

总装备部“1153”人才工程资助

张培忠 等著



火炮

武器试验新技术

“金属风暴”

*New Testing Technologies for Gun
and Metal Storm Weapon*



兵器工业出版社

前 言

本书的研究工作是在教育部资助的重点学科博士点基金项目以及总装备部试验技术研究项目资金支持下完成的，目的是对火炮试验新技术进行开拓性研究，促进试验技术发展。

本书同时也得到了总装备部“1153”人才工程资助经费。

总装备部“1153”人才工程资助经费主要用于资助第一、二层次培养对象出国留学、攻读硕士以上学位、出版学术专著及参加高层次学术技术交流等。

申请出版学术专著资助，必须是第一编著者，其专著内容应符合下列条件之一：

1. 学术水平高，在本学科处于领先水平的基础科学理论专著；
2. 在武器装备建设、科研试验、教学、医疗等方面有重要创新的专著；
3. 学术思想新颖，内容实用性强，对武器装备建设、国防科技发展和人才培养等具有较大推动作用的专著；
4. 其他填补目前国防科技领域空白的著作。

火炮相似模拟试验技术是将相似理论应用于火炮领域的大胆探索。在传统力学相似理论的基础上，寻求火炮发射现象相似模型的设计和试验方法，以小口径模型炮代替大口径火炮进行试验来考核大口径火炮指标参数。

火炮行军试验技术是利用动力学、疲劳力学理论，研究如何使用标准强化路，编写新的国军标，以改变落后的试验方法，使

靶场火炮行军试验更具科学性、合理性。

“金属风暴”武器系统是串联发射结构，每管内串联预装填了若干发弹。在单管内部，如果两发弹发射间隔时间小于膛内时间或者后效期结束时间，前一发弹的火药气体压力将作用于后一发弹丸的前部，后一发弹丸的运动速度改变了前一发弹火药气体的速度，后一发弹丸的膛内位移改变了前一发弹火药气体的容积，两发弹的内弹道相互耦合。研究其耦合内弹道方程，用于靶场全装药、强装药的选药试验中，进行药量修正计算。

研究内容是对火炮系统试验理论的发展和完善，具有一定的通用性，为火炮科研试验提供了新的理论支持。研究成果能够改进现有的火炮研究方法，节省研制经费，缩短研制周期，对提高我国火炮研究开发具有较高的理论意义和推广价值。

本书可供从事火炮研究开发、设计制造、试验等技术人员参考，也可以作为高等院校火炮专业研究生教材。

第一篇：张培忠、冯金富著；

第二篇：金文奇、王显会、张培忠、米中贺、黄彦昌著；

第三篇：张培忠、高挺、杭小初、何明焕著。

由于著者水平有限，不妥之处，望读者批评指正。

著 者

2006 年 10 月

目 录

第一篇 火炮相似模拟试验技术

第 1 章 绪论	(3)
1.1 概述	(3)
1.2 国内外研究状况	(6)
1.3 火炮相似模拟试验技术研究的主要内容	(12)
第 2 章 弹道相似	(14)
2.1 概述	(14)
2.2 外弹道相似	(14)
2.3 内弹道相似	(18)
2.4 本章小结	(25)
第 3 章 火炮强度相似	(27)
3.1 结构强度相似	(27)
3.2 分布载荷作用下的相似	(33)
3.3 体载荷作用下的相似	(34)
3.4 断裂强度相似	(36)
3.5 本章小结	(40)
第 4 章 火炮动力学相似	(41)
4.1 火炮模型设计	(41)
4.2 炮位土壤相似	(46)

4.3	本章小结	(47)
第 5 章	模型炮设计制造	(48)
5.1	内弹道相似设计与弹药改装	(48)
5.2	火炮相似设计与制造	(52)
5.3	炮位土壤相似	(61)
5.4	模型设计形位公差的选择及加工精度的确定	(62)
5.5	本章小结	(63)
第 6 章	模型炮射击试验	(64)
6.1	火炮静态测量检查	(64)
6.2	调试射击、选药、内弹道试验	(66)
6.3	后坐阻力试验	(70)
6.4	炮口制退器效率试验、炮口冲击波试验	(72)
6.5	稳定性试验	(78)
6.6	动态应力测定试验	(79)
6.7	本章小节	(82)
第 7 章	模型相似畸变与试验误差	(83)
7.1	相似畸变及试验误差来源	(83)
7.2	相似畸变及试验误差理论分析	(84)
第 8 章	总结	(89)
8.1	总结	(89)
8.2	存在问题及今后发展方向	(90)
参考文献		(93)

第二篇 火炮行军试验技术

第 1 章 绪论	(101)
1.1 概述	(101)
1.2 相关研究概述	(103)
第 2 章 火炮牵引状态的动力学理论方法	(114)
第 3 章 随机路面不平度模拟与路谱分析	(117)
3.1 路面不平度及其描述	(117)
3.2 路面不平度模拟方法研究	(121)
3.3 随机过程与随机振动概述	(126)
3.4 路面不平度模拟	(133)
3.5 牵引火炮列车道路谱的推导	(146)
第 4 章 轮胎与悬架力学模型研究	(152)
4.1 轮胎模型分析	(152)
4.2 非线性自适应随机接地印迹轮胎力学模型的 提出	(155)
4.3 非线性自适应随机接地印迹轮胎力学模型的 建立	(156)
4.4 悬架力学特性分析	(161)
第 5 章 火炮牵引行驶动力学模型	(164)
5.1 建模方法分析	(164)
5.2 牵引火炮列车行驶动力学模型的分析与建立	(168)
5.3 坐标系的建立及广义坐标的选取	(173)
5.4 牵引火炮列车的运动学	(177)

5.5	牵引火炮列车动力学方程	(182)
5.6	牵引火炮列车动力学方程求解方法研究	(188)
第6章	火炮牵引行驶试验研究	(198)
6.1	试验概况	(198)
6.2	实验路面路谱及不平度的测量与处理	(201)
6.3	平稳随机激励下火炮牵引平顺性试验研究	(204)
6.4	离散激励下火炮牵引试验研究	(216)
第7章	火炮在强化路上行军的动力学仿真	(221)
7.1	火炮与强化路计算机三维建模	(221)
7.2	动力学仿真	(225)
第8章	火炮在强化路上行军时悬挂系统应力、振动 加速度测试与分析	(232)
8.1	悬挂系统应力测试	(232)
8.2	应力分析	(252)
8.3	疲劳寿命分析	(280)
8.4	振动加速度特性分析	(308)
第9章	火炮牵引试验最小里程	(315)
9.1	概述	(315)
9.2	分析计算	(316)
9.3	结论	(322)
参考文献		(323)

第三篇 “金属风暴”武器试验技术

第 1 章 “金属风暴”武器概述	(335)
第 2 章 “金属风暴”武器耦合内弹道分析	(338)
2.1 火药几何燃烧定律和燃烧速度定律	(338)
2.2 弹丸运动规律方程	(339)
2.3 火药气体能量转换方程	(343)
2.4 火药气体压力分布方程	(344)
第 3 章 “金属风暴”武器后效期方程	(352)
第 4 章 “金属风暴”武器耦合内弹道计算实例	(354)
4.1 迫击炮	(354)
4.2 舰炮	(365)
4.3 “金属风暴”枪的耦合内弹道计算实例	(372)
4.4 总结	(378)
第 5 章 “金属风暴”武器试验技术	(379)
5.1 “金属风暴”武器内弹道随机过程模拟	(379)
5.2 “金属风暴”武器常温选药试验	(386)
第 6 章 高速反导“金属风暴”武器后效期方程	(390)
6.1 普通火炮后效期	(390)
6.2 “金属风暴”武器后效期	(390)
6.3 后效期耦合例子	(400)
6.4 结论	(403)
参考文献	(404)

第一篇

火炮相似模拟试验技术

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

火炮作为陆军的主要火力突击力量之一，在战争中具有举足轻重的作用。在未来战场上，火炮将与导弹等兵器一并履行火力打击、火力支援任务。由于火炮攻、防性能兼备，反应时间短，抗干扰能力强，操作简易，造价低廉，弹药种类丰富等特点，在战争中具有其他任何武器不可替代的作用。随着高新技术在战场上的大量应用，战争形式在不断发生变化，对火炮的战术技术性能提出新的要求，促使火炮领域也在发生深刻的变化。为了提高火炮性能，加快研制步伐，节约经费，一些新概念、新原理、新的研究手段不断被采用，如在计算机上进行仿真，实物模拟等。

火炮是以火药为能源的复杂机电系统，为了设计出性能优越的火炮，利用实物模拟和计算机仿真确定总体方案，并进行系统性能分析是必不可少的手段。由于计算机仿真 CAD/CAM 技术受模型的正确性、计算方法的精度、稳定性、收敛性和参数选择的制约，使得结果带有一定的近似性。实物模拟是在实物对象上的实验技术，其优点是可以严格控制实验对象的主要参数不受外界条件和自然条件的限制，做到结果准确；在复杂的实验过程中突出主要矛盾，便于把握、发现现象的内在联系，也可以用来对原型的结论进行校验；使用适当缩小的模型，可使制造容易、拆装调试方便、实验人员少、设备设施简便；可对不能或难以获取

的对象进行模型试验，如外星球、“核冬天”、温室效应等；可以避开在数学上难以表达清楚的物理关系、因素，把复杂的事物看成“黑匣子”，通过试验直接得到所需要结果，所得结果直观、可信，又比较准确。然而，有时原尺寸的实物模型制造困难，试验费用高，时间周期长。而用一个缩小的模型（有些特殊情况下，也可以是放大的模型）代替原实物，则是一条捷径。设计缩小的模型，将用到著名的相似理论。

相似理论是说明自然界和工程中各种相似现象的学说。它的理论基础是关于相似的三个定理。

相似第一定理：彼此相似的现象必定具有数值相同的相似准则，这种性质称为相似第一定理；

相似第二定理：被同一完整的方程组所描述的现象，当单值条件相似，且由单值条件的物理量所组成的相似准则在数值上相等，则这些现象相似；

相似第三定理表述为：描述某现象的各种物理量之间的关系，可以表示成相似 $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n$ 准则之间的函数关系，此定理也称为相似 π 定理。

这一理论一诞生，就发表在世界最高学术刊物——英国的《NATURE》杂志上，可见其具有极高的学术价值，在以后的几十年里，相似理论在各个领域广泛的应用中也确实证明了这一点。

相似理论可以应用于武器研制阶段和验收阶段，在不同的应用阶段，其所起的作用也不同。相似理论应用于武器研制阶段，主要是在大学、研究所的实验室内，模拟武器的几个部分、局部功能，确定一些未知参数、证明新原理、新结构、新方法、验证计算结果，最终指导研究工作。一般此类相似模型涉及参数较少，相似精度高，功能单一。相似理论应用于武器验收阶段，主要是在工厂、研究所、国家靶场的鉴定、定型试验中，此类相似模型涉及参数较多，功能复杂，实现较高的相似精度很困难，特别是相似一些综合性能参数。

1.1.1 相似理论应用于研制阶段

理论仿真和模型模拟是设计中常用的两种手段。在火炮设计中,人们常用理论仿真法,如计算机仿真,却很少采用模型模拟法,如缩小的实物模拟。由于模型模拟法可以获得试验数据,是理论仿真法不可取代的,开展火炮相似模拟研究是十分必要的。比如,研制某些大口径火炮,上千万元经费也仅够研制一个样机,研制中期试验中如出现总体设计上颠覆性问题、关键部件致命故障,样机可能被毁,项目只能被迫下马。又如某些火炮,试验中因炮口冲击波、振动加速度过高,严重影响炮上光学仪器和数字设备正常工作。如能在设计初期,利用缩小模型试验,使问题及早暴露,可防止较大的损失。

武器研制过程中有时会采用一些新原理、新结构,如近年来的电热化学炮、曲线后坐、二维后坐技术等,其原理方程、结构参数大多数是未知的或待定的,必须经过模型试验给予确定。

1.1.2 相似理论应用于验收阶段

在火炮验收阶段,大量地进行各类试验,在此过程中必然涉及到火炮性能参数的测试,这些参数包括膛压、初速、反后坐装置后坐抗力、炮口制退器效率、冲击波、全炮稳定性、动态应力等。原型火炮试验过程中,消耗在火炮制造、弹药、仪器设备、参试人员、野外靶场试验上的费用十分昂贵,也很难得到较多的参试样机。为了节省费用和时间,又可获得多个参试样机,参考相似理论在航空、航天模型在风洞中做空气动力学试验的方法,设计火炮相似模拟模型(按比例缩小的模型),利用此模型代替原型试验,测得火炮性能参数,再利用模型与原型之间的相似关系,得出原型的性能参数,达到代替原型炮验收的目的。

此项研究工作是由教育部资助的南京理工大学国家级重点学

科博士点专项科研基金项目：火炮系统物理模拟研究。课题思路是：在传统的力学相似理论基础上，寻求火炮发射现象的相似模型的设计和试验方法，用小口径火炮代替大口径火炮进行试验。这是对系统相似理论的完善和发展，研究成果可以改进现有的火炮研究方法，具有一定的通用性，能够提高我国火炮总体设计水平，使得设计方案更加科学合理，加快研制步伐，节省研制经费和时间，具有较强的理论意义和较高的使用价值。

1.2 国内外研究状况

1.2.1 国外研究状况

以相似理论为指导，人们在探索自然规律的过程中，已形成一种具体研究自然界和工程中各种相似现象的方法，即“相似方法”。相似方法已在航空航天、海洋开发、原子能、军工、动力机械、化工、水利、建筑桥梁工程等领域得到广泛的应用。早在100多年以前，柯西对振动的梁和板、弗鲁德对船、雷诺对液体、莱特兄弟对飞机的试验研究，都用到了相似方法。

美国是世界上把相似理论应用到工程最多的国家，在NASA报告中，有丰富的有关相似理论应用的文献资料，他们自20世纪六七十年代以来进行了大量的相似模型试验，如美国陆军工兵航路试验站做的月球表面探索车模型，它是在地球重力场中、模拟月球表面上的土质，研究车在月球表面的运动特性的装置，见图1.1。

美国史蒂文斯技术研究所的海上油田钻井台的水槽试验模型，不论从流体力学，还是从材料力学角度来看都是相似的；X-15型飞机的风洞试验模型，它是一种具有着陆速度直到马赫数为6的飞行性能的试验机，曾经对缩尺比例为1:15~1:50的各种模型进行了风洞试验，将其结果与实物的飞行试验结果作



图 1.1 月球车模型试验

了比较，才弄清了用模型测定的底部压力的可靠性，见图 1.2。

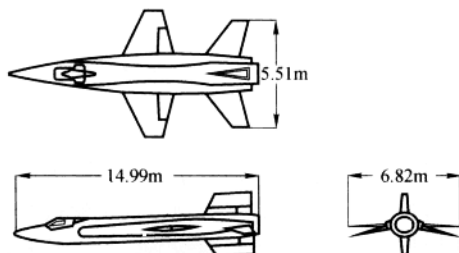


图 1.2 X-15 飞机

美国航空和空间管理局进行了“大力神”导弹和发射架的风洞试验模型试验，见图 1.3。

在土星—V 型火箭设计中，火箭发射时的振动特性是非常重要的因素。然而，由于火箭整体结构复杂，理论振动的分析很困难，而且实物高达 49.4m，发射时重量 410t，实物非常庞大，用原型试验并不容易，先期研究中也不能获得原型，因此先用了

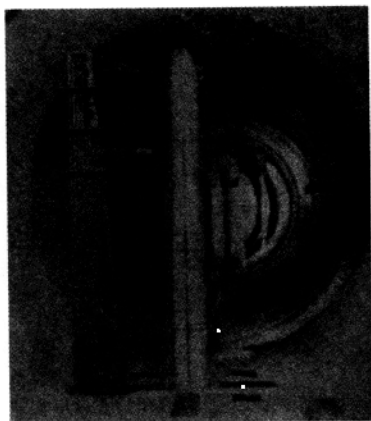


图 1.3 “大力神”导弹和发射架的风洞模型试验

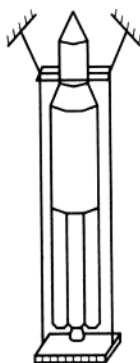


图 1.4 土星—V 型火箭
振动特性模型试验

模型试验，缩尺比例为 1 : 5。从文献给出的曲线看，模型与原型的测试结果非常一致，见图 1.4。

为了得到阿波罗指挥舱再入大气层的气体动力学资料，阿诺德技术研究中心进行了大规模的风洞试验，特别是对广泛飞行的升力、阻力及俯仰力矩，由于需要这方面的资料，曾大幅度地改变攻角和速度并进行了试验。但是，阿波罗发射前所进行的模型试验与实际的飞行试验数据差别很大，查明原因是由于空气摩擦产生的热量熔化了部分挡热板，破坏了模型的几何相似，修正了这些缺点后，风洞试验结果与飞行中的测试值

比较一致，见图 1.5。

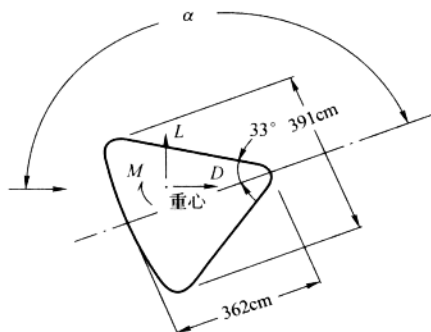


图 1.5 阿波罗指挥舱再入大气层风洞试验

垂直起降飞机当起飞、着陆、低空飞行时，从发动机向地面喷出的排气刮起沙土的细小颗粒，地面反弹的排气阻碍发动机的喷气，从而降低飞机的性能，沙土颗粒被吸入发动机更影响飞行性能。为了研究排气与地面的干涉，进行了模型试验。美国陆军工兵航路试验站先后做了纽约港、诺约港的防波堤模型试验，伊和诺依州水库的放水道模型试验，用以研究工程的防护性能；此外，还有汽车撞击试验模型、破冰船的低温水槽试验模型；船冲破激浪航行时，由于前后颠簸而受到冲击，美国 Exxes 号航母的构件发生了破损，为此研制了航母的颠簸模型进行模拟试验。

将相似理论应用于火炮方面，俄罗斯在此方面处于领先，圣彼得堡机械学院火炮教研室的物理模拟实验室已具有较高的水平和相当的规模，获得了大量的科研成果，对火炮相似设计和试验方法已经有了成套的规范，并拥有大量的本领域学术专家，为俄罗斯的火炮事业做出了突出的贡献，巴仕卡托夫教授为学术带头人，建立了一套火炮物理模拟理论。波罗的海国立技术大学（原