



国家重点出版物出版规划项目

陆战装备科学与技术（第二辑）· 远程精确火力打击丛书



野战火箭外弹道理论

Exterior Ballistic Theory of Field Rockets

刘怡昕 李臣明 著



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

《国之重器出版工程》

编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	高延敏	何 琼	刁石京	谢少锋
闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生	赵永红
韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波	卢 山
徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁	张 炜
聂 宏	付梦印	季仲华		



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- 于 全 中国工程院院士
- 王少萍 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 王建民 清华大学软件学院院长
- 王哲荣 中国工程院院士
- 王 越 中国科学院院士、中国工程院院士
- 尤肖虎 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 邓宗全 中国工程院院士
- 甘晓华 中国工程院院士
- 叶培建 中国科学院院士
- 朱英富 中国工程院院士
- 朵英贤 中国工程院院士
- 邬贺铨 中国工程院院士
- 刘大响 中国工程院院士
- 刘怡昕 中国工程院院士
- 刘韵洁 中国工程院院士
- 孙逢春 中国工程院院士
- 苏彦庆 “长江学者奖励计划”特聘教授



- 苏哲子 中国工程院院士
- 李伯虎 中国工程院院士
- 李应红 中国科学院院士
- 李新亚 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨德森 中国工程院院士
- 张宏科 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆建勋 中国工程院院士
- 陆燕荪 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、原
机械工业部副部长
- 陈一坚 中国工程院院士
- 陈懋章 中国工程院院士
- 金东寒 中国工程院院士
- 周立伟 中国工程院院士
- 郑纬民 中国计算机学会原理事长
- 郑建华 中国科学院院士



- 屈贤明** 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
- 项昌乐** “长江学者奖励计划”特聘教授，中国科协书记处书记，北京理工大学党委副书记、副校长
- 柳百成** 中国工程院院士
- 闻雪友** 中国工程院院士
- 徐德民** 中国工程院院士
- 唐长红** 中国工程院院士
- 黄卫东** “长江学者奖励计划”特聘教授
- 黄先祥** 中国工程院院士
- 黄 维** 中国科学院院士、西北工业大学常务副校长
- 董景辰** 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
- 焦宗夏** “长江学者奖励计划”特聘教授



丛书序

随着世界新军事变革的发展和高新技术在军事领域的应用，陆军火力打击装备正向远程化、精确化、体系化、智能化方向发展，陆军火力作战形态将产生重要变革，远程、快速、精确、多能打击将成为高度信息化条件下陆军火力作战的重要模式，远程精确火力打击装备也必将是陆军装备发展的重要方向，其工程技术和作战运用研究亟待同步开展。

《陆战装备科学与技术（第二辑）·远程精确火力打击丛书》是一套深入阐述陆军远程精确火力打击创新理论、科学内涵、学术研究进展、技术创新与突破等方面的学术论著。该丛书汇聚了外弹道学、射击学、作战运用、人工智能、任务规划、制导控制、数值仿真等多个学科和方向的前沿技术和创新成果，填补了我国在陆军远程精确火力打击领域技术与运用的多项空白。

本丛书包括《野战火箭外弹道理论》《远程火箭末敏弹射击学与弹道学》《远程制导火箭火力运用理论》《陆军远程精确火力打击任务智能规划技术》和《陆军远程精确火力打击装备作战运用》5个分册。其中，《野战火箭外弹道理论》对无控和有控野战火箭的外弹道理论进行了系统分析，纳入了作者多年来的创新成果，特别是融入了高空远程弹箭和系列新弹种的内容；《远程火箭末敏弹射击学与弹道学》以末敏弹作为具备二次弹道特点的弹种代表，详细研究了远程火箭末敏弹的母弹和子弹弹道理论，并对其决定射击开始诸元理论、射击效力评定理论和精度折合方法等内容进行了研究；《远程制导火箭火力运用理论》针对卫星和惯导组合制导的远程火箭弹，区别于传统炮兵无控弹药，从目标分析、不同战斗部毁伤分析、火力分配、射击效率评定、弹药消耗量计算、火力协同、火力方案优选等方面进行了系统性和开创性研究；



《陆军远程精确火力打击任务智能规划技术》瞄准未来智能化战争需求，以火力任务规划为主线，结合人工智能技术，系统介绍了陆军远程精确火力打击任务智能规划的研究思路和系列关键技术，创新研究了人工智能技术在火力任务规划领域的应用方法，搭建了面向智能化战争的火力任务规划技术框架；《陆军远程精确火力打击装备作战运用》介绍了国内外陆军远程精确火力打击装备发展现状、趋势与特点，分析了未来高度信息化条件下战争形态的演进方向，阐述了陆军远程精确火力打击制胜机理，并从作战部署、机动线路优化、作战效能、作战样式、作战行动、作战指挥等方面进行了系统性研究。

本套丛书将陆军远程精确火力打击装备工程技术与作战运用相结合，将我国陆军远程精确火力打击领域的装备研发与应用水平提升到一个新的高度，对于优化我国陆军武器装备领域战略高技术布局、推动我国陆军远程精确火力打击装备和运用发展、满足陆军未来智能化战争需求具有重要意义，对于推动陆战装备科学与技术的创新发展、培养陆军远程精确火力打击力量工程技术人才和新型指挥人才也大有裨益。

中国工程院院士

2020 年 4 月



前言

野战火箭是陆军的重要武器装备，随着高新技术在火箭领域的广泛应用，野战火箭的发展日新月异。自 20 世纪 50 年代末，我国开始出现火箭外弹道学方面的专门著作，并形成了火箭外弹道基本理论体系，此后一直到 20 世纪 80 年代末，除了增加少量关于制导的基本理论外，基本保留了原有的理论特点。本书作者于 1998 年所著的《外弹道学》中较为系统地阐述了外弹道学的基本理论，并根据长期科研和教学的实践，较早地将控制弹道相关内容充实到其中。同时，结合作战实际，新增了修正理论、射弹散布理论和一些新型弹种的外弹道理论，丰富了外弹道理论体系。到 21 世纪前 10 年，国内开始在新版的外弹道著作中增加了有控弹道和部分新弹种内容，使得火箭外弹道理论更加丰富。

在世界火箭装备阔步发展和军事需求不断拓展的大背景下，我国野战火箭装备技术在近年来也得到很大发展。在这个过程中，随着射程和弹道高度的不断增加，出现了弹道模型精确化、高空风场、气动弹道优化计算、非线性稳定性、弹道系数解算、柔性弹道等一系列新问题。本书作者基于研究成果对这一系列问题进行了详细论述，以期进一步发展野战火箭外弹道学理论。

为了提高射击精度和威力，火箭远程化和制导化成为重要发展方向，美国在 M270 火箭炮、俄罗斯在“旋风”火箭炮和“狂风”火箭炮、中国在远程火箭炮等武器系统中均发展了制导火箭，控制弹道成为火箭外弹道的一个重要内容。采用倾斜发射方式的远程野战火箭，其控制弹道有一定特点，远程火箭在飞行过程中应用了主动段姿态控制、弹道修正技术和末段制导等措施。特别是近年来发展的远程制导火箭，采用了“卫星 + 惯导”组合导航模式，在弹道



末段还采用了角约束技术以增大入射角度等，其控制弹道变得较为复杂。为此，本书论述了远程制导火箭控制弹道理论。

为了丰富火箭外弹道学理论体系，本书除了对火箭外弹道的基础理论、解算方法、修正理论和散布理论等进行系统阐述外，还增加了火箭末敏弹、火箭子母弹和火箭巡飞弹等新型弹种的外弹道理论，并对野战火箭射表编制进行了简要分析。

本书适合于外弹道、武器系统与运用工程、军事装备学、作战指挥学等专业的本科生及研究生教学使用，也可供相关理论研究人员、工程技术人员以及装备使用与管理人员用作参考。

在本书撰写过程中，部分内容参考了芮筱亭院士、徐明友教授、韩子鹏教授等的相关著作，在此表示感谢。同时，也对所引用的其他文献的作者一并致谢！

由于著者水平有限，不足之处在所难免，敬请读者批评指正！

作 者

2020 年 4 月



目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 野战火箭外弹道理论的发展历程	002
1.1.1 外弹道学的发展历程	002
1.1.2 火箭外弹道学的发展历程	003
1.2 火箭外弹道学的研究任务	004
1.3 火箭外弹道学的作用	004
1.4 火箭外弹道学常用术语	006
1.5 本书所采用的单位制	009
第 2 章 零攻角时作用在火箭上的力和力矩	011
2.1 引言	012
2.2 重力及重力加速度	012
2.3 科氏惯性力及科氏加速度	014
2.4 大气特性和炮兵标准气象条件	015
2.4.1 大气分层	015
2.4.2 空气状态方程和虚温	016
2.4.3 我国炮兵标准气象条件	017
2.4.4 空气阻力及空气阻力加速度	021
2.5 推力及推力加速度	031
2.6 非零攻角时作用于火箭的空气动力和力矩	035
2.6.1 切向阻力	036



2.6.2	升力	036
2.6.3	翻转（稳定）力矩	037
2.6.4	极阻尼力矩	037
2.6.5	赤道阻尼力矩	038
2.6.6	马格努斯力和马格努斯力矩	038
2.6.7	尾翼导转力矩	039
2.7	实现控制飞行的力和力矩	040
2.7.1	控制飞行概述	040
2.7.2	控制力和控制力矩	040
第3章	火箭质心运动微分方程组	045
3.1	基本假设和质心运动矢量方程	046
3.1.1	基本假设	046
3.1.2	弹丸质心运动的矢量方程	047
3.2	火箭质心运动微分方程组	047
3.2.1	描述弹丸质心运动的主要参量	047
3.2.2	以时间 t 为自变量的直角坐标系内弹丸质心运动微分 方程组	048
3.2.3	以时间 t 为自变量的自然（速度）坐标系内弹丸质心 运动微分方程组	049
3.2.4	以射距离 x 为自变量的弹丸质心运动微分方程组	050
3.2.5	以弹道高 y 为自变量的弹丸质心运动微分方程组	051
3.2.6	以弹道弧长 s 为自变量的弹丸质心运动微分 方程组	052
3.2.7	火箭弹质心运动微分方程组	052
3.3	真空弹道特性	053
3.3.1	真空弹道的确定性	053
3.3.2	真空弹道的对称性	054
3.3.3	平均弹道高	055
3.3.4	最大射程角	055
3.3.5	相对停留时间	055
3.3.6	弹道刚性原理	056
3.3.7	射程的修正公式	056



3.3.8	全飞行时间修正公式	056
3.4	空气弹道特性	057
3.4.1	空气弹道的确定性	057
3.4.2	最大射程角	057
3.4.3	速度沿全弹道变化的特点	058
3.4.4	空气弹道的非对称性	059
第4章	火箭质心弹道求解	061
4.1	火箭弹道主动段解析解	062
4.1.1	变量变换	063
4.1.2	主动段终点诸元公式	064
4.2	火箭弹道被动段解法	069
4.2.1	分段解法	069
4.2.2	虚速法	071
第5章	火箭刚体运动微分方程组	075
5.1	坐标系及其转换关系	076
5.1.1	地面坐标系 $O - xyz$	076
5.1.2	理想弹道坐标系 $O - x_i y_i z_i$	076
5.1.3	速度坐标系 $O - x_2 y_2 z_2$	077
5.1.4	第一弹轴坐标系 $O - \xi_1 \eta_1 \zeta_1$ 和第二弹轴坐标系 $O - \xi_2 \eta_2 \zeta_2$	078
5.1.5	弹体坐标系 $O - \xi \eta \zeta$	082
5.2	作用在刚体弹丸上的力和力矩	083
5.2.1	重力	084
5.2.2	有攻角时的空气动力和空气动力矩	084
5.2.3	与自转和角运动有关的空气动力和力矩	087
5.2.4	推力、喷管导转力矩和推力偏心力矩	088
5.3	火箭刚体运动方程组的建立	092
5.3.1	地面坐标系内六自由度刚体运动微分方程组	092
5.3.2	降阶的刚体运动方程组——五自由度方程组	099
第6章	尾翼式低旋火箭的扰动运动和散布分析	101
6.1	用于扰动和散布分析的刚体弹道模型	102



6.1.1	质心运动动力学方程	105
6.1.2	弹丸角运动方程	105
6.2	起始扰动引起的散布	110
6.2.1	起始扰动引起的攻角和偏角	110
6.2.2	起始扰动引起的散布	112
6.3	推力偏心引起的散布	112
6.3.1	推力偏心引起的攻角和偏角	112
6.3.2	影响散布的因素	116
6.4	风引起的散布	117
6.4.1	垂直风引起的攻角和偏角	117
6.4.2	风引起的角散布	119
6.5	动不平衡引起的散布	119
第7章 高速旋转火箭的扰动运动和散布分析		123
7.1	概述	124
7.2	起始扰动引起的攻角和偏角	125
7.2.1	攻角和偏角公式	125
7.2.2	影响角散布的因素	127
7.3	推力偏心引起的攻角和偏角	128
7.4	风的影响	129
7.4.1	垂直风引起的攻角和偏角	129
7.4.2	影响偏角的因素	131
7.5	动不平衡的影响	132
第8章 起始扰动机理及优化		135
8.1	半约束期内旋转火箭的扰动方程	137
8.2	发射装置振动引起的起始扰动	140
8.3	重力矩影响下的起始扰动	141
8.4	优化发射时序减小起始扰动	142
8.4.1	基于起始扰动的多管火箭发射动力学模型	142
8.4.2	优化射序和发射时间间隔机理	147
8.4.3	非满管射击方案优化	149



第 9 章 特殊情况下的锥摆运动	155
9.1 坐标系的定义	156
9.2 复平面及复攻角	157
9.3 角运动方程	158
9.3.1 火箭质心横向运动方程的复数形式	158
9.3.2 火箭横向转动方程的复数形式	160
9.4 赤道阻尼力矩章动与进动不同形成的极限圆锥运动	162
9.4.1 大攻角下赤道阻尼力矩章动与进动阻尼特性的不同	162
9.4.2 奇点理论	164
9.4.3 振幅平面方程	166
9.4.4 赤道阻尼力矩章动与进动特性不同时的极限圆锥运动	167
9.5 外形非对称引起的强迫圆锥运动	174
9.6 转速闭锁产生的圆运动	177
9.6.1 诱导滚转力矩与诱导侧向力矩的产生	177
9.6.2 转速闭锁的形成	179
9.6.3 转速闭锁的抑制措施	182
9.7 非线性马格努斯力矩产生的极限圆锥运动	183
9.8 大攻角下远程火箭的极限平面摆动	188
第 10 章 非制导尾翼火箭的能量控制与气动控制	193
10.1 有风时火箭的空气动力表达式	194
10.1.1 风引起的附加攻角	194
10.1.2 有风时的精确气动力	196
10.2 风引起的角散布	197
10.2.1 角散布方程的离散化	197
10.2.2 风引起的角散布分析	199
10.3 气动控制和能量控制减小随机风偏	201
10.3.1 气动控制减小非制导尾翼火箭弹的随机风偏	201
10.3.2 能量控制减小非制导尾翼火箭弹的随机风偏	210



第 11 章 制导火箭空间运动方程组	215
11.1 制导火箭的基本弹道方案	216
11.2 制导火箭弹道模型	217
11.2.1 所用坐标系	217
11.2.2 各坐标系之间的转换关系	219
11.2.3 地面发射坐标系中的质心动力学方程	223
11.2.4 弹体坐标系中的绕心运动方程	228
11.2.5 补充方程	230
11.2.6 制导火箭在地面发射坐标系中的空间运动 方程组	234
11.3 制导火箭弹误差分析模型	237
11.3.1 卫星接收机测量误差模型	237
11.3.2 IMU 惯组测量误差模型	237
11.4 制导控制系统分析	241
11.4.1 俯仰回路控制系统	241
11.4.2 偏航回路控制系统	243
11.4.3 滚动回路控制系统	243
11.4.4 舵机超前校正环节的选择	243
第 12 章 远程火箭高空弹道分析	247
12.1 高空远程火箭弹道模型的精确化	249
12.1.1 火箭低空弹道模型	249
12.1.2 高空远程火箭弹道模型精确化	251
12.1.3 高空弹道计算中气动系数的处理方法	262
12.1.4 高空低密度大气中火箭气动力计算方法	268
12.1.5 高空精确弹道模型与低空弹道模型的对比分析	272
12.2 高空标准风场模型及弹道气象条件	277
12.2.1 高空条件下大气风场计算	277
12.2.2 高空标准风场模型的建立	285
12.2.3 高空弹道温度、密度和气压场计算方法	288
12.2.4 炮兵标准气象条件的拓展	292
12.3 缓变系数对远程火箭弹道特性的影响	292



12.3.1	求解变系数微分方程的 WKB 方法	293
12.3.2	缓变系数攻角方程的近似解	294
12.3.3	缓变系数对高空远程火箭动稳定性的影响	296
12.3.4	缓变系数攻角方程对再入稠密大气层角运动振幅的 影响	299
第 13 章 大长径比火箭柔体弹道分析		303
13.1	柔体弹道动力学模型	304
13.1.1	坐标系选取及运动描述	304
13.1.2	动力学方程的建立与简化	309
13.2	弹体气动弹性变形对射弹散布的影响	312
13.2.1	推力偏心引起的变形对角散布的影响	312
13.2.2	动不平衡引起的变形对角散布的影响	313
13.2.3	风引起的变形对角散布的影响	313
13.2.4	起始扰动引起的变形对角散布的影响	315
13.2.5	综合分析	315
第 14 章 火箭子母弹弹道分析		317
14.1	子母弹子弹空间六自由度非线性模型	319
14.1.1	坐标系的建立	319
14.1.2	各坐标系之间的转换	320
14.1.3	诸外力和外力矩	322
14.1.4	子弹运动微分方程的建立	325
14.2	子弹抛撒点诸元的确定	327
14.2.1	抛撒速度的计算	327
14.2.2	抛撒点其他诸元值的确定	329
第 15 章 火箭末敏弹弹道分析		331
15.1	火箭末敏弹作用过程	333
15.2	坐标系的建立及转换	334
15.2.1	坐标系的建立	334
15.2.2	坐标系的转换	335
15.3	有伞末敏子弹弹道分析	338



15.3.1	作用在伞弹上的力和力矩	338
15.3.2	有伞末敏子弹减速减旋弹道	345
15.3.3	有伞末敏子弹稳态扫描弹道	347
第 16 章	火箭巡飞弹弹道分析	361
16.1	弹道模型的建立	363
16.1.1	所用坐标系及转换	363
16.1.2	受力分析	367
16.1.3	弹道数学模型	369
16.2	编队飞行数学模型	373
第 17 章	野战火箭射表编制	377
17.1	野战火箭射表编制的发展	379
17.1.1	射表解算弹道模型	379
17.1.2	空气动力计算方法	380
17.1.3	射表形式分类	380
17.2	野战火箭射表编制的基本方法	381
17.2.1	弹道符合法	382
17.2.2	参数辨识法	384
17.3	野战火箭射表编制的基本流程	385
17.4	野战火箭射表的特点	386
17.4.1	火箭子母弹射表特点	386
17.4.2	简易控制火箭弹射表特点	387
17.4.3	火箭末敏弹射表特点	388
17.4.4	远程制导火箭弹射表特点	389
参考文献		393
索引		397