

连续变倍显微镜综述

陈腾飞, 余飞鸿*

浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027

摘要 传统显微镜通常需要通过更换不同倍率物镜同目镜来改变系统的放大倍率,且放大倍率不连续。将连续变焦光学系统设计应用于显微成像系统中便可以实现成像放大倍率的连续变化。概括性地总结了各种类型的连续变焦光学系统及其变焦原理,接着介绍了不同类型的连续变倍显微镜,最后对连续变倍显微镜的未来发展方向进行了讨论与展望。

关键词 成像系统; 显微镜; 光学系统; 连续变倍; 镜头

中图分类号 TH742

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0600005

Review of Continuous Zoom Microscope

Chen Tengfei, Yu Feihong*

College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract The traditional microscope usually needs to change the magnification of the system by changing the magnification of objective lens, which is same as that of the eyepiece, and the magnification is not continuous. Applying the continuous zoom optical system design to the microscopic imaging system can realize the continuous change of imaging magnification. Continuous zoom optical systems and their zoom principles are summarized in this review. Various types of continuous zoom microscopes are discussed. The future development of continuous zoom microscopes are also discussed and prospected.

Key words imaging systems; microscope; optical system; continuous zoom; lens

OCIS codes 110.0180; 120.4820; 220.3620

1 引言

随着连续变焦光学系统理论的不完善和凸轮加工技术的成熟,连续变焦光学系统的成像质量已经接近定焦光学系统,甚至可以与定焦光学系统的成像质量相媲美^[1-3]。连续变焦光学系统的应用领域从最初的电影和电视摄影领域^[4],逐渐延伸到显微成像系统、照相系统及望远系统等领域中。显微镜在微观物体表面形态观测方向发挥着重要作用,传统显微镜通过物镜把物体成像在目镜物方焦平面上,然后再经目镜成像在无限远供人眼观察。但是

传统显微系统为改变成像放大倍率,通常需要更换不同倍率物镜同目镜。为了保证物镜同目镜的互换性,通常需要固定系统的共轭距,这些限制了显微成像系统的发展。

随着连续变焦光学系统在显微成像系统中的不断应用,逐渐产生了不同类型的连续变倍显微系统,连续变倍显微技术逐渐成熟起来。本文首先对不同类型的连续变焦光学系统进行总结并相应介绍其变焦原理,接着介绍了不同类型的连续变倍显微镜,最后对连续变倍显微镜的未来发展方向进行了讨论与展望。

收稿日期: 2020-09-10; 修回日期: 2020-10-15; 录用日期: 2020-11-05

* E-mail: feihong@zju.edu.cn

2 连续变焦光学系统基本原理

连续变焦光学系统是指焦距在一定范围内连续改变,而其像面保持固定的光学系统,如图 1 所示。光学系统的总焦距由组成系统的单个透镜(或透镜组)的焦距($f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$)及透镜(或透镜组)主平面间的距离($d_1, d_2, d_3, \dots, d_{n-1}$)所决定。现有技术下,难以实现单个透镜(或透镜组)的焦距按一定规律变化,只能通过使某些间隔 d 连续变化,来实现光学系统总焦距连续变化的目的^[5]。假设 f_a, f_b 分别为两个透镜的焦距, d 为它们之间的间距,则光学组合焦距 f ^[5] 为

$$f = \frac{f_a \times f_b}{f_a + f_b - d} \quad (1)$$

由此按照一定关系改变 d 值,便可以改变组合焦距 f 。

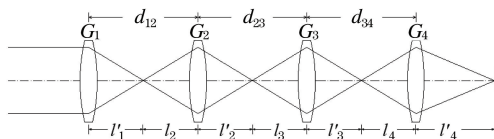


图 1 变焦距光学系统示意图

Fig. 1 Schematic of zoom optical system

对于四组元变焦光学系统,当物距为无限远时,表征光学性能的参数用系统焦距 f 表示:

$$f = f_1 \times m_2 \times m_3 \times m_4 = (f_1 \times m_4) \times (m_2 \times m_3) = (f_1 \times m_4) \times m \quad (2)$$

当物距为有限远时,表征光学性能的参数用系统倍率 M ^[6] 表示:

$$M = (m_1 \times m_4) \times m \quad (3)$$

式中: m_1, m_2, m_3, m_4 分别为各个组元的成像放大倍率; f_1, f_2, f_3, f_4 分别为各组元的焦距。其中,

$$m = m_2 \times m_3 \quad (4)$$

在大多数情况下, $f_1 \times m_4$ 或者 $m_1 \times m_4$ 是常数, G_4 组主要用于校正像差和调整物像关系位置。当 G_4 组不存在时,可以认为 $m_4 = 1$, 像距 l'_3 是一个变量,但系统像面在光轴上的位置是稳定的^[7]。一般要改变系统的焦距,就必须移动变倍组 G_2 , 要使像面位置保持固定则要按一定规律移动补偿组 G_3 。当 G_1 组不存在时,可以认为 $m_1 = 1$, 物距 l_2 为变量。根据推导可得变倍系统总倍率 M 与各透镜组焦距、透镜组实际间隔之间的关系^[8]。

$$d_{23} = f_3 + f_2 - \frac{f_2 \times f_3 \times m_4}{f_1 \times M} - (f_2 - l'_2) - (f_3 + l_3) \quad (5)$$

$$d_{34} = f_3 - l_4 - \frac{f_1}{m_4} - \frac{f_1 \times f_3}{f_2 \times m_4} \times M - (f_3 - l'_3) - (f_4 + l_4) \quad (6)$$

由于透镜组 G_1, G_4 固定,因此 $d_{12} + d_{23} + d_{34}$ 为定值,也就能求出 d_{23}, d_{34}, d_{12} 。

3 连续变焦光学系统类型

通过移动透镜组来改变系统焦距的方式势必会导致像面的偏移,因此需要对像面偏移量进行补偿。根据连续变焦光学系统变焦组及补偿组的运动方式,可将连续变焦光学系统分为光学补偿式变焦光学系统和机械补偿式变焦光学系统;根据变焦镜头内部移动组元数量,分为双组联动变焦光学系统、多组联动及全自动型变焦光学系统。

3.1 光学补偿式变焦光学系统

光学补偿形式的镜头内部透镜组的移动是同方向、等速度的,只需把透镜组固连在一起进行线性移动即可。其最大的优点是不需要设计偏心凸轮,仅需在镜筒上开一条直槽,因此比较容易加工。然而这种结构一般要比机械补偿系统长,而且随着焦距的改变,像平面会发生微位移,镜头设计者的任务就是要控制光学系统像面的位移小于焦深^[5]。图 2(a)为二组元光学补偿变焦光学系统,图 2(b)为三组元光学补偿变焦光学系统,图 2(c)为四组元光学补偿变焦光学系统。

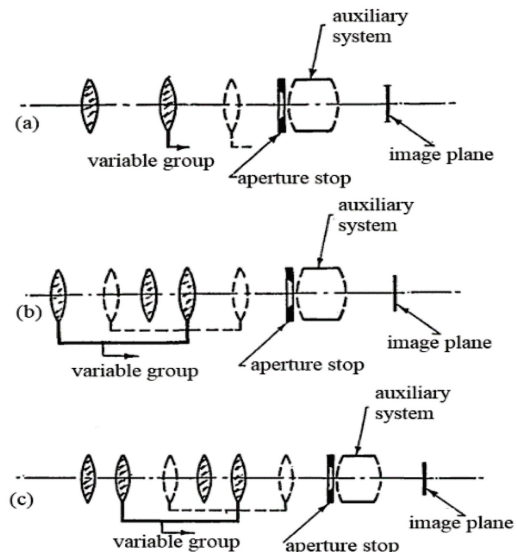


图 2 光学补偿变焦光学系统。(a)二组元系统;(b)三组元系统;(c)四组元系统

Fig. 2 Optically compensated zoom system. (a) Two-component system; (b) three-component system; (c) four-component system

按光学补偿变焦理论,对于无限远物体成像,如果组成的光学补偿式变焦光学系统各分离的透镜组之间存在 n 个间隔,就会有 n 个焦距的像面处在同一个位置,称之为像面补偿点。对像面补偿点个数的判断,是从最后一个变倍透镜组向物方数去,有几个透镜组就有几个完全补偿像面偏离的点,就是说这几个焦距像面的位置都是一样的^[9]。Bergstein 等^[10-13]在 1962 年发表的文献中对光学补偿形式的变焦光学系统有详细论述。

3.2 机械补偿式变焦光学系统

与光学补偿连续变焦光学系统不同的是,机械补偿变焦光学系统中各运动组元沿光轴方向的运动是相互独立的,其运动轨迹既有线性的也有非线性的^[14-16]。有时为了降低凸轮曲线的设计难度,通常将变倍组的运动轨迹视为线性,补偿组的运动轨迹视为非线性,变倍组和补偿组之间的移动变化是一一对应关系^[17]。总的来说,机械补偿变焦光学系统根据其不同功能作用的透镜组数量可以分为两组元、三组元、四组元变焦光学系统,其中变倍组和补偿组是必需的,根据要求可以在系统前后配置固定组以校正像差,后固定组还能起到调整系统后工作距离和光学筒长的作用。

四组元机械补偿式连续变焦光学系统的变焦部分是由变倍组和补偿组两个活动组分组成的,变倍组和补偿组各自的光焦度都可以是正或是负^[18-20]。根据各组元光焦度的正负,理论上有 8 种可能的形式:PNPN, PPPN, PNNN, PNPN, PPNN, PPNP, NPNP, PNPP,其中 P 代表组元光焦度为正,N 代表组元光焦度为负。图 3 为几种常见类型的四组元机械补偿连续变焦光学系统变倍组同补偿组从短焦到长焦的运动形式^[21]。

由于正组-正组搭配或负组-负组搭配的变倍组的像面位移曲线和补偿组的物面位移曲线走势相反,难以选择物像交换及补偿曲线换根的原则,使得变焦速度偏慢。而正组-负组搭配和负组-正组搭配方式,其变倍组的像面位移和补偿组的物面位移曲线刚好同向,因而比较容易选择物像交换原则及补偿组曲线换根^[18]。

3.3 双组联动变焦光学系统

双组联动型变焦光学系统有两个固连在一起的变倍组,它们按照同一方向进行线性移动,补偿组置于两个变倍组中间进行非线性运动来补偿变倍组移动所引起的像面偏移,各组元共同移动实现系统变倍与像面稳定,从而保证变焦过程中能够始终成像

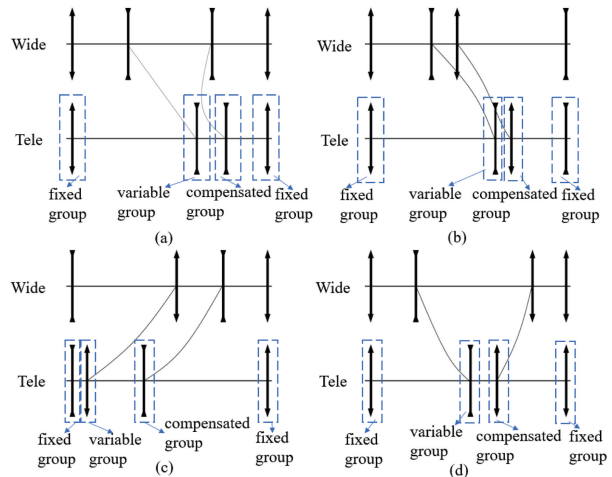


图 3 四组元机械补偿式连续变焦光学系统^[21]。(a)PNPN 形式;(b)PNPN 形式;(c)NPN 形式;(d)PNPP 形式

Fig. 3 Four-component mechanically compensated zoom optical system^[21]. (a) PNPN form; (b) PNP form; (c) NPN form; (d) PNPP form

清晰^[22-24]。因此双组联动变焦光学系统兼有光学补偿和机械补偿两种形式的变焦光学系统的特点^[25]。双组联动型变焦光学系统的变倍组由两组透镜构成,它们共同分担了变倍组的光焦度,因此可以降低变倍组凸轮曲线的压力角,同时还能减少镜片数量、实现较大相对孔径,实现光学系统小型化的同时提高了系统的变倍比。

3.4 多组联动及全动型变焦光学系统

多组元联动及全动型变焦光学系统的特点就是在变焦过程中,有多个透镜组参与运动,各透镜组都能按照最佳方式移动且各组元相互独立,尽可能地实现光学系统的焦距快速、连续的变化^[26-27]。而且光学系统中各运动透镜组对系统焦距的变化均有贡献,并不像机械补偿式变焦光学系统仅有变倍组、补偿组参与^[28]。因此多组联动型变焦光学系统可以实现变倍比增大的情况下仍能使光学系统总长保持较短,在提高光学系统变倍比的同时光学系统结构更为紧凑。

4 连续变倍显微镜

显微镜通过物镜把物体成像在目镜物方焦平面上,然后再经目镜成像在无限远供人眼观察。图 4(a)为有限远共轭距显微镜,图 4(b)为无限远共轭距显微镜。这里的共轭距一般指显微镜物镜的物像共轭距,对于生物显微镜,我国规定为 195 mm。

无限远共轭距显微镜原理为:从物体一点发出的光路通过显微物镜后变为平行光路,平行光经筒

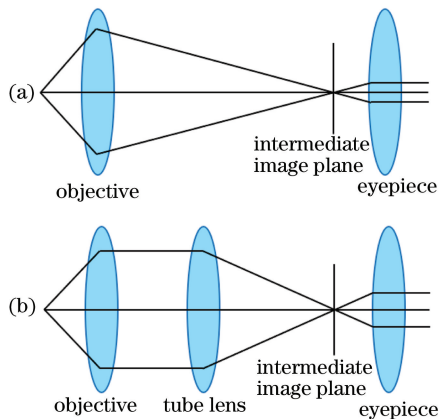


图 4 两种类型的光学显微镜光路。(a)有限远共轭距系统;(b)无限远共轭距系统

Fig. 4 Light path of two optical microscope systems. (a) Finite conjugate system; (b) infinite conjugate system

镜会聚成一实像,然后再由目镜将中间像成像于人眼。无论哪种类型的显微镜,都是通过更换不同倍率物镜同目镜来实现改变系统成像放大倍率的,放大倍率变化不连续,而连续变倍显微镜则可以实现放大倍率的连续变化。

4.1 连续变倍体视显微镜

依据观察对象的不同,可以将光学显微镜分为生物显微镜、金相显微镜、荧光显微镜、体视显微镜、干涉显微镜、像衬显微镜和专用显微镜等类型^[29]。除体视显微镜可以实现连续变倍外,其他类型的显微镜大多只能通过更换不同倍率的物镜同目镜实现变倍,放大倍率不连续。体视显微镜有两种基本形式:一种是有一主物镜,中间像平面平行于物镜平面;另一种则是格里诺发明的双目体视显微镜,有两对完全相同的物镜组成,光轴夹角在 12° 左右。由于连续变倍体视显微镜性能好,且利润远大于有级变倍体视显微镜,目前各厂商相继开发出多种连续变倍显微镜^[30]。

连续变倍体视显微镜物镜设计有别于通常所说的变焦光学系统,由于体视显微镜物镜是对有限远物距成像的光学系统,其变倍比不再是传统变焦光学系统长短焦距比,而是光学系统成像放大倍率的最大最小两个极值之比。根据不同应用场景和使用精度需求,连续变倍体视显微镜可以采用光学补偿形式、机械补偿形式或者双组联动形变焦方式。连续变倍体视显微镜通常采用机械补偿变焦形式,理论上可以做到像面不漂移,但是这种变焦形式对变倍曲线的加工精度要求较高,而且装配难度大。因

此,变倍范围较小的连续变倍体视显微镜也会采用光学补偿的变焦方式,其变倍组固联在一起往同一方向进行直线运动,只需要在变倍组筒上开一直槽,易于加工。采用光学补偿形式的体视显微镜在变倍过程中像面是漂移的,但因其数值孔径小、景深较大,只要像面漂移不超出景深范围,观察时就不会感觉到明显的像面漂移^[30]。双组联动型式的显微物镜容易实现大变倍比,许利峰等^[31]于 2013 年采用双组联动型变倍补偿形式,设计实现了变倍比为 $20\times$ 的连续变倍体视显微镜物镜。两个变倍组元按照同一轨迹运动,另一个组元按照特定轨迹在联动的变倍组元之间运动,如图 5 所示。该显微物镜系统的放大倍率为 $0.8\times\sim 16\times$,工作距离可达 91 mm,后工作距离达 200 mm。

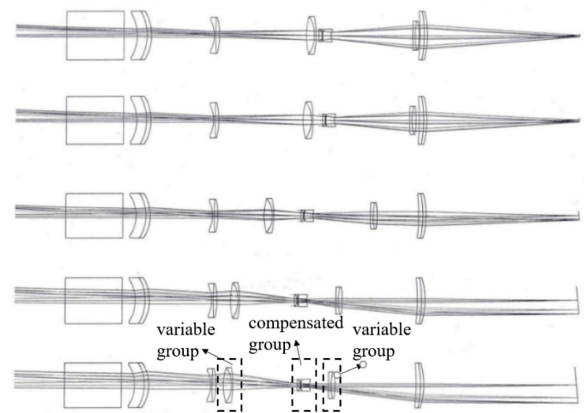


图 5 双组联动连续变倍体视显微镜物镜光学系统
Fig. 5 Continuous zoom stereo microscope optical system with double linkage moving lens groups

4.2 连续变倍电子目镜适配器

由于光学显微镜只能通过目镜进行观察,通过目镜观察往往会带来问题:其一,长期观察易用眼疲劳;其二,无法实时记录图像,不便于后期处理。随着图像传感技术的发展,CCD 和 CMOS 图像传感器的出现使存储数字图像成为可能。对于有照相筒的三目光学显微镜,可以通过安装缩倍镜和显微镜相机来实时拍摄图片与视频。对于没有照相筒的双目光学显微镜,可采用电子目镜进行显微图像的数字化的,如图 6 所示。

具有连续变倍功能的电子目镜也可以实现显微图像大小的连续变化,为了将显微镜所成中间像可以稳定地成像在图像传感器上,连续变倍电子目镜适配器通常采用机械补偿形式的变焦方式。根据能适配光学显微镜光路结构的异同,可分为无限远共轭距显微镜用连续变倍电子目镜适配器、有限远共

轭距显微镜用连续变倍电子目镜适配器。



图 6 加装电子目镜适配器的双目显微镜

Fig. 6 Binocular microscope with eyepiece adapter

2019 年,杭州图谱光电科技有限公司发明的一种有限远共轭距显微镜用可变倍电子目镜适配器光学系统如图 7 所示^[32],包括场镜和变倍系统。变倍系统由变倍组、固定组和补偿组组成,通过调节变倍组与固定组、补偿组与固定组的间距实现连续变倍功能。显微物镜所成的中间像经过场镜收光后,物体由连续变倍电子目镜适配器二次成像到图像传感器上。

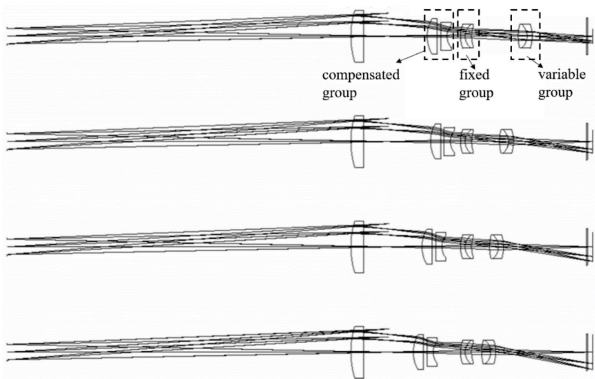


图 7 有限远共轭距显微镜用可变倍电子目镜适配器光学系统^[32]

Fig. 7 Magnification variable eyepiece adapter optical system of finite conjugate microscope^[32]

4.3 手持式连续变倍数码显微镜

随着对显微图像数字化的需求增加,数码显微镜成像技术应运而生。数码显微镜又称为视频显微镜,能对通过显微镜成像得到的图片进行一定的数模转换,从而将被观测物体显现在显微镜本身的屏幕上或者计算机的屏幕上。数码显微镜的优势主要包括:一是能够显微摄像,将观测得到的各种显微图像完整地保存下来,并输出数字资料,为不同工作者之间传阅提供了可能和方便;二是能将图像在电脑屏幕上展现出来,可大幅减轻眼睛的工作强度;三是

数码显微镜应用范围极广,如产品检测领域、教学演示领域及法庭科学领域等,是现代科学仪器仪表发展到一定高度的代表。

手持式连续变倍数码显微镜实物图如图 8 所示。其内部的光学镜头是一定焦镜头,采用了光学补偿变焦的原理,通过改变光学镜头相对于物体的距离以及相对图像传感器的距离实现不同的放大倍率。具体的实现形式又分为两种,第一种形式是在保持图像传感器位置不动的情况下,通过调整物体相对于光学镜头的距离即物距,实现清晰成像。不同的物像共轭距对应不同的放大倍率。采用此类原理设计的手持式连续变倍数码显微镜的厂家有中国台湾 Dino-Lite 公司,北京爱迪泰克科技有限公司等。



图 8 手持式连续变倍数码显微镜

Fig. 8 Handheld continuous zoom digital microscope

这种镜头使用起来非常方便,也容易携带,其不足之处有:通过移动整个镜头来实现放大倍率的改变,但是放大倍率不连续,低倍同高倍之间放大倍率会出现部分缺失情况;有的共轭距对应两个放大倍率;放大倍率与工作距离没有线性关系,使得难以依据工作距离选定合适的放大倍率。

第二种形式是在保证光学镜头位置固定不变的情况下,图像传感器相对于镜头的位置可以前后移动。当被观察物体相对于光学镜头的距离发生变化,即物距变化后,相应地调整图像传感器相对于光学镜头的距离,即改变像距,就可以得到不同放大倍率的图像。理想透镜的物像关系式可表述为

$$l' = f'(1 - m), \quad (7)$$

$$l = f'(1/m - 1), \quad (8)$$

$$L = l' - l = f'(2 - 1/m - m), \quad (9)$$

式中: l 为观察对象离镜头的物距; l' 为镜头与光电图像传感器之间的像距; L 为物像共轭距,是物距与像距之和; m 为透镜成像的放大倍率。由(8)式可知,放大倍率与像距具有线性关系。当镜头与光电图像传感器的距离取较大值时,可以得到大倍率的

影像;当镜头与光电图像传感器的距离取较小值,放大倍率较小,可以观察更大的范围。且在最小像距与最大像距之间的放大倍率的变化是连续的。

4.4 单筒式连续变倍数码显微镜

4.4.1 有限远单筒连续变倍数码显微镜

单筒式连续变倍数码显微镜主要由连续变倍物镜和图像传感器组成。有限远单筒式连续变倍数码显微镜通常采用有限远共轭距光学系统进行设计,将距离镜头前有限远距离的物体经连续变倍物镜放大或缩小后成像在图像传感器上。2010年,厉以宇等^[33]设计了一款可供电子助视器使用的变倍比为 $9.3\times$ 的有限远共轭距连续变倍光学系统,如图9所示。系统采用四组元机械补偿式结构,前固定组、变倍组、补偿组、后固定组四个组元的焦距分别为 38.80 mm 、 -7.81 mm 、 9.56 mm 、 -11.54 mm ,属于“正负正负”形式。该系统能够实现放大倍率从 0.03 到 0.28 的连续变化,焦距为 $8.8\sim 52\text{ mm}$ 。系统整体放大倍率不是很大且倍率均小于 1 ,导致系统头部直径比较大。该系统工作距离可达 262 mm ,镜头筒长 76 mm ,像距为 11 mm ,半像高为 3 mm ,能匹配 $1/3\text{ inch}$ ($1\text{ inch}=2.54\text{ cm}$)图像传感器使用。

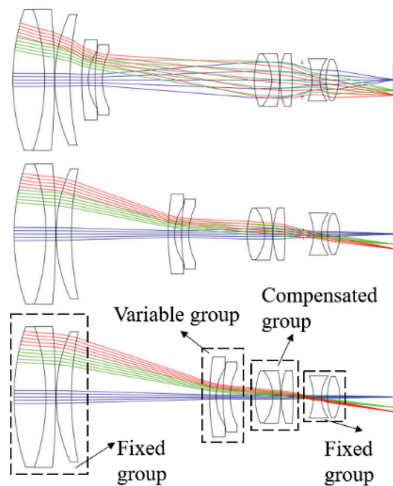


图9 变倍比为 $9.3\times$ 的有限远共轭距连续变倍光学系统^[33]
Fig. 9 Continuous zoom optical system with finite conjugate distance for zoom ratio of $9.3\times$ ^[33]

2015年,陈艳婷^[34]设计了一款成像放大倍率为 $0.7\times\sim 5.6\times$ 的连续变倍数码显微系统,如图10所示。该显微镜具有 $8\times$ 的变倍比,高倍时的最大数值孔径设计为 0.76 。前固定组第一透镜前表面到图像传感器的距离为 135 mm ,具有 31.73 mm 的工作距离,物像共轭距为 166.73 mm ,像面高度

为 7.16 mm 。

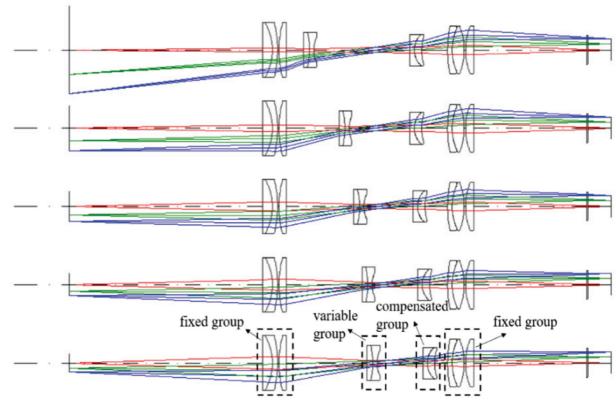


图10 $0.7\times\sim 5.6\times$ 有限远物距连续变倍数码显微镜光学系统^[34]

Fig. 10 Optical system of $0.7\times\sim 5.6\times$ continuous zoom digital microscope with finite conjugate distance^[34]

为了实现良好的成像性能,有限远单筒式连续变倍数码显微镜光学系统大多采用机械补偿式以保证像面稳定,且物像共轭距保持不变。但是这种类型的连续变倍数码显微镜工作距离固定,只能对特定距离处的物面成清晰像,无法应对高低起伏的物体。对于不同高度的物体,需要移动物体或者变倍镜头来调整成像物面与镜头之间的距离,实现对不同物面的清晰成像。

4.4.2 无限远单筒连续变倍数码显微镜

无限远单筒连续变倍数码显微镜采用无限远光学系统进行设计,放大倍率能够在一定范围内连续无级调节^[35]。其光路结构采用物方无焦同像方无焦设计,以方便使用各种规格的前置附加物镜、后置TV镜头等其他配件。这种类型的连续变倍显微镜最突出的特点在于,光学系统中具有一段平行光路,可以插入滤光片、分光棱镜及偏振片等器件而不产生像差,也不会影响整个系统的测量精度。除此之外,还可以让光源的位置不受约束。无限远单筒连续变倍视频显微镜代表产品有普密斯VP-LZH-8010系列连续变倍显微镜、桂林市迈特光学仪器有限公司MZDH0850系列连续变倍显微镜、桂林方天仪器有限公司生产的FB0650系列 $0.6\sim 5.0\times$ 连续变倍镜头等。如图11所示,无限远单筒连续变倍数码显微镜能够以积木式结构搭配各种规格的附加件,得益于其采用的无限远光学系统。

目前市场上采用无限远平行光路结构的单筒式连续变倍镜头具有以下特点。

1) 变倍过程中镜头的共轭距、工作距离、后焦均



图 11 无限远单筒连续变倍数码显微镜系统

Fig. 11 Infinite single tube continuous zoom digital microscope system

保持不变,各倍率位置均保持齐焦。

2) 由于工作距离固定,只能对某一固定平面物体清晰成像。有的厂商为适应不同工作距离的环境需要,提供具有固定放大倍率的附加前置物镜。不同放大倍率的附加物镜具有不同的工作距离,且改变工作距离同时会使整个变倍镜头主体的放大倍率成倍改变。

3) 当前市面上连续变倍数码显微镜镜头变倍范围都不大,一般在 $0.7\times\sim 4.5\times$ 。若要改变连续变倍数码显微镜系统的总倍率,可根据倍率需求,选购相应厂商生产的前置附加物镜或者后置 TV 镜头。前置附加物镜可改变系统的总倍率和工作距离,而后置 TV 镜头可加装在变倍镜头主体与相机之间,能够在不改变工作距离的情况下调整系统的放大倍率或光学总长。

4.5 电动连续变倍数码显微镜

当前市面上连续变倍数码显微镜主要通过手动形式将凸轮的旋转运动转换为变倍镜组、补偿镜组沿光轴方向的直线移动,从而实现放大倍率的连续变化。但是在某些应用领域,如精密加工、自动检测系统及测绘仪器等领域,倍率数值是十分重要的数据。每调节一次镜头,需要人工读取镜头当前位置的倍率数值,这种操作方式不仅繁琐、工作效率低,而且容易出错,精度低。具有电动变倍功能的连续变倍显微镜镜头解决了上述问题,如图 12 所示。

电动连续变倍显微镜在使用时需要配合步进电机和相应的控制软件来实现电动变倍功能,软件给



图 12 电动连续变倍镜头

Fig. 12 Electric continuous zoom lens

予指令通过控制步进电机转动来改变镜头内部变倍组元的位置,实现自动变倍。图 13 为普密斯一款型号为 VP-LZL-G12104 的 12.5X 导轨电动变倍镜头。其采用内置双导轨结构,通过直线电机直接驱动变倍镜组和补偿镜组,能够有效解决传统电动变倍马达步进电机速度慢、电机失步造成重复精度低的问题,大大提高了镜头的光学性能、稳定性及使用寿命。



图 13 导轨电动变倍镜头

Fig. 13 Guide electric zoom lens

4.6 自动对焦连续变倍数码显微镜

连续变倍显微镜,尤其是对有限远物成像的连续变倍显微镜镜头,仅能对某一特定对准平面成清晰像。然而某些应用场合往往要求快速聚焦,如果采用手动旋转调节环带动牙套机构进行聚焦或者手动移动镜头与物体之间的距离的方式,不仅聚焦速度较慢,而且可能由于人体主观判断,对焦不准。具有自动对焦功能的连续变倍单筒数码显微镜系统则可以解决这个问题。

实现自动对焦的方式有两种。一种是采用具有自动对焦功能的工业相机,其基本原理是:当连续变倍单筒数码显微镜处于某一工作距离时,依据算法分析获取图像的清晰程度,然后电机带动图像传感器进行向上或向下移动,直至对焦清晰。另一种方式是采用具有自动对焦功能的液体透镜。液体透镜主要指一种内部充满透明液体并在外部作用下能够改变折射率或者曲率半径的透镜^[36-37]。目前已经商品化的液体透镜主要有法国的 Varioptic、美国的

Holochip 以及瑞士的 Optotune, 虽然工作原理不尽相同, 但最终都能实现透镜焦距的连续变化。

Optotune 液体透镜的基本原理是基于驱动电流改变透镜表面曲率。如图 14 所示, 液体透镜由两块保护玻璃和两个液体腔组成, 两个液体腔被弹性薄膜分隔开。两个液体腔内充入折射率不相同的透明光学液体。当两个液体腔内的压力不相同, 压力差会引起弹性薄膜曲率半径变化, 从而改变液体透镜的焦距^[38]。因此可以选择在连续变倍单筒数码相机显微镜的前端、后端加入液体透镜甚至可以在镜头内部嵌入液体透镜来实现自动调焦。加入液体透镜的连续变倍数数码相机显微镜会通过算法分析当前图像的清晰度, 然后相应地改变液体透镜的光焦度, 直至对焦清晰。图 15 为 Edmund optics 公司的 dynamic focus VZM lens, 这款产品不仅可以进行电动调焦, 还可以在不改变工作距离的情况下调整放大倍率, 克服了景深的限制。使用液体透镜还能扩展工作距离, 如表 1 所示, dynamic focus VZM lens 的工作距离为 20~101 mm, 而普通单筒式连续变倍显微镜的工作距离通常是固定的。

表 1 Edmund optics dynamic focus VZM lens 连续变倍镜头参数
Table 1 Specifications of continuous zoom lens of Edmund optics dynamic focus VZM lens

Parameter	0.75×	1×	2×	3×	4×	4.5×
Magnification range	0.65×-1.15×	0.9×-1.2×	1.5×-2.0×	2.4×-3.0×	3.2×-4.0×	3.7×-4.6×
Working distance/mm	20-101	20-100	54-90	75-90	82-90	84-90
Horizontal field of view/mm	9.8-5.6	7.1-5.3	4.3-3.2	2.7-2.7	2.0-1.6	1.7-1.4

5 总结和展望

首先概括性地总结了各种类型的连续变焦光学系统及其变焦原理, 接着介绍了不同类型的连续变倍显微镜。目前制约连续变倍光学系统性能的参数主要有变倍比、工作距离、光学系统长度和口径, 这几个条件相互约束, 例如要想达到比较大的工作距离, 就必须牺牲变倍比或是增加系统的长度来实现。各种类型的连续变倍显微镜适用于不同的应用场合, 且各有优缺点。连续变倍体视显微镜主要应用于生物观察及教学领域, 最大的特点是具有正像立体感, 但其只能通过目视观察, 长期使用会导致用眼疲劳, 同时显微图像无法保存供后续使用, 使用起来不是很方便。传统光学显微镜无法实现显微图像数

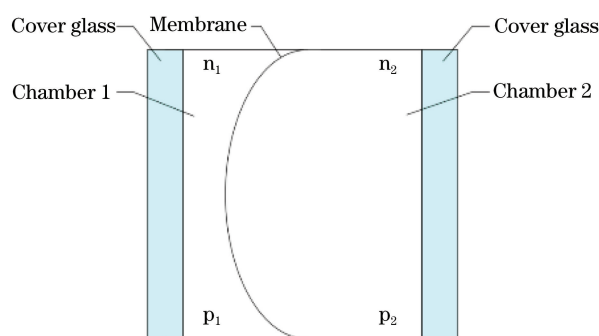


图 14 Optotune 液体透镜^[38]

Fig. 14 Optotune liquid lens^[38]



图 15 Edmund optics 带有液体透镜的连续变倍镜头

Fig. 15 Edmund optics continuous zoom lens with liquid lens

字化, 连续变倍电子目镜适配器很好地解决了这个问题, 在传统光学显微镜目镜上加装合适的连续变倍电子目镜适配器可以将显微镜所成的中间像成像在连续变倍电子目镜适配器的图像传感器上, 以实现显微图像的数字化, 或者连接到电脑将图像保存以便后续查阅。手持式连续变倍显微镜外型小巧、便于携带, 应用范围也十分广泛。手持式连续变倍数数码相机显微镜可用于珠宝行业观察宝石内部结构并对其进行鉴定、用于电子行业观察印刷线路板铜铂板的走线等, 通常用于成像质量要求不高的领域。手持式连续变倍数数码相机显微镜通常通过移动整个镜头来实现放大倍率的改变, 由于放大倍率与工作距离没有线性关系, 难以依据工作距离选定合适的放大倍率。相比手持式连续变倍数数码相机显微镜, 单筒式连续

变倍数码显微镜的成像质量与精度更高,可以应用在机器视觉、精密加工及在线检测等领域。但是由于需要手动实现变倍,对于自动化程度比较高的应用来说,使用起来不是非常方便。电动连续变倍数码显微镜通过电机驱动齿轮替代人手来进行自动变倍,使其能够适应自动化、智能化的设备,满足日益发展的自动化的要求。自动对焦连续变倍数码显微镜则可以通过软件算法判断图像清晰度,从而找到最佳对准物面。包含液体透镜的连续变倍数码显微镜还可以扩展工作距离,在某一工作距离范围内均可清晰成像,但是相应成本也比较高。

随着连续变焦光学系统的不断发展和新形式的连续变焦光学系统理论的不完善,采用不同变焦方式的连续变倍显微镜相继被开发出来。相比于采用光学补偿式和机械补偿式的连续变倍显微镜,采用多组联动及全动型变焦系统的连续变倍显微镜更容易实现大的变倍比。随着镜头装配技术的提高及凸轮曲线加工工艺的进步,高精度的加工技术为各种复杂形式变焦镜头的加工提供了保障,使得更高倍率的连续变倍显微镜得以实现。随着液体透镜的问世,连续变焦光学系统的设计出现根本性改变,使得不用改变透镜组之间的距离就能改变整个光学系统焦距成为可能。因为没有移动组元,可以很大程度地减小变焦光学系统的尺寸,从而使连续变倍显微镜外形更加紧凑,实现小型化。将液体透镜应用于显微成像系统时还可实现自动对焦、扩展工作距离、增加景深功能。随着百万乃至千万像素级高分辨率光电图像传感器的迅速更新迭代,对镜头提出了更高要求,各种高分辨率连续变倍数码显微镜镜头相继开发,以满足大型工业检测行业要求。

随着连续变焦光学系统理论的不完善及镜头加工技术的进步,未来连续变倍显微镜将会朝着紧凑式、小型化、高变倍比并具有自动变倍功能的方向发展,功能愈加完善,应用领域也不断扩大。

参 考 文 献

- [1] Chunkan T. Design of zoom system by the varifocal differential equation. I[J]. Applied Optics, 1992, 31(13): 2265-2273.
- [2] Youngworth R N, Betensky E I. Fundamental considerations for zoom lens design (tutorial) [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8488: 848806.
- [3] Tao C K. Varifocal differential equation theory of zoom lenses [J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2539: 168-179.
- [4] Back F G, Lowen H. Generalized theory of zoomar systems [J]. Journal of the Optical Society of America, 1958, 48(3): 149-153.
- [5] Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics [M]. 4th ed. Beijing: Chinese Machine Press, 2015: 164-171. 郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2015: 164-171.
- [6] Xu Z G, Liang L S. Research of OZSAD system assistant design software [J]. Optical Technique, 2005, 31(2): 235-237, 240. 许正光, 梁来顺. 二组元变焦距系统辅助设计的软件研究 [J]. 光学技术, 2005, 31(2): 235-237, 240.
- [7] Liang L S. A rapid computing method of zoom optical design [J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(1): 17-20. 梁来顺. 变焦距系统设计的快速求解 [J]. 应用光学, 2004, 25(1): 17-20.
- [8] Wang L C, Wen H R, Luo B. Design of high-magnification zoom stereo microscope [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 1989, 25(1): 15-20. 王良诚, 温怀荣, 罗滨. 高倍连续变倍电视显微镜的设计 [J]. 航空精密制造技术, 1989, 25(1): 15-20.
- [9] Wang Z J. Practical manual optical technology [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006: 416-464. 王之江. 实用光学技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 416-464.
- [10] Bergstein L. General theory of optically compensated varifocal systems [J]. Journal of the Optical Society of America, 1958, 48(3): 154-171.
- [11] Bergstein L, Motz L. Two-component optically compensated varifocal system [J]. Journal of the Optical Society of America, 1962, 52(4): 353-362.
- [12] Bergstein L, Motz L. Three-component optically compensated varifocal system [J]. Journal of the Optical Society of America, 1962, 52(4): 363-375.
- [13] Bergstein L, Motz L. Four-component optically compensated varifocal system [J]. Journal of the Optical Society of America, 1962, 52(4): 376-388.
- [14] Tanaka K. Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. 1: four-component type [J]. Applied Optics, 1982, 21(12): 2174-2183.
- [15] Tanaka K. Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. 2: generalization of Yamaji type V [J]. Applied Optics, 1982, 21(22): 4045-4053.
- [16] Tanaka K. Paraxial analysis of mechanically

- compensated zoom lenses. 3: five-component type [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(4): 541-553.
- [17] Yang M Y. Study of high ratio continuous zoom system[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017: 15-31.
杨明洋. 大变倍比连续变焦光学系统研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017: 15-31.
- [18] Yao D S. Design method of mechanically compensated three-element continuous zoom optical system(1)[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(1): 165-170.
姚多舜. 机械补偿式三组元连续变焦光学系统设计方法(1)[J]. *应用光学*, 2008, 29(1): 165-170.
- [19] Yao D S. Design method of mechanically compensated three-element continuous zoom optical system(2)[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(2): 321-326.
姚多舜. 机械补偿式三组元连续变焦光学系统设计方法(2)[J]. *应用光学*, 2008, 29(2): 321-326.
- [20] Yao D S. Design method of mechanically compensated three-element continuous zoom optical system(3)[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(3): 481-486.
姚多舜. 机械补偿式三组元连续变焦光学系统设计方法(3)[J]. *应用光学*, 2008, 29(3): 481-486.
- [21] Pal S, Hazra L. Structural design of mechanically compensated zoom lenses by evolutionary programming[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(6): 063001.
- [22] Li H Z, Zhang Z D. Design of 20 × double-linkage continuous zoom optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0222003.
李宏壮, 张振铎. 20 倍双组联动变焦距光学系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0222003.
- [23] Wang N X, Jiao M Y, Jiang X B, et al. Calculation of initial configuration for 15 × double-linkage infrared continuous zoom system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(4): 670-674.
王楠茜, 焦明印, 姜霄白, 等. 15 倍双组联动红外连续变焦系统的初始结构计算[J]. *应用光学*, 2012, 33(4): 670-674.
- [24] Yao D S, Wang N X, Kang W L. Method of designing linearization double-linkage continuous zoom lens [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(1): 1-8.
姚多舜, 王楠茜, 康文莉. 线性双组联动型连续变焦光学系统设计[J]. *应用光学*, 2015, 36(1): 1-8.
- [25] Tao C K. Design of zoom system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: 1-7.
陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988: 1-7.
- [26] Wang X Y, Liu W L. Optical design of telephoto zoom lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(2): 277-280.
王向阳, 刘卫林. 多动型变焦距物镜设计[J]. *应用光学*, 2017, 38(2): 277-280.
- [27] Xu L F, Zhang X, Cai W, et al. Optical design of high-magnification zoom systems with multiple moving lens groups [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1748-1753.
许利峰, 张新, 蔡伟, 等. 高变倍比全动型变焦距光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(7): 1748-1753.
- [28] He H X. Medium wave infrared optical system based on three group linkage continuous zoom[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(19): 190801.
何红星. 三组联动连续变焦中波红外光学系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(19): 190801.
- [29] Wang L, Jiang H, Sun L L. A review of the development of microscope [J]. *Science & Technology Information*, 2009(11): 117-118, 133.
王莉, 蒋洪, 孙丽丽. 显微镜的发展综述[J]. *科技信息*, 2009(11): 117-118, 133.
- [30] Zeng C M. The optical design of zoom stereomicroscope using optical compensation [J]. *Optical Instruments*, 2001, 23(4): 20-24.
曾春梅. 光学补偿式连续变倍体视显微镜的光学设计[J]. *光学仪器*, 2001, 23(4): 20-24.
- [31] Xu L F, Zhang X, Qu H M, et al. Optical design of high-magnification zoom stereo microscope objective [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(1): 38-44.
许利峰, 张新, 曲贺盟, 等. 高变倍比连续变焦体视显微镜物镜设计[J]. *应用光学*, 2013, 34(1): 38-44.
- [32] Yu F H, Shi J. A zoom electronic eyepiece adapter for a finite conjugate distance microscope: CN201921362086.7[P]. 2019-08-21.
余飞鸿, 石佳. 一种有限远共轭距显微镜用可变倍电子目镜适配器: CN201921362086.7[P]. 2019-08-21.
- [33] Li Y Y, Chen H, Wang Y Y, et al. Continuous zoom optical system for E-vision aid device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2387-2392.
厉以宇, 陈浩, 王媛媛, 等. 用于电子助视器的连续变焦光学系统[J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2387-2392.
- [34] Chen Y T. Optical design of three-in-one zoom digital microscope system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015: 72-76.

- 陈艳婷. 3 合 1 连续变倍数码显微系统的设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 72-76.
- [35] Huang Y P, Lin F, Huang S Y, et al. Design of front objective for digital slit-lamp microscope system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(15): 152202.
黄幼萍, 林峰, 黄淑燕, 等. 数码裂隙灯显微系统前置物镜的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(15): 152202.
- [36] Xu R Q, Kong M M, Zhang H C, et al. Experimental research on reducing zoom time of electrowetting liquid lenses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1322003.
徐荣青, 孔梅梅, 张宏超, 等. 减少电润湿液体透镜变焦时间的实验研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(13): 1322003.
- [37] Lü H Y, Cui J G. Dielectrophoresis liquid lens based on frequency modulation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(13): 132201.
吕红艳, 崔建国. 基于调频法的介电液体透镜研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(13): 132201.
- [38] Blum M, Büeler M, Grätzel C, et al. Compact optical design solutions using focus tunable lenses [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8167: 81670W.