UDC

MH

中华人民共和国行业标准

P

MH/T 5093—2026

民航相干多普勒测风激光雷达建设规范

Code for civil aviation coherent Doppler wind lidar

2026-08-04 发布

2026-09-04 施行

中国民用航空局　发布

中华人民共和国行业标准

民航相干多普勒测风激光雷达建设规范

Code for civil aviation coherent Doppler wind lidar

MH/T 5093—2026

主编单位：中国民用航空西南地区管理局

批准部门：中国民用航空局

施行日期：2026 年 9 月 4 日

中国民航出版社有限公司

2026　北　京

图书在版编目（CIP）数据
民航相干多普勒测风激光雷达建设规范/中国民用航空西南地区管理局主编．-- 北京：中国民航出版社有限公司，2026.9. -- ISBN 978-7-5128-1665-7
Ⅰ.TN959.73-65
中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2026J2D541 号

中华人民共和国行业标准

民航相干多普勒测风激光雷达建设规范

MH/T 5093—2026

中国民用航空西南地区管理局　主编

责任编辑	韩景峰
出　　版	中国民航出版社有限公司（010）64279457
地　　址	北京市朝阳区十里河桥东中国民航报社二层（100122）
排　　版	中国民航出版社有限公司录排室
印　　刷	北京金吉士印刷有限责任公司
发　　行	中国民航出版社有限公司（010）64297307　64290477
开　　本	880×1230　1/16
印　　张	3.5
字　　数	98 千字
版 印 次	2026 年 9 月第 1 版　2026 年 9 月第 1 次印刷
书　　号	ISBN 978-7-5128-1665-7
定　　价	28.00 元

官方微博　http://weibo.com/phcaac
淘宝网店　https://shop142257812.taobao.com
电子邮箱　phcaac@163.com

中 国 民 用 航 空 局

公　　告

2026 年第 16 号

中国民用航空局关于发布《民航相干多普勒测风激光雷达建设规范》的公告

现发布《民航相干多普勒测风激光雷达建设规范》（MH/T 5093—2026），自 2026 年 9 月 4 日起施行。

本标准由中国民用航空局空管办负责管理和解释，由中国民航出版社出版发行。

中国民用航空局

2026 年 8 月 4 日

前　言

本标准依据《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。本标准规定了测风激光雷达的系统组成、技术性能和数据格式等，适用于测风激光雷达的设计、生产、检验、建设和应用，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标准。

测风激光雷达作为一种晴空条件下的测风设备，具有时空分辨率高、三维立体探测风场的优点，在机场风场探测、风切变告警预警等业务中发挥作用，本标准的制订将填补民航该类设备标准的空白。

本标准的编制得到了中国民用航空西南地区管理局、中国民航大学、中国民用航空局空中交通管理局、中国民航科学技术研究院、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、南京信息工程大学，以及诸多设备厂商的大力支持。本标准的编制历经三年多时间，前后经过几十次专题会议，查阅了大量国内外相关规范及报告、科技文献，调研了国内相关机场的测试情况。

本标准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、性能和选址。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。在附录 C 中，较全面地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器风切变的概念内涵及差异。

本标准共分 6 章和 3 个附录。

本标准由中国民用航空局空管行业管理办公室负责日常管理。执行过程中如有意见和建议，请函告中国民用航空局空管行业管理办公室航空气象处（地址：北京

市东城区东四西大街 155 号；电话：010-64092676），以及民航工程建设标准化技术委员会秘书处（网址：www.caecs.org.cn；电子邮箱：mhgcjsbwh@163.com），以便修订时参考。

主编单位：中国民用航空西南地区管理局

参编单位：中国民用航空局空管行业管理办公室

中国民航大学

南京信息工程大学

中国民用航空科学技术研究院

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

成都信息工程大学

榆林机场

四川西物激光技术有限公司

南京牧镭激光科技股份有限公司

主　　编：李为民

参编人员：邹国良　邢伟宁　庄子波　李　岩　舒志峰　马　欣　张　杰

张　曦　沈钟伟　张开俊　高　兵　靳国华　康晓华　朱　飞

主　　审：拓瑞芳

参审人员：王　玮　匡　炎　梁　飞　包　侃　王　楠　杨银凤　朱亚杰

步志超

目 次

1 总则 …… **1**

2 术语和缩略语 …… **2**

2.1 术语 …… 2

2.2 缩略语 …… 3

3 基本规定 …… **5**

4 选址 …… **6**

5 系统功能 …… **7**

5.1 工作模式与控制 …… 7

5.2 数据产品与处理软件功能 …… 8

5.3 雷达显示软件功能 …… 9

6 系统性能 …… **10**

附录 A 雷达文件存储数据格式 …… **15**

附录 B 雷达数据产品色标规范 …… **29**

附录 C 风切变告警识别与算法 …… **33**

标准用词说明 …… **41**

引用标准名录 …… **42**

1 总 则

1.0.1 为满足民航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、科学合理、经济实用的原则，制定本标准。

【条文说明】测风激光雷达是民用机场气象安全保障系统的重要设备，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、能进行下滑道扫描的优点。

1.0.2 本标准适用于民航相干多普勒测风激光雷达建设和应用。

1.0.3 民航相干多普勒测风激光雷达建设除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关规定和标准的要求。

2 术语和缩略语

2.1 术语

2.1.1 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、飞机尾涡探测等。

［来源：QX/T 605—2021，3.1，有修改］

注：本标准后文中用“雷达”或“测风激光雷达”代替“相干多普勒测风激光雷达”。

2.1.2 最大采集距离 maximum acquisition range

雷达信号被记录和处理的最大距离。

2.1.3 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。

2.1.4 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。最小作用距离也被称为盲距或盲区。

2.1.5 距离分辨率 range resolution

雷达获得可分辨两个独立回波信号的最短径向距离间隔，一般根据探测需求最短距离间隔可变。

2.1.6 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。

2.1.7 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。

2.1.8 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。

2.1.9 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。

2.1.10 风切变 wind shear

气象学上，在大气中垂直或水平方向上风速或风向的快速变化。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。

2.1.11 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，表现为风速或风向的非线性波动与涡旋结构，航空上，用涡旋耗散率（Eddy Dissipation Rate，EDR）来衡量湍流强度。

2.1.12 航空器风切变 Aircraft 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。该现象会导致航空器在起飞、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，是威胁航空器运行安全的主要危险天气之一。

2.1.13 飞机尾涡 wake vortex

航空器在飞行过程中，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，是航空器产生升力的副产品。

2.1.14 下滑道扫描 Glide Path Scan

是指激光雷达从跑道接地带或跑道中心点，对航空器降落和起飞的“管状”路径（参考附录 C 中 C.4.6）实施水平扇扫与 RHI 扫描结合的高刷新风场探测扫描，旨在探测、反演下滑道方向的风场分量及其空间梯度变化，用于实时识别进近走廊内的低空风切变及湍流。

2.2 缩略语

PPI（Plan Position Indicator）	平面位置显示扫描
RHI（Range Height Indicator）	距离高度显示扫描
DBS（Doppler Beam Swinging）	多普勒波束摆动扫描
GPScan（Glide Path Scan）	下滑道扫描
VCP（Volume Coverage Pattern）	体扫
FWHM（Full Width at Half Maximum）	半高全宽
SNR（Signal-to-Noise Ratio）	信噪比

CNR（Carrier-to-Noise Ratio）	载噪比
FTP（File Transfer Protocol）	文件传输协议
TCP/IP（Transmission Control Protocol/Internet Protocol）	传输控制协议/网际协议
AC（Alternating Current）	交流电
UPS（Uninterruptible Power Supply）	不间断电源
LRU（Line Replaceable Unit）	外场可更换单元
EMC（Electromagnetic Compatibility）	电磁兼容性
EMI（Electromagnetic Interference）	电磁干扰
RFI（Radio Frequency Interference）	射频干扰

3 基本规定

3.0.1 测风激光雷达建设工程应按照运行规模和气象条件、功能、性能选用设备。

3.0.2 测风激光雷达系统应由激光发射系统、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以及应用软件组成。

3.0.3 测风激光雷达技术性能指标选择应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 测风激光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，应实现不同相干多普勒测风激光雷达厂商设备间的数据互通。

3.0.5 本标准规定了测风激光雷达的技术要求、数据格式和接口协议等，适用于雷达的设计、生产和检验。

3.0.6 测风激光雷达的风切变告警识别与算法可符合附录 C 的规定。

4 选址

4.0.1 探测风场的测风激光雷达宜布设于机场跑道接地带或跑道中心点附近，距跑道中线140 m至500 m区域。为了确保对沿跑道方向风分量的有效探测，雷达对准跑道接地带或跑道中心点进行扫描时，激光束在水平面上的投影与跑道中线的夹角应小于30°（见图C.4.6）。

4.0.2 用于机场航空器尾涡探测的测风激光雷达，宜布设于跑道端，距跑道延长线垂直外侧140 m至300 m范围内，覆盖跑道入口向外500 m至1 000 m的下滑道。

4.0.3 用于机场风场探测用途的测风激光雷达，宜在机场主降方向布设一部。枢纽机场宜根据多跑道布局、遮挡情况，增加雷达配置数量，实现全跑道及着陆和起飞区域的全覆盖。

4.0.4 雷达应远离突发性强烟雾、重度粉尘源或高浓度无水油烟环境，以免影响测量性能和对光学窗口造成严重污染；周边应远离大型振动源，避免扫描指向偏差或光学相干性被破坏，进而影响测量精度；雷达在进行下滑道扫描时，扫描路径上不应有建筑物、树木、山体、金属等固定遮挡物。

5 系统功能

5.1 工作模式与控制

5.1.1 雷达远程控制终端应包括参数设定界面和操控界面，应具有远程开机、待机、发射、重启、关机等功能。

5.1.2 雷达远程控制终端应具有监控各子系统工作状态、环境参数的功能，当雷达异常时应进行故障诊断、告警。监控信息应能储存、查询、输出，应包括但不限于下列内容：

1 系统重要参数，包括激光发射功率、激光器温度、设备舱内湿度、设备舱内温度、重复频率、激光器脉宽；扫描方式和速度、方位角、俯仰角、设备水平度。

2 运行环境及附属设备状态参数。

3 信号处理器工作状态，包括距离门数目、载噪比阈值、频移。

4 各模块通信状态和各模块工作状态等。

5 任何硬件或软件异常警报。

6 所有操作、事件和警报记录。

5.1.3 参数配置与校准设计应符合下列规定：

1 设置激光脉冲功率、脉冲宽度、重复频率、扫描速度、距离门等；

2 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。雷达应具有内部自动校准、外部北斗授时或基准时钟信号自动授时同步功能。

5.1.4 工作模式应包括多普勒波束摆动扫描（DBS）模式、平面位置扫描（PPI）模式、距离高度扫描（RHI）模式、下滑道扫描（GPScan）模式、体扫（VCP）模式和自定义模式。

5.1.5 扫描模式控制的设计应符合下列规定：

1 应可实时操作雷达执行 PPI、RHI、VCP 和 GPScan 扫描；

2 应可预先设置扫描模式，以及扫描范围（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 雷达应可以预设工作任务，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，应能分发产品、发出警报和预警。

5.2 数据产品与处理软件功能

5.2.1 数据产品与处理的设计应符合下列规定：

1 雷达应具有生成原始数据、一次产品、二次产品和图像产品的功能。

2 雷达一次产品应包括 SNR、径向速度、谱宽、谱强等。其数据文件头信息应包括台站信息、性能参数、观测参数、数据记录参数信息。

3 雷达二次产品数据应包括但不限于下列内容：

1）基本数据产品：三维风场反演产品、风廓线产品（水平风速、风向，垂直速度）；

2）物理量产品：湍流强度、湍流耗散率、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、径向数据等应在存储前进行质量控制，质量控制原则应包括但不限于下列内容：

1）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；

2）径向数据可以从载噪比阈值、数据时空连续性等方面进行处理；

3）二次产品数据质量控制以原始数据为依据进行处理。

5.2.2 数据产品处理软件应包括但不限于下列功能：

1 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；

2 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；

3 二次产品的形式需支持数字文档、图片等多种形式；

4 二次产品的文件或图片名称可由用户自行设置；

5 二次产品的分发方式应包含 FTP、在线网络获取及订阅式主动推送；

6 二次产品的分发通道应不少于 10 个；

7 二次产品分发时用户可按需求添加底图、线条、点等信息；

8 原始数据、一次产品、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应可设置；

9 自动保存风场 10 分钟一次的产品数据和风切变告警基数据；

10 图像产品的输出方式、输出位置可设置；

11 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能力；

12 可编辑和设置地理、跑道及空管背景信息；

13 一次产品、二次产品的历史数据可调用、展示和分析；

14 识别告警产品、系统告警阈值和其他物理量参数阈值可修改和设置；

15 时区、报文或语音播报方式和背景色等其他参数的调整。

5.2.3 数据产品处理及显示软件，应具备多部激光雷达的协同控制与数据融合能力。软件应支持利用两部或多部雷达对同一区域进行交叉探测，通过径向风场融合获得真实风矢量（真风），并实现多设备组网拼图及一体化协同显示。

5.2.4 雷达应支持 API 接口功能，可对雷达配置、发指令、状态监控、日志访问和数据下载。方便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应低于 0.5 s。可支持历史数据的按时间范围查询与下载。

5.3 雷达显示软件功能

5.3.1 雷达显示软件功能应包括但不限于下列内容：

1 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。

2 显示软件应显示一次产品和二次产品。

3 显示软件应具备同时直观呈现风速（标量）和风向（矢量）的功能。风场空间分布图应采用“背景风速色标+上层风矢量”的叠加显示方式。

4 下滑道扫描方式下的风场高度显示应选择真高、QNH 或 QFE 值。其中 QNH 和 QFE 的基准应引自实时数据。

5 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。

6 显示时支持鼠标随动显示、状态条显示功能。

7 应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）的功能。

8 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。

9 显示测站位置信息：包括名称、经纬度、高程。

10 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。

6 系统性能

6.0.1 雷达主要技术指标必须满足表6.0.1-1的规定。雷达远程控制终端主要性能指标必须满足表6.0.1-2的规定。

表6.0.1-1 雷达技术指标

项目		技术指标
工作波长		1 500 nm~2 200 nm
脉冲宽度（FWHM）		机场测风：200 ns~1 333 ns 尾涡测量：≤100 ns
扫描模式		PPI、RHI、DBS、GPScan、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		>10 km（能见度≥5 km）
径向最小作用距离		≤60 m
径向最大采集距离		>10 km
径向距离分辨率		机场测风：30 m~200 m（可调节） 尾涡测量：≤15 m
径向风速测量范围		50 m/s~50 m/s
径向风速测量误差		≤0.1 m/s
径向风速分辨率		≤0.01 m/s
指向精度		≤0.1°
时间分辨率	径向	≤60 s（可调节）
	廓线	≤10 s
最大扫描速度	方位	≥20°/s（可调）
	俯仰	≥15°/s（可调）
水平风速测量范围		≥50 m/s

续表

项目		技术指标
水平风速测量误差		≤0.5 m/s
水平风速分辨率		≤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		≤0.3 m/s
风向测量范围		0°~360°
水平风向分辨率		≤0.1°
水平风向测量误差		≤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≥10 km，且距离分辨率≤50 m、角度分辨率≤3°的情况下，时间分辨率≤60 s
	水平风垂直风廓线探测	DBS 光束扫描，最大作用距离≥3 km，且距离分辨率≤10 m 的情况下，时间分辨率≤10 s
	下滑道风场探测	最大作用距离≥10 km，且距离分辨率≤50 m 的情况下，角度分辨率≤0.2°，时间分辨率≤25 s
	尾涡探测	最大作用距离不小于 1 km，且距离分辨率≤15 m，扫描角度范围≤10°，角度分辨率≤0.2°的情况下，时间分辨率≤10s
	数据输出延迟	从物理探测结束到数据可用于显示，总延迟<10 s
数据产品		按本标准 5.2.1 规定
功耗（峰值）		不大于 1.5 kW
连续工作时间		具有无人值守的自动运行功能和 7 d×24 h 连续工作能力

注：最大作用距离是指数据获取率不小于 80%，能见度大于 5 km 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最小距离；指向精度是指发射的激光束中心轴线的真实角度，与系统控制的角度之间的最大偏差；测量误差是指均方根误差。

表 6.0.1-2　雷达远程控制终端主要性能指标

项目	性能指标
参数管理	可设置测站位置信息，包括名称、经纬度、海拔
	监测部件温度、激光脉冲能量、脉冲重复频率
	记录雷达校正过程数据
	监测运行环境及附属设备状态参数
显示产品	从物理探测和数据处理结束至产品生成显示的时间不大于 5 s，设置雷达扫描模式后显示模式立即生效
	显示基数据：径向风速、谱宽、谱强和载噪比
	显示产品数据：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、水平风向、湍流耗散率、垂直气流、尾涡场、涡核位置、涡环量等
在线监控	可对参数超限告警提示、进行故障诊断
数据接收与处理	可接收原始数据、状态参数、告警信息
	可生成数据产品，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、设置工作模式等功能
信息管理	对监控告警、参数变更、软件更迭、标定过程的日志记录进行检索和复制等

6.0.2　供电与通信应符合下列规定：

1　雷达供电应采用市电，单相交流，AC220 V±10%，50 Hz±5%；

2　雷达应配备满足 TCP/IP 协议的以太网络光纤通信接口和无线通信接口，传输速率应不低于 100 Mbit/s。

6.0.3　雷达环境适应性必须满足表 6.0.3 中的规定。

表 6.0.3　雷达环境适应性指标

项目	适应性指标
工作温度	-40℃～+50℃，室内装置工作温度为+0℃～+40℃
贮存温度	-45℃～+60℃，室内装置的贮存温度为+0℃～+60℃
工作湿度	0～100%，无凝结

续表

项目	适应性指标
抗风能力	带有扫描装置的系统，方位、俯仰装置上有电气、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、俯仰控制有保护电路。在平稳风速≤30 m/s（10 min 平均）的环境下，设备应连续工作；在阵风风速≤50 m/s（瞬时）的环境下，设备不应发生物理结构损坏
防雷要求	雷达具有较强的综合防雷击能力，防雷设施符合气象设备防雷规范的要求，接地电阻小于 4 Ω
其他要求	雷达室外部分具有防水、防霉、防盐雾、防风沙等措施，防护等级 IP66，沿海和多雨地区有全方位防护策略。冲击、振动、淋雨符合国家有关部门对观测设备的规定。光学窗口具备防止凝露和结霜的能力

6.0.4 可靠性与维修性应符合下列规定：

1 雷达结构布局应确保良好可达性，明确划分出最小可更换单元。设备的现场维护与故障修复宜采用直接更换最小可更换单元的模块化维修方式。

【条文说明】各模块、组件的物理装配宜采用模块化插拔式设计，便于快速拆装。设备维修人员可仅使用简单的通用工具独立完成更换及维修。

2 雷达的各核心模块与组件均应配置必要的工作状态指示灯、测试点或维护接口，以便于状态检测与故障定位。

3 雷达可靠性、架拆应满足表 6.0.4 中的规定。

表 6.0.4 雷达可靠性、架拆指标

项目	可靠性、架拆指标
平均无故障时间	不小于 7 500 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，移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

6.0.5 电磁兼容与互换性应符合下列规定：

1 雷达应具有抗电源干扰、电磁干扰、无线电频率干扰的能力，应符合电磁兼容性（EMC）、电磁干扰（EMI）、射频干扰（RFI）的国内国际标准，电磁兼容性应符合《电磁兼容试验和测量技术 第 1 部分：抗扰度试验总论》（GB/Z 17626.1—2024）第 6 章的规定；

2 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。

6.0.6 安全性、结构与贮存要求应符合下列规定：

1　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。整机应满足《激光产品的安全 第1部分：设备分类和要求》（GB 7247.1—2024）Class 1的要求，并在光学窗口粘贴激光安全警示标识。

2　雷达数据安全性应符合《智慧民航数据治理规范 数据安全》（MH/T 5057—2021）第5章的要求。

3　雷达网络安全性应符合《民用航空网络安全等级保护基本要求》（MH/T 0076—2020）第5章、《民用航空跨网数据交换安全技术要求》（MH/T 0073—2020）第4章的要求。

4　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。雷达底座应预留与架设平台机械接口。

5　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。

6　雷达应具备镜面污染检测告警和自动清洁镜面功能。

7　雷达远程控制终端由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。本地显示和控制终端和远程控制终端之间采用标准的网络协议和硬件接口连接。

8　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6个月时，进行通电。不应将包装的测风激光雷达放在靠近热辐射和直接照射的地方。

9　伺服扫描系统应有保护电路和机械安全保护措施。

附录 A　雷达文件存储数据格式

A.1　数据格式总要求

A.1.1　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，数据按天存储在一个子目录下。

A.1.2　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：

1　径向速度数据文件；

2　风廓线数据文件；

3　起降通道文件；

4　反演水平风数据文件；

5　反演栅格水平风数据文件；

6　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.2　径向速度数据文件

A.2.1　命名格式。

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、GPScan；

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. 2. 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（表 A. 2. 2-1）、设备性能参数（表 A. 2. 2-2）、观测参数（表 A. 2. 2-3）。径向速度数据（表 A. 2. 2-4）根据需求实时动态生成。在一种探测模式下，其中 DBS、VAD 和 GPScan 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 径向风速文件标识。

structFileFlag（共 73 字节）

表 A. 2. 2-1 径向风速文件标识

类型	变量名	字节数	说明
char	FileID［8］	8	文件标识，这里为 AWLRADVR
char	VersionNo［5］	5	数据格式版本号，有 2 位整数和 2 位小数，如 01. 00
int	FileHeaderLength	4	表示文件头长度（字节数），2 位整数
char	Temp［56］	56	保留

2 设备性能参数。

struct LIDARPERFORMANCEPARAM PerformanceInfo（共 40 字节）

表 A. 2. 2-2 设备性能参数

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

3　观测参数。

struct LIDAROBSERVATIONPARAM ObservationInfo（共 112 字节）

表 A. 2. 2-3　观测参数

类型	变量名	字节数	说明
char	SYear［4］	4	观测记录开始时间（年），4 位整数
char	SMonth［2］	2	观测记录开始时间（月），2 位整数
char	SDay［2］	2	观测记录开始时间（日），2 位整数
char	SHour［2］	2	观测记录开始时间（时），2 位整数
char	SMinute［2］	2	观测记录开始时间（分），2 位整数
char	SSecond［2］	2	观测记录开始时间（秒），2 位整数
char	EYear［4］	4	观测记录结束时间（年），4 位整数
char	EMonth［2］	2	观测记录结束时间（月），2 位整数
char	EDay［2］	2	观测记录结束时间（日），2 位整数
char	EHour［2］	2	观测记录结束时间（时），2 位整数
char	EMinute［2］	2	观测记录结束时间（分），2 位整数
char	ESecond［2］	2	观测记录结束时间（秒），2 位整数
char	ObsvMode［6］	6	观测模式（DBS/VAD/PPI/RHI/GPScan）
float	AzStart	4	方位扫描起点角度
float	AzEnd	4	方位扫描终点角度
float	AzStep	4	方位扫描角分辨率
float	ElStart	4	俯仰扫描起点角度
float	ElEnd	4	俯仰扫描终点角度
float	ElStep	4	俯仰扫描角分辨率
int	ScanNum	4	径向波束个数，4 位整数
int	StartBin	4	测量起始距离（m），5 位整数
int	EndBin	4	测量终止距离（m），5 位整数
int	BinLength	4	距离库的长度（m），3 位整数
int	BinNum	4	距离库的个数，3 位整数

续表

类型	变量名	字节数	说明
int	Fft	4	FFT 点数，4 位整数
int	RcdNum	4	探测次数（扫描周期数）
short int	ModelNum	2	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	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	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	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	起降通道方位角（起降通道模式有效，其他模式保留）
int	YAngle	4	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	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 * 5 字节）

表 A. 2. 2-4　径向风场

类型	变量名	字节数	说明
BYTE	ModelNo	1	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	观测记录时间（时），2 位整数
char	SMinute［2］	2	观测记录时间（分），2 位整数
char	SSecond［2］	2	观测记录时间（秒），2 位整数
float	BeamAz	4	波束方位角，有 3 位整数和 2 位小数
float	BeamEl	4	波束俯仰角，有 3 位整数和 2 位小数
float	flatBeamAz	4	转台方位角
float	flatBeamEl	4	转台俯仰角
float	longitude	4	探测数据所在位置经度

续表

类型	变量名	字节数	说明
float	latitude	4	探测数据所在位置纬度
float	Altitude	4	探测数据所在位置海拔高度
float	V	4	雷达平台相对于大地的绝对速度（固定不动为 0）
float	VEAST	4	雷达平台沿东向相对于大地的速度（固定不动为 0）
float	VNORTH	4	雷达平台沿北向相对于大地的速度（固定不动为 0）
float	ZAixV	4	雷达平台沿垂直方向的速度（固定不动则为 0）
float	StemAngle	4	雷达平台移动方位角（度）（固定不动则为 0）
float	VerticalAngle	4	雷达平台纵摇角（度）（固定不动则为 0）
float	TransverseAngle	4	雷达平台横摇角（度）（固定不动则为 0）
int	ScanNo	4	扫描波束序号（0~），4 位整数
int	BinNum	4	距离库的个数，3 位整数
float	RadVrData［BinNum］［5］	4	径向速度、谱宽、载噪比、频谱强度数据、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、载噪比、频谱峰强度、距离，无效数据径向速度标识为 999，谱宽、载噪比、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.3　风廓线数据文件

A.3.1　命名格式。

命名格式如下：AWL_ YYYYMMDDhhmmss_ 站点号_ 雷达编号_ ROBS. 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.3.2 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（表 A.3.2-1）、设备性能参数（表 A.2.2-2）、观测参数（表 A.2.2-3）。风廓线数据（表 A.3.2-2）根据需求实时动态生成。其中一次实时风廓线探测形成一个文件，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 风廓线数据文件标识。

structFileFlag（共 73 字节）

表 A.3.2-1 风廓线数据文件标识

类型	变量名	字节数	说明
char	FileID［8］	8	文件标识，这里为 AWLWNDPR
char	VersionNo［5］	5	数据格式版本号，有 2 位整数和 2 位小数，如 01.00
int	FileHeaderLength	4	表示文件头长度（字节数），2 位整数
char	Temp［56］	56	保留

2 设备性能参数、观测参数的定义同 A.2.2 的第 2 和 3 款。

3 风廓线数据。

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

表 A.3.2-2 风廓线数据

类型	变量名	字节数	说明
char	SHour［2］	2	观测记录时间（时），2 位整数
char	SMinute［2］	2	观测记录时间（分），2 位整数
char	SSecond［2］	2	观测记录时间（秒），2 位整数

续表

类型	变量名	字节数	说明
float	V	4	雷达平台相对于大地的绝对速度
float	VEAST	4	雷达平台沿东向相对于大地的速度
float	VNORTH	4	雷达平台沿北向相对于大地的速度
float	ZAixV	4	雷达平台沿垂直方向的速度
float	latitude	4	探测数据所在位置经度
float	longitude	4	探测数据所在位置纬度
float	Altitude	4	探测数据所在位置海拔高度
float	StemAngle	4	雷达平台移动方位角（度）
float	TransverseAngle	4	雷达平台横摇角（度）
int	BinNum	4	距离库的个数，3 位整数
int	BandNum	4	使用的波束数目，3 位整数
int	WndAvg	4	风平均时间（0 表示瞬时风）
float	WndPrfData［BinNum］［6］	4	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（m）、风速（m/s）、风向（°）、风速标准偏差（0 为无平均）、垂直气流（m/s）、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.4　起降通道文件

A.4.1　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）；

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.4.2 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（表 A.4.2-1）、设备性能参数（表 A.2.2-2）、观测参数（表 A.2.2-3）。起降通道风场数据（表 A.4.2-2）根据需求实时动态生成。其中一次实时起降通道探测形成一个文件，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 起降通道数据文件标识。

structFileFlag（共 73 字节）

A.4.2-1 起降通道数据文件标识

类型	变量名	字节数	说明
char	FileID［8］	8	文件标识，这里为 PWLWNDGL
char	VersionNo［5］	5	数据格式版本号，有 2 位整数和 2 位小数，如 01.00
int	FileHeaderLength	4	表示文件头长度（字节数），2 位整数
char	Temp［56］	56	保留

2 设备性能参数、观测参数的定义同 A.2.2 的第 2 和 3 款。

3 起降通道数据。

struct GPSCAN WndGP（共 78+4 * BinNum * 3 字节）

表 A.4.2-2 起降通道数据

类型	变量名	字节数	说明
char	SHour［2］	2	观测记录时间（时），2 位整数
char	Sminute［2］	2	观测记录时间（分），2 位整数

续表

类型	变量名	字节数	说明
char	Ssecond［2］	2	观测记录时间（秒），2 位整数
float	V	4	雷达平台相对于大地的绝对速度
float	VEAST	4	雷达平台沿东向相对于大地的速度
float	VNORTH	4	雷达平台沿北向相对于大地的速度
float	ZAixV	4	雷达平台沿垂直方向的速度
float	latitude	4	雷达平台经度
float	longitude	4	雷达平台纬度
float	Altitude	4	探测数据所在位置海拔高度
float	StemAngle	4	艏向角（度）
float	VerticalAngle	4	纵摇角（度）
float	TransverseAngle	4	横摇角（度）
int	Xangle	4	起降通道方位角
int	Yangle	4	起降通道俯仰角
int	xpoin	4	着地点 X 坐标位置
int	ypoint	4	着地点 Y 坐标位置
float	qfe	4	机场实时场压
float	qnh	4	机场实时海压
int	WndAvg	4	风平均时间（0 表示瞬时风）
int	BinNum	4	距离库的个数，3 位整数
float	WndPrfData［BinNum］［3］	4	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（m）、迎头风风速（m/s）、侧风风速（m/s）。

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 WndGP 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.5 反演水平风数据文件

A.5.1 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.5.2 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（表 A.5.2-1）、设备性能参数（表 A.2.2-2）、观测参数（表 A.2.2-3）。反演水平风数据（表 A.5.2-2）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 反演水平风场文件标识。

structFileFlag（共 73 字节）

表 A.5.2-1 反演水平风场文件标识

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

2 设备性能参数、观测参数的定义同 A.2.2 的第 2 和 3 款。

3 反演水平风数据。

struct WNDPRF WndPrf（共 62+4 * BinNum * 3 字节）

表 A.5.2-2 反演水平风数据

类型	变量名	字节数	说明
char	Shour［2］	2	观测记录时间（时），2 位整数
char	Sminute［2］	2	观测记录时间（分），2 位整数
char	Ssecond［2］	2	观测记录时间（秒），2 位整数
float	V	4	雷达平台相对于大地的绝对速度
float	VEAST	4	雷达平台沿东向相对于大地的速度
float	VNORTH	4	雷达平台沿北向相对于大地的速度
float	ZaixV	4	雷达平台沿垂直方向的速度
float	latitude	4	探测数据所在位置经度
float	longitude	4	探测数据所在位置纬度
float	Altitude	4	探测数据所在位置海拔高度
float	StemAngle	4	雷达平台移动方位角（度）
float	VerticalAngle	4	雷达平台纵摇角（度）
float	TransverseAngle	4	雷达平台横摇角（度）
int	BeamAz	4	数据位置方位角
int	BeamEl	4	数据位置俯仰角
int	BinScanNo	4	水平风场波束序号
int	BinNum	4	距离库的个数，3 位整数
float	WndPPIData［BinNum］［3］	4	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（m）、风速（m/s）、风向（角度）。

A.6　反演栅格水平风数据文件

A.6.1　命名格式。

命名格式如下：AWL_ YYYYMMDDhhmmss_ 站点号_ 雷达编号 . WG3D

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 WG3D 表示直角坐标系三维（Wind Grid 3D）反演水平风场数据，文件名中的时间为观测开始时间。

A. 6. 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（表 A. 6. 2-1）、设备性能参数（表 A. 2. 2-2）、观测参数（表 A. 2. 2-3）。反演水平风场数据（表 A. 6. 2-2）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 反演水平风场文件标识。

structFileFlag（共 73 字节）

表 A. 6. 2-1 反演水平风场文件标识

类型	变量名	字节数	说明
char	FileID［8］	8	文件标识，这里为 AWLWNDGD
char	VersionNo［5］	5	数据格式版本号，有 2 位整数和 2 位小数，如 01.00
int	FileHeaderLength	4	表示文件头长度（字节数），2 位整数
char	Temp［56］	56	保留

2 设备性能参数、观测参数的定义同 A. 2. 2 的第 2 和 3 款。

3 反演水平风数据。

struct WNDGRID WndGrid（共 90+4 * TotalGridNum * 5 字节）

表 A. 6. 2-2 反演水平风数据

类型	变量名	字节数	说明
char	Shour［2］	2	观测记录时间（时），2 位整数
char	Sminute［2］	2	观测记录时间（分），2 位整数

续表

类型	变量名	字节数	说明
char	Ssecond［2］	2	观测记录时间（秒），2 位整数
float	V	4	雷达平台相对于大地的绝对速度
float	VEAST	4	雷达平台沿东向相对于大地的速度
float	VNORTH	4	雷达平台沿北向相对于大地的速度
float	ZaixV	4	雷达平台沿垂直方向的速度
float	latitude	4	探测数据所在位置经度
float	longitude	4	探测数据所在位置纬度
float	Altitude	4	探测数据所在位置海拔高度
float	StemAngle	4	雷达平台移动方位角（度）
float	VerticalAngle	4	雷达平台纵摇角（度）
float	TransverseAngle	4	雷达平台横摇角（度）
float	X_ Min	4	X 轴（东西向）网格起始边界（m），西向为负
float	X_ Step	4	X 轴网格步长（m）
int	X_ GridNum	4	X 轴方向的网格总个数
float	Y_ Min	4	Y 轴（南北向）网格起始边界（m），南向为负
float	Y_ Step	4	Y 轴网格步长（m）
int	Y_ GridNum	4	Y 轴方向的网格总个数
float	Z_ Min	4	Z 轴（垂直向）网格起始边界（m），地面为 0
float	Z_ Step	4	Z 轴网格步长（m）
int	Z_ GridNum	4	Z 轴方向的网格总个数
int	TotalGridNum	4	栅格总数，由 X_ GridNum ＊ Y_ GridNum ＊ Z_ GridNum 计算所得
float	WndGridData［TotalGridNum］［5］	4＊TotalGridNum＊5	直角坐标系三维栅格水平风反演数据场

4　WndGridData 数组分量定义与排布说明。

对于三维网格中的任意一个栅格点，其包含的 5 个单精度浮点数要素定义如表 A.6.2-3 所示。

表 A. 6. 2-3　WndGridData 数组结构

数组分量表达式	代表要素	单位	说明
WndGridData［i］［0］	Grid_ X	m	该格点中心距离雷达的东西向距离（正为东，负为西）
WndGridData［i］［1］	Grid_ Y	m	该格点中心距离雷达的南北向距离（正为北，负为南）
WndGridData［i］［2］	Grid_ Z	m	该格点中心距离雷达的垂直高度（地上为正）
WndGridData［i］［3］	Grid_ Speed	m/s	该直角坐标栅格点上的水平反演全风速
WndGridData［i］［4］	Grid_ Direction	°	该直角坐标栅格点上的水平反演全风向（气象来向角）

三维矩阵数据在写入一维流文件时，应按照“Z 轴（高度层）Y 轴（南北行）X 轴（东西列）”的嵌套循环顺序平铺写入。

附录 B　雷达数据产品色标规范

B. 0. 1　为了规范民航气象色图的可识别性，统一色标规范，雷达数据产品中的径向风速、水平风速、谱宽等热力图显示应以此色标规范为基本基准；在满足此基准的前提下，用户可根据实际业务需求自行增加或扩展色标种类。

B. 0. 2　径向速度色标要求。

径向速度色标采用 24 级，范围覆盖-50 m/s~50 m/s，色标以 0 m/s 为中心，在 0 m/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，超过最高值时，以最高值区色标显示。冷色代表负速度，暖色代表正速度。径向速度显示等级及色标显示如表 B. 0. 2 所示。

表 B. 0. 2　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	

续表

序号	显示等级（m/s）	R	G	B	颜色
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.0.3 水平风速色标要求。

风速色标采用 17 级，范围覆盖 0 m/s~50 m/s，30 m/s 前采用 2 m/s 等值间隔，30 m/s~50 m/s 采用 10 m/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 B.0.3 所示。

表 B.0.3 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	

续表

序号	显示等级（m/s）	R	G	B	颜色
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. 0. 4　谱宽色标要求。

谱宽色标采用 10 级，范围覆盖 0 m/s～10 m/s，采用 1 m/s 等值间隔，色标采用过渡色。谱宽显示等级及色标如表 B. 0. 4 所示。

表 B. 0. 4　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　风切变告警识别与算法

C.1　范围与概述

C.1.1　本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。

C.2　风切变探测设备

C.2.1　低空风切变告警系统（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。它不受气象条件（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，无法探测航空器在 300 m~500 m 高度受到的空中切变。

C.2.2　终端区多普勒天气雷达（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）。其在降雨条件下对低层风切变告警非常有效，民航常用 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。

C.2.3　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。其能够提供机场上空连续的垂直风的梯度数据，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。

C.2.4　测风激光雷达作为一种晴空条件下的测风设备，是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的。其具有时空分辨率高、能进行下滑道扫描和可用于晴空风场探测的优点。但是，它穿透力弱，在强降雨、大雾或云层较低时，激光会迅速衰减，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。包括以下天气现象：

1　风吹过丘陵地带，即地形引起的风切变；

2　雷暴引起的风切变（微下击暴流和阵风锋）；

3　海陆风与背景风的辐合；

4　冷锋；

5　急流。

C. 2. 5　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，从中抽取航空器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. 3　广义风切变和航空器风切变

C. 3. 1　低层风切变。

从广义角度看涵盖了低层大气的一系列空气运动，包括从可能影响航空器的微小涡流和阵风，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“风在空间中的速度或方向的变化，包括上升气流和下沉气流”。

C. 3. 2　航空器风切变。

航空器风切变对航空的重要性在于其对航空器性能的影响，从而可能对飞行安全构成重大风险。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 m）时，对航空器起降尤为重要。在爬升和进近阶段，航空器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突然变化，会导致航空器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。航空器对风切变的响应极其复杂，受多种因素影响，包括航空器类型及重量、飞行阶段及姿态、风切变相对航空器大小的尺度，以及遇到的风切变的强度和持续时间。

C. 3. 3　《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 m（1 600 ft）之间的所有航空器产生不利影响”。ICAO 推荐的风切变强度判断标准见表 C. 3. 3。

表 C.3.3　风切变强度表

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

C.4　风切变告警识别方法

C.4.1　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 4 个处理步骤：

1　通过检测多普勒回波的每个径向数据，识别是否存在辐散状的径向速度段，从而构建损耗段；

2　对损耗段分组；

3　用分组后的损耗段来拟合微下击暴流形状；

4　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.4.2　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或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.4.3　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，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 30 m（100 ft）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.4.4 TDWR 的谱宽估算涡旋耗散率。

从气象探测和飞行安全角度来看，涡旋耗散率（Eddy Dissipation Rate，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旋耗散率之间的定量关系。

$$\epsilon \approx \frac{1}{\delta}\left[\frac{\sigma_v^2}{1.35\alpha}\right]^{3/2} \tag{C.4.4}$$

式中：σ_v ——雷达观测到的多普勒谱宽（m/s）；

ϵ ——湍流能量耗散率（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（通常与雷达波束宽和脉冲长度有关）。

根据《国际民用航空公约》附件三，湍流强度等级推荐如下，用户可结合实际进行调整：

1 当 $EDR \geqslant 0.45$ 时为严重；

2 当 $0.45 > EDR \geqslant 0.20$ 时为中等；

3 当 $0.20 > EDR \geqslant 0.10$ 时为轻；

4 当 $EDR \leqslant 0.10$ 时为零。

C.4.5 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。雷达扫描的径向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 8 个方位上相邻的数据的风切变值。

C. 4. 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°（降落航空器以跑道端头为终点，仰角为 3°，而起飞航空器则从跑道中部附近开始，仰角为 6°）下滑路径扫描（图 C. 4. 6），扫描区域是着陆点向上 3 海里，300 m 宽、60 m 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航空器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。

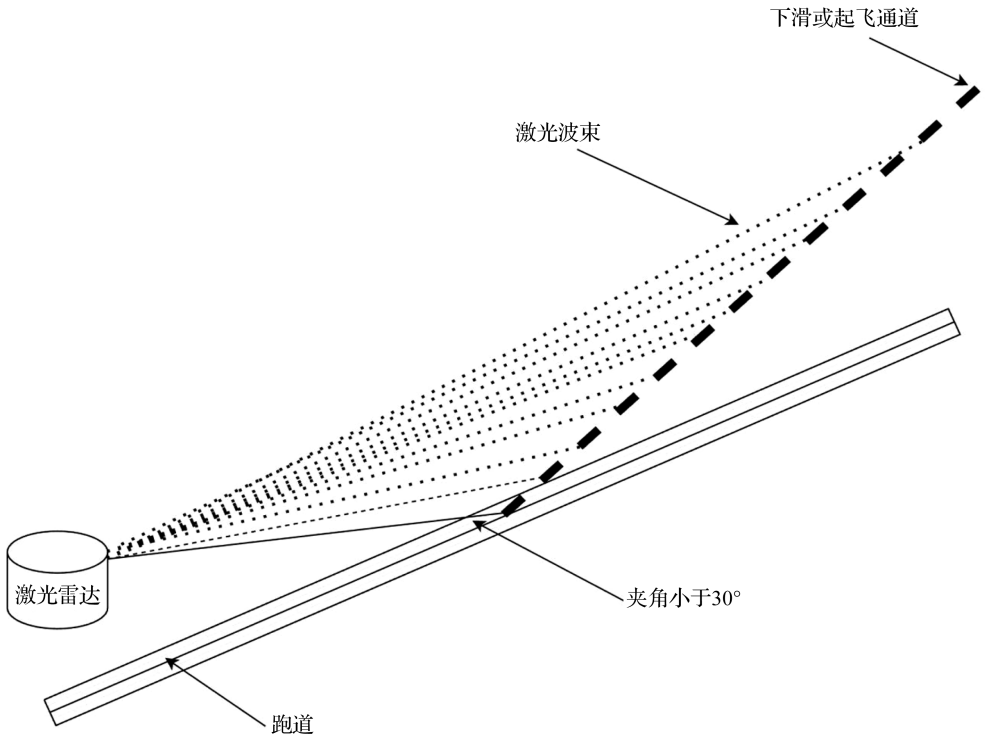

图 C. 4. 6　下滑道扫描模式示意

C. 4. 7　斜坡检测算法。

下滑道扫描（GPScan）的风切变识别，其理念是测量机场下滑道上的逆风，从而确定下滑道航空器将遇到的风切变。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，航空器在飞行过程中，遭遇迎头风速变化超过 7. 7 m/s（15 kt）时即认为存在风切变，因此将 15 kt 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。

1　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的，而是用来衡量风切变对航空器的总能量。航空器在风场中所受的力主要有航空器发动机的推力、空气对航空器的阻力以及航空器自身的重力。结合航空器动力学方程得到以下公式：

$$F = \frac{1}{g}\frac{d}{dt}U_x - \frac{w}{V_a} \tag{C.4.7-1}$$

式中：U_x ——沿下滑道方向 x 的顶风；

t ——时间；

w ——垂直风速；

V_a ——飞机的空速；

g ——重力加速度。

$$F \cong \frac{\partial U_x}{\partial x}\left[\frac{V_a}{g} + \frac{2h}{V_a}\right] \tag{C.4.7-2}$$

式中：$\frac{\partial U_x}{\partial x}$ ——空间风梯度，激光雷达直接能测出的物理量，即风速随空间距离的变化；

$\frac{V_a}{g}$ ——将空间梯度转化为时间变化率；

$\frac{2h}{V_a}$ ——连续性方程修正，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）；

h ——无线电高度。

公式（C.4.7-2）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，所以可通过链式法则进行转换。

2　S 因子算法。

结合斜坡检测算法，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。

$$S = \left(\frac{dv}{dt}\right)\left(\frac{\Delta V}{V_{app}}\right)^2 = \left(\frac{\Delta V}{H^{1/3}}\right)^3 / V_{app} \tag{C.4.7-3}$$

式中：$\frac{dv}{dt}$ ——沿下滑路径风的加速度；

ΔV ——沿下滑路径全部风变化量；

V_{app} ——飞机进近速度；

H ——斜坡长度。

C. 4. 8　风切变告警的验证。

风切变和湍流告警面临的另一个主要问题在于建立用于算法校准的“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。通过获取航空器机载的快速存取记录器（QAR）数据，计算逆风变化或者 F 因子，就可以与测风激光雷达数据计算出的对应数值进行直观对比。

C. 5　风切变告警系统指标的统计方法

C. 5. 1　雷达风切变告警系统的性能通过命中率（POD）和虚警率（FAR）来衡量，先建立一个判断矩阵（表 C. 5. 1），再通过将系统告警与“实际风切变事件（真值）”进行时空匹配来评判。

表 C. 5. 1　风切变判断矩阵

分类	实际有风切变（真值）	实际无风切变（真值）
系统有告警	A（命中）	B（虚警）
系统无告警	C（漏警）	D（正确否定）

C. 5. 2　命中率（Probability of Detection，POD）：在所有实际发生了风切变的时空单元中，告警系统成功发出告警的比例。系统整体告警命中率宜以特定周期统计平均值为准。

$$公式：POD = A/(A + C)$$

C. 5. 3　虚警率（False Alarm Ratio，FAR）：在所有系统发出了告警的时空单元中，实际并没有发生风切变的比例。系统整体告警命中率宜以特定周期统计平均值为准。

$$公式：FAR = B/(A + B)$$

C. 5. 4　实际有无风切变的判断方法有以下两种：

1　QAR 译码数据验证。

通过提取经纬度、高度处于雷达探测的下滑道内，并且时间在告警发生前后一段时间的航空器 QAR 数据，通过算法和解码来判断是否有实际风切变发生。第一种方法是基于 QAR 原始参

数计算“F 因子”来判断；第二种方法直接提取 QAR 中的机载风切变警告信号来判断。

2　航空器报告定性验证。

航空器报告是风切变验证的重要依据，但存在主观性和时间滞后性。对于实际有风切变的判断，可只保留报告中明确含有“掉速/增速 15 节”“中度”“严重”“复飞”等关键特征的报告。

针对实际无风切变的判断，可累积连续 3~5 架同型机在相同高度层均无报告才判定无；由于飞行员通常是在飞出风切变区域、航空器状态平稳后，才有精力用无线电通知塔台，涵盖时间也可适当放宽；在风切变验证阶段也可针对飞行员开展无风切变事件填报来判定。

标准用词说明

1　为便于在执行本规范条文时区别对待，对于要求严格程度不同的用词，说明如下：

1）表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。

2）表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。

3）表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。

表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词采用“可”。

2　条文中指定应按其他有关标准、规范执行时，写法为“应符合……的规定”或“应符合……的要求”。非必须按所指定的标准、规范或其他规定执行时，写法为“可参照……”。

引用标准名录

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件，凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

[1]《电磁兼容 试验和测量技术 第1部分：抗扰度试验总论》（GB/Z 17626.1—2024）

[2]《激光产品的安全 第1部分：设备分类和要求》（GB 7247.1—2024）

[3]《智慧民航数据治理规范 数据安全》（MH/T 5057—2021）

[4]《民用航空网络安全等级保护基本要求》（MH/T 0076—2020）

[5]《民用航空跨网数据交换安全技术要求》（MH/T 0073—2020）

[6]《地基相干多普勒测风激光雷达》（QX/T 605—2021）