

文章编号 1674-2915(2013)06-0810-08

## 天基激光武器系统的发展

高明辉\*, 郑玉权, 王志宏

(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:**介绍了天基激光武器系统的概念、组成、应用和关键技术,分析了激光对目标的杀伤程度,并给出了相应的参考阈值。针对系统的关键问题提出一些解决方法,包括高能激光器的研制和种类,大口径反射镜研制技术和结构形式,以及天基目标捕获跟踪瞄准(ATP)系统精度的影响因素和提高精度的方法。通过对天基激光武器系统发展的研究,为该系统的进一步发展和精度的提高提供研究方向和理论基础。

**关键词:**航天技术;天基激光武器;高能激光器;大口径反射镜;跟踪瞄准系统

中图分类号:TN977 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20130606.0810

## Development of space-based laser weapon systems

GAO Ming-hui\*, ZHENG Yu-quan, WANG Zhi-hong

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

\* Corresponding author, E-mail: ccgaomh@163.com

**Abstract:** The concepts, composition, applications and key techniques of space-based laser weapons are introduced in detail in this article. The destruction degree of laser on the target has been analyzed and the corresponding reference threshold is given. Some solutions to the key problems of the systems are put forward, including the development and variety of high-energy laser, the development technology of large aperture mirror and its structure, as well as affecting factors on system precision and methods of improving the accuracy about space-based target acquisition tracking and pointing(ATP). The research direction and basic theory are provided for the further development and improvement of the precision of the systems through the research of the development of space-based laser weapon systems.

**Key words:** space technology; space-based laser weapon; high-energy laser; large-aperture mirror; tracking and pointing system

收稿日期:2013-10-15;修订日期:2013-11-13

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(No. 2010AA1221091001)

## 1 引言

天基激光武器是以太空为基础的尖端激光武器,通过激光武器对太空内的有效载荷形成威胁和杀伤,被称为“杀手”卫星,也称为激光作战卫星或天基激光武器系统。天基激光武器所在的卫星轨道高,覆盖地面范围大,可以把地球作为攻击目标。因为地球静止轨道激光卫星大约可以覆盖42%的地球表面,如果采用近地轨道激光卫星来实现全球覆盖,就要相应增加卫星的数量,但是由于近地轨道卫星离目标比较近,激光武器的杀伤能力很大。早在20多年前,美国就已经意识到天基激光武器对于发展强大军事空间力量的重要性,1987年美国物理学会定向能研究小组已在《定向能武器的科学与技术》专题研究报告中研讨了天基激光武器的可行性<sup>[1-3]</sup>。近20年来,美国一直在努力研发天基激光武器,内容涵盖了总体概念、关键技术以及子系统的工程化集成等。俄罗斯对天基激光武器也一直很重视,其单元关键技术研究也具有较高水平。美国先期的研究项目是采用“集成飞行实验”(Integrated Flight Experiment, IFX)的方法,该方法分为三个阶段,第一阶段为“阿尔法”(Alpha)计划,目的是验证百万瓦级柱型氟化氢化学激光器轨道飞行的技术可行性;第二阶段是“大型光学演示实验”(LODE)计划,目的是验证利用与自适应光学系统相耦合的输出波检测技术控制与瞄准激光束的精确性。LODE计划还包含一项“大型先进反射镜计划”(LAMP),用来验证制造适于在空间使用的4 m直径多块拼接轻质主反射镜的可行性;第三阶段是“金爪”(Talon Gold)计划,目的是验证捕获、跟踪与瞄准技术<sup>[4]</sup>。其中高风险的关键技术包括:大口径发射望远镜、远距离靶目标的捕获跟踪瞄准、激光器的光腔自动准直调节及光束波前控制、系统集成与自动控制等。针对关键技术提出的解决方案主要有:研发大推力发射系统;分批多次发射;在轨组装;研发可折叠展开的超轻型薄膜发射望远镜;研发短波长高能激光器;减少单次燃料携带量;增加后续补给与在轨维护。

国内这方面的研究刚刚开始,也是从激光器

的选择和技术指标出发。对于化学激光器来说,因为它容易做到兆瓦级,且自带能源,能量转换效率较高,耗电较少,波长较短,光束质量好<sup>[5]</sup>。由美国科研局设计的未来太空激光武器的技术参数为:波长为2.7  $\mu\text{m}$ ;激光介质能连续发光200~500 s;功率为5~10 MW;倾斜角为40°;作用轨道高度为800~1 000 km;航程为4 000~12 000 km;一颗卫星的覆盖面积为地球表面积的1/10;发光直径为0.3~1 m;最大射程为3 km;一次射击时间为10 s;平均瞄准时间为1 s;质量为35 000 kg;由20颗卫星和10个轨道镜组成整个激光作战卫星系统<sup>[6]</sup>。卫星研制成本可根据美国军用的历史统计数据进行估算:已知单价为5~15万美元/kg。天基激光武器星座由24颗卫星组成,总质量约为840 t(24×35 000 kg),若按平均单价10万美元/kg计,研制成本大约为840亿美元。研制实战型卫星,需在完成演示器太空试验的基础上,增加10%的技术延伸费;发射成本按改进型一次性运载约5 650美元/kg计<sup>[7]</sup>。总的看来,全部研制与发射成本总计约970亿美元。目前我国的氟化氙(DF,波长~3.8  $\mu\text{m}$ )与氧碘(COIL,波长1.3  $\mu\text{m}$ )两种化学激光器已发展到连续波功率 $P\approx 0.3$  MW规模,光束质量 $\beta < 5$ 倍衍射极限。5~10万瓦级的地基车载化学激光器已于2005年在我国新疆地区对斜距~600 km的低轨卫星成功地进行了致盲实验,其中发射望远镜口径 $D\sim 0.6$  m,目前ATP跟踪精度与瞄准精度 $< 5$   $\mu\text{rad}$ 。美国为完成太空的霸主地位,完成了“天眼”系统,包括天基红外系统(SBIRS)、空间跟踪与监视系统(STSS)、天基天空监视系统(SBSS)、轨道深空成像仪(ODSI),并于2010年9月发射SBSS。

## 2 天基激光系统组成

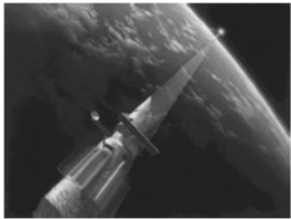
天基激光系统用精确定向的高强度相干光束干扰、毁伤空间目标,可以达到灵活的软杀伤作战效果,组成的星座可形成覆盖全球的攻击能力,将成为21世纪天战中最重要武器之一,也是弹道导弹防御的第一道屏障<sup>[8-9]</sup>。天基激光武器如图1所示。天基激光武器系统由适应于天基平台

环境的高能激光器、大口径发射望远镜、天基目标捕获跟踪瞄准(ATP)系统以及作战管理控制(BM/C<sup>4</sup>I)系统等组成,如图2所示。目前提高天基激光武器性能的方法主要有:研制波长更短的激光器,以便缩小光学系统的尺寸;增大主反射镜的直径,以提高激光的光束能量。反射镜尺寸越大,可使光束越集中,光强越高。如果保持光强不变,则有利于降低对激光器输出功率的要求,从而减轻卫星质量,降低研制成本;进一步提高跟踪和指向精度,有利于弥补因光束抖动产生的模糊度,其效果相当于使激光器输出功率提高或增大光学反射镜尺寸。



(a) 天基激光系统(SBL)卫星星座

(a) Satellite constellation of space-based laser system



(b) “阿尔法”计划天基激光武器系统

(b) Space-based laser system of alpha project

图1 天基激光武器

Fig. 1 Space-based laser weapon

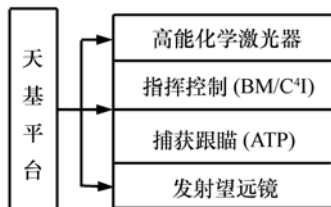


图2 天基激光武器系统组成

Fig. 2 System composition of space-based laser weapon

### 3 激光攻击目标的程度分析

激光武器摧毁空间目标具有速度快、攻击空域广的特点,利用激光的光效应和高能热效应,直接照射卫星可以破坏其光电探测器,从而破坏敌方的卫星装置<sup>[10]</sup>。激光作为攻击武器,主要看它能够在多远距离范围内聚焦到一定的功率密度及能量密度。而所需的能量密度则取决于被打击军事卫星的失效机制及相应的激光损伤阈值。原理如图3所示<sup>[4]</sup>。

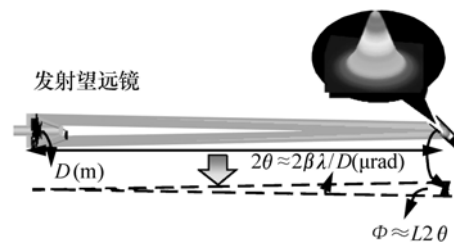


图3 天基激光系统工作原理图

Fig. 3 Operation principle configuration of space-based laser system

卫星光学系统失效的能量密度阈值:  $E_{\text{optic}}$  ( $\sim 10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ J/cm}^2$ ); 卫星热控系统失效的能量密度阈值:  $E_{\text{thermal}}$  ( $\text{J} \sim 10 \text{ J/cm}^2$ ); 卫星供电系统失效的能量密度阈值:  $E_{\text{elect}}$  ( $\sim 10^2 \text{ J/cm}^2$ ); 卫星材料结构失效的能量密度阈值:  $E_{\text{struct}}$  ( $\sim 10^3 \text{ J/cm}^2$ )。

激光束的聚焦能力受限于:

$$F_p = \frac{\pi}{4} P \left( \frac{D}{\lambda \beta L} \right)^2 (1 - \varepsilon^2), F_a \approx \frac{1}{4} F_p, (1)$$

式中,  $F_p$  为焦斑峰值光强,  $F_a$  为焦斑平均光强,  $P$  为激光输出总功率,  $D$  为发射望远镜口径,  $\lambda$  为激光波长,  $\beta$  为持续出光时间内在靶面累积平均光束质量(衍射极限倍数),  $\varepsilon$  为激光器输出光环内外径之比。

### 4 关键技术的分析研究

对于任何载荷和平台,首先应该攻关解决关键技术。目前的主要问题有:对于具有大口径主镜的发光装置,即大型的激光装置如何送入预定

轨道,解决的主要办法是研制能够放到运载火箭的货舱内可折叠式主镜,在太空激光武器进入预定轨道后可折叠式主镜能够自动打开。在太空向轨道上的太空激光武器补充化学介质仍然是个关键问题,由于将来激光武器都是大功率的,主要使用的都是化学激光武器,所以没有介质就不能发生化学反应,也就不能产生激光<sup>[11-12]</sup>。由此就要考虑未来设计、制造的天基激光武器要节能,主要参数包括20 m的光学系统,1 μm激光波长和衍射极限光束,由此预计未来天基激光武器的某些创新技术将需要进行优化设计,主要包括以下几方面:

(1) 高功率短波长激光器的研制;

(2) 利用更先进的薄膜加工工艺制造大型轻质光学系统的设计和研制;

(3) 采用新技术、新工艺实现高平均功率相位共轭技术;

(4) 采用各类先进的光阀技术或集成微机电装置的新颖自适应光学系统的研制;

(5) 采用新技术、新工艺实现光束成形与控制用的高精度相控阵二极管激光器的研制。

虽然有些技术目前还没达到,但随着技术的接续发展是可以突破的。所以做研究工作,既有目前应用的可行性,而且要有技术发展的前瞻性。目前天基激光武器的输出功率规模主要受限于两点:一是在一定外形尺寸限制下化学燃料的能流通量;二是在一定口径限制和保持一定光束质量的要求下高反射率腔镜所能承受的激光功率<sup>[13-14]</sup>。未来节能型的激光武器使用的短波长激光器大致包括化学氧碘激光器(1.315 μm)、二极管泵浦固体激光器(1.06 μm)、氟化氢泛频激光器(1.35 μm)和相控阵二极管激光器(0.8 μm),其中最成熟适用的是COIL激光器<sup>[15-17]</sup>。以目前的技术为基础进行10年后的预测,总质量~5 t的天基高性能化学激光器以1 MW的功率累积输出100 s是有可能的(其中燃料质量~2.5 t。天基激光武器的发射望远镜采用可折叠展开式轻质镜,预测10年后有可能使口径达~10 m。目前我国已具备一定的自适应光学调整技术,但大口径轻质镜的材料与工艺、折叠展开机构、以及在天基轨道上展开后的面型检测与

调整判据等关键技术需要重点研发。

天基激光武器的ATP系统跟瞄精度预计在10年后 $\leq 0.5 \mu\text{rad}$ ,对卫星目标的探测距离 $\geq 5000 \text{ km}$ 。

#### 4.1 化学激光器的工作原理和种类

高能化学激光器的工作原理如图4所示。

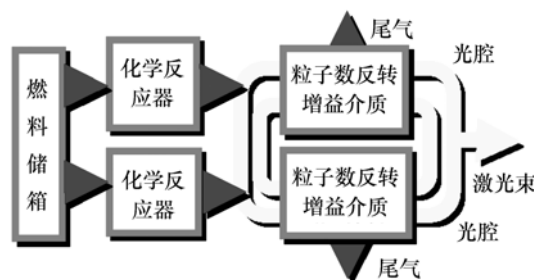


图4 高能化学激光器的工作原理图

Fig. 4 Operation principle configuration of high energy chemistry laser

短波长高能化学激光可分为两类:一类为全气相化学激光(AGCL),另一类为气液二相化学激光(LGCL)。目前主要应用在高能激光武器中比较成熟的化学激光器有:氟化氢泛频激光器(HFOT)、化学氧碘激光器(SB-COIL)、全气相碘激光(AGIL)以及固体激光(SSL)等。其中,固体激光(SSL)具有波长短(1.06 μm)、全固化、无化学燃料补给等优点,但是在高功率时其电源系统和热交换系统重量很大,天基储能式高功率电源技术还不成熟,天基固体激光很难放大到十万瓦级或兆瓦级。当前更被看好的两种激光是HF泛频激光(HFOT)和天基氧碘激光(SB-COIL)。HF泛频激光(HFOT)因增益较低,且为多谱线输出,采用稳定腔高功率输出时激光束发散角较大,采用常规非稳腔时输出功率较低,高亮度输出需要特殊的非稳腔设计;氧碘激光(COIL)在高功率输出时仍可具有较好的光束质量,目前技术较成熟,但包含气液二相反应,须针对天基失重环境重新设计。英国《简氏防务周刊》2008年曾报道:美国导弹防御局宣布,它与波音公司和诺思罗普-格鲁曼公司合作,在加利福尼亚州爱德华兹空军基地完成了在改装后的波音747-400F(YAL-1A)技术

验证机上,“氧碘化学激光器(COIL)”的首次机载反导激光武器测试<sup>[18-21]</sup>。全气相碘激光(AGIL)兼有 HF 激光全气相运行与 COIL 激光光束质量较好的优势,但目前高功率放大技术还不成熟,有待进一步研发。

#### 4.2 捕获跟瞄(ATP)子系统工作原理

首先,通过卫星轨道预报及雷达系统探测等手段,对靶目标的方位进行初步定位。然后,用广角(7°)CCD 相机搜索目标,将大口径望远镜转向并粗跟踪目标,以窄视场(6′)成像电视(CCD)闭环锁定目标,以压电陶瓷驱动快速倾斜镜实现闭环调节,以重复脉冲照明激光束照亮精跟踪视场内靶目标,选取瞄准点并发射强激光束<sup>[5]</sup>。远距离靶目标的捕获跟踪瞄准(ATP)是天基激光武器系统将激光束准确地定位于上千公里远处米级尺寸目标的技术保证。ATP 子系统需要解决的问题包括:

(1)对上千公里远处目标的捕获与识别(取决于目标自身亮度或其散射太阳光的亮度、与背景之间的对比度,避开日、月、地三大天体时,天基背景很黑暗)以及探测 CCD 的灵敏度等。

(2)天基平台与目标相对运动过程中跟踪瞄准光束抖动的抑制—惯性参照基准单元技术。

(3)激光武器系统光束波前像差的校正—光束净化与自适应调整技术。

(4)大口径发射望远镜通过聚焦成像原理将强激光束尽可能集中地会聚于靶面。

#### 4.3 可展开薄膜发射望远镜

对于天基激光武器系统来说,可展开薄膜发

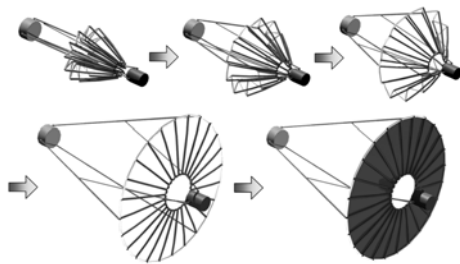
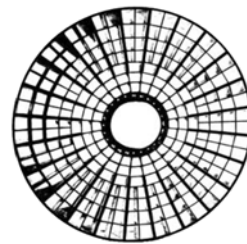


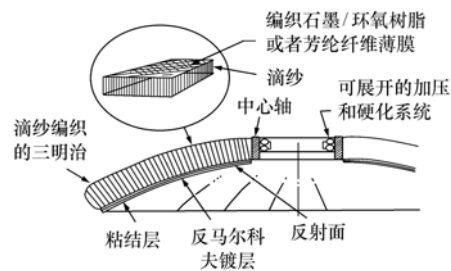
图5 大口径可折叠薄膜发射望远镜展开过程示意图  
Fig.5 Expansion process configuration of large calibre deployable membrane launching telescope

射望远镜的研制至关重要。因为激光的能量和作用距离通过该反射镜来实现。大口径可折叠薄膜发射望远镜展开过程如图5所示。

编织石墨/环氧树脂或者 kevlar 芳纶纤维薄膜主要的关键技术包括:大口径非球面光学系统设计;离轴超薄反射镜加工与检测;超薄反射镜制作材料的性能研究;多块反射镜的共相位调整与检测;超薄反射镜的主动光学调整与波面检测;轻质高强度反射镜支撑结构;离轴超薄反射镜的精密展开机构和精密定位机构(含精密铰链、锁定机构与展开机构等);激光束变形波面与超薄主镜的面形匹配控制;超薄反射镜的表面改性处理与强激光镀膜技术研究;定位、展开结构的精度测试装置的研究,包括重复性、可靠性、位置精度等方面。针对这些关键技术开展相应的研究<sup>[22-25]</sup>。采用有限元分析的方法研究反射镜支撑结构的合理性。对于反射镜面型的保持采用主动光学技术;把分块反射镜的精密展开技术与镜面共相位



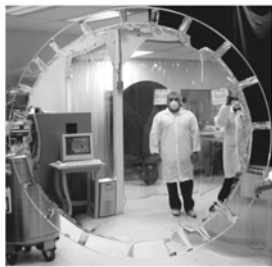
(a) 可折叠薄膜发射望远镜示意图  
(a) Deployable membrane launching telescope



(b) 采用自适应光学精细调整面形示意图  
(b) Precisely adjusting surface figure by adaptive optics

图6 可折叠薄膜发射望远镜展开后将采用自适应光学精细调整面形示意图

Fig.6 Precisely adjusting surface figure by adaptive optics after deployable membrane launching telescope expansion



(a) 美国空军研究实验室 (AFRL) 工作示意图  
(a) Working in AFRL



(b) 大口径可折叠展开式薄膜发射望远镜示意图  
(b) Large calibre deployable membrane  
launching telescope configuration

图7 美国空军研究实验室 (AFRL) 正在进行大口径可折叠展开式薄膜发射望远镜研发

Fig.7 Development of large calibre deployable membrane launching telescope in AFRL

技术相结合来进行研究;对于大尺寸主镜的共相

#### 参考文献:

- [1] 美国天基激光反导卫星研究取得重大进展[EB/OL]. [2013-05-07]. <http://home.cetin.net.cn>.
- [2] 任国光. 美国高能激光武器两年来的重大进展[J]. 激光与红外, 1998(1):7-11.  
REN G G. Signifant progress of American high energy laser in last two years[J]. *Laser & Infrared*, 1998(1):7-11. (in Chinese)
- [3] 王立志, 史佳熠. IFX 计划-解读美国激光武器新发展[EB/OL]. [2013-05-07]. <http://www.cpvip.com>.  
WANG L ZH, SHI J Y. IFX plans-Interpretation of the new development of the U. S. laser weapon. [EB/OL]. [2013-05-07]. <http://www.cpvip.com>.
- [4] 苏毅, 万敏. 高能激光系统[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.  
SU Y, WAN M. *High Energy Laser System*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [5] 徐惠忠. 高能激光武器的毁伤机理及飞行器防御途径分析[J]. 中国航天, 2004(9):33-35.  
XU H ZH. Damage mechanism of high-energy laser weapon and analysis of aircraft defense approach[J]. *Aerospace China*, 2004(9):33-35. (in Chinese)
- [6] 王永仲. 现代军用光学技术[M]. 北京:科学出版社, 2003.  
WANG Y ZH. *The Modern Military Optic Technology*[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [7] 李传庐. 新概念武器[M]. 北京:国防工业出版社, 1999.  
LI CH L. *New Concept Weapon*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004. (in Chinese)

位检测与面形检测采用精密装调技术和计算机辅助技术确保超轻反射镜的装校和光学系统的波前检测、波前分析;通过采用现代控制理论、经典控制理论和计算机控制技术的结合,确保反射镜定位、展开结构的精度。可折叠薄膜发射望远镜展开后将采用自适应光学精细调整面形,示意图如图6所示。

美国空军研究实验室 (AFRL) 正在进行大口径可折叠展开式薄膜发射望远镜研发,如图7所示。

## 5 结束语

在未来战争中,反卫星武器的发展非常重要,其中激光系统具有攻击目标速度快、抗干扰性强、毁伤效率高等特点,作为天基反卫星武器具有显著优势,因此天基激光武器系统将成为其发展的重大项目之一。本文对天基激光武器系统组成、关键技术以及单项关键技术内容进行了详细介绍,特别是对高能激光器的工作原理以及系统的攻击程度进行了细致的说明。开展此系统的研究对国防建设具有深远的意义和重要的应用指导。

- [8] 周义,周丽,胡根秀,等. 未来战争主攻手—美军激光武器即将走向战场[J]. 飞航导弹,2005(10):32-36.  
ZHOU Y,ZHOU L,HU G X,*et al.*. Spiker of Future War-U. S. laser weapon coming to battlefiled[J]. *Aerodynamic Missile J.*,2005(10):32-36. (in Chinese)
- [9] 余宗敏,蔡传能. 未来战场的攻防新锐—激光武器[J]. 飞航导弹,2005(2):62-64.  
YU ZH M,CAI CH N. Future battlefiled offensive cutting-edge-laser weapon[J]. *Aerodynamic Missile J.*,2005(2):62-64. (in Chinese)
- [10] 陆彦文,陆启生. 军用激光技术[M]. 北京:国防工业出版社,1999.  
LU Y W,LU Q SH. *Military Laser Technology*[M]. Beijing:National Defence Industry Press,1999. (in Chinese)
- [11] 宛东生. 关注美国机载激光武器(ABL)计划[J]. 激光与光电子学进展,2006(3):28-31.  
WAN D SH. Briefing of ABL project in the united states[J]. *Laser Optoelectronics Progress*,2006(3):28-31. (in Chinese)
- [12] 赵书文,周世明,尤志锋. 未来防空与防天利器—飞速发展的激光武器[J]. 飞航导弹,2005(8):1-3.  
ZHAO SH L,ZHOU SH M,YOU ZH F. Air defense and arospace defense in the future-the rapid development laser weapon[J]. *Aerodynamic Missile J.*,2005(8):1-3. (in Chinese)
- [13] 余辉,谭胜. 高能激光武器的发展和应用前景[J]. 红外与激光工程,2002(3):267-271.  
YU H,TAN SH. Development and application prospects of high-energy laser weapon[J]. *Infrared and Laser Eng.*,2002(3):267-271. (in Chinese)
- [14] 任国光,黄裕年. 美国高能激光武器的发展及其面临的挑战(下篇)[J]. 激光技术,2001(5):321-327.  
REN G G,HUANG Y N. Development and challenges for american high-energy laser weapon(Part 2)[J]. *Laser Technol.*,2001(5):321-327. (in Chinese)
- [15] 美国的强激光武器系统. [EB/OL]. [2013-05-07]. <http://www.lisa-mil.com>.
- [16] 李博,陈健,王伟国,等. 防空反导高能激光武器[J]. 中国光学,2012(4):352-357.  
LI B,CHEN J,WANG W G,*et al.*. High power anti-missile laser weapons for aerial defence[J]. *Chinese Optics*,2012(4):352-357. (in Chinese)
- [17] 周彦平,陶坤宇,曲晓彤,等. 天基目标瞄准多传感器联合探测[J]. 光学精密工程,2008,16(6):1003-1008.  
ZHOU Y P,TAO K Y,QU X T,*et al.*. Multi-sensor joint detection in space-based pointing[J]. *Opt. Precision Eng.*,2008,16(6):1003-1008. (in Chinese)
- [18] 李治国,高立民,张博妮,等. 空间光电跟踪系统动量平衡设计与试验[J]. 光学精密工程,2013,21(1):62-68.  
LI ZH G,GAO L M,ZHANG B N,*et al.*. Design and experiment of momentum balance wheels for optoelectric tracking gimbals[J]. *Opt. Precision Eng.*,2013,21(1):62-68. (in Chinese)
- [19] 谭显路. 高能激光武器的发展和应用前景[J]. 航空兵器,2000(3):25-29.  
TAN X L. Development and application prospects of high-energy laser weapon[J]. *Aero Weaponry*,2000(3):25-29. (in Chinese)
- [20] 钟建业,徐梓茂. 美国激光武器综述[J]. 航空知识,2004(4):50-51.  
ZHONG J Y,XU Z M. An overview of american laser weapon[J]. *Aerospace Knowledge*,2004(4):50-51. (in Chinese)
- [21] 任国光,黄裕年. 美国高能激光武器的发展战略(上篇)[J]. 激光技术,2001(4):241-245.  
REN G G,HUANG Y N. Developing strategic of American high power laser weapons(part 1)[J]. *Laser Technol.*,2001(4):241-245. (in Chinese)
- [22] 刘天华,王云萍. 高能激光武器综述[J]. 现代军事,2001(293):42-44.  
LIU T H,WANG Y P. An overview of american laser weapon[J]. *Modern Military*,2001(293):42-44. (in Chinese)
- [23] 陈娅冰. 激光武器新技术及应用[J]. 激光与光电子学进展,2003(4):18-20.  
CHEN Y B. New technology and application of laser weapon[J]. *Laser Optoelectronics Progress*,2003(4):18-20. (in Chinese)

[24] 美国机载激光武器研究动向. [EB/OL]. [2013-05-07]. <http://www.lisa-mil.com>.

[25] 黄勇,侯海梅. 美国的战术高能激光武器[J]. 激光技术,2002(4):273-276.

HUANG Y, HOU H M. The tactical high-energy laser weapon of america[J]. *Laser Technology*, 2002(4):273-276. (in Chinese)

#### 作者简介:



高明辉(1971—),男,吉林榆树人,博士,副研究员,主要从事航空航天光机结构设计、分析、材料加工、检测方面的研究。E-mail:ccgaomh@163.com



王志宏(1967—),男,吉林长春人,助理研究员,主要从事装校、检测、试验方面的研究。E-mail:wzh@ciomp.ac.cn



郑玉权(1972—),男,内蒙古通辽人,博士,研究员,主要从事航空航天高光谱成像技术、光学系统设计、光谱辐射定标等方面的研究。E-mail:zhengyq@sklao.ac.cn