

总 65059

电 0 0 7

中国电机工程学会高电压测量及試驗技术年会論文报告

模型空气断路器噴口最佳距离的选择

清华大学电工研究室

1965年9月

模型空气断路器喷嘴最佳距离的选择

夏 凯 张节容 王伯翰

吉嘉琴 周 正 沈锡越

一、前 言

空气断路器喷嘴与触头间的距离(以下简称开距)对开断性能有很大影响。长时期来已引起各国学者们的注意,并已进行了大量试验研究工作。英国 A. A. Hudson 曾对图 1 的灭弧室模型研究了在不同开距 l 时的灭弧性能。试验结果表明开距 l 愈短,能够开断的电流值愈大(文 1)。

苏联 P. A. Микаллян 对图 2 的灭弧室模型进行了试验,根据试验结果指出:当触头与喷嘴间圆柱形的侧面积(πdl)等于喷嘴截面积($\frac{\pi}{4}d^2$)时,灭弧室具有最好的灭弧性能(文 2)。苏联 E. M. Цейров 也提出了类似的观点(文 3)。

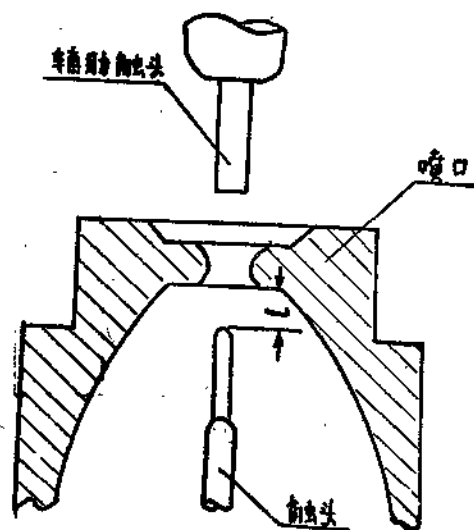


图 1

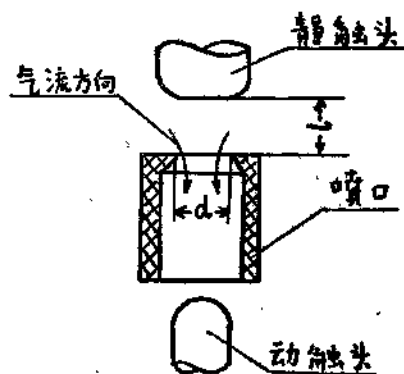


图 2

以后苏联 H. З. Аронзон 根据试验结果提出,开距愈长,由于径向气流速度减小,因而使弧柱径向收缩速度减慢,不利于灭弧,缩小开距可以改善灭弧性能。

日本在开距方面也进行了很多研究工作(文 5)。主要观点是开距增加,喷嘴的热制动效应也愈严重,不利于灭弧。

到目前为止,虽然在开距问题上已经有了很多不同的观点,并已积累了不少的实验

数据,但是在设计灭弧室时应如何比较正确的决定开距问题仍未得到彻底解决,特别是开距与灭弧室额定电压间的关系还不很清楚。根据这一情况本文将在实验基础上讨论开距改变,对空气断路器灭弧性能的影响,并且提出如何根据较少量的实验结果调整喷口距离到最佳数值的方法。

二、試驗設備及試驗結果

全部試驗工作是在图 3 模型灭弧室上进行。模型灭弧室采用单向縱吹的吹弧方式。試驗线路见图 4。試驗前在模型灭弧室 B_1 的噴口与触头间挂上二根直径为 0.1 毫米的銅絲,考虑銅絲很细,金属蒸气带来的影响不大。当合閘断路器 B_2 合閘后,已充电的电容器组 C 即与电抗器 L 组成单頻振盪回路,在銅絲內即有交流电流通过。銅絲在极短時間內熔断,旋即在噴口与触头间形成电弧,如果灭弧室內压力足够高,那末电弧即能在电流第一次过另时熄灭。

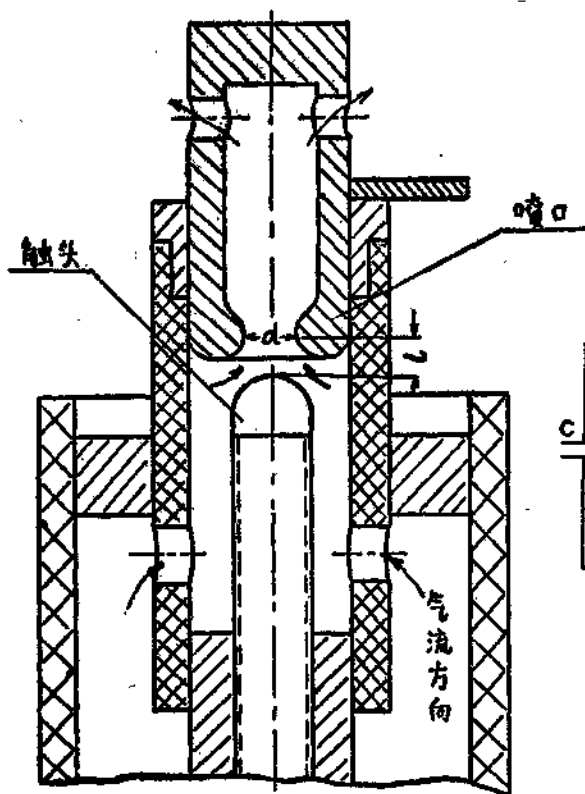


圖 3

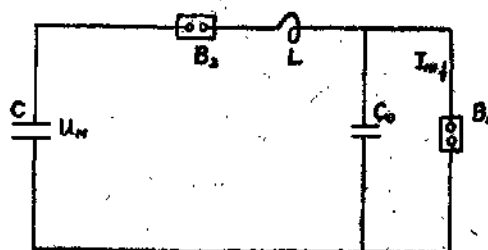


圖 4

試驗中測量了电弧电压,灭弧室压力,恢复电压,残余电流等参数,試驗內容有:

- (1) 在噴口直径 $d=12$ 毫米,开断电流最大值 $I_m=2.2$ 仟安,频率 $f=102$ 赫,工頻恢复电压最大值 $u_m=12$ 仟伏,恢复电压振盪频率 f_0 为 3.9, 9.5, 17, 20.5

仟赫时，测定在不同开距 l （见图 3）下，灭弧所需的最低压力值（用贮气罐绝对压力 P_0 表示），试验结果经整理绘成曲线后见图 5。

(2) 在 $d=12$ 毫米， $I_m=3.2$ 仟安， $f=150$ 赫， $u_m=12$ 仟伏， $f_0=3.9$ 仟赫时，测定在不同开距 l 下，灭弧所需的最低压力值，试验结果见图 6。

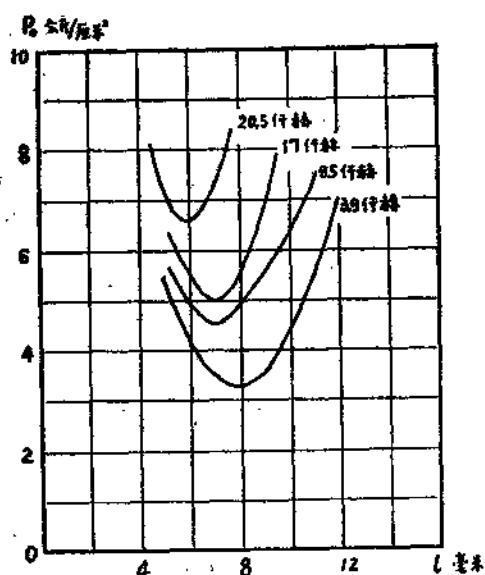


图 5

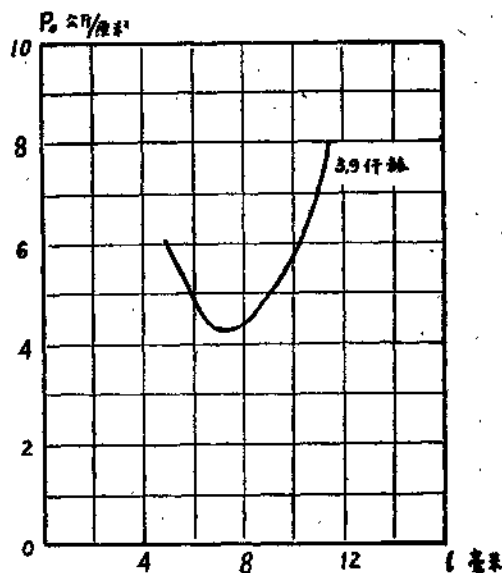


图 6

(3) 在 $d=12$ 毫米， $I_m=2.2$ 仟安， $f=102$ 赫，贮气罐绝对压力 $P_0=5$ 公斤/厘米²时，改变调频电容 C_0 及工频恢复电压最大值 u_m ，测定在不同开距下，电流过另后电强度的恢复曲线，试验结果见图 7。

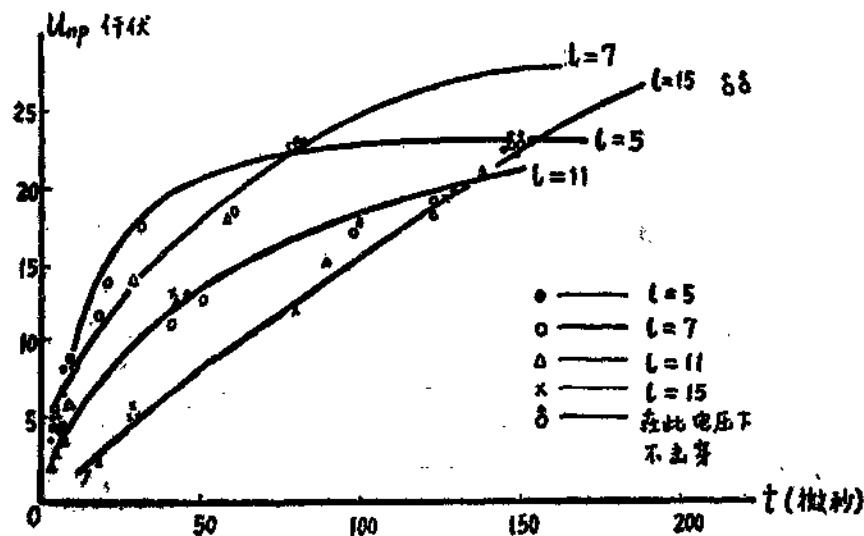


图 7

以上试验结果表明:

(1) 由图5曲线可知, 对于试验中所用的单向纵吹灭弧室, 在一定电参数下, 存在有某一最佳开距, 在此开距下熄弧所需的贮气罐压力 P_0 最低, 也即所需的空气流量最小。当 f_0 增加时, 最佳开距的数值稍有减小, 而熄弧所需的最低的贮气罐压力要增加。

(2) 由图5曲线可知, 在 $P_0=6.5$ 公斤/厘米², 开距 $l=6$ 毫米时, 熄弧的临界恢复电压频率为 20.5 仟赫, 而 $l=12$ 毫米时, 熄弧的临界恢复电压频率降为 3.9 仟赫。由此可见在相同贮气罐压力及空气流量下, 开距改变对灭弧性能有很大影响。

(3) 由图5, 图6曲线可知, 当 $d=12$ 毫米, $u_m=12$ 仟伏, $f_0=3.9$ 仟赫, I_m 由 2.2 仟安增加到 3.2 仟安时, 最佳开距的数值几乎不变, 而灭弧所需的最低贮气罐压力由 3.3 公斤/厘米²增加到 4.3 公斤/厘米²。

(4) 由图7试验结果可知, 开距减小, 电流过另后电强度最初阶段的增长速度增加, 而电强度的最终值却减小。反之增加开距, 虽然电强度的最终值增加, 但电强度起始阶段的增长速度却很慢。当交流电流过另后恢复电压增长速度较高时, 开距太长就未必对灭弧有利。同样开距过小, 也有可能因电强度最终值低于高频恢复电压最大值而使电弧不能熄灭。因此在一定高频恢复电压幅值及恢复电压频率下必然有一最佳开距存在, 而且最佳开距的数值必定与高频恢复电压幅值及恢复电压频率有关。

三、試驗結果分析

模型空气断路器实验结果表明: 开距长短对灭弧性能有很大影响, 当高频恢复电压幅值及频率一定时, 有一最佳开距存在。但是这些结论是否只适用于模型空气断路器, 还是对一般单向纵吹空气断路器灭弧室也能同样适用? 要回答这个问题, 必需首先分析开距改变后对弧柱变化过程的影响, 以及开距改变对电流过另后电强度增长过程的影响。

(1) 开距长短对弧柱冷却作用的影响:

根据文(6)的分析认为, 处在流动压缩空气中的电弧, 弧柱热量的散出主要通过对流散热, 轴向散热两种方式。如果认为灭弧室内的气流的情况可按一元定常流动处理时, 则单位体积弧柱的轴向散热功率 N_l 及对流散热功率 N_r 可按下面公式计算。

$$N_l = -C \frac{dP}{dx} \quad (1)$$

$$N_r = -\frac{2C_r}{r} H \quad (2)$$

式中 C ——弧柱处轴向气流速度

C_r ——弧柱半径为 r 处, 径向气流速度

$\frac{dP}{dx}$ ——弧柱处轴向压力梯度

r ——弧柱半径

H ——弧柱区单位体积气体与单位体积冷气体蓄积能量之差

由式 (1)(2) 可知, 弧柱轴向及对流散热均与弧柱区气流场有关, 而开距改变却对气流场有很大影响。开距减小后, 由于喷口内弧柱区压力梯度及径向气流速度增加, 弧柱散热条件得到改善。实验结果指出, 当开距改变时, 电弧电压 u_a 及电弧电压梯度 E_a 均有很大改变, 具体数值见表 1。

表 1

l (毫米)	5	7	15
E_a (伏/厘米)	120	110	93
u_a (伏)	600	770	1390

由表 (1) 数据可知, 开距减小, 电弧电压梯度 E_a 增加。电弧电压梯度 E_a 的增加, 正是弧柱冷却条件得到改善的结果。

(2) 开距改变对弧柱直径的影响:

当交流电流瞬时值达到峰值附近时, 可以认为此时弧柱正处于热平衡状态, 即弧柱能量输入与输出达到平衡, 因而可列出下面关系式:

$$E_a I_m = N_r S + N_e S \quad (3)$$

式中 E_a ——电弧电压梯度

I_m ——交流电流最大值

S ——弧柱截面积

电弧电压梯度 E_a 与电流 I_m 间的关系应符合下式:

$$I_m = S E_a e n^- b^- \quad (4)$$

式中 e ——电子电荷

n^- ——电子浓度

b^- ——电子迁移率

由于 n^- , b^- 均为温度 T 的函数, 因此式 (4) 可改写成

$$I_m = S E_a f_1(T) \quad (5)$$

式中

$$f_1(T) = e n^- b^- \quad (6)$$

联解式 (3) (5) 可得

$$E_a^2 = \frac{N_r + N_e}{f_1(T)} \quad (7)$$

将式 (7) 两边对温度 T 微分, 得

$$2E_a \frac{\partial E_a}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial T} \left[\frac{N_r + N_e}{f_1(T)} \right] \quad (8)$$

根据最小电場原理, $\frac{\partial E_2}{\partial T} = 0$, 因此

$$\frac{\partial}{\partial T} \left[\frac{N_r + N_l}{f_1(T)} \right] = 0$$

或

$$\frac{N_r + N_l}{f_1(T)} = \text{常数} \quad (9)$$

将式 (5) 代入式 (9) 可得

$$\frac{(N_r + N_l) S E_2}{I_m} = \text{常数} \quad (10)$$

由式 (10) 可知, 在同样开断电流下, 因为 N_r , N_l , E_2 均随开距减小而增加, 因此弧柱直径也随开距减小而减小。

(3) 开距改变对热制动效应的影响。

由表 1 数据可知, 开距减小, 电弧电压数值也低, 在同样开断电流下 $u_a I_m$ 的乘积也愈小。(文 3) 指出当贮气罐压力 P_0 及喷嘴截面一定时, $u_a I_m$ 的乘积愈小, 电弧的热制动效应愈不显著。加上开距减小后弧柱直径减小, 弧柱散热又改善, 必然使电流过另时弧隙电阻有所增加, 为熄弧提供了有利条件。试验指出当喷嘴直径 $d = 12$ 毫米, $I_m = 2.2$ 仟安, 开距为 7 及 15 毫米时, 电流过另时的弧隙电阻分别为 250 及 78 欧, 开距增大, 电流过另时的弧隙电阻反而减小, 原因即在于此。

(4) 开距改变对电流过另后弧隙电强度恢复过程的影响:

电流过另后弧隙电强度的恢复过程主要由三方面决定:

(a) 决定于电流过另时弧柱区的温度及残余弧柱的直径, 有时也可用电流过另时弧隙电阻的阻值来表明。根据上面分析, 可以认为开距愈小, 电流过另时弧隙电阻的阻值也愈高, 有利于电强度的增加。

(b) 决定于电流过另后残余弧柱的冷却作用。弧柱冷却作用愈强烈, 弧隙电阻的增长速度也愈快。根据 (文 6) 分析, 电流过另后弧隙电阻的变化过程近似地可用下式表示

$$\frac{1}{R'} \frac{dR'}{dt} = \theta \left(1 - \frac{e^2}{N_l S R'} \right) \quad (11)$$

式中 R' ——单位长度的弧隙电阻

e ——单位长度弧隙上所加的恢复电压

θ ——时间常数

$$\theta^{-1} = \frac{T}{5850 u_j} \frac{K}{K-1} \frac{N_l}{P} \quad (12)$$

式中 u_j ——气体游离电位

T ——弧柱绝对温度

K ——绝热指数

P ——弧柱区平均压力

由式 (11) 可知, 电流过另后弧隙电阻的增长速度主要与时间常数 θ 有关, θ 愈小弧隙电阻增长速度也愈快。而时间常数 θ 主要由纵向散热 N_l 决定, 因此开距减小, N_l 加大, θ 就减小。弧隙电阻的绝对值与增长速度均增加, 也即电流过另后电强度 u_{np} ($u_{np} = \sqrt{N_l S R I}$) 的数值也增加。

(c) 决定于最终电强度的数值。

弧隙最终电强度的数值决定于灭电弧时流动空气下的击穿电压。这一数值与触头喷嘴形状, 开距及贮气罐压力 P_0 有关。当触头喷嘴形状一定时, 开距愈大, 弧隙最终电强度的数值也愈高。

由上分析可知, 当气流参数及开断电流值一定时, 开距愈小电流过另时弧隙电强度 u_{np0} 较高, 电强度增长速度较快, 但最终电强度的数值却较低。增加开距虽然能使最终电强度的数值增加, 但电流过另时弧隙电强度 u_{np0} 很低, 增长速度也很慢, 其变化过程如图 8 曲线 1, 2 所示。

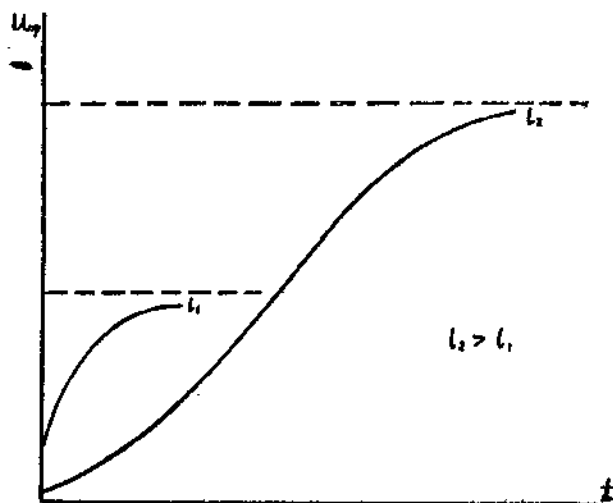


图 8

四、调整最佳开距的方法

通过上面的理论分析可知, 在一般的单向纵吹空气断路器灭弧室中, 确有一最佳开距存在, 在此开距下具有最强的灭弧性能。但是要通过计算方法来精确地确定最佳开距的数值目前还有很大困难, 最好的方法是通过试验, 根据示波图逐步地使开距调整到最佳的数值。为了说明这个问题可结合图 9 中三条不同开距时电强度恢复曲线进行分析。当开距不同时, 弧隙即使在同一恢复电压作用下, 电弧重燃的时刻及击穿电压值都会有很大的不同。

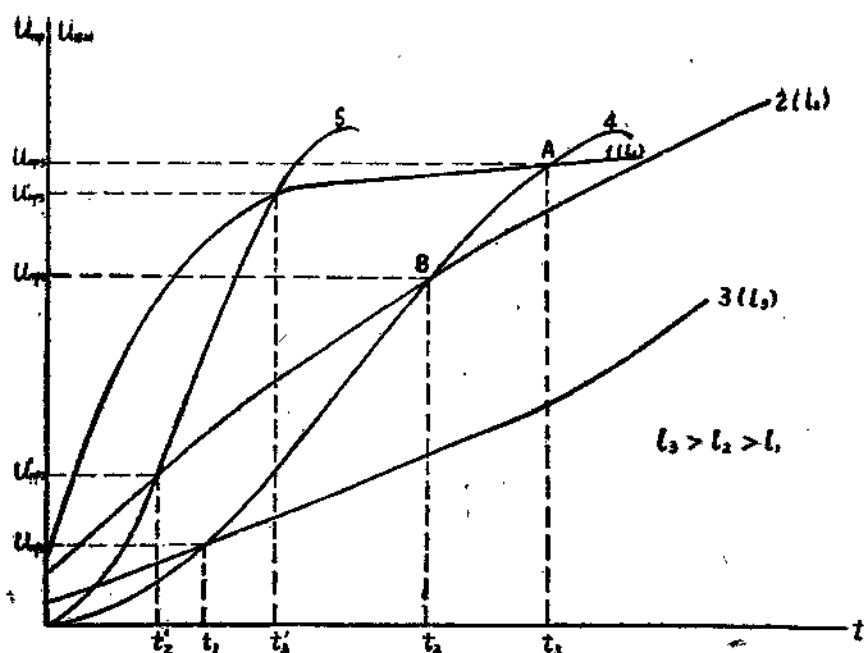


圖 9

(a) 电流过另恢复电压出现后不久电弧即重燃，此时击穿电压 u_{np1} 很低。这一情况表明开距太长，电强度增长太慢（如图 9 中曲线 3），而使电弧重燃，减小开距可以改善这一情况。

(b) 电流过另后经较长时间才发生电弧重燃，而且击穿电压值较高，如图 9 中 u_{np2} 及 u_{np3} ，此时就有两种可能：

(i) 开距太短，电强度最终值不够，在 A 点电弧重燃，如图 9 中曲线 1。

(ii) 也可能由于开距仍太长，如图 9 中曲线 2，在 B 点发生电弧重燃。

为了区分这两种情况，可以在改变恢复电压频率后再进行一批试验。例如当增加恢复电压频率后（图 9 中曲线 5），若原来开距过长，此时击穿电压值将大为减小（由 u_{np2} 降为 u_{np2}' ）而原来开距过短，则恢复电压频率增加只会使击穿时间改变（由 t_2 变为 t_2' ）而对击穿电压值影响很小（由 u_{np3} 降为 u_{np3}' ）同理也可用降低恢复电压频率来进行试验。

由于开距减小，电强度恢复速度增加，电弧重燃大多由于最终电强度不够而引起，因此在进行试验前可按下式初步确定最佳开距的数值 l_m 。

$$l_m = \frac{k u_{em}}{E_p} \quad (\text{厘米}) \quad (13)$$

式中 u_{em} ——弧隙两端。可能出现的恢复电压最大值(千伏)

E_p ——在给定压力下，流动空气的击穿强度(千伏/厘米)，与触头，喷嘴的形状及其间的距离有关，应通过试验决定之。

k ——储备系数取 1.5~2.0。

貯气罐压力增高时, E_p 增加, 在同样恢复电压作用下开距可适当减小。

必需指出, 即使在最佳开距下, 也只能达到一定的开断电流值, 若这一电流值仍不能满足要求时, 还需改变其它参数如增加喷嘴直径, 貯气罐压力等。

五、結 論

通过以上试验结果与分析, 对单向縱吹空气断路器灭弧室可以得出以下结论:

1. 喷嘴与触头间距离对空气断路器灭弧性能有很大影响。在一定貯气罐压力, 一定恢复电压幅值及频率下存在有一最佳开距, 在此开距下, 灭弧室具有最强的灭弧能力。

2. 在触头未伸到喷嘴里边, 并且触头与喷嘴间形成的环形气流截面大于喷嘴最小截面时, 縮短开距能增强弧柱冷却作用, 能提高电流过另后电强度的增加速度, 同时电流过另时的电强度也增加。

3. 开距过小, 由于电强度最终值太低, 同样对灭弧不利。

4. 最佳开距的数值与恢复电压频率 f_0 有关, f_0 愈高, 希望开距能小一些。

5. 最佳开距的数值还与恢复电压幅值及貯气罐压力有关。恢复电压幅值愈大, 最佳开距的数值也应增加, 而貯气罐压力增加时最佳开距可相应地减小。最佳开距的具体数值最后应通过实验来调整。

参 考 文 献

- [1] A. A. Hudson. "The Engineer" 1955, 200, No. 5195 和 5196. 譯文见 "高压电器譯文集" 1959 第二期, "电弧对空气断路器喷嘴中气流的影响。"
- [2] Р. А. Микаллян. Исследование влияния параметров сопла на гашение дуги потоком сжатого воздуха. "Электричество 1958—2"
- [3] Е. М. Цейлов. Воздушные выключатели высокого напряжения, 1957 年版。
- [4] Н. З. Аронозон. Исследование процесса дугогашения в камере с воздушным дутьем. "Ж. Т. Ф. 1962, Том 32, Вып. 1"
- [5] Seiji Yamazaki and Tsuneyoshi Takasuna. Fundamental Research on Air-blast Circuit Breakers. "Hitachi Review 1962 Special Issue No.3"
- [6] 潮恒郎, 伊藤利郎: 空气断路器电流另点附近现象。
"电气学会杂志(11) 1961—3"