

深部地层时深转换中的拟合式选择问题

周 蒂¹, 胡登科^{1,3}, 何 敏², 连世勇²

1. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 南海海洋研究所, 广东广州 510301
2. 中海石油深圳分公司技术部, 广东广州 510240
3. 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要: 对珠江口盆地白云凹陷多口探井的数据分别用多项式和幂函数进行了时深关系拟合, 并对结果进行了分析讨论。对于深度大于钻井控制范围的地层和地壳的时深转换, 常用的三次多项式时深关系式只有三次项系数为负和二次项系数为正时才可用, 但在深部必然产生速度倒转的问题, 因此在理论上就不适用于深部; 二次多项式时深关系式虽然不会导致速度倒转, 但其速度向下匀速增大, 也不符合速度向下减速增大的规律, 常常导致深部速度超高。乘幂在 1 和 2 之间的幂函数拟合式 $D=at^b+c$ 有可能同时近似浅部和深部的时深关系, 是相对最优的关系式, 但也不是对每口井都能拟合出可用于全区和全部深度的时深关系。分区和分深度进行幂函数拟合是最理想的办法。针对区域性的时深转换, 可以分区对多口井进行幂函数拟合, 从中择优选用。

关键词: 时深转换; 深部地层; 白云凹陷; 珠江口盆地。

中图分类号: P628

文章编号: 1000-2383(2008)04-0531-07

收稿日期: 2008-03-05

The Selection of Fitting Curve in Time-Depth Transformation of Deep-Seated Strata and Crust

ZHOU Di¹, HU Deng-ke^{1,3}, HE Min², LIAN Shi-yong²

1. CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China
2. Shenzhen Branch, China National Offshore Oil Corp., Guangzhou 510240, China
3. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract: Polynomial and power functions have been used to fit the time-depth relation based on data from wells in the Baiyun sag, Pearl River Mouth basin, northern South China Sea. For the time-depth relation of the strata deeper than the termination depth of the wells, the 3rd-order polynomial function may be applicable only if the coefficient of its 3rd-order term is negative and the coefficient of its 2nd-order term is positive. This function, however, is not applicable to the depth because it inevitably leads to the velocity inversion at depth. The fitting of 2nd-order polynomial function does not cause the velocity inversion, but the velocity increases linearly towards the depth, violating the natural law that the velocity increment decreases downwards in the Earth's strata and crust. The power function $D = at^b + c$ with $1 < b < 2$ may approximate the time-depth relation for both shallow and deeper strata and crust without the problems encountered by using 3rd- and 2nd-order polynomial functions. It is not guaranteed, however, that for each well the fitted power function is suitable for the entire region and all the depths. For a regional time-depth conversion, the best practice is to divide the region and fit the power function for multiple wells, and then select the best functions for each sub-regions.

Key words: time-depth transformation; deep-seated strata; Baiyun sag; Pearl River Mouth basin.

时深转换是将地震剖面转化为地质剖面的必经环节, 正确选择时深关系式对结果的好坏极为关键。一般在石油勘探中采用相邻的钻井数据来拟合时深关系, 但这些关系式只表达了钻井控制深度内的时

深关系,对于勘探时确定目的层的深度一般够用,但在进行地球物理正反演、构造研究和盆地分析时,尤其是在盆地沉积厚度很大时就需要进行深部地层甚至地壳的时深转换,以确定盆地和构造的真实形态,确定烃源层的真实埋深,确定莫霍面的深度和起伏等。这时重要的问题是:根据钻井数据得出的时深关系式能否应用于深部呢?是否有既适用于浅部又适用于深部的关系式呢?本文以南海北部珠江口盆地白云深水区多口钻井的时深转换为例探讨了这些问题,指出多项式时深关系式不能适用于深部,而幂函数拟合是一个可能的选择,但也有其局限性。

1 根据 PY33-1-1 数据拟合时深关系式

白云凹陷沉积厚度超过 11 km,为了进行凹陷的构造研究需要进行区域性的时深转换。根据相邻的番禺低凸起上钻探最深探井 PY33-1-1 井的实测时深数据(表 1 中第 1、2 列,图 1 中曲线 1),计算了各时间面以上的层速度(表 1 第 3 列,图 1 中点群 6)。同时为了进行区域时深转换,用三次多项式拟合了从海底算起的时深关系式:

$$D_{\text{poly3}} = -0.000\ 000\ 039\ 1\ t^3 + 0.000\ 487\ 245\ 7\ t^2 + 0.484\ 087\ 730\ 0\ t + 131.062\ 909\ 807\ 0.$$

表 1 PY33-1-1 井时深拟合数据

Table 1 Time-depth data fitted to well PY33-1-1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
TWT	D	V	D_{poly3}	V_{poly3}	D_{power}	V_{power}	$D-D_{\text{poly3}}$	$D-D_{\text{power}}$	$D_{\text{poly3}}-D_{\text{power}}$	$V_{\text{poly3}}-V_{\text{power}}$
0	0	1 449	131.0		124.0		-131.1	-124.0	7.1	
0.04	86.6	1 800	151.2	1 007.0	132.1	407.5	-64.6	-45.6	19.1	599.551 4
0.14	174.6	1 760	208.3	1 141.5	175.8	873.9	-33.7	-1.3	32.4	267.541 4
0.24	273.6	1 980	274.8	1 329.8	238.9	1 261.8	-1.2	34.7	35.8	67.995
0.34	361.6	1 760	350.4	1 513.5	316.3	1 546.5	11.2	45.3	34.2	-32.958
0.44	448.6	1 740	435.1	1 692.4	405.4	1 782.2	13.5	43.2	29.7	-89.74
0.54	549.6	2 020	528.4	1 866.6	504.7	1 987.6	21.2	44.9	23.6	-120.982
0.684	685.1	1 879.3	677.8	2 155.7	664.1	2 295.4	7.3	21.0	13.8	-139.705
0.84	885.1	2 567.4	858.3	2 361.3	855.2	2 496.9	26.8	29.9	3.1	-135.617
0.989	1085.1	2 684.6	1 048.6	2 629.7	1 054.7	2 746.6	36.5	30.4	-6.1	-116.961
1.14	1305.1	2 857.1	1 258.2	2 813.6	1 272.0	2 911.5	46.9	33.1	-13.8	-97.854
1.265	1 485.1	2 950.8	1 444.0	3 041.2	1 462.7	3 111.3	41.1	22.4	-18.7	-70.052
1.395	1 665.1	2 769.2	1 648.4	3 194.6	1 670.8	3 244.4	16.7	-5.7	-22.4	-49.746
1.521	1 865.1	3 174.6	1 857.0	3 339.3	1 881.5	3 369.6	8.1	-16.4	-24.5	-30.258
1.657	2 100.1	5 000.0	2 093.1	3 483.9	2 118.5	3 495.0	7.0	-18.4	-25.4	-11.105
1.765	2 285.1	3 425.9	2 288.4	3 663.2	2 313.4	3 652.0	-3.3	-28.3	-25.1	11.281
1.863	2 485.1	4 081.6	2 471.2	3 772.5	2 495.3	3 749.0	13.9	-10.3	-24.1	23.533
1.981	2 685.1	3 389.8	2 698.2	3 887.4	2 720.5	3 852.6	-13.1	-35.4	-22.3	34.781
2.087	2 885.1	3 773.6	2 908.2	3 990.9	2 928.3	3 947.9	-23.1	-43.2	-20.2	43.027
2.197	3 105.1	4 000.0	3 131.8	4 091.3	3 149.3	4 042.5	-26.7	-44.2	-17.5	48.83
2.293	3 320.1	4 479.2	3 331.5	4 180.3	3 346.6	4 128.6	-11.4	-26.5	-15.1	51.733
2.335	3 420.1	4 761.9	3 420.2	4 221.9	3 434.2	4 169.7	-0.1	-14.1	-14.0	52.229
2.413	3 600.1	4 615.4	3 586.8	4 274.9	3 598.8	4 223.0	13.3	1.3	-12.0	51.878
2.481	3 745.1	4 264.7	3 734.1	4 343.3	3 744.4	4 293.6	11.0	0.7	-10.2	49.761
2.54	3 885.1	4 516.1	3 863.4	4 382.4	3 872.3	4 335.0	21.7	12.8	-8.8	47.478
2.629	4 085.1	4 651.2	4 060.9	4 438.1	4 067.9	4 395.4	24.2	17.2	-6.9	42.707
2.707	4 255.1	4 359.0	4 236.3	4 501.9	4 241.9	4 467.0	18.8	13.2	-5.6	34.863
2.781	4 435.1	4 864.9	4 404.7	4 560.6	4 409.3	4 535.8	30.4	25.9	-4.6	24.794
2.851	4 585.1	4 285.7	4 565.5	4 614.5	4 569.5	4 601.9	19.6	15.6	-4.0	12.597
2.893	4 703.1	5 619.1	4 662.8	4 630.5	4 666.6	4 622.3	40.3	36.6	-3.8	8.284
拟合优度 R^2							0.999 5	0.999 4	0.999 9	0.987 2

注: TWT 代表从海底起算的双程反射时间(s); D 代表相应的深度(m); V 代表各时间面以上的层速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); 第 1—3 列为实测数据; poly3 代表三次多项式拟合; power 代表幂函数拟合。

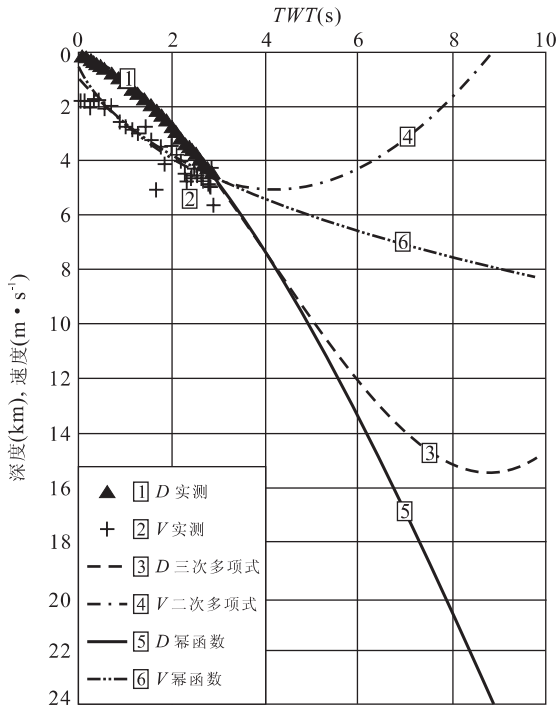


图 1 PY33-1-1 数据的时深关系和时速关系拟合曲线

Fig. 1 Curves fitted to the time-depth and time-velocity data of the well PY33-1-1

D 代表深度; V 代表速度(单位 $m \cdot s^{-1}$)

其中 D_{poly3} 代表用三次多项式拟合的海底以下深度, 单位为 m; t 代表海底以下的双程走时, 单位为 ms. 若将时间单位用 s 表示并进行四舍五入, 上式变为:

$$D_{poly3} = -39.1 t^3 + 487.2457 t^2 + 484.087 t + 131.063. \quad (1)$$

实际应用时, 某层的深度应为公式(1)求得的深度再加上该测点的水深.

尽管由表 1 中第 1、2 列的数据不能直接得到公式(1), 但式(1)在 0.14 s 以下都得到与实测数据很好的拟合, 拟合深度差小于 50 m, 拟合优度(相关系数的平方) $R^2 = 0.9995$ (表 1 第 8 列, 图 1 曲线 2).

2 三次多项式拟合时深关系在深部所遇到的问题及其适用范围

由于地壳各层的深度因地而异, 而速度却有一定的变化特征, 所以可用拟合的时速关系是否符合理论上的速度变化特征来判断拟合的时深公式是否合理. 一般认为大陆沉积层和地壳的层速度会向下增大, 但增速会向下减小, 上地壳速度在 $6.0 \sim 6.5 m \cdot s^{-1}$, 下地壳速度在 $6.5 \sim 7.6 m \cdot s^{-1}$, 莫霍

面上的速度不超过 $8.0 m \cdot s^{-1}$ (Kearey and Vine, 1990). 若拟合的速度变化超出上述理论变化范围, 则认为该公式在超出理论值的深度段上不能用.

将三次多项式拟合时深公式应用于计算深部的层速度时, 会发生速度倒转的问题, 给出不合理的结果. 这是因为速度是时深曲线的一阶导数乘 2 (因为时间是双程走时). 对于三次多项式 $D = at^3 + bt^2 + ct + d$, 其速度是二次多项式 $V = (3at^2 + 2bt + c) \times 2$, 它必然有一个极值, 其位置在 $t = -b/2a$ 处, 大小为 $V = -b^2/(2a) + 2c$. 例如, 公式(1)的速度为

$$V_{poly3} = (-39.1 \times 3 t^2 + 487.2457 \times 2 t + 487.087) \times 2 = -234.6 t^2 + 1949.0 t + 974.174. \quad (2)$$

曲线极值为 $V = 5023.70 m \cdot s^{-1}$, 产生在 $t = 4.15 s$ 处(图 1 中曲线 4), 即在 4.15 s 以后, 速度向深部不是增大而是减小. 由式(1)所计算的深度在 $t = 8.74 s$ 后不是变深而是变浅(图 1 中曲线 2), 显然不符合实际情况.

速度倒转的出现位置取决于公式中三次项和二次项的系数. 图 2 表明, 只有三次项系数为负, 二次项系数为正时, 才能在时间和速度都为正值的象限

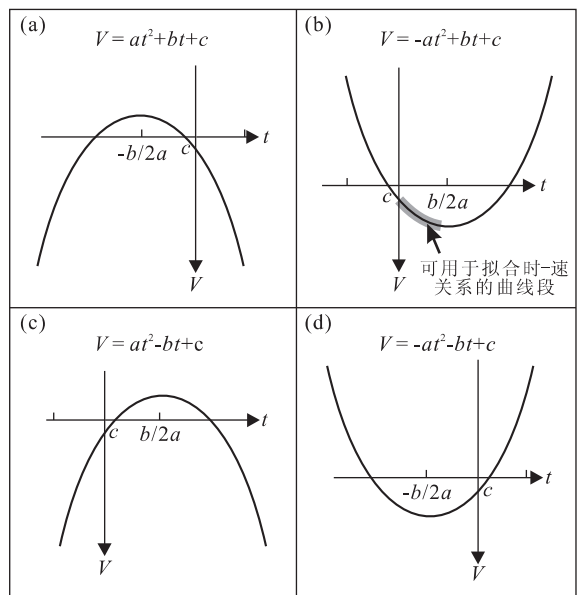


图 2 用二次多项式拟合时速关系的可适性图示

Fig. 2 Graphs showing the applicability of using 2nd-order polynomial to fit the time-velocity relationship

V 为速度, 向下为正; t 为时间, 向右为正; a、b、c 均为正数. 由于时间和速度都是正值, 其关系曲线只能在右下象限. 可见只有(b)中的粗灰线段才符合速度向深部增高且增量向深部减小的要求, 才能用于拟合时速关系

内出现速度向深部增高,且增量向深部减小的曲线段,才能用该段来拟合地层的时速关系.二次项系数与三次项系数的比值的绝对值越大,速度倒转出现的位置越深.因此当沉积物厚度不大时,或只考虑浅部地层时,速度倒转的问题不会显现,使用三次多项式时深公式问题不大.但对于白云凹陷和其他沉积物厚度很大的盆地,构造研究和沉降史分析都需要对深部地层甚至地壳进行时深转换,这时使用三次多项式显然会导致错误的结果.

3 幂函数用于拟合时深曲线

为了解决超深盆地的时深转换问题,需要找到一种能满足以下要求的拟合函数:(1)对浅部地层可以达到常用的三次多项式的拟合效果;(2)对深部地层拟合的速度向下单调增高,但增高的速度逐渐减小,既不会产生速度倒转,又不会产生速度增量向下增大;(3)所拟合的速度基本符合理论速度范围或符合实测速度,如新生界底面(Tg)以上的速度一般不超过 $5\ 500\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,莫霍面以上速度接近 $8\ 000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 等.

我们发现幂函数在时间 t 的幂大于 1 但小于 2 时可满足上述要求,其形式为:

$$D_{\text{power}} = a * t^b + c.$$

其中: D_{power} 代表用幂函数拟合的深度; t 为海底以下的双程走时; a 、 b 、 c 为待定常数,其中 $1 < b < 2$. 其时速关系式仍为幂函数,其 t 的幂大于 0 但小于 1,即:

$$V_{\text{power}} = 2ab * t^{(b-1)}.$$

以下用白云凹陷的 2 个实例讨论幂函数的适用性.

3.1 PY33-1-1 数据的幂函数拟合

对表 1 所示的时深数据用 DataFit 程序进行幂函数拟合,得到以下公式(代号及测量单位同公式 1):

$$D_{\text{power}} = 946 * t^{1.477} + 124, \quad (3)$$

$$V_{\text{power}} = 1\ 397.242 * t^{0.477}. \quad (4)$$

用幂函数拟合的时深曲线(表 1 第 6 列,图 1 中曲线 5)与时深的观测值的拟合优度高达 0.999 5(表 1 第 9 列);除 0.14 s 以上的浅表地层以外,深度差值不超过 47 m. 与用三次多项式拟合的时深曲线相比,在钻井所控制的深度内拟合优度高达 0.999 9(表 1 第 10 列). 所拟合的时速曲线(表 1 第 7 列,图 1 曲线 6)向深部梯度变缓,但不会发生速度倒转. 在

钻井所控制的深度内,幂函数拟合的速度与三次多项式拟合的速度之间的拟合优度为 0.987 2;除 0.14 s 以上的浅表地层以外,两者速度值相差不超过 $150\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,多数不超过 $70\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (表 1 第 11 列).

白云凹陷 1 530 m 深反射地震剖面揭示了凹陷的深部构造(黄春菊等,2005). 在凹陷中心,海底深度约 2 s, Tg 界面出现在海底以下约 5 s,莫霍面出现在海底以下近 8 s. 用三次多项式拟合式(1)和(2)中, Tg 面速度约 $4\ 859\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,在理论速度范围内,但在 Tg 面以上约在 4.15 s 时已开始速度倒转,从 3.4~5 s 区间的速度都大于 $4\ 859\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,显然不合理. 向深部速度继续减小,到莫霍面上速度仅为 $1\ 599\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,接近海水的速度,更是荒谬. 而用幂函数公式式(3)和式(4)拟合,则 Tg 面上速度约 $6\ 000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,比理想的速度略偏大,但没有速度倒转的情况;向深部速度继续增大,但增速变慢,在莫霍面上速度约为 $7\ 521\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,符合理论速度范围(表 2 第 3、4 列).

3.2 白云凹陷内数据的拟合

根据白云凹陷内部钻井资料拟合了时深关系多项式公式. 同样从海底算起,其三次项系数很小可视为零,而得到二次多项式形式的时深公式(表 3 第 2 列,图 3 中曲线 3):

$$D_{\text{poly2}} = 0.000\ 204\ 6 t^2 + 0.875\ 314\ 4t - 58.672\ 580\ 6.$$

若时间以 s 为单位并四舍五入,则上式成为:

$$D_{\text{poly2}} = 204.6 t^2 + 875.3 t - 58.67. \quad (5)$$

其时速关系式为线性方程

$$V_{\text{poly2}} = (409.2t + 875.3) * 2 = 818.4t + 1\ 750.6. \quad (6)$$

其速度向深部均匀增高.

由于所用的钻井数据最深到海底以下 3 700 m(图 3 中曲线 4),故可将由式(5)拟合到海底以下 3 700 m 内的数据视为“实测数据”. 用幂函数公式对

表 2 白云凹陷中心处 Tg 和莫霍面的时速拟合数据

Table 2 Fitted depths of Tg and Moho at the center of the Baiyun sag

界面	TWT(s)	PY33-1-1 井拟合 层速度($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		新钻井拟合层 速度($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	
		V_{poly3}	V_{power}	V_{poly2}	V_{power}
Tg	5	4 859	6 000	5 843	4 493
Moho	8	1 599	7 521	8 297	5 239

代号及单位同表 1, 黑体数字示符合理论速度范围的计算速度.

表 3 白云凹陷内部钻井时深拟合数据
Table 3 Time-depth data fitted to the well inside the Baiyun sag

1	2	3	4	5	6	7
<i>TWT</i>	D_{poly2}	V_{poly2}	D_{power}	V_{power}	$D_{poly2}-D_{power}$	$V_{poly2}-V_{power}$
0.1	30.906	1 832.44	63.584 8	1 250.161	-32.678 8	582.278 7
0.2	124.574	1 914.28	134.656 7	1 568.205	-10.082 7	346.074 9
0.3	222.334	1 996.12	218.877 5	1 790.543	3.456 546	205.572
0.4	324.186	2 077.96	312.962 3	1 967.16	11.223 72	110.8
0.5	430.13	2 159.8	415.136	2 116.066	14.993 97	43.733 8
0.6	540.166	2 241.64	524.255 6	2 246.061	15.910 38	-4.420 84
0.7	654.294	2 323.48	639.511 8	2 362.181	14.782 16	-38.700 7
0.8	772.514	2 405.32	760.296 1	2 467.61	12.217 94	-62.289 8
0.9	894.826	2 487.16	886.130 9	2 564.504	8.695 103	-77.343 9
1.0	1 021.23	2 569	1 016.63	2 654.398	4.6	-85.398 1
1.1	1 151.726	2 650.84	1 151.473	2 738.429	0.252 871	-87.588 9
1.2	1 286.314	2 732.68	1 290.39	2 817.464	-4.075 72	-84.783 7
1.3	1 424.994	2 814.52	1 433.148	2 892.181	-8.153 62	-77.661 4
1.4	1 567.766	2 896.36	1 579.545	2 963.125	-11.779	-66.764 7
1.5	1 714.6	1 713.494	1 729.405	3 030.735	-14.774 6	-52.534 5
1.6	1 865.586	1 866.614	1 882.569	3 095.375	-16.983	-35.335 2
1.7	2 020.634	2 023.514	2 038.898	3 157.351	-18.263 7	-15.470 9
1.8	2 179.774	2 184.057	2 198.264	3 216.919	-18.49	6.800 695
1.9	2 343.006	2 348.117	2 360.553	3 274.3	-17.547 2	31.259 87
2.0	2 510.33	2 515.582	2 525.661	3 329.683	-15.330 7	57.717 17
2.1	2 681.746	2 686.345	2 693.491	3 383.232	-11.744 9	86.008 1
2.2	2 857.254	2 860.31	2 863.956	3 435.091	-6.701 77	115.988 8
2.3	3 036.854	3 037.387	3 036.974	3 485.387	-0.12	147.532 6
2.4	3 220.546	3 217.493	3 212.47	3 534.233	8.075 667	180.527 4
2.5	3 408.33	3 400.551	3 390.375	3 581.727	17.955 25	214.873 3
2.6	3 600.206	3 586.487	3 570.622	3 627.959	29.584 03	250.481 2
拟合优度 R^2					0.999 8	0.941 0

注: *TWT* 代表从海底起算的双程反射时间(s); *D* 代表相应的深度(m); *V* 代表各时间面以上的层速度($m \cdot s^{-1}$); 第 1-3 列为实测数据; poly2 代表二次多项式拟合; power 代表幂函数拟合。

该“实测数据”拟合也能得到很好的结果(表 3 第 4 列, 图 3 中曲线 5):

$$D_{power} = 1\,000.15 t^{1.327} + 16.48. \quad (7)$$

$$\text{拟合优度 } R^2 = 0.999\,8.$$

相应的时速曲线为

$$V_{power} = 2 * 1\,000.15 * 1.327 t^{0.327} = 2\,654.4 t^{0.327}. \quad (8)$$

若仍假设 T_g 界面出现在海底以下约 5 s, 莫霍面出现在海底以下近 8 s, 则由线性方程(6)得到 2 个面上的速度分别为 $5\,843 m \cdot s^{-1}$ 和 $8\,297 m \cdot s^{-1}$ (表 2), 都略显偏高; 而由幂函数方程(8)得到的 2 个面上的速度分别为 $4\,493 m \cdot s^{-1}$ 和 $5\,239 m \cdot s^{-1}$ (表 2), T_g 界面的速度尚可, 但莫霍面速度偏低很多。

根据白云凹陷 2 口井的时深数据分别拟合多项式和幂函数, 并将所得出的 4 个关系式应用于计算白云凹陷中心的 T_g (新生界底面) 和莫霍面上的层速度, 结果是没有哪一个函数得出完全令人满意的结果(表 2)。同样是用多项式拟合, 根据 PY33-1-1 井数据得出三次多项式, 在 $TWT=4.15 s$ 深度以下发生速度倒转, 更深部的速度根本不可用; 而根据新钻井数据拟合得出二次多项式, 其速度呈线性向下增大, 在白云凹陷中心到 T_g 时已略超过理想的速度, 而到莫霍面上则速度偏大更多。同样是用幂函数拟合, 根据 PY33-1-1 井数据得出的公式计算白云凹陷中心的 T_g 速度略偏高, 而莫霍面速度较理想; 而根据新钻井得出的 T_g 速度合适, 但莫霍面速度偏

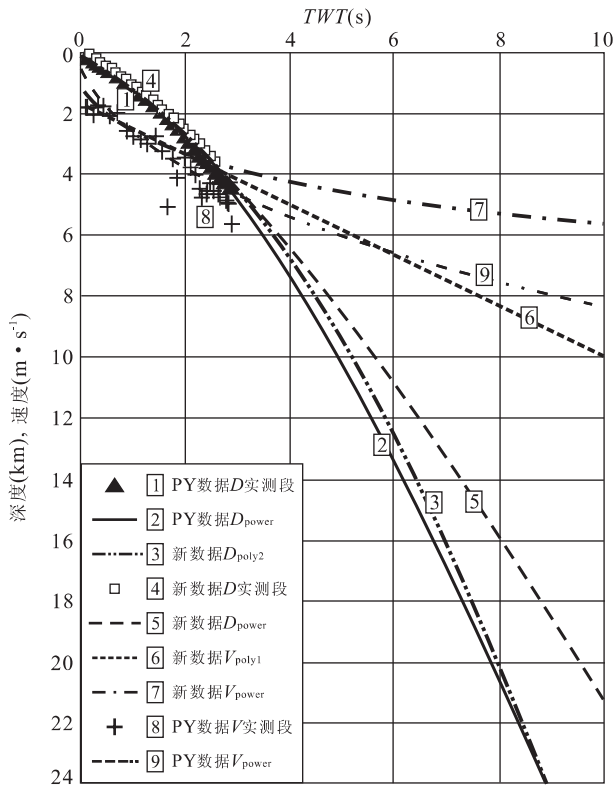


图 3 白云凹陷内部钻井数据的时深关系和时速关系拟合曲线

Fig. 3 Curves fitted to the time-depth and time-velocity data of the well inside the Baiyun sag

D 代表深度; V 代表速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); poly2 代表二次多项式; power 代表幂函数。为便于对比, 也表示出 PY33-1-1 数据的实测和幂函数拟合的时深和时速关系曲线

低很多。以下讨论产生这些问题的原因及解决办法。

4.1 影响速度变化的主要因素

无论用多项式还是幂函数拟合公式, 都假设速度只与深度有关, 即只考虑压实作用。实际上影响地层速度的主要因素除压实作用外, 还有岩性和地层年代。在进行区域性的时深转换时一般都忽略岩性变化, 因为岩性在水平和垂直方向上的变化都非常复杂, 根本无法考虑。但地层年代则多为已知, 较老的地层即使上覆沉积很薄甚至出露海底, 仍有较同一深度上年轻地层更高的速度, 因为随着时间的推移, 岩石也会发生固结而速度增高, 而且许多老地层还经历过上覆岩石的压实作用, 由此产生的速度增高不会由于后期剥蚀作用而消失。

PY33-1-1 井和白云凹陷内部钻井时深数据拟合结果的差异可能主要反映了地层年代对速度的影响。图 3 表明, 在双程走时相同时, 白云凹陷内部钻井的实测深度(图 3 中曲线 4)比 PY33-1-1 井的实

测深度(图 3 中曲线 1)要浅, 差别达 30~400 m, 1.3 s 以下差别超过 100 m; 相应地, 新钻井的实测速度(图 3 中曲线 7)比 PY33-1-1 井的实测速度(图 3 中曲线 8)要低, 在 1.5 s 以下差别尤为显著。这是因为 PY33-1-1 井位于白云凹陷北缘的番禺低凸起上, 沉积层薄, 而位于白云凹陷内部的钻井, 沉积层厚, 因此在双程走时相同时新钻井的地层相对于 PY33-1-1 井要新些, 速度也要低些。

考虑到地层年代的影响, 可采用层速度进行区域性的时深转换, 但这时又忽略了同样年代的地层因为上覆沉积厚度不同而经受的压实作用不同的问题, 而后者所引起的速度差异在盆地沉积厚度很大时会特别明显。考虑到这一因素, 我们在进行白云凹陷 1530 剖面的时深转换时采用了分段的办法, 穿过凹陷的剖面北段的各层都采用比靠近洋盆的剖面南段相应层位更高的层速度(黄春菊等, 2005)。但若将这种办法用于区域性的时深转换, 就要分区块采用不同的层速度组合, 这就需要有足够的资料来指导区块的划分和各区块各层速度的确定, 不是在所有情况下都可以做到的。

4.2 使用幂函数进行区域性的时深转换的局限性

前已述及用于区域性时深转换的拟合时深关系式应能满足 3 个要求。我们的拟合试验表明, 三次多项式和二次多项式拟合都不能满足第 2 和第 3 个要求, 只有乘幂在 1 和 2 之间的幂函数拟合式有时能满足全部 3 个要求(如对 PY33-1-1 井数据的拟合), 一般能满足前 2 个要求, 所以幂函数拟合式是三者之中唯一有可能处理深部地层和地壳时深转换的拟合式。

但是用幂函数拟合时也可能发生拟合速度偏低的问题, 如对白云凹陷内部钻井数据的拟合, 显然该钻探深度内的时速关系不足以代表更深部地层的速度变化。这个例子说明, 幂函数拟合也不能保证对所有井的数据都取得理想的时深关系曲线, 白云凹陷内部对 T_g 以下进行时深转换时应该用与浅部不同的幂函数公式。这个例子也说明, 白云凹陷内部沉积层的速度变化特征与凹陷以外不同。

因此, 使用幂函数时也应该分块和分层拟合时深关系, 但这只在理想情况下可以做到。王衍棠等(2006)曾综合地震剖面上的层速度数据分层用幂函数拟合南海中建南盆地速度资料, 得出以下一组时速关系式:

$$V = 2428 \times t^{0.27} \quad (0.2 \leq t \leq 1.0 \text{ s})$$

$$V=2\,428\times t^{0.22} \quad (1.0 < t \leq 2.0 \text{ s})$$

$$V=2\,409\times t^{0.23} \quad (2.0 < t \leq 4.0 \text{ s})$$

$$V=2\,188\times t^{0.30} \quad (t > 4.0 \text{ s})$$

但用该组关系式计算深部的速度时,在 9 s 位置上速度仅为 $4\,230 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,偏低太多,说明在缺乏高质量的深部速度资料时使用幂函数拟合时深关系也可能得出谬误的结果。

比较而言,对于白云凹陷的区域性时深转换还是使用 PY33-1-1 井数据的幂函数拟合式(式 3)较好,在浅部,该公式的时深曲线不仅与 PY33-1-1 井数据有很好的拟合(图 1 中曲线 3 和 1),与凹陷内钻井的数据拟合也不算太差(图 3 中曲线 2 和 4),在 0.4 s 到 2.6 s(井底)范围内预测的深度误差不超过 10%;在深部,该公式计算的速度与理想速度也最接近(图 1,表 1)。

5 结论

实例计算和理论分析表明,对于深度大于钻井控制范围的地层和地壳进行时深转换,常用的三次多项式时深关系式必然会产生速度倒转的问题,因此在理论上就不适用;二次多项式时深关系式虽然不会导致速度倒转,但其速度向下匀速增大,也不符合速度向深部减速增大的规律。而乘幂在 1 和 2 之间的幂函数拟合式有可能近似深部地层和地壳的时

深关系,但也不是对每口井都能拟合出可用于全区和全部深度的幂函数时深关系式。分区和分深度进行拟合是最理想的办法,但只在具有足够的优质深部资料时才可能实现。在缺乏足够资料的情况下,可以对多口井进行幂函数拟合,从中选择相对最优的拟合式。

References

- Huang, C. J., Zhou, D., Chen, C. M., et al., 2005. Deep crustal structure of Baiyun sag, northern South China Sea revealed from deep seismic reflection profile. *Chinese Science Bulletin*, 50(11): 1131—1138.
- Kearey, P., Vine, F. J., 1990. *Global tectonics*. Blackwell Scientific Publications, London.
- Wang, Y. T., Chen, L., Wu, D. M., 2006. Velocity data analysis and its application to Zhongjiannan basin in South China Sea. *J. Tropical Oceanography*, 25(5): 49—55 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 黄春菊,周蒂,陈长民,等,2005. 深反射地震剖面所揭示的白云凹陷的深部地壳结构. *科学通报*, 50(10): 1024—1031.
- 王衍棠,陈玲,吴大明,2006. 南海中建南盆地速度资料分析与应用. *热带海洋学报*, 25(5): 49—55.