

doi: 10.7690/bgzdh.2016.09.002

某种空气炮发射控制系统设计

李大勇, 赵俊利, 刘国志, 赵凡, 郭利强
(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要: 针对发射软控制和卡锁控制这 2 种控制系统存在的不足, 提出一种由活塞组和多个密闭腔室组成的新型空气炮发射控制系统设计方案。通过介绍发射控制系统的总体组成以及工作原理, 建立了空气炮的三维模型, 对控制系统的受力情况进行动态分析并将其抽象为数学模型进行理论计算, 利用 Matlab 软件进行计算机仿真, 得到系统中各部分的动力学关系和关键参数。经过对仿真结果的分析, 验证新方案在原理上的可行性。最终得到结论: 该新型发射控制系统安全可靠, 能够达到预期的目标。

关键词: 机械设计; 空气炮; 发射; 软控制
中图分类号: TJ302 **文献标志码:** A

Design of Certain Type Gas Gun Launching Control System

Li Dayong, Zhao Junli, Liu Guozhi, Zhao Fan, Guo Liqiang
(School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the shortcoming of launching soft control system and chain control system, put forward a new gas-gun launching control system design scheme which consists of piston assembly and sealed cabin. Through introduce composition and work principle of launching control system, establish the 3D model of gas-gun, carry out dynamic analysis of control system stress performance and transmit the performance into math model for theory calculation, use Matlab software for computer simulation to acquire dynamic relation and key parameter of every part of system. The feasibility of the design in principle could be verified, though the analysis of calculation results. Finally the conclusion can be obtained: the new type of control system is safe and reliable, and it can achieve the desire requirements.

Keywords: mechanical design; gas-gun; launch; pneumatic control

0 引言

空气炮是一种特殊的发射装置, 其工作原理是利用压缩空气储能, 将气室中气体储存的一部分内能转化成身管中弹丸动能, 完成发射任务。

与常规火炮相比, 空气炮虽然威力较小但是具有常规火炮无法替代的优点。例如, 它发射时的膛温远低于一般火炮, 可以用于发射试验仪器、救援物资等不耐高温的材料。用于消防领域的空气炮称为气动灭火炮, 可以远距离将装有干粉灭火剂的灭火弹发射到火场, 灭火弹在火场里爆破灭火。气动灭火炮可用于高层建筑灭火、森林远程灭火、船舶码头灭火和油气罐灭火等^[1-3]。

发射控制方式直接影响到炮弹的内弹道曲线^[4]和出炮口速度, 因此发射控制系统是空气炮的核心结构^[5-6]。发射控制方式一般分为发射软控制^[7-8]和卡锁控制^[9]。软控制是将活塞组、储气室和单向阀三者巧妙地组合起来, 通过活塞组的移动达到用低气压控制高压效果的控制方式; 卡锁控制是将弹丸尾部直接与气室连通, 发射前用卡锁将弹丸固定住, 发射时打开卡锁, 高压气体直接把弹丸推出。对膛压较高的空气炮来说, 这种控制方式存在卡锁

受力过大、开锁困难、弹尾漏气等缺点。与卡锁控制相比, 发射软控制方式气密性好, 不需要考虑卡锁力, 对弹丸没有硬卡滞现象, 弹底受力良好, 可将弹丸进行有效控制发射, 具有可靠和发射稳定的特点。而软控制普遍存在发射时气压不稳定的缺点, 原因在于随着气室气压降低, 活塞组会由于自身重力作用或炮体振动等因素下落堵住炮尾连接孔, 导致气流中断影响发射效果。基于此, 笔者设计了一种新型发射控制机构, 有效地克服了这一缺点。

1 发射控制器设计

图 1 为空气炮的三维模型。

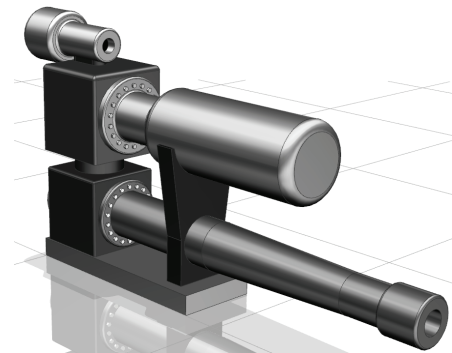


图 1 空气炮三维模型

收稿日期: 2016-05-28; 修回日期: 2016-07-02

作者简介: 李大勇(1987—), 男, 黑龙江人, 满族, 硕士, 从事武器系统机动工程研究。

1.1 结构简介

如图 2 所示，空气炮气路控制室结构由控制室箱体、控制室内筒、调压筒、活塞、活塞连杆、阀门等结构组成。炮尾连接孔是气室和炮尾的连接通道，高压气体由此进入炮尾完成发射过程。炮尾连接活塞是打开和关闭炮尾连接孔的机构，固连于活塞连接杆 1。连接杆 1 上端固连内筒小活塞和内筒大活塞，这 2 个活塞可以在控制室内筒中滑动。连接杆与 3 个活塞均为刚性连接，它们之间的相对位置不变。单向阀是约束气体流向的装置，限制气体只能从它的一侧流向另一侧，反向不通。单向阀 1 限制气体只能由图示位置的内筒小活塞下端流向上端，反向不通；单向阀 2 限制气体只能由图示位置的活塞左端流向右端；单向阀 3 限制气体只能由图示位置的隔板上端流向下端；单向阀 4 限制气体只能由内筒内侧流向外侧。泄压孔一侧连接调压筒另一侧与外部大气相连，用于发射时排出内筒上腔高压气体。孔 1 是连接内筒上腔与调压筒的通道；孔 2 连接控制室与调压筒。活塞 1、活塞 2、调压筒大活塞三者固连于连接杆 2 上，均为刚性连接无相对滑动。活塞 1、活塞 2 直径相等，可以随连杆在充气筒内运动。发射阀可以用来向调压筒充气，推动调压筒大活塞运动，发射时将其打开，高压气体将大活塞顶回原位。充气阀是向整个空气炮充气的总阀门，主要作用是向气室充入高压发射气体。发射结束后打开放气阀，排出调压筒内多余气体。

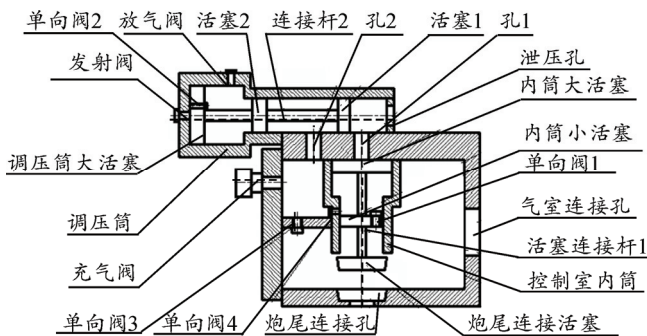


图 2 空气炮气路控制室结构

1.2 工作原理

空气炮气路控制室的工作过程分为 4 个阶段，分别是起始阶段、调压筒充气阶段、气室充气阶段和发射阶段。

1) 起始阶段。如图 3 所示，调压筒大活塞处于调压筒左端，内筒大活塞位于控制室内筒上部，炮尾连接活塞打开。

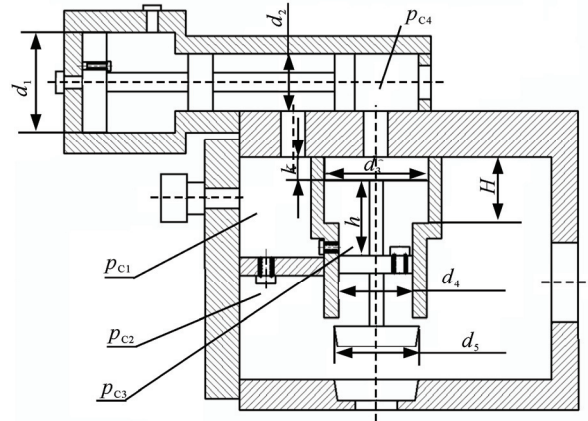


图 3 起始阶段

2) 调压筒充气阶段。如图 4 所示，通过发射阀向调压筒充气，活塞组被推到发射筒右端，高压气体通过单向阀 2 进入活塞 1 与活塞 2 之间的空间内。

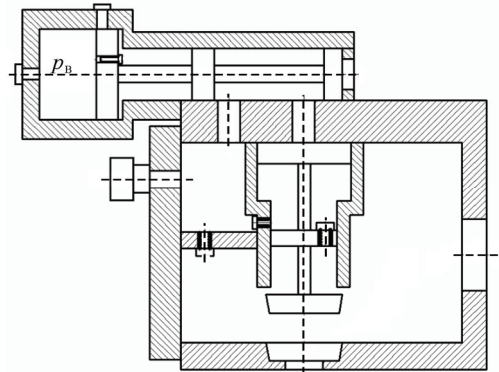


图 4 调压筒充气阶段

3) 气室充气阶段。如图 5 所示，设空间 1、2、3 内气压分别为 p_{C1} 、 p_{C2} 、 p_{C3} 。空间 2 与气室相连，所以 p_{C2} 为气室气压。打开充气阀向气室充气。进入控制室空间 1 的高压气体通过孔 2 进入活塞 1 与活塞 2 之间的空间内，这部分气体又经过孔 1 进入控制室内筒，将内筒大活塞推下。随着充气过程的进行，气压逐渐升高。当 p_{C1} 升高到某一数值时，单向阀 3 被打开，高压气体灌满整个控制室并且通过接口进入气室。当气室气压 p_{C2} 升高到某一数值时，单向阀 1 被打开，高压气体充满内筒大活塞与内筒小活塞之间的空间。由于 2 个单向阀的限制，控制室中的气压出现了梯度。其气压大小顺序为 $p_{C1} > p_{C2} > p_{C3}$ 。

4) 发射阶段。如图 6 所示，设空间 4、5 内气压分别为 p_{C4} 、 p_{C5} 。将发射阀打开，调压筒内大活塞左侧气体流出，气压降低。因为调压筒大活塞的

横截面积比活塞 2 大，所以在空间 5 内高压气体的作用下大活塞所受的压力大于活塞 2，导致整个活塞系统移动至最左端。此时，孔 1 连接空间 4，空间 4 与外部大气相连 p_{C4} 降至大气压。空间 2 内的气压对内筒小活塞产生向上的推力，对炮尾连接活塞有向下的推力；空间 3 内高压气体对内筒大活塞的作用力大于小活塞。通过对各活塞直径恰当的选取，使得活塞组所受的合力向上，炮尾连接活塞被拔出。气室内高压气体通过炮尾连接孔进入炮尾，推动弹丸运动。随着时间的推移，空间 2 内的气压逐渐减小，导致空间 1 内气体流入空间 2，空间 1 内气压随之降低，当其低至一定程度时，空间 3 内的空气流向空间 1，最后 p_{C3} 降至单向阀 4 的启动压力。由于单向阀 3、单向阀 4 的作用各腔室产生了气压梯度，此时的气压关系为 $p_{C3} > p_{C1} > p_{C2}$ 。在 p_{C3} 的作用下使空间 3 容积达到最大，对内筒活塞系统施加向上的推力起到预紧作用，避免炮尾连接活塞下落堵住炮尾连接孔。发射结束后打开放气阀、充气阀释放多余气体，使控制室达到初始状态。此时，除空间 3 外，其余腔室气压均降至大气压。

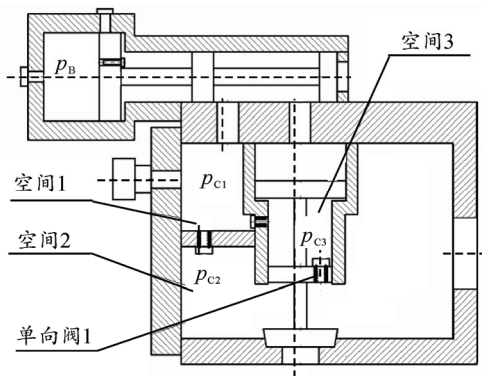


图 5 气室充气阶段

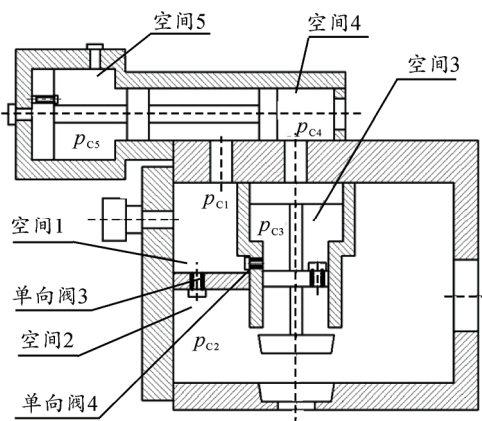


图 6 发射阶段

2 计算与仿真

2.1 建立力学模型

2.1.1 基本假设

设空气炮工作过程各腔室内无气体泄漏，整个过程在等温等熵条件下进行^[10-12]。气室充气平缓，即充气气压 p_{C1} 匀速增加。不计各部件工作过程的弹性形变，忽略活塞与筒壁接触面之间的摩擦力。

控制室的重要结构尺寸如图 3 所示。调压筒大活塞的横截面直径为 d_1 ；活塞 1、活塞 2 的横截面直径相等都为 d_2 ；内筒大活塞、内筒小活塞的横截面直径分别为 d_3 、 d_4 ；炮尾连接活塞的上表面直径（大径）为 d_5 ；内筒大活塞厚度为 k ，内筒大直径部分高度为 H ；内筒大、小活塞之间的连杆长度为 h ；单向阀 1、单向阀 2、单向阀 3、单向阀 4 的启动压力分别为 p_{d1} 、 p_{d2} 、 p_{d3} 、 p_{d4} 。

2.1.2 力学模型的建立

发射控制系统工作过程中各活塞组的运动比较复杂，为了更清楚地表达调压筒活塞组和控制室内筒活塞组在不同时刻的空间位置，笔者绘制了如图 7 所示的整个工作过程动作时序图。

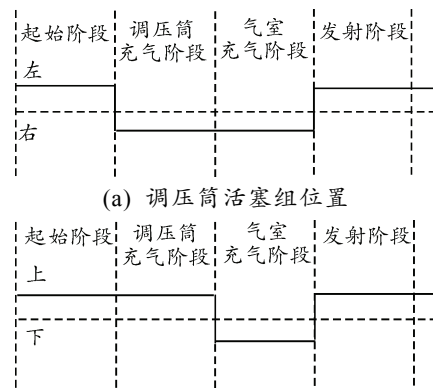


图 7 动作时序

调压筒充气过程：

通过受力分析，得到调压筒充气结束后气体压力对活塞组的预紧力 F_B 与调压筒充气压力 p_B 的关系，规定 F_B 向右为正。

$$F_B = \frac{\pi}{4} [p_B d_1^2 - (p_B - p_{d2})(d_1^2 - d_2^2) - p_0 d_2^2] \quad (1)$$

其中 $p_0 + p_{d2} \leq p_B \leq p_{BM}$ ， p_0 为标准大气压， p_{BM} 为调压筒最大充气压力。

气室充气过程：

由气体状态方程^[12] $p_{d4}V_0^\gamma = p_{C3}V_3^\gamma$ ，得到空间 3 气压 p_{C3} 与充气气压 p_{C1} 的关系：

$$p_{C3} = \begin{cases} p_{d4} + p_0, p_0 < p_{C1} \leq \sigma \\ \frac{p_{C1}d_3^2 - p_0d_4^2}{d_3^2 - d_4^2}, \sigma < p_{C1} \leq \lambda \\ \mu, \lambda < p_{C1} \leq \mu + p_{d1} + p_{d3} \\ p_{C1} - p_{d1} - p_{d3}, \mu + p_{d1} + p_{d3} < p_{C1} \leq p_t \end{cases} ; \quad (2)$$

$$\text{气室气压 } p_{C2} = \begin{cases} p_0, p_0 < p_{C1} \leq p_{d3} + p_0 \\ p_{C1} - p_{d3}, p_{d3} + p_0 < p_{C1} \leq p_t \end{cases} . \quad (3)$$

式中： $\sigma = \frac{p_{d4}(d_3^2 - d_4^2) + p_0d_4^2}{d_3^2}$ ， $\mu = p_{d4} \left[1 + \frac{(d_3^2 - d_4^2)(H - k)}{(d_4^2 - d^2)h} \right]^\gamma$ ，

$\lambda = p_{d4} \left(1 - \frac{d_4^2}{d_3^2} \right) \left[1 + \frac{(d_3^2 - d_4^2)(H - k)}{(d_4^2 - d^2)h} \right]^\gamma + p_0 \frac{d_4^2}{d_3^2}$ ，均为常数； γ

为气体绝热指数； V_0 、 V_3 分别为空间 3 的初始体积和充气后的体积； p_0 为标准大气压， p_t 为最大充气压力。充气结束时由气体状态方程得到空间 3 内的气体压力 $p_{3M} = (p_t - p_{d1} - p_{d4}) \left[\frac{(d_4^2 - d^2)h}{(d_3^2 - d_4^2)(H - k) + (d_4^2 - d^2)h} \right]^\gamma$ 。

由式 (2)、式 (3) 可以推导出控制室气压对内筒活塞组的作用力 F_C 与 p_{C1} 的关系，规定向上为正。

$$F_C = \begin{cases} \frac{\pi}{4} [p_{C1}d_3^2 - p_{C3}(d_3^2 - d_4^2) - p_{C2}d_4^2], p_0 < p_{C1} \leq \sigma \\ 0, \sigma < p_{C1} \leq \lambda \\ \frac{\pi}{4} [p_{C1}d_3^2 - p_{C3}(d_3^2 - d_4^2) - p_{C2}(d_4^2 - d_5^2)], \lambda < p_{C1} \leq p_t \end{cases} . \quad (4)$$

发射活塞开启过程：

调压筒活塞组所受的气压合力

$$F_{BS} = \frac{\pi}{4} [p_B d_1^2 - (p_{BM} - p_{d2})(d_1^2 - d_2^2) - p_0 d_2^2] . \quad (5)$$

其中 $p_0 \leq p_B \leq p_{BM}$ ， p_B 从 p_{BM} 降至 p_0 。

发射过程：

发射过程中气室压力 p_{C2} 逐渐减小，一直降至标准大气压 p_0 。空间 3 气压 p_{C3} 也随之降低，它与气室气压 p_{C2} 的关系为

$$p_{C3} = \begin{cases} p_{3M}, p_{3M} - p_{d3} - p_{d4} \leq p_{C2} \leq p_t - p_{d3} \\ p_{C2} + p_{d3} + p_{d4}, p_0 \leq p_{C2} < p_s - p_{d3} - p_{d4} \end{cases} . \quad (6)$$

其中 $p_0 \leq p_{C2} \leq p_t - p_{d3}$ 。

气体压力提供的内筒活塞组开启力

$$F_{Ck} = \frac{\pi}{4} [(p_t - p_{C4} - p_{d1} - p_{d3})d_3^2 + p_{d1}d_4^2 - (p_t - p_{d3} - p_0)d_5^2] . \quad (7)$$

式中 p_{C4} 为空间 4 气压， $p_0 \leq p_{C4} \leq p_t$ 。

气体进入炮尾后，活塞组受到的气压锁紧力

$$F_S = \frac{\pi}{4} [p_{C2}d_4^2 + p_{C3}(d_3^2 - d_4^2) - p_0d_3^2] . \quad (8)$$

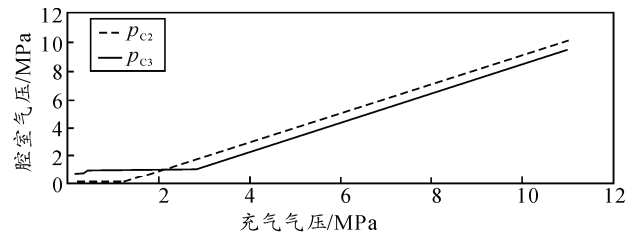
2.2 仿真结果

2.2.1 设定初始条件

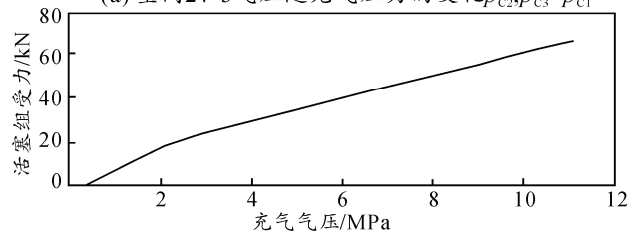
$d_1 = 90 \text{ mm}$ ， $d_2 = 60 \text{ mm}$ ， $d_3 = 120 \text{ mm}$ ， $d_4 = 100 \text{ mm}$ ， $d_5 = 80 \text{ mm}$ ， $d = 30 \text{ mm}$ ， $h = 280 \text{ mm}$ ， $H = 230 \text{ mm}$ ， $k = 50 \text{ mm}$ ， $p_0 = 0.101 \text{ MPa}$ ， $p_{d1} = 0.6 \text{ MPa}$ ， $\gamma = 1.4$ ， $p_{d2} = 0.08 \text{ MPa}$ ， $p_{d3} = 1 \text{ MPa}$ ， $p_{d4} = 0.8 \text{ MPa}$ ， $p_t = 12 \text{ MPa}$ ， $p_{BM} = 0.3 \text{ MPa}$ ， $m = 30 \text{ kg}$ ， $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

2.2.2 计算结果

根据式 (1)~式 (8) 及上述初始条件进行计算机仿真，得到以下计算结果。由图 8(a)可以直观地反应出气室充气过程中气室压力 p_{C2} 、内筒压力 p_{C3} 随充气气压 p_{C1} 的变化规律，从而可以得出图 8(b)控制室气压对内筒活塞组的作用力 F_C 与 p_{C1} 的关系。



(a) 空间 2、3 气压随充气压力的变化 $p_{C2}, p_{C3} - p_{C1}$



(b) 活塞组受力随充气压力的变化 $F_C - p_{C1}$

图 8 充气时内筒活塞组受力随充气压力变化规律

发射时系统的受力情况如图 9、图 10 所示。发射初期空间 4 内的气体瞬间释放，其压强 p_{C4} 迅速降至 p_0 ，内筒活塞开启力 F_{Ck} 随之升高，打开活塞。 F_{Ck} 变化规律如图 9 所示。气室中的气体进入炮尾，压力随之减小。这个过程中空间 1、3 的压力以及内筒活塞组受到向上的锁紧力随气室压力的变化规律如图 10 所示。

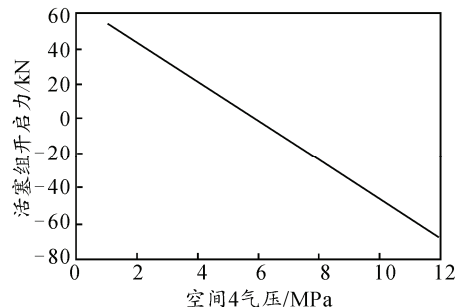


图 9 发射前期内筒活塞开启力变化规律

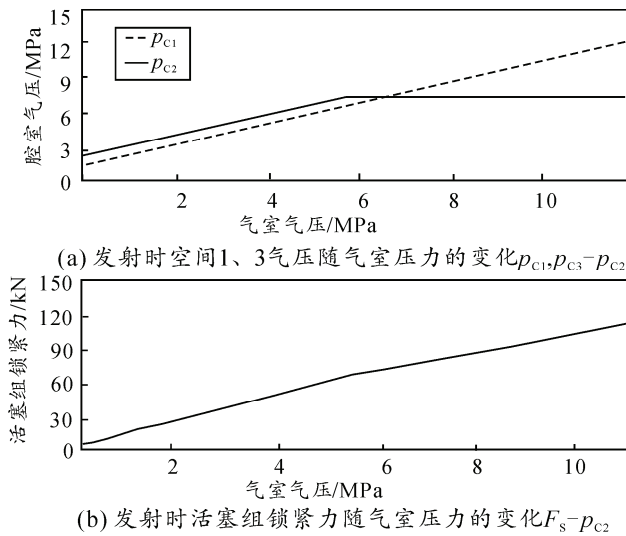


图 10 发射时内筒活塞锁紧力随气室压力变化规律

2.2.2 计算结果分析

对以上计算结果进行归纳，将直接影响机构性能的关键参数归纳于表 1、表 2 之中。

表 1 调压筒关键参数

调压筒最大充气压力 p_{BM}/MPa	活塞最大预紧力 F_{BM}/kN	最大发射回程力 F_{BS}/kN	调压筒活塞组重 m_0/kg
0.30	0.85	0.42	0.09

表 2 控制室内筒关键参数

气室最大充气压力 p_{c2}/MPa	活塞最小密封力 F_C/kN	活塞最大开启力 F_{Ck}/kN	活塞最小发射锁紧力 F_S/kN	活塞组重 m/kg
10	8.12	55.10	6.22	0.29

对比表 1、表 2 可以看出，调压筒最大充气压力 p_{BM} 远小于气室最大充气压力 p_{c2} 。单独分析表 1、表 2，因为气压对活塞组的力远大于活塞组的重力，所以活塞组的重力对其运动的影响可以忽略不计。

3 分析与讨论

根据上述分析可以得出以下结果。第一，新方案可以达到以小压力控制大压力的目的。参照表 1，发射时发射阀内部气压等于调压筒最大充气压力 0.3 MPa，相当于自行车轮胎内部气压，压力小阀门容易开启。气室压力为 10 MPa，高压为发射提供强大的动力。第二，确保了工作过程的安全可靠性。从表 1 可以看出，调压筒充气过程活塞组的最大预紧力远大于其重力，使得在发射之前调压筒活塞组不会因为外界干扰因素而移动，保证了气室充气过程的安全性。从表 2 可以看出，气室充气过程中内筒活塞最小密封力为 8.12 kN，数值较大，可以确保

充气过程不漏气；发射过程中活塞最小发射锁紧力 6.22 kN，远大于活塞组重力，确保发射过程活塞组不会落下堵住炮尾连接孔。第三，发射速度快。表 1 中，活塞组最大回程力 0.42 kN 而其重力只有 0.09 kN，所以回程加速度很大，活塞开启速度快；表 2 中，内筒活塞组最大回程力 55.1 kN 远大于其重力 0.29 kN，回程加速度大，活塞快速开启，发射迅速。

4 结论

与传统的发射控制系统相比，新方案的主要优点是以小压力控制大压力，并且添加了活塞锁紧功能，所以工作安全可靠。在工程上，可以根据实际需要调整各部分结构尺寸。这种设计思想可以为发射控制系统的研发提供一种新方法。

参考文献：

- [1] Tzenga J T, Abrahamian A S. Dynamic compressive properties of composites at interior ballistic rates of loading-Experimental method[J]. Composites Engineering. 1995(5): 501-508.
- [2] O'Dwyer J M. Projectile launching apparatus and methods for fire-fighting: US, 6860187[P]. 2005-03-01.
- [3] Pang Y G, Liu S G. Simulation research on control system and ballistic of a remote forest fire fighting cannon[C]// Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering(CMCE), 2010 International Conference. Changchun, IEEE, 2010, 2: 394-397.
- [4] 钱林方. 火炮弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 147-163.
- [5] 刘少刚, 刘刚, 赵丹, 等. 气动发射灭火炮伴随管式击发装置研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(10): 1318-1323.
- [6] Rui X T, Yun L F, Wang H, et al. Experimental simulation for fracture of gun propellant charge bed[J]. Journal of China Ordnance Society, 2005, 1(2): 151-155.
- [7] 赵华. 气压传动式软发射原理与技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [8] 黄浩, 梁世昌, 李海燕, 等. 二级轻气炮发射过程内弹道数值计算研究[J]. 空气动力学学报, 2013, 31(5): 657-661.
- [9] 汪永忠, 王卫, 程涛, 等. 一种火炮自动卡锁装置设计分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2005(3): 36-38.
- [10] 廖振强, 王涛, 徐世海. 武器气体动力学数值计算方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 217-252.
- [11] 王保国, 刘淑艳, 黄伟光. 气体动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 152-219.
- [12] 沈维道, 童均耕. 工程热力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 99-133.