

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.04.020

火炮复进机液量检测方法热力学分析

李涛, 郑立评, 阎文, 祁春阳

(军械工程学院火炮工程系, 石家庄 050003)

摘要: 为准确测量火炮复进机内液量, 分析复进机的特殊结构, 指出复进机液量检测方法的特殊性。并对现有检测方法检测过程进行热力学分析, 依据功能转换原理。计算结果表明: 温度变化引起的液量误差可以忽略不计, 论证了检测原理的合理性。

关键词: 复进机; 液量检测; 热力学

中图分类号: TJ303 **文献标志码:** A

Thermodynamics Analysis on Liquid Volume Measurement of Artillery Recuperator

Li Tao, Zheng Liping, Yan Wen, Qi Chunyang

(Dept. of Artillery Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to detect liquid quantity in artillery recuperator accurately, analysis of the especial structure of the recuperator, point out particularity of detection method. And analyze thermodynamics of the detection progress, according as principle of work-energy transformation. The calculating result shows that error by temperature change is negligible, demonstrate the rationality of the detection principle.

Key words: recuperator; liquid volume measurement; thermodynamics

0 引言

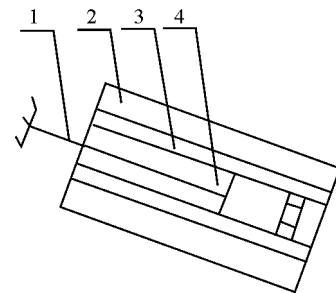
火炮被称为“战争之神”, 反后坐装置及其复进机是火炮的“心脏”^[1]。复进机气、液量常因为泄露、加注不准确等原因发生变化而影响火炮正常使用。因此, 每次射击前都必须检查复进机内气液量。

部队现有检测方法主要有人工后坐法、放气法以及放液法。由于火炮复进机是一种内部结构复杂的压力容器, 其特殊结构和气、液体分布使得常规液量检测方法都不适用。以人工后坐法为例, 此方法能耗大, 检测时间长, 人工后坐、放气法采用压力表测压力, 根据液量检测表判断液量误差大。随着科学技术的发展, 复进机液量检测也向着数字化方向发展, 主要体现在采用高精度传感器测量气压, 并变人工查表计算方式为自动计算方式, 数字化已成为复进机液量检测的必然趋势。而波义尔-马略特定律原理简单, 易于使用。因此, 笔者针对火炮复进机现有的波义尔-马略特定律检测方法, 进行详细的热力学分析。

1 火炮复进机结构

我军现役火炮多采用液体气压式复进机, 其结构主要为筒后坐式。为保证在任何射角下, 复进机

内液体都能有效地密封气体, 防止气体进入内筒而从紧塞器以及活塞的间隙处漏掉, 筒后坐式复进机一般都采用 3 个筒套装的结构, 如图 1。在内筒和外筒中间有一后方开有通孔的中筒, 同时, 内筒或中筒相对外筒作偏心布置, 外筒储存高压氮气, 同时还有部分液体以密封气体, 内筒和中筒内储存驻退液^[2]。



1: 活塞杆; 2: 外筒; 3: 中筒; 4: 内筒。

图 1 筒后坐式复进机结构图

复进机主要作用为发射时, 贮存部分后坐能量, 后坐终了时使炮身复进到射前位置; 平时保持炮身于待发位置, 在射角大于零时, 使炮身不致下滑。

复进机中液量多少直接影响火炮的性能, 如果复进机内液量低于标准会使火炮复进无力, 从而导致复进不到位, 严重时会发生炮身滑落, 经常会出

收稿日期: 2011-10-06; 修回日期: 2011-11-15

作者简介: 李涛(1986—), 男, 湖北人, 在读硕士, 从事武器试验、性能检测及故障诊断研究。

现火炮发射后需战士将炮身抬回至原位的情况；复进机液量过多会引起末压增大，使后坐部分复进过猛、冲击炮架，火炮产生强烈振动，破坏瞄准，影响射击精度，降低发射速度并容易造成内筒压扁。

工业上对液量的测量多采用液位计。按测量液位的感应元件与被测液体是否接触，可分为接触式测量和非接触式测量。随着技术的发展，超声波及 CT 成像技术等非接触测量手段广泛应用于液位测量。利用以上技术可以直接在容器外部进行测量，适合对密闭压力容器内液位进行检测^[3-4]。

复进机可看成是一种压力容器，压力容器是指盛装气体或者液体，承载一定压力的密闭设备。因此，对于接触式液位计，容器内需为其配置安装空间，维修拆卸更换也极不安全和方便，不适用于复进机的液量检测。早期人们尝试将超声波、核辐射等技术用于复进机液量检测，但复进机采用多层嵌套结构，内部构造复杂，气体和液体在多层同时存在，采用以上方法不能准确检测出所需要的参数。

2 检测原理

虽然复进机内液量不便直接测得，但可以通过间接方法测得。复进机内气体和液体总体积是一定而且已知的，若测出气体体积，就可计算出液量。部队现有检测方法依据为理想气体的状态方程：

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (1)$$

所谓理想气体，是指气体分子只有质量而没有体积，除了相互碰撞外，分子间完全没有作用力。正常工作条件下氮气在驻退液中的溶解度相当小，驻退液的饱和蒸汽压较低，气室内小肠蒸汽含量相对较少，产生的相变潜热也较少，故忽略气体溶解引起的物质交换及气液变化引起的物质交换和相应的热交换，可将气室近似为封闭系统。此外，由于整个工作过程中，复进机内部满足温度不太低，压力不太大，故气室内气体可近似按理想气体处理^[5]。

对一定质量的理想气体，对于任意 2 个始末状态，式 (1) 总成立，而与中间变化过程无关。为此，可以通过改变气体状态参数从而求得气体体积。部队现有检测方法都将检测过程视为等温过程，即有 $T_1 = T_2$ ，则

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (2)$$

式 (2) 即为波义尔-马略特定律。理论上只要检测时间足够短，当温度还未变化时即完成检测，则满足条件 $T_1 = T_2$ 。以下为验证测量过程满足等温条

件，对测量过程进行热力学分析。

3 部队现有检测方法及其热力学分析

部队现有检测方法主要有后坐法、放气法以及放液法。

3.1 人工后坐法

通过对火炮人工后坐一段距离，压缩复进机内气体，分别测出后坐前后压力，并对照液量检查表得出液量。

采用人工后坐，若压缩气体其体积改变量为 ΔV ，气体温度改变量为 ΔT (ΔV 、 ΔT 增大为正，减小为负)，则 $V_2 = V_1 + \Delta V$ ，代入式 (1) 有：

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 (V_1 + \Delta V)}{T_1 + \Delta T} \quad (3)$$

整理后有：

$$V_1 = \frac{P_2 \Delta V T_1}{(P_1 - P_2) T_1 + P_1 \Delta T} = \frac{P_2 \Delta V}{P_1 - P_2 + P_1 \frac{\Delta T}{T_1}} \quad (4)$$

若按等温过程处理，则有：

$$V'_1 = \frac{P_2 \Delta V}{P_1 - P_2} \quad (5)$$

两者差值为：

$$\Delta V' = V_1 - V'_1 = \frac{P_1 P_2 \Delta V \Delta T}{(P_1 - P_2)^2 T_1 + P_1 (P_1 - P_2) \Delta T} \quad (6)$$

人工后坐过程中复进杆活塞压缩气体做功，并转换为气体和驻退液的内能。以某型号加农炮为例，复进机活塞工作面积 A_e 为 50.56 cm²，炮身后座长度为 250 mm，其标准液量为 13.4 L，由功的定义：

$$W = F \cdot S \quad (7)$$

又由压强定义有：

$$P = \frac{F}{A_e} \quad (8)$$

则

$$W = \frac{F}{A_e} A_e S = P V \quad (9)$$

如图 3，活塞压缩气体，气体体积和压强都发生变化，活塞移动 dl 长度时，气体体积变化 $dV = A_e dl$ ，压强增大，活塞压缩气体做功，则活塞做功：

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P dV \quad (10)$$

式中： V_1 为后坐前气体体积； V_2 为后坐后气体体积。

由微积分的数学意义知所做功即为图 2 中曲线与横坐标所围成的面积, 从图 2 中可以看出:

$$W < P_2(V_1 - V_2)$$

而

$$P_2(V_1 - V_2) = 7.4 \times 10^6 \times 50.56 \times 10^{-4} \times 250 \times 10^{-3} = 935.36 \text{ J}$$

由能量守恒定律知活塞做功全部转化为气体内能。

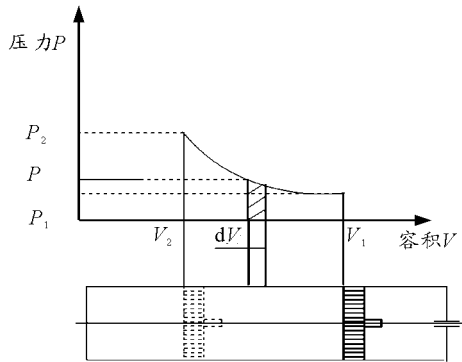


图 2 人工后坐中 $P-V$ 变化过程

人工后坐采用卷扬机等装置使炮身后坐, 速度缓慢, 复进机内气体和液体热交换充分, 最终达到热平衡。根据热传递公式:

$$Q = cm\Delta T \quad (10)$$

式中: Q 为总热量; c 为驻退液比热容; m 为驻退液质量。

为满足火炮在规定的气温条件下正常工作和持续射击, 要求火炮驻退液热容大, 气化热高, 密度和黏度较大且随温度变化小。驻退液的比热容约为 $2 \times 10^3 \sim 3 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 密度约为 $1 \times 10^3 \sim 1.1 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$, 取驻退液比热容为 $2.5 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 密度为 $1 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$, 则温度变化:

$$\Delta T = \frac{Q}{cm} = \frac{935.36}{2.5 \times 10^3 \times 1 \times 10^3 \times 13.4 \times 10^{-3}} = 0.0285 \text{ } ^\circ\text{C}$$

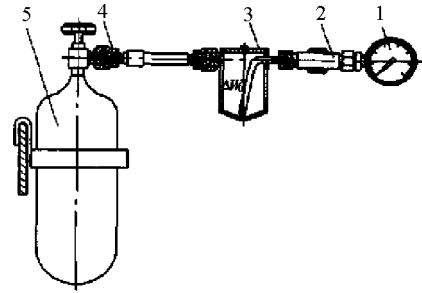
而实际上复进机内与外界也存在着热交换, 温度变化会更小。取温度 $T_1 = 25 \text{ } ^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$, 将以上数值代入式 (6), 计算得: $\Delta V' = 0.0047 \text{ L}$ 。

通过以上计算分析可以看出, 温度变化带来的影响非常小, 可以忽略不计。但是使火炮人工后坐, 费时费力, 效率低; 机械压力表和液量检查表存在较大的误差。人工后坐法已越来越不符合时代发展的要求。

3.2 放气法

通过放出一定体积的气体, 从而改变气体压强

和体积, 检测装置如图 3。分别测量放气前后复进机内气压值 P_1 、 P_2 , 由 P_1 、 P_2 查液量检查表得出液量值。如液量符合标准, 只需打开连通的小气瓶和开闭杆将复进机气压加到标准值即可; 如液量不足, 向检查筒中注进所缺的液量, 打开小气瓶和开闭杆, 使液体压入复进机中^[6]。



1: 气压表; 2: 三通管; 3: 检查筒; 4: 接头; 5: 小气瓶。

图 3 复进机液量检查器

采用放气法测量, 由于复进机内气压远大于外界大气压, 因此, 打开开闭杆后, 气体会迅速充满检查筒, 即气体体积迅速膨胀, 气体来不及与外界进行热交换, 整个过程可以看成是一个绝热自由膨胀过程, 由热力学第二定律:

$$Q = \Delta U + W$$

式中: Q 为吸热量; ΔU 为气体内能改变量; W 为气体对外做功大小。对绝热自由膨胀过程有 $Q=0$, $W=0$, 可见气体内能不变, 即温度不发生变化, 因此, 放气法满足等温过程。

这种方法不需要专用工具人工后坐火炮, 操作强度相对降低。但每次检查, 都要放出复进机原有的气体和液体, 使复进机液量不断减少, 对于液量保持及其不利。另外, 检查筒的原有空气参与了末压的测试, 引入了误差, 人工量取驻退液过程中也引入了误差, 总体精度不高。

3.3 放液法

该方法将复进机内驻退液放入容积一定的小气瓶, 放出液体后, 气体扩散充满剩余空间, 体积和压力发生变化。检测过程中有传感器测量压力值, 并由计算机自动计算出液量, 测量完成后通过手动泵将小液瓶内液体压回复进机内, 保证原有液量不损失。

放液过程中, 驻退液在气体压力的作用下被压入小气瓶, 气体体积随之膨胀, 压强降低; 气体对液体做功, 气体温度降低, 由人工后坐过程的热力学分析可知, 其做工引起温度变化可忽略不计, 即

放液测量法其测量过程也满足等温测量。

此方法不需要人工后坐，简化了操作，效率得到大幅度提高，这对于各类难于人工后坐的某类火炮很有意义。此外，该方案采用传感器测量气压值，并将复进机液量计算公式编写在系统程序内，能自动测出液量，避免了查表计算带来的误差，提高了测量精度。

通过分析可见，现有检测方法中忽略温度带来的影响是可行的。

4 总结

通过对部队现有检测方法的热力学分析，论证了波义尔-马略特定律适用于现有检测方法，检测过

(上接第 70 页)

其中： D 为粗加药的最佳值，根据实际经验选定为设定值减去最大称量值的 12%； K_1 为修正系数，根据经验 $K_1 = 0.5$ ，初始值 $C_1 =$ 设定值。

同样，对精加药停止工作时的称量值进行修正，使之达到最高精度。假如第 n 次称量，当电子称的称量值为 P_n 时，精加药停止。经过 $t = 1.5$ s 后，接药盘稳定时测得称量值为 Q_n ，其值为接药盘内药的实际重量，则第 $n+1$ 次精加药应停止的称量值 $P_{(n+1)}$ 为：

$$P_{(n+1)} = P_n + K_2 \times (Q - Q_n) \quad (4)$$

其中： Q 为设定值； K_2 为修正系数。

根据实验得出，当 Q_n 在允许称量误差内时， $K_2 = 0.2$ ，超标时 $K_2 = 0.8$ ，初始值 $P_1 =$ 设定值。

3.2 设置控制提前量

在动态自动称量时，称量的精度不仅取决于电子称的测量精度，也取决于控制精度^[3]。在皮带送药和气动震盘送药时，由于大颗粒发射药来料流量的不稳定，以及机械惯性所造成的滞后，给提高控制精度带来了很大的困难。可以根据经验设置一个控制提前量，在接药盒中的药量达到控制提前量后，立即停止防爆步进电机或气动震盘，判断是否需要补加药或气缸点动精加药，从而满足动态自动称量速度和精度的要求。同时在自动称量过程中，可以依据称量情况对控制提前量进行修改。另外为减小冲击对电子称实时读数的影响，需要在粗加药结束

程符合等温测量的条件，方法正确可行。

参考文献：

- [1] 马福球. 解析火炮的反后坐装置[J]. 兵工科技, 2007(9): 55-56.
- [2] 高树滋, 陈运生, 张月林, 等. 火炮反后坐装置设计[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995: 102-114.
- [3] 刘红丽. 传感与检测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [4] 韩玲, 彭光正, 张金铎. 超声波液位检测仪的设计[J]. 现代科学仪器, 2006(2): 23-26.
- [5] 王成, 张培林, 傅建平. 火炮复进机内气体特性的热力学分析[J]. 兵工学报, 2008(5): 526-531.
- [6] 党铁安, 于文浩. 复进机液量检查方法研究[J]. 兵器试验技术, 2006(2): 32-34.

后延时一段时间再进行比较，判断是否需要补加药；若需要补加药，控制防爆步进电机，进行皮带的半圈、1/4 圈等的补药，在补加药完成后延时一段时间再进行比较，判断是否需要精加药；若需要精加药，启动气动震盘进行精加药，在精加药结束后延时一段时间再进行比较，判断是否需要点动气动震盘进行加药。延时的时间可根据经验或现场调试以及冲击的大小来确定。由于有了控制策略，这些不确定因素以及随机干扰得到很好的控制，从而减小了误差、加快了称量的速度、提高了称量的精度^[4-5]。

4 结论

动态自动称药技术解决了大颗粒发射药称量范围大、称量节拍快、称量精度高的难题，实现了大颗粒发射药的动态自动称量。目前，该技术已成功应用于某厂的发射药自动称量机项目中，降低了工人的劳动强度，提高了生产效率，得到了用户方的一致好评。

参考文献：

- [1] 严中清, 韩银泉. 西门子 FTA 称重模块在定量加药系统中的应用[J]. 兵工自动化, 2011, 30(1): 85-86.
- [2] 汪建宇, 廖哲智, 胡劲松, 等. HP-1 型自动称量机控制系统[J]. 机电一体化, 2001(1): 44-46.
- [3] 蒋焕新, 赵琳. 组合称量技术的研究[J]. 包装工程, 2005(2): 66-67.
- [4] 江杰, 王建国, 张乃洪, 等. 动态定量自动称重机[J]. 自动化仪表, 1992, 13(2): 19-24.
- [5] 孟华, 庄健, 贾辉然, 等. 高精度自动称量控制系统的设计及应用[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(3): 152-154.