

电影摄影物镜光学设计

电影镜头设计组

中国工业出版社

71.62
4

DF 42/04

电影摄影物镜光学设计

电影镜头设计组



中国工业出版社

内 容 提 要

本书是电影摄影物镜光学设计的实践总结,着重介绍光学设计中的初始结构选型、具体设计方法以及象差分析、质量评价等问题。内容包括:成象质量评价和象差平衡方案,反远距物镜设计,中焦距物镜设计,长焦距物镜设计和变焦距物镜设计等五章,以及有关光学计算程序方面的六个附录。

电 影 摄 影 物 镜 光 学 设 计

电影镜头设计组

(凭証发行)

*

中国工业出版社编辑出版

新华书店发行

中国工业出版社第四印刷厂印刷

1971年9月第一版 1971年9月第一次印刷

15165·4774 (综合-56) 每册 1.10 元

3700

毛 主 席 語 录

需要把我們工作中的主要經驗，包括成功的經驗和錯誤的經驗，加以總結，使那些有益的經驗得到推广，而从那些錯誤的經驗中取得教訓。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

13.4.3.12.5
1651

前 言

在伟大领袖毛主席亲自发动和领导的无产阶级文化大革命中，在中央领导同志的亲切关怀下，我国电影工业正遵循毛主席“自力更生，艰苦奋斗，破除迷信，解放思想”的伟大方针向前发展。电影工业战线上的广大职工活学活用毛泽东思想，高举“九大”团结胜利的旗帜，狠抓阶级斗争和路线斗争，积极开展对叛徒、内奸、工贼刘少奇反革命修正主义路线的批判；并以只争朝夕的革命精神，为更好地宣传战无不胜的毛泽东思想，摄制和普及无产阶级革命电影；为赶超世界先进水平，使我国电影器材早日成龙配套，正在多快好省地创造着物质条件。

根据一九六九年全国电影工业生产协作会议上中央领导同志的指示精神，在有关部委和省市的大力协作下，电影镜头设计组于一九七〇年三月正式在北京成立，设在一个光学工厂，实行使用、生产、设计三结合，开展了我国电影摄影系列镜头的设计工作。一年来，他们遵照毛主席的伟大哲学思想，经过了一段“实践、认识、再实践、再认识”的过程，总结了设计实践中的一些初步经验，并将它们按电影摄影物镜成像质量评价和象差平衡方案，反远距物镜设计，中焦距物镜设计，长焦距物镜设计，变焦距物镜设计及光学设计程序加以归类，整理成册，以供全国广大光学工作者参考。

这个总结还很不成熟，尚需继续在大量生产实践的考验中进行改正、充实和提高。望同志们批评指正。

电影工业生产协作指导小组办公室

1103259

1002061

I

目 录

前言

第一章 电影摄影物镜成象质量评价和象差平衡方案	1
第一节 影幕效果和对电影摄影物镜的象质要求	3
第二节 象差平衡方案	10
第二章 反远距摄影物镜设计	24
第一节 反远距物镜的理想光学	25
第二节 反远距物镜的象差分析	31
一、前组分析	32
二、后组分析	41
三、“鼓形透镜”分析	52
四、色差分析	60
第三节 “鼓形透镜”应用的一个实例	63
一、玻璃选择	65
二、初始结构确定	66
三、象差平衡	75
四、结果质量判断	80
第三章 中焦距摄影物镜设计	82
第一节 结构型式选择和象差分析	84
一、焦距50毫米镜头的象差校正方案和结构特点	84
二、焦距35毫米和焦距40毫米镜头的结构特点和象差特性	90
三、松纳型物镜的象差特性和焦距75毫米的结构特点	94
四、双高斯物镜色球差的产生和校正	97
第二节 双高斯物镜的设计方法	100
一、对称型结构的象差特性	100
二、双高斯物镜半部系统的高级象差特性	103
三、基本结构的选择	114
四、全系统的合成	117
五、加入胶合面	120

六、象差平衡	123
七、七片五组双高斯物镜的象差分析	126
第四章 长焦距摄影物镜设计	132
第一节 一般长焦距物镜	132
一、双胶合及其分离透镜系统	133
二、对称型结构	152
第二节 远距型与折反射型长焦距物镜	155
一、远距型系统	155
二、折反射型物镜	163
第五章 变焦距摄影物镜设计	167
第一节 变焦距物镜的一些类型及发展简况	167
第二节 变焦距物镜的设计步骤	176
一、参数确定和型式选择	176
二、理想光学问题	180
三、求解 P^∞ , W^∞ 方程与 P^∞ , W^∞ 的分配	208
四、选玻璃, 求半径	223
五、象差平衡	228
六、确定口径, 制订公差	242
第三节 几个初步设计结果的比较	244
一、倍率选段比较	245
二、前固定组焦距和补偿组焦距的比较	246
三、后固定组的倍率 m_1 以及变焦距物镜的筒长比较	248
四、初始解 P^∞ , W^∞ 的比较	248
五、调焦方法的比较	258
六、象差分析比较	259
附录 I 光线追迹程序	274
附录 II 象差分布程序	293
附录 III 求解变焦距物镜各组元焦距分配程序	305
附录 IV 求解 $P-W$ 程序	317
附录 V 选玻璃程序	323
附录 VI 凸轮程序	325

第一章 电影摄影物镜成象质量

评价和象差平衡方案

有关电影摄影物镜的成象质量评价问题，直接涉及到使用、设计和制造三个方面，它们之间的关系极为密切。这里着重从使用和设计角度谈谈成象质量评价问题。

为了获得一个较理想的电影摄影物镜，光学设计人员首先必须了解使用要求、使用效果和设计结果转入加工制造时的可能性。通常使用方面对摄影物镜所提出的焦距值、孔径、视场、最近物距，甚至畸变值、鉴别率等，设计人员都是不难理解的；而当涉及使用效果方面的专用术语及其中的问题，就往往互相之间缺少共通的语言。如有关象质方面的亮度范围、调子软硬、反差、层次、质感等等概念，光学设计人员就不甚熟悉，所以在设计时往往从技术的角度来校正各种象差；而设计中所校正的各种象差，如球差、彗差、象散等等概念，使用方面又不常接触，总是以电影画面所反映的影调、色调的艺术效果作为衡量物镜质量的前提。这是一个矛盾。正因为电影摄影物镜是一种把技术和艺术两者相结合的产品，所以这里实际上提出了一个如何将使用要求变成设计要求的课题。其次，当设计人员明白了使用效果上常用术语的概念之后，又怎样根据使用要求，按光学设计规律，确定各种象差的平衡方案，进行设计，而最终达到符合使用要求的设计结果，这就产生设计阶段的成象质量评价问题。它确定着光学设计方向，指导着具体的光学设计。这里又提出了一个设计结果如何体现使用要求的课题。

设计和使用必须紧密结合。

一般来讲，根据使用要求所进行的设计，总是预示着加工成产品后的使用效果，两者之间是有机联系着的，有相对的一致性，存在着“变成”和“体现”的关系。光学设计阶段的成象质

量评价原则，也正是基于长期光学设计与加工的实践而产生的理论。但是，它并不能代替未来产品的实际成象质量，最终的成象质量评价还有待于对产品通过各种仪器进行测试，和对产品的实际拍摄效果进行检验，从而验证设计阶段成象质量评价的理论是否正确和发展这些理论。

光学设计中的成象质量评价这一专用名词，是指光学系统在设计过程中评价各种象差的容限，如“瑞利判断”、“中心点亮度”、“光学传递函数”、“点列图”、“能量集中度”等等，都是以存在各种象差的情况下，如何确定象差的容限和最佳平衡方案，使设计结果接近理想的程度，以此来控制设计过程和生产过程。

在实际使用过程中对一个光学系统的评价是非常广泛的，不但要求它有理想的成象质量，而且还对它的体积、重量、外形形式、适应性、牢固度、工艺性能、材料选用、造价等等都有一定要求。最好的成象质量，如果在工艺上，材料的物理、化学性能上无法保证，也无实际用处；至于体积、重量等要求，有时甚至就直接地影响着这个系统的实际使用价值。在进行设计时，所有这些都要与象质一起加以考虑，过份追求某一指标而忽略其它指标都是片面的。

光学系统的不同使用场合有着不同的评价内容，因此，不同的光学系统其评价方法和标准也不一样。摄影光学系统的象质评价，是以在感光片上所表现的象质来衡量的。由于在底片上感光乳剂的“感光量”(表现为“密度”)是与它所接受的“照度”成正比关系，因此使用“能量集中度”的方法以评价摄影光学系统的成象质量较近实际。又因这种方法易于掌握，使用方便，所以在设计过程中常被采用。至于最近发展起来的“光学传递函数”方法，它可直接表现出光学系统对于不同“频率”(实际即鉴别率)而产生的不同“对比度”(即反差)，这等于告诉了某光学系统在感光片上对线条和阶调的表现能力，因此已成为实验室中广泛应用的评价方法。这种方法亦可直接地被应用于光学系统的设计过程以指导光学设计。

总之，从光学设计实践的角度来说，解决使用要求变成设计要求，设计结果体现使用要求的成象质量评价问题，极为重要，否则设计必然存在某种盲目性。但是，这是一个影响因素颇多，国内外实践经验总结尚少的复杂问题，尤其是对用于艺术创作任务的电影摄影物镜来说，就更显复杂。这里只是试着提出这方面的问题，并根据设计实践的体会，谈些初步看法，尚有待进一步的实践加以验证和补充。

第一节 影幕效果和对电影摄影 物镜的象质要求

影幕效果从技术角度来讲，是指被拍对象通过摄影机的拍摄，在感光底片上成象，再经一定的洗印条件，反映成正象而放映出来的画面与原被拍对象的差别情况。摄影与洗印专业人员往往根据这些差别来判断摄影机及镜头的优劣、感光胶片的性能、洗印条件是否得当等等。显然，这其中要鉴别的内容是多方面的，影响影幕效果的因素也是非常复杂的；同时，还带有一定的主观性。为了解决这个问题，常常确定单一的鉴别内容，排除其它影响因素，使其易于判断；并补以对画面密度进行仪器测试的手段，来衡量主观感觉是否反映客观情况。

通过影幕效果鉴别电影摄影物镜的质量，一般是指对不同物镜象质的比较而言，因此必须固定其它条件，如所用胶片和洗印条件一致，被拍对象和拍摄条件不变，而唯独变换摄影物镜，方能通过影幕效果衡量该物镜的结象情况。

按照上述方法所获得的电影画面，如果具备鉴别率高、亮度范围大、反差适中、层次丰富、杂光少、彩色还原正确、成象不变形、画面中各处成象和感光均匀而使画面的景物质感强，则就是一个用较理想的电影摄影物镜所获得的画面。由此看来有关象质的评价内容也是很多的，必须将这些内容加以综合分析，方能得出较全面的结论。因为评价内容之间多有互为影响的联系，所以还可把这些内容概括成几个方面，这就是被拍对象是否能在

影、线、色、形方面得到正确还原。

影、线、色、形的还原程度反映着摄影物镜象质的优劣，而它的原因则由摄影物镜的结象力、杂光、彩色还原、畸变、渐晕、透过率所造成。下面我们将就这些因果关系联系起来加以叙述，并在叙述中解释上述所有概念。

一、结象力（即清晰度或鉴别率）

结象力的高低与光学系统各种象差的校正有着直接的关系，它是衡量摄影物镜质量的主要指标之一。在实验室里往往通过目视和拍摄鉴别率板的方法，看它在每毫米内能分辨的线数（即线/毫米）而定，但有时会出现这种情况：一个目视鉴别本领较高的物镜，影幕效果并不十分理想，或两个目视鉴别率不相上下的物镜在影幕上的效果却不一样。这是因为上述鉴别方法，仅只是表现线条的，所用的都是一种高对比（即对比度=1）的鉴别率板，如图1—1所示，即在等面积的白色衬底上排列着深浅相同、粗细不等的黑色线条，也就是说不管线形多粗多细，在黑线与黑线之间总存在着一条白线，这样就形成了黑白显然的对比，通常叫高对比；而实际被拍景物不只有各种高对比的物体，尤其有各种低对比（即黑与更黑、白与更白、灰与更灰相临所形成的微弱对比）的物体。它们所呈现出来的明暗阶调是非常丰富的，而不同明暗阶调的配置则构成整个画面的影调。摄影人员在通过影幕效果鉴别物镜的质量时，不只注意线条的表现，还更为注意影调、色调的表现，所以常常在被检验的画面中拍一块照度间隔相等的八级灰板，如图1—2所示。以此来衡量物镜对影调层次的再现能力和对不同明暗阶调对比所形成的线条的再现能力。这是因为一个普通的电影画面，画面中的景物都是由不同的明暗阶调和它们对比时所形成的轮廓线构成的，如天为灰白色，人脸与天空相近，头发是黑的，衣服是灰的，当然人脸、头发、衣服的受光面与背光面又呈现出不同的阶调。总之，正象明暗不同的八级灰板那样，它大致的反映着景物中的各种阶调，如果再细分下去，衣

服受光面和背光面上的布纹则又有受光面和背光面的区别，又会形成更多的不同阶调。这种细微的差别是难以用八级明暗等级来概括的。不同明暗阶调的对比，摄影上称为反差，不同反差在临界的地方会形成深浅不同、形状不一的线。强烈明暗阶调的对比叫反差强或调子硬（即高对比）；一般明暗阶调的对比叫反差适中或调子适中（即中对比）；微弱明暗阶调的对比叫反差弱或调子软（即低对比）。图1—3正是这种例子。而层次是指整个画面的不同阶调被区分的多少，被区分的越多就是层次越多或层次越丰富，反之则相反。质感则是在画面中表现景物细部的表面结构的能力，如不同的衣料，不同的黑绒，不同的皮毛，不同皮肤的表面特征等等。亮度范围是指再现景物最黑和最白的能力，一般来讲再现的范围越大越好。图1—4正是说明亮度范围大小的示意图。图1—5则是在相同条件下用两个不同物镜所拍摄的灰板，经密度计测量后所得出的坐标曲线，显然物镜②比物镜①再现景物亮度范围的能力小，②的密度差为1.21，①的密度差为1.42，两者相差0.21，使黑色阶调部份有所损失（以光学传递函数的观点就是损失了原景物的信息量），反差也随之减弱，层次自然也会减少。所以就整个画面的亮度范围、反差、层次、质感来说，它们是互为因果的。不能

最大限度的再现景物的亮度范围而使反差减弱，或虽能最大限度的再现景物的亮度范围但层次少必然反差过强，这样的画面就显得平淡或者生硬。而层次少必然是失掉了许多弱反差（低对比）部份（即中间层次）。失掉许多弱反差部份必然不足以表

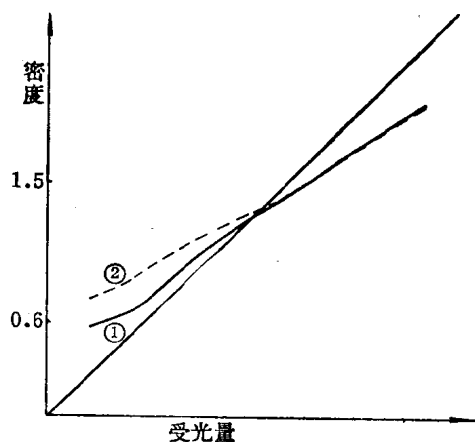


图 1—5

现物体的质感，使景物的真实感减弱。因为要想表现皮肤，尤其是不同皮肤的质感，必须把皮肤的反光程度、细纹、毛孔、汗毛等表面结构的区别表现出来，也就是说摄影物镜对弱反差（即低对比）的物体要有较高的鉴别本领才行。

一个理想的摄影物镜，不仅要求它对高对比的线条有很好的再现能力，还要求对影调、层次以及由它们的对比构成的线条有很好的再现能力。通过对“光学传递函数”的分析知道，要使光学系统对高对比的景物有高一些的鉴别率，并不十分困难；如果不但对景物的高对比部份，而且对较低对比部份，都有较高的鉴别本领，这就要求光学系统必须具有很好的成象质量。以为反差强或调子硬的画面，是由于象质太好，结象力很高所造成的，这实际上是一种误解。这是因为人眼总是对黑与更黑、白与更白、灰与更灰相比所形成的界线难以分辨，显得模糊，如雨点在明亮的天空中降落，黑布涂有墨汁那样；相反，黑白分明所形成的界线就显得格外清楚，象白纸黑字那样。因此应当将摄影物镜的实际结象力和因不同明暗阶调对比所造成的假象区别开来。另一种情况，即调子太软，画面的反差比原景物有所减弱，以致线条不清晰或不易分清。不易分清一般多属杂光的影响（详见下述）或对焦不实等等；不清晰则是光学系统的象差校正不当，特别是色差校正不良，以致象点弥散较大所致。

上述对一个普通的电影画面所进行的分析，实际上是说明摄影物镜对不同影、线的鉴别本领，即对高、中、低影调对比的结象能力。通过影幕效果不只看画面所容纳的亮度范围，反差强弱，还要看层次多少，质感怎样，正是评价电影摄影物镜实际结象力的一种方法。

二、杂 光

在画面的全部或局部不是按被拍景物结象而是不规则光线在底片上产生密度，这种不规则光线叫杂光。它直接影响着画面中暗部阶调的再现，使黑色明显变灰，使各种彩色变淡，因此降低

了整个画面的反差，减少了整个画面的层次，缺乏质感，看去影像一片含混，象蒙上一层雾一样。一般来讲，杂光是由物镜镜筒和透镜的漫反射所引起。透镜的气泡，条纹以及镀增透膜不良等也会引起这种反射，因此要在物镜的结构设计中采取措施，以防产生这种漫反射（折反射和长焦系统尤其重要），同时在工艺上还应应对镜筒、透镜外缘、光栏片作涂黑处理，选择合格的光学玻璃材料，使杂光减少到不超过5%的程度。

有杂光的物镜分局部有杂光和全部有杂光两种。全部有杂光的摄影物镜并不一定就说明它的结象力差，而只是显得差，正象人眼对灰与更灰、白与更白不易分辨而显得模糊一样，所以必须把光学系统本身的结象力差和由于杂光的影响两者区别开来，才能找出真正的原因。

其次，在有棱镜的光学系统中，还常常会在画面中出现“双象”，这是因为物镜视场之外的景物由棱镜直接反射到画面中去的缘故。因此在确定棱镜的大小和位置时，必须连同整个光学系统进行总体考虑。

充分利用遮光罩也能防止或减少杂光与“双象”的产生。

三、彩色还原

影幕上的彩色画面如果不能真实地反映出被拍景物的实际颜色，就叫彩色失真；足以被人眼分辨出来的失真现象就是彩色还原不好。彩色还原好坏有两种表现：一种是整个画面正常或偏黄、偏青，一种是画面中的各种彩色饱和或不饱和。不饱和的彩色显得陈旧而不鲜艳，其对比必然微弱，以致不易分辨两种相近的颜色。影响彩色正确还原的因素很多，诸如胶片的感色性能，拍摄时的色温是否正常，曝光是否准确及洗印加工条件等等。与摄影物镜有关的如透镜的镀膜工艺，光学材料的选择吸收等因素，对于整个画面都有着相同的影响，因此它使整个画面都有相同的彩色失真，一般的情况下，镀膜呈蓝紫会使画面偏黄，镀膜呈黄会使画面偏青。彩色饱和度问题，常与物镜的杂光和各种象

差情况有关。杂光会使画面彩色不饱和，象蒙有一层灰雾，难以区分不同颜色；而光学系统的色差校正不好，由于结象不能集中而使色块扩散，必然影响彩色的饱和程度，降低颜色的对比（色反差）不易分辨相近的颜色。另外，如果摄影物镜有严重的渐晕现象存在，使画面中心与边缘的曝光量相差悬殊，也会造成画面中心与边缘彩色还原不一的情况，往往中心准确边缘则失真，反之则相反，因此光学设计中对于渐晕现象必须加以控制。还有一种情况，有些物镜与成象底片之间要放一分光元件，一般多为镀干涉膜的棱镜，如果镀膜面的入射角安排不当，则会引起光的偏振，使画面感光的均匀性受到破坏，而影响画面对角线两边的彩色正确还原。上述两种画面的局部彩色失真情况，在洗印加工过程中是很难校正的，因此在物镜设计时要引起足够重视。

四、变 形

物体不按同一比例成象在影幕上就是变形，有变形的画面是很难看的。一种是由于摄影的“透视”所造成，同一物体与镜头的轴向距离相差悬殊就会产生这种现象，特别是用短焦距物镜拍摄近距离物体时要注意，这只要拍摄人员适当掌握一下拍摄角度是能够避免的；另一种情况就是设计镜头时的畸变过量，对于直线物体特别容易显露出来，在影幕上将直线物体表现为曲线体就是畸变严重。广角物镜的失对称缺陷较为严重。一般畸变值控制到3%时，人眼是不易察觉的。

五、渐 晕

画面四角较暗或彩色失真就是这种现象的表现。由于物镜象面边缘的照度是与视场角余弦的四次方成比例的（ $E \propto \cos^4 \omega$ ），因此广角物镜的画面边缘照度与中心照度之差别就较大，容易出现渐晕现象。其次，有时为了提高成象质量而遮拦掉一部份象差不良的光束，这样就使本来画面边缘照度不足的情况更加严重起来，而出现更严重的渐晕现象。这只要用摄影物镜拍摄一块中性

灰板就能检查出来。当边缘照度为中心照度的50~60%时，人眼还不易分辨，是允许的，低于这个数值在影幕上就容易看出来，有时严重到“缺角”（即这部份光束全部被遮拦）程度在摄影中是不许可的。

六、透 过 率

透过率是指按曝光表测定正确的曝光量。曝光后，在影幕上却呈现较暗的画面——曝光不足（有时也会出现曝光过度）。这一般是由于物镜中的透镜光吸收较大和透镜镀增透膜控制不当所造成的。复杂的系统特别是目前使用较多的变焦距摄影物镜，就容易产生这种现象。为了克服这个缺点可以在镜头上刻上“ T ”值来解决，通常称“ T 光圈”，它是考虑了系统的光损失后，与理想通光等值的通光孔径，与“ f ”值（它表示理论光圈值称 f 光圈）常差半档光圈，如 $f/2.0$ 就相当 $T/2.3$ 。当然，这个差值与系统的复杂程度和工艺情况是有关的。

七、其 它

以上几点只是根据影幕效果对物镜设计所提出的几点要求。除此以外我们还要考虑到摄影物镜在实际拍摄过程中的一些情况，了解使用情况后才能更合理地确定设计的最佳方案。

（一）摄影距离从10~20倍焦距开始直到无限远都要用到，因此对无限远物体进行象差的校正必须预先估计到物体移至近距离时象差的变化情况。一般常用的距离为50倍焦距左右，因此首先要保证这一段距离有良好的成象质量是必要的。对于变焦距物镜，由于它不是整体物镜调焦，而是利用某些组元的移动来进行调焦，因此它不但会使象差有较大的变化，而且有时还会引起渐晕现象的加剧，甚至到缺角不能使用的地步，这是必须加以注意的。

（二）一般常用底片的感光度为21定左右，在室内灯光照明下，物镜的光圈用到 $T/3.5$ 就可以满足要求，室外日光照明时一

般多在 $T/11 \sim T/22$ 之间。由于受摄影棚的限制,室内很少使用焦距 $f = 100$ 毫米以上的物镜。由此看来对于 $f = 100$ 毫米以内的物镜,首先保证 $T/3 \sim T/4$ 左右光圈有较好的象质是非常必要的,而对于焦距超过 $f = 200$ 毫米以上的物镜,由于它常用于室外日光照明摄影,因此首先要保证它在 $T/8$ 光圈内有较好的象质。

(三) 为了适应人们的观察习惯,在通常情况下主题内容多是布置在画面较中央的部位,为此强调50%视场以内的画面有特别良好的象质就非常必要,在0.85%视场处有较好的象质即可。为了保证画面的完整性,应适当照顾画面边缘有相应的成像质量。

第二节 象差平衡方案

由于光学系统象差的校正不能达到绝对无象差的地步(也没有这个必要),因此确定一个既能满足实际使用要求;又能够实现的象差最佳校正方案就是非常必要的。要达到这一点,首先必须有一个正确的象质评价方法。为了计算上的方便,目前我们仍然是采用“能量集中度”的方法来衡量象差(有时也采用“瑞利判断”方法),而且是以单项象差计算为基础的。目前经常计算的有下列几种曲线:球差、色差($LA'_\lambda \sim \sin U'$ 曲线)、正弦条件($OSC' \sim \sin U'$ 曲线)、象散($x_s, x_t \sim \omega$ 曲线)、畸变($Dist \sim \omega$ 曲线)、倍率色差($H_\lambda - H_D \sim \omega$ 曲线)以及特性曲线($\Delta H'_\lambda \sim \text{tg} U'$ 曲线)。有些是描述细光束的,有些则描述了宽光束的特性;有些是轴上点(或近轴点)的象差情况,有些则是轴外点的象差情况。这些都是为了运算上的方便而分割开来的,而实际上它们都同时成像在一幅画面上,因此就要求我们能综合起来统一加以评价。

一、球差、色差

球差是由于光束孔径增大而引起的效应,它对整个视场的各点都起作用,没有校正好球差的物镜即使在视场中央也得不到清