

文章编号 1004-924X(2009)02-0445-08

航天测量船船体变形的数据处理

李晓勇,张忠华,朱伟康,薛国虎,陈贵明
(中国卫星海上测控部,江苏 江阴 214431)

摘要:为了克服船体变形对航天测量船船载设备外测数据的影响,需对船载设备外测数据进行船体变形修正,为此建立了船体变形修正数学模型。从航天测量船船体变形测量系统的基本构成、测量原理和测量元素入手,建立变形测量坐标系,讨论变形测量角与欧拉角的关系,详细推导了船体变形数据处理计算公式,给出了变形数据处理的数学模型。工程应用结果表明:船体变形对飞行器初轨半长轴 a 的影响比较大,对于近地近圆轨道,影响值是几百米的量级,最大达到 800~900 m,而对于大椭圆轨道,影响值则达 20 km,经船体变形修正后可以消除这项影响。建立的变形修正数学模型反映了船体变形的客观规律,能有效消除船体变形对船载设备外测数据的影响,提高测量船外测数据处理的精度。

关键词:航天测量船;船体变形;数据处理;数学模型

中图分类号:V557.5 **文献标识码:**A

Data processing of hull deformation for spacecraft TT & C ship

LI Xiao-yong, ZHANG Zhong-hua, ZHU Wei-kang, XUE Guo-hu, CHEN Gui-ming

(China Satellite Maritime Tracking and Controlling Department, Jiangyin 214431, China)

Abstract: To weaken the influence of hull deformation on the data of TT & C shipborne outer-trajectory measuring equipments, a hull deformation correction mathematical model is established. The basic structure, measurement principle and measurement elements of hull deformation measurement system are briefly introduced; Then, a hull deformation measurement coordinate system is established, and relationship between deformation measurement angles and Euler's angles is discussed; Finally, hull deformation data processing formula is deduced in detail and data processing mathematical model is presented. The engineering application results show that the influence of hull deformation on the semi-major axis " a " of spacecraft initial orbit is relatively greater. To near earth and near circular orbit, the influence value is in magnitude of hundred meters, whose maximum value is 800~900 m; and to big elliptical orbit, the influence can reach 20 km. However, the influence can be eliminated after correcting hull deformation. The established mathematical model reflects the objective law of hull deformation, which can be used to eliminate the influence of hull deformation on measurement data effectively and can improve data processing precision.

Key words: TT & C ship; hull deformation; data processing; mathematical model

收稿日期:2008-05-08;修订日期:2008-07-10.

基金项目:总装备部重点科研项目资金资助项目

1 引言

远望号测量船上的航天测量设备固连在船体甲板基座上,以此基座为中心建立测量坐标系对空间目标进行观测,可获得空间目标相对测量坐标系的观测值。测量船以惯导基座平台建立惯导坐标系作为全船测量基准,由于受船舶装载、风浪、海流、潮汐等内外力的影响,船体会产生扭曲和弹性变形,使得测量设备坐标系与惯导坐标系的对应轴不平行,测量设备基座与惯导平台基座之间的船体变形量将直接影响船载外测设备对目标的外弹道测量,文献[1]从多个层面讨论了船体变形对测量船外弹道测量的影响。为了确保船载设备外弹道测量的精度,测量船上安装了高精度的光电测量设备——船体变形测量系统。该系统可精确测量惯导平台基座与测量设备基座之间的船体变形量,为外弹道数据处理的船体变形修正提供船体变形实测值。文献[1]同时强调了船体变形修正的重要意义,指出:“船体变形修正是船载外测数据处理的一个重要修正项目”。

在船体变形测量技术方面,为了优化测量方案、提高测量精度和自动化水平,有学者在传统手段的基础上不断探索研究新的途径,提出了一些新的测量技术和方法,文献[2-5]反映了他们的研究成果,从中可以看出,这些新技术和新方法都能使变形测量达到很高的精度。

本文将简要介绍船体变形测量系统和测量原理,着重从数据处理的角度讨论船体变形测量数据的处理方法,详细推导计算公式,并在此基础上建立整套变形数据处理的数学模型。

2 航天测量船船体变形测量

2.1 船体变形测量技术简介

在航天测量船上,安装的外弹道测量设备包括无线电测量设备和光学测量设备。许多船载精密测量设备均以惯导作为基准参考点,为了获得船体变形量,在测量设备基座与惯导平台基座之间建立船体变形测量。

变形测量设备是一组光电测量设备,它由测量望远镜、光电信号处理系统、数据中转系统和控制台 4 部分组成。

航天测量船船体变形量以 3 个角度量来描述,如图 1 所示,船艏绕节线(Z 轴)的相对转角 θ_b ,称纵摇角;船艏绕艏艉线(X 轴)的相对转角 ψ_b ,称横摇角;船艏绕甲板垂线(Y 轴)的相对转角 K_b ,称艏摇角。

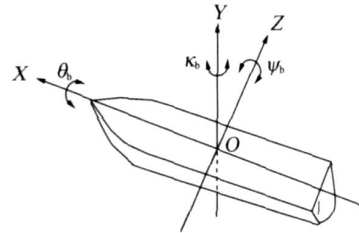


图 1 船体三个变形角示意图

Fig. 1 Three deformation angles

变形测量为光电测量,它的基本工作原理是:对需要测量相对变形量的两个设备基座其一安装一个发射光管,发出一束平行光;而另一个基座上安装一个接收光管,接收发射光管发出的平行光束。接收光管像面上装有光电转换器件线阵 CCD,落在线阵 CCD 上光斑的位移量即代表变形量,每一套变形测量设备用来测量 θ_b 、 ψ_b 、 K_b 3 个变形量。所以,船体变形测量设备是另一种精密的光学测角装置。

2.1.1 挠曲变形测量

船体变形的 3 个量中,纵摇角 θ_b 、艏摇角 K_b 为挠曲测量, ψ_b 为船艏上下相对挠曲变形, K_b 为船艏左右相对挠曲变形。如图 2 所示。

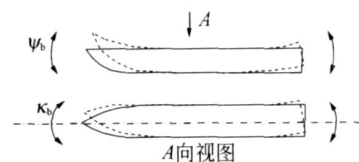


图 2 双轴挠曲变形示意图

Fig. 2 Deformation by bending about two axes

2.1.2 扭曲变形测量

船体变形中的横摇角 ψ_b 为扭曲测量,扭曲变形是两设备基座绕船纵轴(艏艉线)的相对变形量。某航天测量船船体变形测量设备的布局和外弹道测量设备位置如图 3 所示。

扭曲变形测量是在两设备基座之间架设一根大钢管作为参考基准,分别测量两设备基座相对大钢管的扭曲变形,然后合成两设备基座间的扭曲变形。扭曲变形测量在技术上有两个特点:一

是测扭光管是自准式光管,发射与接收用同一光路,二是作为扭曲测量参考基准的大钢管,本身的

变形量必须很小,因此由它引入的变形量可以忽略不计。

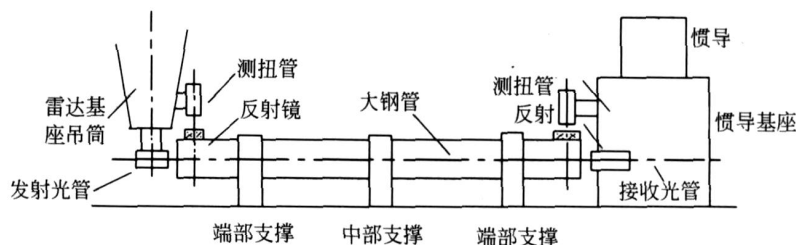


图 3 变形测量

Fig. 3 Deformation measurement

2.2 变形测量坐标系

测量船上的船体变形测量分为艏艉线方向的变形测量和上下(垂直)方向的变形测量两种情况,对应这两种情况的变形测量坐标系的定义分别如下:

(1) 艏艉线方向的变形测量坐标系

发射光管端变形坐标系:

O_b —— 原点,为发射光管处;

$O_b X_b$ —— 沿发射光管的发射光束方向,指向船艏;

$O_b Y_b$ —— 沿测扭光管的发射光束方向,向上为正;

$O_b Z_b$ —— 按右手法则确定。

接收光管端变形坐标系:

O_b —— 原点,为接收光管处;

$O_b X_b$ —— 沿接收光管主反射镜法线方向,指向船艏;

$O_b Y_b$ —— 沿测扭光管的发射光束方向,向上为正;

$O_b Z_b$ —— 按右手法则确定。

(2) 上下(垂直)方向的变形测量坐标系

激光电视经纬仪基座端变形坐标系:

O_b —— 原点,为激光电视经纬仪测扭支架组件中心;

$O_b X_b$ —— 沿测扭波罗棱镜法线方向,指向船艏;

$O_b Y_b$ —— 沿测扭光管的发射光束方向,向上为正;

$O_b Z_b$ —— 按右手法则确定。

惯导基座端变形坐标系:

O_b —— 原点,为惯导基座上表面中心;

$O_b X_b$ —— 沿惯导平台侧面反射镜法线方向,指向船艏;

$O_b Y_b$ —— 沿惯导基座上表面反射镜法线方向,向上为正;

$O_b Z_b$ —— 按右手法则确定。

根据测量设备在不同测量船上安装的情况,远望号测量船有多套变形测量系统和多个变形测量坐标系。

2.3 船体变形角及变形测量的相对基准

船体变形量用 3 个角度量来描述:

k_b : 艏摇变形角,船艏艉绕甲板垂线(Y 轴)的转角;

b_b : 纵摇变形角,船艏艉绕节线(Z 轴)的转角;

b_b : 横摇变形角,船艏艉绕艏艉线(X 轴)的转角。

测量船现有以下几类船体变形测量角:

雷达基座与惯导(或惯导)基座之间的变形测量角,以惯导基座为基准,记为 k_{bl} 、 b_l 、 b_u ;

某频段统一测控系统基座与惯导(或惯导)基座间的变形测量角,以惯导(或惯导)基座为基准,记为 k_{bu} 、 b_u 、 b_u ;

某频段统一测控系统基座与惯导基座之间的变形测量角,以惯导基座为基准,记为 k_{bc} 、 b_c 、 b_c ;

惯导基座与惯导基座之间的变形测量角,以惯导基座为基准,记为 k_{bg} 、 b_g 、 b_g ;

激光电视经纬仪基座与惯导基座之间的变形测量角,以惯导基座为基准,记为 k_{bj} 、 b_j 、 b_j 。

2.4 船体变形角的符号

船体变形角表示变形测量设备的一组坐标轴(变形坐标系 $O-X_{bj} Y_{bj} Z_{bj}$) 相对另一组坐标轴(某基准变形坐标系 $O-X_{bi} Y_{bi} Z_{bi}$) 之间的偏差角,如图 4 所示。

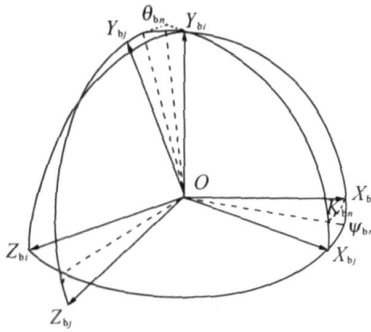


图 4 变形角示意图
Fig. 4 Deformation angles

3 个变形角及其符号规定如下:

θ_{bn} : 艏摇变形角,为 X_{bj} 轴相对平面 $X_{bi} O Y_{bi}$ 的夹角,逆时针为正(自桅杆向下看);

ψ_{bn} : 纵摇变形角,为 X_{bj} 轴相对平面 $X_{bi} O Z_{bi}$ 的夹角,逆时针为正(自右舷向里看);

θ_{bn} : 横摇变形角,为 Y_{bj} 轴相对平面 $X_{bi} O Y_{bi}$ 的夹角,逆时针为正(自船艏向后看)。

3 变形数据处理数学模型

航天测量船船体变形测量的目的是修正船载外测数据中船体变形的影响。为了在外测数据处理时使用变形数据,需要从数学上描绘船体变形量,即建立船体变形量的数学描述。

由变形测量角的定义可知,变形测量所得到的每一组参数与一般坐标变换的 3 个“欧拉角”不尽相同,因此不能直接利用变形测量的一组参数来确定两坐标系之间的关系,而首先应建立变形测量参数与一般坐标变换的“欧拉角”之间的关系,从而达到利用一般坐标变换来求取变形测量所需坐标变换的目的。

3.1 欧拉角与坐标变换

船体变形测量问题可以看作刚体绕固定点的转动,确定绕固定点转动的刚体的位置,通常采用欧拉角的方法。

取刚体赖以转动的定点 O 为笛卡尔坐标的原点,通过固定点 O 做固定坐标系 $O-X_{bi} Y_{bi} Z_{bi}$ 和

与刚体相固联的动坐标系 $O-X_{bj} Y_{bj} Z_{bj}$, 这样,确定刚体在空间绕定点转动后的位置问题就变为确定动坐标系 $O-X_{bj} Y_{bj} Z_{bj}$ 相对固定坐标系 $O-X_{bi} Y_{bi} Z_{bi}$ 的位置问题。

首先让动坐标系各轴与固定坐标系各轴重合,作为起始位置,欧拉角可以由下面 3 个独立的转动来实现:

(1) 首先由动坐标系绕 $O Y_{bj}$ 轴逆时针转出 K_{bn} 角,如图 5 所示;

(2) 在此基础上让动坐标系绕 $O Z_{bj}$ 轴逆时针转出 ψ_{bn} ,如图 6 所示;

(3) 让动坐标系绕 $O X_{bj}$ 轴逆时针转出 θ_{bn} 角,如图 7 所示。

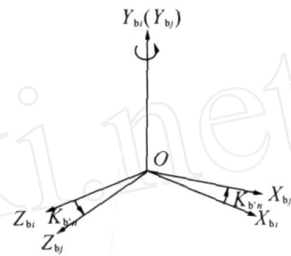


图 5 欧拉角示意图(1)
Fig. 5 Euler angle(1)

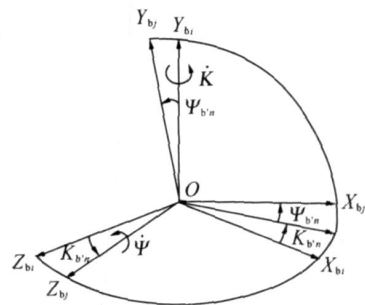


图 6 欧拉角示意图(2)
Fig. 6 Euler angle (2)

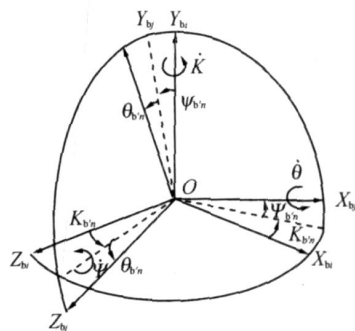


图 7 欧拉角示意图(3)
Fig. 7 Euler angle (3)

通过以上转动得到的 3 个角 $\alpha_n, \beta_n, \gamma_n$, 统称为欧拉角,用它们可以确定刚体相对固定坐标系 $O-X_{bi} Y_{bi} Z_{bi}$ 的位置。

不论刚体绕定点怎样运动,它的位移都可以用绕过此点的某轴线的一次转动来实现。值得注意的是,欧拉角是个笼统的名词,采用不同的方法,选择不同的转角及转动方向,就可以得到不同的欧拉角坐标。只要选择 3 个合适的角变量就能圆满地描述直角坐标系的旋转。

一般将欧拉角变换记作 $B(j) = (\alpha_n, \beta_n, \gamma_n)_j$, $\alpha_n, \beta_n, \gamma_n$ 3 个角的旋转顺序及其转动方向,是根据实际问题来确定的,一般定义后不可随意改变。

根据航天测量船变形测量的特点,对欧拉角变换 $B(j) = (\alpha_n, \beta_n, \gamma_n)_j$ 的旋转方向和顺序进行规定:

首先绕 $O Y_{bj}$ 轴逆时针转 α_n 角,得到旋转矩阵 K :

$$K = \begin{bmatrix} \cos K_{\alpha_n} & 0 & -\sin K_{\alpha_n} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin K_{\alpha_n} & 0 & \cos K_{\alpha_n} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$B(j) = \begin{bmatrix} \cos K_{\alpha_n} \cos K_{\beta_n} & -\cos K_{\alpha_n} \sin K_{\beta_n} \cos K_{\gamma_n} & -\sin K_{\alpha_n} \sin K_{\beta_n} \cos K_{\gamma_n} & \cos K_{\alpha_n} \sin K_{\beta_n} \sin K_{\gamma_n} & -\sin K_{\alpha_n} \cos K_{\beta_n} \cos K_{\gamma_n} \\ \sin K_{\alpha_n} \cos K_{\beta_n} & \cos K_{\alpha_n} \cos K_{\beta_n} \cos K_{\gamma_n} & -\sin K_{\alpha_n} \cos K_{\beta_n} \cos K_{\gamma_n} & \cos K_{\alpha_n} \cos K_{\beta_n} \sin K_{\gamma_n} & -\sin K_{\alpha_n} \cos K_{\beta_n} \sin K_{\gamma_n} \\ \sin K_{\alpha_n} \sin K_{\beta_n} & -\sin K_{\alpha_n} \sin K_{\beta_n} \cos K_{\gamma_n} & \cos K_{\alpha_n} \sin K_{\beta_n} \cos K_{\gamma_n} & \sin K_{\alpha_n} \sin K_{\beta_n} \sin K_{\gamma_n} & \cos K_{\alpha_n} \sin K_{\beta_n} \sin K_{\gamma_n} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

在公式(6)中,为了书写简便,引入了一个符号 $[]_{bn}$,它表示括号内参数 $\alpha_n, \beta_n, \gamma_n$ 的下标均为 b_n (后面公式中 b_n 与之类似)。

从上面的描述可以知道,对于两坐标系之间的旋转变换,只要确定二者间的欧拉角即可,确定了转换矩阵 $B(j)$,可方便地完成坐标系间的变换。

3.2 变形角与欧拉角的关系

为了确定两坐标系之间的欧拉角,首先应建立起变形测量参数与欧拉角的关系,下面通过一系列的数学推导来建立变形测量参数与欧拉角的关系。

3.2.1 变形角与变形测量坐标系

根据变形角的定义(见图 3),设: X_{bj}, Y_{bj}, Z_{bj} 为发射光管端变形坐标系相应各轴的单位矢量, X_{bi}, Y_{bi}, Z_{bi} 为接收光管端变形坐标系相应各轴的单位矢量。根据矢量投影知识^[6],有:

其次绕 $O Z_{bj}$ 轴逆时针转 β_n 角,得到旋转矩阵:

$$= \begin{bmatrix} \cos \beta_n & -\sin \beta_n & 0 \\ \sin \beta_n & \cos \beta_n & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

最后绕 $O X_{bj}$ 轴逆时针转 γ_n 角,得旋转矩阵:

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma_n & -\sin \gamma_n \\ 0 & \sin \gamma_n & \cos \gamma_n \end{bmatrix}, \quad (3)$$

这样便可得到动坐标系 $O-X_{bj} Y_{bj} Z_{bj}$ 与固定坐标系 $O-X_{bi} Y_{bi} Z_{bi}$ 之间的关系式为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{bi} = B(j) \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{bj}, \quad (4)$$

其中:

$$B(j) = \dots, \quad (5)$$

将公式(1)、(2)、(3)代入公式(5)并将旋转矩阵 $B(j)$ 的右边全部展开,可得:

$$\sin \beta_n = X_{bj} \cdot Z_{bi}, \quad (7)$$

$$\sin \beta_n = X_{bj} \cdot Y_{bi}, \quad (8)$$

$$\sin \beta_n = Y_{bj} \cdot Z_{bi}. \quad (9)$$

从公式(7)、(8)、(9)可以看出:变形测量角 $\alpha_n, \beta_n, \gamma_n$ 唯一地确定了变形测量坐标系之间的关系,但还不能直接进行坐标变换,需选择一般坐标变换式中的 3 个欧拉角来确定变形坐标系间的关系。这样处理并不改变原坐标的空间位置和相互关系,因此 3 个欧拉角也就由 3 个变形测量角唯一地确定,称此处的 3 个欧拉角为“等效欧拉角”。

3.2.2 变形实测角与“等效欧拉角”

变形测量的一般坐标变换公式为^[7]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{bi} = B_n(j) \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{bj}. \quad (10)$$

根据公式(6), X_{bj} 轴在变形接收光管坐标系

$O-X_{bi}Y_{bi}Z_{bi}$ 中的方向余弦是:

$$X_{bj} = (\cos \alpha_{bn} \cos \beta_{bn}, \sin \alpha_{bn} \cos \beta_{bn}, \sin \alpha_{bn} \sin \beta_{bn})_{bn}, \quad (11)$$

而

$$X_{bi} = (1, 0, 0). \quad (12)$$

同理有:

$$Y_{bj} = (-\cos \alpha_{bn} \sin \beta_{bn}, -\sin \alpha_{bn} \sin \beta_{bn}, \cos \alpha_{bn} \cos \beta_{bn} - \cos \alpha_{bn} \sin \beta_{bn})_{bn}, \quad (13)$$

$$Y_{bi} = (0, 1, 0), \quad (14)$$

$$Z_{bj} = (\cos \alpha_{bn} \sin \beta_{bn} - \sin \alpha_{bn} \cos \beta_{bn}, -\cos \alpha_{bn} \cos \beta_{bn}, \sin \alpha_{bn} \sin \beta_{bn} + \cos \alpha_{bn} \cos \beta_{bn})_{bn}, \quad (15)$$

$$Z_{bi} = (0, 0, 1). \quad (16)$$

由公式(7) ~ (16)可得:

$$\sin \beta_{bn} = X_{bj} \cdot Z_{bi} = \sin \alpha_{bn} \cos \beta_{bn}, \quad (17)$$

$$\sin \alpha_{bn} = X_{bj} \cdot Y_{bi} = \sin \beta_{bn}, \quad (18)$$

$$\sin \alpha_{bn} = Y_{bj} \cdot Z_{bi} = -\sin \alpha_{bn} \sin \beta_{bn} \cos \beta_{bn} + \cos \alpha_{bn} \sin \beta_{bn}. \quad (19)$$

由公式(17)、(18)有:

$$\beta_{bn} = \alpha_{bn}, \quad (20)$$

$$K_{bn} = \arcsin \frac{\sin K_{bn}}{\cos \beta_{bn}} = \arcsin \frac{\sin K_{bn}}{\cos \alpha_{bn}}. \quad (21)$$

为了使 β_{bn} 与船体航向角 α_{cn} 定义的正向(顺时针为正)一致^[7], 实际应用时需将其反号, 即有:

$$K_{bn} = -\arcsin \frac{\sin K_{bn}}{\cos \beta_{bn}}. \quad (22)$$

根据公式(19)并注意到 β_{bn} 的反号有:

$$\begin{aligned} \sin \beta_{bn} &= -\sin K_{bn} \sin \beta_{bn} \cos \beta_{bn} + \cos K_{bn} \sin \beta_{bn} = \\ &= \sin K_{bn} \sin \beta_{bn} \cos \beta_{bn} + \cos K_{bn} \sin \beta_{bn} = \\ &= \cos K_{bn} \left(\frac{\sin K_{bn}}{\cos K_{bn}} \sin \beta_{bn} \cos \beta_{bn} + \sin \beta_{bn} \right) = \\ &= \cos K_{bn} (\tan K_{bn} \sin \beta_{bn} \cos \beta_{bn} + \sin \beta_{bn}), \end{aligned} \quad (23)$$

整理有:

$$\sin \beta_{bn} = \cos K_{bn} (\tan K_{bn} \sin \beta_{bn} \cos \beta_{bn} + \sin \beta_{bn}), \quad (24)$$

在公式(24)两边同除 $\cos \beta_{bn}$, 得:

$$\frac{\sin \beta_{bn}}{\cos \beta_{bn}} = \tan K_{bn} \sin \beta_{bn} \cos \beta_{bn} + \sin \beta_{bn}, \quad (25)$$

设:

$$b = \frac{\sin \beta_{bn}}{\cos K_{bn}}, \quad (26)$$

$$\tan \beta_{bn} = \tan \beta_{bn} \sin \beta_{bn}, \quad (27)$$

将公式(26)、(27)代入公式(25), 则有:

$$b = \tan \beta_{bn} \cdot \cos \beta_{bn} + \sin \beta_{bn}, \quad (28)$$

在公式(28)两边同乘 $\cos \beta_{bn}$ 得:

$$b \cos \beta_{bn} = \sin \beta_{bn} \cos \beta_{bn} + \cos \beta_{bn} \sin \beta_{bn} = \sin(\beta_{bn} + \beta_{bn}), \quad (29)$$

上式经整理有:

$$(\beta_{bn} + \beta_{bn}) = \arcsin(b \cdot \cos \beta_{bn}),$$

即:

$$\beta_{bn} = \arcsin(b \cdot \cos \beta_{bn}) - \beta_{bn}. \quad (30)$$

根据公式(27)有:

$$\beta_{bn} = \arctan(\tan \beta_{bn} \sin \beta_{bn}). \quad (31)$$

将以上详细的数学推导整理后, 可得变形测量角 β_{bn} 与等效欧拉角 α_{bn} 的关系式如下:

$$K_{bn} = -\arcsin \frac{\sin K_{bn}}{\cos \beta_{bn}}, \quad (32)$$

$$\beta_{bn} = \alpha_{bn}, \quad (33)$$

$$\beta_{bn} = \arcsin(b \cdot \cos \beta_{bn}) - \beta_{bn}, \quad (34)$$

等效欧拉角 α_{bn} 用来确定变形坐标系之间坐标变换的 3 个欧拉角, 它是由变形测量角 K_{bn} 、 β_{bn} 、 α_{bn} 计算得到的。

公式(32) ~ (34) 即工程上使用的由变形测量角转换等效欧拉角的计算公式。

4 工程应用与结果分析

针对测量船外测定轨的工程应用背景, 本文以测量船上的某测量设备 A 和 B 为例, 使用本文建立的变形修正模型, 对上述设备获取的外弹道测量数据进行船体变形修正, 观察变形修正对外测数据以及对外测定轨的影响, 以考察变形修正的效果。

4.1 变形修正对外测数据的影响

对船载设备外弹道测量数据 R 、 A 、 E , 分别采用修正变形与不修正变形两种方法, 然后将两种处理结果进行比对, 考察变形数据对外测数据处

理结果的影响。两种方法处理结果的比对数据见表 1(表中 Δ = 修正变形 - 不修正变形)。

表 1 变形修正对外弹道测量数据的影响

Tab.1 Influence of deformation correction on outer-trajectory measurement data

任务代号	弧段	测量设备	R(m)	A(°)	E(°)
甲	A	a 船 B 设备	- 0.013 ~ 0.021	- 29 ~ 17	- 54 ~ 6
甲	A	a 船 A 设备	- 0.02 ~ 0.02	- 5 ~ - 52	5.1 ~ 50
甲	A	b 船 B 设备	- 0.027 ~ 0.016	40 ~ 50 ~ 30	22 ~ 61
甲	C	c 船 B 设备	- 0.14 ~ 0.18	- 20 ~ 110 ~ 20	55 ~ - 55
甲	B	c 船 A 设备	- 0.047 ~ 0.16	- 154 ~ 136	- 16.9 ~ 18
乙	E	a 船 A 设备	- 0.093 ~ 0.037	- 25.1 ~ 29.9	- 19 ~ 75

从表 1 看出,变形修正与否对斜距 R 的影响很小,基本上可以忽略不计,但对测角 A、E 的影响比较大,有时达到 1 ~ 2 。

4.2 变形修正对外测定轨的影响

对实测的外弹道测量数据采用修正变形和不修正变形两种方法分别进行处理,然后分别用同样的方法进行初轨计算,比较二者之间的半长轴之差 Δa (Δa = 修正变形 - 不修正变形),结果见表 2。

表 2 变形修正与否对初轨半长轴 a 的影响

Tab.2 Influence of deformation correction or not on initial orbit semi-major axis

任务代号	跟踪弧段	测量设备	a(m)
甲	A	a 船 B 设备	- 147 ~ - 11
甲	A	a 船 A 设备	10 ~ 140
甲	A	b 船 B 设备	- 530 ~ 120
甲	C	c 船 B 设备	- 770 ~ 800
甲	B	c 船 A 设备	- 543 ~ - 185
乙	E	a 船 A 设备	- 28 352 ~ 21 969

从表 2 看出,变形修正与否对初轨半长轴 a 的影响是比较大的,对于近地近圆轨道,影响值是几百米的量级,最大可达 800 ~ 900 m,而对于大椭圆轨道,影响值 > 20 km。

5 结 论

测量船上安装的变形测量设备是一组精密的光电测量设备,系统结构复杂、测量精度要求高,变形测量有严格的定义和正向规定,变形数据处理有一套复杂的数学模型,船体变形是船载测量设备外弹道数据的一项重要误差源,为确保外弹道数据处理的高精度,应对船体变形进行精确修正。

参考文献:

[1] 李晓勇,张忠华,何晶. 船体变形对航天测量船外弹道测量的影响[J]. 飞行器测控学报,2006,25(3):7-12.
LI X Y, ZHANG ZH H, HE J. The effects of spacecraft TT&C ship's deformation on its outer-trajectory measurement data[J]. *Journal of spacecraft TT&C Technology*, 2006, 25(3):7-12. (in Chinese)

[2] 李珉,张尧禹,李岩,等. 基于测量船角变形光电测

量系统的研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版),2006(3):14-15.
LI M, ZHANG Y Y, LI Y, et al.. Research of angle diatortion for measuring ship [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2006(3):14-15. (in Chinese)

[3] 李向荣,乔彦峰,刘微,等. 扭转变形测量的干涉条纹处理技术[J]. 光电工程,2005,32(12):47-50.
LI X R, QIAO Y F, LIU W, et al.. Interferometry fringe processing for torsion measurement[J]. *Op-*

- Optoelectronic Engineering*, 2005, 32(12):47-50. (in Chinese)
- [4] 王建军,王颖. 光栅法在船体横扭角测量中的应用[J]. *光学 精密工程*, 2005, 13(3):371-375.
WANG J J, WANG Y. Application of raster metering to hull transverse twist measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3):371-375. (in Chinese)
- [5] 李向荣,乔彦峰,刘微,等. 船体三维角度变形的自准直干涉测量方法[J]. *光电技术*, 2005, 31(5):761-763.
LI X R, QIAO Y F, LIU W, *et al.*. Autocollimation interferometry method for boats' three-dimensional distortion[J]. *Optical Technique*, 2005, 31(5):761-763. (in Chinese)
- [6] 编写组. 数学手册[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.
Compiling group. *Manual of Mathematics* [M]. Beijing: High Grade Education Press, 2000. (in Chinese)
- [7] KB30-99. 航天测量船外测数据处理船姿和船体变形修正方法[S].
KB30-99. TT&C Ship Attitude and Hull Deformation Correction Methods in Outer-trajectory Measurement Data Processing[S]. (in Chinese)

作者简介:



李晓勇(1962-),男,湖南人,高级工程师,主要从事弹道数据处理、精度分析等方面的研究工作。E-mail:xy-li212@163.com



薛国虎(1975-),男,江苏人,高级工程师,主要从事航天测控等方面的研究工作。



张忠华(1954-),男,山东人,总工程师,高级工程师,主要从事航天测控、精度分析等方面的研究工作。



陈贵明(1967-),女,湖南人,工程师,主要从事航天测控、信息处理等方面的研究工作。



朱伟康(1961-),男,上海人,高级工程师,主要从事航天测控等方面的研究工作。