

# 采用场强数值归算法测试飞机通讯天线方向图的试飞方法研究

高向东 朱科原

中国飞行试验研究院 710089

**[摘要]** 本文主要从理论上对飞机通讯天线方向图试飞方法以及由于飞机空中动态无法原地盘旋和压坡度小半径盘旋带来的各种误差进行了分析，提出了用场强数值归算法测试飞机通讯天线方向图的试飞方法。并按电波传输原理建立了此方法的数学模型和处理方法。理论分析和实际飞行数据证明可用于飞机通讯天线方向图的试飞。

**关键词：** 飞机通讯天线 方向图 场强数值归算法

## 1 引言

方向图是飞机天线辐射特性的表征。因为该天线的主要参数如方向性、增益、相位、极化等特性可由完整的方向图中导出，所以人们常常将方向图作为天线最重要、最基本的参数来测量。测量方向图的原理比较简单，但要精确地测定方向图却要涉及许多方面的问题，难度较大。飞机天线由于飞机空中动态无法原地盘旋以适应天线方向图测试时，所要求的天线相位中心与旋心应重合的要求，人们虽然提出了“∞”型和“梅花瓣”型试飞方法，但是飞行难度较大，飞机转弯时，需要压坡度。盘旋半径越小压坡越大。小半径盘旋时，虽然减小了由于距离变化引起的误差，但是由于飞机压坡引起的天线辐射有效高度、极化方式以及机身遮挡引入的误差则急剧上升。于是人们又提出了“多边”型试飞方法，以减小这种误差影响，但是，这样仍然解决不了不能动态原地盘旋的问题，而且飞行难度加大。此外，随着飞机速度增大，盘旋半径减小，角度和场强读数偏差又会相对增大。为了解决以上问题，本文从理论上对飞机通讯天线方向图试飞方法以及飞行中无法动态原地盘旋和压坡小半径盘旋等因素带来的误差进行了分析，提出了用场强数值归算法测试飞机通讯天线方向图试飞方法和按电波传输原理建立数学模型，并给出了计算机辅助数据处理流程图，使得飞机通讯天线方向图试飞技术难度降低，相应的测试精度却有所提高。此方法对正确地评估飞机通讯天线的辐射特性提供了适用的试飞方法。

## 2 理论基础与分析

### 2.1 天线方向图的基本测试方法

如图1所示天线方向图测试的基本方法为旋转法，即：天线的相位中心和转台的旋转中心必须重合，转台绕轴心旋转，接收天线固定不动，或者被测天线不动，接收天线绕过旋心且垂直于台面的旋转轴为心的圆周上运动，接收各个角度上的被测天线辐射信号。

由于飞机在空中处于运动状态，无法原地旋转，一般情况下都是采用轨迹如图2所示的空中盘旋测试法或其它空中盘旋法。

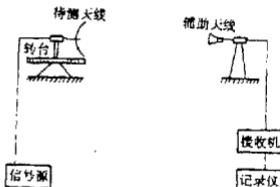


图1 天线方向图测试的基本方法

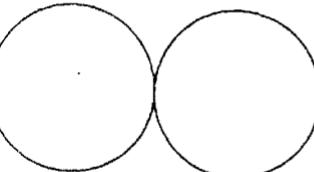


图2 机载天线方向图试飞方法

## 2.2 视距传输场强和距离的关系

由电波传播理论(1)可知：机载甚高频、超高频通讯隶属于视距传播的范畴。若以中等干土地面做反射区的话，空间任一距离  $d$  和场强  $E$  的关系如下：

$$|\bar{E}| = \frac{\sqrt{30P_r(W)D_f}}{d(km)} \sqrt{1 + D^2 / |R|^2 - 2|R|D_f \cos \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda d}} \quad (1)$$

其中： $P_r$  是天线的辐射功率； $D_f$  是天线的方向性系数； $D_f$  是地球扩散系数； $R$  是地面的反射系数； $h_1, h_2$  分别是接收天线和发射天线的等效高度； $\lambda$  是工作波长。

由(1)式可知：随着距离的增大，在一定的区域内， $E$  是呈递减趋势。另外，由文献[2]知： $|E|$  在一定的范围内随  $d$  呈缓变趋势，即等场强区。表 1 中所列飞机通讯天线 120MHz 试飞的场强—距离关系(2)亦证明了这一点。

表1 飞机通讯天线试飞的场强距离关系

$d$ (km)	123.7	137.6	145.9	150.3	158.6	162.4	170.8	198.1
$E$ (db)	41.4	41.5	41.2	41.0	40.4	39.9	39.6	38.3

## 2.3 飞机通讯天线方向图试飞时误差引入的分析

### 2.3.1 飞机盘旋时引入的误差分析

当飞机盘旋时，必须向盘旋方向压坡，且盘旋半径越小，压坡坡度越大。压坡引起的如图3所示的天线有效高度降低、极化状态改变和机身遮挡等，由此而带来测试误差。图4

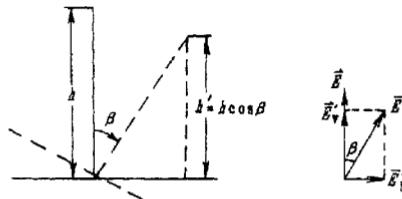


图3 飞机压坡盘旋引入的误差图解

中所列采用“∞”飞行方法的同条件下飞机左盘旋和右盘旋时天线方向图变化从试验的角度

度证明了分析的正确性。

一般情况下，要求盘旋压坡小于 $15^\circ$ ，此时，盘旋半径最小约 $10\text{ km}$ ，近台点与远台点间的距离约 $20\text{ km}$ 。由(I)式和表1可知：场强 $|E|$ 已发生了变化。试飞虽然是在所谓的等场强区飞行，但由2.2节讨论可知：空间只有缓变区，而无绝对的等场强区，所以误差是存在的。

“多边”型飞行方法力图改善压坡引起的误差，需要在每个测试点上摆平机身，但仍解决不了天线相心和旋心重合的问题。飞行难度则相应提高。

### 2.3.2 方向性天线接收引起的误差分析

若接收天线为有方向性天线时，天线方向图主瓣角度范围是有限的。飞机在空中盘旋时，盘旋半径愈大，相当于飞机通讯天线辐射相心偏离接收天线主瓣方向愈大，此时引入的误差就愈大。

### 2.2.3 读数误理

要减少场强随距离变化引入的误差，就必须在小半径内盘旋。飞机速度大，盘旋时间短，这样读角度读数和地面记录带来误差。

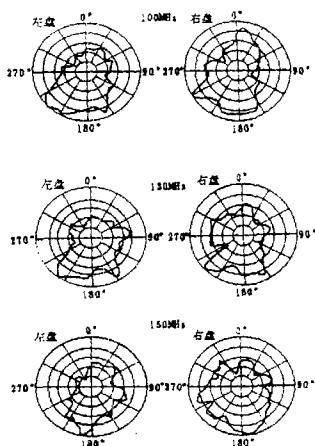


图4 马刀天线装机试飞方向

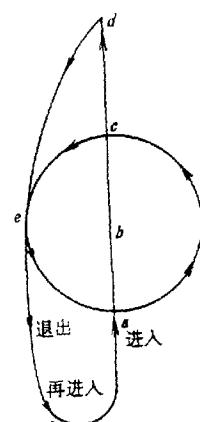


图5 场强数值归算法的试飞方法飞行轨迹

## 3 场强数值归算法的试飞方法、数据采集及数学模型的建立

场强数值归算法是将远离盘旋圆心的各个角度上接收的场强值通过数学方法处理后归算为此角度上，天线绕盘旋圆心原地盘旋的场强数值。下面将给出场强数值归算法的试飞方法、数据聚集和数学模型的建立。

### 3.1 场强数值归算法的试飞方法

为了降低飞行难度，减少误差，提出飞行轨迹如图5所示的盘大圆飞行方法。这样盘旋坡度减小，盘旋时间加长，报数和记录准确率将大大提高，飞行难度将随之大大降低。

### 3.2 场强数值归算法的数据采集与飞行步骤

当飞机从a点进入时，机上电台开始发射，地面记录，然后，飞机沿a b c d匀速直线飞行、且机上电台等间隔发射，地面接收记录下此空域上场强—距离关系，作为归算的校准参数。飞机到d点返回，从e点进入测试，绕以b点为圆心，以及R半径的圆周盘旋，每隔 $10^{\circ}$ 报数，且发射信号，地面接收记录，此数据则为归算的测试数据。最后从e点退出。如果还需改变频率试飞，飞机只需从f点再次进入完成上述过程即可。

### 3.3 场强数值归算法的数学模型建立

天线方向图测试时，要求天线相位中心和测试旋转中心重合。而我们所提出的方法则是盘大圆、小坡度飞行，这样，虽然减小了因压坡、报数时间不充分引起的误差，降低了飞行难度，但是盘旋半径的增大，引起各个角度点上的距离差别增大，因方向性接收天线限制，引起的接收场强误差增大，但是，这两方面引入的误差可以通过数学方法加以补偿和修正。另外，通过数值处理的方法还可以将各个测试点上的场强数值归算到圆心b点，以满足天线方向图测试时的要求，得到较精确的天线方向图。

因接收天线方向性限制引起的误差值正可以根据盘旋半径，接收点距盘旋圆心b点的距离求出各个点偏离接收天线主瓣轴线的角度，再根据所用接收天线的辐射方向性图找出所接收的场强值与最大方向所接收的场强值偏差 $\Delta E_i$ ，将其累加到该点所接收到的场强 $|E_i|$ 上即可。

由于距离变化引起的误差 $\Delta E_i$ 可以以a b c直线上的场强变化值做为归算的校准参数，以b点的场强值为基准值进行补偿修正。

根据(1)式以及试飞时选择场强随距离变化呈缓变空域的条件可知：

$$\begin{cases} |E_i| > |E_0| & ; \quad d_i < d_0 \quad i = 1, 2, \dots, n \\ |E_i| < |E_0| & ; \quad d_i > d_0 \quad i = n+1, \dots, n+n \end{cases} \quad (2)$$

其中： $E_i$ 是a b c直线上等间隔点上的场强值， $E_0$ 是基准点b点上的场强值。

因此有：

$$\begin{cases} \Delta E_{2i} = |E_i| - |E_0| & ; \quad d_i \leq d_0 \quad i = 1, 2, \dots, n \\ \Delta E_{2i} = |E_0| - |E_i| & ; \quad d_i > d_0 \quad i = n+1, \dots, 2n \end{cases} \quad (3)$$

那么在盘旋圆周上第j点接收的场强值 $|E_j|$ 要归算到基准点b点时，则有：

$$\begin{aligned} E_{bj} &= |E_j| + |\Delta E_{ik}| + \Delta E_{2i} & ; \quad d_j < d_0; \quad j, k = 1, 2, \dots, 18 \\ &\quad i = 1, 2, \dots, n & \\ E_{bj} &= |E_j| + |\Delta E_{ik}| - \Delta E_{2i} & ; \quad d_j > d_0; \quad j, k = 1, 2, \dots, 18 \\ &\quad i = n+1, \dots, 2n & \end{aligned} \quad (4)$$

其中： $E_{bj}$ 、 $\Delta E_{ik}$ 分别为第j点的归算值和因接收天线引入的误差修正值。

将(3)式代入(4)式有：

$$E_{bj} = |E_j| + |\Delta E_{ik}| + |E_0| - |E_i| \quad i = 1, 2, \dots, 2n \quad j, k = 1, 2, \dots, 36 \quad (5)$$

(5)式中 $|\Delta E_{ik}|$ 和 $|E_i|$ 由圆周上第j点距接收天线的距离 $d_j$ 而定。一般的取值范围

如下：

$$\left\{ \begin{array}{ll} E_i = E_{i+1} & ; \quad d_i + \frac{1}{2} \Delta d < d_i \leq d_{i+1} \\ E_i = E_i & ; \quad d_i \leq d_i \leq d_i + \frac{1}{2} \Delta d \end{array} \right. \quad (6)$$

其中:  $\Delta d$  是  $abc$  直线上的等间距间隔, 此值随  $i$  的取值和  $g_C$  的长度而定。

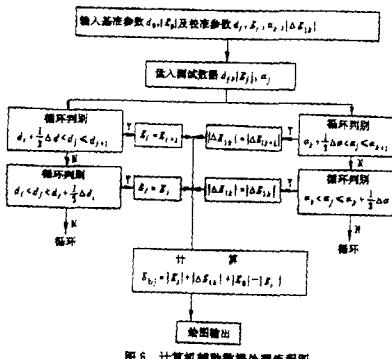
$$\begin{aligned} |\Delta E_{1k}| &= |\Delta E_{1k+1}|; \quad \alpha_k + \frac{1}{2}\Delta\alpha < \alpha_j \leq \alpha_{k+1} \\ |\Delta E_{1k}| &= |\Delta E_{1k}|; \quad \alpha_k < \alpha_j < \alpha_k + \frac{1}{2}\Delta\alpha \end{aligned} \quad j, k = 1, 2, \dots, 36 \quad (7)$$

其中： $\Delta\alpha$ 是由 $k$ 的取值以及接收天线主瓣方向和盘旋圆周上的 $e$ 点张角而定。

(5)、(6)、(7)式是所要建立的场强数值归算法的数学模型。此时，只要将盘旋圆周上各个点上接收的场强值用经(6)、(7)两式确定的修正值代入(5)式进行归算处理，便可得到天线相位中心和旋转中心重合的飞行方向图。而且还大大降低了因各种因素引入的误差和飞行难度。

#### 4 计算机辅助数据处理

飞机通讯天线试飞方向图虽然精度得到提高和飞行难度得以降低。但是数据处理繁琐且复杂。为此，可借助计算机快速、准确的进行辅助数据处理。计算机辅助数据处理流程图如图6所示：



#### 图 6 计算机辅助数据处理流程图

5 结论

本文在对以往飞机通讯天线方向图试飞方法引入的各种误差进行分析的基础上，并按电波传输原理提出了用场强数值归算法测试飞机通讯天线方向图试飞方法，并建立了该方法的数学模型，给出了计算机辅助数据处理流程图，以提高飞机通讯天线方向图试飞的精度，同时，降低飞行难度，该试飞方法可在今后的应用中进一步发展、完善。

## 参考文献

- [1] 王元坤. 电波传播摄论. 国防工业出版社, 1984
- [2] 王广学. 超短波通信电台天线等场强区域飞行研究. 航空工业部飞行试验研究中心, 1983.

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>