

地球物理学中的计算机作图

罗伯特B.史密斯, 约翰B.沃诺克等

摘 要 由现代仪器采集的大量地球物理数据,在着手进行有意义地解释以前,必须有效地储存、处理和显示已日益明显了。为了满足这个要求,已经发展了人机联作的计算机系统,使地球物理学家可直接与计算机联系,而且还发展了在阴极射线管上进行地球物理数据的二维和三维显示的方法。重力、磁法、电阻率和激发极化法的特性曲线可在联作系统上进行模拟,用阴极射线管显示。联作模拟处理允许直接交换地球物理变量和交换其后有复算过的模型显示及相应理论特性的数据。模型参数可以用视觉进行监视并可连续调整以便取得更好的解答。此外,也可以产生表征航磁、重力、地形及相关数据的三维曲面的彩色晕渲透视。对于地震数据处理的滤波器合成和褶积来说,已经证明人机通讯可用来作程序指令和数据的修正。处理过的地震剖面用二维的、半色调图显示在阴极射线管屏上。

引 论

一般地说,数字处理和解释的应用,比解决地球物理问题的人机联作和图解显示要早。随着数字采集系统地出现,显然需要存储和提取大量数据的技术,才能保证有效地处理和解释。在二维和三维域里分析地球物理数据带来了新的对多维数据存储、处理和图解显示的需要。本文讨论计算机作图和人机联作技术对地球物理数据处理和解释的应用。这些技术赋予地球物理学家以新的工具,运用这些工具在解释过程中可以更容易地和计算机相互作用。

兰格和法夸尔(1969)描述了早期计算机作图在矿产勘探的一个方面的应用。他们说明了一种技术,可借以将野外取得的磁法剖面在阴极射线管上作视觉上可见的模拟,以便与先前算出的理论地下模型的剖面参照对比。他们的基本结论是大大减少了以前磁法解释需要的时间和力量。沃森与霍奇(1969)报导了解释重力剖面的人机联作计算技术。他们的系统是这样的,解释员经由键盘和阴极射线管与主机直接通讯并赋予机器各种任务。因而解释员可以根据输出进行判断,并将观测到的特性曲线与理论的特性曲线进行比较。

地球物理解释员可以利用人机接口作为他的推断解题处理的延伸。这就使他可以指挥计算机执行大规模的数学操作。因为地球物理学家可根据其已有的知识迅速进行逻辑

推断，他就有直接解题的能力，并使求解加快。而通常这种推断要求大量程序和大量的机器执行时间。

联作技术使地球物理学家处于一个优越的位置，可以监控程序的执行，快速采取办法发展和加速解题过程。因为使用者可以指挥程序，所以与以往经济上可能编成的程序组相比，可以得到更短而且更合逻辑的途径。这类联作使地球物理学家直接与计算机联系，大为提高解释过程的效率，使几天的工作几分钟就能完成，结果是几个月的工作几天就可完成。

这里描述的计算机作图系统提供将标准的地球物理处理和解释程序转换到计算机联作系统中去的必要的程序和硬设备。这个技术使解释员成为执行他的程序的整体的一部分，解释员运用电传打字机控制台输入和阴极射线管输出作为通讯工具。

系统给解释员提供一个方法，可据以修改和提取在他的程序中所刻划的变量的现在的值，并可转移到指令中各种陈述的数。它也允许解释员成为在程序中划定的逻辑处理顺序的一部分，并且实际上就是提供出人机联作的连接。

地球物理数据处理的首要问题，一般需要两个技术中的一个：模拟，以及列出处理参数的方程式。当观测到的特性曲线与理论计算的特性曲线相配时（无论是在剖面上或等值线图上），地下构造的数学模拟是容易做的。这里，解释员的主要目的是用人机相互作用来改变模拟程序中的独立变量，使地球物理数据的理论显示与野外的观测相符。

其次，联作图解在地震数据分析中已用于滤波器设计和数据显示。在执行复杂的处理顺序之前，地球物理学家可以指定并检验诸如因子长度、陡度等地震处理参数。将这些要求通过图解终端送入计算机，处理之后就再次显示出其答案。处理功能或任何操作上的变化都可以修正，俾能提出最好的处理过的数据供解释员判断。

联作系统的一个非常有益的效用是，由完全不熟悉地球物理模拟处理的人员作地质知识的综合。例如，一个地质学家可能帮助在一个被模拟的地下构造上指挥重力和磁法数据的模拟。他的地质数据容易用作地球物理模拟处理的输入。

计算和显示系统

图 1 表示在犹他大学建立的重力解释用的人机联作计算机图解系统。这是一个与主计算机分离的装置，可以作为远方终端而有效地工作。在地球物理人机联作部件中所用的基本设备，包括一个卡片阅读器和行式打印机，允许使用者阅读卡片，取得其程序的打印结果。

一个存储量 2800 字的小的外围计算机与主机的中央处理器联机连结，起控制及与模拟图解设备通讯连结的作用。小外围计算机也作主机与远方终端之间的通讯连结之用。模数和数模转换器用来将数字处理器与模拟输入和输出设备相连。

一个通用的电传打字机用作人机联作通讯键盘。新型的阴极射线管用作显示，而且，与电传打字机一起形成人机联作控制台。

这个人机联作系统的一切程序是通过推广的公式翻译程序 IV 实现的。一个基本的、

电传打字机子程序可确定“联作”变量；这是可以改变并可由使用者提取出来的值。一个“指挥”变量允许将程序的执行转移到任何在程序中陈述的数。这两个人机联作变量提供使用者和主处理计算机之间的重要的控制。

电传打字机和电子片 (pentablet) 发出的硬设备中断储存在中央处理器中，然后识别出来并像解释员程序引起的软设备中断一样动作。一旦将一个要求暂时终断的命令发送到子程序，使用者的程序就从主机的存储器读出到存储系统的备用部分去。然后，不论在任何时间，解释员都可以用著名的交换 (swapping) 法将正在进行的成组程序转移出去而代之以将他自己的程序转入中央处理器的存储器中。由本尼昂等 (1968) 建

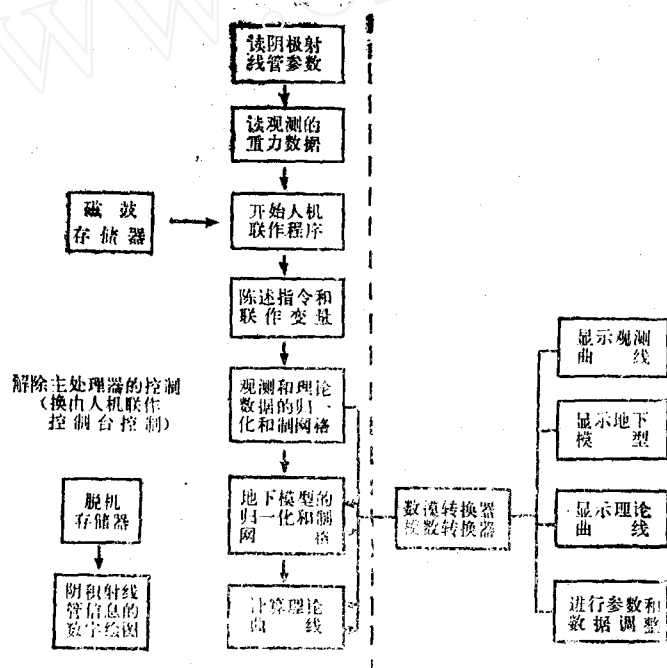


图 1 表示出一个典型的二维重力模拟程序框图的人机联作系统草图

立的软设子代程序库为交换系统提供了基本的电传打字机程序。

阴极射线管提供数据和答案的图解显示。阴极射线管是较新鲜的光栅线式的，且通过运用线段绘图产生显示。这些设备利用点矢量和线矢量作为成图的要素。低分辨率型阴极射线管 (21 吋直径的管子) 的分辨率局限于 1024×1024 的矩阵间隔足够提供详尽的二维位场显示。

地球物理数据的人机联作处理

地球物理模拟

地球物理模拟技术是众所周知的,而且也是通过计算机而广泛应用的。对模拟应用人机联作法的主要优点在于控制尝试法的过程,这是地球物理学家将野外数据与理想化了的模型上的理论特性拟合的常用手段。当解释员可通过对地质制约的事先了解,如对深度和大小的限制、密度差等的了解而限定他的答案时,可以最好、最快地解决这些问题。但是,要想用正式的成组程序补债全部边界条件是困难的。而用人机联作控制台,解释员可以简单的调整、控制其程序的答案,而在程序的指令和执行之间只用非常短暂的回转时间。

第二个优点是同时将观测数据和理论数据的显示重叠在理想地下模型的显示上。这种能力允许在通过漫长而又昂贵的解题算法之前快速地整理原始野外数据。对于多自由度的、收敛缓慢的模型解题,人机联作大大减少尝试法的实际解题时间。例如,电阻率模拟程序做一个模型需约30秒的计算时间。一般地说,解释员用约5次尝试迭代法可配好一条电测深曲线,需费时约3分钟;而成组处理配好同样一条测深曲线得几个小时,因为通过成组服务的执行程序的输入和输出需要大量的时间。人机联作系统在解地球物理模拟程序所需要的迭代次数上的简化是有限的,但是使解释员可以用视觉监控复杂的数据集,从而在时间上可大为节约。两次执行之间的空隙时间用于分析图解显示过的数据,以便更好的判断下次迭代应如何变化。

对于迭代图解系统,发展了包括重力、磁法、电法以及激发极化法的几种模拟程序。图1为人机联作的二维重力模拟的程序框图。左边是在主机中央处理器控制下执行的那部分程序。右边是显示和由远方联机人机联作终端操作的人机联作系统。模拟程序的起始写入和显示参数处于中央处理器的执行系统的控制之下。观测的重力数据以剖面的形式 $g(x)$ 写入,而图解人机联作系统由外存进入。指令条文和人机联作变量以卡片形式写入,随后就是观测和理论数据的归一化以便与阴极射线管吻合。根据定标和改变显示数据的原点,阴极射线管就可以接受或拒斥,并可以观察显示文件的任何一部分。在建立了这些起始参数以后,就计算理论重力曲线。然后,为了显示就将全部数据转移到人机联作控制台。这时中央处理装置恢复到进行正常的成组操作,而图解程序储存在可重新找到位置的外存储器中。

因而地球物理学家就可以观察他的初步计算结果。他可以改变参数使理论曲线与观测数据相匹配。在重力模型中,人机联作可以说明的变量有:层数,各层的密度,刻划各层边界的点的坐标 X 和 Z ,以及区域重力场的子样。这些变量可以用在电传打字机控制台上打入指令的办法简单地改变或抹去,打字指令可依次存储在人机联作终端的小计算机中。当一切这种改变都完成以后,打入一条指令,它将使用者与中央处理装置连接起来,并按照相应的变化重新确立主程序。然后程序再计算归一化和理论曲线并且将数据送回到人机联作终端去显示。这个过程一直重复到确定出可靠的解答为止。

为取得硬拷贝的成果,可用两个方法。一个装在阴极射线管上的像机拍下显示出的数据的图形。当需要更高的分辨力时,将显示的文件送入脱机数字绘图仪的子程序中,可由阴极射线管得到一切信息的数字式图件。

图2a表示一个重力模拟程序的成果图。由测站观测的重力剖面数据画在阴极射线

管的上部。地球物理学家推测的区域重力场是人机联作的输入，也画在上部。剩余场的数据与理论曲线（实践）一起画在阴极射线管的中段。理论模型与密度一起画在下部，其水平比例尺与观测数据的比例尺相同。

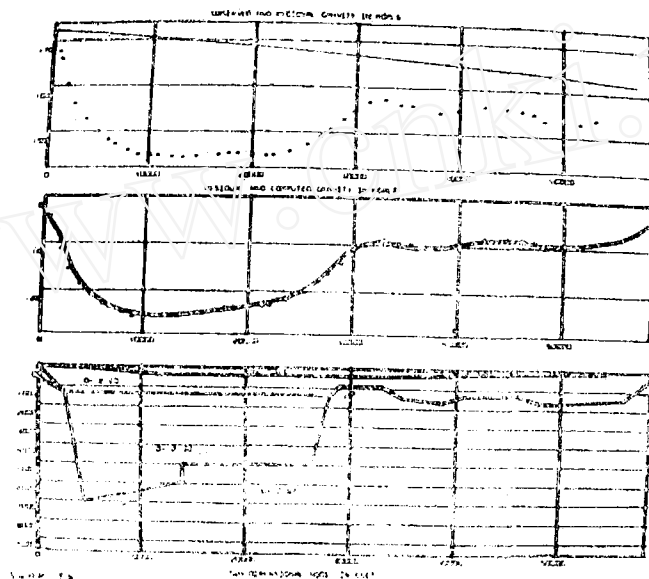


图2a 表示二维重力模拟数据的阴极射线管显示。上面是观测的、区域的和理论的重力数据，下部是理论模型

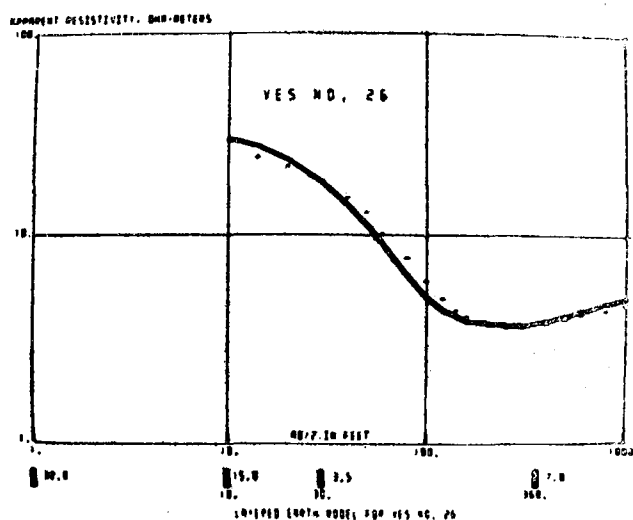


图2b 电法模拟结果的阴极射线管显示。这是一幅双对数坐标中视电阻率（欧姆—米）有纵坐标，半电极距有横坐标的图，层状地下模型也画在电极距坐标轴的下面

图 2b 是一个二维电法模拟成果图。其中,以欧姆一米为单位的视电阻率是纵坐标,横坐标是半电极距。这些变量以双对数比例尺作图,同时电性界面深度用与电极距相同的对数比例尺画在横坐标下面。观测的视电阻率值画成零星的园点,而模型的理论曲线以连续曲线的形式重迭在上面。作为人机联作变量的模拟参数有各层的深度和电阻率。

地震数据处理

人机联作图解系统对地震数据处理的应用,主要是帮助设计滤波因子和地震剖面的作图显示。为此,运用新型的人机联作计算机图解设备。它由两个具有公共存储器的分时处理器构成,仅供图解处理之用。图解终端由一个小的通用计算机加上一个或多个有再存储能力的高精度阴极射线管控制。系统可以用较低的成本作出即时响应。在这个处理器上加有联机的用于地震数据分析的波形处理系统。它由模数转换器,数模转换器和高精度阴极射线管组成。

设计诸如带宽、陡度和滤波器长度等参数的地球物理学家,通过电传打字机控制台和模拟指示设备控制地震处理系统的工作。然后,显示出刚设计的滤波器的响应特征,以便直接判断。假如结果是不理想的,地球物理学家就改变参数,直至获得理想的特性为止。根据需要滤波器的情况,直接应用或储存起来备作将来之用。

取自犹他州大盐湖的地震反射资料(史密斯等,1970)用这种系统进行处理,就是一例。这个数据首先用单道模数转换器以 2 毫秒的间隔数字化。人机联作的预处理子程序有自动增益控制、水平叠加带通滤波。然后,将预测反褶积的顺序记录道显示出来(图3)。

为了显示地震数据,将记录道的输出转换为阴极射线管束的垂直扫描。射线束的强度调制正比于振幅,规定负振幅强度为零(黑色),而正振幅被调制为从零到最大强度(白色)的 2047 个强度色调范围。这种处理产生一个变密度显示。完整的数据图形是将底片对着阴极射线管在图示的时间里打开快门曝光产生的。为达此目的用两个示波仪:一个低分辨力 4×4 吋² 的阴极射线管有 1024×1024 个点,每秒钟激发 10000 点;一台高分辨力 4096×4096 点 9 吋的阴极射线管。图 3 是用这种系统显示的地震数据的一个例子。这两张图表示大盐湖的滤波和预测反褶积前后的地震剖面。垂直比例尺代表 512 个数字点,水平比例尺是 1024 个顺序道。加黑的 100 毫秒一道的计时线迭加在剖面上。为了对阴极射线管的分辨力作比较,图 4 给出了未处理的地震剖面的高分辨力阴极射线管显示图。注意在单个数据点差不多是可分辨的地方清晰度增加了。



图 4 在高分辨力阴极射线管上显示的大盐湖地震反射剖面。分辨力是图 3 的 4 倍

三维地球物理数据的表示

表示三维地球物理数据 $f(x,y)$ 是计算机图解系统的独特应用。它提供通常是黑白(半色调)阴影和彩色图形的数字数据的透视。这些曲面表示是独特的,因为可用曲面色彩的变化表示出第四个独立变量。

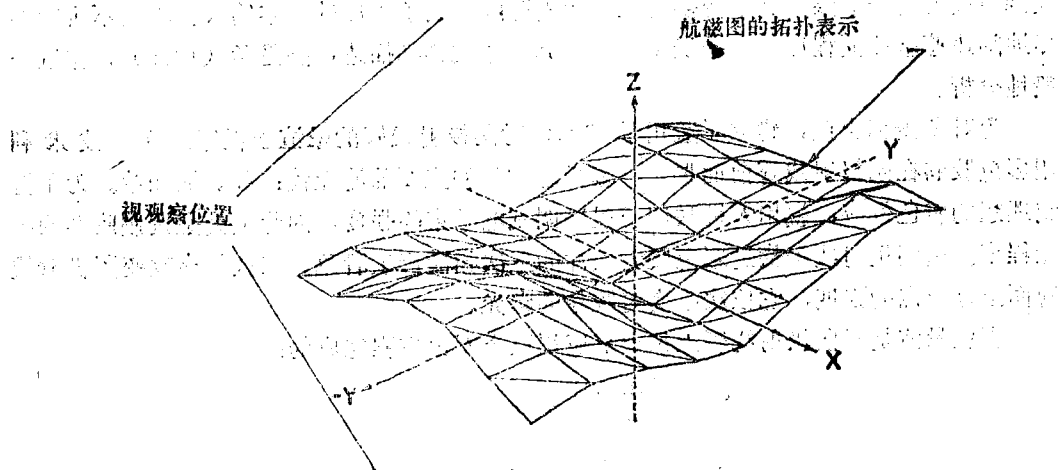


图 5 航磁图的透视拓扑表示

为了解释一下拓扑表示,我们看一看图 5 的例子。假定给了我们一个打上网格的区域,在其每一点 (x,y) 处的 Z 坐标表示该点的航磁值。如果网格由 $m \times n$ 个点组成并设想出在三维空间中 $Z(m-1) \times (n-1)$ 个三角形的曲面,三角形的顶点在点 (x,y,z) ,那么这个由通过点 (x,y,z) 的三角形构成的曲面就是近似的实际航磁图。

为了用视觉观察这个磁场,每个三角形的顶点必须旋转、变形,并经过透视换算,使消除了遮蔽面的曲面投影产生理想的视觉效应。读输入数据的方法是使网格的 (x,y) 坐标处在第一象限,而网格的左下角在原点。网点的 Z 值是磁测值。因此整个曲面就变形了, x,y,z 数据点的平均值将变成原点。

通过滚动、倾斜和角度偏移将曲面旋转,以便取得理想的曲面图。旋转是用简单的解析几何技术。例如对 x 轴旋转 ϕ (倾斜),是对曲面的每一点 (x,y,z) 用如下的换算实现的:

$$\begin{aligned}x &= x' \\y' &= y \cos \phi - z \sin \phi \\z' &= y \sin \phi + z \cos \phi\end{aligned}$$

其他的旋转方程式是类似的。

透视换算是按曲面的理想视觉特征的函数确定的。其中包括想像曲面大小和曲面与观测者之间的假想距离,并取如下的形式:

$$\begin{aligned}x' &= \frac{x}{t_y + 1} \\y' &= \frac{y}{t_y + 1} \\z' &= \frac{z}{t_y + 1}\end{aligned}$$

这里 t 是观测点坐标的倒数,并且假定落在指向右手坐标系的原点的负 y 轴上(图5)。

为了显示这个换算曲面,对 $x-y$ 面的第一象限做等值投影。在此之前应将曲面变换到空间的第一象限。这个变换的坐标形成遮蔽曲面子程序的基本输入。本文不可能详尽地阐述遮蔽曲面程序,但是沃诺克(1968)作过详细描述,萨瑟兰(1970)也作过一般地分析。

为对 Z 坐标上色,建立了适用于4吋 $\times$ 4吋阴极射线管的晕渲子程序。这个技术利用彩色胶卷在阴极射线管前面曝光,曝光时加三种主要的滤光镜:红、绿和兰。为了得到理想的着色效应,就用人机联作子程序调制电子束的强度,因此也就是调制胶卷的曝光程度。由阴极射线管横过彩色胶卷底片的三次扫描产生着色。每次扫描改变阴极射线管面上每一点的强度,它依次改变对胶卷的曝光。

彩色晕渲是对阴极射线管上每一点应用三个着色方程完成的:

$$\begin{aligned}S_R &= \frac{R |\cos \theta|}{r + c} + m \\S_G &= \frac{G |\cos \theta|}{r + c} + m\end{aligned}$$

$$S_B = \frac{B|\cos\theta|}{r+c} + m$$

这里 S 是每种颜色的晕渲函数, R (红), G (绿) 和 B (兰) 是色彩, θ 是视光源的射线与三角形面的法线之间的夹角, r 是三角形到视光源的距离, c 和 m 是对 r 调整以便得到能够采用的操作阴极射线管的数的范围。

为使图更现实, 将一个虚构的白光源置于观察者的观察点上。这个作用产生镜面反射的白光, 它使强度从与到观测位置的线成正交的曲面上的纯白, 变化到当正交于曲面的线垂直于引自观测位置的线时, 完全没有附加的白光。

为了产生全色谱, 可同时用红、绿、兰中的两种或多种滤光镜曝光来调制阴极射线管的射线来扫描, 实现主要色彩间的调配。例如, 红与绿等量混合, 结果就是黄的。当兰和红混合时, 结果就是淡紫色的。色比的变化等价于附加一个晕渲函数 S_i 。

这里所举的例子表示航磁、重力、和地形资料的彩色晕渲透视。航磁和重力数据的相互关系也表示出来了。这些数据代表蒙大拿州落矶山与大平原边界附近的 20 哩 $\times$ 30 哩的区域。全部数据都是在一个普通的 2 哩网格上数字化的。重力数据取自史密斯 (1970), 航磁和附加的重力数据取自马奇等 (1968)。地形学的数字化取自 USFS 的 15 分图幅地形图。

图 6a 表示蒙大拿州中西部的航磁场 $m(x, y)$ 的彩色透视。在这个图中观察者正在地平面上 20 度处直接朝北看; 图上表示出的从绿到红的色谱相当于 +3860 到 +4720 伽马。着色的变化迭合在也代表磁场值的晕渲面上。最大的异常约 +600 伽马, 可在主要是红色色调的东北角上看到。较小的异常在图的另一角。西南角上的正异常代表 +100 伽马的异常, 相当于黄的色调。

为了论证透视图的关系, 将进行数字化所用的原始磁测图示于图 6b。靠近斯卡皮戈特山的大异常可清楚地看出来具有橙色色调, 相当于 +300 伽马的异常。右上角那个较大的 +700 伽马的异常在图 6a 中有红色的色调。史密斯 (1970) 将这个异常解释为与沿着斯卡皮戈特一班纳太尼重力带的大的北东向基岩侵入有关。图 6a 左上角和右下角的较小的正异常分别相当深埋的侵入体和地面火山区。

图 6c 表示蒙大拿州中西部布格重力场 $g(x, y)$ 的北视透图。曲面的地形特征刻画重力场的形状, 而从绿到红的色谱代表 -160 到 -135 毫伽的范围。

透视显示的另一有益应用是说明两变量之间的关系。图 7a 为图 6a 和图 6c 的磁场和重力场的相关曲面的北视球面投影图。这个相关是用零滞后逐点互乘得到的, 即重力场集的每一个 x, y 点都用相应的磁场值去乘, 然后归一化。其后, 将这些值用彩色的形式显示在曲磁场曲面上, 用球面投影对表示相关的程度。红色意味着最大的正重磁相关幅度, 而绿色表示最小的代数的相关系数, 这时或者是由低值或者是由高值变量相乘获得低值变量。

透视图的一个极为有益的应用就是建立球面投影模型, 图 7a 就是一例。在理想的原点作一次观测, 然后移动一个弧形距离到新的假想的相应于目视眼睛位移的观测位置。这个目视的位移相当于图 6a 观测位置的 4 度。注意这个表示的良好球面质量和理



图6b 蒙大拿州中西部航磁等值线图。等值线间距20伽马

解异常的程度。这个技术能使解释员从任何需要的位置观察一组地球物理数据，并可在三维中比较异常的相对大小和鲜明性。

在西南角显然有一个大的相关异常。那里一个大的正重力异常与一个突出的磁异常良好地相关，并由红的色调指示出来。此外，在东北角一个大的磁异常与一个正的重力异常良好地相关，并由图 7a 东北角上大的从白到红的特点表示出来。注意白色曲面的存在，它相当于为逼真而虚构的白光源。这后一个特点被史密斯解释为称之为斯卡皮戈特一班纳太尼重力带的主要的前寒武系基岩侵入至少向东北延伸了 110 哩。

图 7b 表示相应的该地区的实际地形数据的透视图。在此图中，由红到绿的色谱相当于 2900 呎到 10,100 呎的高度范围。山区与平原之间的过渡引人注目的效果是清晰可见的，地形影响与相应的重、磁异常的关系也容易找出来。

从图 7b 观察显然有若干地形特征是被遮蔽的。为了观察这些被遮蔽的特征，简单地向右旋转 35 度得到一个新图，就象是观测者变到一个新位置一样（图 7c）。这个技术允许观测者从任何位置观察弄淡了的以及遮蔽了的特征。

结 论

人机联作计算机图解已经应用到地球物理模拟，地震数据处理以及二维和三维数据显示了。重力、磁法、电法和激发极化法可用人机联作控制合作二维模拟以控制数据和变数。阴极射线管已用于显示观测的和理论特性曲线图和地下模型。这些技术已显示出是地球物理解释的新的有效工具，并且与一般的成组处理相比时间节约了，几天的工作量几个小时就能完成。地震资料处理已利用人机联作系统设计和实现滤波和反褶积因子。地震剖面在阴极射线管上用从黑到白的半色调变密度图显示。

三维曲面的二维表示已经用彩色晕渲透视图进行显示。它们包括重力、航磁、地形以及相关数据。而且，这些图可以改变和旋转到任何观测位置，允许解释员以任何比例尺、在任何假想的观测位置目测数据的若干个变量。此外，可以得到这些数据的球面投影图，可以做地球物理数据的、真正的四变量显示。

总之，在地球物理学中应用计算机图解已大为减少解题和显示需要的时间。因为地球物理学家可以直接根据解的显示进行判断，对数据的快速解题和同时进行图解观察可以更快更好作出解答。他可以完全专心致力于显示解答而不是像一般的成组处理和数字数据绘图那样等待一个长的循环时间。这些技术表明将来人机联作计算机图解在地球物理学中将产生有意义而又高效率的解题方法。

（物探局研究所情报组译自《Geophysics》V·37·NO·5）