

文章编号 1004-924X(2014)09-2536-09

## 船载经纬仪测量数据的回归及补偿

盛磊<sup>1,2</sup>, 吴志勇<sup>1\*</sup>, 高世杰<sup>1</sup>, 刘旨春<sup>1</sup>, 高策<sup>1</sup>, 王世刚<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039;

3. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 基于舰载经纬仪的使用条件, 分析了各测量范围内船姿变量和测角量之间的关系, 提出了分段回归模型, 并给出了舰载光测设备的回归测量方案及补偿方法。首先, 基于船姿测角误差模型, 结合多次不同测角范围内的实测数据残差, 分析各测量变量间的相关性; 通过摇摆台实验, 结合双 GPS 定位数据, 对测量数据进行分段双回归, 建立了回归数据库。然后, 提出了在执行任务前为事后回归处理进行附加观测的方案。最后, 基于附加测量残差和回归数据库, 提出以测量条件相似度为依据对任务数据进行补偿的方法。实验结果表明, 船姿误差最大(航向 72", 纵倾 24", 横倾 24")时, 补偿后光测设备的方位测角均方差由小于等于 57"变为小于等于 21", 俯仰测角均方差则由小于等于 34"变为小于等于 17", 基本满足了舰载光测设备对数据处理精度及稳定性的要求。

**关键词:** 舰载经纬仪; 船姿; 角度测量; 分段回归; 残差

**中图分类号:** U666; TH761.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142209.2536

## Regression and compensation of measuring data for shipboard theodolite

SHENG Lei<sup>1,2</sup>, WU Zhi-yong<sup>1\*</sup>, GAO Shi-jie<sup>1</sup>, LIU Zhi-chun<sup>1</sup>, GAO Ce<sup>1</sup>, WANG Shi-gang<sup>3</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

\* Corresponding author, E-mail: wuzy@ciomp.ac.cn

**Abstract:** On the basis of service conditions of a shipboard theodolite, the relationship between ship-attitudes in different scopes and measuring angles was analyzed, a segmented regression model was put forward, and a scheme of regression and compensation for the shipboard optical measurement equipment was given. Firstly, based on the ship-attitude error model and several different residual errors of experimental data, the correlation between the measured variables was analyzed. According to the characteristics of shipboard equipment, a segmented dual-regression model was given, and a regression database was established. Then, an additional observation scheme before mission was proposed for afterward regressing. Finally based on the additional measurement residual errors and

收稿日期: 2013-07-30; 修订日期: 2013-10-12.

基金项目: 中国科学院三期创新工程资助项目(No. Y10532B110)

the regression database, the compensating method was explained based on measuring condition similarity. The experimental results after compensation by proposed method show that the angle measuring errors (RMS) of the equipment change from less than or equal to  $57''$  into  $21''$  for the azimuth, and from  $34''$  into  $17''$  for the pitch respectively, when the maximum ship-attitude errors are at the head of  $72''$ , pitch of  $24''$  and the roll of  $24''$ . The scheme basically meets the precision and stability requirements of the data processing for shipboard optical measurement equipment.

**Key words:** shipboard theodolite; ship-attitude; angle measurement; segmented regression; residual error

## 1 引言

用于靶场光学测量的舰载经纬仪通过舰载船姿及船位系统获得实时姿态及站位数据。它不仅能够在行驶的舰艇上跟踪动态目标,并获取目标图像,还能获得具有较高测角精度的外弹道测量数据。相对于固定光测设备,舰载经纬仪所独有的海上机动能力使其能够根据需要完成海上布站测量任务,从而极大地拓展了光测设备的使用范围和方式,也使其成为近年来光测经纬仪发展的一种趋势。本文针对某型舰载经纬仪测量设备的测量数据进行回归分析及补偿,以提高其测角精度。

我国的舰载外弹道测量设备主要集中应用在远望测量船上,用于测量空间目标,包括雷达,辅助使用惯导、定位及标校经纬仪等设备。在此平台上提出的一些基于数据统计特性分析的滤波、平滑、拟合回归及补偿算法基本都是以远望号这一应用平台的特性为基础,即具有极高精度的测姿系统、测量目标为空间目标,且观测角度有限定范围等<sup>[1-3]</sup>。与上述情况不同,舰载经纬仪测量的是全方位飞行目标,采用的测姿系统精度相对较低,使用常规的回归方法将出现算法不收敛或补偿后精度反而降低的情况。本文正是基于舰载经纬仪的这种使用条件,通过分析测角精度的影响因素,选择船姿误差这一主因建立误差公式,然后结合在摇摆台及船坞内测试时获得的测量数据残差,提出了分段回归模型,即依据各测角范围内误差的影响权值,从中挑选出符合某一姿态变量唯一回归条件的数据,将多元变为单变量回归;最后,基于(不少于)2台GPS差分定位设备提供的站位数据,再次进行回归,计算融合参数,得到最终的单回归函数组。通过建立舰载回归数据库,

存储回归计算结果、开机时长及海况,建立并拟合外推函数。针对测姿设备开机后一定时段内误差相对稳定的特点,提出了附加测量方案,在任务开始前对指定范围内合作靶标进行观测,由观测结果计算回归参数;最后由数据库外推函数计算该任务的外推回归参数,对附加回归参数进行检验并修正,以修正后参数对任务数据进行补偿。实验结果表明,经过本文提出的回归及补偿,设备的测角精度稳定提高,且随着舰载回归数据库的累积,数据回归补偿效果将进一步提升。

## 2 分段回归模型

通过船坞内标校,设备的轴系误差可限定在 $6''$ 内。对于舰载设备来说,对数据进行静态误差修正后,由经纬仪轴系、平行度和方位零点(设备方位零点与舰船艏尾线指向一致)引入的测角误差可以忽略不计。站位数据由GPS设备通过事后差分得到,经过船摇修正后,其误差 $\leq 0.12$  m,对于舰载设备,其跟踪目标距离一般 $\geq 15$  km,计算后其对测角精度的影响 $\leq 1.6''$ ,可近似为 $0^{[4]}$ 。排除上述误差的影响,船姿数据(包括船体变形)由姿态测量系统获得,其精度如下:航向角( $H$ ) $\leq 72''$ ,横倾角( $R$ ) $\leq 24''$ ,纵倾角( $P$ ) $\leq 24''$ 。船姿数据被用于从甲板坐标系到大地测站坐标系的转换算法中,姿态测量误差由此被引入测角量,成为影响舰载设备测角误差的主因<sup>[5-7]</sup>。

设备测角数据为( $A, E$ ),由甲板系转换为测站系( $CA, CE$ )的公式如下<sup>[8-9]</sup>:

$$\begin{bmatrix} CX \\ CY \\ CZ \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{RPHr} \begin{bmatrix} \cos(E) \cos(A) \\ \sin(E) \\ \cos(E) \sin(A) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

$$\begin{cases} CA = \arctan(CZ/CX) \\ CE = \arcsin(CY) \end{cases}. \quad (2)$$

$$M_{RPH} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R & \sin R \\ 0 & -\sin R & \cos R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos P & \sin P & 0 \\ -\sin P & \cos P & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos H & 0 & \sin H \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin H & 0 & \cos H \end{bmatrix}^{-1} \quad (3)$$

对(CA,CE)由公式(2)分别对船姿变量求偏导,结果表示如下:

$$\begin{cases} dAR=dCA/dR \\ dAP=dCA/dP. \\ dAH=1 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} dER=dCE/dR \\ dEP=dCE/dP. \\ dEH=0 \end{cases} \quad (5)$$

设姿态测量误差为(ErrR, ErrP, ErrH),则测角误差公式表示为:

$$\begin{cases} ErrA=dAR \times ErrR+dAP \times ErrP+ErrH \\ ErrE=dER \times ErrR+dEP \times ErrP \end{cases} \quad (6)$$

使用该公式对测量残差数据进行回归计算,得到(ErrR, ErrP, ErrH)。由于姿态数据误差较大,且存在 ErrR ∈ [-24", 24"], ErrP ∈ [-24", 24"], ErrH ∈ [-72", 72"]。变量之间有很高的自相关性,同时还要满足 2 个回归函数,如使用普通的线性回归方法(包括逐步线性性和偏线性)[10-11],则计算过程很可能不收敛,在收敛的情

况下回归参数也可能不符合变量范围,在少数收敛和符合范围的情况下,可能出现补偿后数据段内有误差量反而增大的情况(由算法不稳定造成)。

为了提高回归效果,增加算法精度及稳定性,本文针对船载经纬仪全方位跟踪和双 GPS 定位的特性,提出了一种分段双回归模型。通过分析式(4)和式(5)可以看出,对于方位角 A,航向误差是 1 比 1 传递的,首先将 ErrH 设为方位残差均方根,将残差数据减掉 ErrH,即为(ErrR, ErrP)的回归残差,开始新的回归计算。则公式(6)变为公式(7)(其中 std 为计算均方根算子)如下:

$$\begin{cases} ErrH=std(ErrA) \\ (ErrA-ErrH)=dAR \times ErrR+dAP \times ErrP. \\ ErrE=dER \times ErrR+dEP \times ErrP \end{cases} \quad (7)$$

下面分析测角量(A, E)和姿态角量(R, P)对(dAR, dAP, dER, dEP)的影响。设 R=3°, P=-3°, H=198°, 对于 A ∈ [0°, 360°], E ∈ [-5°, 65°], 则(dAR, dAP, dER, dEP)的计算结果如图 1 所示。

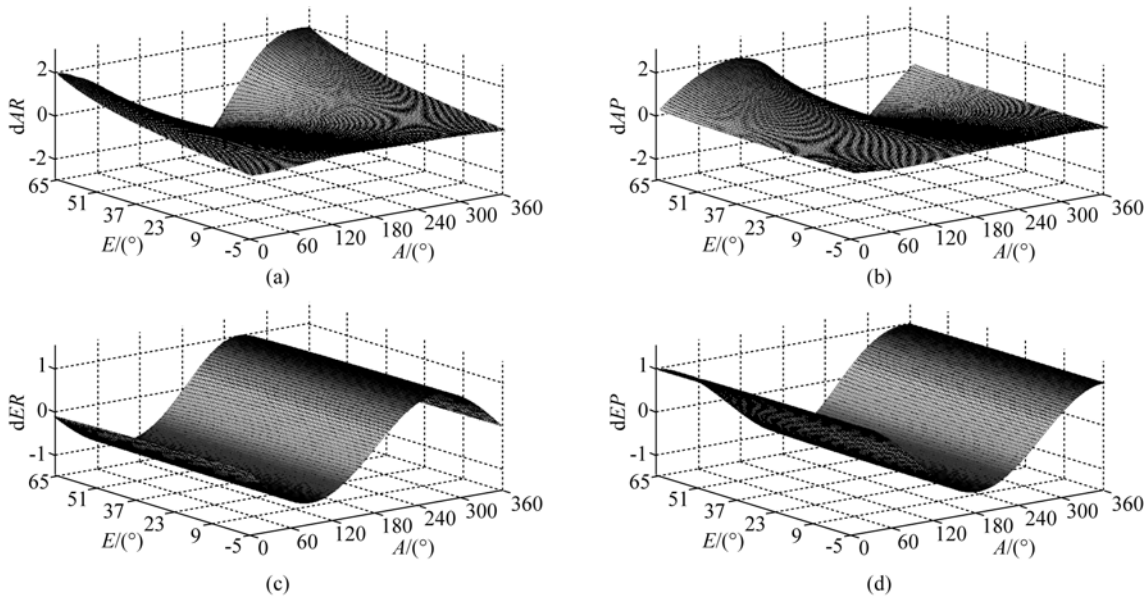


图 1 偏导数(AE)计算结果示意图

Fig. 1 Schematic of partial derivative(AE) results

设 A = 100°, E = 10°, H = 198°, 对于 R ∈ [-3°, 3°], P ∈ [-3°, 3°], 则(dAR, dAP, dER,

dEP)的计算结果如图 2 所示。

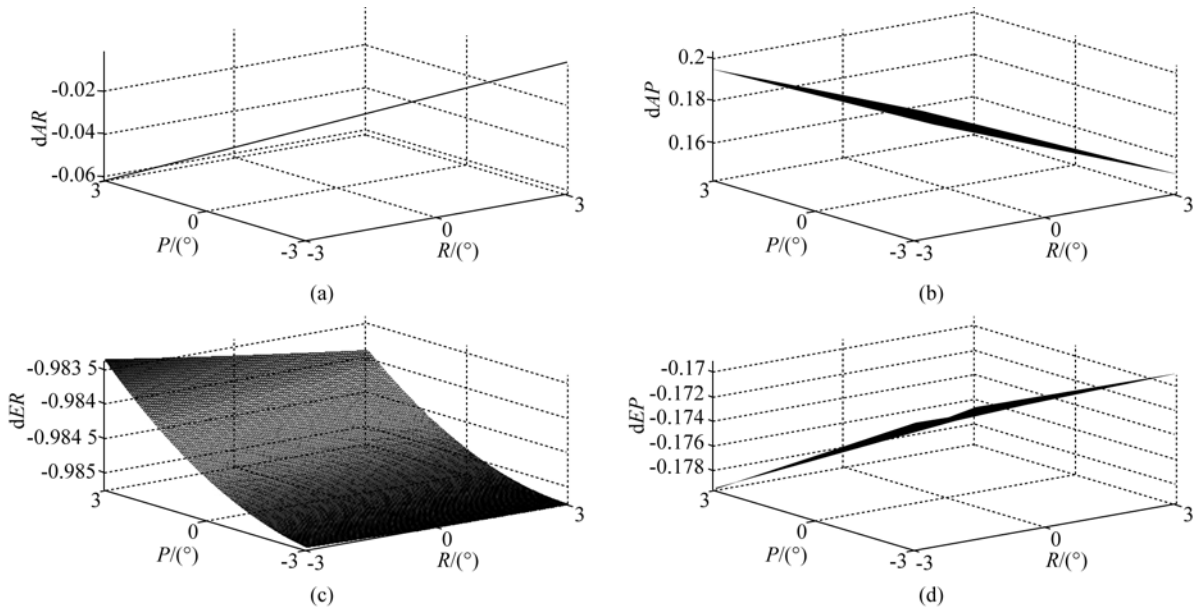


图 2 偏导数(RP)计算结果示意图

Fig. 2 Schematic of partial derivative(RP) results

通过上述结果,可以看出对偏导数结果影响较大的为测角量(A, E)的范围,而姿态角量(R, P)为辅助微调因素。因此基于全方位跟踪目标的特性,通过观测不同测角范围内的靶标(即规定(A, E)的范围),从测量数据中选出满足  $|dAR| \leq \epsilon_R$  的数据残差( $\epsilon_R$  为选择阈值, R 最大的测量误差为  $24'' \times \epsilon_R \leq 0.5''$ , 这里  $\epsilon_R$  取 0.02, 同理  $\epsilon_P = 0.02$ ), 对这些数据进行单变量 ErrP 数据回归, 同理计算出 ErrR。这一分段回归算法描述如下:

(a)由公式(7)变为单变量回归如下:

$$\begin{cases} ErrH = std(ErrA) \\ (ErrA - ErrH)_{[|dAR| \leq \epsilon_R]} = dAP \times ErrP_A \\ (ErrA - ErrH)_{[|dAP| \leq \epsilon_P]} = dAR \times ErrR_A \\ (ErrE)_{[|dER| \leq \epsilon_R]} = dEP \times ErrP_E \\ (ErrE)_{[|dEP| \leq \epsilon_P]} = dER \times ErrR_E \end{cases} \quad (8)$$

由公式(8)进行单参数回归计算<sup>[12]</sup>出  $ErrP_A, ErrR_A, ErrP_E, ErrR_E$ ;

(b)将融合参数( $\partial_P, \partial_R$ )代入式(9)计算融合函数,其中 $\partial_P, \partial_R \in [0, 1]$ ;

$$\begin{cases} ErrP = ErrP_A \times \partial_P + ErrP_E \times (1 - \partial_P) \\ ErrR = ErrR_A \times \partial_R + ErrR_E \times (1 - \partial_R) \\ ErrH = ErrA - dAP \times ErrP - dAR \times ErrR \end{cases} \quad (9)$$

分段算法中使用双 GPS 差分定位数据再次回归,计算融合参数( $\partial_P, \partial_R$ )。对于舰载设备,为了保证站位数据的精度,常使用 2(或更多)台 GPS 差分设备获得定位数据并进行验证。为了避免对 GPS 的工作产生干扰,其定位天线要放置在空旷处,即测量点与实际经纬仪视轴交点不同。具有 2 套 GPS 差分设备的布局及舰载坐标系建如图 3 所示。

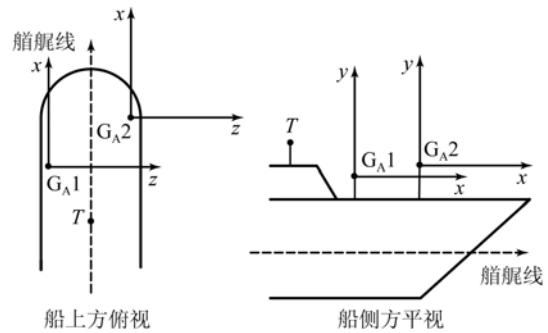


图 3 船载双站位坐标系示意图

Fig. 3 Schematic of dual station-position coordinate for shipboard theodolite

图 3 中 T 为经纬仪视轴交点(站址),  $G_{A1}$  和  $G_{A2}$  为测量点,其输出差分(经度,纬度,高程)数据为  $(GB_j, GL_j, GH_j)$ , 其中  $j = 1, 2$ 。则设  $G_{A1}$  为中心点 O, y 轴指向天空为正, x 轴指向船艏为正, z 轴由左手定则确定建立坐标系,在此坐标下

T 点坐标为  $(x_{c1}, y_{c1}, z_{c1})$ ; 以  $G_A2$  为 O, 同样坐标系下 T 点的坐标为  $(x_{c2}, y_{c2}, z_{c2})$ 。这 2 组坐标都可以通过事先测量获得 (采用激光测距等方式)。使用修正后船摇变换矩阵  $M_{RPHr}$  (将式 (3) 中的船摇量 R, P, H 替换为  $R - ErrR, P - ErrP, H - ErrH$  获得, 这一过程引入  $\partial_p, \partial_R$ ) 可计算出 T 点的地心系坐标  $(RX_j, RY_j, RZ_j)$ , 过程如下:

(a) 利用公式 (10) 将 T 点坐标转化为测站大

$$\begin{bmatrix} RX_j \\ RY_j \\ RZ_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin GL_j & \cos GL_j & 0 \\ \cos GL_j & \sin GL_j & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -\sin GB_j & \cos GB_j & 0 \\ \cos GB_j & \sin GB_j & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} GX_j \\ GY_j \\ GZ_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{sj} \\ y_{sj} \\ z_{sj} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

由于 2 台 GPS 的定位测量精度在差分后为 5 cm, 可忽略, 则根据 2 次计算后的地心坐标系下坐标近似相等, 建立方程组如下:

$$\begin{cases} RX_1 = RX_2 \\ RY_1 = RY_2 \\ RZ_1 = RZ_2 \end{cases} \quad (12)$$

由于  $ErrR, ErrP, ErrH$  中的理论最大绝对值为  $72''$ , 则可将方程组中三角函数以正/余弦公式打开, 将其中的修正量三角函数泰勒展开为  $\sin(x) = x, \cos(x) = 1 - x^2/2$ , 则公式 (12) 变为含有未知量  $\partial_p, \partial_R$  的二次方程组。以 200 ms 为步长采集测量数据 (这里不像分段回归算法那样采用完全相同的测量点, 因那样采集的数据较稀疏, 目的是降低二次回归之间的数据相关性), 选择多组数据代入公式 (12), 以多元最小二乘回归 (拟合) 方式计算出融合变量  $\partial_p, \partial_R$ , 其中  $\partial_p, \partial_R \in [0, 1]$ 。

通过这种双回归过程, 不仅可以使分段算法稳定收敛, 同时通过 2 台 GPS 测量站位的船摇转换一致性检验了回归参数的可用性和可靠性。

### 3 建立船载回归数据库

本文提出的光测设备回归方法, 本质上是通过对不同测量状态下的大量实验数据进行分析, 计算出误差的统计平均值。通过对大量先验数据进行筛选, 归类和检索, 由此提高数据补偿效果, 进而提高设备测角精度, 建立了一个管理已有实验数据和回归成果的回归数据库。采用 Microsoft SQL Server 数据库平台, 通过多个数据表存储实验测量数据及回归结果。

地坐标  $(x_{sj}, y_{sj}, z_{sj})$ ;

$$\begin{bmatrix} x_{sj} \\ y_{sj} \\ z_{sj} \end{bmatrix} = M_{RPHr} \begin{bmatrix} x_{cj} \\ y_{cj} \\ z_{cj} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

(b) 由  $(GB_j, GL_j, GH_j)$  计算出地心系坐标  $(GX_j, GY_j, GZ_j)^{[13]}$ , 再由公式 (11) 计算 T 点地心坐标系下的坐标  $(RX_j, RY_j, RZ_j)$ :

在摇摆台上模拟各种海况 (摇摆台上同样放置 2 根 GPS 定位天线), 并跟踪静态及动态目标, 分析测量残差数据。经过回归计算后发现, 在摇摆台做周期变化时, 测角残差呈现周期性变化, 图 4 为 3 组摇摆台上和 1 组测量船上实验的 E 残差数据。由于姿态测量误差是构成测角误差的主因, 且仅纵横摇误差影响俯仰误差 ( $dEH$  为 0), 则实验结果表明, 随着摇摆幅度和加速度的变化, R 和 P 的测量误差也发生了周期性变化, 且由实验数据的趋势可以看出, 当加速度和摆幅增加时, 其纵横摇测量误差也随之增大。

由于姿态测量误差随摆幅 (即海况) 的不同发生变化, 则其统计学上的估计值, 即回归计算结果也必然会随之发生变化。这就需要定义一个表征海况变化情况的参数, 用于检索回归数据库内的先验计算成果。当需要分析或补偿任务段实际测量数据时, 先计算任务时的海况参数, 然后从数据库内检索出相似海况下的回归结果以供参考。

定义模拟海况参数  $K_s$  来表征海面波动或在摇摆台上做正弦摆动情况, 计算公式如 (13) 所示:

$$K_s = |S_R + S_P| \exp(-T_{Per}/60). \quad (13)$$

式中:  $S_R$  为本段数据中 R 的最大摆幅;  $S_P$  为本段数据中 P 的最大摆幅;  $T_{Per}$  为本段数据的摆动周期。本文采用周期图搜索方法<sup>[14]</sup>对数据进行频谱分析, 进而估算出该周期。通过分析多次实验的计算结果, 建立回归数据库外推函数, 如公式 (14) 所示。式中, 使用数据库内已有的先验计算结果, 采用最小二乘法拟合参数  $a_k, b_k, c_k$ 。

$$\begin{cases} \Delta R_t = a_R K_s^2 + b_R K_s + c_R \\ \Delta P_t = a_P K_s^2 + b_P K_s + c_P \\ \Delta H_t = a_H K_s^2 + b_H K_s + c_H \end{cases} \quad (14)$$

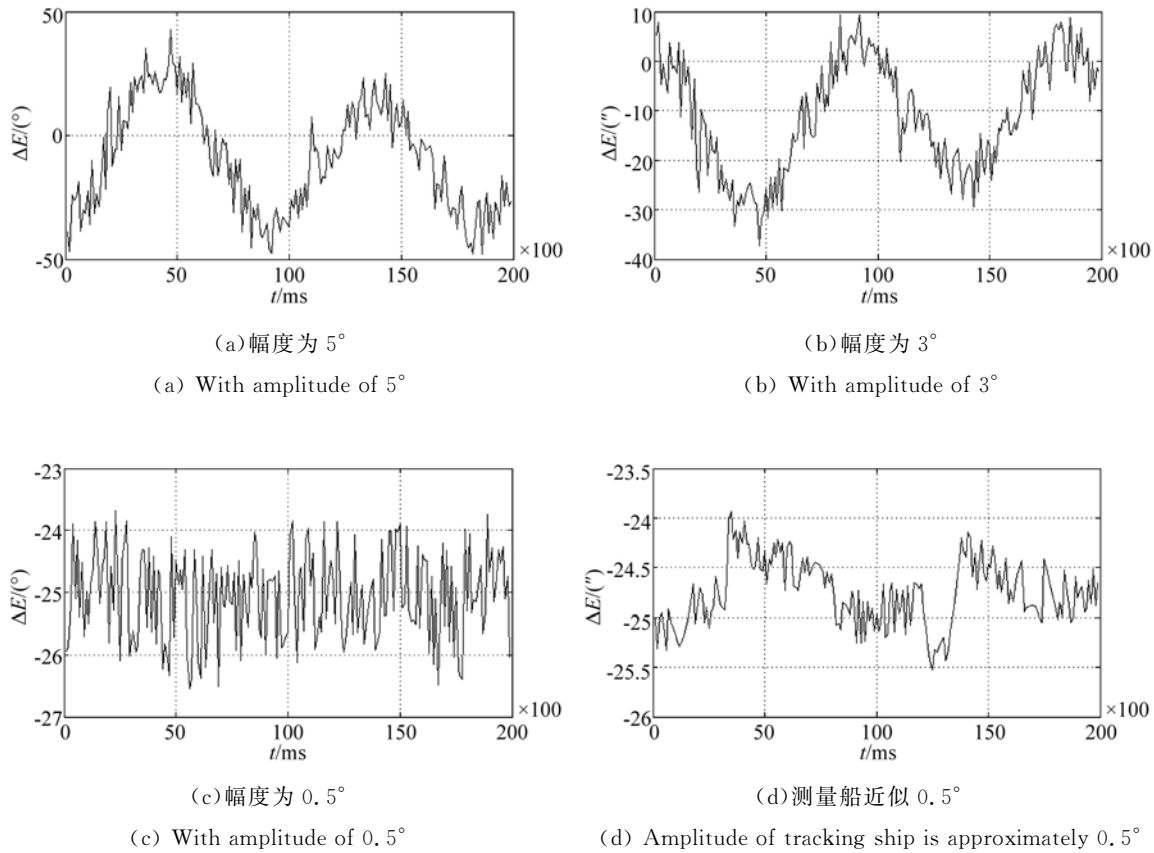


图 4 不同海况条件下 E 残差示意

Fig. 4 Figure of E error in different sea-states

#### 4 附加观测及补偿方法

为了更好地对任务数据进行回归分析及补偿,确定任务开始前的附加测量方案如下:

(a)任务开始前,测量船处于停靠状态,通过式(4)和式(5)计算出符合分段回归条件的测角范围(即使  $dAR, dAP, dER, dEP$  分别为零),在该范围内设立靶标。如没有合适的范围,可通过分析出港路线,设定线路上可见的陆上靶标;

(b)在任务开始前,根据海况(此时为估计情况),提前一段时间将船姿测量设备开机,待稳定后对各靶标进行测量,并对残差数据进行分段双回归处理。根据当前海况参数,调用外推函数(14)计算外推回归参数。比较外推值与回归值,如近似相等,则外推值即为回归值;否则延迟一段时间再测量。每次测量结果都输入回归数据库,加入下一次拟合外推运算;

(c)任务执行前,如不能使附加测量结果符合规律,则根据公式(15)以外推值( $\omega tErrRPH$ )修正附加测量值( $fjErrRPH$ )(更相信附加回归计算结果);

$$ErrRPH = 0.8 \times fjErrRPH + 0.2 \times \omega tErrRPH. \quad (15)$$

(d)由公式(6)计算补偿值,由公式(16)对测量数据进行补偿。

$$\begin{cases} REA = A - ErrA \\ REE = E - ErrE \end{cases} \quad (16)$$

#### 5 实验结果

图 5 为一次摇摆台回归补偿的结果,该实验环境为 3 级海况。综合结果为:补偿前方位均方差  $\leq 39''$ ,俯仰  $\leq 25''$ ,补偿后方位  $\leq 8''$ ,俯仰  $\leq 5''$ 。

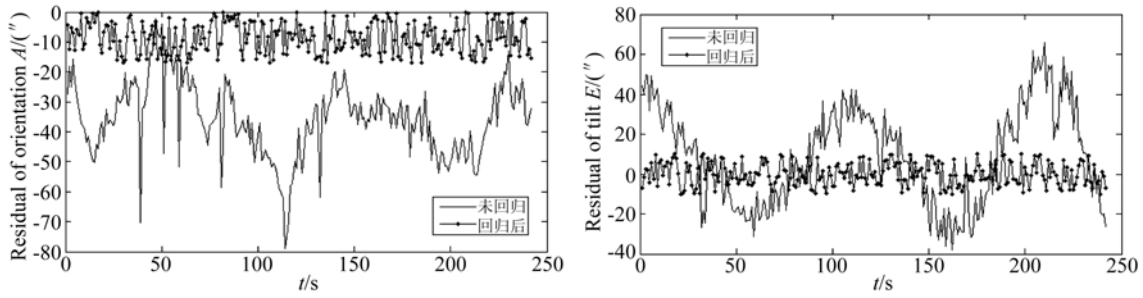


图 5 摇摆台回归处理结果

Fig. 5 Results of regressing on swing table

设备上舰后,某次任务时海况近似为 1 级,  $k_s=0.76$ ,开机 30 min 后分别拍摄 5 组靶标(包括 3 个固定方位标和 2 个临时设定 GPS 靶标),循环 2 次后,附加观测残差回归参数符合规律。实际任务执行时长为 2 h,分为不同航次及测量

段,对其中不同航次的 3 段数据进行分析可知,补偿后残差都稳定减小,其回归结果如图 6 所示。

在各海况下,汇总(均方根)多次摇摆台实验及任务数据,其回归补偿结果如表 1 所示。

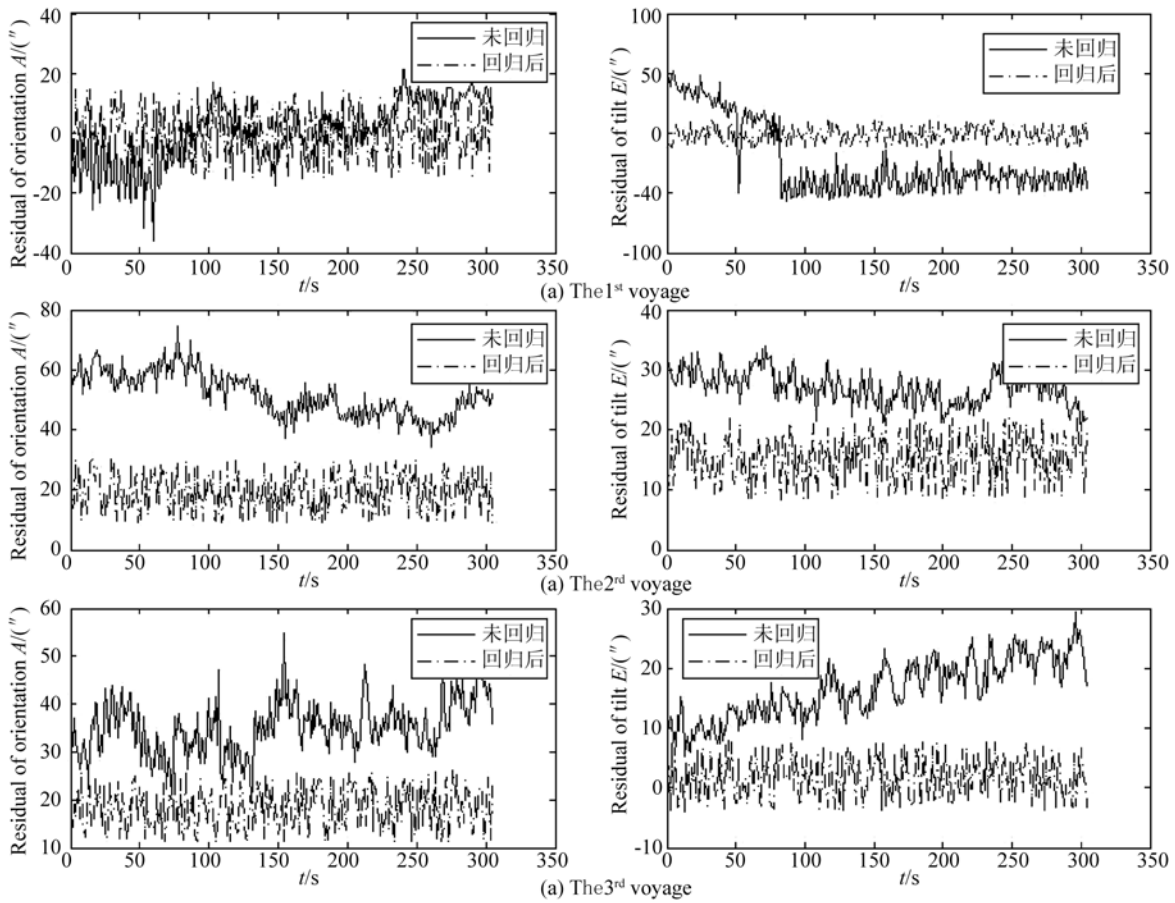


图 6 舰载时回归处理结果

Fig. 6 Results of regressing on ship

表1 回归处理结果  
Tab.1 Regressing results (")

	补偿前残差 $0A$	补偿前残差 $0E$	补偿后残差 $0A$	补偿后残差 $0E$
摇摆台第1组 模拟海况1级	32	25	7	3
摇摆台第2组 模拟海况2级	34	23	7	4
摇摆台第3组 模拟海况3级	39	25	8	5
摇摆台第4组 模拟海况4级	40	29	10	6
摇摆台第5组 模拟海况5级	42	25	11	5
摇摆台综合结果	$\leq 42$	$\leq 29$	$\leq 11$	$\leq 6$
任务第1组 海况近似为1级	18	34	13	12
任务第2组 海况近似为1级	57	28	21	17
任务第1组 海况近似为1级	32	16	17	7
任务综合结果	$\leq 57$	$\leq 34$	$\leq 21$	$\leq 17$

由以上结果可以看出:在摇摆台上,由于可以精确控制模拟海况级别及运行时长,算法的补偿结果接近理论最优残差值;在长时间多航次的实际任务中,该补偿方法稳定收敛,方位及俯仰残差都显著减小。

## 6 结 论

本文通过进行摇摆台实验,结合双GPS定位数据对测量数据进行分段双回归,建立回归数据库后,再利用回归参数进行补偿。由于摇摆台的摆动情况可控,其补偿前后的综合测角残差  $A$  从

42"变为11",  $E$  从29"变为6"。在已经进行的航行任务测量中,通过附加观测,配合数据库循环拟合等方法对测角数据进行回归补偿。多航次实验的综合结果表明,其残差由补偿前的  $A \leq 57"$ ,  $E \leq 34"$ , 变为补偿后的  $A \leq 21"$ ,  $E \leq 17"$ , 残差均稳定减小,表明以数据处理的方式较大地提升了设备测角精度,这说明本文提出的舰载经纬仪测角数据回归及补偿方法是有效和稳定的,基本满足了舰载光测设备数据处理的要求。比较摇摆台和任务的处理结果还可以看出,通过不断累积不同海况下的回归数据,还可以拟合出更精确的外推函数,进一步提升回归及补偿处理的效果。

## 参考文献:

- [1] 黄杰,吴旭贤,丁坚. 航天测量船静电陀螺监控器标校过程卡尔曼滤波误差分析[J]. 价值工程, 2013, 3:287-288.  
HUANG J, WU X X, DING J. Calibration process Kalman filtering error analysis of ESGM on the TT&C ship [J]. *Value Engineering*, 2013, 3:287-288. (in Chinese)
- [2] 姜永刚,金洵,毛亮. 航天测量船经纬仪系统误差动态修正方法[J]. 价值工程, 2012, 16:299-300.  
JIANG Y G, JIN X, MAO L. System errors modification method for photoelectrical theodolite under the dynamic condition in TT&C-Ship [J]. *Value Engineering*, 2012, 16:299-300. (in Chinese)
- [3] 王小明,张尧禹,乔彦峰. 用动态水平基准测量系统实时测量船体横扭角和纵挠角[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2):294-300.  
WANG X M, ZHANG Y Y, QIAO Y F. Real-time measurement of ship's transverse and vertical twist angles by dynamic horizontal datum measuring system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):294-300. (in Chinese)
- [4] 钟林,周海渊. 测姿GPS系统在测量船上的应用[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(3):641-644.  
ZHONG L, ZHUO H Y. Application of measured pose GPS system on the tracking ship [J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(3):641-644. (in Chinese)
- [5] 沐俊山,刘冰,薛国虎,等. 基于测量船的实时定轨改进方法[J]. 电讯技术, 2013, 53(2):171-181.  
MU J SH, LIU B, XUE G H, et al. Improvement of optimal sequential orbit determination method for TT&C Ship [J]. *Telecommunication Engineering*, 2013, 53(2):171-181. (in Chinese)
- [6] 王宗友,付承毓,王芳. 基于数据配准提高光电经纬仪的测量精度[J]. 中国光学, 2010, 3(6):586-590.



- WANG Z Y, FU CH Y, WANG F. Improvement of measuring precision for electro-optical theodolite based on data matching [J]. *Chinese Optics*, 2010, 3(6):586-590. (in Chinese)
- [7] 刘廷霞, 王伟国, 陈健. 车载惯性平台稳定位置解算算法[J]. *中国光学*, 2012, 5(5):537-543.
- LIU T X, WANG W G, CHEN J. Position arithmetic for a vehicular inertial stabilized platform [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(5):537-543. (in Chinese)
- [8] GAWRONSKI W, BAHER F, QUINTERO O. Analysis of tracking error source for shipboard photo-electric tracking system[J]. *Electronics Optics & Control*, 2007, 14(2):100-103.
- [9] 薛向尧, 高云国, 韩光宇, 等. 水平式经纬仪指向误差的统一补偿技术[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(7):1524-1530.
- XUE X Y, GAO Y G, HAN G Y, *et al.*. Total correction method of pointing error for level mounting theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7):1524-1530. (in Chinese)
- [10] 李森, 高慧斌. 应用径向基函数神经网络的经纬仪跟踪误差建模[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(4):818-825.
- LI M, GAO H B. Modeling for tracking error of theodolite based on RBF neural network[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4):818-825. (in Chinese)
- [11] 田国富, 胡军, 郭玉学. 多元线性回归理论在数控机床热误差补偿中的应用[J]. *机械工程与自动化*, 2013, 2:128-131.
- TIAN G F, HU J, GUO Y X. Application of multiple linear regression theory in thermal error compensation of CNC machine tool [J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2013, 2:128-131. (in Chinese)
- [12] 包研科, 李娜. 数理统计与 MATLAB 数据处理[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2008.
- BAO Y K, LI N. *Mathematical Statistics & Matlab Data Processing* [M]. Shenyang: Northeast College Press, 2008. (in Chinese)
- [13] 马志强, 郭福生, 陈良友, 等. 靶场大地测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- MA ZH Q, GUO F SH, CHEN L Y, *et al.*. *Optical Measurement of Shooting Range* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [14] 张忠华. 航天测量船船姿数据处理方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009:134-166.
- ZHANG ZH H. *Attitude Data Processing Method in TT&C-Ship* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009:134-166. (in Chinese)

#### 作者简介:



盛磊(1981—),男,吉林长春人,博士研究生,助理研究员,2006年于吉林大学获得硕士学位,主要从事光电测控设备软件开发及数据处理的研究。E-mail:sljlu@163.com

#### 导师简介:



吴志勇(1965—),男,内蒙通辽人,博士生导师,研究员,主要从事光电测控设备总体技术和光纤通讯技术方面的研究。E-mail:wuzy@ciomp.ac.cn

#### 导师简介:



王世刚(1962—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,2001年于吉林大学获得博士学位,主要从事多媒体通信、视频压缩及视频通信研究。E-mail:wangshigang@vip.sina.com