

WUHAN TECHNICAL UNIVERSITY OF SURVEYING AND MAPPING

综合导航定位数据后处理研究*

文 和

摘要

本文简要地讨论了综合导航系统的误差源，并详细地论述了数据的后处理方法。本文以位置线归化原理为基础，推导了测线上船位逐次平差方法。最后，给出了有关结论。

【关键词】 导航；定位；位置线；后处理

引言

目前，较常用的导航定位系统有三类：卫星定位系统，地面无线电定位系统，坐标推算系统。这3类系统各有其优缺点：子午卫星定位系统具有全天候作业性能，定位精度较高，但不能连续定位，且定位时需要知道船位的先验航迹，定位精度受航速误差影响大；地面无线电定位系统按测程可分为近、中、远程3类，一般近、中程系统定位精度较高，但作用范围有限；远程系统作用范围虽大，但其精度无法满足许多工程勘探的要求；坐标推算系统能提供较高精度的相对船位，但不能单独测定船位的绝对位置，且定位误差随推算时间的增大而增大。因此，把各种系统组合起来，取长补短，组成一种综合导航系统，成了导航定位界关心的一个课题。

笔者为5000型综合导航系统后处理软件开发的需要而做了一些研究，本文介绍其中部分研究结果。

1 系统介绍及误差分析

5000型综合导航系统包括一台MX1107双频卫星导航仪，一套多普勒声纳导航系统，多种地面无线电导航系统(ARGO, LORAN-C等)。下面简单讨论各系统的工作原理及误差来源，详细内容参看〔1〕。

收稿日期：1988—01—20

* 本文为硕士论文的一部分，指导教师为陈永奇教授。

1.1 坐标推算系统

综合导航系统中常用的坐标推算系统是多普勒声纳导航系统。该系统由罗经提供航向，由多普勒声纳仪提供相对于海底的航速。目前，大多数多普勒声纳仪只能在水深不超过400~500米的条件下测定相对于海底的“绝对速度”。当水深超过上述深度，多普勒声纳转换为另一工作方式，所测速度是相对于水团的。

多普勒声纳导航系统的误差来源主要有：传播媒介的影响，包括混响和回声噪声的影响；处理误差，包括声速误差，频率漂移误差，基准频率误差等；转换误差，包括航向偏差及误差。这些误差主要是系统性的，因此，对坐标推算的影响也是系统性的。

坐标推算公式为：

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= \sum_{i=1}^j \Delta t_i \cdot v_i \cdot \cos \alpha_i \\ \Delta y &= \sum_{i=1}^j \Delta t_i \cdot v_i \cdot \sin \alpha_i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

考虑到系统误差为主要误差，速度近似为恒速，速度采样间隔 Δt 不变，可得：

$$d\Delta x = \cos \alpha (J \cdot \Delta t) dv - v \sin \alpha (J \cdot \Delta t) d\alpha \approx K_x \cdot \Delta T_J, \quad (2)$$

类似地有：

$$d\Delta y \approx K_y \cdot \Delta T_J.$$

式中， Δx ， Δy 为北一东坐标系坐标增量； Δt 为采样间隔； v_i 为船速； α_i 为航向； J 为推算区间内的采样次数； $\Delta T_J = \sum_{i=1}^j \Delta t_i$ 。

由(2)式可知，由坐标推算系统推算的点位的误差近似与时间成正比。

1.2 地面无线电定位系统

地面无线电定位系统定位的误差主要与两方面因素有关：一方面是测量的误差；另一方面是定位的图形条件。综合导航系统中较常用到的 LORAN-C 定位系统测量误差的主要来源有：设备误差，主要是由于发射机和接收机计时钟基准频率的漂移引起；大气延迟的影响和大地电导率对电磁波传播的影响。LORAN-C 的测量误差主要是系统性的。近海测量中较常用的另一系统是 ARGO，其测量误差主要是由于仪器设计方面的误差和起始船位误差引起。所谓起始船位误差是由于该系统测量的是小于一个整数巷的小数部分，整数巷必须由其他方法提供。因此，起始整数巷的误差引起起始船位的误差。同时，该系统还会出现丢巷现象，即产生粗差。

1.3 卫星定位系统^[1]

海上子午卫星定位原理与陆地上定位原理基本上是相同的，不同的是定位接收机处于运动状态，因此，必须预先知道船舶运动过程的相对位置才能定位^[2]。知道了船舶的运动状态，就可按本文将要介绍的位置线归化法将所有观测值归化同到一位置进行解算。

海上卫星定位的误差源可分为两方面：与陆地定位相同的那些误差源^[2]；先验航迹的误差所引起的误差。此外，定位时把高程当已知值，高程误差也将引起定位的误差。

2 后处理模型

根据前面的误差分析，综合导航后处理工作的主要任务是：改正坐标推算系统的偏差；剔除地面无线电系统中的粗差并改正其系统误差；减小卫星定位时船速误差的影响；综合利用各种数据求出船位坐标值。后处理时各系统间相互关系见图 1。

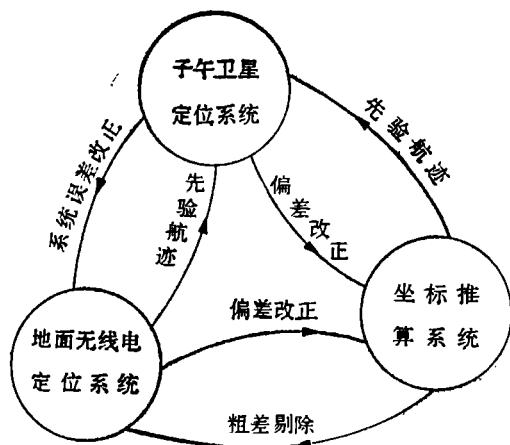


图 1 综合导航系统中各系统的相互关系

数。

为方便起见，只讨论有两次卫星通过的一段测线。限于篇幅，有些公式不做具体推证。

2.1 测线上船位逐次平差法

2.1.1 基本原理

该法是利用位置线归化原理，进行船位的逐次计算。其特点是有效利用了计算机的贮存单元，并减少了计算工作量。下面先简单介绍位置线归化原理：

位置线归化是为了将所有观测值联合起来进行平差。若按传统方法进行联合平差，工作量是相当大的^[3]。考虑到海洋物探测量中并不需要知道每次定位采样时刻的船位，可借助于航向、航速把各个时刻的位置观测值归化到所求位置（对应于T时刻），再进行计算。现绘出有关公式。

归化后的误差方程：

$$V = B\delta X + l \quad , \quad (3)$$

式中：

$$\delta X = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \end{bmatrix} \quad , \quad l = \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \dots \\ l_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_1^0 - L_1 \\ L_2^0 - L_2 \\ \dots \\ L_n^0 - L_n \end{pmatrix} \quad ;$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{\partial L_1}{\partial x} & \frac{\partial L_1}{\partial y} & \dots & \frac{\partial L_n}{\partial x} \\ \frac{\partial L_1}{\partial x} & \frac{\partial L_1}{\partial y} & \dots & \frac{\partial L_n}{\partial y} \end{pmatrix}^T.$$

L_i 是位置线观测值， L_i^0 是根据坐标推算系统求出的船位反算出的位置线近似值， B 为误差方程系数阵，归化前后不变^[3]。

我们要求的只是 T 时刻的船位，按传统方法，只能选取一个船位未知数，设为 X_T^0 （对应的位置线计算值 L_T^0 ），则有关系式：

$$l_i = \left(L_T^0 + \frac{\partial L_i}{\partial x} \Delta x_i + \frac{\partial L_i}{\partial y} \Delta y_i + \dots \right) - L_i.$$

这里 Δx_i ， Δy_i 为 T 至 T_i 时间内的坐标增量。为进行误差分析，上式只考虑一次项，并改用矩阵表示：

$$l = L^0 + B' \Delta X - L,$$

则：

$$Q_1 = Q_L + B' Q_{\Delta X} B'^T, \quad (4)$$

式中：

$$B' = \begin{pmatrix} \frac{\partial L_1}{\partial x} & \frac{\partial L_1}{\partial y} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial L_2}{\partial x} & \frac{\partial L_2}{\partial y} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{\partial L_n}{\partial x} & \frac{\partial L_n}{\partial y} \end{pmatrix},$$

$$\Delta X = [\Delta x_1 \ \Delta y_1 \ \Delta x_2 \ \Delta y_2 \ \dots \ \Delta x_n \ \Delta y_n]^T.$$

Δx_i ， Δy_i 为所求位置时刻 T 至 T_i 时刻坐标增量，由坐标推算系统提供； $Q_{\Delta X}$ 为 ΔX 的协因数阵，计算时可取对角线矩阵。

由 (3)，(4) 式即可按最小二乘法求解。

船位逐次平差法就是把 T_i 以前的观测值归化到 T_i 时刻位置，进行平差计算，求出 T_i 点船位，然后进行 T_{i+1} 的计算。如此逐次进行下去。

假设在 T_1 ， T_2 时刻单独列立的位置线观测值误差方程式分别为：

$$\nu_1 = B_1 \delta X_1 + l_1, \quad (5)$$

$$\nu_2 = B_2 \delta X_2 + l_2, \quad (6)$$

观测值协因数阵分别为 Q_{L_1} ， Q_{L_2} ，且 $Q_{L_1 L_2} = 0$ 。

由 (5) 式按最小二乘法求出 $\hat{\delta X}_1$ （因为 T_1 时刻前没有其它位置线观测值，所以这里把 δX_1 改为 $\hat{\delta X}_1$ ）及其协因数阵 $Q_{\hat{X}_1}$ 。为确定 T_2 时刻船位，把 T_1 时刻位置线观测值归化到 T_2 时刻位置，归化后联合列出误差方程式：

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} \delta \hat{X}_2 + \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

根据(4)式，并顾及 $B'_1 = B_1$ ，归化到 T_2 时刻位置后 T_1 时刻位置线协因数阵为：

$$Q = Q_{L_1} + B_1 Q_{\Delta X_{12}} B_1^T,$$

式中， $Q_{\Delta X_{12}}$ 为 $X_2 - X_1$ 的协因数阵。则(7)式对应的协因数阵为：

$$Q_2 = \begin{pmatrix} Q_{L_1} + B_1 Q_{\Delta X_{12}} B_1^T & 0 \\ 0 & Q_{L_2} \end{pmatrix}.$$

组成法方程，并利用 T_1 时刻平差结果，令： $\delta \hat{X}_2 = \delta \hat{X}_1 + \delta X'_2$ ，可将法方程简化为：

$$(P_{X_1}(T_2) + B_2^T Q_{L_2}^{-1} B_2) \delta X'_2 + B_2^T Q_{L_2}^{-1} T_2 = 0, \quad (8)$$

式中

$$P_{X_1}(T_2) = (Q_{X_1} + Q_{\Delta X_{12}})^{-1}, \quad (9)$$

$$\bar{l}_2 = l_2 + B_2 \hat{X}_1.$$

由(8)式可求出 $\delta X'_2$ ，从而可求出 T_2 时刻船位估值 $\hat{X}_2 = X_1^0 + \Delta X_{12} + \delta \hat{X}_1 + \delta X'_2 = X_2^0 = \delta \hat{X}_1 + \delta X'_2$ 及其协因数阵 $Q_{\hat{X}_2}$ 。同理可逐次计算下去。

2.1.2 逐次平差过程偏差的计算

推算坐标增量的误差阵 $Q_{\Delta X}$ 是偶然误差的度量，而由前面讨论知道，坐标推算系统的误差主要是系统性偏差，因此，应计算出偏差值，对观测结果加以改正。改正后的残差按偶然误差处理。本文介绍在逐次平差过程计算速度偏差值的方法，这时速度偏差向量为：

$$W_i = (\hat{X}_i - X_i^0) / t_i,$$

式中， $W_i = \begin{pmatrix} W_{x_i} \\ W_{y_i} \end{pmatrix}$ ， t_i 为自初始点至计算点时间； \hat{X}_i 为按逐次平差法求得的坐标向量； X_i^0 为单独由坐标推算系统求出的坐标向量。

利用前面各次求得的 W 取一个简单的算术平均值 \bar{W} ，即

$$\bar{W}_i = \frac{(i-1)\bar{W}_{i-1} + W_i}{i} \quad (10)$$

作为 T_i 时刻的偏差估值，加到速度向量观测值中进行 T_{i+1} 点的逐次计算。

考虑到偏差向量在一段时间内可视为不变值，可把测线分成若干分段，在每个分段按(10)式计算出该分段的偏差向量估值 \bar{W} ，取前面各分段所求估值的带权平均值 \hat{W} ，即

$$\hat{W}_j = ((J-1)\hat{W}_{j-1} + 2\bar{W}_j) / (J+1) \quad (11)$$

作为 $J+1$ 分段的偏差改正数。

2.1.3 逐次平差计算的修正和扩充

由前面的讨论可知，求 T_i 点的船位只用到了 T_i 及其以前的观测值，而未用到 T_i 以后的观测值。在精度要求较高的测量中，希望把 T_i 以后的观测值也归化到 T_i 位置进行计算。因

此，需对前面讨论的逐次计算结果进行修正。此外，前面讨论中未知数仅包含船位坐标参数，有时我们需要加入其它参数（如尺度因子等）进行计算，需对前面公式加以扩充。

2.1.3.1 逐次平差计算的修正

假设按前述逐次平差法求出了 P_1 点船位 X'_{P_1} ，现把 P_1 以后的观测值也归化到 P_1 点进行计算。考虑到归化误差的影响，与 P_1 相距很远的点的位置线观测值对 P_1 几乎没影响，只需把 P_1 点至 P_2 点间的观测值归化到 P_1 点加以改正。 $P_1 P_2$ 的间隔视仪器和精度要求而定。如图 2，假设在 P_1, P_2 间有 n 次观测值，其中 T_1 时刻观测值已参加前面的逐次计算。这里设 T_1 时刻有一权阵 $Q_{\Delta L}^{-1} = 0$ 的虚拟观测值，按前述计算方法自 T_n 点逐次计算至 T_1 点，求出船位估值 X''_{P_1} 及其协因数阵 $Q_{X''_{P_1}}$ 。 X'_{P_1} 与 X''_{P_1} 互相独立，取带权平均值作为 P_1 点点位的结果：

$$X_{P_1} = (Q_{X'_{P_1}}^{-1} + Q_{X''_{P_1}}^{-1})^{-1} (Q_{X'_{P_1}}^{-1} X'_{P_1} + Q_{X''_{P_1}}^{-1} X''_{P_1}). \quad (12)$$

顺便指出，按这种方法求出的船位参数估值可减弱坐标推算系统偏差的影响。



图 2 逐次计算法的修正

2.1.3.2 逐次平差法的扩充

假设在误差方程式中有非船位坐标参数 λ ， λ 可以是无线电测距的尺度因子或其他参数，这时误差方程式可写成：

$$\nu_i = \frac{\partial L_i}{\partial x} \delta x_i + \frac{\partial L_i}{\partial y} \delta y_i + \frac{\partial L_i}{\partial \lambda} \delta \lambda + l_i.$$

由于 λ 在不同时刻是不变的，即 λ 的增量 $\Delta \lambda = 0$ ，把坐标增量 ΔX 改为参数增量 ΔZ ：

$$\Delta Z = \begin{bmatrix} \Delta X \\ 0 \end{bmatrix},$$

则 (9) 式中的 $Q_{\Delta X}$ 将改变为 $Q_{\Delta Z}$ ：

$$Q_{\Delta Z} = \begin{bmatrix} Q_{\Delta X} & \vec{0} \\ \vec{0}^T & 0 \end{bmatrix}.$$

式中， $Q_{\Delta X}$ 与 (9) 式的相同； $\vec{0}$ 表示零向量。这时，计算过程与只有坐标参数时的计算过程完全相同。

对于多个参数 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ ，可按同样方法处理。

2.2 数据的综合处理过程

本文主要讨论系统中有子午卫星定位系统和坐标推算系统以及低精度地面无线电定位系统时，数据的处理过程。步骤为：

(1) 对位于两卫星定位点之间的测线段进行逐次平差，并求出卫星测量时的船速向量；

(2) 利用 (1) 中所提供的船速向量进行卫星定位计算，并将结果归算到与 (1) 对应

位置。若卫星定位结果 X_2 与(1)中所求结果 X_1 相差不大,可按最小方差估计,求出对应时刻船位参数 \hat{X} 。若 X_1 与 X_2 之差超限,应查明原因,加以处理^[1]。

(3)利用 \hat{X} 与 X_1 之差(称为闭合差)对两卫星定位点间的测线段船位坐标值进行改正。坐标改正按闭合差线性分配法进行。

计算程序框图见图3。

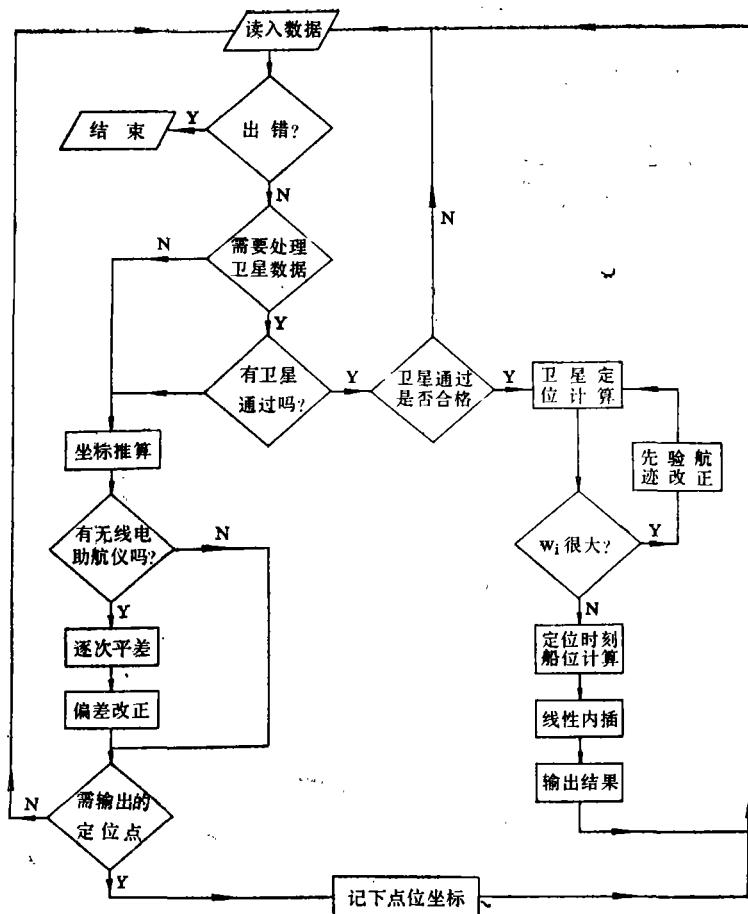


图3 计算程序框图

3 试验結果介紹

由于数据方面的原因,本试验分为两部分进行,一部分是检验逐次平差法的功效,另一部分是模拟船舶航行情况下的卫星定位。本文只讨论前一部分情况,后一部分情况见[1]。

试验方法是通过人为地给定地面无线电观测值(ARGO系统的观测值)和船速观测值(MX610D声纳导航系统的观测值)一组误差,按逐次平差法进行计算。计算结果与不加误差的观测值的计算结果比较,以检验逐次平差法的有效性。根据前面的误差分析结果,船速

误差按系统误差给出，表示速度偏差；地面无线电观测值的误差按偶然误差给出。偶然误差由随机函数产生，其中随机函数的变量 μ （数学期望）取 0， σ （方差）取 50 米。观测值的采样速率均为 5 秒钟一次。计算过程中，当无线电观测值（加了误差的“观测值”）与对应的计算值之差大于 100 米时，该观测值予以剔除。

图 4 至图 6 是定位误差曲线图。曲线是按每分钟所求点位中误差绘制的。图 4 中曲线 I，II 所取船速误差为 $0.5 + 0.1\sin(\pi I/6)$ （米/秒），虚线是取船速误差为 $0.1\sin(\pi I/6)$ （米/秒），表示没有速度偏差时的定位结果（以上的 I 表示采样次数）。图 5 中所给误差与图 4 的基本相同，只是船速偏差在计算过程发生了变化，即在开始给定偏差值为 0.5 米/秒，从第 10 分钟起变为 0.8 米/秒，从第 15 分钟起又变为 0.5 米/秒。其中虚线和实线是分别按(10)式和(11)式进行偏差改正（称为方法 I 和方法 II）的逐次平差结果。

从图 4 中可看出，当速度没有偏差时，按逐次平差法计算，定位误差很小；当速度有偏差时，在逐次平差过程进行偏差改正的结果（曲线 II）比不进行偏差改正的结果（曲线 I）好得多。从图 5 中可看出，按方法 I 或方法 II 进行偏差改正，结果相差不大，只是在速度偏差发生变化后一段时间内，方法 II 比方法 I 效果好。

试验结果还表明，当给定初始点位一个较大的误差（100 米）时，逐次平差法仍使定位结果（图 6 中的实践）很快趋于准确。

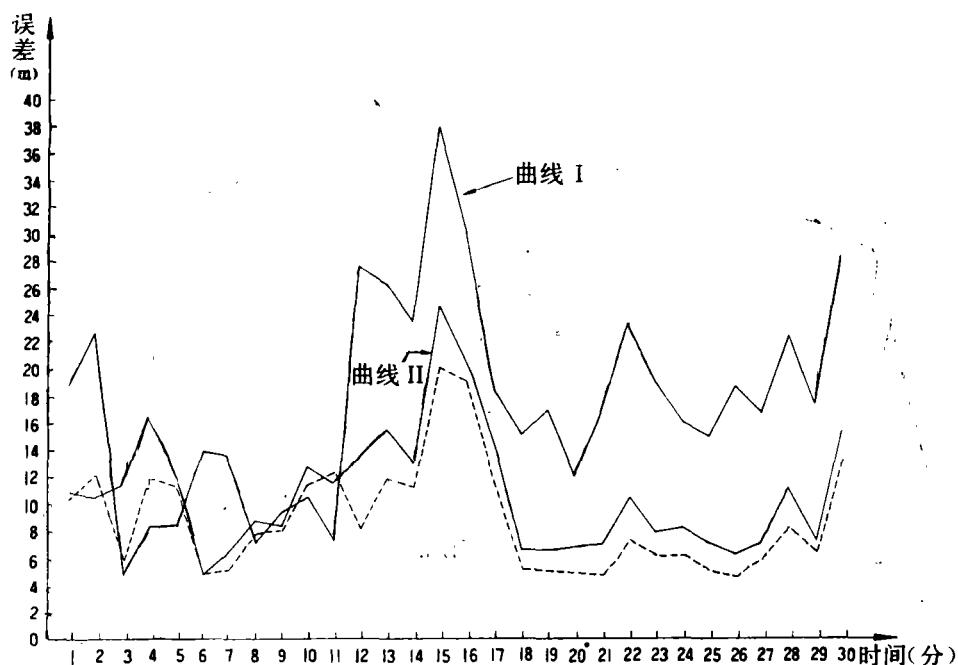


图 4 定位误差曲线图

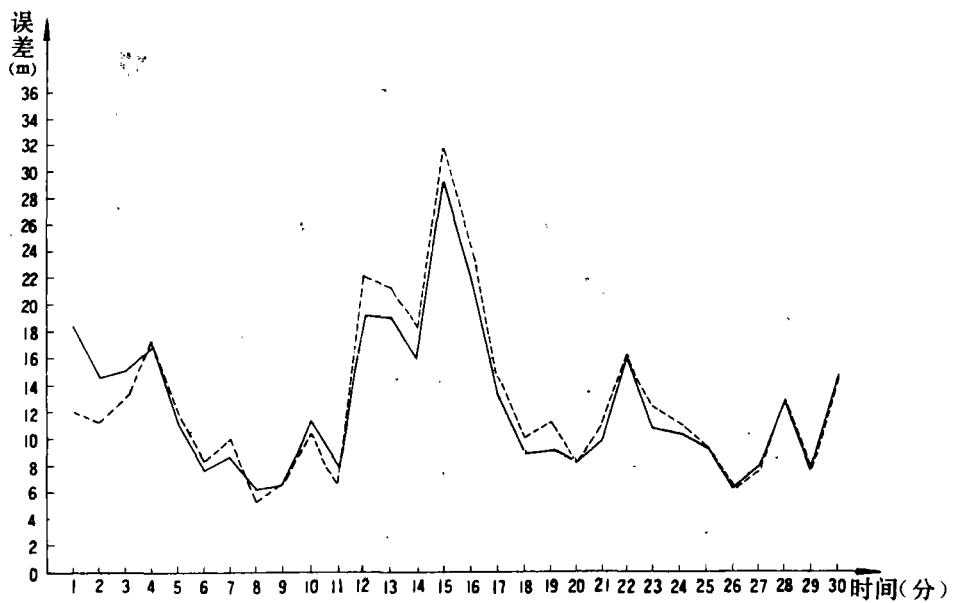


图 5 船速偏差发生变化时的定位结果

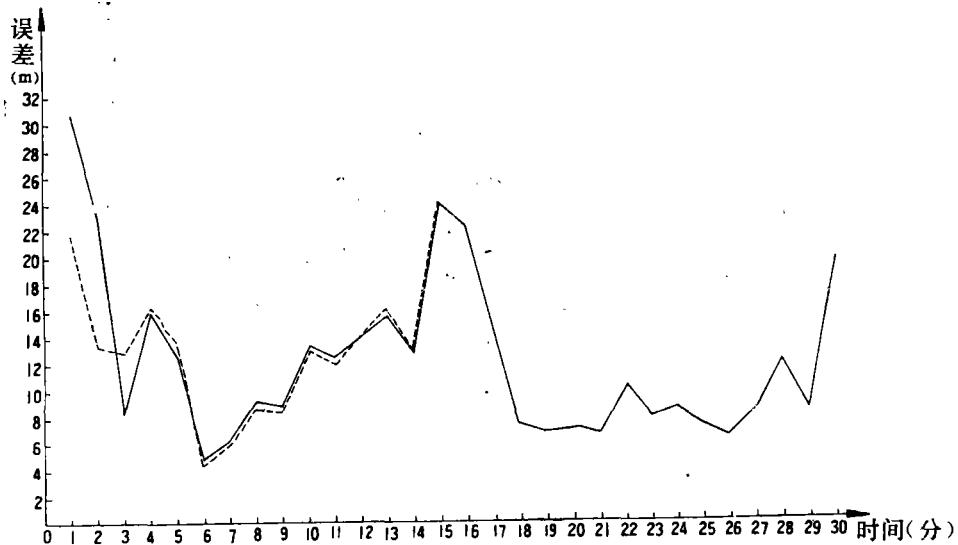


图 6 起始点位误差对定位结果的影响

4 结 论

根据理论分析和试验结果，得出有关结论如下：

1. 船位逐次平差法是一种行之有效的方法，该法不仅能节省计算机的贮存单元，而且

能获得较好的定位结果；

2. 船位逐次平差中，船速向量偏差影响很大，应在逐次平差过程计算出偏差值，对速度观测值加以改正；

3. 在精度要求较高的海洋测量中，可考虑采用逐次平差修正法进行计算。

参 考 文 献

- [1] 文和. 综合导航定位数据后处理研究: [学位论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学工程测量系, 1987.
- [2] 陈永奇等. 海洋测量概论. 武汉测绘学院教材科, 1980.
- [3] 维·亚科基娅等. 海洋大地测量网. 海军司令部航海保证部译, 1983.
- [4] Adams J R, et al. Improved Navigation Reliability Through Kalman Filtering. Proceedings Colloquium on Petroleum Mapping & Surveying in the 80's, 1981.
- [5] Grant S T. Interactions Among Integrated Navigation System Components. Marine Geodesy, 1983, 7(1—4).
- [6] Joukdan D W. Doppler Sonar Navigation Error Propagation and Correction. Navigation, 1983, 30 (1).

A Study on the Post-processing Method in the Integrated Navigation

Wen He

Abstract

In this paper, the error sources of each component in an integrated navigation system are briefly discussed. The method of data integration processing is analyzed in detail. Based on the principal of LOP (Line of Positioning) reduction, the adjustment method of LOP in successive steps is derived. Finally, some conclusions are given.

【Key words】 navigation; positioning; Line of Positioning; post-processing