

# 实测地质剖面中地层真厚度计算公式的修正

王兆国<sup>1,2</sup>, 鲁如魁<sup>1,2</sup>, 夏立元<sup>3</sup>

(1. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069;

3. 安徽省地质调查院, 安徽 合肥 230001)

**摘要:** 地层真厚度列氏公式被广大地质工作者所接受和使用,但仍存在诸多问题。从实际情况出发推导了地层厚度计算公式、分析了地层厚度取值范围和角度误差影响、讨论了“0值”、“负值”、“负厚度”等问题,并以实例进行了验证,得到以下认识:①列氏公式只包含了两种野外实测情况,漏掉了一种野外实测情况,文中修正了地层厚度计算公式。②地层厚度 $F$ 值范围为0~1,  $F$ 值在三种野外测量情况下分别具有不同的变化特征,但均在地层倾向与测绳经过的地面坡向近垂直时取得最大值,均在地层倾向与测绳经过的地面坡向近平行时取得最小值。③真倾角、坡角、导线方位与地层走向之间锐夹角的误差影响在三种野外情况下分别具有不同的变化特征,但真倾角与坡角误差均在地层倾向与测绳经过的地面坡向近平行时对厚度计算影响最大,同时导线方位与地层走向锐夹角均在锐夹角小时对地层厚度影响大。④导线是平移导线时,地层厚度才为0;负厚度概念是在特殊的列氏改进公式中才具有意义,只表明导线由上层面向下层面;列氏公式计算的负值是因为缺失一种野外实测情况造成的,负值不等于负厚度;修正的地层厚度公式计算值全为正值,符合客观实际,可结合构造分析用于计算地层总厚度。以上认识对于野外实测剖面选择、导线方位选择、室内地层厚度和总厚度计算具有指导作用,对于基于地层认识的科学研究和生产具有重要价值。

**关键词:** 实测地质剖面;地层真厚度;误差分析

**中图分类号:** P535

**文献标志码:** A

## Correction of the Calculation Formula of Stratum True Thickness in the Measured Geological Section

WANG Zhaoguo<sup>1,2</sup>, LU Rukui<sup>1,2</sup>, XIA Liyuan<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 3. Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, China)

**Abstract:** The ЛЕОНОВСКИЙ' s stratum true thickness formula is widely accepted and used by lots of geologists, but some problems still exist. Based on the actual situation, the calculation formula of stratum thickness was deduced, the range of the stratum thickness value and the influence of angle error were analyzed, and the problems of zero data, negative data and negative thickness of the stratum thickness were discussed. Finally, the case study was carried out to verify it. The results are obtained as follows: ① the ЛЕОНОВСКИЙ' s formula only contains two kinds of field measurement and omits one kind of field measurement, so the calculation formula of stratum thickness is corrected; ② the range of  $F$ -data of stratum thickness is 0~1, and the  $F$ -data has different variation characteristics in three field survey situations respectively, but the maximum values are all obtained when the stratum dip direction is nearly vertical to the ground slope where the measure line passes, and the minimum values are all obtained when the stratum dip direction is nearly parallel to the ground slope where the measure line passes; ③ the error influence of true dip angle, slope angle as well as the acute angle between the guiding line direction and the stratum strike has different variation characteristics in three field conditions, but both the true dip angle and the slope angle error have the greatest influence on the thickness calculation when the stratum trend is nearly parallel to the ground slope direction where the measure line passes, meanwhile, the acute angle between the guiding line direction and the stratum strike has the greatest influence on the stratum thickness when the acute angle is smallest; ④ When the measure line is the translation line, the stratum thickness is zero; the concept of the negative stratum thickness only has its sense in the modified form of ЛЕОНОВСКИЙ' s formula, which just indicates that the measure line crosses from the

收稿日期:2019-04-08

基金项目:国家自然科学基金(41421002);西北大学本科教育质量提升计划(JX17022);陕西省高校青年创新团队计划;陕西省教育厅科学研究计划(2013JK0843)

第一作者:王兆国(1982—),男,讲师,理学博士,主要研究方向为地球物理学。E-mail:wwangzhaoguo@163.com



论文  
拓展  
介绍

upper stratum surface to the lower stratum surface; the negative data of the calculation using the ЛЕОНОВСКИЙ's formula is caused by that the ЛЕОНОВСКИЙ's formula lacks one kind of field measurement, and the negative data isn't equal to the negative thickness; the calculated values of the corrected formula are all positive values, which are in line with the objective reality, meanwhile it can be used to calculate the total stratum thickness combining with the structural analysis. The above knowledge has a guiding role in the selection of field measured profile and guiding line direction as well as the calculation of indoor stratum thickness and total thickness, and has an important value in the scientific research and production based on stratigraphic knowledge.

**Key words:** measured geological section; the true thickness of the stratum; error analysis

区域地质调查工作是获取野外第一手资料的主要手段,也是综合分析沉积相和古地理环境、厘定构造格架、重塑区域构造演化史等后续研究工作的重要基础,主要包括地质踏勘、实测剖面 and 地质填图等三阶段工作。实测地质剖面是厘定地层结构构造特征与地层接触关系、确定地质填图单元及其识别标志的核心工作,涉及剖面实测和编制综合地层柱状图两部分内容。近年来很多学者针对实测地质剖面的绘制问题进行了很多研究<sup>[1-3]</sup>,发展了新的地质剖面绘制方法<sup>[4-5]</sup>,并进行了数字化成图<sup>[6-9]</sup>、自动成图<sup>[10-11]</sup>和数据库系统建设<sup>[12-17]</sup>等研究工作。综合地层柱状图的编制涉及真厚度的计算问题,Mertie<sup>[18]</sup>和Price<sup>[19]</sup>分别提出了地层厚度计算公式,与20世纪50年代引入我国的列氏厚度计算公式相同<sup>[20]</sup>,Ickes<sup>[21]</sup>给出了用积分和方向余弦表示的地层厚度公式,Price<sup>[22]</sup>指出用斜距(纵横距)、真倾角、坡角和地层倾向与测绳经过的坡向的夹角表示的地层厚度公式对于地质学家更适用,Mandelbaum等<sup>[23]</sup>指出公式存在负值问题,建议采用绝对值对负值进行处理,Addie<sup>[24]</sup>提出了用视倾角表示的地层厚度公式,对于负值依然采用取绝对值进行处理。列式公式引入我国后,为便于计算,前人对列氏公式进行了多次讨论和改进<sup>[25-28]</sup>,叶东虎<sup>[29]</sup>编著了岩层厚度计算手册,刘元生<sup>[30]</sup>设计绘制了地层厚度计算表盘,许边远<sup>[31]</sup>在对列氏公式进行改进的基础上,提出了正负厚度的概念,朱正勇等<sup>[32]</sup>根据计算结果针对不同的测量情况对列氏公式采用了取绝对值和负值的方式进行了

改正。在上述文献中,特别是实际工作中发现有“0值”、“负值”现象,其产生的根源、“负值”和“负厚度”概念统一性问题、列氏公式适用性问题悬而未决,亟待研究。

本文从实际工作过程中不同野外露头情况出发,推导了地层厚度的计算公式,对列氏公式进行了修正,分析了新公式的取值范围和角度误差影响,明确了“0值”和“负值”产生原因,理清了“负值”和“负厚度”概念的差异,并以实例验证了地层厚度计算公式。

## 1 地层真厚度计算公式

### 1.1 计算公式推导

列昂托夫斯基<sup>[20]</sup>提出的地层厚度计算公式一直为我国广大地质工作者所接受和使用<sup>[25-32]</sup>,要明确“0值”和“负值”现象,确定“负值”和“负厚度”概念,首先需理清地层厚度计算公式的准确性、正确性和适用性。野外实测剖面时地层倾向与测绳经过的地面坡向存在三种情况(图1):①地层倾向与测绳经过的地面坡向相向;②地层倾向与测绳经过的地面坡向相同,坡度角大于地层倾角;③地层倾向与测绳经过的地面坡向相同,坡度角小于地层倾角。

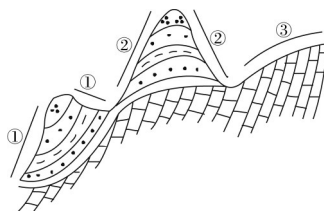


图1 实测地层剖面测线坡度角与地层产状关系示意图

Fig.1 Schematic diagram of the relationship between the slope angle and the stratum dip angle in the field measured profile

图2中两不同灰度的面 $S_{abcd}$ 和 $S_{efgh}$ 是两个平行的层面, $S_{bcgf}$ 是水平面, $S_{ADE}$ 是垂直于 $S_{abcd}$ 和 $S_{efgh}$ 的平面。从 $S_{abcd}$ 和 $S_{ADE}$ 的交线上的点E向面 $S_{efgh}$ 做垂线EF,EF位于面 $S_{ADE}$ 上,F为垂足,因此EF为两个平行层面的垂线段长度,即为地层真厚度。 $S_{bcgf}$ 与 $S_{abcd}$ 、 $S_{bcgf}$ 与 $S_{efgh}$ 的夹角即为真倾角,图中用 $\alpha$ 表示。线段AB为导线经过地面斜坡的导线斜距,过A点做面 $S_{efgh}$ 的垂线,垂足为C, $\angle ABC$ 为坡角,用 $\beta$ 表示。 $\angle \gamma$ 为地层倾向与测绳经过的地面坡向的锐夹角。

由图2a知,

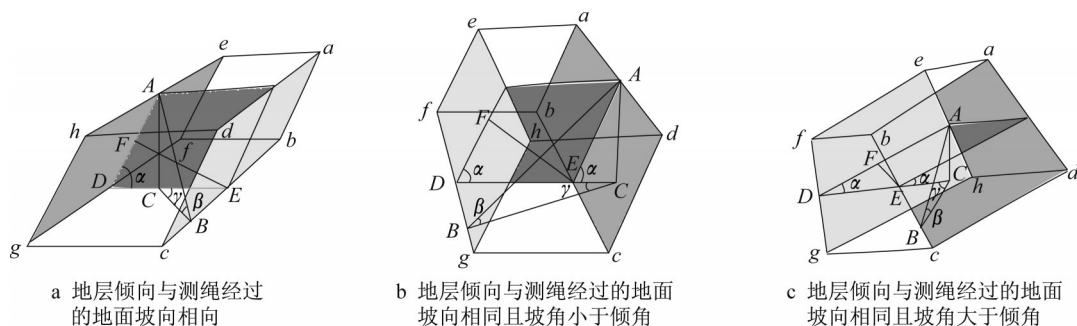


图2 地层真厚度计算模型

Fig.2 The calculation model of the stratum true thickness

$$\begin{cases} AC = AB \sin \beta \\ CD = AC \cot \alpha \\ BC = AB \cos \beta \\ CE = BC \cos \gamma \\ EF = (CD + CE) \sin \alpha \end{cases} \quad (1)$$

由公式(1)可得,

$$EF = AB(\sin \alpha \cos \beta \cos \gamma + \sin \beta \cos \alpha) \quad (2)$$

由图2b知,

$$\begin{cases} AC = AB \sin \beta \\ CE = AC \cot \alpha \\ BC = AB \cos \beta \\ CD = BC \cos \gamma \\ EF = (CD - CE) \sin \alpha \end{cases} \quad (3)$$

由公式(3)可得,

$$EF = AB(\sin \alpha \cos \beta \cos \gamma - \sin \beta \cos \alpha) \quad (4)$$

由图2c知,

$$\begin{cases} AC = AB \sin \beta \\ CD = AC \cot \alpha \\ BC = AB \cos \beta \\ CE = BC \cos \gamma \\ EF = (CD - CE) \sin \alpha \end{cases} \quad (5)$$

由公式(5)可得,

$$EF = AB(-\sin \alpha \cos \beta \cos \gamma + \sin \beta \cos \alpha) \quad (6)$$

由式(2)、(4)、(6)可得地层总厚度计算公式为

$$EF = AB(\pm \sin \alpha \cos \beta \cos \gamma \pm \sin \beta \cos \alpha) \quad (7)$$

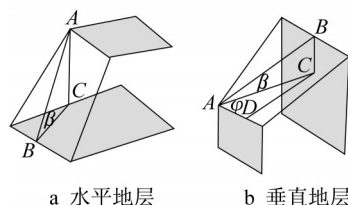
设  $\varphi$  表示导线与地层走向之间的锐夹角, 则  $\varphi$  与  $\gamma$  互余, 由公式(7)得

$$EF = AB(\pm \sin \alpha \cos \beta \sin \varphi \pm \sin \beta \cos \alpha) \quad (8)$$

可知当地层倾向与测绳经过的地面坡向相向时, 式(7)、(8)取“+”、“+”; 当地层倾向与测绳经过的地面坡向相同且坡角小于倾角时, 式(7)和式(8)取“+”、“-”; 当地层倾向与测绳经过的地面坡向相同且坡角大于倾角时, 式(7)和式(8)取“-”、“+”。

## 1.2 地层真厚度计算公式对特殊地层的适用性

为检测公式对特殊地层的适用性, 进行了水平地层和垂直地层的验证。如图3所示, 两灰色面是平行的层面,  $AB$  是导线斜距, 两个层面的垂线段是地层厚度,  $\beta$  是坡角。由图3a知水平地层厚度  $AC = AB \sin \beta$ ; 水平地层的真倾角  $\alpha = 0$ , 代入公式(7)得:  $AC = AB \sin \beta$ , 两者结果一致。由图3b知垂直地层厚度  $CD = AB \cos \beta \sin \varphi$ ; 垂直地层真倾角  $\alpha = 90^\circ$ , 代入公式(7)得:  $CD = AB \cos \beta \sin \varphi$ , 两者结果一致。因此水平或垂直地层计算公式均为地层厚度计算公式(7)的特例。



a 水平地层 b 垂直地层

图3 特殊地层厚度计算模型

Fig.3 The calculation model of the stratum thickness in particular situation

## 2 地层厚度数值特征和误差分析

### 2.1 地层厚度数值取值特征

由公式(8)可知, 因为测绳斜距恒为正, 因此地层厚度值取决于地层倾角、坡角、导线与地层走向锐夹角的三角函数计算项的结果, 即取决于公式(9)。

$$F = \pm \sin \alpha \cos \beta \sin \varphi \pm \sin \beta \cos \alpha \quad (9)$$

图2a为地层倾向与测绳经过的地面坡向相向的情况, 公式(9)取“+”、“+”,  $\alpha$  为  $0 \sim 90^\circ$ ,  $\beta$  为  $0 \sim 90^\circ$ ,  $\varphi$  为  $60 \sim 90^\circ$ ,  $F$  值如图4所示。由图4a可知, 地层厚度  $F$  值关于  $\alpha = \beta$  和  $\alpha + \beta = 90^\circ$  直线是近乎对称的, 说明地层倾角和地层坡角对  $F$  值计算具有相同

的影响;当 $\varphi$ 值变小时,关于 $\alpha=\beta$ 的对称性变差,说明测绳与地层走向间的锐夹角影响了对称性;当 $\alpha+\beta=90^\circ$ 时 $F$ 值取得最大值,说明地层倾向与坡向垂直时 $F$ 取得最大值;当 $\alpha=\beta=0^\circ$ 或 $\alpha=\beta=90^\circ$ 时 $F$ 值取得最小值0,说明实测剖面是水平层面或垂直层面且测绳均为平移导线时, $F$ 取得最小值0。由图4b可知, $F$ 值随着 $\varphi$ 值增大而增大,对 $F$ 值影响范围为0~0.10,且 $F$ 值越大变化范围越大。

图2b为地层倾向与测绳经过的地面坡向相同且坡角小于倾角的情况,式(9)取“+”、“-”, $\alpha$ 为 $0^\circ\sim 90^\circ$ , $\beta<\alpha$ , $\varphi$ 值为 $60^\circ\sim 90^\circ$ , $F$ 值如图5所示。由图5a可知,地层厚度 $F$ 取值关于 $\alpha+\beta=90^\circ$ 是对称的,随着地层倾角 $\alpha$ 的增大而增大,随着 $\beta$ 的增大而减小; $\alpha=\beta$ 时, $F$ 取得最小值,说明地层倾向与坡向近平行

时 $F$ 取得最小值;在 $\alpha=90^\circ$ 、 $\beta=0^\circ$ 时取得最大值,说明地层倾向与坡向应近垂直时 $F$ 取得最大值; $\varphi$ 值越小越影响 $F$ 极大值。由图5b可知,随着 $\varphi$ 值增大 $F$ 值增大, $\varphi$ 对 $F$ 值影响范围为0.10~0.15。

图2c为地层倾向与测绳经过的地面坡向相同且坡角大于倾角的情况,式(9)取“-”、“+”, $\alpha$ 为 $0^\circ\sim 90^\circ$ , $\beta>\alpha$ , $\varphi$ 值为 $60^\circ\sim 90^\circ$ , $F$ 值如图6所示。由图6a可知,地层厚度 $F$ 取值关于 $\alpha+\beta=90^\circ$ 是近乎对称的,随着 $\alpha$ 的增大而减小,随着 $\beta$ 增大而增大; $\alpha=\beta$ 时 $F$ 取得最小值,说明地层倾向与坡向近平行时 $F$ 取得最小值; $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=90^\circ$ 时取得最大值,说明地层倾向与坡向近垂直的取得最大值。由图6b可知,随着 $\varphi$ 值增大, $F$ 值减小, $\varphi$ 对 $F$ 值影响范围为0~0.05。

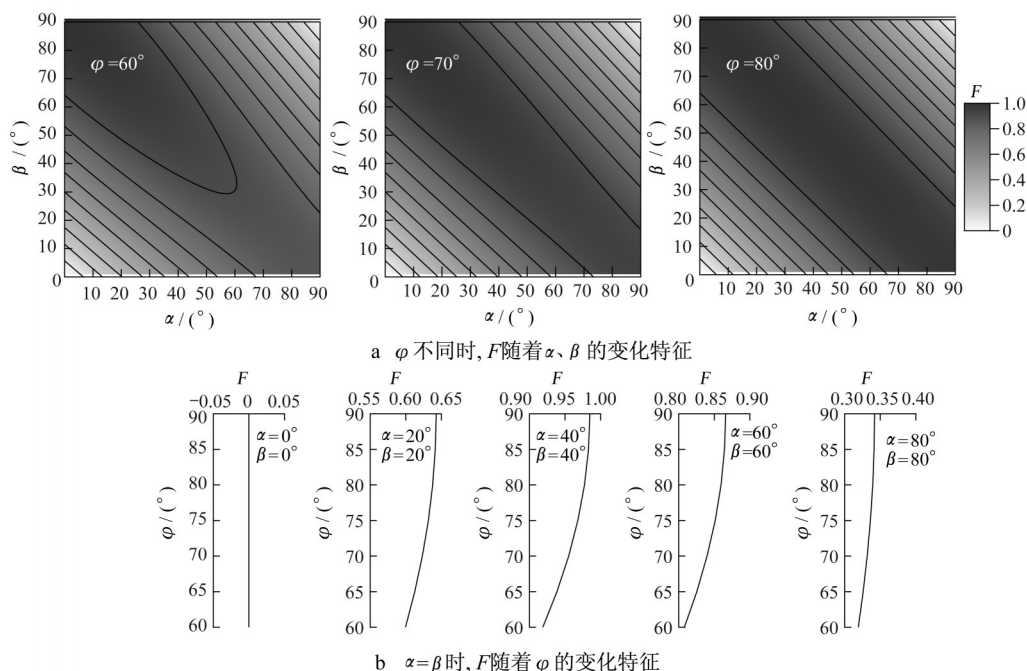


图4 地层倾向与测绳经过的地面坡向相反时地层厚度取值

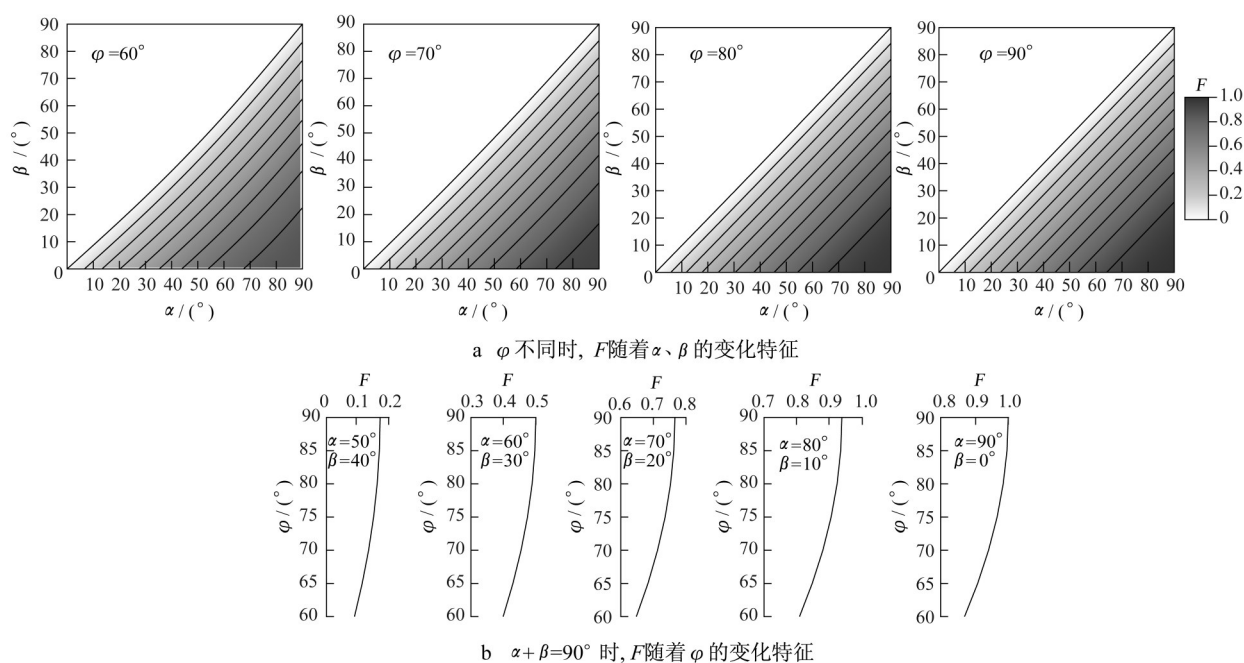
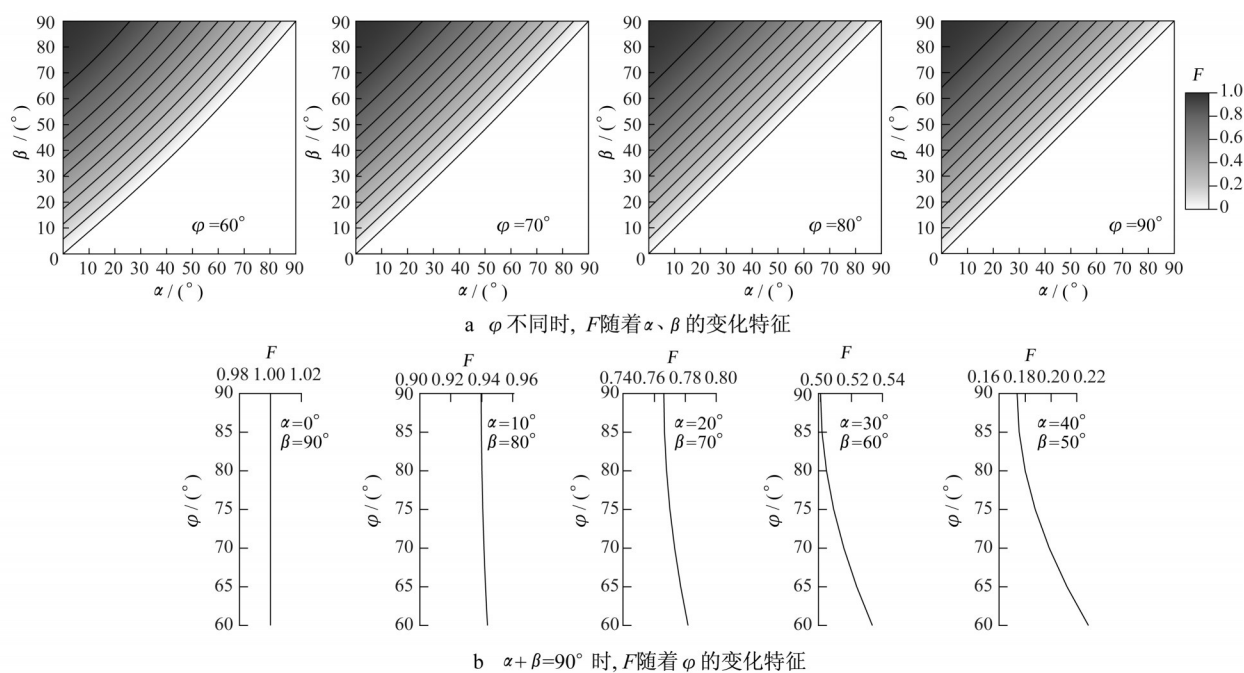
Fig.4  $F$ -data variation map when the stratum dip direction is opposite to the slope direction of ground where the measure line passes

## 2.2 地层厚度误差分析

为了进一步分析地层厚度 $F$ 值误差对地层真厚度计算的影响,掌握其误差变化特征,需对公式(9)计算 $F$ 误差值。在 $\alpha$ 为 $0^\circ\sim 90^\circ$ , $\beta$ 为 $0^\circ\sim 90^\circ$ , $\varphi$ 为 $60^\circ\sim 90^\circ$ 范围内,分别计算了三种情况下 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\varphi$ 角分别误差 $1^\circ$ 时 $F$ 的误差值。

当地层倾向与测绳经过的地面坡向相向时,误差分析结果如图7所示。图7a为 $\alpha$ 误差 $1^\circ$ 时 $F$ 的误差图, $F$ 的误差值范围为 $-0.02\sim 0.02$ , $\varphi$ 影响 $F$ 误差极大值, $\varphi$ 值越小, $F$ 误差极大值越小;随着 $\alpha$ 增

大, $F$ 误差由大变小, $F$ 误差绝对值先小后变大;随着 $\beta$ 增大, $F$ 误差由大变小, $F$ 误差绝对值先变小后变大。图7b为 $\beta$ 误差 $1^\circ$ 时 $F$ 的误差图, $F$ 的误差值范围为 $-0.02\sim 0.02$ , $\varphi$ 值影响 $F$ 误差极大值, $\varphi$ 越小, $F$ 误差极大值越大,但绝对值越小;随着 $\alpha$ 的增大, $F$ 误差由大变小,其绝对值先变小后变大;随着 $\beta$ 增大, $F$ 误差由大变小,误差绝对值先变小后变大。图7a和图7b表明在 $\alpha$ 、 $\beta$ 极小或极大时, $F$ 误差绝对值最大,由图4a可知,此时 $F$ 值较小,表明地层倾向与测绳经过的地面坡向近平行时 $\alpha$ 、 $\beta$ 误差对地层厚度计算产

图5 地层倾向与测绳经过的地面坡向相同且 $\beta < \alpha$ 时地层厚度取值图Fig.5  $F$ -data variation map when the stratum dip direction is same as the slope direction of the ground where the measure line passes and the slope angle is smaller than the stratum angle ( $\beta < \alpha$ )图6 地层倾向与测绳经过的地面坡向相同且 $\alpha < \beta$ 时地层厚度取值图Fig.6  $F$ -data variation map when the stratum dip direction is same as the slope direction of the ground where the measure line passes and the slope angle is bigger than the stratum angle ( $\alpha < \beta$ )

生最大影响。图7c为 $\varphi$ 误差 $1^\circ$ 时 $F$ 的误差图, $F$ 的误差范围为 $0 \sim 0.01$ ,只有在大 $\alpha$ 值、小 $\beta$ 、 $\varphi$ 时, $F$ 误差较大,表明地层倾向与测绳经过的地面坡向近垂直时 $\varphi$ 误差影响最大,且 $\varphi$ 越小误差影响越大。

当地层倾向与测绳经过的地面坡向相同且 $\beta < \alpha$ 时, $F$ 误差结果如图8所示。图8a为 $\alpha$ 误差 $1^\circ$ 时 $F$ 的误差图, $F$ 的误差范围为 $0 \sim 0.02$ ,随着 $\alpha$ 增大、 $\beta$ 减小, $F$ 误差减小; $\varphi$ 越小,对小 $\alpha$ 、小 $\beta$ 情况影响越大。

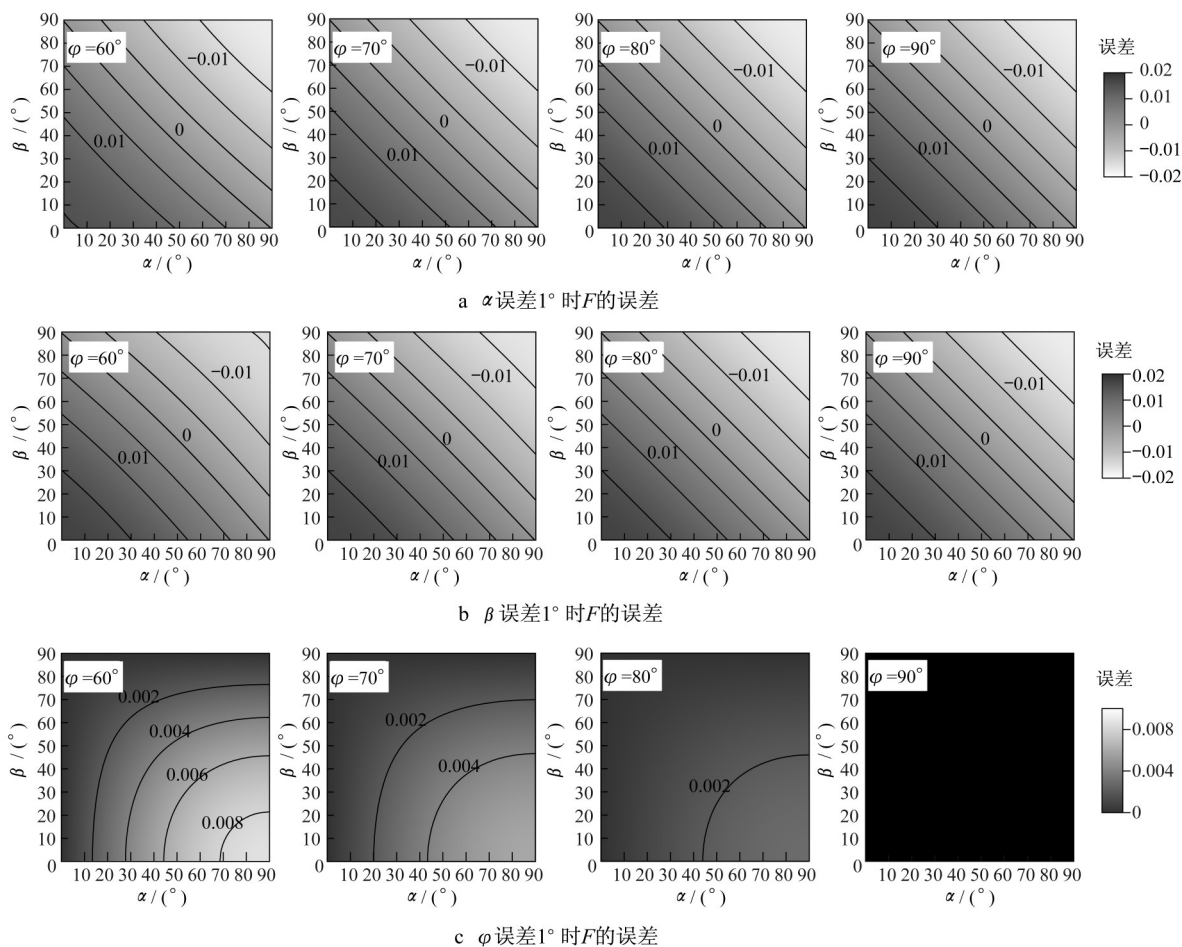


图7 地层倾向与测绳经过的地面坡向相向时地层厚度  $F$  取值误差分析图

Fig.7 Error analysis chart of  $F$ -data when the stratum dip direction is opposite to the slope direction of the ground where the measure line passes

图8b为 $\beta$ 角误差 $1^\circ$ 时 $F$ 的误差图, $F$ 的误差范围为 $-0.02 \sim 0$ ,随着 $\alpha$ 增大、 $\beta$ 减小, $F$ 的误差增大,但绝对值减小; $\varphi$ 值越小,对大 $\alpha$ 、大 $\beta$ 情况影响越大。图8a和图8b均表明在 $\beta=\alpha$ 附近, $F$ 误差绝对值最大,由图5a可知,此时 $F$ 值较小,说明地层倾向与测绳经过的地面坡向近乎平行时 $\alpha$ 、 $\beta$ 误差对地层真厚度的计算影响最大。图8c为 $\varphi$ 误差 $1^\circ$ 时 $F$ 的误差图, $F$ 的误差范围为 $0 \sim 0.01$ ,只有在大 $\alpha$ 、小 $\beta$ 、 $\varphi$ 时, $F$ 误差较大,说明地层倾向与测绳经过的地面坡向近垂直时 $\varphi$ 误差影响最大,且 $\varphi$ 越小, $F$ 误差影响越大。

当地层倾向与测绳经过的地面坡向相同且 $\beta > \alpha$ 时,误差结果如图9所示。图9a为 $\alpha$ 误差 $1^\circ$ 时 $F$ 的误差图, $F$ 的误差范围为 $-0.02 \sim 0$ ,随着 $\alpha$ 增大、 $\beta$ 减小, $F$ 误差减小但其绝对值增大; $\varphi$ 越小,对小 $\alpha$ 、小 $\beta$ 情况影响越大。图9b为 $\beta$ 误差 $1^\circ$ 时 $F$ 的误差图, $F$ 误差范围为 $0 \sim 0.02$ ,随着 $\alpha$ 增大、 $\beta$ 减小, $F$ 误差增大; $\varphi$ 越小,对大 $\alpha$ 、大 $\beta$ 情况影响越大。图9a和图9b表明,在 $\beta=\alpha$ 附近, $F$ 误差绝对值最大,由图6a可知此

时 $F$ 较小,说明地层倾向与测绳经过的地面坡向近平行时, $\alpha$ 、 $\beta$ 误差对地层真厚度的计算影响最大。图9c为在 $\varphi$ 误差 $1^\circ$ 时 $F$ 的误差图, $F$ 误差范围为 $-0.006 \sim 0$ ,只有小 $\varphi$ 且 $\alpha$ 与 $\beta$ 取值相近时, $F$ 误差较大,说明地层倾向与测绳经过的地面坡向近平行时 $\varphi$ 误差影响最大, $\varphi$ 值越小误差影响越大。

### 3 “0值”和“负值”讨论

当式(9) $F$ 为0时,地层厚度为0,包括以下几种情况:①由图4a可知,在地层倾向与测绳经过的地面坡向相向情况下, $\alpha=\beta=0^\circ$ 或 $\alpha=\beta=90^\circ$ 时, $F$ 为0,说明地层水平或垂直且在层面拉测线时,地层厚度为0。②由图5a可知,在地层倾向与测绳经过的地面坡向相同且 $\alpha > \beta$ 情况下, $\varphi \neq 90^\circ$ , $\alpha=\beta=0^\circ$ 或 $\alpha=\beta=90^\circ$ 时, $F$ 为0;当 $\varphi=90^\circ$ , $\alpha=\beta$ 时, $F$ 为0,均说明在地层倾向方向沿层面拉测绳时,地层厚度为0。③由图6a可知,在地层倾向与测绳经过的地面坡向相同且

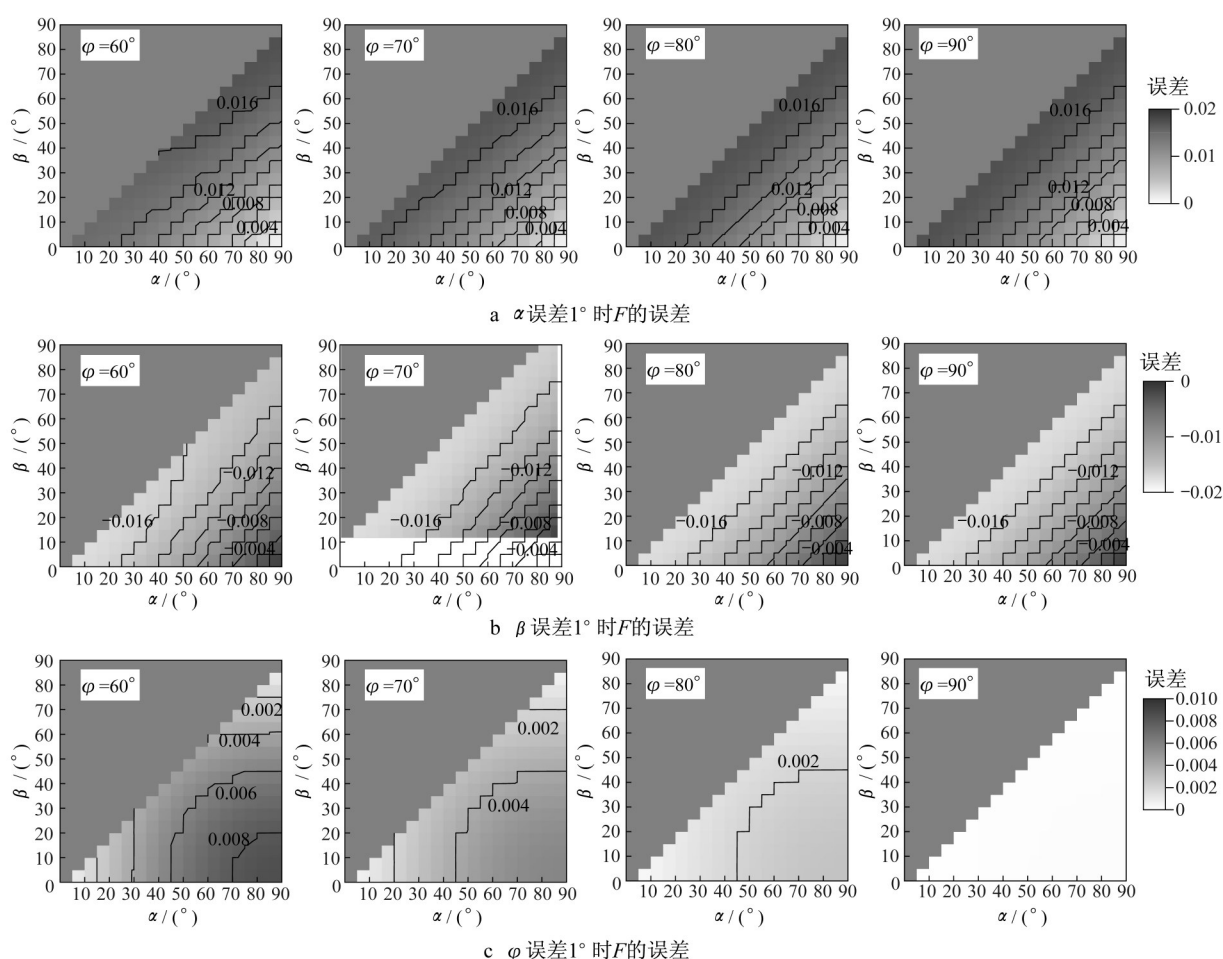


图8 地层倾向与测绳经过的地面坡向相同时且 $\beta < \alpha$ 时地层厚度 $F$ 取值误差分析图

Fig.8 Error analysis chart of  $F$ -data when the stratum dip direction is same as the slope direction of the ground where the measure line passes and the slope angle is smaller than the stratum angle ( $\beta < \alpha$ )

$\alpha < \beta$ 情况下,  $\varphi \neq 90^\circ$ ,  $\alpha = \beta = 0^\circ$ 或 $\alpha = \beta = 90^\circ$ 时,  $F$ 为0;当 $\varphi = 90^\circ$ ,  $\alpha = \beta$ 时,  $F$ 为0,均说明在地层倾向方向沿层面拉测绳时,地层厚度为0。

当式(9) $F$ 为负时,计算的地层厚度才为负。 $F$ 为负时,可能包括以下几种情况:

(1)地层倾向与测绳经过的地面坡向相同且坡角小于倾角时,欲使 $F$ 为负,坡角须位于最小 $\beta$ 线上方(图10)。

在地层倾向与测绳经过的地面坡向相同且坡角小于倾角的情况下,  $S_1$ 和 $S_2$ 是平行层面,受三维空间角度关系影响(图11),易知,

$$\tan \beta = \tan \theta \cos \gamma \quad (10)$$

由图11可知,  $\theta < \alpha$ , 由 $\gamma$ 与 $\varphi$ 互余知,  $\gamma$ 为 $0^\circ \sim 30^\circ$ , 因此可得,

$$\tan \beta = \tan \theta \cos \gamma < \tan \alpha \cos \gamma \quad (11)$$

令 $\tan \eta = \tan \alpha \cos \gamma$ , 则 $\beta < \eta$

计算结果如图10所示,  $\beta$ 取值位于最大值 $\eta$ 线下

方, 最大 $\eta$ 线均位于最小 $\beta$ 线下, 说明在 $\alpha, \beta, \varphi$ 定义域内受三维空间角度关系制约,  $F$ 不为负。

(2)地层倾向与测绳经过的地面坡向相同且坡角大于倾角时, 按列氏地层厚度公式计算, 倾向与坡向相同, 因此式(8)取“+”、“-”, 可得

$$\begin{aligned} F &= \sin \alpha \cos \beta \sin \varphi - \cos \alpha \sin \beta < \\ &= \sin \alpha \cos \beta \sin 90^\circ - \cos \alpha \sin \beta = \\ &= \sin(\alpha - \beta) \end{aligned} \quad (12)$$

因此 $\alpha < \beta$ , 式(12)必小于0。

若考虑坡角与倾角关系,  $\alpha < \beta$ 时, 式(8)取“-”、“+”, 此时有

$$\begin{aligned} F &= -\sin \alpha \cos \beta \sin \varphi + \cos \alpha \sin \beta \geq \\ &= -\sin \alpha \cos \beta \sin 90^\circ + \cos \alpha \sin \beta = \\ &= \sin(\beta - \alpha) > 0 \end{aligned} \quad (13)$$

从文献[1]可以看出, 列氏公式只强调地层倾向与测绳经过的地面坡向之间的关系, 分为相同与相向两类, 没有考虑倾角与坡角关系, 当倾角小于坡角

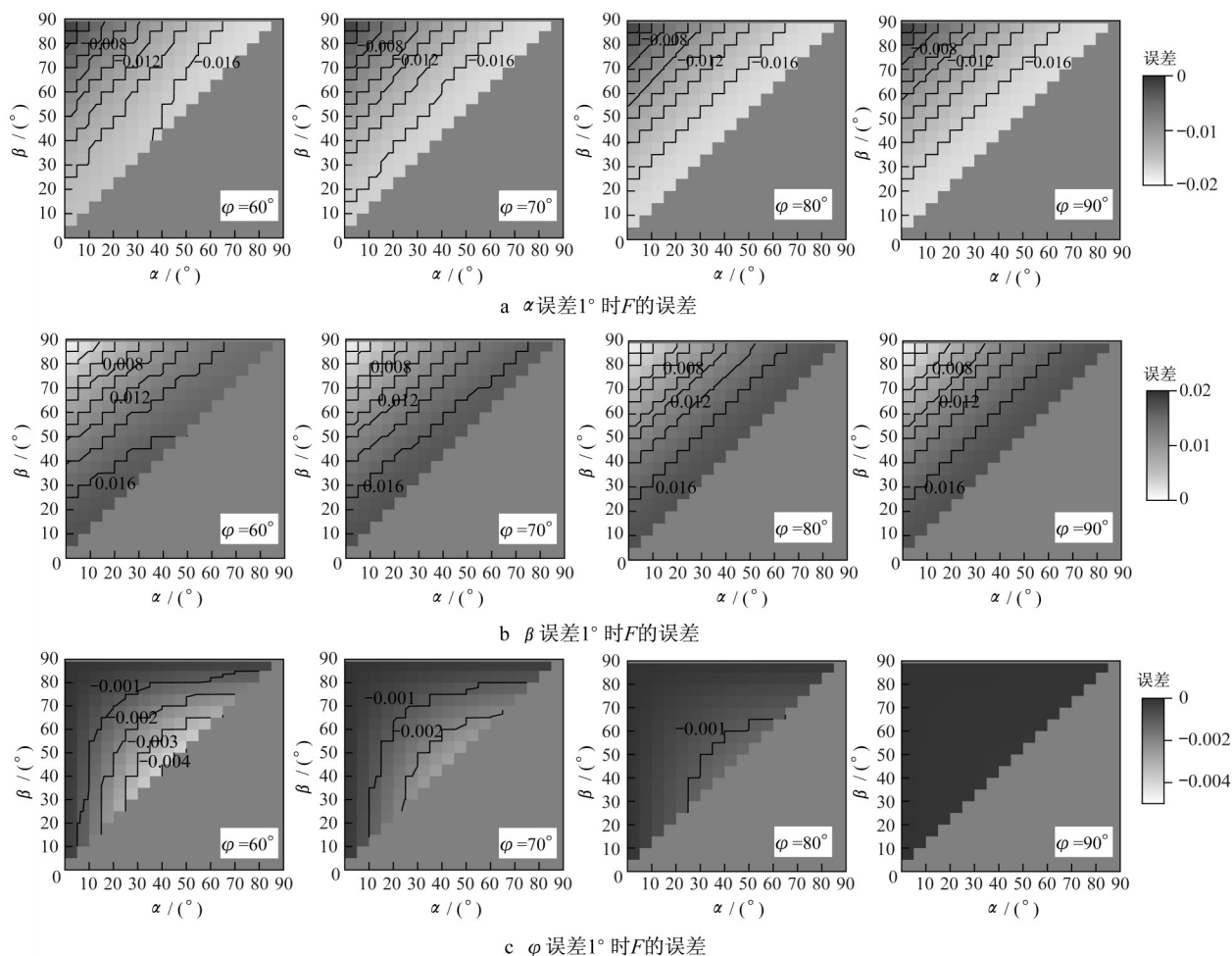


图9 地层倾向与测绳经过的地面坡向相同时且 $\beta > \alpha$ 时地层厚度 $F$ 取值误差分析图

Fig.9 Error analysis chart of  $F$ -data when the stratum dip direction is same as the slope direction of the ground where the measure line passes and the slope angle is bigger than the stratum angle ( $\beta > \alpha$ )

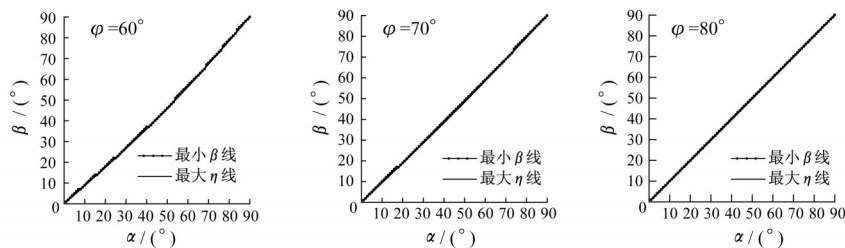


图10 地层倾向与测绳经过的地面坡向相同且 $\alpha > \beta$ 的情况下 $F$ 值为负值时的坡角分析图

Fig.10 The analysis map of the slope angle when the  $F$ -data is negative under the situation that the stratum dip direction is same as the slope direction of the ground where the measure line passes and the slope angle is smaller than the stratum angle ( $\alpha > \beta$ )

时,根据列氏公式必然为负(公式12);而由图2c可知,导线无论由上层面到下层面还是从下层面到上层面,地层厚度真实客观存在,计算结果与实际地层空间关系不符。而式(13)计算结果与实际地层空间关系相符,说明改进公式的正确性,同时也说明列氏公式不全面,缺失了野外实际情况,且列氏公式计算

的负值不具有地质意义,后续实例分析也可证明,前人往往采用取绝对值进行处理<sup>[25]</sup>。

地层真厚度公式在沉积盆地分析、构造岩相分析与古地理恢复等研究中具有重要的价值。众所周知,沉积盆地分析、构造岩相分析与古地理恢复的基本研究手段是岩石地层剖面的测制,根据剖面所揭

示的地层发育、岩性、岩相、厚度、接触关系及它们的时、空变化特点,恢复各地质时期的古地理(包括海陆分布、海侵方向、海水深度等)、古气候、古地貌(隆起-剥蚀区与拗陷-沉积区)、地壳沉降幅度(即沉积物厚度的相对大小)与速度(快速或逐渐堆积)、古构造状况以及演化历史等。显而易见,地层真实厚度的客观准确反映是正确分析古地理、古地貌、古构造运动的重要前提和必由途径,地层厚度计算公式的补充完善在科学研究与生产实践中均具有潜在的应用价值。

### 4 实例分析

文中选用了包含图 1 中所有情况的安徽省明光市杏山新近纪中新世下草湾组( $N_{1x}$ )—上新世桂五组( $N_{2g}$ )实测剖面,验证本文所完善的地层厚度计算公式。为了突出反映问题,选取了部分导线数据(表 1),对比了列氏公式、矢量厚度公式<sup>[31]</sup>和本文的厚度计算公式的计算结果(表 1)。

从表 1 中可以看出,列式公式计算的负值是表 1 中 3—4 导的 4、5、6 分层,地层均是在地层倾向与测绳经过的地面坡向相同且倾角小于坡角的情况,说明列氏公式本身缺失一种实测情况,使实际地层厚度出现负值,列式公式计算的厚度负值不能看作“负厚度”。矢量厚度计算公式的特点是不需要进行公式正负符号选择,矢量厚度公式计算的负厚度是表

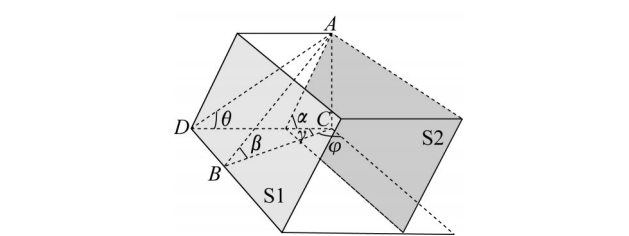


图 11 地层倾向与测绳经过的地面坡向相同且  $\alpha > \beta$  的情况下三维空间角度关系

Fig.11 Three dimensional spatial angle diagram under the situation that the stratum dip direction is same as the slope direction of the ground where the measure line passes and the slope angle is smaller than the stratum angle ( $\alpha > \beta$ )

示由上层面向下层面测量、正厚度表示由下层面到上层面向上测量,计算总厚度时可以直接把负厚度舍去,只累加正值<sup>[31]</sup>。

但从表 1 中可以看出,6—7 导的 12、13 分层,8—9 导的 14、15 分层都是由上地层到下地层的测量方法,而计算结果为正值;9—10 导的 17 分层是由下地层到上地层的测量方法,而计算结果为负值,可以看出矢量厚度公式由下一上地层的测量方法并非全为正,由上一下地层的测量方法也并不全为负,上述不符合矢量厚度计算公式表述的地层都是地层倾向与测绳经过的地面坡向相同且坡角小于地层倾角的情况,这是由矢量厚度公式直接去除负号的处理方式造成的。矢量厚度公式结果由上一下不全为负和由

表 1 安徽省明光市杏山新近纪中新世下草湾组( $N_{1x}$ )—上新世桂五组( $N_{2g}$ )实测地质丈量表及计算结果对比  
Tab. 1 Comparison table of geological survey and calculation results of Xiacaowan Formation of Neogene Miocene ( $N_{1x}$ ) to Guiwu Formation of Neogene Pliocene ( $N_{2g}$ ) at Xingshan of Mingguang city, Anhui province

导线号	方位角/(°)	斜距/m	坡度角/(°)	分层				地层厚度/m			导线与地层走向	坡角与倾角关系	测线穿过上下界面关系
				编号	斜距/m	产状/(°)	产状斜距/m	列式公式	矢量厚度公式	本文公式			
0—1	162	77	7	0	0~25	140 $\angle$ 20	10	10.7	10.7	10.7	相向		下一上
	162	77	7	1	25~77	150 $\angle$ 6	50	11.6	11.6	11.6	相向		下一上
3—4	153	138	20	4	0~22	285 $\angle$ 6	5	-6.0	6.0	6.0	相同	坡角大于倾角	下一上
	153	138	20	5	22~45	285 $\angle$ 6	30	-6.3	6.3	6.3	相同	坡角大于倾角	下一上
	153	138	20	6	45~70	290 $\angle$ 8	50	-6.0	6.1	6.0	相同	坡角大于倾角	下一上
6—7	181	203	-7	12	0~125	180 $\angle$ 9	80	4.4	4.4	4.4	相同	坡角小于倾角	上一下
	181	203	-7	13	125~203	170 $\angle$ 8	160	1.2	1.2	1.2	相同	坡角小于倾角	上一下
8—9	166	205	-7	14	0~102			1.7	1.7	1.7	相同	坡角小于倾角	上一下
	166	205	-7		102~205	170 $\angle$ 8		1.8	1.8	1.8	相同	坡角小于倾角	上一下
				15	0~80			15.2	15.2	15.2	相向		下一上
9—10	165	375	3	16	80~120	170 $\angle$ 8		7.6	7.6	7.6	相向		下一上
	165	375	3	17	120~375	340 $\angle$ 5	200	8.8	-8.8	8.8	相同	坡角小于倾角	下一上

下一上不全为正(表1),因此总厚度计算时不能简单正值相加,对于构造复杂地区的地层总厚度,更应该计算出所有层的厚度,结合构造分析把有效地层进行相加。本文改进的厚度计算公式对所有野外测量情况计算结果全为正(表1),结合构造特征,更能有效计算地层总厚度。

## 5 结论

通过对实际测量情况下的地层厚度公式的推导、地层厚度取值范围和误差分析、“0值”“负值”的讨论及实例验证,主要得到了以下几个认识:

(1)列氏地层厚度计算公式不全面,不包括所有的野外实测情况,对其进行了修正,新的地层厚度计算公式为 $EF = AB(\pm \sin \alpha \cos \beta \sin \varphi \pm \sin \beta \cos \alpha)$ ,其中 $\alpha$ 是真倾角, $\beta$ 是坡角, $\varphi$ 是测线与地层走向之间的锐夹角,当地层倾向与测绳经过的地面坡向相向时,取“+”、“+”;当地层倾向与测绳经过的地面坡向相同且坡角小于倾角时,取“+”、“-”;当地层倾向与测绳经过的地面坡向相同且坡角大于倾角时,取“-”、“+”。

(2)三种情况下 $F$ 值随着 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\varphi$ 具有各自不同的变化规律,但均在地层倾向与测绳经过的地面坡向近垂直时取得最大值;均在地层倾向与测绳经过的地面坡向近平行时取得最小值。

(3)三种情况下 $F$ 误差随着 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\varphi$ 具有不同的变化规律,但 $\alpha$ 、 $\beta$ 角度误差均在地层倾向与测绳经过的地面坡向近平行时对地层厚度计算影响最大, $\varphi$ 角度误差均在测绳与地层倾向偏离最大时对地层厚度计算影响最大。

(4)地层倾向与测绳经过的地面坡向无论是相同还是相向,只有在沿层面拉测绳时(测绳不穿层),地层厚度才为0;运用列氏公式计算的“负值”,是由公式缺失一种野外情况造成的,不具有地质意义;“负厚度”概念,只在矢量厚度计算公式中具有意义,表明由上界面到下界面穿过地层;本文实例表明矢量厚度计算公式也缺失了野外实测情况,使正厚度并不能完全表示由下一上穿过层面,负厚度并不能完全表示由上一下穿过层面,总厚度也不能用正值相加获取;修正的厚度计算公式,计算值全为正,符合客观实际情况,结合构造分析,能够计算地层总厚度。

## 参考文献:

- [1] 范朝焰,王正海,蒋丽怡,等.导线投影法实测地层剖面的误差分析及校正方法[J].地质学刊,2013,37(2):188.  
FAN Chaoyan, WANG Zhenghai, JIANG Liyi, *et al.* On error analysis and correction method of measured strata section with wire projection method[J]. Journal of Geology, 2013, 37(2): 188.
- [2] 罗华彪.实测地质剖面及成图方法研究[J].矿产勘查,2015,6(1):62.  
LUO Huabiao. Study on mapped geological profile and mapping method[J]. Mineral Exploration, 2015, 6(1): 62.
- [3] 杨光忠,胡永虹.试论实测地质剖面的电算化处理[J].贵州地质,2002,19(1):67.  
YANG Guangzhong, HU Yonghong. Treatment of electronic calculation for measured geological sections [J]. Guizhou Geology, 2002, 19(1): 67.
- [4] 王兆国,鲁如魁.一种新的实测地层剖面绘制方法[J].地质科学,2016,51(3):1002.  
WANG Zhaoguo, LU Rukui. A kind of new drawing method of measured stratigraphy section [J]. Chinese Journal of Geology, 2016, 51(3): 1002.
- [5] 王兆国,鲁如魁.一种实测地层剖面绘制的三维投影法:ZL201510553546.4[P].2017-11-14.  
WANG Zhaoguo, LU Rukui. A three-dimensional projection method for mapping measured stratigraphic profiles: ZL201510553546.4[P]. 2017-11-14.
- [6] 方成名,葛梦春,张雄华.数字实测地层剖面工作方法[J].新疆地质,2003,21(S):21.  
FANG Chengming, GE Mengchun, ZHANG Xionghua. The working method of digital stratum section survey [J]. Xinjiang Geology, 2003, 21(S): 21.
- [7] 刘书才,杜圣贤,张贵丽.实测剖面地层厚度计算方法探讨[J].山东国土资源,2006,22(9):37.  
LIU Shucai, DU Shengxian, ZHANG Guili. Study on measuring actual strata profile thickness [J]. Land and Resources in Shandong Province, 2006, 22(9): 37.
- [8] 孙羽,李永军.浅谈数字化实测地质剖面操作方法与技巧[J].新疆地质,2012,30(4):487.  
SUN Yu, LI Yongjun. Discussion on the methods and skills of operating the digital section map [J]. Xinjiang Geology, 2012, 30(4): 487.
- [9] 杨利容,赖德军,罗娟.基于AutoCAD实测地质剖面数字成图关键技术[J].物探与化探,2011,35(2):261.  
YANG Lirong, LAI Dejun, LUO Juan. The key technology for digital mapping of measured geological profile based on AutoCAD [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2011, 35(2): 261.
- [10] 王兆国,鲁如魁.基于Fortran语言和GMT软件的实测地质剖面的迅速实现[J].计算机应用,2015,35(S2):301.

- WANG Zhaoguo, LU Rukui. Rapid implementation of measured geological section based on fortran language and gmt software [J]. Journal of Computer Applications, 2015,35(S2):301.
- [11] 王兆国,鲁如魁.一种地层剖面绘制的复数运算法: ZL20151055922.3[P].2019-01-25.
- WANG Zhaoguo, LU Rukui. A complex method for drawing stratigraphic profiles: ZL20151055922.3[P]. 2019-01-25.
- [12] 郭福生,吴志春,谢财富,等.数字地质填图系统的几点改进意见及实用技巧[J].中国地质,2012,39(1):252.
- GUO Fusheng, WU Zhichun, XIE Caifu, *et al.* Some suggestions for the improvement of the regional geological mapping system and practical skills [J]. Geology in China, 2012,39(1):252.
- [13] 李莉,刘永权,庞迎春,等.基于WebGIS技术的实测地层剖面数据Web发布系统设计与实现[J].中国地质调查,2016,3(2):58.
- LI Li, LIU Yongquan, PANG Yingchun, *et al.* Design and implementation of measured stratigraphic profile data publishing system based on WebGIS [J]. Geological Survey of China, 2016,3(2):58.
- [14] 李莉,万勇泉,王江立,等.青藏高原实测剖面数据管理与检索系统开发的方法与意义[J].华南地质与矿产,2010(2):76.
- LI Li, WAN Yongquan, WANG Jiangli, *et al.* The build of data management and retrieval system of measured section on tibetan plateau method and significance [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2010(2):76.
- [15] 刘丽利,梁玉辉.实测地质剖面数据库建设初探[J].安徽地质,2017,27(3):234.
- LIU Lili, LIANG Yuhui. On construction of database of measured geological profile [J]. Geology of Anhui, 2017,27(3):234.
- [16] 于宁,陈仁.数字剖面系统在实测地层剖面中的应用及整理[J].贵州地质,2010,27(2):148.
- YU Ning, CHEN Ren. Application and arrangement of digital section system in the surveyed stratum section [J]. Guizhou Geology, 2010,27(2):148.
- [17] 张克信,李超岭,于庆文,等.数字地质填图技术中的数字剖面系统[J].地层学杂志,2007,31(2):157.
- ZHANG Kexin, LI Chaoling, YU Qingwen, *et al.* The digital section system of digital mapping techniques [J]. Journal of Stratigraphy, 2007,31(2):157.
- [18] MERTIE J B Jr. Graphic and mechanical computation of thickness of strata and distance to a stratum[J].United States Geological Survey, 1922,129:39.
- [19] PRICE W A. General formulae for the determination of thickness and depth of strata [J]. Economic Geology, 1922, 17:370.
- [20] 布雅洛夫.构造地质学和野外地质学:下册[M].马名权,刘启华,译.北京:地质出版社,1955.
- Проф Н И Буялов. Structural geology and field geology : volume 2 [M]. Translated by MA Mingquan, LIU Qihua. Beijing:Geological Publishing House,1953.
- [21] ICKES E L. Formulas for calculating stratigraphic thickness exposed between two dips [J]. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, 1934, 18(1):139.
- [22] PRICE W A. Thickness and depth of strata[J]. Bulletin of The American Association of Petroleum Geologists, 1934, 18(6):817.
- [23] MANDELBAUM H, SANFORD J T. Table for computing thickness of strata measured in a traverse of encountered in a bore hole[J]. Geological Society of America Bulletin, 1952,63(8):767.
- [24] ADDIE G. A new true thickness formula based on the apparent dip[J]. Economic Geology, 1968,63:188.
- [25] 何昌祥.岩层真厚度计算的改进公式[J].中国区域地质, 1990(1):78.
- HE Changxiang. The improved formula for calculating the true thickness of the strata [J]. Regional Geology of China, 1990(1):78.
- [26] 胡福仁.对《地层厚度计算方法的改进》一文的几点意见[J].地层学杂志,1985,9(4):270.
- HU Furen. Several suggestions to the paper 《The Improvement of the Calculation Method of the Stratum Thickness》 [J]. Journal of Stratigraphy, 1985,9(4):270.
- [27] 肖水清.实测剖面上计算岩层厚度的方法[J].地质与勘探, 1977,13(3):50.
- XIAO Shuiqing. The calculation of the strata thickness in the measured geological section [J]. Geology and Prospecting, 1977,13(3):50.
- [28] 庄培德.地层厚度计算方法的改进[J].地层学杂志,1983,7(2):154.
- ZHUANG Peide. The improvement of the calculation method of the strata thickness [J]. Journal of Stratigraphy, 1983,7(2):154.
- [29] 叶东虎.岩层真厚度计算手册[M].北京:地质出版社,1976.
- YE Donghu. Manual for calculating true thickness of the strata [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1976.
- [30] 刘元生.地层厚度计算表盘[J].长春地质学院学报, 1976(3):57.
- LIU Yuansheng. The dial plate of the calculation of the stratum thickness [J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 1976(3):57.
- [31] 许边远.试用矢量表示岩层真厚度[J].中国区域地质, 1998, 17(1):80.
- XU Bianyuan. The use of the vector in expressing the true thickness of strata [J]. Geological Bulletin of China, 1998, 17(1):80.
- [32] 朱正勇,熊意林,鲁显松,等.岩层真厚度计算中负厚度的处理及其地质意义[J].资源环境与工程,2016,30(2):217.
- ZHU Zhengyong, XIONG Yilin, LU Xiansong, *et al.* Discussion on geological significance and treatment of negative thickness in calculation of the true thickness of strata [J]. Resources Environment&Engineering, 2016,30(2):217.