

国防科学技术大学惯性技术实验室优秀博士学位论文丛书

面向水下地磁导航的 地磁测量误差补偿方法研究

Research on Geomagnetic
Measurement Error Compensation for
Underwater Geomagnetic Navigation

吴志添 胡小平 吴美平 著 



国防工业出版社
National Defense Industry Press

国防科学技术大学惯性技术实验室优秀博士学位论文丛书

面向水下地磁导航的地磁测量 误差补偿方法研究

Research on Geomagnetic Measurement
Error Compensation for Underwater
Geomagnetic Navigation

吴志添 胡小平 吴美平 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

面向水下地磁导航的地磁测量误差补偿方法研究/吴志添,胡小平,吴美平著. —北京:国防工业出版社, 2017. 2

ISBN 978-7-118-10260-4

I. ①面… II. ①吴… ②胡… ③吴… III. ①地磁测量-误差补偿-研究 IV. ①P318.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第023795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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 8½ 字数 140千字

2017年2月第1版第1次印刷 印数1—1500册 定价50.00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

国防科学技术大学惯性技术实验室
优秀博士学位论文丛书
编委会名单

主任委员 胡小平 吴美平

委 员 杨功流(北京航空航天大学)
陈家斌(北京理工大学)
李四海(西北工业大学)
徐晓苏(东南大学)
蔡体菁(东南大学)
刘建业(南京航空航天大学)
赵 琳(哈尔滨工程大学)
胡柏青(海军工程大学)
王跃钢(火箭军工程大学)
吴文启(国防科学技术大学)

秘 书 练军想

序

大学之道，在明明德，在亲民，在止于至善。

——《大学》

国防科学技术大学惯性导航技术实验室，长期从事惯性导航系统、卫星导航技术、重力仪技术及相关领域的人才培养和科学研究工作。实验室在惯性导航系统技术与应用研究上取得显著成绩，先后研制我国第一套激光陀螺定位定向系统、第一台激光陀螺罗经系统、第一套捷联式航空重力仪，在国内率先将激光陀螺定位定向系统用于现役装备改造、首次验证了水下地磁导航技术的可行性，服务于空中、地面、水面和水下等各种平台，有力地支撑了我军装备现代化建设。在持续的技术创新中，实验室一直致力于教育教学和人才培养工作，注重培养从事导航系统分析、设计、研制、测试、维护及综合应用等工作的工程技术人才，毕业的研究生绝大多数战斗于国防科技事业第一线，为“强军兴国”贡献着一己之力。尤其是，培养的一批高水平博士研究生有力地支持了我军信息化装备建设对高层次人才的需求。

博士，是大学教育中的最高层次。而高水平博士学位论文，不仅是全面展现博士研究生创新研究工作最翔实、最直接的资料，也代表着国内相关研究领域的最新水平。近年来，国防科学技术大学研究生院为了确保博士学位论文的质量，采取了一系列措施，对学位论文评审、答辩的各个环节进行严格把关，有力地保证了博士学位论文的质量。为了展现惯性导航技术实验室博士研究生的创新研究成果，实验室在已授予学位的数十本博士学位论文中，遴选出 23 本具代表性的优秀博士学位论文，分成五个专题，结集出版，以飨读者。这五个专题分别是：(1) 激光陀螺惯导系统技术；(2) 地磁导航技术；(3) 嵌入式组合导航技术；(4) 航空重力测量技术；(5) 自主导航理论与方法。

结集出版的目有三：其一，不揣浅陋。此次以专著形式出版，是为了尽可能扩大实验室的学术影响，增加学术成果的交流范围，将国防科学技术大学惯性导航技术实验室的研究成果，以一种“新”的面貌展现在同行面前，希望更多的同仁们和后来者，能够从这套丛书中获得一些启发和借鉴，那将是作者和编辑都倍感欣慰的事。其二，不宁唯是。以此次出版为契机，作者们也对原来的学位论

文内容进行诸多修订和补充,特别是针对一些早期不太确定的研究成果,结合近几年的最新研究进展,又进行了必要的修改,使著作更加严谨、客观。其三,不关毁誉,唯求科学与真实。出版之后,诚挚欢迎业内外专家指正、赐教,以便于我们在后续的研究工作中,能够做得更好。

在此,一并感谢各位编委以及国防工业出版社的大力支持!

吴美平

2015年10月09日于长沙

前 言

长航时高精度自主导航技术是发展水下自主航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)亟待解决的瓶颈技术之一。惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)因其能够提供自主性及全维导航信息而成为 AUV 的核心导航设备。但是,惯性导航系统存在导航误差随时间累积的固有弱点,单独使用难以满足 AUV 的任务需求。地磁匹配导航技术可为 AUV 提供隐蔽性好的外部校正信息源,用以修正 INS 的累积误差,是当前导航技术领域研究的热点。本书紧密结合水下地磁导航技术的发展需求,重点研究了强干扰环境下地磁测量误差补偿、观测数据空间分布对地磁测量误差补偿的影响以及水下惯性/地磁匹配方法等,并通过试验初步验证了研究成果应用的技术可行性。本书的主要研究工作和研究成果总结如下:

(1) 深入分析了地磁测量误差传播特性,对影响地磁测量精度的各类误差源进行了一体化建模。在分析和测试载体动态干扰磁特性变化的基础上,提出一种利用载体的运动约束来提高载体干扰场的稳定性和可补偿性的方法,有效地简化了地磁测量误差在线补偿问题;给出了地磁测量误差补偿算法的框架,可供实际工程中解决相关问题参考。

(2) 给出了基于约束总体最小二乘估计的地磁测量误差补偿方法。本书对传统的地磁测量误差补偿方法进行了分析和改进,针对参数模型线性化过程中地磁测量噪声特性发生改变、噪声相关的特点,采用约束总体最小二乘方法来抑制观测方程两边测量噪声对参数估计的影响,并且充分利用测量噪声之间的相关性,进一步提高了参数估计精度。仿真和车载磁定向试验结果验证了该算法的有效性。

(3) 提出了一种基于伸展粒子群优化策略的地磁测量误差补偿方法。针对参数模型非线性强、公式计算复杂的特点,采用粒子群优化策略进行全局性搜索,避免了解析类优化算法性能依赖于初值的缺点。伸展函数技术嵌入粒子群优化搜索策略,提高了算法跳出局部最优点的能力,增加了算法的全局收敛性和鲁棒性。室内实验和外场试验结果均表明,该算法的参数估计精度要高于现有

的解析类算法。

(4) 采用 D 优化设计方法,实现有限空间约束下的磁力仪转动编排优化。在磁力仪标定过程中,对磁力仪进行多姿态的转动,可以充分激励地磁测量误差,提高模型参数的可辨识度。但是,由于磁力仪捷联在导航载体上,其机动能力受到较大限制,难以完全满足磁力仪的转动要求。D 优化设计是从实验设计的角度出发,在该设计原则下寻找磁力仪在允许的转动空间内的最优编排。仿真试验表明该方法有效减小了地磁观测方程中观测矩阵的条件数,提高了地磁测量误差补偿算法的稳定性。该方法可以指导 AUV 在标定区内的机动航迹规划。

(5) 针对船载三轴磁力仪 (Shipboard Three Component Magnetimeter, STCM) 标定所面临的病态问题,将截断总体最小二乘估计与 L 曲线准则相结合,给出了一种改进的地磁测量误差补偿方法。对船载三轴磁力仪标定问题的病态性进行了深入分析,针对磁力仪特定的安装环境和机动条件,将总体最小二乘解估计进行奇异值分解,并按照 L 曲线准则截除受测量噪声影响较大的解成分,获得稳定的解估计。仿真和试验结果表明,基于该方法的地磁测量误差补偿算法能够有效地减小病态性问题的影响,获得稳定的高精度参数估计。

(6) 提出了一种基于树搜索的水下惯性/地磁匹配定位算法。在详细分析现有地磁匹配算法的基础上,结合补偿后的地磁测量信号特性和 AUV 运动特性,采用误差有界的思想描述地磁测量信号的误差以及惯性导航误差,并将地磁匹配定位问题转化为树搜索问题,进而采用宽度优先搜索策略和相关匹配准则搜索得到最佳匹配轨迹。水下 AUV 搭载试验结果表明,采用本书所给出的地磁测量误差补偿方法对地磁场数据进行处理后,偏差能降至 10nT 的量级;基于树搜索的地磁匹配导航算法能够有效修正 AUV 的位置误差,位置均方根误差由修正之前的 2.5km 减小到 139m。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究进展	3
1.2.1 地磁导航技术研究现状	3
1.2.2 地磁传感器技术研究现状	6
1.2.3 地磁测量误差补偿技术研究现状	7
1.3 本书拟解决的主要问题	9
1.4 本书的研究内容与组织结构	11
第 2 章 地磁测量误差补偿问题综合分析	13
2.1 地磁场基本理论	13
2.1.1 地磁要素	13
2.1.2 地磁场组成与地磁场模型	14
2.2 地磁测量误差分析与建模	17
2.2.1 仪表误差分析	17
2.2.2 载体干扰磁场误差分析	18
2.2.3 地磁测量误差综合建模	19
2.3 载体干扰磁场动态特性测试	21
2.3.1 惯性导航系统磁场特性测试	21
2.3.2 AUV 磁场特性测试	24
2.3.3 测试结论	25
2.4 地磁测量误差补偿算法分析	25
2.4.1 姿态独立标定原理	26

2.4.2	算法影响因素分析	27
2.5	本章小结	28
第3章	约束总体最小二乘地磁测量误差补偿方法	29
3.1	引言	29
3.2	约束总体最小二乘算法	30
3.3	仿真试验结果	33
3.4	车载磁定向导航试验	37
3.5	本章小结	42
第4章	伸展粒子群优化地磁测量误差补偿方法	43
4.1	引言	43
4.2	伸展粒子群优化算法	44
4.2.1	粒子群优化(PSO)算法	44
4.2.2	伸展粒子群优化(SPSO)算法	46
4.2.3	SPSO与PSO对比	47
4.3	实验室试验结果	49
4.4	基于AUV的外场试验	54
4.5	本章小结	59
第5章	基于D优化设计方法的磁力仪标定编排优化	60
5.1	引言	60
5.2	D优化设计方法	61
5.2.1	问题描述	61
5.2.2	D优化设计	63
5.3	D优化设计问题求解	64
5.4	仿真试验结果	65
5.5	本章小结	71
第6章	病态情况下地磁测量误差补偿方法	72
6.1	引言	72

6.2	船载磁测误差补偿病态问题	72
6.2.1	病态问题的基本概念	72
6.2.2	船载三轴磁力仪标定的病态问题分析	74
6.2.3	正则化方法选取	77
6.3	截断总体最小二乘方法与 L 曲线准则	79
6.3.1	总体最小二乘方法	79
6.3.2	截断总体最小二乘方法	80
6.3.3	基于 L 曲线准则的正则化参数确定	80
6.3.4	算例分析	81
6.4	仿真实验验证	82
6.5	船载试验验证	85
6.6	本章小结	88
第 7 章	水下地磁匹配导航试验	89
7.1	引言	89
7.2	地磁匹配算法	89
7.2.1	地磁匹配原理	89
7.2.2	现有地磁匹配方法的局限性	90
7.2.3	基于树搜索的地磁匹配算法	91
7.3	惯性/地磁匹配组合导航系统样机	94
7.3.1	系统样机的组成	94
7.3.2	系统样机软件设计	95
7.4	试验航迹规划	96
7.5	水下搭载试验结果	99
7.5.1	地磁测量误差补偿结果	99
7.5.2	地磁匹配定位结果	101
7.6	本章小结	103
第 8 章	结论与展望	105
8.1	总结	105
8.2	研究展望	106

附录 A 系数矩阵 $F_i (i=1,2,\dots,10)$ 的表达式	108
附录 B 牛顿迭代法中梯度和 Hessian 矩阵的推导	110
参考文献	112

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

水下自主航行器 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) 作为探索和开发海洋的一种重要工具,在军用和民用方面都有很大的需求和应用前景。军事方面如战区水域侦察、探雷扫雷、海上预警、航线封锁、水下通信中继等;民用方面如海洋资源勘察与开发、海底地形地貌勘测以及海洋救援等^[1]。目前,美国、英国、德国、法国、加拿大、俄罗斯、日本、韩国、澳大利亚等国已有较多的机构和人力投入到 AUV 的研究和开发,并且产品已进入系列化、商业化阶段^[2]。

就发展现状而言,长航时、高精度、隐蔽性好的水下自主导航技术仍然是 AUV 所面临的主要技术挑战之一。现存的各种水下导航技术,如惯性导航、声学导航、地形匹配导航等,在一定程度上能够满足民用的需求,但不能很好地满足军事应用需求。惯性导航系统以其自主性强、隐蔽性好、短期精度高、可提供全天候、连续实时导航信息等优点成为 AUV 的首选。但是,由于惯性导航系统误差随时间累积,如果没有其它辅助信息及时修正其累积的导航误差,则难以满足 AUV 在长时间航行状态下对导航精度的要求。“惯性导航系统 + 多普勒测速仪”是目前国内 AUV 常用的组合导航方案,但由于受捷联惯性导航系统和多普勒测速仪自身性能等诸多因素的制约,这类组合导航系统的精度也只能保持在航程的千分之几的水平,不能满足远程 AUV 的需求。部分 AUV 采用“惯性导航系统 + 卫星导航定位接收机”组合导航方案,该方案虽然可以满足长航时高精度要求,但必须以降低潜航深度和牺牲隐蔽性为代价,这对于军用 AUV 是非常不利的。

地球磁场具有无源、稳定、与地理位置有对应关系等特点,这为航空、航天、航海提供了天然的导航资源,因此,地磁匹配导航技术就成为导航技术领域研究的热点。地磁匹配导航的基本原理是:利用安装在载体上的地磁传感器实时测量地磁数据,通过匹配算法将实测数据与事前获取的基准数据库(地磁图)进行匹配,确定出载体的位置信息。近年来,随着水下航行器、高空巡航飞行器、无人飞行器的发展,地磁匹配导航技术得到迅速发展和应用,如中低轨道卫星磁导航定位^[3-7]、飞行器姿态控制^[8-11]等。从原理上看,地磁匹配导航误差不随时间

累积,但是难以提供连续实时的导航信息。此外,地磁匹配导航受到地磁图空间分辨率、地磁测量精度等因素的制约,匹配定位精度不高,目前只能达到100m量级。若将惯性导航系统与地磁匹配导航系统进行组合,构成组合导航系统,利用地磁场匹配定位误差的有界性,定期校正惯性导航系统的累积误差,则可以获得长航时高精度的导航结果。因此,惯性/地磁组合导航系统有望成为理想的水下自主导航系统。惯性/地磁组合导航技术的主要优点归纳如下^[12-20]:

(1) 地磁场是地球固有的矢量场,无论在高空、地面还是水下,都可以探测到地磁信息。

(2) 地磁导航具有多个特征量,如总磁场强度、磁偏角和磁倾角等参量,可同时提供方向信息和位置信息。

(3) 地磁测量具有良好的隐蔽性。地磁测量是被动的,其与惯性导航系统组合可以保持很好的隐蔽性,可避免AUV因浮出水面接收卫星导航信号导致自身的暴露。

(4) 惯性/地磁组合导航系统保持了纯惯性导航设备全天候、连续导航的特点,且可靠性高。

(5) 惯性/地磁组合导航系统精度高。它不仅能够为载体提供姿态、航速、航向和位置等高精度导航信息,而且可以克服纯惯性导航系统的导航误差随时间积累的弱点。

(6) 与重力仪和重力梯度仪相比,磁力仪成本低、重量轻,为构成低成本高精度组合导航系统提供了一条新的技术途径。

目前,制约地磁匹配导航技术发展和应用的三个主要因素:①高精度地磁参考数据库难以获取;②动态环境下地磁测量误差较大;③地磁匹配导航算法复杂。这三个因素均与地磁测量误差补偿效果密切相关。地磁测量技术是地磁匹配导航的基础,它的精度直接影响导航精度。因此,研究新的地磁测量误差补偿理论和方法,对于提高地磁匹配导航精度具有重要意义。

地磁测量主要利用地磁传感器(磁力仪)完成。目前磁力仪的标称性能指标可以达到地磁匹配导航的精度要求,但是磁力仪容易受到载体环境误差源的干扰,致使测量精度受到严重影响。地磁测量误差源主要分为两类,一类是由传感器自身结构、材料和电路传输引起的误差,称为仪表误差,这类误差理论上可以通过磁力仪事前标定来补偿;另一类是外部干扰磁场的叠加影响,称为磁干扰场误差,这类误差一般通过误差建模进行实时补偿。在实际使用中,磁力仪的仪表误差与磁干扰场误差互相影响,共同作用于磁力仪并一直贯穿于整个测量过程。由于上述两类误差是高度耦合的,目前的主流方法是将二者进行统一补偿。基本思路是:首先深入分析磁力仪仪表误差和磁干扰场在测量过程中的传播特

性,在此基础上构建完备的参数化测量误差补偿模型,最后根据优选的观测数据对模型参数进行估计。

观测数据的噪声特性以及空间分布对参数估计具有重要的影响。由于磁力仪捷联安装在载体上,其所处的磁场环境非常复杂,并且地磁场测量容易受到干扰,导致地磁场测量数据混合了大量的干扰信号,信噪比较低。现有的地磁测量误差补偿算法对测量噪声的描述和处理均较为简单,与实际的测量情况不甚相符,在一定程度上影响了地磁测量误差的补偿效果。

另一方面,载体有限的机动能力限制了磁力仪的标定转动编排。有效的转动编排能够充分激励地磁测量误差,获得空间分布合理、具有代表性的观测数据,进而可以提高参数估计精度。但是由于 AUV 在水下的机动受到一定的限制,使得磁力仪不能进行全空间的转动,致使观测数据局限在有限的空间分布范围内。因此,研究如何在有限的转动空间条件下进行转动编排优化,对于提高地磁测量误差补偿算法的鲁棒性和误差补偿精度具有重要意义。此外,在航空、航海地磁测量中,载体的机动能力更弱,致使误差参数不能被充分激励,地磁测量误差补偿面临新的难题——病态问题。此时,观测值的微小变化,就会导致误差参数的估值发生“巨大”的相对变化^[21-22]。为此,很有必要研究地磁测量误差补偿的病态问题,以改善在病态条件下误差参数的估计精度。

地磁测量数据作为地磁匹配算法的输入,其测量精度将很大程度影响地磁匹配的精度。为了提高地磁匹配精度,有必要研究地磁测量误差对地磁匹配算法的影响。从另一个角度讲,地磁匹配算法应该对地磁测量误差有一定的容忍度。为此,基于目前可达到的地磁测量误差补偿水平,研究与之适应的鲁棒性好的地磁匹配算法,是很有必要的。

本书以远程 AUV 为应用背景,致力于解决地磁测量误差补偿的理论和工程应用问题,研究成果也可以为解决航空航海磁法勘探中的补偿问题提供新的技术途径和参考。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 地磁导航技术研究现状

地磁导航很早就有应用,我国古代“四大发明”中的指南针,正是利用地磁场南北指向特性来辨别方向和指引道路,但这只是地磁导航最简单的应用。现代地磁导航技术的研究始于 20 世纪 60 年代。国外学者首先提出地磁导航的概

念,探讨了利用地磁场总场值的等值线图进行导航的原理和方法,并展开相关的研究。同期,美国 E - Systems 公司在水面上验证了利用地磁场进行制导的构想,研究出了基于地磁等值线约束的 MATCOM (Magnetic Contour Matching) 系统。

20 世纪 70 年代,苏联 Ramenskoye 设计公司以地磁场强度作为特征量,采用磁通门传感器,运用地磁场等值线匹配导航方式进行了离线试验,MAGNET 项目试验成功^[23]。但是,受到磁传感器技术与地磁图(尤其是海洋地区)精度的制约,地磁导航没有迅速发展和获得广泛应用。

20 世纪 80 年代,瑞典开始研究地磁导航技术。Carl Tyren (Lund Institute of Technology) 介绍了利用地磁异常进行测速定位的方法,并进行了海上试验,提出了“Magnetic Terrain Navigation”的概念。Carl 在试验中采用了两个标量地磁传感器并且按阵列排布,与载体的姿态信息融合进行导航(即确定传感平面与当地水平面的夹角)。这样在匹配过程中可以进行二维匹配,能够有效地提高匹配精度^[12, 24]。

地磁导航技术已经成功应用于低轨道卫星导航领域。1989 年,美国康奈尔大学的 Psiaki 等人首先提出利用地磁场信息确定低轨卫星轨道的概念,地磁导航开始成为航天器导航新的研究方向^[6,7]。Psiaki 领导的科研小组对基于地磁导航方法进行了深入的研究,提出了扩展卡尔曼滤波、最小二乘法等算法,利用卫星测量数据进行了离线试验。研究结果表明,如果结合卫星的姿态信息,那么系统的导航精度可以达到 10 ~ 35 km。随后, Psiaki 等人研究地磁传感器与其它传感器组合用于低轨卫星导航的可行性。在文献[4]中,三轴磁力仪与三轴星敏传感器组合,仿真试验能得到 0.3 km 的精度。文献[3]则用太阳敏传感器代替星敏传感器,利用卫星实测数据仿真,指出测量精度为 10 nT 的三轴磁力仪与精度为 0.005° 的太阳敏传感器组合,系统可以达到 0.5 km 的定轨精度。同期, Barltzhack^[25] 和 Wiegand^[26] 也展开了类似的研究,得到低轨卫星地磁导航精度范围在 8 ~ 125 km, 并指出地磁导航的精度依赖于地磁场模型精度和地磁测量精度。Mohammad^[27] 等基于全球地磁模型 WMM2005, 分析了仅使用磁传感器进行低轨卫星导航的情况。他们重点研究了全球地磁模型的阶数对导航精度的影响,假定以 12 阶的磁场模型导航的轨迹作为基准,则采用 4 阶和 6 阶模型导航的轨迹误差分别小于 5.6% 和 1.4%, 这个结论对于选取模型的截断阶次具有指导意义。

地磁导航的应用领域正逐步从卫星导航扩展至空中导航和 underwater 导航。2003 年,美国国防部军事关键技术列表中提到地磁数据参考导航系统,他们所研制的

纯地磁导航系统的导航精度为:地面和空中定位精度优于30m(CEP);水下定位精度优于500m(CEP)^[28]。

2006年,美国 Goodrich 公司发表了他们对地磁辅助导航技术的研究成果^[29]。他们以飞机为应用对象,利用高精度磁通门传感器测量地磁矢量,然后与地磁图进行三维相关匹配,从而确定载体的位置。他们还分析了地磁图的制作方法 with 误差,探讨了地磁测量值的实时校正问题。J. F. Vasconcelos^[30]利用地磁矢量和重力矢量修正惯托导航的姿态信息,利用 GPS 修正惯托导航的位置和速度信息,仿真结果表明该组合系统能够有效地修正低精度惯托导航系统的累积误差,从而提高导航精度。John M. Wilson^[31]利用局部地磁异常图和实测地磁异常值经过匹配获得位置更新,算法同时估计风速和风向参数。文中没有给出具体匹配或组合导航的细节,主要介绍了飞行试验和试验结果。飞行试验1h内的定位误差在600~1200m,并指出,如果进一步消除飞机磁场对测量的影响,导航精度可达到200~300m。

俄罗斯也在地磁导航应用方面获得了实质性进展,在2004年进行的“安全-2004”演习中,俄罗斯试射的SS-19导弹可沿大气层边缘平行于水平线飞行,使敌方导弹防御系统无法准确地预测来袭导弹的弹道,专家分析认为这可能使用了地磁场等高线匹配制导技术^[32]。

近20年来,随着微电子技术、计算机技术、磁探测等技术的迅猛发展,国内的地磁导航技术研究迅速发展,已成为当前导航技术领域研究的热点之一。

2002年,国防科技大学吴美平等提出利用三轴磁强计确定卫星轨道,并通过仿真试验,得出地磁导航满足低轨卫星中等精度要求的结论^[33]。西安交通大学的赵敏华将地磁导航系统与雷达高度计等导航系统组合,并利用我国某卫星实测数据进行了仿真试验研究,也得到类似的结论^[34-36]。哈尔滨工业大学的杨旭^[37-38]等将地磁场模型的不确定性扩展为滤波器的状态,在进行滤波定轨的同时修正地磁场模型的高斯系数,仿真结果显示,基于模型修正的地磁导航定位效果较无模型修正的提高了一个量级。

航天科工集团三院的李素敏等运用平均绝对差法对地面所测量的地磁强度数据进行了匹配运算,在一定程度上验证了地磁匹配的可用性^[39]。西北工业大学的晏登洋^[40,41]等针对多数地磁导航系统完全采用图匹配方式的精度问题,改进了惯性/地磁匹配组合方案,增加地磁偏角和地磁倾角的信息,取得了较高的导航精度。周军^[16,42,43]等针对地磁导航在巡航导弹的应用展开仿真研究,他们以全球地磁场模型为参考,重点分析模型阶次对导航精度的影响,指出该导航方式可用于巡航导弹初、中制导段的自主导航。国防科技大学的蔡洪^[14,44,45]等采用局部地磁场模型对飞航导弹进行地磁辅助导航仿真研究,得到了更高的定位