

天文学、地球科学

# 均角全距法钻孔轨迹一般计算公式的缺陷修正

李长俊<sup>1 2</sup> 杨典森<sup>1</sup> 陈卫忠<sup>1 3</sup> 刘金泉<sup>1 2</sup>

(中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室<sup>1</sup>, 武汉 430071;  
中国科学院大学<sup>2</sup>, 北京 100049; 山东大学岩土与结构工程研究中心<sup>3</sup>, 济南 250061)

**摘要** 均角全距法是定向钻孔轨迹计算最常用的方法之一;但均角全距法一般计算公式存在一个缺陷:当临近两测点的方位角差值大于  $180^\circ$  时,按均角全距法一般公式计算的方位角算术平均值方向与模型假设的实际平均方位方向正好相反;如果忽视此问题往往会造成水平向坐标增量出现较大的计算误差,进而影响钻孔定位精度。针对该问题,首先讨论了实际平均方位与方位角算术平均值的关系;然后通过严格的几何计算推导出了全新的均角全距法修正公式;最后采用一般公式、SY/T 5088—2008《钻井井身质量控制规范》(以下简称《规范》)算法、修正公式三种方法进行算例对比分析。计算结果显示:修正公式与《规范》算法的计算结果完全一致,证明了修正公式的正确性;当相邻两测点方位角差值大于  $180^\circ$ ,一般计算公式与修正公式的水平向坐标增量  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  正负异号,表明修正公式正好克服了一般公式方位算反的缺陷。总的说来,修正公式成功地解决了一般公式的缺陷,同时克服了《规范》算法需分类讨论的缺陷,建议推广使用。

**关键词** 定向钻 钻孔轨迹 均角全距法 方位角算术平均值 平均方位  
中图法分类号 P207; 文献标志码 A

随着定向钻进技术在石油、煤炭、地勘、非开挖管道敷设等众多领域得到日益广泛的应用,其对钻孔定位精度也提出了更高的要求。然而,钻孔轨迹是一条连续变化、形态未知的曲线,常规的测斜方法无法对钻孔进行连续测量,只能对有限的测斜点的钻孔轴线长度(测程)、井斜角、方位角进行测量,然后对测斜点之间的孔段做某些几何假设,建立数学模型来间接描述钻孔轨迹。据相关文献,由于所作几何假设的不同,国内外已提出的钻孔轨迹计算数学模型有二十多种,但应用最广泛的方法是计算简洁且精度较好的均角全距法(也叫平均角法)和全角半距法<sup>[1 2]</sup>。

均角全距法作为一种应用最普遍的钻孔轨迹计算方法,其一般计算公式却存在一个缺陷,即当临近两个测点的方位角差值大于  $180^\circ$  时,按均角全距法一般公式计算的平均方位角方向与模型假设的实际方

位角方向正好相反,如果忽视此问题往往会造成水平向坐标增量出现较大的计算误差,进而影响钻孔定位精度。例如钻孔轨迹上相邻两测点的方位角分别为  $350^\circ$  和  $10^\circ$ ,则二者计算的平均方位角为  $(350^\circ + 10^\circ) / 2 = 180^\circ$ ,很明显实际的平均方位对应的方位角应该为  $0^\circ$ ,如果仍然按照  $180^\circ$  计算会出现明显的错误。在四川某钻井工程中,曾出现某技术员把定向钻钻孔轨迹的方位算反了,导致最后工程事故急救时寻找钻头钻具一直找不到位置,严重影响了工程事故处理的进度。但在国内很多专著、手册、学术论文中,均没有注意到此问题,如《钻井手册(甲方)下册》(1990)、《定向钻进原理与应用》等专著中均角全距法计算公式均没有提及该问题<sup>[3 4]</sup>。在现行行业标准 SY/T 5088—2008《钻井井身质量控制规范》(以下简称《规范》)附录 A 中对平均角法(即均角全距法)的方位角进行了规定,当相邻两测点方位角差值大于  $180^\circ$  时,较大的方位角取值减小  $360^\circ$ ,不失为一种较简便的计算方法,但不足之处在于每次都需要先对两测点方位角的差值范围进行分类讨论,且未对两方位角正好相差  $180^\circ$  这一极特殊情况进行讨论<sup>[5]</sup>。此外,刘学俊、袁代义也针对该问题进行了讨论,但也是通过分类讨论来调整平均方位角取值,并没有从公式本身去修正<sup>[6 7]</sup>。有没有一种通用的计算公式,既能克服均角全距法一般计算公式方位可能算反的缺陷,又无需每次都分类讨论两方位角的差值范围。

2016 年 10 月 9 日收到 国家重点基础研究发展计划(973)项目  
(2013CB036006)资助

第一作者简介:李长俊(1988—),男,博士研究生。研究方向:隧道及地下结构健康监测。E-mail:lichangjun24@126.com。

引用格式:李长俊,杨典森,陈卫忠,等.均角全距法钻孔轨迹一般计算公式的缺陷修正[J].科学与技术工程,2017,17(10):108—113

Li Changjun, Yang Diansen, Chen Weizhong, et al. Modification of the general formula of the average-angle method for drilling trace calculation [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(10): 108—113

鉴于均角全距法使用频率很高,其一般形式公式又存在明显缺陷,而《规范》给出的方法需要分类讨论,本文将通过严格的几何推导对均角全距法一般计算公式进行修正。修正后的公式可克服均角全距法一般计算公式方位可能算反的缺陷,且无需分类讨论两方位角的差值范围,对任意取值的两个方位角均能直接带入修正公式直接计算出正确结果。

### 1 均角全距法一般计算公式介绍

均角全距法假设两相邻测点之间的孔段为直线段,长度等于此相邻两测点之间钻孔轴线长度,该直线段的井斜角和方位角分别等于上下两测点井斜角和方位角的平均值,整个钻孔轨迹是一空间折线。均角全距法几何原理图如图1。图1中A、B为钻孔轨迹上相邻的两个测点,A'、B'是其水平投影,A''、B''是其在竖直坐标轴上的投影,已测得A、B两点间测程为Δl,井斜角分别为θ<sub>A</sub>、θ<sub>B</sub>,方位角分别为α<sub>A</sub>、α<sub>B</sub>,钻孔轨迹计算时假设A、B两点间为直线段,AB段的长度等于测程Δl,AB段的井斜角和方位角为两测点角度的平均值。AB孔段钻孔轴线坐标增量的一般计算公式为式(1),对应的整个钻孔轴线轨迹绝对坐标的一般计算公式为式(2)。

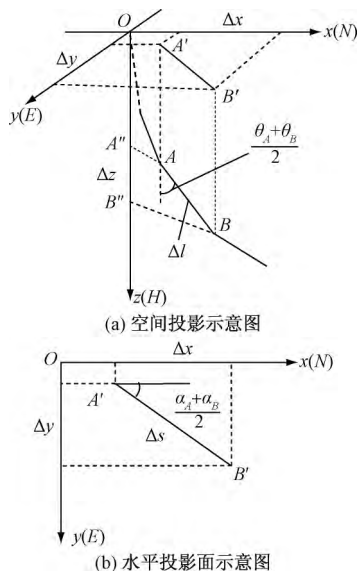


图1 均角全距法计算原理图

Fig. 1 Diagram of the computational principle of the average-angle method

$$\begin{cases} \Delta x = \Delta l \sin \frac{\theta_A + \theta_B}{2} \cos \frac{\alpha_A + \alpha_B}{2} \\ \Delta y = \Delta l \sin \frac{\theta_A + \theta_B}{2} \sin \frac{\alpha_A + \alpha_B}{2} \\ \Delta z = \Delta l \cos \frac{\theta_A + \theta_B}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中,Δx、Δy、Δz分别为AB段轨迹在正北、正东、竖直方向的坐标增量;Δl为A、B两测点间测程;θ<sub>A</sub>、θ<sub>B</sub>分别为A、B测点井斜角;α<sub>A</sub>、α<sub>B</sub>分别为A、B测点方位角。

$$\begin{cases} x_n = x_0 + \sum_{i=1}^n \Delta l_i \sin \frac{\theta_i + \theta_{i-1}}{2} \cos \frac{\alpha_i + \alpha_{i-1}}{2} \\ y_n = y_0 + \sum_{i=1}^n \Delta l_i \sin \frac{\theta_i + \theta_{i-1}}{2} \sin \frac{\alpha_i + \alpha_{i-1}}{2} \\ z_n = z_0 + \sum_{i=1}^n \Delta l_i \cos \frac{\theta_i + \theta_{i-1}}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中,x<sub>0</sub>、y<sub>0</sub>、z<sub>0</sub>为孔口坐标;x<sub>i</sub>、y<sub>i</sub>、z<sub>i</sub>为测点i的坐标;Δl<sub>i</sub>为测点i-1和测点i之间的测距;θ<sub>i</sub>、α<sub>i</sub>分别为测点i的井斜角、方位角。

### 2 实际平均方位与方位角算术平均值的关系讨论

下面重点讨论两测点平均方位问题,仍采用图1中的模型计算。方位角的取值范围为0° ≤ α<sub>A</sub> < 360°, 0° ≤ α<sub>B</sub> < 360°,两测点的方位角算术平均值为(α<sub>A</sub> + α<sub>B</sub>)/2,两测点实际平均方位对应的方位角为γ,即γ为均角全距法模型实际应采用的方位角,规定0° ≤ γ < 360°。下面分三种情况讨论:①当0° ≤ |α<sub>A</sub> - α<sub>B</sub>| < 180°时,γ = (α<sub>A</sub> + α<sub>B</sub>)/2,如图2(a);②当180° < |α<sub>A</sub> - α<sub>B</sub>| < 360°时,|γ - (α<sub>A</sub> + α<sub>B</sub>)/2| = 180°,如图2(b),γ具体取值如表1;③当|α<sub>A</sub> - α<sub>B</sub>| = 180°时,γ = (α<sub>A</sub> + α<sub>B</sub>)/2 或 |γ - (α<sub>A</sub> + α<sub>B</sub>)/2| = 180°,具体取值按上测段方位变化趋势选取,如图2(c)。由此可知,实际平均方位γ与方位角算术平均值(α<sub>A</sub> + α<sub>B</sub>)/2对应的方位只存在两种关系:方位相同、方位相反。针对每种具体情况,γ具体取值如表1。此处关于实际平均方位取值的讨

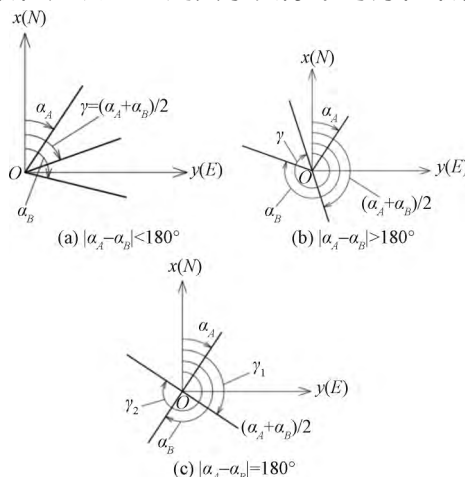


图2 实际平均方位γ与方位角算术平均值(α<sub>A</sub> + α<sub>B</sub>)/2关系示意图

Fig. 2 The corresponding relation of γ and (α<sub>A</sub> + α<sub>B</sub>)/2

表 1 实际平均方位  $\gamma$  与方位角算术平均值  $(\alpha_A + \alpha_B) / 2$  的对应关系表

Table 1 The corresponding relation of  $\gamma$  and  $(\alpha_A + \alpha_B) / 2$

|  |             | $\alpha_A$ 与 $\alpha_B$ 关系   | 相应的 $\gamma$ 与 $(\alpha_A + \alpha_B) / 2$ 关系    |
|--|-------------|--|--|
| $0^\circ \leq  \alpha_A - \alpha_B  < 180^\circ$ |             | —  | $\gamma = (\alpha_A + \alpha_B) / 2$             |
| $180^\circ <  \alpha_A - \alpha_B  < 360^\circ$  |             | $(\alpha_A + \alpha_B) / 2 < 180^\circ$                            | $\gamma = (\alpha_A + \alpha_B) / 2 + 180^\circ$ |
|  |             | $(\alpha_A + \alpha_B) / 2 \geq 180^\circ$                         | $\gamma = (\alpha_A + \alpha_B) / 2 - 180^\circ$ |
| $ \alpha_A - \alpha_B  = 180^\circ$              | 上测段方位沿顺时针增大 | $(\alpha_A + \alpha_B) / 2 < 180^\circ$ 且 $\alpha_A < \alpha_B$    | $\gamma = (\alpha_A + \alpha_B) / 2$             |
|  |             | $(\alpha_A + \alpha_B) / 2 < 180^\circ$ 且 $\alpha_A > \alpha_B$    | $\gamma = (\alpha_A + \alpha_B) / 2 + 180^\circ$ |
|  | 上测段方位沿逆时针增大 | $(\alpha_A + \alpha_B) / 2 \geq 180^\circ$ 且 $\alpha_A < \alpha_B$ | $\gamma = (\alpha_A + \alpha_B) / 2$             |
|  |             | $(\alpha_A + \alpha_B) / 2 \geq 180^\circ$ 且 $\alpha_A > \alpha_B$ | $\gamma = (\alpha_A + \alpha_B) / 2 - 180^\circ$ |

论与《定向井轨道设计与轨迹计算》(SY/T 5435—2012)、《定向钻井设计与计算》及文献[6,7]中关于方位角增量取值、平均方位角取值的讨论有异曲同工之妙<sup>[6-9]</sup>。

### 3 均角全距法一般计算公式的修正

在上面一系列讨论的基础上可知,实际平均方位  $\gamma$  与方位角算术平均值  $(\alpha_A + \alpha_B) / 2$  的方位只存在同向和反向两种关系。下面针对均角全距法一般计算式(1)和式(2)的缺陷,仍基于图1中所示模型,从几何上严格地推导均角全距法的正确计算公式。具体计算原理图如图3,其中图3(a)代表  $\gamma$  与  $(\alpha_A + \alpha_B) / 2$  同向的情形,图3(b)代表  $\gamma$  与  $(\alpha_A + \alpha_B) / 2$  反向的情形。设方位角  $\alpha_A, \alpha_B$  在  $Oxy$  坐标面上对应的单位方向向量分别为  $r_1, r_2$ , 记  $r = r_1 + r_2$ , 则  $r_1 = (\cos\alpha_A, \sin\alpha_A), r_2 = (\cos\alpha_B, \sin\alpha_B), r = (\cos\alpha_A + \cos\alpha_B, \sin\alpha_A + \sin\alpha_B)$ 。在几何上,无论  $\gamma$  与  $(\alpha_A + \alpha_B) / 2$  同向或反向,  $\gamma$  方向总是与  $r$  方向一致,即  $r$  是  $\gamma$  的方向向量,于是可以通过向量  $r$  的坐标求得  $\sin\gamma$  和  $\cos\gamma$ , 如式(3)和式(4)。需要注意的是,若  $|\alpha_A - \alpha_B| = 180^\circ$ , 则  $r = (0, 0)$ , 对于此极特殊情况,应参照表1计算  $\sin\gamma$  和  $\cos\gamma$ 。

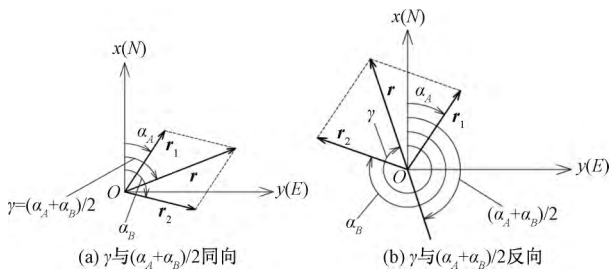


图3 均角全距法修正公式推导原理图

Fig. 3 The derivation schematic diagram for the modified formula of the average-angle method

$$\sin\gamma = \frac{\sin\alpha_A + \sin\alpha_B}{\sqrt{(\sin\alpha_A + \sin\alpha_B)^2 + (\cos\alpha_A + \cos\alpha_B)^2}} =$$

$$\frac{2\sin\frac{\alpha_A + \alpha_B}{2}\cos\frac{\alpha_A - \alpha_B}{2}}{\sqrt{2 + 2(\cos\alpha_A\cos\alpha_B + \sin\alpha_A\sin\alpha_B)}} = \frac{2\sin\frac{\alpha_A + \alpha_B}{2}\cos\frac{\alpha_A - \alpha_B}{2}}{\sqrt{2 + 2\cos(\alpha_A - \alpha_B)}} = \frac{2\sin\frac{\alpha_A + \alpha_B}{2}\cos\frac{\alpha_A - \alpha_B}{2}}{\sqrt{4\cos^2\frac{\alpha_A - \alpha_B}{2}}} = \frac{\cos\frac{\alpha_A - \alpha_B}{2}}{\left|\cos\frac{\alpha_A - \alpha_B}{2}\right|} \sin\frac{\alpha_A + \alpha_B}{2} \quad (3)$$

$$\cos\gamma = \frac{\cos\alpha_A + \cos\alpha_B}{\sqrt{(\sin\alpha_A + \sin\alpha_B)^2 + (\cos\alpha_A + \cos\alpha_B)^2}} = \frac{2\cos\frac{\alpha_A + \alpha_B}{2}\cos\frac{\alpha_A - \alpha_B}{2}}{\sqrt{2 + 2(\cos\alpha_A\cos\alpha_B + \sin\alpha_A\sin\alpha_B)}} = \frac{2\cos\frac{\alpha_A + \alpha_B}{2}\cos\frac{\alpha_A - \alpha_B}{2}}{\sqrt{2 + 2\cos(\alpha_A - \alpha_B)}} = \frac{\cos\frac{\alpha_A + \alpha_B}{2}\cos\frac{\alpha_A - \alpha_B}{2}}{\sqrt{4\cos^2\frac{\alpha_A - \alpha_B}{2}}} = \frac{\cos\frac{\alpha_A - \alpha_B}{2}}{\left|\cos\frac{\alpha_A - \alpha_B}{2}\right|} \cos\frac{\alpha_A + \alpha_B}{2} \quad (4)$$

至此,明确了实际平均方位  $\gamma$  与方位角算术平均值  $(\alpha_A + \alpha_B) / 2$  的关系,并给出了  $\sin\gamma, \cos\gamma$  的数学表达式,下一步就可以用实际平均方位  $\gamma$  去替换  $(\alpha_A + \alpha_B) / 2$  来修正式(1)、式(2)的缺陷,即可采用  $\sin\gamma, \cos\gamma$  的表达式(3)、式(4)去替换式(1)、式(2)中对应的项  $\sin(\alpha_A + \alpha_B) / 2, \cos(\alpha_A + \alpha_B) / 2$ , 这样

就可以得到均角全距法修正式(5)、式(6)。可以看到,修正后的式(5)、式(6)比一般计算式(1)、式

$$(2) \text{ 多出了修正系数 } \lambda = \frac{\cos \frac{\alpha_A - \alpha_B}{2}}{\left| \cos \frac{\alpha_A - \alpha_B}{2} \right|}, \text{ 修正系数}$$

$\lambda$  的取值如表 2,与表 1 正好是一一对应的。至此,修正公式已完全推导完毕。由于修正公式采用严格的向量方法计算平均方位,不会出现方位算反的情况,同时可直接将给定的两个方位角直接带入计算,无需分类讨论。

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta x &= \Delta l \sin \frac{\theta_A + \theta_B}{2} \cos \gamma = \\ &\Delta l \sin \frac{\theta_A + \theta_B}{2} \cos \frac{\alpha_A + \alpha_B}{2} \frac{\cos \frac{\alpha_A - \alpha_B}{2}}{\left| \cos \frac{\alpha_A - \alpha_B}{2} \right|} \\ \Delta y &= \Delta l \sin \frac{\theta_A + \theta_B}{2} \sin \gamma = \\ &\Delta l \sin \frac{\theta_A + \theta_B}{2} \sin \frac{\alpha_A + \alpha_B}{2} \frac{\cos \frac{\alpha_A - \alpha_B}{2}}{\left| \cos \frac{\alpha_A - \alpha_B}{2} \right|} \\ \Delta z &= \Delta l \cos \frac{\theta_A + \theta_B}{2} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{aligned} x_n &= x_0 + \sum_{i=1}^n \Delta l_i \sin \frac{\theta_i + \theta_{i-1}}{2} \cos \gamma = \\ &x_0 + \sum_{i=1}^n \Delta l_i \sin \frac{\theta_i + \theta_{i-1}}{2} \cos \frac{\alpha_i + \alpha_{i-1}}{2} \times \\ &\frac{\cos \frac{\alpha_A - \alpha_B}{2}}{\left| \cos \frac{\alpha_A - \alpha_B}{2} \right|} \\ y_n &= y_0 + \sum_{i=1}^n \Delta l_i \sin \frac{\theta_i + \theta_{i-1}}{2} \sin \gamma = \\ &y_0 + \sum_{i=1}^n \Delta l_i \sin \frac{\theta_i + \theta_{i-1}}{2} \sin \frac{\alpha_i + \alpha_{i-1}}{2} \times \\ &\frac{\cos \frac{\alpha_A - \alpha_B}{2}}{\left| \cos \frac{\alpha_A - \alpha_B}{2} \right|} \\ z_n &= z_0 + \sum_{i=1}^n \Delta l_i \cos \frac{\theta_i + \theta_{i-1}}{2} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

表 2 修正系数  $\lambda$  与  $|\alpha_A - \alpha_B|$  对应关系表

Table 2 The corresponding relation of  $\lambda$  and  $|\alpha_A - \alpha_B|$

| $ \alpha_A - \alpha_B $ 取值范围                     | 相应的修正系数 $\lambda$ 取值 |
|--|----------------------|
| $0^\circ \leq  \alpha_A - \alpha_B  < 180^\circ$ | 1                    |
| $180^\circ <  \alpha_A - \alpha_B  < 360^\circ$  | -1                   |
| $ \alpha_A - \alpha_B  = 180^\circ$              | 1 或 -1,可根据上测段的趋势确定   |

### 4 算例对比分析

分别使用一般计算式(1)和式(2)、《规范》中的分类讨论法、修正式(5)和式(6)三种算法对给定算例进行计算结果对比分析。

某定向井段的多个测点的测程  $L$ 、井斜角  $\theta$ 、方位角  $\alpha$  如表 3 所示。分别采用上述三种方法计算该井段的坐标增量,结果如表 4 所示。

表 3 算例井段参数表

Table 3 The parameters of calculation examples

| 测点编号            | 1  | 2  | 3   | 4   |
|-----------------|----|----|-----|-----|
| $L/m$           | 0  | 50 | 100 | 150 |
| $\theta/^\circ$ | 7  | 8  | 9   | 10  |
| $\alpha/^\circ$ | 50 | 30 | 320 | 300 |

表 4 三种算法的计算结果对比表

Table 4 The comparison of calculation results by three algorithms

| 坐标项          | 方法 | 坐标值  |       |       |        |
|--------------|----|------|-------|-------|--------|
|              |    | 测点 1 | 测点 2  | 测点 3  | 测点 4   |
| $\Delta x/m$ | 一般 | 0    | 5.00  | -7.36 | 5.30   |
|              | 规范 | 0    | 5.00  | 7.36  | 5.30   |
|              | 修正 | 0    | 5.00  | 7.36  | 5.30   |
| $\Delta y/m$ | 一般 | 0    | 4.20  | 0.64  | -6.32  |
|              | 规范 | 0    | 4.20  | -0.64 | -6.32  |
|              | 修正 | 0    | 4.20  | -0.64 | -6.32  |
| $\Delta z/m$ | 一般 | 0    | 49.57 | 49.45 | 49.31  |
|              | 规范 | 0    | 49.57 | 49.45 | 49.31  |
|              | 修正 | 0    | 49.57 | 49.45 | 49.31  |
| $x/m$        | 一般 | 0    | 5.00  | -2.36 | 2.94   |
|              | 规范 | 0    | 5.00  | 12.36 | 17.67  |
|              | 修正 | 0    | 5.00  | 12.36 | 17.67  |
| $y/m$        | 一般 | 0    | 4.20  | 4.84  | -1.48  |
|              | 规范 | 0    | 4.20  | 3.55  | -2.77  |
|              | 修正 | 0    | 4.20  | 3.55  | -2.77  |
| $z/m$        | 一般 | 0    | 49.57 | 99.02 | 148.34 |
|              | 规范 | 0    | 49.57 | 99.02 | 148.34 |
|              | 修正 | 0    | 49.57 | 99.02 | 148.34 |

计算结果显示:①修正公式计算结果与《规范》计算结果完全相同,表明修正公式完全正确;②修正公式和一般公式计算的竖直方向坐标值  $\Delta z$ 、 $z$  完全相同,表明竖直方向坐标计算不受方位角影响;③当相邻两测点方位角差值大于  $180^\circ$  时,一般计算公式与修正公式的水平向坐标增量  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  正好正负异号,表明水平向坐标计算值与方位角密切相关,且修正公式正好克服了一般公式方位角算反的缺陷。

### 5 结论

本文通过严格的几何方法,推导出了均角全距法钻孔轨迹计算的准确公式,最终可得出如下几点

结论:

(1) 均角全距法一般计算式(1)、式(2)中,当相邻两测点方位角差值大于 $180^\circ$ 时,会出现方位角算术平均值与实际平均方位正好相反,进而导致水平方向坐标增量的正负号刚好算反。

(2) 本文推导的均角全距法修正式(5)、式(6)与《规范》中分类讨论方法计算的结果完全一致,说明本文所提出的修正公式完全正确。

(3) 本文提出的均角全距法修正式(5)、式(6)完美地克服了均角全距法一般式(1)、式(2)的方位角可能算反的缺陷。

(4) 《规范》中均角全距法公式的形式仍然采用式(1)、式(2)的形式,只是在最后代入计算时调整方位角值来修正公式本身的缺陷,且未对两方位角正好相差 $180^\circ$ 这一极特殊情况进行讨论。该方法不足之处在于每次都需要先对两测点方位角的差值范围进行分类讨论,且代入计算时很多人只看公式而忽略了代入计算时方位角值的调整问题。除了两方位角正好相差 $180^\circ$ 这一极特殊情况需单独讨论外,本文提出的修正式(5)、式(6)对两测点方位角的任何取值都可直接带入计算,无需分类讨论,克服了《规范》算法的不足之处,建议下次修订该规范时采用本文中的均角全距法修正公式。

(5) 在以后的专著、手册、论文、规范中,凡是涉及均角全距法钻孔轨迹计算的地方,建议都可考虑采用本文提出的修正式(5)、式(6)。

#### 参 考 文 献

- 1 黄井武,王志强,谭玉峰. 煤矿工程钻孔轨迹参数计算方法及绘图. 建井技术, 2012; (2): 19—22  
Huang Jingwu, Wang Zhiqiang, Tan Yufeng. Parameter calculation and drawing of mine project drilling trace. Mine Construction Technology, 2012; (2): 19—22
- 2 朱永宜. 钻孔轨迹数学模型在地质勘探中的定位精度验证. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2001; (1): 37—39  
Zhu Yongyi. Verification of the orientation accuracy of mathematical models for borehole courses in geological exploration. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling Engineering), 2001; (1): 37—39
- 3 钻井手册(甲方)编写组. 钻井手册(甲方)下册. 北京:石油工业出版社, 1999: 40  
Drilling manual (Party A) preparation group. Drilling Manual (Part A) Volume II. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999
- 4 吴翔,杨凯华,蒋国盛. 定向钻进原理与应用. 武汉:中国地质大学出版社, 2006  
Wu Xiang, Yang Kaihua, Jiang Guosheng. Directional drilling principles and applications. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2006
- 5 国家发展和改革委员会. SY/T 5088—2008 钻井井身质量控制规范. 北京:石油工业出版社, 2008  
National Development and Reform Commission. SY/T 5088—2008 Specification for wellbore quality. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008
- 6 袁代义. 用平均角法计算井底水平位移时数据的处理. 钻采工艺, 1989; 12(2): 41—44  
Yuan Daiyi. Data processing of wellbore horizontal displacements by the average-angle method. Drilling & Production Crafts, 1989; 12(2): 41—44
- 7 刘学俊. 关于“曲率半径法”和“平均角法”计算井斜水平位移公式的补充修改意见. 石油工业标准与计量, 1990; 6(3): 10—13  
Liu Xuejun. Complementary comments on “the curvature-radius method” and “the average-angle method” for wellbore horizontal displacements calculation. Petroleum Industry Standard and Measuring, 1990; 6(3): 10—13
- 8 国家能源局. SY/T 5435—2012 定向井轨道设计与轨迹计算. 北京:石油工业出版社, 2012  
National Energy Administration. SY/T 5435—2012 Wellpath planning & trajectory calculation for directional wells. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012
- 9 韩志勇. 定向钻井设计与计算. 2版. 北京:中国石油大学出版社, 2007  
Han Zhiyong. Directional drilling design and calculation (second edition). Beijing: China University of Petroleum Press, 2007

## Modification of the General Formula of the Average-angle Method for Drilling Trace Calculation

LI Chang-jun<sup>1,2</sup>, YANG Dian-sen<sup>1</sup>, CHEN Wei-zhong<sup>1,3</sup>, LIU Jin-quan<sup>1,2</sup>

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics<sup>1</sup>, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, P. R. China;  
University of Chinese Academy of Sciences<sup>2</sup>, Beijing 100049, P. R. China; Geotechnical & Structural Engineering Research Center of Shandong University<sup>3</sup>, Jinan 250061, P. R. China)

**[Abstract]** The average-angle method is one of the most generally-used methods for drilling trace calculation. However, there's a defect in the general formula of the average-angle method. When the azimuth difference between two adjacent measuring points exceeds  $180^\circ$ , the corresponding direction of the arithmetic average of azimuth angles used in the general formula is opposite to the actual average azimuth orientation. If we ignore this defect, it may lead to a relatively big calculation error of the horizontal coordinate increments, which may directly affect the borehole positioning accuracy. To solve the defect of the general formula, this paper discussed the relationship between the actual average azimuth orientation and the corresponding direction of the arithmetic average of azimuth angles, and then derived the modified formula from rigorous geometric calculations, and finally use the general formula, the calculation method in "Drilling Borehole Quality Control Specification" (SY/T 5088—2008), the modified formula to calculate a certain example respectively. Through the analysis of the calculation results by three methods, we concluded: the modified formula is exactly the same as the Specification method in calculation results, which proved the correctness of the modified formula; when the azimuth difference between two adjacent measuring points is greater than  $180^\circ$ , the horizontal coordinate increments calculated by the general formula and the modified formula are just opposite, which just verifies the effectiveness of the modified formula's correcting the defect of the general formula. In summary, the modified formula perfectly corrects the defect of the general formula, and overcomes the shortcomings of the Specification method which requires classified discussion meanwhile, which is well worth being popularized.

**[Key words]** directional drilling    drilling trace    the average-angle method    the arithmetic average of azimuth angles    average azimuth orientation