

激光与光电子学进展

直线运动无限远动态目标模拟系统研究

许淑伟, 尹晶*, 刘玉桥, 赵希, 张子熙

长春电子科技学院电子工程学院, 吉林 长春 130114

摘要 直线运动动态目标模拟系统可提供相对航空相机做像移直线运动的无限远动态目标,用于检测航空相机的动态分辨率指标。针对动态模拟系统中的大视场长焦距的准直光学系统完成了复消色差光学设计,结合鉴别率板、精密直线滚动导轨、直线电机等共同组成了动态目标发生装置。根据航相机像移速度方程设计了动态目标模拟的运行轨迹,在 LABVIEW 虚拟仪器平台上采用比例-积分-微分算法控制直线电机实现了运行速度 10~900 mm/s、匀速段瞬时速度误差 $\leq 1\%$ 的动态目标模拟。结果表明,优化后的光学系统传递函数优于 0.2@100 lp/mm,畸变 $\leq 0.03\%$ 。

关键词 光学设计; 动态目标模拟; 航空相机; 平行光管; 比例-积分-微分控制; LABVIEW

中图分类号 TH745

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1922003

Simulation System of Linear Motion Infinite Dynamic Target

Xu Shuwei, Yin Jing*, Liu Yuqiao, Zhao Xi, Zhang Zixi

College of Electronic Engineering, Changchun College of Electronic Technology, Changchun 130114, Jilin, China

Abstract The linear motion dynamic target simulation system can provide an infinite distance dynamic target with linear motion relative to the aerial camera, which is used to detect the dynamic resolution index of the aerial camera. This paper completes the achromatic optical design of a collimator with a large field of view and long focal length. The dynamic target generator comprises a collimator, resolution chart, precise linear guide, and linear motor. The trajectory of the dynamic target was designed using the image motion velocity equation on an aerial camera. Based on the LabVIEW platform, the proportional-integral-derivative algorithm was used to control the linear motor to realize dynamic target simulation with an operating speed of 10–900 mm/s and instantaneous velocity error less than 1% at a constant speed segment. The result reveals that the optimized optical system's modulation transfer function is better than 0.2@100 lp/mm, and distortion is less than 0.03%.

Key words optical design; dynamic target simulation; aerial camera; collimator; proportional-integral-derivative algorithm; LabVIEW

1 引言

全景航空相机固定在航空器上可对地面景物完成拍摄任务,然而飞行过程中的飞行速度和姿态变化(俯仰、偏航、横滚)均会影响拍摄成像质量,因此航空相机控制系统会对这些干扰因素进行补偿,而补偿效果如何则需专门的设备进行检测^[1]。直线运动无限远动态目标模拟系统则是模拟飞行器以不同速高比并产生变速直线运动的虚拟目标,以模拟相对航空相机做直线快速像移的地面景物目标的相对运动。动态目标模拟系统集成光、机、电、算一体化的高精度专用检测设备,是光电侦察设备在实验室内进行动态精度检测不可或缺

的地面专用检测设备之一^[2]。

20世纪80年代,欧美等发达国家在半实物仿真系统方面就已经达到了比较好的水平,尤其是在航空航天领域已建设了一批高水平、大规模的半实物仿真系统^[3]。2006年美国艾格林空军基地仿真实验中心为其战斗机吊装的光电跟瞄设备开发了高分辨力(1024×1024)、宽光谱(2~20 μm)红外景象目标特征模拟系统^[4]。国内在航空相机的静、动态分辨率检测方面也做出了大量的研究。2007年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的吴国栋^[5]研发了一种航空相机动态分辨力测试用模拟动态目标发生器,采用平行光管模拟无穷远目标,并将平面反射镜置于光管的出射

收稿日期: 2022-05-12; 修回日期: 2022-06-07; 录用日期: 2022-06-30

通信作者: *621232@qq.com

光路中,由一维转台带动反射镜旋转从而实现目标移动。2013年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的魏忠伦等^[6]研究了一种基于液晶光阀的动态光学目标模拟器用视景仿真镜头,液晶光阀位于视景仿真镜头的焦平面位置,镜头对液晶光阀成像后可在有限距离上产生无限远效果模拟观测结果。2020年长春理工大学王志强等^[7]设计了一种小视场宽光谱的离轴三反光学系统,结合数字微镜器件目标生成器为装甲车辆提供动态实时模拟目标。

通过调研上述国内外动态目标模拟系统的研究现状可知,这些研究动态目标模拟系统均将动态目标转鼓固定于精密转台上且调整到平行光管的焦面上,并且动态目标转鼓圆周面上固定有多个目标板,动态的转鼓转动形成目标的移动。此种方式具有以下两种特点:1)回转运动在边缘上一点的速度为切向速度,即速度的方向是时刻变化的,在检测相机动态分辨力要求运动的目标垂直于光轴做匀速直线运动,即使回转体作绝对的匀速运动,在准直物镜的焦面上作垂直于光轴的运动也很难保证较好的匀速直线运动;2)转体是有一定曲率的,分辨力的图案不会完全位于准直物镜的焦面上,这样会造成分辨力图案部分处于离焦状态。本文所研究的直线运动无限远目标模拟系统采用鉴别率板置于平行光管焦面做垂直光轴的直线运动,则可以避免上述问题。

2 系统组成与检测原理

将航空相机固定在二维摇摆台上,根据飞行器姿态以及速高比参数设定控制摇摆台运动,直线运动无限远目标模拟系统同步解算控制信号并控制其内鉴别率板做匀速直线运动,以模拟相对航空相机做直线快速像移的地面景物目标的相对运动。相机内部控制系统启动像移补偿模块并对鉴别率板进行扫描拍照,根据所拍摄的图像便可检测航空相机的动态分辨力指标。直线运动无限远动态目标模拟系统的组成如图1所示。

动态目标模拟系统由动态目标源组件、大视场准直平行光管、精密直线导轨、基座组成,其中动态目标源组件由光源、鉴别率板组成,光源照亮鉴别率板,经

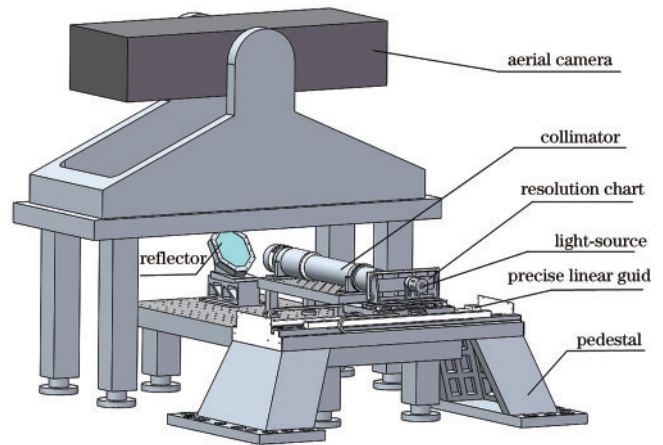


图1 直线运动无限远动态目标模拟系统组成

Fig. 1 Composition of linear motion dynamic target simulation system

过平行光管后出射平行光以模拟无限远的动态目标。控制台发出指令使得动态目标源做匀速直线运动,由平行光管模拟无限远目标后经由反射镜折转光路进入航空相机进行扫描拍摄,最终通过图像处理模块实时监控与分析检测相机的动态分辨力指标。

3 大视场准直平行光管设计

动态目标模拟系统内置平行光管产生无限远动态目标,为了使跨度较长的鉴别率板能够大范围成像,且保证鉴别率板清晰成像,则需要准直光学系统具备长焦距、大视场的特点^[8]。依据平行光管与航空相机的光瞳匹配原则,确定准直平行光管的设计参数为:视场角 $2\omega=5^\circ$;光管焦距 $F=1000\text{ m}$;口径 $D=100\text{ mm}$ 。

长焦距平行光管,其焦距越长,二级光谱越大,需要采用有效的复消色差设计予以校正^[9]。常见的复消色差光学结构为柯克三片式,本文也采用了柯克三片式结构,同时为了校正二级光谱,需选取色散差大而阿贝数差小的玻璃材质组合。为了尽量减小场曲的影响,在经典的三片式结构前面加入一片弯月透镜,并且对于负透镜所承担的负屈光度较大的问题,将经典柯克三片式中间的F2火石玻璃负透镜拆分为两个分离负透镜以平衡系统的高级像差。基于上述思路,优化后的准直平行光管的光学结构如图2所示。

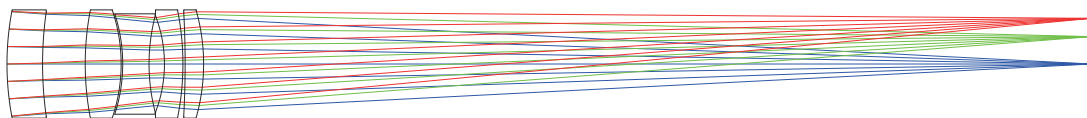


图2 准直平行光管的光学结构

Fig. 2 Optical structure of collimator

优化后的准直平行光管达到了较好的成像质量,如图3~6所示。

从图3可以看出,全视场内弥散斑均小于艾里斑。从图4可以看出,光管物镜的调制传递函数(MTF)优

于 $0.2@100\text{ lp/mm}$,且接近衍射极限。由图5可知,光学系统的畸变小于 0.03% 。从图6可以看出,可见光三色的纵向像差曲线交于一点,即光学系统的二级光谱得到了较好的校正。

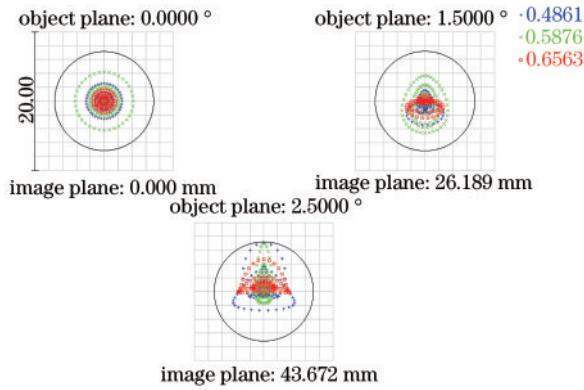


图 3 点列图
Fig. 3 Spot diagram

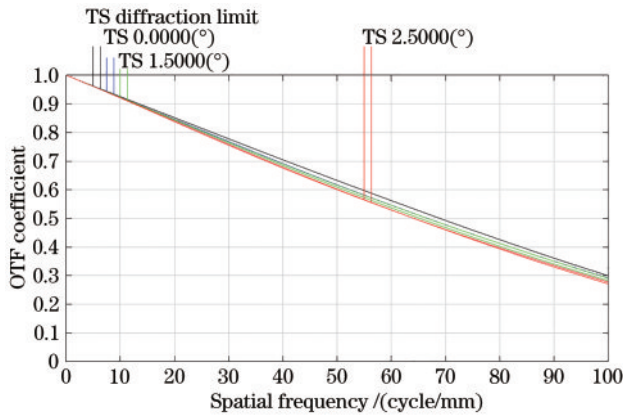


图 4 光学调制传递函数
Fig. 4 Optical modulation transfer function

根据上述光学设计结果,且考虑到光管的口径偏大,对每个光学镜片分别进行结构设计,即将光学系统分为前、中、后三段,装调时先将各镜组装调好,然后再组装一起,平行光管的光机结构设计如图 7 所示。为了保证各光学元件间的空气间隔及同轴度,各段子镜

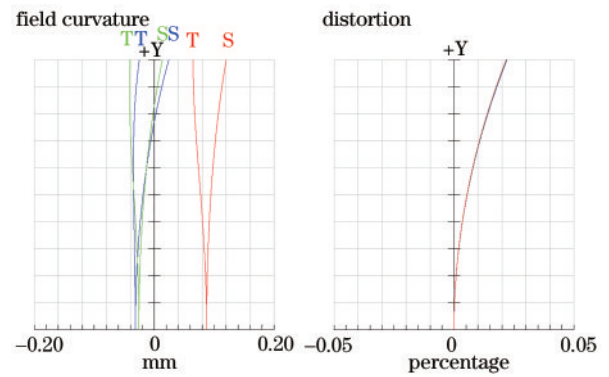


图 5 场曲和畸变
Fig. 5 Field curve and distortion

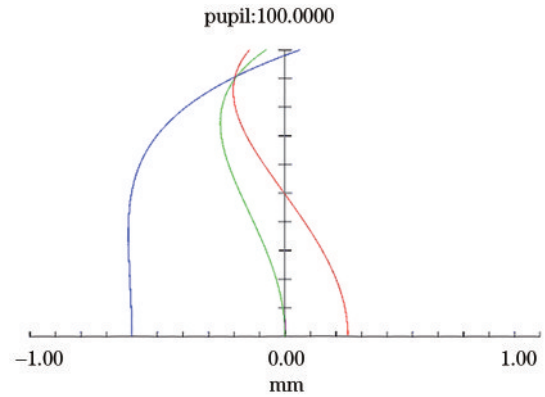


图 6 纵向像差曲线
Fig. 6 Longitudinal aberration curves

筒与主镜筒之间采用止口保证同轴度,并在各段子镜筒的周向方向均设计了半锥形定位槽口,调整同轴后用紧定螺钉拧紧并用 704 胶黏合,螺纹副设计作为辅助定位。这种止口定位与螺纹副辅助固紧的设计既保证了光学系统各元件的中心偏差的装调可行性,又保证了大口径光管的具有足够的结构稳定性。

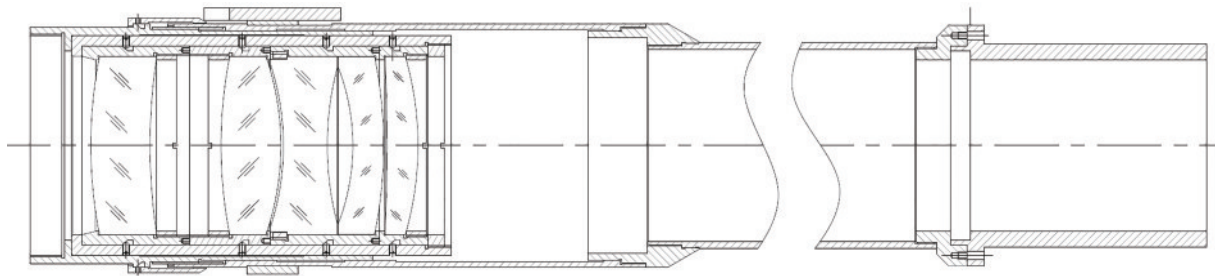


图 7 准直平行光管机械结构
Fig. 7 Mechanical structure of collimator

4 动态目标发生装置

4.1 动态目标发生装置机械结构

动态图形发生装置的主要功能是提供相机动态拍照时所需的目标,由基座、鉴别率板、光源、精密直线滚动导轨、直线电机、光栅尺等组成,动态图形发生装置

机械结构如图 8 所示。鉴于相机扫描拍摄时动态目标的移动速度快、速率平稳性高的特点,在装置基座采用铸铝加工,并设计加强筋且采用地脚螺栓固定方式以提高基座的基础模态,从而减少在快速启动中因动态图形发生装置的晃动带来的误差。

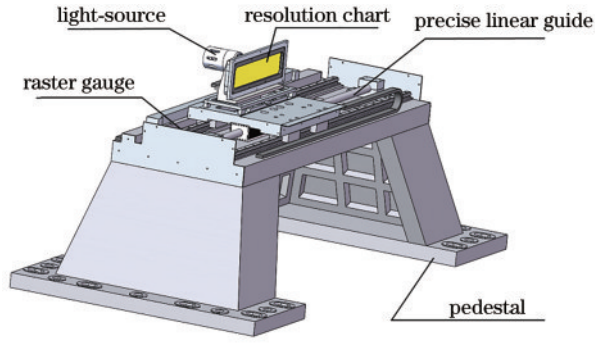


图 8 动态目标发生装置机械结构

Fig. 8 Mechanical structure of dynamic linear-motion-target generator

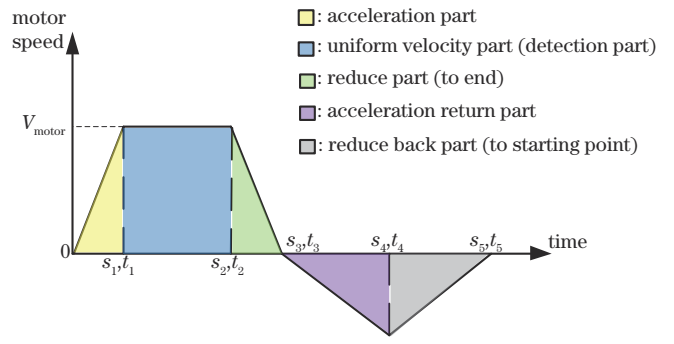


图 9 动态目标运行轨迹

Fig. 9 Trajectory of dynamic target

4.2 动态目标运行轨迹设计

动态模拟目标的运动轨迹分为以下 5 个阶段:匀加速阶段、匀速阶段(检测阶段)、匀减速至终点阶段、加速回程阶段、减速回程至起点。综上所述,直线运动无限远动态目标模拟的移动轨迹如图 9 所示。

根据航空相机像移速度方程^[10],设飞机以速度 v 飞行,飞行高度为 H ,航空相机的焦距为 f ,航线角为 α 。地面景物相对于飞机的前向像移速度 v 按照下式计算,该速度就作为动态目标匀速段的电机速度,即运行轨迹中的匀速段 $s_1 \sim s_2$ 的电机速度,代入某特定航线角与相机焦距后,匀速段电机的速度表示为

$$v_{\text{motor}} = \frac{v}{H} \cdot f \cdot \cos \alpha = \frac{5000}{9H} \quad (1)$$

在 $s_1 \sim s_2$ 匀速段运动过程中,电机相邻两次到达 s_1 位置的时间间隔必须为被检测相机工作周期 T 的整数倍数,即动态目标模拟系统化匀速段时间间隔足够相机至少进行一次完整的拍摄过程,相机工作周期 T 表示为

$$T = \frac{B \cdot (1 - \eta)}{f \cdot \frac{v}{H}} \quad (2)$$

式中: B 为航空相机所拍摄图片的幅宽; η 为所拍摄图片的纵向重叠率。根据上述分析计算,在 LABVIEW 图形化编程环境下结合 MATLAB 计算脚本将电机匀速段的电机速度、检测周期以及运动曲线的各阶段行程与时间编写程序框图,如图 10 所示。

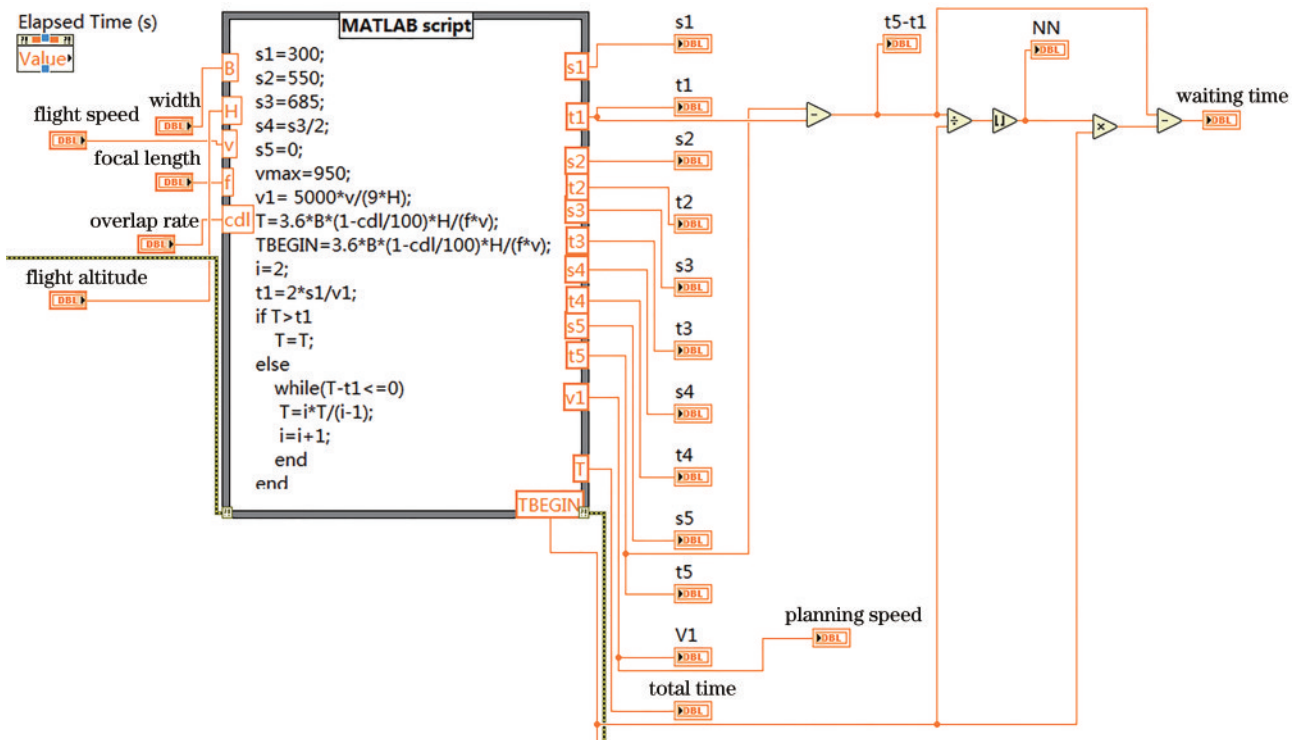


图 10 动态目标运行轨迹参数编程框图

Fig. 10 Programming diagram of dynamic target trajectory parameters

4.3 直线电机伺服控制实现

动态目标由直线伺服电机带动沿着平行光管光轴的法向方向做往复运动,运动过程中非匀速段行程均采用比例-积分-微分(PID)控制算法,其中直线电

机的控制系统的电流环带宽通常比较大,因此简化电流闭环为线性的比例控制,同时简化速度环为经典的微分/积分控制,综上简化后的PID控制模型如图 11 所示。

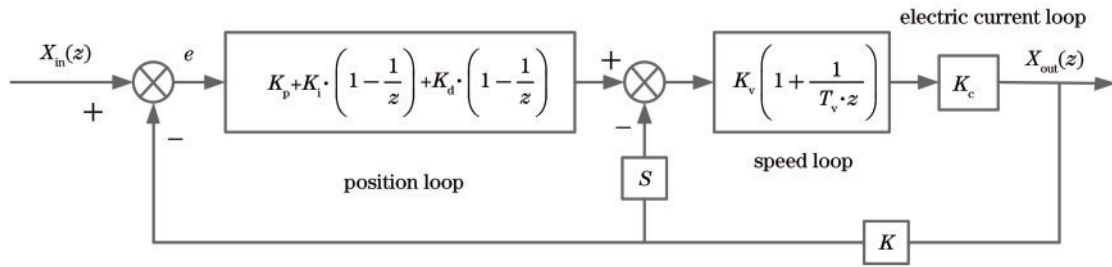


图 11 直线电机 PID 控制模型
Fig. 11 PID control model of linear motor

采用参数实验调整法最终调试出的 PID 控制参数如下:位置比例增益 $K_p=320$;位置积分增益 $K_i=0.24$;位置微分增益 $K_d=0.006$;速度前馈增益 $K_v=$

0.012 ;加速度前馈增益 $K_a=1.86 \times 10^{-4}$ 。将对应的控制参数输入至程序前面板中的输入控件中,直线伺服电机的 PID 控制部分程序框图如图 12 所示。

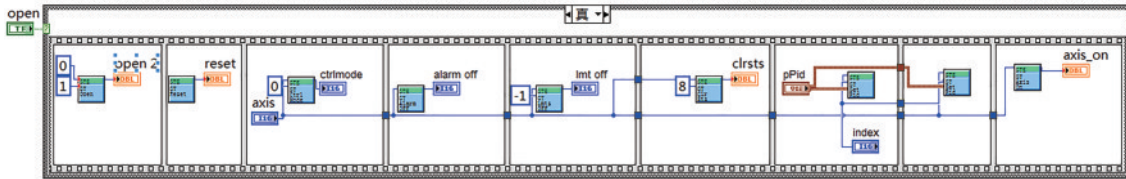


图 12 直线电机 PID 控制程序框图
Fig. 12 PID control program diagram of linear motor

5 实验结果

针对某型号航空相机搭建动态分辨力检测平台,如图 13 所示。输入特定速高后,匀速段的电机运行速度经(1)式计算后为 185.185 mm/s,即电机的规划速度。电机按照预定行程运动直至检测结束,同时航相机对动态目标进行扫描拍摄,当相机前向像移补偿机构达到补偿最佳状态时所拍摄图像如图 14 所示,可以看出,所拍摄的鉴别率板图像基本清晰。

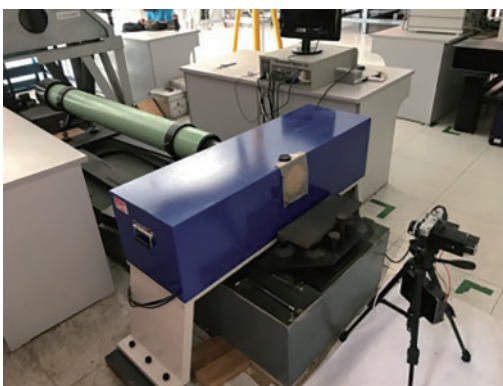


图 13 动态目标模拟系统实验平台
Fig. 13 Experimental platform of dynamic target simulation system

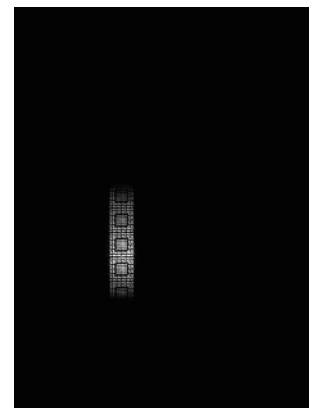


图 14 相机拍摄图像
Fig. 14 Image taken by camera

测试匀速段不同速高比(即不同电机规划速度)下的电机实际移动速度的平均误差,设定参数如下:重叠率为 10%,幅宽为 25 mm,焦距为 2000 mm。通过输入不同的速高比设定电机的规划速度,最终实验测得匀速段电机运行过程的速度误差结果如表 1 所示。直线电机控制系统运行过程位移-速度曲线如图 15 所示,匀速段瞬时速度误差 $\leq 1\%$ 。

由表 1 可知,检测系统满足 0~950 mm/s 移动速度、匀速段瞬时速度误差 $\leq 1\%$ 技术指标要求,且运行平稳、速度波动小。

表 1 匀速段电机规划速度的速度误差实验结果

Table 1 Experimental results of speed error of motor planning speed in constant speed section

Velocity-height ratio	Motor planning speed / ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Testing period / s	Average velocity error / %	Instantaneous velocity error / %
0.09	50	24.300	-0.068	-0.052-0.008
0.18	100	13.050	-0.031	-0.025-0.003
0.54	300	5.250	0.001	-0.033-0.020
0.90	500	3.690	0.001	-0.018-0.008
1.71	950	2.652	0.043	-0.018-0.026

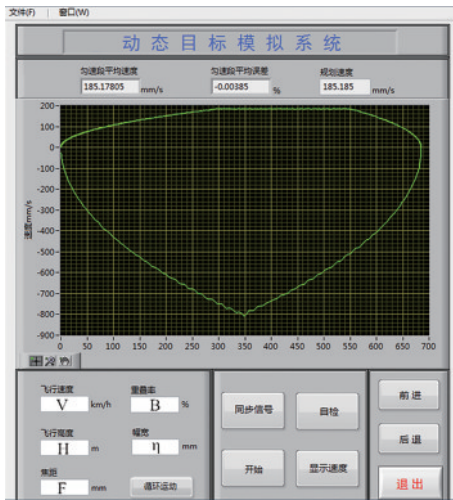


图 15 直线电机控制运行结果截图

Fig. 15 Screenshot of linear motor control operation results

6 结 论

本文针对航空相机的动态分辨力检测需求,设计了一种直线运动无限远动态目标模拟系统。系统内采用长焦距、大视场的平行光管作为准直光学系统,并基于复消色差思想优化了光学系统成像质量。然后,介绍了动态目标发生装置的机械结构组成,并在 LABVIEW 虚拟仪器平台采用 PID 控制算法完成了运动轨迹中的高精度匀速段的直线电机控制。最后,实验结果表明,本系统控制过程自动化程度高,具有较好的精度和速度稳定性。

参 考 文 献

- [1] 万磊,贾平,张叶,等.飞行器姿态对 CMOS 航空相机成像的影响[J]. 光学精密工程, 2016, 24(1): 203-209.
Wan L, Jia P, Zhang Y, et al. Effect of aircraft attitude on imaging of CMOS aerial cameras[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(1): 203-209.
- [2] 王志强,王春艳,孙昊,等.动态目标模拟离轴三反光学系统的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 012203.
Wang Z Q, Wang C Y, Sun H, et al. Design of off-axis three-mirror optical system for dynamic target simulation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 012203.
- [3] 王伟,陈柏霖,高峰,等.航空航天类专业制导控制室内外半实物仿真实验技术研究与探索[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(12): 115-119, 125.
Wang W, Chen B L, Gao F, et al. Research and application of indoor and outdoor hardware-in-the-loop simulation experiment technology for guidance and control of aerospace specialty[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2021, 40(12): 115-119, 125.
- [4] 王昭.多波段空中目标红外仿真研究[D]. 成都:电子科技大学, 2018: 2-4.
Wang Z. Infrared imaging simulation of aerial target in multi-band[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018: 2-4.
- [5] 吴国栋.航空相机动态分辨力测试用模拟动态目标发生器: CN1896867A[P]. 2007-01-17.
Wu G D. Analog dynamic object generator for testing aviation camera dynamic resolving power: CN1896867A [P]. 2007-01-17.
- [6] 魏忠伦,刘伟奇,柳华.动态目标模拟器用视景仿真镜头光学设计[J].应用光学, 2013, 34(1): 26-31.
Wei Z L, Liu W Q, Liu H. Optical design of visual simulation lens for dynamic target simulator[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(1): 26-31.
- [7] 王志强,常艳贺,王春艳,等.静、动态目标模拟离轴三反光学系统设计[J].光学技术, 2020, 46(2): 192-197.
Wang Z Q, Chang Y H, Wang C Y, et al. Optical system design of off-axis three mirror for static and dynamic target simulation[J]. Optical Technique, 2020, 46(2): 192-197.
- [8] 何煦,吴国栋,韩冰.大口径、长焦距平行光管装调技术研究[J].光学技术, 2009, 35(5): 781-784, 787.
He X, Wu G D, Han B. Sturdy of large-diameter, long focal length collimator assemble technical[J]. Optical Technique, 2009, 35(5): 781-784, 787.
- [9] 李润顺,王鹏,张爱红,等.波差法设计长焦距复消色平行光管物镜[J].哈尔滨工业大学学报, 1996, 28(2): 44-49.
Li R S, Wang P, Zhang A H, et al. Long focus collimator lens design of the three color achromats with wave disparity method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1996, 28(2): 44-49.
- [10] 翟林培,刘明,修吉宏.考虑飞机姿态角时倾斜航空相机像移速度计算[J].光学精密工程, 2006, 14(3): 490-494.
Zhai L P, Liu M, Xiu J H. Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(3): 490-494.