

# 气体灭弧断路器的热力学分析 及其过程的数值模拟

中国科学院力学研究所 薛明伦 顾瑛

**内容提要:** 本文提供一个气体灭弧断路器的热力学分析及过程数值模拟计算方法。在电流、电压、机械动作对时间关系及结构参数已知的条件下,用于计算吹冷电弧的外气流热力学参数包括温度、压力及流量对时间的关系。这种计算结果对于压力室、排气室容积和流通面积的最佳选择有参考意义。

## 一、前言

气体灭弧断路器的问题,可分为以下两大类。

### 1. 系统的热力学分析

已知: 电流、电压对时间的关系和机械动作对时间的关系。

求: 吹冷电弧的外气流参数(温度、压力、流量等)对时间的关系。

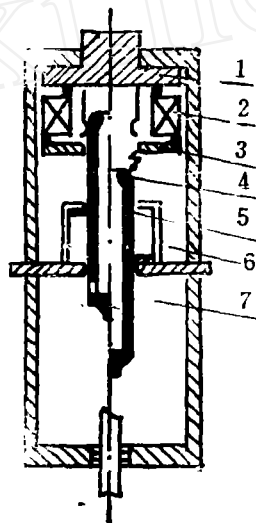
### 2. 电弧和外界气流的动量能量交换问题。

已知: 外界气流的参数

求: 电弧的气动热力学参数, 电流、电压对时间的关系。

二者是耦合的, 本文是对第一类问题的分析。近年来, 鉴于电流过零前的电弧对工作室有加温增压作用(此作用相当于用活塞压缩工作室气体), 因而发展研制一种结构简单、可靠的无压气作用的气自吹式断路器, 对于中等功率线路将是十分必要的。为了提高在小电流时的开断能力, 可以在排气室辅以活塞抽气, 以降低背压。本文讨论如图1所示的装置情况, 并考虑了可以有压气或抽气活塞的结构。

当动触头运行到一定距离时, 在环形电极与动触头中间产生电弧, 此电弧有旋转及轴向两个分量。旋转分量由开断电流通过线



中心线左边: 开关闭合 右边: 开关打开

1 固定触头 2 线圈 3 环形电极 4 喷嘴

5 运动触头 6 压力室 7 排气室

图1 气自吹式SF<sub>6</sub>气室原理图

圈时产生的磁场所驱动, 起着加热周围气体使工作室压力提高的作用。触头断开时, 工作室和排气室通过在动触头里的喷管连通, 压力差使电弧沿轴向通过喷管。在这种结构中, 压力产生几乎与动触头的机械速度无关。

## 二、热力学过程的描述

热力学模型如图2。

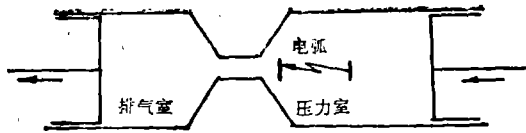


图2 热力学模型

V 体积 $m^3$   $C_v$ 定容比热 P压力牛顿/ $m^2$   
M 容积内的气体质量kg T 温度K  
 $W_j$  单位时间内输出的热能焦耳/秒 R 气体  
常数焦耳/度 A 流动面积 $m^2$

我们列出气体的能量方程:

$$MC_v \frac{dT}{dt} = -P \frac{dV}{dt} + \frac{dM}{dt} RT + W_j$$

(注: 压力室参数以下标p表示, 排气室参数以下标e表示。)

对于压力室:

$$M_p C_v \frac{dT_p}{dt} = -P_p \frac{dV_p}{dt} + \frac{dM_p}{dt} RT_p + W_j \quad (1A)$$

对于排气室:

$$M_e C_v \frac{dT_e}{dt} = -P_e \frac{dV_e}{dt} + \frac{dM_e}{dt} RT_e \quad (1B)$$

式中的  $\frac{dV_p}{dt}$  及  $\frac{dV_e}{dt}$  由机械动作决定, 对于无压气作用的纯“气自吹”结构, 则有  $\frac{dV_p}{dt} = \frac{dV_e}{dt} = 0$

由状态方程  $P = \rho RT = \frac{M}{V} RT$

可以写出  $V \frac{dP}{dt} + P \frac{dV}{dt} = R (M \frac{dT}{dt} + T \frac{dM}{dt})$

对于压力室  $V_p \frac{dP_p}{dt} + P_p \frac{dV_p}{dt} = R (M_p \frac{dT_p}{dt} + T_p \frac{dM_p}{dt}) \quad (2A)$

对于排气室, 只是下标改为e。

$-\frac{dM}{dt}$  = 即G单位时间内气体流量。

从压力室向排气室的气体流动, 可以看作是一系列初温、初压变化的准稳态过程, 即:

对于亚临界状态:  $P_e/P_p >$

$$\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad \text{式中 } k = C_p/C_v$$

$$-\frac{dM_p}{dt} = \frac{dM_e}{dt} = \left(\frac{k}{RT_p}\right)^{\frac{1}{2}} P_p \cdot \frac{M_p}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M_p^2\right)^{\frac{k+1}{2}} / 2^{(k-1)}} \cdot A \quad (3A)$$

式中A为最小流通面积

$M_p$  是马赫数  $M_p = \left\{ \left[ \left( \frac{P_p}{P_e} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \frac{2}{k-1} \right\}^{\frac{1}{2}}$

对于超临界状态:

$$P_e/P_p \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$-\frac{dM_p}{dt} = \frac{dM_e}{dt} = \left(\frac{k}{RT_p}\right)^{\frac{1}{2}} P_p \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M_p^2\right)^{\frac{k+1}{2}}} \cdot A \quad (3B)$$

$M_p = 1$

所以对每个过程, 都须首先确定其属于的状态, 然后依次对下列常微分方程组进行数值积分, 给出初始情况计算热力学过程。为提高计算精确度, 采用预测校正法<sup>(7)</sup>。

1.  $\frac{dV_p}{dt} = f_0(t)$  作为已知条件给出

2.  $\frac{dM_p}{dt} = f_1(P_p, T_p, P_e, A)$  (方程 3A, 3B)

3.  $\frac{dT_p}{dt} = f_2\left(\frac{dM_p}{dt}, T_p, M_p\right)$

$\left(\frac{dV_p}{dt}, P_p, W_j\right)$  (方程 1A)

$$4. \frac{dP_p}{dt} = f_3(M_p, \frac{dM_p}{dt}, T_p, \frac{dT_p}{dt}, P_p, \frac{dV_p}{dt}, V_p) \quad (\text{方程 2 A})$$

$$8. \frac{dP_e}{dt} = f_8(M_e, \frac{dM_e}{dt}, T_e, \frac{dT_e}{dt}, P_e, \frac{dV_e}{dt}, V_e) \quad (\text{方程 2 B})$$

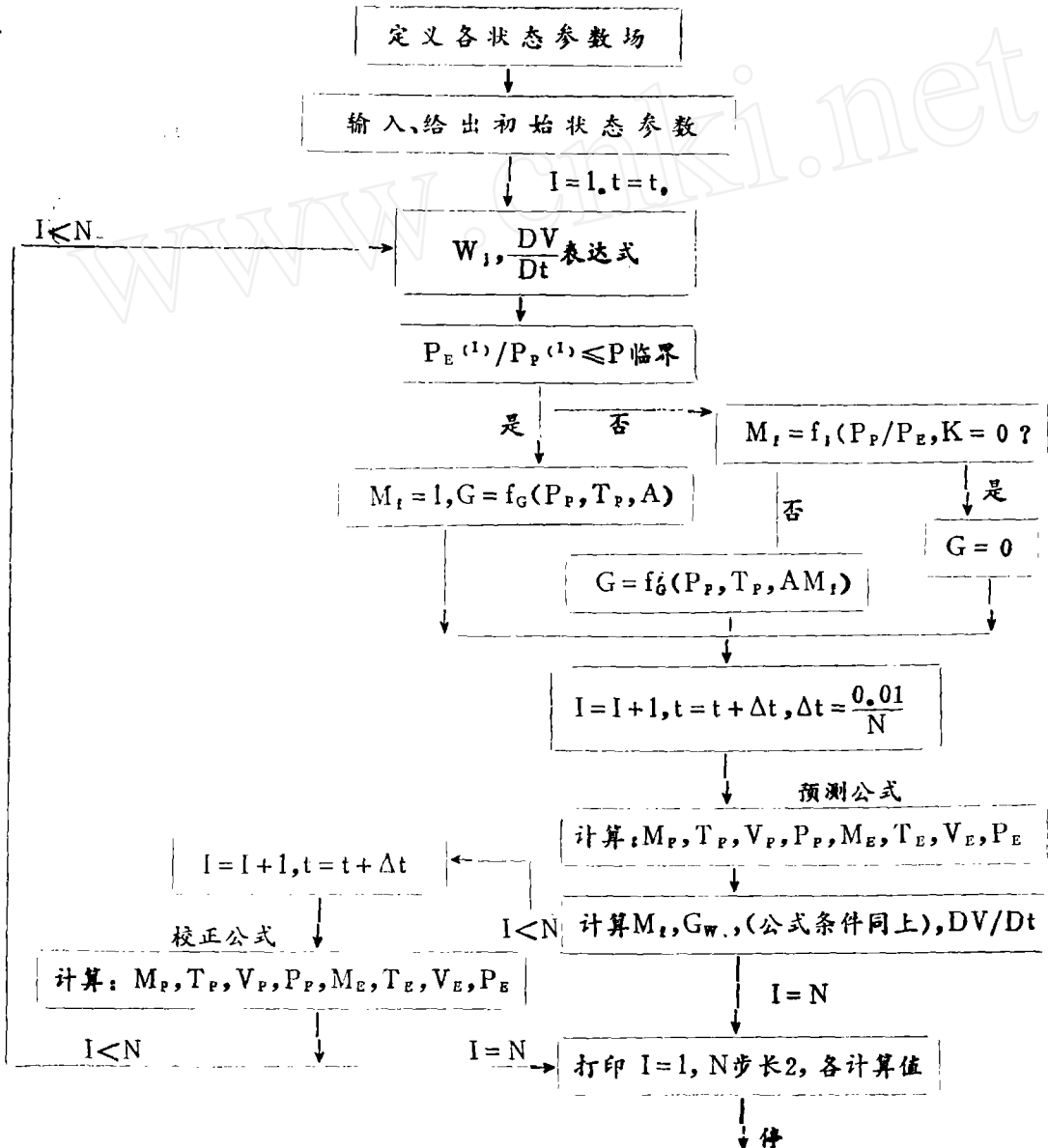
$$5. \frac{dV_e}{dt} = f_4(t) \quad \text{作为已知条件给出}$$

$$6. \frac{dM_e}{dt} = - \frac{dM_p}{dt}$$

$$7. \frac{dT_e}{dt} = f_5(\frac{dM_e}{dt}, T_e, M_e, \frac{dV_e}{dt}, P_e)$$

计算程序中考虑了压力室活塞的压气作用和排气室活塞的抽气作用。工质的热力学初始参数及电弧特性将作为输入数据。是一个通用的计算程序，可以用来作为模拟设计以选择参数，程序计算框图见后。

### 程 序 框 图



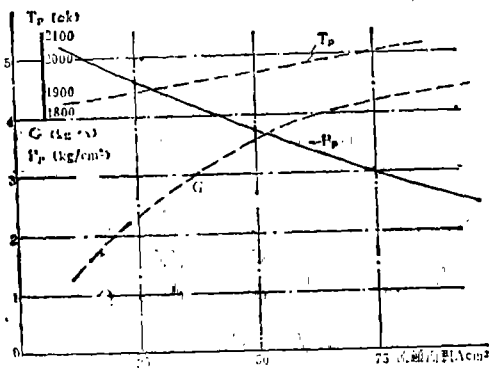


图3 电流过零时 $P_p$ ,  $T_p$ ,  $G$ 对流通面积 $A$ 的关系

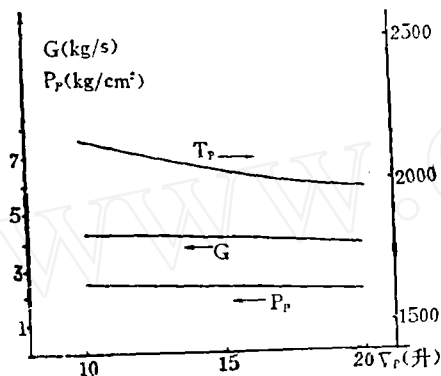


图4 电流过零时压力室压力、温度、流量与压力室容积的关系

$V_E = 3 \times 10^{-2} \text{m}^3$ , 流通面积 $A = 100 \text{cm}^2$

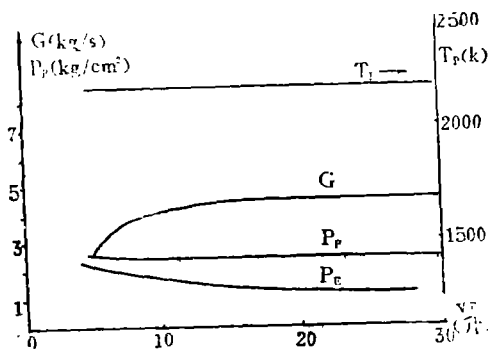


图5 电流过零时压力室压力、温度、流量及排气室压力与排气室容积的关系

$V_r = 10 \text{升} = 10^{-2} \text{m}^3$ , 流通面积 $100 \text{cm}^2$

### 三、算例

SF<sub>6</sub>无压气作用的气自吹断路器

$I_m = 25,000 \text{A}$ , 电弧电压(最大值)500V

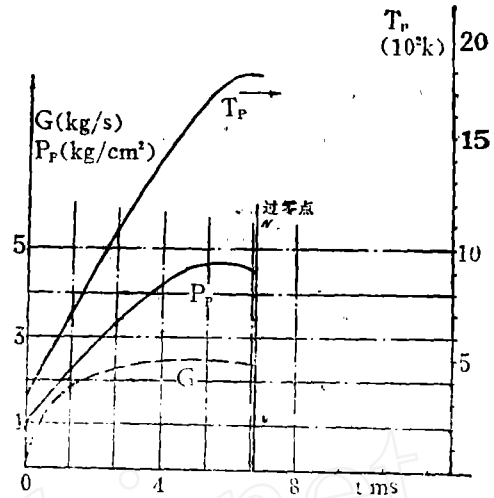


图6 断路器开断后压力室内压力 $P_p$ 、温度 $T_p$ 、流量 $G$ 随时间的变化

SF<sub>6</sub>“自流动型” $V_P = 10^{-2} \text{m}^3$ ,  $V_E = 3 \times 10^{-2} \text{m}^3$   
 $I = I_m \sin(\omega t + \psi)$ ,  $\psi = 57.3^\circ$ ,  $u = 500 \text{V}$   
 流通面积 $A = 26 \text{cm}^2$

作为算例, 本文计算了从触头断开到电流过零的热力学过程。SF<sub>6</sub>的热力学性质参考文献<sup>[7]</sup>。为简化起见, 端电压假设为常数, 这在大多数情况下是可以这样近似的<sup>[8]</sup>, 当然也可以是以任何已知的按时间变化关系式输入。计算结果表明:

1. 流通面积超过50cm<sup>2</sup>后, 对流量不敏感。因而流通面积应选择在流量小一些, 而使压力室的压力较高的流通面积(例如25cm<sup>2</sup>)下对灭弧较有利, 见图3。

2. 压力室容积的大小, 在一定范围内对流量的影响不很明显, 见图4。但容积过小会导致温度上升太高。

3. 排气室容积太小时, 其压力会很快提高, 使流量减少。但在超过一定数值后, 对流量的影响很小, 见图5。所以排气室容积应选择在进入流量平直段的附近值。

4. 图6所示为触头分开到电流过零的过程。对于这个过程流量最大处不是发生在电流过零时。这一过程与电弧随时间变化的详细分析是直接有关的。

## 附录

从通用能量方程:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} = -\operatorname{div}(\rho e \vec{v}) - P \operatorname{div} \vec{v} + \mu(\operatorname{rot} \vec{v})^2 + \left(\lambda + \frac{\mu}{3}\right) \cdot (\operatorname{div} \vec{v})^2 + \frac{j^2}{\sigma} + K_a \nabla^2 T$$

(见“计算物理学方法第九卷等离子体物理学” P349)

式中  $\mu, \lambda$  为第一第二粘性系数

$K_a$  导热系数

$e$  单位质量内能

$P, \rho, T$  分别为压力、密度、温度

展开式:

$$e \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial e}{\partial t} = -\operatorname{div} \rho \vec{v} - \rho \vec{v} \cdot \operatorname{grad} e - \rho \operatorname{div} \vec{v} + \frac{j^2}{\sigma} + \left[ \mu(\operatorname{rot} \vec{v})^2 + \left(\lambda + \frac{\mu}{3}\right) \cdot (\operatorname{div} \vec{v})^2 + K_a \nabla^2 T \right]$$

$$\therefore \rho \frac{de}{dt} = \rho \left( \frac{\partial e}{\partial t} + \vec{v} \cdot \operatorname{grad} e \right)$$

$\therefore$  上式可写为:

$$e \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vec{v} \right) + \rho \left( \frac{de}{dt} - \vec{v} \cdot \operatorname{grad} e \right) = -\rho \vec{v} \cdot \operatorname{grad} e - P \operatorname{div} \vec{v} + j^2 / \sigma + [\dots\dots\dots]$$

从连续方程  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) \leq 0$

$$\therefore \rho \frac{de}{dt} = -P \operatorname{div} \vec{v} + j^2 / \sigma + [\text{中括号内各项}]$$

对整个容积积分:

$$\oint_V P \frac{de}{dt} dV = - \oint_V P \operatorname{div} \vec{v} dV + \oint_V j^2 / \sigma dV$$

取这些参数整个体积内的平均参数, 采

用 Gauss 定理

$$M \frac{de}{dt} = -P \oint_A \vec{v} \cdot d\vec{A} + w_j$$

其中  $M = \oint_V \rho dV$  为容积内气体质量

$A$  为封闭面  $\therefore -P \oint_A \vec{v} \cdot d\vec{A}$  应包括两部分, 一部分为活塞移动引起的单位时间内容积的变化, 另一部分为容积流量。

$$\begin{aligned} \therefore M \frac{de}{dt} &= -P \left( \frac{dV}{dt} + \frac{dM}{dt} \cdot \frac{1}{\rho} \right) + w_j \\ &= -P \frac{dV}{dt} + \frac{dM}{dt} \cdot RT + w_j \end{aligned}$$

$\vec{v}$  表示速度向量,  $V$  表示体积。

### 参考文献

1. Flurscheim, C.H. Power Circuit Breaker Theory and Design (1975)
2. Ragaller, K. (editor), Current Interruption in High-Voltage Networks. New York, Plenum (1978)
3. Ragaller, K. "Physics of Arcs in Circuit Breakers." Proc. of the 13th Inter. Conf. on Phynomena in Ionized Gases (1977) PP 251-268
4. Vshio, T. etc. "Self-interruption by a Gas Circuit Breaker without Puffer Action IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 8 1981 PP 3801-3810
5. Veda, Y. etc. "Self-flow Generation Phenomena in a Gas Circuit Breaker without Puffer Action." ibid Vol. PAS-100 No. 8 (1981) PP3888-3898
6. Murai, Y. etc. An Improvement of Low Current Interrupting Capability in Self-Interruption GCB, ibid, Vol. PAS-101, No. 2 (1982) PP448-452
7. Frost, L.S. et al. "Composition and Transport Properties of SF<sub>6</sub> and their Use in a Silmplified Anthalpy Flow Arc Model." Proc. of the IEEE, Vol. 59, No. 4, (1971) P474-485
8. 常微分方程数值解法 南京大学数学系编, 科学出版社 (1979) 51-61