

文章编号:1001-5078(2025)01-0097-05

· 光电技术与系统 ·

三推杆伺服系统在空间遥感仪器中的应用

张凯, 刘畅, 李佳欣, 石启龙

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:空间伺服系统可用于提高有效载荷的使用效率和搭载卫星的寿命。可用于空间观测、空间预警和态势感知等领域,但受到重量、转动范围等因素的限制。本文提出一种由三根电动推杆组成的三推杆伺服系统。每根电动推杆两端均通过球铰链分别与有效载荷和卫星平台连接。通过不同电动推杆的伸长和缩短,实现伺服系统的转动;通过设计电动推杆行程,获得不同的转动范围。本文对三推杆伺服系统的自由度进行了解算;结合实际设计了三推杆伺服系统的 60° 转动范围;增加了解锁机构,以满足力学性能要求;分析了伺服系统的热适应性,证明可以作为星载接口使用。结果表明三推杆伺服系统可以用于空间环境;具有较大的转动范围,重量更轻;可以进行空间目标搜索和跟踪;可以完成并替代以往需要卫星机动、调姿的任务,节省卫星燃料。

关键词:伺服机构;电动推杆;态势感知;空间预警

中图分类号:TH745;V443+.5 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2025.01.015

Application of triple linear actuator servo mechanism in space instrument

ZHANG Kai, LIU Chang, LI Jia-xin, SHI Qi-long

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

Abstract:Space servo system can be used to increase the efficiency of payload use and the lifetime of on-board satellites and be used in the fields of space observation, space early warning and situation awareness, but it is limited by factors such as weight and rotation range. In this paper, a type of three linear actuator servo mechanisms is proposed. The two ends of the linear actuator are connected with the space instrument and the satellite platform through a ball hinge. The rotation of the servo system is achieved through the extension and shortening of different electric actuators. Different rotation ranges are obtained by changing the travel of linear actuator. The degrees of freedom of the triple-actuator servo system are solved, and the 60° rotation range of the triple-actuator servo system is designed in combination with reality. The unlocking mechanism is added to meet the requirements of the mechanical properties. And the thermal adaptability of the system is analyzed, and it is proved that it can be used as a star-carrying interface. The results show that the three linear actuator servo mechanisms can be used in space environment, and it has a larger rotation range and is lighter in weight. It can carry out space target search and tracking and can complete and replace previous tasks that require satellite maneuvering and attitude adjustment, saving satellite fuel.

Keywords: servo mechanism; linear actuator; situation awareness; space early warning

作者简介:张凯(1981-),男,硕士,副研究员,主要从事空间光机结构设计、制造、系统装调、试验等方面的研究工作。
E-mail:25889429@qq.com

收稿日期:2024-03-03;修订日期:2024-04-28

1 引言

随着空间技术的飞速发展,要求空间载荷具备的功能越来越多样,性能也逐步提高。例如,要求卫星在进行对地或对空间目标观测时,有效载荷(相机、雷达等)要具备改变观测区域的功能,以提高载荷的使用效率;要求卫星具有空间态势感知能力^[1],能实时搜索卫星周围空间,提前发现威胁性目标,预警并持续跟踪,以保障高价值目标的在轨安全等^[2]。

为满足上述要求,改变有效载荷的指向是主要手段。一般通过卫星机动、调姿(如侧摆、前视、后视等)来实现观测区域的改变。但是卫星大范围、快速、多次机动或调姿,会消耗携带的燃料,减少卫星寿命。

因此需要一种空间伺服系统,能够在空间环境下使用的,依靠电力驱动,可以实现有效载荷较大范围自由转动功能,来替代卫星完成上述任务,无需消耗卫星燃料,延长卫星在轨寿命。

2 国内外主流技术

目前,空间伺服系统在实际应用中一般都是将地面伺服系统稍加改进后应用于航天领域。主要包括:二维转台伺服系统和六推杆(六足)伺服系统,如图 1 所示。

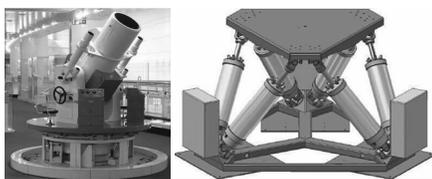


图 1 二维转台系统和六推杆系统

Fig. 1 Two dimensional turntable system and six push rod system

二维转台伺服系统,应用最为广泛,主要用于地面经纬仪等大型仪器。优点是:可实现大范围转动,一般为方位 360° 转动,俯仰 180° 转动角度;转动速度快、稳定性高;转动角度线性变化,测量、控制方式简单。缺点是:系统体积规模较大,重量难以控制,在重量要求极严的航天领域推广比较困难^[3]。

六推杆(六足)伺服系统,主要用于机械加工和精密检测等中小型仪器领域。优点是:重量明显低于二维转台伺服系统;系统稳定性高、精度高^[4]。缺点是:转动范围小(一般小于 30°);转动速度较慢;系统重量仍显略重。

综上所述,亟需一种具有高度轻量化、大转动范

围、较高转速、较高稳定性的伺服系统,用于装备空间有效载荷。

3 三推杆伺服系统工作原理

本文将现有的六推杆伺服系统改进为三推杆(三足)伺服系统,结构形式如图 2 所示。三推杆伺服系统的运行原理和六推杆伺服系统基本一致。改进内容是:将三根电动推杆布置于有效载荷与卫星平台之间。三根电动推杆轴线的延长线交点在有效载荷质心所在轴线上,并高于质心位置,以保证伺服系统具有较高的运行稳定性^[5]。

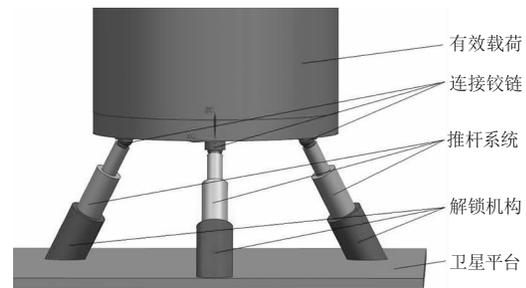


图 2 三推杆伺服系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the three push rod servo system

三推杆伺服系统相比于六推杆系统,减少了 3 组电动推杆及其控制系统,因此重量减轻至少一半以上。三推杆系统推杆伸长方向和系统转动方向基本一致,不像六推杆系统存在一个几十度的夹角,这也是三推杆系统可以实现大转动范围的主要原因。因此在相同转动范围的情况下,三推杆系统的推杆长度更短,重量可以进一步减轻。而三推杆系统相对于二维转台系统则更具备重量优势。

三推杆伺服系统通过控制电动推杆的伸长和缩短,来实现有效载荷的转动。改变电动推杆行程,可获得不同的转动范围。调整电动推杆运行速度,可控制系统的转动速度。电动推杆自带编码器、光栅尺和电位计,可实现闭环控制,保证转动精度,也可以实现位置监测、行程保护等功能^[6]。

电动推杆的两端通过球铰链分别与有效载荷和卫星平台连接。卫星平台、三根推杆、有效载荷之间形成了“P-3-P”的连接形式。通过自由度解算可知,如公式(1)所示,“P-3-P”的连接形式为静定结构,满足伺服系统对约束和转动的共同需求,不会出现过约束的情况。

$$F = 3n - (2P_L + P_H) = 3 \times 4 - 2 \times 6 = 0 \quad (1)$$

三推杆伺服系统与六推杆伺服系统相比:重量减轻一半;伺服系统的转动角度大小基本取决于推杆的伸长量,因此可实现较大的转动角度,如图3所示。



图3 三推杆伺服系统大转角示意图
Fig.3 Schematic diagram of large angle of the three push rod servo system

电动推杆的结构组成主要包括:步进电机、谐波齿轮减速器/蜗轮蜗杆减速器、螺杆、多层套管、刹车装置、编码器、光栅尺和位移传感器等^[7],电动推杆结构形式如图4所示。

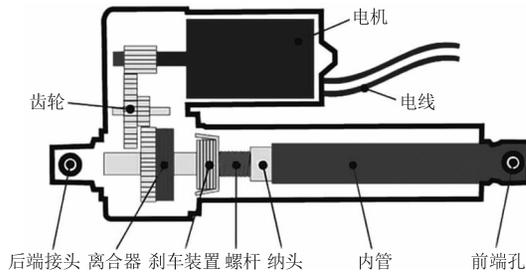


图4 电动推杆结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of electric push rod structure

电动推杆行程主要取决于套管层数和套管长度。航天产品一般选用2层套管形式,以提高运行的可靠性。只有在载荷重量较轻的情况下才采用3层套管形式,以追求更大的转动范围。

4 三推杆伺服系统设计

本文所涉及的有效载荷是用于空间态势感知的小型空间相机,使用可见光进行空间扫描和目标跟踪。相机重量52 kg,外形为 $\phi 500$ mm \times 600 mm的圆筒结构,要求转动范围是顶角为 60° 的圆锥角空间。三推杆伺服系统工作时,载荷的质心位置、推杆与卫星平台角度都是非线性变量^[8]。这里仅对转动范围进行近似计算,以判定是否满足指标要求。

三根电动推杆圆周均匀分布,与载荷连接点选在 $\phi 400$ mm直径的圆上,推杆与卫星平台成 60° 夹角。电动推杆零位长度250 mm,行程设计为

200 mm。伺服系统初始位置选在电动推杆全行程的中点位置,推杆可以伸长或缩短100 mm,采用2层套管结构形式。

一个根推杆伸至最长,两根推杆缩至最短时,可以获得最大的转动角度,转动过程参数如图5所示。伸长杆变化量水平面投影为:垂直伸长 $100 \times \cos 0^\circ \approx 86.6$ mm,水平位移 $100 \times \cos 60^\circ \approx 50$ mm。缩短杆变化量水平面投影为:垂直缩短 $86.6 \times \sin 60^\circ \approx 75$ mm,水平位移 $50 \times \sin 30^\circ = 25$ mm。修正水平位移25 mm差值后,伸长杆垂直伸长 $86.6 - 0.7 \times 25 \times \tan 30^\circ \approx 76.5$ mm,缩短杆垂直缩短 $75 + 0.3 \times 25 \times \tan 30^\circ \approx 79.3$ mm。推杆连接点间距水平投影为 $200 + 200 \times \arcsin 30^\circ = 300$ mm。

则此三推杆伺服系统的最大转动角度为 $\arcsin [(76.5 + 79.3)/300] \approx 31.3^\circ$,所以伺服系统最大转动范围是有效载荷轴线方向顶角约 62.6° 的圆锥空间,能够满足 60° 锥角范围的指标要求。经过轻量化设计,整个三推杆伺服系统样机重量约7.8 kg。

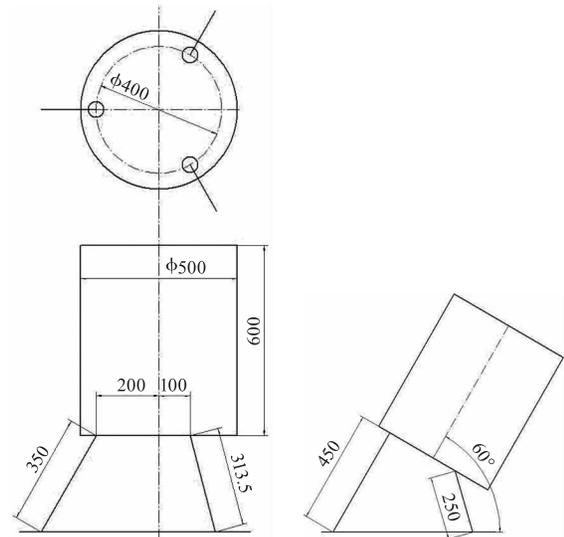


图5 三推杆伺服系统转动范围计算示意图
Fig.5 Schematic diagram of rotational range calculation of the three push rod servo system

三推杆伺服系统在转动角度较大时(一般大于 120° 时),转动角度与推杆伸长量的比例关系会有明显下降。受力学性能、球铰链转动范围等因素限制。在实际设计中,三推杆伺服系统一般设计为不大于 120° 圆锥角的转动范围^[9]。

5 三推杆伺服系统力学特性分析

三推杆伺服系统最大的缺点是:由于减少了支撑数量,造成伺服系统的刚度下降,对力学性能有影

响。虽然在轨工作时处于失重状态,但是在发射入轨阶段力学性能偏低就会影响到有效载荷的安全。

在实际使用中,三推杆伺服系统除了需提高推杆自身刚度外,还需增加辅助解锁装置。通过解锁装置限制球铰链的转动,使伺服系统变为过约束状态,通过冗余约束来提高三推杆伺服系统的力学性能,以满足发射入轨的需要^[10]。

因此在入轨前,需要将三根电动推杆收至最短,辅助解锁装置处于锁定状态,此时伺服系统具有最高的力学性能。在入轨后,解除装置锁定,使伺服系统回复静定状态,以重新满足转动条件。

6 三推杆伺服系统热适应性分析

三推杆伺服系统在轨工作时,需要能够适应卫星平台温度的变化,不能将热应力传递给有效载荷。

三推杆伺服系统热适应原理如图 6 所示。卫星平台由于温度上升会产生长度为 L 的膨胀;推杆与卫星平台的角度会由 α° 减小到 β° ;有效载荷会产生 t 的下降。该适应过程是由伺服系统自发完成的,无需检测和控制。适应前后伺服系统始终处于静定状态,有效载荷不会受到热应力的影响^[11]。所以,三推杆伺服系统即可作为伺服系统使用,也可作为载荷与卫星的连接接口使用。

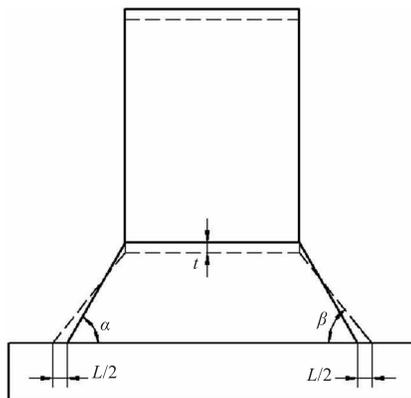


图 6 三推杆伺服系统热适应性分析示意图

Fig. 6 Schematic diagram of thermal adaptability analysis for the three push rod servo system

7 结 论

综上所述,本文在现有空间伺服系统的基础上提出了一种三推杆伺服系统。可同时作为伺服系统和星载接口使用;可在获得较大转动范围的同时,大幅降低系统重量;可满足空间目标搜索和空间目标跟踪的需求;可完成以往需要卫星机动、调姿的任务,而不消耗卫星的燃料,以延长卫星的使用寿命。

本文同时设计了一款三推杆伺服系统,可以满足空间 60° 圆锥角度的转动范围,重量控制在 7.8 kg ,正在进行进一步的调试和试验工作。

三推杆伺服系统适用于重量较轻,质心较低,在轨工作时有较大转动范围需求的中小型有效载荷。在对地观测、深空探索、空间预警、态势感知等领域有着极其广泛的需求和应用前景。

参考文献:

- [1] Zhao Xin, Song Yansong, Tong Shoufeng. Dynamic demonstration experiment of acquisition, pointing and tracking system in space laser communications [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(3): 0305005. (in Chinese)
赵馨, 宋延嵩, 佟首峰. 空间激光通信捕获、对准、跟踪系统动态演示实验 [J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305005.
- [2] Wang Mingjian, Fan Xiaohu, Huang Lei. Progress on the development and trend of overseas space laser communication technology [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2014, (8): 51 - 53. (in Chinese)
王明建, 范小虎, 黄雷. 国外天基武器系统及其关键技术 [J]. 飞航导弹, 2014, (8): 51 - 53.
- [3] Zou Ji, San Xiaogang, Li Yaobin. Dynamic characteristics study of opto-electronic theodolite turntable [J]. Laser & Infrared, 2019, 49(1): 93 - 98. (in Chinese)
邹冀, 伞晓刚, 李耀彬. 光电经纬仪转台动态特性研究 [J]. 激光与红外, 2019, 49(1): 93 - 98.
- [4] Yu Peng, Wang Peijun, Li Baoqing. Design and simulation analysis of 3-DOF motion platform based on serial mechanism [J]. Machinery Design & Manufacture, 2015, (1): 180 - 183. (in Chinese)
于鹏, 王培俊, 李保庆. 基于串联机构的三自由度运动平台设计与仿真分析 [J]. 机械设计与制造, 2015, (1): 180 - 183.
- [5] Huang Linglong, Guo Yangkuan, Jiang Peijun. Control system for high-precision turn table [J]. Journal of Tsinghua University, 2004, 44(8): 1054 - 1056. (in Chinese)
黄令龙, 郭阳宽, 蒋培军. 高精密伺服转台控制系统的设计 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(8): 1054 - 1056.
- [6] Li Ruqiang, Li Xinang, Zhu Jie. Application of solar pusher in pitching mechanism of tracker [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(11): 124 - 128. (in Chinese)

- 李如强,李新昂,朱杰. 太阳能推杆在跟踪装置仰俯机构中的应用[J]. 武汉理工大学学报,2012,34(11):124-128.
- [7] Guo Chaoyong,Liu Jikui,Cheng Junbo. Compound control strategy of satellite laser communication coarse tracking system[J]. Optics and Precision Engineering,2020,28(4):946-953. (in Chinese)
- 郭超勇,刘继奎,程俊波. 卫星激光通信粗跟踪系统复合控制策略[J]. 光学精密工程,2020,28(4):946-953.
- [8] Ren Bin,Tong Shoufeng,Song Yansong. Research on the driving technique of high precision and speedy piezo-electric ceramic transducer in fine tracking system of air laser communication[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2011,32(2):420-425. (in Chinese)
- 任斌,佟首峰,宋延嵩. 空间激光通信精跟踪单元的高精度快速 PZT 驱动技术研究[J]. 仪器仪表学报,2011,32(2):420-425.
- [9] Lv Jiafei,Zhang Lizhong,Zhang Jiaqi. Design and analysis of coarse tracking assembly for micro-satellite laser communication project[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology,2017,40(1):93-97. (in Chinese)
- 吕佳飞,张立中,张家齐. 微小卫星激光通信粗跟踪机构设计与分析[J]. 长春理工大学学报:自然科学版,2017,40(1):93-97.
- [10] Guo Jingbin,Cao Hongyan,Wang Kexin. Study on verification and compensation of indexing errors for turntable[J]. China Mechanical Engineering,2014,25(7):895-899. (in Chinese)
- 郭敬滨,曹红艳,王克新. 转台分度误差检测及补偿技术的研究[J]. 中国机械工程,2014,25(7):895-899.
- [11] Li Xiaofeng,Wang Bo,Hu Yu. Influence of mirror thermal distortion in thermosphere to space-to-ground laser communication links[J]. Journal of Astronautics,2005,26(5):581-585. (in Chinese)
- 李晓峰,汪波,胡渝. 在轨运行热环境下的天线镜面热变形对空地激光通信链路的影响[J]. 宇航学报,2005,26(5):581-585.