

水中摄影学

(理论与实践)

(美) L. E. 默顿斯 著

科学出版社

水中摄影学

(理论与实践)

[美] L. E. 默顿斯 著

张闻迪 关福民 杨作昇 译

科学出版社

1979

内 容 简 介

本书论述了有关水中摄影各个方面的问题,例如光在水中的传输特性、水中的自然及人工光场分布、滤色镜、黑白与彩色摄影及感光材料、水中摄影机与水密外壳、水中摄影的应用,以及进行水中摄影时会遇到的若干实际问题等,并介绍了一些改善摄影质量的新方法,并且列举了不少有实用价值的曲线与数据。本书内容比较全面,可供水中摄影工作者、设计人员及其他有关海洋和摄影工作者参考。

L. E. Mertens

IN-WATER PHOTOGRAPHY

(*Theory and Practice*)

WILEY-INTERSCIENCE

1970

水 中 摄 影 学

(理论与实践)

[美] L. E. 默顿斯 著

张闻迪 关福民 杨作昇 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979年2月第一版 开本: 787×1092 1/16

1979年2月第一次印刷 印张: 19 插页: 2

印数: 0001—5,900 字数: 439,000

统一书号: 13031·937

本社书号: 1324·13—17

定价: 2.50 元

译 者 的 话

水中摄影是海洋研究和开发,水下工程等所必需的一门重要技术。由于水下环境的特殊性,特别是水介质的光学特性,使水下摄影与陆上摄影大为不同,仅凭陆上摄影的知识和经验不可能取得良好的水下摄影效果。

L. E. 默顿斯所著的《水中摄影学》一书,比较全面地论述了水中摄影各方面的问题。其中包括光在水中的传输特性,水中的自然及人工光场分布,水中摄影设备、材料及方法等。并且还列举了不少有实用价值的曲线与数据。所有这些,对于掌握水中摄影技术都是很有帮助的。

原书除供专业工作者阅读外,同时还在很大程度上照顾了一般水下摄影爱好者。但作者又过分追求“全面”、“系统”,因而显得冗长烦杂。不少内容也仅限于泛泛而谈。鉴于国内这方面的书籍极少,所以我们除个别章节有删节外,一般是尽可能按原著译出,以供参考。

原书出版及译成时间均较早,近几年来科学技术的发展已使某些内容显得陈旧。而对新技术所作的一些展望,如水下激光电视和声全息成象等,从近年来的理论和实践来看,作者的估计又过分乐观了。但作为原理性了解,仍然是可取的,故仍予以保留。

刘智深同志曾初译了第四章及第五章的一部分,在翻译本书时曾作参考,特此致谢。

本书涉及内容甚广,我们水平有限,错误和不当之处在所难免,诚恳地欢迎读者批评指正。

序 言

水中摄影这个领域是比较新的,专业队伍还比较小。但与此相比,这方面已出版的书籍与文献却意外之多。在查阅这些文献时,该领域的开拓者的勇敢、机智与创造力给了我深刻的印象。他们细致地考察了颜色的选择吸收和光在水中的散射等基本问题,并创造了许多巧妙的技术来减轻或避免这些有害的影响。但是,尽管有这些进展,看来还十分缺乏定量的测量与数据。除去少数另星的文章(著名的有 S. Q. Duntley 及其同事们的文章)以外,很少注重普遍的分析理论和应用这种理论。看来,对水中摄影系统的日益增长的需求以及系统之日趋复杂,不可避免地会要求有一个以详尽的科学分析与工程分析为依据的广泛的系统研讨法。我相信,人们迫切需要一本既叙述基本理论又说明如何在实践中应用这些理论的书籍。简言之,这就是我撰写本书的基本目的。

有些读者初一见到我用“水中”(in-water)一词代替通常的术语“水下”(under-water)可能会感到不大习惯。我作此修正,仅是因为“水中”一词描述得更为确切,并且在一些与此相关的重要领域中,现在都使用“水中”这个名称。

在本书中,我试图描述水中环境,并把各种现象与基础物理学连系起来。在水中工作,最好的情况相当于在浓雾中工作。所以,水中摄影系统的设计,实质上完全受水的物理及光学传输特性所支配。因为水的特性因时因地变化很大,所以初想之下,似乎觉得毫无可能对光在水中的传输特性进行任何分析。但是,在许多场合,用少数几个参数就足以描述水的重要的光传输特性。而且,对于大多数天然水来说,其传输参数之间,看来还存在一些很重要的关系。

除了把水作为摄影媒质进行了分析外,还尽力对大多数基本的水中摄影部件的作用和性能进行了理论描述。只要实用,就给出方程式附上曲线图,以阐明某种参数的重要影响。有些曲线肯定也有助于设计新的摄影系统,有助于估计现有系统的性能或工作极限,或者能预示改变某个参数将产生的影响。

为简明起见,理论方面的许多地方作了简化。但是还得用数学,包括某些高等数学,来描述一些水中的现象;这些内容无从简略。然而,为了使不熟悉高等数学的读者不致感到不便,我试着用文字表达一些较重要的结论,并用曲线图以及一些近代的设备与部件的大量插图来帮助说明。跳过数学推导,读者就能节约时间;但是,仍应掌握一般的概念与基本的相互关系。

我力图把本书在理论的逻辑推演方面,以及随后关于设备与技术的论述方面,组织得自然一些。我们从媒质本身以及象的传播问题开始;其次,考察了主要的工作部件,如滤色片、辅助照明、壳窗、镜头、胶片、摄影机和外壳。另外还考察了关于人类视觉的一些基本关系。最后,我们考虑了系统设计、系统应用和一些重要的新技术的展望。

差不多所有的技术书籍都会遇到符号问题,当然,本书也不例外。有时,一个符号会用来代表几个十分不同并且互不相关的量。当好几门技术术语混合在一起,并且各自有标准符号时,这个问题就更为突出。我在引入每一个新的或可疑的符号时,都对其作了

• 11 •

定义。还逐一规定了单位(优先采用米制,只有少数通常都以英制度量的量例外)。

在本书中出现的许多概念既可用辐射计量单位,也可用光度单位来处理。为避免重复,只使用了一种单位(一般是光度单位)。读者在推导换算成另一种单位的公式时,应无多大困难。

水中摄影学的许多方面尚有争议。我尽可能不带倾向性,并摆出争议双方的意见。在许多情形中,应用或参考意见就是决定因素;在另一些情形中它只不过是个人的选择。

我提请读者注意,有一部分分析是原始的,未经实地测量充分证明。并且尽管不辞辛劳、竭尽小心,排印错误与理论方面的疏忽,总在所难免。

目 录

译者的话	i
序言	ii
第一章 绪论	1
1.1 海洋科学和技术	1
1.2 水中摄影的应用	1
1.3 水中摄影系统	4
第二章 光在水中的传输	5
2.1 引言	5
2.2 海中光的来源	6
2.3 空气-水交界面	13
2.4 水中光的传输	18
2.5 日光在水中的特性	33
2.6 海中的照明	38
2.7 水下光的测量仪器	40
2.8 对水的物理特性和光的传播的进一步探讨	42
第三章 影象的衬度	46
3.1 引言	46
3.2 大目标相对于水本底的表观衬度	47
3.3 大目标各部分之间的表观衬度	51
3.4 细部的表观衬度	52
3.5 小结	61
第四章 滤光器的应用	63
4.1 引言	63
4.2 中性密度滤光镜	63
4.3 用于彩色校正的光谱滤色镜	64
4.4 用来提高衬度的光谱滤色镜	71
4.5 光谱滤色镜的其它用途	72
4.6 偏振滤光器	74
第五章 辅助照明	79
5.1 引言	79
5.2 水下照明的一般性质	80
5.3 用辅助光源来改善影象的衬度和彩色平衡	84
5.4 照明光源	87
5.5 电源	100
5.6 用辅助照明的摄影曝光	104
5.7 反射镜	107

5.8	小结	107
第六章	镜头和光学壳窗	109
6.1	引言	109
6.2	平面光学壳窗	109
6.3	光学系统的校正	116
6.4	镜头的选择	121
6.5	相对孔径	126
6.6	变焦距镜头	128
6.7	辅助镜头	128
第七章	摄影机和水密外壳	133
7.1	引言	133
7.2	照相机	133
7.3	电影摄影机	142
7.4	全景摄影机	145
7.5	多镜头摄影机	147
7.6	航线摄影机	147
7.7	立体摄影机	148
7.8	电视摄影机	150
7.9	水密封外壳	152
第八章	照相胶片与摄象管	163
8.1	引言	163
8.2	胶片特性及感光测定	164
8.3	胶片冲洗	181
8.4	电子摄象管	187
8.5	摄影影象的评定	194
第九章	海洋中与生物有关的光和色	205
9.1	引言	205
9.2	与生物学有关的光和色	205
9.3	人类的视觉机理	213
第十章	水中摄影系统及其应用	217
10.1	引言	217
10.2	子系统和部件	217
10.3	应用于生物学的摄影系统	221
10.4	一种设想的海底种群调查系统的设计	223
10.5	延时摄影	229
10.6	用于物理海洋学的摄影系统	231
10.7	地质学上用的摄影系统	232
10.8	工程应用的摄影系统	234
10.9	水中摄影测量学	234
10.10	考古上的用途	245
10.11	电视应用	245
10.12	系统费用的有效性	245

第十一章 新技术	251
11.1 引言	251
11.2 距离选通系统	251
11.3 同步扫描系统	258
11.4 图象的处理	261
11.5 全息摄影	270
11.6 声学成象	273
第十二章 潜水技术	281
12.1 引言	281
12.2 潜水设备	281
12.3 来自海洋生物的危险	282
12.4 人的能力	285
12.5 深潜	286
12.6 任务的规划	289
12.7 拍摄鱼类和其他海洋动物	290
12.8 夜间潜水	292
附录	294

第一章 绪 论

1.1 海洋科学和技术

尽管人类同海洋作过无数世纪的斗争,但是对海洋的了解却依然是十分有限的。然而海洋覆盖着我们这个星球表面百分之七十。

有力的证据表明,在军事上、工业上和科学上研究与开发海洋的计划在加速进行。例如,石油工业在发展滨外生产方面一直特别积极。滨外石油产量目前已达西方世界石油总产量的六分之一左右。投入滨外租借地的投资已达十亿美元以上,其中许多地方水深超过 300 英尺。这类工业上的兴趣和投资必定会促使深水工程进一步发展和完善。

世界人口始终在增长,需要有足够的食物,这是未来最重要的问题之一。海洋拥有生产食物的巨大潜力,可以协助解决这个问题。但是,应努力发展技术,以确定海洋生物的位置,并诱住它们;培育人们所希望的品种,除去有害的,为人们不需要的品种。

在更远的未来,人们可以试行控制天气。业已表明,在大范围内天气型式的变化与海面温度分布密切相关。大量增加的海洋学资料可以使精确的长周期天气预报成为可能。即使还没能控制天气,改进天气预报也可以轻而易举地避免每年数十亿美元的损失。

许多书籍充满了海洋开发和应用的现代幻想和预言。很清楚,如果我们想要达到这个目的,就应该收集大量资料,应该发展许多技术,并应投下巨大的人力和物力。

这样,涉及到的就不仅仅是少数学科,而是很多学科。摄影科学技术已经在海洋学研究中起重大的作用,并将继续有助于更多的水中应用。摄影在海洋中的现代用途大大地扩展和多样化了,以致很难把它们清楚地列成表格或进行分类。一些普通的水中摄影的应用,包括海底地形测绘,测量海流,测量海水光学性质,研究海洋生物,摄录勘探和科学研究的成果,记录考古学的发现,遥测和监视,以及娱乐等。甚至空中和宇宙空间摄影系统在海洋测量上也起作用,例如绘制表面温度图,测量波浪特性等。

摄影科学有助于其他许多领域的发展。同样,这些领域里的发现和发展可以用来完善和改进摄影的能力。为了更好地满足难度较高的水中摄影的要求,必须改进结构材料、摄影感光材料、能源、灯及控制系统。美国海军潜艇长尾鲨号是在 8,000 英尺深的水中失踪的,在找寻它时遇到了许多解决不了的问题,显示出我们的现代海洋技术的许多短处。

1.2 水中摄影的应用

通过考察水中摄影的某些用途,就大概可以明瞭水中操作的摄影系统的要求及其问题。现代的洋底地图和海图很不详细,而且可能相当不准确。据估计,约有百分之二的大

洋绘制了详细的海图。已经证明,航空摄影在测绘陆上地图方面非常有效,自然也就考虑到水中摄影机对海洋制图的用处。海水中光的传输特性与空气中大不相同。如果水中摄影机能够涵盖30英尺见方以上的面积,就算相当好了。把这一情况与航空照片比较,则航空照片很容易涵盖若干平方海里。海底制备系统被限制在离海底数十英尺之内“飞行”,因此拍摄很小的区域就需要许多照片;又没有现成的准确导航工具来确定拍摄照片的位置,强大的阻力使水中运载器比飞机航行慢得多,因此,完成摄影制图要花相当多的时间。迫切需要各种技术来扩展水中摄影机的有效范围。装平面玻璃壳窗的普通摄影镜头有较大的误差和畸变,不能进行准确的摄影测量。为了达到测量的准确度,应该使用校正壳窗或校正镜头。

海洋学家非常关心海洋的循环。很久以来就已经知道有表面海流存在,但是近来也已观察到了重要的洋底海流。摄影机提供了测量和记录这些底部海流的几种不同方法。海流使砂成波纹状,因此观察海底照片可以推断出很多情况。拍摄偏转舵的偏斜,或者连续地观察染色水团乃至仪器所搅起的污泥,可以获得更多有关海流的定量资料。现在的深海工作相当费钱,还要花费很多时间去安放和取回测量仪器。

摄影系统对于观察海洋生物,了解生命循环,估计种群密度是很有用的。无人操纵的摄影系统只能靠碰运气。在一次任务中所拍摄到的照片可能仅有一小部分含有所需要的信息。用电视摄影机作遥控观察可以改善系统的控制,增加有用资料的输出。但是电视的图象信号需要用宽频带传输,因此需要用电缆经过任意距离的水层来传送宽频带信号。而电缆是不方便的东西。如能实现无电缆遥测遥控将具有最大的价值。

用便携式自动传感器控制摄影系统已经成功,它们能够探测靠近海底的地方和生存的动物等。但是,具有人的识别能力的传感器还没有研制出来。

已经作了把人送到海底,使他能够观察并执行任务的尝试。我们现代的技术能够把几个人送到大洋的最深处作短期逗留并安全返回水面。现在仅有少数深水潜艇可用,而且非常费钱,行动慢,不易操纵,在深处停留时间也短。它们能执行的任务又很复杂,因此其能力是很有限的。从事摄影工作的载人潜艇也缺乏合适的观察壳窗,并且非常容易搅起底部沉积物,从而使能见度变得更坏。

随意游动的潜水员本来适宜于执行多种任务,但是,由于寒冷和压力,潜水员在目前只能限于在较浅的地方与较短的时间内工作。已有供潜水员在1,000英尺以下呼吸用的专门混合气体,但是潜水员仍不能在数百英尺之下进行很有效的工作。必须迅速增进潜水员的能力,看来在不远的将来即可实现。潜水员使用的摄影系统应该是结实可靠的,易于操纵,并应设计得能在所遇到的照度和能见度条件下工作。至今大多数水中摄影机都是装在水密外壳中的稍作了改装的地面摄影机,它们常常很庞大而难以操作,装片量不合适,或者产生很差的光学影像。

随着对各种水中现象的了解不断深入,部件和技术也不断得到改进,光在水中的传输的测量及解析表示法获得了进展。使用了滤色镜和辅助照明来补偿水的选择性吸收。甚至非常棘手的光散射问题也用了偏振、距离选通和同步扫描等技术来加以克服。为水中摄影专门设计了超广角的光学系统。由于使用了最好的水中镜头和壳窗系统,畸变和象差已降低到与高质量的地面镜头差不多的程度。

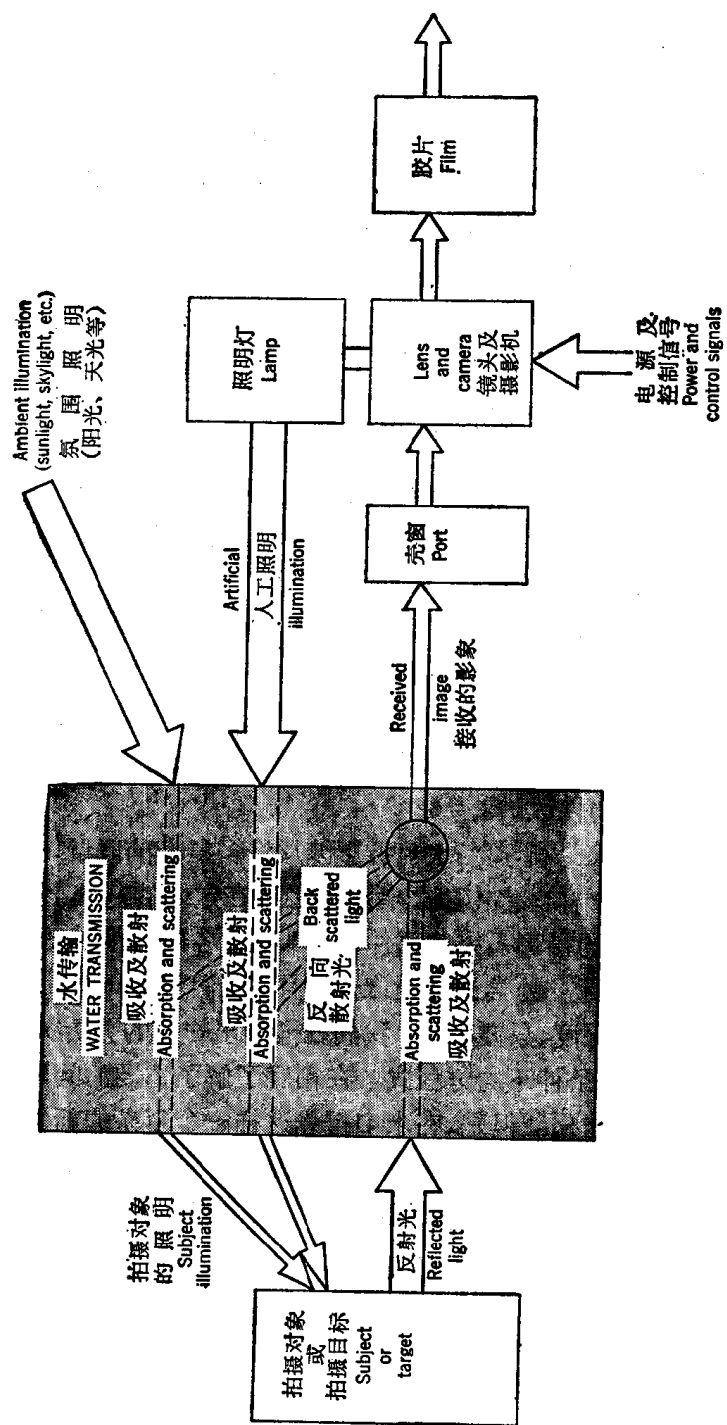


图 1.1 典型的水中摄影系统的简化方块图

1.3 水中摄影系统

我们已经简短地浏览了水中摄影者所面临的某些应用和技术问题。下一步我们来详述一个简单的水中摄影系统及其主要部件。摄影的主要步骤用方块图显示,见图 1.1。一般说来,氛围光和辅助灯两者均照明物体。从物体传到摄影机的反射光受到选择性的吸收和散射。氛围照明和人工照明同样被水中的微粒散射,同时此散射光的一部分重叠在被摄物的影象上。光线经过水密外壳的壳窗时受到折射,偏折的大小取决于光线的方向与波长(颜色)。被摄物的影象在达到摄影机时,由于壳窗产生的象差和畸变以及水路径的吸收和散射效应,可能严重畸偏,色光和偏光选择滤光片和摄影机上的专门镜头可用来补偿某些影象的畸偏。最后摄影机镜头在胶片上成象(或者在电视中,在显象管的光敏面上成象)。为操纵摄影系统,还应提供电源和各种控制、启动信号。

一个复杂的系统,可以比图 1.1 包含更多的部件。推进、导航、定向及稳定等系统可以和摄影机装在一起,此外,摄影系统并不仅限于将胶片曝光。随后的冲印处理、底片的检视和判读,以及资料整理,应同样看作是完整系统的一部分。在很多情况下,系统分析并不仅仅涉及介质的物理特性和设备的性能;当涉及到照片的最终用途以及摄影机的操纵时,应该考虑人的能力与反应。

摄影系统摄取的影象常常远远不能达到任务的要求。照片的反差和分辨率可能过低,或是畸变太大,或除了蓝色或蓝绿色外,事实上并无其他颜色。上述情况是可以改善的,改进照明、壳窗、镜头、滤片、胶片及拍摄技术都可以减轻或校正影象的许多不足之处。在目前的工艺条件下,只能做到有限的改善。然而,不断有新技术提示,其中某些技术最终必定会提供更多的实质性改进。

水中摄影既是艺术又是科学。水中摄影涉及许多复杂的问题,它们与空气中的摄影者通常所遇到的问题不一样。水中摄影者至少必须在定性的基础上了解这些问题及其相互关系。在设计高效能的摄影系统与部件时,对各种各样的水中现象的定量了解以及彻底的系统研讨法特别重要。为尝试达到这一目标,我们对每一主要的系统部件的工作性能和理论均考虑到一定深度,只要有用,我们就推导出一般的分析关系式,并提出图表和曲线,以解释在各种实际条件下的方程式。在彻底了解了重要的问题和部件后,就可尝试进行系统设计和使其最佳化。但是,在水中摄影这样一个复杂的新领域中,没有任何分析能够完全代替实际的尝试法。实际上,分析法和尝试法是相辅相成的。最初的分析可以大大减少所需要的尝试量,而通过实地试验所获得的经验又可以编入新的或修正了的理论中去。

参 考 文 献

- Bibliography on Underwater Photography and Photogrammetry*, Eastman Kodak Company, Rochester, N. Y., 1968.
- Hersey, J. B. (ed.), *Deep Sea Photography*, Johns Hopkins Press, Baltimore, 1967.
- Rebikoff, D. and P. Chernery, *Underwater Photography*, Amphoto, New York, 1966.
- Stark, W. A. and P. Brundza, *Art of Underwater Photography*, Amphoto, New York, 1966.

第二章 光在水中的传输

2.1 引言

即使是最纯最清的水也是“朦胧”的。水的能见度在最理想的情况下也只有几百英尺,一般则少得多。情况恶劣时,浑浊的水甚至使潜水员不能直接看到他面前的手指。海水中的目视和摄影就是这样严重依赖于光在水中的传输特性。这与空气中的情况不同。在空气中,几英里的能见度并不罕见,因而空气的传输特性只有在距离非常长时才需要考虑。只要我们注意到水与空气的密度比大于 800,水与空气能见度的这种巨大差别,也就不奇怪了。

水对光的吸收是有选择性的,它是光的波长或颜色的复杂函数。蒸馏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约衰减百分之四。其它颜色的光被吸收的更多,几米之外,几乎完全消失了。

水的污染使光的透射进一步减弱。天然污染大都使水对短波区域的吸收更甚于长波区域,以致使水的透射曲线的峰值移向绿或黄-绿区域。从很清的大洋中转移到不大清的近岸区域时,这种颜色的变化极为明显。

光被水吸收时转换为其他形式的能量——主要是热。被吸收的光从光学波段上消失了,因而对可见的影象不起作用。这与散射时的情况不同。散射只是偏离或改变光子行进的方向。这些光子与弹球机中的小球相似,这些小球在弹球机中向下滚的过程中可能被偏转许多次。散射光的能量没有消失,有可能叠加在没有被散射的直射光上。散射光对影象的衬度产生极为有害的影响,使影象的衬度成为水中摄影最严重的问题之一。如果能见度条件较好,杂乱的偏离或散射比较小,只是物体的精细细节受到干扰。但当条件较差或距离物体较远时,物体所有的细节都消失不见了。甚至整个物体都可能变成模糊和难以辨认。

图 2.1 表示出最通常的摄影情况,其中,物体是用太阳光和辅助光源,如闪光灯或闪光枪来照明的。太阳光和天光经过空气-水界面时发生折射。吸收和散射使照到物体上的光减弱并扩散开来。注意,虽然太阳并不一定在头顶的上方,但太阳光却基本上是从垂直方向来的。水下光源所发出的附加光在图中也表示出来。入射到物体上的光被反射,进而在摄影机的胶片平面上形成影象。物体的反射光在向摄影机传输的过程中遭到吸收和散射。结果使影象的亮度和衬度降低,并且使影象的细部变模糊了。水的选择吸收剧烈地减弱了蓝-绿光以外的其他颜色的光。另外,太阳光和人工照明受到悬浮于水中的粒子的散射。这些散射光一部分位于摄影机的视场中,叠加在欲拍摄的影象上,更进一步降低了影象的衬度。

海中的条件变化很大,即使是对图 2.1 所表示的那些最基本的因素作定量的描述也很困难。下面几节我们详细地回顾光在水中传输的基本物理学。并在有需要之处,给出

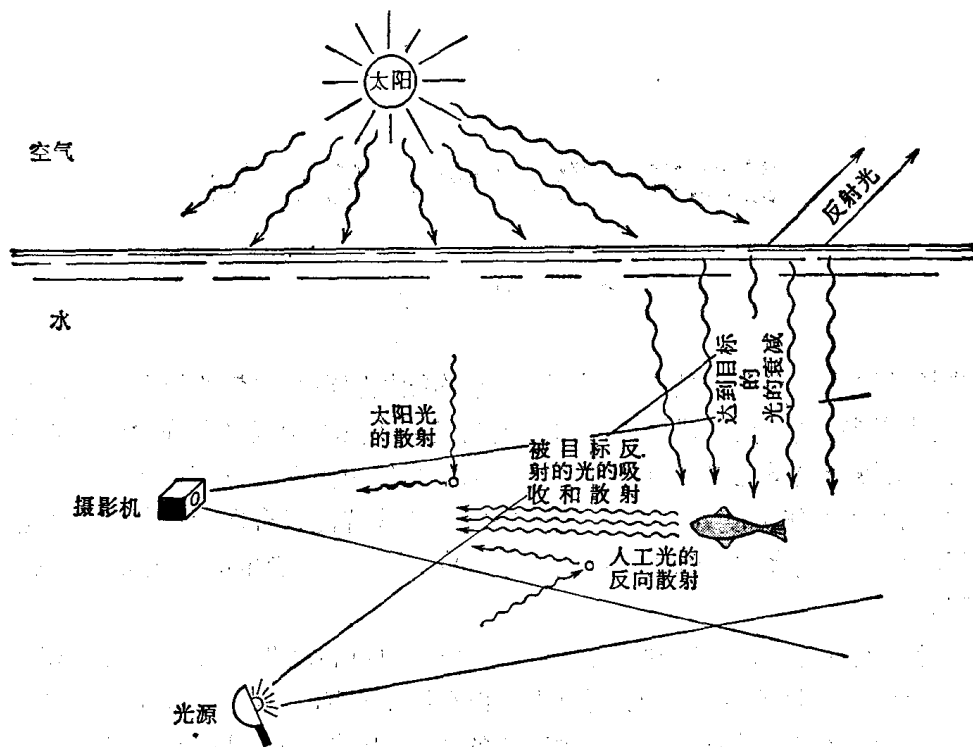


图 2.1 影响水中摄影的各种因素

了有关的基本参数之间的方程,以说明基本的倾向。另外,还列出了在典型观察条件下的专门数据,为实际系统的设计提供合理的出发点。

2.2 海中光的来源

2.2.1 引言及基本物理学的回顾

来自太阳、月亮和星的光入射到海表面上,并以减弱的强度向下传播。人们可以用各种人工照明光源来补充这些自然照明。海中还有许多自然发光的动物,他们提供了很微弱的背景照明。这些光源产生的照明量级分布在一个很大的、几乎接近 10^0 的范围内。光源的相对强度与许多因素有关,其中包括深度、时刻、气候条件 and 水的能见度条件。除非在很深的地方或在夜晚,最弱的光源一般觉察不到。由于描述光源及其产生的照明的方法和单位很多,并常常会引起混乱。因而,我们暂且离开本题先来回顾一下基本的物理学。

电磁能源称为辐射体。能源在单位时间内所发射的辐射能量称为“辐射通量”,在 MKS (米-千克-秒) 单位制中以瓦特为单位。入射到某一表面的每单位面积上的辐射通量称为“辐照”。辐照的单位是瓦特/米²。能源表面上每单位面积发射的通量称为“辐射度”,其单位也是瓦特/米²。多数能源的辐射度与能量的波长或频率有关。“光谱辐射度”是每单位波长间隔内的辐射度。在光学领域内,波长用毫微米(即 10^{-9} 米)作单位比较合适。光谱辐射度的单位是瓦特/米²·毫微米。

实际能源的辐射经常与所谓“理想辐射体”或“黑体”的辐射进行比较。

黑体的辐射度 W_{bb} 由斯梯芬-波尔兹曼方程给出。

$$W_{bb} = 5.67 \times 10^{-8} T^4 \quad (\text{瓦/米}^2) \quad (2.1)$$

式中 T 为黑体的绝对温度, 以绝对温标 (即摄氏温度 $+273.2$) 表示。

能源的“发射率” ϵ 是它的辐射度与黑体在同一温度下的辐射度之比; 即

$$\epsilon = \frac{W}{W_{bb}} \quad (2.2)$$

式中 W 是所考虑的能源的辐射度。

光谱辐射度 W_λ 由普朗克方程给出:

$$W_\lambda = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (\text{瓦/米}^2 \cdot \text{毫微米}) \quad (2.3)$$

式中 $c_1 = 3.74 \times 10^{20}$

$c_2 = 1.44 \times 10^7$

e 为自然对数的底 (2.718)

λ 为波长 (毫微米)

温度为 2000、5000、和 10000°K 时的方程 (2.3) 示于图 2.2。光谱辐射度的峰值波长 λ_m 为

$$\lambda_m = \frac{2.897 \times 10^6}{T} \quad (\text{毫微米}) \quad (2.4)$$

并图示于图 2.3。方程 (2.4) 可由 W_λ (方程 2.3) 对 λ 微分并使其导数为零得出。

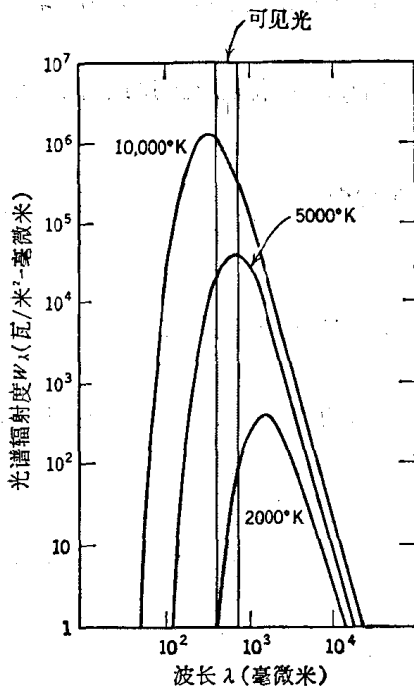


图 2.2 黑体在温度为 2000, 5000, 和 10000°K 时的光谱辐射度

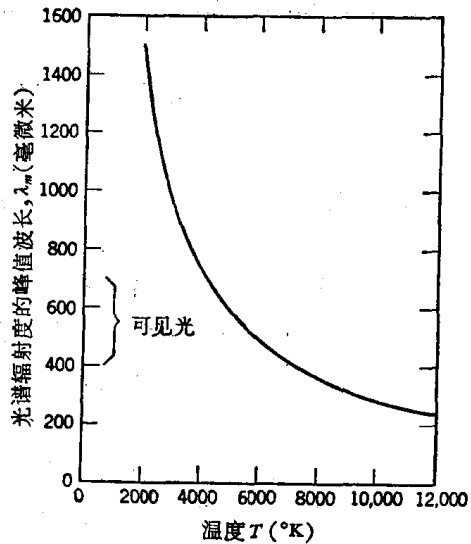


图 2.3 黑体光谱辐射度的峰值波长与温度的函数关系

光谱辐射度曲线下的总“面积”当然应当等于辐射度, 因此方程 (2.1) 可由 W_λ 在整个波长范围内对 λ 积分得出。

前述各量是从纯物理或客观的基础上定义的, 没有直接联系到人对亮度或颜色的视

觉。人的视觉是一个很复杂的问题,将在第九章作简短的讨论。在这里,需要指出的只是不同波长的光引起亮度感觉的相对能力不同。图2.4的曲线被当作标准的视见度曲线。

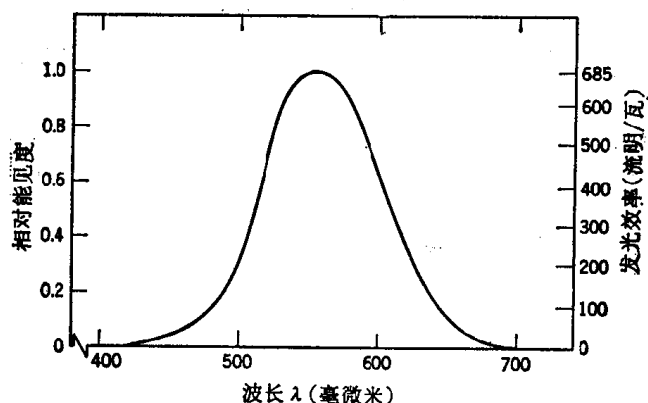


图 2.4 标准的相对视见度曲线和发光效率

它表示对一个标准的观察者,不同颜色的辐射通量引起亮度视觉的相对能力。单独某一个人的真实视见度曲线密切依赖于总光强和一些其他因素。然而为了便于光度学数据的标准化,常用标准的视见度曲线来定义另外一些量。

辐射能量或通量,按其引起亮度视觉的能力(正如标准相对视见度曲线所描述的)加以适当权重后称为光通量。“流明”是光通量的单位,

它是标准发光体产生亮度感觉能力的量度。一瓦特所对应的流明数不是恒定的,它与波长有关,如图2.4所示。对于最敏感的波长555毫微米(即黄-绿光),每一瓦特的辐射通量相当于685流明。而对在清水中透射最好的480毫微米的蓝-绿光,则只有95流明/瓦。在光强很低的情况下,眼睛最灵敏的波长向短波方向移动约40毫微米,这种迁移称为浦尔金耶(Purkinje)效应。对于弱光,480毫微米处的相对视见度大约是0.7,约比图2.4的标准相对视见度曲线所表示的大五倍。因此,浦尔金耶效应对于在海中弱光条件下的视力是有帮助的。

“发光效率”定义为给定样品的光通量与辐射通量之比。单位为流明/瓦特。若辐射通量不是单色的,它的发光效率由下式计算

$$\text{发光效率} = 685 \frac{\int_0^{\infty} V(\lambda)P(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda)d\lambda} \quad (2.5)$$

式中 $P(\lambda)$ 是辐射通量的光谱分布,单位为瓦特/毫微米, $V(\lambda)$ 是如图2.4表示的标准相对视见度曲线。

由于大多数光源辐射的能量的相当大部分是在相对视见度远小于1的波长范围内,因而其发光效率比685流明/瓦小得多。事实上,所有理想黑体光源的发光效率如第五章所指出的,也都低于100流明/瓦。在有些情况下,使用光源的“总发光效率”这个量比较合适,它是光源发出的全部光通量与总输入功率之比。这样总发光效率就包含了这样的因素,即输入功率并不是全部都转换为辐射通量。

“发光强度” I 定义为单位立体角[即球面度(sr)]内所发射的光通量。发光强度的单位是流明/立体角,通常称为“烛光”¹⁾。

$$I = \frac{\Delta F}{\Delta \omega} \quad (\text{烛光}) \quad (2.6)$$

1) 发光强度的单位是烛光。它被规定为一平方厘米的辐射黑体在温度为铂的凝固点(2046°K)时的发光强度的六十分之一。