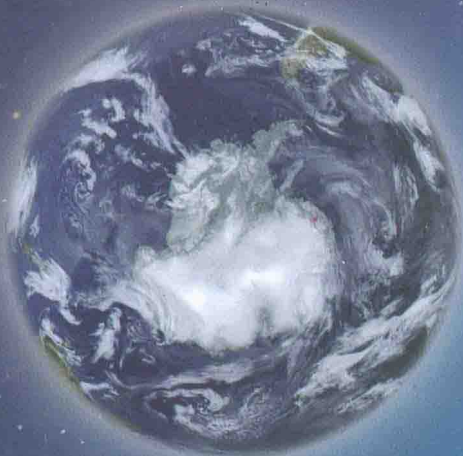


Flight Dynamics of Ballistic Missile in
Gravity Anomaly Field

扰动引力场中 弹道导弹飞行力学

郑伟 汤国建 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

扰动引力场中 弹道导弹飞行力学

Flight Dynamics of Ballistic Missile in
Gravity Anomaly Field

郑伟 汤国建 著



国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

扰动引力场中弹道导弹飞行力学 / 郑伟, 汤国建著.
北京: 国防工业出版社, 2009. 7

ISBN 978-7-118-06249-6

I. 扰... II. ①郑... ②汤... III. 弹道导弹 - 导弹
飞行力学 IV. TJ761. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 034800 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)

天利华印刷装订有限公司印刷
新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 6 字数 144 千字
2009 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革

开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

- 主任委员 刘成海
- 副主任委员 宋家树 蔡 镭 程洪彬
- 秘 书 长 程洪彬
- 副 秘 书 长 彭华良 贺 明
- 委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴
刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁
李德毅 杨 伟 吴有生 吴宏鑫
何新贵 张信威 陈良惠 陈冀胜
周一宇 赵万生 赵凤起 崔尔杰
韩祖南 傅惠民 魏炳波
- 本书主审委员 芮筱亭

序

地球扰动引力场对弹道导弹命中精度的影响及其快速补偿方法是航天工业部门非常关注的问题,它事关国家战略精确打击的能力。目前,经初步补偿修正后,地球扰动引力场对战略导弹命中精度的影响仍达到几百米的量级,难以满足导弹高精度的要求。但是,如果采用更为精确的模型,将大大增加发射前射击诸元计算的时间,会影响到导弹机动快速发射的性能。如何在保证模型赋值快速性的同时降低扰动引力场对导弹命中精度的影响,是导弹研制中必须解决的问题。

国防科技大学飞行力学课题组曾在著名导弹专家任莹教授的带领下,在 20 世纪 80 年代初就开展了相关的研究工作,并先后提出了一些行之有效的方法。作者郑伟、汤国建曾是任莹教授的两任学生,他们在原有工作基础上进一步深入,形成了扰动引力场中弹道导弹飞行力学的完整体系。现在他们把这些成果整理出来并公开出版,是一件非常有意义的事情。

通读全书,感觉这本专著在学术水平和应用价值方面都有较高的水准。

在学术水平方面,提出了弹道简化计算的状态空间摄动法、扰动引力快速赋值的广义延拓逼近法和球谐函数换极法,推导出定位定向影响分析的完整解析解。这些均是作者多年的研究成果,理论水平高,方法有创新。

在应用价值方面,本书所提的方法瞄准工程实际中的关键所

在,对相关技术问题的解决有很好的参考价值。书中给出了大量算例,直观地演示了所提方法的效果,能让读者较好地理解本书,有助于读者解决自己所面临的实际问题。

据我所知,该书将是国内第一部公开出版的全面论述战略弹道导弹在地球扰动引力场下的弹道计算方法、命中精度分析和射击诸元快速生成的专著。

总之,这是一本选题好、内容新、具有实用价值的专著,我很高兴看到该书在国防科技图书出版基金的资助下出版,并衷心希望本书的问世能推动我国在相关领域的研究更上一个台阶。

中国科学院院士

Handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters '余梦俊'.

前 言

扰动引力场是影响弹道导弹命中精度的重要因素。随着弹上惯性测量系统精度的逐步提高,这一问题的重要性日渐突出。但目前国内对这一问题的研究还比较少,特别是从弹道导弹飞行力学的角度来研究扰动引力场的影响及其补偿方法的著作还没有看到。本书即以此为背景,结合前人的工作和作者近年的研究成果,试图对这一问题进行系统的分析和研究。

弹道导弹飞行力学是研究弹道导弹在内、外部环境和控制系统作用下运动规律的学科。而扰动引力场是影响弹道导弹运动的重要外部环境。因此,本书要研究的就是在扰动引力场这一外部环境作用下,弹道导弹飞行力学需要解决的一些特殊问题。这些问题归结起来可分为三个方面,即:扰动引力场中弹道快速计算,扰动引力场对弹道导弹运动的影响分析和扰动引力场影响补偿方法。

扰动引力场中弹道快速计算的关键是扰动引力场参数的快速赋值。扰动引力场的赋值问题属于地球物理学和大地测量学研究的范畴,但现有方法对弹道计算而言太过复杂,因此需要探讨战场环境下速度快、精度高的新方法。

扰动引力场对弹道导弹运动的影响分析可以为工程应用中满足不同命中精度要求下的取舍提供理论依据,同时也是补偿的前提和基础。

扰动引力场影响的补偿主要体现在诸元计算和制导方法中。因此研究扰动引力场中弹道导弹诸元计算和制导方法是扰动引力场中弹道导弹飞行力学研究的落脚点和归宿。

针对前述问题,本书内容共分6章和两个附录。

第1章概述了扰动引力场的概念、相关研究的进展及其意义;第2章给出了弹道导弹主动段和自由段的运动模型,针对主动段和自由段的特点,分别引入状态空间摄动法,推导了其状态转移矩阵;第3章针对战场环境对扰动引力快速赋值的需求,介绍了有限元逼近法、广义延拓逼近法和球谐函数换极法,可以在保证一定精度的前提下大大提高计算速度;第4章系统分析了扰动引力对弹道导弹命中精度的影响,研究了其对主动段弹道、被动段弹道、惯性测量系统误差系数标定、显式制导等方面的影响;第5章深入剖析了定位定向误差的影响机理,以陆基机动发射弹道导弹和海基潜射弹道导弹为背景,提出了定位定向误差影响分析的解析计算方法;第6章针对诸元计算中的两个关键问题:方位角初值的选取和主动段弹道快速计算提出了新的计算方法,对于陆基机动发射和海基潜射两种情况给出了诸元快速计算的方案,并提出了制导计算中考虑扰动引力场影响的方法。为避免正文的冗长,将推导出的自由段摄动分析状态转移矩阵解析解和考虑四阶带谐项扰动引力下的自由段弹道解析解两部分公式作为附录列在最后。

作者的导师、飞行力学专家任莹教授在这一领域做过深入的研究。在先生的谆谆教导、耳提面命之下,我们得以进入这一领域进行工作。2003年底,先生不幸去世。因此,本书的完成也是对先生的告慰和纪念。

感谢余梦伦院士、包为民院士对本书出版的大力支持和推荐。他们认真审阅了书稿,提出许多宝贵意见,余梦伦院士并欣然为本书作序。

感谢贾沛然教授、陈国强研究员、王增寿研究员,他们在这一领域内的研究成果是本书工作的基础。感谢博士生杨华波、钱山、谢愈、徐明亮等同学在研究工作及书稿撰写过程中给予的支持与帮助。

本书写作过程中参考了国内外学者的大量文献,对前人的工作已尽我们所知在文中加以标注,并在此表示诚挚的感谢。

本书的出版得到国防科技图书出版基金评审委员会的大力支持。国防工业出版社的胡翠敏编辑为本书的出版花费了大量精力。在此一并表示感谢。

本书可供从事弹道导弹总体及飞行力学专业的研究人员和工程设计人员参考,也可以作为相关专业研究生的参考书。希望本书的出版对推动我国扰动引力场中弹道导弹飞行力学的相关研究能起到良好的作用。

鉴于作者学术水平有限,因此疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

郑伟 汤国建

2008年12月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 地球引力场	1
1.1.1 地球的形状、大小和运动.....	2
1.1.2 地球引力位的球谐函数	4
1.2 正常引力场与扰动引力场	7
1.2.1 正常引力场	7
1.2.2 扰动引力场	9
1.2.3 天文坐标系与大地坐标系.....	13
1.2.4 扰动引力场对弹道导弹运动的影响	16
1.3 研究工作的意义.....	16
1.4 相关研究进展.....	18
1.4.1 地球外部扰动引力赋值方法	18
1.4.2 扰动引力场对弹道导弹运动的影响分析方法	22
1.4.3 弹道导弹射击诸元计算与制导方法	23
第 2 章 扰动引力场中的弹道导弹运动模型及其简化	25
2.1 扰动引力场中弹道导弹运动模型.....	25
2.1.1 坐标系的定义	25
2.1.2 主动段运动模型	28
2.1.3 自由段运动模型	29
2.1.4 关机点偏导数计算	32
2.2 主动段弹道简化计算的状态空间摄动法.....	35
2.2.1 状态空间摄动法	35
2.2.2 主动段运动摄动方程	35

2.2.3	主动段运动状态转移矩阵解析解	38
2.3	自由段弹道简化计算的状态空间摄动法	41
2.3.1	极点变换	41
2.3.2	含摄动的运动状态空间方程	43
2.3.3	摄动方程状态转移矩阵的解析解	52
2.3.4	落点偏差的计算	53
第3章	战场环境下的空间扰动引力快速赋值	55
3.1	有限元逼近法	55
3.2	广义延拓逼近法	59
3.2.1	广义延拓逼近的基本思想	59
3.2.2	广义延拓逼近方法的空域划分	62
3.2.3	广义延拓逼近方法在被动段弹道的应用分析	64
3.2.4	算例分析	64
3.3	球谐函数换极法	69
3.3.1	球谐函数换极表示	69
3.3.2	球谐函数换极法的改进	74
3.3.3	换极法精度分析	76
第4章	扰动引力对弹道导弹命中精度的影响分析	80
4.1	扰动引力对不同飞行阶段弹道的影响分析	80
4.1.1	基于状态空间摄动法的主动段扰动引力影响 分析	80
4.1.2	基于状态空间摄动的被动段扰动引力影响 分析方法	84
4.1.3	被动段扰动引力影响分析的解析解	88
4.2	发射点重力测量误差对弹道导弹命中精度的影响 分析	90
4.3	扰动引力对弹道导弹显式制导的影响分析	91
第5章	定位定向误差对弹道导弹命中精度的影响分析	94
5.1	定位定向误差对弹道导弹运动的影响机理及其 分析方法	95

5.1.1	定位定向误差的影响机理	95
5.1.2	定位定向误差分析的基本方法	96
5.2	进行独立天文测量下的定位定向误差影响分析	97
5.2.1	几何项模型	97
5.2.2	初值项模型	99
5.2.3	偏差方程及引力项模型	101
5.2.4	算例分析	103
5.3	不进行独立天文测量下的定位定向误差影响分析	105
5.3.1	几何项模型	105
5.3.2	初值项模型	107
5.3.3	偏差方程及引力项模型	108
5.3.4	算例分析	109
5.4	定位定向误差对显式制导精度的影响分析	111
5.4.1	导航误差的计算	112
5.4.2	基于标准弹道参数的制导精度影响估算	112
5.4.3	算例分析	114
5.4.4	两种算法的同一性	115
5.5	定位定向误差传播模型	116
5.6	视加速度误差耦合影响分析	120
第6章	扰动引力场中弹道导弹的射击诸元与制导计算	127
6.1	发射方位角初值的精确确定	128
6.1.1	方位角初值确定的传统方法	128
6.1.2	考虑主动段弹道变形的方位角初值确定	129
6.1.3	算例分析	130
6.2	主动段弹道的快速计算方法	133
6.2.1	考虑地球自转时主动段弹道特性分析	133
6.2.2	主动段固定程序飞行段弹道的拟合方法	135
6.2.3	真空飞行段弹道的近似解析解	136
6.2.4	算例分析	141

6.3	机动发射弹道导弹射击诸元快速计算	145
6.3.1	机动发射射击诸元计算方案	145
6.3.2	基本诸元计算	147
6.3.3	修正诸元计算	148
6.3.4	算例分析	149
6.4	考虑扰动引力场时的显式制导方法	150
6.4.1	导航计算中的扰动引力补偿	150
6.4.2	需要速度计算中的扰动引力场因素补偿	151
附录 A	自由段弹道摄动分析状态转移矩阵解析解	154
A.1	X 等角偏差状态转移矩阵	154
A.2	Y 等角偏差状态转移矩阵	155
A.3	等地心距偏差状态转移矩阵	157
附录 B	考虑四阶带谐项扰动引力下的自由段弹道解析解	
	系数	158
	参考文献	164

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Gravitational Field of the Earth	1
1.1.1 Shape, Size and Movement of the Earth	2
1.1.2 Spherical Harmonics of the Gravitational Potential	4
1.2 Normal Gravitational Field and Gravity Anomaly Field	7
1.2.1 Normal Gravitational Field	7
1.2.2 Gravity Anomaly Field	9
1.2.3 Celestial Coordinate System and Geodetic Coordinate System	13
1.2.4 Effect of Gravity Anomaly Field on Movement of Ballistic Missile	16
1.3 Significance of the Research	16
1.4 Research Progress	18
1.4.1 Determination Method of the Gravity Anomaly Outside the Earth	18
1.4.2 Analysis Method of the Effect of Gravity Anomaly Field on the Movement of Ballistic Missile	22
1.4.3 Firing Data Computation and Guidance Method of Ballistic Missile	23
Chapter 2 Movement Model of Ballistic Missile and Its Simplified Form in Gravity Anomaly Field	25
2.1 Movement Model of Ballistic Missile in Gravity Anomaly Field	25

2. 1. 1	Definition of Coordinates	25
2. 1. 2	Movement Model of Powered Phase	28
2. 1. 3	Movement Model of Free Phase	29
2. 1. 4	Computation of Partial Derivative of Shutdown Point ...	32
2. 2	The State Space Perturbation Method Based on Simplified Computation of Powered-flight Trajectory	35
2. 2. 1	State Space Perturbation Method	35
2. 2. 2	Perturbation Equations of Powered Phase	35
2. 2. 3	The Analytical Solution to State Transition Matrix about Powered Phase Movement	38
2. 3	The State Space Perturbation Method Based on Simplified Computation of Free Phase Trajectory	41
2. 3. 1	Poles Transform	41
2. 3. 2	State Space Movement Equations Affected by Perturbation	43
2. 3. 3	Analytical Solution to the State Transition Matrix about Perturbation Equations	52
2. 3. 4	Computation of Impact Point Deviation	53
Chapter 3 Fast Determination of Gravity Anomaly in Battlefield Environment		55
3. 1	Finite Element Approximate Method	55
3. 2	Generalized Extended Approximate Method	59
3. 2. 1	Principle of the Generalized Extended Approximate Method	59
3. 2. 2	Space Partition of the Generalized Extended Approximate Method	62
3. 2. 3	Application of the Generalized Extended Approximate Method in Free-flight Trajectory	64
3. 2. 4	Examples	64