

# 基于模型的无波前探测自适应光学系统

杨慧珍<sup>1</sup> 吴 健<sup>2</sup> 龚成龙<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 淮海工学院电子工程学院, 江苏 连云港 222005  
<sup>2</sup> 中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要** 基于波前梯度的二阶矩和修正后的远场强度分布近似呈线性关系,设计了一种基于模型的无波前探测自适应光学系统快速闭环控制算法。使用 61 单元变形镜、CCD 成像器件等建立了自适应光学系统仿真平台,并以不同湍流强度下的波前像差作为校正对象,分析了这种基于模型的无波前探测自适应光学系统的收敛速度、校正能力及对不同像差的适应性。结果表明,基于模型的无波前探测自适应光学系统在快速收敛的同时,能够获得接近波前校正器件的理想校正能力。 $N$  阶模式像差校正时,系统只需要进行  $N+1$  次远场光斑的测量。和现有的各种无波前探测自适应光学系统控制算法相比较,基于模型的无波前探测自适应光学系统所需的测量次数大大减少。

**关键词** 大气光学;波前校正;自适应光学系统;变形镜

**中图分类号** TP273.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0801002

## Model-Based Sensorless Adaptive Optics System

Yang Huizhen<sup>1</sup> Wu Jian<sup>2</sup> Gong Chenglong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Electronic Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang, Jiangsu 222005, China

<sup>2</sup> Department of Information and Electrical, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China

**Abstract** A closed-loop control algorithm for sensorless adaptive optics system is proposed based on a relationship where the second moments of the wavefront gradients are approximately proportional to the modified far-field intensity distribution. An adaptive optics system simulation platform is established with a 61-element deformable mirror and a CCD imaging device. The convergence rate, the correction capability and the adaptability of the adaptive optics system are investigated through correcting wavefront aberrations under different strengths of turbulence. The results show that the model-based sensorless adaptive optics system can converge rapidly and obtain correction capability closing to the ideal correction of deformable mirror. The system only needs  $N+1$  photodetector measurements when  $N$  order aberrations are corrected and the number of times of measuring far-field intensity is greatly reduced in comparison with existing control algorithms for sensorless adaptive optics system.

**Key words** atmospheric optics; wavefront correction; adaptive optics system; deformable mirror

**OCIS codes** 010.1285; 110.0115; 110.1080; 010.7060

## 1 引 言

相比常规自适应光学技术<sup>[1]</sup>,无波前探测自适应光学系统<sup>[2]</sup>不需要波前探测环节,系统复杂性大大降低,且有着比常规自适应光学技术更为广泛的应用空间,如大气激光通信、扩展目标成像等常规自适应光学技术无法应用的环境。目前,这一技术已经成为相关领域的研究热点。

无波前探测自适应光学系统按照控制算法的不同分为无模型优化和有模型优化两大类。无模型优化系统不需要建立系统模型,直接采用各种盲优化算法作为系统控制算法,如随机并行梯度下降算法(SPGD)<sup>[3-6]</sup>、模拟退火<sup>[7]</sup>、遗传算法<sup>[8]</sup>、模式提取算法<sup>[9]</sup>等。收敛速度慢是无模型优化自适应光学系统的最大缺陷,难以用于实时像差校正系统。有模型

**收稿日期**: 2014-04-04; **收到修改稿日期**: 2014-04-24

**基金项目**: 中国科学院自适应光学重点实验室开放基金(LAOF201302)

**作者简介**: 杨慧珍(1973—),女,博士,副教授,主要从事自适应光学技术及其应用方面的研究。

E-mail: yanghz526@126.com

优化系统又称为基于模型的无波前探测自适应光学系统,该类系统首先基于某种原理建立系统模型,如模式法<sup>[10-12]</sup>、非线性优化方法<sup>[13]</sup>或几何光学原理<sup>[14]</sup>,进而确定相应的系统控制算法。当校正  $N$  阶 Zernike 像差时,模式法仅需要  $N+1$  次远场光斑测量、非线性优化方法需要  $N+4$  次远场光斑测量、几何光学原理需要  $N+1$  次远场光斑测量。和无模型优化系统相比,基于模型的无波前探测自适应光学系统有相对较快的收敛速度,因此在像差实时校正领域具有非常巨大的应用潜力。

基于模式法的无波前探测自适应光学系统在校正不同大小的像差时,需要事先定义不同类型的基函数<sup>[12]</sup>。基于非线性优化的无波前探测自适应光学系统首先建立表征系统输入输出模型的非线性方程,然后基于建立的方程多次读取强度信息,再利用非线性最小二乘法求解。另外,该类系统在波前校正之前还需要清除系统像差。以上两类方法在实际应用时,实现手段相对复杂。基于几何光学原理的无波前探测自适应光学系统利用波前梯度的二阶矩与远场光强之间的线性关系建立系统模型,和前述的模式法类似,需要事先定义基函数,区别之处在于该方法不依赖具体的基函数类型,不需要系统像差的清除,实现简单。

文献[14]给出了基于几何光学原理、与无波前探测自适应光学系统有关波前校正的理论分析和初步仿真结果。当把该类系统用于系统闭环校正时,需要进一步研究波前校正控制算法。本文基于 61 单元变形镜建立无波前探测自适应光学系统,研究了相应的控制算法,分析了系统的收敛速度和校正能力。

## 2 基于模型的无波前探测自适应光学系统

如图 1 所示,基于模型的无波前探测自适应光学系统由主控计算机、高压放大单元、61 单元变形镜、成像透镜、CCD 成像器件等组成。待校正的畸变波前  $\phi(r)$  由变形镜校正后反射到成像透镜上,经成像透镜聚焦在其焦平面上的 CCD 成像器件上。CCD 探测到的光强信号,经图像采集卡采集到计算机内。在计算机内完成控制算法实现并生成校正电压,电压信号由数模(D/A)转换部分转换为模拟信号并行输出,经过高压放大器驱动 61 单元变形镜校正像差。所使用的 61 单元变形镜驱动器位置呈六边形排布,影响函数近似为高斯分布,交连值设为

0.08,高斯指数设为  $2^{[15]}$ ,驱动器位置排布如图 2 所示。本文仿真中假定变形镜的变形量满足校正要求。

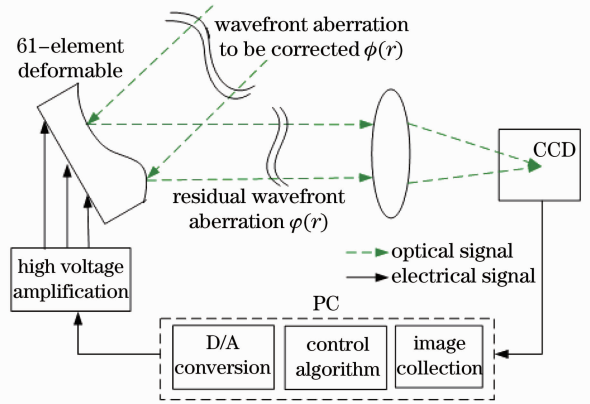


图 1 无波前探测自适应光学系统结构示意图  
Fig. 1 Block diagram of sensorless adaptive optics system

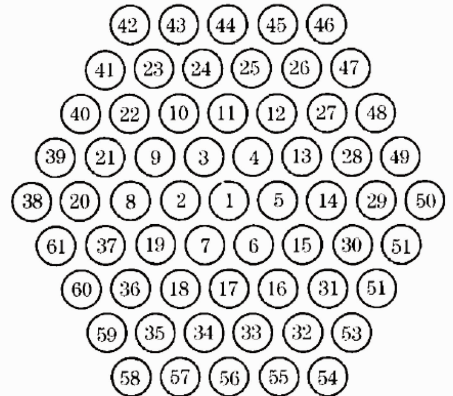


图 2 61 单元变形镜驱动器位置排布  
Fig. 2 Actuator arrangement of 61-element deformable mirror

## 3 基于模型的无波前探测自适应光学系统控制算法设计

几何光学原理中远场光斑强度的质心与待校正波前畸变有关<sup>[16]</sup>。经过一定的数学变换可以得到波前梯度的二阶矩和修正后的远场强度分布近似呈线性关系,具体可参考文献[14],利用上述线性关系设计系统闭环控制算法,分为预处理、算法迭代两大部分。

### 3.1 预处理部分

定义远场光斑修正矩阵  $\mathbf{M}_{\text{ask}}^{[14]}$ 。定义一组表征波前像差的基函数,这里以 Zernike 多项式为例。首先计算各阶 Zernike 模式分别对  $x$  分量和  $y$  分量的二阶矩,并求逆,记为  $\mathbf{P}$ ,其对角向量记为  $\mathbf{P}_m$ 。

测量变形镜的影响函数,根据驱动器影响函数

计算影响函数间的耦合矩阵,记为  $C_v, C_v$  为对称可逆阵,计算驱动器影响函数与 Zernike 模式间的相互关系矩阵,记为  $C_{zv}$ 。待测像差  $\phi(r)$  可以看作是各阶 Zernike 多项式的线性组合。

$$\phi(r) = \sum_{i=1}^M a_i Z_i(r), \quad (1)$$

式中  $M$  为 Zernike 阶数,  $a_i$  为第  $i$  阶 Zernike 系数,  $Z_i(r)$  为第  $i$  阶 Zernike 模式。经过一定的推导可以得到 Zernike 系数与变形镜驱动向量之间的关系<sup>[17]</sup>,即

$$\mathbf{v}^* = \mathbf{C}_v^{-1} \mathbf{C}_{zv} \mathbf{a}, \quad (2)$$

式中的变形镜控制向量  $\mathbf{v}^*$  为最小二乘解。可以证明最佳控制电压  $\mathbf{v}^*$  使波前拟合方差最小。

值得说明的是预处理部分得到的向量  $\mathbf{P}_m$ , 矩阵  $\mathbf{P}, \mathbf{C}_v, \mathbf{C}_{zv}$  与系统待校正的波前像差没有关系。当基函数和实际系统中的变形镜确定之后,上述数据可视为已知,在像差校正时可直接调入。

### 3.2 算法迭代部分

1) 由 CCD 探测待校正像差的远场光强,以质心为中心截取  $M \times M$  大小的像面,并与修正矩阵  $\mathbf{M}_{ask}$  相乘,然后求和,记为  $I_0$ ,  $M$  取值范围为 10 ~ 20 倍衍射极限;

2) 以系数  $\mathbf{a} = \{0, \dots, a_i, 0, \dots\}$  代入(2)式得到第  $i$  阶 Zernike 模式像差对应的变形镜驱动信号并施加到变形镜各驱动器。变形镜产生的面形与待校正波前叠加,CCD 探测叠加后的波前对应远场光斑,计算截取部分像面的光强之和,记为  $I_i$ 。重复以上过程,分别得到叠加  $N$  阶 Zernike 像差之后的光波对应的远场光强之和,分别记为  $I_1, I_2, \dots, I_N$ 。总的 Zernike 系数向量为  $\mathbf{a} = \{\dots, a_i, \dots, a_j, \dots\}$ 。

3) 按(3)式计算叠加 Zernike 模式后的远场光强与待测波前对应的光强之差  $\mathbf{Q}$ :

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} I_1 \\ \dots \\ I_N \end{pmatrix} - I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

4) 利用(4)式得到待校正波前对应的变形镜各控制器驱动信号,该驱动信号经高压放大器放大施加到变形镜各驱动器校正波前,(4)式具体推导见文献[14],

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{P}(c_0 \mathbf{Q} - \mathbf{a}^2 \mathbf{P}_m)}{2 * \mathbf{a}}, \quad (4)$$

即式中  $c_0$  为可调参数。

5) 将校正之后的残余波前作为待校正波前,重复步骤 2)~4)直到算法满足预先设定的终止条件,

如一定的迭代次数或残余波前对应的远场光斑光强之和大于一个阈值。控制算法流程如图 3 所示,图中以控制算法满足一定的迭代次数为结束条件,内循环的次数  $N$  等于待校正的 Zernike 像差的阶数。

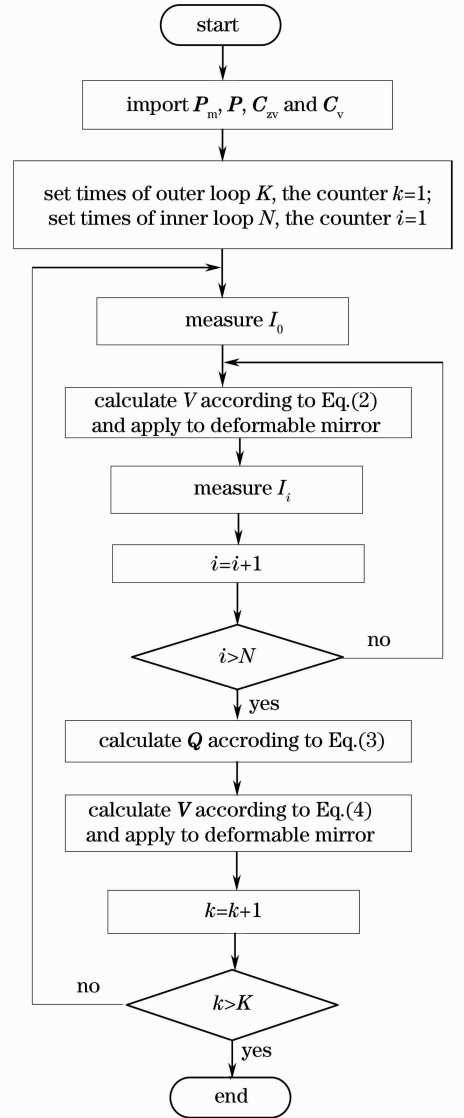


图 3 基于模型的无波前探测自适应光学系统控制算法流程图

Fig. 3 Flow chart of control algorithm for model-based sensorless adaptive optics system

## 4 仿真结果与分析

采用 Roddier<sup>[18]</sup>提出的方法生成不同湍流强度的相屏,相屏由 3~65 阶 Zernike 像差组成,不包括倾斜分量,在自适应光学系统中,倾斜分量通常由倾斜镜单独校正。用这种方法生成的相屏统计属性符合 Kolmogrov 谱,且相屏之间不具有相关性。湍流强度的大小可以使用  $D/r_0$  表示,其中  $D$  为望远镜口

径,  $r_0$  为大气相干长度。仿真中分别以  $D/r_0 = 5, 10, 15, 20$  时的湍流情况进行分析。每种情况下通过对 500 帧不同相屏的有关数据做系综平均得到该湍流情况下的各种校正数据。

#### 4.1 不同湍流情况下的校正效果分析

使用远场光斑的平均半径(MR,  $r_a$ )来衡量无波前探测自适应光学系统的校正能力,表达式如下:

$$r_a = \frac{\int \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2} I(x,y) dx dy}{\int I(x,y) dx dy}, \quad (5)$$

式中  $(x', y')$  =  $\frac{\int (x,y) I(r) dx dy}{\int I(x,y) dx dy}$  为光斑质心。平均

半径  $r_a$  的值越小,说明远场光斑能量越集中,波前像差越小。平均半径在实际系统中通过 CCD 或其他光电探测器件很容易获得。图 4 给出了不同湍流条件下的平均校正效果,如虚线所示。为便于对比,图中同时给出了不同湍流条件下的初始  $r_a$  值(划线所示)和 61 单元变形镜理想校正能力(实线所示)。理想校正能力,即 61 单元变形镜所能获得的最佳校正效果,通过最小二乘拟合方法获得。

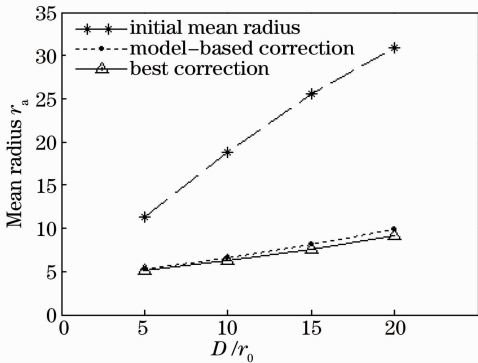


图 4 不同湍流条件下的校正能力对比  
Fig. 4 Comparisons of correction capabilities under different turbulences

对比不同湍流条件下的初始平均半径值,可以发现校正后远场光斑的平均半径大大减小。将所提出控制算法获得的校正曲线和 61 单元最佳校正效果曲线对比,可以发现两者非常接近。也就是说本文基于模型的无波前探测自适应光学系统基本发挥了 61 单元变形镜的最大校正能力。

#### 4.2 不同湍流情况下的校正速度分析

以完成图 3 控制算法流程图中的外循环作为一次迭代,图 5 给出了不同湍流条件下的平均半径迭代变化曲线。可以看出基于模型的无波前探测自适

应光学系统仅经过 1 次算法迭代,系统已基本收敛,这个结论和文献[14]中的结论一致。当然为获得更精确的校正效果,可以进行 2 次或 3 次迭代。

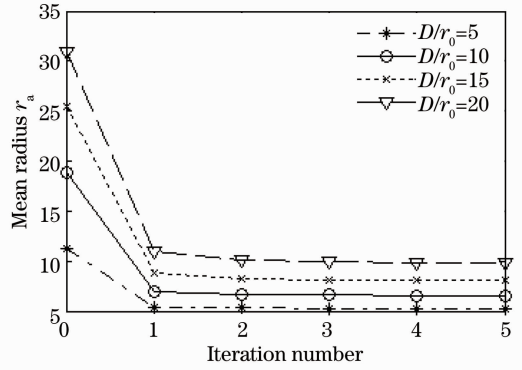


图 5 不同湍流条件下的平均半径的变化曲线  
Fig. 5 Adaptation curves of mean radii under different turbulences

下面以控制算法中远场光斑测量的次数来衡量算法的收敛速度。参照图 3 中的控制算法流程图,如果进行  $N$  阶模式像差的校正,则 1 次控制算法的迭代包括  $N+1$  次远场光斑的测量。以包含 3~65 阶 Zernike 模式的波前像差作为校正对象,1 次迭代则需要 64 次远场光斑的测量。和现有的无波前探测自适应光学系统控制算法<sup>[19]</sup>相比,所需的远场光斑测量次数大大减少。

另外,为考察系统对不同像差的适应能力,图 6 给出了不同湍流条件下 500 帧不同相屏校正过程中的平均半径变化曲线的标准差(SD,  $D_s$ )。标准差表达式如下:

$$D_s = \frac{\langle (r_a - \langle r_a \rangle)^2 \rangle^{1/2}}{\langle r_a \rangle}, \quad (6)$$

式中  $\langle \rangle$  表示取均值。

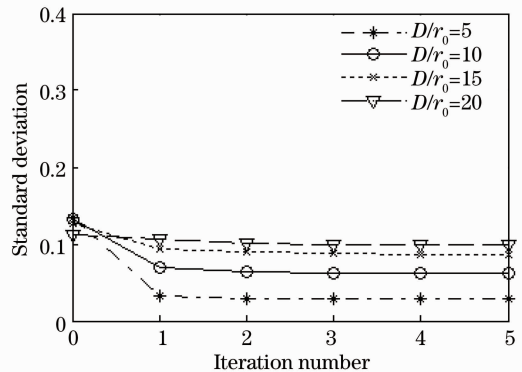


图 6 不同湍流条件下的 500 帧相屏的 MR 值变化的标准差曲线  
Fig. 6 Standard deviations of mean radii over 500 frames phase under different turbulences

从图 6 可以看出,系统收敛之后几种湍流条件下的标准差值都非常小,即不同相屏的平均半径值偏离平均值的离散程度小,这表明基于模型的无波前探测自适应光学系统对不同的像差具有较强的适应能力。

## 5 结 论

基于波前梯度的二阶矩和修正后的远场强度分布近似呈线性关系的原理,设计了一种基于模型的无波前探测自适应光学系统闭环控制算法。使用 61 单元变形镜、CCD 成像器件等建立了自适应光学系统仿真平台,并以不同湍流强度下的波前像差作为校正对象,分析了这种基于模型的无波前探测自适应光学系统的收敛速度、校正能力及对不同像差的适应能力。结果表明,基于模型的无波前探测自适应光学系统在快速收敛的同时,能够获得接近波前校正器件的理想校正能力。 $N$  阶模式像差校正时,只需要进行  $N+1$  次远场光斑的测量系统就已经接近收敛,和现有的各种无波前探测自适应光学系统控制算法比较,所需的测量次数大大减少,为无波前探测自适应光学系统用于实时像差校正提供了一种可行途径。

**致谢** 感谢中国科学院自适应光学重点实验室黄林海同志为本文工作所提的建设性意见。

## 参 考 文 献

- 1 R K Tyson. Principle of Adaptive Optics [M]. New York: CRC Press, 2010.
- 2 R A Muller, A Buffington. Real-time correction of atmospherically degraded telescope images through image sharpening [J]. J Opt Soc Am A, 1974, 64(9): 1200—1210.
- 3 M A Vorontsov, G W Carhart. Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration [J]. J Opt Soc Am A, 2000, 17(8): 1440—1453.
- 4 Geng Cao, Luo Wen, Tan Yi, *et al.*. Experimental demonstration of using divergence cost-function in SPGD

- algorithm for coherent beam combination with tip/tilt control [J]. Opt Express, 2013, 21(21): 25045—25055.
- 5 Mu Jie, Jing Feng, Wang Xiao, *et al.*. Error control of piston and tilt based on SPGD in coherent beam combination [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0602002.  
母杰,景峰,王道,等.相干合成中基于 SPGD 算法的平移误差和倾斜误差控制[J].中国激光,2014,41(6): 0602002.
- 6 H T Ma, Z J Liu, X J Xu, *et al.*. Simultaneous adaptive control of dual deformable mirrors for full-field beam shaping with the improved stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. Opt Lett, 2013, 38(3): 326—328.
- 7 S Zommer, E N Ribak, S G Lipson, *et al.*. Simulated annealing in ocular adaptive optics [J]. Opt Lett, 2006, 31(7): 1—3.
- 8 P Yang, M W Ao, Y Li, *et al.*. Intracavity transverse modes controlled by a genetic algorithm based on Zernike mode coefficients [J]. Opt Express, 2007, 15(25): 17051—17062.
- 9 M S Zakythinaki, Y G Saridakis. Stochastic optimization for a tip-tilt adaptive correcting system [J]. Computer Physics Communication, 2003, 150(3): 274—292.
- 10 M J Booth. Wavefront sensorless adaptive optics for large aberrations [J]. Opt Lett, 2007, 32(1): 5—7.
- 11 A Facomprez, E Beaufrepaire, D Debarre. Accuracy of correction in modal sensorless adaptive optics [J]. Opt Express, 2012, 20(3): 2598—2612.
- 12 M A Neil, M J Booth, T Wilson. Closed-loop aberration correction by use of a modal Zernike wave-front sensor [J]. Opt Lett, 2000, 25(15): 1083—1085.
- 13 H Song, R Fraanje, G Schitter, *et al.*. Model-based aberration correction in a closed-loop wavefront-sensor-less adaptive optics system [J]. Opt Express, 2010, 18(23): 24070—24084.
- 14 L H Huang, C H Rao. Wavefront sensorless adaptive optics: a general model-based approach [J]. Opt Express, 2011, 19(1): 371—379.
- 15 W H Jiang, N Ling, X J Rao. Fitting capability of deformable mirror [C]. SPIE, 1991, 1542: 130—137.
- 16 M Born, E Wolf. Principle of Optics (7th Edition) [M]. New York: Cambridge University Press, 2003.
- 17 Yang Huizhen, Li Xinyang. Stochastic parallel gradient descent algorithm for adaptive optics system based on Zernike mode [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(5): 645—648.  
杨慧珍,李新阳.基于 Zernike 模式的自适应光学系统随机并行梯度下降算法研究[J].强激光与粒子束,2009,21(5): 645—648.
- 18 N Roddier. Atmospheric wave front simulation using Zernike [J]. Opt Eng, 1990, 29(10): 1174—1180.
- 19 Yang Huizhen, Li Xinyang. Comparison of several stochastic parallel optimization algorithms for adaptive optics system without a wavefront sensor [J]. Opt Laser Technol, 2011, 43(3): 630—635.

栏目编辑:王晓琰