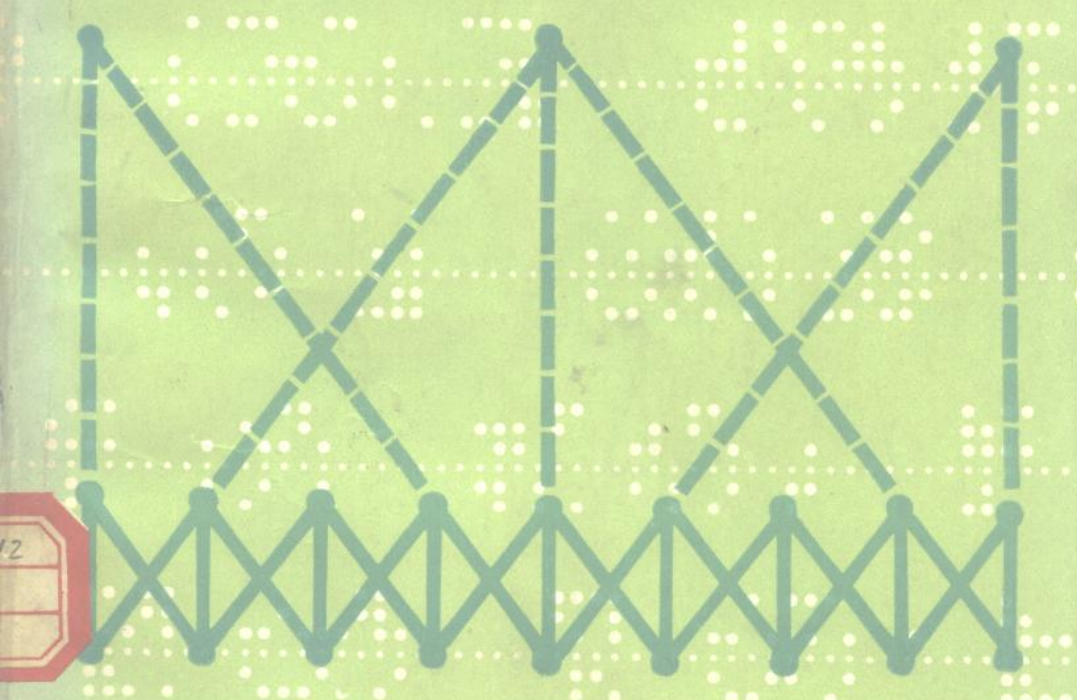


应用电子数字计算机 进行摄影三角测量

(修订第三版)

〔苏〕A. H. 罗班诺夫 等著



测绘出版社

56.1572

952

应用电子数字计算机 进行摄影三角测量

[苏] A.H. 罗班诺夫 等著

郑恩多 张绪茂 田允中 译校

(修订第三版)

测绘出版社

DS84/13

应用电子数字计算机进行摄影三角测量

(修订第三版)

〔苏〕A.H.罗班诺夫 等著

郑恩多 张绪茂 田允中 译校

测绘出版社出版

山西新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开本：850×1168 1/32 印张：9 字数：258千字

1981年3月第一版 1981年3月第一次印刷

印数：1—5,700册 定价：1.10元

统一书号：15039·新156

译 者 的 话

本书为苏联莫斯科测绘学院A.H.罗班诺夫教授等集体所著。书中详细地阐述了以应用自动精密坐标量测仪和电子数字计算机为基础的解析摄影三角测量的理论和实际工作流程。

书中论述了航线摄影三角测量的理论，区域摄影三角测量的理论，建立航线和区域摄影测量网的精度，确定和消除象点坐标的系统误差，确定摄影测量网内插点坐标，象片量测和刺点仪器、数值法和电子数字计算机在摄影测量构网和平差中的应用，以及建立摄影测量网的技术操作等问题。

本书的内容反映了苏联和其他国家在解析摄影测量方面的成就及其今后的展望。该书对从事摄影测量及有关方面的大专学生、研究生、工程师和其他工程技术人员有一定的实用和参考价值。

本书译校中错误难免，敬请读者指正。

一九七九年八月

前 言

在苏联成功地解决了发展国民经济根本问题之一的广泛的生产自动化，有力地改善了劳动条件和提高了劳动生产率。

摄影测量过程自动化的有效措施是采用电子技术，特别是电子计算机。采用现代计算技术的摄影三角测量已成为大地控制网加密的主要方法。

本书阐述的是关于航线和区域网解析摄影三角测量的理论和技术问题，用数值法和电子数字计算机建立和平差摄影测量网问题及其精度分析，介绍测量仪器的性能以及象片的量测方法，同时还考虑到系统误差影响的方法。

本书资料由下述各作者分别撰写：第一章和第五章，第二章的第15节和结束语是由科学技术博士A.H.罗班诺夫教授撰写；第二章（第15节除外）和第六章——科学技术博士Φ.Φ.雷先克；第三章——奥夫辛尼可夫副教授；第四章和第八章（第41节除外）——B.Б.杜宾诺夫斯基副教授；第七章——科学技术博士M.M.马西莫夫；第八章的第41节——科学技术副博士A.П.诺维科夫撰写。

作者在此对莫斯科测绘学院摄影测量教研室的教师以及M.H.布卢舍夫副博士、Г.П.费多鲁克副教授积极参与手稿的讨论深表谢意。

目 录

第一章 航线摄影三角测量的理论	(1)
§ 1. 航线摄影三角测量的实质和主要过程。局部相关 模型法	(1)
§ 2. 象片相对定向元素的确定	(8)
§ 3. 计算摄影基线的方位角和倾角	(14)
§ 4. 计算右象片的外方位角元素	(16)
§ 5. 计算右摄影站的摄影测量坐标	(17)
§ 6. 计算模型点的摄影测量坐标	(17)
§ 7. 模型的比例尺归化	(18)
§ 8. 确定网点的大地坐标	(20)
§ 9. 独立模型法	(28)
第二章 多航线(区域)摄影三角测量的理论	(31)
§ 10. 区域摄影三角测量方法的分类	(31)
§ 11. 直接利用象片的量测数据建立区域网的方法	(32)
§ 12. 利用预先处理数据的构网方法	(59)
§ 13. 利用辅助数据建立区域网	(74)
§ 14. 建立区域网的精度估计	(78)
§ 15. 利用外方位元素和虚拟象片的区域摄影三角 测量	(84)
第三章 航线和区域摄影测量网的构网精度	(96)
§ 16. 摄影测量网的误差源	(96)
§ 17. 航线和区域网的误差方程式	(100)
§ 18. 构网的系统误差对航线网和区域网变形的影响	(111)
§ 19. 偶然误差对航线网构建精度的影响	(124)
§ 20. 偶然误差对区域网构建精度的影响	(133)
第四章 象点坐标系统误差的确定和估计(象片校准)	(140)
§ 21. 象片校准的任务和方法	(140)

§ 22. 试验场摄影的校准方法	(145)
§ 23. 系统误差的估计	(167)
第五章 摄影测量网的内插点	(169)
§ 24. 一般概念	(169)
§ 25. 按控制点确定象片的定向元素	(169)
§ 26. 确定新点的坐标	(176)
§ 27. 计算象片上公里网格线交点的坐标	(176)
第六章 象片量测和刺点仪器	(178)
§ 28. 一般概念	(178)
§ 29. 立体坐标量测仪	(178)
§ 30. 单片坐标量测仪	(197)
§ 31. 象片刺点仪器	(200)
§ 32. 立体坐标量测仪的检查	(208)
第七章 数值方法和电子数字计算机在摄影测量构网和 平差中的应用	(220)
§ 33. 矩阵代数在平差计算中的应用	(220)
§ 34. 摄影三角测量中条件方程组的分组答解方法 及未知数的评价	(231)
§ 35. 在地形摄影测量中有效地应用电子数字计算 机的基础	(236)
§ 36. 应用电子数字计算机对观测结果的分组迭代 平差法	(250)
第八章 建立摄影测量网的操作法	(257)
§ 37. 摄影三角测量的操作方案及准备工作	(257)
§ 38. 象片量测	(262)
§ 39. 计 算	(274)
§ 40. 电子计算机的工作检查与程序调整	(276)
§ 41. 用ALGOL算法语言进行摄影测量问题的 程序设计	(277)
结 束 语	(279)

第一章 航线摄影三角测量的理论

§ 1. 航线摄影三角测量的实质和 主要过程。局部相关模型法

摄影三角测量是按象片确定地面点的大地坐标，以满足编绘地形图、影像地图和象片平面图，以及解决其它的地形测量与大地测量问题的需要。

航线摄影三角测量在于，按立体象对建立属于一条航线的单个模型，进行模型连接，以及将所连接起来的统一模型，按大地坐标进行定向。

航线摄影三角测量的解析方法，是以应用精密立体坐标量测仪和电子数字计算机为基础的。在立体坐标量测仪上量测所选取构网的象点坐标。电子数字计算机用于建立单个模型，将其连接为统一模型，并将统一模型进行外方位定向。

单个模型如同是点的集合而组成的，其点位坐标是按立体象对相应点的坐标来确定的：

$$X = NX'_1, \quad Y = NY'_1, \quad Z = NZ'_1 \quad (I.1)$$

式中：

X, Y, Z ——以左摄影站为原点的坐标系内的地面点坐标（图1），

X'_1, Y'_1, Z'_1 ——同一坐标系内左象片上点的坐标。

N 为比例尺因子，它和摄影基线的分量 B_x 与 B_z ，以及左象片象点空间坐标（ S_1XYZ 坐标系）和右象片同名点的空间坐标（在与 S_1XYZ 平行的 S_2XYZ 坐标系）有关：

$$N = \frac{B_x Z'_2 - B_z X'_2}{X'_1 Z'_2 - Z'_1 X'_2} \quad (I.2)$$

象点空间坐标与平面坐标 x 和 y 的关系式为：

$$\left. \begin{aligned} X' &= a_1(x-x_0) + a_2(y-y_0) + a_3z \\ Y' &= b_1(x-x_0) + b_2(y-y_0) + b_3z \\ Z' &= c_1(x-x_0) + c_2(y-y_0) + c_3z \end{aligned} \right\} \quad (I.3)$$

式中:

a, b, c ——由 x, y, z 坐标轴与 X, Y, Z 轴的夹角所组成的方向余弦(表1);

x_0, y_0 ——象主点坐标。

z 坐标对于所有象点都是等于 $-f$ 的常数。

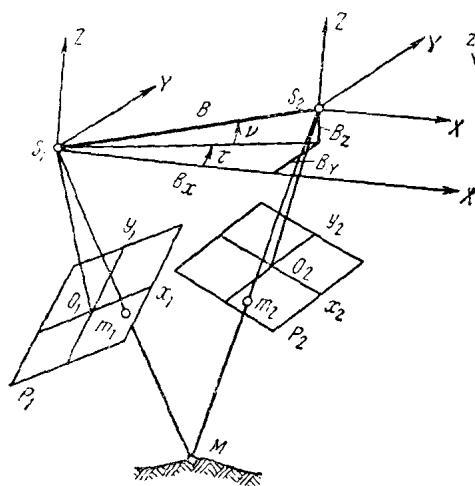


图 1

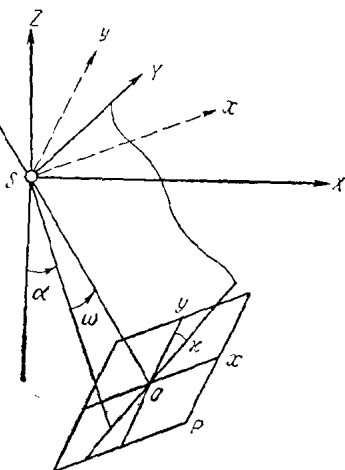


图 2

方向余弦与象片的外方位角元素 α, ω, κ (图2)有关:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \cos \alpha \cos \kappa - \sin \alpha \sin \omega \sin \kappa \\ a_2 &= -\cos \alpha \sin \kappa - \sin \alpha \sin \omega \cos \kappa \\ a_3 &= -\sin \alpha \cos \omega \\ b_1 &= \cos \omega \sin \kappa \\ b_2 &= \cos \omega \cos \kappa \\ b_3 &= -\sin \omega \\ c_1 &= \sin \alpha \cos \kappa + \cos \alpha \sin \omega \sin \kappa \end{aligned} \right\} \quad (I.4)$$

$$\left. \begin{aligned} c_2 &= -\sin \alpha \sin \kappa + \cos \alpha \sin \omega \cos \kappa \\ c_3 &= \cos \alpha \cos \omega \end{aligned} \right\}$$

这些方向余弦的内在联系是六个独立的方程式：

$$\left. \begin{aligned} a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 &= 1, & a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3 &= 0 \\ b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 &= 1, & b_1 c_1 + b_2 c_2 + b_3 c_3 &= 0 \\ c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 &= 1, & c_1 a_1 + c_2 a_2 + c_3 a_3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (I.5)$$

由此看出，在九个方向余弦中只有三个是独立的。

表 1

坐 标 轴	x	y	z
X	a_1	a_2	a_3
Y	b_1	b_2	b_3
Z	c_1	c_2	c_3

如果方向余弦是已知的，则象片外方位角元素可按下式确定：

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= -\frac{a_3}{c_3} \\ \sin \omega &= -b_3 \\ \operatorname{tg} \kappa &= \frac{b_1}{b_2} \end{aligned} \right\} \quad (I.6)$$

由上述看出，为确定地面点坐标，必须量测立体象对的象点坐标 x 和 y ，并知道象对的内方位元素和外方位元素值。此时，立体象对的点位坐标量测值要加入改正数，以清除底片变形、摄影机物镜畸变差、大气折光差和其它系统误差的影响。

用立体坐标量测仪量测象片时，只记录分划尺的读数，而象点坐标及其改正数，则是在构网过程中用电子数字计算机计算出来的。

将单个模型连接成统一模型的过程，通常叫做模型的相对定向，这个过程可用直角坐标的变换公式来表示：

$$\left. \begin{aligned} X_{\Phi} &= X_0 + (a'_1 X + a'_2 Y + a'_3 Z) \frac{t}{t_0} \\ Y_{\Phi} &= Y_0 + (b'_1 X + b'_2 Y + b'_3 Z) \frac{t}{t_0} \\ Z_{\Phi} &= Z_0 + (c'_1 X + c'_2 Y + c'_3 Z) \frac{t}{t_0} \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

式中：

$X_{\Phi}, Y_{\Phi}, Z_{\Phi}$ ——摄影三角测量点在所有模型统一坐标系中的坐标；

X_0, Y_0, Z_0 ——单个模型坐标系原点的坐标；

X, Y, Z ——摄影三角测量点的坐标；

a'_i, b'_i, c'_i —— X, Y, Z 轴与 $X_{\Phi}, Y_{\Phi}, Z_{\Phi}$ 轴夹角的方向余弦；

t ——单模型的比例尺分母；

t_0 ——统一模型的比例尺分母。

显然，(1.7)式中的 X_0, Y_0, Z_0 坐标值就是立体象对左象片摄影站坐标 X_s, Y_s, Z_s 。

模型的相对定向是按象片三度重叠带内选取的连接点来完成的。

各个模型的统一摄影测量坐标系 $X_{\Phi}Y_{\Phi}Z_{\Phi}$ 相对于大地坐标系的位置，一般是任意的。因此就产生了对统一模型进行大地定向的必要性。因为大地定向的过程包含比例尺变换、摄影测量坐标系原点位移和旋转，所以由摄影测量坐标变换为大地坐标的这一过程，可用与(1.7)式类似的公式来表示。

统一模型的大地定向是利用平面和高程控制点进行的。在摄影测量网大地定向的过程中，还要考虑因建立单模型及模型连接误差而引起的网的变形。

在下述的局部相关模型方法中，取航线第一张象片的摄影站坐标为统一摄影测量坐标系 $X_{\Phi}Y_{\Phi}Z_{\Phi}$ 的原点。 X_{Φ} 和 Y_{Φ} 坐标轴根据第一张象片的外方位角元素 α, ω, κ 来建立。

如果这些角元素是未知的，就取其任意值。当然，希望所取的 α, ω, κ 角度值应尽量接近其真值。例如，如果象片是水平的，则认为

这些角等于零。此时坐标轴 X_0 和 Y_0 将分别与第一张象片的 x 和 y 轴平行。

第一个立体象对的右象片的外方位角元素是按左象片的 a, ω, κ 角及该象对的相对定向元素确定的。

为了确定右象片的外方位线性元素，取摄影基线的任意长度并计算其水平角和垂直角，以标定基线方向。这些角是左象片外方位角元素和立体象对相对定向元素的函数。

在计算第一个模型各点的摄影测量坐标之前，第一个立体象对各点的量测坐标 x 和 y 应按下式进行变换：

$$\left. \begin{aligned} x^0 &= -f \frac{a_1(x-x_0) + a_2(y-y_0) - a_3f}{c_1(x-x_0) + c_2(y-y_0) - c_3f} \\ y^0 &= -f \frac{b_1(x-x_0) + b_2(y-y_0) - b_3f}{c_1(x-x_0) + c_2(y-y_0) - c_3f} \end{aligned} \right\} \quad (\text{I.8})$$

此时按(I.4)式来计算左象片和右象片的方向余弦。由此所求得的坐标 x_1^0 和 y_1^0 ，以及 x_2^0 和 y_2^0 将属于与 X_0Y_0 面平行的新象片。但是这些象片的焦距和原象片相比是不变的(图3)。

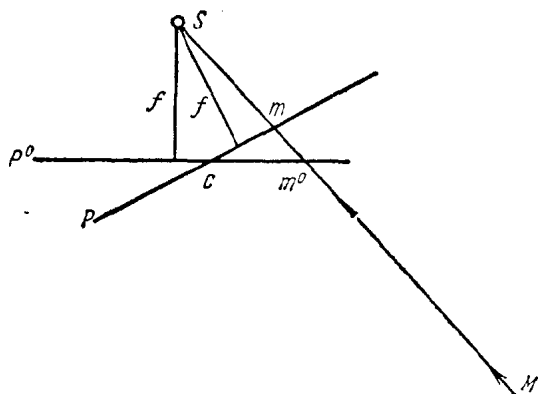


图 3

鉴于此，计算地面点坐标的公式(I.1)和(I.2)可简化并写成如下形式：

$$\left. \begin{aligned} X &= N x_1^0, & Y &= N y_1^0, & Z &= -Nf \\ N &= \frac{B_x + \frac{x_2^0}{f} B_z}{x_1^0 - x_2^0} \end{aligned} \right\} \quad (\text{I.9})$$

为了建立第二个模型，第二个立体象对左象片的外方位元素就不是取任意值了，而是在建立第一个模型时，按第一个立体象对的右象片的元素值求得的。因此第二个模型的坐标系与第一个模型的坐标系是平行的。

在其它方面建立第二个和其余的模型，与建立第一个模型没有什么区别。

在这种情况下，后一个模型和前一个模型的连接只是作比例尺变换，也就是将后一模型的比例尺归算为前一模型的比例尺并移动坐标原点。表达上述过程的公式可按 (I.7) 式求得，如果考虑到 XYZ 与 $X_\phi Y_\phi Z_\phi$ 两坐标系相互平行，那么有：

$$\left. \begin{aligned} X_\phi &= X_s + X \frac{t}{t_0} \\ Y_\phi &= Y_s + Y \frac{t}{t_0} \\ Z_\phi &= Z_s + Z \frac{t}{t_0} \end{aligned} \right\} \quad (\text{I.10})$$

式中： $t:t_0 = \lambda$ 为比例尺系数。

将单模型连接成统一模型所必须的摄影站坐标，可按摄影基线的分量来计算：

$$\left. \begin{aligned} X_{s_k} &= \sum_1^k B_{X_i} \\ Y_{s_k} &= \sum_1^k B_{Y_i} \\ Z_{s_k} &= \sum_1^k B_{Z_i} \end{aligned} \right\} \quad (\text{I.11})$$

式中符号 k 表示摄影站和象片的编号, 取其值从零到 n 。将象片和摄影站这样编号, 其基线号和模型号与立体象对右象片的摄影站号是一致的。

所论述的航线摄影三角测量解析法的主要过程有:

1. 拟定摄影三角测量的计划。
2. 在立体坐标量测仪上量测象片。
3. 用电子数字计算机计算如下数据:
 - 1) 按象片量测结果所记录的读数计算象点坐标;
 - 2) 象点坐标的系统误差改正数, 如象片在仪器上的安置误差, 象片变形, 摄影机物镜径向畸变差和切向畸变差, 大气折光差等;
 - 3) 改正后的象点坐标;
 - 4) 象片的相对定向元素;
 - 5) 摄影基线的方位角和倾角;
 - 6) 右象片的外方位角元素;
 - 7) 右摄影站的摄影测量坐标;
 - 8) 模型点的摄影测量坐标;
 - 9) 模型的比例尺系数及归化比例尺的模型点坐标;
 - 10) 网点的大地坐标。

航线网有多少立体象对, 1 ~ 9 过程就要重复多少次。完成这些过程构成了统一模型, 该模型为自由比例尺并且对大地坐标系是任意定向的。第10项过程是将统一模型归化为已知的比例尺, 并将其相对大地坐标系定向。此时就清除了模型残余变形的影响, 从而确定出网点的大地坐标。

拟定摄影三角测量的计划, 在地形摄影测量工作的指南和规范中都有详细论述。该计划一般是标在旧地形图或略图上, 在上面标出摄影航线, 以及摄影测量网的控制点和待定点。网点标注在晒印的正片上, 以供在立体坐标量测仪上观测象片时使用。航线摄影三角测量网应至少有五个控制点(图4)。在每一个象对上一般至少选择六个点, 这些点的地面位置是根据所建立的航线网来确定的(图5)。

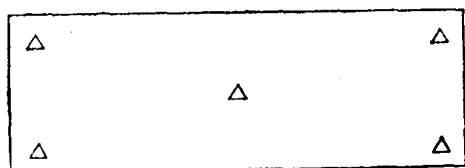


图 4

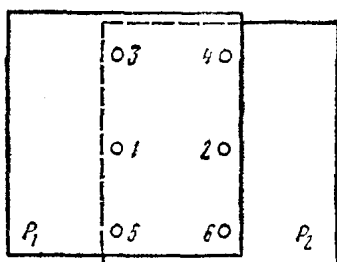


图 5

§ 2. 象片相对定向元素的确定

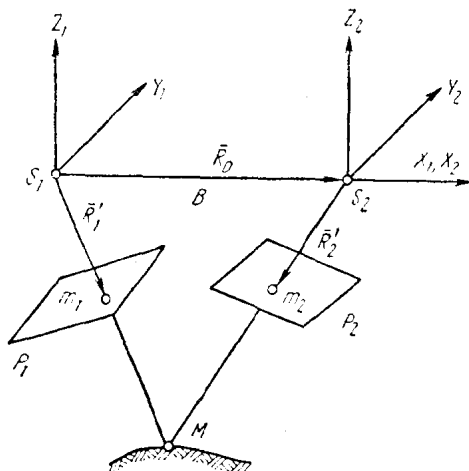


图 6

图 6 所示为一对相对定向象片 P_1-P_2 ，其投影中心分别为 S_1 和 S_2 ，一对同名点 m_1 和 m_2 及投影光线 S_1m_1 ， S_2m_2 ，模型点为 M 。

取 S_1 为 XYZ 坐标系的原点。 X 轴与基线 B 重合，而 Y 轴的指向是垂直于左象片的主核面。

取下述各值作为象对相对定向元素（图 7）：

α'_1 ——在左象片主核面内，基线的垂线与左象片主光线之间的夹

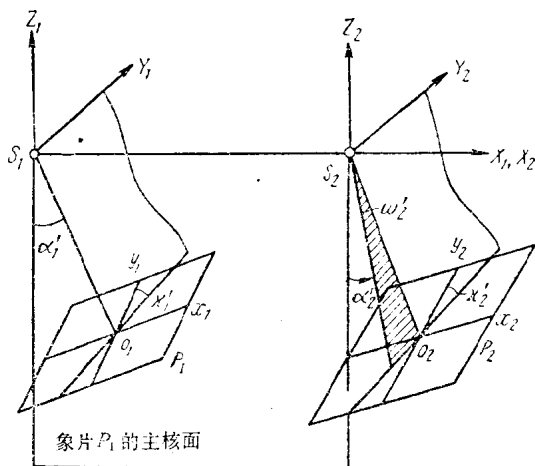


图 7

角；

κ_1' ——左象片上 y_1 轴与通过主光线 S_1O_1 并垂直于主核面 $S_1O_1S_2$ 的平面在左象片上的迹线之间的夹角；

α_2' ——在左象片主核面内，基线的垂线与右象片主光线在该面的投影之间的夹角；

ω_2' ——右象片主光线与 $S_1O_1S_2$ 平面组成的夹角；

κ_2' ——在右象片上 y_2 轴与过主光线 S_2O_2 并垂直 $S_1O_1S_2$ 面的平面在右象片上的迹线之间的夹角。

点 S_2 ， m_1 和 m_2 对于 S_1 点的位置用向量 $\overline{R}_0$ ， $\overline{R}_1'$ 和 $\overline{R}_2'$ 来确定（见图 6）。由于象片相对定向的同名光线在一个核面上，所以这些向量是共面的，即其标量与向量的混合积等于零：

$$\overline{R}_0 \cdot (\overline{R}_1' \times \overline{R}_2') = 0$$

或者写为坐标公式：

$$\begin{vmatrix} B & 0 & 0 \\ X_1' & Y_1' & Z_1' \\ X_2' & Y_2' & Z_2' \end{vmatrix} = 0 \quad (a)$$

式中：

X_1' ， Y_1' ， Z_1' —— m_1 点在 $S_1X_1Y_1Z_1$ 坐标系中的坐标，

X'_1, Y'_1, Z'_1 —— m_2 点在与 $S_1 X_1 Y_1 Z_1$ 平行的坐标系 $S_2 X_2 Y_2 Z_2$ 中的坐标。

由等式 (a) 可得:

$$Y'_1 Z'_1 - Z'_1 Y'_2 = 0$$

将上述象片相对定向方程表示为:

$$\varphi(\alpha'_1, \kappa'_1, \alpha'_2, \omega'_2, \kappa'_2) = Y'_1 Z'_1 - Z'_1 Y'_2 = 0 \quad (\text{I.12})$$

假设相对定向元素的近似值是已知的, 并令其为:

$$\alpha'_{10}, \kappa'_{10}, \alpha'_{20}, \omega'_{20}, \kappa'_{20}$$

求这些近似值的改正数 $\delta\alpha'_1, \delta\kappa'_1, \delta\alpha'_2, \delta\omega'_2, \delta\kappa'_2$ 。

为此, 将 (I.12) 式用下式代替:

$$\begin{aligned} \varphi(\alpha'_1, \kappa'_1, \alpha'_2, \omega'_2, \kappa'_2) &= \varphi_0(\alpha'_{10}, \kappa'_{10}, \alpha'_{20}, \omega'_{20}, \kappa'_{20}) + \\ &+ \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha'_1} \delta\alpha'_1 + \frac{\partial \varphi}{\partial \kappa'_1} \delta\kappa'_1 + \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha'_2} \delta\alpha'_2 + \frac{\partial \varphi}{\partial \omega'_2} \delta\omega'_2 + \frac{\partial \varphi}{\partial \kappa'_2} \delta\kappa'_2 \end{aligned}$$

引入符号:

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha'_1}, \quad b = \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha'_2}, \quad c = \frac{\partial \varphi}{\partial \omega'_2}, \quad d = \frac{\partial \varphi}{\partial \kappa'_1}, \quad e = \frac{\partial \varphi}{\partial \kappa'_2} \\ l &= \varphi_0(\alpha'_{10}, \kappa'_{10}, \alpha'_{20}, \omega'_{20}, \kappa'_{20}) = Y'_{10} Z'_{10} - Z'_{10} Y'_{20} \end{aligned} \right\} \quad (\text{I.13})$$

并组成改正数方程式:

$$a\delta\alpha'_1 + b\delta\alpha'_2 + c\delta\omega'_2 + d\delta\kappa'_1 + e\delta\kappa'_2 + l = v \quad (\text{I.14})$$

求偏导数。令 $x_0 = y_0 = 0$ 。由 (I.12) 式与 (I.3) 式得:

$$\begin{aligned} \varphi(\alpha'_1, \kappa'_1, \alpha'_2, \omega'_2, \kappa'_2) &= Y'_1 Z'_1 - Z'_1 Y'_2 = \\ &= (b_1 x_1 + b_2 y_1 - b_3 f)(c'_1 x_2 + c'_2 y_2 - c'_3 f) - \\ &\quad - (c_1 x_1 + c_2 y_1 - c_3 f)(b'_1 x_2 + b'_2 y_2 - b'_3 f) = 0 \end{aligned}$$

顾及 (I.4) 式得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} &= -[(\cos \alpha'_1 \cos \kappa'_1 - \sin \alpha'_1 \sin \omega'_1 \sin \kappa'_1) x_1 + \\ &\quad + (-\cos \alpha'_1 \sin \kappa'_1 - \sin \alpha'_1 \sin \omega'_1 \cos \kappa'_1) y_1 + \\ &\quad + f \sin \alpha'_1 \cos \omega'_1] Y'_2 = -(a_1 x_1 + a_2 y_1 - a_3 f) Y'_2 = \\ &= -X'_1 Y'_1 \end{aligned}$$

按同样方法可求出其它偏导数。其结果为: