

# 激光跟踪仪在飞机雷达天线面板安装精度测量中的应用

## Application of Installation Accuracy of Measurement in Aircraft Radar Antenna Panel with Laser Tracker

詹玉凤 韩永伟 宁锐 朱华 / 中航工业西飞

**摘要:** 简述了激光跟踪仪的基本组成及测量原理, 结合总装生产特点, 介绍了利用激光跟踪仪测量飞机雷达天线面板底座的基本方法, 并对测量误差进行了精度分析。

**关键词:** 激光跟踪仪; 测量; 误差

**Keywords:** laser tracker; measurement; error

### 0 引言

飞机总装配阶段需要进行一系列的测量工作。由于空间、精度要求的限制, 机载设备装配精度的测量对测量设备和操作者提出了很高的要求, 如雷达天线面板最小设计允许误差的测量值一般在  $\pm 4' \sim \pm 12'$  之间, 而总装厂传统的测量手段(水平仪、象限仪)是无法满足如此高精度测量要求的。经过分析调研, 首次尝试将激光跟踪仪引入飞机的总装配生产中。

### 1 激光跟踪仪概述

激光跟踪测量系统是工业测量系统中一种高精度的测量仪器。它集合了激光干涉测距技术、光电探测技术、精密机械技术、计算机及控制技术、现代数值计算理论等各种先进技术, 对空间运动目标进行跟踪并实时测量目标的空间三维坐标。具有高精度、高效率、实时跟踪测量、安装快捷、操作简单等特点, 适合于大尺寸工件装备的测量。激光跟踪测量系统一般由激光跟踪头(跟踪仪)、控制器、用户计算机、反射器(靶

镜)及测量附件等组成。

### 2 激光跟踪仪测量原理概述

激光跟踪仪是移动式光学三坐标测量设备, 核心是一台激光干涉仪, 以极坐标原理为工作原理, 跟踪头发射激光至一个由三棱镜反射器组成的球形反射镜, 且激光束与反射镜的中心始终保持对准, 随着反射镜在被测物体上的移动, 激光束被反射镜连续地反射回跟踪仪, 从而测出跟踪仪与反射镜之间的距离。

激光跟踪仪的可移动特性, 使其测量时的坐标系随跟踪仪位置的变化而变化, 为了使激光跟踪仪在不同位置具有相同的测量坐标系, 每次移动激光跟踪仪后必须对其进行转站。在实际测量中, 使用地标点进行激光跟踪仪的转站。转站原理如下。

假设跟踪仪在初始测量坐标系下对地标点的测量值为  $P_{\text{测量}}$ , 对地标点的理论值为  $P_{\text{理论}}$ , 那么必然存在一个旋转变换矩阵  $R$  和一个平移变换矩阵  $T$ , 使得  $R \times P_{\text{测量}} + T = P_{\text{理论}}$ 。

理论上, 只要有不在同一直线上的3个点就可以确定旋转变换矩阵  $R$  和平移变换矩阵  $T$  的值 ( $R, T$ )。实际上, 测量存在误差, 3个或多个测量点  $P_{\text{测量}}$  经过变换 ( $R, T$ ) 后不可能完全等于  $P_{\text{理论}}$ , 需要利用最小二乘拟合方法寻找一组最佳的 ( $R, T$ ), 使变换后各点与理论点的距离之和最小, 即

$$\min |R \times P_{\text{测量}} + T - P_{\text{理论}}|。$$

激光跟踪仪的转站计算就是利用最小二乘拟合方法求解最佳的 ( $R, T$ ) 的过程。转站算法由激光跟踪仪的内部函数提供, 测量软件通过调用生产厂家提供的二次开发接口函数实现转站。转站后, 自动弹出的转站报告显示了该次转站各点相对于理论值的偏差, 即转站误差。由于该误差是由激光跟踪仪在当前位置测量所得地标点数据直接与地标点理论值进行计算所得, 不是在前面转站数据的基础上进行计算所得, 因而不存在多次转站间的误差累积, 同时转站也不会对地标点的理论值产生影响。又由于每次转站都与地标点的理论值进行比较计算, 给出转站误差报告, 相当

于每次转站都是在对地标点理论位置进行复核。

### 3 激光跟踪仪在飞机总装配测量中的应用

以雷达天线面板底座测量为例：

#### 3.1 建站

以雷达天线面板底座的测量为例，在地面上选择4个地标点作为基站。要求4个点均匀地分布在飞机左右两侧，且两两不能共线。

当激光跟踪仪位于飞机右侧时，首先建立站点1，如图1所示。对飞机上12框和57框右侧的点、55框下方的点进行测量，分别命名为R12、R57、M55，再对地面上的地标点进行测量。在测量过程中基站上的点固定不能移动，并进行顺序编号(1、2、3、4)，并对每个点建立族。

相应地，将激光跟踪仪设置在飞机左侧建立站点2。按顺序再次测量地面上的点，把相对应的点放入同一族中。对飞机上12框和57框左侧的点、12框下侧的点进行测量，分别命名L12、L57、M12。对站点1和站点2的同族点进行转站计算，并进行误差分析。

#### 3.2 建立坐标系

原点在机头正前方雷达罩顶点处，高度方向为Y向，其中向上为正；翼展方向为Z向，指向左翼为正；航向为X向，机头指向机尾方向为正。

首先利用L12、R12、L57、R57这4个点构建平面PLN1为飞机的水平

构造面；通过点M12向平面PLN1作垂线，垂线即为Z轴方向；利用点M12、M55在PLN1上投影的连线构造直线1，直线1即为X轴；构造原点O12，M12在PLN1面上的投影点向X轴反方向平移(由飞机结构位置决定)即为坐标原点O12。其中X轴为逆航向方向，Y轴为翼展向右方向，Z轴为垂直向上。

#### 3.3 天线面板底座的水平测量

测量地面4个点，并重新建族。建立站点3，并激活。将激光跟踪仪挪到合适位置，确保激光跟踪仪既能够同时测量地面4个点又能够测量飞机雷达天线面板上的点。将站点3与站点2进行转站计算，并进行误差分析。再对雷达天线面板底座上的4个测量点(LD1、LD2、LD3、LD4)进行测量。

#### 3.4 雷达天线面板底座的俯仰误差和方位误差的计算

##### 1) 俯仰误差的计算

利用雷达天线面板底座上的4个测量点LD1、LD2、LD3、LD4构造雷达天线安装平面，命名为LDPM。雷达天线安装平面与飞机构造水平面的垂直度误差，为俯仰误差(飞机坐标系，向上取正值、向下取负值)。因此，雷达天线安装平面的俯仰角即为雷达天线面板与飞机对称中心面的夹角。将面与面的夹角转换为线与线的夹角进行计算，利用雷达天线面板平面LDPM与坐标系XOY平面构造一条交线，命名为FYL，FYL与Y轴的夹角即为俯仰角。

##### 2) 方位误差的计算

利用雷达天线面板底座上的4个测量点LD1、LD2、LD3、LD4构造雷达天线的安装平面，命名为LDPM。雷达天线安装平面与飞机对称面的垂直度误差，为方位误差(飞机坐标系，向右取正值、向左取负值)。因此，雷达天线安装平面的方位角即为雷达天线面板与飞机水平构造面的夹角。将面与面的夹角转换为线与线的夹角进行计算，利用雷达天线面板平面LDPM与坐标系XOZ平面构造一条交线，命名为FWL，FWL与Z轴的夹角即为方位角。

### 4 激光跟踪仪结果误差分析

#### 1) 测量误差

激光跟踪仪测量精度为 $10+5\mu\text{m}/\text{m}$ ，即假设测量距离为10m，测量误差为：

$$10\mu\text{m} + 10\mu\text{m} \times 5\mu\text{m} = 0.06\text{mm}$$

由于厂房内实际场地位置的限制，一般测量距离不超过5m，误差为

$$10\mu\text{m} + 5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m} = 0.035\text{mm}.$$

#### 2) 计算误差

转站的计算过程是要找到一组变换参数(R,T)，使 $|R \times P_{\text{测量}} + T - P_{\text{理论}}|$ 的值最小，该计算采用最小二乘法，计算过程存在误差，该误差包括在转站误差中。

#### 3) 地标点的变化误差

地标点嵌入在混凝土地面中，混凝土的热膨胀系数为 $0.8-1.2 \times 10^{-5} \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ 。按此计算，在距离为10m，温度变化 $10^\circ\text{C}$ 时，混凝土可变形 $0.8 \sim 1.2\text{mm}$ 。在转站计算中，使用温度补偿方法可以部分地克服温度变化的影响，但不可能完全消除温度对测量的影响。实际测量时，温度变化不会超过 $5^\circ\text{C}$ ，转站距离不会超过10m，因此混凝土的最大变形量为 $0.4 \sim 0.6\text{mm}$ 。

综合考虑各因素的影响，确定跟

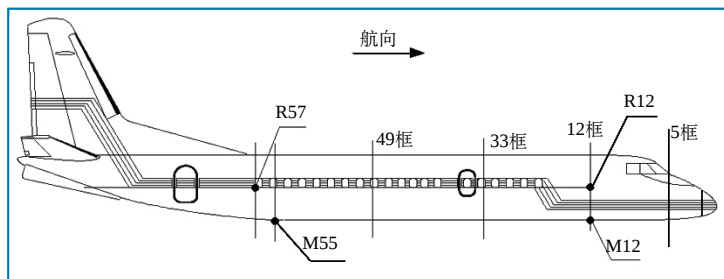


图1 激光跟踪仪位于飞机右侧

# 机载气象雷达风切变信号模拟系统设计与应用\*

## Design and Application of Airborne Weather Radar Wind Shear Signal Simulation System

孙焱<sup>1</sup> 马存宝<sup>2</sup> 陈杰<sup>2</sup>

1 中航工业雷达与电子设备研究院第七研究室 2 西北工业大学航空学院

**摘要:** 为了对某型民机气象雷达系统的前视风切变探测技术进行功能验证和性能评估, 组建了一套风切变信号模拟系统。根据风切变气象条件发生时间短, 发生区域小的特点, 通过在实验室条件下对风切变气象回波信号进行研究, 建立用于验证和评估前视风切变气象雷达性能的信号模拟平台, 为自主研制具有风切变探测能力的机载气象雷达提供技术途径, 系统联试实验验证了该系统的有效性和工程实用性。

**关键词:** 气象雷达; 风切变; 模拟系统; 回波信号

**Keywords:** weather radar; wind shear; simulation system; echo signal

### 0 引言

气象因素是影响民机飞行安全的主要因素之一, 而起飞、着陆等飞行过程中的低空风切变是民航飞行的“隐形杀手”。机载多普勒气象雷达(见图1)的前视风切变探测能力, 能使驾驶员在繁重的进场和离场飞行任务过程中提前知晓低空风切变的信息, 帮助飞

行员驾驶飞机回避灾难性的微下冲暴流低空风切变区, 达到确保民机飞行安全的目的<sup>[1-4]</sup>。由于风切变气象具有发生时间短(通常维持1~10分钟)、发生区域小(直径1~10km)的特点, 属于小概率事件, 且不具备重复性。因此在实验室条件下对风切变气象回波信号进行研究, 建立具备验证和评估前

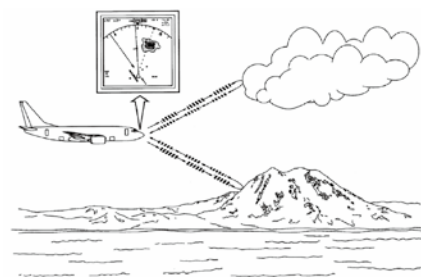


图1 气象雷达系统

踪仪的最大转站误差为0.3mm。该容差保证在地标点包容的区域内, 测量点综合误差不会超过0.3mm, 从而保证了测量的精度。转站过程中如果有测量点的转站误差大于0.3mm, 表明该地标点出现了异常变化, 必须弃用该点而选用其他满足容差要求的地标点来进行转站计算。实际使用时, 各检测点的转站误差误差范围一般为0~0.2mm, 转换为角度误差为2.3'。

综上所述, 激光跟踪仪完全满足

飞机机载设备装配精度的最小测量误差要求。

### 5 结束语

在总装配过程中使用激光跟踪仪进行测量后得到了一致好评。与传统的测量方法相比, 激光跟踪仪不仅测量精度高, 测量速度也有很大提升, 能在短时间内采集大量数据信息, 并可以直接对数据进行处理, 输出测量报告。一般只需要一名计算机操作员和

一名手持反射镜的工作人员就可以完成整个测量过程, 大大提高工作效率, 节省了资源。

AST

### 参考文献(略)

### 作者简介

詹玉凤, 助理工程师, 主要从事航空雷达系统工艺技术支持工作。

韩永伟, 工程师, 主要从事飞机总装配技术管理工作。