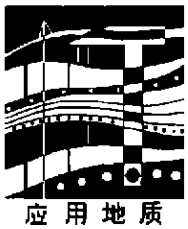
维普资讯 http://www.cqvip.com

电、磁方法在地下古墓葬探测中的应用

张寅生
（安徽省滁州市文物保护科研所·滁州·239001）

以电、磁方法在地下古墓葬探测中的应用实例说明了电、磁方法在地下古墓葬探测中可以发挥重要的作用。

关键词 电法 磁法 古墓葬 探测



古墓葬是田野考古工作中颇为常见的研究对象。大量实践证明、电、磁等物探方法是探测地下古墓葬的支柱方法，可以发挥重要的作用。

由于各个不同历史时期的葬制不同，古代墓葬有砖、石结构，土坑、木椁结构，竖穴土坑和岩穴墓等；其布局有单室、双室和多室。大、中型墓葬一般都有墓道；历经数百、上千年的自然和人为破坏，地下古墓葬有的处于坍塌或半坍塌状况，也有保存完好的；墓内随葬品有的被盗空或部分被盗，也有完整如初的。这些都是古墓葬探测工作中需要掌握的有关考古资料。

1 古墓葬的地球物理特性

古墓葬的地球物理特性与其结构、保存状况有着机因性的关系。保存完好的砖结构墓葬，由于是以大量经过烘烧的砖为结构材料，且以空洞状态存在于围土中，很显然，它与周围介质存在着一定的电性、磁性等物性差异。在墓砖的生产过程中，粘土砖坯经过了高温烘烧，在热运动和地磁场的共同作用下，物质磁畴的体积和排列方向都发生了变化，因此产生了热剩余磁性（也称温差顽磁性）；与此同时，粘土中含有的简单盐类、三氧化物类和次生铝硅酸盐类等矿物，在温度变化过程中经过化学反应（如氧化还原反应），生成新的矿物（如 $Fe(OH)_3$ 还原为 Fe_2O_3），使墓砖又伴生了化学剩余磁性。表1列出不同时代墓砖的磁性参数，其剩余磁化强度 Jr 和磁化率 κ 均明显地高于常见的第四系土层。尽管它们杂乱无章地垒砌成墓室后，其"矢量和"仍表现出与周围介质的磁性差异。实践中发现，其宏观上常呈正（高）磁异常反映。

墓室的电性特征，从理论上来讲，应出现 ρ_s 高阻异常。为此，做了计算机模拟计算。模拟墓室长 74 cm，宽 26 cm，高 12 cm，埋深 20 cm；墓室 $\rho_0 = 1\ \Omega\cdot m$，周围介质 $\rho = 0.05\ \Omega\cdot m$ 采用中间梯度装置，$AB = 3000$ cm，$MN = 2$ cm。模拟结果见图1(a)。在墓室模拟体对应位置上，产生了 ρ_s 高阻异常，其范围约是模拟体的1.3倍；其形状为椭圆形，未能表现出多室的特征。在此基础上，又做了土槽模拟实验。以同样的尺寸，用绝缘板材制作了一个墓室模型，埋深为19 cm，周围介质 $\rho = 122\ \Omega\cdot m$；采用对称四极装置，$AB = 50$ cm，$MN = 10$ cm。实验结果见图1(b)，ρ_s 高阻异常带为似矩形，并反映出墓道的存在。但是，异常范围的长、宽分别是模型的1.4倍和2.3倍。据分析，这是由于土槽尺寸偏小，边界影响造成的。

表1 古代墓砖标本磁性参数表 (10^{-6}SI)

时代	标本数	剩余磁化强度 J_r		磁化率 κ	
		变化范围	平均值	变化范围	平均值
战国	7	18779～21332	20207	1356～2483	1872
北魏	12	6735～8848	7846	923～2692	1472
汉代	16	39576～1330613	76637	1386～36495	5144
三国	3	7310～12900	10320	116220	3697
唐代	11	15163～34694	22645	715～4027	1429

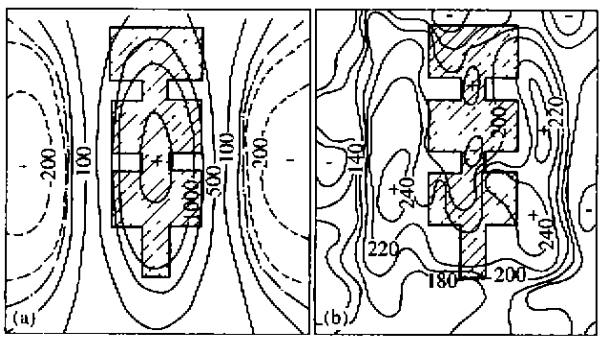


图1 古墓葬模拟电测 ρ_s 平面图
(a)—计算机模拟；(b)—土槽模拟

在实际工作中发现，有的保存完好地下墓室并不是呈 ρ_s 高阻异常反映，而是呈 ρ_s 低阻异常反映。对此特殊现象初步分析认为，由于在古墓葬营造过程中，古代人通常在墓室的周围（主要是上半空间），

本文1998年3月收到，6月改回，于延忠编辑。

维普资讯 http://www.cqvip.com

用"白膏泥"(由粘土掺拌碳酸钙类或某些有机物质组成)充填并夯实。这样,在墓室周围便形成了一层透水、透气性能很差的"屏蔽层"。因此,墓室内潮气均聚集在墓壁(墓砖)上,使墓室整体成为了一个湿度较大的"低阻体"。这种分析有待进一步证实。

土坑型墓葬的地球物理特性较上述类型差异要小的多。从理论角度出发,此类墓葬是存在于原生土层内,经过了先挖空后回填而成墓,则应在原生土层相对稳定的背景磁场中,产生一个与墓葬位置相吻合的紊乱磁场区域。这便成为磁法探测此类墓葬的间接磁场信息;再者,按照某些古代葬制,成墓时需回填"四方土",即是掺杂异地土回填造墓,土质的差异,则增强其间接磁场信息的分辨程度;尤其是在古代土坑类墓葬营造过程中,墓室四周的回填土以及其上的封土均需逐层夯压,压力的作用使土层的密度、结构等物理因素发生了变化,随之磁化率呈现出增大的趋势;加之有的墓葬内存在的磁性随葬品,如瓷器、陶器、(磁性料质制作的)石器等。这些均增大了上述间接磁场信息的差异。土坑类墓葬一般呈负(低)磁异常反映。

应用电法、磁法探测土坑类古墓葬的难度比较大,一是因为其物性信号弱,受干扰影响大,往往较难分辨;二是其物性信号反应规律难以掌握,且其异常边界不明显,直接影响解释效果。土坑型葬制在我国历史上沿袭时代较长,是田野考古工作中出现的频率较高,所以电法、磁法在土坑类墓葬探测中的应用是当前一个研究重点。

其它类型古墓葬的地球物理特性各具特点,如岩穴、(砖)石结构墓葬等,在此不一一阐述。

2 工作方法及应用效果

由于地下各类文物遗存埋藏浅,物性差异小,致使其受浅层和地表不均匀性干扰较大。这也决定了电法、磁法的应用,首先在野外测量中具有小电极距、低探头高度的特点;再就是在资料解释中,需注重通过异常转换和数据处理排除各类干扰;与各种考古信息紧密结合、综合分析,推断解释出符合考古要求的勘探结果。

在实际工作中,视墓葬的不同情况,或单一采取电法或磁法,或综合应用电法和磁法进行探测,下面用实例加以介绍。

河南新郑某战国—汉代古墓群,区内地形平坦,浅层土质均匀,人为干扰极少,故其区域磁场较为稳定,$\triangle T$ 变化范围在 10 nT 左右。考古探测对象为一小型砖墓。磁法使用 MP-4 型质子磁力仪,探头高度 0.5 m,测网密度 1 m×2 m。图 2 为磁法 $\triangle T$ 结果。从中显见,砖墓在稳定的背景场下产生了 20 nT 左右的正磁异常。据异常形态推断出墓的平面布局。该墓为"甲"字形墓,坐北朝南,南边有一长近 4 m、宽 1 m 多的墓道;墓室范围约 5 m×7 m,主墓室的东西侧拥有两个耳室。

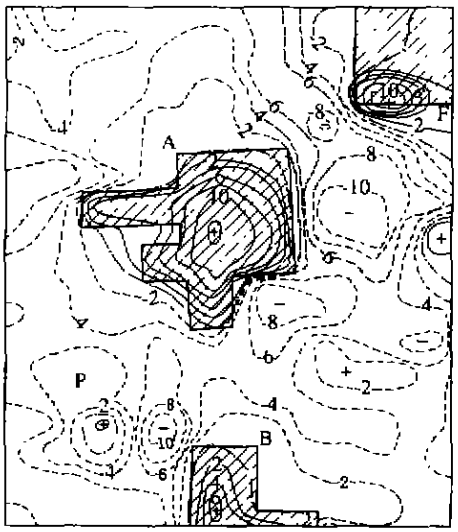


图 2 某汉代时期墓葬 $\triangle T$ 平面图

在此例应用中,由于区域背景磁场平缓,无其它磁信号干扰,仅从 $\triangle T$ 平面结果,便获得了较为具体的考古探测效果。

在已经坍塌了的砖石墓上,应用电法探测也曾取得了较显著的效果。

考古对象为三国时期汉魏帝曹操的一个家族墓。周围介质表层为耕土层,厚约 0.3 m~0.5 m,其下为砂土层,$\rho = 20\ \Omega\cdot m$。采用对称四极装置(AB = 11 m,MN = 1 m),图 3(a)为该墓 ρ_s 等值线图。图

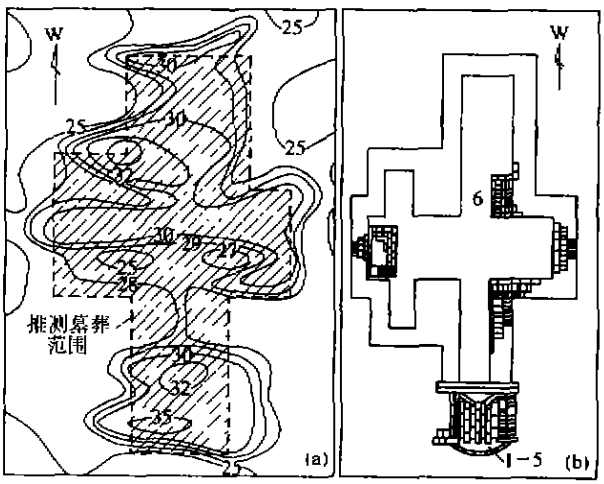


图 3 安徽省亳州汉魏时期墓葬 ρ_s 平面图(a)及考古发掘平面图(b)

维普资讯 http://www.cqvip.com

中，ρ_a = 28 Ω·m 等值线基本反映出墓的位置和平面布局。通过对墓室中心剖面分析，定性认为该墓已坍塌堆积厚度不一，进而分辨出墓门和墓室的关系，并确定出墓的边界。结合汉魏时期墓葬结构和布局的特点，推断该墓坐 W 向 E，墓门位于 E 侧，墓室由前室、后室及耳室组成，见图 3(a)中的虚线部分。图 3(b)为考古发掘验证结果，可见电法解释与发掘结果基本一致 。

在地形平坦、周围介质均匀等理想条件下，依赖单一方法便可获得成效。对于非理想条件，需综合运用物探资料，有针对性地对异常进行数据转换处理，以提高推断解释准确性。

某东汉时期砖结构墓葬，多室，上有"封土堆"，局部出现坍陷，周围介质较为紊乱，墓室内有积水和淤泥。磁法 $\triangle T$ 反映为在"馒头状"正磁异常北侧伴生负磁异常；负磁异常分布范围大，正磁异常向南扩张，延伸远远超出考古推测范围，仅靠图 4(a)难以解释分析。针对斜磁化和边界处理的需要，对图 4(a)进行了延拓、求一阶导数和化极等异常转换，结果见图 4(b)。显然，墓葬异常得到完整、突出的表现。特别是其南、北界尤显清晰；但是，其东、西侧 $\triangle T$ 等值线发生内扭，这给墓的平面布局分析带来了多解性。

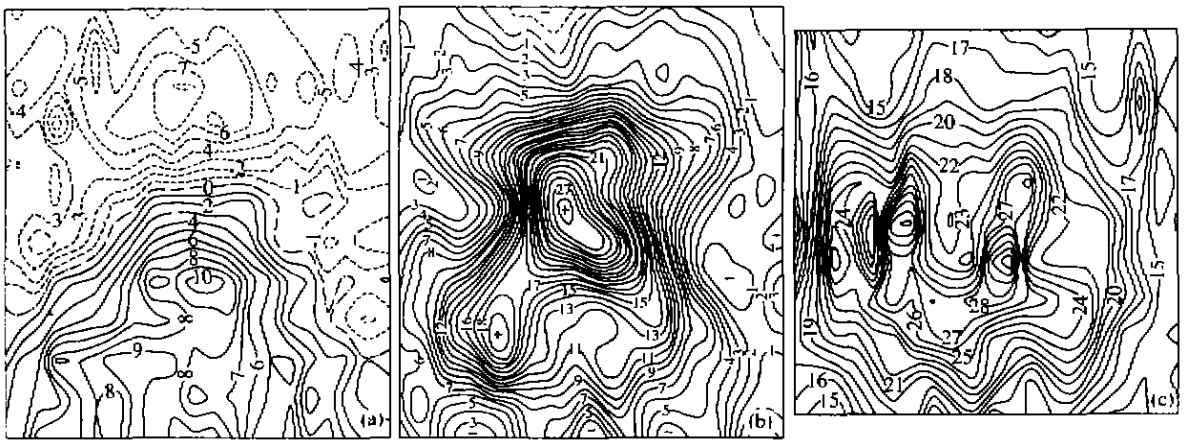


图 4　安徽省霍邱汉代墓葬探测综合平面图

(a)—$\triangle T$ 平面图；(b)—$\triangle T$ 化极平面图；(c)—ρ_s 平面图

为此，小范围地实施了电法，图 4(c)即其 ρ_s 测量结果。显见，ρ_s 参数较显著地揭示了东、西边界的位置。同时，由通过墓穴中心的 ρ_s 剖面测量结果还确定出墓的中心位置 。

综合电、磁法探测结果和考古资料分析推断，该墓平面布局为矩形；东西长 16 m，南北宽 13 m，墓室坐北朝南，南边有一墓(道)门；墓室内多处见有墙垛迹象反映，推断其为一多室结构墓。

经考古验证，此为一座大型砖结构多室墓；平面为矩形，东西长 17 m，南北宽 12.8 m，面积为 217.6 m^2，比物探解释面积大 9.6 m^2，误差为 4.4%；4 条边界位置误差分别为：0.75 m、0.25m、0.5 m、0.3 m；墓内按网络状排列 12 个墓室，彼此间有甬道互通；墓室南界正中有两扇石板组成的墓门(未打开)，此应为墓道入口；墓室内泥水淤积厚达 40 cm。

上例采用磁场总量 T 解释，存在着斜磁化影响。以下是一个采用磁场垂直分量 $\triangle Z$ 参数，结合电性 ρ_s 参数研究土坑木椁墓葬的实例。

河南省固始县"侯古堆"系春秋战国时期墓葬遗址。墓坑断面为上大下小梯形状；坑顶、底、壁均填充青膏泥(即粘土)；坑内有积水；墓室内有陶器、瓷器、玉器、青铜器、漆木器等随葬品。周围介质为新生界松散地层，岩性主要是亚粘土。航磁反映为一近 200 nT 的平稳正磁场背景。图 5 为该墓 $\triangle Z$ 平剖面图，图中呈现两条近 EW 向带状正异常($\triangle Z_{max}$ = 53 nT)；其间有一下降近 20 nT 的鞍部。这正是墓坑的反映；异常区的 S、N、E 面均为负磁场。结合考古

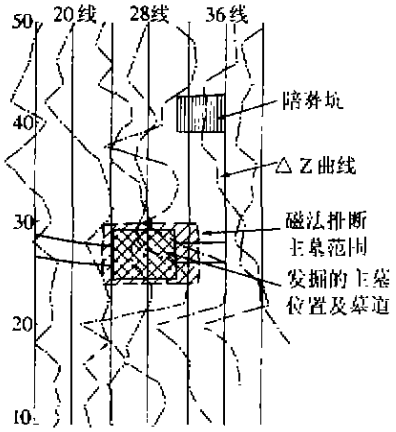


图 5　某春秋战国时期墓葬 $\triangle Z$ 平剖面图

维普资讯 http://www.cqvip.com

资料，推断出墓葬遗存的位置。同时，电法在磁法推断墓的位置出现 $\rho_s < 8\ \Omega\cdot m$ 的低阻异常区；电测深 ρ_s 曲线以 H 型为主，对其采用量板、经验法综合解释了考古地层和遗存深度。电、磁法综合解释结果见表 2，并得到了考古验证。

表 2 战国时期土坑木椁结构墓葬电法、磁法解释与考古发掘结果对比表

解释内容	磁法		电法		考古发掘(m)
	结果(m)	误差(%)	结果(m)	误差(%)	
墓西界距参照点	14.2	23.6	11.2	0	11.2
墓南界距参照点	12.0	8.7	9.8	11.5	11.0
墓顶埋深	未解释	未解释	6.9	1.4	7.0
墓底埋深	未解释	未解释	21.7	5.8	23.0

综上所述，应用电法，磁法探测地下古墓葬，具备地球物理前提，也获得显著的效果。其野外工作方法和资料解译方法，既沿袭了传统的形式，又有所改进和发展。诸如高密度、高精度、CT 技术等，即是在利用地下古墓葬的电、磁地球物理特性的基础上，充分利用计算机 CAD 技术和彩显功能，将探测结果更为显著地表现出来。

总之，随着研究工作的深入和拓展，应用方法将会出现根本性的变革。首先，在成果参数采选方面，可在 $\triangle T$、ρ_s 参数基础上，经过前期异常变换或数据处理，派生出一个更适合文物勘探的、综合性的新参数；其次，在成果图件的表现形式方面，以灰阶、影像、彩显、几何形体等直观的形式取代曲线、数字类的传统的形式，都将是此项应用研究发展的趋势和方向。

本文“电算模拟”工作由中国科技大学王华俊教授完成。

参考文献

1 张寅生. 物探在考古勘探中的应用. 物探与化探, 1990, 14(6): 444
2 董平波. 高精度磁测在勘察古墓上的应用. 工程勘察, 1991, (2): 68
3 阎桂林. 考古磁学—磁学在考古中的应用. 考古, 1997, (1): 85
4 张寅生. 一种考古勘探的新技术. 文物, 1987, (4): 71
5 吴天龙. 地球物理方法勘探古墓实例. 物探与化探, 1998, 12(2): 151

APPLICATION OF ELECTRONIC AND MAGNETIC EXPLORATION METHODS TO THE PROBING OF UNDERGROUND ANCIENT TOMBS

Zhang Yansheng

The practical cases are displayed to approve the important rule which electronic and magnetic exploration methods played in the probing of underground tombs.

Key words electronic exploration, magnetic exploration, ancient tomb, probing

第一作者简介：

张寅生 男，1950 年生。1976 年毕业于合肥工业大学地质系物探专业。原任安徽省滁州市文物保护科研所高级工程师，现任滁州地震局副局长。主要从事物探考古应用研究。

通讯地址：安徽省滁州市 安徽省滁州市地震局 邮政编码：239000

《黄金科学技术》(双月刊)2000 年征订启事

《黄金科学技术》是中国黄金学会的综合性科技期刊，由中国黄金学会和中国科学院资源环境科学信息中心联合主办，《黄金科学技术》编辑委员会编辑出版，全国公开发行，国内统一刊号 CN62－1048/TF，国际标准刊号 ISSN：1005－2518。1988 年创刊，1996 年入编《中国学术期刊(光盘版)》。

本刊设综述、地质、矿床、采、选、冶技术、国外动态、学会活动、分析测试、黄金经济、黄金材料、会议消息、文献资料等栏目。

《黄金科学技术》可使您了解、掌握国内外黄金工业发展、黄金地质找矿，采、选、冶新技术、新方法、新发现、新成果的最新动态和发展趋势。本刊适合黄金科研、企业、生产和管理人员、勘探和选冶工作者、黄金材料及金融工作者、大专院校有关专业师生阅读。

现办理 2000 年的征订手续，本刊逢双月出版，每期约 10 万余字，每期国内定价 5.00 元，全年定价 30.00 元(含邮费)，需订单位或个人请与编辑部联系。

地址：兰州市天水路 342 号 中国科学院资源环境科学信息中心

邮编：730000 电话：(0931)8842245