

文章编号: 0253-2697(2015)12-1580-06 DOI:10.7623/syxb201512013

井眼分离系数计算新方法

史玉才¹ 张 晨¹ 薛 磊¹ 管志川¹ 吴丽娟² 席传明¹

(1. 中国石油大学石油工程学院 山东青岛 266580; 2. 中国石化集团华北石油局 河南郑州 450006)

摘要:井眼分离系数是目前最常用的井眼交碰风险评价指标,但现有计算方法无法实现在三维空间中直接评价 2 个误差椭球的分离程度,导致井眼交碰风险评价结果难以满足防碰钻井要求。提出了一种全新的井眼分离系数计算方法,该方法通过同比例缩放 2 个误差椭球使之满足外切条件,与之对应的缩放系数即为井眼分离系数,实现了直接在三维空间中准确评价 2 个误差椭球的分离程度;推导出了井眼分离系数计算新方法对应的基本方程组(四元二次方程组),探讨了与之配套的数值求解方法及快速求解策略,使该方法在理论上和计算上均可行。井眼交碰实例分析表明,与其他井眼分离系数计算方法相比,新方法能够更好地指导井眼交碰风险评价工作,有助于准确定位危险井段,减少防碰施工工作量。

关键词:井眼防碰;分离系数;误差椭球;缩放;计算方法

中图分类号:TE28

文献标识码:A

A new calculation method of wellbore separation factor

Shi Yucai¹ Zhang Chen¹ Xue Lei¹ Guan Zhichuan¹ Wu Lijuan² Xi Chuanming¹

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Shandong Qingdao 266580, China;

2. Sinopec North China Petroleum Bureau, Henan Zhengzhou 450006, China)

Abstract: Wellbore separation factor is the most common index for evaluating the risk of wellbore collision. However, current calculation methods fail to directly evaluate the separation degree of two error ellipsoids in 3D space, leading to the evaluation results of wellbore collision unable to satisfy the anti-collision drilling requirements. Therefore, a new calculation method of wellbore separation factor has been presented, in which two error ellipsoids are zoomed at the same scale to satisfy circumscribed condition. Then, the corresponding zoom coefficient is selected as the wellbore separation factor for directly and accurately evaluating the separation degree of two error ellipsoids in 3D space. The basic equations (quaternionic quadratic equation set) corresponding to the new calculation method of wellbore separation factor have been derived. Then the matched numerical solution method and rapid solution strategy are further explored to ensure the new method completely feasible in both theory and calculation. The case analysis of wellbore collision has shown that the new method can preferably evaluate the risk of wellbore collision as compared with other calculation methods of wellbore separation coefficient, helpful to locate dangerous intervals and reduce anti-collision workloads.

Key words: wellbore anti-collision; separation factor; error ellipsoid; zooming; calculation method

引用:史玉才,张晨,薛磊,管志川,吴丽娟,席传明.井眼分离系数计算新方法[J].石油学报,2015,36(12):1580-1585.

Cite: Shi Yucai, Zhang Chen, Xue Lei, Guan Zhichuan, Wu Lijuan, Xi Chuanming. A new calculation method of wellbore separation factor[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(12): 1580-1585.

随着老油田加密井、调整井越来越多,新建丛式井组规模越来越大,井与井之间的空间距离越来越小,导致邻井套管损毁甚至彻底报废的井眼交碰事故时有发生^[1-3]。为了避免井眼交碰事故,需要选择合适的井眼交碰风险评价指标,做好防碰预警工作。现有的井眼交碰风险评价指标包括邻井最近距离^[4-6]、井眼分离系数^[6-17]、井眼交碰概率^[6,18-20]等。其中,井眼分离系数

综合考虑了邻井最近距离和井眼轨迹误差影响,评价结果比邻井最近距离可靠,计算过程比井眼交碰概率简单,在国内外钻井现场均获得了较广泛应用。现有的井眼分离系数计算方法较多,包括传统方法、中心向量法^[6,15]、垂足线法^[6,15]、等效误差椭球法^[8-12,17]、误差椭圆缩放法^[15]等。上述计算方法仅给出了某个平面上 2 个误差椭圆的分离程度,并非三维空间中 2 个误

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA091501)和教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1086)资助。

第一作者:史玉才,男,1972年8月生,1995年获石油大学(华东)学士学位,2005年获中国石油大学(华东)博士学位,现为中国石油大学(华东)石油工程学院副教授,主要从事定向钻井理论与技术教学与研究工作。Email: shiyucai2008@163.com

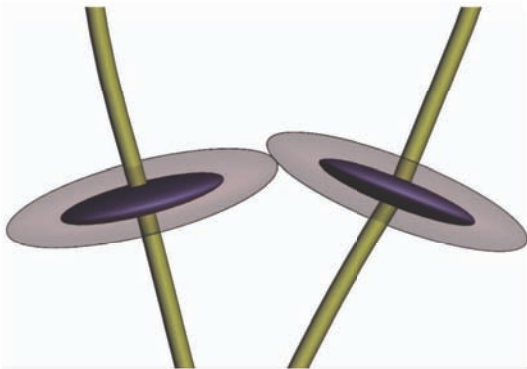
通信作者:薛磊,男,1990年5月生,2013年获中国石油大学(华东)学士学位,现为中国石油大学(华东)硕士研究生,主要从事定向钻井理论与技术研究。Email: xuelei0902@126.com

差椭球的真实分离程度, 因而导致井眼交碰风险评价结果或过于乐观, 或过于保守, 难以满足防碰钻井要求。鉴于此, 笔者给出了一种全新的井眼分离系数计算方法, 可直接在三维空间中准确评价 2 个误差椭球的分离程度, 该方法有助于准确定位危险井段, 提高防碰施工质量和效率。

1 误差椭球缩放法基本原理

2012 年, Sawaryn^[15] 采用“误差椭圆缩放法”计算井眼分离系数。该方法通过缩放 2 个误差椭圆使之达到外切条件来计算井眼分离系数, 首次实现了准确评价 2 个误差椭圆的分离程度, 但是该方法尚未实现在三维空间中准确评价 2 个误差椭球的分离程度, 评价结果难以满足防碰钻井要求。

本文将误差椭圆缩放方法推广至三维空间中, 通过直接缩放误差椭球使之达到外切条件来计算井眼分离系数, 称为“误差椭球缩放法”, 实现了在三维空间中准确评价 2 个误差椭球的分离程度。以 2 个相互分离的误差椭球为例(图 1), 深色区域为基准点和参考点的 2 个不确定误差椭球, 保持 2 个误差椭球的中心位置不变, 将 2 个椭球同比扩大 m 倍, 达到浅色区域形态, 使之刚好满足外切条件, 与之对应的扩大倍数 m 为所求井眼分离系数, 即误差椭球缩放的基本原理。



注: 深色区域为放大前, 浅色区域为放大后。

图 1 误差椭球缩放原理

Fig. 1 Zoom principle of error ellipsoids

基于上述基本原理可以推断出: ①当 2 个误差椭球完全分离时, 只有放大误差椭球才能满足外切要求, 井眼分离系数应大于 1; ②当 2 个误差椭球外切时, 无需缩放误差椭球即可满足要求, 井眼分离系数应等于 1; ③当 2 个误差椭球相交时, 只有缩小误差椭球才能满足外切要求, 井眼分离系数应小于 1; ④当 2 个误差椭球相含时(其中一个误差椭球被另一个误差椭球完全包裹住), 也只有缩小误差椭球才能满足外切要求, 井眼分离系数应远小于 1。

2 井眼分离系数计算方法

先将目标井的全部相关参数转换到以基准井井口为原点的坐标系中, 应用最近距离扫描方法^[4]及井眼轨迹误差分析模型^[20-22]求解出邻井最近距离及协方差矩阵, 再按下述方法求解井眼分离系数。

2.1 误差椭球基本方程

设基准井上某点坐标 (x_1, y_1, z_1) , 该点处协方差矩阵为 C_1 ; 比较井上某点坐标 (x_2, y_2, z_2) , 该点处协方差矩阵为 C_2 ; 误差椭球置信因子为 k_E 。

应用井眼轨迹误差分析模型^[20]求解出协方差矩阵 C_1 和 C_2 :

$$C_1 = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ d_1 & e_1 & f_1 \\ g_1 & h_1 & i_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} a_2 & b_2 & c_2 \\ d_2 & e_2 & f_2 \\ g_2 & h_2 & i_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i, g_i, h_i, i_i$ 为常数, $i=1, 2$ 。

在井眼轨迹测量领域中, 通常假定井眼位置坐标服从三维正态分布, 在分布空间内概率密度相等的点组成一个误差椭球^[20]。基准点 (x_1, y_1, z_1) 、比较点 (x_2, y_2, z_2) 对应的误差椭球方程式为:

$$\begin{bmatrix} x-x_1 \\ y-y_1 \\ z-z_1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ d_1 & e_1 & f_1 \\ g_1 & h_1 & i_1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x-x_1 \\ y-y_1 \\ z-z_1 \end{bmatrix} = k_E^2 \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x-x_2 \\ y-y_2 \\ z-z_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} a_2 & b_2 & c_2 \\ d_2 & e_2 & f_2 \\ g_2 & h_2 & i_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x-x_2 \\ y-y_2 \\ z-z_2 \end{bmatrix} = k_E^2 \quad (4)$$

将式(3)和式(4)展开后得:

$$A_1 x^2 + B_1 y^2 + C_1 z^2 + D_1 xy + E_1 xz + F_1 yz + G_1 x + H_1 y + I_1 z + J_1 = k_E^2 \quad (5)$$

$$A_2 x^2 + B_2 y^2 + C_2 z^2 + D_2 xy + E_2 xz + F_2 yz + G_2 x + H_2 y + I_2 z + J_2 = k_E^2 \quad (6)$$

式中: $A_i, B_i, C_i, D_i, E_i, F_i, G_i, H_i, I_i$ 为展开后多项式的系数(展开过程略), $i=1, 2$ 。

式(5)和式(6)就是基准点 (x_1, y_1, z_1) 和比较点 (x_2, y_2, z_2) 对应的误差椭球基本方程。

2.2 井眼分离系数对应的基本方程组

据误差椭球缩放法基本原理, 将基准点 (x_1, y_1, z_1) 和比较点 (x_2, y_2, z_2) 的误差椭球同时缩放 m 倍, 缩放后的椭球方程如下:

$$A_1 x^2 + B_1 y^2 + C_1 z^2 + D_1 xy + E_1 xz + F_1 yz + G_1 x + H_1 y + I_1 z + J_1 = m^2 \cdot k_E^2 \quad (7)$$

$$A_2x^2 + B_2y^2 + C_2z^2 + D_2xy + E_2xz + F_2yz + G_2x + H_2y + I_2z + J_2 = m^2 \cdot k_E^2 \quad (8)$$

令

$$f(x, y, z, m) = A_1x^2 + B_1y^2 + C_1z^2 + D_1xy + E_1xz + F_1yz + G_1x + H_1y + I_1z + J_1 - m^2 \cdot k_E^2 \quad (9)$$

$$g(x, y, z, m) = A_2x^2 + B_2y^2 + C_2z^2 + D_2xy + E_2xz + F_2yz + G_2x + H_2y + I_2z + J_2 - m^2 \cdot k_E^2 \quad (10)$$

因为2个误差椭球缩放 m 倍之后应满足外切条件,设切点坐标 (x_0, y_0, z_0) ,则有:

$$f(x_0, y_0, z_0, m) = g(x_0, y_0, z_0, m) = 0 \quad (11)$$

二次函数 $f(x, y, z, m)$ 和 $g(x, y, z, m)$ 在切点 (x_0, y_0, z_0) 处存在连续偏导数,且3个偏导数不同时为零^[23],则与该切点对应的切平面方程分别为:

$$f'_x(x_0, y_0, z_0, m)(x - x_0) + f'_y(x_0, y_0, z_0, m)(y - y_0) + f'_z(x_0, y_0, z_0, m)(z - z_0) = 0 \quad (12)$$

$$g'_x(x_0, y_0, z_0, m)(x - x_0) + g'_y(x_0, y_0, z_0, m)(y - y_0) + g'_z(x_0, y_0, z_0, m)(z - z_0) = 0 \quad (13)$$

因为经过同一个切点 (x_0, y_0, z_0) 的2个切平面方程的系数对应成比例^[21],则有:

$$\frac{f'_x(x_0, y_0, z_0, m)}{g'_x(x_0, y_0, z_0, m)} = \frac{f'_y(x_0, y_0, z_0, m)}{g'_y(x_0, y_0, z_0, m)} = \frac{f'_z(x_0, y_0, z_0, m)}{g'_z(x_0, y_0, z_0, m)} \quad (14)$$

将式(11)和式(14)整理成以切点坐标 (x_0, y_0, z_0) 和缩放系数 m 为未知数的方程组:

$$\begin{cases} f(x_0, y_0, z_0, m) = 0 \\ g(x_0, y_0, z_0, m) = 0 \\ \frac{f'_x(x_0, y_0, z_0, m)}{g'_x(x_0, y_0, z_0, m)} = \frac{f'_y(x_0, y_0, z_0, m)}{g'_y(x_0, y_0, z_0, m)} \\ \frac{f'_y(x_0, y_0, z_0, m)}{g'_y(x_0, y_0, z_0, m)} = \frac{f'_z(x_0, y_0, z_0, m)}{g'_z(x_0, y_0, z_0, m)} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)即为误差椭球缩放方法求解井眼分离系数对应的基本方程组(四元二次方程组)。

2.3 基本方程组的求解方法

式(15)中前2个方程仅有 m^2 项,后2个方程不含未知数 m ,利用此特点可将式(15)转换成以切点坐标 (x_0, y_0, z_0) 为未知数的三元二次方程组,先求解切点坐标 (x_0, y_0, z_0) ,再求解缩放系数 m 。但通常情况下,该三元二次方程组均为一般形式的二次多项式,求解该方程组难度较大。

据数学机械化理论^[24],对于一般形式的三元二次方程组来说,若转化为多项式方程求解,则变元次数将高于4次,目前尚无解析求解方法;若采用特征列方法

求解,多项式的项数和次数会急速膨胀,还有可能存在Collins-李现象,超出普通计算机的运算能力。在这种情况下,对特征列方法中多项式系数进行系统化压缩处理,可以显著提高运算速度。

除了求解难度较大,上述三元二次方程组还存在多解现象。求解以切点坐标 (x_0, y_0, z_0) 为未知数的三元二次方程组相当于求解三维空间中3个椭球面的共同交点。设三个椭球面分别为A、B、C,则椭球面A和B的交线(通常为椭圆)与椭球面C的交点即为该三元二次方程组的解。通常情况下,一个椭圆与一个椭球面有1~6个交点(多为2个或4个),也就是说式(15)有1~6个解。尽管如此,符合误差椭球缩放法要求的井眼分离系数只有一个。此外,2个误差椭球相切有外切和内切之分,二者均满足式(15),但是仅有外切条件对应的井眼分离系数才满足要求,这也是式(15)多解的另一个原因。

采用数值方法求出式(15)的全部解之后,还需要根据2个误差椭球的位置关系,从式(15)的全部解中选择合适的椭球缩放系数作为井眼分离系数。

2个误差椭球有3种位置关系,此处以误差椭圆代替误差椭球,简单讨论井眼分离系数的选择原则。

(1) 2个误差椭球(椭圆)相离,如图2所示。该情况下需要将2个误差椭球(椭圆)同时扩大 m_1 倍才能满足外切条件,同时扩大 m_2 倍才能满足内切条件。显然,该情况下缩放系数 $m_2 > m_1 > 1$,井眼分离系数应该取较小值 m_1 。

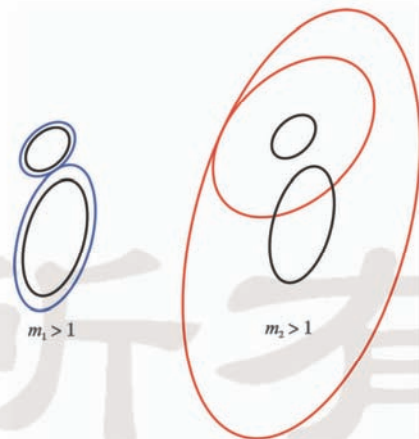


图2 两个误差椭球(椭圆)相离

Fig. 2 Two separate error ellipsoids (ellipses)

(2) 2个误差椭球(椭圆)相交,如图3所示。该情况下需要将2个误差椭球(椭圆)同时缩小 m_1 倍才能满足外切条件,同时扩大 m_2 倍才能满足内切条件。显然,该情况下缩放系数 $m_2 > 1 > m_1$,井眼分离系数也应该取较小值 m_1 。

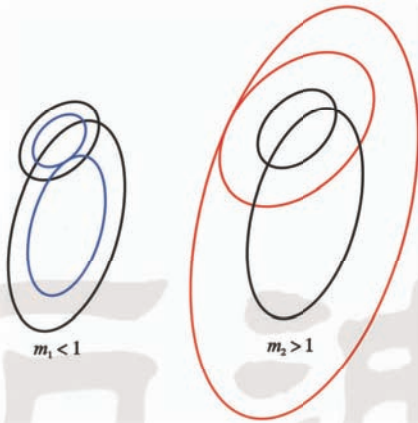


图 3 两个误差椭球(椭圆)相交情况
Fig. 3 Two crossing error ellipsoids (ellipses)

(3) 2 个误差椭球(椭圆)相含,如图 4 所示。该情况下需要将 2 个误差椭球(椭圆)同时缩小 m_1 倍才能满足外切条件,同时缩小 m_2 倍才能满足内切条件。显然,该情况下缩放系数 $m_1 < m_2 < 1$,井眼分离系数也应该取较小值 m_1 。

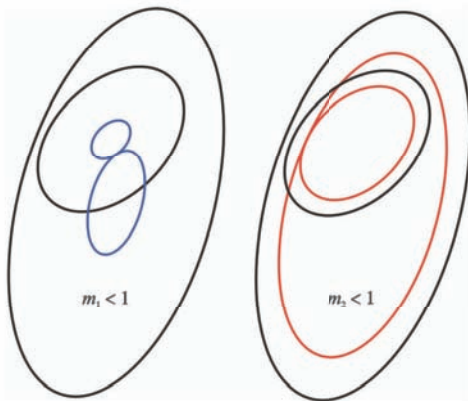


图 4 两个误差椭球(椭圆)相含情况
Fig. 4 Two embodying error ellipsoids (ellipses)

综上所述,按式(15)求出全部缩放系数 m 值之后,只有最小值才满足 2 个误差椭球外切条件,才是误差椭球缩放法所求的井眼分离系数。

3 井眼交碰实例分析

2008 年 1 月,国内陆上油田发生了一起较严重的井眼交碰事故,基准井 L111-X7 井(正钻井)、比较井 L111-X5 井(邻井)位于同一井场,地面井口中心距约 5 m,造斜点井深分别为 3 100 m 和 2 900 m。L111-X7 井钻进至井深约 2 470 m 出现井下异常情况,停钻循环钻井液,发现钻屑中含铁屑较多,邻井井口有钻井液流出。上述异常现象足以判断出该井与邻井交碰了,并且已经将邻井套管打穿了。

收集 2 口井的测斜数据,取井斜角测量精度为 $\pm 0.1^\circ$,井斜方位角测量精度为 $\pm 1.0^\circ$,井深测量误差为 0.0025(相对误差)。利用 MATLAB 软件,采用多种方法计算井眼分离系数,包括传统方法、中心向量法、等效误差椭球法(也称为“定向分离系数”,orienting separator factor,OSF)、误差椭球缩放法,各种井眼分离系数随井深变化关系如图 5 所示。

国外依据井眼分离系数划分了井眼交碰风险等级,制定了相应的防碰技术规范^[9,12]。通常情况下,井眼分离系数(SF) >5.0 时可以安全钻进, $1.5 < SF \leq 5.0$ 时需要警戒和实时监测, $1.0 < SF \leq 1.5$ 时建议关闭邻井, $SF \leq 1.0$ 时要求停钻,直至危险消除。采用该井眼交碰风险评价方法,分别统计出上述 4 种计算方法对应的井眼交碰风险等级及风险井段长度(表 1)。

据图 5 及表 1 可以看出,采用不同方法计算出的井眼分离系数及井眼交碰风险等级划分结果存在较大差异,究竟哪一种计算方法及其评价结果最可靠呢?

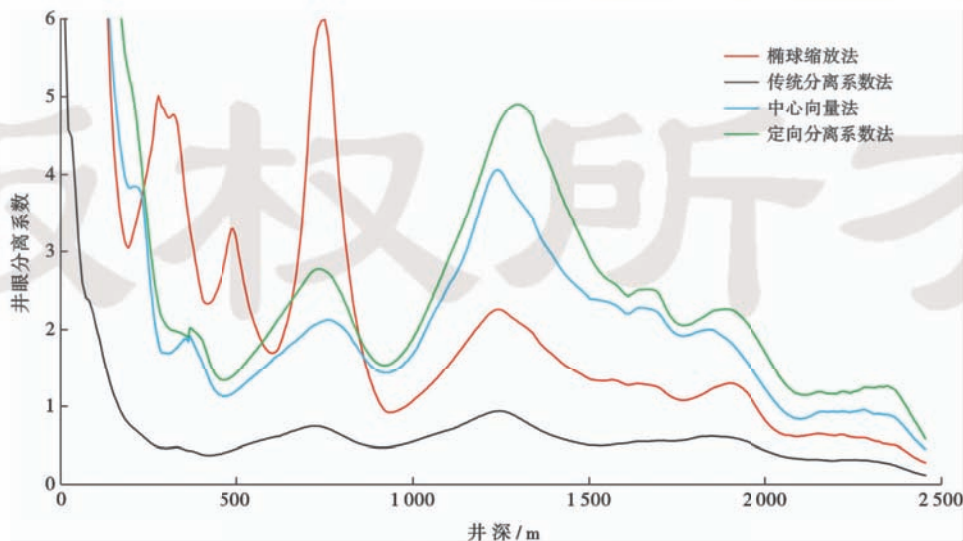


图 5 几种井眼分离系数随井深变化关系

Fig. 5 Wellbore separation factors at different measured depths

表1 井眼交碰风险评价结果

Table 1 Evaluation results of wellbore collision risk

分离系数 SF (风险等级)	防碰措施	防碰井段长度(井深区间)/m			
		传统方法	误差椭球缩放法	中心向量法	等效椭球法
$SF \leq 0.5$ (极度危险)	停钻, 直至危险消除	915	100 (2 370~2 470)	28 (2 442~2 470)	0
$0.5 < SF \leq 1.0$ (重度危险)	停钻, 直至危险消除	1 384	464	402	70 (2 400~2 470)
$1.0 < SF \leq 1.5$ (轻度危险)	关闭邻井, 制定防碰措施	35	683	321	458

实钻资料证实,该井自井深约 1 800 m 开始逐渐靠近邻井 L111-X5 井,井深约 2 450 m 以后与邻井套管发生实质性交碰,至井深约 2 470 m(井底处)将邻井套管打穿。对比分析表明,只有误差椭球缩放法计算出的井眼分离系数随井深变化规律与实钻资料最吻合(自井深约 1 800 m 开始至井底),从轻度危险($1.0 < SF \leq 1.5$,井深 1 800~1 973 m)逐渐变成重度危险($0.5 < SF \leq 1.0$,井深 1 974~2 369 m),直至极度危险($SF \leq 0.5$,井深 2 370 m~井底)。该实例分析间接证明了误差椭球缩放法给出的评价结果最可靠。

对比表 1 中井眼交碰风险等级及防碰井段长度可知,传统方法对应的评价结果过于保守;等效误差椭球法对应的评价结果过于乐观(甚至会漏掉危险井段);中心向量法对应的评价结果较接近误差椭球法,但是仍然过于乐观。出现上述明显差异的根本原因在于:误差椭球缩放法直接在三维空间中评价两个误差椭球的分离程度,其余方法均在某个平面上近似评价两个误差椭圆的分离程度^[15]。

该实例分析表明,以误差椭球缩放法分离系数为依据评价井眼交碰风险和划分风险等级,有助于准确定位危险井段,减少防碰工作量,提高钻井速度。

此外,应用 MATLAB 软件求解该实例时发现,误差椭球缩放法运算时间明显多于其他计算方法。自井口至井深 2 455 m,步长取 1m/点时,误差椭球缩放法运算时间约 30~120 min(与计算机配置有关,平均 1~3s/点),其余 3 种方法运算时间均在 1 min 以内。以井深 750 m 处为例,式(15)有 4 个解,与之对应的误差椭球缩放系数分别为 6.01、14.77、705.18、795.48。不难发现, MATLAB 软件在求解式(15)时是在较大范围内寻找全部解,而真正有价值的解只有一个,大部分运算时间都浪费在无用解上了。针对该问题,除了采用变步长策略来减少计算点(在危险井段适当缩短步长,其他井段适当增加步长),还考虑 2 个误差椭球的半轴长及中心距,限定和缩小可行解的搜索范围,最终将全井的运算时间控制在 10 min 以内,使得该方法在理论上和计算上均可行。

4 结论

(1) 基于误差椭球缩放及外切条件给出了井眼分离系数计算新方法(“误差椭球缩放法”),实现了直接在三维空间中评价两个误差椭球的分离程度。

(2) 导出了井眼分离系数计算新方法对应的基本方程组(四元二次方程组),给出了配套求解方法及快速求解策略,使之在理论上和计算上均可行。

(3) 实例分析表明,采用误差椭球缩放法计算井眼分离系数能够提高井眼交碰风险评价质量,有助于准确定位危险井段,提高防碰作业效率。

参 考 文 献

- [1] 李建超. 盐家油田井碰事故原因分析及经验总结[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2014, 10: 124.
Li Jianchao. Cause analysis and experience summary of a wellbore collision accident in Yanjia Oilfield[J]. China Petroleum and Chemical Industry Standard and Quality, 2014, 10: 124.
- [2] 刘永旺, 管志川, 史玉才, 等. 丛式定向井直井段交碰事故分析、处理及启示[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(3): 45-47.
Liu Yongwang, Guan Zhichuan, Shi Yucai, et al. Analysis and treatment on vertical section collision accidents occurred in cluster directional wells and its revelation[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(3): 45-47.
- [3] 王恒, 崔永辉. 草 4 丛式井组相碰事故经验与教训[J]. 钻采工艺, 2007, 30(4): 151, 158.
Wang Heng, Cui Yonghui. Lesson and experience of collision in Cao 4 cluster wells [J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(4): 151, 158.
- [4] 江苏石油勘探局钻井处. SY/T 6396-2009 钻井井眼防碰技术要求[S]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
Drilling Department of Jiangsu Petroleum Exploration Bureau. SY/T 6396-2009 Requirements for wells anticollision technology [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [5] 中国石油天然气集团公司. QSY 1296-2010 密集丛式井上部井段防碰设计与施工技术规范[S]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
China National Petroleum Corporation. QSY 1296-2010 Specifications of anti-collision design and construction for upper section of dense cluster well [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.

- [6] Angus Jamieson. Introduction to wellbore positioning (An ISC-WSA Initiative). [EB/OL]. <http://www.uhi.ac.uk/en/research-enterprise/energy/wellbore-positioning-download>.
- [7] de Wardt J P, Mullin S, Thorogood J L, et al. Well bore collision avoidance and interceptions-state of the art[R]. SPE/IADC 163411, 2013.
- [8] Poedjono B, Avila C M, Van Chinh P, et al. Case studies in the application of an effective anticollision risk management standard [R]. SPE 126722, 2010.
- [9] Poedjono B, Phillips W J, Lombardo G J. Anti-collision risk management standard for well placement[R]. SPE 121040, 2009.
- [10] Poedjono B, Akinniranye G, Conran G, et al. A comprehensive approach to well-collision avoidance[R]. AADE-07-NTCE-28, 2007.
- [11] Poedjono B, Conran G, Akinniranye G, et al. Minimizing the risk of well collisions in land and offshore drilling[R]. SPE/IADC 108279, 2007.
- [12] Poedjono B, Akinniranye G, Conran G, et al. Well-collision risk in congested environments[R]. SPE 101719, 2006.
- [13] McNair G A, Lance S J, Codling J, et al. Implementation of a new risk based well collision avoidance method [R]. SPE/IADC 92554, 2005.
- [14] Williamson H S. Towards risk-based well separation rules[R]. SPE 36484, 1998.
- [15] Sawaryn S J, Jamieson A, McGregor A E. Explicit calculation of expansion factors for collision avoidance between two co-planar survey error ellipses[R]. SPE 159840, 2012.
- [16] Cheng Kun, Cheng Zhong, Wei Yunan, et al. China offshore anti-collision risk management standard and remedial measures[R]. SPE 141089, 2011.
- [17] 刁斌斌, 高德利. 邻井定向分离系数计算方法[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(1): 22-27.
- [18] Diao Binbin, Gao Deli. Calculation method of adjacent well oriented separation factors[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(1): 22-27.
- [19] Brooks A G. A new look at wellbore-collision probability[R]. SPE 116155, 2010.
- [20] Brooks A G, Wilson H. An improved method for computing wellbore position uncertainty and its application to collision and target intersection probability analysis[R]. SPE 36863, 1996.
- [21] 柳贡慧, 董本京, 高德利. 误差椭圆(圆)及井眼交碰概率分析[J]. 钻采工艺, 2000, 23(3): 5-12.
- [22] Liu Gonghui, Dong Benjing, Gao Deli. Probability analysis of error ellipsoid (ellipse) and hole intersection[J]. Drilling & Production Technology, 2000, 23(3): 5-12.
- [23] 刘修善, 王超. 空间圆弧轨迹的解析描述技术[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 134-140.
- [24] Liu Xiushan, Wang Chao. Analytic description of spatial-arc wellbore trajectory[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 134-140.
- [25] 鲁港, 佟长海, 夏泊沔, 等. 空间圆弧轨迹的矢量描述技术[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 759-764.
- [26] Lu Gang, Tong Changhai, Xia Boyi, et al. Vector description of spatial-arc wellbore trajectory[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 759-764.
- [27] 同济大学数学系. 高等数学[M]. 第七版. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [28] Mathematics Department of Tongji University. Advanced Mathematics[M]. 7th ed. Beijing: Higher Education Press, 2014.
- [29] 吴文俊. 数学机械化 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [30] Wu Wenjun. Mathematics Mechanization [M]. Beijing: Science Press, 2003.

(收稿日期 2015-06-28 改回日期 2015-11-10 编辑 宋宁)

版权所有