

光电技术新成果及其应用

——中航工业制造所光电技术发展综述

New Achievement and Application of Optics and Electronics Technology

中航工业北京航空制造工程研究所 耿宏伟

中航工业北京航空制造工程研究所光电技术专业成立于 2002 年,借助制造所技术门类齐全、工艺技术手段先进和所拥有的高能束流加工技术国防重点实验室等技术优势,目前已经发展成为涵盖装备生产、型号研制和新技术预研的全流程专业化研发机构。10 多年来,在军方、政府和集团公司的支持下,光电技术专业团队围绕固体激光器及其工程化应用技术,先后承担了多项预先研究、产品开发和型号研制任务,在高功率固体激光器及激励源技术、光参量振荡(OPO)激光器技术、激光高效损伤技术、激光应用相关技术(包括储能供电、热管理技术、光束质量控制及相干合成技术)等方面取得了突破,形成了相应的系统级产品并得到应用。

中航工业北京航空制造工程研究所光电技术专业成立于 2002 年,借助制造所技术门类齐全、工艺技术手段先进和所拥有的高能束流加工技术国防重点实验室等技术优势,目前已经发展成为涵盖装备生产、型号研制和新技术预研的全流程专业化研发机构。10 多年来,在军方、政府和集团公司的支持下,光电技术专业团队围绕固体激光器及其工程化应用技术,先后承担了多项预先研究、产品开发和型号研制任务,在高功率固体激光器及激励源技术、光参量振荡(OPO)激光器技术、激光高效损伤技术、激光应用相关技术(包括储

能供电、热管理技术、光束质量控制及相干合成技术)等方面取得了突破,形成了相应的系统级产品并得到应用。

高功率固体激光器及激励源技术

激光器是通过激光工作物质将其他形式的能量转变为相干光的装置。按照产生激光的工作物质的不同可以分为气体激光器、固体激光器、半导体激光器、光纤激光器、化学激光器和自由电子激光器等。世界上出现的第一台红宝石激光器就是一台固体激光器。由于固体激光器

具有结构紧凑、牢固耐用、无污染、输出功率高等综合优势,在民用和军用领域都获得了大量应用。比较典型的应用包括激光加工(打孔、焊接、冲击强化等)、医疗、测距、雷达、制导、光电对抗等多个方向。随着固体激光器功率水平的不断提升,有望未来应用于定向能武器系统,使以动能武器、化学能武器为主的常规军事技术再添光能武器新军。

固体激光器是指以均匀掺入少量激活离子的光学晶体或光学玻璃作为工作物质的一类激光器。虽然可用于作为激光工作物质的晶体和玻璃有上百种,但工程化应用最多

的主要为红宝石、掺钕钇铝石榴石($\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$)和钕玻璃等。由于掺钕钇铝石榴石晶体具有导热性好,不仅可以单脉冲运转,还可以高重复频率或连续运转,输出功率高等突出优点获得了大量的应用。因此,我们的研究主要集中在采用掺钕钇铝石榴石晶体的固体激光器技术。

固体激光器普遍采用光激励方式,产生激励光的泵浦源种类很多,但应用最广的主要有两种,一种为惰性气体放电灯,一种为半导体二极管激光器。惰性气体放电灯泵浦是一种传统的泵浦方式,具有技术成熟、成本低等优势,虽然近年来面临二极管激光器泵浦方式的挑战,但在激光输出脉冲频率要求不高,对成本非常敏感的应用领域仍有广泛的市场。二极管激光器泵浦作为近年来异军突起的泵浦方式获得了快速的发展。与灯泵浦方式相比,二极管激光器泵浦由于输出光谱集中在激光物质的吸收带上,具有更高的光光转换效率,并且可靠性更高、寿命更长。但二极管激光器需要恒温工作,在极端气候条件或大功率应用条件下,热管理系统设计成为需要关注的主要问题,如果处理不好,为保证二极管激光器恒温工作可能需要消耗大量的能量,导致整个激光器系统的电光转换效率并不高。

对于固体激光器,振荡级+放大级的组合(MOPA)是获得高光束质量高功率激光的主要手段。通常的做法是使振荡级所输出的高光束质量、小功率的种子激光,通过放大模块,获得功率放大。但在工程应用中,随着输出功率的增大,会带来一系列难题:由于热透镜效应、热致双折射、泵浦与散热不均匀以及光学元件本身不均匀造成光束传输过程中产生波前畸变,在激光工作物质中产生自聚焦,从而造成光学元件的损伤;在泵浦能量比较大的情况下,激光工作物质的增益比较高,受激的自发辐

射(ASE)损耗储存能量,不能转化成激光输出;泵浦产生的热量需要通过冷却系统迅速带出散掉,否则,系统局部过热会导致元件损伤甚至系统崩溃。相对于连续或长脉冲激光放大系统,脉宽在10ns的Q开关脉冲放大由于峰值功率比较高,以上三种情况更加突出。

对于MOPA结构的激光器而言,本振的设计是整个系统成功的基础,它的任何光学畸变和不稳定性造成的扰动都会在后面的光学系统中放大,造成系统输出的变化,严重时会造成系统的崩溃,要求本振的输出为单横模、单纵模。另外,放大级采用包括光学相位共轭在内的多种光学畸变的补偿措施,设计合理的泵浦结构以减少热畸变,都是解决高功率MOPA结构固体激光器工程化应用的有效途径。

使用灯泵浦方式的激励源经过了多年的发展,技术非常成熟。随着二极管激光器(LD)泵浦方式的出现,为二极管供电的恒流源设计成为近年来发展的热点。为保证输出电流的稳定和相对较低的驱动电压,恒流源必须有较大的动态输出阻抗;由于LD内阻很小,工作电流较大,LD的稳定工作受工作电压、噪声、环境、温度、电网波动的影响较大,必须采取相应措施。

图1为恒流源的组成原理框图,采用直流稳压源作为LD激励源的总供电系统,当系统加电后,首先由精密基准源电路根据LD供电电

值要求产生一基准电压送入恒流控制电路作为电流控制基准信号,此时恒流电路处于待命状态。当收到LD工作指令后,电流控制基准信号将由缓开电路控制缓慢变为稳定电流,恒流放大电路同时缓变将电流放大到所需电流值。恒流源采取了多种措施抑制浪涌尖峰脉冲。

通过多年的技术积累,我们已经完全掌握了从灯泵到二极管泵浦的MOPA结构固体激光器的设计和制造技术,研制的激光器具有可靠性高、结构紧凑、可连续工作、光束质量好等突出特点。目前,可以批量生产重复频率从1Hz~200Hz,单脉冲能量从3J~10J,脉宽10ns的各种规格该类激光器。

为了进一步提高固体激光器的功率输出,棒状固体激光物质的热畸变将成为最大的阻碍因素。为了解决这一问题,人们想到了通过改变固体激光物质形状,增大表面积和体积之比,提高激光物质散热能力的方法。这就诞生了光纤激光器和板条激光器、盘片激光器等类型。当前,光纤激光器取得了巨大的技术进步,通过多个光纤激光器合束可以取得很高的功率输出,已被广泛的用于激光焊接、增材制造等领域。但在远距离激光能量投射方面,由于其光束质量较差,还有很多难题需要克服。单个板条激光器或盘片激光器通过MOPA结构放大,可以获得很大的激光功率输出,可以避免多激光合束带来的技术难题,具有良好的发展潜

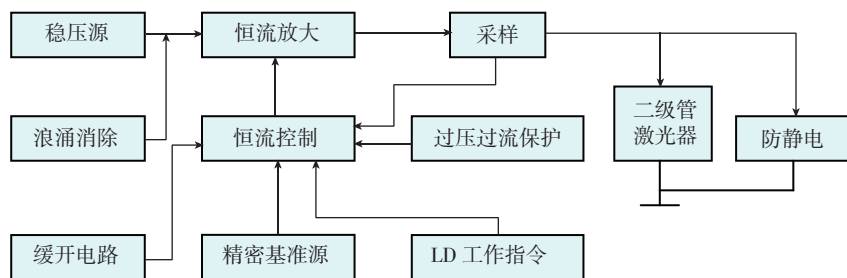


图1 恒流源组成原理框图

力,目前,我们正在积极开展这两类激光器的技术研究工作。

光参量振荡(OPO)激光器技术

以掺钕钇铝石榴石作为工作物质的激光器,其激光输出频率为 $1.064\mu\text{m}$,通过OPO技术可以获得其他频率的激光。比较有代表性的应用为人眼安全激光测距机及中红外激光器。

在非线性介质中的差频过程中,一个能量为 $h\nu_p$ 高频泵浦光子能产生两个低频光子,即信号波频率的光子($h\nu_s$)和空闲波频率的光子($h\nu_i$)。如将非线性晶体置于谐振腔中,用强的泵浦光照射,当增益超过损耗时,在腔内就可以建立起相当可观信号光和空闲光,这就是光参量振荡器,即OPO。

激光器技术在军事上的最早应用就是激光测距机, $1.064\mu\text{m}$ 的激光对人眼有较大的危害,可以导致人眼失明,因此,在很多应用场合不变使用。采用人眼安全波段的激光进行测距应用最多主要有两种方式,一种是采用钕玻璃为激光工作物质的激光器,另一种即为采用OPO技术的激光器。钕玻璃激光器具有体积小、结构简单等特点,但只能工作在较低重复频率。因此,在高重复频率的人眼安全测距机中,主要采用OPO技

术。

为了解决飞机试飞过程中,飞行轨迹的精确测量问题,我们成功开发了采用OPO技术的 $1.57\mu\text{m}$ 人眼安全二极管泵浦风冷激光测距机,结构外形如图2所示。

该测距机根据使用需求,采用了可变激光束散角、可变激光单脉冲能量和可变回波探测灵敏度控制技术,保证了对漫反射目标和合作目标的兼容测距,实现了飞机试飞过程中的稳定、连续的精确测距。具有高能量(60mJ)、高重频(50Hz)、连续工作时长(不小于 $10\text{min}/25\text{Hz}$)、测距精度高(0.5m)、测距范围宽($0.2\text{km}\sim 40\text{km}$ /合作目标)、风冷工作、重量轻(29kg)、环境适应能力强等突出特点。

中红外激光器是机载定向能红外对抗系统(DIRCM)的关键部件。中红外激光器工程应用最成熟的方法就是OPO技术。我们对OPO技术进行了大量的研究工作,首先,对晶体的频率转换技术进行了深入细致的研究。对不同厂家生产的晶体进行优选,对影响晶体转换效率的因素进行研究,开展了晶体的工作温度对输出激光波长的关系试验验证工作,并对晶体的损伤阈值进行测试,全面掌握OPO晶体的使用特性。

同时,由于泵浦光束耦合系统是

影响中红外激光输出效率的重要因素之一,因此通过反复试验研究,掌握了泵浦光束耦合系统优化设计方法,将本振输出的准连续激光进行聚集,得到优化的束腰光斑直径、光束发散角后,耦合进入非线性晶体的适当位置,使泵浦光场与中红外振荡光场在非线性晶体中有最大的空间耦合,得到了最佳的非线性转换效率。

其次,OPO腔型影响着大功率中红外激光输出,腔镜的镀膜参数、曲率半径和腔长都影响中红外激光的光束质量,并进一步影响着系统的干扰能力。因此,需要对OPO腔型进行认真仔细的优化设计,才能保证获得满足使用要求的中红外激光输出。

通过上述研究工作,我们已经开发出了可以完全满足使用要求的中红外激光器样机,该样机经过试验验证,表明其在输出能量、干扰效果、体积重量、工程化程度等方面均达到了较高水平,具备进行工程化应用的条件。

激光高效损伤技术

制造所长期从事激光加工方面的技术研究工作,对激光与物质相互作用机理有着深入的研究。随着激光技术向军事领域的渗透,研究激光的损伤技术,不但对如何使用激光高效损伤敌目标具有重要的指导意义,同时,对如何加固我方目标,防止被敌激光武器损伤也具有重要的参考价值。

激光对物质的破坏机理主要有3种:烧蚀效应、激波效应和辐射效应。

烧蚀效应:当激光照射到物体表面时,大量的热被表面吸收产生高温,在高温的状态下,物体表面汽化,在汽化的过程中表面材料以液滴或细颗粒的状态向外喷射,形成凹坑或穿孔而被破坏。

激波效应:在表面材料汽化向

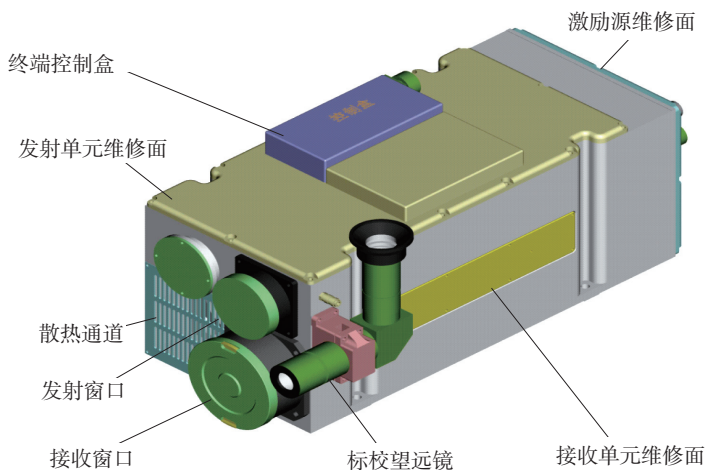


图2 人眼安全测距机

外喷射的过程中,会对目标形成一种极大的反冲作用,相当于对物体表面施加脉冲载荷的作用过程,在材料内部形成激波,激波被内表面发射后再产生反射,从而使目标产生断裂破坏。

辐射效应:目标表面因为汽化而形成等离子体,等离子体一方面对激光形成屏蔽作用,另一方面能够辐射紫外线甚至X射线,使内部元器件损坏,试验发现,这种紫外线和X射线比激光直接照射引起的破坏更有效。

从上述3种破坏机理可以看出,连续激光和脉冲激光,脉冲激光的重复频率及脉宽都会对损伤效率产生影响。例如,短脉冲激光具有更大的峰值功率,作用到物质表明能够形成更高的场强,有利于表面形成等离子体,但等离子体会对激光形成屏蔽作用,影响进一步的激光破坏。因此,开展不同模式激光对不同物质的损伤研究具有重要的意义。近年来,我们先后开展了大量对于雪崩探测器、CCD、PIN管以及航空材料的激光损伤试验,取得了大量第一手资料。

激光应用相关技术

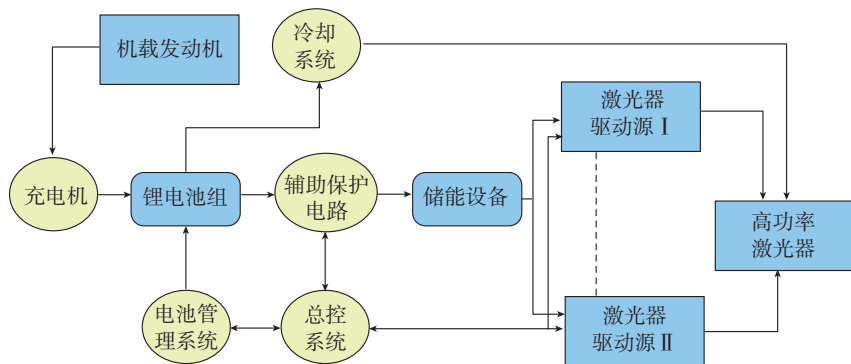


图3 储能供电试验原理框图

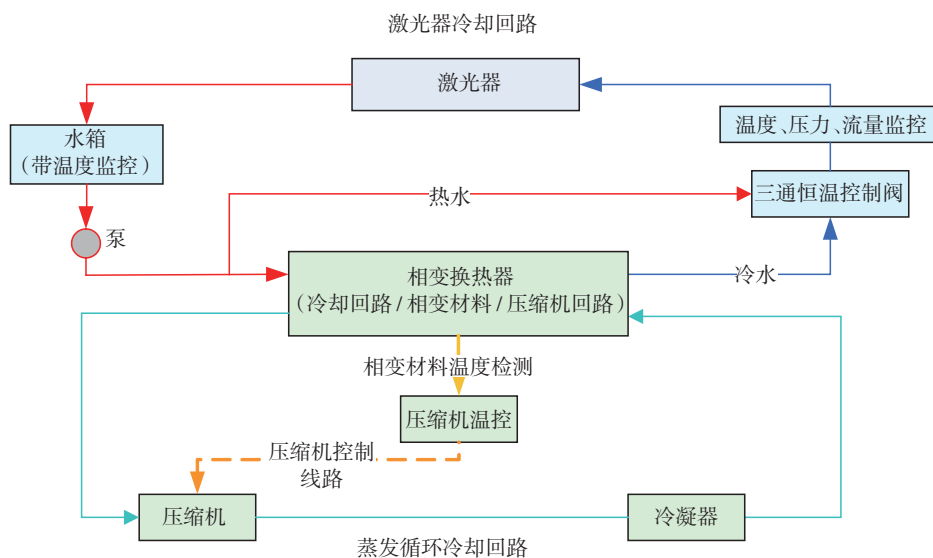


图4 热管理系统试验原理框图

在专注激光器技术研究的同时,我们还对激光应用的相互技术,包括储能供电、热管理技术、光束质量控制及相干合成等技术开展了研究工作。

大功率激光器大多为间断工作模式,工作时需要很大功率输入,间歇期几乎不消耗电能。在很多条件下,供电系统不能满足激光工作时瞬时功率需求,但可以满足长时平均功率需求。因此,需要采用储能供电的功率调蓄功能,解决供电系统和激光器系统间的不匹配问题。我们通过开展对不同蓄能供电方案的对比试验研究,积累了一定试验数据,目前正在进行更深入的研究,以期得到储

能供电的优化设计方法。图3为储能供电试验原理图。

固体激光器的能量转化效率较低,大部分输入电能量转化成了热能,如果不能将大量的热能及时导出,就会造成激光工作物质或其他光学元件的损伤,最终导致系统的崩溃。高效热管理技术是推动固体激光器向更高功率发展的重要因素。包括相变材料在内的多种热管理系统方案试验研究是我们的一项重要研究内容。图4为热管理系统试验方案原理框图。

光束质量控制是保证激光能量可以远距离集中投射到目标前提,相干合成技术可以将多束激光合成,并确保远距离投射到目标后具有最佳的作用效果。在这两项技术方面我们也开展了大量的研究工作,搭建了试验平台,并取得了可喜的研究进展。

光电技术研究室自成立以来,虽然取得了可喜的成绩,但仍处于艰难的成长期,面临着各种压力、机遇和挑战。我们期待和各界开展广泛的交流合作,共同开创美好的未来。

(责编 日午)