

常用防碰计算方法

简介

多数作业公司和定向钻井承包商均有处理井碰风险的策略。这些策略会包括至少一个或多个关于参考井在钻井时能多接近邻井的规定。

防碰策略会详细指明在比较理论井间距和最小允许间距后应采取的一系列改正措施。本文的主要目的是指出诠释最小允许间距的定义与计算。

因为有太多其它因素的影响，例如办公室和现场工程师对防碰流程的执行程度，或是钻井数据库的正确性和完整性，所以就算是最保守的计算方式也不能确保最小间距能达到可接受的最小碰撞概率。

文中所使用的大部份术语均可在由防碰工作小组主编的防碰辞典查询。上述文件可从 [ISCWSA 网页](#) 下载。

文中提到的所有建议均是由工作组一致同意并决定的。

此文由贝克休斯北亚区应用工程小组共同翻译。所有建议均可邮寄到 NorthAsiaWellPlanning@bakerhughes.com。

This document was translated by Baker Hughes' North Asia Application Engineering Group. If you have any comments or suggestions about the translation, please contact NorthAsiaWellPlanning@bakerhughes.com.

2011 年，防碰工作小组

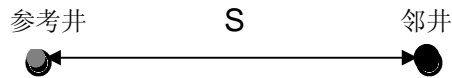
章节	目录	页数
1.0	分类	2
2.0	计算选项	3
3.0	比较	12
4.0	建议	13

1.0 分类

根据防撞规则所使用的标准来划分，能粗略的分为四大类，分别缩写为 S, E, R 和 P--并非业内标准命名。

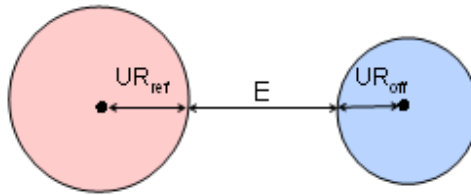
一个防撞策略并不局限于只使用一个防撞规则。

1.1 S – 井间距



由于 S 不考虑误差定位，因此防撞策略不会让其成为主要的参考标准。但是对于浅层或近距离防撞来说却是最有意义的。与浅层的情况类似，当误差定位低而井间距小时，其它规则可能造成一个安全的假象。因此某些防撞策略会把 S 和其它规则合起来使用。

1.2 E – 误差椭圆或椭球分离距



UR_{ref} = 参考井误差椭圆半径

UR_{off} = 邻井误差椭圆半径

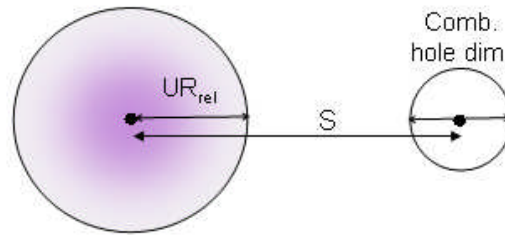
E 也可以计算为椭圆之间最短距离或是 $S - (UR_{ref} + UR_{off})$

1.3 R- S/总误差

常被称为分离系数或间隙系数。计算方式为 $S/(S-E)$ 或常用的 $S/(UR_{ref} + UR_{off})$ 。

分离系数常被缩写为 SF 所以很多时候会被误认为安全系数。实际上，误差规模与概率分布相关，所以 SF 为 2 时并不表示安全系数比 SF 为 1 时增加了两倍。

1.4 P – 交点概率



UR_{rel} = 1 个标准偏差时的相对误差总和。

Comb hole dim = 参考井井眼或是套管直径+邻井井眼或套管直径（见 2.5）

交点概率的计算方式是一个含有 S , UR_{rel} , 以及集和井眼尺寸的一个方程。（见 2.11）

P 是唯一能量化碰撞概率的规则。但现在的计算方式所用的假设条件在某些情况下并不正确。

2.0 计算选项

每个规则由多个部分组成，每个部分都有变量，须逐一清楚地指定。有些变量对结果并无太大的影响。但不管多么细微的变化都能在报告里呈现，所以在不同的程序或电脑里计算相同的规则时必须保持一致。下面会详细介绍能影响防撞策略里 13 个常用部分的变量：

当调查两个独立的防撞扫描（ E, R, P ）的差异时，首先检查两个程序的 S 是否相同。如有不同，也许与下面的 2.1 或 2.2 有关。

2.1 中心距计算方式（影响 S, E, R, P ）

软件通常支持 3 种扫描方式：

- 最小距离（也叫 3 维或最近间隔）扫描
 - 与邻井垂直
 - 如果目标点不能垂直于邻井（比如参考井深于邻井），最短间隔就是目标点与邻井井底之间的直线距离。
 - 常用于数字分析
- 法面扫描
 - 与参考井垂直
 - 仅限于在法平面图上出现。
- 水平面扫描
 - 防撞计算中一般不会使用

尽管法平面图只是用来表示参考井与邻井之间距离有多接近的一种替代方式，其结果会因不同的计算规则而异，相应的也会影响实钻决定。所以这是一个重要的计算变量，而不仅是一种报告选项。

所有软件均不支持水平面扫描。就算有，极可能被错误的应用。

如扫描间隔过长，上述方法均可能漏掉最短间隔的深度。在设计软件和工作流程的时候必须确保所有的邻井以及最短间隔都能及时发现并做出补救措施（见 2.2）。如果邻井紧邻扫描面，在水平面和法平面扫描时会被遗漏或发现得太晚。如果邻井是位于参考井钻头前方的位置，这两种扫描方式均不会察觉。对法平面扫描报告来说，此不足可从邻井反算与参考井的最短间隔距离来弥补，但会有不规则的扫描段。

2.2 扫描段（影响 S, E, R, P）

在近距离钻井规则中，扫描段无明确规定。常规假设是扫描方法能辨别出所有重要的近距离目标点。

软件会在预设好的间隔段沿井筒进行防撞扫描；如实钻井的每个测量点或设计井轨上有规律的测深增量（常用间隔是每 30 米或 100 英尺）。最近距离的目标点是用区间二分或相似的方法来确定。部分软件会在两个连续扫描（收敛点）之间加上额外的点来确认之间是否有最近距离的目标点。

如前所述（见 2.1），法平面扫描是在邻井均匀间隔上进行的，所以参考井的防撞报告上会有不规则的间隔段。

即使以 30 米的间隔进行防撞扫描计算对于井数拥挤的大油田来说是非常费时的工作，因此缩短扫描间隔的可行性极小。然而有些井轨设计需要较短的扫描间隔以确保能发现最近距离目标点的井段。用户必须了解软件后面的扫描逻辑，反之软件也须具备能让用户改变默认间隔的功能。

2.3 误差模型（影响 E, R, P）

现今常用的误差模型有好几种。ISCWSA 通用模型常为首选，但仍有为数不少的作业公司还在使用圆锥模型或是 Wolff 和 De Wardt 模型。在任何情况下，上述几个模型均需用户输入与工具相关的数值。所以就算同样的模型，会因用户的不同而变化。

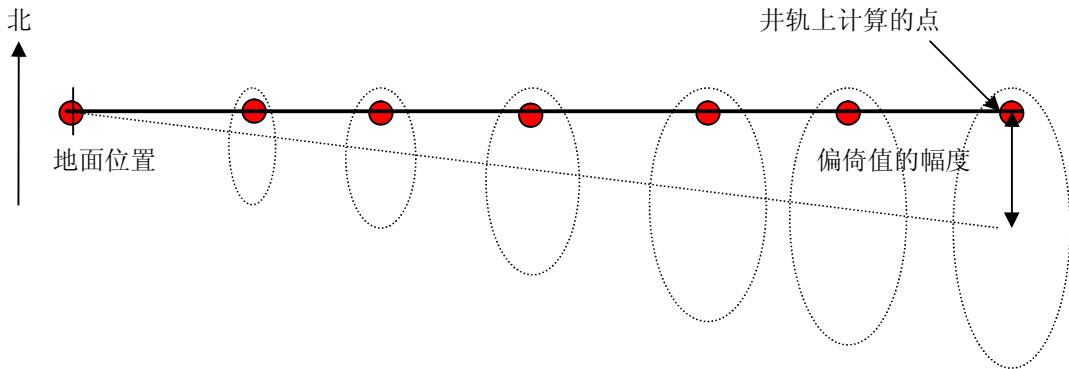
偏倚误差源的管理

多数误差均假设其分布的均值为零，但有些误差的均值不等于零（偏倚误差）。此为已知误差而非统计中的不确定性。

ISCWSA 模型考虑了偏倚误差的存在。在通用 MWD 工具模型中，钻杆拉伸和轴向磁干扰易有偏倚误差特性，并给出偏倚误差和不确定性这两个选项。然而如果定位报告里含有偏倚误差值，会使其结果更难被用户理解或增加日常工作流程的难度。

几种管理偏倚误差的方法：

- 去掉偏倚值
 - 对测量数据进行偏倚误差校正并将其偏倚值设为零。
- 忽略偏倚值
 - 偏倚值设为零并增加数据的不确定性以弥补偏倚误差。
- 在定位报告中，间隔距离和防碰计算中包括偏倚值：
 - 在间隔计算中总是包括偏倚值
 - 或者
 - 当其能给出更大的最小允许间距时才包括偏倚值



图为轴向磁干扰对方位角偏倚值误差的影响

上图为表示偏倚值最普遍的方式。井轨并没有随着椭球的中心而移动。如在这 4 种防碰规则中加入偏倚值，其影响绝对会在间隔距离中体现。

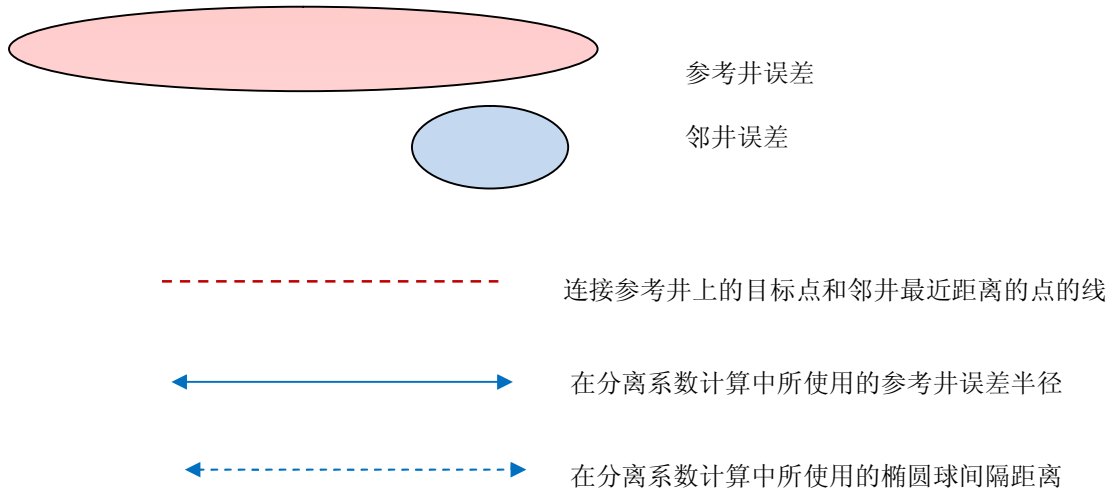
钻柱磁干扰偏倚误差的幅度由井轨和地球磁场向量之间的角度决定。例如，相同的井轨在南半球的偏倚值和北半球的偏倚值正好相反。ISCWSA 基础模型里的偏倚值在 SPE 67616 中是正数，可能让人误会偏倚值只能是正数。实际上，正负皆可依需求而定。

2.4 椭球半径（影响 E, R）

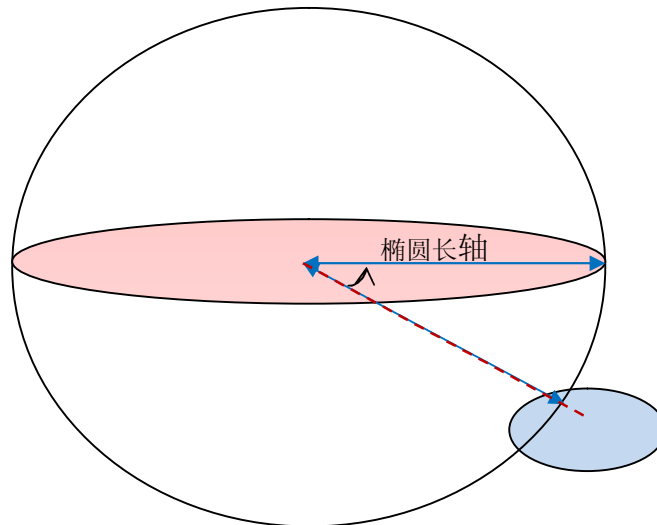
有些软件会先把 3 维几何形状投影在 2 维的平面上，下面列举的方法适用于所有椭圆或椭球。计算结果不论是以 3 维，2 维，或是 2 维投影平面的选择，对最终结果影响甚微。

参考井半径的建立方式可在下面一系列的图中看到，但同样的方法也适用于建立邻井的半径。

图解：



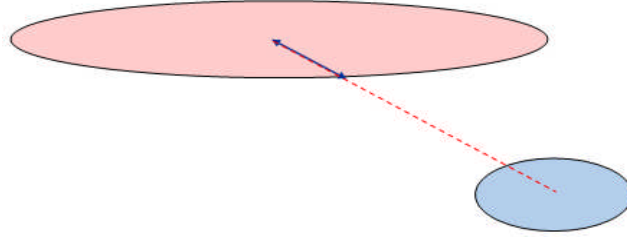
- 最长半轴（等同于假设误差椭圆或椭球）



该方法在没有严格控制条件下，夸大误差定位，在一定条件下它并不能提供额外的安全系数，但在其它条件下又过于保守。它有可能引起不必要的重新设计，定向控制，或干预。

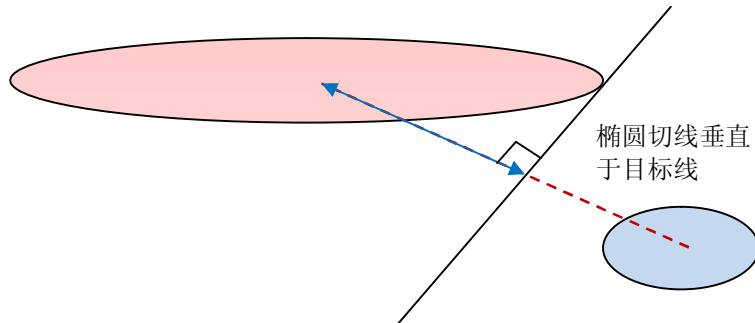
Collision Avoidance Calculations - Current Common Practice

- 沿连接参考井和邻井目标点的线上椭圆或椭球的半径（目前没有在软件中使用）



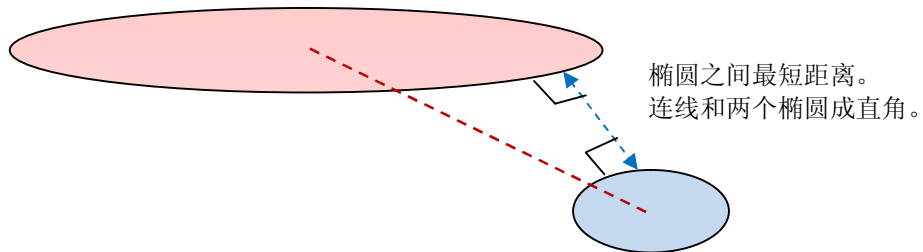
在椭球的某些角度上，会低估误差范围。

- 垂足曲线或表面半径（椭圆或椭球投影在参考目标点和邻井线上的长度）。



为多数井轨设计软件使用，但在某些角度会夸大误差椭圆。

- 椭圆或椭球间隔距离（E, R）



椭圆或椭球之间最短间隔，与目标线无关。在 R 规则里，系数计算方式为 $S/(S-E)$ 。（见 1.3.）

2.5 包括井眼和套管直径（影响 S, E, R, P）

P 的计算方式必须含有井眼尺寸，并推荐在其它规则中使用。当井与井之间的间隔较短时，如计算中没有考虑井眼尺寸，结果不仅会误导也可能非常危险。

在不同的计算方式中井眼尺寸的使用也有微小的差别（顺序为 S,E,R,P）：

包括什么？

参考井	邻井
井眼	套管
套管	套管
井眼	井眼
没有（P 不需要）	

计算方式？

- 从中心距减去井眼尺寸。
- 增加误差规模（R）。

2.6 包括椭圆或椭球比例（影响 E, R）

置信水平选择

此选项对椭球的尺寸有很大影响。一般说来可任意选择，目前常用的是 2，2.58，2.79 和 3 sigma。

如何细分

a. 不同的标准偏差下的置信水平

- 置信水平

概率	标准偏差				
	±1	±2	±2.58	±2.79	±3
维数					
1	68.27%	95.45%	99.01%	99.47%	99.73%
2	39.35%	86.47%	96.41%	97.96%	98.89%
3	19.87%	73.85%	91.63%	94.93%	97.07%

b. 不同维数下的置信水平

- 标准偏差隐含在置信水平里

概率	置信区间				
维数	68.3%	90.0%	95.0%	99.0%	99.7%
1	0.9999	1.6448	1.9599	2.5758	2.9677
2	1.5151	2.1459	2.4477	3.0348	3.4086
3	1.8779	2.5002	2.7954	3.3682	3.7325

2.7 误差分布函数（影响 P）

业内通用的方法是假设误差函数呈正态分布。但 StatoilHydro 分析指出某些地磁参考误差分布多有长尾的情况。本工作组的成员也指出类似的分布状态也适用于其它几个误差值。这会大大影响防碰概率的计算（P）。

工作组还专门成立了一个小队来研究是否有更合适的概率分布来精确的模拟实际情况。调查结果显示大尾分布函数极少且计算方式过于复杂，实现起来不太实际。

众所周知，正态分布也为 BGGM 模型所采用，但在 2009 年，有报告对它进行了重新评估，发现其真实的误差分布与当前使用的正态分布有着显著的不同（详见 Macmillan S., McKay A. and Grindrod S., “Confidence Limits Associated with Values of the Earth’s Magnetic Field Used for Directional Drilling”, SPE/IADC 119851）。文中提出误差分布最好使用置信水平参照表，并提议 ISCWSA MWD 模型里地磁参数的值也使用同样的参照表。

大尾误差分布的高概率让基于正态分布的交叉概率的估计显得过于乐观。这也许是因为有些防碰策略只在没有 HSE 危险的情况下使用 P 的原因之一。

如果是从数据中导出误差值的话，工作组建议 1 个标准偏差是 95.4% 置信水平除以 2。这样能确保在重要的置信水平内误差的实际分布和正态分布能更好的吻合。

2.8 地面位置误差（影响 E, R, P）

更准确的说法应是井眼参考点的定位误差或是与联结深度相关的第一个测量数据点的误差。对海上钻井来说，也指水下位置。

现今实施各有不同：

- 包括或不包括
- 如果包括：
 - 直接累加在井下测斜数据的误差上
 - 考虑井下测斜数据的误差
 - 考虑邻井测斜数据的误差（相关或不相关）

当井间距越小，地面位置误差对防碰计算的影响越大，所以最好在计算时考虑在内。正确的方法是适当考虑与其它测斜数据误差的关联性。

2.9 相对误差计算（影响 R, P）

井和井之间的误差关联性：

- 每口井有独立的椭球
 - R 使用
- 假设误差之间没有关联性（相关系数为 0）
 - P 使用
 - 参考井和邻井斜方差阵之和
- 相关性的精确度
 - ISCWSA 模型对井和井之间的相关性精确度估算能达到相关系数 $\rho=0.3$ 。
 - SPE67616 详细的叙述了计算相对误差的数学原理。

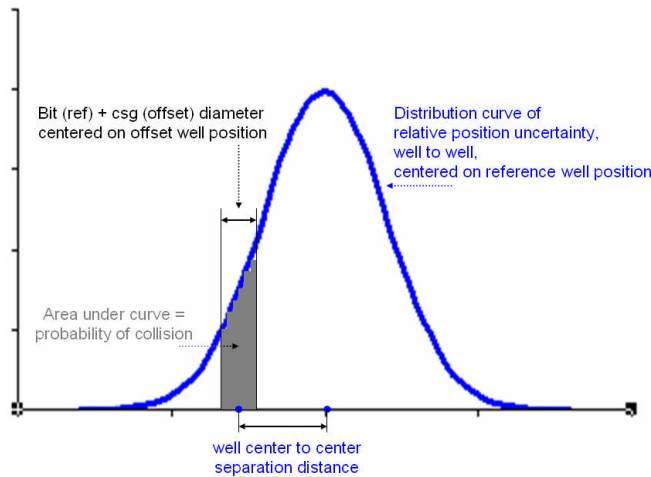
2.10 随意量化误差（影响 S, E, R）

- 人为误差。*
- 误差累加或从井的间隔距离中减去
- 或是一个固定值或测深的百分比
- 完钻长度的百分比可四舍五入。

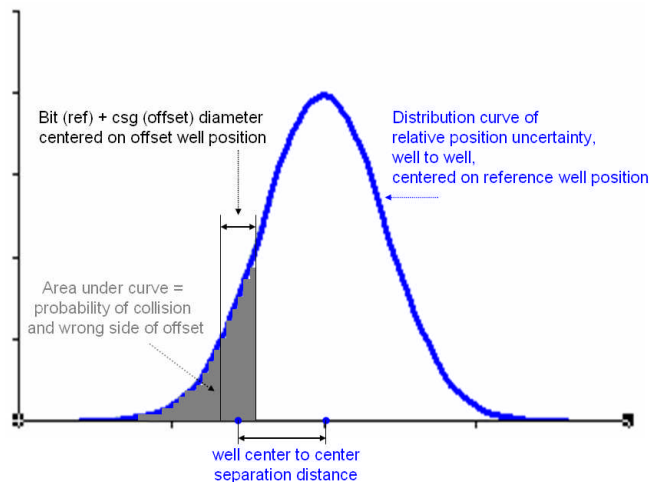
* 误差模型无法估计错误。数据管理必须拥有严格的质量监控流程来确保模型的预测质量。

2.11 防碰概率计算（影响 P）

虽然计算防碰概率的方法有很多，但实际应用的只有一种。如下图所示，此法是依据垂直于参考井和邻井的一维概率密度函数积分计算。



另一种方法就是包括参考井位于邻井错误一方的概率。



工作组评估过所有发表的计算防碰的方法，SPE 20908, 23941/2, 36484, 92554, 101719, 116155, 美国专利 5901795，以及 Angus Jamieson (ISCWSA 28) 和 Jerry Codling (ISCWSA 27) 在会上提出的两种方法。

SPE36484 里所描述的方法除对相距很近的平行井轨无效外，其它情况下都是正确的。通过将其表达为沿参考井的二维有限段积分，该方法可得到进一步改进。如有平行井轨，使用的方法必须考虑误差定位变量。

SPE 23941/2 和 116155，以及 Jamieson 和 Codling 算法都可用来更好的研究如何计算平行井轨之间的防碰。同时使用蒙特卡洛模型来评价候选方法，如能解决其计算的复杂性以及电脑运行的限制的话，它本身就是一个有效的计算方式。

工作组也考虑过概率稀释（在这个点上碰撞概率会随着误差的增加而减少）这个现象，对于在防碰管理上无法提出任何有效建议。

2.12 量化参数选择(影响 S, E, R, P)

基本测量值:

- S 距离
- E 距离
- R 比率
- P 分数

这 4 个规则里，每个点的上限都可用距离来表示（如最小允许间距，缩写为 **masd**）。井间距与最允许间距相比较来决定是否在可接受范围内。

2.13 规则中的上限值 (影响 S, E, R, P)

防碰策略中会有多个上限值，因不同的碰撞概率会有相应的纠正措施。

置信区间的选择对 E 和 R 的上限值有很大的影响（见 2.6）。例如，R 规则误差椭圆为 **3sigma**，上限值为 1.0 的 **masd** 和误差椭圆为 **2sigma**，上限值为 1.5 的 **masd** 是一样的。

3.0 比较

下表中的井眼尺寸为英尺，但结果并不受单位的影响。单位只对 S 和 E 有效。E 和 R 误差椭圆为常用的 3sigma。这是常用的方法，目前业内尚无标准方法。为防不同的角度会有不同的结果，下列例子均用椭圆。

	参考井		邻井		S	S	E	E	R	R	R	R	P	P
	钻头	误差	套管	误差		注释		注释	注释	注释	注释	注释		注释
	直径	3σ	直径	3σ		a.		a.	d.	b, d.	c, d.	c, e.		f.
1	2.00	5.0	2.00	3.0	16.0	14.0	8.0	6.0	2.0	1.6	1.8	2.4	1:3E12	1:3E12
2	0.80	30.0	1.00	50.0	80.0	79.1	0.0	-0.9	1.0	1.0	1.0	1.4	1:128,000	1:42,500
3	3.00	2.0	2.50	2.3	7.0	4.3	2.7	0.0	1.6	1.0	1.0	1.4	1:69,600	1:69,600
4	0.70	250.0	0.50	120.0	200.0	199.4	-170.0	-170.6	0.5	0.5	0.5	0.7	1:2,000	1:65
5	0.25	50.0	0.25	50.0	0.5	0.3	-99.5	-99.8	0.0	0.0	0.0	0.0	1:120	1:2
6	3.00	2.0	2.00	1.0	4.0	1.5	1.0	-1.5	1.3	0.7	0.5	0.7	1:45	1:45
7	3.00	6.0	3.00	6.0	7.0	4.0	-5.0	-8.0	0.6	0.5	0.3	0.5	1:13	1:13
8	0.25	1.0	0.25	1.0	0.5	0.3	-1.5	-1.8	0.3	0.2	0.1	0.2	1:4	1:3
9	2.00	0.5	2.00	0.5	2.0	0.0	1.0	-1.0	2.0	0.7	0.0	0.0	1:2	1:2

注释:

- 减去钻头和套管的半径
- 误差包括钻头和套管半径
- 间隔距离中减去钻头和套管半径
- 井和井之间的误差就是椭圆尺寸相加
- 井和井之间的相关系数为 0
- 包括本井在邻井的另一边概率

不同结果的比较是颇有意义的，它表明不同规则的应用对井轨设计和钻井决策影响巨大。尽管 R 不是标准的碰撞概率计算规则，但如果碰撞概率大于千分之一时可提供警告。

4.0 建议

R 是目前最常用的防碰规则。第二章里提到的 13 个计算变量中有 11 个被 R 采用。工作组在审查了所有的可能性后，对 R 的使用提出下列建议：

- a. 勿用于水平面扫描。(2.1)
- b. 误差模型必须能量化重要的变量并能针对模型导出的质量监控参数进行验证 (ISCWSA 模型)。(2.3)
- c. 模型中的钻柱干扰值不宜含有偏倚值。(2.3)
- d. 椭圆半径是由垂足曲线或最近距离计算而来的。(2.4)
- e. 对参考井上任意深度，确认最小 R，不是最小 S 或 E (2.2, 2.4)
- f. 包括井眼尺寸，最好是从间隔距离里减去井眼尺寸的总和。(2.5)
- g. 正确评估井口误差与相应的井下测斜数据或邻井井口误差的相关系数。(2.8)
- h. 仅在适当考虑使用 rho3 井间相关系数的前提下计算相关误差（与参考井或邻井相关的椭球）。(2.9)