

【引用格式】艾佳, 蓝强, 马树青, 等. 基于磁异常信号解析的目标速度特性研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6(5): 562-568.

基于磁异常信号解析的目标速度特性研究

艾佳^{1,2}, 蓝强², 马树青², 张理论², 仝青山¹

(1. 长沙理工大学 数学与统计学院, 湖南 长沙 410114;
2. 国防科技大学 气象海洋学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 水下磁性目标产生的磁场成为重要的水下目标非声探测信号源, 因此对水下磁性目标的静磁场建模原理开展了研究。实现了均匀磁化的旋转椭球体模型和磁偶极子模型, 并对 2 种模型在目标磁异常信号仿真上的适应性进行了分析。研究表明: 相比于磁偶极子模型, 旋转椭球体模型在传感器与目标距离较近时也能表现很好的适应性。由此, 利用旋转椭球体模型, 首先通过仿真计算构建了目标在不同运动速度状态下的近距离磁异常信号数据集, 然后开展基于深度学习的水下磁性目标运动速度识别方法研究, 最后识别效果在验证集和测试集上分别取得了 0.17 m/s 和 0.74 m/s 良好的误差精度, 为后续目标的航向等状态识别奠定重要基础。

关键词 磁异常; 信号仿真; 旋转椭球体模型; 速度识别

中图分类号 TJ630 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2023)05-0562-07

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2023.05.005

Research on Target Speed Characteristics Based on Magnetic Anomaly Signal Analysis

AI Jia^{1,2}, LAN Qiang², MA Shuqing², ZHANG Lilun², TONG Qingshan¹

(1. School of Mathematics and Statistics, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Magnetic fields generated by underwater magnetic targets become an important source of non-acoustic detection signals for underwater targets. In this paper, the principles of static magnetic field modeling of underwater magnetic targets are investigated. The rotating ellipsoid model with uniform magnetization and the magnetic dipole model are implemented, and the adaptability of the two models to the simulation of target magnetic anomaly signal is analyzed. The results show that the rotating ellipsoid model can also perform well when the sensor is close to the target compared to the magnetic dipole model. Therefore, using the rotating ellipsoid model, we firstly construct the close-range magnetic anomaly signal dataset of the target in different motion speed states by simulation, and then carry out the research on the underwater magnetic target motion speed recognition method based on the deep learning method. Finally, the recognition effect achieves good error accuracy, which is 0.17 m/s on the validation set and 0.74 m/s on the test set, and the work of this paper lays an important foundation for the subsequent target heading and other state recognition.

Key words magnetic anomaly; signal simulation; rotating ellipsoid model; speed recognition

0 引言

随着减声降噪技术的发展, 由铁磁性材料制造

的潜艇、舰船等水下运动目标所产生的磁场已成为一种重要的非声探测信号源。利用水下磁性目标产生的磁场进行目标的探测识别受到了广泛

收稿日期: 2023-06-27

作者简介: 艾佳 (1998-), 女, 硕士生, 主要从事水下磁性目标识别相关研究。

*通信作者: 蓝强 (1988-), 男, 博士, 副教授, 主要从事高性能计算、海洋信息处理等相关方向的教学研究。

的关注。

水下磁性目标磁场按照不同的频率可以划分为静磁场和交变磁场。对磁性目标静磁场建模的方法较多, 如磁偶极子模型, 均匀磁化的旋转椭球体模型、磁偶极子阵列模型、均匀磁化的旋转椭球体模型与磁偶极子阵列混合模型等^[1], 以上述模型为基础可计算仿真出磁性目标所产生的磁异常信号。在磁异常信号仿真模型的选择上, 目前并没有统一的方法, 例如: 欧津东采用磁偶极子模型对铁磁性目标的磁异常信号进行仿真^[2], 而马剑飞则采用旋转椭球体与磁偶极子阵列模型构造运动目标磁场数据集^[3]。磁异常信号曲线与目标的运动速度在物理意义上存在着一定的关系, SHEN 等人进行了相关的理论研究, 基于磁偶极子模型, 在理论公式中引入了目标的运动速度、方向、CPA 距离等参数^[4-5]。利用磁异常信号可以进行目标运动状态的识别, 例如, 许杰等人提取了三分量磁场信号通过特性曲线相关特征, 利用神经网络对舰船的航速进行分类识别^[6]。另外, 刘昌锦、李斌利用磁异常信号的时频信息进行了速度识别的相关实验^[7-8]。

本文对水下磁性目标的静磁场建模开展了研究, 实现了均匀磁化的旋转椭球体模型和磁偶极子模型, 并对 2 种模型在目标磁异常信号仿真上的适应性进行了分析。使用旋转椭球体模型构建了一套目标在不同运动速度下磁异常信号数据集, 基于该数据集, 本文采用卷积神经网络这一深度学习方法对目标的运动速度参数进行识别。

1 均匀磁化的旋转椭球体模型

潜艇等具有规则几何形状的水下磁性目标, 其产生的磁场, 可以将其近似等效成一个长轴等于目标长度, 短轴等于目标宽度的均匀磁化的旋转椭球体来进行计算。

如图 1 所示, 目标长 L , 宽 B , 则有椭球体长半轴 $a = L/2$, 2 个短半轴 $b = c = B/2$ 。

假设目标的固定磁场已被消除, 目标在地磁场中沿 x 、 y 、 z 这 3 个轴方向均匀磁化, 目标在空间中某一点 $p(x, y, z)$ 处所产生的磁场强度 H 为

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \\ c_x & c_y & c_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

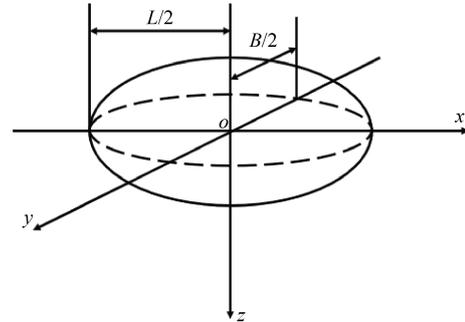


图 1 旋转椭球体模型

Fig. 1 Rotating ellipsoid model

式中, 计算系数分别为

$$\begin{cases} a_x = -\frac{3}{4\pi} \left(\frac{1}{2g^3} \ln \frac{a_n + g}{a_n - g} - \frac{a_n}{g^2 t} \right) \\ a_y = \frac{3}{4\pi} \frac{xy}{a_n b_n^2 t} \\ a_z = \frac{3}{4\pi} \frac{xz}{a_n b_n^2 t} \\ b_x = a_y \\ b_y = -\frac{3}{8\pi} \left(\frac{a_n}{b_n^2 g^2} - \frac{1}{2g^3} \ln \frac{a_n + g}{a_n - g} - \frac{2a_n y^2}{b_n^4 t} \right) \\ b_z = \frac{3}{4\pi} \frac{a_n yz}{b_n^4 t} \\ c_x = a_z \\ c_y = b_z \\ c_z = -\frac{3}{8\pi} \left(\frac{a_n}{b_n^2 g^2} - \frac{1}{2g^3} \ln \frac{a_n + g}{a_n - g} - \frac{2a_n z^2}{b_n^4 t} \right) \end{cases}$$

其中:

$$\begin{aligned} g &= \sqrt{a^2 - b^2} \\ t &= \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2 + g^2)^2 - 4g^2 x^2} \\ a_n &= \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2 + g^2 + t)}/2 \\ b_n &= \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2 - g^2 + t)}/2 \end{aligned}$$

式中, m_x , m_y , m_z 为目标磁矩 m 的三分量值, 且

$$m = (\mu_r - 1) \cdot H_i \cdot V$$

其中:

$$V = \frac{4}{3} \pi a b^2$$

$$H_i = \frac{H_e}{1 + (\mu_r - 1)N}$$

式中, N 为去磁系数, 且满足 $N_x + N_y + N_z = 1$ 。

对于均匀磁化的旋转椭球体模型, 有:

$$N_x = \frac{1}{\lambda^2 - 1} \left[\frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2 - 1}} \ln(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) - 1 \right]$$

$$N_y = N_z = \frac{1 - N_x}{2}$$

$$\lambda = \frac{a}{b}$$

式中: H_e 为磁化 (背景) 磁场; H_i 为椭球体内感应磁场; μ_r 为材料相对磁导率; V 为旋转椭球体体积。

2 磁偶极子模型

磁偶极子模型是另一种常用的磁场建模方法。

以目标为坐标原点, 其在空间中某一点 $p(x, y, z)$ 处产生的磁场强度 H 为

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \frac{1}{4\pi r^5} \begin{bmatrix} 3x^2 - r^2 & 3xy & 3xz \\ 3xy & 3y^2 - r^2 & 3yz \\ 3xz & 3yz & 3z^2 - r^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 为场点与目标之间的距离。

3 磁异常信号仿真及模型对比

3.1 磁异常信号仿真

目标磁化后引起其周围空间中局部均匀地磁场畸变而产生磁异常, 在其运动过程中经传感器采集而得到磁异常信号。

如图 2 所示, 现假设传感器处于 $x'o'y'$ 平面的下方。

以传感器为原点建立空间直角坐标系, 设目标在 $x'o'y'$ 的平面上沿 x 轴方向做匀速直线运动, 航行速度为 v , 目标航行至传感器正上方时为 $t=0$ 时刻, 设传感器的采样点数为 N (0 时刻前后的采样点数为 $N/2$), 采样频率为 f_s , 则目标在运动过程

中的位置参数满足如下的运动方程:

$$\begin{cases} x(k) = v \cdot k / f_s \\ y(k) = \pm R \\ z(k) = -d \end{cases} \quad (3)$$

式中: $k = -\frac{N}{2}, -\frac{N}{2} + 1, \dots, \frac{N}{2}$; R 为正横距; d 为传感器的深度。

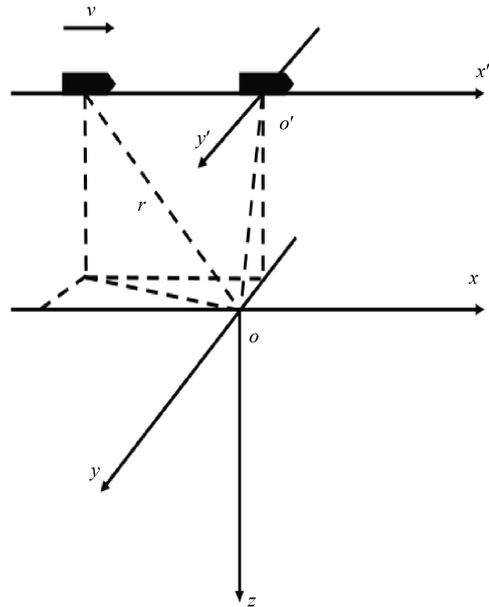


图 2 运动模型

Fig. 2 Motion model

联立目标磁场数学模型和运动方程, 即可仿真目标在一段时间内运动所产生的磁异常信号。采用均匀磁化的旋转椭球体模型按照如下仿真参数进行磁异常信号的仿真。

经查阅相关资料^[9], 以长沙为例, 该地的地磁要素值分别为水平分量 $H = 36.03 \mu\text{T}$, 垂直分量 $Z = 31.252 \mu\text{T}$, 磁偏角 $D = -2.43^\circ$ 。假设现有某一水下目标长 $L = 111.8 \text{ m}$, 宽 $B = 17.8 \text{ m}$, 材料相对磁导率 $\mu_r = 200$, 则可计算出目标的磁矩三分量值 (单位: $\text{A} \cdot \text{m}^2$) 分别为 $m_x = 11672832.56$, $m_y = -46509.75$, $m_z = 951428.92$, 目标 (场源) 位置为 $(v \cdot t, 44.5, 80.5)$, 传感器 (场点) 位置为 $(0, 0, 125)$, 采样点数 $N = 5120$, 采样频率 $f_s = 20 \text{ Hz}$, 仿真得到的三分量磁异常信号如图 3 所示。

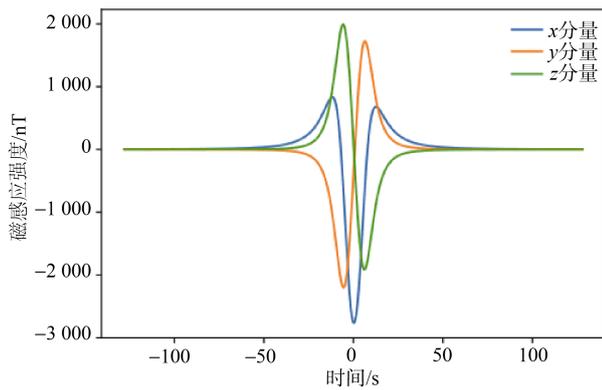


图 3 仿真三分量磁异常信号

Fig. 3 Simulation of three component magnetic anomaly signal

3.2 仿真模型性能对比分析

对均匀磁化的旋转椭球体模型, 实际计算经验表明, 当探测距离大于目标的 2 倍宽度以上时, 其拟合精度超过 85%^[10], 对磁偶极子模型, 当探测距离大于物体长度 2.5 倍时, 具有良好的拟合精度^[11]。对 2 种模型在不同探测距离下计算的磁场强度进行误差对比, 以及模型在仿真的适应性上进行分析。

以 3.1 节目标为例, 并以旋转椭球体模型的计算结果为基础, 计算不同探测距离下 2 种模型在场点处产生的磁场强度总量的相对误差。

2 种模型均适用于远距离的磁异常信号仿真, 且由表 1, 当探测距离大于目标长度的 2.15 倍时, 两模型计算得到的磁场强度相对误差小于 5%, 可以认为是相同的^[12], 探测距离越远, 两模型之间相对误差越小。

表 1 不同距离下 2 种模型计算的磁场强度的相对误差
Table 1 Relative errors of magnetic field intensity calculated by 2 models at different distances

距离/m	倍数	相对误差/%
111.8	1	21.75
134.16	1.2	15.10
167.7	1.5	9.66
201.24	1.8	6.71
223.6	2.0	5.44
240.37	2.15	4.70
257.14	2.3	4.11
279.5	2.5	3.48
335.4	3	2.42

在 2.5 倍目标长度以下的范围内, 磁偶极子模型的相对误差较大 (可以超过 10%)^[11], 又在探测距离大于 2.15 倍目标长度时, 这一距离仍大于 2 倍的目标宽度, 2 种模型计算的磁场可以认为相同。因此, 即使与真实值之间存在误差, 均匀磁化的旋转椭球体模型相比于磁偶极子模型, 在探测距离大于 2 倍目标宽度, 小于 2.5 倍目标长度的范围内, 仍然能够保证相对误差低于 15%。

根据 2 种模型的理论公式, 计算目标在某一点处产生的磁场强度, 除需要场源、场点的位置参数外, 更重要的是确定目标的磁矩大小。尽管可以根据有限的磁异常信号数据进行外推实现仿真, 但大多数情况下实测的磁异常信号仍是难以获得的。在这种情况下, 对比 2 种模型, 在一定的假设条件下, 均匀磁化的旋转椭球体模型不仅能够通过目标的尺寸参数计算出目标的磁矩, 同时相比于磁偶极子模型能够在一定的精度下计算相对近距离的目标产生的磁场强度。以 3.1 节的仿真信号参数为例, 给定探测距离 r 的最小值为 $2.5\sqrt{2}B$, 这一距离仅约为目标长度 L 的 0.56 倍。

4 基于磁异常信号的目标速度识别

4.1 磁异常信号与运动速度

为探究目标磁异常信号与其运动速度之间的关系, 以 3.1 节中的仿真为基础, 针对同一目标, 固定其他参数, 仅改变运动速度, 分别在 $v=2.45$ m/s、3.27 m/s、4.80 m/s、5.31 m/s、6.80 m/s、7.55 m/s、8.40 m/s 这 7 种不同的运动速度下进行磁异常信号仿真, 得到三分量磁异常信号如图 4 所示。

由图可知, 不同的速度下得到的三分量磁异常信号在幅值上并没有显著的差异, 且同一分量下, 信号的波形相同。但同一分量下, 信号波形的宽度具有较大的差异: 速度越快, 信号波峰与波谷之间的间隔越短、波形越窄; 速度越慢, 信号波峰与波谷之间的间隔越长、波形越宽。可见, 目标的运动速度与信号波形的宽度成反比。

通过上述分析, 建立运动速度与信号波形宽度之间的映射关系即可实现通过信号识别目标运动速度。

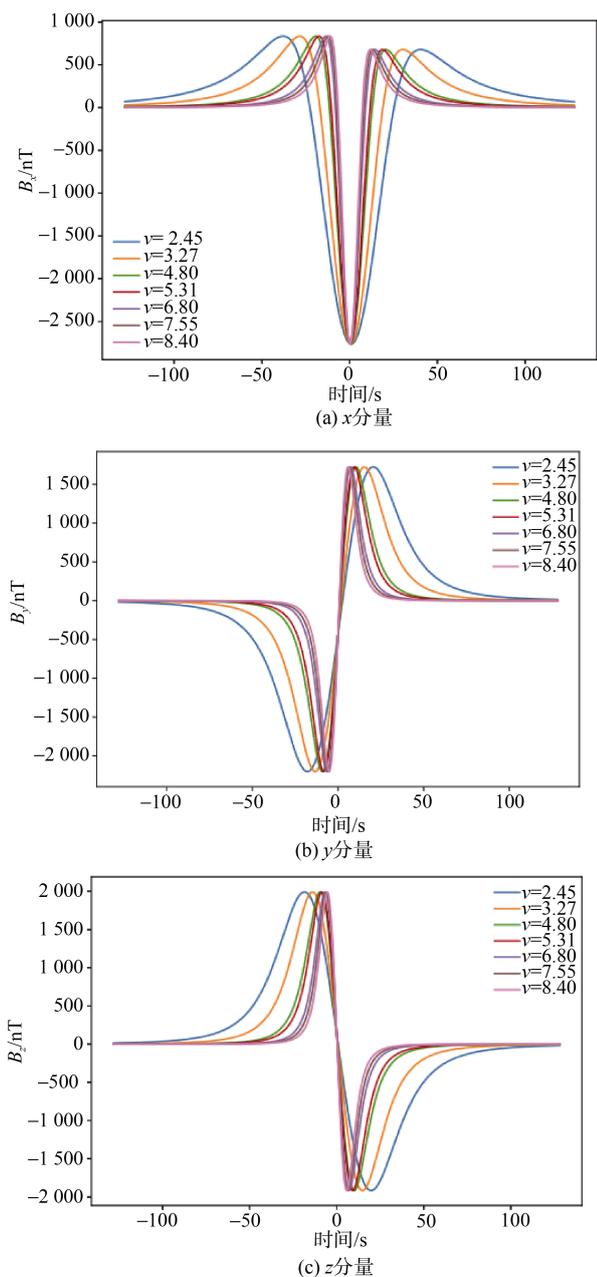


图 4 不同运动速度下的磁异常信号

Fig. 4 Magnetic anomaly signals at different speeds

4.2 基于卷积神经网络的磁性运动目标速度识别

4.2.1 仿真数据集的构建

现有 110 个水下磁性目标的尺寸参数, 利用均匀磁化的旋转椭球体模型进行水下磁性目标的磁异常信号仿真, 生成目标信号数据集。

与 3.1 节相同, 仍给定地磁要素值分别为水平分量 $H = 36.03 \mu\text{T}$, 垂直分量 $Z = 31.252 \mu\text{T}$, 磁偏角 $D = -2.43^\circ$ 。其它仿真参数设置: 材料相对磁导

率 $\mu_r \sim U(200, 400)$; 采样点数 $N = 2048$, 采样率 $f_s = 20 \text{ Hz}$; 运动速度 $v \sim U(5, 20)$; 传感器深度 $d = 125 \text{ m}$; 正横距 $R \sim U(-d, d) \text{ m}$ 。

按照上述设定的仿真参数, 针对每个目标, 生成 100 组不同速度 v 和正横距离 R 的三分量磁信号数据, 并按照一定的信噪比 $\text{SNR} \sim U(5, 20)$ 随机加入高斯白噪声, 共得到 11 000 个样本的三分量磁信号数据。图 5 为某样本的三分量磁异常信号。

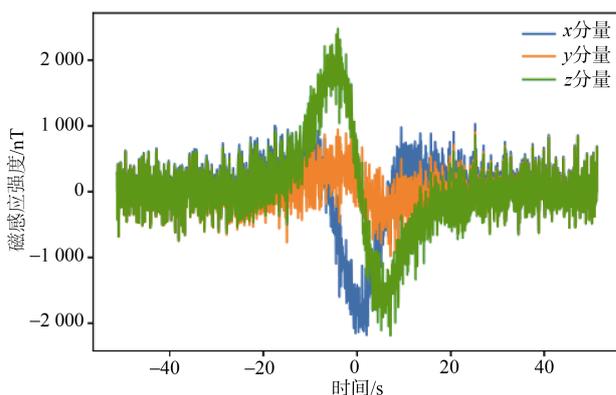


图 5 某样本三分量磁异常信号

Fig. 5 Three component magnetic anomaly signal of a sample

由于希望在目标通过传感器之前可以估计出目标的运动速度, 因此, 取三分量信号 0 时刻之前 (1 024 个采样点) 的信号序列, 将 3 个分量上一维的信号序列组成一个 3×1024 的矩阵, 作为网络的输入特征。

4.2.2 卷积神经网络结构设计及实验

卷积神经网络是一种常用的深度学习方法, 针对水下磁性目标的速度识别, 设计了一个包含 4 层卷积、4 层池化和 1 个全连接层的卷积神经网络。网络结构参数如表 2 所示。

在每个卷积层和池化层之间均进行批量归一化处理, 以加快网络的计算速度, 批处理大小设置为 55, 激活函数均选用 Tanh 函数, 输出层不使用激活函数, 损失函数选用最小均方误差 MSE, 优化器选用 Adam 优化算法, 学习率 $\alpha = 0.001$; 按照 75% 和 25% 划分训练集和验证集, 分别包含 8 250 和 2 750 个样本; 共训练 250 次, 得到均方误差随训练次数增加的变化情况如图 6 所示。经过 250 次

训练后, 在训练集上的均方误差为 0.08 m/s, 在验证集上的均方误差为 0.17 m/s。

表 2 卷积神经网络参数
Table 2 Parameters of CNN

网络层	核大小	步长	“零”填充	核数量	输入维度
Conv2d-1	1*7	1*1	0*0	32	1*3*1 024
MaxPool2d-1	1*5	1*1	-		32*3*1 018
Conv2d-2	1*7	1*3	0*0	32	32*3*1 014
MaxPool2d-2	1*5	1*1	-		32*3*336
Conv2d-3	1*7	1*3	0*6	64	64*3*332
MaxPool2d-3	1*5	1*3	-		64*3*113
Conv2d-4	1*7	1*3	0*6	32	64*3*37
MaxPool2d-4	1*5	1*3	-		32*3*15
Full	-	-	-	132	384
Output	-	-	-	1	132

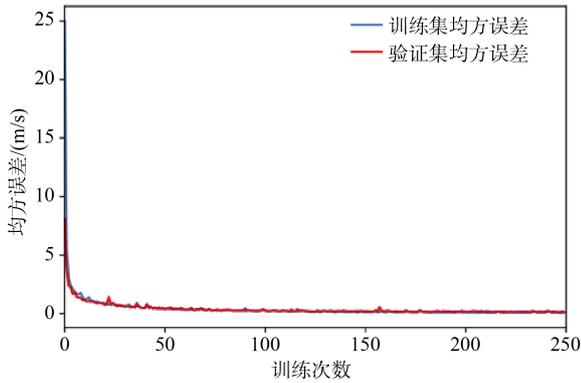


图 6 估计误差曲线
Fig. 6 Estimation error curve

同时, 为进一步验证所构建的模型的泛化能力, 选取了 12 个未用于模型训练与验证的样本尺寸参数, 针对每个样本按照前述的参数设置及特征处理方法, 随机生成了 1 200 个磁矩样本的三分量磁异常信号测试数据集。利用训练好的模型, 对该数据集样本的速度参数进行识别, 得到的均方误差为 0.74 m/s。

4.2.3 实测数据验证

上述实验中, 在测试集和验证集上均取得了较好的识别效果, 为进一步体现算法的可行性, 利用实测得到的磁场信号数据进行验证。

考虑到开展海上试验的复杂性, 且由于磁异常目标探测具有跨介质性, 针对水下磁性目标的速度

识别技术同样适用于陆地环境下车辆等磁性目标, 因此, 以车辆作为磁性目标, 对其运动过程中产生的磁异常信号进行了采集, 并利用该实测信号数据进行接下来的验证。

图 7 为现场实验示意图。实验在长沙某高校校内进行, 所用的目标车辆为小轿车, 运动方向为东西向, 运动速度均值约为 5.56 m/s (20 km/h)。采用三分量磁通门传感器进行测量, 三轴方向如图 7 中坐标所示, 目标与传感器的 CPA 距离约为 4 m。利用测量的 5 个信号样本进行速度识别, 表 3 为识别结果。5 个样本与实测均值的绝对误差均较小, 计算平均绝对误差为 0.25 m/s, 在实测数据上同样具有较好的识别效果。



图 7 现场实验照片
Fig. 7 A picture of field experiment

表 3 实测数据速度识别结果
Table 3 Speed recognition results of measured data

样本编号	实测均值/(m/s)	预测值/(m/s)	绝对误差/(m/s)
A		5.80	0.24
B		5.83	0.27
C	5.56	5.26	0.30
D		5.86	0.30
E		5.43	0.13

5 结束语

本文对比分析了均匀磁化的旋转椭球体模型与磁偶极子模型在水下磁性目标磁异常信号仿真中的适用性, 均匀磁化的旋转椭球体模型能够通过

目标的尺寸参数计算出目标的磁矩,并且能够在相对较近的距离下以一定的精度拟合出目标所产生的磁场,因此更加适用于水下磁性目标磁异常信号的仿真。基于此,利用该模型构建仿真磁异常信号数据集,进行了水下磁性目标速度识别的实验,设计了一个多层的卷积神经网络,对水下磁性目标速度参数进行识别,取得了良好的识别效果,在验证集上均方误差为 0.17 m/s,在测试集上的均方误差为 0.74 m/s,模型具有较好的泛化能力,并且利用实测数据进行验证,仍取得了较好的识别效果,进一步证明了算法的技术可行性。

参考文献

- [1] 曲晓慧,杨日杰,单志超. 潜艇磁场建模方法的分析与比较[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(3): 7-11.
- [2] 欧津东. 铁磁性运动目标磁异常探测识别方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [3] 马剑飞,颜冰,林春生,等. 基于多通道卷积神经网络的磁性舰船目标运动参数估计[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(4): 78-84.
- [4] SHEN Y, HASANYAN D, GAO J Q, et al. A magnetic signature study using magnetoelectric laminate sensors[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(9): 095007.
- [5] SHEN Y, WANG J Z, SHI J D, et al. Interpretation of signature waveform characteristics for magnetic anomaly detection using tunneling magnetoresistive sensor[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, 484: 164-171.
- [6] 许杰,程锦房,何光进. 一种基于舰船磁场的神经网络识别模型[J]. 船电技术, 2011, 31(9): 51-54.
- [7] 刘昌锦,叶平贤. 舰船磁场信号的频域分析[J]. 海军工程学院学报, 1992(4): 1-9.
- [8] 李斌,袁翔,汪晓亚. 基于磁场时频分析的舰船速度识别[J]. 探测与控制学报, 2000, 22(3): 42-46.
- [9] 管志宁. 地磁场与磁力勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [10] 林春生,向前,龚沈光. 水中磁性运动目标信号的模型化检测[J]. 兵工学报, 2005, 26(2): 192-195.
- [11] 张朝阳,肖昌汉,高俊吉,等. 磁性物体磁偶极子模型适用性的试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(5): 862-868.
- [12] 孙权,唐劲飞. 潜艇磁场的估算与仿真[J]. 鱼雷技术, 2011, 19(4): 318-321.

(责任编辑: 曹晓霖)