文章编号：1672-8785(2023)06-0038-06

基于机械臂路径规划的内场轨迹实现技术研究

乔 丹 高 阳*

（中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033）

摘 要：为了解决传统光电跟踪设备的跟踪性能测试系统参数调试繁琐、设备安装困难、靶标适用性差等问题，研究了基于机械臂路径规划的内场轨迹实现技术。通过规划六自由度机械臂的末端运动轨迹，设计了更加灵活、高效的跟踪性能测试系统。首先，对传统测试靶标系统进行分析，明确实现跟踪性能测试的数学模型；然后提出基于六自由度机械臂的新型技术方案，并分析了两种方案的差异性；接着通过靶标轨迹的坐标变换，根据传统动态靶标轨迹得到适用于六自由度机械臂的末端位姿参数，从而实现轨迹规划；最后，通过数值仿真验证了本文方法与传统方法的跟踪性能测试效果的一致性。仿真结果表明，两者具有相同的跟踪性能测试效果。相较于传统方法，采用机械臂的测试系统在参数调节、工具安装和靶标适用性上更具优势，完全能够满足光电跟踪设备内场跟踪性能测试的要求。

关键词：路径规划；机械臂；光电跟踪设备；跟踪测试

中图分类号：TP394.1 **文献标志码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1672－8785.2023.06.006

Research on Infield Trajectory Realization Technology Based on Path Planning of Mechanical Arm

QIAO Dan, GAO Yang*

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

Abstract: *In order to solve the problems such as tedious parameter debugging, difficult equipment installation and poor target applicability in the tracking performance test system of traditional photoelectric tracking equipment, an infield trajectory realization technology based on path planning of mechanical arm is studied. A more flexible and efficient tracking performance testing system is designed by planning the trajectory of the end of the six-degree-of-freedom mechanical arm. Firstly, the traditional test target system is analyzed, and the mathematical model of tracking performance test is defined. Then, a new technology scheme based on the six-degree-of-freedom mechanical arm is proposed, and the differences between the two schemes are analyzed. Through the coordinate transformation of the target trajectory, the terminal pose parameters suitable for the six-degree-of-freedom mechanical arm are obtained according to the traditional dynamic target trajectory, so as to realize the trajectory planning. Finally, the consistency between the proposed method and the traditional method is verified by numerical simulation. Simulation results show that*

收稿日期：2023-04-13

作者简介：乔丹(*1995-*)，女，内蒙古赤峰人，研究实习员，主要研究方向为机器人及自动控制。

*__通讯作者：__*E-mail*：gaoyang@ciomp.ac.cn*

the proposed method has the same tracking performance as the traditional method. Compared with traditional methods, the test system based on mechanical arm has more advantages in parameter adjustment, tool installation and target applicability, which can fully meet the requirements of photoelectric tracking equipment in the field tracking performance test.

Key words: *path planning; mechanical arm; photoelectric tracking equipment; tracking test*

0 引言

光电跟踪设备是一类具有目标识别与跟踪能力的光电设备的总称。它们最早以地基的光电跟踪设备为代表，之后车载、舰载、机载和星载等多种应用场景下的综合性光电系统也得到了发展[1-4]。光电载荷更是涵盖了可见光、红外等多种类型，在军事、工业等领域得到了广泛的应用[5-7]。

虽然光电跟踪设备的形式多种多样，但其核心指标始终为跟踪性能[8-9]。目标跟踪性能是图像处理能力与伺服能力的综合体现。跟踪性能不足会导致目标脱靶量过大，甚至丢失目标。因此，为了保证光电设备的跟踪能力满足设计要求，需要进行大量的跟踪性能测试。以地基光电跟踪设备为例，验证过程通常包括人造靶标内场跟踪测试与自然靶标外场跟踪测试。

在内场条件下，目前最常用的测试系统是平面镜反射式旋转靶标测试系统[10-11]。但该系统的体积和重量较大，安装与搬运较为困难。传统测试系统参数多采用机械机构来加以调节。旋转轴系角度、平面镜位置、平面镜角度等参数的调整十分复杂[9]。在实际跟踪性能测试过程中，受限于光学视场角，能够成像的平行光射入角度有限，需要反复调节动态靶标参数。这就进一步增加了参数调节的时间成本。此外，由于反射镜结构的存在，对于不同波长的光源，应选择与其波长对应的反射镜。这进一步增加了设备更换的难度，降低了靶标系统的适应性。因此，一种可实现快速部署、快速调节参数、无反射结构的跟踪性能测试技术具有重要的应用价值。

本文基于传统动态靶标测试跟踪性能的基本原理，采用六自由度机械臂代替动态靶标。通过建立动态靶标的轨迹模型，利用机械臂末端的位姿轨迹规划来实现与传统方法相同的靶标轨迹。机械臂底座使用螺钉固定，可实现快速搬运、安装；参数调节由数字输入实现，轨迹解算自动完成；机械臂末端直接安装靶标光管，无反射结构。相较于传统方法，本方法具有部署灵活、调整便捷、无靶标限制等优点。

1 动态靶标测试原理

1.1 传统动态靶标

传统动态靶标的结构如图 1 所示。平行光管发出的平行光经过反射镜进入光电跟踪设备。通过识别平行光管分划板形成的像，光电跟踪设备可锁定目标。反射镜为动态靶标。通过调节反射镜与旋转轴的距离以及反射镜的夹角，可设置夹角 a。此时可模拟无穷远处运动的物体。然后启动旋转电机，靶标开始运动。根据靶标转速可等效实现任意距离下物体运动的速度。通过测试不同旋转速度下的光电跟踪设备脱靶量，可实现跟踪性能的评估。

在测试过程中，通常需要进行以下参数的调节。首先，靶标的旋转轴应穿过光电跟踪设备光学系统的旋转中心，以免位置偏移导致靶标光线偏离视场。因此在靶标底座设置调节机

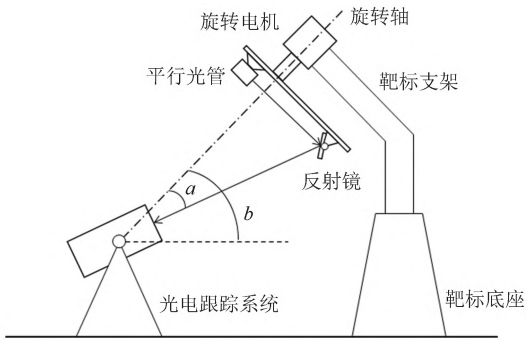

图 1 采用动态靶标进行光电跟踪性能检测的原理图

构，可实现方位角和俯仰角的调节。其次，根据底座位置与结构参数，可确定光电跟踪设备坐标系下的旋转中心点坐标。接着，基于测试指标要求，调节反射镜到旋转轴的距离以及反射镜倾角，使靶标光线同样穿过光学系统的旋转中心。由于手动调节靶标旋转轴与反射光线存在偏差，需要反复迭代参数调整过程，直至靶标图像在整个圆周都能成像。最后匀速旋转靶标，完成跟踪性能测试。

1.2 建立数学模型

由于设备本身的重量与机械调节的复杂性，传统动态靶标在实际应用中操作困难。因此，尝试对靶标的轨迹位姿进行建模，并通过机械臂完成动态靶标位姿的复现。将需要调节的参数作为机械臂路径规划的输入变量，在快速解算出轨迹位姿后将其输入至机械臂，避免了机械调节，从而提高了工作效率。

如图 2 所示，以光电跟踪设备的光学旋转中心 O 为原点，以垂直向上的方向为 z_O 轴，以水平的动态靶标方向为 y_O 轴，建立参考坐标系 $O\text{-}x_Oy_Oz_O$。动态靶标的旋转中心为 P，位于 $O\text{-}y_Oz_O$ 平面。直线 OP 为动态靶标的旋转轴线。S_1 为动态靶标的空间位置，即反射镜出射点位置。S_1 点的出射光线在空间中形成以 O 点为顶点的圆锥。

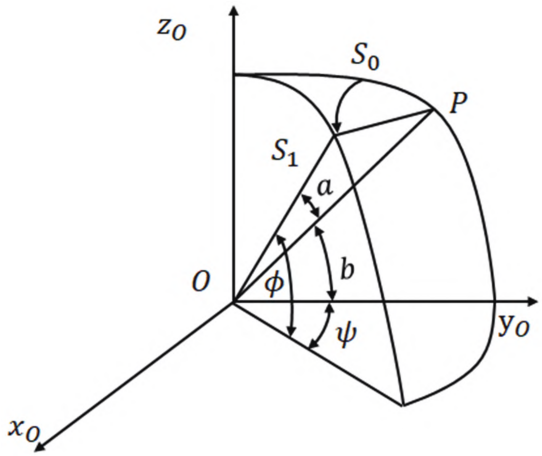

图 2 动态靶标与光电跟踪设备的空间运动关系

OP 与水平方向的夹角 b 为空间锥形的倾角，此时动态靶标的半锥角为 a。S_0 是方位角为零时的靶标位置。PS_0 与 PS_1 的夹角为 θ，可得到光电跟踪设备方位角 ψ、俯仰角 Φ 与靶标位置 S 的空间位置关系：

$$\begin{cases}\Phi = \arcsin(\cos a\sin b + \sin a\cos b\cos\theta) \\ \psi = \arcsin(\dfrac{\sin a\sin\theta}{\cos\Phi})\end{cases} \tag{1}$$

式中，$\theta=\omega t$，ω 为靶标旋转角速度，t 为目标匀速运动的时间。当 $t=0$ 时，S 在 S_0 点。

a、b、θ 的具体数值均可通过 P 与 S 的坐标获得。能够确定 P、S 坐标与直线 SO 方向的系统就可以应用于光电跟踪设备的跟踪性能评估。这为基于机械臂路径规划实现跟踪性能测试提供了可行的理论基础。

2 基于机械臂路径规划的测试系统

2.1 系统组成

对于市场上常用的串联/并联式机械臂，运动学与动力学解算已十分完善，相关计算已经嵌入到机械臂的驱动程序当中[12]。因此，基于现有机器人技术的路径规划方案使靶标设计更加灵活，是十分有效的动态靶标替代方案。

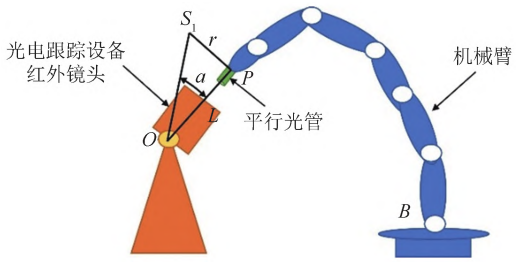

图 3 基于机械臂的光电跟踪设备的结构示意图

图 3 为基于机械臂的光电跟踪设备的结构示意图。六自由度机械臂基座 B 与地面通过螺钉固定。平行光管直接安装在机械臂的末端 P 上。平行光管的出射光线通过光电跟踪设备的光学旋转中心 O。在 ΔPS_1O 中，线段 OP 的长度为 L，线段 PS_1 的长度为 r，夹角为 a，三者之间的关系为

$$r = L \cdot \tan a \tag{2}$$

结合前面的内容可知，S_1 为动态靶标的空间位置，即机器人末端 P 要到达的位置。因此，得到直线 OS_1 相对于机械臂基座的位姿信

息后，就可得到机械臂末端 P 的位姿信息，进而实现机械臂末端 P 的路径规划。

2.2　工作原理

本文中机械臂的运动按照基坐标系、工具坐标系进行描述。图 4 所示为机械臂与光电跟踪设备的空间位置关系。以光电跟踪设备的光学旋转中心 O 为原点建立参考坐标系 O–$x_O y_O z_O$。附着于平行光管上的工具坐标系表示为 P–$x_P y_P z_P$。参考坐标系{O}的 y_O 轴与工具坐标系{P}的 z_P 轴平行。将机械臂固定基座相连的基坐标系表示为 B–$x_B y_B z_B$。设工具坐标系原点 P 相对于基坐标系{B}的位置矢量为 $\boldsymbol{P}^B$，$\boldsymbol{P}^B = [X \quad Y \quad Z]^T$。以 P′为原点建立辅助坐标系 P′–$x_{P'} y_{P'} z_{P'}$，P′与 P 重合。

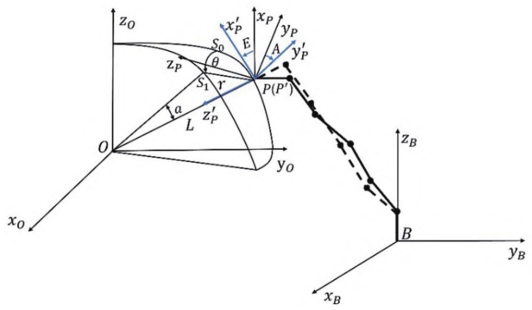

图 4 机械臂与光电跟踪设备的空间位置关系

由图 5 可得到辅助坐标系{P′}到工具坐标系{P}的坐标变换矩阵 $\boldsymbol{R}_{P'}^{P} = R(x, -A)R(Y, -E)$。其中，$A$、$E$ 为直线 OP 在工具坐标系{P}下的方位角与俯仰角。

机械臂的工具坐标系{P}到基坐标系{B}的变换矩阵存在图 6 所示的坐标变换矩阵：$\boldsymbol{R}_P^B = R(x, 90°)\,R(z, 90°)$。

参考坐标系的原点 O 相对于工具坐标系{P}的位置矢量 $\boldsymbol{O}^P$ 为

$$\boldsymbol{O}^P = [-L\sin E \quad -L\cos E\sin A \quad L\cos E\cos A]^T \tag{3}$$

参考坐标系的原点 O 相对于基坐标系{B}的位置矢量 $\boldsymbol{O}^B$ 为

$$\boldsymbol{O}^B = \boldsymbol{R}_P^B \boldsymbol{O}^P + \boldsymbol{P}^B \tag{4}$$

在辅助坐标系{P′}下，以参考坐标系原点 O 为顶点，OP′为旋转轴，OS_0 为母线，底面

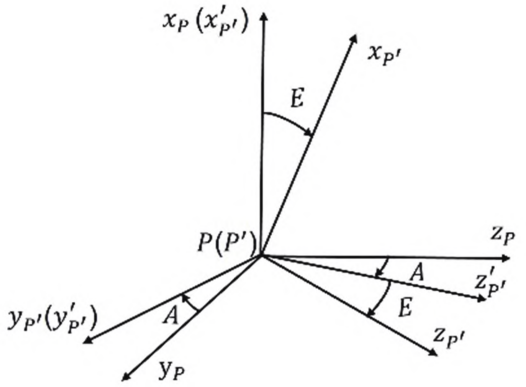

图 5 辅助坐标系与工具坐标系的欧拉变换图

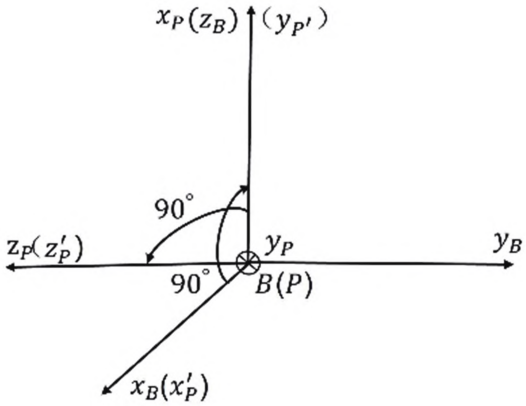

图 6 工具坐标系与基坐标系的欧拉变换图

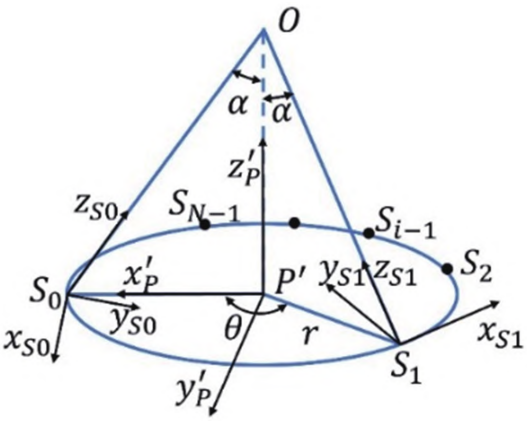

图 7 运动轨迹点分支坐标系的示意图

圆半径为 r，旋转角度为 θ，得到图 7 所示的圆锥。

θ 的取值范围为 $0° \leqslant \theta \leqslant 360°$。在该圆锥的底圆上取 N 点，表示为 $S_0 \sim S_{N-1}$。分别以 $S_0 \sim S_{N-1}$ 为原点，建立分支坐标系 S_{i-1}–$x_{s_{i-1}} y_{s_{i-1}} z_{s_{i-1}}$。由图 8 可以得到分支坐标系{$S_{i-1}$}到参考坐标系{P′}的坐标变换矩阵 $\boldsymbol{R}_{s_{i-1}}^{P'} = R(z_{i-1}, \delta_{i-1})\,R$

$(x_{i-1},-a)$。$\delta_{i-1}=90°+\theta(i-1)/N$。其中，$i=1,\cdots,N$，$0°\leqslant\theta(i-1)/N\leqslant360°$。令 $D_{i-1}=\theta(i-1)/N$，并将其划分为 4 个象限进行表示：

$$\begin{cases} D_{i-1}=0 & i=1 \\ D_{i-1}=\dfrac{\theta}{N}(i-1) & 0<D_{i-1}\leqslant 90° \\ W_{i-1}=180°-D_{i-1} & 90°<D_{i-1}\leqslant 180° \\ M_{i-1}=D_{i-1}-180° & 180°<D_{i-1}\leqslant 270° \\ N_{i-1}=360°-D_{i-1} & 270°<D_{i-1}\leqslant 360° \end{cases} \tag{5}$$

分支坐标系的原点 S_{i-1} 相对辅助坐标系{P′}的位置矢量 $\boldsymbol{S}_{i-1}^{P'}$ 为

$$\boldsymbol{S}_{i-1}^{P'}=\begin{cases} [r\quad 0\quad 0]^{T}, i=0 \\ [r\cos D_{i-1}\quad r\sin D_{i-1}\quad 0]^{T}, 0<D_{i-1}\leqslant 90° \\ [-r\cos W_{i-1}\quad r\sin W_{i-1}\quad 0]^{T}, 0\leqslant W_{i-1}<90° \\ [-r\cos M_{i-1}\quad -r\sin M_{i-1}\quad 0]^{T}, 0<M_{i-1}\leqslant 90° \\ [r\cos N_{i-1}\quad -r\sin N_{i-1}\quad 0]^{T}, 0\leqslant N_{i-1}<90° \end{cases} \tag{6}$$

根据式(6)得到分支坐标系的原点 S_{i-1} 相对于工具坐标系{P}的位置矢量 $\boldsymbol{S}_{i-1}^{P}$ 与姿态变换矩阵 $\boldsymbol{R}_{S_{i-1}}^{P}$：

$$\begin{cases} \boldsymbol{R}_{S_{i-1}}^{P}=\boldsymbol{R}_{P'}^{P}\boldsymbol{R}_{S_{i-1}}^{P'} \\ \boldsymbol{S}_{i-1}^{P}=\boldsymbol{R}_{S_{i-1}}^{P}\boldsymbol{S}_{S_{i-1}}^{P'} \end{cases} \tag{7}$$

由上述公式可以得到分支坐标系的原点 S_{i-1} 相对于基坐标系{B}的位置矢量 $\boldsymbol{S}_{i-1}^{B}$ 与姿态变换矩阵 $\boldsymbol{R}_{S_{i-1}}^{B}$：

$$\begin{cases} \boldsymbol{R}_{S_{i-1}}^{B}=\boldsymbol{R}_{P}^{B}\boldsymbol{R}_{S_{i-1}}^{P} \\ \boldsymbol{S}_{i-1}^{B}=\boldsymbol{R}_{P}^{B}\boldsymbol{S}_{i-1}^{P}+\boldsymbol{P}^{B}) \end{cases} \tag{8}$$

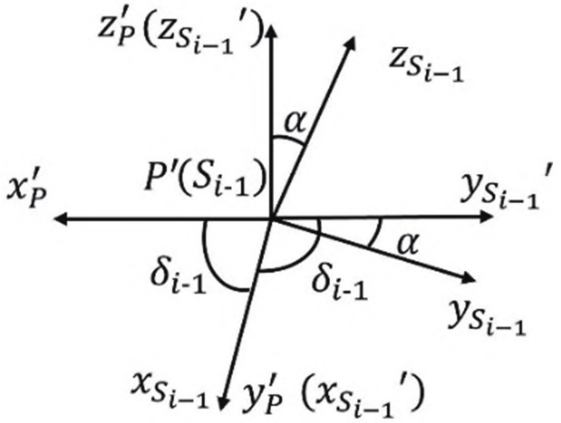

图 8 分支坐标系的欧拉变换图

通过上述推导，得到 N 个靶标空间位置 $\boldsymbol{S}_{i-1}$ 相对于机械臂基坐标系的空间位置与姿态变换。

3 数值仿真

为了验证本文方法与传统方法效果的一致性，采用数值仿真进行验证。为了模拟实际跟踪实验调参过程中光电跟踪设备中心未知的情况，在仿真时随机给出中心的坐标点与测试参数。

通过反复调节靶标旋转中心 P 与 OP 的距离 L、靶标方位角 A、靶标俯仰角 E，可得到使锥形顶点处于光电跟踪设备光学中心(即符合跟踪测试需求)的测试参数(见表 1)。此时的机械臂末端运动轨迹的三维图如图 9 所示。

由图 9 可知，在提出的测试系统中，存在符合测试要求的轨迹，且可通过调节有限的参数获得。这满足跟踪性能测试的靶标位姿要求。

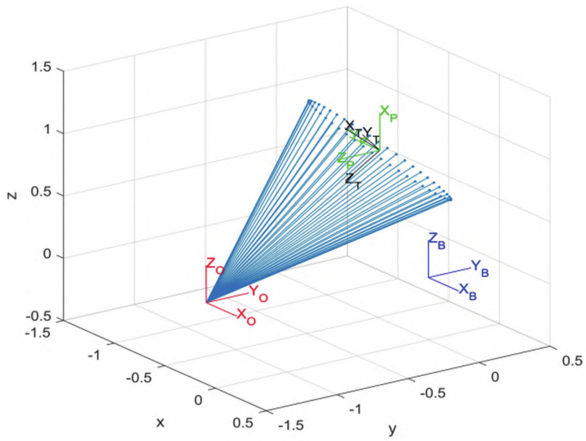

图 9 机械臂末端运动轨迹的三维图

表 1 仿真参数

参数	数值	单位
光电系统原点 O	(−0.4388, −1.0195, 0.1361)	m
半锥角 a	20	°
靶标旋转中心 P	(0.2, −0.2, 1)	m
轨迹点数量 N	50	—
OP 距离 L	1.2145	m
靶标方位角 A	16.2475	°
靶标俯仰角 E	−45.3427	°

在此基础上，根据光电跟踪设备坐标与机械臂末端坐标，算得 S 点相对于 O 点的方位角 A_s 与俯仰角 E_s：

$$A_s = \arctan\left(\frac{y_s - y_o}{x_s - x_o}\right) + \Delta \tag{9}$$

$$E_s = \arcsin\left(\frac{z_s - z_0}{\sqrt{L^2 + r^2}}\right) \tag{10}$$

式中，x_s、y_s、z_s 为 S 点坐标值；x_o、y_o、z_o 为 O 点坐标值；Δ 为方位角修正变量，受靶标方位角以及 S 点与 O 点的相对位置影响。当 A $\in(-90°, 90°)$时，可以得到以 O 点为中心、S 点处于不同象限时的 Δ 值：

$$\Delta = \begin{cases} A，第\ 1\ 象限 \\ -A，第\ 2\ 象限 \\ -A，第\ 3\ 象限 \\ A，第\ 4\ 象限 \end{cases} \tag{11}$$

经过修正的俯仰角与方位角曲线如图 10 所示。可以看出，由本文方法得到的跟踪性能测试轨迹与传统方法完全一致，满足跟踪性能测试的动态靶标轨迹要求。

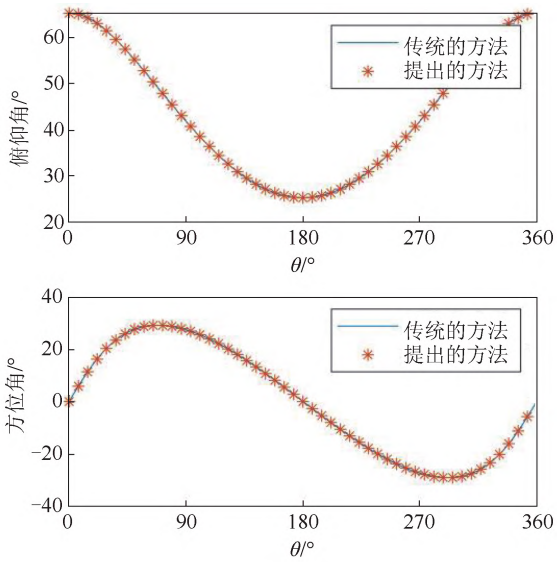

图 10 传统靶标与新型靶标轨迹对比图

4 结束语

本文分析了传统跟踪性能系统的动态靶标检测原理，采用机械臂路径规划的方法实现了新型动态靶标测试方案。相较于传统方法，本文提出的方法不再需要专用的机械机构，适用于所有工作空间满足测试需求的机械臂结构；整机重量轻，安装形式简单，降低了测试系统搭建的复杂度；通过软件输入参数，避免了机械调节导致的调参困难问题，有效提高了测试效率；直接更换靶标即可实现不同光电系统的测试，提高了靶标适用范围。仿真结果表明，基于机械臂路径规划的动态靶标可实现跟踪性能测试所需的靶标轨迹，满足光电跟踪设备的跟踪性能研究需求。此外，机械臂末端位姿的数据更加准确、全面，为更加复杂的跟踪测试技术奠定了基础，具有一定的应用价值与技术探索性。得益于机械臂的灵活性，在后续工作中还要对变速度、非圆周的靶标轨迹规划进行研究，最终实现任意给定轨迹下的跟踪性能测试。

参考文献

[1] 徐涛，李博，刘廷霞，等. 车载光电跟踪系统跟踪转台的初始标定 [J]. **光学精密工程**，2013，**21**(3)：782–789.

[2] 罗涛. 基于 FPGA 的船载视频光电跟踪系统设计 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2015.

[3] Alam M S，Bal A. Improved Multiple Target Tracking via Global Motion Compensation and Optoelectronic Correlation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*，2007，**54**(1)：522–529.

[4] 王卫兵，王挺峰，郭劲. 星载光电捕获跟踪瞄准控制技术分析 [J]. **中国光学**，2014，**7**(6)：879–888.

[5] 汪嘉鑫，徐贵川，于婷洋，等. 复杂红外背景中运动小目标快速跟踪技术 [J]. **应用光学**，2021，**42**(3)：443–453.

[6] 岳元，彭亮节. SDI 红外图像在火炮光电跟踪系统中的应用 [J]. **激光与红外**，2016，**46**(8)：1024–1028.

[7] 亓贺. 光电图像制导系统中目标跟踪关键技术研究 [D]. 北京：北京理工大学，2016.

（下转第 48 页）

在 1.5～250 W 功率范围内间隔取点进行多次测试，然后将其数据与标准功率计的测试结果进行对比。结果表明，本文研制的热电堆激光功率计的误差均在±3%以内，测量数据准确性高。该功率计响应时间短，测试结果重复性好，可满足本实验室光电测试方向相关项目中光束探测以及功率测试的需求。同时，我们还对 532 nm 绿光光源以及 2～14 μm 红外光源进行了功率测试实验。结果表明，本文研制的功率计可实现快速响应和准确测试。

5 结束语

本文基于塞贝克效应研制出一款实用的百瓦量级激光功率计，验证了热电堆方案在大功率激光功率测试中的可行性。本文研制的功率计可实现对 1.5～250 W 激光的精确测量，测量误差在±3%以内。该功率计相较于国内其他产品具有功率测试范围大、响应时间短等优点，对激光器研制与生产、光束合成、激光损伤测试等方向具有重要意义。目前存在的主要问题是 1.5 W 功率以下的测试结果波动较大。下一步拟从硬件电路和软件算法两方面进行优化，重点解决 100 mW～1.5 W 激光功率测试的准确度问题。

参考文献

[1] Bao A, Lei C, Mao H Y, et al. Study on a High Performance MEMS Infrared Thermopile Detector [J]. *Micromachines*, 2019, 10(12): 877.

[2] 夏燕，薛晨阳，欧文，等. 基于黑硅为吸收层的热电堆红外探测器 [J]. **仪表技术与传感器**，2012，42(3)：11–14.

[3] 王楷群. 热电堆红外探测器的设计与性能测试 [D]. 太原：中北大学，2010.

[4] 徐峥谊. 微机械热电堆红外探测器 [D]. 上海：中国科学院上海微系统与信息技术研究所，2002.

[5] 陈彦丽，罗通顶，田耕，等. 一种大动态高带宽模块化的信号调理电路设计 [J]. **现代应用物理**，2022，10(2)：44–48.

[6] 朱思浩，罗显志. 可配置八阶巴特沃斯低通滤波器的设计 [J]. **湖北大学学报(自然科学版)**，2021，43(3)：276–281.

[7] 张君涵，唐灏，张玉华. 基于现场可编程逻辑门阵列的 STM32 单片机自动下载通用串行总线的设计 [J]. **信息记录材料**，2022，23(3)：108–111.

(上接第 43 页)

[8] Sui S, Zhao T. Active disturbance rejection control for optoelectronic stabilized platform based on adaptive fuzzy sliding mode control [J]. *ISA Transactions*, 2021, 125: 85–98.

[9] 刘红. 光电跟踪设备测试技术研究 [D]. 成都：中国科学院光电技术研究所，2021.

[10] 贾峰，李桂芝，李阳. 光电经纬仪室内检测系统的研究与应用 [J]. **飞行器测控学报**，2011，30(3)：32–35.

[11] 张宁，沈湘衡，杨亮，等. 利用动态靶标谐波特性评价光电经纬仪的跟踪性能 [J]. **光学精密工程**，2010，18(6)：1286–1294.

[12] 解迎刚，兰江雨. 协作机器人及其运动规划方法研究综述 [J]. **计算机工程与应用**，2021，57(13)：18–33.