

舰载激光武器稳定平台粗精复合控制

赵磊,纪明,赵振海,王虎,马优恒

(西安应用光学研究所,陕西 西安 710065)

摘要:为了实现舰载激光武器在复杂作战环境中对目标的精确毁伤,提出一种基于快速反射镜的粗精复合稳定平台,用以控制激光光束的稳定精度。首先,介绍了系统组成及工作原理,设计了压电陶瓷驱动的全柔性精级快速反射镜,并且分析了该快速反射镜的性能特点。然后,设计了粗精复合控制系统,在此基础上探讨了粗精复合稳定平台各组成单元之间的相互影响因素。最后,通过理论计算推导了粗精复合控制系统的误差传递函数,并搭建了实验平台,进行了稳定精度测试实验。实验结果表明:在四级海况摇摆扰动条件下,相较于传统粗级稳定平台,方位复合平台的稳定精度从 $191.6\ \mu\text{rad}$ 提高到 $6.7\ \mu\text{rad}$,提高了约27.6倍,俯仰复合平台的稳定精度从 $121.3\ \mu\text{rad}$ 提高到 $4.9\ \mu\text{rad}$,提高了约23.8倍;在各种外界摇摆扰动下,粗精复合平台对激光光束的稳定控制精度均 $\leq 10\ \mu\text{rad}$ 。满足了舰载激光武器平台对激光光束高精度稳定控制的作战需求。

关键词:舰载激光武器;快速反射镜;粗精复合稳定平台;稳定精度;压电陶瓷

中图分类号:TN206;TH703 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.01.015

Primary-precise compounded control for stabilized platform in shipborne laser weapon

ZHAO Lei, JI Ming, ZHAO Zhen-hai, WANG Hu, MA You-heng

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to achieve precise damage to target by shipborne laser weapon in complex combat environment, a primary-precise compounded stabilized platform based on fast steering mirror is proposed to control the stabilization precision of laser beam transmission. First, the composition of the system and the working principle are introduced, a fully flexible fast steering mirror driven by piezoelectric ceramic is designed, and the performance characteristics of the fast steering mirror is analyzed. Then the primary-precise compounded control system is designed, on this basis, the interaction factors between the components of the primary-precise compounded stabilized platform is discussed. Finally, the error transfer function of the primary-precise compounded control system is deduced by theoretical calculation, and an experimental platform is set up to test the stabilization precision. The experimental results indicate that, in swaying state of the four level sea condition, compared with the traditional primary stabilized platform, the stabilization precision of the azimuth compounded platform is about 27.6 times increased from $191.6\ \mu\text{rad}$ to $6.7\ \mu\text{rad}$, the stabilization precision of the pitching compounded platform is about 23.8 times increased from $121.3\ \mu\text{rad}$ to $4.9\ \mu\text{rad}$. In the conditional of external disturbance, the stabilization precisions of the laser beam controlled by the primary-precise compounded stabilized platform are no more than $10\ \mu\text{rad}$. It can satisfy the operational requirements of the high stabilized precision laser beam controlled by shipborne laser weapon platform.

Key words: shipborne laser weapon; fast steering mirror; primary-precise compounded stabilized platform; stabilization precision; piezoelectric ceramic

基金项目:国防预研基金项目资助。

作者简介:赵磊(1984-),男,博士研究生,高级工程师,主要从事光电系统总体设计方面的研究。E-mail: chrisjoto@163.com

收稿日期:2018-05-17

1 引言

激光武器作为一种高密度定向能武器,以其打击精度高、毁伤能力强、反应速度快、效费比高等特点,在光电对抗、防空反导以及要地防御等领域具有极高的军事价值,因此受到世界各国战略部队青睐,正在由关键技术攻关逐步转向部队装备应用^[1]。美国激光区域防御系统(Laser Area Defence System, LADS)采用激光武器实现近距离作战防御,该激光武器光电稳定平台的方位机构随动于战斗部,俯仰机构独立运动,通过粗探测器和惯性测量单元获取光电平台的惯性空间参数,并依靠此惯性空间参数引导系统控制万向节和快速反射镜,进而指引激光光束精确锁定目标,实战演习中在超过 503 m 的距离上引爆了多枚 60 mm 迫击炮弹^[2]。美国海军激光武器系统(Laser Weapon System, LaWS)采用多框架复合控制技术,其基于快速反射镜的内框架自适应该光学系统能够将激光光束指向精度控制提高到微弧度数量级上。安装该激光武器系统的美国海军“庞塞”号两栖船坞运输舰于 2014 年在波斯湾进行了一系列实弹射击试验,在强风、高温、潮湿等恶劣海洋环境下,激光武器系统成功摧毁了无人机和快艇等多个目标^[3]。

从作战机理分析,激光武器发射的激光光束必须精确、持续的照射目标,聚积一定能量之后才能达到毁伤目的^[4]。然而在海洋环境影响下,舰载激光武器稳定平台在作战过程中,通常会受到低频率、大幅度的外界扰动,这些因素直接影响激光武器对作战目标的稳定瞄准精度,进而削弱武器系统的打击精度以及杀伤力。传统舰载粗级稳定平台伺服控制系统能够隔离大部分扰动,但剩余残差较大,无法满足激光武器对高速摆脱、大机动突防等威胁目标的高精度稳定瞄准^[5]。因此需要增加一套适用于舰载使用环境的精级伺服稳定机构,用以补偿伺服外框架的残余误差,控制激光光束的稳定指向误差,进而提高舰载激光武器系统对目标的精确打击能力^[6]。

从功能需求分析,基于快速反射镜的精级伺服稳定平台能够将传统粗级舰载光电平台的稳定精度从毫弧度级提升到微弧度级^[7]。快速反射镜(Fast Steering Mirror, FSM)作为光束指向控制器件,通过高精度位置传感器反馈平台角度信息,依靠微纳驱

动器控制反射镜高速偏摆,进而改变激光光束偏转方向,具有结构紧凑、响应速度快、控制精度高等特点^[8]。这种数量级的飞跃能够极大提升舰载激光武器毁伤效能,为战略部队谋取作战先机,掌握战场决胜权。

根据以上任务需求,本文提出一种基于快速反射镜的舰载激光武器粗精复合稳定平台,用以控制激光光束的稳定指向精度。首先介绍粗精复合平台组成及工作原理,重点设计了压电陶瓷驱动的全柔性精级快速反射镜,从控制效率和机械带宽等方面分析了快速反射镜的特点;然后设计粗精复合伺服控制系统,通过理论分析探索粗级、精级平台控制系统之间的相互影响因素,并定性分析粗精复合平台稳定精度;在此基础上,通过半实物仿真测试四级海况舰船摇摆扰动模拟输入情况下,精级平台对提高系统稳定精度的巨大作用;最后通过实验测试数据可知,舰载激光武器粗精复合平台能够有效控制激光光束的稳定精度。

2 组成及工作原理

2.1 粗精复合稳定平台

如图 1 所示,舰载激光武器粗精复合稳定平台在结构上主要由粗级稳定平台和精级稳定平台组成。其中粗级复合稳定平台承载了所有光电传感器、光学系统以及控制系统,能够隔离舰船对激光武器系统的大部分扰动,实现对目标的探测、搜索、调转以及粗级稳定瞄准。精级稳定平台承载了精级快速反射镜,通过反射镜高频往复运动补偿粗级平台残余误差,提高平台对激光光束的稳定控制精度,实现粗精复合稳定平台对目标高带宽、高精度的稳定瞄准。

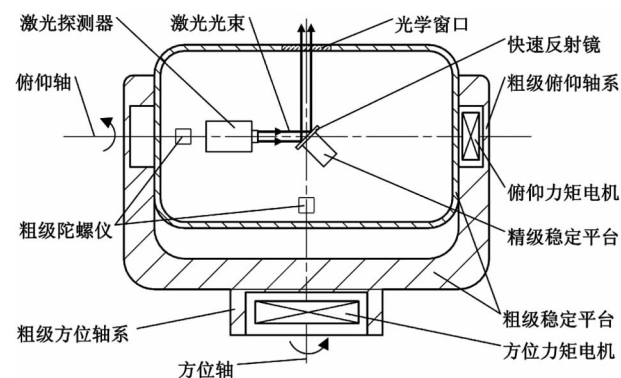


图 1 粗精复合稳定平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of primary - precise compounded stabilized platform

2.2 粗级稳定平台

粗级稳定平台能够根据高精度导航设备提供的舰船姿态角及稳定平台自身的高精度位置、速度传感器共同解算稳定平台实时姿态,并通过全数字式伺服控制单元,驱动两轴力矩电机补偿平台相对惯性坐标系的偏差,进而隔离激光武器系统的外界扰动。

2.3 精级快速反射镜

精级快速反射镜通过压电陶瓷驱动器控制反射镜,以高精度位置应变传感器(Strain Gauge Sensor, SGS)作为位置反馈单元,采用柔性铰链作为反射镜与压电陶瓷驱动器的连接装置,实现激光光束在方位和俯仰两个自由度上的高速调整^[9]。其结构组成如图2所示,4个压电陶瓷驱动器与其对应内置位置应变传感器组成的压电陶瓷驱动单元,对称分布于反射镜的两个轴系上。每一组驱动单元产生相反方向的微小推拉作用力,迫使柔性铰链在反射镜绕轴回转方向上发生小角度偏转,进而改变反射镜光路。在此过程中,位置应变传感器能够实时测量反射镜光轴位置量,并与粗级稳定平台瞄准线位置量求差,最后通过控制系统补偿差值,实现粗精复合稳定平台对激光光束的实时修正。

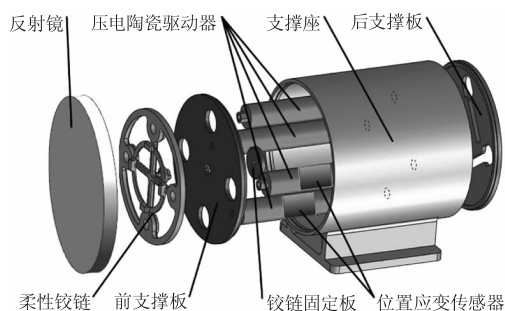


图2 精级快速反射镜组成图

Fig. 2 Composition diagram of the precise fast steering mirror

这种全柔性铰链连接的快速反射镜具有零摩擦,高精度、高带宽等特点,由于整个链路中没有轴承、滑轨等非线性器件存在,有效地消除了非线性因素带来的伺服解算难度。一方面,柔性铰链将快速反射镜启动力矩控制在线性范围内,减小了位置应变传感器对反射镜的零位修正误差,进而提高了快速反射镜系统零位重复性。另一方面,柔性铰链在其工作方向上具有较高的柔度,而在其非工作方向上具有较高的刚度,这种设计为快速反射镜提供了足够的机械带宽,使得快速反射镜能够隔离更舰载

使用环境中的高频率外界扰动。

3 控制系统设计及精度分析

3.1 粗精复合控制设计

舰载激光武器粗精复合稳定平台在本质上是一种轴系嵌套平台,粗级平台与精级平台的位置输出量是相互影响的,在控制形式上是多变量控制系统中的二维关联控制系统^[10],其控制系统原理如图3所示。其中, R_1 为粗级平台位置输入, A_1 为粗级控制器, G_1 为粗级被控对象, C_1 为粗级位置输出, K_{21} 为粗级平台对精级平台输入的位置关联因子, L_{21} 为粗级平台对精级平台被控对象的关联因子;同理, R_2 为精级平台位置输入, A_2 为精级控制器, G_2 为精级被控对象, C_2 为精级位置输出, K_{12} 为精级平台对粗级平台的位置关联因子, L_{12} 为精级平台对粗级平台被控对象的关联因子。

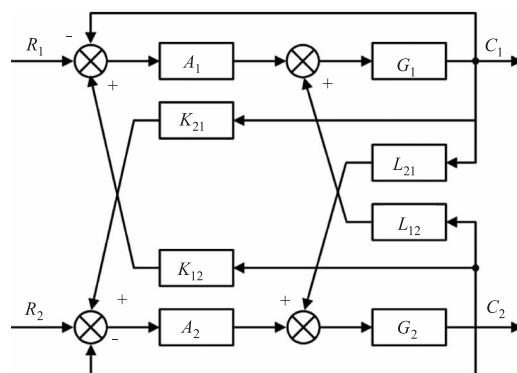


图3 二维关联控制系统

Fig. 3 two dimensional association control system

由图3可以看出,粗级平台与精级平台之间存在着一定的耦合,这种耦合一方面增加了控制系统设计难度,另一方面降低了系统的稳定性^[11]。因此有必要对控制系统解耦,使得粗、精平台之间任何一个输出的变化不影响其他输出,也就是说系统闭环传递矩阵非对角线上的元素为0。

系统的闭环传递矩阵为:

$$\phi = \begin{pmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中各元素为:

$$\phi_{11} = \frac{(1 + A_2 G_2) A_1 G_1}{(1 + A_1 G_1)(1 + A_2 G_2) - G_1 G_2 (A_1 K_{12} + L_{12})(A_2 K_{21} + L_{21})} \quad (2)$$

$$\phi_{12} = \frac{G_1 G_2 A_2 (A_1 K_{12} + L_{12})}{(1 + A_1 G_1)(1 + A_2 G_2) - G_1 G_2 (A_1 K_{12} + L_{12})(A_2 K_{21} + L_{21})} \quad (3)$$

$$\phi_{21} = \frac{G_1 G_2 A_1 (A_2 K_{21} + L_{21})}{(1 + A_1 G_1)(1 + A_2 G_2) - G_1 G_2 (A_1 K_{12} + L_{12})(A_2 K_{21} + L_{21})} \quad (4)$$

$$\phi_{22} = \frac{(1 + A_1 G_1) A_2 G_2}{(1 + A_1 G_1)(1 + A_2 G_2) - G_1 G_2 (A_1 K_{12} + L_{12})(A_2 K_{21} + L_{21})} \quad (5)$$

使粗精复合控制系统解耦的条件为:

$$\begin{cases} \phi_{12} = A_1 K_{12} + L_{12} = 0 \\ \phi_{21} = A_2 K_{21} + L_{21} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

3.2 稳定精度分析

粗级稳定平台与精级稳定平台各承载一个探测器,分别称为粗级探测器和精级探测器。粗级平台稳定精度较差,需要将激光光束导入精级探测器视场范围内。当粗级平台稳定误差大于精级探测器视场时,精级平台无法获取稳定的激光光束,处于待机状态;当粗级平台稳定误差小于精级探测器视场时,精级平台接收粗级平台导入的激光光束,并通过控制系统进行闭环控制,实时修正粗级平台残余误差。

粗精复合控制系统的实质是将精级控制系统作为粗级控制系统的前馈控制,提高粗精复合控制系统阶次。根据系统工作原理,精级控制系统的实时性以及稳定精度远高于粗级控制系统,因此粗精复合控制系统能够有效提高粗精复合平台的伺服带宽以及稳定精度。

粗精复合控制系统原理如图4所示, R 为粗精复合系统位置输入, P 为粗精复合系统位置输出, D_1 为粗级控制器, H_1 为粗级被控对象, e_1 为粗级稳定偏差, p_1 为粗级位置输出;同理, D_2 为精级控制器, H_2 为精级被控对象, e_2 为精级稳定偏差, p_2 为精级位置输出。

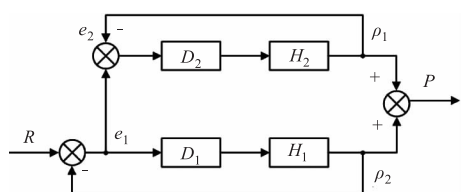


图4 粗精复合控制系统原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the primary-precise compounded control system

由图4可知,粗级控制系统稳定误差传递函数为:

$$\phi_{e_1}(s) = \frac{p_1(s)}{e_1(s)} = \frac{1}{1 + H_1(s)D_1(s)} \quad (7)$$

精级控制系统稳定误差传递函数为:

$$\phi_{e_2}(s) = \frac{p_2(s)}{e_2(s)} = \frac{1}{1 + H_2(s)D_2(s)} \quad (8)$$

粗精复合控制系统误差传递函数为:

$$\begin{aligned} \phi_e(s) &= \frac{1}{[1 + H_1(s)D_1(s)][1 + H_2(s)D_2(s)]} \\ &= \phi_{e_1}(s)\phi_{e_2}(s) \end{aligned} \quad (9)$$

由式(9)可以看出,粗精复合控制系统误差传递函数是粗级控制系统与精级控制系统误差传递函数之积。表明粗精复合控制系统的无差度阶数为粗级、精级控制系统无差度阶数之和,因此粗精复合控制系统具有很高的控制精度^[12]。

精级控制系统误差为:

$$\begin{aligned} e_2 &= \frac{e_1(s)}{1 + H_2(s)D_2(s)} \\ &= \frac{R(s)}{[1 + H_1(s)D_1(s)][1 + H_2(s)D_2(s)]} \end{aligned} \quad (10)$$

由式(9)和式(10)可以得出,粗精复合控制系统稳定误差等于精级控制系统稳定误差。

分析系统开环传递特性,粗精复合系统开环传递函数为:

$$\begin{aligned} \phi_{\text{open}}(s) &= H_1(s)D_1(s) + H_2(s)D_2(s) + \\ &H_1(s)D_1(s)H_2(s)D_2(s) \end{aligned} \quad (11)$$

由式(11)可以看出,粗精复合控制系统带宽并不是粗级通道带宽与精级通道带宽的简单求和或求积。从系统频域特性分析,在低频区间,系统开环传递函数可近似表示为粗级、精级控制系统开环传递函数之积;在高频区域,由于精级控制系统带宽远高于粗级控制系统,此时系统开环传递函数主要取决于精级控制系统。因此粗精复合稳定平台具有高于粗级稳定平台的伺服带宽以及稳定精度。

4 实验测试及结果分析

为定量分析粗精复合平台稳定精度,搭建了粗精复合平台稳定精度实验测试环境,粗级稳定平台借用海军某光电转台。将精级稳定平台合理安装于光电转台激光光束回路中,保证精级光轴与粗精复合光轴完全重合。分析对比世界范围内激光武器系统发展现状,从控制机构稳定性角度分析,有效毁伤目标的平台稳定精度不大于 $10 \mu\text{rad}$ ^[13]。由于方位平台轴系与俯仰平台轴系

空间正交,根据误差分析原理,若方位平台、俯仰平台稳定误差均小于极限误差,则两轴复合误差小于极限误差。基于以上分析,本次实验指标参数设定为:粗精复合稳定平台方位、俯仰两轴对激光光束的稳定控制精度均小于等于 $10\ \mu\text{rad}$ 。

4.1 稳定精度仿真测试

将粗精复合稳定平台安装于双轴摇摆台上,如图5所示。高精度激光准直仪架设于激光光路中,起到检测稳定精度的作用,在粗级、精级以及粗精复合误差输出环路接入测试点,通过测试软件实时读取并记录平台稳定精度测量值。将双轴摇摆台固定在零位上,采用半实物仿真的方式分析两轴粗级、精级平台之间的相互关系与影响因素,并初步测量粗精复合平台的稳定精度。



图5 稳定精度测试实验环境

Fig. 5 Experimental environment of stabilization precise test

为了切合实际作战环境,利用信号发生器模拟四级海况下舰船的摇摆扰动^[14]。扰动条件为:方位、俯仰均为幅值 22.5° ,频率 $0.14\ \text{Hz}$ 的正弦波。两轴稳定误差曲线如图6、图7所示,将误差量进行统计,获得粗精复合平台稳定精度仿真结果如表1所示。可以看出,传统的粗级稳定平台在外界扰动的影响下,稳定精度较差:方位粗级平台为 $191.6\ \mu\text{rad}$,俯仰粗级平台为 $121.3\ \mu\text{rad}$ 。而精级平台稳定精度远高于粗级平台:方位精级平台为 $3.8\ \mu\text{rad}$,俯仰精级平台为 $3.1\ \mu\text{rad}$ 。最终,在粗精复合平台的作用下,系统获得了较高的稳定精度:方位复合平台为 $6.7\ \mu\text{rad}$,俯仰复合平台为 $4.9\ \mu\text{rad}$ 。经过分析计算,与传统粗级平台对比,方位复合平台稳定精度提高了约27.6倍,俯仰复合平台稳定精度提高了约23.8倍。半实物仿真结果表明精级平台能有效地提高粗精复合平台的稳定精度,并且将两轴粗精复合稳定平台对激光光束的稳定精度均控制在 $10\ \mu\text{rad}$ 以内,满足设定的指标要求。

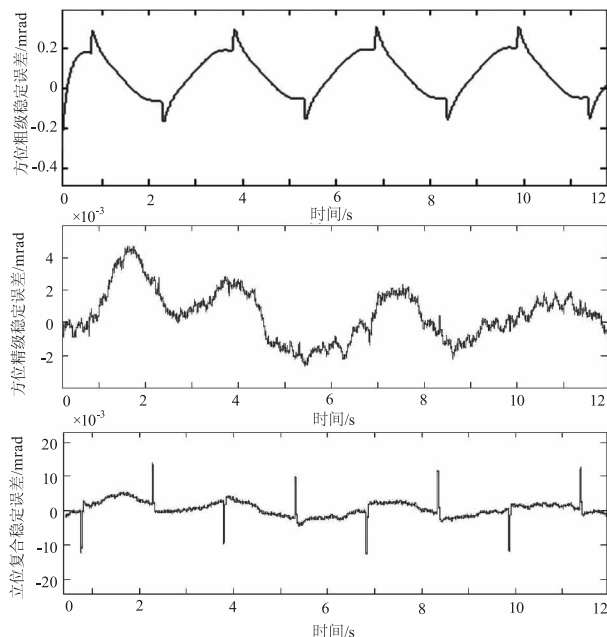


图6 方位轴稳定误差曲线

Fig. 6 Stabilization error of azimuth axis

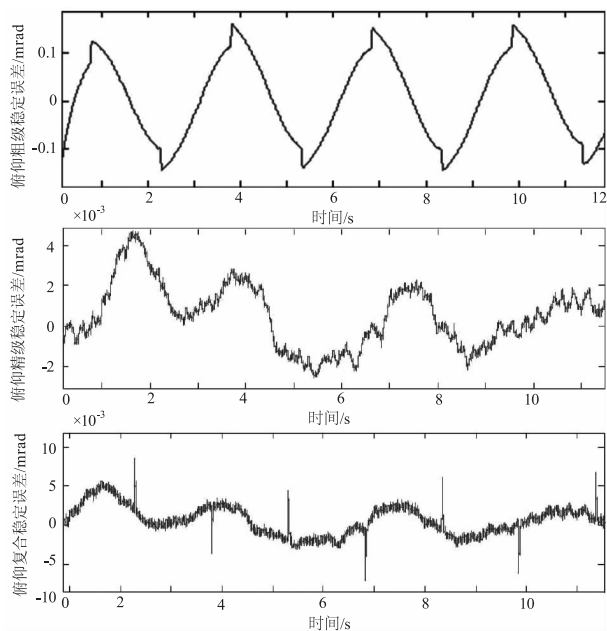


图7 俯仰轴稳定误差曲线

Fig. 7 Stabilization error of pitching axis

表1 稳定精度仿真结果

Tab. 1 Simulation results of stabilization precise

误差统计项	峰值误差/ μrad	统计误差/ μrad
方位粗级平台	237.5	191.6
俯仰粗级平台	164.4	121.3
方位精级平台	9.3	3.8
俯仰精级平台	8.1	3.1
方位复合平台	12.2	6.7
俯仰复合平台	8.9	4.9

4.2 实验测试

为进一步验证粗精复合平台在真实摇摆扰动下对激光光束的稳定控制精度,在半实物仿真基础上进行实验测试。双轴摇摆台输入相应扰动参数,进行5组实验,试验时间均为120 s,模拟各种舰船工作环境。由于半实物仿真已经验证了粗级平台和精级平台对粗精复合平台稳定精度的影响因素,因此实验测试只验证粗精复合平台对激光光束的稳定控制精度,试验结果如表2所示。

表2 实验测试结果

Tab. 2 Results of the experimental test

扰动条件		轴系	峰值误差/ μrad	统计误差/ μrad
振幅/ $^{\circ}$	频率/Hz			
62	0.25	方位	18.9	8.6
		俯仰	17.7	6.4
54	0.33	方位	25.4	9.1
		俯仰	20.8	7.9
40	0.45	方位	31.0	9.7
		俯仰	27.3	8.8
16	0.86	方位	21.7	5.9
		俯仰	18.2	4.0
10	1.25	方位	19.5	6.5
		俯仰	21.2	3.7

从表2可以得出,在双轴摇摆台的各种扰动影响下,方位、俯仰平台稳定精度均小于等于 $10\mu\text{rad}$ 。也就是说,粗精复合稳定平台能够有效的控制激光光束稳定精度,进而提高舰载激光武器对目标的毁伤效能,满足设计指标要求。

5 总结

本文针对舰载激光武器在复杂作战环境下精确毁伤目标的战术要求,提出一种基于快速反射镜的粗精复合稳定平台,用以控制激光光束的稳定精度。首先介绍粗精复合稳定平台的组成和工作原理,根据系统需求设计压电陶瓷驱动的全柔性精级快速反射镜,并分析该快速反射镜性能特点。接着设计粗精复合平台控制系统,探讨粗精复合稳定平台各组成单元之间相互影响因素,在此基础上推导系统稳定精度的表达方式;最后,通过半实物仿真及实验测试方式验证设计可行性。半实物仿真结果表明:在模拟四级海况舰船摇摆扰动下,相对传统粗级平台,方位复合平台稳定精

度提高了约27.6倍,俯仰复合平台稳定精度提高了约23.8倍。实验测试结果表明:在各种外界摇摆扰动下,粗精复合平台对激光光束的稳定控制精度均小于等于 $10\mu\text{rad}$,能够满足舰载激光武器平台对激光光束高精度稳定控制的作战需求。

参考文献:

- [1] YI Hengyu, QI Yu, HUANG Jijin. Development of ship-based laser weapons system[J]. Laser Technology, 2015, 39(6): 834-839. (in Chinese)
易亨瑜, 齐予, 黄吉金. 舰载激光武器的研制进展[J]. 激光技术, 2015, 39(6): 834-839.
- [2] WANG Dahai. Development analysis of laser weapon of United States[J]. Electro-optic Technology Application, 2008, 23(2): 1-5. (in Chinese)
王大海. 美国激光武器发展分析[J]. 光电技术应用, 2008, 23(2): 1-5.
- [3] HE Qiyi, ZONG Siguang. Research progress and consideration of shipborne laser weapon[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(12): 1455-1460. (in Chinese)
何奇毅, 宗思光. 舰载激光武器发展进展与思考[J]. 激光与红外, 2017, 47(12): 1455-1460.
- [4] ZHANG Haochun, SONG Naiqiu, DAI Zanen, et al. Multiple physical field system simulation for high energy laser weapon target attacking[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(4): 526-532. (in Chinese)
张昊春, 宋乃秋, 戴赞恩, 等. 高能激光武器目标打击的多物理场系统仿真[J]. 应用光学, 2017, 38(4): 526-532.
- [5] XU Qingqing, JI Ming, LEI Feilin, et al. Performance analysis and test of opto-electronic two-level stabilization system[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(1): 17-21. (in Chinese)
胥青青, 纪明, 雷霏霖, 等. 光电稳瞄二级稳定系统性能分析及测试[J]. 应用光学, 2014, 35(1): 17-21.
- [6] AI Zhiwei, TAN Yi, WU Qiongyan, et al. Fuzzy compensation control of disturbance signal in fast steering mirror[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(2): 210-215. (in Chinese)
艾志伟, 谭毅, 吴琼雁, 等. 快速反射镜扰动信号的模糊补偿控制[J]. 激光与红外, 2017, 47(2): 210-215.
- [7] LU Peiguo, SHOU Shaojun. High accuracy tracking technology and its application in ship-borne electro-optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(6):

- 476 – 484. (in Chinese)
- 陆培国, 寿少峻. 舰载光电系统高精度跟踪控制技术[J]. 应用光学, 2006, 27(6): 476 – 484.
- [8] LU Xiaodong, WU Tianze, ZHOU Jun, et al. Compound image stabilization for coupled disturbance in ship-borne imaging system[J]. Opt. Precision Eng., 2017, 25(5): 1291 – 1299. (in Chinese)
- 卢晓东, 吴天泽, 周军, 等. 耦合扰动下船载成像系统的复合稳像[J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1291 – 1299.
- [9] FANG Chu, GUO Jin, YANG Guoqing, et al. Design and performance test of a two-axis fast steering mirror driven by piezoelectric actuators[J]. Optoelectronics Letters, 2016, 12(5): 0333 – 0336.
- [10] SONG Yansong, TONG Shoufeng, DONG Yan, et al. Technique of compound axis control using single detector based on field programmable gate array[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(4): 0406001. (in Chinese)
- 宋延嵩, 佟首峰, 董岩, 等. 基于现场可编程门阵列单探测器复合轴控制技术[J]. 光子学报, 2014, 43(4): 0406001.
- [11] WU Pengsong, WU Chaoye, ZHOU Donghua. Analysis of signal decoupling control system[J]. Control Engineering of China, 2013, 20(3): 471 – 474. (in Chinese)
- 吴鹏松, 吴朝野, 周东华. 信号解耦控制系统分析[J]. 控制工程, 2013, 20(3): 471 – 474.
- [12] TIAN Jing, YANG Wenshu, PENG Zhenming, et al. Inertial sensor-based multiloop control of fast steering mirror for line of sight stabilization[J]. Optical Engineering, 2016, 55(11): 111602.
- [13] PENG Cong, LU Faxing, XING Changfeng. Research and expectation on fire control system of shipborne high-energy laser weapon[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(5): 521 – 526. (in Chinese)
- 彭聪, 卢发兴, 邢昌风. 舰载激光武器火控系统研究与展望[J]. 激光与红外, 2017, 47(5): 521 – 526.
- [14] Environmental condition for machinery products-Ocean: GB/T 14092. 4 – 2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- 机械产品环境条件—海洋 GB/T 14092. 4 – 2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.