

# 动目标空间位置精度测量系统设计

杨亮<sup>1\*</sup>, 张宁<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup>辽东学院信息工程学院, 辽宁 丹东 118003;

<sup>2</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间光学研究三部, 吉林 长春 130033

**摘要** 提出了一种动目标空间位置精度的测量方法, 并建立了一套测量系统。该系统采用非接触式测量方法, 实现了动目标空间位置精度的测量。利用被测目标与测量系统的空间关系, 确定测量系统的状态参数, 根据该参数得到动目标在运动状态下的理论位置。将理论位置与被测目标实测位置进行比对, 得到动目标的动态精度。分析了空间位置精度测量系统的各个误差源, 得到该系统的总误差小于  $1.00''$ , 满足测量系统的设计要求。利用该系统对某动态靶标进行动态精度测量, 实验结果表明: 该动态靶标以低速、中速及高速在不同空间位置运动时, 最低动态精度为  $4.13''$ , 符合设计指标小于  $5''$  的要求。

**关键词** 测量; 非接触式; 测量系统; 动目标; 动态精度; 空间位置

中图分类号 TB872

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1304001

## 1 引言

光电经纬仪的主要动态性能指标是动态跟踪精度和动态测量精度<sup>[1]</sup>。其靶场检测即空中飞行目标的跟踪通常消耗大量的人力和物力, 因此通常利用室内的空间动态靶标来完成。

动态靶标可模拟远距离的空间运动物体, 并能够提供实时的空间位置信息。利用该设备能够对光电经纬仪等目标跟踪设备进行室内的过程检验和最终检验, 从而分析目标跟踪设备的动态跟踪性能。

随着科技的发展, 光电经纬仪的性能得到逐步提高, 动态靶标由传统简易的旋转动目标发展为高精度的动态目标, 跟踪检测设备也发展为跟踪测量设备, 这就要求动目标的空间位置是精确已知的。

动态靶标的空间位置精度分为静态精度和动态精度。其中, 静态精度是通过 Leica 全站仪进行测量, 测量精度达到  $0.5''$ 。目前, 可参考的动态精度检测方法主要有跟踪法、视频判读法和自准直仪检测方法。跟踪法是通过在动态靶标的光锥顶点处放置一台具有跟踪测量功能的高精度经纬仪, 实时记

录并输出测量结果。其缺点是跟踪速度慢, 精度低, 仪器价格昂贵, 动辄数百万元, 且建立时间同步控制时, 还需对相关设备的接口进行改造, 因此不适用于靶标的动态精度检测<sup>[2]</sup>。视频判读法是通过视频图像记录靶标的运动轨迹, 在多圈扫描过程中, 因扫描时刻不同, 形成了多条不同的运动轨迹, 对这些运动轨迹的数据进行处理, 得到靶标的动态空间角位置变化规律, 从而测量出靶标的动态精度。该方法采样速度慢, 基准位置判定误差大, 测量精度低。自准直仪检测方法是在动态靶标轴系端面上安置一平面反射镜, 当靶标运动时, 利用自准直仪采集靶标的轴系晃动量, 并对数据进行处理。该方法能够检测出由轴系晃动以及旋转臂变形引入的动态误差, 具有一定的参考价值, 但不能综合给出靶标的动态精度<sup>[3-4]</sup>。目前缺少一种有效的动态靶标的动态精度测量手段。

本文提出了一种动态目标空间位置精度的非接触式测量方法。该方法采用计算机视觉技术, 利用高速摄像机拍摄整个视场中动目标的运动轨迹, 记录信息并反演实际空间位置, 得到客观的目标空间

收稿日期: 2020-11-17; 修回日期: 2020-12-10; 录用日期: 2021-01-08

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61905243, C0029803)、辽宁省教育厅服务地方项目(LNSJYT202003)

通信作者: \*yangliang1220@163.com; \*\*ning0025@163.com

位置信息。基于该测量方法设计了一套空间位置精度测量系统。将该系统与动目标设备组成测量平台，通过分析动目标与高速摄像机的空间坐标关系，给出摄像机状态参数的标定方法，并确定目标的理论空间位置。通过对比理论位置与被测目标的实测位置，实现目标的动态精度测量。该测量方法具有非接触、高精度等优点，且从客观角度测量运动目标。

## 2 动态靶标的工作原理

动态靶标是一个在室内模拟空间运动目标的装置<sup>[5]</sup>。它的工作原理如图 1 所示。

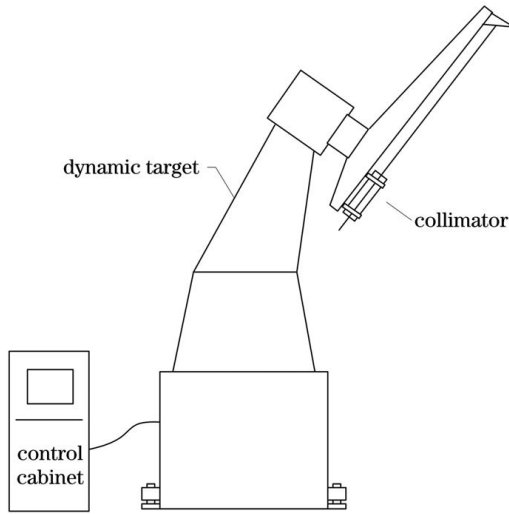


图 1 动态靶标示意图

Fig. 1 Schematic of dynamic target

动态靶标的主要组成部分是平行光管、反射镜、旋转臂、支撑架和控制柜等。平行光管发出的平行光可以模拟无穷远处的空间飞行目标。平行光管被固定在旋转臂上，电机转动带动该旋转臂，通过改变电机的转速，实现室内不同空间运动目标的模拟<sup>[2-3]</sup>。

## 3 空间位置精度测量系统的设计

### 3.1 空间位置精度测量系统的硬件构成

本文提出的空间位置精度测量系统主要由光学镜头、高速摄像机、支撑架、变频控制分系统和主控计算机等组成。

光学镜头选用适马变焦镜头，焦距为 150 ~ 500 mm，其主要作用是将被测目标成像在高速摄像机的接收面上；高速摄像机选用加拿大 Mega Speed 公司生产的 MS50K，其能够快速抓取高速运动的空间目标，并以数字图像的方式记录，曝光时间达到 2 μs；支撑架用于稳定地支撑光学镜头和高速摄像机，并调整高速摄像机的指向角度；变频控制分系统可对采样信号进行分频处理，并控制高速摄像机采样；主控计算机用于控制高速摄像机并对图像及相关数据进行处理。

将空间位置精度测量系统与动态靶标组合成一个测量平台。该平台的组成结构如图 2 所示，上部分是空间位置精度测量系统的主要硬件结构，下部分是动态靶标的主要硬件结构，其中 BCD 为二进制编码的十进制。

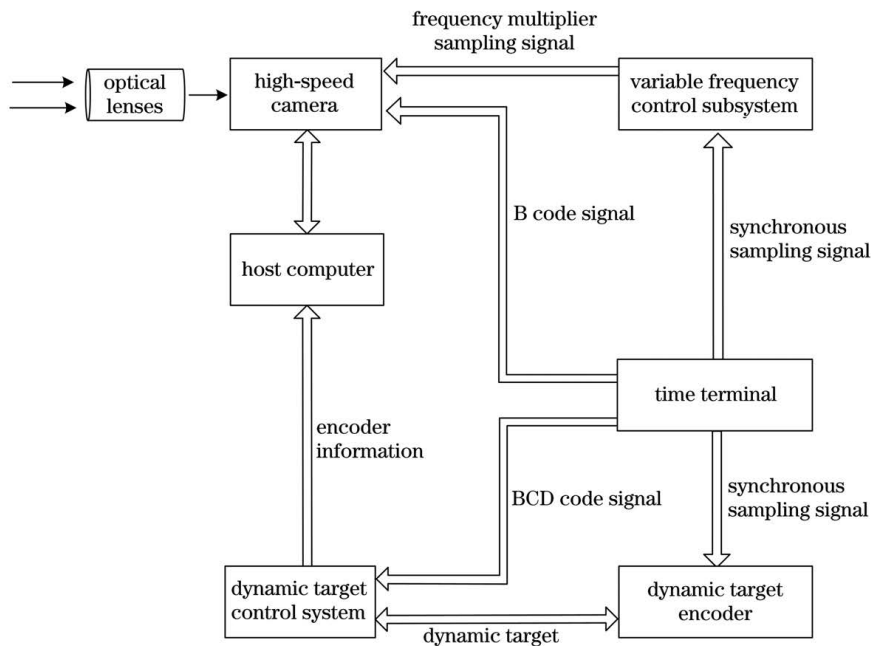


图 2 测量平台的结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of measurement platform

测量平台以动态靶标的全球定位系统/B 码 (GPS/B) 时统终端作为时间基准信号, 该时统终端向被测设备和测量设备同时发出统一的时间基准信息和同步信号, 即将 B 码形式的时间基准信息发送给测量设备中的高速摄像机, 将 BCD 码形式的十进制时间基准信息发送给被测设备动态靶标控制系统。对于被测设备——动态靶标, 其内部编码器接收同步信号后将当前时刻编码器的数据发送给靶标的主控计算机, 主控计算机将编码器数据处理为角度值并记录, 同时记录相应的时间数据。对于测量设备——空间位置精度测量系统, 其变频控制系统将接收的同步信号进行倍频和脉宽调整

处理, 处理后的信号发送到高速摄像机外触发信号的输入端, 高速摄像机同时接收时统终端发出的时间基准信息。测量系统的主控计算机控制高速摄像机的工作方式和工作状态, 并存储高速摄像机录取的图像信息和时间信息, 结合靶标主控计算机记录的靶标编码器角度值和时间信息, 通过处理可得到所测区间内目标运动轨迹上任意空间位置的真值。

### 3.2 空间位置精度测量系统的工作原理

为了测量动目标在运动状态下的位置精度, 首先建立该目标与空间位置精度测量系统的对应关系, 如图 3 所示。

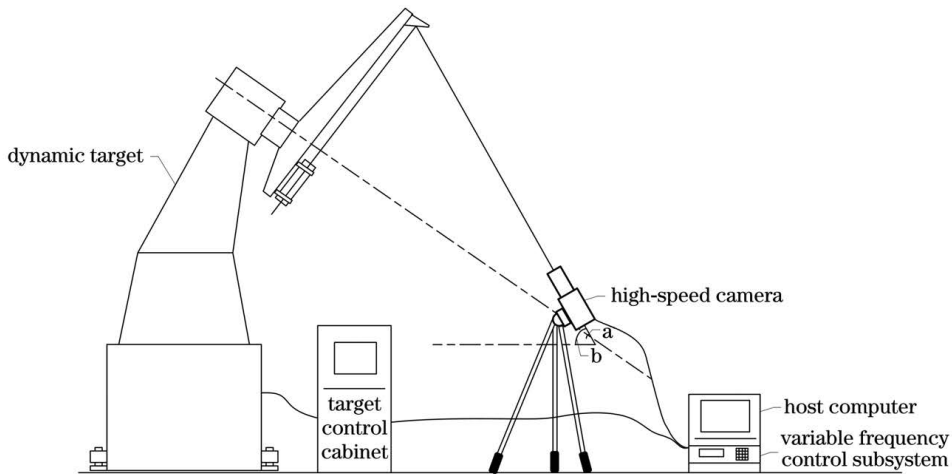


图 3 测量系统示意图

Fig. 3 Schematic of measurement system

图 3 左侧为被测设备——动态靶标, 右侧为测量设备——空间位置精度测量系统。测量前将高速摄像机与光学镜头安装在支撑架上, 调整高速摄像机的水平、竖直方向角度并固定。在测量过程中, 动目标通过光学镜头成像在高速摄像机的接收面上, 被测设备的时统终端发出同步信号, 经测量系统的变频控制分系统倍频处理后触发高速摄像机, 高速摄像机摄录动目标的图像信息。

高速摄像机在测量过程中是处于凝视状态的, 单次测量只能局限于目标运动轨迹的一部分。因此, 在测量过程中需要将目标的运动轨迹分成多个测量区间。

单区间的测量步骤如下。

1) 对动目标进行静态精度测量。记录静态精度测量结果。

2) 以动目标静态精度测量后的目标静态点为基准点, 高速摄像机接收基准点, 记录每个基准点在像面上的坐标值以及相对应的靶标编码器提供的目

标空间角度值。根据摄像机的外部状态参数标定方法确定参数值, 建立像面坐标与目标空间角的对应关系, 如图 4 所示, 其中  $S_1 \sim S_8$  为基准点。

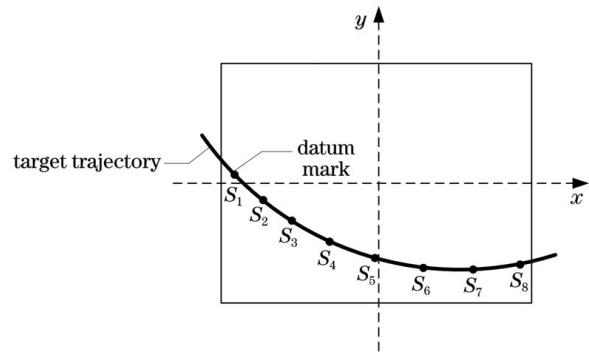


图 4 目标运动轨迹

Fig. 4 Target motion trajectory

3) 时统终端与测量设备的变频控制分系统控制高速摄像机的曝光时间及曝光频率, 使之与靶标编码器采样时刻同步。动目标以设定的速度旋转, 目标进入高速摄像机的视场, 通过高速摄像机的外

触发功能,接收采样控制信号并录取图像,记录目标的运动轨迹,并重复记录多组图像。

4) 通过图像处理,解算出每个目标图像在像面上的坐标值,并转换为目标在像面上的偏转角。建立动态状态下目标在像面上的偏转角与靶标编码器提供的角度值的对应关系,如图 5、6 所示,其中  $\theta$  为靶标编码器提供的角度值,  $\Delta A$  为目标在像面上对应的水平偏转角,  $\Delta E$  为目标在像面上对应的垂直偏转角。

5) 通过数据处理,确定靶标在该点的动态精度。

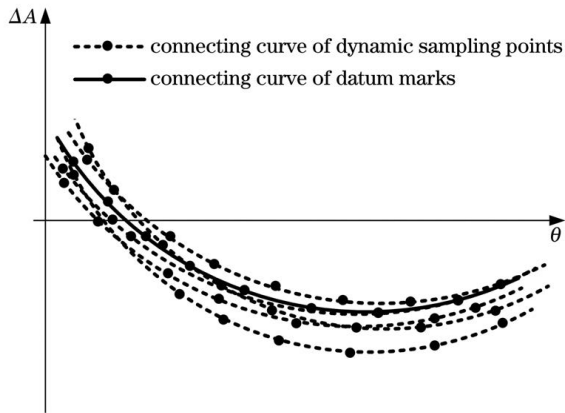


图 5  $\theta$  与  $\Delta A$  的对应关系

Fig. 5 Corresponding relation between  $\theta$  and  $\Delta A$

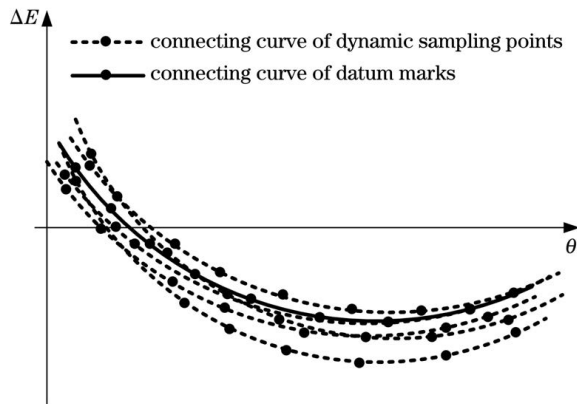


图 6  $\theta$  与  $\Delta E$  的对应关系

Fig. 6 Corresponding relation between  $\theta$  and  $\Delta E$

## 4 摄像机状态参数的标定方法

为了测量动目标在运动状态下的空间位置,首先要确定其在任意时刻的理论位置。因此需要建立目标在空间的运动轨迹与像面坐标系的空间位置关系。

### 4.1 动目标的空间坐标

图 7 为动态靶标提供的动目标在空间运动时的坐标图。动目标  $P_1$  以空间某一特定位置  $R$  为圆

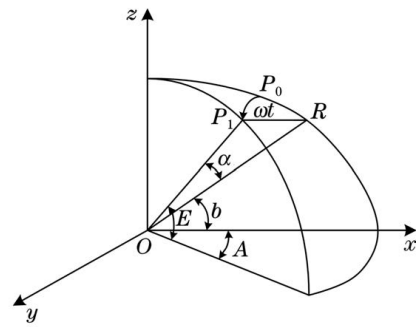


图 7 动目标的空间运动坐标

Fig. 7 Space motion coordinates of dynamic target

心,以直线  $OR$  为旋转的轴线,在与  $OR$  相垂直的平面上旋转。 $P_1$  点的出射光形成以  $O$  点为顶点的光锥, $O$  点是光锥的顶点。

$\alpha$  为  $P_1$  点出射光与旋转轴  $OR$  的夹角,即光锥的半锥角; $b$  为旋转轴线  $OR$  与水平面的夹角; $A$ 、 $E$  分别为  $P_1$  点出射光的方位角和俯仰角。

以  $P_0$  作为动目标旋转零点,目标从  $P_0$  运动到  $P_1$  点时,相对于旋转轴线的转角为  $\theta$ ,  $\theta = \omega \times t$ ,其中  $\omega$  为匀速运动的角速度, $t$  为目标运动所用的时间。根据球面三角定理<sup>[1,6]</sup>,有

$$\sin E = \cos a \cdot \sin b + \sin a \cdot \cos b \cdot \cos \theta, \quad (1)$$

$$\sin A = \frac{\sin a \cdot \sin \theta}{\cos E}. \quad (2)$$

### 4.2 像面坐标与动目标坐标的关系

如图 8 所示,  $P_1$  是被测目标的空间位置;  $P$  是被测目标在像面上的像点;  $O_2$  是像面坐标系的原点;  $O_2O_1$  是高速摄像机光学系统的主光轴,  $O_2O_1$  所对应的空间角度为  $A_k$ 、 $E_k$ ,即摄像机的方位角和俯仰角;  $O_0P_1$  是跟踪观测线,其对应的角度为  $A$ 、 $E$ ;  $Q$  是像面所在的平面;  $Q_1$  是过目标点  $P_1$  且与  $Q$  面平行的平面;  $O_0O$  是测量系统的焦距  $f$ ;  $Q_0$  是过  $O_0$  且与水平面平行的平面;  $M$ 、 $N$  为  $P$  在像面  $Q$  坐标系中的坐标;  $O_2$ 、 $P$ 、 $M$ 、 $N$  在平面  $Q_0$  上的投影点分别记为  $O'$ 、 $P'$ 、 $M'$ 、 $N'$ ;  $P_1$  在平面  $Q_1$  坐标系中的坐标记为  $M_1$ 、 $N_1$ ;  $O_1$ 、 $P_1$ 、 $M_1$ 、 $N_1$  在平面  $Q_1$  上的投影点分别记为  $O'_1$ 、 $P'_1$ 、 $M'_1$ 、 $N'_1$ <sup>[7-8]</sup>。

$$A_k = A - \Delta A, \quad (3)$$

$$E_k = E - \Delta E, \quad (4)$$

$$\tan \Delta A = \frac{X}{f \cos E_k - Y \sin E_k}, \quad (5)$$

$$\sin E = \frac{f \sin E_k + Y \cos E_k}{(f^2 + X^2 + Y^2)^{\frac{1}{2}}}, \quad (6)$$

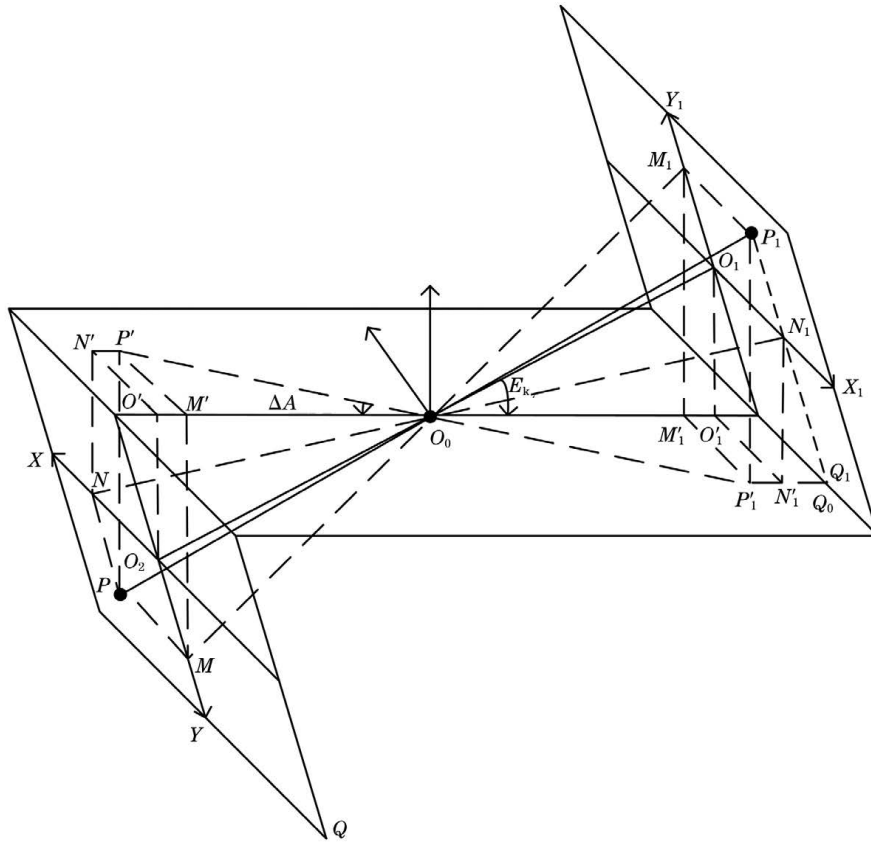


图 8 像面坐标与动目标坐标的关系

Fig. 8 Relationship between image plane coordinates and dynamic target coordinates

$$\cos E_k = \frac{1}{(f^2 + Y^2)^{\frac{1}{2}}} \left[ YP \sin E + f(Y^2 + f^2 - P^2 \sin^2 E)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (7)$$

式中:  $X$  为像面横坐标;  $Y$  为像面纵坐标;  $P = (f^2 + X^2 + Y^2)^{\frac{1}{2}}$ 。

### 4.3 高速摄像机位置参数算法

高速摄像机在测量过程中处于凝视工作状态, 高速摄像机的状态参数为: 像面偏转角度  $\beta$ , 摄像机的俯仰角  $E_k$ , 摄像机的方位角  $A_k$ 。当高速摄像机的像面旋转角度为  $\beta$  时, 示意图如图 9 所示。

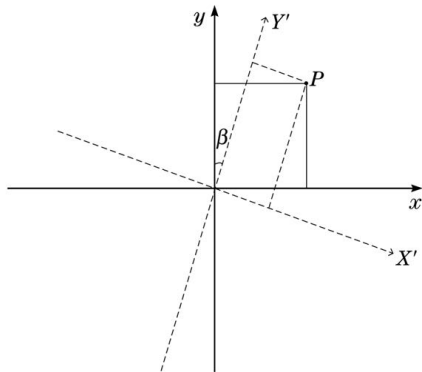


图 9 像面旋转示意图

Fig. 9 Schematic of image plane rotation

$$X = Y' \sin \beta + X' \cos \beta, \quad (8)$$

$$Y = Y' \cos \beta - X' \sin \beta, \quad (9)$$

式中:  $X'$  为像面偏转后的横坐标;  $Y'$  为像面偏转后的纵坐标。

将(1)式代入(6)式, 得

$$\cos \theta = \frac{f \sin E_k + Y \cos E_k - P \cos a \sin b}{P \sin a \cos b}. \quad (10)$$

结合(9)、(10)式, 得到

$$X' \sin \beta \cos E_k - Y' \cos \beta \cos E_k - f \sin E_k = P \sin a \cos b \cos \theta + P \cos a \sin b, \quad (11)$$

式中:  $\theta$  为目标空间角度值;  $P = (f^2 + X'^2 + Y'^2)^{\frac{1}{2}}$ 。

将(2)、(5)、(8)、(9)式代入(3)式, 得

$$A_k = a \sin \left( \frac{\sin a \sin \theta}{\cos E} \right) - a \tan \left[ \frac{Y' \sin \beta + X' \cos \beta}{f \cos E_k - (Y' \cos \beta - X' \sin \beta) \sin E_k} \right]. \quad (12)$$

在摄像机的视场范围内, 选取  $n$  个不同位置目

标的像点,对这  $n$  个像点进行多次重复采集并判读,确定坐标值  $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$  及其对应的空间角度值  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ 。利用(11)、(12)式建立方程组,此为非线性方程组,本文采用高斯-牛顿迭代法<sup>[9-10]</sup>求解待估计参数,通过解此方程组得到像面参数  $\delta(\beta, E_k, A_k)$ 。

## 5 测量系统的精度分析

空间位置精度测量系统作为检测设备应具有较高的测量精度。如何确定并提高空间位置精度测量系统的测量精度是研究过程中需要解决的关键问题。

分析可知,影响空间位置精度测量系统误差的主要因素有以下几种。

1) 图像获取过程中引入的误差。其中,摄像过程中的主要误差是由几何畸变带来的<sup>[11]</sup>,测得高速摄像系统的畸变误差为  $\sigma_1 < 0.69''$ 。

2) 测量系统与设备的采样不同步引入的误差。对于测量系统,采样脉冲信号的响应时间测量误差为  $\Delta t < 1 \mu\text{s}$ 。高速摄像机的曝光时间会引入一个系统延迟误差,曝光时间一般设置为  $10 \mu\text{s}$ ,对于测量系统,由于采样脉冲信号响应延迟带来的误差是一个稳定的且可测的系统误差,通过事后处理可将该误差消除。经分析得不同步引起的误差为  $\sigma_2 < 0.26''$ 。

3) 由图像星点光斑的定位引入的图像处理算法误差<sup>[12-16]</sup>。实验测得该误差为  $\sigma_3 < 0.05''$ 。

4) 支撑架的轴系晃动带来的误差。根据精密机架的设计可知,水平与垂直方向的轴系晃动误差最大值为  $2''$ ,按正态分布有  $\sigma_4 = 2''/3 = 0.67''$ 。

空间位置测量系统本身的测量误差为  $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2} < 1.00''$ 。

## 6 实验数据及分析

对某一型号高精度动态靶标进行空间位置精度的测量。首先确定了该动态靶标提供的动目标参数即目标旋转轨迹出射光锥的半锥角  $\alpha$  及光锥主轴与水平面的夹角  $b$ ,进行空间静态位置的精度测量。然后通过空间位置精度测量系统,对该动目标进行空间动态位置的精度测量。根据该测量结果,对该动目标的空间位置进行修正。

该型号高精度动态靶标的设计技术指标要求为:目标静态指示精度  $\leq 2''$ ,目标动态指示精度  $\leq 5''$ 。利用精度为  $0.5''$  的 Leica 经纬仪对目标进行参数及静态测角精度测量。根据目标高低点的空间指向角的测量结果,计算得到目标参数分别为  $\alpha = 29^\circ 45' 00''$ ,  $b = 35^\circ 09' 13''$ 。静态测角结果的均方根误差小于等于  $0.59''$ 。该靶标编码器同一个位置空间角度的变化小于  $2''$ ,重复性好。

目标以  $12 (\text{°}) \cdot \text{s}^{-1}$  的速度顺时针作匀速运动,由于测量系统的视场角小,因此目标的动态精度测量采用多区间测量。测量空间角位置是在以  $180^\circ$  为中心的区间内进行的。高速摄像机接收到的目标角度值范围为  $3.67^\circ$ 。

靶标编码器与高速摄像机的数据采样频率均为  $400 \text{ Hz}$ 。高速摄像机接收时统同步信号的上升沿时曝光,曝光时间为  $10 \mu\text{s}$ 。以时统信号的下降沿作为触发信号,采集编码器信息,时统信号的脉冲信号宽度为  $8 \mu\text{s}$ 。由于曝光时间造成拖尾现象及编码器采样产生的位置误差,动目标速度不同,其误差不同,此误差将在具体数据中给予修正。

首先进行静态基准点采集,分别采集  $179.33^\circ$ 、 $179.67^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $180.33^\circ$ 、 $180.67^\circ$  这 5 个静态基准点,该 5 个基准点在像面上的坐标如图 10 所示。

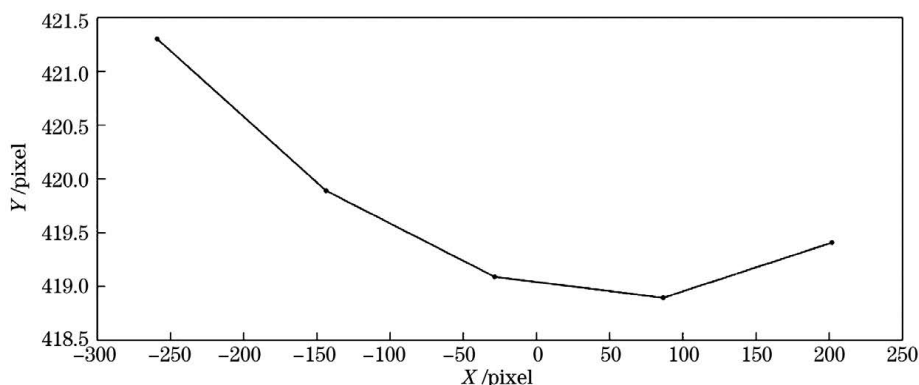


图 10 中速静态基准点轨迹

Fig. 10 Static reference point trajectory at medium speed

利用这 5 个基准点得到高速摄像机的外方位参数,高速摄像机的竖直方向偏转角  $E_k = 4^\circ 48' 12''$ ,水平方向偏转角  $A_k = 0^\circ 2' 37''$ ,旋转角  $\beta = -0^\circ 14' 2''$ 。

通过以上参数,将各静态点像元位置值转换为目标在像面竖直方向与水平方向上相对于原点的角度偏移量  $\Delta E$ 、 $\Delta A$ ,如图 11 所示。

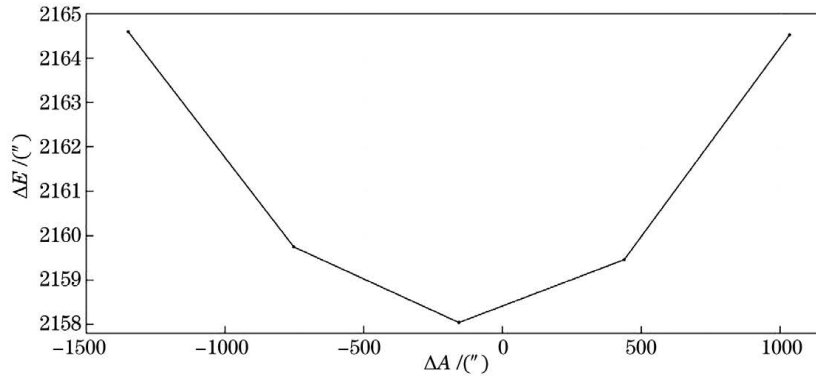


图 11 中速静态基准点的像面偏移量轨迹

Fig. 11 Image surface offset trajectory of static reference point at medium speed

跟踪目标在旋转过程中进入高速摄像机的视场,记录目标动态运动轨迹,如图 12 所示,其中 No. 1~No. 5 为目标在不同时段的 5 组动态运动轨迹。

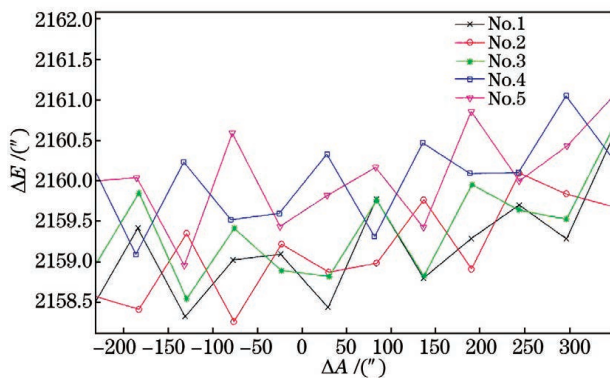


图 12 中速动态运动轨迹

Fig. 12 Dynamic motion trajectory at medium speed

建立目标动态运动轨迹与编码器角度值的对应关系,如图 13、14 所示。

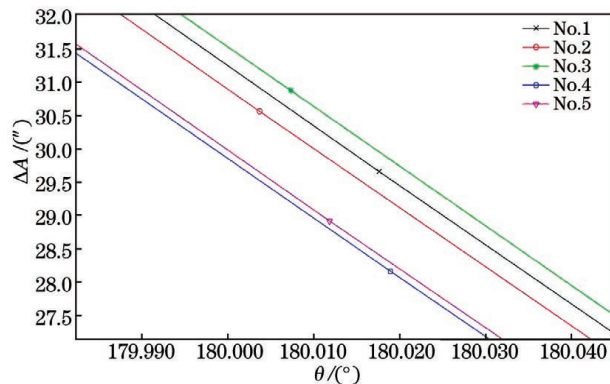


图 13 水平方向偏移量与编码器角度值的对应关系

Fig. 13 Corresponding relation between horizontal offset and coder angle

目标动态误差的测量采用的是动态误差增量法。目标的动态误差是由动态随机误差、静态系统误差、动态条件下的动态误差增量合成的<sup>[1, 17]</sup>。即

$$\sigma_A^2 = \sigma_{A,S}^2 + \sigma_{A,r}^2 + \sigma_{A\Delta}^2, \quad (13)$$

$$\sigma_E^2 = \sigma_{E,S}^2 + \sigma_{E,r}^2 + \sigma_{E\Delta}^2, \quad (14)$$

式中:  $\sigma_A$ 、 $\sigma_E$  为动态误差;  $\sigma_{A,S}$ 、 $\sigma_{E,S}$  为静态误差均方值;  $\sigma_{A,r}$ 、 $\sigma_{E,r}$  为动态随机误差均方值;  $\sigma_{A\Delta}$ 、 $\sigma_{E\Delta}$  为动态误差增量。

如图 14 所示,通过目标在像面竖直方向与水平方向上相对于原点的角度偏移量与空间位置的对应关系,可以得到  $180^\circ$  空间角位置的动态重复性误差为  $\sigma_{A,r} = 0.55''$ ,  $\sigma_{E,r} = 0.30''$ 。目标的动态偏移量相对于静态偏移量的系统误差增量为  $\sigma_{A\Delta} = 1.42''$ ,  $\sigma_{E\Delta} = 1.21''$ 。动目标在该点的静态误差为  $\sigma_{A,S} = 0.62''$ ,  $\sigma_{E,S} = 0.50''$ 。

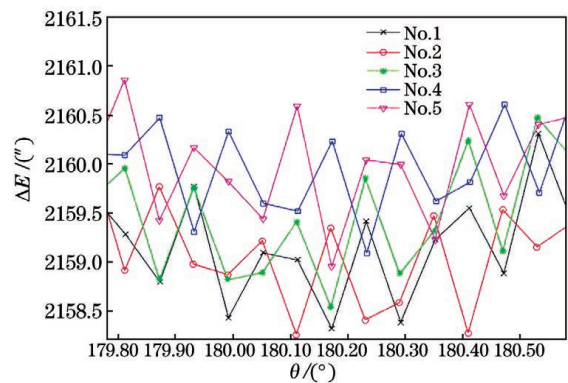


图 14 垂直方向偏移量与编码器角度值的对应关系

Fig. 14 Corresponding relation between vertical offset and coder angle

将以上误差合成,确定了动目标以  $12^\circ \cdot s^{-1}$

速度顺时针作匀速运动时在该点的动态误差为

$$\sigma_A = \sqrt{\sigma_{A,S}^2 + \sigma_{A,r}^2 + \sigma_{A\Delta}^2} = 1.64'' \quad (15)$$

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_{E,S}^2 + \sigma_{E,r}^2 + \sigma_{E\Delta}^2} = 1.35'' \quad (16)$$

分别对低速、中速和高速工作状态下的动态靶

标进行测量。在每种速率下,分别测量动态靶标顺时针和逆时针旋转的动态误差。测量点选择  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $180^\circ$  四个点的空间位置。

根据以上方法得到的各点测量结果如表 1 所示。

表 1 动态精度

Table 1 Dynamic accuracy

Target motion state	Dynamic error	$0^\circ$ position	$90^\circ$ position	$135^\circ$ position	$180^\circ$ position
Rotation clockwise with $3.6 (^\circ) \cdot s^{-1}$	$\sigma_A$	1.64''	2.05''	0.85''	1.17''
	$\sigma_E$	2.74''	3.44''	0.78''	1.96''
Rotation counterclockwise with $3.6 (^\circ) \cdot s^{-1}$	$\sigma_A$	1.28''	1.16''	0.78''	1.89''
	$\sigma_E$	3.50''	2.92''	0.52''	2.05''
Rotation clockwise with $12 (^\circ) \cdot s^{-1}$	$\sigma_A$	1.88''	1.74''	1.18''	1.64''
	$\sigma_E$	1.01''	0.69''	0.82''	1.35''
Rotation counterclockwise with $12 (^\circ) \cdot s^{-1}$	$\sigma_A$	1.86''	1.01''	0.46''	0.71''
	$\sigma_E$	2.17''	1.56''	0.94''	1.31''
Rotation clockwise with $72 (^\circ) \cdot s^{-1}$	$\sigma_A$	4.01''	1.55''	1.12''	3.68''
	$\sigma_E$	1.49''	1.20''	1.43''	2.31''
Rotation counterclockwise with $72 (^\circ) \cdot s^{-1}$	$\sigma_A$	1.57''	1.81''	3.19''	3.74''
	$\sigma_E$	1.33''	3.90''	3.53''	1.23''

通过空间位置精度测量系统测量上述该动态靶标,由表 1 得不同速度不同位置的动态误差最大值为  $\delta_1 = 4.01''$ 。引入测量系统的测量误差  $\delta_2 = 1.00''$ ,合成后该动态靶标的总动态误差为  $\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2} = 4.13''$ 。

目前,国内光电经纬仪的动态测量精度一般不小于  $20''$ <sup>[18-19]</sup>。按照误差传递原则,高精度动态靶标动态精度的设计要求在  $5''$  以内,本测量系统测量上述某型号高精度动态靶标的总动态误差为  $4.13''$ ,小于  $5''$ ,满足其动态精度指标的设计要求。

以上实验验证了本测量系统可以广泛地用于动态靶标的动态精度参数检测。

## 7 结 论

主要研究了动态靶标提供的目标在动态工作状态下的空间位置精度测量方法,该测量方法采用高速图像处理方法,以透视几何理论为基础,将三维的空间信息经过成像系统转化为二维图像信息,具有客观检测、非接触、高精度等优点。分析得出空间位置精度测量系统引入的总误差小于  $1.00''$ ,满足其作为测量系统的设计要求。对某高精度动态靶标进行动态精度测量,该靶标在不同速度及不同位置下的动态误差最大值为  $4.13''$ ,符合设计精度指标在

$5''$  以内的要求。实验表明,空间位置精度测量系统能够完成动态靶标的初步动态标定,使其能够作为跟踪测量设备使用,填补了目标跟踪设备动态检测领域的空白,为进一步解决光电经纬仪等目标跟踪设备的动态测量精度检测提供了参考。

## 参 考 文 献

- [1] Jin G, Yang X B, Zhang X. Analysis of error and image motion in airborne electro-optical imaging and tracking measurement system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018.  
金光, 杨秀彬, 张岫. 机载光电成像跟踪测量系统误差与像移分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018.
- [2] Zhang B, He G X, Shen X H. Calibration of programmable dynamic target[J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(2): 176-180.  
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.
- [3] Guo P P. The autocollimation optical dynamic target precision test method research[D]. Changchun: Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2005.  
郭平平. 光学动态靶标精度的自准直检测方法研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2005.
- [4] He H H. Research on the relation between shaking shloshing and precision of dynamic target[D].



- Changchun: Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2007.
- 贺和好. 轴系晃动与动态靶标测角精度关系研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2007.
- [5] Wang Y F. The development and optimization technology of dynamic target for tracking detection [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016.
- 王一凡. 检测用动态靶标的研制与优化[D]. 长春: 长春理工大学, 2016.
- [6] Ma J G. Tracking and measuring technology of a tracking theodolite[J]. Proceedings of SPIE, 1993, 1979: 719-728.
- [7] Zhou H Y, Wang J Q, Meng Q H. Theory and method of data fusion processing for range measurement[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- 周海银, 王炯琦, 孟庆海. 靶场测量数据融合处理理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [8] Long H W, Shen X H, Ma J. Miss distance error due to rotation of CCD sensor imaging surface and its testing method[J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(6): 607-611.
- 龙华伟, 沈湘衡, 马军. CCD像面旋转引起的脱靶量误差及检测方法[J]. 光学精密工程, 2003, 11(6): 607-611.
- [9] Li Z K. Theory and application of data processing in space of nonlinear models [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- 李朝奎. 非线性模型空间测量数据处理理论及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [10] Wang Z S. Introduction to numerical analysis [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- 王正盛. 数值分析引论[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [11] Hou Y L, Su X Y, Chen W J. Centering of camera principal point and turntable axis in optical measurement systems[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(11): 1104002.
- 侯艳丽, 苏显渝, 陈文静. 光学测量系统中相机主点与转台轴线的对中方法[J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1104002.
- [12] Li J. The analysis and research on the spot energy distribution and the center location of the laser[D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- 李洁. 激光光斑能量分布及中心定位的分析与研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [13] Zhang X H. Researches on moving target detection and tracking for images of shooting ranges[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- 张小虎. 靶场图像运动目标检测与跟踪定位技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [14] Meng J J, Yu J, Mo Z Q, et al. Laser spot illuminance measurement method based on scattering imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0712004.
- 孟晶晶, 余锦, 貂泽强, 等. 激光光斑照度的散射成像测量方法[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0712004.
- [15] Cao Y, Li B Q, Li H T, et al. High-accuracy star sensor centroid algorithm based on star image resampling[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0712003.
- 曹阳, 李保权, 李海涛, 等. 基于星点像重采样的星敏感器高精度质心算法[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0712003.
- [16] An Y Y. Photoelectric detection and signal processing [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- 安毓英. 光电探测与信号处理[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [17] Fei Y T. Error theory and data processing [M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [18] Wang J L. Study on TV tracking system of O-E theodolite to track and acquire fast moving targets [D]. Changchun: Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2002.
- 王建立. 光电经纬仪电视跟踪、捕获快速运动目标技术的研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2002.
- [19] Chen K J. Research on high precision target tracking based on photoelectric theodolite[J]. Information & Communications, 2018, 31(4): 28-29.
- 陈克坚. 基于光电经纬仪的高精度目标跟踪研究[J]. 信息通信, 2018, 31(4): 28-29.

# Measurement System Design of Spatial Position Accuracy of Dynamic Targets

Yang Liang<sup>1\*</sup>, Zhang Ning<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup> College of Information Engineering, Eastern Liaoning University, Dandong, Liaoning 118003, China;

<sup>2</sup> The Third Space Optics Research Section, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

## Abstract

**Objective** The main dynamic performance indexes of the photoelectric theodolite are dynamic tracking accuracy and dynamic measuring accuracy. The target detection is to track the airborne flight targets, such as aircrafts, which usually consumes a lot of manpower and material resources. Therefore, the process detection and the final detection before this step are detected by the dynamic targets provided indoors. The dynamic targets are used to simulate objects in space with a long distance and can provide real-time spatial location information. This equipment can be used to carry out an indoor process detection and a final detection on a target tracking equipment such as photoelectric theodolite, so that can analyze the dynamic tracking performance of a target tracking equipment. With the development of science and technology, the performance of a photoelectric theodolite is improved, and the dynamic target has developed from the traditional simple rotary dynamic target to the high-precision one. The improvement from a tracking detection equipment to a tracking measurement equipment requires spatial positions with high precision.

The spatial position accuracy of a dynamic target includes static accuracy and dynamic accuracy. The static accuracy is measured by Leica theodolite, and the measuring accuracy is 0.5". At present, the available dynamic accuracy detection methods include tracking method, video judging method and autocollimator detection method. The tracking method has low tracking speed, low accuracy, and high instrument price, so it is not suitable for the dynamic accuracy detection on target. In addition, the video judging method has low sampling speed, large reference position error, and low measurement accuracy. The autocollimator detection method can detect the dynamic errors caused by shafting shaking and rotating arm deformation, which has a certain reference value, but it cannot give the dynamic precision of the target comprehensively. Based on the above analysis, there is a lack of an effective method to measure the dynamic precision of dynamic targets.

**Methods** This article introduces a spatial target position measurement method to measure the accuracy of the target position when the target is in the state of high-speed movement. This method uses a computer vision technology to record the motion trajectory of a dynamic target captured by a high-speed camera in the whole field of view, and the recorded information is inverted into an actual space position to obtain the objective spatial position information of this target. A spatial position precision measurement system is designed based on this method. The measurement platform is composed of the system and the dynamic target equipment. By analyzing the relationship between the target and the measurement system, the state parameters of the measurement system could be calculated. Based on these parameters, the theoretical position of the target could be derived. By comparing the theoretical position with the actual position, the position accuracy of the dynamic target was able to be confirmed. After analyzing the error sources of the space target position measurement system, the total error of the whole system is less than 1.00", which meets the design requirement of the measurement system.

**Results and Discussions** To measure the spatial position accuracy of a certain type of high-precision dynamic target, the static accuracy of the dynamic target was first measured, which was less than 0.59", and then the dynamic accuracy of the dynamic target was measured with the spatial position accuracy measurement system. The measurement results are shown in Table 1. As shown in the table, the maximum dynamic error for different speeds and different positions is 4.01". Combining the measurement error of the measuring system as described above, the total dynamic error of the dynamic target is 4.13".

Generally, the dynamic measurement accuracy of photoelectric theodolite in China is not less than 20". According to the principle of error transfer, the design requirement of the dynamic precision of the high-precision dynamic target is within 5". The total dynamic error of the high-precision dynamic target measured by this measurement system is 4.13", which is less than 5". The dynamic target meets the dynamic precision index

requirement.

This experiment confirmed that the spatial position accuracy measurement system can be widely used for dynamic precision parameter detection of dynamic targets, so that it can be used as a tracking measurement equipment.

**Conclusions** This article mainly studied the measurement method of the spatial position accuracy of the dynamic target based on the perspective geometry theory. The measurement method adopts the high-speed image processing method, and converts the three-dimensional spatial information into the two-dimensional image information through the imaging system. The advantages of the method are objective detection, non-contact and high precision. Based on the method, the article established one spatial position precision measurement system, and the dynamic precision of a high-precision dynamic target was measured by this measurement system. The experimental results show that the measurement system can complete the initial dynamic calibration of dynamic targets, so that it can be used as a tracking measurement equipment. The design of the spatial position precision measurement system lays a foundation for further solving the difficult problems in dynamic measurement precision detection of target tracking equipment such as photoelectric theodolite, and fills the gap in the field of dynamic detection of target tracking equipment.

**Key words** measurement; non-contact; measurement system; dynamic target; dynamic precision; spatial position

**OCIS codes** 120.6085; 150.1488