

# 四维整体大地测量和应变分析\*

孙廷萱<sup>1)</sup> 赵金瑞<sup>1)</sup> 杨元喜<sup>2)</sup>

周庆珍<sup>2)</sup> 贾占岭<sup>1)</sup> 熊 介<sup>2)</sup>

1) 中国济南 250021 山东省地震局

2) 中国郑州 450052 郑州测绘学院

## 摘 要

本文研究了四维整体大地测量实用化和空间应变的一系列问题。

利用整体大地测量和动态平差的理论,建立了实用模型和基础观测方程;进而导出了重力向量、天顶距、方位角、距离、正常高差和重力位差的观测方程,并解决了实用化的局部重力场协方差函数的求定问题;推导了三维应变的公式,并计算了应变参数;改进了德国学者 Landan, Hein 等人的 OPERA 软件,用 Fortran 语言编写了 MASSCOMP 小型机上的程序,对一个一等三角锁环和部分二等三角点(共 124 个点)的三角网和重力、水准、天文测量的两期观测结果进行了整体平差,做了应变分析。取得了有参考价值的初步结果。

**关键词** 四维整体大地测量; 应变; 协方差函数; 重力位; 梯度(grad.)

## 1 引 言

大地测量的各类观测,都是在地球重力场这一物理空间进行的。因而,大地网的数据处理不是一个纯几何问题。重力场和地面点位置的测定是一个不可分割的整体。而传统的和现行的平差计算,是采取分离式的方法来进行的,即:求解点的二维位置是将观测量化归到参考椭球体面上来计算;求解点的第 3 个坐标——高程时,是在大地水准面或似大地水准面上来计算;而重力场的确定,则是和求解点的几何坐标分开进行,是根据解大地边值问题的概念,通过复杂的积分,单独求解重力扰动位泛函来实现的。这种分离处理的方法,显然是很不完善、很不严密的,且在实践上甚为繁琐(杨元喜, 1987)。理想的方法是,将一切观测值置于重力场空间,并视为统一体,同时求解三维坐标和重力位及其泛函。这样,不仅理论上是严密的,而且二者的精度上会相得益彰。对地球动力学或大地形变来讲,在三维平差中再引入时间变量,作四维整体大地测量平差,乃是最佳的选择。

四维整体大地测量的理论是本世纪 80 年代才开始形成的,经多位学者的研究,得到

\* 地震科学联合基金会资助课题。

1992 年 2 月 29 日收到初稿,1993 年 3 月 10 日决定采用。

了逐步的充实和完善。但由于实践中涉及的问题很多,尚有待于进行大量实用化的研究,才能日臻成熟。为此,我们结合山东的部分大地网资料,做了尝试性的研究。

## 2 观测资料及预处理

试验区域范围如图 1 所示。该区内布设有一等三角锁、二等基本锁(1973 年第二次施测时是二等网)、一等水准网以及相应的天文点、重力点等。各类观测资料的基本情况如下。

### 2.1 水平方向观测值

三角测量共有两期观测资料。第一期是 1952—1954 年观测的,其中包括一等三角锁 4 条,68 个点;二等三角网 56 个点。一锁按菲列罗公式计算的测角中误差最大为  $\pm 0.79''$ ,最小为  $\pm 0.37''$ ,平均为  $\pm 0.60''$ 。第二期是 1973 年按国家新规范二等网的要求观测的,测角中误差为  $\pm 0.74''$ 。

### 2.2 天顶距观测值

在进行两期三角测量的同时,均测定了天顶距。平差时采用了相邻点间的高差值,第二期高差观测中误差(按三角形闭合差计算的)约为  $\pm 0.37''$ 。第一期三角点高差平均中误差据统计约为  $\pm 0.4$  m,与水准高差比较计算的中误差约为  $\pm 0.9$ — $\pm 1.3$  m。

### 2.3 距离观测值

第一期观测结果中有基线扩大边 4 条,其边长平均相对中误差小于 1:40 万。第二期观测结果中潍县—东海锁段 53 条边为电磁波测距边,边长平均相对中误差均小于 1:100 万。两期的直接量边及扩大边都只收集到归算到高斯平面上的长度值,故需化为空间距离。

### 2.4 天文观测值

第一期观测有 8 个一等天文点和 4 个拉普拉斯点,其内符合中误差分别为:  $m_\varphi_{\text{最大}} = \pm 0.27''$ ,  $m_\varphi_{\text{平均}} = \pm 0.16''$ ,  $m_\lambda_{\text{最大}} = \pm 0.50''$ ,  $m_\lambda_{\text{平均}} = \pm 0.23''$ ;  $m_a_{\text{最大}} = \pm 0.18''$ ,  $m_a_{\text{平均}} = \pm 0.14''$ 。第二期观测有 8 个一等天文点,其平差后中误差分别为:  $m_\varphi = \pm 0.10$ — $\pm 0.20''$ ;  $m_\lambda = \pm 0.24$ — $\pm 0.39''$ ;  $m_a = \pm 0.18$ — $\pm 0.28''$ 。

### 2.5 其它观测

重力观测一般不与三角点重合,如果使用重力观测值,则观测方程中需加入重力垂直梯度未知数,而我们的重力观测信息并不丰富,增加未知量必然会增加法方程式的病态性。所以,只利用重力观测求协方差函数。

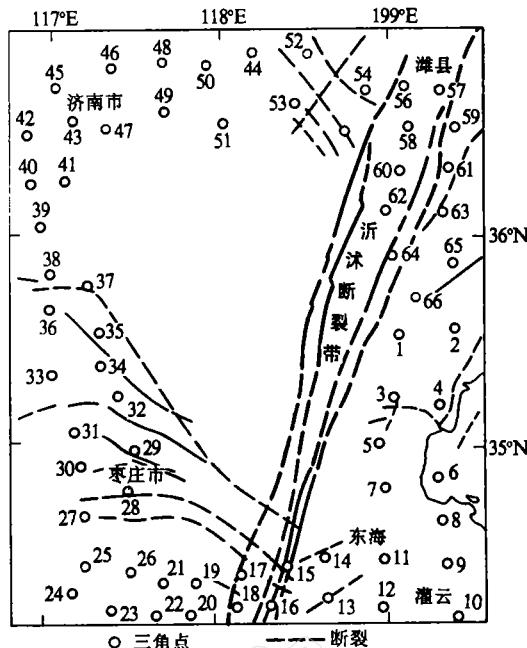


图 1 一等三角锁环位置略图

水准点大多数不与三角点重合，而且大多数不与重力点重合，故无法计算有效的重力位差，而只利用那些与三角点重合的水准高差。

对观测资料进行了以下几项预处理：(1) 将高斯平面上的距离化算为空间距离(萨卡托夫, 1953; 熊介, 1988); (2) 三维近似坐标计算(熊介, 1988); (3) 各点正常重力位和正常重力计算(杨元喜等, 1990a); (4) 各点正常椭球体子午曲率半径  $M$  和卯酉曲率半径  $N$  及梯度  $\text{Grad}(W)$  在子午方向投影曲率的计算(杨元喜, 1990a); (5) 地心直角坐标系到测站直角坐标系的转换计算(熊介, 1988); (6) 计算协方差函数的特征参数(杨元喜等, 1990d)。

### 3 四维整体大地测量的实用模型和观测方程 的建立及试验区计算的结果

在不同时期获得的观测值，一般是不相容的。其原因是除了受观测误差的影响外，还受多种时变因素的扰动，它们往往互相影响，互相制约。利用有限的观测信息，是难以进行严格区分和处理的。因此只能顾及其综合效应，从整体上构造四维大地测量模型。

与 Collier *et al.* (1988) 的模型不同，我们将观测值  $L(t)$  表征为

$$L(t) = F\{X(t), W[X(t), t], t\} \quad (1)$$

经线性化后可表示成(杨元喜等, 1990b)

$$L(t) = L(t_0) + A \dot{X} + B \dot{W} \quad (2)$$

式中， $X, W$  分别为点位几何时变速率参数和重力位时变速率。

基于方程(1)和(2)我们推导了一系列适用于计算的观测方程(推导过程及符号见杨元喜等(1990d))。

#### 3.1 天文和重力观测方程

$$-\begin{bmatrix} g(t_0) \cdot \delta\varphi \\ g(t_0) \cos\varphi(t_0) \cdot \delta\lambda \\ \delta g \end{bmatrix} = \bar{W}(t_0)R(t_0)^T \cdot \Delta t \dot{X} + R(t_0)^T \cdot \Delta t \text{ grad } \bar{W} \quad (3)$$

#### 3.2 天顶距、方位角和距离的观测方程

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} S_{ki}(t_0) \delta\beta_{ki} \\ S_{ki}(t_0) \sin\beta_{ki}(t_0) \delta A_{ki} \\ \delta S_{ki} \end{bmatrix} = Q(t_0)^T R(t_0)^T \Delta t \begin{bmatrix} \dot{X}_{1i} - \dot{X}_{1k} \\ \dot{X}_{2i} - \dot{X}_{2k} \\ \dot{X}_{3i} - \dot{X}_{3k} \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} -S_{ki}(t_0) \cos A_{ki}(t_0) & -S_{ki}(t_0) \sin A_{ki}(t_0) \\ S_{ki}(t_0) \sin A_{ki}(t_0) \cos\beta_{ki}(t_0) & S_{ki}(t_0) \{\sin\beta_{ki}(t_0) \text{tg}\varphi(t_0) - \cos A_{ki}(t_0) \cos\beta_{ki}(t_0)\} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ & \times \begin{bmatrix} \delta\varphi \\ \cos\varphi(t_0) \delta\lambda \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

由(4)式可给出天顶距  $\beta_{ki}$  的观测方程

$$V\beta_{k1} = \beta_{k1}\dot{X}_{1k} + \beta_{k2}\dot{X}_{2k} + \beta_{k3}\dot{X}_{3k} + \beta_{11}\dot{X}_{1i} + \beta_{12}\dot{X}_{2i} + \beta_{13}\dot{X}_{3i} + L_\beta(W)\Delta t + I_\beta \quad (5)$$

方位角  $A_{ki}$  的观测方程为

$$VA_{k1} = A_{k1}\dot{X}_{1k} + A_{k2}\dot{X}_{2k} + A_{k3}\dot{X}_{3k} + A_{i1}\dot{X}_{1i} + A_{i2}\dot{X}_{2i} + A_{i3}\dot{X}_{3i} + L_A(T)\Delta t + I_A \quad (6)$$

角度误差方程为相应两个方位角误差方程之差(从略).

空间斜距的观测方程为

$$VS_{k1} = S_{k1}\dot{X}_{1k} + S_{k2}\dot{X}_{2k} + S_{k3}\dot{X}_{3k} + S_{i1}\dot{X}_{1i} + S_{i2}\dot{X}_{2i} + S_{i3}\dot{X}_{3i} + L_S(W)\Delta t + I_S \quad (7)$$

### 3.3 重力位差及正常高差之观测方程

$$\begin{aligned} V_{\Delta W_{ki}} &= W_{k1}\dot{X}_{1k} + W_{k2}\dot{X}_{2k} + W_{k3}\dot{X}_{3k} + W_{i1}\dot{X}_{1i} \\ &\quad + W_{i2}\dot{X}_{2i} + W_{i3}\dot{X}_{3i} + L_{\Delta W}(\dot{W})\Delta t + I_{\Delta W} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} d\Delta H_{ki} &= -[\partial H_k/\partial X_k]^T X(t_0) \Delta t \dot{X}_k + [\partial H_i/\partial X_i]^T X(t_0) \Delta t \dot{X}_i \\ &\quad + (\Delta t/g_k(t_0)) W_k - (\Delta t/g_i(t_0)) \dot{W}_i \end{aligned} \quad (9)$$

经平差计算, 试验区的整体精度如表 1.

表 1 平差后的点位中误差(单位:m)

年份	$m_x$		$m_y$		$m_z$		注
	平均	最大	平均	最大	平均	最大	
1953	0.481	0.847	0.374	0.665	0.429	0.720	按 68 个一锁点统计
1973	0.589	1.289	0.431	1.009	0.473	1.092	按 124 个一、二等点统计

需要说明的是, 1973 年三角锁中包含许多二等点且图形结构很弱, 所以法方程结构弱, 解算精度受到较大影响.

## 4 应变场及试验区力学性质的分析

我们首先研究应变模型. Xiong 和 Yang (1987; 1988) 曾将三维应变理论用于三维网的转换与变形研究和强度分析. 我们参考该理论侧重研究时变应变问题, 给出三维应变及其速率的实用模型和精度估计的表达式(杨元喜等, 1990c).

设位移向量为

$$W(t) = X(t) - X(t_0) \quad (10)$$

对式(10)求导并引入 Lagrang 应变张量  $E(t)$ , 得

$$\frac{\partial W(t)}{\partial X(t_0)} = E(t) + R(t) \quad (11)$$

$$E(t) = \frac{1}{2} \left\{ \left[ \frac{\partial W(t)}{\partial X(t_0)} \right] + \left[ \frac{\partial W(t)}{\partial X(t_0)} \right]^T \right\} \quad (12)$$

$$R(t) = \frac{1}{2} \left\{ \left[ \frac{\partial W(t)}{\partial X(t_0)} \right] - \left[ \frac{\partial W(t)}{\partial X(t_0)} \right]^T \right\} \quad (13)$$

$E(t)$ ,  $R(t)$  分别为  $t$  时刻的应变矩阵和旋转矩阵. 如果将位移向量表示成

$$W_j(t) = \left[ \frac{\partial W(t)}{\partial X(t_0)} \right]_{ij} (dX(t_0))_{ij} + (X_0)_i \quad (14)$$

则有

$$E(t) = \frac{1}{2} \left\{ \left[ \frac{\partial W(t)}{\partial X(t_0)} \right] + \left[ \frac{\partial W(t)}{\partial X(t_0)} \right]^T \right\} = \begin{bmatrix} e_{xx} & e_{xy} & e_{xz} \\ e_{yx} & e_{yy} & e_{yz} \\ e_{zx} & e_{zy} & e_{zz} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$R(t) = \frac{1}{2} \left\{ \left[ \begin{bmatrix} \partial W(t) \\ \partial X(t_0) \end{bmatrix} - \left[ \begin{bmatrix} \partial W(t) \\ \partial X(t_0) \end{bmatrix}^T \right] \right\} = \begin{bmatrix} 0 & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 0 & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & \varepsilon_x & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式(15), (16)中的  $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$  为线应变, 它们使平行于  $X, Y, Z$  轴方向的长度相对伸缩;  $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{xz}$  为剪应变, 它们引起线与线之间夹角的增减;  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  为局部旋转应变, 它们使网产生局部旋转. 该二式即为应变参数与位移的关系式,

下面我们再给出三维应变速率的计算式(杨元喜等, 1990c)

$$\dot{\varepsilon}_{xx} = \frac{\partial \dot{X}}{\partial X(t_0)} \quad \dot{\varepsilon}_{yy} = \frac{\partial \dot{Y}}{\partial Y(t_0)} \quad \dot{\varepsilon}_{zz} = \frac{\partial \dot{Z}}{\partial Z(t_0)} \quad (17)$$

$$\dot{\varepsilon}_{xy} = \frac{1}{2}(\tilde{\varepsilon}_5 + \tilde{\varepsilon}_2) \quad \dot{\varepsilon}_{xz} = \frac{1}{2}(\tilde{\varepsilon}_9 + \tilde{\varepsilon}_3) \quad \dot{\varepsilon}_{yz} = \frac{1}{2}(\tilde{\varepsilon}_{10} + \tilde{\varepsilon}_7) \quad (18)$$

$$\dot{\varepsilon}_x = \frac{1}{2}(\tilde{\varepsilon}_7 - \tilde{\varepsilon}_{10}) \quad \dot{\varepsilon}_y = \frac{1}{2}(\tilde{\varepsilon}_9 - \tilde{\varepsilon}_3) \quad \dot{\varepsilon}_z = \frac{1}{2}(\tilde{\varepsilon}_2 - \tilde{\varepsilon}_5) \quad (19)$$

应变速率、剪应变速率和局部旋转速率可由相应的协方差阵和协方差传播推出(杨元喜等, 1990c).

根据上述公式, 我们计算了试验区的线应变、剪应变和局部旋转, 结果列入表 2, 3,

表 2 线应变速率( $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  单位为  $10^{-6}/a$ ;  $\varepsilon_z$  单位为  $10^{-7}/a$ )

点号	$\varepsilon_x$	$\varepsilon_y$	$\varepsilon_z$	点号	$\varepsilon_x$	$\varepsilon_y$	$\varepsilon_z$	点号	$\varepsilon_x$	$\varepsilon_y$	$\varepsilon_z$
1	-0.0052	0.0388	0.00	23	-0.8049	-3.7792	2.20	45	0.0148	-2.3917	1.60
2	0.8372	1.5529	0.00	24	2.0953	4.3823	1.79	46	0.1052	-1.2948	0.47
3	-0.6704	-6.2618	0.29	25	3.7320	8.9895	2.50	47	-0.2338	-1.3828	0.90
4	-1.6704	-6.2618	0.57	26	1.0123	1.8032	1.82	48	0.0923	-1.3793	0.39
5	0.3370	-1.9880	0.52	27	-0.3892	14.2982	0.59	49	0.0922	-1.3793	0.52
6	0.3370	-1.9880	1.19	28	-0.3892	14.2982	0.55	50	0.0684	-1.4549	0.04
7	1.0755	0.3443	1.10	29	-4.8874	-10.3205	0.47	51	0.2577	1.1832	0.26
8	1.0755	0.3443	1.62	30	-4.8874	-10.3205	0.82	52	-2.6764	-0.5302	0.68
9	1.5887	3.0038	0.95	31	-1.7764	-1.9762	1.20	53	-0.0528	0.9263	0.40
10	1.5887	3.0038	0.58	32	-2.0484	-3.1434	1.18	54	1.9030	5.6160	0.23
11	1.5854	2.9386	1.50	33	-0.2743	0.0743	2.00	55	1.9030	5.6160	0.06
12	0.7308	1.4797	1.43	34	-0.2743	0.0743	2.12	56	-0.0834	7.5422	0.01
13	0.8230	6.1041	1.80	35	-0.2266	0.4599	2.20	57	-0.0834	7.5422	0.20
14	0.8230	6.1041	1.85	36	-0.2266	0.4599	2.97	58	-0.2616	1.5793	0.48
15	-1.9840	0.1310	2.20	37	-0.4460	-2.3648	3.30	59	-0.5987	-0.7713	0.26
16	-1.9840	0.1310	1.97	38	-0.5370	-2.6485	3.92	60	0.3390	0.8561	0.38
17	4.6191	5.5021	2.60	39	0.4185	-1.9775	3.40	61	0.4381	1.7845	0.29
18	4.6191	5.5021	2.37	40	-0.1152	1.2837	3.41	62	-0.2467	-0.1579	0.36
19	0.3006	5.6059	2.20	41	-0.1085	0.1288	3.20	63	-0.2467	-0.1579	0.65
20	0.3006	5.6059	2.54	42	0.0994	-0.1792	2.65	64	-0.2379	1.8828	0.15
21	-0.5508	0.1867	2.30	43	-0.0300	-0.7984	1.50	65	-0.2379	1.8828	0.58
22	-0.5508	0.1867	2.22	44	1.0584	4.5617	0.97	66	1.5808	6.1612	0.09

注: 按习惯符号, 本表中的  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  分别相当于公式中的  $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$ , “+”为伸长, “-”缩短.

表3 剪应变速率(单位为"/a)

点号	$\gamma_{xy}$	$\gamma_{yz}$	$\gamma_{zx}$	点号	$\gamma_{xy}$	$\gamma_{yz}$	$\gamma_{zx}$	点号	$\gamma_{xy}$	$\gamma_{yz}$	$\gamma_{zx}$
1	0.0537	-0.1162	0.1199	23	3.4338	2.7438	-6.0378	45	1.4643	-0.9636	-0.1009
2	-2.4863	-1.5993	1.8781	24	-6.7184	-5.9322	8.6576	46	0.7034	0.5782	-2.3987
3	6.6010	4.1791	-8.3520	25	-12.4627	-10.4976	16.2398	47	1.4435	1.5530	-3.3358
4	6.6010	4.1791	-8.3520	26	-3.1693	-2.7754	3.7060	48	0.7371	0.3098	-2.0385
5	0.3929	-0.2308	-2.1992	27	-6.8382	-6.4304	25.2344	49	0.7371	0.3098	-2.0385
6	0.3929	-0.2308	-2.1992	28	-6.8382	-6.4304	25.2344	50	0.7944	0.3775	-2.0893
7	-2.2944	-2.2610	1.4455	29	15.1325	10.7586	-14.4308	51	-1.0890	-0.5034	1.3019
8	-2.2944	-2.2610	1.4455	30	15.1325	10.7586	-14.4308	52	5.4499	4.0645	0.3410
9	-4.7567	-4.7545	6.7775	31	4.4040	1.4184	0.9684	53	-0.3015	-1.8307	4.5710
10	-4.7567	-4.7545	6.7775	32	5.5686	2.4321	-1.1110	54	-6.5990	-4.1619	7.2302
11	-4.7208	-4.7719	6.7653	33	0.2916	0.2461	0.2946	55	-6.5990	-4.1619	7.2302
12	-2.2961	-3.0175	4.6683	34	0.2916	0.2461	0.2946	56	-4.1750	-2.4011	11.2510
13	-5.0751	-4.4771	10.8139	35	0.0057	0.9803	-1.0063	57	-4.1750	-2.4011	11.2510
14	-5.0751	-4.4771	10.8139	36	0.0057	0.9803	-1.0063	58	-0.3823	0.8721	0.6169
15	3.6136	4.1533	-2.1965	37	1.8669	3.0424	-6.8054	59	1.5733	3.3679	-5.0174
16	3.6136	4.1533	-2.1965	38	2.1989	3.3609	-7.3714	60	-1.0965	-2.0105	3.3844
17	-12.1284	-8.9835	8.1409	39	-0.1027	-0.1650	-2.8907	61	-1.8062	-2.1989	4.2571
18	-12.1284	-8.9835	8.1409	40	-0.085	1.4241	-1.4848	62	0.5580	1.5353	-2.1246
19	-3.9289	-2.7424	8.5696	41	0.3750	1.2938	-2.1265	63	0.5580	1.5353	-2.1246
20	-3.9289	-2.7424	8.5696	42	0.1310	0.5204	-1.4657	64	-0.6538	0.1229	2.0872
21	0.7025	1.2063	-0.7921	43	0.7152	0.2103	-0.8556	65	-0.6538	0.1229	2.0872
22	0.7025	1.2063	-0.7921	44	-4.4694	-4.3283	8.9584	66	-6.4772	-4.1823	8.4441

注: 按习惯符号, 本表中的  $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$  分别相当于公式中的  $\epsilon_{xy}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{zx}$ ; “+”为角度增大, “-”为角度减小.

4 中(剪应变和旋转应变都是无量纲的, 为了几何解释, 分别乘上了  $\rho'' = 206265''$ ).

现在, 根据试验区的应变参数, 粗略分析一下该区 1953—1973 年的地壳(严格说是地表)运动的状况:

(1) 从线应变计算结果来看, 全区 X(东西方向)、Y(南北方向)两个轴向压缩和拉伸约各占一半.  $\epsilon_x$  全区平均约为  $1 \times 10^{-5}$ ,  $\epsilon_y$  全区平均约为  $3 \times 10^{-5}$ , 即南北向应变速率大于东西向.  $\epsilon_x$  的极大值出现在枣庄附近, 张应变达  $5 \times 10^{-5}$ , 其它部位东西向没有较大值.  $\epsilon_y$  的极大值出现在下列几个部位: 1) 莒南—赣榆, 压应变达  $6 \times 10^{-5}$ , 伴沉降; 2) 东海—徐州—枣庄一带, 张应变达  $5 \times 10^{-5}—4 \times 10^{-5}$ , 伴沉降; 3) 益都—潍坊附近, 张应变达  $5 \times 10^{-5}—7 \times 10^{-5}$ . 至于垂直方向的  $\epsilon_z$  是否视为应变, 还有不同见解, 兼之, 在低纬度地区垂直轴向的应变矢量分量很小, 精度较低, 所以本文不作定量依据去讨论. 但定性的分析是泰沂山区都在继承性地抬升, 莒南—灌云—徐州这一平原区全部在沉降.

(2) 全区受剪较强,  $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$  的平均值分别达  $3.4''$ ,  $2.9''$  和  $5.3''$ . 剪应变速率极大值出现在: 1) 东海—邳县一带, 3 个面上剪应变分量都较大, 达  $3—12''$ ; 2) 徐州—枣庄一带, 量值达  $3—25''$ , 特别是枣庄附近,  $\gamma_{xz}$  达  $14—25''$ ; 3) 益都—潍坊, 应变速率达  $11''$ .

(3) 旋转应变速率都较小, 平均  $(1.5—1.7'')/年$ , 且顺旋和逆旋几近相等, 说明没有系统误差和统一作用的旋转力.

综合上述结果, 结合以往一些学者的研究(杨元喜等, 1990b; 鄢家全等, 1979; 环文林

等,1979;李钦祖,1980;国家地震局测量队,1975;1977;华祥文,1980;许忠淮等,1979;周翠英、魏光兴,1987;赵金瑞,1981),我们对该区的受力模式有如下认识:

表4 局部旋转应变速率(单位为 $(\text{"/a})$ )

点号	$\omega_x$	$\omega_y$	$\omega_z$	点号	$\omega_x$	$\omega_y$	$\omega_z$	点号	$\omega_x$	$\omega_y$	$\omega_z$
1	0.0089	0.1023	0.0486	23	0.5305	0.6550	-0.7278	45	-4.3368	-1.4151	-1.2614
2	0.8164	0.9860	-0.5929	24	-1.5181	0.7044	-2.1866	46	0.0063	0.4516	0.8690
3	-1.9713	-0.6962	-0.4720	25	-1.7944	1.2944	-3.1468	47	0.7326	0.2935	-0.2352
4	-1.9713	-0.6962	-0.4720	26	-0.6782	0.4783	-1.3520	48	-0.5622	0.3251	-1.0201
5	-1.1057	0.6863	-1.6013	27	-2.4660	-7.5620	7.8230	49	-0.5622	0.3251	-1.0201
6	-1.1057	0.6863	-1.6013	28	-2.4660	-7.5620	7.8230	50	-0.4389	0.3190	-0.9456
7	-0.7770	1.0170	-1.7522	29	-1.9131	-4.6694	4.4267	51	0.8809	0.1289	0.1498
8	-0.7770	1.0170	-1.7522	30	-1.9131	-4.6694	4.4267	52	-1.3307	-4.9287	4.7396
9	-1.7924	0.1584	-1.3377	31	-3.9392	-4.0275	2.2888	53	2.9144	-2.2431	0.6382
10	-1.7924	0.1584	-1.3377	32	-3.6888	-3.8413	2.2134	54	2.8236	1.7902	-0.2496
11	-1.8794	0.1385	-1.3699	33	-0.0042	-0.5234	0.3606	55	2.8236	1.7902	-0.2496
12	-2.1427	-0.6038	-0.6116	34	-0.0042	-0.5234	0.3606	56	2.1709	-2.6550	4.4561
13	-0.8327	-1.8151	1.8565	35	1.9226	0.3558	0.4461	57	2.1709	-2.6550	4.4561
14	-0.8327	-1.8151	1.8565	36	1.9226	0.3558	0.4461	58	2.1584	0.0538	1.3157
15	2.6908	-1.3929	3.7672	37	3.2133	1.7229	-0.5127	59	3.6776	1.4791	0.6258
16	2.6908	-1.3929	3.7672	38	3.2912	1.7475	-0.4925	60	-1.9117	-1.0084	-0.1288
17	0.9713	5.2152	-6.0457	39	-0.1233	1.4179	-2.1561	61	-1.1110	-0.8643	0.2661
18	0.9713	5.2152	-6.0457	40	3.5860	0.7634	0.7956	62	1.7779	0.7448	0.3087
19	0.7858	-1.4382	2.2540	41	2.2707	0.6305	0.2845	63	1.7779	0.7448	0.3087
20	0.7858	-1.4382	2.2540	42	1.0057	0.4049	-0.2437	64	1.0587	-0.6269	1.4848
21	1.3618	-0.1274	0.9039	43	-0.6781	-0.3765	-0.2673	65	1.0587	-0.6269	1.4848
22	1.3618	-0.1274	0.9039	44	-0.6809	-0.9308	0.4577	66	2.1265	0.7196	0.5907

注:按习惯符号,本表中的  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  分别相应于公式中的  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ ; “+”为顺旋,“-”为逆旋.

(1) 华北南部地区,由于东面受太平洋板块的挤压俯冲,西面印度板块向北东方向的欧亚板块碰撞和俯冲,并可能通过六盘山褶皱带传递到华北,因而华北地区主压应力轴为北东东-南西西(约  $60^{\circ}\text{N}-75^{\circ}\text{E}$ )方向,在三维空间,该轴与 XY 平面的夹角很小.这个大区应力场的态势对本区有重要的制约作用.

(2) 本区正处于华北块体的次级构造鲁中断块,北以广饶-齐河断裂(向东延伸至益都、安丘)为界,南以秦岭一大别山纬向构造的北支(韩庄-新沂)为界,这个块体一直处于隆起膨胀,其运动是本区应变态的主导因素.

(3) 由上述两种作用力的综合效应,使鲁中断块发生了错综复杂的应变状态.总体来讲,以北西向蒙阴断裂和苍山-尼山断裂为界,其南部以南北拉张伴随沉降为主;其北部以南北压缩伴随抬升为主;而北西向分界带的两端,即莒南和枣庄-曲阜一带,则以南北向压缩为主;试验区东北角的潍坊附近则以南北拉伸为主.我们具体分析一下 3 个应变比较显著的地段:

潍坊附近,56, 57, 58, 60, 62 号点同处于沂沭带上,从线应变分析,优势方向是南北向拉伸,东西向应变极其微弱,而且拉伸和上升都是北强南弱.这可能意味着潍坊附近的沂沭带地垒在隆起、扩张,但由于北东东向区域应力场的制约,向东受到抑制,因而表现为

南北拉伸. 同时两种力的交互作用, 使这些点受到较强的剪切.

灌云—徐州段应变以南北拉伸为主, 兼有量级较小的东西向压缩的优势反映, 同时具有较大的剪切应变, 说明这一带处于鲁中断块的南界, 受该断块隆起膨胀的作用. 这个结果与周翠英和魏光兴(1987)的结果比较吻合.

枣庄附近的应变态极为复杂, 既有量值较大的南北向拉伸, 又有东西向挤压, 兼受较强的剪切, 旋转应变速率在全区也比较突出. 究其原因, 笔者认为有两种可能性: 一是该处位于鲁中断块的西界峰山断裂与南界韩庄断裂的交汇部位, 压扭、张扭兼而有之. 再加上受大区应力场的北东-南西向挤压, 因而出现了复杂的应变图象; 二是, 枣庄是个老矿区, 地下矿井纵横交错, 形成地表的扭曲、沉降等多种形态的变形的可能性也是不能排除的. 目前, 笔者尚难于对这两种原因作出选择.

## 5 结语

(1) 用四维整体大地测量的方法处理大范围的大地测量资料, 迄今国内外尚未见报道. 在实用化研究方面, 本课题解决了大量的问题. 作为尝试, 有了一个较好的开端. 用四维大地测量的结果进行三维应变模型的建立和实际计算, 本课题在应用理论和开发研究上也是首例. 当然, 用三维应变状态来研究问题, 可能是不成熟的或出现错误.

(2) 本课题的理论研究部分经试验区实际计算检验, 基本上是严密的、可靠的. 试验的资料虽不尽理想(如三角点、水准点、重力点很少重合或不重合), 但计算结果说明观测精度是可信的. 例如测边精度主要决定着三角网的尺度比, 即主要反映在线应变中, 从结果可知, 线应变较大部位恰恰在潍坊、徐州两个起始边附近, 而不在最弱边部位. 测角精度主要决定着网的旋转. 从全区旋转应变都较小这一结果, 可以认为测角精度也是较好的.

(3) 本文对实验区地壳运动的研究认为, 从 50—70 年代, 本区受鲁中断块的构造运动和大区应力场的综合作用, 而以本区构造运动为主. 所以各个部位出现了极不相同的应变态. 与大区的应力场很不一致. 这说明本区是在积累应变能, 但没有达到足以发生中强以上地震的能量.

(4) 从应变速率来看, 潍坊、灌云—徐州和枣庄附近是 3 个值得注意的部位, 特别是枣庄附近应深入研究.

本研究得到郑州测绘学院电算中心全体同志的大力支持和协助. 得到刘大杰、晁定波、黄维彬教授、陈锦太、许坤福、李家灵高级工程师的指导, 杨云青、杨丽军同志清稿, 严立众、游本跃同志统计, 李启秀工程师清绘. 在此一并致谢.

## 参 考 文 献

国家地震局地震测量队, 1975. 1966 年邢台地震的形变. 地球物理学报, 18, 240—245.

国家地震局测量队, 1977. 海城 7.3 级地震的地形变. 地球物理学报, 20, 251—263.

环文林、时振梁、鄢家全、汪素云, 1979. 中国及邻区现代构造形变特征. 地震学报, 1, 109—120.

华祥文, 1980. 唐山强震前后北京、天津周围地区应力的变化过程. 地震学报, 2, 130—145.

李钦祖, 1980. 华北地壳应力场的基本特征. 地球物理学报, 2, 376—388.

- 萨卡托夫, П. С. (著), 1953. 高等测量学教程, p. 127. 同济大学测量系大地教研室与中国科学院地理研究所大地测量组(译), 1956. 高等教育出版社, 北京.
- 熊介, 1988. 椭球大地测量学, p. 37. 解放军出版社, 北京.
- 许忠淮、刘玉芬、张鄂珍, 1979. 京津唐张地区地震应力场的方向特征. 地震学报, 1, 121—132.
- 杨元喜、周庆珍、赵金瑞、孙廷萱、贾占岭, 1990a. 四维整体大地测量的计算程序及主要技术说明. 测绘科技, 4:10.
- 杨元喜、孙廷萱、赵金瑞、熊介、周庆珍, 1990b. 四维整体大地测量实用模型及观测方程. 郑州测绘学院学报, 2, 12—19.
- 杨元喜、熊介、周庆珍、孙廷萱、赵金瑞, 1990c. 地壳应变分析模型. 郑州测绘学院学报, 2:20.
- 杨元喜、熊介、周庆珍、孙廷萱、赵金瑞, 1990d. 四维整体大地测量的解算及其协方差函数的确定. 测绘科技, 4:3.
- 杨元喜, 1987. 整体大地测量若干问题的研究, p. 2. 郑州测绘学院, 郑州.
- 鄂家全、时振梁、汪素云、环文林, 1979. 中国及邻区现代构造应力场的区域特征. 地震学报, 1, 9—24.
- 周翠英、魏光兴, 1987. 沂沐断裂带现代构造应力场与地震活动. 华北地震科学, 5, 2, 29—39.
- 赵金瑞, 1981. 鲁中南应变场和地壳的最新运动. 地震学报, 3, 126—134.
- Collier, P. A., Eissfeller, B., Hein, G. W. and Landau, H., 1988. On a 4-D Integrated Geodesy. *Bull Geodesique* 62, 1.
- Xiong, J. and Yang, Y. X., 1987. Three dimensional strength analysis of geodetic networks using strain. *Proceedings of 19 IUGG*.
- Xiong, J. and Yang, Y. X., 1988. On the transformation and deformation of 3-D geodetic network. *Acta Geo. Cart. Sinica*, 17, Special Issue of Geodesy, 112.