

文章编号 1004-924X(2015)12-3329-06

成像光学系统的相对波像差梯度偏离值评价法

宣 斌*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:针对成像光学系统的波像差检测,提出了相对波像差梯度偏离值评价方法,用于直接表征波前的成像性能。给出了波像差梯度偏离值的定义,即为波前成像点与成像能量中心的偏离值。在此基础上定义相对波像差梯度偏离值为波像差梯度偏离值与艾里斑大小的比值,并提出了相对波像差梯度偏离值评价方法。相对波像差梯度偏离值与波前口径、形状、焦距均无关,故文中提出用成像尺寸、成像集中度以及成像能量分布等多种方法进行相对波像差梯度偏离值评价。其中成像集中度和成像能量分布在不同的检测分辨率条件下的稳定性较好,分辨率每相差一倍产生的差异通常小于 10%。根据出瞳位置的相对波像差梯度偏离值分布和像面位置的波像差梯度分布情况,可以方便地指导光学加工和系统装调。进行了相应的实验分析,结果显示:相对波像差梯度偏离值评价方法可以用于制定波像差指标,进行波前质量控制。

关键词:光学检测;成像光学系统;波像差评价;波像差梯度;相对梯度偏离值

中图分类号:O439;TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152312.3329

Relative wavefront gradient deviation evaluation methods for imaging systems

XUAN Bin*

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: xbj_snt@sina.com

Abstract: The relative wavefront gradient deviation evaluation methods were proposed to evaluate wavefront errors of imaging systems for characterizing directly the imaging performance of the wavefront. The wavefront gradient deviation was defined as the deviation between each image point and image energy center and the relative wavefront gradient deviation was defined as the ratio of gradient deviation to Airy disk radius. Then, the relative wavefront gradient deviation evaluation methods were given. As the relative wavefront gradient deviation is independent on wavefront dimension, wavefront shape and focal length, the relative wavefront gradient deviation was evaluated by image size, image concentration and image energy distribution in this paper. The evaluations of image concentration and image energy distribution are usually stable enough for different test resolutions. The differences for every double or half resolution differences are usually less than 10%. According to the relative wavefront gradient deviation distribution on an exit pupil and wavefront gradient distribution on an image

收稿日期:2015-08-10;修订日期:2015-09-26.

基金项目:中国科学院探索与验证条件建设专项资助项目

plane, it can be convenient to operate for optical manufacture and system assembling. The experiments show that the relative wavefront gradient deviation evaluations can be used as the wavefront specifications for quality control.

Key words: optical testing; imaging optical system; wavefront evaluation; wavefront gradient; relative gradient deviation

1 引言

波像差评价^[1]在光学设计、光学加工、光学系统装调等多个光学工程领域具有极其重要的作用。目前,通用性最好的波像差评价方法包括峰谷值(Peak-to-Valley, PV)和均方根值(Root Mean Square, RMS)等,这些已经被制定在国际标准 ISO10110^[2-5]中。峰谷值和均方根值的应用广泛,可以很好地表征波前的幅值信息,但是不能表征波前的空间频率信息。ISO10110 中的功率谱密度^[6-8](Power Spectral Density, PSD)是一种利用傅里叶变换(Fourier Transformation, FT)将波前转换至频谱域的评价方法。它将波前分解成不同空间频率的余弦分量,从而对波前的空间频率特性进行质量控制。功率谱密度常直接用于评价中频波像差^[9],并在美国的国家点火装置^[10-12](National Ignition Facility, NIF)等项目中发挥了重要作用。但是 ISO 只规定了一维波像差数据的 PSD,而实际检测得到的二维波像差所对应的 PSD 比较复杂,分析时还需要选取截线降低维度。此外,PSD 与空间位置没有确定关系,对边缘数据非常敏感,几个边缘像素的调整往往可以改变整个 PSD 曲线的分布,这给光学加工尤其是非球面度梯度较大的元件加工带来很多不便。因此,PSD 一直没有得到广泛的应用。除了 ISO, ZYGO 公司提出的 PV_r^[13](Peak-to-Valley Robust)已经应用在 MetroPro 的 8.3.1 版本中。PV_r 将 PV 和 RMS 相结合,物理意义与 PV 类似,但是稳定性更好。波像差梯度^[14-18]是另一种可以表征波前空间频率信息的评价方法,同时也可以表征波前成像性能;但是该方法与波前口径相关,不利于标准化,因此一直没有得到广泛应用。

本文在波像差梯度的基础上提出了相对波像差梯度偏离值评价方法。该方法采用相对波像差

梯度偏离值表征波像差,可以更准确更直接地对成像光学系统的波前成像性能进行质量控制,从而为光学系统元件的制造和系统集成装调提供有利的工程指导。

2 相对波像差梯度偏离值

2.1 相对波像差梯度偏离值定义

假设归一化圆口径出瞳处有一个会聚波前的波像差为 Zernike 彗差,如图 1 所示,其表达式为:

$$W = 3x^3 + 3xy^2 - 2x. \quad (1)$$

根据几何光学理论,出瞳位置 (x, y) 处的出射光线与完好波前的出射光线在 x 和 y 方向的偏离角分别为 $\partial W/\partial x$ 和 $\partial W/\partial y$ 。像面位置的波像差梯度分布与波前的成像分布是一致的,它与点扩散函数(Point Spread Function, PSF)的区别在于忽略了物理光学的衍射。当出瞳直径 $D=100$ mm 时,像面位置的波像差梯度分布如图 2 所示。

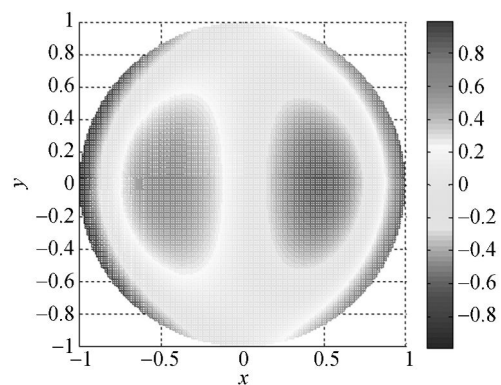


图 1 出瞳位置的泽尼克彗差分布图

Fig. 1 Wavefront distribution of Zernike coma on exit pupil

当出瞳的光强均匀时,成像点的能量中心位于波像差梯度的平均值 $(\overline{\partial W/\partial x}, \overline{\partial W/\partial y})$ 处,如图

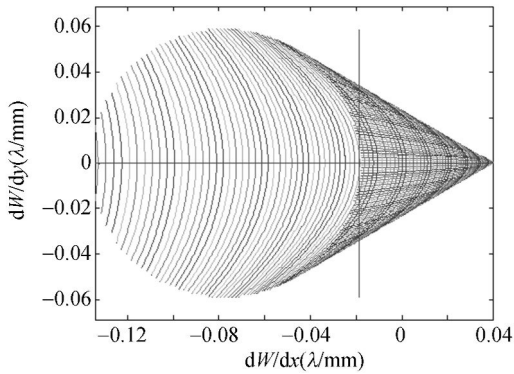


图 2 泽尼克彗差在像面位置的波像差梯度分布图
Fig. 2 Wavefront gradient distribution of Zernike coma on image plane

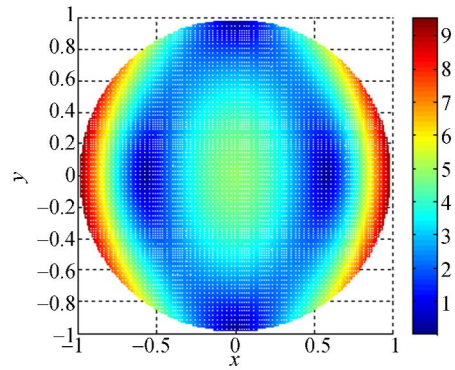


图 3 泽尼克彗差在出瞳位置的相对波像差梯度偏离值分布图
Fig. 3 Distributions of relative wavefront gradient deviation of Zernike coma on exit pupil

2 所示的十字线位置。其中:

$$\begin{cases} \overline{\partial W / \partial x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\partial W}{\partial x_i} \\ \overline{\partial W / \partial y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\partial W}{\partial y_i} \end{cases} \quad (2)$$

当出瞳的光强不均匀时, 成像点的能量中心位置与光强权值 m 有关, 即有:

$$\begin{cases} \overline{\partial W / \partial x} = \left[\sum_{i=1}^n \left(m_i \cdot \frac{\partial W}{\partial x_i} \right) \right] / \sum_{i=1}^n m_i \\ \overline{\partial W / \partial y} = \left[\sum_{i=1}^n \left(m_i \cdot \frac{\partial W}{\partial y_i} \right) \right] / \sum_{i=1}^n m_i \end{cases} \quad (3)$$

将成像点的能量中心作为评价基准, 波像差梯度偏离值定义为各成像点位置与成像点能量中心位置的偏离, 并以此来评价波前的成像质量, 即有:

$$GD = \sqrt{\left(\frac{\partial W}{\partial x} - \overline{\frac{\partial W}{\partial x}} \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial y} - \overline{\frac{\partial W}{\partial y}} \right)^2} \quad (4)$$

根据衍射理论, 一个波长 λ 的完好汇聚波前成像为一个艾里斑, 其中心能量的半径与出瞳直径 D 成反比, 即有:

$$\theta_0 = 1.22\lambda / D \quad (5)$$

只要波像差的分布形式和幅值不变, 成像点与艾里斑的相对大小是恒定的。因此, 定义相对波像差梯度偏离值为波像差梯度偏离值与艾里斑半径之比, 其评价结果与波前的口径、形状和焦距都无关, 如式(6)所示。

$$GD_{\theta_0} = GD / \theta_0 \quad (6)$$

图 1 对应的出瞳位置的相对波像差梯度偏离值分布如图 3 所示。图 1 和图 3 的坐标是完全一致的。

2.2 相对波像差梯度偏离值的评价

为了表征波前的成像质量, 用相对波像差梯

度偏离值来评价成像尺寸、成像集中度和成像能量分布。

2.2.1 成像尺寸

成像尺寸是像面位置的所有成像点的分布范围, 可以用相对波像差梯度偏离值的最大值来评价, 如式(7)所示:

$$GD_{\max \theta_0} = \max(GD_{\theta_0}) \quad (7)$$

以成像点的能量中心为圆心, 成像尺寸 $GD_{\max \theta_0}$ 为半径画一个圆, 所有的成像点均落于该圆范围以内。

2.2.2 成像集中度

成像集中度是各成像点的紧密程度, 可以用相对波像差梯度偏离值的平均值或者均方根值来评价。当光强均匀时, 有:

$$\overline{GD_{\theta_0}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n GD_{\theta_0 i} \quad (8)$$

$$rms(GD_{\theta_0}) = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n GD_{\theta_0 i}^2} \quad (9)$$

当光强不均匀时, 有:

$$\overline{GD_{\theta_0}} = \left[\sum_{i=1}^n (m_i \cdot GD_{\theta_0 i}) \right] / \sum_{i=1}^n m_i \quad (10)$$

$$rms(GD_{\theta_0}) = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (m_i \cdot GD_{\theta_0 i}^2) \right] / \sum_{i=1}^n m_i} \quad (11)$$

2.2.3 成像能量分布

以成像点的能量中心为圆心画圆, 将圆的半径作为横坐标, 圆内包含的成像点百分比作为纵坐标, 所对应的曲线定义为成像能量分布曲线。成像能量分布曲线必定经过点(0, 0)和点

($GD_{0_{\max}}, 100$)。图 2 的像面位置波像差的梯度分布图可以转换为图 4 的成像能量分布曲线。图中包含了任意能量阈值所对应的圆的半径信息,例如 $GD_{84\%0_0}$ 为 84% 的成像能量对应的圆的半径。

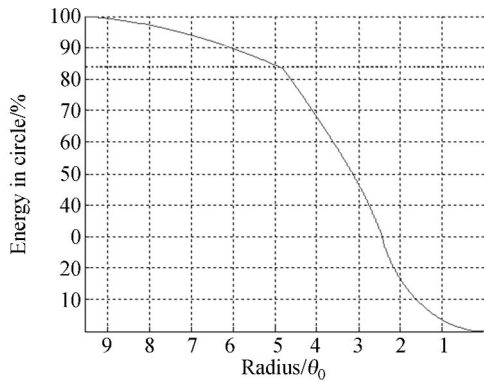


图 4 泽尼克彗差的成像能量分布曲线

Fig. 4 Image energy distribution curve of Zernike coma

成像能量分布曲线的物理意义与环围能量曲线相似,但是后者是基于物理光学的衍射理论计算的,可以由 PSF 转换。由于评价基准移至成像点的能量中心,成像能量分布曲线对波前的成像质量评价更为合理、精确。当波前接近衍射极限水平时,衍射效应开始显著,成像能量分布曲线的数值可能不再准确,但是其趋势仍然是正确的,即波前越好,成像能量分布曲线对应的横坐标值越小、斜率更陡。

2.3 相对波像差梯度偏离值的工程适用性

由于出瞳位置的波像差梯度偏离值分布与波像差分布的坐标完全对应,可以直接指导光学加工。如图 3 所示(彩图见期刊电子版),如果对红色区域进行合理的抛光,就可以直接使成像点向成像能量中心聚拢,提高成像质量,改善波像差梯度偏离值的评价结果。通过分析像面位置的波像差梯度分布图,无需进行波前重构^[19-21]就可以使用计算机辅助装调技术(Computer-Aided Alignment, CAA)指导子孔径拼接^[22-23]等光学系统的集成。这种优势在波像差超出干涉检测设备量程范围时尤为显著。为了得到完整正确的波像差梯度分布信息,需要综合分析两个或多个波像差的梯度分布图,可以对波前进行离焦或者其他类型的调制。因此,相对波像差梯度偏离值适用于光学设计、加工、装调等环节中的过程检测以及最终检测。

3 实验和分析

图 5 和图 6 分别是球面和非球面元件产生的波像差以及对应的成像能量分布曲线(彩图见期刊电子版)。球面波像差的分布比非球面波像差更平滑,中频误差更少,成像能量分布曲线的斜率更大。将波前幅值缩放至一样大小的均方根值以后,球面波像差的相对波像差梯度偏离值更小,如表 1 所示。由此可知,相对波像差梯度偏离值可以很好地表征波前中频误差等空间频率。

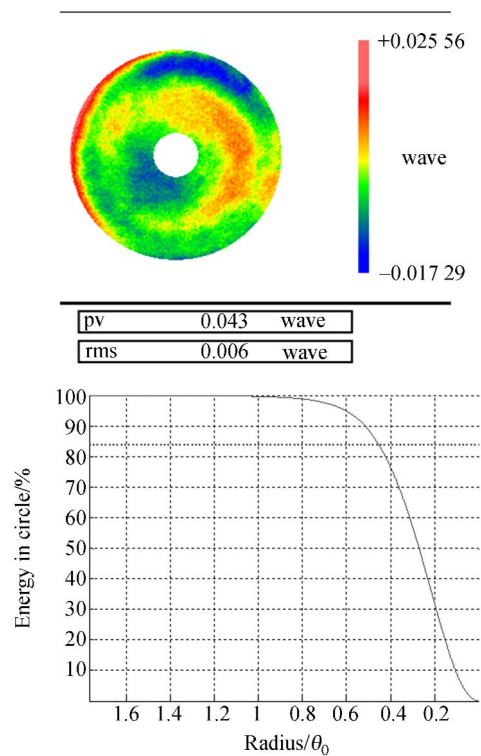


图 5 球面波像差及其成像能量分布曲线

Fig. 5 Wavefront distribution and image energy distribution of a spherical wavefront

当波前检测设备具有更高的分辨率时,可以探测出更多的波像差细节,相对波像差梯度偏离值也会有不同的结果。理论上,如果波前分布非常平缓,检测分辨率不同时设备的检测结果之间的差别可以忽略,波像差梯度偏离值不会有差异,评价结果仅与波前分布和幅值有关。在实际情况下,通过大量数据的统计可知,对于平缓分布的波前,检测分辨率每相差一倍,rms GD_{0_0} 和 $GD_{84\%0_0}$ 等成像集中度和成像能量分布指标的差异一般不

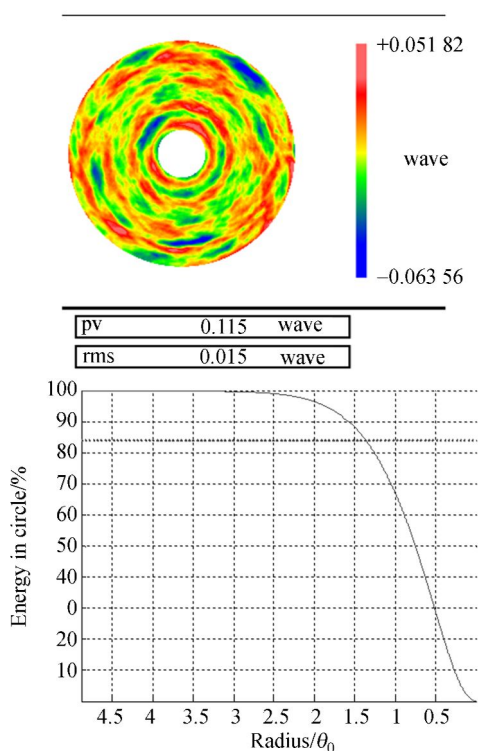


图 6 非球面波像差及其成像能量分布曲线

Fig. 6 Wavefront distribution and image energy distribution of an aspherical wavefront

超过 2%；而当波前的中频误差比较严重时，指标差异一般不超过 10%。这种稳定性符合标准化指标的要求；但是 $GD_{\max\theta_0}$ 的稳定性不能让人满意，灰尘、遮阑等产生的衍射光有时会造成很大的影响，检测分辨率产生的指标差异有时甚至会超

参考文献：

- [1] MALACARA D. *Optical Shop Testing* [M]. New York: Wiley-Interscience, 1992: Chap. 13.
- [2] *International standard ISO 10110, Optics and optical instruments -Preparation of drawings for optical elements and systems*[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.
- [3] SELBERG L A, TRUAX B E. ISO figure specification (ISO 10110-5) and digital interferometry [J]. SPIE, 1992, 1776: 86-93.
- [4] WANG D Y, JR ENGLISH R E, AIKENS D M. Implementation of ISO 10110 optics drawing standards for the national ignition facility [J]. SPIE, 1999, 3782: 502-508.
- [5] KIONTKE S R, AIKENS D M, YOUNGWORTH R N. Description and tolerancing of freeform surfaces

过 50%。因此，推荐使用成像集中度和成像能量分布等指标来控制波前质量。

表 1 球面和非球面波像差的评价结果

Tab. 1 Evaluation results of spherical and aspherical wavefronts

评价项	波像差项	
	球面	非球面
PV (λ)	0.043	0.115
rms (λ)	0.006	0.015
$GD_{\max\theta_0}$	1.77	4.88
rms(GD_{θ_0})	0.343	1.02
$GD_{84\%\theta_0}$	0.455	1.37
$GD_{\max\theta_0}/\text{rms}$	300	315
rms(GD_{θ_0})/rms	58.1	65.6
$GD_{84\%\theta_0}/\text{rms}$	77.1	88.5

4 结 论

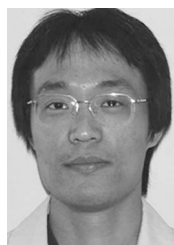
本文提出了用相对波像差梯度偏离值表征波像差的方法，它可以直接表征成像光学系统的成像性能，并且与波前口径、形状无关。检测分辨率的不同会造成相对波像差梯度偏离值的差异，绝大部分情况下，成像集中度和成像能量分布等指标的差异小于 10%。出瞳位置的波像差梯度偏离值分布、像面位置的波像差梯度分布可以很方便地指导光学加工和光学装调。因此，相对波像差梯度偏离值指标适用于波前的过程检测和最终检测。

in standards [C]. *International Optical Design Conference, Optical Society of America*, 2014: paper ITh3A. 2.

- [6] LAWSON J K, WOLFE C R, MANES K R, et al. . Specification of optical components using power spectral density function [J]. SPIE, 1995, 2536: 38-50.
- [7] YOUNGWORTH R N, GALLAGHER B B, STAMPER B L. An overview of power spectral density (PSD) calculations [J]. SPIE, 2005, 5869: 58690U.
- [8] 杨飞, 安其昌, 张景旭. 基于功率谱的反射镜面形评价[J]. 中国光学, 2014, 7(1): 156-162.
YANG F, AN Q CH, ZHANG J X. Mirror surface figure evaluation based on power spectral density [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 156-162. (in Chinese)
- [9] WOLFE C R, DOWNIE J D, LAWSON J K. Measuring the spatial frequency transfer function of

- phase-measuring interferometers for laser optics [J]. *SPIE*, 1996, 2870:553-557.
- [10] AIKENS D M, WOLFE C R, LAWSON J K. The use of power spectral density (PSD) functions in specifying optics for the National Ignition Facility [J]. *SPIE*, 1995, 2576:281-292.
- [11] AIKENS D M. The origin and evolution of the optics specifications for the National Ignition Facility [J]. *SPIE*, 1995, 2536:2-12.
- [12] WOLFE C R, LAWSON J K. The measurement and analysis of wavefront structure from large aperture ICF optics [J]. *SPIE*, 1995, 2633: 361-385.
- [13] EVANS C J. PVr - a robust amplitude parameter for optical surface specification [J]. *Opt. Eng.*, 2009, 48(4): 043605.
- [14] LAWSON J K, AUERBACH J M, ENGLISH R E JR, *et al.*. NIF optical specifications-the importance of rms gradient [J]. *SPIE*, 1999, 3492: 336-343.
- [15] PUGH W N L, LOBB D R, WALKER D D, *et al.*. Williams, pupil-imaging wavefront gradient sensor [J]. *SPIE*, 1995, 2534: 312-317.
- [16] BARBERO S, RUBINSTEIN J, THIBOS L N. Wavefront sensing and reconstruction from gradient and Laplacian data measured with a Hartmann-Shack sensor [J]. *Opt. Letters*, 2009, 31(12): 1845-1847.
- [17] XUAN B, LI J F, WANG P, *et al.*. Supplemental optical specifications for imaging systems: parameters of phase gradient [J]. *Opt. Eng.*, 2009, 48(12): 123401.
- [18] YANG F, LIU G J, AN Q C, *et al.*. Method of evaluation of a mirror surface figure based on frequency and its application for the giant steerable science mirror of the thirty meter telescope [J]. *Chines Opt. Letters*, 2015, 13(4): 041201.
- [19] XU H Y, XIAN H, ZHANG Y D. Algorithm and experiment of whole-aperture wavefront reconstruction from annular subaperture Hartmann-Shack gradient data [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(13): 13431-13443.
- [20] MOCHI I, GOLDBERG K A. Modal wavefront reconstruction from its gradient [J]. *Appl. Opt.*, 2015, 54(12): 3780-3785.
- [21] YAMAZOE K, MOCHI I, GOLDBERG K A. Gradient descent algorithm applied to wavefront retrieval from through-focus images by an extreme ultraviolet microscope with partially coherent source [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2014, 31(12): B34-B43.
- [22] 林旭东, 王建立, 刘欣悦, 等. 拼接镜主动光学共相实验[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7): 1520-1528.
LIN X D, WANG J L, LIU X Y, *et al.*. Co-phase experiment of active optics for segmented-mirrors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1520-1528. (in Chinese)
- [23] 林旭东, 陈涛, 王建立, 等. 拼接镜主动光学共焦实验[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 563-569.
LIN X D, CHEN T, WANG J L, *et al.*. Co-focus experiment of segmented-mirrors for active optics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 563-569. (in Chinese)

作者简介:



宣 斌(1983-),男,江苏南通人,博士,副研究员,2010年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事高精度光学检测和光学加工方面的研究。E-mail: xbjst@sina.com