

文章编号:1002-2082(2007)04-0416-05

# 水下变焦镜头的设计

翟学锋<sup>1,2</sup>, 董晓娜<sup>1</sup>, 王国富<sup>1</sup>, 陈良益<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**通过对光在水中传播特性的分析,讨论水下摄影中需要特殊考虑的关键因素,如光能衰减、镜头视场损失和内腔防水等,分析普通相机加隔水窗后在水中拍摄时像质变差的规律。为了适应深水探测,获得清晰成像质量,基于光焦度分配公式,提出了水下变焦镜头设计思想。用实例说明水下镜头的设计方法,设计的镜头相对孔径为F/1.6。设计结果表明:该镜头克服了普通镜头水下使用像质变差和最大视场渐晕等缺点。

**关键词:**水下摄影;变焦镜头;光学设计;像质;渐晕

中图分类号: TN942; TB81

文献标志码: A

## Design of underwater zoom lens

ZHAI Xue-feng<sup>1,2</sup>, DONG Xiao-na<sup>1</sup>, WANG Guo-fu<sup>1</sup>, CHEN Liang-yi<sup>1</sup>

(1. Xi'an Institute Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Based on the analysis for propagation characteristics of the light traveling in water, several essential factors in underwater photography, such as energy attenuation, field loss and water proof, are discussed. The regularity of image quality degradation due to defocus was analyzed when ordinary cameras installed with water proof windows were used under water. To achieve high quality images in deep water exploration, the design concept of the underwater zoom lens is proposed based on the focal power division formula, and an example is given for further explanation of the design consideration. The relative aperture of the zoom lens is F/1.6 in this design. The image quality of the zoom lens is improved, and the maximum FOV vignette is avoided.

**Key words:** underwater photography; zoom lens; optical design; image quality; FOV vignette

## 引言

空气介质中使用的普通照相机有时会被外加隔水视窗和防水罩沉入水下进行摄影或者科学的研究。由于水具有一定的折射率,镜头的视场会变小,并且由于离焦现象使得形成的像会变模糊;虽然这种模糊的像有时可以接受,但是相比像质在空气中那种高清晰度来说还是有一定的差距。光线在水介质中传播时不仅会发生折射和散射等,

而且水的折射率、色散率等受到水温、压力和水中含盐量的影响,因此,他们都是影响水下成像的重要因素。对于特殊需求,研究和设计专用的水下镜头是很有必要的。

## 1 水的传光特性

水是人类赖以生存的最基本的无机物质,很早人类就研究了水的各种物理和化学性质。光在水中

传播与其在空气中传播的特性具有较大的不同, 主要表现在:

1) 光能衰减较大。拿普通手电筒来说, 其光亮度在水中传播1 m时变为原来的10%, 2 m时为原来的1%, 3 m时为原来的0.1%等。导致光能损失的因素有2个: 一是水对光的强烈吸收作用。研究表明, 水几乎对所有波长的可见光都有不同程度的吸收, 吸收长波光的能力更强, 水下光传播的窄波段中心大约为532 nm; 二是由于水分子和水中悬浮微粒对光有很强的散射作用。

2) 视场损失。光线从光疏介质射向光密介质, 在临界角时发生全反射, 根据 Snell's 定律可计算出视场, 发现它会变小。

图1是一个玻璃平板隔水镜头的结构示意图。光线从上至下依次为穿过水、玻璃、空气, 到达镜头(第一面)。

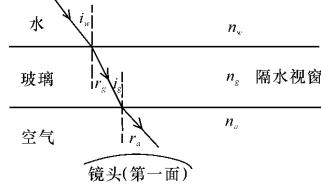


图1 光线从水中通过平板视窗射入空气

Fig. 1 Light from water travelling through plane porthole into air

头。图1中:  $n_w, n_g, n_a$  分别表示光在水、玻璃、空气中的折射率;  $i_w, r_g, i_g, r_a$  分别表示光从水入射到玻璃的入射角、水到玻璃的折射角, 玻璃到空气的入射角, 玻璃出射到空气的折射角。根据 Snell's 定律, 有:

$$\frac{n_g}{n_w} = \frac{\sin i_w}{\sin r_g}, \quad \frac{n_a}{n_g} = \frac{\sin i_g}{\sin r_a}$$

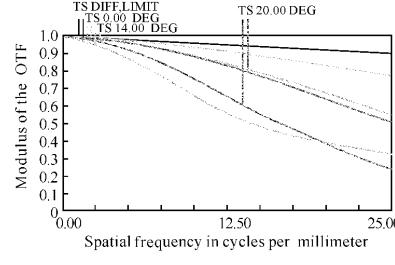
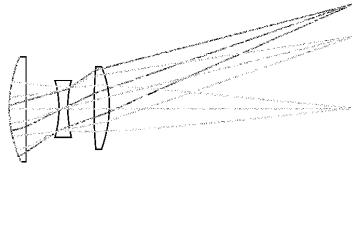


图3 柯克物镜及其像质 MTF

Fig. 3 Cooke triplet lens and its image quality

如果该镜头在水中使用, 并加防水玻璃, 则成像示意图和成像质量如图4所示。

将上式相乘, 得到:

$$\frac{n_a n_g}{n_g n_w} = \frac{\sin i_g \sin i_w}{\sin r_a \sin r_g}$$

由于  $i_g = r_g$ ,  $n_a = 1$ , 因此  $\frac{n_a n_g}{n_g n_w} = \frac{\sin i_g \sin i_w}{\sin r_a \sin r_g}$ , 从而得出  $n_w = \frac{\sin r_a}{\sin i_w}$ 。仅当  $r_a, i_w$  较小时,  $n_w, i_w = r_a$

从上面导出结果可以看出: 由于  $n_w > 1$ , 所以  $i_w < r_a$ 。根据  $n_w = \frac{\sin r_a}{\sin i_w}$ ,  $n_w = 1.34$ ,  $r_a = 90^\circ$ , 计算得到  $i_w = 47.5^\circ$ 。这表明视场有所损失, 在物方水中  $47.5^\circ$  以外的景物经过光学系统后最终不能到达像方; 视场损失与防水材料厚度等无关, 这也说明成像透镜设计得无论多么简单或者复杂, 均不能增大视场。视场范围示意图如图2所示。

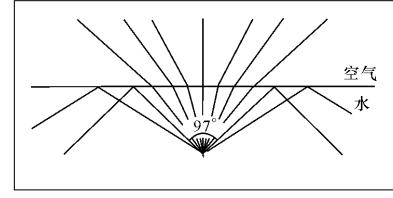


图2 空气、水界面的视场范围

Fig. 2 The range of FOV at interface between water and air

## 2 普通镜头水中使用时的像质分析

为了分析镜头在水中使用时的像质变化情况, 本文以三片式柯克定焦镜头为例予以说明。该镜头的基本参数为: 焦距52 mm, 视场  $2w=40^\circ$ , 在空气中使用时, 其成像示意图和像质 MTF 如图3所示。

方向MTF几乎都为零, 该视场不能被分辨。由于水折射率大于空气, 如果不使用隔水窗而使成像物镜的第一面直接接触水, 则焦面会大大向后移动; 如

从图4中可以看出, 在边缘视场, 子午和弧矢

果使用隔水窗并使其与透镜第一面之间夹有一定厚度的空气，则使得后成像面处在原设计位置前后数 mm 内移动，在这个范围内，存在一个最佳成像位置。对于定焦镜头，调节像面也很难提高像质。从

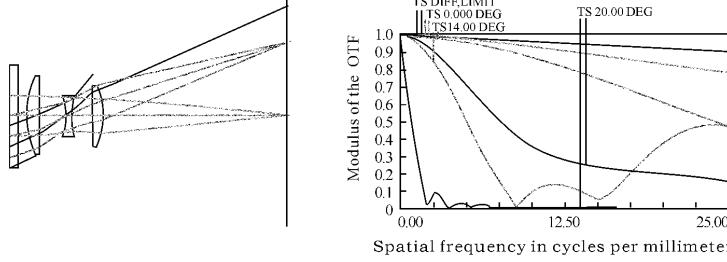


图 4 加平板隔水视窗后的柯克物镜系统及其像质 MTF

Fig. 4 The Cooke lens system with the addition of water-isolated porthole and its degrading image quality

### 3 水中变焦镜头的设计指标

为了提高镜头水下摄影的成像质量，设计专用的水下镜头是必要的。为了适应不同的摄影物距和水下视场，本文设计一种水下变焦镜头，并参照现有商业 CCD 的像面尺寸，选取了其中一种像面画幅尺寸为  $14.1 \text{ mm} \times 11.3 \text{ mm}$  的 CCD 进行镜头设计，镜头设计指标见表 1。

表 1 镜头设计指标

Table 1 Specifications of underwater lens

Items	Requirements
Focal length	约 20 mm
Mechanical constraints	Optical: total length less than 120 mm
Image sensor	$14.1 \text{ mm} \times 11.3 \text{ mm}$ , $1280 \times 1024$ pixel array, pixels span $10.8 \mu\text{m}$ for average
F-number	1.6
Field of view	$\pm 15^\circ$ to edges
Focus	Micro ratio variable, object 300 mm to infinity
Distortion	Less than $\pm 2\%$
Image quality	MTF > 0.3 at 30 lp for central field; MTF > 0.25 at 30 lp for edge field
Spectral bandwidths	Visible, $0.532 \mu\text{m}$ for central

为适应水下弱光拍摄，相对孔径应大些，即透镜的速度足够快，这里取 F/1.6。我们选用的 CCD 像元尺寸平均为  $10.8 \mu\text{m}$ ，一般成像系统要求镜头的分辨率在 CCD  $2 \sim 4$  个像元能分辨 1 个线对，由于本文的 F 数较小，因此考虑取 4 个像元，所以镜头的分辨率在  $1000 / (10.8 \times 4) = 23.2 \text{ lp/mm}$  时

上图还可以看出，边缘视场有挡光现象，造成了渐晕。在深水弱光时，边缘照度降低，这将不利于摄影；当渐晕达到一定程度的时候，有些视场将不能成像。

### 4 设计方法

设计水下镜头系统要考虑：光谱透过率、色度变化、防水渗漏、防强水压、视场损失和水色散等。本文对物方介质为水以及防水设计展开讨论。

典型的隔水窗有 2 种形式：平板型和同心圆顶型。这两种形状各有其特点，从光学设计角度来说，后者比前者容易控制像差。由于深水下可见光被广泛吸收，光的水下窗口大约在  $0.532 \mu\text{m}$ 。可以预测，进入镜头成像的实际上是窄谱段光，色差会降低，因此可以通过选用平板型隔水窗代替同心圆顶型隔水窗。

设计平板隔水玻璃，材料选取便宜的 K9 玻璃，K9 玻璃的折射率为 1.5163，阿贝数为 64.12。平板玻璃对像质影响不大，考虑水压时，其厚度既不能太薄，太薄承受不了强水压和意外硬物碰撞；亦不能太厚，厚了光会被玻璃更多吸收，不利于深水弱光摄影。

考虑到系统的光学总长，试验采用正光焦度变焦组和负光焦度固定组的系统，其初始结构如图 5 所示。

理想光学镜头总长预设为 80 mm（由于实际玻璃有一定厚度，所以初始设计时，理想透镜总长取小一些），固定组负透镜到像面距离为 17 mm，变焦组距离固定组最近为 5 mm，最远 48 mm（ $43 + 5 = 48$ ，也可为其他长度），在此范围内连续变焦。由于

隔水窗为平板, 光焦度为零, 对整个光学系统的光焦度无贡献, 故不予考虑。根据设计要求, 镜头总焦距约为20 mm, 结构如图6所示。设定在2个极限位置, 系统总焦距在18 mm~23 mm内连续变化, 则2组镜头的光焦度分配可以根据下列方程求出。

变焦组和固定组的光焦度分配公式为

$$\varphi_1 + \varphi_2 - \left(\frac{t}{n}\right)\varphi_1\varphi_2 = \varphi, n=1.0$$

代入数值得到:

$$\varphi_1 + \varphi_2 - \left(\frac{5}{n}\right)\varphi_1\varphi_2 = 1/23$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 - \left(\frac{48}{n}\right)\varphi_1\varphi_2 = 1/18$$

式中  $t$  代表理想透镜的间隔 ( $t=5.48$  mm), 其选择依据是根据总长结构并考虑镜片厚度。经计算, 变焦组和固定组的光焦度分别为  $\varphi_1=0.489$  mm,  $\varphi_2=0.0058595$  mm。变焦组焦距为20 mm, 口径约20 mm, 局部F数为1.0。因此选用双高斯(或其改进型)结构作为原始雏形时, 首先需进行单独的消色差设计。当固定组焦距取为-170 mm, 口径约20 mm, 局部F数为8.5时, 选用双分离双片结构; 单独设计结构后与前变焦组组合, 然后进行消色差后续设计。

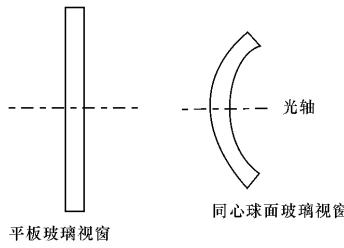


图5 2种典型隔水视窗

Fig. 5 Two types of typical water-isolated porthole

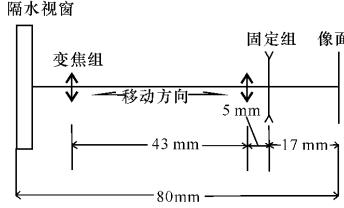


图6 镜头理论尺寸分布图

Fig. 6 Theoretical distribution of optical elements

优化, 其优化光路如图7所示。

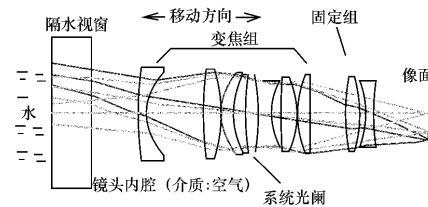


图7 水下镜头

Fig. 7 Layout of the underwater lens

对笔者设计的光学系统, 从下面几个方面来进行评价。

### 1) 外形尺寸

该系统的光学总长(从隔水窗到像面)为110 mm, 镜片外径最大为φ32 mm, 最小为φ22 mm, 结构似筒状。入瞳直径为φ16.5 mm, 物方F/1.6, 像方F/1.4, 焦距变化为18.3 mm~23.5 mm。作为变焦范围小的镜头, 此结构似乎复杂, 但是由于孔径大, 因此还算合理。

### 2) 传递函数

笔者设计的光学系统的空间频率MTF为25 lp/mm, 中心MTF为0.3, 边缘MTF为0.25; 经公差分析, 镜头采用中等精度可满足要求, 如图8所示。

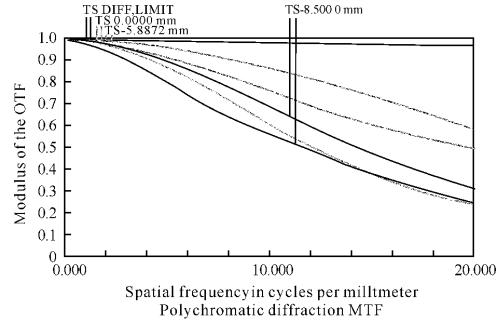


图8 像质评价, MTF 标准

Fig. 8 MTF criteria for image quality evaluation

### 3) 能量包络图

本文所选用的CCD器件像元尺寸为10.8 μm, 根据光学设计理论, 要求每一线对能量包络达到80%。据图9可知, 本文设计的结果为20 μm时能量包络达到80%, 大约就是2个像元。在设计中曾增大F数到2.8, 可以达到10.8 μm, 能量包络达到80%的要求。但是由于此镜头主要用于水下弱光摄影, 要求大口径, 相对孔径小, 使用4个像元分辨率

## 5 设计结果

采用ZEMAX光学设计软件对光学系统进行

是允许的。

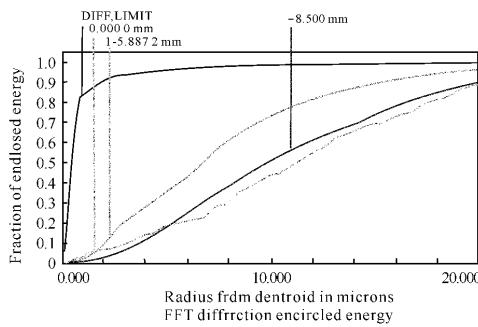


图9 像质评价的能量包络标准

Fig. 9 Energy enclosed criteria for image quality evaluation

#### 4) 畸变

笔者设计的镜头最大视场畸变为 $-0.60\%$ ,约0.15 mm,如图10所示。对于水下成像,这一畸变合理。

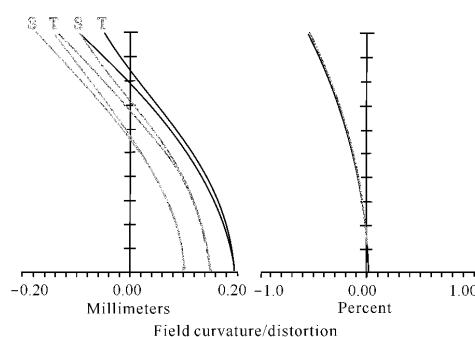


图10 水下镜头的畸变

Fig 10 Distortion of the underwater lens

## 6 结论

文中通过光焦度分配公式建立了变焦镜头的初始结构,由计算机模拟的方法和结果可看出,该方法合理可靠。通过对光在水中传播特性的分析,以及对普通相机在水中使用时像质变化的规律的讨论,提出了水下变焦距镜头设计的思想,并用实例说明该镜头的设计思路和方法,解决了普通镜头用于水下时存在像质不好和最大视场渐晕的缺点。本文的设计参考了现有商业CCD的像面尺寸,采用半对角线8.5 mm的大面阵宽画幅CCD,旨在提高物方视场分辨率。该镜头对应的物方视场 $2\omega$ 为

$30^\circ$ ,物距25 mm至无穷远。通过变焦,可以近距离拍摄水中动物的活动情况,也可在照明条件下进行深水探测。本文的设计在像质方面还需要进一步提高。另外,在深水弱光情况下需要大口径摄像镜头,本文的设计还可以进行进一步优化。

## 参考文献:

- [1] 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.  
YU Dao-yin, TAN Heng-ying. Engineering optics [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1994. (in Chinese)
- [2] GEARY J M. Introduction to lens design with practical ZEMAX examples [M]. New York: Published by Willmann-Bell, Inc., 2003.
- [3] BORN M. Principles of optics [M]. 7th ed. UK: Cambridge University Press, 1999.
- [4] 李士贤. 光学镜头设计手册[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.  
LI Shi-xian. Optical lens design manual [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology University Press, 1990. (in Chinese)
- [5] Lens VIEW™ Version Inc. Optical data solutions: US, 5,257,137[P]. 2001-03-01.
- [6] GLOVE T, HARWOOD G E, LYTHGOE J N. A manual of underwater photography [M]. London: Academic Press, 1977.
- [7] EVANS C, DOSHI R. Underwater imaging, photography and visibility[J]. SPIE, 1991, 1537: 203-209.
- [8] 程珂,周泗忠,张恒金. 短焦距变焦物镜设计[J]. 光子学报, 2005, 12(7): 1825-1828.  
CHENG Ke, ZHOU Si-zhong, ZHANG Heng-jin. Design of a short focal-length zoom system [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 12 (7): 1825-1828. (in Chinese)
- [9] 周华鹏,陈文建,唐绍凡. 相对孔径为 $1:1$ 镜头的光学系统设计[J]. 应用光学, 2007, 28(1): 55-57.  
ZHOU Hua-peng, CHEN Wen-jian, TANG Shao-fan. Optical system design for lens with relative aperture  $1:1$  [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(1): 55-57. (in Chinese)
- [10] 梅丹阳,焦明印. 变焦距投影光学系统中的远心光路设计[J]. 应用光学, 2006, 27(4): 264-267.  
MEI Dan-yang, JIAO Ming-yin. Design of telecentric beam path for zoom projection [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27 (4): 264-267. (in Chinese)