

doi: 10.7690/bgzdh.2018.02.003

光电标校装置总体设计

贺林波, 刘爱东, 于金冬

(海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 为了在着舰引导系统中实现光学助降装置和中线电视下滑道的一致性标校, 保证系统的可靠性和精确性, 同时丰富真值获取方法, 对光电标校装置进行总体设计。提出一种将光电标校装置置于理想着舰点, 对空中目标进行实时跟踪, 测量目标相对于理想着舰点的空间位置信息, 获取真值的方法。通过公式推导, 对装置各个组成部分提出指标要求, 并介绍光电标校装置总体方案设计思想、系统构成及主要工作原理, 详细阐述系统总体设计及系统工作过程。分析结果表明: 该设计有助于着舰引导系统安全可靠地工作, 能够满足系统标校精度要求, 为系统标校真值测量技术分析提供一定的理论依据。

关键词: 标校; 跟踪; 转台; CCD 相机

中图分类号: TJ86 **文献标志码:** A

Overall Design of Photoelectric Calibration Equipment

He Linbo, Liu Aidong, Yu Jindong

(College of Coast Defense Army, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to achieve the consistency of the optical landing device and the midline television glide in the landing guidance system, ensuring system reliability and accuracy and enriching method for true value acquiring, carry out overall design of photoelectric calibration. This article presents a method to store the photoelectric calibration device in the ideal landing point for tracking the air target in real time. In the way, it can measure the spatial position information of the target relative to the ideal landing point and obtain the true value. Through the formula derivation, the article puts forward the index requirements of each component of the device, and introduces the overall design idea, the system structure and the main working principle of the photoelectric calibration system. The text elaborates the overall design and the system work process in detail. The analysis results show that the design can help the landing guidance system to work safely and reliably. It can meet the requirements of the calibration precision and provide some theoretical basis for the analysis of the true value measurement technology of the calibration system.

Keywords: calibration; track; swivel table; CCD camera

0 引言

着舰引导系统是航空母舰的重要组成系统, 其作用是引导舰载机安全准确地着舰, 其性能直接影响航母编队战斗力。确保着舰引导系统安全可靠工作, 需要对着舰引导系统进行标校, 评估系统性能。

对着舰引导系统进行标校需要一套真值测量设备, 用来测量合作目标空间位置信息。目前对着舰引导系统标校所用的真值获取方法有全站仪定位、基于双目立体视觉的定位^[1]和差分 GPS 定位^[2]。全站仪真值测量方法对操作人员要求较高, 同时需要进行复杂的事后数据处理。利用双目立体视觉原理进行真值测量需要采用多个高速相机进行人工提取目标特征, 如果操作人员技能娴熟, 提取的特征精度高且可靠性强, 需要将相机拍摄的所有照片进行储存, 以备事后处理, 这就需要很大的存储空间。

另外, 高速相机测量得到的真值无法实时获取, 事后处理比较复杂。采用 RTK (real time kinematic) 技术进行真值测量, 易受干扰, 无法保证战时 GPS 信号的正确可靠性。这几种方法是在自身坐标系下进行测量的, 最终需要将测量结果统一到以理想着舰点为原点的甲板坐标系。而航母靠泊码头或海上锚泊过程中处于晃动状态, 首先需要根据惯导设备提供的舰船姿态信息将原始测量数据转化至地平坐标系, 但由于惯导设备测量存在一定误差, 即转化至地平坐标系下引入姿态测量误差。其次, 由于甲板存在一定变形, 传感器与理想着舰点之间相对位置发生变化; 最后从地平坐标系转化至甲板坐标系下, 引入了甲板变形导致的误差, 整个过程包含多次坐标变换, 每一次变换引入不同类型的误差。

为了丰富和扩展系统标校真值测量手段, 提高标校效率, 减少系统误差传递, 笔者提出将光电标

收稿日期: 2017-10-07; 修回日期: 2017-11-10

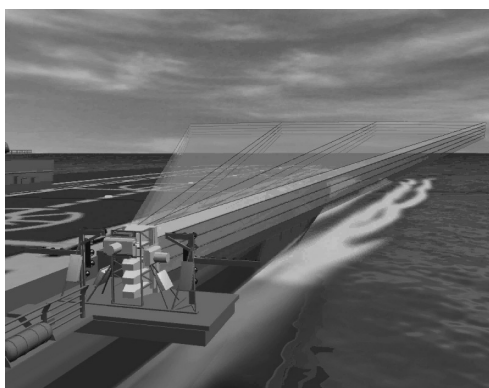
作者简介: 贺林波(1993—), 男, 河南人, 在读硕士, 从事嵌入式系统研究。

校装置置于理想着舰点处，对空中目标进行检测和跟踪，实时得出目标的俯仰、方位和距离，并根据舰船姿态设备提供的理想着舰点处的纵、横摇信息，将测量值转化到以理想着舰点为原点的甲板坐标系下，作为约定真值的方法。整个过程只需一次坐标变换，减少引入的误差类型，降低了系统误差传递。为了对光电测量系统获取真值的方法进一步研究，笔者对光电标校装置进行总体设计，使其具备较强的天候条件适应能力，测距和测角精度高，体积小，标校时可以快速部署于甲板上的特点。

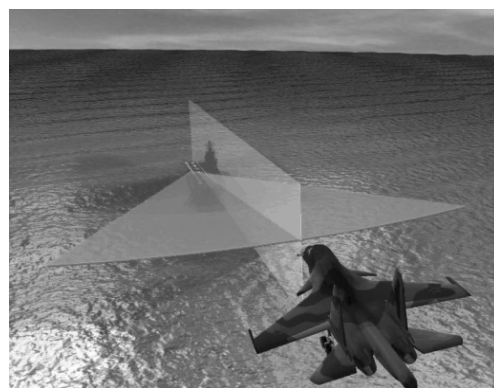
1 光学助降装置工作原理

光学助降装置通过内部光源向空中投射出一

道光束，提供下滑道引导光束的中间瞄准灯箱发出橙色光束(为方便考虑可将其视为光平面)。该光平面与通过阻拦跑道中心线且垂直于甲板的平面在空间相交，得到一条直线，这条直线指示的就是舰载机飞行员所跟踪的下滑道。图 1 为工作示意图。在着舰过程中，飞行员通过实时判断瞄准灯箱的光球和基准灯组光柱二者的相对位置，调整飞机与下滑道在高度上的偏移，通过对准跑道中心线调整与下滑道在左右方向上的偏移，由此跟踪下滑道着陆。在舰摇摆时，装置接收航母的纵横摇参数并进行解算，得到对应瞄准灯箱转轴的转角信息，通过随动系统灯箱的光束进行补偿。工作原理如图 2。



(a) 光束平面示意图



(b) 着舰引导光束模型

图 1 光学助降装置工作示意图

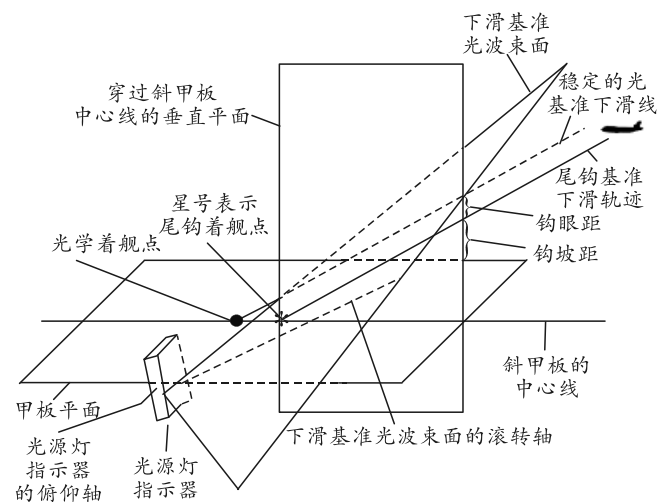


图 2 光学助降装置原理

2 光电标校测量原理

笔者将光电标校装置置于理想着舰点处，利用光电标校装置对飞机尾钩进行实时跟踪，得出尾钩相对于理想着舰点的空间位置信息，将带有时间戳的信息传输给计算机，事后根据舰船姿态信息处理单元提供的理想着舰点处纵、横摇等姿态信息，转

换至基准坐标系，作为约定真值。光学助降装置为飞行员提供眼位信息，将光学助降装置的信息转换至尾钩处，与光电标校装置测量的真值进行比较，对下滑道一致性进行标校。光电设备标校如图 3。

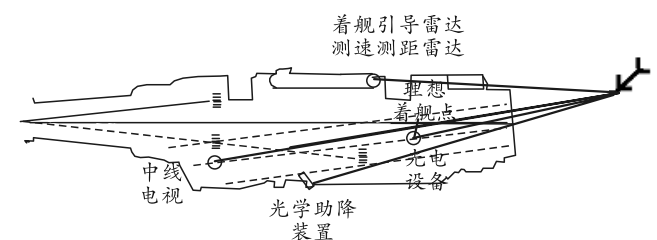


图 3 光电设备标校

3 总体设计

3.1 系统组成及工作原理

光电标校装置主要由显示器、电动变焦镜头、CCD 相机、激光测距机、图像跟踪板、串口转换器、转台等组成。相机和激光测距机安装在转台内，视轴平行，显示器用来显示监视画面。系统组成如图 4 所示。

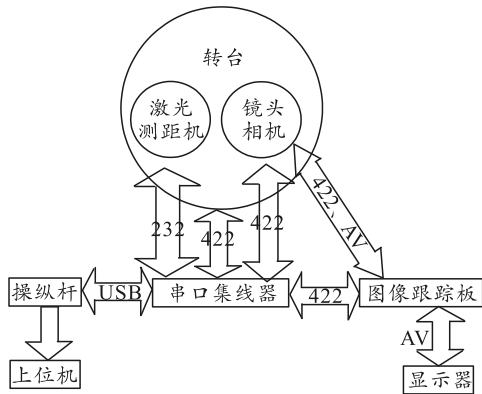


图 4 系统组成

光电标校装置由 CCD 相机获取视场中的目标，并输出标准 PAL 制式模拟视频信号给图像跟踪板，经过数字图像处理，检测到目标的位置，解算出目标相对于光轴的脱靶量，将处理结果、系统状态和相关辅助显示内容复合到视频中，在显示器上显示，同时将解算结果传送给上位机。上位机根据脱靶量数据、角速度及角度信息计算控制量传输给驱动控制，从而驱动转台运动，进而将目标锁定在视场中心，实现对目标的实时跟踪测量。光电测量系统原理如图 5。

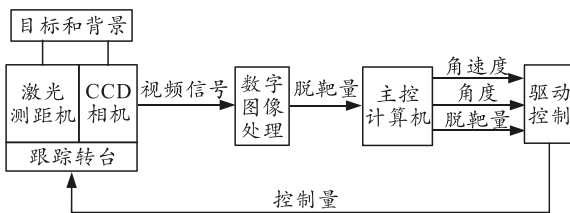


图 5 光电测量系统原理

3.2 变焦镜头

系统采用电动变焦镜头，具有电动变焦机构和电动调焦机构，可以通过通信接口接收控制指令，实现连续变倍变焦，同时保持像面稳定，改变物镜对目标进行放大，以达到改变观测范围的目的，并通过通信接口对外反馈当前工作状态；采用长焦距镜头，成像亮度高，作用距离远；采用自动光圈调整方式，调光范围满足目标照度和从明亮到黑暗的变化需要，有利于对目标的检测和跟踪；选用高分辨率化学镜头和高灵敏度成像器件，满足系统对不良环境下目标检测需要。

3.3 相机

相机作为系统的核心部件，性能直接影响系统的作用距离和成像质量。作用距离是系统设计的技术指标之一，决定系统探测距离的内因是光学传感器的性能^[3]，外因是气候条件和目标特性；因此，

在进行系统设计时需要考虑传感器的参数、目标几何尺寸、辐射特性和大气条件。

对于远距离的目标进行稳定的跟踪，在满足一定对比度条件下，还应该满足 CCD 靶面的成像占据一定像元数和 CCD 靶面成像照度大于 CCD 靶面的最低照度。

光学镜头的焦距由识别目标所需的分辨率、最大视场角及 CCD 像元尺寸决定。

空间分辨率

$$\Delta\theta = \frac{L}{2nR} \quad (1)$$

式中： L 为探测目标的外形尺寸； R 为探测的最远距离； n 为目标的成像在靶面上所压的线对数。

长焦距为

$$f_{\max} = \frac{P}{\Delta\theta} \quad (2)$$

式中 P 为 CCD 像元尺寸。

短焦距为

$$f_{\min} = \frac{f_{\max}}{g} \quad (3)$$

式中 g 为变倍比。

依据约翰逊判据，目标成像在 CCD 靶面上占据 2 个像元(1 对线)，可以实现的目标探测概率大于 50%；占据 8 个像元(4 对线)，对目标的探测概率大于 80%^[4]。

镜头的相对孔径影响系统的靶面照度和分辨率^[5]，因此确定相对孔径时需要满足以下要求。

1) 照度原则。

CCD 靶面最小照度公式为

$$E_c = \frac{1}{4} E_0 \tau_0 \left(\frac{1}{F}\right)^2 p_0 \quad (4)$$

式中： E_0 为目标照度； τ_0 为镜头透过率； F 为镜头光圈系数； p_0 为漫反射系数。

探测器接收目标照度为

$$E_m = \frac{1}{4} E_g p_1 \tau_0 \tau_1 \alpha \left(\frac{D}{f}\right)^2 \quad (5)$$

所选探测器件要达到天候条件，必须满足照度方程^[6] $E_m \geq E_c$ ，则有

$$\left(\frac{D}{f}\right) \geq \sqrt{\frac{4E_c}{E_g p_1 \tau_0 \tau_1 \alpha}} \quad (6)$$

式中： E_g 为一定太阳高角时地面照度； p_1 为漫反射系数； τ_0 为镜头透过率； τ_1 为典型海洋条件下大气

透过率； α 为光学弥散系数； $\frac{D}{f}$ 是光学系统的相对口径。

2) 分辨率原则。

为保证目标成像在 CCD 靶面上不少于 8 个像元，则镜头的最低分辨率为

$$N = \frac{1}{8P} \quad (7)$$

为了使目标的识别概率更高，取镜头的极限分辨率 $N_{\max} = 2N$ ，则相对孔径为

$$\frac{D}{f} = N_{\max} \times 1.22\lambda \quad (8)$$

式中 λ 为波长，在可见光波段 λ 取 $0.65 \mu\text{m}$ 。

比较系统的靶面照度和分辨率，最终确定相对孔径。

3.4 激光测距机

距离测量采用激光器作为光源，与普通光源相比具有亮度高、发散角小、单色性好的优点，所以文中系统采用激光测距机进行距离测量。激光测距机可以产生并向合作目标发射编码激光脉冲，接收编码脉冲回波，对目标距离信息进行转换和处理，并提供给计算机分系统。测距系统主要由激光器、控制电路、微机接口、控制软件等部分组成。

激光测距的精度由测距仪器的精度决定，与测量距离无关。该激光测距仪的体积小、质量轻，便于安装，采用激光脉冲反射时差法原理进行测量。与相位法相比，脉冲法具有以下优点：1) 相同功率下，脉冲法瞬时功率较大，可以接受较远处反射回来的信号，所以测距距离较远；2) 脉冲法测距只需记录往返时间，接收到反射信号，测量结束。相位法接收到反射信号后需要与初始激光相位进行比较，计算差值，需时较长。

3.5 图像跟踪板

为了在有限的时间实现大量的运算处理，达到实时跟踪的目的，文中系统设计采用 DSP 和 FPGA 协同完成实时图像处理。图像跟踪板主要由 DSP 和 FPGA 2 个处理芯片构成，采用 FPGA+DSP 相互配合的高速图像处理结构，完成图像的处理和脱靶量解算，其最大的特点是结构灵活，处理速度可以达到毫秒级，通用性较强，适于模块化设计，从而提高算法运行效率。其中，DSP 主要负责解算目标脱靶量，并将脱靶量传输给上位机，同时将叠加后视频通过视频解码芯片在显示器上呈现，供观察者使

用。FPGA 主要负责图像信号的帧捕获和视频叠加功能。采用 FPGA 完成视频叠加任务的优点主要体现在以下 2 个方面：首先，系统中存在大量控制信号，导致逻辑变化较多，为了避免器件分立增加电路的复杂性，提高系统稳定性，可以充分利用 FPGA 空间完成逻辑处理任务，从而不会额外增加逻辑控制电路；其次，在视频信号上叠加由上位机配置的信号，包括目标方位、俯仰、距离、跟踪波门、跟踪状态以及视场中心十字丝，这些信息要求能够实时刷新并显示在电视监视设备上，而 FPGA 可以达到上述要求。图像跟踪系统原理如图 6 所示。

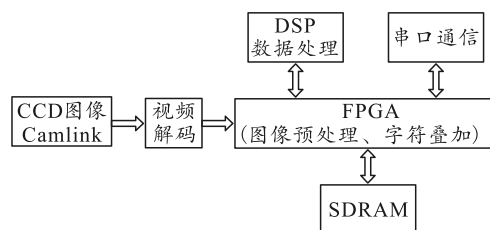


图 6 图像跟踪系统原理

3.6 伺服控制

转台是光电标校装置的重要组成部分，承载多个任务设备，完成对目标的实时跟踪功能。伺服控制在驱动电机的同时，转台要具有稳定的速度和较高的精度，所以系统可以采用具有高精度、高分辨率、低惯量、低噪声的光电编码器作为系统的数字测速元件，有利于控制直流伺服电机。而增量式编码器以脉冲形式输出信号，既可以进行角度测量，又可以利用基于脉冲计数的方法进行测速，所以系统采用增量式编码器作为转台伺服控制系统的反馈元件，采用位置环、速度环方案实现对系统的稳定控制。伺服控制回路原理如图 7 所示。

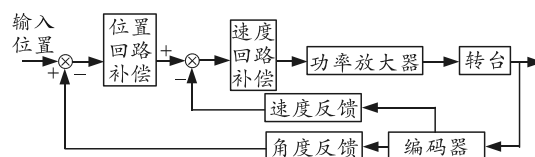


图 7 伺服控制原理

3.7 结构形式

该系统的稳定平台是光电标校装置系统主体的基础，对系统技术性能起决定性作用。本系统转台采用“U”形臂结构，由俯仰轴和方位轴组成，设计成球形外壳，不仅起到支撑和动力传递作用，而且对球体内可见光电视分系统和激光测距机分系统起保护作用，这种结构紧凑、承载力大、便于调整测量。

采用这种结构便于更换光电传感器，例如红外与相机之间的替换。转台组成框图如图 8 所示。

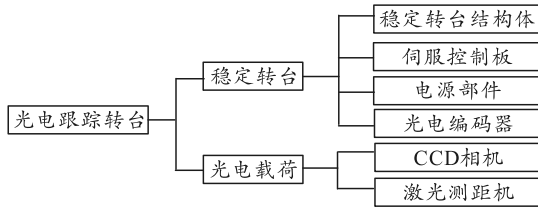


图 8 转台组成

转台依靠俯仰和方位电机驱动机械结构件，带动负载实现 2 个自由度的转动。在伺服转台的俯仰轴上，安装光电编码器和俯仰限位开关，限位开关用来限定俯仰轴转动的极限位置，光电编码器则用来探测精确的俯仰和方位信息。伺服转台结构如图 9 所示。



图 9 转台结构

3.8 串口转换器

相机、激光测距机和视频跟踪器要与上位机进行通信，但是下位机支持的外设接口与上位机不匹配，所以需要串口转换器对下提供多个串行 RS-232/422/485 外设接口，对上提供一个 USB 接口，通过串口转换器实现上位机与光电标校装置的组成部件进行通信。转换器应具有良好的兼容性，可以实现即插即用，易于维护和管理。

4 系统工作过程

光电标校装置系统是由光学器件、电子器件、机械器件共同组成的闭环伺服控制系统。系统通电后，首先进行自检，云台在水平方向旋转 1 周，如果系统工作正常，操控人员通过电视监视器观察到

CCD 相机拍摄的视频图像，观察者通过与上位机连接的控制杆将目标调整到 CCD 相机视场内，对准目标后确定捕获目标，这时相机将视频信息传输到图像跟踪板的图像采集模块，图像采集模块将视频信号转化为数字信号，送给跟踪处理器，经过处理器的分析，解算出目标相对于视场中心的脱靶量，即目标对准线与相机光轴的偏差。

上位机将脱靶量转发给伺服控制，驱动云台在水平和俯仰方向转动，使目标实时处在视场中心。

光电成像跟踪系统信号流向如图 10 所示。

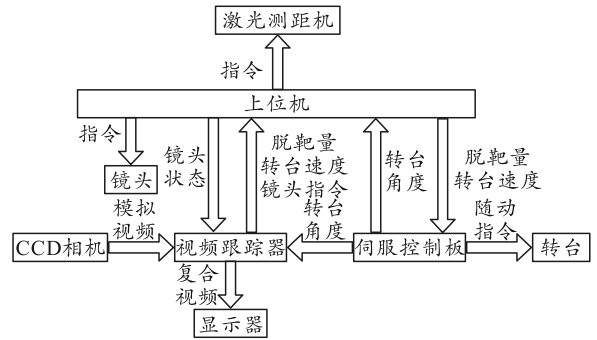


图 10 系统信号流向

5 结论

综上所述：笔者利用技术成熟的设备，结合相关的算法，在满足高精度的条件下，研制了光电标校验证装置，具备科学实验研究的条件，并对真值测量技术进行研究，可为系统标校真值测量技术分析提供一定的理论依据。

参考文献：

- [1] 沈彤, 刘文波, 王京. 基于双目立体视觉的目标测距系统[J]. 电子测量技术, 2015, 38(4): 52-54.
- [2] 刘高峰, 刘健. 基于 GPS 定位系统的舰船雷达标校技术研究[J]. 舰船科学技术, 2006, 28(6): 100-114.
- [3] 许洪, 王向军. 多光谱、超光谱成像技术在军事上的应用[J]. 红外与激光工程, 2007, 1(4): 13-17.
- [4] 朱莹, 常本康, 刘磊. 帧积分时间对微光电视观察视距的影响[J]. 中国激光, 2008, 35(2): 259-262.
- [5] 张钊, 陈涛, 周勇, 等. 光电稳定平台自适应摩擦补偿方法[J]. 兵工自动化, 2016, 35(11): 68-70.
- [6] 黄猛, 张葆, 沈宏海, 等. 海上光电监视系统的设计与研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 849-852.