



引文格式: 耿涛, 冯凡, 郭培虹, 等. 地面高精度磁测工作中有关精度评价问题的探讨[J]. 西北地质, 2025, 58(3): 162–172. DOI: 10.12401/j.nwg.2024124

Citation: GENG Tao, FENG Fan, GUO Peihong, et al. Discussion of Precision Evaluation Issues in Ground High Precision Magnetic Exploration[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(3): 162–172. DOI: 10.12401/j.nwg.2024124

地面高精度磁测工作中有关精度评价问题的探讨

耿涛¹, 冯凡², 郭培虹^{1,*}, 冯治汉¹

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710119;

2. 西安西北有色物化探总队有限公司, 陕西 西安 710068)

摘要: 地矿行业现行的《地面高精度磁测技术规程》(DZ/T 0071-93)是一部很好的技术规程, 为中国高精度磁测的大规模应用打下了良好的基础。然而这毕竟是在 30 年前的技术条件下制定的技术规程, 存在历史的局限性, 其中有许多方面已不能适应当今的需求。本研究是笔者在实际工作中, 对《地面高精度磁测技术规程》(DZ/T 0071-93)在应用时常出现的问题及现阶段看来存在的局限性进行一些总结和思考, 讨论了地面高精度磁测野外工作质量评价过程中和在进行精度统计时极其常见的一些错误, 在此基础上进一步分析了该规程中有关精度评价部分本身存在的一些问题和不足, 并提出了相应的改进建议。这些建议可能并不是最佳方案, 希望与从事高精度磁测工作的地球物理工作者共同探讨。

关键词: 地面高精度磁测; 精度; 误差; 评价方法; 问题

中图分类号: P631.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)03-0162-11

Discussion of Precision Evaluation Issues in Ground High Precision Magnetic Exploration

GENG Tao¹, FENG Fan², GUO Peihong^{1,*}, FENG Zhihan¹

(1. Xi'an Center of China Geological Survey / Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710119, Shaanxi, China;

2. Xi'an Northwest Nonferrous Geophysical and Geochemical Exploration Co., Ltd., Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: The technical specification for ground high precision magnetic survey (DZ/T 0071-93) currently implemented by the geological and mining industry is a good technical regulation, which has laid a good foundation for the large-scale application of high precision magnetic exploration in China. However due to the technical specification made thirty years ago, there are some historical limitations, and many aspects of it are no longer suitable for today's needs. This paper is the author's summary and reflection on the problems that often occur in the application of the technical specification for ground high precision magnetic survey (DZ/T 0071-93) and the shortcomings that seem to exist at this stage, firstly discussing an extremely common error of precision statistic-

收稿日期: 2023-04-13; 修回日期: 2024-12-08; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 国家重点研发计划项目“典型覆盖区航空地球物理技术示范与处理解释软件平台开发”(2017YFC0602200)第五课题“北秦岭华阳川地区隐伏铀矿空-地-井协同勘查技术示范研究”(2017YFC0602205)资助。

作者简介: 耿涛(1969-), 男, 正高级工程师, 主要从事区域地球物理调查研究。E-mail: gengtao926@163.com。

* 通讯作者: 郭培虹(1984-), 女, 高级工程师, 主要从事重磁数据处理、反演和解释工作。E-mail: gph_1984@126.com。

sin the process of the quality evaluation of ground high-precision magnetic exploration, secondly further discussions on some problems and shortcomings of the precision evaluation related to the specification are made, and put forward corresponding suggestions for improvement. These suggestions may not be the best solutions, but it is hoped that the discussion of geophysicists engaged in high-precision magnetic survey can arouse, and be helpful to the revision of new ground high-precision magnetic survey specification.

Keywords: ground high-precision magnetic survey; precision; error; evaluation method; problem

从 20 世纪 80 年代后期开始, 由于高精度磁力仪的应用和电子计算机技术的迅猛发展, 使磁法勘探进入了一个高精度测量和自动化解释阶段(管志宁, 1997)。中国在引进技术的基础上批量生产了 MP-4 微机质子磁力仪后, 高精度磁法测量工作日渐普及(秦葆瑚, 1988, 1989, 1991), 磁法勘探现在已经从过去单纯寻找铁磁性矿产, 发展成为在矿产勘查(陈靖等, 2024; 刘诚等, 2024; 李正明等, 2025)、区域地质调查(庞振甲等, 2022)、能源勘查(耿涛等, 2023; 李普涛等, 2023)、水文地质与环境地质调查(黄磊等, 2022)、考古研究(孙萍萍等, 2019)等众多领域广泛应用的一种地球物理勘查方法。

地矿行业现行的地面高精度磁测规范是《地面高精度磁测技术规程》(DZ/T 0071-93)(以下简称“93 规程”)(中华人民共和国地质矿产部, 1993), 1994 年颁布实施, 距今已逾 30 年。由于“93 规程”在编制时国内的高精度磁法测量工作开展时间并不是很长, 对如何用好高精度磁测仍缺乏经验, 很多方面的完善和优化还都处于摸索阶段(秦葆瑚, 1989; 袁照令, 1991),

加之当时的一些技术条件限制, 因此“93 规程”中难免存在一些在今天看来不合理的地方。而且, 由于当时质子磁力仪尚未完全普及, “93 规程”中保留了一些采用磁秤仪器进行相对测量时的概念及技术要求, 这对后来一直采用质子磁力仪从事高精度磁测工作, 不了解磁秤工作原理及工作方法的从业人员, 在理解“93 规程”时造成了较大的困扰。

笔者讨论了高精度磁测野外工作质量评价过程中, 在进行精度统计时极其常见的一个错误, 在此基础上进一步讨论“93 规程”中有关精度评价部分本身存在的一些问题及不足, 并提出了相应的改进建议。

1 高精度磁测工作的精度评价方法及常见错误

地矿行业相关单位在开展高精度磁测项目时均执行“93 规程”, 在进行野外工作精度评价时, 均依据“93 规程”中的误差分配表(表 1)及相关条款进行。

表 1 《地面高精度磁测技术规程》(DZ/T 0071-93)中的磁测误差分配表

Tab. 1 Error allocation table for magnetic measurement in technical specification for ground high-precision magnetic survey (DZ/T 0071-93)

磁测 总误差 (nT)	野外观测均方误差 (nT)					基点、高程及正常场改正误差 (nT)			
	总计	操作及 点位误差	仪器一致性 误差	仪器噪声 误差	日变改正 误差	总计	正常场改正 误差	高程改正 误差	总基点改正 误差
5	4.36	2.65	2.0	2.0	2.0	2.45	1.0	1.0	2.0
2	1.56	1.1	0.7	0.5	0.7	1.212	0.7	0.7	0.7
1	0.87	0.7	0.3	0.3	0.3	0.497	0.28	0.28	0.3

注: 操作及点位误差中, 含点位不重合、探头高度不准、探杆倾斜等误差。引自《地面高精度磁测技术规程》(DZ/T 0071-93)第 5.2.4 条。

从表 1 中可以看出, 野外观测均方误差包含了 4 个方面的误差, 即操作及点位误差、仪器一致性误差、仪器噪声误差及日变改正误差, 并为每一项误差分配了具体的限差值。

笔者多年来在西北项目办进行野外工作检查时,

发现绝大部分地面高精度磁法项目在统计野外工作精度时是按以下流程进行的:

将野外工作中按总测点数 3%~5% 进行的质量检查点观测结果与原始观测结果经过日变改正后, 按公式(1)计算出质量检查均方误差:

$$\varepsilon_{qs} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [T_O(x_i, y_i) - T_C(x_i, y_i)]^2}{2n}} \quad (1)$$

式中: ε_{qs} 为质量检查均方误差 (Quality inspection mean square error); $T_O(x_i, y_i)$ 为原始观测值 (Original observation value); $T_C(x_i, y_i)$ 为检查观测值 (Check the observation value)。

利用公式(2)计算野外观测均方误差:

$$\varepsilon_S = \pm \sqrt{\varepsilon_{op}^2 + \varepsilon_{ic}^2 + \varepsilon_{in}^2 + \varepsilon_{dv}^2} \quad (2)$$

式中: ε_S 为野外观测均方误差 (Mean square error of field observation)。 ε_{op} 为操作及点位误差 (Operation and point position error), 指重复测量时由于操作原因造成的探头空间位置与原始测量时探头空间位置不重合而形成的误差。 ε_{ic} 为仪器一致性误差 (Instrument consistency error), 指不同仪器对同一物理量进行测量时, 结果吻合度的差异, 其实质是由于仪器本身不够精密所造成的测定结果与实际值之间的偏差。磁力仪制作探头与夹固探头的各种材料的“磁清洁”程度差异, 是造成磁力仪一致性误差的主要因素。 ε_{in} 为仪器噪声误差 (Instrument noise error); 主要由仪器中的电子器件的不稳定及传输线屏蔽状况产生的耦合效应引起的测量信号随机变化而产生的误差。 ε_{dv} 为日变改正误差 (Daily variation correction error), 指日变改正值与实际日变化值存在差异而形成的日变改正后残余值。

利用公式(3)计算出磁测总误差:

$$\varepsilon_T = \pm \sqrt{\varepsilon_S^2 + \varepsilon_N^2 + \varepsilon_E^2 + \varepsilon_B^2} \quad (3)$$

式中: ε_T 为磁测总误差 (Total error of magnetic measurement); ε_S 为野外观测均方误差 (Mean square error of field observation); ε_N 为正常场改正误差 (Normal field correction error); ε_E 为高程改正误差 (Elevation correction error); ε_B 为总基点改正误差 (Total base point correction error)。

上述计算过程看似是依据规范要求进行的, 但实际上是不合理的。因为大多数高精度磁测项目工作者在第二步计算时陷入了一个误区。

在第二步计算过程中, 会遇到两个问题:

在该过程中参与计算的 4 项误差中, 仪器一致性误差和仪器噪声误差好理解, 在开始工作前的仪器性能试验中可以得到, 并且“93 规程”附录 A 中有明确具体的试验及计算方法。那么, 操作及点位误差和日

变改正误差如何取得?

在实际工作中, 大多数高精度磁测项目工作者是这样操作的: 表 1 下的注释中明确说明, 操作及点位误差含点位不重合、探头高度不准、探杆倾斜等误差, 但这些误差只有在测点重复观测时才会体现出来, 因此自然把这些项理解为重复观测统计出来的误差, 于是用第一步计算出来的质量检查均方误差 (ε_{qs}) 取代操作及点位误差 (ε_{op}) 参与计算; 而每天的磁场日变化值是不一样的, 是一个不可重复观测的值, 无法通过重复测量统计其误差, 因此工作者会直接把表 1 中分配的日变改正误差限值作为最大误差代入公式(2)进行计算, 因为不知道实际的日变改正误差到底是多少, “93 规程”中也没有给出统计方法。

实际上, 由于表 1 表述的问题, 使“93 规程”的参与者陷入了误区。具体分析如下:

在所有的地球物理测量工作中, 凡是可重复观测的物理量均是采用一定数量的重复观测 (即采用同点位, 不同仪器、不同操作者、不同观测时间的“一同三不同”原则进行质量检查) 来统计误差的。具体到高精度磁测工作中, 就是一名操作员用仪器对某一测点 (x,y) 的磁场值进行原始观测后, 另一名操作员用另外的仪器在其他时间点对同一个测点 (x,y) 的磁场值进行重复观测 (称为“质量检查”)。

测点 (x,y) 上的两次磁场值测量结果理论上可分别表达为:

$$T_O(x, y) = T(x, y) + \delta(t) \quad (4)$$

和

$$T_C(x, y) = T(x, y) + \delta(t') \quad (5)$$

上述两式中: $T_O(x, y)$ 和 $T_C(x, y)$ 分别为测点 (x,y) 上原始观测和检查观测得到的磁场值; $T(x, y)$ 为测点 (x,y) 的真实磁场值; $\delta(t)$ 和 $\delta(t')$ 分别为原始观测时和检查观测时的地磁日变化值。

但在实际工作中, 由于测量时使用的磁力仪本身存在噪声干扰及一致性误差, 因此在测点 (x,y) 上原始观测时实际测得的磁场值应为:

$$T_O(x, y) = T(x, y) + \delta(t) + \delta_{Oin} + \delta_{Oic} \quad (6)$$

式中: δ_{Oin} 为原始观测所使用磁力仪的噪声引起的误差; δ_{Oic} 为原始观测所使用磁力仪的一致性误差。而检查观测时, 在测点 (x,y) 测得的磁场值应为:

$$T_C(x, y) = T(x', y') + \delta(t') + \delta_{Cin} + \delta_{Cic} \quad (7)$$

式中: δ_{Cin} 为检查观测的磁力仪的噪声引起的误

差, δ_{Cic} 为检查观测量的磁力的一致性误差; $T(x', y')$ 为检查观测时实际点位 (x', y') 上的真实磁场值。由于检查观测时, 探头放置的位置、方向及探杆倾斜度等的差异, $T(x', y')$ 与 $T(x, y)$ 存在误差, 即存在操作及点位误差。

$T(x', y')$ 可表示为 $T(x, y) + \delta_{op}$, 则检查观测的表达式可变换为:

$$T_C(x, y) = T(x, y) + \delta_{op} + \delta(r') + \delta_{Cin} + \delta_{Cic} \quad (8)$$

经日变改正后, 原始观测值与检查观测值可分别表示为:

$$T_{Odv}(x, y) = T(x, y) + \delta_{Odv} + \delta_{Oin} + \delta_{Oic} \quad (9)$$

和

$$T_{Cdv}(x, y) = T(x, y) + \delta_{op} + \delta_{Cdv} + \delta_{Cin} + \delta_{Cic} \quad (10)$$

式中: δ_{Odv} 和 δ_{Cdv} 分别为原始观测结果和检查观测结果在日变改正计算时残留的误差, 其大小与日变站仪器对地磁日变化记录的准确性及计算时所取的内插值与实际变化值的吻合度有关(需要说明的是, 这里的日变改正计算误差是日变改正过程中的计算误差, 并非真正的日变误差, 文后详细论述)。

那么, 测点 (x, y) 上原始观测与检查观测的质量检查观测误差为:

$$\begin{aligned} \Delta_{qs}(x, y) &= T_{Cdv}(x, y) - T_{Odv}(x, y) \\ &= T(x, y) - T(x, y) + \delta_{op} + (\delta_{Cdv} - \delta_{Odv}) + \\ &\quad (\delta_{Cin} - \delta_{Oin}) + (\delta_{Cic} - \delta_{Oic}) \\ &= \Delta_{op} + \Delta_{dv} + \Delta_{in} + \Delta_{ic} \end{aligned} \quad (11)$$

这里需要说明的是: 操作及点位误差实际上可分解为操作误差和点位误差两部分, 操作误差是由于操作人员本身的原因(如操作人员本身磁性差异等)引起测量误差, 原始观测和检查观测都存在; 而点位误差是检查观测时与原始观测时因操作员的操作习惯不同(如探头方向及探杆的倾斜度等)造成的探头空间位置不重合而产生的误差。由于质量检查所要求的同点位是以原始观测为基准的, 所以原始观测中不存在点位误差。但是为了和“93 规程”中表述一致, 在此还是统一表述为操作及点位误差, 因此在原始观测表达式(9)中没有单独将操作误差表述出来, 这不影响结论。

由表达式(11)可见, 经日变改正后的原始观测和检查观测的观测值差值中, 两次观测时产生的操作误差及点位误差、两台仪器的一致性误差和噪声误差以及不同时间日变影响的改正误差等就都已经包含在内了, 即利用公式(1)计算出的所谓质量检查观测均

方误差(ε_{qs})其实就是野外观测均方误差(ε_s), 第二步的计算过程是多余且不正确的, 因为其对仪器一致性误差(ε_{ic})和噪声误差(ε_{in})进行了重复统计。

实际上, “93 规程”第 5.2.2 条规定磁测工作精度时, 说明“用磁场观测精度的均方误差作为衡量磁测精度的标准”。并在介绍计算公式的各项含义时, 说明参与计算的是“经各项改正的原始观测与检查观测之差”。这里的“磁场观测精度”实际上是表 1 中的“磁测总误差”, 那么, “93 规程”的执行者自然理解为要经过表 1 中要求的各项改正才能计算出磁测总误差, 因而导致“93 规程”的执行者陷入误区。

但这里需要说明的是, 野外观测均方误差(ε_s)中虽然包含了操作及点位误差(ε_{op})、仪器一致性误差(ε_{ic})、仪器噪声误差(ε_{in})和日变改正误差(ε_{dv})4 项误差, 但这 4 项误差其实是一个混合误差, 因为在测量所得到的数据中, 是无法把这 4 项误差分离出来的, 因此表 1 中给野外观测均方误差中的各项进行误差分配是没有实际意义的, 把仪器一致性误差和仪器噪声误差得到的误差分配值理解为对仪器性能的约束可能更合理一些, 所以, 表 1 的结构是不合理的。

陷入这个误区的原因, 笔者认为主要是“93 规程”的表述引起的使用者对“野外观测均方误差”到底是什么的困惑。另外, 恐怕还有历史传承的原因, 因为在“93 规程”之前的中国第 1 版高精度磁测规程——《地面高精度磁测技术规定》(DZ 56-87)中, 误差分配表是如表 2 的形式。

在表 2 中, 仪器噪声误差、一致性误差、测点观测均方误差等是并列的, 并且 2.2.5 条文字中也明确说明: “磁测总误差是测点观测误差、基点联测误差、仪器噪声均方误差、仪器一致性误差, 以及日变、正常场与高度等各项改正误差的总和。”(中华人民共和国地质矿产部, 1987)。

正如前文分析, 《地面高精度磁测技术规定》(DZ 56-87)(中华人民共和国地质矿产部, 1987)中的精度统计方法是错误的, 相当于重复统计了仪器噪声误差和一致性误差, 因此“93 规程”中对此已做了修正, 表述为: “磁测总精度是测点观测误差(含操作及点位误差、仪器噪声均方误差、仪器一致性误差以及日变改正误差)、总基点、正常场与高度等各项改正误差的总和”。请注意用语的差别, 是“测点观测误差(含操作及点位误差、仪器噪声均方误差、仪器一致

表 2 《地面高精度磁测技术规定》(DZ 56-87)中的磁测误差分配表

Tab. 2 Error allocation table for magnetic measurement in technical regulation for ground high-precision magnetic survey (DZ 56-87)

磁测总 误差(nT)	仪器噪声均 方误差(nT)	仪器一致性 误差(nT)	测点观测均 方误差(nT)	基点联测均 方误差(nT)	各项改正误差(nT)			
					总计	日变改正	正常场 改正	高度改正
±5	±1.2	±1.5	±3.8	±1.5	±2.1	±1.5	±1.0	±1.0
±2	±0.5	±0.7	±1.1	±0.7	±1.21	±0.7	±0.7	±0.7
±1	±0.3	±0.3	±0.7	±0.3	±0.52	±0.3	±0.3	±0.3

注：引自《地面高精度磁测技术规定》(DZ 56-87)第2.2.5条。

性误差以及日变改正误差)”，即操作及点位误差，不是测点观测误差，而是测点观测误差中的一项。

“93 规程”虽然在表述上做了修正，但并不明晰，因此大多数使用者仍然陷入了这个误区。甚至在野外验收时，很多专家都在犯这个错误，更别说一般的工作者了。

之所以会出现这种现象，主要是很多工作者没有去认真理解“93 规程”，或者说没有较长时间的工作经验，很难真正理解其中的含义，因为表 1 的表述使第一次使用它的人很容易陷入这个误区，再加上第一代使用者以讹传讹的影响，一旦形成思维定式就很难改了。而当犯错的人太多，在认知上错的就成了对的

了，这时这个错误就更难改正了。

表 1 中的表述引发的歧义影响是广泛的，这从其他行业的规程中可以看出。

表 3 是石油行业 1995 年实施的《地面磁法勘探技术规程》(SY/T 5771-1995)(石油天然气总公司, 1995)中的误差分配表。

由表 3 可见，该误差分配表除各项分配的误差值略有不同外，其表示方式和“93 规程”几乎是一模一样的。

估计是在实际工作中遇到了和前文所述相同的问题，石油行业 2004 年修订的规程(国家发展和改革委员会, 2004)中，对误差分配表进行了调整，见表 4。

表 3 《地面磁法勘探技术规程》(SY/T 5771-1995)中的磁测均方根误差分配表

Tab. 3 Root mean square (RMS) error allocation table for magnetic measurement in technical specification for ground magnetic exploration (SY/T 5771-1995)

磁测总均方 根误差(nT)	野外观测均方根误差(nT)					正常场 改正(nT)	高程改正 (nT)	基点联测 (nT)
	总计	操作及点位	仪器一致性	仪器噪声	日变改正			
7	5.8	3.8	2.4	2.4	2.8	2.5	2.5	1.5
5	4.2	2.6	2	1.8	2	1.5	1.8	1
2	1.6	1.1	0.7	0.5	0.7	0.7	0.7	0.6
1	0.9	0.7	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

注：详见《地面磁法勘探技术规程》(SY/T 5771-1995)第4.4.2.4条。

表 4 《地面磁法勘探技术规程》(SY/T 5771-2004)磁测均方根误差限差表

Tab. 4 RMS error limits table for magnetic measurement in technical specification for ground magnetic exploration (SY/T 5771-2004)

比例尺	异常总均 方根误差(nT)	分项均方根误差(nT)				仪器性能指标(nT)				日变改正 精度(nT)
		检查 观测	正常场 改正	高度 改正	日变站 联测	一致性	噪声 水平	观测 精度	系统 误差	
1 : 200 000	7	6.0	1.0	1.0	2.5	2.4	2.4	2.8	2.4	2.4
1 : 100 000	5	4.0	1.0	1.0	1.8	2.0	1.8	2.2	2.0	1.8
1 : 50 000	3	2.0	1.0	1.0	1.5	1.2	1.0	1.3	1.2	1.0
1 : 25 000	2	1.5	0.5	0.5	0.5	0.9	0.5	1.0	0.9	0.5
1 : 10 000	1	0.9	0.1	0.1	0.1	0.5	0.3	0.6	0.5	0.3

注：详见《地面磁法勘探技术规程》(SY/T 5771-2004)第4.4.2条。

需要注意的是,表4中仪器性能指标部分(表4中灰色区域)是不参与异常总均方误差计算的,但规程中没有说明,因此使用者很难注意到这个问题,大概率会全部纳入计算。因此2011年再次修订规程(国家

能源局,2011)时误差分配表变为表5的样子,并且将表4中仪器性能指标部分内容单列出来,作为仪器维护部分的内容。至此,在石油行业执行的磁法技术规程中,基本解决了前述引起歧义的问题。

表5 《地面磁法勘探技术规程》(SY/T 5771-2011)中的异常总精度及分项精度分配表

Tab. 5 Total anomaly accuracy and subitem accuracy allocation table in technical specification for ground magnetic exploration (SY/T 5771-2011)

比例尺	异常总精度(nT)	分项精度(nT)			
		检查观测	日变站联测	正常场平面改正	高度改正
1:200 000	7.0	6.0	2.5	1.0	1.0
1:100 000	5.0	4.0	1.8	1.0	1.0
1:50 000	3.0	2.0	1.5	0.7	0.7
1:25 000	2.0	1.5	0.5	0.4	0.4
1:10 000	1.0	0.9	0.3	0.2	0.2

注:详见《地面磁法勘探技术规程》(SY/T 5771-2011)第4.5条。

然而由于地矿行业所执行的“93规程”一直没有修订,地矿行业在进行高精度磁测工作时,也不执行石油部门的相关规程,因此这个问题一直没有解决。

2 对高精度磁测工作中精度评价问题的讨论

除前文所述的由于表述问题引起的使用错误外,“93规程”中有关精度评价的要求本身也存在一定的问题,以及在现今技术条件下所反映的不足之处,下面分别予以讨论。

2.1 日变改正的误差问题

前文分析得出,日变改正误差是包含在野外观测误差中的,不应再另外重复计算,这一结论实际上是建立在“93规程”中的日变改正方法的基础上的。

由于无法直接在工作区的任意测点设立地磁日变站进行地磁日变化观测,因此需要在工作区内或附近设立地磁日变站,用地磁日变站测得的地磁日变化值代替测点相同时刻的地磁日变化值进行日变改正。在大量试验的基础上,“93规程”附录B中给出了日变站的控制范围,针对不同的磁场总精度要求,在误差允许的范围内,可认为在日变站的控制范围内(20~50 km)地磁日变化值是一致的,可用日变站测得的地磁日变化值代替测点上的地磁日变化值进行日变改正,这就是表1中给日变改正误差分配的限差值的由来。

在日变站上测得的随时间变化的地磁场为:

$$T(t) = T_0 + \delta(t) \quad (12)$$

式中: T_0 为该点的正常地磁场值,它不随时间 t 变化; $\delta(t)$ 为该点的地球变化磁场,是时间 t 的函数,可分解为:

$$\delta(t) = L(t) + S(t) + D(t) \quad (13)$$

式中: $L(t)$ 为长期变化磁场; $S(t)$ 为地磁场的静日变化; $D(t)$ 为地磁场扰动变化,即短周期变化。

由于 $L(t)$ 的变化周期长,每天的变化很小,因此在日变站上测定的随时间变化场主要源于地磁场的静日变化 $S(t)$ 和短周期变化 $D(t)$ 。

由于地磁场短周期变化受地磁感应场的影响特别明显,而且周期愈短,所受影响愈大。而日变站与测点之间存在的空间差异,两点间的地电结构存在差异,其对地磁短周期变化的影响必然有所不同,即日变站的地磁日变化并不能完全反映测点的地磁场日变化,两者间存在一定的误差,即在测点上得到的经日变改正的磁场值实际为:

$$\begin{aligned} T_{dv}(x,y) &= T(x,y) + \delta_{xy}(t) - \delta_0(t) \\ &= T(x,y) + \Delta_\delta \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $T_{dv}(x,y)$ 为测点 (x,y) 处经日变改正后的磁场值; $T(x,y)$ 为测点 (x,y) 处的真实磁场值; $\delta_{xy}(t)$ 为测点 (x,y) 处在测量时刻的地磁场变化值; $\delta_0(t)$ 为测点 (x,y) 处在测量时刻日变站测量的地磁场变化值; Δ_δ 为 $\delta_{xy}(t)$ 和 $\delta_0(t)$ 的差值,是真正的因地磁场日变化值在日变站和测点的变化不同而引起的日变改正误差。公式(2)

中的日变改正误差(ε_{dv})其实只是日变站仪器在测量地磁场变化值时的不准确及数据在使用时的不准确(内插值与实际值的差异)形成的误差,严格说其属于观测误差,而非真正意义上的日变改正误差。

“93 规程”中给出了日变改正误差的限差范围,但并没有给出求取日变改正误差的方法。然而,对于一项具体的高精度磁测工作,在进行磁测总精度评价时,需要知道具体的日变改正误差,而不应采用规定的误差限差值代替,毕竟,给定的误差范围和具体的误差值是两个不同的概念。

那么,如何确定日变改正误差 ε_δ 呢?笔者认为,由于无法确定每一个测点上的日变改正误差,那么,可以考虑采用实际工作中测区内最大日变改正误差来代替日变改正均方误差。具体做法是,在测区内选择 M 个点($M \geq 2$),各点间距离应大于野外工作中日变站的实际控制距离。在这 M 个点上同时进行秒级同步的连续日变观测(即采用日变站联测的方法),观测时段应涵盖磁场日变化最大的时段。

首先,截取各点上相同时间段相同数据量的磁测数据,然后,取 M 个点中的任意两点 A 、 B ,利用公式(15)计算该两点间的日变均方误差:

$$\varepsilon_\delta(AB) = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [T_A(t_i) - T_B(t_i) - (T_{A0} - T_{B0})]^2}{2n}} \quad (15)$$

式中: $\varepsilon_\delta(AB)$ 为 A 、 B 两点间的日变均方误差, $T_A(t_i)$ 为 A 点 i 时刻的磁场日变化值, $T_B(t_i)$ 为 B 点 i 时刻的磁场日变化值, T_{A0} 和 T_{B0} 分别为 A 、 B 两点的正常地磁场值,其求取方法可参照日变站基本磁场值的求取方法。

依次类推,直到计算出 M 个点中所有任意两点间的日变均方误差,选择其中最弱边的均方误差代替该工作区的日变改正误差。

但是,野外工作中在日变站上实际测得的地磁场为:

$$T(t) = T_0 + \delta(t) + \delta_{in} + \delta_{ic} \quad (16)$$

即在日变测量时必然也包含有仪器的噪声误差和一致性误差,而这两项误差是无法分离并剔除的,因此,上述方法求得的日变改正误差必然大于实际的日变改正误差。为了尽量压制仪器的噪声误差和一致性误差所造成的影响,在上述过程中应注意以下几方面:首先,应选择一致性良好的仪器进行同步日变观测;其次,在计算各点的 T_0 值时,应尽量选择相同

时段的地磁场变化平稳段进行计算;第三,参与计算的各点上磁场日变化值 $\delta(t_i)$ 在计算前应进行圆滑(视日变采样时间间隔选择进行5点~9点圆滑),因为地磁场短周期变化的振幅与质子磁力仪噪声均方根值是近于同一数量级的,而噪声是随机的,地磁场脉动变化是有规律的,因此,进行圆滑后可大大压制噪声水平,降低噪声误差(秦葆瑚,1991;李才明,2004)。

在地球物理工作中,对于一些无法通过重复观测来确定误差的物理量,经常会用到多个观测项中的最弱项作为总体误差的方法。在上述过程中,由于是在每一个点上长时间观测,因此随机误差趋近于0,再经过噪声压制后,得到的结果可认为是两点间的日变误差,且上述测量过程中,每两点间的距离均大于野外测点观测时的日变站控制距离,因此,测点上的日变改正误差一定小于上述方法确定的最弱项,所以用求得的最弱 ε_δ 做为整个测区日变改正的误差是可行的。

笔者之所以建议采用最弱边的均方误差代替该工作区的日变改正误差,是考虑到目前开展的地面高精度磁测工作测区范围一般都不大,联测两、三个点就能满足要求。但对于一些测区范围很大的项目,如果联测点数量较多($M \geq 5$),也可利用公式(17)计算全区的日变均方误差,用其做为全区的日变改正均方误差:

$$\varepsilon_\delta = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K \varepsilon_{\delta i}^2}{K}} \quad (17)$$

式中: K 为联测的边段数。

2.2 日变站联测及其改正误差问题

“基点”是“93 规程”中为满足相对地磁测量时传递地磁场值而保留下来的一个概念。虽然使用质子磁力仪测定地磁场强度,无需用基点网进行地磁场值传递,因此基点只是起到了日变站的作用,但是“93 规程”中为总基点另外赋予了一项职能:作为全测区的零值点,即异常起算点。

然而在实际工作中,工作者往往并不会刻意在工作开始前从宏观上对测区的磁场形态进行研究(有时也不具备条件),选择总基点位置时一般以工作方便为优先考虑,因此把总基点的地磁场值作为零值来计算测区的磁异常不一定是恰当的。事实上,使用质子磁力仪进行工作时,测量的是地磁场的总场,在工作完成以后,根据整个测区的磁场分布情况,可以选择任意的磁场值作为零值来确定磁异常,把总基点的地

磁场值作为测区的异常起算点并不是必须的。因此,在使用质子磁力仪进行的高精度磁测工作中,总基点和各分基点只保留了日变站的功能。鉴于相对地磁测量的方法早已被淘汰,因此,在此不再保留基点的概念,而直接使用日变站进行论述。

为消除日变影响,需求出各日变站之间地磁场的真正差值,把测区的观测值归一化到同一时间,因此各日变站之间需进行联测,即各日变站在同一时间进行秒级同步的连续日变观测,按“93 规程”附录 B 的要求取各日变站的真实地磁场值。

在实际工作中,发现有的工作者没有进行日变站的联测,而是在需要时临时选定分日变站位置,按“93 规程”附录 B 的要求求取分日变站的真实地磁场值;还有工作者用求测点磁场值的方法测量分日变站的磁场值。这两种方法貌似都可以测得分日变站的磁场值,但都是不妥的,因为前者没有消除地磁长周期变化 $L(t)$ 的影响,无法把各日变站的磁场值归一化到同一时间点,而后一种方法则存在 2.1 节中讨论的日变改正误差的问题。

日变站改正误差(即“93 规程”中的总基点改正误差)指的是日变站联测时测得的各分日变站与主日变站间(即分基点与总基点)磁场值的差值与它们之间真实磁场值差值间的误差。

关于日变站改正误差如何统计,“93 规程”并没有给定误差评价的方法。石油行业 2011 版《地面磁法勘探技术规程》(国家能源局, 2011)中给出了日变站联测精度计算公式(公式 18 和 19),笔者认为,地矿行业在现阶段执行“93 规程”时可参照使用。

$$\varepsilon_{Bj} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta T_i - \Delta \bar{T}_i)^2}{n-1}} \quad (18)$$

$$\varepsilon_B = \pm \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^K \varepsilon_{Bj}^2}{K}} \quad (19)$$

式中: ε_{Bj} 为第 j 边段日变站联测精度; ΔT_i 为第 i

时刻日变站与日变分站之间观测值之差; $\Delta \bar{T}_i$ 为日变站与日变分站之间联测段差 ΔT_i 的平均值; n 为截取的地磁场变化平稳段数据个数; ε_B 为日变站联测总精度(为便于和前文对应,在此暂时保留总基点改正误差的符号); K 为日变站联测的边段数。

笔者在这里直接引用了石油行业 2011 版《地面磁法勘探技术规程》(国家能源局, 2011)中给出的日变站联测精度计算公式,但有一点需要补充,即当测区内联测的日变站数量较多($M \geq 3$)时,各个日变站实际上已经构成了一个日变站网(即“93 规程”中所指的基点网)。当利用公式(18)计算完各个边段的误差后,如果日变站网的闭合差 $\neq 0$,那么这时需对这个日变站网进行网评差。这是各个地面磁化勘探技术规程中都没有要求的,但笔者认为这么做是合理且必要的。

关于网平差的方法,相应的研究已经非常多,也可以参照重力基点网平差或测绘部门有关 GPS 网平差的方法,笔者在此不再展开讨论。

通过以上两节的分析,可以看出,日变改正的误差求取和日变站联测的误差统计问题可利用野外日变站联测时获得的数据按不同的计算方法同时解决。需要注意的是,在计算日变改正误差时,所截取的数据应包含地磁场日变化最大的时间段,而计算日变站联测误差时,只需截取地磁场变化平稳段(即“93 规程”附录 B 中要求的 2 小时内地磁场平均值变化不超过 2 nT 的时间段)的数据。

2.3 高精度磁测中的误差构成分析

高精度磁测中的磁测总误差包含观测误差和改正误差两部分。通过前文分析可以看出,观测误差可由质量检查得到的野外观测均方误差直接评价,而改正误差则包含了日变改正误差、日变站联测误差、正常场改正误差和高程改正误差等 4 项。因此笔者认为,地面高精度磁测的误差统计表可以调整为表 6 的形式。

表 6 和石油行业 2011 版《地面磁法勘探技术规程》(国家能源局, 2011)中的误差分配表(表 5)相比,改变

表 6 调整后的高精度磁测误差统计表

Tab. 6 Revised error statistics table for high-precision magnetic measurement

磁测总误差 nT	野外观测均方误差(nT)	改正误差(nT)			
		日变站联测误差	日变改正误差	正常场改正误差	高程改正误差
.....					

误差栏目细分中多了日变改正误差。笔者认为,表5回避了日变改正误差的问题,实际上是把日变改正的误差遗漏了。

由表1到表5,可以看到一个比较有意思的现象,就是磁测技术规程的制定、修订者在如何处理日变改正误差时的纠结。

“93 规程”中把磁测总精度分为 ± 5 nT、 ± 2 nT、 ± 1 nT 3 个等级,并针对不同的磁测总精度要求,给出了不同的误差分配方案。然而在实际工作中可以发现,在地矿行业一提到高精度磁测,就默认是指总精度为 ± 5 nT 这个等级的磁测工作,其他两个精度等级的磁测工作极为少见,几乎从不被提起,这是为什么呢?

笔者通过对磁测总精度中各部分误差目前所能达到的水平及其在总误差中的占比来探讨这个问题。

(1) 野外观测均方误差

这是构成磁测总误差的一项主要误差。因为目前开展高精度磁测工作的仪器中,质子磁力仪是绝对的主力。质子磁力仪的工作原理决定了其测量精度基本就在 ± 1 nT 左右。从 20 世纪 80 年代引进技术生产的 MP-4 微机质子磁力仪到现在众多的国产或进口品牌质子磁力仪,精度虽有改善,但没有本质的提高;再加上其他几项因素的影响,绝大多数高精度磁测项目最终统计的野外观测均方误差绝对值基本保持在 2 ± 0.5 nT 这个范围,而且大于 2 nT 的占大多数。

(2) 日变站联测误差

“93 规程”附录 B 中说明,当磁测均方误差为 2~5 nT 时,日变站的控制范围不应超过 50 km。按照这一要求,理论上一个 1:20 万图幅范围的测区内一个日变站就可以控制了。而随着航磁覆盖面积的不断扩大,现如今几乎不再有机会出现一个地面高精度磁测项目有这么大的工作面积,有 2~3 个 1:5 万图幅的面积就算是比较大的了,更多的是一些更小范围的工作。因此,大多数地面高精度磁测工作不需要建立分日变站,日变站联测误差是不存在的。一些项目建立分日变站,也仅仅是为了工作方便,而非一个日变站控制不了,这些日变站间的距离一般是比较近的,只要是严格按照要求去选点和求取各日变站的 T_0 值,日变站联测误差一般也是很小的。

(3) 日变改正误差

前文提到过,高精度磁测工作者在不知如何统计日变改正误差的情况下,会把分配的误差限差值直接

作为日变改正误差使用。这么做虽然不合理,但 2 nT 这个数据却是有依据的,是前人在大量实验基础上得到的;笔者的团队也曾做过少量验证工作,结论是一致的。可见,日变改正误差也是一项主要的误差来源。

(4) 正常场改正误差和高程改正误差

正常场改正和高程改正,就是利用地磁图或地磁模型,把测区内所有测点的磁场值归一化到同一起算点(“93 规程”中的总基点)上的过程。“93 规程”要求采用国际地磁参考场 IGRF1990.0 模型提供的高斯系数计算出测区 1 km $\times$ 1 km 节点的地磁场 T_0 值,然后进行内插改算。由于 IGRF1990.0 模型只能用来调整 1990~1995 年间的磁场模型,因此后来改正时都采用相应工作年份的 IGRF 模型进行改正。随着计算机技术的发展,现在的高精度磁测工作已不再使用内插的方式进行改正,而是直接计算出测点坐标位置相对于选定的起算点坐标位置正常场及受高程影响的变化值进行改正,大大提高了工作效率并减少了误差。

有关地磁场模型的研究很多(徐文耀, 2008; 白春华, 2008; 黄晓颖, 2010),也有多种地磁场模型,还有学者提出,采用 IGRF 模型进行正常场改正是不合适的(孙中任, 2011),但这些不在本研究讨论范围之内。无论采用什么模型,只要空间位置确定,那么其在该点的解是固定的。正常场改正误差和高程改正误差的出现是由于测量得到的测点空间三维坐标与测点的实际坐标不一致引起的,这个误差的大小取决于测地工作的精度。

“93 规程”颁布实施时, GPS 测量技术刚进入国内不久,尚未普及,当时的测地工作主要以地形图定点为主。因此“93 规程”中对这两项改正分配的误差均是 ± 1 nT。但是,随着 GPS 测量技术的发展及广泛应用,现在最基本的导航型手持 GPS 测量精度就可以轻松地保证高程改正误差优于 ± 0.2 nT(高程误差优于 ± 8 m)。正常场改正,更是优于 $\pm n \times 10^{-2}$ nT,更遑论更高精度的亚米级、厘米级测地技术,其引起的正常场改正误差和高程改正误差已经可以忽略不计了。

由以上分析可见,在磁测总精度计算公式(3)中,野外观测误差和日变改正误差是主要成份,在平方和计算时能占到 90% 以上,而野外观测误差的大小与采用的仪器性能关系密切,通过提高野外测地精度等

手段对于提高磁测总精度的影响是极其有限的。野外工作中很多时候要求采用更高精度的测地工作,其目的是更准确的确定磁异常的位置,而非提高改正精度。

缩小日变站控制半径能提高日便改正精度,但又会增加日变站联测误差,因此对改善日变改正误差作用也是有限的。

总的来说,采用质子磁力仪进行高精度磁测工作,磁测总精度一般会维持在 ± 3 nT左右,并且不会因工作比例尺或测区面积的变化而有大的改变。因为仅野外观测均方误差一项往往就超过了 ± 2 nT,因此磁测总精度是很难达到 ± 2 nT的要求的,要达到 ± 1 nT可以说是不可可能的,除非采用精度更高的光泵磁力仪,这也就是目前大家很少采用其他精度要求的原因。那么,如何合理确定磁测总精度及相应进行误差分配是需要进一步研究的。

3 结语

(1)总体来说,“93 规程”是一部很好的技术规程,为中国高精度磁测的大规模应用打下了良好的基础。到目前为止,中国开展的高精度磁测工作,其投入和覆盖面积可能是全球规模最大的。然而“93 规程”毕竟是在当年的技术条件下制定的技术规程,存在历史的局限性。其中,有许多方面已不能适应当今的需求。中国地质调查局 2009 年就启动了《地面高精度磁测技术规程》的修订工作,然而时至今日,仍未见到新修订的技术规程颁布实施,显然修订工作未达到预期目标,但新的规程修订工作是势在必行的。

(2)笔者重点讨论了两方面的问题,一是高精度磁测野外工作质量评价过程中,在进行精度统计时极其常见的一个错误;二是讨论了“93 规程”中有关精度评价部分本身存在的一些问题及不足,并提出了相应的改进建议。这些是笔者在实际工作中,对“93 规程”在应用时常出现的问题及现阶段看来存在的不足进行的一些总结和思考,不一定都合理,有些问题笔者也无法给出合理的建议,例如,如何合理地确定磁测总精度及相应进行误差分配的问题,因为这需要有大量不同类型的仪器进行实验得到的数据做支撑,而笔者缺乏相应的数据积累,因此笔者希望从事高精度磁测工作的地球物理工作者能共同探讨。

参考文献(References):

- 白春华,徐文耀,康国发.地球主磁场模型[J].地球物理学进展,2008,23(4):1045-1057.
- BAI Chunhua, XU Wenyao, KANG Guofa. Main Geomagnetic Field Models[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(4): 1045-1057.
- 陈靖,郭文波,王宏宇,等.综合电磁法在凤太二里河铅锌矿深部的找矿效果分析[J].西北地质,2024,57(1):196-206.
- CHEN Jing, GUO Wenbo, WANG Hongyu, et al. Analysis on Prospecting Effect of Integrated Electromagnetic Methods in Deep Prospecting of Fengtai Erlihe Lead-Zinc Deposit[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(1): 196-206.
- 耿涛,郭培虹,冯治汉,等.北秦岭华阳川地区复杂地形条件下隐伏硬岩型铀矿的地球物理勘查方法[J].西北地质,2023,56(2):225-244.
- GENG Tao, GUO Peihong, FENG Zhihan, et al. Geophysical Exploration Eethod of Concealed Hard Rock Type Uranium Deposit with Complex Topographic Conditions in Huayangchuan Area, North Qinling Mountains[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 225-244.
- 管志宁.我国磁法勘探的研究与进展[J].地球物理学报,1997,40(Supp.):299-307.
- GUAN Zhining. ResearchesAnd Progresses of Magnetic Prospecting In China[J]. Acta Geophysica Sinica, 1997, 40(Supp.): 299-307.
- 黄磊,侯泽明,韩莹,等.基于二维 NLGC 反演的水文地质结构辨识研究[J].西北地质,2022,55(1):249-254.
- HUANG Lei, HOU Zeming, HAN Xuan, et al. Study on Aquifer Structure Identification based on 2D Magnetotelluric NLGC Inversion[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(1): 249-254.
- 黄晓颖,边少锋.国际高精度地磁模型研究进展[J].海洋测绘,2010,30(3):79-82.
- HUANG Xiaoying, BIAN Shaofeng. The Research Evolution Of International High-Resolution Geomagnetic Models[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2010, 30(3): 79-82.
- 李才明,李军,余舟,等.提高磁测日变改正精度的方法[J].物探化探计算技术,2004,26(3):211-214.
- LI Caiming, LI Jun, YU Zhou, et al. The Method Of Increasing Precision Of Diurnal Correction In High Precision Magnetic Survey [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2004, 26(3): 211-214.
- 李普涛,辜平阳,何世平,等.小秦岭华阳川地区铀矿综合找矿方法研究[J].西北地质,2023,56(2):245-259.
- LI Putao, GU Pingyang, HE Shiping, et al. Study on Exploration Methods Combination for Uranium Deposit in the Periphery of Huayangchuan Area, Xiaoqinling Mountains[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 245-259.

- 李正明, 王备战, 展卫露, 等. 青海省锡铁山铅锌矿床沉积盆地构造与找矿方向浅议[J]. 西北地质, 2025, 58(1): 166-177.
- LI Zhengming, WANG Beizhan, ZHAN Weilu, et al. Discussion on Structure and Prospecting Direction of Xitieshan Lead-zinc Deposit Sedimentary Basin in Qinghai Province[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 166-177.
- 刘诚, 唐卫东, 杨凯, 等. 荒漠浅覆盖区萤石矿定位预测技术研究[J]. 西北地质, 2024, 57(4): 144-156.
- LIU Cheng, TANG Weidong, YANG Kai, et al. Research on Location and Prediction Technology of Fluorite Deposits in Shallow Desert Coverage Area[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(4): 144-156.
- 庞振甲, 成欢, 冀月飞. 陕西省略阳县陶家沟地区地质地球物理特征及找矿预测[J]. 西北地质, 2022, 55(1): 93-100.
- PANG Zhenjia, CHENG Huan, JI Yuefei. Geophysical Characteristics and Prospecting Prediction of Taojiagou Area in Lueyang County, Shaanxi Province[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(1): 93-100.
- 秦葆瑚, 张昌达, 朱文孝, 等. 高精度磁法勘探 (第一版)[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1988.
- 秦葆瑚. 谈谈高精度磁测[J]. 物探与化探, 1989, 13(3): 229-230.
- QIN Baohu. About The Application of High-Precision Magnetic Survey[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 1989, 13(3): 229-230.
- 秦葆瑚. 高精度磁测方法指南[J]. 湖南地质, 1991, A(05): 1-100.
- 孙中任, 赵雪娟, 王丽娜. 地面磁测数据正常场改正现行方法探讨[J]. 地质与勘探, 2011, 47(4): 679-685.
- SUN Zhongren, ZHAO Xuejuan, WANG Lina. Discussion of Current Correction Methods of the Normal Magnetic Field for Data Processing of Ground Magnetic Surveys[J]. Geology and Exploration, 2011, 47(4): 679-685.
- 孙萍萍, 余常华, 田中英, 等. 关中盆地城市群地下文物遗迹精准探测——以茂陵为例[J]. 西北地质, 2019, 52(2): 72-82.
- SUN Pingping, YU Changhua, TIAN Zhongying, et al. Accurate Detection of Underground Cultural and Historic Relics in Guanzhong Basin: Example from the Maoling Mausoleum[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(2): 72-82.
- 徐文耀, 白春华, 康国发. 地壳磁异常的全球模型[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(3): 641-651.
- XU Wenyao, BAI Chunhua, KANG Guofa. Global Models Of The Earth's Crust Magnetic Anomalies[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(3): 641-651.
- 袁照令. 进行地面高精度磁测的几点认识[J]. 地质科技情报, 1991, 10(3): 96-99.
- YUAN Zhaoling. Land Magnetometry With High Accuracy[J]. Geological Science and Technology Information, 1991, 10(3): 96-99.
- DZ/T 0071-93 地面高精度磁测技术规程[S]. 中华人民共和国地质矿产部, 1993.
- DZ 56-87 地面高精度磁测技术规定[S]. 中华人民共和国地质矿产部, 1987.
- SY/T 5771-1995 地面磁法勘探技术规程[S]. 石油天然气总公司, 1995.
- SY/T 5771-2004 地面磁法勘探技术规程[S]. 国家发展和改革委员会, 2004.
- SY/T 5771-2011 地面磁法勘探技术规程[S]. 国家能源局, 2011.