

东华理工大学科研团队

国家海洋局第二海洋研究所所长基金 (JG-1508) 资助

江西省自然科学基金 (20161BAB206163)

SHUIXIA DICI PIPEI DAOHANG DINGWEI GUANJIAN JISHU YANJIU

水下地磁匹配导航定位 关键技术研究

王胜平 赵建虎 吴白银 著

非外借



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

东华理工大学科研团队

国家海洋局第二海洋研究所所长基金(JG - 1508)

江西省自然科学基金(20161BAB206163)

资助

水下地磁匹配导航定位 关键技术研究

SHUIXIA DICHI PIPEI DAOHANG DINGWEI GUANJIAN JISHU YANJIU

王胜平 赵建虎 吴自银 著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

图书在版编目(CIP)数据

水下地磁匹配导航定位关键技术研究/王胜平,赵建虎,吴自银著. —武汉:中国地质大学出版社,2017.3

ISBN 978-7-5625-4015-1

I. ①水…

II. ①王…②赵…③吴…

III. ①水下航行-地磁导航-研究

IV. ①U675.5②TN96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 053002 号

水下地磁匹配导航定位关键技术研究

王胜平 赵建虎 吴自银 著

责任编辑:舒立霞

责任校对:周旭

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路388号) 邮编:430074

电 话:(027)67883511 传真:(027)67883580 E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店 <http://cugp.cug.edu.cn>

开本:787毫米×960毫米 1/16

字数:196千字 印张:10

版次:2017年3月第1版

印次:2017年3月第1次印刷

印刷:武汉市籍缘印刷厂

印数:1—500册

ISBN 978-7-5625-4015-1

定价:50.00元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

水下导航定位系统性能是衡量水下潜航器性能的重要指标之一。尤其是以潜艇为代表的军用水下潜航器,对水下导航定位系统在自主性、无源性以及精度等方面提出了更高的要求。

现有导航方法中,全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System,简称 GNSS)因信号在水下衰减快而无法应用;声学导航需向外界发射或接收声信号,隐蔽性差;地形匹配导航因需采用声呐获取地形信息,同样易暴露;重力匹配导航则由于海底重力变化特征较为平缓,特征量较少,导航精度和可靠性相对较低,因此上述导航方法难以满足水下潜航器导航需要。惯性导航系统(Inertial Navigation System,简称 INS)具有自主、无源导航的特点,但其定位误差会随时间积累,难以满足载体长时间精密水下导航需要。地磁匹配导航以地球固有物理特征地磁为匹配对象,通过线图匹配实现导航,具有无源、隐蔽性强和匹配特征明显等优点,可以实现对 INS 积累误差的修正,是一种极佳的辅助 INS 水下导航手段。因此,研究以惯性导航为主,地磁匹配导航为辅的水下组合导航技术,可以满足水下潜艇导航对精度和隐蔽性的双重要求,也成为目前的研究热点。

地磁匹配导航技术目前尚不成熟,国际上仅少数国家具备地磁匹配导航系统研制能力,但尚处于试验阶段。我国在该方面还处于基础理论研究阶段,完整的地磁匹配导航系统尚未出现。因此,对水下地磁匹配导航开展深入研究显得非常必要和迫切。

为此,本书在分析国内外研究现状的基础上,开展了如下研究。

1. 海洋地磁数据测量与数据处理

地磁测量及数据处理是地磁匹配导航中背景场建立和实测地磁序列准确获取的基础。本书以局部船载实测海洋地磁数据作为研究对象,首先给出了船载海洋地磁测量系统的组成。并在此基础上,介绍了船载海洋地磁测量及数据获取流程。

针对已获取的实测海洋地磁数据,开展了手工编辑与 FFT 低通滤波相结合的地磁数据质量控制、日变改正、八方位船磁模型改正等海洋地磁数据处理研究,进而获得了稳定的地磁场强度数据。在此基础上,结合国际标准参考地磁场(International Geomagnetic Reference Field,简称 IGRF)模型,准确计算了地磁

异常值。最后,采用交叉点以及重复测线,对测量精度进行评定,为地磁匹配导航提供了准确而稳定的地磁数据。

2. 局域海洋地磁场模型建立

地磁背景场模型是水下地磁匹配导航的参考场。鉴于 IGRF 以及中国地磁参考场模型(Chinese Geomagnetic Reference Field,简称 CGRF)精度较低,难以满足匹配导航精度需求的现状,本书采用船载实测局部海洋地磁强度数据,探讨了泰勒多项式、勒让德多项式、多面函数、样条函数、矩谐分析、球冠谐分析等局域海洋地磁场建模理论。其中,对不同建模方法最优模型参数的确定、不同分辨率数据对背景场模型精度的影响、特征地磁量与地磁背景精度的关系以及分区建模等关键问题进行了深入研究。通过实验分析,对于 1:10 000 海洋地磁测量数据,实现了优于 5nT 的地磁背景场模型精度。并通过对上述模型精度进行比较,最终确定了分区多面函数法作为最优局域海洋地磁场模型建立方法。

3. TERCOM、ICCP 地磁匹配导航算法及改进

匹配算法是地磁匹配导航的核心。在研究 TERCOM(Terrain Contour Matching)、ICCP(Iterative Closest Contour Point)的基础上,分析这两种算法的局限性,认为导致 TERCOM 匹配导航精度较差的原因在于仅顾及了平移变换而未考虑 INS 角误差引起的旋转变换;引起 ICCP 易出现局部收敛原因在于初始位置偏差过大。据此,提出了自适应角度探测 TERCOM 改进算法、预平移 ICCP 改进算法,显著地削弱了上述问题的影响。

在此基础上,根据 TERCOM 与 ICCP 在精度及速度上的互补性,研究了一种基于 TERCOM 与 ICCP 联合的地磁匹配导航算法。该算法实验结果表明,在背景场精度小于 5nT、实测地磁序列误差小于 2nT 时,导航精度小于 200m。同时联合算法导航时间仅为传统 TERCOM 算法的 1/2,ICCP 算法的 1/6,提高了导航速度。

4. SITAN 地磁匹配导航算法及改进

SITAN(Sandia Inertial Terrain Aided Navigation)算法采用单一点就可以实现定位,实时性强。但稳定性差,容易产生滤波发散。基于此,本书研究了基于改进 TERCOM 与 ICCP 辅助的 SITAN 改进算法。极大地改善了 SITAN 算法在初始位置误差过大时,滤波收敛慢或容易滤波发散的缺陷。

5. 海洋地磁匹配导航误匹配诊断

由惯导误差过大、地磁背景场变化平缓以及算法自身等原因引起的匹配导航结果与真实位置偏差过大,称之为误匹配。误匹配严重影响着水下地磁匹配导航的精度和可靠性,且在深海环境下无法采用外部导航手段进行诊断。

为此,本书在分析了误匹配产生机理的基础上,研究并提出了一种基于相似度极值探测的 TERCOM 误匹配诊断技术,以及基于 M 值与角度结合的 ICCP 算法误匹配探测方法。针对 SITAN 算法出现的误匹配,给出了以稳健的 TERCOM 与 ICCP 匹配结果为参考,辅助检测误匹配的思想。借助 INS 外源信息,提出了一种基于距离和角度约束的误匹配综合诊断和修正方法,在实现现有 3 种导航算法误匹配综合诊断的基础上,可将 TERCOM 误匹配修复至 2 倍格网长度以内。

6. 导航区域适配性能分析及适配航向选择

地磁背景场变化特征也是影响匹配导航精度及稳定性的重要因素。因此,潜航器导航前,对航行区适配性能进行分析尤为重要。本书采用熵、粗糙度等统计参量,实现了对匹配区地磁变化特征的描述,并结合匹配试验对其显著性进行分析,进而实现了适配区性能分析。在此基础上,提出一种基于地磁共生矩阵适配航向的确定方法,实现了水下潜航器在 0° 、 45° 、 90° 、 135° 4 个角度中最优航向的选择。

7. 水下地磁导航系统组成及误差分析

研究了地磁匹配辅助 INS 水下组合导航系统的组成、配置以及各单元的功能。分析了影响组合导航系统导航精度的误差源。

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 研究背景及意义	(1)
第二节 国内外研究现状	(4)
一、地磁匹配导航系统研究现状	(4)
二、地磁匹配导航相关理论算法研究现状	(5)
第三节 研究内容及章节安排	(9)
第二章 海洋磁力测量与数据处理	(11)
第一节 海洋地磁测量	(11)
一、系统组成	(11)
二、测量比例尺和测线布设	(13)
三、海洋磁力测量	(14)
第二节 海洋地磁数据处理	(15)
一、地磁数据质量控制	(16)
二、日变改正	(18)
三、船磁模型建立及改正	(19)
四、拖鱼归位计算	(20)
五、地磁场总强度计算	(22)
六、磁异常计算	(23)
七、地磁测量精度综合评估	(24)
第三节 本章小结	(25)
第三章 局域海洋地磁场模型建立	(26)
第一节 Taylor 多项式建模	(26)
第二节 Legendre 多项式建模方法研究	(31)
第三节 样条曲面建模方法研究	(36)

第四节	多面函数建模方法研究	(41)
第五节	球冠谐和分析建模方法研究	(46)
第六节	矩谐分析建模方法研究	(53)
第七节	建模方法比较及最优建模方法	(59)
第八节	本章小结	(60)
第四章	TERCOM、ICCP 地磁匹配导航算法及改进	(61)
第一节	TERCOM 算法及改进	(61)
一、	TERCOM 算法基本原理	(61)
二、	基于自适应角度探测机制的 TERCOM 算法改进	(63)
三、	关键技术研究	(64)
四、	试验及分析	(66)
第二节	ICCP 算法及改进	(68)
一、	ICCP 算法基本思想	(68)
二、	ICCP 地磁匹配导航的实施过程	(72)
三、	ICCP 算法局限性	(72)
四、	预平移 ICCP 算法	(75)
第三节	基于改进 TERCOM 与 ICCP 联合的高精度导航算法	(77)
一、	改进 TERCOM 算法及其性能	(77)
二、	改进 ICCP 算法	(78)
三、	改进 TERCOM 与 ICCP 联合匹配导航算法实施过程	(79)
四、	实验验证与算例分析	(81)
第四节	本章小结	(83)
第五章	SITAN 地磁匹配导航算法及改进	(84)
第一节	SITAN 算法的基本原理	(84)
第二节	SITAN 算法的局限性	(88)
第三节	改进的 SITAN 匹配导航方法	(89)
一、	SITAN 实时导航改进原理	(90)
二、	改进 SITAN 导航算法可靠性分析	(91)
三、	改进 SITAN 导航算法实施过程	(92)
四、	实验验证与算例分析	(93)

第四节	本章小结	(95)
第六章	海洋地磁匹配导航误匹配诊断	(96)
第一节	误匹配特点分析	(96)
一、	INS 初始误差过大引起的误匹配	(96)
二、	地磁变化平缓或相似性较大区域	(98)
三、	航迹沿等值线梯度方向分布	(99)
第二节	基于相似度极值探测的 TERCOM 误匹配诊断	(100)
第三节	基于 M 值与角度联合的 ICCP 误匹配判断法	(102)
第四节	SITAN 匹配算法中的误匹配诊断	(103)
第五节	基于 INS 信息的误匹配综合诊断和修复	(103)
一、	误匹配综合诊断原理	(104)
二、	误匹配综合诊断算法的实施流程	(106)
第六节	实验验证及算例分析	(107)
第七节	本章小结	(111)
第七章	导航区域适配性能分析及适配航向选择	(112)
第一节	导航区域适配性分析	(112)
一、	地磁特征表述统计参量	(113)
二、	特征参量显著性分析	(114)
第二节	基于共生矩的适配航向确定	(118)
一、	地磁共生矩阵建立原理	(118)
二、	基于地磁共生矩的水下地磁匹配导航适配航向确定	(120)
三、	试验验证	(123)
第三节	本章小结	(125)
第八章	水下地磁匹配系统组成及误差分析	(126)
第一节	地磁匹配导航系统	(126)
一、	地磁匹配导航原理	(126)
二、	惯导系统	(128)
三、	磁测仪	(129)
四、	背景场	(129)

五、压力传感器	(130)
六、匹配算法	(130)
第二节 水下地磁匹配导航系统误差源	(130)
一、INS 误差	(130)
二、地磁背景场误差	(132)
三、实测地磁数据误差	(133)
四、地磁匹配导航算法误差	(134)
第三节 本章小结	(135)
第九章 总结及展望	(136)
第一节 本书总结	(136)
第二节 需进一步研究的问题及展望	(138)
主要参考文献	(139)

第一章 绪论

第一节 研究背景及意义

随着陆地资源的消耗,近年来我国对海洋资源开发和海洋工程建设力度愈来愈大,应用于海底管线探测、水下沉船打捞以及水下资源勘探等领域的水下潜航器[如 ROV(Remote Operated Vehicle),AUV(Autonomous Underwater Vehicle)]的研究得到了快速发展。同时在军事应用方面,潜艇在整个战略威慑中的地位也越来越重要。随着艇载导弹发射精度和水下工程精密性要求的提高,水下潜航器自身对位置的精度要求也就越来越高,尤其是在长时间、远距离、深海条件下航行时,如何获取高精度的载体自身位置也成为水下潜航器最主要的性能指标。世界各国均在水下潜航器导航方面进行了大量的研究,并诞生了一系列导航手段。

现有的导航手段如 GPS、声学导航定位系统等,大多由于隐蔽性较差或者水下信号衰减速度过快而难以很好地满足目前水下载体导航的需要。

(1)GNSS,是目前主要的导航设备,具有精度和采样率高以及提供的导航参数全面等显著优点。然而对于水下运动载体,由于电磁波信号在水中衰减很快,GNSS 难以应用于水下潜器的导航定位。针对这一缺陷,我国相关部门研制了由 GPS 与超短基线相结合的水下 GNSS 定位系统。经过南海实地海试,水下 GNSS 系统精度达到了 30cm。但水下 GNSS 导航定位系统的缺陷也非常明显,该系统必须采用母船装载超短基线阵列和水上的 GNSS 设备,因此其目标易暴露,作用范围有限,这些特性也成为了全天候、长距离隐蔽性水下载体导航发展的制约因素。

(2)INS,是目前水下运动载体的主导航手段。INS 采用惯性陀螺、加速度计等设备实现了载体的无源自主导航,不需要与外界发生任何联系,但其误差会随时间积累。如果不对该误差进行定期和有效修复,随着时间的积累,载体位置偏差将可能达到几千米甚至几十千米,难以满足潜艇长时间航行的需要。因此,发展以惯导为主,多手段辅助导航系统成为水下导航定位系统的发展方向。

(3)地形匹配导航,是一种辅助导航手段,借助地形匹配获取载体当前位置,并实现对 INS 积累误差的修正。20 世纪 80 年代地形匹配导航就开始投入实际应用(Kamgar - Parsi B et al,1989)。由于地形匹配导航需要背景图中包含较为明显的地形特征,因此对于海面、海底平原、沙漠等地形变化较为平缓的区域,地形导航基本无能为力。同时,水下地形的获取主要依赖声呐系统,因此其隐蔽性差,容易被对方的反潜手段捕获,从而暴露自身,严重威胁到潜艇的安全。

(4)水下景象匹配和地貌匹配,水下景象或地貌图像包含了更为丰富的特征信息,因此匹配精度及稳定性更高。而水下景象的获取,主要依赖近海底的水下摄像手段。目前战略核潜艇的下潜深度主要在 300~600m 之间,而在大多数深海水域受光线以及下潜深度的影响,潜艇很难实现水下摄像;另一方面,水下地貌的获取主要依赖侧扫声呐,也存在隐蔽性差的缺陷。

(5)水下重力匹配辅助导航,重力匹配具有无源导航的优点,但由于水下重力变化较为平缓,重力特征较少,因此在潜艇航行路径上所能应用于导航的目标较少,必然引起匹配导航的稳定性较差,同时导航所需的航迹长度较长。对于航行速度较慢的水下潜艇来说实现一次导航就需要非常长的时间(Behzad Kamgar - Parsi et al,1999)。

通过对现有导航系统的性能分析,不难发现,对于外界环境以及无源性要求更高的水下运动载体导航,目前现有的任何单一导航系统均不能满足其需要。因此,发展以 INS 为主,其他手段为辅的导航成为水下载体导航的主要研究方向。尽管现有的地形、景象匹配以及重力辅助 INS 系统取得了很大的进展,也得到了较好的匹配精度,但也存在一些自身无法规避的缺陷。因此,为弥补现有辅助导航系统的缺陷,以及增加导航系统的可靠性,研究具有无源性、高隐蔽性以及高精度的水下载体辅助 INS 导航系统具有重要的意义。

地磁作为地球的一种基本地球物理学特征,其形成和发展伴随着地球的形成和演变过程,主要部分来源于地核,小部分起源于地球周围空间的电流体系。正是这种与地球一衣带水的关系,决定了它存在于地球的每一个角落;同时地磁场是一个矢量场,是空间位置和时间的函数,不同的位置对应不同的地磁要素值,这些特征均为地磁作为匹配源进行导航提供了很好的基础。地磁场包含 7 个要素,这些要素均可以作为匹配源,保证了匹配的多样性和稳定性。同时地磁要素获取不需要发送或接受任何外源信号。不难看出,地磁具有解决现阶段导航缺陷的一系列优点。为此,近年来,地磁匹配导航引起了国内外导航专家的广泛关注。

地磁辅助惯性组合导航系统是以惯性导航为核心、地磁匹配为辅助的综合导航系统,其基本原理是预先测量载体航行区域范围内的地磁场要素,用于建立

地磁背景场模型,并将模型存入计算机中;当载体在该区域内航行时,利用惯性导航系统为载体提供概略位置,同时在载体上将实测地磁传感器所测地磁要素值与地磁背景参考图进行匹配,从而计算出载体的精确位置,最终达到修正 INS 误差的目的。围绕整个匹配过程需要开展地磁背景场模型的建立、地磁匹配导航算法的研究、误匹配研究、地磁匹配区划分以及地磁误差综合分析等一系列研究。

本研究具有如下意义:

(1)地磁辅助惯性导航系统中,无论是惯性导航系统还是地磁要素测量均不需要任何外来信息,也不需要向外辐射任何信息,仅依靠本系统自身即能够在全天候条件下实现自主、隐蔽、连续三维空间定位和定向,解决了目前导航手段应用于潜艇导航时隐蔽性差的缺陷。

(2)由于地磁场是地球的固有资源,也是显著的地球物理学特征之一,存在于地球的任何一个角落,在海面、沙漠以及水下地形较为平坦的地区均包含有丰富的特征信息。这一特点解决了地形、景象匹配时,无法覆盖海洋表面以及沙漠等特征较少区域的缺陷,丰富了现有匹配导航手段,增强了导航的稳定性。

(3)INS 导航误差会随时间而积累,无法实现潜艇长时间续航的要求。而地磁匹配导航过程中,以包含准确位置信息的实测地磁背景数据为模板,因此不存在误差随时间积累现象,可以很好的对 INS 误差进行修正,保证了导航的准确性。

(4)相对地形、重力等地球其他固有物理属性,地磁变化较为剧烈,其所包含的特征信息更为丰富。这一特点为匹配导航的精度以及稳定性提供了非常可靠的保障。同时匹配特征量的增加大大缩小了导航所需要的序列长度,提高了导航效率。

(5)地磁匹配导航系统的完整实现需要一系列的数据处理流程,其中包括地磁数据滤波、地磁场模型建立、地磁异常计算、地磁日变改正以及船磁模型的建立等。这一套数据处理流程的实现既可以应用于军事用途的潜艇导航、电磁对抗等领域,也可以在海底管线探测、沉船打捞以及地质物探等海洋工程领域发挥极其重要的作用。

总之,随着空间技术的飞速发展,地磁学与测绘学、空间物理学的交叉与综合不断加强,地磁在导航定位、战场电磁对抗以及水下工程等领域展现出巨大的应用潜力。尤其是地磁制导技术与惯性导航系统组合使用方面,可以校正惯性导航系统远程导航与制导中的积累误差,提高导弹和巡航鱼雷的命中率,同时为水下潜航器导航提供了一种新的导航手段,增强了现有水下导航系统的稳定性和隐蔽性。围绕地磁匹配导航所开展的一系列研究在军事应用、水下工程等领域将发挥愈来愈重要的作用。

第二节 国内外研究现状

海洋地磁匹配导航是近年来新发展起来的一项辅助 INS 导航技术,可为水下潜艇、AUV、ROV 等水下自制潜航器提供导航服务(John J Leonard et al, 1998; John B Philips, 1996; Kildishev A V et al, 1999)。地磁匹配导航系统可对 INS 积累误差进行修正,且具有无源、隐蔽性强、导航精度高等优点,近年来引起了国内外学者和导航界的广泛关注。

一、地磁匹配导航系统研究现状

在我国古代的宋朝就出现了以指南针为代表的地磁匹配导航系统,并作为一种很好的导航手段沿用至今。

20 世纪 60 年代末,美国的 E-Systems 公司推出了基于地磁异常场等值线匹配的 MAGCOM(Magnetic Contour Matching)系统,从而成为现代地磁匹配导航系统研究的开端。80 年代初,瑞典的 Lund 学院对船测地磁强度进行了实验,实验中将地磁强度的测量数据与地磁图进行人工比对,确定船只的位置,同时根据距离已知的两个传感器的输出时差,确定船只的速度(郭才发等, 2009)。90 年代,美国科学家 Pasiaki 和 BarItzhack 提出通过测量卫星所在位置的地磁强度来自主确定卫星轨道,将地磁匹配导航应用于实践。

辅助 INS 的水下潜航器导航对其地磁匹配辅助导航系统的导航定位精度提出了更高的要求,其数据处理过程也更为复杂。由于难度相对较大,目前该方面的研究进展相对缓慢。直到 21 世纪初,美国才推出了陆地精度优于 30m、水下精度优于 500m 的地磁匹配导航系统,并计划将其应用于提高巡航鱼雷的命中率。NASA Goddard 空间中心和有关大学也对水下地磁匹配导航进行了研究,并进行了大量的地面试验。同时,波音公司也正在开展基于地磁匹配导航的飞机自动着陆系统的研究。俄罗斯在 2004 年进行的“安全-2004”演习中试射的 SS-19 导弹可以不按照抛物线沿稠密大气层边缘近乎水平飞行,使敌方导弹防御系统无法准确预测来袭导弹弹道,军事专家认为其很可能使用了地磁场等高线匹配制导技术。

国内目前对水下地磁匹配导航的研究还处于起步阶段,进入试验阶段的完整地磁匹配导航系统尚未出现。现阶段,仅中国航天科工集团三院、西北工业大学、北京国浩传感器研究院、北京科技大学、中国人民解放军第二炮兵学院、武汉大学、国防科技大学以及哈尔滨工程大学等几家单位开展了地磁匹配导航系统

相关方面的研究。

目前地磁匹配导航系统的研制,对于各国来说均以国防建设为出发点,因此该方面的资料信息获取较为困难。就目前所能收集到的资料而言,国外水下潜航器的地磁匹配导航系统研究较少,且大多数处于试验样机阶段;而国内尚无完整试验样机系统出现,研究尚处于起步阶段。

二、地磁匹配导航相关理论算法研究现状

地磁匹配导航相关理论算法方面的研究是除了地磁传感器等硬件设备以外,整个地磁匹配导航最为核心的部分,包括了地磁背景场模型建立、地磁匹配导航算法以及地磁匹配导航误匹配研究 3 个方面。

(一)地磁背景场模型研究现状

地球磁场是一个矢量场,是空间分布和时间分布的函数。地磁场包括稳定磁场和变化磁场。稳定磁场与时间关系较小,是地磁匹配导航和定位的主要可利用因素。作为地磁匹配导航系统中的参考场,地磁场模型在地磁匹配导航中起着非常关键的作用(Registraton K P B,1997)。根据模型所反映区域大小的不同,地磁场模型主要分为全球地磁场模型和区域地磁场模型 2 种。

(1)IGRF 是目前最主要的全球地磁场表述模型,由 IAGA(The International Association of Geomagnetism and Aeronomy)的有关小组每 5 年更新一次。其所用地磁资料主要来自卫星磁测,平均测量高度为 400km,由于源于地壳的中小尺度地磁异常已被滤除,因此 IGRF 精度仅有 100nT,局部地区甚至超过 200nT;另一方面由于该模型顾及全球地磁特征描述,分辨率较低,无法满足现阶段高精度海洋地磁匹配导航需求。目前全球地磁场模型的理论基础是地磁场的高斯理论,根据全球分布的各种类型的地磁资料(包括陆地、海洋、航空和卫星磁测),利用最小二乘法,依据球谐模型计算获得。

(2)区域地磁参考场模型。区域地磁参考场模型主要反映一些特定区域内的地磁变化。如一些国家自己建立的地磁场模型,美国、日本、加拿大、罗马尼亚、蒙古、越南等国每 5 年更新一次自己国家的区域地磁场模型。区域地磁场模型因区域不同而有所差异,其主要问题除测点问题以外还有模型问题。区域地磁场模型不建议采用球谐分析方法,因为没有“三维”意义。20 世纪六七十年代主要采用泰勒多项式,当时国内外学者常用的判断是:根据多项式模型的均方偏差(RMS)衰减趋势,选择截断阶数。20 世纪 80 年代,出现了地磁矩谐模型,该模型给出了区域地磁场内、外源区分的可能性。加拿大 Haines(1985)提出球冠谐新模型,大大促进了区域地磁场模型的研究。我国学者采用该模型也研究了

中国地磁场模型,即 CGRF。CGRF 作为区域地磁场模型的代表之一,由我国的地质部门和中国科学院地球物理研究所建立,每 10 年更新一次。其发展和建立主要经历了如下几个阶段。

1. 泰勒多项式模型

陈宗器先生计算了 1946 年重庆北碚地区地磁场泰勒多项式模型,并绘制了相应的地磁图,这是我国学者首次计算的地磁场多项式模型。

安振昌等分别于 1992—2003 年期间计算了 1960 年和 1970 年中国地磁场泰勒多项式模型以及 1960—1970 年地磁场长期变化泰勒多项式模型,并绘制了相应的地磁图(等值线图和等变线图);根据中国及邻区 26 个地磁台的年均值,计算 1980 年中国及邻近地区地磁场长期变化速度和加速度的泰勒多项式模型;还计算了 1965 年青藏高原地磁场多项式模型,以及 1950 年、1960 年、1970 年和 1980 年中国地磁场多项式模型。徐元芳等(1992)计算了 1950—1985 年(时间间隔为 5 年)中国地磁场长期变化多项式模型。夏国辉等计算了 1980 年中国地磁场模型,以及 1990 年中国附近海域地磁场模型。林云芳等(1985)和徐元芳(1993)等用泰勒多项式方法计算和研究了东亚地磁场模型。安振昌等还用勒让德多项式计算东亚地磁场模型。安振昌等对地磁场多项式模型的展开原点、截断阶数、边界效应以及选择计算地磁场模型数学方法的判据等进行了分析和讨论。

2. 矩谐模型

徐文耀等(1985)对 1970 年中国及其邻近地区地磁场进行了矩谐分析,提出了嵌套式地磁场模型,并对中国地磁场的三维结构及其长期变化进行了分析;对与矩谐分析有关的截断水平、光滑处理以及误差分析等问题进行了讨论。王月华等(1999)计算了 1980 年东亚地磁场的矩谐模型。

3. 球冠谐模型

安振昌(1995)对 1970 年中国地磁场、1980 年东亚地磁场和 1965 年青藏高原地磁场进行了冠谐分析,计算相应地磁场的冠谐模型,绘制相应的理论地磁图,并对球冠极点的位置、球冠半角大小以及冠谐模型的截断阶数等问题进行了讨论。

4. 曲面样条函数模型

安振昌(1995)于 1982 年首次提出用曲面样条函数(Surface Spline)方法计算中国地磁场模型,即曲面样条函数模型。曲面样条函数方法是一种表示地磁场及其长期变化、地磁异常的插值方法,而多项式方法、矩谐分析方法和冠谐分析方法都属于拟合方法。我国学者林云芳和阚济生都曾使用该方法计算江苏地区、中国东部地区和东亚地区地磁场模型。

总之,CGRF 模型顾及中国地区地磁变化,且地磁测量分辨率更高,因此精度高于 IGRF 模型。但目前受地磁场台站分布不均匀,地磁测量范围、规模、测量手段以及资料更新速度等条件的限制,CGRF 模型依然无法满足高精度海洋地磁匹配导航的需求(王丹等,2009)。

(二)地磁匹配导航算法

匹配算法是地磁匹配导航的核心。

TERCOM(Terrain Contour Matching)系统又称为地磁轮廓匹配系统,是美国 E 系统公司于 20 世纪 80 年代研制的。该系统采用的匹配算法为断续的批相关处理算法,是相关处理技术的代表,同时也是目前应用较为广泛的一种导航技术。美国麦道飞机公司研制的机动地形相关系统(MTCS)、英国不列颠宇航公司(BAE)研制的地形剖面匹配系统(TERPROM)、英国费伦蒂公司研制的 PENETRATE 系统以及法国萨基姆公司(SAGEM)研制的地形剖面匹配导航系统均是在 TERCOM 系统的基础上形成的。但是由于其对初始角度积累误差较为敏感,在角度偏差过大时,难以实现高精度的导航定位。

不同于 TERCOM 算法,ICCP 是一种以地磁等值线点为匹配单元的导航匹配算法。该算法是一种基于几何学原理的匹配方法,最初源于图像配准的 ICP 算法,在等值线上寻找最小度量意义下的全局最优值。国内外很多学者对其进行了研究,并认为在不同背景场变化特征下,ICCP 只能收敛至局部最优,难以实现向真实航迹的逼近。针对这一问题,国内学者也进行了一些 ICCP 匹配导航相关技术的研究。比较突出的有 2003 年刘承香、刘繁明等开展的基于海底地形使用 ICCP 匹配技术对惯性导航进行修正的研究,针对 ICCP 算法存在的缺陷,提出了一种随机旋转和平移的改进算法,取得了较为满意的效果;2004 年刘繁明、孙枫、成怡等开展了 ICCP 重力匹配技术相关研究,并针对重力仪测量数据存在噪声的情况,对匹配算法进行了推广,完善了算法理论;2006 年王可东、陈懿等在水下地形匹配导航中考虑了初始位置误差,采用 TERCOM 的 MSD 算法首先进行粗匹配,然后再用 ICCP 算法进行精匹配;2007 年吴美平、刘颖等在进行的 ICCP 地磁辅助导航研究中,提出了扇形扫描法,在一定程度上提高了 ICCP 算法的稳定性;2008 年郑彤、边少锋等进行了 ICCP 地形匹配导航研究,他们认为只要地形特征独特,无论参考导航系统的累积误差有多大,匹配算法都能进行匹配对准;2008 年周贤高、李士心等对地磁匹配导航中的特征区域选取方法进行了研究,为基于 ICCP 算法的地磁匹配导航开辟了新的思路。

桑迪亚惯性地形辅助导航系统(Sandia Inertial Terrain Aided Navigation, 简称 SITAN),是美国 Sandia 实验室于 20 世纪 80 年代末开始研制的一套地形