

# 电磁法在工程地质勘察中的应用\*

李文录

(广东省地震局, 广州)

**提要** 本文采用有场源电磁法勘探粤东沿海广(州)深(圳)珠(海)及深(圳)汕(头)南线等高速公路工程, 勘探使用美国GDP—12及加拿大EM—37电磁数据采集系统。文章论述了时间域与频率域的多种电磁法装置在桥梁、互通、遂道及软土公路工程中的地磁物理应用前提及它们的应用环境、工作效率、勘探深度等, 低阻覆盖下的地质分层及断层产状性质等问题是本文探讨要点。文中例举了多种装置的电磁异常场剖面图及其曲线形态: 对磨刀门桥址西江断裂的电磁异常剖面曲线形态、特征作了构造地质解释, 认为该断裂系由两条主干断层组成的蠕滑断层组。上述工程地质解释结论已作为工程勘察设计依据。有的电磁异常已被工程地震及钻探证实。

**关键词** 电磁法勘探 粤东沿海 高速公路 西江断裂

公路交通是国民经济发展的重要前提和命脉。1988年至1990年间, 我们先后使用美国ZONGE公司GDP—12及加拿大GEONICS公司的电磁数据采集系统, 采用频率域电磁测深法(CSAMT)及瞬变脉冲电磁法(TEM), 其中包括中心及重叠回线法, 长导线法(LOTEM)及框内(外)回线法等, 在粤东沿海地区的广(州)深(圳)珠(海)、深(圳)汕(头)南线高速公路工程及珠海市磨刀门和汕头市妈屿岛特大桥梁等工程场地进行了工程物探勘察。并应用电磁测深处理解释软件在电脑上做了室内的计算反演和绘图打印等工作, 取得了丰富的电磁异常剖面图件及其地质解释图件。所得结果得到有关工程设计部门的充分肯定, 及工程设计科学依据。有些由电磁场所解释得到的重要工程地质问题已为工程地震勘探所验证, 有的已被实地钻探揭露证实。

电磁法勘探是工程物探中一项较新的勘探方法, 应用于公路工程地质勘探尚属先例, 而其使用的地球物理场前提和应用环境是本勘探方法的关键环节之一。在山区互通、遂道公路工程中开展音频电磁测深及桥址水域开展瞬变电磁法(中心回线或重叠回线)对勘察基岩起伏及低阻断层是极为经济有效的勘探方法。

然而, 应用电磁勘探工程地质问题只能定性或半定量解释方法进行工程地质解释, 故对勘探中的电磁异常尚须研究和探讨。

## 一、电磁法在工程场地中的应用前提和环境

有场源电磁法是应用各种装置的电(磁)偶极子场, 其交变场与地下地质体互感作用, 形成环流电磁场。其互感的程度与地下地质岩体, 构造和异常体的导电与导磁性的差异, 形状大小及其间路途、方位等因素相关。观测和研究电磁场空间及时间分布规律来解释工程场

\* 地震科学联合基金资助课题, (90013)

本文1991年11月27日收到

地问题以达到勘察工程场地目的。

工程物探中的电磁法是利用工程场地良导地质体电性、形状等差异来达到勘探效果，有场源电磁法中的各种电(磁)偶极子装置对不同工程项目地下的良导地质体所产生的电磁异常场灵敏度是各不相同的。即工程场地地下同一地质导体对各种装置所获得的电磁异常场幅度及异常曲线形态会有差异，其解释效果明显不同。故电磁法在不同工程项目中有着不同的应用前提和环境。下面分四种装置分别叙述。

### 1. 重叠(中心)回线法

它属时间瞬变电磁法，利用不接地框架回线向地下发送交变脉冲电磁场，在一次磁场间歇期间利用同一回线或另一组回线(中心回线一般比发射线圈小)接收地下良导体感应出的二次磁场，该二次磁场是由地下良导地质体受电磁场激励引起的涡流所产生的非稳定场。利用瞬变二次场信息确定电磁异常曲线，进而解释其良导地质体产状及电性等特征。在高速公路勘察中，我们首次应用重叠(中心)回线法勘探低阻水域覆盖桥址工程场地勘探基岩、破碎断层及基岩起伏面取得较好效果。

桥址水域一般采用中心回线装置时其发射线圈为 $20 \times 20\text{m}$ 方框架。收发线圈在水面随船漂载，工作效率高，装置移动轻便。但这种装置在山地平川互通、隧道、软土等工程勘探时因植被阻拦而工作效率大为降低。前述工程一般要求勘探深度为 $100\text{m}$ 。故其收发线圈框首及脉冲电流均可减小，使装置及移动更为轻便。由于收发线圈重叠或收线圈位于发射圈中心。对二次场有较高的接收信号电平。对导电覆盖层下的直立板状(断层)尚有较强的电磁异常分解能力(尽管直立断层与回线电磁感应耦合较差)。其水域中心回线勘察桥址电异常剖面图如图1、图2、图3所示。由于瞬变电磁效应中“电流环”的传播将逐渐局限于较围

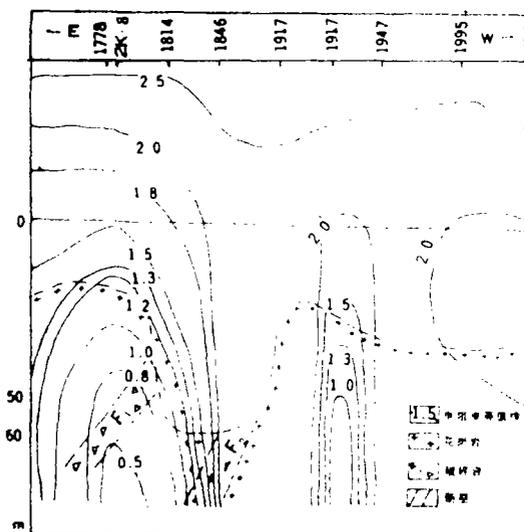


图1 磨刀门大桥剖面ps断面和地质解释图

Fig. 1 The Ps and geological interpretation of main pseudosection in Modaomen bridge

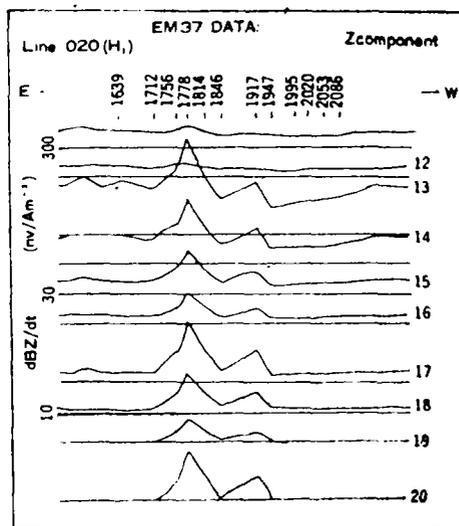


图2 磨刀门大桥轴剖面二次电位异常图

Fig. 2 The anomalous response potential curve, about main pseudosection in Modaomen bridge

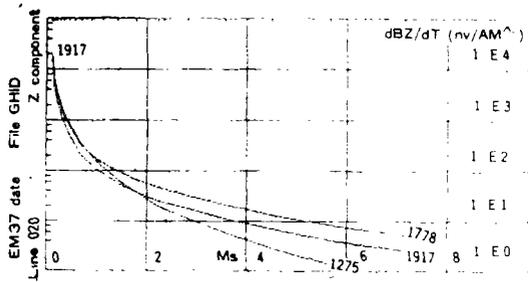


图3 瞬变衰域时间谱曲线

Fig. 3 Spectral decay curve of TEM

岩为导电的地层里，电场最大值（或电流环）逐步被限制在中间导电层，故对含水低阻破碎断层，特别是其断层倾角较小的低阻层有较高勘探灵敏度。

2. 大框内（外）回线法

本法属时间域电磁法。瞬变电磁系统中，信噪比随发送磁矩增大而提高。故大框回（内或外）中应尽可能有大的发送矩（一般大框圈线 $200 \times 300\text{m}$ ）。由于发送源固定，可以加大电源功率（一般电流为 $20\text{A}$ ），因此，这种装置具有发射磁矩大，场强均匀、随收发距衰减慢及勘探深度深等优点。较适用于水陆边缘的工程场地电磁法勘探。但又因其铺设大回线装置笨重费时，效率低等不利因素，故只适用于工程场地详查。但一旦铺设好回线，其接收圈线能多条剖面多台接收仪器一齐工作，其工作效率又比重叠回线要高。图4为海门大桥桥址水域主剖面框外回线二

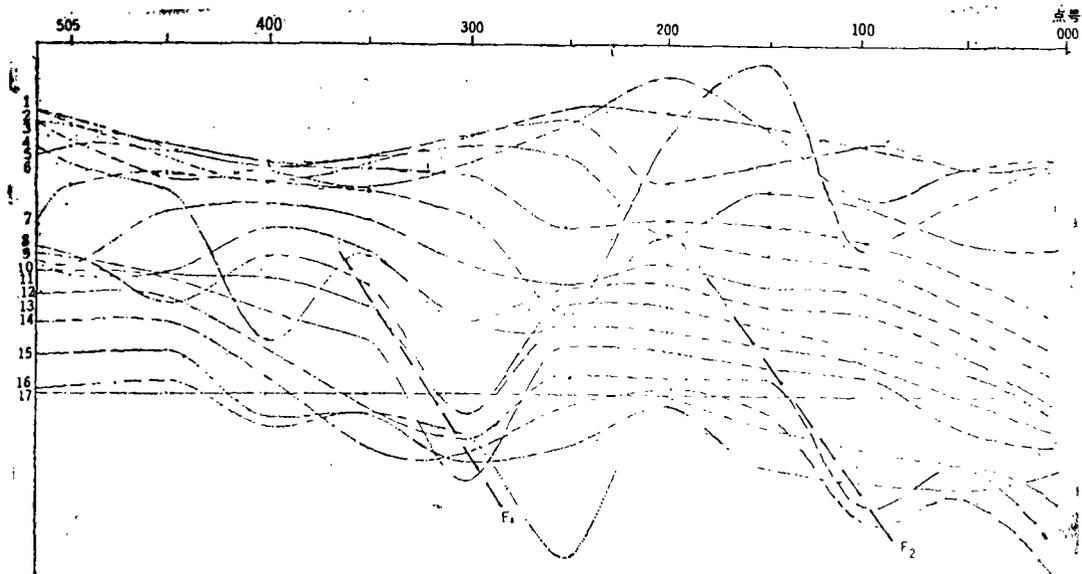


图4 海门大桥桥址主剖面框外回线二次电磁异常曲线

Fig. 4 The anomalous response curve in out-loop setup of electromagnetic field about main pseudosection in Haimen bridge

次电磁场异常曲线。图中因基岩断层引起的电磁异常尚清楚。而其定性解释断层产状较为困难，解释的人为性较大。特别是框外回线水域勘探作业时，由于框外电磁场在一定距离后衰减较快，接收二次场信息较差，不太适合水域宽的工程场地。且由于大框回（内或外）装置的围岩效应是随接收点移动而变化的，尤其在框外回线具有复杂的时间特性。故框内（外）回线装置是地质噪声较大的装置。

### 3. 音频电磁测深法 (CSAMT)

它属频率域电磁测深。利用接地电偶极源装置。即在相距约 1 km 埋设二组接地电极，并向这二组电极发送各种频率点的交变脉冲电磁场。以电偶极子长为弦的 45 度扇形“远区”剖面作电磁分量接收。改变发送频率点在测点对应得到卡尼亚电阻率而达到取得不同深度地层的良导地质体信息。由于电偶极源装置固定于工程场地外某点，只需观测记录点沿剖面移动，即可获得所需的数据。故特别适用于山区互通、隧道等高速公路工程场地的勘察。其工作效率及勘察效果是其它装置所不及的。但无线通讯设备一定要好。

本方法的勘探深度约为  $356 \sqrt{\rho/f}$  ( $\rho$  为测点电阻率  $\Omega \cdot m$ 、 $f$  为频率  $H_z$ )。低阻复盖区(例如公覆路软土工程)，因其地下电阻率极低，会使有效勘探深度减小。在前述工程的互通、隧道场地勘察时我们曾对非远场校正做了许多研究，而电磁异常幅度及形态没有得到改善，而对有干扰测点进行静态校正 (STATIC CORRECTION AND ALSO STATIC CORRECTION 相位和振幅校正) 对取得地下真正电磁异常信息是有效的，如图 1、2 所示。在 CSAMT 法应用中上述前二个注意问题在山区的互通、隧道等工程场地是不成问题的。

CSAMT 法勘探前述工程场地所得到的电磁异常信息较多，测点观测到的电磁分量振幅及其相位差能得到相应的视电阻率断面图和电磁相位差断面图，如图 5、6 为中山市石岐港

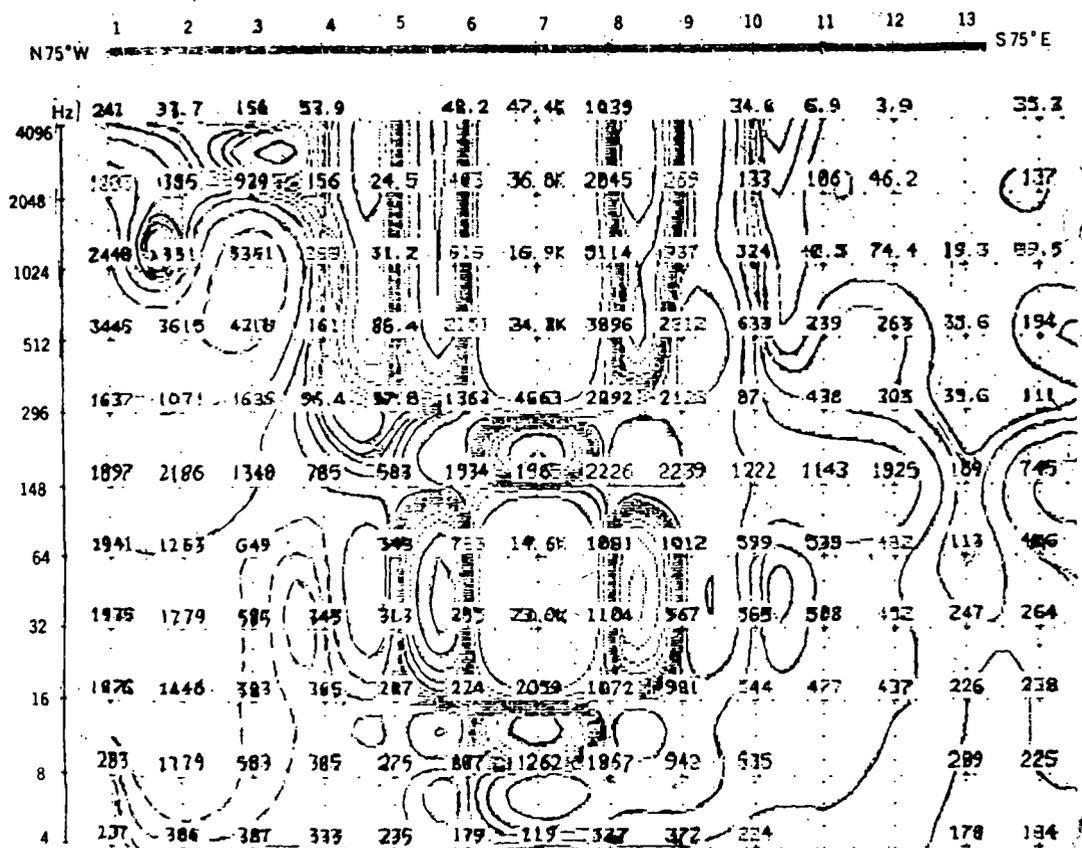


图 5 中山频率电磁测深 ps 断面图

Fig. 5 The Ps pseudosection of frequency domain magnetotelluric sounding in Zhongshan

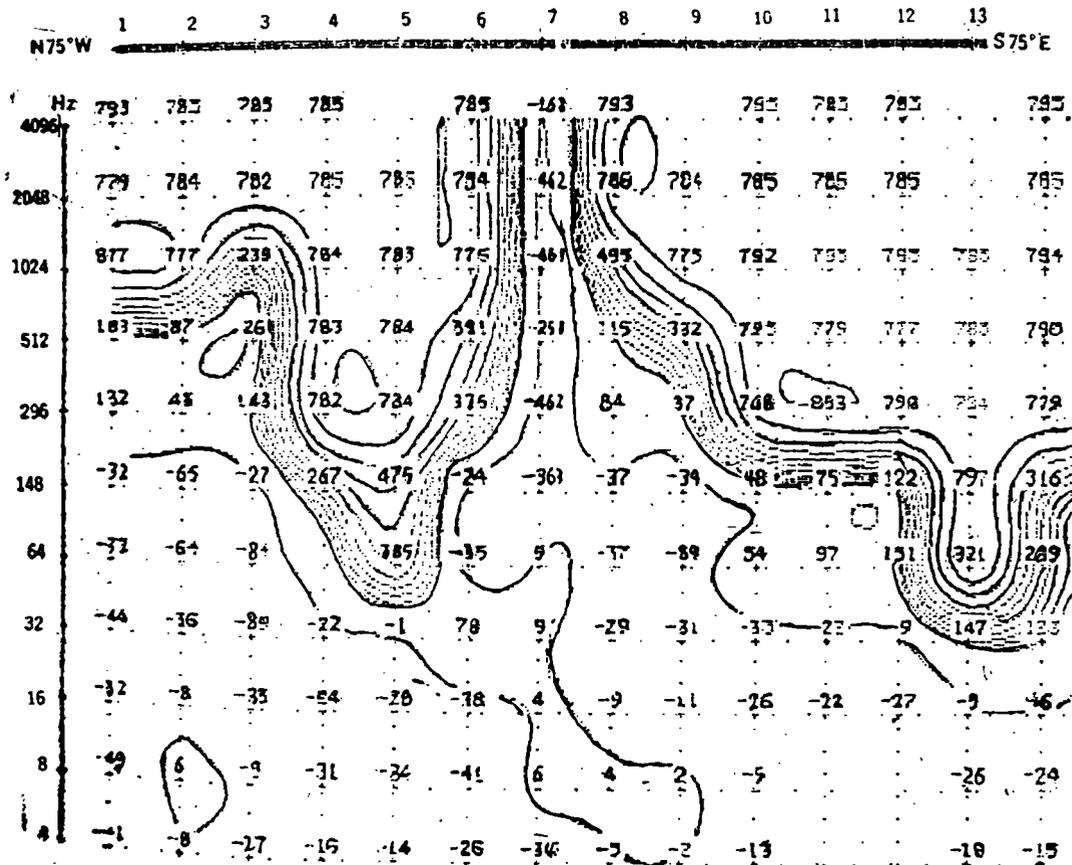


图6 中山频率域电磁测深电磁相位差断面图

Fig. 6 The phase difference pseudosection of frequency domain magnetotelluric sounding in Zhongshan

口桥 $\rho_s$ 及相位差断面图。图中卡尼亚电阻率及相位异常剖面清楚反映了其地下二种地质岩性分界形态。对地下存在的低阻破碎断层,本方法有更为灵敏电磁异常。特别在因高压线干扰下场地,电磁异常振幅信息受磁饱和干扰无法解释时,其电磁异常相位差剖面尚能较好反映地下地质体异常。

#### 4. 长导线瞬变电磁法 (LOTEM)

它属时间域电磁法,其激发场源如同CSAMT的电偶极子装置,不同时它发射的间隙脉冲方波。我们曾在南沙蕉门水道做过这种方法。但从早晚期视电阻率剖面图中很难判断真正因地质良导体引起的电磁异常。这可能是用于水域测点离电偶极源较远其二次场电磁信息较弱,所加接的前置放大器噪声大造成接收信息正负号,且在桥址水域进行这项方法装置时其电偶极子源导线要穿越河流而因水流造成装置的变形等因素共同影响的结果。

## 二、西江断裂电磁异常的探讨

磨刀门设计桥址位于珠海西南侧的西江出口挂定角。其西江断裂被物探地质资料认为在西江的水域通过。有关电磁法资料认为其主干断层在距桥址东岸780m的主航道附近通过,并

认为它是主干断层电磁异常场中心,其结论为:主干断层为低阻破碎断裂,向西陡倾,其断层走向为 $N35^{\circ}W$ ,电磁异常对应断层宽度约100m,主干断层表现为基岩上下错动,为正断层。

图4为上述测段视电阻率断面图。在1817至1947号测点间的低阻与高阻异常较为清楚。我们用EM37系统RECTAN(Version4.09)电磁测深正演软件计算解释了这异常段地层埋深。其解释结果如图4虚线所示。在1778号测点附近基岩隆起向西急剧变深,基岩凹陷中心在1846号测点附近。视电阻率异常段基岩大起大落,可明显发现基岩上下逆冲错动。由上述推断西江断裂主干断层组如图4的 $F_1$ 与 $F_2$ 展示。从图中视电阻率异常形态可以推测这组断层倾角较大。以上推断可从ZK—8钻孔揭示—49m深处有挤压破碎带得到证实,其破碎带厚约10m(电镜扫描破碎带石英形貌活动时代为早更新世至晚更新世)。图中1778号测点西侧无电磁异常而低阻异常在电磁测深反演为基岩隆起部位。而1846号测点高阻异常反而为基岩凹陷。众所周知,低阻挤压破碎断裂基岩隆起是最易受风化、蚀变和河海冲刷,更不能为隆起。恰恰相反,其坚硬高阻基岩不易受风化蚀变和冲刷为深沟,其低阻及高阻异常原因笔者初步认为是基岩起伏大造成视电阻率整体低阻或高阻假异常,而真正基岩低阻是由于基岩凹陷段向北东倾斜的低阻破碎挤压断层组 $F_{1,2}$ 引起。

图5为二次电位异常剖面,因其早期道二次电压( $dBz/dT$ )曲线基本反映导电覆盖层水的信息,故已从图中略去。而晚期道曲线则反映桥址基岩良导体异常特征。图中可见其 $dBz/dT$ 剖面异常范围为1756至1917号测点。电磁异常曲线呈幅度不大的非对称双峰。参“地面脉冲瞬变电磁法—物理模拟图册”中图26(两倾斜板组合的异常剖面曲线)。其地下基岩二组砾立低阻断层异常体在水面投影应在1846号测点,倾向应视为北东。从低频道(6.25Hz)晚期电磁异常曲线形态却为单峰。其异常中心在1846号测点东侧,并随晚期延时增加异常曲线峰值向北西倾斜。笔者认为基岩的二组断层的西北侧断层随晚期延时增长而西北侧低阻断层显示使异常峰值向北西向倾移原因。从而更说明二组低阻断层,向北东倾斜。

以上结论也可以从图3 $dZ/dT$ 瞬变衰减时间谱曲线中得以证实。很明显1778号测点瞬变衰减比相邻非异常段的二次场衰减明显变缓。说明在上述电磁异常段基岩存在低阻破碎断层组 $F_{1,2}$ 。同时从上述异常测段的Q形视电阻率曲线形态与邻区的H曲线明显差异更可证实上述低阻破碎断层组 $F_{1,2}$ 存在。

在上述桥址水域测区平行桥轴三条纵剖面电磁异常带存在相同形态电磁异常,其连线可以说明西江断裂主干断层组 $F_{1,2}$ 呈北 $35^{\circ}$ 西走向的逆断层。尽管横向剖面同样存在电磁异常。但其展布基本在纵向电磁异常的北西延长线或其附近。故笔者认为桥址区北东向断层存在可能性较小。

综上所述可得出桥址区西江断裂五条结论:

(1)西江断裂主干断层在桥址水域离东岸850m的主航道附近通过,其主干断层为二条断层组成的断层组。

(2)西江断裂主干断层组走向为 $N35^{\circ}W$ ,其倾向为NE、倾角大于 $70^{\circ}$ 。

(3)西江断裂主干断层组由挤压破碎低阻逆断层组组成,各断层的破碎带宽度约为10m。

(4)该断层的活动方式是以蠕滑活动为主。

(5)桥址水域测区内不存在北东向断层,或规模很小。

## 四、结 语

电磁法应用于工程物探主要研究其电磁异常场。而电磁异常场幅度及形态不但同地下良导地质体产状有关，还与其导电导磁性质有关，同时与其环境和装置有关。其定量反演解释难度较大，尚待进一步研究。

本文得到美国ZONGE公司卡松博士 ( Dr. NORMAN R. CARLSON ) 指导，在此表示感谢。

# APPLICATION OF ELECTROMAGNETIC METHOD TO THE PROSPECTION IN ENGINEERING GEOLOGY

Li Wenlu

( Seismological Bureau of Guangdong Province )

[Abstract] In this paper, the projects of expressways, such as Guang-Shen-Zhu and Guang-Shan expressways along the east coast in Guangdong province, are explored by the controlled source magnetotelluric method. And the electromagnetic data acquisition systems of GDP12 ( U.S.A ) and EM-37 ( Canada ) are used during the exploration. This paper also discusses the application of electromagnetic setups about time domain and frequency domain in engineering geophysics of bridges, cross roads, tunnels and soft earth expressways and their applied environment, working efficiency, exploration depth and so on. Some problems about geological layer distinction and the characters of faults occurrence in the lower resistivity cover are the main points to be discussed in this paper. Some pseudosections and anomalous curves in the electromagnetic field are illustrated. The shapes and characters of anomalous curves at the electromagnetic field of Modaomen bridge site where is located at Xijiang fault are also explained by tectonic geology. The designs of above-mentioned engineering explorations are based on the interpreted conclusions of the engineering geology. Some of the electromagnetic anomalies have been checked and proved by engineering seismic exploration and drill holes.

[Key words] Electromagnetic prospecting; The east coast in Guangdong Province; Expressway; Xijiang fault