

文章编号 1004-924X(2010)03-0677-08

# 应用跟踪误差等效模型评价光电经纬仪跟踪性能

张 宁<sup>1,2</sup>, 沈湘衡<sup>1</sup>, 杨 亮<sup>1,2</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 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**针对目前光电经纬仪跟踪性能室内检测方法的缺陷,提出了评价光电经纬仪跟踪性能的新方法。基于系统辨识理论建立了光电经纬仪跟踪误差等效模型,将等效正弦信号输入等效模型,通过对模型输出进行数据处理来评价光电经纬仪的跟踪性能。介绍了建立等效模型的原理和等效模型阶次,给出了根据光电经纬仪检测指标进行等效正弦信号设计的方法。为得到精确的模型参数,采用动态靶目标角频率连续调制模式实现了对光电经纬仪动态性能的持续激励。仿真和实验结果显示,得到的跟踪误差等效模型估计误差均值为 $(2.5872 \times 10^{-6})^\circ \approx 0^\circ$ ,最大值为 $1.8''$ ,标准差为 $1.1''$ ,表明建立的等效模型能够满足跟踪性能评价要求,实现了对光电经纬仪跟踪性能的合理、准确评价。

**关键词:**光电经纬仪;跟踪误差等效模型;等效正弦;最小二乘估计;误差估计

**中图分类号:**V556.5 **文献标识码:**A

## Evaluation of tracking performance of photoelectric theodolite using equivalent model of tracking error

ZHANG Ning<sup>1,2</sup>, SHEN Xiang-heng<sup>1</sup>, YANG Liang<sup>1,2</sup>

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

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** Considering the drawback of checking method indoor for the dynamic characteristics of tracking systems of photoelectric theodolites, a novel approach is proposed to evaluate the tracking performance of photoelectric theodolites in this paper. The equivalent mathematical model of tracking error of a photoelectric theodolite is established. On the basis of identification theory, the equivalent sine signal is inputted to the equivalent model, and then the output signals are processed to evaluate the tracking performance. The principle of the equivalent model of tracking error and the identification method of equivalent model order are introduced, and the design approach of equivalent sine signal is given according to the checking and testing desires of theodolites. Because the dynamic characteristics of the theodolite need to be inspired fully by input signals to obtain accurate parameters of equivalent model, the frequency of dynamic target is modulated continuously. The proposed equivalent model is verified by simulation and experiments, obtained results indicate that the estimate errors of equivalent

收稿日期:2009-04-10;修订日期:2009-06-01.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA7034320B)

model including average error, maximum error and standard error are  $(2.5872 \times 10^{-6})^\circ \approx 0''$ ,  $1.8''$  and  $1.1''$ , respectively, which shows that the equivalent model meets the needs of evaluating the tracking performance of theodolites, and achieves the accurate evaluation of tracking performance.

**Key words:** photoelectric theodolite; equivalent model of tracking error; equivalent sine; least square estimation; error estimation

## 1 引言

目前室内检测光电经纬仪电视、红外跟踪伺服系统性能的方法主要有光学动态靶标检测和等效正弦引导检测两种<sup>[1]</sup>。动态靶标检测并不能有效评价光电经纬仪的跟踪性能,其原因主要是动态靶标只能提供一个近似正弦的运动目标而非标准正弦,目标运动的高阶导数过大;根据经典控制理论中的动态误差系数法,过大的高阶导数会使跟踪误差无法真实体现光电经纬仪的跟踪性能。由于无法准确获取光电经纬仪跟踪系统的传递函数,动态误差法仅可用于理论分析,而不能对过大的跟踪误差进行量化计算和修正。等效正弦检测法因没有相应的光学目标检测装置而只能通过被检设备的计算机引导完成,亦不能直接检测电视跟踪系统的跟踪性能<sup>[2]</sup>。所以,目前的检测手段尚不能很好地完成对光电经纬仪跟踪性能的评价。

准确建立光电经纬仪跟踪伺服系统的传递函数模型,可以设计合理的输入信号(如等效正弦信号)得到等效的跟踪误差,从而间接地完成系统跟踪性能的评价。但是光电经纬仪的光学系统,包括 CCD 传感器以及跟踪架结构等难以用准确的数学模型表述,由于存在大气抖动、摩擦、传感器滞后等噪声干扰,使得建立一个准确、有效的光电经纬仪跟踪伺服系统数学模型很困难。

系统辨识是现代控制理论的一个重要分支,其理论基础是一个系统的动态特性必然表现在系统的输入输出数据之中,因此可以利用输入输出数据所提供的信息来建立系统的数学模型。系统辨识采用测试法建立系统数学模型,主要利用系统的大量输入输出信息,不需要分析系统各部分的机理和结构。

本文根据系统辨识理论建立了光电经纬仪跟踪误差等效模型,根据光电经纬仪的指标要求设计等效正弦信号作为测试信号,将信号输入到所

建立的模型中得到等效跟踪误差,据此评价其跟踪性能。

## 2 跟踪误差等效模型的建立

### 2.1 跟踪误差等效模型建立原理

光电经纬仪跟踪伺服系统是一个单输入单输出的位置伺服系统,可认为是单位反馈系统,其误差采样闭环离散系统结构如图 1 所示。图中, $r(t)$ 、 $c(t)$ 是光电经纬仪的输入、输出, $e(t)$ 是稳态误差输出。虚线所示的理想采样开关并不存在,是为了便于分析而虚设的。分别对  $r(t)$ 、 $c(t)$ 、 $e(t)$  进行采样后得到对应的脉冲序列为  $r^*(t)$ 、 $c^*(t)$ 、 $e^*(t)$ ,采样后的  $z$  变换函数分别为  $R(z)$ 、 $C(z)$ 、 $E(z)$ 。 $G(s)$  为光电经纬仪跟踪伺服系统的传递函数。

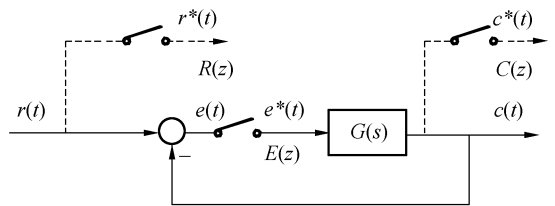


图 1 光电经纬仪跟踪系统离散结构图

Fig. 1 Block diagram of discrete tracking system of photoelectric theodolite

由图 1,跟踪伺服系统的连续输出和跟踪误差输出的拉氏变换为

$$C(s) = G(s)E^*(s), \quad (1)$$

$$E(s) = R(s) - C(s). \quad (2)$$

于是,误差采样信号  $e^*(t)$  的拉氏变换为

$$E^*(s) = \frac{G^*(s)}{1 + G^*(s)} R^*(s), \quad (3)$$

对式(3)取  $z$  变换,并整理得到光电经纬仪跟踪伺服系统对输入量的误差脉冲离散传递函数

$$\Phi_e(z) = \frac{1}{1 + G(z)}, \quad (4)$$

$\Phi_e(z)$  可以进一步表示为

$$\Phi_e(z) = \frac{b_0 z^m + b_1 z^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_n} = \frac{b_0 \prod_{i=1}^m (z - z_i)}{a_0 \prod_{k=1}^n (z - p_k)} \quad (5)$$

式中,  $z_i (i=1, 2, \dots, m)$  表示  $\Phi_e(z)$  的零点,  $p_k (k=1, 2, \dots, n)$  表示  $\Phi_e(z)$  的极点。

跟踪系统稳定时,所有极点均位于  $z$  平面上的单位圆内,即  $|p_k| < 1 (k=1, 2, \dots, n)$ 。对光电经纬仪跟踪性能进行评价,首先要保证跟踪系统处于稳定状态,那么可以将等效模型设计为具有无穷稳定度的离散系统,即使  $\Phi_e(z)$  的极点全部位于  $z$  平面上单位圆的原点处。此时  $\Phi_e(z)$  表示为

$$\Phi_e(z) = d_0 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + \dots + d_n z^{-n}. \quad (6)$$

通常,令  $d_0 = 0$ ,光电经纬仪跟踪误差等效模型可以采用式(6)的形式。此时,跟踪误差等效模型为维纳滤波器形式。其采用了非递归结构,因而无论从理论上还是实际中有限精度的运算都是稳定的,并且有限精度运算的误差也较小。

如果再得到模型的阶次和系数,就可以准确地建立光电经纬仪跟踪误差对目标输入信息的模型,进而对跟踪性能做出评价。下面分析模型阶次和系数的辨识方法。

### 2.2 等效模型阶次和系数辨识

根据系统辨识原理,可以将待辨识的光电经纬仪跟踪伺服系统看作“黑盒”,只考虑过程的输入输出,而不强调内部结构。跟踪误差等效模型的“黑盒”如图2所示,输入  $r(k)$  是光电经纬仪跟踪的目标信号,输出  $e(k)$  为相应的跟踪误差,输入输出均可测。跟踪过程的输出除了受输入的作用之外,还受其他一些不定因素的影响,统一等效为附加噪声  $n(k)$ 。

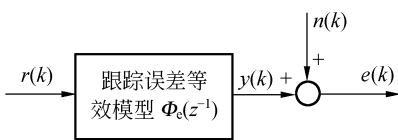


图2 跟踪误差“黑盒”等效模型

Fig.2 Equivalent “block box” model of tracking error

由图2,跟踪误差等效模型可以写为

$$e(k) = \Phi_e(z^{-1})r(k) + n(k), \quad (7)$$

进一步将式(8)写成最小二乘格式

$$e(k) = \mathbf{h}^T(k)\boldsymbol{\psi} + n(k), \quad (8)$$

式中

$$\begin{cases} \mathbf{h}(k) = [r(k-1), \dots, r(k-n)]^T \\ \boldsymbol{\psi} = [d_1, d_2, \dots, d_n]^T \end{cases}.$$

其中,  $r(k-1), \dots, r(k-n)$  为输入目标信号的延迟,  $d_1, \dots, d_n$  为等效模型待辨识系数,个数为  $n$ 。

对于  $k=1, \dots, L$ ,式(8)构成一个方程组写为

$$\mathbf{e}_L = \mathbf{H}_L \boldsymbol{\psi} + \mathbf{n}_L, \quad (9)$$

式中

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_L &= [z(1), z(2), \dots, z(L)]^T \\ \mathbf{n}_L &= [n(1), n(2), \dots, n(L)]^T \\ \mathbf{H}_L &= \begin{bmatrix} \mathbf{h}^T(1) \\ \mathbf{h}^T(2) \\ \vdots \\ \mathbf{h}^T(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r(0) & \dots & r(1-n) \\ r(1) & \dots & r(2-n) \\ \dots & \dots & \dots \\ r(L-1) & \dots & r(L-n) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

式中,  $L$  是测量数据的长度。

根据光电经纬仪输出数据中含有的噪声特性,在最小二乘辨识时,假设测量噪声  $n(k)$  是白噪声序列<sup>[3]</sup>。

等效模型的阶次辨识采用了文献[4]中介绍的积矩矩阵法,这里不再详述。

由最小二乘辨识法规则<sup>[5]</sup>得到模型系数  $\boldsymbol{\psi}$  的最小二乘估计值  $\hat{\boldsymbol{\psi}}_{LS}$

$$\hat{\boldsymbol{\psi}}_{LS} = (\mathbf{H}_L^T \mathbf{H}_L)^{-1} \mathbf{H}_L^T \mathbf{e}_L. \quad (10)$$

$\hat{\boldsymbol{\psi}}_{LS}$  称为最小二乘估计值,并且是唯一的。当获得充足的数据之后就可以通过式(10)一次求得相应的跟踪误差等效模型参数估计值。另外,采用式(10)描述的最小二乘法一次完成运算,要求  $\mathbf{H}_L^T \mathbf{H}_L$  是正则矩阵,其充分必要条件是过程的输入信号  $r(k)$  必须是  $2n$  阶持续激励信号<sup>[6-7]</sup>,也即要求

$$\bar{\mathbf{U}}_L^T \bar{\mathbf{U}}_L > 0, \quad (11)$$

式中

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{U}}_L &= [\mathbf{F}r_L, \mathbf{F}^2 r_L, \dots, \mathbf{F}^{2n} r_L]^T \\ r_L &= [r(1), r(2), \dots, r(L)]^T \\ \mathbf{F} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

这意味着输入信号不能随便选择,其中常用的信号是含有各频率不是整数倍关系的正弦信号组合的采样序列。

目前的光电经纬仪室内检测设备光学动态靶标的目标多工作在匀速圆周运动状态,运动速率恒定、频率单一<sup>[8]</sup>,不能充分激发光电经纬仪的动态特性,为此提出了动态靶标连续调频运动模型。图 3 是动态靶标与光电经纬仪空间运动关系。由球面三角定理可得方位角  $A$ 、俯仰角  $E$  将随  $\theta = \omega t$  按式(12)、(13)变化,式中  $a = 22.5^\circ, b = 42.5^\circ$ 。

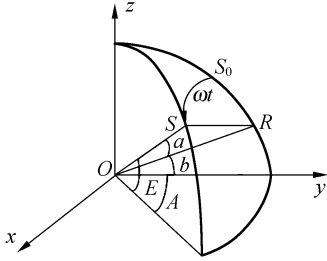


图 3 动态靶标与光电经纬仪空间运动关系图

Fig. 3 Space relation between dynamic target and theodolite

本文提出的连续调频运动模型就是动态靶标在运动过程中使  $\omega$  按照一定的规律变化,如按式(14)变化。 $\alpha$  和  $\beta$  为常数,根据被检设备的动态特性设定。

$$E = \arcsin(\cos a \sin b + \sin a \cos b \cos \theta), \quad (12)$$

$$A = \arcsin\left(\frac{\sin a \sin \theta}{\cos E}\right), \quad (13)$$

$$\omega = \alpha + \beta t, \quad (14)$$

利用某动态靶标产生连续调频运动目标对某光电经纬仪进行持续激励测试,得到了动态靶标运动模型并按式(13)计算得到了方位角和光电经纬仪方位跟踪误差,结果如图 4 所示。此时  $\alpha$  为 0.251 3,  $\beta$  为 0.001 9。

经证明提出的由连续调频运动模式获得的模拟目标方位信号满足式(11),而且易于在目前动态靶标设备上实现。

利用模型系数  $\hat{\psi}_{LS}$  可以按式(15)来计算等效模型输出估计向量  $\hat{e}_L$ , 并设等效模型估计误差为  $\varepsilon_L$ 。

$$\hat{e}_L = \mathbf{H}_L \hat{\psi}_{LS}, \quad (15)$$

$$\varepsilon_L = e_L - \hat{e}_L, \quad (16)$$

建立光电经纬仪跟踪误差等效模型的步骤如下:

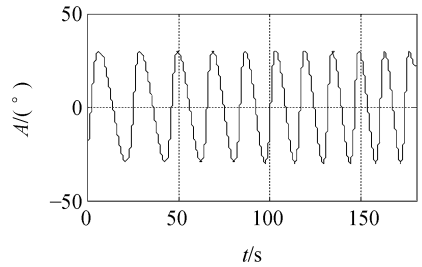
(1) 使动态靶标工作在连续调频运动模式,

光电经纬仪跟踪动态靶标,在同一时刻记录动态靶标目标位置,并进行坐标变换得到光电经纬仪的输入和相应的跟踪误差;

(2) 利用积矩阵法辨识跟踪误差等效模型的阶次,并验证是否满足式(11),直到得到符合要求的模型阶次;

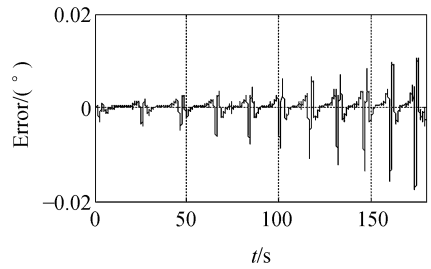
(3) 根据得到的输入信号及相应的跟踪误差信号利用式(10)计算模型系数;

(4) 根据式(16)计算模型估计误差,如果估计误差在允许范围内,则建立了有效的光电经纬仪跟踪误差等效模型。



(a)方位角连续调频信号

(a) Azimuth A with continuous frequency modulation



(b)跟踪误差

(b) Relevant tracking error

图 4 方位角连续调频信号和相应跟踪误差

Fig. 4 Azimuth A with continuous FM (frequency modulation) and relevant tracking error curve

### 3 跟踪性能评价方法

在建立了光电经纬仪跟踪误差等效模型后,就可以利用等效模型对跟踪性能做出合理评价。首先要设计等效模型的输入信号。最佳的输入信号应该是其特性与光电经纬仪外场跟踪的目标特性一致;但实验室环境中常常对信号做简化和理

想化处理,因此,主要采用等效正弦和等效目标两种形式<sup>[9]</sup>。文中采用了等效正弦法。用一个与运动目标具有相同角速度和角加速度的正弦代替目标的运动,该正弦信号就称为等效正弦。

已知目标运动最大角速度  $\dot{\theta}_{\max}$ 、最大角加速度  $\ddot{\theta}_{\max}$  时,就可以求出一个等效正弦  $\theta_1(t)$

$$\theta_1(t) = \varphi \sin(\omega' t), \quad (17)$$

式中,等效正弦振幅  $\varphi = \frac{\dot{\theta}_{\max}^2}{\ddot{\theta}_{\max}}$ ; 等效正弦的角频率

$\omega' = \frac{\dot{\theta}_{\max}}{\ddot{\theta}_{\max}}$ 。 $\theta_1(t)$  的最大角速度、最大角加速度分别为  $\dot{\theta}_{\max}$  和  $\ddot{\theta}_{\max}$ 。

根据光电经纬仪的最大速度和加速度设计产生正弦运动目标对光电经纬仪的伺服系统动态性能进行检测。将设计的等效正弦信号输入到等效模型中,如果得到的模型输出最大值在指标要求范围内,则说明跟踪性能满足设计需求。

## 4 评价方法的验证

### 4.1 评价方法的仿真实验

目前,在实验室环境下没有能够产生等效正弦信号的装置,无法对文中提出的评价方法的合

理性、准确性进行全面验证,但是可以利用计算机仿真完成验证。通过建立光电经纬仪跟踪伺服系统模型、动态靶标信号以及等效正弦信号模型,再利用仿真试验得到的数据,通过上文描述的评价方法建立仿真模型中的光电经纬仪跟踪伺服系统的跟踪误差等效模型,在完成对所建立的光电经纬仪跟踪伺服系统性能做出评价的同时完成了对评价方法的考评。

以目前广泛使用的 MathWorks 公司的 MATLAB/SIMULINK 软件,以某光电经纬仪伺服系统实际参数为基础进行仿真试验。首先建立动态靶标、等效正弦信号产生和光电经纬仪跟踪伺服系统的 SIMULINK 模型,模型如图 5 所示。图中,  $\omega t$  为动态靶标旋转角度信号, Model of target 为动态靶标信号产生模块,  $\varphi \sin(\omega' t)$  是等效正弦信号产生模块, 1, 2 为切换开关,  $n(k)$  为系统噪声信号序列, ZOH 为零阶保持器,  $Err(k)$  为跟踪误差序列,  $Z(k)$  为跟踪角度输出序列,  $G_p(s)$ 、 $G_v(s)$  分别为光电经纬仪伺服控制系统位置校正环节和速度校正环节,  $G_0(s)$  为速度回路控制对象特性。为与目前多数光电经纬仪电视传感器采样时间一致,采样时间为 0.02 s。

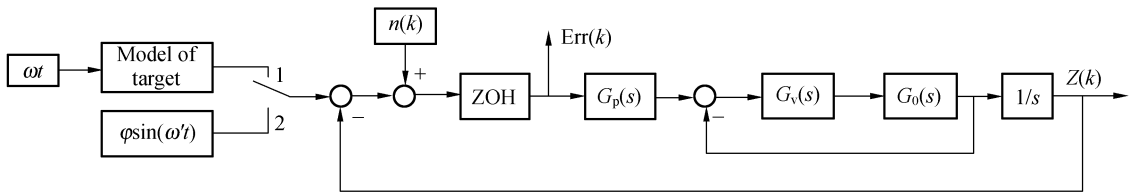


图 5 跟踪仿真模型框图

Fig. 5 Block diagram of emulation tracking model

测试流程:由动态靶标产生连续调频的方位角信号用于等效模型阶次、系数的辨识。由等效正弦信号和动态靶标匀速圆周运动信号分别输入到建立的跟踪误差等效模型和 SIMULINK 模型中,对比其输出对跟踪误差等效模型精度进行验证。

设置动态靶标调频参数,使  $\omega = 2\pi(0.04 + 0.0001t)$ ,将开关设置到 1 位置。为使模型估计误差不被噪声信号淹没,以观察误差变化规律,将噪声信号设置为 0。

利用图 5 仿真模型,仿真试验时有效时间选择 400 s,共获得样本数量 20 000 个,同时为防止相邻数据采样时间间隔太短而使数值计算出现病态<sup>[10]</sup>,进行了二次采样,使最终采样时间为 0.2 s,输入输出数据样本分别为 2 000 个。

首先要对模型阶次进行辨识。模型采用 FIR 滤波器结构,不存在由输出到输入的反馈<sup>[11]</sup>,此时需要较多的阶次才能满足辨识精度。通过实验,当  $n = 15$  时,  $H_L^T H_L$  为正则矩阵(可逆矩阵),且可获得较高的辨识精度。此时按式(11)计算模

型系数  $\hat{\psi}_{LS}$  如表 1。

表 1 等效模型系数

Tab. 1 Parameters of equivalent model

模型系数		模型系数	
$n_1$	1.195 2	$n_9$	55.334 0
$n_2$	-6.914 4	$n_{10}$	-37.231 6
$n_3$	19.841 1	$n_{11}$	21.007 2
$n_4$	-38.836 6	$n_{12}$	-9.562 6
$n_5$	58.904 0	$n_{13}$	3.288 1
$n_6$	-73.399 5	$n_{14}$	-0.756 3
$n_7$	77.501 1	$n_{15}$	0.087 0
$n_8$	-70.456 8		

将获得的模型系数  $\hat{\psi}_{LS}$  代入式(15)计算输出估计  $\hat{e}_L$ , 并根据式(16)计算出估计误差, 结果如图 6 所示。由图 6 可知, 建立的跟踪误差等效模型具有较高的精度, 完成了跟踪误差等效模型的建立。

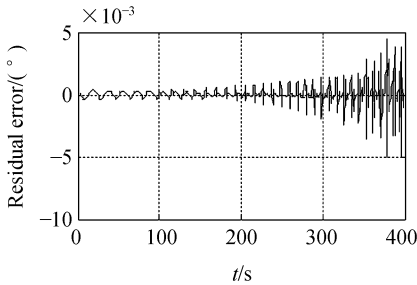


图 6 动态靶标连续调频信号估计误差曲线

Fig. 6 Estimate error curve of continuous FM signal of dynamic target

分别利用动态靶标匀速圆周运动模型和等效正弦模型验证了所建等效模型的准确性。

该光电经纬仪的最大速度和最大加速度指标分别为  $50(^{\circ})/s$  和  $30(^{\circ})/s^2$ 。根据图 5 的仿真结构, 将动态靶标模型设置为匀速圆周运动模式, 周期  $T=8.5 s$ , 获得跟踪系统输入信号和误差输出。将该信号输入到所建立的跟踪误差等效模型中得到模型估计输出, 由式(16)得到等效模型估计误差, 结果如图 7 所示。

估计误差均值  $= (5.723 8 \times 10^{-6})^{\circ} \approx 0^{\circ}$ , 均方差为  $4.7''$ 。动态靶标动态精度为  $5''$ , 而光电经纬仪跟踪误差一般要求其  $1' \sim 3'$ , 满足检测精度要求。

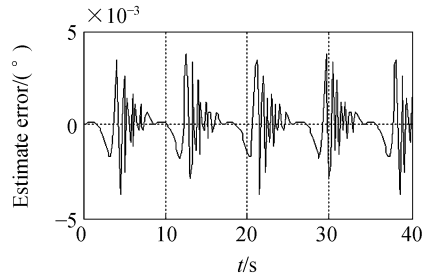


图 7 动态靶标单频信号估计误差曲线

Fig. 7 Estimate error curve of single frequency signal of dynamic target

根据式(17)得到等效正弦输入信号

$$\theta_1(t) = \varphi \sin(\omega't) = 1.454 4 \sin(0.6t)$$

按照同样的方法利用等效正弦信号进行验证, 其估计误差如图 8 所示。估计误差均值  $= (2.587 2 \times 10^{-6})^{\circ} \approx 0^{\circ}$ , 均方差  $= (3.061 6 \times 10^{-4})^{\circ} \approx 1.1''$ 。根据上述分析满足光电经纬仪检测要求, 并且在速度和加速度都满足指标的情况下, 效果优于动态靶标模型。

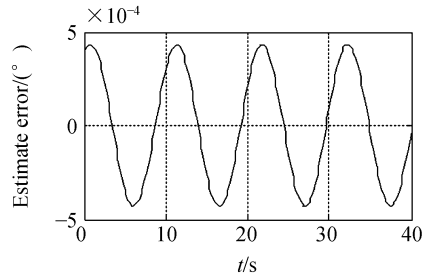


图 8 等效正弦信号估计误差曲线

Fig. 8 Estimate error curve of equivalent sine signal

采用两种输入信号测试发现建立的等效模型能够准确地反映光电经纬仪跟踪系统误差特性, 证明该方法可以用于跟踪性能的评价。

#### 4.2 评价方法的实验测试

按照上述方法对某光电经纬仪进行室内检测来验证该方法并对光电经纬仪跟踪性能做了评价。该光电经纬仪最大速度和最大加速度指标分别是  $35(^{\circ})/s$  和  $15(^{\circ})/s^2$ , 跟踪误差  $< 2'$ 。

利用动态靶标产生连续调频信号, 调频参数  $\alpha=0.251 3, \beta=0.001 9$ 。光电经纬仪跟踪动态靶标模拟目标得到的跟踪误差输出, 如图 4 所示。为降低实测跟踪误差噪声信号对模型系数辨识的干扰, 采用小波去噪法<sup>[12]</sup>进行了数据预处理。

利用预处理后的数据进行模型阶次和系数辨

识,其中阶次同样选择了 15 阶,模型系数  $\hat{\psi}_{LS}$  如表 2。

表 2 等效模型系数

Tab. 2 Parameters of equivalent model

模型系数		模型系数	
$n_1$	0.028 7	$n_9$	0.017 0
$n_2$	-0.011 7	$n_{10}$	0.007 8
$n_3$	-0.023 9	$n_{11}$	-0.006 8
$n_4$	-0.019 7	$n_{12}$	-0.017 2
$n_5$	-0.008 4	$n_{13}$	-0.021 7
$n_6$	0.006 3	$n_{14}$	-0.011 8
$n_7$	0.015 5	$n_{15}$	0.024 5
$n_8$	0.021 4		

这时估计误差如图 9。估计误差均值为  $-0.148 1''$ ,均方差为  $3.3''$ ,相对光电经纬仪跟踪误差指标而言,可以认为准确地建立了等效模型。

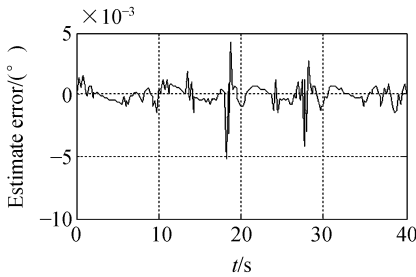


图 9 实测数据估计误差曲线

Fig. 9 Estimate error curve of experimental data

根据指标设计等效正弦输入信号

$$\theta_1(t) = \varphi \sin(\omega' t) = 0.855 2 \sin(0.714 3t),$$

利用上面建立的等效模型对跟踪性能做出评价,结果如图 10。跟踪误差最大值为  $1.43'$ ,满足设计指标要求。

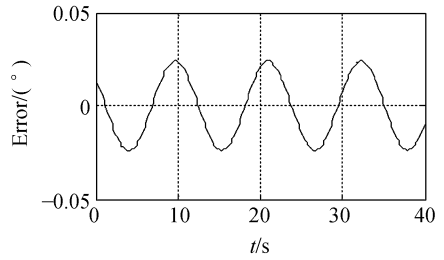


图 10 由跟踪误差等效模型获得的误差曲线

Fig. 10 Curve of equivalent tracking error obtained from equivalent model

### 5 结 论

本文提出了建立光电经纬仪跟踪误差等效模型,并利用等效模型来对光电经纬仪跟踪性能进行评价的新方法。该方法有效地结合了目前光学动态靶标检测法和等效正弦检测法,并互补了其缺陷,形成了一种新的跟踪性能评价策略。采用了文中方法对某型号光电经纬仪跟踪性能进行了评价测试,得到该光电经纬仪跟踪等效正弦信号的最大跟踪误差为  $1.43'$ ,满足最大跟踪跟踪误差  $2'$  的指标要求,给出了准确的评价结果,同时也验证了方法的可行性。限于目前的室内检测手段,文中将动态靶标目标信号看作理想状态建立了跟踪误差等效模型,而实际的靶标目标信号存在误差和噪声,因此,需要进一步对动态靶标目标信号进行误差分析和滤波去噪,以便得到更准确的跟踪误差等效模型。

### 参考文献:

[1] 何照才. 光电测量[M]. 北京:国防工业出版社, 2002:80-81.  
HE ZH C. *Photoelectricity Measure* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002:80-81. (in Chinese)

[2] 王建立. 光电经纬仪电视跟踪伺服系统捕获跟踪快

速运动目标技术的研究[D]. 长春:长春光机所, 2002.  
WANG J L. *Study on TV tracking system of O-E theodolite to track and acquire fast moving targets* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. 2002. (in Chinese)

[3] 李文军,陈涛. 光电跟踪系统噪声分析及其抑制[J].

光学精密工程,2007,15(2):254-260.

LI W J, CHEN T. Analysis and restraining of random noise of optoelectronic tracking system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 254-260. (in Chinese)

- [4] 吴今培. 系统辨识[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994:168-170.

WU J P. *System Identification* [M]. Beijing: China Railway Publish House, 1994:168-170. (in Chinese)

- [5] 方崇智, 萧德云. 过程辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007:134-137.

FANG CH ZH, XIAO D Y. *Process Identification* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007:134-137. (in Chinese)

- [6] 丁峰, 杨慧中, 纪志成. 时变系统辨识方法及其收敛定理[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2006, 5(1): 115-126.

DING F, YANG H ZH, JI ZH CH. Time-varying system identification methods and convergence theorems[J]. *Journal of Southern Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2006, 5(1): 115-126. (in Chinese)

- [7] SUZUKI H, SUGIE T. Optimal input design for system identification in the presence of undermodeling [C]. *46th IEEE CDC, New Orleans, USA, DEC. 12-14, 2007*:5522-5527.

- [8] 张波, 贺庚贤, 沈湘衡. 可编程动态旋转靶标标定方

法[J]. 光学精密工程, 2003, 11(2):176-180.

ZHANG B, HE G X, SHEN X H. Calibration of programmable dynamic target [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(2): 176-180. (in Chinese)

- [9] 张宁, 沈湘衡. 基于等效正弦、等效目标的直线动态靶标建模[J]. 激光与红外, 2008, 38(2):154-157.

ZHANG N, SHEN X H. Modeling of linear dynamic target based on equivalent sine curve and equivalent target [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(2):154-157. (in Chinese)

- [10] 孟中, 张涛, 郑秀筠, 等. 正交基函数多项式实时拟合在轴角编码器测速中的应用[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2):303-307.

MENG ZH, ZHANG T, ZHENG X J, et al.. Application of real time polynomial fitting based on orthogonal basis function algorithm to encoder rate measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):303-307. (in Chinese)

- [11] AGÜERO J C, GOODWIN G C. Choosing between open-and closed-loop experiments in linear system identification [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(8).

- [12] 付明. 小波变换在信号降噪中的应用研究[J]. 微计算机信息, 2008, 24(1-1):237-238.

FU M. The application of decreasing noise by wavelet transform [J]. *Microcomputer Information*, 2008, 24(1-1):237-238. (in Chinese)

#### 作者简介:



张宁(1982-),男,山东安丘人,博士研究生,主要研究方向为光电测量设备动态特性检测。Email: ning0025@163.com



杨亮(1981-),女,吉林松原人,博士研究生,主要研究方向为光电设备的精度检测。Email: yangliang1220@163.com

#### 导师简介:



沈湘衡(1952-),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事光电测量设备精密检测技术的研究。Email: shenxiangheng@yahoo.com.cn