

地球物理技术在识别海(咸)水入侵界线中的应用

——以莱州湾冲洪积扇区为例

刘宏伟,黄忠锋,郭旭,陈社明,杜东,苏永军,马震

(天津地质矿产研究所,天津 300170)

摘要:海(咸)水入侵是我国沿海地区的主要地质灾害之一,在一定程度上制约了沿海经济发展和生态文明建设,因此,识别海(咸)水入侵前缘界线对查明灾害发育现状和防治对策的制定具有重要意义。地球物理方法因施工方便、获取数据连续等优点成为海(咸)水入侵界线识别的重要技术手段。阐述了高密度电阻率法和 EH-4 法 2 种地球物理探测技术识别海(咸)水入侵界线的原理、依据,并以莱州湾南岸冲洪积扇区为实例进行了探讨。结果表明:这 2 种方法能够有效的识别海(咸)水入侵界线,并较好地与水质检测结果相吻合;高密度三维探测试验证明地球物理技术可以识别海(咸)水入侵界面的空间分布。

关键词:地球物理;海(咸)水入侵界线;莱州湾

中图分类号: P313

文献标识码: A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2016.09009

海(咸)水入侵是海岸带地区普遍存在的一种环境地质问题,海(咸)水入侵的发生缩减了淡水资源量、恶化了生态环境、造成了严重的经济损失。有关数据显示^[1],至 20 世纪初仅山东省受海(咸)水入侵的土地面积就达 1 478 km²,报废机井 500 多眼,减产粮食 4.44 亿 kg,造成经济损失约 5.94 亿元。因此,海(咸)水入侵的监(检)测与防治一直是水文地质研究的热点。检测海(咸)水入侵的技术方法很多,其中地球物理技术因操作灵活、可立体刻画海(咸)水侵入范围,被广泛应用于海(咸)水入侵检测工作。姜振蛟等^[2]、赵战坤等^[3]详细论述了电阻率法在海水入侵监(检)测中

的可行性;李福林等^[4]、杨学明^[5]等分别在莱州和昌邑应用电阻率法识别了海水入侵界线;A Cimino 等^[6]、F Jørgensen 等^[7]应用电阻率法分析评价了西西里岛北部、丹麦与德国边界的海水入侵状况。本文以莱州湾南岸冲洪积扇区为例探讨了高密度电阻率法和 EH-4 法 2 种地球物理技术在海(咸)水入侵界线检定和识别中的有效性,以期在海(咸)水入侵防治提供基础数据支撑。

1 地球物理技术应用原理

当受地下水开采或海平面上升等多种因素影响致使内陆地下水头低于滨海地下水头时,咸水会顺势入侵内陆地下水含水层,入侵区含水层中的地下水盐度会随之增加,地层电阻率值逐渐降低。地层电阻率值与地层岩性、地层结构、含水量和含盐量等相关,可表示为^[5,8]:

$$\rho_s = a\varphi^m S^{-N} A_c C^{-1} \quad (1)$$

式中: a 为常参数;

收稿日期:2016-01-22

基金项目:中国地质调查局项目“莱州湾地质环境调查评价”(12120113003800);亚发行水基金“Comparative research of groundwater management in the coastal areas in Southeast Asia”(RETA 6498);中欧水平平台 WATER4COASTS 项目

作者简介:刘宏伟(1982—),男,工程师,主要从事水环地质、海水入侵等方面的研究工作。E-mail: liuheny022@163.com

φ^m 为指数形式的孔隙度,与地层岩性相关;
 S^{-N} 为指数形式的饱水度,饱水带该参数可看做常量;

A_c 为水化学参数,与离子成分相关;

C 为盐度,是电阻率值的主要影响因素。

由于盐度与电阻率值具有良好的相关性,因此可根据探测电阻率值变化来检定海(咸)入侵。

2 常用技术方法介绍

2.1 高密度电阻率法

高密度电阻率法是一种电阻率的层析成像勘查技术,其以地下介质体的电阻率差异为探测前提,用直流电阻率法的阵列布设电极点,可进行二维、三维^[6]地电断面测量。

以 SuperSting R8/IP(AGI)高密度电阻率仪为例,其数据采集系统由主机、多路电极转换器、电极系 3 部分组成。主机通过通讯和供电电缆向多路电极转换器发出工作指令、向电极供电、接收及存贮测量数据。数据经处理模块剔除畸变点、校正地形后进行反演计算和断面图绘制,其工作流程^[10]如图 1。

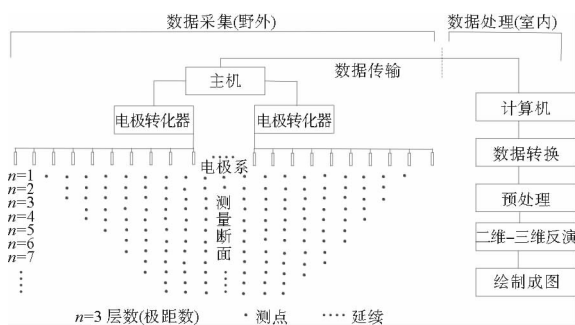


图 1 高密度电阻率法工作流程

Fig. 1 Working flow chart of the high-density resistivity method

2.2 EH-4 法

EH-4(音频大地电磁)法是一种可控源与天然场源相结合的电磁测深勘查技术,其观测的主要参数包括正交电场分量(E_x, E_y)和磁场分量(H_x, H_y)。若定义地表波阻抗为地表天然电场

与磁场分量的比值,则在均匀介质情况下,该阻抗与入射场极化无关,仅与介质电阻率和电磁场频率相关^[5]:

$$Z = \sqrt{\pi \rho \mu} \cdot f(1-i) \quad (2)$$

式中: Z 为介质波阻抗;

ρ 为电阻率;

μ 为磁导率;

f 为频率;

i 为虚数符号。

通过测量相互正交的电场和磁场分量可确定介质的电阻率值:

$$\rho = \frac{1}{5f} \cdot \left| \frac{E}{H} \right|^2 \quad (3)$$

上述公式适用于水平层状地层,但需要注意的是,测得的电阻率值会随频率变化改变。当地下介质体不均匀时,由式(3)可计算得到的电阻率为视电阻率。在一个宽频带上测量电场强度分量和磁场强度分量时,可通过改变并观测不同频率的电磁信号来获取不同深度地层的电性信息。

3 应用实例

3.1 地质概况

研究区位于莱州湾南岸,属暖温带半湿润季风型气候,兼有海洋性气候特征。地形南高北低,平均坡降 0.47‰。区内发育潍河、白浪河、弥河等多条河流。

该区属于华北平原东缘,发育 NNE 向郯庐断裂带,大地构造上属于胶莱地堑北段^[11]。前寒武纪结晶基底由花岗片麻岩和片岩组成,古生界由灰岩、砂岩、泥岩组成,中生界由砂岩、泥岩组成。古近、新近系厚度巨大,古近系为一套以泥岩、砂岩为主夹灰岩的含油沉积;新近系主要为细砂岩、泥岩。第四系地层沉积较厚,自南部 30~50 m 至北部超过 300 m,下更新统至中更新统岩性以棕色黏土和黄褐色粉土为主,夹粉细砂;上更新统岩性与现代黄河冲积物相似,为灰黄色粉土、粉砂互层,夹部分褐黄色粉质黏土;全新统一般均可三分,中部为海相层,上下均为陆相沉积层,但在近海岸区则常为海相层和滨岸相地层。受河流冲洪积作用的影响,研究区南部形成了潍河、白浪

河和弥河 3 个大的冲洪积扇,是地下水动力条件较为活跃的地带,也是海(咸)水入侵特征明显变化的区域。

3.2 地层电性特征

研究区上覆地层主要为第四系和新近系沉积物,含水层地下水埋深相对较浅,岩层多处于饱水状态,海(咸)水入侵区内地下水盐度成为地层电阻率的控制性因素。根据前人资料^[12]可知,区内咸水赋存地层电阻率值一般为 $1 \sim 10 \Omega \cdot m$,卤水赋存地层电阻率值一般低于 $1 \sim 2 \Omega \cdot m$,高浓度卤水(盐度 $> 100 \text{ g/L}$)赋存地层电阻率值最低在 $0.4 \sim 0.6 \Omega \cdot m$ 范围内;淡水赋存地层电阻率值一般介于 $10 \sim 30 \Omega \cdot m$ 之间,其中浅层淡水的电阻率相对高些,一般为 $20 \sim 30 \Omega \cdot m$,深层淡水的电阻率相对低些,一般为 $10 \sim 20 \Omega \cdot m$;不含水的地层或基岩电阻率一般 $> 30 \Omega \cdot m$,局部地段 $> 100 \Omega \cdot m$ 。不同盐度水体的电阻率差异是划定咸水和卤水底界的重要依据。

3.3 监测剖面布设

根据潍河、白浪河和弥河冲洪积扇发育特征,分别在 3 个区内布设探测剖面 I-III(图 2)。

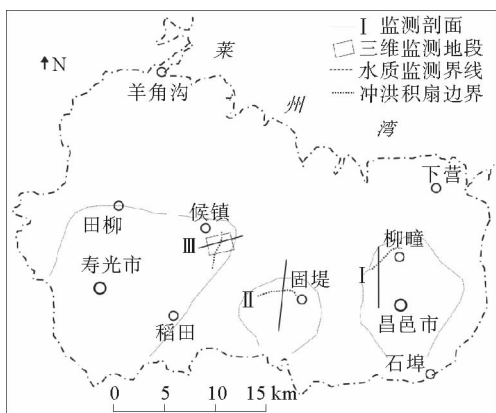


图 2 实例区及监测剖面位置

Fig. 2 Location of the case study and monitoring profiles

3.4 探测仪器、数据处理与质量控制

EH-4 法使用 EH-4 快速成像系统采集数据,使用 Imagem 软件进行数据处理及反演,使用 Surfer 软件成像。高密度电法使用 SuperSting

R8/IP(AGI) 高密度电阻率仪采集数据,使用 Earth image 2D/3D 软件进行数据处理及反演,使用 Surfer 软件成像。为控制质量,野外数据采集严格执行规范要求。尽量避免电磁干扰较强地段,检查点数量不少于总点数的 5% 且应分布均匀,及时检查数据点质量以考虑是否进行补测工作。

3.5 结果分析

(1) 潍河冲洪积扇区剖面 I

该剖面位于潍河冲洪积扇区西侧,长 4.9 km,点距 500 m,测线方位为 137° 。由图 3 剖面 EH-4 综合解译成果可以看出:

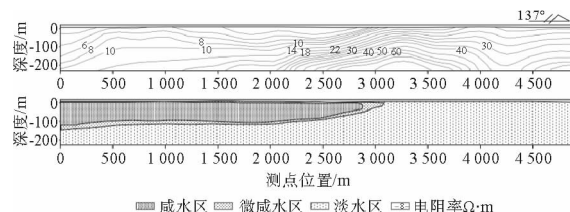


图 3 潍河冲洪积扇 EH-4 剖面电阻率反演断面

Fig. 3 Resistivity map of EH-4 profile in Weihe alluvial-proluvial fan

电阻率值呈现东南高西北低、浅部高深部低的趋势。剖面 -100 m 以浅 $0 \sim 2850 \text{ m}$ 之间电阻率值 $< 104 \Omega \cdot m$, 平稳连续, 且整体呈楔形分布, 反映为咸水体分布; -100 m 以深处电阻率值普遍 $> 124 \Omega \cdot m$, 反映为淡水体分布; $3100 \sim 4900 \text{ m}$ 电阻率值普遍 $> 10 \sim > 124 \Omega \cdot m$, 反映为淡水体分布, 深部高阻异常为基岩反映; $2850 \sim 3100 \text{ m}$ 呈现较好的电阻异常, 且连续呈条带状延伸到 0 m 起点 -140 m 深度, 电阻率值自 $1 \sim 10 \Omega \cdot m$ 过渡至 $30 \Omega \cdot m$ 以上, 为咸淡水混合过渡的微咸水带, 推断其前缘为海(咸)水入侵界线。

(2) 白浪河冲洪积扇区 EH-4 剖面 II

该剖面位于白浪河冲洪积扇北部, 起点在杏家子村东, 终点在北王家码头村东, 长 14.0 km , 点距 500 m , 测线方位为 6° 。由图 4 剖面异常区段的 EH-4 综合解译成果可以看出: 电阻率值呈现南高北低趋势, 起点至 -1200 m 处电阻率值普遍 $> 10 \Omega \cdot m$, 反映为淡水体分布, 深部高阻层状异常较好为基岩反映; 剖面 -60 m 以浅 $-90 \sim 500 \text{ m}$ 之间电

阻率值 $<4\ \Omega\cdot\text{m}$,且平稳连续,反映为卤水体分布;—1 200~500 m 之间—120 m 以浅地层低阻层状异常明显,电阻率值介于 $2\sim10\ \Omega\cdot\text{m}$ 之间,且整体在断面上呈“舌”状,整体反映为咸水体分布;在—1 200 m 处电阻率 $10\ \Omega\cdot\text{m}$ 等值线平滑分布,推断为海(咸)水入侵界线。

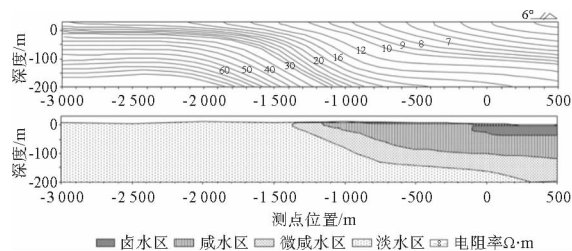


图 4 白浪河冲洪积扇 EH-4 剖面电阻率反演断面

Fig. 4 Resistivity map of EH-4 profile in Bailanghe alluvial-proluvial fan

为了更精确地识别入侵界线位置,在界线附近增加了点距 50 m 的 EH-4 加密剖面(图 5)。结果显示,加密剖面与原剖面整体电阻率分布存在差异,但识别的界线位置基本相同。究其原因有二,一是因探测点密度不同造成数据插值差异形成;二是 2 种点距的数据采集时间存在少许时间差受地下水波动干扰。总体来看,50 m 点距的解译结果能更为精确地反映咸淡水体的分布状态;500 m 点距的解译结果能宏观地展现咸淡水体在区域上的分布规律。

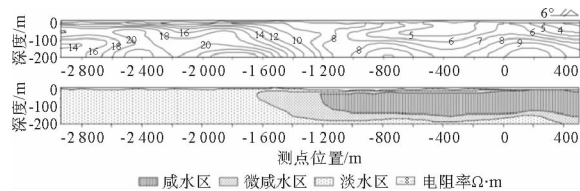


图 5 50 m 点距 EH-4 剖面电阻率反演断面图

Fig. 5 Resistivity map of EH-4 profile on grid of 50 m

(3) 弥河冲洪积扇区剖面Ⅲ

该剖面位于弥河冲洪积扇东北部,长 2.08 km,点距为 10 m,测线方位为 77° 。

由图 6 可见,电阻率值呈现西高东低趋势。自 1 800 m 至 2 460 m 处电阻率值一般介于 $10\sim$

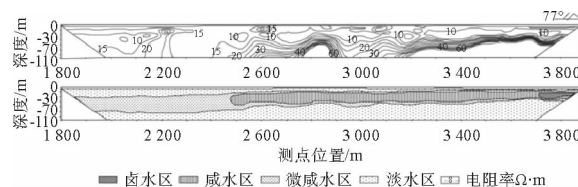


图 6 弥河冲洪积扇 4# 高密度剖面反演断面图

Fig. 6 High density resistivity section along the 4# profile in Mihe alluvial-proluvial fan

$30\ \Omega\cdot\text{m}$ 之间,反映为淡水和微咸水体分布;自 2 460 m 至 3 880 m 处浅部(—10~—60 m 以浅)地层电阻率值普遍 $<10\ \Omega\cdot\text{m}$,反映为咸水体分布;自 3 700 m 至 3 880 m 处浅部(—20~—50 m 以浅)地层电阻率值普遍 $<4\ \Omega\cdot\text{m}$,反映为卤水体分布;剖面上—10 m 以浅区域电阻率等值线呈较薄的盖层状,电阻率值普遍 $>10\ \Omega\cdot\text{m}$,推断为地表入渗的淡水体;剖面上—60 m 以深区域电阻率值普遍 $>10\ \Omega\cdot\text{m}$,推断为深部淡水和微咸水体;在 2 460 m 处电阻率等值线呈现明显异常,其值自几欧姆·米过渡至十几欧姆·米以上,推断为海(咸)水入侵界线。

(4) 弥河冲洪积扇区三维剖面组

为了更为直观地反映海(咸)水入侵形态,在剖面Ⅲ探测的咸淡水过渡带布设高密度监测剖面组,以识别入侵界线在空间上的分布。

如图 7 所示,剖面组共包括 8 条平行剖面,长度均为 470 m,间距为 10 m,剖面方位为 77° 。

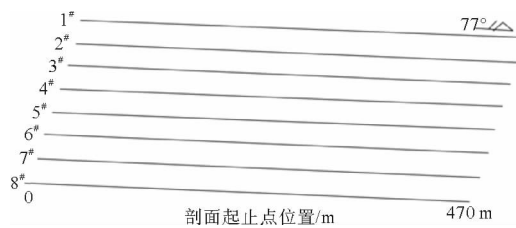


图 7 弥河冲洪积扇三维监测剖面位置

Fig. 7 Location map of 3D monitoring profiles in Mihe alluvial-proluvial fan

图 8 较好地展示了具有不同电阻率值的咸淡水体在空间上的分布特征。垂向上,总体呈现中部水体咸(电阻率值 $<9\ \Omega\cdot\text{m}$)、上下部水体淡(电阻率值一般 $>10\ \Omega\cdot\text{m}$)的特征;平面上,各深度水体具有不同的分布特征,以—63 m 深度平面

解译结果为例,呈现南部水体偏淡、北部水体咸,北部咸水区东西两侧局部有淡水体分布的特征;空间形态整体上咸水以“层状条带”向淡水分布区侵入。

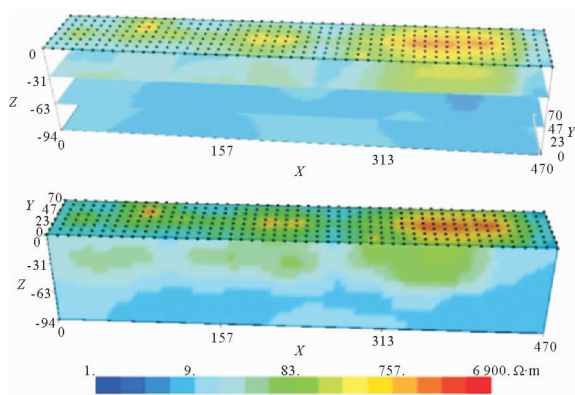


图 8 弥河冲洪积扇三维监测解译立体图

Fig. 8 3D map of monitoring profiles in Mihe alluvial-proluvial fan

4 讨论

(1) 解译时需要考虑的因素

地层电阻率值与外界电磁场、地层岩性、结构及含盐量等多因素相关,因此,本次剖面选取时尽量避开高压线、铁路及工业厂房,并在不同剖面上各选取了 1 眼钻孔或民井的视电阻率测井曲线和岩性编录资料进行现场试验和数据校正,以尽量提高解译精度。

(2) 与水质检测结果的对比

为验证地球物理技术在识别海(咸)水入侵界线的准确度,本次在 3 条剖面附近采集了地下水样进行对比(图 2),可见两者识别的界线位置吻合较好。

5 结论

(1) 高密度电阻率法和 EH-4 法 2 种地球物理技术在海(咸)水入侵界线识别中应用效果良好。

(2) 应用高密度电阻率法实现了海(咸)水入

侵的三维探测,反演结果能较好的指示咸淡水体在空间上的分布。

(3) 通过测井曲线和水化学数据标定,在莱州湾南岸地区该区大致以 $8 \sim 10 \Omega \cdot m$ 电阻率值异常带划分海(咸)水入侵界线前缘。

参考文献:

- [1] 李 壮,徐建国. 环渤海地区地下水资源与环境地质调查评价环境地质专题研究报告[R]. 济南:山东省地质调查院,2004.
- [2] 姜振蛟,卞建民,查恩爽,等. 高密度电阻率成像法在水文地质领域中的应用[J]. 水文地质工程地质,2010,37(2): 21-26.
- [3] 赵战坤,贾永刚,郭 磊,等. 高密度电阻率探针原位监测海水入侵过程试验研究[J]. 工程地质学报,2012,20(5): 868-876.
- [4] 李福林,陈学群,张 奇. Gamma 测井系统在山东莱州海(咸)水入侵监测中的应用[J]. 水文地质工程地质,2007,34(5):90-93.
- [5] 杨学明,苏永军,杜 东,等. 音频大地电磁法在海(咸)水入侵动态监测中的应用[J]. 物探与化探,2013,37(2):301-305.
- [6] Cimino A, Cosentino C, Oieni A, et al. A geophysical and geochemical approach for seawater intrusion assessment in the Acquadolci coastal aquifer (Northern Sicily) [J]. Environmental Geology, 2008, 55(7): 1473-1482.
- [7] Jørgensen F, Scheer W, Thomsen S, et al. Transboundary geophysical mapping of geological elements and salinity distribution critical for the assessment of future sea water intrusion in response to sea level rise[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(7): 1845-1862.
- [8] 刘宏伟,马 震,陈社明,等. 基于水化学与地球物理法的莱州湾南海(咸)水入侵勘查[J]. 现代地质,2015,29(2): 337-343.
- [9] Adrian D W, Mark B, Vincent E A P, et al. Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges [J]. Advances in Water Resources, 2013, 51(3): 3-26.
- [10] 苏永军,范 剑,刘宏伟,等. 高密度电阻率法探测海(咸)水入侵咸淡水界限的初步调查研究[J]. 地质调查与研究, 2014,37(3):177-181.
- [11] 苗 青,陈广泉,刘文全,等. 莱州湾地区海(咸)水入侵灾害演化过程及成因[J]. 海岸工程,2013,32(2):69-78.
- [12] 徐建国,卫政润,杨丽芝,等. 环渤海地区(山东部分)地下水资源与环境地质调查评价报告[R]. 济南:山东省地质调查院,2003.

APPLICATION OF GEOPHYSICAL METHODS TO DETECTING SEA WATER OR SALINE WATER INTRUSION: A CASE STUDY OF ALLUVIAL-PROLUVIAL FAN OF LAIZHOU BAY

LIU Hongwei, HUANG Zhongfeng, GUO Xu, CHEN Sheming, DU Dong, SU Yongjun, MA Zhen
(Tianjin institute of Geology and mineral resources, Tianjin 300170, China)

Abstract: Sea water and/or saline water intrusion is one of the main geological hazards in coastal areas, which seriously constrains economic development and ecological civilization of the areas to some extent. To find out the front of sea water and/or saline water is of significance to the management of the disaster. Geophysical methods have become an important technical mean to solve this problem attributing to the convenience of operation and continuous behaviour of data acquisition. This article is devoted to the principles of the geophysical methods of high-density resistivity and EH-4, taking the southern alluvial-proluvial fan of the Laizhou Bay as a study case. Results show that both ways are effective to detecting the intrusion fronts, and the results are basically consistent with the hydro-chemical data. Testing experiment proves that the geophysical technique of three-dimensional high-density resistivity could be effectively used to identify the spatial distribution of sea water and/or saline water invasion.

Key words: geophysics; front of sea water and/or saline water; Laizhou Bay

=====

(上接第 52 页)

CHARACTERISTICS OF HARD SEAFLOOR IN CENTRAL YINGGEHAI AND ITS ENGINEERING SIGNIFICANCE

CHEN Daixin, HAO Gaojian, WANG Tao, CHEN Guanjin, LI Fengcai
(Geotech, Geophysical-China Oilfield Services Limited, Tianjin 300451, China)

Abstract: Based on the survey data from the Central Yinggehai zone, some undulating hard seafloor is observed. The Side Scan Sonar and multi-beam data suggest that the reflection of the hard seafloor is distinct or slightly stronger than that in surrounding areas. The distribution of the hard seafloor changes from place to place, and mainly occurs with tongue-shaped topography. Stratigraphic profiles show that the hard seafloor is characterized by very thin layer A or without the layer A. Sampling results show that the layer A is very soft brown gray clay and the underlying layer B is hard to very hard brownish yellow silty clay, suggesting an oxidational depositional environment. Further study suggests that the hard seafloor consists of the deposits which deposited in the area out of paleo channels and lakes and distributed near the border. Evidence shows that the hard seafloor was formed during the regressive period. The characteristics and engineering significance of the hard seabed is also analyzed and discussed in this paper. The hard ground is important for constructions of submarine pipelines and various coastal construction programs.

Key words: Central Yinggehai; hard seafloor; engineering influence