



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

航天发射地面支持技术

SPACE LAUNCH GROUND
SUPPORT TECHNOLOGY

何家声 编著

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

内 容 简 介

《航天发射地面支持技术》主要以运载火箭和弹道导弹发射流程为主线,介绍航天发射地面支持技术及地面设备系统。

全书共分10章,第一章绪论介绍发射准备工艺流程和地面发射支持技术的特点,随后各章逐一介绍箭(弹)运输技术、转载和对接组装技术、装填技术、地面瞄准技术、地面供配电技术、常温液体推进剂贮运和加注技术、低温液体推进剂贮运和加注技术、地面供配气技术、抗核加固和防护技术。具体内容包括各项支持技术任务要求、操作方式、技术原理,以及要解决的主要技术问题和发展方向等。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

航天发射地面支持技术 / 何家声编著. —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 - 0738 - 6

I. ①航… II. ①何… III. ①航天器发射 - 地面维护 IV. ①V554

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 133398 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 / 18.75

字 数 / 362 千字

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

定 价 / 72.00 元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 封 雪

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 镇	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和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

本书是《航天发射科学与技术》系列丛书中的一个分册，是在总结、提炼已有技术成果和发射实践经验的基础上编著的。全书共10章，分别为绪论、箭（弹）运输技术、转载和对接组装技术、装填技术、地面瞄准技术、地面供配电技术、常温液体推进剂贮运和加注技术、低温液体推进剂贮运和加注技术、地面供配气技术、抗核加固和防护技术。除了“第1章 绪论”外，其余各章均以发射准备工艺流程中一个程序所采用的技术为内容，包括各程序的任务使命、操作方式、技术原理、发射对该程序的技术要求、要解决的主要技术问题和发展方向等。

以在试验场（发射场）发射所采用的技术（包括国内、国外的技术）为主，而不仅是以系统和设备设计为主要内容，这是本书内容与已有丛书内容的主要不同。而且，由于发射技术是在不断地提高和发展的，因此，许多技术内容是已有丛书很少涉及或没有涉及的。理论上讲，发射装置、测试及试验场土建设施等也属于地面发射支持技术范畴，但根据编委会的安排，这些内容划归另外的分册。

本书适合于从事发射技术研究和地面发射支持系统研究、设计、生产、试验、使用的工程技术人员和管理人员阅读与参考，也可作为高等院校相关专业的参考教材，这是本书编写的初衷和目的。

全书约36万字，插图254幅，表格38个，主要公式98条。在编写过程中，力求做到内容全面翔实、逻辑严谨、概念清楚、公式与原理正确，既反映历史沿革又突出先进技术。

本书在丛书编委会的组织和领导下，由时任北京航天发射技术研究所科技委委员的何家声研究员编著。在编著过程中，北京航天发射技术研究所的胡习明所长、牛养慈所长、王缙副所长等领导高

度重视，并给予了大力支持，包元吉、王镇、傅伟等专家对全书进行了审读，付顺昌、王紫竹、张宗相、张福全、岳尚武、丁爽、罗强等同志对部分章节进行了审校，张健、路峰等同志做了许多工作，在此对他们表示由衷的感谢！

由于掌握的信息和作者水平有限，本书内容不够全面，其他的缺点和错误也在所难免，恳请广大读者批评指正。

作 者

2015 年 3 月

目 录

CONTENTS

第1章 绪论	1
第2章 箭（弹）运输技术	4
2.1 概述	4
2.2 出厂运输	5
2.2.1 铁路运输	5
2.2.2 水路和空中运输	13
2.3 转场运输	16
2.3.1 分体运输	16
2.3.2 整体运输	24
2.4 其他场合的转运	38
2.5 机动运输	42
2.6 公路和越野车应具有的性能	45
2.6.1 通过性	45
2.6.2 制动性	50
2.6.3 平顺性和稳定性	50
2.6.4 使用寿命	53
2.6.5 逃逸速度	53
第3章 转载和对接组装技术	54
3.1 概述	54

3.2 转载方式和设备	55
3.3 对接组装	58
3.3.1 箭（弹）体的对接组装	58
3.3.2 有效载荷与箭体的对接组装	66
3.3.3 弹头与弹体的对接组装	68
第4章 装填技术	72
4.1 概述	72
4.2 装填发射筒	73
4.3 装填发射箱	81
4.4 装填无发射筒的地下井	84
第5章 地面瞄准技术	89
5.1 概述	89
5.2 瞄准原理	90
5.3 地面瞄准设备	95
5.3.1 方位瞄准设备	95
5.3.2 基准标定设备	100
5.3.3 射向变换设备	100
5.3.4 风摆跟踪装置	101
5.3.5 寻北设备	101
5.3.6 水平检查设备	103
5.3.7 检测训练设备	103
5.4 瞄准误差及环境影响检测	104
5.4.1 方位瞄准总误差检测	104
5.4.2 环境影响检测	105
5.5 各种发射方式下的地面瞄准	107
5.5.1 固定场坪发射的瞄准	107
5.5.2 地下井发射的瞄准	110
5.5.3 地面机动发射的瞄准	112
第6章 地面供配电技术	115
6.1 概述	115
6.2 用电单元和用电要求	115

6.3 供电系统组成及其特点	117
6.4 地面电源	120
6.4.1 固定式电站和移动式电站	120
6.4.2 二次电源	124
6.5 箭（弹）上电池的充放电	129
第7章 常温液体推进剂贮运和加注技术	131
7.1 概述	131
7.2 推进剂特性	132
7.2.1 常用氧化剂的种类和特性	132
7.2.2 常用燃烧剂的种类和特性	133
7.3 推进剂的运输和贮存	135
7.3.1 运输方式和运输设备	135
7.3.2 贮存方式和贮存设备	138
7.4 推进剂加注	142
7.4.1 助推器和芯级的推进剂加注	142
7.4.2 姿控贮箱的加注	159
第8章 低温液体推进剂贮运和加注技术	164
8.1 概述	164
8.2 推进剂特性	167
8.3 推进剂的运输和贮存	168
8.3.1 贮运方式和设备	168
8.3.2 贮存和加注场地	175
8.4 推进剂加注	178
8.4.1 对加注的要求	178
8.4.2 加注方式和技术原理	179
8.4.3 液氢加注流程和加注系统	184
8.4.4 液氧加注流程和加注系统	207
8.4.5 液氮加注流程和加注系统	216
8.4.6 加注程序和工序	219
第9章 地面供配气技术	225
9.1 概述	225

9.2	常用气体的特性	226
9.3	气体的制备、供应和贮运	227
9.3.1	气体的制备和供应	227
9.3.2	气体的贮运	230
9.4	供配气	234
9.4.1	对供配气的要求	234
9.4.2	供配气原理和方式	237
9.4.3	常温供配气流程和系统	242
9.4.4	低温供配气流程和系统	251
第10章 抗核加固和防护技术		260
10.1	概述	260
10.2	核爆的影响	260
10.3	抗核加固和防护措施	263
10.3.1	地下工程的抗核加固和防护	263
10.3.2	机动发射设备的抗核加固和防护	267
参考文献		268
索 引		269

第 1 章 绪 论

运载火箭和弹道导弹〔以下简称箭（弹）〕发射是一项宏大而复杂的系统工程，尤其是在试验场或发射场（以下统称为试验场）发射。在试验场发射时，从箭（弹）出厂或出库开始，需要按预先制定的发射准备工艺流程，在各阶段和各程序中采用专门的技术，才能使箭（弹）由出厂状态变为可以点火发射的状态，具备点火发射的条件。发射准备工艺流程以及流程中各阶段与各程序所采用的技术支撑和保障着箭（弹）的按时、成功发射，因而称为航天发射地面支持技术，它是发射科学与技术的重要组成部分。

海基或空基机动发射时，从箭（弹）出厂或出库开始，也要按预先制定的发射准备工艺流程，在地面上完成一系列的技术处理和准备，才能使之达到随时可以发射的状态。

发射准备工艺流程通常分为两大流程段：其中一个流程段为从箭（弹）出厂或出库开始至进入发射倒计时程序（即射前 $\times\times$ 小时程序）前，另一个流程段为射前 $\times\times$ 小时程序。对于不同的箭（弹）和发射方式可采用不同的推进剂，且在这两个流程段内的准备工作内容也各有不同。对于在试验场固定发射采用常温推进剂的箭（弹），在第一个流程段内的准备工作包括运输、转载、单元测试、供配气、姿控常温推进剂加注、对接组装、垂直度调整、发射状态下的测试与检查和模飞、助推器和芯级常温液体推进剂加注等，完成这些工作后即可进入射前 $\times\times$ 小时程序。对于在试验场固定发射且采用低温推进剂的箭（弹），射前检查、供电供气、低温推进剂加注、加注后的垂直度调整、精确瞄准等通常要在射前 $\times\times$ 小时程序中进行，直到所有地面管线与箭（弹）连接的连接装置脱落和塔架的摆杆摆开，远离火箭。机动发射采用固体推进剂的箭（弹）时，绝大部分准备工作通常都要在技术保障阵地和机动行进中完成，以尽量缩短在发射阵地上的停留时间。机动运输到发射阵地后，经起竖、射前检查后即可发射。

发射准备工艺流程方案制订原则：①保证所需的发射准备时间最短，尤其是发射密度较高时，在试验场发射工位的停留时间要尽量短。对于机动发射，在发射阵地的停留时间更要短；②能确保准备工作可靠和安全，不会损害箭（弹），不会改变箭（弹）固有的技术状态和质量状态；③能将箭（弹）要求的状态保持到点火发射；

④所需设施、设备的投入最合理，所需保障条件容易具备，发射成本低；⑤如发射时可能会遇到难以抵御的恶劣气候，则应有规避这种风险的机动灵活性。

流程中各程序所采用的技术均由专用技术和公用技术两大部分组成。专用技术包括箭（弹）运输技术、转载和对接组装技术、装填技术、地面瞄准技术、推进剂贮存和加注技术、供配气技术、供配电技术、测试与控制技术等，包括这些程序中所采用的操作方式或模式、依据的原理、为满足要求需解决的主要技术问题以及要采用的设施、系统和设备，其中的系统和设备称为地面支持系统（Ground Support Systems），有时也简称为地面设备。公用技术包括公用供电、供水与排水、通风、消防、防雷击、防静电、空调、温度控制和通信等技术。

地面发射支持系统也分为专用系统和设备与通用系统和设备两类。专用系统和设备包括专用的发射台、发射车、铁路运输设备、公路运输设备、机动运输设备、空中运输设备、水路运输设备、装填设备、转载与对接组装设备、瞄准设备、供配电系统和设备、测试-控制系统和设备、推进剂加注系统和设备、供配气系统和设备以及辅助设备等。公用系统和设备包括为保证箭（弹）与专用系统和设备经常处于发射准备状态以及为操作人员提供正常、安全的工作和生活条件的系统与设备，如供电、供水与排水、通风、消防、防雷击、防静电、空调、温度控制和通信等系统和设备。

地面发射支持技术的主要特点是：

（1）专业门类多、专业面广、构成和相互协调与衔接关系复杂、集成性高，所涉及的专业和技术有力学、流体力学、热力学、材料学、光学、电子技术、自动控制、计算机技术、真空技术、低温技术、车辆技术、伪装与防核加固技术、仪器仪表技术、人机工程学和一些边缘科学等。

（2）对于不同的发射对象、不同的发射方式，其需求的发射支持技术也不一样，且随箭（弹）的需求而更新和发展。

（3）发射支持技术直接关系到发射能力、生存能力、发射准备周期、机动性、快速反应能力、快速展开和撤收的能力等，其发展水平受箭（弹）发展的牵引，反过来又会在一定程度上制约箭（弹）的发展。

（4）对箭（弹）是否能准时成功发射及导弹的弹着点精度和飞行器的入轨精度会造成直接影响。例如，假定导弹的射程为 10 000 km，如果方位瞄准误差为 $1'$ ，则导弹的弹着点横向偏差为 1.85 km；如果加注到火箭贮箱的低温推进剂温度过高或加注量出现较大偏差，都会影响到火箭的正常飞行乃至使发射成败；如果连接器不能准时脱落，脐带不能准时与箭（弹）分离，发射就要终止，甚至导致发射失败。

（5）地面发射支持系统配套设备多，协调关系复杂，大多数要在野外和露天条件下使用，对各种恶劣气候和环境条件的适应能力强，而且大多数设备是一次建造，长期反复使用，故需具有较高的可靠性及较好的现场和即时可维修性。

地面发射支持技术是在不断探索、研究和积累发射实践经验的基础上产生、完善的,并且随着箭(弹)的发展而发展。迄今为止,箭(弹)直径已由初时的2 m左右发展到10 m以上,长度由20~30 m发展到110 m以上,起飞质量由70~80 t发展到2 900 t以上;发射对象由箭(弹)发展到航天飞机和空天飞机;发射方式由单一的固定发射发展到多种方式的机动发射,由陆地机动发射发展到海上、空中和空天机动发射;所用推进剂由液体推进剂发展到固体推进剂,由有毒、有污染的常温推进剂发展到无毒、无污染的低温推进剂;所需加注的推进剂量也由60~70 t发展到约3 000 t;等等。与此相适应,地面发射支持技术中的箭(弹)运输技术、转载技术、装填与起竖技术、瞄准技术、加注与供配气技术、测试与控制技术等均有了长足的发展,发射支持技术平台的水平与支持和保障成功发射的能力有很大提高。

综观国内外情况,运载火箭及地面设备的发展趋势主要为:①由小、中型火箭向大型火箭发展,并在多子级上使用低温推进剂,以进一步提高运载能力。为了提高试验场的使用效率,保持和控制适当的环境条件,发射方式也由固定发射方式向活动发射方式转变。为此,地面设备系统也必须发展,包括发展大型的、具有牵制释放功能的活动发射平台,垂直运输火箭的大型运输车或牵引车,能向多级贮箱并行加注、管路能与贮箱阀门快速连接和分离的低温加注系统及其测试-控制系统,能向多级火箭并行供配冷氦气而且其管路能与火箭插座快速连接和分离的供气系统等。为了确保人员的安全,做到低温推进剂开始加注后现场无人值守,发射测试与控制将由原来几百米距离的近前控制发展为3~5 km的远程控制。为此,必须提高系统和设备的可靠性,受控设备必须具有可靠接受远程控制指令、准确执行并反馈信息的功能。②发展机动发射的中、小型运载火箭,并由陆地机动发射发展为海上和空中机动发射。

导弹地面设备系统是导弹系统的重要组成部分,其发展必须与现代战争的需求相适应。现代战争具有突然性、复杂性、精确打击性和信息化等特点,现代侦察卫星轨道高、侦察范围大、发现目标快、传输信息容量大、实效性强和不受国界及地理条件限制,严重威胁着对方导弹系统的生存。因此,导弹地面设备系统要适应多种机动发射方式的需求,从整体上经济有效地解决作战能力、快速反应能力和生存能力及信息化等问题。

第2章 箭（弹）运输技术

2.1 概 述

在试验场发射箭（弹）时，箭（弹）要经历多次运输，包括从生产厂直接运往试验场的出厂运输、从生产厂到码头或机场的短距离转运、从码头或机场到试验场的转运、从试验场技术准备区某一厂房到另一厂房的转运、从试验场技术准备区到发射区发射工位的转运等。机动式发射箭（弹）时，运输包括从基地中心库到保障和测试地点的转运、从测试地点到装填地点的转运以及从发射阵地到有依托或无依托待机地点的机动运输等。从试验场技术准备区到发射区发射工位的转运通常称为转场运输。

出厂运输有陆路运输、水路运输和空运。由于生产厂离试验场一般较远，公路运输存在通过性、时间长和安全难以保证等问题，故陆路运输一般采取铁路运输。试验场内的转场运输一般为几千米路程的短途运输，道路为场内公路或专用轨道。场外转运通常为公用公路运输，机动运输则有公路运输、铁路运输、越野运输以及水路运输和空运。

试验场外运输通常采用分体水平运输方式，机动运输则采用整体水平或倾斜运输方式。对于在试验场发射的箭（弹），出厂运输一般采取分体水平运输方式。转场运输的运输方式则依箭（弹）的总装地点、总装方式（水平或垂直组装）的不同而异，目前有以下几种方式：①分体水平（有效载荷除外）运输；②整体（含有效载荷/整流罩组合体）水平运输；③整体垂直运输；④整体倾斜运输（箱式发射）。对于不同场合的运输和不同的运输方式，除了要满足通用要求外还要满足特定的要求。

运输过程会遇到各种各样的地理和气候环境，而且箭（弹）体积较大、长度较长，直径小则1 m左右，大则10 m以上；长度短则10 m以下，长则达110 m以上。因此，对于大型箭（弹）无论是铁路运输还是公路运输，都会遇到一个通过性的问题。海运和空运虽不存在通过性问题，但装卸前后需采用公路运输，也存在通过性问题。而且，海运和空运的运输工具需要有足够大的容纳空间，并需解决如何方便地装卸箭（弹）的问题。更主要的是，箭（弹）承受弯曲力矩和冲击载荷的能力一般较低，箭（弹）上的仪器设备、固体推进剂和火工品等对过载特别敏感，对环境要求严格。因此，运

输过程中必须确保箭（弹）的安全，使之保持良好的质量状态。上述各种运输都是发射准备工艺流程中的重要环节，出现问题不仅会延误发射，甚至还可能酿成大的事故。

因此，为确保安全和顺利运输，对运输工具或设备的通用要求包括以下几点：

（1）具有良好的环境适应性，能在各种恶劣环境条件下正常工作，尤其是机动运输设备，应有全天候的适应能力。

（2）在规定的运输条件（道路和环境等）下有良好的性能。除满足使用要求外，导弹运输车辆的性能指标还应符合汽车车型发展规划和军用汽车发展规划中规定的指标。

（3）有环境保护措施，运输固体燃料箭（弹）、有效载荷和精密仪器等的船舱、机舱和厢式车应有防污染以及温湿度保障措施和防噪声措施。

（4）与箭（弹）的协调性好，包括与箭（弹）外形尺寸的协调、质量参数的协调、运输所产生动载荷的协调和固定、支撑的协调等。

（5）导弹运输工具和设备，尤其是机动运输设备应有防侦察和防核加固措施。

（6）便于维护和操作人员接近箭（弹），以对箭（弹）进行固定、检查和维护。

（7）便于装卸车、转载和对接。

2.2 出厂运输

2.2.1 铁路运输

铁路运输是箭（弹）体以及有效载荷、整流罩和装配型架、仪器设备等从生产厂运到试验场的一种常用的陆路长途运输方式。与公路长途运输相比，铁路运输运输速度更快、更顺利、更安全。铁路运输通常采用公用的铁路线，只有无公用铁路线的地方才采用专用铁路线。

受路轨弯道曲率半径的限制，一般的铁路车车厢长度只有 20 m 左右，而箭（弹）的外形尺寸一般较大，故除了单级且长度较短的箭（弹）采用整体（不含有效载荷和某些仪器仪表）水平状态运输外，较大型箭（弹）通常采用分级和水平状态运输。

运输对铁路车的要求是：①能在标准轨道的铁路上通行，超限车厢应符合铁路部门的有关规定；②能与客、货车厢联挂；③箭（弹）装卸和转载方便；④能通过曲率半径为 145 m（国内）的弯道；⑤车厢内有紧固装置；⑥便于检查；⑦运输中地板的各向动载荷应限制在箭（弹）允许范围内；⑧车厢密封；⑨厢内温度不超出允许范围。

铁路车型式选择原则有以下几种：①应适应多种规格箭（弹）的外形尺寸，具有较好的通用性；②尽量采用符合铁路限界要求的独立车厢式或组合式铁路车，只有当箭（弹）的外形尺寸超过一定限度时才采用超限铁路车；③应满足伪装要求，尽量采