

# 三维激光扫描仪油膜粗糙度检测\* Detection of Oil Film Roughness of 3D Laser Scanner

岳瀚森<sup>1</sup>, 过杰<sup>2\*\*</sup>, 牟彦恺<sup>2,3</sup>, 张天龙<sup>2,3</sup>

YUE Hansen<sup>1</sup>, GUO Jie<sup>2</sup>, MU Yankai<sup>2,3</sup>, ZHANG Tianlong<sup>2,3</sup>

(1. 烟台市第二中学, 山东烟台 264000; 2. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东省海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东烟台 264003; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

(1. Yantai No. 2 Middle School, Yantai, Shandong, 264000, China; 2. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong, 264003, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

**摘要:**【目的】观测水面油膜粗糙度, 以进一步研究水面油膜对后向散射的影响, 提高微波监测水面溢油的精度。【方法】采用三维激光扫描仪观测激光垂直扫描油面获得测距数据, 多次测量求平均值后再求其均方根误差以实现油膜粗糙度的观测。【结果】随着含水率的增加, 原油张力和粘度逐渐增大, 当温度为 20~33℃ 时, 其乳化饱和含水率不大于 21%, 在理想状态下的原油乳化制备过程中, 油膜粗糙度与含水率基本呈余弦关系。三维激光扫描仪可在 0~6 m/s 风速下观测油膜厚度 > 0.005 mm 的油面粗糙度。【结论】采用三维激光扫描仪观测油膜粗糙度是可行的。

**关键词:** 油膜粗糙度 三维激光扫描仪 乳化 含水率

**中图分类号:** P76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-7378(2017)04-0298-05

**Abstract:**【Objective】The roughness of the oil film is observed to further study the influence of the surface oil film on the back scattering and to improve the accuracy of microwave monitoring of oil spill.【Methods】The laser vertical scanning on the surface of oil are observed by 3D laser scanner to obtain the measurement data. The average value of multiple measurements is evaluated and then the root mean square error is obtained to realize the observation of the oil film roughness.【Results】With the increase of moisture content, the tension and viscosity of crude oil gradually increase. When the temperature is 20℃ to 33℃, the saturated moisture content of emulsified oil is not more than 21%. In the ideal state of the crude oil emulsion preparation process, the oil film roughness and moisture content are basically co-

sine relation. The 3D laser scanner can observe the oil surface roughness > 0.005 mm at 0~6 m/s wind speed.【Conclusion】It is feasible to observe the oil film roughness using 3D laser scanner.

**Key words:** oil film roughness, 3D laser scanner, emulsification, moisture content

收稿日期: 2017-08-10

修回日期: 2017-10-15

作者简介: 岳瀚森(2000—), 男, 高中生, 主要从事仪器方位设置研究。

\* 国家自然科学基金面上基金项目“基于二维激光观测的溢油及其乳化过程散射模式研究”(41576032)和中国科学院国际合作局对外合作重点项目“海上溢油探测及其生态影响研究”(133337KYSB20160002)资助。

\*\* 通信作者: 过杰(1965—), 女, 副研究员, 主要从事海洋遥感与数值模拟研究, E-mail: jguo@yic.ac.cn.

## 0 引言

**【研究意义】**随着经济的快速发展,全球对石油的需求越来越大,石油已成为各个国家经济发展的主要支撑因素之一。我国已从石油出口国转为石油进口国,石油进口数量不断上升,而海上运输是我国石油进口的主要途径。目前,中国海上石油运量仅次于美国和日本,居世界第三位,中国港口石油吞吐量正以每年1 000余万t的速度增长。随着运输量和船舶密度的增加,我国发生灾难性船舶事故的风险逐渐增大,中国海域可能是未来船舶溢油事故的多发区和重灾区。海上石油开采与运输业的迅速崛起,使得水上运输如火如荼,伴随而来的是日益突出的海上航行安全问题:船舶压舱水肆意排放,船舶碰撞和沉没导致的原油泄漏造成的污染,以及石油平台开采的溢油事故等。据统计,1970—2009年全球共发生700 t以上的油轮溢油事故458起,1976—2010年我国沿海共发生大小船舶溢油事故3 115起,平均每4 d发生一起,1973—2010年共发生50 t以上的重大溢油事故82起<sup>[1]</sup>。2010年发生的大连输油管道爆炸事件使大量石油输入海洋,导致大连湾、大窑湾和小窑湾等局部海域受到严重污染,对泊石湾、金石滩和棒槌岛等十余个海水浴场和滨海旅游景区,三山岛海珍品资源增殖自然保护区、老偏岛-玉皇顶海洋生态自然保护区和金石滩海滨地貌自然保护区等敏感海洋功能区产生了巨大的影响<sup>[2]</sup>。2011年6月渤海蓬莱19-3油田溢油,溢油量约2 500桶,污染海域面积约为6 200 km<sup>2</sup>,造成了巨大的生态灾难<sup>[3]</sup>。除油类污染事故外,其它船舶载运的污染危害货物泄漏入海也会对海洋环境造成严重危害,直接影响到人民生命财产安全和社会稳定。如何准确监测水面溢油,为海上溢油应急提供准确的技术支持是目前广大学者关注的焦点。**【前人研究进展】**遥感技术的发展为海面溢油监测提供了广阔的空间,光学、微波、声纳、激光等技术的应用,为水面溢油监测研究提供了新的途径和方法,由于微波遥感技术不受雨、云影响,在海面溢油监测过程中发挥着越来越重要的作用。但是,同时也发现同一传感器无法实现对水面溢油的全方位观测,主动微波在油品识别、油膜厚度及溢油量研究方面有其局限性<sup>[4]</sup>。不同波长传感器在探测地物特性方面各有所长,多传感器联合研究水面溢油是水面溢油专家越来越关注的焦点。海面粗糙度是表征海面空气动力学粗糙程度的物理量,它描写了海面微尺度起伏

的程度,其变化规律在某种程度上反映了海洋和大气之间动量输送过程的主要特征。海面粗糙度通常以空气动力学粗糙长度 $Z_0$ 表示,它定义为风速等于零的高度<sup>[5]</sup>。海面粗糙度通过粗糙雷诺数、空气动力学粗糙长度或阻力系数的近似计算来表征。关于溢油海面粗糙度也有通过蒙特卡罗仿真模拟获得的<sup>[6]</sup>。加拿大的Landy等<sup>[7]</sup>利用三维激光扫描仪观测了固态冰的粗糙度并对此展开了一系列的研究。三维激光扫描仪在地质灾害如山体滑坡、雪崩、古建筑探测及考古发掘、工程改建等非接触、高精度<sup>[8]</sup>扫描工作中发挥着优势,主要用于固体扫描,很少涉及液体,尤其是油膜。**【本研究切入点】**目前还没有通过仪器检测海面油膜的粗糙度的先例。尤其是原油乳化油膜粗糙度的观测,目前没有任何文章发表。乳化是溢油风化过程中海水和石油混合在一起形成油水乳化物的过程,即油包水。因为吸收了大量的水,油水乳化物的含水率、粘度、表面张力和体积不断增大,使得油的性质发生很大的变化<sup>[9]</sup>,进而使原油表面粗糙度发生变化。乳化前后含水率的增加主要与原油中沥青质含量与胶质含量的比例、粘度和密度有关。稳定的乳化物有足够的沥青质(>7%)或者可能和胶质一起产生强的粘弹性界面,使得小水滴保持在油中;半稳定的乳化物可能缺少足够的沥青质(3%~7%)或者含有太多的破乳物质使其不能完全稳定;不稳定乳化物沥青质的含量较少(<3%),很容易被分解为油和水<sup>[6]</sup>;乳化一定程度上影响了溢油的其它风化过程,原油乳化过程中物理参数的变化对海洋生态环境有重大影响。**【拟解决的关键问题】**本研究利用三维激光扫描仪尝试对原油乳化水面油膜粗糙度进行观测,为研究海面溢油理论及微波遥感准确观测海面溢油提供数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

实验油品是沥青含量<3%的原油,过滤海水,1 L玻璃烧杯,7 cm培养皿若干,电子天平ME204E,温度计,玻璃棒,三维激光扫描仪C10,SCKF105型微量水分测定仪,JJ-2A双数显控温电动搅拌器,SCZL203型全自动张力测定仪,NDJ-8S旋转粘度计,HWY-10多功能循环恒温水浴。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 实验设备设置

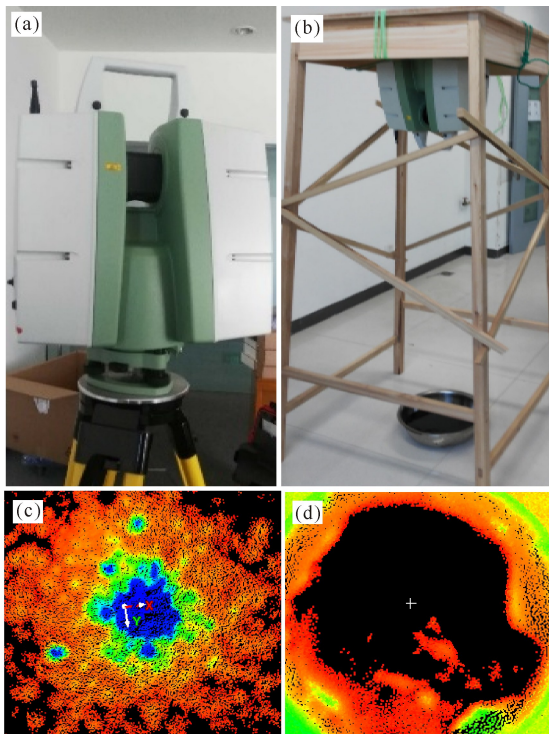
三维激光扫描仪(图1a)必须固定在稳固的支

撑平台上,支撑平台不能有任何震动,扫描入射角与油面保持垂直(图 1b),获取测距图像数据(图 1c),通过 Cyclone 软件处理,然后再利用均方根误差公式(1)计算获得表示油膜粗糙度的量值( $Z$ )。

$$Z = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n}}, \quad (1)$$

其中  $X$  是实测数据,  $\bar{X}$  是实测数据均值,  $n$  实测数据个数。

如果机器扫描入射角不能与油面保持垂直将会出现图 1d 无数据情况(黑色),测距高度将根据机器点间距设置。



(a) 三维激光扫描仪正常放置; (b) 三维激光扫描光束垂直油面位置; (c) 垂直扫描图像测距(蓝色)数据展示; (d) 非垂直扫描图像测距(黑色)无数据展示

(a) 3D-laser scanner is normally place; (b) 3D-laser scanning beam vertical position on the surface of oil; (c) Vertical scan image ranging (blue) data display; (d) Nonvertical scanning image ranging (black) no data display

图 1 三维激光扫描仪 C10 测量油膜粗糙度

Fig. 1 The oil film roughness measured by 3D laser scanner C10

### 1.2.2 预实验

首先实验测定原油(沥青含量 $<3\%$ )乳化程度及张力、粘度变化。取一个干净的容量为 1L 空烧杯用电子天平称量其质量  $M_0$ , 向其中加入原油至约 400 mL 处,再次称量此时烧杯的质量  $M_1$ , 则计算得出加油质量  $M = M_1 - M_0$ , 记录室温。然后将

装有原油的烧杯放在电动搅拌器的搅拌台上,调整搅拌器位置使搅拌转子位于原油的中间。将温度探头插在油中,记录此时的油温,设置搅拌温度为  $25.0^\circ\text{C}$ ,调整搅拌器转速至  $600 \text{ r/min}$  左右,记录实验开始时间。向油中缓慢滴入海水并记录滴加量,搅拌 10 min,静置 2 h 后取样,称量其质量,即获得含水率  $3\%$  的乳化物。取出一部分样品放入在直径为 7 cm 的培养皿中,于  $25^\circ\text{C}$  恒温水浴 30 min,待温度恒定后,用张力测定仪和粘度计测定乳化物的表面张力和粘度。

重复以上实验制备含水率分别为  $6\%$ ,  $9\%$ ,  $12\%$ ,  $15\%$ ,  $18\%$  和  $21\%$  的乳化物并测定其张力和粘度。为了更直观看到乳化现象,用玻璃棒沾取少量含水率为  $9\%$  的乳化物,均匀涂在载玻片上制成显微镜样片,置于放大倍数为 40 倍的显微镜下观察。

### 1.2.3 电动搅拌油膜粗糙度观测

取沥青含量 $<3\%$ 的原油 200 g 放入 1 L 烧杯中,向其加入海水,用电动搅拌器搅拌 5 min,转速  $300 \text{ r/min}$ ,静置 10 min,使原油的含水率达到  $3\%$ ,设置三维激光扫描仪距油面距离  $0.6 \text{ m}$ ,垂直扫描 3 次获得测距值并求其平均值,根据公式(1)计算得出此时表面油膜粗糙度。再向其加入海水,重复上述操作,使含水率分别达到  $6\%$ 、 $9\%$ 、 $12\%$ 、 $15\%$ 、 $18\%$ 、 $21\%$ 。实验从开始到结束保持电动搅拌器、烧杯和扫描仪的位置不移动,室温保持在  $20.5^\circ\text{C}$ 。

### 1.2.4 室外水槽实验观测油膜粗糙度

于户外水槽(长 $\times$ 宽 $\times$ 高分别为  $6 \text{ m} \times 2.2 \text{ m} \times 0.7 \text{ m}$ )中注入过滤海水  $4.7 \text{ t}$ ,水高至  $0.35 \text{ m}$ ,加入沥青含量 $<3\%$ 的原油  $6996.7 \text{ g}$ ,气温  $25 \sim 32^\circ\text{C}$ ,油温  $28 \sim 32^\circ\text{C}$ ,风速  $1.10 \sim 3.57 \text{ m/s}$ ,空气湿度  $53.6\% \sim 64.0\%$ ;三维激光扫描仪距油面垂直距离  $1.5 \text{ m}$ ,每次搅拌 2 min,取样间隔(1~2 h)用于含水率测量,每点扫描 3 次取平均值后根据公式(1)计算获得粗糙度值,并绘制油膜粗糙度与含水率之间的关系图。

## 2 结果与分析

### 2.1 预实验结果

制备含水率为  $3\%$  的乳化物时,沥青含量 $<3\%$  的原油加入量为  $333.7 \text{ g}$ ,室温为  $21.2^\circ\text{C}$ ,初始搅拌油温为  $21.9^\circ\text{C}$ 。依次制备获得不同含水率的乳化物后测得其张力和粘度,结果如表 1 所示。由于实验油品的沥青含量 $<3\%$ ,乳化物属于不稳定态,随



随着含水率的增加,原油张力和粘度逐渐增大,这一实验结果与已发表的结论一致<sup>[9]</sup>。因此,可以通过观测乳化物含水率了解乳化进程。由图 2 可清晰看到乳化现象,其中,亮点是包在油里的水滴,黄色物质是原油里的成份,中心暗斑是成像造成的。

通过多次预实验发现,实验油品在温度为 20~33℃,含水率超过 21%后,乳化物置留不到 1 h 就会出现析水现象,推断该实验油品乳化饱和含水率不大于 21%。所以,在下面的油膜粗糙度观测过程中,电动搅拌制作乳化物的含水率将不超过 21%。由于乳化物含水率能很好的反映原油乳化进程,因此本实验将根据含水率判断原油乳化程度。

表 1 原油乳化过程含水率、张力及粘度对应值

Table 1 The moisture content, tension and viscosity of crude oil emulsification process

含水率 Moisture content (%)	平均张力 Mean tension (mN/m)	平均粘度 Average viscosity (mPa/s)
3	28.4	2 050
6	30.1	2 090
9	32.3	2 040
12	33.3	2 350
15	35.9	2 520
18	36.5	3 070
21	38.1	3 500

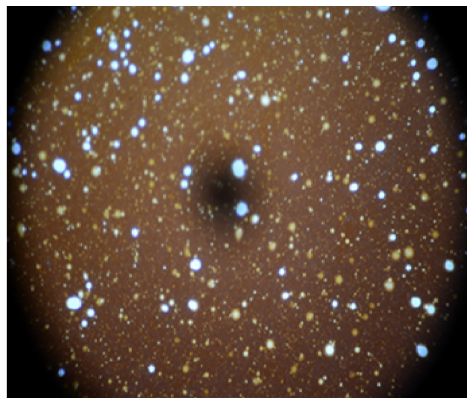


图 2 含水率为 9% 显微镜观察(油包水像)

Fig. 2 The picture (water in oil) of moisture content was 9 percent under microscope

## 2.2 电动搅拌油膜粗糙度观测结果

室内试验获得的不同乳化程度(由含水率描述的)的油膜粗糙度如图 3 所示。在理想状态下的原油乳化制备过程中,油膜粗糙度与含水率基本呈余弦关系,当温度为 20~33℃,含水率为 18%~21%时,实验油品正好处于饱和状态(图 3a)。图 3b 中蓝色数据是垂直扫描,通过 Cyclone 软件处理带入公式(1)获得油膜粗糙度的值如图 3a 所示。

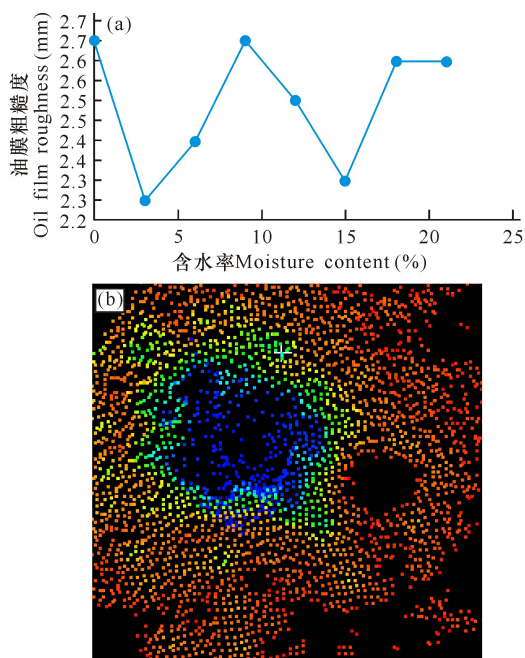


图 3 室内电动搅拌油膜粗糙度与含水率关系(a);室内垂直扫描图像测距(蓝色)数据展示(b)

Fig. 3 Relationship between film roughness and moisture content of indoor electric stirring oil (a); Vertical scan image ranging (blue) data display in indoor (b)

## 2.3 室外水槽实验观测油膜粗糙度

由于是在自然条件下,取样时间间隔不均匀(1~2 h),乳化进程无法控制,再加上该油乳化属于不稳定态,所以粗糙度与含水率之间的关系与电动搅拌结果相差较大(图 4a)。同时还发现,三维激光扫描仪可以探测油膜厚度 $>0.005$  mm 的粗糙度,

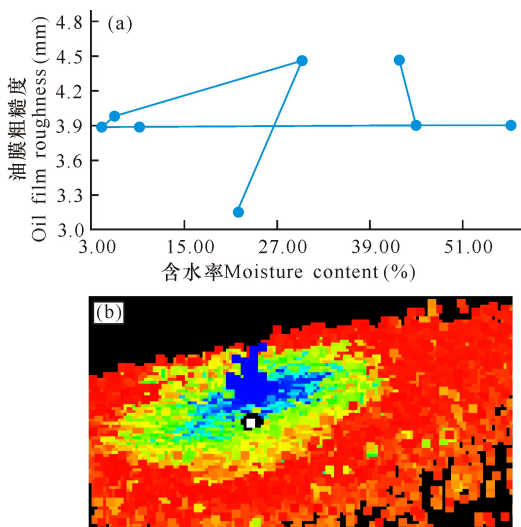


图 4 户外泼油实验油膜粗糙度与含水率关系(a);户外垂直扫描图像测距(蓝色)数据展示(b)

Fig. 4 The relationship between oil film roughness and moisture content of oil experiment in outdoors (a); Vertical scan image ranging (blue) data display outdoors (b)

垂直距离拉大虽然能获得更多的有效数据,但是同时也拉长了扫描时间。由图 4b 可见,当风速为 0~3.75 m/s 时,利用三维激光扫描仪垂直扫描可以测量表面油膜粗糙度,尽管与图 3b 室内垂直扫描数据对比,干扰比较多。

### 3 结束语

本研究采用三维激光扫描仪观测激光垂直扫描油面获得测距数据,然后根据几次测量值获得平均值,再求其均方根误差来实现对油膜粗糙度的观测。研究结果总体实验显示,三维激光扫描仪可以在风速为 0~6 m/s 条件下扫描油膜厚度  $>0.005$  mm 的油面粗糙度,表明本实验设计是可行的。这使得户外散射计与三维激光扫描仪联合实验成为可能,必将推动油膜粗糙度与后向散射之间关系的研究工作。本研究填补了油膜粗糙度不可测的空白,为研究水面溢油散射机制提供了强有力的数据支持,不足之处是垂直扫描面积小,获取数据量较少,需要多点观测,这需要在以后的散射计联合实验中,考虑如何实现多点同步观测,寻求合理设计方案。

#### 参考文献:

- [1] 国家海洋局北海分局. 2010 年北海区海洋环境公报 [EB/OL]. [2017-10-12]. <http://www.doc88.com/p-677121292071.html>.  
North China Sea Branch of State Oceanic Administration. The 2010 Marine environmental bulletin in the North Sea [EB/OL]. [2017-10-12]. <http://www.doc88.com/p-677121292071.html>.
- [2] 纪乐. 大连输油管道爆炸致百平方公里水域受漏油影响 [EB/OL]. [2017-10-12]. [http://www.cnr.cn/china/newszh/yaowen/201007/t20100719\\_506752529.html](http://www.cnr.cn/china/newszh/yaowen/201007/t20100719_506752529.html).  
JI L. 100 square kilometers of water was affected by oil spills caused by oil pipeline explosion of the Dalian [EB/OL]. [2017-10-12]. [http://www.cnr.cn/china/newszh/yaowen/201007/t20100719\\_506752529.html](http://www.cnr.cn/china/newszh/yaowen/201007/t20100719_506752529.html).
- [3] 第一财经(微博)日报. 康菲渔民赔偿基金裹足不前事故油田准备复产 [EB/OL]. [2017-10-12]. <http://finance.qq.com/a/20120409/000470.htm>.

- China Business News(MicroBlog). ConocoPhillips fisherman compensation fund dodged, the accident field ready to resume production [EB/OL]. [2017-10-12]. <http://finance.qq.com/a/20120409/000470.htm>
- [4] 过杰,过爽. 海面溢油及浒苔遥感监测研究进展 [J]. 广西科学院学报, 2016, 32(2): 73-78, 82.  
GUO J, GUO S. Status and trends of remote sensing study to monitor sea surface oil spill and enteromorpha [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2016, 32(2): 73-78, 82.
- [5] 斯塔尔 R B. 边界层气象学导论 [M]. 杨长新, 译. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1991.  
STULL R B. An introduction to boundary layer meteorology [M]. YANG C X, trans. Qingdao: Ocean University of Qingdao Press, 1991.
- [6] 李扬. 基于实验的海面溢油微波散射特性研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014.  
LI Y. Research on microwave scattering properties of oil spill based on experimental method [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [7] LANDY J C, ISLEIFSON D, KOMAROV A S, et al. Parameterization of centimeter-scale sea ice surface roughness using terrestrial LiDAR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(3): 1271-1286.
- [8] 捷配仪器仪表. 瑞士徕卡三维激光扫描仪 Scanstation C10 [EB/OL]. [2017-10-12]. <http://www.hi1718.com/company/161961/products/2013148184120.html>.  
The MRT Instrument. The Swiss leica 3d laser scanner Scanstation C10 [EB/OL]. [2017-10-12]. <http://www.hi1718.com/company/161961/products/2013148184120.html>.
- [9] 于占国. 日本海洋溢油迁移与转化研究概况——II. 海洋溢油的乳化 [J]. 海洋环境科学, 1988, 7(3): 61-66.  
YU Z G. Overview of oil migration and transformation in the Sea of Japan: II. The oil emulsification of sea [J]. Marine Environmental Science, 1988, 7(3): 61-66.

(责任编辑: 陆雁)