

光电导弹校靶方法研究

李庆波, 樊瑞山, 李芳, 黄建雄, 谢文龙

(上海机电工程研究所, 上海 201109)

摘要: 针对光电制导导弹高精度指向需求, 通过研究导弹校靶方法以修正系统误差, 提升光电导引头指向精度; 提出解析法和几何法两种校靶方法, 解析法是从数学推导的角度出发, 利用坐标等效变换列写方程组, 通过求解多元方程组获得校靶修正角度; 几何法是从距离逼近的角度出发, 通过多点测量实际指向误差, 利用最小二乘、几何旋转变换等方法得到校靶修正角度; 最后利用数字仿真分别模拟了两种校靶算法, 并进行了对比分析, 验证了两种算法的有效性。

关键词: 光电导弹; 校靶; 指向精度

Research on Target Calibration Method of Photoelectric Missile

LI Qingbo, FAN Ruishan, LI Fang, HUANG Jianxiong, XIE Wenlong

(Shanghai Electromechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Aiming at the high-precision pointing demand of photoelectric guided missile, studies the method of missile target calibration to correct the system error and improve the pointing accuracy of photoelectric seeker. Two calibration methods, analytical method and geometric method, are proposed. Analytical method is based on mathematical derivation, using coordinate equivalent transformation to get equations, and solving multiple equations to obtain correction angle; geometric method is from the perspective of distance approximation, through multi-point measurement of actual pointing error, using least square, geometric rotation transformation and other methods to get the correction angle. In the end, two kinds of target calibration algorithms are simulated by numerical simulation, and the effectiveness of the two algorithms is verified by comparative analysis.

Keywords: photoelectric, target calibration, seeker pointing accuracy

0 引言

光电制导导弹自第二次世界大战时期就已经出现, 其最初主要用于攻击舰船目标的空地导弹上。随着技术的不断革新与发展, 目前光电制导技术已成为精确制导武器的重要技术手段, 广泛应用于反坦克导弹、空地导弹、地空导弹、空空导弹、末制导炮弹等各类武器中。光电制导采用的光波波段划分可分为可见光、红外、激光和多模复合制导等, 典型代表有美国的 AIM-9X、美国的“标枪”和“海尔法”改进型反坦克导弹、美国的 AGM-65E“玛伐瑞克”空地导弹、欧盟的远程“崔格特”反坦克导弹、以色列“怪蛇”、“拉哈特”和英国的 ASRAAM 等^[1-4]。

光电制导的先决条件是光电导引头截获目标, 这取决于导引头探测器性能以及目标指向精度^[5]。对光电制导武器, 通常导引头探测视场越小, 角分辨率越高, 则探测器精度也就越高, 探测距离就越远。以红外成像导引头为例, 为了保证足够的探测性能, 导引头视场单边角通常小于 2.5° , 有的甚至只有 1.5° 。较小的探测视场, 对于整个武器系统的光学指向精度链控制提出了很高的要求。光电导弹的指向精度主要受目标探测偏差和系统安装测量误差两方面影响, 其中对目标的探测误差为外部输入影响^[5], 主要由探测雷达的精度所决定。系统安装测量误差又包含两部

分, 分别为探测雷达到发射筒的误差和发射筒到导引头光轴的误差。对于完整的作战系统, 通常是一套武器系统配备多发筒弹, 如果对每一发筒弹都进行全系统的校靶, 将耗费巨大的人力与物力资源, 因此一种更有效的方式是进行一次全系统的校靶, 和多次筒弹级别的校靶。筒弹级别校靶的主要目的就是为降低发射筒到导引头光轴之间的传递误差, 从而提升武器系统光学指向精度, 提高武器作战效能。由于每一发筒弹在生产和总装过程中存在差异, 导致发射筒与导引头光轴间的同轴度也各不相同, 因此需要针对筒弹的校靶是一项非常重要且工作量较大的任务。

目前, 校靶技术主要在机载武器系统、火箭发射系统中得到较多的应用与发展^[6-11]。校靶技术从 20 世纪 60/70 年代传统的靶板一望望远镜校靶^[12]方式开始, 逐渐发展到各种新技术校靶方式。典型的有: 1990 年代中期, AAI 公司成功研制出的 ABE 300 光电—惯性先进校靶设备^[13]、美国霍尼韦尔公司大约 2000 年代初发展出纯惯性校靶装置以及挪威 Metronor 公司于 2000 年代中发展出采用摄影测量技术的 HarmoLign 光电校靶系统^[14]。各类新技术校靶装置实现了技术性能和使用特性上的大跨越, 极大提高了在相关行业领域内校靶作业的精度和效率。

在光电武器领域, 目前国内外对校靶技术的研究较少。

收稿日期:2020-12-11; 修回日期:2021-01-08。

作者简介:李庆波(1988-),男,硕士,山西大同人,高工,主要从事航天器制导控制方向的研究。

引用格式:李庆波,樊瑞山,李芳,等.光电导弹校靶方法研究[J].计算机测量与控制,2021,29(7):156-160,165.

在工程实际中, 传统的校靶通常采用试凑法, 即通过不断的测量与迭代来提升指向精度, 但这种方法操作反复, 缺乏理论支撑且精度不高, 因此在精度性能和操作便捷方面均难以满足大批量的筒弹校靶的任务需求。因此, 本文结合光电导弹工作机理, 从实际工程角度出发开展校靶研究, 在保证校靶性能的基础上, 同时兼顾工程实现的便捷性, 切实提升光电导弹的作战性能。

1 校靶基本内与容原理

在校靶问题研究过程中, 涉及多个坐标系之间的转换。所使用的坐标系包括: 地面惯性坐标系、发射筒坐标系、弹目视线坐标系、导引头光轴坐标系、实际平台坐标系和理论平台坐标系。其中, 平台坐标系是指导弹滚转稳定平台对应的坐标系, 用于抑制弹体滚转扰动, 为探测成像器件提供相对稳定的平台, 对于探测器滚动通道与弹体捷联的导弹, 可将平台系视为弹体系。各坐标系之间的角度定义及转换关系如图 1 所示。

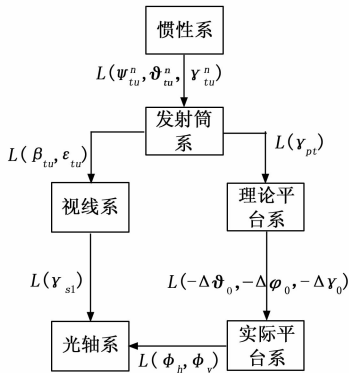


图 1 校靶坐标转换关系

图 1 中, $\psi_{tu}^n, \theta_{tu}^n, \gamma_{tu}^n$ 为发射筒的姿态欧拉角; $\epsilon_{tu}, \beta_{tu}$ 为视线系相对发射筒的俯仰、方位角度; γ_{st} 为光轴视线扭角; ϕ_n, ϕ_v 为导引头光轴转动方位、俯仰角度; γ_{MP} 为理论平台系相对发射筒的转动角度, 导引头在发射架上截获目标的过程中, 为便于操作和计算, 通常将初始平台滚转角置零, 即 $\gamma_{pt} = 0$ 。因此在本文设计过程中, 也将初始滚转角置零, 即认为发射筒坐标系与理论平台系一致; $\Delta\theta_0, \Delta\phi_0, \Delta\gamma_0$ 为平台坐标系相对于弹体系的误差偏角, 对校靶内容的研究即是研究如何求解 $\Delta\gamma_0, \Delta\phi_0, \Delta\theta_0$ 三个角度。

在目标信息从发射筒坐标系向导引头光轴系转换的过程中, 引起转换误差的环节包括: 弹体与发射筒间的安装误差、导引头相对于弹体的安装误差、光轴相对于导引头的安装及测量误差等。这些误差会导致导弹在发射前可能无法按照预定指令截获目标, 因此需通过一定的步骤和算法, 测量和补偿以上误差链综合作用后形成的固定偏差, 从而实现发射筒坐标系和导引头光轴坐标系的准确映射。

校靶系统由校靶台、目标光源、导弹与发射筒(简称筒弹)及测试设备等组成, 整套校靶系统的如图 2 所示。

其中目标光源与校靶台之间的相对关系通过激光仪进

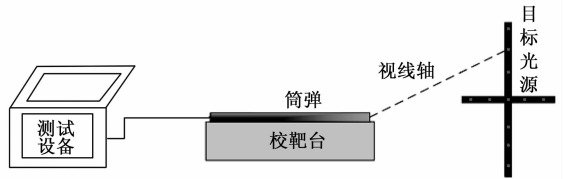


图 2 校靶系统示意图

行高精度标定, 从而形成导弹校靶的测量基准。

校靶过程为: 将筒弹放置于校靶台, 通过地面测试设备的控制使得导引头光轴对不同光源目标进行指向, 并采集和记录实际的指向偏差。根据记录的指向偏差, 按照特定的方法提取转换角度, 并按照一定的算法对导引头光轴指向进行补偿。

2 校靶方案及算法研究

校靶最终是为了实现发射筒坐标系到导引头光轴坐标系的准确映射, 也就是要找到不同坐标系间的准确转换关系, 那么获得坐标转换中的欧拉角则是校靶的关键所在。

本文结合红外成像导引头的特点, 设计提出了两种转换角度提取方法: 一种为解析法, 计算严密但算法复杂; 另一种为几何法, 过程简单, 且易于工程实践。

2.1 解析法

解析法是指利用数学的方法, 通过测量记录的指向偏差, 计算提取转换角度。解析法的数学原理为: 利用坐标系等效变换法, 列写关于 $\Delta\gamma_0, \Delta\phi_0, \Delta\theta_0$ 的多元方程, 通过解方程的形式求解转换角度。下面对解析法的原理和求解过程展开描述。

导引头光轴指向与真实目标的关系见图 3 所示。

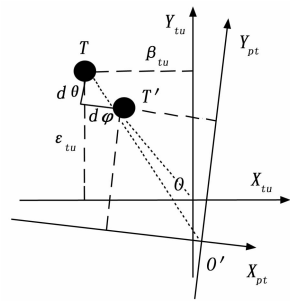


图 3 光轴指向角平面示意图

图中, $X_{pt}O'Y_{pt}$ 为真实平台系坐标平面, $X_{tu}OY_{tu}$ 为发射筒坐标系平面, $OT, O'T'$ 分别为目标视线轴在 $X_{tu}OY_{tu}$ 和 $X_{pt}O'Y_{pt}$ 平面上的上的投影。

在校靶转换角度求解问题中, 目标光源与发射筒坐标系的相对关系由高精度激光仪进行精确标定, 即为 $\beta_{tu}, \epsilon_{tu}$ 已知项。

如果发射筒坐标系和平台坐标系完全重合, 则只需要操纵平台光轴按照偏航 β_{tu} 和俯仰 ϵ_{tu} 进行偏转, 既可使实际光轴指向目标 T 。

但由于系统偏差的存在, 实际指向为 T' , 则 T' 即为导

引头视场中心，通过读取此时真实目标在视场中的位置，获得指向偏差角 $d\varphi$, $d\theta$ 。

令目标在视线系下的坐标为：

$$X_i^s = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

从图 1 中可以看出，从视线系转换到实际平台坐标系有两种方法。方法 1 是先从视线系转换到发射筒系，再从发射筒系转换到实际平台系；方法 2 是先从视线系转换到光轴系，再从光轴系转换到实际平台系。

则根据目标在真实平台系下的分量，可列写如下关系式：

$$L(-\Delta\vartheta_0, -\Delta\varphi_0, -\Delta\gamma_0)L(-\epsilon_{iu}, -\beta_{iu})X_i^s = L(-\epsilon_{iu}, -\beta_{iu})L(-d\theta, -d\varphi)X_i^s \quad (2)$$

式中， $\Delta\gamma_0, \Delta\varphi_0, \Delta\vartheta_0$ 为待求解量，相关转换矩阵展开形式如下。

$$L(-\epsilon_{iu}, -\beta_{iu}) = \begin{bmatrix} \cos\beta_{iu}\cos\epsilon_{iu} & -\cos\beta_{iu}\sin\epsilon_{iu} & \sin\beta_{iu} \\ \sin\epsilon_{iu} & \cos\epsilon_{iu} & 0 \\ -\sin\beta_{iu}\cos\epsilon_{iu} & \sin\beta_{iu}\sin\epsilon_{iu} & \cos\beta_{iu} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$L(-d\theta, -d\varphi) = \begin{bmatrix} \cos d\varphi \cos d\theta & -\cos d\varphi \sin d\theta & \sin d\varphi \\ \sin d\theta & \cos d\theta & 0 \\ -\sin d\varphi \cos d\theta & \sin d\varphi \sin d\theta & \cos d\varphi \end{bmatrix} \quad (4)$$

令：

$$L(-\Delta\vartheta_0, -\Delta\varphi_0, -\Delta\gamma_0) = \begin{bmatrix} C_{11}^{ip} & C_{12}^{ip} & C_{13}^{ip} \\ C_{21}^{ip} & C_{22}^{ip} & C_{23}^{ip} \\ C_{31}^{ip} & C_{32}^{ip} & C_{33}^{ip} \end{bmatrix} \quad (5)$$

将式 (3) ~ 式 (5) 代入到等式 (2)，进行展开可得：

$$\begin{bmatrix} C_{11}^{ip} & C_{12}^{ip} & C_{13}^{ip} \\ C_{21}^{ip} & C_{22}^{ip} & C_{23}^{ip} \\ C_{31}^{ip} & C_{32}^{ip} & C_{33}^{ip} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta_{iu}\cos\epsilon_{iu} \\ \sin\epsilon_{iu} \\ -\sin\beta_{iu}\cos\epsilon_{iu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos d\varphi \cos d\theta \\ \sin d\theta \\ -\sin d\varphi \cos d\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

由上式可知，方程中共含有 9 个未知变量，单点校靶测量可获得 3 个多元一次方程。因此共需要进行 3 个点的校靶测量，通过 3 个校靶点共 9 个方程联立求解，即可得到 $L(-\Delta\vartheta_0, -\Delta\varphi_0, -\Delta\gamma_0)$ 矩阵各个元素，进而得到校靶角度。

2.2 几何法

由上节可知，解析法理论上需要 3 个点即可精确得到校靶角度，但在实际工程应用中，存在读数误差、光轴对指令响应误差等，因此希望通过多点测量方式来减小这些过程误差，获得综合最优的校靶角度；同时，校靶的最终目的是实现导引头视场中心与目标光源点能够尽可能的接近。本文基于以上两方面的考虑，设计提出了一种基于几

何距离最短的校靶方案及相应的配套算法。整个校靶过程分为 3 步。

(1) 多点测量，标记指向角：

本文采用最为简化的“十字形”校靶光源开展几何法的校靶设计。以图 4 进行解释说明：圆点为目标光源，目标光源与校靶台之间的角度关系已提前通过高精度激光仪进行标校，形成校靶的测量基准。通过地面设备给出指向指令，操纵光电导引头光轴依次指向目标光源，标记导引头视场的中心位置与目标光源在导引头视场的位置间的相对关系，可以计算出在以目标光源平面中导引头的实际指向，以方点标记导引头的实际指向。

方点与圆点的位置偏差即为导引头在不同指向角条件下的指向误差，几何法的目的就是使得两者的偏差尽可能接近于 0。

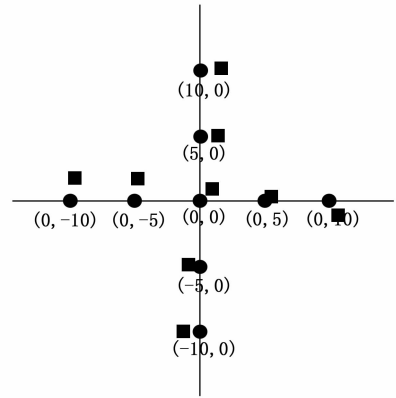


图 4 光轴实际指向标记示意图

(2) 滚转角求解：

完成导引头实际指向角标记后，首先进行滚动方向的修正角度求解。通过算法设计，求取正交的坐标轴尽可能逼近图中的方点，如图 5 所示。其中，正交坐标轴与靶标光源坐标轴的夹角即为滚转角 $\Delta\gamma_0$ 。

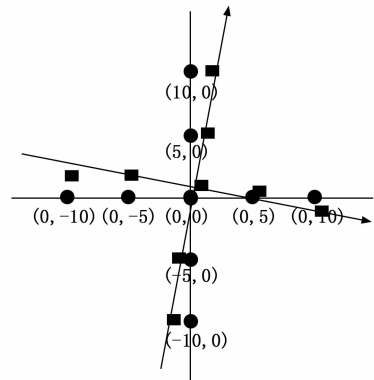


图 5 正交拟合示意图

本文采用最小二乘拟合的思想求取坐标轴，即使得图中方点距离坐标轴的距离平方和最短。

如果对纵向和侧向两个方向的标记点分别进行最小二乘拟合，能够获得距离所有点综合最短的两条坐标轴，但

是无法保证两条坐标轴相互正交。为解决正交坐标轴最小二乘拟合的问题, 本文提出了一种扩维的解决方案, 即通过扩展拟合维度, 将所有标记点统一到一个拟合方程中, 从而将正交轴的最小二乘拟合问题转化为常规的弹轴线性最小二乘拟合问题。

具体过程如下:

校靶得到的导引头光轴中心 (对应上图图中的方块标记点) 在靶标光源坐标系下的位置标记为:

(X_i^1, Y_i^1) 为沿横轴第 i 个点的坐标位置;

(X_i^2, Y_i^2) 为沿纵轴第 i 个点的坐标位置。

基于横轴坐标位置拟合的直线为:

$$y = kx + b_1 \tag{7}$$

基于纵轴坐标位置拟合的直线为:

$$x = -ky + b_2 \tag{8}$$

将以上方程进行组合, 扩展拟合维数, 形成新的拟合方程如下:

$$f = kx_1 + b_1x_2 - ky_1 + b_2y_2 \tag{9}$$

扩维后, 沿横轴的坐标位置表示为: $([X_i^1, 1, 0, 0], Y_i^1)$, 沿纵轴的坐标位置表示为: $([0, 0, Y_i^2, 1], X_i^2)$ 。

通过以上的扩维, 便将两条正交轴的最小二乘拟合问题转化为常规的线性最小二乘拟合问题。通过最小二乘求解, 可得到具体的 k 值, 既可得到拟合的正交轴与靶标光源坐标轴的夹角。具体计算公式为:

$$\Delta\gamma_0 = \text{atan}(k) \tag{10}$$

(3) 偏航角、俯仰角求解:

对拟合的正交坐标轴旋转 $\Delta\gamma_0$, 使其与靶标光源轴平行, 如图 6 所示。

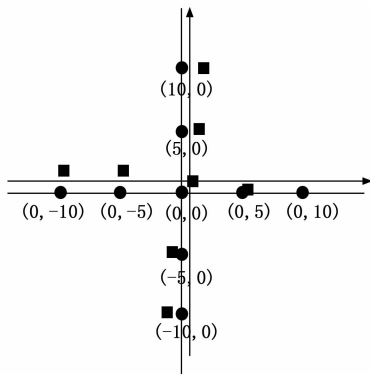


图 6 旋转后的相对关系图

通过公式 (9) 进行最小二乘拟合后, 可以获得 k, b_1, b_2 的具体数值, 从而可以获得公式 (7) 和 (8) 的两条坐标线。显然, 通过平移将旋转后的坐标系原点与目标光源十字架的原点对齐, 则可使用的导引头实际指向点与目标光源点尽可能的接近。两条坐标线的交点在目标光源系下的坐标即为待求解的俯仰和偏航修正角度。

因此横轴的偏差即为俯仰角偏差 $\Delta\theta_0$, 具体计算公式如下:

$$\Delta\theta_0 = \frac{b_1 + kb_2}{1 + k^2} \tag{11}$$

纵轴的偏差即为偏航角偏差 $\Delta\varphi_0$ 。具体计算公式如下:

$$\Delta\varphi_0 = \frac{b_2 - kb_1}{1 + k^2} \tag{12}$$

2.3 补偿算法

校靶的目的是为了获取修正角度, 提升导引头对目标的指向精度。本节主要推导校靶修正角度如何应用于导引头的实际指向。

设目标在视线/光轴系下的坐标为:

$$\begin{bmatrix} X_i^s \\ Y_i^s \\ Z_i^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{13}$$

则目标在平台系下的坐标为:

$$\begin{bmatrix} X_i^p \\ Y_i^p \\ Z_i^p \end{bmatrix} = \mathbf{L}(-\Delta\theta_0, -\Delta\varphi_0, -\Delta\gamma_0)\mathbf{L}(-\varepsilon_u, -\beta_u) \begin{bmatrix} X_i^s \\ Y_i^s \\ Z_i^s \end{bmatrix} \tag{14}$$

在平台坐标系下的目标空间指向角如下。

偏航指向角:

$$\beta_p = \text{RTD} * \text{atan} 2(-Z_i^p, X_i^p) \tag{15}$$

俯仰指向角:

$$\varepsilon_p = \text{RTD} * \text{arcsin}(Y_i^p) \tag{16}$$

3 数字仿真分析

本节通过数字仿真模拟导弹校靶过程, 利用以上的两种校靶方案求解校靶角度, 并展开对比分析。

设“十字靶”目标源沿 X 向距距离为 5 m, 距地面高为 3 m, 横竖各 7 个点源。横向间距 0.8 m, 纵向间距 1 m。则 13 个点源目标点的坐标分如图 7 所示。

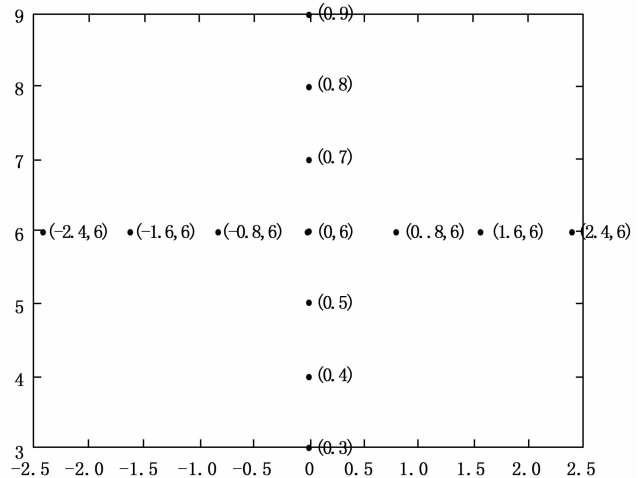


图 7 目标点源示意图

导引头图像目标点与视场中心偏 $d\theta, d\varphi$, 通过人工判读, 读取误差满足: 满足:

$\Delta d\theta \sim N(0,0.01), \Delta d\varphi \sim N(0,0.01)$ 。

导引头光轴转动误差满足： $\Delta\varphi_v \sim N(0,0.2), \Delta\varphi_h \sim N(0,0.2)$ 。

由于实际平台与理论平台存在偏差角度，因此实际操作纵光轴指向靶标点源时，目标点源在导引头视场中图像如图 8 所示。

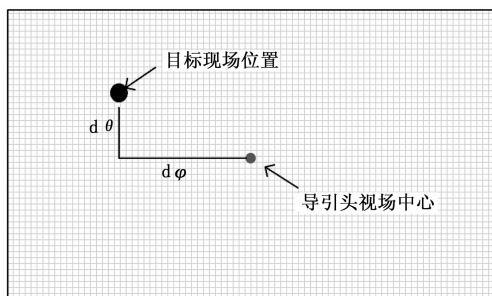


图 8 目标在视场中的位置示意图

数值仿真中，可通过下式计算得到：

$$X_{rs}^s = L(\beta_{in} + \Delta\varphi_h, \epsilon_{in} + \Delta\varphi_v) *$$

$$L(-\Delta\vartheta_0, -\Delta\varphi_0, -\Delta\gamma_0)L(-\epsilon_{in}, -\beta_{in})X_i^s \quad (17)$$

其中： X_{rs}^s 表示目标在真实光轴系坐标。

$$d\theta = \arcsin(X_{rs}^s(2) / |X_{rs}^s|) + \Delta d\theta \quad (18)$$

$$d\varphi = \arctan(-X_{rs}^s(3), X_{rs}^s(1)) + \Delta d\varphi \quad (19)$$

设实际平台与筒弹理论平台偏角，即校靶角度为： $\Delta\vartheta_0 = 2.5^\circ, \Delta\varphi_0 = 3^\circ, \Delta\gamma_0 = 2^\circ$ 。分别采用以上两种方法进行校靶，得到的校靶修正角度如表 1 所示。

表 1 校靶修正值对比表

	$\Delta\vartheta_0$	$\Delta\varphi_0$	$\Delta\gamma_0$
理论值/ $(^\circ)$	2.5	3	2
解析法修正/ $(^\circ)$	2.513 6	3.039 7	2.586 6
几何法修正/ $(^\circ)$	2.537 9	2.985 9	2.120 8

校靶修正前后导引头视场中心指向如图 9 所示。

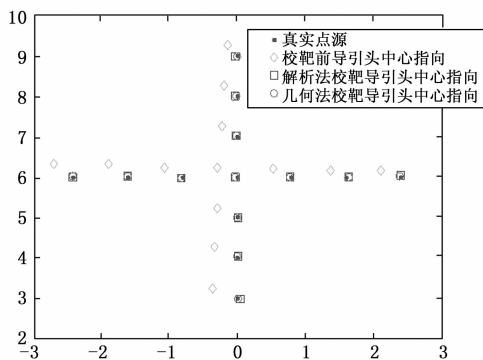


图 9 指向结果对比

利用两种方法的校靶结果分别进行修正计算，得到最终指向偏差如图 10 所示。

从以上仿真结果可知，在存在读数、测量等工程误差的基础上，两种方法均能获得接近于理论值的校靶修正角度，显著提高导引头的指向精度。在序列号为 3、8 和 12 的

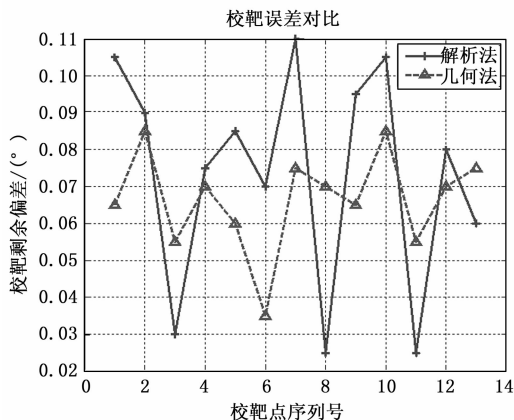


图 10 修正结果对比

点上，解析法能够取得较好的补偿效果，这是因为解析法能够基于 3 个点获得极为精确的解析解。但综合比较下来，几何法的精度略高于解析法的精度，这是由于几何法综合了所有光源点的观测偏差来求取校靶修正角度，降低了对工程误差的敏感性。

4 结束语

本文针对光电导弹校靶问题，创新性的提出了两种光电导弹校靶方法，并给出完整的求解算法。解析法是利用坐标转换的方法解算校靶修正角度，过程推导严谨，理论上仅需 3 个不共线的目标光源即可完成精确校靶。几何法则是从距离逼近的角度出发，通过本文设计的扩维方法，解决“十字”交叉测量点正交拟合问题，在试验室或专门的测试厂房中，综合利用多点测量值来计算校靶修正角度，能够有效的减弱操作过程中不可避免的各种工程误差，获得更好的校靶效果。该方法目前已在某型号中获得了工程应用，实际校靶精度可达到 0.1° 以内，有效提升了导弹对目标的截获概率。

本文提出的校靶解决方案具备较强的通用型，针对光电导弹类别如可见光、红外点源或成像、激光主动半主动等不同光电体制导弹，都可通过本文方法实现对筒弹系统安装误差的高效准确补偿。在应用方面，配套设备简单，校靶过程易于操作，尤其是几何法，过程直观，工程适用性强，可广泛应用于批产导弹的过程调试、维修保障等过程，具备较高的工程实用价值。

参考文献：

[1] 范晋祥, 杨建宇. 红外成像探测技术发展趋势分析 [J]. 红外与激光工程, 2012, 42 (12): 3145-3153.
 [2] 张腾飞, 张合新, 等. 激光制导武器发展及应用概述 [J]. 电光与控制, 2015, 22 (10): 62-67.
 [3] 杨卫平, 沈振康. 红外成像导引头及其发展趋势 [J]. 红外与激光工程, 2007, 37 (11): 1129-1136.
 [4] 戴卫青, 刘康, 刘杰. 国外防空导弹弹族化发展研究 [J]. 空天防御, 2018, 1 (3): 60-66.

(下转第 165 页)