

高等学校教材

自动武器动力学

甘高才 主编

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书系统地论述了自动武器动力学的基本理论及其在自动武器工程上的应用,主要包括自动机原件在火药燃气作用下的运动、自动机零部件在弹簧作用下的运动、机构转动和撞击等。

本书可作为高等院校自动武器专业自动武器动力学课程的教材,以及从事自动武器工程研究、设计和制造工作的科技人员的参考书。

本书经机械电子工业部枪炮教学指导委员会复查,兵工教材编审室审定,同意作为部级教材出版。

《自动武器动力学》

甘高才 主编

兵器工业出版社 出版

(北京市海淀区车道沟10号)

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经销

吴海印刷厂印装

开本: 787×1092 1/16 印张: 10.375 字数: 243千字

1990年8月第1版 1990年8月第1次印刷

印数: 1400册 定价: 2.10元

ISBN 7-80038-226-5/TJ·30(课)

(内部发行)

前 言

本书根据机械电子工业部兵工教材编审室审定的自动武器专业自动武器动力学课程教学大纲编写。

自动武器动力学是自动武器专业的主干课程之一。编者的意图是按照大纲的要求，总结和吸取有关院校多年来的教学经验，编写一本符合自动武器动力学规律的教材。

本书的内容有绪言、自动机原动件在火药燃气作用下的运动、自动机零件在弹簧作用下的运动、机构的传动和机构运动微分方程的求解、构件间的撞击和撞击应力、改变自动武器射击频率的措施、自动武器工作可靠性问题，以及自动武器动力学展望等。

和过去教材相比，第一，明显地增加了缓冲条件下自动机的动力学分析；第二，增加了用应力波理论计算构件间的撞击应力；第三，强调了数值计算方法。这样的安排与当前自动武器工程在动力学方面发展的趋势是一致的。

本书的教学时数为45学时。由于增加了一些新内容，使用本书时，特别是对多自由度弹簧质量系统的运动、武器在缓冲条件下机构的传动和用应力波理论计算构件间的撞击应力及撞击后的速度，可根据学生情况作适当的调整。

自动武器动力学的先修课程有机械原理、兵器构造、内弹道学、自动武器气体动力学，后续课程为自动武器结构设计。但在具体安排五门专业课程时只需要将部分内容按所列次序先后排列，而后可交错进行。

本书由华东工学院甘高才主编。书中绪言、第一章和第四章第四节及结束语由甘高才编写；第二章第一节至第二节和第三章第一节至第七节由李莉丽编写；第二章第三节至第四节和第三章第八节由李德芬编写；第四章第一节至第三节和第五节由史瑞明编写。

本书由机械电子工业部二〇八所朵英贤主审，太原机械学院欧学炳任责任编委，兵工教材编审室夏咸松任责任编辑。他们不辞辛苦审阅和编辑了全部稿件，并提出许多宝贵意见，在此一并表示感谢。

编 者

1989年5月

常用符号表

A	后效期内常系数	s^{-1}
a	火药静力燃烧时期内常系数	s^{-1}
b	与膛内压力冲量有关的时间系数	s
b	恢复系数	
c	阻尼系数	$N \cdot s/cm$
c_0	临界阻尼系数	$N \cdot s/cm$
d	武器口径	mm
F	力	N
F_a	A构件替换点a速度方向上的外力	N
F'_a	转换力	N
F_b	B构件替换点b速度反方向上的外力	N
F_{bi}	第i个构件替换点上的外力	N
F_f	复进簧力	N
F_{gh}	枪管的后坐力	N
F_N	约束反力	N
F_{RK}	弹壳与膛壁间的摩擦阻力	N
F_1	预压状态时的弹簧力	N
F_2	最大工作行程时的弹簧力	N
F_s	弹簧圈贴合时的弹簧力	N
f	摩擦系数	
f_1	预压状态时弹簧的压缩量	cm
f_2	最大工作行程时弹簧的压缩量	cm
f_s	弹簧圈贴合时弹簧的压缩量	cm
I	力的冲量	$N \cdot s$
I_h	后效期内膛底压力合力冲量	$N \cdot s$
$\bar{I}_h$	有膛口装置时后效期内膛底压力合力冲量	$N \cdot s$
I_{hz}	整个后效期内膛底压力合力冲量	$N \cdot s$
I_g	气室内火药燃气压力合力冲量	$N \cdot s$
I_0	弹头完全嵌入膛线前火药燃气压力合力冲量	$N \cdot s$
i_s	气室压力冲量	$\frac{N}{cm^2} \cdot s$
i_0	弹头从经过导气孔起到后效期结束止的膛内火药燃气压力总冲量	$\frac{N}{cm^2} \cdot s$

$i_{0.}$	整个气室工作时间内气室内火药燃气压力总冲量	$\frac{\text{N}}{\text{cm}^2} \cdot \text{s}$
J_A	构件对通过点A并垂直于运动平面的轴的转动惯量	$\text{kg} \cdot \text{cm}^2$
J_G	构件对通过质心G并垂直于运动平面的轴的转动惯量	$\text{kg} \cdot \text{cm}^2$
$[K]$	刚度矩阵	
k	弹簧刚度	N/cm
k_i	A构件替换点到第i个工作构件替换点的传递比	
L	弹头在膛内的行程长度	mm
L'	枪膛换算长度	mm
L_d	从弹头起动点到导气孔的行程长度	mm
L_{lim}	弹壳可以移动的极限长度	mm
$[M]$	质量矩阵	
m	质量	kg
m_a	A构件替换点a的质量	kg
m'_a	转换质量	kg
m_b	B构件替换点b的质量	kg
m_{bi}	第i个构件替换点的质量	kg
m_D	弹头质量	kg
m_g	枪管及与其联接零件的质量	kg
m_j	枪机及与其联接零件的质量	kg
m_x	机匣及与其联接零件的质量	kg
m_s	活塞及与其联接零件的质量	kg
m_r	装药质量	kg
NN	法线	
p	平均压力、弹道压力、膛压	MPa
p_a	大气压力	MPa
p_D	弹底压力	MPa
p_d	弹头经过导气孔时的膛压	MPa
p_k	弹头飞出膛口时的膛压	MPa
p_{lh}	弹壳不发生横向断裂的极限膛压	MPa
p_{lx}	弹壳不发生纵向破裂的极限膛压	MPa
p_m	最大膛压	MPa
p_s	气室压力	MPa
p_T	膛底压力	MPa
p_0	起动压力	MPa
p_1	弹壳切向应力达到材料弹性极限的压力	MPa
p_2	弹壳与膛壁间的正压力	MPa
$[Q]$	振型矩阵	
q_i	多自由度弹簧质量系统的第i个广义坐标	

S	枪膛横断面面积	cm^2
S_x	导气孔有效横断面面积	cm^2
S_i	活塞横断面面积	cm^2
TT	切线	
t	时间	s
t'	后效期时间	s
t_d	弹头从起动到经过导气孔所用的时间	s
t_{dk}	从弹头经过导气孔到出膛口所用的时间	s
t_0	弹头在膛内运动的时间	s
t_1	由底火发火开始到弹头完全嵌入膛线的时间	s
u_{pi}	膛内某一瞬间火药燃气平均速度	m/s
V_0	药室容积	cm^3
V_{0s}	气室初始容积	cm^3
v	速度	m/s
$\bar{v}$	自动机原动件制动后坐速度	m/s
v_a	A构件替换点a的速度	m/s
v'_a	A构件替换点a撞击后的速度	m/s
v_b	B构件替换点b的速度	m/s
v'_b	B构件替换点b撞击后的速度	m/s
v_c	C构件替换点c的速度	m/s
v'_c	C构件替换点c撞击后的速度	m/s
v_D	弹头相对于枪管运动的速度	m/s
v_d	弹头经过导气孔时相对于枪管运动的速度	m/s
v_F	枪管前冲速度	m/s
v_k	弹头飞出膛口瞬间自动机原动件自由后坐速度	m/s
v_m	自动机原动件自由后坐最大速度	m/s
$\bar{v}_m$	自动机原动件制动后坐最大速度	m/s
v_r	机匣自由后坐速度	m/s
v_0	弹头初速	m/s
x	位移	mm
$\bar{x}$	自动机原动件制动后坐位移	mm
x_d	A构件替换点a的位移	mm
x_k	弹头飞出膛口瞬间自动机原动件自由后坐位移	mm
x_m	后效期末自动机原动件自由后坐位移	mm
x_r	机匣自由后坐位移	mm
α	与导气装置结构参数有关的结构系数	
α_i	影响系数	
β	后效系数	
β_i	影响系数	

γ_i	影响系数	
ΔS_i	活塞与气室壁间间隙横断面面积	cm^2
δ	内耗系数	s^{-1}
ξ	阻尼比	
η_i	A构件替换点到第i个工作构件替换点的传动效率	
η_i	气室压力总冲量与膛内压力总冲量之比	
λ	弹簧工作行程	mm
μ_T	膛口装置的冲量系数	
ρ	密度	kg/cm^3
σ_m	活塞相对质量	kg/cm^2
σ_s	活塞相对面积	
σ_A	间隙相对面积	
σ_0	气室相对初始容积	cm
φ	弹头质量虚拟系数	
φ_i	枪机质量虚拟系数	
φ_1	考虑弹头在膛内的旋转功和摩擦功的弹头质量虚拟系数	
ω	角速度	s^{-1}
ω_n	自由振动的圆频率	s^{-1}
ω'_n	衰减振动的圆频率	s^{-1}

目 录

常用符号表	(1)
绪言	(1)
一、自动武器的分类	(1)
二、自动武器的自动机和自动动作循环图表	(1)
三、自动武器自动动作时的作用力	(2)
四、自动武器动力学的任务	(3)
第一章 自动机原动件在火药燃气作用下的运动	(4)
第一节 枪管后坐	(4)
一、枪管后坐式武器的工作特点	(4)
二、膛内火药燃气压力的变化规律	(5)
三、枪管自由后坐	(8)
四、枪管制动后坐	(11)
五、枪管前冲作用	(15)
第二节 枪机后坐	(16)
一、枪机后坐式武器的工作特点	(16)
二、自由枪机后坐原理	(17)
三、自由枪机自由后坐	(21)
四、半自由枪机自由后坐的计算特点	(26)
第三节 活塞后坐	(27)
一、导气式武器的工作特点	(27)
二、气室内火药燃气压力的变化规律	(28)
三、活塞自由后坐	(33)
第四节 当武器有缓冲时自动机原动件和机匣的运动特点	(37)
一、助退腔内火药燃气压力的作用	(38)
二、自由枪机中膛内火药燃气压力的作用	(38)
三、膛内和气室内火药燃气压力的作用	(41)
第二章 自动机零件在弹簧作用下的运动	(46)
第一节 不考虑内耗时零件在弹簧作用下运动的计算	(46)
一、弹簧的工作图表和弹簧的转换质量	(46)
二、零件在弹簧作用下的运动微分方程及其求解	(47)
第二节 考虑弹簧内耗时零件的运动计算	(53)
一、零件在小刚度单股簧作用下的运动	(56)
二、在缓冲簧作用下零件的运动	(57)
三、多股簧运动计算的特点	(58)

第三节 零件对任意随时间变化力的响应	(59)
一、单位脉冲	(59)
二、系统在脉冲载荷作用下的响应	(59)
三、系统在任意力 $F(\tau)$ 作用下的响应	(60)
第四节 多自由度弹簧质量系统的运动	(62)
一、二自由度弹簧质量系统自由振动运动微分方程的建立	(62)
二、二自由度系统自由振动微分方程组求解	(63)
三、系统对初始条件的响应	(65)
四、系统对任意随时间变化的力的响应	(67)
五、三自由度弹簧质量系统运动计算的特点	(68)
第三章 机构传动	(71)
第一节 质量替换理论的应用	(71)
第二节 机构运动微分方程的建立	(74)
第三节 传速比的求法	(78)
一、极速度图法	(79)
二、微分法和图解微分法	(82)
第四节 传动效率的求法	(84)
一、直移凸轮机构的传动效率	(84)
二、圆柱凸轮机构的传动效率	(85)
三、平面回转凸轮机构的传动效率	(86)
四、带双臂杠杆凸轮机构的传动效率	(87)
五、滚柱凸轮机构的传动效率	(89)
第五节 机构传动时构件的约束反力	(90)
第六节 机构运动微分方程的求解	(92)
一、尤拉方法	(94)
二、尤拉方法的改进	(95)
三、龙格—库塔方法	(97)
第七节 机构的逆传动	(101)
一、产生逆传动的条件	(101)
二、逆传动阶段运动的计算	(102)
第八节 在缓冲条件下机构的传动	(104)
一、在缓冲条件下机构运动微分方程组的建立	(104)
二、影响系数 α_i 、 β_i 及 γ_i 的确定	(110)
三、力列阵的确定	(115)
四、机构运动微分方程组的求解	(115)
第四章 撞击 (碰撞)	(119)
第一节 概述	(119)
一、撞击对武器性能的影响	(119)
二、研究撞击的目的	(120)

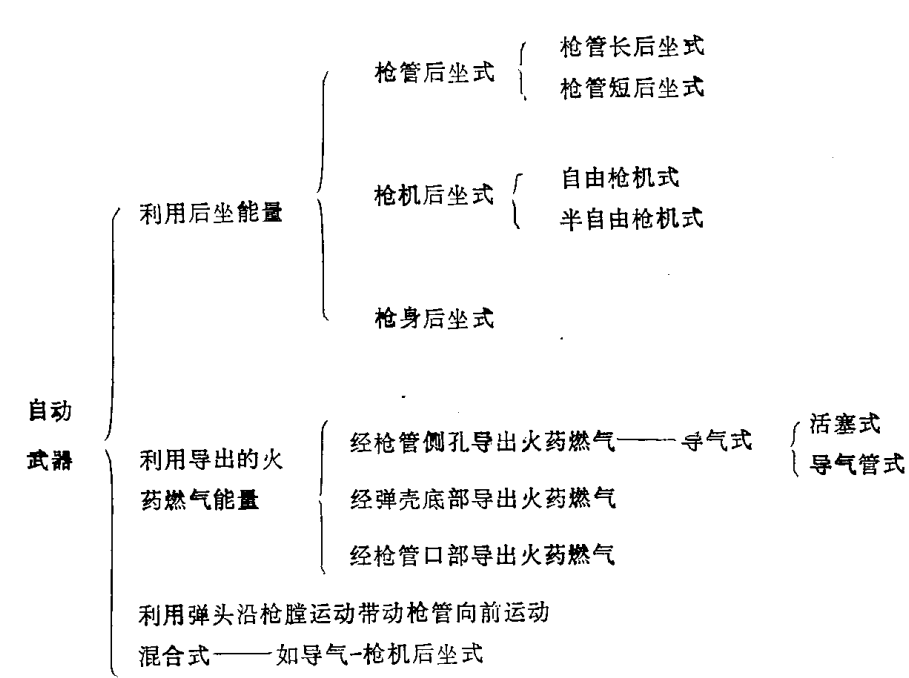
第二节 正撞击	(120)
一、正撞击理论的计算公式	(120)
二、正撞击理论在自动武器中的应用	(121)
三、撞击中心在自动武器中的利用	(123)
第三节 斜撞击	(124)
一、两构件斜撞击时速度的计算	(124)
二、斜撞击理论在自动武器中的应用	(126)
第四节 三构件撞击	(128)
一、动量方程和动量矩方程	(129)
二、恢复系数	(130)
三、速度计算公式	(131)
四、特殊情况下的速度计算公式	(131)
第五节 应用应力波理论计算杆件间撞击后的速度	(136)
一、杆中一维纵波的控制方程——波动方程	(136)
二、两根半无限长杆正撞击时的计算公式	(138)
三、弹性波在变截面杆中的反射与透射	(139)
四、计算两根材料相同的有限长杆正撞击的速度和应力并与实测值之比较	(140)
结束语	(149)
一、改变射击频率的措施	(149)
二、自动武器工作可靠性问题	(150)
三、自动武器动力学展望	(152)
参考文献	(153)

绪 言

一、自动武器的分类

通常所说的自动武器是指利用武器发射时膛内的火药燃气能量进行射击的一类自动武器。由于利用火药燃气能量的方式不同，武器的基本结构也就不同，因此通常是根据其利用火药燃气能量的不同方式对自动武器加以分类。这就是所谓自动武器按自动方式的分类，如表0-1所示。在现代装备的步兵自动武器中，常见的自动方式是导气式、枪机后坐式和枪管短后坐式。

表0-1 自动武器按自动方式分类



除了上述这类利用火药能量自动射击的自动武器外，还有一类利用外部能量自动射击的转管式自动武器，本书不予讨论。

二、自动武器的自动机和自动动作循环图表

为了使自动武器完成自动动作，首先必须有提供工作能源的原动机，还需要有一套机构，以保证自动武器的连续发射。

自动武器的原动机由弹药、枪管与枪机（或枪管、枪机与导气装置）组成。原动机中接受火药燃气能量并带动其它机构运动的构件称为原动件。不同自动方式的自动武器，其原动件也不同。在枪管后坐式武器中，原动件为枪管与枪机；在枪机后坐式武器中，为枪机与弹壳；在导气式武器中，为活塞与枪机框。

为了保证自动武器的连续发射，必须重新装填枪弹和击发枪弹的底火。为此，还必须具备以下各个主要工作机构：

1. 枪机的开锁和闭锁及打开和关闭枪膛的机构——开锁闭锁机构，简称闭锁机构；

2. 退出弹壳的机构——退壳机构；
3. 向进弹口输弹和向弹膛进弹的机构——供弹机构；
4. 击发机构；
5. 发射机构；
6. 复进机构。

此外，还有保证武器使用安全的机构——保险机构。有的武器还有加速机构（或减速机构）、点射机构等。

自动武器的原动件和上述闭锁机构等组成的总体称为武器的自动机。

自动机的工作，由原动件运动时依次控制各工作机构的动作来完成。各主要工作机构动作的顺序及其与原动件的关系，可以用自动武器自动动作循环图来表示。图0-1所示为捷59式7.62mm机枪自动动作循环图。图中左面注明各个不同动作的名称，右面注明相应于各个动作过程中原动件的位移。

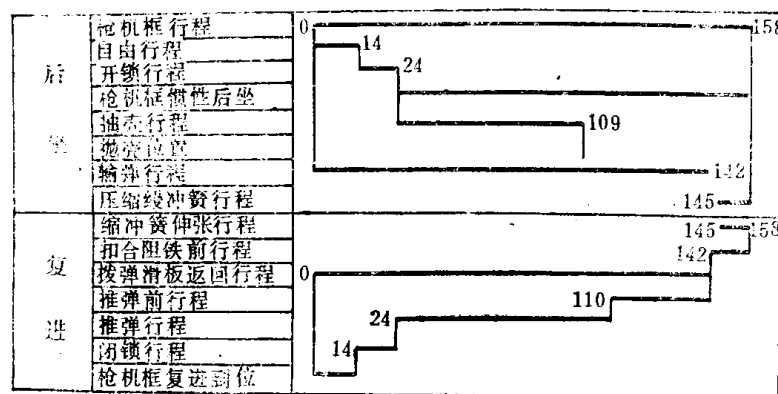


图0-1 捷59式7.62mm机枪自动动作循环图

循环图亦称循环图表，它将武器中各主要机构的动作顺序，画出了一个明确的轮廓，这对分析自动武器工作过程十分重要。因为，尽管自动机工作全过程比较复杂，但各个不同动作的过程却比较简单。例如苏AK47突击步枪，其自由行程是活塞与枪机框在气室压力作用下的运动，开锁行程是枪机框上的开锁斜面推动枪机转动而开锁，复进扣合阻

铁前行程是枪机框和枪机在复进簧作用下的运动，抛壳是抛壳挺撞击弹壳等。按照循环图表所列动作顺序，把各个简单的动作过程分析清楚，就可以得到某一自动武器工作全过程的规律。

不同自动武器有不同的循环图表。循环图表千差万别。但是，经过比较和归纳后，可以看出，各种自动武器工作全过程，实质上是：火药燃气作用下原动件的运动、弹簧作用下零部件的运动、机构传动和撞击等四类运动形态的不同组合。本书将逐一研究它们的规律。

三、自动武器自动动作时的作用力

使自动武器各机构构件运动的作用力，按其物理本质，可以分为火药燃气压力、弹簧和其它弹性元件的弹性力、重力和惯性力。此外，还有约束反作用力和摩擦力。

火药燃气压力通常是原动力，是自动武器工作的动力源。由于它的作用，原动件才能具有足够的动能完成武器的自动动作。不同自动方式，火药燃气压力的变化规律不尽相同。火药燃气压力的变化非常迅速，而且作用时间很短。自动机原动件或整个武器的位移，对火药燃气压力变化的性质或大小，一般没有多大影响。因此，火药燃气压力被认为仅仅是时间的函数。

弹簧力，一般在弹簧伸张时为原动力，在弹簧压缩时为阻力。弹簧力的变化与弹簧压缩量成正比。

在自动武器中，弹簧质量通常比在弹簧作用下运动的物体的质量小得多，因此，在研究这

类问题时，可以近似地考虑弹簧质量对该物体运动的影响。

考虑和确定重力不太困难，但在不同射角下检查自动机动作可靠性时，重力的计算就颇为重要。此时，重力在原动件运动方向上的分力将在自动机的不同工作时期使原动件运动加速或减速。

由于自动武器各机构在工作时的动态性质，惯性力起着很大的作用，而惯性力不同于前述几种已知的主动力，它是一种内力。在主动力作用下各机构构件均有惯性力产生。当构件之间发生撞击时，惯性力将达到十分巨大的数值，但必须在构件运动规律研究确定之后，才能确定惯性力的大小。

作用于构件上的约束反力往往是校核各构件的强度所必须的，通常也是在机构构件运动规律确定之后才能确定它。

摩擦力主要取决于约束反力，确定它是十分困难的，自动武器中的摩擦通常接近于干摩擦，因此，通常把摩擦力看作与约束反作用力的垂直分量成正比。

四、自动武器动力学的任务

自动武器动力学的任务是研究自动机的运动规律，即对自动机作动力学分析，它包括：

1. 已知机构构件的质量、几何构造和作用在构件上的主动力，求各构件的运动诸元——运动时间、位移和速度，从而获得自动机的运动规律，以便研究自动机的工作性能，如射击频率、可靠性等。

2. 由已知各构件的运动诸元，计算惯性力、约束反作用力等，以便用于计算零件强度。

由此可见，无论是分析或设计自动武器，对自动机作动力学分析都是十分重要的。

第一章 自动机原动件在火药燃气作用下的运动

第一节 枪管后坐

一、枪管后坐式武器的工作特点

枪管后坐式武器是利用枪管的后坐运动能量进行工作的武器。这类自动武器的原动件是枪管及与其联接的枪机，原动力是作用于膛底的火药燃气压力。武器发射之初，枪机与枪管牢固地扣合在一起，火药燃气压力经弹壳底部作用于枪机上，使二者向后运动。在后坐或复进过程中，枪机开锁并打开枪膛。根据枪管运动的特点，这类武器有两种类型：

1. 枪管长后坐式武器 发射之初，枪管和枪机保持闭锁状态共同后坐，压缩复进簧，直到后方位置，枪机被扣合在后方。然后枪管在复进簧作用下先行复进，在复进过程中完成枪机开锁枪膛等动作。待枪管复进到位后，枪机才开始复进。例如法绍沙轻机枪，见图1-1。这类武器射击频率很低，机构也较复杂，目前已很少采用。

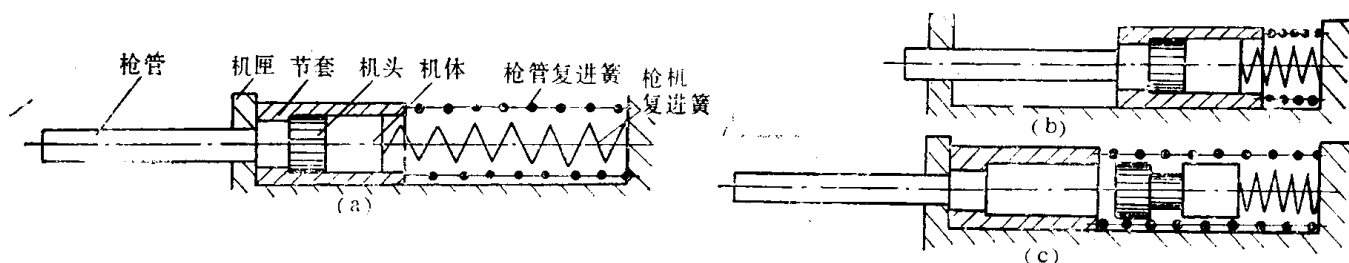


图1-1 枪管长后坐式武器工作原理图

(a) 枪管在前方位置； (b) 枪管在后方位置；
(c) 枪管复进到位，枪机开始复进。

2. 枪管短后坐式武器 枪管和枪机只在很短的一段行程上保持闭锁状态共同后坐。当膛压降低到弹壳可以安全工作的压力后，枪机开锁并打开枪膛。然后，向后运动的枪管受到限制，而枪机则继续后坐到枪管与枪机之间的距离足够供弹为止。根据枪管运动到后方位置是否暂时停止，它又有两种型式：

(1) 枪管与枪机一起复进到位 枪机开锁后，向后运动受到限制的枪管被卡榫扣住，暂时停止运动。继续后坐的枪机运动到后方位置后反向复进，快到前方位置时，解脱枪管卡榫。然后，枪管与枪机一起复进，完成闭锁动作并复进到位。如54式7.62mm手枪即属于这种形式，见图1-2。一般这种武器的枪管和枪机共用一根复进簧。

(2) 枪管与枪机分别复进到位 开锁后，向后运动的枪管受到限制后，后坐终止，随即在枪管复进簧作用下向前复进到位。而继续后坐的枪机运动到后方位置，随后在枪机复进簧作用下复进，完成闭锁动作后复进到位。如56式14.5mm高射机枪即属于这种形式。见图1-3，

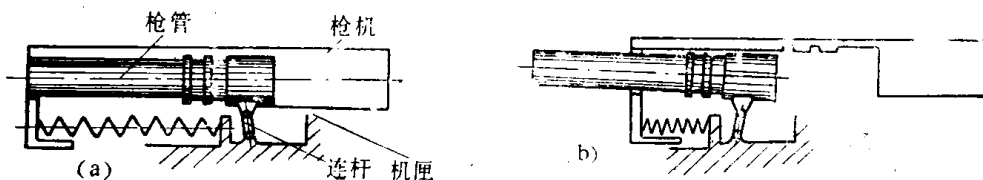


图1-2 54式7.62mm手枪工作原理图

(a) 枪管枪机在前方; (b) 枪管暂停在后方。

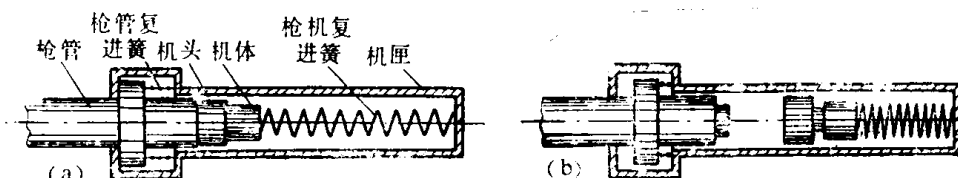


图1-3 56式14.5mm高射机枪工作原理图

(a) 枪管枪机在前方; (b) 枪管复进枪机后坐。

二、膛内火药燃气压力的变化规律

由于发射时作用于膛底的火药燃气压力是使枪管后坐的原动力，为了分析枪管的后坐运动，必须知道膛内火药燃气压力的变化规律。

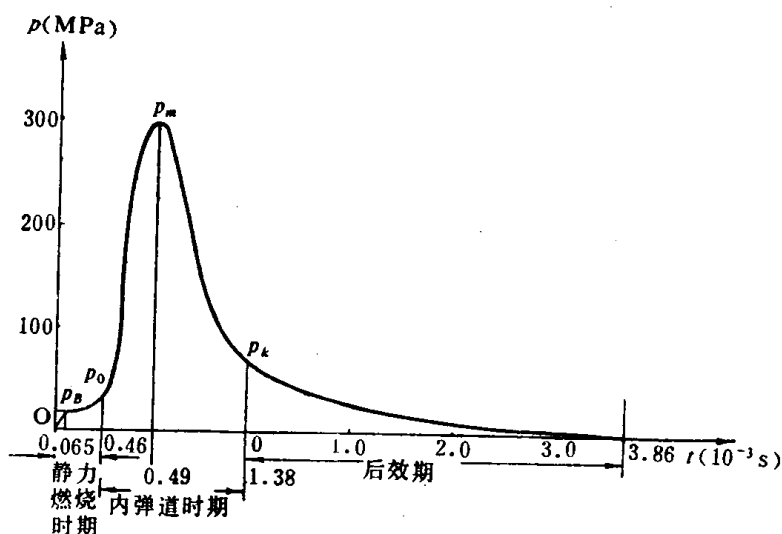


图1-4 53式7.62mm枪弹膛内压力实验曲线(用弹道枪实测)

$p_B=15.7\text{MPa}$; $p_0=29.4\text{MPa}$;

$p_m=294\text{MPa}$; $p_k=56.8\text{MPa}$ 。

和燃烧的。由图可以看出，静力燃烧时期的时间是很短的。

2. 内弹道时期 指从弹头起动到弹头出膛口为止的一段时间。在此时期中，由于弹头的运动，弹后空间的火药燃气也跟着一起运动，因此在膛内形成了燃气流。在弹头底部气流平均速度最大，并等于弹头运动速度；而在膛底气流平均速度最小，可以认为等于零。这就是说，在弹后空间的燃气流存在着速度分布，因而也必然存在着压力分布。气流平均速度最大的弹头底部，压力最低，而气流平均速度最低的枪膛底部，压力最高。用内弹道学的方法计

根据膛内火药燃气压力变化的特点，可将火药燃气作用的全过程分为静力燃烧时期、内弹道时期和后效期三个时间区段，如图1-4所示。

1. 静力燃烧时期 指从击发底火开始到弹头完全嵌入膛线之前的一段时间。在此时期内，可以认为只有火药燃烧而弹头没有运动，于是膛内压力随时间不断增高，一直到推动弹头起动，即达到图1-4中的 p_0 点的起动压力，一般 $p_0=29.4\sim39.2\text{MPa}$ 。 p_B 点的压力为点火压力，弹壳内的火药就是在此压力下开始着火

算确定出的膛压只是每瞬时弹后空间火药燃气压力的平均值。显然

$$p_T > p > p_D$$

式中 p_T ——膛底压力；
 p ——平均压力，简称膛压，又称弹道压力；
 p_D ——弹底压力。

膛底压力、平均压力和弹底压力之间的关系，在内弹道学中已有讨论，这里只介绍几个半经验公式。

弹底压力与平均压力的关系为

$$p = \left(1 + \frac{1}{3} \frac{m_Y}{\varphi_1 m_D}\right) p_D$$

式中 m_Y ——装药质量；
 m_D ——弹头质量；
 φ_1 ——考虑弹头在膛内的旋转功和摩擦功的弹头质量虚拟系数。对穿甲弹头， $\varphi_1 = 1.07$ ；对其它弹头， $\varphi_1 = 1.05$ 。

膛底压力与弹底压力的关系为

$$p_T = \left(1 + \frac{1}{2} \frac{m_Y}{\varphi_1 m_D}\right) p_D$$

膛底压力与平均压力的关系为

$$p_T \approx \left(1 + \frac{1}{6} \frac{m_Y}{\varphi_1 m_D}\right) p$$

利用这三个关系式，对几种枪弹进行计算，其结果列于表1-1中。由表可见，弹底压力比平均压力约小10%左右，膛底压力比平均压力约大5%左右。

表1-1 膛底压力 p_T 、弹底压力 p_D 和平均压力 p 之间的相对值

枪弹名称	$m_Y(g)$	$m_D(g)$	m_Y/m_D	φ_1	p_D/p	p_T/p	p_T/p_D
56式7.62mm普通弹	1.6	7.9	0.203	1.05	0.94	1.03	1.10
53式7.62mm普通弹	3.0	9.6	0.312	1.05	0.91	1.05	1.15
53式12.7mm穿甲弹	10.3	48.2	0.338	1.07	0.91	1.05	1.16
56式14.5mm穿甲弹	30.5	64	0.476	1.07	0.87	1.07	1.23

在内弹道时期，作用于枪管上使枪管后坐的力 F_{gh} 为膛底压力的合力 $S p_T$ 与弹头沿膛线运动时产生的轴向膛线阻力 F_z 之差，即

$$F_{gh} = S p_T - F_z$$

通常称 F_{gh} 为枪管的后坐力。在一般武器中， $F_z \approx 0.02 S p_T$ ，又由于

$$p_T \approx \left(1 + \frac{1}{6} \frac{m_Y}{\varphi_1 m_D}\right) p$$

故

$$F_{\varepsilon k} = 0.98 \left(1 + \frac{1}{6} \frac{m_Y}{\varphi_1 m_D} \right) S p \approx S p$$

即枪管的后坐力近似地等于枪膛横断面面积 S 与膛内平均压力的乘积。

3. 后效期 弹头飞出膛口以后的一段时间。在后效期内, 火药燃气压力的变化规律, 目前多采用布拉文的以指数函数形式表示的经验公式

$$p = p_k e^{-At} \quad (1-1)$$

式中 p ——后效期内某瞬时的膛内平均压力;

p_k ——弹头飞出膛口时膛内平均压力, 即后效期开始时膛内平均压力;

e ——自然对数的底;

t ——从后效期开始算起的时间;

A ——常系数。

利用整个后效期内作用于膛底的火药燃气压力合力冲量的表达式, 即可求出常系数 A 的值。

后效期内某一瞬间 t 之前作用于膛底的压力合力冲量 I_h 的表达式为

$$I_h = \int_0^t S p_T dt \approx \int_0^t S p dt = \int_0^t S p_k e^{-At} dt$$

$$\text{最后得} \quad I_h = \frac{S p_k}{A} (1 - e^{-At}) \quad (1-2)$$

式中 S ——枪膛横断面面积。

由式(1-1), 有

$$e^{-At} = p/p_k$$

将上式代入式(1-2), 得

$$I_h = \frac{S p_k}{A} \left(1 - \frac{p}{p_k} \right)$$

后效期末, $t=t'$, $p=p_a$ (p_a 为大气压力), $I_h = I_{hz}$, 即整个后效期内作用于膛底的压力合力冲量为

$$I_{hz} = \frac{S p_k}{A} \left(1 - \frac{p_a}{p_k} \right) \approx \frac{S p_k}{A} \quad (1-3)$$

这里, 因为 p_a/p_k 远小于1, 故可略去。

另一方面, 后效期内作用于膛底的压力合力的反作用冲量将使得由膛口喷出的火药燃气的动量发生变化。由动量定理, 整个后效期内作用于膛底的压力合力的反作用冲量, 应等于同时期内由膛口流出的火药燃气动量的增量。令在火药燃气作用全过程内, 膛内火药燃气所具有的最大平均速度 $u_{jm} = \beta v_0$, 于是有

$$I_{hz} = m_Y (\beta v_0) - m_Y (0.5 v_0) \quad (1-4)$$

式中 v_0 ——弹头初速;

β ——火药燃气后效作用系数, 简称后效系数;

$0.5 v_0$ ——弹头飞出膛口瞬间, 假设膛内火药燃气的速度沿膛轴呈线性分布, 并假设