

# 一种免轴系校准AE平台指向角标校方法

周海利, 顾保国, 白玲, 吴利辉, 戈西伟, 谢昕

63726部队, 宁夏 银川

收稿日期: 2021年9月25日; 录用日期: 2021年10月18日; 发布日期: 2021年10月27日

## 摘要

针对安装于方位、俯仰(AE)旋转平台的测量设备, 通过分析配件6自由度方法建立了完整的制造和安装误差模型并给出了刚体模型指向角解析算法。算法消除了传统近似算法存在的轴偏离误差、高仰角误差等算法误差, 且无需校准望远镜的机械安装误差、无需人工或自动读数。基于这种解析算法, 提出一种通过非线性方程组数值求解获取指向角度标校参数的方法, 在显著降低系统设计制造难度的前提下有效提高了标校精度。

## 关键词

AE旋转平台, 指向, 测量, 解析解, 算法, 误差, 角度标校参数

# A Calibration Method of AE Platform Pointing Angle without Shafting Calibration

Haili Zhou, Baoguo Gu, Ling Bai, Lihui Wu, Xiwei Ge, Xin Xie

The Unit 63726 of PLA, Yinchuan Ningxia

Received: Sep. 25<sup>th</sup>, 2021; accepted: Oct. 18<sup>th</sup>, 2021; published: Oct. 27<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

For the measuring device mounted on Azimuth-Elevation rotational platform, integrated making & assembling error model is set up by six freedom analysis for an assembly, the Pointing Angle analytical algorithm for the rigid model is given as well. By the analytical algorithm, such traditional errors as axis-deviation error and high-elevation error are eliminated, and do not need to

calibrate the assembly error of telescope, and do not need manual or automatic reading. A method that acquires the parameter for pointing angle calibration is proposed by numerical solving for system of nonlinear equations. This method can effectively improve the calibration accuracy under the premise of significantly reducing the difficulty of system design and manufacturing.

## Keywords

Azimuth-Elevation Rotational Platform, Angle of Direction, Measuring, Analytic Solution, Algorithm, Error, Parameter of Direction Angle Calibration

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着太赫兹通信、测控以及深空激光通信等技术的应用,对 AE 旋转平台的测角精度提出了前所未有的要求[1]。AE 旋转平台广泛应用于光学和雷达测量设备[2],角度测量是其主要测量功能之一[3]。AE 旋转平台包括方位旋转轴、俯仰旋转轴以及机械轴,理想情况下此三轴相交于一点且相互垂直,通常称之为三轴中心。实际工程应用中 AE 平台往往安装多个测量设备,但只能有一个主要测角设备的指向轴线居于三轴中心,其他测角设备的指向轴线并不能通过三轴中心,且存在制造和安装误差[4],故测量设备的指向角度不能简单通过轴角编码器直接给出,需要进行大量精细的轴系校准工作。以往轴系测量误差公式是采用球面三角学原理简化后,在考虑一种误差时将其他项设为零且假设轴系误差都非常小的情况下推导的[5],但 AE 旋转平台轴系误差种类繁多且相互存在耦合影响,在轴系误差较大或旋转平台在高俯仰角状态时,该方法不再适用[6] [7],且误差合成公式是通过定性分析近似得到的[8] [9]。文献[5]通过坐标变换方法建立了光电经纬仪轴系误差对测量误差影响的数学模型,将轴偏离误差近似为零处理,也存在一定误差。本文采用分析配件 6 自由度方法和坐标变换方法,给出了 AE 旋转平台指向角的解析解,通过非线性方程组数值求解方法实现了各误差参数的便捷、准确获取。

## 2. AE 旋转平台指向角数学模型的建立

### 2.1. 确定坐标系

采用测站坐标系作为原始参考坐标系,以正北为  $x$  轴指向、正西为  $y$  轴指向、本地铅垂线远离地心方向为  $z$  轴指向[10]。先设定一个初始理想状态:AE 旋转平台无制造误差和安装误差,平台三轴中心位于测站坐标系原点,其方位旋转轴、俯仰旋转轴(下文分别简称方位轴和俯仰轴)、机械轴分别与测站坐标系三轴重合,如图 1 所示。

将平台分解为方位轴刚体、俯仰轴刚体和望远镜刚体三个刚体组件,刚体组件的内坐标系在初始状态与原始参考坐标系重合。取方位轴线为方位轴内坐标系  $z$  轴,取俯仰轴线为俯仰轴内坐标系  $y$  轴,两轴线的公垂线分别是两轴内坐标系之  $x$  轴,取垂足为其内坐标系原点;分别取望远镜光轴及成像水平线为其内坐标系  $x$  轴、 $y$  轴,取望远镜测距参考点为其内坐标原点。坐标系符合右手定则,坐标轴指向根据不同设备可自定。

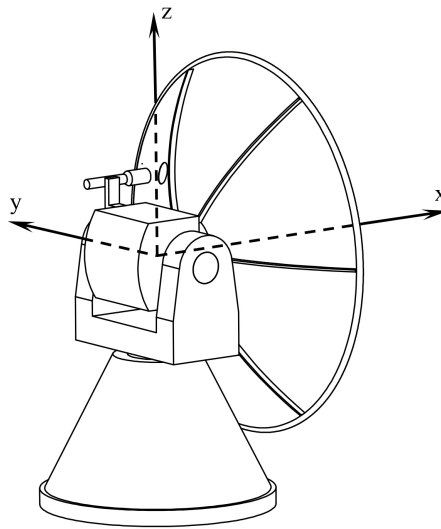


Figure 1. AE rotating platform and station coordinate diagram  
图 1. AE 旋转平台与测站坐标系图

## 2.2. 分析误差项

以往关于 AE 旋转平台制造和安装误差项分析与计算[11]中不包括三轴不相交的情况,且忽略了轴偏离误差、俯仰大角度误差和近距离目标的近似算法误差。为保证制造和安装中各自由度形成的误差都得到考虑,采用 6 自由度方法进行分析。完全无约束的自由刚体在三维空间具备  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个轴向的平移和旋转运动,总共 6 种自由运动[12]。偏开三轴中心安装的角度标校望远镜是较具代表性的角度测量设备,本文以此为例进行说明。基于 2.1 所述初始状态,可以认为 AE 旋转平台的配件因 6 自由度运动后形成了制造和安装误差。望远镜内坐标系分别绕俯仰轴刚体内坐标系  $y$  轴、 $z$  轴旋转造成其轴线偏离俯仰轴刚体内坐标系  $x$  轴指向,该误差项通常称为光机差。望远镜内坐标系原点在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向偏离俯仰轴刚体内坐标系原点造成其轴线偏离三轴中心,该误差项称为光轴偏离误差。因绕  $x$  轴的运动并不造成望远镜轴线指向的变化,所以对望远镜进行 6 自由度分析后只取上述 5 种运动造成的误差。这样分析能够做到既不遗漏误差项,又不至于使计算出现冗余项。对俯仰轴刚体分析,绕方位轴刚体内坐标  $y$  轴的旋转为俯仰角度(包括零差),绕方位轴刚体内坐标  $x$  轴旋转的偏差称为方位俯仰轴不垂直误差,绕方位轴刚体内坐标  $z$  轴的旋转为方位角(包括零差和指北偏差),沿方位轴刚体内坐标  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三轴平移的偏差称为俯仰轴偏离误差。对方位轴分析,沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三轴平移的偏差可以通过移动 AE 旋转平台三轴中心至测站系原点进行消除,绕测站坐标  $x$ 、 $y$  轴旋转的偏差称为大盘倾斜误差,绕  $z$  轴的旋转误差称为指北偏差归并至上述俯仰轴方位角。

## 2.3. 指向角解析公式

所要解决的问题是:对于刚体 AE 旋转平台,1.2 所述各类制造和安装误差项都存在时,求标校望远镜轴线所指向的与望远镜内坐标原点距离为  $D$  的目标在测站坐标系的坐标值。

为便于数学求解,可以认为误差项由 2.1 所述初始状态经过坐标旋转和平移造成,然后求解望远镜内坐标为  ${}^{E_yT}P = (D \ 0 \ 0)^T$  的目标在测站坐标系中的坐标,如式(1)所示。

$${}^S P = {}^S R_{S_y} {}^{S_y} R_{S_x} {}^{S_x} R_{A_z} R \left( \begin{matrix} A_z T \\ A_y E \end{matrix} + \begin{matrix} A_x R \\ A_y E \end{matrix} R \left( \begin{matrix} A_y E T \\ E_z R \\ E_y T \end{matrix} R \begin{matrix} E_z R \\ E_y T \end{matrix} P \right) \right) \quad (1)$$

机器人学中的坐标空间转换表示约定能够有效防止坐标转换时极易出现的混乱情况,故式(1)中采用

了这种约定。 $P$ 、 $T$ 、 $R$  分别表示空间点、平移矢量和坐标旋转矩阵，左上前导符表示量所属的参考坐标空间名称，左下前导符表示空间点经平移或旋转后的坐标空间名称， $P$ 、 $T$  采用列向量 $(x \ y \ z)^T$ 表示。本文中，前导符首位字符由坐标空间的参考坐标系名称头字母表示，第二位字符表示坐标空间形成所绕的参考坐标系之坐标轴名，第三位字符由参考坐标系经转换后所重合的刚体内坐标系名称头字母表示。坐标空间指经旋转或平移转换后的所形成的坐标系。

式(1)中各量说明如下。

${}^{Ez}P$  为空间点  $P$  在望远镜绕俯仰轴刚体内坐标  $y$  轴旋转后之坐标空间  $EyT$  中的坐标值。

${}^{Ez}_{EyT}R$  为坐标空间  $Ez$  绕俯仰轴刚体内坐标系  $y$  轴旋转角度  $\theta_1$  (光机差角  $y$  轴分量)至坐标空间  $EyT$  之旋转矩阵，如式(2)所示：

$${}^{Ez}_{EyT}R = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & \sin(\theta_1) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_1) & 0 & \cos(\theta_1) \end{pmatrix} \quad (2)$$

${}^{AyE}_{Ez}R$  为坐标空间  $AyE$  绕俯仰轴刚体内坐标  $z$  轴旋转角度  $\phi_1$  (光机差角  $z$  轴分量)至坐标空间  $Ez$  之旋转矩阵，如式(3)所示：

$${}^{AyE}_{Ez}R = \begin{pmatrix} \cos(\phi_1) & -\sin(\phi_1) & 0 \\ \sin(\phi_1) & \cos(\phi_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

${}^{AyE}_{EyT}T$  为坐标空间  $EyT$  的原点在坐标空间  $AyE$  中的偏移矢量，即光轴偏离误差，如式(4)所示：

$${}^{AyE}_{EyT}T = (x_{d1} \ y_{d1} \ z_{d1})^T \quad (4)$$

${}^{Ax}_{AyE}R$  为坐标空间  $Ax$  绕方位轴刚体内坐标  $y$  轴旋转角度  $\theta_2$  至坐标空间  $AyE$  之旋转矩阵，如式(5)所示：

$${}^{Ax}_{AyE}R = \begin{pmatrix} \cos(\theta_2) & 0 & \sin(\theta_2) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_2) & 0 & \cos(\theta_2) \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中  $\theta_2$  是俯仰角度(包括零差)。

${}^{Az}_{Ax}R$  为坐标空间  $Az$  绕方位轴刚体内坐标  $x$  轴旋转角度  $\varphi_1$  (方位俯仰轴不垂直误差角)至坐标空间  $Ax$  之旋转矩阵，如式(6)所示：

$${}^{Az}_{Ax}R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi_1) & -\sin(\varphi_1) \\ 0 & \sin(\varphi_1) & \cos(\varphi_1) \end{pmatrix} \quad (6)$$

${}^{Az}_{AyE}T$  为坐标空间  $AyE$  的原点在坐标空间  $Az$  中的偏移矢量，即俯仰轴偏离误差，如式(7)所示：

$${}^{Az}_{AyE}T = (x_{d2} \ 0 \ 0)^T \quad (7)$$

${}^{Sx}_{Az}R$  为坐标空间  $Sx$  绕方位轴刚体内坐标  $z$  轴旋转角度  $\phi_2$  至坐标空间  $Az$  之旋转矩阵，如式(8)所示：

$${}^{Sx}_{Az}R = \begin{pmatrix} \cos(\phi_2) & -\sin(\phi_2) & 0 \\ \sin(\phi_2) & \cos(\phi_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

其中  $\phi_2$  是方位角(包括零差和指北偏差)。

${}_{Sx}^{Sy}R$  为坐标空间  $Sy$  绕测站坐标系  $x$  轴旋转角度  $\varphi_2$  (大盘倾斜角度  $x$  轴分量) 至坐标空间  $Sx$  之旋转矩阵, 如式(9)所示:

$${}_{Sx}^{Sy}R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi_2) & -\sin(\varphi_2) \\ 0 & \sin(\varphi_2) & \cos(\varphi_2) \end{pmatrix} \quad (9)$$

${}_{Sy}^S R$  为坐标空间  $S$  绕测站坐标系  $y$  轴旋转角度  $\theta_3$  (大盘倾斜角度  $y$  轴分量) 至坐标空间  $Sy$  之旋转矩阵, 如式(10)所示:

$${}_{Sy}^S R = \begin{pmatrix} \cos(\theta_3) & 0 & \sin(\theta_3) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_3) & 0 & \cos(\theta_3) \end{pmatrix} \quad (10)$$

### 3. 获取指向角度标校参数

#### 3.1. 需要解决的问题

由 2.3 得到了指向角解析公式, 利用该公式能够准确计算空间目标的测站系坐标, 但其前提是公式中的各误差项参数是准确的, 如何获得准确的误差项参数是需要解决的关键问题。

#### 3.2. 数值求解法获取指向角度标校参数

由 2.3 可知, 式(1)中包含  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 、 $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 、 $x_{d1}$ 、 $y_{d1}$ 、 $z_{d1}$  及  $x_{d2}$  共 11 个待定参数, 可采用非线性方程组数值求解来获取这些参数。式(1)为 3 阶矩阵等式, 测量一次可获得 3 条相互独立的约束关系, 对于一个标校靶标可通过正反“镜”方法进行两次标校, 获得 6 条相互独立的约束关系。首先, 调整 AE 旋转平台方位、俯仰角度使测量设备轴线正“镜”指向标校靶标, 由 2.3 可知靶标在望远镜内坐标系中之坐标  ${}^{Ey^T}P = (D \ 0 \ 0)^T$ , 所以标校时只需对准而不需要读数, 如图 2 所示。

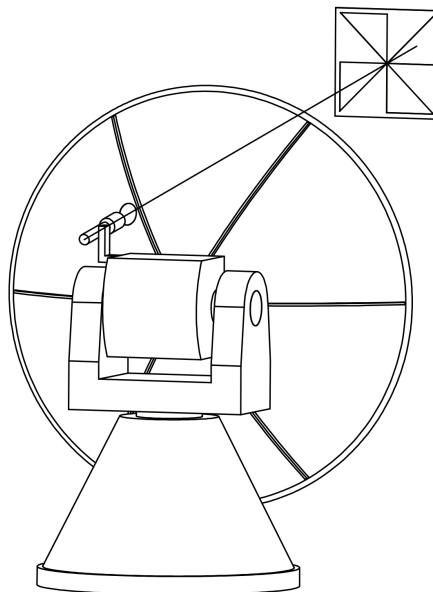
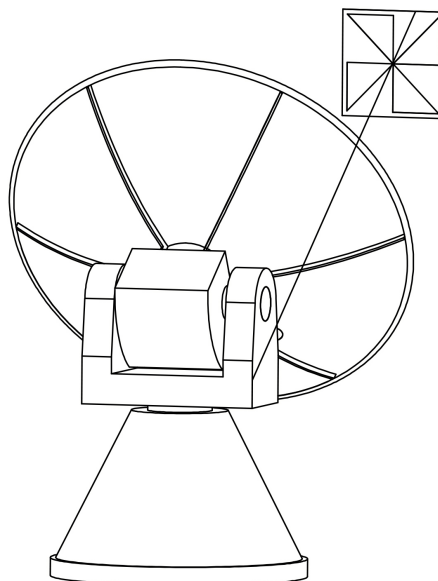


Figure 2. After Effects rotating platform “mirror” mapping  
图 2. AE 旋转平台正“镜”对标图

此时, 根据标校靶标的三维坐标和指向角解析公式可联立 3 个等式, 即 3 个约束条件。

然后, 再次调整 AE 旋转平台方位、俯仰角度使测量设备轴线倒“镜”指向标校靶标, 同样只对准靶标, 如图 3 所示。



**Figure 3.** After Effects rotating platform inverse “mirror” mapping  
**图 3.** AE 旋转平台倒“镜”对标图

此时, 根据标校靶标的三维坐标和指向角解析公式可再获得 3 个约束条件, 总共 6 个约束条件。

如此, 通过正反“镜”方法对 2 个标校靶标标校即可获得 12 个独立约束条件, 完成对 11 个标校参数的求解。由于  $\theta_1$  (光机差角  $y$  轴分量)、 $\phi_1$  (光机差角  $z$  轴分量)、 $\varphi_1$  (方位俯仰轴不垂直误差角)、 $x_{d1}$ 、 $y_{d1}$ 、 $z_{d1}$  (光轴偏离误差)及  $x_{d2}$  (俯仰轴偏离误差)通常不会变化, 所以后续标校过程中可将以往结果代入上述参数, 这样, 只通过 1 个靶标就可完成其他 5 个参数的获取。

数值求解非线性方程组通常采用迭代方法, 标校参数精度可以通过收敛误差的大小进行控制。

#### 4. 结束语

建立 AE 旋转平台误差模型时采用 6 自由度方法能有效防止因计算困难或设计困难造成的误差项遗漏, 结合坐标平移和转换方法可以推导出 AE 旋转平台误差解析计算模型, 该模型能消除以往近似算法存在的轴偏离误差、高俯仰角误差和近距离目标的算法误差。

利用上述误差解析计算模型, 并采用数值求解法获取指向角度标校参数, 无需调整望远镜安装参数、无需读取望远镜偏离角度、测量快速准确、可以克服误差项不能分离问题, 其精度可通过提高迭代次数减小收敛误差得到控制。

#### 参考文献

- [1] 姜航, 姚远. 高速长距离太赫兹通信系统研究现状与难点综述[J]. 无线电通信技术, 2019, 45(6): 633-637.
- [2] 曹曙璜. 雷达天线座轴系误差三轴建模与公差分析[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [3] 张力. 天线座结构与轴系精度分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [4] 刘云飞. 船载测控系统的标校[J]. 无线电通信技术, 2003, 29(2): 1-3.

- [5] 李慧, 沈湘衡. 光电经纬仪轴系误差仿真计算的新方法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 334-337.
- [6] 曾志雄, 胡晓东, 高立民. 天顶摄影仪轴系误差对垂线偏差测量精度的影响及其修正方法[J]. 光学精密工程, 2004, 12(1): 6-10.
- [7] 巩岩. 利用恒星标校卫星激光测距经纬仪的指向精度[J]. 光学精密工程, 2000, 8(3): 258-260.
- [8] 杜俊峰, 李正周. GD-220 光电经纬仪轴系的精度分析[J]. 光学精密工程, 2002, 10(4): 416-419.
- [9] 李松, 张立平. 空间相机偏流调整旋转轴系的设计与精度分析[J]. 光学精密工程, 2004, 12(2): 141-145.
- [10] 杨斌峰. 地面测控雷达角度标校技术[J]. 现代电子技术, 2005, 28(17): 47-49+52.
- [11] 郝铁宁, 王军政, 汪首坤. 六自由度摇摆台的空间位置解算和误差分析[J]. 液压与气动, 2002(3): 32-34.
- [12] 王录, 路建功, 张维宁. 精密测量雷达常规标校误差校正参数研究[J]. 雷达与对抗, 2013, 33(1): 1-5+41.