

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.05.011

激光雷达测风建模与模拟

田盛华, 王欣, 秦斌, 吴天霞

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 利用激光雷达测定风速是实现前馈控制的方法之一, 但该方法会受设备的限制。因此, 针对无设备研究激光雷达测风实现前馈控制的这一问题, 提出了一种采用基于雷达坐标系和风坐标系变换方法模拟激光雷达测定风速的方法。首先, 在Fast环境下利用TurbSim生成剖面风, 然后在Matlab软件中进行模块搭建, 最后联合仿真。仿真结果表明, 该方法能较准确地模拟激光雷达测量风速的过程, 可为装备激光雷达风速设备的控制系统研究提供仿真环境。

关键词: 激光雷达; 模拟测风; Fast; Matlab 仿真

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2019)05-0062-05

引文格式: 田盛华, 王欣, 秦斌, 等. 激光雷达测风建模与模拟 [J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(5): 62-66.

LiDAR Wind Measurement Modeling and Simulation

TIAN Shenghua, WANG Xin, QIN Bin, WU Tianxia

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: As one of the methods to realize feedforward control, the measurement of wind speed by lidar is unstable in its efficiency due to the equipment restriction. Therefore, in view of the flaw found in the feedforward control of lidar wind measurement without equipment, a new method based on radar coordinate system and wind coordinate system has thus been adopted to simulate the wind measurement process of lidar. Firstly, TurbSim is to be used to generate cross-section wind in Fast environment, with the module built in Matlab software, followed by a joint simulation experiment. The simulation results show that the method can accurately simulate the process of measuring wind speed by lidar, thus providing a simulation environment for the research on the control system of wind speed equipment equipped with lidar.

Keywords: LiDAR; simulation of the wind; Fast; Matlab simulation

1 研究背景

风不仅给风力涡轮机提供动能, 而且是风力涡轮

机控制系统的干扰因素之一。由此, 预览风流入的信息对能源生产优化和减轻结构负荷具有重要意义。传统风场信息测量手段分为被动式测量和主动式测

收稿日期: 2018-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61673166), 湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ4022, 2018JJ4070)

作者简介: 田盛华(1993-), 男, 山东滕州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为复杂机电系统的信息集成和协调控制, E-mail: 2451884132@qq.com

通信作者: 王欣(1971-), 女, 山东青岛人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事复杂工业过程建模与优化控制方面的教学与研究, E-mail: wwangxin97@163.com

量两大类, 传统的被动式测量装置有风速计、风向标和探空仪, 而主动式测量装置有微波雷达、声波雷达。风速计和风向标借助测风塔仅能实现单点风速的测量, 而且这类装置易受到恶劣天气的影响, 测风塔的建设和维护需要人力物力, 前期和后期都存在移动困难等复杂问题。微波雷达的探测介质为电磁波, 它常用的波长为厘米波, 探测方式为厘米波与大气中大尺寸粒子互相作用产生回波, 利用回波的特性实现探测; 在晴空时, 大气中存在较少的大尺寸粒子, 厘米波无法与大气中气溶胶粒子互相作用, 因此会出现探测盲区。声波雷达在夜间和海拔较高的区域会出现信噪比降低的情况, 而导致无法测量。

当前较为先进的探测装置为激光雷达 (light detection and ranging, LiDAR), 它是以发射激光束探测目标的位置、速度等特征量的雷达系统。激光雷达是激光技术与光电探测技术结合的先进探测方式, 优点为分辨率高, 可获得极高的角度、距离和速度分辨率, 且它的隐蔽性较好, 抗有源干扰能力较强, 低空探测性能较好, 以及体积小、质量轻, 可更好地运用到风场探测中。根据探测方式, 把激光雷达分为相干探测激光雷达和非相干探测 (直接探测) 激光雷达, 相干探测激光雷达是综合技术的产物, 不仅能实现直接探测激光雷达的功能, 获取被测目标的空间信息, 且能运用相干探测技术特点获取被测目标速度、微多普勒等特征信息, 它在目标探测和自动识别方面具有很好的发展前景。最具代表性的直接探测激光雷达为星载直接探测激光雷达, 它能同时利用大气中气溶胶粒子的散射和瑞利散射测量大气风场, 因此覆盖的地区很广, 如空气稀薄的海洋上空和两极地区, 也能为天气预报提供较准确的初始风场数据。美国国家航空航天局和欧洲航天局共同认为: 星载激光多普勒测风激光雷达是唯一可直接测量风剖面的仪器。测风激光雷达有广泛的社会效益, 如精确的大气风场数据, 可被运用到大气污染和扩散预报、风电系统的管理以及军事用途, 具有很高的商业潜力。

近年来, 激光雷达辅助控制已得到广泛关注, 利用激光雷达测量风速能解决如下问题: 如何从激光雷达数据中提取有用的风预览信号, 如何将这此信号整合到控制系统中。因此, 有必要对风的性质和测量原理进行彻底了解。但是, 由于设备条件的限制使大多数的科研工作者无法获得激光雷达所测得的风速, 因此需要建立模型, 然后利用软件平台进行模拟, 获得模拟风速。文献 [1-5] 介绍了激光雷达测风原理, 并通过雷达坐标系和风坐标系变换给出了激光雷达模型, 但没有通过 Fast 的子程序 TurbSim 和 Matlab 进

行模拟。文献 [6-7] 讲解了利用激光雷达预测数据的更新, 但存在数据是否精确的问题。文献 [8-13] 探讨了依赖多普勒激光雷达系统的测量精度, 以确定其对风力涡轮机前馈控制系统的适用性, 并讨论了使用预览风测量的前馈控制系统设计, 但没有考虑其控制偏差。文献 [14] 介绍了 Fast 的子程序 TurbSim 的来源并讲解了如何生成剖面风的过程, 但理想的风速模型需要专门研究。因此, 本文在介绍利用 LiDAR 模型和 Fast 软件生成湍流风模型的基础上, 进行单点模拟 LiDAR 测风, 并基于 Fast 软件和 Matlab 软件进行仿真, 以期在无设备研究激光雷达测风实现前馈控制提供理论参考。

2 激光多普勒风场遥感原理简介

现阶段流行的激光测风为激光多普勒测风^[1], 它可得到精确的三维风场廓线, 具备提供全球风场数据的潜力^[2-3]。该方法利用光的多普勒效应, 即当光源与观测点相对运动时, 观测点处所接收的光波频率不等于光源频率。光的多普勒效应与声音的相比, 其本质的不同之处是声波需要介质传播, 而光波不需要介质传播。激光具有单色性、相干性较强、波长较短的特点, 利用大气中气溶胶的后向散射光, 就能获得足够强的多普勒测风信息, 有利于探测微风风速, 且测风精度较高。测风激光雷达以激光器为光源, 从发射系统发射的激光束在大气中传输, 利用大气中气溶胶粒子的后向散射特性, 再由接收系统收集其回波信号的多普勒频移, 最后通过系统的反演获得风速分布, 激光多普勒测风原理如图 1 所示, 演示了激光束从发射系统到接收系统的路径, 其中 V_D 为观测点的接收频率, v 为光源与观测点之间相对速度的绝对值, K_s 为散射光的波矢量, K_i 为照射光的波矢量。

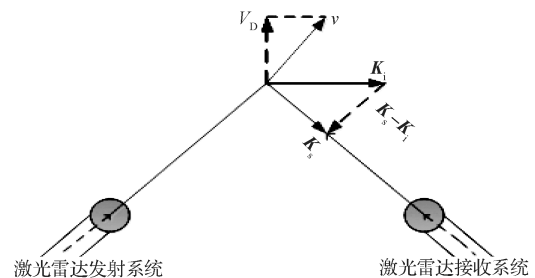


图 1 激光多普勒测风原理图

Fig. 1 Principles for laser doppler wind measurement

根据光学多普勒效应原理, 观测点的接收频率可以表示为

$$V_D = \frac{c - \vec{v} \cdot \vec{i}}{\lambda} \quad (1)$$

式中: \vec{i} 为照射光方向的单位矢量; \vec{v} 为速度矢量; c

为光速； λ 为波长。

此时，双端多普勒测风激光雷达接收的气溶胶颗粒的散射光波长为

$$\lambda' = \frac{c - \vec{v} \cdot \vec{s}}{V_D}, \quad (2)$$

式中 \vec{s} 为散射光方向的单位矢量。

散射光频率表示 V' 为

$$V' = \frac{c}{\lambda'} = \frac{c}{\lambda} \left(\frac{c - \vec{v} \cdot \vec{i}}{c - \vec{v} \cdot \vec{s}} \right), \quad (3)$$

$$\Delta V_D = V' - V = \frac{c}{\lambda} \left(\frac{c - \vec{v} \cdot \vec{i}}{c - \vec{v} \cdot \vec{s}} - 1 \right). \quad (4)$$

式中： V 为照射光频率，即激光频率。

由于风速远小于 c ，则式 (4) 可以简化为

$$\Delta V_D = \frac{v \cdot (\vec{K}_s - \vec{K}_i)}{2\pi}, \quad (5)$$

其中 \vec{K}_s 和 \vec{K}_i 分别为散射光和照射光的波矢量，其与单位矢量 \vec{s} 和 \vec{i} 之间的关系为

$$\vec{K}_s = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{s}, \quad (6)$$

$$\vec{K}_i = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{i}. \quad (7)$$

如图 1 所示，通过使用散射光的频移 ΔV_D ，可以根据式 (5) 获得沿 $\vec{K}_s - \vec{K}_i$ 方向上的风速分量。于是式 (5) 可以简化为

$$\Delta V_D = \frac{\vec{v} \cdot \vec{K}_i}{\pi}, \quad (8)$$

定义径向风速分量为 V_r ，则式 (8) 可表示为

$$\Delta V = \pm \frac{2V_r}{\lambda}. \quad (9)$$

若径向风速分量和气溶胶粒子后向散射光两者方向相同，则为正号；若径向风速分量和激光发射两者方向相同，则为负号。

3 LiDAR 风速测量系统建模

建模的基础原理：经过坐标变换实现雷达坐标系和风坐标系的转换。雷达坐标系 (X_L, Y_L, Z_L) 和风参考坐标系 (X_W, Y_W, Z_W) 转换关系如图 2 所示^[4]。

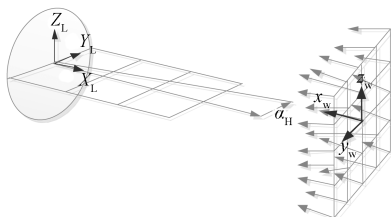


图 2 雷达坐标系和风参考坐标系转换关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of conversion relationship between radar coordinate system and wind reference coordinate system

图 2 演示了平面风中某一点风坐标与雷达坐标系中固定点坐标的转换，简单地说，某一点风坐标投影到雷达坐标系固定点坐标，只不过其中有偏差角度 α_H ，这里的偏差固定，每一个点的偏差都不相同，而且偏差的范围较小，易于处理。

激光雷达系统模型用于描述激光雷达坐标系中的风速测量。激光雷达系统只能在雷达坐标系一点 $i(x_{iL}, y_{iL}, z_{iL})$ 测量激光束方向的风矢量分量。视线风速 v_{si} 的测量可以用风速矢量 $[u_{iL}, v_{iL}, w_{iL}]^T$ 和激光束方向的单位矢量的数量积表示为

$$v_{si} = x_{iL} u_{iL} + y_{iL} v_{iL} + z_{iL} w_{iL}. \quad (10)$$

距雷达系统 r_i 处激光束方向的单位矢量定义为

$$\begin{bmatrix} x_{iL} \\ y_{iL} \\ z_{iL} \end{bmatrix} = -\frac{1}{r_{iL}} \begin{bmatrix} x_{iL} \\ y_{iL} \\ z_{iL} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中 $r_{iL} = \sqrt{x_{iL}^2 + y_{iL}^2 + z_{iL}^2}$ 。

基于雷达坐标系风矢量可用旋转矩阵转换得到

$$\begin{bmatrix} u_{iL} \\ v_{iL} \\ w_{iL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\alpha_H) & \sin(\alpha_H) & 0 \\ -\sin(\alpha_H) & -\cos(\alpha_H) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{iW} \\ v_{iW} \\ w_{iW} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中 α_H 为偏航偏差。

偏航偏差一般定义为

$$\alpha_H = \alpha_{H,b} - \alpha_{H,0}, \quad (13)$$

式中： $\alpha_{H,b}$ 为偏置偏航偏差； $\alpha_{H,0}$ 为机舱偏航偏差。

在这里无法获得机舱的偏航偏差，经过阅读大量的资料，获得偏航偏差的大概范围，因此在仿真时可用一随机模块代替，获取每个时刻的偏航偏差。

激光雷达坐标系中的测点位置见表 1。

表 1 激光雷达坐标系中的测点位置

Table 1 Measuring position in laser radar coordinate system

测点	x_{iL}	y_{iL}	z_{iL}
1	0.40	0	0
2	0.50	0	0
3	0.75	0	0

通过公式 (10) ~ (12) 和测量位置，简化了视线风速，为

$$v_{si} = \cos(\alpha_H) u_{iW} - \sin(\alpha_H) v_{iW}. \quad (14)$$

在建模过程中有许多影响因素需要考虑，但在这个建模中忽略了一些不必要的因素，其结果对整个系统的影响可以忽略^[5-8]。

4 LiDAR 风速测量模拟

激光雷达系统模型描述了激光雷达坐标系统的

风速测量。模拟 LiDAR 风速测量主要是对数据的处理和怎样实现坐标变换, 其剖面风由 Fast 的子程序 TurbSim 中涡轮模拟器生成, 其它数据处理在 Matlab/Simulink 中完成, 模拟过程如图 3 所示。



图3 模拟过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the simulation process

4.1 剖面风的生成

Fast 为由多数软件组成的风力发电系统综合仿真软件, 论文中所需要的风由子程序 Turbsim 产生。TurbSim 运用涡轮模拟方法产生风文件, 此方法是由频域向时域转换, 产生与气动性相适应的风量。涡轮模拟器是一个随机、全场、湍流的模拟器^[14], 它使用一个统计模型(而不是基于物理的模型)来数值模拟在空间中固定的二维垂直矩形网格点上的三分量风速矢量的时间序列。TurbSim 是一个全场随机紊流仿真软件, 通过给定合适的风速谱, 生成全场内随空间和时间变化的随机紊流风速场, 其结果可以模拟影响风力机气弹响应和载荷的紊流环境。它的优点是能根据对风轮直径、塔架高度、平均风速等参数的设置, 模拟出所需要的风速, 大概的模拟过程如下:

- 1) 打开 TurbSim 文件夹下所需风的文件;
 - 2) 修改里面的参数(平均风速、轮毂高度、剖面风的大小等);
 - 3) 打开 DOS 系统, 输入运行指令, 运行已修改好的文件;
 - 4) 生成所需风的数据;
 - 5) 在 Matlab 中输出生成风的 3 个方向的分量。
- 风机的部分参数见表 2。

表 2 风机的部分参数

Table 2 Partial parameters of the fan

参数	额定功率 / MW	平均风速 / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	轮毂高度 / m	剖面风大小 / m^2
取值	5	15	90	145×145

4.2 仿真结果与分析

本研究借助 Fast 软件和 Matlab/Simulink 之间的接口, 由子程序 TurbSim 生成风速模型, 生成的平均风速为 15 m/s 的湍流风。第一步, 在 Fast 中搭建所需要的风机模型; 第二步, 在 Simulink 环境中设计完成模型搭建; 第三步, 在 Fast 和 Simulink 中进行联合仿真。由 TurbSim 生成的随机风速大小如图 4 所示。

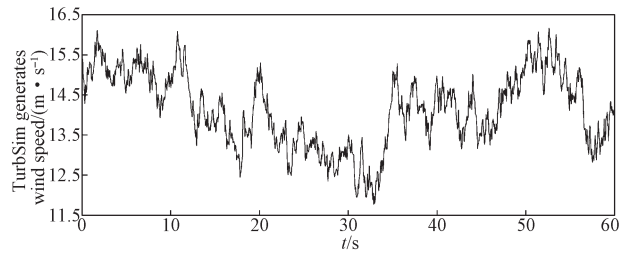


图4 TurbSim 随机风速大小

Fig. 4 TurbSim random wind speeds

由 TurbSim 生成 U 轴(横轴)方向的风速如图 5 所示。

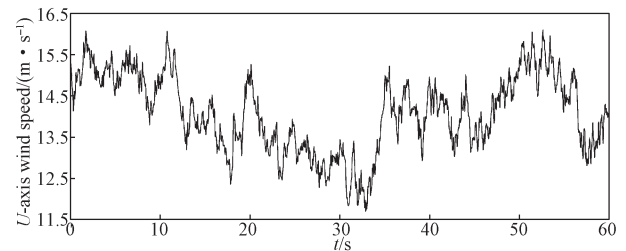


图5 TurbSim 生成的 U 轴方向风速

Fig. 5 U -axis wind speeds generated by TurbSim

TurbSim 生成的风速大小主要取决于 U 轴方向的风速大小, 其他方向的风速大小对总的风速没有太大的影响, 因此, 只给出 U 轴方向的风速仿真图。

由 TurbSim 生成的随机风速模拟出的风速如图 6 所示。

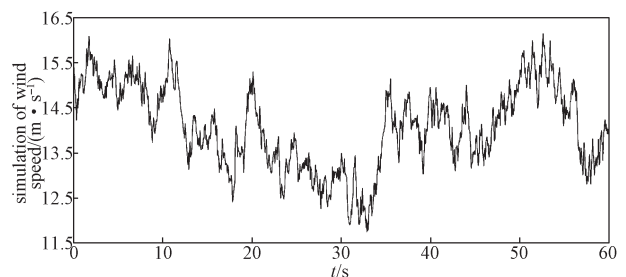


图6 模拟风速

Fig. 6 Simulated wind speed

其中由 U 轴风速模拟 X 轴(横轴)的风速如图 7 所示。

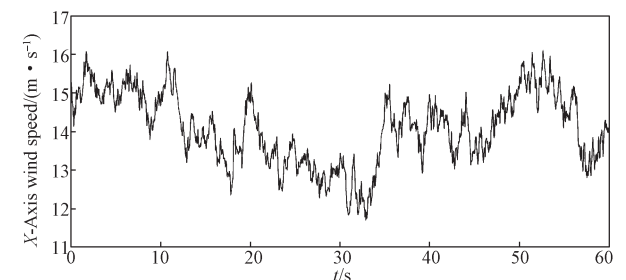


图7 模拟 X 轴方向的风速

Fig. 7 X -axis wind speeds simulated

由 TurbSim 生成的随机风和模拟风速的误差如图

8所示。

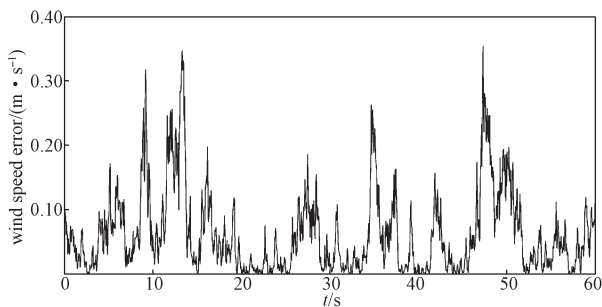


图8 风速误差

Fig. 8 Wind velocity errors

由图8可知,在风速波动较大处误差较大,为0.150~0.354 m/s;其它点误差较小,为0~0.14 m/s。根据图8,可得风速误差的最大值为0.354 m/s,整个风速误差的平均值为0.062 3 m/s。

5 结语

本文提出一种基于雷达坐标系和风坐标系转换模拟激光雷达测定风速的方法,通过Fast和Matlab/Simulink联合仿真,从TurbSim生成风速、模拟出的风速以及风速误差可以得知,模拟出来的风速与TurbSim生成的风速基本吻合,效果理想,另一方面也验证了基于雷达坐标系和风坐标系变换来模拟激光雷达测风过程的可行性,能为LiDAR风电系统控制仿真做基础。

参考文献:

[1] 黄晨,朱海龙,周军.多普勒测风激光雷达系统[J].光电产品与资讯,2017,8(2):49-51.
HUANG Chen, ZHU Hailong, ZHOU Jun. Doppler Wind Lidar System[J]. OE Product & News, 2017, 8(2): 49-51.

[2] 周艳宗,王冲,刘燕平,等.相干测风激光雷达研究进展和应用[J].激光与光电子学进展,2019,56(2):9-26.
ZHOU Yanzong, WANG Chong, LIU Yanping, et al. Research Progress and Application of Coherent Wind Lidar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(2): 9-26.

[3] 冯长中,吴松华,黄海广,等.梯度下降VAD方法的单多普勒激光雷达风场探测技术[J].红外与激光工程,2018,47(11):50-58.
FENG Changzhong, WU Songhua, HUANG Haiguang, et al. Technique of Wind Field Detection Based on Single Doppler Lidar with Gradient Descent VAD Method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(11): 50-58.

[4] SCHLIPF D, HAIZMANN F, COSACK N, et al. Detection of Wind Evolution and Lidar Trajectory Optimization for Lidar-Assisted Wind Turbine Control[J]. Meteorologische Zeitschrift, 2015, 24(6): 565-579.

[5] HAN B, ZHOU L W, ZHANG Z W. LIDAR-Assisted Radial Basis Function Neural Network Optimization for Wind Turbines[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2018, 13(2): 195-200.

[6] SCHLIPF D, CHENG P W. Flatness-Based Feedforward Control of Wind Turbines Using Lidar[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2014, 47(3): 5820-5825.

[7] 冯长中,吴松华,刘秉义,等.激光雷达探测信号数据融合算法[J].光子学报,2018,47(6):93-101.
FENG Changzhong, WU Songhua, LIU Bingyi, et al. Gluing Method of Detected Signal Based on Lidar[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(6): 93-101.

[8] 丁红星,孙东松,杨昭,等.测风激光雷达光束发散对测量精度的影响[J].激光与红外,2004,34(1):18-20.
DING Hongxing, SUN Dongsong, YANG Zhao, et al. Accuracy Affected by the Beam Divergence in a Fabry-Perot Etalon Based Wind Lidar[J]. Laser & Infrared, 2004, 34(1): 18-20.

[9] 郭百顺.风电机组独立变桨距控制技术研究[D].株洲:湖南工业大学,2014.
GUO Baishun. Research on the Technology of Independent Variable Pitch Control for Wind Turbine[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2014.

[10] BAO J, YUE H, LEITHEAD W E, et al. Feedforward Control for Wind Turbine Load Reduction with Pseudo-LIDAR Measurement[J]. International Journal of Automation and Computing, 2018, 15(2): 142-155.

[11] BAO J, WANG M, YUE H, et al. Pseudo-LIDAR Data Analysis and Feed-Forward Wind Turbine Control Design[J]. IFAC-PapersOnLine, 2015, 48(8): 483-488.

[12] CORTINA G, CALAF M. Turbulence Upstream of Wind Turbines: A Large-Eddy Simulation Approach to Investigate the Use of Wind Lidars[J]. Renewable Energy, 2017, 105: 354-365.

[13] 林淑,兰杰,莫尔兵,等.基于激光测风雷达的风速前馈控制算法设计[J].东方汽轮机,2017(2):51-55,60.
LIN Shu, LAN Jie, MO Erbing, et al. Design of Wind Speed Feedforward Control Algorithm Based on Laser Lidar[J]. Dongfang Turbine, 2017(2): 51-55, 60.

[14] JONKMAN B J, BUHL M L J. TurbSim User's Guide[R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2006. DOI:10.2172/891594.

(责任编辑:姜利民)