

文章编号: 1672-8785(2023)04-0020-13

国内外调焦机构研究综述 及发展趋势

高宇轩 陈星明* 代俊 杨美霞 黄守彬

陈翔 侯振岩 黄建

(西南技术物理研究所, 四川 成都 610045)

摘要: 调焦是高能激光系统中发射聚焦装置的关键一环。调焦机构对系统的瞄准和打击精度有着重要作用。为了解调焦机构的研究现状和发展趋势, 首先对国外各类研究成熟的调焦机构进行了介绍, 并分析了其调焦控制的原理以及针对各类技术问题所提出的解决方案。对于国内研究情况, 则着重介绍了凸轮、丝杠、蜗轮蜗杆和直接驱动四种形式的调焦机构。然后分析了其控制调焦的基本原理, 并介绍了应用于不同系统的调焦机构的设计特点。通过分析各类型调焦机构的设计及控制, 总结和对比了它们的优点与不足, 提出了适用于高能激光系统的调焦机构设计思路及研究方向, 为高能激光系统调焦机构研究打下了技术基础。

关键词: 调焦机构; 凸轮结构; 丝杠结构; 蜗轮蜗杆; 直线电机

中图分类号: TH13 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.04.004

Review and Development Trend of Domestic and Foreign Focusing Mechanism

GAO Yu-xuan, CHEN Xing-ming*, DAI Jun, YANG Mei-xia, HUANG Shou-bin,
CHEN Xiang, HOU Zhen-yan, HUANG Jian

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610045, China)

Abstract: Focusing is a key part of the launch focusing device in high-energy laser systems, and the focusing mechanism plays an important role in the targeting and striking accuracy of the system. In order to understand the research status and development trend of focusing mechanism, various types of foreign mature focusing mechanisms are introduced firstly. The principle of their focusing control and the solutions of various technical problems are analyzed. The domestic research situation focuses on four types of focusing mechanisms: cam, screw, worm gear and direct drive. For each form of focusing mechanism, the basic principle of controlling focusing is analyzed, and the design features of the focusing mechanism applied to different systems are introduced. By analyzing the design and control of each type of focusing mechanism, the advantages and disadvantages

收稿日期: 2022-12-06

基金项目: 型号预研项目

作者简介: 高宇轩(1998-), 男, 四川邛崃人, 硕士研究生, 主要研究方向为激光技术与应用。

***通讯作者:** E-mail: 13982129403@163.com

ges are summarized and compared, and the design ideas and research directions of the focusing mechanism for high-energy laser systems are proposed to lay the technical foundation for the research on focusing mechanism of high-energy laser systems.

Key words: focusing mechanism; cam structure; screw structure; worm gear; linear motor

0 引言

作为 20 世纪以来的一项重大发明, 激光在诸多领域都有着重要的研究和应用价值。作为一种可对目标定向实现有效毁伤的新型武器, 高能激光系统在军事领域具有极高的应用价值。激光对目标的快速精准毁伤打击是高能激光武器系统的主要目的。这就需要将激光聚焦到不同距离的目标上, 即需要采用高精度、高动态性能的调焦机构。作为激光发射聚焦装置中的关键一环, 调焦对系统的打击精度和瞄准精度起着重要的作用。因此, 研究适用于高能激光系统的调焦机构技术是十分必要的。

在瞄准的过程中, 激光系统通常需要对几千米到几十千米开外的远距离运动目标进行聚焦。由光学成像原理可知, 物距越大, 像距越小, 相应的调焦行程通常就只有毫米级。当目标距离发生变化时, 要想获得理想的聚焦效果, 需要调整透镜进行微小的位移。这就要求达到至少微米级的调焦精度。另一方面, 激光系统根据测量高速运动目标距离而进行调焦的工作情况对调焦的实时性有很高的要求。

在工程应用上, 激光系统的调焦机构不仅对调焦精度和动态响应速度有着很高的要求, 而且还需满足环境适应性的要求。实现良好的调焦性能(精准和快速调焦控制), 是调焦机构研究的核心关键技术。本文从国内外调焦机构的研究情况入手, 介绍了不同类型调焦机构的结构设计和控制特点; 通过分析和总结, 根据高能激光系统的调焦需求提出了相应的调焦机构设计方案。

1 国外调焦机构研究现状

欧美调焦技术的发展领先于我国, 其调焦机构应用的光学器件口径、光学系统结构等都呈现出多样化的发展趋势^[1-5]。调焦机构从一维方向的控制扩展到了多维空间的控制。由于各类新技术在调焦机构上的应用, 调焦机构在结构简化、高可靠性、空间适应性等方面都有着长足的发展^[6-11]。

1.1 柔性铰链调焦结构

Jinwon J 等人针对小型卫星光学系统中主镜与副镜之间的对准可能会受航天器和空间内恶劣环境影响的问题, 提出了一种由单电机驱

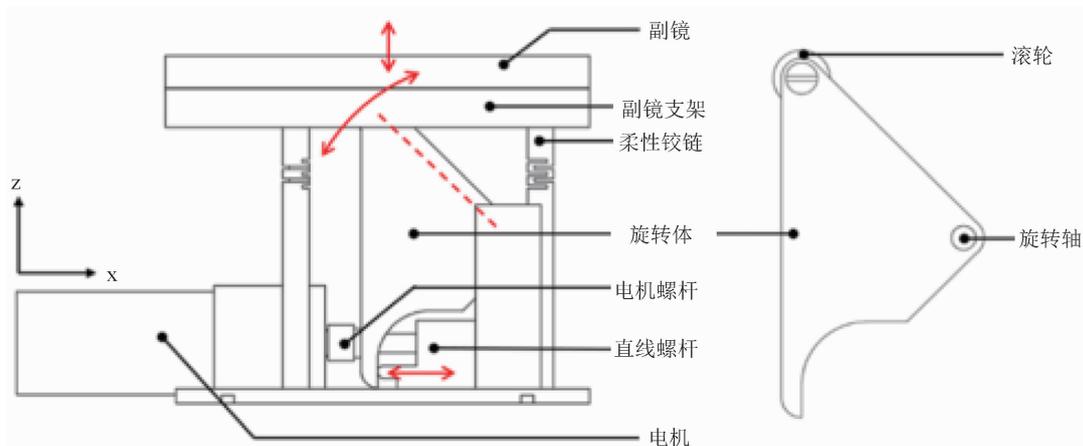


图 1 柔性铰链调焦机构^[12]

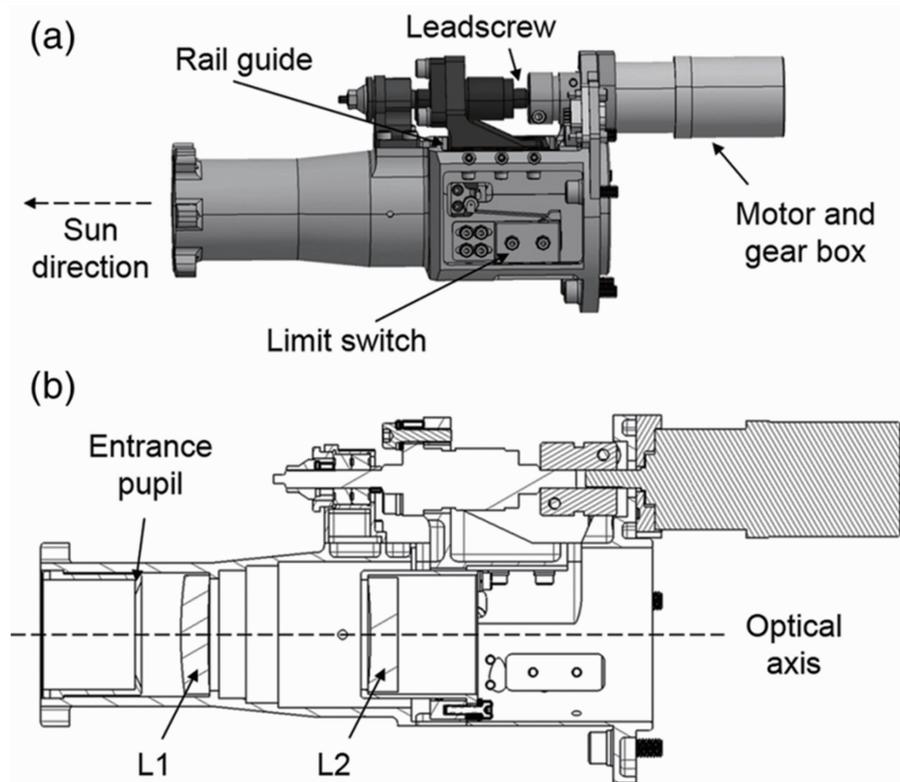


图 2 调焦机构：(a) CAD 模型侧视图；(b) 光学结构侧视图^[13]

动的柔性铰链调焦机构^[12]。采用径向“之”字形缝来实现柔性铰链(见图 1)，并对铰链结构进行预加载以减少产生的滞回，从而补偿受环境影响产生的形变。通过拉伸/延展试验可知，该调焦机构最大能产生 $5.2 \mu\text{m}$ 中心补偿位移和 $88.45 \mu\text{rad}$ 倾斜补偿，其控制分辨率最高可达 $0.1 \mu\text{m}$ 。

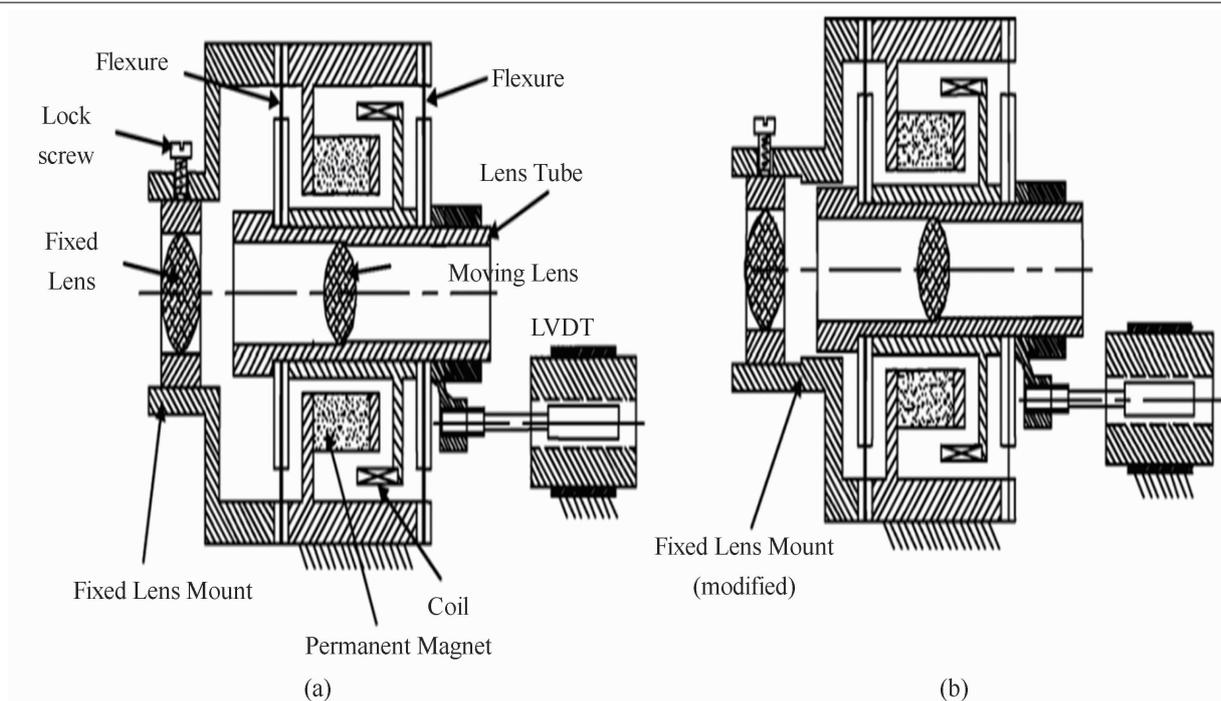
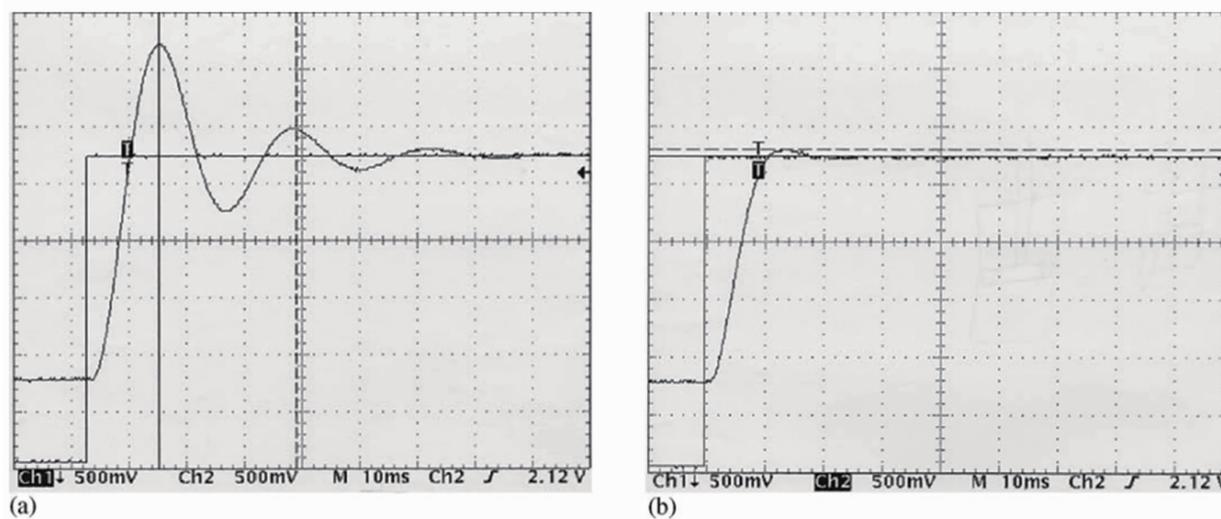
1.2 自主调焦机构

用于欧洲航天局/美国国家航空航天局太阳轨道飞行器任务的全盘望远镜会因为热漂移产生聚焦位置位移。Manuel S L 等人设计了一种自主调焦机构，即通过图像对比度分析，调整镜头位移达到最佳聚焦位置^[13]。图 2(a)和图 2(b)分别为该调焦机构的 CAD 模型侧视图和光学结构侧视图。透镜 L1 位置固定；透镜 L2 安装在滑动导轨上，可沿光轴方向运动。通过图像检测计算最佳聚焦位置，然后通过电机驱动透镜 L2 运动到达计算出的位置，补偿由温度变化和制造公差引起的离焦效应所造成的成像退化。 $80 \mu\text{m}$ 的 L2 位移就可以补偿 1 mm 的聚焦位移，整体的调焦精度能达到 $2 \mu\text{m}$ 。

1.3 空气阻尼式调焦机构

Gaunekar A S 等人开发和设计了一种高精度可编程调焦机构 (Programmable Focusing Mechanism, PFM)，并将其应用于半导体器件中的视觉系统。图 3 为 PFM 的原理图。该机构将一个透镜相对于另一个固定透镜移动，从而改变光学系统的焦点。在结构设计中采用了柔性轴承^[14]。小型音圈电机驱动移动的镜头，并通过线性可变位移传感器 (Linear Variable Displacement Transducer, LVDT) 提供的反馈在闭环伺服模式下精确控制其轴向位置。

图 3(b)为带有空气阻尼器的 PFM(改变了固定透镜的安装设计)的原理图。可以看出，固定透镜与移动透镜运动管道形成了近似全封闭的设计，两者之间只有 $10 \sim 15 \mu\text{m}$ 大小的径向间隙。当空气被驱动通过环形间隙时，在两个透镜之间引入了大量的空气阻尼，使行程结束时的残余振动衰减。图 4 所示为两种 PFM 的阶跃响应。其中，带有空气阻尼器的 PFM 的超调量大幅降低，可更快地达到稳态值。

图 3 PFM 原理图: (a)无阻尼式; (b)带有空气阻尼器^[14]图 4 PFM 的阶跃响应: (a)无阻尼式; (b)带有空气阻尼器^[14]

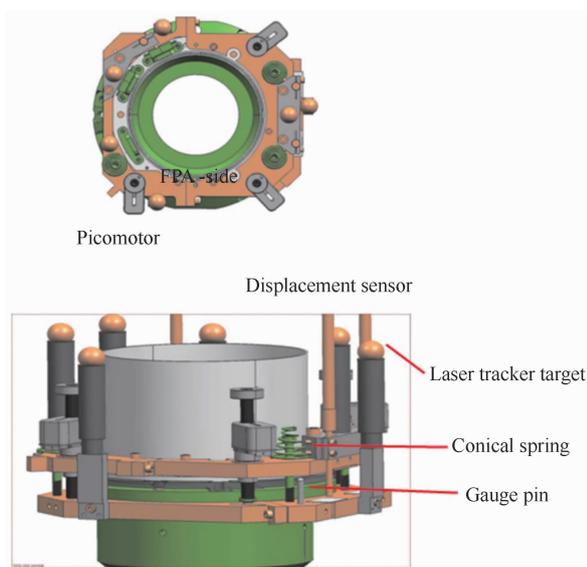
1.4 三维调节型调焦机构

Carl C L 等人基于空间二氧化碳分析仪的最佳聚焦设计了一种调焦机构。他们采用三个压电驱动电机实现了探测器的三维调整。通过位移传感器的反馈将探测器置于最佳光学成像位置,同时调整安装垫片的厚度来适应电机的驱动^[15]。图 5 为该调焦机构的俯视和侧视结构图。上面的灰色结构包含焦平面阵列,下面的绿色结构是带有聚焦透镜的仪器,橙色结构

为调焦装置。调焦装置的上半部分与灰色结构连接,下半部分与绿色结构连接,上下两边再由弹簧进行连接。通过用三个压电驱动电机调整距离来实现调焦(精度可达到 $5\ \mu\text{m}$)。

1.5 小结

国外的调焦机构研究相对成熟,已有多种产品成功应用于空间卫星、航天望远镜等。调焦机构的类型多样化,可实现一维到三维的调焦。在优化调焦机构时采用柔性铰链、空气阻

图 5 二氧化碳分析仪的调焦机构^[15]

尼器等结构设计,改善了响应速度、稳定性、精度等性能。此外,采取热适应的挠曲装置和特殊材料涂层等技术手段来提高对高低温等极端工作环境的适应性。

2 国内调焦机构研究现状

国内的调焦机构研究主要是基于空间相机、光学遥感器等光电设备的应用^[16-19]。从驱动类型上来看,主要有旋转电机配合传动装置驱动和直线电机直接驱动两种类型。其中,传动装置的结构主要有凸轮、丝杠和蜗轮蜗杆三种形式^[20-23]。下面将分析这些调焦机构的驱动原理并介绍其研究情况。

2.1 凸轮型调焦机构

2.1.1 凸轮结构的基本形式

调焦机构主要采用圆柱形凸轮,其结构主要由电机、凸轮、导向销、镜组等组成(见图6)。旋转电机输出扭矩对凸轮进行驱动。凸轮通过导向销和销钉将动能传递到镜组上,从而实现镜组的往复直线运动^[24]。凸轮机构结构紧凑的特性适合空间比较狭小的工况,但凸轮与外镜筒之间存在摩擦,对镜组的移动精度和运行平稳性带来影响。此外,由于齿轮传动的影

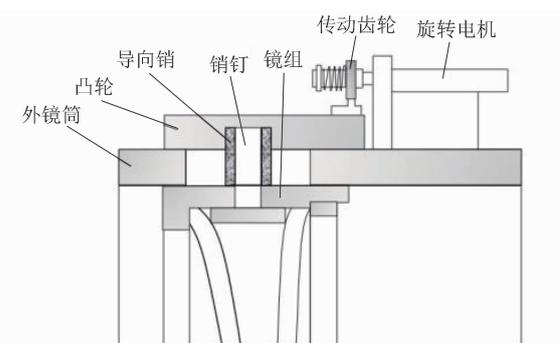


图 6 凸轮传动结构

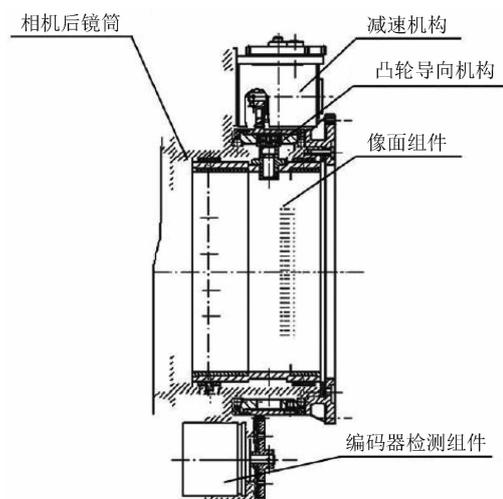


图 7 带减速措施的凸轮调焦机构

2.1.2 相关研究情况

在对凸轮调焦机构的研究中,王智等人设计的以凸轮为导向的调焦机构(见图7)采用了可靠性设计和消空回措施,其传动误差仅为 $\pm 1.71 \mu\text{m}$ 。这既保证了一定的结构强度和刚度,又有着较高的调焦精度。具体工作原理如下:作为驱动源的步进电机输出的机械能通过减速机构调节后,使凸轮导向机构带动像面组件作直线运动^[25]。在凸轮的安装上采用双轴承的设计来消除正反转产生的空回误差(见图8),并通过用编码器检测位移量来提高数据的准确性。

刘磊等人设计的调焦机构采用基于双凸轮驱动和高刚度导轨的支撑导向设计(见图9),提高了调焦机构的动态刚度,并且可实现 $\pm 0.008 \text{ mm}$ 的调焦精度^[26]。电机通过联轴器输出机械能至凸轮;用制动器对凸轮的转动进

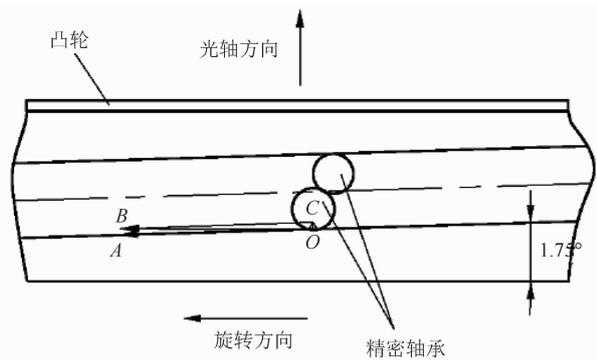


图 8 凸轮运动原理图

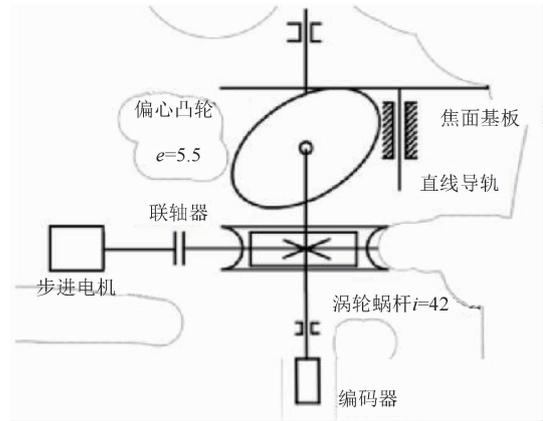


图 11 蜗轮蜗杆减速的传动原理

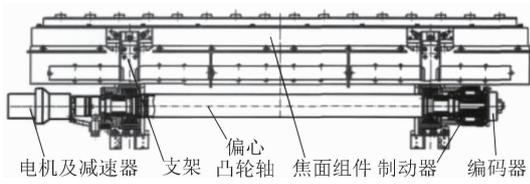


图 9 双凸轮调焦机构结构

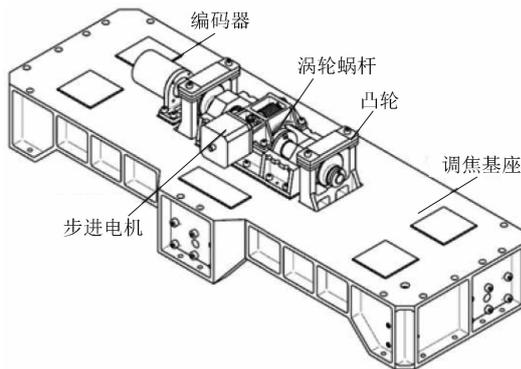


图 10 基于蜗轮蜗杆减速的凸轮调焦机构

行限制, 再通过编码器对凸轮的转角位置进行反馈, 从而实现闭环的调焦控制。双凸轮可以限制长焦面组件在调焦过程中的倾斜量。与单凸轮单点限制焦面组件在调焦过程中的倾斜量相比, 双凸轮限制焦面组件倾斜的效果更明显, 重复性更好。

杜一民分析了造成相机离焦的主要因素, 并结合相机光学系统的特点设计了一套双凸轮调焦机构^[27]。该调焦机构主要由步进电机、减速器、凸轮、基座、编码器、直线导轨等组成(见图 10)。双凸轮双点驱动的设计对调焦过程中焦面的晃动有着很好的限制作用, 有效减小了焦面晃动量, 提高了调焦的重复性。

这种调焦机构采用了基于蜗轮蜗杆一级减速的凸轮调焦方案(原理见图 11)。步进电机输出旋转机械能, 然后将其传递到蜗轮蜗杆与偏心凸轮机构并转换为直线运动, 再带动镜面组件实现调焦控制。基座上安装的高精度直线导轨保证了调焦镜组沿焦面法线方向进行一维往复移动, 并通过编码器对调焦机构的位移数据进行检测。

2.1.3 小结

凸轮型调焦机构的结构精密, 能实现较高的调焦精度。凸轮传动可采取多种形式来实现性能的提升。比如, 双凸轮结构能有效减小焦面的晃动量, 提高了系统的重复性和稳定性; 它还可配合减速机构形成速度缓冲, 从而减小误差。但凸轮机构加工成本较高、周期长且容易磨损, 是一个值得关注的问题。

2.2 丝杠型调焦机构

2.2.1 丝杠结构的基本形式

调焦结构中常用的丝杠结构有滑动型和滚动型两种。其中, 滑动型丝杠由螺母和丝杠组成, 螺纹摩擦传递动力。优点是结构简单、成本低, 缺点是容易出现卡死现象。滚动型丝杠通过滚珠将丝杠和螺母的滑动摩擦转换为滚动摩擦, 有效提高了传动效率、定位精度等性能, 但成本也更高且不方便维护。

丝杠结构主要由旋转电机、传动齿轮、丝杠、移动镜组等组成(见图 12)。电机产生的机械能通过齿轮传递到丝杠上, 螺母将丝杠的

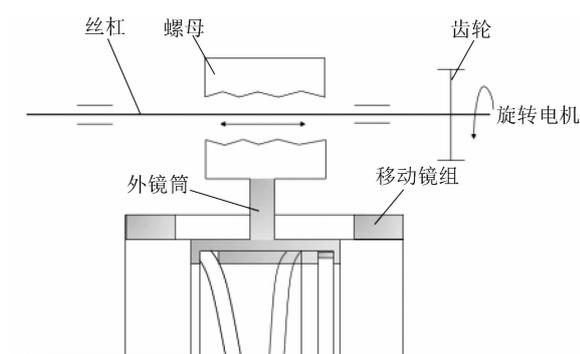


图 12 丝杠传动结构

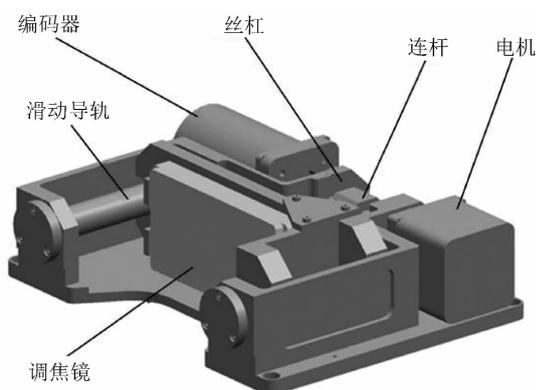


图 13 双滑块丝杠调焦机构

轴向旋转转换为直线往复运动，从而带动镜组实现调焦控制。

2.2.2 相关研究情况

国内对丝杠调焦机构的应用研究较多。贾学志等人提出了丝杠和连杆配合使用的双滑块机构(见图 13)^[28]。在丝杠结构设计中加入了连杆装置,有效解决了系统的离焦问题。该调焦机构的总质量为 2.5 kg,最大尺寸为 186 mm×144 mm×60 mm。通过试验得出单向和重复定位精度分别为 0.008 mm 和 0.0025 mm,满足了调焦机构的高精度和轻量化要求。

在提高调焦机构的可靠性方面,薛乐堂等人提出了双步进电机驱动形式的调焦机构(见图 14)^[29]。这种调焦机构主要由两个步进电机、丝杠、直线滑动导轨、电位计、限位开关等组成。丝杠两端连接的步进电机通过精密丝杠驱动平台在直线导轨上平移来完成调焦,电位计反馈平台的当前位置,限位开关可以限制平台平移范围。

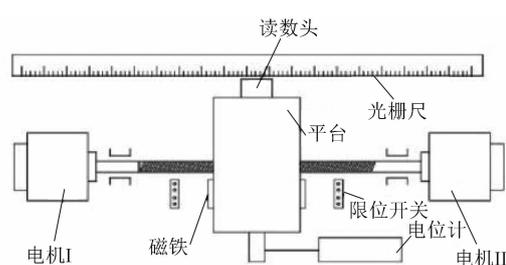


图 14 双电机丝杠调焦机构

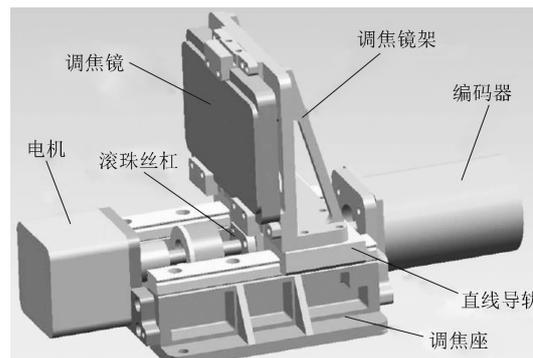


图 15 滚珠丝杠调焦机构

在结构简化设计上,安源等人采用滚珠丝杠将旋转运动转换为直线运动,并结合直线导轨约束运动形式^[30]。设计方案如图 15 所示。步进电机驱动滚珠丝杠将旋转运动转换为直线运动。采用高精度的直线导轨保证了调焦的稳定性,在简化传动过程的同时还提高了定位精度。

2.2.3 小结

与凸轮相比,丝杠传动的结构更加简单且易于加工。由于丝杠本身有多种类型(如柔性丝杠、滚珠丝杠等),可以根据不同需求的应用场合来加以选择。在调焦方式上可与滑块机构、柔性装置相结合,从而提高系统性能。但丝杠在低温条件下容易产生卡滞现象且抗冲击能力较差,这在设计时需要重点考虑。

2.3 蜗轮蜗杆型调焦机构

2.3.1 蜗轮蜗杆结构的基本形式

图 16 为蜗轮蜗杆传动机构的示意图。工作原理如下:采用旋转步进电机作为驱动源,带动蜗轮蜗杆进行旋转运动,再通过与蜗轮连接的丝杠将旋转运动转换为直线运动并输出到镜组,从而实现调焦。蜗轮蜗杆传动产生的摩擦会造成一定的磨损并导致蜗杆产生轴向回

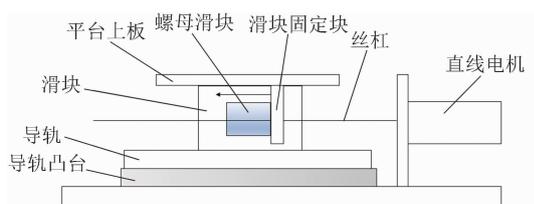


图 20 直线电机驱动平台

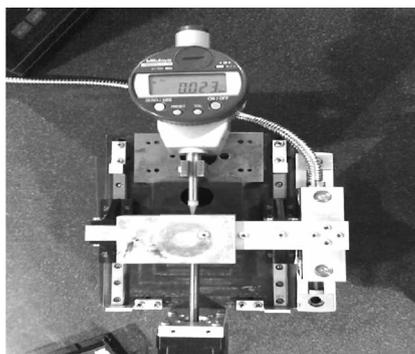


图 21 直线电机驱动的调焦机构

成调焦。

2.4.2 相关研究情况

林为才等人设计了一种主要由直线电机、直线导轨、位移传感器、DSP 控制器等组成的新型调焦机构(见图 21)^[36]。位移传感器将位移变化量传输到 DSP 控制器,并对直线电机发出控制指令带动镜组移动。通过试验测得调焦机构的最大绝对误差在 0.005 mm 以内。经分析得出误差产生的原因主要有以下三点:光栅尺的制造误差、直线电机自身精度的影响、直线导轨的直线以及安装误差。

高飞等人设计的直接驱动型调焦机构(见图 22)将直线电机作为驱动源,采用光栅尺进行位移检测^[37]。他们对控制精度、晃动和高低温等方面进行了试验。结果表明,控制精度的最大绝对误差为 0.003 mm,最大水平和垂直晃动量分别为 2.5"和 5.8",工作温度为-40~55℃。

张春林等人设计了一种基于 CCD 相机的直接驱动型调焦机构(见图 23),并分析了针对直线电机选型的调焦行程、分辨率、负载重量等参数的计算方法^[38]。直线电机直接驱动 CCD 相机在直线导轨上运动,重复定位精度

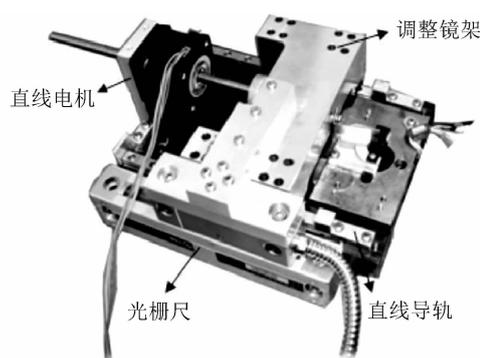


图 22 直接驱动型调焦机构组成

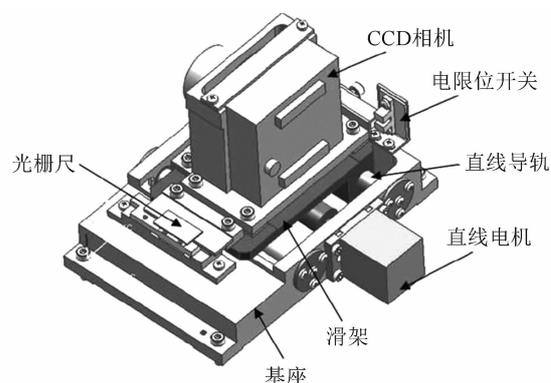


图 23 基于 CCD 相机的直接驱动型调焦机构

可达到 0.004 mm。

2.4.3 小结

采用直接驱动形式的调焦机构的最大特点就是通过直线电机直接输出直线运动从而取消了中间传动环节,极大简化了整个系统结构,有效降低了传递误差,同时在设计和加工方面都更有优势。因此,对于这种类型的调焦机构设计,主要需要考虑的是电机的控制性能以及滑轨的精度等。

3 各类型调焦机构的特性分析

国外对调焦机构的各类研究(如多维调焦控制、压电驱动、柔性机构等新技术)都较为领先,在性能上更加优良,对空间环境也有着更好的适应性^[39]。国内目前应用于光电设备的调焦机构以旋转步进电机配合传动装置的结构为主。这种结构稳定可靠,精度能满足大部分应用需求。而以直线电机为驱动源的直接驱动型调焦机构结构简单,大幅简化了传动环节。

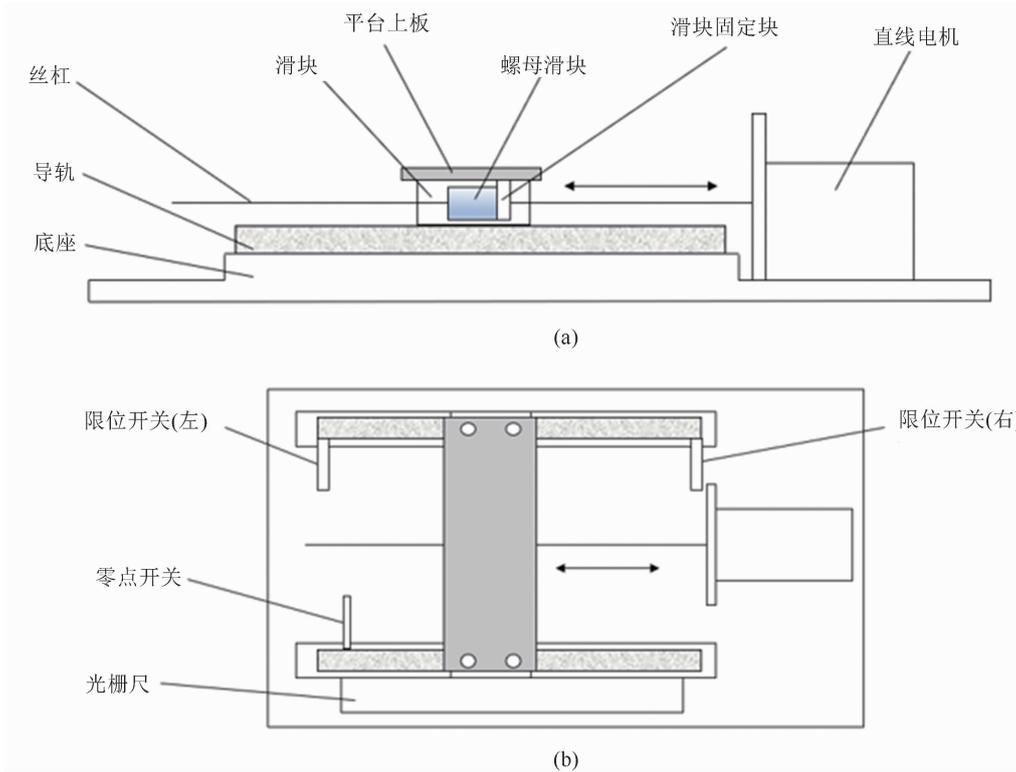


图 24 高能激光系统调焦机构结构: (a)侧视图; (b)俯视图

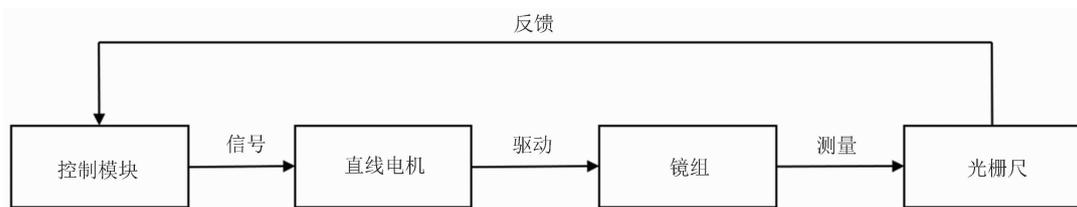


图 25 调焦工作流程

表 1 各类型调焦机构的主要性能对比

调焦机构类型	定位精度	重复精度	响应速度	工作温度
凸轮型	优于 10 μm	优于 10 μm	较慢	-40~50℃
丝杠型	优于 10 μm	优于 5 μm	较慢	-40~60℃
蜗轮蜗杆型	优于 10 μm	优于 10 μm	慢	0~40℃
直接驱动型	优于 5 μm	优于 5 μm	较快	-40~50℃

表 1 列出了各类型调焦机构的主要性能参数。总的来说,各类型调焦机构在精度上都能达到微米级别,而直线电机型调焦机构则可达到更高的精度,并且在响应速度上更有优势。

4 用于高能激光系统的调焦机构设想

激光对目标的快速精准毁伤打击是高能激光武器系统的主要目的。这就需要将激光聚焦到不同距离的目标上,即需要高精度、高动态

性能的调焦机构。因此,研究适用于高能激光系统的调焦机构技术是十分必要的。随着高能激光系统逐步实现工程应用,对调焦机构提出了高精度、高动态特性等技术指标。传统的旋转电机和传动机构在精度上能满足一定的需求,但其动态特性还有所欠缺。直线电机具有直接驱动的特点,大大提高了系统的动态响应,并在精度上也有所提高。因此,将基于直

线电机的调焦机构用于高能激光系统调焦是一个值得关注的研究方向。

4.1 设计原则

基于高能激光系统的调焦性能需求，调焦机构的设计有以下几个要点：(1)整体结构设计；(2)导轨选取；(3)电机选取；(4)传感器选取。

4.1.1 整体结构设计

主体结构材料根据需要适应的工作环境来选择；对于整体尺寸，根据需求设计相应大小的基座以及各功能模块的安装位置。

4.1.2 导轨选取

根据需求选择导轨类型，需要考虑的参数主要有行走平行度、摩擦系数、重复定位精度等。

4.1.3 电机选取

根据系统所需的调焦行程、负载重量、精度等选择电机，主要参考的参数有推力、行程范围、功率等。

4.1.4 传感器选取

由于要对直线位移进行实时检测，传感器需满足高精度、高分辨率、高动态特性的要求。

4.2 设计方案

根据上述设计原则，提出了一种适用于高能激光系统的调焦机构设计方案(见图 24)。该调焦机构主要由直线电机组件、直线导轨、导轨滑块、滑块固定块平台上板、平台底座、限位/零点开关、光栅尺式位移传感器组成。其中，直线电机组件包含直线电机、与电机连为一体的丝杠及其配套的螺母滑块；螺母滑块和滑块安装块相连接；平台上板用于安装镜组，分别与导轨滑块、滑块安装块通过螺钉连接；两个限位开关安装在导轨滑块运动的两侧极限位置；零点开关安装在零点位置。

主体结构选用性能优异且适应高低温工作环境的因瓦合金；直线导轨选用的动、静摩擦系数极小的可调整式滚动直线导轨适用于高速直线运动，能有效提高总体的定位精度；驱动

电机选用直线步进电机，通过 ARM 控制板进行控制，取消了中间的传动环节，在降低误差的同时极大提高了系统响应速度；传感器选用光栅尺式位移传感器，对镜组进行位移测量。

具体工作流程如图 25 所示。光栅尺将测得的镜组位移反馈给控制模块；数据经过处理后对电机发出控制信号；电机收到信号后通过螺母滑块带动平台上板的镜组在滑轨上产生相应的位移；光栅尺再次对位移进行测量并反馈给控制模块，实现闭环控制。当控制模块判断误差已符合要求的精度后发出终止信号，电机停止运转，至此完成整个调焦流程。

5 结束语

目前国外的调焦机构研究较为领先，已经实现了多维控制、压电驱动等各类新技术的应用。国内现在常规应用的调焦机构主要还是以传统旋转电机为驱动，以凸轮、丝杠、蜗轮蜗杆为传动装置，具有一定的精度和较高的稳定性，广泛应用于空间相机等光电设备。

高能激光系统对调焦精度、动态特性等性能指标有着更高的要求。直线电机直接驱动的特性非常适用于高精度、高动态响应的调焦机构驱动，环境适应性强，并具有很多传统旋转电机无法比拟的优势。因此，基于直线电机驱动的调焦机构会是未来高性能调焦机构研究的一个重要发展方向。

参考文献

- [1] Yannick L, Andreas R, Brewster R, et al. A new test environment for the SOFIA secondary mirror assembly to reduce the required time for in-flight testing [C]. *SPIE*, 2016, **9906**: 99064T.
- [2] Yannick L, Andreas R, Alfred K. An end-to-end simulation to predict the in-flight performance improvement of a modified SOFIA secondary mirror mechanism [C]. *SPIE*, 2018, **10700**: 107001F.
- [3] Ghaemi F T. Design and fabrication of lenses for the color science cameras aboard the Mars Science Laboratory rover [J]. *Optical Engineering*, 2009, **48**(10): 1-15.

- [4] Salvignol J C, Honnen K, Barho R. JWST NIR-Spec mechanical design [C]. *SPIE*, 2008, **7018**: 70181Y.
- [5] Jeffrey K R, Nicholas M L, Henry T C, et al. Robotilter; an automated lens/CCD alignment system for the Evryscope [J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2020, **6**(1): 1-30.
- [6] Reinacher A, Lammen Y, Roeser H. SOFIA's secondary mirror assembly: in-flight performance and control approach [C]. *SPIE*, 2016, **9908**: 99082V.
- [7] Matthew A G, Vicki B, Pamela D, et al. Status of the James Webb Space Telescope integrated science instrument module [C]. *SPIE*, 2012, **8146**: 814606.
- [8] Anouk L, Robert D, Pierre P, et al. The Gaia focal plane [C]. *SPIE*, 2007, **6690**: 66900A.
- [9] Minwoo L, Jongun K, Chang J S, et al. Development of in-orbit refocusing mechanism for Space-Eye-1 electro-optical payload [C]. *SPIE*, 2016, **9972**: 99721O.
- [10] Matteo T, Giorgio B, Reiner B, et al. The cryogenic refocusing mechanism of NIRSpec opto-mechanical design, analysis, and testing [C]. *SPIE*, 2008, **7018**: 70181Z.
- [11] Novi A, Taccola M, Koehler J, et al. The optical manufacturing of the refocusing mechanism of NIRSpec [C]. *SPIE*, 2008, **7018**: 701820.
- [12] Jinwon J, Nguyen V S, Lee D, et al. A Single Motor-Driven Focusing Mechanism with Flexure Hinges for Small Satellite Optical Systems [J]. *Applied Sciences*, 2020, **10**(20): 1-5.
- [13] Manuel S L, Daniel G G, Antonio S, et al. Analysis and evaluation of the Full Disk Telescope refocusing mechanism for the Solar Orbiter mission [J]. *Optical Engineering*, 2015, **54**(8): 1-11.
- [14] Gaunekar A S, Widdowson G P, Srikanth N, et al. Design and development of a high precision lens focusing mechanism using flexure bearings [J]. *Precision Engineering*, 2004, **29**(1): 81-85.
- [15] Carl C L, Harold R P, Brett H, et al. System for establishing best focus for the Orbiting Carbon Observatory instrument [J]. *Optical Engineering*, 2009, **48**(7): 1-9.
- [16] 黄和平, 夏寅辉, 安成斌, 等. 大口径、长焦距红外系统调焦机构设计 [J]. *激光与红外*, 2005, **35**(10): 40-42.
- [17] 伞兵, 李景林. 大口径反射光学系统调焦机构设计 [J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(S2): 329-332.
- [18] 贾学志, 张雷, 安源, 等. 空间光学遥感器精密调焦机构设计与试验 [J]. *机械工程学报*, 2016, **52**(13): 25-30.
- [19] 杨会生, 张银鹤, 柴方茂, 等. 离轴三反空间相机调焦机构设计 [J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(4): 948-954.
- [20] 吕世良, 刘金国, 贾平, 等. 离轴三反消像散多光谱相机调焦系统设计 [J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(8): 2154-2160.
- [21] 张新洁, 颜昌翔, 谢涛. 星载光学遥感器调焦机构的设计 [J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(11): 2757-2761.
- [22] 林为才, 王晶. 一种高精度调焦机构设计 [J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2010, **33**(4): 39-42.
- [23] 王凯, 闫勇, 徐明林, 等. 轻小型空间遥感相机精密调焦机构设计与试验 [J]. *红外与激光工程*, 2018, **47**(12): 243-249.
- [24] 林为才. 经纬仪调焦机构设计 [J]. *光机电信息*, 2010, **27**(12): 88-92.
- [25] 王智, 张立平, 李朝辉, 等. 传输型立体测绘相机的调焦机构设计 [J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(5): 1051-1056.
- [26] 刘磊, 曹国华. 大视场长焦面光学遥感器双凸轮式焦面调焦机构 [J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(9): 1939-1944.
- [27] 杜一民. 高分辨率空间相机调焦机构设计与分析 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
- [28] 贾学志, 王栋, 张雷, 等. 轻型空间相机调焦机构的优化设计与精度试验 [J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(8): 1824-1831.
- [29] 薛乐堂, 陈涛, 徐涛, 等. 一种高精度高可靠性调焦机构 [J]. *长春理工大学学报(自然科学*

- 版), 2012, **35**(2): 9-11.
- [30] 安源, 齐迎春. 相机直线调焦机构的设计 [J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(3): 609-614.
- [31] 陈新峰, 王宁, 刘华林, 等. 斗轮取料机控制电缆蜗轮蜗杆减速机改造 [J]. *港口装卸*, 2016, **23**(4): 36-38.
- [32] 王凯, 徐明林, 解鹏, 等. 空间高光谱相机调焦机构精度分析与试验 [J]. *机械工程学报*, 2019, **55**(12): 29-36.
- [33] 姜紫庆, 贾建军. 空间相机透镜调焦机构的设计与测试 [J]. *光学精密工程*, 2018, **26**(12): 2956-2962.
- [34] 王忠善, 何欣, 崔永鹏, 等. 长焦面空间相机调焦机构分析与验证 [J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(4): 1206-1209.
- [35] 马俊林, 沙欧, 郑黎明. 模块化多维直线运动机电平台 [J]. *机电产品开发与创新*, 2015, **28**(6): 48-49.
- [36] 林为才, 王晶. 一种新型调焦机构设计 [J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2007, **30**(4): 46-48.
- [37] 高飞, 张葆, 刘大禹. 一种空间相机调焦机构的设计研究 [J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2008, **31**(4): 74-76.
- [38] 张春林, 宋立维. 直线电机驱动的经纬仪调焦机构设计 [J]. *光机电信息*, 2010, **27**(11): 47-51.
- [39] 陈洪达. 空间高分辨遥感仪器调焦系统研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2014.