

大峡谷附近航空时间域电磁数据的校准

Laura Davis¹ 贾瑞忠¹, Ross Groom¹

Petros Eikon Inc., 加拿大

电子邮件:rjia@petroseikon.com

简介

航空时间域电磁法 (TEM) 是一种流行的矿产资源勘测的地球物理方法, 可允许大面积进行勘测。有几个不同的系统, 包括固定翼系统, 如 MEGATEM 和 GEOTEM (Fugro Airborne Surveys), 及载有位于发射线圈内的接收器直升机系统, 如 VTEM (Geotech Ltd) 和 AEROTEM (Aeroquest Airborne)。然而, 有关航空时间域电磁数据是否可以定量应用的研究还很少。航空时间域电磁法通常用于定性研究, 以寻找导体。

我们研究的目的是, 通过使用地面时间域电磁数据作为航空数据的校准, 来确定航空时间域电磁法是否可以定量用于沉积环境的解释工作。地面时间域电磁法有一个较长的应用历史, 其建模源代码已有很长时间。我们首先确定地面数据模型。然后, 将该模型的航空模拟数据与实测航空数据比较, 以试图找出造成差异的原因所在。虽然地面勘测和航空勘测的分辨精度不同, 它们所代表的总体结构应该是一致的。

我们的校准区域位于大峡谷附近, 该地区进行着大量的角砾岩筒铀矿床探测工作。该区有已知的角砾岩筒, 而且是 Uranium One 公司进行深入研究的一个区域。角砾岩筒的地质背景是一个相对平坦的沉积岩序列, 包括灰岩, 砂岩和页岩(见[1])。孟科匹 (Moenkopi) 地层位于表层, 由砂岩和粉砂岩组成。位于孟科匹地层下面的是凯巴布(Kaibab)石灰石和 Toroweap 地层。再下面的是 Coconino 砂岩层以及 Hermit 页岩层。试验区所在地的 Coconino 砂岩层相当薄。位于 Hermit 页岩层下面的是 Esplanad 砂岩, 其为 Supai 组顶层。邻近地区的地质资料是从 Uranium One 公司的位于试验区南部工作地得到。钻井记录一直延伸到了 Hermit 页岩层。

方法

进行时间域电磁勘测时, 采用了一个带有 TEM 67 发射器 (Geonics) PROTEM 系统, 沿着南北两条线, 线距 100 米, 发射器线圈位置固定。基频是 30 赫兹, 测量了 x, y, z 三个分量。之后, 使用 ZeroTEM 系统 (Zonge 公司) 在发射线圈内及靠近发射线圈的多个测点收集了数据。此外, 在校准区 100 米的南部又采用 MaxMin 系统收集了一些数据, 系统设定

为发射器与接收器同时移动，采用几个不同频率，两个不同的发射器与接收器间距。在这个测区还收集了两个偏振的 VLF-R 数据。

在 2007 年使用 MEGATEM, GEOTEM, VTEM 系统收集了航空数据。Fugro 数据最初有 5 个通电时间窗口和 15 断电时间窗口，但为改善浅层分辨率重新定位窗口后得到 20 个断电时间窗口。VTEM 数据包含 28 断电时间窗口。虽然 Fugro 数据收测量了三个分量，在这里只讨论 z 分量。Fugro 数据中 z 分量质量较好，VTEM 系统只收集 z 分量。

两条 GEOTEM 测线位于大约与地面测线相同的东西位置。离地面勘测区最近的 MEGATEM 和 VTEM 测线大致位于两条地面测线之间。这些为本报告中提到的测线。

我们使用 EMIGMA 版本 8.6 (PetRos EiKon, 2011) 来做地层模型和一维反演(见 [2], [3])。航空数据的校准通过下述步骤进行：

1. 使用多测点 PROTEM 数据的一维反演建立地球分层模型。
2. 将所得到的 PROTEM 模型与钻探结果进行比较。
3. 用得到的 PROTEM 模型进行正演得到 ZeroTEM 系统模拟数据，再与 ZeroTEM 实测数据比较。
4. 用得到的 PROTEM 模型分别产生 MEGATEM, GEOTEM, VTEM 系统模拟数据，以确定航空数据是否与地面数据一致。在可能的情况下，波形文件被用来确定正确的航空系统参数。
5. 如果可能的话，分析评估任何地面和航空数据之间的差异。

地面结果

Geonics 固定发射器线圈的时间域电磁法

初步建模得到的一个四层模型被用来作为四层信赖域反演的初始模型。反演中用的是最靠南的 11 个测点的 Hz 数据，它们位于 650E 测线上（离线圈中心 1300 至 2300 米以南，偏离线圈中心 100 米）。反演结果是模型 4S，该模型与整个勘测的 Hz 和 Hx 相符。Hy 的质量不够好，不足以用来做解释。仅仅一个分层电阻率模型可以满足所有的数据，这表明地下结构在整个勘测区域几乎是一致的，并为我们这些研究提供了一个不寻常的样本。正演和反演工作中，接收器的上限带宽设为 17 kHz。

我们将地质背景电阻率结构与模型 4S 进行了对比。电阻率为 $123 \Omega\text{M}$ 的顶层被认为是低电阻率的孟科匹 (Moenkopi) 地层。此电阻率对以石灰石为主的 Kaibab 和 Toroweap 层太低，因为在该地区没有 Moenkopi 层的其他测区，EM 的数据表明，在表层有一个较高的电阻率。VLF-R 和高频率的 Max-Min 数据也表明视电阻率约为 $120 \Omega\text{M}$ 。由于这两个方法对深层结构并不敏感，检测到的视电阻率应约孟科匹层的电阻率。模型中的孟科匹层厚度

(40 米) 的也大致与南部孟科匹层钻空样本厚度吻合, 其平均厚度为 46 米。

低于孟科匹电阻层的是 Kaibab 和 Toroweap 层。进一步正演发现, 通过电磁法不能区分这些层。始于 263 米的深度的 $40 \Omega M$ 层为 Coconino 和 Hermit 组合。作为含盐流体 Coconino 可能导电性较强。虽然它在这个区非常薄(钻探结果表明约 2 米厚), 由于含盐流体的高电导, 我们的正演表明我们应该能够探测到该层。但事实上我们探测不到 Coconino 层, 我们怀疑该层含盐流体并没有期望的那样丰富。由南部钻空样本得知 Coconino 层顶部的深度是 260-280 米, 因此模型中的深度与钻探结果一致。模型中的最底层被认为是 Supai 组(砂岩和粉砂岩)。钻孔延伸到了 Hermit 层。

解释地面数据的衰变须用模型 4S 中所有四层。然而, 在较短的间距和线圈内测量, 系统对第四层不是特别敏感。一个三层利用单测点数据的信赖域反演, 并只用最上面三层作为初始模型给出较好的接收器位于线圈内的结果, 但线圈外结果较差, 特别是在大间距情形。相反, 只采用底部的三层为初始模型的一个三层反演即不与数据相符也不同于与模型 4S, 这点对线圈内早期时间窗口最明显。这表明结合线圈内外数据来确定地质背景电阻率结构的实用性。

Zonge 公司固定线圈时间域电磁法

Zonge 公司系统与 PROTEM 不同, 没有监测脉冲, 模拟前需要对一些系统设置作调整。一旦作了调整, 模型 4S 就拟合 Zonge 公司的数据。

航空结果

MEGATEM (Fugro 航空)

通过使用校准试验区上空飞行的波形文件, 仔细检查脉冲宽度, 偶极矩, 发射器与接收器间距和窗口位置, 用模型 4S 模拟出了校准试验区 MEGATEM 数据。以一个半正弦波脉冲用来表示电流波形。

如果上限带宽设为 4 kHz, 由模型 4S 模拟的数据与 4200N 以北的 MEGATEM 数据拟合。请注意, 使用适当的带宽是模拟早期时间窗口数据的关键。如果使用更高的带宽(如 17 千赫), 第一个时间通道的模型数据将高于实测数据, 但在随后的早期时间通道会太低。4 kHz 的带宽, 拟合早期时间窗口数据, 也与波形文件一致。

位于 3000N 和 4200N 之间, MEGATEM 实测数据显示出一个变化, 这在地面数据中并未观察到: 4200N 以南的早期时间窗口模拟数据稍微小了一些。这个差异随着南移而上升, 中期及后期时间窗口数据仍然拟合。这个现象也在 GEOTEM 和 VTEM 数据中出现。要想调整模型, 以适应南端早期时间通道的增加幅度, 需要加入浅电导。增加电导可通过以下几个因素来达到: 减少表面层(Moenkopi)的电阻率, 增加表面层厚度, 或另加入一个较薄的近地表层, 其最大电导为 0.25 S。

试验区南端采集的 VLF-R 和 MaxMin 数据排除了降低表面层的电阻率的可能性。而从位于南 100 米的几个钻孔获得的钻空样本排除了增加表面层厚度的可能性。正演显示，地面数据对勘测区南端具有这样电导的薄浅层并不敏感。航空模型中需增加浅电导层的位置正处于 VLF-R 和 MaxMin 系统勘测区域。这两个勘测结果一致显示，不能近地表来增加电导。另外，理论上讲，也不可能出现浅层电阻率下降，原因是该地区水分缺乏，高温和干旱的环境造成浅层物质中的水分迅速蒸发的。从地质角度来看唯一剩下的可能性是更深的位于 Moenkopi 层内或其基底部的低电阻率层。

虽然模型 4S 适合的 MEGATEM 数据，单独研究 MEGATEM 数据不会得到这样的 4 层模型。该系统对 Supai 组的灵敏度有限，无法探测到它。

GEOTEM (Fugro 航空)

GEOTEM 结果与 MEGATEM 结果非常类似，但 GEOTEM 数据比 MEGATEM 数据噪音更大。如果使用 6 kHz 的带宽，模型 4S 与 4200N 以北的 GEOTEM 数据相符。但在 4200N 南，象 MEGATEM 一样，浅层电导率需要增加。

在一段距离以外附加测点，测得了 GEOTEM 和地面数据。研究发现对于 6 kHz 的带宽，地面模型与 GEOTEM 数据相符。此外，该带宽也与波形文件一致。请注意，这个带宽比为 MEGATEM 带宽略高。虽然这两个系统使用相同的接收器线圈，两个系统之间还有其他的差异。

VTEM (Geotech Ltd)

波形文件中的数据是电流波形的导数，但是，我们没有有关这个文件中的资料是如何收集到的详细信息。正演用的电流波形为波形文件的积分形式。为代表电流波形，我们利用作为地面系统的标准通电法，指数波形通电，以 77% 的四分之一正弦波形为断电。

当采用模型 4S 对这个波形的 VTEM 系统进行正演时，后期时间窗口模拟数据过大，而早期时间窗口模拟数据过小。早期时间窗口数据的差异可能是由于时间窗口定位错误所导致的。如果时间窗口向脉冲结束点移动 0.03 毫秒，除第一窗口外，模拟和实测数据之间的差异为 1.15 倍。因此，一种可能性是，时间窗口的定位不正确。我们认为这可能是由于 Geotech Ltd 对脉冲结束点的定义所导致的，但与 Geotech Ltd 的讨论表明，他们的定义与建模软件使用的一致。因此，对这个问题我们没有一个满意的解释。

Geotech Ltd 公司所提供的 VTEM 数据已消除偶极矩因素。模拟和实测数据之间 1.15 倍之差异可能是由消除偶极矩因素导致的，这也可能仅是原因之一。例如，发射器多个绕组的效果可能没有被校准，或可能是发射器线圈面积计算有误。此外，我们也不知道偶极矩因素是如何被消除的，换言之，是否使用高峰的偶极矩，及高峰的偶极矩是如何确定的。这个问题一直没有得到解决。

因此，我们发现，如果做一些系统参数的改变，VTEM 数据可与地面数据校准。这说明充

分了解系统参数对准确建模的重要性。请注意，数据是在 2007 年收集的而航空系统是不断发展的。

结论

航空数据与地面模型基本相符，但从 4200N 向南的浅层电导略有增加，并在校准区南端达到最大。然而，将浅导电板加入勘测区南端，再对地面勘测进行正演的结果表明，地面勘测对导电性横向变化的敏感性有限。因此，所观察到的航空数据的在南北变化并不与地面数据结果矛盾。

我们的研究已经表明，航空的时间域电磁法数据可用于定量解释。因此，它可以被用来确定矿产资源勘测和其他应用(包括地下水的研究)中的地质背景情况，见[4]。

但是请注意，为了使 VTEM 数据与地面数据校准，必须调整一些系统参数。总的来说，我们的结果强调确切地知道系统参数对有效解释航空时间域电磁数据的重要性。这些参数包括如脉冲宽度，确切的窗口位置，接收器线圈的脉冲响应，及波形细节。这些方面都必须在正演和反演中准确地应用。

根据我们的研究结果，我们建议，当航空数据被定量使用时，尽量为航空时间域电磁勘测建立一个校准区。校准区用来检查航空数据的质量是否适合定量的应用，以及是否充分了解系统参数。

参考文献

- [1] Beus, S. S. and M. Morales, eds. 2002. Grand Canyon Geology, Second Edition: Oxford University Press.
- [2] Groom, R. and R. Jia, 2005, On time-domain transient electromagnetic soundings: 18th Annual Meeting, SAGEEP Proceedings, 514.
- [3] Jia, R., and R. Groom, 2007, Enhancing Model Reliability from TEM Data Utilizing Various Multiple Data Strategies: 20th Annual Meeting, SAGEEP Proceedings.
- [4] Dickinson, J.E., D.R. Pool, R.W. Groom, and L.J. Davis. 2010. Inference of lithological distribution in an alluvial aquifer using airborne transient electromagnetic surveys [J]. Geophysics, 75 (4): WA149-WA161.