文章编号:1001-5078(2025)01-0102-09

光电技术与系统。

大功率激光直写设备光学系统分析与散热设计

胡兴涛^{1,3},田磊磊¹,童宝宏³,苗思忠¹,周 硕¹,李 凡¹,陈 堃²,王 儒¹ (1.安徽信息工程学院机械工程学院,安徽 芜湖 241000;2.安徽工程大学机械与汽车工程学院,安徽 芜湖 241000; 3.安徽工业大学机械工程学院,安徽 马鞍山 243032)

摘 要:本文针对一款大功率激光直写设备光学系统,采用了数值模拟与试验相结合的方法, 并设计了一款镜筒的散热结构。利用有限元分析软件对光学系统结构进行了热分析与应力应 变分析,分析结果显示:光学系统激光功率为 100 W,SUS304 和 AL6061 材质的镜筒表面温度 最高位置都集中在棱镜盒附近区域,最高温度达 59.016 ℃,整体温度均匀性和散热性能较差; AL6061 材质光学镜筒棱镜盒附近区域存在较大的应力,结构性能较差。总结光学系统散热设 计的一般原则,采用被动和主动相结合的散热设计,并进行了试验验证,试验结果表明:在散热 系统正常工作时,系统整体温差为 0.99 ℃,达到了温度均匀性指标要求;DMD 标定误差小于 15 μm 且中心位置多向同一方向漂移,满足误差小于20 μm 的技术指标要求,有利于系统曝光 时图像拼接,验证了散热设计的有效性。

关键词:大功率激光直写设备;光学系统;热分析;应力应变分析;散热设计;试验验证 中图分类号:TN365 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2025.01.016

Optical system analysis and heat dissipation design of high-power laser direct writing equipment

HU Xing-tao^{1,3}, TIAN Lei-lei¹, TONG Bao-hong³, MIAO Si-zhong¹, ZHOU Shuo¹, LI Fan¹, CHEN Kun², WANG Ru¹

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui Institute of Information Technology, Wuhu 241000, China;

2. School of Mechanical And Automotive Engineering, Anhui Polytechaic University, Wuhu 241000, China;

3. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract: The method of combining numerical simulation and experiment is adopted for the optical system of a highpower direct writing device, and the heat dissipation structure of a lens barrel is designed. The thermal analysis and stress-strain analysis of the structure of the optical system were carried out by finite element analysis software, and the analysis results showed that the laser power of the optical system was 100 W, and the highest surface temperature of the lens barrel made of SUS304 and AL6061 was concentrated in the area near the prism box, with a maximum temperature of 59. 016 °C , and the overall temperature uniformity and heat dissipation performance were poor. The test results show that when the heat dissipation system is working normally, the overall temperature difference of the system is only 0. 99 °C , which meets the requirements of temperature uniformity, and the DMD calibration error is less than 15 μ m and the center position drifts in the same direction, which meets the technical index requirements of less than

基金项目:安徽省高等学校自然科学研究项目(No. KJ2021A1205;No. KJ2021ZD0144);安徽工程大学科研启动基金项目 (No. S022022113)资助。

作者简介:胡兴涛(1997-),男,硕士研究生,助教,研究方向为直写光刻设备机械数字化设计与分析。E-mail:xthu5@if-lytek.com

通讯作者:陈 堃(1988 -),男,博士研究生,讲师,研究方向为现代机械设计理论与方法。E-mail:535630207@qq.com **收稿日期:**2024-09-02;**修订日期:**2024-11-13

 $20~\mu m$, which is conducive to the image stitching when the system is exposed, and verifies the effectiveness of the heat dissipation design.

Keywords: high-power direct writing equipment; optical system; thermal analysis; stress-strain analysis; heat dissipation design; experimental verification

1 引 言

大功率激光直写设备光学系统对于实现高质 量、高速度、高精度的激光打印至关重要。该系统一 般应用于工业加工、医疗设备、科研实验等多个领 域,特别是在高精度图形加工、精密制造等方面有着 不可替代的作用^[1-4]。大功率激光在加工过程中会 产生大量热量,导致光学系统产生剧烈温升,容易造 成局部温度过高,影响光学系统整体的温度均匀性, 严重时会对内部镜片造成破坏^[5]。为确保光学系 统能够正常曝光运行,减小温度及热应力对成像质 量的不良效应,需要通过合理的散热设计来解决光 学系统散热问题^[6]。

光学系统曝光产生热量,高温区域集中于数 字微镜(Digital Micromirror Devices,DMD)和棱镜 盒,对以上两处高温区域进行降温处理是散热设 计的主要内容^[8-9]。常见的光学系统散热方法主 要有主动散热和被动散热两种,被动散热方式具 有设计简单可靠性强等优点^[11-12]。但对大功率 激光直写设备光学系统散热效果有限,需要结合 其他散热方法来提高散热效果,而主动散热方式 通常配合温度控制装置,可以达到温度可控的 效果^[13]。

2 光学系统构成及其工作原理

本文大功率激光直写设备光学系统结构较为复 杂,主要包括光纤、照明圆筒、DMD模块、棱镜盒、连 接外筒以及倍率镜筒,主要组成如图1所示。



(Laser Direct Imaging,LDI)^[14-16]。半导体激光器接 收上位机输入的曝光程序后,通过光纤传递光束至 照明系统,照明系统对光束进行增宽和均匀化处理, 使其经过竖向照明转接箱及棱镜以一定形式照射在 DMD 上,DMD 控制微镜单元翻转和开合将目标图 形反射出去,光束经过透镜投影至工件平台实现曝 光成像目的^[17-18]。



3 光学系统结构性能分析

3.1 热固耦合分析

光学系统热固耦合分析是利用有限元软件平 台热力学模块和结构力学模块的单向耦合,首先 需要确定镜筒、镜片和其他零件的材料参数,再分 析光学系统的热源边界,包括外部环境温度和热 通量等,在热力学分析中设置边界条件,计算出光 学系统整体温度分布,将光学系统整体温度场导 入结构分析模型,并根据实际装配条件施加合适 的约束进行热应力应变计算。光学系统结构包含 镜片和镜筒及其附件都通过热传导、热对流及热 辐射方式进行能量传递。100 W 工况下光学系统 结构内部热源温差为十几度,可以忽略热辐射作 用,主要考虑光学镜头表面与内部温度的热传导 和热对流。

3.1.1 热固耦合仿真模型建立

在保证热力学模型计算精度的前提下,为提高 网格划分质量,简化过程中将光学系统分为镜筒和 DMD 模块两部分。其中对镜筒部分倒角、孔以及槽 进行简化处理,清除 DMD 模块中水管、载板以及垫 板部分特征。光学系统简化后的物理模型如图 3 所示。对简化后的光学系统物理模型进行网格划分, 有限元网格模型如图 4 所示。整体采用四面体网格 划分方法,得到的光学系统网格模型包含2 136 532 单元,共432 804个节点。以单元质量为网格度量标 准,最小0.18,最大为1,平均质量为0.79,实际网格 大部分单元质量接近于1,网格质量较好,满足计算 要求。



图 3 热固耦合物理模型 Fig. 3 Physical model of thermo-solid interaction



图 4 有限元网格模型 Fig. 4 Finite element mesh model

3.1.2 材料参数设定

光学镜组材料为普通玻璃,自研 DMD 载板为 印刷电路层压板,具体相关材料参数如表1所示。 光学系统结构相关材料参数表中部分材料系数未作 具体展示,如热膨胀系数等有关温度的函数,由于离 线测试现场处于光学试验室,有大型温控系统控温, 使得整个光学系统离线测试过程中,室温波动较小。 因此,作为近似,在有限元结构参数设置中热膨胀系 数近似取 22℃的常数值。

	表	1	材料	斗参数	-
Tab.	1	Ma	terial	paran	ieters

			1	
结构名称	材料名称	密度 p/(kg・m ⁻³)	热传导系数 λ/(W・m ⁻¹ ・k ⁻¹)	比热容 C/(J・kg ⁻¹ ・K ⁻¹)
自研 DMD 载板	PCB	1850	17	1500
DMD 芯片	Al	2719	202. 4	871
DMD 芯片外壳	Al ₂ O ₃	3900	30	1050
DMD 垫板及固定件	Al alloy	2713	155	915
光学镜筒1	SUS304	7900	16. 3	423
光学镜筒2	AL6061	2703	167	885
光学镜片	Glass	2500	1.4	750

3.1.3 热源边界设置

根据光学系统温度测试结果显示,在镜头到达稳态的过程中,光学镜组与镜筒接触面的温度变化维持在22℃左右,因此,为确保模拟结果的准确性,本文研究在22℃时,对镜筒等支撑结构与光学镜组进行接触约束,并将其设定为恒温边界条件,以进行有限元求解。光学系统曝光激光功率为100W,镜片透过率一般在99%,忽略入射角度不同造成的吸收率差异,假设平均1%的能量全被镜片入射表面膜层吸收。忽略镜片入射表面膜层吸收的少部分能量向外辐射这一作用,考虑大部分热量传导给镜片。考虑镜片入射面与透过面的热交换作用为定流边界条件。光学系统中镜筒腔体内气体较为恒温、恒压,会与镜片表面发生对流换热

作用。根据气固表面换热系数,本文取换热系数为5 W/(m²·K)。考虑大功率激光照射光学系统带来的 热变形,故利用光学系统热力学模型仿真计算得出温 度分布情况,通过热固单项耦合的形式将温度载荷施 加到镜头的全体,设定连接外筒处的圆孔为固定约束, 镜片与镜筒接触面定义为接触约束,以模拟接触面的 相互作用。

3.2 光学镜筒温度分布

当大功率激光长时间照射光学系统时,光学镜筒 以及镜片会产生剧烈的温升和应力可能会导致玻璃发 生损伤,从而影响光束的传输质量和最终的成像质量, 故对光学镜筒以及镜片建立强激光照射下的热力学模 型并进行数值模拟计算,光学镜筒的具体温度分布如



图5所示。



在相同激光功率的照射下,不同材质的光学镜筒 表面温度最高位置都集中在棱镜盒、竖向转向箱以及 连接外筒上部,最低温度都分布在复眼镜筒和连接外 筒下部。相比 SUS304 材质光学镜筒, AL6061 材质光 学镜筒在棱镜盒附近的温度较低,而在其他位置的温 度较高。仿真结果表明:棱镜盒处靠近热源,AL6061 材 质具有较好的热传导性,光学镜筒热量传导较快,能够 快速的将热量从棱镜盒附近传导至整个光学镜筒。为 更加详细的分析光学镜筒表面温度,在光学镜筒表面 取8个温度探针进行温度数据统计(与试验监测点位 置相同),具体探针点位的温度仿真数据如图6所示。 在四种不同工况下,光学镜筒表面温度都呈现出中间 高两边低的变化规律。在100 W 激光功率的照射下, SUS304 材质的光学镜筒温度在3、4 以及5 点探针位置 温度较高,而其他探针位置的温度较小于 AL6061 材 质,设置洁净室室温下的材料参数作为热分析的边界 条件,AL6061 导热系数较高于 SUS304,这可能是导致 AL6061 光学镜筒其他探针点位温度较高的原因。



3.3 光学镜筒应力应变分布

续激光照射光学系统时会产生镜片对激光的吸 收、反射等光学效应,而引起入射光源衰弱的主要因 素为材料对光的吸收和反射,其中在本研究中吸收 占据主导地位,光学镜筒和镜片对光的吸收会使材 料产生温升,因材料的属性不同使得热传导过程中 温度分布不均匀进而产生热应力。直写设备的光学 镜筒为 AL6061 材质,以 AL6061 材质光学镜筒为 例,分析其应力应变分布,具体如图7所示。从等效 应力、最大主应力以及最大主应变材料参数去分析 AL6061 材质光学镜筒应力应变分布,棱镜盒附近区 域温度变化较大,同时存在较大的应力变化,当温度 越高时,此区域的应力值越大。从不同激光功率工 况分析,100 W 时光学镜筒应力效应以及发生的应 变更明显,低功率激光对镜筒应力变化影响较小,在 棱镜盒部分区域出现压应力,可见的是应变数值也 较大,说明棱镜盒附近区域相对初始状态的变化量 较大。

光学系统镜筒散热设计 4

从光学系统热固耦合分析结果表明光学系统的 高温区域集中在 DMD 和棱镜盒附近。本文提出一 种基于系统降温的散热方法,该方法是将 DMD 和 棱镜盒的高温作为散热目标,降低剧烈温升对成像 质量的影响,实现光学系统满功率曝光状态下的温 度分布均匀。

4.1 散热设计原则

100 W 激光功率下光学系统产生剧烈温升,容 易造成局部温度过高,影响光学系统整体的温度均 匀性,严重时会对内部镜片造成破坏,同时局部温度

过高会降低光学系统曝光成像质量。因此,需要对 光学系统进行散热设计,使得局部高温区域降温及 整体温度分布均匀,确保光学系统能够正常曝光运 行,从而减小温度对成像质量的影响。光学系统曝 光而产生的高温区域集中于 DMD 和棱镜盒,对以 上两处高温区域进行降温处理是散热设计的主要内 容。常见的光学系统散热方法主要有主动散热和被 动散热两种,被动散热方式具有设计简单可靠性强 等优点,但对大功率光学系统散热效果有限,需要结 合其他散热方法来提高散热效果,主动散热方式通 常配合温度控制装置,可以达到温度可控的效果。



图7 应力应变分布云图

Fig. 7 Stress-strain distribution contour

结合光学系统在大功率激光直写设备中的实际应用场景,采取被动和主动混合式的散热方法, 主要内容为:在被动散热设计中使用铝合金材质 的光学镜筒,将 DMD 铝制散热模块改为铜制的水 冷块,在棱镜盒表面进行散热片设计,以增加热量 散发面积。主动散热设计利用新型的棱镜水冷块 散热结构,搭配温度控制装置对棱镜盒区域进行 主动降温,温度控制装置以冷却水为介质,可根据 水冷块内部的温度变化,通过 PID 算法实时调节 循环液的出液温度。

4.2 被动散热设计

被动散热设计是利用材料的导热性能,通过设 计散热片等结构增加散热面积,是一种常见可靠的 散热方法。两种常见材质的光学镜筒,具体如图 8 所示。仿真分析结果为铝合金材光学镜筒温度分布 均匀且产生应力应变较小,因铝合金材质具有优良 的导热性能,可以更有效地传导散热,达到快速散发 热量效果。



图8 不同材质光学镜筒(黄光实验室)

Fig. 8 Optical tubes of different materials(yellow light laboratory)

将 DMD 原有的铝制散热模块更换为铜制,需要注 意的是铜制水冷块相对较重以及成本较高,根据 DMD 散热需求要考虑材质的导热性能及结构强度。铜制水 冷快具有较高的导热系数和耐腐蚀性,可以有效地传 导 DMD 投图时产生的热量,提高了散热效果,在长期 使用水作为冷却介质情况下,铜制水冷块更耐久且不 容易被腐蚀,图9 为不同材质 DMD 散热模块。



图 9 不同材质 DMD 散热模块(黄光实验室) Fig. 9 DMD heat dissipation module of different materials (yellow light laboratory)

如图 10 所示,对棱镜盒区域进行散热处理。棱 镜盒是整个光学系统的核心部位,其左侧装配竖向 转接箱,上接 DMD 模块,正下方装配连接外筒,对 光束的传递起到重要作用。棱镜处于棱镜盒内部, 与棱镜盒之间接触面积很小,对散热造成了阻碍,尤 其在满功率曝光状态下,此区域产生较大热量造成 棱镜盒区域温度较高。因此,在棱镜盒表面进行散 热片设计,并通过螺钉将散热片与棱镜盒接触固定, 增加棱镜对外散热,提高散热效率。



图 10 棱镜盒区域散热处理 Fig. 10 Prism box area heat dissipation treatment

4.3 主动散热设计

对大功率激光直写设备光学系统来说,只是依 靠被动散热设计是无法保证光学系统满功率曝光状 态下处于合理的温度层次,必然需要通过主动散热 设计使镜头温度能够满足曝光成像需求。

在前面被动散热设计可知棱镜盒左侧装配竖向 转接箱,则不适合进行结构设计,而棱镜盒右侧无其 他装配零件,棱镜只与棱镜盒底部两侧实际接触,与 底部区域之间存在空气间隙。因此,在棱镜盒底部 中间区域开方孔槽,为不破坏棱镜盒与连接外筒的 装配方式,最终方孔尺寸制定为22 mm×22 mm× 9.5 mm。根据方孔槽尺寸大小,设计一款新型棱镜 水冷块结构,可搭配温度控制装置对棱镜盒区域进 行主动散热,从而保证光学系统整体的温度均匀性。

如图 11 所示,棱镜水冷块主要由水冷块和微型 软管接头两部分结构组成。水冷块为铜材质并在表 面进行镀黑处理,使得外观呈现黑色的颜色,这样不 仅增加了水冷块的美观度,还提高了耐腐蚀性能。 水冷块进行打孔设计用于引导冷却水的流动,将冷 却水温度均匀传递给散热块,冷却水进出口均与微 型软管接头适配,确保了冷却水可以迅速进出,同时 在通路设计时,将进出口水路连接,对两端再选择铜 作为电焊材料进行密封,这样保证了冷却水在整个 水冷块的均匀流动,也避免冷却水积聚在水冷块内 部,影响散热效果。在水冷块外表面进行同心圆形 状凹槽设计,目的是增加与棱镜盒以及内部区域接 触面积,提高散热效果,同时热量在圆周凹槽上均匀 分布,防止局部过热,分散热应力集中于一个区域, 降低热膨胀引起的应力损伤,从而提高散热的均匀 性和水冷块整体结构的稳定性。



图 11 棱镜水冷块结构示意图 Fig. 11 Schematic diagram of the structure of the prism water-cooled block

对于微型软管接头的选择,考虑到棱镜水冷块 需搭配温度控制装置,利用温度控制装置对 DMD 和棱镜水冷块同时控温,因此选择与原始 DMD 水 冷块结构相同配置的水管接头,具体型号参数如表 2 所示。

表2 微型软管接头参数

Tab. 2 Miniature hose fitting parameters

型号	M-5HLH-4	
材质	铜	
适用管子材质(外管/内管)	Ф4/Ф2.5	
接头形状	万向弯头	
连接种类	螺纹管连接	
螺纹公称	M5 × 0. 8	
螺纹种类	М	

光学系统主动散热搭配的温度控制装置为 SMC 的 HRS012-A-20,采用水冷冷却方式,可以实现 ±0.1 ℃温度控制精度,温度可设定范围为+5 ℃ ~ +40 ℃,具体性能参数可见前面章节离线测试平 台模块。利用温度控制装置对光学系统 DMD 和棱 镜盒进行主动散热,其工作原理为:将洁净水注入贮 液腔室充当循环液,有效地防止冷却水长时间循环 使用产生的杂质堵塞水管。工控机利用串行通信 (RS232C·RS485),对温度控制装置进行远程操作 并设定初始温度,通过自带的 PID 算法控制制冷和 制热模块,形成温度闭环系统可根据光学系统的温 度变化实时调节循环液的出液温度,冷却水通过水 管分流到达 DMD 及棱镜盒区域进行恒温循环散 热,达到了对光学系统温度的有效控制,整个过程中 工控机可实时监测循环液的输出温度及输出压力, 同时具有异常情况下报警信息功能,从而能够保证 光学系统主动散热过程的正常运行。光学系统主动 散热工作原理如图 12 所示。



5 散热试验验证

5.1 散热试验设计

光学系统散热试验包括两方面内容,一方面利 用温度数据采集系统,采用高精度温度探头监测光 学系统的温度分布,具体探点布置和在仿真探针位 置相同,得到镜头稳定后的温度数据,验证当前散热 设计是否满足温度均匀性指标要求,如图13所示。 另一方面是对光学系统 DMD 位置关系进行标定, 采用 DMD 位置关系标定误差来评估系统的散热效 果。DMD 位置关系标定用于确定每个 DMD 之间的 相对位置关系,以保证在曝光过程中两个 DMD 投 图可以准确无误地拼接上。在大功率激光直写设备 生产过程中,光学系统的 DMD 位置关系经常会受 温度影响产生误差,从而导致成片质量变差,可以通 过对光学系统 DMD 位置关系标定的方法检测系统 成像误差。DMD 位置关系标定测试方法如图 14 所 示,DMD 位置关系标定用于标定两个 DMD 中心点 之间的相对位置关系,以 DMD1 的中心点位置为原 点(0,0),后面每个 DMD 的位置关系都是相对于原 点的 XY 方向距离。在每个 DMD 的左中右三个位 置都投一个固定尺寸的方形 MARK,使用同一个吸 盘相机查看左右两个 DMD 相同位置上的 MARK 中 心点,得到两个中心点坐标,即可计算出这两个 DMD 的相对位置关系。



图 13 光学系统散热试验(黄光实验室)





图 14 DMD 位置关系标定测试方法 Fig. 14 DMD positional relationship calibration test method

5.2 散热试验结果

在散热试验中,光学系统温度逐渐达到稳态, 具体温度数据如图 15 所示。光学系统在无散热 条件下整体温度很高,只对棱镜盒进行散热片设 计时,棱镜区域温度散热较快,而整体降温效果较 差,对光学系统增加棱镜水冷块结构进行主动散 热时,整体降温效果明显,同时保留棱镜区域的散 热片,系统整体温差仅为0.99 ℃,可以满足温度 均匀性指标。图 16 为光学系统无散热条件时 DMD 位置关系标定误差,在满功率曝光一段时间 后,光学系统标定位置发生漂移,DMD10、DMD11 以及 DMD12 标定误差高于 15 μm。图 17 为采用 散热设计后 DMD 位置关系标定误差,此时各路 DMD 标定误差小于 15 µm,满足技术指标中小于 20 μm 的要求。由图 16 和图 17 对比可知,采用散 热设计后中心位置多向同一方向漂移,有利于系 统曝光时图像拼接。



Fig. 15 Comparison of the temperature of the optical system with different heat dissipation methods



图 16 DMD 位置关系标定误差一

Fig. 16 DMD position relationship calibration error 1



图 17 DMD 位置关系标定误差二

Fig. 17 DMD position relationship calibration error 2

5.3 试验分析与讨论

光学系统散热试验中,完成了激光功率100 W 工况下的散热效果和 DMD 位置关系标定成像误差 测试工作,可得出如下结论:

(1)在激光功率 100 W 工况下,大功率激光直 写设备光学系统温度满足散热指标要求,在散热系 统正常工作时,系统整体温差仅为 0.99 ℃,达到了 温度均匀性指标要求。

(2)采用散热设计后各路 DMD 标定误差小于 15 μm 且中心位置多向同一方向漂移,满足误差小 于 20 μm 的技术指标要求,有利于系统曝光时图像 拼接,验证了散热设计的有效性。

6 结 论

本文针对一款大功率激光直写设备光学系统展 开研究,结合数值模拟和试验的方法,并设计了一款 具备优良散热性能的镜筒结构。通过使用有限元分 析软件对光学系统结构进行热分析和应力应变分 析,结果显示:在激光功率为100 W时,SUS304 和 AL6061 材料的镜筒表面温度最高位置都集中在棱 镜盒附近区域,最高温度达到 59.016 ℃,整体温度 均匀性和散热性能较差;AL6061 材质的光学镜筒在 棱镜盒附近区域存在较大的应力,结构性能较差。 为解决散热问题,总结了光学系统散热设计的一般 原则,并采用被动和主动相结合的散热设计方法,通 过试验验证了该设计方案,试验结果表明:在散热系 统正常工作时,系统整体温差仅为0.99℃,达到了 温度均匀性指标要求; DMD 标定误差小于 15 µm 且中心位置多向同一方向漂移,满足了误差小于 20 μm的技术指标要求,结果对于大功率激光直写 设备系统曝光时图像拼接具有重要意义。

参考文献:

- Huang L, Hong Z, Chen Q D, et al. Imaging/nonimaging microoptical elements and stereoscopic systems based on femtosecond laser direct writing [J]. Light: Advanced Manufacturing, 2024, 4(4):543 - 569.
- [2] Gonzalez-Hernandez D, Varapnickas S, Bertoncini A, et al. Micro-optics 3D printed via multi-photon laser lithography
 [J]. Advanced Optical Materials, 2023, 11(1):2201701.
- [3] Zhou Guozun, He Minfei, Yang Zhenyao, et al. Dual-beam laser direct-writing nanolithography system based on edge light suppression technology[J]. Chin J Lasers, 2022, 49 (22):121-128. (in Chinese)
 周国尊,何敏菲,杨臻垚,等.基于边缘光抑制技术的 双光束激光直写纳米光刻系统[J].中国激光,2022,
- 49(2):7-17.
 [4] Wang Hongqing, Wen Jisen, Yang Zhenyao, et al. High-speed parallel two photon laser direct writing lithography system[J]. Chin J Lasers, 2022, 49(22):2202009. (in Chinese)

王洪庆,温积森,杨臻垚,等.高速并行双光子激光直 写光刻系统[J].中国激光,2022,49(22):2202009.

- [5] Zuo J, Lin X. High-power laser systems [J]. Laser Photonics Rev, 2022, 16(5):2100741.
- [6] Shi Jia, Yu Feihong. Optical software thermal analysis methods and athermatory lens design[J]. Laser Infrared, 2021,51(9):1217-1226. (in Chinese) 石佳,余飞鸿. 光学软件热分析方法和消热差镜头设计[J]. 激光与红外,2021,51(9):1217-1226.
- [7] Zhang Siqi, Zhou Sihan, Yang Zuojun, et al. Advances in maskless lithography based on digital micromirror devices
 [J]. Opt-Precision Eng., 2022, 30(1):12-30. (in Chinese) 张思琪,周思翰,杨卓俊,等. 基于数字微镜器件的无掩膜 光刻技术进展[J]. 光学精密工程,2022,30(1):12-30.
- [8] Chung H, Zhang F, Li H, et al. Inverse design of high-NA metalens for maskless lithography [J]. Nanophotonics, 2023,12(13):2371-2381.
- [9] Hornbeck L J. Digital Light Processing for high-brightness, high-resolution applications [J]. Proc. of SPIE, 1997,3013:27-40.
- [10] Jiang Y F, Liu Lei, Zhao Yao, et al. Research on the performance of liquid cooling and heat dissipation system of UVLED optical components [J]. Chemical Industry Eng., 2023, 74(S1):154 160. (in Chinese)

蒋祎璠,刘蕾,赵耀,等. UVLED 光学元件液冷散热系

统性能研究[J]. 化工学报,2023,74(S1):154-160.

- [11] Li Guangyi, Zhang Junhong, Gao Jianxin. A review of heat dissipation research on high-power power electronic devices[J]. Journal of Ordnance Equipment Eng, 2020, 41 (11):8-14. (in Chinese)
 李广义,张俊洪,高键鑫. 大功率电力电子器件散热研究综述[J]. 兵器装备工程学报,2020,41(11):8-14.
- [12] Nie Hongfei, Li Xiaoping, Zhang Lingli. Temperature control algorithm for a projection objective lens of a lithography machine[J]. Chin M Eng, 2008, (10):1135 1139. (in Chinese)
 聂宏飞,李小平,张玲莉. 光刻机投影物镜的温度控制算法[J]. 中国机械工程,2008,(10):1135 1139.
- [13] Yu Bin, Li Xiaoping, Nie Hongfei. Step-by-step scanning projection lithography machine, projection objective lens, precision temperature control system [J]. Machin Tool Hydraulics, 2006, (10):127-130. (in Chinese) 余斌,李小平,聂宏飞. 步进扫描投影光刻机投影物镜精 密温度控制系统[J]. 机床与液压, 2006, (10):127-130.
- [14] Xie Fanglin, Wang Lei, Huang Shengzhou. Research progress of maskless digital lithography technology based on digital micromirror devices [J]. Laser Optoelectronics Pro,2022,59(11):151-160. (in Chinese) 谢芳琳,王雷,黄胜洲. 基于数字微镜器件的无掩模数 字光刻技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2022,59(11):151-160.
- [15] Zhou Ziyi, Dong Xianzi, Zheng Meiling. Progress and application of maskless lithography technology of digital micromirrors[J]. Laser Optoelectronics Pro., 2022,59(9): 503-517. (in Chinese)
 周子逸, 董贤子, 郑美玲. 数字微镜无掩模光刻技术进展及应用[J]. 激光与光电子学进展,2022,59(9):503-517.
- [16] Syu Y S, Huang Y B, Jiang M Z, et al. Maskless lithography for large area patterning of three-dimensional microstructures with application on a light guiding plate [J]. Opt. Express, 2023, 31(8):12232 - 12248.
- [17] Yang Z, Lin J, Liu L, et al. Genetic algorithm-based optical proximity correction for DMD maskless lithography
 [J]. Opt. Express, 2023, 31(14):23598 23607.
- [18] Wang Fei, Zhou Liansheng, Fang Bin, et al. Thermal design calculation and experimental verification of digital micromirror devices [J]. Opto-Electron Eng., 2016, 43 (9):84-88. (in Chinese)

王飞,周连生,方斌,等.数字微镜器件热设计计算与 试验验证[J].光电工程,2016,43(9):84-88.