



申请代码	F0506
接收部门	
收件日期	
接收编号	6237030962



# 国家自然科学基金 申 请 书

(2023 版)

资助类别：	面上项目		
亚类说明：			
附注说明：			
项目名称：	基于激光自混合干涉的非接触脉搏波传感与心血管疾病自动监测研究		
申 请 人：	黄文财	办公电话：	0592-2580141
依托单位：	厦门大学		
通讯地址：	福建省厦门市思明南路422号		
邮政编码：	361005	单位电话：	0592-2181680
电子邮箱：	huangwc@xmu.edu.cn		

国家自然科学基金委员会



基本信息

申请人信息	姓名	黄文财	性别	男	出生年月	1976年06月	民族	汉族
	学位	博士	职称	教授				
	是否在站博士后	否		电子邮箱	huangwc@xmu.edu.cn			
	办公电话	0592-2580141		国别或地区	中国			
	申请人类别		依托单位全职					
	工作单位		厦门大学/电子科学与技术学院					
	主要研究领域		激光传感与精密测量					
依托单位信息	名称	厦门大学						
	联系人	李荔敏	电子邮箱	limin@xmu.edu.cn				
	电话	0592-2181680	网站地址	https://std.xmu.edu.cn/				
合作研究单位信息	单位名称							
项目基本信息	项目名称	基于激光自混合干涉的非接触脉搏波传感与心血管疾病自动监测研究						
	英文名称	Research on non-contact pulse wave sensing and automatic monitoring of cardiovascular diseases based on laser self-mixing interference						
	资助类别	面上项目				亚类说明		
	附注说明							
	申请代码	F0506. 激光				F0511. 生物、医学光学与光子学		
	研究期限	2024年01月01日 -- 2027年12月31日				研究方向：激光技术及应用		
	申请直接费用	65.0000万元						
中文关键词		激光自混合干涉；光反馈干涉；非接触测量；脉搏波探测						
英文关键词		Laser self-mixing interference; Optical feedback interference; Non-contact measurement; Pulse-wave detection						



中文摘要	<p>心血管疾病已成为我国居民死亡原因的首位，对脉搏波的常态化监测能够有效预防心血管疾病的发生。本项目立足激光自混合干涉技术，构建兼具大动态距离范围和高精度的非接触式脉搏波传感手段及心血管疾病自动分类诊断系统，开拓流动性、常态化的心血管健康评估和疾病诊断的新途径，计划：</p> <p>1) 阐明腔增益效应与预反馈光学结构的动态放大机制，将二者耦合进激光自混合脉搏波远距离传感系统，突破探测灵敏度至光子反馈水平，实现5米范围内皮肤微振动自混合干涉信号的获取。</p> <p>2) 针对低信噪比条件下位移方向计算错误带来的累计重构误差问题，提出线性移频重构技术实现无需方向计算的皮肤位移鲁棒重构；同时研究不同时频特征信号的分离算法，实现不同运动状态条件下的脉搏波运动伪影消除。</p> <p>3) 鉴于自混合干涉脉搏波信号与临床脉搏波数据间的差异，借助小样本迁移学习搭建自混合脉搏波信号与常见心血管疾病之间的深度学习网络模型，实现心血管疾病的自动分类。</p>
英文摘要	<p>Cardiovascular disease has become the first cause of death among Chinese residents, and the normal monitoring of pulse wave can effectively prevent cardiovascular disease. Based on laser self-mixing interference technology, this project constructs a non-contact pulse wave sensing method with high dynamic distance range and high precision and an automatic classification and diagnosis system for cardiovascular diseases, and opens up a new way of cardiovascular health assessment and disease diagnosis with fluidity and normalization. It is planned that:</p> <p>1) Expound the cavity gain effect and the dynamic amplification mechanism of the pre-feedback optical structure, couple them into the laser self-mixing pulse wave remote sensing system, break through the detection sensitivity to photon feedback level, and realize the acquisition of skin micro-vibration self-mixing interference signals within 5 meters.</p> <p>2) Aiming at the cumulative reconstruction error caused by the calculation error of displacement direction under the condition of low signal-to-noise ratio, a linear frequency-shift reconstruction technique is proposed to realize the robust reconstruction of skin displacement without direction calculation; At the same time, the separation algorithm of different time-frequency characteristic signals is studied to eliminate pulse wave motion artifacts under different motion conditions.</p> <p>3) In view of the difference between self-mixing interference pulse wave signal and clinical pulse wave data, a deep learning network model between self-mixing pulse wave signal and common cardiovascular diseases is established by means of small sample transfer learning to realize automatic classification and diagnosis of cardiovascular diseases.</p>



## 科学问题属性

- ☐ “鼓励探索，突出原创”：科学问题源于科研人员的灵感和新思想，且具有鲜明的首创性特征，旨在通过自由探索产出从无到有的原创性成果。
- ☐ “聚焦前沿，独辟蹊径”：科学问题源于世界科技前沿的热点、难点和新兴领域，且具有鲜明的引领性或开创性特征，旨在通过独辟蹊径取得开拓性成果，引领或拓展科学前沿。
- ☒ “需求牵引，突破瓶颈”：科学问题源于国家重大需求和经济主战场，且具有鲜明的需求导向、问题导向和目标导向特征，旨在通过解决技术瓶颈背后的核心科学问题，促使基础研究成果走向应用。
- ☐ “共性导向，交叉融通”：科学问题源于多学科领域交叉的共性难题，具有鲜明的学科交叉特征，旨在通过交叉研究产出重大科学突破，促进分科知识融通发展为知识体系。

请阐明选择该科学问题属性的理由（800字以内）：

我国心血管疾病的死亡人数不断攀升，已成为城乡居民总死亡原因的首位。十四五规划指出要加强泛在感知体系建设，强化慢性病预防、早期筛查，并将生物传感器列为优先发展领域。对心血管疾病进行非接触、常规化监测可以有效预防心血管疾病的发生。常见的心血管健康监测手段包括心电图和脉搏波，而传统接触式测量适用患者类型、场景及测量范围受限，故近年来研究多聚焦于非接触式脉搏波探测。该技术可细分为激光散斑分析技术、毫米波雷达技术、基于视频分析的rPPG技术和激光自混合技术。激光散斑分析技术需要相机相对被测振动面的离焦距离满足一定约束条件，探测距离受限于摄像机焦距。毫米波雷达易受到邻近目标干扰，探测距离受限于波束的束宽空间和回波强度的约束。rPPG技术探测精度和探测距离受限于光照条件和视频分辨率。此三者皆存在探测信号能量分散，偏离特定位置探测精度恶化的共性瓶颈，难以在大距离动态范围保持脉搏波探测精度。

本项目立足我国对心血管疾病远距离、常态化监测技术这一重大民生需求，以深入剖析可调腔增益原理和小样本迁移学习模型为基础，致力于构建出基于激光自混合干涉技术和深度学习的宽动态距离范围、高精度脉搏波波形传感和心血管疾病自动分类系统。基于此，对远距离弱光反馈目标振动位移重构、脉搏波运动伪影去除、常见心血管疾病与自混合干涉脉搏波信号对应关系等方向展开深入研究。主要特色和创新：（1）设计结合可调移频技术和预反馈原理的光学结构，在降低低频噪声干扰的同时最大程度放大“腔增益”效应，将系统探测下限延申至光子反馈水平。（2）提出线性移频位移重构算法，在不进行额外位移方向计算的前提下稳定重构脉搏振动位移，为弱振动目标的探测提出新的重构算法。同时，采用变分模态分解算法有效去除皮肤位移中的运动伪影，实现脉搏波的精准提取。

（3）引入卷积神经网络算法建立高适应度和高准确度的心血管疾病分类模型，实现远距离心血管疾病自动分类诊断。



主要参与者（注：主要参与者不包括项目申请人）

编号	姓名	出生年月	性别	职 称	学 位	工作单位	项目分工	办公电话	证件号码

总人数统计（注：包括项目申请人、主要参与者及其他参与人员；勿重复计数）

总人数	高级职称	中级职称	初级职称	博士后	博士生	硕士生	本科生及其他学生	其他
9	1	0	0	0	2	6		



国家自然科学基金项目资金预算表

项目申请号：6237030962

项目负责人：黄文财

金额单位：万元

序号	科目名称	金额
1	一、项目直接费用合计	65.0000
2	1、设备费	6.0000
3	其中：设备购置费	6.0000
4	2、业务费	40.2000
5	3、劳务费	18.8000
6	二、其他来源资金	0.0000
7	三、合计	65.0000

注：请按照项目研究实际需要合理填写各科目预算金额。



## 预算说明书

(请按照《国家自然科学基金项目申请书预算表编制说明》等的有关要求,按照政策相符性、目标相关性和经济合理性原则,实事求是编制项目预算。填报时,直接费用应按设备费、业务费、劳务费三个类别填报,每个类别结合科研任务按支出用途进行说明。对单价 $\geq 50$ 万元的设备详细说明,对单价 $< 50$ 万元的设备费用分类说明,对合作研究单位资质及资金外拨情况、自筹资金进行必要说明。)

### 一、直接费(65.00万元)

#### 设备费(6.00万元)

- 设备购置费(6.00万元)

在已有声光调制模块基础上,购置Intra Action公司的可调声光调制器(AOM-405AF1),单价约6.00万元。

#### 业务费(40.20万元)

- 材料费(18.70万元)

高动态范围光电探测器New Focus 2101,约3.7万元;固体激光器LSR543及驱动模块,约3.1万元;监护器CMS8000,约1.7万元;数据采集分析模块NI 9232两个,单价约1.2万元;半导体激光二极管HL6385DG十个,单价约2500元;半导体激光二极管HL6756MG十个,单价约500元;精密运放芯片OPA129十个,单价约500元;超低偏置电流运放芯片LTC6268十个,单价约100元;俯仰、倾斜和旋转位移台TTR001/M及配套光学元件,约9000元;激光扩束模块GBE20-C两个,单价约4500元;1/4波片WPMQ10M-808两个,单价约3000元;连续衰减片NDC-100C-4M,约6000元;压力/容积探测器,约2000元;实验室其它常用低价易耗品,约1.0万元;以上合计约18.7万元。

- 测试加工费(3.00万元)

测试系统的外围加工费和其它不具条件的测试费。

- 燃料动力费(1.00万元)

项目相关仪器设备的水电费,每年约0.25万元。

- 差旅/会议/国际合作与交流费(9.00万元)

1). 差旅费:6.00万元。执行期内预计12人次参加国内学术会议,每人0.50万元(会议注册费、机票、食宿、交通等),合计约6.00万元。

2). 国际合作交流费:3.00万元。项目组成员出国合作交流:课题执行期内预计共计派出3人次出国参加相关国际学术会议。按1.00万元每人计算,合计3.00万元。

- 出版/文献/信息传播/知识产权事务费(8.50万元)

预计发表论文8篇,每篇出版费按0.80万元计,版面费合计6.40万元;申请3项发明专利,专利申请费1.50万元;文献检索、打印约0.60万元。

#### 劳务费(18.80万元)

- 研究生劳务费(16.80万元)

用于项目组8名研究生的劳务费用。每人每年工作10个月,按博士生/硕士生每人每月1200元/300元计算,博士生2人 $\times 10$ 月/年 $\times 4$ 年 $\times 1200$ 元/人/月=9.60万元,硕士生6人 $\times 10$ 月/年 $\times 4$ 年 $\times 300$ 元/人/月=7.20万元,共计16.80万元。

- 专家咨询费(2.00万元)

计划聘请国内高级职称专家进行现场咨询5人次,每人2天,每人每天2000元,5人次 $\times 2$ 天/人次 $\times 2000$ 元/天=2.00万元,共计2.00万元。

### 二、合作研究单位资质及资金外拨情况、自筹资金

无



## 报告正文

参照以下提纲撰写，要求内容翔实、清晰，层次分明，标题突出。  
请勿删除或改动下述提纲标题及括号中的文字。

### (一) 立项依据与研究内容 (建议 8000 字以下):

1. 项目的立项依据(研究意义、国内外研究现状及发展动态分析,需结合科学研究发展趋势来论述科学意义;或结合国民经济和社会发展中迫切需要解决的关键科技问题来论述其应用前景。附主要参考文献目录);

#### 1.1 研究背景与意义:

随着人口老龄化的加重和社会生活节奏的加快,心血管疾病发病率逐步攀升,中国因心血管疾病造成的死亡已占城乡居民总死亡原因的首位,心血管疾病的防治已经成为了一种重大的公共卫生问题<sup>[1]</sup>。十四五规划指出要加强泛在感知体系建设,解决传统技术瓶颈,发展智能预警、应急救援救护,强化慢性病预防、早期筛查和综合干预,并将生物传感器列为优先发展领域<sup>[2]</sup>。常见的心血管健康监测手段包括心电图(ECG)和脉搏波,心电图虽然能直接反映心跳的规律,但是需要在人体表面贴合多个导联电极。对于皮肤损伤的患者不易实施,尤其不适用于皮肤烧伤或高度感染患者以及早产儿。另一方面,当对于不同人进行监测时,需要重新拆卸、清洗、定期消毒,所以 ECG 的实施一般局限在专业医疗机构中,难以在家庭、办公及人员流动场所形成大动态距离范围、常规式的实时心电监测,例如:如厕监护、自主居家医疗监测、公共场所心血管疾病预防,以及偏远地区远程医疗诊断。基于此,作为同样重要的心血管健康状态监测信号一脉搏波,因其单点的非电信号获取方式,使得监测仪器更简单,易于集成,伴随着便携式消费电子的兴起走进了更广大的人群视野。脉搏波作为人体生理信号的重要组成部分,其波形和人体心血管系统的健康状况密切相关,通过脉搏波波形特征的变化可以便捷地诊断出处于不同阶段的人体心血管疾病,进而帮助预警和阻断心血管疾病发生<sup>[3]</sup>。目前,脉搏波已被广泛应用在人体生理健康的诊断上,例如上肢外周动脉疾病<sup>[4]</sup>,血氧检测<sup>[5]</sup>,动脉硬化检测<sup>[6]</sup>,血压测量<sup>[7,8]</sup>,睡眠监测<sup>[9]</sup>,血红蛋白浓度检测<sup>[10]</sup>,血糖监测<sup>[11]</sup>。临床上对于脉搏波的传感更多地采用接触式手段,包括人体特定部位夹持的压力传感器<sup>[12]</sup>,和探测组织血容量变化的光电容积描记术(PPG)<sup>[13]</sup>。此二种接触式传感方式需传感器紧贴皮肤,才能获取到脉搏波信号。同时考虑到不同部位接触式测量方法探测精度不同,对人体脉搏的监测也主要集中在手腕、指尖,不同程度上面临和 ECG 同样的佩戴问题。因此,发展大测量距离范围的非接触式脉搏波传感技术对于流动性、常规式的心血管健康监测具有重大意义。





目前对脉搏波的非接触式探测主要有视频检测<sup>[14]</sup>，激光散斑测振<sup>[15]</sup>，毫米波雷达<sup>[16]</sup>，激光自混合干涉<sup>[17]</sup>四种方式。视频检测方案：原理类似 PPG，用视频中人体皮肤目标区域的 RGB 通道像素值的平均值来表示该帧时刻的脉搏波信号强度，进而计算得到脉搏波的波形。该方法可同时监测多个目标，但需要充足且稳定的环境光照条件，且受限于帧率以及皮肤目标区域图像分辨率的大小，探测距离范围小，脉搏波波形重构精度较低，更多用于心率的监测。激光散斑测振：通过将激光打在待测皮肤表面并使用 CCD 或相机采集皮肤的散斑干涉图样，根据相邻帧散斑图样之间的相位关系来计算振动位移，是一种主动探测技术，对于环境光要求不高。但该方法中相机相对被测振动面的离焦距离须满足一定的约束条件，当完全聚焦或者完全离焦时，位移重构算法失效。另外，探测距离受限于摄像机焦距，因此无法满足大探测距离范围下的脉搏振动测量。毫米波雷达：利用人体的皮肤位移对毫米波产生的相位调制，通过对回波信号进行线性相位解调来重构心肌收缩产生的位移。研究显示该技术探测时易受到临近目标干扰，在实际流动人群监测中精度易受到影响。此外，探测距离的动态范围受限于波束的束宽空间和回波强度，即存在一个最佳探测距离，偏离最佳探测距离时其探测精度会下降。但不论是人脸图像还是散斑图样亦或是毫米波回波信号，能量都较为分散，偏离特定位置探测精度会产生恶化，难以在大距离动态范围内保持脉搏波探测的精度。

激光自混合干涉（self-mixing interference, SMI）效应指的是外部目标反射或散射的激光返回激光腔内与腔内激光发生干涉，对激光的输出功率和相位产生调制的现象。通过光电探测器对激光器的输出进行解调即可探测外腔运动位移。相比于传统的干涉现象，该现象中耦合回腔内的光场强度只需要达到原输出光强的  $10^{-7}$ - $10^{-8}$ ，功率和相位的变化就可被探测到<sup>[18]</sup>。进一步的，对干涉信号进行移频还可以对腔增益进行调控，干涉信号强度最大提高 60dB<sup>[19]</sup>。因其单光路、高灵敏度的优点，自发现以来，被广泛用于位移、绝对距离、角度、速度以及激光腔内部参数的测量。其中，对位移的探测最为广泛和深入，采用干涉相位解调的方法进行目标位移重构，探测精度可达到 1.5 nm<sup>[20]</sup>。激光高准直、发散小的特点和腔内干涉特有的腔增益效应，使得激光自混合干涉技术对于远距离皮肤脉搏波精准探测的需求而言，是一种潜在的有效技术解决方案。

本申请以心血管健康监测这一全民健康需求为牵引，以皮肤的微弱振动为探测目标，深入研究可调腔增益机理以及预反馈镜与皮肤构成的复合腔光放大理论，构建高灵敏度的自混合干涉系统。同时，采用信号分离算法去除脉搏波的运动伪影，实现远距离脉搏波精准探测；另一方面，鉴于自混合干涉脉搏波信号与临床脉搏波数据间的差异，在搭建激光自混合干涉脉搏波信号与常见心血管疾病之间的深度学习网络模型的基础上，使用小样本迁移学习，实现心血管疾病的自动分类诊断。力求突破远距离、大距离范围的流动性脉搏波精准健康监测瓶颈。



## 1.2 国内外研究现状分析及立项思路:

激光自混合干涉效应,指的是激光束打在待测目标上经过反射或散射返回到激光腔内与腔内的激光发生干涉,使激光器输出光功率及频率受到外腔相位调制的现象。该模型的发射和接收光路共用一条光路,结构紧凑、利于集成。作为一种发生在任意类型激光器中的现象,自从激光诞生之初<sup>[8]</sup>就引起了研究人员的兴趣。1980年,R. Lang 和 K. Kobayashi<sup>[21]</sup>提出著名的 L-K 方程,描述了激光腔内电场的演化,并通过引入耦合强度的延迟场项,考虑光反馈的影响,建立了存在外界光反馈条件下的激光动力学的核心理论模型。在此基础上,自混合干涉技术在各领域蓬勃发展,时至今日,该技术已实现测量:(1)微振动<sup>[22-25]</sup>、绝对距离<sup>[26-29]</sup>、位移<sup>[30-33]</sup>、速度<sup>[34-36]</sup>、角度<sup>[37-39]</sup>等基本运动物理量;(2)激光器参数<sup>[40,41]</sup>;(3)厚度<sup>[42]</sup>、折射率<sup>[43]</sup>、机械共振<sup>[44]</sup>、应力迟滞<sup>[45]</sup>、阻尼系数<sup>[46]</sup>、杨氏模量<sup>[47]</sup>等机械参数;其中,对于振动位移测量的研究最为广泛和深入,目前已实现单光子反馈条件下,待测目标振动位移的测量。如谈宜东课题组将可调移频技术引入到自混合干涉方法中,实现200m处纸壳箱表面单光子反馈水平的声音振动测量<sup>[48]</sup>。在测量精度方面,自混合干涉技术实现了1.5nm的位移测量误差<sup>[20]</sup>。脉搏波作为一种重要的微振动现象,吸引了该领域大量研究者的目光。

最早于2001年,由K. Meigas等人<sup>[49]</sup>通过激光自混合干涉技术测量皮肤表面的微小振动来获取脉搏波信号,并根据脉搏波传导时间获取舒张压和收缩压。作者将该方法和其他方法如PPG、生物阻抗法、压电转换法进行比较,发现SMI技术和压电换能法获得的脉搏波波形具有高度的一致性。在信号重构方面,2014年,Arasanz等人<sup>[50]</sup>基于修正的条纹计数法,在大约10cm距离处,有效重构了处于固定状态的手指指甲处的脉搏波形,且可以适用于不同粗糙程度皮肤的脉搏波重构,但是该方法需要用到微分计算并且需要人为设定电平阈值来消除噪声的影响,对信噪比要求高,缺乏自适应能力。进一步的,为了解决人体皮肤不自主颤动产生的脉搏波信号伪影问题,2017年,Wijshoff等人<sup>[51]</sup>在前者基础上提出一种消除运动状态下的脉搏波信号伪影的算法,该算法使用SMI技术获取传感器相对于头部皮肤的运动,另外使用单独的加速度传感器计算头部运动,并结合正交谐波模型利用步进速率来计算伪影。2017年,魏颖斌等人<sup>[52]</sup>基于脉搏波传导时间和血压之间的关系,使用双光路在10cm左右距离同时测量手指和脚趾的脉搏波,计算出人体舒张压和收缩压。2020年,王秀琳等人<sup>[53]</sup>进一步地使用极限学习机对MIMIC-II中的脉搏波数据进行学习,然后使用激光自混合技术对获取的脉搏波信号进行舒张压和收缩压的预测,与Coriolis方法相比,相差在5mmHg范围以内。2021年,Skripal等人<sup>[54]</sup>基于短时傅里叶变换,研究激光干涉信号时频谱和脉搏波波形导数之间的高度线性相关关系,该方法显示了从频域角度重构脉搏波波形的可能性。2022年,刘旭亮等人<sup>[55]</sup>研究了人体皮肤反射率与光波长之间的关系,为激光器波长选型提供了实验指导。



目前,国内外基于激光自混合干涉的脉搏波传感的探测方法和信号处理手段越来越丰富,但仍主要基于脉搏波信号的周期性和传导时间差来测量血压和心率,对探测灵敏度和探测范围的研究尚不深入。对于脉搏波位移的精准重构方面,缺乏鲁棒性强、适应性高的位移重构算法;同时,需要借助额外的加速度传感器来估计运动伪影。另一方面,对于脉搏波与心血管疾病之间的关联没有进行深入的数据挖掘。因此,基于激光自混合干涉欲实现脉搏波健康评估和临床诊断上的实际应用,以下关键问题和难点亟待突破:

1. 皮肤对激光的反射率低导致获取的反馈光信号强度低,同时当待测部位离光源较远时,散射回激光腔内的激光进一步减少,导致自混合干涉信号信噪比降低,以致无法有效探测到皮肤震颤引起的自混合干涉信号。限于此,目前对于脉搏波的探测范围一般局限在十厘米内。
2. 实际测量中,待测皮肤位置变化导致的散斑效应和光反馈强度变化,以及激光器功率、波长波动和环境噪声干扰,都会对信号条纹产生整体和局部波形的干扰。目前的脉搏波重构方法主要采用时域分析方法,极易受到噪声和散斑的干扰,导致皮肤运动方向判断出错,进而产生累计重构误差,难以实现脉搏波的鲁棒、精准重构。
3. 人体的呼吸和待测部位不自主的抖动会对测量到的脉搏波信号施加额外的位移干扰即常见的运动伪影干扰,目前基于自混合干涉原理的脉搏波探测方案需要佩戴额外的加速度传感器来估计待测部位的运动伪影,缺乏实用性。

### 1.3 立项依据及研究重点:

为解决远距离非接触式心血管疾病监测问题,针对以上技术瓶颈,本项目将从自混合信号高信噪比探测、脉搏波精准重构算法研究、基于深度学习的心血管疾病与脉搏波关系挖掘这三个方面展开研究。具体立项思路如下:

- 光学上, 1.引入预反馈技术,该技术在光源与待测物之间加入一个透镜构成复合腔,增大反馈光能量从而提高自混合干涉信号的信噪比; 2.引入可调移频技术,亦称作可调腔增益技术,该技术将干涉信号移至合适的更高频率区域,有效避免了低频噪声及环境扰动干扰,且能有效放大自混合干涉效应里的“腔增益”现象。通过该两项技术延伸系统的探测下限至量子噪声极限水平,为远距离高信噪比脉搏波探测打下基础。
- 信号处理上,采用时频谱谐波处理方法,抑制环境噪声干扰和反馈强度因子带来的谐波分量。构建不同时间点主频与速度之间的多普勒关系。结合移频技术,使用时频谱线性重构方法实现在不判断脉搏运动方向的情况下,完成皮肤振动位移的高精度、鲁棒重构。进一步的,拟采用变分模态分解(VMD)算法去除叠加在脉搏振动位移之上的人体不自主呼吸、抖动位移,即去除脉搏波运动伪影,还原真实的脉搏波波形。



- 心血管疾病自动分类上, MIMIC-III 心血管疾病临床数据库含大量带标签的脉搏波样本, 利用深度卷积神经网络训练得到人体脉搏波信号时频谱与常见心血管疾病之间的神经网络分类模型。在该基础上进行小样本迁移学习, **得到基于激光自混合干涉技术获取的脉搏波信号与心血管疾病之间的神经网络分类模型, 并基于此进行心血管疾病的远距离非接触式自动监测。**

本项目以激光自混合干涉技术为切入点, 在引入腔增益放大技术和新重构技术的同时, 通过卷积神经网络自主挖掘脉搏波自混合干涉信号与常见临床心血管疾病之间的关系, **可为医护人员提供准确的脉搏波波形供辅助分析, 同时实现常见心血管疾病的自动诊断。**目前通过激光自混合干涉技术实现远距离人体心血管疾病监测的研究尚未有报道。基于上述研究背景和立项思路, 本项目可确切的实现远距离心血管疾病的实时监测这一有利于全民健康的课题。

本课题组在光反馈干涉信号光学增强、非平稳信号时频分析、低信噪比信号高精度位移重构、人体皮肤脉搏波重构和信号分类, 以及基于深度卷积神经网络的参数估计等方面均已开展较深入的研究<sup>[52,53,56-62]</sup>, 在系统构建和实验研究方面都具有较好的研究基础。在上述立项思路和前期工作基础上, **本项目重点研究:** ①远距离皮肤这类低反射率粗糙散射表面的反馈光信号的高质量获取; ②使用抗干扰能力强的线性移频重构算法, 实时重构脉搏波, 以提高检测的准确性和心血管疾病监测的鲁棒性; ③脉搏波、呼吸位移、人体不自主抖动的分离算法即伪影去除算法; ④通过对卷积神经网络的构建和训练建立脉搏波与人体心血管疾病之间的关联。在此基础上利用小样本迁移学习, 得到脉搏波对应的激光自混合干涉信号与心血管疾病之间的关系。

## 参考文献:

- [1] 国家心血管病中心. 中国心血管健康与疾病报告 2021. 科学出版社. (2022).
- [2] 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.  
[http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm)
- [3] Meng K, Xiao X, Wei W, et al. Wearable pressure sensors for pulse wave monitoring[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34 (21): 2109357.
- [4] Chen P Y, Sun Z L, Wu J X, et al. Photoplethysmography analysis with duffing-holmes self-synchronization dynamic errors and 1D CNN-based classifier for upper extremity vascular disease screening[J]. *Processes*, 2021, 9(11): 2093.
- [5] Nabavi S, Bhadra S. Smart mandibular advancement device for intraoral monitoring of cardiorespiratory parameters and sleeping postures[J]. *IEEE transactions on biomedical circuits and systems*, 2021, 15(2): 248-258.
- [6] Miao F, Wang X, Yin L, et al. A wearable sensor for arterial stiffness monitoring based on machine learning algorithms[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(4): 1426-1434.



- [7] Peltokangas M, Vehkaoja A, Huotari M, et al. Combining finger and toe photoplethysmograms for the detection of atherosclerosis[J]. *Physiological Measurement*, 2017, 38(2): 139-154.
- [8] Wei Y, Huang W, Wei Z, et al. Double-path acquisition of pulse wave transit time and heartbeat using self-mixing interferometry[J]. *Optics Communications*, 2017, 399: 178-184.
- [9] Lazazzera R, Deviaene M, Varon C, et al. Detection and classification of sleep apnea and hypopnea using PPG and SpO<sub>2</sub> signals[J]. *IEEE*, 2021, 68(5): 1496-1506.
- [10] Kavsaoglu A R, Polat K, Hariharan M. Non-invasive prediction of hemoglobin level using machine learning techniques with the PPG signal's characteristics features[J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 37: 983-991.
- [11] Hina A, Saadeh W. Noninvasive blood glucose monitoring systems using near-infrared technology—A review[J]. *Sensors*, 2022, 22(13): 4855.
- [12] Ferreira A D S. Resonance phenomenon during wrist pulse-taking: A stochastic simulation, model-based study of the 'pressing with one finger' technique[J]. *Biomedical Signal Processing & Control*, 2013, 8(3): 229-236.
- [13] Moye A R, Kyriacou P A, Gregg A, et al. Photoplethysmographic (ppg) signals recorded from the human oesophagus[J]. *BJA British Journal of Anaesthesia*, 1999, 82: 17-18.
- [14] Wang W, Stuijk S, Haan G D. Exploiting spatial redundancy of image sensor for motion robust rPPG[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2015, 62(2): 415-425.
- [15] Dai C, Liu C, Wu Y, et al. Audio signal detection and enhancement based on linear CMOS array and multi-channel data fusion[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 133463-133469.
- [16] Chen J, Zhang D, Wu Z, et al. Contactless electrocardiogram monitoring with millimeter wave radar[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2021, 1: 1-17.
- [17] Hast J T, Myllyl R A, Sorvoja H, et al. Arterial pulse shape measurement using self-mixing interferometry[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2003, 4956.
- [18] Donati S, Norgia M. Self-mixing interferometry for biomedical signals sensing[J]. *Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(2): 6900108.
- [19] Tian M, Li M, Xu X, et al. A coherent detection method with 10<sup>6</sup> higher intensity response sensitivity than normal heterodyne interferometry[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(14): 4649-4654.
- [20] Tao Y, Wang M, Xia W. Carrier-separating demodulation of phase shifting self-mixing interferometry[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 89: 75-85.
- [21] Lang R, Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16(3): 347-355.
- [22] Zhang Y, Wang R, Wei Z, et al. Broad range and high precision self-mixing interferometer based on spectral analysis with multiple reflections[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 19(3): 926-932.
- [23] Liang L, Zhang W, Bo Y, et al. Dual-channel self-mixing vibration measurement system in a linear cavity fiber laser[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(11): 4387-4392.



- [24] Zhang Z, Li C, Huang Z. Vibration measurement based on multiple Hilbert transform for self-mixing interferometry[J]. *Optics Communications*, 2019, 436: 192-196.
- [25] Bhardwaj V K, Maini S. Measurement of micro-harmonic vibration frequency from the modulated self-mixed interferometric signal using dynamic time warping method[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 168: 108712.
- [26] Zhao Y, Wang C, Zhao Y, et al. An all-fiber self-mixing range finder with tunable fiber ring cavity laser source[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 39 (12): 4217-4224.
- [27] Duan Z, Yu Y, Gao B, et al. Absolute distance measurement based on multiple self-mixing interferometry[J]. *Optics Communications*, 2017, 389: 270-274.
- [28] Guo D, Wang M. Self-mixing interferometry based on a double-modulation technique for absolute distance measurement[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(9): 1486-1491.
- [29] Veng M, Perchoux J, Bony F. Fringe disappearance in self-mixing interferometry laser sensors: model and application to the absolute distance measurement scheme[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(14): 5521-5528.
- [30] Tan Y, Zhang S, Zhang Y. Laser feedback interferometry based on phase difference of orthogonally polarized lights in external birefringence cavity[J]. *Optics Express*, 2009, 17(16): 13939-13945.
- [31] Zhu D, Zhao Y, Tu Y, et al. All-fiber laser feedback interferometer using a DBR fiber laser for effective sub-picometer displacement measurement[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(1): 114-117.
- [32] Jiang C, Li C, Wang Y. Improved transition detection algorithm for a self-mixing displacement sensor[J]. *Optik*, 2016, 127(14): 5603-5612.
- [33] Amin S, Zabit U, Bernal O D, et al. High resolution laser self-mixing displacement sensor under large variation in optical feedback and speckle[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(16): 9140-9147.
- [34] Wu S, Wang D, Xiang R, et al. All-fiber configuration laser self-mixing doppler velocimeter based on distributed feedback fiber laser[J]. *Sensors*, 2016, 16(8): 1179.
- [35] Jiang C, Geng Y, Liu Y, et al. Rotation velocity measurement based on self-mixing interference with a dual-external-cavity single-laser diode[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(3): 604-608.
- [36] Du Z, Lu L, Zhang W, et al. Measurement of the velocity inside an all-fiber DBR laser by self-mixing technique[J]. *Applied Physics B-Lasers and Optics*. 2013, 133(1):153-158.
- [37] Donati S, Rossi D, Norgia M, et al. Single channel self-mixing interferometer measures simultaneously displacement and tilt and yaw angles of a reflective target[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2015. 51(12):1-8.
- [38] Wang C, Fan X, Guo Y, et al. Full-circle range and microradian resolution angle measurement using the orthogonal mirror self-mixing interferometry[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10371-10381.
- [39] Yang B, Wang D, Zhou L, et al. A ultra-small-angle self-mixing sensor system with high



- detection resolution and wide measurement range[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 91: 92-97.
- [40] Zhao Y K, Xu G T, et al. Vibration displacement immunization model for measuring the free spectral range by means of a laser self-mixing velocimeter[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(20): 5540-5546.
- [41] Fan Y, Yu Y, Xi J, Guo Q. Dynamic stability analysis for a self-mixing interferometry system[J]. *Opt. Express*. 2014, 22(23): 29260-29269.
- [42] Xu L, Zhang S, Tan Y, et al. Simultaneous measurement of refractive-index and thickness for optical materials by laser feedback interferometry[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(8): 083111.
- [43] Fathi M T, Donati S. Thickness measurement of transparent plates by a self-mixing interferometer[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(11): 1844-1846.
- [44] Annovazzi-Lodi V, Benedetti M, Merlo S, et al. Spot optical measurements on micromachined mirrors for photonic switching[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, 10(3): 536-544.
- [45] Donati S, Norgia M, Giuliani G. Self-mixing differential vibrometer based on electronic channel subtraction[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(28): 7264-7268.
- [46] Chen M, Zhang Y, Chen C, et al. Damping microvibration measurement using laser diode self-mixing interference[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 6(3): 5500508.
- [47] Ke L, Yu Y, Xi J, et al. A fiber-coupled self-mixing laser diode for the measurement of Young's modulus[J]. *Sensors*, 2016, 16(6): 928.
- [48] Xu Z, Li J, Zhang S, et al. Remote eavesdropping at 200 meters distance based on laser feedback interferometry with single-photon sensitivity[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 141(1): 106562.
- [49] Meigas K, Kattai R, Lass J. Continuous blood pressure monitoring using pulse wave delay[C] *Proceedings of the 23rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. 2001, 4: 3171-3174.
- [50] Arasanz A, Azcona F J, Royo S, et al. A new method for the acquisition of arterial pulse wave using self-mixing interferometry[J]. *Optics and Laser Technology*, 2014, 63: 98-104.
- [51] Wijshoff R, Mischi M, Aarts R, et al. Reduction of periodic motion artifacts in photoplethysmography[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2017, 64(1): 196-207.
- [52] Wei Y, Huang W, et al. Double-path acquisition of pulse wave transit time and heartbeat using self-mixing interferometry[J]. *Optics Communications*, 2017, 393: 178-184.
- [53] Wang X, Lu L, Hu L, Huang W. Real-time human blood pressure measurement based on laser self-mixing interferometry with extreme learning machine. *Optoelectronics Letters*, 2020, 16(6): 467-470.
- [54] Skripal A V, Dobdin S Y, Dzhaifarov A V, et al. Analysis of the pulse waveform in arterial vessels using the spectrum of the autodyne signal of a laser interferometer[J]. *Quantum*





*Electronics*, 2021, 51(1): 33-37.

- [55] 刘旭亮, 韦慧心, 王志勇,等. 基于高光谱成像技术的皮肤应变-反射率相关性研究[J]. 实验力学, 2022, 37(3): 297-304.
- [56] Lu L, Hu L, Li Z, et al. High precision self-mixing interferometer based on reflective phase modulation method[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 204153-204159.
- [57] Ge S, Lin Y, Chen H, et al. Signal extraction method based on spectral processing for a dual-channel SMI vibration sensor. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 164: 107531.
- [58] Ge S, Kong X, Zhu D, et al, Robust signal extraction based on time-frequency joint analysis and GRNN for a laser SMI system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(22): 7229-7235.
- [59] Zhang Y, Wang R, Wei Z, et al. Broad range and high precision self-mixing interferometer based on spectral analysis with multiple reflections[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(3): 926-932.
- [60] Wei Z, Huang W, Zhang J, et al. Obtaining scalable fringe precision in self-mixing interference using an even-power fast algorithm[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(4): 1-11.
- [61] Wang L, Luo X, Wang X, et al. Obtaining high fringe precision in self-mixing interference using a simple external reflecting mirror[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(3): 6500207.
- [62] Sun H, Zhang Y, Chen H, et al. Large-range nanoscale self-mixing interferometer based on multiple reflections and even-power fast algorithm[J]. *Optics Communications*, 2019, 443: 160-165.





## 2. 项目的研究内容、研究目标，以及拟解决的关键科学问题（此部分为重点阐述内容）；

### 2.1 研究目标：

- (1) 基于激光自混合干涉技术，构建可调腔增益/预反馈放大效应理论调控体系，将二者与激光自混合干涉技术有机结合，最大程度放大大混合信号信噪比，实现5m范围内皮肤表面微振动自混合干涉信号的获取。
- (2) 基于皮肤振动的自混合干涉信号，使用线性移频重构技术鲁棒地重构出皮肤振动位移。并采用信号分离算法去除叠加在脉搏振动上的人体不自主呼吸和抖动位移，得到真实的脉搏波波形，即去除脉搏波信号伪影。
- (3) 利用卷积神经网络训练得到人体脉搏波信号与常见心血管疾病之间对应的神经网络模型，并在此基础上进行小样本迁移学习，得到基于激光自混合干涉技术获取的脉搏波信号与心血管疾病之间的神经网络模型，并基于此进行心血管疾病的远距离非接触式自动诊断。

### 2.2 研究内容：

本项目基于激光自混合干涉技术远距离获取人体脉搏波信号，并利用深度学习挖掘脉搏波与心血管疾病的联系，最终实现对心血管疾病的远距离实时监测。重点研究：1. 可调移频结合预反馈结构实现远距离人体脉搏波获取；2. 自混合信号的时频域脉搏波鲁棒重构算法；3. 人体不自主抖动、呼吸位移即运动伪影的去除；4. 通过深度学习挖掘激光自混合干涉脉搏波信号时频谱和常见心血管疾病之间的对应联系。具体研究内容主要包括以下几个方面：

#### （1）研究可调移频量和预反馈结构对自混合干涉信号信噪比及灵敏度的影响。

可调移频技术和预反馈结构产生的光学放大效果和移频量及预反馈镜的位置、反射率、光源类型有关，基于此，拟开展以下研究：

- 从理论上研究可调移频技术中的移频量以及预反馈结构中反馈镜位置、反射率对自混合干涉信号产生不同增强效果的机理，并分析这些因素对于不同激光器的自混合干涉脉搏波信号幅值、信噪比、灵敏度和时频域分布的影响。
- 结合理论，从实验上验证本系统最佳的光源选择、移频量、预反馈镜位置和反射率。



## (2) 研究时频域人体皮肤振动位移的高精度重构算法，以得到皮肤的运动位移。

人体皮肤表面产生的散斑调制、光反馈强度的变化以及环境中的随机干扰和电路高频噪声都会对SMI信号的主频、谐波分量以及能量分布产生影响。基于此，拟开展以下研究：

- 研究光反馈强度对SMI信号时频域能量分布影响。
- 研究不同皮肤表面的散斑包络大小及其对信噪比的影响。
- 研究环境微扰动、人体皮肤散斑效应和电路噪声对SMI信号时频域的能量分布的影响。
- 研究如何抑制以上三种干扰对SMI信号时频图的主频的影响，从而有效根据时频域主频高精度重构出皮肤振动位移。

## (3) 设计脉搏波的运动伪影去除算法以得到精准脉搏波波形。

根据时频域重构得到的皮肤位移除包含脉搏的位移外，还包括呼吸和不由自主抖动等位移成分。基于此，拟开展以下研究，实现脉搏波有效提取以供医护人员进行辅助诊断分析：

- 不同位移成分的时域及频域的特性及它们之间的差别。
- 研究卷积神经网络对不同位移成分干扰的鲁棒性。
- 研究VMD算法对这三种主要位移成分能够进行有效分离的干扰位移范围。
- 研究其他运动伪影去除算法，并进行性能比较。

## (4) 构建激光自混合干涉脉搏波信号时频谱与心血管疾病之间的神经网络模型。

脉搏波波形与心血管疾病具有紧密的联系，卷积神经网络可以对输入的图像信号进行自动特征学习，实现对常见心血管疾病的自动分类诊断。同时，MIMIC-III临床医学数据库中提供了丰富的带标签的搏波数据可供研究者进行统计学习。基于此，拟开展以下研究：

- 根据自混合干涉信号数学模型，对MIMIC-III数据库中带标签的脉搏波数据进行自混合信号转化，同时将自混合信号进行时频域变换。将时频图作为卷积神经网络(CNN)的输入，标签作为输出，选择网络参数构建网络并进行训练，得到脉搏波波形时频图与常见心血管疾病之间对应的网络关系模型。
- 在此基础上，使用激光自混合技术获取脉搏波信号，基于上述网络模型对该信号进行小样本迁移学习，得出激光自混合干涉脉搏波信号与人体心血管疾病之间的神经网络模型。
- 研究不同的人体微抖动去除效果对迁移学习的准确率的影响，即抗伪影性能。



## 2.3 拟解决的关键科学问题:

- (1) 基于激光自混合干涉效应, 结合腔增益和预反馈原理, 远距离获取人体皮肤微弱振动位移对应的自混合干涉信号是本项目要解决的关键科学问题之一。人体皮肤反射率低, 同时, 反馈光的比例反比于探测距离的平方, 导致自混合干涉信号随着探测距离的增大而快速减小, 需要进行足够的腔增益放大和额外的光放大技术来增大信噪比, 进一步增大探测范围。
- (2) 在低信噪比条件下, 实现脉搏波振动位移的稳定重构是本项目要解决的关键科学问题之二。现有的位移重构技术采用时域分析的方法, 在低信噪比条件下, 易造成累计误差。需要探索出一种鲁棒的位移重构算法, 实时重构出皮肤位移。同时, 皮肤的振动位移不仅包含脉搏振动, 还包含不自主的呼吸和颤动引起的运动伪影。需设计针对性算法对皮肤运动伪影进行有效去除, 精准、实时地还原出真实脉搏振动位移。
- (3) 以激光自混合干涉脉搏波信号为目标域进行小样本的迁移学习, 实现常见心血管疾病的自动分类是本项目要解决的关键科学问题之三。深度学习可以从庞大的临床脉搏波数据样本中挖掘与之对应的心血管疾病网络模型。由于激光自混合干涉脉搏波探测和临床脉搏波探测技术不同, 得到的脉搏波波形有微小差异, 需要在基于临床医学数据训练得到的脉搏波心血管疾病网络模型基础上, 进行小样本迁移学习, 得到适应性的网络模型。

## 3. 拟采取的研究方案及可行性分析 (包括研究方法、技术路线、实验手段、关键技术等说明);

### 3.1 可行性分析

#### (1) 通过人体皮肤振动获得脉搏波的理论可行性

脉搏波的产生是由于心脏周期性地收缩和舒张时, 心室射入主动脉的血液将以波的形式, 从主动脉根部出发沿动脉管系传播。脉搏波的传输会引起血管的扩张与收缩, 由此产生的血管壁形变或血液流速变化经过机体软组织作用于皮肤、指甲等表面组织, 并表现为皮肤表面微颤。根据血管的力学分析, 当动脉管壁很薄、受力后形变很小时, 血管壁半径的微小变化 $dr$ 与血管壁内外压力差的微小变化 $dp$ 成正比, 即:

$$\frac{1}{r_0} dr = \frac{r_0}{Eh} dp \quad (1)$$

其中,  $r_0$  为自然状态下血管半径,  $E$  和  $h$  分别为血管壁的杨氏弹性模量和血管壁厚度。实验以测量皮肤表面的微小位移为基础, 因为微小位移产生于动脉的压力变化即扩张和收缩, 因此可以通过研究动脉组织对血流的反应即皮肤振动, 来获得动脉的压力变化即脉搏波。



## (2) 远距离探测皮肤位移对应的自混合干涉信号的可行性

本项目基于激光自混合干涉技术,结合动态移频技术和预反馈结构,可实现单光子水平反馈强度的目标探测。可调移频腔实现增益效应的物理原理,根据 L-K 速率方程,存在频移效应下的电场传输方程可表示为:

$$\frac{d(E(t)e^{j\omega t})}{dt} = j\omega_m t + \frac{1}{2}(\Gamma G(2\Omega) - \gamma_c) \times E(t)e^{j\omega t} + \kappa E(t - \tau_{ext})e^{j\omega(t - \tau_{ext})} \frac{dN(t)}{dt} \quad (2)$$

其中,  $E(t)$  为电场的缓变复振幅,  $\omega_m$  为谐振腔角频率,  $\omega$  为激光的角频率,  $N(t)$  为上能级反转粒子数,  $\Gamma$  为光学限制因子,  $\tau_{ext}$  为光在外腔传播时的往返时间,  $\kappa$  为耦合系数。通过一定条件下的近似,求解式(2),即可获得光源输出功率随反馈光相位及强度的动态变化过程,受到调制后的激光相对输出可表示为:

$$\frac{\Delta n_{out}(t, 2\Omega)}{\langle n_{out}(t) \rangle} = \kappa \times 2\gamma_c \frac{\sqrt{(\eta\gamma_1)^2 + (2\Omega)^2}}{\sqrt{(\Omega_r^2 - 2\Omega^2)^2 + (2\Omega\eta\gamma_1)^2}} \times \cos(2\Omega t - \omega t + \phi_r) \quad (3)$$

其中,  $\langle n_{out}(t) \rangle$  为平均光子输出速率,  $\phi_r$  为附加相移,  $\Omega$  为可调移频量,  $\Omega_r$  为激光器弛豫振荡峰的角频率,  $\eta$  为归一化的泵浦系数, 光子衰变率  $\gamma_c$  和粒子数反转衰变率  $\gamma_1$  分别对应激光器腔光子寿命  $\tau_c$  与荧光发光寿命  $\tau_1$  的倒数。当信号频率与激光器弛豫振荡峰共振时腔增益系数达到峰值, 最大调制度可简化为:

$$M_{max} = \frac{\Delta n_{out}(t, 2\Omega)}{\langle n_{out}(t) \rangle} \cong 2\kappa \frac{\gamma_c}{\eta\gamma_1} \quad (4)$$

基于式(4), 可知可调移频光反馈干涉系统的探测灵敏度正比于光源荧光-光子寿命比, 因此通过频移将信号移至激光器的弛豫振荡峰附近, 可大幅提升系统最小可测下限。对于固体激光器, 信号腔增益系数理论上可达  $10^6$  量级, 具备实现光子回馈水平实时测量的可行性。谈宜东课题组在实验上利用可调移频技术实现了 200 米距离处以纸壳的自混合干涉声音振动的测量。实验中纸壳反射率为 0.5, 与研究现状调研中指出的人体皮肤在红光波段的反射率接近, 如图 1 所示, 这在实验上一定程度地验证了远距离探测脉搏波的可行性。

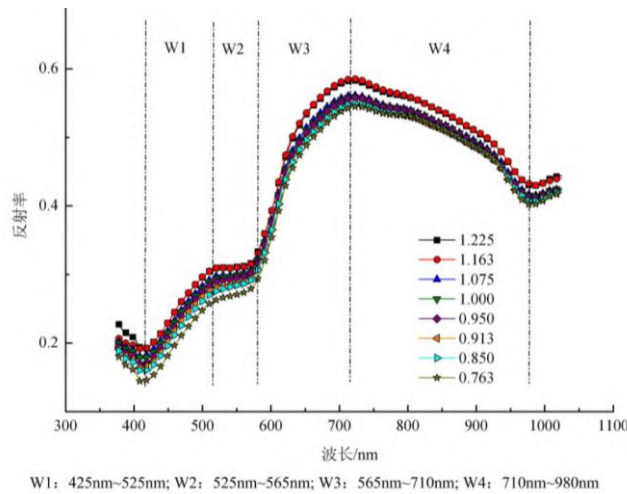


图 1 不同拉伸比状态下的人体皮肤光谱曲线

通过动态移频产生的腔增益效应仅作用于光反馈干涉信号与激光器量子噪声自身，因此具备“主动”降低低频噪声干扰同时放大自混合信号的作用。

依据式(4)，可知调制度  $M$  还取决于耦合系数  $\kappa$ ， $\kappa$  可表示为：

$$\kappa = \varepsilon(1 - R_2) \sqrt{\frac{R_{eff}}{R_2}} \quad (5)$$

其中， $|\varepsilon| \leq 1$  表示由于模式不匹配等原因造成反馈光重新注入激光腔内时的损耗， $R_2$  为激光器出射端的功率反射率。对于人体皮肤表面， $R_{eff} < 1$ ，而预反馈结构可有效改善这一限制，其理论模型如图2所示：

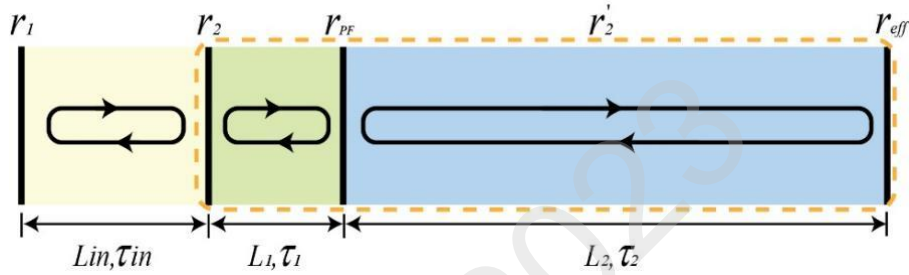


图2 预反馈结构原理图

将外腔的反馈效应等效到激光器的输出端面，则等效后的反射系数为：

$$r_2' = r_2 + (1 - r_2^2)r_{pf}e^{-i\varphi_1} + (1 - r_2^2)(1 - r_{pf}^2)r_{eff}e^{-i(\varphi_1+\varphi_2)} \quad (6)$$

其中， $r_2$ 、 $r_{PF}$ 、 $r_{eff}$  分别表示激光器输出腔镜、预反馈镜和待测目标的功率反射系数， $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  分别表示光在激光器出射端面和预反馈镜之间，以及预反馈镜和待测目标之间往返传播时引起的相位时延。此时，信号调制度与预反馈结构特征参量间的关系可表示为：

$$\frac{\Delta n_{out}(t, 2\Omega)}{\langle n_{out}(t) \rangle} \propto \frac{r_{PF} \cos(\omega\tau_1) - r_{PF}^2 r_{eff} \cos(\omega\tau_1 + \omega\tau_2)}{r_2 \cos(\omega\tau_1 + \omega\tau_2)} \quad (7)$$

其中， $\tau_1$ 、 $\tau_2$  分别表示光在激光器出射端面和预反馈镜之间以及预反馈镜和待测目标之间的往返传播时间。基于式(7)，可知：预反馈镜的反馈系数和在激光传输光轴上的所处位置是影响反馈信号调制度的主要参数，因此，预反馈系统的设计需同时兼顾预反馈镜的位置、反/透射率、级联方式等因素。实验中预反馈的放大倍数可达到 16dB，如图 3 所示。采用预反馈结构后，信号幅值和信噪比显著提高。基于以上分析，结合可调移频技术和预反馈技术可有效提升信号信噪比和灵敏度，对于远距离皮肤位移传感是确实可行的。



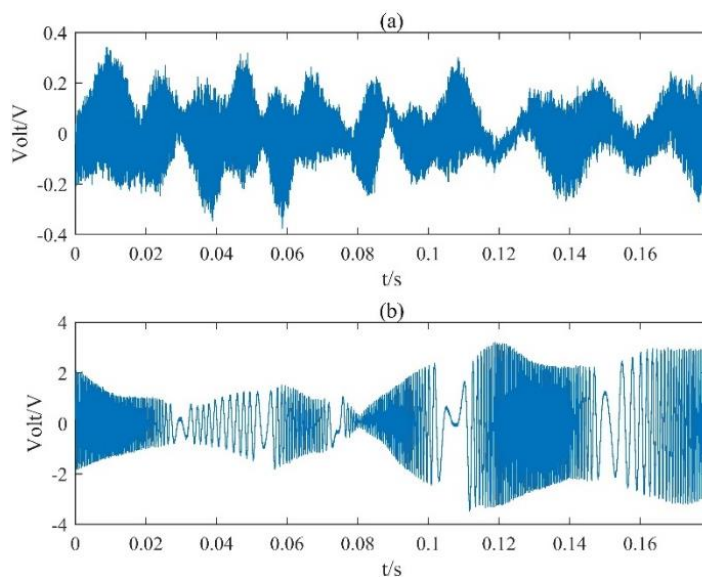


图3 预反馈镜用于脉搏波信号增强实验结果。0.4m 距离 (a)不使用预反馈镜 (b)使用预反馈镜

### (3) 脉搏信号重构的可行性分析

本项目计划先采用时频谱线性移频重构算法对人体皮肤位移进行重构，并采用 VMD 算法对皮肤位移中包含的运动伪影进行去除，准确还原脉搏波波形。

#### a) 通过时频谱线性重构皮肤振动位移可行性分析

脉搏波信号为非平稳信号，为了得到信号频谱随时间变化的情况，从而更直观的揭示脉搏波周期内能量的变化，故采用时频分析方法对信号进行联合分析。

皮肤的振动位移 $L(t)$ 产生的光反馈干涉信号的功率 $P(t)$ 如式(8)所示：

$$P(t) = P_0 \{1 + m \cos[x_f(t)]\} \quad (8)$$

其中  $m$  为调制系数， $P_0$ 为光反馈干涉系统不存在外部光反馈时的输出功率， $x_f(t)$ 为系统存在光反馈时的激光输出相位。皮肤反射率较低，光反馈强度一般较弱，此时有：

$$x_f(t) \approx x_0(t) = \frac{4\pi L(t)}{\lambda_0} \quad (9)$$

其中 $x_0(t)$ 为系统不存在光反馈时的激光输出相位， $\lambda_0$ 为无光反馈时的激光器输出波长， $L(t)$ 脉搏波振动。对 $x_f(t)$ 求导数，可以得到系统的多普勒频率为：

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{dx_f(t)}{dt} = \frac{2}{\lambda_0} v \quad (10)$$

对脉搏波自混合信号做短时傅里叶变换（STFT），其时频图如图 4(a)所示，由于此时在时频谱中只显示频率为正的分量，不能确定脉搏振动的方向，即无法根据公式(10)提取出脉搏波振动速度变化曲线。

针对在时频谱中无法判断脉搏波振动方向的问题，拟采用在光路中添加 AOM 声光调

制器的方案。AOM 能够使信号产生频率移动 $k$ ，理论上只要采集到的脉搏波光反馈干涉信号的多普勒频率恒大于零，即 $f_d + k > 0$ ，在时频谱中就能够显示完整的频率分量，接着，用提取到的主频曲线减去已知的移频量，即可得到真实的带方向信息的多普勒频率信号。此时依据多普勒频移公式(10)就能够正确地提取出脉搏波振动速度变化曲线，从而重构出脉搏波的振动位移。移频前的脉搏波光反馈干涉信号时频谱仿真如图 4(a)所示，通过选取合适的频移 $k$ 值，能够使光反馈干涉信号频率整体恒大于 0，如图 4(b)所示。这从原理和仿真上验证了该方案是可行的。

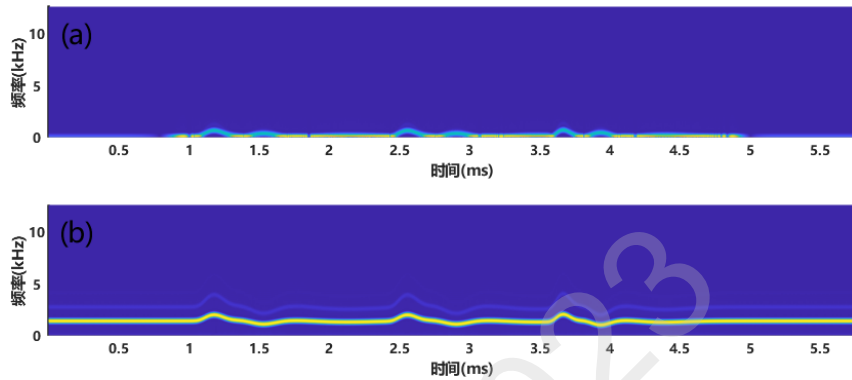


图 4 移频前(a)和移频后(b)的脉搏波时频谱

此外，由于振动信息主要包含于信号的主频中，故需增强 SMI 信号时频谱中的主频能量并抑制其他谐波成分能量。图 5(a)和图 5(b)分别给出了脉搏波信号在反馈强度  $C=0.1$  以及  $C=0.9$  下的时频谱图。可见随着  $C$  增加，引入更多高阶谐波使频谱成分会变得复杂。对自混合信号的成分进行解析，由自混合信号的相位关系，公式(8)可以改写为：

$$P(t) = P_0 \{1 + m \cos[x_0(t) - C \sin(x_f(t) + \arctan(\alpha))]\} \quad (11)$$

对公式(11)中的余弦部分记为 $P_0(t)$ ，表示经过信号预处理过后得到的归一化 SMI 信号。对 $P_0(t)$ 进行贝塞尔函数展开后在频域中表示可以得到如下关系：

$$\begin{aligned} |F(f)| &= \cos(x_0(t)) |J_0(C)| \delta(f) \\ &+ \cos(x_0(t)) \sum_{n=1}^{\infty} |J_{2n}(C)| \delta(f - 2nf_0) \\ &+ \sin(x_0(t)) \sum_{n=0}^{\infty} |J_{2n+1}(C)| \delta(f - (2n-1)f_0) \end{aligned} \quad (12)$$

中 $J_n(C)$ 为 $n$ 级第一类贝塞尔函数， $\delta(f)$ 为冲击函数。可以分析得出结论， $P_0(t)$ 在频域中表示为 $\cos(x_0(t))$ 的主频成分以及一系列高频谐波成分。谐波成分的幅值与 $C$ 值相关，但始终小于主频的幅值，这也解释了图 5(a)、(b)中时频谱存在的波纹状的差别。进一步的，只要设计出特定的算法，在时频谱中消除这些能量成分，就可以得到信号的主频，从而重构出位移。

此外，由于高斯噪声具有比主频更高的频率以及更低的能量，为脉搏波自混合信号加 10 dB 高斯白噪声，其结果如图 5(c)所示，可以看见噪声带来的频率成分和  $C$  带来的谐波

同时作为时频谱中的低能量成分存在,即该算法在消除反馈强度因子引入的谐波成分的同时,也能够消除由噪声引入低能量成分,这使得该算法对噪声具备很强的抗干扰能力。

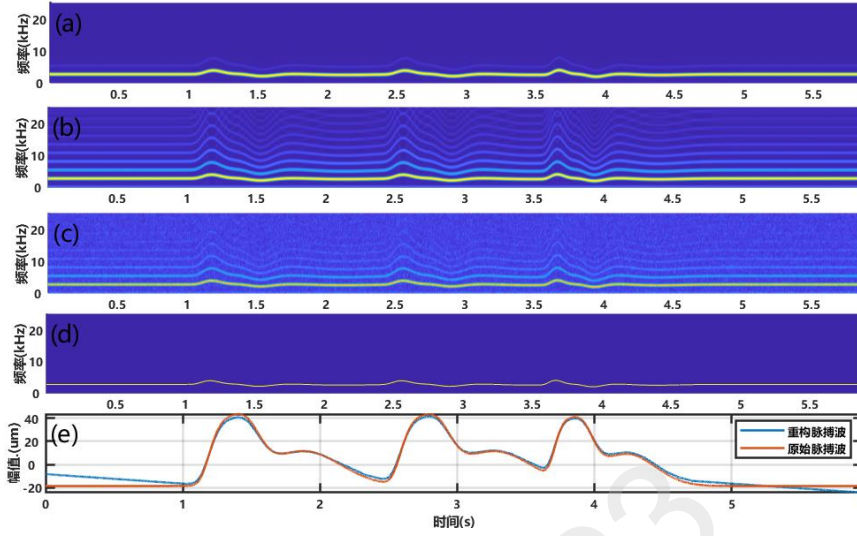


图 5 (a)  $C=0.1$  下的时频谱 (b)  $C=0.9$  下的时频谱 (c)  $C=0.1$ ,  $SNR=10dB$  下的时频谱  
(d) 提取的主频 (e) 重构的脉搏波位移

时频谱本质上为信号频谱的时域展开,由于只需要保留每一个时刻上的主频,所以算法的设计拟采用时频系数模值的归一化矩阵为基础,以汉明窗 $g(t)$ 作为窗函数,对 SMI 信号 $P_0(t)$ 做 STFT 可以表示为:

$$STFT(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_0(\tau) g(\tau - t) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (13)$$

其中 $STFT(t, \omega)$ 表示 SMI 信号的时频系数,以 $r$ 为转化因子构建如下权重函数 $\Psi_r$ :

$$k = \left[ \frac{\|STFT(t, \omega)\|}{\max(\|STFT(t, \omega)\|)} \right]^r \quad (14)$$

$$\Psi_r = \begin{cases} 0, & k < \sigma(k) \\ 1, & else \end{cases} \quad (15)$$

其中 $\|\cdot\|$ 表示复数信号的模值,  $\sigma(\cdot)$ 表示信号的标准差。因为 $STFT(t, \omega)$ 已经过模值归一化,可知系数 $k(t, \omega) \in (0, 1]$ , 转化因子可调控不同的归一化系数的衰减速度但保持主频系数不发生变化。权重函数 $\Psi_r$ 由在每一个时间维度上的 $k$ 经过方程(15)所示的运算得到构建。通过权重函数 $\Psi_r$ 与初始的 $STFT(t, \omega)$ 相乘运算,便实现了对谐波成分的抑制。算法仿真结果如图 5(d)所示,可以看见算法对于信号中多余的谐波成分和噪声起到了很好的抑制效果,此时利用多普勒频移公式对信号主频进行处理,能够得到正确的脉搏波位移如图 5(f)所示。根据上述理论及仿真分析,本项目基于时频域使用移频线性重构方法重构皮肤振动位移是可行的。

## b) 通过 VMD 算法分离脉搏振动和运动伪影可行性分析

通常来说,在脉搏波的采集过程中将不可避免地受到噪声的干扰,包括基线漂移、工



频干扰、运动伪影等。基线漂移主要是由于采集过程中人体的呼吸作用所引起的皮肤机械振动以及硬件电路的不稳定性造成的。具体表现为缓变的正弦波，会对脉搏波的波形进行幅度与频率调制，一般来说，其频率范围在 0.06~0.5Hz 之间。由于呼吸信号所占频带与心率的范围互不交叠，因此，可以从脉搏波中提取呼吸波形及呼吸率。工频干扰是由于市电引起的固定频率为 50Hz 及其倍频谐波组成的正弦干扰波。而运动伪影是由人体不自主的抖动导致的测量部位与测量系统之间发生相对运动或自混合测量光路发生变化而引起的，该波形组成比较复杂且具有随机性，频率范围有时会与心率的范围有所重叠，难以通过频谱滤波去除，是影响脉搏波测量准确性的主要因素。基于前述分析与思考，本项目组设计了利用 VMD 的混合生理信号分离方法。

对自混合时频谱处理后的信号进行 VMD 分解即可从混合的皮肤振动数据中分离出脉搏波、呼吸信号及高频噪声。利用 VMD 对 PhysioNet 中的 MIMIC-III 临床数据集进行了呼吸、脉搏以及运动伪影进行分离，具体流程如图 6 所示。

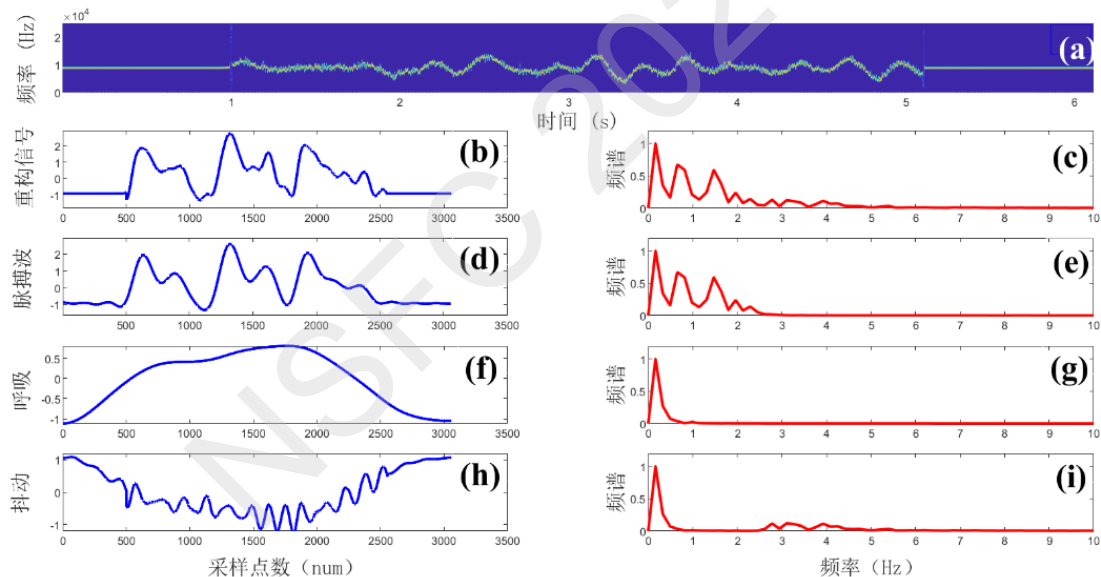


图 6 带有呼吸和抖动伪影的脉搏波信号 VMD 分解图解。(a)为脉搏波速度对应的时频图，(b)、(d)、(f)、(h)分别为线性移频重构皮肤位移，经过 VMD 分解后提取到的脉搏波，呼吸位移和抖动位移，(c)、(e)、(g)、(i)为对应的频谱。

该结果证明此方案是可行的，且可为后续疾病诊断与分类提供了多方位信息。在前期工作中，项目组已实现了对人体静息时皮肤振动信号进行分离，接下来将进一步优化 VMD 的参数选择模块，实现不同人体状态、不同场景下的高精度、鲁棒性脉搏波运动伪影分离。

#### (4) 建立基于卷积神经网络的自混合干涉脉搏波心血管疾病识别模型的可行性分析

人体心脏搏动产生的信号沿着动脉血管在人体中传播形成脉搏波信号，包含了反应心脏、血管的健康状态的重要的生理信息。目前获取到的脉搏波信号一般由医生诊断后给出诊断意



见，这无疑限制了健康诊断的使用场景和人群。利用神经网络对 SMI 医学信号进行诊断的原理是利用神经网络对数据的敏感特性，通过网络设计进行大量的计算获取到不同的心血管疾病的脉搏信号中代表不同疾病的本质特征，从而判断出患者的患病类别和概率。

SMI 信号对应的时频谱图像中蕴含脉搏振动的速度变化信息，使得位移的增减体现为速度的正负，放大了信号的变化特征弱化了时域上噪声带来的巨大影响，更加利于作为深度学习的输入进行疾病分类处理。采用卷积神经网络对 SMI 脉搏信号图像进行分类处理，主要经过卷积层、池化层、全连接层的运算处理。经过多重卷积核运算，不同种类疾病下 SMI 脉搏波信号时频图像的数据特征与对应的卷积核高度匹配，可完好的计算出疾病的数据特征。同时为防止产生过拟合现象，利用最大值池化直接放大该部分数据中的最大特征。经过多次层级运算之后，将数据拉至一维序列，在全连接层中通过计算权重获取到有关疾病的分类概率，并根据数据集中给出的标签不断进行迭代，最终获取准确率最高的一组权值作为参数应用，其过程如图 7 所示。依据上述理论，分类准确率如图 8 所示。

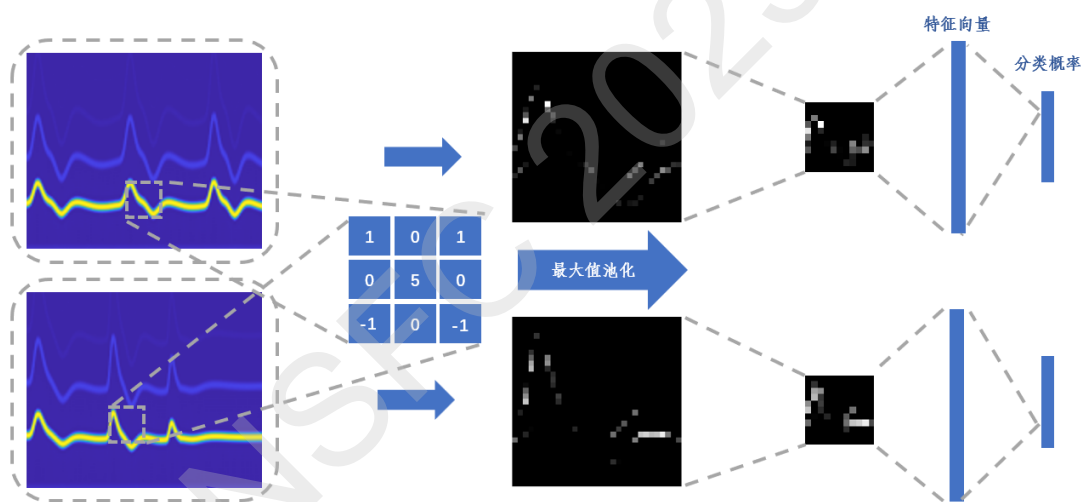


图 7 基于卷积神经网络的脉搏波图像分类基本流程

预测值						真实值
	正常	早搏	心律失常	心房纤颤	心跳过速	
正常	500	1	0	0	1	
早搏	0	498	0	5	0	
心律失常	0	1	493	3	1	
心房纤颤	0	0	3	489	3	
心跳过速	0	0	4	3	495	

图 8 基于脉搏时频谱图像的心血管疾病分类结果



依据上述分析和前期工作结果，本项目拟采用卷积神经网络对自混合干涉脉搏信号的时频图像进行学习，提取出有关人体心血管疾病的数据特征，而后对患者进行疾病初步诊断并给出患病概率，将是可行的。

### (5) 项目顺利实施并达到预期目标的可行性分析

课题组从2011年开始从事光学传感工作，实验室硬件设备齐全，课题组人员构成合理，包含博士生导师、博士、硕士，专业背景涵盖电子、光学、信息处理等相关专业。在光学非接触式测量领域已经完成高分辨率位移测量、材料折射率测量、材料阻尼系数测量、转速测量和时频域非平稳振动重构的研究，积累了丰富的相关理论知识、技术方法，发表了多项成果论文和相关专利，详情见工作基础。近年来在激光自混合干涉人体皮肤脉搏振动测量方面，开展了脉搏波传导时间差与收缩压、舒张压之间的关系研究，和基于脉搏波使用支持向量机和极限学习机进行血压分类的研究，发表了系列论文，并且使用嵌入设备实时的完成了血压分类、测量及显示的工作，该工作分别于2016年、2017年获得华为杯研究生电子设计竞赛全国二等奖和全国三等奖。并且和厦门大学附属第一医院心电功能科张丽娟主任医师建立了紧密的合作关系，已经合作发表系列论文。进一步的，课题组已开始项目包含的远距离振动位移探测、短时傅里叶变换时频谱分析、高分辨率自混合信号重构、低信噪比条件下的基于正交解调的位移重构、基于卷积神经网络的光反馈强度计算等与本项目相关联的关键技术研究，并取得系列成果。

### 3.2 研究方案、技术路线和关键技术分析

本项目拟采用图9所示的技术路线开展研究工作，主要由三个模块组成：①自混合干涉信号获取方案；②数字信号处理方案；③卷积神经网络的搭建与训练方案。

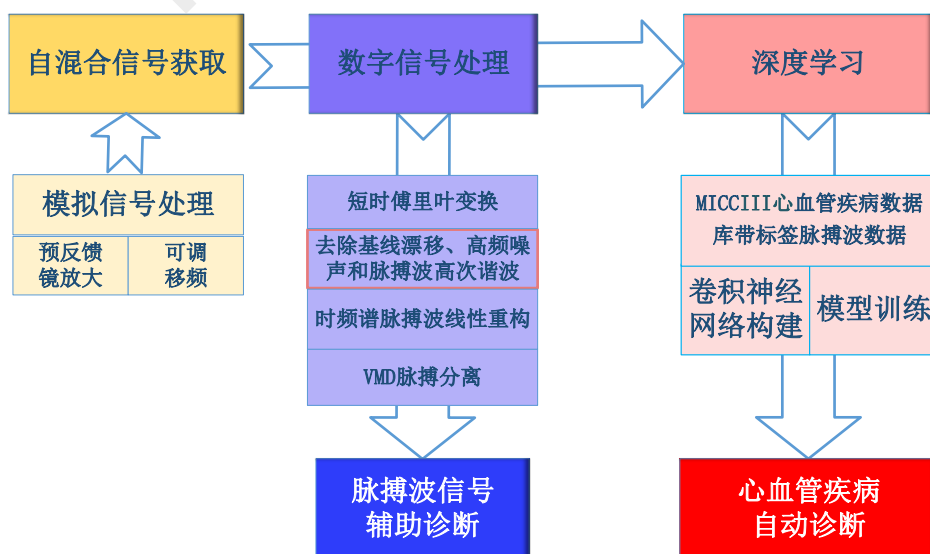


图9 研究技术路线



### (1) 自混合干涉信号获取方案

自混合干涉信号的探测系统如图 10 所示，该装置主要包含光路部分和模拟电路部分。

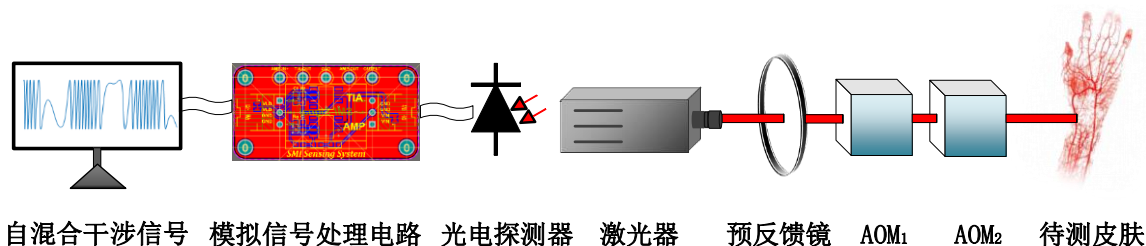


图 10 自混合干涉信号获取装置模型

光路部分由光路准直调节和光学放大部分组成，光路准直：调整光源出射角度，使光打在目标人体皮肤上，集成在激光器内部的光电探测器探测反馈干涉信号的变化，并将其转化为光电流。光放大部分：光放大器器件包含预反馈镜和一对声光调制器（AOM）。预反馈镜为在外腔中插入的一块半透半反的镜子，其与外部振动目标构成一个复合的外腔，使出射激光进行二次反馈从而产生光放大作用

声光调制器包含一个固定移频  $AOM_1$  和一个可变移频  $AOM_2$ ，通过调节 AOM 驱动电压将激光器的输出光频率移动到弛豫振荡区，使光增益达到最大，同时摆脱低频噪声的干扰。光增益强度  $G$  与移频量  $\Omega$  之间的关系可表达为：

$$G(2\Omega) = 2\gamma_c \frac{[\eta^2 \gamma_1^2 + (2\Omega)^2]^{1/2}}{[(\Omega_r^2 - (2\Omega)^2)^2 + (\eta \gamma_1)^2 (2\Omega)^2]^{1/2}} \quad (16)$$

$\Omega$  为可调移频量， $\Omega_r$  为激光器弛豫振荡峰的角频率， $\eta$  为归一化的泵浦系数，光子衰变率  $\gamma_c$  和粒子数反转衰变率  $\gamma_1$  分别对应激光器腔光子寿命  $\tau_c$  与荧光发光寿命  $\tau_1$  的倒数。基于式(16)，可知：① 系统探测灵敏度正比于光源的荧光-光子寿命比；② 信号频率与激光器弛豫振荡峰共振时腔增益系数达到峰值。因此，在合适光源选型的基础上通过可调移频将信号移至弛豫振荡峰附近，可大幅提升系统最小可测下限，降低后续的信号处理压力。基于该方法，可实现单光子水平的探测灵敏度。

光电流经过模拟信号处理电路中的跨阻运放转化为电压信号，并经过后续的二级差分放大、隔直滤波和二阶低通滤波电路作用进一步对自混合干涉信号的幅值进行放大，对高频干扰和直流偏移进行有效滤除。

该研究内容的关键之处在于：

- 一、 计算并事先校验预反馈镜的位置，以使光反馈放大的效果达到最大。
- 二、 调整 AOM 的移频数值，以确保将激光器的工作频率搬移到弛豫震荡位置，从而达到最大的光增益效果和有效滤除激光器的低频噪声。

## (2) 数字信号处理方案

### a) 皮肤位移的时频谱重构方案

经过模拟电路处理后得到的自混合干涉信号如图 11(b)所示, 对其做 STFT, 得到时频图。由于时频谱中只能显示频率为正的分量, 故采用在光路中添加 AOM 的方案, 使信号频率产生整体的正向频移, 添加的移频信号如图 11(d)所示, 移频后的脉搏波自混合信号如图 11(e)所示, 相应的时频谱如图 11(f)所示。

移频后的脉搏波自混合信号时频谱中仍存在着由  $C$  值和噪声引入的能量成分, 故通过抑制算法对时频谱中的低能量谐波以及其他能量成分进行抑制, 得到信号的主频, 即线性频移后脉搏波的运动速度曲线。此时信号多普勒频率始终为正, 通过减去 AOM 处设置的线性频移数值  $k$ , 就能得到线性频移前的多普勒频移量  $f_d$  以及运动方向信息的。利用多普勒频移公式(17), 得到时域的脉搏波振动曲线。通过时频谱重构脉搏波的方案流程图如图 12 所示。

$$L(t) = \int \frac{f_d * \lambda_0}{2} \quad (17)$$

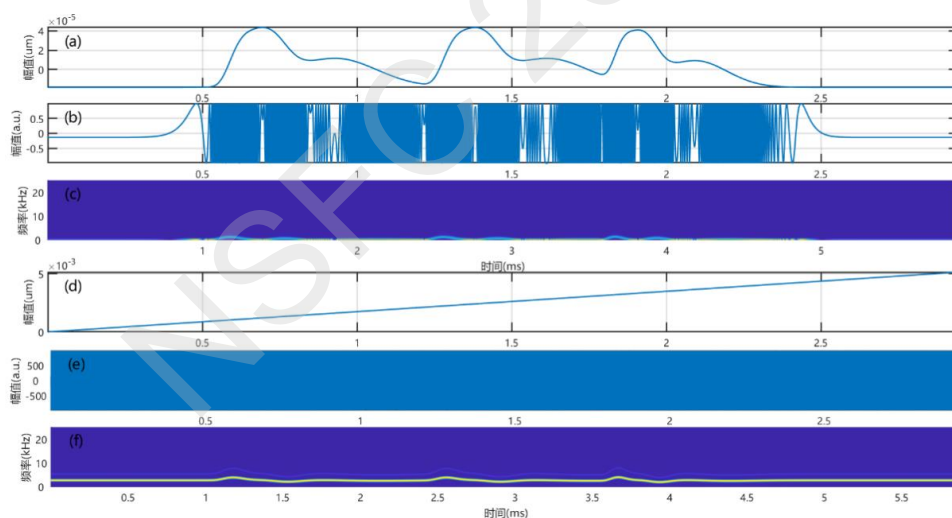


图 11 (a)脉搏波信号 (b)自混合信号 (c)自混合信号时频谱 (d)移频信号 (e)移频后的自混合信号 (f)移频后的自混合信号时频谱

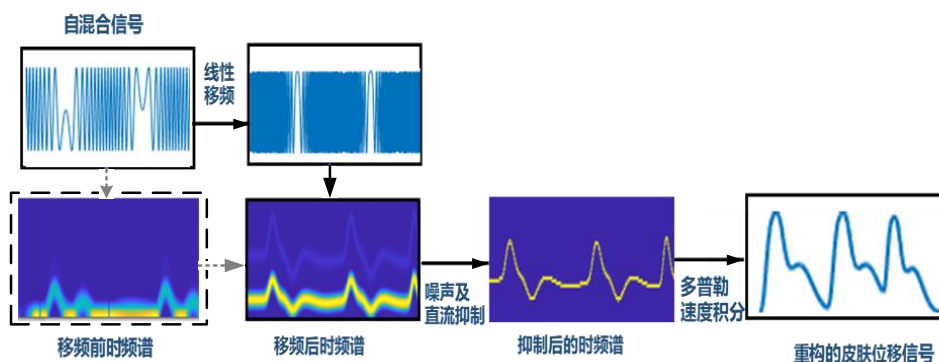


图 12 通过时频谱重构脉搏波流程图



该研究内容的关键之处在于：

- 一、 选取合适的 AOM 移频参数：移频数值过小，时频谱中频率为负的分量仍未完全显示。移频数值过大，系统则需要更高的采样率。
- 二、 时频谱变换的参数选取：依据海森堡的不确定性原理，STFT 需要在高频率分辨率和高时频分辨率之间进行权衡，这与所选择的窗类型、窗的长度、窗滑动步长、信号采样率都有关系。
- 三、 低能量谐波及信号噪声滤除：时频谱中由 C 值增大引入的高频谐波成分以及由信号噪声引入的频率成分同时作为时频谱中的能量成分存在，会对主频选取产生干扰，因此设计合适的时频谱能量转换算法对于脉搏波的重构非常关键。

#### b) 去除脉搏波信号伪影方案

由于在测量中，人体会发生不自主的抖动，导致待测皮肤发生除心血管收缩的额外位移，这种额外的位移会产生额外的外腔干涉相位，使重构得到的皮肤位移中含有信号伪影。

本项目利用 VMD 皮肤位移运动伪影去除以提取脉搏波信号，其基本原理如下：VMD 采用自适应非递归模型，通过迭代搜寻变分模型，并引入维纳滤波对变分问题进行求解，很好的解决了 EMD 分解所共有的端点效应和模态混叠的问题，具有很强的鲁棒性。模态分量变分约束模型的表达式如下：

$$\begin{cases} \min_{\{x_k\}, \omega_k} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[ \delta(t) + \frac{j}{\pi t} * x_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{subject to } \sum_k x_k(t) = f(t) \end{cases} \quad (18)$$

其中， $k$  为分解层数， $x_k(t)$  为第  $k$  个模态分量， $\omega_k(t)$  第  $k$  个模态分量的中心频率， $f(t)$  为输入的原始信号。该模型具体含义为：①每个模态分量中心频率带宽之和最小；②所有模态分量之和等于原始信号。为了求(18)，引入二次惩罚项和拉格朗日算子，将其转换为求解无约束变分模型，转化结果如下式：

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\{x_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = & \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * x_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \\ & + \left\| f(t) - \sum_k x_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k x_k(t) \right\rangle \end{aligned} \quad (19)$$

式中  $\alpha$  为惩罚因子， $\lambda$  为拉格朗日乘法算子。通过交替方向乘法算子法对式(19)中的变量  $x_k^{n+1}$ ， $\omega_k^{n+1}$ ， $\lambda_k^{n+1}$  进行不断迭代更新，得到符合条件的最优解。VMD 信号分解具体步骤如图 13 所示：



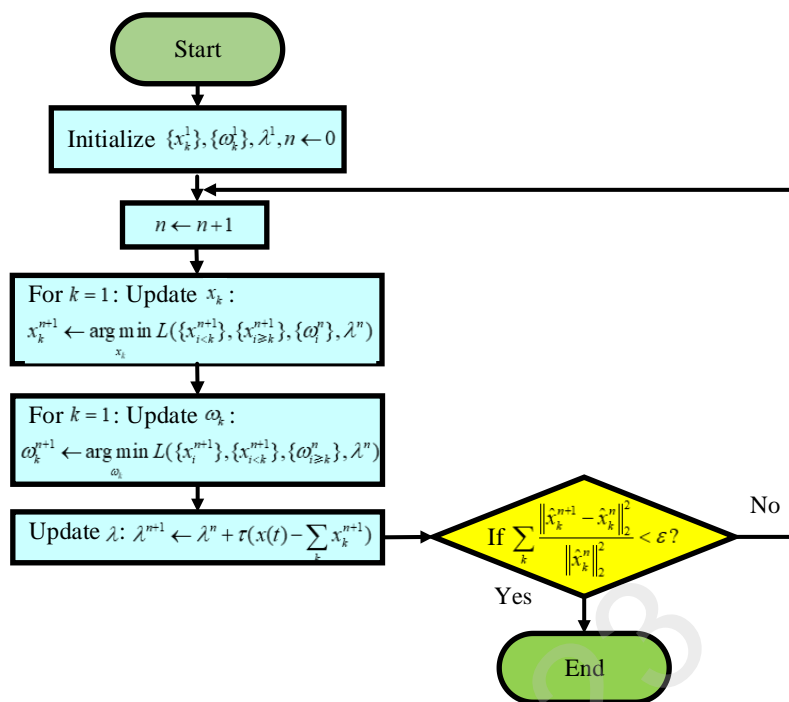


图 13 VMD 算法流程图

对含运动伪影的脉搏波信号的整个分解过程如图 14 所示:

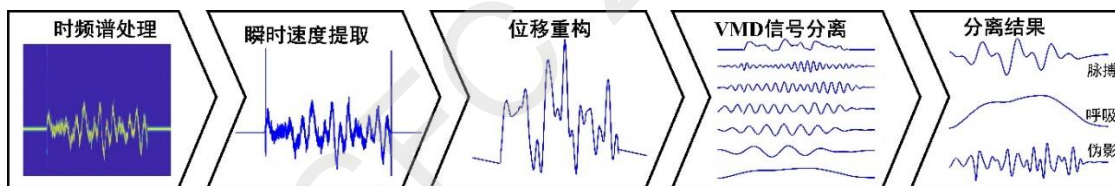


图 14 脉搏波信号 VMD 分解过程

该研究内容的关键之处在于:

合理的参数选择:分解层数 $k$ 以及惩罚因子 $\alpha$ 的大小都会影响 VMD 信号分解的效果,因此需要根据输入信号的特征选取合适的分解层数与惩罚因子。

### (3) 卷积神经网络对心血管疾病迁移学习方案 and 关键技术

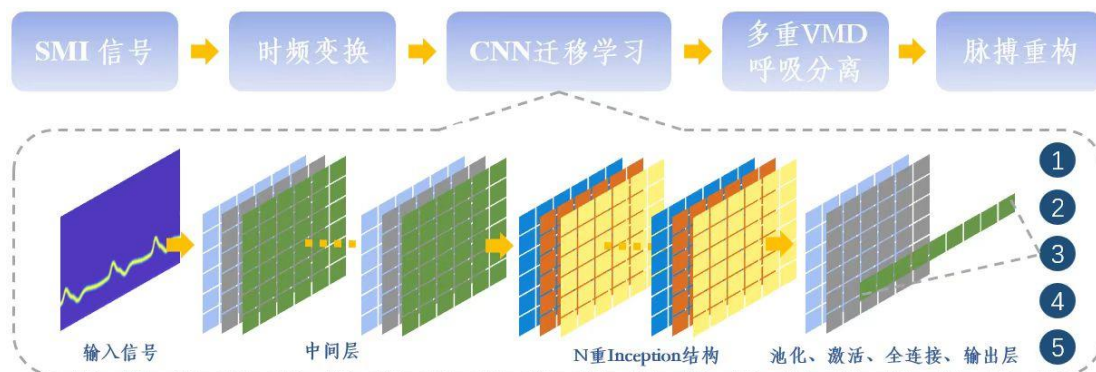


图 15 数字信号处理流程和 CNN 结构

本项目采用 PhysioNet 中的 MIMIC-III (<https://physionet.org/content/mimiciii/1.4/>) 临床脉搏波数据集进行心血管疾病与脉搏波关系的卷积神经网络训练。深度学习的过程为一个负反馈的过程，通过不断的将网络的输出与真实值之间的差反馈回到网络内部，不断的迭代更新网络参数，使得输出值更加靠近真实分类。前期采用如图 15 所示的网络方案进行功能设计。对于大规模稀疏的神经网络，通过分析激活值的统计特性，而后对具有较高的相关度的输出进行聚类计算可以逐层构建出最优网络。但是稀疏数据的非均匀性使得计算机往往面临着庞大的计算量，故为了综合网络的稀疏特性和计算的高性能，多重的 Inception 结构被引入到网络的构建之中，基本结构如图 16。利用不同大小的卷积核对不同尺度的感受野进行计算，最后进行特征拼接，可以实现较高的计算能力。

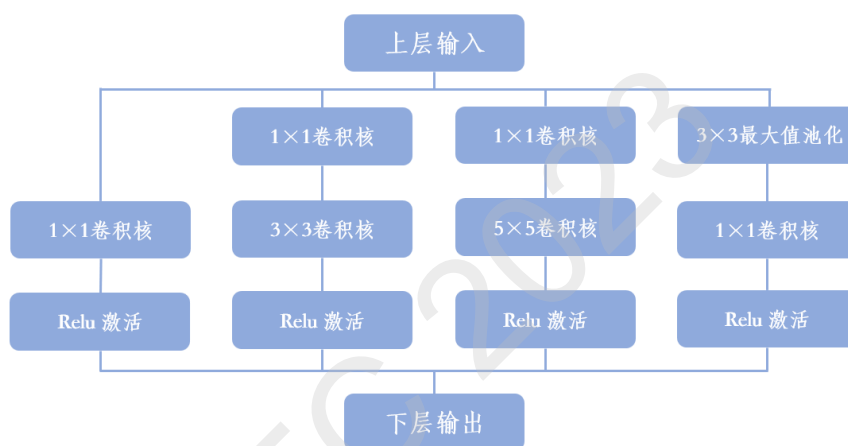


图 16 单层 Inception 基本结构示意图

先期构建的网络效能通过测试，发现其可以对图像实现较高水平的聚类效果，接下来则利用训练好的网络进行迁移学习。基于参数共享的原则对已有网络进行改进，并带入数据集进行训练，对网络参数进行微调。在前期工作中，项目组已经实现了基于 SMI 传感的 5 种不同心血管疾病的探测和分类，接下来则进一步优化迁移学习设计，并且考虑人体存在自然抖动的情况下的网络设计方案。进一步提升网络的鲁棒性，对网络结构、数据集组成、输入数据结构、网络参数进行验证和优化，使得输出值与真实值的差不断减小，直至到达预期的误差范围。

**该研究内容的关键之处在于：**

- 一、合理的数据集设计：数据集的组成以及数据形式会对网络学习产生影响，因此需要特别注重以下两个方面的设计，其一需要增添当人体存在自然抖动的状态下的数据图像，其二需要增添不同的信噪比情况下的图像；
- 二、网络结构的搭建和选取：面对自然噪声和人体自然抖动条件下网络的稳定性需要进一步的验证，实验中，人体不同探测位置和抖动状态会对网络输出结果产生影响，因此拟进行多层级网络的设计对抖动进行去除，从而提升聚类准确度；





三、迁移学习的设计和验证：数据集面向的是非亚洲群体的 PPG 信号，故需要针对亚洲人或者本国人的自混合干涉脉搏波信号进行迁移学习，同时使得原本针对 PPG 信号的网络模型同时可以适配 SMI 的信号特征，需要对网络参数和结构进行微调以适配实际应用。

#### 4. 本项目的特色与创新之处；

本项目基于激光自混合干涉原理，结合腔增益效应和迁移学习方法，构建兼具大动态距离范围和高精度的非接触式脉搏波传感手段及心血管疾病自动分类诊断系统，开拓流动性、常态化的心血管健康评估和疾病诊断的新途径。

具体创新之处在于：

- (一) 人体皮肤表面属于低反射、高散射表面，无法反射回足够的光到激光腔内，使得探测到的激光自混合干涉信号强度信噪比低，在距离稍远处（十厘米之外）甚至无法获取到自混合干涉信号。本项目结合可调移频技术和预反馈结构在降低低频噪声干扰的同时可最大程度放大“腔增益”效应，**将系统探测下限延申至光子反馈水平。**
- (二) 传统的激光自混合干涉重构算法方法在弱反馈和低信噪比条件下，对运动方向计算易出错，无法稳重构出皮肤振动。本项目提出线性移频重构算法，**可在不进行额外方向计算的前提下稳定重构皮肤位移，为微弱光反馈目标的微振动位移重构提出新算法。**同时，待测人体发生不自主颤动和呼吸对脉搏波信号施加运动伪影。采用变分模态分解的方法根据不同位移的振幅和频率特点从皮肤位移中**有效去除运动伪影**，准确提取真实脉搏运动位移。
- (三) 传统的激光自混合干涉脉搏波探测方案依据自混合干涉信号的周期性和脉搏波传导速率探测心率和血压，缺乏对脉搏波波形与心血管疾病类别关系的研究。本项目依据自混合干涉数学模型，对心血管临床数据库中脉搏波波形进行自混合干涉信号的转化，并使用深度学习挖掘其与常见心血管疾病之间的关系，得出脉搏波波形和心血管疾病之间的神经网络模型。基于此，**通过迁移学习得到自混合干涉脉搏波信号与常见心血管疾病之间的神经网络模型，为大距离范围心血管疾病的自动监测提供新方法。**



## 5. 年度研究计划及预期研究结果（包括拟组织的重要学术交流活动、国际合作与交流计划等）。

### 5.1 年度研究计划

本项目计划在 4 年内完成，起止时间为：2024 年 1 月～2027 年 12 月。

#### 2024 年 1 月～2024 年 12 月

- 进一步查阅相关文献资料，在前述基础上制定皮肤光子水平回馈下高灵敏度探测系统的整体研究思路及各环节的细分研究方案、性能指标；
- 研究不同激光器使用可调移频技术和预反馈结构所带来的灵敏度提升效果；
- 完成所需器件及材料的采购，为开展实验研究做准备；
- 摸索并建立基于预反馈和可调移频结构的光反馈干涉皮肤位移传感物理模型，并搭建相应实验系统，初步探索针对复杂环境下皮肤振动信号获取的可能性；
- 3 人次参加国内学术交流，发表论文 2 篇。

#### 2025 年 1 月～2025 年 12 月

- 实验探索不同激光器对于不同距离下，人体皮肤振动信号对应的自混合干涉信号的信噪比大小，并确定信噪比最高条件下的可调移频参数和预反馈镜的结构参数；
- 研究时频谱能量转换算法对于散斑和其他噪声的抑制效果，确定能量转换因子。同时确定时频谱重构算法的参数和移频量大小；
- 根据视频谱特点，学习相关卷积神经网络的构建和数据集制作方法；
- 3 人次参加国内学术交流，1 人次参加国际会议，发表论文 2 篇以上，申请 1 项发明专利。

#### 2026 年 1 月～2026 年 12 月

- 构建 5 米距离人体皮肤振动位移传感系统，并进行优化设计，实现实时脉搏振动传感；
- 针对重构的脉搏波信号的特征与静息状态下专业医疗设备采集的脉搏波信号进行对比分析，设计脉搏波信号伪影分离算法，并测试算法在不同运动状态下的适用性；
- 基于 MIMIC-III 中脉搏波数据和自混合数学模型，生成自混合干涉脉搏波信号，并适用卷积神经网络进行监督训练，得到自混合干涉脉搏波信号与常见心血管疾病之间的网络模型；
- 3 人次参加国内学术交流，1 人次参加国际会议，发表论文 2 篇以上，申请 1 项发明专利。



## 2027 年 1 月~2027 年 12 月

- 招募不同年龄、不同性别志愿者，通过激光自混合干涉技术采集他们的脉搏波信号，基于训练得到的卷积神经网络模型，进行小样本迁移学习，构建适用于亚洲人和本探测技术手段的心血管疾病自动诊断系统；
- 使用 MCU 结合 FPGA 进行信号采集、重构、显示及预测，并对光源、模拟电路、光路元件和信号处理电路进行集成，研制一套激光脉搏波波监测系统；
- 3 人次参加国内学术交流，1 人次参加国际会议，发表论文 2 篇以上，申请 2 项发明专利。

## 5.2 预期研究成果

- (1) 成功构建激光自混合干涉脉搏波波形传感及心血管疾病自动分类诊断系统，为远距离脉搏监测提供一种切实可行的新手段；
- (2) 在业界公认的重要科技期刊发表高质量论文 8 篇以上；
- (3) 形成具有高质量和核心知识产权的专利成果 2-3 项；
- (4) 培养博士研究生 2 名，硕士研究生 5-6 名。

## (二) 研究基础与工作条件

### 1. 研究基础（与本项目相关的研究工作积累和已取得的研究工作成绩）：

申请人及所在课题组长期从事激光技术，光电传感系统与信号处理等方面的研究。已主持完成了两项国家自然科学基金以及多项省部级科技项目。课题组自 2012 年起开展光反馈干涉传感技术的研究，在光反馈干涉光路系统改进与优化、微弱信号探测方法与增强、光反馈干涉信号高精度鲁棒重构、脉搏波信号传感等方面取得了系列成果，在实验和仿真分析方面均具备良好基础，为本项目研究积累了扎实的基础。与本项目密切相关的工作包括以下几个方面：

#### (1)多通道非平稳和随机性信号测量——时频域联合分析法研究

课题组近期针对在复杂传感环境和粗糙目标表面条件下的位移鲁棒传感系统的实现进行了一系列研究工作。首先实现了利用短时傅里叶变换对光反馈干涉信号进行时频域联合分析，旨在解决较弱反馈条件下非平稳信号的鲁棒性提取这一关键问题【*J. Light. Technol.*, 40, 2022】，其结果如图 17 给出。

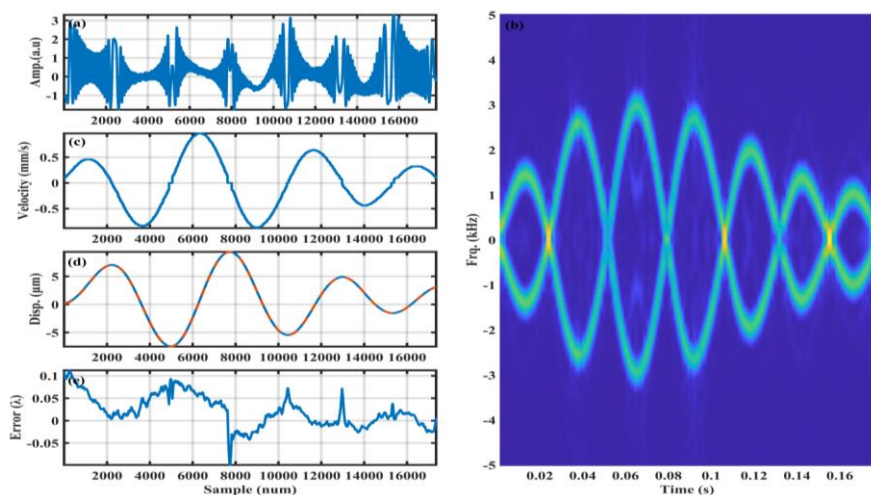


图 17 实验非平稳振动重构结果 (a) 光反馈干涉实验信号 (b) 信号的时域-频域联合分析结果 (c) 分析获取的速度信号 (d) 积分求得的位移信号(蓝线)与参考信号(红线)的对比 (e) 重构误差

同时,为了解决不同的振动表面带来信号的散斑效应以及反馈强度的非平稳扰动的问题,课题组对上述重构算法进行了进一步的修正,使得算法对交叉反馈工作状态以及不同的测量表面具有较高的鲁棒性,提升了传感系统对机械振动的测量稳定性,结果由图 18 给出【*Mech. Syst. Signal Process.*, Under review】。

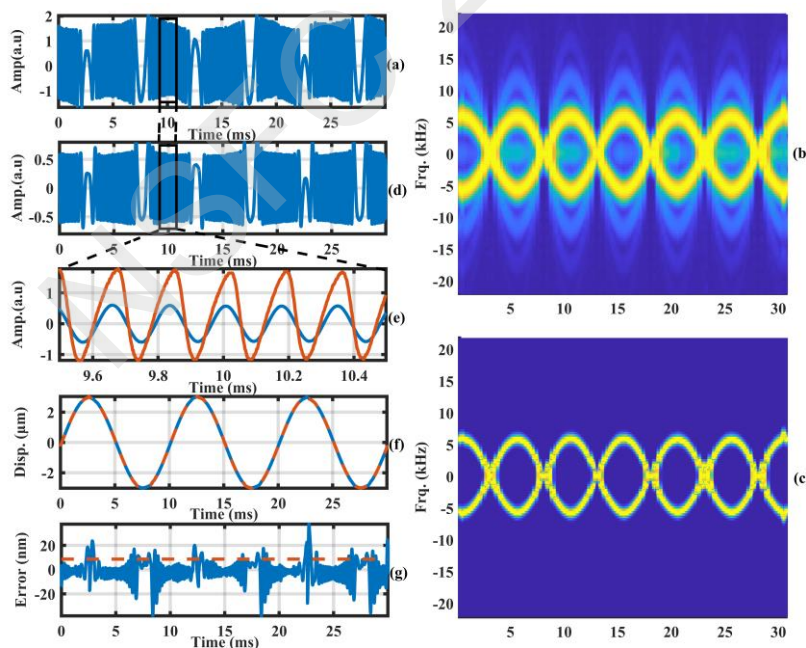


图 18 实验机械振动重构结果 (a) 光反馈干涉实验信号 (b) 信号的时域-频域联合分析结果 (c) 频谱处理后获得的时频谱 (d) 处理后获取的时域信号 (e) 频谱处理后(蓝线)与频谱处理前(红线)信号的细节对比 (f) 重构信号(蓝线)与参考信号(红线)的对比 (g) 重构误差(蓝线)与 RMS 误差(红线)

此外,进一步研究还表明该算法具有有效降低噪声干扰和分辨若干个相近频率信号的能力,可以用来解决多腔传感中无法处理相近振动频率目标的困境【*Opt. Laser Eng.*, 164, 107531】。因此课题组开展了基于多通道光反馈干涉结构的多目标非平稳振动的探测、分





离和提取算法设计,可以为本项目中探测目标信号以及自然抖动信号的同步测量与标定这一关键问题提供解决方案。

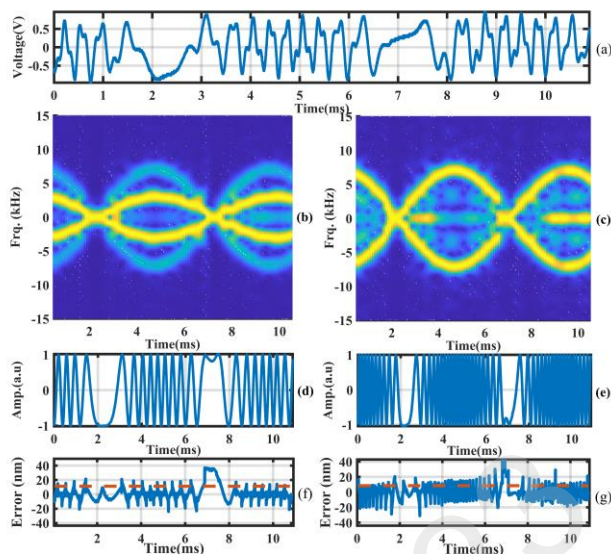
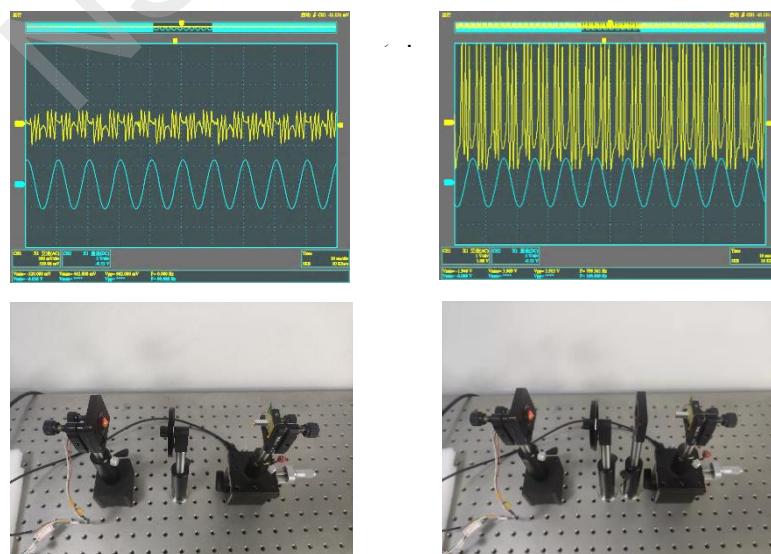


图 19 多目标振动传感实验 (a) 光反馈干涉实验信号 (b-c) 第一通道和第二通道的时频域谱 (d-e) 提取一通道和二通道传感信号 (f-g) 一通道和二通道的信号重构误差(蓝线)与 RMS 误差(红线)

## (2) 弱反馈目标测量——可调移频技术及预反馈结构研究

- a) 针对微弱光回馈信号探测开展了基于预反馈结构的信号放大处理系统研究,该系统可有效提高被测信号的反馈水平。将图 20 中 (a) 图与 (b) 图进行对比,可知预反馈镜显著提高了自混合干涉振动信号的幅值。该方案具有可拓展性,通过设计不同预反馈参数(预反馈镜位置、反/透射率、级联方式等)可满足不同应用场景的需求。



(a) 不加预反馈镜

(b) 加预反馈镜

图 20 预反馈镜光学放大系统实验装置及测量结果

- b) 课题组博士生曾开展基于可调移频技术的光反馈干涉微弱位移传感研究,系统可测最

小动态位移达 55.40 pm 【*Opt. Lett.*, 46(1), 2021】。该工作通过动态移频有效减弱了低频噪声及环境扰动对待测目标反馈信号的干扰，同时对自混合干涉信号进行放大，为本项远距离探测皮肤表面位移奠定了基础。

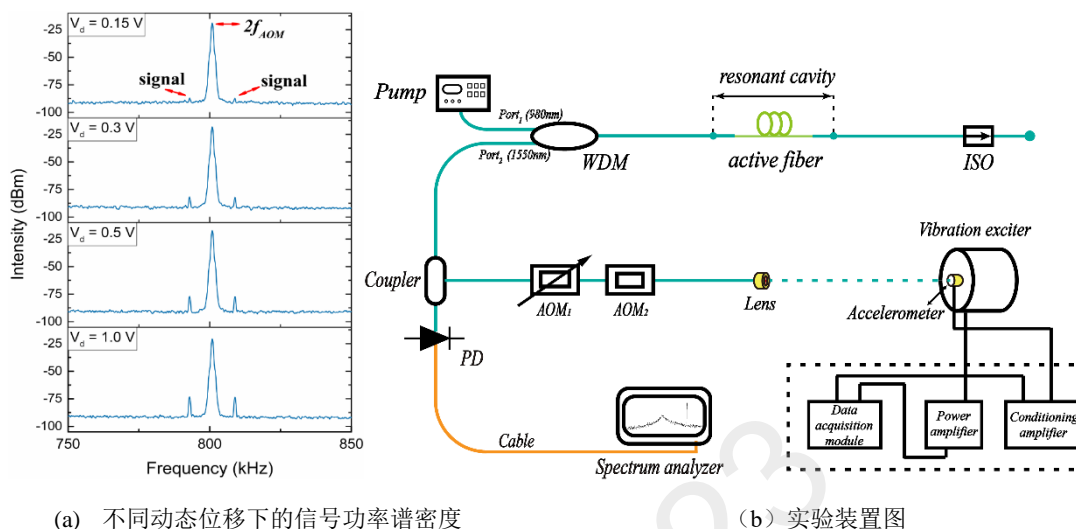


图 21 基于频移技术的微位移传感系统实验装置及测量结果

### (3) 低信噪比条件下的微弱光反馈目标位移重构

课题组使用 EOM 对自混合干涉信号进行方波调制，对自混合信号施加周期性的 90 度相移，并通过插值拟合的方法从单探测器得到的调制信号中同步提取到一对正交信号。基于正交解调方法在 13.1 dB 信噪比和弱反馈条件下，实时重构得到喇叭运动位移，精度达到 20.7 nm (0.50%) 【*Measurement*, Under review】。

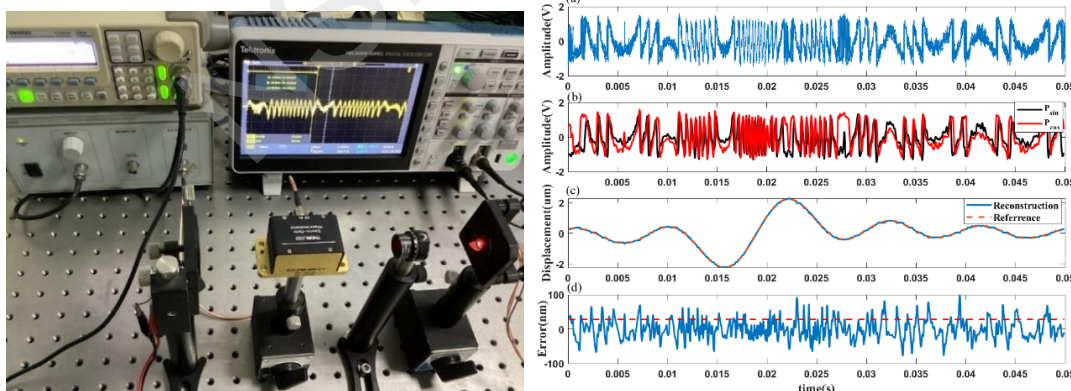


图 22 非平稳振动正交重构. 左图：实物图；右图：自混合信号及其正交信号及位移重构过程

### (4) 心血管疾病快速自诊断——基于深度学习的信号特征量分析

a) 课题组首次采用深度卷积神经网络开展了光反馈干涉信号中外腔反馈强度  $C$  值的预测研究 【*IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Second round revision】。该工作采用基于神经网络的监督学习机制，根据其训练数据中特征值及其间的关系，构建高适应度、高精确度的网络模型，为本项目研究中构建基于迁移学习的心血管疾病分类模型、网络结构提供了前期基础。基于以上工作，在本项目中课题组先期进行了基于深度卷



积神经网络的心血管疾病分类的研究，初步实现了在较微弱抖动条件下对脉搏波时频图像的疾病特征分类，为后期进行迁移学习提供了有力的技术支撑。图 23 (a)给出了对不同的反馈强度下的光反馈参数进行网络测算的结果，(b)中给出了对五种不同的心脏疾病脉搏信号的网络分类结果。

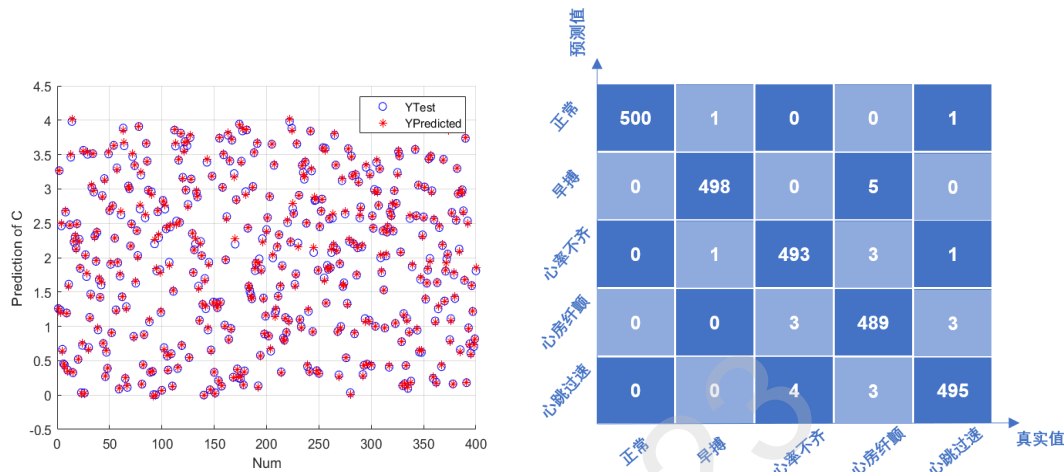


图 23 基于深度卷积神经网络的光反馈干涉传感前期工作

b) 课题组开展有关脉搏波的测量与分类研究【*Opt. Commun.*, 393, 2017】。主要从脉搏波特征参数的提取，基于单隐层前馈神经网络血压模型的构建，以及血压模型预测三个方面展开研究。

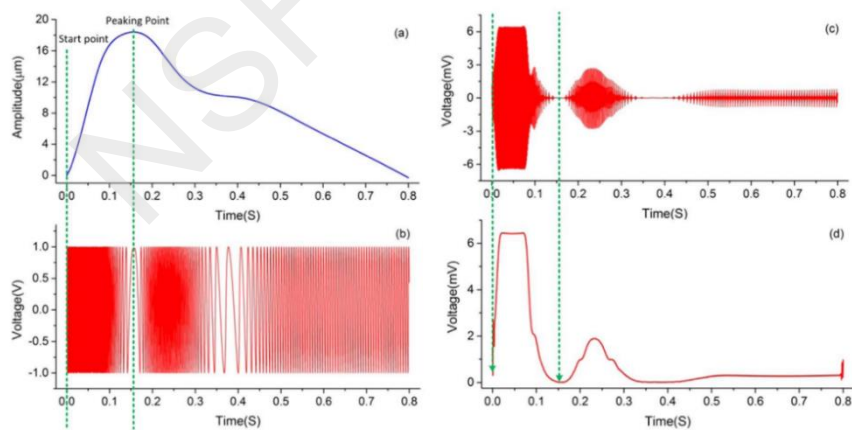


图 24 利用脉搏波光反馈干涉信号提取传导时间

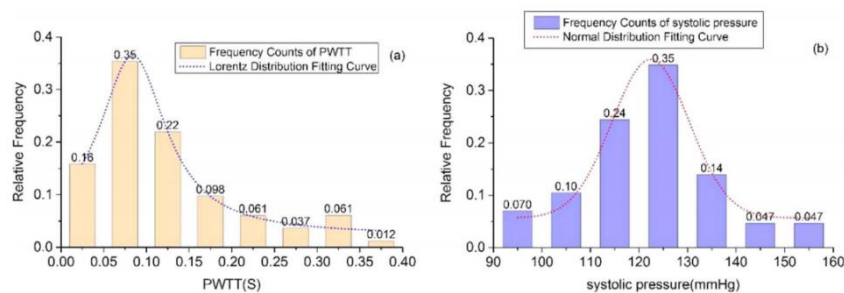


图 25 脉搏波传导时间和舒张压分布实验结果



### (5) 纳米微振动测量——光程倍增时频分析与正交相位调制研究

课题组首次提出了一种外部光路光程倍增技术，并将其应用于光反馈干涉振动测量，理论和实验结果均证明了位移测量的分辨率可低于 $\lambda/6$ 【*IEEE Photonics J.*, 5(3), 2013】，该工作从光路上根本解决了光反馈干涉技术中测量下限及分辨率受限的问题。为解决外部光路光程倍增技术带来的光路复杂化，进一步提出了一种偶次幂倍增算法【*IEEE Photonics J.*, 9(4), 2017】，在不增加任何光学元件的基础上实现了更低的探测下限和可拓展的测量精度。基于此，课题组发展了光程倍增技术与偶次幂算法，提出了一种用于纳米振动测量的具有可扩展精度的集成测量技术【*Opt. Commun.*, 443, 2019】，理论上该方法可将条纹精度提高到 $\lambda/(2^{n+3} \times G)$ ，实验上获得了 $\lambda/63.52$ 的条纹精度和 1.34 nm 的最小误差。进一步地，提出光程倍增技术结合频谱分析方法，解决了小数条纹时条纹计数法引起的误判，实现了振幅 75 nm 的弱振动信号重构，误差为 5.43 nm【*IEEE Sensor J.*, 19(3), 2019】。为进一步拓展测量下限，将偶次幂算法与正交相位调制技术相结合，取得了良好的实验结果【*Appl. Opt.*, 61(2), 2022】。上述工作为本项目开展皮肤中光反馈信号的有效捕捉奠定了良好基础。

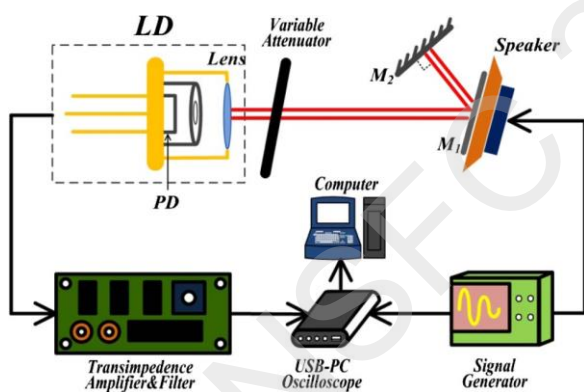


图 26 基于外部光路光程倍增技术的光反馈干涉系统

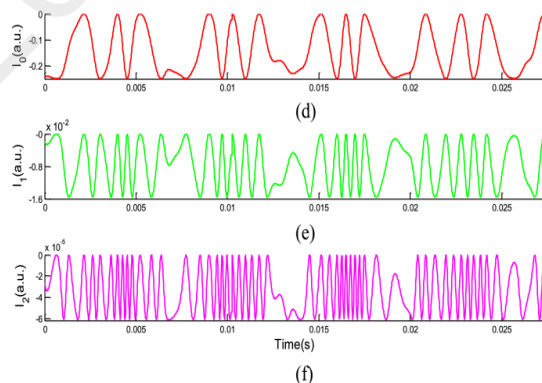


图 27 偶次幂算法不同倍增次数实验结果图

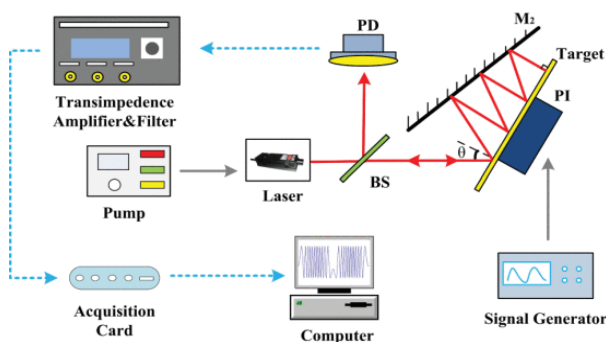


图 28 基于频域分析的精度可扩展纳米振动测量

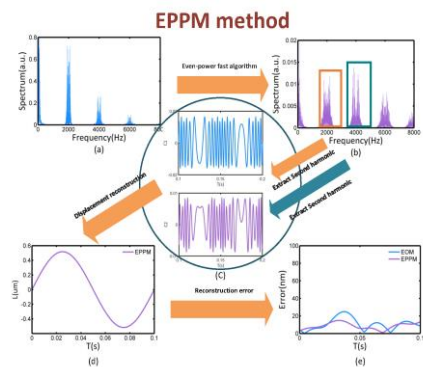


图 29 基于偶次幂相位调制的高精度光反馈干涉仪





**2. 工作条件（包括已具备的实验条件，尚缺少的实验条件和拟解决的途径，包括利用国家实验室、国家重点实验室和部门重点实验室等研究基地的计划与落实情况）；**

申请者及其所在课题组依托“厦门大学光电子工程技术研究中心”，该中心是集聚了激光技术、半导体技术、光通信与传感技术、电磁场与微波技术等领域的优势力量而组建的科研创新团队。项目负责人在厦门大学 985 三期及厦门大学双一流建设经费的支下，于 2012 年组建了激光与光电传感实验室，拥有 2.4m 光学平台 1 个，1.2m 平台 3 个，已购置的设备具备了拟开展的基于激光自混合干涉技术的脉搏波传感与心血管疾病监测研究的要求。主要实验设备和仪器有：Santec TSL-570 可调谐光纤激光器；多种波长的自制光纤光源；BY-A65 光纤熔接机；Thorlabs 不同功率红光及红外半导体激光器；光斑分析仪 BP209-VIS；各种功率级别的 Coherent 光功率计；ILX-Lightwave pw 级功率计；HR4000 高分辨率光谱仪；ZJ1812 高精度隔振平台；Newport 大型精密光学平台；Tektronix tbs1000c 数字示波器；RSA3408B 实时频谱分析仪；Thorlabs 光电探测器；Thorlabs 电光调制器；Tektronix AFG3100 任意波信号发生器；U4164A 多通道逻辑分析仪；P.I.P-840.S1 预载压电陶瓷促动器；E-505 压电陶瓷放大模块；E-625 压电陶瓷伺服控制；PI 纳米平移台；医用高精度血压仪；高性能深度学习服务器；其他常见光路调整元件和电子元件。已具备的实验条件和测试设备为本项目的开展提供有力的支持和实验条件保障。

**3. 正在承担的与本项目相关的科研项目情况（申请人和主要参与者正在承担的与本项目相关的科研项目情况，包括国家自然科学基金的项目和国家其他科技计划项目，要注明项目的资助机构、项目类别、批准号、项目名称、获资助金额、起止年月、与本项目的关系及负责的内容等）；**

无

**4. 完成国家自然科学基金项目情况（对申请人负责的前一个已资助期满的科学基金项目（项目名称及批准号）完成情况、后续研究进展及与本申请项目的关系加以详细说明。另附该项目的研究工作总结摘要（限 500 字）和相关成果详细目录）。**



**项目类别：**国家自然科学基金面上项目

**项目名称：**基于激光自混合效应的心血管医学信号高分辨率传感研究

**项目批准号：**61675174

**项目起止年月：**2017/01-2020/12

**项目总结摘要（500字）：**

心血管疾病是严重危害人类健康的一大高死亡率疾病，心血管医学信号的非接触无损测量和诊断系统至关重要。本项目提出以新型高分辨微振动测量技术——激光自混合效应为核心，结合嵌入式系统信号分析处理方案，通过模型构建和实验研究，以期有效地获取和重构人体脉搏波，进而得到表征心血管状态的特征参量。通过该项目研究，实现了采用激光自混合测量技术直接获取到人体浅表微振动的自混合信号，采用光路优化和硬件电路及软件算法实现高分辨率和同步多路传感，结合嵌入式的多线程信号分析处理系统，实现实时自混合信号显示与医学信号重构。项目取得的主要创新性成果：基于自混合干涉的双通道脉搏波传导时间测量，并构建相应的血压模型；基于小波多分辨率自混合信号分析结合极限学习机(ELM)实现连续的血压监测；基于支持向量机(SVM)的脉搏波分类，进而分析预测人体生理状态；基于光程倍增的时-频域分析实现纳米级极弱微振动测量。本项目明确了可通过测量脉搏波引起皮肤表面微颤来重构脉搏波，进而提取脉搏波特征参数以评估心血管医学信号，获得了激光自混合技术应用于心血管医学信号检测和诊断的有效方案和关键技术。

**项目完成情况：**

该项目提出采用激光自混合干涉技术获取人体脉搏波信号，建立脉搏波传导时间和血压之间的数学关系，构建基于嵌入式的自混合参数估计与信号重构系统，研究了自混合信号与医学信号之间的相关性，以及浅表动脉部位自混合信号的高精度获取方法，从时间、波速等对脉搏波进行多角度分析，解析出若干个与心血管特征相对应的特征参量。该项目还采用极限学习机和支撑向量机分别实现了人体血压预测和脉搏分类。项目按预定计划完成研究任务，已于2020年12月结题。基于该项目研究，课题组在生物医学激光探测及非平稳信号处理方面积累了一些经验，尤其在待测目标微弱运动情况下信号的获取与增强上取得了一些创新成果。该项目研究成果已在IEEE Sensors Journal, IEEE Photonics Journal, Applied Optics, Optics Communications等期刊发表相关论文12篇，并申请3项国家发明专利，其中1项授权。资助项目执行期间共培养硕士研究生10名，其中一名获得国家奖学金，多名研究生获得校级奖学金、优秀三好学生、优秀毕业生、三好学生、优秀学生干部荣誉。



### 后续研究进展:

该项目结题后进一步开展了 1. 基于正交相位调制的脉搏波测量与重构的研究, 提高了脉搏波重构精度和抗噪能力。2. 采用时频谱分析方法实现多振动目标同时测量。3. 采用时频谱能量转换算法降低由反馈水平变化和噪声带来的重构误差。未来计划对以下方面展开进一步研究: 1. 采用可调移频及预反馈技术实现光子水平反馈光的探测, 以增大探测的动态范围并提高自混合信号的信噪比; 2. 基于可调移频进行时频谱移频线性重构 3. 采用深度卷积神经网络对脉搏波和常见心血管疾病之间的关联进行研究, 实现心血管疾病的在线分类检测。

### 与本项目的关系:

两个项目的探测对象均为人体皮肤的微弱振动位移, 探测手段均为激光自混合干涉技术。上一项目采用半导体激光器直接探测皮肤位移, 结构相对简单, 探测灵敏度较低, 导致探测范围小 (10 cm 以内)。在脉搏波信号分析上, 通过对自混合干涉脉搏波信号进行预处理得到脉搏波特征点, 并根据特征点进行收缩压和舒张压等常规参数的有效计算, 但未进行脉搏波的重构。本项目在上一项目基础上引入可调移频技术和预反馈结构, 大幅提升了系统的探测灵敏度, 可将探测范围延申至 5 m 以内。此外, 使用线性移频手段对脉搏波进行鲁棒重构, 并针对人体不自主呼吸、颤动等运动伪影的去除这一难题, 提出了有效解决方案。进一步的, 本项目基于脉搏波自混合信号时频谱, 根据临床数据库中的脉搏波信号和疾病标签之间的关系。同时, 考虑自混合干涉技术探测的脉搏波与临床脉搏波信号在波形上存在的差别, 使用迁移学习工具有效挖掘了激光自混合干涉脉搏波信号和心血管疾病之间的关系, 可进行常见心血管疾病的自动诊断。

### 研究成果目录:

- (1) Shize Ge, Yunxiu Lin, Hanqiao Chen, Xinyu Kong, Desheng Zhu, Zhipeng Dong, XiuLin Wang, **Wencai Huang\***, Signal Extraction Method Based on Spectral Processing for a Dual-channel SMI Vibration Sensor, Optics and Lasers in Engineering, 2023, 164:107531.
- (2) Shize Ge, XinYu Kong, Desheng Zhu, Hanqiao Chen, Yunxiu Lin, Xiulin Wang, **Wencai Huang\***, Robust Signal Extraction Based on Time-Frequency Joint Analysis and GRNN for a Laser SMI System, Journal of Lightwave Technology, 2022, 40: 7229-7235.
- (3) Zhen Li, Lirong Qiu, Lu Hu, Liping Lu, Desheng Zhu, Hanqiao Chen, **Wencai Huang\***. High precision even-power phase modulation method for a self-mixing displacement sensor under the weak feedback regime. Applied Optics, 2022, 61(2): 540-545.
- (4) Xiulin Wang, Liping Lu, Lu Hu, **Wencai Huang\***. Real-time human blood pressure measurement based on laser self-mixing interferometry with extreme learning machine. Optoelectronics letters, 2020, 16(6): 467-470.



- (5) Liping Lu, Lu Hu, Zhen Li, Lirong Qiu, **Wencai Huang\***, Xiuling Wang. High precision self-mixing interferometer based on reflective phase modulation method. IEEE Access, 2020, 8: 204153-204159.
- (6) Yanbin Xiong, Hanqiao Chen, Xiulin Wang, Teng Feng, Huiru Yang, **Wencai Huang\***. Improved method for damping coefficient measurement based on spectral analysis of a self-mixing signal. Applied Optics, 2020, 59(8): 2386-2392.
- (7) Huifang Sun, Yanting Zhang, Hanqiao Chen, Yanbin Xiong, **Wencai Huang\***, Xiulin Wang, Huizhen Xu. Large-range nanoscale self-mixing interferometer based on multiple reflections and even-power fast algorithm. Optics Communications, 2019, 443: 160-165.
- (8) Yanting Zhang, Rui Wang, Zheng Wei, Xiulin Wang, Huizhen Xu, Huifang Sun, **Wencai Huang\***. Broad range and high precision self-mixing interferometer based on spectral analysis with multiple reflections. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(3): 926-932.
- (9) Xiulin Wang, Zheng Wei, Rui Wang, **Wencai Huang\***. High-accuracy self-mixing interferometer based on multiple reflections using a simple external reflecting mirror. Optoelectronics Letters, 2018, 14(3): 161-163.
- (10) Yingbin Wei; Zheng Wei, **Wencai Huang\***, Jie Zhang, Lijuan Zhang. Non-invasive human extremely weak pulse wave measurement based on a high-precision laser self-mixing interferometer. Optoelectronics Letters, 2017, 13(2): 143-146.
- (11) Yingbin Wei, **Wencai Huang\***, Zheng Wei, Jie Zhang, Tong An, Xiulin Wang, Huizhen Xu. Double-path acquisition of pulse wave transit time and heartbeat using self mixing interferometry. Optics Communications, 2017, 393: 178-184.
- (12) Zheng Wei, **Wencai Huang\***, Jie Zhang, Xiulin Wang, Huili Zhu, Tong An, Xia Yu. Obtaining scalable fringe precision in self-mixing interference using an even-power fast algorithm. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(4): 6803211.
- (13) **黄文财**; 林芳; 熊彦彬; 胡路; 吕莉萍. 基于自混合干涉的相位倍增振幅测量方法及装置, 2020.10.19, 中国, CN202011116329.6.
- (14) **黄文财**; 陈汉桥; 熊彦彬; 杨惠茹; 冯腾. 基于自混合干涉的方波变换振幅测量装置及方法, 2020.09.29, 中国, ZL201910537796.7.
- (15) **黄文财**; 魏铮; 张燕亭; 冯腾; 熊彦彬. 基于自混合干涉的高精度振幅实时测量装置和方法, 2018.06.22, 中国, CN201810648440.6.



### (三) 其他需要说明的问题

1. 申请人同年申请不同类型的国家自然科学基金项目情况（列明同年申请的其他项目的项目类型、项目名称信息，并说明与本项目之间的区别与联系）。

无

2. 具有高级专业技术职务（职称）的申请人或者主要参与者是否存在同年申请或者参与申请国家自然科学基金项目的单位不一致的情况；如存在上述情况，列明所涉及人员的姓名，申请或参与申请的其他项目的项目类型、项目名称、单位名称、上述人员在该项目中是申请人还是参与者，并说明单位不一致原因。

无

3. 具有高级专业技术职务（职称）的申请人或者主要参与者是否存在与正在承担的国家自然科学基金项目的单位不一致的情况；如存在上述情况，列明所涉及人员的姓名，正在承担项目的批准号、项目类型、项目名称、单位名称、起止年月，并说明单位不一致原因。

无

4. 其他。

无



## 黄文财 简历

2023版

厦门大学， 电子科学与技术学院， 教授

## 教育经历：

- (1) 2000-09 至 2003-07， 中国科学技术大学， 光学， 博士
- (2) 1997-09 至 2000-07， 福建师范大学， 光学， 硕士
- (3) 1993-09 至 1997-07， 福建师范大学， 物理教育， 学士

## 博士后工作经历：

- (1) 2008-11 至 2009-11， University of Bath

## 科研与学术工作经历（博士后工作经历除外）：

- (1) 2017-09 至 今， 厦门大学， 电子科学与技术学院， 教授
- (2) 2011-08 至 2017-08， 厦门大学， 信息科学与技术学院， 教授
- (3) 2006-08 至 2011-07， 厦门大学， 信息科学与技术学院， 副教授
- (4) 2003-07 至 2006-07， 厦门大学， 信息科学与技术学院， 讲师

## 曾使用其他证件信息：

无

## 近五年主持或参加的国家自然科学基金项目/课题：

无

## 近五年主持或参加的其他科研项目/课题（国家自然科学基金项目除外）：

- (1) 厦门艾科瑞激光科技有限公司， 委托开发， 校合20223160A0580， 激光自混合多参量测量系统研发， 2022-08 至 2023-08， 105万元， 在研， 主持
- (2) 华为技术有限公司， 委托开发， 校合20213160A0625， 可见光窄线宽激光器技术合作项目， 2021-11 至 2022-11， 211.15万元， 结题， 参与

代表性研究成果和学术奖励情况（填写代表性论文时应根据其发表时的真实情况如实规范列出所有作者署名，不再标注第一作者或通讯作者）：

## 一、代表性论著（请在“申请书详情”界面，点开“人员信息”-“代表性成果”卡片查看对应的全文）：

- (1) Shize Ge; Yunxiu Lin; Hanqiao Chen; Xinyu Kong; Desheng Zhu; Zhipeng Dong; Xiulin Wang; **Wencai Huang** ; Signal Extraction Method Based on Spectral Processing for a Dual-Channel SMI Vibration Sensor, *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 164: 107531 (期刊论文)
- (2) Shize Ge; Xinyu Kong; Desheng Zhu; Hanqiao Chen; Yunxiu Lin; Xiulin Wang; **Wencai Huang** ; Robust Signal Extraction Based on Time-Frequency Joint Analysis and GRNN for a Laser SMI System, *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(22): 7229-7235 (期刊论文)
- (3) Zhen Li; Lirong Qiu; Lu Hu; Liping Lu; Desheng Zhu; Hanqiao Chen; **Wencai Huang**; Xiulin Wang ; High Precision Even-Power Phase Modulation Method for a Self-Mixing Displacement Sensor Under The Weak Feedback Regime, *Applied Optics*, 2022, 61(2): 540-545 (期刊论文)





(4) Yanting Zhang; Rui Wang; Zheng Wei; Xiulin Wang; Huizhen Xu; Huifang Sun; **Wencai Huang** ;  
Broad Range and High Precision Self-Mixing Interferometer Based on Spectral Analysis With  
Multiple Reflections, *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(3): 926-932 (期刊论文)

(5) Yingbin Wei; **Wencai Huang**; Zheng Wei; Jie Zhang; Tong An; Xiulin Wang; Huizhen Xu ;  
Double-Path Acquisition of Pulse Wave Transit Time and Heartbeat Using Self Mixing  
Interferometry, *Optics Communications*, 2017, 393: 178-184 (期刊论文)

## 二、论著之外的代表性研究成果和学术奖励:

(1) **黄文财**; 陈汉桥; 熊彦彬; 杨惠茹; 冯腾 ; 基于自混合干涉的方波变换振幅测量装置及方法, 2020-09-29, 中国, ZL201910537796.7 (专利)

(2) **黄文财**; 陈晨曦; 张咏冰; 陈敏亮; 王晓忠 ; 一种基于自混合干涉的折射率测量装置及方法, 2018-01-19, 中国, ZL201510022741.4 (专利)

(3) **黄文财**; 林芳; 熊彦彬; 胡路; 吕莉萍 ; 基于自混合干涉的相位倍增振幅测量方法及装置, 2020-10-19, 中国, CN202011116329.6 (专利)

(4) **黄文财**; 魏铮; 张燕亭; 冯腾; 熊彦彬 ; 基于自混合干涉的高精度振幅实时测量装置和方法, 2018-06-22, 中国, CN201810648440.6 (专利)



附件信息

序号	附件名称	备注	附件类型
1	Optics and Lasers in Engineering, 2023	基于时频联合分析和预反馈技术的双通道自混合干涉仪双目标同步探测信号分离方法	代表性论著
2	Journal of Lightwave Technology, 2022	基于时频联合分析和回归神经网络的弱反馈条件下非平稳振动信号的鲁棒性提取	代表性论著
3	Applied Optics, 2022	一种适用于弱反馈条件下自混合位移传感的高精度相位调制方法	代表性论著
4	IEEE Sensors Journal, 2019	基于光程倍增技术结合频谱分析实现自混合干涉仪对弱振动信号的高精度重构	代表性论著
5	Optics Communications, 2017	双路自混合干涉结合连续小波变换实现人体脉搏波传导时间和心率的获取	代表性论著



项目名称： 基于激光自混合干涉的非接触脉搏波传感与心血管疾病自动监测研究  
资助类型： 面上项目  
申请代码： F0506. 激光

国家自然科学基金项目申请人和参与者承诺书

为了维护国家自然科学基金项目评审公平、公正，共同营造风清气正的科研生态，本人**在此郑重承诺**：严格遵守《中华人民共和国科学技术进步法》《国家自然科学基金条例》《关于进一步加强科研诚信建设的若干意见》《关于进一步弘扬科学家精神加强作风和学风建设的意见》《关于加强科技伦理治理的意见》以及科技部、自然科学基金委关于科研诚信建设有关规定和要求；申请材料信息真实准确，不含任何涉密信息或敏感信息，不含任何违反法律法规或违反科研伦理规范的内容；在国家自然科学基金项目申请、评审和执行全过程中，恪守职业规范和科学道德，遵守评审规则和工作纪律，杜绝以下行为：

- （一）抄袭、剽窃他人申请书、论文等科研成果或者伪造、篡改研究数据、研究结论；
- （二）购买、代写申请书；购买、代写、代投论文，虚构同行评议专家及评议意见；购买实验数据；
- （三）违反成果发表规范、署名规范、引用规范，擅自标注或虚假标注获得科技计划等资助；
- （四）在项目申请书中以高指标通过评审，在项目计划书中故意篡改降低相应指标；
- （五）以任何形式打听或散布尚未公布的评审专家名单及其他评审过程中的保密信息；
- （六）本人或委托他人通过各种方式和途径联系有关专家进行请托、游说、“打招呼”，违规到评审会议驻地窥探、游说、询问等干扰评审或可能影响评审公正性的行为；
- （七）向工作人员、评审专家等提供任何形式的礼品、礼金、有价证券、支付凭证、商业预付卡、电子红包，或提供宴请、旅游、娱乐健身等任何可能影响评审公正性的活动；
- （八）违反财经纪律和相关管理规定的行为；
- （九）其他弄虚作假行为。

如违背上述承诺，本人愿接受国家自然科学基金委员会和相关部门做出的各项处理决定，包括但不限于撤销科学基金资助项目，追回项目资助经费，向社会通报违规情况，取消一定期限国家自然科学基金项目申请资格，记入科研诚信严重失信行为数据库以及接受相应的党纪政务处分等。

申请人签字：

编号	参与者姓名 / 工作单位名称（应与加盖公章一致） / 证件号码	签字
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		



项目名称： 基于激光自混合干涉的非接触脉搏波传感与心血管疾病自动监测研究  
资助类型： 面上项目  
申请代码： F0506. 激光

## 国家自然科学基金项目申请单位承诺书

为了维护国家自然科学基金项目评审公平、公正，共同营造风清气正的科研生态，**本单位郑重承诺**：申请材料中不存在违背《中华人民共和国科学技术进步法》《国家自然科学基金条例》《关于进一步加强科研诚信建设的若干意见》《关于进一步弘扬科学家精神加强作风和学风建设的意见》《关于加强科技伦理治理的意见》以及科技部、自然科学基金委关于科研诚信建设有关规定和要求的情况；申请材料符合《中华人民共和国保守国家秘密法》和《科学技术保密规定》等有关法律法规和规章制度要求，不含任何涉密信息或敏感信息；申请材料不含任何违反法律法规或违反科研伦理规范的内容；申请人符合相应项目的申请资格；依托单位、合作研究单位、申请人及主要参与者不在限制申报、承担或参与财政性资金支持的科技活动的期限内；在项目申请和评审活动全过程中，遵守有关评审规则和工作纪律，杜绝以下行为：

（一）以任何形式打听或公布未公开的项目评审信息、评审专家信息及其他评审过程中的保密信息，干扰评审专家的评审工作；

（二）组织或协助申请人/参与者向工作人员、评审专家等给予任何形式的礼品、礼金、有价证券、支付凭证、商业预付卡、电子红包等；宴请工作人员、评审专家，或组织任何可能影响科学基金评审公正性的活动；

（三）支持、放任或对申请人/参与者抄袭、剽窃、重复申报、提供虚假信息（含身份和学术信息）等不当手段申报国家自然科学基金项目疏于管理；

（四）支持或协助申请人/参与者采取“打招呼”“围会”等方式影响科学基金项目评审；

（五）其他违反财经纪律和相关管理规定的行为。

如违背上述承诺，本单位愿接受自然科学基金委和相关部门做出的各项处理决定，包括但不限于停拨或核减经费、追回项目已拨经费、取消本单位一定期限国家自然科学基金项目申请资格、记入科研诚信严重失信行为数据库以及主要责任人接受相应党纪政务处分等。

依托单位公章：

日期： 年 月 日

合作研究单位公章：

日期： 年 月 日

合作研究单位公章：

日期： 年 月 日