

火炮发射 火药气体动力学特性 与工程应用

张福三 尤广志 姚志军 张培忠 著



Dynamic Characteristics of Powder Gases
And Engineering Application
During Gun Propulsion



國防工業出版社

National Defense Industry Press

TJ3/1023



NUAA2013049927

TJ3
1023-1

火炮发射火药气体动力学 特性与工程应用

Dynamic Characteristics of Powder Gases
And Engineering Application during Gun Propulsion

张福三 尤广志 著
姚志军 张培忠



国防工业出版社

· 北京 ·

2013049927

图书在版编目(CIP)数据

火炮发射火药气体动力学特性与工程应用/张福三等著. —北京:国防工业出版社, 2009. 6

ISBN 978-7-118-06331-8

I. 火... II. 张... III. 火炮 - 气体动力学 IV. TJ30

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 066849 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京四季青印刷厂印刷

新华书店经售

※

开本 880 × 1230 1/32 印张 8 字数 222 千字

2009 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

火炮是以火药为能源的动力机械,在膛内时期火药气体压力是推动弹丸做功以及使后坐部分产生后坐动量的动力来源;在后效期,从弹丸飞出炮口瞬间开始至膛内火药气体压力降至一个大气压为止,这一时期就是高压容器突然打开火药气体的喷出过程,前喷火药气体使后坐部分获得的动量增量等于火药气体对后坐部分的实际等效推力冲量的大小;在后效期终结时,后坐部分具有的自由后坐动量等于膛内时期终结时后坐部分具有的自由后坐动量和后效期后坐部分获得的动量增量之和。

我国科研设计部门在火炮研制过程中,发现我国使用的后效期终结时后坐部分具有自由后坐动量的计算方法 $M_h W_{K, \max} = mv_0 + \beta \omega v_0$ 中,在求取滑膛炮与线膛炮火药气体后效作用系数 β 值时,在现行使用的火药气体后效作用系数 β 的经验计算方法 $\beta = A/v_0$ 中,建议取 $A = 1300$ 时,计算滑膛炮后效期终结时后坐部分具有的自由后坐动量的计算结果与实测值的误差过大,不能在科研设计时使用,这是什么原因引起的呢?我国现在使用的炮口装置冲量特征量的计算方法,在计算火炮发射不同弹药(种)炮口装置冲量特征量时,炮口装置冲量特征量的计算结果不等于常量,它不能反映炮口装置工作时冲量特征量的本质,不能在工程设计中使用。火炮设计理论表明:火炮发射不同弹药(种)条件下,炮口装置冲量特征量应该等于某一常量,它与不同弹药(种)的使用条件无关。在评价火炮总体、炮架的动力学特性时,当火炮发射不同弹药(种)时,炮口动能较大的弹药(种)条件,火炮总体、炮架的受力并不一定就较大,看来使用炮口动能金属利用系数评价火炮动力学特性来说明金属材料的利用水平是存在问题的,这又是什么原因引起的?

产生上述问题的原因是我们的试验仪器设备或是试验数据的处理结果有问题,还是我国现在使用的计算与评价方法存在问题?本试验中心立专题开展研究,对组建 50 多年火炮动力学特性等相关试验数据的分析、处理计算与研究,并查阅了大量国内外相关技术资料,从理论与工程实践的结合上,找出了问题产生的原因。给出滑膛炮、线膛炮和滑膛与线膛混合型火炮在膛内时期、后效期和后效期终结时后坐部分具有自由后坐动量的准确计算方法,计算结果与实测值具有良好的一致性。给出炮口装置冲量特征量和火药气体冲量相对变化率的准确计算方法,解决了现行方法计算结果不能在工程上使用的问题。提出后效期火药气体等效(实际等效)推力喷射速度的新概念,给出膛线是滑膛炮与线膛炮后效作用系数产生差异的核心因素以及修正计算方法。给出对膛口气流气体动力学有重要应用价值的火药气体喷出炮口临界断面时的速度 $\bar{C}_0$ 与等效推力喷射速度 A 之间的关系 $A = \zeta \bar{C}_0$ 。并给出采用后坐动量金属利用系数评价火炮动力学特性的方法,自由后坐诸元以及炮口装置性能特征量的计算新方法等。因此,书中给出的一系列准确计算方法,是本中心组建 50 多年来有关火炮动力学特性等相关试验经验的总结。

全书分 5 章:第 1 章概述;第 2 章火炮自由后坐时的动量守恒问题;第 3 章实测自由后坐数据和自由后坐诸元以及炮口装置性能特征量的计算方法;第 4 章自由后坐试验的工程实践与应用。第 5 章火炮自由后坐计算方法在轻武器上的应用。书中主要内容的说明见概述。

在对上述问题的研究过程中得到北京大学胡望雨教授、中北大学潘玉田教授以及国营和平机器制造厂吴成金研究员等对书稿内容提出宝贵的建议,在此深表谢意。

由于作者的学术技术水平有限,书中所述内容不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者于中国白城兵器试验中心
2009 年 2 月

主要符号表

名称	符号	单位
1. 装药量	ω	kg
2. 弹丸质量	m	kg
3. 膛内时期火药气体压力	p	MPa
4. 火药气体具有的对膛底压力	$p_t(t)$	MPa
5. 火药气体具有的对弹底压力	$p_d(t)$	MPa
6. 弹丸对后坐部分的轴向阻力	$F_{md}(t)$	N
7. 后坐部分对弹丸的轴向阻力	$F_{mh}(t)$	N
8. 后坐力	$F_{pt}(t)$	N
9. 弹丸初速	v_0	$m \cdot s^{-1}$
10. 弹丸炮口速度	v_g	$m \cdot s^{-1}$
11. 弹丸飞出炮口临界断面时炮口气流的声速 (声速平均值)	$c_0(\bar{c}_0)$	$dm \cdot s^{-1}$
12. 炮膛横断面面积	S	dm^2
13. 弹丸行程	l	dm
13. 弹丸行程长	l_g	dm
14. 火药气体等效推力喷射速度	A	$m \cdot s^{-1}$
15. 滑膛炮火药气体实际等效推力喷射速度	A	$m \cdot s^{-1}$
16. 线膛炮火药气体实际等效推力喷射速度	A^*	$m \cdot s^{-1}$

17. 滑膛与线膛混合型火炮火药气体实际等效推力喷射速度	A^{**}	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
18. 膛内时期后坐部分自由后坐速度	W	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
19. 不带炮口装置时膛内时期终结时后坐部分具有的自由后坐速度	W_g	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
20. 带炮口装置时膛内时期终结时后坐部分具有的自由后坐速度	W_{gT}	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
21. 后坐部分质量	M_h	kg
22. 炮架质量	M_J	kg
23. 自动机质量	M_Z	kg
24. 火炮战斗状态全炮质量	M_Q	kg
25. 不带炮口装置时膛内时期终结时后坐部分具有的自由后坐动量	I_g	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
26. 带炮口装置时膛内时期终结时后坐部分具有的自由后坐动量	I_{gT}	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
27. 不带炮口装置弹丸飞出炮口断面时具有的炮口动量	I_q	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
28. 带炮口装置弹丸飞出炮口断面时具有的炮口动量	I_{qT}	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
29. 不带炮口装置后效期火药气体使后坐部分获得的动量增量	$I_{T,\max}$ (ωA)	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
30. 不带炮口装置滑膛炮后效期火药气体使后坐部分获得的动量增量	$I_{T,\max}$ (ωA)	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
31. 不带炮口装置线膛炮后效期火药气体使后坐部分获得的动量增量	$I_{T,\max}$ (ωA^*)	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

32. 不带炮口装置时滑膛与线膛混合型火炮后效期火药气体使后坐部分获得的动量增量	$I_{T, \max}$ (ωA^{**})	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
33. 不带炮口装置时后效期终结时后坐部分具有的最大自由后坐动量	$I_{K, \max}$	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
34. 带炮口装置后效期终结时后坐部分具有的自由后坐动量	I_{KT}	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
35. 不带与带炮口装置时后效期火药气体冲量相对变化率	σ	%
36. 炮口装置冲量特征量	χ	%
37. 不带炮口装置火药气体喷出炮口临界断面时的推力系数	ζ	%
38. 不带与带炮口装置时后坐动量变化率	λ	%
39. 不带或带炮口装置时后坐动量金属利用系数	$\eta_{I_h} (\eta_{I_{hT}})$	$\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^{-1} / \text{kg}}$
40. 威力系数	$C_E \left(\frac{E_g}{d^3} \right)$	J / dm^3
41. 不带或带炮口装置时后坐动量示性系数	$C_{I_h} (C_{I_{hT}})$	$\frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{dm}^3}$
42. 充满系数	η_g	%
43. 炮口动能示性系数	C_{E_g}	J / dm^3
44. 炮口动能金属利用系数	η_{E_g}	J / kg
45. 炮口装置能量效率	η_E	%

目 录

第 1 章 概述	1
第 2 章 火炮自由后坐时的动量守恒问题	9
2.1 两个小球发生碰撞时的动量守恒问题	9
2.2 火炮自由后坐时的动量守恒问题	11
2.2.1 膛内时期火药气体具有的压力作为系统 内力的特点	11
2.2.2 膛内时期火药气体具有的压力是系统内力	11
2.2.3 膛内时期系统总动量(矢量)守恒和后坐部分 与弹丸具有动量的关系与计算方法	12
2.2.4 后效期火药气体使后坐部分获得的动量增量	16
2.2.5 后效期终结时后坐部分具有的自由后坐动量	16
2.2.6 对膛内时期终结时后坐部分具有自由后坐动 量($M_h W_g$)与弹丸炮口动量(mv_g)相等的说明	17
2.2.7 膛内时期火药气体的所谓前移动量($0.5\omega v_0$) 对系统总动量不产生影响	21
2.2.8 对两种火药气体冲量相对变化率(σ)计算 方法的比较	25
2.2.9 滑膛炮不带与带炮口装置后效期终结时后坐 部分具有自由后坐动量两种方法计算结果与 实测值的比较	30
2.2.10 线膛炮不带炮口装置后效期终结时后坐部分	

	具有的自由后坐动量两种方法计算结果与 实测值的比较	33
2.2.11	线膛炮带炮口装置时两种方法计算结果与 实测值的比较	37
2.2.12	主要结论与看法	38
2.3	对膛内时期火药气体压力时间曲线变化规律的分析	40
2.3.1	对“力”的构成与存在的两个必备要素条件 及其在系统和独立研究对象中作用的说明	41
2.3.2	不能假设火药气体膨胀流动速度按直线增加 的规律变化	42
2.3.3	主要结论与看法	45
2.4	对实际测试得到的弹底与膛底压力关系的分析	45
2.4.1	火药气体本身具有的压力	45
2.4.2	实际测试时得到的火药气体压力	46
2.4.3	有别于铜柱测压法的新的膛底和弹底压力 测量方法	60
2.4.4	结束语	64
2.5	对不带炮口装置时后效期有关问题的分析	65
2.5.1	对不带炮口装置时炮口断面喷管气流状态 的分析	65
2.5.2	炮口喷管临界断面处产生等声速气流(C_0) 的现象	69
2.5.3	对炮口气流从炮口喷出现象的分析	70
2.5.4	滑膛炮后效期终结时后坐部分具有的自由 后坐动量	73
2.5.5	线膛炮后效期终结时后坐部分具有的自由 后坐动量	74
2.5.6	滑膛与线膛混合型火炮后效期终结时后坐 部分具有的自由后坐动量	74

2.5.7	两种后效期终结时后坐部分具有自由后坐 动量计算方法的比较	77
2.5.8	对美陆军工程设计手册中火炮后坐部分 具有的自由后坐动量计算方法的分析	79
2.5.9	后效期终结时后坐部分具有自由后坐动量 的计算方法	80
2.6	对火药气体等效推力喷射速度“ A ”值的分析	80
2.6.1	对火炮发射时火药气体动力学特性的统计分析	80
2.6.2	对火炮发射时火药气体动力学特性试验数据 的统计分析	82
2.6.3	对线膛炮和滑膛炮等效推力喷射速度“ A ”值 的方差一致性检验	86
2.6.4	对线膛炮和滑膛炮等效推力喷射速度“ A ” 的平均值一致性检验	87
2.6.5	滑膛与线膛混合型火炮考虑弹丸旋转影响时实际 等效推力喷射速度(“ A^{**} ”)值的求取方法	90
2.6.6	考虑弹丸旋转影响时后效期火药气体对后坐 部分的实际等效推力冲量($I_{T,max}$)的计算	91
2.6.7	对炮口声速的统计计算	94
2.6.8	迫击炮发射时火药气体喷出炮口临界断面时 炮口声速 C_0 的大小	101
2.6.9	对迫击炮和一般火炮炮口声速方差(中间误差) 的一致性检验	103
2.6.10	对迫击炮和一般火炮炮口声速平均值一致性 检验	103
第3章	实测自由后坐数据和自由后坐诸元以及炮口装置性能 特征量的计算方法	105

3.1 考虑车轮转动影响对自由后坐实测数据的修正

计算方法	105
3.1.1 自由后坐车车轮转动对测试数据的影响	105
3.1.2 自由后坐车车轮转动对自由后坐参数的修正 计算方法	106
3.1.3 考虑自由后坐车车轮转动对火炮自由后坐 参数的影响	108
3.1.4 结论与建议	110
3.2 自由后坐诸元和运动动能的计算方法	111
3.2.1 膛内时期后坐部分自由后坐速度的计算方法	111
3.2.2 膛内时期后坐部分自由后坐行程长的计算方法	111
3.2.3 后效期后坐部分自由后坐诸元的计算方法	112
3.2.4 后坐部分运动动能的计算方法	113
3.3 炮口装置性能特征量的计算方法	116
3.3.1 后效期火药气体推力冲量特征量	116
3.3.2 后坐动量相对变化率 λ 的定义式(不考虑 炮口装置质量影响)	117
3.3.3 火药气体冲量相对变化率 σ 的定义式	118
3.3.4 炮口装置能量效率 η_E 的定义式	120
3.3.5 炮口装置3个性能特征量(η_E 、 σ 和 λ)之间 的关系	120
3.3.6 后坐动量相对变化率 λ 的计算方法	125
3.3.7 炮口装置能量效率的计算新方法	125
3.3.8 在自由后坐台上测定炮口装置3个性能特征 量时的计算方法	126
第4章 火炮自由后坐试验的工程实践与应用	128
4.1 内弹道 $p-l$ 曲线包络面积(炮口动能)大小不是火炮 动力学特性的本质因素	128

4.1.1	对刚性炮架受力分析	129
4.1.2	对只配备单一弹种的弹性炮架火炮总体(炮架) 受力分析	131
4.1.3	配备多弹种时炮口动能较大的弹种条件其炮口 动量却较小出现的条件	134
4.1.4	对配备多弹种的弹性炮架火炮总体(炮架) 受力分析	134
4.1.5	对59式130mm加农炮和59式152mm加农炮 后坐动量与反后坐装置抗力的分析	141
4.1.6	炮口动量较大弹种在后效期终结时后坐部分 具有的自由后坐动量也较大的界限条件	142
4.2	采用后坐动量(动能)和炮口动能进行火炮受力分析 的比较	145
4.2.1	内弹道参数与测试计算结果的比较	145
4.2.2	对采用后坐动量(动能)与炮口动能进行火炮 受力分析的比较	148
4.2.3	结论与看法	151
4.3	后坐动量及其金属利用系数在火炮受力分析上的应用	152
4.3.1	后坐动量和炮口动能在火炮总体(炮架)受力 分析上的应用	153
4.3.2	后坐动量和炮口动能在火炮自动机受力分析上 的应用	157
4.3.3	后坐动量金属利用系数与炮口动能金属利用系数 在评价后坐部分质量上的应用	161
4.3.4	对炮身动力学特性的看法	163
4.3.5	炮口动量与膛内时期炮膛合力两者对火炮受力 分析的比较	164
4.3.6	结论	165

4.4	后坐动量大小在火炮强装药设计指标给出与使用上的应用	165
4.4.1	对强装药的说明	166
4.4.2	对选配与使用强装药原则的说明	168
4.4.3	不同弹药(种)条件的内弹道性能、动力学特征量与反后坐装置抗力关系的比较	172
4.4.4	火炮内弹道试验对强装药的选配与评定方法	173
4.4.5	加农炮、榴弹炮试验对选配全装药和强装药及其他各号装药和强装药试验结果的评价方法	174
4.4.6	结论	174
4.5	对现在使用的苏联评价火炮威力系数 C_E 的分析	175
4.5.1	沿用的苏联教科书中描述火炮威力系数 C_E 的方法	176
4.5.2	在同一种(门)火炮上使用威力系数 C_E 表征和评价火炮威力时存在的不当之处	177
4.5.3	在不同火炮上使用威力系数 C_E 表征和评价火炮的威力时存在的不当之处	178
4.5.4	采用后坐动量示性系数 C_{I_h} ($C_{I_{HT}}$) 描述火炮威力(动力学)特性的方法	180
4.5.5	在同一种(门)火炮上采用后坐动量示性系数 C_{I_h} ($C_{I_{HT}}$) 描述火炮威力(动力学)特性的方法	183
4.5.6	在不同火炮上采用后坐动量示性系数 C_{I_h} ($C_{I_{HT}}$) 描述火炮威力(动力学)特性的方法	184
4.5.7	几种火炮威力系数 C_E 和后坐动量示性系数 C_{I_h} ($C_{I_{HT}}$) 的比较	185
4.5.8	对火炮发射时内弹道动力“源”对弹丸做功特性的评价方法	186

4.5.9	在同一种(门)火炮上采用炮口动能示性系数 C_{E_g} 描述火炮内弹道特性	189
4.5.10	在不同火炮上采用炮口动能示性系数 C_{E_g} 描述火炮内弹道特性	190
4.5.11	几种火炮炮口动能示性系数 C_{E_g} 、后坐动量示性系数 C_{I_h} ($C_{I_{hT}}$) 和威力系数 C_E 的比较	192
4.5.12	结束语	193
4.6	对火炮内弹道性能给出原则的分析	193
4.6.1	对某型火炮内弹道性能规定值和试验结果的分析	194
4.6.2	初速的变化对后效期终结时后坐部分具有的最大自由后坐动能的影响	200
4.6.3	结束语	203
4.7	对某滑膛炮动力学特性的分析	204
4.7.1	某滑膛炮自由后坐试验结果	205
4.7.2	发射不同弹种时炮口装置性能特征量的统计计算结果(表4-7-4)	207
4.7.3	不带和带炮口装置时后效期火药气体对后坐部分的后效作用系数的统计结果(表4-7-5)	208
4.7.4	对后效期火药气体对后坐部分的等效推力喷射速度“A”的统计结果(表4-7-6)	209
4.7.5	结束语	209
4.8	对某滑膛炮理论计算抗力值与实际测试结果差异的分析	210
4.8.1	后效期终结时后坐部分具有的自由后坐动量的理论计算结果	210
4.8.2	采用实际试验数据计算后效期终结时后坐部分具有的自由后坐动量(表4-8-3)	212

4.8.3 结束语	213
第5章 火炮自由后坐计算方法在轻武器上的应用	214
5.1 膛内时期终结时后坐部分具有自由后坐动量与枪口 动量关系的验证试验	214
5.1.1 验证试验的目的	214
5.1.2 弹丸、装药量、全弹以及弹道枪和后坐滑车及 夹具的质量测量结果	215
5.1.3 车轮转动对后坐部分自由后坐速度影响的 修正计算	215
5.1.4 枪口动量与膛内时期终结时后坐部分具有 自由后坐动量的比较	218
5.1.5 结论	224
5.2 膛内时期终结时后坐部分具有自由后坐动量的推算 方法	225
5.2.1 以某 12.7mm 高射机枪枪口制退器效率试验数据, 推算膛内时期终结时后坐部分具有的自由后坐 动量	225
5.2.2 两种方法计算结果与实测值的比较	226
5.2.3 后效期火药气体对后坐部分的实际等效推力 喷射速度 A^*	226
5.2.4 带枪口制退器后效期终结时后坐部分具有 自由后坐动量的计算方法	227
5.2.5 枪口制退器冲量特征量 χ 与火药气体冲量 相对变化率 σ 计算结果的比较	228
5.2.6 结论	229
后记	230
参考文献	237

第1章 概 述

采用火药为能源的火炮,膛内时期和后效期的动力学特性,实际上就是这两个时期火药气体的动力学特性。书中叙述内容无一不和火药气体的动力学特性有关,因此将该书名字定为“火炮发射火药气体动力学特性与工程应用”。

本书论述了火炮自由后坐试验结果,不支持我国现在使用的苏联、美国等国家对膛内时期终结时,后坐部分具有的自由后坐动量的计算方法,不支持后效期火药气体使后坐部分获得动量增量的计算方法。我国现在使用的火药气体后效作用系数 $\beta = \frac{A}{v_0}$ 的计算方法中,建议取 $A = 1300$ 时, β 值的计算结果不能在滑膛炮上使用;现在使用的炮口装置冲量特征量计算方法的计算结果与火炮设计理论相左,不能在工程上使用;在评价火炮总体、炮架的动力学特性时,当火炮发射不同弹药(种)时,炮口动能较大的弹药(种)条件下,火炮总体、炮架的受力并不一定就较大,使用炮口动能金属利用系数评价火炮动力学特性来说明设计火炮的金属材料的利用水平是有问题的。对于上面的一系列问题是什么原因引起的呢?本书从理论与工程实践的结合上进行了论述,重新推证了火炮自由后坐系统总动量(矢量)守恒方程式,给出膛内时期后坐部分与弹丸具有动量的关系与计算方法,给出后效期后坐部分获得动量增量的计算新方法,进而给出后效期终结时后坐部分具有自由后坐动量的准确计算方法,给出采用后坐动量金属利用系数计算与评价火炮动力学特性的方法等,计算与评价结果与实际测量值具有良好的一致性。

我国现在使用的(苏联、美国等国家的)对火炮自由后坐系统总动量(矢量)守恒的分析如下:

把后坐部分、装药和弹丸看成一个质点系,该系统在发射过程中沿水