

# 基于等效正弦、等效目标法的直线动靶标建模

张宁<sup>1,2</sup>, 沈湘衡<sup>1</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:**以等效正弦法、等效目标法检测原理为基础,根据光电经纬仪伺服系统动态性能室内检测的需求,设计了能够提供标准正弦和等速直线目标的直线动靶标检测装置。对直线动靶标运动进行了数学建模和靶标速度、加速度最值计算,并对给出的直线动靶标的结构组成和设计进行了可行性探讨。

**关键词:**等效正弦;等效目标;直线动靶标;数学模型

**中图分类号:**TH741.1<sup>+2</sup> **文献标识码:**A

## Modeling of Linear Dynamic Target Based on Equivalent Sine Curve and Equivalent Target

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

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The linear dynamic target (LDT) is designed according to the need of indoor checking and testing for the dynamic characteristic of photoelectric theodolite tracking system, based on the theory of equivalent sine and equivalent target. LDT can offer standard sine optic target and liner optic target which speed is constant. The mathematical model and the max of target's speed and acceleration is gived. In this paper, LDT's structure and method of design also is discussed.

**Key words:** equivalent sine; equivalent target; linear dynamic target (LDT); mathematical model

### 1 前言

在光电经纬仪动态性能室内检测过程中,等效正弦法和等效目标法是检测伺服系统跟踪精度中非常实用的工程方法<sup>[1]</sup>,但目前没有能够提供用于光电经纬仪检测的标准正弦和等速直线目标的检测装置,只能通过计算机引导光电经纬仪仿真实现。但由于不经过电视、红外等跟踪传感器,无法检测电视、红外等跟踪器的性能,因此无法真实反映系统的动态性能。

本文以等效正弦、等效目标检测法为理论基础,提出了通过一个无穷远光学目标按照检测指标做往

复直线运动来产生标准正弦和等效目标信号的一维直线动靶标模型。直线动靶标按照设定的参数通过直线运动和角度调整来合成一个标准正弦或等速直线运动目标,光电经纬仪通过跟踪该目标来完成伺服性能指标的检测。靶标角度实时调整的目的是使靶标目标的光线方向和光电经纬仪主光轴始终在同一条直线上,保证光电经纬仪能够对准目标。通常情况下光电经纬仪方位伺服系统跟踪指标要高于俯

作者简介:张宁(1982-),男,博士研究生,主要研究方向为光电测量设备精密检测技术。E-mail:ning0025@163.com  
收稿日期:2007-09-17

仰伺服系统,同时为降低直线动靶标运动复杂度和研制难度,本文只研究靶标和光电经纬仪三轴交点<sup>[2]</sup>在同一水平面上这一特殊情况,也即该装置主要对光电经纬仪方位系统进行检测。

文中主要阐述了等效正弦法和等效目标法<sup>[3]</sup>的检测原理,根据检测原理提出了能够同时提供标准正弦目标和等速直线目标的直线动靶标,并对直线动靶标的数学模型做了详细的分析,同时为靶标的研制提供了理论依据和研制方案及主要参考数据。这种检测方法的提出解决了目前无法提供标准正弦目标和等效目标的困难,同时将两种目标在同一靶标上实现,避免了设备重复研制和使用效率低下的问题。

### 2 等效正弦法检测原理

对于任何运动轨迹都可以用傅里叶分析分解成若干个正弦曲线,所以可以用一个或几个正弦运动代替目标运动。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  $\theta_1(t)$ ,用来检测伺服系统跟踪精度,即:

$$\theta_1(t) = \theta_{\max} \sin(\omega_1 t) \quad (1)$$

其中,等效正弦振幅为:  $\theta_{\max} = \frac{\dot{\theta}_{\max}^2}{\ddot{\theta}_{\max}}$ ; 等效正弦的角频率为  $\omega_1 = \frac{\ddot{\theta}_{\max}}{\dot{\theta}_{\max}}$ ; 周期为  $T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1}$ 。显然,  $\theta_1(t)$  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,能够对光电经纬仪的伺服系统动态性能进行检测。

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,能够对光电经纬仪的伺服系统动态性能进行检测。

### 3 等效正弦模式下靶标模型建立<sup>[4-5]</sup>

如图 1 所示,  $O$  点为直线动靶标的中点,  $O'$  点是光电经纬仪三轴的交点,  $O$ 、 $O'$  在同一水平面内。  $T$  是直线动靶标的模拟无穷远光学目标,根据需要可采用可见或红外光源。  $MN$  为目标  $T$  沿  $x$  轴作往复直线运动的范围,其长度设为  $2D$ ,任一时刻目标距  $O$  点的距离为  $d$ ,并规定沿  $x$  方向在  $O$  点的右侧为正,左侧为负(这里只是为了表示方便,无实际意

义)。光电经纬仪到直线动靶标目标的距离为  $L$ ,  $L$  的长度根据待检测光电经纬仪的焦距、最大速度、加速度,以及设备尺寸等要求具体设定,一般在  $2000 \sim 3000\text{mm}$ 。光电经纬仪的方位角为  $A$ ,直线动靶标目标  $T$  调整角度为  $\alpha$ 。  $O'T$  为光电经纬仪主光轴的方向。

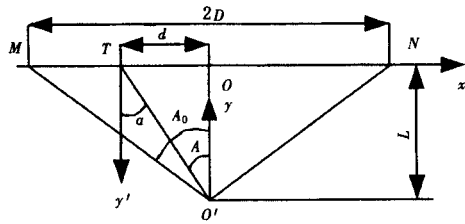


图 1 等效正弦模式下直线动靶标和光电经纬仪位置关系

根据等效正弦法的检测原理,当目标作正弦运动时,光电经纬仪的方位角  $A = A_0 \sin(\omega t)$ 。其中,

$$A_0 = \frac{\dot{\theta}_{\max}^2}{\ddot{\theta}_{\max}}, \omega = \frac{\ddot{\theta}_{\max}}{\dot{\theta}_{\max}}, \dot{\theta}_{\max} \text{ 和 } \ddot{\theta}_{\max} \text{ 分别为光电经纬仪的最大速度和最大加速度。}$$

靶标通过往复直线运动产生正弦目标,同时为使光电经纬仪的传感器接收到目标,要求目标光线方向和光电经纬仪主光轴在一条直线上,需要对目标光线方向实时调整,使之始终指向光电经纬仪三轴的交点。因此,靶标的目标运动模型由直线运动和角度调整两部分构成。

#### 3.1 靶标直线运动部分的数学模型

由图 1,利用三角公式得到目标直线运动的数学模型为:

$$d = L \tan A = L \tan(A_0 \sin \omega t) \quad (2)$$

对  $d$  求导得目标运动的速度  $\dot{d}$ ,对速度  $\dot{d}$  求导的目标的加速度  $\ddot{d}$ ,即:

$$\dot{d} = \frac{dd}{dt} = \frac{A_0 \omega L \cos \omega t}{\cos^2 A} \quad (3)$$

$$\ddot{d} = \frac{d^2 d}{dt^2} = \frac{2A_0^2 \omega^2 L \tan A \cos^2 \omega t - \omega^2 L A}{\sec^2 A} \quad (4)$$

当目标位置位于  $O$  点处有最大速度  $\dot{d}_{\max}$ ,此时  $\omega t = 2n\pi$ ,其中  $n$  为正整数。

$$\dot{d}_{\max} = \frac{A_0 \omega L \cos \omega t}{\cos^2 A} \Big|_{\omega t = 2n\pi} = A_0 \omega L \quad (5)$$

当目标位置位于两端时有最大加速度  $\ddot{d}_{\max}$ :

$$\ddot{d}_{\max} = \frac{2A_0^2\omega^2 L \tan(A) \cos^2 \omega t - \omega^2 LA}{\sec^2(A)} \Big|_{\omega t = 2n\pi \pm \frac{\pi}{2}} = \frac{A_0\omega^2 L}{\cos^2 A_0} \quad (6)$$

此时,  $\omega t = 2n\pi \pm \frac{\pi}{2}$ , 其中  $n$  为正整数。

### 3.2 靶标角度调整部分的数学模型

靶标角度调整与光电经纬仪光轴关系如图2所示。

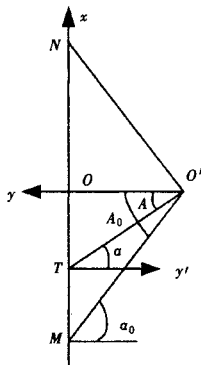


图2 目标角度调整部分与光电经纬仪角度关系

$A$  为光电经纬仪方位角,  $\alpha$  为靶标角度调整机构调整角度, 则:

$$\alpha = A_0 \sin \omega t \quad (7)$$

靶标角度调整机构的角速度  $\dot{\alpha}$ , 角加速度  $\ddot{\alpha}$  为:

$$\dot{\alpha} = A_0 \omega \cos \omega t \quad (8)$$

$$\ddot{\alpha} = -A_0 \omega^2 \sin \omega t \quad (9)$$

靶标角度调整的最大角速度  $\dot{\alpha}_{\max}$ , 最大角加速度  $\ddot{\alpha}_{\max}$ , 取得最大调整角速度和角加速度的位置、时刻与直线运动部分相同:

$$\dot{\alpha}_{\max} = A_0 \omega \cos \omega t \Big|_{\omega t = 2n\pi} = A_0 \omega \quad (11)$$

$$\ddot{\alpha}_{\max} = -A_0 \omega^2 \sin \omega t \Big|_{\omega t = 2n\pi \pm \frac{\pi}{2}} = A_0 \omega^2 \quad (12)$$

靶标直线运动部分的数学模型由式(2)、(3)、(4)即可得出, 通过式(5)、(6)确定了运动的速度、加速度最大值, 直线运动的幅值就是直线动靶标直线导轨长度的一半, 即  $D$ 。角度调整部分角度变化和光电经纬仪方位角变化相等。当待检光电经纬仪指标确定时, 角度调整部分即为确定。

### 4 等效目标法原理和靶标模型

目标  $T$  沿  $x$  方向作等速直线运动,  $O'$  点是光电经纬仪所在位置, 目标从  $O$  点开始做等速直线运动, 速度为  $v$ , 到  $P$  点结束, 总距离为  $S$ , 航路捷径  $L$ , 如图3所示。

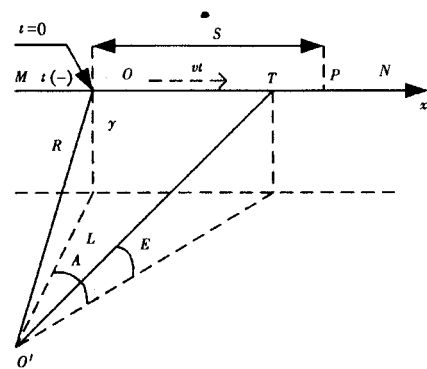


图3 目标作水平直线飞行时与光电经纬仪的位置关系

则目标的方位角  $A$ 、角速度  $\dot{A}$ 、角加速度  $\ddot{A}$  分别为:

$$A = \arctan \frac{vt}{L} \quad (13)$$

$$\dot{A} = \frac{dA}{dt} = \frac{v}{L} \cos^2 A \quad (14)$$

$$\ddot{A} = \frac{d^2 A}{dt^2} = -\frac{v^2}{L^2} \sin 2A \cos^2 A \quad (15)$$

本文为简化模型, 设目标的俯仰角为零, 只考虑目标的方位角。则直线动靶标和光电经纬仪的位置关系如图4所示。

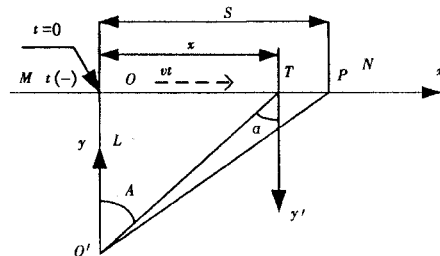


图4 俯仰角为零时等速目标与光电经纬仪的位置关系

目标  $T$  距  $O$  的距离为  $x$ , 则靶标直线运动部分的模型为  $x = vt$ 。靶标角度调整机构方位角调整  $\alpha$ ,  $\alpha = A$ 。上面已经写出, 这里省略。

当  $\alpha = 0^\circ$  时, 有最大调整角速度  $\dot{\alpha}_{\max}$ :

$$\dot{\alpha}_{\max} = \frac{d\alpha}{dt} \Big|_{\alpha=0} = \frac{v}{L} \cos^2 \alpha \Big|_{\alpha=0} = \frac{v}{L} \quad (16)$$

当  $\alpha = 30^\circ$  时, 有最大调整角加速度  $\ddot{\alpha}_{\max}$ :

$$\ddot{\alpha}_{\max} = \frac{d^2 \alpha}{dt^2} \Big|_{\alpha=\frac{\pi}{6}} = -\frac{v^2}{L^2} \sin 2\alpha \cos^2 \alpha \Big|_{\alpha=\frac{\pi}{6}} = -\frac{3\sqrt{3}v^2}{8L^2} = -0.64951095 \frac{v^2}{L^2} \quad (17)$$

按等效目标模式检测时, 靶标直线运动部分模型简单, 就是做等速直线运动, 运动速度根据不同的检测指标具体设定。运动距离受导轨长度限制, 本

文中设距离为  $S$ 。角度调整公式和光电经纬仪方位角变化一致,由式(13)、(14)、(15)即可得到。

### 5 直线动靶标模型最值分析与结构组成

根据目前某些光电经纬仪跟踪伺服系统的技术指标,采用本文上面提出的等效正弦模式下直线动靶标的数学模型进行分析计算。根据光电经纬仪室内检测需求,对直线动靶标的尺寸、构成等数据进行了设计。当  $L=2000\text{mm}$ ,  $D=2000\text{mm}$  和  $3000\text{mm}$  时利用上文的结论,求得了目标做标准正弦运动的幅值和角频率以及靶标直线运动、角度调整的最大速度和最大加速度等,如表1、表2中所示。

表1  $L=2000\text{mm}$ ,  $D=3000\text{mm}$  时靶标运动最值

待检设备最大角速度 /( $^{\circ}\text{s}^{-1}$ )	待检设备最大角加速度 /( $^{\circ}\text{s}^{-2}$ )	正弦运动幅值 /( $^{\circ}$ )	正弦运动角频率/Hz	最大直线速度 /( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	最大直线加速度 /( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	最大调整角速度 /( $^{\circ}\text{s}^{-1}$ )	最大调整角加速度 /( $^{\circ}\text{s}^{-2}$ )
25	45	13.89	1.8	1.3090	2.5002	25	45
30	60	15	2	1.0472	2.2448	30	60
35	45	27.22	1.2857	1.2217	1.9864	35	45
35	50	24.5	1.4286	1.2217	3.3464	35	50
50	50	50	1	1.7453	4.2242	50	50
50	80	31.25	1.6	1.7453	3.8208	50	80
70	80	61.25	1.1428	2.4435	12.0701	70	80

表2  $L=3000\text{mm}$ ,  $D=3000\text{mm}$  时靶标运动最值

待检设备最大角速度 /( $^{\circ}\text{s}^{-1}$ )	待检设备最大角加速度 /( $^{\circ}\text{s}^{-2}$ )	正弦运动幅值 /( $^{\circ}$ )	正弦运动角频率/Hz	最大直线速度 /( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	最大直线加速度 /( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	最大调整角速度 /( $^{\circ}\text{s}^{-1}$ )	最大调整角加速度 /( $^{\circ}\text{s}^{-2}$ )
25	45	13.89	1.8	1.3090	2.5002	25	45
30	60	15	2	1.5708	3.3671	30	60
35	45	27.22	1.2857	1.8326	2.9797	35	45
35	50	24.5	1.4286	1.8326	5.0195	35	50
50	50	50	1	2.6180	6.3362	50	50
50	80	31.25	1.6	1.8326	5.7312	50	80
70	80	61.25	1.1428	3.6652	18.1058	70	80

通过计算,等效正弦的最大幅值超过  $60^{\circ}$ ,目标直线运动的速度一般在  $1\sim 3\text{m/s}$ ,加速度  $2\sim 6\text{m/s}^2$ ,速度特别是加速度变化非常大,而且随着光电经纬仪型号的不同变化很大。作为一种通用检测设备,不可能为每种型号的光电经纬仪研制配套的检测设备(另作要求除外)。因此要求直线运动部分具有高速、高加速度特点。但是,有些光电经纬仪也会以

低速、超低速工作,直线动靶标也需要具有较好的低速、超低速平滑特性。

综上所述,直线运动部分采用直线电机滑台作为驱动装置和运动导轨,并配有光栅尺<sup>[6]</sup>,作为距离、速度检测机构。直线电机采用长定子短动子结构,具有高效、定位精度高的优点。定子轨道可以按需要连接,理论上电机长度不限,所以直线动靶标目标直线运动部分的距离可以无限长(实际还受光栅尺限制)。控制方式采用多闭环控制,常用的有PID控制、矢量控制、解耦控制<sup>[7]</sup>。

角度调整部分原理与精密转台原理一致<sup>[8]</sup>,驱动采用力矩电机,光电编码器作为调整角度、角速度检测机构。无穷远光学目标由平行光管提供,目标光源根据需要可以是可见光源或红外光源。并配有计算机用于完成对装置的实时控制、数据处理和与被检测设备的通讯等。另外,直线动靶标还配有支撑、升降、调平、限位等装置,这里不再详述。

### 6 结论

本文提出了直线动靶标检测装置。主要对等效正弦法、等效目标法的原理做了阐述,并据此得出了直线动靶标的数学模型。根据目前国内光电经纬仪的指标,利用目标的数学模型得出靶标直线运动和角度调整的最大速度、加速度值和进行了方案可行性论证。

### 参考文献:

- [1] 周建军. 光电经纬仪伺服系统室内检测方法研究[J]. 导弹测试技术, 2005, 4: 24 - 26.
- [2] 何照才. 光电测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 36 - 37.
- [3] 尹义林. 经纬仪跟踪控制系统主要性能指标提出的依据[J]. 光电工程, 1999, 2: 1 - 4.
- [4] Chen Juan, Huang Yangqiu. The real-time guide data fusion for an optoelectronic TH eodolite [J]. SPIE, 2004, 5434: 372 - 379.
- [5] 王建立, 陈涛, 陈娟, 等. 提高光电经纬仪跟踪快速运动目标能力的一种方法[J]. 光电工程, 2002, 1: 34 - 37.
- [6] 张百海, 柴森春, 贾媛媛, 等. 数据采集系统中光栅尺信号处理方法的研究[J]. 机床与液压, 2003, 2: 118 - 119.
- [7] 胡耀斌, 余明亮, 陈艾华. 直线驱动关键技术问题及其解决对策[J]. 机电工程, 2007, 24(1): 68 - 70.
- [8] 姬伟, 李奇, 杨海峰, 等. 精密光电跟踪转台的设计与伺服控制[J]. 光电工程, 2006, 33(3): 11 - 16.