

doi:10.3788/gzxb20164506.0622001

大变倍比液体透镜变焦系统设计

王鸿鹤¹, 李湘宁^{1,2,3}, 潘文强¹, 黄浩¹

(1 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

(2 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

(3 教育部光学仪器与系统工程研究中心, 上海 200093)

摘 要:分析了电润湿液体变焦透镜的光学特性和变焦系统设计理论, 将各组元焦距作为变量, 列出了该液体透镜变焦系统的变焦方程, 利用粒子群算法优化求解变焦方程, 得到符合条件的初始结构; 再利用优化设计软件进行像差平衡, 设计了一个具有 4 片液体透镜, 焦距为 20~120 mm 的大变倍比液体透镜变焦系统. 系统各焦距处光学传递函数在 66 lp/mm 处均大于 0.3, 畸变小于 2%, 满足设计要求.

关键词:光学设计; 变焦系统; 初始结构; 光焦度分配; 液体透镜

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)06-0622001-7

Design of Large Zoom Ratio Liquid Lens System

WANG Hong-he¹, LI Xiang-ning^{1,2,3}, PAN Wen-qiang¹, HUANG Hao¹

(1 School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

(2 Shanghai Key Lab of Modern Optical System, Shanghai 200093, China)

(3 Research Center of Optical Instruments and System Engineering, Ministry of Education, Shanghai 200093, China)

Abstract: The optical properties of the electro-wetting liquid zoom lens and the theory of zoom lens design were analyzed. Make the focal length of each element be variable and list the equations of the liquid lens zoom system. An initial liquid zoom lens structure by utilizing PSO and balance aberrations was studied by using optical design software. A $6\times(20\sim 120\text{mm})$ zoom ratio liquid lens zoom system with four pieces of liquid lens was designed. The MTF at 66 lp/mm of this system at each focal length are greater than 0.3, and distortion is less than 2%, which meets the design requirements.

Key words: Optical design; Zoom system; Original structure; Optical power allocation; Liquid lens

OCIS Codes: 220.4830; 220.3620; 220.3630

0 引言

变焦距系统其焦距在一定范围内变化, 而像面位置保持不变或基本不变. 变焦距系统既能对被观察物体作大范围小倍率的概览, 也能对它作小区域大倍率的仔细观察^[1]. 近年来, 随着光学设计理论的完善以及加工制造业的发展, 变焦距光学系统的成像质量逐渐提高, 甚至可与定焦距系统相媲美, 因此变焦系统在各种工作生活领域越来越多地被应用.

传统的变焦镜头通常由两片或者多片透镜组合而

成, 有些甚至要结合棱镜等其他光学部件, 并利用电机和齿轮等机械装置调节透镜间的相对位置来实现变焦. 由于变焦镜头的结构复杂、精确度低、质量大、能耗高, 不仅制约其应用范围, 而且成本较高. 为了在不配备机械部件的情况下实现自动对焦和变焦功能, 国内外研究学者提出了许多方案. 如液压式微透镜、基于液晶的微变焦透镜及基于电润湿原理的液体光学透镜等^[2-3].

目前确定变焦系统初始结构高斯参量的基本数学方法是解一元或多元非线性方程(组)或者通过查找专

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11104184)、国家重点基础研究发展计划(No. 2011cb707504)、教育部博士点新教师类基金(No. 2011312012011)和上海市教育委员会创新项目(No. 12YZ108)资助

第一作者: 王鸿鹤(1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光学系统设计. Email: shlgdxwhh@163.com

导师(通讯作者): 李湘宁(1956—), 女, 教授, 硕士, 主要研究方向为光学系统设计. Email: lxning@usst.edu.cn

收稿日期: 2015-11-20; **录用日期:** 2016-03-07

<http://www.photon.ac.cn>

利的方式获得,但关于新型液体变焦系统的专利较少,而求解法一般是解一元或多元非线性方程(组).但高斯括弧、变高斯括弧、连分数、几何法等^[1]存在各种缺点,如计算困难、计算量大、不易找到合理解等,且对设计人员要求较高.

某些初始结构生成算法可以不需要全部组态的结构参量,但只能优化变焦系统中各组态间变化的变量.如 T. Kryszczczyński 提出的优化算法,分开优化运动和焦距,是一种嵌套优化方法^[4],但效率较低,完全依赖于好的初始值. Sourav Pal 提出了一种优化初始结构的算法,但只能使用少数特定变焦类型^[5-6](两组元的变焦系统).

本文研究了变焦理论,给出了改变元件焦距变焦系统的变焦方程,并使用优化的方法求解该方程,设计了一个具有 6 倍变倍比,焦距范围为 20.0~120.0mm 的液体透镜变焦结构.该设计算法以全部组态为对象,无需提供变焦系统变焦组态的全部结构,只需要提供一个组态即可,其他组态由程序在适当限制条件下自动寻找,简化了设计难度,并能同时优化间距和焦距,效率较高.适用于任何变焦系统,不管是改变间距的传统变焦,还是改变焦距的液体变焦和液晶变焦,还是它们的组合形式.在不同类型的系统中应用时,修改相关程序或者限制条件即可.

1 电润湿效应液体透镜

设计中,使用上海理工大学研制的双层薄膜液体变焦透镜,该液体透镜具有较大的口径,能为光学系统提供较大的视场^[7-10].主要光学参量为:口径 10 mm,厚度 8 mm,液体 1 的折射率 $n_1 = 1.34$,色散系数 $v_1 = 44.2$,液体 2 的折射率 $n_2 = 1.49$,色散系数 $v_2 = 51.8$,单片焦距范围 $(-\infty, -40 \text{ mm}] \cup [40 \text{ mm}, +\infty)$,光焦度变化范围 $[-25D, 25D]$,结构示意图和实物图见图 1.

图 1(a)为圆柱型双液体变焦透镜结构,(b)为实物图,圆柱管材料为金属钽,圆柱管内壁镀有高介电常量层薄膜和疏水层薄膜.在圆柱管内注入两种不相容并透明的液体,得到液体透镜.其中液体 1 和液体 2 分别为导电液体和绝缘非极性液体.两种液体的制备必须满足两个基本条件^[2]:

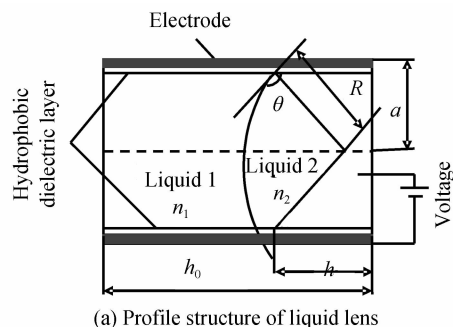
1) 折射率不同:当光线透过液面时,液体透镜可以改变光线的方向.从而,在液体曲率发生改变时液体透镜可以实现变焦功能;

2) 密度相同:确保模型结构不受重力方向的影响,需要使其密度相同^[8].

根据高斯公式,该液体透镜的焦距 f' 为

$$f' = r_1 / (n_2 - n_1) \quad (1)$$

焦距与液体透镜外加电压有一定对应关系,文献^[9]中分析得到不同条件下液体透镜焦距与外加电压



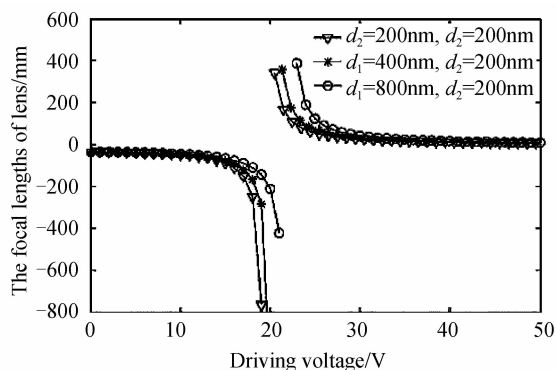
(a) Profile structure of liquid lens



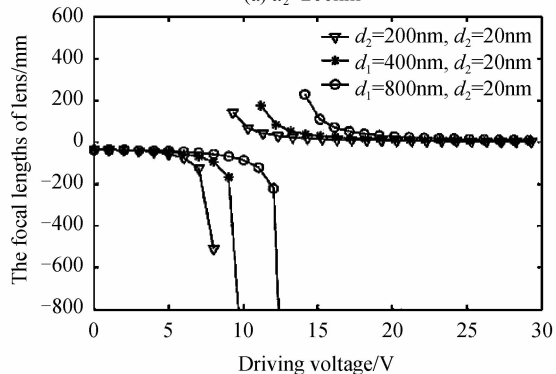
(b) Real picture of liquid lens

图 1 液体透镜结构与实物

Fig. 1 The structure and real picture of liquid lens 的关系,见图 2,图中 d_1 为高介电常量层薄膜的厚度, d_2 为疏水层薄膜的厚度.从图 2 中可以看出,不同膜层厚度只影响透镜在达到不同变焦范围时驱动电压的大小.因此,电压数值只是中间变量,设计中只考虑其光学特性,保证焦距在允许范围内变化,可忽略电压值.



(a) $d_2 = 200 \text{ nm}$



(b) $d_2 = 20 \text{ nm}$

图 2 外部电压与透镜焦距的关系

Fig. 2 Focal length versus voltage for the liquid lens

设计变焦系统时只考虑其光学特性,根据其像差特性,忽略前后密封用的薄玻璃片等大部分参量,考虑其液面曲率变化范围^[1],在ZEMAX中等效模型见图3.

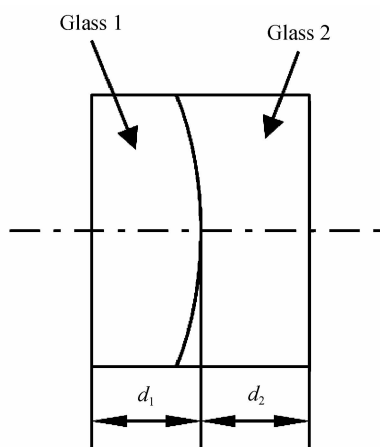


图3 液体透镜在 ZEMAX 中的等效模型
Fig. 3 Alternative structure in ZEMAX

2 液体变焦设计方法

2.1 优化设计变焦理论

液体透镜变焦系统的变焦过程可以理解为一个连续微分的过程,不同的变焦结构,差别仅仅在于系统的焦距不同.文献[1]以放大率为间接参量,利用变焦微分方程来描述变焦系统,使用方便,利于对系统作解析判断,如解区间、平滑换根等.本文以此为出发点,根据变焦系统不同变焦结构的焦距构造不同的变焦方程,以放大率为间接参量,设定适当的限制条件,用粒子群优化算法求解各组元的焦距.

以中焦端结构为初算条件,将组元的焦距设为变量,构造出不同焦距的变焦方程,并设置适当的边界条件,用粒子群优化算法求得最佳解.对最佳解进行转换计算,就可以得到不同焦距处各组元的焦距.

在图4所示的结构中,有 k 个组元,每个组元焦距

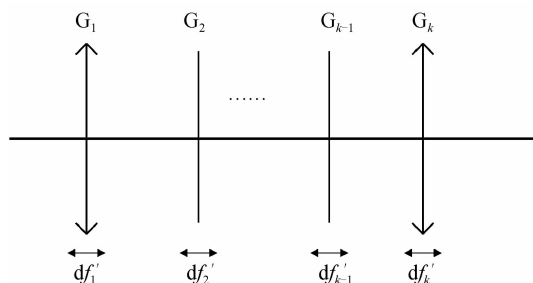


图4 液体透镜变焦结构

Fig. 4 Structure chart of liquid lens zoom system

可以在指定范围内自由变动.各组元序号为 $i(i=1,2,3,\dots,k)$,设每个组元的焦距、垂轴放大率、位置、焦距变化量分别为 f'_i, m_i, x_i, df'_k .

系统变焦方程 Y 为

$$Y = \sum_{i=1}^k dL_i = 0 \quad (2)$$

式中 $L=l'+l$,表示各组元物像共轭距,说明变焦系统在变焦过程中,只需要保证个组元共轭距总和相等即可.因此,结合光线追迹的数据,求解方程 Y ,可求得各组元的焦距 f'_k .但式(2)有无数解,需使用优化法找到一组解,使其满足这个方程的同时,又使系统焦距发生指定变化.

假设变焦系统需要使用 n 个结构描述整个变焦过程,其焦距分别为 $F'_1, F'_2, F'_3, \dots, F'_n$,且 $F'_1 < F'_2 < F'_3 < \dots < F'_n$,则该系统变倍比为 $K = F'_n / F'_1$. $f'_{z,1}, f'_{z,2}, f'_{z,3}, \dots, f'_{z,k}$ 为第 z 个变焦结构处各组元焦距.根据式(2)构造一系列焦距为 $F'_z(z=1,2,3,\dots,n)$ 的方程 $Y_z(z=1,2,3,\dots,n)$,并用优化的方法找到满足的解 $X_z(z=1,2,3,\dots,n)$.

根据一系列的解,换算得到各组元焦距 $f'_{z,i}(z=1,2,3,\dots,n; i=1,2,3,\dots,k)$,并绘制出变化曲线,这种思想可以用图5说明.

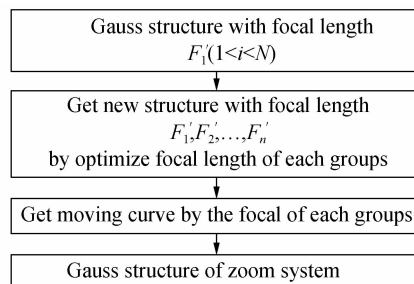


图5 变焦过程微分量化思想示意图

Fig. 5 Differential quantization of zoom lens system

然而,在优化求解变焦方程 Y 时,需要对解空间增加约束条件,否则无法找到合理解.

对于一个焦距为 F'_z 的变焦方程 Y_z ,其合理的解必须要满足两类约束.一是要满足其系统自身的约束,二是要满足其他变焦结构的约束:

1) 焦距与目标焦距的差在一定范围内

由于本文的主要思想就是微分分解变焦结构,所以对于每一个变焦方程焦距要求较为严格,将目标焦距差限制在1%以内,即: $|F'_z - F'_z| < 0.01F'_z$,其中 F'_z 为结构的目标焦距.

2) 各焦距在合理范围内

各组元的焦距要符合实际,变化范围要跟实际元件一致.

3) 不同变焦结构间各焦距变化在合理范围内

连续两个变焦结构之间各组元的焦距变化不能太大,文中将该限制与焦距结合起来.在 z 结构到 $z+1$ 结构的突变过程中,假设系统焦距变化规律为: $F'_{z+1} = \alpha F'_z$,其中 $\alpha > 1$,文中限制 $z+1$ 结构中各组元焦距的变化必须满足条件

$$|f'_{z+1,i} - f'_{z,i}| = 0.5\alpha F'_z \quad (3)$$

4) 各组元焦距变化曲线在任意点处的曲率限制在

一定较小范围之内

为防止液体透镜焦距变化过速, z 变焦结构中 k 组元的焦距变化曲率 $u_{z,k}$ 应该在一定范围内, 使用差商代替微商之后得

$$u_{z,k} = f'_{z,k} / (1 + f'^2_{z,k})^{3/2} \quad (4)$$

式中 $f'_{z,k}$, $f''_{z,k}$ 分别为 $x_{z,k}$ 的一阶和二阶数值微分

$$f'_{z,k} = (f_{z,k} - f_{z-1,k}) / (F'_z - F'_{z-1}),$$

$$f''_{z,k} = (f'_{z,k} - f'_{z-1,k}) / (F'_z - F'_{z-1}).$$

文中规定: $|u_{z,k}| \leq 2/F'_z$.

5) 曲率平方和在一定范围内

由于优化算法具有容易掉入局部极值, 且掉入局部极值后无法跳出循环的固有局限性. 在大量试验中发现, 优化 z 次数较多之后, 出现某些组元焦距停滞变化, 而其他组元焦距变化过于迅速的现象, 且一旦出现这种现象后, 算法无自动矫正能力, 再优化下去这种现象越发严重. 这种各组元焦距变化不均匀的结构没有充分利用各组元变焦能力, 也不利于像差矫正与平衡. 为此需要增加限制条件, 使其焦距变动平均分配到每一个组元. 本文规定曲率平方和满足

$$\sum_{k=1}^n u^2_{z,k} \leq \frac{n}{F'_z} \quad (5)$$

2.2 用粒子群算法优化光学结构

粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法^[12] 是 Kennedy 和 Eberhart 受人工生命研究结果的启发, 通过模拟鸟群觅食过程中的迁徙和群聚行为而提出的一种基于群体智能的全局随机搜索算法, 它将群体 (Swarm) 中的个体看作是在 N 维搜索空间中没有质量和体积的粒子 (Particle), 每个粒子以一定的速度在解空间运动, 并向自身历史最佳位置 P_{best} 和邻域历史最佳位置 G_{best} 聚集, 实现对候选解的进化. PSO 算法具有很好的生物社会背景^[13] 而易理解, 参量少而易实现, 对非线性多峰问题均具有较强的全局搜索能力, 在科学研究与工程实践中得到了广泛关注^[14-15].

根据粒子群算法的数学模型, 将每个解 X 看作一个粒子就可以将粒子群优化算法应用到液体变焦系统的优化求解中. 应用过程中, 优化算法三要素的对应关系为:

1) 优化变量

优化变量为每个组元的焦距 f' . 为了能评价组元焦距的变化曲线是否光滑等指标, 必须将该组元在多个变焦结构中的 f' 传入用于计算光滑程度的评价函数.

2) 适应度

本文使用的评价函数为

$$\phi(x) = |F' - F'_t| \quad (6)$$

如文献^[16], 在后续研究中可以增加像差优化等功能, 设计出更复杂的系统.

3) 限制条件

在优化的时候对焦距使用 2.1 节提到的约束条件. 算法的特点是限制条件可以自由添加, 并不局限于各组元的焦距, 可以是各组元焦距变动均匀、平滑等条件, 也可以是总长、后截距、焦距范围等其他自定义条件. 自定义化的条件就需要对应的计算参量, 比如计算焦距变化是否平滑时, 需要至少 3 个变焦结构, 然而粒子算法在优化的时候只提供该粒子的当前结构, 因此计算时需要格外注意.

用 MATLAB 算法进行程序设计与实现, 设计重点与难点为光路追迹和粒子群算法, 程序代码见表 1.

表 1 MATLAB 粒子群算法优化程序清单
Table 1 File list of the program in MATLAB

File name	Function declaration	Note
p_main.m		Main file
p_cons.m	function yes=p_cons (fS,dS,sN,fTar)	File of constraint
p_fit.m	function fitness=p_fit (fS,dS,sN,fTar)	File for compute fitness

p_main.m 文件为算法入口文件, 它控制整个优化程序有序进行, p_cons.m 为检查某个粒子限制条件的文件, p_fit.m 为计算某个粒子评价函数的文件, 其中 fS, dS, sN, fTar 分别为某个粒子的焦距序列, 间距序列, 系统组元数, 目标焦距.

3 计算与分析

液体变焦系统要求视场 $2\omega = 10^\circ - 60^\circ$, 使用 $1/4''$ CCD, CCD 对角线半像高 2.16 mm, 焦距范围 20~120 mm, CCD 像素颗粒尺寸为 $7.5 \mu\text{m} \times 7.5 \mu\text{m}$.

由于所设计的变焦系统变倍比较大, 要求视场大, 使各元件距离不能太远, 否则各元件口径过大, 超过口径限制. 元件厚度决定各组元最小距离, 因此系统变倍比受元件厚度与口径的严格限制. 文献^[17] 设计了一个使用两片液体透镜的摄影物镜, 如图 6. 该设计利用了 Varioptic SA 公司的 ARCTIC 416 液体透镜, 有效通光口径为 2.4 mm, 厚度为 2.45 mm, 物镜焦距范围为 8~16 mm, 变倍比为两倍. 由于两片式无法控制像差, 使系统带有复杂的固定组. 将其透镜尺寸缩放到本例透镜大小, 其焦距变化为 40~80 mm, 远小于本例设计要求. 因此, 为了保证系统能设计成功, 拟使用 4 片液体透镜.

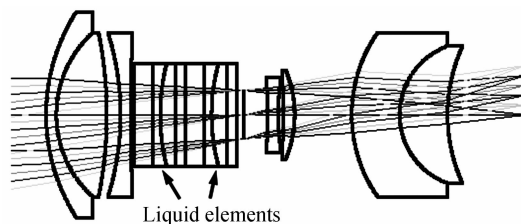


图 6 两倍液体透镜变焦系统实例

Fig. 6 Example of liquid zoom lens system with 2X focal various ratio

起算结构见图 7,数据见表 2.其中各组间距设为定值 30 mm,该值远大于透镜厚度 8 mm,各组元焦距也远大与焦距极限,有利于粒子在解空间运动,利于粒子群优化.



图 7 初始结构二维图

Fig. 7 Layout of original structure

表 2 初始结构数据

Table 2 Data of original structure

	Focal length F' /mm	Thickness d /mm
Group 1	-100	30
Group 2	100	30
Group 3	200	30
Group 4	100	

图 8 是在某次优化中粒子群算法的评价函数下降趋势.

从图 8 中可以看出,在较少迭代次数下就能将焦距优化到指定值,说明该算法效率高,收敛速度快.优化过程需要计算多次,找到较好的结果作为最终结果,建立 5 个变焦结构,并建立相应变焦方程,分别优化求解,最终得到一个变倍比为 6 倍的结构,如图 9.

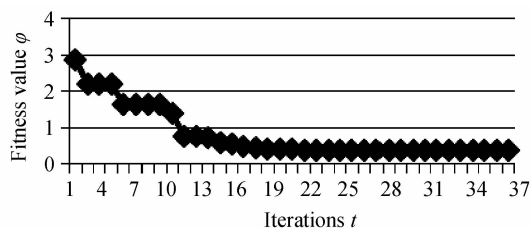


图 8 评价函数变化趋势

Fig. 8 Trend of fitness value in PSO

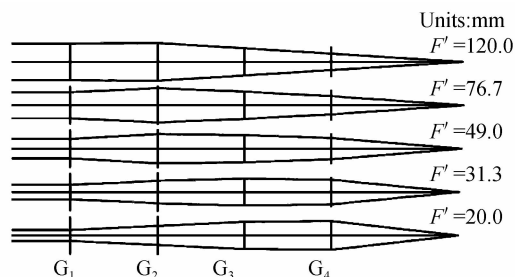


图 9 变焦系统的 5 个高斯结构

Fig. 9 2D layout of five configurations

5 个变焦结构焦距按等比数列分布,分别为 20.0、31.3、49.0、76.7 和 120.0 mm.将理想透镜替换为实际透镜后,结构如图 10.为整体平衡像差,需加入后固定组.由于液体透镜材料选择只有两种,色差较严重,因此后固定组采用一个双胶合透镜和一个单透镜的组合形式,所设计的液体变焦系统结构图见图 11.

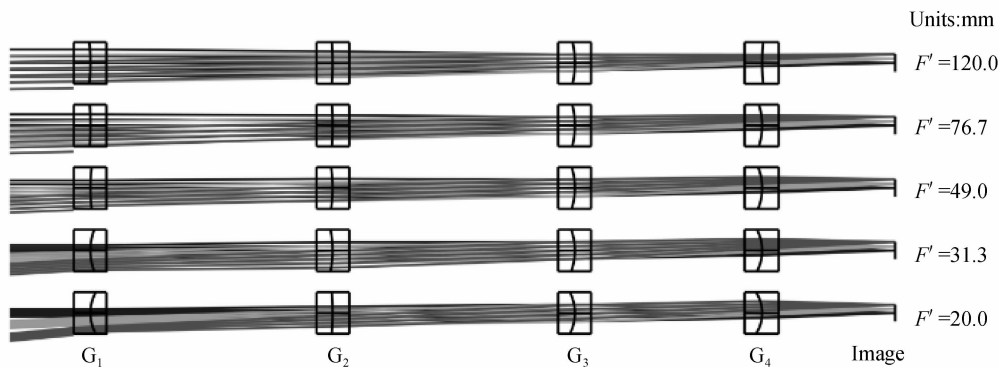


图 10 变焦系统实际结构

Fig. 10 2D layout of five configurations of real lens

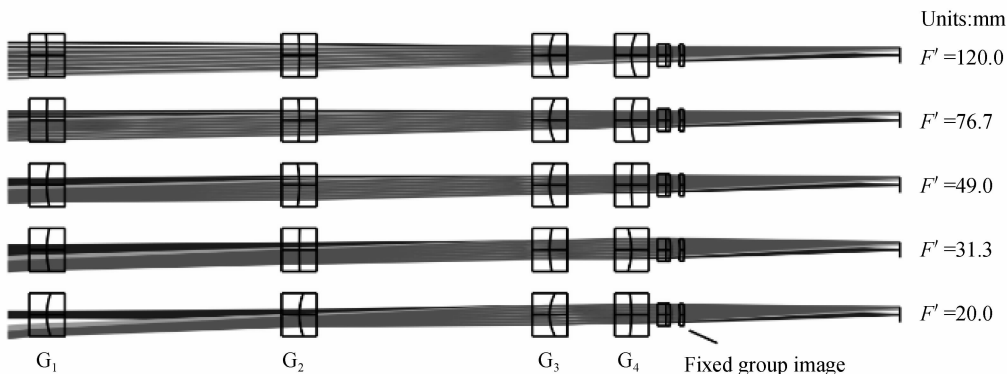


图 11 带后固定组的最终结构

Fig. 11 2D layout of zoom lens system with a fixed group at the back

各组元光焦度变化曲线见图 12. 其中各组元光焦度均在单片变焦范围内, 并且从图中 5 个结构的拟合曲线变化来看, 各个结构在变焦过程中光焦度变化平滑. 系统传递函数图见图 13, 不同视场的弥散斑均方根半径(Root Mean Square, RMS)值见表 3.

表 3 各变焦结构的 RMS 半径

Table 3 RMS of each configuration

Focus/mm	20.0	31.3	49.0	76.7	120
On axis/ μm	6.2	5.7	5.2	6.7	3.1
Half field/ μm	5.1	4.4	4.4	7.1	6.1
Full field/ μm	4.8	4.3	4.1	7.3	7.2

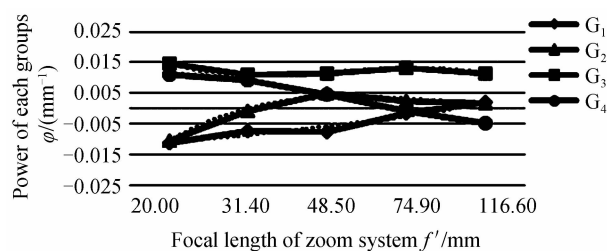


图 12 各组元光焦度变化曲线
Fig. 12 Power curves of each group

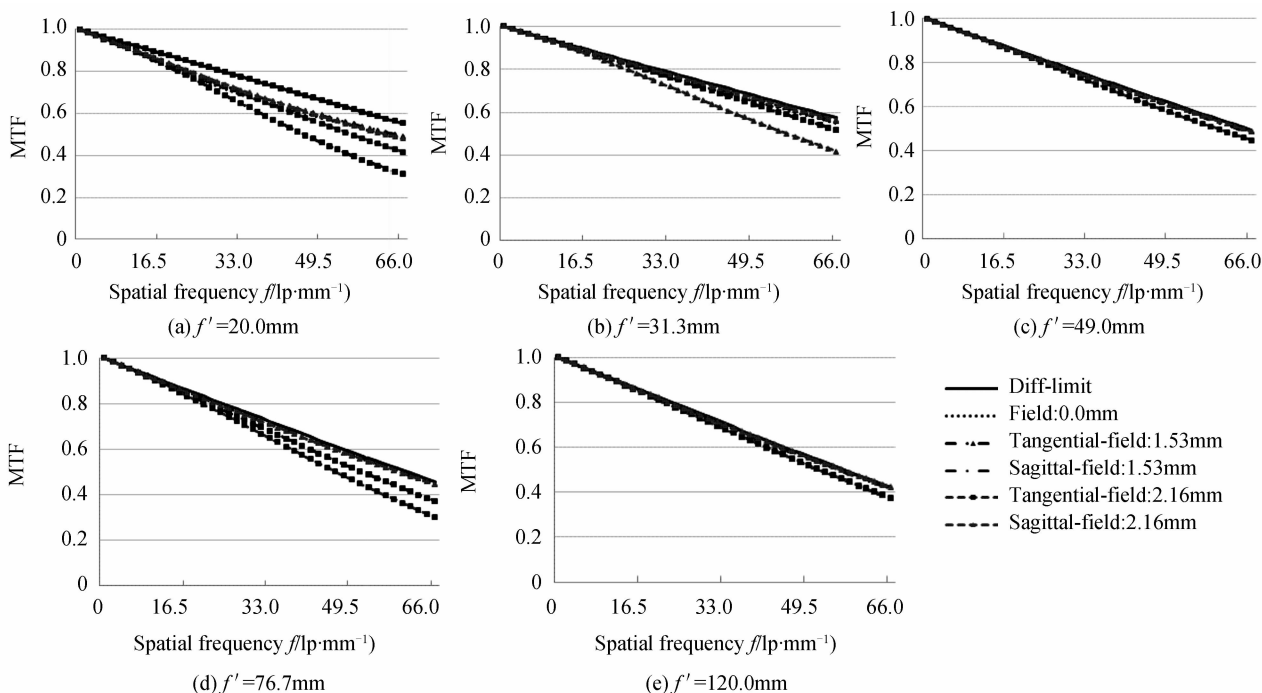


图 13 各变焦位置的 MTF
Fig. 13 MTF of the system

系统各结构各视场的传递函数在 66 lp/m 处均大于 0.3, 畸变均控制在 2% 以内, 满足成像质量要求. 从系统 RMS 值可以看出, 系统在各个位置各个视场处均达到小于一个像素 ($7.5 \mu\text{m}$) 的要求, 满足设计要求.

4 结论

文中采用全新的变焦系统设计模型, 利用粒子群优化算法针对指定的液体透镜, 设计了焦距为 20~120 mm 的 6 倍的液体透镜变焦系统. 该系统片数多、设计复杂、变焦比大、变焦无机械运动、响应速度快、可用于照相摄影、工业内窥镜、机器视觉、航空摄影等领域.

参考文献

[1] 陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
[2] BERGE B, PESEUX J. Variable focal lens controlled by an external voltage: an application of electrowetting[J]. *The European Physical Journal E*, 2000, **3**(2): 159-162.

[3] ZHANG Ying, ZHANG Xin, SHI Guang-wei, *et al.* Applications of liquid lenses in zoom systems[J]. *Chinese Optics*, 2013, **6**(1): 46-56.
张鹰, 张新, 史广维, 等. 液体透镜在变焦系统中的应用[J]. *中国光学*, 2013, **6**(1): 46-56.
[4] KRYSZCZYNSKI T, MIKUCKI J. Structural optical design of the complex multi-group zoom systems by means of matrix optics[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(17): 19634-19647.
[5] PAL S, HAZRA L N. Structural design of optically compensated zoom lenses using genetic algorithm[C]. SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2009, **7429**: 742910.
[6] PAL S, HAZRA L. Ab initio synthesis of linearly compensated zoom lenses by evolutionary programming[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(10): 1434-1441.
[7] PENG Run-ling, CHEN Jia-bi, ZHU Cheng, *et al.* Design of a zoom lens without motorized optical elements[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(11): 6664-6669.
[8] XIONG Yuan-lin, PENG Run-ling, CHEN Jia-bi, *et al.* Influence of liquid density on the property of double-liquid lens [J]. *Optical Instruments*, 2008, **30**(4): 24-27.
熊渊琳, 彭润玲, 陈家璧, 等. 液体密度对双液体透镜性能的

- 影响[J]. 光学仪器, 2008, **30**(4): 24-27.
- [9] HU Shui-lan, PENG Run-lin, LI Yi-fan, *et al.* Research on the double-liquid lens with double-layer dielectric films[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 67-70.
胡水兰, 彭润玲, 李一凡, 等. 双层介电薄膜结构双液体变焦透镜的研究[J]. 光子学报, 2014, **43**(2): 67-70.
- [10] PENG Run-ling, WANG Da-zhen, CHEN Jia-bi, *et al.* Electrically-controlled and liquid-based optical imaging apparatus[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(10): 1836-1839.
- [11] XU Yuan-tao, CHEN Jia-bi. Aberration measurement of double-liquid variable-focus lens [J]. *Optical Instruments*, 2013, **35**(4): 38-42.
徐元韬, 陈家璧. 双液体变焦透镜像差的测量研究[J]. 光学仪器, 2013, **35**(4): 38-42.
- [12] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]. IEEE, 1995, **4**(1): 1942-1948.
- [13] GARNIER S, GAUTRAIS J, THERAULAZ G. Thbiological principles of swarm intelligence [J]. *Swarm Intelligence*, 2007, **1**(1): 3-31.
- [14] EBERHART R C, SHI Y. Particle swarm optimization: developments, applications and resources[C]. IEEE, 2001, **1**(5): 81-86.
- [15] PARSOPOULOS K E, VRAHATIS M N. Recent approaches to global optimization problems through particle swarm optimization[J]. *Natural Computing*, 2002, **1**(2): 235-306.
- [16] PAL S. Aberration correction of zoom lenses using evolutionary programming [J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(23): 5724-5732.
- [17] FANG Y C, TSAI C M, CHUNG C L. A study of optical design and optimization of zoom optics with liquid lenses through modified genetic algorithm [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(17): 16291-16302.