

·特邀综述·

中国新一代巨型高峰值功率激光装置发展回顾

张小民^{1*}, 魏晓峰²

¹中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621999;

²中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621999

摘要 巨型高峰值功率激光装置的总体规模与性能是一个国家在强激光技术研究与应用领域综合实力的集中体现。简要介绍了装置基本结构、关键科学技术与工程问题以及总体设计要素, 回顾了两台中国二代巨型高峰值功率激光装置的基本状态与技术特点, 展望了未来中国高峰值功率激光技术与工程发展的基本趋势。

关键词 激光技术; 惯性约束聚变; 高能量密度物理; 原型装置; 主机装置; 兆焦耳级聚变科学激光装置

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0100003

Review of New Generation of Huge-Scale High Peak Power Laser Facility in China

Zhang Xiaomin^{1*}, Wei Xiaofeng²

¹China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621999, China;

²Laser Fusion Research Centre, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621999, China

Abstract The overall scale and performance of a huge-scale high peak power laser facility are the concentrated expression of the integrated strength of a country in the field of high-power laser technological researches and applications. The basic structure, key science and technology and engineering problems as well as the overall design elements are briefly introduced. The basic state and technical characteristics of two Chinese second generation huge-scale peak power laser facilities are reviewed, and the trend of the future Chinese high peak power laser technology and engineering development is also prospected.

Key words laser technique; ignition confinement fusion; high energy density physics; prototype facility; host facility; mega joule fusion scientific laser facility

OCIS codes 140.3460; 140.3550; 140.3538

1 引言

高峰值功率激光是当今实验室内创造超高温、超高压、超高密度, 逼近聚变极端条件的唯一途径, 已成为开展惯性约束聚变(ICF)、高能量密度物理(HEDP)、极端条件物理特性和天体物理基础研究不可或缺的唯一手段^[1]。

巨型高峰值功率激光装置(简称激光装置)是以脉冲运行模式、输出激光脉冲宽度为数十飞秒至数纳秒、输出脉冲峰值功率为太瓦至百太瓦(脉冲峰值功率达到 10^{12} W)范围, 甚至高达拍瓦(10^{15} W)或吉瓦(10^{18} W)量级的大型科学实验装置, 具有总体规模巨大、技术集成复杂、研制周期长、专业涉及面广、

投资强度大、性能指标全面逼近相关科学与技术受限条件的基本特点, 是目前世界上最具有代表性的巨型光学工程之一, 其总体规模与主要性能代表一个国家强激光技术与工程的最高水平。目前, 国际上仅有美国、法国等少数发达国家建立了这类巨型激光装置完备的研发体系。

早在 20 世纪 90 年代中期, 我国著名高功率激光科学家、中国科学院上海光学精密机械研究所范滇元院士在全面分析 ICF/HEDP 研究需求与高功率激光技术发展趋势的基础上, 准确地预言了高峰值功率激光技术与应用的主流趋势与基本技术特征^[2]。

第一代巨型高峰值功率激光装置的基本技术特

收稿日期: 2018-10-25; 修回日期: 2018-11-05; 录用日期: 2018-11-26

* E-mail: zxmcaep@gmail.com

征是采用“主振荡器+功率放大(MOPA)”技术路线,系统结构为单口径、分离式结构,能量转换效率较低(远低于1%),其典型代表是美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)于1984年建成的Nova激光装置^[3-4]。

第二代巨型高峰值功率激光装置是激光束数高达上百束、输出能量高达1 MJ以上的巨型科学装置,主要技术特征为采用方形光束、组合口径、多程放大以及较大的运行通量、模块化结构,在确保较高控制精度的前提下,追求较高的性能价格比,其代表装置是LLNL于2009年建成并投入运行的国家点火装置(National Ignition Facility,简称NIF)^[5-8]。

第三代巨型高峰值功率激光装置的设计目标为10 Hz重复运行频率,高于10%的能量转换效率,输出脉冲能量大于10 MJ,主要技术特征为低重复频率、高效率、全宽带等,其典型代表是美国LLNL完成的惯性聚变能源概念装置(LIFE)^[9]。

20世纪90年代初我国制定了ICF/HEDP总体发展战略规划,其中二代激光装置的研制包括两个阶段,首先研制输出能力为万焦耳级的二代高峰值功率激光原型装置(简称原型装置),掌握核心技术,积累工程经验,建立研发体系,再研制输出能力高达二十万焦耳级的主机装置(简称主机装置)。在国家高技术计划与国家相关重大专项支持下,中国工程物理研究院作为总体责任单位,组织国内数十家优秀单位持续攻关20余年,相继突破与掌握了二代巨型激光装置总体设计、总体集成以及一系列新技术、新工艺、新器件、新材料,系统突破与掌握了以“方形光束+组合口径+多程放大”为基本特征的二代高功率激光技术,独立自主地建立了世界上为数不多的二代巨型激光装置研发体系,实现了我国本领域由20年前“望尘莫及”到今天“并驾齐驱”的跨越发展。

同时,结合ICF/HEDP精密物理诊断和靶科学技术的进步,基于原型装置、主机装置相继建立了我国ICF/HEDP研究万焦耳级和二十万焦耳级的精密物理实验国家能力,支撑ICF/HEDP物理研究水平达到国际先进水平。同时,两台二代激光装置分别作为中国兆焦耳级聚变科学激光装置(简称超级科学装置)的科学样机和工程样机,全面奠定了中国独立自主地研发超级科学装置的科学技术与工程基础。

2 基本概况

2.1 概 述

巨型高峰值功率激光装置是服务于ICF/

HEDP的激光装置,其根本任务是为ICF/HEDP物理实验提供足够强度、对称、均匀、干净、可预测、可调控、可重复的超强激光辐照场。

按照ICF/HEDP精密物理实验要求,激光装置总体设计与研发紧密围绕三类基本问题展开,即如何得到高品质、高性价比的激光能量,如何安全、稳定地用好激光能量,以及如何在时域、空域和频域精密调控激光能量。

三个基本问题的求解又集中体现在装置总体层面的输出能力、光束质量、光束与脉冲综合控制能力和“三性”(即可靠性、可用性和可维护性)4类性能指标。因此,激光装置前期论证与总体设计往往根据ICF/HEDP物理实验的相关要求,分别研究、设置4类性能设计基线,以便“横向”贯穿整个子束光路、实现主体光学系统有机关联,“纵向”逐级分解设计功能与性能、实现装置各个层面的参数关联;同时4类性能设计基线也是装置工程研发阶段技术状态管理的基本依据。

激光装置的总体输出能力是由其增益能力与负载能力共同决定的,是装置总体设计首先考虑的重要问题。增益能力主要决定于装置主放大系统的总增益与增益损耗比(β/α ,其中 β 为主放大单元小信号增益系数, α 为系统损耗系数),在不同饱和和放大条件下, β/α 对装置输出能力和主放大单元储能抽取效率的影响是不同的;负载能力定义为激光装置常规设计运行点稳定运行发次,所谓“稳定”系指激光装置连续运行不检修、不更换关键光学元件。

输出光束质量是激光装置总体设计与研发应考虑的基本要素之一。光束质量主要包括光束近场分布和远场分布两个部分。其中,表征光束近场分布的技术指标包括光束轮廓与软化因子、强度调制度和通量对比度;描述光束远场分布的技术指标包括可聚焦功率(即主瓣强度分布)与旁瓣强度分布。

激光装置的光束与脉冲综合控制能力,主要包括光束指向性与打靶精度、脉冲时间整形能力、脉冲能量与功率平衡控制能力,以及靶面光强分布管控能力,是激光装置精度与可用性的集中体现。

“三性”是激光装置工程属性的集中体现,是牵引激光装置工程设计的主要因素,主要用打靶成功率、年打靶次数、发射间隔时间、装置可用度、无故障运行时间和装置寿命等性能参数表征。

激光装置一般由种子光源、预放、主放、靶场、光束管控、激光参数测量、计算机集成控制等系统组成,图1所示为激光装置一条子束的光路示意图。

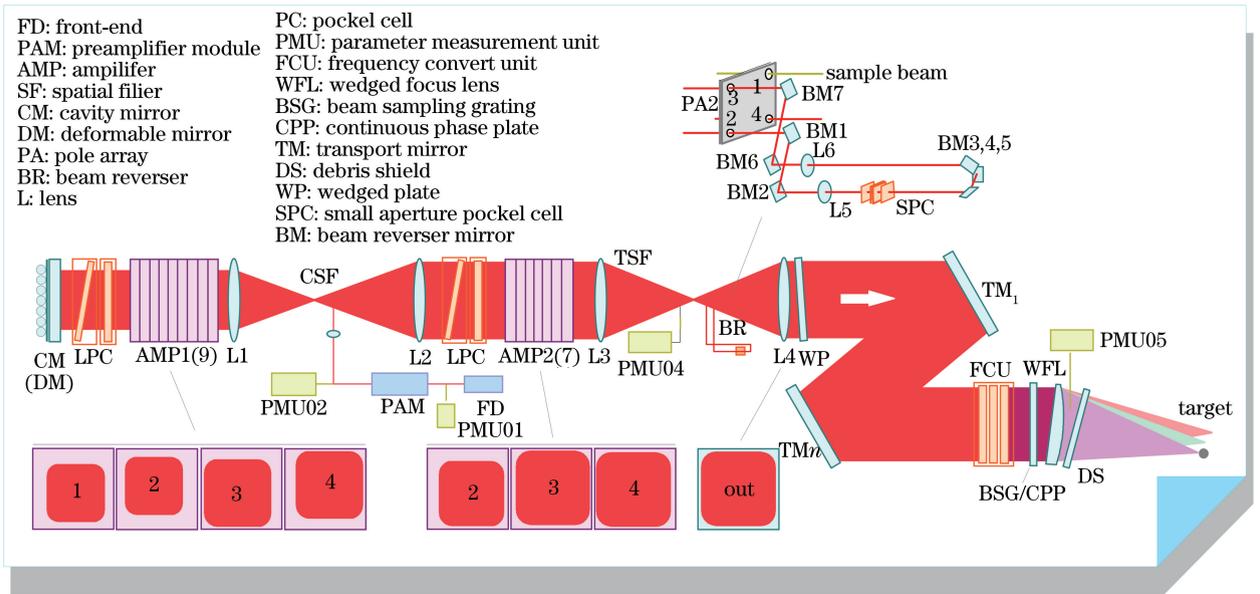


图 1 巨型高峰值功率激光装置一条子束的光路示意图

Fig. 1 Schematic of single beam of huge-scale peak power laser facility

前端是整个激光装置的“种子光源”，其主要功能是为后续系统提供 N 束已初步整形，并具有一定能量、带宽、高信噪比与高光束质量且精确同步的“种子”激光脉冲。

预放系统是连接前端与主放大系统的关键环节，其主要功能包括：1) 实现纳秒级预整形脉冲的能量预放大，将前端系统输出的预整形脉冲放大至驱动主放大系统所需要的焦耳量级；2) 光束/脉冲精确控制与补偿，实现预放模块与主放大系统的精确耦合；3) 为装置总体运行服务，为后续系统光路自动准直、波前校正、系统运行状态监测提供重复频率、能量为百兆焦耳量级的激光脉冲。

主放大系统和靶场系统是激光装置的两大主体工程。主放大系统的主要功能包括：1) 激光脉冲能量放大，即将前端-预放系统注入的 N 束激光脉冲由焦耳量级放大到数千/万焦耳 ($1\omega/3$ ns/束)；2) 光束控制与补偿，即利用相关光束控制与补偿技术的优化组合，确保系统输出光束质量(包括近场和远场分布)满足高效三倍频和靶面激光能量分布精确管控的基本要求。靶场系统是开展各类 ICF/HEDP 精密物理实验，实现高效、高品质束靶耦合的主要平台，其设计功能包括：1) 根据物理实验的基本要求，完成 N 束激光束的编组；2) 完成 N 束激光的传输引导、频率转换、谐波分离、聚焦定位、测量取样和靶面光强的精确控制，确保束靶耦合定位精度达到 $2''$ 以内。

激光参数测量系统是装置调制、运行的“眼睛”，

其设计功能包括：1) 在运行发射前期，快速完成 N 束激光准直和波前校正，确认装置技术状态；2) 在运行发射期间，完成各子束关键位置的激光参数常规测量以及数据采集、处理和储存，为物理实验与装置稳定运行提供准确可靠的测量数据；3) 在维护与维修期间，完成子束状态的精密诊断和各类光学元件损伤状态的在线检测，确保装置可靠性、可用性全面达标。

计算机集成控制系统作为装置的“神经控制网络”，其设计功能包括：1) 完成装置总体运行与各大系统的精确同步(即建立装置各子束脉冲的时间基准)和实时控制；2) 完成激光参数与系统工作参数的采集、处理、传输和管理；3) 完成装置与实验室环境状态的实时监测，同时提供以上各部分功能的集中控制与管理，实现对全装置调试、运行、维护的指挥、协调和管理。

激光装置的设计、研制与运行，还必须考虑通用支撑系统，包括结构工程、真空工程、能源工程、洁净工程、二次布管工程和安全防护工程，为整个装置工程建设、运行与维护提供必要的技术与工艺支撑。

因此，激光装置的设计、研制、运行与维护过程中，必须解决一系列科学、技术与工程问题，图 2 所示为巨型高峰值功率激光装置科学技术研究与工程设计体系示意图。

2.2 物理层面的基本问题

激光装置总体设计与研发的物理基础是脉冲激光抽运与放大动力学、脉冲激光传输动力学和激光光学元件损伤动力学。三大动力学既相互关联又相

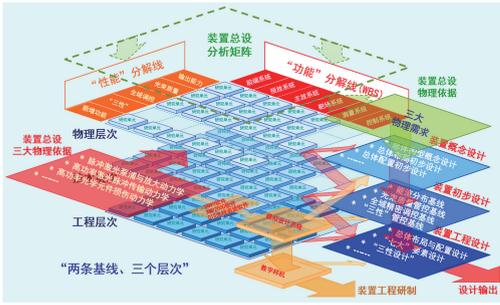


图2 巨型高峰值功率激光装置科学技术研究与工程设计体系示意图

Fig. 2 Schematic of science and technology researches and engineering design system for huge-scale peak power laser facility

对独立。共同的学科基础为激光原理、物理光学、非线性光学、应用光学、工程光学、光电子技术、凝聚态物理、材料科学等。

脉冲激光抽运与放大动力学^[10-15]主要研究高功率激光脉冲放大过程中脉冲与激活介质反转粒子的相互作用,以及激活介质粒子反转数动态变化的机理、规律与主要影响因素;这一动力学过程决定了系统增益能力与储能抽取效率,奠定了激光装置增益能力与能流分布设计的科学基础。

脉冲激光传输动力学^[16-22]主要研究高峰值功率激光脉冲/光束传输与放大过程中线性与各类非线性效应,激光光束/光场时域、空域与频域分布特性,以及光场时域、空域与频域相互作用现象与基本规律,其奠定了激光装置输出光束质量和激光光束/脉冲“全域”综合管控的科学基础。

激光光学元件损伤动力学^[23-25]主要研究强激光光场、光学材料与元件表面和各类“缺陷”三者相互作用下,光学元件各类损伤现象以及产生、发展与控制的主要机理与规律,其奠定了激光装置总体负载能力设计的科学基础,是各类光学元件“缺陷”管控的理论依据。所谓“缺陷”系指任何可能吸收激光能量或引入光场相位/振幅调制,并导致光学元件出现不可逆转的永久性损伤的各类“扰动源”。

对三大动力学问题的深化研究,将有助于确定预期条件下激光装置总体设计的相关受限条件。脉冲激光抽运与放大动力学研究提供了深度饱和放大条件下(即 $F_L \geq 3F_s$,其中 F_L 是设计的激光通量, F_s 是增益介质的饱和通量)主放大系统的增益受限条件,即增益损耗比。脉冲激光传输动力学研究分别给出了高功率激光束在线性和非线性传输放大区域的受限条件:前者主要涉及如何控制衍射效应,可

用菲涅耳数表征;后者主要涉及自聚焦效应,包括表征小尺度自聚焦效应的级间B积分(ΔB)和表征高功率激光束非线性相移的全孔径自聚焦效应(ΣB)。激光光学元件损伤动力学研究给出了激光装置各类光学元件的损伤要求,包括损伤阈值、损伤增长速率和元件洁净管控的基本要求。

2.3 技术层面的基本问题

在技术层面涉及的关键技术研发或攻关,同样也是根据装置功能与性能要求,围绕上述三类基本问题展开的。

第一类基本问题,即获得高品质、高性价比的激光能量,主要涉及种子源脉冲产生技术、放大器技术、级间隔离技术、能源技术、热管理技术、高效频率转换技术,以及相关的精密测量方法与技术。

第二类基本问题,即安全、稳定地用好激光能量,主要涉及有效管控各类线性和非线性效应。前者如像传递技术、光束近场整形技术、主动相位补偿技术;后者如空间滤波技术,以及相关的精密测量方法与技术。

第三类基本问题,即在时域、空域和频域精密调控脉冲激光能量,主要涉及各类精密管控技术,以及相关精密测量方法与技术。

同时,作为一类巨型光学科学工程,也必须解决一系列工程技术与工艺,如装置总体集成控制技术、精密装校技术、洁净环境技术等。

2.4 工程层面的基本问题

激光装置研发涉及总设、总成和总控三类总体性问题^[26],作为具有典型意义的巨型光学科学工程,激光装置研发在技术层面是以高功率激光束为核心展开相关工作的,而在工程层面则是以各类高品质、大口径光学元件为核心,并以贯穿整个装置总体设计、工程研发、安装集成、运行维护各个阶段的光、机、电、测、控、装、防等方面的相关工程问题展开的。

激光装置的“光”主要包括光路/光学设计、光束排布和光束/光场管控三大研发内容。其中,光路/光学设计包括主光路(或称“子束”光路)、测量取样光路和“接口”三类光路,以及关键单元的光学设计;光束排布主要涉及主放大系统和靶场系统光路设计;光束/光场管控包括按ICF/HEDP精密物理实验以及装置稳定、安全运行的相关要求,实现光束指向性以及脉冲空域、时域、频域和偏振等方面的精密调控。

激光装置的“电”涉及四大研发内容:1)强电系统研发与布局;2)弱电系统研发与布局;3)研究解决

整个激光装置电磁兼容性与防护的关键问题;4)建立整个装置的时域基准。

激光装置的“机”涉及两大任务定位,首先是三个“J”的问题:第一个“J”为“精”,体现了巨型激光装置结构的高精度要求;第二个“J”为“静”,取稳定之意,体现了巨型激光工程结构稳定性方面的要求;第三个“J”为“净”,体现了巨型激光装置对洁净度的基本要求。其次,研究建立整个装置空域基准,为整个装置工程研发与运维期间数千件大口径光学元件的快速、准确定位提供必须的空间基准、基准建立、基准传递、基准检测条件。

3 原型装置

3.1 总体概况

原型装置^[27-29]是亚洲第一台采用二代高功率激光技术研制成功的激光装置,其任务定位首先是全面演示、综合考核二代高功率激光装置总体技术路线,包括总体技术方案、关键技术与光学元器件;其次,建成万焦耳级物理实验装置,服务于ICF/HEDP基础物理实验。该装置是国内首台可输出8束口径为300 mm×300 mm的激光、三倍频

(351 nm)脉冲能量高达万焦耳、可“8束对打”与“8束并打”的激光装置。图3为原型装置的总体设计效果示意图,图4为原型装置激光大厅与靶场实验室的全景照片。原型装置于1995年底启动概念研究,历经概念设计、可行性设计、工程设计、工程研制、外协研制、安装集成、集成实验与试运行打靶等阶段,于2007年11月全面实现设计功能、性能达标,并正式投入运行,历时12年。

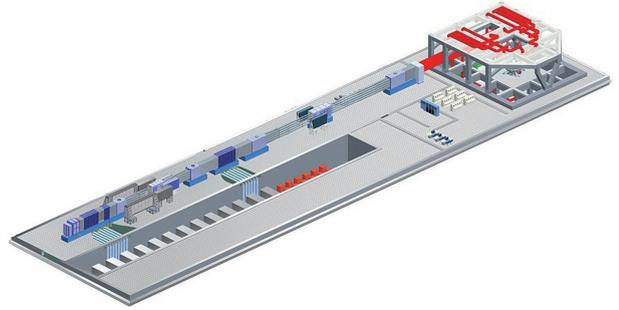


图3 中国二代万焦耳级高功率原型装置总体设计与研发效果示意图

Fig. 3 Schematic of general design and development effects of Chinese second generation ten-thousand-joule high peak power prototype facility

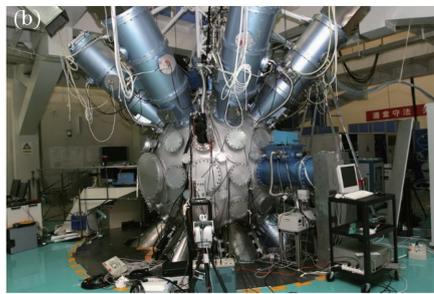


图4 中国二代万焦耳级高功率原型装置。(a)激光大厅;(b)靶场实验室

Fig. 4 Panoramic photos of Chinese second generation ten-thousand-joule high peak power prototype facility.

(a) Laser hall; (b) target lab

3.2 主要性能

原型装置脉冲宽度优化设计运行点为1 ns,属于功率型激光系统,即整个装置总体设计与研发将克服功率受限条件作为首要考虑的核心要素,装置最终实现的性能指标如下。

- 1) 激光束数:8束;
- 2) 光束口径:290 mm×290 mm(零强度束宽);
- 3) 激光波长:0.351 μm(3ω);
- 4) 输出能量:1.2 kJ/1 ns/0.351 μm/束, 1.8 kJ/3 ns/0.351 μm/束;
- 5) 脉冲波形:1.0~3.0 ns(平顶脉冲,并具有一

定的整形能力);

- 6) 光束发散角:70 μrad(包含95%脉冲能量);
- 7) 打靶方式:8束对打,8束并打;
- 8) 打靶精度:30 μm(RMS);
- 9) 能量分散度:10%(RMS)。

与此前研发的高功率激光装置相比,原型装置常规运行的三倍频负载能力提高近一倍,总体能量转换效率提高近三倍,脉冲时间波形控制能力和束间能量平衡控制水平都有较大幅度的提高,“8束对打”和“8束并打”打靶模式,更是满足了ICF/HEDP基础物理实验对不同注入方式的要求。

原型装置自研制成功并投入运行十余年来,平

均年出束打靶数百发次,以大于 85% 的打靶成功率服务于 ICF/HEDP 基础物理实验;同时,结合先进高功率激光技术研发或验证,持续提高了自身的性能指标,使装置始终保持良好的技术状态,成为我国万焦耳级 ICF/HEDP 基础物理实验的主要实验装置。

3.3 主要技术特征与进步

原型装置的成功研制,标志着我国全面掌握了以“方形光束+组合口径+多程放大”为主要技术特征的二代激光装置的核心技术,集中体现在以下三个方面:

1) 原型装置总体技术方案最具特色的是独立提出“外置式 U 型光束+90°角反射”光束反转设计构型,实现了高功率激光脉冲在四程放大系统中反转传输、旋转隔离、口径匹配和波前补偿等多种功能,简化了主放大系统结构,降低了系统总体损耗;并利用其光束自补偿功能,有效缓解了大口径光学元件面形精度的制造与检测压力,同时为后续巨型激光装置的研发奠定了坚实的技术基础^[30]。

2) 成功研制与美国、法国等发达国家功能相同、性能相当且具有自主知识产权的巨型激光装置设计软件,包括光传输设计软件(SG99)、激光放大器设计软件(Amp2000)和光线追迹软件等,为后续装置的设计与研发提供了不可或缺的设计工具。

3) 创造了中国激光装置研发历程中若干“首次”或“独创性”研究成果,全面奠定了后续激光装置设计、研制、运维的科学与技术基础,主要包括:

(1) 首次突破并掌握了全固化、全光纤种子光源的核心技术,即解决了多年来一直困扰巨型激光装置多束稳定分光的技术难题,同时研究发展了“高速电子学实现脉冲时间整形技术”,实现了脉冲时域的精确管控和纳秒级激光脉冲高对比度的任意整形。

(2) 独立提出基于“液晶光阀”实现激光束空域分布精确管控的新方法,为巨型激光装置激光光束空间特性精密控制提供了新的技术途径。

(3) 独创“单脉冲与并联驱动”技术,成功研制高性能、高可靠性和多单元应用的等离子体电光开关。

(4) 首次结合四程放大系统光路特点,提出“总体设计、分段控制、串并互动、柔性对接”设计与控制方法;并基于“光束远、近场成像诊断+并行数据处理”技术,成功研制高精度、高效率光路主动准直

系统。

(5) 首次提出“多光束时空编码并行引导+靶面共轭式直接诊断”设计思路,实现了靶场系统甚多束激光快速精确引导和基准物理实验靶的精密定位,精度达到 2"。

(6) 首次提出利用“六自由度机器人”的基本原理,成功研制六维、高精度、多功能靶支撑单元组件,其主要性能达到国际先进水平。

(7) 首次采用“凹面镜成像取样诊断+纹影法”技术路线,成功研制高功率激光脉冲远场实时诊断系统,该系统具有高衰减率、小畸变、高精度等基本特点,实现了高功率激光脉冲实时(在线)诊断,为原型装置光传输与光束质量的集成实验研究提供了新的精密诊断工具。

(8) 首次基于自动控制及测量技术、网络技术和分布式控制软件技术,采用分层分布式及模块化的控制系统体系架构、基于软件总线的系统设计方案,自底向上通过逐层、逐系统的分步集成,形成原型装置正常打靶运行的集中控制及管理平台,实现了巨型激光装置全装置、全流程地集中指挥控制和管理。

4 主机装置

4.1 基本概况

于 2015 年建成投入运行的主机装置^[31-32]既代表了中国目前高峰值功率激光技术与工程发展的最高水平,具有里程碑的意义,同时也是中国巨型光学工程的典型装置之一,标志着我国已全面掌握二代巨型激光装置总设、总成、总控等核心技术。整个装置的总体规模与主要性能仅次于美国 LLNL 的 NIF 装置,其任务定位包括:1) 建立二十万焦耳级 ICF/HEDP 物理实验能力,支撑 ICF/HEDP 物理实验综合能力升级换代,以及国防基础科研与聚变科学前期物理实验研究;2) 重点解决二代巨型激光装置的工程问题,全面演示、综合考核装置总设、总成、总控工程方案与体系能力。

主机装置脉冲宽度优化设计运行点为 3 ns,属于功率/能量兼容性高功率激光系统。装置仍采用 4×2 组束模式,可输出 48 束口径为 400 mm×400 mm 的高能激光束,三倍频激光输出能力达到 200 kJ/3 ns,目前已成为我国 ICF/HEDP 物理实验的主力装置。图 5 为主机装置总体设计示意图,图 6 为主机装置靶场实验室全景照片。

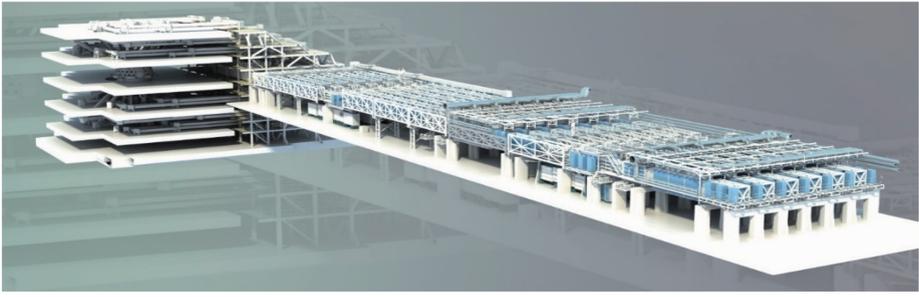


图 5 中国二代巨型二十万焦耳级主机装置总体设计与研发效果示意图

Fig. 5 Schematic of general design and development effects of Chinese second generation two-hundred-thousand-joule high power host facility

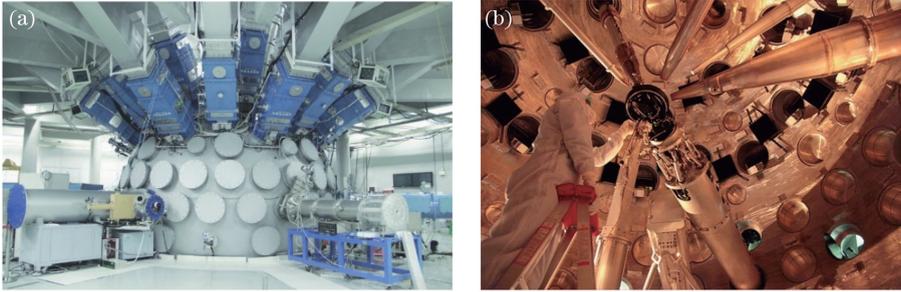


图 6 中国二代巨型二十万焦耳级主机装置靶场实验区照片。(a)靶场外部照片;(b)真空靶室内部照片

Fig. 6 Experimental area photos of Chinese second generation two-hundred-thousand-joule high power host facility.

(a) Photograph outside target chamber; (b) photograph inside vacuum target chamber

4.2 主要性能

与原型装置相比,主机装置的光束口径由 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 扩大到 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$,激光束数由 8 束(1 套 4×2 束组)增加到 48 束(6 套 4×2 束组),且功能得到有效扩展、性能得到显著提升,主要体现在以下方面:

1) 装置实验打靶能力大幅度提升,是目前国际上第二台可实现双孔两环注入和六孔单环注入、满足多类 ICF/HEDP 物理实验打靶要求的巨型激光装置。

2) 基本解决了三倍频光学元件“亚线”(设计运行通量为 3 J/cm^2)运行条件下紫外光学元件三倍频损伤问题,三倍频激光运行能力显著提升,通量提升一倍,即由 1.5 J/cm^2 提升至 3.0 J/cm^2 。

3) 国内相关单位成功研制的 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 口径自适应变形镜(AO),可替代小口径 AO;同时研究与发展了基于“双程”补偿模型的波前控制技术,增强了整个子束全口径波前补偿能力。

4) 解决了小宽带运行条件下幅频效应(FM-to-AM 效应),首次在国内采用“连续相位板(CPP)+光谱角扫描(SSD)+偏振匀滑(PS)”束平滑技术路线,提升靶面光强分布管控能力,满足了 ICF/HEDP 基础物理实验基本要求。

5) 采用分区并行引导与瞄准定位技术,使 48 束激光的靶瞄准定位时间和精度与原型装置相当,即 48 束激光,打靶精度为 $2''/30\text{ min}$ 。

6) 研究建立了甚多束脉冲功率平衡模型以及精密管控方法,实现了高对比度整形脉冲的功率平衡达到 10% 的设计要求。

7) 提出“高精度数据流选单”控制方法,研究建立主机装置高精度时域基准,项目实施解决了大时间跨度、较广空域分布、强电磁干扰环境下数千路高精度同步信号产生、传输与恢复的技术难题,实现了近百路皮秒级、数百路纳秒和上千路微秒触发信号以及数十路 GHz 精密锁相时钟信号的高精度、皮秒级抖动的稳定输出,脉冲之间同步抖动由原型装置的 100 ps 级降低至数 ps 级,达到世界先进水平。

8) 主机装置验收投入运行以来,运行效率与成功率已全面达到设计要求,年运行 300 余次,运行成功率达到 80%。

4.3 主要技术特征与进步

系统地掌握了以“三大物理基础(即激光脉冲抽运与放大动力学、传输动力学和损伤动力学)、三个设计阶段(即可行性研究、初步设计和工程设计)、四大设计基线(即输出能力、光束质量、精密调控和三性管控)、七大设计要素(即光、机、电、控、测、装、

防)”为主要特征的巨型激光装置总体设计方法与技术,实现了巨型激光装置总体设计与验证的系统化和规范化。

系统地掌握了以“三大阶段(即加工制造、安装集成和联机调试)、三类基线(即安装精度线、环境洁净线和集成效率线)、三性验证(即工程设计符合性、加工制造匹配性和工程实施保障性)、三类评估(即集成评估、性能评估和运行评估)”为主要特征的巨型激光装置的总体集成方法与技术,基本实现了各类光学功能模块批量安装集成的流程化和规范化;坚持“以装代调”和“离线精密装校、在线精密复位”的工艺途径,全程单元组件/模块安装集成到位之后,通光之后光束进入准直传感器视场范围之内的设计目标;实现了三个月完成一套束组精密装校、安装集成、联机调试的设计目标,大大缩短了装置工程建设周期。

采用成组技术实现了巨型激光装置光机结构设计“元件标准化、单元模块化、系统阵列化、装置一体化”,构建了涵盖总体、系统、部(组)件、单元/模块和光学元(器)件5个层次的“模块化”结构框架和性能指标体系,奠定有效提升装置工程实施效率和装置总体性价比的工程基础。

系统地掌握了巨型激光装置三大主体结构(真空靶室、靶区编组站和激光大厅束组)的设计、验证、制造、安装和调试等关键技术与工艺。激光大厅首次采用“墙/桥/厢+高架式网络结构”,解决了布局紧凑与安装集成的空间受限问题;靶场大厅采用“柔性阻力支撑”模式,解决了直径近6 m的真空靶室的“高塔结构”引入的高稳定性问题;真空靶室加工与安装精度、形变量小于1 cm,气密性一次性调试成功;采用“网架”设计的靶场编组站,稳定确保了48束激光(共计250件大口径反射型光学元件)打靶精度优于 $2''$ 的设计要求。

提出了巨型激光装置洁净工程的基本概念并制定了“全程闭环、动态实现、重点控制、分级保障”的总体实施策略,以装置常规运行条件下数千件大口径光学元件(几何尺寸对角线超过60 cm)和上万件小口径光学元件(几何尺寸对角线小于20 cm)表面洁净度稳定达标为核心,构建了“三个层次、四大环节”为特征,涵盖装置工程设计、工程制造、安装集成、运行维护全流程、规范的巨型激光装置洁净管控体系,支撑了主机装置总体集成“洁净”工艺基线实施,确保了主机装置输出能力全面达标。

持续突破或掌握了一批先进激光技术,如高精

度“种子光源”、高品质激光束的预放大、精密同步、辐射定标损伤检测、全光路精密波前校正、甚多束光路自动准直、自动化靶瞄准定位、计算机集中控制、高效谐波转换、靶面光强精密控制、“一捆准”精密安装、超精密光学加工等,并成功应用于主机装置工程建设,使其设计功能全面实现,运行性能显著提高。

5 发展展望

5.1 未来高峰值功率激光技术与工程发展趋势

展望未来强激光技术与应用趋势,已呈现出两类高度“融合”。应用层面,高峰值功率激光技术与高平均功率激光(又称高能激光)技术高度“融合”,聚变能激光(IFE)就是这一“融合”的典型代表之一;技术层面,以“波导器件”为基础的高功率高能光纤激光技术与以“块状器件”为基础的高功率高能块状激光技术高度“融合”,高功率高能波导激光有望成为这一“融合”的典型代表之一^[33]。

两大“融合”将有力地促进以高峰值功率、高平均功率和高重复频率(简称“三高”激光)为主要技术特征的新一代高功率激光技术与工程的发展^[34],强激光技术研发与应用进入大有作为、新的发展机遇期。

两台二代巨型高功率激光装置研发作为中国高功率激光技术与工程发展的一个重要历史阶段,其成功经验不单在科学技术层面将支撑未来“三高”激光的研发,更将在激光工程与装置设计理念、系统方法等方面提供不可或缺的宝贵经验,必将助推中国在新时代高功率激光技术与工程研发领域实现“领跑者”的梦想。

5.2 助推中国兆焦耳级聚变科学激光装置

超级科学装置是二代高峰值功率激光技术与工程“登峰造极”之作,总体规模达到巨型激光科学工程之最,性能指标全面挑战二代激光装置科学与技术极限。

第一个重大挑战是“子束”输出能力与负载能力,其核心是解决两个“跨线”问题,即基频光部分由主机装置浅度饱和放大区($F_{\omega} \sim F_s$,其中 F_{ω} 为基频光的运行通量, F_s 为主放大器的饱和通量)提升至深度饱和放大区($F_{\omega} \geq 3F_s$)所涉及的关键科学与技术问题;三倍频光部分运行通量 $F_{3\omega}$ 超过熔石英元件紫外损伤增长阈值($F_{3\omega} \geq 4 \text{ J/cm}^2$)。

第二个重大挑战是“集束”问题,是中国巨型激光装置研发尚未开垦的“处女地”,物理层面应解决集束“F数”、集束“束靶耦合”效率和非线性抑制有

效性等关键问题;技术层面将攻克集束光束指向性、引导与定位精度,以及集束空域、时域、频域、偏振精密调控的相关技术;工程层面将解决“开放式”终端光学系统(FOS)结构稳定性、集成/安装/调试工艺和维护工艺等关键问题。

第三个重大挑战是“全束”问题,即超级科学装置总设、总成、总控所涉及的可靠性、可维护性和可用性问题。

勿容置疑,超级科学装置总设、总成、总控将源于主机装置但又高于主机装置,两台二代巨型激光装置的成功研发,为我国独立自主地研发超级科学装置、实现人类梦想奠定了坚实的工程技术基础。

5.3 助推中国 EW 激光技术研发

自激光发明以来,不断提升单脉冲峰值功率就是人们一直追求的科学目标之一。啁啾脉冲放大自1985年被法国科学家提出以后,就迅速在聚变快点火、许多交叉前沿学科以及国防应用的牵引下迅速成为各科技强国关注的热点,多台皮秒和飞秒脉宽的拍瓦级超强激光装置已经建成或正在研制中。

研究表明,基于全 OPCPA 技术途径,原型装置作为抽运源,在解决多束抽运条件下相干合成、高信噪比管控、米量级口径高强度压缩等关键技术的基础上,有望支撑输出能力高达 200 PW 超强激光装置的研制,建立 HEDP 物理实验国家能力。在此基础上,进一步探索解决甚多束抽运的高效率“合成”问题,可利用主机装置作为抽运源,研发国际上首台输出能力高达 EW 的超强超短激光装置。

6 结束语

中国两台巨型激光装置由概念研究、方案论证、研制建造,历经 20 余年艰苦努力,实现了由“望尘莫及”到“并肩齐驱”的跨越发展,在国际上形成了中、美、法“三足鼎立、三分天下”的基本格局,为中国建造超级科学装置奠定了坚实的科学、技术与工程基础。同时,由国内数十个单位组成的研发团队,传承高功率激光技术与工程研发领域前辈们数十年形成的优良传统,在整个研发过程中所体现的全局意识、担当精神,民主意识、团队精神,系统意识、科学精神,创新意识、唯实精神,必将为未来年轻团队完成中国超级科学装置的工程建造以及实现聚变科学领域的中国梦提供宝贵的精神支撑。

参 考 文 献

[1] Zhang J. An overview of inertial confinement fusion

[J]. *Physics*, 1999, 28(3): 142-152.

张杰. 浅谈惯性约束核聚变[J]. *物理*, 1999, 28(3): 142-152.

[2] Fan D Y, He X T. Inertial confinement fusion energy and the laser driver[J]. *Exploration of Nature*, 1999, 18(67): 31-35.

范滇元, 贺贤土. 惯性约束聚变能源与激光驱动器[J]. *大自然探索*, 1999, 18(67): 31-35.

[3] Summers M A, Seppala L G, Williams J D. Nova activation and performance [R]. *Laser Program Annual Report*, Lawrence Livermore National Laboratory, 1984.

[4] Hunt J T, Speck D R. Present and future performance of the NOVA laser system[J]. *Optical Engineering*. 1989, 28(4): 461-468.

[5] Spaeth M L, Manes K R, Kalantar D H, *et al.* Description of the NIF laser[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 25-145.

[6] Paisner J A, Campbell E M, Hogan W J. The National Ignition Facility project [J]. *Fusion Technology*, 1994, 26(3): 755-766.

[7] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, *et al.* National ignition facility laser performance status [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16): 3276-3303.

[8] Moses E I, Wuest C R. The national ignition facility: status and plans for laser fusion and high-energy-density experimental studies [J]. *Fusion Science and Technology*, 2003, 43(3): 420-427.

[9] Caird J A, Agrawal V, Bayramian A, *et al.* Nd: glass laser design for laser ICF fission energy (LIFE) [J]. *Fusion Science and Technology*, 2009, 56(2): 607-617.

[10] Fan D Y, Yu W Y. High power multi-pass amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1980, 7(9): 1-6.

范滇元, 余文炎. 高功率多程放大器[J]. *中国激光*, 1980, 7(9): 1-6

[11] Lowdermilk W H, Murray J E. The multipass amplifier theory and numerical analysis[J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(5): 2436-2444.

[12] Jing F. Study on Nd-glass laser multi-pass amplification technology [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 1998.

景峰. 钕玻璃激光多程放大技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 1998.

[13] Wang T. Numerical simulation and optimization of multiple-way laser amplification system [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Machinery, Chinese Academy of Sciences, 1999.

王韬. 多程激光放大系统的数值模拟与优化设计[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 1999.

- [14] Wang W Y, Su J Q, Jing F, *et al.* Study on the models of multi-pass amplification of nanosecond light pulse[J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(s1): 424-426.
王文义, 粟敬钦, 景峰, 等. 纳秒级光脉冲多程放大物理模型研究 [J]. 中国激光, 2004, 31(s1): 424-426.
- [15] Zhang X M. Research on the overall and key technologies of broadband high power laser system [D]. Shanghai: Fudan University, 2006.
张小民. 宽带高功率激光系统总体与关键技术研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2006.
- [16] Fan D Y. The Fresnel number in terms of ray matrix elements[J]. Acta Optica Sinica, 1983, 3(4): 319-325.
范滇元. 用光线矩阵元表达的菲涅尔数[J]. 光学学报, 1983, 3(4): 319-325.
- [17] Bespalov V I, Talanov V I. Filamentary structure of light beams in nonlinear liquids[J]. Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, 1966, 3(12): 307-310
- [18] Liu L Q. Study on beam control of high power ultrashort pulse Ti:sapphire laser [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2005.
刘兰琴. 高功率超短脉冲钛宝石激光光束控制研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2005.
- [19] Sui Z. Beam holographic control in high power laser system [D]. Shanghai: Fudan University, 2006.
隋展. 高功率激光系统中的光束全息控制 [D]. 上海: 复旦大学, 2006.
- [20] Jing F, Zhang X M, Zhu Q H, *et al.* Study on characteristics of intense beam propagation in Nd³⁺ doped glass media [J]. High Power Laser & Particle Beams, 2000, 12(5): 551-555.
景峰, 张小民, 朱启华, 等. 钕玻璃介质中强激光束传输特性的初步研究 [J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(5): 551-555.
- [21] Wen S C, Fan D Y. Small-scale self-focusing of intense laser beams in the presence of vector effect [J]. Chinese Physics Letters, 2000, 17(10): 731-733.
- [22] Wen S C, Fan D Y. Filamentation of intense laser beam in high power laser and the B integral[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(11): 1331-1335.
文双春, 范滇元. 高功率激光放大器中光束的成丝和 B 积分 [J]. 光学学报, 2001, 21(11): 1331-1335.
- [23] di Nicola J M, Mennerat G, Widmayer G. FY17 NIF performance quad campaign: laser performance results and conclusions [R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2017.
- [24] Han J H, Fan W X, Li Y G, *et al.* Laser plasma effects on surface damage characteristics of silicon [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8206: 820616.
- [25] Zhang X M. Redisussion on global countermeasure and system method of CIF-3w 'cross-line' operation [R]. 2017 Academic Conference of Laser Fusion Research Centre, China Academy of Engineering Physics, 2017.
张小民. 再论 CIF-3w“跨线”运行总体应对策略与系统方法 [R]. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心 2017 年度学术报告会, 2017.
- [26] Moses E. National Ignition Facility comes to life [R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2003.
- [27] Xiao M Z, Wei X F, Zhang S K, *et al.* Concept of three-pass 4-f amplifying system for ICF driver [J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2633: 548-553.
- [28] Jing F, Zhang X. M, Zhu Q H, *et al.* Preliminary design of the main amplification stage of Technical Integration Line (TIL) for the SG-III laser facility [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3683: 164-169.
- [29] Yu H W, Zheng W G, Wang C C, *et al.* Design and performance of prototype laser amplifiers for technical-integration-line facility [J]. Optical Engineering, 42(3): 725-729.
- [30] Wei X F, Zheng W G, Zhang X M. Two breakthroughs in the development of high power solid-state laser technology in China [J]. Physics, 2018, 47(2): 73-83.
魏晓峰, 郑万国, 张小民. 中国高功率固体激光技术发展中的两次突破 [J]. 物理, 2018, 47(2): 73-83.
- [31] Zheng W G, Zhang X M, Wei X F, *et al.* Status of the SG-III solid-state laser facility [C]. Journal of Physics: Conference Series, 2008, 112: 032009.
- [32] Zheng W G, Wei X F, Zhu Q H, *et al.* SG-III laser facility has successfully achieved 60 TW/180 kJ ultraviolet laser (351 nm) output [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(1): 019901.
郑万国, 魏晓峰, 朱启华, 等. 神光-III 主机装置成功实现 60 TW/180 kJ 三倍频激光输出 [J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(1): 019901.
- [33] Li J, Jiang N, Ge L, *et al.* Research development and future prospect of optical waveguide laser ceramics [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 030001.
李江, 姜楠, 葛琳, 等. 光波导激光陶瓷的研究进展与展望 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 030001.
- [34] Siders C W, Haefner C. High-Power Lasers for Science and Society [R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2016.