

气枪工作原理的等效电路分析

郑 昌 武

(中国科学院东海研究站)

本文根据气动力学原理分析了气枪的充气、放气规律及活塞受力后的状态，建立了气枪的等效电路方程，并绘出了气枪工作原理的等效电路图。利用等效电路对气枪的工作过程进行了分析，从而得到了能使气枪正常运行各另部件之间的有关定量关系式，为气枪的工程设计提供了计算依据。

前 言

气枪作为一种高效率的人工激发震源在海洋及浅水湖沼地带的地震勘探中得到广泛的应用^{[1][2][3]}。现在不仅有不同型号的气枪作为商品出售，同时对于气枪引爆后释放出来的高压空气在水中或泥层介质中激发地震波的机理问题也进行了较为深入的研究^{[3][4]}。然而对于气枪本身工作原理的分析却做得不是很多，致使在气枪设计过程中某些部件只能定性的估计。由于气枪是一种在气动力作用下由机械部件控制的对高压空气进行贮存和释放的器件，因此描述整个系统工作状态的数学物理方程的建立和求解比较困难，而且采用这种方法所得的结果应用于工程设计时也不简便。

本文将要证明气枪的工作过程可以用电路进行等效，从而可将电路的研究方法用于对气枪的分析，由此得出为保证气枪可靠工作时各个部件之间所应满足的定量关系，为气枪的工程设计提供了计算方法。

(一)、气枪的基本结构及工作原理简介

图1—1，图1—2分别为单气室枪和双气室联合枪的工作原理图。它们的顶部都有一

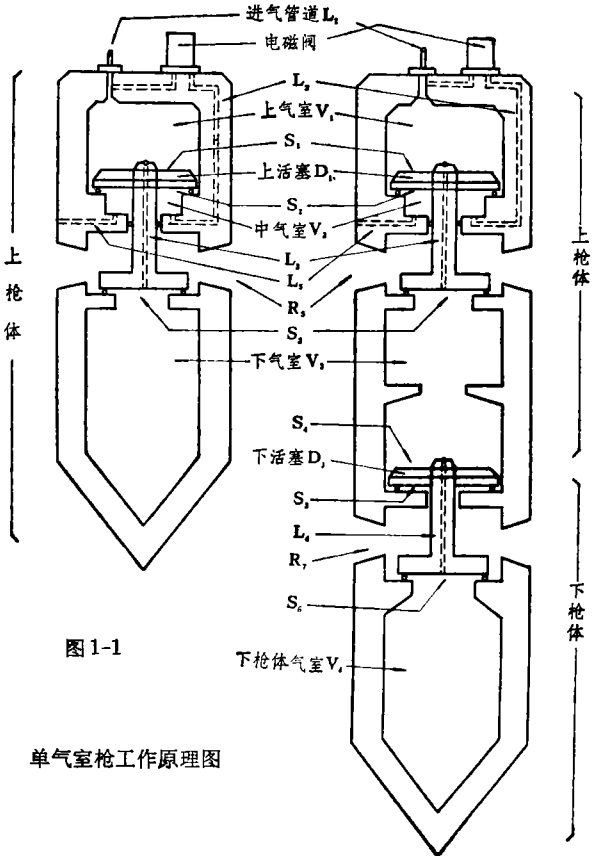


图 1-1

单气室枪工作原理图

图 1-2 双气室联合枪工作原理图

根与气源相通的进气管路 L_1 及控制气枪引爆的电磁阀；下面便是枪体，它分为上，中下三个气室 V_1, V_2, V_3 ，密封活塞 D_1 ，中气室充气孔道 L_2 ，中气室泄气孔道 L_5 ，及下气室进气管道 L_3 。双气室联合枪与单气室枪在结构上的区别在于联合枪比单枪增加了一个下枪

体, 其中包括: 气室 V_4 , 联动活塞 D_2 , 及 V_4 的进气孔道 L_4 。从结构上看, 联合枪下枪体的上气室便是上枪体的下气室。

S_1, S_2, S_3 分别表示活塞 D_1 对应于 V_1, V_2, V_3 三个气室内气体压力的作用面积。 S_4, S_5, S_6 为活塞 D_2 对应于气室 V_3, V_4 内气体压力的作用面积。它们满足关系式:

$$S_1 > S_3, S_2 > S_1 - S_3, S_4 > S_6$$

气枪的工作原理如下:

在充气过程中, 高压空气源通过充气管道 L_1 进入上气室 V_1 , 接着通过活塞 D_1 上的进气孔道 L_3 进入气室 V_3 , 对于联合枪还将通过联动活塞 D_2 上的进气管道 L_4 进入气室 V_4 。充气过程结束, V_1, V_3, V_4 三个气室内的气体压强均为 P_0 , 与气源平衡。此时上、下两个枪体的活塞 D_1, D_2 分别受到 $P_0(S_1 - S_3)$ 及 $P_0 \cdot (S_4 - S_6)$ 的两个方向向下的作用力而位于最低位置将 V_3, V_4 两个气室的排气孔 R_5, R_7 关闭, 高压空气被贮存于这两个气室之中。当气枪引爆时, 由气枪控制器送来的电流脉冲启动电磁阀, 即有一定量的高压空气经过管路 L_2 送入气室 V_2 , 从而在活塞 D_1 上施加了一个方向向上的作用力 $P_0 S_2$, 当它达到能使活塞 D_1 上所受气体作用的总合力 $P(t)(S_1 - S_2 - S_3)$ 克服活塞本身的自重 $m_1 g$ 和摩擦力 F_{D1} 时便推动活塞向上运动, 气室 V_3 的排气孔 R_5 被打开向外排放高压空气, 其内部的气体压强急剧下降。在气室 V_3 放气时作用在联动活塞 D_2 上的力 $P_3(t)S_4$ 不断减小, 当它达到使 D_2 的两受力面 S_4, S_6 上的合力能克服自重 $m_2 g$ 和摩擦力 F_{D2} 时便也开始向上运动, V_4 的排气孔 R_7 被打开使内部的高压空气向外释放加强了对枪外介质的冲击。

V_3, V_4 两气室内的高压空气释放到一定程度后, 由于高压空气不断地从顶部的 L_1 中流入补充, 作用在各个活塞面上气体的总合力方向发生变化, 再加上活塞本身自重的作用, D_1, D_2 开始向下运动分别将 V_3, V_4 的排气孔关闭, 高压空气再一次贮存在这两个

气室之中, 等待下一次的激发。

(二)、气枪的几个基本功能分析:

1. 充气过程:

压强、温度、密度分别为 P_0, T_0, ρ_0 的气源通过一根孔口直径相对于被充气容器的体积来说是很小的管道充气的最简单情况如图—2所示

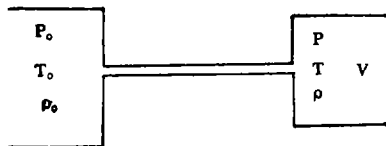


图 2 最简单的充气情况

对于这种情况的充气具有下列特征^[7],

当容器 V 中的气体压强 P 小于 $\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} P_0$ 时 ($k=1.4$ 为空气的比热比), 在管路的出口处气体以声速出流到 V 中, 并且流入到 V 中的气体质量流 Q (单位时间流入到 V 中的气体质量) 为一常数, 它不因 V 中的气体压强增大而改变。

$$Q = C_0 f \rho_0 \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1} R_0 T_0} \quad (2-1)$$

其中: f ——输气管道的出流面积

R_0 ——气体常数

C_0 ——流量系数。对于确定的气体它取决于管路内壁的光滑程度及管路的几何状态。

随着 V 内气体质量的增加, 气室内的气体压强 $P(t)$ 不断升高, 只有当 $P(t) >$

$$\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} P_0 \text{ 以后, 输气管道出口处的气体}$$

出流速度才降低到声速以下, 此时流入到 V 中的气体质量流 Q 将不再保持恒定, 而是随着 V 内气压的升高而逐渐减小到 0

$$Q = C_0 f \rho_0 \sqrt{\frac{2k}{k-1} R T_0} \left(\frac{P(t)}{P_0}\right)^{\frac{1}{k}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{P(t)}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \quad (2-2)$$

当 $P(t) > P_K = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} P_0$ 时

P_K 称之为充气过程中 V 内的临界气体压强。在忽略充气过程中容器对外的热辐射和传热的影响，可以得到容器 V 内的气体压强未超过 P_K 时的声速流充气期间压强随时间的变化规律由下式表示：

$$P(t) = \frac{k C_0 f P_0 \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1} R_0 T_0}}{V} t = \frac{0.96 C_0 f P_0 \sqrt{R_0 T_0}}{V} t \quad 0 < t < t_k$$

其中 t_k 为 V 内的气体压强达到 $P = P_K$ 的时刻

对于 V 内的气压超过 P_K 的亚声速流充气期间， V 内气体密度的变化为：^[7]

$$V \frac{d\rho}{dt} = C_0 f \rho_0 \sqrt{\frac{2k}{k-1} R_0 T_0} \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{k-1}} \quad (2-4)$$

将上式等号右端在 $\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{\left(1 + \frac{2}{k+1}\right)^{\left(\frac{1}{k-1}\right)}}{2}$

$= 0.817$ 处展开成泰勒级数后取一级近似，并利用 $t = t_k$ 时 $\rho = \rho_k = \rho_0 \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}$ ， $t \rightarrow \infty$ 时 $\rho = \rho_0$ 的初始条件和终值条件，便可得出亚声速流的充气期间，容器 V 内气体密度随时间的变化为：

$$\rho(t) = \rho_0 - (\rho_0 - \rho_K) e^{-\frac{C_0 f \sqrt{R_0 T_0}}{V} (t - t_k)} \quad t \geq t_k \quad (2-5)$$

ρ_k 为 V 内的气体压强为 P_K 时所对应的气体密度。

在亚声速流充气期间，不考虑气体对外界的热交换时其压强与密度之比近似于声速的平方^[7]。对空气来说当压强在150公斤/厘米²及其对应的临界压强 $P_K = 79$ 公斤/厘米² 之间变化时相应的声速变化范围为1080米/秒~1335米/秒^[8]，在这个压强变化范围内的声速用1207米/秒代替时，其相应的误差约为10%，因而我们可根据(5)式近似地给出在亚声速充气期间容器 V 内的气体压强随时间的变化为：

$$P(t) = P_0 - (P_0 - P_K) e^{-\frac{C_0 f \sqrt{R_0 T_0}}{V} (t - t_k)} \quad t > t_k \text{ 时} \quad (2-6)$$

综合(2-3)，(2-6)两式的结果，在整个充气期间容器 V 内气体压强随时间的变化规律如图-3所示

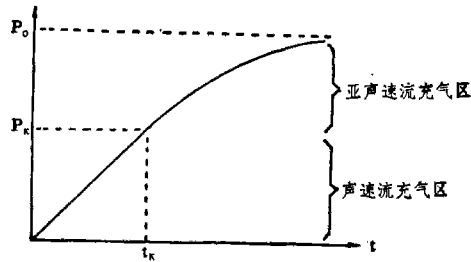


图3 充气时容器内压强随时间变化规律

在(2-3)，(2-6)两式中分别作下列的类比

$$\begin{aligned} 0.96 C_0 f \sqrt{R_0 T_0} P_0 &\rightarrow \text{电流 } I \\ \text{容积 } V &\rightarrow \text{电容 } c \\ \text{气阻 } \frac{1}{C_0 f \sqrt{R_0 T_0}} &\rightarrow \text{电阻 } r \\ \text{气压 } \begin{cases} P(t) \\ P_0 \\ P_K \end{cases} &\rightarrow \text{电压: } \begin{cases} u(t) \\ u_0 \\ u_K \end{cases} \end{aligned}$$

则(2-3)，(2-6)两式改写为：

$$u(t) = \frac{It}{C} \quad 0 < t < t_K$$

$$u(t) = u_0 - (u_0 - u_K) e^{-\frac{t-t_K}{cr}} \quad t > t_K$$

从而看出声速流充气等效于电流源 $I = 0.96C_0f\sqrt{R_0T_0}P_0$ 对电容的充电,亚声速流充气等效于电压 $u_0 = P_0$ 通过电阻 $r = \frac{1}{C_0f\sqrt{R_0T_0}}$ 对电容 c 的充电(见图—4)。对于这种由于气流本身特性所造成的充气过程中根据容器内的气压低于或高于临界压强而区分为声速流和亚声速流充气的两个阶段在图—4 中通过虚线方框 Z 中的理想电路来模拟。当 $V_1 = V(t) \cdot 1.893 < V_0$ 时表明电容 c 上的电压低于临界电压,比较器输出将开关 J 置“0”位置电容处于在电流源 $I = 0.96C_0f\sqrt{R_0T_0}V_0$ 充电状态,此相应于容器处于声速流充气阶段,当 $V_1 > V_0$ 时比较器输出将 J 置“1”位置,电容处于电压 V_0 经过电阻 $r = \frac{1}{C_0f\sqrt{R_0T_0}}$ 充电状态,相应于容器的亚声速流充气阶段。

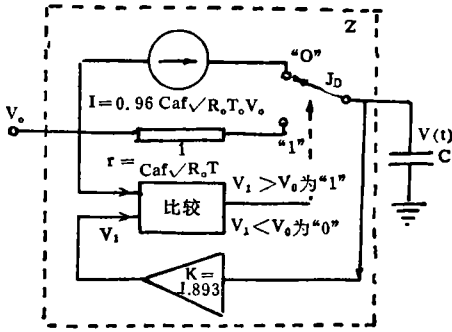


图 4 容器充气时的等效电路

2. 排气过程:

气枪被引爆以后,活塞开始向上运动,排气孔被打开,贮存在气室内的高压空气向外排放。一般情况下气室外介质空间的压强 P_a 近似于常量(例如在水中, P_a 等于气枪所在深度的静水压强。在泥层中 P_a 近似于泥土的无排水极限抗压强度^[6])。气室内的高压空气向外排放过程中同样存在着声速流排气与亚声速流排气两个阶段,对应于这两个排气过程的枪室内气体质量的流出量为:^[7]

$$\frac{d(V\rho)}{dt} = -C_{Q1}F\rho\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}\sqrt{\frac{2k}{k+1}R_0T}\quad (2-7)$$

$$P(t) > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{-k}{k-1}} P_a = P_{K1}$$

$$\frac{d(V\rho)}{dt} = -C_{Q2}F\rho\left(\frac{P_a}{P(t)}\right)^{1/k}\sqrt{\frac{2k}{k-1}R_0T\left[1-\left(\frac{P_a}{P(t)}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}\quad (2-8)$$

$$P(t) \leq P_{K1}$$

P_{K1} 为气枪放气时的临界压强,显然它由气枪所在环境的外界压强 P_a 所决定。 C_{Q1} , C_{Q2} 为对应于声速出流和亚声速出流两种放气状态时的流量系数。 F 为排气孔的有效截面积, ρ 为气室内的气体密度,它与气体的温度 T , 压强 P 有下列关系 $\rho = \frac{\mu P}{R_0 T}$ (μ 为空气的平均克分子量, R_0 为气体常数), 从而有

$$\frac{d(V\rho)}{dt} = V\left[\frac{\mu}{R_0 T}\frac{dP}{dt} - \frac{\mu P}{R_0 T^2}\frac{dT}{dt}\right]\quad (2-9)$$

气室的排气近似于绝热膨胀,因而在放气过程中气体的温度和气压服从下列关系:

$$T = T_0\left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\quad (2-10)$$

T_0 , P_0 为排气前枪室内气体的温度和压强, 将(2-10)式代入(2-9)后有

$$\frac{d(V\rho)}{dt} = \frac{\mu V}{kR_0 T}\frac{dP}{dt}\quad (2-11)$$

从而得到

$$\frac{dP}{dt} = -\left[C_{Q1}Fk\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}\sqrt{\frac{2k}{k+1}R_0T_0\left(\frac{P}{P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}}}\right]\frac{P}{V}\quad (2-12)$$

$$P > P_{K1}$$

$$\frac{dP}{dt} = -\left\{C_{Q2}Fk\left(\frac{P_a}{P}\right)^{\frac{1}{k}}\left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{2k}}\right\}$$

$$\sqrt{\frac{2k}{k-1}R_0T_0\left[1-\left(\frac{P_a}{P}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}\frac{P}{V}$$

$$P \leq P_{K1}$$

由于气枪激发以后枪室内的气体压强 P 及排气口的等效出流面积 F 均随着时间 t 不

断地变化，因此可以定出一个时间函数

$$\frac{1}{R(t)} = \begin{cases} C_{O_1} F(t) k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1} R_0 T_0 \left(\frac{P(t)}{P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} R_0 T_0} & P > P_{K1} \\ C_{O_2} F(t) \left(\frac{P_a}{P(t)}\right)^{\frac{1}{k}} \left(\frac{P(t)}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{\gamma k}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} R_0 T_0 \left[1 - \left(\frac{P_a}{P(t)}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} & P \leq P_{K1} \end{cases} \quad (2-14)$$

利用(2-14)式可将(2-12)，(2-13)式合并成

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{P}{V \cdot R(t)} \quad (2-15)$$

从(2-14)式看出在排气开始的瞬间， $P(t) = P_0$ ，而排气孔的出流面积很小因而 R 很大，随着活塞上升排气孔出流面积 F 不断增大最后达到恒定，而 $P(t)$ 随放气时间延长而不断减小致使 $R(t)$ 单调地下降，因此当对此式施行 $0 \rightarrow t$ 积分时可以利用中值定理及 $P(t)_{t=0} = P_0, P(t)_{t \rightarrow \infty} = P_a$ 的条件得到

$$P(t) = (P_0 - P_a) e^{-\frac{t}{V R(\zeta)}} \quad 0 < \zeta < t \quad (2-16)$$

将 $R(\zeta)$ 类比于一个随时间 t 变化的电阻，则可得气枪激发后对外放气时气枪室内气压变化的规律用一个初始电压为 P_0 的电容 V 通过一个时变电阻放电的过程来等效(见图一5)。

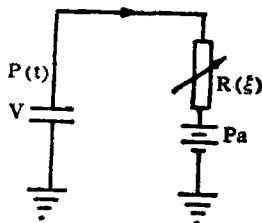


图5 枪室放气时的等效电路

3. 活塞的开关作用

气枪中的活塞相当于电路中的开关。活塞关闭，高压空气被密封于气室之中，它可类比于充以一定量电荷的电容器其放电回路被开关切断，电容上的电压保持不变。活塞打开气室内的高压空气通过排气孔向外排放，气室内的空气量不断减少，气压下降。前节已经证明放气过程中枪室内气压随时间变化的规律相当于电容的放电回路被开关接通后

通过一可变电阻放电时电容器上电压变化的情况。活塞的“开”或“关”取决于它受力的情况，由图6可知当 $P_1 S_1 + mg + F_D > P_2 (S_1 - S_*) + S_3 P_3$ (3-1)

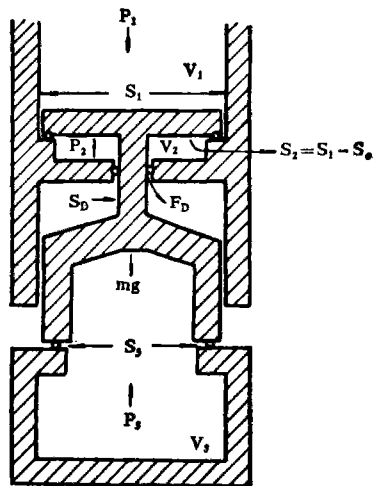


图6 活塞受力状态示意图

成立时活塞关闭

反之

$P_1 S_1 + mg + F_D < P_2 (S_1 - S_*) + P_3 S_3$ 时活塞开启

其中 P_1, P_2, P_3 及 $S_1, S_2 = S_1 - S_*, S_3$ 分别图1中的上、中、下三个气室 V_1, V_2, V_3 内的气体压强和对应于这些气压的活塞受力面积， S_* 为活塞连杆的截面积， mg 为活塞重量， F_D 为活塞连杆与导向套之间的摩擦力

(3-1)，(3-2)两式所表示的判断活塞“开”或“关”状态的一组不等式的等效电路如图7所示

由图可知 $P_1 S_1$ 与 $(P_2 S_2 + P_3 S_3)$ 两组电压比较的结果决定了开关 J_D 取“1”或“0”的状态，当(3-1)式成立时 J_D 置“0”位置，活塞关闭。(3-2)式成立时 J_D 置“1”位置，活塞

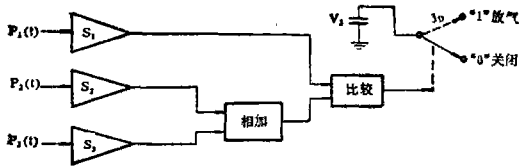


图7 活塞的等效电路

开启， V_3 对外放气。显然 $mg + F_D$ 为比较器的比较灵敏度，“关”与“开”之间的过渡时间近似地等于

$$t \approx \sqrt{\frac{2Lm}{[P_1S_1 + mg - (S_2P_2 + S_3P_3) - F_D]}} \quad (3-3)$$

(三) 气枪的等效电路及气枪正常工作的条件

根据第一节中所述气枪工作原理及第二节中对气枪基本功能的分析可以画出气枪的等效电路如图8所示，该电路中的原件与图1中所表明的气枪各部件的对应关系列于表1之中。

从图8可以看出电路的工作原理如下：

电源接通的瞬间 D_1 、 D_2 内的两比较器输入端电压之差不会超过各自的翻转电平，电容 C_1 、 C_3 、 C_4 的放电回路被切断，电源通

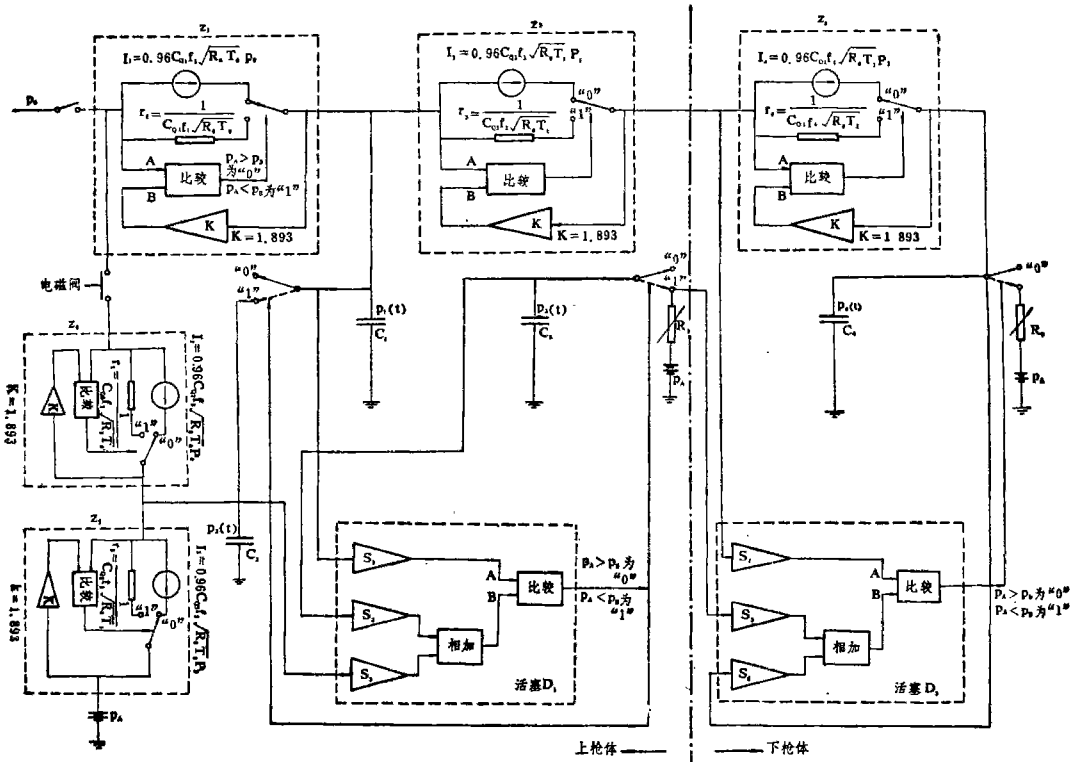


图8 气枪等效电路图

过 Z_1 、 Z_3 、 Z_4 充电的结果使各电容上的电压不断升高。在充电过程中根据每个 Z 的两端电压之比大于或小于 $K = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{1-k}} = 1.893$ 两种情况而使每个电容充电均具有电流源充电或电压源充电的两种可能性。如各电容上

的电压经过与之相联的 D_1 或 D_2 中的放大器作用于相应的比较器输入端不会引起比较器输出状态的改变，则充电的最后结果必然是使各电容器上的电压与电源电压 P 达到平衡，此时电荷被贮存于电容 C_1 、 C_3 、 C_4 之中，电路处于稳定状态。

表1 气枪机械部件与等效电路元件对照表

等效电路(图8)	气 枪(图1)
(1)电容 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4	(1)气室 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4
(2)电容的充电回路 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4	(2)气室的进气管道 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4
(3)电容 C_2 的放电回路 Z_5	(3)中气室 V_2 释压泄气孔 L_5
(4)虚线方框 D_1 中的电路及开关 J_{D-1}	(4)上枪体活塞 D_1
(a)放大器 S_1 、 S_2 、 S_3	(a)活塞 D_1 在 V_1 、 V_2 、 V_3 三个气室内的气压作用面积 S_1 、 S_2 、 S_3
(b)比较器—1的电压比较灵敏度	(b)活塞 D_1 的自重 m_{D1} 和摩擦力 F_{D1}
(c) J_{D-1} 置“0”位置: 切断 C_3 放电回路及 C_2 、 C_3 的并联回路	(c)活塞 D_1 位于最低位置: 密封气室 V_2 和 V_3
(d) J_{D-1} 置“1”位置: C_3 通过 R_5 放电, C_2 与 C_3 并联	(d)活塞位最高位置: 气室 V_3 通过排气孔 L_5 放气, V_2 、 V_3 联通。
(5)虚线方框 D_2 中的电路及开关 J_{D-2}	(5)下枪体活塞 D_2
(a)放大器 S_4 、 S_5 、 S_6	(a)活塞 D_2 在气室 V_3 、 V_4 气室内的气压作用面积 S_4 、 S_5 、 S_6
(b)比较器—2 的电压比较灵敏度	(b)活塞 D_2 的自重 m_{D2} 和摩擦力 F_{D2}
(c) J_{D-2} 置“0”位置: 切断 C_4 的放电回路	(c)活塞 D_2 位最低位置, 封闭气室 V_4
(d) J_{D-2} 置“1”位置: C_4 通过 R_7 放电	(d) D_2 处于最高位置, 气室 V_4 经排气口放气
(6)可变电阻 R_5 、 R_7	(6) V_3 气室排气孔 R_5 、 V_4 气室排气孔 R_7
(7)电源电压 P_0	(7)气源压强 P_0
(8)恒压电源 E	(8)枪室外介质压强 P_0

当需要电容放电时, 用具有一定宽度的脉冲使开关 J_K 与电源接通, 经过 Z_2 对电容 C_2 充电。显然, 当 C_2 上的电压增加到使 D_1 中的比较器 B 端电压大于 A 端电压时, 比较器的输出状态改变, 并置开关 J_{D-1} 于 “1” 位置, 电容 C_3 上的电荷开始通过可变电阻 R_5 释放, C_3 上的电压 $P_3(t)$ 也将开始急速下降, 随之 D_2 内比较器 A 端的电压跟着减小, 同时, B 端电压升高, 当达到 A 端电压低于 B 端电压时, D_2 内的比较器输出状态改变, 开关 J_{D-2}

置于 “1” 位置, C_4 的放电回路也被接通, 经过可变电阻 R_7 放电, C_4 上的电压 $P_4(t)$ 也开始急速下降, 此时电路处于激发状态。

C_3 下降的电压经过放大器 S_3 反馈到 D_1 内比较器的 B 端当 $P_B < P_A$ 以后, 比较器的输出恢复到激发前的状态, 开关 J_{D-1} 又被置于 “0” 位置, C_3 的放电回路再次被切断, 在充电的作用下 C_3 上的电压 $P_3(t)$ 开始回升, 此时 C_4 上的电压 $P_4(t)$ 由于电荷继续通过 R_7 释放而继续下降, 但是这种 $P_3(t)$ 上升和 $P_4(t)$ 下降的双重作用的结果, 将很快导致 D_2 内的比较器 A 端电压大于 B 端, 从而改变了比较器的输出状态, 并通过 J_{D-2} 将 C_4 的放电回路切断。在 J_{D-1} 切断 C_3 放电回路的同时也将 C_2 、 C_1 之间的并联通道断开, 残存于 C_2 中的电荷通过 Z_5 释放, C_2 上的电压逐渐减小, 使 D_1 内比较器 A 端电压大于 B 端电压的程度得到加强, 从而保证 C_1 、 C_3 、 C_4 的电压充电到 P_0 为止, 电路再次处于稳定状态之中。

由此看出, 图 8 电路的工作原理正确地模拟了气枪的整个工作过程, 因而我们可以利用对图 8 电路的分析, 找出为保证气枪正常工作所要求的各部件相互之间应当满足的定量关系及其他有关参数的计算。

1. 可靠充气的条件:

气枪可靠充气是指充气阀门打开后直至各气室压强达到与气源压强 P_0 相平衡的整个充气期间不发生自激放炮。从等效电路看出, 充电结束后电容 C_1 、 C_3 、 C_4 上电压均为 P_0 , 同时由于开关 J_{D-1} 切断后的绝缘电阻不可能达到理想要求(相当于图—1中 V_2 、 V_1 之间的漏气), C_2 上将会有漏电压存在, 下节将指明漏电压被控制在不大于 $\frac{1}{4}P_0$, 因此为了使整个充气期间不发生自激发炮现象, 需要满足

$S_1 > (S_3 + \frac{1}{4}S_2)$ 及 $(S_1 - S_2)P_1(t)$ 的上升速度大于 $S_3P_3(t)$ 的上升速度。比较图 9 与

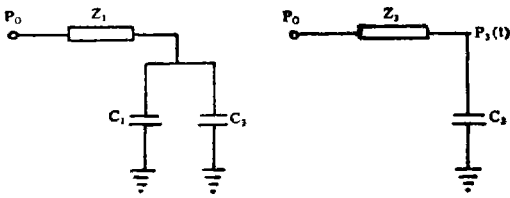


图9 气室充气过程的简化电路

图8两电路，此两图中标明的各元件对应相等，可以看出图9中 $P_1'(t)$ 的上升速度低于图8中 $P_1(t)$ 的上升速度，而 $P_3'(t)$ 的上升速度高于 $P_3(t)$ 的上升速度。从而根据(2—3)、(2—6)式得出

$$S_1 > (S_3 + \frac{1}{4}S_2) \quad (4-1)$$

$$\frac{1}{C_{Q1}f_1} < \frac{(S_1 - S_2)}{S_3} \frac{V_3}{(V_1 + V_2)} \frac{1}{C_{Q3}f_3} \quad (4-2)$$

由此看出为了保证气枪可靠地充气除了要求活塞与各气室的接触面需要满足(4—1)关系外，还要使得下气室进气管道 L_3 的气阻(图—1)比气源管道 L_1 的气阻大 $\frac{(S_1 - S_2)V_3}{S_3(V_1 + V_2)}$ 倍。根据同样原理对于双气联合枪除满足上述条件外还需要下列关系成立：

$$S_4 > (S_5 + \frac{1}{4}S_6) \quad (4-3)$$

$$\frac{1}{C_{Q3}f_3} < \frac{S_4 - S_5}{S_6} \frac{V_4}{V_3 + V_4} \frac{1}{C_{Q4}f_4} \quad (4-4)$$

2. 引爆压强 P_H 、中气室泄漏气压的控制、及触发信号时间宽度 Δt_H 的估算：

(1) 引爆压强 P_H ：能够推动活塞向上运动打开放气阀门所需要的中气室内最低的气体压强。

对应于等效电路图8中， P_H 是将 D_1 中比较器置于“1”状态时电容 C_2 上所具的最低电压

$$P_H = \frac{(S_1 - S_3)P_0 + m_1g + F_{D1}}{S_2} \\ = \frac{S_1 - S_3}{S_2} P_0 \quad (4-5)$$

气源压强 P_0 给定以后， P_H 由活塞有关面积的大小来决定。在设计气枪时 P_H 的选取不宜太小，以避免上气室 V_1 与中气室 V_2 之间的密封不好而形成的微小漏气将导致气枪的自激放炮。同时， P_H 也不能选择得很高，否则 V_2 上气压的建立过程将有一段时间处于亚声速流充气期间，气压随时间的上升较慢，这不仅会使触发时间延长，而且由于温度，部件组装时紧松程度的改变而引起的摩擦力不同或更换活塞后自重的不同均会引起触发时间不稳定程度的增加。根据以上两点考虑及计算上的方便， P_H 选择在 V_2 充气时的临界

压强附近较为合适，即 $P_H = \frac{1}{1893} P_0 \approx \frac{1}{2} P_0$

(2) 中气室的泄漏压强及其大小的控制：

活塞关闭排气孔，同时也将 V_1 、 V_2 隔开，由于密封不可能达到理想的程度， V_1 向 V_2 的漏气在 V_2 中产生漏气压强 P_L ，实践证明这种漏气效应往往是引起气枪自激放炮的主要原因之一，因此必须自中气室 V_2 向外开一释压泄气孔 L_5 (图1)，使漏入 V_2 的气体得以向外泄放，将 P_L 限制在允许的范围以内。仿照电子学中单稳态电路触发系统中干扰电平通常比触发脉冲幅度低6分贝的要求，在外界压强 P_a 可忽视的情况下根据(2—1)式可以得出泄压孔 L_5 的气阻必须比两气室之间密封件的漏气气阻小四倍，即 $C_{Q5}f_5 > 4C_{Q*}f_*$ ， C_{Q5} 、 f_5 与 C_{Q*} 、 f_* 分别为释压孔 L_5 和密封件泄漏的流量系数和等效出流面积。

(3) 触发脉冲宽度 Δt_H ：从电磁阀起对中气室充气起直到气压达到 P_H 值时所需要的充气时间。由图8可知在考虑到泄压孔 L_5 和漏气压强的影响，该值由下式估算：

$$\Delta t_H \approx \frac{V_2}{3.84[C_{Q2}f_2 - C_{Q5}f_5] \sqrt{R_0 T}} \quad (4-6)$$

3. 气室压力的释放幅度 ΔP ，及气压激发后恢复到稳态时的条件

(1) 气压的释放幅度 ΔP 是指活塞打开，

气室刚开始放气时的气压与活塞关闭时的气压之差, 即 $\Delta P = P_0 - P(tm)$ 。

气枪通过排气孔放气相当于图 8 中开关 J_{D-1} , J_{D-2} 跳变到“1”位置后电容 C_3 , C_4 分别通过可变电阻 R_5 , R_7 放电而引起 $P_3(t)$, $P_4(t)$ 急速下降的过程。在此期间 C_1 与 C_2 并联, 它通过 Z_3 , Z_5 流出的电荷量相比于所贮存的电荷来说很少, 而且电流经过 Z_1 不断的流入电荷补充, 因此 C_1 上的电压基本保持不变。在图 8 中当 C_3 上的电压下降到使 D_1 内比较器两输入端电压满足不等式 $S_2 P_0 + S_3 P_3(t) - S_1 P_0 < m_1 g + F_{D1}$ 时开关 J_{D-1} 开始从“1”位置跳到“0”位置, 此时 C_3 上的电压为:

$$P_3(tm) = \frac{(S_1 - S_2)P_0 + m_1 g + F_{D1}}{S_3} \\ \doteq \frac{(S_1 - S_2)}{S_3} P_0 \quad (4-7)$$

气压的释放幅度为:

$$\Delta P_3 \doteq \left[1 - \frac{(S_1 - S_2)}{S_3} \right] P_0 = \left[1 - \frac{S_{*1}}{S_3} \right] P_0 \quad (4-8)$$

式中的 S_{*1} 为上枪体活塞 D_1 的连杆截面积(见图 6) S_3 可近似地看成 V_3 气室出口面积(见图 1)。因此对单气室枪, 当活塞的连杆越细, 气室的口径越大气压的释放幅度便大, 能量的释放率越高。

C_3 的放电回路被 J_{D-1} 切断后, 电压 $P_3(t)$ 开始回升, 但它的上升速度比之 C_4 通过 R_7 放电时 $P_4(t)$ 下降要慢得多, 因此 J_{D-1} 跳变到“0”位置后紧跟着 J_{D-2} 也开始向“0”位置跳变, 因而联合枪下气枪排气孔被关闭时 V_4 间的剩余气压为

$$P_4(tm) = \left[\frac{(S_1 - S_2)}{S_3} P_0 \right] \left(\frac{S_4 - S_5}{S_6} \right) \quad (4-9)$$

气压的释放幅度为:

$$\Delta P_4 \doteq \left[1 - \frac{(S_1 - S_2)}{S_3} \frac{(S_4 - S_5)}{S_6} \right] P_0 \\ = \left[1 - \frac{S_{*1}}{S_3} \frac{S_{*2}}{S_6} \right] P_0 \quad (4-10)$$

S_{*2} 为图 1 中联合枪下枪体中活塞 D_2 的连杆截面积。因此当活塞与气室出口面积相同时联合枪比单枪气压的释放幅度大 $\left[1 + \frac{S_{*1}}{S_3} \right]$ 倍。

(2) 恢复到稳定状态的条件:

气室 V_3 , V_4 的排气孔关闭后内部的气压 $P_3(t)$, $P_4(t)$ 开始回升, 与此同时被活塞关闭在中气室 V_2 的高压空气通过 Z_5 的泄放作用自 P_0 开始下降, 只有在整个恢复阶段使得

$S_1 P_0 - [S_2 P_2(t) + S_3 P_3(t)] < m_1 g + F_{D1}$ 对任何 t 均成立, 气枪才能可靠地恢复到稳定状态。

由于此时 $P_2(t)$ 单调下降, $P_3(t)$ 单调上升, 而在排气孔关闭瞬间(4-6)式成立, 因此如果 $S_2 P_2(t)$ 的下降速度大于 $S_3 P_3(t)$ 的上升速度便可保证在恢复阶段不发生自激放炮现象。

在气枪通常使用的条件下一般满足 $P_0 \gg P_a$, 因此在能够引起气枪引爆的中气室气压的范围内 ($P_0 \sim P_H = \frac{1}{2} P_0$, P_H 为引爆压强) 再考虑到上气室 V_1 对中气室 V_2 的漏气影响, 中气室 V_2 内气压 $P_2(t)$ 的下降速度不慢于

$$\frac{1}{2} P_0 \frac{0.94 C_{Q5} f_5 \sqrt{R_0 T}}{V_2} - P_0 \frac{0.94 C_{Q*} f_* \sqrt{R_0 T}}{V_2}$$

而 V_3 内气压 $P_3(t)$ 的上升速度不快于

$$P_0 \frac{0.94 C_{Q3} f_3 \sqrt{R_0 T}}{V_3},$$

从而可得到气枪激发后恢复到稳定状态的条件为:

$$\frac{S_2 C_{Q5} f_5}{2V_2} - \frac{S_2 C_{Q*} f_*}{V_2} > \frac{S_3 C_{Q3} f_3}{V_3}$$

通常 $V_3 \gg V_2$, 再考虑到(2)节中所要求的中气室的泄漏压强小于 $\frac{1}{2} P_H$ 的要求, 一般取

$$C_{Q5} f_5 \geq 4 C_{Q*} f_*$$

也就是说中气室释压气孔的气阻最大不能超过过上气室与中气室间的泄漏缝隙气阻的 $\frac{1}{4}$ 。

(四) 结语

气枪的工作过程可以用一电路进行等效，它的基本特征为：

(1) 气枪的充气过程在电路上等效于对电容的充电，根据枪室内气体压强高于或低于临界压强的两种情况在电路上将分为电流源充电与电压源充电的两种形式。

(2) 气枪激发后气室内的高压空气通过排气孔对外放气相当于电容上的电荷经过一时变电阻的放电过程。

(3) 气枪中的活塞相当于一个由比较器输出电压控制的开关电路。

根据对单气室枪和双气室联合枪等效电路的分析，得到了下列结果：

(1) 为了保证气枪正常工作，在使用中不发生自激放炮现象，气枪各部件的机械参数和气动力学参数之间需要满足(4—1)，(4—2)，(4—3)，(4—4)式的关系式，同时要按照

$C_{05}f_5 > 4C_{0*}f_*$ 的要求控制中气室的密封精度。

(2) 引爆压强的大小，触发脉冲宽度的估算，及气室内气压的释放幅度可分别按(4—5)、(4—6)、(4—8)、(4—10)式计算。

参 考 文 献

- [1] Giles. B. F. "Pneumatic Acoustic Energy Source." *Geophysical Prospecting* 16 (1968) 21~53
- [2] Brode. E. C. et al "A Pneumatic Seismic Energy Source for shallow water/Marsh Areas" *Geophysical Prospecting* 18 (1970) 581~599
- [3] 张叔英, 郑昌武等“适用于浅水区的高效率气枪震源” *海洋地质研究* 第二卷第三期(1982)47~53
- [4] Safar. M. H "The Radiation of Acoustic wave from an Air Gun" *Geophysical prospecting* 24 (1976) 720~750
- [5] Ziolkowski. A. "A Method for Calculating the Output Pressure Waveform from an Air-Gun" *Geophys. J. R. Astr* 21 (1970) 137~161
- [6] 郑昌武, 张训义, 张叔英“湖泊沼泽气枪激发机理的研究”(待发表)
- [7] 复旦大学数学系编著“流体力学” 第十八章上海科学技术出版社1960年10月第一版
- [8] Φ, A. 鲍姆著众智译“爆炸物理学” 179页~180页科学出版社1963年6月第一版。

(上接第44页)

参 考 文 献

- [1] 贝歇尔, “乳状液理论与实践”, 科学出版社, 北京, 1978年, p.85。
- [2] Reddy S. R. and Fogler H. S., "Emulsion Stability of Acoustically Formed Emulsions", *Journal of Physical Chemistry*, Vol.84, No.12, 1980, p.1570.
- [3] Sun Yao-qiu and Yuan Wen-chang, "The Coal-content Measuring and Monitoring Equipment for COM", *Proc. Fourth International Symposium on Coal Slurry Com-bustion*, Vol.4, U. S. Department of Energy, Florida, 1982.
- [4] 钱榴清、曾毓华、张宏根、胡昌明, “柴油—水—添加剂体系乳化稳定性的研究”, 1982年掺水燃料与燃烧会议论文集, 安徽屯溪市, 1982.9。