

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

水下地磁导航 适配性研究

Research on Matching Suitability
for Underwater Geomagnetic Navigation

王鹏 曹聚亮 胡小平 著 



国防工业出版社

National Defense Industry Press

国防科学技术大学优秀博士学位论文丛书

水下地磁导航适配性研究

**Research on Matching Suitability for
Underwater Geomagnetic Navigation**

王 鹏 曹聚亮 胡小平 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

水下地磁导航适配性研究/王鹏,曹聚亮,胡小平著.
—北京:国防工业出版社,2017.2

ISBN 978-7-118-10274-1

I. ①水… II. ①王… ②曹… ③胡… III. ①水下航行—地磁导航—研究 IV. ①U675.5 ②TN96

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第023775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 10 字数 170千字

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员,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。

结集出版的目的是有三: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

潜航器是人类探索和开发海洋的重要工具。随着潜航器趋于深海远航程方向的发展,水下长航时高精度自主导航已成为发展潜航器亟待解决的瓶颈技术之一。地磁导航具有全天候、全地域、无辐射、高隐蔽性以及误差不随时间变化等优点,将地磁导航同惯性导航进行组合可以有效满足潜航器的导航任务需求。

地磁导航的核心在于获取精准的匹配位置信息,而匹配精度不仅与所采用的匹配算法有关,还与地磁图的适配性有着重要的关系。本书针对水下地磁导航中的适配性问题展开研究,目的在于选出高可靠性的地磁适配区和地磁适配方向,并进一步为潜航器的导航定位提供支持。

首先,结合水下环境以及地磁导航特点对水下地磁导航适配性问题的约束条件进行分析,并进一步建立水下地磁导航适配性问题的基本框架。接着从该框架出发,针对适配性问题的研究前提进行了讨论:一方面从惯性导航系统误差传播的角度建立了候选匹配区的尺寸模型;另一方面构建了基本适配特征体系,给出了适配性评价指标——匹配概率的合理定义,并在此基础上建立了面向地磁适配性分析的数据库。

然后,重点研究了地磁区域适配性和方向适配性的分析方法,主要内容如下:

(1) 提出了基于基因表达式编程的地磁进化合成特征构建方法。

将合成特征同匹配概率之间的相关系数作为基因表达式编程的适应度函数,并通过模仿生物学的遗传过程使合成特征不断进化,最终将基因表达式编程搜索得到的基本适配特征的最优组合作为地磁进化合成特征。该方法在特征合成时可以实现对基本适配特征的自适应选取,同时还能够生成丰富的合成特征数学构型,为此所构建的进化合成特征能够有效融合各基本适配特征的内在优势。实验结果表明,构建的进化合成特征具有较好的稳健性,经其优选出的适配区具有较高的平均匹配概率。

(2) 提出了候选匹配区自组织优化分类方法。

将候选匹配区的分类问题统一在模式识别的框架下,利用遗传算法和支持

向量机实现对候选匹配区的自组织优化分类。其中,将支持向量机用作候选匹配区的分类器,而遗传算法则用于自组织选取利于分类的最优特征子集以及优化支持向量机参数;同时,为满足实际问题需求,还引入一对一策略用以解决候选匹配区的多分类问题。实验结果表明,利用遗传算法从特征选择和参数优化两个角度同时对支持向量机进行优化,可以显著提高候选匹配区的分类正确率,并且得到的分类结果还具有较低的误判风险。

(3) 提出了面向地磁方向适配性分析的层次决策方案。

首先,利用 Gabor 滤波和灰度共生矩阵分别从频域和空域的角度对候选匹配区的方向适配性进行了分析;与此同时,通过对 Gabor 滤波和灰度共生矩阵参数的合理设定,使得提取出的方向适配特征与方向匹配概率之间具有较好的一致性;然后,利用自适应神经模糊推理系统建立了 Gabor 滤波和灰度共生矩阵之间的互补模型,并进一步构建了面向地磁方向适配性分析的层次决策方案。实验结果表明,构建的决策方案是有效的,它可以根据给定候选匹配区的特点自适应地选择恰当的方向适配性分析方法,并且能够获得比单独使用 Gabor 滤波或者灰度共生矩阵更优的分析结果。

最后,在上述理论研究成果的基础上,进行了水下地磁导航适配性分析综合仿真实验。一方面分析了向下延拓对地磁图适配性的影响,并指出向下延拓会使地磁图的适配性能得到一定程度的提升;另一方面,利用本书提出的适配性分析方法进行了适配区和适配方向的选取实验,结果表明优选出的适配区和适配方向具有较高的匹配概率,在所选区域和方向上进行地磁匹配可以获得较为理想的定位精度。另外,还结合水下地磁导航实际,提出了适配性约束下的航迹规划策略,生成的航迹既能够保证潜航器成功规避威胁,同时还可以满足潜航器的运动约束,使其顺利通过适配区。以上实验结果进一步验证了本书所提适配性分析方法的有效性,相关研究结论可以为地磁匹配和航迹规划等任务提供有益的指导。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	3
1.2 研究现状及评述	3
1.2.1 地磁导航技术研究现状	3
1.2.2 适配性问题研究现状	5
1.2.3 研究现状评述	10
1.3 研究内容与主要贡献	11
1.3.1 研究内容	11
1.3.2 主要贡献	13
1.4 本书组织结构	14
第 2 章 水下地磁导航适配性问题综合分析	16
2.1 引言	16
2.2 水下地磁导航适配性问题约束条件分析	16
2.2.1 地磁基准图制备	16
2.2.2 构图要素选取	17
2.2.3 地磁匹配算法	18
2.2.4 惯性导航系统精度	18
2.2.5 潜航器运动约束	18
2.2.6 水下地磁图获取	19
2.3 水下地磁导航适配性问题基本框架	19
2.4 候选匹配区尺寸建模	21
2.4.1 问题分析	21

2.4.2	候选匹配区尺寸模型构建	22
2.4.3	算例分析	26
2.5	面向地磁适配性分析的数据库构建	26
2.5.1	基本适配特征	26
2.5.2	匹配概率	31
2.5.3	数据库构建	36
2.6	本章小结	36
第3章	基于基因表达式编程的地磁进化合成特征构建	37
3.1	引言	37
3.2	地磁进化合成特征构建问题分析	38
3.3	基于基因表达式编程的地磁进化合成特征构建策略	39
3.3.1	合成特征基因编码	39
3.3.2	合成特征进化过程	41
3.3.3	进化适应度函数	46
3.3.4	进化合成特征构建方法	47
3.4	地磁进化合成特征性能评估实验	48
3.4.1	实验环境配置	48
3.4.2	实验验证与分析	51
3.4.3	合成特征性能比较	56
3.4.4	进一步讨论	61
3.5	本章小结	63
第4章	候选匹配区自组织优化分类方法	65
4.1	引言	65
4.2	候选匹配区自组织优化分类问题分析	66
4.3	候选匹配区分类器:支持向量机	67
4.3.1	支持向量机分类性能影响因素	67
4.3.2	候选匹配区多分类策略	69
4.4	基于 GA-SVM 的候选匹配区自组织优化分类方法	70
4.4.1	面向候选匹配区自组织优化分类的遗传算法设计	70
4.4.2	候选匹配区自组织优化分类方法:二分类情形	74

4.4.3	候选匹配区自组织优化分类方法:多分类情形	74
4.5	自组织优化分类方法性能评估实验	76
4.5.1	实验环境配置	76
4.5.2	实验验证与分析	78
4.5.3	分类方法性能比较	81
4.5.4	进一步讨论	84
4.6	本章小结	87
第5章	面向地磁方向适配性分析的层次决策方案	88
5.1	引言	88
5.2	地磁方向适配性问题分析	89
5.2.1	方向匹配概率	89
5.2.2	问题描述	89
5.3	基于 Gabor 滤波的地磁方向适配性分析	90
5.3.1	Gabor 方向特征提取	91
5.3.2	面向地磁方向适配性分析的 Gabor 滤波器频域设计	92
5.4	基于灰度共生矩阵的地磁方向适配性分析	96
5.4.1	灰度共生矩阵方向特征提取	96
5.4.2	灰度共生矩阵参数对方向适配特征性能的影响分析	98
5.4.3	面向地磁方向适配性分析的特征融合	100
5.5	地磁方向适配性分析层次决策方案	101
5.5.1	Gabor 滤波和灰度共生矩阵的互补关系分析	101
5.5.2	基于自适应神经模糊推理系统的互补模型构建	103
5.5.3	层次决策方案	105
5.6	层次决策方案性能评估实验	106
5.6.1	实验环境配置	106
5.6.2	实验验证与分析	108
5.6.3	基于不同建模方法的层次决策方案性能比较	111
5.6.4	进一步讨论	112
5.7	本章小结	114
第6章	水下地磁导航适配性分析综合仿真实验	116
6.1	引言	116

6.2	地磁场向下延拓对适配性的影响	117
6.3	水下地磁导航适配区选取及结果检验	118
6.3.1	基于进化合成特征的地磁适配区选取及结果检验	119
6.3.2	基于自组织优化分类器的地磁适配区选取及结果检验	122
6.3.3	区域适配性分析方法的应用策略	123
6.4	水下地磁导航适配方向选取及结果检验	125
6.4.1	基于层次决策方案的地磁适配方向选取	125
6.4.2	地磁适配方向选取结果检验	126
6.5	适配性约束下的水下地磁导航航迹规划应用算例	128
6.5.1	水下地磁导航航迹规划的约束条件	128
6.5.2	适配性约束下的水下地磁导航航迹规划策略	129
6.5.3	算例分析	130
6.6	本章小结	131
第7章	总结与展望	132
7.1	工作总结	132
7.2	进一步研究展望	133
附录 A	基于最大离差和最大熵的多属性决策方法	135
附录 B	Tikhonov - Lcurve 向下延拓算法	137
附录 C	基于粒子群优化算法的水下地磁导航航迹规划方法	138
	参考文献	140

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

海洋占地球表面积的 70.8%，拥有 14 亿 km^3 的体积。海洋中蕴藏着丰富的生物、矿产、化学和动力资源，对国家经济的发展起着重要的支撑作用；同时，作为濒海大国，海防也是我国国防的重要组成部分。21 世纪是海洋的世纪，海洋空间的开发和利用将成为我国经济发展和国防建设的战略重点之一^[1-3]。

潜航器(Underwater Vehicle)是人类探索和开发海洋的重要工具，它可以承担海洋勘探、海洋救险与打捞、水下情报搜集以及水下武器对抗等多项任务。潜航器又被称作水下机器人、水下潜航器，是当前世界海洋大国的研究热点之一。美国海军于 2005 年公布了升级版的“海军无人潜航器主计划”，该计划以“21 世纪海上力量”为指南，确定了无人潜航器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)的使命任务以及所应具备的能力；英国、意大利、丹麦等欧洲国家则根据 EUREKA 计划在缆控潜航器(Remotely Operated Vehicle, ROV)的研究方面保持了超前的发展优势；日本在深海探测方面发展迅速，其研制的“海沟”号深潜器设计的最大下潜深度为 11000m；我国则在 2002 年将深海载人潜航器的研制列为“863”计划重大专项，启动了“蛟龙”号载人潜航器的研制工作。2012 年 6 月 27 日，“蛟龙”号在西太平洋的马里亚纳海沟海试成功，最大下潜深度达到 7062m，刷新了我国载人深潜的纪录，这对于加快我国开发利用深海资源的步伐具有重要意义^[1-4]。

潜航器本质上属于特种机器人，通常由硬件系统、导航和通信系统、控制系统三部分组成，其中导航系统的作用是为潜航器提供位置、速度和姿态等信息^[1]。随着潜航器趋于深海远航程方向的发展，水下长航时高精度自主导航已成为发展潜航器亟待解决的瓶颈技术之一^[2]。

目前潜航器可用的水下导航定位系统主要有水深计、定向系统、水下多普勒测速仪、声学导航系统、卫星导航定位接收机以及惯性导航系统(Inertial Naviga-

tion System, INS)等。然而,单一的导航方式很难满足水下导航长航时、高精度、高可靠性的要求,因此通常将两种或两种以上的导航系统结合在一起进行组合导航。“捷联惯性导航系统+多普勒测速”是目前潜航器常用的组合导航方案,但是其导航精度也只能保持在航程的千分之几水平;对于“捷联惯性导航系统+卫星导航定位接收机”的组合导航方案而言,虽然能够获得较高的定位精度,但是必须以降低潜航深度和牺牲隐蔽性为代价,这显然无法满足军事应用上的需求^[2]。因此,随着潜航器技术的日益发展和应用领域的不断拓展,有必要探索和研究新的水下长航时高精度自主导航技术。

地磁场是地球固有的保守力场,它蕴含着丰富的导航信息资源。近年来,随着地磁测量、计算机、微处理等技术的进步,地磁导航技术也得到了长足的发展。地磁导航具有全天候、全地域、无辐射、高隐蔽性以及误差不随时间积累等优点,将地磁导航同惯性导航进行组合则可以有效满足潜航器长航时高精度自主导航的需求^[2]。惯性/地磁匹配组合导航的基本原理是:在惯性导航系统提供的位置信息基础上,通过地磁匹配算法将地磁测量序列和事先存储的地磁图进行配准,并利用获取的地磁匹配结果对惯性导航系统的累积误差进行修正。惯性/地磁匹配组合导航系统的构成如图 1.1 所示。

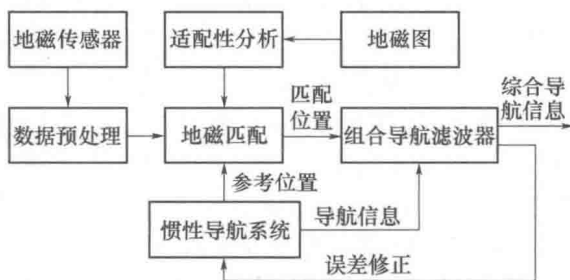


图 1.1 惯性/地磁匹配组合导航系统

获取精准的匹配位置信息是地磁导航的核心所在。在地磁匹配定位中,匹配精度不仅与所选用的地磁匹配算法有关,还与地磁图本身的特征有着重要的关系^[5],通常将这一类影响因素称作地磁图适配性或者地磁适配性。在不引起歧义的情况下,也可以将其简称为适配性(Matching Suitability)。所谓适配性是指地磁图对匹配的适应性,即地磁场特征在匹配定位中表征地理位置的能力。

本书以水下地磁导航为应用背景,针对地磁图的适配性问题展开研究,目的在于为潜航器的导航定位选取高可靠性的地磁适配区和地磁适配方向。

1.1.2 研究意义

适配性研究是地磁导航的关键技术之一,对地磁图的区域和方向适配性能进行分析具有重要的理论价值和实际意义。

从理论价值角度来讲,当前关于地磁匹配算法的研究已经相对比较成熟,但是关于地磁适配区和适配方向选取问题的研究却并不充分,因此地磁适配性研究的理论意义就显得尤为突出。另外,考虑到水下航行的实际环境,适配性问题会受到地磁匹配算法、惯性导航系统精度、潜航器运动状态以及水下地磁图获取等多重条件的约束,为此通过地磁适配性问题将上述多个方面的相关理论结合在一起,将有利于进一步深化水下地磁导航的基本理论。

从实际意义角度来讲,适配性研究过程中所构建的适配性能评价策略可以为合理确定地磁导航适配区和适配方向提供依据。将特征明显、信息丰富、适应性强、可导航性好的区域和方向用于地磁匹配,可以有效提高匹配定位的精确性和实时性。另外,地磁适配性研究在水下地磁导航中处于基础性地位,其研究成果不仅可以为地磁匹配定位服务,还可以为潜航器的航迹规划任务提供有益的指导。

1.2 研究现状及评述

地磁适配性研究不仅应该考虑到地磁图自身的特点,还应当与地磁导航的实际约束相结合。因此,为了使地磁适配性问题的论述更为清晰有序,本节首先介绍地磁导航技术的研究现状,然后再对适配性问题的研究进展进行综述,最后针对水下地磁导航适配性研究中有待解决的若干问题进行评述。

1.2.1 地磁导航技术研究现状

从古至今,人类对地磁场资源的开发和利用进行了不懈的努力和探索。20世纪中叶,地磁导航技术成为导航领域的研究热点。

20世纪60年代中期,美国的E-Systems公司设计了基于地磁异常场等值线匹配的MAGCOM(MAGnetic COntour Matching)系统,并于70年代利用美国海军获取的某区域地磁异常数据对该系统进行了离线实验^[6]。1968年,英国提出了基于地磁图的组合导航技术,论述了通过实测地磁数据与预存地磁图的比对进行位置估计的可行性^[7,8]。1974-1976年,苏联的Ramenskoye公司采用磁通

门传感器,以地磁场等值线匹配制导的方式进行了离线实验并取得了成功^[2]。80年代,瑞典也开始了地磁导航技术的研究工作,Tyrèn^[9,10]介绍了利用地磁异常进行测速定位的方法并进行了海上实验,同时指出当载体在海中航行时,应该考虑到其自身的磁场特性。2003年,美国国防部文件称,其研制的纯地磁导航系统的定位精度在地面和空中可以达到30m(CEP),在水下可以达到500m(CEP)^[11]。2004年,俄罗斯将地磁等值线制导系统装备在SS-19导弹上,实现了导弹的变轨制导;该导弹在大气层中并不按照抛物线飞行,而是沿地磁等值线飞行,这使得导弹的突防能力大大提高^[2]。2006年,美国的Goldenberg^[12]提出了基于三维地磁图的测速定位方法,通过矢量匹配的方式获得了精确的导航信息。2009年,日本的科研人员提出了基于地磁图和等深线图的自主潜航器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)导航定位方法,并利用骏河湾(Suruga Bay)和Harima海域的地磁场数据和水深数据进行了仿真实验^[13]。

国内对地磁导航技术的研究相对较晚,但是近年来也取得了较为丰硕的研究成果:①在理论研究方面,国防科学技术大学的刘颖等人^[14]提出了简单易操作的基于等值线约束的地磁匹配算法;北京大学的林沂^[15]从“粗—精”两级匹配的角度提出了面向水下地磁导航的匹配算法;西北工业大学的周军等人^[16]提出了基于概率神经网络的地磁匹配算法,用于解决在地磁特征不明显的区域无法实现地磁导航的问题;哈尔滨工业大学的李明明等人^[17]提出了基于无迹粒子滤波(Unscented Particle Filter)和卡尔曼滤波(Kalman Filter)的地磁导航算法,该算法可以实现对飞行器所有运动学状态的估计;中国科学院的郑晖等人^[18]则将重力导航技术和地磁导航技术相结合用于水下导航,仿真结果表明提出的方法比单独使用重力场或者地磁场具有更高的导航定位精度。②在实验验证方面,中国航天科工集团第三研究院三十五研究所于2004年进行了地磁匹配定位的静态实验,初步验证了地磁匹配的可行性^[2];中国船舶重工集团第707研究所于2008年在地面上开展了地磁导航的相关实验验证^[2];北京大学的林沂在我国渤海海域进行了水面地磁导航实验,并取得了393.63m的定位精度^[15];国防科学技术大学于2007年研制出了惯性/地磁匹配组合导航系统样机,并在2008年、2009年和2011年分别进行了地面车载实验、水面船载实验和水下实验,验证了惯性/地磁匹配组合导航的技术可行性^[2,19,20]。

以上介绍的国内外研究成果多数都将关注的重点放在了地磁匹配算法的研究上,然而制约地磁导航工程化进程的除了地磁匹配算法之外,还包括地磁场延拓、地磁图适配性以及外干扰场补偿等多项关键技术,为此本书针对其中的地磁图适配性问题展开深入的研究。

1.2.2 适配性问题研究现状

1.2.2.1 地磁适配性研究的基本思路

首先介绍地磁适配性研究过程中涉及的一些基本概念。

1. 基本适配特征

地磁图是以网格形式存储在计算机中的。在适配性研究领域,将从地磁图中提取出的特征称为基本适配特征(Basic Suitable - matching Feature)。每个基本适配特征都反映了地磁图适配性能的一个方面。

2. 地磁基准图、候选匹配区、适配区

(1) 地磁基准图(Geomagnetic Reference Map):地磁导航过程中预存在计算机中的地磁图,它是适配性分析的重要数据来源之一。

(2) 候选匹配区(Candidate Matching Area):在地磁基准图中选取的小块矩形区域地磁图,它是适配性分析的基本对象。

(3) 适配区(Suitable - matching Area):通过对候选匹配区适配性的分析,将适配性能优良的区域作为适配区。

以上三种不同属性的地磁图如图 1.2 所示,其中 grid 表示网格。

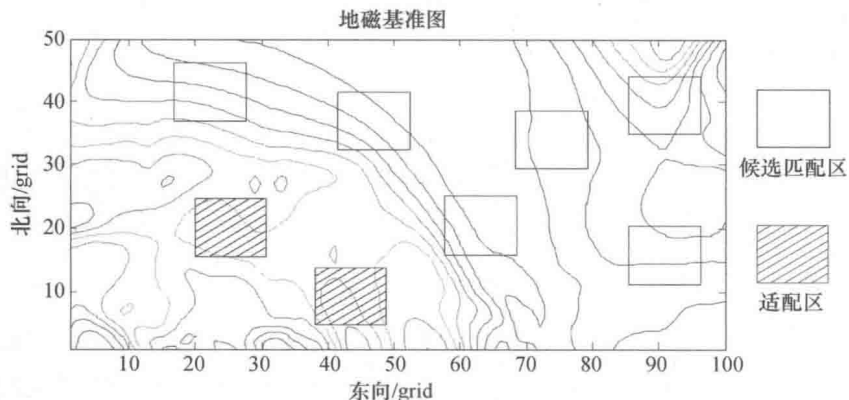


图 1.2 地磁基准图、候选匹配区、适配区

适配性问题主要是针对候选匹配区的适配性能进行分析。迄今为止,适配性研究主要从如下两个角度展开:基于图像本身相关运算和基于适配特征^[21]。其中,前者在景象适配性领域中有所涉及^[22],而地磁适配性领域却很少见;后者则是目前适配性研究领域的主流,下面将进行重点介绍。