

变焦距镜头设计

1. 引言

这篇报告主要是讲在用计算机进行变焦距镜头最优化光学设计中，我们遇到的并尽我们之所能加以解决的一些问题。在过去几年中，我们根据自己的需要，对比着镜头设计者普遍具有的关于固定焦距镜头工作原理的知识，对变焦距镜头的设计，试图建立一些基本概念。

固定焦距镜头或许可以说成是一个“黑盒子”，这个“黑盒子”的内部结构是由镜头设计者来规定的。“黑盒子”的内部结构有三种可取的结构型式，镜头设计者对于这种型式以及它们的许多变型所具有的潜力，是或多或少了解的，并且可以象处理日常事务那样地解决固定焦距镜头的设计问题。（我们都认识到，存在着一些非一般的要求，它们要用不常用的镜头结构型式加以解决。但是镜头设计者认为他有相当好的装备来处理这些问题，仅仅偶而会使他们感到出乎意料）。

和固定焦距镜头相比，变焦距镜头的设计，大家是不太熟悉的。我们也看到，现在还不能马上就希望象固定焦距镜头设计那样给出变焦距镜头设计的全套方法，即给定了镜头的规格以后，就几乎总是可以立刻挑出最好的（或者至少是接近最好的）基本结构型式。

以下将介绍我们设计变焦距镜头经验中最突出的几点。

2. 基础理论及其结果

所有镜头设计者都知道，设计普通照相

用的三片型物镜，匹兹伐场曲半径只有简单物镜的一半左右。这剩余的匹兹伐弯曲必须保留，以便和两种高级象差相平衡：一种是向后弯的高级弧矢场曲，另一种是弧矢斜光束（轴外）球差。想成为一个镜头设计者而不知道这一点，至少在用计算机进行最优化作三片型物镜设计时会浪费很多时间，在最坏的情况下，他甚至找不到最佳的解（这是可能的，而不是不可能的）。

所有设计用作消费产品的变焦距镜头都是不完善的，并且，按我们的看法，想预先估计应当校正的和允许存在的剩余基本象差及它们随焦距改变的变化，这就象没有镜头设计经验的人要预先估计到对于普通照相物镜，匹兹伐和应当几乎不加校正一样，至少是同样困难的事情。

3. 对变焦距镜头有用的公式组

下面列出几个对变焦距镜头设计有用的公式。

考虑任意一个透镜单元，或者刚性连接在一起的一组透镜。令 u_1 代表轴上旁轴入射角， u_2 代表轴上旁轴出射角。又令 u_0 代表整个透镜系统的轴上旁轴出射角。设 x 是被研究的透镜组的位移，它沿光轴方向和垂直于光轴方向的两个分量分别是 dx 和 dy 。相应的象点的移动是 ds' （沿光轴方向）和 dy' （垂直于光轴方向）。于是我们就有：

$$ds' = dx(u_2^2 - u_1^2)/u_0^2 \quad \dots\dots(1)$$

$$\text{和 } dy' = dy(u_2 - u_1)/u_0 \quad \dots\dots(2)$$

用(1)式和(2)式易于了解变焦距镜头结构中可能遇到的重要的公差问题。方程(1)可以使寻找光学补偿变焦距镜头初始结构型式

的问题简化。

现在考虑任意一个变焦距镜头的“变焦核”。“变焦核”指的是包括第一个和最后一个可动透镜在内的它们之间的所有透镜组元。设 P_1 是变焦核倍率为 M_1 时主点之间的间隔， P_2 是它倍率为 M_2 时的主点间隔， f_1 和 f_2 是相应的焦距。则如果满足下列条件：

$$P_1 - P_2 = 2(f_2 - f_1) \quad \dots\dots(3)$$

变焦核就具有下列特性：倍率 $-1/M_1$ 的共轭平面和倍率 $-1/M_2$ 的共轭平面相重合，即存在稳定光瞳条件。

现在考虑常用型式的机械补偿变焦距镜头。它的变焦核由两个相邻的凸轮驱动的两组透镜构成。

设 Φ_1 和 Φ_2 是这两个活动组的光焦度， L 是变焦核的物平面和象平面之间的距离， t 是两个活动组之间的间隔。假若这两个活动组是厚透镜的话， t 是第一组透镜的第二主面到第二组透镜的第一主面之间的距离。并且假设我们从 L 减去了第一组与第二组透镜主面间隔的和。

于是我们得到下列方程：

$$t = 0.5L \pm [0.25L^2 + (M+1)^2 / (M\Phi_1\Phi_2) - L(\Phi_1 + \Phi_2) / (\Phi_1\Phi_2)]^{1/2} \quad \dots\dots(4)$$

$$\text{及： } \Delta t / \Delta M = (M^2 - 1) / (M^2\Phi_1\Phi_2 \times (2t - L)) \quad \dots\dots(5)$$

(4)式是解机械补偿变焦距镜头的变焦方程通用的基础。(5)式对于建立机械补偿变焦距镜头的结构型式是有用的，它表明倍率变化的可能范围以 $2t = L$ 为限。否则，当 $2t = L$ 时，倍率是 ± 1 。

由光焦度分别为 Φ_1 和 Φ_2 的两个薄透镜相距 a 所组成的透镜组，主点之间的距离 P 等于：

$$P = -a^2\Phi_1\Phi_2f \quad \dots\dots(6)$$

f 是这透镜组的组合焦距。当 P 取负值时表示主点是交叉的。

4. 变焦距镜头类型的描述方法

我们先讨论变焦核。平常的机械补偿变焦距镜头包含一个变焦核，它的物面和象面是固定的。这物面和象面，可以是实的，也可以是虚的。假若变焦核构成正透镜，物和象就既可以是实的也可以是虚的，但若构成负透镜，则物和象就一定是虚的。

当机械补偿变焦距镜头的变焦核构成正透镜时，它的两组透镜可以都是正透镜，也可以是一组正的一组负的。物与象可以是实的也可以是虚的。因此就可以有六种基本型式的变焦核，他们总的光焦度是正的。假若变焦核构成负透镜，它就可以是两组负透镜，或者是一组正透镜跟着一组负透镜，再或者是一组负透镜跟着一组正透镜。因此，机械补偿变焦距镜头总共有九种变焦核的结构型式可供选择。（参考文献[1] R.Kingslake, J.SMPTE, Vol. 69, 534, 1960）

光学补偿变焦距镜头的变焦核，包含有奇数组透镜，两两相间的各组移动相同的距离，就象这两两相间的每组透镜刚性连接成两个大组一样。一组相对于物面和象面固定不动。移动组可以是正透镜，这时固定组就是负的。或者反过来，移动组是负的，固定组是正的。假若最外面的两组透镜是正的，物和象就既可以是实的也可以是虚的；而假若它们是负透镜的话，物和象就都是虚的（例外的情形也是可能的，但那时变焦功能将不再存在）。

光学补偿变焦距镜头的象面在变焦过程中并不保持稳定，而是在几个“交点”前后变动，交点的数目等于可变的空气间隔数目。光学补偿变焦距镜头结构型式的选择分两部进行：首先决定为使所需焦距范围的象面稳定所需的交点数目，其次决定最外面的两组透镜取正透镜还是取负透镜。

典型的变焦距镜头，除了变焦核以外，

还有前、后两个辅助透镜组，它们一般是为了保证变焦核的共轭象面满足以上所述的条件所必须的。假若变焦距镜头作为一个整体，它所成象的物面在有限距离，那么前辅助透镜组就可以不要；而假若镜头的象面在有限距离，后辅助组可以不要。当然，假若物方和象方共轭距离都是有限的话，这两个辅助组都可以不要。

（甚至当物在无限远的情况，变焦距镜头也可以不要前辅助组。但是以下将看到，要想设计成一个不昂贵的变焦距镜头来说，这常常并不是富有成果的选择。得出的机械补偿变焦公式简单得不必再加专门讨论。对于光学补偿变焦距镜头，当变焦核的物或象在无限远时，“交点”减少一个。“交点指的是象面位移等于零的焦距位置）。

5. 变焦距结构型式的选择

通常，变焦距镜头的结构型式主要是从尺寸、重量和满足使用性能要求所需的成本来选择的。经常的情况是把原来的性能要求加以剪裁，使它和尺寸、重量和成本的研究结果相配。这一研究通常得到的结果是：变焦核的中间放大倍率接近于1（或者-1），变焦范围从 m 到 $1/m$ ，总的放大倍率范围 $M = m^2$ ，是最好的总的折衷。

机械补偿变焦距结构型式的选择往往局限于两种情况，除了变焦核起变倍转象镜作用这种情况以外，一般都是选择变焦核构成正透镜，物和象都是虚的这种结构型式。假若物和象都是实的话，变焦核主面间隔的变化就会抵消一部分倍率的变化。然而当变焦核是由正透镜组和负透镜组构成时，这一点可以变得有用：当主面落在前辅助组的前面的时候（比如远摄型），这就有助于减小整个镜头的尺寸。变焦核由两个负透镜组构成时的型式具有下列优点：主面间隔的变化是谐调一致的。以上几种结构型式容易产生比较紧凑的机械补偿式变焦距镜头。在给定的条

件下，究竟选择那一种型式还要决定于其它的条件。

负—负结构型式的变焦核，优点是由变焦组组合得出变焦核的净光焦度，并且初看来好象是保持在总系统中的许多单元上。另一方面，这种（负—负）的变焦核，出射光束是发散的，而（正—负）结构型式的正变焦核，出射光束是会聚的，因而前者加重了后辅助组的光焦度负担，后者则减轻其负担（当整个镜头要求成实象时）。假若要求整个系统有较小的 f/D 值，则这一点可能是起决定作用的因素。

另外一些需要考虑的问题是光阑，快门的空间，取景器等等。

平常认为机械补偿变焦距镜头比等价的光学补偿变焦距镜头来得紧凑，但小倍率镜头（ $2 \times$ 左右）并不一定如此。大倍率镜头看来肯定是这样。因而是选择光学补偿还是选择机械补偿，要考虑到光学补偿机械尺寸比较大，机械补偿有凸轮和凸轮磨损等问题。假若选光学补偿，则外边是正透镜组的结构型式一般比较可取，因为出射光束是会聚的，这在要求整个镜头成实象的时候有好处。

6. 光瞳稳定性

伍特 (Wooters) 和西弗图斯 (Silvertooth) 证明 (参考文献 *J. O. S. A.*, Vol55, P347, 1965) 负—正—负对称型光学补偿变焦核，存在另一对象面，它们的位置是近于稳定的。这也就是说，假若物和象都是实的，就存在一个虚的物面，它的象（虚的），位置是近于稳定的。或者说假若使虚象的位移极小化，实象就只有很小一点点位移。这实象与虚象之一可以看作是物（目标）的象，而另一个则是光瞳的象。在某些重要的方面，这给镜头设计者造成一种不利的情况，假若虚象是目标的象，这个系统（指变焦核）在一个转象系统中起场镜作

用，并且象成在变焦距镜头内，这通常是不允许的。假若虚象是光瞳的象，则光瞳和光瞳的象必定是远离前、后辅助透镜组，这也同样常常是不允许的。

具有稳定的实共轭面的机械补偿变焦核，可以具有虚的共轭面。在光学补偿的意义上来说，它可以有四个交点，即对于四个不同的倍率，（也就是四个不同的焦距位置）有共同的象面。这也就是说，（2）式对1倍位置和另一个倍率 M 成立，因而对倍率 $1/M$ 也成立。因为由于对称性，象在1倍位置附近没有位移，光瞳象就有四个交点。满足这些条件的变焦核的结构型式是一个正透镜组和一个负透镜组构成的（净）正透镜组，它在1, -1倍位置，两组透镜的间隔可以等于零。假若间隔不等于零（在 $1 \times$ 位置），主面就在透镜组之外，在任意一组透镜“闯过”目标的象之前，就可以有相当大的变倍范围。比如总的变倍比可以达到4.5。有时，这是校正变焦过程中的象差的厚透镜解。

7. 用计算机进行最优化，准备阶段。

建立变焦距镜头的初始薄透镜解的有效方法是寻找一个变焦核，它工作于倍率 M 到 $1/M$ ，这里 $m = M^2$ 是变倍范围（见文献〔2〕，〔3〕）。对于机械补偿变焦距镜头，寻找变焦核是比较简单直接的事情。我们有下列条件：

$$L = -f(M-1)^2 M^{-1} \quad \dots\dots(7)$$

其中 L 是变焦核的物点到象点的距离。

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - a\Phi_1\Phi_2 \quad \dots\dots(8)$$

其中 $\Phi = 1/f$ 是变焦核的光焦度， Φ_1 和 Φ_2 是变焦核的两组透镜的光焦度， a 是它们的间距。并且

$$P = -a^2\Phi_1\Phi_2f$$

这里 P 是变焦核的主面间隔。

当 L 选定，变焦核的结构型式也选定

以后，按上列公式，用台式计算机叠代出一个初始数值解是并不麻烦的。寻求光学补偿变焦核的初始薄透镜解的叠代过程则要繁复得多，平常都是用电子计算机进行的（见文献〔2〕，〔3〕和〔4〕）。

找到了薄透镜变焦核的解以后，可以按问题的要求，加上薄透镜的前、后辅助透镜组。下一步可以是对系统追迹光线，以便检查一下那一组相对孔径太大，必须分成一个以上的单元。作这初始薄透镜解的光线追迹计算还可以告诉我们，那些组需要校正色差或者至少是部分消色差。

除了以上两方面的研究以外，继续研究薄透镜解，我们发现再得不出太多东西了。

8. 用计算机进行最优化，中间阶段。

某些类型的变焦距问题，可以用未校正色差的单元构成的变焦核来解决。比如用于8毫米家庭摄影机的高质量但变倍比不太大的变焦距镜头。对于这种比较简单的问题，经常需要将移动组之一分成两个单元。但是用不校正色差的变焦核，也可以使色差随变焦的变化在容限之内。主要的问题是垂轴色差随焦距改变的变化。位置色差在变焦过程中始终是比较小的。对于上述这样简单的变焦核，可以预料当用厚透镜代替薄透镜时通常会出现的那些问题：即各组互相闯入（即间隔小于零），所需净孔径比薄透镜解大等等。因而问题就是让计算机最优化程序开辟出自己的道路来。根据我们的经验，发现对于这一类镜头，最好让最优化过程进行得慢一点，以免计算机程序跳出所希望的结构型式。我们可以比方说，开始的时候，允许有有限的“闯过”，以后渐渐处理成实际的结果。简而言之，简单结构型式的变焦核在把薄透镜解变为实际透镜的时候，一般都会发生困难，但是我们经常惊奇地发现这种困难是如此之小。

当变焦核的结构比上述由无象差薄透镜理论得出的复杂得多的时候,情况就和上述完全不同了。对于这样的系统,当把薄透镜解转换成厚透镜解时,我们常常发现厚透镜解比薄透镜近似要来得好。在研究发生这种情况的各种条件的过程中,发现当一组透镜转换成厚透镜时,这组透镜的主点有时被推到这组透镜之外,给出一个由薄透镜理论得不到的解。十分令人奇怪的是,计算机最优化看起来不需要在一组透镜里再分离出更多的单元来做到这一点……为此它使允许值达极小……而是在一组透镜中造成曲率很大的弯月形单元。

使我们感到十分懊恼的是我们对在整个变焦过程中剩余象差小到可以允许的解还没有基本认识。但是我们发现用下述的一些办法可以帮助计算机得出一个好的变焦距镜头。一个办法是采用有潜力帮助解决象差问题的前、后辅助组。另一个办法是用能使光瞳落在变焦核希望它落在的位置的辅助组。再一个办法是给镜头增加一些组元,超过实际需要,然后让计算机找出一个好的结构型式,最后再把那些不必要的单元去掉。我们发现有效的另一个战略是先按比最终的要求低一点的要求(变倍比, f/D , 视场, 尺寸等等)做设计,在找到厚透镜解以后再逐渐做到比较高的最终要求。

9. 用计算机进行最优化, 最后阶段。

用计算机进行一个比较复杂的变焦距镜头的最优化的最后阶段,常常是考虑去掉不必要的单元。有时计算机基本上是自己完成这一工作。它选择那些光焦度很小的单元(但光焦度几乎等于零的很弯的弯月镜除外,它们在这里可能是用来把主面移到透镜组之外的)。我们有一个这种情况的很好的例子:在设计初期阶段,看起来绝对必要几次增加透镜组元,以求达到比较好的性能。

最优化程序最后找到一个结构型式以后,我们逐步地从16个组元中一共去掉了6个。

10. 特殊的变焦距结构型式。

工作于倍率-1左右的机械补偿变焦距镜头是一个有趣的特殊情况。这种镜头,既不需要前辅助组也不需要后辅助组。而且假若孔径光阑随移动组移动的话,它可以做得很紧凑。我们进行了广泛研究的一种情况是作“呼吸”运动的双高斯型,即当整个镜头沿轴移动以改变倍率的同时,镜头两半部之间的间隔同时改变。这样一个镜头并不是真正的双高斯型。它必须作某些修改,使每半部分别(单独)校正彗差,否则象散随这两半部的间隔改变的变化(因而象散在变焦过程的变化)会超过允许的大小。

另一类变焦距镜头是比上述更为普遍型式的机械补偿变焦距镜头。在这种比较复杂型式的变焦距镜头当中,最简单的是在移动组之间多一个固定组(它与光学补偿变焦距的区别在于移动组不是刚性连结的)。这可以推广到可任意移动的 N 组。我们进行过认真研究的是一种类似于光学补偿变焦距镜头的形式:所有的活动组互相之间作相对的线性移动(见参考文献[5])。

还有一些有趣的镜头类型但是他们不是真正的变焦距镜头,比如:

焦距可变,但后节点固定的镜头(这在模拟器中有用);

用加进或移出几个组元的办法改变焦距的镜头,这是改变焦距的一种紧凑的办法。

在物距改变时,校正好象差的镜头(使一部分组元相对另一部分移动)或者对一个物距范围是有最好的折衷校正的镜头;

沿轴移动,使倍率等于 M 和 $1/M$ 的中继镜头,它不工作于其它中间倍率。

11. 用于红外的变焦距镜头。

设计用于红外的变焦距镜头,可以预料到它们在比较大的变焦范围能有好的象质,特别是在 $8-12\mu$ 波段,因为可以用锗,而它是几乎没有色散的。在变倍比 12:1 的整个范围内,倍率色差和它随焦距的变化,在小视场情况可以做得很小,但是对于远摄位置有大相对孔径的系统,就必须校正倍率色差(在远摄位置)。

我们所知的红外变焦距镜头,大多和象扫描器一起使用。这时存在冷脉冲问题:即某个面象镜子那样把接收器成象在接收器附近。这是不允许的,因为它们在扫描器的中心产生一个假的冷脉冲。这就要求任何面不应当处在中间象附近,也不应当有曲率中心和波面的曲率中心近于重合的面。冷脉冲信号的强度反比于入射于该面的轴上旁轴角乘上轴上旁轴光在该面上的高变。

12. 物距可变

假若镜头要聚焦于不同距离的目标,就必须由前辅助组产生调焦运动,否则在变焦过程中,镜头不能保持适当地调焦。

13. 变焦距镜头设计指南。

变焦核最重要的特性是它的变倍范围和它的集光能力。集光能力定义为象的直径和象的数值孔径的乘积。由于集光能力会随焦距改变而改变,因此这个概念变得复杂了,并且这个概念还没有考虑渐晕(因而也不考

虑渐晕随焦距的变化)。重要的是在判断某个变焦核是否可用于某个问题时,我们不必将视场角,焦距和 f/D 分开考虑,而只要把它们变换成对集光能力的要求就可以了。合适的前、后辅助组可以使变焦核用于最适合于它的缩放因子和视场角(假若尺寸要求允许的话)。

注意整个变焦距镜头最优化的进展过程,特别是怎样修改辅助组控制象差随焦距的改变,这常常是很有益的。比如考虑变焦过程中数值孔径和象尺寸不改变的情况,这时后辅助组的作用就象一个固定焦距镜头,但它的入瞳可以随焦距改变而改变,并且它可以对一个焦距位置校正象差。然而,前辅助组可以看成是一个大场镜,它在广角位置有大的视场和小的孔径,而在远摄位置则有小的视场和大的孔径。因而,前辅助组可以用来校正畸变随焦距的改变,它是由变焦核产生的。但是这不能由计算机来做,除非镜头设计者提供一个能产生所需畸变的前辅助组。

14. 总 结

每当我们承担一个新的变焦距镜头的设计任务时,我们料想会出现新的意外,会要求新的计算程序和要求推导新的方程。我们总结这些经验的目的也正在于此,而并不是想显示什么新的惊人的发现。

译自:

"Applications of Geometrical Optics Proceedings SPIE"
Vol. 39, P223.

(蒋筑英译)