

DOI: 10.3901/JME.2013.04.025

# 基于光度立体学的金属板带表面 微小缺陷在线检测方法\*

徐科 周鹏 杨朝霖

(北京科技大学高效轧制国家工程研究中心 北京 100083)

**摘要:** 高品质金属板带对于表面质量的要求非常严格,不允许存在一些微小的缺陷,现有的基于机器视觉的表面在线检测系统很难检测到微小缺陷。采用光度立体学的原理,利用两幅不同光照角度的灰度图像获得表面法向的方法检测表面微小缺陷。彩色三线阵电荷耦合元件(Charge-coupled device, CCD)摄像机安装在垂直于金属板带方向上,一台红光光源和一台蓝光光源对称安装在摄像机两侧。摄像机采集到的彩色图像可分离出 R、G、B 通道图像,其中 R、B 通道图像分别为红色、蓝色光源的反射光图像。表面倾角法可通过 R、B 通道图像计算表面倾角分布图,并根据表面倾角分布图检测微小缺陷。通过试验验证该方法可检测直径为 0.1 mm 的孔洞。讨论在一套检测装置中实现微小缺陷与常规缺陷同步检测的方案。在红光、蓝光两种光源基础上增加一台绿光光源,与摄像机形成介于明暗场的照明方式,可通过摄像机分离出的 G 通道图像检测金属板带表面的常规缺陷。

**关键词:** 金属板带 表面缺陷 表面检测 光度立体学

**中图分类号:** TH741

## On-line Detection Technique of Tiny Surface Defects for Metal Plates and Strips Based on Photometric Stereo

XU Ke ZHOU Peng YANG Chaolin

(National Engineering Research Center for Advanced Rolling Technology,  
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

**Abstract:** Requirement of surface quality for high-quality metal plates and strips is very strict, and tiny defect is not allowed on the surface. Existing surface inspection systems based on machine vision are difficult to detect tiny defects. Photometric stereo is applied to detect tiny surface defects with surface normal calculated from two gray images under different illumination angles. One color camera with triple line-scan charge-coupled device(CCD) is mounted perpendicular to the surface of the metal. One red lighting and one blue lighting are mounted symmetrically on both sides of the camera. Three channels of gray image including red, green, blue are separated from the color image captured by the camera, and red, blue channel gray images represent reflected lights of the red lighting and the blue light. The distribution map of surface slope angles is calculated from red and blue channel gray images with the developed algorithm. Tiny defects can be detected from the distribution map of surface slope angles. Experiments showed that pinholes with the diameter less than 0.1 mm can be detected. The scheme of detection normal defects and tiny defects with one apparatus is discussed. One green lighting is added, and mounted to the camera at the position between bright-field illumination and dark-field illumination. Normal defects can be detected from the green channel gray image of the camera which represents reflected lights of the green lighting.

**Key words:** Metal plate and strip Surface defect Surface inspection Photometric stereo

\* “十二五”国家科技支撑计划(2012BAB19B06)、中央高校基本科研业务费专项资金(FRF-TP-09-027B)资助项目。20120802 收到初稿, 20121227 收到修改稿

## 0 前言

表面缺陷是影响金属板带质量的一个重要因素,尤其对于高品质金属板带,如汽车板、家电板、不锈钢等,对于表面质量的要求非常严格。表面在线检测技术可在线检测金属板带表面缺陷,是控制金属板带表面质量的重要途径。目前,基于机器视觉的表面在线检测系统是表面在线检测的主流,照明方式是该系统的关键,它直接影响到缺陷在图像中的对比度。表面检测技术中常用的照明方式有两种<sup>[1]</sup>,一种是明场照明,一种是暗场照明。图1a是明场照明方式,摄像机放置在反射光的光路上。如果金属中表面没有缺陷,反射光的光强应该是分布均匀的。如果表面有缺陷,反射光的光强在缺陷区域就会发生变化,通过图像中灰度的变化情况可检测缺陷区域。图1b是暗场照明方式,摄像机没有放置在反射光的光路上。如果金属板带表面是绝对光滑的,那么摄像机就采集不到反射光。如果表面上有三维缺陷(凹凸性的缺陷),就会在缺陷区域造成漫反射,摄像机就可以采集到漫反射光,因此暗场照明方式可检测三维缺陷。

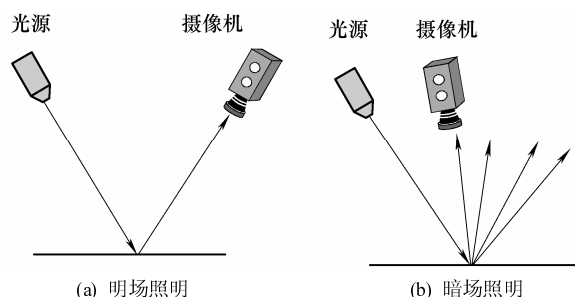


图1 照明方式

明场照明和暗场照明的原理来源于镜面反射,由于一般的金属板带不是严格的镜面,因此,在实际应用中,往往把两种照明方式结合起来使用<sup>[2]</sup>。为了减少设备数量,降低系统成本,也可以采用介于明场照明与暗场照明的方式<sup>[3]</sup>,如图2所示。与图1相比,图2中摄像机所在的角度介于明场照明与暗场照明之间,在这种角度下,系统可以同时检测到明场照明和暗场照明下的缺陷,在不增加设备的情况下,达到检测多种缺陷类型的目的。

图1、2所示的明场照明、暗场照明和介于明暗场照明的方式对于微小缺陷的检出能力不足<sup>[4]</sup>。为了提高微小缺陷的检出能力,需要提高摄像机的分辨率,这样会增加设备成本,而且由于摄像机分辨率增加会造成数据量的增加,从而对系统的数据处理能力提出更高的要求。

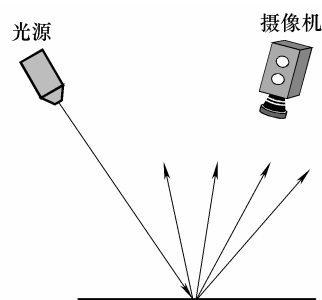


图2 介于明暗场的照明方式

光度立体学最早是由WOODHAM<sup>[5]</sup>提出的,采用一个摄像机和几个发光强度相同的光源,保持摄像机和所拍摄的物体不动,通过改变光源的方向,同时拍摄物体在不同光源照射条件下的一组图像,然后根据这些图像计算出物体的表面法向,由计算出的表面法向求解出物体表面的三维形状。试验表明<sup>[6-7]</sup>,利用两幅具有不同光照几何特性的灰度图像来获得表面法向,利用三幅图像就可以获得一个漫反射表面的表面法向和反射率。

本文采用两幅不同光照的灰度图像获得表面法向的方法,通过红、蓝两种不同光源与彩色线阵电荷耦合元件(Charge-coupled device, CCD)摄像机的组合,获取金属板带表面倾角的分布,并通过表面倾角分布图检测微小缺陷。

## 1 检测原理

图3中,摄像机放置在垂直于金属板带表面上方。光源1放置在摄像机与金属板带运行方向相同的一侧,其入射角为 $\alpha$ 。光源2放置在摄像机与金属板带运行方向相反的一侧,其入射角也为 $\alpha$ 。光源2与光源1的发光强度相等,并且距离金属板带表面的高度也相等。光源1、光源2发射的光照射到金属板带4的同一区域,摄像机3采集该区域的图像。

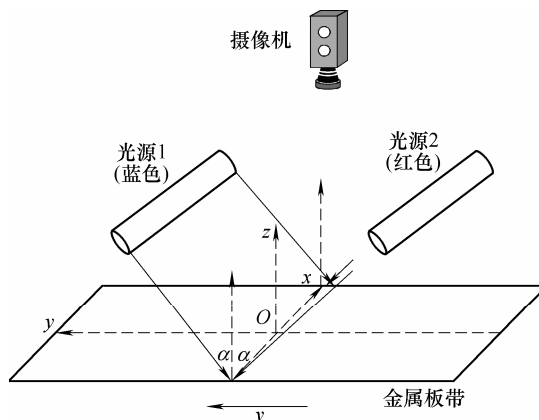


图3 检测示意图

根据光度立体学原理, 对于发光强度为  $I$  的光源, 其反射光的光亮度为<sup>[9]</sup>

$$L = I\xi \cos \theta \quad (1)$$

式中,  $\xi$  为表面反射率,  $\theta$  为光源与表面法线间的夹角。令  $\mathbf{s}$  为光源入射方向的单位矢量,  $\mathbf{n}$  为表面法线的单位矢量, 则式(1)可表示为

$$L = I\xi \frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{n}}{|\mathbf{s}| |\mathbf{n}|} \quad (2)$$

令

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}(x, y) \quad (3)$$

$$q = \frac{\partial z}{\partial y}(x, y) \quad (4)$$

则

$$L = I\xi(S_{1x}p + S_{1y}q - S_{1z}) / \sqrt{p^2 + q^2 + 1} \quad (5)$$

对于光源 1, 有

$$L_1 = I_1\xi(S_{1x}p + S_{1y}q - S_{1z}) / \sqrt{p^2 + q^2 + 1} \quad (6)$$

对于光源 2, 有

$$L_2 = I_2\xi(S_{2x}p + S_{2y}q - S_{2z}) / \sqrt{p^2 + q^2 + 1} \quad (7)$$

由于光源 1、光源 2 为条形光源, 并且在  $x$  方向上光强相等, 所以  $S_{1x} = S_{2x} = 0$ 。并且根据图 1, 由于光源 1 和光源 2 距离金属板带表面的高度相等, 因此有  $S_{1z} = S_{2z} = S_z$ 。由于光源 1 和光源 2 的入射角相同, 分别位于表面法线两侧, 因此有  $S_{1y} = -S_{2y} = S_y$ , 代入式(6)和式(7), 有

$$L_1 = I_1\xi(S_yq - S_z) / \sqrt{p^2 + q^2 + 1} \quad (8)$$

$$L_2 = I_2\xi(-S_yq - S_z) / \sqrt{p^2 + q^2 + 1} \quad (9)$$

将式(8)与式(9)相除, 并根据  $I_1 = I_2$  得

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{S_z - S_yq}{S_z + S_yq} \quad (10)$$

由式(10)可得

$$q = \frac{S_z(L_2 - L_1)}{S_y(L_2 + L_1)} \quad (11)$$

因为  $S_z/S_y = \cot \alpha$ , 所以式(11)为

$$q = \cot \alpha \frac{L_2 - L_1}{L_2 + L_1} \quad (12)$$

根据式(4)得

$$q = \tan \gamma \quad (13)$$

式中,  $\gamma$  为表面的倾角。由式(12)和式(13)可得

$$\gamma = \arctan \left( \cot \alpha \frac{L_2 - L_1}{L_2 + L_1} \right) \quad (14)$$

由于  $\cot \alpha$  为一常数, 因此式(14)可简化为

$$\gamma' = \arctan \left( \frac{L_2 - L_1}{L_2 + L_1} \right) \quad (15)$$

根据式(15)可得表面倾角的变化情况。由于表面缺陷造成了表面倾角的变化, 因此, 可通过表面倾角的变化检测表面缺陷, 尤其是表面的微小缺陷<sup>[9]</sup>。

式(15)中,  $L_1$  和  $L_2$  分别是在光源 1 和光源 2 单独照明时的反射光亮度, 可以通过摄像机采集到的图像灰度表示。对于静止物体, 可分别采用打开光源 1 和关闭光源 2 以及打开光源 2 和关闭光源 1 的方式得到  $L_1$  和  $L_2$ , 这样,  $L_1$  和  $L_2$  是在不同时刻得到的, 但是由于物体静止, 因此  $L_1$  和  $L_2$  对应的是物体的同一区域。对于运动物体, 如果采用上述方式, 得到的  $L_1$  和  $L_2$  对应的是物体的不同区域, 这样式(15)就不成立了。

本文采用不同波长光源同步照明的方式解决上述的问题<sup>[10]</sup>。光源 1 和光源 2 分别发射红色波长和蓝色波长的光, 摄像机选用彩色三线阵 CCD 摄像机, 具有 R、G、B 三种像元, 分别对红、绿、蓝三种波长的光线敏感, 可将采集到的图像分成 R、G、B 三个通道, 分别对应不同光源的反射光亮度。从摄像机采集到的彩色图像中分离出 R 通道和 B 通道图像, 就是式(15)的  $L_1$  和  $L_2$ 。由于  $L_1$  和  $L_2$  是同一时刻采集的, 对应的是金属板带表面同一区域, 因此, 式(15)可用于运动状态下金属板带的表面缺陷检测。

## 2 缺陷检测试验

图 3 中, 光源 1 选用波长为  $0.44 \mu\text{m}$  的蓝色 LED 线光源, 光源 2 选用波长为  $0.63 \mu\text{m}$  的红色 LED 线光源, 光源 1 与光源 2 的入射角都为  $45^\circ$ 。摄像机选用加拿大 DALSA 公司的 PC-30-04K60 型彩色三线阵 CCD 摄像机, 分辨率为 4 096 像素, 最大采集速度为 12 000 行/s。该摄像机像元的行间距为  $30 \mu\text{m}$ , 仅为像元尺寸的 3 倍, 尽可能减小了空间误差, 能够对高速运动的物体进行高质量成像。

图 3 中的金属板带为铝板, 在铝板上制作了大小不同的两种孔洞, 大孔洞的直径为  $0.5 \text{ mm}$ , 小孔洞的直径为  $0.2 \text{ mm}$ 。将摄像机与光源 1、光源 2 按图 3 所示安装在试验平台上, 调节摄像机的高度, 使摄像机的采集宽度为  $410 \text{ mm}$ , 此时摄像机每个像素代表的物理尺寸为  $410/4096 = 0.1 \text{ mm}$ , 即摄像机在铝带宽度方向上的采集精度为  $0.1 \text{ mm/行}$ 。打开光源 1 和光源 2, 调节光源 1 和光源 2 的亮度, 使它们相等。铝板以  $1 \text{ m/s}$  的速度在试验平台上水平往复运动, 摄像机以  $10000 \text{ 行/s}$  的速度采集图像, 因此摄像机在铝带运行方向上的采集精度为  $1 \text{ m/s} \div 10000 \text{ 行/s} = 1 \times 10^{-4} \text{ m/行} = 0.1 \text{ mm/行}$ 。摄

像机采集的图像在铝板宽度与运行方向(长度方向)上的精度相等,保证了图像不变形。

将摄像机采集到的彩色图像分离出 R、B 通道图像,这两个通道的图像分别为光源 1 和光源 2 的反射光图像。图 4a~4d 分别为 R 通道的大孔洞图像、B 通道的大孔洞图像、R 通道的小孔洞图像、B 通道的小孔洞图像。

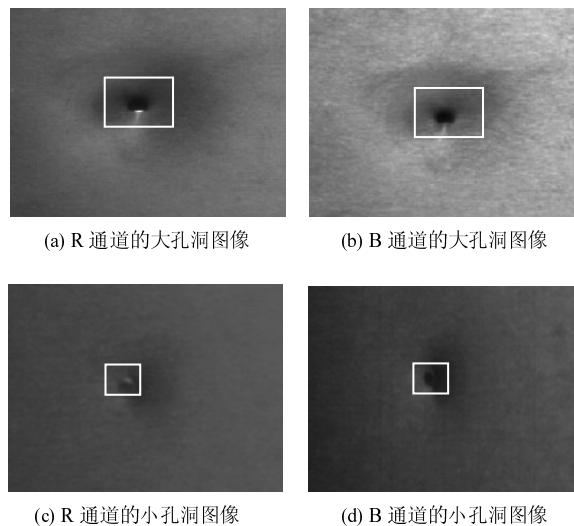


图4 摄像机采集到的 R、B 通道图像

图 4 中白色区域为孔洞区域。由图 4 可以看出,大孔洞的分辨率和对比度比较高,从图 4 上很容易检测到,而小孔洞的分辨率和对比度很低,从图 4 上很难检测到。这也就说明,对于 0.2 mm 的缺陷,即使在 0.1 mm 的精度下,也很难从图像中被检测到。

图 5 为根据式(15)计算得到的表面倾角分布图,图 5 中白色方框区域为检测到的针孔区域,从图 5 中可以很明显检测到这一区域。

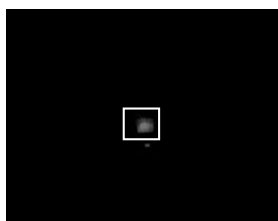


图5 表面倾角分布图

### 3 讨论

上述方法的原理是通过表面倾角分布图检测金属板带表面微小缺陷,对于一些斑类的二维缺陷,如锈斑、乳化液斑、黑斑等缺陷,由于这些缺陷没有造成表面倾角的变化,因此难以用上述方法加以检测。这类二维缺陷以及面积大的缺陷统称为常规缺陷,可通过图 2 所示的介于明暗场的照明方式检

测。表面检测系统既需要检测常规缺陷,也需要检测微小缺陷,如果用不同的摄像机检测常规缺陷和微小缺陷,不仅增加摄像机的数量和系统成本,而且由于不同摄像机检测的区域不同,难以将不同摄像机采集到的缺陷进行合并统计。如果能通过一台摄像机采集到的图像同时检测常规缺陷与微小缺陷,则可以解决上述问题。

摄像机采集到的图像可分离出 R、G、B 三个通道图像,前面介绍了通过 R、B 通道图像检测微小缺陷,剩下的 G 通道图像可用来检测常规缺陷。在图 3 中增加光源 3,如图 6 所示。

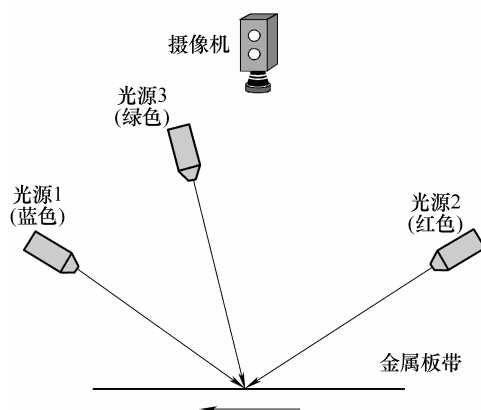


图6 微小缺陷与常规缺陷同步检测装置

光源 3 采用绿色 LED 线光源,其入射角较小,为  $0^\circ \sim 15^\circ$ 。光源 1、光源 2、光源 3 照射到金属板带的同一区域,也就是摄像机的采集区域。光源 3 与摄像机形成了介于明暗场照明的方式,摄像机采集到的 G 通道图像为介于明暗场方式得到的金属板带表面灰度图,可通过现有的算法检测常规缺陷。

图 7 为图 6 所示检测装置的算法流程图。从摄像机采集到的彩色图像分离出 R 通道图像  $L_1$ 、B 通道图像  $L_2$  和 G 通道图像  $L_3$ 。对  $L_1$  和  $L_2$  用式(15)计算表面倾角分布图,根据表面倾角分布图检测表面微小缺陷。对  $L_3$  用现有的算法检测表面常规缺陷。由于  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  对应的是金属板带的同一区域,根据检测到的缺陷所在坐标即可判断缺陷是否重复,通过缺陷的合并去除重复的缺陷,得到金属板带表面缺陷的准确统计。

在图 7 所示的算法流程中,虽然在检测常规缺陷的基础上,增加了两幅灰度图像用以检测微小缺陷,数据量为常规缺陷检测的 3 倍,但是由于微小缺陷的检测仅通过表面倾角分布图实现,而表面倾角分布图的计算方法很简单,因此,整个算法流程所需的时间并没有太多增加。而且,常规缺陷检测与微小缺陷检测算法可在中央处理器的两个线程中完成,可以用并行处理的方式实现,因此,图 7 所

示的算法流程完全能以实时方式完成, 保证系统的在线检测能力。

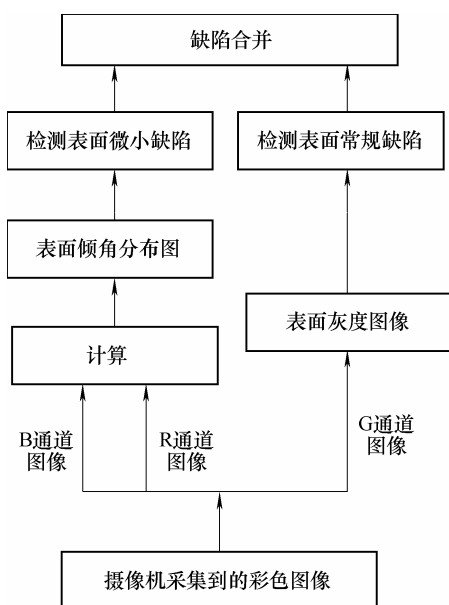


图 7 缺陷检测算法流程

## 4 结论

本文采用光度立体学的原理设计一种金属板带表面微小缺陷的检测方法, 并用一台摄像机实现常规缺陷与微小缺陷的同步检测。

(1) 通过红、蓝两种不同颜色的光源与彩色三线阵 CCD 摄像机的组合, 可在不增加摄像机分辨率的基础上实现微小缺陷的检测。

(2) 从摄像机采集到的彩色图像中可分离出 R、G、B 通道灰度图像, 其中 R、B 通道图像为红、蓝光源反射光图像, 通过 R、B 通道图像可计算表面倾角的分布, 通过表面倾角分布图检测微小缺陷。

(3) 在上述微小缺陷检测的基础上, 增加一台绿色光源, 与摄像机形成介于明暗场照明方式, 摄像机的 G 通道图像为绿色光源反射光图像, 通过该图像可检测常规缺陷, 从而实现常规缺陷与微小缺陷的同步检测。

本文提出的金属板带表面微小缺陷检测方法以及用一台摄像机实现常规缺陷与微小缺陷同步检测的算法简单、易实现, 具有很高的推广价值。

## 参 考 文 献

- [1] XU Ke, XU Jinwu, LU Shouli. Surface inspection system for cold rolled strips based on image processing technique[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 1999, 6(4): 296-298.
- [2] 魏玉兰, 颜云辉, 李兵, 等. 结合邻域信息的带钢表面

明暗域缺陷图像配准[J]. 东北大学学报, 2010, 31(11): 1619-1622.

WEI Yulan, YAN Yunhui, LI Bing, et al. Strip steel surface bright/dark field defect image registration combined with neighborhood information[J]. Journal of Northeastern University, 2010, 31(11): 1619-1622.

- [3] 杨水山, 何永辉, 王振龙, 等. 带钢视觉检测系统的研究现状及展望[J]. 冶金自动化, 2008, 32(2): 5-9.

YANG Shuishan, HE Yonghui, WANG Zhenlong, et al. Development and perspective of automatic strip surface inspection system based on machine vision[J]. Metallurgical Industry Automation, 2008, 32(2): 5-9.

- [4] 夏承亮, 李成贵, 熊昌友. 板材表面质量在线检测方法概述[J]. 工业计量, 2010, 20(1): 1-5.

XIA Chengliang, LI Chenggui, XIONG Changyou. Summary of the online test methods of surface finish for rolled steel plates[J]. Industrial Measurement, 2010, 20(1): 1-5.

- [5] WOODHAM R J. Photometric method for determining surface orientation from multiple images[J]. Optical Engineering, 1980, 19(1): 139-144.

- [6] 徐庆相. 基于光度立体视觉的表面精细特征三维重建技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.

XU Qingxiang. Research on 3D reconstruction of detailed features based on photometric stereo[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011.

- [7] CARLOS H, GEORGE V, ROBERTO C. Multiview photometric stereo[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(3): 548-554.

- [8] ABDUL R F, MELVYN L S, LYNDON N S, et al. Dynamic photometric stereo for on line quality control of ceramic tiles[J]. Computers in Industry, 2005, 56: 918-934.

- [9] MELVYN L S, LYNDON N S. Dynamic photometric stereo-a new technique for moving surface analysis[J]. Image and Vision Computing, 2005, 23: 841-852.

- [10] BRINGIER B, HELBERT D, KHOUDEIR M. Photometric reconstruction of a dynamic textured surface from just one color image acquisition[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2008, 25(30): 566-574.

作者简介: 徐科(通信作者), 男, 1972 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为表面检测与机器视觉。

E-mail: xuke@ustb.edu.cn

周鹏, 男, 1981 年出生, 博士研究生。主要研究方向为表面检测与机器视觉。

E-mail: zhoupeng@necar.ustb.edu.cn