

基于航磁垂向分量的二度体场源深度识别方法研究

李冰*, 王志博, 金久强, 耿圣博, 周德文, 郭琦, 范正一

中国自然资源航空物探遥感中心, 北京

收稿日期: 2024年1月26日; 录用日期: 2024年3月14日; 发布日期: 2024年3月21日

摘要

本文提出了一种基于航磁垂向分量的二度体场源深度识别方法。从无限延伸水平圆柱体磁异常垂向分量的正演公式出发, 给出了利用极大值估算异常中心埋深的表达式, 并在此基础上提出了约束条件下的深度估算方法, 此方法具有计算简便、快速、易于操作等优点。通过两组无限延伸水平圆柱体模型计算结果表明, 约束条件下的深度估算方法结果均优于常规极大值深度估算方法, 其深度估算偏差均值为3.16%。将此方法应用于我国北部某地区的实测航磁垂向分量数据, 与钻孔资料相对比, 其深度估算偏差均小于5%, 进一步验证了该方法的有效性。

关键词

航磁垂向分量, 二度体, 深度识别, 埋深

Field Source Depth Identification Method of Two-Dimensional Body Based on Aeromagnetic Vertical Component

Bing Li*, Zhibo Wang, Jiuqiang Jin, Shengbo Geng, Dewen Zhou, Qi Guo, Zhengyi Fan

China Center for Airborne Geophysical Exploration and Remote Sensing of Natural Resources, Beijing

Received: Jan. 26th, 2024; accepted: Mar. 14th, 2024; published: Mar. 21st, 2024

Abstract

A method for depth identification of two-dimensional field source based on aeromagnetic vertical component is proposed in this paper. Based on the forward formula of vertical component of

*第一作者。

文章引用: 李冰, 王志博, 金久强, 耿圣博, 周德文, 郭琦, 范正一. 基于航磁垂向分量的二度体场源深度识别方法研究[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(3): 269-276. DOI: 10.12677/ag.2024.143025

magnetic anomaly for infinitely extended horizontal cylinder, the expression for estimating the buried depth of anomaly center by maximum value is given, and a depth estimation method under constraints is proposed. This method has the advantages of simple calculation, fast operation and so on. The calculation results of two groups of infinite extension horizontal cylinder models show that the depth estimation method under constraints is superior to the conventional maximum depth estimation method, with the mean deviation of 3.16%. This method is applied to the measured aeromagnetic vertical component data in a certain area in northern China. Compared with borehole data, the deviation of depth estimation is less than 5%, which further verifies the effectiveness of this method.

Keywords

Aeromagnetic Vertical Component, Two-Dimensional Body, Depth Identification, Buried Depth

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

磁源体埋深的估算是磁异常反演过程的重要组成, 对于了解场源地质体的几何形态和空间赋存状态具有重要意义, 为进一步的场源物性反演提供基础[1]。利用场源的分布求取其深度的方法主要包括特征点法、切线法、Werner 反褶积方法[2]、功率谱法[3]、欧拉反褶积法[4]、谱矩方法[5]等方法。其中, 特征点法是利用磁异常曲线上的一些特征值, 如极大值、半极值、1/4 极值、拐点、零值点、拐点及极小值等坐标位置关系求解磁源体参量的方法。梁韧等[6]提出了基于球体模型的磁异常垂向分量场源深度估算方法, 并在我国北部地区的实测航磁垂向分量数据中进行了计算, 通过钻孔数据进行了验证, 取得了较好的应用效果。

地球磁场是具有强度大小与方向的空间矢量[7], 矢量磁测与传统的总场强度或梯度模量测量相比, 可同时获取磁异常大小与方向信息, 能够有效减少反演的多解性, 提高磁测数据处理与解释的精度和可靠性[8]。航空磁场分量(航空矢量磁测)是航空磁测技术发展的第三阶段[9]。2017 年中国自然资源航空物探遥感中心成功研制出具有自主知识产权的航磁三分量勘查系统, 并实现了国内首次航磁矢量测量飞行[10]。随着航磁多参量测量与解释技术的发展, 航磁三分量数据在位场边缘识别、场源深度估算等方面的研究也进一步深入, 为航磁多参量数据的处理与解释提供了理论依据与研究基础。

本文从磁异常垂向分量特征点法出发, 提出了以无限延伸水平圆柱体正演公式为基础的垂向分量深度识别方法。在理论模型试算与实际数据计算中都具有较好的应用效果, 能够为解决二度体场源埋深问题提供依据与参考。

2. 基本原理

2.1. 常规特征点(极大值)法

假设水平圆柱体沿走向无限延伸, 横截面积为 S , 中心埋深为 h , 有效磁化强度为 M_s , 倾角为 i_s , 其垂向分量 Z_a 的正演计算公式为

$$Z_a = \frac{\mu_0 m_s}{2\pi} \frac{1}{(x^2 + h^2)^2} \left[(h^2 - x^2) \sin i_s - 2hx \cos i_s \right] \quad (1)$$

其中, $m_s = SM_s$ 为单位长度的有效磁矩, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (T \cdot m/A)$ 为真空磁导率。

在垂直磁化的情况下, $i_s = 90^\circ$ 时, 由(1)式可得

$$Z_{a\perp} = \frac{\mu_0 m_s (h^2 - x^2)}{2\pi(x^2 + h^2)^2} \quad (2)$$

在水平圆柱体正上方, 即 $x = 0$ 时, $Z_{a\perp} = Za_{\max} = \frac{\mu_0 m_s}{2\pi h^2}$, 此时的埋深 h 为

$$h = \left(\frac{\mu_0 M_s}{2Za_{\max}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot r \quad (3)$$

式中 r 为横截面积半径, 当已知异常体的有效磁化强度、截面半径和垂向分量异常最大值时, 可通过(3)式计算异常体的中心埋深。但是, 对于地下空间的未知异常体, 其截面半径可根据不同延拓高度的边界识别结果进行粗略估计, 但其磁化强度的确定具有一定难度, 使得根据(3)式计算异常体中心埋深具有一定困难。本文提出了以已知异常点作为约束的垂向分量异常深度识别方法, 并对其计算公式进行了推导。

2.2. 约束条件下的特征点法

研究区内已知水平圆柱体二度异常体, 令其磁化强度为 M_{s1} , 截面半径为 r_1 , 中心埋深为 h_1 , 在水平圆柱体正上方垂向分量最大值为 $Za_{\max 1}$; 另一未知水平圆柱体二度异常体, 其磁化强度为 M_{s2} , 截面半径为 r_2 , 中心埋深为 h_2 , 在水平圆柱体正上方垂向分量最大值为 $Za_{\max 2}$, 由(3)式可知, 已知异常体的中心埋深为

$$h_1 = \left(\frac{\mu_0 M_{s1}}{2Za_{\max 1}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot r_1 \quad (4)$$

未知水平圆柱体二度异常体的中心埋深为

$$h_2 = \left(\frac{\mu_0 M_{s2}}{2Za_{\max 2}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot r_2 \quad (5)$$

假设两个异常体所处的外部磁场为 H , 已知水平圆柱体的磁化率大小为 κ_1 , 未知水平圆柱体的磁化率大小为 κ_2 , 则已知水平圆柱体的磁化强度 M_{s1} 为

$$M_{s1} = \kappa_1 \cdot H \quad (6)$$

未知水平圆柱体的磁化强度 M_{s2} 为

$$M_{s2} = \kappa_2 \cdot H \quad (7)$$

则将(4)式与(5)式相除可得

$$h_2 = \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \gamma \cdot h_1 \quad (8)$$

式中, α 为两个异常体的磁化强度之比, $\alpha = \frac{M_{s2}}{M_{s1}} = \frac{\kappa_2}{\kappa_1}$ 。 β 为垂向分量最大值之比, $\beta = \frac{Za_{\max 2}}{Za_{\max 1}}$ 。 γ 为横

截面半径之比, $\gamma = \frac{r_2}{r_1}$ 。

在研究区内计算未知异常体的中心埋深时,由(8)式可知,无需已知异常体的磁化强度值,只需已知其磁化率之比、垂向分量最大之比和截面半径之比,在一定程度上解决了磁化强度测量困难的问题。为了进一步验证本文提出的约束条件下的特征点法的计算精度,并与原始方法进行对比分析,设计并计算了两组沿走向无限延伸的水平圆柱体模型,并利用公式 $\delta = \frac{h_c - h_0}{h_0} \times 100\%$ 对其进行深度误差估算,式中 h_0 为未知模型体的设计埋深, h_c 为未知模型体的计算埋深。

3. 模型试验

3.1. 两个水平圆柱体模型

首先设计了两个沿 Y 方向无限延伸的水平圆柱体,其 XY 平面图和 XZ 剖面图如图 1 所示,并假设模型 1 为已知模型,模型 2 为未知模型,其模型参数见表 1。

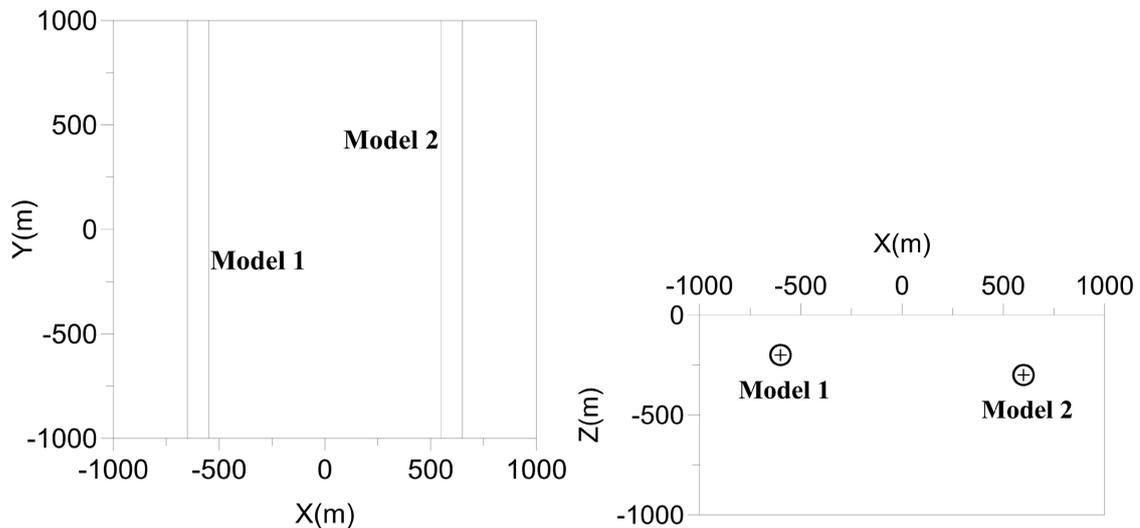


Figure 1. XY plane position map and XZ profile position map
图 1. XY 平面图与 XZ 剖面图

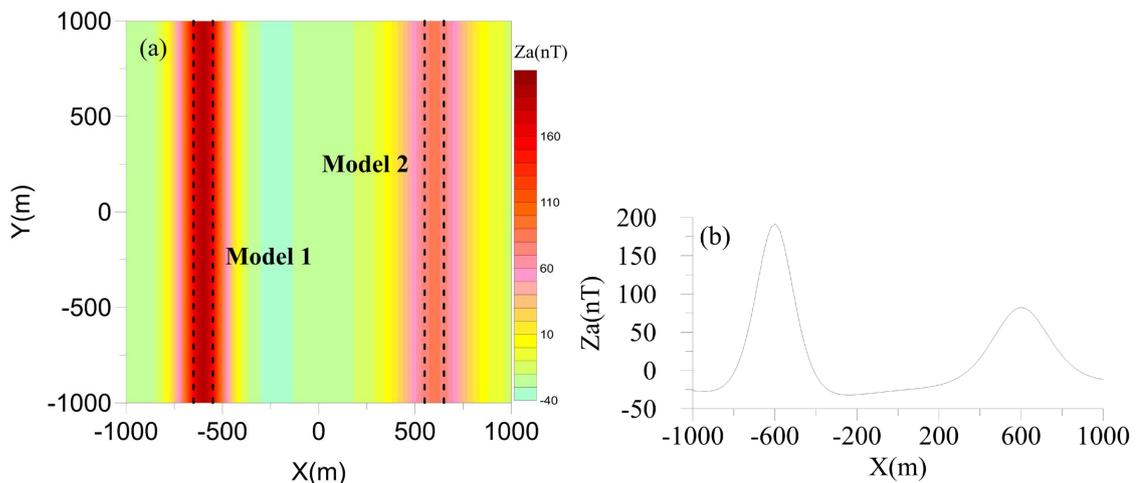


Figure 2. (a) Planar contour map of two horizontal cylinder models; (b) Profile map of a section perpendicular to strike
图 2. (a) 两个水平圆柱体模型平面等值线图; (b) 垂直走向剖面异常图

Table 1. Parameter table of two horizontal cylinder models**表 1.** 两个水平圆柱体模型参数表

模型编号	中心埋深 h (m)	横截面半径 r (m)	磁化强度 M (A/m)	Za_{\max} (nT)
1	200	50	5	191.82
2	300	50	5	82.24

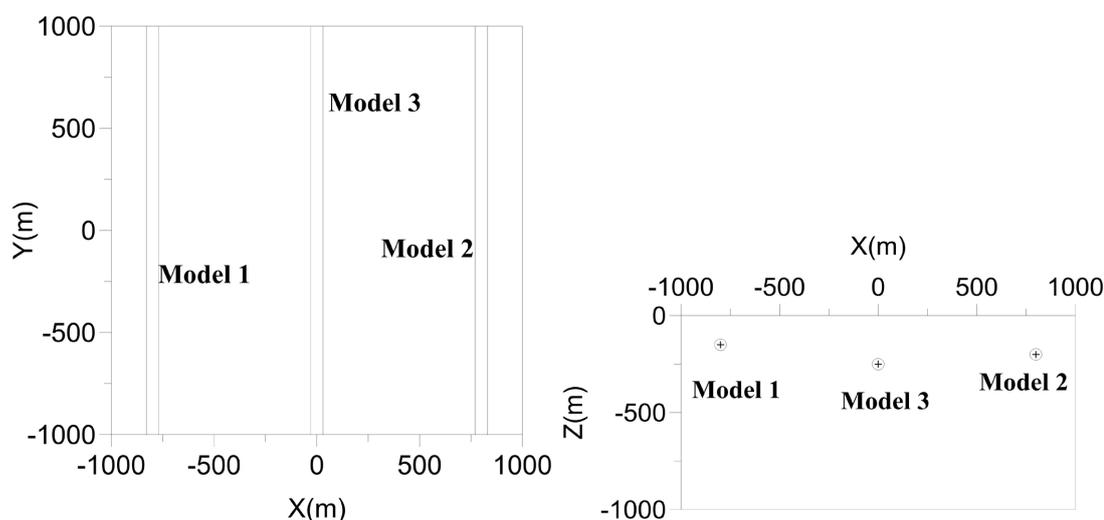
Table 2. Comparison of calculation results of different methods for central buried depth of model 2**表 2.** 水平圆柱体 2 中心埋深不同方法计算结果对比表

计算方法	柱体 2 埋深 h (m)	计算埋深 h_c (m)	深度估算误差 δ (%)
常规方法	300	309.01	3.00
本文方法	300	305.43	1.81

两个水平圆柱体模型平面等值线图如图 2(a)所示, 黑色虚线为模型平面位置, 其异常形态为相互平行但间距不等的直线, 沿垂直于异常体走向方向抽取了剖面, 其异常形态如图 2(b)所示, 分别在两个异常体中心上方出现两个极大值, 由于两个异常体的中心埋深不同, 所以其异常幅值也不同, 随着埋深的增大, 异常幅值减小。本文分别用常规特征点(极大值)方法和约束条件下的特征点(极大值)法对模型 2 的埋深进行了计算, 结果见表 2 所示。常规方法的深度估算误差为 3.01%, 本文提出的方法的估算误差为 1.81%, 说明本文提出的计算方法精度更高, 同时计算简便快捷。

3.2. 三个水平圆柱体模型

为了进一步试验本方法的适用性与应用效果, 设计了三个埋深不同的无限延伸水平圆柱体模型, 将模型 1 作为已知模型, 模型 2 和模型 3 作为未知模型, 其平面位置与剖面位置如图 3 所示。

**Figure 3.** XY plan and XZ section of three horizontal cylinder models**图 3.** 三个水平圆柱体模型 XY 平面图与 XZ 剖面图

三个水平圆柱体模型的平面等值线图与剖面异常图如图 4 所示, 图 4(b)中显示, 在 3 个水平圆柱体中心正上方出现三个极大值, 表 3 中显示, 模型 1-模型 3 分别为 119.31 nT、64.31 nT、64.73 nT。当将模

型 1 作为已知点；表 4 中显示，模型 2 作为未知点时，传统方法与本文方法的深度估算误差分别为 4.83% 与 2.15%，本文方法要优于传统方法。当由已知模型 1 计算未知模型 3 的埋深时，传统方法与本文方法的深度估算误差分别为 8.28% 与 5.51%，本文方法亦优于传统方法。由模型 2 和模型 3 的计算结果可知，当两个异常体的距离逐渐靠近时，对于估算结果的精度会产生一定的影响。

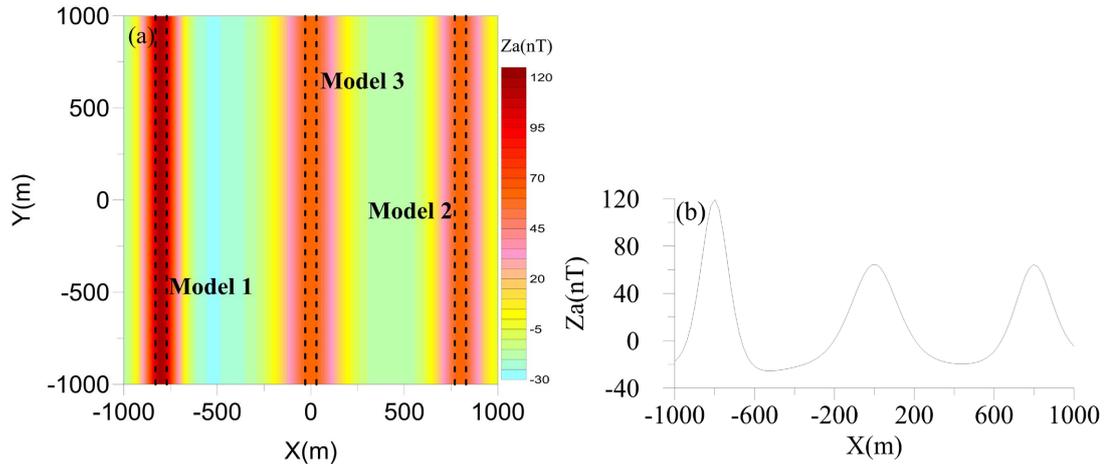


Figure 4. (a) Contour map of three horizontal cylinder models; (b) Profile map of a section perpendicular to strike
图 4. (a) 三个水平圆柱体模型平面等值线图；(b) 垂直走向剖面异常图

Table 3. Parameter table of three horizontal cylinder models

表 3. 三个水平圆柱体模型参数表

模型编号	中心埋深 H (m)	横截面半径 r (m)	磁化强度 M (A/m)	Za_{\max} (nT)
1	150	30	5	119.31
2	200	30	5	64.31
3	250	30	8	64.73

Table 4. Comparison of calculation results of different methods for center buried depth of models

表 4. 水平圆柱体中心埋深不同方法计算结果对比表

计算方法	柱体 2 埋深 h (m)	计算埋深 h_c (m)	深度估算误差 δ (%)	柱体 3 埋深 h (m)	计算埋深 h_c (m)	深度估算误差 δ (%)
传统方法	200	209.66	4.83	250	270.70	8.28
本文方法		204.30	2.15		263.77	5.50

4. 实际资料应用

为了进一步验证本文所提出的约束条件下基于水平圆柱体模型的异常深度估算方法的应用效果和适用范围，对我国北部某区域的实测航垂向分量数据进行了处理分析。图 5(a)为研究区垂向分量航磁异常等值线图，图 5(b)为化极后的垂向分量航磁异常等值线图，化极后的磁异常与原始异常形态相似，但异常整体向北偏移。梁韧等[6]利用约束条件下的基于球体模型的深度估算方法对此区域的两个已知钻孔的异常埋深进行了估算，本文根据其两个钻孔的异常参数，应用基于水平圆柱体模型的异常深度估算方法，其钻孔异常参数见表 5。

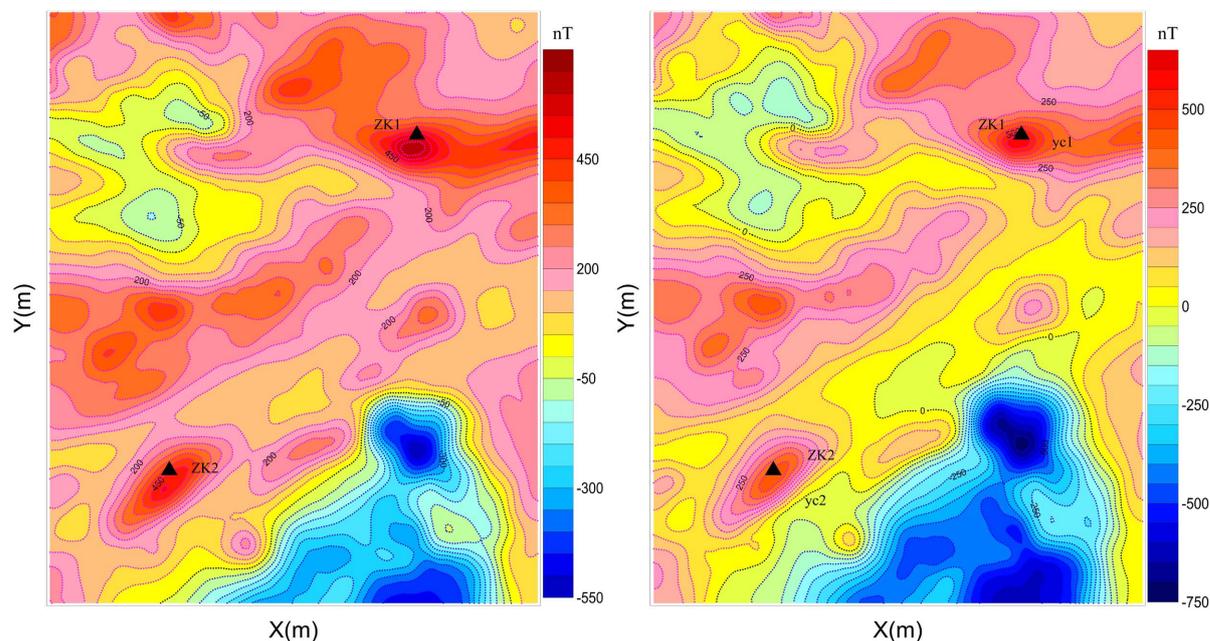


Figure 5. (a) Contour map of measured aeromagnetic vertical component; (b) Contour map of RTP aeromagnetic vertical component

图 5. (a) 实测航磁垂向分量等值线图; (b) 实测航磁垂向分量化极等值线图

Table 5. Borehole (anomaly) parameter table [6]

表 5. 钻孔(异常)参数表[6]

钻孔 (异常)	见矿深度 (m)	磁化率值($\times 10^{-5}$ SI)	$Za_{max}(nT)$	异常半径 (m)	理论中心埋深(m)
ZK1	144	13000	456.31	39	183
ZK2	225	7800	351.45	76	301

通过计算可知,表 5 中显示,将 yc2 作为已知异常时,通过公式(8)计算的 yc1 埋深为 175 m,与理论埋深 183 m 相比,深度估算误差为 4.57%,球体方法的计算埋深为 167.87 m,深度估算误差为 8.27%。表 6 中显示,将 yc1 作为已知异常时,本文方法计算得到 yc2 的埋深为 314.76 m,深度估算误差为 4.37%,球体方法的计算埋深为 328.13 m,深度估算误差为 9.01%。通过对比分析可知,将研究区内的异常视为水平圆柱体模型时,得到的计算结果更加接近于真实埋深,进一步验证了本文所提出的方法的应用效果与适用性。

Table 6. Comparison of calculation results of different methods for central buried depth of borehole (anomaly)

表 6. 钻孔(异常)中心埋深不同方法计算结果对比表

	yc1 实际埋深 (m)	计算埋深 (m)	深度估算误差 δ (%)	yc2 实际埋深 (m)	计算埋深 h_c (m)	深度估算误差 δ (%)
本文估计	183	175.00	4.57	301	314.76	4.37
球体方法[6]		167.87	8.27		328.13	9.01

5. 结论

本文提出了一种基于无限延伸水平圆柱体模型的航磁垂向分量数据估算异常埋深的方法,从无限延

伸水平圆柱体磁异常垂向分量的正演公式出发,推导了常规特征点(极大值)法的异常埋深估算公式,并提出了约束条件下的特征点(极大值)估算异常体埋深法。本文提出的针对二度体埋深正向演算方法计算精度优于常规方法,已知参数要求少且适用于近似二度体异常埋深计算。

在模型实验与实测数据检验中发现,二度体与三度体异常,取极大值等值线的一半,若长轴长度为短轴长度的三倍以上,即可将其近似看作二度体异常[1],利用本文提出的基于无限延伸水平圆柱体模型的计算埋深更接近于实际埋深。实际工作中,可根据异常体的先验信息进行判断,选择合适的模型体进行深度估算。

参考文献

- [1] 罗孝宽,郭绍雍.应用地球物理教程——重力磁法[M].北京:地质出版社,1991.
- [2] Hartman, R.R., Teskey, D.J. and Friedberg, J.L. (1970) A System for Rapid Digital Aeromagnetic Interpretation. *Geoexploration*, **8**, 237. [https://doi.org/10.1016/0016-7142\(70\)90044-X](https://doi.org/10.1016/0016-7142(70)90044-X)
- [3] Spector, A. and Grant, F.S. (1970) Statistical Models for Interpreting Aeromagnetic Data. *Geophysics*, **35**, 293-302. <https://doi.org/10.1190/1.1440092>
- [4] Thompson, D.T. (1982) EULDPH: A New Technique for Making Computer-Assisted Depth Estimates from Magnetic Data. *Geophysics*, **47**, 31. <https://doi.org/10.1190/1.1441278>
- [5] 付丽华,杨文采.谱矩方法在磁源体深度反演中的应用研究[J].地球物理学报,2018,61(7):3044-3054.
- [6] 梁韧,郭华,郑强,等.基于航磁垂向分量的深度识别技术研究与应用[J].地球物理学进展,2020,35(4):1410-1414.
- [7] 焦新华.重力与磁法勘探[M].北京:地质出版社,2009.
- [8] 林君,刁庶,张洋,等.地球物理矢量场磁测技术的研究进展[J].科学通报,2017,62(23):2606-2618.
- [9] 张昌达.航空磁力梯度张量测量——航空磁测技术的最新进展[J].工程地球物理学报,2006,3(5):354-361.
- [10] 谢汝宽,段树岭,王金龙,等.航磁三分量测量方法及勘查系统试验飞行[C]//中国地球物理学会.2017中国地球科学联合学术年会,2017.