

弹性薄膜液体透镜的优化设计及面形分析

刘永明^{1,2} 谢军¹ 李湘勤^{1,2} 刘震宇¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 为使弹性薄膜液体透镜的光学薄膜变形后面形满足光学系统对球面面形的设计要求,采用固体各向同性惩罚微结构拓扑优化模型和移动渐近算法优化算法,对液体透镜的弹性体支撑区域进行了拓扑优化,得到了满足收敛条件的拓扑构型。根据拓扑优化结果,对关键结构尺寸进行了形状优化。综合考虑加工制造等因素,设计了易于加工制造的光学透明弹性薄膜液体透镜。对光学薄膜进行了面形精度分析,计算了不同口径下的面形误差峰谷(PV)值和方均根(RMS)值。数值结果表明,光学薄膜变形面形在弦高为 0.5 mm,光学薄膜口径分别为 100%、95%、90%时,优化结构面形误差 PV 值分别是初始结构面形误差 PV 值的 5.7%、11.9%、2.5%,RMS 值分别是初始结构 RMS 值的 11.2%、21.9%、45.4%。用 36 项 Zernike 多项式对变形光学薄膜进行拟合,结果表明,优化结构的 Zernike 系数第 4、第 9、第 16、第 25 项比初始结构明显降低。

关键词 光学设计;液体透镜;拓扑优化;Zernike 多项式;面形精度

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.1216001

Optimization and Figure Analysis of Elastic Thin-Film Liquid Lens

Liu Yongming^{1,2} Xie Jun¹ Li Xiangqin^{1,2} Liu Zhenyu¹

[¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China]

Abstract In order to meet the requirement of an optical system design on the spherical surface via the thin-film elastic deformation of liquid lens, a numerical optimization method is implemented on the elastomeric supporting region of liquid lens using the solid isotropic material with penalization type topology optimization model and moving asymptotes constrained optimization algorithm. The topological configuration meeting the convergence conditions is obtained. According to the topology optimization results, the shape optimization is further implemented for key structural dimensions. And a manufactureable elastic thin-film liquid lens is designed according to micromachining technology. Surface error of optical thin-film is analyzed based on the deformation of thin-film. The peak valley (PV) and root mean square (RMS) values about surface error are calculated on the different diameters. The numerical results show that the optical surface error PV values of the optimized structure are 5.7%, 11.9% and 2.5% of the initial structure, respectively, and the RMS values are 11.2%, 21.9% and 45.4% of the initial structure, respectively, at diameters of 100%, 95% and 90% of thin-film and the height of chord of 0.5 mm. The deformation of the optical thin film is fitted with 36 Zernike polynomials. Fitting results show that the 4th, 9th, 16th, 25th Zernike coefficients are also obviously reduced.

Key words optical design; liquid lens; topology optimization; Zernike polynomial; surface precise

OCIS codes 220.3630; 310.6845

收稿日期: 2013-05-07; 收到修改稿日期: 2013-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(51275504)

作者简介: 刘永明(1986—),男,博士研究生,主要从事工程光学结构设计、工程计算结构力学等方面的研究。

E-mail: liuyongming1015@163.com

导师简介: 刘震宇(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事微光机电系统微流控系统的设计制造方面的研究。

E-mail: liuzy@ciomp.ac.cn

1 引言

液体透镜是一种新兴的小型光学元件,它可通过某种控制方法改变透镜的形状或折射率,实现自身焦距的调整。和传统变焦方式相比,利用液体透镜设计的变焦系统无需依靠移动部件即可实现焦距的变化,具有结构紧凑、响应速度快、无磨损、寿命长、精确度高等优点。在手机、数码相机、网络摄像机、内窥镜等追求轻、薄、短、小的光学系统应用领域,液体透镜有很大的应用前景。同时液体透镜在光学系统的小型化领域开辟了新的思路,对光学系统的小型化发展具有重要意义^[1-6]。

然而,目前的液体透镜在变形成凸透镜时,弹性薄膜往往只能产生近似抛物面的面形,不能满足光学系统设计时对球面面形的要求,在需要球面镜的光学系统中会产生波前差较大的问题。这些缺点都制约着液体透镜的实用性。

在目前所见变曲率液体透镜的结构形式中,阻碍弹性薄膜变形成理想球面的本质原因在于:光学薄膜与支撑结构刚性连接造成变曲率液体透镜只能通过透镜的局部结构即光学薄膜承担全部变形,这种利用集中式柔性结构设计方法设计出的变曲率液体透镜连接部分刚度过大,限制了光学薄膜的变形形式。解决该问题的方法是设计出合理的分布式柔性链接结构,使得光学薄膜在液体压力作用下较高精度满足球面变形,这也是设计的难点所在。本文从分布式柔性结构设计理念出发,利用连续体拓扑优化的方法寻找液体透镜弹性体结构的最优拓扑构型,使液体透镜全部结构参与变形,从而在液体压力作用下获得有较高精度满足球面变形的弹性体结构。首先采用固体各向同性惩罚微结构(SIMP)拓扑优化模型对弹性体的支撑部分拓扑构型优化;为了满足易于加工制造的要求,在确定拓扑构型的基础上,建立参数优化模型,获得具有可制造性的薄膜透镜。最后对液体透镜变形结构进行面形精度分析,为液体透镜的光学系统设计提供了一定的参考。

2 材料属性

使用光学透明的弹性薄膜将液体限制在腔体当中,通过液体的压力控制薄膜面形变化从而控制液体透镜曲率是目前众多方法中较有吸引力的一个^[2-3],原理示意图如图1所示,透镜的光焦度(或焦距)由液体表面的曲率和液体与空气的折射率差决定,可变形的弹性薄膜在液体腔与外界的压力差

下产生所需的面形。当光学液体注入到液体腔时将产生一个正压力,弹性薄膜受到压力差作用将向外凸起,形成凸透镜;相反地,当光学液体从液体腔被抽出时,将产生负压力形成凹透镜。通过液体的进出控制腔内的压力,从而实现对焦距进行调节,其工作原理类似于人眼的聚焦机理。

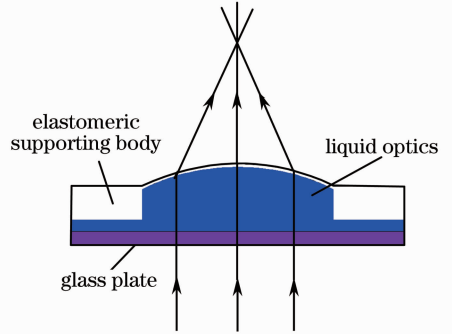


图1 变曲率液体透镜原理示意图

Fig. 1 Schematic of the liquid lens

在对液体透镜弹性体结构进行优化之前,首先需要了解弹性体的材料属性。聚二甲基硅氧烷(PDMS)因其良好的光学性能和力学性能常用来制作光学透明的弹性薄膜。利用固化工艺加工的PDMS透光性良好,文献[7]利用阿贝折射仪分别测试了边长为405、532、635 nm的光线的折射率,测试样本的尺寸为10 mm×30 mm×30 μm。对测试后的结果,利用Sellmeier色散模型进行拟合,在可见光范围内,波长λ与折射率n(λ)的关系可近似为

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C}, \quad (1)$$

式中B、C为Sellmeier拟合系数。对于RTV 615, B=1.0057, C=13.217;对于Sylgard 184, B=1.0093, C=13.185。

PDMS的杨氏模量较低,具有良好的弹性变形能力和化学稳定性,作为液体透镜的材料时可选择的光学填充液体范围较广。另外,其热稳定性好,能在-50℃~200℃范围内工作,且具有电绝缘性。由固化方法制造的PDMS面形粗糙度均方根(RMS)值小于10 nm。当应变小于45%时,PDMS表现为线弹性,对于RTV 615,弹性模量E=1.54 MPa。对于Sylgard 184,弹性模量E=1.85 MPa,本文选择杨氏模量E=1.85 MPa^[7],泊松比为0.45的PDMS建立薄膜变形有限元计算模型^[8]。

3 优化模型的建立

结构设计的目的是使结构设计能够有效满

足某种功能和特征几何尺寸,因此结构设计问题可归结为一个优化问题,即在保证结构达到某些性能目标并满足一定约束的前提下,通过改变选取的设计变量,使结构的性能达到最期望的目标值。结构优化设计通常可分为三个类型:结构拓扑优化,确定结构的最优拓扑,用于概念设计阶段;结构形状优化,确定结构内外边界的最优形状;结构参数优化,确定结构各部件的具体尺寸^[9]。因此本文首先对变曲率型液体透镜的弹性体结构进行拓扑优化设计,

用以在给定的设计区域内寻求最优材料分布;为了使拓扑优化的结果能够用 PDMS 固化工艺加工制造出来,以拓扑优化结果为依据,在考虑可加工性的基础上,对液体透镜变形结构进行形状和特征尺寸优化,获得易于加工制造的液体透镜变形结构。

变曲率型液体透镜的弹性体结构的初始设计区域及尺寸如图 2 所示,考虑到液体透镜的旋转轴对称特征,以模型的剖视图表示初始设计区域及尺寸。

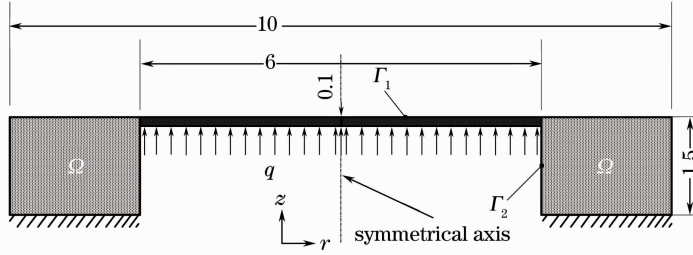


图 2 初始设计区域及尺寸

Fig. 2 Initial design domain and structure dimensions

3.1 拓扑优化的数学模型

结构拓扑优化本质是一个“0-1”问题,即材料的“有”与“无”的问题,而数学上通常将此问题转化为连续的问题去研究。目前常见的连续体结构拓扑优化方法有均匀化方法、SIMP、进化算法(ESO)和水平集方法。SIMP 方法因其具有建模简单、求解方便、计算效率高、通用性好以及可移植性强等优点,是目前常用的设计方法^[9]。

SIMP 方法通过引入一种假想的相对物理密度 $\bar{\rho}_e \in [0, 1]$, 假设设计材料的宏观弹性模量与相对物理密度满足

$$E = E_{\min} + \bar{\rho}_e^p (E_0 - E_{\min}), \quad (2)$$

式中 E 是材料的宏观弹性模量; E_{\min} 为一很小的正值,用来保证整体刚度矩阵的非奇异性; E_0 为实体材料的弹性模量; p 为惩罚因子, $\bar{\rho}_e$ 为单元 e 的相对物理密度, $\bar{\rho}_e = 1$ 表示为实体单元, $\bar{\rho}_e = 0$ 表示该单元没有材料分布。这里 $\bar{\rho}_e$ 采用节点设计变量 $\bar{\rho}_i$ 的函数表达^[10]。

如图 2 所示,优化目标是在液体压力 q 作用下,寻找设计区域 Ω 的最优材料分布,使得边界 Γ_1 的变形面形尽量逼近球面。这是一个结构刚度和柔度平衡的问题,即设计区域 Ω 的结构既要有一定的刚度承受压力的作用,同时结构又要有足够的柔度产生满足球面方程的变形。因此选择最小平方和形式的柔性目标与能量形式的刚度目标加权的形式作为拓扑优化的目标函数,

$$\min[L(u, \bar{\rho})] =$$

$$\omega_1 \int_{\Gamma_1} F_{\Gamma_1}^{\text{arf}} (u - u^*)^2 d\Gamma_1 + \omega_2 \int_{\Omega} \frac{1}{2} f_{T_0} u d\Omega, \quad (3)$$

$$\text{s. t. } L(u, \bar{\rho}) = 0, \quad (4)$$

$$L_{\text{arf}}(u_{\text{arf}}, \bar{\rho}) = 0, \quad (5)$$

$$V = \int_{\Omega} \bar{\rho}_e d\Omega \leq V_{\max}, \quad (6)$$

式中 ω_1 、 ω_2 是柔性目标和刚性目标的权值; $F_{\Gamma_1}^{\text{arf}}$ 为由平衡方程(5)式计算所得为达到指定变形所需的约束反力^[11]; u^* 为在指定变形边界 Γ_1 上所需达到的变形,由特定球面的解析表达式给出; f_{T_0} 为平衡方程(4)式由于液体压力所产生的外载荷; u 为平衡方程(4)式的位移解。

在优化模型中,约束条件 s. t. 包括两个平衡方程。(4)式表示由于液体压力作用于变形薄膜表面而产生的位移。由于薄膜变形量相对于变形透镜的关键几何尺寸较大,因此需要采用几何大变形表述平衡方程的非线性应变位移关系。平衡方程的有限元离散求解采用牛顿迭代法,在每一步迭代中需要更新切线刚度矩阵。(5)式表示在给定理想薄膜变形下需要在变形边界处提供的变形力^[11],该变形力将作为罚因子作用在目标函数中。

基于标准 Galerkin 有限元离散形式,优化模型式可离散为

$$L(\mathbf{U}, \bar{\rho}) = \omega_1 \cdot (\mathbf{U} - \mathbf{U}^*)^T \mathbf{A} (\mathbf{U} - \mathbf{U}^*) + \omega_2 \cdot \mathbf{U}^T \mathbf{K}_{T_0} \mathbf{U}, \quad (7)$$

式中 \mathbf{U} 为平衡方程(4)式的收敛解矢量; \mathbf{U}^* 为指定薄膜变形矢量; \mathbf{A} 为与解矢量 \mathbf{U} 维数相同的对角矩阵, 矩阵中除与变形边界 Γ_1 相关的自由度外, 其余全为零值, 在与 Γ_1 边界离散相关的自由度上主对角元素值为与 \mathbf{U}_{arf} 自由度相对应的数值。矢量 \mathbf{U}_{arf} 为由平衡方程(5)式所求得的数值解, \mathbf{K}_{T0} 为(4)式迭代收敛解所对应的切线刚度矩阵。对离散目标 $L(\bar{\rho}, \mathbf{U})$ 求物理设计变量 $\bar{\rho}$ 的一阶导数, 可得

$$\frac{\partial L}{\partial \bar{\rho}} = \omega_2 \mathbf{U}^T \frac{\partial \mathbf{K}_{\text{T0}}}{\partial \bar{\rho}} \mathbf{U} + \boldsymbol{\lambda} \frac{\partial \mathbf{K}_{\text{T0}}}{\partial \bar{\rho}} \mathbf{U}, \quad (8)$$

式中伴随矢量 $\boldsymbol{\lambda}$ 由伴随方程

$$\mathbf{K}_{\text{T0}}^T \boldsymbol{\lambda} = [-2\omega_1 \mathbf{A}(\mathbf{U} - \mathbf{U}^*) - 2\omega_2 f_{\text{T0}}]^T \quad (9)$$

求得。在上述求解过程中, 假定 \mathbf{U}_{arf} 是拉氏乘子型变量, 不参与对设计变量 $\bar{\rho}$ 的求导^[12-13]。

SIMP 方法在数值实现过程中存在棋盘格式和网格依赖性两类数值不稳定问题。常用的处理方法是在优化时对敏度、密度进行滤波处理, 可有效避免棋盘格式和网格依赖性。采用文献[14]中的滤波技术, 敏度滤波为

$$\frac{\partial \hat{f}}{\partial \rho_j} = \frac{1}{\max(\gamma, \rho_j) \sum_{i \in N_j} H_{ji} \rho_i} \sum_{i \in N_j} H_{ji} \rho_i \frac{\partial f}{\partial \rho_i}, \quad (10)$$

式中 f 为目标函数或约束函数, ρ_i 和 ρ_j 分别为节点 i 的密度和节点 j 的密度, γ 为很小正值(一般可取 $\gamma = 10^{-3}$) 以避免分母为零值, N_j 为以节点 j 为原点, 半径 r_{min} 内所有邻近节点的集合, H_{ji} 为加权系数,

$$H_{ji} = \max(0, r_{\text{min}} - \|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i\|), \quad (11)$$

式中 \mathbf{x}_j 和 \mathbf{x}_i 分别为节点 j 和节点 i 的位置。密度滤波为

$$\bar{\rho}_j = \frac{1}{\sum_{i \in N_j} H_{ji} \rho_i} \sum_{i \in N_j} H_{ji} \rho_i. \quad (12)$$

滤波前单元密度 ρ_i 称为设计变量, 滤波后的单元密度 $\bar{\rho}_i$ 称为物理密度。需注意的是, 在使用密度过滤时, 优化模型中的目标函数、约束函数值都利用物理

密度计算获得, 即滤波后的密度。应用密度过滤时, 目标函数及约束函数对设计变量的导数可通过连锁法则求得, 即

$$\frac{\partial f}{\partial \rho_j} = \sum_{e \in N_j} \frac{\partial f}{\partial \bar{\rho}_e} \frac{\partial \bar{\rho}_e}{\partial \rho_j} = \sum_{e \in N_j} \frac{1}{\sum_{i \in N_e} H_{ei}} H_{je} \frac{\partial f}{\partial \bar{\rho}_e}. \quad (13)$$

4 优化方法数值实现

优化问题的初始结构如图 2 所示, 液体压力设定为 $q = 25.6 \text{ Pa}$, 边界 Γ_1 的理想变形设定为半径 $R = 9.25 \text{ mm}$, 球心坐标在 $(0, 0, -8.75 \text{ mm})$ 的球面。

本文数值计算基于有限元软件 COMSOL 实现, 由于薄膜变形相对透镜的几何特征尺寸较大, 因此需要采用几何大变形有限元分析。为了更好地模拟液体作用在薄膜上力的方向将随薄膜变形而改变的特性, 综合考虑计算量及轴对称特性, 本文采用圆周角为 1° 的三维有限元模型进行薄膜变形的准确计算, 单元采用六面体单元, 图 3 为初始结构的三维网格模型。

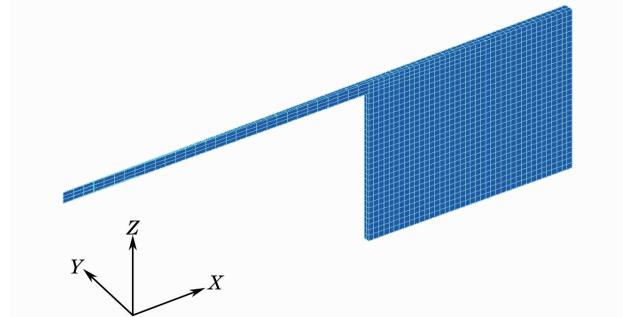


图 3 网格模型

Fig. 3 Initial mesh model

优化参数 $p = 4, \rho_{\text{mi}} = 0.3, E_{\text{min}} = 1.85 \times 10^{-3} \text{ MPa}, E_0 = 1.85 \text{ MPa}, V_{\text{max}} = 0.3, \omega_1 = 0.9995, \omega_2 = 0.0005$, 优化迭代步数在 102 步、200 步、295 步和 396 步时的拓扑结构如图 4 所示。图 5 为优化模型迭代 396 步过程中目标函数迭代曲线。

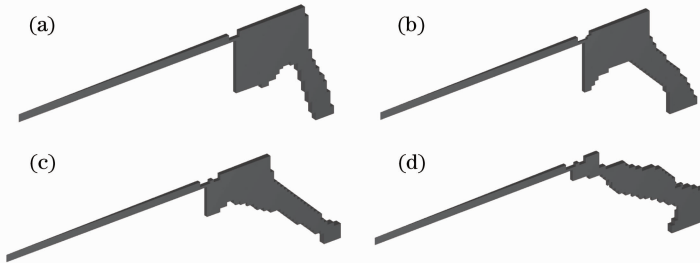


图 4 弹性基体拓扑结构。(a) 迭代步为 102; (b) 迭代步为 200; (c) 迭代步为 295; (d) 迭代步为 396

Fig. 4 Topology configurations of elastomeric supporting body. (a) Iterative step is 102; (b) interative step is 200; (c) interative step is 295; (d) iterative step is 396

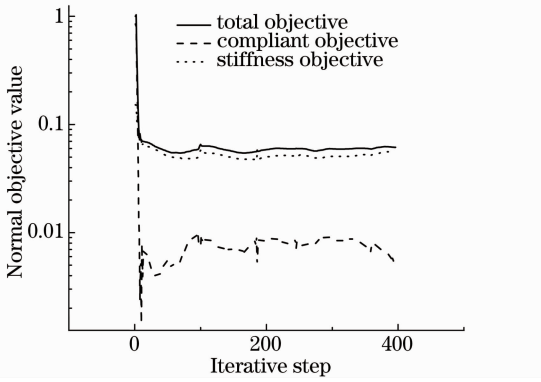


图5 拓扑优化迭代过程

Fig. 5 Topology optimization iterative progress

柔度目标由 $\omega_1 \cdot (U - U^*)^T A (U - U^*)$ 表示, 刚度目标由 $\omega_2 \cdot U^T K_{T0} U$ 表示。由图5可知, 加权目标、柔度目标、刚度目标三种目标都有不同程度的下降, 且柔度目标下降程度最大, 因此在图4中光学薄膜与弹性基体连接部分为柔性铰链, 这为弹性基体与薄膜连接处能提供足够大的变形。由图4和图5可知, 虽然迭代过程有轻微的振荡, 但结构的拓扑构型没有变, 改变的只是柔性铰链的分布形状。边界 Γ_2 在建立有限元模型时, 没有施加液体压力, 这是为了避免因施加液体压力边界 Γ_2 出现实体结构, 此处的结构除了限制腔体的拓扑结构之外对边界 Γ_1 变形成球面影响很小。

5 结构参数设计及仿真

为了使拓扑优化的结果能够用 PDMS 固化工工艺制造出来并保持光学薄膜的变形能力, 本文以拓

扑优化结果为依据, 在考虑可加工性的前提下, 对拓扑优化所得拓扑构型来提取主要拓扑构型; 由于模型具有旋转对称性, 因此只需提取对称面的二维形状, 用分布式柔性铰链替代拓扑优化结果中弹性薄膜与弹性体连接部分的中间值结构^[15], 并利用二阶贝塞尔曲线对边界进行光滑处理; 以贝塞尔曲线的端点坐标、控制点坐标和权重作为设计变量, 对分布式柔性铰链的关键形状参数做进一步寻优。因此形状优化设计变量选择图6(a)中所示的点1、点2、点3、点4的位置坐标 (r_1, z_1) 、 (r_2, z_2) 、 (r_3, z_3) 、 (r_4, z_4) 及点2、点5、点6的权重 w_2, w_5, w_6 , 记为 $x = [r_1, z_1, r_2, z_2, r_3, z_3, r_4, z_4, w_2, w_5, w_6]$, 其中点1为曲线L1与曲线L5的公共端点, 点2为曲线L1的线外控制点, 点3为曲线L1与曲线L2的公共端点, 点4为曲线L3与曲线L4的公共端点, 点5、点6分别是曲线L4、L5的线外控制点。形状优化目标函数选择与拓扑优化目标函数相同的加权和目标函数, 权重 $\omega_1 = 0.01, \omega_2 = 0.09$ 。为了避免出现不易加工的结构形状, 对设计变量施加 $|x - x_{ini}| \leq 0.1$ 约束, 其中 x_{ini} 为设计变量初始值, 优化算法采用复合形法, 设计变量初始值为 $[-0.0553, 3.4000, -0.0603, 3.4869, -0.0848, 3.5704, -0.0153, 3.5000, 0.9935, 0.7775, 0.7945]$, 目标函数初始值为 5.0×10^{-8} , 优化后设计变量为 $[-0.0650, 3.4033, -0.0568, 3.4878, -0.0903, 3.5709, -0.0077, 3.4966, 0.9951, 0.7780, 0.7931]$, 优化后目标函数为 4.8×10^{-8} 。得到了易于加工制造的液体透镜变形结构, 如图6(b)所示。

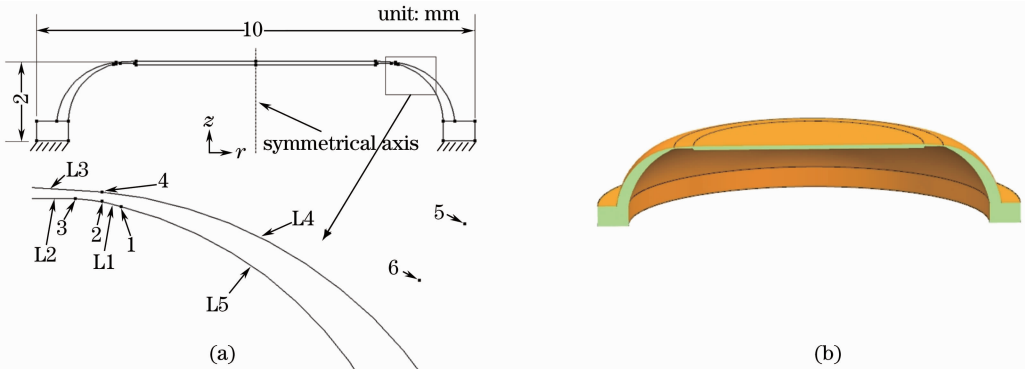


图6 形状优化模型及优化结果。(a) 形状优化模型; (b) 优化结构三维模型

Fig. 6 Shape optimization model and optimization result. (a) Shape optimization model; (b) three dimension optimized structure

针对图6所示的液体透镜结构与初始设计结构建立几何大变形有限元模型进行仿真并对变形后光学薄膜进行面形精度分析^[16-20], 光学薄膜变形后弦

高分别为 0.6、0.5、0.4、0.1 mm, 对应球面半径分别为 7.8、9.25、11.45、45.05 mm 时, 液体透镜优化结构和初始结构面形误差峰谷(PV)值、RMS 值如

表 1、表 2 所示,表中 Is 表示初始结构, Os 表示优化结构, D 、 $0.95D$ 、 $0.9D$ 表示光学薄膜取全口径、95%口径、90%口径。

表 1 面形误差的 PV 值
Table 1 PV value of mirror surface error

Hypotenuse high /mm	Structure	PV (D) /(10^{-2} mm)	PV ($0.95D$) /(10^{-2} mm)	PV ($0.9D$) /(10^{-2} mm)
0.6	Is	5.2008	2.3959	1.0184
	Os	0.40567	0.32349	0.24758
0.5	Is	4.9865	2.3912	1.0169
	Os	0.28472	0.28405	0.25513
0.4	Is	5.4418	3.3513	1.7583
	Os	0.32985	0.35077	0.33365
0.1	Is	2.7897	2.1791	1.6766
	Os	0.39137	0.31038	0.24252

表 2 面形误差的 RMS 值
Table 2 RMS value of mirror surface error

Hypotenuse high /mm	Structure	PV (D) /(10^{-3} mm)	PV ($0.95D$) /(10^{-3} mm)	PV ($0.9D$) /(10^{-3} mm)
0.6	Is	7.5345	3.4672	1.4019
	Os	0.88955	0.69379	0.52575
0.5	Is	7.2906	3.3445	1.3692
	Os	0.81888	0.73188	0.62220
0.4	Is	8.9554	5.2214	2.8409
	Os	1.0676	0.99220	0.88086
0.1	Is	5.9792	4.6994	3.6672
	Os	0.87590	0.69709	0.55125

由表 1、表 2 可知,优化后结构变形薄膜面形误差 PV 值、RMS 值比初始结构变形薄膜面形误差 PV 值、RMS 值降低了近一个数量级,并且优化后结构变形薄膜在弦高为 0.5 mm 时取得面形误差 PV 值、RMS 值的最小值,这是优化目标函数中薄膜理想变形的弦高为 0.5 mm 时对应的理想半径为 9.25 mm 差别最小的缘故。而此时在光学薄膜口径分别取 100%、95%、90%时,优化结构变形薄膜面形误差 PV 值分别是初始结构的 5.7%、11.9% 和 2.5%,RMS 值分别是初始结构的 11.2%、21.9% 和 45.4%。

与文献[3]中液体透镜变形薄膜面形误差 PV 值、RMS 值做对比表明,优化后液体透镜变形薄膜的面形误差有明显的改善,对比结果在表 3 中列出,表中 Fs 表示文献[3]中液体透镜。对比时,薄膜变形后弦高分别取 0.6、0.5、0.4、0.1 mm 时,对比口径取 $d=2.5$ mm。

由于 Zernike 多项式与光学中惯用的 Seidel 像差容易建立联系,利用 36 项 Zernike 多项式对光学

薄膜变形后弦高分别为 0.6、0.5、0.4、0.1 时进行拟合^[21-22],忽略前三项,用 Zernike 系数 Z 作为评价指标对比优化结构变形薄膜的拟合 Zernike 系数 Z_{Os} 和初始结构变形薄膜的拟合 Zernike 系数 Z_{Is} ^[3,23],如图 7 所示。可知,优化结构的变形薄膜 Zernike 系数的第 4、第 9、第 16、第 25 项比初始结构的变形薄膜 Zernike 系数有显著的降低,优化后的液体透镜高级球差基本消失。

表 3 面形误差 PV、RMS 值
Table 3 PV、RMS values of mirror surface error

Hypotenuse high /mm	Structure	PV / (10^{-3} mm)	RMS / (10^{-4} mm)
0.6	Fs	0.3154	0.6756
	Os	0.03795	0.07086
0.5	Fs	0.3592	0.7921
	Os	0.07441	0.1497
0.4	Fs	0.3267	0.7569
	Os	0.1833	0.4042
0.1	Fs	1.360	3.156
	Os	0.1051	0.2588

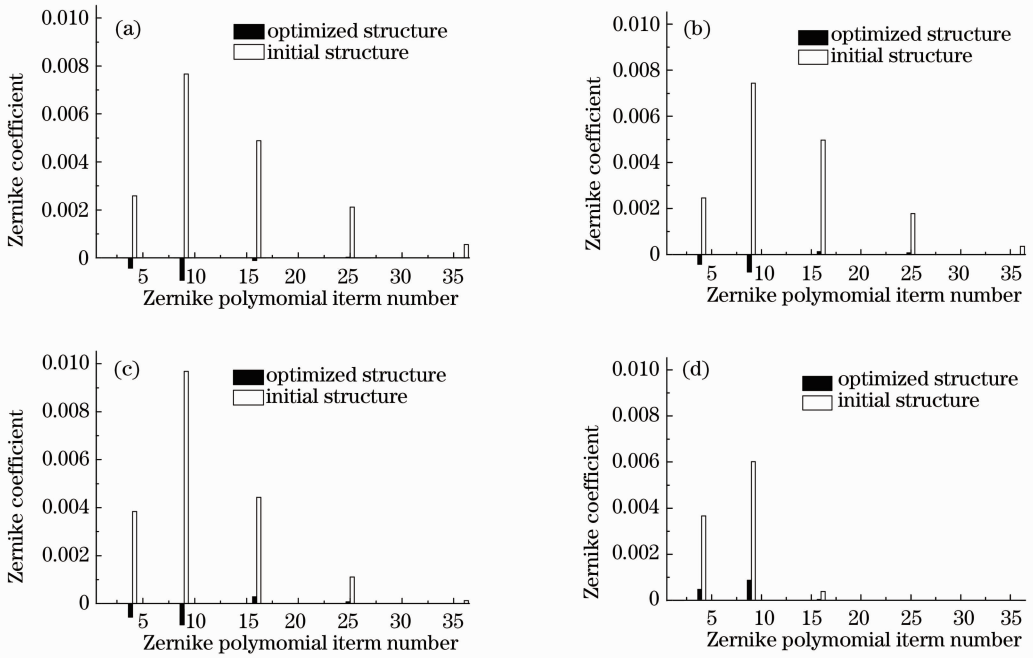


图 7 优化液体透镜和初始透镜变形薄膜的 Zernike 系数对比(Z_4, Z_9, Z_{10}, Z_{26})。

(a) 弦高为 0.6 mm; (b) 弦高为 0.5 mm; (c) 弦高为 0.4 mm; (d) 弦高为 0.1 mm

Fig. 7 Contrast of Zernike coefficients of optimized liquid lens and initial liquid lens (Z_4, Z_9, Z_{10}, Z_{26}). (a) Hypotenuse high is 0.6 mm; (b) hypotenuse high is 0.5 mm; (c) hypotenuse high is 0.4 mm; (d) hypotenuse high is 0.1 mm

Z_{Os} 与 Z_{Fs} 的对比如图 8 所示, Z_{Fs} 为文献[3]中液体透镜变形薄膜的面形误差的 Zernike 系数。对

比时, 薄膜变形后弦高分别取 0.6、0.5、0.4、0.1 mm 时, 对比口径取 $d=2.5$ mm。

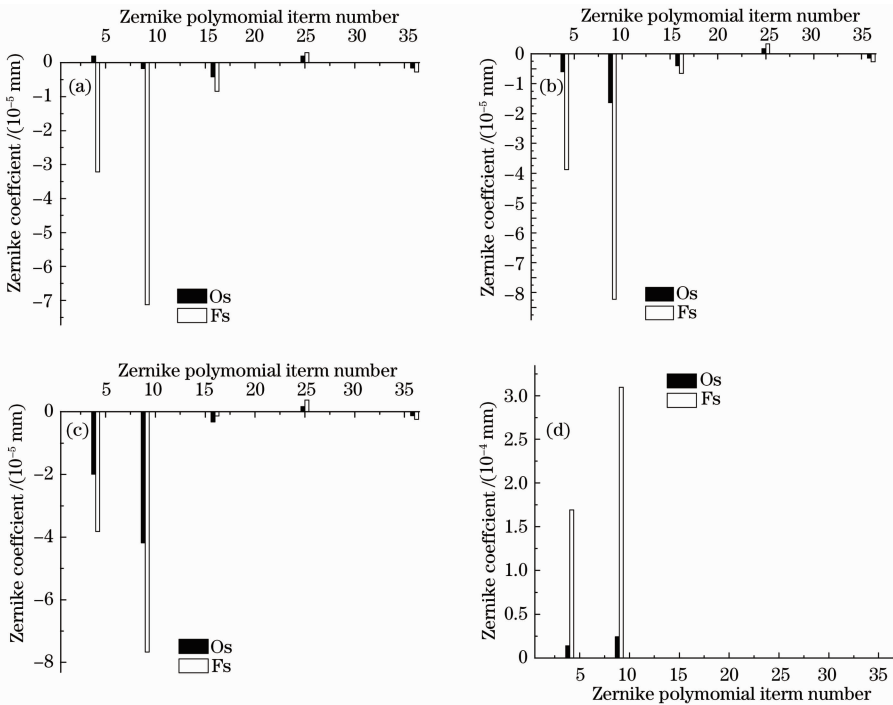


图 8 优化液体透镜和 Fs 液体透镜变形薄膜的 Zernike 系数对比(Z_4, Z_9, Z_{16}, Z_{36})。

(a) 弦高为 0.6 mm; (b) 弦高为 0.5 mm; (c) 弦高为 0.4 mm; (d) 弦高为 0.1 mm

Fig. 8 Contrast of Zernike coefficients of optimized liquid lens and Fs liquid lens (Z_4, Z_9, Z_{16}, Z_{36}). (a) Hypotenuse high is 0.6 mm; (b) hypotenuse high is 0.5 mm; (c) hypotenuse high is 0.4 mm; (d) hypotenuse high is 0.1 mm

对比结果显示,优化后液体透镜变形薄膜的几何像差较文献[3]中的液体透镜有明显的改善。

6 结 论

通过对光学透明弹性薄膜变曲率液体透镜弹性基体的拓扑优化,获得了接近球面变形的优化拓扑构型,并依据拓扑优化的结果,设计了易于制造液体透镜的变形结构。该变形结构的数值仿真结果表明,优化后结构变形薄膜面形误差 PV 值、RMS 值比初始结构变形薄膜面形误差 PV 值、RMS 值降低了近一个数量级,并且优化后结构变形薄膜在弦高为 0.5 mm 时取得面形误差 PV 值、RMS 值的最小值。同时在光学薄膜口径分别取 100%、95%、90% 时,优化结构变形薄膜面形误差 PV 值分别是初始结构的 5.7%、11.9% 和 2.5%,RMS 值分别是初始结构的 11.2%、21.9% 和 45.4%。变形薄膜 Zernike 多项式拟合结果表明,优化结构的第 4、第 9、第 16、第 25 项 Zernike 系数比初始结构的 Zernike 系数有显著的减小,成像质量得到很大程度的提高。本文的研究结果为利用液体透镜进行光学系统集成设计以及光学系统的小型化提供了一定的参考。关于透镜倾斜、振动及温度的影响还需进一步的研究。

参 考 文 献

- 1 L Dong, A K Agarwal, D J Beebe, *et al.*. Adaptive liquid microlenses activated by stimuli-responsive hydrogels [J]. *Nature*, 2006, 442(7102): 551-554.
- 2 H Ren, S T Wu. Variable-focus liquid lens[J]. *Opt Express*, 2007, 15(10): 5931-5936.
- 3 F Schneider, J Draheim, C Müller, *et al.*. Optimization of an adaptive PDMS-membrane lens with an integrated actuator[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, 154(2): 316-321.
- 4 Y Seow, A Liu, L Chin, *et al.*. Different curvatures of tunable liquid microlens via the control of laminar flow rate[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 93(8): 084101.
- 5 W Xiao, S Hardt. An adaptive liquid microlens driven by a ferrofluidic transducer [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2010, 20(5): 055032.
- 6 Zheng Haobin, He Yanlan, Ding Daoyi. The developing milestones of liquid lens[J]. *Physics and Engineering*, 2008, 18(4): 42-47.
- 7 郑浩斌, 何焰蓝, 丁道一. 液体透镜的诞生和发展[J]. *物理与工程*, 2008, 18(4): 42-47.
- 7 F Schneider, J Draheim, R Kamberger, *et al.*. Process and material properties of polydimethylsiloxane (PDMS) for Optical MEMS[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, 151(2): 95-99.
- 8 F Schneider, T Fellner, J Wilde, *et al.*. Mechanical properties of silicones for MEMS [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2008, 18(6): 065008.
- 9 Guo Zhongze, Zhang Weihong, Chen Yuze. The review of structure topology optimization design[J]. *Mechanic Design*, 2007, 24(8): 1-5.

- 郭中泽, 张卫红, 陈裕泽. 结构拓扑优化设计综述[J]. *机械设计*, 2007, 24(8): 1-5.
- 10 F Wang, B S Lazarov, O Sigmund. On projection methods, convergence and robust formulations in topology optimization[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2011, 43(6): 767-784.
- 11 Z Liu, J G Korvink. Using artificial reaction force to design compliant mechanism with multiple equality displacement constraints[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2009, 45(8): 555-568.
- 12 T Buhl, C B Pedersen, O Sigmund. Stiffness design of geometrically nonlinear structures using topology optimization [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2000, 19(2): 93-104.
- 13 C B Pedersen, T Buhl, O Sigmund. Topology synthesis of large-displacement compliant mechanisms[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2001, 50(12): 2683-2705.
- 14 E Andreassen, A Clausen, M Schevenels, *et al.*. Efficient topology optimization in MATLAB using 88 lines of code[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2011, 43(1): 1-16.
- 15 O Sigmund. On the design of compliant mechanisms using topology optimization[J]. *Journal of Structural Mechanics*, 1997, 25(4): 493-524.
- 16 Zhao Lei, Gong Yan. Design and analysis for the high-precision lens support structure of objective lens for lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0922001.
- 赵磊, 巩岩. 光刻物镜中透镜高精度支撑结构的设计及分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0922001.
- 17 Chen Fulin, Zhang Jingxu, Wu Xiaoxia, *et al.*. Supporting structure of 620 mm thin primary mirror and its active surface correction[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(5): 1022-1029.
- 陈夫林, 张景旭, 吴小霞, 等. 620 mm 薄镜面的主动支撑结构及面形校正[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 1022-1029.
- 18 Yang Guanghua, Li Yanqiu. Thermal and structural deformation of projection optics and its influence on optical imaging performance for 22 nm extreme ultraviolet lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0322005.
- 杨光华, 李艳秋. 22 nm 极紫外光刻物镜热和结构变形及其对成像性能影响[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0322005.
- 19 Wu Xiaoxia, Yang Hongbo, Zhang Jingxu, *et al.*. Optimal design of support for the large-aperture sphere mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(1): 129-132.
- 吴小霞, 杨洪波, 张景旭, 等. 大口径球面镜支撑系统的优化设计[J]. *光子学报*, 2009, 38(1): 129-132.
- 20 Ceng Chunmei, Guo Peiji, Yu Jingchi. Demonstration and analysis on correction of 0.5 m ultra-thin mirror with active supports[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(3): 571-578.
- 曾春梅, 郭培基, 余景池. 0.5 m 超薄镜主动支撑面形校正及实验[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 571-578.
- 21 Zhang Wei, Liu Jianfeng, Long Funian, *et al.*. Study on wavefront fitting using Zernike polynomials [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(5): 675-678.
- 张伟, 刘剑峰, 龙夫年, 等. 基于 Zernike 多项式进行波面拟合研究[J]. *光学技术*, 2005, 31(5): 675-678.
- 22 Lan Gongpu, Wang Xuan, Liang Wei, *et al.*. Optical design and thermal analysis for the active-focusing aerial camera objective [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0322006.
- 蓝公仆, 汪旋, 梁伟, 等. 主动调焦式航空相机物镜光学设计及温度仿真分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0322006.
- 23 Yuan Wenquan, Gong Yan. Design and analysis for the high-precision lens support structure of objective lens for lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1222003.
- 袁文全, 巩岩. 光刻物镜中主动液体透镜的像差特性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1222003.