



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200610118878.0

[45] 授权公告日 2008 年 11 月 5 日

[11] 授权公告号 CN 100430774C

[22] 申请日 2006.11.29

WO2005/116697 A1 2005.12.8

[21] 申请号 200610118878.0

US6952313 B2 2005.10.4

[73] 专利权人 上海理工大学

CN1705901 A 2005.12.7

地址 200093 上海市杨浦区军工路 516 号

审查员 胡 涛

[72] 发明人 陈家璧 彭润玲 绳金侠 祝 澄
瞿晶晶 庄松林

[74] 专利代理机构 上海申汇专利代理有限公司

代理人 吴宝根

[56] 参考文献

CN1818737 A 2006.8.16

CN1794018 A 2006.6.28

US2005/0113912 A1 2005.5.26

CN1720466 A 2006.1.11

JP2005-128518 A 2005.5.19

CN1788224 A 2006.6.14

WO2006/111933 A1 2006.10.26

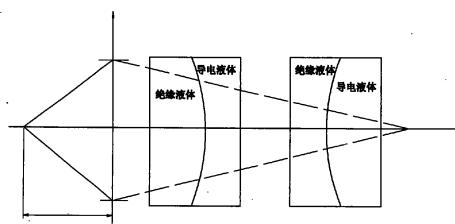
权利要求书 1 页 说明书 9 页 附图 3 页

[54] 发明名称

无机械运动变焦照相透镜组对有限远成像的
光学设计方法

[57] 摘要

一种无机械运动变焦照相透镜组的高斯光学设计方法，涉及光学设计技术领域；该设计方法的步骤是：1) 确定无机械运动变焦照相透镜组的结构；2) 计算两双液体透镜光焦度为零、物距为 l_0 时，由后一个液体透镜的后表面到像点位置的后顶像距 l' ；3) 计算两双液体透镜前一组曲率半径为负，后一组曲率半径为正时整个透镜组的像点位置 l'' ；4) 确定透镜组对有限远处物体成像的像面位置保持不变需要满足的条件： $l''=l'$ ；5) 计算透镜组的组合焦距以及变倍比，根据透镜组的组合焦距表达式计算出外加电压变化的最大焦距与最小焦距之比，得到一个变倍比。本发明解决现有液体透镜仅能在外加电压的作用下改变焦距、而不能实现保持像面位置不变的技术问题。



1. 一种无机械运动变焦照相透镜组的高斯光学设计方法，其特征在于，具体步骤是：

1) 确定无机械运动变焦照相透镜组的结构，

在一个固定焦距成像透镜后，成像面之前，增加两个同轴的双液体透镜组成无机械运动的光学变焦透镜组；成像透镜的光焦度主要由固定焦距成像透镜来承担；

2) 计算两个双液体透镜光焦度为零、物距为 l_0 时，由后一个双液体透镜的后表面到像点位置的后顶像距 l'

根据设定参数，计算出双液体透镜中透镜焦距与各主面位置，以及两个双液体透镜光焦度为零时，光学变焦透镜组对有限远物体成像的像点位置；

3) 计算两个双液体透镜前一组曲率半径为负、后一组曲率半径为正时新的像点位置到后一个双液体透镜的后表面的后顶像距 l''

利用单一折射面物像距关系公式： $\frac{n_2}{s'} - \frac{n_1}{s} = \frac{n_2 - n_1}{r}$ ，算出新的像点位置；其中 s' 为像距， n_2 为像方折射率， s 为物距， n_1 为物方折射率， r 为折射面的曲率半径；

4) 确定透镜组对有限远处物体成像的像面位置保持不变需要满足的条件
像点位置不变的条件是： $l'' = l'$ ；通过数值解法迭代逼近求出方程 $l'' = l'$ 所给出的两个双液体透镜的界面曲率半径的关系；

5) 通过外加电压与双液体透镜界面曲率半径的关系，步骤4给出的两个双液体透镜界面曲率半径的关系可以转换为两个双液体透镜上外加电压的关系；

6) 计算透镜组的组合焦距以及变倍比，

根据透镜组的组合焦距表达式计算出外加电压变化的过程中所对应的最大焦距与最小焦距之比，得到一个变倍比。

2. 根据权利要求1所述的无机械运动变焦照相透镜组的高斯光学设计方法，其特征在于，所述无机械运动的光学变焦透镜组，在无机械运动情况下，对于有限远成像，调节控制电压，使两个双液体透镜在变焦过程中保证各组份的共轭距之和不变。

无机械运动变焦照相透镜组对有限远成像的光学设计方法

技术领域

本发明涉及光学系统的设计技术，特别是涉及一种针对有限远成像，分析一种其组分中含有两个双液体变焦透镜的无机械运动的光学变焦透镜组的高斯光学设计方法的技术。

背景技术

传统成像系统一般使用变焦距透镜组，用若干具有固定焦距的镜头组合在一起，协同改变各镜头之间的间距以后，来实现保持成像面位置不变的同时改变整个透镜组的焦距，以满足利用一个光学系统同时能够完成大区域小倍率的观察和照相与小区域大倍率的观察和照相的要求。这种变焦距镜头的设计方法有两种，一种是光学补偿法，另一种是机械补偿法，两种方法都要求对于组成整个透镜组的若干组份镜头的机械位置进行精确的控制与定位，在透镜组结构中需要设计有精密的驱动电机和实现同步精确运动的精密空间凸轮。这就使得这种光学变焦距透镜组的结构相当复杂，体积庞大，制造精度要求高，而且不易在诸如手机摄像镜头这样的小范围空间内实现。针对现有技术的研究，有人提出了折衍射混合型变焦距透镜。利用这种方法，可以使整个成像光学系统做得紧凑轻巧。而且它采用电控制变焦，比机械控制变焦更方便更精确，使得折衍射混合液晶变焦透镜成为取代传统变焦透镜的一个很有前景的光学器件。但是由于液晶菲涅尔透镜利用光的衍射特性，使得衍射造成的色差影响难以完全消除；在折衍射混合型变焦距透镜中，焦距的改变可以用电控实现，但不用机械运动来保持成像面的不变还需要进一步研究；另外，液晶菲涅尔透镜的多焦点问题也还有待解决。因此，折衍射混合型液晶菲涅尔变焦距透镜目前还处于研究阶段，还没有能够实用化。

飞利浦公司实验室的 Robert A.Hayes & B.J.Feenstra 2003 年 9 月在《Nature》杂志上发表了利用“电湿效应”制作双液体变焦透镜的文章，文章说明了用两种折射率不同而密度相同的液体在圆柱形容器中形成球形界面，在液体与圆柱形容器壁之间的介电层施加电压控制改变液体和固体壁之间的湿润角，从而改变球形

界面的半径，进而改变光在其中透过时聚焦点的位置。该论文提供了一种利用“电湿效应”实现单个双液体透镜变焦的可能性。它不同于前文提到的光学补偿法和机械补偿法，因为光学补偿法和机械补偿法中使用的是不可改变焦距的固体透镜，变焦的原理是利用改变透镜之间的光学间隔来实现的；它也不同于前文提到的折衍射混合型液晶菲涅尔变焦透镜，后者是用衍射效应，用电控制液晶改变折射率，使其所形成的菲涅尔透镜的焦距改变实现变焦的。作为一种折射型光学元件，它没有上述衍射元件多焦点，大色差的缺点；作为一种本身变焦、非固定焦距的元件，它提供了不用改变器件之间机械距离，无须机械运动进行调焦的可能性。为了满足变焦光学系统的基本条件，需要用这种借助“电湿效应”的双液体透镜与固定焦距的光学系统进行组合。因此，它只能变焦不能调焦，即便是能够电控调焦，还是不能避免机械运动。

近年来，欧洲和日本等地区陆续发表了与双液体透镜相关的多项专利。如日本专利 2001-013306、欧洲专利 EP1674892 和国际专利 WO2006013541，当中都提到使用两种不浸润的液体来组成双液体变焦透镜，并利用“电湿效应”来改变两种液体的界面形状以达到改变焦距的目的。它们三者的不同之处在于模型工艺结构稍有不同，其中日本专利 2001-013306 使用的是平板型的电极，欧洲专利 EP1674892 使用的是圆台型的电极，国际专利 WO2006013541 使用的是圆柱型的电极，但三者（包括其它延伸的专利）仅能在外加电压的作用下改变焦距，均不能实现保持像面位置不变的调焦功能。

本专利是针对无限远物体成像进行分析，研究有限远物体成像时，保持像面位置不变所需要满足的条件及它的组合焦距和变倍比。

变焦透镜组即变焦光学系统需要满足的基本条件是：(1) 改变焦距；(2) 改变焦距过程中保持像面位置不变。对于光学补偿法和机械补偿法已经发展出了一整套设计方法来实现满足这两个基本条件的光学系统。这种方法设计的是含有三个以上透镜或透镜组的变焦光学系统，三个以上的透镜或透镜组中有一个是变焦组，一个是补偿组。设计的目的是为达到所需要的变倍比各透镜（组）的参数和在变焦时为实现变倍比相应要求的各个透镜（组）的位置。通过建立变焦过程微分方程，即根据在变焦时各运动组份对应共轭距之改变量的和为零来设计个透镜组参数和运动参数。显然，对于我们现在面对的无机械运动变焦透镜组，设计的

目的不同，设计的方法也不可能直接加以利用。

发明内容

针对上述现有技术中存在的缺陷，本发明所要解决的技术问题是提供一种其组分中含有两个双液体变焦透镜的无机械运动的光学变焦透镜组的设计方法，该设计方法针对有限远成像，利用高斯光学的理论解决现有双液体透镜仅能在外加电压的作用下改变焦距、而不能实现保持像面位置不变的技术问题。

为了解决上述技术问题，本发明所提供的一种无机械运动变焦照相透镜组的高斯光学设计方法，其具体步骤是：

1) 确定无机械运动变焦照相透镜组的结构，

在一个固定焦距成像透镜的像面之前，增加两个同轴的双液体变焦透镜组成无机械运动的光学变焦透镜组；成像透镜的光焦度主要由固定焦距成像透镜来承担；

2) 计算两个双液体透镜光焦度为零、物距为 l_0 时，由后一个双液体透镜的后表面到像点位置的后顶像距 l'

根据设定参数，计算出双液体透镜中透镜焦距与各主面位置，以及双液体透镜光焦度为零时针对有限远物体成像变焦镜组的像点位置；

3) 计算两个双液体透镜前一组曲率半径为负，后一组曲率半径为正时新的像点位置到后一个双液体透镜的后表面的后顶像距 l''

利用单一折射面物像距关系公式： $\frac{n_2}{s'} - \frac{n_1}{s} = \frac{n_2 - n_1}{r}$ ，算出新的像点位置；其中 s' 为像距， n_2 为像方折射率， s 为物距， n_1 为物方折射率， r 为折射面的曲率半径。

4) 确定光学变焦透镜组对有限远处物体成像的像面位置保持不变需要满足的条件：

像点位置不变的条件是： $l'' = l'$

5) 计算光学变焦透镜组的组合焦距以及变倍比

根据光学变焦透镜组的组合焦距表达式计算出外加电压变化的过程中所对应的最大焦距与最小焦距之比，得到一个变倍比。

无机械运动的光学变焦透镜组在无机械运动情况下调节控制电压，使两个双液体变焦透镜在变焦过程中保证各组份的共轭距之和不变。

利用本发明的无机械运动变焦照相透镜组的高斯光学设计方法，通过无机械运动变焦照相透镜组的结构设计，在一个固定焦距成像透镜的像面之前，增加两个同轴的双液体变焦透镜组成无机械运动的光学变焦透镜组，并针对有限远物距 l_0 ，分别计算两个双液体透镜光焦度为零时整个光学变焦透镜组的像点位置和两个双液体透镜前一组曲率半径为负，后一组曲率半径为正时整个光学变焦透镜组的像点位置，得到光学变焦透镜组对有限远处物体成像的像面位置保持不变需要满足的条件和光学变焦透镜组的组合焦距以及变倍比。解决了现有双液体透镜仅能在外加电压的作用下改变焦距、而不能实现保持像面位置不变的技术问题。

附图说明

- 图 1 是本发明的无机械运动的光学变焦透镜组结构示意图；
图 2 是双液体透镜变焦时产生的间隔与相应曲面半径的关系示意图；
图 3 是定焦镜头与光焦度为零的两个双液体透镜合成像点示意图；
图 4 是定焦镜头与光焦度不为零的两个双液体透镜合成像点示意图；
图 5 是变焦时 $r_2 \sim r_5$ 曲线图：其中（a）组合焦距变大时，（b）组合焦距变小时；
图 6 是物距 l_0 与变倍比 k 之间的关系曲线。

具体实施方式

以下结合附图说明对本发明的实施例作进一步详细描述，但本实施例并不用于限制本发明，凡是采用本发明的相似设计方法及其相似变化，均应列入本发明的保护范围。

本发明的设计方法具体步骤是：

步骤一：无机械运动变焦照相透镜组的结构设计

本发明是在一个固定焦距成像透镜的像面之前，增加两个同轴的双液体变焦透镜组成无机械运动的光学变焦透镜组（参阅图 1）。成像透镜组的光焦度主要由固定焦距成像透镜来承担。当两个双液体变焦透镜中前组在电压控制下呈现负透镜特性，与呈现正透镜特性的后组组合成变焦透镜组时，由于前组的发散性能和一定距离后的后组会聚性能使得原固定透镜在像面上的会聚角增大，从而焦距

变短；当两个双液体变焦透镜中前组在电压控制下呈现正透镜特性，与呈现负透镜特性的后组组合成变焦透镜组时，由于前组的会聚性能和一定距离后的后组发散性能使得原固定透镜在像面上的会聚角减小，从而焦距变长。在无机械运动情况下依靠改变电压实现变焦功能。适当的调节控制电压，可以使两个双液体变焦透镜在变焦过程中保证各组份的共轭距之和不变，从而实现变焦光学系统必需满足的第二个基本条件。

首先简述一下电控双液体变焦透镜的性能。如图 2 所示，在一个密封的圆柱形玻璃管中注入两种具有不同折射率的密度相同而又互不浸润液体从而构成电控液体变焦透镜。两种液体中一种导电，一种绝缘。在导电液体与玻璃管内壁电极间的疏水介电层之间施加电场时，会引起其表面能的变化，从而改变其浸润角。当导电液体与介电层之间的浸润角改变时，这两种互不相溶的液体之间的界面形状会发生变化。鉴于两种液体的密度相同，这一界面总呈现为球面。对于不同的浸润角对应球面半径是不同的。这两种液体之间的相对折射率会使这样的圆柱状液体呈现出透镜的性质。当液体间界面为平面时两个双液体透镜表现为焦距为无穷大的平行平板。适当的控制电压改变界面面形可以使得两个双液体透镜或为会聚的正透镜，或为发散的负透镜。这里我们不详谈控制电压与界面球面半径之间的关系，而把讨论焦点集中于其成像性质。假设控制电压与界面球面半径之间的关系是已知的，于是我们可以得到需要的界面球面半径。由于液体的不可压缩性，界面球面半径的变化使得界面球面的顶点即球面与圆柱轴线的交点位置同时变化。这就使得双液体透镜在变焦时，透镜的主点也有相应的移动，这是在设计中必须考虑的。如果将图中间隔 d 对应的曲面半径记做 r ，将两个双液体透镜的柱状容器的内半径记做 a ，当双液体透镜中绝缘液体占总体积的 k ($0 < k < 1$) 倍，间隔 d 可以用曲面半径 r 和双液体透镜总厚度 d_0 表示为：

$$d = \begin{cases} kd_0 + \frac{1}{3a^2} (2r^3 - 2r^2\sqrt{r^2 - a^2} - 3a^2r + 2a^2\sqrt{r^2 - a^2}) & \text{当 } r > 0 \\ kd_0 + \frac{1}{3a^2} (2r^3 + 2r^2\sqrt{r^2 - a^2} - 3a^2r - 2a^2\sqrt{r^2 - a^2}) & \text{当 } r < 0 \end{cases} \quad (1)$$

曲面半径 r 的符号按照光学设计的规则，从顶点出发到球心位置，与光线方向相同为正，相反为负。同时双液体透镜的焦距和以球面顶点为坐标原点的两主面位置分别如（2）式和（3）式所示：

$$\begin{cases} f = -\frac{r}{n_2 - n_1} \\ f' = \frac{r}{n_2 - n_1} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} L_H = \frac{(1-n_1)d}{n_1} \\ L'_H = \frac{(n_2-1)(d_0-d)}{n_2} \end{cases} \quad (3)$$

步骤二：计算两个双双液体透镜光焦度为零、物距为 l_0 时，后一个双液体透镜的后表面到像点位置的后顶像距 l'

假设定焦透镜焦距为 f_0 ，是一个理想薄透镜，由焦距公式知，物体经定焦透镜成像后的像距为：

$$l_0' = \frac{f_0 l_0}{f_0 + l_0} \quad (4)$$

图 3 中画出了定焦透镜的后主面、像距、两个双液体透镜之间以及与定焦透镜之间的各种距离、以及双液体透镜的结构。在如图 3 的情况下，后一个双液体透镜的后表面到像点位置的后顶像距可以用固定焦距透镜的焦距、各种材料的折射率及中心厚度表示为：

$$l' = \frac{d_0 f_0}{f_0 + l_0} - d_1 - \frac{n_0}{n_1} d_2 - \frac{n_0}{n_2} d_3 - d_4 - \frac{n_0}{n_1} d_5 - \frac{n_0}{n_2} d_6 \quad (5)$$

如果两种液体密度相同，并假定前一组液体透镜的孔径大小为 $2a_1$ ，厚度为 d_{01} ，

其中绝缘液体占总体积的 k_1 倍；后一组双液体透镜的孔径大小为 $2a_2$ ，厚度为 d_{02} ，

其中绝缘液体占总体积的 k_2 倍， n_0 为空气的折射率，近似为 1，即：

$$d_2 = k_1 d_{01}; \quad d_3 = (1-k_1) d_{01}; \quad d_5 = k_2 d_{02}; \quad d_6 = (1-k_2) d_{02} \quad (6)$$

则：

$$l' = \frac{f_0 l_0}{f_0 + l_0} - d_1 - d_4 - \frac{n_2 - n_1}{n_1 n_2} (k_1 d_{01} + k_2 d_{02}) - \frac{d_{01} + d_{02}}{n_2} \quad (7)$$

步骤三：计算两个双液体透镜前一组曲率半径为负，后一组曲率半径为正时整个透镜组的像点位置 l''

当前一双液体透镜中液体界面是凹球面时，透镜半径为负。由于 $n_1 < n_2$ ，此时双液体透镜为一个负透镜，它的作用将使得像点位置变大，甚至变为负数。为了最后像点位置不变，后一个双液体透镜必须是正透镜。如图 4 所示，假设前一双液体透镜和后一个双液体透镜中液体界面的曲率半径分别为 r_2 和 r_5 ，由此可以决定出间隔 d_2 和 d_5 ，因此整个光组的参数都是确定的，由此可以计算出最后像点相对于后组双液体透镜最后一面的位置 l'' 。前一双液体透镜半径为负保持像点位置不变时后一双液体透镜的半径就是 l'' 和 l' 相等时的后一双液体透镜的半径。在这种情况下两个双液体透镜与固定焦距透镜合成的透镜组的合成焦距一定会改变，并一定会变小。这就完成了变焦的目的，同时也保证了像点位置不变。

对于物距为 l_0 ，利用单一折射面物像距关系公式： $\frac{n_2}{s'} - \frac{n_1}{s} = \frac{n_2 - n_1}{r}$ ，不难算出新的像点位置到后一个双液体变焦透镜的后表面的后顶像距为：

$$l'' = \frac{r_5 \left(\frac{(n_1(\frac{f_0 l_0}{f_0 + l_0} - d_1) - d_2)r_2}{r_2 + (n_2 - n_1)(\frac{f_0 l_0}{f_0 + l_0} - d_1 - \frac{d_2}{n_1})} - \frac{n_1 d_3}{n_2} - n_1 d_4 - d_5 \right)}{n_1 r_5 + (n_2 - n_1) \left(\frac{(n_1(\frac{f_0 l_0}{f_0 + l_0} - d_1) - d_2)r_2}{r_2 + (n_2 - n_1)(\frac{f_0 l_0}{f_0 + l_0} - d_1 - \frac{d_2}{n_1})} - \frac{n_1 d_3}{n_2} - n_1 d_4 - d_5 \right)} - \frac{d_6}{n_2} \quad (8)$$

步骤四：计算光学变焦透镜组对有限远处物体成像的像面位置保持不变需要满足的条件

像点位置不变的条件则是：

$$l'' = l' \quad (9)$$

将 (1) 及 (8) 式代入 (9) 式可以得到一个只含有 r_2 和 r_5 两个未知数的方程，也就是说得到保证像点位置不变的 r_2 和 r_5 之间的函数关系。对于确定的系统 (9) 式右边的 l' 是不变的常数，但是由 (8) 式可以看出左边的 l'' 中分子分母都含有 r_5 和 d_5 ，因此 r_2 和 r_5 两者之间存在非线性关系，表示如下：

$$r_5 = \frac{(d_{02} + n_2 l' - d_s)(n_2 - n_1)\alpha}{n_2 \alpha - n_1(d_{02} - d_s + n_2 l')} \quad (10)$$

其中:

$$\alpha = \frac{(n_1(\frac{f_0 l_0}{f_0 + l_0} - d_1) - d_2)r_2}{r_2 + (n_2 - n_1)(\frac{f_0 l_0}{f_0 + l_0} - d_1 - \frac{d_2}{n_1})} - \frac{n_1 d_3}{n_2} - n_1 d_4 - d_s$$

$$d_2 = k_1 d_{01} + \frac{1}{3a_1^2} (r_2 - \sqrt{r_2^2 - a_1^2})(r_2^2 - r_2 \sqrt{r_2^2 - a_1^2} - 2a_1^2)$$

$$d_s = k_2 d_{02} + \frac{1}{3a_2^2} (r_5 - \sqrt{r_5^2 - a_2^2})(r_5^2 + r_5 \sqrt{r_5^2 - a_2^2} - 2a_2^2)$$

尽管对于单个折射面来说，物像共轭面的位置确定以后，折射球面半径有无穷多选择，但是同时要满足上述要求，解将具有唯一性。在给定 r_2 的情况下，用代入法计算解析解将会出现关于 r_5 的高次方程，出现增根。实际上，可以用数值解法迭代逼近给出 $r_2 \sim r_5$ 曲线。

步骤五：通过外加电压与双液体透镜界面曲率半径的关系，步骤四给出的两个双液体透镜界面曲率半径的关系可以转换为两个双液体透镜上外加电压的关系

由于双液体透镜球形界面半径与外加电压之间的一一对应关系是已知的， $r_2 \sim r_5$ 曲线可以直接转化为两个双液体透镜上外加电压之间的曲线，也就是说用此曲线上每一个点对应的两个电压值同时控制两个双液体透镜就可以保证像面位置不变。这就意味着，对有限远处成像时，像距变化而像面位置不变。可以实现用一个光学系统同时完成大区域小倍率的观察和照相与小区域大倍率的观察和照相的变焦和调焦功能。

同理可以得到前一双液体透镜是凸球面、后一双液体透镜是凹球面时 $r_2 \sim r_5$ 的关系表达式，从而也可以得到两个双液体变焦透镜上外加电压的关系曲线。

步骤六：计算光学变焦透镜组的组合焦距以及变倍比

变焦距透镜组的变倍比总是对于透镜组的组合焦距来计算的，实际上就是要计算出随着 r_2 即外加电压变化的过程中所对应的最大焦距与最小焦距之比。根据

(2) 式和 (3) 式, 利用光组合成公式, 总的焦距 f 也就不难由以下 (11) 式算出; 变倍比也就很容易由下面的 (12) 式得到。

$$f = \frac{r_2 r_5 f_0}{(n_2 - n_1)^2 (d_4 + \frac{d_3}{n_2} + \frac{d_5}{n_1} - \frac{r_2 + r_5}{n_2 - n_1}) (d_1 + \frac{d_2}{n_1} - \frac{f_0 l_0}{f_0 + l_0}) - (n_2 - n_1) r_2 (d_4 + \frac{d_3}{n_2} + \frac{d_5}{n_1}) + r_2 r_5}$$

(11)

$$k = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} \quad (12)$$

式中 f_{\max}, f_{\min} 分别为最大与最小组合焦距。

如果设计结果不能满足设计要求, 可以通过改变光组中各个参数来达到要求。实际双液体透镜是圆柱形玻璃管, 其两端的封闭是用透明的玻璃平行平板做成的, 因为平行平板对于成像系统的成像过程没有实质的影响, 此处没有进行考虑, 实际设计时可以将其插入系统进行计算, 对于结果的影响是很小的。

实施例一

1) 根据步骤一设定此光学变焦透镜组的结构, 确定一些相关参数:

$$\begin{aligned} f_0 &= 10\text{mm}, \quad n_0 = 1, \quad n_1 = 1.38, \quad n_2 = 1.55, \quad a_1 = 1.5\text{mm}, \quad a_2 = 1\text{mm} \\ d_4 &= 2.9\text{mm}, \quad d_1 = 0.1\text{mm}, \quad d_{01} = 1\text{mm}, \quad d_{02} = 1.5\text{mm}, \quad k_1 = 1/3 \\ k_2 &= 2/3 \end{aligned}$$

2) 根据步骤二、步骤三、步骤四推导出的 $r_2 \sim r_5$ 关系表达式模拟给出 $r_2 \sim r_5$ 的关系曲线如图 5 所示。

3) 根据以上计算, 给出一定的物距范围, 模拟出物距 l_0 与变倍比 k 之间的关系曲线如图 6 所示。从图中可以看出, 双液体透镜组对于较远物距有较大的变倍比, 即有较好的变焦效果。

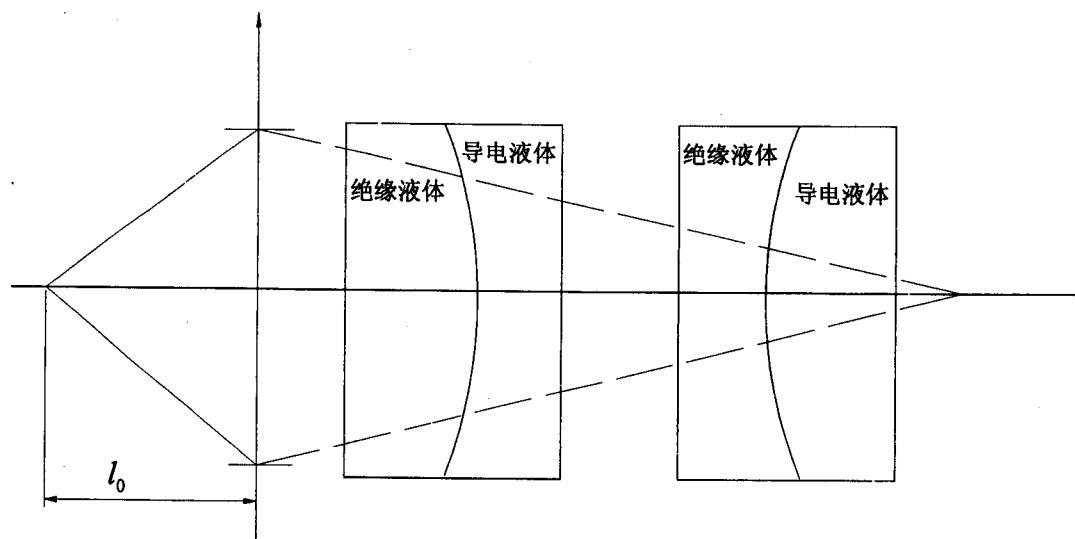


图 1

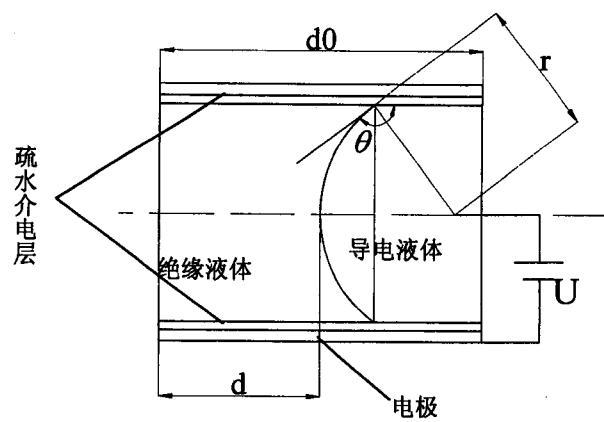


图 2

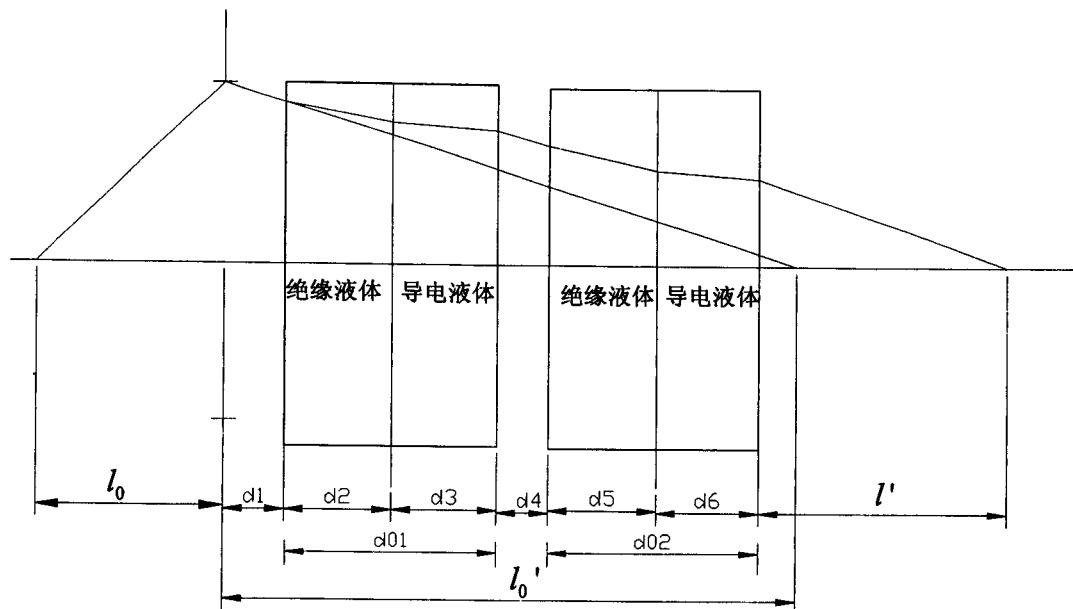


图 3

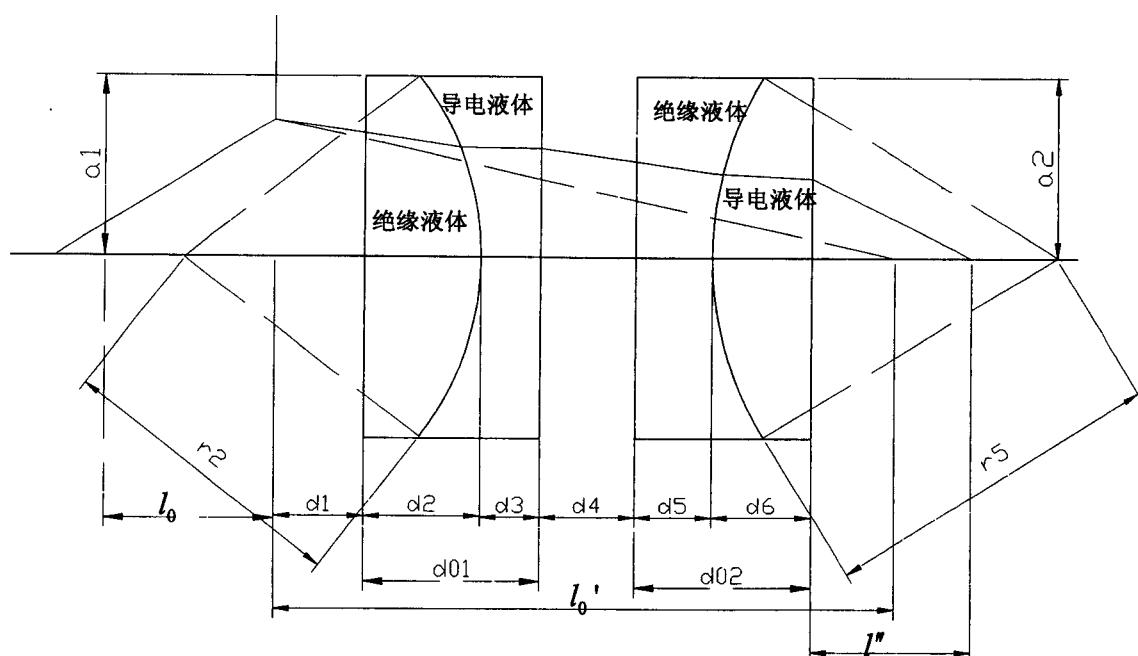
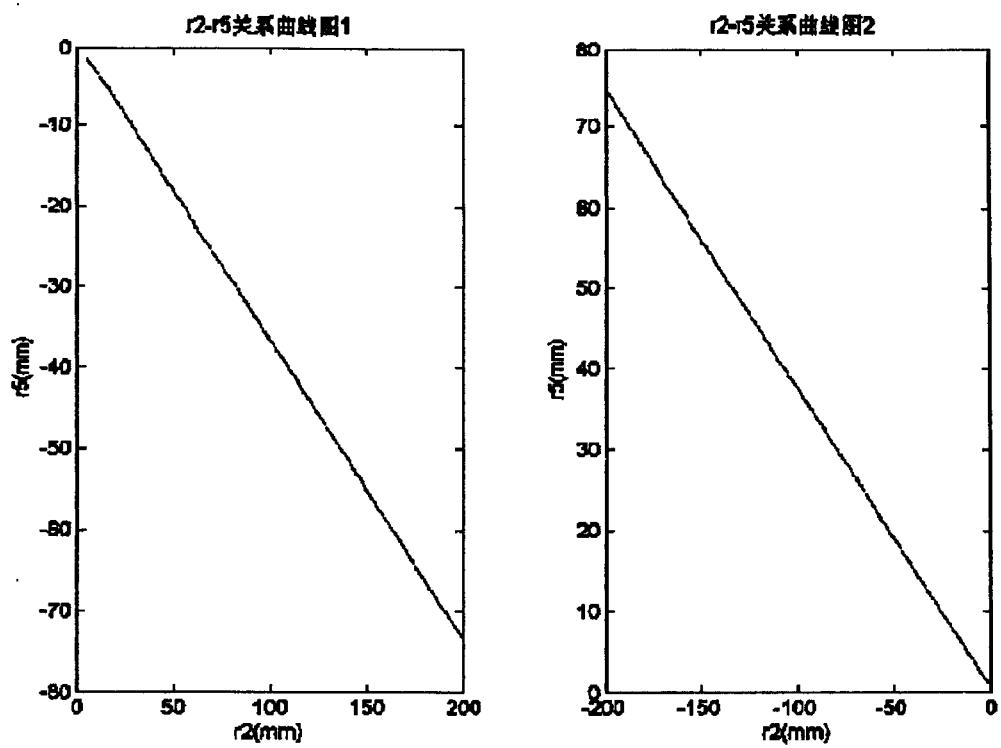


图 4



(a)

(b)

图 5

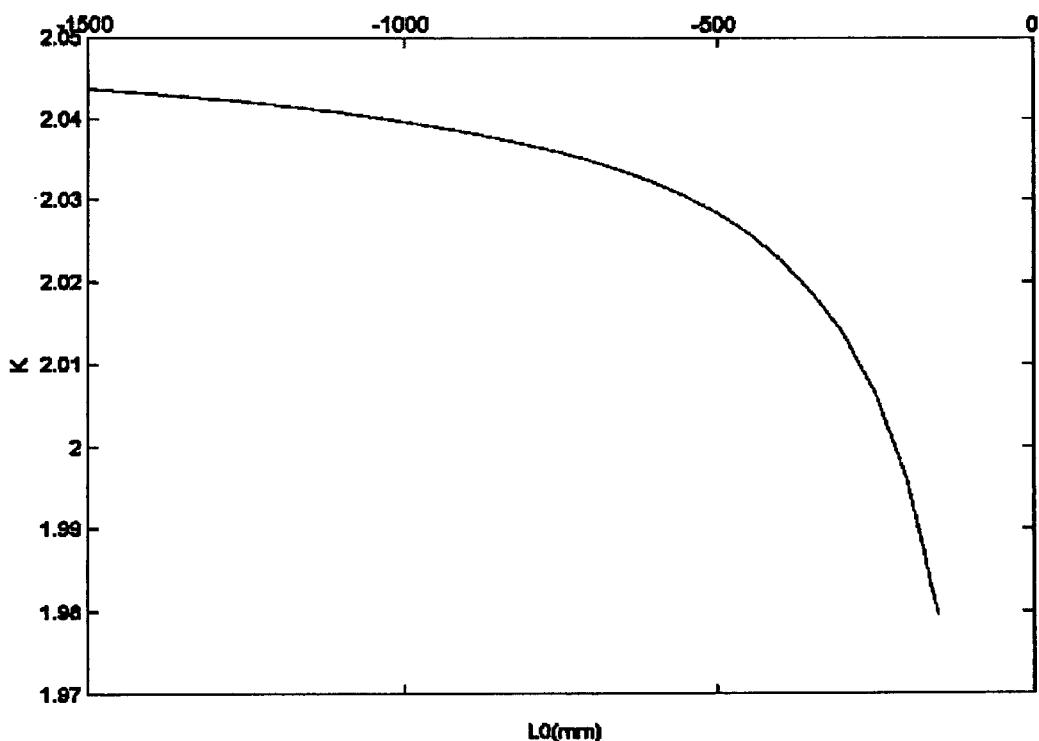


图 6