

高等学校交流讲义

电 器 学

下 册

华中工学院电机电器教研室編著

只限学校内部用书



中国工业出版社

本书分上下两册，在上册中讲述磁系统的理论及计算和非线性电器元件的理论基础；而本册则介绍开关电器理论的计算基础，其中包括电器的发热、电器中的电动力、电弧理论与熄弧装置，以及开关电器的机构分析等内容。

本书系华中工学院电机电器教研室编著。可作为高等工业学校电器专业或电机与电器专业“电器学”课程的教材，亦可供电器制造的工程技术人员参考。

电 器 学

下 册

华中工学院电机电器教研室编著

*

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张 $12\frac{1}{4}$ ·字数282,000
1961年9月北京第一版·1961年9月北京第一次印刷
印数0001—3,337·定价（10-6）1.50元
统一书号：15165·686（一机-102）

前 言

“电器学”分为上下两册出版。下册专门讲开关电器理论计算基础，由华中工学院电机电器教研室电器学小组在原有电器学讲义的基础上编写的。

作为开关电器的理论及计算基础，本册书中讲到了：

1. 电器的发热；
2. 电器中的电动力；
3. 电弧理论及熄弧装置；
4. 电接触理论；
5. 电器机构静特性分析；
6. 电器机构动特性分析及缓冲阻尼装置。

为了使读者了解这些理论在电器整个结构设计中的应用，在讲这些理论问题之前，先讲一章引论，在那里简单叙述了开关电器的结构、任务，并说明了有这些共同性理论问题的原因。作为开关电器的理论基础，尚有绝缘理论、各种电磁机构的动作原理、特性及计算方法，以及各类电器的结构、功用等，这些都将在其他教材中叙述。

作为负责编写的单位，我们感到的学识浅薄，教学经验不够，尤其是出版时间仓促，来不及对原有的讲义稿加以详细的核对及加工整理，所以本书中当存在不少缺点，甚至有错误的地方；希望读者发现后，能即时向我们指出，以便以后改进。假若采用本书作为教材，更希望随时将使用过程中的情况告诉我们，将不胜感谢之至。

目 次

前 言

第一章 引 論

- 第一节 概 述..... 1
- 第二节 低压自动开关..... 2
- 第三节 10仟伏少油断路器..... 3
- 第四节 开关电器的共同理論性問題..... 5

第二章 电器的發热

- 第一节 概 述..... 7
- 第二节 电器各部分的允許溫度..... 7
- 第三节 电器的發热..... 10
- 第四节 电器的散热..... 16
- 第五节 各种工作情况下电器的热計算..... 18
- 第六节 导体和繞圈的热計算... 22
- 第七节 短路时导体的热計算... 25
- 第八节 电器的热穩固性..... 28
- 第九节 导体截面变化时的热計算..... 28
- 第十节 电弧作用在导体(触头)表面时的热計算..... 30
- 第十一节 导体端部析出能量时的短时發热..... 32
- 第十二节 电器的强迫冷却..... 33
- 第十三节 电器温升測量及求法... 33

第三章 电器中的电动力

- 第一节 概 述..... 37
- 第二节 計算电动力的基本方法..... 37
- 第三节 圓形导体作各种布置时的电动力与回路系数... 39
- 第四节 用图解法計算电动力... 43
- 第五节 导体截面对电动力的影响与截面系数..... 45

- 第六节 帶流导体在鉄磁体附近所受的电动力..... 49

- 第七节 导体截面改变与触点間的电动力..... 52

- 第八节 單相交流电流下的电动力..... 55

- 第九节 三相交流电流的电动力..... 57

- 第十节 机械共振..... 61

- 第十一节 电器的电动穩固性..... 61

第四章 电弧理論与熄弧装置

- 第一节 概 述..... 63

- 第二节 电器中电弧的基本物理过程..... 64

- 第三节 直流电弧特性..... 70

- 第四节 电弧的热平衡方程式... 75

- 第五节 电弧能量.....

- 第六节 直流电弧和它的熄灭... 81

- 第七节 交流电弧和它的熄灭... 86

- 第八节 电器的熄弧方法与装置..... 98

第五章 电接触理論

- 第一节 概 述.....109

- 第二节 接触电阻.....112

- 第三节 各种物理因素对接触电阻的影响.....116

- 第四节 触头的机械振动.....123

- 第五节 接触联结的工作情况和磨損.....131

- 第六节 触头电磨損的計算.....136

- 第七节 接触联结所用的材料...142

第六章 电器机构靜特性分析

- 第一节 概 述.....149

- 第二节 四連杆联动机构及其特性.....153

第三节	直綫运动机构.....	159	第四节	电器关合时的关合功...	173
第四节	空間联动机构.....	162	第五节	电器可动部分的开断过	
第五节	脱扣机构.....	163	程.....	174	
第七章	电器机构的动特性分析与缓		第六节	用图解近似积分法求电	
	冲阻尼装置		器可动部分的动特性...	175	
第一节	概 述.....	167	第七节	掣动装置的作用原理及	
第二节	作用力及质量的計算与		結構.....	178	
	归化.....	167	第八节	电器可动部分掣动过程	
第三节	电器可动部分的关合过		的分析.....	186	
	程.....	171			

第一章 引 論

第一節 概 述

在本書上冊中講過了磁系統的理論及計算和非線性電器元件的理論基礎；本冊中將講述開關電器理論計算基礎。

開關電器是一種在正常情況與故障情況下能自動地或非自動地開斷與閉合電路的一種電氣裝置。在這類電器中，有結構簡單的刀開關；有結構複雜的高壓空氣斷路器；有電流小、切斷能力小的所謂弱電流電器（如繼電器）；還有電流大、切斷能力大的強電流電器；有電壓甚低，在1000伏以下的低壓電器，也有電壓超過110千伏的所謂超高壓電器。從重量方面講，它們有的不到一公斤，有的重達百噸以上；從體積方面講，它們有的比火柴盒還要小，有的高達十餘米，長與寬均在數米以上。這類電器品種繁多，結構上的差別也是很大。

開關電器雖然結構上差別甚大，在電路中使用时彼此所負擔的任務有時也有很大的不同，但它們在結構上及動作原理上仍有其共同的問題。一般地說，開關電器是串聯在電路中，在各種要求下，在各種條件下來執行它們關合或分斷電路，控制電路中電量的任務。開關電器主要有下列四種工作狀態：

1. 在關合位置。此時，全部導體是帶電的，電流流過電器導體部分。在這種情況下，帶電部分與地間、不同極的帶電導體間均承受有電壓，而且正常電流與短路電流流過導體時要使電器發熱和產生機械力。

2. 切斷電路也就是分斷的過程。開關電器要在不同情況下切斷電路：有要求在正常電流下切斷電路的；有要求在短路電流下切斷的；也有規定只能在無電流通過時切換電路的。在有電流通過的情況下切斷電路時，一般要產生電弧。電弧本身具有很大的破壞力，不能讓其長期存在。在某些情況下，電路對於電器切斷電路的時間有很高的要求。一般地說，開關電器切斷電路是它們最嚴重的任務。

3. 在斷開位置。此時，開關電器在電路中形成斷點，使電流不能流過，或者使電路某部分的導體與其他部分導體隔離。在這種情況下，斷點間要承受電壓。

4. 關合電路也就是合閘的過程。開關電器視其任務不同，要求在不同情況（大電流、小電流、無電流）下關合電路。有時候，電路對電器關合電路的時間有具體的要求。

電器要在各種條件下工作，在使用過程中，要接受電的、熱的、機械的、自然條件的以及老化等作用，假如這些作用超過了電器本身在這方面所能承受的能力，則電器就會損壞。因此，電器工作者就要研究電器中的絕緣問題、發熱問題、機械強度問題、自然條件對電器性能的影響及電器的壽命等問題。

為了在開關電器品種複雜、類型繁多的情況下，能根據它們的任務、它們的工作情況，以及電路對它們的要求，找出其共同性的理論問題加以研究，因此我們先來了解下面兩節內所介紹的兩種電器的工作原理與結構。

第二節 低壓自動開關

低壓自動開關是低壓配電裝置中應用最廣泛的一種電器。可以用於直流和交流額定電壓在500伏以下的電路中。能在正常電流、過載電流以及短路電流下開斷電路。

這種開關可以在電路的下列非正常情況下自動分斷，對電路及其中設備起保護作用。

1. 電路發生短路故障時；
2. 電路中電流超過規定的電流值時（即過載）；
3. 電路中電流低於規定的電流值時；
4. 電路中電壓低於規定的電壓值時；
5. 電路中功率反向時。

在這些情況下都是通過過載脫扣器、失壓脫扣器等保護元件的作用使自動開關來開斷電路。

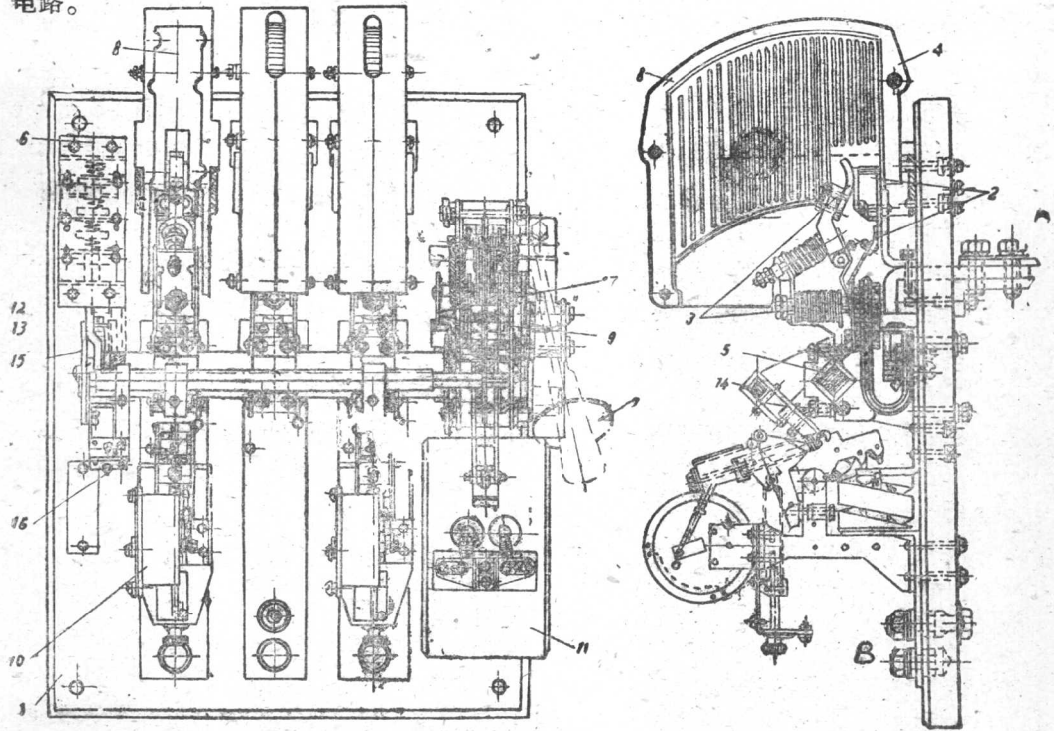


圖 1—1' 三極低壓自動開關的結構。

1—絕緣板；2—靜觸頭；3—動觸頭；4—帶有滅弧柵片的滅弧室；5—主軸；6—轉換開關；7—操作手柄；8—滅弧柵片；9—自由脫扣機構；10—過載脫扣器；11—脫扣延時裝置；12—開斷彈簧；13—緩沖器；14—小軸；15—軸承座；16—接觸彈簧；17—鎖鈎。

圖 1—1 示 A2 系列及 A15 型自動開關的結構圖。圖示開關為三極，手動操作，開關的結構元件裝在絕緣底板 1 上。操作手柄 7 時，通過自由脫扣機構，將動作傳到動觸頭 3 上，使動靜觸頭關合。這些觸頭均處在滅弧室中，在開斷過程中，動觸頭 3 與靜觸頭 2 之間形成電弧。滅弧室的主要功用是使電弧很快的熄滅，可靠地切斷電路。

图 1—1 示开关在关合位置。此时，每极电流路径为：接线端点 A，静触头 2，动触头 3，动触头联接软线，经过载脱扣器 10 至接线端点 B。

在过载脱扣器工作时，使带有脱扣钩的小轴 14 旋转，这时使机构脱扣，动触头系统由于开断弹簧 12 的作用反着时针方向旋转，与静触头 2 脱开，最后并由锁钩固定在开断位置。

在本节所讲的 A 型开关中，装置有一个、二个或三个过载脱扣器。这种脱扣器的动作元件是一种螺管式电磁铁，线圈串联于其所控制的电路中。当电路中所流过的电流超过所规定的数值时，脱扣器的铁芯被吸上，冲撞脱扣机构，使断路器分闸。除了过载脱扣器外，断路器上也可以装失压脱扣器或其他脱扣器。失压脱扣器的动作元件一般为拍合式电磁铁，其线圈跨接在所控制的电源上。当电源电压高于某规定数值时，衔铁能克服反作用力被吸上，使脱扣机构锁住不能动作，因此，断路器保持在合闸位置。当电压低于规定的数值时，由于反作用弹簧力的作用，衔铁被释放，脱扣机构能动作，因此断路器不能保持在关合位置。开关的脱扣器可以做成瞬时动作或延时动作。

开关电器执行分合线路任务的结构元件叫做触头装置。A 型开关的触头有三对：如图 1—1 最下面的一对为主触头；中间的为附触头；最上面的叫做灭弧触头。主触头镀银，或者镀镍银片，或者是采用迭片式的刷形触头结构。灭弧触头一般镀有耐弧金属片。在合闸时，灭弧触头先接触，其次附触头，最后主触头接触。分闸时，主触头先离开，其次附触头，最后灭弧触头离开，切断电路，熄灭电弧。这种结构是为了保护主触头，使其不受电弧或电火花的烧损，保证开关在关合也就是在合闸位置时的工作性能。

A 型开关的灭弧装置，是由钢片所制成的灭弧栅片制成。在面板 1 上尚装有产生磁场的 U 形钢板，它的功用是使电弧容易进入灭弧罩中，帮助电弧熄灭。

A 型开关除了上述手动直接操作外，尚可用远距离手动杠杆操作及电磁铁操作等。

低压自动开关除了上面所述结构外，尚还有其他结构型式。

第三節 10 仟伏少油断路器

10 仟伏少油断路器是一种户内装置的高压开关，主要用于工业企业、发电厂、变电站中，应用甚为广泛。

图 1—2 示 BMI—133 型断路器结构图。这种断路器有三极，每极具有各自的油筒 4，在油筒内的下部装置有灭弧装置，油筒底部装置有静触头。静触头为玫瑰形结构，与下部接线端头 1 相联。

断路器在关合位置时，油筒是带电的，因此油筒装的支持瓷瓶 3 上，瓷瓶 3 又装在铁架 12 上。动触头杆 6 的端头做成可以更换的，在其被烧损后，可以更换新的。在关合位置时，动触头杆插入玫瑰式静触头中。

动触头杆 6 的上部装有铜块 9、软连接 8 与角形接触片支架 7 相联。电压加在角形接触片 7 与油筒底部接线端头 1 之上。断路器在分闸状态时，动触头杆 6 处在最上位置，其下部与静触头脱离，因此在动静触头之间形成油的（包括部分气空的）绝缘间隙。此时，由于油筒与下部接线端头 1 是相联的，故动触头杆 6 必须用套管瓷瓶与油筒绝缘。通过套管，动触头杆 6 可以上下运动。

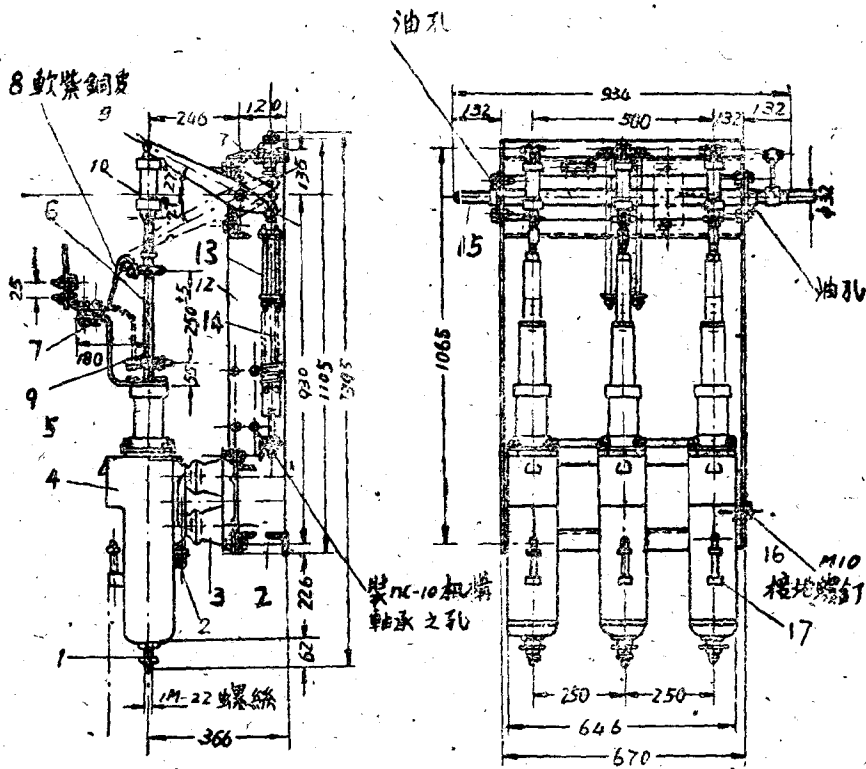


圖 1—2 BMI—133 少油斷路器的結構。

1—下接綫端頭；2—油筒與支持瓷瓶的連接螺釘；3—支持瓷瓶；4—油筒；5—套管瓷瓶；6—動觸頭杆；7—角形接觸片；8—軟連結；9—銅塊；10—拉杆瓷瓶；11—轉杆；12—鐵架；13—油緩衝器；14—開斷彈簧；15—主軸；16—接地螺釘；17—油表。

在合閘過程中，操作機械（圖中未繪出）使主軸 15 轉動，此時，焊在主軸上的轉杆 11 的左端向下運動（如圖中點畫綫所示），動觸頭杆 6 下降，它的端頭插入筒內玫瑰形靜觸頭中。這時，每級中電流路徑為：自角形接觸片 7，軟連結 8，銅塊 9，動觸頭杆 6，經玫瑰形靜觸頭至下部接綫端頭 1。為了使帶電部分與機構及鐵架絕緣，拉杆 10 用絕緣材料制成。

在關合過程中，操作機構使開斷彈簧 14 拉長，因此在彈簧中儲存有能量，以備在分閘時應用。在高压油斷路器中，操作機構一般作成單個電器元件供應，可以為手動、電動或其他形式。

在分閘時，操作機構中的脫扣電磁鐵元件作用，使斷路器傳動機構脫扣，此時開斷彈簧 14 因失去限制，受其中儲能的作用，可以恢復到原來未拉伸的位置，作用在轉杆 11 的右端，使主軸 15 轉動，帶動動觸頭杆 6 向上，使動觸頭杆 6 的端點與油筒底部的玫瑰形靜觸頭脫離，在動靜觸頭之間形成電弧。由於滅弧室的作用，電弧很快熄滅，在動靜觸頭之間形成絕緣間隙，完成分閘作用。由於開斷彈簧的作用，保持動觸頭杆 6 在分閘的位置。

在分閘及合閘位置的終了，斷路器的運動部分均具有很大的速度，具有很大的動能。

因此需要采用緩冲裝置以緩冲运动部分的冲击作用，避免断路器損坏。图中 13 为在分閘过程中作用的油緩冲器；同样，在合閘过程的終了，采用了彈簧緩冲裝置。

10 仟伏少油断路器除了 BMΓ - 133 型外，尚还有其他結構形式。

第四節 开关电器的共同理論性問題

根据上面所述的 A 型开关及 BMΓ - 133 少油断路器的結構，可知虽然它們都称为断路器，但在动作原理上及結構上的差別是很大的。但若根据其功用及任务，將开关电器的結構元件分类加以研究，不难發現在上述兩种电器中均具有下列結構元件：

1. 流过电流的通道，也就是所謂导电回路。在导电回路中包括各种結構的导体，固定与可动的接触联結。回路中的各种元件，应能在各种电流的作用下不受損坏。

2. 总体的絕緣結構。考慮电器的絕緣結構时，應該考慮电器极与极間，极与地間，以及在分閘状态下同极的断点間在各种电压作用下的絕緣能力。

3. 执行分合电路任务的元件也就是触头裝置。开关电器的触头裝置应能在大电流、小电流情况下，应能在分閘、合閘的过程中，以及在分閘、合閘位置的情况下可靠地工作。

4. 使切断电流所产生的电弧很快熄灭的灭弧裝置。灭弧裝置应能保証在大电流、小电流下可靠地熄灭电弧，对于切断短路电流的开关电器來說，这是最重要的結構元件。

5. 使电器各可动部分之間發生联系的中間机构。这种机构要能很快地动作，准确地动作，要使动作时所需的操作力小，所产生的机械应力小。

6. 使电器产生合閘动作的操作机构。这种机构要能使电器可靠地合閘，并保持电器在合閘的位置。

7. 使电器产生分閘作用、灵敏度很高的保护元件，也就是脱扣裝置与脱扣机构。这种元件要能可靠地在預定的工作条件下發生保护动作，使断路器分閘或合閘。

根据上面分析，虽然开关电器的品种繁多，結構上的差別甚大，我們仍然可以將它的基本理論归納为下列几个問題：

1. 絕緣的問題；

2. 电流流过电器时的热效应与电动力效应的問題；

3. 电弧的基本理論以及熄灭裝置；

4. 电接触的基本理論与接触裝置；

5. 电器中常用的各种机构及其靜特性与动特性的分析；

6. 各种操作、保护元件的动作原理、結構及其特性。目前开关电器中所用的这类元件大部分都是电磁机构。

上述各类基本理論問題中，除了第一項在高压工程課中講述，与第 6 項有关的电磁机构理論已在本書上册中講述外，其他問題即为本書中的主要內容。

本書主要內容是：

1. 电器的發热。其中主要講电流的热效应及其对电器工作性能的影响；

2. 电器中的电动力。其中主要講各种电流各种导体的电动力特性，及电动力对电器的机械力效应；

3. 电弧理論及熄弧裝置；
4. 电接触理論；
5. 电器机构的靜特性分析；
6. 电器机构的动特性分析与緩冲阻尼裝置。

开关电器的基本理論以專題的形式講述，是本課程的特点。学习本課程之后，应能对这些專門問題，进行进一步研究的能力；应能对已知結構的开关电器作出性能的分析与計算。本書中介绍开关电器結構方面的知識較少，因此有待于其他專門課程以及現場教学、实习、參觀、設計与生产劳动等其他教学环节加以补充。

第二章 电器的發熱

第一節 概 述

电器在工作时由于有电流通过导体和线圈而产生焦耳损失,如果电器工作于交流线路,则由于交变电磁场的作用,在鉄磁体内产生渦流磁滞损失,在絕緣体内产生介質损失。所有这些损失几乎全部都轉变为热能,一部分散失在周圍介質当中,一部分加热电器,使它的温度升高。

由于材料的絕緣水平,机械强度等性能在温度超过一定的范围以后便要破坏,因此电器工作时的温度便不能过高,否則就会使电器寿命降低,甚至遭到损坏。

电器的损坏以及工作不正确会给整个被控制的系統带来极为严重的后果,所造成的經济上的损失比电器本身的价值常高出千百倍。电器热計算的目的在于研究电器的各种工作状态下的發热,并保証它的最高温度不超过規定的最大允許温度。

电器發热和散热問題的研究对于縮小电器的体积,減輕重量,节约原材料等方面有极其重大的意义。

發热与散热是一个极其复雜的过程,影响它的因素很多,很难建立一个包括一切影响因素的热过程的分析公式,因此直到目前为止,电器的热計算还只能是近似的,但經過实验的校准以后对于各种不同的具体条件下,应用一些經驗数据可以得到比較准确的结果。

在着手进行电器的热計算之前,我們必須首先討論一下电器各部分的最高允許温度,以作为进行热計算的标准。

第二節 电器各部分的允許温度

制訂电器各部分最高允許温度的基本根据是保証电器在工作时不致于降低其寿命和工作的可靠性的最高温度,具体地說,就是电器絕緣不致因温度过高而燒毀或失掉其絕緣性能,导体及結構部分不致因温度过高而降低其机械性能。

在規定电器各部件的允許温度之前,必須首先确定电器工作环境的温度范围,因为环境温度的高低会直接影响电器的散热过程,这个温度主要根据国内大部分地区气候的参数的变化并照顧到个别地区的特殊条件而制定的。我国国家标准試行草案規定电器工作时周圍介質温度范围为 $-30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 。

电器各部件的允許温度是根据材料的絕緣及机械等性能的破坏条件决定的,在制定最高允許温度之前,必須了解温度对材料性质的影响。

金属材料在温度高达一定极限以后,机械强度就会显著降低,如图 2-1 曲线所示,材料机械强度开始下降时的温度我們称做材料的软化点。软化点不仅是温度的函数,而且与材料的加热时间有关,加热时间愈短,則达到软化点的温度愈高。以銅为例,长期發热时它的软化点为 $100\sim 200^{\circ}\text{C}$;而在短时發热时软化温度增高到 300°C 左右。

电器中裸导体的最大容許發热温度主要根据于图 2-1 曲线的性质决定的。

对于触头除考慮它的机械强度以外,还要特別考慮它的氧化問題。一般材料的氧化物

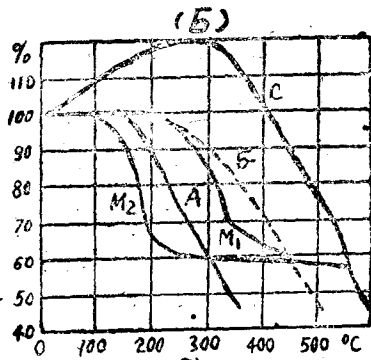
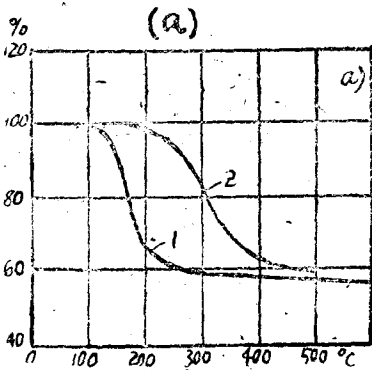


圖 2—1 金属材料机械强度与温度的关系。

(a)—銅. 1—連續发热; 2—短吋发热; (b)—不同的导线金属;
A、B与M₁—硬拉铝; 青銅与銅; C—鋼; M₂—电解銅。

都是电阻系数特别高的半导体（銀除外），例如銅触头氧化以后接触电阻將增大几十到几百倍，而且氧化的速度与触头表面温度有关，当触头温度大于 70°C~80°C 时氧化便开始剧烈起来，这点便限制了触头最大的工作温度，否則因氧化而使接触电阻剧增，其結果会导致触头进一步發热而破坏。

絕緣材料和帶絕緣的載流导体的最大容許發热温度决定于絕緣材料的老化和它的介質損失，或击穿电压。介質損耗随温度上升而增加，因而絕緣材料的电气强度就下降，图 2—2 的曲线表示出这种情形。当温度为 85°C 时瓷的击穿电压急剧地下降。我国国家标准試行草案把絕緣材料分成七級，見表 2—1 所列。

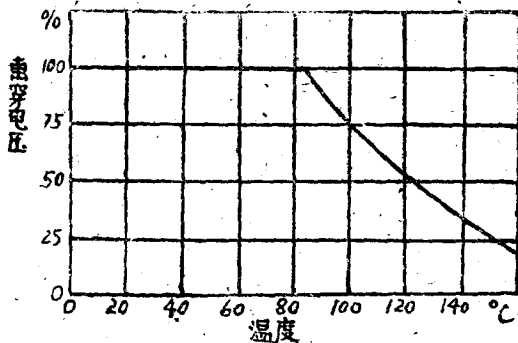


圖 2—2 瓷的击穿电压与温度的关系。

表 2—1 各級絕緣材料的耐热性

等 級	温 度 °C
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	>180

关于表中術語的說明：

1. Y 級絕緣材料是指未浸漬的棉、絲、电工絕緣紙板及其他經過試驗能用在此温度範圍內的各种材料。

2. A 級絕緣材料是指浸漬过的或在液体电介質如油中沉浸过的棉、絲、电工絕緣紙板或皮革及其他經過試驗能用在此温度範圍內的各种材料。

3. E 級絕緣材料是指耐热温度高于 A 級絕緣 15°C 的一切經試驗能用在此温度範圍內

工作的各种材料。

4. B級絕緣材料是指云母、玻璃纖維、石棉等的粘和材料及其他有机材料經試驗能用在此温度範圍內工作的各种材料。

5. F級絕緣材料是指耐熱温度高于B級絕緣25°C的一切經試驗能用在此温度範圍內工作的各种材料。

6. H級絕緣材料是指云母、玻璃纖維、石棉用硅有机樹脂粘和的材料以及一切經過試驗能用在此温度範圍內工作的各种材料。

7. C級絕緣材料是指云母、陶瓷、玻璃及石英質用或不用无机的粘和材料以及其他一切經過試驗能用于高于H級絕緣温度範圍的各种材料，这一級材料的特点是具有可靠的物理化学及电气性能。

我国国家标准尚在陸續制訂中，表2—2为国家标准試行草案中所規定的交流高压电器各部最大允許發熱温度。

表2—2

交流高压电器在长期工作时的允許發熱温度

項 目	电器各部分的名称	最大允許發熱温度		在周期间介質温度为+40°C时的温升	
		在空气中	在油中	在空气中	在油中
		°C	°C	°C	°C
1	不与絕緣材料接触的載流和不載流的金属部分	115	90	75	50
2	与絕緣材料接触的載流和不載流的金属部分以及由絕緣材料制成的零件当絕緣材料的等級为：Y	85	—	45	—
	A	100	90	60	50
	E, B, F, H和C	115	90	75	50
3	最上層变压器油	—	—	—	—
	A. 作为灭弧介質时 B. 只作为絕緣介質时	— —	80 90	— —	40 50
4	接触連接： A. 由鋼或其合金制成沒有銀的复蓋層：用螺拴、螺紋、鉚釘和其他能保證緊固連接方法压緊的	80	85	40	45
	用彈簧压緊的	75	80	35	40
	B. 用鋼和其合金制成有銀鍍層	90	90	50	50
	C. 由銅制成或表面帶有焊接的銀片	105	90	65	50

对于导体、絕緣材料等在很大电流包括短路电流在內的短時發熱情形，到目前为止我国尚未制訂国家标准，但其允許温度显然較长期工作大大提高。下面的叙述仅作为一般的参考。

由短路电流引起的短時过負荷时油中未絕緣的載流导体最大的允許發熱温度不应超过250°C，不和有机絕緣材料或油接触的銅和黃銅部件不超过300°C，而在任何情況下鋁的

温度不超过 200°C。

短路时固定接触连接的发热不应超过载流部分相应的发热，甚至希望更低些。对于可动接触连接由于它们的不同用途就有不同的要求。短路时主触头的发热限制在 200°C 内。至于短路时熄弧触头的发热，由于开断时受到电弧的作用，使在阴极和阳极斑点区域内熄弧触头的温度达到熔解温度，所以对它们的要求是不要熔接，不影响以后的开断。

无论电器在长期工作或者在短时工作限制电器载流部分温度的原因是任何有机绝缘，特别是油，在热作用下老化着和损坏着；此外，在上面已经提到过载流导体在热作用下会氧化，使接触连接的接触电阻增加，在高温时金属的机械强度会剧烈的下降。

应该指出，电器元件的发热温度是用一定测量方法得到的，所以实验中所确定的电器最高发热温度和测量方法有关，也和电器结构有关。因此应该考虑测量方法，当然最大允许发热温度并不决定于这两因素。

第三 电器的发热

电器的发热决定于电器各部分的损耗，电器中损耗大致有下面三种：

1. 电流通过导线时产生的电阻损耗，单位时间内通过导线所消耗的功率为：

$$P = k_p I^2 R \dots \dots \dots (2-1)$$

式中 P —— 所消耗的功率 (瓦)；

k_p —— 附加损耗系数，考虑集肤效应及邻近效应影响的系数；

I —— 通过导线的电流 (安)；

R —— 导线的电阻 (欧)。

以 $R = \rho \frac{l}{S}$ 代入 (1-1) 式，便有

$$P = k_p j^2 G \frac{\rho}{\gamma} \times 10^{-3} \dots \dots \dots (2-2)$$

式中 j —— 电流密度 (安/平方毫米)；

ρ —— 导线的电阻系数 (欧·平方毫米/米)；

γ —— 导线材料的比重 (克/立方厘米)；

G —— 导线的重量 = $\gamma l s$ (公斤)；

l —— 导线的长度 (米)；

s —— 导线截面积 (平方毫米)。

附加损耗系数等于集肤系数 $k_{n.3}$ 和邻近系数 k_6 之积；

$$k_p = k_{n.3} k_6 \dots \dots \dots (2-3)$$

集肤及邻近效应现象在电工基础中已经有详细的理论分析和一般的计算方法，在实际电器中由于情况比较复杂，要准确计算这种效应是比较困难的，这时可利用实验方法确定附加损失系数的大小。

利用平面电磁波在导电媒质内传播的基本关系推导得的圆截面导体的集肤系数为：

$$k_{n.3} = \frac{S}{\pi} \sqrt{\frac{\mu_M \omega}{2 \rho}} \dots \dots \dots (2-4)$$

式中 $S=2\pi r$ ——导体截面；
 Π ——导体截面周长；
 r ——导体半径（毫米）；
 μ_m ——导体磁导系数；
 ω ——电流变化的角频率； $\omega=2\pi f$ ；
 f ——频率（赫芝）。

將該式繪成曲綫以后得图 2-3 的形式。显然在一定的电流交变频率下当导体直径越大，导磁系数越大，电阻系数越小时，集膚系数越大，也就是实际电阻增加得越多。

如果导体为管状，則集膚系数还与管壁厚 Δ 与直径 d 的比有关， $\frac{\Delta}{d}$ 愈大，則 $k_{n,s}$ 也愈大，見图 2-4 曲綫。

对于长方形截面导体， $k_{n,s}$ 与其寬 b 对厚 Δ 之比有关，見表 2-3。

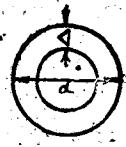
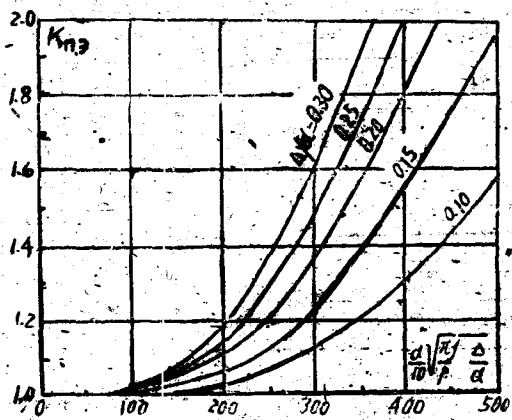
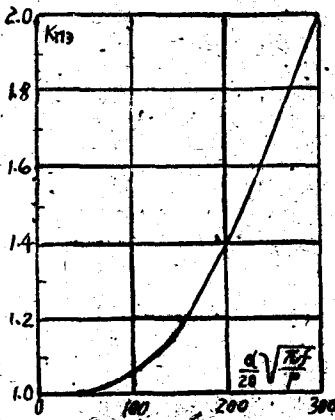


图 2-3 导体直径、电阻系数电流频率与集膚系数的关系。

图 2-4 管状导体尺寸与集膚系数的关系。

表 2-3 长方形截面导体寬 b 与厚 Δ 之比不同时 $k_{n,s}$ 的值

b/Δ	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	8
1:1	1.18	1.31	1.55	1.74	1.93	2.1	2.28	2.46	2.64	2.84	2.22
2:1	1.13	1.30	1.49	1.67	1.84	2.03	2.21	2.40	2.58	2.77	3.16
4:1	1.12	1.28	1.38	1.49	1.58	1.78	1.94	2.10	2.24	2.39	2.70
6:1		1.25	1.36	1.46	1.57	1.68	1.79	1.90	2.09	2.20	2.84
8:1			1.34	1.43	1.51	1.60	1.70	1.79	1.90	2.04	2.37
12:1				1.40	1.48	1.56	1.63	1.71	1.79	1.7	2.06

契克立尔及森孟根据很多实验结果得到了铁磁材料导体如下的集膚系数經驗公式。

契克立尔得到：

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } x \geq 3 \text{ 时, } k_{n,s} &= 0.758 + 1.159x; \\ \text{当 } 3 \geq x \geq 1 \text{ 时, } k_{n,s} &= 0.758 + \sqrt{1.343x - 0.183}; \\ \text{当 } 1 > x > 0 \text{ 时, } k_{n,s} &= 1 + 0.84x^4. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2-5)$$

式中 $x = 0.02 \frac{S}{\pi} \sqrt{\frac{f \mu_M}{\rho}}$ 其中 f 为电流频率, 圆截面导体的 $x = 10^{-2} r \sqrt{\frac{f \mu_M}{\rho}}$

聶孟得到:

$$k_{n,0} = 0.028 \frac{S}{\pi} \sqrt{\frac{f \mu_M}{\rho}} \dots \dots \dots (2-6)$$

实验证明, 在某些情况下, 聶孟的经验公式比契克立尔公式准确。

邻近效应系数与导体之间的分布和距离有关, 导体相距越远, 则 k_6 越小, 表 2-4 中即为圆截面导体邻近效应与其相隔距离的关系。图 2-5 表出矩形导体的 k_6 以 $\frac{1}{10} \sqrt{\frac{fh\Delta}{\rho}}$ 为函数的关系曲线, 从图 2-5 (6) 中看到 $k_6 < 1$, 这是由于邻近效应改变了集肤效应不均匀程度的结果。

表 2-4 圆截面导体邻近效应与其相隔距离的关系

导线直径 毫米	导线轴心间的距离: 毫米							
	25	50	75	100	125	150	175	200
25	1.20	1.05	1.02	1.01	1.00	—	—	—
50	—	1.50	1.90	1.09	1.07	1.05	1.03	1.01
75	—	—	1.80	1.40	1.14	1.10	1.08	1.05

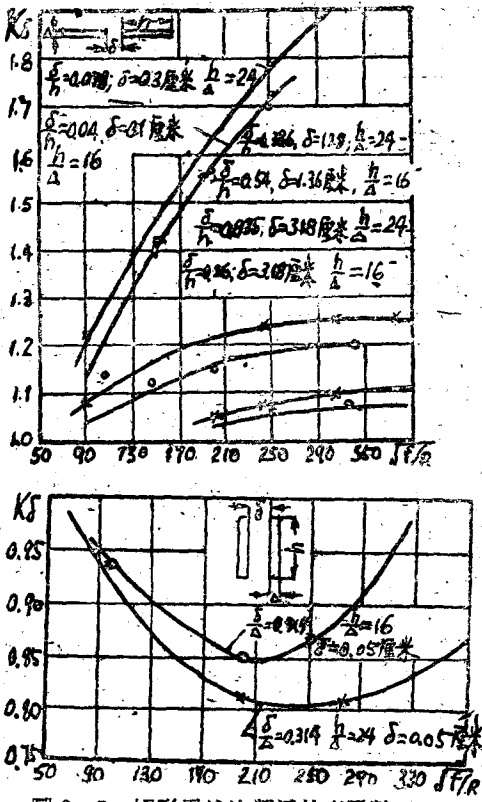


图 2-5 矩形导线的邻近效应系数。

在电流大于 1,000 安及以上时, 电器的载流部分必须采用几根平行导体, 在隔离开关中就有这种情形。但是应用多根平行导体有着一个严重的缺点。由于导体间的相互影响在它们之间的电流分布是不均匀的, 隔离开关额定电流并不和导体数成正比增加, 而要低些。图 (2-6) 给出了四根平行导体间电流密度分布的曲线。其结果各根导体的温度分布也是不均匀的, 正如图 (2-7) 所示。同时指出, 边缘和中间导体的散热条件影响着温度分布。

2. 铁磁体在交变磁场的作用下产生的涡流与磁滞损失。

在电工基础中已经求得方形截面导磁体的涡流损失的一般式为: