

采用矩谐分析和支持向量机的 地磁导航基准图构建方法

乔玉坤, 王仕成, 张金生, 张琪, 孙渊

(第二炮兵工程学院精确制导与仿真实验室, 710025, 西安)

摘要: 为便于在地磁导航工程应用中进行载体磁场和地磁场变化的修正,提出了一种采用矩谐分析和支持向量机的地磁基准图构建方法.在导航区域中心采用矩谐分析法来预测基准数据,包括地磁场剩余值计算、地理坐标转换、地磁分量转换、矩谐系数求解及中心区域基准数据预测等,以提高地磁基准图的精度并利于修正;在导航区域边缘采用支持向量机法来预测基准数据,包括核函数选取、参数优化、模型训练及边缘区域数据预测等,以减弱边界效应的影响;采用粒子群优化算法对支持向量机参数进行优化,以提高算法的运算效率.试验结果表明,该方法可提高所构建地磁基准图的精度,降低算法的运行时间.

关键词: 矩谐分析;支持向量机;粒子群优化;地磁导航;基准图

中图分类号: U666.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)10-0047-05

A Constructing Method of Reference Maps for Geomagnetic Navigation Using Rectangular Harmonic Analysis and Support Vector Machine

QIAOYukun, WANG Shicheng, ZHANG Jinsheng, ZHANG Qi, SUN Yuan

(Laboratory of Accurate Guidance and Simulation, The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

Abstract: A constructing method of geomagnetic reference maps is proposed using rectangular harmonic analysis and support vector machine to conveniently correct both the magnetic field variation of vehicles and geomagnetic field variation in engineering application of geomagnetic navigation. Rectangular harmonic analysis method is adopted to predict reference data in heartland of the navigation region so that the accuracy of geomagnetic reference maps can be improved or conveniently corrected. The processes include calculation of geomagnetic field remnants, transformations of geographical coordinates and geomagnetic components, calculation of rectangular harmonic coefficients, and prediction of reference data in heartland region, etc. The support vector machine method is adopted to predict reference data in the margin of the navigation region to reduce the influence of edge effects, and the data include selection of kernel functions, optimization of parameters, model training, and prediction of reference data in marginal region, etc. Parameters of support vector machine are determined using particle swarm optimization algorithm to improve the computational efficiency of the method. Experimental results show that the accuracy of geomagnetic reference maps constructed by the proposed method is improved and the runtime of the proposed method is reduced markedly.

Keywords: rectangular harmonic analysis; support vector machine; particle swarm optimization; geomagnetic navigation; reference map

高精度地磁基准图的构建是实现精确稳定导航的关键,对区域地磁场进行建模和对测量数据进行插值是地磁基准图构建的两种可行方法.黄学工、杨功流、王哲及张晓明等^[1-4]分别研究了各种插值方法在地磁基准图构建中的应用,如克立格、加权反距离和径向基函数法等;杨云涛、乔玉坤等^[5-7]探讨了多项式和曲面样条函数拟合法等在地磁基准图构建中的应用;王仕成、乔玉坤等^[8-9]将人工神经网络、支持向量机等方法引入地磁基准图的构建,试验结果表明,可取得与克立格等插值方法基本相当的精度.

在地磁导航工程应用中,地磁场测量不可避免地受到载体自身磁场和地磁变化场等的影响,其中载体壳体磁场和变化磁场中的磁暴等影响较为显著,如不予以修正将最终导致产生较大的导航定位误差.磁场是矢量场,因此采用基于三分量测量数据的形式便于进行矢量合成,虽然目前国内在地磁场三分量数据测量上仍存在一些现实的困难,比如测量角度误差的控制等,但从长远看,三分量测量数据形式仍是最佳选择.

本文提出了一种地磁基准图构建方法,旨在依据有限测量数据尽可能提高地磁基准图构建的精度,同时提高算法的运行效率.

1 基准图构建方法

1.1 方法的基本思想

矩谐分析(RHA)和球冠谐和分析(SCHA)方法是两种基于三分量测量数据的区域地磁场建模方法,二者的选择取决于建模区域的大小,当地球表面可以用平面来近似时采用矩谐分析方法,当地球表面大到不能用平面去近似时采用球冠谐和分析更为合理^[10-14].地磁匹配导航区域一般较小,因此矩谐分析是较为理想的地磁基准图构建方法,但采用该方法的不足之处是其存在较为明显的边缘效应.在条件允许的情况下,可以通过增加测量区域范围来减小矩谐分析方法的边界效应,以增加经济成本为代价来提高地磁导航基准图的精度,但实际上除本国领土和公海之外,其他目标区域的精确地磁数据测量很难获取,因此在本文方法中,中心区域采用由矩谐分析方法计算得到的高精度地磁基准数据,在边缘区域不采用矩谐分析方法.

从数值拟合的角度看,区域地磁场建模的实质是建立该区域中的部分离散测量数据与相应的因素之间的函数关系,通过函数关系预测得到该区域内的其他地磁数据.严格地讲,地磁场是与其相对应的

地理经度、纬度、高程以及时间等因素之间的复杂的多元非线性函数关系,是高维问题.与人工神经网络相比,支持向量机(SVM)基于结构风险最小化原则,具有全局最优和泛化推广能力强等特点^[15-17].实验结果表明,基于支持向量机的地磁基准图构建方法精度适中,但其建模误差与数据所在的区域关系不大,即不存在明显的边界效应.因此,为降低边界效应的影响,本文在边缘区域采用支持向量机建模方法预测得到的基准数据,提高了地磁基准图的整体精度.

粒子群优化(PSO)算法具有较强的全局收敛能力和鲁棒性,适合于复杂环境中优化问题的求解^[18-19].由于采用支持向量机方法建模时存在可调整参数(如惩罚系数等),加之为保证地磁导航的精度,建立区域地磁场模型时使用的测量数据也相对较多,如果使用常规的交叉验证法来确定支持向量机的参数,耗时会很长,用试凑法则会引入较多的主观因素,而且也难以取得满意的结果,因此,本文采用粒子群优化算法进行支持向量机的参数优选,一方面可避免过多的人为干预,提高方法的智能化程度,另一方面可减少参数优选所需的时间,提高算法的运行效率.

1.2 方法的流程

步骤 1 对测量得到的地磁基准图构建区域内的地磁数据进行日变改正、粗大误剔除等预处理.

步骤 2 根据地磁导航的精度要求和区域地磁数据的特点设定中心区域和边缘区域的界限范围.

步骤 3 利用矩谐分析方法获取中心区域的地磁基准数据,主要包括地磁场剩余值计算、地理坐标转换、地磁分量转换、矩谐系数求解和中心区域地磁基准数据获取等步骤^[10-14].

(1)地磁场剩余值的计算是指根据地磁场绝对观测值和 IGRF 理论计算值进行运算,从而得到地磁场剩余值,计算公式为

$$\left. \begin{aligned} X_R &= X_o - X_c \\ Y_R &= Y_o - Y_c \\ Z_R &= Z_o - Z_c \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: X_R 、 Y_R 和 Z_R 为地磁场三分量的剩余磁场值; X_o 、 Y_o 和 Z_o 为绝对观测值; X_c 、 Y_c 和 Z_c 为根据 IGRF 计算的理论值.

(2)地理坐标变换是指按照式(2)和式(3)将地理坐标系转换至直角坐标系

$$\left. \begin{aligned} x &= R_e \sin\varphi \cos\alpha \\ y &= -R_e \sin\varphi \sin\alpha \\ z &= R_e (1 - \cos\varphi) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \arccos[\cos\theta_0 \cos\theta + \sin\theta_0 \sin\theta \cos(\lambda_0 - \lambda)] \\ \alpha &= \arcsin(\sin\theta \sin(\lambda_0 - \lambda) / \sin\varphi) \end{aligned} \right\}$$

(3)

式中: x,y,z 为直角坐标系中的坐标; φ,α 为中间变量; θ,λ 为地理坐标系中的余纬和经度; θ_0,λ_0 为直角坐标系中原点位置的余纬和经度; $R_e=6\,371.2\text{ km}$ 为地球半径。

(3)地磁分量变换是指根据式(4)和式(5)将剩余磁场值转换为直角坐标系中的磁场分量

$$\left. \begin{aligned} B_x &= -\bar{X}\cos\theta_0\cos\lambda_0 - \bar{Y}\cos\theta_0\sin\lambda_0 - \bar{Z}\sin\theta_0 \\ B_y &= -\bar{X}\sin\lambda_0 + \bar{Y}\cos\theta_0 \\ B_z &= -\bar{X}\sin\theta_0\cos\lambda_0 - \bar{Y}\sin\theta_0\sin\lambda_0 + \bar{Z}\cos\theta_0 \end{aligned} \right\}$$

(4)

$$\left. \begin{aligned} \bar{X} &= -X_R\cos\theta\cos\lambda - Y_R\sin\lambda - Z_R\sin\theta\cos\lambda \\ \bar{Y} &= -X_R\cos\theta\sin\lambda + Y_R\cos\lambda - Z_R\sin\theta\sin\lambda \\ \bar{Z} &= X_R\sin\theta - Z_R\cos\theta \end{aligned} \right\}$$

(5)

(4)矩谐系数求解是指根据各个测点的矩谐坐标和各个分量的矩谐剩余值,用最小二乘法求解得到矩谐系数,详细过程参见文献[10-14]。

(5)中心区域地磁基准数据获取是指根据上述得到的矩谐系数,计算中心区域的地磁基准数据。

步骤 4 利用支持向量机方法获取边缘区域的地磁基准数据,主要包括支持向量机核函数选择、基于粒子群优化的支持向量机参数优化、支持向量机训练及边缘区域地磁基准数据获取等步骤^[15-17]。

(1)SVM 核函数的选取是指综合理论分析和构建结果选取适用的核函数;

(2)基于 PSO 的 SVM 参数优化是指在参数可选区间之内,以最小误差为适应度函数,采用 PSO 方法对 SVM 的参数进行优化^[18-19];

(3)SVM 训练是指根据 PSO 优化得到的 SVM 参数,利用测量数据对 SVM 模型进行训练;

(4)边缘区域地磁基准数据获取是指由训练后的 SVM 模型计算边缘区域的地磁基准数据;

步骤 5 综合步骤 3 和步骤 4,得到整个区域的地磁基准数据,对交界部分进行平滑处理,并对地磁基准图的构建精度进行评价。

2 地磁基准图构建实验与结果分析

2.1 实验数据

原始数据为三分量测量数据(F,D,I),从中选取 15×15 网格共 225 个测点,区域面积约为 14 km

$\times 14\text{ km}$,其测点分布如图 1 所示,其中浅色部分表示中心区域,深色部分表示边缘区域,圆形表示的 176 个测点数据用于建立模型,菱形表示的 49 个测点数据用于精度验证,最终构建的地磁基准图特征量采用总强度 F 的绝对值。

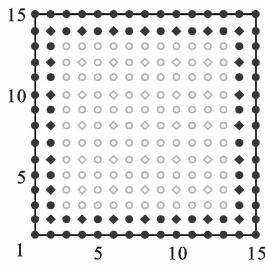


图 1 实验数据分布示意图

2.2 实验过程与结果分析

实验过程中矩谐分析方法的均方根误差(E_{RMS})随模型阶数的变化情况如表 1 所示.从表 1 可以看出,当模型阶数增加至 7 时,其 E_{RMS} 已无明显变化,因此,取矩谐模型阶数为 7。

表 1 均方根误差随矩谐分析阶数的变化

阶数	3	4	5	6	7	8
E_{RMS}/nT	102.0	94.4	89.3	86.5	84.6	84.6

为验证支持向量机采用不同核函数时对基准图精度的影响,采用常用的 4 种核函数分别进行了实验, E_{RMS} 结果对比如表 2 所示,由表 2 可见,采用径向基核函数时 E_{RMS} 最小.同时,理论分析和大量实验结果也表明,径向基核函数是应用最广泛、稳定性较好、学习能力较强的核函数,不受维度、样本量的限制,具有较宽的收敛域,且具有参数少、易于掌握的优点.因此,综合上述分析和实验结果,本文方法中支持向量机采用了径向基核函数。

表 2 4 种支持向量机核函数的实验均方根误差

核函数	线性	多项式	径向基	Sigmoid
E_{RMS}/nT	242.1	112.6	99.2	96.5

为节省实验运算时间,首先采用试凑法将支持向量机 3 个参数的区间初步确定如下: $C\in[300,600],\sigma\in[0.1,1],\epsilon\in[0.01,0.1]$.然后,采用粒子群优化算法对这 3 个参数进行优化,优化后的参数经取整后为 $C=480,\sigma=0.23,\epsilon=0.05$ 。

为验证采用粒子群优化算法在提高计算效率方面的优越性,将其与交叉验证法进行了比较,交叉验证中 C 、 σ 和 ϵ 的步长分别取为 10、0.1 和 0.01. 实验所用机器的配置如下: 主板为 Intel Pentium D, CPU 主频为 2.80 GHz, 内存为 512 MB, 操作系统为 Windows XP, 采用 Matlab 软件进行编程运算. 验证结果表明: 采用粒子群优化算法和交叉验证法的运算时间分别为 0.9 和 37.6 min.

为验证本文方法的有效性,分别使用矩谐分析方法、支持向量机方法和本文提出的基于 RHA 和 PSO-SVM 的方法进行地磁基准图的构建实验. 图 2 为由原始数据绘制的地磁场总强度等值线图,图 3 为采用本文方法得到的地磁场总强度等值线图,表 3 列出了采用上述 3 种不同方法时得到的地磁基准图误差结果.

从图 2 和图 3 可看出,用原始数据绘制的等值线图和采用本文方法得到的基准数据绘制的等值线图在总体形态上十分相似,只在一些局部形态上存在小的差异,说明本文所提方法可较为准确地反映该区域中地磁异常的分布情况,由于地磁导航算法采用测量序列而非单点匹配的方法,因此,单独存在的较小差异不会对匹配结果造成大的影响. 从表 3 可看出,采用本文方法构建得到的地磁基准图的误差低于分别使用矩谐分析或支持向量机方法时的误差,表明采用本文方法可提高地磁基准图的精度.

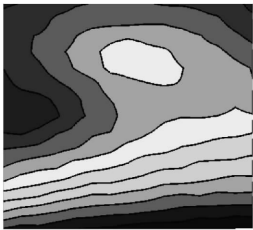


图 2 原始测量数据的等值线图

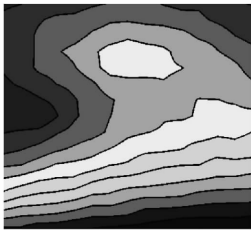


图 3 本文方法的等值线图

表 3 第 1 组数据的误差比较

精度指标	RHA	SVM	本文方法
E_{RMS}/nT	84.6	99.2	75.7
平均绝对误差 E_{MA}/nT	48.1	51.0	45.1

为避免实验结果的偶然性,在同一较大区域内共取了区域大小、网格间距和数据分布均相同的 3 组数据(少部分数据有重叠)进行实验,另外 2 组数据的实验方案和流程与之相同,限于篇幅略去了详细实验过程,其误差结果对比见表 4 和表 5. 从表 4

和表 5 可看出,采用本文方法构建得到的地磁基准图的误差低于分别使用二者时的误差,进一步表明了本文方法的有效性.

表 4 第 2 组数据的误差比较

精度指标	RHA	SVM	本文方法
E_{RMS}/nT	89.5	101.6	77.3
E_{MA}/nT	50.2	53.7	47.0

表 5 第 3 组数据的误差比较

精度指标	RHA	SVM	本文方法
E_{RMS}/nT	72.0	88.3	65.5
E_{MA}/nT	37.8	41.6	34.5

3 结 论

为便于进行载体和变化磁场的修正,本文提出了一种基于 RHA 和 PSO-SVM 的地磁导航基准图构建方法,试验结果表明,该方法可提高地磁基准图的精度,同时显著缩短算法的运行时间.

参考文献:

[1] 黄学功,房建成,刘刚,等. 地磁图制备方法及其有效性评价[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(7): 891-894.
HUANG Xuegong, FANG Jiancheng, LIU Gang, et al. Geomagnetic mapping and validity estimation [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35 (7):891-894.

[2] 王哲,王仕成,张金生,等. 一种地磁匹配制导基准图制备方法及其有效性评价[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(11):2207-2211.
WANG Zhe, WANG Shicheng, ZHANG Jinsheng, et al. Method for preparation of reference map in geomagnetism matching guidance and its validity evaluation [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(11):2207-2211.

[3] 杨功流,张桂敏,李士心. 泛克里金插值法在地磁图中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(2):162-166.
YANG Gongliu, ZHANG Guimin, LI Shixin. Application of universal Kriging interpolation in geomagnetic map [J]. Journal of Chinese Inertial Technology,

- 2008, 16(2):162-166.
- [4] 张晓明,赵剡. 基于克里金插值的局部地磁图的构建[J]. 电子测量技术, 2009, 32(4):122-125.
ZHANG Xiaomin, ZHAO Yan. Local geomagnetic field mapping based on Kriging interpolation method [J]. Electronic Measurement Technology. 2009, 32(4):122-125.
- [5] 杨云涛,石志勇,吕建刚,等. 适于地磁导航的高精度区域地磁场建模研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(3):380-384.
YANG Yuntao, SHI Zhiyong, LU Jiangang, et al. Study on modeling of high accuracy regional geomagnetic field used for the geomagnetic navigation [J]. Journal of China Ordnance, 2009, 30(3):380-384.
- [6] 乔玉坤,王仕成,张金生,等. 泰勒多项式拟合法在区域地磁场建模中的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2008, 5(3):294-298.
QIAO Yukun, WANG Shicheng, ZHANG Jinsheng, et al. Research on Taylor polynomial fitting in modeling of regional geomagnetic field[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2008, 5(3):294-298.
- [7] QIAO Yukun, WANG Shicheng, ZHANG Jinsheng, et al. Surface spline based constructing method for geomagnetic reference map [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Information and Automation. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2009:708-711.
- [8] 乔玉坤,王仕成,张金生,等. 基于 BP 网络的地磁基准图制备方法及其精度评价[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(1):53-58.
QIAO Yukun, WANG Shicheng, ZHANG Jinsheng, et al. BP neural network based preparation method of geomagnetic reference map and its accuracy evaluation [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2009, 17(1):53-58.
- [9] WANG Shicheng, QIAO Yukun, ZHANG Jinsheng, et al. SVM based constructing method for geomagnetic reference map [C] // Proceedings of the Pacific-Asian Conference on Circuits, Communications, and Systems. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2009:578-581.
- [10] 徐文耀. 地磁学. 北京:地震出版社, 2003.
- [11] ALLDREDGE L R. Rectangular harmonic analysis applied to the geomagnetic field [J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86(B4):3021-3026.
- [12] MALIN S R C. Rectangular harmonic analysis revisited [J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101(B12):28205-28209.
- [13] 徐文耀,朱岗昆. 我国及邻近地区地磁场的矩谐分析[J]. 地球物理学报, 1984, 27(6):511-522.
XU Wenyao, ZHU Gangkun. A Study of the RHA for the geomagnetic field of China and neighboring region [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1984, 27(6):511-522.
- [14] 王月华,安振昌, Golovkov V P, 等. 东亚地区地磁场的理论分析与矩谐模型[J]. 地球物理学报, 1999, 42(5):640-647.
WANG Yuehua, AN Zhengchang, Golovkov V P, et al. Theoretical analysis of geomagnetic field over East Asia and rectangular harmonic model [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, 42(5):640-647.
- [15] 张学工. 关于统计学习理论与支持向量机[J]. 自动化学报, 2000, 26(1):32-42.
ZHANG Xuegong. Introduction to statistical learning theory and support vector machines [J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(1):32-42.
- [16] HUANG Zhiwen, WANG Baijian, LI Yiping, et al. Modelling of modern automotive petrol engine performance using support vector machines [J]. Chinese Journal of Zhejiang University Science A, 2005, 6A(1):1-8.
- [17] YUAN Xiaofang, WANG Yaonan. Parameter selection of support vector machine for function approximation based on chaos optimization [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics. 2008, 19(1):191-197.
- [18] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization [C] // Proceedings of the IEEE international conference on neural networks. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 1995:1942-1948.
- [19] 谢晓锋,张文俊,杨之廉. 微粒群算法综述[J]. 控制与决策, 2003, 18(2):129-134.
XIE Xiaofeng, ZHANG Wenjun, YANG Zhilian. Overview of particle swarm optimization [J]. Control and Decision, 2003, 18(2):129-134.

(编辑 武红江)