

# 航天发射试验工程

崔吉俊 主编



中国宇航出版社

# 航天发射试验工程

崔吉俊 主编



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

航天发射试验工程/崔吉俊主编. —北京:中国宇航出版社,2010.12

ISBN 978-7-80218-886-0

I. ①航… II. ①崔… III. ①航天器发射—发射试验 IV. ①V553.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 253165 号

责任编辑 曹晓勇 装帧设计 03 工舍 责任校对 王 妍

出版  
发行 **中国宇航出版社**

社 址 北京市阜成路 8 号 邮 编 100830  
(010)68768548

网 址 [www.caphbook.com/](http://www.caphbook.com/) [www.caphbook.com.cn](http://www.caphbook.com.cn)

经 销 新华书店

发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)  
(010)68768541 (010)68767294(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑  
(010)68371105 (010)62529336

承 印 北京国中画印刷有限公司

版 次 2010 年 12 月第 1 版  
2010 年 12 月第 1 次印刷

规 格 787×1092

开 本 1 / 16

印 张 45

字 数 1064 千字

书 号 ISBN 978-7-80218-886-0

定 价 240.00 元

本书如有印装质量问题,可与发行部联系调换

# 《航天发射试验工程》

## 编写人员名单

主    编    崔吉俊

编写人员    崔吉俊    王家伍    贾立德    唐  建  
              纪容林    何烈堂    李春锋    肖建峰  
              麻纪庵    杨红兵    赵炳昆    王  军  
              刘钦磊    庄景钊    李晓阳    樊忠泽  
              聂  冲    郑永煌    崔周顺    董学军

专业编辑    王家伍    唐  建

# 前 言

航天事业的辉煌成就,极大地促进了科学技术的发展,人类的生产和生活方式也随之发生了巨大变化。人类开展航天活动 50 多年来,在认识宇宙和地球、导航、通信、气象等领域取得了巨大成就。航天活动扩大了人类的知识宝库和物质资源,对人类的生产和生活产生了重大的影响,并带来巨大的社会、经济、技术和军事效益,大大推进了现代科学技术进步和社会发展。航天事业在许多国家已成为国民经济和军事部门的重要组成部分。

航天发射试验工程作为航天工程的重要组成部分,是一项研究航天发射各相关系统的组织管理、工程技术、发射场建设和使用的系统工程,它与运载火箭、航天器技术有着密切的联系,也随着运载火箭、航天器技术的发展而发展。其主要内容涉及发射场建设、运载火箭和航天器的测试与发射、飞行测量控制与数据处理、发射试验组织指挥与管理以及技术勤务保障等。航天发射试验工程的主要任务是在航天发射系统的组织管理下,统一协调航天工程各系统在发射场的各项工作,高标准、高质量、高效益地完成航天发射任务,将航天器(或航天员)送入预定轨道。

中国酒泉卫星发射中心组建于 1958 年,见证了中国航天事业的发展历程,也为中国航天事业的发展作出了巨大贡献。1970 年 4 月 24 日,从这里发射了我国第一颗人造地球卫星东方红 1 号,使中国成为世界上第五个独立发射航天器的国家;2003 年 10 月 15 日发射的神舟 5 号载人飞船将杨利伟送入太空,实现了中华民族的千年飞天梦想。50 余年来,中心共完成了 7 次飞船发射和 40 多次卫星发射任务,将 6 名航天员送入太空。特别是自 1980 年以来,取得了航天发射 100% 的成功率,多次在中国航天发射的危难时刻,实现了“龙抬头”,取得了举世瞩目的成就,极大地鼓舞了国人的意志,为中华民族的伟大复兴注入了强劲的动力。

本书作者多年从事航天测试与发射工作,有着丰富的工程实践与理论基础。经过几年的思考和酝酿,作者系统总结了我国航天发射试验工程多年来的实践经验,特别是近几年开展的发射仿真训练、质量管理、项目管理、可靠性与安全性管理、装备管理与延寿及发射场信息化建设等研究成果,使传统的航天发射理论得到新的拓展与延伸。本书力求从系统工程高度,将试验理论与工程实践相结合,阐述航天发射试验工作的全过程,内容全面,工程实用性强,对于从事航天发射试验的技术人员和指挥人员,具有较强的指导作用。

本书是中国酒泉卫星发射中心集体智慧的结晶。参加编写的人员均直接从事航天发射试验工程的一线工作,有航天工程发射场系统总指挥和总设计师,有研究员和高级工程师,有西安交通大学和国防科技大学毕业的博士,也有岗位操作人员。他们既有多年从事航天发射试验的工程实践经验,也具有较深厚的基础理论知识,使本书具有较强的理论指导性和工程实用性。

本书共分 14 章,100 余万字。全书内容包括引论、航天发射场、运载火箭与航天器、测试与发控、测量与控制、数据处理与试验分析、试验故障诊断技术、发射场信息化建设、发射指挥

技术、仿真训练技术、发射试验质量管理、发射试验可靠性与安全性、发射试验装备管理与延寿,以及发射试验项目管理等。其中,第1章由崔吉俊、王家伍编写,第2章由崔吉俊、王家伍、唐建编写,第3章由王家伍、贾立德、唐建编写,第4章由纪容林、何烈堂、王家伍编写,第5章由李春锋、肖建峰、麻纪庵编写,第6章由杨红兵、赵炳昆编写,第7章由王军编写,第8章由刘钦磊、庄景钊编写,第9章由崔吉俊、李晓阳编写,第10章由樊忠泽、聂冲编写,第11章由唐建、崔吉俊编写,第12章由郑永煌编写,第13章由崔周顺、崔吉俊编写,第14章由董学军编写。全书由崔吉俊、王家伍、唐建进行统稿。

本书的编写和出版得到中国航天科技集团公司,中国酒泉卫星发射中心试验技术部、发射测试站和中国宇航出版社的大力支持与帮助,在此表示衷心的感谢。

由于本书规模较大,时间较紧,书中难免存在差错,敬请专家和读者批评指正。

编 者

2010年11月28日

# 目 录

第1章 引论	1
1.1 概述	1
1.1.1 航天工程	1
1.1.2 航天工程系统	2
1.1.3 航天发射试验工程	15
1.1.4 航天发射试验工程系统	16
1.2 航天发射试验工程总体要求	17
1.2.1 发射能力	17
1.2.2 年发射次数	18
1.2.3 发射周期	18
1.2.4 恢复发射周期	18
1.2.5 连续两次发射的时间间隔	18
1.2.6 发射可靠性与安全性	18
1.2.7 发射成本	19
1.2.8 环境保护	19
1.2.9 气象保障	19
1.3 发射试验要素	20
1.3.1 发射窗口	20
1.3.2 发射方位角	27
1.3.3 发射场位置	28
1.4 发射方式和形式	29
1.4.1 航天发射方式	29
1.4.2 航天发射形式	30
1.5 测试发射工艺流程	32
1.5.1 水平分段组装测试模式	32
1.5.2 水平整体组装测试模式	32
1.5.3 直接在发射台上垂直组装测试模式	33
1.5.4 垂直整体组装测试模式	34
1.6 发射诸元	36
1.6.1 发射诸元准备	38
1.6.2 发射诸元计算	38

1.7	发射预案和应急处置预案	45
1.7.1	发射预案	45
1.7.2	应急处置预案	46
<b>第2章</b>	<b>航天发射场</b>	<b>48</b>
2.1	航天发射场建设要求	48
2.1.1	任务需求	48
2.1.2	安全性要求	48
2.1.3	自然环境要求	49
2.1.4	交通条件要求	49
2.1.5	地面测控设备布站要求	49
2.1.6	地理位置因素的影响	49
2.1.7	返回着陆场选择	50
2.2	航天发射场功能与组成	50
2.2.1	功能与布局	50
2.2.2	主要试验场所	51
2.2.3	测试发射控制中心	56
2.2.4	技术勤务系统	57
2.3	主要发射设施	61
2.3.1	航天发射设施的特点	61
2.3.2	发射台	61
2.3.3	导流槽	69
2.3.4	脐带勤务塔	71
2.3.5	发射前地面瞄准系统	72
2.4	液体推进剂加注	76
2.4.1	常用液体推进剂种类及性能	76
2.4.2	液体推进剂加注技术	76
2.4.3	常规液体推进剂加注	80
2.4.4	低温液体推进剂加注	83
2.5	发射场安全性	88
2.5.1	一般要求	88
2.5.2	安全区域划分	88
2.5.3	航天发射主要安全性措施	89
2.5.4	爆炸安全距离	90
2.5.5	噪声安全距离	92
2.5.6	有毒推进剂安全距离	92
<b>第3章</b>	<b>运载火箭与航天器</b>	<b>93</b>
3.1	运载火箭飞行基础	93



3.1.1	运载火箭的速度与级数	93
3.1.2	运载火箭的运动方程	96
3.2	运载火箭组成系统	98
3.2.1	结构组成	99
3.2.2	动力推进分系统	104
3.2.3	控制分系统	108
3.2.4	遥测分系统	111
3.2.5	外测安全分系统	112
3.2.6	故障检测与逃逸救生分系统	113
3.3	运载火箭发射轨道	116
3.3.1	发射轨道的基本形式	116
3.3.2	发射轨道的基本过程	117
3.4	航天器轨道描述	118
3.4.1	轨道半长轴 $a$	119
3.4.2	轨道偏心率 $e$	119
3.4.3	轨道倾角 $i$	120
3.4.4	升交点赤经 $\Omega$	121
3.4.5	近地点幅角 $\omega$	121
3.4.6	过近地点时刻 $\tau$	122
3.5	航天器结构组成	122
3.5.1	航天器平台系统	123
3.5.2	航天器应用系统	128
3.6	航天器轨道运动	132
3.6.1	轨道运动基本方程	132
3.6.2	轨道运动守恒定律	133
3.6.3	航天器轨道摄动	135
3.6.4	航天器轨道预测	138
3.6.5	航天器轨道机动	139
3.7	航天器交会与对接	141
3.7.1	基本概念	141
3.7.2	交会对接任务阶段划分	143
3.7.3	影响交会对接的外部因素	146
<b>第4章</b>	<b>测试与发控</b>	<b>148</b>
4.1	概述	148
4.2	测试与发控系统构成	151
4.2.1	系统组成	151
4.2.2	发控系统	154
4.2.3	测试系统	156

4.2.4	测控软件	159
4.3	运载火箭测试方法	161
4.3.1	单元测试	161
4.3.2	分系统测试	161
4.3.3	匹配测试	167
4.3.4	总检查测试	170
4.4	测试与发控基本技术	172
4.4.1	可编程逻辑控制器技术	172
4.4.2	VXI总线技术	178
4.4.3	其他总线技术	184
4.4.4	虚拟仪器技术	189
4.5	一体化测试与发控	194
4.5.1	一体化设计内涵	194
4.5.2	一体化测试发控系统构成	197
4.5.3	一体化测试发控系统发展	204
<b>第5章</b>	<b>测量与控制</b>	<b>212</b>
5.1	测量控制总体技术	212
5.1.1	测控系统任务与组成	212
5.1.2	测控频段与体制	214
5.1.3	测控设备选址原则	217
5.1.4	箭(器)载测控设备	219
5.1.5	信息传输体制	220
5.1.6	测控系统常用坐标系及关系角	222
5.1.7	时间统一系统	224
5.2	光学跟踪测量	227
5.2.1	分类与组成	227
5.2.2	工作原理与主要技术指标	229
5.2.3	新技术在光测设备中的应用	234
5.3	雷达跟踪测量	236
5.3.1	系统组成及基本工作过程	237
5.3.2	角度跟踪与测量	238
5.3.3	速度测量	240
5.3.4	距离跟踪与测量	241
5.3.5	相控阵雷达测量	243
5.3.6	目标特性测量	245
5.4	遥测跟踪测量	246
5.4.1	系统组成和工作原理	246
5.4.2	遥测信号调制	248

5.4.3	遥测系统分类 .....	249
5.4.4	常用遥测传输系统 .....	249
5.4.5	遥测系统发展 .....	251
5.5	微波统一系统测量与控制 .....	252
5.5.1	系统组成与信息流程 .....	252
5.5.2	主要分系统工作原理 .....	253
5.5.3	系统工作方式及功能 .....	256
5.5.4	微波统一系统技术特点 .....	257
5.5.5	微波统一系统发展 .....	258
5.6	地面逃逸与安全控制 .....	260
5.6.1	地面逃逸系统 .....	260
5.6.2	地面逃逸模式与实施工作程序 .....	263
5.6.3	地面安全控制系统 .....	264
5.6.4	地面安控工作实施程序 .....	266
5.7	指挥控制中心 .....	268
5.7.1	任务及功能 .....	268
5.7.2	中心计算机系统 .....	270
5.7.3	指挥显示系统 .....	271
5.7.4	测控应用软件 .....	273
<b>第6章</b>	<b>数据处理与试验分析</b> .....	<b>278</b>
6.1	数据处理任务与数据特性 .....	278
6.1.1	数据处理任务 .....	278
6.1.2	数据类型 .....	278
6.1.3	数据误差 .....	279
6.2	外测数据处理 .....	282
6.2.1	光学数据预处理方法 .....	282
6.2.2	脉冲雷达数据处理方法 .....	283
6.2.3	连续波雷达数据处理方法 .....	285
6.2.4	GPS测量数据预处理 .....	287
6.2.5	解析弹道参数解算 .....	289
6.2.6	外弹道融合数据处理方法 .....	297
6.2.7	误差修正 .....	298
6.3	遥测数据处理 .....	303
6.3.1	遥测参数基本特点 .....	303
6.3.2	遥测数据处理基本要求 .....	304
6.3.3	遥测数据处理方法 .....	305
6.4	试验结果分析 .....	312
6.4.1	试验结果分析要求 .....	312

6.4.2	试验结果分析程序 .....	313
6.4.3	总体性能分析 .....	313
6.4.4	火箭控制系统结果分析 .....	315
6.4.5	火箭动力系统结果分析 .....	320
6.4.6	火箭外安系统结果分析 .....	329
6.4.7	火箭遥测系统结果分析 .....	331
6.4.8	推进剂利用系统结果分析 .....	331
<b>第7章</b>	<b>试验故障诊断技术</b> .....	<b>334</b>
7.1	故障诊断特点和要求 .....	334
7.1.1	故障诊断特点 .....	334
7.1.2	故障诊断要求 .....	335
7.2	故障诊断基础 .....	335
7.2.1	基本原理 .....	335
7.2.2	基本方法 .....	336
7.3	故障诊断常用方法 .....	338
7.3.1	跟踪寻迹法 .....	338
7.3.2	隔离检查法 .....	340
7.3.3	换元检查法 .....	343
7.3.4	状态检查法 .....	346
7.3.5	物理检查法 .....	348
7.3.6	环境试验法 .....	351
7.3.7	对比法 .....	353
7.3.8	故障模拟检查法 .....	358
7.3.9	综合诊断法 .....	361
7.3.10	综合治理法 .....	363
7.4	故障树诊断技术 .....	366
7.4.1	基本原理 .....	366
7.4.2	诊断步骤和分析方法 .....	366
7.4.3	诊断案例 .....	368
7.5	故障字典诊断技术 .....	370
7.5.1	故障字典构建方法 .....	370
7.5.2	基于故障字典的诊断方法 .....	371
7.5.3	诊断案例 .....	373
7.6	软件故障诊断技术 .....	374
7.6.1	软件失效机理和故障模式 .....	375
7.6.2	软件故障诊断的一般程序 .....	376
7.6.3	诊断案例 .....	379

第8章 发射场信息化建设	381
8.1 概述	381
8.1.1 信息化建设相关概念	381
8.1.2 发射场信息化作用与意义	383
8.1.3 发射场信息化建设基本内容	384
8.2 信息化基本技术	385
8.2.1 信息采集技术	385
8.2.2 信息传输技术	387
8.2.3 信息处理技术	389
8.2.4 信息安全技术	391
8.3 发射场信息化体系结构	393
8.3.1 总体框架	393
8.3.2 技术体系结构	394
8.3.3 系统体系结构	395
8.3.4 综合业务承载网	395
8.3.5 信息化业务集成	396
8.3.6 业务运行管理	397
8.4 一体化指挥控制系统	398
8.4.1 基本概念	398
8.4.2 系统组成和信息流程	399
8.4.3 一体化实现方式	401
8.4.4 系统关键技术	403
8.5 网络化测量控制系统	405
8.5.1 基本概念	405
8.5.2 系统功能与结构	405
8.5.3 智能测控设备	406
8.5.4 网络传输系统	407
8.5.5 信息处理系统	408
8.5.6 应用管理系统	409
8.6 自动化测试发射系统	410
8.6.1 基本概念	410
8.6.2 自动化发射场设施设备	411
8.7 数字化试验保障系统	414
8.7.1 基本概念	414
8.7.2 信息化计量系统	414
8.7.3 信息化气象系统	416
8.7.4 技术装备信息管理系统	417
8.7.5 数字化信息服务系统	418
8.8 发射场测试发射指挥监控系统	420

8.8.1	主要任务和发展历程 .....	420
8.8.2	系统结构 .....	421
8.8.3	服务器分系统 .....	424
8.8.4	指挥显示分系统 .....	425
8.8.5	对外接口分系统 .....	426
8.8.6	应用软件分系统 .....	428
8.8.7	指挥监控系统关键技术 .....	430
<b>第9章</b>	<b>发射指挥技术</b> .....	<b>433</b>
9.1	指挥在测试发射中的地位和作用 .....	433
9.1.1	发射指挥的概念 .....	433
9.1.2	发射指挥的特点 .....	433
9.1.3	发射指挥的地位和作用 .....	434
9.2	发射指挥原则 .....	434
9.3	发射指挥机构 .....	436
9.3.1	发射指挥机构的特点和分类 .....	436
9.3.2	发射指挥机构组成及职能 .....	438
9.3.3	指挥人员 .....	442
9.4	发射指挥程序 .....	443
9.4.1	发射任务组织指挥程序 .....	443
9.4.2	指挥程序的控制与优化 .....	445
9.4.3	总检查协同指挥程序 .....	448
9.4.4	发射协同指挥程序 .....	451
9.5	决策技术 .....	453
9.5.1	发射决策特点 .....	453
9.5.2	决策阶段 .....	454
9.5.3	决策信息来源 .....	455
9.5.4	辅助决策 .....	456
9.5.5	专家系统 .....	458
9.6	并行试验管理 .....	460
9.6.1	并行试验的特点 .....	460
9.6.2	并行试验制约因素 .....	460
9.6.3	并行试验管理的主要内容 .....	463
<b>第10章</b>	<b>仿真训练技术</b> .....	<b>465</b>
10.1	仿真训练系统的任务及主要功能 .....	465
10.1.1	仿真训练系统的任务 .....	465
10.1.2	仿真训练系统的主要功能 .....	466
10.2	复杂大系统仿真基本技术 .....	467

10.2.1	复杂大系统仿真	467
10.2.2	基于高层体系结构 HLA/RTI 的分布仿真	468
10.2.3	基于 Multigen Vega Prime 的视景仿真	470
10.2.4	基于运动获取与控制的虚拟人	474
10.2.5	基于 CORBA 的分布式并行计算	477
10.2.6	基于 LabVIEW 的虚拟仪器	479
10.2.7	基于跨协议互连的实时无缝连接	481
10.3	虚拟吊装与装配	484
10.3.1	虚拟吊装训练技术	484
10.3.2	虚拟装配训练技术	484
10.4	火箭测试发射仿真	485
10.4.1	系统组成	485
10.4.2	LabVIEW 仿真框架	485
10.4.3	仿真成员设计	488
10.4.4	故障推演训练技术	493
10.5	火箭飞行仿真	494
10.5.1	系统组成和功能	494
10.5.2	六自由度弹道仿真	495
10.5.3	遥测数据仿真	503
10.6	测控半实物仿真	505
10.6.1	测控半实物仿真原理	505
10.6.2	光学设备模拟器	507
10.6.3	雷达设备模拟器	508
10.6.4	遥测设备模拟器	508
10.7	地勤支持仿真	509
10.8	仿真训练系统的集成	510
10.8.1	应用体系结构	511
10.8.2	系统体系结构	511
10.8.3	技术体系结构	513
<b>第 11 章</b>	<b>发射试验质量管理</b>	<b>516</b>
11.1	相关名词术语	516
11.1.1	质量	516
11.1.2	质量管理	516
11.1.3	航天发射试验工程质量管理	517
11.2	试验质量管理任务与目标	518
11.2.1	试验质量管理指导思想、原则与质量方针	518
11.2.2	试验质量管理目标	520
11.3	试验质量管理体系	521

11.3.1	质量管理体系	521
11.3.2	试验质量管理体系模式	522
11.3.3	试验质量管理体系组织机构及职责	524
11.3.4	试验质量管理体系文件	526
11.4	试验质量管理	527
11.4.1	试验任务质量策划	527
11.4.2	试验任务质量控制	529
11.4.3	试验任务质量保证	541
11.4.4	试验任务质量改进	542
11.4.5	试验任务质量管理制度与方法	543
11.4.6	试验任务质量管理常用工具与技术	547
11.5	航天质量文化	550
11.5.1	质量文化	550
11.5.2	航天质量文化	551
11.5.3	航天质量文化建设	553
<b>第12章</b>	<b>发射试验可靠性与安全性</b>	<b>555</b>
12.1	概述	555
12.1.1	试验可靠性基本概念	555
12.1.2	试验安全性基本概念	555
12.1.3	试验可靠性与安全性关系	555
12.2	试验可靠性评估基本方法	556
12.2.1	单元可靠性分析评估方法	556
12.2.2	典型系统可靠性评估方法	559
12.3	试验安全性分析基本方法	567
12.3.1	安全性分析方法种类	567
12.3.2	故障模式、影响及危害性分析方法	568
12.3.3	故障树分析方法	572
12.3.4	危险分析方法	579
12.3.5	潜在电路分析方法	582
12.3.6	软件安全性分析方法	588
12.4	航天发射场可靠性定量评估方法	590
12.4.1	航天发射场可靠性基本概念	590
12.4.2	航天发射场可靠性数据分布与选取方法	590
12.4.3	航天发射场可靠性评估思路	592
12.4.4	应用实例	593
12.5	航天发射场安全性分析方法	594
12.5.1	安全性分析目的与要求	594
12.5.2	安全性分析内容	594



12.5.3	风险评估方法	594
12.5.4	应用实例	596
<b>第13章</b>	<b>发射试验装备管理与延寿</b>	<b>597</b>
13.1	发射试验装备分类与管理	597
13.1.1	发射试验装备分类	597
13.1.2	装备管理的基本内容	604
13.2	发射试验装备检修检测与评估	606
13.2.1	状态维修技术	606
13.2.2	发射场典型设施设备的状态检测与评估方法	611
13.3	试验装备延寿	627
13.3.1	装备延寿的概念与要求	627
13.3.2	产品寿命与可靠性、失效率的关系	628
13.3.3	常用寿命分布	630
13.3.4	寿命评估的一般步骤	633
13.3.5	系统或设备可靠寿命预测评估方法	636
13.3.6	试验装备延寿技术	645
<b>第14章</b>	<b>发射试验项目管理</b>	<b>652</b>
14.1	概述	652
14.1.1	项目与项目管理基本概念	652
14.1.2	航天发射项目	654
14.1.3	航天发射项目管理	656
14.1.4	航天发射项目管理的发展	657
14.2	航天发射项目组织管理	658
14.2.1	航天发射项目组织原则	658
14.2.2	航天发射项目组织结构设计	659
14.2.3	航天发射项目组织实施流程	661
14.3	航天发射项目范围管理	663
14.3.1	航天发射项目范围界定	663
14.3.2	航天发射项目范围计划编制	666
14.3.3	航天发射项目范围核实	667
14.3.4	航天发射项目范围变更	669
14.4	航天发射项目资源管理	670
14.4.1	人力资源管理	670
14.4.2	基础设施管理	670
14.4.3	信息资源管理	671
14.5	航天发射项目进度管理	671
14.5.1	航天发射项目进度计划编制	671