

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2016.12.013

专题:数字诊疗装备研发

## 基于光声-超声协同的多模成像系统

陶超<sup>1</sup>, 项四平<sup>2</sup>

1. 南京大学声学研究所, 江苏 南京 210093; 2. 无锡海鹰电子医疗系统有限公司, 江苏 无锡 214061

**【摘要】**光声成像兼具声学成像和光学成像两者的优势, 在生物医学领域表现出巨大的应用前景。实时成像、多模成像满足了对动态生理过程实时监控的需求, 提高了临床诊断准确率, 因而是生物医学成像技术发展的重要趋势。本项目拟集成光声-超声技术, 在实现光声-超声双模实时成像的基础上, 充分挖掘光声-超声两者物理效应的协同机制, 解决两者不能独立解决时变复杂声学环境中的成像难题, 实现两者不具备的新功能。本项目的研究顺应生物医学成像发展潮流, 赋予光声-超声技术新的功能和应用空间, 对于增强我国数字诊疗装备的技术竞争力具有积极意义。

**【关键词】**光声; 超声; 多模成像; 超声聚焦; 电离辐射

**【中图分类号】**O426; O439

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2016)12-1240-05

## Multi-modal imaging system based on photoacoustic-ultrasound cooperation

TAO Chao<sup>1</sup>, XIANG Siping<sup>2</sup>

1. Institute of Acoustic, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Wuxi Haiying Electronic Medical System Co. Ltd., Wuxi 214061, China

**Abstract:** Photoacoustic imaging which takes the both merits of acoustic imaging and optical imaging shows great potential in biomedicine. Real-time imaging and multi-modal imaging, which satisfy the clinical requirements in real-time monitoring the dynamical physiological process and improving the diagnosis accuracy, are the important trends of biomedical imaging. The research group of this program will realize the photoacoustic-ultrasound dual-modal imaging by integrating the photoacoustic and ultrasonic techniques. By digging the cooperative effect between photoacoustics and ultrasound, the research group will try to challenge the imaging problems in the time varying and inhomogeneous tissues, which have not been solved by any signal techniques. This research program shows significant in improving technique competence of digital diagnosis and treatment equipment of China.

**Keywords:** photoacoustic; ultrasound; multi-modal imaging; ultrasound focusing; ionizing radiation

### 前言

光声成像是21世纪初兴起的一种基于光声效应的新颖复合成像技术, 它集光学成像与声学成像优点于一体, 让人们看得更深入、更清楚、更安全<sup>[1-2]</sup>。在脉冲或调制激光照射下, 生物组织中的光吸收体吸收电磁波能量, 进而导致其热胀冷缩并向周围激发声波, 这就是所谓的光声效应, 其产生的声信号称

为光声信号。由于光声信号的强度和相位与组织中光学吸收参量的空间分布特性有关, 因此人们可以通过探测光声信号, 从中提取深层组织中光吸收参量的空间分布特性, 并以此作为成像参数重构组织图像<sup>[1-2]</sup>。

光声成像既具有超声成像深层组织成像分辨率高的优点, 又具有光学成像在对比度、分子成像、功能成像等方面的优势, 而且光声成像采用的非电离辐射比X射线等电离辐射具有更高的生物安全性。这些优点使得光声成像在生物医学的诸多领域表现出巨大的应用潜力, 例如脑功能成像<sup>[3-5]</sup>、血流速度及微循环检测<sup>[6-8]</sup>、内窥成像<sup>[9]</sup>、乳腺癌诊断<sup>[10]</sup>、关节炎诊断<sup>[11]</sup>等, 成为发展最迅速的生物医学影像技术之一。

**【收稿日期】**2016-10-15

**【基金项目】**国家重点研发计划(2016YFC0102300)

**【作者简介】**陶超, 研究生, 副教授, 主要研究方向: 生物医学光声成像,  
E-mail: taochao@nju.edu.cn

**【通信作者】**项四平, 高级工程师, 主要研究方向: 医学超声成像设备,  
E-mail: xiangsiping@haiying.com.cn

## 1 国内外现状及趋势分析

近年来,实时成像和多模成像成为光声成像两个重要的发展趋势。实时成像是生命科学和临床医学对生理、病理动态发展过程实时监测的必然需求,它有利于缩短成像时间、改善医生和患者的临床使用体验。为此,国际上多个研究团队争相开展了这方面的研究<sup>[4-5, 12-14]</sup>。例如,美国密歇根大学课题组开发了基于商用超声机的光声实时成像系统,该系统可以提供帧率为10帧/s的动态光声影像<sup>[12]</sup>;佛罗里达大学团队则利用自主研制的192通道光声信号同步采集系统,实现了实时三维光声成像,他们成功利用该系统实时监控了药物注射过程,以及老鼠运动过程中的脑活动<sup>[4-5]</sup>;加州大学团队实现了高速光声内窥镜,该系统可以获得血管壁1帧/s的光声内窥影像<sup>[13]</sup>;最近,华盛顿大学研究团队利用高重复频率激光和快速扫描系统,实现了超高速光声显微镜,该系统一维成像帧率可达400K帧/s,二维成像帧率约为400帧/s,三维成像帧率仍能保持约1帧/s<sup>[14]</sup>。这些光声实时成像系统的研究有效拓展了光声成像对生物活体动态生理过程的监测能力。

多模成像集多种成像技术于一体,能够提供成像区域的多种信息,从而提高临床诊断的可靠性,它是目前生物医学影像学发展的重要趋势<sup>[15]</sup>。光声多模成像的研究大体上可以分为两个方面:一方面,主要着眼于光声成像内在的多参量特性,挖掘光声信号自身与生命过程有关的多重信息,从而获得多参量的光声图像<sup>[1]</sup>。例如,利用不同生化成分对特定波长电磁波的选择性吸收,人们可以获得组织中DNA/RNA<sup>[16]</sup>、血红蛋白<sup>[17]</sup>、血氧饱和度<sup>[17]</sup>等特定成分的光声图像;此外,研究者还成功从光声信号中提取了组织的温度分布<sup>[18-19]</sup>、血流速度<sup>[20-21]</sup>等多种成像参量。另一方面,则着眼于将光声成像与其它成像技术集成,在同一系统上实现多种不同的成像功能。例如,光声成像分别与X射线CT、扩散光学成像<sup>[22]</sup>、超声成像<sup>[9, 23-25]</sup>等成像技术集成,期望被用于提高临床诊断的准确率。

特别值得一提的是光声与超声集成的双模成像系统。超声成像具有经济、安全、信息丰富等诸多优点,成为常见疾病诊断首选的筛查技术手段,超声设备也是各级医疗卫生机构最广泛的医疗设备。超声和光声成像提供了不同的成像参数,但是两者具有类似的声学信号探测系统。因此,光声成像和超声成像两者具有天然的互补性,而在系统上又具有高

度兼容性。光声-超声双模成像系统已经成为目前光声成像研究的一个重要方向<sup>[9, 23-25]</sup>。光声与超声有机集成实现的多模实时成像系统,将以最小的额外系统开销,极大地丰富成像信息,更好地满足临床医学对早期诊断、精确诊断的需求。正是由于这些优点,光声-超声结合的多模成像、实时成像系统正成为目前光声研究的热点,也是未来的重要发展趋势。

在生物医学光声成像技术的发展伊始,国内多家研究机构与国际前沿保持同步,并取得了丰硕的研究成果,在光声实时成像和多模成像方面,也做出了重要的贡献。华南师范大学团队提出的光声黏弹成像丰富了光声成像参量,为肿瘤、心血管等疾病早期诊断提供更为可靠的影像学信息<sup>[26-27]</sup>。他们开发的血管内光声脂质成像技术在斑块易损性关键指标方面取得了重大进展,活体实验表明该技术能够在全血液背景下准确原位成像斑块内的脂质<sup>[28]</sup>。此外,该团队还在以微波代替激光实现光声成像的研究上取得了重大进展,成功利用微波作为光声激发源,获取了深层组织高分辨率图像<sup>[29]</sup>。华中科技大学在光声-超声多模实时成像方面做出原创性工作,他们将光声成像与超声成像结合起来,率先实现了动态监测皮肤组织光透明过程中的声学参数与光学参数变化。实验结果验证了光透明机制的假说,并一定程度上预测了在体光透明的效果<sup>[30]</sup>。他们还利用电控变焦透镜和成像光纤束实现了一套分辨率1.0~44.8  $\mu\text{m}$ 连续可调的多尺度光声显微成像系统,该研究成功降低系统生物学中多尺度信息整合的难度<sup>[31]</sup>。中国科学院深圳先进技术研究院团队也在光声多模成像领域做出重要贡献,他们采用纳米探针作为造影剂,同时增强多模成像系统中核磁共振成像(MRI)、光声等多种成像模式的图像质量<sup>[32]</sup>。此外,他们提出采用光学分辨率的光声成像系统自动提取微血管网络的血管直径分布、密度、弯曲度、分形维度等多种定量生理参量,该多参量定量成像技术对于研究肿瘤血管生成,以及其它与微循环有关的疾病具有重要意义<sup>[33]</sup>。电子科技大学团队采用光声实时成像技术研究了针灸过程中小动物大脑的血流变化情况,他们发现当用针灸刺激特定穴位时,会导致血流动力学的变化,这一研究为人们深入研究针灸的治疗机制提供了一种有效的可视化工具<sup>[34]</sup>。他们还采用高分辨率三维光声成像的方法研究手指关节炎,活体实验的光声成像结果与MRI结果一致,表明光声成像在关节炎早期诊断上具有潜在的应用价值<sup>[35]</sup>。北京大学光声课题组发展了光声-超声双模



显微镜系统,利用该多模态成像系统,他们成功实现对小鼠虹膜血管、眼底血管以及黑色素上皮层进行清晰成像,获得眼部组织高分辨率三维空间结构,并实现了超声-光声两种图像的精确融合<sup>[36]</sup>。复旦大学光声团队则在解决有限视角条件下,在光声成像和稀疏视角条件下的光声成像方面做出系列创新工作。他们通过改进光声成像算法,有效提高了这些情况下的光声成像质量<sup>[37-39]</sup>。上海交通大学研究团队正致力于研究光声相干层析成像和光声成像集成的双模态内窥成像技术,并期望以此技术全面观测动脉粥样硬化易破裂斑块的3个主要特征,即薄纤维帽、脂核、巨噬细胞的活动。此外,同济大学、厦门大学、哈尔滨工业大学、福建师范大学、清华大学等多家研究机构也做出了卓越的研究成果<sup>[40-42]</sup>。南京大学光声研究团队做出了富有特色的工作,首先提出光声频谱参数这一新的光声成像参数<sup>[43-45]</sup>。系列的理论和实验研究证明光声信号的频域参数与被成像组织的随机微结构特征存在确定性对应关系,而且光声频谱参数与测量系统参数无关,因此光声频谱参数成像理论为定量衡量深层组织的微结构特性提供了有效的手段。由于很多组织病变过程都伴随有微结构特征的变化,因此光声频谱成像已经在肝组织病变、血管增生、牙釉质早期损伤等领域表现出有价值的应用前景<sup>[46-48]</sup>。其次,还初步探索了声散射环境中的光声成像,提出将超声干涉测量法与光声成像相结合,有效提取了声散射信号中的有用信息<sup>[49-51]</sup>。仿真和实验研究表明该方法可以有效提高具有复杂声学特性组织中的光声成像效果,该研究拓展了光声成像的潜在应用领域<sup>[49-50]</sup>。

## 2 项目目标与内容

目前光声实时成像和多模成像研究仍有局限性:其一,光声实时成像是建立在均匀稳定声学媒质这一重要前提之下,但是实际活体组织的声学特性空间分布并不均匀,时间上还随着呼吸、心跳等因数发生动态变化,这会严重降低光声成像的质量,甚至导致不能获得可辨识的影像,这一局限性极大地制约了光声成像的效果及其应用;其二,多模成像研究大多只局限于将光声技术与其它成像技术叠加在同一设备之中,未能充分挖掘多模条件下多物理效应之间的相互作用,从而实现单一技术不具有的新功能。

2016年首批启动的国家重点研发计划“数字诊疗装备研发”重点专项旨在抢抓健康领域新一轮科技革命的契机,以早期诊断、精确诊断、微创治疗、精

准治疗为方向,重点突破一批引领性前沿技术,加快推进我国医疗器械领域创新链与产业链的整合,促进我国数字诊疗装备整体进入国际先进行列。以此为契机,针对光声实时成像与多模成像的局限性,南京大学声学研究所携手无锡海鹰电子医疗系统有限公司联合研究基于光声超声协同的自适应诊疗系统。科研团队巧妙利用光声成像与传统超声成像的内在联系及其成像设备硬件的内在兼容性,在具有自主知识产权的国产商用超声系统基础上,研发光声成像的新功能,进而实现光声-超声结合的多模态实时成像系统。这一研发模式有利于节省研发周期、降低研发风险和研发成本,有利于形成自主知识产权的光声诊疗装备,多模态成像提供病患区域丰富的影像学信息有利于病灶的早期发现,提高临床诊断的可靠性。以普及型超声机为基础研发新型诊疗装备,便于在未来临床使用中更好符合医务工作者已有的操作使用习惯。在此基础上,科研团队还将针对目前光声成像在骨骼附近成像存在伪像、动态条件下超声准确聚焦等难题,充分挖掘光声-超声两者物理效应的协同机制和光声-超声信号的内在联系,实现自适应的光声实时成像和超声靶向聚焦。该项目研究内容顺应了实时成像和多模成像这一生物医学成像发展潮流,丰富了光声成像理论,赋予光声-超声技术新的内涵和功能;基于新机理样机的研制,对于研究成果的产业化和增强我国数字诊疗装备技术竞争力具有积极意义。

南京大学声学研究所是我国最早建立的声学教学与科研基地,是我国从事声学基础研究最重要的单位之一。海鹰电子医疗系统有限公司隶属于中国船舶工业集团,是中国医用超声的发源地之一,其自主研发的“海鹰B超”获得国家科技进步二等奖,为打破外商垄断我国普及型B超市场作出了突出贡献。南京大学基础研究方面的长处与海鹰医疗丰富的设计制造经验形成优势互补、产学研结合共同促进光声成像技术的实用化和产业化。

## 3 结语

每一种新型医学成像技术都具有其独特的魅力,让人们看到以往不能看到的器官结构和生理过程。光声成像既具有超声技术成像深度大和深层组织成像分辨率高的优点,又具有光学成像在对比度、分子成像、功能成像等方面的优势。光声成像采用的激光是非电离辐射,它比X光成像、CT等采用的X射线等电离辐射具有更高的生物安全性。光声成像

技术集光学成像与声学成像优点于一体,让人们看得更深入、更清楚、更安全。南京大学声学研究所携手无锡海鹰电子医疗系统有限公司联合攻关的项目“基于光声-超声协同的自适应诊疗系统研究”获2016年国家重点研发计划“数字诊疗装备研发”专项支持,倾力打造国产光声成像设备。可以预期在不久的将来,国产光声-超声多模诊疗设备的成功研发将增强我国数字诊疗装备的技术竞争力,同时集光声-超声技术一体的多模实时成像系统能够提供病患区域的多重信息,提高临床诊断的可靠性,更好地满足临床医学对早期诊断、精确诊断、精确医疗的需求,让象牙塔中的科研成果造福人类健康。

### 【参考文献】

- [1] WANG L V. Multiscale photoacoustic microscopy and computed tomography[J]. Nat Photonics, 2009, 3(9): 503-509.
- [2] WANG L V, HU S. Photoacoustic tomography: *in vivo* imaging from organelles to organs [J]. Science, 2012, 335(6075): 1458-1462.
- [3] WANG X, PANG Y, KU G, et al. Non-invasive laser-induced photoacoustic tomography for structural and functional *in vivo* imaging of the brain[J]. Nat Biotechnol, 2003, 21(7): 803-806.
- [4] XIANG L, WANG B, JI L, et al. 4-D photoacoustic tomography [J]. Sci Rep, 2013, 3(12): 1113.
- [5] XIANG L, JI L, ZHANG T, et al. Non-invasive real-time tomographic imaging of epileptic foci and networks [J]. Neuroimage, 2013, 66(2): 240-248.
- [6] ZHANG H F, MASLOV K, STOICA G, et al. Functional photoacoustic microscopy for high-resolution and noninvasive *in vivo* imaging[J]. Nat Biotechnol, 2006, 24(24): 848-851.
- [7] FANG H, MASLOV K, WANG L V. Photoacoustic Doppler effect from flowing small light-absorbing particles [J]. Phys Rev Lett, 2007, 99(18): 184501.
- [8] WANG L, XIA J, YAO J, et al. Ultrasonically encoded photoacoustic flowgraphy in biological tissue[J]. Phys Rev Lett, 2013, 111(20): 204301.
- [9] YANG J M, FAVAZZA C, CHEN R, et al. Simultaneous functional photoacoustic and ultrasonic endoscopy of internal organs *in vivo* [J]. Nat Med, 2012, 18(8): 1297-1302.
- [10] XIE Z, HOOI F M, FOWLKES J B, et al. Combined photoacoustic and acoustic imaging of human breast specimens in the mammographic geometry[J]. Ultrasound Med Biol, 2013, 39(11): 2176-2184.
- [11] SUN Y, SOBEL E, JIANG H. First assessment of three-dimensional quantitative photoacoustic tomography for *in-vivo* detection of osteoarthritis in the finger joints[J]. Med Phys, 2011, 38(7): 4009-4017.
- [12] WANG X, FOWLKES J B, CANNATA J M, et al. Photoacoustic imaging with a commercial ultrasound system and a custom probe [J]. Ultrasound Med Biol, 2011, 37(3): 484-492.
- [13] PIAO Z, MA T, LI J, et al. High speed intravascular photoacoustic imaging with fast optical parametric oscillator laser at 1.7  $\mu\text{m}$  [J]. Appl Phys Lett, 2015, 107(8): 083701.
- [14] YAO J, WANG L, YANG J M, et al. High-speed label-free functional photoacoustic microscopy of mouse brain in action [J]. Nat Methods, 2015, 12(5): 407-410.
- [15] SAVAGE N. Multiple exposure-combining imaging techniques can provide a wealth of information about disease [J]. Nature, 2013, 502: S90-S91.
- [16] YAO D K, MASLOV K, SHUNG K K, et al. *In vivo* label-free photoacoustic microscopy of cell nuclei by excitation of DNA and RNA [J]. Opt Lett, 2010, 35(24): 4139-4141.
- [17] HU S, MASLOV K, WANG L V. Second-generation optical-resolution photoacoustic microscopy with improved sensitivity and speed [J]. Opt Lett, 2011, 36(7): 1134-1136.
- [18] YAO J, KE H, TAI S, et al. Absolute photoacoustic thermometry in deep tissue [J]. Opt Lett, 2013, 38(24): 5228.
- [19] WANG B, EMELIANOV S. Thermal intravascular photoacoustic imaging [J]. Biomed Opt Express, 2011, 2(11): 3072-3078.
- [20] YAO J J, MASLOV K, SHI Y F, et al. *In vivo* photoacoustic imaging of transverse blood flow by using Doppler broadening of bandwidth [J]. Opt Lett, 2010, 35(9): 1419-1421.
- [21] SONG W, LIU W Z, ZHANG H F. Laser-scanning Doppler photoacoustic microscopy based on temporal correlation [J]. Appl Phys Lett, 2013, 102(20): 203501.
- [22] XI L, LI X, YAO L, et al. Design and evaluation of a hybrid photoacoustic tomography and diffuse optical tomography system for breast cancer detection [J]. Med Phys, 2012, 39(5): 2584-2594.
- [23] KUMON R E, DENG C X, WANG X D. Frequency-domain analysis of photoacoustic imaging data from prostate adenocarcinoma tumors in a murine model [J]. Ultrasound Med Biol, 2011, 37(5): 834-839.
- [24] LI R, WANG P, LAN L, et al. Assessing breast tumor margin by multispectral photoacoustic tomography [J]. Biomed Opt Express, 2015, 6(4): 1273-1281.
- [25] FEHM T F, DEAN-BEN X L, RAZANSKY D. Four dimensional hybrid ultrasound and optoacoustic imaging *via* passive element optical excitation in a hand-held probe [J]. Appl Phys Lett, 2014, 105(17): 173505.
- [26] GAO G D, YANG S H, XING D. Viscoelasticity imaging of biological tissues with phase-resolved photoacoustic measurement [J]. Opt Lett, 2011, 36(17): 3341-3343.
- [27] ZHAO Y, YANG S, CHEN C, et al. Simultaneous optical absorption and viscoelasticity imaging based on photoacoustic lock-in measurement [J]. Opt Lett, 2014, 39(9): 2565-2568.
- [28] ZHANG J, YANG S, JI X, et al. Characterization of lipid-rich aortic plaques by intravascular photoacoustic tomography (IVPAT): *ex-vivo* and *in-vivo* validation in a rabbit atherosclerosis model with histologic correlation [J]. J Am Coll Cardiol, 2014, 64(4): 385-390.
- [29] LOU C, YANG S, JI Z, et al. Ultrashort microwave-induced thermoacoustic imaging: a breakthrough in excitation efficiency and spatial resolution [J]. Phys Rev Lett, 2012, 109(21): 218101.
- [30] YANG X, LIU Y, ZHU D, et al. Dynamic monitoring of optical clearing of skin using photoacoustic microscopy and ultrasonography [J]. Opt Express, 2014, 22(1): 1094-1104.
- [31] JIANG B, YANG X, LIU Y, et al. Multiscale photoacoustic microscopy with continuously tunable resolution [J]. Opt Lett, 2014, 39(13): 3939-3941.
- [32] MOU J, LIU C, LI P, et al. A facile synthesis of versatile Cu<sub>2</sub>-xS nanoprobe for enhanced MRI and infrared thermal/photoacoustic multimodal imaging [J]. Biomaterials, 2015, 57(1): 12-21.
- [33] YANG Z, CHEN J, YAO J, et al. Multi-parametric quantitative microvascular imaging with optical-resolution photoacoustic microscopy *in vivo* [J]. Opt Express, 2014, 22(2): 1500-1511.

- [34] LI T, XU X, CHEN B, et al. Photoacoustic imaging of acupuncture effect in small animals[J]. Biomed Opt Express, 2015, 6(6): 433-442.
- [35] XI L, JIANG H. High resolution three-dimensional photoacoustic imaging of human finger joints *in vivo* [J]. Appl Phys Lett, 2015, 107(6): 063701.
- [36] WU N, YE S, REN Q, et al. High-resolution dual-modality photoacoustic ocular imaging[J]. Opt Lett, 2014, 39(8): 2451.
- [37] ZHANG Y, WANG Y, ZHANG C. Total variation based gradient descent algorithm for sparse-view photoacoustic image reconstruction[J]. Ultrasonics, 2012, 52(8): 1046-1055.
- [38] ZHANG C, WANG Y. Deconvolution reconstruction of full-view and limited-view photoacoustic tomography: a simulation study [J]. J Opt Soc Am A, 2008, 25(10): 2436-2443.
- [39] ZHANG C, WANG Y. High total variation-based method for sparse-view photoacoustic reconstruction [J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(11): 111703.
- [40] SONG W, LIU W, ZHANG H F. Laser-scanning Doppler photoacoustic microscopy based on temporal correlation [J]. Appl Phys Lett, 2013, 102(20): 203501.
- [41] NIE L, HUANG P, LI W, et al. Early-stage imaging of nanocarrier-enhanced chemotherapy response in living subjects by scalable photoacoustic microscopy [J]. ACS Nano, 2014, 8(12): 12141-12150.
- [42] XIE W, LIU Y, LI Z, et al. Reconstruction of 3D light distribution produced by cylindrical diffuser in deep tissues based on photoacoustic imaging[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(5): 051702.
- [43] WANG S, TAO C, GAO X, et al. Quantitatively photoacoustic examination of abnormal particles hidden in a mixture of particles with non-uniform sizes[J]. Opt Express, 2015, 23(25): 32255.
- [44] WANG S, TAO C, WANG X, et al. Quantitative detection of stochastic microstructure in turbid media by photoacoustic spectral matching[J]. Appl Phys Lett, 2013, 102(11): 114102.
- [45] YANG Y, WANG S, TAO C, et al. Photoacoustic tomography of tissue subwavelength microstructure with a narrowband and low frequency system[J]. Appl Phys Lett, 2012, 101(3): 034105.
- [46] XU G, MENG Z, LIN J, et al. High resolution physio-chemical tissue analysis: towards non-invasive *in vivo* biopsy [J]. Sci Rep, 2016, 6: 16937.
- [47] CHENG R, SHAO J, GAO X, et al. Noninvasive assessment of early dental lesion using a dual-contrast photoacoustic tomography [J]. Sci Rep, 2016, 6: 21798.
- [48] GAO X, TAO C, WANG X, et al. Quantitative imaging of microvasculature in deep tissue with a spectrum-based photoacoustic microscopy[J]. Opt Lett, 2015, 40(6): 970-973.
- [49] YIN J, TAO C, CAI P, et al. Photoacoustic tomography based on the Green's function retrieval with ultrasound interferometry for sample partially behind an acoustically scattering layer [J]. Appl Phys Lett, 2015, 106(23): 234101.
- [50] WU D, TAO C, LIU X. Photoacoustic tomography extracted from speckle noise in acoustically inhomogeneous tissue [J]. Opt Express, 2013, 21(15): 18061-18067.
- [51] WU D, TAO C, LIU X. Photoacoustic tomography in scattering biological tissue by using virtual time reversal mirror [J]. J Appl Phys, 2011, 109(8): 084702.

(编辑:陈丽霞)



陶超 理学博士, 南京大学声学研究所副教授, 中国声学学会理事, 中国声学学会超声检测分会委员, 医学超声分会委员, 中国超声医学工程学会会员, 中国生物医学工程学会会员, 国际期刊 Shock and Vibration 副主编。2000年毕业于南京大学电子科学与工程系, 获理学学士学位; 同年9月保送南京大学声学研究所直接攻读博士, 并于2004年5月获得理学博士学位。2005~2009年在美国威斯康星大学医学院攻读博士后。2009年归国, 受聘于南京大学声学研究所, 同年当选教育部新世纪优秀人才; 2014年获国家基金委优秀青年基金资助。目前主要从事光声成像及其生物医学领域应用等方向的研究, 相关工作已在国际学术期刊发表论文70余篇。