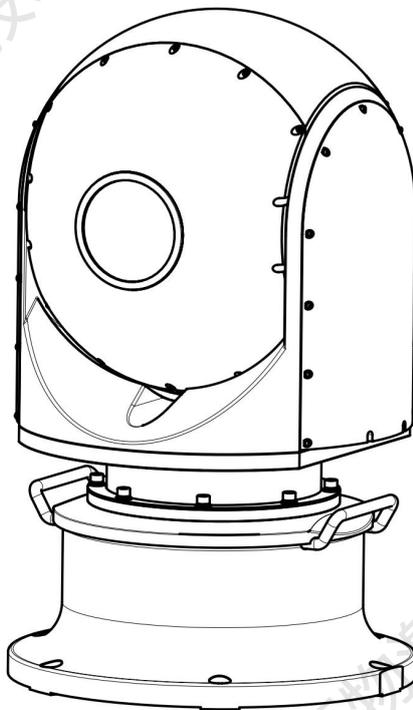


# FC-III相干多普勒测风激光雷达

## 用户手册



四川西物激光技术有限公司

2024年07月

## 目 录

1 前言.....	1
2 设备简介.....	4
2.1 设备组成.....	6
2.2 工作原理.....	7
2.3 探测模式.....	8
2.4 基本算法.....	16
2.5 应用领域.....	25
3 设备安装.....	35
3.1 安装选址.....	35
3.2 基础建设.....	36
3.3 安装要素.....	38
3.4 设备安装.....	42
4 设备维护.....	43
4.1 维护内容.....	43
4.2 雷达窗口玻璃清洁.....	44
4.3 气体置换.....	44
4.4 雷达输出功率检测.....	45
4.5 雷达探测精度比对.....	46
5 报警及常见故障排除.....	48

## 1 前言

本手册描述了 FC-III 型 3D 相干多普勒测风激光雷达（后简称为测风雷达）的技术、使用维护、常见故障与处理等方面的内容，其中技术方面包含了测风雷达的基本组成、工作原理、探测模式等内容；使用维护方面则主要包含了设备的安装、软件的使用、常规维护和保养等；常见故障与处理方面主要列举了日常可能会遇见的问题现象，并提供了对应的处理方法。

本手册也包含了用户对多普勒激光测风所需了解的一般知识和规范，这些内容不仅仅适用于脉冲型激光多普勒测风雷达，也适用连续型激光多普勒测风雷达。



这个标志被用来提醒操作员可能面临着直接暴露在可见、不可见以及紫外激光辐射下的危险。



这个标志被用来警示操作员，不当操作可能对操作员以及设备造成潜在的风险，并给操作员提供重要的指导。



这个标志提示高压电伤害危险，触电会立即导致严重伤害甚至死亡，雷达电子舱带有高压电。



这个标志提示您注意本系统软、硬件安装和操作过程中需注意的重要事项。



危险!

本设备采用的光纤激光器发射强度为等级1M类 (波长 $1550\text{nm} \pm 5\text{nm}$ ) , 因此在使用操作过程中必须特别小心。

输出的激光束会产生大量的热并对安全造成一定的危险，只有对本手册中安全防护条例 比较熟悉后，才可以操作该雷达系统。

发射强度等级为1M的高功率激光操作安全须知：

1. 任何情况下严禁打开雷达的外壳。
2. 禁止用眼睛检查激光器故障，激光器必须在断电情况下进行检查。
3. 避免直视激光的输出光束，反射光与散射光也同样有害。
4. 使用激光的过程中禁止佩戴珠宝首饰。
5. 使用过程中必须遵循一条原则：光路不能与人的眼睛处于相同高度
6. 使用激光过程中必须佩戴防护性眼罩，您可以向激光公司咨询相关事宜。

由于激光光束的特殊性质，与普通光源发生的光相比，激光具有一定的危险性。

所有激光使用者以及在激光系统附近的工作者必须明确认识到激光使用过程中的危险性。只有对激光设备比较熟悉，对激光光束的相干性以及光强有充分的了解，才能保证激光使用者的安全。



危险!

直视从激光器中输出的激光会对眼睛产生严重的伤害，甚至导致失明。

激光使用过程中最值得注意的是保护眼睛的安全。除了主光束以外，在激光系统的附近还会存在各种角度的小光束。这些光束是由主光束在各种抛光表面（如透镜、反射镜以及其他光学元件）由于镜面反射而形成的。尽管这些光束相比于主光束非常弱，但他们仍然能对人眼造成较大的伤害。

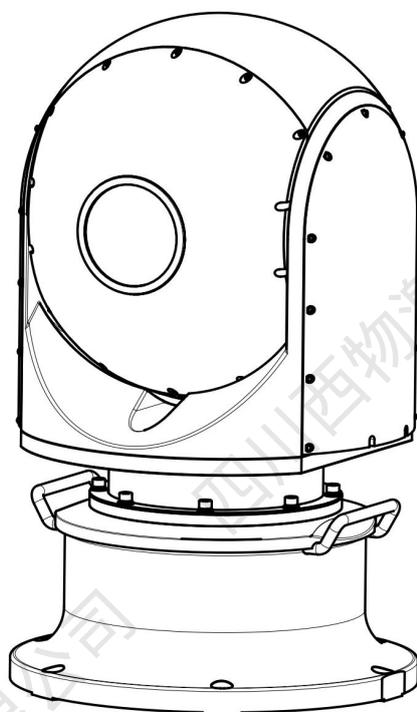
激光光束非常强，可以灼伤人的皮肤，烧坏衣服和表面的油漆，即使传播了相当距离，它仍然可以点燃挥发性物质，如有机溶剂等。激光光束还会对光学相机和发光二极管中的光敏元件产生破坏。同时，在间接接触时激光光束也会对反射表面产生破坏。因此本手册建议使用者在操作过程中采取以下的预防措施：

1. 使用前仔细阅读本手册中预防措施。
2. 在激光工作区域内使用易燃物品要特别小心。
3. 使用过程中只有对激光系统比较熟悉以及对激光的危险性有充分认识的专业人员才可以接近雷达激光器。
4. 禁止直视雷达窗口或者任何反射表面产生的散射光，同时，不要将激光光束直接反射回雷达输出窗口内。
5. 不要将身体直接暴露在激光下，它会灼伤人的皮肤，或者烧坏人的衣服。

## 2 设备简介

- 2.1 设备组成
- 2.2 工作原理
- 2.3 探测模式
- 2.4 应用领域

FC-III型相干多普勒测风激光雷达是一种基于光学相干多普勒频移检测原理的新型、高效的实时风场探测仪器，可对大气风场进行实时三维遥测，具有响应快、精度高、时空分辨率高、环境适应性强等特点，广泛应用于气象部门观测、民航飞行保障、环境监测、风力发电、应急救援、体育赛事等领域。



**设备功能:**

- (1) 具备对一定高度范围内风速、风向、垂直气流等风场信息的测量功能，具备获取大气气溶胶后向散射信号的能力，能够实现风场与气溶胶同步探测，可区分降雨、云；
- (2) 能够实时生成风切变、合成风等数据产品；具备对载荷状态进行监控能力；
- (3) 具备参数控制，状态监测，风场数据处理、显示及存储等功能；
- (4) 结构紧凑，便于搬运、展开、撤收方便快捷；
- (5) 具备风廓线探测模式、扫描探测模式，扫描探测模式包括单波束垂直测量 \VAD\DBS\PPINRHI 等，并支持扫描任务编程开发功能；

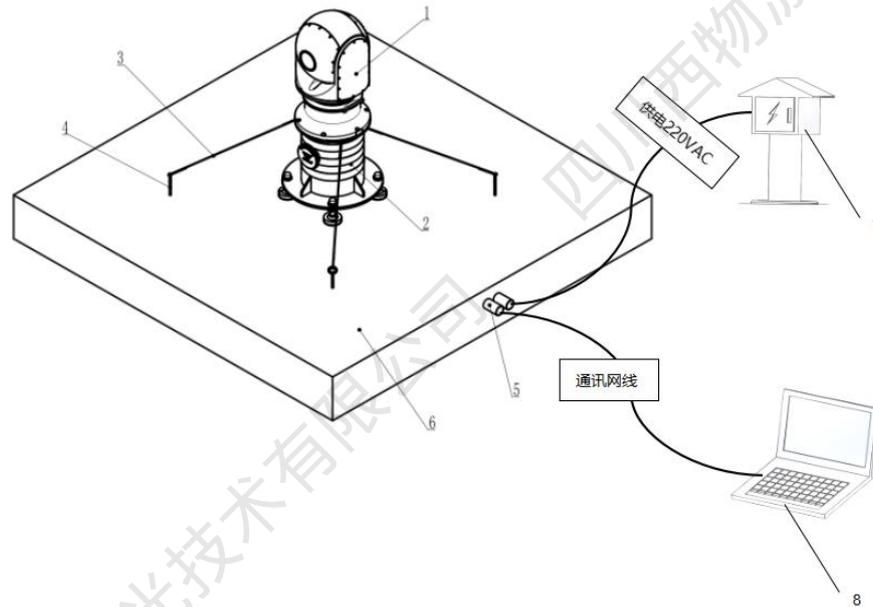
**技术规格:**

序号	工作波段	1550nm+/-3nm
1	工作体制	脉冲
2	重复频率	> 10KHz
3	光路设计	透射式同轴光学系统
4	探测口径	有效探测口径≥100mm
5	垂直探测高度	> 3000m
6	水平探测距离	> 10000m
7	探测盲区	≤30m
8	探测范围	风速 0 ~ 75m/s, 风向: 0 ~ 360°
9	径向风速误差	< 0.1m/s
10	风速误差	≤0.3m/s (10min 平均)
11	风向误差	≤3° (10min 平均)
12	伺服精度	< 0.1°
13	最大扫描角速度	60°/s
14	距离分辨率	15 ~ 100m 可设置
15	数据刷新率	1s ~ 10min 可设置

16	径向速度刷新率	< 0.1s
17	数据产品	数据产品：信噪比、谱宽、云高、水平风、合成风、垂直气流、风切变因子、气溶胶消光系数、能见度、雷达状态信息等。
18	扫描方式	DBS、PPI、RHI、CPS 等
19	扫描范围	水平方向：N×360°、俯仰方向：-10° ~ 190°
20	体积	≤φ420×700mm
21	重量	≤65kg
22	电源及功耗	220V AC, ≤250W
23	工作温度	-40°C ~ 55°C
24	相对湿度	0 ~ 93%
25	通信方式	LAN/无线传输（选配）
26	防护等级	IP66
27	激光辐射	激光等级 1M 级；满足《激光产品的安全》GB 7247.1-2012 标准

## 2.1 设备组成

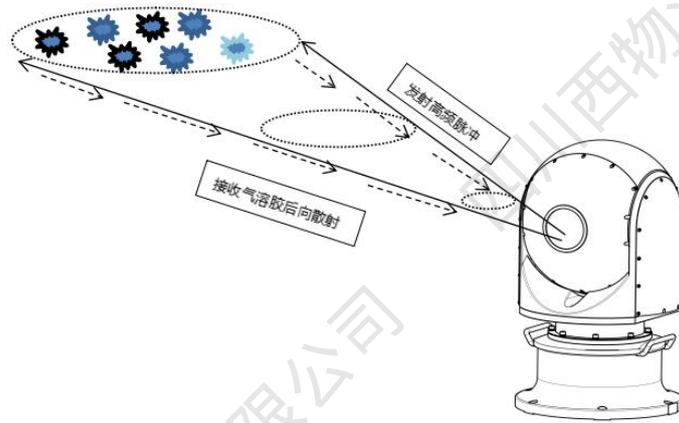
设备由雷达主机、便携式数据终端、安装支架、固定辅件及其他配件组成。



- |          |            |
|----------|------------|
| 1-雷达主机   | 2-安装支架     |
| 3-固定钢缆   | 4-固定地钉     |
| 5-PVC预埋管 | 6-水泥基底     |
| 7-配电箱    | 8- 便携式数据终端 |

## 2.2工作原理

相干多普勒测风激光雷达采用激光相干探测体制，以大气气溶胶为示踪物，通过向空中发射激光脉冲，沿脉冲传播途径上的运动粒子在对激光脉冲产生散射效应的同时，粒子的运动群速度会引起散射光的多普勒频移，激光视线方向的风速与多普勒频移有固定关系： $\Delta f_d = \frac{\pm 2v}{\lambda}$ ，其中 $\Delta f_d$ 为多普勒频移， $v$ 为径向速度， $\lambda$ 为测量激光波长，雷达通过检测气溶胶对激光后向散射回波信号的多普勒频移，结合多波束光机扫描和风场反演，实现对大气风场分布的测量。

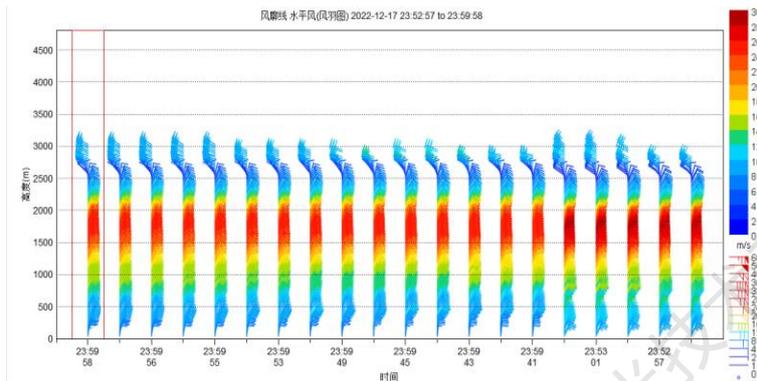
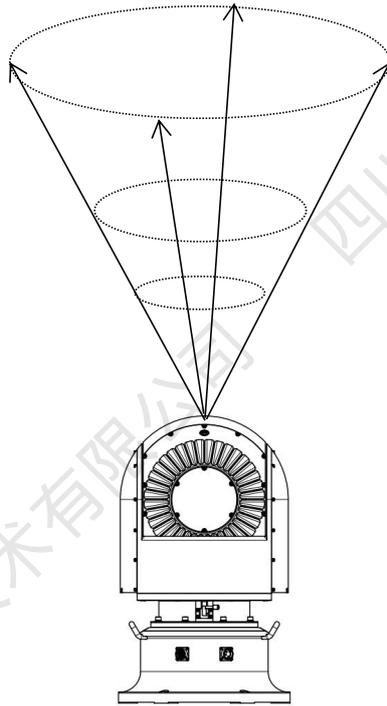


## 2.3 探测模式

测风雷达结合方位 $N \times 360^\circ$ 、俯仰 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 的伺服平台，实现多种扫描模式的风场探测，探测模式包括风廓线DBS模式、平面位置扫描PPI模式、距离高度剖面扫描RHI模式、下滑道扫描GLIDE模式、组合扫描CPS模式等。

### 2.3.1. DBS模式

DBS (Doppler Beam Swinging) 模式亦称为风廓线模式，是一种基于DBS算法的扫描探测模式，该扫描模式是测风雷达始终保持 $70^\circ$ 仰角指向顶空进行探测扫描，其作用是获取顶空区域内风场演变特征，其产品有水平风，垂直速度、信噪比、水平风切变和垂直风切变等。



## 模式理论：

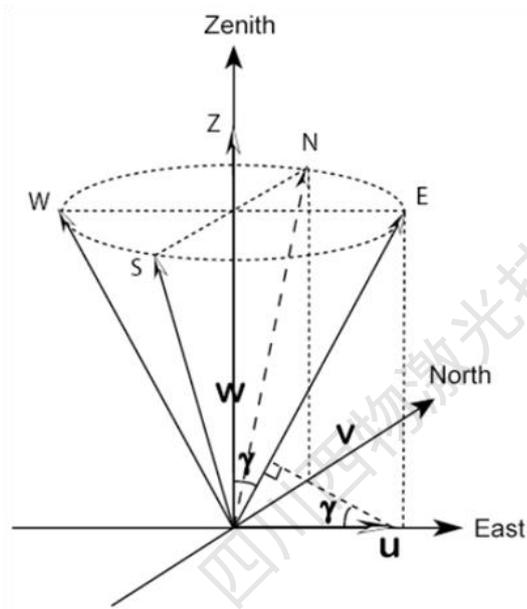
DBS算法即多普勒波摆动扫描，假设风场矢量在DBS扫描过程中保持不变，四个激光束发射方向间隔 $90^\circ$ ，脉冲测风雷达直接测量这四个方向上的径向风速。设风矢量为 $(u, v, w)$ ，在直角坐标系中： $u$ 沿着 $x$ 轴， $v$ 沿着 $y$ 轴， $w$ 沿着 $z$ 轴，圆锥扫描半角 $\gamma$ 是激光束指向与 $z$ 正轴的夹角，扫描方位角 $\theta$ 以 $x$ 坐标正轴为 $0$ 度起点。则每个径向风速与风向矢量的关系可表示如下：

$$V_R = u \cos \theta \sin \gamma + v \sin \theta \sin \gamma + w \cos \gamma$$

设四个方向测得的径向风速分别为VR1, VR2, VR3, VR4, 对应的方位角分别为θ1, θ2, θ3, θ4。

$$\begin{cases} V_x * \sin \alpha_1 * \cos \beta + V_y * \cos \alpha_1 * \cos \beta + V_z * \sin \beta = V_{r1} \\ V_x * \sin \alpha_2 * \cos \beta + V_y * \cos \alpha_2 * \cos \beta + V_z * \sin \beta = V_{r2} \\ V_x * \sin \alpha_3 * \cos \beta + V_y * \cos \alpha_3 * \cos \beta + V_z * \sin \beta = V_{r3} \\ \vdots \\ V_x * \sin \alpha_i * \cos \beta + V_y * \cos \alpha_i * \cos \beta + V_z * \sin \beta = V_{ri} \end{cases}$$

假设：坐标轴x, y分别与East, North方向重合，则四个扫描方位角对准E, N, W, S方向，即θ1, θ2, θ3, θ4分别为0°, 90°, 180°, 270°，如图7-33所示。（事实上，即使真北坐标与雷达坐标不重合，也可在反演风向后进行坐标变化，换算到真北坐标内）。



DBS 算法示意图

通过化简得到：

$$\begin{cases} V_{RE} = V_{R1} = u \sin \gamma + w \cos \gamma \\ V_{RN} = V_{R2} = v \sin \gamma + w \cos \gamma \\ V_{RW} = V_{R3} = -u \sin \gamma + w \cos \gamma \\ V_{RS} = V_{R4} = -v \sin \gamma + w \cos \gamma \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} u = \frac{(V_{RE} - V_{RW})}{2 \sin \gamma} \\ v = \frac{(V_{RN} - V_{RS})}{2 \sin \gamma} \\ w = \frac{(V_{RE} + V_{RN} + V_{RW} + V_{RS})}{4 \cos \gamma} \end{cases}$$

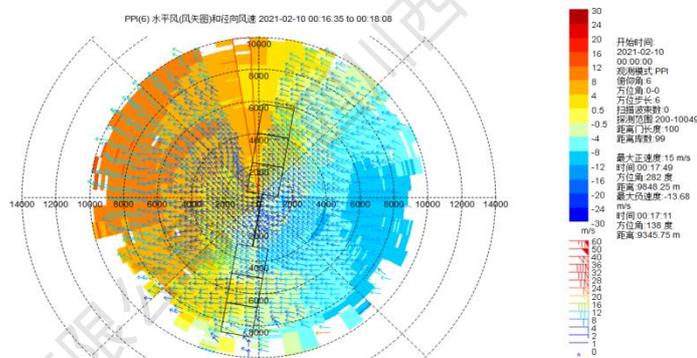
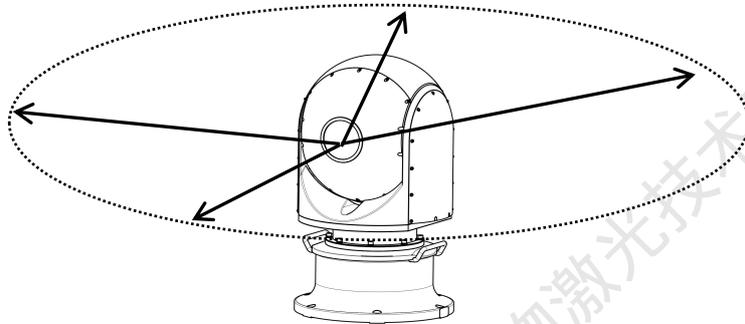
u (东风为正)、v (北风为正)、w (即为垂直风速, 风向下吹为正) 为三维风场矢量的分量。那么, 水平风速 $V_H$ 、水平风向 $\alpha$ 的表达式如下:

$$V_H = \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\alpha = \arctan(v/u)$$

### 2.3.2. PPI模式

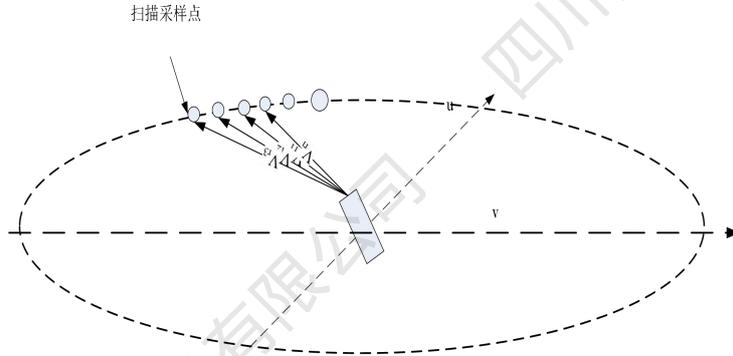
PPI (Plan Position Indicator) 模式亦称为平面位置扫描模式, 是一种以设定的固定仰角进行圆周扫描的探测模式, 其作用是获取设备周边区域空中风场演变特征, 其数据产品有径向速度、水平风、风切变等。



模式理论:

雷达一次测量得到的径向风速与实际大气风速风向 ( $u, v, w$ ) 关系可表示为:

$$V_r = u \cos \theta \sin \gamma + v \sin \theta \sin \gamma + w \cos \gamma$$



式中  $V_r$  为雷达的径向波束测量值, 为大气风场在沿激光波束方向的各个分量叠加, 雷达在对周边指定敏感区域或周边的大致扫描, 可以得到下列方程组:

$$V_x * \sin \alpha_1 * \cos \beta + V_y * \cos \alpha_1 * \cos \beta + V_z * \sin \beta = V_{r1}$$

$$V_x * \sin \alpha_2 * \cos \beta + V_y * \cos \alpha_2 * \cos \beta + V_z * \sin \beta = V_{r2}$$

$$V_x * \sin \alpha_3 * \cos \beta + V_y * \cos \alpha_3 * \cos \beta + V_z * \sin \beta = V_{r3}$$

$$V_x * \sin \alpha_i * \cos \beta + V_y * \cos \alpha_i * \cos \beta + V_z * \sin \beta = V_{ri}$$

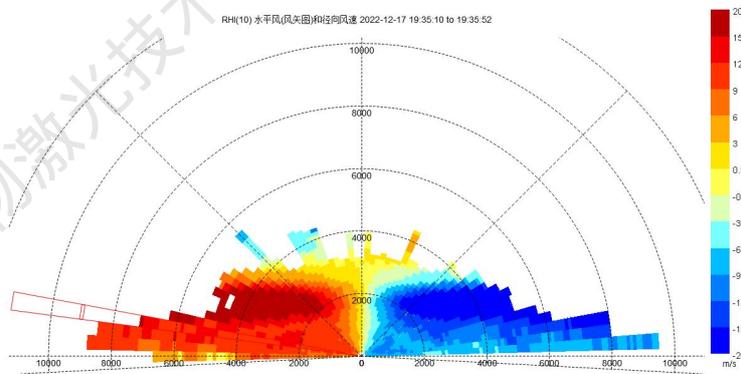
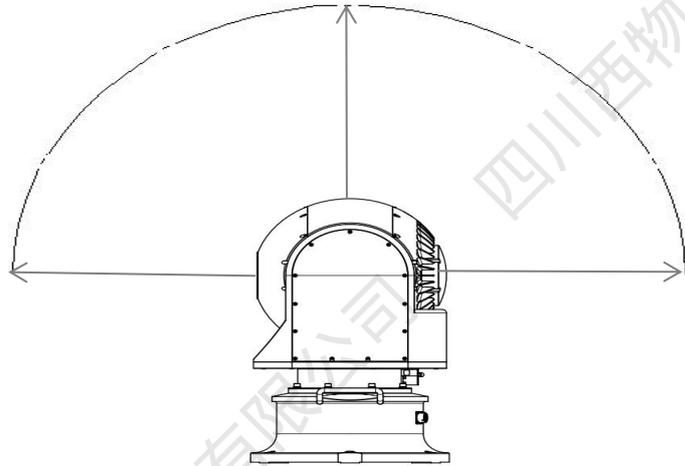
对上述方程组根据超定方程的最小二乘法解进行计算, 可以找出最佳的 ( $u, v, w$ ) 值, 即可得到正下方完整的大气水平风场信息。

$$V_H = \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\alpha = \arctan(v/u)$$

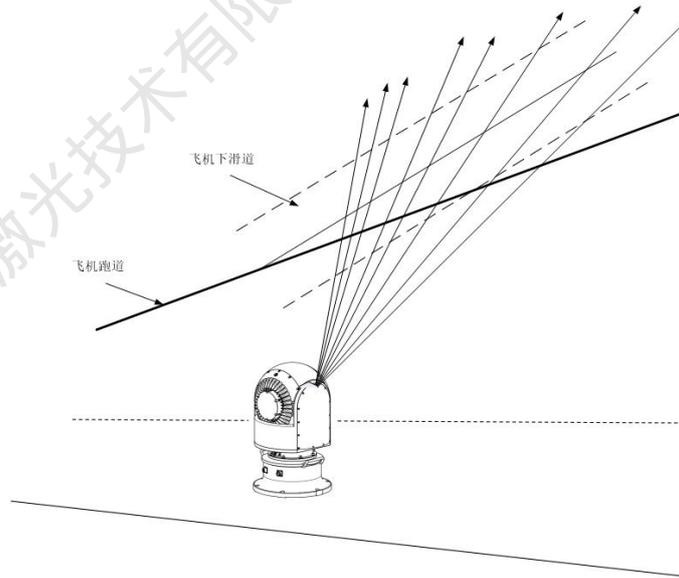
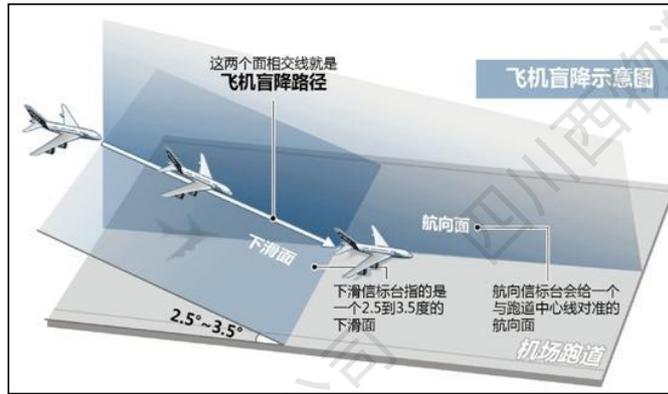
### 2.3.3. RHI模式

RHI(Range Height Indicator)模式亦称为距离高度剖面扫描模式, 是一种针对设定的某个方位, 进行上下扫描探测模式, 其作用是获取特定方位空中流场垂直结构的演变特征, 其产品有径向速度、风切变等。

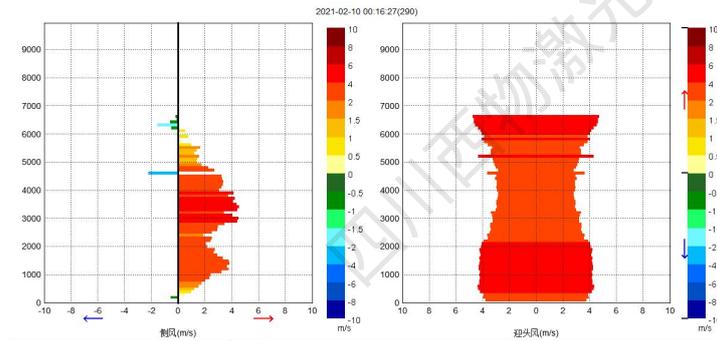


#### 2.3.4. GLIDE模式

GLIDE模式亦称为下滑道扫描模式，是自定义的一种特例扫描模式，通过设定扫描方式的工作参数，实现对飞机降落通道（下滑道）的风场测量以及风切变的探测与预报。下滑道扫描的范围主要覆盖飞机降落通道，能获得起降通道上的纵风（逆风廓线）和迎头风、侧风分布等，并反演出风切变值。下滑道扫描为测风雷达的一个重要扫描策略，主要用于飞机降落前，为飞机降落提供气象支持。



下滑道GLIDE模式扫描示意图



### 模式理论:

下滑道GLIDE扫描模式中，测风雷达针对起降通道区域进行多波束扫描，设雷达一次测量得到的径向风速与实际大气风速风向  $(u, v, w)$  关系可表示为：

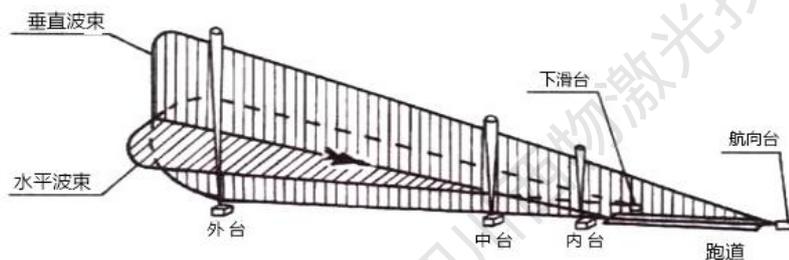
$$V_r = u \cos \theta \sin \gamma + v \sin \theta \sin \gamma + w \cos \gamma$$

其中 $V_r$ 为雷达的径向波束测量值，为大气风场在沿激光波束方向的各个分量叠加。

因此，多个波束不同的方位俯仰得到多个径向风速与大气风场的关系式，得到下列方程组：

$$\begin{aligned} u * \sin \alpha_1 * \cos \beta_1 + v * \cos \alpha_1 * \cos \beta_1 + w * \sin \beta_1 &= V_{r1} \\ u * \sin \alpha_2 * \cos \beta_2 + v * \cos \alpha_2 * \cos \beta_2 + w * \sin \beta_2 &= V_{r2} \\ u * \sin \alpha_3 * \cos \beta_3 + v * \cos \alpha_3 * \cos \beta_3 + w * \sin \beta_3 &= V_{r3} \\ u * \sin \alpha_i * \cos \beta_i + v * \cos \alpha_i * \cos \beta_i + w * \sin \beta_i &= V_{ri} \end{aligned}$$

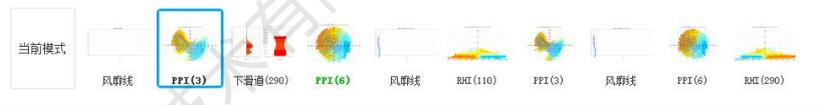
对上述方程组根据超定方程的最小二乘法解进行计算，可以找出最佳的  $(u, v, w)$  值，即可得到正下方完整的大气风场信息。然后根据起降通道的地理方位和俯仰角度，反算出起降通道的横风 $V_x$ 和逆风分量 $V_y$ ，实际测量效果如下图所示。



### 2.3.5. CPS模式

CPS模式亦称为组合扫描模式，该模式扫描策略是从按DBS模式进行一次探测开始，得到顶空流场分布，随后进行3°仰角和6°仰角的PPI模式各探测一次(飞机着陆通常按3°仰角下降，按6°仰角起飞)，得到机场周边空中风场分布，随即按跑道方位和跑道

垂线方位各探测一次，得到跑道上空和垂直方位上空的风场分布，最后对正在使用的起降通道进行下滑道探测，得到沿飞机起降轨迹通道内的飞机将遭遇的左/右侧风、顺/逆风的大小，按照给定的阈值条件，实时进行告警，其产品分布见下图。该扫描模式主要是考虑满足用户监测飞机起降遭遇的风切变、进行航空气象服务中的临近预报的掌握周边区域、跑道及垂直方向、设备顶空等风场演变的综合需求设计的。因地理位置、地形环境、以及应用情况不同，组合模式顺序可根据用户实际需求进行设置。



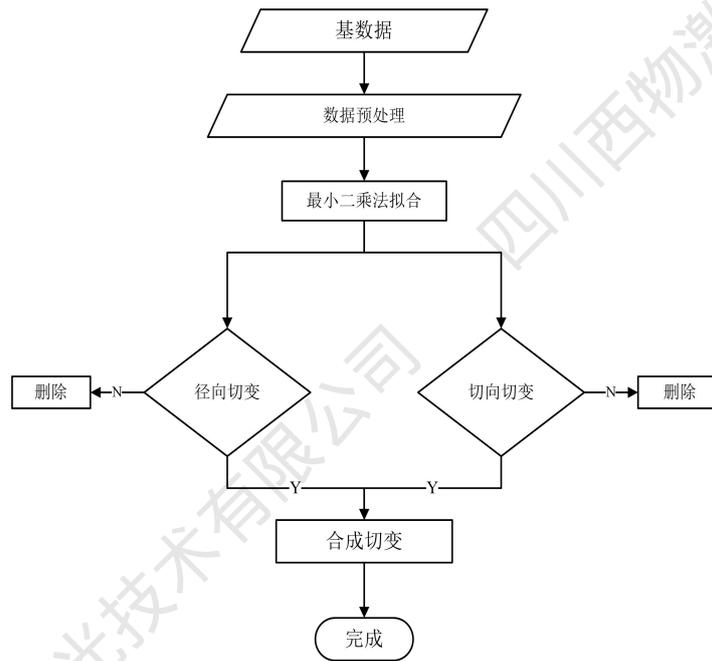
CPS组合扫描模式及对应产品

该模式扫描下，需要用户自行选择需要的模式进行组合，各模式工作顺序以及各模式在组合扫描中的次数均可由用户自行设定。

## 2.4 基本算法

### 2.4.1. 风切变算法

风切变虽尺度小、持续时间短、突发性特征，但其本质还是表现为一定距离内风矢量的变化。径向速度作为大气真实风场在径向上的投影分量，其速度沿径向上的变化和速度沿切向上的变化即可反映大气流场中的这种不均匀性。根据以上描述，在雷达PPI扫描中，选取 $M * N$ 大小的“拟合窗口”，基于最小二乘拟合法，对窗口内径向基数据分别做沿径向和切向的线性拟合，求得径向切变和切向切变从而得到二维合成切变，算法流程图如下图。



二维合成切变流程图

对于一维径向切变：首先在同一条径向上选取长度为M的“拟合窗口”，窗口内包含m个资料点，即为 $(v_{i,j}, r_{i,j})$ 、 $(v_{i,j+1}, r_{i,j+1})$ 、……、 $(v_{i,j+m}, r_{i,j+m})$ ， $v_{i,j+m}$ 为拟合窗口中第m个点的径向速度， $r_{i,j+m}$ 则为第m个点相对于雷达中心点的距离，然后计算沿雷达径向方向的切变值 $C_{Rs}$ 。

一维径向切变值为：

$$C_{Rs} = \frac{\partial v}{\partial r} = b = \frac{\sum_{j=1}^m v_j \sum_{j=1}^m r_j - n \sum_{j=1}^m v_j r_j}{\sum_{j=1}^m r_j \sum_{j=1}^m r_j - m \sum_{j=1}^m r_j^2}$$

对于一维切向切变 $C_{As}$ ，在距离雷达中心点相同距离的径向圆圈上选取宽度为N的拟合窗口，窗口内包含n个资料点，即为 $(v_{i+1,j}, \theta_{i+1,j})$ 、 $(v_{i+2,j}, \theta_{i+2,j})$ 、……、 $(v_{i+n,j}, \theta_{i+n,j})$ ，其中 $v_{i+n,j}$ 为拟合窗口内第n点的径向速度， $\theta_{i+n,j}$ 为第n个点的方位角。则切向风切变值 $C_{As}$ 为：

$$A_s = \beta = \frac{\partial v}{\partial \theta} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \sum_{i=1}^n \theta_i - n \sum_{i=1}^n v_i \theta_i}{\sum_{i=1}^n \theta_i \sum_{i=1}^n \theta_i - n \sum_{i=1}^n \theta_i^2}。$$

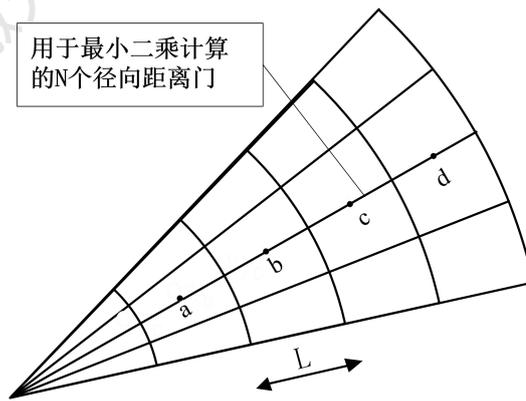
对切向风切变进行归一化处理：

$$C_{As} = \frac{A_s \times 180^\circ}{r \times \pi}。$$

最后，将径向切变与方位切变合成可得到二维合成风切变：

$$Cs = \sqrt{C_{Rs}^2 + C_{As}^2}$$

径向变化示意图：



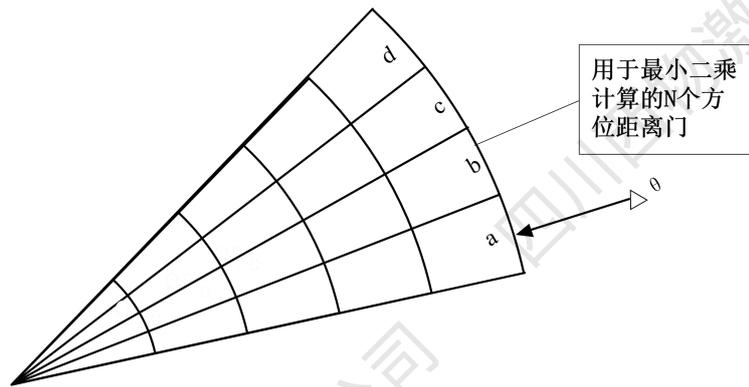
径向变化示意图

径向变化值  $\frac{\partial v}{\partial r}$  可通过N个径向距离门进行最小二乘法计算得到：

$$\frac{\partial v}{\partial r} = \frac{\sum_{i=-N}^N r_i \cdot v_i}{\sum_{i=-N}^N i^2} \cdot \frac{\Delta r}{(\Delta r + L)}$$

上式中， $v_i$  表示从计算点开始的第*i*点速度， $r_i$  表示距雷达距离，N为总点数， $\Delta r$  为点与点之间距离， $L$  为一个单位距离门长度。

方位变化示意图：



方位变化示意图

同理，方位变化值也可通过N个方位距离门进行最小二乘法计算得到：

$$\frac{\partial v}{r\partial\theta} = \frac{\sum_{-N}^N \theta_i \cdot v_i}{r \cdot \Delta r \cdot \sum_{-N}^N \theta_i^2} \cdot \frac{r\Delta\theta}{(r\Delta\theta + \frac{\pi \cdot r \cdot \Delta\theta}{180^\circ})}$$

式中， $\theta_i$  表示从计算点沿切向开始距离雷达的第  $i$  个点的方位角，N为总方位数，

$\Delta\theta$  为方位角步进量。将得到径向变化值  $\frac{\partial v}{\partial r}$ ，方位变化值  $\frac{\partial v}{r\partial\theta}$  进行合成，可得到风切变值：

$$R = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{r\partial\theta}\right)^2}$$

### (1)垂直风切变

水平风的垂直切变是指在垂直方向上一定距离（通常取 30 米）间，水平风速或风向的变化量，垂直风切变计算如下：

设某高度层风速为  $V$ ，风向为  $\theta$ ；与之相邻的上下两个高度层的风速分别为  $V_1, V_2$ ，风向为  $\theta_1, \theta_2$ ，与两个高度层的水平风垂直切变值为  $S_1, S_2$ ，垂直风切变为：

$$S_i = \sqrt{V_i^2 + V^2 - 2V_i V \cos(\theta_i - \theta)} (i = 1, 2)$$

该高度层的水平风垂直切变值：

$$S = \max(S_1, S_2)$$

## (2) 垂直气流切变

垂直风的切变是指上升或下降的气流在水平方向上两点之间的改变量。垂直风存在于所有下击暴流中，且强度随高度上升而增加。此类风通常在高度大于 150 米时达到强度的峰值。垂直气流切变计算如下：

设某高度层垂直气流为  $V$ ，与之相邻的上下两个高度层的垂直气流分别为  $V_1, V_2$ 。与两个高度层的风切变值为  $S_1, S_2$ ，垂直气流切变为：

$$S_i = |V - V_i| (i = 1, 2)$$

该高度层的垂直气流切变值：

$$S = \max(S_1, S_2)$$

## (3) 水平风场切变

水平风的水平切变是指水平方向上，一定距离内两点之间的水平风速或风向的改变。水平风场切变计算如下：

设一条径向上某个距离门的风速为  $V$ ，风向为  $\theta$ ；与其相邻的两条径向同一距离门位置及该条径向前后相邻距离门的风速分别为  $V_1, V_2, V_3, V_4$ ，风向为  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 。

则该门与相邻四个距离门的水平风水平切变值分别为  $S_1, S_2, S_3, S_4$ ，计算方法为：

$$S_i = \sqrt{V_i^2 + V^2 - 2V_i V \cos(\theta_i - \theta)} (i = 1, 2, 3, 4)$$

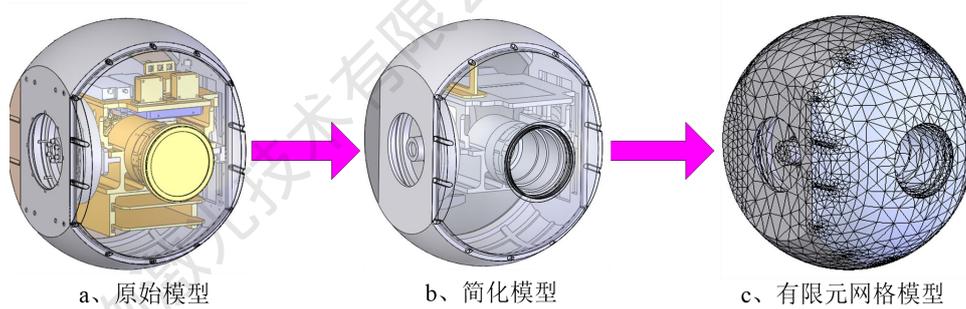
该位置的水平风水平切变值为：

$$S = \max(S_1, S_2, S_3, S_4)$$

## 2.4.2. 抗高温概算

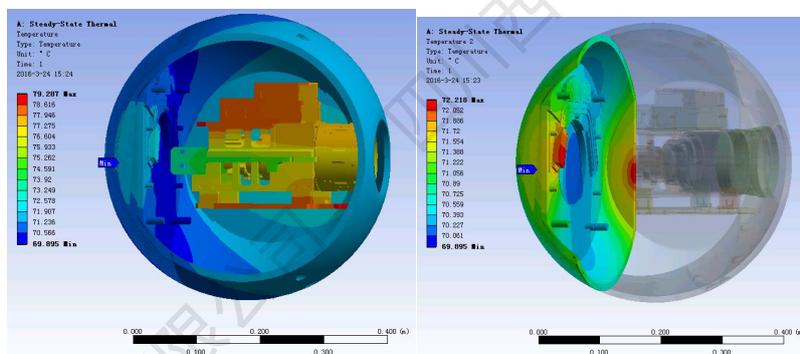
测风雷达主机为室外设备，在高温环境下，由于测风雷达工作时自身元器件发热，将导致主机内温度的进一步提高，将可能对部分光学元器件，尤其是系统中的光电元器件的长期正常工作产生影响。

扫描球光学头舱热仿真有限元分析模型如下图。



有限元热分析模型

仿真结果：设置球体的环境温度 $65^{\circ}\text{C}$ ；球体内部采用风扇强迫对流，对流参数取 $30\text{w}/\text{m}^2$ ，球体外对流系数 $9\text{w}/\text{m}^2$ (自然对流)；据上述边界条件进行有限元仿真，结果如图8.7.8-1所示。分析结果表明，在温度 $65^{\circ}\text{C}$ 情况下，球体内光电组件的最高温度将达到 $79^{\circ}\text{C}$ ，后端盖组件LD处的温度达到 $72^{\circ}\text{C}$ ，可满足LD及其他光学部件的正常工作要求，如图所示。



a 球体热分布云图

b 后盖组件热分布云图

(69.9°C ~ 78.3°C)

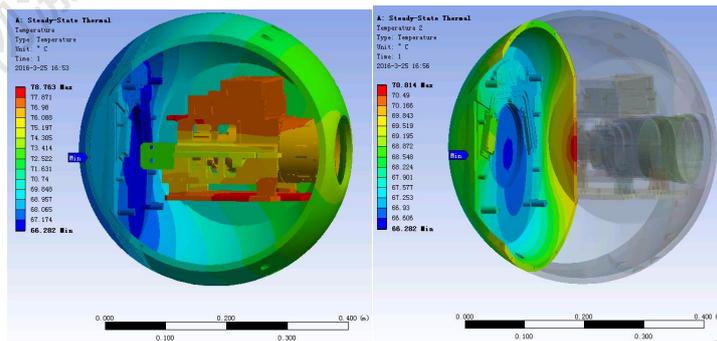
(69.9°C ~ 72.2°C)

## 高温下扫描球体的分析-热分布云图

同样，对环境温度69°C进行分析，在热交换平衡情况下，球内温度不超过75度，该温度值不会导致雷达内光电子元器件的损坏。

考虑太阳辐射情况下雷达的工作，考虑环境温度48°C，太阳辐射1120w/m<sup>2</sup>。

取边界条件为环境温度48°C；太阳辐射1120w/m<sup>2</sup>，吸收率15%。仿真结果如图8.7.8-5所示。结果表明，球体内最高温度为78.7°C，一般器件位置温度达到75°C左右；光纤放大器LD处温度约70°C，球体的温度均低于电子元器件及光学元器件的极值温度，可满足正常工作要求。



a 球体热分布云图

b 后盖组件热分布云图

(76.3°C ~ 78.7°C)

(76.3°C ~ 80.8°C)

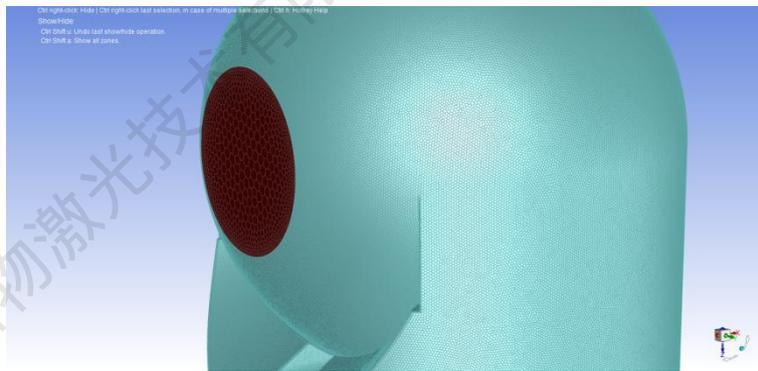
## 太阳辐射下扫描球体热分布云图

## 2.4.3. 抗风概算

采用CFD对测风雷达自然放置状态下在风速35m/s时的外流场进行了数值仿真，分析了设备在该风速条件下的受力情况。

## 仿真前处理

采用Ansys Fluent软件Meshing模式对模型进行网格划分。构建雷达设备外流场使其完全包络雷达设备，尺寸约为雷达设备的10倍。对球罩表面网格采用小的网格尺寸，对球罩安装台表面表面采用较小的网格尺寸，对于外流域采用较大的网格尺寸，对靠近球罩和球罩安装台外流域的网格进行加密，构建雷达设备外流场网格，如图8.7.8-8所示。网格量约149万，网格质量大于0.2。



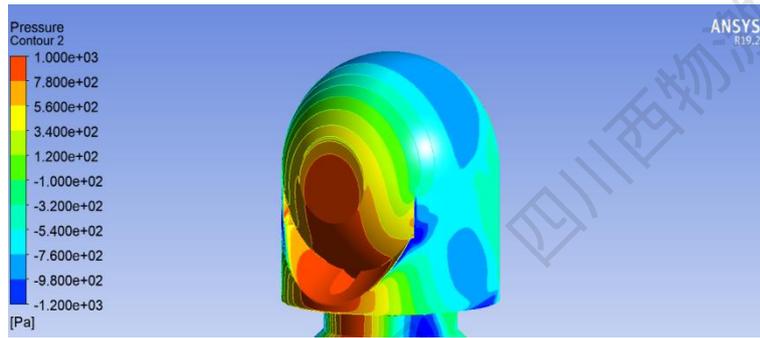
雷达设备表面网格

采用Ansys Fluent软件对求解工况进行设置。采用基于压力的求解器，打开能量方程，湍流模型采用SA模型。入口采用速度入口，来流速度35m/s，来流温度300K，来流方向X方向，压力101325Pa。出口采用速度入口，来流速度35m/s，来流温度300K，来流方向X方向，压力101325Pa。流域顶部和侧面采用速度入口，来流速度35m/s，来流温度300K，来流方向X方向，压力101325Pa。设备表面和地面采用无滑移绝热壁面。

## 仿真结果

以入口对流场进行初始化后进行数值仿真，待流场定常后得到雷达外流场数值仿真结果，并进行后处理。

雷达表面压力分布如图：



35m/s流速雷达球罩表面气动力分布

球罩迎风面所受压力最大，沿流向到两侧压力迅速减小出现负压，再沿流向到背风面逐渐增大。在流向上，球罩受总气动外力为128.3332N，其中玻璃面受力14.08716N。

因雷达为球形结构，风阻在方位上位对称的，产生的力矩微小，俯仰方向因有1/4的面积被遮挡，因此存在不平衡力矩。

根据风阻力的经典计算公式：
$$F = \frac{1}{2} \rho C S v^2 ;$$

式中  $\rho$  为空气密度， $C$  为风阻系数，球体为0.5、 $S$ 为迎风面积、 $V$ 为相对风速；风速为35m/s下俯仰不平衡力矩分别为：0.35N.m<sup>2</sup>。

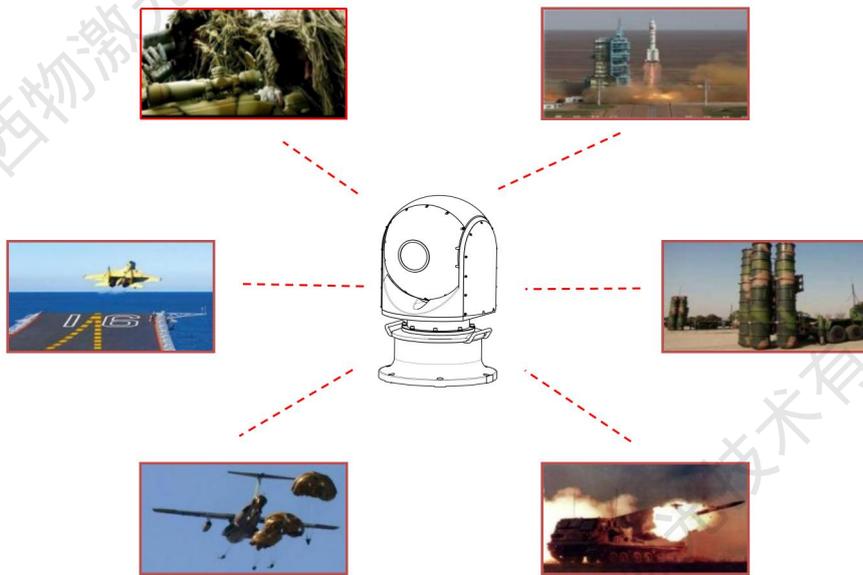
结论：测风雷达的伺服电机的力矩远大于在35m/s情况下产生的风阻扰动力矩，并且雷达的伺服机构有惯性传感器，可以克服该风阻扰动，因此35m/s风速下不会影响雷达无法正常工作 and 测量精度。

安装支架下端的每一个万向脚撑均有两颗膨胀螺钉与地面刚性连接，安装支架上端有6个固定绳孔通过钢丝绳与地面基点固定，并且测风雷达与安装支架采用刚性连接，因此测风雷达完全能够在40m/s的风速下正常工作。

## 2.5 应用领域

### 2.5.1. 军事领域

测风激光雷达作为一种专门用于测量高空风向、风速的雷达，其基本工作方式是通过发射脉冲激光和接收从目标返回的脉冲波来跟踪上升且随风飘移的气溶胶粒子，借以测量气溶胶粒子在空间中的运动轨迹来确定各高度上自由大气的风向和水平风速，探测高度可达4~5km，且不受天气条件限制，在军事领域中，测风激光雷达的作用不可忽视，目前测风激光雷达广泛的应用于航空航天、战机起降、定点投放、导弹发射等。



#### 应用意义：

- (1) 测风雷达能够实时提供战场区域的大气风场信息，了解风速和风向的变化可以帮助军事计划制定者调整战术策略，确保军事行动的顺利进行，对预测和评估军事行动的环境因素至关重要。
- (2) 测风雷达可为舰载机提高准确的风场信息，保障飞机起降安全。
- (3) 测风雷达可为火控系统提供发射阵地区域的风场信息，提高武器命中精度。

(4) 测风雷达可为航天发射提供发射场地的风场信息，保障发射任务的顺利完成。

(5) 测风雷达可为物质投送提供精确的风场信息，提供物质投送的精准度。

## 2.5.2. 民航领域

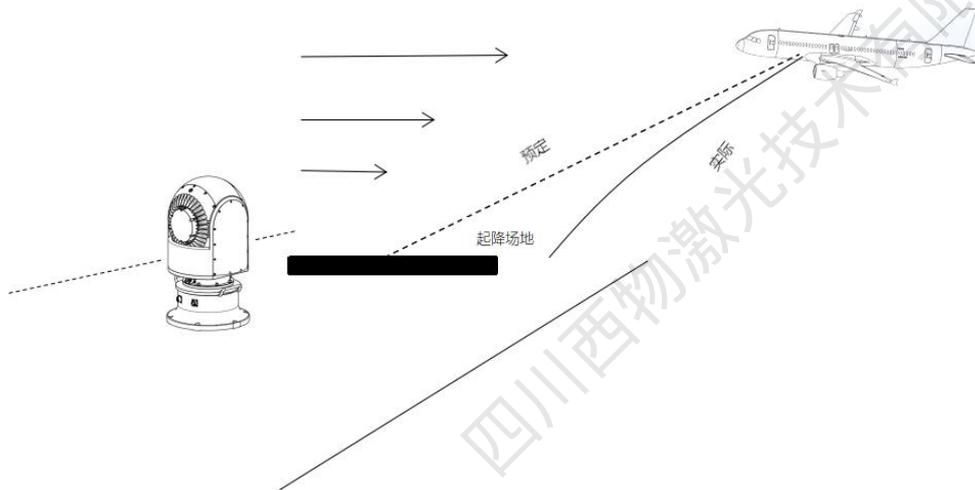
### 2.5.2.1. 风切变探测

空气流经空间不同点的时候，其运动速度和方向可能存在差异，这种在空间两点之间风向或风速的变化就称作为风切变，风切变严重影响民航飞行的安全通常被称为民航飞行的“隐形杀手”。

#### (1) 顺风切变

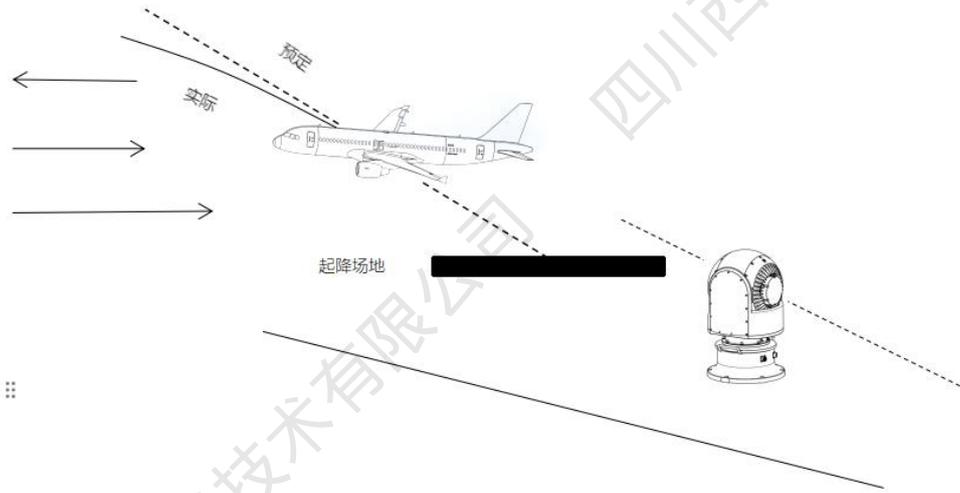
顺风切变是指水平风的变量对飞机来说是顺风，比如飞机从逆风进入顺风、从大逆风进入小逆风等情况，空气相对飞机的运动速度突然减小，升力减小，高度降低，实际飞行轨迹低于计划轨迹，具体情形如下：

情形一：



在逆风减弱时着陆

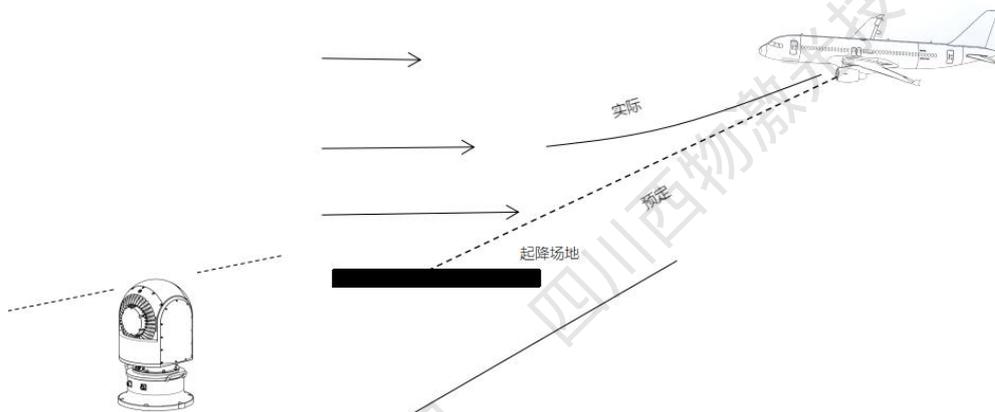
情形二：



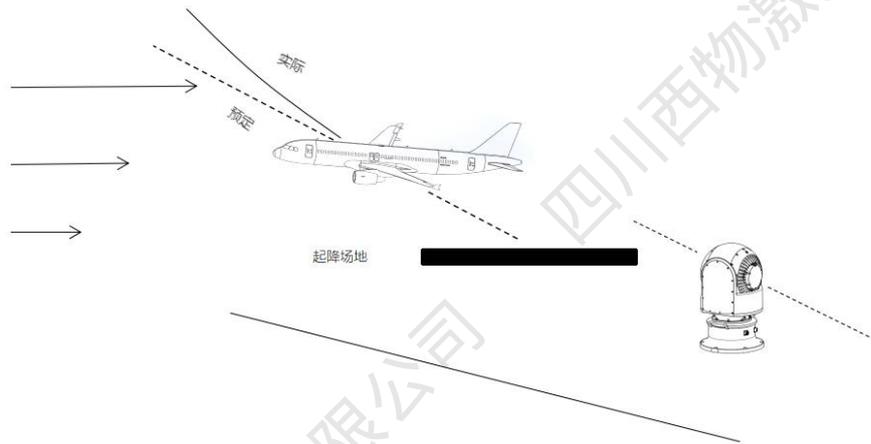
在逆风减弱时起飞

逆风切变是指水平风的变量对飞机来说是逆风，比如从顺风进入逆风、从大顺风进入小顺风等情况，空气相对飞机的运动速度突然增加，升力增加，高度升高，实际飞行轨迹高于计划轨迹，具体情形如下：

情形一：



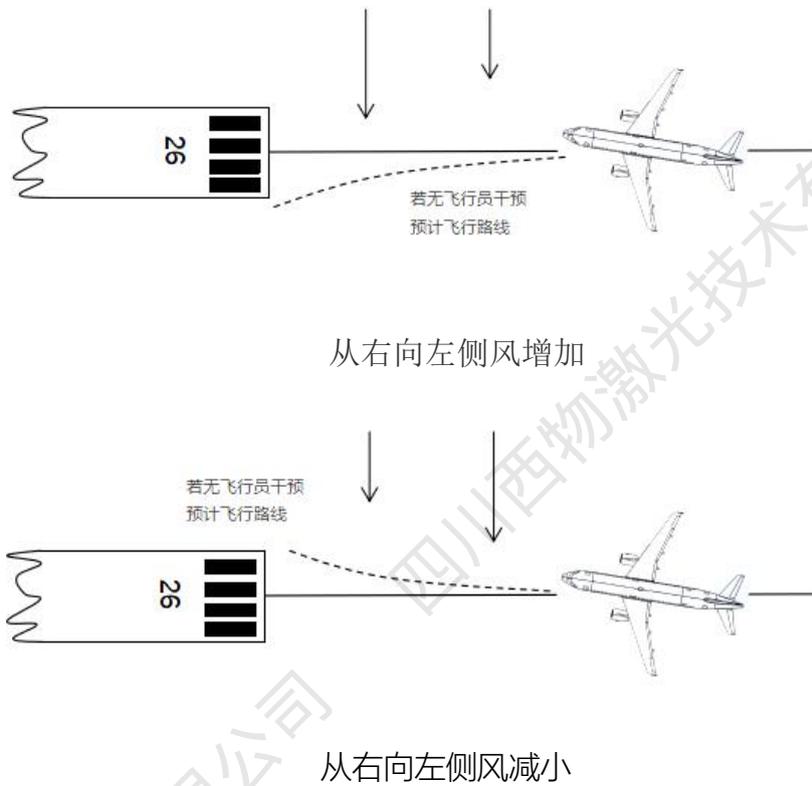
在逆风增强时着陆



在逆风增强时起飞

侧风切变指飞机从一种侧风或无侧风状态进入另一种明显不同的侧风状态，会使飞机发生侧滑、滚转或偏转，对不准跑道，具体情形如下：

情形一：



从右向左侧风增加

从右向左侧风减小

垂直风切变是指飞机从无明显的升降气流区进入强烈的升降气流区域的情形，强烈的下降气流会使飞机突然下沉、难以保持稳定姿态等，危害很大。

#### 风切变探测的意义：

测风雷达可以实时对飞机起降跑道周围10Km范围内区域的风场信息进行探测，并能正对飞机起降下滑道进行特定扫描，及时捕捉下滑道区域的风场信息，尤其是风切变信息，并及时反馈给塔台人员，辅助飞机起飞和降落，保障飞机起降安全。

#### 2.5.2.2. 飞机尾流探测

##### 尾流的产生：

飞机飞过后，其尾部区域内会产生的一定强度的气流，此种气流就称为飞机尾流。通常飞机尾流包含有滑流、紊流、喷流、翼尖涡流等种类形式。

- ①滑流：由于螺旋桨飞机的螺旋桨高速旋转而产生的尾流。
- ②紊流：飞机机翼表面由于横向流动的气流而产生的尾流。
- ③喷流：喷气发动机飞机的发动机产生的高温、高速尾流。
- ④翼尖涡流：飞机机翼翼尖处产生的尾流。

翼尖涡流是航空器在飞行过程中形成的尾流的主体部分。由于机翼翼尖处有自下而上翻动的气流，从而以翼尖为中心形成高速旋转并向后、向下延伸的螺旋形气流。机翼两翼尖形成的两股涡流的选择方向相反，在两股涡流内侧形成强大的下降气流，外侧形成强大的上升气流，从而对其后通过的航空器造成影响。翼尖涡流在航空器起飞时抬前轮的那一点开始形成，直至该航空器着陆时前轮接地的那一点消失。

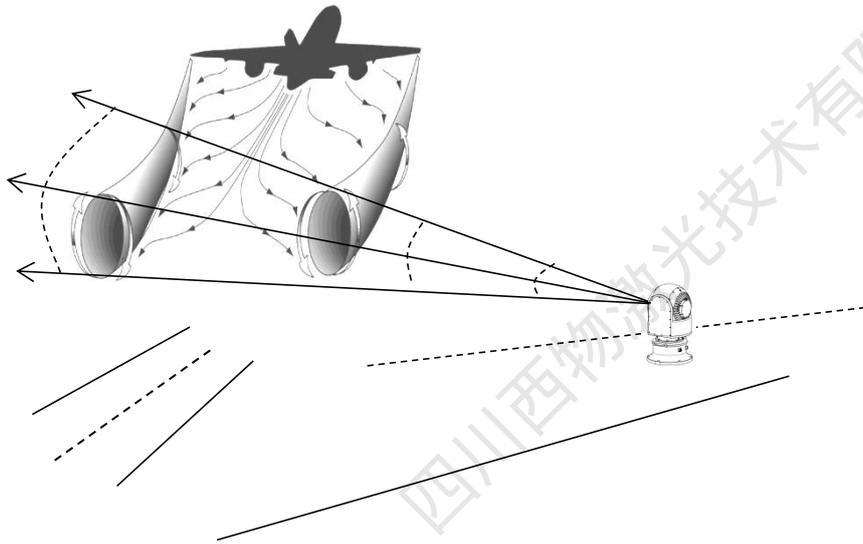
##### 尾流的危害：

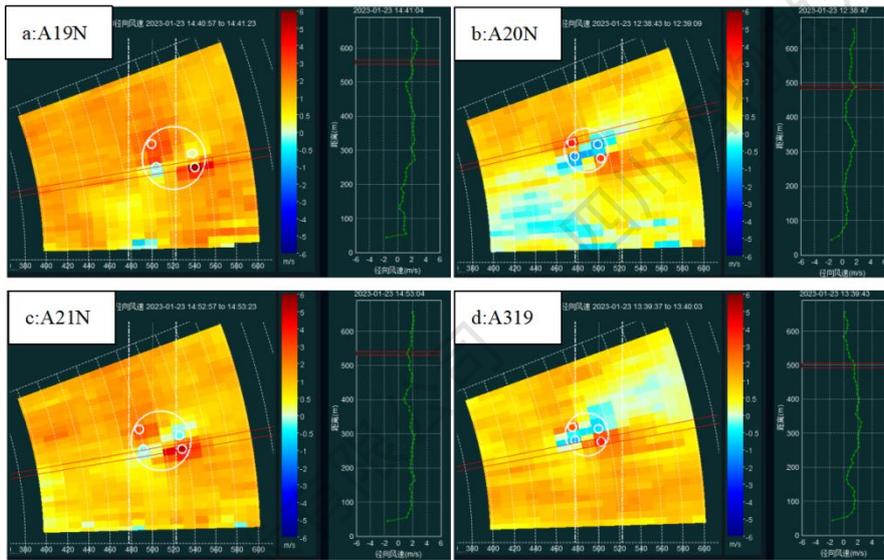
当后机从后方进入前机的一个尾涡中心时，一个机翼遇到上升气流，另一个机翼遇到下降气流，飞机会因承受很大的滚转力矩而出现飞机抖动、下沉、改变飞行状态、

发动机停止甚至翻转等现象，滚转速率主要取决于后机翼展的长度，翼展短的小型飞机滚转速率大，如果滚转力矩超过飞机的控制能力，飞机就会失控翻转，发生航空事故。

### 尾流探测的意义：

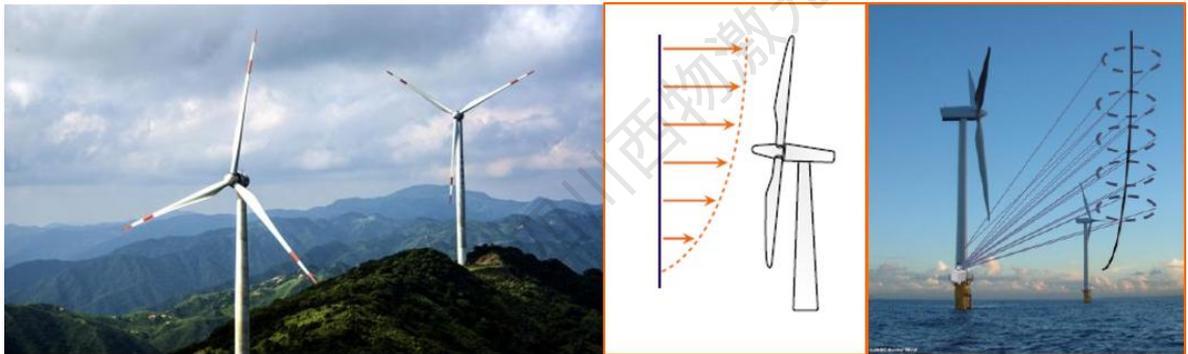
目前机场为保障飞机起降安全，防止飞机尾流对后机造成危害，引发飞行事故。主要通过控制飞机起降速率，设定固定的飞机起降的时间间隔的措施，虽然该措施能够有效的保障飞行安全，但是随着国民经济的发展，越来越满足不了机场的吞吐量要求，测风雷达的出现这一矛盾有望得到有效的缓解，测风雷达可有效的探测到飞机的尾流变化状态，能够准确的探测尾流的产生、强度、消逝的时间等信息，机场工作人员可以根据以上信息，及时决策，可大大提供飞机起降的速率，缓减机场拥堵的状况，更好服务国民经济建设。





### 2.5.3. 智能风电领域

测风雷达通过检测激光对气溶胶散射回波信号的多普勒频移信息，实现对径向风矢量的测量，为提高风场风功率预测的精度以及风机正前方风向风速的准度提供了依据。这种技术的应用解决了风电行业中核心的痛点，即提升风机的发电效率。由于风的方向是不断变化的，风电机组需要保持正对风的方向，才能最大程度提升风能利用率。测风雷达的引入，使得风机能够实时监测风向和风速的变化，从而调整自身的方向，以最大程度地捕获风能，提高发电效率。



雷达应用的意义：

- (1) 风资源预评估、微观选址及其验证；

- (2) 对风机功率曲线测量与验证，计算出风电场发电量；
- (3) 风机偏航传感器校准，改进控制算法，提高生产率；
- (4) 测量风力的垂直资料和紊流用于风机的震动分析，提高效率；
- (5) 复杂地形的评价分析，还原在复杂地形下风资源的分布状况。

#### 2.5.4. 体育赛事保障

测风雷达在体育赛事中的应用主要体现在提供实时的风速和风向数据，这对于确保比赛的安全和公平具有重要意义。

北京冬奥会的滑雪比赛中，通过使用测风雷达对赛场的风速和风向进行实时监测，确保了比赛的公平性和安全性。

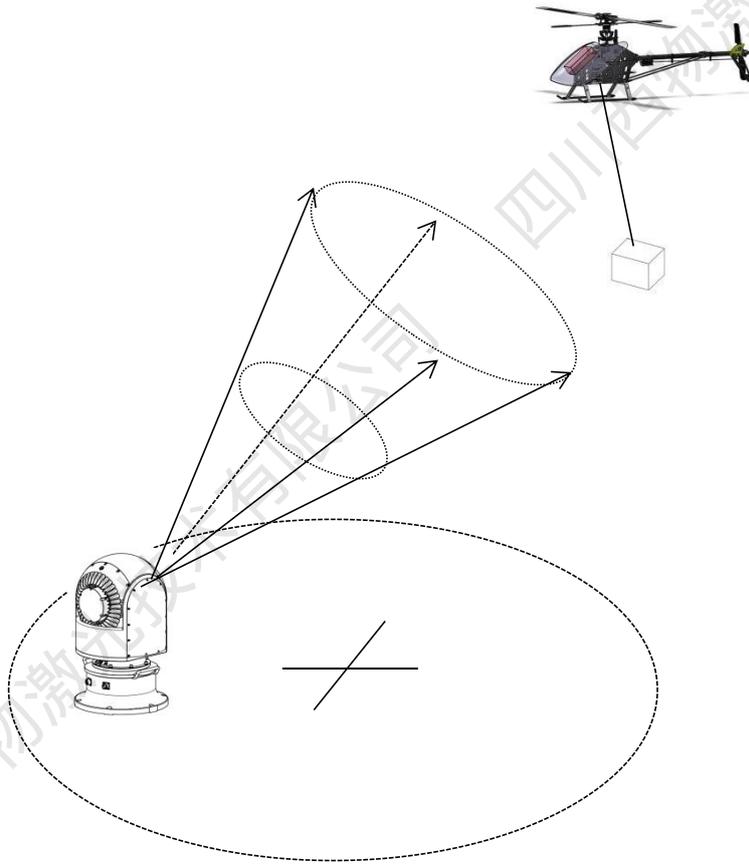
杭州亚运会中，测风雷达还能提供关于极端天气的监测预警，避免对赛事的正常进行产生影响确保了赛事期间的安全和顺利进行。

成都大运会期间，测风雷达被用于监测场内的风速和风向，确保开幕式和比赛的顺利进行，通过使用激光测风雷达进行三维风场数据监测，可以实现对场馆内外高、中、低垂直梯度的风场数据监测，为赛事的气象保障提供了重要的技术支持。

#### 2.5.5. 应急救援领域

##### (1) 救援物资投送

测风雷达能够实时精确的探测周边环境的风场信息，可以辅助进行救援物资的精确投送，同时保障救援飞机的飞行安全等。



## (2) 森林防火

森林防火系统主要由前端探测感知设备、无线通信终端设备、应急通讯系统以及森林防火预警系统平台组成，前端探测感知设备部署在目标区域的高点，通过建设的5G无线网络或有线光纤网络将当前视频、环境探测感知设备（摄像机、气象雷达）的数据回传到森林防火预警系统平台，当前端探测感知设备智能识别到火灾，通过前端设备智能算法识别到着火点，上报森林防火预警系统平台，指挥中心接收到报警，安排相关人员到达现场，无线通讯终端设备在网络覆盖的环境下可实时与指挥中心进行语音、视频通信回传，当进入到弱网和无网区域时，指挥中心使用应急通讯系统通过天通卫星和北斗卫星对现场的终端实现语音和文字的指挥沟通。

系统工作连接示意图如下图所示。



### 森林防火及应急指挥系统

其中，测风激光雷达具备PPI、DBS、RHI、GLIDE等多种扫描模式，可精准地扫描火场风场，提供实时的精细化三维风场、垂直气流、湍流耗散率、大气边界层等关键信息。协助救援人员研判火场风力状况和关键位置点态势，辅助制定有效的灭火策略和资源调度，为应急响应提供科学依据。同时，激光雷达能实时监测局地瞬时强阵风、风向突变等危险情况，及时预警，确保救援行动的安全高效。

## 3 设备安装

3.1 安装选址

3.2 基础建设

3.3 安装要素

3.4 设备安装

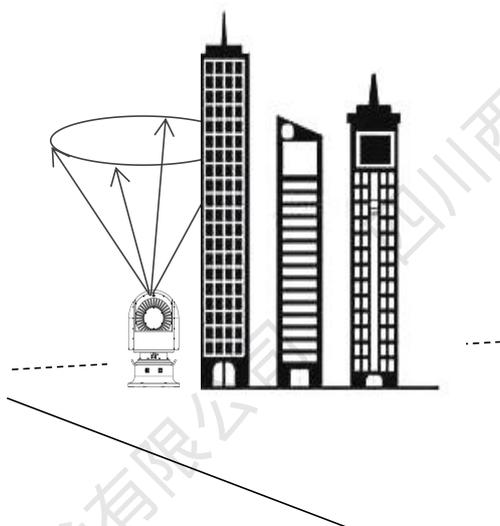
### 3.1 安装选址

#### 3.1.1. 选址要求

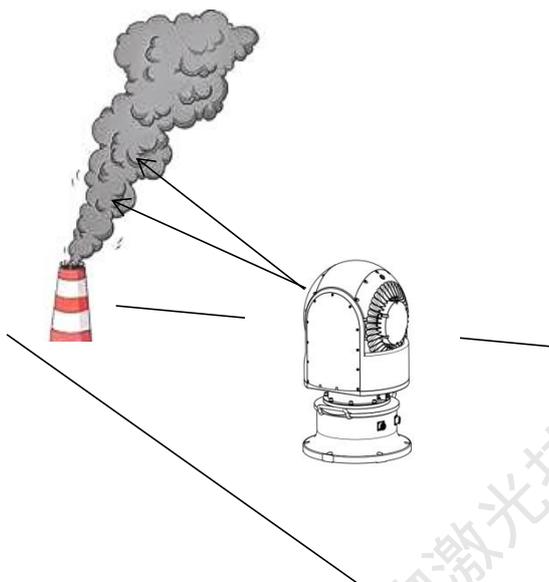
- (1) 雷达安装位置周围避免遮挡，应与障碍物保持足够距离。
- (2) 雷达安装位置尽量选择在目标探测区域的中心以保证最大限度的覆盖目标探测区域。
- (3) 雷达安装位置应配备有便利的供电及通讯等设施。
- (4) 雷达安装位置应远离大型热源、强电磁干扰源、强污染源。

#### 3.1.2. 错误选址

雷达安装点离周围高楼、树木等障碍物较近，则可能会对雷达探测产生遮挡。



雷达安装点离污染源较近，可能影响雷达的探测性能。

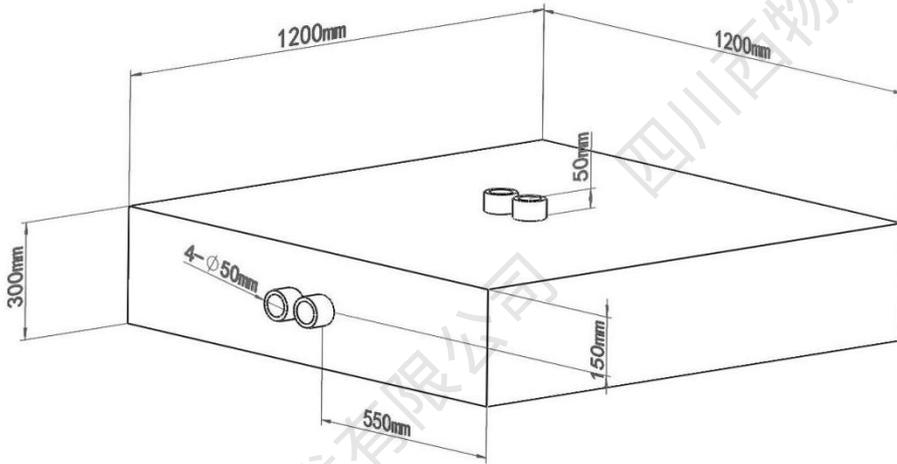


### 3.2 基础建设

雷达安装平台通常为水泥基底，并预埋有pvc通讯、供电线管。

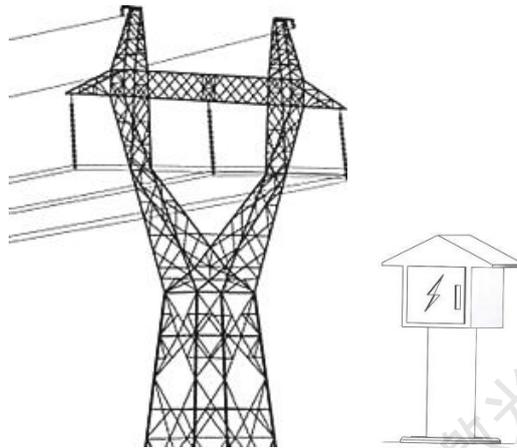
水泥基底尺寸：1200mm（长）×1200mm（宽）×300mm（高）

线管尺寸：直径50mm,露出台面50mm。



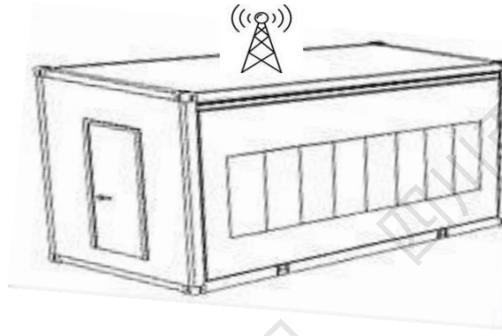
供电电压：220V±10% 交流

供电电流：≥10A



工作方舱尺寸（选配）：≥2000mm（长）×2000mm（宽）×2000mm（高）

网络：4G 无线网络



### 3.3 安装要素

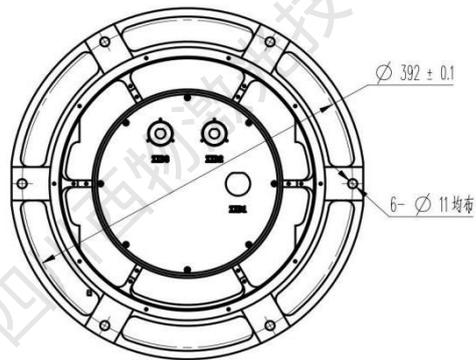
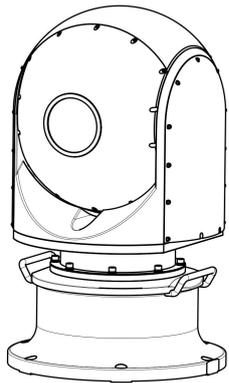
(1) 雷达主机：

外形尺寸：  $\leq \varphi 420 \times 700 \text{mm}$

主机重量：  $\leq 60 \text{kg}$

供电电压： 220V AC,

主机功耗：  $\leq 150 \text{W}$

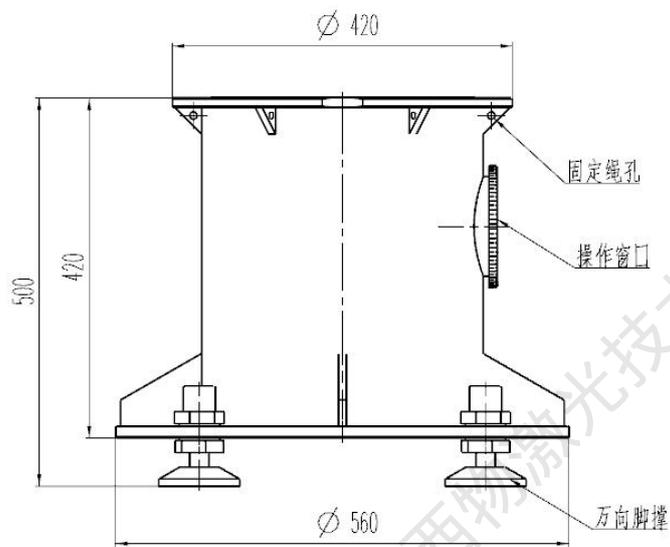
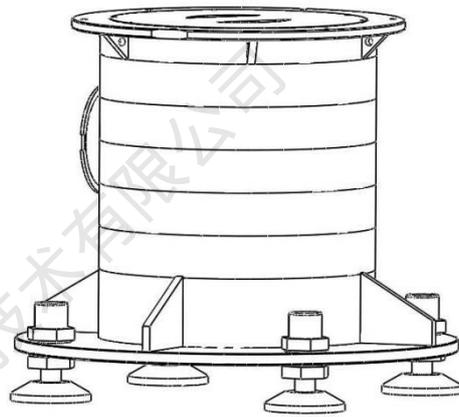


雷达底座安装尺寸

(2) 安装支架

外形尺寸： $\Phi 560 \times 500\text{mm}$

重量： $\leq 60\text{kg}$



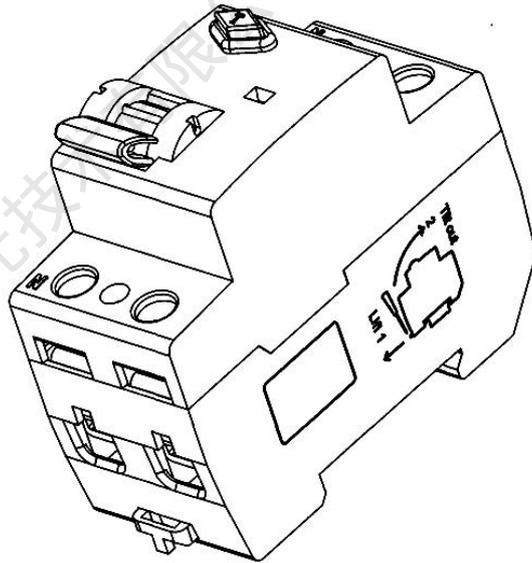
支架安装尺寸图

## (3) 空气开关

电压：230V/50Hz

电流：6000A

GB/T16917.1



## (4) 供电电缆

线缆规格：3×1.5mm<sup>2</sup>

标配长度：30m

航插型号规格：XCG24T5K1P1

接线定义对照表

序号	航空插头	供电插头
1	2 针	E
2	4 针	L
3	5 针	N

## (5) 通讯电缆

规格：屏蔽超六类网线

标配长度：30m

航插型号：XCG24T19K1P1

接线定义对照表

序号	航空插头	RJ45 水晶头
1	6 针	1 针
2	7 针	2 针
3	8 针	3 针
4	10 针	4 针
5	17 针	5 针
6	9 针	6 针
7	18 针	7 针
8	19 针	8 针

#### (6) 固定钢缆

直径：Ø4mm

每根长度：1.5m

数量：4根

材质：钢丝



#### (7) 固定地钉

材质：1008#钢

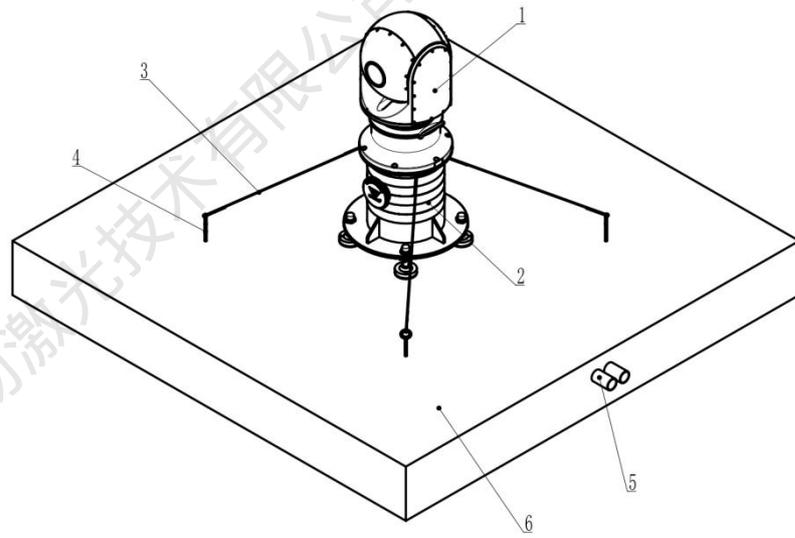
重量：160g

尺寸：30cm

数量：4颗



### 3.4 设备安装



1. 雷达主机
2. 安装支架
3. 固定钢缆
4. 固定圆环
5. PVC预埋管
6. 水泥平台基底

## 4 设备维护



警告：  
经过培训的维护人员才可进行以下操作。



警告：  
雷达主机维护时，设备须停止测量并断电。



警告：  
维护过程中要注意激光防护和设备操作警示，以免造成人身伤害。

### 6.1 维护内容

6.2 雷达窗口玻璃清洁

6.3 雷达输出功率检测

6.4 雷达探测精度比对

6.5 雷达气压检测

### 4.1 维护内容

维护周期	维护项目	备注
日维护项目	查看雷达主机出光窗口表面是否有异物	现场
	查看雷达主机转动是否正常	现场
	查看雷达软件运行是否正常	现场
	查看所有的安全警告标识是否脱落，必要时补贴新标识	现场
	清洁雷达出光口玻璃表面	现场

月维护项目	清洁雷达系统外表面	现场
年维护项目	检测雷达输出功率	返厂
	标定雷达探测精度	返厂
	升级软件	远程
	气压检测	现场
不定期保养项目	死机、异常关机或软件异常关闭后需要确认雷达参数是否发生变化，如发生变化恢复参数。	现场

## 4.2 雷达窗口玻璃清洁

本系统只有雷达窗口玻璃需要清洁，玻璃镜片清洁使用工具：高级光学脱脂棉、无水乙醇、橡胶吹尘球、软毛刷等。

- (1) 左手托住雷达扫描球体，保持雷达输出窗口朝上；
- (2) 用橡胶吹尘球以大约45°角反复鼓吹窗口玻璃表面；
- (3) 针对无法吹掉的污染物可用软毛刷轻轻擦拭，再进行吹尘；
- (4) 将脱脂棉蘸上无水乙醇，以由内向外螺旋状向外进行擦拭（切忌不能来回擦拭，以免镜片二次污染）；
- (5) 清洁完成后再次确认不能有以下残留：浮尘、异物、杂质等。

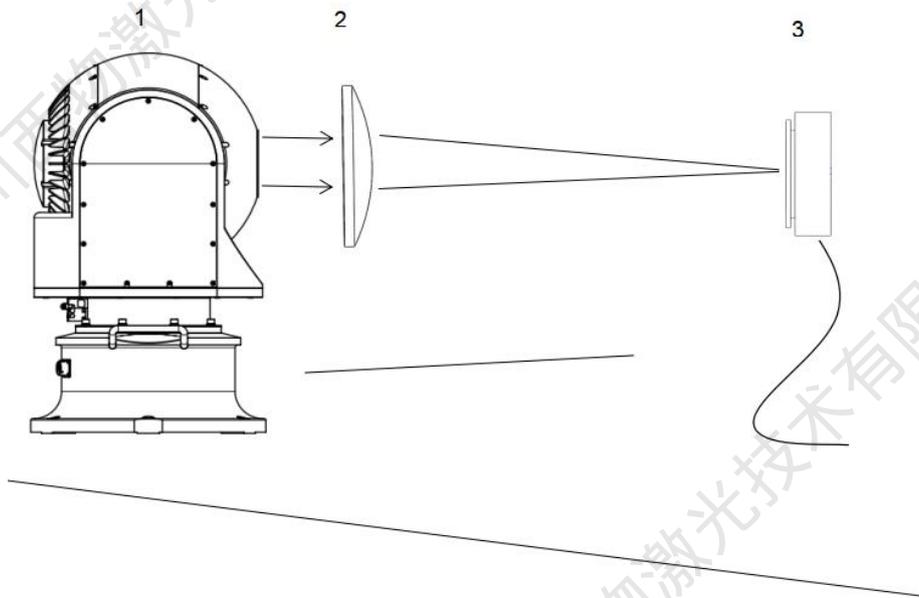
## 4.3 气体置换

- (1) 将雷达主机盖板底部螺钉松开，保证测风雷达主机内部可与外界充分交换。
- (2) 再将充气阀的防尘盖取下，将充气咀旋入充气阀、旋紧。
- (3) 开始对测风雷达主机进行气体置换，气压为0.04~0.06Mpa，置换时间15min。
- (4) 气体置换完成后，将气压值减小到0.02 Mpa，并将前盖板螺钉拧紧，保证雷达内部气压值为0.02~0.03Mpa即可，完成充气后将充气防尘盖盖上。

## 4.4 雷达输出功率检测

检测雷达输出功率是否正常，可以估测雷达的工作状态，保持雷达的良好工作状态，输出功率检测示意图如下：

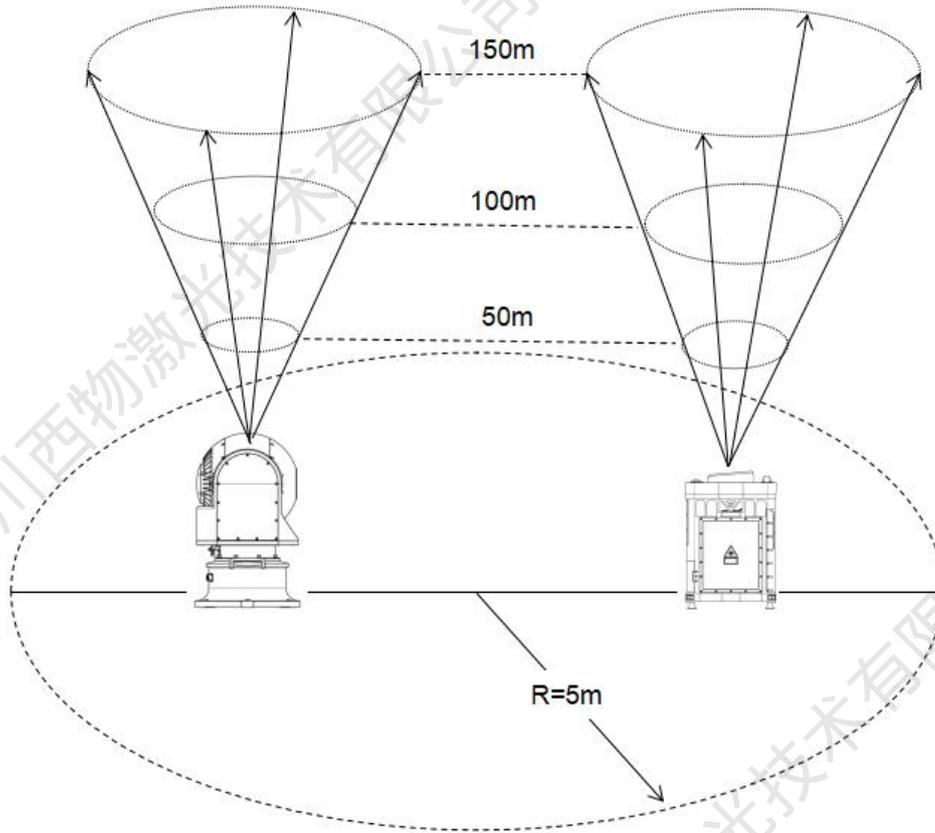
- (1) 雷达上电；
- (2) 通过控制软件设置不同的激光输出功率值；
- (3) 读取雷达输出功率值是否与设置值一致；
- (4) 若偏差较大，通过在控制软件中配置功率参数，将雷达输出功率值与设置值校准一致。



- 1、雷达主机
- 2、聚焦透镜
- 3、功率探头

## 4.5 雷达探测精度比对

雷达通过与气象标定雷达进行同时段、同区域风场探测，依据GJB 6556.8-2008中的方法对同一高度层进行数据统计和分析，评判雷达探测精度，精度标定示意图如下图。



### 比对要求：

- (1) 雷达与气象标定雷达进行校时和对北；
- (2) 雷达与气象标定雷达同时开始测量；
- (3) 比对时间2小时以上；
- (4) 比对高度层不少于2个；
- (5) 每个高度层比对有效样本量不少于60组。

**处理方法：**

按照公式（1），（2），（3），（4）计算比对差值、系统误差及标准偏差。

详细计算公式如下：

$$x_i = a_i - b_i \dots\dots\dots (1)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \dots\dots\dots (2)$$

$$S_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \dots\dots\dots (3)$$

$$S_B = \sqrt{|S_A^2 - S_o^2|} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$a_i$  ——标准器风场测量值（矢量平均值）；

$b_i$  ——被试品风场测量值（矢量平均值）；

$n$  ——测量次数；

$\bar{x}$  ——系统误差；

$S_A$  ——样本标准偏差；

$S_o$  ——标准器标准偏差；

$S_B$  ——被试品标准偏差。

## 5 报警及常见故障排除

序号	故障提示	可能原因	异常处理
1	主机通讯故障	(1) 主机未上电启动; (2) 通讯线缆断开; (3) 网络配置错误; (4) 综合控制电路故障。	(1) 检查主机供电是否正常; (2) 若主机供电正常, 检查网络通讯是否正常; (3) 若网络通讯正常, 检查上位机电脑IP地址配置是否正确和软件上网络IP地址是否配置正确; (4) 若网络配置正确, 则可通过更换雷达主机综合控制电路板进行处理。
2	信息处理板通讯故障	(1) 光电舱供电故障; (2) 信息处理电路板障; (3) 伺服转台滑环故障。	(1) 检查光电舱是否供电, 若无供电, 更换电子舱电源模块; (2) 若光电舱供电正常, 则控制伺服转台360°转动, 若故障恢复正常, 则判断为伺服转台滑环故障, 检修伺服转台; (3) 若控制伺服转台360°转动, 故障仍未恢复, 则更换信息处理电路板;
3	伺服平台通讯故障	(1) 伺服平台供电故障; (2) 伺服平台通讯线缆断开; (3) 伺服平台故障。	(1) 检查伺服平台供电情况, 若无供电, 更换电子舱电源模块; (2) 若伺服平台供电正常, 检查伺服平台通讯接插件是否断开, 通讯线缆是否脱落; (3) 若伺服平台供电正常, 则更换伺服平台控制板。

4	光纤放大器 通讯故障	(1) 光电综合板故障; (2) 通讯线路断开; (3) 光纤放大器故障。	(1) 用万用表检查光纤放大器供电是否正常, 若供电不正常, 则光电综合板故障, 更换光电综合板故障; (2) 若供电正常, 检查通讯线路是否连接正常, 若出现线路断开, 重新连接; (3) 若供电通讯均正在, 则更换光纤放大器。
5	种子激光器 通讯故障	(1) 种子机构器故障; (2) 通讯线路断开。	(1) 用万用表检测种子激光器供电是否正常; (2) 若供电正常, 检查通讯线路是否连接正常, 若出现线路断开, 重新连接; (3) 若供电通讯均正在, 则更换种子激光器。
6	光电综合板 通讯故障	(1) 光电综合板故障; (2) 通讯线路断开;	(1) 用万用表检测光电综合板供电是否正常; (2) 若供电正常, 检查通讯线路是否连接正常, 若出现线路断开, 重新连接; (3) 若供电通讯均正在, 则更换光电综合板。
7	光学电机通 讯故障	(1) 光学电机故障; (2) 通讯线路断开;	(1) 用万用表检测光学电机供电是否正常; (2) 若供电正常, 检查通讯线路是否连接正常, 若出现线路断开, 重新连接; (3) 若供电通讯均正在, 则更换光学电机。