

中华人民共和国行业标准

MH/T XXXX—XXXX

民航相干多普勒测风激光雷达 技术规范

Code for civil aviation coherent doppler wind lidar

(点击此处添加与国际标准一致性程度的标识)

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国民用航空局 发布

前 言

本文件依据《中国民用航空气象工作规则》制定，聚焦民航领域相干多普勒测风激光雷达系统的应用和建设，旨在满足民用航空领域大气风场探测业务应用及发展需求。为中国民用航空局首次制定并发布的民航相干多普勒测风激光雷达技术规范。

本文件主要规定了民航相干多普勒测风激光雷达系统的构成、功能、性能、通用质量特性、验收和培训、选址和配备以及包装、标志与运输要求。技术指标制定遵循核心指标统一要求、探测场景适配指标灵活调整的原则，明确水平风场探测、垂直风廓线探测、下滑道风场探测、尾涡探测等典型民航应用场景的差异化技术要求。在雷达文件存储方面，统一了径向速度数据、风廓线数据、起降通道数据、反演水平风数据等数据产品的命名规则、存储格式和数据结构，实现了不同厂商设备间的数据互通。在附录C中，较全面列举了风切变告警识别与算法方面的成果，并简要阐述了气象广义风切变与航空风切变的概念内涵及差异。

本文件旨在规范民航相干多普勒测风激光雷达产品的设计、生产和检验要求，统一数据格式及接口协议，明确设备在民航各类应用场景的技术要求，填补我国民航领域相干多普勒测风激光雷达专用标准空白，为该类雷达系统的研制、生产与建设应用提供技术依据，保障系统产品质量，提升其探测性能与应用能力。下一步，中国民用航空局将组织开展利用航空器报告与机载数据进行航空风切变告警的研究工作，并相继出台相关技术规范，持续完善风切变告警预警标准体系。

本规范共分七章和三个附录。

本规范的日常管理工作由中国民用航空局机场司负责。

主编单位：中国民航大学、中国民用航空西南地区管理局、南京信息工程大学、中国民用航空华北地区空中交通管理局、中国民用航空华东地区空中交通管理局、中国民用航空西北地区空中交通管理局

主 编：XXXX

参编人员：邹国良、邢伟宁、庄子波、李岩、舒志峰、张杰、张开俊、张曦、高兵、康晓华、靳国华、李为民

主 审：XXX

参审人员：XXX

目 次

1	总 则	- 1 -
2	术 语	- 2 -
3	基 本 规 定	- 4 -
4	选 址 与 规 划	- 5 -
5	功 能 、 性 能 与 特 性	- 6 -
5.1	系统功能	- 6 -
5.2	系统性能	- 9 -
5.3	通用质量特性	- 10 -
6	标 志 、 包 装 及 运 输	- 13 -
7	验 收 与 培 训	- 14 -
附 录 A	(规范性) 雷达文件存储数据格式	- 15 -
附 录 B	(规范性) 雷达数据产品色标规范	- 23 -
B.1	径向速度色标要求	- 23 -
B.2	水平风速色标要求	- 23 -
B.3	谱宽色标要求	- 24 -
附 录 C	(资料性) 风切变告警识别与算法	- 25 -
C.1	风切变探测设备	- 25 -
C.2	广义风切变和航空风切变	- 25 -
C.3	风切变告警识别方法	- 26 -

1 总 则

1.0.1 为满足民用航空领域大气风场探测业务应用及发展需求,规范民航相干多普勒测风激光雷达建设,本着安全适用、经济合理、节能环保的原则,制定本规范。

【条文说明】测风激光雷达是民用机场的重要组成部分,是一种晴空条件下的测风设备,利用激光的多普勒效应,通过探测大气中的气溶胶粒子散射来反演风场,具有时空分辨率高、能进行下滑道扫描和可用于晴空风场探测的优点。因此,在工程建设时应遵守上述技术标准。

1.0.2 本规范适用于民航相干多普勒测风激光雷达建设。

1.0.3 民航相干多普勒测风激光雷达建设除应符合本规范外,尚应符合国家现行有关规定或标准的要求。

2 术 语

2.0.1 相干多普勒测风激光雷达 **coherent Doppler wind lidar**

利用脉冲激光作用于大气气溶胶粒子产生的多普勒频移效应,采用相干探测体制,实现对大气风场遥测的一种激光雷达,在民航领域通常用于三维风场、飞机尾涡探测。

[来源: QX/T 605-2021, 3.1, 有修改]

注: 本规范后文中用“雷达”或“测风激光雷达”代替“相干多普勒测风激光雷达”。

2.0.2 最大采集距离 **maximum acquisition range**

雷达信号被记录和处理的距离。

2.0.3 最大作用距离 **maximum operational range**

在指定数据获取率条件下,从测量信号中获取具有特定准确度风矢量的最大空间距离。最大作用距离与激光雷达参数和大气条件相关,且不大于最大采集距离。

2.0.4 最小作用距离 **minimum operational range**

在指定数据获取率条件下,从测量信号中获取具有特定准确度风速的最小空间距离。最小作用距离也称为盲距或盲区。

2.0.5 距离分辨率 **range resolution**

雷达能够获得独立信号数据的最短距离间隔,一般根据探测需求最短距离间隔可变。

2.0.6 角分辨率 **angular resolution**

雷达的指向精度,雷达在角度上区分邻近目标的能力,通常以最小可分辨的角度来度量。对于测风激光雷达因其光束较窄,角分辨率取决于系统伺服电机转动精度。

2.0.7 时间分辨率 **temporal resolution**

雷达能够获得独立信号数据的最短时间间隔。

2.0.8 径向速度 **radial velocity**

指大气目标物(如气溶胶)相对于雷达天线中心方向的速度分量,其本质是真实风矢量在雷达波束指向方向上的投影。在民航领域,规定负值代表朝向雷达的径向速度,正值代表远离雷达的径向速度。

2.0.9 垂直气流 **vertical air current**

垂直气流一般指气流的上下垂直运动。在民航领域,定义气流上升方向为正,下沉方向为负。

2.0.10 风切变 **wind shear**

气象学上,在大气中垂直或水平方向上风速和/或风向的快速变化。这种变化可以在不同高度、不同纵向或横向距离上发生,通常伴随着气流的不稳定性。

2.0.11 大气湍流 **turbulence**

大气运动中的一种不规则、随时间与空间快速变化的流动状态，表现为风速和/或风向的无规波动与涡旋结构，航空上，用涡动耗散率（Eddy Dissipation Rate, EDR）来衡量湍流强度。

2.0.12 航空风切变 **aviation wind shear**

指大气中风矢量（包括水平风速、风向及垂直气流）在空间或时间上的突然变化。该现象会导致飞机在起飞、进近和着陆等关键阶段发生空速与升力的剧烈波动，进而引发飞行状态失稳或偏离预定飞行路径，是威胁民航运行安全的主要危险天气之一。

2.0.13 飞机尾涡 **wake vortex**

飞机在飞行过程中，由于机翼上下表面压力差引发的空气绕流，在翼尖处形成的一对反向旋转的强烈涡流。这些涡流从翼尖向后延伸，形成螺旋状气流，是飞机产生升力的副产品。

2.0.14 下列缩略语适用于本文件。

PPI: 平面位置显示扫描（Plan Position Indicator）

RHI: 距离高度显示扫描（Range Height Indicator）

DBS: 多普勒波束摆动扫描（Doppler Beam Swinging）

GP: 下滑道扫描（Glide Path Scan）

VCP: 体扫（Volume Coverage Pattern）

LOS: 视线路径观测（Line of Sight）

FWHM: 半高全宽（Full Width at Half Maximum）

SNR: 信噪比（Signal-to-Noise Ratio）

FTP: 文件传输协议（File Transfer Protocol）

TCP/IP: 传输控制协议/网际协议（Transmission Control Protocol/Internet Protocol）

AC: 交流电（Alternating Current）

UPS: 不间断电源（Uninterruptible Power Supply）

LRU: 外场可更换单元（Line Replaceable Unit）

EMC: 电磁兼容性（Electromagnetic Compatibility）

EMI: 电磁干扰（Electromagnetic Interference）

RFI: 射频干扰（Radio Frequency Interference）

3 基本规定

- 3.0.1** 民航相干多普勒测风激光雷达建设工程可按照构成、功能、性能、通用质量特性选用设备。
- 3.0.2** 雷达系统主要由激光发射系统、光学接收系统、伺服扫描系统、光电转换和数据采集系统、信号处理系统、显示和控制终端及附属设备（供电、通信、防雷、雷达指北标定装置等）、远程控制终端和用户终端组成。
- 3.0.3** 技术指标制定遵循核心指标统一要求、探测场景适配指标灵活调整的原则，明确水平风场探测、垂直风廓线探测、下滑道风场探测、尾涡探测等典型民航应用场景的差异化技术要求。
- 3.0.4** 雷达文件存储应统一径向速度数据、风廓线数据、起降通道数据、反演水平风数据等数据产品的命名规则、存储格式和数据结构，不同相干多普勒测风激光雷达厂商设备间的数据实现互通。在附录C中，较全面列举了风切变告警识别与算法方面的成果，简要阐述了气象广义风切变与航空风切变的概念内涵及差异。
- 3.0.5** 规范民航相干多普勒测风激光雷达产品的设计、生产和检验要求，统一数据格式及接口协议，明确设备在民航各类应用场景的技术要求。

4 选址与规划

4.0.1 探测风场的激光雷达建议布设于机场跑道落地端或跑道中间点附近，位于跑道中心线外侧150m至500m区域。确保覆盖飞机主降方向/次降方向接地带风场，提供低空风切变告警和预警。

4.0.2 探测航空器尾涡时，建议布设于跑道起降端，与跑道延长线垂直外侧150m至300m范围内。覆盖跑道入口向外500m至1000m的下滑轨迹区。

4.0.3 用于机场风场探测用途的测风激光雷达，一般应在机场主降方向布设一部。枢纽机场建议在跑道两端和中间布设各一部，实现全跑道及进近区域的全覆盖。

5 功能、性能与特性

5.1 系统功能

5.1.1 工作模式包括多普勒波束摆动 (DBS) 模式、平面位置显示 (PPI) 模式、距离高度显示 (RHI) 模式、下滑道扫描 (GP) 模式、体扫 (VCP) 模式和自定义模式。

5.1.2 数据产品的设计应符合下列规定：

1) 雷达应当具有生成原始数据、二次产品和图像产品的功能。

2) 雷达原始数据产品应当包括SNR、径向速度、谱宽、谱强等（数据文件头信息应当包括台站信息、性能参数、观测参数、数据记录参数信息）。

3) 雷达二次产品数据包括但不限于下列：

基本数据产品：基于原始数据反演的水平风速风向、垂直速度、垂直风廓线、侧风廓线、速度方位显示产品；

物理量产品：湍流、涡度、散度、风切变指数（不包含对航空器影响的判断）。

4) 雷达原始功率谱数据、秒级径向数据及平均径向数据应当在存储前进行质量控制，质量控制原则包括但不限于下列：

在信号采集及信号转换阶段，采用减弱背景信号、增强累加信号等方法处理；

秒级径向数据可以从信噪比阈值、数据时空连续性等方面进行处理；

二次产品数据质量控制以原始数据为依据进行处理。

5) 数据产品处理软件应能包括但不限于下列：

能分析并生成多种二次产品，包含但不限于风场反演类产品、识别告警类产品；

可以按用户需求自行设定二次产品的距离范围、高度范围、精度等参数信息；

二次产品的形式需支持数字文档、图片等多种形式；

二次产品的文件或图片名称可由用户自行设置；

二次产品的分发方式应包含FTP、网络、有通知的分发等方式；

二次产品的分发通道不能少于10个；

二次产品分发时用户可按需求添加底图、线条、点等信息；

原始数据、二次产品、自动识别告警产品、反演产品以及图像产品的保存位置和保存周期；

图像产品的输出方式、输出位置；

图像产品的色标等级编码及色调符合本标准附录B，也具备支持用户自行设定色标的的能力；

编辑和设置地理、跑道及空管背景信息；

基本产品、二次产品的历史数据的调用展示分析；

识别告警产品、系统告警阈值和其他物理量参数阈值修改和设置；

用户自定义雷达的工作模式；

时区、报文或语音播报方式和背景色等其他参数的调整。

5.1.3 雷达显示软件功能应能包括但不限于下列：

实时显示雷达回波和数据产品，实时显示雷达状态参数和告警信息。

显示软件可以显示一次产品和二次产品；

产品显示根据扫描模式周期性刷新，可以通过切换、分屏同时对多台雷达或多种扫描模式进行显示；

显示时支持鼠标随动显示、状态条显示功能；

应当具有对各种二次产品做各种显示变化（包括叠加、放大和动画）功能；

支持图像产品的保存，叠加地图地形，支持测距，叠加显示地理及空管背景信息功能；

显示测站位置信息：包括名称、经纬度、高程；

具有检索回放系统储存的产品，历史产品支持叠加、放大和动画播放交互功能，具有叠加显示地理及空管要素信息的功能。

5.1.4 控制终端包括参数设定界面和操控界面。应当具有远程开机、待机、发射、重启、关机等功能。

5.1.5 扫描模式控制的设计应符合下列规定：

可实时操作雷达执行PPI、RHI、体积扫描和下滑道扫描。可设置扫描范围（方位角、仰角）、分辨率（角度、距离库）、脉冲宽度、扫描速度和优先级等。

5.1.6 参数配置与校准的设计应符合下列规定：

可设置激光脉冲功率，脉冲宽度、重复频率、扫描速度、距离门、接收器增益等。执行内部校准、几何对准等。运行内置测试程序，检查各部件状态。雷达应当具有外部北斗授时或基准时钟信号授时同步功能。

5.1.7 雷达可以预设工作任务，配置工作方式、扫描模式、二次产品、数据存储，并让系统在不同时间、不同条件或不同优先级下自动执行。同时，根据不同用户的需求，分发产品、发出警报和预警。

5.1.8 雷达远程控制终端应当具有监控各子系统工作状态、环境参数的功能。异常时进行故障诊断、告警。监控信息可储存、查询、输出。系统监控信息包括但不限于下列：

系统重要参数：激光发射功率、激光器温度、湿度、重复频率、激光器脉宽；扫描方式和速度、方位角、俯仰角；

运行环境及附属设备状态参数；

信号处理器工作状态：距离门数目、信噪比阈值、频移；

各模块通讯状态、各模块工作状态等；

任何硬件或软件异常会立即弹出警报；

记录所有操作、事件和警报，用于事后分析。

5.1.9 雷达应支持API接口功能，可对雷达配置、编程、状态监控、日志访问和数据下载。可轻松将雷达数据集成至第三方软件。实时风数据传输到接口的延迟低于0.5秒。支持历史数据的按时间范围查询与下载。

5.2 系统性能

5.2.1 雷达主要技术指标应满足表5.2.1的规定。雷达显示与控制终端主要性能指标应满足表5.2.1-2的规定。

表 5.2.1-1 雷达技术指标

项目		技术指标
工作波长		1500 nm ~ 2200 nm
FWHM		机场测风: 200 ns ~ 1333 ns 尾涡测量: ≤ 100 ns
扫描模式		PPI、RHI、DBS、GP、VCP、自定义
扫描范围	方位	0° ~ 360°
	俯仰	-2° ~ 90°
径向最大有效探测距离		不小于10 km (能见度≥5km)
径向最小作用距离		不大于60 m
径向最大采集距离		大于10 km
径向距离分辨率		机场测风: 30 m ~ 200 m (可调节) 尾涡测量: ≤ 15m
径向风速测量范围		-50 m/s ~ 50 m/s
径向风速测量误差		不大于0.1 m/s
径向风速分辨率		不大于0.01 m/s
指向精度		不大于0.1°
时间分辨率	径向	0.1 s ~ 10 s (可调节)
	廓线	不大于1 min
最大扫描速度	方位	大于等于20° /s (可调)
	俯仰	大于等于15° /s (可调)
水平风速测量范围		不小于50 m/s
水平风速测量误差		不大于0.5m/s
水平风速分辨率		不大于0.1 m/s
垂直气流测量范围		-20 m/s ~ 20 m/s
垂直气流测量精度		不大于0.3 m/s
风向测量范围		0~360°
水平风向分辨率		不大于0.1°
水平风向测量误差		不大于5°
探测场景要求	水平风场探测	可实现0~360° PPI扫描, 最大作用距离不小于10km, 且距离分辨率不大于50m、角度分辨率不大于2° 的情况下, 时间分辨率不大于60s;
	水平风垂直风廓线探测	DBS光束扫描, 最大作用距离不小于3km, 且距离分辨率不大于10m的情况下, 时间分辨率不大于10s
	下滑道风场探测	最大作用距离不小于10km, 且距离分辨率不大于50m的情况下, 角度分辨率不大于0.2° , 时间分辨率不大于25s

	尾涡探测	最大作用距离不小于1km, 且距离分辨率不大于2m, 角度分辨率不大于0.2° 的情况下, 时间分辨率不大于10s
	数据输出延迟	从物理探测到数据可用于显示, 总延迟 < 10秒
	数据产品	按本标准5.1.2规定
	功耗 (峰值)	不大于1.5 kW
	连续工作时间	应具有无人值守的自动运行功能和 7d × 24h 连续工作能力
<p>注: 最大作用距离是指数据获取率不小于80%, 能见度大于5km条件下, 能从雷达测量信号中获取特定准确度风速的最大空间距离; 最小作用距离是指雷达信号被记录和处理的距离; 指向精度是指扫描步进最小角度; 测量误差是指均方根误差。</p>		

表 5.2.1-2 雷达显示与控制终端主要性能指标

项目	技术指标
参数管理	测站位置信息, 包括名称、经纬度、海拔
	部件温度、激光脉冲能量、脉冲重复频率
	雷达校正过程数据
	运行环境及附属设备状态参数
显示产品	产品生成时间不大于5秒, 设置雷达扫描模式后应立即生效
	基数据: 径向风速、谱宽、谱强和信噪比 产品数据: 径向风切变、方位风切变、仰角风切变、下滑道风切变、综合风切变、水平风速、风向、湍流、垂直气流、尾涡场、涡核位置、涡环量
在线监控	参数超限告警提示、故障诊断
数据接收与处理	接收原始数据、状态参数、告警信息
	生成数据产品, 并以数据文件的形式存档和上传
远程控制	具有控制激光发射系统开/关、监控光电转换系统工作状态、设置工作模式
信息管理	维护维修信息、关键器件出厂测试重要参数及更换信息, 其中维护维修信息包括适配参数变更、软件更迭、标定过程

5.2.2 供电与通信应符合下列规定:

雷达配市电, 单相交流, AC220V ± 10%, 50Hz ± 5%, 配备UPS应能满足4小时以上供电。

雷达配备满足TCP/IP协议的以太网光纤通信接口和无线通信接口, 传输速率不低于100Mbit/s。

5.3 通用质量特性

5.3.1 环境适应性应符合下列规定:

雷达工作温度、贮存温度、工作湿度、抗风能力以及防雷应满足表5.3.1中的规定。

表 5.3.1 雷达环境适应性指标

项目	技术指标
工作温度	- 40°C ~ +50°C, 室内装置工作温度为+0°C~+40°C
贮存温度	- 45°C ~ +60°C, 室内装置的贮存温度为+0°C~+60°C

工作湿度	0 ~ 100%，无凝结
抗风能力	对于带有扫描装置的系统，方位、俯仰机构上应有电气、机械安全设施，以保护设备在工作与运输过程中的安全。方位、俯仰控制应有保护电路。应能承受50 m/s的最大阵风风速、30 m/s的最大平稳风速，伺服扫描系统应不产生永久性变形或破坏。
防雷要求	雷达应当具有较强的综合防雷击能力，防雷设施应当符合气象设备防雷规范的要求，接地电阻应小于4Ω。
其他要求	雷达室外部分应具有防水、防霉、防盐雾、防风沙等措施，防护等级IP65，冲击、振动、淋雨应符合国家有关部门对于观测设备的规定。光学窗口应当具备防止凝露和结霜的能力

5.3.2 可靠性与维修性应符合下列规定：

雷达结构布局的设计在保证可达性的条件下，能够确定最小可更换单元（LRU），采用更换最小可更换单元的方法进行维修。雷达的各模块与组件还应设置必要的工作状态指示，便于维修时检测。各模块、组件的装配尽量采用插拔式结构，应具有良好的可达性，采用简单的通用工具即可进行维修操作。雷达可靠性、架拆应满足表4中的规定。

表 5.3.2 雷达可靠性、架拆指标

项目	技术指标
平均无故障时间	不小于2500 h
平均故障修复时间	不大于1 h
架设、拆收	雷达可采用固定架设和移动平台式架设，动平台式架设时间不大于2 h，拆收时间不大于1 h；工作人员不超过3人

5.3.3 电磁兼容与互换性应符合下列规定：

雷达应具有抗电源干扰、电磁干扰、无线电频率干扰的能力，应当符合电磁兼容性(EMC)、电磁干扰(EMI)、无线电频率干扰(RFI)的国内国际标准，电磁兼容性应满足GB/T 17626.1-2006第6章的规定。

雷达备份零件、部件、组件和功能单元均能在现场更换，无需调整而正常工作。

5.3.4 安全性、结构与贮存要求应符合下列规定：

雷达应有安全性设计，确保雷达按规定条件进行制造、安装、运输、贮存、使用和维护时的人身安全和设备安全。满足《激光产品的安全 第1部分：设备分类、要求（GB 7247.1-2012）》人眼安全的系统要求光学窗口粘贴激光安全警示标识。

雷达数据安全性要符合《智慧民航数据治理规范数据安全（MH/T 5057-2021）》的要求。

雷达网络安全性要符合《民用航空网络与信息安全管理规范》(MH/T 0035-2012)、《民用航空跨网数据交换安全技术要求》(MH/T 0073-2020)的要求。

雷达底座应预留与架设平台机械接口。激光发射系统、光学接收系统、光电转换及数据采集系统、伺服扫描系统、信号处理系统等分系统安装在组合机箱内，形成一体化的结构，且能够实现最小可更换单元的快速拆装。

雷达主机结构设计应综合考虑室外工作环境、电磁兼容性、可维修性和通风散热等要求，并在机壳预留接地端子。

雷达应具备镜面污染检测告警和自动清洁镜面功能

雷达显示和控制终端采用商用计算机或工控机及外围设备组成,应符合通用的商业或工业产品设计标准。本地监控终端和远程监控终端之间采用标准的网络协议和硬件接口连接。

应按维护或使用说明书要求进行贮存保管,当贮存时间超过六个月时,进行通电。不应该将包装的测风激光雷达放在靠近有热辐射和直接照射的地方。

伺服扫描系统应有保护电路和机械安全保护措施。

6 标志、包装及运输

6.0.1 标志与可追溯性应符合下列规定：

雷达标志应包括但不限于下列：

- a) 生产商标；
- b) 产品型号和名称；
- c) 制造厂名；
- d) 制造日期或生产批号；
- e) 雷达系统的主要组件和可更换单元都应当具有唯一的部件号和序列号，唯一标识应直接、永久地标记在部件实体上；
- a) 包装箱编号（No. ）；
- b) 包装储运图示标志；
- c) 外形尺寸（长×宽×高）；
- d) 毛重（kg）；
- e) 到站名称。

6.0.2 包装应符合下列规定：

包装箱外表明显处，应注明防雨、防晒、防潮、防磁、防辐射等要求。雷达包装箱内应有完整的随机文件、随机工具，包括但不限于下列：

- a) 装箱或部件清单；
- b) 产品合格证书；
- c) 技术说明书；
- d) 使用维护说明书；
- e) 出厂测试报告；
- f) 随机备件；
- g) 随机工具。

6.0.3 运输应符合下列规定：

雷达装箱后的可以航空、公路、铁路和水运运输；运输装卸过程中应避免高温日晒、雨雪淋湿和强烈撞击；不应和易燃、易爆、易腐蚀的物品同车装运。

7 验收与培训

7.0.1 雷达验收包括但不限于下列：

- a) 雷达及附属设备的交付验收分为出厂测试和现场测试两个步骤；
- b) 出厂前严格按照出厂测试大纲进行测风激光雷达的技术指标测试、例行试验和考机试验等，应邀请用户代表参加；
- c) 雷达安装、调试完成后，应严格按照现场测试大纲要求对雷达进行全面的测试、标定，合格后投入业务试运行；
- d) 供应商和用户应共同参加现场测试；
- e) 雷达附属设备按照安装、调试、标定操作手册和验收细则，以供应商为主，在用户参与下进行安装、调试、标定、验收。
- f) 应组织实施试运行，并针对雷达风场探测的准确性开展对比观测。

7.0.2 雷达培训包括但不限于下列：

- a) 供应商家应提供随机配套的教学录像以及不少于两周的现场培训；
- b) 雷达使用人员培训结束后进行考核，合格后才能上岗操作。

附 录 A
(规范性)
雷达文件存储数据格式

测风激光雷达以规定格式存储数据，方便数据的录取。数据存储在指定计算机设定的目录下，测试数据按天存储在一个子目录下。

数据存储格式包括数据文件的命名格式和数据格式。

输出数据文件的分类为：

- a) 径向速度数据文件（1级数据）；
- b) 风廓线数据文件（2级数据）；
- c) 扫描风场数据文件（2级数据）。
- d) 风切变监测报告文件（3级数据）。

其中，所有文件均采用二进制格式（bin）存储，采用的数据类型有：char（1字节），int（4字节），float（4字节），double（8字节）。

A.1 径向速度数据文件

A.1.1 命名格式

命名格式如下：AWL_YYYYMMDDhhmmss_站点号_观测模式_雷达编号.RADV

其中：AWL表示机场测风激光雷达（Airport Wind Lidar）；

YYYY表示4位年份；

MM表示月份（01-12）；

DD表示日（01-31）；

hh表示小时（00-23）；

mm表示分钟（00-59）；

ss表示秒（00-59）；

观测模式：DBS、VAD、PPI、RHI、LNDCHL；

雷达编号：

扩展名RADV表示原始径向速度数据，文件名中的观测时间均为观测开始时间。

A.1.2 数据格式

文件由文件头和径向速度数据组成。文件头包括文件标识、设备性能参数、观测参数。径向速度数据根据需求实时动态生成。在一种探测模式下，其中DBS、VAD和LNDCHL一分钟形成一个文件，PPI、RHI一个探测周期形成一个文件。读写时，文件单字节对齐。

(1) 文件标识

structFileFlag（共73字节）

表 A.1 径向风速文件标识

类型	变量名	字节数	绝对编译地址	说明
char	FileID[8]	8	0	文件标识, 这里为AWLRADVR
char	VersionNo[5]	5	8	数据格式版本号, 2位整数2位小数, 如01.00
int	FileHeaderLength	4	13	表示文件头长度(字节数), 2位整数
char	Temp[56]	56	17	保留

(2) 设备性能参数

struct LIDARPERFORMANCEPARAM PerformanceInfo (共40字节)

表 A.2 设备性能参数

类型	变量名	字节数	绝对编译地址	说明
float	WaveLength	4	73	发射波长(纳米), 4位整数1位小数
int	Prf	4	77	脉冲重复频率(赫兹), 5位整数
int	PulseW	4	81	脉冲宽度(纳秒), 3位整数
int	PulseE	4	85	激光脉冲能量(微焦)
int	AccuPluse	4	89	累计脉冲数(功率谱积分时间内)
int	ADSample	4	93	系统采样率(MHz)
float	ZeroVFP	4	97	中心频率(MHz)
float	StrVFP	4	101	起始频率(MHz)
float	StpVFP	4	105	结束频率(MHz)
char	Temp[3]	3	109	保留字
char	observNum	1	112	后面观察参数的个数

(3) 观测参数

struct LIDAROBSERVATIONPARAM ObservationInfo (共112字节)

表 A.3 观测参数

类型	变量名	字节数	绝对编译地址	说明
char	SYear[4]	4	113	观测记录开始时间(年), 4位整数
char	SMonth[2]	2	117	观测记录开始时间(月), 2位整数
char	SDay[2]	2	119	观测记录开始时间(日), 2位整数
char	SHour[2]	2	121	观测记录开始时间(时), 2位整数
char	SMinute[2]	2	123	观测记录开始时间(分), 2位整数
char	SSecond[2]	2	125	观测记录开始时间(秒), 2位整数
char	EYear[4]	4	129	观测记录结束时间(年), 4位整数
char	EMonth[2]	2	131	观测记录结束时间(月), 2位整数
char	EDay[2]	2	133	观测记录结束时间(日), 2位整数
char	EHour[2]	2	135	观测记录结束时间(时), 2位整数
char	EMinute[2]	2	137	观测记录结束时间(分), 2位整数
char	ESecond[2]	2	139	观测记录结束时间(秒), 2位整数
char	ObsvMode[6]	6	141	观测模式(DBS/VAD/PPI/RHI/LNDCHL)
float	AzStart	4	147	方位扫描起点角度
float	AzEnd	4	151	方位扫描终点角度
float	AzStep	4	155	方位扫描角分辨率
float	EIStart	4	159	俯仰扫描起点角度
float	EIEnd	4	163	俯仰扫描终点角度
float	EIStep	4	167	俯仰扫描角分辨率
int	ScanNum	4	171	径向波束个数, 4位整数
int	StartBin	4	175	测量起始距离(米), 5位整数
int	EndBin	4	179	测量终止距离(米), 5位整数

int	BinLength	4	183	距离库的长度（米），3位整数
int	BinNum	4	187	距离库的个数，3位整数
int	Fft	4	191	FFT点数，4位整数
int	RcdNum	4	195	探测次数（扫描周期数）
short int	ModelNum	2	199	混合探测模式下所有模式的总数m（非混合模式为1）
short int	ModelNo	2	201	混合模式下探测模式序号（0~m）（非混合模式始终为0）
Int	xpoin	4	203	着地点X坐标位置（起降通道模式有效，其他模式保留）
Int	ypoint	4	207	着地点Y坐标位置（起降通道模式有效，其他模式保留）
int	XAngle	4	211	起降通道方位角（起降通道模式有效，其他模式保留）
int	YAngle	4	215	起降通道俯仰角（起降通道模式有效，其他模式保留）
char	Temp[6]	6	219	保留字

单一模式下观测参数只有一个，混合模式下，观测参数有ModelNum个，按探测模式序号ModelNo依次存储。

（4）径向速度数据

struct RADVR RadVr（共71+4*BinNum*4字节）

表 A. 4 径向风场

类型	变量名	字节数	绝对编译地址	说明
BYTE	ModelNo	1	225+ (ModelNum-1) × 112	混合模式下探测模式序号（0~m）（非混合模式始终为0）
char	SHour[2]	2	226+ (ModelNum-1) × 112	观测记录时间（时），2位整数
char	SMinute[2]	2	228+ (ModelNum-1) × 112	观测记录时间（分），2位整数
char	SSecond[2]	2	230+ (ModelNum-1) × 112	观测记录时间（秒），2位整数
float	BeamAz	4	232+ (ModelNum-1) × 112	波束方位角，3位整数2位小数
float	BeamEl	4	236+ (ModelNum-1) × 112	波束俯仰角，3位整数2位小数
float	flatBeamAz	4	240+ (ModelNum-1) × 112	转台方位角
float	flatBeamEl	4	244+ (ModelNum-1) × 112	转台俯仰角
float	longitude	4	248+ (ModelNum-1) × 112	探测数据所在位置经度
float	latitude	4	252+ (ModelNum-1) × 112	探测数据所在位置纬度
float	Altitude	4	256+ (ModelNum-1) × 112	探测数据所在位置海拔高度
float	V	4	260+ (ModelNum-1) × 112	雷达平台相对于大地的绝对速度（固定不动则为0）
float	VEAST	4	264+ (ModelNum-1) × 112	雷达平台沿东向相对于大地的速度（固定不动则为0）
float	VNORTH	4	268+ (ModelNum-1) × 112	雷达平台沿北向相对于大地的速度（固定不动则为0）
float	ZAixV	4	272+ (ModelNum-1) × 112	雷达平台沿垂直方向的速度（固定不动则为0）
float	StemAngle	4	276+ (ModelNum-1) × 112	雷达平台移动方位角（度）（固定不动则为0）
float	VerticalAngle	4	280+ (ModelNum-1) × 112	雷达平台纵摇角（度）（固定不动则为0）
float	TransverseAngle	4	284+ (ModelNum-1) × 112	雷达平台横摇角（度）（固定不动则为0）
int	ScanNo	4	288+ (ModelNum-1) × 112	扫描波束序号（0~），4位整数
int	BinNum	4	292+ (ModelNum-1) × 112	距离库的个数，3位整数
float	RadVrData[BinNum][4	296+ (ModelNum-1) × 112	径向速度、谱宽、信噪比、频谱强

	5]			度数据、距离
--	----	--	--	--------

注：径向速度数据存储含义如下：

RadVrData[i][0, 1, 2, 3, 4]——依次表示第ScanNo个扫描波束（方位角为BeamAz，俯仰角为BeamEl）的，第i个距离库的径向速度、谱宽、信噪比、频谱峰强度、距离，无效数据径向速度标识为999，谱宽、信噪比、频谱强度标识为0；一个波束存储一次RadVrData变量数据，多个波束按波束顺序进行顺序存储。

ScanNo是每个测量波束在一个扫描周期内的编号，雷达设置工作参数完成后，系统自动按扫描顺序为每个波束指向分配一个ScanNo编号。

A.2 风廓线数据文件

A.2.1 命名格式

命名格式如下：AWL_YYYYMMDDhhmmss_站点号_雷达编号_ROBS.WPD（实时风廓线数据）

AWL_YYYYMMDDhhmmss_站点号_雷达编号_AVG××.WPD（平均风数据）

其中：AWL表示机场测风激光雷达（Airport Wind Lidar）；

YYYY表示4位年份；

MM表示月份（01-12）；

DD表示日（01-31）；

hh表示小时（00-23）；

mm表示分钟（00-59）；

ss表示秒（00-59）；

雷达编号：

ROBS：表示实时风廓线数据

AVG××：表示风廓线数据（平均风），××为平均时间（分钟）

扩展名WPD，表示风廓线数据文件，文件名中的时间均为观测开始时间。

A.2.2 数据格式

文件由文件头和风廓线数据组成。文件头包括文件标识、设备性能参数、观测参数。风廓线数据根据需求实时动态生成。其中实时风廓线数据一分钟形成一个文件，存储该分钟内的所有瞬时数据。平均风数据按平均时间形成一个文件，存储该平均时间内数据的平均值。读写时，文件每部分单字节对齐。

(1) 文件标识

structFileFlag（共73字节）

表 A.5 风廓线数据文件标识

类型	变量名	字节数	绝对编译地址	说明
char	FileID[8]	8	0	文件标识，这里为AWLWNDPR
char	VersionNo[5]	5	8	数据格式版本号，2位整数2位小数，如01.00

int	FileHeaderLength	4	13	表示文件头长度（字节数），2位整数
char	Temp[56]	56	17	保留

(2) 设备性能参数、观测参数的定义同1.1.2部分。

(3) 风廓线数据

struct WNDPRF WndPrf (共58+4*BinNum*6字节)

表 A.6 风廓线数据

类型	变量名	字节数	绝对编译地址	说明
char	SHour[2]	2	225	观测记录时间（时），2位整数
char	SMinute[2]	2	227	观测记录时间（分），2位整数
char	SSecond[2]	2	229	观测记录时间（秒），2位整数
float	V	4	231	雷达平台相对于大地的绝对速度
float	VEAST	4	235	雷达平台沿东向相对于大地的速度
float	VNORTH	4	239	雷达平台沿北向相对于大地的速度
float	ZAixV	4	243	雷达平台沿垂直方向的速度
float	latitude	4	247	探测数据所在位置经度
float	longtitude	4	251	探测数据所在位置纬度
float	Altitude	4	255	探测数据所在位置海拔高度
float	StemAngle	4	259	雷达平台移动方位角（度）
float	VerticalAngle	4	263	雷达平台纵摇角（度）
float	TransverseAngle	4	267	雷达平台横摇角（度）
int	BinNum	4	271	距离库的个数，3位整数
int	BandNum	4	275	使用的波束数目，3位整数
int	WndAvg	4	279	风平均时间（0表示瞬时风）
float	WndPrfData[BinNum][6]	4	283	风廓线数据

注：风廓线数据存储含义如下：

WndPrfData[i][0, 1, 2, 3, 4, 5]——依次表示第i个距离库的高度层（米）、风速（米/秒）、风向（角度）、风速标准偏差（0为无平均）、垂直气流（米/秒）、风可信度（-1：无数据，0：数据可疑，1：数据可信）；

观测记录时间：指参与计算的最后一个波速探测时间。

一个风廓线数据存储一次WndPrf变量数据，多个风廓线按时间顺序进行顺序存储。

A.3 起降通道文件

A.3.1 命名格式

命名格式如下：AWL_YYYYMMDDhhmmss_站点号_雷达编号_ROBS.LWD（实时起降通道数据）

AWL_YYYYMMDDhhmmss_站点号_雷达编号_AVG××.LWD（平均风数据）

其中：AWL表示机场测风激光雷达（Airport Wind Lidar）；

YYYY表示4位年份；

MM表示月份（01-12）；

DD表示日（01-31）；

hh表示小时（00-23）；

mm表示分钟（00-59）；

ss表示秒 (00-59);

雷达编号:

AVG××: 表示平均, ××为平均时间 (分钟)

TR××: 表示刷新时间 (平均风), 扩展名LWD, 表示起降通道数据文件, 文件名中的时间均为观测开始时间

A.3.2 数据格式

文件由文件头和起降通道数据组成。文件头包括文件标识、设备性能参数、观测参数。起降通道风场数据根据需求实时动态生成。其中实时起降通道数据一分钟形成一个文件, 存储该分钟内的所有瞬时数据。平均风数据按平均时间形成一个文件, 存储该平均时间内数据的平均值。读写时, 文件每部分单字节对齐。

(1) 文件标识

structFileFlag (共73字节)

表 A.7 起降通道数据文件标识

类型	变量名	字节数	绝对编译地址	说明
char	FileID[8]	8	0	文件标识, 这里为PWLWINDGL
char	VersionNo[5]	5	8	数据格式版本号, 2位整数2位小数, 如01.00
int	FileHeaderLength	4	13	表示文件头长度 (字节数), 2位整数
char	Temp[56]	56	17	保留

(2) 设备性能参数、观测参数的定义同1.1.2部分。

(3) 起降通道数据

struct WNDPRF WndPrf (共70+4*BinNum*3字节)

表 A.8 起降通道数据

类型	变量名	字节数	绝对编译地址	说明
char	SHour[2]	2	225	观测记录时间 (时), 2位整数
char	Sminute[2]	2	227	观测记录时间 (分), 2位整数
char	Ssecond[2]	2	229	观测记录时间 (秒), 2位整数
float	V	4	231	雷达平台相对于大地的绝对速度
float	VEAST	4	235	雷达平台沿东向相对于大地的速度
float	VNORTH	4	239	雷达平台沿北向相对于大地的速度
float	ZaixV	4	243	雷达平台沿垂直方向的速度
float	latitude	4	247	雷达平台经度
float	longtitude	4	251	雷达平台纬度
float	Altitude	4	255	探测数据所在位置海拔高度
float	StemAngle	4	259	艏向角 (度)
float	VerticalAngle	4	263	纵摇角 (度)
float	TransverseAngle	4	267	横摇角 (度)
int	Xangle	4	271	起降通道方位角
int	Yangle	4	275	起降通道俯仰角
int	xpoin	4	279	着地点X坐标位置

int	ypoint	4	283	着地点Y坐标位置
int	WndAvg	4	287	风平均时间 (0表示瞬时风)
int	BinNum	4	291	距离库的个数, 3位整数
float	WndPrfData[BinNum][3]	4	295	起降通道风场数据

注: 起降通道数据存储含义如下:

WndPrfData[i][0, 1, 2]——依次表示第i个距离库的距离(米)、迎头风风速(米/秒)、侧风风速(米/秒);

观测记录时间: 指参与计算的最后一个波速探测时间。

一个起降通道风场数据存储一次WndPrf变量数据, 多个起降通道风场数据按时间顺序进行顺序存储。

A.4 反演水平风数据文件

A.4.1 命名格式

命名格式如下: AWL_YYYYMMDDhhmmss_站点号_雷达编号.WPDP

其中: AWL表示机场测风激光雷达(Airport Wind Lidar);

YYYY表示4位年份;

MM表示月份(01-12);

DD表示日(01-31);

hh表示小时(00-23);

mm表示分钟(00-59);

ss表示秒(00-59);

雷达编号:

扩展名WPDP表示PPI反演水平风场数据, 文件名中的时间为观测开始时间。

A.4.2 数据格式

文件由文件头和反演水平风场数据组成。文件头包括文件标识、设备性能参数、观测参数。反演水平风场数据根据需求实时动态生成。一次扫描周期形成一个文件。读写时, 文件每部分单字节对齐。

(1) 文件标识

structFileFlag (共91字节)

表 A.9 反演水平风场文件标识

类型	变量名	字节数	绝对编译地址	说明
char	FileID[8]	8	0	文件标识, 这里为AWLWNDPP
char	VersionNo[5]	5	8	数据格式版本号, 2位整数2位小数, 如01.00
int	FileHeaderLength	4	13	表示文件头长度(字节数), 2位整数
char	Temp[56]	56	17	保留

(2) 设备性能参数、观测参数的定义同1.1.2部分。

(3) 反演水平风数据

struct WNDPRF WndPrf (共58+4*BinNum*3字节)

表 A. 10 反演水平风数据

类型	变量名	字节数	绝对编译地址	说明
char	Shour[2]	2	225	观测记录时间(时), 2位整数
char	Sminute[2]	2	227	观测记录时间(分), 2位整数
char	Ssecond[2]	2	229	观测记录时间(秒), 2位整数
float	V	4	231	雷达平台相对于大地的绝对速度
float	VEAST	4	235	雷达平台沿东向相对于大地的速度
float	VNORTH	4	239	雷达平台沿北向相对于大地的速度
float	ZaixV	4	243	雷达平台沿垂直方向的速度
float	latitude	4	247	探测数据所在位置经度
float	longtitude	4	251	探测数据所在位置纬度
float	Altitude	4	255	探测数据所在位置海拔高度
float	StemAngle	4	259	雷达平台移动方位角(度)
float	VerticalAngle	4	263	雷达平台纵摇角(度)
float	TransverseAngle	4	267	雷达平台横摇角(度)
int	BeamAz	4	271	数据位置方位角
int	BeamEl	4	275	数据位置俯仰角
int	BinScanNo	4	279	水平风场波束序号
Int	BinNum	4	283	距离库的个数, 3位整数
float	WndPPIData[BinNum][3]	4	287	水平风反演数据

注: 风场数据存储含义如下:

WndPPIData[i][0, 1, 2]——依次表示第i个距离库的距离(米)、风速(米/秒)、风向(角度)。

























附 录 B
(规范性)
雷达数据产品色标规范

由于雷达数据产品中的径向风速、水平风速、谱宽等需要用热力图显示，为了规范整个民航领域色图的可识别性，统一色标规范。

B.1 径向速度色标要求

径向速度色标采用24级，范围覆盖-50~50m/s，色标以0m/s为中心，在0m/s速度值附近采用小值间隔，在中值区采用等值间隔，在高值区采用不等间隔，色标取色采用过渡色，超过最高值，以最高值区色标显示。冷色代表负速度，暖色代表正速度。径向速度数据显示等级及色标显示如表1所示。

表 B.1 径向速度显示等级及色标



序号	显示等级 (m/s)	R	G	B	颜色
1	40~50	64	0	0	
2	30~40	128	0	0	
3	24~30	173	0	0	
4	21~24	212	0	0	
5	18~21	251	0	0	
6	15~18	255	35	0	
7	12~15	255	74	0	
8	9~12	255	113	0	
9	6~9	255	152	0	
10	3~6	255	191	0	
11	0.5~3	255	230	0	
12	0~0.5	255	255	80	
13	-0.5~0	120	255	255	
14	-3~0.5	0	224	255	
15	-6~-3	0	196	255	
16	-9~-6	0	168	255	
17	-12~-9	0	140	255	
18	-15~-12	0	112	255	
19	-18~-15	0	84	255	
20	-21~-18	0	56	255	
21	-24~-21	0	28	255	
22	-30~-24	0	0	255	
23	-40~-30	0	0	128	
24	-50~-40	0	0	64	

B.2 水平风速色标要求

风速色标采用17级，范围覆盖0~50m/s，30m/s前采用2m/s等值间隔，30m/s~50m/s采用10m/s间隔，色标取色采用过渡色，超过最大值以最大值区颜色表示。冷色代表低速，暖色代表高速。等级及色标如表2所示。

表 B.2 水平风速显示等级及色标











序号	显示等级 (m/s)	R	G	B	颜色
----	------------	---	---	---	----

1	40~50	64	0	0	
2	30~40	128	0	0	
3	28~30	179	0	0	
4	26~28	230	0	0	
5	24~26	255	26	0	
6	22~24	255	77	0	
7	20~22	255	128	0	
8	18~20	255	179	0	
9	16~18	255	230	0	
10	14~16	116	221	0	
11	12~14	20	212	116	
12	10~12	0	210	255	
13	8~10	0	168	255	
14	6~8	0	126	255	
15	4~6	0	84	255	
16	2~4	0	42	255	
17	0~2	0	0	255	

B.3 谱宽色标要求

谱宽色标采用10级，范围覆盖0~10m/s，采用1m/s等值间隔，色标采用过渡色。谱宽显示等级及色标如表3所示。

表 B.3 谱宽显示等级及色标

序号	显示等级 (m/s)	R	G	B	颜色
1	9~10	215	0	0	
2	8~9	255	50	0	
3	7~8	255	140	0	
4	6~7	255	230	0	
5	5~6	166	221	0	
6	4~5	20	212	116	
7	3~4	0	189	255	
8	2~3	0	126	255	
9	1~2	0	63	255	
10	0~1	0	255	255	

附 录 C (资料性) 风切变告警识别与算法

本附录为**资料性附录**，旨在介绍风切变探测与告警领域的研究成果及相关技术原理，供理解和参考之用，不构成需强制执行的规范要求。

C.1 风切变探测设备

低空风切变告警系统 (以下简称LLWAS)是一种地基探测网，由分布在机场跑道周边的多个风向风速计组成。通过对比机场不同位置 (如跑道两端和中部) 地面风传感器的实时数据，计算水平风矢量差。不受气象条件 (雨/晴) 影响，是地面水平风切变的最直接测量手段。但是，它只能监测地面附近的切变，无法探测飞机在 300-500 米高度感受到的空中切变。

20世纪八十年代到九十年代开始，终端区多普勒天气雷达 (以下简称TDWR) 被用来专门探测微下击暴流和阵风锋，它能穿透暴雨，精确识别雷暴诱发的微下击暴流 (Microburst) 和阵风锋 (Gust Front)。在降雨条件下对低层风切变告警非常有效，民用航空常用C和X波段。但是，在非降雨条件下，由于缺乏反射粒子 (回波)，往往出现“数据静默”或探测不到切变的情况。

微波风廓线仪垂直向上发射电磁波，利用大气折射率的不均匀性 (大气湍流引起的) 产生回波。能够提供机场上空连续的垂直风垂直梯度数据，对监测低空急流和锋面切变有意义。但是，该类设备只能探测雷达正上方很小范围的垂直廓线，无法像测风激光雷达那样沿下滑道进行水平覆盖。多普勒天气雷达和测风激光雷达采用DBS扫描，也可以像风廓线仪一样工作。但由于波长不同，反射体分别是降水、气溶胶和大气湍流，另外，探测高度和盲区也不同。

相比之下，测风激光雷达作为一种晴空条件下的测风设备，利用激光的多普勒效应，通过探测大气中的气溶胶粒子散射来反演风场。具有时空分辨率高、能进行下滑道扫描和可用于晴空风场探测的优点。但是，它的穿透力弱，在强降雨、大雾或云层较低时，激光会被迅速衰减，探测距离大幅缩小。

由于机场的地理和气候差异，多种天气现象都可能带来风切变和湍流。包括：

- a) 风吹过丘陵地带，即地形引起的风切变；
- b) 雷暴引起的风切变 (微下击暴流和阵风锋)；
- c) 海陆风与背景风的辐合；
- d) 冷锋
- e) 急流

因此，一个机场的风切变和湍流探测系统可能是这样的：

降水情况下利用机场多普勒天气雷达的径向风计算辐合辐散区块，然后按大小决定是风切变或下击暴流；晴空下则用测风激光雷达做下滑道扫描，从中抽取飞机起降航路的逆风曲线计算风切变大小；由跑道自动站和风向风速仪构成的地面站网计算跑道及附近的风切变；湍流告警则靠地面自动测风网的拟合，再配合降水时机场多普勒天气雷达的湍流算法。

C.2 广义风切变和航空风切变

从广义角度看，低层风切变涵盖了低层大气的一系列空气运动，包括从可能影响飞机的微小涡流和阵风，到大气中一个气团层越过相邻气团层的大尺度流动。产生此类空气运动的各种现象包括雷暴、海陆风、低空急流、山地波和锋面系统。对风切变最广义的解释是“风在空间中的速度和/或方向的变化，包括上升气流和下沉气流”。

低空风切变对航空的重要性在于其对飞机性能的影响，从而可能对飞行安全产生不利影响，构成重大风险。尽管风切变可能存在于大气的所有层面，但其发生在最低高度 (500米) 时，对飞机起降尤为重要。在爬升和进近阶段，飞机的空速和高度接近临界值，因此特别容易受到风切变的不利影响。当水平风速、风向及垂直气流在空间或时间上的突然变化。会导致飞机空速与升力的剧烈波动，进而引发飞

行状态失稳或偏离预定飞行路径。飞机对风切变的响应极其复杂，受多种因素影响，包括飞机类型、飞行阶段、风切变相对飞机大小的尺度，以及遇到的风切变的强度和持续时间。

在国际民用航空公约附件三对风切变告警是这样描述的，“这些风切变可能对进近、起飞、盘旋或滑行的，跑道面向上500米（1600英尺）之间的所有飞机产生不利影响”。

ICAO推荐的风切变强度判断标准如下：

轻度	每 30 米 (100 英尺) 的高度风速变化 0-4 海里/小时 (含)
中度	每 30 米 (100 英尺) 的高度风速变化 5-8 海里/小时 (含)
强烈	每 30 米 (100 英尺) 的高度风速变化 9-12 海里/小时 (含)
严重	每 30 米 (100 英尺) 的高度风速变化超过 12 海里/小时

C.3 风切变告警识别方法

C.3.1 TDWR 微下击暴流检测

该方法通过分析覆盖机场区域的多普勒天气雷达回波来检测风切变。包含以下四个处理步骤：

- 通过检测多普勒数据的每个径向数据，识别是否存在辐散状的径向速度段，从而构建损耗段。
- 对损耗段按分组。
- 用分组后的损耗段来拟合微下击暴流形状。
- 将拟合出的微下击暴流形状与跑道走廊进行叠加，从而确定跑道在其中的位置并估算风损。

C.3.2 低空风切变告警系统 (LLWAS)

通过分析部署在机场跑道周围的风向风速网所采集的风场数据来检测风切变。地面风场的辐散与辐合情况是基于三角形排列的风速计和两点组合的风速计数据进行估算的。辐散值用于生成风损告警，辐合值则用于生成风增告警。在发布告警前，系统会对检测到的风场辐散和辐合进行统计显著性判断。如果统计显著的辐散值足够大，则判定检测到了微下击暴流。

受限于风向风速网的间距，实测风速可能无法反映外流场的最大强度。因此，系统基于对称性假设和网络几何结构，采用统计修正因子来降低测量不足的影响。如果辐散不够大或检测到的是辐合，则不应用修正因子。在上述任何一种情况下，发布的告警均为沿各跑道方向直接测得的风切变。

C.3.3 DBS模式风切变识别

DBS模式是指多普勒天气雷达和测风激光雷达的风廓线扫描模式，它通过以下步骤识别风切变，首先，DBS模式能够连续测量不同高度层的风速和风向，从而生成详细的垂直风廓线。其次，通过比较相邻高度层之间的风速和风向差异超过预设的阈值时，系统会识别出风切变。根据国际民航组织的标准，通常采用每30m（100ft）高度区间的风速变化值来定义风切变的强度，以此实现垂直风切变的预警。

虽然DBS主要提供垂直廓线，但通过在不同位置部署多个DBS系统或利用其扫描范围内的水平变化，也可以推断出水平风切变。

C.3.4 TDWR的谱宽估算涡动耗散率

从气象探测和飞行安全角度来看，涡动耗散率（Eddy Dissipation Rate，简称 EDR）是公认的衡量大气颠簸（Turbulence）的参数，用于测量湍流强度。在航空气象和雷达气象学中，多普勒天气雷达测量的频谱宽度与EDR之间有确定的关系，Labitt 在 1981 年的研究中推导出了谱宽与涡动耗散率之间的定量关系。

$$\epsilon \approx \frac{1}{8} \left[\frac{\sigma_v^2}{1.35 \alpha} \right]^{3/2} \dots \dots \dots (C.1)$$

式中：

- σ_v —— 雷达观测到的多普勒谱宽（单位：m/s）。
- ϵ —— 湍流能量耗散率（单位： m^2/s^3 ）。
- α —— Kolmogorov 常数（通常取值约 1.5 到 1.6）。

δ ——雷达测量体积的特征尺寸（通常与雷达束宽和脉冲长度有关）。

根据国际民用航空公约附件三，湍流强度被定义如下：

- a) 当 $EDR \geq 0.45$ 时为严重
- b) 当 $0.45 > EDR \geq 0.20$ 时为中等
- c) $0.20 > EDR \geq 0.10$ 时为轻
- d) $0.10 \geq EDR$ 时，为零

C.3.5 PPI 扫描风切变识别

多普勒天气雷达和测风激光雷达都可以进行PPI扫描，用PPI扫描产品进行风切变识别的原理是，低空风切变的本质是指风场中一定距离内风向、风速的变化。雷达扫描风速是大气风场在雷达扫描径向方向上的分量，风速数据在径向上和切向上都会存在一定的变化，那么就可以根据雷达PPI扫描数据计算出雷达扫描径向和切向上的切变值，再将切变值进行合成，就可以得出合成切变产品。

计算切变值有两种方式，一种是直接计算差值算法，这种方法直接计算两点间风速的差值与距离的比值，得到切变值，计算结果易受到噪声数据的影响。另一种方法是利用最小二乘拟合算法计算切变值，这种方法最早是针对多普勒天气雷达提出的，将其运用到测风激光雷达数据的风切变识别中，同样具有良好的识别结果。除最小二乘拟合算法外，还有一种八邻域算法。其原理与最小二乘拟合算法基本类似，都是检测一定距离内的风速变化，采用的是每一个数据点附近的八个方位上相邻的数据的风切变值。

C.3.6 下滑道扫描模式风切变识别

以降落通道为例，激光雷达的波束被配置为朝向跑道上3度或6度（降落飞机以跑道端头为终点，仰角为3度，而起飞飞机则从跑道中部附近开始，仰角为6度）下滑路径扫描（图一），扫描区域是着陆点向上3海里，300米宽，60米高的“管状”路径。在每个下滑道扫描中，收集该路径的激光雷达径向风速测量数据，用于构建逆风廓线。为了自动检测和告警飞机下滑路径上的风切变，必须通过计算机的算法从逆风廓线上识别显著变化。

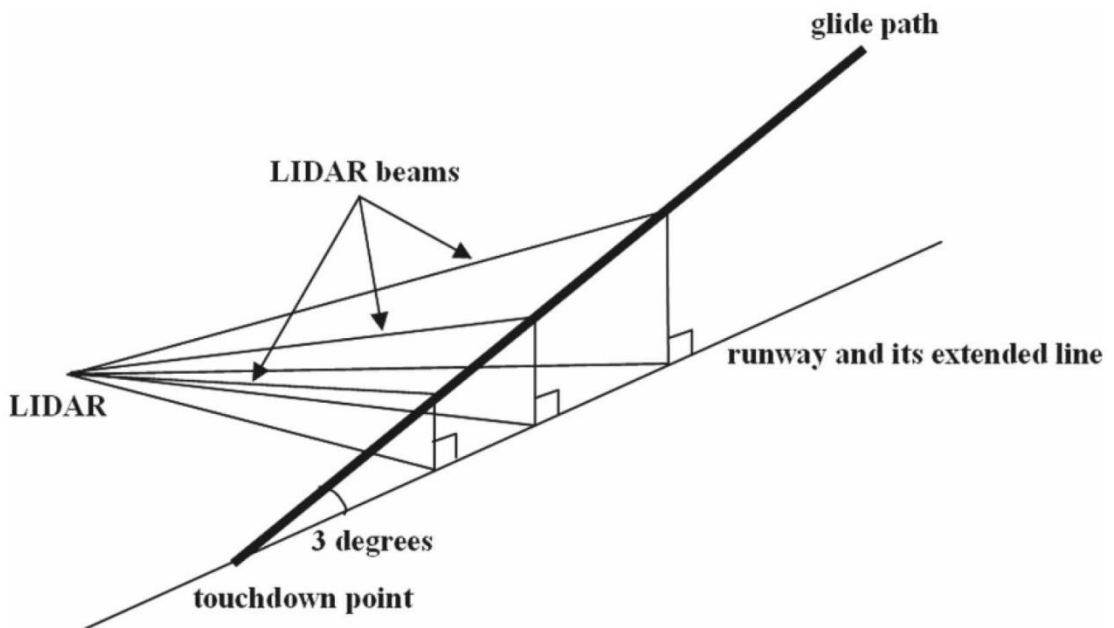


图 C.1

C.3.6.1 斜坡检测算法

下滑道扫描 (GP scan) 的风切变识别, 其理念是测量机场下滑道上的逆风, 从而确定下滑道飞机将遇到的风切变。该算法是寻找下滑道扫描的逆风持续变化, 称为风切变斜坡 (wind shear ramp)。激光雷达数据首先需经过质量控制, 消除因杂波产生“尖刺”, 以及飞机尾流引起的小尺度风场波动, 再分辨它与周围的数据差值是否达到预设的阈值。国际上通常规定, 飞机在飞行过程中, 遭遇迎头风速变化超过7.7m/s (15kt) 时即认为存在风切变, 因此将15kt 作为告警阈值。

由于检测时采用固定斜坡长度, 那么当实际风廓线中的风切变尺度大于检测斜坡长度时, 检测结果会偏小, 造成风切变强度识别不准确; 当实际风切变尺度小于检测斜坡长度时, 则会造成风切变识别的遗漏。

C.3.6.2 F 因子算法

F因子是民航气象与飞行力学中一个至关重要的无量纲数值。它不是用来描述风速有多快, 而是用来衡量风切变对飞机总能量。飞机在风场中所受的力主要有飞机发动机的推力、空气对飞机的阻力以及飞机自身的重力。结合飞机动力学方程得到以下公式。

$$F = \frac{1}{g} \frac{d}{dt} U_x - \frac{w}{V_a} \dots\dots\dots (C.2)$$

式中:

U_x 是沿下滑道方向x的顶风, t 是时间, w 是垂直风速, V_a 是飞机的空速, g 是重力加速度。

$$\cong \frac{\partial U_x}{\partial x} \left[\frac{V_a}{g} + \frac{2h}{V_a} \right] \dots\dots\dots (C.3)$$

式中:

公式 (C.3) 是用测风激光雷达对F因子算法进行的近似推导。因为激光雷达测得的是空间上的风场梯度, 而非时间上的加速度, 所以需要通过对链式法则进行转换:

- a) $\frac{\partial U_x}{\partial x}$ (空间风梯度): 这是激光雷达直接能测出的物理量, 即风速随空间距离的变化。
- b) 方括号内的修正项:
- c) $\frac{V_a}{g}$: 这一项将空间梯度转化为时间变化率。
- d) $\frac{2h}{V_a}$ (连续性方程修正): 这是一个非常关键的工程处理。由于激光雷达主要测水平风, 很难直接测垂直风 ω 。但在低空, 根据流体力学的连续性方程, 水平风的辐散 $\frac{\partial U_x}{\partial x}$ 与垂直下沉气流 ω 存在比例关系 (通常与高度 h 成正比)。
- e) h 为无线电高度。

C.3.6.3 S 因子算法

结合斜坡检测算法来说, 一个逆风廓线包括多个切变斜坡。检测斜坡根据严重性因子 (S因子) 来判断, 它最初由Woodfield 和Wood(1983)提出, 以确定下滑路径上最重要的切变。

$$S = \left(\frac{dV}{dt} \right) \left(\frac{\Delta V}{V_{app}} \right)^2 = \left(\frac{\Delta V}{H^{1/3}} \right)^3 / V_{app} \dots\dots\dots (C.4)$$

式中:

$\frac{dV}{dt}$ 是沿下滑路径风的加速度, ΔV 是沿下滑路径全部风变化量, V_{app} 是飞机进近速度, H 是斜坡长度。

C.3.7 风切变告警的验证。

风切变和湍流警报服务开发面临的另一个主要问题在于建立用于算法校准“真实天空”数据集。目前, 航空器报告的低空风切变和湍流是“真实天空”数据最重要的来源。然而, 这些报告容易受到飞行员主观判断的影响。

通过获取飞机机载的快速存取记录器 (QAR) 数据, 计算逆风变化或者F因子, 与测风激光雷达数据计算出的对应数值就可以很直观地进行对比。