

独树一帜的光学分支学科——海洋光学

陆金男

海洋光学是光学与海洋学之间的交叉和边缘学科。它主要研究海洋的光学性质、光辐射与海洋水体的相互作用、光在海洋中的传播规律，以及与海洋激光探测、光学海洋遥感、海洋中光的信息传递等相关的应用技术和方法。

关于海洋光学的研究，始于 19 世纪初，人们用一个直径 30cm 的白色圆盘(透明度盘)垂直沉入海水中，直到刚刚看不见为止，这时的深度叫海水的透明度(能见度)。将透明度盘提升至透明度一半深度处，俯视透明度盘之上水柱的颜色，称为海水的水色。到了 19 世纪末，海洋工作者把海水光学性质的研究和海洋初级生产力结合起来，并测量了海洋的辐照度。这时对海洋光学的研究还处于原始的、分散的、零星的状态。人们在研究海洋光学的同时，海洋声学的研究也悄然兴起，由于声波相对光波存在波长长和声速与介质流速有关，光波在水中又存在超强吸收等现象，在当时，海洋声学的研究价值明显超过海洋光学。具体表现在声波传得远，声波的反射作用明显，声波传播速度与海流速度有关等特性，人们利用声波传播远和能量损失少的特点，进行远距离信息交流、监测水下地震、火山爆发和海啸等。但是当声波进入海面或与海底相遇，特别在浅海，声波长距离传播就会失效，光的直线传播和光的反射能远小于光的折射能显出了它的威力。利用声波作用海底或作用海洋生物时的反射能强这一特点，通过接收和监测反射波可进行分析了解海底地貌地质结构，掌握海洋生物特别是探测海洋鱼群和海



洋鱼类资源的分布，甚至可以通过发出声信号控制或者驱赶鱼群活动，以满足人类的需要。声波的传播速度与海水的水流速度有关，顺流则声速增加，逆流则反之，利用这一现象可测海流速度并了解沉积物的迁移情况，而光波没有这特性。由波浪产生的 500~5000Hz 的噪声，与海面的风级和海况有关，利用此频率的噪声可以

监测海面的风级和海况，当然在海洋光学中，也可通过监测日光在海浪面的反射光谱探测到海面的风级和海况，但是成本增大。海洋声学 & 海洋光学是研究海洋学的两个不同分支学科，海洋声学主要研究声波在海洋中的传播，而海洋光学注重光与海水、光与水中颗粒相互作用的研究，通过荧光效应探测水质组分，它的主要理论基础是海洋光辐射传递理论和水中光能见度理论。特别是到 20 世纪中叶，随着激光技术、光电池和电荷耦合器(简称 CCD)技术的诞生，海洋光学进入了系统的、全面的、长足的发展阶段，人们研制了水中辐照计、水中散射仪、海水透射率计、水中辐亮度计等海洋光学仪器，系统地测量了海水的衰减、散射和光辐射场的分布，为研究海洋水质成分及水质状况分布提供科学依据。特别是近几年，随着与光电技术结合的各种遥感仪器的不断研发，各种遥感探测仪器、智能化仪器为探测海洋水质成分变化和海洋资源开发以及水下作业等不但提高了效率，而且精度也大大提高，海洋光学的研究进入了一个崭新的、全面和系统的研究状态而越来越受到人们的关注。



但无论多么普通，太阳对于人类来说都是独一无二的。它是光和热的源泉，也是唯一一颗能让我们看到圆面的恒星。它与我们的关系是如此密切，在任何一个晴朗的白天，它那光芒夺目的圆面哪怕只有些许的破缺，或几分钟的消失，都是非同小可的事情。在下一篇里，我们将一同去欣赏这种被称

为日食的现象。

作者简介

卢昌海，本科毕业于上海复旦大学物理系，后赴纽约哥伦比亚大学从事理论物理学习及研究，并获物理学博士学位。现旅居纽约。个人主页：<http://www.changhai.org>

一、研究现状

1 描述海洋光学的一些参数

单色辐亮度 L_λ 在俯仰角 θ 及方位角 φ 方向单位立体角内, 通过垂直于此方向的单位截面积的辐射通量 (图 1)。 $L_\lambda = \frac{d\Phi}{dA \cos \theta d\Omega d\lambda}$ ($\text{w} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$),

式中 dA 为面积元, $d\Omega$ 为立体角, θ 为光子流与 dA 法向夹角, $d\Phi$ 为通过 dA 的辐射通量, λ 为光的波长。

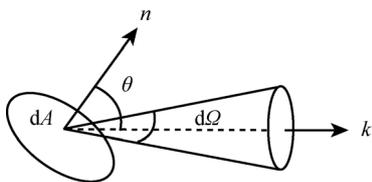


图 1

在海洋中, 对给定波长光, L_λ 为空间坐标、方向、时间的函数, 即 $L_\lambda(x, y, z, \theta, \varphi, t)$ 。对稳定辐射场, L_λ 与时间无关, 即 $L_\lambda(x, y, z, \theta, \varphi)$; 各向同性辐射场 L_λ 与方向无关, 即 $L_\lambda(x, y, z)$; 均匀辐射场的 L_λ 与空间坐标无关, 即 $L_\lambda(\theta, \varphi)$; 水平分层辐射场的 L_λ 与平面坐标 x, y 无关, 即 $L_\lambda(z, \theta, \varphi)$ 。

单色辐照度 E_λ 海中单位面积接收到的辐射通量, 表示单位面积接收到的各个方向的辐亮度之和 (图 2)。可表示为

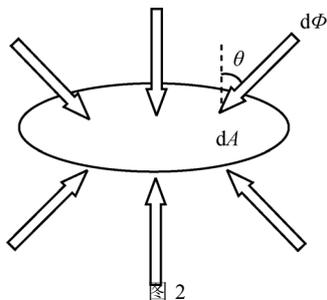


图 2

$$E_\lambda = \lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \sum_{4\pi} L_\lambda \cos \theta \Delta\Omega$$

$$= \int_{4\pi} L_\lambda \cos \theta d\Omega$$

$$= \int_0^{2\pi} \int_0^\pi L_\lambda \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi \quad (\text{w} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1})$$

对各向同性辐射场, $E_\lambda = \pi L_\lambda$ 。其中海中向下辐照度

$$E_{\lambda u}(z) = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} L_\lambda(z, \theta, \varphi) d\Omega$$

$$E_{\lambda d}(z) = - \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=\pi/2}^\pi L_\lambda(z, \theta, \varphi) d\Omega$$

海水体积散射函数 $\beta(\theta)$ 单色准直光束通过海水介质, 辐亮度 L_λ 呈指数规律衰减 (图 3)。 $L_\lambda(r) = L_\lambda(0)e^{-cr}$, 其中 c 为海水体积衰减系数, r 为光的传输距离, $L_\lambda(0)$ 为坐标 0 点沿 r 方向的辐亮度, $L_\lambda(r)$ 为路径 r 处沿 r 方向的波长为 λ 的光的辐亮度。光在水中衰减的原因是受到水的散射和吸

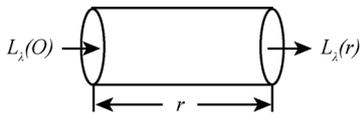


图 3

收, 所以 $c=a+b$, a 为体积吸收系数, b 为体积散射系数。

当一束光入射到海水的一小体积上时, 散射光的辐亮度随散射角 θ 而发生变化。如图 4 所示, $\beta(\theta)$ 定义为在 θ 方向单位散射体积、单位立体角内散射辐射通量与入射在散射体积上的辐照度之比, 即

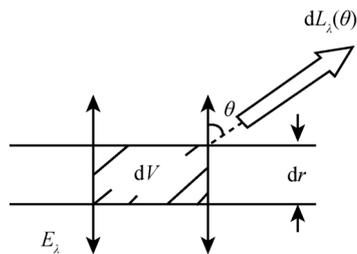


图 4

$$\beta(\theta) = \frac{dL_\lambda(\theta) dA \cos \theta}{E_\lambda dV} = \frac{d\Phi}{d\Omega E_\lambda dV} \quad (\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1})$$

2 海洋光学仪器的作用

测定海水固有光学性质的仪器 因为固有光学性质不受环境条件的影响, 可采样在实验室中测量, 也可在现场测量, 故这类仪器又分为实验室仪器和现场测量仪器两种。它主要包括测定体积衰减系数的 c 仪 (或准直光透射率仪)、测定体积散射函数的 β 仪、测定总散射系数的 b 仪, 其中 β 仪和 b 仪都称为水中光学散射仪。

准直光束通过 r 距离传输后, 透射率 $T_r = \frac{L_\lambda(r)}{L_\lambda(0)} = e^{-cr}$, 所以 $c = \frac{1}{r} \ln \frac{1}{T_r}$ 。通过始末辐亮度的比较, 终端显示 c 值的仪器称体积衰减系数测定仪, 显示 T_r 的称准直光透射率仪。

$\beta(\theta)$ 仪可用于测定各个散射角度的散射光辐亮度或测定散射光辐亮度随角度分布。 b 仪可用于测定各个角度散射光辐亮度之和。光散射仪的 β 仪和 b 仪对不同波长光影响不大, 故测量时一般不作光谱分析。

通过对海水固有光学性质的测量, 可探知海水折射率随温度、盐度、深度和入射光波长而变化。具体测量时, 一般选用某一波长光如 589.3nm, 检测在不同温度和不同盐度下的海水折射率值, 如温度 20℃, 盐度 35% (100g 海水中含有 35g 盐) 时折射率为 1.33940, 海水深度与温度有关, 与盐度影响不大, 深水产生水压大折射率也大, 由已知量可求未知量。通过对体积衰减系数是波长函数的分析, 发现沿岸海水的光谱透射窗口 (即在此波段, 光在海水中的衰减最小, 透射最大) 约为 520nm, 其体积衰减系数约为 0.2~0.6m⁻¹, 衰减长度为 1.7~5m;

而大洋清洁水的光谱透射窗口为 480nm, 体积衰减系数为 0.05m^{-1} , 衰减长度约为 20m, 所以沿岸水呈浑浊的黄色, 清洁的大洋水呈蓝色。图 5 是在某一海域测得的海水体积衰减系数与波长的关系。

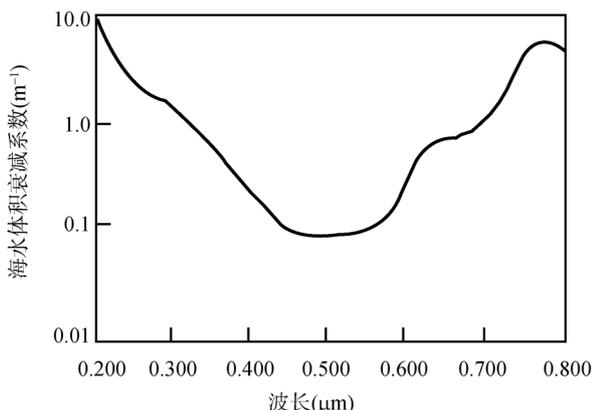


图 5 海水体积衰减系数随波长的变化关系

测定表观光学性质的仪器 海洋的表观光学性质与环境密切相关, 故必须在现场测量。主要包括辐照度仪和辐亮度仪。辐照度仪一般用光电池作为接收光电器件, 测量光谱向下辐照度 $E_{\lambda d}$ 和光谱向上辐照度 $E_{\lambda u}$, 通过计算可进一步得到反射比(辐照比) $R = \frac{E_{\lambda u}}{E_{\lambda d}}$, 接收的光辐射经光谱分光后, 被

光电接收器件转换为电信号。通常的仪器都配以光学或电子学放大器, 以适应从海面到深层的辐照度的大范围变化。辐亮度仪用于测量各个方向的表观辐亮度, 其接收系统是准直接接收的光度计, 限定接收很小的视场角(约 $10^{-4} \sim 10^{-3}\text{rad}$)的辐亮度。光度计在机械控制下沿不同方位角和俯视角旋转, 可接收海水空间立体角 4π 的各个方向的辐亮度。

自从发明了各种航天器后, 人类已经能充分利用海面向上光谱辐射从海洋和沿岸海区的上空探测到各种海洋参数和观察到各种海洋现象。它可获取由于潮汐、沿岸流或河流入海所造成的悬移质分布, 还可获取水中浮游生物、有机溶解物的浓度分布及海底地形结构, 这种卫星遥感技术称为海洋多光谱遥感或海色遥感, 它的基础是研究海面向上光谱辐射与海中叶绿素含量、悬移质含量、有机溶解物和浮游生物的关系。

3 光电结合的各种光电探测仪器极大促进了海洋光学的发展

随着激光技术的诞生, 光信息处理技术的不断

进步, 和各种光电倍增管、放大器的研制, 加上计算机处理数据技术的应用, 人们利用各种激光器发出激光, 通过与海水相互作用的研究, 逐步完善了光在海水中的辐射传递理论、水下目标的能见度理论等。极大促进了海洋光学研究深度和广度。

海洋激光雷达 用船载光学仪器进行测量不仅耗时多成本高, 而且准确率低下。若用飞机或卫星运载的海洋激光雷达系统, 可以做很多以前不能做的工作, 如:

a. 测量水深

根据发射光信号脉冲功率 P_t 和回收到的脉冲功率 P_r 之间关系, $P_r = P_t \frac{A}{(H + nr)^2} \eta_1 \eta_2 \rho \Delta r e^{-2kr}$, 式中 A 为激光雷达望远镜接收面积, H 、 r 分别为激光雷达飞行器的飞行高度和 underwater 深度, n 为海水的折射率, η_1 、 η_2 分别为激光雷达光学效率和电子效率, ρ 为海水反射率, k 为海中漫射衰减系数, Δr 为水深距离分辨率。水深 $r = \frac{c\Delta t}{2n}$, 一般利用 Nd:YAG 激光器波长为 1060nm 激光测量, 可用于测量水深, 更多用于测量海底深度, 从而获知海底地形地貌, 为探测海底资源提供帮助。至于能测量多大深度取决于回收到的脉冲功率 P_r 的大小和接收仪器的灵敏度。

b. 测量海水中叶绿素浓度

在所有的海洋生物中, 浮游植物占有特殊的地位, 因为其他海洋生物以浮游植物作为直接或间接的食物来源。为观察海洋生物量的分布, 调查者一般借助于测定海水中的叶绿素浓度作为浮游植物生物量的指标。传统的仪器分析技术, 如分光光度法、荧光分光光度法和色谱分析等, 虽然精度能满足要求, 但这些方法要依靠逐点采样测量的方式, 且分析速度很慢, 故很难应用于大面积水域的现场测量。而遥感技术正好弥补了传统方法的不足, 可以对大面积甚至全球范围内水域进行叶绿素浓度实时或动态监测。532nm 的激光发射到海水中, 除了海水粒子的散射外, 还有水分子的喇曼散射, 叶绿素分子接收光子而发出 685nm 的荧光, 因此, 回收散射光中通过记录 685nm 处的荧光强弱来获知叶绿素浓度的大小。

激光雷达接收到的激光荧光信号为

$$P_r = P_t \frac{A}{(H + nr)^2} \eta_1 \eta_2 \sigma_f c e^{-(k+k_f)r}$$

式中 σ_f 为海水叶绿素荧光散射截面面积, c 为

叶绿素浓度, k 为海洋漫射衰减系数, k_f 为在荧光波长 685nm 处海洋漫射衰减系数, 其他同前。

水的喇曼散射是水的固有特性, 只与水分子的 O-H 键有关。对 532nm 波长的激光, 其喇曼散射在 650nm 处出现峰值。激光雷达接收到的海水喇曼散射为

$$P_R = P_t \frac{A}{(H+nr)^2} \eta_1 \eta_2 \sigma_R N e^{-(k+k_R)r},$$

式中 σ_R 为海水喇曼散射截面面积, N 为单位体积内的水分子数, k_R 为在喇曼波段海洋漫射衰减系数, 其他同前。上两式, 由于 k_f 与 k_R 均很小且接近相等, 则 $\frac{P_f}{P_R} = \frac{\sigma_f c}{\sigma_R N}$, 测出 P_f 、 P_R , 并已知 σ_f 、 N 、 σ_R , 可求得叶绿素浓度 c 。

c. 探测海洋油污染和海底油气藏分布

近几年来, 由于工业的高度发展, 世界用油量越来越多, 非采油国主要靠海上船只运油从采油国进口, 由于在运输中不幸遭遇大浪或暗礁撞击, 油船泄漏事件时有发生, 严重污染了海洋环境, 给海洋生物带来了灭顶之灾。所以保护海洋生态环境及时探测海面油污染刻不容缓。另外, 随着陆地石油的大量开采, 人们越来越意识到必须从海洋中索取石油天然气。截至 2009 年的探测数据表明, 世界石油资源储量 10000 亿吨, 可开采量约 3000 亿吨, 其中海底储量 1350 亿吨, 占世界石油可开采量的 45%, 世界天然气储量 255 亿~280 亿立方米, 已探明近海海底天然气储量为 140 亿立方米, 占可开采储量的 52%。我国有辽阔的海域和大陆架, 经物探调查表明, 我国近海具有含油区远景的沉积盆地有 7 个, 面积达 70 万平方千米, 海水深度为 50~200m, 沉积岩厚度为 1~10km, 在南黄海、南海、北部湾地区有油气远景的海区, 都与邻近国家在海洋权益、专属经济区和陆架主权的划分和归属方面有争议, 由于海底下这些资源的可流动性, 因此尽早尽快开发利用这些资源尤为迫切需要。

人们经过研究发现, 虽然提纯油与原油的物理特性基本一致, 且油膜的厚度变化范围也相同, 但激光束照射这些油膜时, 各自发出的激光荧光光谱有着明显的一系列差别。激励激光荧光光谱或者发射激光荧光光谱都直接同物质的分子结构有关, 因而可以从荧光光谱的带宽、峰值的结构判断被测油膜是提纯油还是原油, 还能粗略分析油膜的物质分子结构和成分。还可以从荧光光谱的衰减时间的大小来判

别油的种类。一般来讲各种原油发射的荧光光谱的峰值为 450~550nm 之间, 大约有 100nm 的宽度, 并且油越轻, 其发射荧光光谱的谱线的波长越短。而提纯油发射的荧光光谱峰值位于 400nm 左右, 发射荧光带宽为 60nm 左右, 大约为原油的一半。并且提纯油的荧光衰减时间较原油的要长, 由此可通过比较发射荧光光谱和 400nm 处的荧光衰减时间, 就可以将原油与提纯油区分出来, 更进一步, 可以将每种样品与其他样品区分出来。所以利用海洋激光雷达装置既可随时随地监测海洋油污染, 也可通过它探测寻找海底油气藏分布。

d. 测水下温度

利用卫星海洋遥感技术, 测量海面热红外辐射, 可以获取海洋表面的温度, 这一技术已经成熟并广为采用。但是如何测量海水以下一定深度处的温度, 这是一个正在研究且很不成熟的课题。目前海洋表层温度的测量都是用常规海水电导率 (Conductivity)、温度 (Temperature) 和深度 (Depth) 相结合, 即简称 CTD 传感器测量技术进行船载测量, 由于蓝-绿激光能穿透海水, 所以可通过某些散射机制探测海水温度。

激光遥测海洋次表层温度主要有三种方法, 通过测量海水对激光瑞利散射、喇曼散射和布里渊散射。这三种散射机制都与海洋海水温度有关, 由此可通过不同深度海水层散射光谱来测定海洋次表层温度剖面。比较成熟的是海洋喇曼激光雷达的测温技术, 水是一种似冰的四面体结构, 相邻水分子的氧原子之间均存在一氢原子形成氢键 O-H, 由于水的平均配位数是 4.4, 说明还有不与相邻水分子形成氢键的单个水分子存在, 由氢键构成的四面体结构的簇团浓度随温度的增加而减少, 相应单个水分子浓度随温度增加而增多。水的 O-H 键喇曼谱随温度而变化或发生频移, 在此基础上, 可通过测量海水喇曼散射谱测量海水温度。

海洋已被认为是我们这个星球上的最大的热量存储系统, 它对整个地球的气候有重要影响。我国南海海域广阔, 表层温度全年均超过 26℃, 而在 1000m 深处终年低于 5℃左右, 稳定、持久而显著的温差, 是温差发电的有利条件, 如能开发, 估计可发电 $(1\sim 2) \times 10^{12}$ W。

4 水下电视技术是海洋光学的又一成就

水下电视是用于探测水中物体, 并在水上进行

电视显像的光学观测工具，它为实时观察水中目标提供高分辨率的视频图像。水下电视的光源如采用激光，称水下激光电视，由于激光的亮度高、方向性好、单色性强，又是相干光，能大大提高水下能见度，克服杂散光对对比度的影响，提高电视图像的分辨率，从而提高水下电视的观测性能。

最早的水下电视摄像装置是普通工业电视系统用的摄像装置放入合适的密封透明装置中，由于水的散射吸收远远大于空气的散射和吸收，所以成像质量较差。进入 20 世纪 90 年代中期，水下电视系统已完全被 CCD 摄像机代替，这种摄像机灵敏度高、体积小、分辨率高，分辨率可达 2048×2048 像元甚至更高，完全可以满足水下摄像的要求。基本的水下电视摄像系统，包括水下光源或水下辅助照明灯、水下密封外壳、光学透明窗、水下摄像物镜、CCD，以及电子扫描控制电路和电源等。

现在，水下电视已经应用于远距离观察、监控、探索，以及水下控制器和深潜器等方面。同时，水下电视已经用于包括军事目的在内的各种水下作业，如观察武器试验、舰船修造、探索水雷和鱼雷，检查布雷情况，搜索和识别沉没大海中的潜舰、飞机、导弹弹头、卫星及其运载设备。观察、控制海底工程作业和水下建筑过程，勘察和选择水下施工场地、设备安装，以及定期检查工程建筑质量，用于海底地质地貌和海底表层地质结构的勘察，观察海中生物的生活习性和活动规律等。

二、海洋光学的进展与展望

由于各个不同海域之间情况不同，海水盐度、温度、深度及组成成分各不相同，所以不可能有统一的研究方法。但是从共性来讲，还有不少课题有

待深入研究：

1. 基础理论方面

鉴于单色光辐射传递模型已不能满足多光谱水色遥感的要求，必须进一步研究海洋辐射传递的逆问题，尤其是浅海和表层光谱辐射传递、非均匀水体光谱辐射传递、海-气系统光谱辐射传递逆问题的物理模型和计算方法。激光在水中单程的平衡态的传输过程的研究，已不能满足激光雷达探测海洋的要求，必须深入研究窄光束反向多次散射的辐射传递和非平衡态辐射传递模型及其计算方法。

2. 实验技术方面

传统的船测方法已不能满足现代海洋光学发展的要求，海洋遥感光学测量仪器还只是处于起步阶段，随着现代光学技术和光电子技术的进一步发展，以及计算机处理能力的不断提高，海洋遥感光学测量仪器的测试性能和测试精度会越来越高。同时还必须研究新的海洋光学测量模型，以发展新的测量技术和测量仪器。

3. 应用研究方面

在海洋光学中不断引入最新光学测试研究新成果和激光新技术，继续开拓海洋光学在海洋开发、海洋光学要素的精确探测及在海洋技术中的应用。

4. 彩色水下电视

彩色水下电视技术的研发还有许多瓶颈要克服，由于海水对蓝绿光吸收少对其他光强烈吸收，所以看到的水下电视一般呈蓝绿色，要能还原成目标本色，还有许多工作要做。还有水下智能仪器如水下机器人的研发将为海底可移动作业带来更为广阔的应用前景。

(江苏省连云港淮海工学院理学院 222005)



科苑快讯

廉价马铃薯电池

以色列耶路撒冷希伯来大学 (Hebrew University) 的哥德堡 (Alex Goldberg) 和同事首次用简单方法以煮熟的马铃薯获得了稳定的电流，而且它的发电成本只是普通电池的 1/50。他们发现，若在电解作用前先水煮马铃薯，比未经处理的马铃薯多上 10 倍电力，电池可供电数日甚至数周。

使用马铃薯电池供电的电灯，比发展中国家常用的煤油灯成本还便宜 6 倍。能以如此简单又天然

的方式提供电力，可让发展中国家数百万人受惠，真正把光与电信带进尚无电力基础建设的地区。

(高凌云编译自 2010 年第 7 期《欧洲核子研究中心快报》)

