ICS 29.120.01
K 30

中华人民共和国国家标准

GB/T 25840—2010/IEC/TR 60943:2009

规定电气设备部件(特别是接线端子)允许温升的导则

Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals

(IEC/TR 60943:2009,IDT)

2010-12-23 发布　　2011-05-01 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

目　　次

前言 …… Ⅰ
引言 …… Ⅱ
1　概述 …… 1
2　关于电接触的性质和触头欧姆电阻计算及测量的一般考虑 …… 2
3　触头和连接端子的老化机理 …… 6
4　导线、触头和连接端子的温升计算 …… 12
5　允许温度和温升值 …… 15
6　确定允许温度和温升应遵循的一般程序 …… 22
附录A（资料性附录）　理论运用的数字举例和其他数据 …… 24
附录B（资料性附录）　金属和合金的物理特性 …… 26
附录C（资料性附录）　流体介质的物理特性 …… 28
附录D（资料性附录）　触头金属与气体反应资料 …… 29
附录E（资料性附录）　接线端子附近通过辐射和对流冷却的导线温升 …… 30
附录F（资料性附录）　本标准使用的符号表 …… 36
附录G（资料性附录）　参考文献 …… 38

前　言

本标准等同采用 IEC/TR 60943:2009《规定电气设备部件(特别是接线端子)允许温升的导则》(2.1 版)。

为便于使用,本标准作了下列编辑性修改:

——删除国际标准的前言;

——根据 GB/T 1.1 的要求,删除国际标准中设置的篇以及标准中有关篇的论述和注;

——将“本报告”改为“本标准”;

——表 9 中 θ_a 和 θ_n 位置有误,将它们按表 8 格式进行位置互换;

——5.2.3.3 中“如果温升 ΔT_c 增加 6.5K”,其中“ΔT_c”有误,改为“ΔT_t”;

——表 E.1 及表 E.2 中 K 值和 K' 值 1.0 下原有“条件规定于 4.3.1”的说明。由于标准中无 4.3.1 条款,所以将其删去;

——图 E.1 的下图中“T”有误,改为“T_3”。

本标准的附录 A、附录 B、附录 C、附录 D、附录 E、附录 F 和附录 G 为资料性附录。

本标准由中国电器工业协会提出。

本标准由全国熔断器标准化技术委员会(SAC/TC 340)归口。

本标准负责起草单位:上海电器科学研究所(集团)有限公司。

本标准参加起草单位:宁波开关电器制造有限公司、厦门宁利电子有限公司、中国质量认证中心、上海电器设备检测所。

本标准主要起草人:吴庆云。

本标准参加起草人:张寅、苏毅镇、赖文辉、郎建才、陈建兵。

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

ORABO

引　言

a) 电气成套设备中的温升是由导线、触头、磁路等内部的各种损耗引起，随着设备的运行和结构新技术的发展，温升问题显得日益突出。

在成套设备中，温升问题越来越引起重视。在这些设备中，许多耗能元件（接触器、熔断器、电阻器等）、特别是一些模块化电器组装在由合成材料制成的外壳中，其中一些外壳散热性很差。温升引起了构成电接触的基本元件相对高的温度；高温加速接触界面的氧化，电阻增加，由此导致进一步发热，结果产生更高的温度。如果触头的构成材料无适当或足够的保护，在设备预期的使用寿命前，触头可能受到无法修复的损坏。

温升也影响到接线端子和所连接的导线，为了保证导线的绝缘在设备寿命期间保持完好，应限制温升的影响。

b) 考虑到上述问题，本标准的目的如下：

——分析触头、接线端子和该接线端子连接的导线（根据它们的环境和布置）发生的各种发热和氧化现象；

——向产品委员会提供基本规则，使他们能规定允许的温度和温升。

c) 当各元部件一起装在同一个外壳中时，应对它们采取预防措施。

用户特别要注意如下事实：由各开关设备标准规定的接线端子允许温升是从型式试验的约定条件下得出的。这些条件可能与实际运用遇到的条件相差很大。在实际运用中还应特别注意到正常情况下与接线端子连接的导线的绝缘允许温度。

d) 应关注如下事实：在相关的产品标准中外部接线端子的允许温度和温升是在约定型式试验中测得的，因此它们可能没反映出正常使用中的实际情况。

应采取适当的防护措施，防止元件接线端子附近的材料暴露在可能影响其寿命的温度之下。

考虑到上述情况，关键是将“外部周围温度”与“围绕元件的流体温度”概念区别开来，前者主要指外壳外部的温度，后者为外部周围温度加上元件产生的内部温升之和。这些概念以及其他补充概念（如外壳的热阻）规定于第 5 章，并且通过数字举例加以说明。

为了便于完整的计算，本标准通过引入“填充系数”的概念将围绕元件的流体温度与外部周围温度结合起来，并在数字举例（5.2.3.2）中规定了几个实际应用的填充系数的值。

由于触头表面的物理条件和污染程度不同，涉及计算触头集中电阻的参数变化很大。仅靠计算所得的触头电阻的精确度几乎等于一个数量级。

由于实际场合经常出现难以计算的劣变机理占主导地位，因此较精确值可在电气设备的零件上直接测量获得。

本标准不用以指导元件的降容处理。

本标准特别建议在使用本标准资料解决实际问题之前，先研究附在标准后面的参考文献。

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

规定电气设备部件(特别是接线端子)允许温升的导则

1 概述

1.1 范围和目的

本标准用于指导电气设备在稳定运行条件下估算其元部件的温度和温升允许值。

本标准适用于电气连接和电气连接附近的材料。

本标准涉及通过连接的电流所产生的热效应,因此没有电压应用的限制。

本标准仅当被适当的产品标准引用时才适用。

各技术委员会负责在标准中使用本标准内容的范围和方式。

本标准中的"允许"值是指相关产品标准的允许值。

本标准包括如下内容:

——电接触的结构及其欧姆电阻计算的综合数据;

——触头的基本老化机理;

——触头和接线端子的温升计算;

——各种元件(特别是触头、接线端子和接线端子连接的导线)的最大"允许"温度和温升;

——产品委员会规定允许温度和温升应遵循的一般程序。

1.2 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 4797.1—2005 电工电子产品自然环境条件 温度和湿度(IEC 60721-2-1:2002,MOD)

GB/T 11021—2007 电气绝缘 耐热性分级(IEC 60085:2004,IDT)

GB/T 11022—1999 高压开关设备和控制设备标准的共同技术要求(eqv IEC 60694:1996)

GB/T 11026.1—2003 电气绝缘材料 耐热性 第1部分:老化程序和试验结果的评定(IEC 60216-1:2001,IDT)

GB 14048.1—2006 低压开关设备和控制设备 第1部分:总则(IEC 60947-1:2001,MOD)

GB 16895.2—2005 建筑物电气装置 第4-42部分:安全防护——热效应保护(IEC 60364-4-42:2001,IDT)

IEC 60050(441):1984 国际电工词汇(IEV) 第441章:开关设备和控制设备和熔断器

IEC 60890:1987 低压开关设备和控制设备部分型式试验组合装置用的外推温升评估方法

1.3 术语和定义

本标准所用术语和定义见国际电工词汇(IEV)外,下列术语和定义适用本标准:

1.3.1

周围空气温度 ambient air temperature

θ_a

在规定条件下确定的围绕整个电器的空气温度[IEV 441-11-13]。

注:对安装在外壳内的电器,此温度是指外壳外部的空气温度。

1.3.2

(机械开关电器的)触头 contact (of a mechanical switching device)

当接触时构成电路接通的导电部件,操作时由于触头的相对运动而断开或闭合电路,或靠触头的转

动或滑动保持电路的接通[IEV 441-15-05]。

注：不能与“IEV 441-15-06 触头(件)：构成触头导电部件的一部分”相混淆。

1.3.3

(用螺栓或相似物进行的)连接　connection (bolted or the equivalent)

通过螺钉、螺栓或相似物向两根或多根导线施力并将它们结合在一起，以保持电路永久接通。

[GB/T 11022—1999，定义 3.5.10]

1.4　符号

本标准使用的符号一览表见附录 F。

2　关于电接触的性质和触头欧姆电阻计算及测量的一般考虑

2.1　电接触和连接端子

电接触以它最简单和最一般的形式从两件导电材料(通常是金属材料)之间建立的接触得来；而连接端子指接线端子本身和与该接线端子连接的导线。

电接触发生在触头的“界面”，该界面是电流从一个触头件通过另一个触头件的区域。触头电阻在此区域内产生，并通过焦耳效应引起发热；同时也在此区域内通过与周围大气发生化学反应出现老化现象。

2.2　电接触性能

当一个金属件施加至另一个金属件时，接触并不发生在整个触头面上，而仅发生在称为“基本触头”的某几个点上。

如果忽略触头界面可能存在的杂质(灰尘等)，接触的有效总截面积等于有效接触面积 S_a[1)]。

通常还存在空气或氧化薄层，这些薄层对触头电阻的影响将在后文(见 2.3)探讨。

为便于计算和更好理解接触机理，下面作简单的假定：在表面接触面积内存在 n 个基本触头，这些触头均匀分布，平均恒定半径为 a(见图 1)，它们之间的平均距离为 l。

有效接触面积为：

$$S_a = n\pi a^2$$

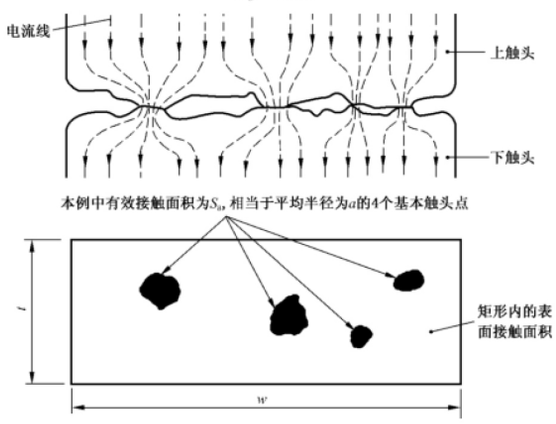


图 1　表面接触和有效接触面积图例

接触面积 S_a 取决于触头互相加压的程度(即所施加的力)、触头表面状态和触头所使用的材料硬度。

接触面积实际指在触头面上施力(指电工技术中通常使用的力)达到触头材料的极限强度(以该材料的“硬度”表示)的那部分面积。

1)　本标准使用的符号说明见附录 F。

事实上，由于触头表面的预处理，触头在接触之前，其表面上的微粒很小(1/100 mm 数量级)，甚至 0.1 N 数量级的力即能压碎。

假定施加在接触面积上的压力等同于金属的接触硬度(H)，于是得到下式：

$$\frac{F}{S_n}=\xi H$$

然而，此式仅适用于接触力 $F\geqslant 50$ N 的情况，实际上：

$$S_n=n\pi a^2=\frac{F}{\xi H}$$

式中 ξ 取决于接触表面状态的无量纲“平面度系数”；在正常力情况下，该系数通常在 0.3 与 0.6 之间；但在接触表面互相作剧烈摩擦后系数可能会变得很小。

结果，基本触头的半径 a 由式(1)给出：

$$a=\sqrt{\frac{F}{n\pi\xi H}} \qquad \cdots\cdots(1)$$

基本触头的数量 n 可有式(2)近似得出：

$$n=n_k H^{0.625}F^{0.2} \qquad \cdots\cdots(2)$$

式中 $n_k\approx 2.5\times 10^{-5}$(标准国际单位制)。

上述公式仅给出基本触头数的数量级。n_k 值可能与估算的值相差很大，如在 0.5×10^{-5} 与 30×10^{-5}(标准国际单位制)之间。

2.3 触头电阻的计算

触头电阻由两部分组成：

a) 集中电阻，该电阻由通过基本触头的电流线汇集在一起而产生；

b) 薄膜电阻，该电阻与氧化薄膜或在界面处吸收分子形成的薄膜有关。

2.3.1 集中电阻的计算

设想一个半径为 a 的理想的基本触头(见图 2)。如果导体远大于基本触头，则电流线为焦点位于基本触头直径端部的双曲线，而等电位面为相同焦点的扁平的椭圆面。

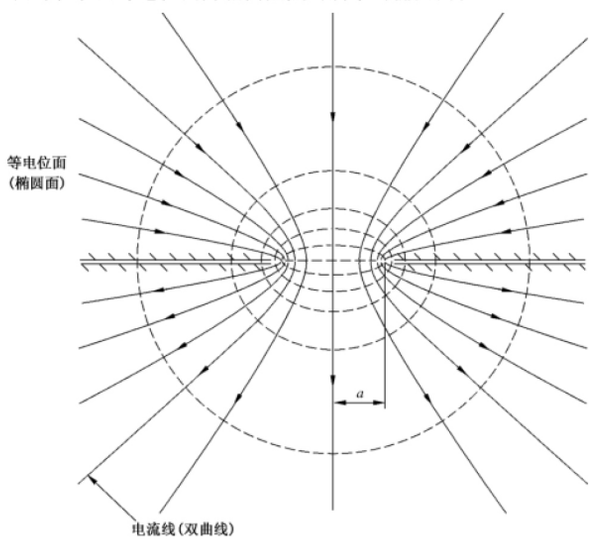


图 2 基本触头点处的等电位面和电流线

触头点(图 2 中粗虚线)和主半轴的半椭圆面 l(l 为相临基本触头之间的平均距离,ρ 为金属的比电阻)之间电阻 $R_{(a,1)}$ 为触头电阻的一半,表示为:

$$R_{(a,1)}=\frac{\rho}{2\pi a}\arctan\frac{\sqrt{l^2-a^2}}{a}$$

如果 l 远大于 a(大多此情况),则:

$$R_{(a,1)(l/a\to\infty)}=\frac{\rho}{4a}$$

由于集中电阻是两个半个触头电阻之和,所以:

$$R_{(c)}=\frac{\rho}{2a} \qquad \cdots\cdots(3)$$

对于一个包含 n 个分布相对广的基本触头点的实际触头,其集中电阻为:

$$R_c=\frac{\rho}{2na} \qquad \cdots\cdots(4)$$

2.3.2 薄膜电阻的计算

基本触头点通常均有腐蚀界面,任何初态纯金属表面均覆盖一层氧气分子层,数分钟后形成数毫微米厚的该金属氧化层。如果此层足够致密和均匀,它可保护金属不再氧化,该金属则被称为"钝化"。这特别是铝和不锈钢在常温下遇到的情况。

对于其他金属(处于氧气中的铜、镍和锡,处于亚硫气体中的银),由氧化或腐蚀产生的第一层反应物减慢了后续反应的速度,即使反应仍在继续,但越来越慢。

还有一些金属(铁),由于表面没有形成的反应层的保护,"氧化"速度或多或少是恒定的。

不同金属表面化学反应的主要公式规定于附录 D 中。公式以形成的厚度 s 作为时间 t 和热力温度 T 的函数表示。

此类公式由下述一般公式导出[见式(5)]:

$$s=X\cdot\exp\left(-\frac{w}{2kT}\right)\cdot\sqrt{t} \qquad \cdots\cdots(5)$$

如果激化能 w 以电子伏特表示,则 w 必须乘以 $1.602\ 1\times10^{-19}$ J/eV。X 是个常数,k 是波耳兹曼(Boltzmann)常数。

上述的氧化薄层对于通过的电流并不呈现一个可被下述公式测算的纯欧姆电阻值:

$$\frac{\rho\times\text{长度}}{\text{截面积}}$$

事实上,由于"隧道效应"机理电子可以通过该薄层。

表征该薄层传导特性的"隧道比电阻"σ_0(表面比电阻)由 $\Omega\cdot m^2$ 表示(典型值见表 1)。隧道比电阻取决于氧化层(或与大气反应的其他生成物)的性质及其厚度(厚度一般不超过 10 nm)。

如果"氧化"层均匀地覆盖在实际接触面积 S_a 上,两接触表面之间的表面电阻 R_i 为:

$$R_i=\frac{\sigma_0}{S_a}$$

在具有 n 个半径为 a 的基本触头的情况下,由于界面上的氧化层,R_i 可由式(6)表示:

$$R_i=\frac{\sigma_0}{\text{总接触面积}}=\frac{\sigma_0}{n\pi a^2} \qquad \cdots\cdots(6)$$

表 1　隧道比电阻的典型值

金　属	状　态	σ_0 $\Omega \cdot m^2$
铜	新的 经氧化 镀锡	$2\times10^{-12}\sim3\times10^{-11}$ 10^{-10} $10^{-12}\sim4\times10^{-11}$
银		$4.6\times10^{-13}\sim4\times10^{-12}$ 特殊至 2.5×10^{-11}
铝		$7\times10^{-11}\sim10^{-9}$

新触头值低。银金属的最低值 4.6×10^{-13} 对应于两层吸纳单分子氧气层的极限厚度，即 $2\times0.272\ nm=0.54\ nm$。

2.3.3　触头总电阻的表示

触头电阻 R_c 是集中电阻 R_c[式(4)]和薄膜电阻 R_f[式(6)]之和，即：

$$R_c=\frac{\rho}{2na}+\frac{\sigma_0}{n\pi a^2} \qquad \cdots\cdots(7)$$

如果式(7)中的 n 和 a 分别由各自的值代入：

$n=n_k H^{0.625}F^{0.2}$，式中 $n_k\approx2.5\times10^{-5}$（标准国际单位制）

$$a=\sqrt{\frac{F}{n\pi\xi H}}$$，式中 $\xi=0.45$

得到 R_c 下列的表达式：

$$R_c=\frac{\rho}{2}\sqrt{\frac{\pi\xi}{n_k}}H^{0.1875}F^{-0.6}+\sigma_0\xi HF^{-1}$$

此式适用于不同的触头金属，式中给出了示于表 2 的 k_1 和 k_2 值。

如果一种金属薄层涂于另一种金属之上，则硬度以涂层的硬度计算，比电阻以基础金属的比电阻计算。

在触头由不同金属材料组成的情况下，总电阻则为使用各金属常数计算得到的电阻的平均值。

表 2　触头电阻常数的典型值，用于相对清洁表面的计算

（用以代入：$R_c=k_1F^{-0.6}+k_2\sigma_0F^{-1}$）

金　　属	集中电阻 k_1 $\times10^{-6}$	薄膜电阻 k_2 $\times10^6$
铜	90	247
黄铜	360	450
铝	130	135
铝镁合金	150	135
银	81	225
锡	400	22.5
镍	420	585
镀银铜	88	225
镀锡铜	57	22.5
镀锡铝	93	22.5
镀银黄铜	310	225
镀锡黄铜	200	22.5

2.3.4 新触头的电阻

与其他触头相比，镀锡铜触头的电阻值理论上为最低。但此要成为现实需符合两个条件：锡的涂层应足够薄，以防止涉及它的比电阻；然而又要足够厚，以致涉及的硬度实际上应以锡来计算。现实是新的涂锡触头的比电阻与镀银铜触头的比电阻相比相差不大，但与铜的比电阻相比稍许低一些。然而柔性型的镀锡触头或承受震动的镀锡触头必须考虑锡涂层的“摩擦腐蚀”现象（见 3.5）。

锡和镍的集中电阻特别高，因此，不采用这些处于固态的材料。

镍和镀镍铜的薄膜电阻高，考虑到腐蚀气体中（电池室、含有 H_2S 的气体等）镍的良好的耐腐蚀性，某些情况下可采用这些材料。

2.3.5 触头电阻的测量

触头电阻测量既可用于产品研发性试验，也可用于常规试验（即通过与进行过温升试验的样品进行比较来检查产品质量）。触头电阻一般通过在接合处通以直流电流（以此避免电感影响）并测量接合处的电压降而获得。

为了便于比较，电压降应在规定处测量。

如用远低于正常使用的标称电流测量触头电阻可能得出错误的值，特别是当弹簧加载触头运行在“无载”情况下。

此外，为了击穿任何可能的表面薄层，试验电源的电压应足够大，但不应超过被试设备的工作电压。还应注意避免因热电效应引起的误差。

3 触头和连接端子的老化机理

3.1 概述

没有受到电弧腐蚀的闭合的电气触头的老化（特别是接线端子情况）主要是由于金属与触头界面周围环境的反应而引起。

此反应可能是下述原因引起：

——电化学原因（腐蚀）：如具有不同电化学电势的双金属触头处在高湿度（>50%相对湿度）环境中；

——化学原因：由于周围介质（空气中的氧、类似 H_2S 或 SO_2 的亚硫蒸气）引起的氧化。

本标准包含了这两种情况。

此外还存在热机影响，包括应力松弛、蠕变和尺寸变化（这些现象也由发热而引起），结果降低了触头力，增加了触头电阻。但本标准不包含此类情况。由于此类复杂的衰变过程取决于设计和制造材料，一般不容易建立模型。对于某些电器，如接触器，此类影响复杂多变，基本不存在通常简单的因温度而衰变的曲线。

3.2 不同金属的触头

如果符合下列条件，不同金属 M_1 和 M_2 的触头将发生腐蚀：

a) 不同金属——端面 A 和 B 之间电化学的电势差在接触前必须是 0.35 V 或以上；

b) 存在电解质——触头表面因吸收周围潮湿环境中的水分而形成的薄膜可能起电解质作用；

c) 存在氧化剂——此处“氧化”具有传输电子的一般意义，为了将形成的电池去极化并让电流通过，氧化剂是必需的。氧化剂在周围的空气中是足够的；

d) 为了通过腐蚀电流，触头应闭合。

图 3 中触头分开时出现在 M_1 和 M_2 触头表面的电势差见表 3。

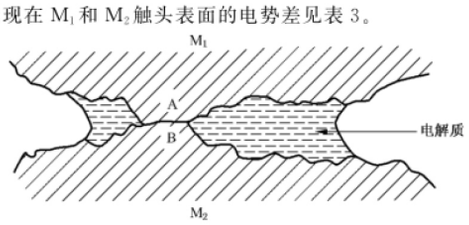


图 3 处于潮湿环境中的不同金属之间的触头（吸水性）

表 3　在双金属结合处形成的电压

单位为毫伏

负极 / 正极	银	镍	镍铜合金（30%铜）	铜/镍（70/30）	铜	银焊料	青铜*	红青铜	黄铜*	不锈钢*	锡	锡—铅共晶	锡银焊料	铅	生铁	软钢	铝合金*	铝	镉	镀锌铁	锌合金*	锌	镁合金*
银	0	150	170	190	190	210	230	250	260	330	470	480	510	560	710	720	770	770	790	1 090	1 100	1 110	1 590
镍		0	020	040	040	060	080	100	110	160	320	330	360	410	530	570	620	620	640	940	950	960	1 440
镍铜合金（30%铜）			0	020	020	040	060	080	090	160	300	310	340	390	540	550	600	600	620	920	930	940	1 420
铜/镍（70/30）				0	0	020	040	060	070	140	280	290	320	370	520	530	580	580	600	900	910	920	1 400
铜					0	020	040	060	070	140	260	290	320	370	520	530	580	580	600	900	910	920	1 400
银焊料						0	020	040	050	120	260	270	300	350	500	510	560	560	580	880	890	900	1 380
青铜*							0	020	030	100	240	250	280	330	480	490	540	540	560	860	870	880	1 360
红青铜								0	010	080	220	230	260	310	460	470	520	520	540	840	850	860	1 340
黄铜*									0	070	210	220	250	300	450	460	510	510	530	830	840	850	1 330
不锈钢*										0	140	150	180	230	380	390	440	440	460	760	770	780	1 280
锡											0	010	040	090	240	250	300	300	320	620	630	640	1 120
锡-铅共晶												0	030	080	230	240	290	290	310	610	620	630	1 110
锡银焊料													0	050	200	210	260	260	280	580	590	600	1 080
铅														0	150	160	210	210	230	530	540	550	1 030
生铁															0	010	060	060	080	380	390	400	880
软钢																0	050	050	070	370	380	390	870
铝合金*																	0	0	020	320	330	340	820
铝																		0	020	320	330	340	820
镉																			0	300	310	320	800
镀锌铁																				0	010	020	500
锌合金*																					0	010	490
锌																						0	450
镁合金*																							0

注：上述值仅用于指南。更精确值可用于金属的特殊等级。如果可行，可使用供应商规定的值。其他情况可查阅专业教科书。

* 典型值。

为避免腐蚀应选择合适的组合，其电势差应低于 350 mV；越低越好。

从表 3 中可以发现，除了银-锡和银-铝组合外，在主要触头材料的不同触头之间形成的电势差是低的。应避免银-锡和银-铝组合，特别是在腐蚀气体环境中应避免此类组合。

3.3 由氧化引起的老化机理

每个接线端子或触头实际上是由许多小的基本触头点组成。正是在这些基本触头点上，腐蚀机理在起作用。存在两种氧化过程，两者可同时发生：

——基本触头点的侧面逐渐被侵蚀，由此减少了导电截面积；

——表面比电阻为 σ_0 的氧化层逐渐变厚。

以下分析此两种机理。

3.3.1 基本触头的截面减少

在非氧化的触头上设想一个半径为 a 的基本触头点(见图 4)。

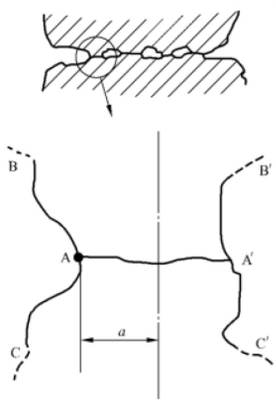


图 4 半径为 a 的基本触头点

触头表面 AA′空气很少，部分空气在触头闭合时被排除出去，留下的空气仅产生轻微的氧化现象。

相反，触头侧面 BC 和 B′C′暴露在空气中，并且逐渐受到氧化作用。

结果，基本触头点的半径逐渐减小，而触头电阻随之增加(见图 5)。

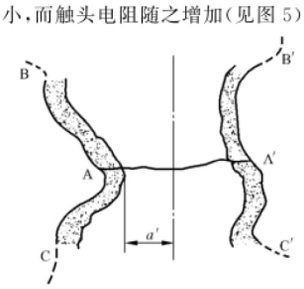


图 5 基本触头点的氧化

实际上，此类氧化引起的截面减少过程相当慢。即使处在高温下，此过程要使该触头发生大的劣变需要几十年。然而经验表明实际情况并非如此。因为在此期间出现了其他物理现象。事实是触头由承受电流循环引起的劣变比承受恒定电流引起的劣变快得多。这些循环引起了触头表面的不同热扩张，由此导致了触头表面的相对微小移动。

由于这些相对微小移动(这些移动也有可能通过电气振动或机械冲击引起)，图 5 所示的接触宽度

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

AA′可能减少至DD′(见图6)。AD和D′A′表面(最初是受保护的)现在受到了腐蚀的影响。当触头回复到初始位置时,触头的非氧化区域变得非常小。

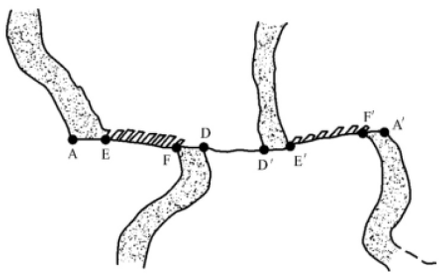


图6　相对微小移动对于基本触头氧化的影响

显然,这一现象极大地增加了氧化对接触点的影响。微小移动的影响在此情况下相当于加速氧化。该现象在电气上闭合的触头(见1.3.2)上比在紧固的连接端子上显得更加严重。

3.3.2　触头界面处氧化层的增加

第2个老化机理如下(见图7)。

假设由于触头移动(应力、振动、冲击)和两个表面(1)及(2)的空隙的扩大,氧气触及了部分表面,在触头的两个部分之间产生了附加的氧化薄膜,由此增加了界面氧化层的表面比电阻,结果增加了触头电阻。

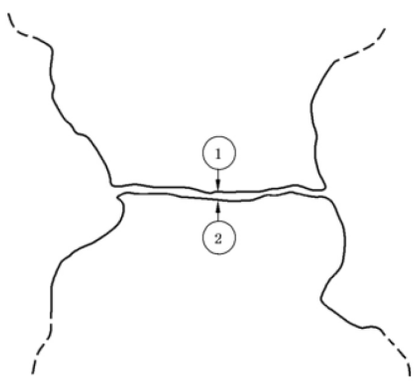


图7　触头相对表面的氧化

如果假设触头表面自由地暴露于周围空气,既使触头温度在非常低的情况下,触头电阻将很快(几个小时内)到达过高的值。显然,触头表面互相提供的保护会降低氧化速度,在此情况下,氧分子扩散的速度非常慢。

3.3.3　两种老化过程的讨论和综合

触头接触面积的减少和表面比电阻的增加是两种老化现象,它们可能同时发生。

老化取决于:

——通常情况是触头的结构及其周围气体的性质;

——特殊情况是:

- 导致微小移动的应力(如由于电流循环或电动力变化和振动引起的热应力)强度,
- 触头周围气体中的氧化物的密度。

实践中识别老化是由两个现象中的哪个现象引起有些困难，而分析时一次只能考虑一种机理。然而无论触头或接线端子的老化以哪种形式显示，每个假设的结果很接近，基本能得出一个共同的结论。

3.4 有关铜触头老化的结果

当铜的老化机理是由空气中的氧气产生的氧化起主要作用时，有可能建立一个数学模型，用来表示作为时间函数的触头特性。此模型通过短时的实验便可实现。从分析该模型得出的主要结果如下：一般来说，有可能将两种影响分开，即将流过触头之间的实际电流引起的温升影响与周围温度（围绕触头的流体温度）的影响区分开来。

其他衰变机理也可能显著地影响老化速率。但目前它们不适于作数学处理，因此下述分析不予考虑。下述方法用于初步研究。但应强调，有必要进行深入的研究性试验，因为在许多情况下其他机理起主要作用。

3.4.1 温升影响

如果仅受空气氧化作用的触头或接线端子温升增加 Δ_i（K），则它的寿命将减少一半。Δ_i 是初始温升的函数（此估算经实验结果证实，见图 8）。ΔT_i 是相对于周围流体的元件温升。

通常当触头或接线端子的温升从 ΔT_{i1} 升至 ΔT_{i2} 时，其寿命应乘以老化系数 K_i。当 ΔT_{i1} 和 ΔT_{i2} 之间的差值适度时，K_i 表示为：

$$K_i = 2^x \text{，式中 } x = \frac{\Delta T_{i1} - \Delta T_{i2}}{\Delta_i} \qquad \cdots\cdots(8)$$

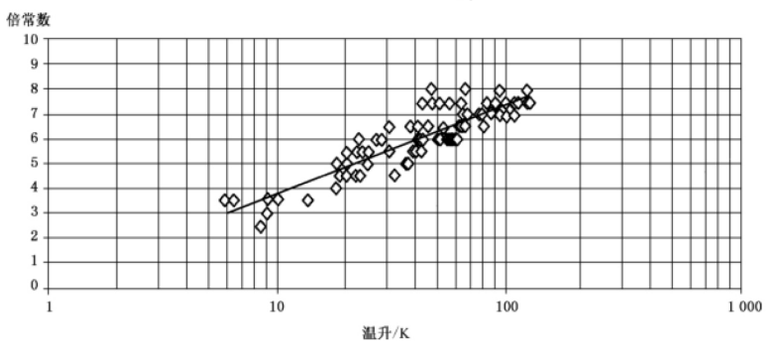


图 8 作为温升函数的倍常数 Δ_i（铜触头的经验结果）

例如：设想一个空气中初始温升为 35 K 的铜触头，其倍常数 Δ_i 接近 6 K。如果使该触头超载，则其初始温升变为 45 K。当其他条件相同时，触头寿命将按下列系数减少：

$$2^{\frac{35-45}{6}} = 0.315$$

即触头寿命应除以 3.2（近似值）。

注：根据对经验数值区域外的结果使用外推法进行计算是不可靠的。

3.4.2 周围温度的影响

当其他条件相同时，如果围绕触头或接线端子周围的介质温度上升 Δ_e（K），则触头或接线端子的寿命将减少一半。图 9 中给出了作为初始温升函数的经验结果 Δ_e。

通常当围绕触头或接线端子的流体温度从 T_{e1} 升至 T_{e2}，触头和接线端子的寿命应乘以老化系数 K_e。K_e 表示为：

$$K_e = 2^y \text{，式中 } y = \frac{T_{e1} - T_{e2}}{\Delta_e}$$

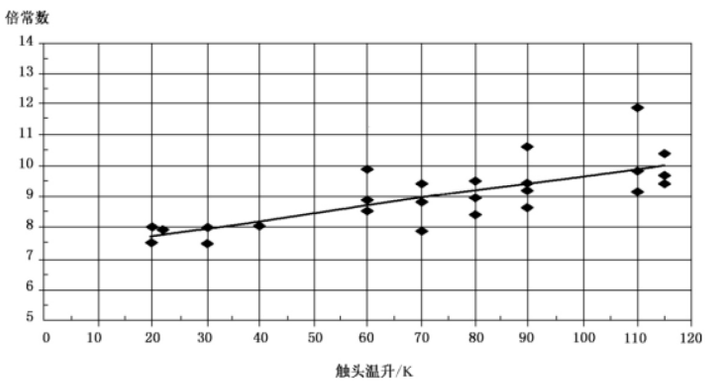


图 9　作为触头温升 ΔT_i 的函数、用所要求的周围流体温升表示的倍常数 Δ_e
（触头材料：铜；流体：空气）

注：根据对经验数值区域外的结果使用外推法进行计算是不可靠的。

例如，对于温升 ΔT_i 为 35 K 的铜触头，当周围空气温度增加 $\Delta_e = 8$ K 时，铜触头的寿命将减少一半。

3.4.3　触头温升和周围流体温升的组合影响

当触头或接线端子的温升和周围介质温度同时变化时，这两个影响组合起来，总的老化系数 K_{th} 见(9)：

$$K_{th} = 2^{[x+y]} \qquad \cdots\cdots(9)$$

3.5　触头材料的使用及采取的预防措施

裸铜容易随时间和温度的增加发生显著的劣变。下列情况是不利的：温度超过 60 ℃～85 ℃（具体值按触头使用的金属和周围气体的性质而定），以及将该材料用于在额定发热电流下长期闭合的触头（如输入断路器的情况）。对于后者，推荐使用镀银铜，因为该铜在非亚硫气体中老化缓慢。

作为一个重要的例子，我们可以计算铜、镀镍铜、镀锡铜和镀银铜触头在触头力 10 N 和暴露在周围空气中 1 000 h 后时的电阻（计算公式见 2.3.2）。

计算结果如下：

表 4　触头电阻比较值

材　料	电　阻 mΩ
裸铜	20
镀镍铜	35
镀锡铜	6.8
镀银铜	0.3

从表 4 中可看出，镀锡铜或镀银铜优点明显。镀镍铜仅用于不适合镀银铜的受污染的气体中。

下面更详细地考虑各种可能性：

a）　镀镍铜适合于腐蚀气体或高温中的触头，经常用于发电站或铁路运输设施；

b）　镀锡铜和镀锡铝是优先用于低压的材料。锡的硬度低，具有低的触头电阻。但它不能用于经常断开和接通的触头，这样会损害锡镀层。镀锡金属一般用在熔断器的触头之中，被更换的熔断体（为了恢复熔断器动作后的供电）提供了新的触头表面。当锡的温度超过 105 ℃应特别注意，特别是当镀锡触头与镀银触头配对时，因为在此温度之上会出现蠕变现象；

c) 承受震动的柔性连接或螺栓连接的镀锡触头可能在锡镀层上产生“摩擦腐蚀”现象，即使比额定值低的电流情况下，此现象也会导致触头很快损害。在此情况下优先使用裸铜、镀银铜或镀镍铜触头；

d) 银是优良的触头材料，除了在含有亚硫烟雾的气体中之外，它的老化速度缓慢；

e) 不使用铝作触头材料，除非用油脂或制造商推荐的其他特殊处理方法将绝缘的氧化铝层刷去。

4 导线、触头和连接端子的温升计算

4.1 符号表示

作为理论上的举例，图 10 显示了沿着形成平接接触的两根导线的温度变化。

在实际接触的情况下(如通向接线端子的导线)，沿着导线的温度变化通常是不对称的。

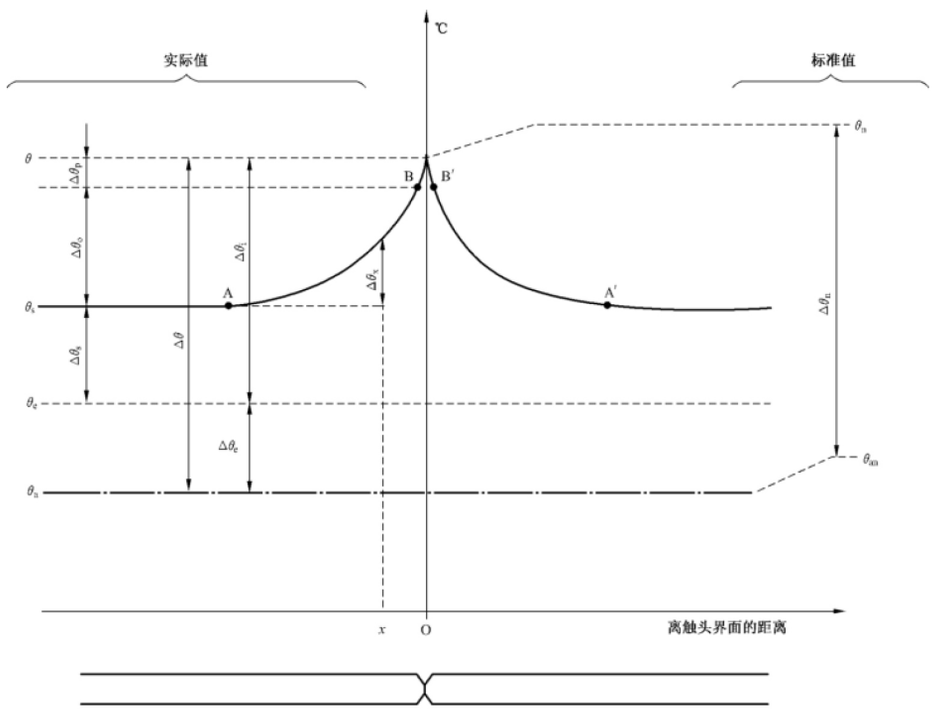


图 10 用于温度和温升的符号表示；举例选择：平接接触

图 11 显示了接线盒内熔断器的实际情况。

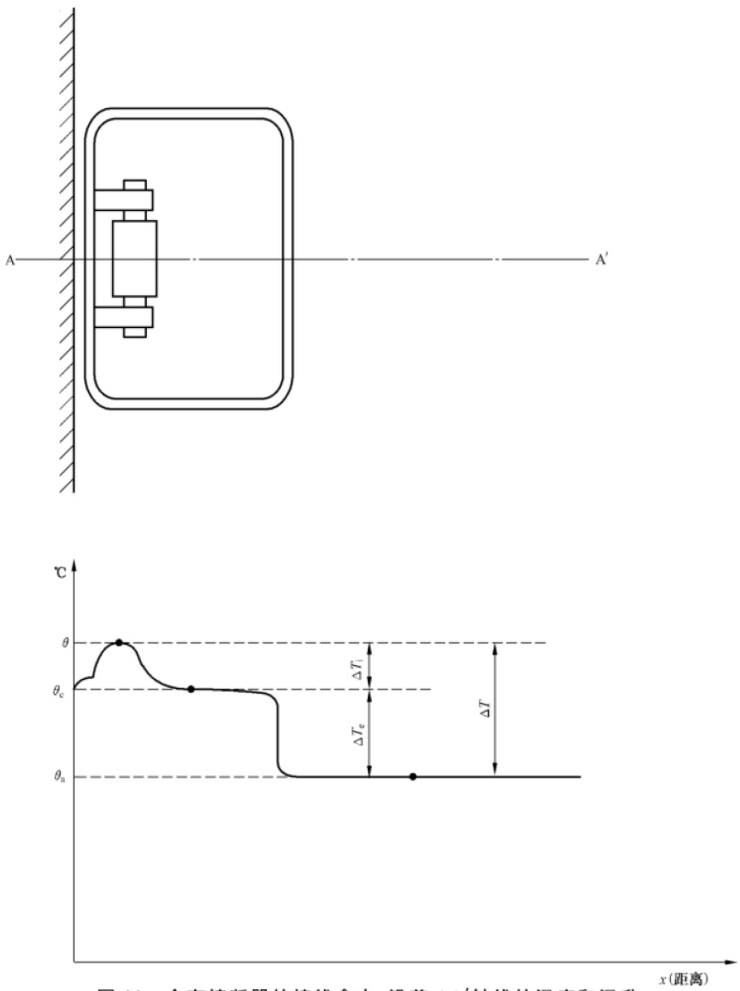


图 11　含有熔断器的接线盒内、沿着 AA′轴线的温度和温升

设定相关触头或元件最大温度 θ 中各主要参数的定义。

最大温度 θ 是下列各项之和：

$$\theta=\theta_a+\Delta T_c+\Delta T_s+\Delta T_o+\Delta T_p$$

式中：

θ_a——外部周围温度，标准定义见 1.3.1；

ΔT_c——围绕相关触头或元件的空气温升，它与周围空气 θ_a 有关；如果元件在外壳内，则围绕元件的空气温度为：

$$\theta_c=\theta_a+\Delta T_c$$

ΔT_s——触头不存在时导线实际温升(温度 θ_s(℃)或 T_s(K))。大多数情况下触头和导线通过辐射和自然对流进行冷却，有些时候通过强制对流进行冷却(空气速度大于 0.3 m/s～0.4 m/s，如架空线或室外导线)；

ΔT_0——触头附近处的温升。事实上由触头电阻的焦耳效应产生的焦耳热沿着导线的周边逸散，呈现出降低的温度分布态势，如图 10 中曲线 BA 和 B′A′部分所示。当 x 接近零时温升为最大；

ΔT_p——基本触头点处的附加温升，该值由基本触头点间界面发出的热流线而引起，数值通常比上述几项值小。

上述几项值的计算公式如下。

4.2 相对于周围介质温度 T_e 的导线温升 ΔT_s

水平放置在与周围温度有关的自由空气中的无限长单芯导线的温升一般可表示为如下关系：

$$\Delta T_s = \frac{[(T_e + \Delta T_s - 273.15)\alpha + 1]R_0 I^2 + r\varphi_s S_r}{Bl\left[\sigma\varepsilon\dfrac{(T_e + \Delta T_s)^4 - T_e^4}{\Delta T_s} + \dfrac{\lambda}{D_h}N_u\right]} \quad \cdots\cdots(10)[3]$$

注：全部温度值 T 以开氏温度表示。

用于上述公式的无量纲努塞尔(Nusselt)数 N_u 取决于冷却方式。

如是自然对流，对于室内触头和接线端子的一般情况，N_u 可表示为：

$$N_u = 0.8\,(G_r P_r)^{0.05} + 0.35\,(G_r P_r)^{0.27} \quad \cdots\cdots(11a)$$

式中：

$$G_r P_r = \frac{M^2 \beta g C_p D_h^3 \Delta T_s}{\mu_d \lambda} \quad \cdots\cdots(11b)$$

通常，从式(10)计算所得的温升正比于电流 I 的 1.5 和 2 之间的次方。具体取决于表面条件(平均值 1.67 用于下面的示范计算中)。

如是强制对流，对于室外触头和接线端子的情况(如输送线或变电所的连接)，N_u 可表示为：

$$N_u = 0.65 R_E^{0.2} + 0.23 R_E^{0.61} \quad \cdots\cdots(12a)$$

式中：

$$R_E = \frac{M_s D_h}{\mu_d} \text{（雷诺(Reynolds)数）} \quad \cdots\cdots(12b)$$

温升与电流的平方成正比。计算 ΔT_s 应注意，公式的两边均有该项。计算时取 ΔT_s 为任意值，通过连续逼近法求得公式的解。收敛非常快，一般重复几次足可使得到的 ΔT_s 值至少在 1 K 之内。

用于计算的数值见附录 B 和附录 C。

注 1：在计算 $G_r P_r$ 乘积时，数量 $\dfrac{M^2 \beta g C_p}{\mu_d \lambda}$ 仅取决于流体(以及 g)，如在空气中，可用近似经验公式[3]表示：

$$3.912 \times 10^{19}\,(273.15 + \theta_e)^{-4.69}$$

注 2：相似地，在计算雷诺数时，数量 $\dfrac{M}{\mu_d}$ 可用下式表示：

$$1.644 \times 10^{9}\,(273.15 + \theta_e)^{-1.78}$$

4.3 触头附近处的温升 ΔT_0：连接端子的温升

使用辐射和自然对流方式冷却的计算公式见附录 E。

4.4 基本触头点的温升

最后，在基本触头处还存在一个附加温升，它是由基本触头的界面发出的热流量线而引起，数值通常比上述几项值小，可表示为：

$$\Delta T_p = \frac{I^2}{2\pi^2 n^2 \lambda_c}\left(\frac{\rho}{4a^2} + \frac{\sigma_0}{a^3}\right) \quad \cdots\cdots(13)[1]$$

式中：

$$a = \sqrt{\frac{F}{n\pi\xi H}}$$

$$n = n_k H^{0.625} F^{0.2}$$

$n_k = 2.5 \times 10^{-5}$（标准国际单位制）

5 允许温度和温升值

5.1 周围空气温度 θ_a

周围空气温度的定义见 1.3.1。周围空气温度的分布见 GB/T 4797.1—2005。

注：对于加热的室内装置（假设恒温器的开关门限设定在 10 ℃）年平均温度接近 15 ℃。这些值（特别是年平均温度值）对于正确估算触头老化非常有用。

应考虑的值：

对于总体装置，除了“极端干热气候”，IEC 标准经常考虑的正常周围温度条件 θ_{an} 如下：

a) 周围温度不超过 40 ℃。然而某些国家标准规定年平均周围温度不超过 20 ℃；

b) 产品标准也考虑最低值，但对于允许温升并不重要；

c) 上述温度极限适用于海拔不超过 2 000 m 的场合，海拔超过 2 000 m 时，可考虑下述观点：
如果在 2 000 m 和 4 000 m 之间的海拔处使用由空气冷却的设备，在海拔 2 000 m 以下正常试验中测得的温升应不高于表 6 相应的降低值（按设备所处海拔超过 2 000 m 每 100 m 降低 1% 的值）。此修正通常没有必要，因为某海拔处由于空气冷却效果降低引起的较高的温升通过该海拔处降低的最大周围温度得到了补偿（见表 5）。结果，最终温度在给定的电流情况下相对来说没有改变。

表 5 最大周围空气温度

海　拔 m	最大周围空气温度 ℃
0～2 000	40
2 000～3 000	30
3 000～4 000	25

d) 关于太阳辐射的意见：
如果设备安装在室外，必须考虑太阳辐射的影响。如有必要应采取适当的措施（屋顶保护、强迫通风等）；此举并不排除设备在任何阳光条件下连续通以正常发热电流时超过某些发热极限。

5.2 各种设备元件的温度和温升

5.2.1 温升值基本因数

表 6 值适用于在连续的额定值条件下稳定运行的设备，且按下述方式进行评估：

a) 对于允许的温升值（见表 6，A 栏）：
——根据相应于 20 年～40 年正常寿命的长期试验，以及此后经验确认的值；
——或根据使用高的额定值进行的短期试验，正常额定值时的寿命从 3.4.1 和 3.4.2 规定的老化规则中导出。
在此情况下，围绕元件的空气平均温度 θ_c 相应于 20 ℃标准平均周围温度。

b) 对于不应超过的最大温度（见表 6，B 栏），考虑到材料和元件的特性（如超过 105 ℃时锡将发生蠕变），采用的周围温度为最大温度 $\theta_{an} = 40$ ℃。

上述考虑的值仅作为评估的指导和起点。确定更精确的值需考虑下述因素：

——运行条件（长期工作制、循环工作制、8 小时工作制等等）及元件的发热时间常数；
——特殊运行模式（可能达到高温的双金属片，接近熔断器的触头，等等）；
——安装方式（装在一个或多个外壳内）；
——与 5.1 规定不同的周围温度范围（例如赤道带周围温度可至 50 ℃）；
——使用方式，特别是导线-接线端子的连接。

表 6　温升和温度极限的典型值[a]

元件名称			A栏 最大温升 K[a] (θ_m=20 ℃)	B栏 最大温度 ℃ (θ_m=40 ℃)	备注
触头性质[a,c,e]	弹簧触头	铜和铜合金，无镀层			
		——OG[l]中	35[p]		
		——NOG[l]中	75[q]		
		——油中	40		
		OG[l]、NOG[l]、油中[b,e]镀锡	50		
		镀银[b,s]或镀镍[b]			
		——OG[l]中或 NOG[l]中	75[q]		
		——油中	50		
		油中接触器		105	油的劣变
	螺栓连接	铜、铝及它们的合金，无镀层			
		——OG[l]中	60[q]		
		——NOG[l]中	75[q]		
		OG[l]或 NOG[l]中镀锡[b]		105	锡的蠕变点
		镀银[b,s]或镀镍[b]			
		——OG[l]或 NOG[l]中	75[q]		
		——油中		100	油的劣变
		油中接触器		105	油的劣变
	接线端子[d,f,r]	通过螺钉或螺栓与外部导线连接			
		无镀层	60[q]		
		镀锡[b]		105	锡的蠕变点
		镀银或镀镍[b]	75[q]		
	其他触头材料		[g,h]		
金属部件	与绝缘材料接触	绝缘等级[i]：			绝缘老化
		Y		90	
		A		105	
		E		120	
		B		130	
		F		155	
		H		180	
		搪瓷：油基		100	
		合成物		120	
		起弹簧作用的部位		[j]	永久劣变
		锡焊		100[k]	破裂
用于油浸式开关装置的油[l,m]				90	油的劣变
除触头外，全部金属部件或全部绝缘材料制成的与油接触部件[m]				100	
电动机和电阻器			[n]		

表 6（续）

元 件 名 称		A 栏 最大温升 K[a] (θ_{am}=20 ℃)	B 栏 最大温度 ℃ (θ_{am}=40 ℃)	备 注
	手动控制元件			GB 16895.2
	——金属		55	
	——非金属		65	
	在正常运行中能触及但不持久握在手中			
表面[o]	——金属		70	
	——非金属		80	
	可接近，但正常运行时不会触及			
	——金属		80	
	——非金属		90	

[a] 对于真空中连接单元，此温度和温升极限值不适用于真空中的元件。对于其他元件，不能超过表 6 规定的温度和温升值。由于 NOG[f] 中不存在氧气，所以在 NOG[f] 中最大可接受温升值对镀银铜、镀镍铜和裸铜均相同。

[b] 下列触头视为银触头：实心银触头、具有镶嵌银带的触头，镀银触头。通常对于全部电镀金属，电镀质量必须如此：经过下列试验后保护层仍保持在接触区域内：

1） 接通和分断试验后（如有）；

2） 允许的短期电流试验后；

3） 机械试验后。

并应符合材料的技术规范。如果不符合要求，触头视为“裸”触头。

对于镀镍触头，如果温升保持在规定极限内，触头电阻和触头寿命与银触头相当。通过提高触头力可达到此目的。

[c] 当啮合部件具有不同镀层，或其中一个部件为裸金属，则允许温度和温升应是：

1） 对于弹簧触头，具有表 6 允许的最低值的表面材料相应值；

2） 对于螺栓连接，具有表 6 允许的最高值的表面材料相应值。

[d] 螺钉紧固力矩值由合适的产品标准给出，如 GB 14048.1—2006 中表 4。

[e] 对于熔断器，考虑到热量从熔体传到触头的匀称性，温升可能增加。对这些元件应参考适当的技术规范。

[f] 与接线端子连接的导线即使没有覆盖层保护，温度和温升值仍然有效。

[g] 当使用非表 6 所列材料时，应考虑这些材料的特性。

[h] 以不损害周围部件为限。

[i] 绝缘等级由 GB/T 11021—2007 规定。

[j] 温度不应达到使材料的弹性降低的值。

[k] 当焊接作为连接两个部件的主要方式时此值适用。否则，极限可升高至 110 ℃。

[l] 温度必须在油的上面部分中测量。

[m] 当使用低闪点的油时，需特别注意油的汽化和氧化。

[n] 按现行规定。

[o] 对安装在外壳内的手动控制元件（当打开外壳时能接近该元件，但不经常使用），允许更高的温度。

金属和非金属表面的区别取决于表面的热导率。镀层和清漆不改变表面的热导率。此外，某些塑料覆盖层可能明显地降低金属表面的热导率，这些金属表面可视为非金属表面。

本规则对某些材料不适用，即这些材料所符合的标准对可接近表面规定的温度和温升极限是固定的。

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

表 6（续）

元 件 名 称	A 栏 最大温升 K[u] (θ_{an}=20 ℃)	B 栏 最大温度 ℃ (θ_{an}=40 ℃)	备 注
[p] 此极限可增加至： 45K ——用于位于仪表盒或上级主线的下级低压电源设备； ——用于连续工作制的接触器； 65K——用于 8 h 工作制、断续工作制或短时工作制的接触器，此时使用条件应符合合适的产品标准。 [q] 以不损害相邻部件（特别是触头的绝缘）为限。 [r] 对预期与绝缘的导线连接的接线端子见 5.3.2。 [s] 对于一些低压工业设备，温升仅以不损害周围部件为限。 [t] NOG=非氧化气体；OG=氧化气体。 [u] 如果符合注 q 要求，并且下述条件成立，允许更高值： ——产品标准规定了更高值，或 ——制造商能证明触头的性能一贯良好。在此情况下，用户和制造商对可接受值宜达成协议。			

5.2.2 **最大温度和允许温升**

有必要区别两组值：

A 栏

——该值对应于容易老化的元件，但对造成这些元件快速破坏的温度是相对高的。例如铜触头的温升被限制在 35 K，尽管它们能耐受差不多 150 ℃的温度也不会立即损坏。很明显，在这种情况下元件在寿命其间所处的周围温度是平均温度，即在多数情况下为 20 ℃。

——对于容易老化的元件（如触头），正常寿命周期取决于标准规定的温升，以及围绕元件温度为 20 ℃的介质温度 θ_c。

B 栏

——该值对应于温度决不能超过某个值的元件，超过该温度，元件将会发生快速（如不是立即）损坏；在这种情况下，所考虑的周围温度为 40 ℃。此适用于如某些绝缘材料、镀锡触头（锡的蠕变点：105 ℃）、弹簧等。

表 6 给出的是用于开关和熔断器装置标准的典型值。注意区别在 $\theta_c=\theta_{an}=20$ ℃时最大允许温升和 $\theta_{an}=40$ ℃时最大允许温度的差异。

由于各单独元件的特殊需要，表 6 中设备的个别元件值可能稍许不同。如需精确的值，可参考合适的产品标准。

5.2.3 **围绕元件的介质温度变化的影响**

如果直接在元件附近的温度 θ_c 发生变化：

——无论是由使用在不同于 5.1.1 规定的气候下引起，

——或由于元件使用在外壳内引起，

都必须考虑：

——新的允许温升值，

——或新的额定发热电流值。

采取新的值应考虑如下的因数：

a) 元件不应超过其最大温度(见表 6,B 栏);

b) 元件可超过其最大温升,条件是在允许老化的范围内存在一个可接受的增加值(见表 6,A 栏)。

从下列假设中导出式(14):

——温升与电流的次方 p 成正比,根据表面(通过辐射和自然对流冷却[1])的辐射率,p 在 1.5 和 2.0之间,平均值 1.67 已用于本标准的某些计算;

——考虑的一种情况是:如果温升 ΔT_i 增加 6.5 K,触头的老化速率乘以 2;

——考虑的另一种情况是:如果围绕触头的介质平均温度 θ_e 增加 8.5 K,老化速率乘以 2。

换句话说,在周围 θ_e 下运行 1 h(此时温升为 ΔT_i)代表了在正常条件 θ_{an} 下运行 K_{th} 小时。ΔT_n、K_{th} 由下式给出:

$$K_{th}=2^{\left(\frac{\theta_e-\theta_{an}}{8.5}+\frac{\Delta T_i-\Delta T_n}{6.5}\right)} \qquad \cdots\cdots(14)$$

附录 A 使用式(14)的数值举例显示了短时超温效应并不能通过以降低的负荷在较低的温度下运行相同的时间得到补偿。

5.2.3.1 含有在最大周围温度 $\theta_{an}=40$ ℃ 时可能达到最大允许标准温度 θ_n 元件的设备条件

在此情况下,对于任何较高的周围温度 θ_a,设备的额定发热电流 I'_{th} 应该为:

$$I'_{th}=I_{th}\left(\frac{\theta_n-\theta_a}{\theta_n-40}\right)^{1/p} \quad \text{如果 } \theta_a>40\ ℃ \qquad \cdots\cdots(15)$$

式中 $1.5<p<2.0$ 取决于表面辐射率。

表 7 规定了相对于各种周围温度和最大允许温度的修正系数 C_{th} 值(p 取标称值:$p=1.67$)。

表 7 用于额定电流的修正系数(C_{th})

θ_a/℃ \ θ_n/℃	55	65	70	75	80	90	100	105
45	0.78	0.87	0.90	0.91	0.92	0.94	0.95	0.95
50	0.52	0.74	0.78	0.82	0.84	0.87	0.90	0.90
55	0.00	0.58	0.66	0.71	0.75	0.81	0.84	0.85

所使用的温度 θ_n 是元件(该元件具有相关设备规范中的最低值)的最大允许温度。显然,选择时应考虑设备的主要元件,而不是辅助元件(按钮,可触及的易近部件等)。对于辅助元件可采取特殊预防措施。

5.2.3.2 设备闭封时,如前假设设备含有在 $\theta_a=40$ ℃ 时可能达到最大允许温度 θ_n 的元件

如果设备装入壳内空气温度为 θ_e 的外壳中,连续工作的最大电流 I'_{th} 将为:

$$I'_{th}=I_{th}\left(\frac{\theta_n-\theta_e}{\theta_n-40}\right)^{1/p} \quad \text{如果 } \theta_e>40\ ℃ \qquad \cdots\cdots(16)$$

考虑 θ_e:

θ_e 取决于壳外周围温度 θ_a(通常离壳壁 1 m 处测得)、由内部热源通过辐射和对流传导的热功率、以及外壳的通风。

对于只有少量通风或无通风的外壳,θ_e 和 θ_a 之间的关系可由下式表示:

$$\theta_e=\theta_a+X\Delta\theta$$

式中:

$\Delta\theta$——较高热源和周围空气温度 θ_a 之间的温度差;

1) 在通过辐射和强制对流冷却的情况下,温升大致与电流平方成正比。

X ——代表壳内器材密集度的填充系数。

经验显示，重要的热源（母线、熔断器）温度通常达到 100 ℃，相对于正常的填充，$X=0.25$，这些条件导致外壳的空气温升为 20 K（相对于周围温度）。

根据上述条件：

$$\theta_e=\theta_a+X(100-\theta_a),X \text{ 等于}=0.25$$

根据上述假设计算修正系数 C_{th}。用于壳内的此设备的额定电流（I'_{th}）可从下式得到：

$$I'_{th}=C_{th}\times I_{th}$$

式中：

$$C_{th}=\left(\frac{\theta_n-(1-X)\theta_a-100X}{\theta_n-40}\right)^{1/p} \qquad \cdots\cdots(17)$$

表 8 和表 9 给出了修正系数 C_{th} 值，该值作为 θ_n 和 θ_a 的函数，用于 $X=0.25$ 和 $X=0.3$（取 $p=1.67$ 标称值）两种场合。

表 8　当 $X=0.25$ 时标称电流修正系数（C_{th}）

θ_a/℃ \ θ_n/℃	55	65	70	75	80	90	100	105
0	1.52	1.33	1.28	1.24	1.21	1.17	1.14	1.13
10	1.28	1.17	1.14	1.12	1.11	1.09	1.07	1.07
20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
30	0.66	0.81	0.84	0.87	0.88	0.91	0.92	0.93
40	—	0.58	0.66	0.71	0.75	0.81	0.84	0.85
45	—	0.44	0.56	0.63	0.68	0.75	0.80	0.82
50	—	0.25	0.44	0.54	0.61	0.70	0.75	0.77
55	—	—	0.29	0.44	0.53	0.64	0.71	0.73

也可使用相关产品标准中所考虑的设备最低值 θ_n。但小元件除外，这些元件（按钮、可接近表面等）的最大允许温度低，应采用其他措施进行防护。

注 1：对于装得非常满的外壳（特别出现在低压情况下），可取 $X=0.3$，由此得出下列值：

表 9　当 $X=0.3$ 时标称电流修正系数（C_{th}）

θ_a/℃ \ θ_n/℃	55	65	70	75	80	90	100	105
0	1.36	1.22	1.19	1.16	1.14	1.12	1.10	1.09
10	1.12	1.07	1.06	1.05	1.04	1.04	1.03	1.03
20	0.83	0.90	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.96
30	0.45	0.71	0.76	0.80	0.82	0.86	0.89	0.89
40	—	0.47	0.58	0.65	0.70	0.77	0.81	0.82
45	—	0.31	0.47	0.56	0.63	0.71	0.77	0.79
50	—	0.00	0.34	0.47	0.56	0.66	0.72	0.75
55	—	—	0.17	0.36	0.47	0.60	0.69	0.71

注 2：仅当实际电流值（根据此电流值得到允许温度 θ_n）在未知情况下，才宜系统地使用修正系数 C_{th}。实际电流值可能高于设备的额定电流值。

5.2.3.3 含有在 θ_a=40 ℃时未达到最大允许温度元件的设备

在此情况下，如果平均周围温度长期超过 20℃，有可能增加最大允许温升，但相关元件的老化不会显著增加。

假设全部其他条件与前述相同：

——如果温升 ΔT_i 增加 6.5 K，铜触头的老化速率乘以 2；

——如果温度 θ_e 增加 8.5 K，老化速率乘以 2；

——总温升包括内部气体的温升 ΔT_e 加上与此气体相关的元件温升 ΔT_i。

于是得到下式：

$$\Delta T=\Delta T_e+\Delta T_i$$

如果 ΔT_e 增加成为 $\Delta T'_e$，必须减少 ΔT_i 至 $\Delta T'_i$。此减少的值如小于增加的值 ΔT_e，结果新的值 $\Delta T(\Delta T'=\Delta T'_e+\Delta T'_i)$ 最终可能是增加的。

附录 A 中一个数字举例计算了运行在有较高内部周围温度外壳内的触头可接受的总温升增加值。

5.3 连接电气设备的导线温度和温升

5.3.1 推荐用于温升试验的连接导线

原则上，连接导线应按正常使用情况进行布置和连接。导线截面积应不会引起被试设备元件（特别是它们的连接端子）的额外加热或冷却。

推荐用于温升试验的合适导线可按相关产品标准规定。

计算围绕壳内触头的空气温度更常用的规则见适当的产品标准（如 IEC 60890）。

5.3.2 温升和温升对有机绝缘材料的影响

多数有机材料加热时发生劣变。劣变程度取决于温度绝对值和在此温度下经受的时间。

根据阿伦尼乌斯（Arrhenius）化学反应速率定律，材料在适当的温度范围内，其劣变速率可表示为绝对温度倒数的对数函数：

$$\log(\text{绝缘寿命})=A'+\frac{A}{(273+T_i)}$$

式中：

A、A'——特定劣变反应常数；

T_i——绝缘摄氏温度。

如果存在多个劣变过程，公式将更为复杂。

绝缘材料的既定类型根据长期运行的经验分级，但目前引入并使用了各种聚合物。

按 GB/T 11026.1—2003 规定的程序可确定任何特定合成物材料的阿伦尼乌斯发热劣变曲线，并且确定该材料的寿命。

应注意如下几点：

a) 聚合物的特性由其成分确定。为了保证聚合物特性的稳定，需对全生产过程进行控制，仅使用已知成分的化合物；

b) 聚合物劣变过程可能受到与之接触的材料和物体（聚合物应用于该物体）形状的影响。确定绝缘材料的阿伦尼乌斯曲线的实验推荐使用适当的样品，如数根绝缘被覆的母线；

c) 温度和湿度可能影响某些聚合物绝缘的机械性能。在高温时一些聚合物绝缘呈柔性，能耐受机械冲击；但在低温时，同样的材料在承受机械冲击（如与短路有关的机械冲击）时呈脆性，可能断裂；

d) 聚合物在模塑或固化过程中应考虑导线的任何退火现象；

e) 绝缘寿命也可能受到机械应力，振动和周围环境的影响。

5.3.3 平行排列的母线

当多根母线平行排列时，由于交流的集肤效应和邻近效应，母线表面总比电阻增加。

表 10 给出了典型的修正系数值。为了得到多根母线(有数根边对边排列的基本母线组成)的允许电流,应将表 10 中系数乘以流过单根母线的电流(50 Hz～60 Hz),如此多根母线的温升与单根母线相同。

表 10 修正系数:边对边平行排列的母线(母线间距与母线厚度接近相同) 单位为毫米

平行母线数量	母线尺寸										
	厚度 50 mm		厚度 80 mm			厚度 100 mm			厚度 160 mm		
	6.3	10	6.3	10	16	6.3	10	16	6.3	10	16
2	1.77	1.72	1.72	1.65	1.61	1.70	1.60	1.50	1.60	1.49	1.45
3	2.27	2.25	2.24	2.12	2.03	2.17	2.02	1.90	2.02	1.95	1.80
4	2.93	2.70	2.69	2.60	2.42	2.64	2.40	2.24	2.40	2.20	2.10
注:其他尺寸的相似表可从国际铜发展协会处获得,铝修正系数可从铝母线供应商处获得。											

5.4 电气设备连接端子的温度和温升——对所连接的导线的影响

5.4.1 从上述理论得到的有用公式

接线端子的温升理论见 E.1。

然而用于多数情况(如 E.1 中通过辐射和自然对流进行冷却)的公式通常对实际应用来说太复杂,除非如 E.2 中建立计算机模型。

5.4.2 数字举例

数字应用举例见附录 A。

6 确定允许温度和温升应遵循的一般程序

对于一个给定的设备元件,通常根据它自身的特性和工作条件(环境、电流、额定值和工作制)来确定它使用的最佳条件。

6.1 基本参数

使用设备应考虑下列基本参数:

——设备参考标准中规定的设备额定特性;

——设备的工作制(适当的产品标准中规定的连续工作制,断续工作制等)和可能的预期寿命;

——环境条件:有关元件是否处在热气体中?是否装在一个或多个外壳内?周围介质是否被污染?

6.2 确定最大允许温度和温升应遵循的方法

一般采取的方法见图 12。

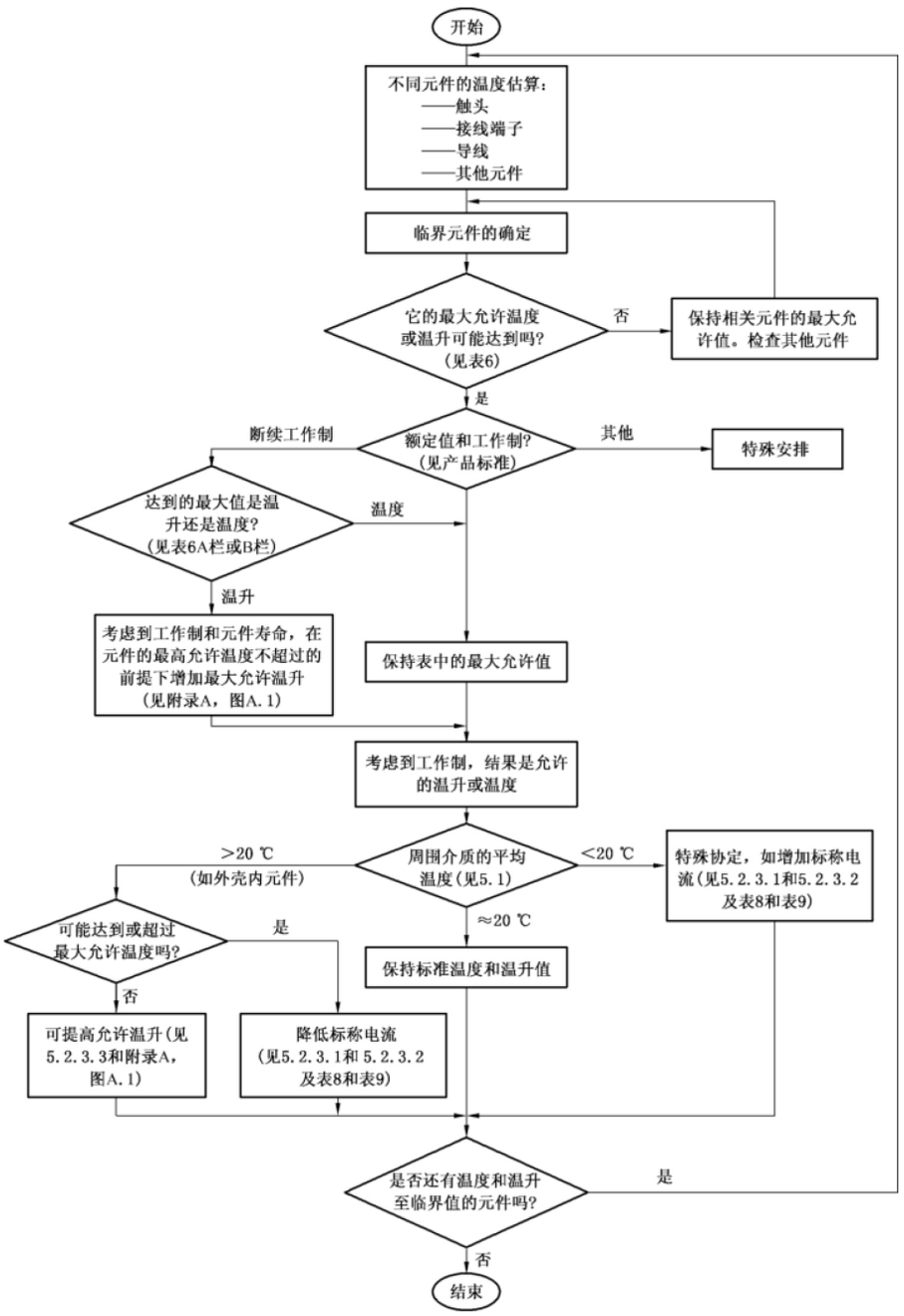


图 12　确定最大允许温度和温升流程图

附 录 A
（资料性附录）
理论运用的数字举例和其他数据

A.1 使用式(14)计算短期过热温度的影响

考虑 $\theta_{an}=20$ ℃ 和 $\Delta T_n=50$ K 情况。

如果 $\theta_e=40$ ℃ 和 $\Delta T_i=65$ K，得到 $K_{th}=25.3$。与正常条件相比，在新的条件下，触头的寿命运行 1 h 将减少 25.3 h。

显然上述减少的寿命不能在同样时间内通过低负载和低温度的运行得到补偿。如 $\theta_e=0$ ℃ 和 $\Delta T_i=35$ K，得到 $K_{th}=0.04$。在此条件下运行 1 h 相当于正常运行 0.04 h(约 2 min)。与上述减少的寿命 25.3 h 相比，寿命仅增加了 58 min。

因此仅需考虑的是周围温度或温升高于正常允许值的情况。

A.2 对运行在有较高内部周围温度外壳内的触头进行总温升可接受的增加的数字计算举例

根据 5.2.3.3 的论证得到如下结果：

如果 ΔT_e 增加 8.5 K，ΔT_i 减少 6.5 K，$\Delta T(=\Delta T_e+\Delta T_i)$ 由此增加 2 K，对元件的老化没有影响。

在最通常的情况下计算温升变化：

假设：

θ_e 外壳内周围温度；

ΔT_i 与 θ_e 有关的元件温升；

θ'_e 新的内部周围温度；

$\Delta T'_i$ 新的温升。

根据式(14)计算老化系数如下：

$$K_{th}=2^{\left(\frac{\theta'_e-\theta_e}{8.5}+\frac{\Delta T'_i-\Delta T_i}{6.5}\right)}$$

假定 $\Delta T_e+\Delta T_i=\Delta T_n$ 是标准温升。

令 $z=\Delta T'_e-\Delta T_e$ 为外壳内气体的温升增加值，便可求得带有 K_{th} 常数的允许标准温升的增加值 $y=(\Delta T'_e+\Delta T'_i)-\Delta T_n$。

结果得出下式：

$$y=\Delta T'_e+\Delta T'_i-\Delta T_n=\Delta T'_e+\Delta T'_i-(\Delta T_e+\Delta T_i)=z+(\Delta T'_i-\Delta T_i)$$

于是：

$$\Delta T'_i-\Delta T_i=y-z$$

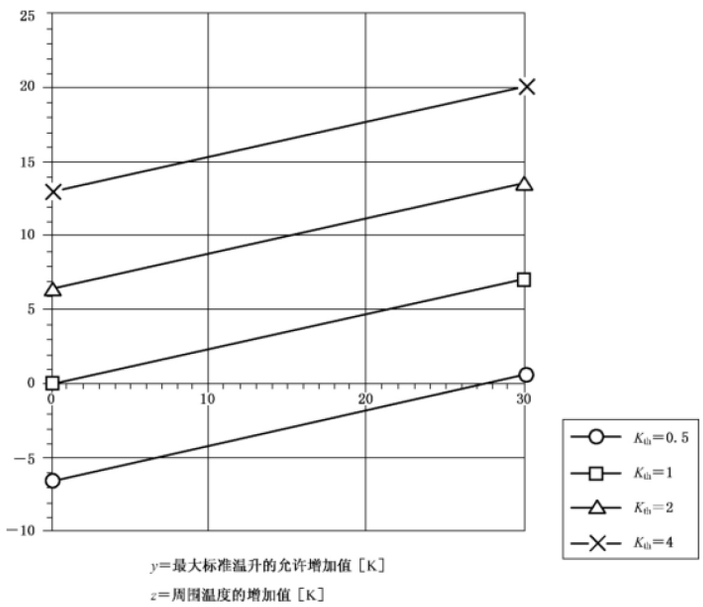
最后为：

$$K_{th}=2^{\left(\frac{z}{8.5}+\frac{y-z}{6.5}\right)}$$

此式可表示为：

$$y=6.5\,\frac{\ln K_{th}}{\ln 2}+\frac{2z}{8.5}$$

上式的图示见图 A.1。



注：此明显的不合逻辑的结论由下述情况产生：由于一个较小的电流通过触头产生了一个温升值，该值对于外部周围温度附加了 4.7 K，但作为内部周围温度（此值高于 20 K）之上的温升值将为较低值（20～4.7）K。

图 A.1　$y=f(z)$。具有 65 K 允许标准温升的触头举例：如果温度 θ_e（指外壳的温度，触头安装在此外壳中）上升 20 K，触头的允许温升可增加 4.7 K 而不会改变它的老化速率；如果触头的老化速率允许增加一倍，则它的温升可增加 11.1 K

附 录 B
（资料性附录）
金属和合金的物理特性

	符号	原子量	原子序数	密度 kg/m³	软化温度 ℃	熔化温度 ℃	硬度 10^8 Pa	温度 ℃	温度 K	比电阻 $10^{-8}\Omega\cdot m$	温阻系数 $10^{-3}k^{-1}$	比热 J/(kg·K)	热导率 W/(m·K)	总辐射率 努塞尔数	总辐射率 已氧化	备注
铜 （经退火）	Cu	63.546	29	8 889	190	1 083	3.5 至 7	0 20 36.85 60	273.15 293.15 310 333.15	1.588 1 1.724 1 1.838 1.995	4.265 3.93 3.69	382 386 389 394	390 387 382 378	0.05	0.7	硬拉铜 $\rho_{20℃}=1.759\times10^{-8}\ \Omega\cdot m$ 电缆中铜导线 $\rho_{20℃}=1.8\times10^{-8}\ \Omega\cdot m$
黄铜	70Cu,30Zn			8 530		915	~10	0 20	273.15 293.15	6 6.2	1.53 1.484	377	119 121	0.04	0.6	
铜钨合金	W,35Cu,0.5Ni			13 600			15	20	293.15	5.3	6		150	0.1	0.5	
铝 （A5L）	Al	26.981 5	13	2 700	150	658	1.5 至 8	0 20 36.85 60	273.15 293.15 310 333.15	2.6 2.826 4 3.02 3.28	4.383 4.03 3.77	881 891 900 910	202 203 204 205	0.07	0.6	铝导线电缆 $\rho_{20℃}=3.06\times10^{-8}\ \Omega\cdot m$
铝镁合金 （AG5L）	Al,0.5Mg,0.5Si			2 700		552		0 20 36.85	273.15 293.15 310	3.016 3.25 3.45	3.88 3.6 3.39	890	185	0.07	0.6	电缆铝镁合金 $\rho_{20℃}=3.3\times10^{-8}\ \Omega\cdot m$
铝合金 （AG3）				2 700				20	293.15	5.5		890	125	0.07	0.6	

表（续）

	符号	原子量	原子序数	密度 kg/m³	软化温度 ℃	熔化温度 ℃	硬度 10^8 Pa	温度 ℃	温度 K	比电阻 $10^{-8}\Omega\cdot m$	温阻系数 $10^{-3}k^{-1}$	比热 J/(kg·K)	热导率 W/(m·K)	总辐射率 努塞尔数	总辐射率 已氧化	备注
铍铜镁合金	Be,Cu,Mg			2 700				20	293.15	2.826	3.9	890		0.07		仍处在实验阶段的合金
银	Ag	107.868	47	10 500	180	962	2.6 至 6	0 20	273.15 293.15	1.47 1.59	4.08 3.77	234 235	418			
锡	Sn	118.69	50	7 300	100	232	0.45 至 0.6	0 20 60	273.15 293.15 333.15	11 12 14	4.47	223.5 226.4 232.2	62.8 62.5 62.0	0.08	0.55	非定形状态（β）
镍	Ni	58.71	28	8 900	520	1 453	7.0 至 20.0	0 20 60	273.15 293.15 333.15	5.9 6.84 8.73	6.9	398 412 442	95.2 92.5 87.8	0.02		纯镍
铜包铝	铜包铝（铜体积 15%）			3 630				20	293.15	2.65	4.1	710	240	0.05	0.7	触头表面相当于退过火的铜

GB/T 25840—2010/IEC/TR 60943:2009

附 录 C
（资料性附录）
流体介质的物理特性

	压力（巴）10^5 Pa	温度 ℃	温度 K	密度 ρ kg/m³	热导率 λ W/(m·K)	动力粘度 μ_d 10^{-5} Pa·s	压缩率 β 10^{-3} K^{-1}	比热 C_p J/(kg·K)	备注
空气	1	−23.15	250	1.413 3	0.022 27	1.599	4.017	1 005.4	
		0	273.15	1.292 8	0.024 19	1.728	3.67	1 005.6	
		20	293.15	1.205	0.025 85	1.822	3.40	1 006.3	
		46.85	320	1.103 3	0.027 79	1.939	3.131	1 007.3	
SF_6 六氟化硫	1.3	20	293.15	7.95	0.013 55	1.52	3.33	655	指示性值
	3	20	293.15	18.65	0.013 55	1.52	3.33	655	
	5	87.5	360.65	25.3	0.014 2	1.82	2.78	766	
	液体	20	293.15	1 371	0.150	29.1	7.1	1 557	
油	1	20	293.15	870	0.13	26	0.764	1 880	指示性值

附 录 D
（资料性附录）
触头金属与气体反应资料

金属	反应物	反应产品	所得氧化公式	单位的备注	资料来源	例子		
						温度 ℃	形成的厚度/$\times 10^{-10}$ m	
							1 000 h 后	100 000 h 后
铜	大气中氧气	Cu_2O	$s=\sqrt{{s_0}^2+t\cdot e^{\left(34.31-\frac{11\,700}{T_c}\right)}}$	s、s_0：埃 Å*（$s_0\approx$20Å 金属上随即形成的氧化层厚度） t = 时间，小时 T_c = 开氏温度（热力温度）	Rönnquist，由 Holm 引用（电接触，Springer 出版社）	20 55 60 85 100	21.7 35 39 87 150	37 170 210 690 1 300
铝	大气中氧气	Al_2O_3	在铝上形成的 Al_2O_3 氧化层厚度不超过 50Å，几秒钟后形成的初态氧化层可达 20Å，该薄层是绝缘的。为了实现电接触，必须击碎该薄层才能使电流通过。水蒸气的存在能促进薄层的增长，时间可达数月之久，但增长很慢。			50Å（不处理不能用作触头材料）		
锡	大气中氧气	SnO	$s=5.22\ln 47t\cdot e^{\left(7.92-\frac{2\,400}{T_c}\right)}$	s：埃 Å*， t：小时， T_c：开氏温度 （$s_0\approx$15Å）	Britton 和 Bright，冶金学，第 56 期（1957 年），第 163 页	20 55 60 85 100	42 103 114 188 250	61 146 162 260 360
镍	大气中氧气	NiO	$s=\sqrt{{s_0}^2+t\cdot e^{\left(4.68-\frac{1\,800}{T_c}\right)}}$	s：埃 Å*， t：小时， T_c：开氏温度 （$s_0\approx$10Å）	Pilling 和 Bedworth，由 Holm 引用（电接触，Springer 出版社）	20 55 60 85 100	15.5 21 22 27 34	150 210 220 270 340
银	H_2S 和亚硫蒸气	Ag_2S	$t<40$：$s=60t^{1/3}e^{\left(27.5-\frac{8\,000}{T_c}\right)}$ $40\leqslant t<70$：$s=0.121t^{2.57}e^{\left(27.5-\frac{8\,000}{T_c}\right)}$ $t\geqslant 70$：$s=3\,750t^{0.15}e^{\left(27.5-\frac{8\,000}{T_c}\right)}$	在 20 ℃时的饱和潮湿空气中含有 2%体积的硫化氢	Frischmeister 和 Drott，冶金学报，第 7 卷（1959 年 12 月），第 777 页	取决于亚硫蒸气的浓度。危险限值大约为 $1/10^9$（体积）		
	臭氧	Ag_2O	剩余层很薄（<10Å），200 ℃时分解，它的存在不影响接触			<10Å		
	大气中硫	Ag_2S	$s=\sqrt{{s_0}^2+t\cdot e^{\left(29-\frac{8\,000}{T_c}\right)}}$	s：埃 Å*， t：小时， T_c：开氏温度 （$s_0\approx$16 Å）	根据 W. E. Camp-bell，电接触，第Ⅲ卷，1972 年，第 185 页	不取决于湿度，但取决于空气流通速度。相对于 H_2S 或 SO_2，自由硫 S 的作用更明显		

* $1Å=10^{-10}$ m

附 录 E
（资料性附录）
接线端子附近通过辐射和对流冷却的导线温升

注 1：当公式编号前没有“E”字母时，此公式取自正文中同样编号的公式。
注 2：为了充分理解本附录内容，应研究附录 G 中参考虑文献[3]、[4]和[5]。

E.1 接线端子附近通过辐射和自然对流冷却的导线温升的方程式的分析推导

由于热流率密度 φ 可表示为 $\varphi=\gamma\Delta T_x^{\ \delta}$，微分方程可由式(E.1)表示：

$$\lambda_c S\frac{d^2(\Delta T_x)}{dx^2}-\gamma B\Delta T_x^{\ \delta}=0 \qquad \cdots\cdots(E.1)$$

计算后上述方程特殊解(对于 $\Delta T_x\to 0$ 满足极限条件 $\frac{d\Delta T_x}{dx}\to 0$)为：

$$\Delta T_x=\frac{A}{(x+C)^{\frac{2}{\delta-1}}}$$

式中：

$$\begin{cases}A=\left(\dfrac{2(\delta+1)\lambda_c S}{(\delta-1)^2\gamma B}\right)^{\frac{1}{\delta-1}}\\ C=\left(\dfrac{\gamma B A^{\delta}(\delta-1)}{W(\delta+1)}\right)^{\frac{\delta-1}{\delta+1}}\end{cases} \qquad \cdots\cdots(E.2)$$

由此可表示为：

——接线端子的补充温升：

$$\Delta T_0=\left(W\sqrt{\frac{\delta+1}{2\lambda_c S\gamma B}}\right)^{\frac{2}{\delta+1}} \qquad \cdots\cdots(E.3)$$

——距离常数 Δx（在该距离处温升除以 e)由下式给出：

$$\Delta x=\left(e^{\frac{\delta-1}{2}}-1\right)C \qquad \cdots\cdots(E.4a)$$

此式可由式(E.4b)表示：

$$\Delta x=(e^{\frac{\delta-1}{2}}-1)\times\frac{2^{\frac{\delta}{\delta+1}}(\delta+1)^{\frac{1}{\delta+1}}}{\delta-1}\times\frac{(\lambda_c S)^{\frac{\delta}{\delta+1}}}{(\gamma B)^{\frac{\delta}{\delta+1}}W^{\frac{\delta-1}{\delta+1}}} \qquad \cdots\cdots(E.4b)$$

或

$$\Delta x=K\times\frac{(\lambda_c S)^{\frac{\delta}{\delta+1}}}{(\gamma B)^{\frac{1}{\delta+1}}W^{\frac{\delta-1}{\delta+1}}}$$

K 作为 δ 函数取自表 E.1 中规定值：

表 E.1 作为 δ 函数的 K 值

δ	K
1.0	1.0
1.1	1.050
1.15	1.074
1.20	1.098
1.25	1.122
1.3	1.146

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

从方程式

$$\Delta T_0 = \frac{A}{C^{\frac{2}{\delta-1}}}$$

可以导出：

$$C = \left(\frac{A}{\Delta T_0}\right)^{\frac{\delta-1}{2}}$$

于是有：

$$\Delta T_x = \frac{A}{\left[x + \left(\frac{A}{\Delta T_0}\right)^{\frac{\delta-1}{2}}\right]^{\frac{2}{\delta-1}}} = \left[\frac{x}{\sqrt{\frac{2(\delta+1)}{(\delta-1)^2}\frac{\lambda_c S}{\gamma B}}} + \frac{1}{\Delta T_0^{\frac{\delta-1}{2}}}\right]^{\frac{-2}{\delta-1}}$$

和

$$\Delta x = (e^{\frac{\delta-1}{2}} - 1)\frac{1}{\Delta T_0^{\frac{\delta-1}{2}}}\sqrt{\frac{2(\delta+1)}{(\delta-1)^2}\frac{\lambda_c S}{\gamma B}}$$

上式可由式(E.4c)表示：

$$\Delta x = K' \frac{\sqrt{\frac{\lambda_c S}{\gamma B}}}{\Delta T_0^{\frac{\delta-1}{2}}} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (E.4c)$$

K' 作为 δ 函数由表 E.2 给出：

表 E.2　作为 δ 函数的 K' 值

δ	K'
1.0	1.0
1.1	1.051
1.15	1.077
1.20	1.103
1.25	1.130
1.3	1.157

E.2　模拟发热型式

E.2.1　引言

作为描述电气设备内发热过程的分析法或数字方程法的一种替换方式，也可使用既有效又相对简单的工具——模拟网络型式法。此方法以下述事实为基础，即以相同型式的微分方程描述热流和电流现象。例如，用于热传导的公式完全等同于欧姆定律：

$$q = \lambda_0 \frac{dT}{dx} \Leftrightarrow j = k \frac{dV}{dx}$$

由此发热量如比热流 q 和温度 T 分别相当于电气量的电流密度 j 和电压 V。一些元件如热阻器和电阻器也以类似的表示法进行描述。

在模型中，实际发热状态通过表 E.3 的电气量来表示：

表 E.3 当量值

	实际量	模型量
P	功率(W)	电流(A)
T	温度(K)	电压(V)
R	热阻($I/\lambda_e s$)	电阻(I/ks)

本方法的优点是不需要数学背景或复杂的计算机软件;此外,可更直接地识别与实际物理元件的关系。

为了有效地确定电工设备内的温度分布情况,需采取以下步骤:

——将设备细分至基本单元:基本单元的必要尺寸和特性由宏观(一维、二维或三维尺寸)结构和材料特性的变化来决定。

——对于连续过程(在正常负载状态期间)这些条件足够确定等效的电阻器值。对于非连续过程(如涌流或短路情况),尺寸的确定可由等效的电容器表示。在此情况下,细分至基本单元的正确尺寸主要由相关的时间标尺和时间节距来决定。为了得到发热时间常数 $t=RC$ 的低值(与时间节距相比),基本单元的尺寸应足够小。单元细分有利于评估模型全范围内的部件。

——确定热源、冷却功率、传导和储备:热源可能是触头收缩内的点源或径向连续的电气发热导线,更具体一些,热源可存在于熔断器内。介质损耗和太阳光热也可能影响到结果。对通过传导、对流和辐射方式实行的散热进行定位。

——电气等效元件的计算:电气发热按电流平方乘以电阻进行计算,此发热可能与温度有关。对于全部类似的热源,可选择等效的电源。代表热传导和热储备的无源元件的发热可立即从基本元件的尺寸中获得。

——模拟的实际操作:随着模拟型式的发展,实际模拟可以使用计算机程序进行。除了自己编写程序外、若干商用软件包可用于模拟操作

作为模拟型式的典型举例,沿着载流导线的温升可根据以下确定。

E.2.2 使用模拟型式确定触头附近载流导线的温度

作为分析方法(此方法已在附录 A 中以数字举例使用了 E.1 中的方程)的替换方式,下面使用的是以对热流和电流相同的描述为基础的模拟型式。

为了能比较结果,使用附录 A 举例中相同的条件。导线水平放置,有轻微氧化铜的表面(辐射率 $\varepsilon=0.1$ 和隧道比电阻 $\sigma_0=5\times10^{-12}$)不带绝缘。导线截面积 S=10 mm×10 mm,有效长度 1 m。导线一边以 $F=100$ N 力压在另一根导线上。导线承载 300 A 电流。考虑自然对流和强制对流($v=0.3$ m/s)。

相关的常数和尺寸集中列在下面,铜材料常数取自附录 B,20 ℃时的空气常数取自附录 C:

$I=300$ A	连续电流
$l=1$ m	铜母线长度
$S=10^{-4}$ m^2	铜母线截面积
$B=0.04$ m	散热导线外部周长
$D_h=0.01$ m	导线总高
$S_e=0.01\times0.2\times4$ m^2	0.2 m 导线部分的冷却表面积
$T_e=293.15$ ℃	周围空气的平均温度
ΔT_s	远离触头的导线温升
$p_0=1.558\ 1\times10^{-8}$ Wm	0 ℃时铜比电阻
$\alpha=4.265\times10^{-3}$ K^{-1}	铜温阻系数
$R_0=\rho_0//S=1.588\ 1\times10^{-4}$	0 ℃时导线电阻
$\lambda_e=387$ W/(m·K)	铜热导率

$\sigma=5.670\times10^{-8}\ \mathrm{Wm^{-2}K^{-4}}$　　斯蒂芬-波耳兹曼(Stefan Boltzmann)常数
$\varepsilon=0$ 至 1(这里 $\varepsilon=0.1$)　　铜导线辐射率
$M=1.205\ \mathrm{kg\,m^{-3}}$　　空气质量密度
$\beta=3.4\times10^{-3}\ \mathrm{K^{-1}}$　　空气压缩率
$g=9.81\ \mathrm{ms^{-2}}$　　重力加速度
$C_p=1\ 006.3\ \mathrm{Jkg^{-1}K^{-1}}$　　常压下空气比热
$\lambda=0.025\ 85\ \mathrm{Wm^{-1}K^{-1}}$　　空气热导率
$\mu_d=1.822\times10^{-5}\ \mathrm{Pa\,s}$　　空气动力粘度

为了运用模拟方法,应将母线分成 5 部分,每部分 0.2 m。

铜母线和相当的电气模式见图 E.1。

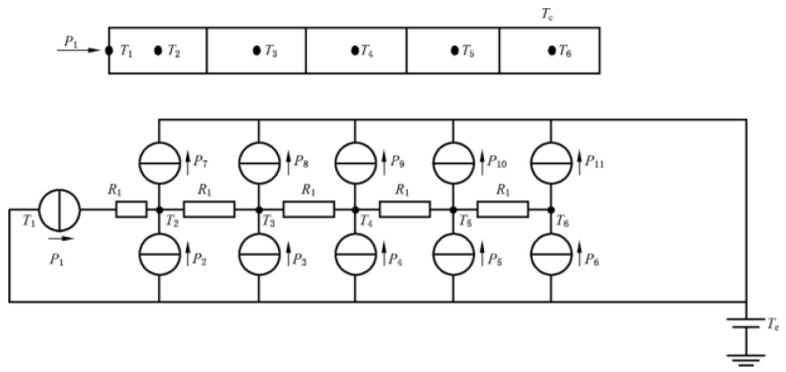


图 E.1　用于母线和电气模拟方法的发热模式

由直流电压源代表的环境温度为 $T_e=293.15$ K 。

由正电流源代表焦耳发热功率值 P_1 至 P_6,由负电流源代表功率损耗 P_7 至 P_{11}。

a)　确定热源

计算触头电阻,使用式(7):

$$R_c=\frac{\rho}{2na}+\frac{\sigma_0}{n\pi a^2} \qquad \cdots\cdots(7)$$

铜材料常数取自附录 B:

$\rho=1.8\times10^{-8}\ \mathrm{Wm}$　　导线比电阻
$\sigma_0=5\times10^{-12}\ \mathrm{Wm^2}$　　触头表面隧道比电阻
$n=n_k H^{0.625} F^{0.2}$　　基本触头点数量
$n_k=2.5\times10^{-5}$
$H=5.5\times10^8$　　触头硬度
$\xi=0.15$　　平面度系数
$a=\sqrt{\dfrac{F}{n\pi\xi H}}$　　基本触头半径

代入数值后得到 $n=18$ 和 $a=0.086$ mm 及触头电阻 $R_c=18\ \mu\Omega$ 。

热流 W 从触头向导线逸散:

$$W=\frac{1}{2}R_c I^2=0.81\ \mathrm{W}$$

用等效的电气量电流源 P_1 代表热流 W:

$$P_1 = \frac{1}{2} R_c I^2 = 0.81 \text{ A}$$

电流源 $P_2 \cdots P_6$ 代表导线每 0.2 m 部分的焦耳损耗(取决于现场温度),即:

$$P_2 = I^2 \frac{l}{5S} \rho_0 [1 + \alpha (T_2 - 273.15)]$$

代入相关值后得到 $P_2 = -0.471\ 6 + 0.012\ 19 T_2$。

用相似方法可得到 P_3 至 P_6 值。

b) 铜母线各段电阻的表示

由电阻 R_1 表示铜母线各段热阻:

$$R_1 = \frac{l}{5\lambda_c S} = \frac{0.2}{387 \times 100 \times 10^{-6}} = 5.168\ \Omega$$

c) 通过对流和辐射冷却的表示

远离触头处(该处以对流/辐射平衡焦耳功率)导线温升 ΔT_s 由式(10)表示:

$$\Delta T_s = \frac{[(T_c + \Delta T_s - 273.15)\alpha + 1] R_0 I^2 + r\varphi_s S_r}{Bl \left[\sigma \varepsilon \dfrac{(T_c + \Delta T_s)^4 - T_c^{\ 4}}{\Delta T_s} + \dfrac{\lambda}{D_h} N_u \right]} \quad \cdots\cdots (10)$$

对于自然对流,室内一般情况下的触头和接线端子的努塞尔数为:

$$N_u = 0.8 (G_r P_r)^{0.05} + 0.35 (G_r P_r)^{0.27} \quad \cdots\cdots (11a)$$

式中:

$$G_r P_r = \frac{M^2 \beta g C_p D_h^{\ 3} \Delta T_s}{\mu_d \lambda} \quad \cdots\cdots (11b)$$

当电流为 $I = 200$ A 和 300 A 两个值时,温升 ΔT_s 和热流 φ 可从式(10)、式(11a)和式(11b)确定:

I A	ΔT_s K	φ Wm^{-2}
300	36.45	443.4
200	17.55	184.3

如果假定方程式 $\varphi = \gamma \Delta T^{\delta}$,则可导出常数 $\gamma = 5.9$ 和 $\delta = 1.2$。

在强制对流情况下,宜使用式(12a)和式(12b)计算努塞尔数:

$$N_u = 0.65 R_E^{0.2} + 0.23 R_E^{0.61} \quad \cdots\cdots (12a)$$

式中:

$$R_E = \frac{M_V D_h}{\mu_d} \text{(雷诺数)} \quad \cdots\cdots (12b)$$

对于强制对流($v = 0.3$ m/s),温升 ΔT_s 和热流 φ 可从式(10)、式(12a)和式(12b)确定。代入 $I = 300$ A 和 200 A 两个值,得到:

I A	ΔT_s K	φ Wm^{-2}
300	20.48	419
200	8.73	178

如果再假定方程式 $\varphi = \gamma \Delta T^{\delta}$,分别可导出常数 $\gamma = 20.3$ 和 $\delta = 1.0$。

对于每部分 0.2 m 导线,总热流等于 φ 乘以冷却表面积 S_c。通过对流/辐射的冷却功率由电流源 $P_7 \sim P_{11}$ 表示。

$$P_7 = S_c \gamma \Delta T^{\delta}$$

对于自由对流,使用参数 $\gamma = 5.9$ 和 $\delta = 1.2$:

$$P_7 = 0.047\ 2\ (T_2 - T_e)^{1.2}$$

对于强制对流（$v = 0.3$ m/s），使用参数 $\gamma = 20.33$ 和 $\delta = 1.0$：

$$P_7 = 0.162\ 6\ (T_2 - T_e)$$

用相似的方法可得出 $P_8 \sim P_{11}$ 值。

最终模拟结果见图 E.2。

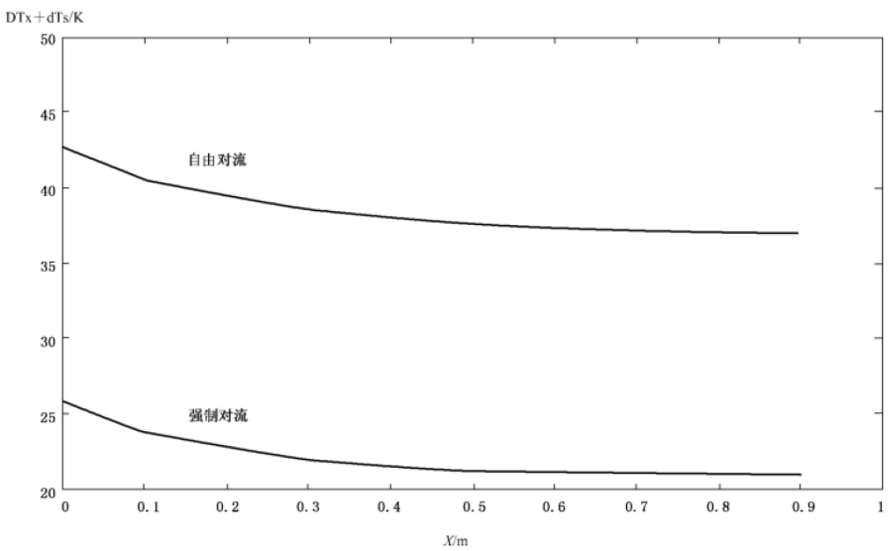


图 E.2　沿铜导线递减的温升

附 录 F
（资料性附录）
本标准使用的符号表

符 号	名 称	单 位
A	阿伦尼乌斯定律系数	K
A'	阿伦尼乌斯定律常数	K
a	基本触头半径	m
B	散热导线的外部周长	m
C_{th}	标称电流修正系数	
D_h	通向触头的导线直径或任何段导线的总高	m
e	指数系数	2.718
F	触头力	N
G_r	格拉肖夫(Grashof)数	
g	重力加速度	9.81 ms^{-2}
H	触头硬度	Pa
K_{th}	总老化系数(电流修正系数)	
K_e	用于周围温度变化的老化系数	
K_i	用于温升变化的老化系数	
k	波耳兹曼常数	1.381 E-23 JK^{-1}
k_1,k_2	触头电阻/力公式中的常数	
l	基本触头之间的平均距离	m
l	导线长度	m
M	周围流体密度	kg m^{-3}
N	努塞尔数	
n	基本触头点数	
n_k	基本触头数计算系数	2.5E-5(SI)
P	持久额定值时的运行寿命	年(月)
P_r	普朗特(Prandtl)数	
$R_{(a,l)}$	离收缩半径 a 距离 l 处的电阻	Ω
R_c	触头总电阻	Ω
R_e	触头集中电阻	Ω
R_i	触头薄膜电阻	Ω
R_0	在 0 ℃时导线长为 l (m)的线性电阻	Ω
r	日光通量接收系数	$0 \leqslant r \leqslant 1$
S	导线截面积	m^2
s	氧化层厚度	m
S_n	有效接触面积	m^2
S_r	接受 φ_s 的导线表面积	m^2
T,θ	温度	K 或℃
T_s,θ_s	周围空气温度	K 或℃
T_{sn},θ_{sn}	标准周围空气温度	K 或℃
T_c,θ_c	触头温度	K 或℃
T_e,θ_e	围绕元件的流体平均温度	K 或℃
T'_e,θ'_e	围绕部件的流体平均温度	K 或℃

表（续）

符　号	名　　称	单　位
T_{e1}，θ_{e1}	特定平均温度	K 或℃
T_{e2}，θ_{e2}	特定平均温度	K 或℃
T_n，θ_n	元件最大允许标准温度	K 或℃
T'_i	绝缘温度	K 或℃
T_s，θ	导线标准温度	K 或℃
t	时间	s
W	通过接线端子向导线逸散的功率	W
w	氧化反应的激化能	J
x	距离	m
X	晶格填充系数，薄膜厚度常数	
y	容许的标准温升增加值	K
z	围绕元件空气的温升增加值 $z=\Delta T'_e$	K
α	导线材料电阻的温度系数	K^{-1}
β	常压下周围流体的扩张系数	K^{-1}
γ	辐射系数	k
Δ_e	增加周围温度的倍常数	K
Δ_i	作为触头温升函数的倍常数	K
ΔT	与周围空气温度 T 有关的温升	K
Δt_e	围绕元件的与外部周围温度有关的介质温升	K
ΔT_i	与环境流体有关的元件温升（平均值）	K
Δt_{i1}	与周围环境有关的温升（初始）	K
ΔT_{i2}	与周围环境有关的温升（最终）	K
$\Delta T'_i$	与周围环境有关的温升	K
$\Delta\tau_l$	离接线端子距离为 Δl 处的温度降	K
ΔT_n	与周围温度 T_m 有关的元件最大允许标准温升	K
$\Delta\tau_p$	收缩引起的基本触头处温升	K
$\Delta\tau_s$	触头不存在时或离触头很远处的导线温升	K
$\Delta\tau_x$	离触头距离为 x 处的温升	K
ΔT_0	$x=0$ 时的 ΔT_x 值	
Δx	间距常数	m
δ	公式 $\varphi=\gamma\Delta T^{\delta}$ 中 ΔT 的指数	$0<\varepsilon<1$
ε	导线的总辐射率	
λ	周围流体的热导率	$Wm^{-1}K^{-1}$
λ_c	导线的热导率	$Wm^{-1}K^{-1}$
k	电导率 $=1/\rho$	$\Omega^{-1}m^{-1}$
x	平面度系数	
ρ	比电阻	Ωm
ρ_0	0 ℃时比电阻	Ωm
s	斯蒂芬-波耳兹曼常数	5.67E-8
s_0	氧化层的隧道比电阻	Ωm^2
j	导线表面的热流率密度	Wm^{-2}
j_s	热流率的日光密度；	Wm^{-2}

附 录 G
（资料性附录）
参 考 文 献

[1] Holm R. 电接触(1967 年第 4 版). Springer 出版社.
[2] Llewellyn Jones. 电接触的物理学(1957 年). 牛津:Clarendon 出版社.
[3] Johannet P. 专用通讯.
[4] Britton 和 Bright. 冶金学,第 56 期(1957 年),第 163 页.
[5] Frischmeister 和 Drott,冶金学报,第 7 卷(1959 年 12 月)第 777 页.
[6] Campbell W E. 电接触,第Ⅲ卷,1972 年,第 185 页.

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