

瞬变电磁法在矿山巷道超前预报系统构建中的应用研究

尹纪超,王慎利

(山东正元地球物理信息技术有限公司)

摘要:利用 CUGTEM - GK II 瞬变电磁仪对矿山巷道的超前勘探工作进行实时物探,并形成三维模型成像结果,给出了矿山岩层地下水涌水量、巷道顶板及两帮位移量等预警数据。其中,机器学习算法整合深度卷积神经网络、多列神经网络、数据二值化输出、模糊决策矩阵预警等算法,给出了覆盖范围较大的粗略预警结果和覆盖范围较小的精细预警结果。经仿真分析,粗略预警结果和精细预警结果均表现出一定的数据敏感性,且精细预警可以在巷道掘进问题岩层前 24 h 给出较高敏感度的预警结果。

关键词:瞬变电磁法;矿山巷道;超前探测;机器学习;神经网络;数据预警

中图分类号:TD263

文献标志码:A

文章编号:1001 - 1277(2024)06 - 0027 - 04

doi:10. 11792/hj20240606

引言

瞬变电磁法也称时间域电磁法(Time Domain Electromagnetic Methods, TEM),是一种利用瞬变电磁场在岩层中的反射导体抗磁、励磁现象进行物探的勘探方法。相比其他物探方法,TEM 无需钻孔,设备体积小,操作时间短,结果分析过程无需进行数据层面的二次开发,能够在保障矿山巷道掘进工作工期接续的同时,进行巷道掘进中的强化勘探工作^[1]。

实际矿山勘探过程中,利用每天固定的工作面检修时间,在矿山巷道掘进工作面前端迎头执行基于 CUGTEM - GK II 瞬变电磁仪的瞬变电磁法勘探,获得持续观测数据^[2]。研究重点为利用大数据分析算法将电磁异常区域翻译为承压水发育区域、断层破碎带等,同时分析读取前置岩层的分界面,在 TEM 三维模型的基础上,构建矿山地层结构三维模型^[3]。

1 基于 CUGTEM - GK II 的 TEM 数据源

研究使用的 CUGTEM - GK II 瞬变电磁仪是一种专门应用于隧道超前探测的便携式 TEM 设备,有效超前探测距离为 150 m,可应用在矿山巷道掘进探测领域。该设备主要针对地下水结构进行探测,包括岩溶水、裂隙水、岩层含水量等,岩层中的金属单质及金属顺磁氧化物也会对结果产生影响,由于不同岩层顺磁性、抗磁性(含水量等)存在差异,在地下水弱侵入区域,即存在岩溶、裂隙等较少干扰因素的前提下,根据不同岩层的含水量差异,可以对岩层赋存情况进行

行高清晰成像。一般全岩断面矿山巷道掘进速度在 6 m/d 以下(炮掘三循环)。因此,150 m 的超前探测量可供施工方掘进施工至少 25 d,且利用每天检修时间进行一次 TEM 探测,近端数据叠加量将达到 25 次以上。随着距离增大,获得的可叠加 TEM 数据量减少,数据精度也有所降低。在勘探过程中设计了 4 个掘进周期,分别给出不同的勘探模型精度和数据挖掘目标^[4],如表 1 所示。

表 1 基于 TEM 的勘探模型精度要求掘进周期

Table 1 Excavation cycle according to exploration model accuracy requirements based on TEM

掘进周期/ d	数据叠加量	勘探模型精度/ mm	数据挖掘目标
1	≥25	≤±5	破碎带/承压水高敏感预警
3	≥22	≤±35	破碎带/承压水预警
15	≥10	≤±50	地层结构三维模型
25	≥1	≤±100	地下水含量三维模型

由表 1 可知:按照 150 m 的超前探测量和 25 d 的掘进周期,距离巷道掘进工作面最近的 1 个掘进周期(约 6 m)内,数据叠加量将达到 25 次以上,对 25 次 TEM 测试数据基于机器学习算法进行叠加,可以获得较高精度的数据。此时,在掘进施工中最关注的数据为掘进过程中发生涌水、岩层压力等风险的概率。

2 基于 TEM 数据的三维模型学习架构

上述数据来源分析中,每天在矿山巷道掘进工作面采集以 TEM 数据为原始数据的三维模型,该三维

模型由 CUGTEM - GK II 瞬变电磁仪配套的软件工具包搭建。研究主要针对 TEM 多次探测产生的三维

模型进行数据卷积分析,最终给出数据预警值。基于 TEM 数据的三维模型学习架构如图 1 所示。

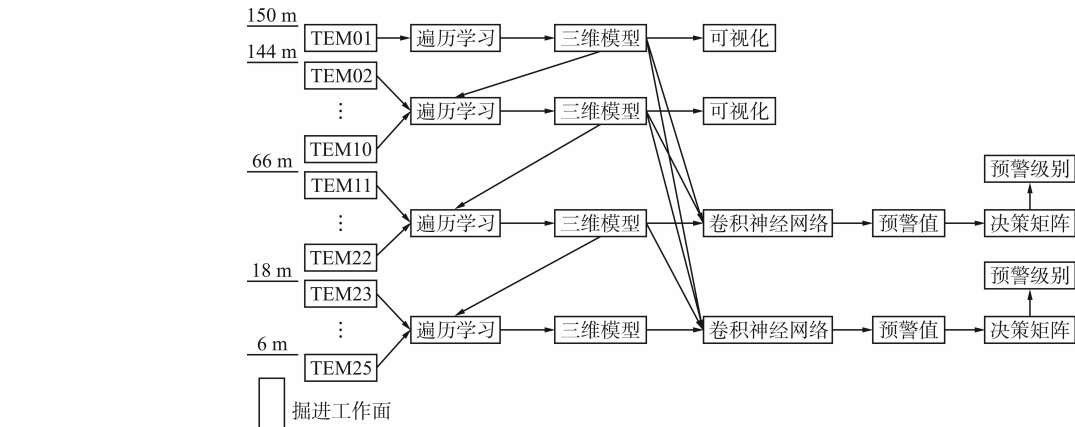


图 1 基于 TEM 数据的三维模型学习架构

Fig. 1 3D model learning architecture based on TEM data

由图 1 可知:通过前置数据分析所获得的 4 个三维模型精度存在差异。其中,整合全部 25 次勘探数据的三维模型,对距离掘进工作面 18 m 内数据有较强的数据支持,最高精度为距离掘进工作面 6 m 内数据。TEM 自带软件工具包给出的三维模型精度可调,一般默认网格节点间距为 100 mm,最大精度可以给出网格节点间距 5 mm 的三维模型^[5]。根据数据分析的推荐配置,上述 4 个三维模型的实际数据结构参数如表 2 所示。

由表 2 可知:该学习架构中共包含 2 个卷积神经网络,用于输出高精度的预警结果。其中,粗略预警

表 2 三维模型数据结构参数

Table 2 Parameters of 3D model data structure

模型	节点间距/ mm	现场尺寸/ (m × m × m)	模型规模	总节点量/ 10 ⁶
三维模型 1	100	15 × 15 × 150	150 × 150 × 1 500	33.75
三维模型 2	50	15 × 15 × 66	300 × 300 × 1 320	118.8
三维模型 3	30	15 × 15 × 18	500 × 500 × 600	150
三维模型 4	5	15 × 15 × 6	3 000 × 3 000 × 1 200	10 800

包含表 2 中三维模型 1 ~ 3 的节点数据,精细预警包含表 2 中全部 4 个三维模型的节点数据。卷积神经网络内部结构逻辑展开图如图 2 所示。

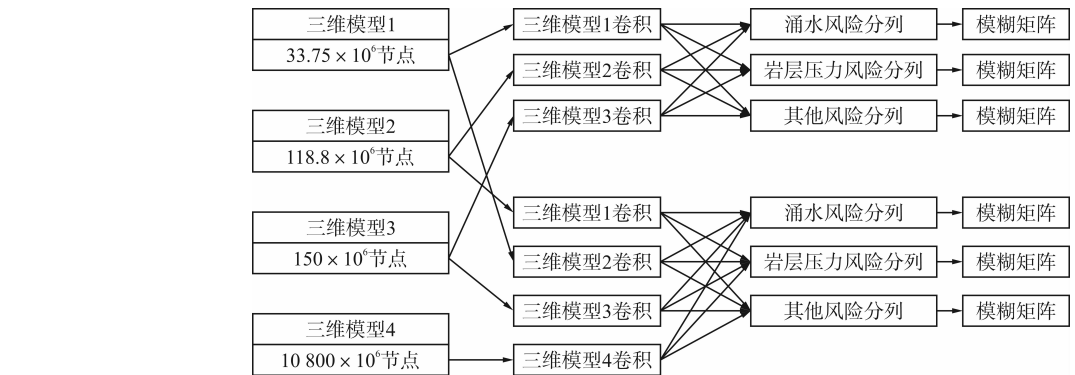


图 2 卷积神经网络内部结构逻辑展开图

Fig. 2 Unfolded internal logical structure of the convolutional neural network

由图 2 可知:对每个三维模型分别构建卷积神经网络,使每个三维模型最终卷积成一个双精度浮点型变量。为加强卷积过程待回归变量的数据卷积能力,采用 6 阶多项式迭代回归函数作为卷积神经网络的基函数,每层节点量不少于上一层节点量的 75 %,则三维模型 1 卷积模块隐藏层数量 59,节点量 1.39×10^9 ;三维模型 2 卷积模块隐藏层数量 62,节点量 4.32×10^9 ;三维模型 3 卷积模块隐藏层数量 64,节点量 6.86×10^9 ;三维模型 4 卷积模块隐藏层数量 78,

节点量 403.52×10^9 。经上述卷积过程,4 个三维模型中诸多节点均会被卷积成 1 个双精度浮点型变量,每个节点至少包含 6 个待回归变量,数据信息会被存储到待回归变量中,确保卷积过程信息损失量无限接近于 0。在卷积神经网络后,连接 3 个分列的多列神经网络模块。其中,粗略预警 3 个分列各有 3 个输入节点,以及 1 个输出节点,输入及输出节点运行数据均为双精度浮点型变量^[6];精细预警 3 个分列各有 4 个输入节点,以及 1 个输出节点,输入及输出节点

运行数据均为双精度浮点型变量。多列神经网络内部隐藏层再度分为2段,前段使用对数型迭代回归函数作为节点基函数,将数据节点量扩增至13个;后段使用二值化函数作为节点基函数,将数据节点量压缩到1个,供给输出层。最终,每列输出数据格式为双精度浮点型变量,但通过二值化过程将数据投影到 $[0,1.000]$ 上,且数据无限接近于0或1.000^[7]。经过上述处理的6列数据,均由独立的模糊矩阵算法模块进行处理,形成最终预警结果^[8]。

3 基于模糊决策矩阵的 TEM 预警结果

经过对前置卷积神经网络和多列卷积神经网络的最终输出值进行验证,其输出值分布情况如图3所示。

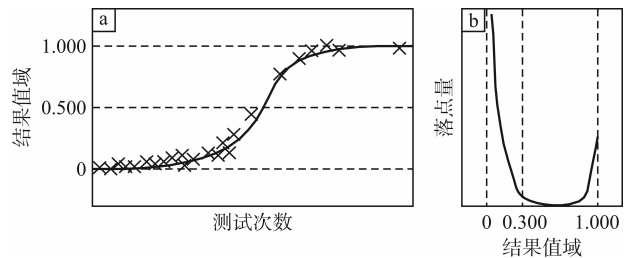


图3 神经网络输出值分布情况

Fig. 3 Distribution of neural network output values

由数据的二值化程度(如图3-a所示)可知:0附近数据较多,其次为1.000附近数据,中间数据量较少,属于典型的二值化数据。图3-b为数据总落点情况的统计,该系统定义数据接近1.000时为高风险数据,接近0时为正常数据。由图3-b可知:数据接近0.300时可能出现向落点值域右侧数据跃迁。所以,设计模糊决策矩阵时,达到0.300的数据被认为是高风险数据。上述模糊决策矩阵策略如表3所示。

表3 模糊决策矩阵策略

Table 3 Fuzzy decision matrix strategy

模糊决策矩阵	> +0.005	0 ~ +0.005	-0.005 ~ 0	< -0.005
$[0,0.005)$	蓝色预警	无预警	无预警	无预警
$[0.005,0.100)$	黄色预警	蓝色预警	无预警	无预警
$[0.100,0.300)$	橙色预警	黄色预警	蓝色预警	无预警
$[0.300,1.000]$	红色预警	橙色预警	黄色预警	蓝色预警

由表3可知:模糊决策矩阵可以给出3项预警结果(涌水风险预警、岩层压力风险预警和其他风险预警),预警结果包括由高至低分别为红、橙、黄、蓝4个预警级别和1个无预警状态。随后的算法仿真验证过程,将分别考察5种预警状态的实际意义^[9]。

4 基于仿真分析的算法效能验证分析

山东正元地球物理信息技术有限公司近5年来承担了4个矿井的巷道掘进工作,相关巷道断面等效直径为5.5~8.0 m,超前勘探过程中涉及到的勘探断面等效为矩形(15 m×15 m),上述4个掘进工作中,均采用了每天使用CUGTEM-GK II瞬变电磁仪进行超前勘探的安全管理辅助勘探模式。矿山巷道最大埋深1 545 m,最小埋深70 m,埋深覆盖范围较广,如该方案在上述4个巷道均有较佳表现,则可以认定基于CUGTEM-GK II瞬变电磁仪的TEM勘探对巷道掘进安全管理辅助勘探工作具有积极意义^[10-11]。

仿真用原始数据选择上述4个矿山巷道掘进工作中采集到的原始数据,包括CUGTEM-GK II瞬变电磁仪的采集数据和根据其配套软件资料包绘制的三维数字化模型,同时参考实际巷道掘进工作日志中记录的涌水量、顶板位移量及两帮位移量等数据。仿真环境选择Matlab+Simuwork大数据分析软件,运行设计的基于卷积神经网络和多列神经网络的机器学习算法仿真软件。

分析5种预警状态与矿山岩层涌水量的关联关系,针对地下水风险判断分列给出数据整合得到的模糊决策矩阵预警结果。其中,涌水量数据为掘进到风险预警位置时的实测涌水量,具体数据如表4所示。

表4 预警状态与涌水量关联关系

Table 4 Relationship between warning status and inflow volume

分析层次	预警级别	最大涌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	最小涌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	平均涌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
粗略预警	红色预警	1 127	493	904.9
	橙色预警	816	196	632.4
	黄色预警	439	105	297.5
	蓝色预警	358	84	138.7
	无预警	104	62	78.4
精细预警	红色预警	1 127	739	938.0
	橙色预警	839	393	695.4
	黄色预警	451	354	402.6
	蓝色预警	396	93	141.7
	无预警	115	62	80.2

由表4可知:矿山岩层实测最大涌水量($1\,127\text{ m}^3/\text{h}$)均出现在红色预警状态下,实测最小涌水量($62\text{ m}^3/\text{h}$)均出现在无预警状态下。使用较少数据量(3组三维模型数据)且预警范围更大的粗略预警功能与使用较多数据量(4组三维模型数据)且预警范围较小的精细预警功能相比,对涌水量的控制结果表现出以下特征:无预警状态下,最大涌水量分别为 $104\text{ m}^3/\text{h}$ 和 $115\text{ m}^3/\text{h}$,涌水量完全处于现场排水

系统控制范围内,施工风险较低;粗略预警功能给出的预警值对应的涌水量值域较宽且不同预警级别之间存在较大范围实测涌水量的交叉数据集,反之,精细预警功能给出的预警值对应的涌水量值域较窄且不同预警级别之间存在较小范围实测涌水量的交叉数据集,可以判断出精细预警的数据敏感性更强。

分析 5 种预警状态下矿山巷道工作面顶板及两帮位移量的关联关系,为简化比较分析过程,该分析结果中提到的所有位移量均为完成永久支护(90 d)时的实测位移量,实际支护工艺对位移量的影响并不在考虑范围内。仿真比较结果如表 5 所示。

表 5 预警状态与位移量关联关系

分析层次	预警级别	顶板位移量/mm	两帮位移量/mm
粗略预警	红色预警	196 ~ 303	97 ~ 219
	橙色预警	75 ~ 227	65 ~ 136
	黄色预警	56 ~ 93	42 ~ 108
	蓝色预警	34 ~ 69	37 ~ 75
	无预警	7 ~ 42	9 ~ 52
精细预警	红色预警	207 ~ 303	127 ~ 219
	橙色预警	92 ~ 218	102 ~ 133
	黄色预警	65 ~ 94	71 ~ 106
	蓝色预警	41 ~ 71	48 ~ 76
	无预警	7 ~ 43	9 ~ 53

由表 5 可知:最大实测巷道顶板位移量(303 mm)和最大实测两帮位移量(219 mm)均出现在红色预警状态,最小实测顶板位移量(7 mm)和最小实测两帮位移量(9 mm)均出现在无预警状态。使用较少数据量(3 组 TEM 三维模型数据)且预警范围更大的粗略预警功能与使用较多数据量(4 组 TEM 三维模型数据)且预警范围较小的精细预警功能相比,对位移量的控制结果表现出与涌水量控制相似的特征:精细预警的值域缩小且不同预警状态下值域交叉缩小。

Application of transient electromagnetic method to the construction
of advanced forecasting system for mine roadways

Yin Jichao, Wang Shenli

(Shandong Zhengyuan Geophysical Information Technology Co., Ltd.)

Abstract: The CUGTEM – GK II transient electromagnetic instrument is used for real-time geophysical exploration of mine roadways, generating 3D model imaging results, and providing forecasting and warning data for water inflow in underground rock layers, displacement of roadway roof and walls, etc. Machine learning algorithms integrated deep convolutional neural networks, multilayer neural networks, data binary output, fuzzy decision matrix warning, etc., to provide rough warning results with wide coverage and precise warning results with narrower coverage. Through simulation analysis, both rough warning results and precise warning results show certain data sensitivity, with the precise warning results able to provide high sensitivity warning results 24 h before encountering problematic rock layers during roadway excavation.

Keywords: transient electromagnetic method; mine roadways; advanced detection; machine learning; neural networks; data warning

5 结 语

利用矿山巷道掘进工作循环中每天固定的检修时间,采用 CUGTEM – GK II 瞬变电磁仪对矿山巷道的超前勘探工作进行实时物探,从初次探及该区域到掘进进入该区域前,最多可能对该区域进行 25 次瞬变电磁法勘探,并形成三维模型成像结果。利用这一系列结果,经过深度卷积神经网络和多列卷积神经网络为核心算法的机器学习算法,给出关于矿山岩层涌水量和岩层压力带来的位移量预警结果。经仿真分析,套用数据量较大的精细预警方案数据敏感性更高,在后续研究中,增加勘探密度获得更丰富的勘探结果或采用更高的数据采样频率,对后续研究中获得更精细预警结果有积极意义。

[参 考 文 献]

[1] 吴国培,张莹莹,张博文,等. 基于深度学习的中心回线瞬变电磁全区视电阻率计算[J]. 物探与化探,2021,45(3):750 – 757.

[2] 景贺. 矿井瞬变电磁法和震波单点法巷道勘探研究[J]. 山东煤炭科技,2021,39(5):178 – 180.

[3] 王志彬. 综合物探方法在孤石探测中的可行性研究[J]. 福建建设科技,2021(3):27 – 30.

[4] MARTINS-BRITTO A G, MORAES C M, LOPES F V. Transient electromagnetic interferences between a power line and a pipeline due to a lightning discharge: An EMTIP-based approach[J]. Electric Power Systems Research,2021,197:107321.

[5] 赵磊磊. 基于瞬变电磁法的采空区探测研究[J]. 江西煤炭科技,2021(2):128 – 130.

[6] 常丰国. 瞬变电磁法在采面顶板岩层富水区的探查应用[J]. 江西煤炭科技,2021(2):134 – 136,140.

[7] 张振雄,易国财,王仕兴,等. 基于最小构造模型的地空瞬变电磁一维正反演技术研究[J]. 物探化探计算技术,2021,43(3):352 – 359.

[8] 王兴春,邓晓红,陈晓东,等. 基于高温超导的瞬变电磁法在青城子矿集区的应用[J]. 地球科学,2021,46(5):1 871 – 1 880.

[9] 杨月月,郭瑞,杜芙蓉,等. 电磁法防砂筛管损伤检测探头设计与仿真[J]. 管道技术与设备,2021(3):38 – 41.

[10] 张丹枫. 瞬变电磁法勘探在煤矿多层采空积水区的应用研究[J]. 冶金管理,2021(9):95 – 96.

[11] 戚伟,李威. 基于瞬变电磁法的金属矿山深部岩体储水分布探测[J]. 黄金,2019,40(8):41 – 45.