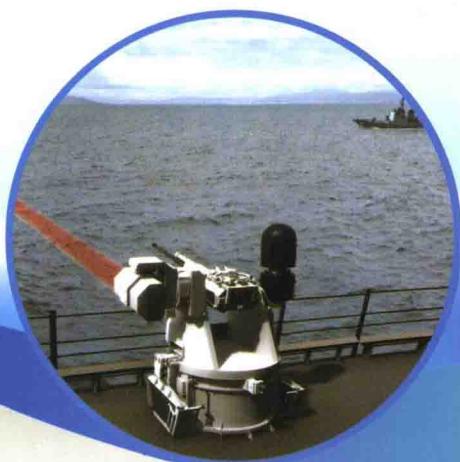


舰载激光武器 跟踪与瞄准控制

■ 田福庆 李克玉 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

舰载激光武器跟踪与 瞄准控制

田福庆 李克玉 编著



国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书针对舰载激光武器系统跟踪与瞄准的控制问题,总结了近年来在高精度光电跟踪领域的一些研究成果,从改进控制结构和控制方法的角度出发,重点研究了提高跟踪与瞄准控制精度的几个关键问题。本书简述了典型的舰载激光武器的研究进展,论述了光电跟踪系统的发展概况,分析了舰载激光武器跟瞄系统的精度需求,研究了舰艇运动对跟瞄系统的影响,并提供了解算方法。在此基础上,分别采用经典控制、模糊控制、共轴跟踪控制以及滑模控制等方法对系统控制器进行了设计,并应用大量仿真实验对研究成果进行了验证与说明。

本书可作为相关专业工程技术人员的业务参考书,也可作为在高等院校从事本领域相关研究的教师和研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

舰载激光武器跟踪与瞄准控制/田福庆,李克玉编
著. —北京:国防工业出版社,2015.4

ISBN 978-7-118-10116-4

I. ①舰... II. ①田... ②李... III. ①海军武器-激光武器-激光跟踪-跟踪控制②海军武器-激光武器-瞄准系统-自动控制 IV. ①TJ95

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第087378号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 11 $\frac{3}{4}$ 字数 264千字

2015年4月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价45.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

现代海战中,水面舰艇防空体系面临的空中威胁主要来自于反舰导弹、精确制导炮弹,以及包括无人机在内的各种作战飞机。因此,如何有效提升舰艇的自身防御能力成为摆在各国海军面前的一大难题。经过长期研究,世界各国军界对水面舰艇的安全对策形成了共识,即构成包含远程、中程和近程防御武器系统的由远及近、由外层至内层的防御网。高能激光武器是以大功率辐射能量摧毁目标的新概念定向能武器,是提高舰船生存能力的有效手段。与传统舰载近程防御武器系统相比,激光武器能以光速作战,具有瞄准即命中、发射即相遇、转火速度快、持续射击能力强、攻击精度高、软硬杀伤功能兼备等特点,特别适合于打击快速运动目标。鉴于以上优点,激光武器在海军舰艇防御方面被认为是最具潜力的新概念武器,已被国外军事强国列为未来舰载攻击和防御武器。因此,将激光武器作为传统舰载防御武器的有效补充,协同作战,为舰船提供多层次、高可靠的保障,将极大提升舰艇的防御能力。

然而,激光武器系统的应用也面临着诸多技术难题。由于激光武器是利用高能激光束直接击中目标造成破坏,所以激光束不仅应直接命中目标,而且还要在目标某部位上停留一段时间,以便积累足够的能量毁伤目标。为了达到让激光束稳定跟踪目标的目的,要求其跟踪瞄准系统的跟踪精度达到微弧度级。因此,高精度的跟踪瞄准系统是亟需突破的技术障碍。同时,在舰载条件下,由于舰艇平台扰动等不利条件,要想将激光束稳定照射在空中目标某一部位上并持续几秒,需要解决舰载条件下对机动目标的高精度跟踪瞄准和稳定锁定等技术难题。

本书针对舰载激光武器对跟瞄系统的高精度需求,对提高其跟踪精度的相关关键技术进行了研究。主要从改进控制结构和控制方法的角度,对补偿粗跟踪子系统的传感器动态误差和动态滞后误差、抑制粗跟踪子系统的力矩干扰,以及提高精跟踪子系统结构控制精度等方面的问题进行了研究。

本书共分为9章。第1章是绪论,介绍了舰载激光武器及其跟瞄系统相关技术的发展概况。第2章阐述了基于复合轴结构的跟瞄系统控制原理,并分别建立了粗跟踪系统和精跟踪系统的数学模型。第3章说明了舰载激光武器跟瞄系统的性能指标及精度需求,并分析了跟瞄系统的主要误差。第4章对舰艇平台的扰动进行了分

析,并建立了解算模型。第5章介绍了应用经典控制理论在粗跟踪系统的综合与校正问题。第6章介绍了模糊控制系统,并为粗跟踪系统建立了基于模糊PID的自适应前馈补偿控制结构。第7章介绍了多种非线性卡尔曼滤波算法,并对容积卡尔曼滤波算法进行了改进,在此基础上建立了共轴跟踪系统。第8章介绍了传统滑模控制和高阶滑模控制的基本理论,提出了一种新的快速自适应超螺旋算法,并在此基础上为粗跟踪系统设计了双环滑模控制系统。第9章介绍了复合轴系统和双重复合轴系统的基本原理,分析了单探测器型复合轴系统的缺陷,基于双驱动复合控制原理设计了一种新的双重复合轴控制结构。第10章分析了三种典型反舰导弹的特点,设计了三种导弹的仿真航路,应用所设计的两种跟瞄系统对导弹航路进行了跟踪仿真,验证了其有效性。

由于本书作者学识和水平有限,难免会有不妥和错误之处,敬请广大读者批评指正,并给予谅解。

作者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 舰载激光武器跟瞄技术概述	1
1.1.1 ATP 与跟瞄系统定义	2
1.1.2 舰载激光武器跟瞄系统	2
1.2 舰载激光武器系统的发展概况	3
1.2.1 海军激光武器系统	3
1.2.2 战术激光系统	4
1.2.3 海上激光验证系统	5
1.3 光电跟踪系统的发展概况	6
1.3.1 光电跟踪系统提高跟踪精度的主要途径	6
1.3.2 典型的光电跟踪系统	7
1.3.3 相关领域的研究概况	8
第 2 章 舰载激光武器跟瞄系统的数学模型	11
2.1 复合轴系统	11
2.1.1 多变量控制与二维关联控制	11
2.1.2 复合轴系统控制的原理	15
2.1.3 复合轴系统稳定性分析	16
2.1.4 复合轴系统响应速度和跟踪精度分析	18
2.2 粗跟踪系统的数学模型	19
2.2.1 目标探测、图像信号处理及解算单元	20
2.2.2 速度稳定及伺服回路的数学模型	22
2.2.3 位置环的数学模型	25
2.3 精跟踪系统的数学模型	26
2.3.1 两驱动轴快速反射镜的驱动结构	26
2.3.2 音圈电机驱动器原理及数学模型	27
2.3.3 PZT 的原理及数学模型	30
第 3 章 舰载激光武器跟瞄系统的性能指标及精度需求	33
3.1 捕获性能要求	33

3.1.1	捕获概率	33
3.1.2	捕获时间	34
3.2	跟踪瞄准的精度需求和性能指标	35
3.2.1	精度需求	35
3.2.2	性能指标	38
3.3	跟瞄系统的主要误差分析	41
第4章	舰艇扰动解算模型	44
4.1	舰艇摇摆稳定技术概述	44
4.1.1	舰载摇摆稳定平台	44
4.1.2	舰载伺服稳定控制技术	45
4.2	空间点的位置和运动的描述	45
4.2.1	参考系	45
4.2.2	坐标表示法和坐标系	47
4.2.3	坐标转换	49
4.3	舰艇运动分析	49
4.3.1	海浪影响下舰船转动运动规律	49
4.3.2	舰艇平移运动的影响分析	50
4.4	舰艇摇摆姿态分析与扰动解算模型	52
4.4.1	定义坐标系	52
4.4.2	船摇姿态模型建立	52
4.5	舰艇扰动解算模型的仿真验证	57
第5章	粗跟踪控制系统的综合与校正	58
5.1	基本控制规律	58
5.2	控制系统的对数频率特性综合设计法	60
5.2.1	系统对开环频率特性的设计要求	60
5.2.2	串联控制	72
5.2.3	并联控制	74
5.2.4	串联控制与并联控制的比较	76
5.2.5	串联与并联控制方法的综合应用及局限性	77
5.3	控制系统的复合控制	79
5.3.1	复合控制系统综合法	80
5.3.2	复合控制系统综合法的应用	84
5.3.3	复合控制系统分析法	88
第6章	粗跟踪系统的模糊控制	90
6.1	模糊控制	90

6.1.1	模糊控制的结构	90
6.1.2	模糊控制器的设计	92
6.2	粗跟踪转台的二维模糊控制	96
6.2.1	二维模糊控制设计	96
6.2.2	基于描述函数法的稳定性分析	99
6.2.3	仿真分析	102
6.3	基于模糊 PID 的自适应前馈补偿控制	103
6.3.1	模糊 PID 控制	103
6.3.2	基于模糊 PID 的自适应前馈补偿控制	106
6.3.3	仿真分析	107
第 7 章	粗跟踪系统的共轴跟踪控制方法	109
7.1	复合控制与共轴跟踪技术	109
7.1.1	复合控制	109
7.1.2	脱靶量时滞的影响	110
7.1.3	粗跟踪系统共轴跟踪技术的原理	112
7.2	目标状态预测及跟踪算法研究	113
7.2.1	目标运动模型	114
7.2.2	滤波算法研究	116
7.3	基于 ICKF 算法的目标状态预测	120
7.3.1	坐标系及目标模型选择	120
7.3.2	改进 CKF 算法	122
7.4	仿真实验及结果分析	124
7.4.1	参数设定	124
7.4.2	仿真实验及分析	125
第 8 章	粗跟踪系统的滑模控制方法	127
8.1	滑模控制简介	127
8.1.1	滑模控制的基本概念	127
8.1.2	滑动模态的不变性	128
8.2	滑模控制理论	128
8.2.1	传统滑模控制理论	128
8.2.2	高阶滑模控制理论	129
8.2.3	二阶滑模控制	129
8.3	粗跟踪系统的双环滑模控制	133
8.3.1	速度环控制器设计	134
8.3.2	位置环控制器设计	136

8.3.3	摩擦力矩及电机力矩波动	141
8.4	仿真实验及分析	142
8.4.1	速度环仿真及分析	142
8.4.2	位置环仿真及分析	144
第9章	精跟踪系统设计及其控制方法研究	147
9.1	基于四驱动器的 FSM 系统模型	147
9.1.1	控制系统模型	147
9.1.2	角自振频率的影响因素分析	148
9.2	压电陶瓷驱动 FSM 的自适应反演滑模控制	149
9.2.1	自适应反演滑模控制器设计	149
9.2.2	仿真分析	152
9.3	双重复合轴系统原理	155
9.4	一种新的双重复合轴系统	156
9.4.1	双驱动复合控制原理	157
9.4.2	双重复合轴系统设计	158
9.4.3	仿真分析	160
第10章	典型反舰导弹航路的跟踪仿真	162
10.1	典型反舰导弹航路模拟	162
10.1.1	“鱼叉”反舰导弹航路模拟	162
10.1.2	“飞鱼”反舰导弹航路模拟	163
10.1.3	“马斯基特”反舰导弹航路模拟	164
10.2	仿真分析	165
10.2.1	仿真环境设定	165
10.2.2	基于共轴跟踪的双重复合轴系统仿真分析	166
10.2.3	基于双环滑模控制的双重复合轴系统仿真分析	170
参考文献	174

第 1 章 绪 论

目前,舰载近程防空武器系统主要由近程防空导弹和近程反导舰炮武器系统组成,例如世界上列装最广的“密集阵”近程防御武器系统,具有射速高、弹幕密度大、全自动化等特点,对于反舰导弹、小型飞行器等目标具有较强的防御能力。但现有近程防空武器系统对空防御作战需要经历目标探测、威胁判断、定位跟踪、火控解算、射击控制、弹丸飞行等过程,系统反应时间较长,备弹量有限且再装填周期长,无法满足持续抗饱和和攻击作战需求。

激光武器是以大功率辐射能量摧毁目标的新概念定向能武器,是提高舰船生存能力的有效手段。与传统舰载近程防御武器系统相比,激光武器能以光速作战,具有瞄准即命中、发射即相遇、转火速度快、持续射击能力强、攻击精度高、软硬杀伤功能兼备等特点,特别适合于打击快速运动目标。因此,将激光武器作为传统舰载防御武器的有效补充,协同作战,为舰船提供多层次、高可靠的保障,将极大提升舰艇的防御能力。

然而,激光武器的发展也需要突破诸多的技术难题。激光武器与目前使用的常规武器相比,其显著特点是:能量传播速度极快;能量高度集中,高能激光束的输出功率可达几百至几千千瓦,击中目标后使其破坏、烧毁或熔化。因此,独特的毁伤机理要求激光束不仅应直接命中目标,而且还要在目标某部位上停留一段时间,才能积累足够的能量毁伤目标。这就要求其跟踪瞄准系统的控制精度达到微弧度级,因此研制精度远高于传统动能武器的跟踪瞄准系统是亟需突破的技术障碍。同时,在舰载条件下,舰艇平台存在摇摆、振动、倾斜、升沉、甲板变形等不利条件。为了使激光束精确命中目标和稳定地跟踪目标,首先需要解决舰载激光武器系统对载体运动干扰的隔离等技术难题。

近程防御的舰炮武器系统主要靠炮弹在区域分布的弹幕来毁伤目标,因此对其跟瞄精度的要求不是很高,如目前世界上有代表性的“密集阵”近程防御武器系统的跟瞄精度只有 0.7mrad (均方根值)。因此,现有的舰炮跟瞄系统精度远未达到舰载激光武器系统要求的跟瞄精度。目前,某些光电跟踪器的跟瞄精度能达到微弧度级,但是它们承载小,跟踪速度与加速度低,并不适用于负载惯量大、跟踪速度高的舰载激光武器。因此,设计更加优化的系统结构和采用更加先进的控制策略和方法是解决激光武器高精度跟瞄技术难题、达到舰用化标准的关键。

1.1 舰载激光武器跟瞄技术概述

由于所打击目标具有高机动性,舰载激光武器必须具备能自动捕获、跟踪与瞄准(Acquisition、Tracking and Pointing, ATP)目标的功能。一般情况下,将舰载激光武器系统中具有 ATP 功能的光电跟踪子系统称为跟瞄系统。

1.1.1 ATP 与跟瞄系统定义

在天文观测、靶场测量、航天器轨道确定以及激光光束定向器等领域中，为了能观测运动目标或者将激光束投送到运动目标上，需要望远镜的视轴跟随目标视线一起运动，并将望远镜的视轴与目标视线之间的角偏差控制在允许的范围内。由此产生了捕获、跟踪与瞄准的概念。

捕获：对预计的目标可能存在的区域进行观测，将目标从背景和假目标中区分出来，并探测出目标的粗略方向、波长或频谱、通量密度、角度尺寸等。

跟踪：跟踪仪器视轴相对于目标视轴的晃动。跟踪的目的在于稳定仪器的视轴，使跟踪误差和动态响应性能满足规定的指标。

瞄准：仪器视轴相对于目标视轴的平均取向。瞄准误差为仪器视轴与目标视线之间偏差的平均值。但这里的视轴可能是跟踪系统的视轴，也可能不是，这要依设备功能而定。例如对于具有激光发射功能的光电跟踪系统，瞄准是指发射主光轴对准目标。当跟踪轴与主光轴不重合时，必须对主光轴进行修正。

应该指出，在捕获、跟踪和瞄准之间并没有一个严格明确的界限。捕获的任务是在预计的目标可能存在的区域从背景中识别出所需要的目标，同时它还有粗跟踪的任务，即识别目标以后将目标引入跟踪视场，以便转入跟踪工作方式。跟踪和瞄准之间也没有严格明确的界限，有时瞄准也叫精跟踪。本书为便于研究，舰载激光武器跟瞄系统定义为具有 ATP 功能的高精度光电跟踪复合轴系统。

1.1.2 舰载激光武器跟瞄系统

舰载激光武器系统是一个复杂的大系统，涉及光、机、电、控制等各学科技术，它主要由通讯、指挥控制系统，高精度跟瞄系统，以及高能激光器子系统组成。其中，跟瞄系统主要负责目标探测、捕获、跟踪和瞄准，是激光武器系统不可或缺的关键部分。舰载激光武器的作战使命是打击高机动的反舰导弹，这就要求其跟瞄系统的反应时间短、跟踪范围大、跟踪精度高。在传统光电跟踪系统中，由于跟踪架惯量大、频带窄、响应慢，难以直接实现快速高精度跟踪。要保证对空中目标进行高精度的测量和跟踪，必须有一个精密的跟踪系统，由粗跟踪和精跟踪两部分构成的复合轴系统是实现高精度跟踪的一种有效途径。粗跟踪系统是由伺服系统驱动，可做俯仰与旋转运动的转台；精跟踪系统是在大惯量跟踪架上安装的一个方位和俯仰方向均可微动的快速反射镜。因此，舰载激光武器跟瞄系统一般采用复合轴控制结构，它包括由跟踪转台构成的粗跟踪系统，由 FSM 构成的精跟踪系统，以及光学系统。

跟瞄系统用于完成目标的探测、捕获、跟踪及瞄准任务，是激光武器的关键部分，其跟瞄精度将直接决定整个武器系统对目标的毁伤效果，其系统原理如图 1-1 所示。

由图 1-1 可见，跟瞄系统的具体工作原理为：首先，由搜索雷达信号将目标位置传送给探测器，探测器对目标进行探测得到目标图像，图形处理单元对目标图形进行分析，给出目标脱靶量信息；然后，粗跟踪控制器结合目标脱靶量信息以及转台测角装置信息计算出瞄准目标所需控制量，对驱动器发出控制信号，驱动器带动力矩电机使目标进入精跟踪系统目标探测器视场；最后，精跟踪目标探测器对目标进行精确探测得到目标图

像信息，精图像处理单元对精探测器给出的图像信息进行处理，得到目标精确脱靶量，精跟踪控制器采用高精度控制算法计算出控制偏差量，控制量控制驱动器带动 FSM 瞄准目标。

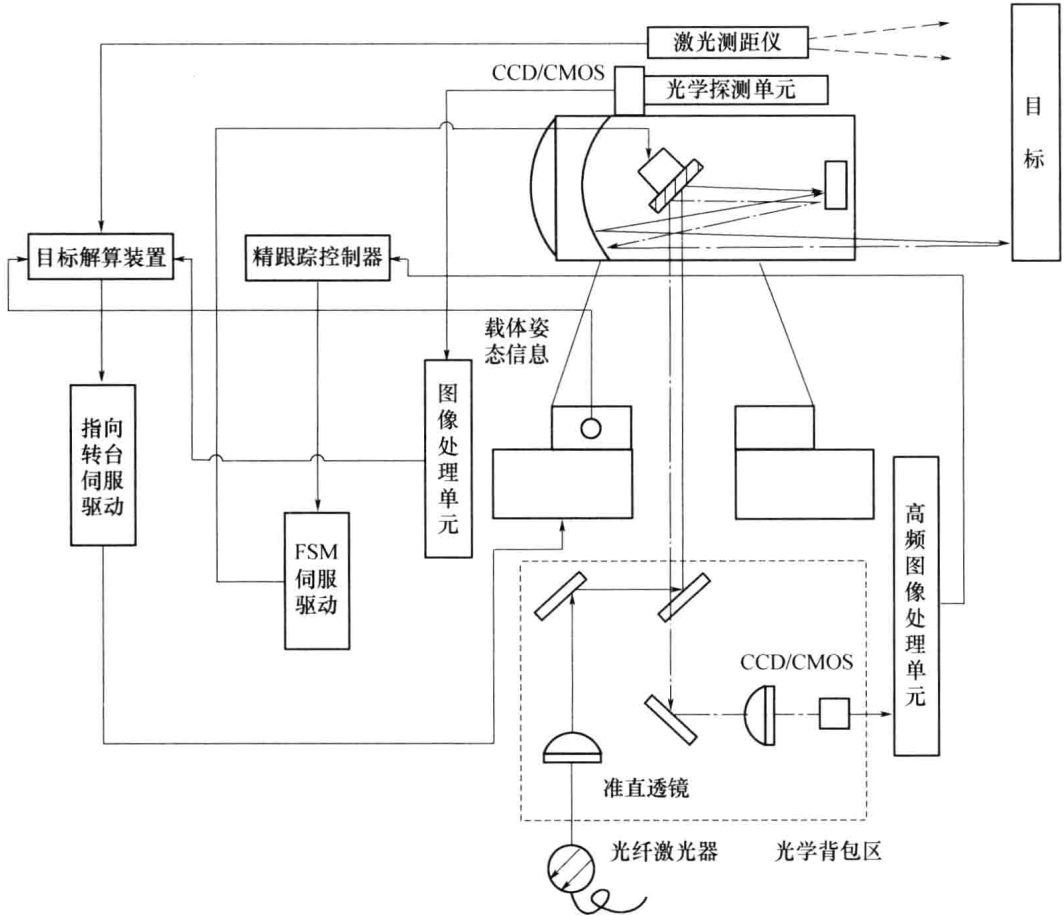


图 1-1 激光武器系统原理图

1.2 舰载激光武器系统的发展概况

自 1960 年激光问世以来，它作为武器的潜力就一直受到世界各国军事部门的关注。从 20 世纪 70 年代开始，空基、海基、天基、陆基等平台的激光武器计划不断涌现，在舰载激光武器的研制上，美国一直处于领先地位。

1.2.1 海军激光武器系统

海军激光武器系统(Laser Weapon System, LaWS)是美国海军近年来最成功的舰载激光武器系统，采用了光束耦合光纤激光器，其激光在光纤中运行，不受光纤弯曲的影响，结构简单，体积较小，且具有较高的可靠性。系统通过将 6 束不同相位的激光合成一束威力强大的高能激光，其功率可以达到 33kW，发射激光波长为 1.064 μm 。LaWS 主要用于干扰或毁伤光电传感器，打击无人机、光电制导导弹等目标。

LaWS 被设计为可单独安装在舰艇上,如图 1-2 所示;也能作为附加武器安装在“密集阵”舰炮系统上,如图 1-3 所示。将固体光纤激光器集成在“密集阵”舰炮系统上时,保留了原舰炮系统的雷达、光电、炮架和随动系统,换装了激光光束定向器。原“密集阵”舰炮系统的搜索与跟踪雷达以及光电传感器用于发现和跟踪目标,随动系统带动激光光束定向器对目标进行粗跟踪,由光束定向器对目标进行精跟踪,直至发射激光摧毁目标。

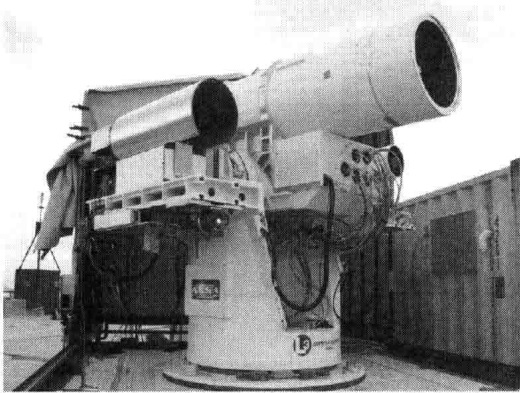


图 1-2 单独安装的 LaWS

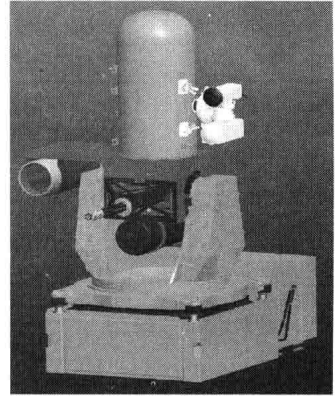


图 1-3 附加于“密集阵”的 LaWS

LaWS 于 2007 年开始改装设计,2008 年进行了分系统试验,2009 年开始能力验证。2009 年,美国海军海上系统司令部在位于加州中国湖的海军空战武器中心进行了 LaWS 项目试验,成功地将 5 架无人机全部击毁。2010 年 5 月,在加州圣尼古拉斯岛进行了 LaWS 项目试验中,高能光纤激光器成功摧毁了 4 架飞行高度 3.2km、飞行速度为 134m/s 的无人机。在 2012 年 7 月至 9 月期间,美国海军将 LaWS 安装在伯克级驱逐舰(DDG-105)上,并在圣迭戈水域进行的试验中成功击毁 3 架无人机。在进一步的研发计划中,美国海军准备将 LaWS 的激光器功率升级为 100kW。LaWS 的能量利用率约为 25%,即为了产生功率 100kW 的激光,供电功率需要达到 400kW。

1.2.2 战术激光系统

战术激光系统(Tactical Laser System, TLS)是美国海军研发的另一套光纤固体激光武器系统,其功率为 10kW。该系统被设计为 MK38 25mm 舰炮的附加武器,将现有的工业固体激光器与 MK38-2 舰炮结合,可扩展原舰炮的打击范围,提高原舰炮随动系统的跟踪精度,如图 1-4 所示。

通常情况下,高能固体激光器会组合几个单独的光束,以实现更高的功率输出。但 TLS 没有采用该方法,而是使用单相激光,这虽然减少了系统的总功率输出,但保证了光束质量。激光对目标的打击效果是由功率输出和光束质量综合决定的。根据 TLS 目前的功率输出和光束质量,在天气和海况较好的情况下,可以打击 2km 范围内的目标。TLS 的能量利用率约为 30%,即为了产生功率 10kW 的激光,需要使用 34kW 的舰船电力。2011 年 8 月,美国海军进行的海上试验中, TLS 对空中和水上目标进行攻击,演示了应对高速、高机动小艇攻击的能力。

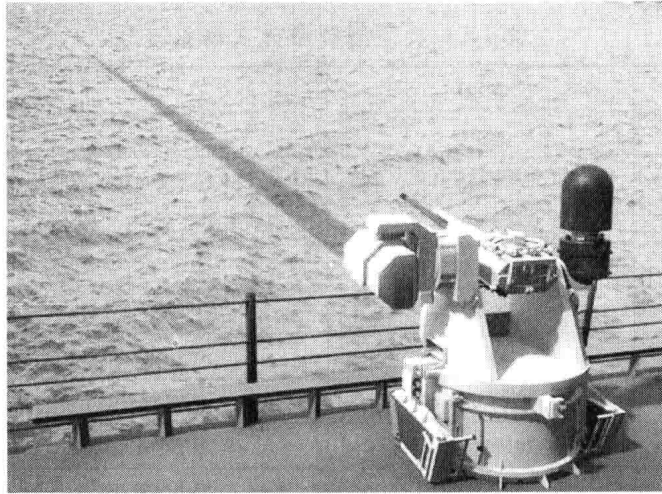


图 1-4 附加于 MK38 舰炮的 TLS

1.2.3 海上激光验证系统

海上激光验证系统(Maritime Laser Demonstration, MLD)是由诺格公司和布拉希尔公司作为主要承包商的综合武器系统。MLD 采用的功率为 15kW,发射激光波长为 $1.064\mu\text{m}$ 的板条固体激光器。为了获得高功率激光,MLD 将 7 个板条固体激光器发射的激光组合为一束功率为 105kW 的高能激光。2009 年 3 月,诺格公司对 MLD 进行的测试中,成功制造出功率为 105kW,光束质量小于 3.85 的强激光。并且有资料表明,制造光束质量小于 2 的兆瓦级激光的技术已经相当成熟。

2010 年 8 月,在圣尼古拉斯岛进行的测试中,MLD 被安装在退役军舰“福斯特”号(DD964)上,将 MLD 与舰艇雷达和导航系统整合,并适当调整使之适应海上的潮湿环境,完成了舰载 MLD 样机在海上条件下的远距离跟踪小艇的试验。在下一步的研制计划中,MLD 最终将会安装到美国海军的各类型军舰上,包括驱逐舰、濒海战斗舰、巡洋舰、船坞登陆舰等。MLD 各子系统的示意图如图 1-5 所示。

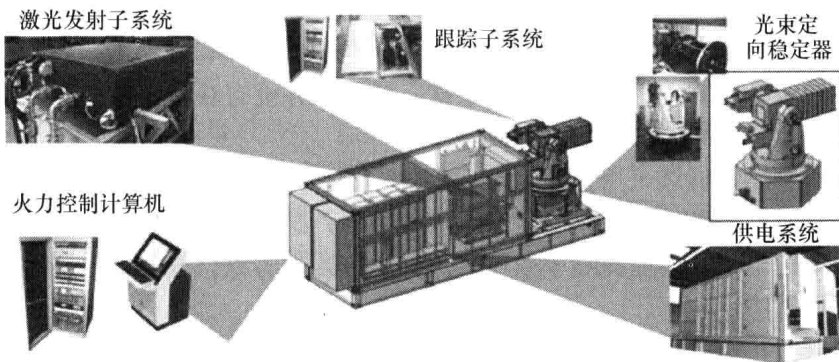


图 1-5 MLD 示意图

综上所述，可将以上三种典型舰载激光武器系统的发展情况概括为表 1-1。

表 1-1 典型舰载激光武器系统

系统	MLD	LaWS	TLS
激光器	SSSL	SSFL	SSFL
激光功率	105kW(由 7 束功率 15kW 激光 相干耦合)	33kW(由 6 束功率 5.5kW 激光非 相干耦合)	10kW
光束质量	小于 3.85	17	2.1
功率转换效率	20%~25%	25%	30%
波长	1.064 μm	1.064 μm	1.064 μm
武器级功率需求	400~500kW	400kW	75kW
技术准备水平(TRL)	5(2010 年 12 月)	6(2010 年 6 月)	6(2013 年 6 月)
研制进度	海上试验	海上试验	海上试验

随着全电舰艇时代的来临，美国等军事强国已经将舰载激光武器作为未来战争中的杀手锏武器，投入了大量的人力、经费用于基础研究、技术攻关和能力提升，在发展激光武器所必须的系统设计、集成、制造技术以及试验测试与鉴定技术方面具备了相当的基础，整体国防科技工业技术能力有了很大提升，具备近几年研制出可大规模部署的战术激光武器系统的能力。

1.3 光电跟踪系统的发展概况

1.3.1 光电跟踪系统提高跟踪精度的主要途径

1. 前馈控制(复合控制)

前馈控制是在闭环控制系统增加一开环控制支路，用来提供输入信号的一阶、二阶导数，使系统静差度提高，较好地解决了精度与稳定性之间的矛盾问题。这种系统称为前馈控制或复合控制系统。

构成复合控制的关键在于得到目标的角速度、角加速度信号，但光电跟踪系统中一般无法直接得到。因此，常采用光电跟踪脱靶量与编码器合成目标位置，然后再对位置进行微分滤波的方法求取目标速度的方法。由于脱靶量常具有噪声，且与编码器采样时间不同步，经微分运算，将产生更大的干扰，该方法并没有获得很好的实际使用效果。

2. 速度滞后补偿与加速度滞后补偿

速度滞后补偿是通过采用低通滤波后的仪器的速度，作为目标速度构成一种等效的复合控制，来提高系统的跟踪精度。从频率特性看，速度滞后补偿提高了原来系统对数频率特性低频段幅值，因而提高了系统的跟踪精度。该方法因简单实用，在国内光电跟踪设备中获得了广泛应用。

加速度滞后补偿是在速度滞后补偿的基础上，将速度补偿值再进行微分和低通滤波，然后送到速度回路，构成一种等效加速度前馈。因为采用的是仪器本身部分加速度，且通过低通滤波，沿用速度滞后补偿的说法称为加速度滞后补偿。加速度滞后补偿环节对系统

开环剪切频率基本没有影响，但会显著提高中低频段增益，从而使跟踪误差大大减小。

这两种方法的共同缺点是会减少系统的稳定裕度，破坏系统的稳定性，尤其是加速度滞后补偿，往往使系统处于临界稳定状态。

3. 共轴跟踪技术

传统跟踪方式存在一个基本问题：从降低传感器噪声的角度考虑，应减小系统带宽；而为了降低系统动态滞后误差，提高快速性，又必须加大系统带宽。由于传感器与伺服系统在一个回路中，设计中只能折中处理，使系统误差和随机误差都无法降至最低，跟踪精度受到限制。

共轴跟踪是计算机技术与复合控制技术结合产生的一种新思想。它分成两部分，一部分由计算机接收传感器的测量数据，进行滤波、预测，提供准确的角位置、角速度等信息；另一部分完成伺服驱动任务，以第一部分输出的角位置信号为输入，以角速度及高阶导数信号为辅助输入，构成复合控制系统，引导光电跟踪设备跟踪目标。两个部分各自独立，互不影响。数据处理部分的带宽可以很窄，以最大限度抑制跟踪噪声和干扰，尽可能减小随机误差；伺服驱动部分可有很宽的频带，大幅度地降低系统误差，保证跟踪的快速性和准确性。共轴跟踪的关键是滤波预测技术，预测目标位置、速度和加速度等运动状态量。

4. 动态高型控制方法

增加积分环节以提高伺服系统无差度，但同时将影响甚至破坏系统的稳定性，美国发射区经纬仪通过对目标航路点附近角速度、角加速度的大小及其符号监视，采用动态 III 型无差控制方法克服了其对系统稳定性的影响，获得了理想的跟踪精度。

动态高型控制方法可以充分利用计算机控制容易实现控制结构变换的优点，根据系统状态变化实现系统稳定与精度提高的平衡。但是动态高型无差系统，需要对积分环节的引入与脱离条件进行研究，需要针对不同对象采用不同对策，缺乏普遍性。

5. 新型控制方法

这里的新型控制策略是与传统的 PID 控制相对而言的，包括自适应控制、变结构滑动模态控制、模糊控制、专家控制、神经网络控制以及它们之间的渗透、结合形成的混合控制。传统的光电经纬仪控制算法是基于频域的 PID 校正算法，其结构和参数在经纬仪整个工作过程中一般保持不变，实际这并不理想。可以根据控制过程，将控制任务分解成子任务分阶段来完成，可以在系统运行的不同阶段，选用合适的控制规律，组合简单的控制方法实现高品质控制。

6. 复合轴控制技术

对于大加速度目标，按经典控制理论采用单轴(单变量)的伺服控制系统实现高精度跟踪是困难的，它不仅受到宽视场高分辨率、快速响应的探测器的限制，同时也受到光机跟踪架的机械结构谐振频率的限制。理论和实践表明，复合轴伺服控制技术是解决上述矛盾，实现战术激光武器精密跟瞄的一种行之有效的途径，目前已取得角秒级或更高的良好跟踪精度。

1.3.2 典型的光电跟踪系统

光电跟踪系统在跟瞄系统中应用得最为广泛，光电跟踪领域的研究水平很大程度上

体现了跟瞄系统的研究现状。国外光电跟踪技术比国内起步时间早,经验积累较为丰富,高机动目标跟踪的精度较国内明显更精确,并且产品稳定性和可靠性也比国内水平高,美国、英国、以色列等国家的光电跟踪技术水平基本代表了该领域的前沿水平。

法国 SFIM 公司的“TROP”光电跟踪系统的动态性能达到了最大跟踪角速度为 $120^\circ/\text{s}$,最大角加速度为 $200^\circ/\text{s}^2$ 。英国 Ferranti EO 公司生产的 FIN1155 稳定跟瞄系统,其伺服转台的跟踪精度达到了 0.1mrad 的跟踪精度;L3 公司的 MK20-0 型舰载光电跟踪设备对方位角最大速度为 $90^\circ/\text{s}$,最大加速度为 $60^\circ/\text{s}^2$ 的目标达到了 $15\mu\text{rad}$ 的稳定精度。意大利 CT 公司生产的光电跟踪系统在方位和俯仰方向均能实现全向转动,最大角速度为 $60^\circ/\text{s}$,并且跟踪精度达到了 0.4mrad ;以色列研制的 ESP-1H 系统的方位角转动范围为 $0^\circ\sim 360^\circ$,俯仰角转动范围为 $-10^\circ\sim 110^\circ$,在最大角速度为 $50^\circ/\text{s}$ 时,稳态的跟踪精度达到了 $50\mu\text{rad}$;而以色列的 ESP-600C 系统的稳定跟踪精度达到了 $15\mu\text{rad}$ 。

美国白沙靶场研制的光电经纬仪系统的最大跟踪角速度为 $120^\circ/\text{s}$,最大角加速度为 $120^\circ/\text{s}^2$,跟踪精度达 $10''\sim 20''$;美国研制的 MMT 系统采用多级快速反射镜(Fast Steering Mirror, FSM),逐级减小了跟踪误差,跟踪精度达到了 $1.5''$;麻省理工学院林肯实验室研发的“火池”雷达激光系统,对飞机的跟踪精度达到了 $1''\sim 2''$,对机动性稍差的测地卫星的跟踪精度达到了 $0.2''$ 。我国的 RCG441 系统采用双探测器型复合轴控制,可以跟踪距离 10km 的导弹,其精度约为 $20''$ 。

1.3.3 相关领域的研究概况

1. 目标预测滤波算法的研究概况

早在 18 世纪末,高斯为了测定行星运行轨道而提出了最小二乘估计法。20 世纪 40 年代,Wiener 等人提出了维纳滤波算法,该算法基于平稳随机过程的最优线性滤波理论,能对与输入信号有关的多种信息进行动态估计。但维纳滤波是根据整个区间上的数据得出滤波结果的,应用计算机求解时,需要存储和处理大量数据,不利于工程实践。

针对维纳滤波的缺点,Kalman 于 1960 年提出的卡尔曼滤波(Kalman Filtering)算法,它将状态空间思想引入最优滤波理论,对于具有高斯分布噪声的线性系统,可以得到系统状态的递推最小均方差估计。卡尔曼滤波算法的提出标志着现代滤波理论的建立。由于卡尔曼滤波采用的是递推计算方法,易于在计算机上实现,卡尔曼算法自提出至今在目标预测等领域得到了广泛的应用。但卡尔曼滤波算法也有着明显的缺点:它的适用范围仅为线性系统,且必须先获取系统的精确数学模型,当系统维数较高时滤波过程中的 Riccati 方程的计算量较大。文献[12]将跟踪目标的状态方程和传感器的测量方程作为线性方程处理,预测精度十分有限。

针对卡尔曼滤波算法只适用于线性系统的缺点,Bucy、Sunahara 等人提出了扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)算法,其基本思想是将非线性的问题近似为线性问题后再使用卡尔曼滤波算法对其进行处理。但该方法仅适用于弱非线性问题,对于高度非线性问题,EKF 可能产生较大的滤波误差和计算发散。文献[13]采用 EKF 算法得到目标运动信息,但 EKF 只适用于弱非线性的情况,对于强非线性系统,存在着滤波精度差、易发散等缺点。