

一种新型PCB数字光刻投影成像技术

刘志涛 周金运 刘丽霞 郭华 邝健

广东工业大学物理与光电工程学院, 广东 广州 510006

摘要 为了满足微米量级印刷电路板(PCB)光刻的需求,提出了一种新型PCB数字光刻投影成像技术。利用ZEMAX光学设计软件设计并优化了双高斯结构型光刻投影物镜。该物镜具有双远心结构,可以避免数字微反射镜(DMD)偏转产生离焦,分辨率可达 $13.68\ \mu\text{m}$,数值孔径 $NA=0.045$,焦深为 $200\ \mu\text{m}$,严格控制像面畸变量小于 0.03% 。采用DMD多光束倾斜扫描技术,将DMD旋转一定的角度,利用曝光点的位置与光斑重叠积分能量的多少,形成更小的像素尺寸,提高了网格精度。基于该投影成像技术进行了光刻实验,实验结果证实了该投影成像技术的可行性,通过控制网格精度既能实现整数像素以外的线宽又能提高图像的分辨率和光刻效率。

关键词 光学设计;光刻;镜头设计;数字微反射镜;倾斜扫描;成像系统

中图分类号 TH702 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.042203

A New PCB Digital Lithograph Projection Imaging Technology

Liu Zhitao Zhou Jinyun Liu Lixia Guo Hua Kuang Jian

*School of Physics & Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology,
Guangzhou, Guangdong 510006, China*

Abstract For meeting the requirements of micron printed circuit board (PCB) lithography, a novel PCB projection imaging digital lithography technology which designs and optimizes the double Gauss type structural lithography projection lens based on ZEMAX optical design software has been proposed. The lens has double telecentric structure and can avoid defocus caused by digital micro-mirror device (DMD) deflection. Its resolution is $13.68\ \mu\text{m}$, numerical aperture NA is 0.045 , depth of focus is $200\ \mu\text{m}$ and image plane distortion is controlled strictly below 0.03% . The lens also uses DMD multi-beam inclined scanning technology, rotating DMD with fixed angle round and forming smaller pixel size by utilizing the position of exposure point and light spot overlap integral energy, which raises mesh precision; since this projection imaging technology is based on lithography experiments proving feasibility of the projection imaging technology, besides integer pixel, the non-integer pixel line width can be obtained and image resolution and production can also be improved by controlling mesh precision.

Key words optical design; lithography; lens design; digital micro-mirror device; inclined scanning; imaging system

OCIS codes 220.3740;220.3620

1 引言

随着印刷电路板(PCB)向大面积、高产量和产率、高密度的方向发展,激光投影光刻机被用于PCB的生产中^[1]。工业上生产PCB所使用的成像技术有接触成像、步进重复成像、激光直接成像和激光投影成像,而激光投影成像技术以它无与伦比的优势被广泛地应用,而且微米量级光刻设备越来越受到重视^[2-3]。针对大面积、高产量PCB生产,本课题组设计并优化得到了分辨率达到 $9\ \mu\text{m}$ 的折叠式光刻投影物镜^[4],之后进一步改进得到了分辨率优于 $7\ \mu\text{m}$ 且结构简单、有对称式双高斯结构的光刻投影物镜^[5-6]。

由于传统的掩模光刻需要昂贵的掩模成本且掩模制作缺乏灵活性,利用数字微反射镜(DMD)阵列代替

收稿日期: 2014-08-01; 收到修改稿日期: 2014-09-02; 网络出版日期: 2015-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(61475037)、国家自然科学基金青年科学基金(61107029, 11304044)

作者简介: 刘志涛(1988—),男,硕士研究生,主要从事数字光刻方面的研究。E-mail: 154168728@qq.com

导师简介: 周金运(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事工程光学方面的研究。E-mail: zhjy@gdut.edu.cn

(通信联系人)

传统的掩模板,能实现快速、高效、实时和低成本图形转移^[7-9]。DMD是目前唯一能用于快速且大批量光刻生产中的纯数字化空间光调制器,它的优点在于掩模图形的生产数字化,通过计算机编程控制一些特殊的空间光调制器(SLM)对入射光进行调制,因此是一种动态掩模。在国外DMD多光束倾斜扫描技术被用来实现更加精细及高密度的图形,其在成像光刻系统中增加了与DMD反射镜阵列对应的微透镜阵列^[10-12],但是微透镜阵列加工昂贵且整个光刻系统设备不易稳定。当一个个像素规则排列组成DMD芯片时,这些间隔就形成了规则的网状结构,这种结构称为像素栅格,这种栅格结构以及其产生的衍射会影响到最终的成像质量^[13]。本文提出了一种新型PCB数字光刻投影成像技术,为光刻设备节约了成本,提高系统的稳定性,消除了像素栅格对成像质量的影响。

2 数字光刻 1:1 投影物镜设计要点

2.1 结构参数

光刻系统的主要性能是由投影光刻物镜决定的,因此投影光刻物镜是光刻系统中的核心部件。该投影物镜采用对称的双高斯结构,它总共由 8 片镜片组成,前 4 片与后 4 片关于中心光阑对称,在加工时只需加工 4 个透镜的模具,这样既可以降低成本,又有利于光刻系统中透镜的装配。由于 DMD 工作时微镜总是处于物方倾斜和离焦状态,为了确保 DMD 微镜和基板的离焦不影响系统的成像倍率,在设计中采用双远心光路。本投影系统光刻物镜不要求达到亚微米级的光刻分辨率,而是满足 PCB 的线宽需求,并且保证掩模图形的转移质量,因此放大倍率为 -1.7。XGA 型 DMD 由 1024 pixel×768 pixel 组成,每个像素的尺寸为 13.68 μm×13.68 μm,DMD 整个尺寸为 14.008 mm×10.506 mm,且对角线为 17.205 mm。为了保证有效曝光视场内包含最多的点数,把投影物镜的物方视场确定为 $\Phi=17.6$ mm。

根据瑞利公式,成像系统的分辨率为

$$R = \frac{k_1 \lambda}{NA}, \quad (1)$$

式中 k_1 是工艺因子, λ 为波长, NA 为数值孔径。在本投影系统中如要达到较小分辨率,需要选择较短波长的光,而半导体激光器输出的光属于非相干光,且光强分布均匀,比传统高压汞灯式紫外光源节能 80% 以上,因此该投影系统的照明光源选用 405 nm 半导体激光器;且其带宽非常窄,只有几个纳米,所以可以忽略物镜的色差;由于采用的是完全对称的结构,所以畸变、慧差也自动消除。因此只需要校正像散、场曲、球差这三种像差。本系统中 k_1 取 0.78,根据瑞利公式计算可以得到满足要求的数值孔径 $NA = k_1 \lambda / R = 0.023$,而本投影物镜的数值孔径 $NA=0.045$ 能够充分保证最小特征线宽的要求。

2.2 光学模拟

将校正初级像差后的初始结构输入到 ZEMAX 工程光学设计软件内进行模拟设计和优化得到的投影物镜三维(3D)图如图 1 所示。



图 1 投影物镜三维图

Fig.1 3D layout of projection lens

本实例初始结构确定后,用均方根(RMS)像点尺寸优化函数、波前优化函数进行优化,控制所优化的变量为一定值或者在一个区间变化,且保证其他各参数满足设计要求。以曲率半径、光阑位置、空气间距、玻璃厚度为次序作为优化变量,不断进行优化,最后得到数值孔径为 0.045 且达到衍射极限的投影物镜。其基本结构镜头物像共轭距为 469.94 mm,其中物面到第一面的距离为 15.96 mm,曝光面直径 $\Phi=17.6$ mm。

关于光阑两侧对称的透镜使用的玻璃材料是相同的,有利于像差补偿相消,同时考虑其对 405 nm 激光的高透射率、低成本和材料的物理性能等,图 1 中透镜 1 和 3 选择 ZF13 型号玻璃,透镜 2 和 4 选择 K9 型号玻璃,右边与左边对称。

3 像质评价

设计优化后的的投影物镜,已经达到了衍射极限分辨率 13.68 μm,为了更好地了解该物镜的成像质量,

选取了物高为0、6、8.8 mm三个具有代表性的视场进行研究。

3.1 光学调制传递函数

光学调制传递函数(MTF)作为光学系统成像的评价标准,能直接、准确地分析光学系统的分辨率和焦深。从图2中的频率-MTF曲线图可以看出,空间频率为37 lp/mm处的调制传递函数值约为0.79,对于本设计系统用于PCB的投影物镜,要求MTF大于0.5,说明该投影物镜在特征线宽为13.68 μm 的成像具有很好的分辨能力。由图3所示的焦深-MTF图可以看出,焦深在-100~+100 μm 之间时,空间频率为37 lp/mm处的MTF大于0.7,一般光学调制传递函数是以0.4为最低标准的,所以该物镜的焦深为200 μm ,在该范围内均可实现13.68 μm 分辨率。

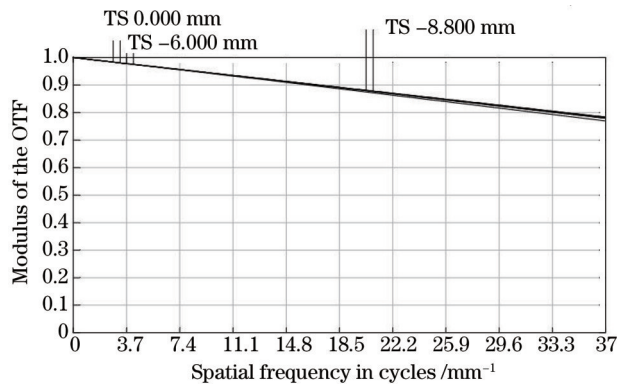


图2 空间频率-MTF图

Fig.2 Spacial frequency-MTF graph

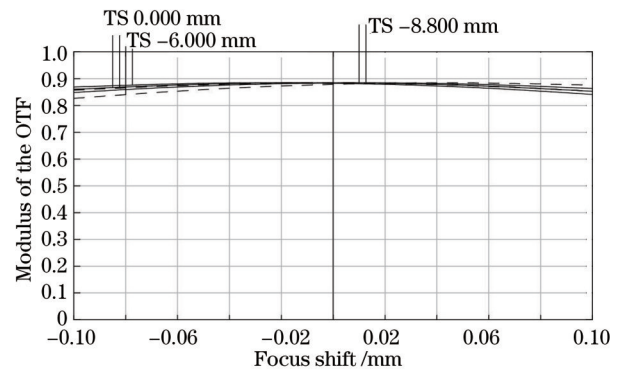


图3 焦深-MTF图

Fig.3 Focus shift-MTF graph

3.2 光程差

对于光学系统而言,投影曝光物镜具有衍射极限的成像质量,而光程差(OPD)能够全面地反应像面的成像质量。按照瑞利判据,整个视场内的最大光程差应该小于 $\lambda/4$,此时成像被认为是理想的。ZEMAX处理得到的各视场在出瞳面上的光程差图如图4所示,可以看到全视场内最大光程差小于 $\pm 0.2\lambda$,说明该投影物镜已经达到衍射极限。

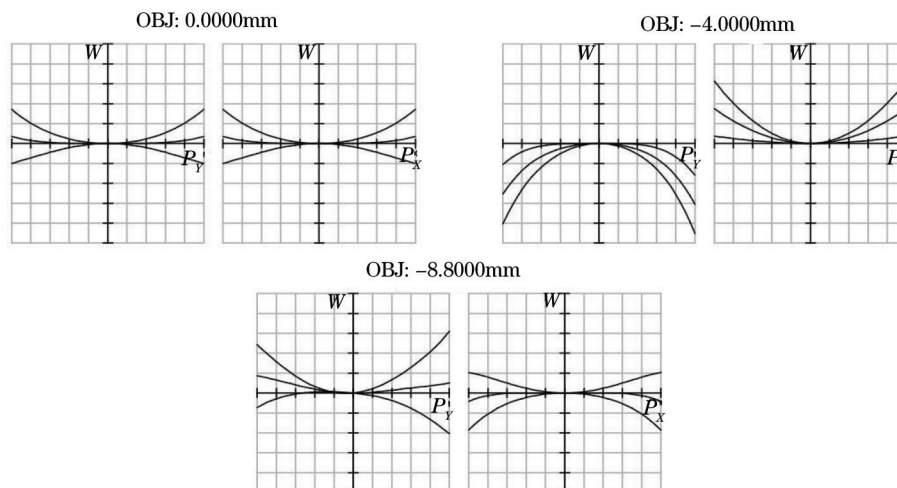


图4 光程差图

Fig.4 Optical path difference graph

3.3 场曲和畸变

光刻投影物镜对场曲和畸变都有严格的要求,因为场曲反应了整个像面的弯曲情况,畸变反应了整个像面的变形情况。太大的场曲会使视场边缘和视场中心不能成像在一个平面内,在像面上很难得到清晰的像,同样也会使PCB边缘或中心部分曝光不清晰。图5为该投影物镜的场曲与畸变图,由图5可以看出该投影物镜的场曲分布在0.08 mm以内,都在焦深以内,所以满足光刻投影物镜的场曲要求;光刻投影物镜对畸变的要求更高,由于采用了结构左右完全对称的形式,从畸变图可以看出,其设计结果仅存在少量畸变,最

大畸变小于0.05%,能够满足使用要求。

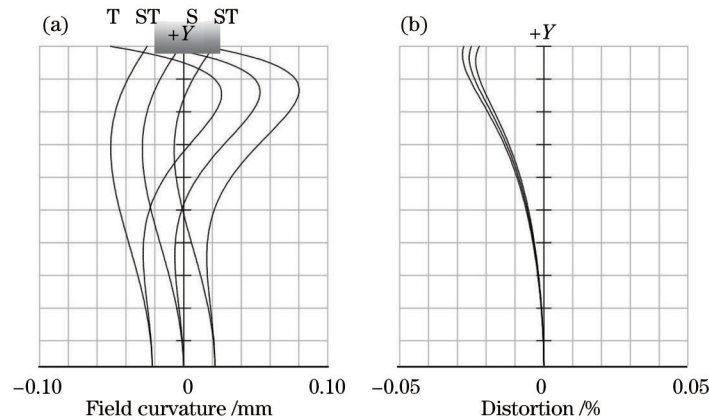


图5 (a) 场曲和 (b) 畸变图

Fig.5 (a) Field curvature and (b) distortion

4 DMD 多光束倾斜扫描技术

DMD由许多微小镀铝的镜子组成,每一个微镜可以看作为一个像素。这些镜片可以绕轴旋转 12° ,镜片在不同的旋转角度下能将射入的光反射到不同的地方。投影曝光系统中激光经扩束、均束、准直后射入到DMD,它根据光刻图像数据分别旋转到不同位置,当镜片旋转 12° 时,射入的激光将被反射到物镜镜头上,经过物镜对图像成像后投影到连续扫描平台的曝光面上。实际上,DMD上一块微镜的尺寸乘以物镜的缩放比就是投影到曝光面上图像的一个像素的尺寸。

在扫描曝光中,连续扫描平台做匀速运动,依靠不断移动微镜DMD来显示图像,由于DMD安装固定,显示图像的移动是采用不断调整微镜DMD显示的图像实现的。而本投影系统的放大倍率为 -1 ,以像素整数倍计算,DMD通过物镜投影到曝光面上图像的一个像素线宽是 $13.68\ \mu\text{m}$, N 个像素线宽是 $N \times 13.68\ \mu\text{m}$ 。如果在扫描时DMD没有倾斜一定的角度,则本系统只能实现整像素线宽,而实际投影的像素大小、DMD图像更新速度都会影响曝光速度,当DMD图像更新速度一定时,实际投影的像素越大,曝光速度越快。但实际投影的像素大小又与图像的分辨率有关,像素的网格加大将降低图像的分辨率。因此需要一种扫描方式,它既能实现整像素以外的线宽,提高网格精度(非整像素线宽),又能提高图像的分辨率。

倾斜式扫描是将DMD旋转一定的角度,利用曝光点的位置与光斑重叠积分能量的多少,形成更小的像素尺寸,这样可以在增大像素大小的前提下来提高曝光速度。而由倾斜扫描引起的像素重叠图像的网格精度由DMD的旋转角控制,DMD倾斜旋转和重叠投影如图6和图7所示,从图中得出在水平方向的网格精度为

$$x = d \sin \theta, \quad (2)$$

式中 θ 为DMD的倾斜角度, d 为初始网格精度,可以看出旋转角度越小则网格精度越高,可以实现的图像分辨率也越高。因此只要使DMD倾斜一定的角度就可以实现介于整像素线宽之间的非整像素线宽。它原来

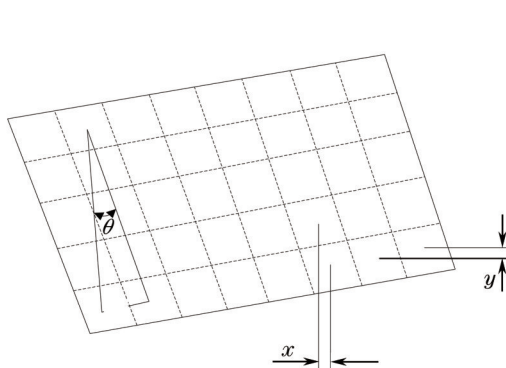


图6 DMD倾斜旋转图

Fig.6 Tilted DMD rotation diagram

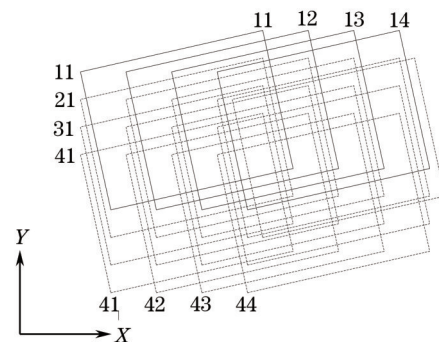


图7 DMD重叠投影图

Fig.7 DMD overlapped projection diagram

的网格精度是 $13.68 \mu\text{m}$, 倾斜后, 网格精度为 $x = 13.68 \times \sin \theta$ 。垂直方向网格精度为

$$y = \frac{v}{f}, \quad (3)$$

式中 v 是平台在 Y 方向的匀速移动速率, f 为 DMD 图像刷新频率。在倾斜的工作方式下前后两帧的相关性降低, 同时要求图像更小的网格精度。

5 实验结果

图 8 为由本光刻投影物镜结合 DMD 倾斜扫描技术曝光的结果。限于实验只是曝光阶段, 尚未显影和蚀刻, 在 PS 基板上涂有 ResoPower Mu-315 光刻胶, 这是一种普通的干膜光刻胶。经过曝光 20 s、显影 60 s 后, 用显微镜观察采集图片。图 8 分别为 $22.2 \mu\text{m}$ 和 $23.6 \mu\text{m}$ 非整像素线宽, 从图中可以看出, 和其他方法用于该精度的曝光情形相比, 像面照度均匀, 线条清晰, 边缘陡峭且线性度好, 因而能很好地满足光刻的需要。

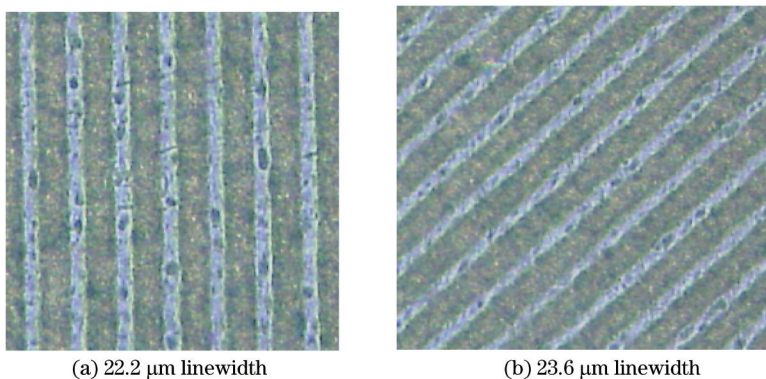


图 8 数字光刻实验结果

Fig.8 Experimental results of digital

6 结 论

介绍了一种用于 PCB 光刻的新型数字光刻投影成像技术。DMD 数字光刻显示出灵活、快速、高效、低成本等优点。用 ZEMAX 光学设计软件设计并优化了一种不同于以往的 PCB 投影物镜, 此投影物镜结构简单, 较易加工和装配, 因此能降低制造成本, 其分辨率可以达到 $13.68 \mu\text{m}$, 曝光面积直径 $\phi = 17.6 \text{mm}$ 。利用此投影物镜及 DMD 多光束倾斜扫描技术得到了线宽为 $22.2 \mu\text{m}$ 和 $23.6 \mu\text{m}$ 的图形, 获得了较好的图形成像质量和光刻效果。本光刻系统较稳定, 可以满足微米级光刻的需求。

参 考 文 献

- 1 Jain, Dunn T J, Black P P. High-speed, high-resolution large-area exposure system for PCB patterning [J]. Printed Circuit Fabrication, 1997, 20(5): 34-36.
- 2 Jain K, Zemel M, Klosner M. Large-area high-resolution lithography and photoablation systems for microelectronics and optoelectronics fabrication [J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(10): 1681-1688.
- 3 Ran Zuo, Zhou Jinyun, Lei Liang, *et al.*. A new zooming method for projection imaging lithography [J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(3): 430-435.
冉 坐, 周金运, 雷 亮, 等. 一种新型投影曝光调焦方法 [J]. 应用光学, 2013, 34(3): 430-435.
- 4 Li Wenjing, Zhou Jinyun, Lin Qinghua. Design of fold laser projection lithography lens [J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(9): 46-49.
李文静, 周金运, 林清华. 折叠式激光投影光刻物镜的设计研究 [J]. 光电工程, 2007, 34(9): 46-49.
- 5 Deng Yafei, Zhou Jinyun, Lei Liang, *et al.*. Novel projection lens design for large-area PCB lithography [J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 42(2): 100-104.
邓亚飞, 周金运, 雷 亮, 等. 新型大面积 PCB 光刻投影物镜设计 [J]. 光电工程, 2013, 40(2): 100-104.
- 6 Cai Yanmin, Wang Xiangzhao, Huang Huijie. Optical design of lithography projective lens with variable total track [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0416003.

- 蔡燕民, 王向朝, 黄惠杰. 共轭距可变的光刻投影物镜光学设计[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0416003.
- 7 Yao Yuan, Wang Dejiang, Xu Zhengping, *et al.*. Design of target simulator based on DMD for infrared imaging guided system [J]. *Laser& Optoelectronics Progress*, 2013, 50(7): 072302.
- 姚 园, 王德江, 徐正平, 等. 基于 DMD 的红外成像制导目标模拟器研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(7): 072302.
- 8 Wang Zhanliang, Hang Yongan, Qian Xiaofan, *et al.*. The research of real-time observation of temperature field by using digital holography and DMD [J]. *Laser Journal*, 2009, 30(6): 36-38.
- 王占亮, 张永安, 钱晓凡, 等. 利用数字全息和 DMD 实时观察温度场的研究[J]. 激光杂志, 2009, 30(6): 36-38.
- 9 Li Dan, Xue Yunyun, Cao Wen, *et al.*. Optimization of DMD illumination system with microlens array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0122002.
- 李 丹, 薛芸芸, 曹 雯, 等. 基于微透镜阵列的 DMD 芯片投影系统照明优化[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0122002.
- 10 Mei W. Point Array Maskless Lithography: US, 6473237B2 [P]. 2002-10-29.
- 11 Chan K F, Feng Z, Yang R, *et al.*. High-resolution maskless lithography [J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2003, 2(4): 331-339.
- 12 Xu Zhengping. Application of digital micromirror device in photoelectric equipment [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(5): 051103.
- 徐正平. 数字微镜器件在光电设备中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 051103.
- 13 Guo Xiaowei, Du Jinglei, Chen Mingyong, *et al.*. Removal of pixel structures by optimizing the parameters of imaging system in digital photolithography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(3): 462-466.
- 郭小伟, 杜惊雷, 陈铭勇, 等. 消除数字光刻像素栅格衍射影响的研究[J]. 光子学报, 2007, 36(3): 462-466.

栏目编辑: 史 敏