

內 容 提 要

本書內容敘述了电气联結的基本要求，主要方法，簡單計算和电气联結的維護，以及电气联結的几种实例，对于供电安全是有一定的帮助作用，因为在电气联結方面來講，如果热稳定度和电动力稳定度不足时，可能引起供电系統的严重事故，這本書在这方面也起了一定的預防事故的作用。

本書讀者对象 为电力工业方面和工业企业方面从事电气工作的工人和技术人員的參考資料。



电 气 的 联 結

舒正芳著

*

1712D472

水利电力出版社出版(北京西郊科學路二里溝)

北京市書刊出版業營業許可證出字第106号

水利电力出版社印刷厂排印 新华書店发行

*

787×1092 $\frac{1}{2}$ 开本 * 2 $\frac{1}{4}$ 印張 * 52千字

1958年12月北京第1版

1959年2月北京第2次印刷(4,101-8,720册)

統一書号: T15143·324 定价(第9类)0.25元

电业工人
学习文选

28



舒正芳著

电气的联结

水利电力出版社

目 录

第一章 电气联结的基本要求.....	3
第一节 正常情况下的工作要求.....	4
第二节 异常情况下的工作要求.....	12
第二章 电气联结的主要方法.....	20
第一节 固定联结.....	20
第二节 可动联结.....	26
第三节 滑动联结.....	33
第三章 电气联结的簡單計算.....	34
第一节 接触电阻的計算.....	35
第二节 电气联结的发热計算.....	40
第三节 耐电强度的計算.....	48
第四章 电气联结的維護.....	52
第一节 电气联结的質量檢查.....	52
第二节 电气联结的維護.....	61
第五章 电气联结的几种实例.....	69

0) 第一章 电气联结的基本原理

电气联结是电力系统中一个重要环节，它需要在正常及异常情况下可靠的工作，否则任何原因促使电气联结不能担负这一使命时，势将造成电力系统发生故障，甚至造成停电等重大事故，引起重大的损失。

而电气联结本身却又是相当复杂的，妥善的联结通常不能凭计算得到的，它需要在各种情况下经过长期的连续运行后方能确定。

影响电气联结质量的原因很多，例如接触压力、接触材料性质以及加工质量等等。此外，外界的运行条件对它的影响也是十分显著的。联结部分在潮气中过一段时间后，便会发生氧化层，除银以外，大多数金属氧化物都是不良导体，它会使接触电阻成百倍甚至成万倍的增加；不同的金属相互接触联结时，它们之间还会产生腐蚀。这些情况都要求加以防止或者设法减轻。

总的说来，对于电气联结必需要满足以下各点要求：

1. 具有足够的机械强度以及抵抗外界腐蚀的能力；
2. 工作性能可靠；
3. 当长期通过额定电流时，温升不能超过容许值；
4. 具有足够的绝缘强度；
5. 当通过短路电流时，应该具有足够的热稳定性以及电动稳定性。

除此之外，还根据联结方法的不同而有不同的要求。

要满足上述基本要求，所涉及到的问题是很多的，也是十分复杂的。现在分别就正常工作下的工作要求与异常情况下的

工作要求，分別討論如下。

第一节 正常情况下的工作要求

在正常情况下工作时，电气联结必需满足以下各点：

1. 长期通过额定电流后，电气联结处的温升应在许可值之内：

各种电气联结的接触面间都存在着接触电阻，电阻值越大，通过相同电流的发热程度便越加厉害，因此要保证电气联结在工作时温度不致过高，首先应该降低接触电阻。接触电阻的降低可以采取增加接触压力，加多接触点的数目，采用电阻系数低的接触材料等。此外也可以加强散热条件来减低温度，例如加大接触面，与接触联结相接的邻近面积加大，或者采用便于散热的接触形状等。

决定电气联结的温度除与接触电阻有关外，还与通过的电流值有关。当通过的电流加大，温度便会迅速上升，因此任何联结许可通过的电流有一定限值，该电流称为额定电流。

额定电流实际上是指周围介质在一定的温度下，电气联结长期通过额定电流后，它的各部分温升值应在容许值以内。

电气联结的周围介质温度通常用 35°C 作为标准。如果周围介质的温度超过 35°C 时，它的额定电流 I_H 应该减少，并可按下式近似计算：

$$I_0 = I_H \sqrt{\frac{Q_H - Q_0}{Q_H - 35}}$$

式中 I_0 ——当周围介质为 $Q_0^{\circ}\text{C}$ 时的连续容许电流（安）；

I_H ——当周围介质为 35°C 时的额定电流（安）；

Q_H ——电气联结部分的许可温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）。

例1 某断路器的触头额定电流为600安，用于周围介质温度为 35°C ，

触头許可溫度为 75°C 。現在要用于周圍介質溫度为 40°C 場合，開連續的容許电流是多少？

解 $\therefore I_n = 600$ 安, $Q_n = 75^{\circ}\text{C}$, $Q_0 = 40^{\circ}\text{C}$ 。

$$\therefore I_0 = I_n \sqrt{\frac{Q_n - Q_0}{Q_n - 35}} = 600 \sqrt{\frac{75 - 40}{75 - 35}} = 562 \text{ 安。}$$

断路器、隔离开关等电器，当周圍介質的溫度低于 35°C 时，那么工作电流允許增加，增加的数值根据周圍介質低于 35°C 的溫度值来决定，每低 1°C ，工作电流可照額定电流增加 0.5% ，但是增加的工作电流总值不能超过額定电流的 20% 。如仍以例 1 的断路器为例，当周圍介質溫度为 20°C 时，那么許可增加的电流为 $600 \times (35 - 20) \times 0.5\% = 45$ 安，即許可工作电流为 $600 + 45 = 645$ 安。

电气联結的許可溫升值，因种类不同而不同，通用的規定值將在第三章中加以介紹。

2. 在最大工作电压下長期工作，應該不发生絕緣破損和影响以后的工作性能：

电气設備在銘牌上都标有額定电压，所謂額定电压是指該設備安全运行的标准电压。例如 35 千伏的断路器，是指該断路器允許接在 35 千伏的电力系統中長期而安全的运行。

实际上，除額定电压外，还有最大工作电压这一規定。最大工作电压是指电气設備在該电压下还容許長期工作，不会发生絕緣破損，也不会发生影响以后的正常工作性能。但是不允許在超过最大工作电压的电力系統上运行。

苏联制造的交流高压断路器的最大工作电压通常較額定电压大 $10 \sim 15\%$ ，如表 1。

电气設備在制造时，必須具有超过最大工作电压的絕緣强度（指短時間承受的电压而言的），特別是高压开关必須有足

表 1

額定电压(仟伏)	3	6	10	15	20	35	110	220
最大工作电压(仟伏)	3.5	6.9	11.5	17.5	23	40.5	121	242

够絕緣强度，这是由于多种的原因，电力網絡在运行中可能产生过电压，所以高压开关設備必須具备相当高的絕緣强度，也就是高压开关設備的相間导电部分之間以及导电部分与大地之間的放电电压必須高于額定电压一定的倍数。該值如表 2。从表中可知，如 6 千伏的高压开关，它的試驗电压有效值为 32 千伏，即为額定电压的 $\frac{32}{6} = 5.34$ 倍。其他各欄的放电电压都較額定电压为高，并且具有一定的倍数。

表 2

額定电压 (仟伏,有效值)	試驗电压 (仟伏,有效值)	隔离开关間一极开断 后触头之間的干放电压 (仟伏,有效值)	湿放电压 (仟伏,有效值)	对地干放 电压 (仟伏,有效值)
3	24	31	—	28
6	32	44	28	36
10	42	58	34	48
15	55	76	47	57
20	66	92	57	68
35	95	135	80	110
110	260	345	220	295
154	360	485	305	375
220	500	670	430	550

放电电压决定了相間导电部分間以及导电部分与地間所必須的距离。当导电部分間或导电部分与地間的距离越大，放电电压值也越大。例如某电器空气間隙为 40 公分时，50 周波的击穿电压为 150 千伏；当空气間隙增到 80 公分时，50 周波的击穿

电压增为 290 千伏；由此可見，間隙越大，放电电压也越大。但是过大的間隙，使电器外形尺寸也相应加大，因此是有一定的限制的。換句話說，电气联結的結構必須具有足够的絕緣强度和合适的外形尺寸。

3. 电气联結的材料應該选用适当：

电气联結用的材料对于使用寿命以及工作可靠性有着很大的关系。因此所用的材料必須滿足以下各点的基本要求：

- 1) 材料應該相当坚硬，机械强度應該足够，熔点及沸点要高；
- 2) 要便于进行加工制造；
- 3) 导电性能以及导热性能要好；
- 4) 有足够抵抗腐蝕的能力；
- 5) 价格便宜。

除了上述基本要求外，还根据具体工作情况而有不同的要求。例如，用在彈性接触中的材料應該具有必須的彈性。用于大电流联結中除需足够机械强度外，还要求导电性能好，在这种場合便采用銅制。在高电压，低电流时，只需机械性能好，导电性能可以差些，这样就可以采用鋼制。

下面將分別介紹几种常用的电气联結用料。

电器中最常用的触头材料是銅，这是因为銅具有以下許多优点：

1) 电阻系数小，在所有的金屬中除銀外要算銅的电阻系数为小，例如銅的电阻系数只有鋼的 $1/6 \sim 1/7$ ；只有鋁的 $1/1.68$ 。而銅的电阻系数与銀相比較，只有銀的 $1.06 \sim 1.15$ 倍，与銀的电阻系数相差不多，而銅的价格远較銀为低，因此电器中便广泛的采用銅触头；

2) 銅容易加工，可以制成各种形狀的触头。

3)容易焊接及熔接;

4)机械强度相当好;

5)銅在大多数使用场合,抵抗腐蝕的能力相当好。銅在空气中虽要氧化,但氧化层厚度很薄,约为 $25/1,000,000$ 公厘(或写为 25×10^{-6} 公厘),并且被压紧后氧化层很容易被破坏。銅在高温下氧化得很激烈,当銅的温度超过 70°C ,銅便开始激烈氧化。如果空气中有氨、硫化氢、硫化气体以及各种气体蒸气时,銅也迅速氧化。为了防止氧化,可在銅的表面上鍍錫或銀,这一点将在第四章中还要讨论。

在充油的电器中,因为油(变压器油)可以防止触头的氧化,所以使用銅制的触头是很普遍的。

由于銅的本身有着上面所列举的一些优点,所以在以空气或者油(变压器油)作为介质的开关中,通常都采用銅制触头。

除銅制触头外,还有采用銀制的。銀在正常温度下对氧化作用很是稳定,銀的氧化物导电率与銀相近,所以銀制触头不会因为氧化而使它的性能变坏,在要求不因为氧化物的作用使导电率变坏的情况下,常采用銀接触或者銀嵌接触。

由于銀是貴重金属,同时在大电流时被腐蝕,常用来制作电流不大的触头,例如用来制作继电器等小型器械的触头。

鎢也可以用来制造触头,鎢触头的优点是:材料的硬度大,机械的磨損小;能够抵抗电弧的作用,不致被焊住,也就是耐熔性高;金属局部过热和熔化而引起的弧坑及熔瘤的磨損小;工作稳定等。通常用在调整器、继电器、接通次数频繁的磁石机以及其他机械中。还可用鎢来制作水銀整流器的电极。

鎢制触头也存在一些缺点,如不容易加工;不能焊接;在空气中容易氧化;为了减小接触电阻需要较大的接触压力等。

断开很大容量的触头可以采用金属—陶瓷材料来制作，它可以防止触头被电弧烧损。金属—陶瓷材料是用钨粉放在高压下（压力自1,000~3,000公斤/公分²）压成半制品，在氢气中焙烧（温度约900~1,000°C）成较坚固而具有多孔性的基本材料，然后用熔融的银或铜来浸渍，这样便可以得到防弧性能与导电性能很好的触头材料。

4. 可动触头的振动应该避免：

可动触头的振动常常引起触头间发生弧光，使触头发生剧烈的损伤，甚至使触头熔焊起来，显然这种情况是十分不利的。而可动触头的振动原因是相当复杂的，主要的原因大致可分为机械振动和电动力所引起的振动两种。

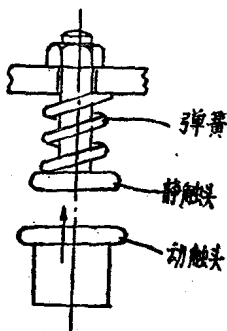


图1 触头的机械振动

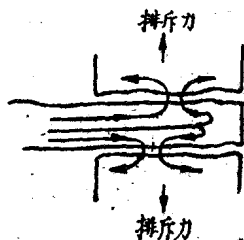


图2 触头间的电流分布

当可动触头在闭合过程中，具有一定速度的动触头向静触头方向闭合，而静触头是靠弹簧支持的，如图1。动触头碰到静触头后，静触头受到冲击后便向后压缩弹簧，这时便使刚相碰的动、静触头又开始分离。而动触头在外力的作用下继续向前移动，因此又与静触头相碰，而静触头又向后压缩弹簧，但是这次往后压缩的距离较上次为小，这是由于弹簧已具有一定

的反作用（即已被壓縮），这种过程繼續进行，一直到振动完全停止。

上述振动是由于机械原因造成的，便称为机械振动。

从图 2 中可以看到触头間的电流分配情况，其中在接触的一方电流在某些地方是与另一方的电流互相平行，但方向相反。根据电学里的定律可以知道，兩平行导体如果通过相反电流，它們之間便会产生互相排斥的力。所以触头間也是存在着这种互相排斥的力。当排斥力大于彈簧压力时，便使触头发生振动。这种振动是由于电动力作用所引起的，与上面所提到的机械振动，性質完全不同，并且有着更为复杂的道理。

避免触头的振动是相当复杂的，它与触头的速度、質量、外力、行程以及彈簧的材料都有关系。在使用及制造时应設法防止振动。

为了避免可动触头的振动，有在动触头上加裝阻尼器，如油阻尼器、空气阻尼器以及永久磁鉄阻尼器的。

5. 应根据使用的要求选用合适的电气联結：

根据使用的要求不同，电气联結应有不同的方法。例如可动联結中的触头，当用在切断或閉合电流在 10 安以上的断路器中，需有工作触头与熄弧触头。工作触头是用来在断路器閉合时允許長期的通过額定电流，但是不能用来切断电弧，而熄弧触头只用来切断电弧，也就是說只用在断路器断开电路的短期过程中，在断路器閉合时，可以不通过或通过很小的負載电流，因此熄弧触头的接触电阻通常都較工作触头为大。

工作触头与熄弧触头是并联裝設的，后者是用来保护前者免受电弧损伤，如以指式可动联結为例，在安裝时，熄弧触头較工作触头为長，以便閉合时，熄弧触头先于工作触头接合，而断路时，后于工作触头分离，因此在运行中的电弧发生在熄

弧触头上。

同时由图 3 可知，熄弧触头是装在工作触头的外边，这是因为两侧触头通过相反而平行的电流，因此产生一种向外排斥的电动力，这种排斥力使熄弧触头发生的弧光吹向外方，为了避免损伤工作触头，所以工作触头一定要放在熄弧触头内面。

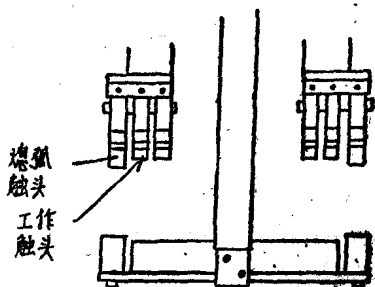


图 3 指式触头的布置

根据结构方法的不同，有的可动触头不必另加熄弧触头即能担任断弧的工作能力，例如玫瑰式可动触头只需外加保护环就能达到上述作用。

在实际使用中，并不是所有的运用场合都需要熄弧触头的，例如隔离开关，由于它在使用过程中，不用来切断电弧，它是在不通过电流的时候才进行断开或闭合电路，因此在隔离开关中就不需要熄弧触头而只需工作触头就够了。

电气联结的种类很多，不同联结还必须满足特定的要求，例如可动联结就应该做到下列各点：

1)除了具有足够的机械强度外，还应该能够承受得住规定的闭合与断开次数。如以交流电磁接触器为例，KT I 级的每小时允许闭合与断开 120 次；KT V 级的为 300 次；KT II 当暂载率为 40% 时，允许 600 次(为额定电流的 1.5 倍)。

2)当断开有电流通过的触头时，触头间产生的电弧不能过分的损伤接触表面，以免影响它的工作性能。

3)当触头通过短路电流或在短路状态下闭合触头，不应该使接触熔接或发生损坏。例如高压断路器中有规定合闸电流

值。所謂合閘電流是指在合閘前電路已經短路，而合閘時容許通過的最大短路電流並且不使觸頭熔焊或發生損傷。

第二節 異常情況下的工作要求

當電力系統發生短路時，這時便有很大的短路電流通過接在該電路內的各元件，而電氣聯結通常也是作為電力系統電路中的一個串聯元件，因此在這種情況下，電氣聯結也將受到短路電流的作用。

短路電流的數值較之額定電流大得很多。例如某綫路工作電流為350安，而在母綫上短路時的電流竟達43千安，在這例子中短路電流為額定電流的 $43,000/350=123$ 倍。這樣大的短路電流通過電氣聯結，勢將產生很大的熱量與電動力。

短路電流的持續時間是十分短促的，因為就電力系統來說，發生短路是異常情況，繼電保護裝置必須盡快的動作，切斷故障。所以電氣聯結所承受短路電流的作用也是十分短促的，例如高壓電力系統發生故障後的切斷時間（包括繼電器及斷路器的動作時間）：

非快速動作斷路器為0.15~0.2秒；

快速動作斷路器為0.1秒。

由於短路電流通過的時間很短，因之聯結處的溫升值可以較正常工作時溫升值大得很多。如以可開斷的接觸聯結為例，在正常工作時的許可溫度為 75°C ，而在短路時可以高達 $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ （指銅、黃銅或青銅制的），也就是說短路時在聯結處的溫升值可以為正常值的 $2.7\sim 4$ 倍；就絕對值來說，溫度雖然高了好幾倍，但是根據實際運行經驗證明，這種情況並不會影響以後的正常工作，所以是許可的。

現在分別就異常情況下的工作要求介紹于后。

1. 必須具有足够的热稳定度:

当触头通过大电流(如短路电流)时, 由于产生的热量很大, 触头本身必須具有能承擋这种热量而不致损坏的能力。这种能力通常用热稳定电流来表示。热稳定电流是指在一定時間內所通过的最大电流而不致使各部分的温升超过短时容許的温度。这里指的一定時間, 一般采用10秒鐘、5秒鐘或1秒鐘。所用的時間不同时, 容許的最大电流值也不同, 可以利用下式来进行换算:

$$I_t = I_{10} \sqrt{\frac{10}{t}}$$

式中 I_t —— 在 t 秒鐘內的最大电流(热稳定电流)(安);

I_{10} —— 在10秒鐘內的最大电流(热稳定电流)(安);

t —— t 秒鐘。

但由上式計算所得的最大电流值等于或大于极限冲击电流(有效值)时, 那么只能取极限冲击电流值。

例2 MKП-35断路器, 极限冲击电流(有效值)为24千安, 10秒鐘的热稳定电流是11.7千安, 試求5秒鐘及1秒鐘的热稳定电流;

解: $\therefore I_t = I_{10} \sqrt{\frac{10}{t}}$

5秒鐘的热稳定电流 I_5 :

$$I_5 = I_{10} \sqrt{\frac{10}{5}} = 11.7 \sqrt{2} = 16.5 \text{ 千安.}$$

1秒鐘的热稳定电流 I_1 :

$$I_1 = I_{10} \sqrt{\frac{10}{1}} = 11.7 \sqrt{10} = 37 \text{ 千安.}$$

但因为算得的1秒鐘最大电流超过极限冲击电流, 所以只能取极限冲击电流值。

即1秒鐘的热稳定电流为24千安。

由于触头通过短路电流的时间很短, 因之允許发热的温度

較正常時為高。銅、黃銅和青銅制成的導電部分所能承受的最大容許溫度為 $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ ，在重要運行場合應該採用更低一些的容許溫度值。鋁制的導電部分為 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ 。固定聯結短時間內的最大溫度可以按照上述數值採用，可動聯結的短時間內最高溫度以不發生觸頭脫焊、金屬熔化或其他情況。

接觸材料的最高容許溫度是受它本身機械強度的影響，當溫度過高，即使時間很短也會引起材料機械強度急劇的下降。

當接觸表面短時間內通過短路電流時，由於短路電流超過正常值很多倍，這時接觸處便產生很大熱量，而這種熱量產生的過程是十分短促的，所以發生的熱量幾乎全部用來提高接觸的溫度，只有極小的一部分熱量散到周圍介質中去。

按照短時最大容許溫度來確定接觸的容許電流密度可以用下式來計算：

$$\delta_k^2 = \frac{c\gamma}{\alpha_0 \rho_0 t_k} \times \ln \frac{(1 + \alpha_0 Q_k)}{(1 + \alpha_0 Q_n)}$$

式中 δ_k ——短路時接觸的電流密度也可稱為熱穩定電流密度
(安/公厘²)；

t_k ——短路的持續時間(秒)；

C ——材料的比熱(焦耳/ $^{\circ}\text{C}$ 克)；

γ ——材料的比重(克/公分³)；

α_0 ——溫度 0°C 時的電阻溫度係數($1/^{\circ}\text{C}$)；

ρ_0 ——溫度 0°C 時的電阻係數(歐·公厘²/公尺)；

Q_n ——短路開始時的溫度($^{\circ}\text{C}$)；

Q_k ——短路時容許的溫度($^{\circ}\text{C}$)。

例3 求下列情況下鋁導線的許可短路電流密度，已知(短路時容許溫度按 200°C 計算)：

1. 在短路開始時鋁的溫度為 $75^{\circ}\text{C}(Q_n)$ ，

2. 短路持續時間為 5 秒(t_k);
3. 溫度 0°C 時電阻溫度係數為 $0.0042\ 1/^\circ\text{C}$ (α_0);
4. 材料的比重為 $2.7\ \text{克/公分}^3$ (r);
5. 溫度 0°C 時的電阻係數為 $0.026\ \text{歐}\cdot\text{公厘}^2/\text{公尺}$ (ρ_0);
6. 鋁的比熱為 0.92 (C)。

解 將各值代入公式, 得:

$$\delta_k^2 = \frac{Cr}{\alpha_0 \rho_0 t_k} \times \ln \frac{(1 + \alpha_0 Q_k)}{(1 + \alpha_0 Q_n)}$$

$$= \frac{0.92 \times 2.7}{0.0042 \times 0.026 \times 5} \times \ln \frac{(1 + 0.0042 \times 200)}{(1 + 0.0042 \times 75)} = 1,545.$$

$$\therefore \delta_k = 39.3\ \text{安/公厘}^2.$$

上面所介紹的計算公式在實用中太麻煩, 表 3 列出了短路電流密度與短路持續時間的關係。該表中的銅和黃銅的短路容許溫度是按 250°C 考慮, 鋁是按 200°C 考慮, 並且已經估計了在短路前的接觸部分的發熱情況。

表 3

接觸材料	電流持續時間(秒)		
	1	5	10
	熱穩定電流密度 安/公厘 ²		
銅	152	67	48
黃銅	73	38	27
鋁	89	40	28

2. 必須具有足夠的電動力穩定度:

當電氣聯結通過短路電流時, 不僅在聯結部分產生大量的熱量, 並且還產生很大的電動力。所以在異常情況下除了考慮聯結地方的熱穩定外, 還必須考慮電動力穩定。電動力穩定度是用極限的衝擊電流來表示的, 即當聯結處通過該極限衝擊電

流后还不致于影响它以后正常工作的最大电流。对于可动联接的触头来说，该电流值是表示了触头工作的稳定程度。

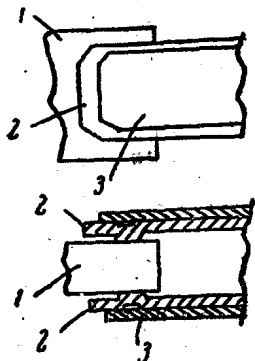
热稳定及电动力稳定在高压开关设备运行中需要予以足够的注意，否则如稳定度不够，则当短路电流通过时，便会使系统发生重大的事故。

极限冲击电流是允许异常工作的最大电流，所以当热稳定电流超过极限冲击电流有效值时，应该取用极限冲击电流作为热稳定电流，这一点已在前例(例3)中提及了。

极限冲击电流可以用有效值与峰值来表示，它们间的关系如下式。

$$\text{极限冲击电流的振幅系数} = \frac{\text{极限冲击电流峰值}}{\text{极限冲击电流有效值}}$$

理论上可能有的最大振幅系数为1.73。例如：BMD-35 断路器的额定电流 600 安，它的极限冲击电流有效值是10千安，峰值是17.3千安，所以它的振幅系数是1.73。但振幅系数并不一定都是1.73，如 MKII-35 断路器额定电流1,000安，它的极限冲击电流有效值是24千安，峰值是45千安，它的振幅系数为1.87。



由于触头间的接触实际上是一些点的接触，因此如图4的触头1、2之间发生相互排斥的力，这种排斥的力随通过的电流加大而加大，当通过短路电流时，所产生的排斥力可能引起触头分离，触头一分离便会发弧，因而损坏接触表面，所以上述由于电动力所产生的排斥力应该设法加以防止。图4是采用电磁封锁

图4 触头的电磁封锁的方法，图中在触片1与2外侧加钢板