

菲尔德斯海峡地壳断裂形变监测

鄂栋臣 徐绍铨 张松波 王升定

摘 要

菲尔德斯海峡地壳断裂形变监测是我国在西南极地区进行地壳动态科学考察的主要研究课题。本文介绍了该监测网的布设和监测方法,分析了监测网的强度、可靠性、可监测性,对两期观测成果进行了初步形变分析,得出了该海峡地壳断裂有继续扩展的动态趋势和菲尔德斯半岛与企鵝岛之间可能有新的断裂存在的趋向性看法。

【关键词】 地壳断裂; 形变监测; 南极菲尔德斯海峡

大地构造理论分析认为,南极半岛地区是几大板块的交汇部位,即该区位于板块的结合地带,应是构造相对活动的区域。乔治王岛所在的南设得兰群岛地区以及群岛和南极半岛之间又有规模不同的区域性的断层和裂沟存在(见图1)。利用近代大地测量技术,在乔治

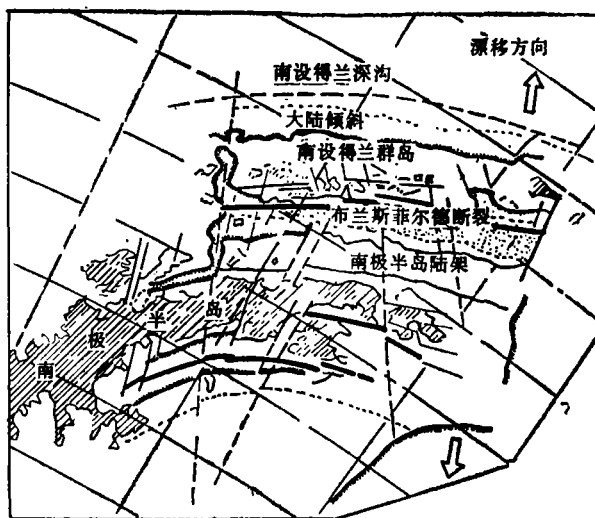


图1 南设得兰群岛大地构造背景图

王岛局部地区的地壳断裂处布设了一个形变监测网，期望利用实测数据，对南极区域性构造运动进行定量分析，探索其动力机制，这对于研究乔治王岛地区的海陆变迁、陆地升沉和地形变化等自然规律有着重要的科学价值。

1 菲尔德斯海峡断层构造

中国南极长城站位于乔治王岛南端的菲尔德斯半岛东侧。其地质属于一套以玄武质和玄武安山质熔岩以及火山碎屑为主组成的火山岩系。半岛南端与纳尔逊岛之间，有一方向为西偏北规模较大的菲尔德斯海峡断裂（见图2）。该海峡东西长约2.5公里。东端最宽处约1

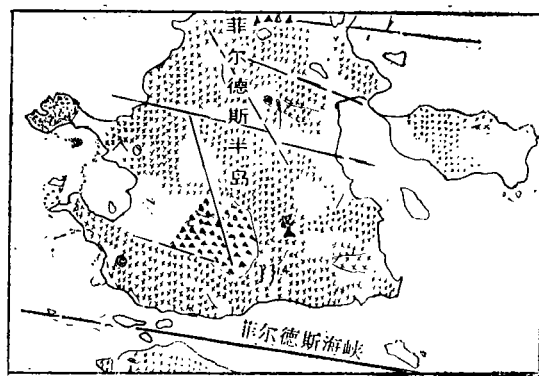


图2 菲尔德斯海峡断裂和半岛断裂—裂隙分布情况

公里，西端最窄处只有300米宽。海峡中部有几处大旋涡湍流，说明峡床基底有局部深裂沟或溶洞存在。海峡两岸断壁陡峭。该海峡断裂具有平推断层或平推正断层性质，是长期发育反复活动的断裂，它同时穿切了新生代火山岩和基底。

菲尔德斯海峡断裂的存在，与菲尔德斯半岛的区域性断裂-裂隙系统的发育有较大的关系。半岛上多处出现高角度的正断层、平推正断层以及断距很小或裂而未断的断裂系统，但规模都不大，且主要分布在半岛南半部，即智利的马尔什基地至菲尔德斯海峡断层一带。因此，半岛区域的断裂-裂隙系统的主要成因，可认为因菲尔德斯海峡这一较大断层的活动引起半岛内部应力场的变化而派生出来的，或者是因半岛的基底断裂或断块的运动，引起上部的火山岩盖层产生相应的断裂或裂隙带。该地区地质构造活动较为活跃，但这仅是一种定性分析的结果。如何定量地去证明该区地质构造运动的活跃程度，通过监测地面形态信息的变化是一种更为直观的有效手段。

2 大地形变监测网的布设

根据半岛构造裂系的分布特点，监测的重点区是菲尔德斯海峡断裂。同时也考虑到有利于分析该断层和半岛整个裂系构造的动态制约关系，故将监测范围由重点监测区向北延伸到马尔什基地和企鹅岛以南。

地壳形变是通过一些地面上点的位置变化信息反映出来的，点位变化可以用水平和垂直两个方向的变化合成表述。对于断裂形变监测，一般是沿断层布设一个由一系列地面点构成

菲尔德斯海峡和半岛的断裂和裂隙分布及其形变监测网的布设

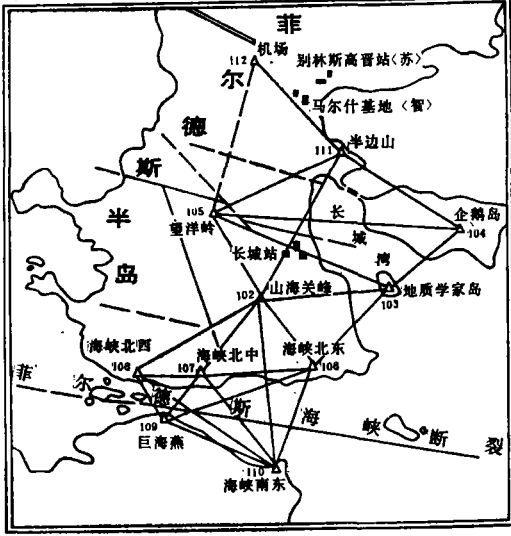


图 3

表 1

点 名	代号	高 程 (m)
山海关峰	102	154.7
地质学家岛	103	32.1
企 鹅 岛	104	61.7
望 洋 岭	105	122.8
海峡北东	106	65.3
海峡北中	107	95.5
海峡北西	108	70.5
巨海燕岩	109	24.9
海峡南东	110	63.8
半 边 山	111	51.2
机 场	112	60.2

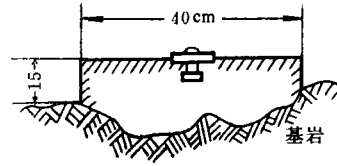


图 4 监测点标石

表 2

边 号	边 名	边长(m)
1	102—103	1 592.3
2	102—104	2 374.1
3	102—112	2 097.9
4	102—105	1 262.4
5	102—106	1 179.2
6	102—107	1 228.4
7	102—108	1 769.6
8	102—110	2 092.9
9	106—103	1 327.1
10	106—107	1 662.4
11	106—109	2 311.3
12	106—110	1 726.9
13	109—108	696.2
14	109—107	840.0
15	109—110	1 097.6
16	107—110	1 230.7
17	107—108	707.9
18	104—103	921.7
19	104—105	2 845.2
20	104—112	1 508.6

的相互制约的控制网，或在断层的某些地段上设置一些固定观测点，通过周期性的重复观测来监视地形变化状态。布网时，尽量考虑有利于提高数据处理精度，采用大地四边形和中心多边形等控制强度较好的图形结构，特别是在海峡的重点监测区，利用短边密集图形结构复盖断层地带（见图 3）。标石点均选取构造特征处的各制高点上，并利用表露的基岩，直接在其上浇灌水泥墩。标石中心设有铜质永久性标志（见图 4）。全网共 12 个点，构成了 20 多条边的多种图形混合网。网的最长边为 2.8 公里，最短边为 708 米（见表 1 和表 2）。

3 海峡断裂监测网的强度分析

由于所布设的控制网，是以监测菲尔德斯海峡断裂活动以及纳尔逊岛和企鹅岛相对菲尔德斯半岛的相对运动为目的，故在作强度分析时，选择菲尔德斯半岛102号和105号点为固定参考基准（见图3）。

监测网的强度分析包括控制网的精度、可靠性和可监测性三部分内容。下面用概略观测值进行具体分析。监测网的点号、边长近似值见图3和表2。该测边网的平均边长为1.4公里。分析时，设为等权，边长中误差为1个单位，即 $\sigma = 1$ 。

3.1 控制网的强度分析

首先计算出各点点位的误差椭圆。椭圆的长短半轴 E 、 F 和主轴方位角 T 列于表3。误差椭圆绘于图5。由图5可见，除106号点外，长轴方向与基线（边号4）大致平行，约在

表 3

点 号	E	F	T
103	3.20	0.92	165°02'
104	3.00	0.71	173 24
106	2.42	0.93	49 08
107	2.93	0.76	137 26
108	4.12	0.87	153 25
109	4.70	0.98	136 05
110	4.64	0.81	104 22
111	1.70	0.74	138 14

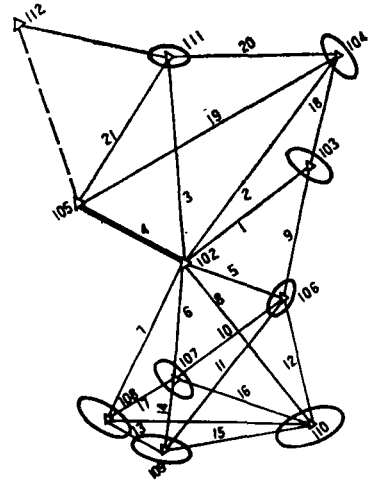


图 5 点位误差椭圆

北西45°方向上精度最弱，而北东45°方向为最强。从控制网图3可知，105至104点的方向和102至109、110点方向正处在精度最弱方向上，故用测边来监测企鹅岛、纳尔逊岛相对菲尔德斯半岛的相对运动，在精度上是有利的。105至104点的边长中误差为0.7个单位，而102至109或110点的边长中误差为1和0.8个单位，平均点位的中误差按下式计算：

$$M_0 = \frac{\sum_i (E_i + F_i)}{u/2} = \frac{32.76}{8} \approx 4.1$$

3.2 监测可靠性分析

可靠性定义为能够成功地发现粗差的一种概率。考虑控制网的可靠性主要包括两个内容，即在给定显著水平 α 和检验功效 β 下，能有效地检测出最小粗差以及未能发现的最大粗差对网中平差参数及其函数的影响有多大，这是布设监测网图形结构优劣的重要质量指标之一。前者称为内可靠性，后者称为外可靠性问题。

根据巴特提出的数据探测法，可发现粗差的下界按下式估算：

表 4

边号	r	p	dL	δ_{0i}
1	0.00	1		
2	0.15	1	8.08	6.79
3	0.19	1	6.40	5.75
4	1.00	1		
5	0.12	1	8.02	7.52
6	0.40	1	4.45	3.46
7	0.24	1	5.74	5.02
8	0.33	1	4.90	4.03
9	0.00	1		
10	0.36	1	3.94	3.70
11	0.38	1	4.52	3.54
12	0.24	1	6.42	4.99
13	0.26	1	5.52	4.76
14	0.32	1	4.94	4.07
15	0.32	1	4.95	4.09
16	0.29	1	5.20	4.38
17	0.36	1	4.65	3.72
18	0.00	1		
19	0.34	1	4.79	3.89
20	0.09	1	9.53	9.11
21	0.24	1	6.47	5.04
22	0.33	1	4.52	3.54

$$\varepsilon_{0i} = \frac{\delta_0}{\sqrt{r_i}} m_i \quad (1)$$

式中 δ_0 是非中心化参数，它是 α 和 β 的函数：

$$\delta_0 = f(\alpha_0, \beta_0) \quad (2)$$

当确定 α_0 和 β_0 后，其值可在正态分布表中查得。例如，在计算时取 $\alpha = 0.05$ ， $\beta = 0.80$ ， $\delta_0 = 2.8$ ； r_i 为多余观测分量，其值为

$$r_i = Q_{v_i} v_i P_i \quad (3)$$

所计算的 r_i 和 ε_{0i} ($\equiv dL$) 列于表 4。

表中 $r_i = 1$ ，表示该观测量是起始数据，即指 102 至 105 边； $r_i = 0$ 为必要观测边，不存在多余观测。因此，这些边没有抗粗差的能力，在观测时应特别注意，可采用一定方法避免出现粗差。

仅就测边监测网而言，由多余观测数表示网的强度是中等的，也是可取的。网的最南端 13、14、15、16、17 和 22 等边的 r_i 一般大于 3，这部分是该网的强度较高的部位，也是监测地形变的重点区域。所以总的说来，该网进行测边监测是可靠的。

因 $m_i = \mu \sqrt{\frac{1}{p_i}}$ ，其中 $p_i = 1$ ，故 $m_i = \mu = 1$ 。表 4 所列的 dL 就是因子 $\delta_0 / \sqrt{r_i}$ 。此值在网的南部各边都小于 5，故这一部分的内可靠性是好的，其余各边的 $\delta_0 / \sqrt{r_i}$ 值均

小于 10，内可靠性只属一般。

$\bar{\delta}_{0i} = \delta_0 \sqrt{\frac{1-r_i}{r_i}}$ 是衡量外可靠性的指标，其值列于表 4。个别的边，如 2、5、20 等

边的 $\bar{\delta}_{0i} > 6$ ，表示外可靠性差。而网的南部各边 $\bar{\delta}_{0i}$ 值均在 3~4 左右，外可靠性较好，估算基本与内可靠性相同。

3.3 可监测性的分析

这里仍取 $\alpha = 0.05$ ， $\beta = 0.08$ ，则 $\delta_0 = 2.8$ 。可监测性下界椭圆画于图 6。其长、短半轴及主轴方向列于表 5。从图和表列数据看，下界椭圆接近于圆，长短半轴相差不大，可监测点的位移误差分布，具有各方向基本均匀性质。

综上所述，以监测网的强度分析，可得出如下结论：

表 5

点号	E	F	φ
103	4.30	2.61	142°10′
104	3.30	2.53	171 18
106	3.04	2.42	157 51
107	2.93	2.46	155 19
108	2.99	2.66	26 43
109	2.88	2.73	161 31
110	2.91	2.47	69 40
111	3.22	2.84	150 02

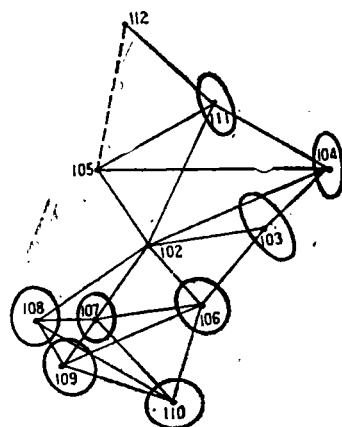


图 6 可监测性的下界误差椭圆

1、所布监测网精度最强的方向，正是需要重点监测位移的方向，图形结构对监测有利；

2、从内、外可靠性指标看，网的强度一般；

3、各形变观测点的可监测下界误差椭圆，各方向位移误差分布，差距不大，在需要监测的各点，可监测其方向位移为 3 个单位左右，如按平均边长 1.4km 计算，测距中误差按 $m = a + bD$ 计算约为 5 mm 的话，此网一般可监测到 1.5cm 的方向位移。故进行精密监测断层形变时，应尽量采用高精度激光测距仪测边，并在观测方案上注意采用削弱误差提高精度的措施。

4 水平位移监测成果的分析处理

1986~1987年，1987~1988年两次赴南极（夏季）考察期间，对平面监测网采用 DI 20 测距仪（ 3 ± 1 ppm）进行了相同方案的三边测量。实际施测时，加测了 104 至 102 边，111 至 103 边，111 至 106 边以加强东部的图形强度。

4.1 模型选择与成果处理

对形变监测数据，采用自由网平差方法处理。在监测区域内，设定 102 点的坐标与该点至 106 点方位为定义参考系，并对参考点的稳定性进行了检验，结果被接受。

自由网平差的观测方程为：

$$\begin{pmatrix} \lambda \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B \\ G^T \end{pmatrix} X. \quad (4)$$

未知参数估值为：

$$X = (B^T P B + G G^T)^{-1} B^T P l. \quad (5)$$

其中，

$$G^T = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{m} & 0 & \cdots & 1/\sqrt{m} & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{m} & \cdots & 0 & 1/\sqrt{m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\lambda_1 \bar{y}_1 & \lambda_1 \bar{x}_1 & \cdots & -\lambda_m \bar{y}_m & \lambda_m \bar{x}_m \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中, $\bar{x}_i = x_i^0 - \sum_{i=1}^m x_i^0$, $\bar{y}_i = y_i^0 - \sum_{i=1}^m y_i^0$, x_i^0, y_i^0 为近似坐标,

表 6

精 度	1986~1987 (mm)	1987~1988 (mm)
σ	± 6.6	± 3.0
M_{102}	± 9.0	± 4.1
M_{103}	± 8.2	± 3.7
M_{104}	± 8.3	± 3.8
M_{106}	± 7.6	± 3.4
M_{107}	± 7.2	± 3.3
M_{108}	± 9.2	± 4.2
M_{109}	± 8.8	± 4.0
M_{110}	± 8.2	± 3.7
M_{111}	± 7.7	± 3.5
M_{112}	± 14.1	± 6.4

$$\lambda = 1 / \sqrt{\sum_{i=1}^m (\bar{x}_i^2 - \bar{y}_i^2)}$$

X 的方差为

$$D(X) = \sigma^2 [(B^T P B + G G^T)^{-1} - G G^T] \quad (7)$$

其协因数阵为:

$$Q_{\hat{x}} = (B^T P B + G G^T)^{-1} - G G^T \quad (8)$$

表 6 给出了两期成果的单位权中误差及各监测点的点位中误差; 表 7 摘抄了各监测点的 Q 值及坐标差值。由于两期采用了相同的观测纲要, 所以取得了完全一致的未知数之解的协因数阵 $Q_{\hat{x}}$ 。

表 7

点 号	Q_x	Q_y	Q_{xy}	Δx (cm)	Δy (cm)
102	0.934 5	0.889 2	-0.672 3	+0.5	-0.1
103	0.537 5	0.993 7	-0.323 9	+0.3	+1.6
104	0.953 0	0.604 5	-0.022 1	0	+1.6
106	0.752 9	0.546 1	-0.384 6	-0.5	-0.1
107	0.772 1	0.405 3	-0.048 2	0	-0.3
108	1.418 6	0.489 6	0.250 0	+0.2	-0.6
109	1.297 3	0.445 1	-0.028 1	-1.0	-0.2
110	0.829 5	0.675 8	0.146 7	-1.2	-0.8
111	0.477 9	0.870 0	0.400 2	+0.7	+0.2
112	1.867 9	2.619 8	1.648 2	+1.0	-0.9

4.2 形变初步分析

4.2.1 两期测量同精度性检验

为进行形变分析, 首先对两期测量成果进行是否同精度的检验。从表 6 可知, $\sigma_I = \pm 6.6\text{mm}$, $\sigma_{II} = \pm 3.0\text{mm}$, 它们是否来自同一母体方差需作 F 检验。

统计量 $F = \sigma_I^2 / \sigma_{II}^2 = 4.84$, 选显著水平 $\alpha = 0.05$, 所以 $F_{\alpha/2} = 7.15$, 由于 $F < F_{\alpha/2}$, 故可认为这两期测量同精度。

4.2.2 综合方差估值的计算

对于同精度的两期观测成果, 可由两期之方差估值 σ_I^2 、 σ_{II}^2 求得综合方差估值:

$$s^2 = (\sigma_I^2 f_I + \sigma_{II}^2 f_{II}) / (f_I + f_{II}) = 0.26$$

4.2.3 位移量显著性检验

由数理统计理论可知, 两期监测得到的坐标平差值 x_I 和 x_{II} (或 y_I 和 y_{II} , 以下同) 均为正态随机变量, 其差数 $\Delta x = x_{II} - x_I$ 也是正态变量。因此, 可通过对坐标差值 Δx 进行位移显著性检验。采用 t 检验:

$$t = \Delta x - (\xi_{II} - \xi_I) / s \sqrt{Q_{II} + Q_{II}} \quad (9)$$

式中 ξ_I 和 ξ_{II} 分别为 x_I , x_{II} 的数学期望。

t 检验的原假设 H_0 是 $\xi_{II} = \xi_I$, 当原假设成立时, 有统计量

$$t = \Delta x / s \sqrt{Q_{II} + Q_{II}} \quad (10)$$

按 (10) 式计算的 $t_{\Delta x}$ (或相应的 $t_{\Delta y}$) 变量结果列于表 8。选定显著水平 $\alpha = 0.05$, 则 $t_{\alpha/2} = 2.2$ 。当 $|t| > t_{\alpha/2}$ 即表示拒绝原假设, 位移显著。由表 8 可看出, 104 点有显著性位移, 103 点也有明显的位移且接近临界值。

由于采用不同统计检验方法, 有时会产生不相一致的结果。所以, 需要用多种方法检验, 然后加以分析判断, 才能获得较为合理的结论。现再用变形椭圆法作单位位移的二维检验。

变形误差椭圆的三要素用以下公式计算:

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \frac{1}{2} \arctg [2\theta_{xy} / (\theta_x - \theta_y)] \\ A_i &= S \sqrt{\lambda_i} \quad i = 1, 2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中,

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \theta_x + \theta_y + \sqrt{(\theta_x - \theta_y)^2 + 4\theta_{xy}^2} \\ \lambda_2 &= \theta_x + \theta_y - \sqrt{(\theta_x - \theta_y)^2 + 4\theta_{xy}^2} \end{aligned}$$

按公式 (11) 计算各监测点点位变形误差椭圆, 其结果列于表 9。以二倍中误差为极限, 极根误差椭圆的长半轴 $2A_1$ 和短半轴 $2A_2$, 也一并列于表 9。

表 8

点 号	$t_{\Delta x}$	$t_{\Delta y}$
102	0.7	-0.1
103	0.6	2.2
104	0	2.9
106	-0.8	-0.2
107	0	-0.7
108	0.2	-1.2
109	-1.2	-0.4
110	-1.8	-1.3
111	1.4	0.3
112	1.0	-0.8

表 9

点 号	θ	A_1	A_2	$2A_1$	$2A_2$
102	$-44^{\circ}02'$	0.91	0.35	1.82	0.70
103	117 25	0.78	0.44	1.56	0.88
104	- 3 37	0.71	0.56	1.42	1.12
106	-37 28	0.74	0.36	1.48	0.72
107	- 7 22	0.64	0.46	1.28	0.92
108	14 09	0.88	0.47	1.76	0.94
109	- 1 53	0.83	0.48	1.66	0.96
110	31 11	0.69	0.56	1.38	1.12
111	58 03	0.77	0.35	1.54	0.70
112	51 25	1.44	0.54	2.88	1.08

为了判断位移是否显著，位移向量和变形误差椭圆、极限变形误差椭圆可用图解表示。图 7 绘出了 1986~1987 年和 1987~1988 年的分析成果（实线为极限变形误差椭圆，虚线为变形误差椭圆）。

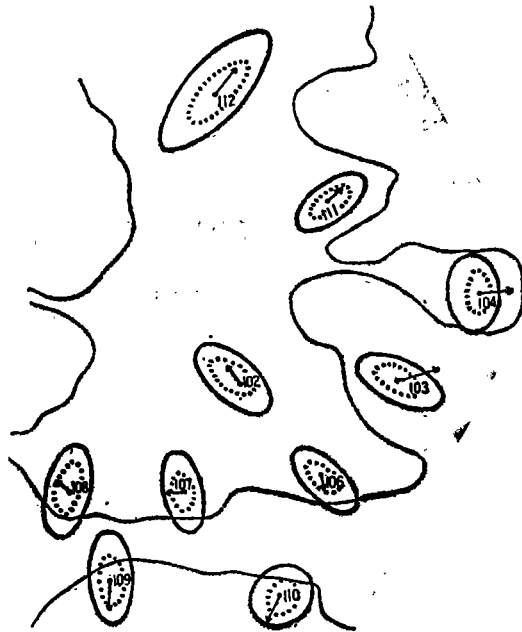


图 7

由图 7 可见，103、104 点的位移向量均超出极限误差，从而可判断位移显著。109、110 点的位移向量虽未超出极限误差，但在变形误差椭圆之外，特别是 110 点，其位移向量已落在极限误差椭圆上。

比较前面 t 检验的结果，两者结论基本一致。

4.2.4 103、104点位移量的区间估计

对位移量显著的103、104点，可按区间估计法估计位移的可能范围。按 t 分布，由(6)式有如下概率表达式：

$$P(-t_{\alpha/2} < \frac{\Delta x - (\xi_n - \xi_1)}{s\sqrt{Q_{11} + Q_{nn}}} < t_{\alpha/2}) = 1 - \alpha. \quad (12)$$

即在给定水平 α 下，位移量大小在如下范围内：

$$(\Delta x - t_{\alpha/2} s \sqrt{Q_{11} + Q_{nn}}, \Delta x + t_{\alpha/2} s \sqrt{Q_{11} + Q_{nn}}).$$

选定置信概率 $1 - \alpha = 0.95$ 时，103、104点 y 坐标位移的区间估计为：

$$y_{103} : (0.1 < \xi_{\Delta y} < 3.1),$$

$$y_{104} : (0.4 < \xi_{\Delta y} < 2.8).$$

垂直位移监测因测区自然条件无法进行精密水准测量，故1986~1987年，1987~1988年均采用 EDM (电磁波测距) 三角高程方法监测。但这只作试验性探索，如何使其精度能达到监测微小地形变量的目的，尚需进一步研究。

5 结论与建议

(1) 菲尔德斯海峡地壳断裂形变网布设合理，结构较强。水平形变监测的方法是可行的，所达到的精度是可靠的。

(2) 经两期监测资料的初步分析可得出，103、104两点有明显的向东位移，这表明在菲尔德斯半岛与企鹅岛和鼓浪屿之间可能有新的断裂存在；109、110两点也有向南偏西方向移动的倾向，这表明菲尔德斯海峡断裂可能在继续扩展；结合图3和图7可看出，其余各监测点尽管移动量不明显，但位移的方向与菲尔德斯半岛断裂和裂隙的分布相一致。

(3) 可初步地认为，菲尔德斯半岛区域性的断裂-裂隙系存在着活动的趋向。因此，必需长期地对该网进行监测，以期获得更多的资料，得出可靠的动态结论，从而来研究该地区应变场的分布及变化，探索其动力机制，得出菲尔德斯海峡形成及半岛构造运动的规律。

(4) 适应南极特殊环境的垂直形变监测方法还有待于进一步研究和探索。

本文对监测网的结构强度分析得到陶本藻教授协助在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 李兆乃、刘小汉。南极乔治王岛菲尔德斯半岛长城站地区火山岩系的地质特征。地质评论，1987。
- [2] 李叔达。动力地质学原理。地质出版社，1983。

- [3] A Chrinaouski. With Contribution by Members of the "AD HOC" Committee on the Analysis of Deformation Measurements; A Comparison of Different Approaches into the Analysis of Deformation Measurements. FIG XVI, 602.3, 1981.
- [4] 陶本藻. 自由网平差与变形分析. 测绘出版社, 1984.

Fault Deformation Monitoring in the Fildes Strait

E Dongchen Xu Shaoquan Zhang Songbo Wang Shengding

Abstract

It is believed by the theory of tectonics that the area of the Antarctic Peninsula stands where the plates meet. In the area of the South Shetland Island area of the King George Island where the Great Wall Station locates, faults and rifts make the crustal movement active, especially the Fildes Peninsula. The large fault of the Fildes Strait is a long developed and active fault. By using modern high precision geodetic technique, a crustal deformation monitoring net was established in the fault area. This paper describes the strength analysis of the monitoring net, and the analysis and processing of the monitoring results for the horizontal displacement. Finally, it gives the tentative conclusion that the local rift-crack system of the Fildes Peninsula has the tendency of movement.

[Key words] crustal fault; deformation monitoring; Fildes Strait on Antarctic