

· 处理技术 ·

# 基于共炮偏移与谐波分解的AVO反演

首皓\*<sup>①</sup> 姚逢昌<sup>①</sup> 曹宏<sup>①</sup> 刘洪<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>中国石油勘探开发研究院,北京 100083;<sup>②</sup>中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029)

首皓,姚逢昌,曹宏,刘洪. 基于共炮偏移与谐波分解的 AVO 反演. 石油地球物理勘探, 2009, 44(1): 38~42

**摘要** 鉴于常规 AVO 反演在 CMP 道集中进行,从而不可避免地导致 AVO 分析的精度降低。Robert 利用谐波分解法获得角度道集,更适合 AVO 反演。本文改进了谐波分解法提取角度道集的算法,并在此基础上形成了利用炮集数据进行 AVO 反演的整体思路,可以概括为:从炮集数据出发,利用单程波保幅偏移使振幅得以保真和归位;运用在炮集数据上抽取角度道集的谐波分解算法,获得入射角和反射系数的准确对应关系;借助于 Aki 和 Richards<sup>[7]</sup>的近似式,进行密度及纵横波速度等 AVO 属性的反演。通过实际数据算例验证了本文方法反演精度明显高于常规 AVO 分析结果。

**关键词** 保幅偏移 反射系数 角度道集 AVO属性 反演

## 1 引言

常规 AVO 反演主要在 CMP 道集上进行,其反演精度受三个因素的影响:①抽取 CMP 道集时,假设地下为水平层状介质,但是实际地下介质多为倾斜地层,地层倾角越大 CMP 道集所反映的地下反射点的位置与实际位置差距就越大;②运用 NMO、DMO 和反褶积等常规处理技术,都会造成振幅失真;③反演所用的反射系数公式是与入射角有关的量,要想从 CMP 道集中获得准确的入射角与振幅之间的对应关系十分困难。波动方程叠前深度偏移除对复杂介质和陡倾角地层具有较强的成像能力之外,还可以最大限度地减少常规处理带来的误差并使振幅归位。炮域叠前深度偏移计算效率高,不受射线阴影区的影响<sup>[1]</sup>,但提取振幅保真的 AVO 反演的角度道集相对困难<sup>[2]</sup>。针对上述问题, Yu Zhang<sup>[3]</sup>和 Zhang<sup>[4]</sup>提出了单程波方程保幅偏移算法,使偏移成像振幅能够反映反射系数强弱变化; Sava 等<sup>[5]</sup>引入了地下炮检距共成像点道集的概念,并利用倾斜叠加转换为角度道集,进行偏移速度分析; Robert<sup>[6]</sup>则利用谐波分解法获得入射、出射和散射角道集,更加适合进行 AVO 反演。本文在保幅偏移、角度道集提取以及 AVO 反演等成熟技术

的基础上,提出直接从炮集数据反演 AVO 属性的方法,有效减少了上述三个因素对 AVO 反演精度的影响。其实现思路可概括为:从炮集数据出发,利用单程波保幅偏移使振幅得以保真和归位,再运用在炮集数据上抽取角道集的谐波分解算法,获得入射角与反射系数的对应关系,并借助 Aki 和 Richards 近似式进行 AVO 属性反演。

## 2 方法原理

波动方程叠前深度偏移可以分解为成像和波场向下延拓两个步骤,本文提出的 AVO 反演思路将上述两步变为成像、提取反射系数角度道集、波场延拓振幅归位和 AVO 反演。下面阐述具体实现过程。

### 2.1 成像条件和提取角度道集

由于成像和提取反射系数角度道集关系密切,所以一起给出这两步的实现过程。文献[6]中利用谐波分解将上下行波场分解为包含角度信息的波场,并用积分求和的方式进行逼近,其具体分解形式为

$$P_n^\pm(x, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} P^\pm(x-u, \omega) du \frac{1}{2\pi} \times \int_{-\frac{\omega}{v}}^{\frac{\omega}{v}} e^{-in \arcsin \frac{vk}{\omega}} e^{iku} dk \quad (1)$$

\*北京市 910 信箱中国石油勘探开发研究院物探技术研究所,100083

本文于 2008 年 4 月 22 日收到,修改稿于同年 7 月 24 日收到。

本研究由国家重点基础研究发展计划(2007CB209505)与国家科技部国际部科技合作项目(2006DFB62030)联合资助。

其中:  $P^-(x, \omega)$  为下行波场;  $P^+(x, \omega)$  为上行波场, 实际处理中分别表示子波和炮集地震数据;  $n$  为整数, 表示对波场  $P(x, \omega)$  近似的阶数;  $P_n^\pm(x, \omega)$  表示经过谐波分解后包含角度信息的波场;  $x$  为横向坐标;  $\omega$  为频率;  $u$  为微小增量;  $v$  为偏移速度;  $k$  为  $x$  方向的波数。式(1)实际上是对波场  $P^\pm(x, \omega)$  进行了一次滤波, 其滤波因子  $F_n(k, \omega)$  可以定义为

$$F_n(k, \omega) = e^{-in \arcsin \frac{vk}{\omega}} = \left( \sqrt{1 - \left( \frac{vk}{\omega} \right)^2} - i \frac{vk}{\omega} \right)^n \quad (2)$$

由式(2)可以看出, 由于在波数域速度只能取平均速度, 因此该方法无法适用于横向变速介质情况。只能利用类似相移加插值<sup>[8]</sup>的方法减少横向变速的影响。其理由如下: 在偏移过程中定义速度场的最大与最小值为

$$v_1(z) = \min[v(x, z)] \quad (3)$$

$$v_2(z) = \max[v(x, z)] \quad (4)$$

由  $v_1$  和  $v_2$  得出的滤波函数分别表示为

$$F_{m_1}^+(k) = e^{-in \arcsin \frac{v_1 k}{\omega}} = \left( \sqrt{1 - \left( \frac{v_1 k}{\omega} \right)^2} - i \frac{v_1 k}{\omega} \right)^n \quad (5)$$

$$F_{m_2}^+(k) = e^{-in \arcsin \frac{v_2 k}{\omega}} = \left( \sqrt{1 - \left( \frac{v_2 k}{\omega} \right)^2} - i \frac{v_2 k}{\omega} \right)^n \quad (6)$$

依此类推, 有滤波函数在空间域的表达式

$$f_n(x, \omega) = A_j f_{m_j}$$

其中

$$A_j = \frac{A_1(v_2 - v_{x_j}) + A_2(v_{x_j} - v_1)}{v_2 - v_1} \quad (7)$$

$$f_{m_j} = \frac{f_1(v_2 - v_{x_j}) + f_2(v_{x_j} - v_1)}{v_2 - v_1} \quad (8)$$

滤波后对于每个  $P_n^-(x, \omega)$  和  $P_n^+(x, \omega)$  有

$$r_n(x, z) = \sum_{\omega} P_n^+(x, \omega) P_n^{-*}(x, \omega) \quad (9)$$

将  $P_n^-(x, \omega)$  和  $P_n^+(x, \omega)$  再次利用谐波分解变换到角度域, 就可以得到角度域的反射系数, 即

$$\begin{aligned} R(x, \theta) &= \sum_n P_n^+(x, \theta_2) e^{in\theta_2} P_n^-(x, \theta_1) e^{in\theta_1} \\ &= \sum_n r_n e^{in\theta} \end{aligned} \quad (10)$$

如图 1 所示,  $\theta_1$  为下行波场与垂直方向的夹角;  $\theta_2$  为上行波场与垂直方向的夹角,  $\theta = \pi - \theta_2 + \theta_1$ 。

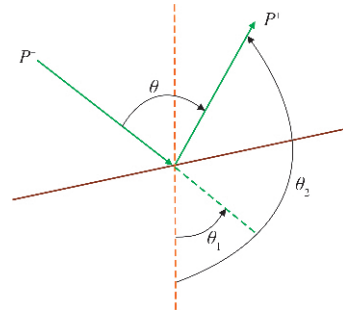


图 1 界面倾斜时入射/反射角与界面倾角

## 2.2 波场延拓和保幅处理

进行叠前反演的前提是从式(10)中得到真实的反射系数, 这就要求偏移算法要最大限度地做到保幅并使振幅归位, 文献[3, 4, 9, 10]通过引入拟微分算子  $\Lambda$  和  $\Gamma$  改善单程波算子, 使得波场在向下延拓过程中最大限度的保幅。在  $(\omega, k)$  域具体实现形式如下

$$P^\pm(\omega, k, z + \Delta z) = \pm (\Lambda(\omega, k, z) + \Gamma(\omega, k, z)) P^\pm(\omega, k, z) \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} \Lambda(\omega, k, z) &= i \frac{\omega}{v(z)} \sqrt{1 - \frac{v^2(z)k^2}{\omega^2}} \\ \Gamma(\omega, k, z) &= \frac{v(z + \Delta z) \sqrt{1 - \frac{v^2(z)k^2}{\omega^2}}}{v(z) \sqrt{1 - \frac{v^2(z + \Delta z)k^2}{\omega^2}}} \end{aligned}$$

其中:  $v(z)$  为偏移速度;  $z$  为深度;  $\Delta z$  为向下延拓步长。式(11)中  $\Gamma$  项起到了振幅恢复作用。通过保幅偏移将真实振幅进行归位以保证 AVO 反演的精度<sup>[11]</sup>。

## 2.3 AVO 反演

Aki 和 Richards<sup>[7]</sup> 给出了 PP 波反射系数近似公式。将式(10)中得到的反射系数和相应的入射角代入反射系数近似公式能够很容易地得到 AVO 属性。

Aki 和 Richards<sup>[7]</sup> 给出的 PP 波反射系数近似公式具有如下形式

$$\begin{aligned} R(\theta) &= \frac{1}{2} (1 - 4\gamma^2 \sin^2 \theta) \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{1}{2} \frac{1}{\cos^2 \theta} \times \\ &\quad \frac{\Delta v_p}{v_p} - 4\gamma^2 \sin^2 \theta \frac{\Delta v_s}{v_s} \end{aligned} \quad (12)$$

其中:  $\theta$  为入射角;  $\gamma = \frac{v_s}{v_p}$ ;  $\Delta \rho, \Delta v_p, \Delta v_s$  分别为上

下地层密度差、P波速度差和S波速度差； $\rho, v_p, v_s$ 分别为上下地层密度、P波速度和S波速度的算术平均值。式(12)可以通过角度变换转化为下面的形式

$$R(\theta) = A + B(1 + \cos 2\theta) + \frac{C}{1 + \cos 2\theta} \quad (13)$$

其中

$$A = \frac{\Delta\rho}{2\rho} - 2\gamma^2 \left( \frac{\Delta\rho}{\rho} + 2 \frac{\Delta v_s}{v_s} \right)$$

$$B = \gamma^2 \left( \frac{\Delta\rho}{\rho} + 2 \frac{\Delta v_s}{v_s} \right)$$

$$C = \frac{\Delta v_p}{v_p}$$

取3个特殊角( $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ )就可以得到A、B、C的值<sup>[12~14]</sup>,即

$$A = -10R_0 + 18R_{30} - 7R_{45} \quad (14)$$

$$B = 4R_0 - 6R_{30} + 2R_{45} \quad (15)$$

$$C = 6R_0 - 12R_{30} + 6R_{45} \quad (16)$$

其中, $R_0, R_{30}, R_{45}$ 分别为入射角为 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 时的反射系数,对于A、B、C可以得到

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = 2(A + 2B)$$

$$\frac{\Delta v_s}{v_s} = -A - 2B + \frac{B}{2\gamma^2}$$

$$\frac{\Delta v_p}{v_p} = C$$

至此,求出了A、B、C,  $\frac{\Delta\rho}{\rho}, \frac{\Delta v_s}{v_s}, \frac{\Delta v_p}{v_p}$ 等6种AVO属性。

在已知地下某点密度、纵横波速度的情况下,还可利用上述相对关系得到整个深度上的绝对属性值。

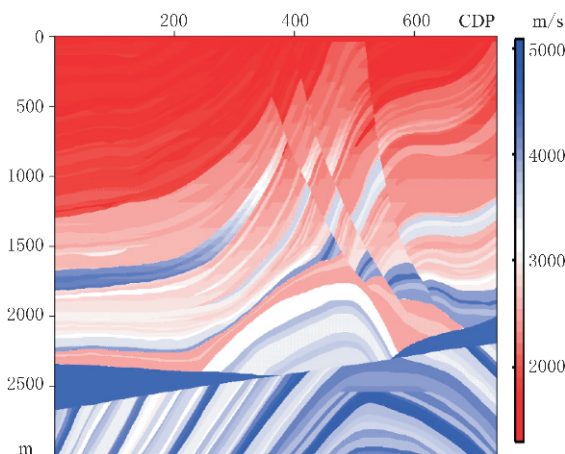


图2 Marmousi模型的P波速度模型

### 3 实际数据算例

Marmousi模型是非常复杂的二维地质模型,图2所示模型上部主要由三大断裂组成,中部有一盐丘,深部两侧有高速体,中间在2400m以下有一低速目的层。图3为经过叠前深度偏移后的剖面。

下面以密度和纵横波速度属性为例对本文思路进行试算。图3中竖线位于CDP586处,将该处的角度道集抽出进行AVO属性反演。图4a为利用Robert Soubaras<sup>[6]</sup>的方法抽出的角度道集,由于受横向变速的影响同相轴发生弯曲和错位;图4b为利用本文所提出的改进算法抽取的角度道集,横向变速带来的影响一定程度上得到了改善;图4c为利用真实弹性参数获得的合成地震记录,通过对比可以看出,本文抽取的角度道集与合成地震记录的AVO特性基本吻合,仍有部分深度上角度道集的AVO特性差异较大,其主要原因是:①由于Marmousi模型本身横向变速大,波场在向下延拓过程中误差会随深度不断积累;②偏移过程中振幅有一定程度的失真;③偏移所得到的反射系数与近似式计算的反射系数不能完全等价<sup>[15]</sup>。以上的影响因素也是今后需要研究的课题。图5与图6分别为基于Robert Soubaras<sup>[6]</sup>的谐波分解法和基于本文方法所得道集反演出的弹性参数曲线,其中实线为Marmousi模型(在CDP为586时)的真实密度和纵横波速度曲线,虚线表示使用本文方法反演出的属性曲线,可以看出基于本文方法提取的道集数据反演精度明显提高。

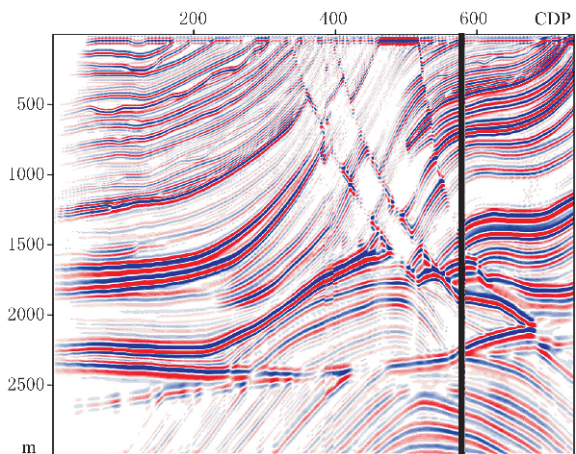


图3 Marmousi模型的偏移剖面

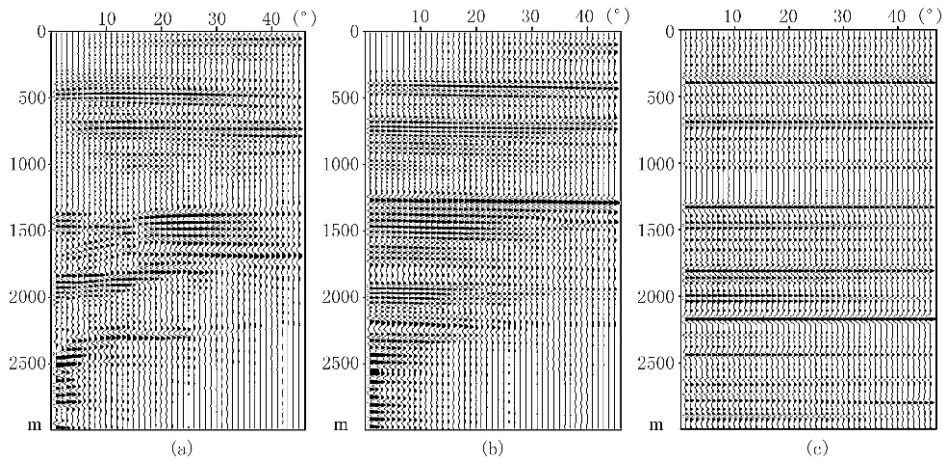


图 4 CDP586 处的角度道集与合成地震记录

(a)利用 Soubaras 方法所得道集;(b)利用本文方法所得道集;(c)合成地震记录

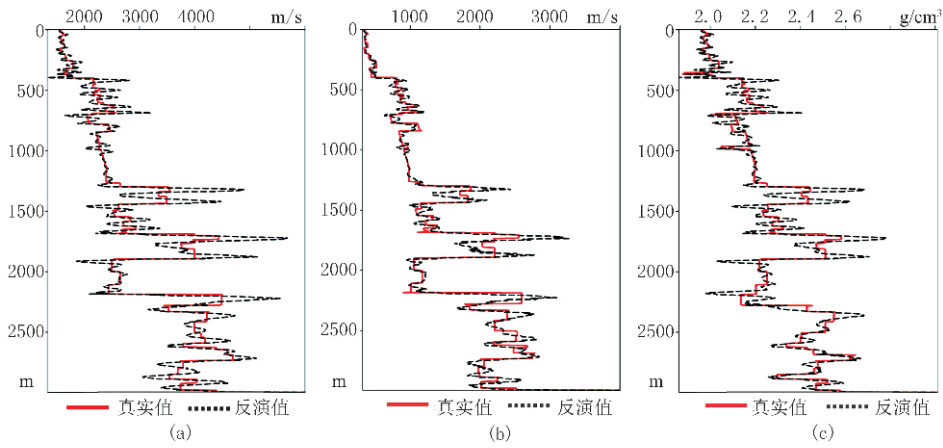


图 5 谐波分解法所得道集反演结果(CDP586)

(a)P 波速度曲线;(b)S 波速度曲线;(c)密度曲线

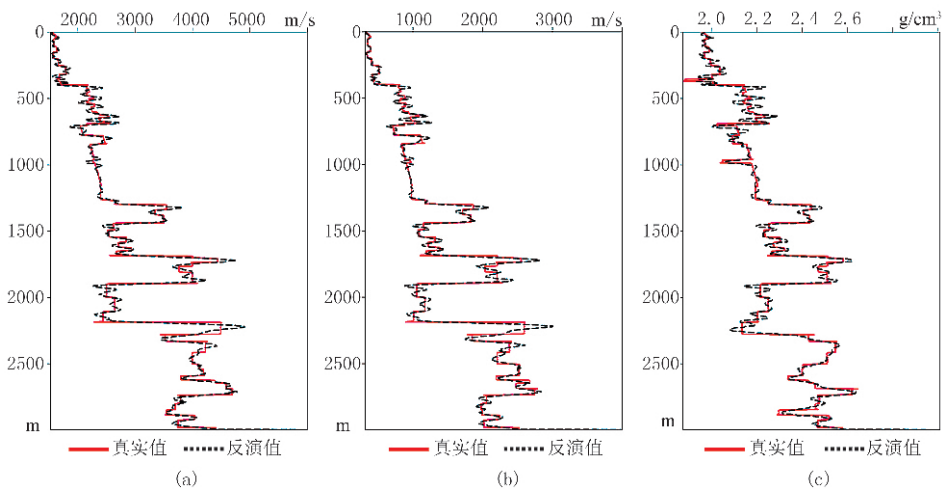


图 6 本文方法所得道集反演结果(CDP586)

(a)P 波速度曲线;(b)S 波速度曲线;(c)密度曲线

## 4 结论

(1)常规 AVO 分析往往忽略倾斜地层和断层绕射波的影响,而且难以实现最大限度保幅处理,从而导致 AVO 的应用效果不佳。相反,叠前偏移不但能够对陡倾角地层进行成像,还能使振幅归位,并将保幅偏移与 AVO 反演相结合,从而将 AVO 分析的应用范围大大拓宽。

(2)本文提出的方法便于在炮集数据上实现,运用炮集数据抽取的角度道集的谐波分解算法,获得了准确的入射角和反射系数的对应关系,充分利用叠前偏移的优势弥补常规 AVO 分析的不足,反演出深度域的 AVO 属性便于确定油气层的位置。

(3)波场延拓过程中如何更精确的保持振幅不失真,以及偏移成像得到的反射系数是否与反射系数近似公式完全等价还需进一步研究。

### 参考文献

- [1] Xu S et al. Common-angle migration: A strategy for imaging complex media. *Geophysics*, 2001, 66(6): 1877~1894
- [2] 张繁昌,印兴耀. 层状半空间地震数据的弹性波方程反演. *石油地球物理勘探*, 2005, 40(5): 523~529
- [3] Yu Zhang. Theory of true amplitude one-way wave equations and true amplitude common-shot migration. *Expanded Abstracts of 72nd SEG Mtg*, 2002, 2471~

- 2474
- [4] Zhang G. System of coupled equations for upgoing and downgoing waves. *Acta Math Appl Sinica*, 1993, 16(2): 251~263
- [5] Sava P C, Fomel S. Angle-domain common image gathers by wavefield continuation methods. *Geophysics*, 2003, 68(3): 1065~1074
- [6] Robert Soubaras. Angle gathers for shot record migration by local harmonic decomposition. *Expanded Abstracts of 73rd SEG Mtg*, 2003, 22, 889
- [7] Aki K, Richards P G. *Quantitative Seismology Theory and Methods*. W H Freeman & Co, San Francisco, 1980, 180
- [8] Jenö Gazdag and Piero Sguazzero. Migration of seismic data by phase shift plus interpolation. *Geophysics*, 1984, 49(2): 124~131
- [9] 崔兴福,张关泉,吴雅丽. 三维非均匀介质中真振幅地震偏移算子研究. *地球物理学报*, 2004, 47(3)
- [10] 刘东奇,崔兴福,张关泉. 波动方程混合法真振幅偏移. *石油地球物理勘探*, 2004, 39(3): 283~286
- [11] 刘定进,印兴耀. 基于双平方根方程的保幅地震偏移. *石油地球物理勘探*, 2007, 24(1): 11~16
- [12] 孙鹏远,孙建国,卢秀丽. P-SV 转换波 AVO 加权叠加反演. *石油勘探与开发*, 2004, 39(3): 271~274
- [13] 孙鹏远,孙建国,李彦鹏. P-SV 波 AVO 响应特征分析. *石油地球物理勘探*, 2005, 40(4): 417~422
- [14] 王保丽,印兴耀,张繁昌. 基于 Gray 近似的弹性波阻抗方程及反演. *石油地球物理勘探*, 2007, 42(4): 435~439
- [15] 孙成禹,印兴耀. 三参数常 Q 黏弹性模型构造方法研究. *地震学报*, 2007, 29(4)

(本文编辑:金文昱)

### · 新书介绍 ·

## 《地震波动力学理论与方法》

由我国著名地球物理学家杜世通教授编写的《地震波动力学理论与方法》一书近日由中国石油大学出版社出版发行。

本书为杜世通教授认真总结 50 年教学经验和成果,从地震勘探技术发展现实需要出发,按照应用地球物理专业和勘查技术与工程专业本科生、研究生教学培养计划,在 1996 年版《地震波动力学》的基础上编写而成的专业技术基础理论教材。

全书由四部分组成:第一部分——弹性动力学基本理论,是全书的基础,是学习和研究地震波传播原理的必备知识;第二部分——弹性动力学基本问题及其解法,介绍波动方程通解、定解和积分解,以及积分变换的应用,是揭示地震波复杂传播现象的研究手段;第三部分——实际介质中的地震波,是当前地震方法理论研究的热门课题,是应用基础理论解释复杂地震物理现象的初步尝试;第四部分——波动方程数值解法,搭建了地震波动力学理论与实际应用的桥梁。

本书理论体系完整,概念准确,公式推导步骤清晰,资料丰富翔实,简繁适宜,代表了现今石油高等教育地球物理专业“地震波动力学”较高的教学学术水平。除可用作教学资料外,还可供从事地震学、地震勘探、地球探测与信息技术的工程技术人员和研究人员参考。

书名:《地震波动力学理论与方法》 作者:杜世通

定价:28.00 元 出版时间:2008 年 8 月

联系人:(中国石油大学出版社李锋)

电话:0532-86981532; 0546-7816910

联系地址:青岛市黄岛区长江西路 66 号中国石油大学行政楼

邮编:266555