

文章编号:1004-132X(2001)11-1235-04

导弹天线罩廓形误差评定研究

姚宝国 王晓明 徐志祥 郭东明

摘要:为实现对导弹天线罩这类薄壁复杂回转体进行测量,研制了导弹天线罩几何参数测量仪。就测量数据的误差处理,探讨了应用鞍点规划的方法对天线罩廓形误差进行评定,给出了评定的线性鞍点规划模型、评定的最小条件,以及具体的操作方法。

关键词:廓形误差评定;天线罩;导弹;鞍点规划

中图分类号:TG801 文献标识码:A

姚宝国 博士研究生

在形位误差评定中,零件的原始误差信息由测量所得。在测量中,由测量仪器产生零件的理想要素,称其为零件初始理想要素,传感器获得的误差信息就是零件实际要素相对于零件初始理想要素的法向变动量。显然这样的误差值不仅与零件的实际误差有关,还与零件在仪器上的安装位置有关。因此,实际测量所得的原始误差值带有综合的特征,必需对其进行加工处理,以便抽取有效成分,确保评定的正确性。

在天线罩形位误差评定中,需进行天线罩的轮廓度误差评定,根据实际要求对轮廓度公差带定义时只考虑形状变动。本文探讨了应用鞍点规划的方法对天线罩廓形误差进行评定,该方法在实际应用中已取得了很好的效果。

1 天线罩廓形误差评定的线性规划模型

目前对于形位误差评定,通常有最小二乘评定法及包容评定法。为了提高评定运算效率,保证较高的评定精度,在进行天线罩廓形误差评定时将上述方法结合起来,先进行最小二乘评定,在此基础上进行最小区域评定(双包容评定)。

文献[1]给出了曲面形状误差评定的线性几何模型,也就是曲面变换后可求得法向误差

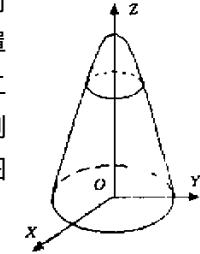
$$\Delta = \delta - \alpha(YN_Z - ZN_Y) - \beta(ZN_X - XN_Z) - \gamma(XN_Y - YN_X) - (xN_X + yN_Y + zN_Z) \quad (1)$$

式中, α, β, γ 分别为理想要素绕 X, Y, Z 轴作旋转变换的转角; x, y, z 分别为理想要素在 X, Y, Z 轴作平移变换的变换量; X, Y, Z 为理想要素坐标; N_X, N_Y, N_Z 为理想要素单位法矢在 X, Y, Z 轴上的分量; δ 为原始法向误差。

由于天线罩是回转体,没有绕 Z 轴的旋转参数 γ ,因而有

$$\Delta = \delta - \alpha(YN_Z - ZN_Y) - \beta(ZN_X - XN_Z) - (xN_X + yN_Y + zN_Z) \quad (2)$$

以下从该线性几何模型出发,给出天线罩廓形误差评定的最小二乘、最小区域线性规划模型,评定坐标系见图 1。



1.1 最小二乘评定

形位误差的最小二乘评定,是用理想要素的等距图形去逼近实际要素,并使残差最小,这时的残差是指等距图形与实际要素的法向距离。若理想要素与其等距图形的距离为 δ_0 ,则残差可表示为

$$e_i = \Delta_i - \delta_0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

式中, e_i 为残差; Δ_i 为变换后的法向误差; m 为测量点数。

将式(2)代入式(3),得到天线罩曲面的残差表达式

$$e_i = \delta_i - \delta_0 - \alpha(Y_i N_{Z_i} - Z_i N_{Y_i}) - \beta(Z_i N_{X_i} - X_i N_{Z_i}) - (x_i N_{X_i} + y_i N_{Y_i} + z_i N_{Z_i}) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

得到天线罩廓形误差最小二乘评定模型

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^m e_i^2 \\ \text{s. t. } & e_i = \delta_i - \delta_0 - \alpha(Y_i N_{Z_i} - Z_i N_{Y_i}) - \beta(Z_i N_{X_i} - X_i N_{Z_i}) - (x_i N_{X_i} + y_i N_{Y_i} + z_i N_{Z_i}) \\ & i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (5)$$

需要指出的是,这里之所以能够引入尺寸误差 δ_0 ,而未将其记入廓形误差,是因为在后续数控加工中,进行刀具半径补偿时可根据 δ_0 进行修正。这与国家标准有一定的出入。

1.2 最小区域评定

曲面轮廓度误差的最小包容区域法简称最小区域法,它是指用理想轮廓面的 2 个等距曲面去

包容实际被测轮廓面,并使 2 个等距曲面的距离为最小,即满足最小条件。

最小区域法评定中存在 2 个理想包容要素,用它们形成的带状区域去包容实际被测要素,也称为双包容评定。为实现最小条件,变换后的理想要素就应处在这样一个位置上,使实际要素与理想要素的法向距离的 Δ_{\max} 与 Δ_{\min} 的差值为最小,即 $\Delta_{\max} - \Delta_{\min}$ 达到极小值。

由式(2)将天线罩廓形误差评定的线性几何模型离散化为

$$\Delta_i = \delta_i - \alpha(Y_i N_{Z_i} - Z_i N_{Y_i}) - \beta(Z_i N_{X_i} - X_i N_{Z_i}) - (x N_{X_i} + y N_{Y_i} + z N_{Z_i}) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

引入特征参量

$$\left. \begin{array}{l} u = \max_i(\Delta_i) \\ v = \min_i(\Delta_i) \\ w = \min(u - v) \end{array} \right\} \quad (7)$$

得天线罩廓形误差最小区域评定模型

$$\left. \begin{array}{l} \min w = u - v \\ \text{s. t. } u \geq \delta_i - \alpha(Y_i N_{Z_i} - Z_i N_{Y_i}) - \beta(Z_i N_{X_i} - X_i N_{Z_i}) - (x N_{X_i} + y N_{Y_i} + z N_{Z_i}) \\ v \leq \delta_i - \alpha(Y_i N_{Z_i} - Z_i N_{Y_i}) - \beta(Z_i N_{X_i} - X_i N_{Z_i}) - (x N_{X_i} + y N_{Y_i} + z N_{Z_i}) \\ i = 1, 2, \dots, m \end{array} \right\} \quad (8)$$

2 天线罩廓形误差最小区域评定的最小条件^[1,2]

文献[1]给出了曲面形位误差评定的统一最小条件式,对于天线罩廓形误差评定,有模型维数 $h = 7$,映射空间维数 $n = 5$,由式(8)得特征向量

$$a_i = [Y_i N_{Z_i} - Z_i N_{Y_i} \quad Z_i N_{X_i} - X_i N_{Z_i} \quad e_{3i}]^T \quad i = 1, 2, \dots, 7 \quad (9)$$

式中, e_{3i} 为理想要素的单位法向量。

于是得到天线罩廓形误差最小区域评定的最小条件式(非退化情形)

$$\left. \begin{array}{l} \sum_{i=1}^g \lambda_i e_{3i} = \sum_{i=g+1}^7 \lambda_i e_{3i} \\ \sum_{i=1}^g \lambda_i (Y_i N_{Z_i} - Z_i N_{Y_i}) = \sum_{i=g+1}^7 \lambda_i (Y_i N_{Z_i} - Z_i N_{Y_i}) \\ \sum_{i=1}^g \lambda_i (Z_i N_{X_i} - X_i N_{Z_i}) = \sum_{i=g+1}^7 \lambda_i (Z_i N_{X_i} - X_i N_{Z_i}) \\ \sum_{i=1}^g \lambda_i = \sum_{i=g+1}^7 \lambda_i = 1, \lambda_i > 0 \end{array} \right\} \quad (10)$$

式中, g 为特征高点数; λ_i 为检验数。

对于天线罩廓形误差最小区域评定,特征点处的单位法向量不可能相等,由文献[1]可知,特征高(低)点数不小于 2。由此推知,特征点总数不少

于 4,于是得到天线罩廓形误差最小区域评定的最小条件如下:① 特征点总数为 4~7;② 特征点的分配为 2:2,2:3(3:2),3:3,2:4(4:2),2:5(5:2),3:4(4:3);③ 特征点的分布满足“交点准则”,即映射空间中的特征高点凸体与特征低点凸体有且仅有一个交点。

3 天线罩廓形误差评定的操作处理方法

由天线罩母线方程(坐标系见图 2),按照前面建立的最小二乘评定模型和最小区域评定模型,可以很容易地进行误差评定计算。但由于天线罩几何参数测量系统需要对各种型号的天线罩进行测量处理,也就是要求系统有很大的柔性。为此需要寻找一种避开母线方程的评定处理方法。

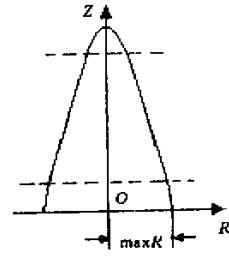


图 2 天线罩母线方程坐标系

分析式(5)和式(8),式中除了评定参量外,只含理想要素上各点的坐标值(X, Y, Z)和该点的单位法矢(N_x, N_y, N_z)。天线罩是一个回转体,显然只要给出其母线上一系列点的坐标和单位法矢,就能按照式(5)和式(8)进行廓形误差评定。这样对于每一型号的天线罩,只要将记录有母线上由控制弦高差决定的系列点的参数(即坐标和单位法矢)的数据文件输入系统,系统就能按照该型号的天线罩进行相应的数据处理工作。

对天线罩进行廓形误差评定,就是要由前面给出的规划模型求解出最佳理想要素位置参数,即初始理想要素变换到最佳理想要素位置时所进行的旋转变换参量 α, β ,以及平移变换参量 x, y, z ,进而得到天线罩的廓形误差值。

3.1 原始法向误差求解

如图 3 所示,ROZ 直角坐标系在数据测量过程中建立的测量坐标系,点 A_1, A_2, \dots, A_n 是在测

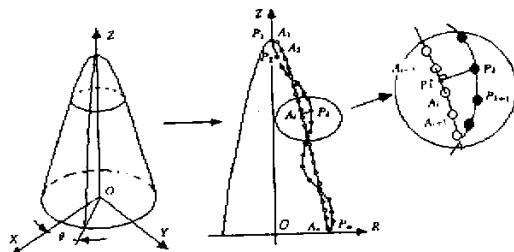


图 3 法向映射点求解示意图
量坐标系下天线罩理论轮廓轴截面上的点,已知

这些点的坐标(R, Z)和单位法矢(N_R, N_Z)(因天线罩是回转体,求原始误差时可按2维问题处理)。点 P_1, P_2, \dots, P_m 为实测轮廓点,测出坐标(R, Z, θ), θ 为绕 Z 轴的转角参数。要求出原始法向误差 δ_k ,必须先求点 P_k ($k = 1, 2, \dots, m$)在理论轮廓上的法向映射点 A_k 。由于理论轮廓曲线是由控制弦高差生成的系列点列(给出坐标及单位法矢)表示的,在软件设计时采用了搜索法进行近似求解。以各测点 Z_k 的坐标为搜索因子,在 A_1, A_2, \dots, A_n 中搜索到和其 Z_k 坐标最接近的点 A_i ($i = 1, 2, \dots, n$),求点 P_k 到线段 $A_i A_{i+1}$ 的垂直相交点 P_k^* ,如 P_k^* 在 $A_i A_{i+1}$ 区间内,则将 P_k^* 点近似为实际轮廓点 P_k 在理论轮廓上的法向映射点(精度由控制弦高差保证);如果点 P_k^* 不在 $A_i A_{i+1}$ 区间内而落在 A_i 点之外,则重新在 $A_{i-1} A_i$ 区间以同样的方法求垂直相交点;如果 P_k^* 点落在 A_{i+1} 点之外,则重新在 $A_{i+1} A_{i+2}$ 区间以同样的方法求垂直相交点。求得法向映射点 P_k^* (R_k^*, Z_k^*)后,则原始法向误差

$$\delta_k = \sqrt{(R_k - R_k^*)^2 + (Z_k - Z_k^*)^2}$$

对于 P_k^* 点单位法矢 N_{Rk}^*, N_{Zk}^* ,可由 A_{i-1} 点和 A_i 点(假定垂直相交落在 $A_{i-1} A_i$ 区间)的法矢进行插值求得。再考虑点 P_k 的转角参数 θ_k ,可进一步得到 P_k 在 X, Y 轴上的坐标分量 $X_k^* = R_k^* \cos \theta_k, Y_k^* = R_k^* \sin \theta_k$;以及法矢分量 $N_{Xk}^* = N_{Rk}^* \cos \theta_k, N_{Yk}^* = N_{Rk}^* \sin \theta_k$ 。

3.2 天线罩廓形误差评定

由上述求出的理论轮廓上的法向映射点 P_k^* 的参数($X_k^*, Y_k^*, Z_k^*, N_{Xk}^*, N_{Yk}^*, N_{Zk}^*$),代入式(2)得变换后的各点法向误差

$$\Delta_k = \delta_k - \alpha(Y_k^* N_{Zk}^* - Z_k^* N_{Yk}^*) - \beta(Z_k^* N_{Xk}^* - X_k^* N_{Zk}^*) - (xN_{Xk}^* + yN_{Yk}^* + zN_{Zk}^*) \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

式中, α, β, x, y, z 为符合评定条件(最小二乘、最小区域等)的最佳理想要素位置参数。

3.2.1 最小二乘法评定

由式(5)和式(11)得实际最小二乘评定模型

$$\begin{aligned} \min & \sum_{k=1}^m e_k^2 \\ \text{s. t.} & e_k = \delta_k - \hat{\delta}_0 - \alpha(Y_k^* N_{Zk}^* - Z_k^* N_{Yk}^*) - \beta(Z_k^* N_{Xk}^* - X_k^* N_{Zk}^*) - (xN_{Xk}^* + yN_{Yk}^* + zN_{Zk}^*) \\ & k = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $\hat{\delta}_0$ 为零件的尺寸误差。

进一步建立最小二乘正规方程,解该方程得理想要素位置参数($\alpha, \beta, x, y, z, \hat{\delta}_0$),最后由 $f = \max e_k - \min e_k$ 得到廓形误差值。

3.2.2 最小区域法评定

同样,由式(8)、式(11)也可得到实际最小区域评定模型

$$\begin{aligned} \min & w = u - v \\ \text{s. t.} & u \geq \delta_k - \alpha(Y_k^* N_{Zk}^* - Z_k^* N_{Yk}^*) - \beta(Z_k^* N_{Xk}^* - X_k^* N_{Zk}^*) - (xN_{Xk}^* + yN_{Yk}^* + zN_{Zk}^*) \\ & v \leq \delta_k - \alpha(Y_k^* N_{Zk}^* - Z_k^* N_{Yk}^*) - \beta(Z_k^* N_{Xk}^* - X_k^* N_{Zk}^*) - (xN_{Xk}^* + yN_{Yk}^* + zN_{Zk}^*) \\ & k = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (13)$$

将这个线性规划问题化为标准形后,用单纯形法可解出满足最小条件的理想要素参数 α, β, x, y, z ,进而得到最小区域法廓形误差值 $w = u - v$ 。

在应用单纯形法规划求解过程中,将最小区域评定公式化为标准形式的矩阵表示时,系数矩阵随测量点数 m 的增加将是一个巨形阵,例如实际测量了10 800个点,则系数矩阵有 $(7 + 2 \times 10 800) \times (2 \times 10 800) = 466 711 200$ 个元素,因式(11)中不含绕 Z 轴的转角参数 γ ,所以系数矩阵是 $(7 + 2m)$ 行,如果用双精度变量将系数矩阵的元素全部存储,则需要3561 Mb的内存空间,显然计算机的内存不能满足要求。因此必须对系数矩阵进行压缩存储,只存储其非零元素(系数矩阵的大部分元素为零)。所以在规划求解时,采用了链表结构进行系数矩阵压缩存储。

使用压缩存储技术也较大地缩短了单纯形法规划求解时间,但即使这样在采样10 800个点时规划求解仍需要1 h多,不能满足实际测量需要。最小二乘法解算迅速而且精度较高,其求解结果已很接近最佳理想要素位置,如在最小二乘评定基础上再进行最小区域评定,也就是采用“两步法”,就可以大大缩短规划求解时间,同时也能提高评定精度。具体做法是,在最小二乘评定后,将实际轮廓面均匀地划分为 n 个小区间,按最小二乘求出的理想要素参数确定出每一区间上的误差极大和极小点,将这 $2n$ 个点再使用最小区域法进行评定,这样30 s内就能得出结果。

4 评定实例

对某型号导弹天线罩进行测量,得到 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 和 270° 这样4条母线(标记为1, 2, 3, 4)的数据,共1516个测量点。评定结果见表1,其中特征点原始位置为 $P(I, J)$, I, J 分别为特征点所在母线的序号及其在该母线上的顺序号。

从评定结果看出,最小区域法评定的特征点

总数为 7,2:5 分配。图 4 为最小区域评定的最小条件在映射空间(维数 $n=5$)中的投影图示(共 10 个投影面)。特征高点凸体与特征低点凸体均有且仅有 1 个交点,故评定为最小。

表 1 某天线罩廓形误差评定结果 单位:mm

评定前	法向误差	$\max = 0.786, \min = -0.236$
最小二乘评定	评定参量	$x = 0.005, y = 0, z = -0.286, \alpha = 0, \beta = 0, \delta_0 = 0.235$
	法向误差	$\max = 0.474, \min = -0.390$
	廓形误差	$f = 0.864$
最小区域评定	评定参量	$x = 0.001, y = -0.006, z = 0.025, \alpha = 0, \beta = 0$
	特征点	高点 $P(1,61) P(3,61)$ 低点 $P(1,32) P(1,379) P(2,36)$ $P(2,379) P(4,379)$
	法向误差	$\max = 0.760, \min = -0.012$
	廓形误差	$w = 0.771$

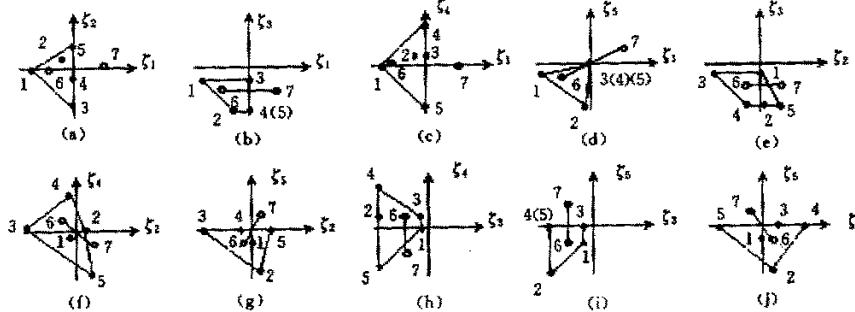


图 4 某天线罩廓形误差评定最小条件图示

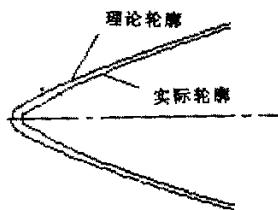


图 5 某导弹天线罩 0°轴截面误差评定前的实际外轮廓和理想外轮廓对比图

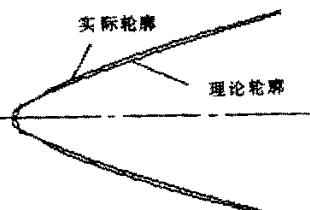


图 6 某导弹天线罩 0°轴截面误差评定后实际外轮廓和理想外轮廓对比图

参考文献:

- [1] 刘健,王晓明.鞍点规划与形位误差评定.大连,大连理工大学出版社,1996:132~291
[2] 安立邦,钱名海,吴宏基等.球度误差的包容评定及其最小条件.计量技术,1992(3):1~4

(编辑 马尧发)

5 结束语

从评定实例看出,用本文介绍的评定方法对天线罩廓形误差进行评定后,取得了很好的效果。图 5(图中以理想外轮廓为基准,将实际外轮廓与理想外轮廓在径向的误差放大 3 倍显示,并截取顶部部分)和图 6(图中以理想外轮廓为基准,将实际外轮廓与理想外轮廓在径向的误差放大 9 倍显示,并截取顶部部分)显示了导弹天线罩 0° 轴截面在误差评定前后的实际外轮廓和理想外轮廓对比图。可以看出,理想要素按评定出的位置参数经平移、旋转变换后,以最佳位置逼近了实际外轮廓。

目前,运用该评定方法已对 13 个导弹天线罩廓形测量数据进行了评定处理,均取得了满意的效果。

作者简介:姚宝国,男,1972 年生。大连理工大学(辽宁省大连市 116024)机械工程学院博士研究生、香港理工大学合作研究人员。研究方向为机电控制及自动化、精密测量及加工。发表论文 5 篇。王晓明,男,1965 年生。大连理工大学机械工程学院副教授。徐志祥,男,1965 年生。大连理工大学机械工程学院副教授。郭东明,男,1959 年生。大连理工大学机械工程学院教授、博士研究生导师。

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)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)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),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>