

# 下滑信标铁塔倾斜对下滑角和入口高度影响的研究

方力阳

中国民用航空西南地区空中交通管理局设备维修中心 四川 成都 610225

**摘要:** 在仪表着陆系统设备运行过程中, 下滑信标铁塔受沉降或地震等地形变化的影响可能出现逐渐倾斜的情况, 在高填方或软土地基区域更应关注该情况。为了研究沉降对下滑信标的影响, 本文对铁塔倾斜时可能对M型下滑天线的上、中、下天线造成的挂高和水平位置偏移进行分析, 结合下滑信标的信号组成分析可能造成影响的指标。利用计算机软件进行仿真, 验证下滑信标铁塔在不同的倾斜状态时, 下滑的下滑角和入口高度的变化趋势, 生成变化曲线。

**关键词:** 铁塔倾斜; 下滑角; 仪表着陆系统; 下滑入口高度

## 引言

仪表着陆系统 (Instrument Landing System, 简称 ILS), 又译为仪器降落系统、盲降系统, 是飞机精密进近和着陆引导系统的重要组成部分。由于仪表着陆系统能在低天气标准或飞行员看不到任何目视参考的天气下引导飞机进近着陆, 因此被称为盲降系统。

下滑信标为飞机提供下滑道指引, 使飞机能够沿着规定的下滑角平稳下降高度, 确保飞机在着陆过程中的安全性和稳定性。下滑天线数量较少, 当出现单个天线异常时对空间造成的影响往往更大, 下滑空间信号的形成依赖地面反射, 对于场地的变化是非常敏感的。本文以常用的M型下滑天线为例, 分析基础不均匀沉降时下滑铁塔的变化情况, 结合计算机仿真软件 and 实际案例来分析倾斜可能造成的影响。

## 1 理论基础和计算模型

当出现不均匀沉降时, 下滑铁塔往往会出现不同程度的倾斜, 这些倾斜可能是朝任意方向的。为了便于分析倾斜对天线位置的变化, 我们把倾斜分为了前向倾斜和侧向倾斜, 其中前向倾斜是指朝着天线方向和背离天线方向倾斜, 侧向倾斜是指朝着跑道方向或远离跑道方向倾斜。当倾斜时铁塔可能会同时存在前向倾斜和侧向倾斜。

(1) 铁塔倾斜时, 天线位置变化分析:

<sup>[2]</sup>当铁塔存在倾斜时铁塔上所有天线会整体都会产生偏移, 会导致天线挂高、前向偏置和横向偏置等天线设置参数发生变化。

已知铁塔长度为L, 铁塔的前向倾斜角为 $\alpha$ , 侧向倾斜角为 $\beta$ , 竖直倾斜角为 $\gamma$ 。铁塔有效高度为H。

我们通过坐标角公式可以得到:  $L^2 \sin^2 \alpha + L^2 \sin^2 \beta = L^2 \sin^2 \gamma$

我们知道铁塔有效高度为:  $H = L \cos \gamma$

因为  $L^2 = L^2 \sin^2 \gamma + L^2 \cos^2 \gamma$

我们可以得到有效高度为:  $H = L \sqrt{1 - \sin^2 \alpha - \sin^2 \beta}$

铁塔的顶部的前向偏移量为:  $S_{前} = L \sin \alpha$

铁塔的顶部的侧向偏移量为:  $S_{侧} = L \sin \beta$

由于铁塔上各天线的高度不同, 每根天线产生的偏移量也不同。以M型下滑天线为例, M型下滑天线系统有下天线、中天线和上天线, 设置高度按照 $H_{下} : H_{中} : H_{上} = 1 : 2 : 3$ 的进行设置。如果将铁塔看作是理想刚性的, 则产生的偏移量比例也是1: 2: 3。我们以中天线为基准, 计算上天线和下天线的偏移量和偏置量。按照比例关系, 下、中天线与上、中天线的距离是相等的, 上天线偏置量与下天线的偏置量等大反向。我们用 $\phi$ 表示下天线前向偏移量, 用 $\tau$ 表示下天线横向偏移量。

那么下天线前向偏移量为:  $\phi = H \cos \alpha$

则下天线的横向偏移量为:  $\tau = H \sin \beta$

倾斜后下天线挂高为:  $H \sqrt{1 - \sin^2 \alpha - \sin^2 \beta}$

(2) 前向偏置变化分析

天线的前向倾斜主要影响挂高和前向偏置, 在M型下滑天线中, 下天线、中天线、上天线3根天线的发射信号与对应的3根镜像天线的反射信号进行合成后形成了下滑最终的空间信号<sup>[1]</sup>。假设下天线高度为H, 中天线高度为2H, 上天线高度为3H, 前向偏移以中天线为基准, 下天线前向偏置为 $\phi$ , 上天线前向偏置为 $-\phi$ 。该天线系统向空间辐射3个信号CSB、SBO和CLR如下:

CSB信号:

$$E_{CSB} = 2A_{CSB} \left( \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} \cdot H \cdot \sin \theta + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \phi \right) - 0.5 \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2H \cdot \sin \theta \right) \right)$$

SBO信号:

$$E_{SBO} = 2A_{SBO} \left( 0.5 \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} \cdot H \cdot \sin \theta + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \phi \right) - \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2H \cdot \sin \theta \right) + 0.5 \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 3H \cdot \sin \theta - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \phi \right) \right)$$

CLR信号:

$$E_{CLR} = 2A_{CLR} \left( \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} \cdot H \cdot \sin\theta + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \varphi \right) + \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 3H \cdot \sin\theta - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \varphi \right) \right)$$

$$\text{DDM的计算公式为: } DDM = 2 \frac{SBO}{CSB} \times \cos \Delta\varphi$$

结合CSB信号和SBO信号的分布,我们通过公式可以计算在不同前向偏置时的下滑角。

### (3) 横向向偏置变化分析

通过查阅技术资料,<sup>[1]</sup>可知当天线和下天线的横向偏置处于最优值时,下滑的入口高度处于最高。此时无论是缩小偏置还是增大偏置下滑入口高度均会降低。通过查看技术规范我们可以得知最优偏置的计算公式如下:

$$\text{下天线最优偏置: } \frac{3H^2}{2D} - H \sin(\text{SSL})$$

$$\text{上天线最优偏置: } \frac{5H^2}{2D} - H \sin(\text{SSL})$$

H为下天线挂高、D为下滑天线距跑道中心线的侧向偏置距离、SSL为侧坡角。

<sup>[3]</sup>我们可以发现下滑天线最优偏置与下滑天线挂高有关,当天线挂高变化时,下滑天线最优偏置也会变化。如果在铁塔倾斜前,下滑天线原有设置偏置不是最优值时,那么由于倾斜造成的入口高度变化情况会非常复杂。为了简化计算,我们仿真时把下滑天线均按照最优偏置进行了设置。

### (4) 天线挂高变化分析

天线的侧向倾斜主要影响挂高和横向偏置,天线的横向偏置主要影响入口高度,对下滑角作用很小,为简化计算,我们忽略横向偏移量造成的下滑角变化,主要

考虑天线的挂高变化造成下滑角变化的影响。<sup>[4]</sup>可以推导出下滑角计算公式:

$$\text{已知天线标准挂高公式为: } H = \frac{\lambda}{4 \sin\theta},$$

当挂高出现变化时,下滑角则为:

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\lambda}{4H \sqrt{1 - \sin^2\alpha - \sin^2\beta}},$$

如天线挂高按照3°设置。

$$\text{下滑角则为 } \theta = \sin^{-1} \frac{\sin 3^\circ}{\sqrt{1 - \sin^2\alpha - \sin^2\beta}},$$

根据该公式计算,同时出现3°的前向倾斜和侧向倾斜时,下滑角仅变化0.008°不足0.01°,证明由于倾斜带来的天线挂高变化可忽略不计。在仿真中我们也将忽略此误差。

## 2 计算机仿真计算

在计算机仿真中我们选择与铁塔倾斜有关的几个参数:前向偏置、横向偏置、保护区场地横坡、保护区场地纵坡进行设置,其余参数保持不变。<sup>[5]</sup>天线初始安装的偏置会与铁塔的倾斜相叠加,所以我们将天线的初始的前向偏置设置为0,将横向偏置设置按照公式设置为最优值。

为了更好的验证倾斜带来的影响情况,我们将计算机仿真分为3种情况进行。

(1) 场地没有前向坡度和横向坡度,改变铁塔的前倾角

当铁塔发生前后倾斜的情况下,我们通过计算机仿真计算铁塔不同前倾角时的下滑角和入口高度。

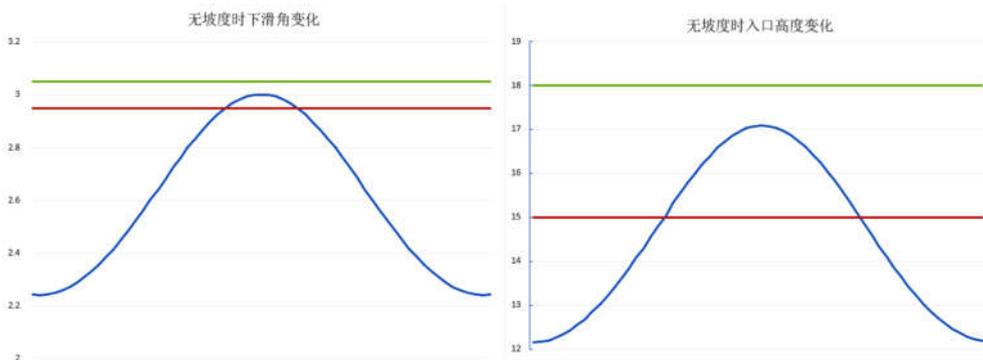


图1 无坡度时下滑角和入口高度的变化

我们仿真了前倾角从-3°到+3°变化时下滑角和入口高度的变化曲线。在图1中横坐标是绿色和红色分别是校飞时下滑角的容限范围,我们发现下滑角和入口高度都会随铁塔的倾斜而变化,下滑角和入口高度都是在铁塔前倾角为0°时达到最大值。当铁塔存在前倾角时,无论是

断增大前倾角还是减小前倾角,下滑角和入口高度均会明显降低。

(2) 地没有前向坡度和横向坡度,改变铁塔的侧倾角  
当铁塔发生左右倾斜的情况下,再次通过计算机仿真计算铁塔不同前倾角时的下滑角和入口高度。

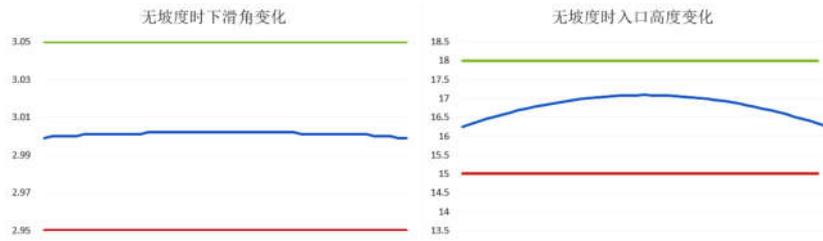


图2 无坡度时下滑角和入口高度的变化

仿真了从 $-2^{\circ}$ 到 $+2^{\circ}$ 变化下滑角和入口高度的变化曲线。当出现左右向的倾斜时，下滑角基本不变，仅入口高度改变。但下滑角和入口高度的变化值均在容限范围内。

(3) 场地存在前向坡度，没有横向坡度。改变铁塔

的前倾角。

我们分别对场地的增加设置了 $-0.3^{\circ}$ 的下坡和 $0.5^{\circ}$ 上坡进行计算机仿真。

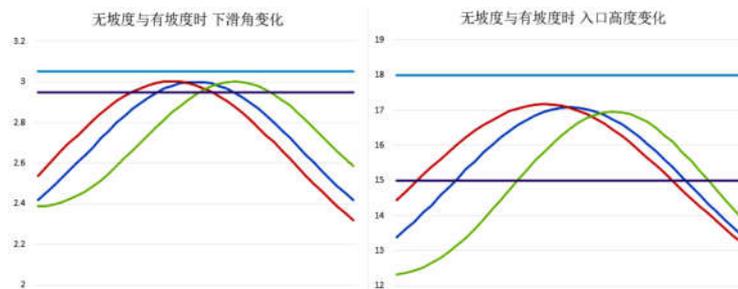


图3 无坡度与有坡度时下滑角和入口高度的变化

在图3中，我们仿真了前倾角在 $-2^{\circ}$ 到 $+2^{\circ}$ 变化时下滑角和入口高度的曲线。我们发现在改变坡度后，下滑角和入口高度同样会随铁塔的前倾角变化而变化。但由于设置坡度后会使得最优值发生偏移，当坡度为下坡 $0.3^{\circ}$ 时，铁塔前倾 $0.3^{\circ}$ 下滑角和入口高度会达到最大值。当坡度为上坡 $0.5^{\circ}$ 时，铁塔后仰 $0.5^{\circ}$ 下滑角和入口高度达到最大值。且无论是否有坡度，改变铁塔的前后倾角下滑角和入口高度都有明显变化。

通过对比仿真，我们可以得出如下结论：

- ① 当铁塔前后倾斜时，下滑角和入口高度都会受影响，其中下滑角的变化更加敏感。
- ② 当铁塔左右倾斜时，下滑角几乎不会受影响，入口高度会受一定的影响。
- ③ 当铁塔前后倾斜角与场地坡度相同时，即与反射面垂直时，下滑角和入口高度会达到最大值。

### 3 结论及应用

综上所述可以得出，铁塔的倾斜对下滑信标的下滑角和入口高度参数会造成影响，且前后向的倾斜影响更大。这设备投产安装时更应该加强对铁塔的紧固，加强对铁塔倾斜角的关注，如果在定期飞行校验中发现下滑角和入口高度都呈现同一趋势的变化时，可以选择定期对铁塔倾斜

情况进行观测，验证是否存在铁塔倾斜的情况。

下滑保护区场地情况较为复杂，通常是没有一个明确的坡度值，在安装铁塔时需要根据现场实际情况合理确定铁塔的前倾角，如果下滑保护区场地无明显坡度，可以对铁塔采用无前倾角度的设置。在此基础上还应该对铁塔加强固定，避免后期铁塔的晃动倾斜造成影响。

### 参考文献

- [1]陆欣.浅析M型下滑天线偏置对入口高度的影响[J].电子技术与软件工程,2014,(04):97-98+149.
- [2]唐凌飞.仪表着陆系统下滑塔微侧倾对下滑角的影响[J].中国航班,2021,(21):94-96.
- [3]刘宇.下滑角和入口高度与M型天线挂高关系的数值分析[J].科技与创新,2017,(16):7-8+13.DOI:10.15913/j.cnki.kjycx.2017.16.007.
- [4]黄钜江.下滑信标场地测量和天线精确安装的重要性[J].科技资讯,2015,13(18):73-74.DOI:10.16661/j.cnki.1672-3791.2015.18.050.
- [5]倪育德,于颖丽,刘瑞华.保护区内地形对ILS下滑信标辐射场的影响[J].信号处理,2022,38(09):1892-1902. DOI:10.16798/j.issn.1003-0530.2022.09.012.