

变焦距镜头凸轮曲线形式的选择和修正

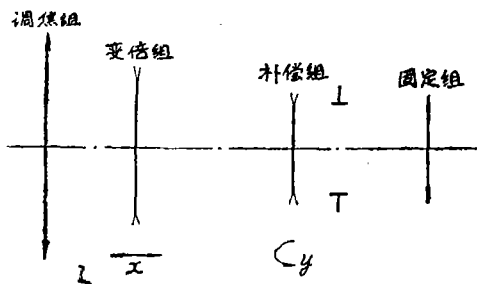
史 光 辉

在我们设计的10倍和18倍彩色电视变焦距镜头中，凸轮的转角和变倍组移动量之间采用了非线性的运动关系。并根据各焦距位置的最佳象面位置对补偿组的移动曲线作了修正。下面分别对两个问题进行论述。

(一)

在机械补偿变焦距镜头中，通过对变倍组的移动和凸轮转角之间运动关系的选择，可以满足在变焦过程中，使成象倍率的变化是匀速的，或是匀加速的。这对用在电视，电影摄影中的变焦距镜头来说，是很希望的。但是，满足这种关系时，在对应短焦距一端凸轮曲线的升角会达到很大的值。这在追求小型化的变焦距镜头的结构中，往往会使凸轮的转动力矩增加到不允许的程度。因此，须要对这种关系进行选择，使之满足在凸轮曲线的最大升角不超过允许值的情况下，尽量满足在变焦过程中，成象倍率的变化接近匀速变化。由下面的讨论中可以看到，这要比凸轮的转角和变倍组移动之间的关系为线性关系时，在变焦过程中，成象倍率变化的不均匀性，改善多了。

以采用负组补偿，取段为符合物象交换原则的10倍变焦镜头为例。光学结构的示意



图一

见图一。

先作如下符号规定：

f_1', f_2', f_3', f_4' ：分别为调焦组，变倍组，补偿组和固定组的焦距。

m_2, m_3 ：分别为变倍组，补偿组的横向放大率。

m_{23} ：由变倍组和补偿组组成的变倍部分的横向放大率。

m_{230} ：起点($\theta = 0^\circ$)焦距位置时，变倍部分的横向放大率。本例为最短焦距位置。

L ：变倍组的最大移动量。

θ ：凸轮的转角。

α ：凸轮的最大转角。本例为 180°

M ：变焦倍率。

$$M = \frac{M_{23}}{M_{230}}$$

$M_{\text{最大}}$ ：最大变焦倍率。本例为10。

x, y ：分别代表变倍组和补偿组的移动量。

我们首先讨论 θ 和 x 之间为线性关系的情况。这是目前变焦距镜头最常用的关系。这个关系可表达为：

$$x = \frac{L}{\alpha} \theta \dots\dots\dots (1)$$

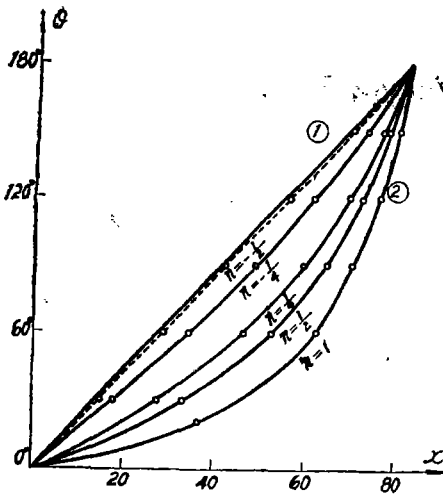
由 x 可求出 y 。通过对上式和凸轮方程进行微分，可得到倍率变化的速度为：

$$\frac{m_{23}}{\Delta\theta} = \frac{m_{23}[f_2' m_3 (m_2^2 - 1) - f_3' m_2 (m_3^2 - 1)]}{f_2' f_3' (m_3^2 - 1)} \frac{L}{\alpha} \dots\dots\dots (2)$$

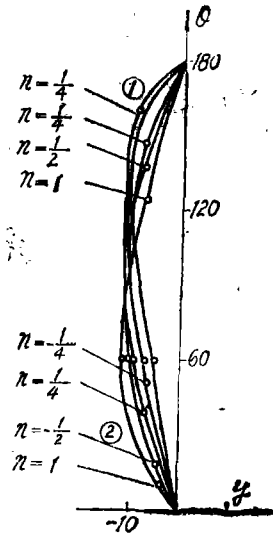
由公式 (1) 和 (2) 计算出的 $\theta-x$ ，

$\theta-y$ ； $\theta - \frac{m_{23}}{0}$ 等曲线见图二，图三，图四中的曲线①。

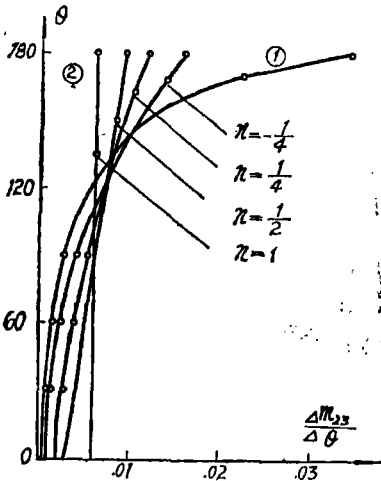
从 $\theta-y$ 曲线看出，由于峰值靠近了凸轮转动的终点 ($\theta = 180^\circ$)，因而引起 $\theta-y$ 曲



图二



图三



图四

线在终点位置的升角大。这在追求小型化的结构中，若凸轮转筒直径取得较小，有时也会达到不允许的程度。这显然是一个缺点。但从图四可见 $\theta-x$ 成线性关系的最大缺点是在变焦过程中，成象倍率变化的速度极不均匀。最长焦距一端倍率变化的速度为最短焦距一端的39.1倍。不仅如此，而且倍率变化的加速度也极不均匀。这样，当凸轮作匀速转动时，如果是由最短焦距向最长焦距变焦，则在凸轮开始转动后较长一段距离内，倍率变化非常缓慢，开始时甚至觉察不出变化来。而到后来，倍率变化速度迅速加快，

而且越来越快。当凸轮转到接近最长焦距一端时，那怕是凸轮转动一个很小的角度，都会引起倍率的很大变化。这势必会影响到电视，电影摄影的艺术效果。考虑到近来电视，电影用变焦距镜头都逐渐采用了伺服变焦系统。这种倍率变化速度的不均匀性，更应该避免了。

为了获得倍率变化的匀速效果，自然应使 $\theta-m_{23}$ 成线性关系。这个关系可表达为：

$$M = 1 + \frac{M_{\text{最大}} - 1}{\alpha} \theta \dots\dots\dots (3)$$

对上式进行微分得：

$$\frac{\Delta m_{23}}{\Delta \theta} = \frac{M_{\text{最大}} - 1}{\alpha} m_{230} = \text{常数} \dots\dots\dots (4)$$

由M可求出相应的 x, y 。

由公式 (3), (4) 计算出的曲线见图二，图三，图四中的曲线②。

由 $\theta-y$ 曲线看出，曲线②和曲线①正好相反。曲线②的峰值靠近起点。因而， $\theta-y$ 曲线在起点位置的升角变大了。 $\theta-x$ 曲线也是在起点位置的升角变大了。这样，使凸轮在最短焦距一端的转动动力矩大大增加，上面已经提到，这个方案有时是不能应用的。

因此，有必要在曲线①和曲线②之间取折衷。我们应寻求一种办法，根据这个办法，能够对不同的具体情况，如不同形式的变焦距，不同的补偿形式，不同的取段范围等进行不同的折衷。

我们发现，取 $\theta-M$ 之间为幂函数关系，通过对幂次的选择，就能圆满地解决这个问题。用公式写出来就是：

$$M^N = 1 + \frac{M^N_{\text{最大}} - 1}{\alpha} \theta \dots\dots (5)$$

对此式微分得：

$$\frac{d m_{23}}{d \theta} = \frac{M^N_{\text{最大}} - 1}{\alpha} \frac{m_{230}}{n M^{N-1}} \dots\dots (6)$$

当取 n 为小于 1 的实数时，就可在曲线①和②中间进行任意的折衷。当 $n=1$ 时，(5) 式就变成了③式。由公式 (6) 可得出，当 $n = \frac{1}{2}$ 时， $\theta - \frac{m_{23}}{\Delta \theta}$ 为线性关系。即倍率变化的速度为匀加速的。用 v 表示倍率变化的速度，则，

$$\frac{dv}{d\theta} = 2 \left(\frac{\sqrt{M^N_{\text{最大}} - 1}}{\alpha} \right)^2 m_{230} = \text{常数}$$

这也是我们所希望的。

由公式 (5) 和 (6)，取 $n = \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, -\frac{1}{4}, -\frac{1}{2}$ 进行计算结果得出的曲线见图二，图三，图四。(为保持图面清晰， $n = -\frac{1}{2}$ 情况只在图二中画出)

由图四可见， $n = \frac{1}{2}$ 时，加速度不仅为一常数，而且速度差别也很小 (3.16 倍)。由图三看到， $\theta-y$ 曲线成了对称的馒头形，其峰值几乎就在中间位置 ($\theta = 90^\circ$)，因而，这是 $\theta-y$ 曲线的最大升角处于最小的情况。但有时， $\theta-x$ 曲线在起点一端的升角还嫌大。 $n = \frac{1}{4}$ 时， $\theta-x$ 曲线的最大升角比起 $n = \frac{1}{2}$ 时有了很大的改善，而 $\theta-y$ 曲线的峰值稍偏离了中间位置。这条曲线仍然

为一馒头形。而 $\theta - \frac{m_{23}}{\Delta \theta}$ 曲线虽然已不是一条直线，但接近一条直线，而且倍率变化的速度差别也不算大 (5.62 倍)。 $n = -\frac{1}{4}$ 时的 $\theta-y$ 和 $\theta - \frac{m_{23}}{\Delta \theta}$ 曲线仍比曲线①的状况好得多。当 $n = -\frac{1}{2}$ 时，由图二可见，已经非常接近曲线①了。(为和曲线①相区别，用虚线表示)。这样一来，我们就可以根据不同的具体情况，通过 n 的选择来达到最适的折衷了。

很明显，选择 n 值的原则是，在凸轮曲线最大升角允许的情况下，应使之尽量接近 1 或 $\frac{1}{2}$ 。

我们设计的 10 倍彩色电视变焦距镜头的 n 值取为 $\frac{1}{4}$ 。而 18 倍变焦距镜头则选 $n = -\frac{1}{8}$ 。后者由于变倍组的导程太长 (200.3)， n 的选择受到变倍曲线最大升角的限制。对这种采用负组补偿，取段为物象交换原则的高倍率变焦距镜头，通过 n 的选择，使变倍曲线变为非线性，不仅大大改善了成象倍率变化速度的不均匀性，而且避免了补偿曲线出现过大的升角。当取 $\theta-x$ 为线性关系时，18 倍变焦距镜头的补偿曲线的最大升角已经大到不允许的程度。

有人提出，取 $\theta-M$ 为对数关系。计算结果表明，这和 $n = -\frac{1}{16}$ 的情况非常接近。但这是一种固定的函数关系。它不能根据不同的情况进行最佳的选择，如在本例中，就不如 $n = \frac{1}{4}$ 的结果好。

当然，为了获得 $\theta - m_{23}$ 或 $\theta - \frac{m_{23}}{\Delta \theta}$ 的线性关系，可以用增加 α 角或增加凸轮转筒直径的办法来减小凸轮曲线的最大升角。但这会增加镜头的体积和重量。减小补偿组的焦距也会使补偿曲线的最大升角减小。但这

会使固定组的结构复杂化，甚至会降低光学设计质量。因此，对凸轮曲线形式进行最远的选择，有助于我们设计出小型化的，高质量的变焦距镜头。

(二)

在进行光学设计时，我们是根据保持高斯象面不变的条件来确定变倍组和补偿组之间的运动规律的。实际上，变焦距镜头的最佳象面在变焦过程中，是连续改变的。它的变化规律和象差校正状况有关。在高倍率变焦距镜头中，二级光谱的存在对最佳象面位移的影响尤其严重。显然，不同的设计结果就有不同的最佳象面位移变化规律。

为了消除各焦距位置之间的最佳象面位移，我们会想到，既然采用了凸轮机构来消除象面位移，为什么不利用它来消除最佳象面位移呢？而且，对于这种没有固定规律的最佳象面位移，也只有采用对凸轮曲线进行修正的方法才能得到解决。

虽然，我们可以用调整各组之间的间隔和变倍组焦距的方法来消除象面位移。但用调整的方法，只能使有限个焦距位置（如本例为三个或四个）的最佳象面一致。其余焦距位置仍然存在遗留的象面位移。而这遗留的象面位移，恐怕主要是由剩余象差起伏产生的。因此，为了提高变焦距镜头的成象质量，有必要根据象差校正结果，选定各焦距位置的最佳象面位置，依此对补偿曲线进行修正。

如果全靠加工精度和玻璃材料的精选来解决象面位移问题，那么据根最佳象面位移的变化规律来对补偿曲线进行修正，就是必不可少的了。

下面介绍我们采用的方法。

在进行光学设计之初，就已经确定了变倍组和补偿之组间的运动关系，即：

$$y = f(x) \dots \dots \dots (1)$$

我们的目的是要在此基础上加进一个修正量

$y = q(x)$ ，使(1)式变为：

$$y = f(x) + q(x) \dots \dots \dots (2)$$

$q(x)$ 是根据最佳象面位移变化的规律来建立的。为此，必须找出最佳象面位移 $\Delta l_4'$ 和 y 之间的函数关系。这种关系的参量应为截距式的。利用牛顿公式可求出补偿组和固定组组成的系统的物象关系式，然后对此式进行全微分可得到下面的式子：

$$y = \frac{f_3'^2 + (d_{34} - f_3' - f_4')(l_3 + f_3')}{f_4'^2 - (l_4' - f_4')(d_{34} - f_4' + l_3)} \Delta l_4' \dots \dots \dots (3)$$

$\Delta l_4'$ 是从高斯象面起算的。为和光学设计符号一致， l_4' 在高斯象面左边取正号；在右边取负号。补偿组向左移动时 y 取正号。

补偿组的物距 l_3 ，以及补偿组和固定组之间的距离 d_{34} 是随焦距而变化的。根据 $\Delta l_4'$ 对应的 x 可求出对应的 d_{34} 和 l_3 来。于是就可通过(3)式求出一系列 x 和 y 的对应值。从而求出方程 $y = q(x)$ 的系数。并建立这个方程。

由于最佳象面位移的变化规律很难用一个确定的函数关系很好地表达出来，因此，我们实际上采用了分段插值法来求解的。

在我们设计的彩色电视变焦距镜头中， $\Delta l_4'$ 是这样确定的。根据传递函数计算结果，确定 n 个 x 位置的最佳象面位置。依此得出 n 个 $\Delta l_4'$ 。然后画出 $x - \Delta l_4'$ 曲线来。从这条曲线可以很方便地确定任意多个与 x 相对应的 $\Delta l_4'$ 来。为了保证足够的精度，应适当地多取些点。在拐点附近，或线性较差的地方，点子应取密一些。作图的比例尺也应适当地取大些。

图五是18倍彩色电视变焦距镜头根据最佳象面位移变化规律对补偿曲线进行修正的情况。

如果用上节中的公式(5)时，(2)式中的自变量 x 变为相应的变倍率 M 。这时，将 l_4' 与 x 对应的数例改为 $\Delta l_4'$ 与总焦距 F 对应的数列。

下转12页

量厂进行加工和装配，共两台。

对哈量和我所的光栅组、刻划组、计量组、试制车间等单位的同志的大力协助，表示感谢！

参考文献

[1] 《测量仪器学》С. В. 耶利谢也夫著，方俊译，1956年，科学出版社。

[2] 《刻度工作法》Ф. П. 布尔米斯特洛夫著，孙振洲译，1962年国防工业出版社。

[3] “精密圆刻度机上的几个问题” 邹自强《测绘学报》1963年№1

[4] “精密圆刻度机主轴调整及圆刻度精度” 1964年庄夔（研究工作报告）

[5] “阿基米德螺旋线刻划机及螺旋分划板的刻制” 1959年9月庄夔（研究工作报告）

[6] QGA405 型光电圆刻线机鉴定资料。

[7] 《球面传动装置的制造》卡尔采夫著，魏任之译，1958年机械工业出版社

[8] 《齿轮及蜗轮传动装置的制造》西道联柯等著，刘仁化译1956年机械工业出版社

[9] Edward Leibhardt J. Opt. Soc. Am. 1952年 №7 p. 447

[10] “不圆度的V形测量法” 1977年9月 邹自强（南宁会议报告）

[11] “精密主轴 0.06 微米晃动量的测量” 方益林《机床》1977年3期。

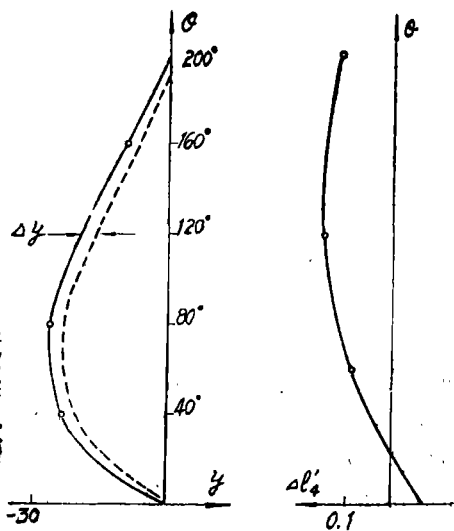
[12] 《机械精度基础》1977年韦恩·R·穆尔著，北京机床研究所译，国防工业出版社

[13] 《刻线长度量具的检验》国家计量局译 1958年机械工业出版社

[14] 《误差理论与实验数据处理》冯师颜编 1964年科学出版社。

〔庄夔执笔〕

上接 4 页



图五：上图为最佳象面位移随凸轮转角 θ 变化的情况。左图实线为原补偿曲线，虚线为经过修正后的补偿曲线。其坐标原点在计算时，仍移到原曲线的坐标原点。起点（ $\theta=0^\circ$ ）为最长焦距位置 f 。图上的 Δy 值被夸大了10倍。

这个方法可以用到实际变焦距镜头的装调中去。用实测的焦距值 F 和与之对应的 $\Delta l'$ 数列，来修正已加工好了的凸轮补偿曲线，以达到消除象面位移的目的。当

然，这要在程序控制铣床上来实现。在国内有关单位正在研制的加工变焦距镜头凸轮的专用程序控制铣床中，是可以做得到的。