



井下巷道地磁匹配特征的CEA 卷积增强的分析

汪金花¹ 张博^{1,2} 郭立稳¹ 刘暑明¹ 张恒嘉¹

1 华北理工大学矿业工程学院,河北 唐山,063210

2 中煤航测遥感集团有限公司,陕西 西安,710199

摘要:针对井下某些巷道地磁空间变化平缓,地磁匹配概率低的问题,构建了井下巷道地磁卷积增强算子(convolution enhancement algorithms,CEA),进行地磁匹配前的目标区域和匹配向量的卷积增强预处理,去除数据噪声和增强识别特征。以Laplace、高通滤波(High Pass)、索伯尔滤波(Sobel)图像卷积算子为基础,通过列向量特征的锐化处理,建立了井下巷道地磁卷积增强的Laplace、High Pass和Sobel卷积算子模板。选取某金矿4个巷道的地磁数据,开展了CEA算子卷积前后的均方差算法地磁匹配定位的仿真试验。试验结果表明,CEA算子卷积可以增强匹配序列和地磁图的地磁空间特征,降低了匹配数据中的噪声影响。在数据CEA卷积前后的地磁统计特征对比中发现,Laplace算子不仅保持了原有地磁图变化特征,还增大了数据空间变化的差异度,降低了相关性,效果明显。特别是600 nT的高噪声干扰匹配试验中,Laplace算子卷积能够降低噪声对地磁定位扰动影响,有效提高了地磁匹配定位的概率和精度,具有较强的鲁棒性,适合作为井下巷道地磁匹配的数据预处理模型。

关键词:井下地磁定位;Laplace卷积;卷积增强;噪声扰动

中图分类号:P318

文献标志码:A

文献[1-4]研究表明地磁定位技术作为卫星、无人机、舰艇导航的初步定位辅助技术,地磁定位的精度要求不高。近几年,地磁定位或地磁组合定位技术逐渐在室内^[4]、地下空间智能导航领域开始兴起,出现了精密深度记录器(precision depth recorder,PDR)和地磁融合室内定位^[5-6],地磁和无线保真(wireless fidelity,WiFi)技术组合定位^[7],地磁与射频识别(radio frequency identification,RFID)组合的地磁和无线电定位法(geomagnetic and radio positioning method,GRPM)^[8]等的相关研究。研究发现,室内或地下工程小区域内,地磁定位优势明显,空间点的地磁特征存在差异^[9-10],但是室内、地下工程地磁数值会随着空域、时域变化发生扰动。实测地磁数值变化复杂,含有较大的常值噪声和随机噪声,波动较大^[11-13]。单纯利用地磁数值进行指纹匹配定位时,有些区域地磁特征信息丰富程度不够,当数值序列中存在较大的噪声时,会影响地磁匹配定

位的精准度和实用性^[14-15]。针对一些环境噪声对地磁定位影响,可以通过数据处理的方式进行抑制,如通过小波域噪声阈值方法可以降低地磁序列中随机强噪声^[16-17],提高目标定位导航精度。

井下巷道内地磁定位是井下应急避险和紧急救援的定位方法之一。其地磁定位的匹配概率和精度受到传感器量设备的性能指标,地磁特征量时域的稳定程度以及目标区域特征信息量的丰富程度等因素影响^[18]。在地磁传感器固定情况下,目标区域地磁信息丰富程度是提高地磁定位精确度的关键指标。井下工程占地面积小,约在几个至十几个平方千米之间,在这个面积内的天然地磁异常场随着空间点的变化波动较小,约几百纳特。实际测量井下巷道地磁数值包含了巷道天然地磁场、巷道建筑材料、钢筋支护等材料磁场,还有巷道内部管道、通信设备、运输铁轨产生的磁场,是多种不规则环境磁场近似的线性叠加^[19]。大量巷道地磁数据的统计显示,井下

收稿日期:2020-09-21

项目资助:国家自然科学基金(51374089);河北省自然科学基金(E2018209345);河北省博士研究生创新项目(CXZZBS2017123)。

第一作者:汪金花,博士,教授,主要研究井下地磁定位技术。jinhua66688@126.com

通讯作者:郭立稳,博士,教授,博士生导师。guoliwen64@163.com

大部分巷道由于巷道走向、结构、环境不同,地磁数值随着空间点位变化差异明显,具有独特性,满足地磁匹配定位要求。有的巷道甚至短短几十米的长度,地磁数据的波动达到了几千到上万纳特;小部分巷道由于结构简单,区域内地磁波动比较微弱,起伏平缓,地磁定位精确度不高。另外,井下巷道地磁数值存在月变、日变^[20]等变化,还受到巷道附近作业面采掘、机电设施工作状态、巷道内部车辆或轨道运输,以及人员行走等多种因素影响,存在较大的常值噪声和随机噪声。这些噪声差别较大,小的有几十纳特,大的甚至达到几百纳特,有时瞬间强噪声可能达到上千纳特,直接影响了井下地磁匹配过程的精确度。本文针对井下某些巷道地磁空间变化平缓、匹配概率低的问题,以及强噪声扰动降低匹配概率的难题,构建了井下巷道地磁卷积增强算子(convolution enhancement algorithms, CEA),对地磁数据进行匹配前的卷积处理,达到去除数据噪声和增强识别特征效果,提高匹配的准确率。

1 地磁数值 CEA 卷积增强

1.1 CEA 的卷积算子

地磁匹配定位是实时测量地磁序列与基准地磁数据相关性计算,要求地磁数据空间分布有一定独特性,属于指纹识别范畴。地磁数据空间分布独特性是指地磁特征量在地理表面单位距离内的变化幅度。区域数值空间特征越突出明显,匹配识别效果越准确。如果地磁特征量在单位距离内的变化幅度太小,这种微小的变化很可能被外部干扰噪声所淹没,会直接导致匹配出错。为了提高地磁匹配成功概率,有必要在匹配之前进行目标区域特征量变化幅度的增强处理。

地磁匹配与影像识别技术原理是相似的,都是判断待匹配数据与基准数据之间某个要素的特征或变化的相似程度。井下地磁图(地磁数据)与影像数据的数据结构是相似的,是以巷道空间点位坐标为格网,地磁场特征量为变量的条带状长图形。在影像识别中,为了突出影像边缘信息、匹配特征,提高影像识别的速度和准确度,常常采用卷积方法来增强识别信息特征。井下地磁图可以借鉴影像处理增强方法,建立适合井下地磁图的卷积因子,达到去除地磁数据噪声,增强地磁空间分布特征目的。

影像卷积增强常用的算子有中值滤波、高通滤波(High Pass)滤波、索伯尔(Sobel)滤波和 La-

place 滤波算子等。下面以 Laplace 算子为例,推导适合井下带状地磁图卷积增强的算子,其他算子推导与此类似。Laplace 算子是基于二阶微分的增强算子,具有各向同性、唯一性和不变性,是适合大多数图像增强的典型算子。井下巷道长度几十米至一百多米,宽度只有几米,运输大巷的宽度能达到 8~9 m,小型连通型巷道只有 3 m 左右,是典型的条带状格网数据。为了防止井下地磁图卷积后的边缘奇异或突变失真,选取一维 Laplace 算子为数学基础模型。

一维离散型 Laplace 算子定义为:

$$\nabla^2 f(x) = \frac{\delta^2 f}{\delta x^2} \quad (1)$$

式中, $\nabla^2 f(x)$ 是变量 x 的二阶偏导数; δf 为磁场变化值; δx 为一维的坐标变量。而区域地磁图是离散的网格点,对 $f(x)$ 来说,用差分代替式(1)的微分。它的一阶偏导可以表示为:

$$\frac{\delta f(n)}{\delta n} = f(n) - f(n-1) \quad (2)$$

式中, n 表示一维的格网点。其二阶偏导为:

$$\frac{\delta^2 f(n)}{\delta n^2} = [f(n+1) - f(n)] + [f(n-1) - f(n)] \quad (3)$$

将式(3)代入式(1),一维 Laplace 算子的离散表达式为:

$$\nabla^2 f(n) = [f(n+1) + f(n-1) - 2f(n)] \quad (4)$$

设卷积处理区域中心格网 $g(n)$ 为卷积后的地磁值,则 Laplace 算子增强算子为:

$$g(n) = f(n) - k\nabla^2 f(n) \quad (5)$$

式中, $f(n)$ 是卷积前地磁值; k 值是与增强效应相关的系数,是可调节常数,通常 k 取值为 1~3。 k 值大小是卷积差分强度,直接影响卷积的增强效果:当 k 值较大时,地磁图的波动特征明显增加;当 k 值较小时,图像卷积前后变化效果明显;当 $k=1$ 时,增强公式为:

$$g(n) = 3f(n) - f(n-1) - f(n+1) \quad (6)$$

根据地磁图的条带状图形特点,参照式(6),建立对应的 Laplace 增强算子模板,如图 1 所示。

从图 1 中可以看出,原始数据经过 Laplace 算子卷积处理后,地磁数据间的区分度明显增强,数值间的差异变化更大。

同理,按照上述相似推导对 High Pass 算子、Sobel 算子和 Laplace 算子进行列向量的特征差异化处理,见表 1,有利于增强巷道延伸方向的地磁空间数值变化。这类改进算子统称为井下巷道

磁卷积算子CEA,通过卷积运算,主要达到降低数据噪声,突出特征的增强目的。

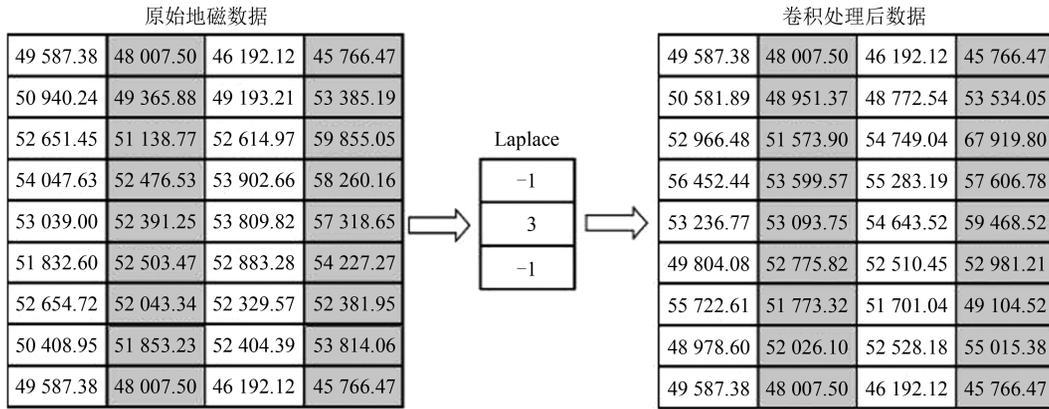


图1 一维Laplace卷积计算

Fig.1 1D Laplace Convolution Calculation

表1 井下地磁图的卷积CEA算子

Tab.1 Convolution CEA Operator of Underground Geomagnetic Map

算子类型	算子原始结构	改进后算子结构 conv(x,y,λ)	算子特点
High Pass 算子	$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$	$\max \begin{bmatrix} r_{11} \\ r_{21} \\ r_{31} \end{bmatrix}$	r是磁总场值,突出大磁场的细节信息
Sobel 算子	$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$	突出边界、边缘特征
Laplace 算子	$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 \\ 3 \\ -1 \end{bmatrix}$	突出数值的突变位置

1.2 基于CEA增强的地磁匹配模型

为了增强地磁空间变化的识别特征,减弱地磁数据噪声的干扰,在地磁匹配之前,运用CEA算子对待匹配地磁序列和地磁基准数据进行卷积处理后再进行地磁匹配相关性计算。其数学描述为:

$$\begin{cases} S(x,y), \text{其中}(x,y) \in G \\ R_{Sc}(x,y) = \text{conv}(x,y,\lambda) * R_s(x,y) \\ R_{Gc}(x,y) = \text{conv}(x,y,\lambda) * R_G(x,y) \\ R_{SG}(x,y) \in R_{Gc}(x,y) \\ (a,b) = \arg(F_{(R_{Sc}(x,y), R_{SG}(x,y))}) \\ \hat{S} = R_s(a,b) \end{cases} \quad (7)$$

式中,(x,y)为区域空间点的横纵坐标;G为匹配地磁尺度空间的点坐标集;S(x,y)为起始点为(x,y)的待匹配轨迹长度(地磁序列步长);R_s(x,y)为待匹配地磁序列;R_G(x,y)为地磁基准数据;conv(x,y,λ)为增强的卷积算子,见表1中CEA算子;*为卷积运算;R_{Sc}(x,y)为卷积后待

匹配地磁序列;R_{Gc}(x,y)为卷积后地磁基准数据;F为绝对误差和算法(sum of absolute difference, SAD)、平均绝对差值(mean absolute difference, MAD)、Hausdorff等相关性算法;R_s(a,b)为最优匹配的地磁基准图序列;(a,b)为最优匹配结果的起点坐标。

式(7)中的conv(x,y,λ)需要根据巷道数据的统计特征灵活选取。当巷道数据空间变化太小,可以适当调大数值。巷道数据地磁特征信息在数学上描述为匹配区域中的地磁特征量的统计特征,可用标准差、信息熵、粗糙度、相关系数等指标描述,见表2。当目标区域内地磁空间分布独特性强、适配性好时,通常地磁数据统计标准差、粗糙度会比较大。表2中M₁与M₂为待匹配区的长度与宽度所对应的单元格的个数,f(i,j)(i=1,2...M₁;j=1,2...M₂)为单元格中心的地磁数值,̄f是区域平均地磁场。

2 数值试验

2.1 数据来源

试验数据来源于某金矿的巷道地磁数据。井下矿化主要是石英大脉型,巷道围岩坚硬稳定,金矿巷道一般为非水泥铺装路面,不设轨道。巷道混凝土、钢筋加固较少,部分巷道内有输电设备、通风设备、运输车、升降罐笼等。井下开挖以爆破掘进为主,井下环境颇为复杂,巷道内部凹凸不平,巷道较狭窄,地面泥泞,部分地段有少量积水。在测区布设8个环境监测点,开展不同太阳日的地磁数据监测,发现测区内总体磁异常平稳,环境磁异常扰动较小。

表 2 区域磁场特征的评价指标

Tab. 2 Evaluation Indexes of Regional Magnetic Field Characteristics

特征	表达式	意义
标准差(δ)	$\delta = \sqrt{\frac{1}{M_1 M_2} \sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} (f(i,j) - \bar{f})^2}$	区域磁场数据的离散程度和总体起伏
粗糙度(r)	$r = \frac{r_x + r_y}{2}, r_x = \sqrt{\frac{1}{M_1(M_2 - 1)} \sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2-1} [f(i,j) - f(i,j+1)]^2}$ $r_y = \sqrt{\frac{1}{(M_1 - 1)M_2} \sum_{i=1}^{M_1-1} \sum_{j=1}^{M_2} [f(i,j) - f(i+1,j)]^2}$	区域磁场数据的平均光滑程度和局部起伏
信息熵(H)	$H = - \sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} p(i,j) \lg_2 p(i,j), p(i,j) = \frac{ f(i,j) }{\sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} f(i,j) }$	区域磁场数据的平均信息量的大小
相关系数(t)	$t = \frac{\rho_x + \rho_y}{2}, \rho_x = \frac{1}{M_1(M_2 - 1)\delta^2} \sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2-1} [f(i,j) - \bar{f}][f(i,j+1) - \bar{f}]$ $\rho_y = \frac{1}{(M_1 - 1)M_2\delta^2} \sum_{i=1}^{M_1-1} \sum_{j=1}^{M_2} [f(i,j) - \bar{f}][f(i+1,j) - \bar{f}]$	区域磁场数据间的独立性

试验分别选取了井下巷道 -30 m、-45 m、-75 m 水平巷道开展地磁测量试验和匹配分析。文中列举其中的部分数据:巷道 H107 和 H213 内有输电设备、井笼,距离工作面较近;H329 是普通巷道,无设备,仅有一些管线;H405 无任何机器设备,仅有一根照明线缆,相对空旷简单。4 条巷道地磁测量按照网格式布点,每个巷道布设 3 条控制线,间隔为 0.6 m,每条线上间隔 0.6 m 设置一个采样点,如图 2 所示。井下地磁测量采用便携式 FVM-400 磁通门磁力仪,量程为 100 000 nT,分辨率达到了 1 nT。测量噪声方差 50 nT²,测量随机常值误差为 10~30 nT,符合小区域高精度地磁场的测量要求。

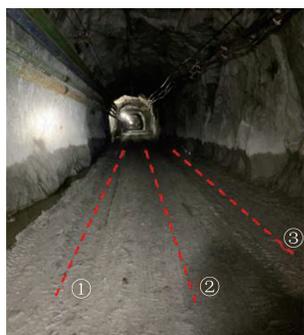


图 2 井下巷道环境

Fig. 2 Underground Roadway Environment

测区内空间点位的磁总场和三轴分量的地磁数据、经过粗差别除、去噪插值后作为巷道地磁基准数据。为了保证试验数据空间尺度的一致性,截取 4 个巷道 20 m 的长度的地磁基准数据作为试验样本,4 个试验样本的地磁数据标准差、信息熵、粗糙度及相关系数的统计特征参数见表 3。

表 3 地磁统计特征参数

Tab. 3 Geomagnetic Statistical Characteristic Parameters

区域 编号	数据空间统计特征			
	地磁标准差/nT	地磁信息熵	地磁粗糙度	相关系数
H107	11 294.0	5.807 2	14 506.0	0.294 8
H213	6 912.8	5.821 0	8 311.8	0.316 5
H329	5 312.5	5.821 8	4 146.4	0.632 9
H405	1 989.4	5.831 9	2 556.9	0.259 0

由表 3 可以看出,巷道 H107 和 H213 的地磁标准差和地磁粗糙度较大,相关系数较小,说明这两个样本的地磁空间特征丰富,匹配定位适配性强;巷道 H329 地磁数据的粗糙度较小,且相关系数达到 0.632 9,说明该样本数据内部存在较多的地磁相似变化区间,匹配定位适配性不强,易产生虚定位;巷道 H405 的地磁标准差和粗糙度数值小,说明该样本地磁空间特征贫乏,匹配定位适配性弱。数字统计特征总体上表明 4 个试验样本适配性有强有弱,区别较大,符合测试要求。

2.2 试验方案

如前文所述,巷道之间连接复杂,巷道狭窄深长,是典型的条带状地磁图。地磁数据受到区域性、时域性和噪声综合影响,实测地磁数值存在一定区间波动,通常有几百纳特噪声扰动。特别是在地磁特征缓变巷道内,如巷道 H405,大噪声的干扰会淹没了巷道实际地磁的微小变化,直接导致匹配结果的虚定位。试验卷积算子的测试需要达到两个效果:(1)巷道地磁数据经过卷积处理后,是否能够强化地磁序列之间差异特征,达到锐化效果,而且条带边缘不能发生畸变,

不偏离原有变化趋势;(2)地磁数据经过卷积处理后,能够保持地磁量空间变化的原有总体特征,并且能够降低噪声对地磁定位的影响。

试验选取CEA算子中High Pass算子、Sobel算子和Laplace算子对H107、H213、H329、H405巷道4个试验样本数据进行卷积处理,对比卷积后地磁数据空间分布统计特征,将卷积效果最为明显的算子称为MM-CEA算子,运用均方差算法(mean-square-error algorithm, MSD)对卷积前后数据进行了地磁匹配定位的仿真试验,验证卷积算子地磁适配性增强效果。在弱适配区域H405内,于600 nT噪声下测试CEA卷积算子对地磁匹配定位的精度和鲁棒性,开展MM-CEA卷积增强算法适应性测试,如图3所示。

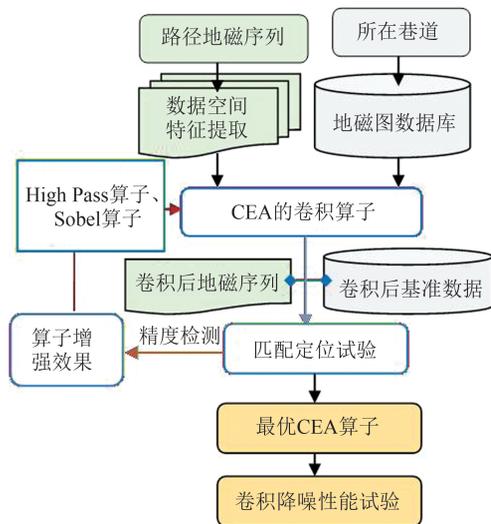


图3 井下地磁CEA卷积处理

Fig.3 CEA Convolution Processing of Underground Geomagnetic Data

测试试验的匹配结果会受采样频率、匹配步长、地磁测量噪声等因素的综合影响,需要合理设定参数。由于井下人员在通常情况下最大行进速度不会超过3 m/s,设定试验地磁采样周期为0.5 s,匹配步长为6个点约1.5 m左右。由于巷道呈带状,横向较短而纵向较长,因此虚定位阈值为横向0.3 m,纵向0.6 m,选取匹配概率和匹配误差作为精度评定的指标。地磁图边缘不足一个匹配长度部分自动忽略。

3 结果与分析

3.1 MM-CEA卷积算子性能

图4所示为巷道H107、H213、H329和H405

的原始地磁图和High Pass算子、Sobel算子和Laplace算子卷积增强后三维地磁图。

从图4中可以看出:High Pass算子卷积后将原始图像地磁明显变化区间弱化了,整体变化趋势一样,但是细微小地磁变化特征消失了,图4中巷道H213卷积后5~10 m变化特征平滑消失了;Sobel算子卷积后,未能很好保持原有图像地磁变化特征,出现了异化,图4中巷道H107和H329在Sobel算子卷积后出现了几处不一样弯曲;Laplace卷积算子卷积后不仅保持了原有地磁图变化特征,还增强了变化的差异度和区分度,效果较好;在3种CEA卷积算子中,Laplace卷积算子对地磁基准图的增强效果最为显著;且Laplace算子对适配性较强的巷道H107、H213和H329地磁数据卷积处理后,其地磁特征更加突出;弱适配性巷道H405地磁数据经过Laplace算子卷积后,地磁特征在一定程度上也得到增强;从卷积前后的地磁三维图的综合对比得出,Laplace算子卷积处理后,可以丰富局部信息对比度,有利于地磁匹配定位。

表4是巷道H107、H213、H329和H405的原始地磁数据和High Pass算子、Sobel算子和Laplace算子卷积增强后地磁数据的空间统计特征指标。

表4 CEA卷积前后的地磁空间统计特征

Tab.4 Statistical Characteristics of Geomagnetic Space Before and After CEA Convolution

样本	数据类型	地磁数据空间统计特征			
		标准差/ nT	信息熵	粗糙度	相关系数
巷道H107	原始	11 294.0	5.807 2	14 506.0	0.294 8
	Laplace卷积后	23 897.0	5.722 7	38 572.0	-0.098 4
	High Pass卷积后	12 768.0	5.804 9	14 353.0	0.303 0
	Sobel卷积后	12 297.0	9.292 7	16 793.0	0.230 6
巷道H213	原始	6 912.8	5.821 0	8 311.8	0.316 5
	Laplace卷积后	13 621.0	5.787 9	21 143.0	-0.049 3
	High Pass卷积后	6 667.1	5.823 4	8 195.4	0.224 9
	Sobel卷积后	8 046.1	18.573 5	10 596.0	0.242 2
巷道H329	原始	5 312.5	5.821 8	4 146.4	0.632 9
	Laplace卷积后	10 668.0	5.781 3	11 705.0	0.264 8
	High Pass卷积后	5 134.4	5.824 1	4 043.0	0.384 1
	Sobel卷积后	6 842.4	19.951 4	6 036.2	0.449 2
巷道H405	原始	1 989.4	5.831 9	2 556.9	0.259 0
	Laplace卷积后	4 644.5	5.827 4	6 912.8	-0.078 0
	High Pass卷积后	2 332.4	5.831 6	2 627.6	0.338 2
	Sobel卷积后	2 386.9	19.705 5	3 130.8	0.141 9

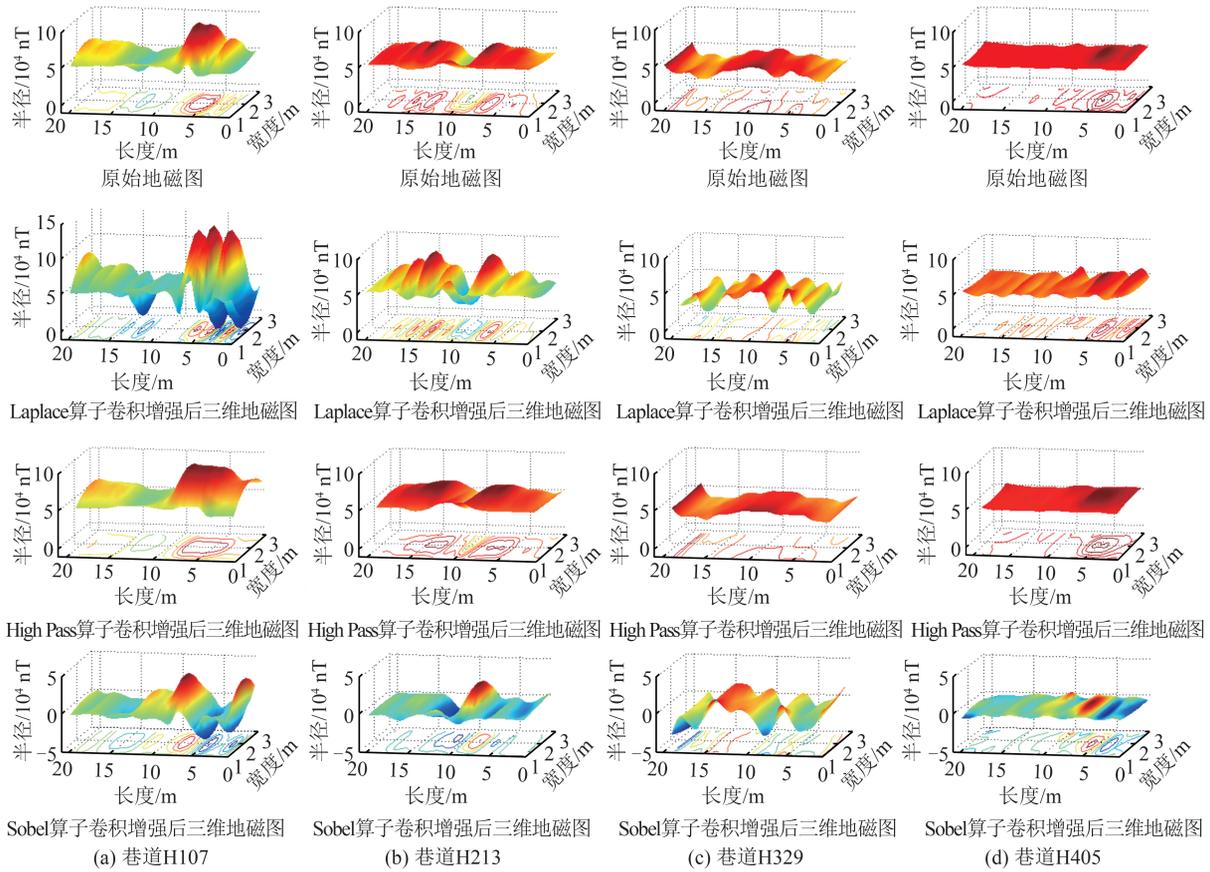


图 4 卷积前后地磁基准图对比

Fig4 Comparison of Magnetic Reference Before and After Convolution

从表 4 可以看出,4 个巷道地磁数据经过卷积计算后的空间统计特征参数出现了明显的波动。High Pass 高通滤波卷积后的地磁空间特征较卷积前变化微小,地磁标准差和地磁粗糙度变化微弱,地磁信息熵几乎不变,相关系数减小均不超过 0.1,有时甚至出现了弱化;巷道 H213、H329 地磁数据的标准差经过卷积处理,由原来的 6 912.8 和 5 312.5 降到了 6 667.1 和 5 134.4。

经过 Sobel 算子卷积后,数据的地磁标准差、地磁粗糙度较卷积前增大了约 15%,信息熵明显增大,由原始的 5 左右变化到 9,说明卷积后数据信息分布的混乱度进一步增大,这与图 4 中卷积后地磁图特征未能保持一致,发生异化现象。

经过 Laplace 卷积后的地磁空间特征较卷积前变化明显,地磁标准差明显增大至约 2 倍多。地磁粗糙度明显增大至 3 倍左右。信息熵基本上保持不变,而相关系数明显减小,降到 0 左右。Laplace 卷积后,地磁数据不仅保持了原有地磁图变化特征,还增强了数据变化差异度,降低了相关性,效果明显。通过 3 种算子对比分析可以得出,在相同测区内,Laplace 算子卷积后的地磁差异性增强效果最好。

3.2 MM-CEA 卷积算子抗噪性能分析

根据磁力仪测量随机常值误差数值,设定随机噪声大约在 50 nT,环境恒值测量噪声约 100 nT 范围内波动。将 4 个区域在自然噪声 2 倍约 300 nT 条件下进行 Laplace 卷积前后的 MSD 地磁匹配定位仿真试验。图 5 为巷道 H107、H213、H329 和 H405 的 CEA 卷积前后的匹配结果误差曲线,纵坐标是匹配误差数值,横坐标为匹配次数,是指待匹配实测序列在匹配总序列中的排序。

从图 5 中可以看出,地磁数据经过 Laplace 卷积处理后,突出地磁数据匹配特征,提高了地磁匹配效果。在强适配区巷道 H107 和 H213 原始数据 MAD 匹配过程中,出现了少量虚定位,经过 Laplace 卷积后的 MSD 地磁匹配较好,无虚定位;在适配性差巷道 H405 内,原始数据 MAD 匹配出现大量虚定位,经过 Laplace 卷积后的匹配结果的虚定位次数有所减少。

表 5 为巷道 H107、H213、H329 和 H405 的 Laplace 卷积前后的 MSD 地磁匹配结果评价指标。其中匹配概率是指成功匹配序列数与总序列数之比,均误差是指成功匹配结果的平均误差。从表 5 中可以看出,总体上 Laplace 卷积之后

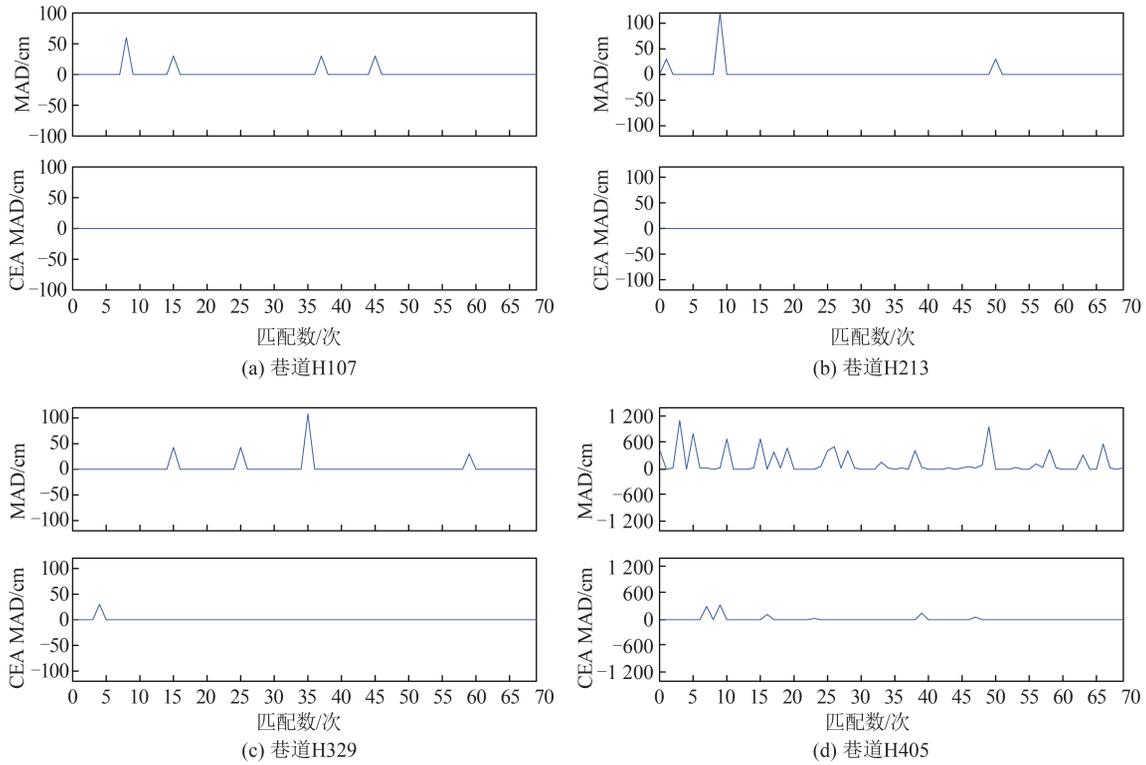


图5 300 nT 噪声下CEA卷积前后的匹配结果误差曲线

Fig.5 Error Curves of Matching Results Before and After CEA Convolution in the Tunnels Under 300 nT Noise

表5 300 nT 噪声下匹配定位结果

Tab.5 Match Location Results Under 300 nT Noise

区域	数据类型	2倍自然噪声下	
		匹配概率	均误差/m
H107	原始数据	0.942 9	0.021 4
	Laplace卷积后数据	1	0
H213	原始数据	0.928 6	0.094 3
	Laplace卷积后数据	1	0
H329	原始数据	0.942 9	0.012 9
	Laplace卷积后数据	0.985 7	0.004 3
H405	原始数据	0.442 9	0.903 8
	Laplace卷积后数据	0.914 3	0.142 2

的地磁基准图上的匹配定位效果远远好于原始基准图上的效果,匹配精度和匹配概率都有所提高。特别是在弱适配区H405,经过卷积后匹配率达到90%左右,匹配误差也有所降低。

考虑到井下环境复杂,在出异常干扰情况下,卷积处理抗噪性能是否会出现匹配不收敛情况,因此开展了600 nT的高噪声干扰测试。图6是在巷道H107、H213、H329和H405进行随机高噪声600 nT的Laplace卷积匹配试验的结果误差曲线。

由图6可以看出,Laplace卷积后的地磁图的匹配效果明显好于原始地磁图。在区域原始地磁基准图匹配中,受到600 nT高噪声影响,4个巷道均出现了不同程度的虚定位。经过Laplace

卷积后,虚定位的次数明显减少,匹配稳合度较好。

表6所示为600 nT强噪声干扰下的4个区域的匹配结果的评价指标。经过Laplace卷积后,地磁匹配概率和均误差明显优于原始地磁图的匹配结果的量化指标。

对比600 nT强噪声和300 nT噪声下匹配结果,可以得出,随着噪声增大,同一个区域的匹配结果精度和概率都会降低。但是在同一个噪声水平下,经过Laplace算子卷积后地磁匹配定位概率明显所有提高,抗噪性能较好。表6中在600 nT强噪声干扰情况下,地磁特征丰富的巷道H107和H405区域,Laplace算子卷积后地磁匹配定位高出原始地磁图匹配成功率10%左右;在地磁场丰富度较弱的H329和H405区域,经过Laplace算子卷积处理后,地磁匹配概率和定位精度发生了明显提升,效果突出。可见Laplace算子在进行地磁匹配数据预处理方面,能够达到突出匹配地磁特征,降低噪声干扰目的。

4 结 语

本文以针对井下巷道地磁空间特征不明显区域和地磁数据强噪声的地磁匹配概率低的问题,对High Pass算子、Sobel算子和Laplace算子

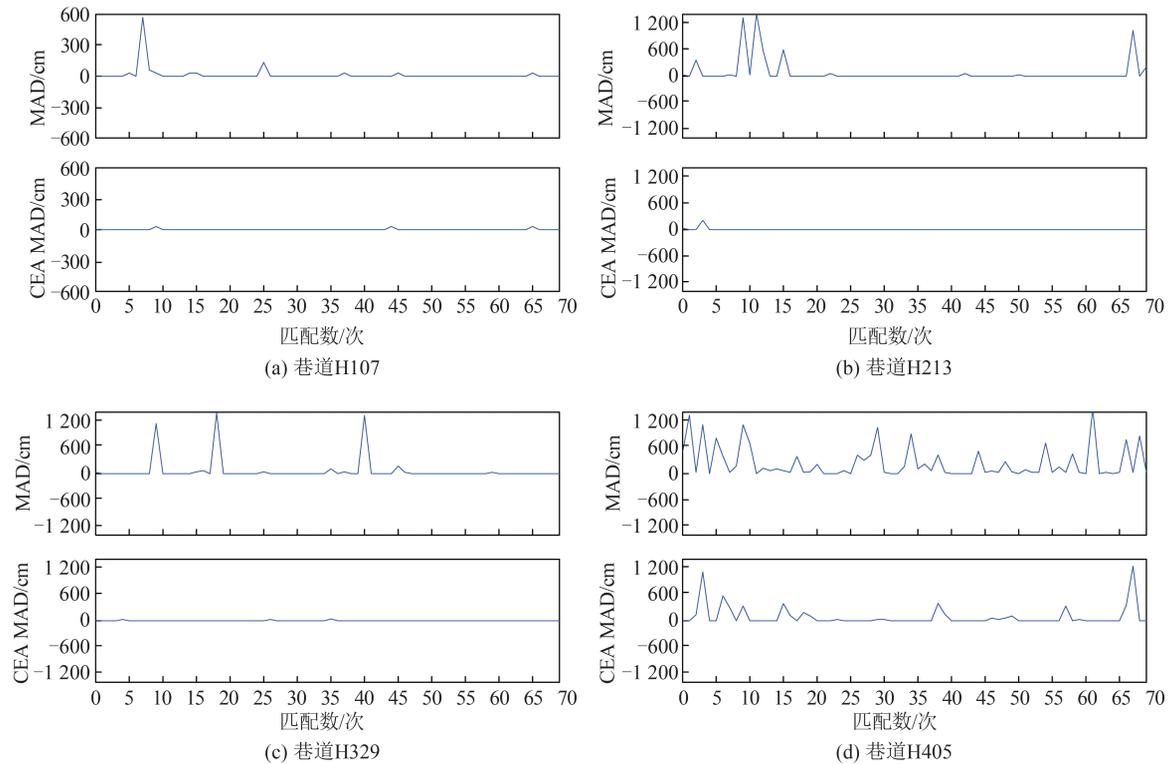


图 6 600 nT 噪声下 CEA 卷积前后的匹配结果误差曲线

Fig.6 Error Curves of Matching Results Before and After CEA Convolution in the Tunnels Under 600 nT Noise

表 6 600 nT 噪声下匹配定位结果

Tab. 6 Match Location Results Under 600 nT Noise

区域	数据类型	600 nT 高噪声下	
		匹配概率	均误差/m
H107	原始数据	0.857 1	0.139 2
	Laplace 卷积后数据	0.958 1	0.012 8
H213	原始数据	0.814 3	0.821 6
	Laplace 卷积后数据	0.971 4	0.518 7
H329	原始数据	0.828 6	0.630 3
	Laplace 卷积后数据	0.957 1	0.014 6
H405	原始数据	0.228 6	0.949 5
	Laplace 卷积后数据	0.685 7	0.872 9

进行列向量特征差异化处理,建立针对井下地磁图卷积处理的 CEA 算子,对地磁数据进行卷积处理,增强巷道延伸方向地磁空间数值变化。本文方法是利用图像增强锐化思想,在保持原有图像变化特征不变基础上,进行差异特征强化。通过某金矿不同适配性巷道地磁数据卷积前后匹配结果对比分析,说明 CEA 算子对匹配序列和地磁图卷积处理有强化地磁图空间特征,去除噪声效果。其中 CEA 算子中 Laplace 算子卷积后地磁数据不仅保持了原有地磁图变化特征,还增强了数据变化差异度,降低了相关性,效果明显,特别是 600 nT 的高噪声干扰匹配试验中, Laplace 算子卷积能够有效提高地磁匹配定位的概率和精度,具有较强的鲁棒性。

参 考 文 献

[1] Zhao Handong, Li Zhipeng, Wang Fang. Projectile Attitude Estimation Based on Inertial & Magneto Integrated Measurement [J]. *Journal of Detection & Control*, 2016, 38(3): 47-51 (赵捍东, 李志鹏, 王芳. 基于惯性/地磁的弹体组合测姿方法[J]. 探测与控制学报, 2016, 38(3): 47-51)

[2] Jin Yuhang, Wang Haiyong, Liu Tao, et al. Strap-down Inertial/Geomagnetic/Radar Altimeter Integrated Navigation Method for Missile [J]. *Navigation and Control*, 2018, 17(6): 54-60 (靳宇航, 王海涌, 刘涛, 等. 一种导弹捷联惯导/地磁/雷达高度表组合导航方法[J]. 导航与控制, 2018, 17(6): 54-60)

[3] Liu Ying, Cao Juliang, Wu Meiping. Research on Geomagnetic Assisted Positioning and Integrated Navigation Technology of UAV [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016 (刘颖, 曹聚量, 吴美平. 无人机地磁辅助定位及组合导航技术研究[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016)

[4] Zhao Jianhu, Wang Shengping, Wang Aixue. Study on the Selection of the Geomagnetic Adaptable Matching Area Based on the Geomagnetic Co-Occurrence Matrix [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(4): 446-449 (赵建虎, 王胜平, 王爱学. 基于地磁共生矩阵

- 的水下地磁导航适配区选择[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(4): 446-449)
- [5] Yu Qiuxing. Indoor Location Method Based on the Geo-Magnetism [J]. *China New Telecommunications*, 2014, 16(23): 19-21 (余秋星. 一种基于地磁强度特征的室内定位方法[J]. 中国新通信, 2014, 16(23): 19-21)
- [6] Li Simin, Cai Chenglin, Wang Yana, et al. A Fusion Method for PDR and Magnetic Fingerprinting Based Indoor Localization on Smartphone [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2018, 31(1): 36-42 (李思民, 蔡成林, 王亚娜, 等. 基于地磁指纹和PDR融合的手机室内定位系统[J]. 传感技术学报, 2018, 31(1): 36-42)
- [7] Huang He, Qiu Kaiyue, Li Wei, et al. Indoor Geomagnetic Positioning Based on Joint Algorithm of Particle Filter [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(3): 604-610 (黄鹤, 仇凯悦, 李维, 等. 基于粒子滤波联合算法的地磁室内定位[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(3): 604-610)
- [8] Ma Tongjin. Chinese Patent Type Model Toy: CN109011636A[P]. 2018-12-18 (马同金. 一种中国专利种类模型玩具: CN109011636A[P]. 2018-12-18)
- [9] Akai N, Ozaki K. Gaussian Processes for Magnetic Map-Based Localization in Large - Scale Indoor Environment [C]// *Intelligent Robots and Systems*, Hamburg, Germany, 2015
- [10] Kang Ruiqing. Interior Buildings Localization and Navigation Based on Complex Background Magnetic Fields[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016 (康瑞清. 建筑物内复杂环境下的地磁场定位导航研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2016)
- [11] Zheng Menghan. Research on Sensitivity-Based Algorithm for Indoor Geomagnetic Localization [D]. Fuzhou: East China University of Technology, 2017 (郑梦含. 基于地磁敏感度的室内定位算法的研究[D]. 抚州: 东华理工大学, 2017)
- [12] Cai Chenglin, Cao Zhenqiang, Zhang Xin, et al. A Study for Optimizing the Indoor Geomagnetic Reference Map [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2017, 37(6): 647-650 (蔡成林, 曹振强, 张忻, 等. 室内地磁基准图构建的优化算法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(6): 647-650)
- [13] Wang Jinhua, Guo Yunfei, Zhang Bo, et al. A Fluctuation Analysis in the Time Domain to the Geomagnetic Values in the Regional Underground [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2018, 40(3): 483-490 (汪金花, 郭云飞, 张博, 等. 井下小区域地磁数值的时域变化与波动分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2018, 40(3): 483-490)
- [14] Yin Gang, Zhang Yingtang, Shi Zhiyong, et al. Real-Time Compensation Method of Magnetic Heading Perturbations Based on Magnetic Anomaly Inversion [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(7): 978-982 (尹刚, 张英堂, 石志勇, 等. 基于磁异常反演的磁航向误差实时补偿方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(7): 978-982)
- [15] Yu Jiabao. The Method Study of Geomagnetic Indoor Localization on Smartphone [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017 (喻佳宝. 基于智能手机的室内地磁定位方法研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2017)
- [16] Xie Fan, Teng Yuntian, Hu Xingxing, et al. Suppression of Magnetic Perturbation Caused by Urban Railway to Geomagnetic Observations Using the Wavelet Method: A Case Study of Tianjin Subway [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(10): 2698-2707 (谢凡, 滕云天, 胡星星, 等. 地磁台站的城市轨道交通干扰的小波抑制方法研究: 以天津轨道交通干扰为例[J]. 地球物理学报, 2011, 54(10): 2698-2707)
- [17] Chong Yang, Chai Hongzhou, Su Mingxiao, et al. RAE-PEKF Matching Algorithm Based on Measurement Residuals to Estimate Residuals Covariance [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(2): 179-188 (种洋, 柴洪洲, 苏明晓, 等. 基于量测残差估计残差协方差的RAE-PEKF匹配算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(2): 179-188)
- [18] Wang Jinhua, Guo Yunfei, Guo Liwen, et al. Experimental Research of MPMD Matching Algorithm Based on the GRPM Underground Positioning [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(4): 1274-1282 (汪金花, 郭云飞, 郭立稳, 等. 基于GRPM井下定位的MPMD匹配算法的试验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 1274-1282)
- [19] Wang Jinhua, Guo Yunfei, Jia Yuna, et al. Modeling and Application of the Underground Emergency Hedging System Based on Internet of Things Technology [J]. *IEEE Access*, 2019(7): 63321-63335
- [20] Liu Xiaogang, Xu Jinglin, Zhang Suqin, et al. Bifactor Weight Determination Method Considering the Influence of Latitude and Longitude in the Calculation of Diurnal Variation of Geomagnetic Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan Uni-*

versity, 2020, 45(10): 1547-1554 (刘晓刚, 徐婧林, 张素琴, 等. 地磁日变数据确定中顾及纬度和

经度方向影响的双因子定权方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(10): 1547-1554)

Performance Analysis of Convolution Enhancement of CEA Operator for Underground Geomagnetic Matching

WANG Jinhua¹ ZHANG Bo^{1,2} GUO Liwen¹ LIU Shuming¹ ZHANG Hengjia¹

¹ School of Mines, East China University of Technology, Tangshan 063210, China

² Aerial Photogrammetry and Remote Sensing Co.Ltd, Xi'an 710199, China

Abstract: Objectives: Underground geomagnetic positioning is a new method for emergency refuge and rescue. Its geomagnetic matching probability and accuracy will be affected by the richness and stability of the matching area. There is a problem of low probability of geomagnetic matching in some areas where the geomagnetic space changes gently. **Methods:** A convolution enhancement operator of the underground is constructed, named convolution enhancement algorithms(CEA), which is used to convolution enhancement processing of geomagnetic data in underground matching area and geomagnetic vector of the target moving track, so as to remove the noise of measured geomagnetic data and enhance the richness of geomagnetic information. CEA operator is a kind of convolution sharpening of geomagnetic features with column quantization, is the modification of Laplace, High Pass and Sobel operators of image convolution, which is suitable for underground strip area. The simulation test of mean-square-error algorithm (MSD) geomagnetic matching before and after the convolution of CEA operator is carried out, which data is the geomagnetic data of 4 tunnels in a gold mine. **Results and Conclusions:** The test results show that the statistical parameters of geomagnetic data fluctuate obviously after convolution by three CEA operators. The variation of geomagnetic data features before and after convolution by the High Pass operator is small, the variation of geomagnetic standard deviation and geomagnetic roughness is small, and the correlation coefficient sometimes even weakens. The information entropy of geomagnetic data before and after convolution by the Sobel operator is increased, which cannot keep the consistency of geomagnetic map trend, appears alienation. The Laplace operator has obvious enhance effect, which keeps the change of the original geomagnetic map, increases the difference degree of the data and reduces their correlation. Especially in the matching test of 600 nT noise, the convolution processing of Laplace operator can reduce the impact of noise on geomagnetic positioning disturbance, improve the probability and accuracy of geomagnetic matching positioning, and show strong robustness, which is suitable for data preprocessing model of underground geomagnetic matching.

Key words: underground geomagnetic positioning; Laplace convolution; convolution enhancement; noise disturbance

First author: WANG Jinhua, PhD, professor, specializes in underground geomagnetic positioning. E-mail: jinhua66688@126.com

Corresponding author: GUO Liwen, PhD, professor. E-mail: guoliwen64@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (51374089); the Natural Science Fund of Hebei Province (E2018209345); the Doctoral Candidate Innovation Project of Hebei Province (CXZZBS2017123).

引文格式: WANG Jinhua, ZHANG Bo, GUO Liwen, et al. Performance Analysis of Convolution Enhancement of CEA Operator for Underground Geomagnetic Matching[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(9): 1422-1431. DOI: 10.13203/j.whugis20200356 (汪金花, 张博, 郭立稳, 等. 井下巷道地磁匹配特征的 CEA 卷积增强的分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(9): 1422-1431. DOI: 10.13203/j.whugis20200356)