

# 水下成像镜头的光学设计

孙传东 李 驰 张建华 陈良益

(中国科学院西安光学精密机械研究所 西安 710068)

**摘要** 水下光学成像技术,如水下摄影、水下电视、水下激光距离选通成像系统等,是海洋研究与开发的得力工具,但由于水对光的散射和吸收等特殊的光学特性,及使用环境的特殊性,使水下光学成像系统的设计和研制较陆上光学系统有更大的难度。本文指出了主要的技术关键,及设计与使用水下光学成像系统时需注意的问题,最后给出了水下电视光学成像系统设计研制的实例。

**关键词** 水下光学成像 水下摄影 水下光学系统设计 海洋光学

## 1 概 述

为了适应海洋开发、海洋基础研究、海洋地质勘察、水下武器试验、水下体育运动的研究和海洋资源勘探的需要,水下光学成像、摄影(电影摄影、照相摄影和电视摄影、摄像)技术已经成为探索海洋奥秘的基本方法。与此同时,随着影视事业的发展,水下光学成像、摄影也是科教、体育、新闻和艺术等影视作品的重要表现手段。但由于水介质的光学性质不同于空气,因此必需研制水下专用的光学系统,才能得到满意的成像质量。

由于水具有与空气不同的折射率,  $n = 1.33$ ,因此当光线从水介质射向空气时,会发生折射现象。水下成像时,目标位于水介质的物空间中,而成像平面(CCD、胶片等)位于空气介质的像空间中,如果使用普通的摄影、摄像物镜,采用简单的透明平行平板玻璃密封防水,将不但使物镜的视角变小(焦距增大),放大率减小,像差也发生变化,其中色差和畸变明显增大,从而使成像质量变坏,图像变形和清晰度降低。

为了克服上述缺陷,可以采用下列几种方法:玻璃半球防水密封窗、普通摄影物镜与远焦型附加镜组组合以及水接触专用摄影物镜。其中,玻璃半球防水密封窗的结构比较简单,能够改善由于水介质折射引起的一些缺陷,但不能完全校正,特别是使物镜的像面弯曲增大;远焦型附加镜组作为水下摄影的附件使用,既保持了普通摄影物镜完整和使用性能,又满足了水下摄影的要求,但它很难满足水下大视场、大孔径的需要;水接触专用摄影物镜能够彻底校正像

差和消除水介质的影响,因而是一种比较理想的水下摄影光学系统。

## 2 水下光学问题的特殊性及其对光学成像的影响

由于水对可见光的吸收和散射,使得光在水中传输时的能量按指数规律迅速地衰减。设  $I_0$  是某水层的光量,传输了  $L$  路程后的光量  $I$  为:  $I = I_0 e^{-L}$ , 式中,  $L$  称衰减系数,表示光传输 1m 距离后光能量衰减的对数值(自然对数),单位是  $1/m$ 。光在水中的衰减是由水对光的吸收衰减和水中胶体粒子对光的散射所造成的,因此式中的  $L$  由两部分组成:  $L = \alpha + \beta$ , 式中,  $\alpha$  是吸收系数,  $\beta$  是散射系数。一般情况下,散射造成的衰减占总衰减为 60%、吸收衰减占 40%。习惯上我们也常用衰减长度表示水质对光的衰减特性,它表示光量衰减到原来的  $e^{-1}$  所传输的距离。

### 2.1 水对光的散射

由于水中存在着悬浮的质点,造成了水对光的散射。水中散射有两种:纯水本身产生的散射和由悬浮粒子所引的散射,海水是由具有吸收本领和随机取向的不规则粒子所组成的复杂色散系统。散射光对影像的衬底产生极为有害的影响,散射主要有前向散射和后向散射,前向散射是指光在水中传播时,遇到水中悬浮的颗粒,发生光向前各方向散射,造成光在传播方向的衰减,这对成像距离增加了困难,后向散射是指光在水中传播时,遇到水中悬浮颗粒,发生光向后各方向散射,造成图像的对比度下降,这对水下光学成像危害极大,使影像衬度成为水下光学成像严重的问题。随着成像距离的增大,画面反差降低,影像的细节模糊,影响成像质量,使摄取图像变得困难。

### 2.2 水对光的选择性吸收

这也就是说,水对光的吸收在不同的光谱区域是不同的,水对光谱中的紫外和红外部分表现出强烈的吸收,纯净的水和清的大洋水在光谱的蓝—绿区域透射比最大,但即使在这个蓝—绿窗口,水的吸收也足以使光的强度每米衰减约百分之四。

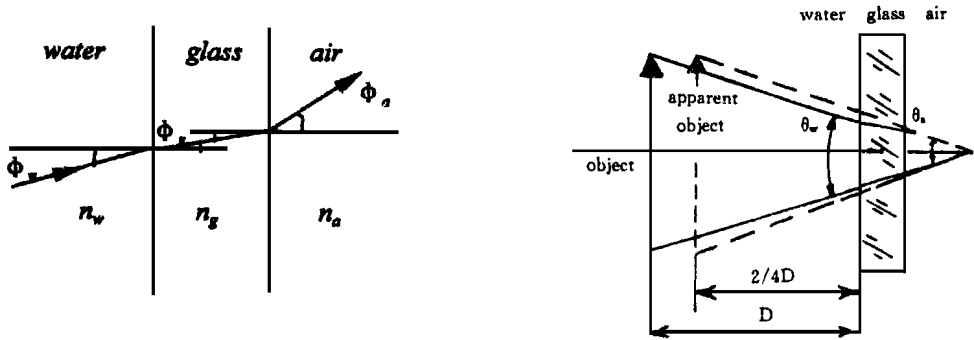
### 2.3 水具有一定的不同于空气的折射率( $n_w = 1.339$ )

由于水具有一定的不同于空气的折射率( $n_w = 1.339$ ),因此,当光线从水介质射向空气(或其它介质)时会发生折射现象。水下成像时,被摄物体是处于水介质的物空间中,而成像系统处于密封壳体內的空气介质中,水下目标的成像光线在经过—玻璃壳窗—空气的界面时,会产生折射,从而给水下光学成像系统带来聚焦误差、视角误差、畸变和色差等不利因素(如图 1 所示):

(1) 聚焦误差: 绝大多数的水下面成像系统的外壳都有一个简单而且可靠的玻璃和光学塑料制成的平行平面壳窗,因为它具有结构简单和密封可靠的优点。光经过水—玻璃壳窗—空气的交界面时传播服从折射定律,其简单的关系由下式表示:

$$n_w \sin \Phi_w = n_g \sin \Phi_g = n_a \sin \Phi_a$$

如果入射角小,可以用角度(弧度表示)近似代替角的正弦,则方程可以简化为:  $\Phi_w = 1.339 \Phi_a$  (当  $\Phi_w \ll 1$ )。因此平行平面壳窗将产生放大作用,如图 1 中所示,壳窗折射的结果是使水下成像的视场约减小到原来的三分之一。这就是说,由于壳窗的放大特性,使得镜头的视场减小。假设成像系统在陆地上具有 130 的视场,结果在水下的视场只有 97 度,而水下应用场合几乎总是需要最大的视场,因此镜头视场的减小是相当不利的。



(a) The refraction of the light when it goes through the interface of water-glass-air (b) The object is looked nearer when the light is being refracted by the glass plane

Fig. 1 The refraction of the light going through the interface of water-glass-air

在水下, 镜头的物距改变, 从原来的物距  $l$  变为  $l_1$ ,  $l_1 = l/n_w + d$ , 一般  $l \gg d$ ,  $l_1 = l/n_w = l/1.339 = 0.751$ , 式中  $d$  为玻璃平板厚度。可以得到, 在水中物距缩短 25%, 仅为原来物距的 75%。光经过水密封外壳平面壳窗折射时, 使物体看起来变近了一些, 平面壳窗的放大作用有时被称为平面屈光度效应, 也就是说平面壳窗增加了水下光学成像镜头的有效焦距, 确切的说是平面壳窗在水下使镜头的前焦距增加约 4/3 倍, 而后焦距没有变化。如果应用普通的成像物镜, 而用平行平板玻璃密封防水, 那么由于光线在水、玻璃和空气界面的折射, 通过平面窗在水下观察一个物体, 折射将会引起聚焦误差、视角误差、畸变和色差;

(2) 视场误差: 使物镜在水下的视场角减小, 物、象空间的视场角不同, 即壳窗的折射的结果使成像物镜的视场角大约缩小 25% ( $\text{tg}(\omega/2) = n \times \text{tg}(\omega/2)$ )。这对于水下需要大视场的应用场合是十分不利的;

(3) 畸变: 在陆地上, 平面壳窗对光学成像系统不产生影响, 而在水中, 它使透镜的放大率在整个视场范围内不均匀, 造成枕形失真(正畸变)。这虽然仅影响象的形状而不影响像的锐度, 但对于真实反映观测目标的形状, 尤其在测量应用时, 对畸变进行校正是很重要的。平面壳窗使透镜放大率在整个视场范围内不均匀, 通过平面壳窗成像造成枕形失真(正畸变)。它仅仅影响像的形状而不使像的锐度;

(4) 色差: 光学材料对不同波长的色光折射率不同, 波长愈短折射率愈高, 同一透镜对不同色光有不同的焦距, 这使得透镜成像时, 位于不同的光谱段的焦点不重合, 造成彩色弥散边缘将使像的锐度降低。

### 3 水下光学成像系统中光学系统的设计

#### 3.1 水下光学系统校正的基本思想

如前所述, 由于在水密外壳上使用了简单的平面壳窗, 不仅减小了水下成像系统的视场,

而且使图像发生了畸变和模糊,在许多应用场合中,明锐而无畸变的影像及宽的视场都很重要,因此改善水下光学系统就显得非常必要了。

作校正的水下光学系统的基本设计方法,与常用镜头设计的基本方法相。然而,水-空气界面必须包括在基本的元件内。设计者通过调节镜表面曲率,光学玻璃和色散,以及各透镜的厚度、间隔及直径来取得最佳设计。

对于水下成像光学系统所特有的、区别于陆上光学系统设计的考虑,主要有以下几点:

(1) 物方空间是水而不是空气,其折射率高于空气折射率 1.339 倍;

(2) 设计光学系统时,决定消单色像差谱线和消色差谱线与被摄景物、照明光源种类、物方介质和接收器的可见光谱响应特性有关系;为了能产生好的成像效果,必须仔细考虑以上因素。水的可见光谱响应特性不同于空气,因此在决定水下摄像光学系统像差谱线时与空气情形不同,通常是选 e 谱线作为消单色像差谱线,这是因为水的可见光谱响应特性敏段处于蓝光段,而空气中的摄像光学系统通常是选择 d 或 D 谱线作为消色谱线,CF 或 C<sub>g</sub> 谱线消色差;

(3) 水下光学系统工作时必须抗住一定静水压,这一点对水下系统很重要,对于深水系统尤为突出。因此在设计水下系统时,必须保证系统第一片透镜有足够的抗静水压的强度,以便在系统工作时足以抵抗工作环境的静水压而不致损坏;

(4) 由于水面和水下温差大,水下系统内部水份易冷凝形成水蒸气,影响成像质量,因此内部干燥是必要的。

### 3.2 水下光电成像系统的 optical 设计及像差校正

为避免采用平板玻璃防护窗与普通摄像物镜配合使用而引起的图像质量不良,可采用以下方法:

#### (1) 采用同心球面防护窗

这是一种简单和价廉的水下光学校正系统,它是一个内外表面同心的半球。这个半球面壳窗的曲率中心应位于摄像物镜的入射光瞳中心上,这样光垂直地投射并通过半球的球面时,不会产生折射,成像物镜的视场角仍保持与在空气中一样。

玻璃半球防水密封窗的结构比较简单,能够改善由于水介质折射引起的一些缺陷,但不能完全校正,视场边缘的清晰度虽然不能完全令人满意,但已有明显改善。它使物镜的像面弯曲增大,这可通过采用短焦距物镜来进行补偿。同时严格保证半球壳窗的球心与成像物镜入瞳的重合是该种方法能否有效的关键;

#### (2) 在镜头前加远焦型附加镜组

这种远焦型附加镜组基本上就是一个倒置的放大率为  $1/1.339$  的伽利略望远镜,其中前面是一块平凹透镜,用作防水窗,这块负透镜和其后的正透镜一起组成一个远焦系统,它可以完全校正畸变、色差以及其它像差,倒置的伽利略望远镜本身具有负畸变,能够用来抵消平面壳窗产生的正畸变。因为它是一个远焦系统,所以成像物镜的视场角在水中不发生变化,水下放大倍数变化的效应得到完善的校正,物镜的焦距和像的大小也都保持和空气中一样。但它很

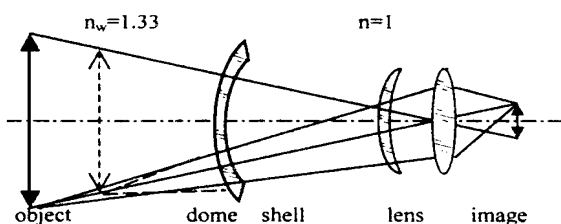


Fig 2 The underwater lens with dome shell

难满足水下在视场、大孔径的需要;

### (3) 水接触专用摄像物镜

为了彻底校正像差、畸变和 underwater 放大倍数变化的效应, 得到清晰的图像, 则应采用专门设计的水下像物镜, 它的前片透镜直接与水接触, 由于镜头和壳窗系统是专为水下使用设计的, 畸变和像差已降低到与高质量的地面镜头差不多的程度。

在设计水下专用光学系统的过程中,

必须记住, 水的折射率不是常数; 它随着温度、盐度和压力而稍有变化。镜头的光学设计, 要考虑到水深、含盐量等各种因素引起的水折射率变化对成像质量的影响; 在光学壳窗(即光学镜头的第一片透镜)的设计上除考虑它对整个物镜成像的影响, 还要考虑它的耐压性和耐腐蚀性。

### 3.3 UW TV1000 水下电视镜头光学设计

#### (1) 物镜的主要技术参数和指标的确定

一般成像物镜的主要技术参数为: 焦距  $f$ , 相对孔径  $D/f$ , 视场角  $2\omega$

选取合适的相对孔径  $D/f$

根据光学设计理论: 水下成像物镜的相对孔径主要是保证水下光电成像器件的靶面上有足够的照射度, 保证图像的质量。所以除保证目标有足够的照射度外, 还要有优良的像面照度  $E_i$ :

$$E_i = \frac{\pi b}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \frac{T}{n_w^2}$$

式中:  $B$  为在空气介质中未衰减的亮度,  $n_w$  为水的折射率,  $T$  为水路径衰减系数。在  $B$ 、 $n_w$ 、 $T$  一定情况下应与  $(D/f)$  成正比。所以水下镜头的相对孔径越大越好, 但这又为设计增加了难度, 经仔细均衡后, 本水下成像物镜的相对孔径定为  $1/2.3$ 。

确定焦距  $f$  和视场角  $2\omega$

在物镜设计中  $f$  与  $D/f$ 、 $2\omega$  之间存在相互制约的关系:  $2\eta = n_w \cdot f \cdot \text{tg}\omega$   $2\eta$  为像方线视场。在我们的水下成像系统中的成像器件选用  $1/2$  CCD, CCD 成像靶面尺寸为  $6.4\text{mm} \times 4.8\text{mm}$ , 对角尺寸为  $8\text{mm}$ 。因此我们可取  $2\eta$  为  $7.5\text{mm}$ 。视场角为  $2\omega$  主要取决于水的折射率  $n_w$ , 根据本水下成像系统的具体使用环境和要求, 参考国外先进水平, 我们取  $2\omega$  为  $40^\circ$ ; 则镜头焦距为:

$$f = \frac{\eta}{n_w \cdot \text{tg}\omega} = \frac{3.75}{1.34 \times \text{tg}20^\circ} \approx 7.69(\text{mm})$$

所以我们设计的水下成像光学系统具备: 像方焦距  $f = 7.69\text{mm}$ , 相对孔径  $D/f = 1/2.3$ , 视场角  $2\omega = 40^\circ$ ; 工作深度为下  $1000\text{m}$ :

性能优化

海水的折射率不是常数, 它随温度、盐度和压力而稍有变化, 水下镜头使用于何种条件, 刚应选择相应的折射率。此设计在取海水折射率  $n = 1.34316$  深海摄像镜头的光学设计, 不同于

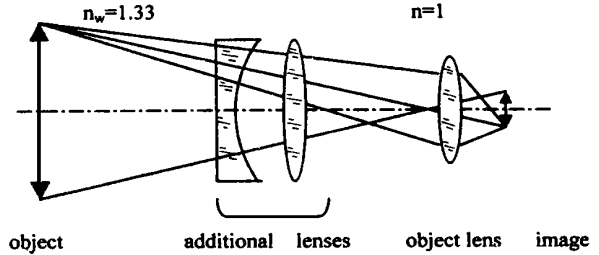
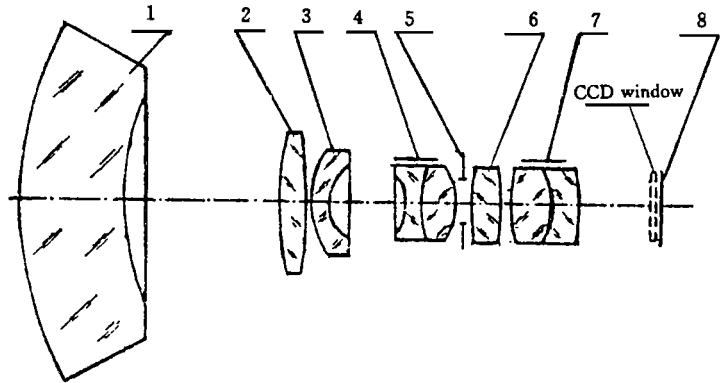


Fig 3 The underwater lens with additional lenses

近表层所用的镜头,因为此时要求更结实、更厚和壳窗,壳窗在大深度情况下的物理形变在细致的设计中也要考虑到。为了最有效地抗深水静压,系统第一块透镜选用高抗压强度的光学玻璃同心球壳,这是因为同心球壳较其它形状的结构具有更好的抗静压性能,我们选用光学石英玻璃作为壳窗材料。它具有优良的光谱特性,有较好的化学稳定性,耐酸性能好,比重小,膨胀系数小,抗压强度相当高,抗弯强度也不错,是制造光学零件的高级材料,只是价格比较昂贵。

由于水下环境的照度变化剧烈,为适应不同场合的使用,我们为镜头配置了自动光圈。它的光阑可根据照度变化迅速进行调整,以保证成像器件有较好的成像条件。此外,镜头还具有遥控调焦功能,使不同距离的目标都可得到高质量的图像。



(2) 设计结果

UW TV -1000 水下专用

摄像镜头的光学结构如图 4 所示。从设计的结果来看,本光学系统是个大孔径的短焦距物镜,经在微机上反复设计、像差平衡,物镜无论是轴上像差还是轴外像差都得到较完善的校正,像质无疑也是好的(见图 5、图 6)。

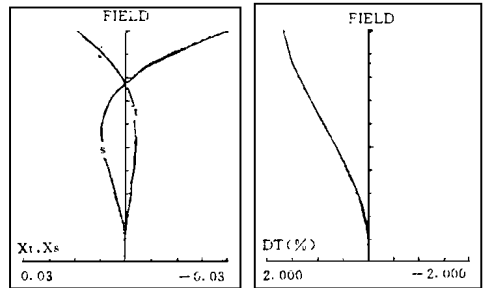
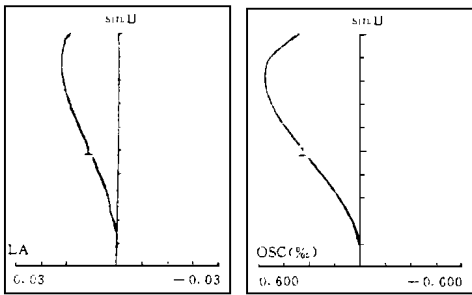


Fig 5 Curve about spherical aberration and sine aberration of the UW TV -1000 s lenses

Fig 6 Curve about the astigmatism and distortion of the UW TV -1000's lenses

### 4 结 论

由于水下环境的特殊性,使得水下光学成像系统的设计与陆上光学成像系统的设计有很大不同,必须考虑到水对光的吸收、散射以及水压、折射率变化等因素的影响。只有针对特定的使用环境设计出水下专用的光学成像系统才能保证系统的成像质量。我们所研制的 UW TV -1000 水下专用摄像镜头已成功地应用于多套水下摄像系统中,成像质量良好,并获得国家专

利。

### 参 考 文 献

- 1 默顿期 L E. 水中摄影学 北京: 科学出版社出版, 1979. 109~ 128
- 2 McNeil Gomer T. Metrical fundamentals of underwater lens system. Opt Eng. 1997, 16(2): 128~ 139
- 3 Thorndike E M. A wide-angle, underwater camera lens J Opt Soc Am. 1950, 40(12): 823~ 824
- 4 Chilton Frank. Imaging properties of light scattered by the sea J Opt Soc Am. 1950, 40(12): 823~ 824
- 5 Smith Raymond C. Optical properties of clear natural water. J Opt Soc Am. 1969, 59(8): 891~ 897
- 6 Wells W H. Diffusion of light in the sea
- 7 Clinton. Tale of two underwater lenses Proc SPIE. 1991, 1537: 203~ 214

## Optical Design of the Lens for Unerwater Imaging System

SUN Chuan-Dong, LI Chi, ZHANG Jian-Hua, CHEN Liang-Yi

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,

Academia of Sinica, Xi'an 710068)

### Abstract

The underwater imaging systems such as underwater camera, video camera, and rangegated system with laser used in water are important tools for ocean researching. But the water has very special property for the light in it, such as scattering and attenuating. The circumstance where underwater imaging systems are being used is also very different from in the air. So it is much more difficult to design the lenses used in water compared with on land. To work properly, the lenses of the underwater imaging systems must be designed specially. This paper is mainly about the design of the lenses of the underwater imaging systems. All the important points for designing the lenses of underwater imaging system are mentioned, and an example is given in the last of the paper.

**Key words:** Imaging underwater ocean optics, Underwater photography, Underwater lens

**孙传东** 男, 1966年9月出生, 1988年7月毕业于武汉华中理工大学光学工程系, 1991年7月于中国科学院西安光机所获得光学仪器硕士学位, 目前在西安光机所攻读博士学位。所从事的工作和研究方向为光电成像技术和水下光学。