

DOI: 10.7652/xjtuxb201702023

# 双投影光固化成型方法研究

陈冬, 王亚宁, 刘亚雄, 贺健康, 王玲, 连芩, 李涤尘, 靳忠民  
(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

**摘要:** 针对现有投影光固化成型系统的数字成像芯片尺寸有限、不能兼顾尺寸和精度的问题, 研制了基于数字微反射镜成像的双投影光固化成型设备, 通过两路不同成像倍率的光路拼接成型, 提高了零件成型尺寸和精度。首先, 提出了基于数字微反射镜的双投影光固化成型方案, 研发了光学系统和机械结构。其次, 进行了该系统 4 倍成像光路的光照强度均匀化测试、畸变校正测试、脱模方法测试和两个光路的单列条纹固化测试。最后, 对双投影光固成型方法进行了实验验证, 结果表明, 该系统两个光路的单列像素固化特征平均宽度为 55  $\mu\text{m}$  和 8  $\mu\text{m}$ , 并且采用双投影光固化成型方法可以同时满足成型尺寸和精度需求, 还可进一步实现宏微结构一体化制造, 用于微结构制造和生物制造的研究。

**关键词:** 光固化成型; 快速成型; 掩膜投影; 微结构

**中图分类号:** TG665   **文献标志码:** A   **文章编号:** 0253-987X(2017)02-0149-06

## Double Mask Projection Stereolithography Equipment

CHEN Dong, WANG Yaning, LIU Yaxiong, HE Jiankang, WANG Ling,  
LIAN Qin, LI Dichen, JIN Zhongmin

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The existing digital imaging chip used in mask projection stereolithography system cannot balance the requirements for part size and precision, so a novel stereolithography method based on DMD with two mask projection systems is proposed in this study and the corresponding equipment is constructed. According to DMD digital imaging chip, a scheme of double mask projection sterolithography system is suggested, and the optical system and the machine structure are designed. The uniformity of illumination intensity of 4X image, the distortion correction of 4X image, the demolding program and the curing parts of single row pixel projection of 4X lens and 0.5X lens are measured and tested. The double mask projection sterolithography method is experimentally verified for the process feasibility. The results demonstrate that the average widths of cured parts of the single row pixel of two projection images reach 55  $\mu\text{m}$  and 8  $\mu\text{m}$ , and the proposed method can balance the requirements for both size and precision in macro/micro structure manufacturing.

**Keywords:** stereolithography; rapid prototyping; mask projection; micro-structure

光固化成型技术 (Stereolithography, SL) 是增材制造技术中最重要的一种, 也是目前研究最深入

的增材制造技术之一,按成型过程主要分为两种:扫描光固化(scanning-based SL)成型方式和投影光固化(projection-based SL)成型方式<sup>[1]</sup>。扫描光固化通过激光点在振镜旋转运动下在 XY 平面扫描选择固化光敏树脂;投影光固化通过数字成像芯片生成投影图形选择固化树脂,一次成型一个截面。相比扫描光固化,投影光固化系统结构简单,成型速度快,利用成像镜头可以实现更高的分辨力。但是,在投影光固化系统中,数字芯片通常为液晶显示屏(LCD)和数字微镜元件(DMD),成像芯片尺寸固定,通过成像镜头只能实现固定的成像幅面和特征分辨力。当采用缩小成像镜头实现高精度投影时,可以实现几微米的零件尺寸特征,但零件宏观尺寸只有几毫米<sup>[2]</sup>;当实现较大尺寸投影时,成像精度降低,最小尺寸特征为几百微米<sup>[3]</sup>。如果利用大尺寸投影幅面加工小尺寸特征,不仅精度低,而且能量不能充分利用。这是固定焦距投影镜头在投影光固化系统中的固有缺陷,因此如何兼顾投影光固化系统中的尺寸和精度需求是一个非常重要的问题。

目前,兼故投影光固化成型中尺寸和精度主要有以下 3 种解决方法:①拼接数字芯片阵列,此种方法昂贵,无法保证极小的拼接间隙;②拼接成像面法<sup>[4-5]</sup>,通过对成像面进行划分区域拼接曝光,但效率较低;③扫描投影曝光<sup>[6]</sup>,在连续移动成像系统的过程中投影图像同步变化,具有曝光能量不均匀的问题。因此,为了解决投影光固化成型中尺寸和精度不能兼顾的问题,本文提出双投影光固化成型方法,并进行了双投影光固化成型设备的研制。

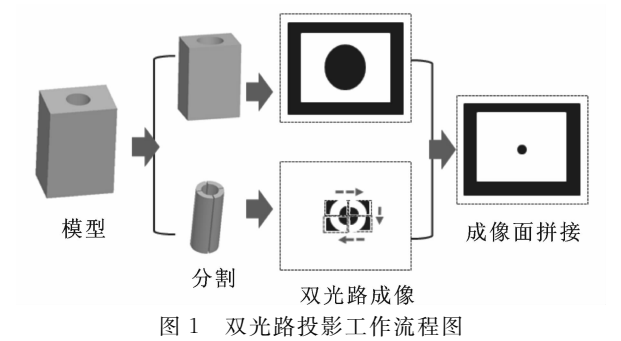
## 1 成型原理与平台构建

### 1.1 成型原理

图 1 为双光路投影工作流程图。首先将加工模型的高精度特征和大尺寸特征分割为两部分,然后采用缩小成像光路对高精度特征部分进行制作,采用放大成像光路对大尺寸特征制作,两个成像光路的成型特征在同一截面拼接,完成单层加工,最后逐层叠加完成零件的制作。当高精度成像光路成像尺寸一次不能完全加工高精度特征时,可将此部分面积分割为若干小尺寸,利用高精度成像光路的移动曝光进行拼接成型。

### 1.2 装置组成

现有树脂发生光交联反应的波长为 365 nm,由于 DMD 相比 LCD 对紫外光有较高的传输率,同时分辨力更高<sup>[2]</sup>,所以本文搭建基于 DMD 的紫外双



投影光固化成型系统。该系统拥有两路不同成像倍率的投影系统,选用的 DMD 芯片像素数为  $1\,024\times 768$ ,一路投影光路镜头缩小成像(0.5 倍成像镜头),实现高精度特征加工需求,另一路投影光路镜头放大成像(满足放大倍率为 2 倍、4 倍两组镜头成像),可以实现不同尺寸特征加工需求。

设计的系统方案如图 2 所示,采用自下而上的投影方式,Z 轴采用高精度运动平台。光路主要组成元件为:照明部分为 365 nm LED、矩形匀光棒、透镜,成像部分为满足两组成像倍率的透镜。放大成像光路光程较长,将镜头和 DMD 光轴横向布置在光学导轨上,更换成像镜头时便于调整,并采用镀铝膜反射镜进行一次反射,投射到溶液槽透光底板上。缩小成像光路光程小,直接从溶液槽透光底板入射,整体安装在高精度 XY 二维移动平台上,布置在设备底层,可相对于成像面移动,满足高精度成型的拼接过程。搭建的系统实物如图 3 所示。

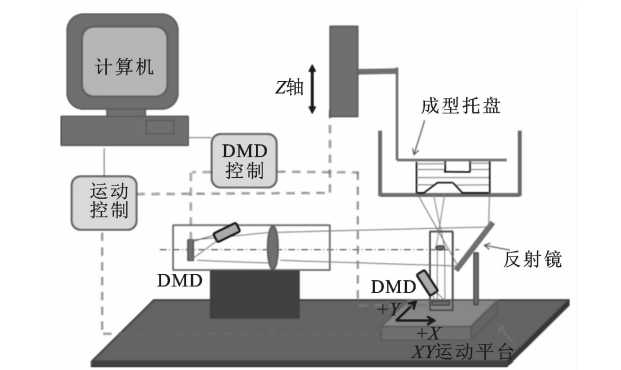


图 2 双光路投影系统方案

## 2 系统测试与实验

搭建好实验设备后,为了顺利实现零件成型,需要对系统关键功能的测试方法进行研究,主要包括成像面的光照强度均匀化方法、成像分辨率调整和畸变矫正方法、自下往上成型的脱模方法测试和单层加工精度测试,最后进行双投影光路成型实验验证。

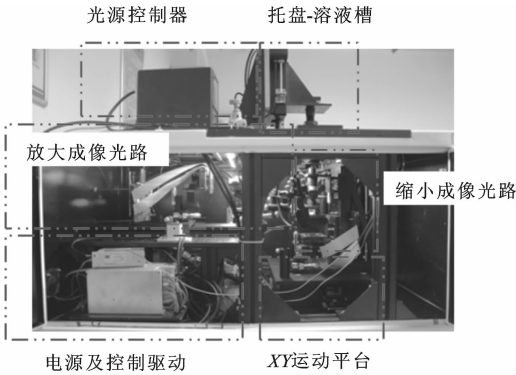


图 3 双光路投影系统结构

2.1 光照强度均匀化

在投影光固化成型过程中,需要一次固化成型一个零件截面,只有成像区域光照强度均匀,才能保证树脂固化一致,因此进行了成像区域光照强度均匀化测试。

在 4 倍成像光路中,首先采用紫外照度计(UV-A)测量视场全亮状态(灰度 255)的能量分布值,对整个区域拟合后的能量分布如图 4 所示。测量结果表明,测量区域紫外光强  $P$  最大值为  $8.48 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$ ,最小值为  $3.99 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$ ,均方根值(RMS)为  $1.32 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$ ,不均性较大。

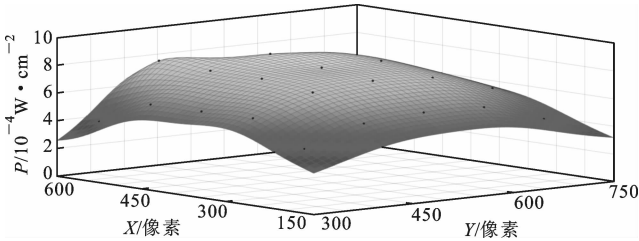


图 4 匀光前能量分布

由于图像光强分布受到图片灰度的影响,改变成像区域灰度值可以改变数字微镜反射时间,从而改变视场内光强,所以建立照度值、灰度值和成像位置之间的数学模型进行数字匀光<sup>[7]</sup>。

均匀化后视场拟合能量分布如图 5 所示。图 5 结果表明:均匀化后的光照强度约等于  $3 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$ ,视场内最大光强和最小光强之差为  $0.89 \times$

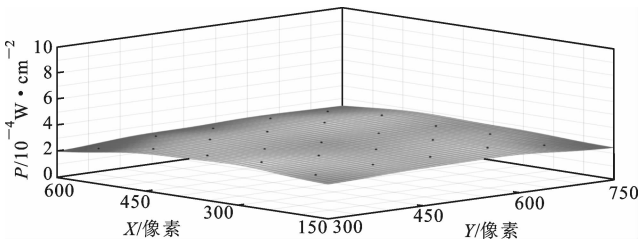


图 5 均匀化后视场拟合能量分布

$10^{-4} \text{ W/cm}^2$ ,均方根值为  $0.19 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$ ,视场内光照强度已比较均匀,可以均匀固化。

2.2 分辨率的调整与畸变校正

由于光路系统的误差在成像面上会存在成像畸变,搭建好光路系统后成像会影响制件精度。为了获得高的成像精度,必须对成像畸变进行校正。本文利用函数转换的方法对图像进行校正,首先测量得到原始图像和畸变图像对应位置,采用二元三次多项式进行几何校正,对畸变图像坐标进行空间变化,恢复图像的空间位置;然后采用空间可变双线性插值函数重新校正图像的灰度分布,重算校正后对应位置的灰度值<sup>[8]</sup>。

得到校正结果后,比较畸变图像和校正图像对应像素点的均方根误差,评价其与理论值的波动程度。畸变校正结果表明:经过图像畸变校正处理,水平方向均方根误差减少到 2.02 个像素,垂直方向减小到 0.61 个像素,如表 1 所示。

表 1 畸变校正结果

| 方向 | 均方根误差/像素 |      |
|----|----------|------|
|    | 畸变图像     | 校正图像 |
| 水平 | 2.84     | 2.02 |
| 垂直 | 2.09     | 0.61 |

2.3 脱模方案的选择

自下而上投影系统在固化过程中已固化树脂会粘结在托盘和透光底板上,当  $Z$  轴带动托盘往上运动时,若固化树脂和透光底板的粘结力过大,会导致已成型零件从托盘上脱离或者被拉断,所以需要对托盘和溶液槽透光底板分别进行处理,实现脱模。

为了增大托盘的接触表面能,选择喷砂处理铝托盘。溶液槽透光底板目前有 4 种处理方式:镀膜法<sup>[3]</sup>、绷膜法、溶液槽机械运动脱模<sup>[8]</sup>、连续投影曝光法<sup>[9]</sup>。由于连续投影曝光法对树脂和底板材料要求较高,所以本文对前 3 种脱模方式选用相同的加工参数进行加工比较,确定合适的脱模方式。

实际加工效果如图 6 所示:①镀膜法采用 Witalan 膜,加工高度有限,如图 6a 所示;②绷膜法能实现脱模,但是由于成型时会将膜拉动,导致下一层成型聚焦不准确,成型质量降低,如图 6b 所示;③溶液槽横向移动脱模方式比直接靠拉力拉断脱模效果有所提升,但横向移动会对成型件产生剪切力变形,在成型件结构不大的情况下,对精度影响小,成型效果较好,如图 6c 所示。根据以上 3 种方法的成型效果,为了提高脱模的成功率和良好的零件效果,选用

贴 Witlan 膜和溶液槽横向移动脱模相结合的处理方式。

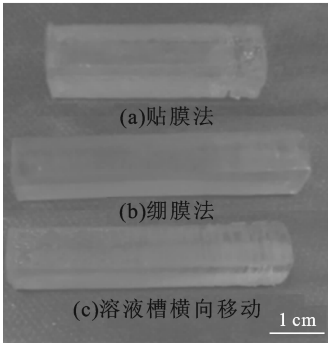


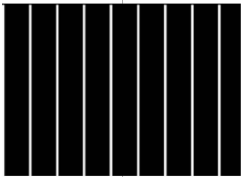
图 6 3 种脱模方式加工零件效果对比

2.4 单层加工分辨力测试

制作系统单层加工分辨力决定零件成型的最小特征尺寸,影响零件的成型精度,因此需要对系统的单层最高加工分辨力进行测试。

在计算机上设计单列像素构成的条纹图片作为最小成像单元,如图 7a 所示。将该图片发送到两个光路的成像系统,然后在透光底板上涂覆一层树脂进行曝光固化,分别在显微镜下观察测量固化后的结构,如图 7b、图 7c 所示。

单层条纹固化实验结果表明:直接用 4 倍放大成像光路和 0.5 倍缩小成像光路的单列像素固化单层树脂,固化后最小特征尺寸平均宽度分别为 55  $\mu\text{m}$  和 8  $\mu\text{m}$ ,实现两个光路的最高成型精度。



(a) 单列条纹图片



(b) 4 倍光路

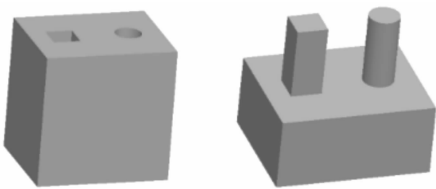
(c) 0.5 倍光路

图 7 单列像素条纹固化特征

2.5 双投影光路成型实验

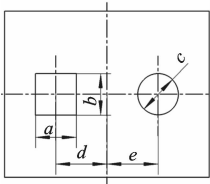
本文设计了两种具有不同孔特征和柱特征的长方体如图 8a、图 8b 所示,孔和柱特征尺寸均需要高精度加工。两个模型均采用双投影光固化成型方法和直接用放大成像光路加工的方法加工,然后利用

光学成像测量仪(VMS400)测量关键特征的尺寸(如图 8c 所示),比较不同加工方法的加工质量。



(a) 孔特征模型

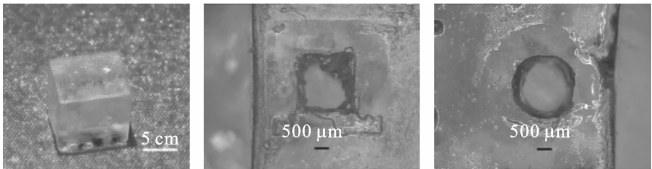
(b) 柱特征模型



(c) 零件 XY 截面主要尺寸

图 8 加工零件模型

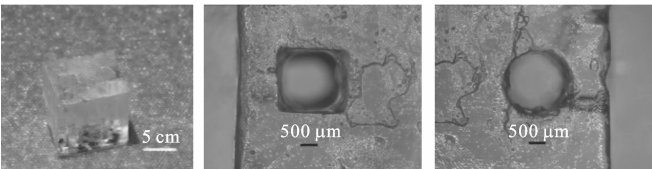
双投影光路拼接加工的孔模型如图 9a、图 9b、图 9c 所示,可以看到分割区域界面有拼接痕迹;直接用放大成像光路加工的模型如图 9d、图 9e、图 9f 所示,零件整体效果较好。两种加工方法的主要特征尺寸如表 2 所示,比较发现拼接加工模型的孔特征尺寸相比直接加工的误差值小,精度更高。



(a) 拼接加工结构

(b) 方孔结构

(c) 圆孔结构



(d) 直接加工结构

(e) 方孔结构

(f) 圆孔结构

图 9 两种加工方法的孔模型加工零件

表 2 两种方法加工模型的主要特征尺寸

| 方法   | $c/\text{mm}$ | $e/\text{mm}$ | $a, b/\text{mm}$ | $d/\text{mm}$ |
|------|---------------|---------------|------------------|---------------|
| 原始设计 | 2.0           | 2.5           | 2.0, 2.0         | 2.5           |
| 拼接成型 | 2.019         | 2.545         | 2.012, 2.017     | 2.456         |
| 直接成型 | 2.066         | 2.537         | 2.063, 2.041     | 2.380         |

双投影光路拼接加工的柱模型如图 10a、图 10b、图 10c 所示,直接用放大成像光路加工的模型如图 10d、图 10e、图 10f 所示。两个模型的主要特

征尺寸如表 3 所示,双投影光路拼接加工模型的特征尺寸相比直接加工模型误差更小,精度更高。

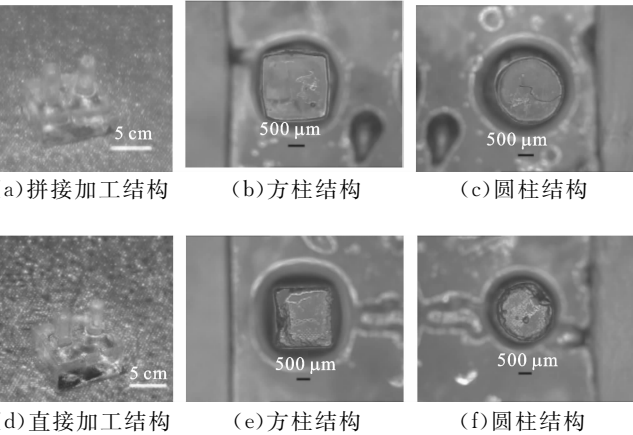


图 10 两种加工方法的柱模型加工零件

表 3 两种方法加工模型的主要特征尺寸

| 方法   | c/mm  | e/mm  | a,b/mm      | d/mm  |
|------|-------|-------|-------------|-------|
| 原始设计 | 2.0   | 2.5   | 2.0,2.0     | 2.5   |
| 拼接成型 | 1.980 | 2.485 | 1.984,1.979 | 2.552 |
| 直接成型 | 1.935 | 2.409 | 1.931,1.946 | 2.553 |

以上两种模型加工结果说明,对于具有加工精度要求的孔特征和柱特征模型,不同成像精度的光路模型最小像素收缩中心不一致,收缩量不一致,所以分辨率高的图像成像精度更高,固化特征收缩量更小。采用双光路拼接法相比直接用放大光路加工可以提高成型件小特征尺寸精度,加工过程能够兼顾成型件尺寸和精度。

利用双投影光固化成型系统进行了其他零件的制作实验,图 11a 为狐狸模型,图 11b 为齿轮模型,图 11c 为双投影光路拼接加工模型。

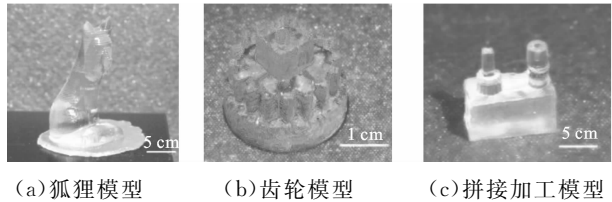


图 11 双投影光固化成型系统加工模型示例

3 讨 论

(1)在搭建好双投影光固化成型系统之后,进行了 4 倍成像光路的光照强度和畸变测试。

在光照强度均匀化的研究中,图 4 中未校正前视场光照强度分布为菱形状态,接近灯丝形状,产生此种现象原因可能是由于入射光能量均匀化不够导致的。由于入射光在 DMD 表面为倾斜入射,光路

长度不同,导致 DMD 表面接收能量不一致,未来可在匀光棒和光源结构上进行优化。同时,可对视场光照强度均匀化区域算法上进行研究,实现针对模型大小的选择区域能量均匀化,提高能量利用率和成型效率。

由于畸变校正结果在 X 方向上误差较大,其可能的影响为:显影误差、测量误差和拟合函数模型误差。显影误差是由于显影纸的感光颗粒分辨率有限造成的,以后的研究中可以通过使用光刻胶进行显影,提高准确度;测量误差是用光学成像测量仪测量成像点位置产生的误差,可通过提高测量次数减小该项误差;拟合函数模型误差是由于拟合函数不能完全准确描述畸变变化产生的误差,未来需选用更多的标定点和更高次拟合函数,以减小校正误差。

(2)搭建了双投影光固化成型系统,并进行了实验验证。在加工过程中,根据所需要加工精细特征的位置进行模型划分,通过两个光路的拼接加工实现,拼接加工时两个光路成像精度不同,所加工模型同时满足了尺寸和精度需求。后续研究可以集中在双投影光路加工模型划分、拼接精度及强度的研究上,针对模型特征精度需求,利用软件算法实现高精度加工特征自动识别,进行智能模型划分,降低人为分割模型的工作量和难度;相对于较大截面的高精度拼接成型,需要研究高精度成型光路在截面的拼接量以及拼接路径规划问题,提高拼接强度,优化成型效率。

4 结 论

(1)本文提出的双投影光固化成型方法解决了投影光固化成型时尺寸和精度不能兼顾的问题。采用两路曝光光路,一路实现放大成像,满足成型零件的尺寸需求,另一路实现缩小成像,满足成型零件的精度需求。通过两路光在零件同一截面的拼接化曝光,满足零件的精度特征和尺寸特征成型。

(2)4 倍成像光路光照强度均匀化处理后,光照强度均方根减小为  $1.9 \times 10^{-5} \text{ W/cm}^2$ ,实现能量均匀化分布;成像畸变校正后,水平方向和垂直方向像素均方根误差为 2.02、0.61 像素。脱模实验结果表明,采用贴 Witlan 膜和溶液槽的横向运动结合的方式可以顺利实现脱模,4 倍成像光路和 0.5 倍成像光路单列像素固化特征平均尺寸宽度为  $55 \text{ }\mu\text{m}$  和  $8 \text{ }\mu\text{m}$ 。

(3)通过双投影光固化成型实验验证该方案能够实现两路不同精度图像的拼接成型,解决了尺寸

与精度不能兼顾的问题,可实现宏、微结构一体化制造,用于微结构制造研究和生物制造研究。

## 参考文献:

- [1] 王伊卿,贾志洋,赵万华,等. 面曝光快速成形关键技术及研究现状 [J]. 机械设计与研究, 2009, 25(2): 96-100.  
WANG Yiqing, JIA Zhiyang, ZHAO Wanhua, et al. The key technology and research status of mask projection stereolithography [J]. Machine Design & Research, 2009, 25(2): 96-100.
- [2] SUN C, FANG N, WU D M, et al. Projection microstereolithography using digital micro-mirror dynamic mask [J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2005, 121(1): 113-120.
- [3] PAN Y, ZHOU C, CHEN Y. A fast mask projection stereolithography process for fabricating digital models in minutes [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2012, 134(5): 051011-051019.
- [4] HA Y M, PARK I B, KIM H C, et al. Three-dimensional microstructure using partitioned cross-sections in projection microstereolithography [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2010, 11(2): 335-340.
- [5] HA Y M, CHOI J W, LEE S H. Mass production of

3-D microstructures using projection microstereolithography [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(3): 514-521.

- [6] EMAMI M M, BARAZANDEH F, YAGHMAIE F. Scanning-projection based stereolithography: method and structure [J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2014, 218: 116-124.
- [7] 谭东才,胥光申,罗声,等. 用于面曝光快速成形系统的光照度测量系统研究 [J]. 光电技术应用, 2010, 25(3): 53-56.  
TAN Dongcai, XU Guangshen, LUO Sheng, et al. Research on illumination measuring system for mask projection stereolithography [J]. Electro-Optic Technology Application, 2010, 25(3): 53-56.
- [8] 杨根,马训鸣,胥光申,等. 面曝光快速成形系统中图像的畸变校正 [J]. 西安工程大学学报, 2011, 25(5): 712-716.  
YANG Gen, MA Xunming, XU Guangshen, et al. The distortion correction of image in mask projection stereolithography system [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2011, 25(5): 712-716.
- [9] TUMBLESTON J R, SHIVANYANTS D, ERMOSHIKIN N, et al. Continuous liquid interface [J]. Science, 2015, 347(6228): 1349-1352.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 103 页)

- [21] 曾刚远. 测量短路电抗是判断变压器绕组变形的有效方法 [J]. 变压器, 1998, 35(8): 13-17.  
ZENG Gangyuan. Measuring the short-circuit reactance: an effective method for judging the deformation of transformer windings [J]. Transformer, 1998, 35(8): 13-17.
- [22] 中国国家标准化管理委员会. 电力变压器: 第 5 部分 承受短路的能力: GB1094.5—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [23] SWIHART D O, WRIGHT D V. Dynamic stiffness and damping of transformer pressboard during axial short circuit vibration [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(2): 721-730.
- [24] 王录亮,刘文力,于会风. 电力变压器绕组轴向短路动态力的计算 [J]. 变压器, 2013, 50(1): 14-17.  
WANG Luliang, LIU Wenli, YU Huifeng. Calculation of winding axial short-circuit dynamic force of power transformer [J]. Transformer, 2013, 50(1): 14-17.
- [25] 滑广军. 结构分析中的多输入多输出传递函数的无偏估计 [D]. 长沙: 中南大学, 2010: 5-6.

- [26] 陆冬,汤宝平,何启源,等. 模态参数识别中频响函数估计的最小二乘优化 [J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(3): 6-10.  
LU Dong, TANG Baoping, HE Qiyuan, et al. Least square based optimization of frequency response function estimation in modal parameters identification [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2007, 30(3): 6-10.
- [27] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 电力变压器绕组变形的频率响应分析法: DL/T 911—2004 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [28] 周建平,林爱弟,吴劲晖,等. 电力变压器振动监测的测点位置选择 [J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(12): 1100-1107.  
ZHOU Jianping, LIN Aidi, WU Jinghui, et al. Selection of the measuring position for on-line monitoring on power transformer vibration [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(12): 1100-1107.

(编辑 杜秀杰)