



国家出版基金项目



工业和信息化部“十二五”规划专著

航天发射科学与技术

航天发射装置试验技术

THE EXPERIMENT TECHNOLOGY OF
SPACE LAUNCH EQUIPMENT

于殿君 张艳清 邓 科 编著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书集中介绍了航天发射装置（重点是火箭、导弹发射装置）的试验方法。在第1章概论中，介绍了发射装置的特点、研制流程、试验的意义；第2章论述了发射装置研制过程中常见的原理性试验；第3章介绍了发射装置常见的工程研制试验，包括功能、性能试验，协调匹配试验，发射试验，环境试验，电磁兼容性试验等；第4章重点论述了定型试验的种类和要求；第5章和第6章分别介绍了发射装置可靠性试验和维修性试验的要求和方法；第7章和第8章从试验测试的角度论述了发射装置试验测试技术、数据采集和处理的方法；第9章对新兴的试验技术进行了总结，并展望了未来发展。

本书可供从事航天发射装置研究、设计、生产、试验、使用的工程技术人员和管理人员参考和借鉴，亦可作为高等院校相关专业研究生和高年级本科生的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目（CIP）数据

航天发射装置试验技术 / 于殿君，张艳清，邓科编著. —北京：北京理工大学出版社，2015.6

（航天发射科学与技术）

国家出版基金项目 工业和信息化部“十二五”规划专著

ISBN 978-7-5682-0736-2

I. ①航… II. ①于… ②张… ③邓… III. ①航天器-发射装置-试验 IV. ①V553-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 133409 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775（总编室）

(010) 82562903（教材售后服务热线）

(010) 68948351（其他图书服务热线）

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京地大天成印务有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 20.75

字 数 / 396 千字

版 次 / 2015 年 6 月第 1 版 2015 年 6 月第 1 次印刷

定 价 / 79.00 元

责任编辑 / 莫 莉

文案编辑 / 莫 莉

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题，请拨打售后服务热线，本社负责调换

航天发射科学与技术

编写委员会

名誉主编：于本水 黄瑞松 刘竹生

主 编：杨树兴 包元吉

副 主 编：（按姓氏笔画排序）

万 全 王生捷 刘 浩

姜 毅 胡习明 贺卫东

葛令民

编 委：（按姓氏笔画排序）

于殿君 王东锋 邓 科

朱恒强 刘占卿 汤元平

李建冬 李 梅 何家声

赵瑞兴 荣吉利 党海燕

傅德彬 路 峰 谭大成

航天发射科学与技术

学术顾问委员会

(按姓氏笔画排序)

丁旭昶	于倩	于建平
王 缜	牛养慈	任跃进
刘淑艳	李喜仁	张泽明
陈亚军	陈登高	周凤广
赵长禄	郝志忠	秦 烨
唐胜景	曾智勇	

总序

世界各国为了进一步提高综合国力，都在大力开发空间资源和加强国防建设。作为重要运载器的火箭、导弹，以及相关的发射科学技术，也相应地都得到了广泛的重视。发射科学技术综合了基础科学和其他应用科学领域的最新成就，以及工程技术的最新成果，是科学技术和基础工业紧密结合的产物。同时，发射科学技术也反映了一个国家相关科学技术和基础工业的发展水平。

航天发射科学技术的发展历史漫长，我国古代带火的弓箭便是火箭的雏形。火箭出现后，被迅速用于各种军事行动和民间娱乐。随着现代科学技术的发展和人类需求的增加，美国、俄罗斯、中国、日本、法国、英国等航天大国，投入了大量的人力、物力进行航天发射的研究和开发，并取得了丰硕成果，代表了世界的先进水平。火箭、导弹的发射水平，决定了一个国家航天活动和国防保障区域的范围。因此，各航天大国均把发展先进的发射和运载技术作为保持其领先地位的战略部署之一。无论是空间应用、科学探测、载人航天、国际商业发射与国际合作，还是国防建设，都对发射技术提出了新的要求，促使航天发射科学技术向着更高层次发展。

综上所述，系统归纳、总结发射领域的理论和技术成果，供从事相关领域教学、研发、设计、使用人员学习和参考，具有重要的意义。这对提高教育水平、提升技术能力、推动科学发展和提高航天发射领域的研发水平将会起到十分重要的作用。

航天发射科学技术构成复杂，涉及众多学科，而且内容广泛，系列丛书的编写需要有关领域的专家、学者来共同完成。因此，北京理工大学、北京航天发射技术研究所、北京机械设备研究所、北京特种机械研究所、总装备部工程设计研究院等国内从事相关领域研究的权威单位组建了本丛书的作者队伍，期望将发射科学技术的

重要成果著作成册，帮助读者更深入地了解 and 掌握航天发射领域的知识和技术，推动我国航天事业的发展。

本丛书力求系统性、完整性、实用性和理论性的统一，从发射总体技术、发射装置、地面支持技术、发射场总体设计、发射装置设计、发射控制技术、发射装置试验技术、发射气体动力学、发射动力学、弹射内弹道学等多个相互支撑的学科领域，以发射技术基本理论，火箭、导弹发射相关典型系统和设备为重点，全面介绍国内外的相关技术和设备、设施。

本丛书作者队伍是一个庞大的教育、科研、设计团队，为了编写好本丛书，编写人员辛勤劳动，做出了很大努力。同时，得到了相关学会，以及从事编写的五个单位的领导、专家及工作人员的关心和大力支持，在此深表感谢！由于种种原因，书中难免存在不当之处，敬请读者批评指正！

编写委员会

前言

航天发射装置是航天系统中一个重要的组成部分，对航天任务成败有着决定性的作用，因此，如何确保航天发射装置功能、性能的稳定性及其工作的可靠性一直以来都是设计开发人员最为关注的问题。在一套发射装置的研制过程中，通过试验来验证产品工作原理的正确性、设计方案的可行性，并对产品主要技术指标进行评估考核，已经成为最为常用和有效的手段。长期以来，航天产品开发人员通过积累大量的工作经验，形成了一套行之有效的试验方法体系，这套体系涵盖了产品开发的全过程，为航天产品的开发和发展做出了卓越贡献。

北京特种机械研究所自 1965 年建所以来，长期从事航天发射技术的研究，是国内最早从事该领域研究的专业化研究机构。近 20 年来，伴随着中国航天事业的飞速发展，北京特种机械研究所在航天发射技术的研究和工程应用也取得了长足的进步，在航天发射装置试验技术上积累了丰富的经验。本书以航天发射装置试验技术为对象，从工程应用角度出发，系统、全面地总结了近 20 年来北京特种机械研究所在陆基、舰载、潜载等发射装置试验技术上的研究成果，理论联系实际，力求完整而系统地论述发射装置从研制到定型全过程的试验技术理论和方法，论述的试验内容具有真实性和覆盖性，力求内容翔实、概念清楚、结论正确。为了描述清楚某些内容，书中给出了详细的工程实例，便于工程技术人员参考。本书在编写过程中进行了非密化处理，以达到公开出版的要求。

本书共 9 章，由于殷君构思和设计全书，张艳清、邓科进行全书的统稿和审定。第 1、9 章由于殷君撰写，第 2、4 章由邓科撰写，第 3 章由罗勇、邓科撰写，第 5 章由张平雨撰写，第 6 章由吴向阳、

张平雨撰写，第7、8章由岳红芳、王建新撰写。

北京特种机械研究所的郝志忠研究员对书稿进行了审阅，提出了许多宝贵的修改意见，并在本书筹备初期做了很多组织协调工作；北京理工大学的姜毅教授对该书进行了审阅，并提出了宝贵的修改意见，对本书的出版做出了较大贡献。此外，本书出版过程中，得到了北京特种机械研究所各级领导和相关技术人员的大力支持，以及兄弟单位、院校的大力协助，特此一并表示衷心的感谢。

鉴于作者水平所限，书中疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编著者

2014年7月

目 录

CONTENTS

第1章 概论

1.1 航天发射装置概述

1.2 航天发射装置的组成与功能

1.2.1 舰载发射装置的组成与功能

1.2.2 潜载发射装置的组成与功能

1.2.3 机载发射装置的组成与功能

1.2.4 车载发射装置的组成与功能

1.2.5 新型集装箱发射系统

1.3 航天发射装置的工程研制过程

1.4 航天发射装置试验

1.4.1 试验的意义

1.4.2 试验真实性和覆盖性分析

1.4.3 试验的主要程序

第2章 原理性试验

2.1 概述

2.2 运动机构和结构原理性试验

2.2.1 开（关）盖机构原理性试验

2.2.2 插头机构原理性试验

2.2.3 锁定解锁机构原理性试验

2.2.4 易碎盖冲破试验

2.3 燃气流排导试验	29
2.3.1 燃气流排导试验简介	29
2.3.2 同心筒垂直发射燃气流排导试验	35
2.4 电气系统原理性试验	37
2.4.1 电气系统原理性试验简介	37
2.4.2 发射车电气系统地面联调试验	38
2.5 液压系统原理性试验	40
2.5.1 液压系统原理性试验简介	40
2.5.2 发射车液压系统原理性试验	40
2.6 缩比试验	41
2.6.1 缩比试验的理论基础	42
2.6.2 典型缩比试验相似准则	46
2.7 发射方式原理性试验	49
2.7.1 电磁弹射原理	49
2.7.2 电磁弹射原理性试验	50

第3章 工程研制试验

3.1 概述	51
3.2 功能、性能试验	51
3.2.1 发射装置仿真试验	52
3.2.2 发射装置结构强度试验	55
3.2.3 插头机构分离试验	57
3.2.4 发射箱(筒)气密试验	58
3.2.5 发射箱(筒)机电开(关)盖试验	60
3.2.6 发射箱(筒)易碎(裂)盖冲破试验	61
3.2.7 发射箱(筒)弹射装置功能试验	62
3.2.8 发射装置跟踪瞄准试验	63
3.2.9 发射车自动调平试验	64
3.2.10 发射车行驶试验	65
3.2.11 发射装置贮存试验	66
3.2.12 起竖装置起竖回平试验	67
3.2.13 发射装置展开和撤收试验	68
3.2.14 发射装置称重和质心位置试验	68
3.2.15 乘员危害性试验	70

3.2.16 发射装置互换性试验	73
3.3 协调匹配试验	73
3.3.1 机械对接协调试验	74
3.3.2 电气性能匹配试验	75
3.3.3 舰/潜载发射装置系泊/航行试验	75
3.3.4 弹架协调试验	84
3.3.5 靶场合练	86
3.4 发射试验	86
3.4.1 缩比模型发射试验	87
3.4.2 模拟与仿真试验	87
3.4.3 全尺寸发射试验	88
3.4.4 靶场飞行试验	90
3.5 环境试验	90
3.5.1 环境试验通用要求	91
3.5.2 温度试验	99
3.5.3 低气压(高度)试验	105
3.5.4 太阳辐射试验	108
3.5.5 淋雨试验	114
3.5.6 湿热试验	117
3.5.7 盐雾试验	120
3.5.8 霉菌试验	124
3.5.9 砂尘试验	128
3.5.10 风压试验	132
3.5.11 振动试验	134
3.5.12 倾斜与摇摆试验	137
3.5.13 冲击试验	141
3.5.14 其他环境试验	143
3.6 电磁兼容性试验	148
3.6.1 发射装置电磁兼容性	148
3.6.2 舰—舰导弹倾斜式发射装置电磁兼容性试验	148
第4章 定型试验	152
4.1 概述	152
4.1.1 定型试验目的	152

4.1.2	定型试验条件	152
4.2	试验种类和要求	153
4.2.1	鉴定试验	153
4.2.2	协调试验	154
4.2.3	靶场试验	157
第5章	可靠性试验	161
5.1	可靠性试验目的	161
5.2	可靠性试验分类	161
5.2.1	环境应力筛选试验	163
5.2.2	可靠性研制试验	169
5.2.3	可靠性增长试验	171
5.2.4	可靠性鉴定和验收试验	172
5.2.5	寿命试验	174
5.3	非电子产品可靠性试验	176
5.3.1	非电子产品可靠性试验方法的基本思路	176
5.3.2	非电子产品可靠性试验的基本分类	177
5.3.3	各类非电子产品可靠性试验基本方案	177
5.4	电子产品可靠性试验	181
5.4.1	电子产品可靠性验证试验	181
5.4.2	电子产品可靠性增长试验	183
第6章	维修性试验	186
6.1	概述	186
6.2	维修性试验的目的、作用、种类和时机	186
6.2.1	维修性试验的目的和作用	186
6.2.2	维修性试验的种类和时机	187
6.3	维修性试验的一般程序	188
6.3.1	维修性试验的准备阶段	188
6.3.2	维修性试验的实施阶段	190
6.4	维修性能指标的验证方法	198
6.4.1	概述	198
6.4.2	使用条件	200
6.4.3	维修作业选择与统计计算	200

6.4.4 判决规则	201
6.5 维修性参数值的估计	203
6.5.1 维修时间期望值 μ 和方差 d^2 的估计	203
6.5.2 规定百分位的最大维修时间的估计	204
第7章 试验测试技术	207
7.1 概述	207
7.1.1 有线测量系统的组成	208
7.1.2 有线测量系统的基本特性	224
7.1.3 不失真测试条件	229
7.2 试验相关测试技术	231
7.2.1 特征秒状态测试	231
7.2.2 应力应变测试	232
7.2.3 振动冲击测试	240
7.2.4 压力测试	245
7.2.5 温度测试	252
7.2.6 速度测试	256
7.2.7 位移测试	257
7.2.8 噪声测试	259
7.2.9 过载测试	261
7.2.10 高速摄影	262
第8章 试验数据采集与处理	265
8.1 数据信号的分类和描述	265
8.1.1 数据信号的分类	265
8.1.2 确定性信号特征描述	265
8.1.3 随机信号特征描述	267
8.2 数据采集	273
8.2.1 采样与混淆	274
8.2.2 泄漏与加窗	275
8.2.3 量化及其误差	277
8.3 数据处理	277
8.3.1 处理原则	277
8.3.2 数据预处理	277

8.3.3 各类信号数据处理	278
第9章 试验技术展望	282
9.1 国内外的虚拟试验在军工领域的发展现状	282
9.1.1 国外虚拟试验现状	282
9.1.2 国内虚拟试验现状	283
9.2 虚拟试验技术在航天发射装置中的应用	283
9.2.1 虚拟试验技术在水下垂直发射技术研究上的应用实例	284
9.2.2 不同排导间隙下模拟导弹水下垂直发射仿真示例	285
9.3 总结	292
参考文献	294
索引	296

第 1 章 概 论

1.1 航天发射装置概述

航天发射装置是火箭导弹武器系统的重要组成部分，其基本任务是发射火箭或导弹。发射装置的设计水平和制造质量直接影响火箭、导弹发射的成败，影响武器系统的作战效能及载体（飞机、舰艇、车辆）的安全，以及武器的费效比。所以发射装置的设计、试验技术是火箭导弹武器系统设计的重要内容。

航天发射装置发展至今，主要作用是平时贮存和运输火箭、导弹等武器，确保其处于良好状态；战时为火箭、导弹提供规定的初始姿态和轨上运动距离，保证火箭、导弹发射的初始精度。按照发射姿态可分为水平式发射装置、倾斜式发射装置和垂直式发射装置。目前，国外的航天发射装置主要有下文介绍的几种。

图 1-1 是美国 MK-41 舰载垂直发射装置，采用模块化结构，可由 8 个、12 个或 16 个模块组成。每个模块为焊接的钢梁网格结构，由中央烟道和气室分隔成两排，每排 4 个号位，各容纳 4 个发射箱。导弹采用共架发射方式，可以发射“战斧”对地攻击型巡航导弹、“阿斯洛克”反潜导弹、“标准”对空导弹等。



图 1-1 美国 MK-41 舰载垂直发射装置

这种舰载垂直发射装置也可根据军舰布置的需要安装于舷侧，图 1-2 即美国 DDG-1000 驱逐舰上布置的 MK-57 舷侧垂直发射装置，可装载美国海军现役的各种防空导

弹、“战斧”对地攻击型巡航导弹、“阿斯洛克”反潜导弹及正在研制的“标准”导弹。



图 1-2 美国 DDG-1000 驱逐舰上布置的
MK-57 舷侧垂直发射装置

图 1-3 是美国“三叉戟”潜射弹道导弹发射装置，采用水下弹射发射、导弹弹出水面后再点火的技术方案。“俄亥俄”级战略核潜艇配有 24 座用于发射“三叉戟”潜射弹道导弹的发射井。后来美军改装了几艘潜艇，将其中的 22 个发射井改装成每个发射井可装载 7 枚“战斧”对地攻击型巡航导弹。改装后，单艘“俄亥俄”级战略核潜艇可以携带 154 枚巡航导弹，其打击火力相当于一个航母作战群（所有舰艇共携带 120 ~ 180 枚对地导弹）。



图 1-3 美国“三叉戟”潜射弹道导弹发射装置

图 1-4 是俄罗斯 S-400“凯旋”远程防空导弹发射车，用于瞄准和拦截隐身飞机、短程导弹、巡航导弹等，也是采用将导弹弹射出发射筒后再点火的发射方式。

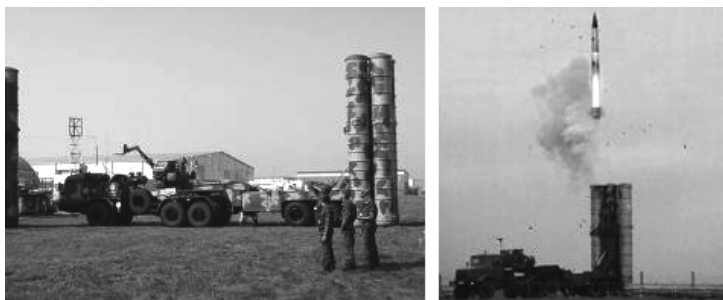


图 1-4 俄罗斯 S-400 “凯旋” 远程防空导弹发射车

图 1-5 是直升机和“守望者”无人机挂载轻型多用途导弹（Lightweight Multi-role Missile, LMM）导弹发射装置和挂架的照片。



图 1-5 直升机和“守望者”无人机挂载 LMM 导弹发射装置和挂架

LMM 是泰勒斯公司为满足英国对未来空面制导武器轻型弹药需求而研制的一种可用于陆、海、空的低成本制导武器。LMM 将装备于 AW159 Lynx 野猫（曾命名为“未来山猫”）直升机。经过优化设计的 LMM 可由无人机携带。泰勒斯公司正在尝试将 LMM 集成到奥地利希伯尔公司的 S-100 Camcopter 旋翼无人机和 BAE 系统公司的 Fury 无人机（Herti 无人机的武装版）上。在 2009 年巴黎航展上，LMM 挂载于英国“守望者”无人机参展。

图 1-6 是美国“网火”发射装置，它是一种独立于平台之外的系统。贮运与发射装置采用基本的导弹运输发射箱和垂直发射装置，具有无人值守、遥控发射的能力。垂直发射装置无需进行导弹的方位和高低瞄准，从而缩短了任务完成的总时间，增加了敌方探测导弹的难度。在建筑物密集、丛林和隐蔽阵地等区域使用时，具有明显优势。箱式发射装置以 4×4 矩阵方式装载待发弹药，内装 15 枚导弹，在第 16 个箱内装载计算机和通信系统，能够安装在高机动多用途轮式车的后部进行机动，也能够使用直升机吊运或 C-130 运输机空运。箱式发射装置安装有自动定位系统，自动定位系统能够从多种传感器接收目标信息。

箱式发射装置的主要功能是作为待发弹药的运输和发射平台。作为未来战斗系统网络的一个节点，箱式发射装置能够向未来战斗系统的网络火力提供共有目标数据图像，同时还能提供可供使用的综合弹药系统的位置和数量。“网火”系统具有内置的灵