

doi: 10.7690/bgzdh.2021.07.005

水下步枪气体调节器的运动规律

于鑫^{1,2}, 魏平¹

(1. 海军工程大学兵器工程学院, 武汉 430033; 2. 陆军工程大学军械士官学校, 武汉 430075)

摘要: 针对自动步枪在水下射击时活塞运动产生冲击力的问题, 对活塞运动规律进行研究。分别建立水下射击时弹丸活塞运动模型和水流对活塞冲击速度的计算模型, 对活塞的运动条件进行分析, 确定在子弹的推动下水流速度的大小。研究表明: 对于 5.8 mm 水陆两栖步枪, 当弹丸运动至导气位置的速度大于 360.25 m/s 时, 活塞才会发生运动, 该研究可用于水下射击条件下气动步枪自动机的动态分析。

关键词: 水下步枪; 活塞; 自动步枪; 流体动力学

中图分类号: TJ22 **文献标志码:** A

Movement Law of Underwater Rifle Gas Regulator

Yu Xin^{1,2}, Wei Ping¹

(1. Institute of Weapons Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Ordnance Officer School, Army Engineering University, Wuhan 430075, China)

Abstract: Aiming at the impact force caused by piston movement of automatic rifle during underwater shooting, research on piston movement law. Separately establish piston movement model during underwater shooting and calculation model of water flow to piston impact velocity, analyze piston movement condition, ascertain water flow velocity under projectile push. The research results show that: for the 5.8 mm amphibious rifle, the piston will move only when the velocity of the projectile to the air guiding position is greater than 360.25 m/s. The results of this paper can be used for the dynamic analysis of the automatic mechanism of pneumatic rifle under the condition of underwater shooting.

Keywords: underwater rifle; piston; automatic rifle; hydrodynamics

0 引言

水下步枪利用从枪管中引出的推进气体来驱动枪机完成开闭锁动作, 气体调节器包括一个通过导气口与枪管相连的导气箍和位于气缸内的活塞^[1]。水下步枪的工作原理同样也是基于气动步枪而来的。与空气中射击相比, 水下射击步枪的气动系统工作方式有很多不同: 在空气中射击时, 弹丸未运动至导气口之前, 推进剂气体不会通过导气箍进入自动机气缸, 此时活塞上因不会受到推进气体所施加的压力而不会移动; 在水下射击的情况下, 在射击前, 气缸体内已经充满了水, 当弹丸开始运动时, 枪管和气缸中的水也会随之立即运动。气缸内的水分 2 部分: 一部分通过活塞和气缸之间的间隙流动, 另一部分则会冲击活塞。如果水流的速度足够大, 达到使活塞产生运动的冲击力, 活塞的运动情况就会出现不确定性, 必须解决这个问题^[2-3]。

笔者建立一个数学模型来研究自动步枪在水下射击时, 弹丸运动到气口位置气体调节器活塞的运动规律。该数学模型由流体动力学理论推导而来,

并应用于某型 5.8 mm 水下自动步枪的研制。

1 数学模型

1.1 假设与模型

为便于建立数学模型, 笔者采用以下几点假设: 水具有不可压缩性和粘性; 实验时所用步枪完全浸没在水下; 活塞与导杆连为一体, 统称为气体调节器; 枪管水平放置, 水处于静止状态; 弹丸在枪管内运动时, 前方水的速度与弹丸速度相同; 水流对气体调节器冲击力的作用点位于活塞表面的中心^[4]。

根据上述假设, 在水下射击时, 在弹丸运动到导气口位置期间活塞运动的示意情况如图 1 所示。

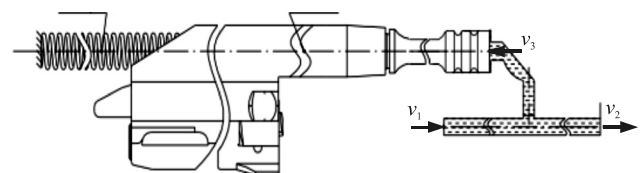


图 1 水下射击弹丸运动至气口位置的活塞运动模型
图中: v_1 为弹丸前面的水流速度, 与弹丸的速度相

收稿日期: 2021-03-24; 修回日期: 2021-04-25

作者简介: 于鑫(1977—), 男, 吉林人, 硕士, 从事兵器工程专业研究。E-mail: Yx2150@qq.com。

等, 可通过内弹道理论计算; v_2 为枪口处出水的速度; v_3 为水流冲击活塞的速度^[5]。

在弹丸运动到气口位置的时间段内, 气体调节器的受力分析如图 2 所示。其中包括:

1) 浮力 F_A , 根据阿基米德定律, 浮力可通过下式确定:

$$F_A = V_{bk} \rho_n g \quad (1)$$

式中: V_{bk} 为导气装置组件在水下的体积; ρ_n 为水的密度; g 为重力加速度。

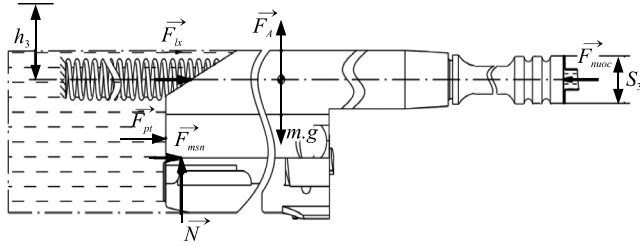


图 2 导气装置受力分析

2) 重力 mg , 机匣造成的法向力 N :

$$N = mg - F_A \quad (2)$$

3) 弹簧的回弹力 F_{lx} 。

4) 水的阻力 F_{moc} , 包括静水压力引起的阻力和动水压力引起的阻力。

$$F_{moc} = \rho_n g h_3 S_3 + \rho_n v_3^2 S_3 / 2 \quad (3)$$

式中: S_3 为活塞的表面积; h_3 为水面与导杆轴线之间的距离。

5) 导杆组件与机匣导向肋之间的静摩擦力为:

$$F_{msn} = (mg - F_A) = f_b (mg - V_{bk} \rho_n g) \quad (4)$$

式中 f_b 为导杆组件与机匣导向筋间的静摩擦系数。

6) 静水压力引起的阻力为:

$$F_{bt} = \rho_n g h_3 S_{bk} \quad (5)$$

式中 S_{bk} 为导杆组件的截面面积。

1.2 螺栓支架的运动条件

当水流的冲击力大于作用在活塞上的总阻力时, 导杆将产生运动。也就是说:

$$F_{muoc} \geq F_{lx0} + F_{pt} + F_{msn} \quad (6)$$

将式(1)~(5)代入式(6), 可得:

$$\rho_n g h_3 S_3 + \rho_n v_3^2 S_3 / 2 \geq F_{lx0} + \rho_n g h_3 S_{bk} + f_b (mg - V_{bk} \rho_n g) \quad (7)$$

因此, 导杆运动条件的数学描述为:

$$v_3 \geq \sqrt{\frac{2[F_{lx0} - \rho_n g h_3 S_3 + \rho_n g h_3 S_{bk} + f_b (mg - V_{bk} \rho_n g)]}{\rho_n S_3}} \quad (8)$$

1.3 计算冲击到活塞上的水流速度

笔者的目的主要是确定在以 v_1 速度运动的子弹的推动下, 水流速度 v_3 的大小, 并以此来检查是否

达到式(8)所描述的运动条件。该计算模型的建立基于如下假设: 水流在导气箍内的运动距离很短, 才可忽略导气箍壁与水之间的摩擦, 只考虑水与枪管内壁之间的摩擦力 (F_{ms1} 、 F_{ms2}); 此外, 假设水流是稳定的。计算模型如图 3 所示。

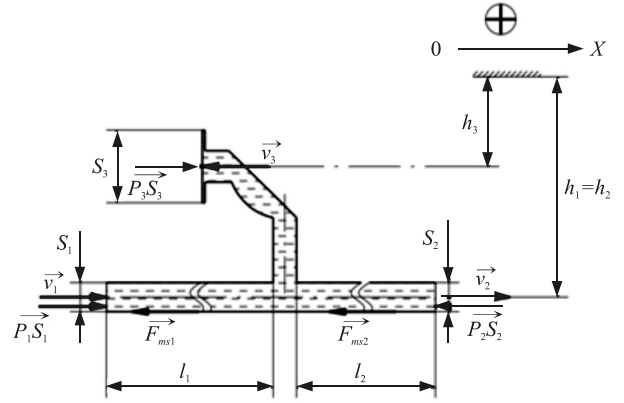


图 3 水流对活塞冲击速度的计算模型

模型中: $h_1 = h_2$ 为枪管轴线距水面的距离 (射击的深度); $S_1 = S_2 = \pi(d/2)^2$ 为枪管内孔截面面积; d 为枪管内壁直径; l_1 为弹丸前端到气口位置的距离; l_2 为气口位置与枪口之间的距离; F_{ms1} 、 F_{ms2} 分别为水与枪管内壁在 l_1 、 l_2 长度区间的摩擦力。

由连续性方程可得:

$$v_1 S_1 = v_2 S_2 + v_3 S_3 \quad (9)$$

应用稳定流动量平衡方程得到:

$$\beta_2 \rho_n \vec{v}_2 \dot{m}_2 + \beta_3 \rho_n \vec{v}_3 \dot{m}_3 - \beta_1 \rho_n \vec{v}_1 \dot{m}_1 = \bar{p}_1 S_1 + \bar{p}_2 S_2 + \bar{p}_3 S_3 + \vec{F}_{ms1} + \vec{F}_{ms2} \quad (10)$$

式中: β_1 , β_2 , β_3 表示动量修正系数, 该系数取决于水流的类型, 其中层流为 $\beta = 4/3$, 湍流为 $\beta = 1.01/1.05$ 。

\dot{m}_1 , \dot{m}_2 , \dot{m}_3 表示质量流量, $\dot{m}_1 = v_1 S_1$, $\dot{m}_2 = v_2 S_2$, $\dot{m}_3 = v_3 S_3$ 。

p_1 , p_2 , p_3 表示截面 S_1 , S_2 , S_3 的压力, 其计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= \rho_n g h_1 + \rho_n v_1^2 / 2 \\ p_2 &= \rho_n g h_2 + \rho_n v_2^2 / 2 \\ p_3 &= \rho_n g h_3 + \rho_n v_3^2 / 2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

在 l_1 、 l_2 区间, 水流与枪管内壁之间的摩擦力可通过下式计算:

$$\left. \begin{aligned} F_{ms1} &= C_{f1} \cdot \rho_n v_1^2 \pi \cdot d \cdot l_1 / 2 \\ F_{ms2} &= C_{f2} \cdot \rho_n v_2^2 \pi \cdot d \cdot l_2 / 2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式(12)中, C_{f1} 和 C_{f2} 为表面摩擦系数, 取决于雷诺系数 Re 。雷诺系数是流体力学中表征黏性影响

的相似准则数。雷诺系数较小时，黏滞力对流场的影响大于惯性，流场中流速的扰动会因粘滞力而衰减，流体流动稳定，为层流；反之，若雷诺数较大时，惯性对流场的影响大于黏滞力，流体流动不稳定，流速的微小变化容易发展、增强，形成紊乱、不规则的紊流流场^[6]。具体数值可根据表 1 中界定的关系计算^[5]。

表 1 表面摩擦系数与雷诺系数的关系

雷诺系数(Re)	表面摩擦系数(C _f)
0~2 300	C _f =64/Re
≥2 300~4 000	C _f =2.7/Re ^{0.53}
≥4 000	C _f =1/[1.8×log(Re)-1.5] ²

上表中，雷诺系数根据公式 $Re=vd/\mu$ 计算。 μ 是液体的运动黏度。

按照 OX 轴的方向，可以将式(10)改写为：

$$-\beta_1 \rho_n v_1^2 S_1 + \beta_2 \rho_n v_2^2 S_2 - \beta_3 \rho_n v_3^2 S_3 = p_1 S_1 - p_2 S_2 + p_3 S_3 - F_{ms1} - F_{ms2} \quad (13)$$

将式(11)、式(12)代入式(13)得：

$$\begin{aligned} &(-\beta_1 S_1 - S_1/2 + C_{f1} \pi \cdot d \cdot l_1/2) \cdot V_1^2 + \\ &(\beta_2 S_2 + S_2/2 + C_{f2} \pi \cdot d \cdot l_2/2) \cdot V_2^2 + \\ &(-\beta_3 S_3 - S_3/2) \cdot V_3^2 = gh_1 S_1 - gh_2 S_2 + gh_3 S_3 \end{aligned} \quad (14)$$

综合式(9)和式(14)，可得到水流对活塞冲击速度的计算方程组为：

$$\left. \begin{aligned} v_1 S_1 &= v_2 S_2 + v_3 S_3 \\ (-\beta_1 S_1 - S_1/2 + C_{f1} \pi \cdot d \cdot l_1/2) \cdot V_1^2 + \\ (\beta_2 S_2 + S_2/2 + C_{f2} \pi \cdot d \cdot l_2/2) \cdot V_2^2 + \\ (-\beta_3 S_3 - S_3/2) \cdot V_3^2 &= gh_1 S_1 - gh_2 S_2 + gh_3 S_3 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

2 结果与讨论

将上述建立的数学模型应用于 5.8 mm 水下自动步枪。输入参数见表 2。

表 2 解决方案的主要输入参数

参数	符号	值
枪管直径/mm	d	5.8
复进簧的初始力/N	F_{i0}	3
水的密度/(kg/m ³)	ρ_n	1 000
水面与导杆轴线之间的距离/m	h_3	975×10^{-3}
重力加速度/(m/s ²)	g	9.8
活塞表面直径/mm	d_3	13.94
导杆组件的截面面积/m ²	S_{bk}	$1 059.26 \times 10^{-3}$
静摩擦系数	f_b	0.29
导杆组件在水面以下的体积/m ³	V_{bk}	74×10^{-6}
导杆组件的质量/kg	m	0.47
射击的深度/m	$h_1=h_2$	1
弹头与导气口位置之间的距离/m	l_1	144.43×10^{-3}
导气口和枪口之间的距离/m	l_2	161×10^{-3}

上表中：螺栓支架组件的横截面积 S_{bk} 和螺栓支架组件低于水面以下部分的体积 V_{bk} 是使用 Autodesk Inventor 软件计算的；复位弹簧的初始力 F_{ms0} 和导杆组件的质量 m 通过实验测得^[7]。

将上述参数代入后，通过求解式(8)得出：当冲击活塞的水流速度 v_3 大于 12.95 m/s 时，导杆即开始移动。通过调整不同的输入值 v_1 ，代入式(15)后进一步研究，得到如图 4 所示结果。结果表明：当弹丸的速度 v_1 小于 360.25 m/s 时，式(15)无解。这表明，当弹丸 v_1 的速度没有达到 360.25 m/s 时， v_3 还没有出现，也就是说此时气缸中水的流速为 0。当弹丸速度为 360.25 m/s 时，缸内水流的流速为 48.71 m/s。

只有当弹丸速度在 360.25 m/s 时，式(15)才可能有解。此时，气缸内水的流速介于 48.7~59.72 m/s^[8]。

将导杆的运动情况与水下自动步枪射击时弹丸在内弹道中的速度进行比较，发现弹丸在气口位置的速度小于 360.25 m/s；因此，在弹丸运动到导气口位置的过程中，导杆不会发生移动^[9]。

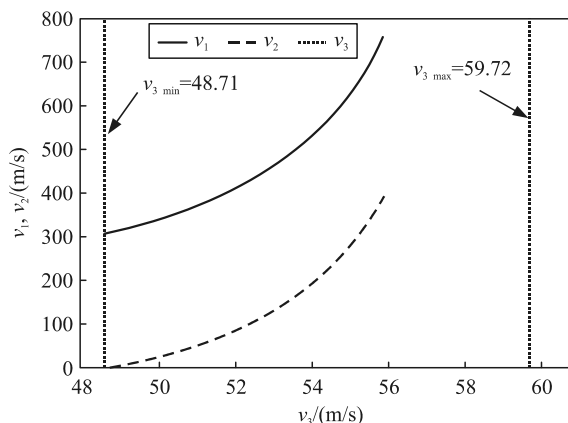


图 4 v_1, v_2, v_3 之间的关系

3 结论

笔者建立了自动步枪在水下射击时弹丸运动到气口位置期间，导杆运动规律的数学模型。该模型适用于某型 5.8 mm 水下自动步枪的研制，可用于检验导杆运动的条件。计算结果表明：在弹丸移动到气口位置的过程中，导杆不会发生移动。该模型可作为分析和设计气动步枪在水下射击时的动态特性的有力工具。

参考文献：

[1] 姚养无, 王刚. 大口径机枪低后坐浮动技术研究[J]. 华北工学院学报, 2001(4): 290-292.

[2] 罗建国, 王刚. 大口径机枪浮动稳定性分析[J]. 华北工学院学报, 2001(3): 202-203.

[3] 徐宁, 曹帅, 吴永海, 等. 持续射击状态自动步枪枪管瞬态温度和变形特性数值分析[J]. 兵工自动化, 2020, 39(1): 63-67.

[4] 苑海威, 薄玉成, 王惠源. 身管短后坐式浮动自动机动力学仿真[J]. 火炮发射与控制学报, 2010(1): 53-55.

[5] 易声耀, 张竞. 自动武器原理与构造学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 12-14.

[6] 步兵自动武器及弹药设计手册编写组. 步兵自动武器及弹药设计手册(中册)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1977: 112-115.

[7] 金志明, 袁亚雄, 宋明. 现代内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1992: 22-24.

[8] 王昌明, 高乃同. 自动武器弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 35-37.

[9] 徐诚, 王亚平. 火炮与自动武器动力学[M]. 北京: 南京工业大学出版社, 2006: 102-104.

(上接第 12 页)

3.4 有人无人协同作战

无人装备可大力提升联合登陆作战态势感知能力, 加速决策与打击周期, 有人无人协同作战是联合登陆作战的必然趋势。无人装备可有效缩短炮兵、装甲兵、防空兵从传感器到射手的时间, 对于监视与打击时敏目标杀伤力巨大; 利用无人机携带精确制导武器实施精准打击, 能够高效实施定点清除任务, 有效打击敌方装甲车辆、碉堡等目标, 同时减少附带伤亡。

鉴于联合登陆作战环境的复杂性, 系统设计需聚焦解决以下重难点问题: 1) 动态多约束环境下的无人集群智能自主协同作战指挥、有人无人协同对地攻击作战指挥能力的实现, 着眼于利用微型无人机器人、无人装甲战车、无人侦察机和察打一体无人机等无人装备构建形成更加机动灵活、更加分散的地面、空作战单位, 对敌目标和防线实施立体侦察、攻坚破障和定点清剿等; 2) 针对美军新提出的“马赛克战”概念, 研究任务动态重组、有人无人集群智能协同对分布式作战体系构建的实际需求和实现方式等, 为提升作战体系对复杂战场环境的动态适应能力提供支撑。

4 结束语

笔者以美军两栖作战部队为主要研究对象, 分

析了联合登陆作战典型兵力编成、指挥关系、超越登陆的行动准则、基本战法和指挥协同要求。在此基础上, 结合当前研究热点和技术发展趋势, 提出联合登陆作战指挥信息系统在多域多时序联合登陆作战指挥、空中火力支援、误伤避免和有人无人协同作战等关键能力方面的设计建议。

参考文献:

[1] 马琳, 郭永金. 美军两栖远征打击群指挥控制系统综述及启示[J]. 舰船论证参考, 2015(2): 105-110.

[2] 黄勇. 国外两栖舰作战系统特点分析[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(2): 16-20.

[3] 朱磊, 丁军, 梁立. “美国”级两栖攻击舰作战能力分析[J]. 指挥控制与仿真, 2017, 39(2): 101-104.

[4] 黄炳越, 周智超, 冯伟强, 等. 海军两栖作战编队指挥信息系统的设计[J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(5): 128-131.

[5] 冷画屏, 周世华, 肖利辉. 两栖登陆部队指挥信息系统建设研究[J]. 指挥控制与仿真, 2015, 37(1): 128-131.

[6] 张维明, 黄松平, 黄金才, 等. 多域作战及其指挥控制问题探析[J]. 指挥信息系统与技术, 2020, 11(1): 1-6.

[7] 冷画屏, 张莉莉. 美军两栖部队指挥与控制体系及其指挥控制能力分析[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(1): 111-114.

[8] 周海瑞, 刘小毅. 美军联合火力机制及其指挥控制系统[J]. 指挥信息系统与技术, 2018, 9(1): 8-17.