文章编号: 0258-1825(2021)04-0172-08

# 激光测风雷达在风场观测领域的应用及展望

傅 军*, 李 洁, 吴 强
(浙江理工大学 建筑工程学院, 杭州 310018)

**摘 要:** 多普勒激光测风雷达因具有高测量精度、高时空分辨率等优势, 在晴空天气的风场观测中发挥着重要作用。本文综述了激光测风雷达技术的应用价值以及国内外测风雷达技术与设备研究现状。针对激光测风雷达所存在的问题进行分析, 提出其需进一步研究的方向。对激光测风雷达在风场的应用、雷达中尺度数据与 CFD (Computational Fluid Dynamics)结合应用进行分析总结, 重点对某沿海地区风场进行多维度分析。分析结果得出: 应用激光测风雷达能提高对风场数据获取水平, 为进一步获取更为精准的风场信息, 可将激光测风雷达观测的数据和 CFD 数值模拟等进行综合分析。最后对激光测风雷达设备在技术参数等方面提出展望。

**关键词:** 激光测风雷达; 大气风场; 测风设备; 中尺度模拟; CFD; 风环境评价
**中图分类号:** P412.25 **文献标识码:** A **doi:** 10.7638/kqdlxxb-2021.0060

## Application and prospect of Dopplar lidar in the wind field observation

FU Jun*, LI Jie, WU Qiang
(*School of Architectural Engineering*, *Zhejiang Sci-Tech University*, *Hangzhou* 310018, *China*)

**Abstract:** Doppler lidar plays an important role in the wind field observation in clear sky weather due to its high measurement accuracy and high spatial-temporal resolutions. This paper reviews the research status and application of the laser wind measurement radar technology at home and abroad. Based on the analyses of current problems of the laser wind measurement radar, directions for further research are proposed. This paper also analyzes and summarizes the application of laser wind measurement radar in wind fields and the integration of meso-scale radar measurements and CFD simulations. Especial attention is paid on a multi-scale analysis of wind fields in a coastal area. The results show that the laser wind measurement radar can enhance the capability of wind field data acquisition. To acquire more accurate wind field information, a comprehensive study of the radar measurements and numerical simulations is preferable. Finally, prospects for the technical parameters of laser wind measurement radars are put forward.

**Keywords:** laser wind radar; atmospheric wind field; wind measuring equipment; mesoscale simulation; CFD; wind environment assessment

## 0 引 言

风场信息的测量是气象或空气动力学领域的重要工作内容之一, 其测量的精确性对于气象研究尤为重要。伴随着观测技术的不断进步, 不同的大气风场测量手段也相应而生。传统的观测方法主要有无线电探空仪、杯式风速传感器、热式风速传感器、微波雷达、多普勒声波雷达和风廓线雷达等, 存在测量精度低、测量范围小、体积大、投资高等不足[1-4] 问题。激光测风雷达是相对较新的一种测风技术, 在过去的几十年中发展迅速。在风切变测量、飞机尾流测量、湍流测量、风电场性能评估、重力波分析以及大气气

**收稿日期:** 2021-04-19; **修订日期:** 2021-05-13; **录用日期:** 2021-05-16; **网络出版时间:** 2021-06-01
**基金项目:** 住建部科技项目(2013-K6-13)
**作者简介:** 傅军*(1970−), 男, 浙江长兴人, 副教授, 主要研究方向: 风工程. E-mail: fujunfujun@163.com
**引用格式:** 傅军, 李洁, 吴强. 激光测风雷达在风场观测领域的应用及展望[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(4): 172−179.
FU J, LI J, WU Q. Application and prospect of Dopplar lidar in the wind field observation[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2021, 39(4): 172−179(in Chinese). doi: 10.7638/kqdlxxb-2021.0060

溶胶光学特性分析等方面有重要的应用价值[5]。

但由于探量应用时间较短，使得现有的数据库不足以对平均值进行合理的统计描述，特别是在复杂的沿海地区问题突出。虽然激光测风雷达的可用性、观测数据的可靠度得到了一定的提升，但在降雨、浓雾等特殊天气下，激光信号减弱会使探测性能受到影响，从而使得仅依赖于单一的激光雷达进行仿真或现场探测的许多辅助控制研究也受到影响[6-7]。

激光测风雷达具有测量精度高、分辨率高、探测范围广、响应速度快等特点，对晴空天气的大气探测具有显著的作用[8]。本文对激光测风雷达技术设备国内外研究现状进行了总结，对存在的问题提出了改进措施。并分析了激光测风雷达在风场领域的应用情况，对沿海丘陵地区的风场进行了多维度评估分析，最后总结了激光测风雷达在风场领域的未来发展趋势。

## 1　激光测风雷达设备与技术研究进展

### 1.1　国外激光测风雷达设备与技术进展

美国雷神公司（Raytheon Company）于 1968 年研制出世界上第一台相干激光测风雷达。1970 年，Huffaker 成功研制脉冲式 $CO_2$ 相干多普勒测风雷达，能观测 35 m 范围内风速，并应用于航线晴空湍流探测[9]。2002 年，报道了第一个商业可用的相干多普勒激光雷达系统——Wind Tracer 脉冲相干多普勒激光雷达，该雷达测量数据可靠，能连续运作，可应用于飞机尾流、晴空湍流等探测[10-11]。NASA Goddard 公司对直接探测激光多普勒测风技术也有一定研究。2001 年，NASA Goddard 公司利用双边缘直接探测技术，研制出移动式多普勒激光雷达系统 GLOW，测量从地表到平流层下部的风廓线[12-13]。2009 年，NASA Goddard 公司又利用双边缘探测技术开发研制了 TWILITE 脉冲多普勒测风雷达，可在飞机巡航高度（约 18 km）到地面的高度范围内对对流层风进行剖面分析[14]。2015 年 NASA 采用了创新的全光纤和模块化收发器架构，研制了工作波长为 1.545 7 μm 的相干激光测风雷达 WindIm-age 系统，应用于现场部署的风和尾流测量[10]。

日本三菱公司（MEC）自 20 世纪 90 年代末开始一直致力于相干多普勒激光测风雷达的研究。MEC 主要从事 1.5 μm 人眼安全波段的激光雷达研究，在光纤激光器的研发方面取得了巨大成就[15]。1998 年，研制出世界上首台基于 1.5 μm 人眼安全波长的相干多普勒激光测风雷达，实现了水平距离超过 800 m 的目标探测。2002 年，MEC 公司开始着手研制和开发全光纤相干多普勒激光测风雷达。2012 年，MEC 公司升级了 Er,Yb:Glass 激光器，研制出 1.5 μm 波长的相干多普勒激光测风雷达，可探测 30 km 以上范围的风场[16-17]。2018 年，首次报道了 2 μm Ho:YLF CDWL，利用 100 mm 望远镜在 1 s 观测时间，能获得约 15 km 范围内的风廓线[18]。

欧洲航天局（ESA）在 1999 年全面启动全球第一台星载直接探测激光多普勒测风雷达计划，2007 年开始提出研制远程星载直接探测激光多普勒测风雷达（ALADIN）以用于全球风廓线观测[19]。ALADIN 多普勒测风紫外激光雷达，波长为 355 nm，重复频率为 50 Hz，应用半导体抽运 Nd:YAG 激光器，用于探测全球对流层和平流层底大气风场垂直剖面，来弥补海洋和极地风场数据的不足[20]。2018 年搭载来自法属圭亚那的 Vega 火箭成功升空，标志着星载激光多普勒测风雷达进入应用阶段[21]。

法国 LEOSPHERE 公司生产的 WINDCUBE 系列多普勒激光测风雷达，通过测量大气颗粒物的后向散射回波信号产生的多普勒频移，反演风速和风向信息，以此获得高时空分辨率、高精度的风场数据。自 2004 年成立起，WINDCUBE 系统已被广泛应用于各种环境条件。LEOSPHERE 已推出多款多普勒激光测风雷达，可提供距系统 200 m（WINDCUBE V1）、3 km（WINDCUBE 100S）、6 km（WINDCUBE 200S）和 10 km（WINDCUBE 400S）范围的风场信息[22]。WINDCUBE V1/100S/200S/400S 扫描型多普勒激光测风雷达是基于激光脉冲多普勒频移原理，图 1 是 WINDCUBE 200S 的样机图。




**图 1　WINDCUBE 200S 设备图**
**Fig. 1　WINDCUBE 200S**

国外对激光测风雷达技术与设备进行了持续深入的研究，但多数研究集中于相干探测技术的研究。目前对于直接探测雷达多利用双边缘技术，主要应用于大气气溶胶散射、分子散射、共振荧光散射的探

测。近来，美国和欧洲航天局对直接探测激光多普勒测风雷达逐渐向星载多普勒测风雷达进行应用发展。国外相干多普勒测风雷达的研究主要有以下发展趋势：1）WindTracer、WINDCUBE 激光测风系统的不断升级，设备的激光发射波长、测距等技术指标不断优化；2）随着光纤通讯技术的不断发展，光纤测风雷达也得到了快速的发展，全光纤激光测风雷达的研究正不断进行深化；3）对于激光测风的应用不仅仅停留在飞机风切变和湍流测量，而是朝着多功能化方向发展。

### 1.2 国内激光测风雷达设备与技术研究进展

我国激光测风雷达的研究相对国外起步较晚。2010 年中国电子科技集团公司第二十七研究所研制出 1.5 μm 连续光波相干激光雷达，该雷达可对 100～200 m 距离内的风速、风向进行多次观测[23]。2012 年潘静岩等[24] 研发了一套全光纤多普勒测风雷达设备，并用 VAD 风场反演方式对测量精度进行理论分析，推导出了四波束相干激光测风雷达的水平风速精度。2013–2015 年，国内研制出能够测量 800 m 距离远的全光纤相干激光测风雷达。2014 年中国科学院上海光学精密机械研究所研制了 1.54 μm 的全光纤相干激光测风雷达，同年研制了 1.54 μm 全光纤机载相干激光测风雷达[25]。上述研究机构的前期研究成果整理见表 1。

**表 1 2010-2015 相干激光测风雷达数据参数[26]**

**Table 1 Parameters of coherent laser wind radars manufactured in China between 2010 and 2015**

| 研究单位 | 中国电子科技集团公司<br>第二十七研究所 | 中国科学院<br>上海光学精密机械研究所 | 中国电子科技集团公司<br>第二十七研究所 | 中国海洋大学 | 中国科学技术大学 |
|---|---|---|---|---|---|
| 年份 | 2010 | 2011 | 2013 | 2014 | 2015 |
| 激光波长/μm | 2 | 1.064 | 1.55 | 1.55 | 1.574 |
| 脉冲宽度/ns | – | 80 | – | 200 | 400 |
| 探测距离/m | 19～96 | 30～500 | 1500 | 3000 | 120～3360 |
| 速度分辨率/(m·s$^{-1}$) | – | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |

近年来，国内对于激光测风雷达的研究正在不断深入。2017 年，中国科学技术大学王冲[27] 等成功研制了世界上第一台能同时观测大气退偏振比和大气风场的相干多普勒激光测风雷达。该雷达系统可以在 10 μJ 单脉冲能量、60 m 距离分辨率条件下，实现 6 km 的水平风场测量，并能给出水平风场的 PPI 扫描数据。同年，中国科学技术大学在国际上首次实现了基于超导纳米线单光子探测器的双频多普勒激光测风雷达，该新型雷达采用了精简的光学结构，提高了系统的稳定性，并增强了实用性和可靠性，一定程度上解决了多普勒测风系统存在的问题[28]。

2020 年国产首台海上漂浮式激光测风雷达（WindMast 350-MB），如图 2 所示，其探测高度范围为 20～350 m，激光波长为 1550 nm，风速精度≤0.1 m/s，扫描方式为多波束扫描/VAD。WindMast 350-MB 系统在严苛海洋环境条件下具有可靠性、稳定性和准确的激光雷达数据分析处理能力。随着激光测风技术的不断发展，国产商用雷达也得到了一定的发展，生产商主要有南京牧雷激光有限公司和北京厚力德仪器设备有限公司。牧镭激光经过十余年技术的积累与进步、数代样机的研发与迭代，形成 1550 nm 全光纤结构、激光相干多普勒原理的技术原型，主要的商用激光雷达有地基式激光测风雷达 Molas B300 和机舱式激光测风雷达 Molas NL。



**图 2 WindMast 350-MB 设备图**

**Fig. 2 WindMast 350-MB**

综上所述，国内对于激光测风雷达的研究起步较晚，但经过科研人员的不懈努力，国内测风雷达的软硬件设施都得到了提升，缩小了与国外的差距。

但国内雷达商用化程度低，大多数还停留在实验室研究阶段。所以增加商用测风雷达的投入是目前需要着重研究的方向。虽然国内设备的测量范围和精度都在逐渐提升，但仍与国外存在一定的差距，需要对激光测风雷达的数据算法处理等方面进行进一步的研究。

## 2　激光测风雷达在风场观测领域应用

### 2.1　高空风场领域中的应用

激光测风雷达在高空风场领域的应用包括对机场风切变和湍流的测量。风切变是一种大气现象，反映风矢量（风向、风速）在空中水平及垂直距离上的变化。减轻风切变对机场飞行安全和营运效率的不利影响至关重要。以香港国际机场为例，机场附近地形复杂，热带气旋横向经过复杂地形时所产生的强风切变，可能与雷暴所产生的微暴一样强烈。为检测机场的低空切变和湍流，在机场设有一台终端多普勒天气雷达（TDWR）和激光雷达系统用于实时探测[29]。TDWR 是 C 波段单极化雷达，发射频率为 5.625 GHz，发射脉冲宽度为 1.0 μs，其峰值功率为 250 kW，平均功率为 500 W[30]。香港天文台研究了 GLYGA（滑行路径扫描风切变预警算法）用于预测低级别风切变，利用大涡模拟对边界参数化方案进行评估，直接输出预报 EDR 对低空湍流进行预测。Hon 等[31] 提出 CIDV 新算法，该算法能使用径向分辨率为 30 m 的短距离激光自动扫描湍流特征。应用激光雷达和 AVM-GLYGA 模式可以给出垂直速度、垂直横截面的风切变数据特征，提供更多的风场信息。

### 2.2　近地面风场领域中的应用

与高空风场不同，近地面风不仅受水平气压梯度力、地转偏向力影响，还受摩擦力影响。近地面风场的观测是一种应用更为广泛的实测手段，主要利用测风塔和激光测风雷达两种方式[32]。对近地面风场领域的评估主要针对台风近地层风场的时空变化特征展开。蔡彦枫等[33] 采用国产 WindPrint S4000 型激光测风雷达（如图 3 所示）对 1604 号强台风“妮妲”登陆期间的局地风场进行了观测。该雷达技术参数：激光波长为 1 550 nm，探测距离为 120～4 000 m，径向风速测量精度 < ±0.1 m/s。激光测风雷达风廓线扫描所获取的现场观测结果，反映了台风“妮妲”局地风场的时间变化特征。激光测风雷达低仰角水平方位扫描所获取的现场观测数据，清晰捕捉了台风“妮妲”局地风场的空间分布特征。史文浩等[34] 也利用该雷达设备对台风“利奇马”边界层风场精度进行了分析。将激光测风雷达与 70 m 测风塔，在相同高度探测台风“利奇马”影响期间的边界层风场数据对比分析，研究多普勒激光雷达的误差分布以及变化。结果表明，在该高度下两者的水平风速、风向相关系数分别为 0.97 和 0.99，垂直风速的相关系数为 0.36。Tsai 等[35] 利用 WINDCUBE V2 脉冲激光雷达对两个超级台风内部 240 m 高度的台风边界层进行观测。该雷达的探测范围在 40～290 m，具有良好的时间分辨率和恒定的空间分辨率。将 WINDCUBE 系统和超声波风速表观测数据进行对比，在 50 m 和 70 m 处误差均为 3%。结果表明，应用激光测风雷达可以较好反映台风环流内的水平风场结构及演变，有利于对台风边界层风场的高分辨率研究和探测。将激光测风雷达应用于低空风场领域，在一定程度上有助于提高对风场数据分析水平。




**图 3　WindPrint S4000 激光测风雷达**
**Fig. 3　WindPrint S4000**

## 3　雷达中尺度数据和 CFD 的结合应用

目前多普勒雷达三维风场反演技术能从根本上了解中小尺度天气系统的三维风场结构，进而分析灾害性天气发生的条件及其演变规律。中尺度数据被广泛应用于风资源的开发、提高风资源评估的精确度，并通常用雷达和卫星等遥感探测、数值分析等方式对其进行分析。中尺度数值模拟的方法主要有：WRF 模式、CMAQ 模式、风场参数化模式。WRF 模式是由美国国家大气研究中心（NCAR）、美国国家海洋和大气管理局（NOAA）等多个机构联合开发的中尺度数值模拟系统[36]。目前，有两个不同的 WRF 求解器模型，用于科学研究的 WRF-ARW 模型和用于业务的 WRF-NMM 模型[37]。对比发现，中尺度数据和雷达观测数据在主风向上的具有一定相关性，中尺度插补订正后的数据与实测数据的月平均值误差、标准偏差误差较小，利用中尺度数据插补后的完整数据能准确地反映风场的实际情况[38]。

中尺度模拟结果在微尺度和细观尺度耦合中具有重要意义。CFD 数值模拟方法可对实体建筑或复杂地形下的风场进行小尺度精细化模拟，其模拟方法主要有直接模拟（DNS）、大涡模拟（LES）及雷诺平均（RANS）[39]。

中尺度数值模拟能拟合出较大区域内气流、气压、风场等特征，但不能够精确评估风场内局部风流

动状况，而微尺度 CFD 数值模拟能够获得精确的风场内部区域状况。但由于 CFD 模型建立时采用假定的入流风廓线，因此无法评估实际的大气边界入流条件下风场的流动。中尺度模拟结果可作为微尺度 CFD 模拟的边界条件输入。目前常基于中尺度 WRF 模式和微尺度 CFD 模式建立中微尺度耦合模式对风资源进行评估。中尺度模拟可以有效对微尺度 CFD 模型边界进行校正。对于风场评估，可将激光测风雷达所观测的数据和数值模拟的结果进行结合，进而提高评估的准确性，并反映真实的风场情况[40-41]。

## 4 多维度风场评估案例分析

复杂地形风况变化较大，风切变相对较小。相对传统测风设备，激光测风雷达易于安装、低空无盲区、时空分辨率高，可测量地面 50 m 以上的风场。但激光测风雷达存在精度依赖仪器固有的测量精度的问题。对于这个问题，国内外学者将激光测风雷达与 CFD 模拟结合来获取更为精准的风场信息，如图 4 所示。

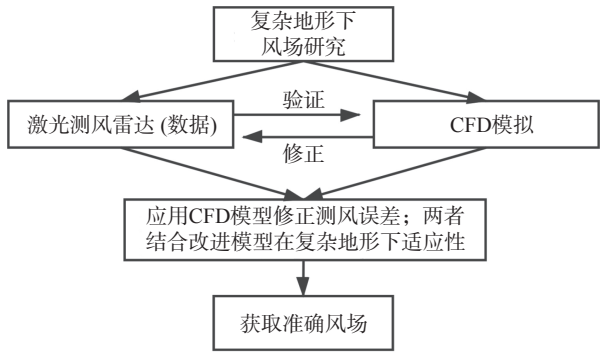



**图 4 激光测风雷达和 CFD 结合应用**

**Fig. 4 A combined application of wind lidar and CFD**

作者所在团队自 2013 年以来对某沿海山地丘陵地区低矮建筑群的风场特征进行了持续研究。一些主要工作内容及结论包括：

1）以奉化市裘村镇黄贤村山体地形（图 5）为研究对象，以 45°间隔进行 CFD 数值模拟。结果表明：风向与峡谷之间的夹角越小，峡谷内风速增强作用越明显。气流受到地形变化趋势不同的山脉的干扰，气流速度有不同程度的增加。当气流进入开阔区域时，风速降低并且湍流强度变化趋于平稳。在风速较低且湍流变化稳定的区域，可作为建筑选址的最佳区域[42]。

2）采用电子风速仪和热式风速仪对黄贤村取点进行现场观测，分析结果表明：峡谷两侧地形特征对平均风速和湍流产生显著影响，且山体越高对风速的影响越小；山体的迎风侧风速随山高的增加而增加，坡度越陡对风速的影响越明显[41]。在此基础上，采用 CFD 数值模拟方法研究该地区山体粗糙度对风环境产生的影响，结果表明：在相同坡度下，山体地形粗糙程度对风速产生一定的影响，风速一般随粗糙度的增加而增加[43]。最后提出了风环境下选址及建筑布局的最优方案，详见文献 [44]。

3）采用新型 LWR2500 激光测风雷达及手持自动气象站（杭州佐格通信设备有限公司产品，图 6），在 2020 年进行了设点气象观测，并对采集的风速、风向数据进行了统计与分析[45]。该雷达支持 50～2 500 m 高度范围内风速风向测量，其具体技术参数见表 2。

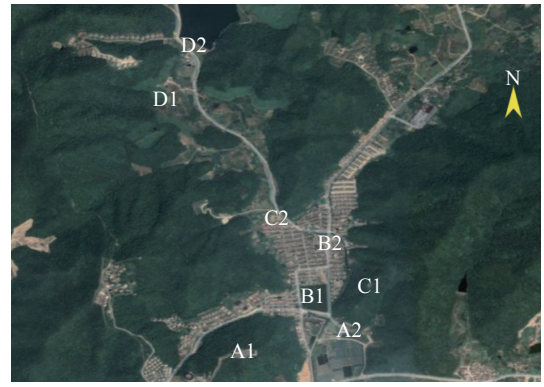



**图 5 黄贤村山体地形图**

**Fig. 5 A topographic map of Huangxian village**



**图 6 现场测量照片（左为手持气象站，右为激光测风雷达）**

**Fig. 6 A photo of field measurements (the hand-held weather station and laser wind radar are respectively on the left and right)**

**表 2 LWR2500 激光测风雷达技术参数**

**Table 2 Technical parameters of LWR2500**

| | |
|---|---|
| 工作波长 | 1550±5 nm |
| 高度范围 | 50～2500 m |
| 风速测量范围 | 50～2500 m |
| 风速测量精度 | 0～60 m/s |
| 风向测量精度 | 0.5 m/s |
| 距离分辨率 | ±3° |

首先，对已有的雷达和测风塔的同步观测数据进行了数理统计及对比分析，结果显示该设备测风数据可信度高，适用于低空领域的三维风场。在此前提下，基于黄贤村各处 8 个测点的雷达及手持气象站数

据，分析了当地风速、风向随时间及地势变化的规律。结果表明，该地区沿海地带风速变化具有日周期性（图 7）。测量期间主导风向分别为东北风和东南风，风向变化规律受海陆风影响较大（图 8）。丘陵地带风速、风向受风速等级和地形的影响较大。

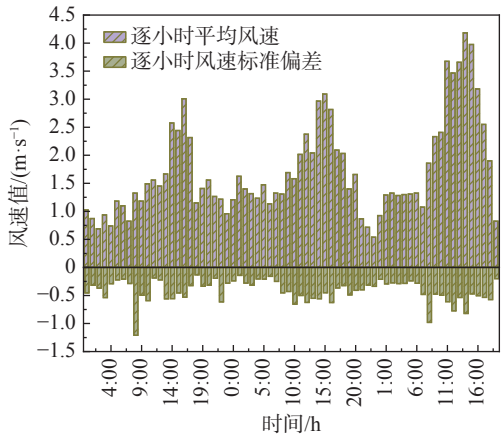



**图 7　沿海地带风速与标准偏差对比**

**Fig. 7　The coastal wind velocity and its standard deviation**

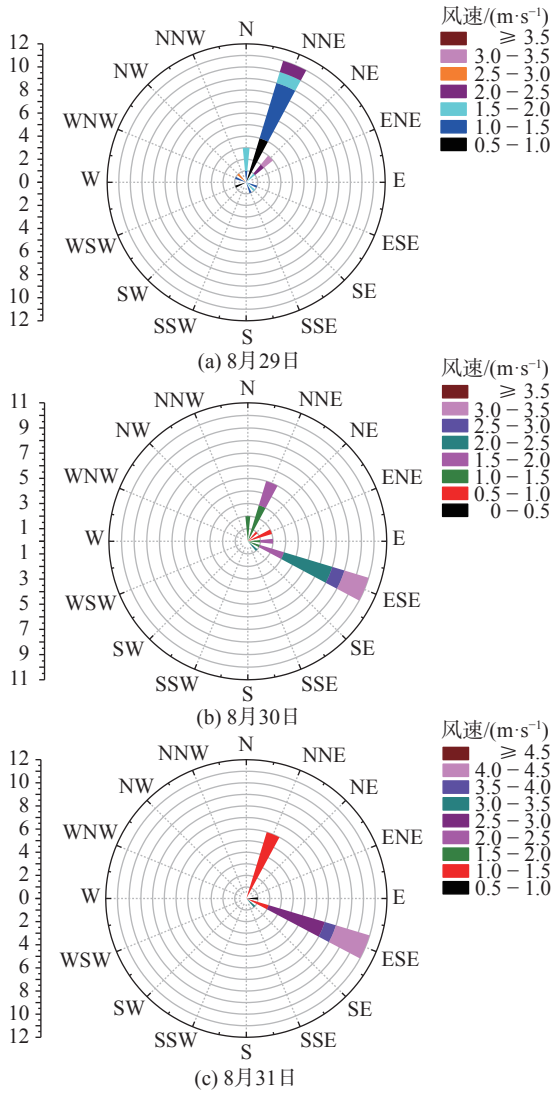



**图 8　沿海地带风速风向玫瑰图**

**Fig. 8　Wind directions and velocities**

4）综合各阶段对案例地区风场特性的研究，对峡谷主来流风沿峡谷的风剖面规律进行了总结。风速仪观测范围在 1.2～2 m 之间，手持气象站观测的范围在 2 m 以下，而激光测风雷达能够观测 50 m 以上的风场（图 9）。

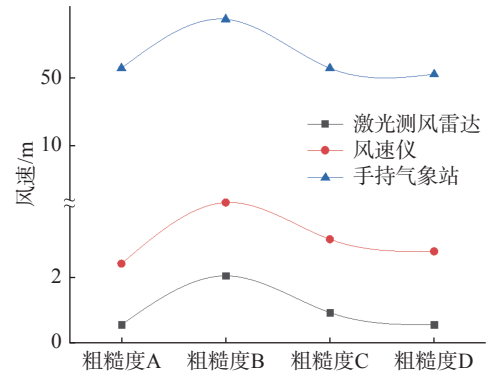



**图 9　不同测风设备风剖面规律**

**Fig. 9　Wind profiles measured by different equipments**

## 5　结　论

本文对国内外激光测风雷达的技术及设备研发现状、在风场观测领域的应用情况等进行了综述。激光测风雷达可同时测得不同高度的水平风速、垂直风速、风向数据、入流角等风场信息，具有测量精度高、分辨率高、探测范围广、响应速度快等优势。对于复杂地形情况，采用激光测风雷达和 CFD 数值模拟相结合，对获取准确的风场信息有重要意义。

针对目前激光测风雷达存在的数据可靠度受环境影响、雷达设备重量较大、移动工作能力较差等缺陷，通过总结与实践，做出如下展望：1）通过开发新的修正算法，可自动修正风向输出；2）根据不同的应用需求，将原有结构材料进行调整，以获取更轻更结实的外壳，比如使用碳纤维材料；3）提高测风雷达移动工作能力等，开发朝小型化、集成化、低成本等方向迈进；4）利用激光测风雷达三维风场反演，结合中尺度数据模拟和 CFD 微尺度数值模拟，能提高风场评估的准确度。

## 参　考　文　献：

[1] LIU Z L, BARLOW J F, CHAN P W, et al. A review of progress and applications of pulsed Doppler wind LiDARs[J]. Remote Sensing, 2019, 11(21): 2522.
doi: 10.3390/rs11212522

[2] 储玉飞, 刘东, 王珍珠, 等. 多普勒测风激光雷达的基本原理与技术进展[J]. 量子电子学报, 2020, 37(5): 580−600.
CHU Y F, LIU D, WANG Z Z, et al. Basic principle and technical progress of Doppler wind lidar[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2020, 37(5): 580−600 (in Chinese).

doi: 10.3969/j.issn.1007-5461.2020.05.007

[3] 马福民, 陈涌, 杨泽后, 等. 激光多普勒测风技术最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 23−34.
MA F M, CHEN Y, YANG Z H, et al. Latest development of laser Doppler wind measurement technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(18): 23−34 (in Chinese).
doi: 10.3788/LOP56.180003

[4] 罗杰, 侯再红, 靖旭, 等. 相干激光测风技术研究进展[J]. 量子电子学报, 2020, 37(2): 129−137.
LUO J, HOU Z H, JING X, et al. Advances in coherent laser wind measurement technology[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2020, 37(2): 129−137 (in Chinese).
doi: 10.3969/j.issn.1007-5461.2020.02.001

[5] 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 Y Z, WANG C, LIU Y P, et al. Research progress and application of coherent wind lidar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(2): 9−26 (in Chinese).

[6] RICCIARDELLI F, PIROZZI S, MANDARA A, et al. Accuracy of mean wind climate predicted from historical data through wind LIDAR measurements[J]. Engineering Structures, 2019, 201: 109771.
doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109771

[7] GULLÌ D, AVOLIO E, CALIDONNA C R, et al. Two years of wind-lidar measurements at an Italian Mediterranean Coastal Site[J]. Energy Procedia, 2017, 125: 214−220.
doi: 10.1016/j.egypro.2017.08.194

[8] 左金辉, 贾豫东. 多普勒激光雷达风场反演研究进展[J]. 激光与红外, 2021, 51(1): 3−8.
ZUO J H, JIA Y D. Research progress in wind field inversion of Doppler lidar[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(1): 3−8 (in Chinese).
doi: 10.3969/j.issn.1001-5078.2021.01.001

[9] HUFFAKER R M. Laser Doppler detection systems for gas velocity measurement[J]. Applied Optics, 1970, 9(5): 1026−1039.
doi: 10.1364/AO.9.001026

[10] PRASAD N S, SIBELL R, VETORINO S, et al. An all-fiber, modular, compact wind lidar for wind sensing and wake vortex applications[C]//2015 SPIE Defense and Security Conference, Baltimore, MD, 2015. SPIE 9465-11.
doi: 10.1117/12.2181170

[11] GENTRY B M, CHEN H L, LI S, et al. Glow: the goddard lidar observatory for winds[C]//2nd International Asia-Pacific Symposium on Remote Sensing of the Atmosphere, Environment, and Space, 2000, Sendai, Japan.
doi: 10.1117/12.417062.

[12] HENDERSON S W, HANNON S M. Advanced coherent lidar system for wind measurements[C]//Optics and Photonics 2005, San Diego, California, United States. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering: Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring VI, 58870I, 2005. SPIE 5887.
doi: 10.1117/12.620318.

[13] CHEN H L, GENTRY B M. Preliminary results of wind measurements by GLOW system in field campaigns[C]//3rd International Asia-Pacific Environmental Remote Sensing Remote Sensing of the Atmosphere, Ocean, Environment, and Space, 2002, Hangzhou, China.
doi: 10.1117/12.466524.

[14] SCHWEMMER G, WILKERSON T, Hancock J, et al. Holographic scanning UV telescope for the tropospheric wind lidar technology experiment[J]. Journal of the Washington Academy of Sciences, 2008, 94(2): 9−15.

[15] IMAKI M, KOJIMA R, KAMEYAMA S. Development of wavelength locking circuit for 1.53 micron water vapor monitoring coherent differential absorption LIDAR[J]. EPJ Web of Conferences, 2018, 176: 05039.
doi: 10.1051/epjconf/201817605039

[16] SAKIMURA T, WATANABE Y, ANDO T, et al. 1.5-μm high-average power laser amplifier using a Er, Yb: glass planar waveguide for coherent Doppler lidar[C]//SPIE Asia-Pacific Remote Sensing, Kyoto, Japan, 2012. SPIE 8526. Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring XIII, 852604.
doi: org/10.1117/12.976293

[17] KAMEYAMA S, SAKIMURA T, WATANABE Y, et al. Wind sensing demonstration of more than 30km measurable range with a 1.5μm coherent Doppler lidar which has the laser amplifier using Er, Yb: glass planar waveguide[C]//SPIE Asia-Pacific Remote Sensing, Kyoto, Japan, 2012. Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring XIII, 85260E, 2012.
doi: 10.1117/12.977330

[18] MIZUTANI K, ISHII S, AOKI M, et al. 2 μm Doppler wind lidar with a Tm: fiber-laser-pumped Ho: YLF laser[J]. Optics Letters, 2018, 43(2): 202−205.
doi: 10.1364/OL.43.000202

[19] ANSMANN A, WANDINGER U, LE RILLE O, et al. Particle backscatter and extinction profiling with the spaceborne high-spectral-resolution Doppler lidar ALADIN: methodology and simulations[J]. Applied Optics, 2007, 46(26): 6606−6622.
doi: 10.1364/AO.46.006606

[20] 郭商勇, 胡雄, 闫召爱, 等. 国外星载激光雷达研究进展[J]. 激光技术, 2016, 40(5): 772−778.
GUO S Y, HU X, YAN Z A, et al. Research development of space-borne lidar in foreign countries[J]. Laser Technology, 2016, 40(5): 772−778 (in Chinese).
doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.05.032

[21] STRAUME A G, ELFVING A, WERNHAM D, et al. ESA's spaceborne lidar mission ADM-Aeolus; project status and preparations for launch[J]. EPJ Web of Conferences, 2018, 176: 04007.
doi: 10.1051/epjconf/201817604007

[22] KUMER V M, REUDER J, FUREVIK B R. A comparison of LiDAR and radiosonde wind measurements[J]. Energy Procedia, 2014, 53: 214−220.
doi: 10.1016/j.egypro.2014.07.230

[23] 李冬梅, 郑永超, 潘静岩, 等. 相干多普勒激光测风雷达系统研究[J]. 光学技术, 2010, 36(6): 880−884.
LI D M, ZHENG Y C, PAN J Y, et al. Index system of coherence Doppler wind lidar[J]. Optical Technique, 2010, 36(6): 880−884 (in Chinese).
doi: 10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2010.06.023

[24] 潘静岩, 邬双阳, 刘果, 等. 相干激光测风雷达风场测量技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1720−1724.
PAN J Y, WU S Y, LIU G, et al. Wind measurement techniques of coherent wind lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(7): 1720−1724 (in Chinese).
doi: 10.3969/j.issn.1007-2276.2013.07.013

[25] LIU J Q, ZHU X P, DIAO W F, et al. All-fiber airborne coherent Doppler lidar to measure wind profiles[J]. EPJ Web of Conferences, 2016, 119: 10002.
doi: 10.1051/epjconf/201611910002

[26] 金效梅, 朱文越, 刘庆. 激光相干测风技术应用研究[J]. 大气与环境光学学报, 2020, 15(3): 161−173.
JIN X M, ZHU W Y, LIU Q. Application research of laser coherent wind technology[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2020,

15(3): 161−173 (in Chinese).

[27] 王冲. 1.5 μm波长全光纤多功能相干多普勒测风激光雷达[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
WANG C. 1.5 μm all-fiber multifunction coherent doppler wind lidar[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019. (in Chinese).

[28] SHANGGUAN M J, XIA H Y, WANG C, et al. Dual-frequency Doppler lidar for wind detection with a superconducting nanowire single-photon detector[J]. Optics Letters, 2017, 42(18): 3541−3544.
doi: 10.1364/OL.42.003541

[29] CHEN F, PENG H R, CHAN P W, et al. Assessing the risk of windshear occurrence at HKIA using rare-event logistic regression[J]. Meteorological Applications, 2020, 27(6): e1962.
doi: 10.1002/met.1962

[30] TSE S M, HAGIO M, MAEDA Y. Windshear detection by terminal Doppler weather radar during tropical cyclone mujigae in 2015[J]. Meteorological Applications, 2019, 26(4): 620−631.
doi: 10.1002/met.1789

[31] HON K K, CHAN P W. Alerting of hectometric turbulence features at Hong Kong International Airport using a short-range LIDAR[J]. Meteorological Applications, 2020, 27(5): e1945.
doi: 10.1002/met.1945

[32] 赵林, 杨绪南, 方根深, 等. 超强台风山竹近地层外围风速剖面演变特性现场实测[J]. 空气动力学学报, 2019, 37(1): 43−54.
ZHAO L, YANG X N, FANG G S, et al. Observation-based study for the evilution of vertical wind profiles in the boundary layer during super typhoon Mangkhut[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2019, 37(1): 43−54 (in Chinese).
doi: 10.7638/kqdlxxb-2018.0297

[33] 蔡彦枫, 黄增浩, 吴新桥, 等. 基于测风激光雷达的沿海架空输电线路台风观测方法[J]. 南方电网技术, 2020, 14(4): 17−23, 84.
CAI Y F, HUANG Z H, WU X Q, et al. Typhoon wind field observation method for overhead transmission lines in coastal area using Doppler lidar[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(4): 17−23, 84 (in Chinese).
doi: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2020.04.003

[34] 史文浩, 汤杰, 陈勇航, 等. 多普勒激光雷达探测台风“利奇马”边界层风场精度分析[J]. 热带气象学报, 2020, 36(5): 577−589.
SHI W H, TANG J, CHEN Y H, et al. Study on the accuracy of Doppler wind lidar in measuring the boundary layer wind field of typhoon Lekima[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2020, 36(5): 577−589 (in Chinese).
doi: 10.16032/j.issn.1004-4965.2020.053

[35] TSAI Y S, MIAU J J, YU C M, et al. Lidar observations of the typhoon boundary layer within the outer rainbands[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2019, 171(2): 237−255.
doi: 10.1007/s10546-019-00427-6

[36] MARUYAMA T, TOMOKIYO E, MAEDA J. Simulation of strong wind field by non-hydrostatic mesoscale model and its applicability for wind hazard assessment of buildings and houses[J]. Hydrological Research Letters, 2010, 4: 40−44.
doi: 10.3178/hrl.4.40

[37] 应有, 申新贺, 姜婷婷, 等. 基于中微尺度耦合模式的风电场风资源评估方法研究[J]. 可再生能源, 2021, 39(2): 195−200.
YING Y, SHEN X H, JIANG T T, et al. Research on wind resource assessment method based on the coupled mesoscale-microscale framework[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(2): 195−200 (in Chinese).
doi: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2021.02.009

[38] 罗勇, 曹鹏, 杨凤志, 等. 中尺度数据在风电项目前期开发过程中的应用现状[J]. 船舶工程, 2020, 42(S2): 233−235, 242.
LUO Y, CAO P, YANG F Z, et al. Application status of mesoscale data in early stage of development process of wind power projects[J]. Ship Engineering, 2020, 42(S2): 233−235, 242 (in Chinese).
doi: 10.13788/j.cnki.cbgc.2020.S2.045

[39] ZHANG X L, WEERASURIYA A U, TSE K T. CFD simulation of natural ventilation of a generic building in various incident wind directions: comparison of turbulence modelling, evaluation methods, and ventilation mechanisms[J]. Energy and Buildings, 2020, 229: 110516.
doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110516

[40] 余文林, 柯世堂. 基于WRF与CFD嵌套的台风下大型风力机流场作用与气动力分布[J]. 太阳能学报, 2020, 41(12): 260−269.
YU W L, KE S T. Flow field action and aerodynamic loads distribution for large-scale wind turbine under typhoon based on nesting of WRF and CFD[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(12): 260−269 (in Chinese).

[41] GARCÍA-SÁNCHEZ C, GORLÉ C. Uncertainty quantification for microscale CFD simulations based on input from mesoscale codes[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 176: 87−97.
doi: 10.1016/j.jweia.2018.03.011

[42] 唐昂, 傅军, 施红辉, 等. 基于实际峡谷地形风场数值模拟的建筑微观选址[J]. 浙江理工大学学报, 2015, 33(5): 423−428.
TANG A, FU J, SHI H H, et al. Micro building site selection based on numerical simulation of wind field on actual canyon terrain[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2015, 33(5): 423−428 (in Chinese).

[43] 傅军. 沿海地区山地丘陵风环境与新农村建筑群合理选址技术研究[M]. 浙江理工大学, 2017.
FU J. Field tests and numerical simulation analysis of coastal mountain hilly region wind environment[M]. Zhejiang Sci-Tech University, 2017. ISBN: 978-1-60595-271-0.

[44] 冯林, 傅军, 施红辉, 等. 山体地形中粗糙度对风速的影响研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(12): 3577−3583.
FENG L, FU J, SHI H H, et al. Study on influence of roughness on wind speed in mountain terrain[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(12): 3577−3583 (in Chinese).

[45] 吴强, 傅军, 徐煜佳, 等. 典型沿海丘陵地区风场变化特性实测研究[J]. 建筑热能通风空调, 2021, 40(4): 25−29.
WU Q, FU J, XU Y JI, et al. Experimental study on wind field variation characteristics in typical coastal hilly area[J]. Building Energy & Environment, 2021, 40(4): 25−29 (in Chinese).

（本文责编：王颖　　英文编审：董思卫）