

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209891

# 计算成像技术在光学检测领域的研究进展\*

林星羽, 于瀛洁

(上海大学机电工程与自动化学院 上海 200444)

**摘要:**成像系统在利用传感器记录图像信息时,只记录了强度信息而丢失了重要的相位信息。传统的干涉相位恢复技术由于需要满足严格的干涉条件,在使用过程中受到一定限制。随着计算成像技术的蓬勃发展,以强度传输方程和相干衍射成像以及在此基础上发展起来的相干调制成像、叠层扫描相干衍射成像为代表的非干涉相位恢复技术受到广泛关注,并被运用于光学检测领域。这类技术无需参考光,系统结构简单,可通过衍射强度图直接获得相位信息,在检测领域有巨大的应用潜力。基于此,介绍了几种典型的计算成像技术的研究现状与最新进展,同时讨论分析了各类方法的主要技术特点。

**关键词:** 计算成像;非干涉;相位恢复;光学检测

**中图分类号:** O439 TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

## Research progress of computational imaging in the field of optical measurement

Lin Xingyu, Yu Yingjie

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** When the imaging system records image information by using sensor, it loses important phase information due to only record intensity information. Traditional interferometric phase retrieval techniques are restricted in their use due to the strict interference conditions. With the significant development of computational imaging techniques, the non-interference phase retrieval techniques represented by transport of intensity equation, coherent diffraction imaging, coherent modulation imaging and ptychography which are both based on CDI, have attracted great attention. They have been utilized in the field of optical measurement. This kind of techniques does not require reference light with a simple system structure, which can retrieve phase information directly from diffracted intensity images. They have great potential for applications in the measurement field. On this base, the current researches and recent progress of several typical non-interference phase retrieval techniques are presented, and the main technical features of each method are discussed and analyzed.

**Keywords:** computational imaging; non-interference; phase retrieval; optical measurement

## 0 引言

在检测领域中,光学检测方法因其无接触、高精度等优势受到广泛应用。然而一般成像系统在记录过程中保留了强度信息的同时也会丢失部分重要信息,例如相位信息。随着光电信息处理技术的不断发展,围绕“相位恢复”这一重点,各种恢复技术与算法不断涌现。传统光学检测技术主要以干涉测量为主,例如移相干涉技术、数字全息技术、电子散斑干涉技术<sup>[1-4]</sup>等。干涉测量技术由于

需要依赖相干光源和复杂的干涉装置,对测量环境要求严苛同时测量结果会产生包裹相位,从而限制了其应用,因此非干涉相位恢复技术便成为科技工作者关注的重点之一。

在非干涉检测技术中,Shack-Hartmann 波前探测<sup>[5]</sup>是一种通过几何光学反演波前相位信息的技术,但是该方法空间分辨率总体受限,难以满足高分辨率的测量要求。近些年来,融合光学、数学与信息处理于一体的计算成像技术如同一颗闪耀的新星冉冉升起,受到科研工作者的广泛关注。以强度传输方程(transport of intensity

equation, TIE)<sup>[6]</sup>和相干衍射成像(coherent diffractive imaging, CDI)<sup>[7]</sup>为代表的计算成像技术由于其无需满足严格的干涉条件,可通过测量光场强度来获取相位信息,因此也被应用到光学检测领域。

计算成像技术主要分为直接法和迭代法。直接法是以 TIE 为代表,由强度图像直接恢复相位信息的一类方法;迭代法是以 CDI 为代表,通过迭代求解的方式获取相位信息一类技术,包括由此基础上发展而来的相干调制成像(coherent modulation imaging, CMI)<sup>[8]</sup>以及叠层扫描相干衍射成像(ptychography)<sup>[9]</sup>。

由于计算成像技术多应用于成像领域,因其非干涉、结构简单、抗干扰能力强等优势而被检测领域所关注,而在检测领域中测量精度要求远高于成像领域,尤其是在对光学元件的检测。在此背景下,本文介绍了几种典型的非干涉相位恢复技术的研究现状与最新进展,对比分析各类方法的主要技术特点,探究其发展规律,同时讨论各类方法在光学检测领域的适用性。

## 1 计算成像相位恢复直接法

计算成像相位恢复技术中的直接法主要是指 TIE。1983 年 Teague<sup>[6]</sup>通过亥姆霍兹方程在傍轴近似条件下分离其虚部从而推导出强度传输方程。TIE 通过简洁的表达式阐述了平行于光轴方向的光强变化与垂直于光轴方向的相位变化之间的定量关系,无需干涉和迭代,通过数值计算的方法直接求解相位信息<sup>[10]</sup>。对于部分难以应用高相干性光源的技术例如 X 射线成像等,TIE 的出现无疑打开了新的思路。同时由于该方法无需对细胞进行染色标记即可实现相位成像,因而在显微成像领域有着广泛的应用。

若考虑沿  $z$  轴传播的傍轴光波,强度传输方程可表示为:

$$-k \frac{\partial I}{\partial z} = \nabla \cdot (I \nabla \varphi) \quad (1)$$

式中:  $k$  为波数,  $I$  为光强分布,  $\varphi$  为待求相位,  $\nabla$  为哈密顿算符。

强度传输方程是一个关于  $\varphi$  的二阶椭圆偏微分方程,计算过程需要考虑边界条件,这就导致强度传输方程的求解较为复杂。Teague<sup>[6]</sup>推导出强度传输方程同时提出可以通过 Green 函数求解该方程,随后多重网格法、Zernike 多项式法、快速傅里叶变换法等方法也相继被提出<sup>[11-13]</sup>,其中快速傅里叶变换应用最为广泛,在非均匀光强下其解的表达式为:

$$\varphi = \nabla^{-2} \left\{ \nabla \left[ I^{-1} \nabla \left[ \nabla^{-2} \left( k \frac{\partial I}{\partial z} \right) \right] \right] \right\} \quad (2)$$

式中:  $\nabla^{-2}$  为逆拉普拉斯算符,  $\nabla$  和  $\nabla^{-2}$  均可通过快速傅里

叶变换实现运算。根据式(2)可知,该方法只需要获取一幅在焦图,两幅正负离焦强度图,通过数值计算即可求解相位。

同时南京理工大学 Zuo 等<sup>[14]</sup>在推进 TIE 方面做出了诸多贡献,提出了基于离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT)的强度传输方程求解方法<sup>[15]</sup>,同时使用一圈硬质光阑解决了边界问题,如图 1 所示。并且在 Savitzky-Golay 差分滤波器的基础上提出了最优频率选择法<sup>[16]</sup>,较好的解决了云雾状噪声。

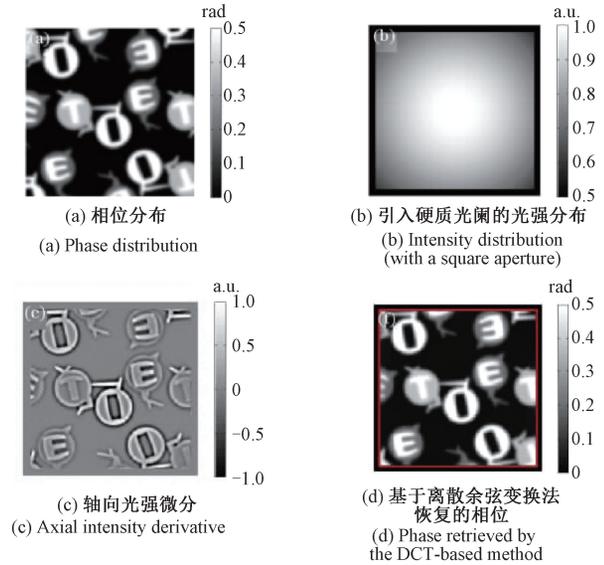


图 1 基于离散余弦变换的 TIE 求解方法结果<sup>[10]</sup>

Fig. 1 Phase retrieval with the DCT-based TIE method

Huang 等<sup>[17]</sup>提出了基于迭代的 DCT 技术,使得硬质光阑的位置无需严格平行于探测器孔径;Zhang 等<sup>[18]</sup>提出了 US-TIE(universal solution-TIE),在任意形状和不均匀边界条件下都可求解出相位信息。除了算法的更新,还有学者对 TIE 成像系统进行改进,通过单次曝光获得不同位置的轴向强度图,例如使用分束镜<sup>[19]</sup>、电控变焦透镜<sup>[20]</sup>、偏振光学元件<sup>[21]</sup>、计算全息图(computer-generated holograms, CGH)<sup>[22]</sup>等。

近些年来,一些与 TIE 相结合的技术也不断被提出。Basunia 等<sup>[23]</sup>指出在光场传播过程中必须同时满足傍轴波动方程的实部和虚部。其虚部方程便是 TIE,实部方程被称作相位传输方程(transport of phase equation, TPE)<sup>[24]</sup>,可使用 TIE 和 TPE 交替求解的方式<sup>[25]</sup>。Zhou 等<sup>[26]</sup>将数字全息与 TIE 结合,通过波前再现方式得到轴向强度图。Soudi 等<sup>[27]</sup>将 TIE 与 Hartmann 波前探测器结合。Wang 等<sup>[28]</sup>将深度学习与 TIE 结合,只需采集一张强度图,能够同时解决边界问题以及云雾状噪声。

在 TIE 应用于光学检测领域方面,Sokkar 等<sup>[29]</sup>使用 TIE 检测了各向异性光纤不同偏振方向的折射率;Dorrer

等<sup>[30]</sup>使用该方法检测了被磁流变抛光过的表面,重建相位的误差达到 0.04 rad;Ishizuka 等<sup>[31]</sup>将该方法应用于波面曲率检测。Lin 等<sup>[32]</sup>借助凹面反射镜通过 TIE 对非圆柱面透镜进行测量,测量光路和结果如图 2 所示,测量结果与接触式测量有较好的一致性。

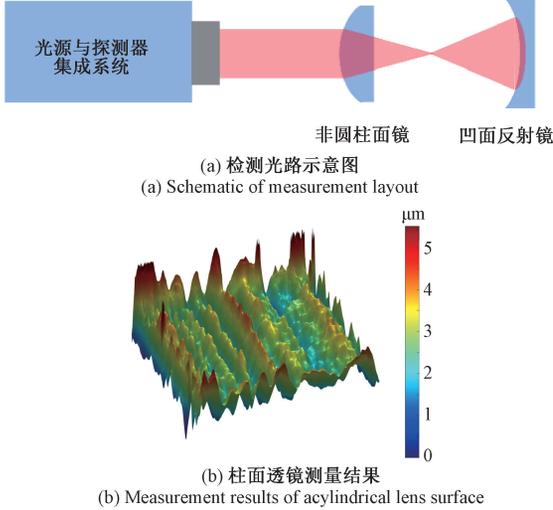


图 2 基于 TIE 的柱面测量<sup>[32]</sup>

Fig. 2 TIE-based acylindrical surface measurement

观察强度传输方程会发现,式(1)核心部分是待求平面光强的轴向微分,所以它依赖小离焦范围的强度相对信息来恢复相位。如果将该方法应用于光学精密检测中,由于光学元件表面面型以低频信息为主,这就导致 TIE 检测精度不够高。

## 2 计算成像相位恢复迭代法

计算成像相位恢复技术中的迭代法主要是指以 CDI 为代表的一类利用衍射强度,通过迭代投影算法求解相位的方法,包括由其发展而来的 CMI 以及叠层扫描相干衍射成像(ptychography)等。

### 2.1 相干衍射成像

无论是基于干涉原理的相位恢复技术还是非干涉技术中的 TIE,在成像过程中均有光学透镜参与其中,导致实验设备复杂的同时不可避免的会引入误差。而 CDI 作为一种无透镜成像技术,在理论上可接近衍射极限的分辨率。1999 年,Miao 等<sup>[7]</sup>将其应用在非晶体样品图像重建中,随后该技术迅猛发展,从最开始的透射式 CDI 衍生出反射式 CDI、布拉格衍射式 CDI(Bragg CDI)、菲涅尔 CDI(Fresnel CDI)<sup>[33-36]</sup>等,如图 3 所示。

CDI 的迭代算法最早是由 Gerchberg 和 Saxton 在傅里叶变换的基础上提出,因而简称 G-S 算法<sup>[38-39]</sup>。由

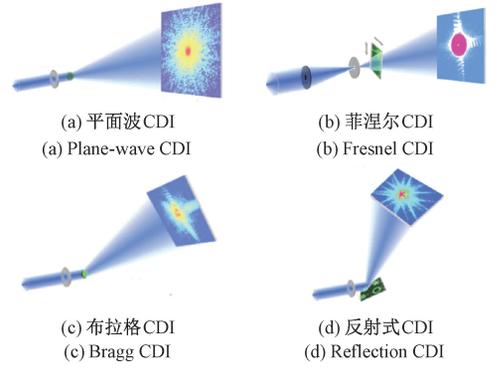


图 3 典型 CDI 结构示意图<sup>[37]</sup>

Fig. 3 Schematic of main CDI layouts

图 3(a)可以看到,在该技术中只需照明光照射样本,由电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)记录衍射强度图像  $I$ ,无需加入任何透镜。在传统 G-S 算法中样本平面和记录平面满足傅里叶变换关系。

迭代过程如下:( $n$  表示第  $n$  次迭代,  $\mathcal{F}$  表示正向传输,  $F^{-1}$  表示反向传输)

1) 对待测样本初始估计,设其分布为  $e_n$ ;

2) 正向传播至记录平面,得到衍射平面分布  $E_n = \mathcal{F}(e_n) = |E_n| \exp(i\varphi_n)$ ;

3) 进行记录平面约束,保持相位  $\varphi_n$  不变,用记录到的强度平方根替换计算所得振幅  $E'_n = \sqrt{I} \exp(i\varphi_n)$ ;

4) 从记录平面逆向传播到样本平面  $e'_n = \mathcal{F}^{-1}(E'_n)$ ;

5) 判断是否收敛,若误差小于设定值,输出结果;若大于,进行样本平面约束,使用样本真实振幅替换第 4) 步计算得到的振幅得到  $e_{n+1}$ ,并进入下一次迭代。

G-S 算法是一种经典的相位恢复算法,但是需提前已知样本平面的强度分布,且在迭代过程中会出现收敛速度慢或者迭代停滞等问题。后来,出现了一系列改进算法,例如误差下降算法(error-reduction, ER)<sup>[40]</sup>、混合输入输出算法(hybrid input-output, HIO)<sup>[41]</sup>以及杨—顾(Y-G)算法<sup>[42]</sup>等。

ER 算法和 HIO 算法大体上于 G-S 算法相近,只是在第 5) 步操作中有所不同,在 ER 算法中:

$$e_{n+1}(\mathbf{r}) = \begin{cases} e'_n(\mathbf{r}), & \mathbf{r} \in Q \\ 0, & \mathbf{r} \notin Q \end{cases} \quad (3)$$

而在 HIO 算法中:

$$e_{n+1}(\mathbf{r}) = \begin{cases} e'_n(\mathbf{r}), & \mathbf{r} \in Q \\ e_n(\mathbf{r}) - \varepsilon e'_n(\mathbf{r}), & \mathbf{r} \notin Q \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{r}$  为物平面坐标系,  $Q$  表示  $e'_n$  中不满足空域约束的点集,  $\varepsilon$  为常数。

由于只记录一幅衍射强度图在迭代恢复相位的过程中会出现收敛不确定、恢复结果不稳定等问题,所以有不

少学者提出基于多平面的 CDI 技术<sup>[43-44]</sup>,通过轴向移动探测器或者调整样本姿态,从而捕获多幅衍射强度图进行迭代。有学者将离轴全息与 CDI 进行结合<sup>[45-46]</sup>,不仅避免了传统离轴全息孪生像的干扰,也提高了迭代的收敛能力。同时也有学者尝试将 CDI 与神经网络相结合<sup>[47]</sup>,达到了实时成像的效果。

CDI 也被应用于光学检测领域,Brady 等<sup>[48]</sup>基于多平面 CDI 测量了大尺寸凹面镜,实验表明多平面测量结果的均方根 (root mean square, RMS) 值达到  $0.003\lambda$ ,系统结构与检测结果如图 4 所示。

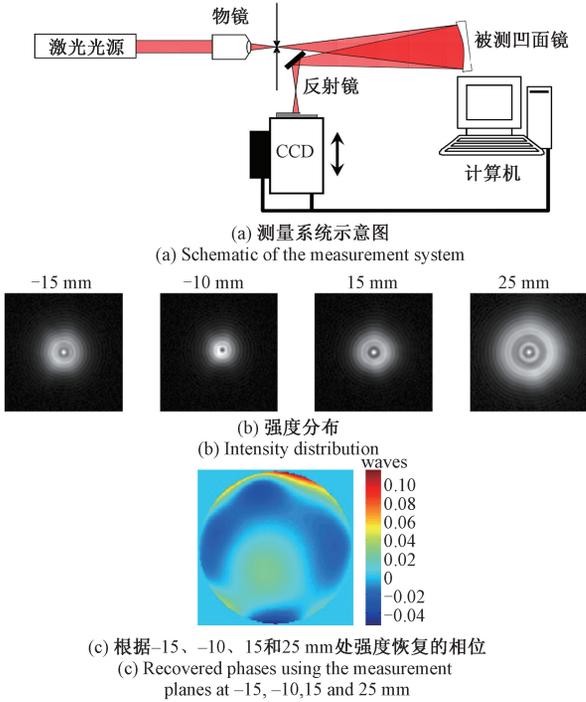
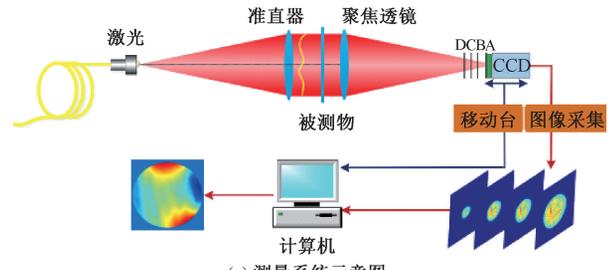


图 4 基于多平面 CDI 技术的凹面镜测量<sup>[48]</sup>

Fig. 4 Multiplane CDI-based concave spherical mirror measurement

Zhao 等<sup>[49]</sup>在 CDI 基础上提出了优化算法,对波前进行检测且能够同时重建振幅和相位,重建精度达到了  $\lambda/100$ 。Wang 等<sup>[50]</sup>将暗场成像技术与 CDI 结合,进行大尺寸光学元件缺陷检测。Liu 等<sup>[51]</sup>在多平面 CDI 基础上改变 CCD 曝光时间,检测结果显示最大差值 (peak to valley, PV) 与 Zygo 检测结果相差  $0.092\lambda$ ,系统结构与检测结果如图 5 所示。

虽然 CDI 结构简单,但是基于单幅衍射强度图的 CDI 收敛缓慢且容易迭代停滞,所以该方法适用于对简单物体成像。更多的应用是在此基础上加入其他一些辅助手段,例如采集多幅衍射强度图、加入波前调制或者叠层扫描引入冗余信息等。



(a) 测量系统示意图  
(a) Schematic of the measurement system

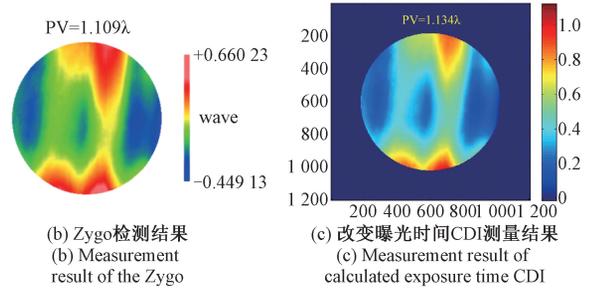


图 5 基于多平面 CDI 技术的光学平板测量方法<sup>[51]</sup>

Fig. 5 Multiplane CDI-based optical plate measurement method

## 2.2 相干调制成像

为了避免 CDI 中出现的迭代停滞同时加速其收敛,2016 年 Zhang<sup>[8]</sup>等提出了 CMI,在被测平面和探测器之间加入分布已知的波前调制器件,常见的是加入随机相位板。其光路结构如图 6 所示,照明光照射被测件后,向前传输到调制器平面,透过调制器后被 CCD 接收衍射强度图。

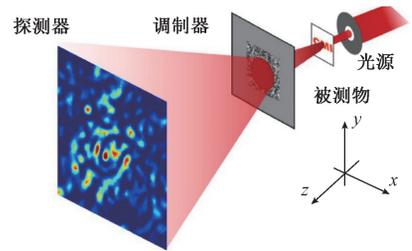


图 6 CMI 结构示意图<sup>[8]</sup>

Fig. 6 Schematic of the CMI structure

随机相位板在其中扮演了重要角色:1) 波前在经过调制之后,相位的共轭像随着反复迭代会逐渐衰减;2) 经过随机相位板之后,被测物的相位信息会编码到调制后的波前中,一个物点的信息会被传感器的多个像素点接收,这就显著提高了 CMI 的收敛性和鲁棒性<sup>[52]</sup>。

CMI 的迭代算法与 CDI 类似,其结构除了样本平面和记录平面之外还多了调制器平面,其中调制器分布  $H$  需已知,记录平面探测器得到的光强为  $I$ 。

迭代过程如下:( $n$  表示第  $n$  次迭代,  $\mathcal{F}$  表示正向传输,  $\mathcal{F}^{-1}$  表示反向传输)

1) 对待测样本初始估计, 设其分布为  $e_n$ ;

2) 正向传播至调制器, 得到调制器平面入射光束分布  $g_n = \mathcal{F}(e_n)$ ;

3) 入射光经过调制器调制后出射光束分布为  $p_n = g_n \times H$ ;

4) 继续正向传播至记录平面, 得到记录平面分布  $E_n = \mathcal{F}(p_n) = |E_n| \exp(i\varphi_n)$ ;

5) 进行记录平面约束, 保持相位  $\varphi_n$  不变, 用记录到的强度平方根替换计算所得振幅  $E'_n = \sqrt{I} \exp(i\varphi_n)$ ;

6) 从记录平面逆向传播到调制器平面  $p'_n = \mathcal{F}^{-1}(E'_n)$ ;

7) 根据式 (5) 对照明光进行更新, 更新后的调制器照明光为  $g'_n, \gamma$  为自选系数,  $H^*$  为  $H$  的共轭:

$$g'_n = g_n + \gamma \frac{H^*}{|H|_{\max}^2} (p'_n - p_n) \quad (5)$$

8) 更新后的照明光继续逆向传播至样本平面  $e'_n = \mathcal{F}^{-1}(g'_n)$ ;

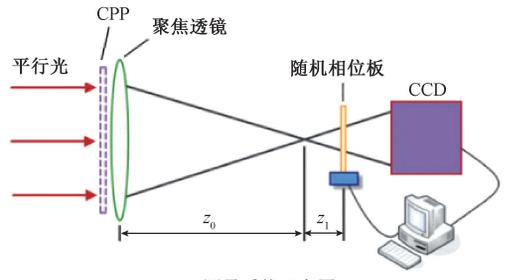
9) 根据式 (6) 对样本平面进行更新, 更新后的波前分布为  $e_{n+1}$ , 同时作为下一次迭代的初始值,  $C$  为样本平面孔径函数,  $\eta$  为自选系数:

$$e_{n+1} = e_n C + \eta (e'_n - e_n) (1 - C) \quad (6)$$

重复上述步骤直到  $E_n$  与  $E'_n$  之间的误差满足要求为止。

由于调制器分布需已知, 这对加工和标定技术提出了很高的要求, 后来 Pan 等<sup>[53]</sup> 提出不需要提前标定调制器的基于随机振幅板调制的算法 (coherent amplitude modulation imaging, CAMI), 并且详细研究了 CMI 迭代收敛性和重建唯一性<sup>[54]</sup>, 为 CMI 的应用打下了坚实的理论基础。还有学者提出了在未知调制器分布的情况下, 通过迭代同时获得物体和调制器分布的方法<sup>[55-56]</sup>。除了使用相位板和振幅板进行调制外, 还有使用其他调制器的技术, 例如空间光调制器<sup>[57]</sup>、旋转柱透镜<sup>[58]</sup>、以及涡旋相位<sup>[59]</sup>等。Jiang 等<sup>[60]</sup> 将离轴全息技术与 CMI 相结合, 去除了零级像和孪生像干扰同时也提高了迭代收敛的速度。Kang 等<sup>[61]</sup> 将神经网络与 CMI 结合, 提高了重建的质量和速度, 同时增强了系统抗噪能力。

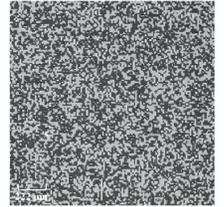
由于 CMI 结构简单, 并且只需采集单幅衍射强度图即可恢复相位, 研究人员一直在探索将其应用到光学检测领域。2015 年 Tao 等<sup>[62]</sup> 使用 CMI 技术检测了大口径光学元件——连续相位板 (continues phase plate, CPP) 的透过率, 为 CMI 在检测领域尤其是对光学元件的检测方面打开了一扇大门, 其检测系统和结果如图 7 所示。



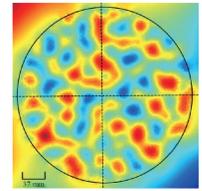
(a) Schematic of measurement system



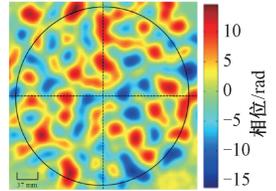
(b) 被测的连续相位板  
(b) CPP under measurement



(c) 连续相位板分布  
(c) CPP phase distribution



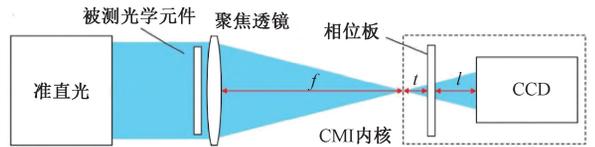
(d) 连续相位板测量结果  
(d) Phase distribution of the CPP obtained by the CMI



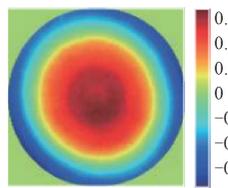
(e) 连续相位板设计分布  
(e) Phase distribution used in the design of the CPP

图 7 基于 CMI 技术的连续相位板透过率测量方法<sup>[62]</sup>  
Fig. 7 CMI-based CPP transmittance measurement method

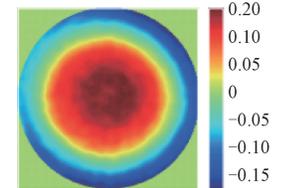
2020 年, 葛银娟等<sup>[63]</sup> 使用 CMI 对 80 mm 大口径平面光学元件面型进行检测, 测量系统及结果如图 8 所示, 达到了较高的检测精度。该方法在光学检测领域的应用, 成为了一种非干涉且系统简单的新型高精度检测技术, 测量结果与 Zygo 干涉仪测量结果有较好的一致性。



(a) Schematic of measurement system



Zygo(8#) PV:0.358 RMS:0.099  
(b) Zygo测量结果  
(b) Phase map measured by Zygo



CMI(8#) PV:0.329 RMS:0.099  
(c) CMI测量结果  
(c) Phase map measured by CMI

图 8 基于 CMI 技术的平面光学元件测量方法<sup>[63]</sup>  
Fig. 8 CMI-based flat optics measurement method

这项研究表明该技术在光学检测方面有巨大的应用潜力。

### 2.3 扫描叠层相干衍射成像

CMI 虽然能够快速收敛,但是在被测物和探测器之间还加入了其他光学元件。1969 年 Hoppe<sup>[64-66]</sup> 首次提出了 ptychography, 系统结构如图 9 所示, 这种无透镜成像技术也可被称为扫描 CDI, 在理论上既可达到衍射极限的分辨率, 又能利用子孔径之间的相互重叠从而无限扩大视场范围, 同时还可通过大量冗余数据提高迭代收敛性。文献 [9] 和 [66] 提出叠层扫描成像迭代引擎 (ptychographic iterative engine, PIE), 之后 Maiden 等<sup>[67]</sup> 改进了 PIE 算法, 称作 ePIE (extended ptychographic iterative engine), 在每个衍射子孔径处理之后都对照明光进行更新, 可同时重建照明光和被测物信息。

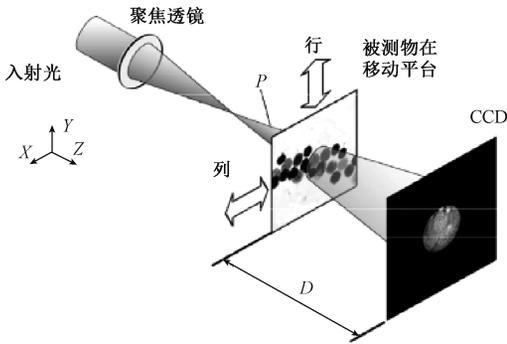


图 9 Ptychography 结构示意图<sup>[68]</sup>

Fig. 9 Schematic of the ptychography structure

ePIE 可以简单描述为一束照明光照射固定在二维移动平台上的样本平面, 之后携带样本信息传输到记录平面, 由探测器记录下衍射图样。之后二维移动平台移动到下一位置, 重新记录, 两次记录图样之间要有一定比例的重叠, 直至样本平面所有位置扫描完成。其迭代过程与 CDI 迭代算法相近。

迭代过程描述如下: ( $n$  表示第  $n$  次迭代,  $j$  表示第  $j$  个位置,  $\mathcal{F}$  表示正向传输,  $\mathcal{F}^{-1}$  表示反向传输)

1) 初始估计照明光分布为  $p_n$ , 样本分布为  $o_{n,j}$ , 则样本面的出射波  $e_{n,j} = p_n \times o_{n,j}$ ;

2) 出射波正向传输至记录平面, 得到衍射平面分布  $E_{n,j} = \mathcal{F}(e_{n,j}) = |E_{n,j}| \exp(i\varphi_{n,j})$ ;

3) 进行记录平面约束, 保持相位  $\varphi_{n,j}$  不变, 用记录到的强度平方根替换计算所得振幅  $E'_{n,j} = \sqrt{I_j} \exp(i\varphi_{n,j})$ ;

4) 从记录平面逆向传播到样本平面  $e'_{n,j} = \mathcal{F}^{-1}(E'_{n,j})$ ;

5) 根据式 (7) 在样本平面对照明光信息及样本信息进行更新;

$$p_{n+1} = p_n + \frac{|o_{n,j}|}{|o_{n,j}|_{\max}} \frac{o_{n,j}^*}{[o_{n,j} + \alpha]} [e'_{n,j} - e_{n,j}] \quad (7)$$

$$o_{n+1,j+1} = o_{n,j} + \frac{|p_n|}{|p_n|_{\max}} \frac{p_n^*}{[p_n + \beta]} [e'_{n,j} - e_{n,j}] \quad (8)$$

式中:  $p_{n+1}$  和  $o_{n+1,j+1}$  分别为更新后的照明光和样本分布,  $p_n^*$  和  $o_{n,j}^*$  分别表示  $p_n$  和  $o_{n,j}$  的共轭,  $\alpha$  和  $\beta$  为常数。

6) 移动样本平面至下一位置, 重复上述步骤直至遍历样本所有位置;

7) 当  $o_{n+1,j}$  与  $o_{n,j}$  之间的误差达到设定值, 迭代停止;  $o_{n+1,j}$  即为待测样品信息。

由以上迭代过程可知, PIE 技术虽然利用数据的冗余性提高了收敛速度, 并且使用扫描的采样方式扩大了成像范围, 但同时也会引入其他问题, 例如在检测大尺寸物体时扫描方式会十分耗时以及样本平面二维移动带来的误差等。基于此, Pan 等<sup>[69]</sup> 提出基于光栅分光的单次曝光 PIE 技术, 在样本平面前加入二维光栅, 将照明光分成不同方向的子光束照射样本; Sidorenko 等<sup>[70]</sup> 将 4f 系统与 PIE 结合, 通过小孔阵列分光采集到交叠的衍射光斑; 之后又有学者分别提出了基于数字微反射镜阵列<sup>[71]</sup> 和基于子孔径阵列<sup>[72]</sup> 的单次曝光 PIE 技术。

除此之外还有其他的 PIE 算法被提出, 如可以对厚样本分层成像的 3PIE (three-dimensional ptychographical iterative engine)<sup>[73]</sup>, 可单次曝光的三维叠层成像技术 3DSSP (three-dimensional single-shot ptychography)<sup>[74]</sup>, 可以修正位置的 pcPIE (position-correcting ptychographical iterative engine)<sup>[75]</sup>, 可以校准样本到探测器距离的 PIE<sup>[76]</sup>, 以及各种不同的算法<sup>[77]</sup>。同时也有学者将 PIE 和单像素成像技术结合<sup>[78]</sup>。最近几年随着深度学习的崛起, 也有学者将 PIE 与深度学习结合<sup>[79]</sup>, 提升了系统的抗噪能力和收敛速度。

PIE 也有在光学检测领域的应用, 由于 ePIE 可以同时重建照明光和物体信息, 所以也可将照明光作为待测量进行波前测量。Wang 等<sup>[80]</sup> 应用 ePIE 技术检测了大口径连续相位板 (CPP) 透过率, 实验结果如图 10 所示。

PIE 在显微成像领域有着广泛的应用, 但是在光学检测领域应用较少, 主要受制于其机械扫描的检测方式。PIE 要求衍射光斑之间要有重叠, 这就导致扫描步长要小于照明光直径, 更加延长了扫描所需的时间, 也增大了数据处理量。同时二维移动样品或者光源也会引入误差。即使有不少单次曝光的 PIE 技术提出, 但这些技术同时也牺牲了一定的分辨率。

### 2.4 傅里叶叠层成像

机械扫描一直是影响 PIE 广泛应用的主要问题之一, 在 2013 年 Zheng 等<sup>[81-82]</sup> 提出了傅里叶叠层成像 (Fourier ptychography, FP), 该技术使用发光二极管 (light-emitting diode, LED) 阵列照明, 多角度的照明方式

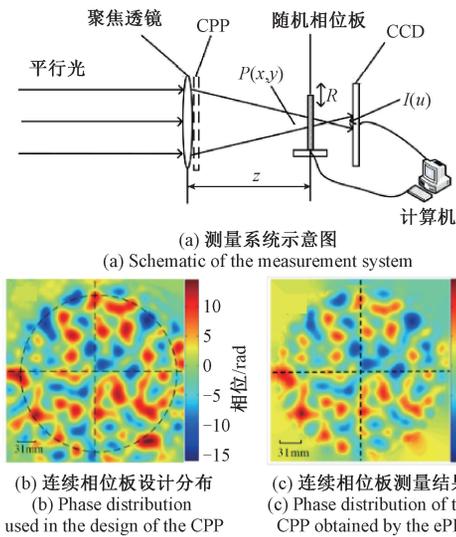
图 10 基于 ePIE 技术的连续相位板透过率测量方法<sup>[80]</sup>

Fig. 10 ePIE-based CPP transmittance measurement method

避免了传统 PIE 中的机械扫描; 使用低数值孔径的物镜成像, 采集不同角度图像的同时扩大了视场范围<sup>[83]</sup>, 其系统结构如图 11 所示。

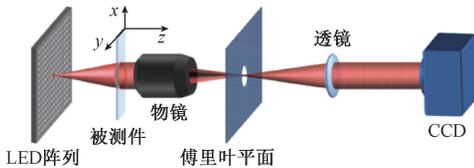
图 11 Fourier ptychography 结构示意图<sup>[84]</sup>

Fig. 11 Schematic of the Fourier ptychography structure

FP 成像过程可以简单描述为 LED 阵列不同角度发出的光束依次照射样本平面, 经过低数值孔径物镜成像之后, 无需移动样本平面即可得到一系列傅里叶域低分辨率图像。使用不同角度照射的低分辨率图像, 通过迭代算法恢复样本平面相位信息。算法与 PIE 基本一致, 不同点是在频域进行, 因而也被称为频域 PIE, 详细迭代过程不再展开描述。

目前傅里叶叠层成像主要应用于显微成像领域 (Fourier ptychography microscopy, FPM)<sup>[81]</sup>, 在对细胞等微小结构的检测中表现出良好的性能<sup>[85-86]</sup>。近些年来 FPM 发展迅速, 一些改进方法也不断被提出, 例如对 LED 进行编码以减少图像采集数量提高采集效率<sup>[87]</sup>、基于单次曝光的 FPM<sup>[88]</sup>、对 LED 位置进行校准的 pcFPM (position-correcting Fourier ptychography microscopy)<sup>[89]</sup>、对系统误差进行校准的 SC-FPM (system calibration-Fourier ptychography microscopy)<sup>[90]</sup>等。同时还有学者对硬件进行改进, 例如使用半球形数字聚光镜<sup>[91]</sup>或者扫描光源<sup>[92]</sup>代替 LED 阵列等。以及一些优化算法, 包括瑞尔

丁格流优化 (Wirtinger flow optimization for Fourier ptychographic, WFP)<sup>[93]</sup>、非线性优化<sup>[94]</sup>等等。同样, 也有不少深度学习与 FPM 相结合的技术出现<sup>[95]</sup>。

不同于显微成像, 如果要将 FP 应用于光学元件的检测, 就需要较大尺寸的 LED 阵列, 而大尺寸的 LED 阵列会出现照明强度不均匀, 同时边缘位置会出现渐晕效应等问题。因此目前鲜有将该技术应用到检测领域的案例。

### 3 结 论

光学手段的加入促进了检测技术的发展, 而计算成像的出现又革新了光学检测的思维方式, 打破了以往“所见即所得”的成像模式, 将计算机作为成像系统的一部分。通过探测器采集到不同衍射图像, 利用先验信息和优化算法, 即可还原被测物体真实相位信息。

计算成像技术仍然存在很多值得进一步研究的方面。首先, 从数学角度来讲, 相位恢复是一个病态的非凸问题。目前解决这一问题的主要手段是基于 G-S 迭代以及各种衍生迭代算法 (除 TIE 之外), 这种迭代是以交替投影的方式来逼近真值, 但对于非凸问题来说很容易陷入局部最优值。其次, 在无先验信息的前提下相位恢复是多解问题, 经典 G-S 算法在空域和频域往复迭代, 而空域相位和频域幅值之间并不是一对一的状态。所以受到迭代估计初值的影响, 算法很可能会收敛到局部最优值, 这就意味着这类算法有很强的初值敏感性。

要解决上述问题, 主要从加入先验信息和改进算法两方面考虑。根据上文介绍的几种计算成像相位恢复技术, 分析其系统构成, 不难发现各种技术特点可以归为四大类: 1) 照明光调制, 例如: PIE 单次曝光中使用二维光栅分光, FPM 中使用 LED 阵列、半球数字聚光镜以及多波长照明等; 2) 成像模块调制, 例如: CMI 中使用随机相位板或振幅板、空间光调制器等调制, PIE 中使用可控制的小孔阵列成像, FP 中使用低数值孔径的物镜成像等; 3) 探测模块改进, 例如: CDI 中使用多平面探测, PIE 快速成像中改变探测器曝光时间以及 FPM 中引入的单像素成像等; 4) 算法优化, 每种技术都有不同的优化算法在前文已提到, 此处不再一一赘述。

计算成像技术在成像领域有着广泛的应用, 但是检测领域相较于成像领域需要更高精度, 所以将其应用到检测领域还在不断的探索中, 现将上文提到的各类计算成像技术在光学检测领域的适用性分析如下:

1) TIE 无需迭代直接求解相位, 但公式的核心是小范围离焦强度的相衬信息, 对于特征比较明显的目标有较好的检测效果, 但对于以低频信息为主的光学元件等被测物, 由于其小离焦范围内相衬度不足, 较难得到理想的相位恢复结果。

2) CDI 作为一种无透镜成像技术,其结构简单,理论上能够达到衍射极限的分辨率,但由于缺少先验信息容易迭代停滞。应用到检测领域可采用多平面 CDI,沿轴向采集多幅衍射强度图进行相位恢复。

3) CMI 在 CDI 基础上通过加入分布已知的调制器,使得 CCD 接收更加丰富的信息,有助于模糊解的消除和迭代的收敛。随着 CAMI 的提出,随机振幅板代替了随机相位板,避免了复杂的调制器标定问题。上海光机所团队已经应用该技术对大口径光学元件面型进行测量,并且获得了高精度的测量结果,证明 CMI 在检测领域有着巨大的应用潜力。

4) PIE 也是一种无透镜成像技术,又被称为扫描 CDI,通过衍射强度图部分重叠得到冗余数据,提高了收敛速度同时在理论上无限扩大了成像范围,其理论分辨率可以达到衍射极限,在显微成像领域有着广泛的应用。成像范围的扩大牺牲的是采集时间,尤其是对大口径光学元件进行叠层扫描检测,会耗费大量的时间,也会产生极大的数据量,对数据处理也造成一定的挑战。因而将该方法应用到光学检测领域的实例较少。

5) FP 也被称作频域 PIE,主要应用于显微成像领域。虽然 LED 阵列的引入避免了样本平面二维的机械扫描,但是在 FPM 系统中使用了低数值孔径的物镜,虽然扩大了视场但也使得采集到的原始数据丢失部分信息,在光学检测领域这将会影响相位恢复精度。同时对于大口径光学元件检测,需要面积较大的 LED 阵列,大角度的照明会导致强度不均且边缘位置渐晕效应明显,这些都限制了其在光学检测领域的应用。

同时就目前的技术来看,检测系统大多以透射式结构为主,这就限制了被测物只能是透明样本,如何将 CDI,PIE 等应用于反射式物体的检测还需进一步探讨。

随着计算机、探测器以及数据处理技术的发展,在光学检测领域引入计算成像的技术已是大势所趋。计算成像其“长处”在于非干涉,系统结构简单,很多技术无需高质量透镜,理论上分辨率可以达到衍射极限;其“短板”在于成像精度还达不到检测领域的要求,或者还有待进一步提高。如何取“长”补“短”是计算成像技术应用于光学检测领域需要探讨的核心。

与此同时,几乎每种计算成像技术都可以与深度学习相结合。神经网络的“黑箱”模式可以巧妙地避开光学系统复杂的中间过程,通过数据集的训练得到较好的恢复效果。作为一把“双刃剑”,如何将其与计算成像相结合,同时达到较高的测量精度或许是未来需要探索的新领域。

## 参考文献

[1] SUN T, ZHENG W, YU Y J, et al. Determination of

surface profiles of transparent plates by means of laser interferometry with wavelength tuning [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 115:59-66.

[2] 常林, 何婷婷, 闫格涛, 等. 考虑移相参数匹配的任意腔长下多表面干涉测量[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(9):181-191.

CHANG L, HE T T, YAN K T, et al. Multi-surface interference measurement with arbitrary cavity lengths considering phase-shifting parameter matching [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(9): 181-191.

[3] QU W J, YU Y J, CHEE O C, et al. Digital holographic microscopy with physical phase compensation[J]. *Optics Letters*, 2009, 8(34): 1276-1278.

[4] CREATH K. Phase-shifting speckle interferometry [J]. *Applied Optics*, 1985, 24(18): 3053-3058.

[5] PLATT B C, SHACK R V. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing [J]. *Journal of Refractive Surgery*, 2001, 17(5): S573- S577.

[6] TEAGUE M R. Deterministic phase retrieval: A Green's function solution [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1983, 73(11):1434-1441.

[7] MIAO J, CHARALAMBOUS P, KIRZ J, et al. Extending the methodology of X-ray crystallography to allow imaging of micrometre-sized non-crystalline specimens[J]. *Nature*, 1999, 400(6742):342-344.

[8] ZHANG F, BO C, MORRISON G R, et al. Phase retrieval by coherent modulation imaging [J]. *Nature Communications*, 2016, 7:13367.

[9] FAULKNER H, RODENBURG J M. Movable aperture lensless transmission microscopy: A novel phase retrieval algorithm[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(2): 023903.

[10] 左超, 陈钱, 孙佳嵩, 等. 基于光强传输方程的非干涉相位恢复与定量相位显微成像: 文献综述与最新进展[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 227-257.

ZUO CH, CHEN Q, SUN J S, et al. Non-interferometric phase retrieval and quantitative phase microscopy based on transport of intensity equation: A review[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 227-257.

[11] ALLEN L J, OXLEY M P. Phase retrieval from series of images obtained by defocus variation [J]. *Optics Communications*, 2001, 199:65-75.

[12] 薛斌党, 郑世玲, 姜志国. 完全多重网格法求解光强度传播方程的相位恢复方法[J]. *光学学报*, 2009, 29(6):1514-1518.

XUE B D, ZHENG SH L, JIANG ZH G. Phase retrieval using transport of intensity equation solved by full

- multigrid method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(6):1514-1518.
- [13] GUREYEV T E, NUGENT K A. Rapid quantitative phase imaging using the transport of intensity equation[J]. *Optics Communications*, 1997, 133(1-6):339-346.
- [14] ZUO C, LI J J, SUN J S, et al. Transport of intensity equation: A tutorial [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 135:106187.
- [15] ZUO C, CHEN Q, ASUNDI A. Boundary-artifact-free phase retrieval with the transport of intensity equation: Fast solution with use of discrete cosine transform[J]. *Optics Express*, 2014, 22(8):9220-9244.
- [16] ZUO C, CHEN Q, YU Y J, et al. Transport-of-intensity phase imaging using Savitzky-Golay differentiation filter-theory and applications [J]. *Optics Express*, 2013, 21(5):5346-5362.
- [17] HUANG L, ZUO C, IDIR M, et al. Phase retrieval with the transport-of-intensity equation in an arbitrarily shaped aperture by iterative discrete cosine transforms [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(9):1976-1679.
- [18] ZHANG J, QIAN C, SUN J, et al. On a universal solution to the transport-of-intensity equation[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13):3649-3653.
- [19] MARTINO J, AYUBI G, DALCHIELE E, et al. Single-shot phase recovery using two laterally separated defocused images [J]. *Optics Communications*, 2013, 293:1-3.
- [20] ZUO C, CHEN Q, QU W, et al. High-speed transport-of-intensity phase microscopy with an electrically tunable lens[J]. *Optics Express*, 2013, 21(20):24060-24075.
- [21] HAI N, KUMAR R, ROSEN J. Single-shot TIE using polarization multiplexing (STIEP) for quantitative phase imaging[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 151:1-6.
- [22] YONEDA N, ONISHI A, SAITA Y, et al. Single-shot higher-order transport-of-intensity quantitative phase imaging based on computer-generated holography [J]. *Optics Express*, 2021, 29(4):4783-4801.
- [23] BASUNIA M, BANERJEE P P, ABEYWICKREMA U, et al. Recursive method for phase retrieval using transport of intensity and its applications [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(33):9546-9554.
- [24] BANERJEE P P, BASUNIA M, POON P C, et al. An optimized transport-of-intensity solution for phase imaging[C]. *Computational Imaging*, SPIE, 2016, 9870:48-53.
- [25] ZHOU H W, GUO H Y, BANERJEE P P. Non-recursive transport of intensity phase retrieval with the transport of phase[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(5):B190-B199.
- [26] ZHOU W J, GUAN X, LIU F, et al. Phase retrieval based on transport of intensity and digital holography[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(1):A229-A234.
- [27] SOUDI M, DARUDI A, SOLTANI P. Accurate solution of the transmission of intensity equation by the Hartmann on a chip [C]. *Computational Optical Sensing and Imaging*, 2019:24-27.
- [28] WANG K Q, DI J L, LI Y, et al. Transport of intensity equation from a single intensity image via deep learning [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134:106233.
- [29] SOKKAR T Z N, EL-FA RAHATY K A, EL-BAKARY M A, et al. Non-interferometric determination of optical anisotropy in highly-oriented fibres using transport intensity equation technique [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 102:10-16.
- [30] DORRER C, ZUEGEL J D. Optical testing using the transport-of-intensity equation [J]. *Optics Express*, 2007, 15(12):7165-7176.
- [31] ISHIZUKA A, MITSUISHI K, ISHIZUKA K. Direct observation of curvature of the wave surface in transmission electron microscope using transport intensity equation[J]. *Ultramicroscopy*, 2018, 194:7-14.
- [32] LIN X Y, CHEN D F, YING Z J, et al. Measurement of acylindrical surface with transport of intensity equation[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(5):B356-B362.
- [33] ROY S, PARKS D, SEU K A, et al. Lensless X-ray imaging in reflection geometry [J]. *Nature Photonics*, 2011, 3(4):9-16.
- [34] PFEIFER M, WILLIAMS G, VARTANYANTS I, et al. Three-dimensional mapping of a deformation field inside a nanocrystal[J]. *Nature*, 2006, 442(7098):63-66.
- [35] GAO Y, HUANG X J, YAN H F, et al. Bragg coherent diffraction imaging by simultaneous reconstruction of multiple diffraction peaks[J]. *Physical Review B*, 2021, 103(1):014102.
- [36] WILLIAMS G J, QUINEY H M, DHAL B B, et al. Fresnel coherent diffractive imaging[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(2):25506.
- [37] MIAO J, ISHIKAWA T, ROBINSON I K, et al. Beyond crystallography: Diffractive imaging using coherent X-ray light sources[J]. *Science*, 2015, 348(6234):530-535.
- [38] GERCHBERG R W. Phase determination from image and diffraction plane pictures in the electron microscope[J].

- Optik, 1971, 35:275-284.
- [39] GERCHBERG R W, SAXTON W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. Optik, 1972, 35: 237-250.
- [40] FIENUP J R. Reconstruction of an object from modulus of its Fourier transform [J]. Optics Letters, 1978, 3(1):27-29.
- [41] FIENUP J R. Reconstruction of a complex-valued object from the modulus of its Fourier transform using a support constraint[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1987, 4(1):118-123.
- [42] 杨国桢, 顾本源. 光学系统中振幅和相位的恢复问题[J]. 物理学报, 1981, 30(3):410-413.  
YANG G ZH, GU B Y. On the amplitude-phase retrieval problem in optical systems [J]. Acta Physica Sinica, 1981, 30(3):410-413.
- [43] IVANOV V Y, SIVOKON V, VORONTOV M A. Phase retrieval from a set of intensity measurements: Theory and experiment [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1992, 9(9):1515-1524.
- [44] HU Z, TAN C, SONG Z, et al. A coherent diffraction imaging by using an iterative phase retrieval with multiple patterns at several directions [J]. Optical and Quantum Electronics, 2019, 52(1):29-39.
- [45] HE S Y, PAN X C, LIU C, et al. Further improvements to iterative off-axis digital holography [J]. Optics Express, 2021, 29(12):18831-18844.
- [46] BARMHERZIG D A, SUN J. Towards practical holographic coherent diffraction imaging via maximum likelihood estimation [J]. Optics Express, 2022, 30(5):6886-6906.
- [47] CHERUKARA M J, NASHED Y, HARDER R J. Real-time coherent diffraction inversion using deep generative networks [J]. Scientific Reports, 2018, 8:1-8.
- [48] BRADY G R, FIENUP J R. Measurement of an optical surface using phase retrieval [C]. Optical Fabrication and Testing, 2006: 9-11.
- [49] ZHAO L, HAO Y, BAI J, et al. Simultaneous reconstruction of phase and amplitude for wavefront measurement based on nonlinear optimization algorithms [J]. Optics Express, 2020, 28(13): 19726-19739.
- [50] WANG H C, LI Y, JIAO Z Y, et al. Phase defect detection of large-aperture optics with static multiplanar coherent diffraction imaging [J]. Applied Optics, 2020, 59(14): 4314-4320.
- [51] LIU X, LIU Y, LI D, et al. Improving phase retrieval accuracy of optical parallel plate by adjusting exposure time of CCD [J]. Journal of Optics, 2021, 23(6):1-7.
- [52] 张福才, 许文慧, 何振飞, 等. 相干衍射成像研究进展: 叠层扫描相干衍射成像和相干调制成像 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(6):167-179.  
ZHANG F C, XU W H, HE Z H F, et al. Progress in coherent diffraction imaging: Ptychography and coherent modulation imaging [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(6):167-179.
- [53] PAN X C, LIU C, ZHU J Q. Coherent amplitude modulation imaging based on partially saturated diffraction pattern [J]. Optics Express, 2018, 26(17): 21929-21938.
- [54] 潘兴臣, 刘诚, 朱健强. 相干调制成像技术的迭代收敛性及重建唯一性 [J]. 光学学报, 2020, 40(18): 107-116.  
PAN X CH, LIU CH, ZHU J Q. Research on the convergency and reconstruction uniqueness of coherent modulation imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18):107-116.
- [55] WANG B Y, HE Z F, ZHANG F C. Coherent modulation imaging using unknown modulators [J]. Optics Express, 2021, 29(19):30035-30044.
- [56] GUO C F, JIANG S W, SONG P M, et al. Quantitative multi-height phase retrieval via a coded image sensor [J]. Biomedical Optics Express, 2021, 12(11):7173-7184.
- [57] CHEN X Y, DUAN Y X, LI H G, et al. A new phase retrieval method using sequential phase modulations [J]. Applied Physics B, 2020, 126(77):1-10.
- [58] ZHENG S Q, SHANGGUAN H C, ZENG X K, et al. Coherent diffractive imaging via a rotatable cylindrical lens [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 124: 105682.
- [59] LI R, CAO L. Complex wavefront sensing based on coherent diffraction imaging using vortex modulation [J]. Scientific Reports, 2021, 11:1-8.
- [60] JIANG Z, PAN X, HE X, et al. Phase retrieval of on-axis digital holography with modified coherent diffraction imaging [J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(6): 1-12.
- [61] KANG I, ZHANG F, BARBASTATHIS G. Phase extraction neural network (PhENN) with coherent modulation imaging (CMI) for phase retrieval at low photon counts [J]. Optics Express, 2020, 28(15): 21578-21600.
- [62] TAO H, VEETIL S P, CHENG J, et al. Measurement of the complex transmittance of large optical elements with

- modulation coherent imaging[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(7):1776-1781.
- [63] 葛银娟, 潘兴臣, 刘诚, 等. 基于相干调制成像的光学检测技术[J]. *物理学报*, 2020, 69(17):265-272. GE Y J, PAN X CH, LIU CH, et al. Measurements of optical components based on coherent modulation imaging[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(17):265-272.
- [64] HOPPE W. Diffraction in inhomogeneous primary wave fields; 1. Principle of phase determination from electron diffraction interferences [J]. *Acta Crystallographica Section A*, 1969, 25: 495-501.
- [65] HOPPE W. Diffraction in inhomogeneous primary wave fields; 2. Optical experiments for phase determination of lattice interferences [J]. *Acta Crystallographica, Section A*, 1969, 25: 502-507.
- [66] RODENBURG J M, FAULKNER H. A phase retrieval algorithm for shifting illumination[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(20):4795-4797.
- [67] MAIDEN A, RODENBURG J. An improved ptychographical phase retrieval algorithm for diffractive imaging [J]. *Ultramicroscopy*, 2009, 109(10):1256-1262.
- [68] 潘兴臣, 刘诚, 陶华, 等. Ptychography 相位成像及其关键技术进展[J]. *光学学报*, 2020, 40(1):163-180. PAN X CH, LIU CH, TAO H, et al. Phase imaging based on Ptychography and progress on related key techniques[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 40(1):163-180.
- [69] PAN X C, LIU C, ZHU J Q. Single shot ptychographical iterative engine based on multi-beam illumination[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(17):171105.
- [70] SIDORENKO P, COHEN O. Single-shot ptychography[J]. *Optica*, 2016, 3(1):9-14.
- [71] SUN A H, HE X L, KONG Y, et al. Ultra-high speed digital micro-mirror device based ptychographic iterative engine method[J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(7):3155-3162.
- [72] SUN A H, KONG Y, JIANG Z, et al. Sub-aperture switching based ptychographic iterative engine (sasPIE) method for quantitative imaging [J]. *Optics Communications*, 2018, 410:514-519.
- [73] MAIDEN A M, HUMPHRY M J, RODENBURG J M. Ptychographic transmission microscopy in three dimensions using a multi-slice approach[J]. *Journal of the Optical Society of America a Optics Image Science & Vision*, 2012, 29(8):1606-1614.
- [74] GOLDBERGER D, BAROLAK J, DURFEE C G, et al. Three-dimensional single-shot ptychography [J]. *Optics Express*, 2020, 13(28):18887-18898.
- [75] MAIDEN A M, HUMPHRY M J, SARAHAN M C, et al. An annealing algorithm to correct positioning errors in ptychography [J]. *Ultramicroscopy*, 2012, 120:64-72.
- [76] LOETGERING L, DU M, EIKEMA K S, et al. zPIE: An autofocusing algorithm for ptychography [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7):2030-2033.
- [77] MAIDEN A, JOHNSON D, LI P. Further improvements to the ptychographical iterative engine [J]. *Optica*, 2017, 4(7):736-745.
- [78] LI M, BIAN L H, ZHENG G A, et al. Single-pixel ptychography[J]. *Optics Letters*, 2021, 46:1624-1627.
- [79] WENGROWICZ O, PELEG O, ZAHAVY T, et al. Deep neural networks in single-shot ptychography[J]. *Optics Express*, 2020, 28(12):17511-17520.
- [80] WANG H Y, LIU C, VEETIL S P, et al. Measurement of the complex transmittance of large optical elements with ptychographical iterative engine [J]. *Optics Express*, 2014, 22(2):2159-2166.
- [81] ZHENG G, HORSTMAYER R, YANG C. Wide-field, high-resolution Fourier ptychographic microscopy [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(9):739-745.
- [82] ZHENG G, SHEN C, JIANG S, et al. Concept, implementations and applications of Fourier ptychography[J]. *Nature Reviews Physics*, 2021, 3:207-223.
- [83] 潘安, 姚保利. 高通量快速傅里叶叠层显微成像技术研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(6):180-198. PAN AN, YAO B L. High-throughput and fast-speed Fourier ptychographic microscopy: A review[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6):180-198.
- [84] 孙佳嵩, 张玉珍, 陈钱, 等. 傅里叶叠层显微成像技术:理论,发展和应用[J]. *光学学报*, 2016, 36(10):89-107. SUN J S, ZHANG Y ZH, CHEN Q, et al. Fourier ptychographic microscopy: Theory, advances, and applications[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 36(10):89-107.
- [85] TIAN L, LIU Z, YEH L H, et al. Computational illumination for high-speed in vitro Fourier ptychographic microscopy[J]. *Optica*, 2015, 2(10):904-911.
- [86] CLAVEAU R, MANESCU P, ELMI M, et al. Digital refocusing and extended depth of field reconstruction in Fourier ptychographic microscopy[J]. *Biomedical Optics*

- Express, 2020,1(11): 215-226.
- [87] TIAN L, LIU Z, YEH L H, et al. Computational illumination for high-speed in vitro Fourier ptychographic microscopy [J]. Optica, 2015, 2(10):904-911.
- [88] LEE B, HONG K, YOO D, et al. Single-shot phase retrieval via Fourier ptychography [J]. Optica, 2018, 5(8): 976-983.
- [89] SUN J, CHEN Q, ZHANG Y, et al. Efficient positional misalignment correction method for Fourier ptychographic microscopy [J]. Biomedical Optics Express, 2016, 7(4): 1336-1350.
- [90] PAN A, ZHANG Y, ZHAO T, et al. System calibration method for Fourier ptychographic microscopy [J]. Journal of Biomedical Optics, 2017, 22(9):1-11.
- [91] PAN A, ZHANG Y, WEN K, et al. Subwavelength resolution Fourier ptychography with hemispherical digital condensers [J]. Optics Express, 2018, 26 ( 18 ): 23119-23131.
- [92] WANG L, SONG Q, ZHANG H, et al. Optical scanning Fourier ptychographic microscopy [J]. Applied Optics, 2021,4(60): A243-A249.
- [93] BIAN L, SUO J, ZHENG G, et al. Fourier ptychographic reconstruction using Wirtinger flow optimization [J]. Optics Express, 2015, 23 ( 4 ): 4856-4866.
- [94] ZHANG Y, JIANG W, DAI Q. Nonlinear optimization approach for Fourier ptychographic microscopy [J]. Optics Express, 2015, 23(26):33822-33835.

- [95] ZHANG J, TAO X, YANG L, et al. Forward imaging neural network with correction of positional misalignment for Fourier ptychographic microscopy [J]. Optics Express, 2020,16(28):23164-23175.

### 作者简介



**林星羽**, 2019 年于上海大学获得学士学位, 现为上海大学机电工程与自动化学院机械工程专业博士研究生, 主要研究方向为计算成像与光学精密测量。

E-mail: noregret\_lxy@shu.edu.cn

**Lin Xingyu** received his B. Sc. degree from Shanghai University in 2019. He is currently pursuing his Ph. D. degree in the School of Mechatronic Engineering and Automation at Shanghai University. His main research interests include computational imaging and optical precision measurement.



**于瀛洁** (通信作者), 1998 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为上海大学机电工程与自动化学院研究员, 主要研究方向为光学精密测量、光学成像、全息显示等。

E-mail: yingjieyu@staff.shu.edu.cn

**Yu Yingjie** (Corresponding author) received her Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 1998. She is currently a research fellow in the School of Mechanical and Electrical Engineering and Automation at Shanghai University. Her main research interests include optical precision measurement, optical imaging and holographic display, et al.