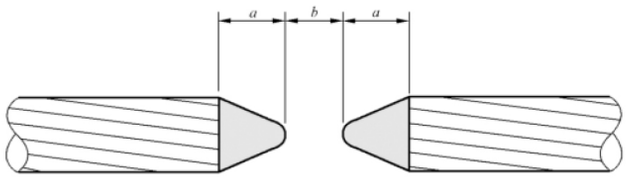
表 A.1 均流器尺寸

截面积 A/mm^2	$A \leqslant 95$	$95 < A \leqslant 240$	$A > 240$
a/mm	3～5	5～10	7～12
b/mm	1～2	2～5	4～6

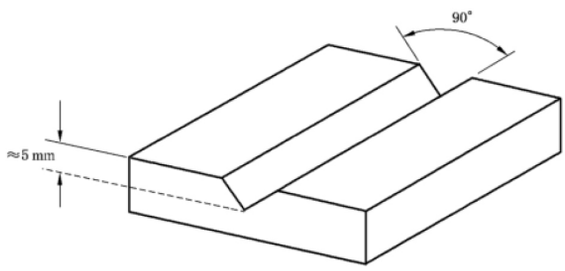
将导体架好并隔开距离 b、从中心处开始焊接、转动导体，以获得均匀的圆形焊接接头。为确保导体焊接区域的机械性能不受影响，该区域必须进行足够的冷却。

A.3 尺寸

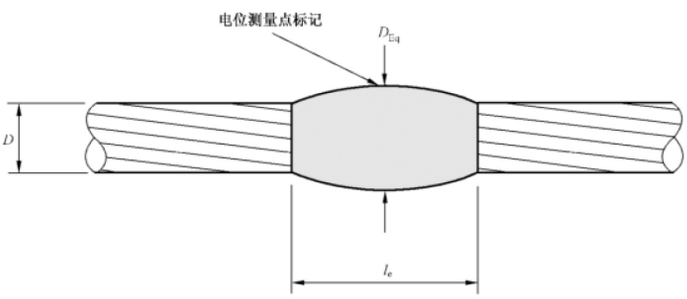
均流器的尺寸详见图 A.1。



a) 制备端头



b) 焊接支架



当 $D \leqslant D_{Eq} \leqslant 1.2D$

截面积 $A \leqslant 95\ mm^2$ 时，$l_e = 10\ mm \sim 15\ mm$；

截面积 $95 < A \leqslant 240\ mm^2$ 时，$l_e = 15\ mm \sim 25\ mm$；

截面积 $A > 240\ mm^2$ 时，$l_e = 25\ mm \sim 35\ mm$。

c) 焊接均流器

图 A.1　均流器制作

附 录 B
（规范性附录）
测 量 方 法

B.1 典型连接金具的电位测量点

测量电阻的电位点位置见图 3a)、3b)、3c)、3d)、3e)和 3g)。实心导体的电位点应靠近，但不得接触连接金具。对于绞合导体，电位点即均流的中点离连接金具，应为是 $15\sqrt{A}$ mm 或 150 mm，取其中较大者，实际测试连接金具的 l_a 和 l_b 的实际长度可能有所出入。因此，在计算每个连接金具的电阻时，有必要需分别测量，尽管螺栓连接终端设备的电阻测量不是本标准的要求，但可以通过直接测量或增加额外电位点[图 3f)、图 3g)和图 3h)]的方法对其进行评估。

B.2 温度测量

温度测量必须在热电偶与其测量点之间建立良好的热交换关系。

如果是测量基准导体的温度[图 3a)]，测温点设置在导体中点，热电偶可以插入实心导体上开出的小孔中，或者将其嵌入绞合导体的内层绞线中。

如果是连接金具[图 3b)至图 3h)]的温度，热电偶既可以插入连接金具主体上开出的小孔中，也可以固定在外表面。如果是后者，为保护热电偶免受损伤而在热电偶上设置遮盖物，遮盖物不应影响连接金具的散热。

B.3 等效导体电阻

测量已知长度基准导体的电阻和其温度[图 3a)]，通过减去基准导体长度 l_a 和 l_b 的电阻就可以计算出连接金具电阻 R_j。需要记录下来的各种长度见图 3。

注意，如果是分支连接金具，当计算真实连接金具电阻时[见图 3d)]，主导体基准导体和分支基准导体的电阻都需要用到。

每次测量连接金具电阻时，必须同时测量基准导体的电阻。基准导体(经温度修正)的所有电阻测量值在整个测量期间都应保持稳定，从原理上讲均流器也是稳定的。为确定参数 k(见附录 E)，必须确保基准导体和所有连接金具的电阻测量均在环境温度下进行。

附 录 C
（资料性附录）
提高测量精确度的建议

C.1 试验回路的处理

搬动和布置试样过程中的弯曲或震动可能导致机械变形，这会影响测试对象的电阻，因此必须避免。

由于计算往往基于最初时的位置，因此在整个测试中，应使用相同的测量点。建议验证一下测量点，特别是在短路测试之后。

C.2 测量、仪器和读数

对于绞合导体，在没有安装连接金具的试验回路中任意均流器之间距离可以用作测量电阻的对照物（核对）。

所有记录值宜表明在整个测试期间均流器都是稳定的。

在试验前，检查每台仪器校验的有效性或进行校验。如果可能，校验整个测量链。

温度仪表可以在 100 ℃的沸水和 0 ℃的冰水中很容易地进行校核。

对于电流测量，可以在试验回路内引入校准的分流器。

如果可能，可使用相同的仪器进行电压（ΔU_{DC}）、电流（分流器的 ΔU_{DC}）和温度（热电偶-电压输出 ΔU_{DC}）测量。

标准电阻可以用作电压测量或电阻直接测量的仪器校准。在测量前或测量后都宜对其进行核对。

建议：

在整个测试期间使用相同的仪器；

尽量避免更换任何仪器，因为测量系统的变动可能导致测量的不良结果；

自动存储测量数值，以避免抄写错误；

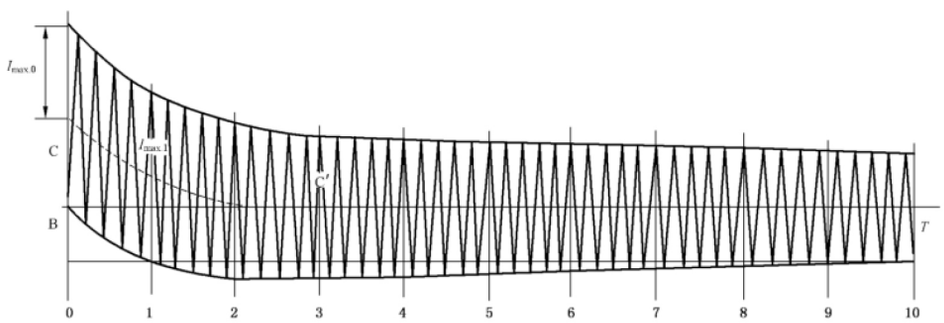
使用有效的计算机程序进行计算，以防止偶然错误。

计算 k 值时，可能会使用到没有经过温度校准的基准导体和连接金具电阻测量值，所以在测量期间基准导体的电阻不应发生变化，在电阻测量时，试验回路内的各部分温度应保持一致和稳定。

必须避免伪读数。

仪器的性能指标应在试验报告中提供。

附 录 D
（资料性附录）
确定短路电流值



图中所示为电流随时间变化的情况，总时间 BT 分成 10 个相等的部分，电流的交变分量的测量是在点 0、1、2…10 的垂直方向进行。

这些数值通过 I_{max0}、I_{max1}、I_{max2}…I_{max10} 来表示。

则有效数值为 $I_i = I_{max\,i}/\sqrt{2}$

I_{max} 是各个点交流分量的最大值。

在 BT 期间内等值短路电流有效值为：

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{30}[I_0^2 + 4(I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2) + 2(I_2^2 + I_4^2 + I_6^2 + I_8^2) + I_{10}^2]}$$

注 1：直流分量(CC')在此忽略。

注 2：本附录与 IEC 60694:1988 附录相一致。

附 录 E
（规范性附录）
计 算 方 法

本统计计算符合 GB/T 21223—2007 的要求。

E.1 所作的测量

根据 6.3.3 列出的热循环，在室温下对试验回路进行如下测量（见 6.2 和附录 B）：

U——各连接金具两测量点之间的电位差；

I——在测量 U 时的直流电流；

θ——在测量 U 时的每根导体的温度；

U_r——基准导体两测量点之间的电位差；

I_r——在测量 U_r 时的直流电流；

θ_r——在测量 U_r 时的基准导体的温度。

上述为推荐方法。电阻可为直接测量。也可以用 U/I 数值作电阻。

此外，电阻测量前或测量后要测量各连接金具和导体或基准导体的温度并加以记录。

按照图 3 定义需要测量的 l_a、l_b、l_j 和 l_r 的长度，并在整个测量期间都适用。对于长度≥40 mm，测量公差是±2 mm；长度<40 mm，则为±5%。

E.2 连接金具的电阻比率 k

温度为 20 ℃时，导体测量点之间的电阻如下：

$$R = \frac{U}{I} \times \frac{1}{1+\alpha(\theta-20)}$$

标准电阻温度系数 α，对于铜和铝是相同的，取 $\alpha=0.004\ K^{-1}$

温度为 20 ℃时，基准导体的电阻如下：

$$R_r = \frac{U_r}{I_r} \times \frac{1}{1+\alpha(\theta_r-20)}$$

连接金具电阻 R_j 为：

$$R_j = R - R_r \times \frac{(l_a+l_b)}{l_r}$$

连接金具电阻比率 k 为：

$$k = \frac{R_j}{R_r} \times \frac{l_r}{l_j} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (E.1)$$

E.3 初始离散度 δ

第 0 次循环时，6 个连接金具 k 值之间的初始离散度计算如下：

计算平均值：

$$\overline{K}_0 = \frac{1}{6}\sum_{1}^{6} k$$

标准差：

$$s_0 = \sqrt{\frac{1}{5}\sum_{1}^{6}(k-\overline{K}_0)^2}$$

则离散度为：

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{s_0}{\overline{K}_0} t_s$$

t_s——t 分布临界值，在试验中取双侧置信度为 99%，自由度为 5，据此查分布临界值表得：

$$t_s = t_{5(0.995)} = 4.032;$$

由此

$$\delta = 1.65 \frac{s_0}{\overline{K}_0} \qquad \cdots\cdots (E.2)$$

E.4 平均离散度 β

平均离散度必须使用电阻测量期内 11 个测量读数才能决定。这 11 个读数始于第 250 次循环，然后以每 75 次循环递增，直至第 1 000 次循环。递增循环误差为±10 循环，只有这样，本标准列出的计算公式才可以适用。如果超出此公差，则必须有具体的统计处理。为了计算方便，将原点移至 11 个读数的中点，并且引入了统计变量 x（见图 E.1）。变量 x 的数值为 0、±1、±2…±5。

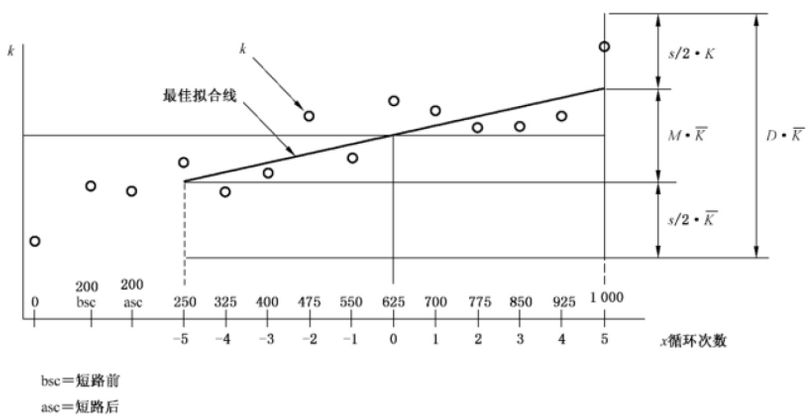


图 E.1 A 类单个连接金具评估图例

对于每个连接金具，其在区间 $x=-5\sim+5$ 的平均值可按下式计算：

$$\overline{k} = \frac{1}{11} \sum_{-5}^{+5} k \qquad \cdots\cdots (E.3)$$

由于已获得 6 个数据，这 6 个数据的平均值为：

$$\overline{K} = \frac{1}{6} \sum_{1}^{6} \overline{k}$$

标准差：

$$s = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{1}^{6} (\overline{k} - \overline{K})^2}$$

离散度：

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{s}{\overline{K}} t_s$$

已知 $t_s=4.032$ 因此，

$$\beta = 1.65 \frac{s}{\overline{K}} \qquad \cdots\cdots (E.4)$$

E.5 每个连接金具的电阻比率变化量

为了计算连接金具在11次电阻测量期内电阻比率的可能变化量，使用最小二乘法来确定最佳拟合线。拟合线和电阻比率有一定的误差，此误差大小取决于电阻比率的离散度置信区间。

E.5.1 最佳拟合线

在 $x=-5\sim+5$ 范围内，最佳拟合线的斜率计算方法如下：

$$b=\frac{\sum_{-5}^{+5}xk}{\sum_{-5}^{+5}x^2}$$

因此，电阻比率的变化量是：

$$M=10\frac{b}{\overline{k}} \qquad \cdots\cdots(\text{E.5})$$

$\overline{k}$ 值按公式(E.3)进行计算。

对6个连接金具中的每个接头分别进行 M 参数的计算。

E.5.2 置信区间的 δ_i

对于电阻比率变化置信区间的 δ_i 为：

$$\delta_i=t_s\sigma$$

式中：

t_s——分布临界值，在试验中双边置信度为90%，自由度为(11－2)＝9时，查表得 $t_s=t_{9,0.95}=1.833$；

σ——按照最佳拟合线在 $x=+5$ 或 $x=-5$ 时估算的标准差。

对于11个测量值的情况，σ 为：

$$\sigma=0.564\sqrt{\sum_{-5}^{+5}\frac{(k-\overline{k}-b\cdot x)^2}{9}}$$

$$\sigma=0.564\times s_j$$

根号表达式是连接金具与最佳拟合线的标准差，将其定义为 s_j，它仅与单个连接有关，不应该与6个连接金具的标准差 s 混淆，后者是当 $x=0$ 时计算出来的平均数，并用于确定离散度 β。

上述表达式 s_j 可简化为：

$$s_j=\frac{1}{3}\sqrt{\left|11\left[(\overline{k}^2)-(\overline{k})^2\right]-110b^2\right|}$$

式中，$\overline{k}$ 由方程式(E.3)得到

这里

$$(\overline{k}^2)=\frac{1}{11}\sum_{-5}^{+5}k^2$$

相对最佳拟合线的总偏差为：

$$S=\frac{2\times t_s\times\sigma}{\overline{k}}=\frac{2\times1.833\times0.564\times s_j}{\overline{k}}=\frac{2.07\times s_j}{\overline{k}}$$

6个连接金具中的每个连接金具都要进行参数 s 的评价。

E.5.3 电阻比率变化量 D

从E5.1～E5.2，在最后11次测量期间，每个连接金具 k 值变化的估算按下式进行：

$$D=|M|+S=\frac{|10b|}{\overline{k}}+\frac{2.07s_j}{\overline{k}} \qquad \cdots\cdots(\text{E.6})$$

E.6 电阻比率比值

$$\lambda = \frac{k}{k_0}$$

式中：

k——每个连接金具在任何测量阶段得到的电阻比率；

k_0——测量 k 值的连接金具在第 0 次热循环时的电阻比率。

E.7 最高温度 θ_{max}

对于每个连接接头，都应记录下 θ_{max} 的值。它是在任何测试阶段连接金具达到的最高温度值。测得 θ_{max} 时的 θ_{ref} 值也需同时记录。

附 录 F
（资料性附录）
计算方法的解释

以下表格表 F.1 和表 F.2 给出了本附录中所使用的符号。

表 F.1 索引

符号		索引
附录 E	附录 F	
—	i	连接金具的编号，1～6
—	j	测量次数，1～14
x	x	最后 11 次测量中，引入坐标系转换的统计变量。如果连接金具是 A 类产品，那么根据 A 类试验的规定，最后 11 次测量从 $j=4$（即 $x=-5$）开始，一直到 $j=14$（即 $x=+5$）为止

表 F.2 测量到的变量

符号		测量变量
第 4 章	附录 F 变量	
I	$I^{(j)}$	在第 j 次测量过程中流过直通连接金具 i 的直流电流（单位 A）
I_r	I_r^j	在第 j 次测量过程中流过基准导体的对应直流电流（单位 A）
U	$U^{(j)}$	在第 j 次测量过程中，连接金具 i 的两个测量点之间的电位差（单位 V）
U_r	U_r^j	基准导体上的两个测量点之间的对应电位差（单位 V）
θ	$\theta^{(j)}$	在第 j 次测量过程中，连接金具 i 的温度（单位℃）
—	θ_r^j	在第 j 次测量过程中，基准导体的对应温度（单位℃）

表 F.3 给出了在电气试验过程中的常量。

表 F.3 常量

符号		常量
第 4 章	附录 F 常量	
l_a	l_a^i	从连接金具 i 到其第一个测量点的长度（单位 mm）
l_b	l_b^i	从连接金具 i 到其第二个测量点的长度（单位 mm）
l_j	l_{con}	根据图 3 定义的所有连接金具的长度（单位 mm）。下标的改变可避免与测量次数相混淆
l_r	l_r	基准导体的测量长度（单位 mm）
α	α	温度系数（单位 K^{-1}），取决于导体的材质

使用上述测量得到的变量和常量，便可以计算得出表 F.4 中的数值。

表 F.4 计算变量

符号		计算变量
第 4 章	附录 F 变量	
R_j	R^{ij}_{20}	在第 j 次测量时的连接金具 i 的已换算成 20 ℃的电阻值
R	R^{ij}	在第 j 次测量时，连接金具 i 两个测量点之间已换算成 20 ℃的电阻
R_r	R^j_r	在第 j 次测量时基准导体已换算成 20 ℃的电阻
k	k^{ij}	在第 j 次测量时连接金具 i 的电阻比率
$\overline{K}_0$	$\overline{k}_{.1}$	组装后在第一次热循环前，6 个连接金具电阻比率的平均值；代表未知真值的一个估计值
s_0	$s_{.1}$	第一次热循环前，6 个连接金具电阻比率的标准差；代表未知统计标准差 σ_k 的一个估计量
δ	δ	第一次热循环前，6 个连接金具电阻比率的平均值相对应初始离散度
$\overline{k}$	$\overline{k_{i.}}$	连接金具 i 电阻比率的平均值，依据最后 11 次测量值计算求得
$\overline{K}$	$\overline{k}$	全部 6 个连接金具电阻比率的总平均值，依据最后 11 次测量值计算求得
s	s	6 个连接金具电阻比率平均值(根据 11 次测量结果得出)与总平均值的标准差
β	β	6 个连接金具电阻比率总平均值的相对平均离散度(根据 11 次测量结果得出)
b	$\hat{b}_i$	由简单线性回归可以算出回归线的估计斜率；简单线性回归是根据最后 11 次测量过程中连接金具 i 的电阻比率计算出来的
M	M^i	在最后 11 次测量过程中，连接金具 i 的电阻比率估计的相对变化量
s_j	s^i	连接金具 i 测量值与回归线的标准差
—	$s^{\hat{b}_i}$	连接金具 i 回归线估计斜率的标准差
σ	σ^i	连接金具 i 回归线最大相对单边偏差
δ_i	δ^i	连接金具 i 回归线最大相对单边离散度
s	s^i	连接金具 i 回归线最大相对总离散度
D	D^i	在最后 11 次测量过程中连接金具 i 的相对统计总变化量
λ	λ^{ij}	在第 j 次测量过程中，连接金具 i 相对于其初始电阻比率的电阻比率增长率

这些数值可以用来确定某个型号的连接金具是否符合本标准的要求。其目的在于定义被测某型号连接金具在整个热循环阶段的电阻稳定性。用模拟数据绘制的图例展示了统计方法证明个别性能的效果。

F.1 所作的测量

在热循环试验中某个 j 次测量期，应在环境温度下测取一系列的数据并记录，然后通过计算，得到每个连接金具的电阻比率，见表 F.5。

表 F.5 重复出现的测量参数

位置	连接金具 1	连接金具 2	连接金具 3	连接金具 4	连接金具 5	连接金具 6	基准导体
第 j 次测量	$U^{1j}, I^{1j}, \theta^{1j}$	$U^{2j}, I^{2j}, \theta^{2j}$	$U^{3j}, I^{3j}, \theta^{3j}$	$U^{4j}, I^{4j}, \theta^{4j}$	$U^{5j}, I^{5j}, \theta^{5j}$	$U^{6j}, I^{6j}, \theta^{6j}$	U^j_r, I^j_r, θ^j_r

通常情况下，每个电阻的测量，都是逐个测量两测量点之间的直流电压降，且在某个温度下测量的，

温度应该与周围温度在同一水平上。当所有测量点上能自动地，几乎是同时地测量时，那么在这一时刻的电流就被视作常量。

测量点应该被清楚地标注出来，并在整个试验过程中不宜改变。一旦开始试验，只要无任何变动，那么这段距离将被视为一个常量。根据实际安装情况，长度 l_a 和 l_b 可以有稍微的不同。因此每个连接金具都有必要测量各自的长度。l_{con} 取决于连接金具的设计。安装后，应根据图 3 测量这些长度。

F.2 连接金具的电阻比率 k

连接金具的电阻比率 k^{ij} 是一个经过多次变化的参数，它用于描述各种类型的连接金具。第一个变化是将连接金具的电阻与其长度相除；第二个是连接金具的电阻与其长度之比的比值被基准导体电阻与其长度的比值相除。第一个变化必须对电阻进行温度校正，因为测量得到的连接金具电阻是其所用材料的电阻温度系数的一个函数；在试验过程中，温度可以在 15 ℃～30 ℃之间变化。

电阻比率 k^{ij} 的计算方法是，将电阻 R^{ij}_{con} 除以其长度 l_{con} 的值和电阻 R^j_r 除以其长度 l_r 的值间相除。

$$k^{ij}=\frac{\dfrac{R^{ij}_{con}}{l_{con}}}{\dfrac{R^j_r}{l_r}}$$

式中 R^j_r 代表热循环中第 j 次测量基准导体的电阻，如要折算至 20 ℃。则，

$$R^j_r=\frac{U^j_r}{I^j_r}\frac{1}{1+\alpha(\theta^j_r-20)}$$

R^{ij}_{con} 代表(20 ℃温度下)在第 j 次热循环中连接金具 i 的纯电阻。R^{ij}_{con} 是 R^j_r 中减去测量点之间导体电阻 R^{ij} 之后的值。所涉及的导体电阻等于相同长度的基准导体电阻。可用下列公式表示：

$$R^{ij}_{con}=R^{ij}-R^j_r\cdot\frac{l^i_a+l^i_b}{l_r}\quad 式中，R^{ij}=\frac{U^{ij}}{I^{ij}}\frac{1}{1+\alpha(\theta^{ij}-20)}$$

因此，B 类连接金具的 72 个电阻比率和 A 类连接金具的 84 个电阻比率(见表 F.6)应根据所记录的数据进行计算，以便能够对结果进行评估。

表 F.6 A 类连接金具中的计算连接金具电阻比率 k^{ij} 的数量

A 类连接金具的第 j 次测量	连接金具 1	连接金具 2	连接金具 3	连接金具 4	连接金具 5	连接金具 6
1	$K^{1,1}$	$K^{2,1}$	$K^{3,1}$	$K^{4,1}$	$K^{5,1}$	$K^{6,1}$
2	$K^{1,2}$	$K^{2,2}$	$K^{3,2}$	$K^{4,2}$	$K^{5,2}$	$K^{6,2}$
3	$K^{1,3}$	$K^{2,3}$	$K^{3,3}$	$K^{4,3}$	$K^{5,3}$	$K^{6,3}$
4	$K^{1,4}$	$K^{2,4}$	$K^{3,4}$	$K^{4,4}$	$K^{5,4}$	$K^{6,4}$
5	$K^{1,5}$	$K^{2,5}$	$K^{3,5}$	$K^{4,5}$	$K^{5,5}$	$K^{6,5}$
6	$K^{1,6}$	$K^{2,6}$	$K^{3,6}$	$K^{4,6}$	$K^{5,6}$	$K^{6,6}$
7	$K^{1,7}$	$K^{2,7}$	$K^{3,7}$	$K^{4,7}$	$K^{5,7}$	$K^{6,7}$
8	$K^{1,8}$	$K^{2,8}$	$K^{3,8}$	$K^{4,8}$	$K^{5,8}$	$K^{6,8}$
9	$K^{1,9}$	$K^{2,9}$	$K^{3,9}$	$K^{4,9}$	$K^{5,9}$	$K^{6,9}$
10	$K^{1,10}$	$K^{2,10}$	$K^{3,10}$	$K^{4,10}$	$K^{5,10}$	$K^{6,10}$
11	$K^{1,11}$	$K^{2,11}$	$K^{3,11}$	$K^{4,11}$	$K^{5,11}$	$K^{6,11}$
12	$K^{1,12}$	$K^{2,12}$	$K^{3,12}$	$K^{4,12}$	$K^{5,12}$	$K^{6,12}$
13	$K^{1,13}$	$K^{2,13}$	$K^{3,13}$	$K^{4,13}$	$K^{5,13}$	$K^{6,13}$
14	$K^{1,14}$	$K^{2,14}$	$K^{3,14}$	$K^{4,14}$	$K^{5,14}$	$K^{6,14}$

F.3 初始离散度 δ

初始离散度提供了关于安装完毕后且在老化影响开始前，对某接触系统的设计在某导体上的表现。又可以认为，可用这 6 个被试验的样品组来估计一个“系列”的连接金具。如果被测连接金具的电阻比率是相等的，那么，只要所使用的是同类型的导体设计和安装方法，就可以认为其结果是一样的。为了方便计算，用了第一次测量中的比率 k（表 F.6，第一行，$j=1$）。假定：电阻比率是符合未知真值和未知变量 σ_k^2 的正态分布的：

$\overline{k_{\cdot 1}}$——第一次热循环前，6 个连接金具电阻比率的经验平均值：

$$\overline{k}_{\cdot 1} = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6} k^{i1} = \frac{1}{6}(k^{1,1} + k^{2,1} + k^{3,1} + k^{4,1} + k^{5,1} + k^{6,1})$$

这个参数是电阻比率未知统计平均值的估计量。该电阻比率代表第一次热循环之前的连接金具类型。

$s_{\cdot 1}$——第一次热循环前，6 个连接金具电阻比率的经验标准差：

$$s_{\cdot 1} = \sqrt{\frac{1}{5}\sum_{i=1}^{6}(k^{ij} - \overline{k_{\cdot 1}})}$$

该参数估计了第一次热循环前，6 个连接金具平均值的未知统计标准差 σ_k。

δ——第一次热循环前，6 个连接金具电阻比率平均值的相对初始离散度：

$$\delta = \frac{\frac{1}{\sqrt{6}} \times s_{\cdot 1} \times t_{5\%,0.995}}{\overline{k_{\cdot 1}}} = \frac{1.65 \times s_{\cdot 1}}{\overline{k_{\cdot 1}}}$$

实际的常用评估方式的结果也可以直接与其他类型连接金具直接进行比较，参数 δ 是一个无量纲的数，它代表标准差与估计平均电阻比率的百分比。并指出了一种可能性，在既定概率下，电阻比率不会超出该值。它基于在第一次热循环前，在未知真实值的情况下，置信度为 99%。这里的 $t_{5\%,0.995}$ 是分布临界值，在第一次循环前，置信区间以 99%的概率 $\overline{k_{\cdot 1}} \pm t_{5\%,0.995} \cdot \frac{s_{\cdot 1}}{\sqrt{6}}$ 覆盖未知真实的电阻比率平均值。即每个电阻比率会被 99%概率的置信区间覆盖的结论是不可能的。

这个数值非常有用且又符合假设的基础是：6 个连接金具的电阻比率各自独立，且未知平均值和未知标准差均符合正态分布。

图 F.1 是连接金具初始电阻比率和计算的相对初始离散度的一个例子。编号为 C1～C6 的连接金具电阻比率是 $k^{1,1}$ 到 $k^{6,1}$，这些电阻比率在图中成圆圈状分布。估计平均电阻比率 $\overline{k_{\cdot 1}}$ 用“×”表示。垂直的虚线表示未知平均数的 99%置信区间(C.I.)的上限和下限；而水平的断线则表示初始离散度 $\delta \cdot \overline{k_{\cdot 1}}$。根据假设，初始电阻比率是正态分布的，因此该分布密度也表示在图 F.1 中。

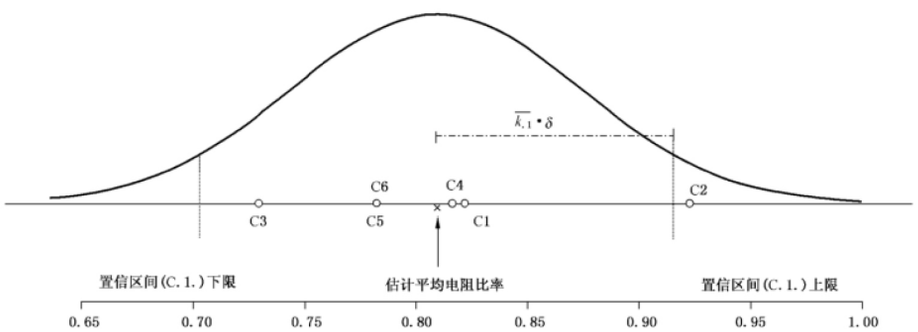


图 F.1 第一次热循环前的连接金具电阻比率和参数 δ 示意图

F.4 平均离散度 β

平均离散度表示是否所有连接金具对热循环试验的电阻比率具有相同表现进而可表明设计试验同一性。从测量读数中计算得到的连接金具后 11 个电阻比率，可以用来确定这个离散度。这 11 个读数是从第 250 次的循环点开始，然后每隔 75 次读取一次，一直到第 1 000 次循环。为了计算方便，原点被转移到 11 个读数的中点，并引入了统计哑变量“x”，见表 F.7。

表 F.7 A 类连接金具电阻比率 k^{ij} 与哑变量 x、初始离散度 δ 和平均离散度 β 的关系

热循环次数	x	$i\rightarrow$ $\downarrow j$	连接金具 1	连接金具 2	连接金具 3	连接金具 4	连接金具 5	连接金具 6	离散度
0		1	$k^{1,1}$	$k^{2,1}$	$k^{3,1}$	$k^{4,1}$	$k^{5,1}$	$k^{6,1}$	δ
200(bsc)[a]		2	$k^{1,2}$	$k^{2,2}$	$k^{3,2}$	$k^{4,2}$	$k^{5,2}$	$k^{6,2}$	
200(asc)[b]		3	$k^{1,3}$	$k^{2,3}$	$k^{3,3}$	$k^{4,3}$	$k^{5,3}$	$k^{6,3}$	
250	+5	4	$k^{1,4}$	$k^{2,4}$	$k^{3,4}$	$k^{4,4}$	$k^{5,4}$	$k^{6,4}$	
325	+4	5	$k^{1,5}$	$k^{2,5}$	$k^{3,5}$	$k^{4,5}$	$k^{5,5}$	$k^{6,5}$	
400	+3	6	$k^{1,6}$	$k^{2,6}$	$k^{3,6}$	$k^{4,6}$	$k^{5,6}$	$k^{6,6}$	
475	+2	7	$k^{1,7}$	$k^{2,7}$	$k^{3,7}$	$k^{4,7}$	$k^{5,7}$	$k^{6,7}$	
550	+1	8	$k^{1,8}$	$k^{2,8}$	$k^{3,8}$	$k^{4,8}$	$k^{5,8}$	$k^{6,8}$	
625	0	9	$k^{1,9}$	$k^{2,9}$	$k^{3,9}$	$k^{4,9}$	$k^{5,9}$	$k^{6,9}$	β
700	−1	10	$k^{1,10}$	$k^{2,10}$	$k^{3,10}$	$k^{4,10}$	$k^{5,10}$	$k^{6,10}$	
775	−2	11	$k^{1,11}$	$k^{2,11}$	$k^{3,11}$	$k^{4,11}$	$k^{5,11}$	$k^{6,11}$	
850	−3	12	$k^{1,12}$	$k^{2,12}$	$k^{3,12}$	$k^{4,12}$	$k^{5,12}$	$k^{6,12}$	
925	−4	13	$k^{1,13}$	$k^{2,13}$	$k^{3,13}$	$k^{4,13}$	$k^{5,13}$	$k^{6,13}$	
1 000	−5	14	$k^{1,14}$	$k^{2,14}$	$k^{3,14}$	$k^{4,14}$	$k^{5,14}$	$k^{6,14}$	

[a] bsc=短路试验之前。

[b] asc=短路试验之后。

$\overline{k_i}$——连接金具 i 的电阻比率经验平均值：

$$\overline{k_i} = \frac{1}{11}\sum_{j=4}^{14} k^{ij}$$

该平均值是单个连接金具 i 的电阻比率未知统计平均值的估计量，是根据后 11 次测量得到。

$\overline{k}$——所有电阻比率的总平均值：

$$\overline{k} = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6}\overline{k_i} = \frac{1}{6}\times\frac{1}{11}\sum_{i=1}^{6}\sum_{j=4}^{14}k^{ij} = \frac{1}{6}\times\frac{1}{11}\sum_{i=1}^{i=6}\sum_{x=-5}^{x=+5}k^{ix}$$

该平均值是所有连接金具的电阻比率未知统计平均值的估计量，是根据后 11 次测量得到的，它表示了热循环过程中被测 6 个连接金具的典型情况。

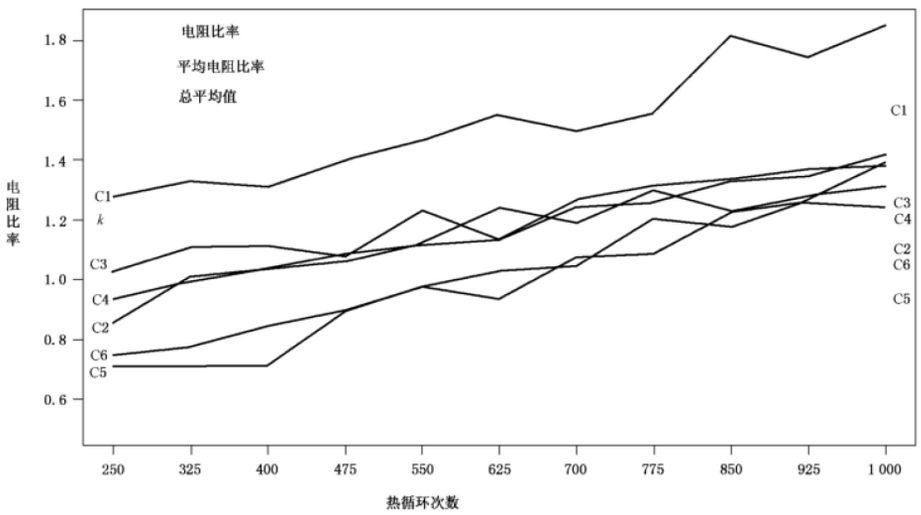


图 F.2　电阻比率 k^{ij}、估计平均电阻比率 $\overline{k}_i$ 和估计总平均值 $\overline{k}$ 的示意图

图 F.2 是 6 个连接金具(编号从 C1～C6)的电阻比率 k^{ij}(在图中用实线表示)以及 6 个对应的平均电阻比率$\overline{k_i}$(虚线)和平均值 $\overline{k}$(断线)的回归示意图。

s——标准差 是 6 个连接金具的电阻比率平均值$\overline{k_i}$(根据后 11 次测量获得)与总平均值 $\overline{k}$ 的经验标准差:

$$s=\sqrt{\frac{1}{5}\sum_{i=1}^{6}(\overline{k}_i-\overline{k})^2}$$

该经验标准差是平均值$\overline{k_i}$与总平均值 $\overline{k}$ 的未知统计标准差的一个估计量。

β——离散度　根据 6 个连接金具的平均电阻比率(根据后 11 次测量得出)与总平均值(被总平均值标准化)可按下式计算平均离散度:

$$\beta=\frac{\frac{1}{\sqrt{6}}\times s\times t_{5;0.995}}{\overline{k}}=\frac{1.65\times s}{\overline{k}}$$

β 是个无量纲的数,它是标准差与总平均值的百分比,并表示每个电阻比率$\overline{k_i}$不期望超过某个概率。它是建立在对于未知真实总电阻比率有一个 99% 置信区间上的。这里的 $t_{5;0.995}$ 分布临界值表示,99% 的置信区间$\overline{k_{.1}}\pm t_{5;0.995}\cdot\frac{s_{.1}}{\sqrt{6}}$将会覆盖概率为 99% 的连接金具 i 的未知真实总电阻比率。不过,它并不暗示所有平均电阻比率$\overline{k_i}$都会被概率为 99% 的置信区间覆盖。

根据以上数值,我们可以做如下假设:即所有连接金具 i 的平均值 $\overline{k}_{i.}$ 均各自独立而又一致地符合正态分布。

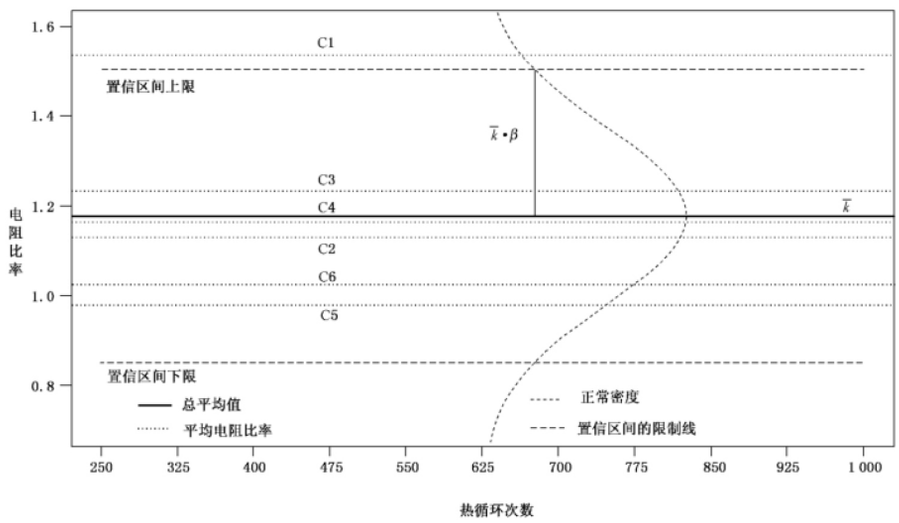


图 F.3　估计平均电阻比率$\overline{k_i}$、估计总平均值$\overline{k}$和参数β的示意图

F.3 表明，6 个连接金具(编号从 C1～C6)的估计平均电阻比率$\overline{k_i}$(图中用虚线表示)以及估计总平均值$\overline{k}$(水平实线)和未知真实总电阻比率(用点线表示)的 99%置信区间上限线和下限线。计算得到的平均离散度$\beta\times\overline{k}$用垂直的实线表示。由于我们假设平均电阻比率$\overline{k_i}$是独立而又符合正态分布的，因此图中也绘出了该分布的密度。

F.5　每个连接金具电阻比率的变化

连接金具的老化是由两个方面引起的。第一是接触力，接触力会随着导体在通电中的蠕变现象而逐渐减少。如果接触力低于最小接触力，那么接头电阻将会急剧上升；第二是化学反应，压接区的化学反应会影响到连接金具的电阻变化。这两个老化过程同时发生，但强度不一样。

通过这两个作用，连接金具的电阻将会增加(见图 F.4)。总的来说，压接区的化学和物理变化将会引起接触电阻的变化。而该变化现象可分为不同的阶段：成型期，开始形成稳定的压接区；第二个阶段是相对稳定期，连接金具的电阻只增加了一点点。就是在这个阶段进行热循环试验的。这个阶段的数学模型已经建立，因此可以对每个连接金具的性能进行分析。不过，其后果是连接金具的能耗会随着连接金具温度的增高而增大。这可以在 E.7 的评估中观察到。

+86 400-860-0988
https://www.terminalblock.net

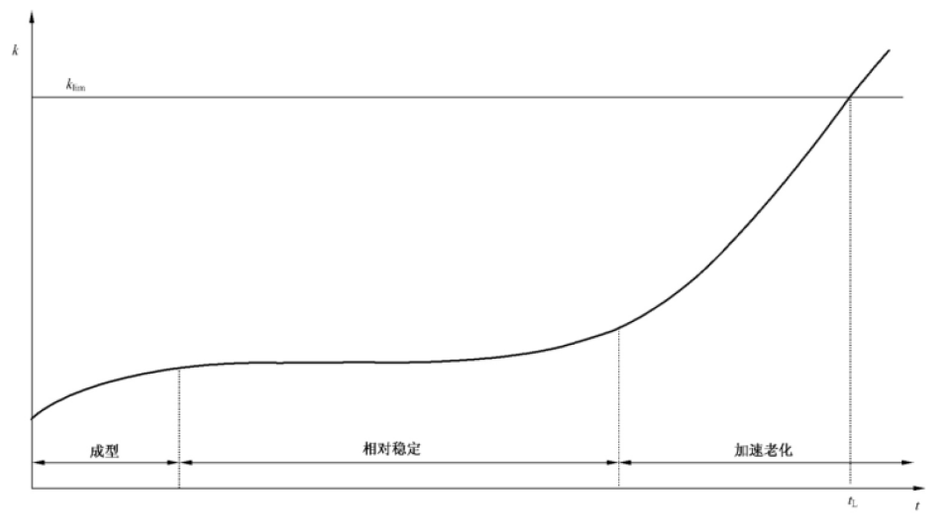


图 F.4　连接金具典型性能变化曲线

（k_{lim}极限电阻比率；t_L 寿命）

第三阶段是加速老化阶段，由于温度较高，化学作用会加速。在该加速老化的阶段，接头电阻会显著增加。这一阶段试验中不应达到。

F.5.1　最佳拟合

用连接金具在热循环中后 11 个测量的数据研究其性能变化，可提供以下模型：每个电阻比率 k^{ij} 取决于：

a）“连接金具 i 的效应”$\tilde{a}_i$（试验中单个金具的独自的电阻行为所引起）；

b）“热循环效应”$b_i \times j$（与 j 次测量对应的热循环对连接金具电阻比率的影响）；

c）未知误差 ε_{ij}（代表 k^{ij} 中不能解释的和其他附加误差）。

上述 3 部分组成单个连接金具电阻比率（性能模型）即：

$$k^{ij} = \tilde{a}_i + \tilde{b}_i \times j + \varepsilon_{ij}$$

据此，根据后 11 次测量过程中得到的数据，对连接金具 i 的所有电阻比率进行简单线性回归（最佳拟合）。为了简化，我们引进了哑变量 $x_j = -5 \cdots +5$（每次测量 j 的值，如代表 A 类连接金具 $j=4$ 次到第 $j=14$ 次测量，见表 F.7），并将该模型转化为等效模型 $k^{ij} = \tilde{a}_i + b_i + x_j + \varepsilon_{ij}$。

这个模型目的是为了尝试估计第 j 次测量中连接金具 i 的电阻比率平均真值的变化。因此由公式 $\hat{k}^{ij} = \hat{a}_i + \hat{b}_i \times j = \hat{a}_i + \hat{b}_i \times x_j$ 建立的回归线，是对第 j 次测量中连接金具 i 的电阻比率平均变化估计。

$\hat{b}_i$——回归线的估计斜率，是在最后 11 次测量过程中，根据连接金具 i 电阻比率使用最小二乘法的简单线性回归计算出来的：

$$\hat{b}_i = \frac{1}{\sum_{j=4}^{14} x_j^2} \times \sum_{j=4}^{14} x_j \times k^{ij} = \frac{1}{110} \sum_{j=4}^{14} x_j \times k^{ij}, \quad \hat{a}_i = \overline{k_{i\cdot}}$$

变量 $\hat{b}_i$ 是回归线的斜率估计值，其数值大小表示热循环对连接金具 i 电阻比率的影响大小。$\hat{a}_i$ 可估算“连接金具 i 的影响”，也可以作为连接金具 i 平均电阻比率$\overline{k_{i\cdot}}$估算。

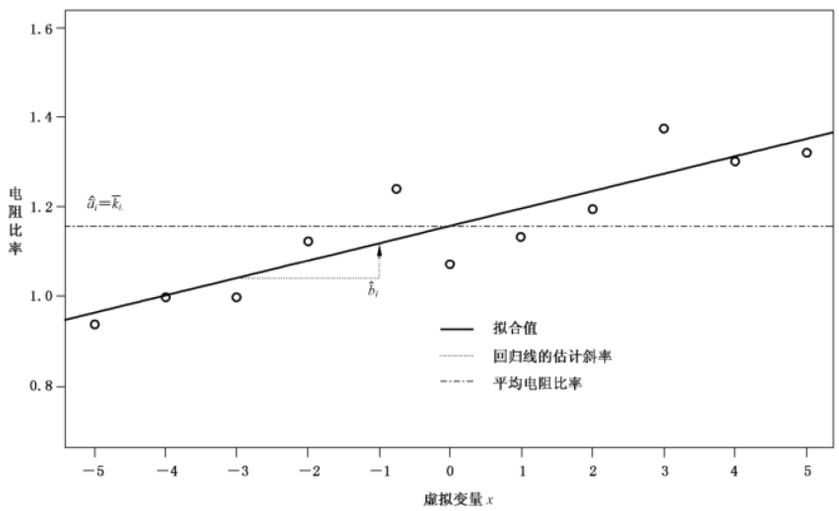


图 F.5　电阻比率、拟合值、估计截距和估计斜率的示意图

图 F.5 是关于斜率 $\hat{b}_i$ 和截距 $\hat{a}_i$ 估计量的一个示意图。这两个值分别表示连接金具 i 的“热循环影响”和“连接金具效应”。

——M^i　11 次测量中，连接金具 i 的电阻比率相对估计变化：

$$M^i = \frac{10 \times \hat{b}_i}{\overline{k}_i}$$

这个数值代表连接金具 i 的电阻比率总估计变化，并被连接金具 i 的平均电阻比率（在 11 次测量中得到）标准化。因此，这是一个无量纲的数值，是连接金具 i 的电阻比率相对于平均电阻比率 $\overline{k}_i$ 的一个百分值。该数值在这 11 次测量过程中是变化的。

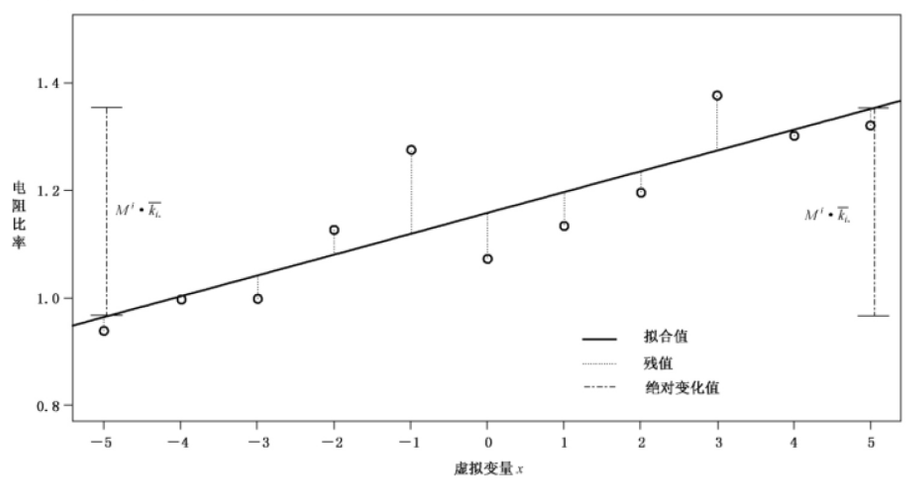


图 F.6　拟合值、残值和参数 M1 的示意图

图 F.6 是绝对数值变化 $M^i \times \overline{k_{i.}}$ 的一个示意图，表示连接金具 i 电阻比率最大和最小拟合值的偏差。该拟合值在图中用实线表示，残值用虚线表示。

F.5.2 置信区间

——s^i 连接金具 i 的残值与回归线的标准差，根据线性回归计算出来。

$$s^i = \sqrt{\frac{1}{9}\sum_{j=4}^{14}(k^{ij} - \overline{k_{i.}} - \hat{b}_i \times x_j)^2}$$

该参数表示连接金具 i 的电阻比率与回归线的偏差。

——σ^i 连接金具 i 的电阻比率平均反应预测值的一个最大标准估计误差。

$$\sigma^i = s^i \times \sqrt{\frac{1}{11} + \frac{\max(x_j^2)^i}{\sum_{j=4}^{14} x_j^2}} = \sqrt{\frac{1}{11} + \frac{25}{110}} \times s^i = 0.564 s^i$$

这个变量可以估计出最大的标准误差。该标准误差会在每一次测量过程中且在连接金具 i 的电阻比率真值估计过程中产生。

就下面的数值独立估算来说，残值相似的正态分布是可以被实际应用的。

——δ^i 连接金具 i 的平均反应值的最大估计离散度。

$$\delta^i = t_{9\pm0.95} \cdot \sigma^i = 1.833\sigma^i$$

δ^i 代表与平均反应值的最小偏差，且回归线不得超过某个概率。它是建立在平均反应值为 90% 的点态置信区间上的。这里的 $t_{9\pm0.95}$ 分位数表示 90% 的点态置信区间：

$$\hat{k}^{ij} \pm t_{9\pm0.95} \times s^i \sqrt{\frac{1}{11} + \frac{x_j^2}{110}} = \overline{k_i} + \hat{b}_i \times x_j \pm t_{9\pm0.95} \times s^i \sqrt{\frac{1}{11} + \frac{x_j^2}{110}}$$

将会在第 j 次测量中，以概率 90% 覆盖的连接金具 i 的未知平均反应值。不过，这并不能得出结论：置信区间将会以概率 90% 覆盖观察值 k^{ij}。该置信区间最宽的跨度是在点 $x=-5$ 和 $x=+5$ 之间，因此，可以在这些点上获得最大的离散度。

$$s^i \times \sqrt{\frac{1}{11} + \frac{x_j^2}{110}}$$

用最大预测估计误差来替代第 j 次测量过程中，连接金具 i 的平均反应预测值估计误差，

$$\sigma^i = s^i \sqrt{\frac{1}{11} + \frac{\max(x_j^2)}{110}}$$

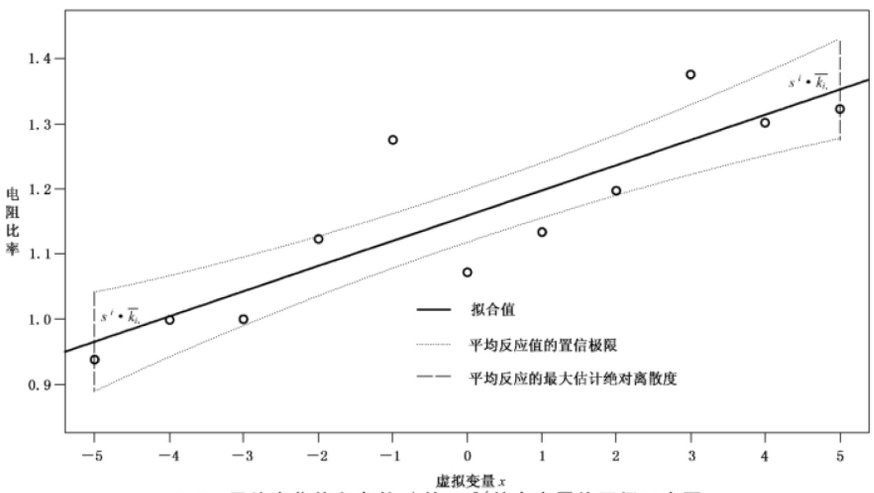
我们便可以得到 δ^i 等式。

——s^i 连接金具 i 平均反应值的相对最大估计离散度。

$$s^i = \frac{2 \times \delta^i}{\overline{k_{i.}}} = \frac{2 \times t_{9\pm0.95}\sigma^i}{\overline{k_{i.}}} = 2.07\frac{s^i}{\overline{k_{i.}}}$$

通过将连接金具 i 的平均反应值最大估计离散度乘以 2，再用连接金具 i 的平均电阻比率进行标准化，便可得到该数值。这是一个无量纲的变量，代表预测误差的最大百分比。该预测通常在连接金具 i 的平均反应估计过程中生成。

图 F.7 是最大估计绝对离散度 $s^i \times \overline{k_{i.}}$ 的一个图例；根据定义，该离散度值是（连接金具 i 平均反应值的）90% 的点位置信区间的上下限之差。图中的拟合值和置信区间分别用实线和虚线表示。



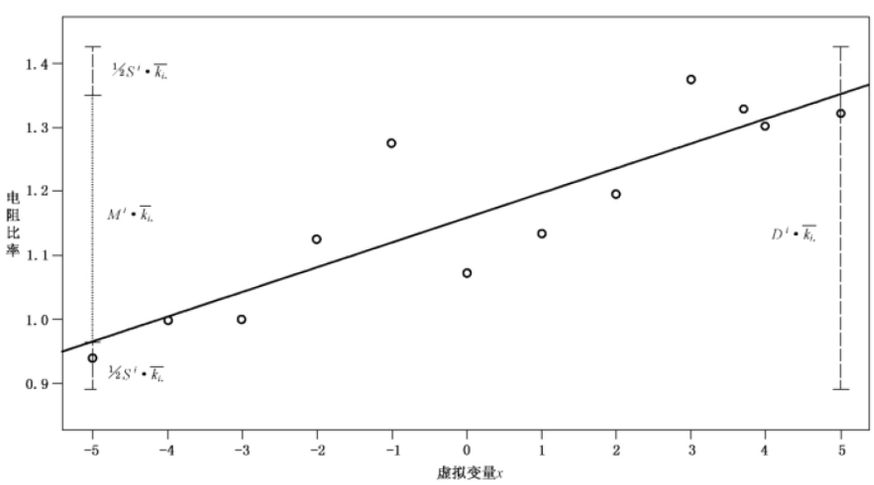
F.7　平均变化值和参数 s^i 的 90%的点态置信区间示意图

F.5.3　电阻比率变化量

——D^i 在最后 11 次测量过程中，连接金具 i 的相对统计总变化

$$D^i = |M^i| + S^i = \frac{|10\hat{b}_i| + 2.07s^i}{\overline{k_i}}$$

该变量考虑到了相对变化和相对离散度，并将它们相加为一个变量。D^i 的那些大值可以表示电阻比率的显著变化，或连接金具 i 回归线的周围的大离散度。不过，D^i 的判读仍有疑问，由于变量 M^i 和 S^i 合成为一元变量 D^i，D^i 的大值可以由两个中等大小的值决定。另一方面，在一个区别其他连接金具和其他连接金具类型的独特标准图形中，可获得一个连接金具热循环期间电阻变化的完整信息。变量 D^i 包含最重要的统计评估结果：当回归线斜率很低的时候，且不存在其他无法被该模型解释的误差：如测量不准确时，连接金具的“稳定性”就会在模型中表现出来。



F.8　参数 M^i、S^i 和 D^i 以及回归线示意图

图 F.8 是绝对总统计变化率 $D^i \times \overline{k_i}$ 的一个示意图，该图定义了绝对变化值 $M^i \times \overline{k_i}$ 和绝对最大离

散度 $S^i \times \overline{k_i}$ 的总量，回归线及最佳拟合线在图中是用实线表示的。

F.6 电阻比率比值

表 F.8 A 类连接金具的电阻比率比值

A 类连接金具的第 j 次测量	连接金具 1	连接金具 2	连接金具 3	连接金具 4	连接金具 5	连接金具 6
1	1	1	1	1	1	1
2	$\lambda^{1,2}$	$\lambda^{2,2}$	$\lambda^{3,2}$	$\lambda^{4,2}$	$\lambda^{5,2}$	$\lambda^{6,2}$
3	$\lambda^{1,3}$	$\lambda^{2,3}$	$\lambda^{3,3}$	$\lambda^{4,3}$	$\lambda^{5,3}$	$\lambda^{6,3}$
4	$\lambda^{1,4}$	$\lambda^{2,4}$	$\lambda^{3,4}$	$\lambda^{4,4}$	$\lambda^{5,4}$	$\lambda^{6,4}$
5	$\lambda^{1,5}$	$\lambda^{2,5}$	$\lambda^{3,5}$	$\lambda^{4,5}$	$\lambda^{5,5}$	$\lambda^{6,5}$
6	$\lambda^{1,6}$	$\lambda^{2,6}$	$\lambda^{3,6}$	$\lambda^{4,6}$	$\lambda^{5,6}$	$\lambda^{6,6}$
7	$\lambda^{1,7}$	$\lambda^{2,7}$	$\lambda^{3,7}$	$\lambda^{4,7}$	$\lambda^{5,7}$	$\lambda^{6,7}$
8	$\lambda^{1,8}$	$\lambda^{2,8}$	$\lambda^{3,8}$	$\lambda^{4,8}$	$\lambda^{5,8}$	$\lambda^{6,8}$
9	$\lambda^{1,9}$	$\lambda^{2,9}$	$\lambda^{3,9}$	$\lambda^{4,9}$	$\lambda^{5,9}$	$\lambda^{6,9}$
10	$\lambda^{1,10}$	$\lambda^{2,10}$	$\lambda^{3,10}$	$\lambda^{1,10}$	$\lambda^{5,10}$	$\lambda^{6,10}$
11	$\lambda^{1,11}$	$\lambda^{2,11}$	$\lambda^{3,11}$	$\lambda^{4,11}$	$\lambda^{5,11}$	$\lambda^{6,11}$
12	$\lambda^{1,12}$	$\lambda^{2,12}$	$\lambda^{3,12}$	$\lambda^{4,12}$	$\lambda^{5,12}$	$\lambda^{6,12}$
13	$\lambda^{1,13}$	$\lambda^{2,13}$	$\lambda^{3,13}$	$\lambda^{4,13}$	$\lambda^{5,13}$	$\lambda^{6,13}$
14	$\lambda^{1,14}$	$\lambda^{2,14}$	$\lambda^{3,14}$	$\lambda^{4,14}$	$\lambda^{5,14}$	$\lambda^{6,14}$

这个比率表示每个独立的连接金具 i 在第 j 次测量时，相对于第一次热循环前初始电阻比率的相对变化。对 A 类连接金具来说，应计算并记录 78 个 λ 值(见表 F.8)。对于 B 类连接金具，只要 66 个值便足够了。

$$\lambda^{ij} = \frac{k^{ij}}{k^{i1}}$$

F.7 最高温度 θ_{max}

与电阻比率的计算不同的是，这部分的评估与在接近环境温度进行的“冷电阻”测量没有任何关系；当连接金具达到最高温度时，本评估与处于任何热循环阶段的连接金具 i 的温度行为有关。这个温度与同时记录下来的基准导体(基准导体有稳定的电阻)的温度相比较，便可以产生每个单独连接金具“热电阻”的大致概念。在热循环过程中且在电阻测量之前或之后，记录每个连接金具以及基准导体的温度(见表 F.9)。

F.9 热循环中被记录下来的最高温度

i→	连接金具 1	连接金具 2	连接金具 3	连接金具 4	连接金具 5	连接金具 6
连接金具[a]	$\theta_{1,max}$	$\theta_{2,max}$	$\theta_{3,max}$	$\theta_{4,max}$	$\theta_{5,max}$	$\theta_{6,max}$
基准导体[b]	$\theta_{1,ref}$	$\theta_{2,ref}$	$\theta_{3,ref}$	$\theta_{4,ref}$	$\theta_{5,ref}$	$\theta_{6,ref}$

[a] 热循环前，连接金具的最高温度。

[b] 在和上述脚注 a 的相同时间，基准导体所测量得到的温度。

附 录 G
（资料性附录）
温度变化曲线图的解释

G.1 总则

挤出绝缘电缆的导体能承受最高 90 ℃连续运行温度，短路时的最高温度 250 ℃。电缆接头中的连接金具温度与电缆导体温度相近。电缆接头在正常运行或短路情况下不应限制载流量。此测试必须在裸导体下展开，以便测试条件与绝缘无关。

在测试过程中，连接金具的正常温度应比导体温度低，这取决于其设计、电阻和散热。为了加快测试条件和表征接头工况，连接金具的温度必须高于正常的接头温度。这里选择的条件是 100 ℃（高于导体温度 10 K）的温度和稳定状态下 10 min。如果当基准导体的温度为 120 ℃时，连接金具的温度高于 100 ℃，那么这时基准温度为 120 ℃。如果连接金具的温度低于 100 ℃，这时基准导体的温度就将升高，直到连接金具达到 100 ℃，但基准导体的最高温度不得超过 140 ℃。这样的话，在测试过程中，连接金具的温度将模拟接头内的最高连接金具温度。稳定状态下 10 min 是为了确保在已知上升的温度内连接金具达到一定程度的老化。

如果是绝缘穿刺连接器，连接金具的温度就将选为超过电缆最高温度 10 K，而非 100 ℃。

G.2 热循环

第一次热循环是为了确定热循环过程中使用的基准导体温度，同时也是为了识别中值连接金具；找出在基准导体上产生 120 ℃的稳定电流，识别中值连接金具是：

a） 如果中值连接金具的温度≥100 ℃，则 θ_R=120 ℃；

b） 如果中值连接金具的温度＜100 ℃，这时需要增加电流直到中值连接金具的温度达到 100 ℃。但是，基准导体的温度不宜超过 140 ℃。在这种条件下，θ_R 被确定。

如果是绝缘穿刺连接器，连接金具的温度应为电缆最高温度之上加 10 K。

第二次热循环是为了确定以后热循环持续时间和使用到的温度变化曲线。电流通过试验回路，直到基准导体温度达到 θ_R，误差是 $^{+5}_{0}$K；在温度稳定的 10 min 期间，中值连接金具温度应保持稳定，并在 2 K范围内变化。

为了减少加热时间，可提高起始电流，提高电流的持续时间见表 1。然后调节或降低电流，以确保在控制期间的稳定。可能需要多次循环来确定温度曲线。

基准导体温度是热循环测试过程中用于控制温度参数。这样的话，无论室内温度发生什么变化，都不会影响到基准导体的温度曲线。

通过这种方法获得的温度将被记录下来并用于后续的热循环。

附 录 H
（资料性附录）
关于电气连接金具评估试验结果统计方法的解释

H.1 历史

不同国家电气连接金具试验方法的较大差异，使得用户按照不同标准获得的试验结果很难进行比较、评估和接受。因此在引进新产品的过程中，有时有必要要求生产商根据所有相关标准提供测试报告。为了克服这些问题，决定建立一个工作小组来制定一套能被全球所接受的标准，此标准应包括规定完善的试验程序和重新制定评估准则。该工作的成果即 IEC 61238-1，于 1993 年推出。

在本标准的准备过程中，考虑到不同试验标准都是基于温度循环，而且多数试验标准中包含短路电流的应用。电阻的要求和验收准则为稳定。在测试期间，使用了不同方法对稳定进行了定义。

本标准描述的评估测试结果的统计方法主要基于意大利标准 CEI 20-28 和英国标准 BS 4579-3 的折衷。在早期的讨论中，同意采用评估电阻变化的统计方法，来代替传统的定性方法。开展了许多试验来找出这两种标准的相似之处和不同点。目的是为了找到能与 1 000 次热循环试验相关的评估方法。意大利标准要求作 1 500 次热循环，在最后的 600 次循环中每隔 60 次循环进行电阻测试，并在 500 次循环后进行 6 次短路测试，而英国标准则要求作 2 000 次热循环，并在热循环之前先作三次短路电流试验，在热循环过程中每隔 100 次循环进行电阻测试。

H.2 IEC 61238-1 评估方法与意大利标准 CEI 20-28 和英国标准 BS 4579-3 的简要比较

不同的统计评估方法都应视作整个评估程序的一部分。三个标准都需要将 6 个相同的样品安装至试验回路，此外 11 个电阻测量值构成了统计评估的基础。需要注意的是，每个标准中公式字母的含义可能有所不同。表 H.1 列出了本标准检查连接金具的要求。

意大利和英国标准的主要区别在于，前者除了温度要求外，将 6 个样品作为 1 组进行评估，而英国标准则是每个样品单独进行评估。

纳入 BS 4579-3 的单个样品分析也被编入本标准，单个样品分析对单个样品变化电阻具有足够的灵敏性。这种分析的目标是关于最佳拟合线的离散度测量。无论怎样，本方法对异常读数敏感，这可能是本试验的一大优点，因为它能检测出异常的起因。同时也宜考虑错误读数对分析的影响。

意大利标准 CEI 20-28 中规定的组回归分析是离散度的敏感显示，其优点是可以全面考虑到 66 个测量值。此方法是对样品和特殊样品电阻变化的差异的反应。然而，该方法对单个样品的不稳定性却不怎么敏感。

本标准平均离散度公式是一组回归分析，它是基于 11 个测量的 6 组平均数值的标准误差上的。意大利组回归分析是基于从 11 个测量处中获得的 6 个样品的平均值后计算的。

组回归分析可验证被试连接金具是否属于同一族。

H.3 IEC 61238-1 测试结果评估方法

引入“相对电阻”k 一般认为是有利的，这样分析就能与连接金具的电阻绝对值独立开来。k 是连接金具电阻和导体等效长度电阻的比。k 的采用同时也希望能改进测量数据的再现率。

其他需要计算的参数包括：

——在热循环前 6 个初始值 k 的初始离散度 δ；

——由最后 11 次测量电阻读数计算得到的 6 个样品的平均离散度 β，本评估可验证 6 个连接金具的性能（电阻）是否为同一方式进行表现，并且试验它们是否属于同一族；

——电阻比率 D 的变化，其显示了最后 11 次测量读数及每个连接金具电阻比率 k 的变化。使用统计方法评估其概率：电阻变化不得超过规定值；

——电阻比率增长率，其显示了测量不同阶段电阻和起始电阻之间的关系；

——测试连接金具的最高温度 θ_{max}。

评估准则是在对不同实验室和国家的测试结果和经验进行分析后作出的选择。

在本标准的早期版本，k 本身以及由于短路而发生 k 的变化，被列为验收标准的一部分。为了减少验收准则的数量，本标准决定不包括这些参数。

H.1 要求总结

要求	IEC 61238-1
1. 连接金具不应过热	对于每个样品，在热循环期间的连接金具温度不应超过基准导线的温度
2. 电阻不可因短路测试而发生急剧变化	电阻比率比值 λ 不应超过 2.0
3. 6 个样品的电阻应接近	6 个 k 值之间的初始离散度 δ 在热循环之前不应超过 0.3
4. 电阻不应在热循环期间发生急剧变化	平均离散度 β 不应超过 0.3 电阻比率 D 的变化不应超过 0.15
5. 机械拉力。不应因机械拉力而发生滑动	铝：$40\times A$：最大 20 000 N 铜：$60\times A$：最大 20 000 N A＝标称截面积 mm^2

参 考 文 献

[1] IEC 60694:1996 高压开关设备和控制设备标准的共同技术要求

[2] IEC 60949:1988 考虑非绝热效应允许短路电流的计算

[3] 意大利标准 CEI 20-28:1998 电力电缆连接器

[4] 英国标准 BS 4579-3:1976 电力电缆和电线导体机械连接和压接连接金具的性能 第3部:铝导体用机械和压接连接金具