

邻井分离系数在老区加密井防碰施工中的应用 及经济效益分析

燕金友（中石化经纬有限公司，山东 青岛 266071）

邵珠磊（中石化经纬有限公司胜利定向井公司，山东 东营 257064）

摘要：随着油田开发的不断深入，老区井位越来越密集，丛式井组的整拖间距不断减小，近年来邻井相碰事故时有发生。在防碰设计和施工中仅仅利用邻井距离扫描来确定相碰的概率已经不能满足需求，如何更精确地反映邻井的相碰概率，为邻井防碰决策提供更为科学的依据已经成为现场施工亟待解决的突出问题。本文首先阐述邻井分离系数的相关概念，进一步说明邻井分离系数的现场应用步骤，并结合现场施工一正一反实例验证，指出目前现场施工提高对邻井分离系数强化认识以及推广应用的必要性，并对成功防碰带来的效益进行分析。

关键词：邻井分离系数；加密井；防碰；施工技术；钻井效益

中图分类号：TE242 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-5167(2025)026-0094-03

Application of Adjacent Well Separation Factor in Anti-Collision Drilling of Infill Wells in Mature Fields and Its Economic Benefit Analysis

Yan Jinyou (Sinopec Geophysics Co., Ltd., Qingdao Shandong 266071, China)

Shao Zhulei (Shengli Directional Drilling Company, Sinopec Geophysics Co., Ltd., Dongying Shandong 257064, China)

Abstract: With the continuous development of oilfields, well locations in mature fields have become increasingly dense, and the spacing between cluster well groups has progressively decreased. In recent years, adjacent well collisions have occurred occasionally. Relying solely on neighbor well distance scanning to determine collision probability in anti-collision design and operations can no longer meet the demands. How to more accurately assess the collision probability of adjacent wells and provide a more scientific basis for anti-collision decision-making has become an urgent issue in field operations. This paper first elaborates on the concept of the adjacent well separation factor, then details its step-by-step field application. Through comparative case studies (one successful and one unsuccessful), it highlights the necessity of enhancing awareness and promoting the application of the adjacent well separation factor in current field operations. Additionally, the economic benefits of successful anti-collision measures are analyzed.

Keywords: adjacent well separation factor; infill wells; anti-collision; drilling technology; drilling efficiency

胜利油田逐步走向中后期开发，井网密集程度越来越高，丛式井施工的整拖距离不断缩小，海上平台丛式井组井口间距已经减小到了2.00m以内，陆地丛式井组的井口间距也减小到了3.00m以内。同时，随着勘探程度的加深，造斜点已经逐渐加深到了2000.00m、甚至3000.00m以后，新井井眼同已钻老井井眼相碰的概率在不断增大，近几年井眼相碰的施工事故也时有发生。井眼防碰已是老区加密井施工过程中最为突出的难题^[1]，井眼一旦发生相碰往往会造成巨大的经济损失：被碰破的老井套管需要进行修补；新钻井因需要填井进行侧钻被迫打断了正常施工进度；井眼相碰事故导致部分进尺报废、施工周期延长及钻井液的漏失等，均造成了施工成本的增加。

目前国内通常还是用传统的邻井最近距离扫描来进行防碰绕障设计和施工^[2]，相当一部分人片面地认为

只要计算出的待钻井和防碰井有一定距离存在，实际施工时两井就不会相碰，但由于井眼轨迹存在误差，导致防碰问题存在诸多不确定性，仅仅利用邻井最近距离扫描方法预防邻井相碰的做法并不能满足现场需求。

1 邻井分离系数

分离系数原用于表示某一单元分离操作或某一分离流程将两种物质分离程度的大小，在钻井设计和施工中引入分离系数的概念，用以描述待钻井同防碰井两者井眼轨迹之间分离程度的大小关系，借以分析两者的相碰概率。井眼轨迹由于误差的存在具有不确定性，轨迹上任意一点可能位于井眼轴线周围一个不确定性的范围内，邻井分离系数可将邻井最近距离扫描计算和井眼轨迹误差结合在一起，可以为邻井防碰决策提供更为科学的依据，如图1所示，其计算原理可表示为：

$$F_s = \frac{R_s}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

式中: F_s 为邻井分离系数; R_s 为最近距离扫描半径, m; R_1 为待钻井井眼轨迹上参考点的不确定区域的半径, m; R_2 防碰井井眼轨迹上距离待钻井参考点三维最近距离扫描点的不确定性区域的半径, m。

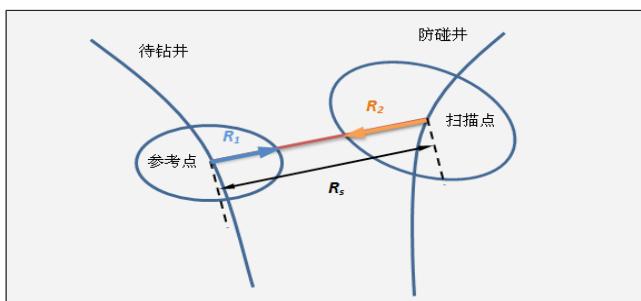


图 1 邻井分离系数计算示意图

由式(1)和图1不难看出,分离系数的计算结果取值将会出现三种结果:①当 $F_s > R_1 + R_2$ 时, $F_s > 1$, 待钻井和防碰井不确定区域相离,两井不会发生相碰;②当 $F_s = R_1 + R_2$ 时, $F_s = 1$, 待钻井和防碰井不确定区域相切,有一个交点,两井有可能在此交点相碰;③当 $F_s < R_1 + R_2$ 时, $F_s < 1$, 待钻井和防碰井不确定区域相交,会有一部分重叠,两井有可能在此重叠区域相碰,值越小,重叠区域越大,相碰概率就越高。

既然邻井分离系数可以描述邻井之间相碰的可能性大小,那么其在防碰绕障设计和施工中具有重要的实用意义,笔者将以WdW经典误差模型为基础,对分离系数的现场应用步骤和方法加以说明。

2 分离系数的现场应用

2.1 分析误差来源并确定误差模型

国内外许多学者研究表明,实际施工中井眼轨迹的误差主要来源于仪器测量误差,Walstrom在此领域做了奠基性的工作,引入了误差椭圆的概念。C.J.M.Wolff 和 J.P.de Wardt^[3]建立了一套井眼轨迹系统误差模型(WdW模型),WdW误差模型是衡量常规测斜仪器测量误差的经典模型。该模型提出了六个误差源,分别是相对深度误差、仪器不居中误差、真实井斜角误差、罗盘参考误差、钻柱磁化误差、陀螺罗盘误差。

该模型认为此六个误差源导致测量结果(井深L、井斜 α 、方位 β)存在误差,误差体现为三维空间位置的误差,即井眼轨迹周围的不确定性范围。三个主要因素(井深L、井斜 α 、方位 β)在不同方向的误差构建了井眼轨迹三维空间误差椭球。

2.2 选定误差表面

误差模型决定了井眼轨迹周围的不确定性空间位置的区域范围,扫描方法决定了井眼轨迹之间的分离

距离,误差表面决定了在邻井分离系数计算中相互关联的待钻井和防碰井两个井眼的误差表面的形状。

目前现场施工时待钻井通常为定向井或者水平井,需要防碰的井同时有直井、定向井和水平井,因此扫描方法选择三维最近距离扫描法,扫描半径即为三维空间的最近距离,也即将最近距离邻井分离系数作为现场的防碰依据。由于井眼周围不确定性范围为一误差椭球模型,三维最近距离扫描半径所在平面与椭球相交即可得到误差形状为椭圆二次曲线^[4]。

2.3 计算邻井分离系数

椭圆二次曲线在每个井眼处内插了误差表面,假设椭圆的长轴和短轴垂直于井眼轴线。三维最近距离扫描半径所在平面与误差椭球体相交,分别得到用于计算分离系数的待钻井误差椭圆的半径和防碰井误差椭圆的半径,半径的取值大小范围从椭圆的最小尺寸(短轴)到最大尺寸(长轴),如图2所示。

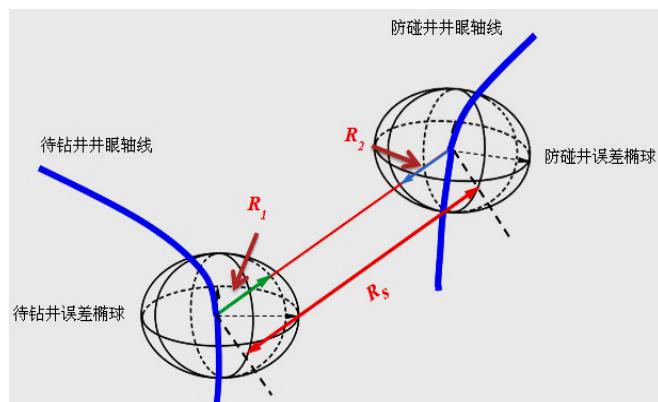


图 2 误差椭圆分离系数计算示意图

根据误差源系数可以确定误差椭球大小,根据扫描方法确定了扫描半径,进而确定了误差半径,既可由式(1)计算出分离系数的大小。

2.4 指导现场施工

计算出邻井最近距离分离系数以后,现场可以根据最小分离系数制定出防碰施工的规则,见表1,利用这些规则可以更好地指导现场防碰施工。

表 1 根据最近距离扫描分离系数制定的防碰规则

计算所得分离系数数值	相碰风险	采取的措施
$1.5 \leq F_s < 5.0$	注意警戒	仔细监测待钻井同邻井的相互靠近情况
$1.0 \leq F_s < 1.5$	有一定风险	到了可以安全钻进的下限,同时做好书面防碰措施报告
$F_s < 1.0$	重大风险	直至风险消除,否则不能继续钻进,同时要有书面防碰措施报告

3 应用实例

3.1 利用分离系数成功绕障实例

X109-X168是一口老区加密定向井,共有邻井防碰井多达32口。原设计造斜点1605.60m,最大井斜

35.36°，方位 80.41°，完钻井深 2943.61m。防碰最近距离在 50m 范围内的井多达 15 口，分离系数在 5.0 以内需要监测邻井靠近情况的有 11 口，1.5 以内到达安全钻进下限的有 6 口，小于 1.0 需要停钻研究的就有 4 口，因此按照原设计施工相碰风险大。防碰绕障优化设计自井深 600.00m 以后，邻井防碰最近距离均在 10.00m 以上，分离系数最小也在 2.0 以上，仅有 4 口井在 5.0 以内需要监测靠近情况，极大的减小了相碰风险，按照防碰绕障优化设计最终本井顺利完钻，未发生相碰事故。

3.2 忽略分离系数导致相碰事故教训

Y451-P15 井是一口老区加密开发水平井，设计造斜点 925.50m，最大井斜 90.56°，方位 125.22°，完钻井深 2385.15m。共有邻井防碰井口数多达 46 口，井网异常密集，进行防碰绕障优化设计后，防碰井最近距离在 10.00m ~ 30.00m 范围内的仍有 7 口，又由于防碰井轨迹与设计井方位走向相同，而方位误差不确定性误差范围较大，该 7 口井防碰分离系数都在 1.5 以内，均到达了安全钻进下限^[5]。鉴于此，施工前技术人员认为此井与邻井相碰概率大，施工风险高，建议甲方放弃该井施工，但甲方相关部门人员认为防碰最近距离都在 10.00m 以上，考虑到加密开发的重要性仍坚持施工。当钻进至井深 2031.00m 时与邻井 Y56-X2 发生相碰事故，此时虽然最近距离扫描为 17.08m，但防碰分离系数为 0.51 < 1.00。由于井网密集，即使填井侧钻，相碰的风险依然很大，最终各方讨论决定将井底 200m 井段用水泥填固，仅利用上部井眼开采上部油层，放弃继续往更深层位钻进。

4 经济效益分析

老区加密井的钻井施工防碰成功是施工的关键，一但发生相碰事故，各个方面的损失综合起来是巨大的，结合本文第二应用实例进行各要素经济效益分析。

4.1 直接经济效益

①事故处理成本节约：防碰成功可避免与邻井相撞导致的填井、侧钻、重钻等各项额外费用。本井与老井相碰后，填井 200m 井段，水泥费用和服务费合计约 3 万元，后续没有侧钻和重钻，否则，还会有侧钻和重钻的费用。②工期延误损失减少：防碰成功可避免因事故导致停工处理、工期延误等费用。本次相碰事故导致钻井队停工 3 天，延误了工期，按照 30 型钻机每日租赁费约 5 万元计算，损失费用约 15 万元。

4.2 间接经济效益

①保护邻井产能，避免产量损失：碰撞可能导致邻井因套管损坏而停产。本井打碰的老井日产量约为 10t 油当量，套管修复恢复生产用了 10 天，损失了

100t 产量（按油价 60 美元 / 桶计，损失约 4 万美元）。②避免修井费用损失：老井被碰后，导致套管损坏，无法继续正常使用，需要修复。本井打碰的老井后续大修作业队进行了套管修复，工期用了 10 天，每日费用约 2 万元，损失费用约 20 万元。

4.3 技术投入的回报分析

防碰技术成本：定向技术服务随钻测量工具 MWD 服务费约 1 万 ~ 3 万元 / 天，陀螺测斜单次 5 万 ~ 10 万元，总投入约占钻井成本的 1% ~ 3%。

投资回报率（ROI）：以单井防碰投入 50 万元为例，避免一次事故即可回收成本（侧钻 + 停产损失 > 200 万元），ROI 可达 300% ~ 500%。

总之，老区加密井防碰成功的经济效益核心在于“事故规避 + 效率提升”，通常可实现单井成本降低 5% ~ 15%，区块整体收益提升 10% ~ 30%。做好钻井施工中的防碰工作对于钻井队施工效益尤为重要，防碰成功安全钻进与防碰失败发生相碰事故一正一反相比，可以实现效益最大化。

5 结论与建议

①在老区加密井防碰施工中，提高防碰分离系数的认识和加强其在设计和施工中的应用具有提高防碰主动性的实用意义。②在不影响井身轨迹质量的前提下，采取直井段造侧位移进行防碰绕障优化设计与施工是一种成功防碰可取的做法。③先进测量工具的不断研制与应用，导致 WdW 模型已逐渐不能满足需求。需要不断修正井眼轨迹误差分析方法，从而建立新的误差模型，进一步再计算邻井分离系数，才能更好地指导老区加密井设计和现场施工。④成功防碰对于老区加密井施工及其重要，所带来的经济效益也是极其可观的，施工各方在以后的设计和施工要以成功防碰作为首要任务。

参考文献：

- [1] 周延军, 李文飞. 丛式井井眼交碰风险因素分析及安全技术对策 [J]. 安全、健康和环境, 2011(9):21-23.
- [2] 王飞跃, 刘峰刚, 薛艳, 杨俊科. 防碰扫描方法在丛式井钻井中的应用 [J]. 辽宁化工, 2010, 39(9):925-928.
- [3] Wolff C.J.M., de Wardt J.P. Borehole position uncertainty—Analysis of measuring methods and derivation of systematic error model [J]. SPE 9223, 1981.
- [4] 许军富, 徐文浩, 耿应春. 渤海人工岛大型丛式井组加密防碰优化设计技术 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46(2):6.
- [5] 刁斌斌, 高德利, 胡德高, et al. 防碰分离系数算法优选与邻井相对位置测量误差计算 [J]. 钻采工艺, 2020, 43(5):5.