



全国高校教材学术著作出版审定委员会审定

地磁导航

理论与实践

DICI DAOHANG LILUN YU SHIJIAN

张晓明 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

全国高校教材学术著作出版审定委员会审定

地磁导航理论与实践

张晓明 著

国防工业出版社

·北京·

内容简介

地磁导航是一种新型的全天时、全天候、全地域自主导航方式,具有导航误差不累积、无源定位、无辐射、低成本等特点,可广泛应用于兵器、航空、航天、航海等运动平台的定位定向导航及姿态控制。本书主要根据作者多年来的研究成果和国内外地磁导航技术领域的最新进展撰写而成。本书系统、深入地阐述了地磁导航理论及实践的各项相关内容,主要包括地磁导航的发展背景及其关键技术、地磁基准图的构建、磁矢量传感器的误差标定及补偿、载体磁场分析、载体磁场标定及补偿、地磁导航算法,并以航空飞行器为例,对各种算法进行了仿真验证。

本书可作为地磁导航技术研究和应用领域的系统设计师、软硬件工程师和科技工作者的业务工具书,也可作为高等院校相关专业教师和研究生教学的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地磁导航理论与实践/张晓明著. —北京:国防工业出版社, 2016.3

ISBN 978-7-118-10615-2

I. ①地… II. ①张… III. 地磁导航-研究
IV. TN96

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第028459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)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 10³/₄ 字数 255 千字

2016年3月第1版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 37.80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

前言

随着新型导航技术的发展,地磁学、测绘学、空间物理学与导航理论的交叉与综合不断加强,地磁导航技术在导航定位、战场电磁信息对抗等领域展现了巨大的军事潜力。地磁导航是一种新型的全天时、全天候、全地域自主导航方式,不仅具有误差不积累、无源定位、无辐射、抗干扰性强、高精度、低成本等特点,而且可以利用地磁场的多种特征量信息进行导航,如总磁场强度、水平磁场强度、垂直分量、磁偏角、磁倾角、磁场梯度等物理量。地磁场作为地球的固有资源,为航空、航天、航海提供了天然的坐标系,地磁导航可广泛应用于航天器、舰船、导弹、无人机、潜艇等系统的定位定向导航及载体姿态控制等。

自“十一五”以来,随着我国国防技术的发展,地磁导航技术在航天、航空、航海领域的需求日益强烈,技术发展十分迅速。但国内较系统全面地介绍地磁导航技术相关方面的教科书或学术专著很少,且为导论性质,内容浅显。随着地磁导航技术的发展,特别是在航天器、航海器微小恶劣环境导航应用中对自主导航的需求,当前该领域迫切需要一本系统介绍海陆空天领域自主地磁导航技术理论和应用的专业书籍。

本书主要根据作者课题组近年来的研究成果和国内外地磁导航技术领域的最新进展撰写而成。全书以航空飞行器为应用背景,围绕地磁基准图构建、磁场实时准确测量、地磁导航算法三个关键技术展开论述。内容分为9章:第1章主要介绍地磁导航需求、相关技术的研究现状及其发展趋势。第2章以航空飞行器为例介绍了飞行器运动模型构建及仿真。第3章详细介绍了地磁导航应用中全球地磁基准图及区域地磁基准图的构建理论及方法。第4章至第7章详细阐述了载体在运动过程中实时获取地磁场矢量信息中的基本测量方法、适用传感器选型、三轴磁传感器误差建模及标定补偿、载体干扰磁场分析及标定补偿等相关理论及关键技术。第8章介绍了地磁匹配导航算法中的关键技术。最后在第9章对地磁导航未来的发展趋势进行了展望。

本书系统全面地介绍了地磁导航相关理论和工程实践中的关键技术,内容新颖,特色鲜明,以满足广大科研和教学人员对这一新兴交叉科学领域知识的迫切需求。与国内外出版的同类书相比,本书具有以下特点:

(1) **内容系统全面。**本书内容涉及地磁学、测绘学、磁场建模理论、误差分析理论、导航理论及应用技术等多学科交叉领域。针对地磁导航技术应用和实践特点,系统阐述了相关的地磁模型及地磁图构建、磁场传感与测量、干扰磁场建模与补偿、地磁导航原理与方法等方面的内容。

(2) **理论与实践相结合。**本书理论性和工程性并重,既有相应的地磁场及地磁模型构建理论、磁场分析理论、地磁导航理论等,又包含了地磁导航技术在海陆空天领域工程实际应用的具体问题。在相应科学问题的研究和分析中,采用理论分析、仿真技术和工程实践相结合的思路,力争做到理论分析清晰明了,并偏重工程实际应用。

(3) 紧跟国际研究前沿。地磁导航是一种新兴载体自主导航技术, 国际各科技强国均在大力开展地磁导航相关的研究工作, 尚未形成成熟理论和研究方法。地磁导航技术涉及多门学科前沿, 本书编写过程中紧跟国际研究前沿, 参考近年来地磁导航领域的相关学术论文和研究成果, 做到内容新颖、翔实。

本书是作者及其课题组多年研究成果的结晶, 课题组博士生陈国彬参与了本书第4章的编写工作。在本书撰写过程中北京航空航天大学赵剡教授给予了大量的指导。此外, 本书部分内容还参考了国内外同行专家、学者的最新研究成果, 在此向他们致以诚挚的谢意! 作者感谢国家自然科学基金委员会、北京航空航天大学、中国航天科工集团三十五研究所以及中北大学在科研工作中给予的支持和帮助, 感谢中国教师发展基金会教师出版专项办公室、国防工业出版社在本书出版过程中的支持和努力。

本书涉及多门学科前沿, 内容较新, 作者水平、时间有限, 难免存在不妥和错误之处, 恳请广大同行、读者批评指正。

作者

2015年12月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 地磁导航的军事需求	1
1.2 地磁导航的国内外研究现状	2
1.2.1 地磁场理论及地磁图构建技术的研究现状	4
1.2.2 载体磁场标定与补偿技术的研究现状	6
1.2.3 地磁导航技术的研究现状总结和发展趋势展望	10
1.3 本章小结	11
第2章 航空飞行器的运动学分析	12
2.1 引言	12
2.2 地磁导航中的常用坐标系	12
2.2.1 常用坐标系	12
2.2.2 坐标系间相互转换	13
2.3 飞行器的运动学模型	14
2.3.1 作用在飞行器上的力和力矩	14
2.3.2 飞行器运动学方程	15
2.4 飞行器典型的运动状态	17
2.4.1 飞行器在铅垂面内运动	17
2.4.2 飞行器在水平面内运动	19
2.5 计算机仿真研究	22
2.6 本章小结	27
第3章 地磁图构建与地磁场仿真	28
3.1 引言	28
3.2 地磁场概述	28
3.2.1 地磁场特性分析	28
3.2.2 地磁场的描述	30
3.3 地磁场模型	31
3.3.1 国际地磁参考场	31

3.3.2	区域地磁场模型	33
3.4	基于空间插值理论的局域地磁图构建	35
3.4.1	空间插值方法概述	35
3.4.2	基于克里金空间插值的局域地磁图构建	36
3.4.3	空间插值方法的优劣性评估	38
3.5	地磁图的构建与地磁场计算机仿真	39
3.5.1	全球地磁场的构建与仿真	39
3.5.2	基于实测数据的局域地磁图构建与仿真	41
3.5.3	飞行轨迹的地磁场向量仿真	43
3.6	本章小结	48
第4章	地磁场测量	49
4.1	引言	49
4.2	地磁测量传感器	49
4.2.1	磁通门磁力仪	49
4.2.2	质子旋进磁力仪	53
4.2.3	光泵磁力仪	57
4.2.4	超导磁力仪	61
4.2.5	磁阻效应磁力仪	64
4.3	地磁场测量方式	70
4.3.1	地面磁测	70
4.3.2	航空磁测	71
4.3.3	海洋磁测	72
4.3.4	卫星磁测	73
4.4	本章小结	73
第5章	捷联式三轴磁传感器建模与标定	74
5.1	引言	74
5.2	三轴磁传感器的数学模型分析	74
5.3	制造误差建模与补偿	75
5.3.1	单轴磁传感器误差	75
5.3.2	三轴磁传感器轴间误差	75
5.3.3	制造误差的数学模型	76

5.3.4 制造误差参数标定与补偿	77
5.4 安装误差	79
5.5 姿态测量误差	80
5.6 捷联式三轴磁传感器仿真研究	81
5.6.1 三轴磁传感器制造误差仿真、标定及补偿	81
5.6.2 捷联式三轴磁传感器误差仿真	86
5.7 本章小结	90
第6章 地磁测量中载体磁场分析与建模	91
6.1 引言	91
6.2 地磁场测量中载体磁场源分析	91
6.3 载体磁场正演分析	93
6.3.1 稳定磁场基本理论	93
6.3.2 特殊形状的铁磁材料磁场	94
6.3.3 磁偶极子模型磁场	98
6.3.4 载流导线磁场	99
6.4 载体磁场数学建模	100
6.4.1 固定磁场	100
6.4.2 感应磁场	101
6.4.3 涡流磁场及其他干扰磁场	102
6.5 载体磁场的仿真研究	102
6.5.1 磁场正演分析	102
6.5.2 载体磁场计算机仿真	108
6.6 本章小结	111
第7章 载体磁场标定及自动磁补偿	112
7.1 引言	112
7.2 捷联式三轴磁传感器量测数据分析	112
7.2.1 理想捷联式三轴磁传感器的量测数据分析	113
7.2.2 载体磁场对量测数据的影响	113
7.2.3 捷联式三轴磁传感器的量测数据分析	114
7.3 基于椭圆拟合的二维载体磁场标定及自补偿技术研究	115
7.3.1 基于椭圆约束的最小二乘法理论	116

7.3.2	数值稳定的带椭圆约束的最小二乘法	118
7.3.3	水平状态下二维误差标定及自动磁补偿	119
7.4	基于椭球拟合的三维载体磁场标定及自补偿技术研究	120
7.4.1	基于椭球约束的最小二乘法	120
7.4.2	姿态机动下三维误差标定及自动磁补偿	124
7.5	载体磁场标定及自动磁补偿方法仿真研究	125
7.5.1	计算机仿真研究	126
7.5.2	半物理仿真研究	134
7.6	本章小结	135
第8章	地磁匹配导航算法研究	136
8.1	引言	136
8.2	地磁导航的匹配量	136
8.3	地磁导航匹配区域选择	137
8.3.1	传统指标	138
8.3.2	地磁熵及地磁方向熵	139
8.3.3	飞行器地磁匹配时最佳路线选择准则	142
8.4	地磁匹配算法研究	142
8.4.1	匹配算法数学描述	142
8.4.2	地磁匹配范围的确定	144
8.4.3	机动飞行地磁匹配	145
8.4.4	基于旋转变换的地磁匹配	148
8.5	算法仿真及结果分析	150
8.5.1	典型匹配算法的仿真试验及结果分析	150
8.5.2	基于旋转变换的地磁匹配方法仿真试验	154
8.6	本章小结	156
第9章	总结与展望	157
9.1	地磁导航关键技术总结	157
9.2	地磁导航展望	158
	参考文献	159

第1章 绪论

1.1 地磁导航的军事需求

导航定位技术是利用电、磁、光、声、天文、惯性等一系列方法，为各种武器平台和军事系统提供执行作战任务所需的统一位置 (P)、速度 (V)、时间 (T) 和姿态 (A) 信息的综合系统技术，是现代精确打击武器的核心信息源，是武器平台总体、精确制导、探测定位、信息感知、信息系统综合、高效打击等关键技术的重要组成部分。在实现“灵敏及时准确的侦察定位、快速反应和机动、中远程精确打击”和构建“陆海空天电(磁) 五维一体作战”体系建设中，高精度导航技术作为其中的核心关键技术，能为武器系统及其运载体提供高精度的运动信息，是发展现代化武器装备的急需。

为了准确可靠地获得航空飞行器的实时位置和姿态信息，实现对重要目标的智能精确打击，现代战争中要求导航系统具有全球、全天候、自主、隐蔽导航功能，并且具有较强的抗干扰能力和抗摧毁能力。目前，在武器系统的中段导航与制导中，已经提出和采用了多种导航方式，其中惯性导航系统 (Inertial Navigation System, INS) 和全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) 应用最为广泛。INS 不仅能够提供载体位置速度参数，还能提供载体的三维姿态参数，是完全自主的导航方式，在航空、航天、航海和陆地等几乎所有领域中都得到了广泛应用。但是，INS 难以克服的缺点是其导航定位误差随时间累加，难以长时间独立工作。20 世纪末发展起来的 GNSS 具有定位和测速精度高的优势，且基本上不受时间、地区的限制，已经得到了广泛应用。但是，基于无线电导航的 GNSS 导航卫星信号的抗干扰能力弱，而且要求载体与 4 颗以上卫星通视，这也限制了 GNSS 在复杂观测条件下的应用。另外，无线电信号不能在水下远距离传播，限制了 GNSS 在水下的应用。反卫星武器的出现使得 GNSS 中发射导航信号的卫星在现代战争中的生存能力变差。即使采用 GNSS/INS 组合导航系统仍然无法从根本上解决 GNSS 在现代化复杂战场中存在的固有脆弱性，需要研究新型的导航原理和技术以适应现代战争需求。

近年来，军事导航领域又重新开始关注地球物理场导航。地球物理场具有各种地球固有的特性。地球物理场在一定时间内不可能被大规模地摧毁或改变，而且不要求提供特殊的服务设施，因此可以考虑作为一个可靠的导航信息源，在地理系统坐标系中，已经绘制了许多描述地球物理场空间分布特征的图件和数学模型，这些地球物理场的图件、数学模型等在民用领域和军事领域中都有广泛的应用。这些周期更新的地球物理场图件和模型在至少 98% 的地球表面 (包括海水覆盖的区域) 都可以作为一个可靠的导航基准。目前可供导航利用的地球物理场主要有地形高程场、地球重力场和地球磁场等。地球物理场可以分为两类：

- (1) 地球表面二维场，仅在地球表面有确定的物理值，如地形场、地物景象。
- (2) 空间的三维场，在地球和近地空间中的每一点都有确定的物理值，如地球重力

场和地球磁场。

利用地形场、地物景象等二维信息进行光学图像匹配制导和地形匹配制导在某些场合下存在着一定的缺陷。在光学图像匹配制导时，实时图是低空摄取的大视角图像，而匹配基准图是卫星遥感图，由于不同天气条件下光照不同、不同季节地表覆盖物的灰度不同，以及山地、建筑物的相互遮挡等影响，实时图和基准图之间存在很大差异，灰度和位移特征也都有不同程度的变化，影响匹配的精度和可靠性。而利用稳定地形信息的地形匹配（TERrain COnTour Matching, TERCOM）技术，在海面上和平原地区由于地形信息匮乏而无法进行正常的导航，严重地限制了基于地形信息的导航系统在上述区域的应用。而地磁场可以穿透岩石、土壤、水等介质，在陆地、海洋、水下及近地空间都有分布，均可以用于载体导航。由于地磁场是一个向量场，包含丰富的与地理位置有关的特征量，如磁场总强度、水平磁场强度、垂直磁场强度、北向磁场强度、东向磁场强度、磁偏角、磁倾角及相应地磁要素的梯度等信息，使得导航方案更加灵活多样，可靠性更高。因此，在跨海制导、水下导航方面、地磁匹配制导具有无比的优越性。另外，地磁匹配制导还具有被动制导，隐蔽性强，不受敌方干扰、误差不随时间累积及磁传感器体积小、功耗低的优点。因此，地磁导航具有其他导航方式不可替代的优点，正在成为军事导航领域的研究热点和关注焦点。

利用地磁场进行载体导航的技术具有重大的研究意义，其研究成果可以很好地应用于各种军事和民用领域。目前，美国、俄罗斯、法国等军事强国都在进行武器系统地磁导航、制导方面的应用研究，如基于地磁信息的导弹制导和无人机辅助导航，还可以在磁近炸引信、隐身飞机的磁探测、反潜、电磁炸弹、复合制导等领域。近年来，随着航空航天技术的飞速发展，对导航系统的要求越来越高。当前，地磁导航系统已成功应用于近地卫星姿态控制、磁力矩器主动控制、运动载体的航向和即时位置以及飞行距离计算，并呈现出与卫星导航、惯性导航信息融合，实现优化组合导航的发展趋势，成为推动现代新军事变革的重要技术力量。将不同机制的制导系统组成复合制导，用于同时具有陆地和海面飞行航道的导弹和飞行器上，可以提高导弹和飞行器的导航和制导精度。地磁制导技术与惯性导航系统组合使用，可以校正惯性导航系统远程制导中的积累误差，提高导弹的精确打击能力。采用地磁等高线制导系统的新型机动变轨导弹不按弹道抛物线而沿稠密大气层边缘近乎水平飞行，大大增强了导弹的突防能力。由于地磁匹配制导技术属于被动制导，因此比 GNSS 制导技术具有更好的隐蔽性和抗干扰性。

总之，地磁导航与制导可以取得与 GNSS 类似的效果，在我国卫星导航系统尚未完善之前，地磁导航与制导不失为较理想的选择。地磁导航及其与 GNSS、INS 组成的复合导航与制导，具有无源、无辐射、全天时、全天候、全地域、体积小、能耗低的优良特征，在武器系统的导航及制导应用中具有很好的应用前景。

1.2 地磁导航的国内外研究现状

美国、俄罗斯、法国等国外军事强国对地磁导航的研究开始于 20 世纪，并且在某些领域已经得到了应用。60 年代中期，E-systems 公司首次证明了地磁可以用于水上定位。德国的 Bremen 大学针对 BREM-SAT 卫星的星载磁强计，利用卡尔曼滤波算法估计卫星

的位置和速度,精度约为 10km。1999 年美国 Conell 大学报道了利用磁强计和太阳敏感信息进行卫星定轨的精度为 1.5km。现在美国生产的波音飞机上配备有地磁匹配导航系统,在飞机起飞、降落时使用。2003 年 8 月美国国防部军事关键技术名单中提到地磁数据参考导航系统,称他们所研制的地磁导航系统地面和空中定位精度优于 30m (CEP),水下定位精度优于 500m (CEP)。美国 NASA Goddard 空间中心和有关大学对地磁导航进行了研究,并进行了大量的地面试验。2005 年《现代军事》报道,法国已在地磁信号特征制导领域获得突破,证实了地磁特征完全可以满足导弹精确制导要求。俄罗斯研究地磁匹配制导技术的时间较长,并且成立了专业研究所,曾以地磁场强度作为特征量,采用磁通门传感器以地磁场等高线匹配制导方式(即“MAGCOM”)进行过试验。俄罗斯 2004 年 2 月 18 日在“安全-2004”演习中试射了新型机动变轨的 SS-19 洲际导弹,该导弹使用地磁场等高线匹配制导技术不按弹道曲线而沿稠密大气层边缘近乎水平地飞行,使美国导弹防御系统无法准确预测来袭导弹的弹道,大大增强了导弹的突防能力。

近年来,国内关于地磁导航技术的研究主要集中在电子磁罗盘航向导航和地磁导航及组合导航算法研究方面。电子磁罗盘航向导航方面技术发展已比较成熟,已开始车载导航、舰船导航等领域工程应用,如 2003 年军械工程学院庞发亮、石志勇等人采用磁通门技术应用航迹推算方法研制了地面车辆导航定位仪,定向精度达到 0.6° ; 2006 年北京科技大学李希胜等人研制的磁罗盘最大罗差不大于 0.1° 。而有关地磁导航及组合导航算法的研究还主要集中在仿真和预研阶段,如 2004 年航天科工集团李素敏、张万清等人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,分辨率能达到 50m,并采用分辨率为 2nT、灵敏度为 0.1mV/nT、响应速度为 10Hz 的三分量磁通门地磁匹配仪,研究了地磁场在巡航导弹地磁匹配制导中的应用; 2007 年西北工业大学晏登洋、任建新等人利用地磁导航校正惯性导航的仿真试验取得了较高的精度。应该看到,我国在航空和导弹领域的地磁导航技术的研究才刚刚起步,与西方先进国家相比存在着一定的差距。

通过对国内外关于地磁导航方面的研究文献整理分析,可以看出,地磁导航是一门涉及地球物理学、材料学、精密仪器学和自动化学科的交叉学科,涉及的研究领域众多。目前地磁导航方面的研究主要集中在以下四个方面。

(1) 地磁场理论研究: 主要涉及地球磁场理论、磁场起源、地磁正常场和异常场测量与建模、地磁图延拓等。

(2) 地磁传感器研究: 涉及磁材料理论、磁测量原理研究、弱磁传感器设计、微型磁传感器设计、磁传感器标定等。

(3) 捷联式地磁传感器的校准和载体磁补偿: 涉及磁传感器误差分析、三轴捷联式磁传感器的快速校准、载体磁场分析、数字载体磁补偿等。

(4) 地磁导航技术研究: 涉及地磁匹配区域选择、匹配特征量的选择与提取、地磁匹配算法研究、地磁动态滤波导航算法研究、地磁辅助 INS 导航系统研究等。

高分辨率局部地磁图的构建、地磁信息的实时准确获取、快速可靠的地磁匹配算法是实现高精度地磁导航的必要条件,也是制约地磁导航实用化的技术瓶颈。本书将以航空飞行器为研究对象,以高分辨率局部地磁图的构建、地磁信息的实时准确获取、地磁匹配算法研究为主线,对地磁导航中所涉及的地磁场理论、数字地磁基准图的快速准确

构建、磁传感器误差分析与补偿、载体磁场的标定与补偿、地磁匹配算法等关键技术展开研究。

1.2.1 地磁场理论及地磁图构建技术的研究现状

地磁场作为地球的固有资源，为航空、航天、航海提供了天然的坐标，可应用于航天器、飞机或舰船的定位定向及姿态控制。地磁场可以使用多种地磁场要素来进行描述。人们在利用地磁场来进行导航时，需要将其转化为数字地磁图存储在计算机中，这种转换过程可以通过插值方法和地磁场模型的手段来完成。数字地磁图是地磁导航的基础，因此研究数字地磁图的快速准确构建技术具有十分重要的意义。目前在地磁导航中广泛使用的地磁场信息主要有以下两种表示方式。

(1) 地磁场数学模型：地磁场模型是根据地磁信息拟合或地磁场理论建立的表示地磁场及其长期变化时空变化的数学表达式，是关于地理位置(经度、纬度、高度)和时间的函数，如多项式模型、球谐模型等。

(2) 各种介质的地磁图：地磁图表示地磁场和地磁场长期变化地理空间分布的二维图件。它是根据各测点在同一时间的磁测资料绘制成的，常见的有各地磁要素的纸质地磁图、电子地磁图。地磁图不能表示地磁异常随高度的变化，也没有考虑地磁场场源的物理限制。另外，地磁图不能给出表示磁异常分布的解析表达式，而且也带来一定的读图误差。

地磁图的测绘和地磁场模型的建立大致可以分为三个时期：第一个时期的标志是1701年 Halley 首次编成大西洋地磁偏角图，这是用海洋磁偏角资料直接平滑绘制而成的最早地磁图，也是最早的地球物理等值线图；第二时期开始于 Gauss 时代，1839年 Gauss 把位理论用于地磁场分析，赋予地磁场有物理意义的数学描述，建立了地磁场球谐模型。这一模型不仅包括内源磁场，而且也包括外源磁场，用适当数目和合理分布的全球磁测资料，可以分别求出地球的内外源场；2000年发表的“地磁场综合模型”(Comprehensive Model of geomagnetic field, CM) 标志着地磁图测绘和地磁场建模第三时期的开始。虽然新模型仍然以球谐函数的形式表述地磁场，但是，新一代模型覆盖的范围更广泛，它不仅包括地核主磁场模型，而且包括岩石圈磁场模型、电离层磁场模型、磁层磁场模型、内部感应磁场模型以及空间磁场模型。新模型力求以更深入的物理内涵和更高的精度表述地球磁场的全貌。

1. 地磁模型研究现状

地磁场模型的计算与研究是地磁学的重要研究内容之一，在历届国际地磁和超高层气流物理协会(International Association of Geomagnetism and Aeronomy, IAGA) 和国际大地测量地球物理学联合会(International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG) 会议所设专题都占有重要的位置。IAGA 还专门设立国际地磁参考场(International Geomagnetic Reference Field, IGRF) 工作组，负责计算各个年代的全球地磁场模型。地磁场模型在地球科学、空间科学、地球物理勘探、岩石层物理学和地球深层研究等许多领域都有重要的学术意义和广泛的实际实用价值。

目前普遍采用的全球地磁模型有国际地磁参考场模型(IGRF) 和世界地磁模型(World Magnetic Model, WMM)。它们是表示地磁场及其长期变化在全球分布的数学模

型,其理论根据是地磁学的 Gauss 理论。它在地球物理研究中主要为磁异常提供正常场(或背景场)。利用 IGRF 或 WMM 研究地磁场具有以下优点:最新的国际地磁参考场包括 1900—2010 年的一系列地磁场数学模型,人们可以同时使用和分析不同年代取得的地磁测量资料(忽略在较短时间内磁异常随时间的变化),从而最大限度地发挥了所有地磁资料的作用;IGRF 提供了一个合理的、统一的地磁正常场,从而避免了不同地区地磁场衔接不上的矛盾,使用时可以很方便地计算出任意时间(1900—2010 年)、任意地点和任意高度的地磁场向量值。

为了更精确地研究全球地磁异常场,由 IAGA 和世界地质图委员会(Commission for the Geological Map of the World, CGMW)共同资助了全球数字磁异常图(World Digital Magnetic Anomaly Map, WDMAM)的国际合作科研工作,其目的是对地球上部的岩石圈产生的地磁异常进行研究,编辑并出版可靠的世界磁异常图。WDMAM 综合了大量的磁测资料(包括过去十多年来在大陆的航空磁测和海洋的航海磁测数据),并参考了卫星磁测数据和各地磁站的观测数据。2007 年发布了 WDMAM 的 1.02 版本,包括 1:50000000 比例尺的印刷版的磁异常图和网格化的地磁异常数据库(分辨率为 3',相当于地球赤道上的 5km)的两部分。WDMAM 的数据标称高度为大地水准面上空的 5km。由于波长大于 2600km 的部分已经包含在地核磁场中,因此 WDMAM 中不包含这一部分磁场信息。

尽管全球地磁场模型(IGRF、WMM)能全面地反映地磁场在全球的宏观分布情况,但由于模型阶次的限制,建模过程中滤除了地磁场的细节信息。1967 年 Bullard 指出,全球球谐模式的阶数 N 所反映的最短波长 $\lambda_{\min} = C/N$, 式中 C 为地球的圆周长,约为 40000km,当 $N=13$ 时, $\lambda_{\min} \approx 3077\text{km}$,即为世界地磁图所反映的地磁场的最短波长。可以看出,世界地磁图对来源于地壳的磁异常是反映不出来的。WDMAM 虽然表示了全球的地磁异常场,但是一方面由于磁异常数据的复杂性,导致现在仍没有一个统一的数学模型可供使用;另一方面,全球的地磁异常数据属于海量数据,对于数据检索、查询、处理等操作带来很大困难,因此目前 WDMAM 公布的地磁异常数据的分辨率仅为 3'(约为 5km)。因此 WDMAM 的磁异常数据不能适用于高精度的地磁导航。

为了高分辨率反映某一相关区域的地磁细节信息(主要是磁异常信息),并建立其数学模型,地磁科学家通过分析近百年的大地磁测、航空磁测及海洋磁测资料,研究了各种区域地磁场模型。这些模型各有特点,以适应不同应用场合。区域地磁场模型是用数学方法表示地磁场在地球某一地区(如某一国家或某一大洲)时空分布的数学模型。计算区域地磁场模型的数学方法多种多样,但主要有多项式方法、曲面样条函数方法、球谐分析方法、矩谐分析方法、冠谐分析方法等。每种方法都有自己的优点和缺点。如何从众多方法中挑选出一种最合适的方法计算某关注区域的地磁场模型,这就需要对各种方法进行综合评价。可以根据物理的合理性、计算的稳定性、级数的收敛性、计算值的准确性、功能的多样性等判据从理论和实践的结合上选择最好的计算方法。

对照以上的各种区域地磁模型可以得出如下结论:

(1) 多项式模型的优点是计算简单、使用方便;缺点是不满足地磁场位势理论的要求以及只能表示地磁场的二维结构,不能表示地磁场的高度变化,而且通过拟合滤掉了一些区域地磁场的细节信息。

(2) 曲面样条模型可以较好地反映小范围地磁异常场及磁场梯度的二维分布,可将

随机分布的测点网格化；其缺点是系数较多，比使用地磁测点的个数还要多3个。多项式模型和曲面样条模型均属于二维地磁模型，仅适用于地表的车辆导航、海洋的船舶导航以及在固定高度运动的载体的导航定位。若要用于不同高度载体的导航，需要对二维地磁模型进行上下延拓；另外，这两种模型均不满足地磁场位势理论，没有统一的地磁模型，需要对三个独立的地磁要素分别进行数学建模。

(3) 矩谐模型、球谐模型及球冠谐模型都满足地磁场位势理论的物理限制，具有统一的地磁模型，表示地磁场在三维空间的分布。各地磁要素均可以由该地磁模型推导得出。其缺点是计算复杂，且通过拟合滤掉了一些区域地磁场的细节信息，等值面变化比较平缓。这几种模型可以用于近地空间载体在不同高度运动时的导航，但定位精度不高。

(4) 由于多项式方法、矩谐分析方法和冠谐分析方法都属于拟合方法，而曲面样条函数方法是一种插值方法，因而利用曲面样条函数建立的数学模型具有更高的精度。

2. 地磁图构建方法

地磁图是描述地磁场和地磁场长期变化分布的纸质或数字化图件。根据地磁图表示地理范围的大小，可分为全球地磁图、区域地磁图（其范围在数百或数千千米）和局部地磁图（其范围在数千米或数十千米）。由于全球地磁图、区域地磁图仅能反映该区域地磁的整体变化趋势，而忽略了局部地区的地磁异常细节信息，因此其精度较低，不适用于高精度的地磁导航需求。为了进行高精度的地磁导航，必须及时准确地构建和更新关注地区的局部地磁图。地磁图的构建方法主要有解析法和图解法两种。解析法是根据地磁场模型绘制地磁图，适合于表现大范围的地磁场信息，但计算量大，分析过程比较复杂。图解法是应用空间插值理论对地磁测量数据进行网格化，并在误差范围内适当描绘光滑的等值线得到地磁等值图。图解法具有形象直观、计算量小、适合表现变化细节的特点，在局部地区的地磁图构建中得到广泛的应用。

空间数据插值就是根据一组已知的空间离散测量数据或分区数据，按照某种数学关系推求出未知点或未知区域数据的数学过程。空间插值是将点数据转换成面数据的一种方法，主要用于网格化数据，估算出网格中每个节点的值。空间插值的理论假设：空间位置上越靠近的点，越可能具有相似的特征值，而距离越远的点其特征值相似的可能性越小。在局部地磁图构建过程中，经常需要进行空间数据内插，如采样点密度不够、采样点分布不合理、采样区存在空白、等值线的自动绘制、区域边界分析、曲线光滑处理、空间趋势预测、采样结果可视化等。

根据空间插值基本假设和数学本质进行分类，插值算法可分为几何方法、统计方法、空间统计方法、函数方法等。常用的空间插值算法有最小二乘法、距离加权最小二乘法、克里金(Kriging)法、曲面样条函数法等。每一种插值算法均有其适用范围和优缺点，没有绝对最优的空间内插方法，必须根据测量数据的空间分布特征选择最优方法，并对内插结果进行严格的检验。

1.2.2 载体磁场标定与补偿技术的研究现状

地磁向量场信息的实时准确获取是实现高精度地磁导航的基础。飞行器在空中航行时，由捷联式三轴磁传感器来实时测量其周围的磁场信息。该磁场信息不仅包括地磁导

航必需的地磁场信息，还包括飞行器本身的铁磁材料、导电线圈产生的载体磁场以及地磁短期变化干扰磁场等干扰信息。从目前的技术来看，载体磁场和变化干扰磁场是影响地磁测量精度的最主要因素。因此在地磁导航实际应用中，研究了各种方法来减小和消除测量中载体磁场误差。目前，克服载体磁场对磁传感器干扰的方法主要有以下几种：

(1) 在设计和建造载体时，尽量避免采用铁磁材料，同时应对载体所必需的铁磁材料进行消磁处理，以减小铁磁材料磁场对测量磁场的影响。

(2) 在磁传感器的安装位置选择上，尽量选择相对的“磁洁净区”，而远离载体上的铁磁材料。在卫星磁测和航空磁测中，一般采用伸杆、吊舱或拖鱼的方式，将磁传感器安装在远离载体磁场的非磁性伸杆的末端、非磁性吊舱中或拖曳缆绳末端，从而减小载体磁场的干扰。

(3) 对于安装位置受限的应用环境中，通常采用磁场补偿的方法来克服载体磁场的干扰。对载体磁性干扰补偿的方法主要有硬补偿和软补偿两类。硬补偿采用固定磁铁或三轴线圈，感应场补偿采用坡莫合金，电气线路涡流场补偿采用导电板，而软补偿则是通过建立载体磁场数学模型，并标定其模型参数，在实时测量中依据模型计算出干扰磁场大小并加以去除，从而达到载体磁场补偿的目的。

在实际磁场测量的应用中，这几种克服载体磁场的方法常常结合在一起使用。传统的磁补偿技术主要为硬补偿，通常采用在磁传感器周围放置各种永久磁铁、软铁球或软铁片，以抵消载体磁场的硬磁材料、软磁材料带来的干扰磁场；或者在磁传感器周围安放与载体坐标系平行的三组补偿绕组，通过调节各绕组中的电流强度来抵消载体磁场。硬补偿技术具有以下缺点：①需要对载体进行改造，以安装补偿磁材料或补偿绕组，成本较高；②补偿过程复杂，不易控制，且精度较低；③体积较大，不利于小型化和集成化。因此，在地磁导航应用中受安装位置、体积功耗等的限制，通常采用计算机软补偿技术消除载体磁场对磁传感器的影响。采用计算机软补偿的方法比较方便快捷，适用范围也比较广泛。计算机软补偿技术相对于传统的磁补偿技术，具有以下优点：①不需要对载体进行改造，大大降低了设计复杂度和成本；②补偿过程在计算机内部实现，针对各种磁环境采用对应的数学模型，使得补偿精度大大提高，而且易于实现补偿的智能化；③体积功耗小，易于小型化和集成化；④不同的软补偿技术只需更改软件即可，易于升级和维护。

关于载体磁场的数字补偿仪，国内外也有相关的报道，如美空军 C-130J “大力神”战术运输机就装备有 ASQ-81 磁感应仪和 ASA-65 磁力补偿仪作为综合探测手段。河北石家庄核工业航测遥感中心在“运五”飞机上引进的加拿大 RMS 公司生产的 AADCII 自动航空磁力数字补偿仪，可实时进行自动补偿，可以对多个磁探头的总场、梯度等 30 项指标进行补偿，补偿时不用进行日变改正和位置改正，补后标准差可达 $0.035\sim 0.08\text{nT}$ 。中国国土资源航空物探遥感中心自主研发的 CS-1 型航空磁自动数字补偿仪可以达到与 AADCII 同样的补偿效果，在频率响应上甚至还优于 AADCII 数字补偿仪。这些自动补偿仪的出现，虽然在很大程度上提高了机载磁测的精度，但这些系统还只是适于空中环境较稳定的飞机上进行自动补偿，并且产品价格非常昂贵，该产品是否适用于地面车辆、潜艇、舰船及高机动飞机、导弹还是个未知数。另外，现在的大部分的航空磁测只是测量地磁场的总强度，现有的数字补偿仪也只是对地磁场的总强度进行标量补偿。正在研

究的地磁场向量测量中,针对地磁向量的数字补偿尚未见成熟的商业产品。

目前,关于计算机补偿的方法主要有航向角的自差补偿法、地磁总强度标量的磁补偿方法、地磁场测量向量的椭球假设方法、基于神经网络的磁补偿方法等。

1. 航向角的自差补偿方法

传统的航海、航空及车辆的磁导航中,经常利用电子磁罗经来获得磁航向信息。实时获取载体航向角过程中,不仅需要进行磁偏角校正,还需要对载体磁场带来的自差(即航向误差)进行校正才能正确导航。针对航向误差,国内外学者研究了给定基准补偿法、无基准补偿法等多种校正方法,其基本思路为:根据自差理论,自差是随航向变化的,可以将自差随航向变化曲线按傅里叶级数展开并忽略高次项,建立自差与航向角间的关于三角函数的关系式。这些自差补偿法将磁罗经自身误差、安装误差、载体磁场对航向角的影响作为整体来考虑,根据建立的三角函数关系式进行自差补偿。该方法虽然具有计算简单方便、应用广泛的特点,但存在以下不足:①自差校准时间长,一般要求几个小时;②只能在指定的具有基准航向信息的校准区域进行校准;③只适用于磁罗经在水平面内工作的场合;④校准场磁纬度与载体航行位置磁纬度相差较大时,需要重新校准;⑤只是针对航向角进行补偿,不能对地磁场的丰富的向量信息进行补偿;⑥没有考虑各个误差源的特点和机理,而只是作为整体来考虑,因此补偿精度较低。

2. 地磁总强度标量的磁补偿方法

1944年美国人 W.E.Tolles、Q.B.Lawson、V.Vacquer 等发现了机载磁探仪测量数据中与载体磁场相关联的机动噪声问题,针对地磁场强度提出了一个实用的标量补偿问题的解决方案。该方案从飞机磁场的种类、磁补偿原理以及飞机结构和物理特性出发将物理模型转化为数学模型,并求解出了飞机恒定磁场、感应磁场、涡流磁场的数学表达式,即 Tolles-Lawson 方程。其基本思想是:当飞机在飞行过程中作小幅度的正弦横滚、俯仰机动时,地磁场向量在载体坐标系中的方向余弦角是关于磁偏角 D 、磁倾角 I 及航向角、俯仰角、横滚角的三角函数。在 Tolles-Lawson 方程中可以确定出对机动信号有影响的磁场项限定为 16 项,其中恒定场 3 项、感应场 5 项、涡流场 8 项。通过一系列的机动飞行,可以将这些飞机磁场各项进行确立、分离、求取,然后再根据这些磁场项对地磁强度测量进行实时的标量补偿。自 Tolles-Lawson 方法提出后,人们就不断研究针对作小幅度正弦横滚、俯仰机动时如何快速有效地对方程中的各项系数进行确立、分离和求取的方法。基于 Tolles-Lawson 方程的磁补偿技术理论比较成熟,补偿精度高,已在航空磁测领域中得到广泛应用。但是该方法所需的校准时间较长;补偿模式中要求飞机应尽量平飞进行磁测,不适合高速、高机动的应用场合;只是对总磁场强度标量进行补偿,不适用于对磁场向量的补偿。

3. 地磁场向量补偿的椭球假设方法

随着三轴捷联式磁通门传感器在航空航天领域的应用,科研人员开始关注地磁场向量测量中的磁误差补偿问题。2001年斯坦福大学的 Demoz Gebre-Egziabher、Gabriel H. Elkaim、J. David Powell 和 Bradford W. Parkinson 等提出了“二维磁场测量轨迹的椭圆假设方法”,进而又推广到“三维磁场测量轨迹的椭球假设方法”。

椭球假设方法的基本思想是:当载体在某一固定位置处作各种姿态的机动时,由于地磁场向量为—常向量,理想的三轴捷联式磁传感器测量的地磁场向量在载体坐标系中