

变焦距物镜正组补偿与负组补偿小型化的比较

冯秀恒

摘要: 长期以来,人们往往认为变焦距物镜正组补偿“细而长”,负组补偿“粗而短”。这个结论是否正确,本文以完全相同的技术指标,做出正组补偿和负组补偿两种变焦距物镜的设计加以比较。当然这种比较应在相同条件下进行:(1)在倍率选段上,正组补偿选取换根解方式;负组补偿采用物像交换原则。这两种补偿方式通常被认为共轭距短。(2)无论正组补偿还是负组补偿,它们的调焦组元和变倍组元,其相对孔径应大致相同。(3)两种补偿方式的变焦距物镜,像差校正应力求完善。

在上述相同条件下,结果证明,变焦距物镜负组补偿比正组补偿不但总长度短,而且前片口径也小。文中介绍了两个2/3in彩色电视10倍变焦距物镜的实例,给出了它们的结构型式和尺寸大小,以及像差校正状况。

一、问题的提出

变焦距物镜已经广泛应用于各种电视摄像机上。为了携带和摄像方便,要求摄像机小型轻便。为此目的,近年来电视摄像机在小型化方面取得了长足的进展。摄像机的小型化要求摄像管也随之小型化,靶面直径越来越小。靶面直径小,才有可能实现变焦距物镜的小型化。六十年代通用的摄像管是超正析管,靶面直径为43.2mm。七十年代则出现了 $1\frac{1}{4}$ in和1in摄像管,靶面直径分别为21.4mm和16mm。八十年代又出现了更小型的 $\frac{2}{3}$ in和 $\frac{1}{2}$ in的摄像管,靶面直径分别为11mm和8.1mm。又由于电子器件的飞速发展,使得摄像机的体积和重量已经相当可观地小型化了。可是与此同时,虽然光学设计者做了可贵的努力,但是变焦距物镜小型化的进展,还是不能满足摄像机小型化的要求。

长期以来,人们往往认为变焦距物镜正组补偿“细而长”,负组补偿“粗而短”。这个结论是否正确,正组补偿和负组补偿到底孰优孰劣,我们在 $\frac{2}{3}$ in电视变焦距物镜的设计中,以完全相同的技术指标,做出了正组补偿和负组补偿两种变焦距物镜的设计加以比较。当然比较应该在相同条件下进行:(1)在高斯光学方面,应当选取共轭距被认为是短的倍率选段方式。(2)无论正组补偿还是负组补偿,它们的调焦组元和变倍组元,其相对孔径要大致相同。(3)两种补偿方式的变焦距物镜,像差校正均应力求完善。

在上述相同条件下,变焦距物镜负组补偿与正组补偿比较,不但总长度短,而且前片口径也小。

下面我们从高斯光学的选段方式、结构型式以及像差校正诸方面加以说明。

二、高 斯 光 学

(1) 正组补偿

以往正组补偿的选段方式通常采取 $m_{B长} = -1$, $m_{C长} = -1$, 即所谓变倍组和补偿组同时处于 -1 倍位置为起始点往上选段, 如图 1。此时起始点为长焦距位置, 它的组合倍率为

$$m_{B长} \cdot m_{C长} = 1 \quad (1)$$

而短焦距位置的组合倍率应为

$$m_{B短} \cdot m_{C短} = \frac{m_{B长} \cdot m_{C长}}{g} = \frac{1}{g} \quad (2)$$

式中 g 为变倍比。

在这里, 长焦距位置变倍组 B 与补偿组 C 之间的距离 $d_{BC长}$ 仅与变倍组焦距 f_B' 和补偿组焦距 f_C' 有关, 即

$$d_{BC长} = 2(f_B' + f_C') \quad (3)$$

而短焦距位置变倍组与补偿组之间的距离为

$$d_{BC短} = d_{BC长} + \delta + \Delta \quad (4)$$

式中 δ 为变倍组的导程, Δ 为补偿组的补偿量。

我们选 $f_B' = -1$, $f_C' = 1.325$, $g = 10$, 此时 $d_{BC长} = 0.65$

计算结果, 导程和补偿量分别为

$$\delta = 2.37200$$

$$\Delta = 0.87067$$

总长为

$$\delta + \Delta + d_{BC长} = 3.89267$$

我们又选取换根解的选段方式, 与上面的从 -1 倍位置往上选段加以比较。这种选段方式从 $m_B = -1$; $m_C = -1$ 位置开始换根, 往下选至 $m_B = -1.3$ 作为长焦距位置, 往上选段为短焦距部分, 如图 2。在这里, 起算位置 $m_B = -1$; $m_C = -1$ 为换根条件。

我们选 $f_B' = -1$, $f_C' = 1.625$, $g = 10$ 。此时起算位置变倍组与补偿组的距离

$$d_{BC0} = 1.25$$

计算表明, 当 $m_{B长} = -1.3$ 时, $m_{C长} = -1.2288$, 其组合倍率为

$$m_{B长} \cdot m_{C长} = 1.5974$$

变倍组和补偿组之间的距离

$$d_{BC长} = 0.6474$$

而导程和补偿量分别为

$$\delta = 1.98077$$

$$\Delta = 1.27091$$

总长为

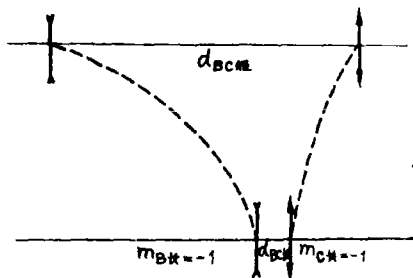


图 1

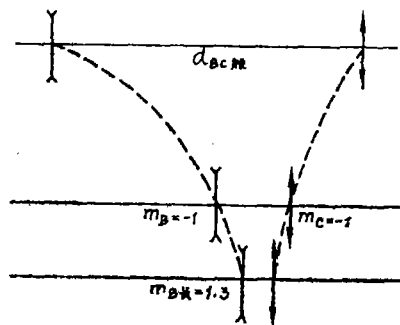


图 2

$$\delta + \Delta + d_{BOK} = 3.89910$$

这两种选段方式相比较，换根解的导程变短，补偿量变长，而总长度却几乎不变。

我们令两种选段方式的调焦组与变倍组在短焦距位置的距离相等，-1倍位置往上选段的调焦组焦距 $f_A' = 4.772$ ，而换根解选段的调焦组焦距 $f_A' = 4.15$ 。可以看出，换根解选段的调焦组焦距短，适当地加大了调焦组的相对孔径，这是有利的，

换根解选段使补偿组的焦距变长，相对孔径减小，这不但有利于高级像差的校正，而且有可能把补偿组的结构简化为双、单结构。更由于补偿组相对孔径变小，减轻后固定组的偏角负担，从而有利于后固定组结构型式的简化和像差校正。应该说这一点是换根解的可取之处。我们选择了换根解选段作为正组补偿的选段方式。

(2) 负组补偿

负组补偿通常采用物像交换原则的选段方式，变倍比

$$g = \frac{m_{B长} \cdot m_{O长}}{m_{B短} \cdot m_O} \quad (2a)$$

令 $m_{B长}$ 与 $m_{B短}$ 互为倒数，取

$$m_{B长} = \sqrt{g}$$

$$m_{B短} = \frac{1}{\sqrt{g}} \quad (5)$$

此时

$$m_{O长} = m_{O短}$$

即补偿组对变倍比没有贡献，如图 3 所示。

我们选 $f_B' = -1$ ， $f_C' = -3$ ， $g = 10$ ，令变倍组与补偿组的距离 $d_{BOK} = 0.6$

计算表明，导程和补偿量分别为

$$\delta = 2.80934$$

$$\Delta = 0.35980$$

总长为

$$\delta + d_{BOK} = 3.40934$$

我们令调焦组与变倍组在短焦距位置时的距离

$$d_{AB短} = 0.77443$$

则调焦组的焦距 $f_A' = 4.9$

计算表明，这种选段方式共轭距最短。与正组补偿相比，当变倍组的相对孔径大致相同时，调焦组的相对孔径比较大，补偿组因为焦距长而相对孔径很小。又因为采用物像交换原则的选段方式，补偿组从 -1 倍起又回到初始位置，其补偿量很小。

负组补偿可不可以偏离物像交换原则呢？我们认为是不好的。比如选段区域偏下，这时导程可以缩短，随之调焦组的焦距也短，使得本来就承担较大相对孔径的调焦组，其相对孔径更大了。给像差校正带来困难。选段区域偏下，又使补偿量增加，对缩短总长度并不利。

假如选段区域偏上，调焦组因导程的增加使焦距变长，相对孔径变小，但补偿量和导程同时增加，使总长度变得很长，这是不利的。更为不利的是选段区域偏上加大了补偿组的相对孔径，导致后固定组的偏角加大，不利于后固定组的像差校正。

因此，负组补偿以物像交换原则的选段方式为最好。

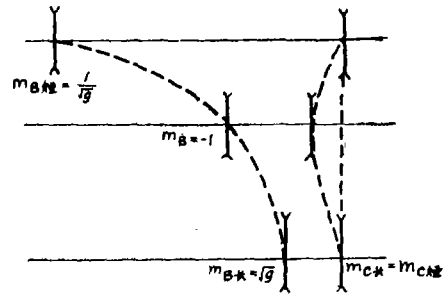


图 3

上述两种补偿，当变倍组规范化为 $f'_b = -1$ 时，它们的总长度分别为

正组补偿换根解选段为3.89910，

正组补偿-1倍往上选段为3.89267，

负组补偿物像交换原则为3.40934。

可以看出，负组补偿物像交换原则比正组补偿短。

这两种补偿前片口径的大小如何呢？我们在变倍组均规范化为 $f'_b = -1$ 时，按实际的相同视场角计算轴外最高点分别为：

正组补偿换根解选段 $h_p = 1.10893$ ，

正组补偿-1倍往上选段 $h_p = 1.11488$ ，

负组补偿物像交换原则 $h_p = 1.64845$ 。

看来好像负组补偿要比正组补偿的前片口径大得多，似乎正组补偿“细而长”、负组补偿“粗而短”的结论是成立的。但是，这个结论缺少一个重要的前提，就是正组补偿和负组补偿相应各组元的相对孔径应当相同。比如当变倍组规范化为 $f'_b = -1$ 时，正组补偿变倍组的相对孔径换根解时为1:1；-1倍往上选段时为1:1.0172；而负组补偿物像交换原则时为1:1.5871，相对孔径小很多。假如令正组补偿和负组补偿的变倍组相对孔径均为1:1，那么负组补偿的变倍组焦距则只有 $f'_b = -0.63008$ ，因而前片口径最高点则为 $h_p = 1.03866$ 。可以看出，前片口径负组补偿还是比正组补偿小，而且总长度更短，只有2.14816。正组补偿与负组补偿前片口径的大小如图4所示。

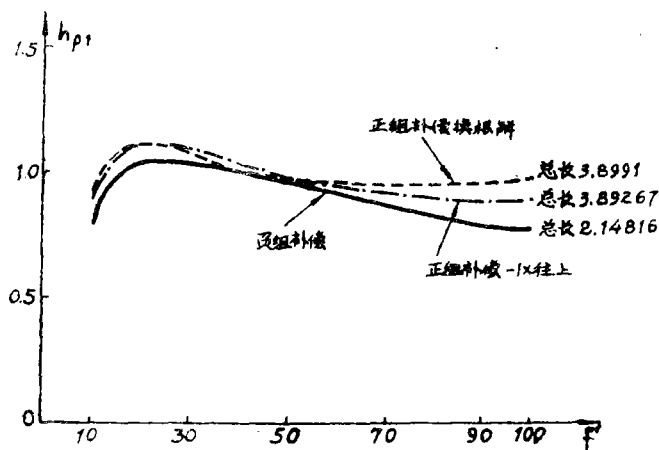


图4 两种补偿前片口径的大小

我们在上述高斯光学的讨论中，已经看出所谓正组补偿“细而长”；负组补偿“粗而短”的结论是不正确的。而在正组补偿中，换根解和-1倍往上选段，总长度和前片口径则大致相同。

三、结构参数的确定和像差校正

我们采用上述两种补偿和选段方式，分别设计两种变焦距物镜，它们的共同技术指标为：

焦距 $f' = 10 \sim 100\text{mm}$

相对孔径 $1:1.6 \sim 1.9$

摄像靶面 $6.6 \times 8.8\text{mm}$

近摄距 1m (以前片量度)

上述两种补偿,无论正组补偿还是负组补偿,其调焦组、变倍组和补偿组,组成了变焦距物镜的前三组。这三组在整个变焦距物镜中是核心,是起变倍作用的。各组元焦距的大小,直接影响结构尺寸和像差校正。各组元之间,它们的焦距又具有确定的比例关系。如果确定每个组元的焦距大小,既要考虑小型化的要求,又要考虑校正像差的难易。上述两种补偿既然要求在相同条件下比较,那么两种补偿相应组元的相对孔径就应该大致相同。在这个前提下,我们选择每个组元的焦距,其相对孔径如表 1:

表 1

	调 焦 组	变 倍 组	补 偿 组
正组补偿	1:1.577	1:0.854	1:0.992
负组补偿	1:1.355	1:0.954	1:2.280

可以认为两种补偿相应各组元的相对孔径大致相同,这里当然也考虑了像差校正的难易。

正组补偿变焦距物镜的实际结构如图 5 所示。

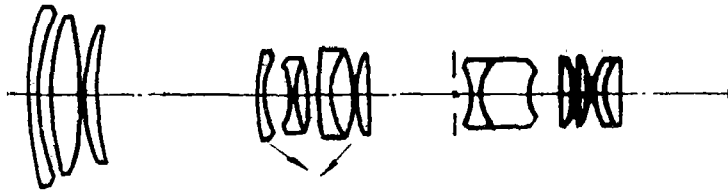


图 5 正组补偿变焦距物镜

负组补偿变焦距物镜的实际结构如图 6 所示

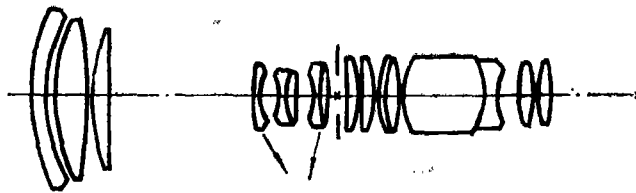
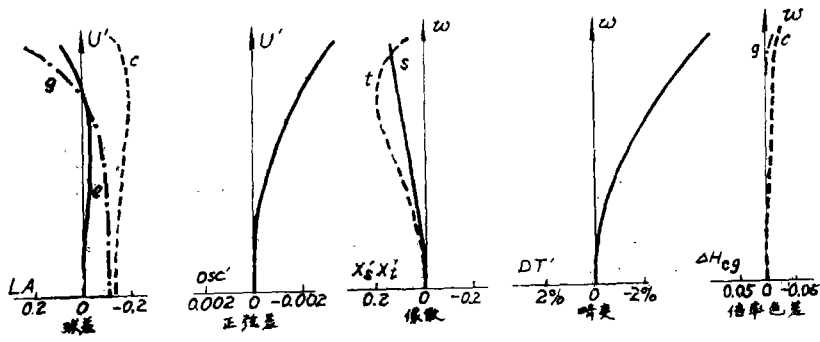


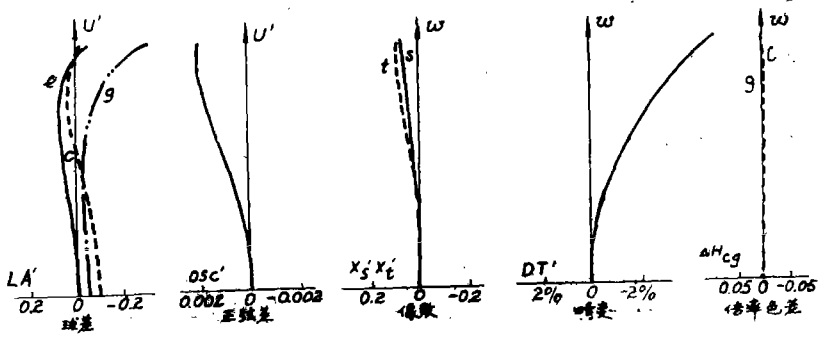
图 6 负组补偿变焦距物镜

下面我们考察两种补偿的像差校正状况。

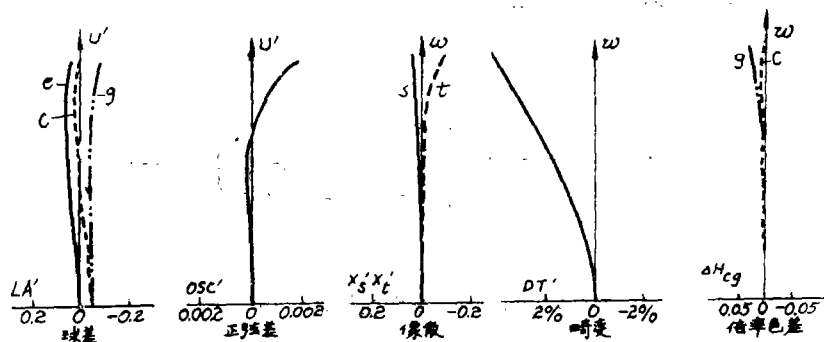
图 7 是正组补偿变焦距物镜的像差曲线。



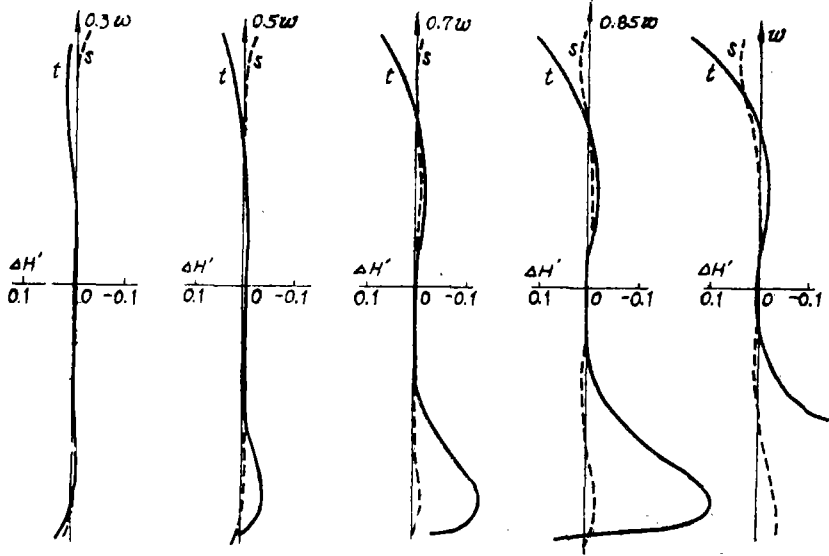
(a) 长焦距位置



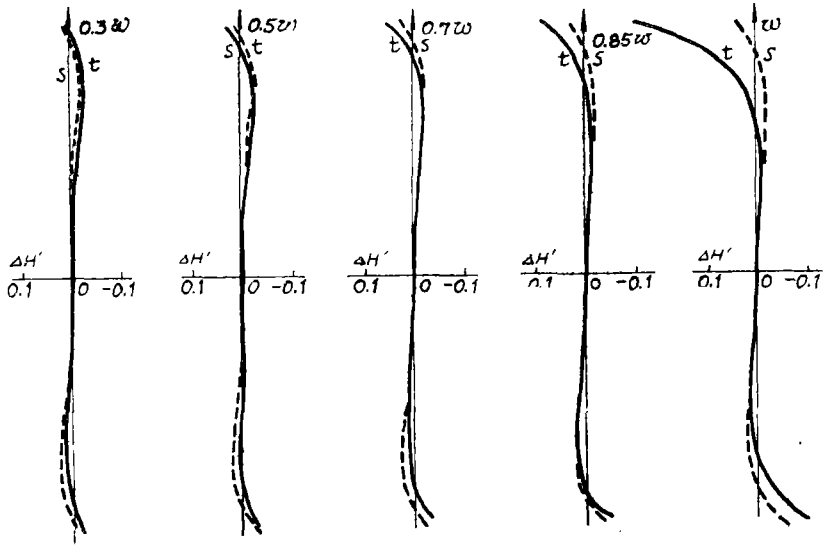
(b) 中焦距位置



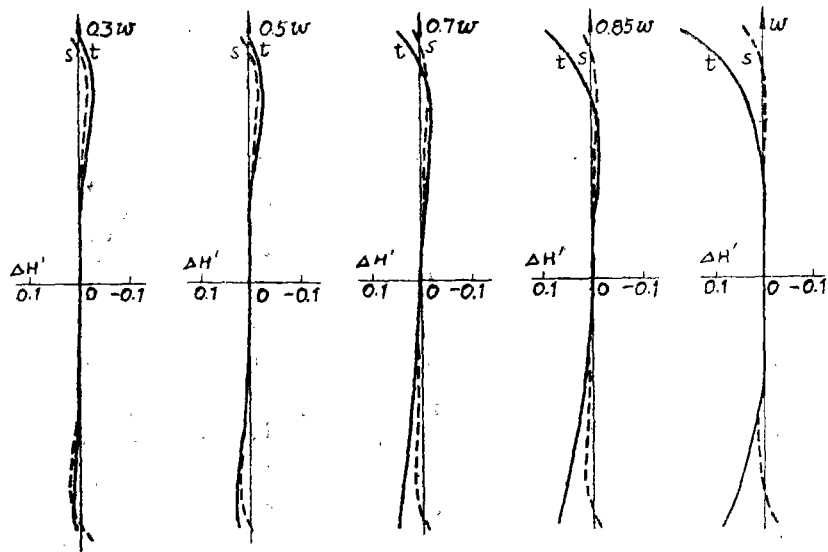
(c) 短焦距位置



(d) 长焦距位置



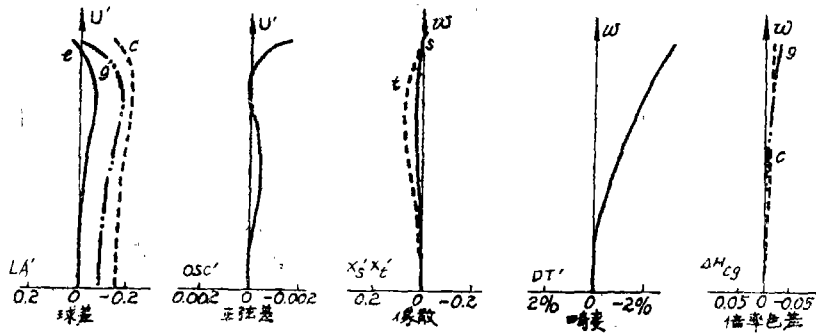
(e) 中焦距位置



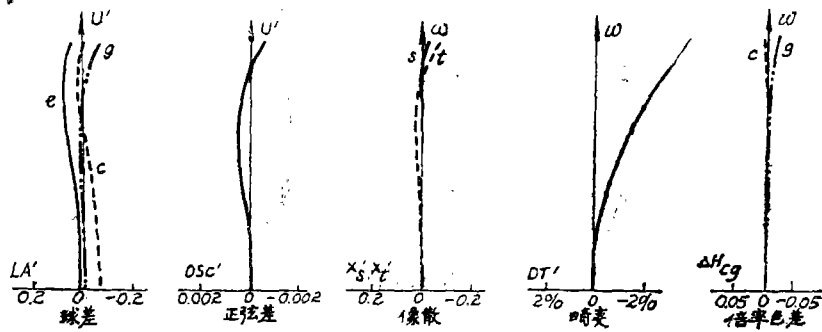
(f) 短焦距位置

图 7

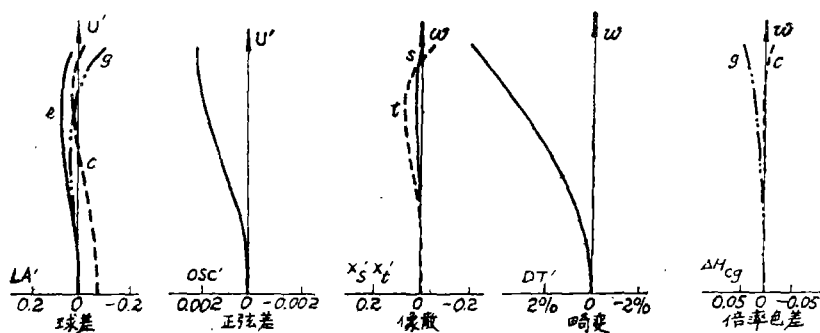
图 8 是负组补偿变焦距物镜的像差曲线。



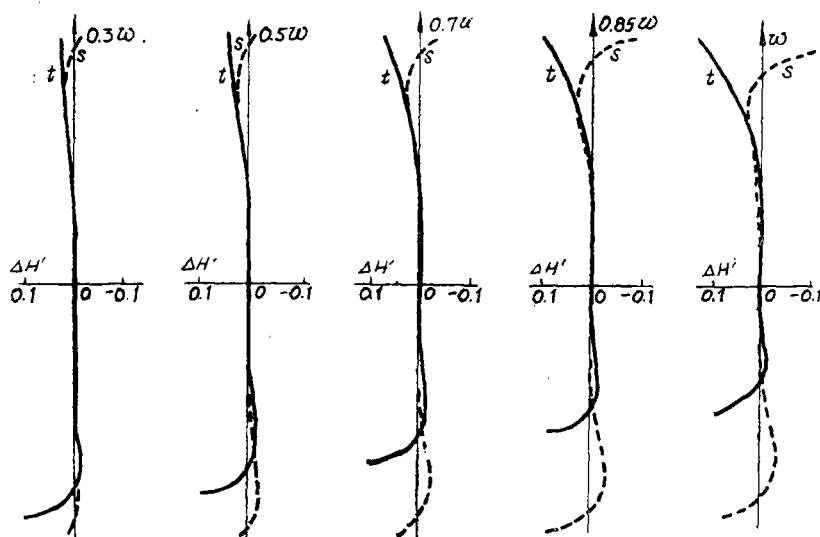
(a) 长焦距位置



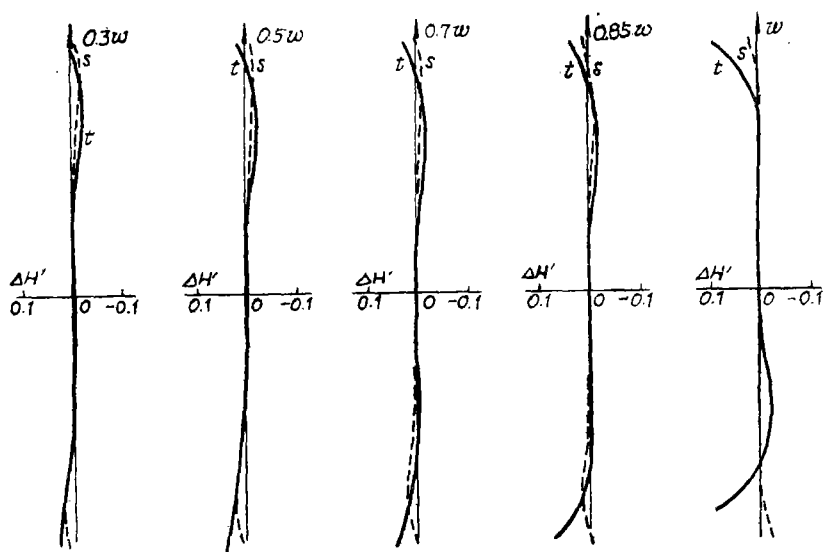
(b) 中焦距位置



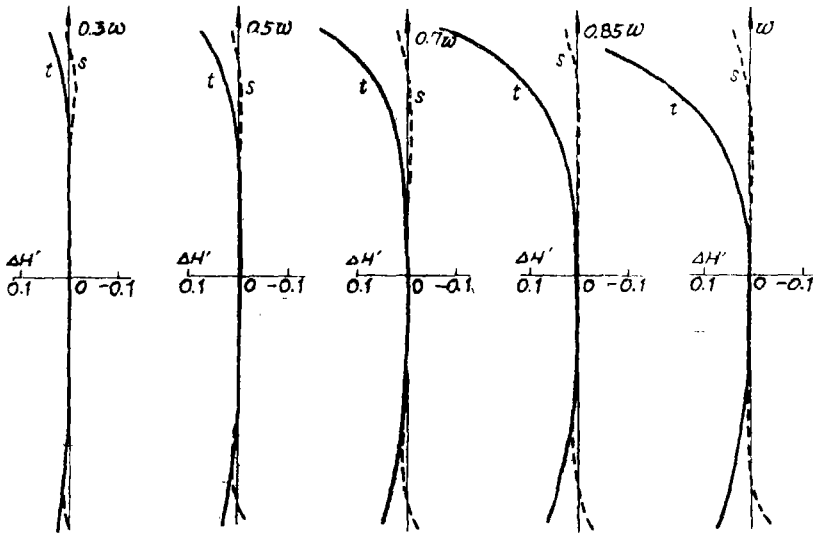
(c) 短焦距位置



(d) 长焦距位置



(e) 中焦距位置



(f) 短焦距位置

图 8

下面比较两种补偿方式的变焦距物镜的像差校正状况。正组补偿时，长焦距位置残存较大的子午轴外球差，表现为轴外下光束的成像特性曲线不好。而负组补偿时，轴外球差的校正比较完善。正组补偿时，短焦距位置又残存较大的像散，表现为轴外上光束的子午光线和弧矢光线的实际弥散较大。总的看来，两种补偿的变焦距物镜，负组补偿比正组补偿的像差校正更为完善。

正组补偿和负组补偿的变焦距物镜，它们的结构尺寸如表 2：

表 2

	前片到后片	前片到像面	前片口径	后片口径
正组补偿	165.29	187.68	68.4	16
负组补偿	145.77	165.77	65.2	16

从表 2 发现，负组补偿时，总长度短 22mm，前片口径小 3.2mm。

由此得出结论，变焦距物镜负组补偿与正组补偿相比，不但总长度短，前片口径小，而且像差校正也更为完善。