

伞状多层分布式结构光学跟踪平台研究

乔永明^{1,2}, 马彩文², 靳虎敏², 郝伟², 吕涛²

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要: 长距离目标探测、快速目标捕获、多个目标跟踪是一个高性能光学预警系统应该具备的几个基本特征,是实现全空域光学闭合探测的基本条件。传统光学跟踪平台,由于结构的固有缺陷使其在预警应用中存在一些问题。提出了一种新概念结构的、适合光学预警应用的光学跟踪平台,称为“伞状多层分布式结构”。旨在通过此新型跟踪平台的结构特点,结合多探测器测量、控制与信息处理系统优化等方面研究,有效解决目标搜索视场小;目标跟踪单一;跟踪过顶盲区几个制约光学预警系统性能的问题,打破光电跟踪设备在光学预警系统中应用的瓶颈。

关键词: 光学预警; 伞状多层分布式结构; 光学视场; 多目标跟踪

中图分类号: TH122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3673-05

Optical tracking platform based on umbrella multi-tier distributed structure

Qiao Yongming^{1,2}, Ma Caiwen², Jin Humin², Hao Wei², Lv Tao²

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: The basic features that should be possessed are detecting long-distance target, capturing rapid target and tracking multiple target for a high-performance optical warning system. It is the basic condition to achieve the whole airspace closure detection. Due to inherent structural defects, there are some problems in the application of early warning for traditional optical tracking platform. A new concept of structure called umbrella multi-tier distributed load structure was proposed that was fitted in photoelectric tracking platform applied in optical warning. Through the structural feature of the new type of tracking platform, combining with measurement-mode plan of multi-detector, optimizing control and information processing system, it aims to solve the problems effectively that restricts the performance for optical warning system, such as the small searching field-goal; single target tracking; the top blind of tracking. It will break the bottleneck of optical tracking device application in optical warning system.

Key words: optical warning; umbrella multi-tier distributed structure; optical field of view; multi-target tracking

收稿日期: 2015-04-12; 修订日期: 2015-05-14

基金项目: 研究所专项课题

作者简介: 乔永明(1972-), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事光电跟踪与测量系统智能控制与信息处理方面的研究。

Email: qym@opt.ac.cn

0 引言

光学预警系统相比雷达等系统具有被动式测量特性,其抗电磁干扰能力强,隐蔽性能好,不受低俯仰跟踪盲区的限制,对弱小、低速目标的探测捕获率高^[1]。通过目标脱靶量测量、目标辐射特性分析、目标几何姿态判定等技术成为评估目标拦截打击效果的重要手段。是一个国家的区域预警系统的重要组成部分。

长距离探测能力是对一个光学预警系统提出的核心要求。但作为一个高性能光学预警系统,在满足一定光学作用距离的条件下还应该具备以下的特征。首先要求具备目标的快速捕获能力,这样才会为后续更高层的决策创造有利条件。其次随着综合武器的出现,进一步要求光学预警系统需要具备多层防御的功能。换言之,要求一个光学预警系统具备空间多个目标同时跟踪的能力,这样第一时间识别定位真实目标的概率会极大提高,才能间接体现出多层防御的作用。所以,长距离目标探测、快速目标捕获、多目标跟踪是一个高性能光学预警系统应该具备的几个基本特征,是实现光学预警系统全空域闭合探测的基本条件。

1 传统光学跟踪平台预警中存在的问题

传统的光学预警跟踪平台是一个包含垂直轴和水平轴的两轴跟踪架系统(即光电经纬仪、图 1 所示),这种传统结构的跟踪架设计简便,并且从刚性和固有谐振的角度分析也有利提高系统的测量精度^[2],在目标运动轨迹测量与景象实况等方面取得了成功的应用。但是基于此结构的跟踪平台拓展应用于光学预警时存在一些问题,主要包括以下几方面。

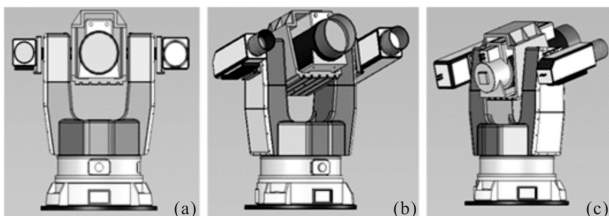


图 1 光电经纬仪结构示意图

Fig.1 Structure of electro-optic theodolite

(1) 目标的搜索视场小

该结构中各光学载荷沿垂直于水平轴系的方向

平行放置,所有探测器的视轴指向在无穷远处汇结为同一空间点,探测的视场大小由探测器的靶面尺寸和光学系统的焦距决定,通常为保证一定的目标作用距离和分辨能力,光学系统一般需要长焦距,相应光学视场非常有限,覆盖的空间范围极小,直接影响了目标的快速搜索和捕获能力。

(2) 目标跟踪的局限性

首先,光电经纬仪工作时,即使视场中出现多个目标,由于各目标的运动轨迹不同,只能选择对一个目标进行跟踪。其次,对于目标过顶时的跟踪,受制于两轴结构的几何约束,为了保证目标的“正镜”跟踪,需要伺服方位轴瞬时转动近乎 180° ,对于方位速度和加速度的要求接近无穷大^[3],在实际的跟踪系统中是无法实现的,形成目标过顶跟踪的盲区。

2 伞状多层分布式结构跟踪平台

上述问题是由传统光学跟踪平台结构的固有缺陷造成的,因此,文中提出并构建一种新概念结构,适合光学预警体系应用的新型跟踪物理平台。这里称为“伞状多层分布式”结构光学跟踪平台,其原理模型如图 2 所示。

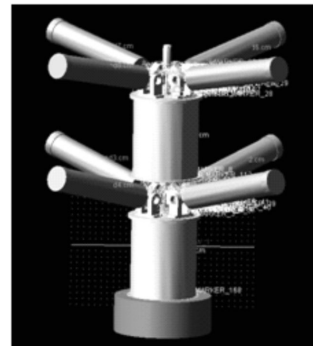


图 2 伞状双层分布式结构模型

Fig.2 Tracking platform of umbrella structure of multi-tier distributed load

2.1 新型结构跟踪平台的特点

第一个特点是多光学载荷的“伞状”分布。多个光学载荷均匀分布在垂直轴多面体的各个侧壁上,通过驱动装置的升降运动,带动联动装置控制各侧壁载荷的收拢或张开幅度,实现光学视轴俯仰方向的调整。由于每个探测器的视轴方位指向都不同,各视轴指向夹角在一个圆周内等间隔分布,对各个单

元光学视场的规划和拼接,可以实现大范围扇区的方位视场。由于该跟踪平台工作时犹如一把倒立撑开或合拢的伞,这里形象的称为“伞状”结构。第二个特点是双层级联的结构形式。整个跟踪平台由两组的单层系统级联而成。各层之间利用过渡连接体实现各组间独立的两自由度动作。两层级联的实现得益于该结构中省略水平轴系,将光电经纬仪方位、俯仰两自由度旋转的运动模式归一化为垂直主轴的旋转和位移运动模式,避免了水平轴回转半径引起多层机构间的干涉,使伞状负载分布与视场拼接和多层结构组合的理念转化为现实。

(1) 全空域、多目标探测原理

为了保证一定的光学作用距离,光学载荷的单元视场一般较小,同时光学载荷的数量往往有限,因此静态时系统一般无法实现全方位视场的无缝拼接,需要采用动态扫描的方法完成周视。由于每个光学载荷单元所需动态扫描的范围被裁剪为若干部分,在一个全方位扫描的周期内,各单元只需要关注各自规划的较小区域,极大地缩短目标搜索时的周扫时间^[4]。

同时也更加凸现了双层级联结构形式的优点。在具有相同光学载荷单元的条件下,对于视场拼接的贡献双层级联结构与单层结构静态时完全相同。而在动态情况下,由于不同层组间在各自动态扫描的基础上可以有不同的规划组合,目标搜索的效能相比于单层结构会更高,一方面使全空域的目标闭合探测成为现实^[5]。更重要的是双层级联的结构实现了空间两个目标的同时跟踪。

(2) 规避过顶跟踪盲区

该新型结构的跟踪平台本质上依然属于两轴光电跟踪系统,因此,针对某一个光学载荷的目标跟踪时同样存在过顶盲区的问题。但是利用此平台多探测器伞状分布的特点,通过多载荷之间的组合跟踪(或者称为接力跟踪)策略^[6],可以有效避免或降低过顶盲区现象的出现。以 2×4 结构平台为例,即每层搭载四个光学载荷,各光学载荷安装时的分割角度固定为 90°的两层结构。如图 3 所示,目标从空间点 r 过顶跟踪到空间点 r' 的整个过程如下:首先目标在初始空间点 r 时,由顶层结构中的 1# 光学载荷负责跟踪,其余的三个光学载荷此时保持同步动作,四个光学载荷的视轴轴线构成一个倒立圆

锥体。随着目标接近天顶,跟踪俯仰角度变大,视轴轴线逐渐向内收束,使该圆锥体的顶部锥角变得越来越小,在圆锥体底部即目标所处的空间位置随着多窗口视场的汇聚,形成一个如图 4 所示的等效视场区域。

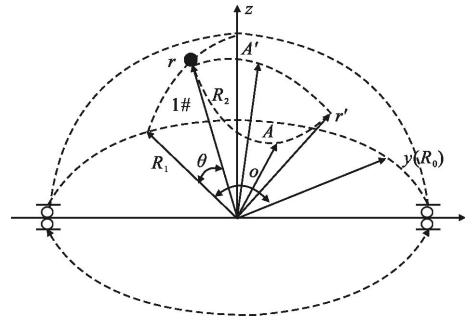


图 3 目标过顶跟踪示意图

Fig.3 Figure of target tracking over the top

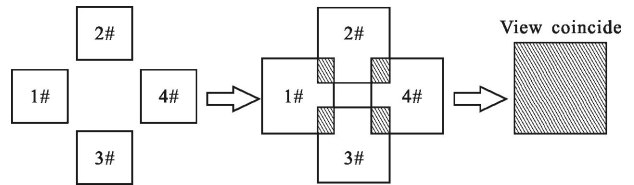


图 4 等效视场的变化过程

Fig.4 Changing process of system equivalent field

当目标接近天顶,跟踪俯仰角逐渐接近 90°时,与其他探测器单元视场会发生重叠,随着视场重叠区域的进一步变大 1# 光学载荷视场中的目标会进入相邻 2# 或 3# 光学载荷视场,此时将目标的跟踪权限移交至 2# 或 3# 光学载荷,同理,接下来会将目标跟踪权限移交至 4# 红外光学载荷,最终通过多级切换完成过顶跟踪的整个过程。由于新型平台结构保证各光学载荷之间的视轴方位指向相差 90°。每一个切换过程相当于系统方位轴瞬间转动 90°,在保证“正镜”跟踪的前提下,并不需要方位轴的过载运动,在整个切换的暂态过程中方位轴实际上处于几乎静止的状态。在此基础上结合记忆跟踪等方法,可以规避目标的过顶盲区。

2.2 俯仰跟踪机构的研究

俯仰跟踪机构是此新型跟踪平台的创新和核心部分,从系统指向精度、结构刚性、结构谐振频率、寿命等几个方面考虑。最终确定了齿轮齿条传动的结构形式。如图 5 所示,采用力学建模、有限元分析、

模态响应分析等方法，定量评估和验证了该俯仰机构的静力学特性、动力学特性。

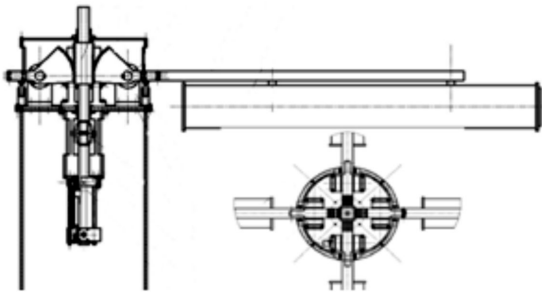


图 5 齿轮齿条式俯仰机构

Fig.5 Gear rack type elevation mechanism

图 6 所示，俯仰机构装配体的最大应力出现在扇形齿轮安装负载连接杆处，此处为最主要的承载部位，与前期分析的情况相符。由于最大应力值远小于材料的屈服极限，故满足设计强度要求。最大位移出现在扇形齿轮负载连接杆连接处的末端，其最大变形量相对于整体系统而言变形量较小，对结构功能和性能无明显影响。满足刚度设计要求。模态分析采用 Block Lanczos 法，计算得到前 10 阶固有频率和振型，提取俯仰机构模态分析的前 4 阶振型，如图 7 所示。仿真结果表明俯仰机构具较好的质量和刚度分布。最低固有频率达到 40 Hz，考虑到模态分析的对象是整体俯仰机构的四分之一单元，分析时将部分传动和支撑部件按照“合体”作较为理想化的处理，因此系统实际固有频率与仿真分析结果可能会出入，但即使折中考虑俯仰机构的一阶谐振频率也应不低于 20 Hz。光学预警系统所需跟踪的运动目标，即使处于最大机动的极限情况，体现到视轴跟踪的运动轨迹频率变化一般也不超过几赫兹。因此在俯仰跟踪过程中，只要控制参数合理，结构因素不会导致系统出现共振或特定频率谐振的现象。

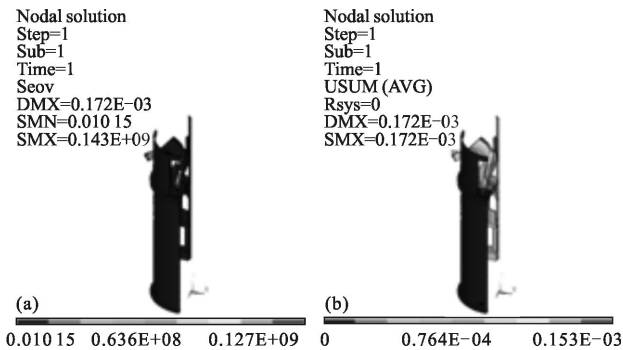


图 6 俯仰机构装配体应力、位移云图

Fig.6 Assembly stress and displacement of elevation mechanism

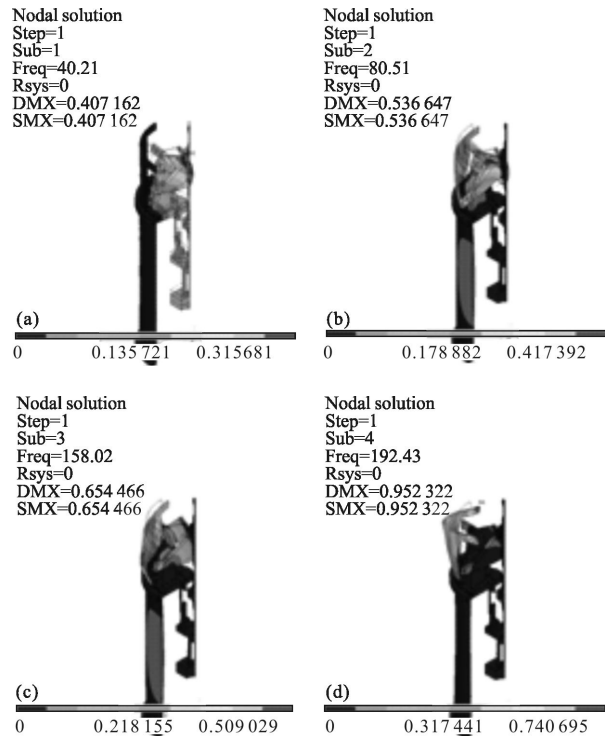


图 7 俯仰机构模态分析前四阶振型

Fig.7 Analysis of fourth-order mode of elevation mechanism model

2.3 基于滑模变结构控制的液压伺服系统

此系统俯仰机构采用四通滑阀对称结构的液压缸作为驱动装置^[7]，安装跟踪轴上的光学编码器作为角度反馈传感器。传感器与执行机构安装在不同实体的状态称为“非并置”情形，这种情况需要分析受控对象柔韧性的影响，一般表现为系统特征根方程中会引入轻阻尼根，考虑这种因素并结合实际液压缸的物理模型^[8]，建立系统闭环控制仿真模型。如图 8 所示。

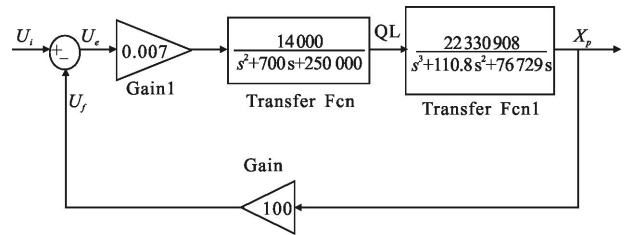


图 8 俯仰机构闭环控制模型

Fig.8 Simulation model of closed-loop control

此俯仰机构在运行过程中，随着俯仰角的变化，光学负载产生的力矩和惯量呈非线性变化，对于控制系统而言相当于受到很大的外部扰动，同时该扰动又会引起控制模型中液压固有频率、液压阻尼比等关键参数的变化。由于滑模变结构的设计与被控

对象参数及扰动不直接相关,具有比鲁棒性更优越的“不变性”。因此该液压伺服控制器的设计采用指数趋近律的滑模变结构控制算法。系统的控制律函数表示为公式(1):

$$u = \frac{1}{844\,019} (75\,129e_2 + 30.8e_3) - 5\text{sgn}(s) - 20\text{ s} \quad (1)$$

取给定跟踪正弦轨迹为: $y = 22.5\sin(2t - \frac{\pi}{2}) + 22.5$,

仿真的跟踪及误差曲线如图 9 所示。

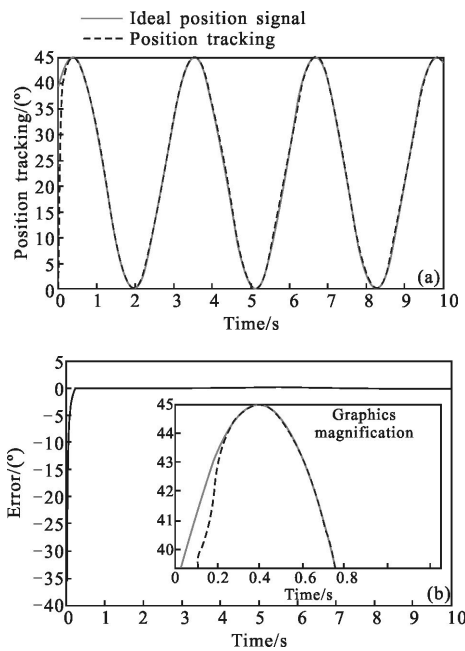


图 9 正弦跟踪及误差曲线

Fig.9 Sine tracing and error curve

图中发现跟踪轨迹与给定跟踪轨迹几乎完全重合,跟踪最大误差小于 0.005° ,稳定时间不超过 0.4 s 。证明该结构俯仰动态跟踪性能不低于传统光电经纬仪的俯仰跟踪性能。

3 结论

文中将多负载伞状分布视场拼接的思想和多层结构理念有机结合,构建了“伞状双层分布式结构”的光学跟踪平台,该思想与方法目前国内外尚无报道。该结构不仅可以实现两个目标同时跟踪,而且具有更灵活的动态扫描组合方式,利于目标快速的捕获和跟踪,同时还可以有效规避和减小跟踪过顶时的盲区,具有很高的应用与研究价值。

参考文献:

[1] Liu Haibo. Electro-optical detection technology for early

warning[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(1): 46-47. (in Chinese)

刘海波. 光电预警探测技术研究 [J]. *应用光学*, 2011, 32(1): 46-47.

[2] Tian Liude, Liu Chaohui, Zhao Jianke, et al. Impact of three-axis error on angle measurement of photoelectric theodolite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 193-195. (in Chinese)

田留德, 刘朝晖, 赵建科, 等. 三轴误差对光电经纬仪测角的影响[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 193-195.

[3] Dong Xiaomeng, Zhang Ping. Zenith blind zone of two axis stabilized platform [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2007, 33(7): 811-815. (in Chinese)
董小萌, 张平. 两轴稳定平台的过顶盲区问题 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2007, 33(7): 811-815.

[4] Li Lin, Lu Huanzhang, Xiao Shanzhu, et al. Infrared moving object detection under the condition of rotating scan[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 967-972. (in Chinese)
李林, 卢焕章, 肖山竹, 等. 周视条件下的红外运动目标检测[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(3): 967-972.

[5] Sun Gang, Guo Shijian, Chen Zengping. Real-time target detection algorithm of infrared imaging alarm system in panoramic field-of-view[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2152-2158. (in Chinese)

孙刚, 郭仕剑, 陈曾平. 周视红外成像搜索系统中的实时目标检测方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(7): 2153-2158.

[6] Yin Yilin. Exploration and practice of switching in multiple tracking modes of theodolite [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1990, 17(4): 57-62. (in Chinese)

尹义林. 经纬仪多种跟踪方式间切换问题的研究与实践 [J]. *光电工程*, 1990, 17(4): 57-62.

[7] Meng Jiang, Li Chengqun. Synchronous speed piston for multi-stage cylinder [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2014, 3: 88-90. (in Chinese)

孟江, 李成群. 多级液压缸速度同步活塞的研究 [J]. *液压与气动*, 2014, 3: 88-90.

[8] Jiang Guiyun, Wang Yongqin, Yan Xingchun. Mathematics modeling and simulation analysis of dynamic characteristics for hydraulic cylinder controlled by servo-valve [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2005, 40(5): 195-198. (in Chinese)

江桂云, 王勇勤, 严兴春. 液压伺服阀控缸动态特性数学建模及仿真分析[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2005, 40(5): 195-198.