

# 成像光学工程面临的光学问题

潘君骅

(南京天文仪器研制中心, 南京 210042)

**[摘要]** 文章简单论述了现代成像光学主要领域的情况, 指出非球面反射系统是发展的必然趋势。讨论了加工与检验方面的基本情况及应着重深入研究的问题。对镜坯材料也提了一点看法。

**[关键词]** 成像光学; 非球面反射镜; 光学设计; 光学加工与检验

## 1 前言

随着科学技术的发展及国防事业的需要, 成像光学工程在 20 世纪, 特别是 20 世纪后半叶, 发展十分迅速。到 20 世纪八九十年代, 各种要求极为苛刻的系统纷纷提出, 有些已经实现, 有些正处于实施阶段, 有些则还在对关键技术及可行性进行研究。成像光学工程包含的方面很广, 这里仅从应用光学的角度讨论一些问题, 包括光学设计、光学制造及光学检测等几个方面。

## 2 成像光学有代表性的几个领域

### 2.1 大型地面观测系统

这一类成像光学仪器又以大型地基天文望远镜为代表。第一架口径为 2.5 m 的反射式天文望远镜出现在 20 世纪的第一个十年, 这就是美国 Wilson 天文台的 2.54 m (100 ins) 望远镜。在 20 世纪上半叶, 可能受两次世界大战的影响, 全世界大型天文望远镜建造的数目很有限, 口径在 2 m 以上的望远镜屈指可数。但是到 60 年代以后有了迅速的发展。除了数量剧增, 口径越做越大, 对光学系统的像质要求也越来越高。过去常以一般天文台址的大气宁静度 ( $1''\sim 2''$ ) 作为光学系统像质的参考指标。后来, 一方面在世界范围内努力寻找大气

宁静度最好的台址, 一方面对大望远镜的光学设计和制造提出更高的要求。另外, 为了降低望远镜本身和建筑物等的造价, 也为了减少建筑物对局部大气宁静的破坏, 望远镜主镜的相对口径 ( $D/f$ ) 愈做愈大, 即  $F (f/D)$  数愈来愈小。这些变化对大口径天文望远镜工程提出愈来愈高的技术要求和建造难度。我国 LAMOST 工程<sup>[1]</sup> 是一架口径为 4 m 左右的多目标光谱巡天望远镜, 它和成像望远镜有同样的光学像质要求, 现在已经启动, 预计在 21 世纪的第一个十年内完成。国际上现在已经建成或将要建成的 10 米级望远镜有多架, 21 世纪的目标是 100 米级的地面光学天文望远镜。

### 2.2 空间对地观测系统

二次大战以后, 冷战期间, 苏美两国都高度重视对方领土的空中侦察工作, 因而发展了光学侦察系统。用飞机进入对方领空, 虽然技术上的难度要小得多, 但是飞机的安全性和政治上的麻烦, 使航空侦察相机逐渐被人造卫星上的设备所代替。卫星的高度大约在 200~300 km, 与飞机的高度 10~20 km 相比, 有数量级的变化, 可是对分辨率的要求不能降低, 甚至还要有所提高。因此, 相机光学系统的口径和焦距必然要相应提高。口径现在至少要在 0.5~1 m 左右才能满足需要。空间对地观测不受地面大气宁静度的限制, 故要求光学系统达

到或很接近衍射极限。航摄相机，用折射式光学系统已能满足要求，但空间相机则只能用反射系统，最多用折反射系统。

### 2.3 光刻物镜

光刻物镜是一个发展很快的高技术成像光学领域，是大规模集成电路制造的关键之一。随着集成电路规模的不断增大，要求光刻物镜的极限分辨率不断提高，现在用 KrF 或 ArF 准分子激光做光源的光刻物镜分辨率在  $0.25\ \mu\text{m}$  左右，但  $0.1\ \mu\text{m}$  分辨率的指标已提出来。解决的办法只有用更短的波长。波长为  $13\ \text{nm}$  的软 X 射线反射膜技术已基本突破，所以反射式高分辨率投影光刻系统的研制，已经提到日程上来，是 21 世纪要解决的重大课题。由于  $13\ \text{nm}$  波长的正入射光的反射率目前还不太高，所以这种物镜设计的一个原则是镜面数目要尽可能少。此外，还有视场大小，渐晕系数，畸变等严格要求。

以上三个领域的共同特点是反射式光学系统将成为今后成像光学工程的主导。由此，还可以得出，光学面采用非球面是不可避免的趋势。国际上 80 年代末就专门召开过“反射光学”讨论会。

## 3 非球面光学的设计问题

自从有了计算机代替手工计算光线及进一步自动作光学系统结构优化之后，光学设计的面目发生了革命性的变化。各种不同的像质评价结果都可以随时获得。能计算各种各样非球面的自动优化光学设计程序已成为商品，好像光学设计已没有什么难题了，什么都可以用计算机。其实，事情不是这样简单。就某一种已经成熟的系统而言，如果稍为改变一下参数，例如口径、焦距等，的确用计算机很快就可以算出你所要的结果。但如果这个改变超出了本来结构形式的范围，那末功能再强的自动优化程序也算不出满意的结果。这些改变对不熟悉光学设计的工程总体设计者来说，不一定意识到其对光学设计所面临的问题，最重要的参数是系统的相对口径和视场。另外，中心遮拦要尽量小，甚至没有中心遮拦，对反射系统而言也是一大难题。有时视场渐晕系数指标也会成为设计的难题。为了解决新出现的各种各样的对光学系统的要求，现在光学设计者的主要精力是放在找到一个合适的结构形式，按照这个形式，自动优化程序能算出满意的结果。

轴对称非球面反射系统已被研究得相当清楚<sup>[2]</sup>，作者对解两镜系统及三镜系统均导出了很实用的公式组<sup>[3,4]</sup>。两镜系统一般只能消除球差及初级彗差，如不加改正镜，其可用视场很小，相对口径也很有限。三镜系统消像差的能力大大增强，不难设计出有足够大平视场的、相对口径也相当大的优质成像系统。但中心遮拦始终是反射系统的致命缺点。为此，很容易想到使用轴对称系统的边上一部分，即所谓离轴系统。就是说，设计时是按一个轴对称的非球面系统算，只不过通光部分是取中心遮拦以外的无遮拦环带中的一个区域。这样做是大大增加了这个轴对称系统的相对口径。这种离轴的两镜系统能用的场合很有限。离轴三镜系统的情况要好一些，因为轴对称三镜系统比较容易获得较大的相对口径。现在空间光学上已在采用三镜系统，有的已经实现<sup>[5]</sup>。解决中心遮拦的另一途径是采用所谓偏轴系统，它与离轴系统不同之处是前者找不出一条几个镜面共有的、与入射的轴上光平行的对称光轴。由两镜组成的偏轴系统是 Art Leonard 发明的，它可以得到视场中心很好的像质，相对口径小时，有相当大的可用视场。偏轴两镜系统中的一个镜面是轴对称的非球面，但另一个必须是双曲率的截面对称曲面。这种系统消除视场中心球差、彗差及像散的理论解已被导出，但未见公开发表。作者独立导出了一套可用的公式<sup>[6]</sup>，并且做出了一个用作平行光管的系统<sup>[7]</sup>。但是在反射光学系统中，偏轴系统的潜力有多大，中心视场以外的像差情况，还没有完整的设计理论。放在地球同步轨道上的对地优质成像系统有极其苛刻的要求： $1\ \text{m}$  级的通光口径， $F/2$  以上的相对口径， $10^\circ$  的视场以及中心无遮拦。这种系统，无论光学设计、加工检验及装配调整都会遇到前所未有的困难。

我国 LAMOST 工程的光学系统是反射式 Schmidt 系统，其反射式改正镜必须和光轴倾斜一个角度才能使星光进入光路。为了减轻整个工程机械及电控方面的问题，另一块大的球面反射镜最好在观测不同天区及跟星过程中都是不动的。这样，问题又转移到光学设计上，即要求改正镜的面形在观测过程中及观测不同天区时是不同的。已有的光学设计方法无法满足这样的要求。LAMOST 工程中采用了主动光学的办法，同时解决了几个方面的困难<sup>[8]</sup>。这种非球面反射 Schmidt 改正板是一个面

形方程可变的、截面对称的高次非球面。

软 X 射线光刻物镜, 国际上现在处于光学设计研究阶段, 也做过一些实验性工作, 但离工业应用还早。接近式 1:1 曝光可能是不实用的办法。投影式光学系统设计有两镜、三镜、四镜等多种方案<sup>[9,10]</sup>, 圆弧线视场能获得较好的设计结果, 但要求模板和芯片作严格同步移动。要求反射镜数目少, 又要视场足够大, 是一对基本矛盾, 作者设计了一个两反射镜的、视场为  $\phi 30$  mm 的系统<sup>[11]</sup>。这方面的光学设计工作还有待深入。

#### 4 非球面反射镜的制造与检验问题

在人类的工业与技术发展过程中, 设计与制造始终是一对辩证统一的矛盾, 随着客观需要的发展, 新的设计总是不断地产生, 它向制造不断提出新的、难度更大的要求。非球面光学也是这样。早些年, 除了天文光学领域, 设计者总是尽量在成像光学系统中避免采用非球面, 理由是制造难度大。但是实际需要已到了不采用非球面不行的地步, 否则许多方面的工作就不能前进。因此, 对于非球面制造必须以积极态度迎接挑战。

非球面的加工难度主要看两个指标: 1) 非球面度, 即它和最接近比较球面的偏离量; 2) 最大非球面斜率, 即单位长度内它与球面的偏离量, 以每厘米或毫米多少波长计。

计算机控制抛光技术是非球面制造技术的一次飞跃, 它的基础是建立在用小磨盘修改局部误差之上的。将很多实验数据存到计算机内, 再根据每次修磨后检测出的面形误差, 算出下次应采取的措施。与过去的人工修磨相比, 优点在于失误率小, 收敛快。但主要的缺点在于留下小的局部误差, 即高频误差较大。为此, 对于大的天文镜面制造, 发展了一种计算机控制的可变形抛光盘技术, 即用适当大一些的抛光盘, 在抛光运动过程中随时自动改变抛光盘的形状以适应所到之处的镜面面形。实验证明它与小磨盘技术结合, 可以加工出很好的镜面。有报道说, 美国口径 6.5 m、 $F/1.25$  的镜面误差均方根值达到 14 nm。但这种可变形抛光盘只适用于大镜面, 因为使抛光盘变形的执行机构都要放置在抛光盘的背面, 没有足够的空间就无法实现。

空间成像光学系统要求镜面面形误差均方根值在  $\lambda/40$  即 16 nm 左右。对于轴对称镜面, 传统的

人工修磨与计算机控制修磨都有可能做到, 但目前还是很费劲的。下一步如果采用离轴非球面, 则非球面度及非球面斜率均将大大增加, 这将对非球面加工带来更大的困难。我们设计过一个口径 0.6 m, 焦比为  $F/1.7$  的离轴成像系统, 其高次非球面主镜的最大非球面度达 325  $\mu\text{m}$ , 最大非球面斜率约为 20  $\lambda/\text{cm}$ 。制造这类非球面, 包括检验问题, 都是目前还没有把握的。但既然光学设计已无其他选择, 则制造必须知难而进, 予以突破。

软 X 射线投影系统的主要困难在于对镜面面形的要求大大超过现在能达到的高水平, 这是显而易见的, 因为工作波长是 13 nm! 根据设计结果, 如用 632.8 nm 的激光检验, 则精度应达  $\lambda/300 \sim \lambda/400$  峰谷值。相应的检验系统的剩余像差也至少要在在这个水平上。看来必须寻找新的途径。

至于检验问题, 高精度镜面必须用零位检验, 这是无疑的。对于二次非球面, 有时可以利用其无像差点, 但大部分情况下只能用补偿器来得到零位检验光路。现在凹面镜检验用得最多的是 Offner 方案<sup>[12]</sup>, 其补偿器尺寸很小, 剩余球差也很小, 因此在大镜面检验时经常使用。麻烦的问题是在凸面镜, Hindle 方案<sup>[13]</sup>能检验凸的双曲面, 并且是在无像差点检验, 没有剩余球差问题, 但是检验镜的口径一般要达到被检镜的 2.2 倍。这对口径很大的凸镜是一个严重障碍。作者提出的反射补偿镜方案<sup>[14]</sup>, 检验镜口径只是被检镜的 1.5 倍, 情况可缓和些。相对口径很大的高次非球面的检验肯定会有更多困难, 看来用折射或反射元件再加计算全息或二元光学件补偿是最有希望的一条途径。补偿器本质上是一个检验基准, 它的可靠性十分重要, 为此应该有另外一个手段来校验它。美国空间望远镜 (HST) 的 2.4 m 主镜就是用反射式 Offner 补偿器检验的, 但遗憾的是他们居然没有核查补偿器 (实物) 本身的可靠性, 结果由于一个场镜的位置尺寸错了一点, 使主镜加工结束时的参数偏离设计数据。造成上天后才发现光学系统成像质量不好。这次事故的错误是初级的, 为补救而化的代价是巨大的。现在美国人已十分重视对补偿器的校验, 最近来华交流的人士谈到他们检验 6.5 m 镜的 Offner 补偿器用了两种不同的方法去校验。

有了零位检验光路, 用什么手段将镜面误差反映出来? 70 年代前, 在加工过程中主要是用刀口检验法, 以阴影图的形式反映镜面误差。这是一个

半定量的方法, 虽然灵敏度很高, 但没有数字表示。现在定量刀口检验在南京天文仪器研制中心作为研究课题已有初步结果<sup>[15]</sup>, 其与干涉检验的数据十分吻合。自从有了长光程差的激光干涉仪, 以及对干涉条纹的数字化处理软件, 干涉检验逐渐被广泛接受。现在已成了光学界评价镜面精度常用的方法。干涉检验对镜面上大尺度的误差很灵敏, 但对小尺度误差是不很灵敏的。如不配合以刀口检验或星点检验, 很难发现镜面有某种程度的高频误差存在, 而这对高精度镜面是十分重要的。

至于镜坯材料, 除了有主动光学支持的薄镜面外, 主要方向还是采取减重措施的超低膨胀玻璃。

## 6 结论

1) 非球面反射光学系统是今后成像光学工程各重要领域无法回避的主要光学系统形式。

2) 针对愈来愈高的性能要求, 光学设计的主要方向是寻求最佳的结构型式, 特别是离轴及偏轴系统。偏轴系统的理论与像差分析有待深入。

3) 今后非球面制造方面的重点是在高精度的、偏离量大、非球面斜率大的镜面, 以及具有双曲率半径的截面对称镜面。高次的离轴或偏轴镜面的检验光路设计是值得深入研究的课题。

### 参考文献

- [1] Wang Shouguan, Su Dingqiang, Chu Yaoquan, et al. Special configuration of a very large schmidt telescope for extensive astronomical spectroscopic observation [J]. Applied Optics, 1996, 35 (250): 5155~5161
- [2] Korsch D. Closed form solution for three-mirror telescopes, corrected for spherical aberration, coma, astigmatism, and field curvature [J]. Applied Optics, 1972, 11 (12): 2986~2989

- [3] 潘君骅, 郝沛明. 两个二次曲面反射镜组成的光学系统的一般研究 [J]. 天文学报, 1965, 13 (1): 46~56
- [4] 潘君骅. 具有三个二次曲面反射镜的光学系统研究 [J]. 光学学报, 1988, 8 (8): 717~721
- [5] Figoski J W. Development of a three-mirror wide-field sensor, from paper design to hardware [A]. SPIE Reflective Optics II [C], 1989, 1113: 126~133
- [6] Pan Junhua, Li xinnan. Design of a tilted two-mirror system [J]. Optical Review, 1994, 1 (2): 246~247
- [7] 潘君骅, 李新南. 偏轴两镜系统的设计 [J]. 光学学报, 1994, 14 (8): 867~871
- [8] Su Dingqiang, Cui Xiangqun, Wang Yauan, et al. Large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope (LAMOST) and its key technology [A]. SPIE Conference on Advanced Technology Optical/IR Telescopes VI [C], Kona, Hawaii, March 1998
- [9] Kurihara K, Kinoshita H, Mizota T, et al. Two-mirror telecentric optics for soft X-ray reduction lithography [J]. J. Vac. Sci. Technology, Nov. /Dec. 1991, B9 (6): 3189~3192
- [10] Jewell T E. Reflective systems design study for soft X-ray projection lithography [J]. J. Vac. Sci. Technology, Nov. /Dec. 1990, B8 (6): 1519~1532
- [11] 潘君骅, 朱永田. 两非球面反射镜非扫描式软 X 射线投影光刻系统 [J]. 光学学报, 1997, 17 (12): 1756~1758
- [12] Malacara D. Optical shop testing [M]. John wiley & Sons, 1978. 444~452
- [13] Malacara D. Optical shop testing [M]. John wiley & Sons, 1978. 455~457
- [14] 潘君骅. 检验反射望远镜中二次凸面镜表面形状的新方法 [J]. 天文学报, 1960, 8 (1): 70~78
- [15] 袁吕军. 刀口定量检验技术的研究 [J]. 光学学报, 1999, 19 (6): 845~851

## Optical Problems in Imaging Optical Engineering

Pan Junhua

(Nanjing Astronomical Instrument Research Center, Nanjing 210042, China)

[Abstract] In this paper the critical area using imaging optics is discussed, i. e. the ground based astronomical telescopes, observing systems from the space to the Earth and the projecting lithographic systems. According to the trend of technical progress, it is unavoidable to use reflective optical systems, and consequently aspherical surfaces. For optical system design, the main problem is how to construct an effective reflecting system

(cont. on p. 41)

## Stiction and Friction in Micro Electro Mechanical Systems

Wang Weiyuan

(Shanghai Institute of Metallurgy, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

**[Abstract]** The stiction and friction influencing the yield and reliability of MEMS are reviewed in this paper. The stiction, called release-related stiction, can occur within micron gaps of Si microstructures during the etching of sacrificial layer by HF and drying. It can also occur after packaging of the device due to over range of input signals and is called in-use stiction. It is concluded that the capillary force of water between two Si hydrophilic surfaces at separation gap of micron is the major contributor to the release-related stiction. The origin of in-use adhesion is from the chemical state of Si surface. Coating of anti-stiction films on the surface of Si microstructures and packaging of devices under dry atmosphere or vacuum are the most important methods to prevent the in MEMS devices from stiction. The preparation technology of anti-stiction films and its problems are described. Comparing with stiction, the friction is more complex. The commercially produced accelerometers and digital mirror devices are the devices with no direct contact friction. After using anti-stiction films, the stiction is fully prevented, and even the friction is apparently decreased. However, friction still exists in MEMS of direct contact moving parts. The wear resulted from friction will decrease the reliability and lifetime of the devices. To fabricate the films with anti-stiction and wear-resisting ability are the key research projects in high speed moving MEMS devices.

**[Key words]** micro electro mechanical systems; stiction; friction; anti-stiction films; wear-resisting films

(cont. from p.35)

which may be optimized by the optical CAD. The need of unobscuring entrance pupil leads using off-axis reflecting system and tilted mirror system. The key problem in fabrication is to make high accuracy, large relative aperture, high-order, large asphericity/aspherical slope and section symmetric surfaces. The null method is the principal way for testing aspheric surfaces up to now. The design of compensator for highorder, off-axis aspheric mirrors is worth studying yet.

**[Key words]** imaging optics; aspheric mirror; optical design; optical fabrication and testing

\* \* \* \* \*

### 更 正

本刊1999年第1卷第3期第3页右栏第2段第3行“…… $\rho V^2/\delta y$  (密度乘以二次方体积……)”更改为“…… $\rho v^2/\delta y$  (密度乘以二次方速度……)”。

谨向读者、作者致歉。