

光学系统的能量评价

一、引言

怎样判断光学系统的优劣，并将这个判断做为可测的数值，这些是人们经常提到的问题。

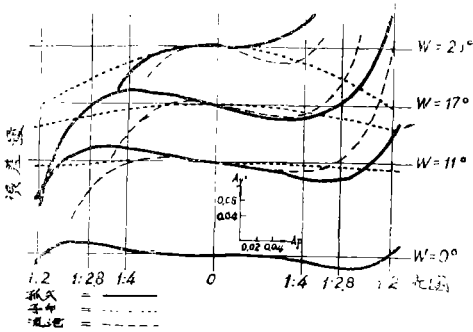


图1 在不同象场时老式结构的摄影物镜的横向偏差

但是，这里以这样简单的形式提出问题是无法解答的，因为光学系统所需的评价与必须满足的条件有密切的关系，光学系统的设计人员十分清楚光学系统运算的要求。并且希望在运用相应的不同品种的玻璃后使得光线会聚很好，以满足所提出的要求。正象图1所示出的那样，当光为 $\lambda = 546$ 毫微米的时候，运算结果显示出象差曲线的形式。在横座标上为光线入射在光瞳的高度，纵座标则指出经过高斯图象平面时光线穿过的距离。这个距离是从理想的象位置去计算的 ($A_y = 0$)。专业人员可以根据这种方式判断系统的优劣和特性，从中可以了解，设计者在怎样的程度上获得了成功。即球面象差，慧差，象散，场曲，畸变和色差消除得怎样。并且从中得知残余象差的量，模糊圈的直径，以及离焦对于系统的影响。

如果制成的系统与规定的数据符合，那么可以满足与此相关的期望。人们通

过对实际系统的重新测得的象差来确定一致性、这必须与计算吻合。反之，人们可以利用对一个未知的系统测得的象差曲线所得的相应认识去判断这个系统对这种或那种是否合格，这种来自于象差曲线中的光学系统的特性判断类似于医生的诊断。在诊断时医生可以利用不同的检查结果，而不可能把他的判断表示为一个数字。就像医生那里一样，初学者对于系统的专业术语不可能很明白，因此象差曲线就不能作为一种制造者和使用者的共同语言。但这一直是一种最佳方法，用它可以描述光学系统的特性。

二、检验方法

在 J. Haofman 研究而后又经过多次改善的检验台上实现了象差曲线的检测。从许多有选择的物点射出的光线测定其穿透象平面的位置。在现代化的装置中可以自动记录象差曲线，但是，由于这种装置昂贵，所以不能普遍地采用或者加以实现。

其它的检测方法是，汇集由各个物点射出的光束并检验在理想成象处所出现的模糊圈。事实证明，经过许多射线的汇集虽然看不到详细的情况，然而，在图象中却可以直接看到象差的结果。例如：样品摄影就是这种意义的检验。对于样品检验判断的经验知识要求并不少于对于象差判断所要求的。诚然，人们在象差曲线中未曾取得数据参考，而现在只能离取得数值这个目标更远。此外，在判断时人们受到主观方面的影响，这一影响对于取得数值不利。如果放大摄影所记录下的图象，可使这种主观影响至少稍稍得以消除，人们甚至可以测量图象中的光分布。图示出了相应的装置。这里谈的是狭

缝——灰楔——摄影。

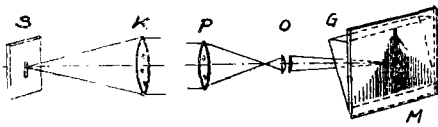


图2 法缝灰楔方法

S = 狭缝 O = 显微一物镜
K = 准直仪 G = 灰楔
P = 试样 M = 毛玻璃

装置比较简单，将准直仪物镜焦面上的狭缝做为物体。试样将在其象面上记录下狭缝图象，再通过显微物镜放大，记录在照像板上。在摄影板前直接放置一个由下到上的光透射逐渐减弱的灰楔，在上端只有最强的光才可通过灰楔将有的变粗了的狭缝图象在摄影膜层中留下影响。与此同时，在楔的较透明部分记载下狭缝的弱光图象。于是光区就象一座小山，人们可以在理想狭缝图象的两侧测定光亮分布。使用特殊的方法（等密度线或使用 AgFa-Cohtur 乳剂）还可以进一步发展这种方法。值得推荐的是，摄影记录前方的显微物镜的过渡作用，因为这可以消除摄影颗粒的影响。另外，这种显微物镜不应因其自身的成像误差而歪曲狭缝图象。狭缝灰楔方法虽然不需多大设备，但是，由于摄影过程而比较麻烦。可是这对于任何一种摄影方法都是如此的。在人们要求较高精度的情况下，必须做线条图象的横向光度测量。为此可以安装自动设备，不过这些设备比较昂贵。虽然人们得到了有关象差对于图象里光会聚的情况的数值，但是，建立在这种原则上的物镜判断仍然比根据象差曲线判断更困难，所以不妨满足对于狭缝——灰楔——摄影的定性判断，这怎么说也比任何一种简单的试样摄影优越。

如果光学系统已经修改得很好，使存在的剩余象差降到和受衍射限制的偏差相等的数量级，那么就可以使用衍射盘的检验来考察系统的价值。人们将人工星做为物体，这种人工星是非常微小的光源，人们通过后面

照明的小孔做成这个光源，同时这个光源与物镜间的距离很远，人们看到了用很强的显微镜所观测或拍摄的衍射盘。此外还看到制造中存在的缺点。如：透镜的偏离中心和应力。对望远物镜这种方法特别有效。

三、传递函数

无疑图象与物体间的关系用传递函数描述，是公认最清楚的了。这个在近廿年来已经成为众所周知的了。大量的使用说明传递函数的许多优点。其中主要的是传递函数明确的表达了图象与物体间的物理关系。其中既介绍了物镜的特性，也介绍了瞬间成像的条件，这里必须将照度调节和图象清晰度都算进去。受系统所限的特性很难与偶然的成像条件分开，人们只可能……。但是，如果我们真正认识了传递函数，那么对这些会有更加深刻的理解。所以我们必须深入地研究这个极其重要的问题。

我们从分辨率本领这个概念开始，按阿贝在光学系统成像理论中，特别是显微镜中所阐述的。阿贝的分辨本领确定了光栅可以分辨的界限与显微物镜孔径的关系。在此相干光照射是先决条件——即所有的通过系统的光线是从一个单一的点，点光源发出来的。这种情况下的光栅可以作为它那样的光栅被辨认出来，只要物镜的孔径大于在光栅上的光线所作的第一级衍射角。如果衍射角超过孔径角，那么没有结构轮廓的均匀灰色表面就会代替可以识别的光栅图象。

与这种有完善定义“分辨本领”概念相对以后使用时就有些随便地用来说明光学成像的质量。因为也可以不是由于光的衍射，而是由于对物镜的改正不足或调整不良就可以使图象中的光栅结构完全消失，以至光栅就不再会被认为是光栅。在这些情况下靠得是眼睛的观测，要看眼睛能否在较低的衬度对比的范围里继续加以区别。但是正因为如此对于分辨本领就会由客观的判断变为主观

的判断。达到什么程度才是不能确定的呢，这一点会在后面谈到。此外，确定分辨本领时，作为物体的光栅衬度应该多大就没有准确的规定。显然，在已经是模糊的光栅图象中，其衬度要比具有强烈衬度的光栅会更快地下降到可以认识的界限。根据这点光学技术人员始终反对滥用“分辨本领”这个概念，但成效不大。

在本世纪的中叶才得出了一种概念，它提出了有关图象与物体之间关系的物理性质的明确阐述。这就是传递函数。当然，有了这个仍没有作到将这一关系压缩为一个数字。正象它的名字所指出的，这是一个函数。也就是说要解决的是彼此两个数值间的相关性。它规定了光栅图象中的衬度与光栅本身中的衬度的关系。当然这个关系与光栅的状态有关。因此，人们必须明确规定光栅的特性。光栅具有等密度的明暗线条，它们之间的区别仅仅是空间频率。为了弄清楚这些，我们必须先将所使用的概念逐一单独地谈谈。

3.1 衬度

现在我们就来研究衬度。衬度的定义是物体的两个不同位置的亮度差异与该两个亮度和之比。亮度对于物体来说是其发光率，而对于象则是其照明强度。于是得出。

$$K = \frac{J_1 - J_2}{J_1 + J_2}$$

或者，如果人们以最大和最小的亮度表示衬度范围： $K = \frac{J_{\text{最大}} - J_{\text{最小}}}{J_{\text{最大}} + J_{\text{最小}}}$ 这样一来如果在

亮度最低处的发光率及照明强度完全消失。则衬度得出了最大的值，就是当 $J_{\text{最小}} = 0$ ，衬度便是 $K = 1$ 。在图 3 的光分布 b 和 c 中我们可以得出这种情况。f 表示的亮度分布时衬度值仅为 $K = 0.4$ 。

图象中衬度 K' 图象与物体的衬度比是： $I = K'/K$ 。如果物体衬度达到它的最大值 1，那么 $I = K'$ ，这时我们可以使衬度比完

全等同于图象衬度。

另外谈谈光栅的“空间频率”。这是指单位长度中栅条的周期数字，垂直于线条进行测量。一个周期有一个亮的和一个暗的线条。如果周期的长度达到 P 毫米，那么光栅的空间频率为 $R = 1/p$ ，有时空间频率会以角度计算，例如每度，每弧度，或者每毫弧度的周期。在这里还需要讲述一下光栅的结构。直角光栅是技术上较简单的一种，其中是全暗和全亮交错的宽度相等的线条。正如图 3 中 a 和 b 所示的一样。正弦光栅与直角光栅的区别在于：不是突然的提高亮度或突然地下降亮度，而是像正弦一样连续地提高和降低亮度。从理论出发，正弦光栅应该比较简便。而技术上制造困难，因此在实际测量中人们仍然喜欢使用直角光栅。这样做是可以的，因为人们不仅可以从计算上论证两种光栅相互间的亮度函数。而且还能够由两者所得的结果证实。所以人们用那种光栅进行检验是不重要的。同时应该指出的是，正弦光栅在不完美的成像时始终保持正弦的形状，直角光栅则改变了形状。

在光学系统成像时，光栅的再现会有某种不清晰。每一个线条的边缘有些晦暗。对于一个间隔宽的光栅，为图所示，对于象衬度的影响不大，因为它的最大和最小亮度不大受边缘的不清晰的影响。不清晰的范围小

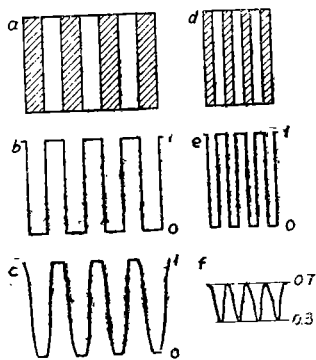


图 3 不同空间频率的光栅：a 和 b 是直角光栅，b 和 d 是普通的强度分布，c 和 f 是图象中的强度分布。

于边缘间的距离之半。对于间隔窄的光栅则不清晰的范围将达到相邻的边缘，于是最大亮度将会下降，而最小亮度将会得到提高。在这个例子中，作为物体的光栅的衬度被定为1，那么，图象 K' 中的衬度同时也是图象与物体间的衬度比。

3.3 调制和相位传递函数

通过各别的论述从而弄清楚了“传递函数”，并且重复一下：传递函数给出每个空间频率的图象衬度与物体光栅的衬度之比。我们根据物理的明确性所得的这个定义同时又接近于一种恰当的测量方法。对于具有至少是四条线以上组成的不同空间频率的光栅，人们对衬度进行光电测量。这种测量首先对各个光栅本身进行，而后是对图象，并且求其商数，由此得出各空间频率的光栅调制传递函数。所有传递因数之和构成了调制传递函数。但是，为了在这种测量方法中得到明确的结果，还必须满足其它的条件。作为物体光栅必须本身是光源。就是说，由它发出的光是不相干的。这种要求虽然对于被照射的物体大致可以满足，但是对于透射的光栅则必需使用大面积的扩展光源。

我们一直默认，由光栅缝隙所成象的不清晰度是两侧对称的。这种现象类似图 3 f 的亮度分布。形成一个相对称的亮度分布。但是，毫无疑问，在成像时未必是这种情况，亮度分布可以是不对称的，而且最大和最小的位置会相对于线条的中央有所移动。不过这时正弦光栅还是原样，它只对于理想的位置有些移动。人们称这种移动与光栅周期长度的比为“相位移动”。这个移动由于各个光栅有不同周期长度的原因，与空间频率有关，因此人们除了调制传递函数外，必须提出光学成像的相位传递函数。只有把这两者结合在一起，才可以真正明确传递函数，然而，调制传递函数却具有更加深远的意义。不过如果对传递函数附加上一定数值的相位传递函数，则在所有的实践中就不够满意调制传递。

付氏分析

有人可能有异议，认为光栅有其片面性，而与一般物体相差很远，因而在这种情况下所得结论不适用于任意形状物体的成像。所以，这需要我们更进一步地深入研究一下数学的关系。付里叶理论对于整个光学来说具有不可估量的价值。按付里叶理论可以将光学系统在成像平面上的每种任意的亮度分布以无数正弦周期结构的重叠表示。这个结构在平面时是二维的。为了简便起见，我们采用的是一维的。也就是光栅。

在光学成像中使用付里叶理论后揭开了一系列令人惊异的关系。这些关系由于需要大量的数学运算，在此就不讲述了，结果如下：

1. 传递函数可以由出射瞳孔限制出的那一块“波面”的形状和大小根据固定的计算步骤计算出来。这个波面是由几何光学的象差确定的，与光线追踪计算有关，是从它的结果中推断出来的。从这波面的大小可以推出衍射的影响。

2. 利用付里叶变换对无限窄的狭缝所成象在与狭缝垂直方向上亮度分布计算出传递函数。亮度分布同样可以从光线追踪中推断出来，这里利用在成象平面上检查光线交点的分布。

这两种关系可以实现传递函数的测量。第一种：人们在 Twyman-干涉仪中通过干涉照象从而得出波面的形状。第二种：人们利用光电测量得到亮度分布。这两种确定传递函数的方法是间接的。因为，在这样两种情况下，所获得的直接的测量数值，还必须进一步经过计算处理。

在光学图象的分析和综合中使用付里叶理论的可能性与两种条件密切相关。第一种条件是在实践中总能满足的，就是在整个所考察的图象范围内，成象质量必须是均匀的。由于光栅周期的长度与整个象场相比是

很小的，因此不必担心。第二种条件是，象方的照度必须严格，这是由物面的发光率相加而成的。这些要求包括前面提到的物体光栅的不相干照明，除此之外，还有图象中的照明强度与物体中的发光率成比例。人们对此惯用的表示是，传递器必须保持线性的传递。一种没有光各向异性的玻璃的光学系统总是一个线性的传递器。不是线性的传递器，如照像乳剂，只能有节制地使用传递函数的概念。

有时，传递函数会被定义为狭缝象的亮度分布的付里叶变换。但是，由于明确的物理性质，我们愿意用由光栅得出的“直接”的定义。但是，要注意测量对光栅是常用直角式的，而狭缝图象中的亮度分布的测量和有关的付里叶变换是对正弦光栅而言的。此外，这种测量方法展示出广阔的使用领域。

五、传递函数的运用

传递函数包括象差曲线如图 1 所含的部分，达到一个完整的结论，同时还有成象条件，例如：精调也包括在内。人们力求通过对多种调焦的测量，从而可能使其与系统本身的部分区分开来。或者，人们一开始就认为调焦是固定的形式。但是，由于从事最佳的清晰度的调焦多半涉及到整个象场的问题，至少是摄影物镜和为生产服务的这类物镜，因此，在光学系统的判断中要考虑标定收集平面。关于这一点使用物镜的人比物镜的设计人员更容易忽视。因为他只关心现成的数字，即使在有些情况下这些数字并不可靠，而且他甚至以为是很有根据的。在许多的情况下。光学系统只是很长的成象环节中的一个元件。例如：照像中的环节有：物镜、摄影乳剂、显影、正象投影。如果在每一个这样的元件中可以给出应用付里叶理论的条件，那么所得的整个环节的传递函数是各个元件的传递函数的乘积。在提到的这些环节中摄影化学过程并没有满足使用付里叶理论的先

决条件。传递函数虽然可以测得，但是这种传递函数却不能在受干扰下再来构成完整的图象。

我们已经谈到传递函数可以由设计数据求得，同时可以在实际的物镜上测量。在此便提出了一个问题，计算的传递函数和测量的传递函数之间能够希望达到怎样的一致。如果人们暂且不管进行中一些形式上的缺陷问题，而且限制于使用色光，那么按着经验来说计算与测量之间没有很大的差异，至少对低空频率很少出现差异。差异的增长出现在较高的空间频率时，因为这时测量误差会逐渐增大。

测量是在单色或白色的光中进行的，如果要进行非常精通的测量与计算间的比较，人们喜欢用单色光。只有这种情况人们才能得到明确的图象位置。对所有其它的光谱颜色多少会使光学系统离焦。因此在计算白光的传递函数时会遇到困难。人们必需对整个光谱积分并考虑一种光谱权重函数将每一个单独颜色的亮度分布集合起来。与此相对，白光的传递函数的测量与单色光的传递函数测量是一样的。这种测量（由于计算上的不太可靠）提供了有关的光学系统的附加信息。

在成象判定时，多数情况下不应局限在图象的中心。它只是整个图象象场中很小的一块。中心以外会继续出现象差，于是传递函数以象场角和光栅位置而定的。光栅的线条或向着轮辐的方向，或垂直于它（即轮辐），人们将得出不同的传递函数。人们称这些传递函数为弧矢或子午调制传递函数。图 4 为此举一例，其中象场角心选择了 0° 值（中心）， 10° ， 14° 和 19° 值。子午部分还附加相位传递函数，而如果没有什么对中心误差的话，那么仅为弧矢并在图象中心时就没有相位传递函数，因为那时是对称的。为了用传递函数标出光学系统，需要用庞大的数字；因为必须将所有的参数，如光圈，象场角，聚焦和波长加以改变。而且必须得出弧矢与子午方

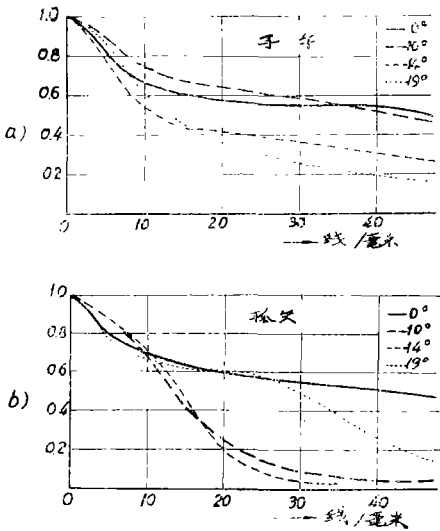


图4 具有图1所示的象差的物镜在不同的象场角时的调制传递函数
a. 子午 b. 弧矢

向之间的区别。

这些都被强制地要加以限制，这种限制是根据实践产生的。对于摄影物镜最多有三种光圈，三种不同的象场角和调整在三个收集面而测量出传递函数。但是，每种情况都要包括弧矢和子午，以致在图象中心，这是为了掌握对中心误差。在许多情况下人们会很快地满足于仅有的一个传递函数，甚至满足于仅有的一个传递因子。这种传递因子是图象中心和象场以外的图象中固定的空间频率的传递因子。这里为了取得弧矢与子午之间的平均传递函数，人们倾向于调整光栅位置，使之与主要方向成 45° 。

六、衬度感受函数

那些令人迷惘的大量曲线大概是一种原因，认为传递函数初看起来虽然是令人兴奋的，却不能排斥掉“分辨本领”这一有些含糊的说法。现在我们必须认真评论这种含糊的观念。这里我们采用眼睛的衬度感受函数，它是光栅的最低衬度与其空间频率的函数关系，在这个衬度下眼睛应该还能够辨认那个光栅。在心理关系上它对各人大不相

同。在全衬度 $K = 1$ 和白昼时，按习惯的视距离250毫米放置一个光栅，则其可辨认性在每毫米为6—8个周期之间。空间频率愈低，对于衬度的要求也就愈低，而不至失去光栅结构，使光栅变为一个均匀的灰色表面。当观测者人数较多时会出现一个光栅界限可辨认性的很粗的带宽，这个大约类似于图5中

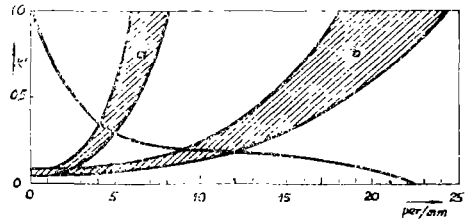


图5 不同视力的两个不同观测者的衬度感受函数与传递函数。

a. 仅用眼睛观测 b. 使用三倍放大镜观测

示出的划线区域。此外，该图中附带绘出调制传递函数。调制传递函数应该适应于焦距为250毫米的物镜和 $K = 1$ 的物体衬度。在图5示出的划线范围内调制传递函数的过程表明，两位观测员将赋予物镜什么样的分辨能力的界限。其中一位观测员认为是每微米5个周期，另外一位则认为是6个周期。这里从来没有谈关于物镜的结论，而仅仅是肯定了这样一点“人们看见了什么”。如果人们使用放大镜帮助一只眼睛，那么在两个观察者之间还是有区别存在。如果人们认为放大镜对象质还没有起到其它的不良作用，那么放大作用仅在于，使空间频率按放大率提高以代替低的频率。衬度感受函数将在纵坐标方向延伸。调制传递函数横截较高空间频率的第二个影线物。但是两名观测人员对“分辨本领”这个问题仍旧存在着区别。

调制传递函数能提供出怎样精确的结论，对这一点人们想弄清楚。当然，传递函数的测量对于用仪器比之根据外观做出光学系统估价工作是昂贵的。同时人们必须始终清醒地看到，在测量时不易避免对当时成象条件的影响。于是，人们可以对它尽可能地予以固

定。并且用同一物镜多次测量时可以令其重复。这样人们就会获得重复性的结果。在比较不同结构形式的光学系统时，保持成象条件这点难以满足。其中包含一种可能性，对两种不同的结构的系统评价时，先根据传递函数，然后再根据象差曲线，会得出相互矛盾的结果，人们已经较信赖于从象差值计算出的传递函数。

如果人们把传递函数用为物镜的连续检验，那么所有以上想法就将是无目的的。这里涉及到的是同类物镜型号的各样品的比较检验，而且创造相同的成象条件比较简单。肯定两个或三个不同空间频率的传递因子的一致性就足以。从中推断出整个函数过程的一致性。保持住为一种任务而确定的自动检验装置成象比较容易。此外，这一装置固定下清晰面，并且检验了系统中透镜的对中心精度。

七、结束语

至今在我们的观测中，放在首要地位的是摄影物镜和在眼中的投影，因为在这方面最频繁地使用了传递函数。但是，这却提出了一个问题，为什么传递函数不大用于需要目视的仪器上，如显微镜和望远镜，首先必须指出：在这种情况下眼睛是促成网膜上成象状况的一个因素，而这一点对整个环节的成象条件产生着强烈的影响。一方面它会作不利的变化，而另一方面通过眼睛的调节从而能遏制住一些调焦的误差，或象场弯曲。目视的光学仪器是就眼睛的这种作用准备的，而这种作用对于应用传递函数却是障碍。同样这也适用于改正色差的特殊情况。这种存在于显微镜和望远镜象场边缘上残余的细小的彩色是属于对系统所获的彩色校正良好的征象。

在显微观测时人们几乎总是用部分相干光照明。在相干光中即使如果球差校正曲线不太理想的话，那么所有的显微物镜都能有按阿贝理论相应的空间频率的完全的分辨本领。因此，在相干光照明时观测的分辨本领不是为物镜的评价标准。仅在不相干光的照明中才会显出球差改正不足的情况。但是，显微镜时通过改变调焦和照明关系来掌握成象条件是通常的和重要的。

好的现代的望远镜具有一个一般比标准的眼睛瞳孔为大的出射光瞳。根据这个出射光瞳确定所使用的望远镜的孔径比。但是，眼睛瞳孔的大小就像视锐度一样，与照明相关。要用传递函数对不同的望远镜类型比较时应将这些复杂的关系考虑进去。但是，这样就算会强烈地损害结论的一般适用性。于是只好以固定的瞳孔并限制在图象中心的调制传递函数。就忽视了望远镜的特殊性能（如“夜用望远镜”“广角望远镜”）。

调制传递函数所以是这样一种，在一定的情况下非常有利于相互的说明，而且物理性清楚。但是，这并不应导致对结论限度的忽略。它不能满足对光学系统性质用一个优值来表示的要求，而且也不能用于识别光学系统是否得到和怎样得到改善的方法。这类目的用象差的观点较为合适。这指出了光学系统运算的现代发展方向。

然而，特别急切地需要对光学系统有一种优值数字，使得结构数据可以由运算装置自动地推算出来。将每个各别计算出来的系统根据优值数据加以比较。这里标出：不是以光线追踪计算和古典的象差解释是最好的，不过必定要扩展到较高级的象差。在此人们通过赋予各个图差以权重因数联系光学系统的特殊任务。

译自“Jahrbuch für Optik und
Feinmechanik” 1974, 27页
[张联维 译 卢寿枏 校]