

水下气泡高速摄影光学系统设计

谢正茂^{1,2} 高立民¹ 何俊华¹

(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 100049)

摘要 为了研究水下气泡的粒径、速度和浓度特性, 提出基于高速电荷耦合器件(CCD)的气泡照明和三维摄影光学系统. 采用 532 nm 半导体激光器, 基于伽利略结构用三个柱面镜设计了厚度 1.5 mm, 宽度 44 mm 的片光源. 设计物像距 530 mm, 放大率为 0.4, 1, 2.5 倍(\times)的摄影光学系统, 每组均由共用前组镜和会聚镜组成, 中间以平行光中继. 通过同步移动片光源和共用前组镜实现 60 mm \times 40 mm 视场内二维高速成像和纵向 5 mm 扫描, 具有结构简单、性能可靠的特点. 对设计结果进行评价, 0.4, 1, 2.5 \times 成像光学系统在 0.707 ω , 50 lp/mm 时调制传递函数值分别为 0.58, 0.55 和 0.38, 能够分辨粒径范围为 10~450 μ m 的气泡.

关键词 海洋光学; 高速摄影术; 光学设计; 水下气泡; 片光源

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0422002

Design of High-Speed Photography Optical System for Air Bubbles in Water

Xie Zhengmao^{1,2} Gao Limin¹ He Junhua¹

(¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract For the purpose of study on diameter, velocity and concentration of air bubbles in water, an optical system of illumination and 3D photography based on high-speed imaging charge-coupled device is proposed. Based on Galileo structure with three cylindrical lens and semiconductor laser of wavelength 532 nm, a light sheet with thickness of 1.5 mm and width of 44 mm is designed. Three groups of imaging lens with magnification of 0.4 \times , 1 \times and 2.5 \times , having a uniform conjugate distance of 530 mm are designed. Each group relayed by collimated light includes frontal lens and focusing lens. A simple and reliable structure of 2D high-speed photography for the area of 60 mm \times 40 mm and 1D scan with length of 5 mm along the optical axis, is achieved by moving light sheet and frontal lens synchronously. The imaging quality of the optical system with magnification of 0.4 \times , 1 \times and 2.5 \times is evaluated, it shows that the modulation transfer function of 0.707 ω has reached 0.58, 0.55 and 0.38 respectively at the spatial frequency of 50 lp/mm, as well as the diameter resolution of air bubbles in water has been from 10 μ m to 450 μ m.

Key words oceanic optics; high-speed photography; optical design; air bubbles in water; light sheet

OCIS codes 220.2945; 220.3620; 010.4450

1 引言

水体在流动过程由于受到外力扰动而卷入空气会形成大量的微气泡. 研究表明, 水下气泡具有独

特的光学、声学和流体力学等特性, 通过对其特性的研究能够帮助人们理解流动现象的物理本质, 为相关工程应用提供理论参考^[1,2]. 自 20 世纪 50 年代

收稿日期: 2011-08-30; 收到修改稿日期: 2011-11-24

基金项目: 瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金(SKLST201006)资助课题.

作者简介: 谢正茂(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事光学设计和水下光电成像等方面的研究.

E-mail: minrycn@163.com

导师简介: 高立民(1965—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电技术和高功率激光参数诊断等方面的研究.

E-mail: glm@opt.ac.cn

以来,随着世界各国在海洋资源开发、大型水利工程建设、航运工程和 水下武器装备等领域的日益发展,人们已采用各种先进的光学技术对水下气泡的光学特性进行了大量的理论和实验研究^[3,4],相继发展了各种水下气泡测量技术,在流体测速、微气泡减阻、水利工程微气泡减蚀和尾流制导等领域具有巨大的应用价值。由于水流气泡数量多,体积小,运动速度快,在上升过程中气泡之间又会发生碰撞、变形和融合等情况,因此对其粒径大小、运动速度和浓度等参数的测量难度极大。近年来,得益于高速摄影、计算机、图像处理 and 互相关算法等技术的综合运用,直观、可靠的光学成像法^[5]被广泛应用于气泡各参数的测量。然而,普通二维成像技术通常只能获取气泡幕的二维图像,无法得到气泡的空间粒径分布和运动速度,其应用受到较大限制。全息照相法^[6]可以将气泡的全息图像瞬时存储在一张底片中,通过分层再现可提取流场的三维信息。但是,该方法需要极为复杂的光路系统,技术难度大,成本高昂,而且对工作环境的要求极为苛刻,不利于广泛应用。针对以上问题,本文提出一种水下气泡三维高速摄影光学系统,该系统由高速电荷耦合器件(CCD)、片光源、可切换式成像光学系统等组成,能实现气泡的切片式照明,并对照明区域同时进行二维高速成像和轴向一维扫描,在极短的时间内获得一定三维空间内的气泡分布场信息,为计算气泡的运动速度和粒径分布等参数提供重要的技术手段。

2 设计分析

2.1 水下气泡成像特点

相对于普通成像光学系统,水下光学系统最大的不同点在于其物方和像方的介质不一致。这主要带来两个问题:1)防水密封;2)对成像质量及光学性能参数的影响。对于一个非水下专用成像系统,如果对其进行简单防水密封然后应用于水下成像会遇到很多问题,如出现像质恶化、视场缩小等现象。为了降低由于水介质带来的影响,需要在光学系统设计之初就将水介质的影响考虑在内。即便如此,由于水介质对光的强烈吸收和散射使得其成像质量要大打折扣,成为阻碍水下成像光学系统发展的主要瓶颈^[7]。根据相关研究^[8]表明光能在水中按指数规律迅速衰减,水下不同深度的光通量为

$$I = I_0 \exp\{-k[\lambda(z)]\}, \quad (1)$$

式中 I 为水下深度为 z 处的光通量, I_0 为水面的通量, $k(\lambda)$ 为水衰减系数,它随波长 λ 的变化而变化。

一般比较纯净海水只对“蓝绿窗口”(0.48~0.57 μm)具有相对较高的透射率,因此水下光学系统的光谱适应范围一般也比较窄。除了水对光的吸收特性之外,水对光的另外一个重要特性是散射^[8]。当光线照射到气泡表面后产生散射光,其中一部分可通过成像镜头在 CCD 上成像。传统的水下照明方式通常都是大范围、大角度照明导致气泡淹没在强烈的背景散射光中无法被分辨。若采用激光片光源则只有薄片区域被照明,能量不仅更为集中,而且背景散射几乎为零,大大提高了气泡的分辨率。在水下气泡高速摄影中,高速 CCD 的感光度是一个关键指标,其定义为

$$S = \frac{1}{E_m t}, \quad (2)$$

式中 E_m 为 CCD 成像所需的最低照度值, t 为曝光时间。通常高速 CCD 的感光度都非常高,故允许的曝光时间 t 和最低照度值 E_m 都很小。实践表明^[9],通过利用柱面镜将大功率激光光源在单方向上进行压缩,提高接收光学系统的相对孔径,合理设置曝光时间就可以满足水下高速摄影的光能量要求。

2.2 系统原理和相关参数

水下气泡高速摄影光学系统主要由片光源和成像光学系统组成。如图 1 所示,片光源包含激光器、柱面扩束镜和反光棱镜。激光经柱面镜准直、扩束后形成具有一定宽度和厚度的片光,经由反光棱镜入射到气泡区域,其入射方向与成像光学系统的光轴垂直。成像光学系统则由共用前组镜和会聚镜共同构成,中间以平行光中继。共用前组镜将物面气泡准直成平行光,经会聚镜成像于 CCD 靶面,其垂轴放大率为会聚镜的焦距与共用前组镜焦距之比,即

$$\beta = -\frac{f_2}{f_1}, \quad (3)$$

如图 2 所示。保持共用前组镜的焦距 f_1 不变,选取不同 f_2 即可实现不同放大率的成像。为了得到三维空间分布信息,须沿光轴方向进行扫描并确保片光源与 CCD 像面始终共轭。

假设物方和像方的介质一样,前组镜头移动时对光学系统的成像质量影响几乎可以忽略不计。但是在本系统中,物方介质为水,当片光源与共用前组以同速移动时由于物方光程的变化导致其出射平行光的平行度产生变化,在成像面不动的前提下必然导致成像质量恶化。如图 3 所示,根据光程等效原理,当前组透镜移动 Δd 时,为了保证成像质量物面

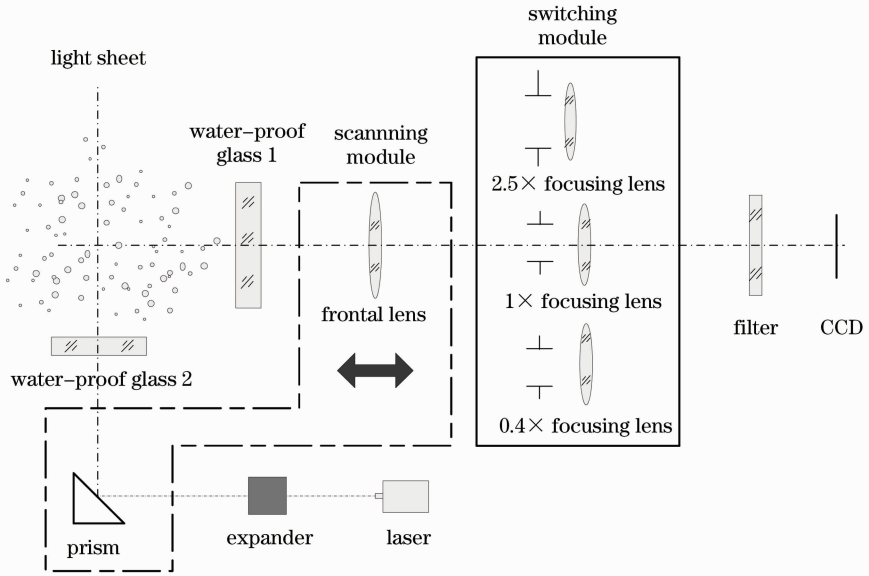


图 1 系统原理图

Fig. 1 Schematic of principle of the system

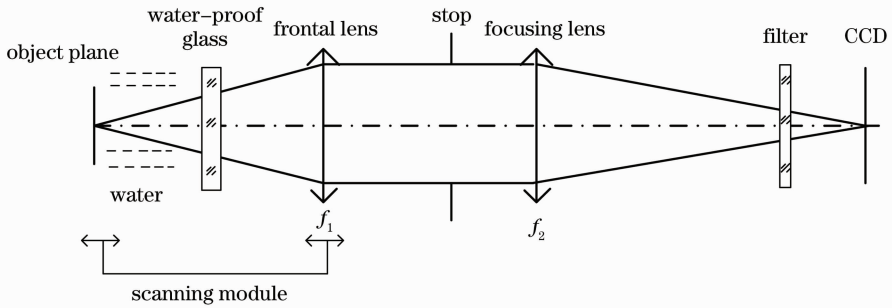


图 2 成像原理图

Fig. 2 Schematic of imaging principle

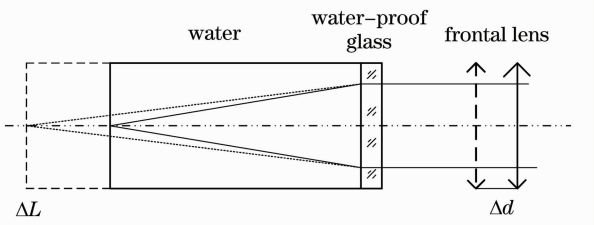


图 3 水介质对扫描成像的影响

Fig. 3 Effect of water on scanning imaging

需要移动

$$\Delta L = n\Delta d, \quad (4)$$

才能保证清晰成像,其中 n 为海水折射率,其取值约为 1.34。换言之,当要求物方的扫描深度 ΔL 时,共用前组透镜只需要移动 Δd 即可。理想物面的运动速度是前组透镜运动速度的 1.34 倍,如果片光源太薄,就有可能出现实际物面无法被照明的情况,这时需要将片光源的厚度适当加厚。系统工作时,在某

一时刻 t ,高速 CCD 成像开始对照明区域进行曝光成像,与此同时共用前组和片光源以同速 V 沿轴向扫描,由于高速 CCD 最高可达 3×10^5 frame 的拍摄速度,故在 $t + \Delta t$ 内可获得数量可观的气泡图像,通过采用相应的图像处理算法和数学计算可以得到该立体空间内的气泡分布信息^[10]。设成像系统的对气泡的分辨率为 δ ,CCD 像元 σ ,在 CCD 上测量精度为

$$\delta' = \beta\delta, \quad (5)$$

要保证该精度, δ 至少应该占两个 CCD 像元的大小^[11],即

$$\delta = \frac{2\sigma}{\beta}. \quad (6)$$

在给定气泡分辨率及 CCD 最小像元的前提下,据此可以计算出光学系统的最小放大率。根据瑞利判据,气泡分辨率为

$$\delta = \frac{0.61\lambda}{NA}, \quad (7)$$

式中 λ 为工作波长, NA 为数值孔径。为了提高分辨率必须尽可能地增大共用前组镜的数值孔径, 但如果数值孔径过大则不利于像差的校正, 故需仔细权衡。

3 设计实例

根据水下气泡三维高速摄影系统的实际应用需求, 本文进行了设计, 其主要设计参数如表 1 所示。

表 1 设计参数

Table 1 Parameters of design

Item	Specification
Field of view /mm	$\leq 64 \times 40$
Length of scan /mm	5
Resolution / μm	10~450
Conjugate distance	530
Wavelength /nm	532 ± 5
Size of CCD /mm ²	25.6×16
Cell size of CCD / μm	10
Thickness of light sheet /mm	1.5 ± 0.2
Divergence angle of laser /mrad	1.2
Spot size of laser /mm	1

3.1 片光源

利用柱面镜单向成像的特性将激光进行扩展从而形成具有一定宽度和厚度的片光源。如图 4 所示, CCD 靶面在 T 方向的高度为 16 mm, S 方向宽度为 25.6 mm。为了减小结构尺寸, 片光源的投射方向与 S 方向一致。当采用 0.4 倍镜头成像时, 要求片光源在 T 方向的最小尺寸: $L_{T\text{min}} \geq 16/0.4 = 40 \text{ mm}$, 此时 $L_S = 25.6/0.4 = 64 \text{ mm}$ 。根据以上分析确定片光源厚度 1.5 mm, 宽度大于 40 mm。532 nm 的半导体激光器具有体积小、重量轻、耗电少、寿命长

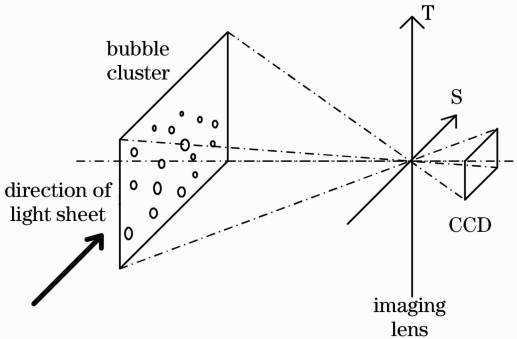


图 4 片光源与 CCD 共轭关系

Fig. 4 Conjugate relation between light sheet and CCD

和功率可调节等优点。在水下探测、成像领域已得到广泛应用。片光源光学系统采用伽利略结构, 前组为负焦距柱面镜, 后组由两个正负分离的单柱面镜构成。玻璃材料全部为 K9。如图 5 所示, 光学系统将激光在子午方向从 1 mm 扩束到 44 mm, 而在弧矢方向激光仍按正常模式传播。

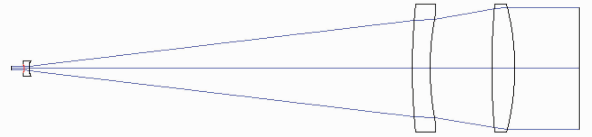


图 5 片光源光学系统

Fig. 5 Optical system of light sheet

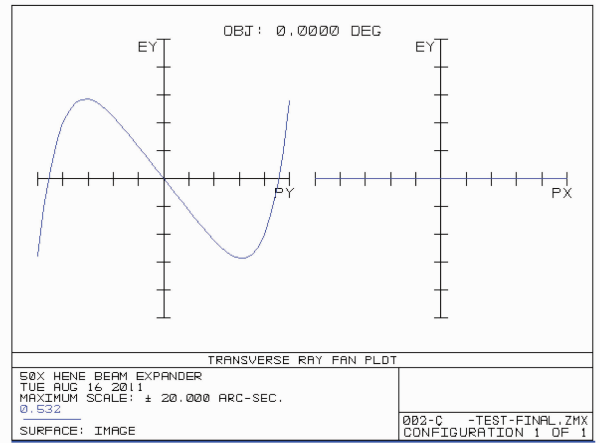


图 6 片光源横向像差曲线

Fig. 6 Transverse aberration plot of light sheet

因采用了柱面镜, 在考察光学系统像差时只需关注子午面^[11]。如图 6 所示, 光学系统出射平行光的发散角小于 $20''$, 对于照明光源而言是完全能够满足要求的。由于激光束在弧矢方向没有受到透镜的约束, 其传播规律可接近轴光线的传播规律进行分析, 片光源工作区的中心厚度

$$d' = d + 2L \tan \theta, \quad (8)$$

式中 $d=1 \text{ mm}$ 为激光器出光口处直径, $L=390 \text{ mm}$ 为激光出口至工作区中心的传播距离, 激光器发散角 $\theta=0.6 \text{ mrad}$, 代入(8)式计算得到激光经过传播后在工作区域中心处的光束厚度 $d' \approx 1.5 \text{ mm}$, 满足技术要求。

3.2 成像光学系统

根据要求, 成像系统的最高分辨率为 $10 \mu\text{m}$, 由 2.2 节讨论可知, $10 \mu\text{m}$ 的气泡经放大后至少要占两个像元, 由于 CCD 的最小像元正好为 $10 \mu\text{m}$, 故光学系统的放大率至少为 2 倍(\times), 为了提供设计余量将其设为 2.5 倍, 此时物方线视场为 $(25.6/2.5) \times$

$(16/2.5) = 10.24 \text{ mm} \times 6.4 \text{ mm}$, 还无法覆盖 $64 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的视场要求, 故还需要增加一个小放大率的光学系统。令其放大率为 0.4 倍, 则刚好可以达到 $64 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的要求。为了对 $10.24 \text{ mm} \times 6.4 \text{ mm} \sim 64 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 中间区域的气泡有一个较好的拍摄特增加 1 倍的成像光学系统。将成像光学系统按放大率分为 0.4, 1, 2.5 \times 三组可以兼顾最小分辨率和最大视场要求。

3.2.1 共用前组镜

共用前组镜由水介质(相当于一个折射率为 1.34 的平板玻璃)、密封玻璃和前组镜头共同构成, 其作用是对物面即片光源照明区域进行准直并以平行光出射, 该光学系统需要综合考虑水介质的影响

并单独校正像差, 以保证其出射光的准直精度。作为水下专用的光学系统, 设计时要考虑到水介质对光学系统的影响^[12]。其次, 不同倍率成像光学系统的视场是不一样的, 作为共用前组, 必须在不同视场, 不同相对孔径条件下都具有良好的像差控制。系统的工作波长为 532 nm, 处于“蓝绿窗口”内, 但常用的干涉滤光片的带宽为 $\pm 5 \text{ nm}$, 因此设计时应将光谱范围设定为 527~537 nm, 以 532 nm 消单色像差, 以 527 nm 和 537 nm 消色差, 以使光学系统获得较好的光谱适应性。最后, 共用前组镜的焦距选择受到物像距、放大率、结构尺寸和设计难度等因素的影响, 应当慎重考虑, 经过仔细权衡, 本系统中将前组的焦距确定为 220 mm。其具体参数如表 2 所示。

表 2 前组镜指标

Table 2 Parameters of frontal lens

Item	Parameters		
Magnification	0.4	1	2.5
Focal length of frontal lens /mm		220	
Focal length of focusing lens /mm	88	220	550
Field of view /mm	64 \times 40	25.6 \times 16	10.24 \times 6.4
Numerical aperture	0.022	0.045	0.082

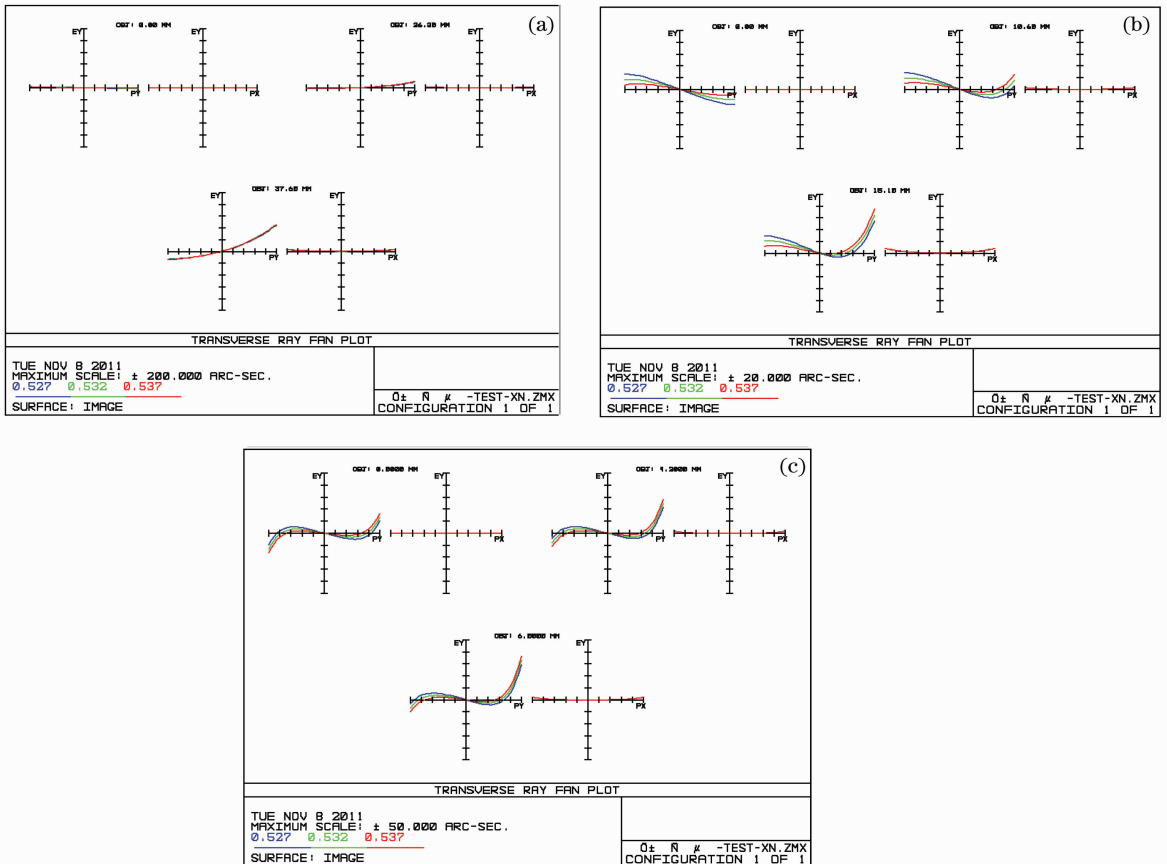


图 7 前组镜横向像差曲线。(a)2.5 \times ; (b)1 \times ; (c)0.4 \times

Fig. 7 Transverse aberration plot of frontal lens. (a)2.5 \times ; (b)1 \times ; (c)0.4 \times

共用前组镜采用三分离单透镜结构,玻璃材料均为常用材料,密封玻璃采用物理、化学性能好的JGS1石英玻璃。前组镜作为一个准直光学系统,在Zemax中可以直接计算其角度像差来评价平行光的平行性。图7中(a),(b),(c)分别为共用前组工作在0.4,1,2.5×时的横向像差曲线(彩图见网络电子版)。

3.2.2 2.5,1.0,0.4×成像系统

成像光学系统由密封玻璃、共用前组镜、会聚镜和滤光片共同组成,如图8所示,虚线框内按从上到下的顺序分别为2.5,1.0,0.4×的会聚镜。共用前组镜和会聚镜之间为平行光,为了保证其通用性须按不同视场进行单独消像差设计,尽管如此还是有剩余像差的存在,因此将通过会聚镜对其进行补偿。根据表2,会聚组的焦距分别为550,220,88 mm,而物像距均为530 mm,为了满足空间尺寸的要求,

0.4×会聚镜采用反望远结构,前组焦距为负后组焦距为正,其后截距远远大于其焦距。2.5×会聚镜则采用了望远结构,前组焦距为正后组焦距为负,后截距远小于焦距^[13]。通过合理选用初始结构实现了不同焦距光学系统的共像面成像。作为一个典型的CCD成像系统,可采用调制传递函数(MTF)曲线对其成像质量进行综合评价,如图9所示,图9(a),(b),(c)分别为0.4,1,2.5×的MTF曲线(彩图见网络电子版)。

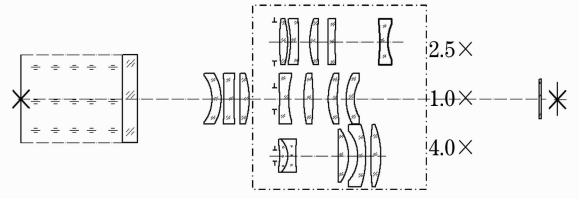


图8 成像光学系统

Fig. 8 Layout of imaging optical system

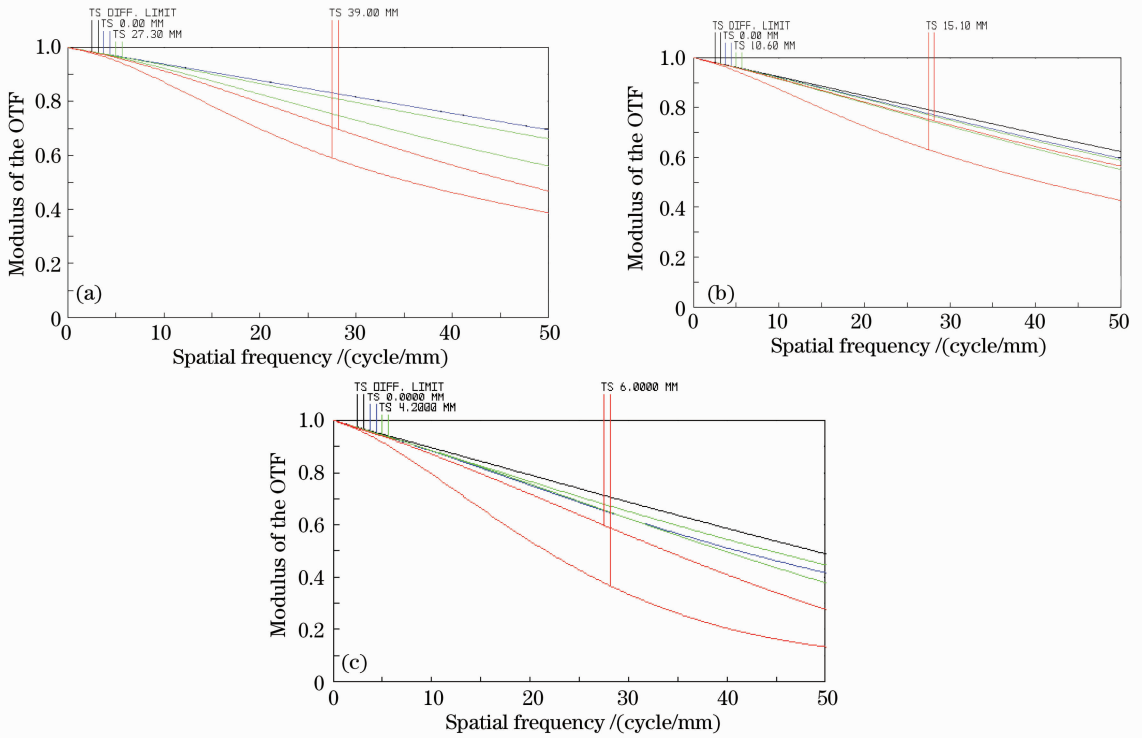


图9 MTF曲线

Fig. 9 Modulation transfer function curves

考察的视场为轴上点(0ω)和轴外视场(0.707ω)。CCD最小像元尺寸 $d=10\ \mu\text{m}$,故尼奎斯特频率

$$N = 1/(2d) = 1/(2 \times 10) = 50\ \text{lp/mm}. \quad (9)$$

在该空间频率下0.4,1.0,2.5×光学系统0.707ω的MTF分别为0.58,0.55,0.38,均高于0.3的设计阈值,且各视场的子午和弧矢方向成像质量比较均匀,当光学系统调焦时可以使各个视场的成像质

量都能同时得到改善。对于2.5×光学系统,其物方分辨率至少为 $10\ \mu\text{m}$,经放大后在像面为 $25\ \mu\text{m}$,此时对应空间频率为20 lp/mm,此时0.707ω的MTF值可达0.5以上,确保了物方 $10\ \mu\text{m}$ 的分辨率要求。另外,2.5,1.0,0.4×成像光学系统的畸变分别为0.7%、-0.074%和-3.8%,0.4×由于其视场大故畸变相对较大,作为系统误差可通过标定

并用相关图像处理技术予以消除。根据技术要求，光学系统在气泡区域的轴向扫描长度为 5 mm，根据(4)式共用前组镜只需要移动 3.73 mm 即可。据

此对光学系统的间隔参数进行调整得到扫描后的 MTF 曲线，从图 10(彩色见网络电子版)可知，扫描后成像质量变化细微，表明扫描方法是合理可行的。

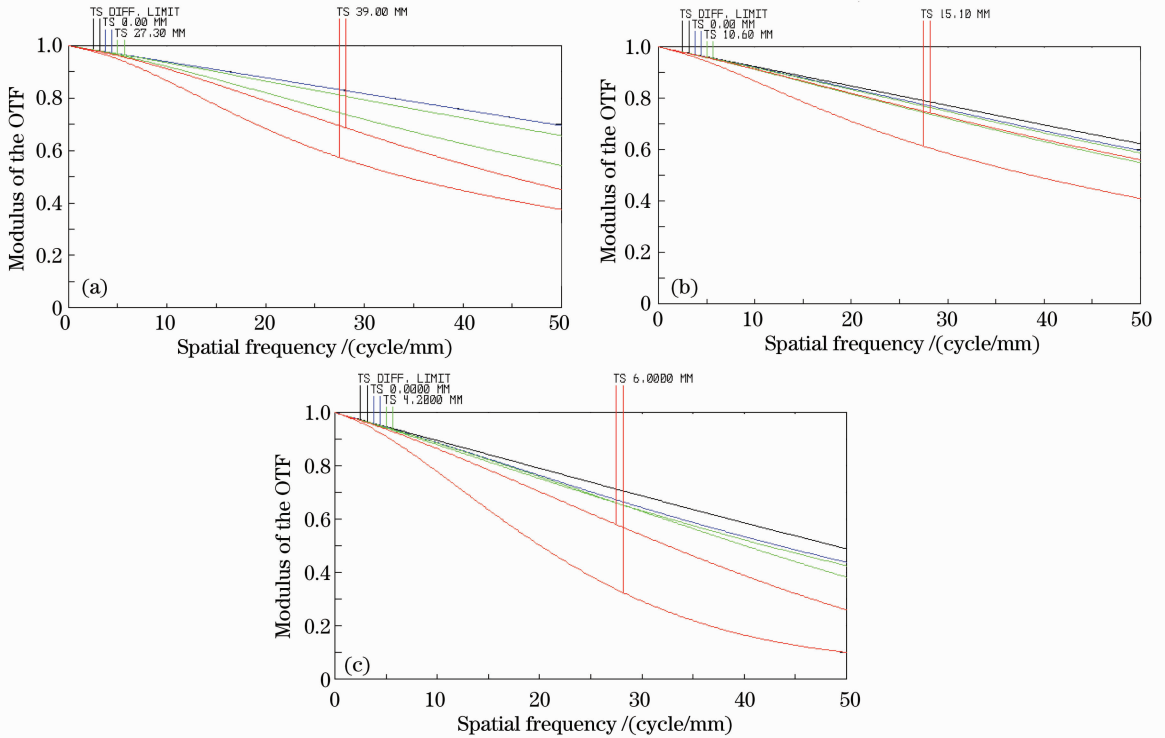


图 10 扫描后 MTF 曲线

Fig. 10 Modulation transfer function curves after scanning

4 结 论

水下气泡照明及三维高速摄影光学系统的研制对于研究水下气泡粒径、运动速度和数密度等特性具有重要意义。本文基于伽利略结构采用柱面镜实现了激光片光源的设计。利用二维摄影、一维轴向扫描相结合的方法设计了三维摄影光学系统，该光学系统由共用前组镜和会聚镜组成，中间以平行光中继，扫描时保证片光源与共用前组镜同步移动，具有移动部件少、扫描过程中放大率恒定、片光源与 CCD 始终共轭和多种放大率复用等特点，为船舶尾流场分布探测和流体测速等应用提供了一条新的技术途径，前景广泛。

参 考 文 献

- 1 Li Wei, Yang Kecheng, Zhang Xiaohui *et al.*. Simulation and computation of bubbles volume scattering function in water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 649~651
李 微, 杨克成, 张晓晖 等. 水中气泡上的体散射函数的模拟与计算[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 649~651
- 2 Cao Jing, Kang Ying, Jiang Xiaoqin *et al.*. An overview in the research of the optical properties of air bubbles in the wake [J]. *Ship Science and Technology*, 2005, **27**(6): 5~8
曹 静, 康 颖, 蒋小勤 等. 气泡尾流光学特性研究的发展评述

- [J]. *舰船科学技术*, 2005, **27**(6): 5~8
- 3 Wang Xiangwei, Zhou Tianhua, Chen Weibiao. Study on laser backscattering properties by ship wakes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 14~18
王向伟, 周田华, 陈卫标. 舰船尾流激光后向散射特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 14~18
- 4 Huang Youwei, Jing Weiqi, Wang Xia *et al.*. Theoretical optical backscattering model for staring underwater laser imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1191~1197
黄有为, 金伟其, 王 霞 等. 凝视型水下激光成像后向散射光理论模型研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1191~1197
- 5 Chen Min, He Junhua, Ji Yanjun *et al.*. Researches on the measurement of bubble velocity based on cross-correlation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1253~1256
陈 敏, 何俊华, 纪延俊 等. 基于互相关的气泡速度的测量方法研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(8): 1253~1256
- 6 Yuan Junhang, Chen Lianyi. Wake holographic imaging[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 636~640
袁军行, 陈良益. 尾流的全息成像方法研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 636~640
- 7 Chen Yanlu, Zhao Qi. Experimental study on property of a laser radiation side-scattered by the spherical particles distributed randomly[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1110~1114
陈延如, 赵 琦. 随机分布粒子侧向散射光特性的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1110~1114
- 8 Sun Chuandong, Cheng Lianyi, Gao Limin *et al.*. The imaging distance of the low-light-level high-speed photo-electricity system underwater [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(2): 185~189
孙传东, 陈良益, 高立民 等. 水下微光高速光电成像系统作用距

- 离的研究[J]. 光子学报, 2000, **29**(2): 185~189
- 9 Zhang Jianwei, Yang Kuntao, Wang Jiang'an *et al.*. Study of bubble characteristic in water by use of high speed photography based line lighting lamp-house [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2010, **25**(4): 35~41
- 张建伟, 杨坤涛, 王江安等. 基于片光源照明成像的水中群气泡特性测量[J]. 光电技术应用, 2010, **25**(4): 35~41
- 10 C. Brucker. Digital-particle-image-velocimetry (DPIV) in a scanning light-sheet: 3D starting flow around a short cylinder [J]. *Exp. Fluids*, 1995, **19**(4): 255~263
- 11 Wang Feng, Li Haifeng, Zheng Zhenrong *et al.*. Video lens design for light-spot position measurement system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(10): 107~110
- 王 丰, 李海峰, 郑臻荣等. 光点位置测量系统摄像镜头设计[J]. 光电工程, 2008, **35**(10): 107~110
- 12 Xie Zhengmao, Dong Xianna, Cheng Lianyi *et al.*. Design for special underwater photography objective lens with wide angle and large relative aperture[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **35**(10): 891~895
- 谢正茂, 董晓娜, 陈良益等. 大视场大相对孔径水下专用摄影物镜的设计[J]. 光子学报, 2009, **38**(4): 891~895
- 13 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Optics of Engineering*[M]. Beijing: China Machine Press, 1999. 165
- 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 165

栏目编辑: 谢 婧