

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1804231

# 某机载视频测量吊舱训练装置的结构分析与设计<sup>\*</sup>

李冠楠, 刘星洋, 徐新行, 陈 宁

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

**摘 要:** 机载视频测量吊舱正常工作在几千米的高空中, 吊舱测量功能比较复杂, 需要在地面对操作人员进行模拟训练。设计了一种在地面上对机载视频测量吊舱的操作人员进行训练的装置, 主要部件包括支架、同步齿形带及带轮、电机、导轨及滑轮、机弹分离模拟装置和限位装置等。从总体和各部分组件的角度入手, 对关键结构部件进行了分析计算和结构设计。该装置能够为视频测量吊舱提供一个跟踪平台来模拟运动目标及输入扰动, 供操作人员在平时不断的练习相关操作及熟悉各种测量信息, 有利于高效地完成吊舱设备的测量任务和后期维护使用。

**关键词:** 机载吊舱; 地面训练; 往复直线运动; 结构设计

**中图分类号:** TH703      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 460.20

## Structure analysis and design of the training device of a certain airborne video measurement pod

Li Guannan, Liu Xingyang, Xu Xinhang, Chen Ning

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

**Abstract:** The airborne video measurement pod is working normally in the altitude of several kilometers. The measurement function of the pod is quite complicated. As a result, it is required to train the operators on ground in simulation. In this paper, a device is designed for training the operators of airborne video measurement pods on ground. The main components include bracket, synchronous toothed belt and belt pulley, motor, guide rail and pulley, the separation simulation device of aircraft and missile, position limit device and etc. The key structural components were analyzed, calculated and designed starting from the whole device and various parts. The device can provide a tracking platform for the video measurement pods to simulate the moving targets and input disturbances. So, the device can be used for the operators to constantly practice the related operations and become familiar with various measurement information, which is benefit to efficiently complete the measurement tasks and post maintenance of the pod equipment.

**Keywords:** airborne pod; ground training; reciprocating linear motion; structure design

## 0 引 言

机载视频测量吊舱系统要完成战斗机试验的黑白目标识别、机弹分离、导弹下滑、平飞弹道等关键段的空中视频测量<sup>[1]</sup>。吊舱系统的正常使用环境为海拔几千米到上万米的高空, 载机的飞行速度根据任务的不同最高可以达到几马赫<sup>[2]</sup>。在真空、高速、高振动等苛刻条件下对目标进行光电测量需要较高的稳定度, 而视频测量吊舱一般悬挂于机翼或机身下部, 其空间和使用环境均受到

较大的限制<sup>[3-4]</sup>。

机载视频测量吊舱系统具有技术先进、结构复杂、价格昂贵等特点<sup>[5-6]</sup>。吊舱测量功能比较复杂, 而在空中执行任务时吊舱本身是高速运动的, 这对操作人员的素质要求较高, 操作人员在地面不进行一段时间相关的模拟训练, 很难在空中顺利的完成各种要求的测试任务<sup>[7-8]</sup>。因此为了提高操作人员操控吊舱的熟练程度, 非常有必要开发相应的地面训练配套设备, 将吊舱与操作人员相对地面静止, 操作人员操纵吊舱对模拟运动目标进行跟踪与测量。以此设备训练操作人员在地面不断的练习相

收稿日期: 2018-09      Received Date: 2018-09

<sup>\*</sup> 基金项目: 吉林省科技发展计划(20180520185JH) 项目资助

关操作及熟悉各种测量信息,有利于高效地完成吊舱设备的测量任务和后期维护使用。

机载视频测量吊舱系统的模拟训练要求操作人员在机库内控制吊舱系统完成目标识别、机弹分离和导弹飞行过程中的跟踪与测量等任务,要求操作人员能够在战斗机不同飞行速度下控制吊舱对飞行目标进行跟踪和测量<sup>[9]</sup>。本文结合地面机库的实际大小、机库内的供电条件、操作人员的专业水平等情况<sup>[10]</sup>,设计了一套机载视频测量吊舱的地面配套训练装置(以下简称训练装置),能够为吊舱系统提供一个跟踪平台来模拟运动目标及输入扰动来检验设备的工作状态。该训练设备能够实现方便的拆卸与安装,运行以后具有良好的可靠性,应用简单、方便,便于维护,在此基础上,将所有装置都安装在支架的背部,支架前面除支架本体外只有移动靶面可见,这样也给操作人员的训练带来了便利,实现了提高操作人员操控吊舱的熟练程度的目标。

## 1 训练装置的功能与原理

### 1.1 训练装置的功能

训练装置的主要功能就是模拟各种场景下目标的运动方式,包括运动速度、高度、多目标、机弹分离初始状态等场景的模拟,通过该装置完成对吊舱视频跟踪、测量的训练任务<sup>[11]</sup>。因此本设计主要采用导轨的方式,在一定距离上保证移动靶面可以顺利被吊舱测量系统进行成像、跟踪和测量。

### 1.2 训练装置的原理

如图1所示,训练装置主要由支架、导轨、电机、同步齿形带及带轮、机弹分离模拟装置、限位、配套电源与信息设置控制盒等部分组成。为了配合吊舱的训练功能,经过对吊舱传感器对移动靶面成像尺寸的计算,确定移动靶面大小为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ,距离被试设备 $10\text{ m}$ ,占设备像元数约为 $100\text{ pixel} \times 100\text{ pixel}$ ,对于 $1\,000 \times 1\,000$ 像元数的探测器,满足对目标成像的要求。

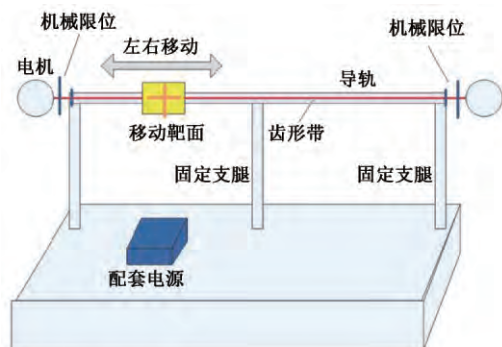


图1 移动靶面组成

Fig. 1 Composition of moving target surface

移动靶面可以沿着导轨进行往复运动,运动速度可以进行一定的调整,从匀速运动到变速运动,这样就可以模拟真实目标的运动方式。电机与移动靶面之间采用同步齿形带及带轮的传动方式,在导轨两端放置限位开关,每次移动靶面碰到限位,由其上的电开关使其做返回运动,往复工作可以使吊舱进行随动的往复运动。

移动靶面带有机弹分离模拟装置,在需要机弹分离场景时,移动靶面触碰支架上的挡块,机弹分离模拟装置的桶盖打开,小球从桶内滚出,形成自由落体掉落,完成机弹分离过程的模拟。

驱动移动靶面运动的电机通过配套电源进行供电,配套的电源盒可以直接连接 $220\text{ V}$ 的电源,方便设备的固定方式供电或移动方式供电,如采用移动方式供电可以采用油机。信息设置控制盒的主要原理就是对吊舱采集的移动靶面的图像信息加入必要的扰动信息,这些扰动信息是吊舱测量过程中经常遇到的实际情况。通过信息设置控制中的视频信息处理电路,包含对视频图像的时延、丢帧、对比度调整等必要变换,然后快速输入给地面控制台,由地面控制台控制吊舱跟踪移动靶面,使操作人员熟悉在各种实际情况下,吊舱跟踪和测量靶面信息和状态,因此要求信息设置控制具有多种快速的图像处理算法。为了达到这种快速的响应能力,采用了硬件解算的方式(多DSP与FPGA组合),这样减少了软件算法的计算时间,在一定程度上保证了扰动信息加入的实时性。

## 2 设计方案

### 2.1 信息设置控制盒

信息设置控制盒相当于黑匣子,对于外界来说属于各种视频图像的变换平台,因此要求具有高度的独立性和可靠性。整体采用高速缓存处理电路和快速的视频图像处理板卡,运算算法直接注入到硬件处理电路中,操作人员只要简单的控制指令就可以实现要求的延时、丢帧、黑白图像等常用的扰动信息,同时信息设置控制盒具有输入和输出视频图像接口,采用高速Cameralink,减少视频图像在传输中的时延,在不加入扰动信息时,能够保证吊舱输入的视频信息快速实时的通过信息设置控制盒。

吊舱测量的移动靶面视频图像输入到信息设置控制盒后,在加入扰动信息后的视频图像重新送入地面控制台,用于控制吊舱的跟踪状态,达到地面就可以进行模拟训练的目的<sup>[12-13]</sup>。整个信息设置控制盒中的各种高速处理电路及板卡采用专门研发的新型板卡,完全能够满足本装置要求的性能指标<sup>[14]</sup>,具体的内外接口关系及功能如图2所示。

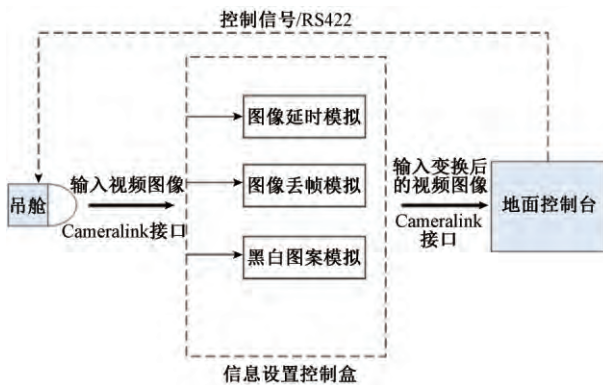


图 2 信息设置控制盒硬件接口及功能

Fig. 2 The hardware interface and function of the information setup control box

信息设置控制盒工作过程中需要直流供电,因此外部设置了直流变压的电源盒,为了保证其通用性,它的主要功能就是把市电 220 V 的电压变换为稳定的 28 V 直流电压连接到信息设置控制台,驱动信息设置控制台稳定工作。信息设置控制盒要达到指定的扰动信号加入,需要通过通信信号接口进行控制,通信信号接口为通用的 RS422 接口,扰动信号的方式通过设置的通用软件界面进行预先设置与调整。

## 2.2 支架整体

移动靶面的支架需要较长的长度和较高的高度,为了保证此系统的稳固性,考虑到齿形带的往复运动结构,本设计采用如图 3 所示的框架结构。为了实现防风能力指标,与地面接触处采用加宽处理,考虑到支架结构的高度为 3 m,在下面 2 m 采用加斜筋加强支撑性。

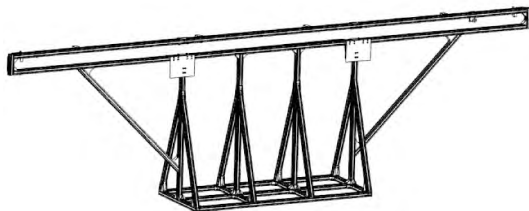


图 3 支架整体结构

Fig. 3 Integral structure of the support

整个支架采用 80 mm × 80 mm 的高强度铝合金型材搭建而成,采用分体结构,方便拆卸与安装。为了保证有效的行程及高度,经过计算,各种长度的型材及需要的数量如表 1 所示。从表 1 可见,最长的型材为 3.5 m 左右,为长途运输带来了方便。

考虑到设备的长期耐用性,整体结构都需要进行防腐处理,在整个框架结构上都预先涂上防腐涂料,用于供电的线缆都通过铝型材中空部分进行排线,避免了电

线的过早老化。供电设备在平时均有保护盖进行保护,起到防沙尘和防雨作用。

表 1 各种型材长度及需要数量

Table 1 Length and required quantity of various profiles

名称	规格/mm	数量
1#型材	长 3 470(80 × 80)	2
2#型材	长 3 510(80 × 80)	1
3#型材	长 380(80 × 80)	2
4#型材	长 3 430(80 × 80)	6
5#型材	长 2 700(80 × 80)	2
6#型材	长 2 075(80 × 80)	4
7#型材	长 1 500(80 × 80)	2

## 2.3 导轨及滑轮

在支架顶端固定导轨,并在导轨中安装滑轮,以此实现移动靶面沿支架宽度方向的水平运动。考虑到制造成本、安装便捷和轻量化等因素,拟选用已经商品化的配置结构实现此项功能。

本设计采用亚固镁铝合金吊轨 + 亚固顶装滑轮的组合结构,如图 4(a) 所示,该结构具有摩擦小、滑动顺畅、运行灵活、平稳静音的特点。吊轨为镁铝合金材质,横截面形状及结构参数如图 4(b) 所示,壁厚 3 mm,具有铝质轻量、密度低、散热性好、抗压性强的特点。滑轮的形状及结构参数如图 4(c) 所示,主要材质为锌合金和尼龙,最大承重为 120 kg,滑轮采用 NSK 轴承进行支撑。

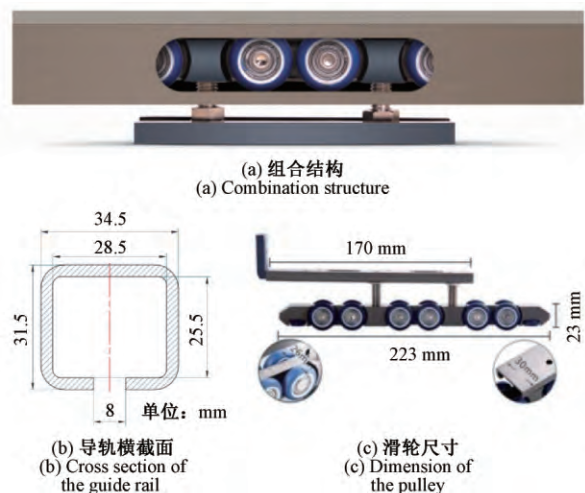


图 4 导轨及滑轮结构

Fig. 4 The structure of the guide rail and pulley

## 2.4 同步齿形带及带轮

基于移动靶面的运动要求,本设计采用同步齿形带及带轮的传动方式。同步齿形带以玻璃纤维为强力层,

外覆以聚氨酯,带的内周制成齿状,使其与齿形带轮啮合。使用同步齿形带与带轮的传动方式,传动比准确,工作时无滑动,传动平稳,具有缓冲、减振能力,轴向作用力小,结构紧凑,耐磨性好,抗老化性好,可在 $-20 \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内使用。同时,选用同步齿形带传动,日后的维护保养也非常方便,不需润滑,维护费用低。

考虑到设备需要传递较大的功率,因此选用H型同步齿形带,如图5(a)所示。从图5(a)可以看出,H型同步齿形带属于弧齿同步带的一种,带齿受载后,应力分布状态较好,平缓了齿根的应力集中,提高了齿的承载能力。为了满足移动靶面10 m范围内的行程,根据支架的结构形式,同步齿形带为长21.4 m,宽6 cm的无缝衔接的环形结构,带轮与支撑座的装配结构如图5(b)所示。

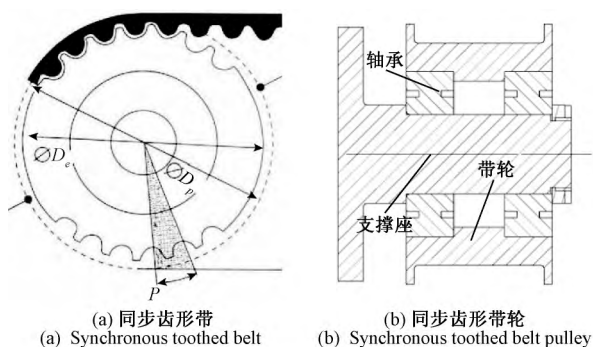


图5 同步齿形带及带轮

Fig. 5 Synchronous toothed belt and belt pulley

## 2.5 电机

为了模拟战斗机的真实飞行效果,以达到系统地训练视频测量吊舱操作人员的目的,需要依据目标战斗机的飞行高度和最大速度设计该训练装置的运动情况<sup>[15-16]</sup>。假设战斗机的最大速度为 $v_f$ ,飞行高度为 $H$ ,由此计算得到跟踪角速度为:

$$\omega_f = \frac{v_f}{H} \quad (1)$$

基于模拟训练场景的实际情况,设定机载视频测量吊舱系统到训练装置的距离为 $L$ ,为了达到对实际效果的模拟,移动靶面模拟运动速度 $v_m$ 需达到:

$$v_m = kL\omega_f \quad (2)$$

考虑到实际情况的需要,将移动靶面的设计最大速度设定为计算得到的速度的 $k$ 倍,因此 $k \geq 1$ 。

根据靶标的最大速度的需要,电机最大转动角速度为:

$$\omega_d = \frac{2v_m}{D_p} \quad (3)$$

式中: $D_p$ 为同步齿形带轮的基准直径。

由于同步齿形带轮为铝制合金制成,其质量较轻,在忽略其自身转动惯量的前提下,电机负载的转动惯量可以表示为:

$$I = \frac{(L\rho + m_c) D_p^2}{4} \quad (4)$$

式中 $L$ 为同步齿形带的长度; $\rho$ 为生产厂家提供的同步齿形带单位长度的质量; $m_c$ 为移动靶面的质量(包含滑轮和机弹分离模拟装置)。

由此可计算得到电机的负载力矩为:

$$M = [s] \left( I \frac{\omega_d}{t} + M_n \right) \quad (5)$$

式中: $t$ 为加速时间, $M_n$ 为摩擦力矩, $[s]$ 安全系数。

根据训练设备的各部分的相关参数,由上述公式可以计算得到电机的总负载力矩为 $2.9\text{ N}\cdot\text{m}$ 。结合电机的最大转动角速度,本设计选用森创两相混合式步进电机(型号为86BYG350CH-SAKSML-0301),驱动器型号为5D3208,具体参数如表2所示。

表2 森创两相混合式步进电机参数表

Table 2 The parameter table of the Synttron two-phase hybrid stepping motor

相数	步距角/ ( $^{\circ}$ )	静态相 电流/A	定位转矩/ ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )	径向跳动/ mm	相电阻/ $\Omega$
3	1.2	3.0	0.4	0.02	3.17
重量/ kg	相电感/ mH	保持转矩/ ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )	转动惯量/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^2$ )	轴向最大间 隙/mm	温升/ K
4	19.5	7	3 480	1	65 K

## 2.6 机械限位与电限位

本设计采用机械限位+电限位的限位形式限制滑轮的行程,并通过电限位开关控制电机反向实现滑轮沿导轨的往复运动<sup>[17-18]</sup>。

如图6所示,电限位挡片固定在滑轮上,随滑轮移动,导轨两侧分别固定一个机械限位座和一个电限位座。移动靶面随滑轮运动到导轨一侧时,电限位挡片与电限位座接触,电限位座的光电开关触发使滑轮做返向运动。如果滑轮移动速度过快,光电开关触发后滑轮多余的动能可被机械限位装置吸收<sup>[19]</sup>。如此工作,可以使机弹分离模拟装置进行随动的往复运动。

对于作直线运动的滑轮,为了保证设备的安全使用,在机械限位中添加了缓冲吸能结构。本设计使用弹簧橡胶在碰撞时产生的压缩变形来吸收滑轮及机弹分离模拟装置的动能,使滑轮在短时间内停止运动。弹簧橡胶吸收能力应大于最大的惯性能量,机构中最薄弱环节应当能承受住最强碰撞时的最大应力。

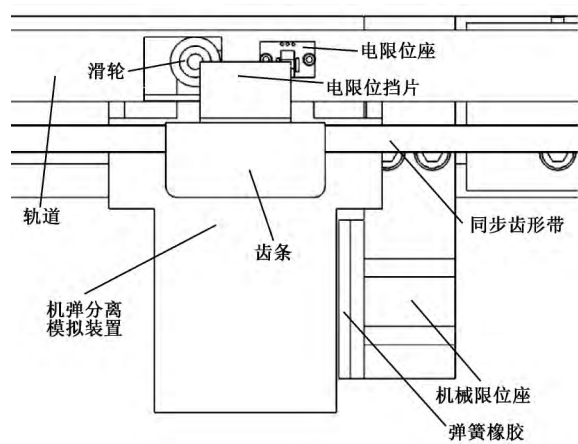


图 6 电限位与机械限位结构

Fig. 6 The structure of the electrical and mechanical position limit devices

假设滑轮运行的最大速度为  $v_{\max}$ ，滑轮及机弹分离模拟装置的  $m_j$ ，则滑轮在最大速度下弹簧橡胶需要承受的惯性能量为：

$$A_g = \frac{1}{2} m_j v_{\max}^2 \quad (6)$$

弹簧橡胶变形吸收惯性动能的计算公式：

$$A = \frac{1}{2} K \lambda^2 \quad (7)$$

式中： $K$  为弹簧橡胶的刚度系数； $\Delta\lambda$  为弹簧橡胶的压缩量。

滑轮和机弹分离模拟装置的惯性能量全部被弹簧橡胶吸收，则  $A = A_g$ ，进而可求弹簧橡胶因受到滑轮和机弹分离模拟装置的冲击而产生的最大压缩量为：

$$\lambda = \sqrt{\frac{m_j v_{\max}^2}{K}} \quad (8)$$

碰撞过程中，弹簧橡胶承受的最大压力为

$$F = K \cdot \lambda = K \cdot \sqrt{m_j v_{\max}^2} \quad (9)$$

在碰撞过程中，受力后最薄弱的零件为机械限位座，对其按剪切强度进行校核，其公式为：

$$S \geq \frac{F}{[\tau]} = \frac{K \cdot \sqrt{m_j v_{\max}^2}}{[\tau]} \quad (10)$$

式中： $S$  为机械限位座与支架连接部分的横截面面积； $[\tau]$  为许用剪切应力。

通过以上推算，将相关参数代入式(10)，可以算得机械限位座与支架连接部分的横截面面积的最小值为  $2.7 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 。实际设计时，该部分的横截面面积为  $6.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ，因此完全可以承受因滑轮的运动冲击而产生的剪切应力。

## 2.7 机弹分离模拟装置

根据操作人员对机弹分离过程跟踪训练的需要<sup>[20]</sup>，借鉴以往的场景模拟设计经验<sup>[21]</sup>，设计了图 7 所示的机

弹分离装置。移动靶面上固定一个装有小球的带盖锥形圆筒，挡块固定在支架上。

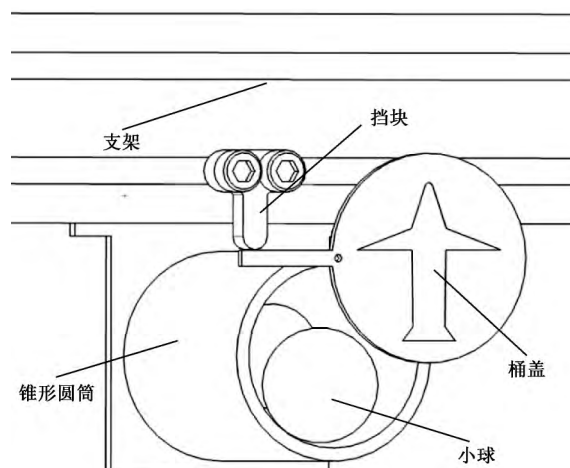


图 7 机弹分离模拟装置

Fig. 7 The separation simulation device of the aircraft and missile

当移动靶面移动到挡块附近时，圆筒盖因与挡块相撞而被打开，小球从圆筒中滚出，掉落在地上，由此实现了机弹分离的模拟。这种机弹分离的模拟方法，简化了结构，省去了复杂的遥控装置，同时使得移动靶面不用带电运动，增强了系统的可靠性。考虑到移动靶面的尺寸大小（100 mm × 100 mm），圆筒直径设计为 100 mm，圆筒长度为 110 mm，圆筒中心距离地面高 3 m，小球直径为 56 mm。锥形圆筒与移动靶面之间采用刚性连接，桶盖与锥形圆筒之间采用铰连接。

## 3 实验效果

上述设计方案已成功应用于机载视频测量吊舱的训练任务之中，其样机支架的整体形式如图 8 所示。利用信息设置控制盒实现了移动靶面的两档速度切换控制。当移动靶面移动到支架两端时，电限位和机械限位均起到了良好的限位保护作用，并且电限位开关被触发时能够使电机反转，实现了当移动靶面接近支架一端时，能够做返回运动，其运行过程如图 9 所示。

当靶标移动到支架上挡块位置时，机弹分离模拟装置被触发，实现了训练所需的机弹分离过程的模拟，训练过程中所用小球在视频中所占像元大小与理论计算值一致，便于实现吊舱操作人员的跟瞄训练。

多次实验结果表明移动靶面能够实现分别以 0.25 和 0.4 m/s 的理论速度平稳移动，依据支架两端的光电开关的触发时间，测量得到移动靶面在两档速度下移动 10 m 所用时间，得到靶面移动速度计算结果如表 3 所



示。通过表 3 的计算结果可以看出,通过运行时间计算得到的实际速度与理论速度的误差小于  $0.000\ 5\ \text{m/s}$ ,误差标准方差小于  $0.003\ \text{m/s}$ 。依据随机误差理论,可以得到该系统的速度控制精度为  $(0.000\ 5 + 3 \times 0.003)\ \text{m/s} = 0.009\ 5\ \text{m/s}$ 。

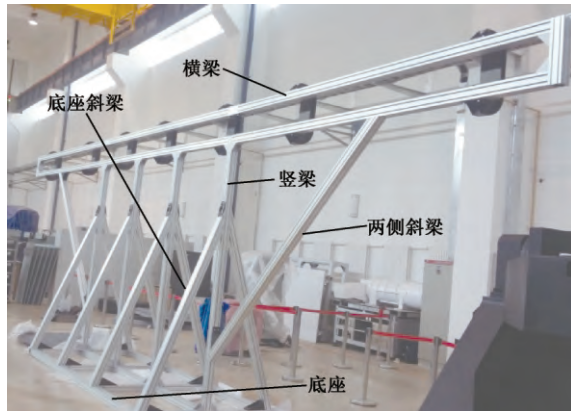


图 8 样机支架整体形式

Fig. 8 The integral form of the prototype bracket

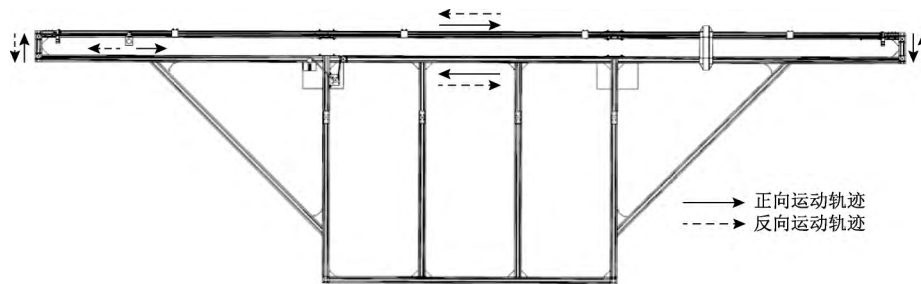


图 9 移动靶面运动轨迹

Fig. 9 The moving trajectory of the moving target surface

该训练装置在实际运行过程中导轨与滑轮、靶标与支架支架无滑动摩擦,支架结构稳定,无抖动和明显变形。综上所述,本文方案所达到的指标符合训练设备的设计要求。

#### 4 结 论

本文以某机载视频测量吊舱的训练要求为背景,以光电类设备的特点为基础,设计了一套地面模拟训练装置,供吊舱操作人员在地面熟悉吊舱操控并进行日常训练使用。该训练装置移动靶面的中心高度为  $3\ \text{m}$ ,运动行程为  $10\ \text{m}$ ,运动速度可以在  $0.25$  和  $0.4\ \text{m/s}$  两个档位间自由切换。对样机的实验结果表明,该装置实际运行速度的平均误差为  $0.000\ 5\ \text{m/s}$ ,运行速度的控制精度为  $0.009\ 5\ \text{m/s}$ 。从训练装置的实际运行结果看,本文所设计的结构能够满足某机载视频测量吊舱的正常训练工作。

表 3 移动靶标运行速度实测值

Table 3 The measured value of the motion velocity of the moving target

测量值	0.25 m/s 理论速度		0.4 m/s 理论速度	
	时间/s	实际速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	时间/s	实际速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
1	39.5	0.253 2	24.7	0.404 9
2	40.1	0.249 4	24.9	0.401 6
3	39.8	0.251 3	25.2	0.396 8
4	40.0	0.250 0	25.2	0.396 8
5	40.3	0.248 1	25.1	0.398 4
6	40.2	0.248 8	25.0	0.400 0
7	39.8	0.251 3	24.8	0.403 2
8	39.8	0.251 3	24.9	0.401 6
均值	39.9	0.250 4	25.0	0.400 4
标准方差	0.26	0.001 6	0.18	0.002 9

#### 参考文献

- [1] 吉书鹏. 机载光电载荷装备发展与关键技术[J]. 航空兵器 2017 (6): 3-12.  
JI SH P. Equipment development of airborne electro-optic payload and its key technologies [J]. Aero Weaponry, 2017(6): 3-12.
- [2] 孙明超, 刘晶红, 张葆. 高帧频图像融合光学测量吊舱的设计[J]. 光学精密工程 2013, 21(1): 94-100.  
SUN M CH, LIU J H, ZHANG B. Design of measuring gondola system with high frame rate for image fusion [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(1): 94-100.
- [3] 庄昕宇, 陈兆兵. 某测量吊舱运动框架结构设计与分析[J]. 红外与激光工程 2014, 43(10): 3444-3450.  
ZHANG X Y, CHEN ZH B. Movement frame structure

- design and analysis on some designing pod [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(10): 3444-3450.
- [4] SABATINIA R, RICHARDSON M A. A new approach to eye-safety analysis for airborne laser systems flighttest and training operations [J]. Optics & Laser Technology, 2003, 35(3): 191-198.
- [5] SABATINI R, RICHARDSON M A, GARDI A, et al. Airborne laser sensors and integrated systems [J]. Progress in Aerospace Sciences 2015(79): 15-63.
- [6] ZHANG Z M, DING M J, WANG L. Integrated automatic test system for airborne optoelectronic pods [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2006(48): 1301-1305.
- [7] 周向阳, 贾媛. 航空遥感惯性稳定平台模糊/PID 复合控制 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(11): 2545-2554.
- ZHOU X Y, JIA Y. Fuzzy/PID compound control for inertially stabilized platform in airborne remote sensing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(11): 2545-2554.
- [8] 王耀南, 罗琼华, 陈彦杰, 等. 旋翼飞行器机器人多机视觉跟踪定位系统及方法 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2): 1-10.
- WANG Y N, LUO Q H, CHEN Y J, et al. Visual tracking and positioning system and method of multiple rotorcrafts [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2): 1-10.
- [9] 周向阳, 李永, 穆全起. 基于自动/手动混合模式的吊舱稳定平台控制系统设计 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 27-33.
- ZHOU X Y, LI Y, MU Q Q. Control system of stabilized pod mixed with automatic tracking and manual manipulation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6): 27-33.
- [10] 耿振余, 孙金标, 李德龙, 等. 机载嵌入式战术对抗训练系统设计 [J]. 系统仿真学报, 2014, 12(26): 2882-2886.
- GENG ZH Y, SUN J B, LI D L, et al. Design of airborne embedded training system of air combat counterwork [J]. Journal of System Simulation, 2014, 12(26): 2882-2886.
- [11] 陈鸿, 李进杰, 高伟, 等. 某型机载电子吊舱维护训练系统设计 [J]. 现代电子技术, 2014(22): 84-87.
- CHEN H, LI J J, GAO W, et al. Design of maintenance training system for an airborne electronic pod [J]. Modern Electronics Technique, 2014(22): 84-87.
- [12] 张正本, 马同伟. 基于卡尔曼一致滤波和分布式协作网络控制的多目标跟踪 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(3): 127-134.
- ZHANG ZH B, MA T W. Multi-tracking based on Kalman-consensus filtering and distributed cooperative network control [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(3): 127-134.
- [13] 孙敬陶, 钟杭, 王耀南, 等. 旋翼飞行机械臂的混合视觉伺服和分层控制方法 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(7): 56-65.
- SUN J T, ZHONG H, WANG Y N, et al. Hybrid visual servoing with hierarchical task control for unmanned aerial manipulation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(7): 56-65.
- [14] HAN S Y, ZHANG Z H, HE H. Research on hybrid scheduling algorithm based on CAN bus [J]. Instrumentation, 2017, 4(2): 22-27.
- [15] 李毓川. 一种具有完整性约束智能小车运动控制的实现 [J]. 电子测量技术, 2018, 41(10): 29-34.
- LI Y CH. Motion control realization for an intelligent car with integrity constraints [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(10): 29-34.
- [16] 孙丹峰, 申友涛, 邵若薇, 等. 基于 FPGA 的永磁同步电机控制系统设计与实现 [J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(4): 40-43.
- SUN D F, SHEN Y T, SHAO R W, et al. Design and implementation of the permanent magnet synchronous motor control system based on FPGA [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(4): 40-43.
- [17] 韩光宇, 曹立华, 张文豹, 等. 光电经纬仪俯仰轴系限位的设计与实现 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(1): 91-96.
- HAN G Y, CAO L H, ZHANG W B, et al. Design and realization of spacing of electro-optic theodolite pitch axis [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2014, 28(1): 91-96.
- [18] 田洪伟. 天线转台限位保护装置的设计与实现 [J]. 行业应用与交流, 2017, 36(12): 128-130.
- TIAN H W. Design and implementation of protective device of displacement restrictor in turntable [J]. Industrial Applications and Communications, 2017, 36(12): 128-130.

- [19] 高云国,赵国杰,韩光宇. 大型光电设备用 700°转动范围限位机构[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 412-415.  
GAO Y G, ZHAO G J, HAN G Y. Spacing device with 700° slewing area for large photoelectric instrumentation[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(3): 412-415.
- [20] 王芳,龚军锋. CFD/CSD 与机弹分离的耦合模拟技术[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(6): 193-196.  
WANG F, GONG J F. CFD/CSD and missile separation integrative simulation method[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(6): 193-196.
- [21] 潘越,徐熙平,乔杨. 双 DMD 红外双波段场景模拟器光机结构设计[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(12): 2994-3002.

PAN Y, XU X P, QIAO Y. Opto-mechanical structural design for two-DMD infrared dual-band scene simulator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(12): 2994-3022.

### 作者简介



E-mail: jx4105@163.com

李冠楠,分别在 2009 年和 2014 年于吉林大学获得学士学位和博士学位,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所助理研究员,主要研究方向为光学精密机械设计。

**Li Guannan** received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Jilin University in 2009 and 2014, respectively. Now, he is a research assistant in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. His main research interest focuses on optical fine mechanical design.