

的深度约为 1.0m；航速为 15km/h 时，螺旋桨后 3.0m 处尾流的深度大于 1.0m。从这些实验结果以及肉眼的观察情况中，可以总结出近似的结论，即尾流的深度与尾流船的航速关系不大，在本实验中螺旋桨深度约为 60cm，尾流的深度约为 1.0m，与文献中关于尾流深度的结果一致。另外，尾流在螺旋桨后的深度并不是一个定值，而是随着离开螺旋桨的距离的增大而缓慢减小。

8.4 分析讨论

为了对上述实验结果有一个更为清楚的整体认识，又分别对尾流船航速为 10km/h 时 0~3.0m 深度透射光照度的变化；没有尾流、40cm 深度湖水的透射特性；没有尾流时从空气到湖水不同深度透射光随时间的变化，深度在 0~1.8m 范围；自然光照度随时间的变化等进行了测量，测量结果如图 8-8a、b、c、d 所示。

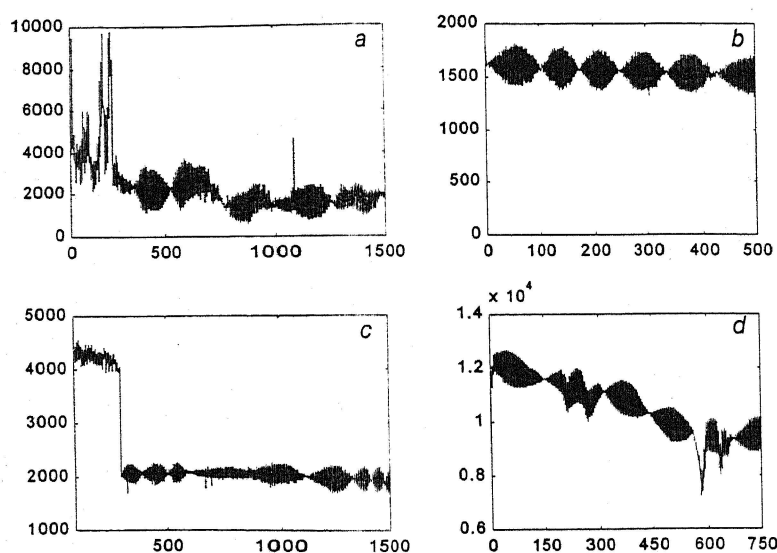


图 8-8 不同情况下透射光照度随时间的变化

a 尾流船航速为 10km/h 时 0~3.0m 深度透射光照度的变化；b 没有尾流、40cm 深度湖水的透射特性；c 没有尾流时从空气到湖水不同深度透射光随时间的变化；d 自然光引起的照度随时间的变化。

从图 8-8b 没有尾流、40cm 深度湖水的透射特性可以看出，没有尾流时湖水的透射光照度随时间的变化呈现出完美的周期性，这一透射光照度是由于水分子、湖水中的溶解物分子所产生的，与散射光照度随时间的变化很相似，可以

认为此时探头采集的光信号主要是水分子等的散射造成的。因为根据文献的结果,能够不经过反射、折射、散射而直接到达探头的直射光线不到万分之一,在前面的讨论中已经使用这一结论。

那么在图 8-8a、d 中的情况看来,随着探头在湖水中的深度的增加,照度显然在逐渐减小,这说明一方面随着深度的增加,自然光的影响逐渐减弱;在到达一定深度时,照度逐渐显示出较强的周期性,说明尾流气泡幕随着深度的增加而逐渐减弱,并且当深度达到一定距离(约 1.5m)时,极强的周期性表明尾流在这一深度已经不再存在。

图 8-8c 中照度的变化规律是明显的,从空气到水中照度有一个急剧减小的过程,但当探头入水以后,照度随深度的减小较为缓慢,稍微表现出有下降趋势。然而信号的周期性却随着深度的增加显著增强。

所有上述讨论都说明,在对尾流光学透射特性的研究过程中,从透射光的相对强度来分析实验结果,可以认为自然光的影响是一个次要的因素。

另外,结合第六章中的理论计算结果来考虑,上述实验结果可以得到近似的解释,当然其中也存在着一些差异。这种差异可能预示着在所建立的理论模型还有没有考虑到的影响因素,或者是在对气泡幕中气泡的分布规律的描述中与真实情况存在误差。但是从上述照度变化情况来看,理论模型在解决小气泡的散射问题中出现的误差并不大。

结语：研究项目的总结与展望

论文题目“尾流的光学特性研究与测量”来源于“鱼雷制导技术国防科技重点实验室”基金试点项目，项目名称是“尾流的光学特性研究与测量”。

1、研究目的、意义及军事应用前景

项目的研究目的是在实验室对气泡、气幕的光学特性进行研究和测量，为光学尾流自导的可行性方案研究提供可靠的实验室数据。在此基础上，进一步研究、论证将鱼雷尾流的光学特性用于鱼雷自导的可操作性和工程化。

其意义在于用声波作为信息的载体进行尾流自导，存在着一些无法克服的缺点，如分辨率差、无法得到直观的图象等。采用光作为信息的载体具有提高精度、提高尾流自导鱼雷作用距离、减小尺寸等优点。近些年来，对海域的控制与争夺成为各国国防的重点，这极大地促进了海洋研究以及相关学科和技术的发展。提高尾流自导鱼雷的作用半径、减小其尺寸，意味着增强了鱼雷及其载体的生存能力，同时增强了其攻击能力，为领海的控制提供了一个有力的保障体系。

基于尾流光学特性的研究，在军事方面，可提高尾流自导鱼雷的作用半径和减小鱼雷的尺寸，这会放大鱼雷及其载体的生命力和战斗力，并降低其成本。在渔业方面，可提高鱼群的跟踪范围和精度，从而为海洋渔业及国民经济带来可观的效益。在其它方面，基于尾流光学特性的研究，甚至可能对水质做出评价，从而为水质检测、水污染控制提供理论依据。

2、研究内容小结

关于尾流的直接文献基于军事秘密而极少见到，根据一些零碎资料显示，国外从二战以来就对尾流的特性着手进行研究，但研究内容主要是尾流的声学特性、尾流的几何特性、尾流中气泡形成和溶解及其在尾流声学特性中所起的作用，另外对尾流的温度及速度场进行了研究，研究结果显示了尾流的声学特性与尾流中气泡的大小、分布等参数的关系；并给出了尾流的温度、速度场分布特征，以及几种舰船的尾流形态。

在项目本身的研究内容的原则下，对舰船尾流具有的多种特性进行了概括

和总结，同时，为了便于将尾流的光学特性从横向与声学特性进行比较，对尾流气泡幕的声学理论进行了详细的描述。在此基础上，对光在水中的特性、水对光的散射中气泡的影响等内容较为细致的阐述。

为了系统地完成研究内容，利用高速摄影技术对实验室模拟的尾流气泡幕进行了研究，初步掌握气泡的运动和动力学规律，并对水中气泡的分布得出了粗略的认识。

关于尾流光学特性的研究，分为两个阶段进行了实验研究。第一阶段是在实验室对气泡模拟器产生的气泡幕进行定量研究，实验使用自行设计、组装的实验系统；第二阶段是对真实尾流的光学特性进行研究，并自行设计了适合于水下测试的实验系统。

在第一阶段实验的基础上，建立了激光通过气泡幕散射的物理模型，并利用模型进行了相应的计算。经与实验结果比较，证实所建立的理论模型可定量描述实验结果，同时还说明了理论结果与实验结果存在一定的差异，并对差异的原由提出了初步看法。

3、后续工作展望

被称为水下导弹的鱼雷是海军的主战武器，精确制导技术在鱼雷上的应用无疑是非常重要的，对于未来海战、特别是高技术条件下的局部战争的主动权和胜负必然起着决定性作用。

我国目前仍然面临着统一祖国的历史重任，对鱼雷的精确制导必然是一个意义重大的课题。基于尾流光学特性的研究，是将来鱼雷制导的一个新的思路，将为鱼雷的精确制导提供一种新的方法。所以无论是理论上还是实践上，对尾流光学特性的研究都具有重要的意义。

参考文献

- [1]. U. S. DEPARTMENT OF COMMANDE, Office of Technical Services, NDRC SUMMARY TECHNICAL REPORTS, "PHYSICS OF SOUND IN THE SEA", 1986, 8 (6): 441~546.
- [2]. Clift R, Grace J R, Weber M E, "Bubbles, Drops and Particles", ACADEMIC PRESS New York San Francisco London 1978, pp27, 171~179, 185~323.
- [3]. Zhang X D, Lewis M and Johnson B, "Influence of bubbles on scattering of light in the ocean", App Opt, 1998, 37(27): 6525~6536.
- [4]. Garrettson G A, "Bubble transport theory with application to the upper ocean", J Fluid Mech, 1973, 59(1): 187~206.
- [5]. Marston P L, Kingsbury D L, "Scattering by bubble in water near the critical angle: interference effects", J Opt Soc Am, 1981, 71(2): 192~196.
- [6]. Davis G E, "Scattering of light by an air bubble in water", J Opt Soc Am, 1981, 45(7): 572~581.
- [7]. Marston P L and Langley D S, "Glory in backscattering: Mie and model predictions for bubbles and conditions on refractive index in drops", J Opt Soc Am, 1982, 72(4): 456~459.
- [8]. Arnott W P, Marston P L, "Unfolded optical glory of spheroids: backscattering of laser light from freely rising spheroidal air bubbles in water", App opt, 1991, 30(24): 3249~3442.
- [8]. Arnott W P, Marston P L, "Optical glory of small freely rising gas bubbles in water: observed and computed cross-polarized backscattering patterns", J Opt Soc Am A, 1988, 5(4): 496~506.
- [9]. Kingsbury D L and Marston P L, "Mie scattering near the critical angle of bubbles in water", J Opt Soc Am, 1981, 71(3): 359~361.
- [10]. Langley D S and Marston P L, "Critical-angle scattering of laser light from bubbles in water: measurements, models, and application to sizing of bubbles", App Opt, 23(7): 1044~1054.
- [11]. Marston P L, "Critical angle scattering by a bubble: physical-optics approximation and observations", J Opt Soc Am, 1979, 69(9): 1205~1211.
- [12]. Yura H T, "Small-angle scattering of light by ocean water", App Opt, 1971, 10(1): 114~118.
- [13]. Bartlett J S, Voss K J, Sathyendranath S, and Vodacek A, "Raman scattering by pure water and seawater", App Opt, 1998, 37(15): 3324~3332.
- [14]. Marston P L, Johnson J L, Love S P, Brim B L, "Critical-angle scattering of white light from a cylindrical bubble in glass: photographs of colors and computation", J Opt Soc Am,

- 1983,73(12): 1658~1664.
- [15]. Henyey F S, "Acoustic scattering from ocean microbubble plumes in the 100Hz to 2kHz region", J Acous Soc Am, 1991,90(1): 399~405
- [16]. Kingsbury D L and Marston P L, "Scattering by bubbles in glass: Mie theory and physical optics approximation", App Opt, 1981,20(14): 2348~2350.
- [17]. Duntley S Q, "Light in the sea", J Opt Soc Am, 1963,53(2): 214~233.
- [18]. Medvin H and Breitz N D, "Ambient and transient bubble spectral densities in quiescent seas and under spilling breakers", J Geo Res, 1989,94(C9): 12751~12759.
- [19]. Haltrin V I, "Apparent optical properties of the sea illuminated by sun and sky: case of the optically deep sea", App Opt, 1998,37(36): 8336~8340.
- [20]. Liebermann L, "Air bubbles in water", J App Phy, 1957,28(2): 205~211.
- [21]. Thorpe S A and Stubbs A R, "Bubbles in a freshwater lake", Nature, 1979,279(5): 403~405.
- [22]. Wriedt T and Doicu A, "Light scattering from a particle on or near a surface", Opt Comm, 1998,152(1): 376~384.
- [23]. Doicu A, Eremin Y A and Doicu A, "Convergence of the T-matrix method for light scattering from a particle on or near a surface", Opt Comm, 1999,159(1): 266~277.
- [24]. Overbeck E and Sinn C, "Three-dimensional dynamic light scattering", J Mod Opt, 1999,46(2): 303~326.
- [25]. [美]L E 默斯顿著, 张闻迪、关福民、杨作昇译, "水中摄影学", 科学出版社, 1979, PP18~33.
- [26]. 袁永羨, "海水的光学特性", 舰船光学, 1985, 4: 76~84.
- [27]. 冯包根译, "多重散射对水中激光传输的影响", 电波研究所季报(日), 1977, 23 (123/124): 75~84.
- [28]. Holoubek J, "Note on light attenuation by scattering: comparison of coherent and incoherent (diffusion) approximations", Opt Eng, 1998,37(2): 705~709.
- [29]. Crawford G B and Farmer D M, "On the special distribution of ocean bubbles", J Geo Res, 1987,92(C8): 8231~8243.
- [30]. Trevorrow M V, Vagle S and Farmer D F, "Acoustical measurements of microbubbles within ship wakes", J Acoust Soc Am, 1994,95(4): 1922~1930.
- [31]. Mulhearn P J, "Distribution of microbubbles in coastal waters", J Geo Res, 1981,86(C7): 6429~6434.
- [32]. Sanford C and Bachhuber C, "The rise of small bubbles in water", J App Phy, 1974,45(6): 2567~2569.
- [33]. Blanchard C D and Syzdek L D, "Film drop production as a function of bubble size", J Geo Res, 1988,93(C4): 3649~3654.
- [34]. Walsh A L and Mulhearn P J, "Photographic measurements of bubbles populations from breaking wind waves at sea", J Geo Res, 1987,92(C13): 14553~14565.

- [35]. Johson B D and Wangersky P J, "Microbubbles: stabilization by monolayers of adsorbed particles", *J Geo Res*, 1987,92(C13): 14641~14647.
- [36]. Johson B D and Cooke R C, "Generation of stabilized microbubbles in seawater", *Science*, 1981,213(7): 209~211.
- [37]. Merlivat L and Memery L, "Gas exchange across an air-water interface: experimental results and modeling of bubble contribution to transfer", *J Geo Res*, 1983,88(C1): 707~724.
- [38]. Steward M B and Miner E W, "Bubble dynamics in a turbulent ship wake", *NRL Memorandum* 6055, 1987,5: 1~44. (NRL: Naval Research Laboratory)
- [39]. Meigas K, "Method for small particle detection by laser", *Opt Eng*, 1998,37(9): 2587~2591.
- [40]. Yi S S and Stafsudd O M, "Optical measurement of large sphere diameters by means of scattering", *App Opt*, 1998,37(19): 4112~4115.
- [41]. Caflisch R E, Miksis M J, Papanicolaou G C and Ting L, "Effective equations for wave propagation in bubbly liquids", *J Fluid Mech*, 1985,153, PP259~273.
- [42]. Caflisch R E, Miksis M J, Papanicolaou G C and Ting L, "Wave propagation in bubbly liquids at finite volume fraction", *J Fluid Mech*, 1985,160, PP1~14.
- [43]. [美]R J 尤立克著, 洪申译, "水声原理" (第三版), 哈尔滨船舶工程学院出版社, PP199~203.
- [44]. Krekov G A, Krekova M M and Shamanaev V S, "Laser sensing of a subsurface oceanic layer. I. Effect of the atmosphere and wind-driven sea waves", *App Opt*, 1998,37(9): 1589~1601.
- [45]. Krekov G A, Krekova M M and Shamanaev V S, "Laser sensing of a subsurface oceanic layer. II. Polarization characteristics of signals", *App Opt*, 1998,37(9): 1596~1601.
- [46]. Haltrin V I, "Self-consistent approach to the solution of the light transfer problem for irradiances in marine waters with arbitrary turbidity, depth, and surface illumination. I. Case of absorption and elastic scattering", *App Opt*, 1998,37(18): 3773~3803.
- [47]. Trabjerg I and Hojerslev N K, "Temperature influence on light absorption by fresh water and seawater in the visible and near-infrared spectrum", *App Opt*, 1996,35(15): 2653~2658.
- [48]. Quan X H and Fry E S, "Empirical equation for the index of refraction of seawater", *App Opt*, 1995,34(18): 3447~3480.
- [49]. Jones A R, "Calculation of the ratios of complex Riccati-Bessel functions for Mie scattering", *J Phys D: App Phys*, 1983,16L49~L52.
- [50]. Kasparian J, Krämer B, Leisner T, Rairoux P, Boutou V, Vezin B, and Wolf J P, "Size dependence of nonlinear Mie scattering in microdroplets illuminated by ultrashort pulses", *J Opt Soc Am B*, 1998,15(7): 1918~1922.
- [51]. Yoshimori K, Itoh K, and Ichioka Y, "Optical characteristics of a wind-roughed water

- surface: a two-dimensional theory", *App Opt*, 1995,34(27): 6236~6247.
- [52]. Raković M J, Kattawar G W, Mehrübeoğlu M, Cameron B D, Wang L V, Rastegar S, and Coté G L, "Light backscattering polarization patterns from turbid media: theory and experiment", *App Opt*, 1999,38(15): 3399~3408.
- [53]. 郑荣钊, 扬瑞昌, 沈幼庭, 朱繁林, "三探头单纤光导探针传感二维气泡速度", 清华大学学报(自然科学版), 1996, 36(10): 1~6.
- [54]. Hammer M, Schweitzer D, Michel B, Thamm E, and Kolb A, "Single scattering by red blood cells", *App Opt*, 1998,37(31): 7410~7418.
- [55]. Velesco N and Schweiger G, "Geometrical optics calculation of inelastic scattering on large particles", *App Opt*, 1999,38(6): 1046~1052.
- [56]. 郑刚, 蔡小舒, 王乃宁, "Mie 散射的数值计算", 应用激光, 1992, 12(5): 220~222.
- [57]. Deniau G, Wagner J M, and Gensane M, "水面舰船尾流的声探测", 周立青译, 杨京江校, UDT' 93, PP100~105.
- [58]. Schulz F M, Stamnes K, and Stamnes J J, "Scattering of electromagnetic waves by spheroidal particles: a novel approach exploiting the $\mathcal{T}$ matrix computed in spheroidal coordinates", *App Opt*, 1998,37(33): 7875~7896.
- [59]. Pendleton J D and Rosen D L, "Light scattering from an optically active sphere into a circular aperture", *App Opt*, 1998,37(33): 7897~7905.
- [60]. Boguchi D J, Domaradzki J A, Stramski D, and Zaneveld J R, "Comparison of near-forward light scattering on oceanic turbulence and particles", *App Opt*, 1998,37(21): 4669~4677.
- [61]. Bartlett J S, Voss K J, Sathyendranath S, and Vodacek A, "Raman scattering by pure water and seawater", *App Opt*, 1998,37(15): 3324~3332.
- [62]. Raković M J and Kattawar G W, "Theoretical analysis of polarization patterns from incoherent backscattering of light", *App Opt*, 1998,37(15): 3333~3338.
- [63]. 漆安慎, 杜婵英, 《力学基础》, 高等教育出版社, 1982 年, PP542~544.
- [64]. R.J. 尤里克著, 洪申译, "水声原理", 哈尔滨船舶工业出版社, 1990.2, pp125~127.
- [65]. 李福新, 中国国防科学技术报告, "舰船尾流及实验室模拟的声学特性研究报告", 1999 年 06 月, pp1~26.
- [66]. 张建生, 孙传东, 卢笛, "水中气泡的特性研究", 西安工业学院学报, 2000, 20(1): 1~8.
- [67]. 张建生, 孙传东, 冀邦杰, 卢笛, "水中气泡的运动规律和光学散射特性", 鱼雷技术, 2000, (总第 29 期) 1: 22~25, 48.
- [68]. 张建生, 刘建康, 冀邦杰, 孙传东, 陈良益, "激光通过实验室模拟尾流的衰减特性", 西安工业学院学报, 2001, 21(2):
- [69]. 张建生, 左军建, "气泡输运方程及其应用", 石家庄军械工程学院学报, 2001, 2:
- [70]. 张建生, 吕青, 孙传东, 卢笛, 陈良益, "高速摄影技术对水中气泡运动规律的研究", 光子学报, 2000, 29(10): 952~955.

- [71]. 张建生, 吕青, 冀邦杰, 孙传东, 陈良益, “实验室模拟尾流的光学特性”, 光子学报, 2001, 30
- [72]. 冀邦杰, 周德善, 张建生, “基于舰船尾流光效应的制导鱼雷”, 鱼雷技术, 2000, (总第 31 期) 3: 40~43.
- [73]. 张建生, 吕青, 冀邦杰, 孙传东, 陈良益, “He-Ne 激光通过气幕的特性”, 鱼雷技术, 2001, (总第 33 期) 1: 20~23.
- [74]. Miner E W, Griffin O M, and Skop R A, “Near-surface bubble motion in sea water”, NRL Memorandum Report 5756, 1986, PP1~31.
- [75]. 李福新, 孙进才, 黄景泉, “声波激励下水中孤立气泡的多阶谐振”, 声学学报, 1996, 21 (第四期增刊): 475~482.
- [76]. 李福新, 孙进才, 黄景泉, “水下气幕的相干和非相干声透射”, 西北工业大学学报, 1996, 14 (4): 522~525.
- [77]. 李福新, 孙进才, 黄景泉, “水中孤立气泡的单极子谐振频率及振动阻尼”, 西北工业大学学报, 1996, 14 (增刊): 120~125.
- [78]. Sangani A S, “A pairwise interaction theory for determining the linear acoustic properties of dilute bubbly liquids”, J Fluid Mech, 1991, 232(3): 221~284.
- [79]. Sangani A S and Sureshkumar R, “Linear acoustic properties of bubbly liquids near the natural frequency of the bubbles using numerical simulations”, J Fluid Mech, 1993, 252(12): 239~264.
- [80]. Hampton S W, “An acoustic bubble density measurement technique for surface ship wakes”, DTIC file copy (NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL, Monterey California), 1987, PP15~185.
- [81]. Carstensen E L and Foldy L L, “Propagation of sound through a liquid containing bubbles”, J Acous Soc Am, 1947, 19(3): 481~501.
- [82]. Hsieh D W and Plesset M S, “On the propagation of sound in a liquid containing gas bubbles”, The Physics of Fluids, 1961, 4(8): 970~975.
- [83]. Trammell G T, “Sound waves in water containing vapor bubbles”, J App Phys, 1962, 33(5): 1662~1669.
- [84]. 钱祖文, 李保文, 郑晓瑜, 邵道远, “气泡幕中的声传播及其反演”, 中国科学 (A 辑), 1992, 2: 193~199.
- [85]. Stewart M B and Miner E W, “Near-surface bubble motion in sea water”, NRL Memorandum Report 6055, 1987, PP1~44.
- [86]. Kaiser J A C, Garrett W D, Ramberg S E, Peltzer R D and Andrews M D, “A ship wake/films exploratory experiment”, NRL Memorandum Report 6270, 1988, PP1~17.
- [87]. Medwin H, “In situ acoustic measurements of bubble populations in coastal ocean waters”, J Geo Res, 1970, 75(3): 599~611.
- [88]. Thorpe S A “Measurements with an automatically recording inverted echo sounder: ARIES and the bubble clouds”, J Phys Ocean, 1986, 16(2): 1462~1478.

- [89]. Medwin H, "In situ acoustic measurements of microbubbles at sea", *J Geo Res*, 1977, 82(6): 971~976.
- [90]. Vagle S and Farmer D M, "The measurement of bubble-size distributions by acoustical backscatter", *J Atmos Ocean Techn*, 1991, 9(12): 630~644.
- [91]. Nicholas M, Roy R A, Crum L A, Oğuz H and Prosperetti A, "Sound emissions by a laboratory bubbles cloud", *J Acous Soc Am*, 1994, 95(6): 3171~3182.
- [92]. Crum L A and Yoon S W, "An investigation of the collective oscillations of a bubble cloud", *J Acous Soc Am*, 1991, 89(2): 700~706.
- [93]. Kameda M and Matsumoto Y, "Shock waves in a liquid containing small gas bubbles", *Phys Fluids*, 1996, 8(2): 322~335.
- [94]. Laird D T and Kendig P M, "Attenuation of sound in water containing air bubbles", *J Acous Soc Am*, 1952, 24(1): 29~32.
- [95]. Davis N and Thurston E G, "The acoustical impedance of a bubbly mixture and its size distribution function", *J Acous Soc Am*, 1950, 22(1): 20~23.
- [96]. Fox F E, Curly S R and Larson G S, "Phase velocity and absorption measurements in water containing air bubbles", *J Acous Soc Am*, 1955, 27(3): 534~539.
- [97]. Dominico S N, "Acoustic wave propagation in air-bubble curtains in water—Part I : History and theory", *Geophysics*, 1982, 47(3): 345~353.
- [98]. Dominico S N, "Acoustic wave propagation in air-bubble curtains in water—Part II : Field experiment", *Geophysics*, 1982, 47(3): 354~375.
- [99]. d'Agostino L and Brennen C E, "Acoustical absorption and scattering cross sections of spherical bubble clouds", *J Acous Soc Am*, 1988, 84(6): 2126~2134.
- [100]. Commander K W and Prosperetti A, "Linear pressure waves in bubbly liquids: comparison between theory and experiments", *J Acous Soc Am*, 1989, 85(2): 732~746.
- [101]. Kobelev Y A and Ostrovsky L A, "Nonlinear acoustic phenomena due to bubble drift in a gas-liquid mixture", *J Acous Soc Am*, 1989, 85(2): 621~629.
- [102]. Suiter H R, "Pulse length effects on the transmissivity of bubbly water", *J Acous Soc Am*, 1992, 91(3): 1383~1387.
- [103]. Drumheller D S and Bedford A, "A theory of bubbly liquids", *J Acous Soc Am*, 1979, 66(1): 197~208.
- [104]. Rubinstein J, "Bubble interaction effects on waves in bubbly liquids", *J Acous Soc Am*, 1985, 77(6): 2061~2066.

发表论文

- [1]. 张建生, 孙传东, 卢笛, 苟增光, “锌的表面增强喇曼散射效应”, 光子学报, 1999, 28 (6): 551~554
- [2]. 张建生, 孙传东, 卢笛, 陈良益, 苟增光, “核酸碱基的表面增强喇曼散射效应研究”, 光子学报, 1999, 28 (9): 806~810.
- [3]. 张建生, 孙传东, 卢笛, 陈良益, 苟增光, “银片上茜素的表面增强共振喇曼散射效应及模式标识”, 光子学报, 1999, 28 (9): 811~814.
- [4]. 张建生, 孙传东, 卢笛, 苟增光, 陈良益, “化学腐蚀法制作 SERS 活性衬底”, 光子学报, 2000, 29 (1): 45~47.
- [5]. 孙传东, 陈良益, 高立民, 李驰, 卢笛, 张建生, “水下微光高速光电成像系统作用距离的研究”, 光子学报, 2000, 29 (2): 185~189.
- [6]. 张建生, 孙传东, 卢笛, 陈良益, 苟增光, “SERS EFFECT FROM MEDICINAL CALCIUM LOCATATE” (英文), 光子学报, 2000, 29 (3): 264~266.
- [7]. 张建生, 莫育俊, 苟增光, “茜素红在银镜上的表面增强共振喇曼散射”, 西安工业学院学报, 1999, 19 (3): 173~176.
- [8]. 张建生, 孙传东, 卢笛, “水中气泡的特性研究”, 西安工业学院学报, 2000, 20 (1): 1~8.
- [9]. 张建生, 孙传东, 冀邦杰, 卢笛, “水中气泡的运动规律和光学散射特性”, 鱼雷技术, 2000, (总第 29 期) 1: 22~25, 48.
- [10]. 吕青, 张建生, “物质结构层次化与大学物理教学”, 高教研究学报, 2000, (总第 57 期) 1: 55~59.
- [11]. 张建生, 吕青, 孙传东, 卢笛, 陈良益, “高速摄影技术对水中气泡运动规律的研究”, 光子学报, 2000, 29 (10): 952~955.
- [12]. 张建生, 刘建康, 冀邦杰, 孙传东, 陈良益, “激光通过实验室模拟尾流的衰减特性”, 西安工业学院学报, 2001, 21 (2):
- [13]. 张建生, 左军建, “气泡输运方程及其应用”, 石家庄军械工程学院学报, 2001, 2:
- [14]. 冀邦杰, 周德善, 张建生, “基于舰船尾流光效应的制导鱼雷”, 鱼雷技术, 2000, (总第 31 期) 3: 40~43.
- [15]. 张建生, 吕青, 冀邦杰, 孙传东, 陈良益, “实验室模拟尾流的光学特性”, 光子学报, 2001, 30.
- [16]. 张建生, 吕青, 冀邦杰, 孙传东, 陈良益, “He-Ne 激光通过气幕的特性”, 鱼雷技术, 2001, (总第 33 期) 1: 20~23.

致 谢

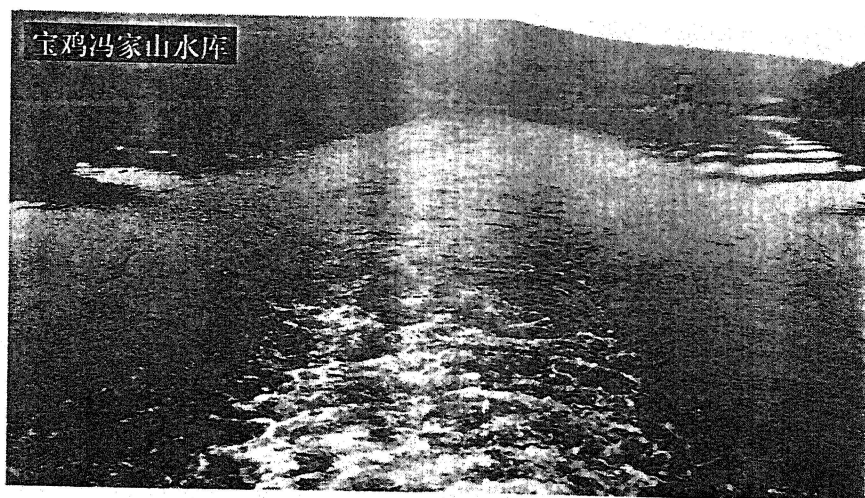
衷心感谢我的导师陈良益先生在三年中无微不至的关怀和爱护，无论在学习、工作上还是在生活上，陈老师都将永远是我的楷模。

感谢孙传东先生在三年中对我的帮助和爱护，在三年的学习中，我们在工作上的默契、对我的教导都是无与伦比的，我将永远向他学习。

感谢课题组的所有同志在三年来的帮助；同时感谢七〇五所重点实验室的所有同志在工作中给予的支持和帮助，特别感谢周德善、冀邦杰先生的关怀和支持。

在此，我真诚地祝愿所有老师、同事、同学身体健康、万事如意！我将以一生的信念回报大家的支持和帮助。

THANKS A MILLION!



张建生

2001年06月

