

基于特征识别与 PSO 结合的地层对比算法

许少华,张宇航,宋美玲,许 辰

(东北石油大学 计算机与信息技术学院,黑龙江 大庆 163318)

摘 要:针对油田开发区块相邻两井之间的小层对比问题,提出了一种以小层测井曲线直接作为过程特征并与粒子群优化相结合的地层对比算法。通过定义可度量曲线特征相似度的距离指标,直接将相邻两口对比井的原始测井曲线作为小层对比特征变量,以此构建带多级罚函数约束的小层对比目标函数。综合利用粒子群算法(PSO)的经验记忆、信息共享和遍历搜索性质优化目标函数参数,实现两井小层之间的最佳匹配。算法可突出测井曲线的过程特征以及多条曲线的整体组合形态,提高对比井段小层之间对应关系的辨识和匹配能力,对于地层对比问题在机制上具有较好的适应性。对油田开发区块相邻两井进行实际资料处理,小层自动对比结果验证了模型和算法的有效性。

关键词:地层对比;过程特征;PSO 算法;模式匹配;层序约束

中图分类号:TP183

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2015)05-0037-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.05.010

A Stratigraphic Correlation Algorithm Based on Characteristics Identification and PSO

XU Shao-hua, ZHANG Yu-hang, SONG Mei-ling, XU Chen

(School of Computer and Information Technology, Northeast Petroleum University,
Daqing 163318, China)

Abstract: For small layer contrast problem of oilfield development block between two adjacent wells, propose an algorithm with small layers logging curve directly as identification characteristics and combined with particle swarm optimization algorithm in stratigraphic correlation. By defining the generalized Hausdorff distance measured curve feature similarity, build small layers compared objective function with multistage penalty function constraint, directly taken the original logging curves of adjacent two contrastive wells as the characteristic variables of detail correlation of reservoir bed. Use the experience memory, information sharing and track traverse searching from PSO for solving global optimization objective function, achieving the optimal matching of small layer between two wells. Algorithm can highlight the well logging curve process characteristics and combination of integral multiple curve form, improve the recognition and matching of corresponding relationship between small layers of contrast wells, which has better adaptability for stratigraphic correlation problem in the aspect of mechanism. Conducting the actual processing for oilfield development block adjacent wells, the results show the effectiveness of the model and algorithm.

Key words: stratigraphic correlation; process characteristics; Particle Swarm Optimization (PSO); pattern matching; sequence constraint

0 引 言

油田开发区块相邻两井之间的地层对比是油藏地质结构精细研究中的一项重要工作,主要揭示油层组和单砂体在连井剖面上的分布以及在空间的几何展布形态^[1-2]。测井地层对比主要依据两口井多个随深度变化、反映小层岩石物理性质的测井变量^[3],根据其连续采样数据的形态特征及其组合关系来确定两口井相

应层段及层位之间的连通关系。目前在油田地质研究中,小层对比主要是根据专家经验和在沉积韵律学的指导下由人工进行测井曲线对比完成的,工作量繁重且人为因素影响大。因此,建立层序约束下的地层自动对比算法,实现地层对比工作的自动化具有重要的实际意义^[4-5]。

近几年,基于进化计算的优化技术被广泛应用于

收稿日期:2014-04-30

修回日期:2014-07-31

网络出版时间:2015-04-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61170132)

作者简介:许少华(1962-),男,教授,博士生导师,研究方向为神经网络、优化算法;张宇航(1990-),男,硕士研究生,研究方向为人工神经网络、优化算法。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20150422.1113.038.html>

求解各种工程领域问题中的最优解,在复杂函数计算、过程工艺优化、系统辨识及控制等领域都得到了成功应用^[6-8]。粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)是对自然界中鸟类捕食现象的模拟而建立起来的一种基于群体智能的演化计算技术,由于具有易于实现、不依赖于梯度信息计算且不易陷于局部极值的特点而被广泛应用^[9-10]。将粒子群算法应用于井间小层砂体对比,可利用其全局寻优和信息共享机制^[11-12],通过对以层位对应关系为变参的目标函数的优化求解,实现两井层位之间的最佳匹配。

根据油田开发钻井剖面地层对比应满足的约束条件,笔者提出了一种基于目标约束和粒子群优化相结合的测井地层对比算法。将对比层段中所有小层的测井数据以井和井筒小层为单位整理为有序、随深度变化的测井曲线序列,根据层位不能交叉对比的地质约束,确定一个多级罚函数,通过定义可度量曲线形态和幅值特征相似度的距离指标,构建带约束的小层对比目标函数,采用 PSO 算法对目标函数进行优化求解。算法可突出测井曲线的过程特征以及多条曲线的整体组合模态在井间地层对比中的相似度,实现小层自动对比。

1 地层对比目标函数的建立

实现井间小层自动对比的关键之一是建立能够实际反映两井对应小层测井曲线之间相似性的度量关系,以及对测井曲线形态特征完整、客观的提取^[13]。

1.1 数据描述

设 A 、 B 为两口井中待对比的地层序列,以 A 为对比主井, B 为对比井,其层数分别为 m 和 n 。实际测井中,测井仪器是每间隔 0.05 m 记录一次采样值。由于砂体小层厚度一般不同,而基于小层测井曲线形态特征之间的对比,两井对应小层应具有相同的采样点。因此,在满足小层形态和幅值特征不变的情况下,笔者根据抽样定理,通过抽稀和加密处理,使对比小层具有等间距相同的采样点数,并把小层厚度的差异通过添加一个厚度指标来反映。为简化计算,实际资料处理时,将小层测井数据归一化为 $[0, 1]$ 区间,构成统一的过程对比区段。设用于地层对比的测井特征曲线有 L 条,则 A 、 B 两口井在对比层段上所对应的测井数据序列可写为:

$$A = \{A_1(t_1, t_2, \dots, t_K), A_2(t_1, t_2, \dots, t_K), \dots, A_i(t_1, t_2, \dots, t_K), \dots, A_m(t_1, t_2, \dots, t_K)\}$$

$$B = \{B_1(t_1, t_2, \dots, t_K), B_2(t_1, t_2, \dots, t_K), \dots, B_j(t_1, t_2, \dots, t_K), \dots, B_n(t_1, t_2, \dots, t_K)\}$$

其中, $A_i(t_1, t_2, \dots, t_K) = \{x_{i1}^A(t_k), x_{i2}^A(t_k), \dots, x_{iL}^A(t_k)\}; k = 1, 2, \dots, K$ 和 $B_j(t_1, t_2, \dots, t_K) = \{x_{j1}^B(t_k),$

$x_{j2}^B(t_k), \dots, x_{jL}^B(t_k)\}; k = 1, 2, \dots, K$ 分别表示 A 井第 i 个小层及 B 井第 j 个小层归一化处理后的测井采样数据序列; $x_{il}^A(t_k)$ 和 $x_{jl}^B(t_k)$ 分别为第 l 个对比指标在 t_k 点处的采样值; K 为小层采样点个数。

1.2 小层对比目标函数

对于连续时间函数或离散时间序列,两函数差的 2 范数可反映函数之间模态特征的近似度。定义函数 $A_i(t) = (a_{i1}(t), a_{i2}(t), \dots, a_{iL}(t))$ 与 $B_j(t) = (b_{j1}(t), b_{j2}(t), \dots, b_{jL}(t))$ ($t \in [0, T]$) 之间的距离范数为:

$$\|A_i(t) - B_j(t)\| = \left(\sum_{l=1}^L \int_0^T (a_{il}(t) - b_{jl}(t))^2 dt \right)^{1/2} \quad (1)$$

当 $a_{il}(t)$ 、 $b_{jl}(t)$ 为过程区间 $[0, T]$ 上的离散数据序列时,采用切比雪夫范数来度量 $A_i(t)$ 与 $B_j(t)$ 之间的距离:

$$\|A_i(t) - B_j(t)\| = \max_{1 \leq l \leq L} \left(\sum_{k=1}^K |a_{il}(t_k) - b_{jl}(t_k)| \right) \quad (2)$$

由于在地层对比中各指标变量的作用大小可能不同,采用加权系数来衡量各指标影响的大小。地层 $A_i(t)$ 与 $B_j(t)$ 匹配的目标函数定义为:

$$d(A_i(t), B_j(t)) = \sum_{l=1}^L \alpha_l \|A_{il}(t) - B_{jl}(t)\| \quad (3)$$

式中, $\alpha_l (l = 1, 2, \dots, L)$ 为对比指标匹配权系数,是小层对比中待定的关键参数,决定了测井地层对比中两井各小层之间整体的对应关系。

按照地质规律,地层 A_i (或 B_j) 可能与间隙(由于地层缺失引起)匹配的距离指标定义如下:

$$g(A_i(t)) = g(B_j(t)) = 0.5 \left[\frac{1}{mn - 2} \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (d(A_i(t), B_j(t))) - \frac{1}{mn - 2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (d(A_i(t), B_j(t)))^2 \right)^{1/2} \right] \quad (4)$$

因此,考虑与间隙匹配,用于两口井地层对比的目标函数 $D_0(A, B)$ 定义为:

$$D_0(A(t), B(t)) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d(A_i(t), B_j(t)) + \sum_{i=1}^m g(A_i(t)) + \sum_{j=1}^n g(B_j(t)) \quad (5)$$

1.3 罚函数

通过引入惩罚函数将约束优化问题转化为无约束优化问题,再使用粒子群算法求解。笔者采用一种多级惩罚策略,即将约束区域分为若干段,每段确定一个惩罚值。违反约束越严重,惩罚值越大。若约束条件个数为 S ,约束区段为 P ,对第 s 个约束第 p 段的惩罚系数为 R_{sp} ,则惩罚函数为:

$$g(x) = \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^P R_{sp} f_s(x) \quad (6)$$

式中, $f_s(x)$ 是点 x 违反第 s 个约束的惩罚度量值。

惩罚函数可按如下步骤设计:

- (1) 算法仅考虑层序约束, 故取 $S = 1$;
- (2) 计算存在交叉对比(层序错误)的层数 P ;
- (3) 设置第 p 段惩罚系数 $R_p = p \times (p - 1)/2, p = 2, 3, \dots, P$;
- (4) 设置第 p 次违反约束的度量值 $f_p(x) = g(B_p)$ 。

整个层段对比的惩罚函数取:

$$g(B) = \sum_{p=1}^P R_p \times g(B_p) \tag{7}$$

加入惩罚函数的地层对比目标函数为:

$$D(A, B) = \sum d(A_i, B_j) + \sum g(A_i) + \sum g(B_j) + g(B) \tag{8}$$

两口井小层之间的最佳匹配, 即是 A, B 序列中的元素在层序约束条件下, 匹配结果使目标函数(8)达到最小。

2 基于带动态惯性因子 PSO 的地层对比算法

2.1 PSO 算法

考虑目标函数中对参数搜索范围的约束和全局匹配性质, 引入一种带动态惯性因子的粒子群算法^[14-15]。设在 n 维空间中, 由 m 个粒子组成一个种群, 其中第 i 个粒子的位置 X_i 、速度 V_i 、自身最优位置 P_i 及全局最优位置 P_g 分别为: $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$, $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$, $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$, $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gn})$ 。粒子状态更新策略为:

$$V_i(s + 1) = w(s)(V_i(s) + c_1 r_1(P_i - X_i(s)) + c_2 r_2(P_g - X_i(s))) \tag{9}$$

$$X_i(s + 1) = X_i(s) + V_i(s + 1), i = 1, 2, \dots, m \tag{10}$$

其中, $w(s)$ 是动态惯性因子, 采用线性递减权重

策略进行设置: $w(s) = w_{\max} - \frac{(w_{\max} - w_{\min})}{T_{\max}} \cdot s, s$ 为迭代次数, T_{\max} 为最大迭代次数, w_{\max} 和 w_{\min} 分别为最大惯性权重和最小惯性权重; c_1, c_2 是常数; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。对种群中每个粒子应用式(9)、(10)进行循环迭代, 实现整个种群向全局最优解的逐步逼近。

2.2 基于 PSO 的地层对比算法

将参与地层对比的两口井, 一口作为对比主井, 另一口作为对比目标井。选择两个区域地质特征显著的解释层位作为对比标志层来确定对比井段, 两井地层对比即在两个标志层之间进行。动态寻优的目标是确

定两口井中各个地层或间隙之间的对应关系, 使地层对比目标函数达到最小。由于目标函数中加入了约束项, 故可抑制因层序变化而引起的交叉对比结果的出现。针对地层对比的目标函数, 采用 PSO 算法进行求解。采用十进制编码, 将目标函数 f 中的权重参数 $\alpha_l (l = 1, 2, \dots, L)$ 整合为一个粒子, 利用 PSO 算法进行小层全局寻优匹配。

算法步骤如下:

- Step1: 设置粒子种群数 N , 误差精度 $\varepsilon > 0$, 进化限定代数 M , 两口井对比小层数, 对比特征曲线, 记循环代数为 gen ;
- Step2: 粒子种群初始化;
- Step3: 按照式(8)计算地层对比目标函数;
- Step4: 按照式(9)进行粒子速度更新;
- Step5: 按照式(10)进行粒子位置更新;
- Step6: $D(A, B)$ 若不满足小于 ε 或 $gen < M$, 则 $gen = gen + 1$, 转 Step3; 否则转 Step7;
- Step7: 选择当前种群中适应度最大者为问题的优化解, 结束。

3 实际资料处理

根据上述原理和方法, 选择某油田开发区北三东区块进行地层对比资料处理。该区块的 BJ173 和 BJ203 两口井具有完整的测井曲线和井间地震解释资料。根据地震层位解释结果确定标志层, 两个地震标志层位之间层段分别对应 BJ173 井 1 321 ~ 1 512 m 之间共 11 个层, BJ203 井 1 336 ~ 1 483 m 之间共 9 个层, 以此作为两口井的对比层段。根据机理研究和专家经验, 选择深侧向电阻率(RL)、浅侧向电阻率(RS)、声波时差(AC)、自然电位(SP)、自然伽马(GR)5 条测井曲线以及小层厚度 h 作为井间小层对比的过程特征变量。资料处理中相关参数设置如下: 粒子种群数 $N = 20$, 限定代数 $M = 200$, 对比井层数 $m = 11$, 目标井层数 $n = 9$, 特征个数 $L = 6$, 区间采样点数 $K = 20$ 。算法经 52 次迭代后结束。对比结果与地震解释资料进行对比, BJ203 井的 9 个层在 BJ173 中全部对上, BJ173 井的 2 个薄层在 BJ203 井缺失, 缺失层所对应的间隙也全部找准。

4 结束语

文中提出了一种将原始测井曲线直接作为小层对比特征变量, 通过定义可度量两条曲线相似度的广义距离范数, 构建了带约束的小层对比目标函数和用于其优化求解的粒子群算法。文中建立的基于目标约束结合粒子群优化的地层对比算法, 既能较好地完成常规地层对比, 也对因断层或地层尖灭等地质现象造成

的地层缺失等复杂地质情况具有良好的适应性。


参考文献:

- [1] 李 鹏,张 芸,王 宁,等. 密集段及其在区域地层对比中的意义[J]. 石油地质与工程,2012,26(6):5-9.
 - [2] 丁 艳,许长福,何幼斌,等. 克拉玛依油田六中区下克拉玛依组精细地层对比研究[J]. 长江大学学报:自然科学版,2011,8(8):32-34.
 - [3] 邓宏文,王洪亮,李熙喆. 层序地层地层基准面的识别,对比技术及应用[J]. 石油与天然气地质,1996,17(3):177-184.
 - [4] 邵才瑞,李洪奇,张福明,等. 人工智能地层对比专家系统原理[J]. 石油物探,2000,39(1):77-84.
 - [5] 杨合群,李 英,赵国斌,等. 新疆—甘肃—内蒙古衔接区地层对比及其意义[J]. 西北地质,2009,42(4):60-75.
 - [6] 刘衍民,牛 奔,赵庆祯. 多目标优化问题的粒子群算法仿真研究[J]. 计算机应用研究,2011,28(2):458-460.
 - [7] 刘海江,黄 炜. 基于粒子群算法的数控加工切削参数优化[J]. 同济大学学报:自然科学版,2008,36(6):803-806.
 - [8] Durillo J J, Garcia-Nieto J, Nebro A J, et al. Multi-objective particle swarm: optimizers an experimental comparison [C]//Proc of 5th international conference on evolutionary multi-criterion optimization. Nantas:Spring,2009:495-509.
 - [9] 王丽萍,江 波,邱飞岳. 基于决策偏好的多目标粒子群算法及其应用[J]. 计算机集成制造系统,2010,16(1):140-148.
 - [10] 杨 帆,胡春平,颜学峰. 基于蚁群系统的参数自适应粒子群算法及其应用[J]. 控制理论与应用,2010,27(11):1479-1488.
 - [11] Abido M A. Multi-objective particle swarm optimization for environmental/economic dispatch problem[J]. Electric Power System Research,2009,79(7):1105-1113.
 - [12] Worasuchee C. A particle swarm optimization with stagnation-detection and dispersion [C]//Proceedings of IEEE conference of evolutionary computation. [s. l.]: IEEE,2008:424-429.
 - [13] 钱 志,胡心红,杨宏伟,等. 综合利用多种测井曲线进行地层划分与对比[J]. 石油仪器,2008,22(5):46-47.
 - [14] 孙 湘,周大为,张希望. 惯性权重粒子群算法模型收敛性分析及参数选择[J]. 计算机工程与设计,2010,31(18):4068-4071.
 - [15] 刘志雄,梁 华. 粒子群算法中随机数参数的设置与实验分析[J]. 控制理论与应用,2010,27(11):1489-1496.
- +++++
- (上接第 36 页)
- [2] Cheng Y, Church G M. Biclustering of expression data [C]//Proc of ISMB. [s. l.]:[s. n.],2000:93-103.
 - [3] Gan X, Liew A, Yan H. Discovering biclusters in gene expression data based on high-dimensional linear geometries [J]. BMC Bioinformatics,2008,9(1):209-210.
 - [4] Liu S, Chen Y, Yang M, et al. Biclustor algorithm and used in market analysis [C]//Proc of second international workshop on knowledge discovery and data mining. Moscow: IEEE,2009:504-507.
 - [5] de Franca F O, Bezerra G, von Zuben F J. New perspectives for the biclustering problem [C]//Proc of IEEE congress on evolutionary computation. Vancouver, BC: IEEE,2006:753-760.
 - [6] Han Lixin, Yan Hong. A fuzzy biclustering algorithm for social annotations [J]. Journal of Information Science,2009,35(4):426-438.
 - [7] 张 敏,戈文航. 双聚类研究与进展[J]. 微型机与应用,2012,31(4):4-6.
 - [8] Madeira S C, Oliveira A L. Biclustering algorithms for biological data analysis: a survey [J]. IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics,2004,1(1):24-45.
 - [9] Zhao Hongya, Liew Alan W C, Xie Xudong, et al. A new geometric biclustering algorithm based on the Hough transform for analysis of large-scale microarray data [J]. Journal of Theoretical Biology,2008,251(2):264-274.
 - [10] 向小军,高 阳,商 琳,等. 基于 Hadoop 平台的海量文本分类的并行化[J]. 计算机科学,2011,38(10):184-188.
 - [11] 蔡佳佳,李名世,郑 锋. 多核微机基于 OpenMP 的并行计算[J]. 计算机技术与发展,2007,17(10):87-91.
 - [12] 吴建章,韩立新,曾晓勤. 一种基于多核微机的闭频繁项集挖掘算法[J]. 计算机应用与软件,2013,30(3):44-46.
 - [13] Wei Shen, Xie Chengjun, Liu Guixia, et al. A novel biclustering with parallel genetic algorithm [C]//Proc of IEEE international conference on human health and biomedical engineering. [s. l.]:[s. n.],2011:900-903.
 - [14] 孙丰荣,刘积仁. 快速霍夫变换算法 [J]. 计算机学报,2001,24(10):1102-1109.
 - [15] Liu B, Wai C, Wang D, et al. Design exploration of geometric biclustering for microarray data analysis in data mining [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems,2014,25(10):2540-2550.
 - [16] 卢风顺,宋君强,银福康,等. CPU/GPU 协同并行计算研究综述[J]. 计算机科学,2011,38(3):5-9.

基于特征识别与PSO结合的地层对比算法

作者：[许少华](#)，[张宇航](#)，[宋美玲](#)，[许辰](#)，[XU Shao-hua](#)，[ZHANG Yu-hang](#)，[SONG Mei-ling](#)，[XU Chen](#)

作者单位：[东北石油大学 计算机与信息技术学院, 黑龙江 大庆, 163318](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：2015(5)

引用本文格式：[许少华](#). [张宇航](#). [宋美玲](#). [许辰](#). [XU Shao-hua](#). [ZHANG Yu-hang](#). [SONG Mei-ling](#). [XU Chen](#) [基于特征识别与PSO结合的地层对比算法](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015(5)