



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

# 发射控制技术

LAUNCH CONTROL TECHNOLOGY

王生捷 李建冬 李梅 编著

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



国家出版基金项目



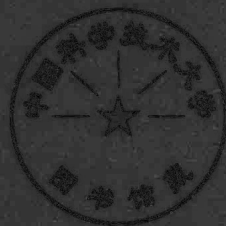
工业和信息化部“十二五”规划专著

航天发射科学与技术

# 发射控制技术

LAUNCH CONTROL TECHNOLOGY

王生捷 李建冬 李梅 编著



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

## 内 容 简 介

本书以火箭导弹武器系统为研究对象,从理论上阐述了与火箭导弹发射过程密切相关的发射装置控制技术和导弹发射过程控制技术的一般性原理和设计思想,并结合工程研究实际,介绍了发射控制系统的设计方法和试验方法。主要内容包括发射控制技术概论、发射装置控制技术、导弹发射过程控制技术和系统试验。

本书可作为火箭导弹发射设备教学,以及从事火箭导弹发射控制系统研究、设计、试验和使用等人员的参考资料。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

发射控制技术 / 王生捷, 李建冬, 李梅编著. —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 - 0740 - 9

I. ①发… II. ①王…②李…③李… III. ①航天器发射 - 发射控制系统  
IV. ①V553. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 133407 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 / 31

字 数 / 597 千字

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

定 价 / 118.00 元

责任编辑 / 张慧峰

文案编辑 / 张慧峰

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 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

《发射控制技术》是航天发射科学与技术丛书关于火箭导弹发射控制系统的基础理论和工程研究成果的专著。本书从工程技术角度出发论述火箭导弹发射控制系统的原理、特点、设计、应用等知识。本书力图根据多年来的研究、开发和实践经验，以对完成火箭导弹发射具有重要意义的发射装置控制技术和导弹发射过程控制技术为主，阐明火箭导弹发射控制技术的理论基础和工程实践。

发射装置控制技术与发射装置或设备相关的控制系统和控制技术，它依据发射方式的不同，主要完成发射装置或设备的展开、初始射向控制等射前一系列准备动作。发射装置伺服系统是发射装置的重要组成部分，它在控制信号的作用下，驱动发射装置运动，在防空导弹武器系统中一般复现雷达的运动轨迹，在地地导弹武器系统中使导弹初始射向对准目标方向。

导弹发射过程控制技术与实施导弹发射直接相关的发射控制系统和控制技术，它依据导弹类型，主要完成导弹射前检测、导弹作战参数装订、发射程序控制和点火发射等功能。

本书的编写主要依托已取得的工作成果和工程经验，同时结合导弹武器系统的研制现状和发展趋势，对经过实践验证的发射控制技术有关内容和方法加以归纳、综合、提炼，并努力在理论方面有所提升，较为全面、系统、深入地论述相关控制技术的工作原理、系统组成、设计和分析方法及其在武器系统中的应用。

本书是北京机械设备研究所众多专家和技术人员多年来从事火箭导弹发射控制系统研制和工程实践经验的总结，是理论和工程实践相结合的产物，力求达到理论论证严谨，概念叙述清楚，引用数据准确无误。本书第一篇和第四篇由王生捷编写。第二篇由李建冬、葛永强编写。第三篇由张浩坤、李梅编写。全书由王生捷策划、统



稿和审定。汤元平在本书编排方面做了大量工作。北京理工大学的姜毅教授对全书进行了认真审阅，提出了许多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

本书编写过程中得到了汤元平、刘浩、丁旭昶、陈亚军、欧有斌、张文波、李毅拓等大力支持，在此深表谢意。

本书内容丰富，实用性和实践意义很强，适合从事火箭导弹发射控制技术研究、设计、实验和应用的工程技术人员阅读，也可作为高等院校相关专业的本科生、硕士生及博士生的学习参考书。

作者在编写过程中虽然花费了很大精力，但限于作者的水平及时间仓促，本书难免存在错误与不足之处，殷切希望专家和读者批评指正。

作者

# 目录

## CONTENTS

### 第一篇 发射控制技术概论

第1章 概述 .....	3
1.1 发射控制系统 .....	3
1.2 发射方式及其分类 .....	3
1.3 发射控制系统的功能及组成 .....	4
1.3.1 发射控制系统的功能 .....	4
1.3.2 发射控制系统的组成 .....	4
1.4 发射控制系统设计的基本要求 .....	4
1.4.1 发射方式及装载平台对发射控制系统设计的影响 .....	4
1.4.2 发射装置控制系统的主要技术指标 .....	5
1.4.3 倾斜发射装置控制系统主要技术指标 .....	6
1.4.4 垂直发射装置控制系统主要技术指标 .....	7
1.4.5 发射装置控制系统设计影响因素 .....	7
1.4.6 导弹发射控制系统及设备 .....	7
1.5 发展趋势 .....	10
1.5.1 测试发控一体化系统 .....	10
1.5.2 通用化发控系统 .....	10

### 第二篇 发射装置控制技术

第2章 概述 .....	15
2.1 发射装置伺服系统简介 .....	15

2.2 发射装置伺服系统工作原理和组成 .....	15
2.2.1 发射装置的运动分析 .....	15
2.2.2 发射装置伺服系统的组成 .....	16
2.2.3 发射装置伺服系统主要部件 .....	17
2.3 发射装置伺服系统误差分析 .....	21
2.3.1 静态误差 .....	21
2.3.2 动态误差 .....	21
2.4 影响系统性能的扰动因素 .....	21
2.4.1 系统外部扰动 .....	22
2.4.2 系统内部扰动 .....	23
2.5 发射装置控制方式 .....	24
2.5.1 发射装置控制方式的分类 .....	24
2.5.2 发射装置控制系统技术要求 .....	24
<b>第3章 发射装置直流伺服系统 .....</b>	<b>25</b>
3.1 概述 .....	25
3.1.1 直流伺服系统简介 .....	25
3.1.2 直流伺服系统分类及发展历史 .....	26
3.2 直流伺服电动机及其控制原理 .....	27
3.2.1 直流伺服电动机的结构 .....	28
3.2.2 直流伺服电动机的基本工作原理 .....	28
3.2.3 旋转变流机组直流伺服电动机控制系统原理 .....	30
3.2.4 晶闸管-直流电动机控制系统原理 .....	36
3.2.5 直流伺服电动机的 PWM 控制原理 .....	38
3.3 直流伺服电动机的控制特性 .....	40
3.3.1 直流伺服电动机的启动 .....	40
3.3.2 直流伺服电动机的运行 .....	40
3.3.3 直流伺服电动机的制动 .....	42
3.4 直流伺服电动机的驱动方式 .....	43
3.4.1 单极性可逆 PWM 驱动系统 .....	43
3.4.2 双极性可逆 PWM 驱动系统 .....	44
3.4.3 单、双极性可逆 PWM 驱动系统的比较 .....	45
3.5 直流伺服系统三闭环控制设计 .....	45
3.5.1 调速系统双闭环设计 .....	46

3.5.2 伺服系统位置闭环设计 .....	62
<b>第4章 发射装置交流伺服系统 .....</b>	<b>65</b>
4.1 无刷直流伺服电动机及其工作原理 .....	65
4.1.1 无刷直流伺服电动机的发展现状 .....	65
4.1.2 无刷直流伺服电动机的基本原理 .....	67
4.1.3 无刷直流伺服电动机的数学模型 .....	72
4.2 无刷直流伺服电动机控制策略 .....	74
4.2.1 无刷直流电动机的调速方法 .....	74
4.2.2 无刷直流电动机双闭环系统 .....	75
4.3 永磁同步电动机及其工作原理 .....	78
4.3.1 永磁同步电动机系统发展现状 .....	78
4.3.2 永磁同步电动机的组成及工作原理 .....	82
4.3.3 永磁同步电动机的数学模型 .....	86
4.3.4 空间矢量脉宽调制技术 .....	88
4.4 永磁同步电动机矢量控制系统 .....	92
4.4.1 永磁同步电动机矢量控制基本原理 .....	92
4.4.2 基于 $i_d = 0$ 的永磁同步电动机矢量控制系统 .....	94
4.4.3 基于最大转矩电流比的永磁同步电动机矢量控制系统 .....	96
4.5 永磁同步电动机直接转矩控制系统 .....	97
4.5.1 永磁同步电动机直接转矩控制基本原理 .....	98
4.5.2 永磁同步电动机直接转矩控制系统框图 .....	99
4.6 永磁同步电动机新型控制策略 .....	102
4.6.1 永磁同步电动机自抗扰控制策略 .....	102
4.6.2 永磁同步电动机卡尔曼滤波器控制策略 .....	107
4.6.3 永磁同步电动机无位置传感器控制策略 .....	113
<b>第5章 发射装置全数字化伺服控制器设计 .....</b>	<b>118</b>
5.1 伺服系统数字控制器设计基础 .....	121
5.1.1 数字信号处理器 TMS320F2812 .....	121
5.1.2 M/T 测速方法 .....	132
5.1.3 常用位置和速度传感器 .....	135
5.1.4 功率开关器件 .....	148
5.1.5 正弦波发生技术 .....	151

5.1.6	信号采集和保持 .....	155
5.1.7	数字滤波器 .....	160
5.2	数字PID控制器设计 .....	173
5.2.1	PID控制原理与程序流程 .....	173
5.2.2	标准PID算法的改进 .....	176
5.2.3	数字PID参数的选择 .....	179
5.3	全数字化直流电动机伺服控制器设计 .....	180
5.3.1	控制器的硬件设计 .....	180
5.3.2	控制器的软件设计 .....	187
5.4	全数字化无刷直流电动机伺服控制器设计 .....	192
5.4.1	无刷直流电动机伺服系统的硬件设计 .....	192
5.4.2	无刷直流电动机伺服系统的软件设计 .....	199
5.5	全数字化交流电动机伺服控制器设计 .....	203
5.5.1	数字控制器的硬件设计 .....	203
5.5.2	数字控制器的软件设计 .....	221
<b>第6章</b>	<b>发射装置液压伺服系统 .....</b>	<b>231</b>
6.1	概述 .....	231
6.1.1	液压伺服控制系统的组成 .....	231
6.1.2	液压伺服控制系统的分类 .....	232
6.1.3	液压伺服控制的优缺点 .....	232
6.2	液压放大元件 .....	233
6.3	液压动力元件 .....	233
6.3.1	阀控液压缸 .....	234
6.3.2	阀控液压马达 .....	235
6.3.3	泵控液压马达 .....	238
6.3.4	泵控液压缸 .....	239
6.4	动力元件与负载匹配 .....	240
6.4.1	负载特性 .....	240
6.4.2	液压动力元件的输出特性 .....	240
6.4.3	负载匹配 .....	240
6.5	电液伺服阀 .....	240
6.5.1	电液伺服阀的组成、分类及工作原理 .....	241
6.5.2	电液伺服阀的特性 .....	244

6.5.3	电液伺服阀的选择	248
6.6	电液伺服系统	249
6.7	液压伺服系统设计	250
6.7.1	液压伺服系统研制流程	250
6.7.2	液压伺服系统的设计要求	251
6.7.3	拟定控制方案、绘制系统原理图	251
6.7.4	液压动力元件参数选择	251
6.7.5	反馈元件的选择	252
6.7.6	确定系统方框图	252
6.7.7	绘制系统开环波德图并确定开环增益	252
6.7.8	系统静、动态品质分析	252
6.8	某发射架伺服系统设计实例	252
6.8.1	某发射架伺服系统功能要求	252
6.8.2	某发射架伺服系统组成	252
6.8.3	某发射架伺服系统技术指标	253
6.8.4	系统负载	253
6.8.5	电液伺服系统工作原理	253
6.8.6	液压系统主要参数计算	257
6.8.7	精度核算与仿真	260
6.8.8	系统仿真	261
6.9	液压伺服系统设计注意事项	266
<b>第7章</b>	<b>发射装置伺服系统综合设计</b>	<b>267</b>
7.1	发射装置伺服系统技术要求	267
7.2	发射装置伺服系统设计	268
7.2.1	伺服系统设计流程	268
7.2.2	控制方式选择	269
7.2.3	功能和组成	274
7.2.4	工作原理	276
7.2.5	技术性能分析	280
7.2.6	精度分析	289
7.2.7	原理仿真设计	293
7.2.8	主要组成部分的设计	305
7.2.9	能量泄放装置设计	321

7.2.10 伺服系统控制软件设计 .....	324
7.3 发射装置伺服系统设计实例 .....	325
7.3.1 伺服系统的性能指标 .....	326
7.3.2 伺服系统方案的选择 .....	326
7.3.3 伺服电动机容量选择 .....	327
7.3.4 位置信号检测装置选择 .....	329
7.3.5 伺服系统控制算法设计 .....	330
7.3.6 伺服系统软件中软件处理问题 .....	331

### 第三篇 导弹发射过程控制技术

第8章 概论 .....	337
8.1 导弹发射控制系统的地位和作用 .....	337
8.2 导弹发射控制系统的功能和组成 .....	337
8.3 导弹发射控制系统的影响因素 .....	338
8.4 导弹发射控制系统的发展演变 .....	339
8.5 导弹发射控制系统的发展展望 .....	340
第9章 导弹发射控制系统设计 .....	342
9.1 武器系统对发射控制系统的要求 .....	342
9.2 确定发射控制系统方案 .....	342
9.3 导弹射前检查 .....	344
9.4 导弹加电准备 .....	344
9.5 导弹发射控制 .....	346
9.5.1 导弹发射条件 .....	346
9.5.2 导弹发射过程与时序 .....	347
9.6 典型系统设计实例 .....	349
9.6.1 功能分析 .....	349
9.6.2 基本原理 .....	349
9.6.3 发射控制顺序 .....	351
9.7 发射控制软件设计 .....	351
9.8 导弹模拟器 .....	352
9.9 导弹发射控制系统的远程控制 .....	353
9.9.1 远程发射控制技术 .....	353
9.9.2 远程控制的信息加密技术 .....	353

第 10 章 导弹发射控制系统的通用化 .....	357
10.1 MK41 垂直发射系统 .....	357
10.1.1 发射控制系统 .....	358
10.1.2 发射程序器 .....	360
10.1.3 供电电源 .....	361
10.1.4 状态监控箱 .....	361
10.1.5 MK41 的系统工作过程 .....	362
10.2 CCL 同心筒垂直发射系统 .....	364
10.2.1 发射控制系统 .....	364
10.2.2 技术特点 .....	365
10.3 MK57 垂直发射系统 .....	365
10.4 通用导弹发射控制系统 .....	366
10.4.1 导弹发射控制系统通用化思路 .....	366
10.4.2 通用导弹发射控制系统的需求分析 .....	368
10.4.3 通用导弹发射控制系统的核心技术 .....	368
10.4.4 导弹通用发射控制的发射协调 .....	370
10.5 通用化导弹发射控制的发展趋势 .....	370
第 11 章 导弹发射控制系统的故障诊断 .....	371
11.1 发射控制系统故障诊断的需求分析 .....	371
11.2 故障诊断方法的分类 .....	371
11.3 基于解析模型的故障诊断方法 .....	374
11.4 基于数据驱动的故障诊断方法 .....	375
11.5 基于图论的故障诊断方法 .....	379
11.6 基于专家系统的故障诊断方法 .....	380
11.7 基于定性仿真的故障诊断方法 .....	381
11.8 多种诊断方法的融合 .....	381
11.9 导弹发射控制系统故障诊断技术 .....	382
11.9.1 基于故障传播有向图的导弹发射控制系统故障诊断 .....	382
11.9.2 基于专家系统的导弹发射控制系统故障诊断 .....	383
11.9.3 基于多种智能方法结合的导弹发射控制系统故障诊断 .....	384
11.10 导弹发射控制系统故障预测与健康诊断技术 .....	385
11.10.1 故障预测与健康诊断技术 .....	385
11.10.2 导弹发射控制系统的故障预测与健康诊断技术 .....	387



第 12 章 导弹发射的安全性 .....	390
12.1 安全性问题分析 .....	390
12.2 MK41 的导弹发射安全性 .....	390
12.2.1 发射安全使能功能 .....	391
12.2.2 系统软件安全性 .....	392
12.2.3 发射异常状况处理 .....	394
12.2.4 多类型武器发射协调问题 .....	395
第 13 章 发射控制总线技术 .....	396
13.1 概述 .....	396
13.2 CAN 总线通信技术 .....	397
13.2.1 CAN 总线的主要特点 .....	397
13.2.2 CAN 总线通信技术 .....	397
13.3 MIL-STD-1553B 总线 .....	400
13.3.1 1553B 总线简介 .....	400
13.3.2 1553B 总线的终端类型 .....	401
13.3.3 1553B 总线的信息组成 .....	401
13.3.4 1553B 总线的信息传输格式 .....	402
13.3.5 1553B 总线系统结构 .....	402
13.4 串行总线 .....	404
13.4.1 RS422 总线 .....	405
13.4.2 RS485 总线 .....	408
13.5 以太网 .....	410
13.6 光纤通道 .....	413
13.6.1 光纤通道分层结构 .....	413
13.6.2 光纤通道拓扑结构 .....	414
13.6.3 光纤通道端口类型 .....	415
13.6.4 光纤通道服务类型 .....	415
13.6.5 光纤通道数据帧 .....	416
13.6.6 FC-AE 标准分析 .....	417
13.6.7 FC-AE-1553 光纤总线 .....	417