

水下可见光相机成像质量测量方法

编制说明

(征求意见稿)

中国科学院西安光学精密机械研究所

2024年9月

水下可见光相机成像质量测试

编制说明

一、工作简况

(一) 任务来源

为了贯彻落实《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》《海洋观测预报管理条例》《中华人民共和国深海海底区域资源勘探开发法》《“十四五”海洋经济发展规划》《智能检测装备产业发展行动计划（2023—2025 年）》等一系列法律法规及政策文件的精神，积极响应习近平主席提出的“进一步关心海洋、认识海洋、经略海洋，推动我国海洋强国建设不断取得新成就”的重要指示，我们深刻认识到，在全球海洋探索、环境监测、石油钻探及国防安全等领域，水下成像技术发挥着不可替代的作用。作为海洋观测与探测的核心工具，水下可见光相机的成像质量不仅直接关系到数据采集的精度与效率，更是提升我国海洋科技水平、促进海洋经济发展的关键因素之一。因此，对水下成像技术的成像质量测试与优化显得尤为重要。

本标准《水下可见光相机成像质量测试》由中国光学工程学会提出，并由中国科学院西安光学精密机械研究所负责起草。本标准的任务是建立一套科学、合理、实用的水下可见光相机成像质量测试方法，以适应当前水下光学成像技术发展的需求，为水下可见光相机的设计、生产和应用提供技术支持。随着海洋资源

开发和海洋科学研究的不断深入，水下成像技术的需求日益增加，而关于水下可见光相机成像质量的测试方法和标准仍然处于空白状态。因此，制定一套全面、系统的水下可见光相机成像质量测试标准显得尤为必要。

（二）协作单位

本标准的起草过程中得到了多家单位的支持与合作，主要包括中国科学院西安光学精密机械研究所、中国电信股份有限公司人工智能研究院（上海）、西北工业大学、自然资源部北海海洋技术中心、中国海洋大学、中国科学院半导体研究所、中国科学院深海科学与工程研究所、上海恒生浩盛海洋科技有限公司。这些单位在水下光学成像技术领域具有丰富的研究经验和实践基础，为标准的制定提供了重要的技术支持和理论依据。

（三）主要工作过程

1. 成立编制组，制定工作计划

2024年9月，项目正式启动。成立了标准起草编制组，明确了项目的目标、任务和时间安排。

2. 工作调研及资料查询

2024年9月，根据相关规定，项目组进行了广泛的资料收集和文献调研，包括国内外相关标准、技术文献、研究报告等，全面了解了水下成像技术的最新进展和测试方法的现状。选定配合实施的合作单位组成标准编制小组，对水下可见光相机成像质

量测试内容、测试方法、数据处理方法等方面进行了讨论，优化了标准制定的原则。

3. 研究确定标准基本思路

2024年9月，标准编制组对各类空气中相机成像质量测试方法进行实验比对后，经初步讨论、分析、比较，确定了标准制定的技术路线，起草了标准的总体框架，明确了主要思路和任务分工，制定了编制工作方案。

4. 编写标准草案和编制说明

2024年9月，编制组根据相关单位意见对标准进行了讨论、编写与修改完善，并组织了相关单位、企业对标准编制内容进行座谈与咨询，最终形成申请立项标准草案。

5. 标准立项及修改

2024年11月，由中国光学工程学会组织召开了团体标准立项审查会，学会标委会5位专家听取了标准立项必要性和可行性汇报。经论证，专家组认为标准立项申请资料齐全、规范，标准编制大纲内容相对齐全、结构合理，同意标准的立项工作。

6. 征求专家意见并修改

暂未开展。

7. 征求意见收集整理并形成送审稿

暂未开展。

(四) 主要起草人

本标准由中国科学院西安光学精密机械研究所牵头，多家单位共同完成。标准主要起草人有：李学龙、吴国俊、孙哲、杨敏、郭金家、封斐、王新伟、孙科林、黄胤卿、史容娜、叶旺全、何忠江、陈银、杨景川、袁媛、王震、孙亮、王瀚宇、王根祥。其中：

李学龙：负责标准体系框架构建，组织协调各单位参与标准编制与应用；

吴国俊：负责标准体系框架审核，参与标准正文和编制说明的编写；参与中国海洋学会团体标准《水基钻井液钻屑含油量海上现场检测方法 荧光分光光度法》制定；

孙哲：参与标准正文及编制说明的修改完善；

杨敏：负责收集现有标准规范及标准体系审核；

郭金家：负责标准细则的完善，参与标准正文修改；

封斐：负责提供技术支撑，参与本标准正文和编制说明的修改；

王新伟：负责标准的标准化修改，参与标准正文修改；

孙科林：参与标准编制研讨及技术支撑；

黄胤卿：负责应用服务部分标准明细收集整理；

史容娜：负责标准正文和编制说明的编写，参与各阶段材料准备及检查工作；参与中国海洋学会团体标准《水基钻井液钻屑含油量海上现场检测方法 荧光分光光度法》制定；

叶旺全：参与标准编制研讨和提出修改意见；

何忠江：参与标准编制研讨、提出标准修改意见；

陈银：参与标准编制研讨和文字修订；

杨景川：参与标准编制研讨和内容的完善修改；

袁媛：参与标准编制研讨、提出标准修改意见；

王震：参与标准编制研讨、提出标准修改意见；

孙亮：参与标准编制研讨和语言规范；

王瀚宇：参与标准编制研讨和总体检查；

王根祥：参与标准编制研讨和内容错误检查。

二、标准编制原则

1. 科学性

标准的制定基于科学的理论和方法，确保各项测试内容和技术指标的合理性。

2. 实用性

标准具有可操作性，能够指导水下可见光相机成像质量的测试工作，满足实际应用的需求。

3. 先进性

标准反映了当前水下成像技术的最新进展，具备一定的前瞻性和引领作用。

4. 可操作性

标准简洁明了，易于理解和执行，便于广大用户掌握和应用。

二、标准主要内容的确定

（一）确定标准主要内容的依据

《水下可见光相机成像质量测量方法》（征求意见稿）共 9 章，主要内容包括范围、规范性引用文件、术语与定义、测试原理、测试条件、测试设备、测试方法、数据处理、测试报告。本标准在制定过程中主要依据以下三点：

1. 国内外相关标准与规范

本标准在制定过程中参考了多项国内外相关标准和规范，如 GB/T 10987-2009《光学系统 参数的测定》、GB/T 11168-2009《光学系统像质测试方法》、GB/T 27667-2011《光学系统像质评价 畸变的测定》、JB/T 7473-2014《照相镜头 分辨率测试图》等。这些标准和规范为本标准的制定提供了重要的参考依据。

2. 水下光学成像技术的研究成果与实践经验

项目组在广泛调研的基础上，总结了水下光学成像技术的最新研究成果和实践经验，确保标准内容的科学性和实用性。

3. 行业专家的意见与建议

在标准的制定过程中，项目组多次组织专家评审会，听取了多位业内专家的意见和建议，对标准内容进行了多次修订和完善。

（二）解决的主要问题

目前，国内外对于水下光学成像质量检测的方法主要由两种：一种是通过空气检测加理论仿真的方法来间接评估水下可见光

相机在水中的成像质量，通过在空气中确定水下可见光相机标定公式，以此推算水下可见光相机的分辨率、视场、畸变等指标。该方法存在两点问题：一是无法得到水下可见光相机在实际水下环境中的真实成像质量；二是受到实际加工装配误差的影响，带来无法避免的仿真模型误差，其检测可靠性难以保证。

另一种方法是将水下可见光相机放置在实验水池中，并在相机设计物距处放置分划板，观察相机拍摄的分划板图案以实现成像分辨率、视场及畸变等指标的检测。由于水体吸收、散射作用的影响，引入了噪声，导致无法准确检测水下可见光相机自身的成像质量；此外，该方法对分划板的放置位置、分划板与水下可见光相机光轴的垂直度等要求较高，该过程不但影响检测准确性，同时增大了水下操作难度。

本标准构建了基于水下专用平行光管和水下云台相结合的水下可见光相机成像质量检测方法，消除了水体对成像的影响，保证测量结果可靠准确；同时，由于水下专用平行光管的工作距离固定，降低了水下操作难度，适用于多种水下可见光相机成像质量检测。

三、主要试验（验证）的分析

（一）研究目标

为解决当下水下光学成像质量检测易受水体吸收、散射作用影响导致检测准确度低及水下操作难度大等问题，本标准希望通过制定一套全面、系统的水下可见光相机成像质量测量方法标准，

提高水下光学成像质量检测的准确性。

（二）方法原理

本标准采用水下专用平行光管测试，通过移动水下专用平行光管内部分划板，可模拟无限远至一定物距的范围。作为检验基准目标的分划板，通过水下专用平行光管内部物镜及待测相机物镜，成像至相机靶面，观察分析相机拍摄的分划板图案。

分辨率的检测可直接通过分析分划板图案获得；视场角和畸变的检测应在上述操作基础上结合水下云台实施，通过云台测量水下可见光相机能拍摄到的物空间边缘对入瞳中心的张角，并利用相机焦距和像素坐标计算获得。

（三）标准技术指标、参数

本标准规定了水下可见光相机成像分辨率、视场角、畸变的测试原理、测试条件、测试设备、测试方法及数据处理。

（四）试验方法

1. 分辨率测试

测试设备：使用了 USAF 1951 分辨率测试图，以及水下专用平行光管等设备。

测试步骤：

- a) 根据待测水下可见光相机的设计物距，将鉴别率板调节至对应位置，利用相机镜头设计波段范围内的光源进行

均匀照明;

- b) 将待测水下可见光相机安装在水下云台上, 将其与主机、显示器连接后放置于水下。将水下可见光相机放置于水下专用平行光管工作距离处, 即水下可见光相机入瞳放置于水下专用平行光管出瞳处, 调整水下可见光相机和水下平行光管位置, 使平行光管光轴与水下可见光相机视场光轴大致重合;
- c) 调整待测水下可见光相机的位置使得鉴别率板成像于视场中央, 调整水下可见光相机拍摄的曝光参数, 待图像稳定后保存;
- d) 转动水下云台方位角, 使平行光管鉴别率板成像于相机不同靶面位置, 分别保存图像。

2. 视场角测试

测试设备: 使用了星点板, 以及水下专用平行光管等设备。

测试步骤:

- a) 根据待测水下可见光相机的设计物距, 将星点板调节至对应位置, 利用相机镜头设计波段范围内的光源进行均匀照明;
- b) 将待测水下可见光相机安装在水下云台上, 将其与主机、显示器连接后放置于水下。将水下可见光相机放置于水下专用平行光管工作距离处, 即水下可见光相机入瞳放置于水下专用平行光管出瞳处, 调整水下可见光相机和

水下平行光管位置，使平行光管光轴与水下可见光相机视场光轴大致重合；

- c) 调整待测水下可见光相机的位置使得星点板成像于视场中央，调整水下可见光相机拍摄的曝光参数，待图像稳定后保存；
- d) 标记星点像位于图像中心像素时转台角度为初始角度。转动水下云台方位角，使星点成像于相机靶面水平方向的两个边缘，分别保存图像，读取转台角度值 α_1 和 α_2 ；
- e) 同理，将相机沿光轴旋转 90 度安装在水下云台上，转动云台方位角使鉴别率板成像于相机靶面垂直方向的两个边缘，分别保存图像，读取转台角度值 β_1 和 β_2 。

3. 畸变测试

测试设备：使用了星点板，以及水下专用平行光管等设备。

测试步骤：

- a) 根据待测水下可见光相机的设计物距，将星点板调节至对应位置，利用相机镜头设计波段范围内的光源进行均匀照明；
- b) 将待测水下可见光相机安装在水下云台上，将其与主机、显示器连接后放置于水下。将水下可见光相机放置于水下专用平行光管工作距离处，即水下可见光相机入瞳放置于水下专用平行光管出瞳处，调整水下可见光相机和水下平行光管位置，使平行光管光轴与水下可见光相机视场光轴大致重合；

- c) 调整待测水下可见光相机的位置使得星点板成像于视场中央，调整水下可见光相机拍摄的曝光参数，待图像稳定后保存；
- d) 标记星点像位于图像中心像素时转台角度为初始角度。旋转水下转台至不同角度，拍摄星点图像并记录此时星点像的像素坐标 (x_p, y_p) 和转台相对于初始角度的旋转角度 ω_p 。

(五) 结果计算

1. 水下专用平行光管调节

本标准采用水下专用平行光管完成水下可见光相机成像质量的检测。为适用不同物距水下可见光相机检测需求，需对水下专用平行光管进行调节以模拟不同物距场景。

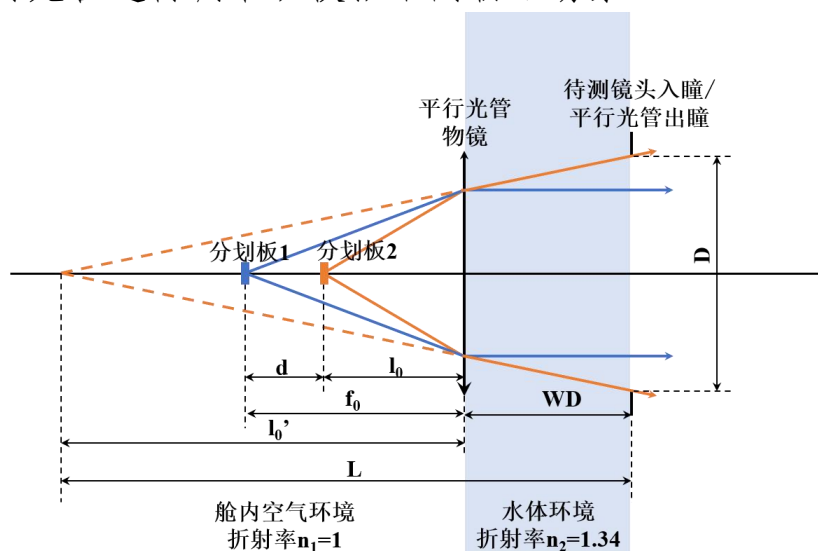


图 1 水下专用平行光管模拟物距调节示意图

如上图所示，分划板 1 代表分划板初始位置；分划板 2 代表

分划板移动后位置； d 为分划板移动距离； f_0 为平行光管物镜焦距； l_0 为平行光管物距； l_0' 为平行光管像距； WD 为平行光管工作距离； L 为模拟有限远工作距离或待测镜头物距。

分划板为实际检测过程中所用的鉴别率板、星点板等标准分划板。分划板 1 所处位置为常规平行光管工作时分划板放置位置，当分划板置于平行光管物镜焦平面处，通过分划板的光线经物镜折射后为平行光束，相当于来自无穷远目标发出的光束。当分划板逐渐向物镜方向移动时，通过分划板的光线经物镜折射后成为发散光束，此时由于物距小于焦距，对于平行光管物镜来说，将在同侧成放大的虚像，即在发散光线的反向延长线与光轴交点位置处成虚像，该虚像到待检相机入瞳处的距离即为平行光管可模拟的目标距离。

平行光管工作距离为其出瞳位置，检测时，待测相机入瞳应置于该位置处。通过移动平行光管内部光源+分划板模块可实现无穷远至一定物距范围的调节。

根据薄透镜高斯公式，对于平行光管物镜有：

$$\frac{n_1}{l_0} - \frac{n_2}{l_0'} = \frac{n_1}{f_0} \quad (1)$$

如上图所示，平行光管焦距和物距均为负值，则可知分划板移动距离为：

$$d = l_0 - f_0 \quad (2)$$

示例：当采用焦距为 130mm、工作距离 150mm 的平行光管检测焦距为 50mm、设计物距 5m、入瞳直径为 26mm 的镜头时，根据上述关系计算可得平行光管内部分划板需移动 4.507mm。利

用 ZEMAX 软件对上述分析进行仿真验证可见,当平行光管内部分划板相对于焦平面位置移动 4.507mm 时,分划板经平行光管物镜及待测镜头后在相机靶面上成像质量较好。

表面类型	标注	曲率半径	厚度	材料	膜层	净口径	延伸区	机械半直径	圆锥系数	TCE x 1E-6	参数 1 (未使用)	参数 2 (未使用)
0 物面	标准面	无限	130.000			4.382	0.000	4.382	0.000	0.000		
1	标准面	无限	-4.507 V			13.624	0.000	13.624	0.000	0.000		
2	近轴面		0.000			13.000	-	-		0.000	130.000	1
3 光阑 (孔径)	标准面	无限	150.000	1.34, 0.0 M		13.000 U	0.000	17.310	0.000	0.000		
4	近轴面		50.679			17.310	-	-		0.000	50.000	1
5 像面	标准面	无限	-			1.716	0.000	1.716	0.000	0.000		

图 2 zemax 仿真镜头结构

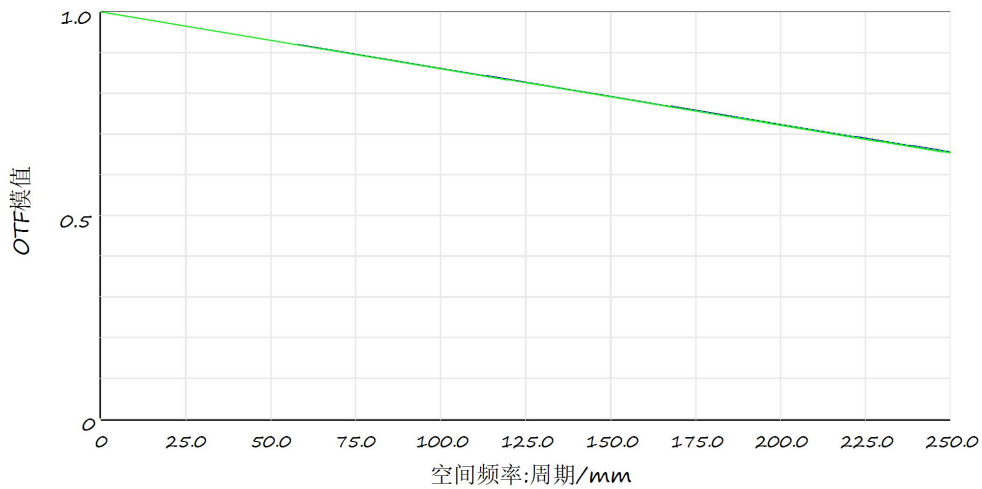


图 3 zemax 仿真 MTF 曲线

2. 分辨率计算

物方分辨率按附录 A 分辨率测试图及其线对数检索表进行检索。

当物距为有限远时,像方分辨率利用下式计算:

$$R_{ima} = \beta_0 \cdot \beta \cdot R_{obj} \quad (3)$$

式中:

R_{ima} —— 像方分辨率;

R_{obj} —— 物方分辨率;

β_0 —— 水下专用平行光管垂轴放大率;

β —— 待测相机垂轴放大率；

其中：

$$\beta_0 = \frac{L - WD}{f_0 + d} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{L}{L'} \quad (5)$$

L —— 待测相机物距；

L' —— 待测相机像距；

WD —— 水下专用平行光管工作距离；

f_0 —— 水下专用平行光管物镜焦距；

d —— 水下专用平行光管内部分划板移动距离。

当物距为无限远时，像方分辨率利用下式计算：

$$R_{ima} = \frac{f}{f_0} R_{obj} \quad (6)$$

式中：

f —— 待测水下可见光相机焦距；

3. 视场角计算

被测水下相机水平视场角按照如下公式计算：

$$\alpha = |\alpha_1 - \alpha_2| \quad (7)$$

式中：

α —— 摄像系统水平方向视场角；

α_1 、 α_2 —— 摄像系统水平方向边缘视场对应转台角度值。

被测水下相机垂直的视场角按照如下公式计算：

$$\beta = |\beta_1 - \beta_2| \quad (8)$$

式中：

β —— 摄像系统垂直方向视场角；

β_1 、 β_2 —— 摄像系统垂直方向边缘视场对应转台角度值。

4. 畸变计算

水下可见光相机畸变计算方法为：

$$M = \frac{p\sqrt{x_p^2 + y_p^2} - f \tan \omega_p}{f \tan \omega_p} \times 100\% \quad (9)$$

式中：

M —— 畸变；

x_p —— 相对于图像中心的横向像素坐标；

y_p —— 相对于图像中心的纵向像素坐标；

p —— 像元大小；

ω_p —— 测试点视场角（由云台读出）。

四、与国际、国外同类标准水平的对比情况

（一）国外相关研究进展

目前，国外暂无水下成像质量测试标准方法，测试技术上主要参考空气中成像质量的检测方法。

（二）本标准与国外相关方法标准规范的关系

本标准在制定过程中借鉴了国际标准的内容和方法，如 ISO 12233、ISO 14524 等。这些国际标准为本标准的制定提供了一定的参考依据。同时，本标准也结合了国内水下成像技术的实际情况，进行了适当的调整和创新，确保标准内容更加贴合国内实际需求。

五、与国内相关标准的关系

（一）国内相关研究进展

目前，国内暂无水下成像质量测试国标方法，测试技术上主要参考空气中成像质量的检测方法。

（二）本标准与国内相关方法标准规范的关系

本标准在制定过程中参考了多项国内相关标准和规范，如 GB/T 10987-2009《光学系统 参数的测定》、GB/T 11168-2009《光学系统像质测试方法》、GB/T 27667-2011《光学系统像质评价 畸变的测定》、JB/T 7473-2014《照相镜头 分辨率测试图》等。这些标准为本标准的制定提供了重要的技术支持。同时，本标准也填补了国内在水下可见光相机成像质量测试方面的空白，为相关产品的研发和应用提供了重要的技术支撑。

六、重大分歧意见的处理经过和依据

无。

七、贯彻学会标准的要求和措施建议

（一）组织措施

1. 成立标准推广工作组

中国光学工程学会将成立标准推广工作组，负责标准的宣传与培训工作。工作组将定期组织培训班、研讨会等活动，提高广大用户对标准的理解和应用能力。

2. 建立沟通机制

学会将建立标准实施的沟通机制，及时收集用户反馈和建议，解决标准实施过程中遇到的问题。

3. 开展合作交流

学会将积极与国内外相关机构开展合作交流，分享标准实施的经验和成果，推动标准的国际化进程。

(二) 技术措施

1. 编写详细的测试操作手册

学会将组织编写详细的测试操作手册，指导用户正确使用标准。手册将详细介绍各项测试方法的操作步骤、注意事项和常见问题的解决方法。

2. 开发配套的测试软件

学会将开发配套的测试软件，提高测试效率和准确性。软件将集成各项测试方法，提供便捷的操作界面和自动化的测试流程。

3. 提供技术支持

学会将设立技术支持团队，为用户提供全方位的技术支持和服务。技术支持团队将解答用户在标准实施过程中遇到的技术问题，提供解决方案和改进建议。

(三) 过渡办法

1. 设定合理的过渡期

学会将设定合理的过渡期，允许现有产品逐步过渡到新标准。

在过渡期内，企业可以根据实际情况逐步调整产品设计和生产工艺，确保顺利过渡到新标准。

2. 提供技术支持

在过渡期内，学会将提供技术支持，帮助企业理解并适应新标准的要求。技术支持团队将定期走访企业，提供现场指导和技术咨询。

3. 组织培训活动

在过渡期内，学会将组织多次培训活动，帮助用户掌握新标准的内容和要求，增强用户的标准化意识和应用能力。

（四）实施日期

本标准自 202X 年 XX 月 XX 日起实施。

八、废止现行有关标准的建议

无。

九、其它应予说明的事项

本标准《水下可见光相机成像质量测试》的制定，旨在建立一套科学、合理、实用的水下可见光相机成像质量测试方法，以适应当前水下光学成像技术发展的需求，为水下可见光相机的设计、生产和应用提供技术支持。通过广泛收集资料、深入调研、多次实验验证和专家评审，本标准在技术内容和操作方法上具有较高的科学性和实用性。标准的实施将极大地提升水下可见光相机成像质量的评估能力，促进相关产品的研发与优化，降低研发成本和生产成本，提高产品的市场竞争力。同时，标准的实施还

将推动水下成像技术的发展，带动相关产业的经济增长，促进海洋资源开发和海洋科学研究的深入发展。希望本标准的发布和实施能够为我国水下光学成像技术发展提供有力的技术支撑。