

航空三维磁梯度测量方案研究

张青杉, 麻丰林, 许丽云

(中国冶金地质总局地球物理勘查院, 保定 071051)

[摘要] 本文概略介绍了航空三维磁梯度测量的发展现状, 指出了实施航空三维磁梯度测量所应着力解决的几个问题, 包括基本装置及其计算方法、探头一致性、探头姿态以及固定翼磁补偿问题等, 并针对当前状况提出了用于大比例尺或中-大比例尺航空三维磁梯度测量的具体方案, 大胆引入了正四面体测量装置, 并将陀螺仪数据同步至原航测数据之中, 既可大幅度提高测量精度及数据稳定性, 同时可解决同点三梯度的数值计算问题, 对后续数据处理、成图、解释均具有重要意义。

[关键词] 三维 磁总场 磁梯度 测量

[中图分类号] P318 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2010)06-1087-05

Zhang Qing-shan, Ma Feng-lin, Xu Li-yun. Study on the 3D gradient aeromagnetic survey [J].
Geology and Exploration, 2010, 46(6): 1087-1091.

0 引言

航空磁总场测量应用于地球物理勘查领域已臻完善; 20世纪80年代我院在国内率先开展了直升机吊舱式航磁垂向梯度测量并取得了较好效果, 使得航磁测量技术又向前迈进了一步; 二十世纪末, 随着光泵磁力仪(谭承泽等, 1984)的发展完善, 磁测精度大幅提高, 使得航空三维磁梯度测量系统(Three Dimensional Aero Gradient Magnetism system, 以下简称3D-AGM)的研制实施成为可能, 目前已取得了诸多可喜的试验成果; 笔者在总结前人的基础上, 对3D-AGM的实施进行了细致研究, 提出了适用于各种比例尺的3D-AGM解决方案, 以供各位同仁参考。

1 3D-AGM 测量的必要性及其前景

① 采集不断丰富、精确的信息数据是地球物理工作的永恒主题; 随着计算技术突飞猛进的发展, 使得地球物理工作中处理大信息量数据的能力日渐增强, 因此各种物探方法均应从时间、空间、装置等方面着手尽力扩展采集信息的种类及数量, 从而丰富基础资料的精度及广度。

② 采集信息量的增多有益于提高反演解释的

精度及准确性、降低多解性风险、提升物探工作解决实际地质问题的能力; 采集信息精度的提高可有效发现并锁定弱异常, 变不可能为可能。

③ 3D-AGM 测量与传统航磁测量方式相比较, 其飞行成本没有明显增加, 但所采集的数据质量(各探头受外界磁干扰比较一致, 梯度精度应优于总场精度)(郭凤霞等, 2007; 康国发等, 2008; 王亚丽等, 2009)、数量、类别均有大幅提升, 在图形标示、数据处理手段、不同类别数据间的相互印证等方面均有明显改善, 为发现弱异常(弱磁性体或深磁性体)及后续精确反演解释奠定了基础(谭承泽等, 1984; 朱自强等, 1992; 张小路, 1999; 郭志宏等, 2004; 杨宇山等, 2006; 姚长利等, 2007; 张凤旭等, 2007; 吴招才等, 2009; 张青杉, 2009); 例: 对于类似板状体的地下磁性体, 由其所引起的总磁场异常(ΔT)及其各方位梯度值(沿测线方位梯度 G_x 、垂直测线方位梯度 G_y 、垂向梯度 G_z)所绘曲线与地下磁性体的对应关系并不理想(参见图1), 异常主体对应于磁性地质体具有一定的发散性及偏移性, 而磁场总梯度曲线($G_T = \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2}$)及水平梯度曲线($G_H = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$)则可以较准确地标示磁性体的顶端位置, 由此可直观地判别磁性地质体平面位置或

[收稿日期] 2009-11-9; [修订日期] 2010-08-09; [责任编辑] 郝情情。

[第一作者] 张青杉(1968年-), 男, 1991年毕业于长春地质学院应用地球物理系, 获学士学位, 高级工程师, 从事地质矿产勘查工作,
Email: qingshan-zhang@163.com.

断裂带等线性地质体的地下展布,同时便于采用小波变换、频谱分析等手段进行后续数据处理解释(李盛汉,1992;李志华等,2009)。

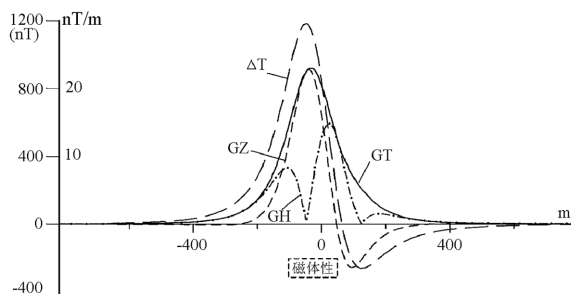


图1 ΔT 与各梯度曲线对比图

Fig. 1 Comparison of ΔT and gradient curves

④ 随着超导磁力仪(张昌达,2005)研制的日趋成熟,3D-AGM 系统可由磁总场三维梯度测量改进为磁总场 X、Y、Z 三分量的三维梯度测量,磁测工作也将由标量测量升级为矢量测量,届时航磁工作的勘探水平将有望得到本质的提升。

2 3D-AGM 测量系统现状

20 世纪末,国外诸多商家如 Scintrex Limited、Pico Envirotec Inc、RMS Instruments、GEM Systems 等公司相继进行了 3D-AGM 系统的研制与试飞,其中主要装置为直升机吊挂系统;国内外个别生产厂家曾于 21 世纪初进行过固定翼 3D-AGM 系统尝试;目前 3D-AGM 系统典型装置大致有以下三种:

① CS-3 铯光泵三维磁梯度吊挂系统(PIC、Scintrex、RMS 公司等):四个 CS-3 探头组装于四面体(非正四面体)的四个角点,以点-点、点-线、点-面等形式计算三维梯度,其探头分辨率 0.0006nT、灵敏度(噪声)0.002nT、转向差 <0.25 nT、最终梯度精度应优于 0.02nT/m。

② GSMP-30A 钾光泵三维磁梯度吊挂系统(GEM 公司):装置与①相同,其探头分辨率 0.0005nT、灵敏度(噪声)0.002nT、转向差 <0.1 nT、最终梯度精度应优于 0.02nT/m。

③ CS-3 铯光泵固定翼三维磁梯度系统(RMS 公司、核工业航遥中心(李晓禄等,2006)等):两探头分别安装于飞机(Y-5 之类)两大翼外侧,于机尾安装支架向后伸出并竖向布置两探头(间距大于 1 米),采用 RMS 公司 AADCII 实时软补偿系统,以点-点、点-线等形式计算三维梯度,经反复调试后其软补偿标准偏差 <0.05 nT,最终梯度精度应可优于

0.1nT/m。

3 3D-AGM 测量所面临的主要问题

当前 3D-AGM 系统所应着力解决的主要问题有以下四点:

① 探头一致性、转向差问题 目前 CS-3、GSMP-30A 等光泵磁力仪已较成熟,但个体间仍存在一致性、转向特性等差异,对梯度测量之精度影响较大。

② 飞机或吊舱姿态问题 飞机或吊舱之航偏角、俯仰角、侧倾角等直接影响到各探头之三维坐标位置及探头方位,导致探头实际位置与计算位置有偏差,从而引起计算场值、探头间水平及垂向距离、探头方位等一系列偏差,其误差难以准确计算且三方位误差极不均衡,粗略估算当上述角度之一达到 10° 时,其受影响最大方位之误差将大于 20%。

③ 三维梯度起算点不统一问题 以固定翼系统为例,其三方位梯度计算方案为:以两翼探头磁场差值计算横向水平梯度,以上述两探头均值与机尾某探头场值之差计算纵向水平梯度,以机尾两探头之场值差计算垂向梯度;由此可见,三梯度值所对应的空间位置并非同一点且三者之计算精度也不统一,其计算点距离最大可达 10m;此问题于吊舱系统不甚突出,但依然存在。

④ 补偿精度问题 对固定翼系统而言,由于飞机本身可视为近源不稳定磁性体,其对磁测数据的影响(为克服此影响所采取的措施称为磁补偿)表现为以下两点:Ⅰ 针对飞机不同位置其影响程度不同(变化幅度可达几十 nT)、Ⅱ 当飞机航偏角、俯仰角、侧倾角及地磁场矢量发生变化时同一位置的影响亦不同(变化幅度亦可达几十 nT);21 世纪初,传统硬件补偿方式被软件补偿(校正)方式所取代并已形成成熟产品,如 RMS 公司的 DAARC500、PIC 公司的实时/事后补偿模块等,其补偿标准偏差分别标称为 0.02nT、0.035nT,为固定翼梯度系统的研制提供了可能;针对四个探头而言,其软补偿同样存在系统一致性问题,既针对四个探头的补偿精度不统一,因此将直接影响到梯度系统的最终精度。

4 3D-AGM 的解决方案

3D-AGM 系统研究之重点在于如何提高梯度测量精度:为更有效地捕获弱磁异常体,针对 1:1 万或更大比例尺测量,其精度应优于 0.01nT/m;针对 1:2 万或更小比例尺测量,其精度应优于 0.02nT/m;

以下将主要讨论基于提高精度的各环节解决措施。

4.1 基础问题解决方案

① 探头一致性、漂移及转向差问题 此问题可通过实地测试及精确计算加以校正,针对一致性校正,可采取如下方式计算:

选取平稳场区 X、Y(相距 1m 即可)两点、测试 A、B 两个 CS-3 探头,A、B 探头的一致性偏差记为 ΔAB ,两探头在 X、Y 点的观测值分别记为 T_{XA} 、 T_{XB} 、 T_{YA} 、 T_{YB} ,X、Y 两点的磁总场差值记为 G_{XY} ,则:

$$\begin{aligned}\Delta AB &= T_A - T_B \\ G_{XY} &= T_X - T_Y \\ G_{XY} &= \frac{T_{XA} + T_{XB} - T_{YA} - T_{YB}}{2} \\ \Delta AB &= \frac{T_{XA} + T_{YA} - T_{XB} - T_{YB}}{2}\end{aligned}$$

上述测试应采用长时间连续同步观测方式(1Hz)进行,由此可提高测试精度,同时测定各探头的漂移曲线并加以校正;针对多个探头可进行长时间循环观测并对最终结果进行平差计算,原理同上;

针对由探头方位所引起的测量偏差,可通过探头转向曲线(或实地测试)加以校正。

通过上述测试计算,可将本环节校正精度控制在 0.005nT 以内。

② 基本装置 为保证三方位梯度计算的均衡稳定,应将四个探头置于正四面体的四个角点最为稳妥,如此可最大限度地发挥每个探头的空间贡献(如图 2)。若正四面体装置难以实现,也应尽量保持四个探头空间位置的均衡性。

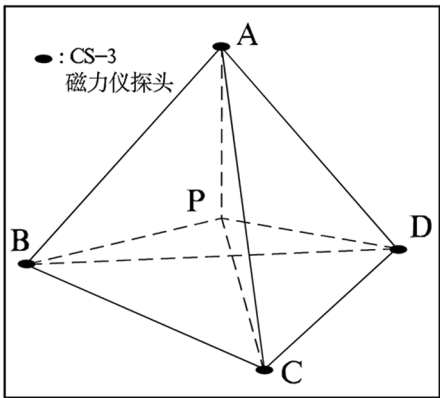


图 2 3D-AGM 系统探头位置示意图

Fig. 2 Sketch showing magnetometer Sensor position of 3D-AGM system

在此装置下可通过空间拟合、插值等多种方式

进行三维空间数据重建,进而完成四面体内任一点的各方位梯度计算,简例如下:

设 P 为四面体 A-BCD 内部任一点,四面体 A-BCD 的体积记为 V_{A-BCD} ,以 P 为顶点的四个四面体体积分别记为 V_{P-ABC} 、 V_{P-ABD} 、 V_{P-BCD} 、 V_{P-ACD} ,四探头的磁场值分别记为 T_A 、 T_B 、 T_C 、 T_D (经校正后),则 P 点的场值 T_p 可由下式计算:

$$T_p = \frac{V_{P-BCD} \times T_A + V_{P-ACD} \times T_B + V_{P-ABD} \times T_C + V_{P-ABC} \times T_D}{V_{A-BCD}}$$

其他各类计算不再赘述。

③ 飞机或吊舱姿态问题 此问题可通过室内校正计算加以解决,基本思路为将陀螺仪类设备安置于飞机(固定翼系统)或吊舱内,配合 RTK GPS 使用,以同步记录飞机或吊舱的准确位置、航偏角、俯仰角、侧倾角等数据,由此可确知四个探头的空间位置并通过②节所述方式准确计算特定点位的各方位梯度值。

④ 固定翼系统的补偿精度问题 此问题应从以下三点着手解决:I 探头附近的去磁工作应尽量彻底,并通过多次补偿飞行以尽量提高补偿精度,采用 RMS 公司 DAARC500 型软补偿系统,其标准偏差应可控制在 0.02nT 以内;II 将陀螺仪数据参与到补偿计算之中以提高补偿精度;III 四探头的位置尽量集中以减小补偿一致性偏差;通过上述努力,由补偿所引起的一致性偏差应可控制在 0.02nT 以内。

4.2 大比例尺 3D-AGM 方案

受测量精度、飞行高度等限制,目前 1:1 万以上大比例尺 3D-AGM 测量仍需使用直升机吊舱系统,系统组成如图 3 所示,ABCD 四探头置于正四面体角点处,两两距离可调整至 3~4m,通过 4.1 中①②③各环节的精确计算,可保证最终梯度精度优于 0.005nT/m。

4.3 中小比例尺 3D-AGM 方案

对于 1:2 万以下中小比例尺 3D-AGM 测量,考虑质量要求、施工效率、勘查成本等因素,采用固定翼系统更为适宜。以 Y-12 飞机为例,可采取以下两种测量装置:

① 大翼装置 即将四个探头分别置于两大翼外侧、垂尾上前方及尾后(参见图 4),由于各探头水平距离较大(分别为 20m、15m)、垂向距离较小(3m),此装置于水平梯度计算较为有利,于垂向梯度计算略有不足;由于各探头受机体影响存在较大

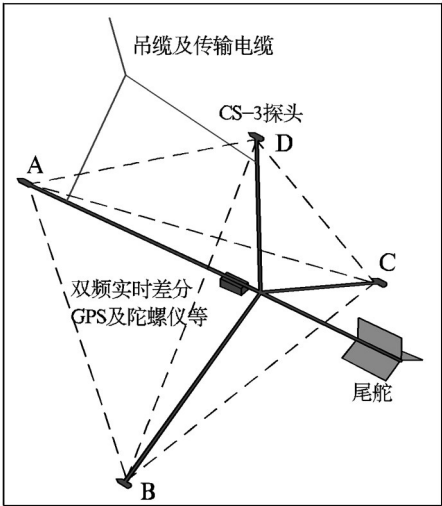


图3 吊舱装置示意图
Fig.3 Sketch of the hanging cabin device

差异,补偿结果亦将存在不一致性,故其数据稳定性及精度均衡性将劣于平尾装置;通过 4.1 中①②③④各环节的精确计算,最终梯度精度有望达到 0.02nT/m 。

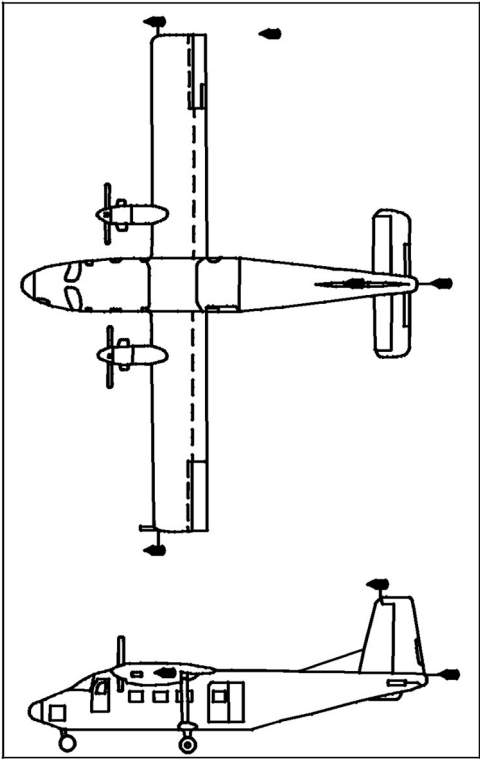


图4 大翼装置示意图
Fig.4 Sketch of big-wing device

② 平尾装置 即将四个探头分别置于平尾外

侧、垂尾上前方及尾后(参见图5),由于各探头水平、垂向距离较均衡(可调整为近似正四面体结构,探头水平距离约 5.5m 、垂向距离约 4.5m),于各方位梯度计算较为均衡;因各探头位置相对集中并远离发动机,因此探头受机体磁干扰差异较小,补偿结果较为一致,其数据稳定性及精度均衡性将明显优于大翼装置,通过 4.1 中①②③④各环节的精确计算,可保证最终梯度精度优于 0.02nT/m 。

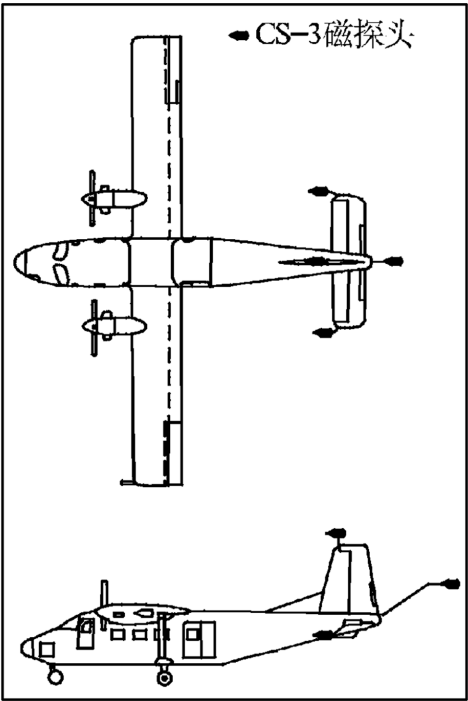


图5 平尾装置示意图
Fig.5 Sketch of horizontal-tail device

5 结论

3D-AGM 的核心问题是精度,低精度(劣于 0.1nT/m)3D-AGM 测量于地质勘查意义不大;笔者引入各种辅助设备、技术,目的在于通过各种精确计算以校正各个环节的系统误差;经采取装置改进、陀螺仪辅助、算法革新等一系列措施,可明显改善 3D-AGM 系统的稳定性、均衡性,并可统一计算点位、提升测量精度,对敏锐发现弱磁性地质体或深部地质体具有一定的实际意义。

[References]

Guo Feng-xia,Zhang Yi-Jun,Yan Mu-hong. 2007. The secular variation characteristics and mechanisms of geomagnetic field [J]. Chinese Journal of Geophysics,50(6):1649-1657 (in Chinese with English abstract)
Guo Zhi-hong,Guan Zhi-ning,Xiong Sheng-qing. 2004. Cuboid δt and its gradient forward theoretical expressions without analytic odd points[J]. Chinese Journal of Geophysics47(6):1131-1138 (in

Chinese with English abstract)

Kang Guo-fa, Bai Chun-hua, Gao Guo-ming. 2008. Periodical characteristics of the geomagnetic secular variation and length-of-day variation[J]. Chinese Journal of Geophysics 51 (2) : 369-375 (in Chinese with English abstract)

Li Sheng-han. 1992. Frequency domain filter approach to the separation of aeromagnetic anomalies due to field sources at different depths [J]. Geology and Exploration (8) : 43-46 (in Chinese with English abstract)

Li Xiao-lu, Cai Wen-liang. 2006. The assembly and compensation of the aeromagnetic gradiometric system on the y-5 aircraft [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 30 (3) : 224-229 (in Chinese with English abstract)

Li Zhi-hua, Zhang Ling-ling, Sun Chang-yu, Bai Kun, Shi Hao. 2009. The application of 2d discrete wavelet transform to magnetic data processing [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 33 (1) : 91-98 (in Chinese with English abstract)

Tan Cheng-Ze, Guo Shao-Yong. 1984. Magnetic exploration course [M]. Beijing: Geological Publishing House: 67-70, 97-149 (in Chinese)

Wang Ya-li, Wu Ying-yan, Lu Jun, YU Su-rong, Li Ming-xiao. 2009. Spatial distribution characteristics of geomagnetic Z component phase variation in Chinese mainland [J]. Chinese Journal of Geophysics 52 (4) : 1033-1040 (in Chinese with English abstract)

Wu Zhao-cai, Liu Tian-you. 2009. The application of particle swarm optimization to the inversion of magnetic anomaly data of tabular bodies [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 33 (2) : 194-198 (in Chinese with English abstract)

Yang Yu-shan, Liu Tian-you, Li Yuan-yuan. 2006. 3d visualized inversion on the gravimagnetic field of arbitrarily shaped bodies using numerical integration method [J]. Geology and Exploration (5) : 79-83 (in Chinese with English abstract)

Yao Chang-li, Zheng Yuan-man, Zhang Yu-wen. 2007. 3-D gravity and magnetic inversion for physical properties using stochastic subspaces [J]. Chinese Journal of Geophysics, 50 (5) : 1576-1583 (in Chinese with English abstract)

Zhang Chang-da. 2005. Recent advances in the research and development of quantum magnetometers [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 29 (4) : 283-287 (in Chinese with English abstract)

Zhang Feng-xu, Zhang Feng-qin, Meng Ling-shun, Liu Cai. 2007. Magnetic potential spectrum analysis and calculating method of magnetic anomaly derivatives based on discrete cosine transform [J]. Chinese Journal of Geophysics, 50 (1) : 297-304 (in Chinese with English abstract)

Zhang Qing-shan. 2009. Develop 3D gradient magnetic survey to improve the capability of deep iron ore exploration [A]. Proceeding of the 2009's Conference of the Geological Society of China [C]. Beijing: China Land Publishing house: 594-596 (in Chinese with English abstract)

Zhang Xiao-lu. 1999. Genetic algorithm of population eugenesis of gravity and mahnetic inversion [J]. Geology and Exploration (5) : 31-35 (in Chinese with English abstract)

Zhu Zi-qiang, Cheng Fang-dao. 1992. A direct algorithm for gravity and magnetic inversion-controlled random search method [J]. Geology and Exploration, (9) : 34-41 (in Chinese with English abstract)

[附中文参考文献]

郭凤霞, 张义军, 言穆弘. 2007. 地磁场长期变化特征及机理分析 [J]. 地球物理学报, 50 (6) : 1649-1657

郭志宏, 管志宁, 熊盛青. 2004. 长方体 ΔT 场及其梯度场无解析奇点理论表达式 [J]. 地球物理学报, 47 (6) : 1131-1138

康国发, 白春华, 高国明. 2008. 地磁场长期变化和日长十年尺度变化的周期特征 [J]. 地球物理学报, 51 (2) : 369-375

李盛汉. 1992. 频率域滤波方法在分离航磁深浅源场中的应用效果 [J]. 地质与勘探, (8) : 43-46

李晓禄, 蔡文良. 2006. 运五飞机上航磁梯度测量系统的安装与补偿 [J]. 物探与化探, 30 (3) : 224-229

李志华, 张玲玲, 孙长玉, 白 琨, 时 皓. 2009. 二维离散小波变换在磁测资料处理中的应用 [J]. 物探与化探, 33 (1) : 91-98

谭承泽, 郭邵雍. 1984. 磁法勘探教程 [M]. 北京: 地质出版社: 67-70, 97-149

王亚丽, 吴迎燕, 卢 军, 余素荣, 黎明晓. 2009. 中国大陆地区地磁场 Z 分量日变化相位的空间分布特征研究 [J]. 地球物理学报, 52 (4) : 1033-1040

吴招才, 刘天佑. 2009. 板状体磁异常数据反演的 PSO 算法 [J]. 物探与化探, 33 (2) : 194-198

杨宇山, 刘天佑, 李媛媛. 2006. 任意形状地质体数值积分法重磁场三维可视化反演 [J]. 地质与勘探, (5) : 79-83

姚长利, 郑元满, 张聿文. 2007. 重磁异常三维物性反演随机子域法方法技术 [J]. 地球物理学报, 50 (5) : 1576-1583

张昌达. 2005. 量子磁力仪研究与开发近况 [J]. 物探与化探, 29 (4) : 283-287.

张凤旭, 张凤琴, 孟令顺. 2007. 基于离散余弦变换的磁位谱分析及磁异常导数计算方法 [J]. 地球物理学报, 50 (1) : 297-304

张青杉. 2009. 发展三维磁梯度勘查技术提升深部铁矿勘查能力 [A]. 中国地质学会 2009 年学术年会论文摘要汇编 [C] 北京: 中国大地出版社: 594-596

张小路. 1999. 重磁反演的群体优生遗传算法 [J]. 地质与勘探, (5) : 31-35

朱自强, 程方道. 1992. 重磁异常反演的直接算法-随机搜索法 [J]. 地质与勘探, (9) : 34-41

Study on the 3D Gradient Aeromagnetic Survey

ZHANG Qing-shan, MA Feng-lin, XU Li-yun
(*Geophysical Exploration Bureau of CMGB, BaoDing 071051*)

Abstract: This paper briefly presents the current situation of development of 3D gradient aeromagnetic (GAM) survey, and points out several problems to be solved by great efforts, such as basic installation and calculation techniques, consistency and attitude of magnetometer sensors and magnetometer compensation. It also proposes a specific scheme for large-scale or mid to large-scale 3D-GAM survey with the aid of introducing the regular tetrahedron measurement device and synchronized gyroscope data recording to the original aerial survey data. It can not only remarkably improve the survey precision and data stability, but also solve the problem of 3D gradient calculation at a same point, which is important to the followed steps such as data processing, map compilation and interpretation.

Key words: 3D, total magnetic field, gradient aeromagnetic survey