

[温升试验]

低压电器温升试验影响因素分析

文/温州海关综合技术服务中心低压电器实验室 叶小木 王建新

分析了低压电器产品主电路和电磁线路温升试验影响因素，提出了周围空气温度和电磁电压线圈影响低压电器温升试验的理论依据，并给出了相应问题的解决方法。

在低压电器产品的实际使用过程中，经常出现产品因发热烧坏的情况，特别是大电流产品，而造成烧坏的很大部分原因是产品长期通电引起产品部件温升异常。在实验室的测试过程中，发现影响低压电器温升试验的因素有很多。本文从主要因素入手，对各个可能的影响因素进行理论分析，通过物理量化数据对比，从不同角度理解温升试验的本质。目的是探讨如何在实验室现有条件下，能够严格按照标准控制低压电器温升试验的干扰因素，使得试验满足预期要求。标准更新的另一个观点，就是在严格的基础上如何简化试验装备和电路及引进新技术。

温升试验

1. 主电路温升试验

主电路的热源就是其接触面的电阻（或熔断体的电阻）通过电流产生的热量，经过接线端向外扩散。主电路的发热与温度分布如图1所示。

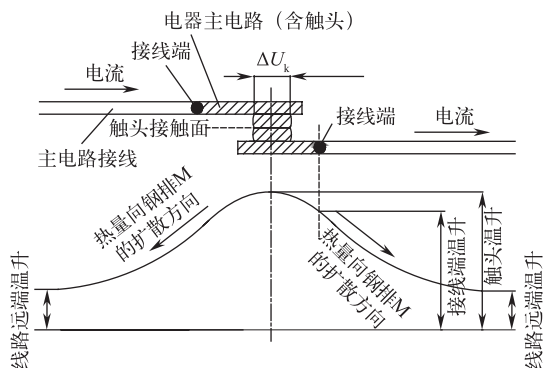


图1 主电路的发热与温度分布

接触部位的发热功率为

$$P = I \times \Delta U_k \quad (1)$$

式中， I 为电流； ΔU_k 为接触部分电阻压降。

功率 P 除依靠其自身散热外，经过接线端 T 向连接铜排传导，然后由铜排向周围空气散热。

由于开关的接触部位（或熔断体）处于封闭的壳体内，其散热作用是微弱的，因而热量向铜排传输，铜排的散热对温升的影响起重要作用，这样，标准试验给定了以下可比性的试验电路。

(1) 三相试验电路

根据标准要求，三相试验电路及其运作参数如图2所示。

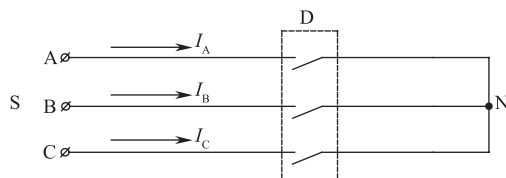


图2 温升试验三相电路

S—三相电源 D—被试电器 I_A 、 I_B 、 I_C —三相电流

标准对不同电流下的导体截面积（ A_{cu} ）、铜排尺寸（宽×厚）、线间的空气间距、表面涂色和接线长度都有具体规定，因为它们对导体的热传导和散热对产品的温升都具有直接影响，可做到试验的同一性和可比性。

多极电器要采用三相电源的原因是各相电流（ I_A 、 I_B 、 I_C ）间存在不可忽略的邻近电磁效应，影响其发热，三相电源的线电流角差则是 180° ，因而

其电磁效应和发热不能获得一致。严格地讲，如果要保持三相电流相角差 120° ，就必须将其终端的中性点(N)连接至电源中性点。标准还提出：“如果电磁效应能够忽略，经制造厂同意，可以将所有极串联起来通以单相电源进行试验”。

经有关单位对某些电器进行试验验证，额定电流400 A及以下的产品，其电磁效应可以忽略，但是各种各样的产品其电磁结构都不一样，且在日新月异的今天，所以这一论断是否可以普遍适用，尚有待于进一步验证。

(2) 连接导体传热作用对温升的影响

开关接触部位产生的热源P经过接线端向连接导体传递，然后在外部导体向周围空气散发，热场分布如图3所示。

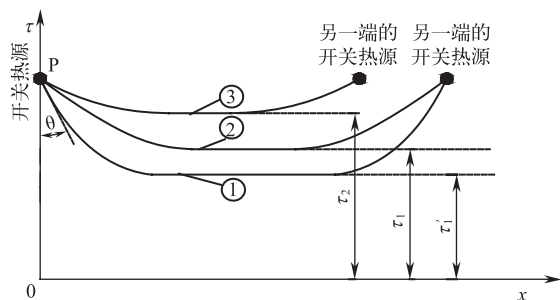


图3 连接导线的热信号曲线

接线端向导体传递的热为

$$\phi = -\lambda A \frac{d\tau}{dx} \quad (2)$$

式中， ϕ 为热通量，单位为W/K； λ 为导热系数，单位为W/(cm²·K)；A为铜导体截面积； $d\tau/dx$ 为铜导体单位长度的温差。

热量通过传导在导体的表面向外散出，其关系为

$$-\lambda A d\tau = \alpha S d\tau dx (W) \quad (3)$$

式中， α 为综合散热系数，含对流和辐射，单位为W/(cm²·K)；S为导体单位长度的散热面积。

图3表示连接导线不同情况下的热传导和散失，它们之间的关系如下述。

根据式(3)，以P为起点的温升衰减曲线为

$$\tau = (\tau_0 - \tau_k) e^{-\frac{\alpha S}{\lambda A} x} + \tau_k = (\tau_0 - \tau_k) e^{-qx} + \tau_k \quad (4)$$

式中， $q = \frac{\alpha S}{\lambda A}$ ； τ_0 为距离开关热源为0时的温升； τ_k 为导体固有温升，即无外来热源下通以电流I的自

然温升，对于曲线① $\tau_k = \tau_1$ ，曲线② $\tau_k = \tau'_1$ 。

曲线①和②，导体截面积不同，散热条件不同。

对于曲线①，自P点传出的热量为

$$\phi_0 = -\lambda A \left(\frac{d\tau}{dx} \right)_{x=0} = -\lambda A \frac{\alpha S}{\lambda A} (\tau_0 - \tau_1) = \alpha S (\tau_0 - \tau_1)$$

对于曲线②

$$\phi'_0 = \alpha S (\tau_0 - \tau'_1)$$

对比可知，导体的固有温升愈低，则传出的热量愈大，反之亦然。因此标准对铜线的尺寸、布置和涂色都有严格要求，做到试验的可比性、同一性，其中涂黑色无光漆是提高其辐射散热作用。

标准的另一要求是两接线端的长度，其目的是两端曲线的温度在其中性点均已衰减至 τ_k 。

根据式(4)，达到这一目的条件是

$$e^{-\frac{\alpha S}{\lambda A} x} \approx 0, \quad -\frac{\alpha S}{\lambda A} x \approx 4, \quad x = 4 \times \frac{\lambda A}{\alpha S}$$

满足这一要求，则两个热源之间不会形成相互干扰，另一个热源的温度不影响开关接线端的温度。随着电流-截面积的增加，A/S值也增加，因而其连接线长度也要随之增加，如标准所述。如果另一接线端为星形接点，不存在热源，接线的长度可以缩短，同理，如果另一热源（电源端）的温升低于两端中性点的温升，则接线长度可以缩短到同一程度。必须注意，图3三根曲线的起始点 τ_0 因传出热量的不同，并非在同一水平线，图上所示只是为了便于作比较。

这种试验方法与实际使用情况相比较，应认为处于偏宽，但标准对接线端的温升极限作了较低的限制。接线端的温升其实已反映了触头的温升，虽然后者要高于前者，为简化测试，现行IEC标准不要求直接测量触头的温升，用接线端温升来代替，只是作了以下原则性提示：“温升应不危及电器的邻近部件和载流部件，特别是对绝缘材料”。对触头的温升测定和允许极限并无具体要求。

2. 电磁线路的温升试验

电磁线路的温升不是直接测量，而是根据线路材料每升高1℃的电阻变化来加以换算

对于铜材，电阻温度系数=0.004 26=1/234.5，线路温升可以用下式换算得出

$$T_2 = \frac{R_2}{R_1}(234.5 + T_1) - 234.5$$

式中， T_2 为热态温度； T_1 为冷态温度； R_2 为热态电阻； R_1 为冷态电阻

温升 $\tau = T_2 - T_1$ 。

必须注意：

1) 用上式换算得出的温升是整个线圈的平均温升，不是最热点温升，最热点是在线圈的内部，难以直接测量，线圈表面层的温升虽然可以测量，但却是其最低温升。

2) 热态电阻必须在断电后瞬间测量，否则就影响其准确度。

允许的温升极限应根据线圈绝缘材料的耐热等级来确定，参考数据见表1。

表1 参考数据

耐热等级	A	E	B	F	H
温升极限/K	85	100	110	135	160

3. 周围空气温度

标准对温升试验的周围空气温度的要求是：应在10~40℃之间，变化不超过10 K。空气温度对温升影响的通常认识是，工作温度升高，导体的电阻增加，发热功率随之增加，导致温升升高。允许在加宽的范围内进行试验，其结果是否一致、正确，对于这一问题，需要理解空气温度对导体发热的关系。铜的电阻温度系数为0.004 3 (/℃)，银钨等触头材料为0.003 9~0.005，如果温度相差30℃，则发热功率相差约13%。

导体的发热通过表面向空气散发，热平衡关系为

$$P = \alpha S \tau (W) \quad (5)$$

式中， α 为综合散热关系，单位W/(cm²·K)； S 为散热面积 (cm²)； τ 为温升，单位为K； P 为导体的发热功率，单位为W。

如果工作温度提高，则 P 以0.43%/℃的比率增高；如果是常数，则温升 τ 以同样比率增高，如果空气温度相差30℃，则温升将同样相差13%。

但综合散热系数 α 并不是一个常数，而是随工作温度变化而变化。

物体热的散发是由对流和辐射两部分组成，综合散热作用与温度的关系如下。

对流散热

$$Q_c = 2.55 \times 10^{-4} (T - T_0)^{1.25} (W/cm^2) \quad (6)$$

式中， Q_c 为单位面积散出的热功率； T 为导体的工作温度； T_0 为空气温升

在温升 $\tau = T - T_0$ 不改变的情况下 Q_c 不变

辐射散热

$$Q_r = 5.7 \varepsilon \left[\left(\frac{T + 273}{1000} \right)^4 - \left(\frac{T_0 + 273}{1000} \right)^4 \right] (W/cm^2) \quad (7)$$

式中， Q_r 为单位面积辐射散出的热功率； ε 为辐射系数，与材料及其颜色有关。

热平衡关系

$$\Sigma Q = Q_c + Q_r = P_a = \frac{P}{S} (W/cm^2) \quad (8)$$

P_a 为导体单位面积的发热功率

Q_r 与绝对温度(温度℃+273)呈4次方关系， T 和 T_0 增加， Q_r 随之增加，对温升起抑制作用，如果 ΣQ 的增幅与发热功率的增幅基本持平，则温升将不因空气温度的改变而改变。对于涂黑色的铜排，辐射系数 $\varepsilon \approx 0.9$ 。铜排温升 τ 以起点的极限值60 K逐渐下降至25 K，在空气温度10~40℃范围内， ΣQ 与 P_a 的关系见表2。

表2 ΣQ 与 P_a 的关系

温升 / K	温度/℃		散热功率 / (10 ⁻⁸ W/cm ²)			相比值		
	T_0	T	Q_c	Q_r	ΣQ	ΣQ	P_a	比差 (%)
60	10	70	4.258	3.713	7.97	1	1	0
	20	80		4.08	8.34	1.046	1.043	0.29
	30	90		4.466	8.724	1.095	1.086	0.79
	40	100		4.88	9.138	1.147	1.129	1.55
50	10	60	3.39	2.94	6.33	1	1	0
	20	70		3.24	6.63	1.047	1.043	0.42
	30	80		3.55	6.94	1.096	1.086	0.95
	40	90		3.88	7.27	1.148	1.129	1.73
40	10	50	2.565	2.233	4.80	1	1	0
	20	60		2.465	5.03	1.048	1.043	0.47
	30	70		2.705	5.27	1.098	1.086	1.1
	40	80		2.966	5.531	1.152	1.129	2.06
30	10	40	1.79	1.595	3.385	1	1	0
	20	50		1.757	3.547	1.048	1.043	0.47
	30	60		1.936	3.726	1.10	1.086	1.29
	40	70		2.121	3.911	1.155	1.129	2.34

周围空气温度增加,辐射散热随之增加,综合散热功率 ΣQ 与发热功率 P 的可平衡度在2%以下,在空气温度 $10\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化下,试验结果在工程允许误差范围。

4. 电磁电压线圈发热对电流-温升的影响问题

电磁线圈温升试验是通以恒定电压,线圈升温,电阻随之增加,因而可能存在以下问题:

1) 电阻的增加是否会影响电流下降,而周围空气温度的不同,对其影响则又是不一样的。电磁线圈属于高电感性,其功率因数在0.15以下,如果因空气温度有 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相差,则电阻相差13%,以 $\cos\varphi=0.15$ 为例,电流的相差为

$$\frac{I'}{I} = \frac{\sqrt{0.988^2 + 0.169^2}}{\sqrt{0.988^2 + 0.15^2}} = 1.0031$$

只有0.31%的相差,因而这一影响可以忽略不计。

2) 电磁线圈表层用绝缘带包扎,不可能是黑体,其辐射能力大大降低,因而1.3条款的分析便不能适用。如从严考核,则可忽略辐射散热,用式

(6)、式(8)将 P_0 换算至空气温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的增幅,然后将试验结果以同比增加。

结束语

本文分析了接触面电阻和传热性能对电压电器主电路温升的影响,电磁线路的温升试验测试的考虑事项,整理了周围空气温度和电磁电压线圈影响低压电器温升试验的理论依据,对各种影响因素进行了综合整理,实验室可根据不同的影响因素比重在实际设备选择和测试站场地建设中更好的科学管控,并为试验人员提供了理论分析依据,可供有关实验室参考。EA

(收稿日期:2021-12-29)

参考文献

- [1] 陈一民,李宏文,张小青,等. 低压塑料外壳式断路器接线端子温升影响因素研究[J]. 低压电器,2009(13): 10-12.
- [2] 杨文强,张蓬鹤,张保亮. 小型断路器温升预测与仿真分析[J]. 电器与能效管理技术,2020(6): 25-29.
- [3] 侯国斌,邓晓峰,吴艺红,等. 电力开关设备温升仿真研究综述[J]. 电器与能效管理技术,2017(11).

第八届全国电气工程师论文大赛 征文通知

征文主题

出于可持续发展的必然要求,以及中国“碳中和”目标的提出,新能源及新技术的发展目标油然而生。加强技术合作和集成创新对实现新能源的发展和应用具有重要意义。本届论文大赛将通过征文的形式,围绕“低碳 高效 创新”这一主题,搜集并发掘相关的知识与经验,并面向业界做进一步推广。

征文范围

- (1) 体现“新能源和新技术”的理论研究及相关实用技术应用。
- (2) 风力发电、光伏发电等新能源相关技术探讨,分布式能源并网的技术原则和方案设计。
- (3) 全面展示输电、变电、配电、用电各个环节最新节能产品、技术成果和解决方案。
- (4) 建设新型电力系统的应用技术方案和工程案例。
- (5) 储能技术领域的最新研究进展和解决方案。
- (6) 电气设备系统集成和变频节能技术的解决方案。
- (7) 节能减排、安全环保的应用电气技术及解决方案。
- (8) 电气节能创新技术的自主研发及相关应用案例。



扫描二维码
查看通知详情

