

# 赋形反射面天线形变效应的研究\*

董 涛 徐晓文 肖 疆

(北京理工大学电子工程系 北京 100081)

**摘要：**本文利用物理光学法(PO)分析了赋形双弯曲反射面天线在冲击波形变效应的影响下远区辐射场的变化，并由测试结果建立了反射面形变的数学模型，推导出了辐射场的计算方法。结果表明，由于反射面的局部形变，直接导致辐射方向图的恶化，并且随着形变部分面积的增大，水平面的副瓣抬高很大，不同部位的形变对方向图的影响也是不同的，中间部位形变对反射面方向图的影响要大于边缘形变对反射面方向图的影响。

**关键词：**赋形反射面 形变效应 辐射方向图 物理光学法

## Study of the Influence on the Shaped Reflector Antenna due to Its Distortion

DONG Tao , XU Xiaowen ,XIAO Jiang

(Dept. of Electronics Engineering , Beijing Institute of Technology , Beijing 100081 )

**Abstract :** PO( physical optics ) method is applied to calculate the radiation patterns of the distorted shaped beam reflector antenna in this paper. The reflector distortion model is built by using the testing results. The calculation results show that the radiation patterns become degraded due to the local distortion of the reflector. The peak sidelobe level in the azimuth plane becomes higher as the distortion area is enlarged. It can be seen that the influence of the distortion in the center of the reflector is much bigger than that near the edge of the reflector.

**Key words :** Shaped reflector , Distortion effect , Radiation patterns , PO method

## 1 引言

在许多雷达系统中，经常需要使用赋形波束反射面天线。如用于对空搜索的雷达，要求天线波束在方位面为窄波束，以确定目标的位置；在俯仰面为余割平方赋形波束，使雷达的威力覆盖一定的高度、仰角和最大作用距离。在实战中，雷达的其它部件一般装在雷达车内而被保护起来，被冲击波和弹片破坏的几率较小，而反射面天线必须裸露在外，故受到打击的概率较大，事先知道天线毁伤对电性能的影响很有必要，因此分析赋形反射面天线的毁伤效应非常有意义。本文运用物理光学法重点分析了赋形反射面天线在冲击波形变的条件下辐射方向图的变化，得出一些有意义的结论，既为了解雷达的实战性能提供了翔实的资料，同时又为反雷达一方如何有效打击对方雷达提供了依据。

## 2 天线完好时的分析和计算

我们采用的是一种赋形双弯曲反射面天线，其轮廓形状如图1所示，纵向直线代表固定反射面的骨筋。

由于这种双弯曲赋形反射面天线尺寸相对于工作波长属于电大尺寸，一般采用物理光学法进行分析计算<sup>[1~3]</sup>。

馈源采用 TE<sub>11</sub> 模和 TM<sub>11</sub> 模叠加激励的双模圆形喇叭，垂直极化，馈源的辐射场表达式为：

$$E_i = E_e \sin \varphi \hat{\theta} + E_h \cos \varphi \hat{\phi} \quad (1)$$

其中：

$$E_e = E_0 j \frac{kD^2}{4} \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \frac{J_1(\mu_{11})}{\mu_{11}} \frac{2J_1(u)}{u} \left( 1 + \frac{\beta'_{11}}{k} \cos \theta - \alpha \frac{u^2}{r_{11}^2 - u^2} (1 + \frac{k}{\beta_{11}} \cos \theta) \right) \quad (2)$$

$$E_h = E_0 j \frac{kD^2}{4} \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \frac{J_1(\mu_{11})}{\mu_{11}} \frac{2J_1(u)}{u} \left( \cos \theta + \frac{\beta'_{11}}{k} \right) \quad (3)$$

其中  $r_1$  为场点到喇叭口面相位中心的距离,  $\theta$  为场点的偏轴角,  $\beta_{11}$ ,  $\beta'_{11}$  分别是 TE<sub>11</sub> 模和 TM<sub>11</sub> 模的传播常数。

数  $D$  为喇叭口径的半径,  $u = kD \sin \theta$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为波长,  $\alpha$  为 TE<sub>11</sub> 模和 TM<sub>11</sub> 模的模比复常数。

根据物理光学法可得反射面的远区辐射场为

$$E = B \int_s \frac{E_i}{r} \cdot [\hat{n} \times (\hat{r} \times \hat{e}_i)] \cdot e^{-jkr(1-\hat{r} \cdot \hat{R})} ds \quad (4)$$

其中系数

$$B = - \frac{j\omega\mu}{2\pi} \left[ \left( \frac{\epsilon}{\mu} \right) \frac{P}{2\pi} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{e^{jkR}}{R}$$

$P$  为馈源的辐射功率,  $E_i$  为馈源的辐射电场强度,  $r$  是反射面焦点(坐标原点)到反射面上一点的矢量,  $r$  是  $r$  的模值,  $\hat{r}$  是  $r$  的单位矢量,  $R$  为坐标原点到观察点的矢量,  $R$  是  $R$  的模值,  $\hat{R}$  是  $R$  的单位矢量,  $\hat{n}$  为反射面上朝外的单位法矢量,  $\hat{e}_i$  为馈源照射极化单位矢量。

我们编制了 Fortran 程序, 将理论计算的两个主平面方向图和对该反射面实际测试的两个主平面方向图进行了对比, 分别如图 2、3 所示。

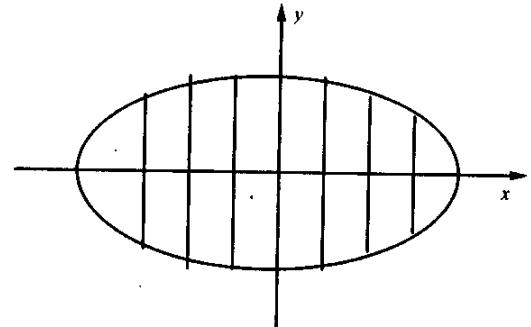


图 1 反射面轮廓示意图

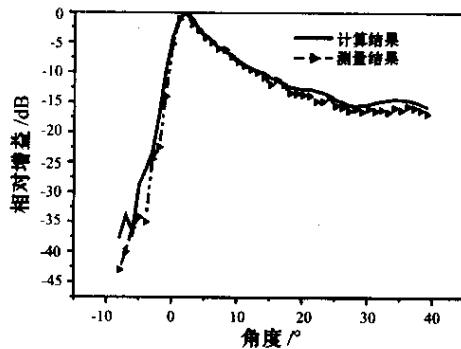


图 2 垂直面计算值和测试值对比

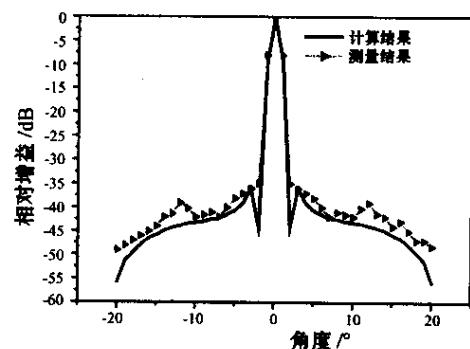


图 3 水平面计算值和测试值对比

由图中可以看出, 测试曲线和计算曲线吻合较好, 从而证明了计算方法的正确性, 为后面分析反射面形变打下了良好的基础。计算曲线和测试曲线的差异主要是由以下因素造成的: 比如测试环境的不理想, 地面杂波干扰, 地面上物体散射作用的影响; 计算时没有考虑馈源、支架等对反射面的遮挡效应, 以及边缘效应等。

### 3 天线形变时的分析和计算

反射面通常固定在较稀疏的骨筋上, 纵向骨筋的距离大约为 400mm。因为骨筋比较粗且材料特殊, 在爆炸冲击波的作用下基本没有发生形变, 而两根骨筋之间的反射面会发生很明显的形变, 形状类似沟状。由我校爆炸破坏预防与控制国家重点实验室提供的反射面爆炸冲击波试验的数据, 可以拟合出两根纵向骨筋之间形变部分的反射面方程为

$$z = f(x, y) = (-4.4932 - 7.7313x + 1.9791x^2) - 4.9100 - 2.3257y + 0.2957y^2 \quad (5)$$

我们先考虑中心两根纵向骨筋之间的反射面形变, 可以将反射面分为 3 部分, 中间部分发生上述形变, 而两边保持不变。<sup>下方数据</sup> 形变部分辐射场的推导如下。

形变部分的单位法向量为

$$\hat{n} = \frac{\tau_x \times \tau_y}{|\tau_x \times \tau_y|} \quad (6)$$

$$\boldsymbol{r} = \hat{x}\hat{x} + \hat{y}\hat{y} + \hat{z}\hat{z} \quad (7)$$

$$\tau_x = \frac{\partial \boldsymbol{r}}{\partial x} = \hat{x} + \hat{y} \frac{dy}{dx} + \hat{z} \frac{dz}{dx} = \hat{x} + \hat{z} \frac{dz}{dx} \quad (8)$$

$$\tau_y = \frac{\partial \boldsymbol{r}}{\partial y} = \hat{y} + \hat{x} \frac{dx}{dy} + \hat{z} \frac{dz}{dy} = \hat{y} + \hat{z} \frac{dz}{dy} \quad (9)$$

馈源照射极化单位矢量

$$\hat{e}_f = \frac{\hat{r} \times (\hat{e}_f \times \hat{r})}{|\hat{r} \times (\hat{e}_f \times \hat{r})|} \quad (10)$$

$\hat{e}_f$  为馈源口径的单位极化矢量, 取垂直极化, 即  $\hat{e}_f = \hat{y}$ , 将(6)和(10)两式代入(4)式可得反射面形变部分的辐射场, 再和未形变部分的辐射场进行矢量叠加, 可得到反射面形变后的总辐射方向图。

先考虑天线中心两根骨筋之间的形变, 将其和完好时的方向图进行对比, 如图 4、5 所示。再考虑天线中心四根骨筋之间的形变, 将其和完好时的方向图进行对比, 如图 6、7 所示。然后再考虑形变发生在边缘位置(右边缘)四根骨筋之间的情况, 将其和完好时的方向图进行对比, 如图 8、9 所示。

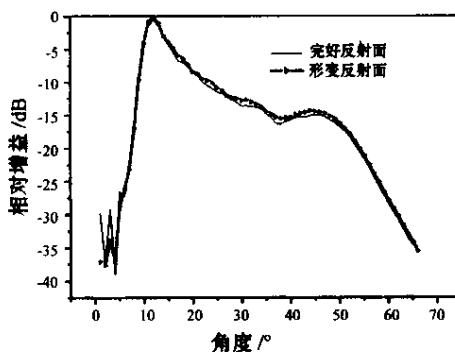


图 4 中心两根骨筋形变时垂直面方向图

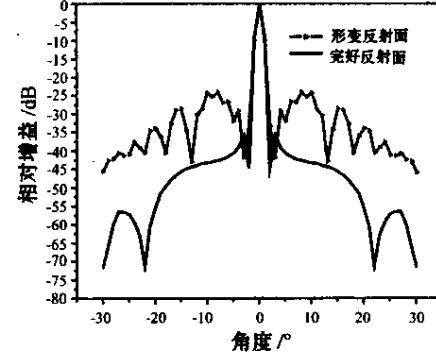


图 5 中心两根骨筋形变时水平面方向图

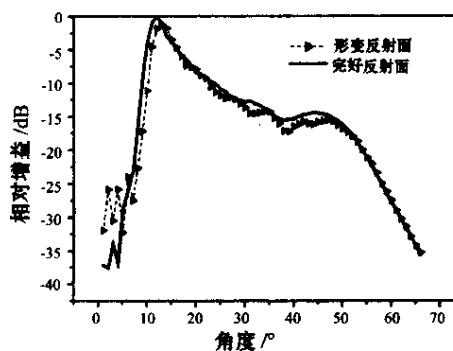


图 6 中心四根骨筋形变时垂直面方向图

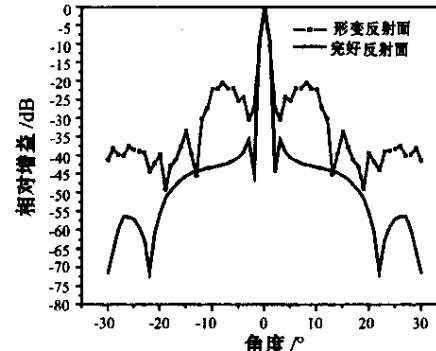


图 7 中心四根骨筋形变时水平面方向图

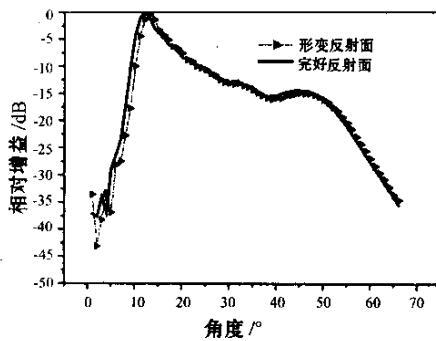


图 8 边缘四根骨筋形变时垂直面方向图

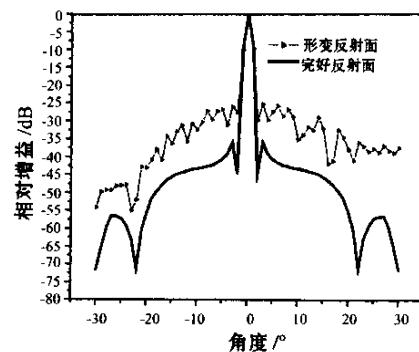


图 9 边缘四根骨筋形变时水平面方向图

可以看出,由于反射面形变的影响,垂直面副瓣抬高较小,但最大值稍微下降,并且最大值稍微偏离原来的方向,而水平面副瓣抬高比较严重,当有两个骨筋之间的反射面发生形变时,峰值副瓣由完好时的-35dB升至-25dB,当有四个骨筋之间的反射面发生形变时,峰值副瓣由完好时的-35dB升至-20dB,严重影响了雷达的抗干扰性能。由于反射面边缘发生形变,不但导致水平面副瓣抬高,还导致方向图不对称。

我们用所编制的 Fortran 程序可以计算反射面上任意位置两根筋或多根筋之间的形变效应,并可以建立详细的反射面形变效应数据库。

## 4 结论

本文分析了双弯曲赋形反射面天线在冲击波形变效应影响下远区辐射场的变化。我们根据实际爆炸测试结果建立了反射面形变的数学模型,并推导出了计算形变反射面辐射场的方法,同时计算了几种典型形变情况下的辐射方向图。这为评估雷达天线的冲击波毁伤效应提供了重要的理论数据,又可作为反雷达一方的重要参考。本文提出的计算方法也可用于其他类型反射面形变效应的计算。

## 参 考 文 献

- [1] Thomas F Carberry. Analysis theory for the shaped-beam doubly curved reflector antenna. IEEE Trans. AP., 1969, 17:131~138.
- [2] Charles F Winter. Dual vertical beam properties of doubly curved reflectors. IEEE Trans. AP., 1971, 19:174~180.
- [3] Dah-Weih Duan, Yahya Rahmat-Samii. A generalized diffraction synthesis technique for high performance reflector antennas. IEEE Trans. AP., 1995 A3 27~40.
- [4] Motoo Mizusawa. A dual doubly curved reflector antenna having good circular polarization characteristics. IEEE Trans. AP., 1978, 26:455~458.
- [5] L Marder. Doubly curved narrow - beam reflectors . Journal of physics , 1978 ,11:2489 ~ 2497.
- [6] Anton Brunner. Possibilities of dimensioning doubly curved reflectors for azimuth-search radar antennas. IEEE Trans.

AP., 1971, 19:52~57.

- [7] 胡明春,李建新. 赋形波束双弯曲反射面探讨. 现代雷达, 1996(6):64~68.
- [8] 林世明. 赋形波束双弯曲反射器天线理论研究. 电子学报, 1981(4):56~66.

**董 涛** 男,1975年11月生,1999年毕业于北京理工大学电子工程系电磁场与微波技术专业,同年攻读该专业硕士学位。2001提前攻读该专业博士学位。研究方向为反射面天线的毁伤效应、超低副瓣相控阵天线以及遗传算法在天线阵优化设计中的应用。

E-mail : dongtaoandy @ sohu. com

**徐晓文** 男,1957年2月生,北京理工大学电子工程系电磁场与微波技术专业教授,博导。主要研究方向为超低副瓣相控阵天线、反射面天线的毁伤效应、分层媒质中电波辐射与传播、智能天线等。

## 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>