

我国地面重磁仪器的现状与前景

吴天彪

(中国仪器仪表学会地质仪器分会 北京 100027)

摘 要:重力仪和磁力仪是重力勘探和磁法勘探(探测)用以观测和采集地球重力场和地球磁场及其异常数据的基础设备,采集到的重磁数据的精确度和准确度将直接影响勘探或探测的效果。本文介绍了我国重力仪和磁力仪的发展历史和现状;讨论了一些常用仪器的性能指标及其特点和应用范围;例举了磁探测领域的生动的应用实例;对于重磁仪器的发展前景提出了建议,同时也指出了在研发和应用中的某些欠妥的概念的误区。

关键词:重力仪 磁力仪 现状与前景 重力勘探和磁法勘探

1 前言

灵敏度达到微伽级($0.01 \sim 10 \mu\text{Gal}$)、量程达到 $4000 \sim 7000 \text{mGal}$ 的专门用于测量重力加速度(重力场强度)的仪器,在地质界通常称之为“重力仪”,灵敏度达到纳特级(0.001 或更低 $\sim 10 \text{nT}$)、量程达到 $100,000 \text{nT}$ 的专门用于测量地球磁场(磁感应强度)的仪器,在地质界通常称之为“磁力仪”,在其它领域,有时将磁力仪称之为磁强计。这两种仪器不仅是地球的两个重要的基本参数——重力场和地磁场的观测以及物探方法中的重力勘探和磁力勘探的基础设备,在航天、军事探测(UXO)与监测(潜艇)、考古、生物磁学等众多领域有着广泛的应用前景。限于篇幅本文仅讨论国产的用于地面观测的重力仪和磁力仪的现状和前景。

2 我国重力仪和磁力仪的发展历史和现状

2.1 磁力仪

我国第一台光学机械式磁力仪——悬丝式磁力仪(磁秤)是 1958 年由原地质部物探仪器修造所仿制成功的,而正式批量投产是在北京地质仪器厂建成之后的 1960 年,到 1961 年底,两年生产了 1704 台,此后一直到 1991 年该厂共生产了 11 种型号的光学机械式磁力仪,包括刃口式、水平定向式、袖珍式、地磁日变仪等近 11000 台,灵敏度由 $10 \sim 20 \text{nT/格}$ 逐步提高到 $1 \sim 2 \text{nT/格}$,完全满足了近 30 年我国大规模地面磁测的需要,它们所测的量是地磁场的垂直分量,但是随着时间的推移,这类仪器从操作使用来看,在每一个测点,要摆三脚架、用罗盘定向、用水泡调平,在一个像显微镜的镜筒里读格数、全手工

记录数据;从制造工艺上讲,要采用精度很高的设备加工机械零件和光学零件,调试过程也比较复杂。总之,操作使用和制造工艺,比起电子磁力仪来,明显呈现出其劣势来,于 1991 年停产,代之而来的是各种各样的电子磁力仪。

我国从上个世纪的 50 年代末开始探索测量垂直分量的磁通门磁力仪,60 年代初开始研制质子磁力仪等电子式磁力仪,但限于当时的条件,如主要器件只能使用电子管,电源只有干电池,探头和电路设计水平也极其有限,仪器的体积、重量远比光学机械式磁力仪大许多,无法推广使用。到 1962 年,研制出了用锗晶体管为主要器件的质子磁力仪,到 1983 年共推出 6 个型号,生产了 1500 多台,“发”到了全国的物探队,几经推广,却未得到普遍应用,主要原因是可靠性差,故障率太高,另外,广大物探工作者也还不太熟悉所测的总向量的推断解释方法。

1983 年,达到国外 70 年代后期水平的灵敏度达到 1nT 的 CZM-2 型质子磁力仪的问世,使我国物探界正式开始使用电子磁力仪,特别是在地震预报领域得到大面积推广使用,到目前,这种仪器及其改进型号 CZM-2A 已经生产近 600 台。

1986 年,我国地矿和核工业系统分别引进了加拿大的 IGS-2/MP-4 型和美国的 G-856A 型的“微机质子磁力仪”,灵敏度为 0.1nT ,观测精度达到 $\pm 2.5 \text{nT}$ 或更高,自动记录数据、自动日便改正、数据可以直接传送到其他计算机系统作进一步处理,同时,地质系统为推广使用 MP-4 仪器,在方法技术,推断解释等方面作了大量工作,出版了“高精度磁法勘探”等书籍、制定了相应的规程,使我国的

地面磁法勘探水平在短时间内达到国际先进水平,并得到全面推广。MP-4 型仪器逐步国产化,到1993 年共生产近 300 台,少部分仪器被我国计量部门采用当作标准仪器。G856A 经过不断改进,如采用锂电池做电源,一直生产到今天,在各个系统得到广泛应用。

进入 21 世纪以来,随着国家对地质事业投资力度的加大,以及铁矿和多金属矿产资源的短缺,对质子磁力仪的需求猛增,北京地质仪器厂在 MP-4 经验的基础上、开发了全新的 CZM-3 型仪器,2005 年投入市场。

核工业系统的京核鑫隆公司在 G856A 的基础上,不断改进,最近推出了 G856F 高精度智能质子

磁力仪,采用锂电池供电,外形保持了传统的结构。据悉,该系列产品已出口上千台,国内销售也达到几百台,在地震、有色、地质、环保、冶金、石油勘探、煤田、科研等领域广泛应用。

2006 年 3 月重庆奔腾数控技术研究所/重庆万马物探仪器有限公司在参照国外仪器的基础上,根据本国国情开发的 WCZ-1 质子磁力仪投产,灵敏度 0.1T,至今已售出数百台。

2006 年,廊坊瑞星仪器有限公司推出了灵敏度 0.1nT 的 PM-1A 型质子磁力仪,其特点是带有 GPS,可外接 GPS,存储测点坐标值,信号质量实时监控,信号质量下降可及时发现以便采取措施补救。

以上 4 个厂家产品性能详见表 1。

表 1 在产的国产商品质子磁力仪的主要性能

型号	量程 (nT)	分辨率 (nT)	精度	梯度容限 (nT/m)	显示器	存储量 (读数)	接口	电源	尺寸(mm)		重量(kg)		制造 单位
									主机	探头	主机	探头	
WCZ-1	2~10 万	0.1	±1	≤5000	240× 128LCD	12 万	RS-232	外置 12V/ 2.3 Ah 铅酸 免维护电池	230× 155× 65	Φ75 ×155	2.5 (含电 池)	0.8	重庆奔腾 数控技术 研究所
PM-1 A	2.5~ 8 万	0.1	±1	5000	320× 240LCD	24 万	USBRS- 232	内置 4Ah 锂 电池	232× 100× 145	Φ70 ×140	1.9 (含电 池)	0.8	廊坊瑞星 仪器有限 公司
G856F	2~10 万	0.1	0.5	-	双排 6 位 LED	基站 1.2 万测点 5700	USB	内置 12V 4.4Ah 锂电 池					京核鑫隆 公司
CZM-3	3~7 万	0.1	±1	垂直 ≤2000 水平 ≤1500	192× 64LCD	基站 4005 测点 2670	USBRS- 232	内置 16V 3.8Ah 锂电 池	210× 80× 200	Φ70 ×140	2.0	1.0	北京奥地 探测仪器 公司(北 京地质仪 器厂)
CZM-2	3.2~7 万	1	±1.5	垂直 ≤2000 水平 ≤1500	5 位 LED	-	-	内置 16V 3.8Ah 锂电 池	224× 80× 235	Φ72 ×140	2.0	1.0	北京奥地 探测仪器 公司(北 京地质仪 器厂)

虽然在 1975 年及以后的一段时间生产了 200 多台测量垂直分量 CCM-1/2 型地面磁通门磁力仪,因其精度并不比光学机械式磁力仪高,还要使用多节干电池,使用维护成本高、可靠性差,使其没有达到取代机械式磁力仪的设计初衷,没有得到推广使用。但是,近 20 年后这种仪器得到了新生,当把升级换代后

的磁通门系统做成 CCM-4 磁力仪并在遵化地区推广后,得到农民找矿者的欢迎,数十台仪器很快售完,形成供不应求的局面。此后,物化探所的 CBT-1 型便携式探矿磁力仪和廊坊瑞星仪器有限公司的 MCL-2 微机磁力仪相继投放市场,后者从 2004 年 4 月已销售 200 余台。几种同类型仪器,其主要性能见表 2。

表 2

在产的国产便携式磁通门磁力仪的主要性能

型号	仪器名称	量程 (nT)	分辨率 (nT)	地磁场 补偿范围	转向差 (nT)	显示器	数据 存储量	电源	主机		探头		制造 单位
									尺寸 (mm)	重量 (kg)	尺寸 (mm)	重量 (kg)	
CCM-4	磁力仪	± 19999	1	35000~ 55000nT	≤ 10	41/2 位 LCD		5 号镍 氢电池	190× 65× 230	2.0	$\Phi 70$ ×160	0.45	北京奥地探 测仪器公司 (北京地质 仪器厂)
MCL-2	微机磁 力仪	0~80000	1	无需补偿	$\leq \pm 10$	160 × 128LCD	5120 点		225× 180× 80	1.0	$\Phi 70$ ×125	0.5	廊坊瑞星仪 器有限公司
CBT-1	便携式 探矿磁 力仪	绝对测量 ± 100000	10	30000~ 60000nT	10			锂电池 2 节 7.2v	220× 115× 70	0.5		1.2	中国地质科 学院地球物 理地球化学 勘查研究所 仪器研制中 心
		相对测量 ± 19999	1										

上海直川信息技术有限公司生产了一种叫做“ZC-206T 高精度智能磁力仪”，用小巧的磁阻芯片磁传感器做探头，用个人电脑做数据采集和存储，可以测“垂直分量”和“水平分量”，据介绍，分辨率达到 1nT，是另一种磁力仪。

基于磁通门技术的磁梯度仪(磁探仪)，我国于 1975 年投产，灵敏度达到 1nT/0.6m，在军事工程方面被列为正式部队装备，到 1996 年更新换代后，灵敏度达到 0.1nT/0.5m，和国外先进水平相同，用于大型探测设备或用于探测 UXO(地下未爆物体)。此类产品总产量也达到数百台。

中国科学院考古研究所利用国产高灵敏度的磁探仪做考古探测取得了令人鼓舞的成果，为我国争得了荣誉。该所利用 CCT-2 型磁探仪在甘肃省考古时，以 10 余纳特的磁梯度异常发现了一支周代的“鼎”，属于国家一级文物，为此，美国探索频道采访了该所钟健研究员，连同仪器照片制作了 20 分钟的节目，在探索频道向全世界播放。钟健研究员访问日本时，介绍了他的考古成果，日本同行问他用的仪器是哪里生产的，他很自豪地告诉他们是中国造的、北京造的，日本同行感到很惊讶地表示，他们还没有这么先进的仪器。

把无磁经纬仪和磁通门零指示器结合在一起的

D/I 磁力仪，用于在台站观测磁偏角和磁倾角，精度达到 1~2'，近年来，在我国的地磁台站已装备近百台，使用情况非常好，我国是唯一能够全部自己生产这类仪器的国家。

用于地磁台站或固定场所(如船坞、实验室)高稳定性三分量磁力仪和多通道(总通道数可达数百道)的磁通门探测系统已经供部队使用，在船体消磁和船体模型磁性研究方面取得了良好效果。

北京地质仪器厂曾于 70 年代中期研制并小批量生产台式铯光泵磁力仪，限于当时条件，仪器性能欠稳定，未能推广使用。

90 年代中期，由原地矿部航遥中心研制成的 HC-95 型手持式氦光泵磁力仪，灵敏度达到 0.05nT，目前，该仪器经改进灵敏度已达到 0.02nT，探头和电路用一根 42cm 的金属管联结，全重仅 1.5kg，操作使用方便。

中船重工集团公司第 715 所研制的 HC-2(GB-4A)台式氦光泵磁力仪/梯度仪是一种观测地磁场总场和梯度的高灵敏度仪器，其静态噪声和 G-822 型仪器在同一环境条件下对比，后者为 0.028nT(据说，是制造商在软件中加了扰动)，而 HC-2 达到 0.0036nT，这说明我们能够制造出性能优越的仪器。二者对比曲线见图 1a 和图 1b。

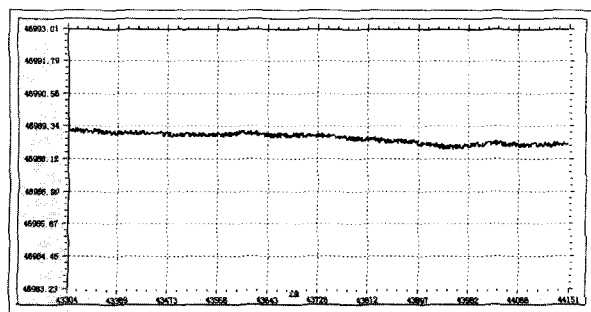


图 1a G882 仪器静态噪声,按航磁测量规范
评价为 0.028 nT

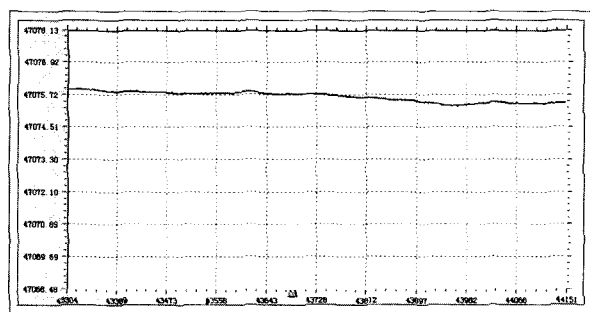


图 1b GB-4A 仪器静态噪声,按航磁测量
规范评价为 0.0036 nT

高温超导磁力仪的特点是:(1)噪声低;(2)频带宽、低频响应好;(3)使用液氮制冷,低温技术相对简单、资源丰富。除用于物探工作外,还可用于医学上的心、脑磁测量以及工程上的无损检测等。在地球物理勘查上,高温超导磁强计做电磁法的探头,主要用于深部金属矿、油气资源的勘查。我国在高温超导磁强计研制及在地球物理勘查中的应用研究处世界领先水平。

中国地质科学院物化探研究所从 1989 年开始进行高温超导磁强计在地球物理上的应用研究工作,先后研制出偏置电流频率为 30MHz 的块材高温超导磁强计、偏置电流频率达 1000MHz 的薄膜高温超导磁强计,并分别在大地球磁测深法、瞬变电磁法、远偏移瞬变电磁法上做了大量的应用研究工作。目前,高温超导磁力仪的指标是:(1)磁场分辨率:97 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$;(2)摆率:1.2 mT/S;(3)带宽:0~30 kHz。用此高温超导磁强计做探头在瞬变电磁法上进行野外试验的结果表明:在低阻覆盖区,与传统瞬变电磁法相比能够加大勘探深度。

2.2 重力仪

在地面使用的重力仪有两大类,即绝对重力仪

和相对重力仪,这里只介绍在物探工作中大量使用的国产相对重力仪的情况。

上个世纪 60 年代后期至 70 年代初期,我国地质仪器企业曾仿制加拿大和前苏联的石英弹簧和金属弹簧重力仪,并投入小批量生产,因精度较低,未大量投产推广。70 年代中期北京地质仪器厂建成了重力车间,设有专门设计的石英系统加工和调试室、高低温实验室、精密机械加工车间,具备了大批量生产的条件。与此同时,ZSM-3 型仪器(灵敏度 10 Gal)研制成功并投入生产,连同此后的 ZSM-4 型大测程重力仪(性能指标见表 3,外形和石英弹簧系统见图 2、图 3)和 ZSM-5 型恒温重力仪,到 80 年代后期,共生产千余台,最高年产量达到百余台,虽然这些产品只具有中等精度水平,但也基本上满足了我国野外重力测量和部队的需要,特别是我国两次登上珠峰的重力测量都是使用国产重力仪完成的。

表 3 国产 ZSM-4 型石英弹簧重力仪的主要技术指标

名 称	参 数
读数精度	± 0.01 毫伽
观测精度	$\epsilon \leq \pm 0.03$ 毫伽
计数器读数范围	0~3999.9 格
格值	0.09~0.11 毫伽/格
测程范围	>5000 毫伽
亮线灵敏度	1.6~2.0 毫伽
混合零点位移	$\leq \pm 0.1$ 毫伽/小时
格值线性度	$\leq 1/1000$
仪器重量	4.5 千克



图 2 石英弹簧重力仪的外形



图3 重力仪的石英弹簧系统
(最细的石英丝直径仅有数微米)

令人遗憾的是,进入 90 年代,随着地质事业投资的锐减,物探工作的萎缩,重力仪的需求量也随之大降,北京地质仪器厂被迫撤销了重力车间,技术人员和技术工人纷纷转行或流失,为了保住这个在全世界产量曾经是第三位(1000 台以上,第一和第二位是 L&R 1500 台和 Worden 1500 台)、在亚洲乃至整个第三世界仅有的一个石英弹簧重力仪生产基地,工厂坚持保留下了一个重力组,到 2005 年,仅有两名技术工人留守阵地,年产量仅 10 台左右,在技术上也几乎没有太大变化,这种状态,远远不能满足近几年来国内外猛增的市场需求,如伊朗的客户开口订 5 台,厂方却无法供货。

从 2005 年底,北京地质仪器厂启动了全自动电子重力仪的研制工作,目前正在攻克传感器难关,相信在不久的将来,我国自行研制的具有自主知识产权的电子重力仪的投产,将会使目前电子重力仪完全依靠进口的形势会有根本性的扭转。

2.3 综合分析

综上所述,作为我国目前物探工作最常用的质子磁力仪大体上是国外 90 年代初期的水平,但是如果确实达到 0.1nT 的分辨率(灵敏度),能够满足高精度磁测的要求,目前的 4 家企业的产能也基本上能够满足国内市场的需求,但是因为前几年产品空当的出现,从加拿大、捷克等国进口了大量的质子磁力仪,分布在各个领域。磁通门磁力仪虽然在全国找铁矿的热潮中,发挥了其简单、价格低廉的优势,但其观测精度尚不能满足专业物探工作的需要,可以说是在我国目前特殊的矿产资源形势下的一个特殊的产品。磁通门梯度仪的水平与国际上的产品相当,主要用于军事方面。光泵磁力仪和国外发展趋势不同,我国有两家单位都是研制跟踪式氦光泵磁

力仪,在地面物探中还未被普遍应用,便携式仪器的灵敏度和国外还有一个数量级的差距。最高灵敏度的超导磁力仪目前尚不适用于传统的磁法勘查,尚处于研究阶段。

我国相对重力仪的水平,如果从国外在 90 年代初推出可供实用的电子重力仪算起,水平落后近 20 年,即使如此,产品还远远不能满足市场需求。

3 我国重磁仪器的发展前景

仅就供野外使用的便携式重力仪和磁力仪而言,无论从市场的角度或从技术的角度,均有良好的发展前景。

当前,国内的用户呈现出多元化趋势,换言之,使用重磁仪器的群体,由于地质市场的变化,已从过去单一的物探专业工作者发展到地质工作者、非地质工作者、民营企业甚至农民兄弟,测量的精度也因目标的不同,高、中、低并存,这就使重磁仪器,特别是磁力仪,从磁通门、质子、光泵都有各自的市场。很多专业的物探队,到国外承包物探、地质工程甚至是买下一片土地进行风险开发,工作的地点多在东南亚、南半球各国,于是出现了“准国外市场”,这些单位和个人,从国内买了仪器到国外工作,所以,我们的仪器性能必须满足在全世界均能正常工作,这是前几年设计仪器时没有考虑到的。另外,也必须瞄准国际市场,特别是第三世界国家,过去都是用美国或加拿大的仪器,如果我国的仪器水平和质量能和国外水平相当,价格低于国外水平,就会有条件拿到国外的订单。CZM-2 曾出口到日本、CZM-3 出口到伊朗、MP-4 出口到越南,G856A/F 通过返销出口到很多国家。

从技术上看,还有很多有待进一步巩固和开发的前景。

(1) 首先,现有的产品,必须实现技术指标的“全球化”,即能够全球使用,适应任何地方的重力场和磁场条件以及环境条件和电源条件,进一步提高可靠性。所有提出的供货指标,必须真实可靠,避免虚假的宣传成分。制造企业应该有完善的质量管理体系,出厂的产品,如标有精度指标,应该有专业计量部门的认证书或测试报告。

(2) 进一步发展功耗低,效率高,轻便的仪器,如国外已经开始普及的动态激发(欧佛豪森效应)型质子磁力仪,整机功耗 2W,灵敏度 0.01nT,每秒可测 10~20 个读数。

(3)发展多参数型仪器,如达到 $2\sim 3\text{pT/m}$ 的光泵梯度仪,对于小型磁性体的探测和研究复杂磁异常有着明显的优越性。

(4)重力仪的前景在于电子化、智能化和自动化,它必须能够自动读数、自动记录、自动或半自动调平、自动倾斜改正、自动固体潮改正、自动漂移改正、自动温度改正等等,仪器自身观测精度 $\pm 10\sim 15\mu\text{Gal}$ ($\pm 0.1\sim 0.15\text{ g.u.}$)。

(5)前面已经提到,现有的全机械式重力仪,适当扩大生产能力、进一步提高质量,仍然有它的国内外市场。

(6)在产品的开发方向上,以物探为主要应用目的的便携式磁力仪,仍将以测量地磁场总场的仪器为主,几乎无它可选。

4 关于几个常见问题的讨论

4.1 关于地面三分量磁力仪

从物探方法的多参数和便于推断解释的角度出发,物探工作者总是希望能够在地面测“三分量”,直到今日,可以测三分量的仪器,最轻便的是“磁通门”,精度最高的是“超导”。试想,如果我们要求每一个分量的自身重复观测精度达到 3nT ,则每一个分量的分辨率至少应该是 1nT ,那么,假定垂直分量为 $46,000\text{nT}$ (北京地区),为了不影响水平分量的观测,就需要一个稳定的水平平台,其水平调整分辨率或精度至少应该是 $\Delta\theta = \arcsin 1/46,000 = 0.00124^\circ$ 即 $\Delta\theta = 0.00124^\circ \times 3600 = 4.48''$ (角秒);当X分量处于“磁”东西向时,如果水平分量为 $30,000\text{nT}$ (北京地区),则定向的精度至少应为 $\Delta\alpha = \arcsin 1/30000 = 0.0019^\circ$, 即 $\Delta\alpha = 0.0019^\circ \times 3600 = 6.87''$ (角秒),如此高水平的平台和定向装置,即使是能够实现,也是高成本、低效率,是野外实际工作无法接受的。质子磁力仪或光泵磁力仪加补偿线圈也可以测“分量”,但是整个装置同样要严格调平和定向,加之补偿线圈的笨重、受温度影响线圈常数的变化,更是操作不便,精度难保。

总之,无论是否必要,地面三分量磁力仪短期内难以实现。

4.2 关于灵敏度

无论重力或磁力测量,要看具体条件。以磁测为例,受很多因素影响,如测点的工业电干扰、有线广播的音频电磁场的干扰,近地表磁性体(被遗弃的

铁丝,铁钉、磁性滚石等)干扰、探头高度的影响、点位误差的影响、日变校正的精度(测日变的时间间隔、定时精度、施工时间内地磁场变化的幅度和频率等)等,否则,多余的高精度,不会带来任何更好的地质效果。曾有一个单位,用进口的光泵磁力仪寻找浅层的铁磁体,竟然用所谓“存在”存储器里的“当地”的“日变纪录”来做日变改正,而对数米深的目标定位准确度能够达到几个厘米!这里真诚希望大家多学一些基本的知识,工作的效果会更好、更符合科学规律。

4.3 关于探测深度

我们经常会问到:“你们的仪器能够探多深?”我们的回答是,对于灵敏度一定的仪器,在正确地操作使用时,其可探测深度首先是被测目标的物理性质以及和它周围介质物理性质差异的大小以及被探目标的形状。如果是磁探,还要看它所在的纬度、它和地磁场的相对姿态以及和地表的相对姿态。以灵敏度为 $0.1\text{nT}/0.6\text{m}$ 的磁探仪为例,在北京地区,直立的 300kg 的航空炸弹,但其周围是低磁性土壤时,可探测深度不小于 3.5m 。

5 结论

在过去的几十年里,我国的地质仪器工业研制和引进技术生产的地面重磁仪器,在物探工作中曾经为我国的地质找矿事业做出过重大贡献,在国防事业上也做出了成绩,近年来有更多的企业参加到这个行列里来,发展形势非常好,但是,品种还有待增加,总体水平和质量有待进一步提高。

当前,我国的地质事业,正处于数十年来最好的发展时机,愿我国的地质仪器工作者能够在不久的将来,创造出更多的具有自主知识产权的先进的地质仪器,为我国的地下资源探测、环境监测、国防事业做出贡献。

(本文所涉及的产品性能指标,是由厂家、研制单位提供或公开发表的,作者不对所列数据负责)。

参考文献:

- 1 秦葆瑚、张昌达等. 高精度磁法勘探. 中南工业大学出版社,1988
- 2 管志宁. 地磁场与磁力勘探. 北京:地质出版社,2005
- 3 曾华霖. 重力场与重力勘探. 北京:地质出版社,2005

(收稿日期:2006年12月15日)