



“十二五”国家重点出版规划项目

国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

野战火箭装备与技术

野战火箭 制导与控制技术

Guidance and Control
Technology of Field Rocket

杨明 汤祁忠 韩磊 编著 |



国防工业出版社
National Defense Industry Press



“十二五”国家重点出版规划项目

国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

野战火箭装备与技术

野战火箭制导与控制技术

杨明 汤祁忠 韩磊 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书主要阐述野战火箭制导与控制技术的相关理论与方法。全书概述了野战火箭制导控制系统的概念、组成和原理,详细讨论了火箭弹弹体动态特性、气动布局与执行机构、弹道特性分析、惯性导航系统和组合导航系统原理与应用,重点论述了各类制导律及自动驾驶仪的设计方法,最后介绍了控制系统数学仿真和半实物仿真以及制导舱工程化设计方法。

本书可以作为野战火箭制导与控制技术相关领域科研人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

野战火箭制导与控制技术/杨明,汤祁忠,韩磊编著. —北京:
国防工业出版社,2015.12
(野战火箭装备与技术)
ISBN 978-7-118-10178-2

I. ①野... II. ①杨...②汤...③韩... III. ①野战 -
火箭 - 制导②野战 - 火箭 - 飞行控制 IV. ①V448.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第284131号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$ 字数 340千字

2015年12月第1版第1次印刷 印数1—1500册 定价86.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

《野战火箭装备与技术》丛书编委会

顾 问 刘怡昕 包为民 杨绍卿

主 编 韩珺礼

副主编 汤祁忠 周长省

编 委 (按姓氏笔画排序)

马 幸 王文平 王良明 王雪松

史 博 刘生海 汤祁忠 李 鹏

李臣明 李照勇 杨 明 杨晓红

陈四春 陈志华 周长省 郝宏旭

韩 磊 韩珺礼 蒙上阳 樊水康

秘 书 杨晓红 韩 磊

序

炮兵是陆军火力打击骨干力量,装备发展是陆军装备发展的重点。野战火箭是炮兵的重要装备,以其突然、猛烈、高效的火力在战争中发挥了重要作用。随着现代高新技术的飞速发展及其在兵器领域的广泛应用,20世纪90年代初,国外开始应用制导技术和增程技术发展制导火箭,使火箭炮具备了远程精确点打击和精确面压制能力,推动了炮兵由覆盖式面压制火力支援向点面结合的火力突击转变。同时,随着贮运发箱模块化发射技术的应用,火箭炮摆脱了集束定向管的束缚,实现了不同弹径、射程、战斗部种类火箭弹的共架发射,具有射程远、精度高、火力猛、点面结合、毁伤高效、反应快速、机动灵活和保障便捷的特点,标志着野战火箭装备技术水平发展到了一个新的高度,夯实了野战火箭在陆军火力打击装备中的重要地位。

我国一直重视野战火箭装备技术发展,近年来更是在野战火箭武器的远程化、精确化、模块化和信息化等方面取得了长足进步,野战火箭装备技术总体水平达到了世界先进水平,部分达到领先水平。韩珺礼研究员带领的陆军火箭科研创新团队,长期从事野战火箭武器装备论证、预先研究、型号研制和作战运用研究等工作,取得了大量成果,相继推出的多型野战火箭武器系统均已成为陆军炮兵的火力骨干装备。

《野战火箭装备与技术》丛书(共14册)系统分析了未来战争形态的演进对陆军炮兵远程精确打击装备的需求,明晰了我国野战火箭武器装备的发展方向,从多角度研究了我国野战火箭武器装备的理论技术与运用问题,是对我国近年来野战火箭特别是远程火箭发展的总结与升华。该丛书在国内首次系统建立了涵盖野战火箭论证、设计、制造、试验和作战运用等多个方面的理论体系和技术体系,是近年来国内野战火箭装备技术和作战运用研究的理论结晶,为野战火箭向更远程、更精确、更大威力发展奠定了坚实理论与技术基础。《野战火箭装备与技术》丛书对于推动我国野战火箭武器深入发展具有重大意义!相信在各级机关的支持下,在广大科研人员的共同努力下,我国野战火箭武器将更加适应基于信息系统的打击需求,在未来信息化战争中将发挥更重要的作用!

刘怡昕

二〇一五年十一月

刘怡昕:中国工程院院士、南京炮兵学院教授。

试读结束: 需要全本请在线购买: www.ertongbook.com

自序

炮兵是陆军火力打击力量的重要组成部分,具备突然、猛烈、密集、高效的火力特点,在历次战争中发挥了重要作用,有“战争之神”的美誉。随着制导技术、电子信息技术等诸多高新技术在炮兵装备中的应用,陆军炮兵的远程精确打击能力得到大幅提升,炮兵已由过去的火力支援兵种向火力主战兵种转型,这与野战火箭武器的发展密不可分。为适应现代战争需求,野战火箭武器系统正朝着远程压制、精确打击、一装多能、高效毁伤、模块通用的方向发展。

为了提高我军炮兵作战能力,我国十分重视野战火箭武器的发展,从装备仿研、技术引进到自主研发,经过多年的积累与创新,在远程化、精确化、模块化、信息化等方面达到了较高水平。在基于信息系统的体系作战中,野战火箭主要担负战役战术纵深内对面目标精确压制和点目标精确打击任务。以贮运发箱模块化共架发射和精确化为主要特征的先进远程野战火箭武器系统,集远程综合压制、精确打击、实时侦察和效能评估于一体,为复杂战场环境下远程精确火力打击提供了重要保证,是我国陆军未来火力打击装备发展的重点。

野战火箭装备技术的发展已进入到一个新的更高阶段,立之弥高,逾之弥艰,需要有完整的基础理论加以支撑,需要有关键技术不断突破和创新,需要在基础研究上下功夫。但是,目前该领域的学术理论、技术研究成果相对分散,成系统的装备技术和理论文献很少,不利于野战火箭武器装备的优化发展。因此,迫切需要对该领域的理论与技术进行系统梳理、结集出版,以满足论证、研制、生产、作战使用等各领域参考资料缺乏的急需,为野战火箭领域人才培养和装备发展提供系统的理论与技术支撑。《野战火箭装备与技术》丛书立足野战火箭发展,填补了国内野战火箭理论与技术体系空白,被列入“十二五”国家重点图书出版规划项目,并得到了国家出版基金的资助。本丛书共有14个分册,全面系统地对我国陆军野战火箭研究成果和国内外该领域的发展趋势进行了阐述,着重对我国野战火箭基础研究和工程化研究方面取得的创新性成果进行了提炼,是我国野战火箭领域科技进步的结晶。本丛书的出版,对推动我国野战火箭装备技术不断自主创新、促进陆军武器装备发展、提升我国武器装备竞争力以及培养野战火箭领域专业人才具有重要意义。

本丛书的撰写得到了机关和广大专家的指导和帮助。感谢中国科学院院士包为民和中国工程院院士刘怡昕、中国工程院院士杨绍卿的悉心指导,感谢徐明友教授等我国野战火箭领域老一辈科研工作者奠定的基础,感谢总装备部某研究所各位领导和诸位同事的支持,感谢南京炮兵学院、南京理工大学、北京理工大学、兵器工业导航与控制技术研究所、国营 743 厂、国营 5137 厂等单位领导和科研工作者的支持,感谢国防工业出版社和陆军火箭科研创新团队为本丛书所做出的大量工作!在本丛书的撰写过程中参考了相关文献和资料,在此对相关作者一并表示感谢!

由于水平所限,书中难免有错误和不当之处,恳请读者不吝赐教。

韩珺礼

二〇一五年十一月

前言

自“喀秋莎”火箭炮在苏德战场首次亮相,多管火箭武器系统已走过了70多年的发展历程,其战术技术水平已有了质的飞跃,配用了多个弹种,配备了简易制导或精确制导装置,实现了射程、压制面积与打击精度的同步提升。现代战争对陆军武器系统远程有效打击的准确性和密集性有了新的要求,制导化和远程化是火箭弹发展的必然趋势。

随着制导与控制技术的发展,特别是惯性器件、卫星定位装置和导引头等主要控制部件野战环境适应性不断提高,成本不断降低,以前只有在高价值战术导弹上采用的制导控制技术,被移植到野战火箭中,使野战火箭武器系统具备了精确打击能力。同时,由于制导控制技术解决了火箭射程与精度的矛盾,口径更大、射程更远的远程制导火箭层出不穷,野战制导火箭武器系统将成为陆军弥补地地战术导弹与身管火炮之间火力空白的主要武器。

制导与控制系统是制导火箭弹的核心和关键,它直接影响到制导火箭弹的射击精度和作战效能。为了推动野战火箭制导与控制技术的发展,提高制导系统在火箭弹上的应用水平,作者汇集了多年研究成果写成此书。

本书将由以下10章组成:

第1章 野战火箭制导与控制技术概论。阐述了制导火箭武器系统的发展现状与趋势,介绍了制导控制系统的概念、组成和原理,明确了对制导控制系统的要求。

第2章 火箭弹弹体运动动态特性。推导了火箭弹动力学方程组,给出了火箭弹动态特性的研究方法,分析了旋转体制火箭弹的运动特性,研究了制导火箭弹气动外形的设计与分析方法,给出了弹体动态特性的某些要求。

第3章 制导火箭弹气动布局与控制执行机构。研究了制导火箭弹气动外形设计、姿态控制方法及控制执行机构。

第4章 制导火箭弹弹道特性分析。对火箭弹的外弹道、气动热等特性进

行了分析与计算,研究了标准气象、射向、阵地纬度等因素对弹道计算的影响。

第5章 惯性导航系统和组合导航系统。研究了惯性导航系统、卫星导航系统及组合导航系统原理及其在制导火箭弹中的应用。

第6章 制导方式与制导规律。介绍了适应于制导火箭弹的各种制导律,重点研究了中远程火箭弹的复合制导方法。

第7章 自动驾驶仪设计。研究了各种自动驾驶仪设计的基本方法。

第8章 先进控制方法在制导控制系统中的应用。研究了变结构、动态逆和自抗扰等先进控制方法在制导控制系统中的应用。

第9章 制导控制系统仿真。研究了数学仿真和半实物仿真在制导火箭弹研制过程中的应用方法。

第10章 制导舱工程化设计方法。研究了制导舱可靠性、维修性、安全性及电磁兼容性设计的工程化方法。

本书的第1、2(除2.3节)、4、6、7、8章由杨明编写,第3、5章由汤祁忠编写,第9章由韩磊编写,第10章由郝宏旭编写,2.3节由李臣明编写,全书由杨明统稿。在本书的成稿过程中,毛昱天、张锐、吴丹和乔治等付出了辛勤的劳动,在此表示感谢!

在本书编写过程中,参考了许多国内外文献资料,在此对这些文献的作者深表谢意。

本书由西北工业大学杨军教授和中国空空导弹研究院李友年研究员负责审稿,他们提出了许多宝贵意见,给予作者很大帮助,在此深表谢意。

本书的写作,从内容到形式,均与作者在科研上的体会和经历有关。在选材和写作上,尽量包含新知识、新成果,力求反映制导火箭弹技术的最新发展。由于知识水平、时间以及经验的局限,本书的写作难免有缺点和不足,恳请广大读者批评指正。

作者

目录

第1章 野战火箭制导与控制技术概论	001
1.1 制导火箭武器技术的发展	001
1.1.1 制导火箭弹的发展历史及现状	001
1.1.2 制导火箭弹技术特点及发展趋势	003
1.2 制导控制系统的概念、组成和原理	004
1.2.1 制导控制系统概念	004
1.2.2 制导控制系统组成	005
1.2.3 制导控制系统原理	006
1.3 对制导控制系统的要求	009
参考文献	011
第2章 火箭弹弹体运动动态特性	012
2.1 火箭弹动力学	012
2.1.1 坐标系	012
2.1.2 作用在弹体上的力和力矩	015
2.1.3 刚性弹体运动方程组	019
2.1.4 旋转体制火箭弹动力学方程	020
2.2 火箭弹动态特性的研究方法	022
2.2.1 火箭弹扰动运动的研究方法	022
2.2.2 弹体小扰动线性化模型	024
2.2.3 弹体动力学传递函数	027
2.3 旋转体制火箭弹运动特性分析	028
2.3.1 坐标系的定义	029
2.3.2 复攻角的定义	030
2.3.3 角运动方程的建立	031

2.3.4	第一种类型的锥摆运动——大攻角下章动阻尼与进动阻尼产生的圆锥运动	033
2.3.5	第二种类型的锥摆运动——由外形非对称引起的强迫圆锥运动	044
2.3.6	第三种类型的锥摆运动——由转速闭锁产生的圆运动 ..	047
2.3.7	第四种类型的锥摆运动——非线性马格努斯力矩产生的极限圆锥运动	052
2.3.8	极限圆锥运动的抑制措施	057
2.4	对弹体动态特性的某些要求	059
	参考文献	061
第3章 制导火箭弹气动布局与控制执行结构		062
3.1	制导火箭弹气动布局	062
3.1.1	翼面沿弹身纵轴的布置形式	063
3.1.2	翼面在弹身周侧的布置形式	065
3.1.3	舵指令分配	066
3.2	制导火箭弹姿态控制方法	067
3.2.1	空气动力控制	067
3.2.2	推力矢量控制	068
3.2.3	喷气反作用控制	068
3.2.4	变质心控制	069
3.3	控制执行机构	069
3.3.1	舵机	069
3.3.2	直接力控制式执行机构	074
	参考文献	078
第4章 制导火箭弹弹道特性分析		079
4.1	概述	079
4.2	标准气象条件	080
4.2.1	大气层基本结构	080
4.2.2	气象参数随高度的变化规律	082
4.2.3	标准大气参数计算	086
4.2.4	气象数据实例	089
4.3	气动热的数值计算	092
4.3.1	控制方程	092

4.3.2	湍流模拟	093
4.3.3	火箭弹的主要流场与气动热特性	096
4.4	外弹道特性分析	098
4.4.1	制导火箭弹射表编拟	098
4.4.2	小射程弹道特性	099
4.4.3	大射程外弹道特性	100
4.4.4	射向对弹道的影响	101
4.4.5	机动变轨控制弹道	101
	参考文献	103
第5章 惯性导航系统和组合导航系统		104
5.1	惯性导航系统	104
5.1.1	概述	104
5.1.2	捷联惯性导航系统	106
5.1.3	捷联惯性导航系统误差分析	113
5.1.4	捷联惯性导航系统程序编排	117
5.1.5	纯惯性导航与惯性导航系统的初始对准	119
5.1.6	惯性导航系统的测试与标定	120
5.1.7	惯性导航系统免维护免测试技术	122
5.2	卫星导航系统	122
5.2.1	概述	122
5.2.2	GPS 卫星导航原理	123
5.2.3	北斗卫星导航系统	126
5.2.4	卫星抗干扰技术	127
5.2.5	高动态条件卫星信号的捕获与跟踪	130
5.3	组合导航系统	131
5.3.1	卡尔曼滤波与组合导航原理	132
5.3.2	惯性导航与卫星导航紧耦合技术	136
	参考文献	138
第6章 制导方式与制导规律		140
6.1	地面目标的特性分析	140
6.1.1	地面固定目标特性	140
6.1.2	地面运动目标特性	142
6.2	各类制导方式及原理	142

6.2.1	自主式制导	143
6.2.2	寻的制导	145
6.2.3	复合制导	156
6.3	制导律与制导方案	158
6.3.1	制导规律与导引方法	158
6.3.2	制导方案	162
	参考文献	167
第7章 自动驾驶仪设计		168
7.1	自动驾驶仪的设计任务	168
7.2	自动驾驶仪组成及主要部件	170
7.2.1	自动驾驶仪的组成	170
7.2.2	自动驾驶仪的主要部件	171
7.3	侧向稳定控制回路设计依据	171
7.3.1	制导系统对侧向稳定控制回路的要求	171
7.3.2	特征气动点的选择	172
7.3.3	设计自动驾驶仪的性能指标	173
7.4	过载自动驾驶仪设计	174
7.5	三回路自动驾驶仪设计	179
7.5.1	系统开环传函特性分析	179
7.5.2	系统闭环回路的控制参数设计	182
7.6	横向速度自动驾驶仪设计	185
7.6.1	姿态自动驾驶仪	185
7.6.2	速度矢量自动驾驶仪	186
7.7	滚转稳定控制回路设计	187
7.7.1	滚转控制方法	187
7.7.2	ITAE 设计法应用于滚转自动驾驶仪	188
7.7.3	设计实例	189
7.8	数字式自动驾驶仪设计	190
7.8.1	传递函数与 z 传递函数间的相互转换	191
7.8.2	由 z 传递函数建立离散状态差分方程组	193
7.8.3	时延补偿	195
7.9	弹性弹体自动驾驶仪设计	197
	参考文献	199

第 8 章 先进控制方法在制导控制系统中的应用	200
8.1 概述	200
8.2 变结构控制	204
8.2.1 变结构控制及其设计方法	204
8.2.2 变结构控制在自动驾驶仪设计中的应用	206
8.3 动态逆控制	210
8.3.1 动态逆系统理论基础	210
8.3.2 逆系统理论在控制系统设计中的应用	213
8.4 自抗扰控制	214
8.4.1 自抗扰控制理论	214
8.4.2 自抗扰技术在姿态控制器设计中的应用	216
参考文献	220
第 9 章 制导控制系统仿真	221
9.1 概述	221
9.2 制导控制系统数学仿真	222
9.2.1 一系统数学模型及其验证	222
9.2.2 数学仿真系统组成	224
9.2.3 数学仿真过程及主要内容	224
9.2.4 仿真结果分析与处理	225
9.2.5 制导火箭弹精度分配	228
9.3 制导控制系统半实物仿真	232
9.3.1 半实物仿真系统组成	233
9.3.2 半实物仿真系统的主要设备和模型	233
参考文献	237
第 10 章 制导舱工程化设计方法	238
10.1 制导舱的组成与功能	238
10.2 可靠性设计	240
10.2.1 可靠性预计和分配	240
10.2.2 可靠性设计准则	242
10.2.3 故障模式分析	243
10.2.4 设计阶段的可靠性工作	243
10.3 检测维修性设计	245

10.4	安全性设计	246
10.4.1	安全性分析	246
10.4.2	安全性设计准则	248
10.4.3	安全性措施	248
10.5	电磁兼容性设计	249
参考文献	251

第1章

野战火箭制导与控制技术概论

1.1 制导火箭武器技术的发展

1.1.1 制导火箭弹的发展历史及现状

野战多管火箭武器系统是陆军地面压制兵器,绝大多数情况下比中等口径身管火炮具有更远的射程,具有野战性能好、反应速度快、对面目标压制能力强等优点,但是也存在射击精度偏低的缺点,采用制导控制技术是提高多管火箭武器系统打击精度的有效途径。

多管火箭系统起初是不含控制系统的,它通过对无控火箭的弹道系统乃至整个武器系统进行优化设计来提高火箭弹的射击精度,通过对火箭外形结构、发射装置进行优化设计,利用尾翼延时展开、正反转控制等方法来稳定弹道,从而提高火箭弹的射击密集度。然而无控火箭弹对射击精度的提高是有限的,特别对于远程火箭弹,这种矛盾尤为突出,火箭弹飞行 70 ~ 80km 后的偏差可能会达到 1km。巴西 ASTROS II 火箭武器系统的最大射程为 90km,射击精度仅为 $1.0\% \times S_{\max}$ (S_{\max} 指最大射程),美国 MLRS 火箭武器系统的最大射程为 45km,射击精度为 $0.71\% \times S_{\max}$ 。而火箭弹本身的结构特征又使其无法采用与提高身管火炮射击精度相同的技术手段,只能采用简易姿态控制或精确制导方法来弥补精度的不足。

简易姿态控制火箭弹采用主动段姿态稳定以抑制各种扰动因素引起的火箭弹主动段终点的速度矢量角散布,从而达到提高武器系统射击密集度的目的。这是因为火箭弹主动段的各种误差,包括初始扰动、推力偏心、弹道风、质量散布、动不平衡、发动机总冲跳动等,会导致一定的速度偏差,其中方

向偏差引起横向散布,幅值偏差引起纵向散布。为减小横向散布,在火箭弹弹道主动段可采用简易姿态控制系统,稳定速度方向;为减小纵向散布,可采用子母战斗部,增加距离修正系统,通过修正开舱时间来减小主动段终点速度偏差对射程的影响。以俄罗斯“旋风”火箭武器系统为例,采用简易控制技术,其最大射程为 90km,射击精度达到了 $0.41\% \times S_{\max}$,从而使火箭弹的散布面积减少了一半,射击精度与传统火箭弹相比提高了 3 倍,弥补了火箭弹散布过大的缺陷^[1]。

随着制导与控制技术的发展,特别是惯性器件、卫星定位装置等控制部件野战环境适应性不断提高,成本不断降低,以前只有在高价值战术导弹上采用的制导控制技术,被移植到野战火箭中,使野战火箭武器系统具备了精确打击能力。同时,由于制导控制技术解决了火箭射程与精度的矛盾,口径更大、射程更远的远程制导火箭层出不穷,野战制导火箭武器系统将成为陆军弥补地地战术导弹与身管火炮之间火力空白的主要武器。世界上各军事强国都以增强武器系统的射程和作战效能为目标,不断地发展和完善各自的野战多管火箭武器系统,既加强对现有装备进行制导化改造,又重视研发有发展前途的新产品。

德国与瑞士为 227mm 火箭弹研制 CORECT 制导模块,制导模块中的核心为制导与控制(G&C)单元,弹载卫星定位系统用于确定火箭弹在飞行过程中的实际位置,G&C 单元确定实际弹道与预期弹道之间的误差,并计算出修正量,磁传感器通过测量磁场确定火箭弹的滚转姿态,执行机构位于 G&C 单元后方,由 60 个小脉冲发动机组成,通过脉冲发动机适时点火在横向和径向产生所需的修正脉冲。227mm 火箭弹配用 CORECT 模块后,射程提高到 38km,精度可达到 50m。

GMLRS 制导火箭弹由美、英、法、德、意五国联合研制,与现有非制导火箭弹相比,GMLRS 制导火箭弹射程远、命中精度高、机动性好,对付现有目标所需火箭弹的数量可减少 80%。原基型 M26 式火箭弹为非制导弹,射程为 32km,圆概率误差(CEP)约为 100m,而 GMLRS 制导火箭弹的最大射程是 70km,其圆概率误差小于 10m^[2]。

GMLRS 制导火箭弹的控制由 4 片鸭式舵翼来实现,要求的制导精度由低成本战术级惯性测量装置独立实现,同时可选用全球定位系统(GPS)接收机辅助制导,当其与惯性测量装置结合使用时,可进一步提高精度。图 1-1 所示为 GMLRS 制导火箭弹结构示意图,图 1-2 所示为 GMLRS 制导火箭弹制导舱剖视图。