



国防科技图书出版基金

High Energy Laser System
Test and Evaluation

高能激光系统 试验与评估

刘晶儒 杜太焦 王立君 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

高能激光系统试验与评估

High Energy Laser System Test and Evaluation

刘晶儒 杜太焦 王立君 编著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

高能激光系统试验与评估/刘晶儒,杜太焦,王立君
编著. —北京:国防工业出版社,2014.11

ISBN 978-7-118-09874-7

I. ①高... II. ①刘... ②杜... ③王... III. ①高
能—激光器 IV. ①TN248

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 270509 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$ 字数 249 千字

2014 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 68.00 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

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

序

近年来随着高新技术的发展,高能激光系统正逐步走向实用,试验与评估是高能激光系统从研发到实际应用的前提和关键,成为国际上备受关注的前沿领域之一。

高能激光系统试验是一项复杂的系统工程,常规的试验技术难以满足实际工程应用的需要,在试验等效性设计、试验体系构建、测试技术和方法及设备研制、基于数值模拟的仿真技术等方面都需要新的探索;高能激光系统效能评估涉及一系列的科学、技术和工程问题,从高能激光的产生、光束控制、大气传输到与目标的相互作用,环节很多,融合了多学科理论、方法和技术。因此高能激光系统试验与评估面临理论和技术的多方面挑战。

本书对高能激光系统试验与评估技术进行了系统的阐述和分析,不仅包括高能激光系统构成、高能激光系统试验、高能激光大气传输等基础理论和技术,而且给出了作者及其团队在高能激光参数测试技术、激光辐照效应测试与分析技术、高能激光系统效能评估等方面的研究新成果,是一本全面论述高能激光系统试验与评估的专著,具有学术意义与实用价值。

本书兼具基础性和前沿性,结构严谨、层次清晰、概念明确。可作为相关专业研究生的教材,也是本领域科研人员十分有用的参考书。近年来,国内已相继出版了一些高能激光技术及应用方面的著作,相信本书的出版会进一步促进本领域的发展和交流。

赵伊君

2014年9月

前 言

高能激光系统是产生和发射高能量激光并将其精确稳定聚焦到远距离目标上的光-机-电综合系统,在精密机械加工、空间光通信、空间能量传送、高效毁伤等方面具有重要的发展前景。国际上,高能激光技术发展已有 40 多年的历史,高能激光系统目前正经历从研发转向实际应用的阶段,而试验与评估是高能激光系统走向实用的重要和关键步骤。

近年来,随着高能激光技术及应用的快速发展,高能激光系统试验与评估成为国际上备受关注的前沿领域之一,国内已经相继出版了《激光辐照效应》、《高能激光系统》等著作,但还没有关于高能激光系统试验与评估方面的专著。本书广泛参考国内外学术论文和专著,以作者及其团队开展的研究工作为基础,对高能激光系统试验与评估技术进行了较全面的介绍和分析,既注重基本概念、基础物理和工程技术问题的阐述,也力图反映本领域的最新技术进展。

全书共分为 9 章。第 1 章简介了国际上高能激光系统及其应用技术的研究进展,概述了高能激光系统试验与评估的要点,由刘晶儒和杜太焦撰写;第 2 章介绍高能激光系统构成,由刘晶儒和王立君撰写;第 3 章概述了高能激光系统试验的主要内容,由刘晶儒、杜太焦、王立君撰写;第 4 章介绍高能激光系统输出能量、功率、光束质量等出光能力测量技术,第 5 章介绍高能激光辐照度时空分布测量技术,第 6 章介绍高能激光系统探测跟踪瞄准能力测量技术,由刘晶儒撰写;第 7 章论述了高能激光大气传输基础理论及数值模拟方法、大气参数测量技术,由杜太焦撰写;第 8 章阐述激光辐照效应测试与分析技术,由王立君撰写;第 9 章探索了高能激光系统效能评估理论和方法,由杜太焦撰写。全书由刘晶儒负责统稿。

衷心感谢赵伊君院士、姜文汉院士、刘泽金教授对本书编写工作的支持和指导,特别感谢赵伊君院士为本书作序。诚挚感谢科研工作中领导和专家们支持与帮助;书中归纳提炼了西北核技术研究所近年来多名博士和硕士研究生等的大量研究成果,已在相关章节的参考文献中注出,在此不一一列举,谨向他们表示感谢。

叶锡生、沈志康研究员对全书进行了认真审阅,并提出了许多宝贵的修改意见;在全书统稿过程中,作者与刘福华、陈绍武等同志进行了讨论,他们提出了不

少中肯的修改建议;蔡跃、戢运峰、栾昆鹏等同志在本书的文字编辑和材料收集方面作了大量细致的工作,在此一并表示感谢。衷心感谢国防工业出版社、国防科技图书出版基金评审委员会、西北核技术研究所、激光与物质相互作用国家重点实验室对本书出版给予的大力支持和帮助。

本书是一本兼具基础性和前沿性的专著,可供高能激光技术及应用研究领域的科研人员阅读和参考,也可作为相关专业研究生的教材。由于水平有限,书中难免存在错误和不足之处,敬请读者批评指正,作者将不胜感谢。

刘晶儒

2014年9月于西安

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 高能激光系统及应用发展概述	1
1.2 高能激光系统试验与评估概述	3
参考文献	4
第 2 章 高能激光系统	6
2.1 概述	6
2.2 高能激光器分系统	6
2.2.1 二氧化碳激光器	6
2.2.2 氟化氢/氟化氙化学激光器	8
2.2.3 氧碘化学激光器	10
2.2.4 二极管泵浦固体激光器	12
2.2.5 光纤激光器	14
2.3 捕获跟踪瞄准分系统	16
2.3.1 ATP 系统构成及工作原理	16
2.3.2 主激光发射单元	17
2.3.3 探测单元	17
2.3.4 跟踪控制单元	17
2.4 自适应光学分系统	17
2.4.1 光束稳定单元	18
2.4.2 内光路光束净化单元	18
2.4.3 大气传输的自适应补偿单元	18
2.5 指挥控制分系统	19
2.5.1 外部信息交互	19
2.5.2 技术状态汇总及信息处理	19
2.5.3 动作指令控制	19
2.6 高能激光系统主要性能参数	20

2.6.1	出光能力	20
2.6.2	远场辐照度	21
2.6.3	捕获能力	22
2.6.4	跟踪瞄准能力	22
参考文献		22
第3章 高能激光系统试验		24
3.1	技术集成试验	24
3.1.1	分系统性能测试试验	24
3.1.2	高能激光系统出光能力测试试验	25
3.2	跟踪瞄准试验	25
3.2.1	跟踪瞄准试验概述	25
3.2.2	跟踪瞄准试验模式	26
3.3	激光大气传输试验	28
3.3.1	激光大气传输试验概述	28
3.3.2	激光大气传输试验设计	30
3.3.3	激光大气传输试验结果及分析	33
3.4	辐照效应试验	34
3.4.1	材料与器件的辐照响应与损伤试验	34
3.4.2	部件结构与功能的毁伤试验	35
3.5	大系统级演示验证试验	36
3.5.1	MIRACL/SLBD 对导弹/无人机的毁伤试验	37
3.5.2	ABL 导弹助推段拦截试验	37
3.5.3	LaWS 无人机毁伤试验	37
3.5.4	海上激光演示系统的船只毁伤试验	37
参考文献		38
第4章 出光能力测量技术		40
4.1	概述	40
4.2	能量和功率测量	41
4.2.1	水循环式全吸收能量计	41
4.2.2	固态全吸收能量计	44
4.2.3	量热阵列	47
4.2.4	出光功率测量	52

4.3	光束质量测量	53
4.3.1	焦平面成像法	54
4.3.2	漫反射成像法	57
4.4	出光能力综合测量	58
	参考文献	58
第5章	辐照度测量技术	60
5.1	概述	60
5.2	光电探测器测量技术基础	60
5.2.1	光电探测器概述	60
5.2.2	HgCdTe 材料和探测器特性	63
5.2.3	InSb 材料和探测器特性	67
5.2.4	PbSe 材料和探测器特性	70
5.2.5	InGaAs 材料和探测器特性	70
5.2.6	PbS 材料和探测器特性	71
5.3	阵列式光电靶斑仪测量技术	72
5.3.1	基本原理和系统构成	72
5.3.2	高能激光衰减取样技术	73
5.3.3	结构设计和数据处理	78
5.3.4	标定和不确定度分析	79
5.4	斩波式光电阵列测量技术	80
5.4.1	基本原理	80
5.4.2	空间取样及衰减算法	81
5.4.3	结构设计	84
5.4.4	标定和不确定度分析	86
5.5	重频激光光电阵列测量技术	86
5.5.1	低重频脉冲激光辐照度分布测量技术	86
5.5.2	高重频脉冲激光辐照度分布测量技术	87
	参考文献	88
第6章	探测跟踪瞄准能力测量技术	89
6.1	高能激光系统捕获跟踪瞄准概述	89
6.1.1	捕获跟踪瞄准工作过程	89
6.1.2	跟踪瞄准误差概念	90

6.2	高能激光系统探测能力测量分析	90
6.2.1	天光背景特性及测量	91
6.2.2	空间目标特性	92
6.2.3	探测能力测量分析	93
6.3	高能激光系统跟踪精度测量技术	94
6.3.1	测试原理	94
6.3.2	数据处理	95
6.3.3	测量不确定度分析	95
6.4	高能激光系统瞄准精度测量技术	95
6.4.1	测试原理	95
6.4.2	数据处理	96
6.4.3	测量不确定度分析	96
	参考文献	97
第7章	高能激光大气传输	98
7.1	大气的结构与组成	98
7.1.1	大气结构	98
7.1.2	大气组分	100
7.2	大气吸收、散射	102
7.2.1	大气吸收	102
7.2.2	大气散射	104
7.2.3	大气衰减常用的计算软件	104
7.3	大气折射	106
7.3.1	大气折射率及其随高度的分布	106
7.3.2	蒙气差及蒙气色差	107
7.4	大气湍流效应	108
7.4.1	大气光学湍流特性	108
7.4.2	湍流对光波传输的影响	110
7.5	大气热晕效应	113
7.5.1	准直光束均匀路径	114
7.5.2	聚焦光束	114
7.5.3	上行传输	115
7.5.4	激光传输代数模型	117
7.6	受激拉曼散射和大气击穿	119

7.6.1	受激拉曼散射	119
7.6.2	大气击穿	119
7.7	大气光学参数测量	121
7.7.1	整层大气透过率测量	121
7.7.2	大气湍流参数测量	122
7.8	高能激光大气传输数值模拟	123
7.8.1	光场传输方程	124
7.8.2	自由空间中光波传输的数值模拟方法	125
7.8.3	湍流大气中折射率起伏的模拟-相位屏法	126
7.8.4	热晕效应中密度的数值模拟	128
7.8.5	热晕与湍流联合效应的数值模拟	130
	参考文献	130
第8章	激光辐照效应测试与分析	132
8.1	激光与材料的耦合测试	132
8.1.1	激光的材料耦合系数	132
8.1.2	耦合特性的测量	133
8.2	辐照损伤相关的材料特性	137
8.2.1	金属材料	137
8.2.2	复合材料	138
8.2.3	光学材料	140
8.2.4	涂层与膜层	141
8.3	材料的热力损伤响应测试技术	143
8.3.1	激光辐照金属的热-力响应	143
8.3.2	复合材料与涂层的烧蚀测量	146
8.3.3	光学材料与薄膜的损伤检测	148
8.3.4	辐照响应的实时综合测量技术	150
8.3.5	损伤的事后分析技术	151
8.4	结构部件的激光辐照响应与损伤测试分析	153
8.4.1	厚壁含能结构的激光热引爆	153
8.4.2	轴压薄壁壳体结构的激光辐照失稳	155
8.4.3	内压薄壳激光辐照的热-力联合毁伤	156
8.4.4	蜂窝夹层复合材料结构激光烧蚀损伤	158
8.5	功能部件的激光辐照响应与损伤测试分析	161

8.5.1	光学探测组件的干扰损伤	161
8.5.2	导引系统的功能失效	165
	参考文献	169
第9章	高能激光系统效能评估	172
9.1	高能激光系统效能评估概述	172
9.1.1	效能评估的概念和模型	172
9.1.2	高能激光系统效能评估模型	173
9.1.3	高能激光系统能力评估模型	174
9.2	高能激光系统可靠性评估方法	175
9.2.1	高能激光系统组成及任务剖面	175
9.2.2	系统可用性评估方法	176
9.2.3	系统可信性评估方法	176
9.3	捕获能力评估方法	177
9.3.1	天光背景	177
9.3.2	目标亮度	179
9.3.3	系统捕获条件	180
9.4	目标处激光参数评估方法	180
9.4.1	激光大气传输模型	181
9.4.2	靶面长曝光功率密度	182
9.4.3	远场光斑形状分析	183
9.4.4	靶面激光瞬时功率密度概率分布	183
9.4.5	激光参数、大气参数的统计模型	184
9.5	目标毁伤效应评估方法	185
9.5.1	目标毁伤的表征方法	186
9.5.2	目标毁伤效应评估方法	187
9.5.3	典型目标毁伤效应评估	188
	参考文献	194

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Overview of High Energy Laser System and Its Application	1
1.2 Outline of High Energy Laser System Test and Evaluation	3
References	4
Chapter 2 High Energy Laser System	6
2.1 Introduction	6
2.2 High Energy Laser Subsystem	6
2.2.1 CO ₂ Laser	6
2.2.2 HF/DF Chemical Laser	8
2.2.3 Chemical Oxygen Iodine Laser	10
2.2.4 Diode Pumped Solid State Laser	12
2.2.5 Fiber Laser	14
2.3 Acquisition, Tracking and Pointing(ATP) Subsystem	16
2.3.1 Configuration and Operation Principle of ATP	16
2.3.2 Laser Projection Element	17
2.3.3 Acquisition Element	17
2.3.4 Tracking Control Element	17
2.4 Adaptive Optics Subsystem	17
2.4.1 Beam Stabilization Element	18
2.4.2 The Clean up Element for Inner optical Path	18
2.4.3 Adaptive Compensation Element	18
2.5 Command and Control Subsystem	19
2.5.1 Information Exchange	19
2.5.2 Technology State Collection and Information Processing	19
2.5.3 Operation Instruction Control	19
2.6 Performance Parameters of High Energy Laser System	20
2.6.1 Laser Output Capability	20

2.6.2	Far Field Irradiance	21
2.6.3	Acquisition Capability	22
2.6.4	Tracking and Pointing Capability	22
	References	22
Chapter 3 Test of High Energy Laser System		24
3.1	Technical Integration Test	24
3.1.1	Performance Measurement Test of Subsystem	24
3.1.2	The Laser System Output Capability Measurement Test	25
3.2	Tracking and Pointing Test	25
3.2.1	Introduction	25
3.2.2	Tracking and Pointing Test Mode	26
3.3	Atmospheric Propagation Test	28
3.3.1	Introduction	28
3.3.2	Design of Atmospheric Propagation Test	30
3.3.3	Data and Analysis of Atmospheric Propagation Test	33
3.4	Irradiation Effect Test	34
3.4.1	Response and Damage Test of Material and Component	34
3.4.2	Lethality Test of Component Sturcture and Function	35
3.5	Full System Demonstration Test	36
3.5.1	MIRACL/SLBD Lethality Test Against Missile and UAV	37
3.5.2	ABL Intercept Demonstration Test Against Boosting Ballistic Missile	37
3.5.3	Lethality Demonstration Test of LaWS Against UAV	37
3.5.4	Lethality Demonstration Test of MLD Against Small Boat	37
	References	38
Chapter 4 The Laser Output Capability Measurement Technology		40
4.1	Introduction	40
4.2	Energy and Power Measurements	41
4.2.1	The Full Absorbing Calorimeter with Recirculating Water	41
4.2.2	The Solid State Full Absorbing Calorimeter	44
4.2.3	Calorimetric Array	47
4.2.4	Laser Power Measurements	52
4.3	Beam Quality Measurements	53
4.3.1	The Focal Plane Array Imaging Method	54
4.3.2	The Diffuse Reflecting Imaging Method	57