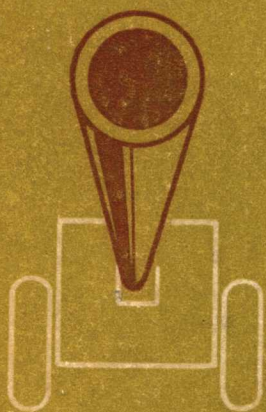


内弹道学

J·康納 著



國防工業出版社

內 彈 道 學

J. 康 納 著

鮑廷鈺、張叔方、童登策 譯



國防工業出版社

4-9

本書是將內彈道學的經典理論和方法與戰後研究的結果結合起來編寫的。

書中討論了四種內彈道學的解法：1. 簡略的解法。這種體系很簡明，並且作為入門特別有價值，但應用到實際火炮時，要作經驗修正。2. 英國用的兩種較精確的解法。一種是夏邦尼解法，另一種是可得出直接解答的簡便解法。兩種解法都不需要大量經驗修正。3. 克連茂解法。作者把這個解法加以改寫使其適於實際計算。4. 能應用於新型火炮（無座力炮、氣體動力炮和錐膛炮）的解法。這是在一般內彈道學中所沒有談到的。

本書可供高等工業院校有關專業及軍事技術學院教學參考，也可供有關研究、設計及工程技術人員閱讀。

J. Corner, M.A., Ph.D.
Theory of the
Interior Ballistics of Guns

內 彈 道 学

J. 應 納 著

鮑張 廷叔 鈺方 童登 策譯

*

國防·業出版社 出版

北京市書刊出版業營業許可証出字第 074 号
机械工业出版社印刷厂印刷 新华书店发行

米

850×1168 1/32 • 15¹/₁₆ 印張 • 插頁 2 • 383,000 字

一九五八年七月第一版

一九五八年七月北京第一次印刷

印数: 1—(1,100册 定价: (10)3.10元

著 者 序

1944年，馬可耳博士 (Dr. J. W. Maccoll) 向作者提出，目前需要有一本关于內彈道學理論的新教科書。當時著者不能寫這樣的書，但是對編寫計劃的討論表明，關於這個問題已有相當多的材料。

戰時彈道研究的最顯著的特點顯然是所要探討的物理和化學過程的複雜性。當然，這種探討的必要性不是明顯的。初看起來，火炮——炮彈——裝藥這個體系好像是一種最簡單的热機。由於這種看法，大約一百年以前，內彈道學即開始作為以幾個簡單的物理假設為基礎的應用數學而發展。後來，彈道學的數學方法逐漸改善，而所研究的問題亦愈益複雜。因為當時物理假設的研究比較不足，所以這種數學上的研究對我們了解射擊時實際發生的現象，不能有多大的幫助。

但是現在，特別是近年來，理論內彈道學的發展完全改變了方向，這主要是因為在彈道學研究中採用了新的儀器。這些儀器揭示了火炮內發生的過程的複雜性，這就使一些純經驗性質的粗略的主要概念得到了訂正。正如所預料的那樣，在特殊情況下發射過程的研究中發現了反常現象；在這方面，最重要的是：這些反常現象的研究也能以改變的形式在正常的條件下去探索。這說明了為什麼許多內彈道問題缺乏理論分析，而以“積累的經驗”為基礎進行研究；這些經驗是多年積累的，僅在技術不發生變革條件下才是可靠的。

內彈道學的物理基礎越複雜，研究內彈道學的數學方法應該越簡單。當人們認為全部內彈道學能以四個方程來概括的時候，對這四個方程的研究自然應集中所有的注意力。但是，如果把內彈道學看作是許多不同方面的綜合時，那麼很明顯，最好盡量使用

简单的数学。

编写本书时，著者极力保留经典内弹道学中最好的东西，并且还介绍了一些对内弹道学未来发展可能有价值的方法。目前还不能建立严整而又完善的内弹道学理论。正确理解和相应的实践进展的新的可能性造成新的复杂性，因此可以预料到，这门学科的研究将飞跃进步。著者指出了理论研究的可能发展道路，并在为本书选材时注意了这一点。应该补充的是，对各种现象的物理和化学方面倾向十分简化的经典理论可作为内弹道学有价值的导言，因而它在本书中占有相当的地位。

J. 康 纳

目 录

第一章 內彈道学的范围	11
1.1 本書的目的	11
1.2 实用彈道学和研究彈道学	13
1.21 火炮膛內压力的測定	17
1.22 初速的測量	20
1.23 其他实验研究	21
1.3 內彈道学的主要問題	24
1.4 內彈道学的未来	26
1.5 內彈道学主要問題的历史	28
第二章 火炮火药	34
2.1 火药成分	34
2.2 火药装药的排列	37
2.21 火药外形和几何形状函数	40
2.22 真实的形状函数	46
2.23 夏邦尼形式的燃燒方程	51
2.3 火炮火药的燃燒理論	53
2.31 表面上的燃燒理論	54
2.32 气相中的燃燒理論	58
2.33 气体中火焰带的理論	60
2.34 应用到火药的燃燒	73
2.35 高压下的理論燃燒速度	77
2.36 火药初溫的影响	80
2.37 燃燒速度的实验研究	80
2.4 火药的燒蝕	84
2.41 火炮压力下火药燒蝕的簡單理論	85
2.42 流体动力学的研究	87
2.43 火焰中的有效导热性	92
2.44 有湍流的燃燒速度	93
第三章 火药的热化学	97

3.1 密閉器內的測壓方法	97
3.11 散熱的修正	99
3.2 火葯燃燒後未冷卻也未作功的平衡狀態的理論	101
3.21 不考慮離解和壓力修正的理論	101
3.22 離解	111
3.23 實驗結果	114
3.24 餘容和其他壓力修正的理論	116
3.3 火葯在定壓下燃燒後未散熱的平衡狀態	130
3.31 不進行壓力修正的理論	130
3.32 壓力修正	133
3.33 火箭燃料的比沖量	136
3.4 火葯氣體在火炮內的热力學	142
第四章 簡易彈道解法	149
4.1 引言	149
4.2 等溫解法	151
4.21 符號	151
4.22 運動方程	152
4.23 火葯燃燒結束後的解	158
4.24 計算公式的摘要	160
4.25 炮和裝葯的效率	161
4.3 和實驗對比	164
4.31 幾種代表性的彈道解法	164
4.311 一種代表性的高射炮	165
4.312 海軍炮的杆狀葯	173
4.32 經驗修正	175
4.4 裝葯和各設計變量的彈道影響	178
4.41 葯厚	178
4.42 裝葯量	180
4.43 彈丸全行程	187
4.44 葯室容積	187
4.45 彈丸重量	187
4.46 火葯形狀	188
4.47 火葯性質	190
4.5 等溫理論的歷史	190

第五章 准确的彈道解法	193
5.1 內彈道的能量方程	193
5.2 柯波克解法	195
5.21 几点假設.....	195
5.22 基本方程.....	196
5.23 方程系的解法.....	197
5.24 計算公式摘要.....	202
5.25 火药余容的影响和由于彈丸动能增加而生的 气体温度下降的影响.....	203
5.26 和实验結果的比較.....	206
5.27 热損失的影响.....	208
5.3 起动压力的理論	209
5.31 一些假設.....	211
5.32 郭耳迪解法.....	212
5.33 起动压力的彈道影响.....	225
5.4 燃燒速度和压力不成正比的非綫性燃燒法則 ...	227
5.5 彈丸运动中阻力的彈道影响	234
5.51 标准阻力对初速的影响.....	236
5.52 一阶理論的精度.....	242
5.53 阻力沿炮膛分布的影响.....	243
5.54 余容的影响.....	244
5.6 数值方法和机械方法	245
第六章 內彈道的相似关系与最有利的解法問題.....	248
6.1 引言	248
6.11 簡單方程系的相似关系.....	249
6.12 彈道解的編表.....	258
6.2 最有利的彈道解	264
第七章 有火药气体流出火炮的內彈道学	269
7.1 引言	269
7.2 噴管的典型理論	272
7.21 余容的修正.....	276
7.22 噴管上的推力.....	277
7.3 有气体流出火炮的內彈道方程	279

7.31 理論假設	279
7.32 符号	282
7.33 在炮膛中火药气体的压力和密度的分布	282
7.34 噴管气流与能量关系	285
7.35 基本方程	287
7.36 与无气体流出相当的彈道問題	288
7.37 数值积分	293
7.38 在綫性燃燒速度情况下的解法	295
7.39 燃燒結束之后的时期	302
✓ 7.4 关于滑膛迫击炮的气体流出問題	305
7.5 炮膛燒蝕火炮的彈道	308
7.51 燒蝕火炮內彈道方程	310
7.511 基本假設	310
7.512 符号	311
7.513 解題的各方程	311
7.514 燃燒結束之后的解	314
7.515 彈丸开始运动的近似解	315
7.52 新火炮与燒蝕火炮試驗数据的分析	317
7.521 新火炮的彈道	318
7.522 燒蝕火炮的彈道	320
7.53 在火炮寿命期間的內彈道变化	324
7.54 气体流出影响的迅速估計	325
7.6 无后座炮的彈道性質	326
7.61 无后座的討論	327
✓ 7.611 作用于炮身的后座动量計算	329
7.62 計算參量与装填条件对典型无后座炮彈道的影响	331
7.621 起动力和噴口打开压力的影响	332
7.622 燃燒速度或火药厚度的影响	336
7.623 装药量对保証后座为零的临界断面面积的影响	337
7.624 彈重对保証后座为零的临界断面面积的影响	338
7.625 药室容积变化的影响	338
7.626 彈丸全行程的变化	339
7.627 火药性質的影响	339

7.628 噴口形状的影响	340
7.63 噴口打开最有利的压力值	340
7.64 炮口制退器用于无后座炮的可能性	311
第八章 某些特种型式的火炮	345
✓ 8.1 气体动力火炮	345
8.11 符号	347
8.12 假設	347
8.13 在火药燃烧时期的內彈道方程	350
8.14 燃燒結束之后的內彈道方程	357
8.15 計算公式摘要	359
8.16 最大可能的示压效率	361
8.2 輕兵器	362
8.3 混合装药	364
8.31 在混合装药情况下的有效火药厚度	365
8.4 錐膛火炮	370
8.41 錐膛火炮的內彈道方程	372
第九章 內彈道的流体动力学問題	376
9.1 拉格兰茲的彈道問題	376
9.11 一般的解	380
9.12 勒烏与皮杜克的研究結果	385
9.13 皮杜克的极限解	388
9.14 实验結果与将来的理論研究	396
9.15 冲击波方程	398
9.16 最大可能的初速	400
9.2 彈丸射出炮口后的內彈道	404
9.21 膛內气体的起始状态	405
9.22 早期的工作	407
9.23 問題的討論	409
9.24 在炮口出現稀疏波之前的时期	411
9.25 与膛底压力实验值的比較	415
9.26 稀疏区域	418
9.3 炮口制退器	424
✓ 9.31 炮口制退器的推力計算	427
9.32 炮口制退器的效率	429

9.4 在炮膛中彈丸前面的空气运动	434
9.41 稳流运动.....	435
9.42 流体动力学方程的黎曼解法.....	438
9.43 加速运动.....	440
9.5 火药在炮膛中的运动	443
9.51 彈道方面的推論.....	451
第十章 炮身的热傳导	455
10.1 引言	455
10.2 导热系数	456
10.3 炮身的傳热	464
10.4 实验結果	469
10.41 半經驗公式	473
附录 I 內彈道方程的数值积分.....	476
§ 1. 利用計算机的解	476
§ 2. 沒有計算机的解	481
附录 II 插值系数.....	481
附录 III 彈道学中所应用的常数表.....	482

第一章 內彈道学的范围

1.1 本書的目的

这本书的目的，不在于說明很多內彈道学的方法。这是因为現在內彈道学的范围很广闊，而且新問題經常发生，不可能在一本中等篇幅的書里全部收罗下来。在这本書里，我們主要地注意經常用来解决各种彈道問題的理論方法，以及这些方法在技术方面的例証。

在实验彈道学方面，这里只討論对理論所必需的部分，例如，关于确定理論方法所要求的准确度問題。节略实验部分并不意味着实验不重要，只是为了减少本書的篇幅。无论怎样，作者在实验方面算不得什么权威，同时作者很了解：彈道学的多数理論工作，无论是解釋新观察到的現象，还是提高原有理論水平以适应測量精度上的突出改进，都是受实验結果推动的。同时，实验常常因为没有理論的檢驗而停頓；应当承認，这种对理論的重視，一部分是由于彈道实验的費用太高。

因此，我們討論的范围是：有关膛內发生的現象以及和它有密切联系的現象的理論。本書不涉及火箭內彈道学。

在說明內彈道方法时，主題的選擇范围是很广闊的。作者曾打算將內彈道学中的大多数問題都加以叙述，并詳細討論其中最重要的部分；对于其余的，只着重討論作者感觉特殊兴趣的問題。書中很多材料取自作者的战时著作，例如：发射藥的燃燒和燒蝕、余容理論、炮口制退器和无后座力炮。从这些題材可以証明內彈道学并不是停滯不前的，其中有象余容这类熟悉的研究对象还有待于量的解釋，还有一些系属于因技术发展而經常引起的新問題。

官方的保密观点，各国的严格程度虽有不同，但不能說对彈道学研究工作的发表有多大帮助。因此作者特別愉快地感謝英国后勤部科学首长对本書的寬容态度。对公开发表的限制的确对我们处理題材上有严重的間接影响：虽然我們尽量提到几位最著名彈道工作者的名字，但不能提出最近彈道工作的詳細参考資料。他們的許多成果，本書除作一些暗示外，不能提得太多，但往后无疑地总是要公开发表的。作者閱讀了多数英国和美国的最新著作，以及几篇沒有发表的德国文献，因此几年內将要出現的研究工作，对于本書已經有了影响。相信这些資料终于发表之后，只会使这本書的参考文献增加，而不需要改写这本書。

可以說几句关于內彈道学对于其他学科的关系地位。內彈道学是一种应用科学；也就是說，它本身並沒有独特的概念，而是运用了各种純科学中的概念。彈道学的特点就在于它涉及的范围很广泛；除了現代所有应用科学的基础—数学以外，它还特別应用了流体动力学、热力学和物理化学。此外，彈道学者对理論化学也必須給予重視。

即使我們只計算已經发表的著作，內彈道学的文献是相当多的。其中英文的并不很多。主要講彈道学的唯一杂志是德文火药炸药杂志 (*Zeitschrift für das gesamte Schiess- und Sprengstoffwesen*)、法国炮兵杂志 (*Mémorial de l'artillerie française*) 和法国火药杂志 (*Mémorial des poudres*)。其他有关炮兵杂志中所刊载的科学論文比較少。因此，应当提到，寻找参考文献的唯一最大帮助是法国火药杂志中有关彈道問題的書报述評。

在內彈道学理論方面，好書比較少，而且沒有一本是英文的。到1926年为止，最好的書是克兰茲著內彈道学（柏林1926），即他的彈道教科書第二卷。这本書在历史上特別有价值，因为提供了不少現在已經絕版的彈道解法的詳細內容。

法国学派提出了两本解决內彈道学主要問題的書：

郭朔和刘維礼著的內彈道学〔Gossot and Liouville, *Balistique intérieure* (Paris, 1922)〕, 苏果著彈道学教程〔Sugot, *Cours de balistique*第1, 3, 4卷 (Paris, 1918)〕。在这一点上我們可以參考兩篇有特殊价值的論文: (1) 法国炮兵杂志1926年第5卷第1131頁上苏果摘述了法国学派的著作, 是內彈道学主要問題上的一篇极为清楚而簡洁的总结; (2) 在法国炮兵杂志1924年第3卷第1009頁上迭思馬齐烈斯(Desmazières)发表了一篇到1922年为止的彈道解法摘要, 有些方面比克兰茲的評述还要明晰。

其他內彈道学文献有的过时了, 有的都包括在克兰茲著作之內。至于1926年以后的发展就需要直接参考原著。

最后, 必須指出夏邦尼著的內彈道学〔Charbonnier, *Balistique intérieure* (Paris, 1908)〕。这本书有重大历史价值, 在彈道学理論的发展上曾經有过显著影响, 細节上当然已經过时, 但是它在內彈道学問題的概念上仍然是最清晰的一本书。

1.2 实用彈道学和研究彈道学

在一般火炮的实射問題方面常常必須用到彈道学, 例如: 炮和火藥的試驗和新裝藥的估算。和“研究的”彈道学相反的, 这可以叫做“实用彈道学”。从实验方面來說, 区别在于: 实用彈道学只需要做比較简单的測量和試驗, 而且很容易大規模进行; 而研究的彈道学則需要大量的准备工作, 同时还要作一些分析, 才能得出最后結果。这种区别看起来也許不太明显, 但实践起来就十分清楚。譬如說, 用銅柱測压器能把炮內的最大压力在1~2分鐘之內測量出来, 在靶場上每天能作百来次。但是要在图解紙上繪出压力-時間曲綫就大半属于研究性質: 安装压电示压仪和其綫路, 需要較长的時間; 作記錄的軟片, 需要显影和定影; 在軟片上讀出記錄并制成图表, 需要更多的時間。此外, 使用压

电示压仪时有很多失败的可能。因此电压示压仪虽然用得很多，然而趋向于局限在必需知道压力随时间变化的这种更重要而精密的研究情况下才应用。

弹道理论方面，也同样区分成“实用的”和“研究的”两部分，这种区分方法与实验数据的类别有一部分关系。当测量时要花费很大工作量的情况，就需要有一个尽可能准确的理论。在特殊情况下，有些量用通常方法完全不能测定时，那么应当尽可能仔细地采用理论分析，这是内弹道学在研究方面的任务。

对于一般的射击分析，只要用最简单的弹道理论已足够。至于理论结果中的所有合理误差，可以根据以往计算最类似的问题记录下来的误差来研究消除。炮和装药在性能上常有的变动，不应该使一般计算不适当地复杂化。不同制造厂作的名义上相同的炮，初速有 10 英尺/秒左右的差别，而发射药性质变动所造成的散布更大，但后者是很容易由变更装药量来加以修正的。弹道理论中必需的精度问题是和我们下面要谈的射击条件的一致性密切联系的。

火药制造时所造成的微小变化，对其弹道性能影响很大。任何工厂生产的火药，每个药粒的弹道性能都是随时间在平均值的周围变化，而且变化可能很大。两个工厂所生产标号相同的火药，平均性质常常有很大差别，不能予以忽视，而且在生产阶段中不容易修正；可以设想，这些差别是由制造过程中的很小变化所引起的，实际上这种变化也是不可能避免的。

在光洁工序后这些变化容易通过混同的方法来补救。工厂的产品分成很多连续的批数，批量的大小可由 1 吨到 20 吨，决定于工厂的生产规模，并在每批之内进行一次混同。这样混同的效率可以用统计方法检查，假使满意的话，那么混同的结果就是一批性质相当均匀的发射药，就是说，每个单粒发射药性质的散布与混同前一样，但把同批的邻近药粒分成药束时，则给出按或然率的平均性质分布。不进行混同时，邻近药粒作成的药束在性质上会有大的跳动，因为每束药可能是同一天制造的，或者是工厂

中同一个小生产单位作成的。

发射药都标出批号，每批都得在規定条件下在火炮或密閉器中作过試驗来决定它的有效燃速，并找出平均值和对平均值的散布規律；一般用平均偏差或者均方根偏差作为参量来測定燃速或者任何其他彈道量的变化性，但有人宁肯用意义不大的統計量，例如：在德国的彈道学上通常采用五次試驗的总散布。

根据求得的平均性質和变化的大小，决定这一批药是驗收或者报廢。举例來說，假定所測出的燃速可能是这样低，以致要使初速达到規定时，装药的体积将会龐大得装不进药室，那么这批火药就得报費。符合規格的一批药，它的有效彈道速度是由这批药在使用炮弹中的装药量来决定的。

把火药分成彈道性能已知的批，才有可能使用标准装药来試驗火炮。試驗炮的主要目的是試驗炮的强度，試驗时使炮身所受的壓力一直超过規定最大壓力的20%。在很多国家里是用增加装药量来作試驗的，这种办法虽然簡單，但是由于正規装药都可能占滿了药室容积，所以不一定經常办得到。德国用加热装药的方法来达到較高的燃速是比較合理的，但需要加热室。此外，用較重的炮弹也是一个可能的代替方法，但是每种炮得准备几种重量不同的試驗彈是不很合适的。这里應該指出，为了使得用布郎雪測速仪的銅絲靶破断时的一律（本章2节2目），試驗彈的彈头应是平的。試驗时虽然有某些空壳試驗彈仍在用但一般用实心的。

用一批装药試驗，炮与炮之間的初速和最大压力表现出有差異。当炮燒蝕时对同样燒蝕程度的炮，这一差別变得小些，但进行的射彈发数不必相同。在开始阶段，当各炮之間差別最大时，可以在一厂制造的所有的火炮之間找到一个普遍的規律。一厂生产的炮的試驗初速平均会比別厂造的高一些。

另一种已知变化，是用同一門炮发射同一批在一定温度下的装药，平均性能每天都有些差別。

直到現在，我們認為在同一門炮內連續射击一批同样的装药

得出的一組初速(和最大膛压)是按某种固定形式分布在某一平均值的周圍的。例如：假使我們計算第一組 n 发炮彈的平均值和偏差，当 n 增加时，平均值已經假定是趋向于一个定值(总数的平均)；同样，用来表征全部总偏差的偏差也假定是趋向于一个定值。这假定是很自然的，試驗檢查虽然簡單，几乎經常可以不加檢查。的确，冷炮射出的前几发炮彈有时候很特殊，应无例外地舍弃。在多数射击中，真正平均值和真实頻率分布的假定都是很好地証实了的。近来，在某种类型榴彈炮里用最小号装药射击时出現了一种例外情况，发现在50发射彈中，初速漸漸升高50呎/秒(向“上蠕变”)。这表明在彈道学中所遇到的某些情况，平均值和平均偏差都并不一定存在。

我們再用几个代表性的数值來說明。同一工厂作出标号相同的发射药的个别药粒，燃燒速度的标准誤差大約是平均值的10%。混合成批并分装成装药后，用一門炮在同一天內射击同一批彈药，其初速的平均偏差大致是5~10呎/秒；这是炮的特性，也是发射药的特性。用同一門炮在同一天內发射不同批的等量装药，所得平均初速可以相差到30呎/秒。这种平均差别是由調整每批装药量来消除的。同一批装药，用同一类型的新炮同时射击，平均初速很容易相差10呎/秒。每門炮在这一天和那一天的平均初速的变动量大約是5呎/秒。

同批装药在靶場測定的初速平均偏差，比装成实射彈药的散布小些。为了把装药給予散布的影响更清楚地显示出来，在靶場使用的彈重和药重的允許偏差应保持在約 $\frac{1}{1000}$ 的范围以內。在实射彈药中不能維持这样严格的条件。特别是装药量公差一般比較寬，这公差的大小决定于发射药在試驗中和在生产过程中显出的內在和不可避免的散布。

回到內彈道学日常計算的本題上来，現在認為計算理論初速的精度一般不应超过5呎/秒。只有在决定微差影响(例如：彈重微小变化的影响)时是例外，在这一情况之下必須进行两次同样的