

# 爆炸冲击波作用下变形毁伤对圆抛物面天线 电性能影响的数值模拟

袁俊明<sup>1, 2</sup> 张庆明<sup>1</sup> 刘彦<sup>1</sup>

(1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京, 100081;

2.中北大学化工与环境学院, 山西太原, 030051)

**摘 要:** 研究圆抛物面天线在冲击波超压毁伤条件下的远场辐射特性规律, 利用 LS\_DYNA 对天线的结构毁伤进行数值模拟获得天线变形模型, 采用高频电磁场分析模块 FEKO 软件, 基于表面电流积分的物理光学法和矩量法混合使用, 对完好和变形天线模型的远场辐射特性进行了建模与分析, 比较了反射面完好时和不同冲击波超压对反射面变形毁伤后的电性能变化。着重研究了天线反射面在不同冲击波超压毁伤后远场辐射特性的变化规律, 结果表明: 反射面天线在冲击波超压作用下, 它的增益随超压的增大而逐渐减小, 且下降显著。

**关键词:** 天线毁伤; 冲击波; 物理光学法; 矩量法; 远场辐射方向图

## Simulation on the Electric Property of Circle Parabolic Reflector Antenna under Distortion Damage Subjected to Shock Wave

YUAN Junming<sup>1,2</sup>, ZHANG Qingming<sup>1</sup>, LIU Yan<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,

Beijing Institute of Technology, 100081, China;

2 Chemical Industry and Ecology Institute, North University of China, Taiyuan, 030051, Shanxi, China)

**Abstract:** The far field radiation characteristics of circle parabolic reflector subjected to shock wave damage is studied. The structural damage of the antenna was simulated with LS\_DYNA and the distorted antenna models were attained. The perfect and distorted antenna model of the far field radiation characteristics of circle parabolic reflector is established and analyzed using the moments method and the method of physical optics based on surface current integration in the analysis model FEKO of electromagnetic field of high frequency characteristics. Comparisons between the electrical performance changes when reflector is perfect and reflector is damaged by shock wave were made. The law of far field radiation characteristics changes with the different shock wave value was studied. The results show that: the gain of the circle parabolic reflector is decreasing with increasing value of shock wave and the descending amplitude is obvious.

**Keywords:** antenna damage; shock wave; PO method; moments method; radiation patterns

圆抛物面天线被广泛应用于各种无线电设备中, 是卫星通讯、雷达与射电天文等领域的基础设施之一。它也是现代军用雷达天线的一种常见结构形式, 安装在雷达运载车厢体上面或裸露在舰艇

甲板上, 往往成为重点打击的军事目标。通常打击该类天线目标的毁伤元是战斗部爆炸后产生的碎片和冲击波, 使天线反射面穿孔或变形、馈源贯穿或破裂以达到破坏天线结构目的, 从而使天线正常功能丧失。关于反射面变形对天线电性能影响研究的文献不多, 王五兔等<sup>[1-5]</sup>主要从天线在结构自重、风载荷、温度载荷和结构设计等角度采用随机表面误差理论对天线微小变形进行研究分析, 当随机表面误差大于 0.1λ 时, 该方法是失效的。由此说明雷达反射面天线在爆炸冲击波载荷作用下产生大面积、大程度变形时, 采用随机表面误差理论不能处理这类变形情况。董涛等<sup>[6]</sup>把简化的天线模型分成变形部分和非变形部分单独处理, 并拟合出变形部分的数学方程加载在辐射场进行研究分析。这种方法对局部变形面积的曲线拟合存在误差, 忽略了天线表面整体大变形的影响, 并且要求研究者编制程序对反射面变形和电磁场的耦合作用进行仿真计算, 不仅非常困难而且难以实现。总之, 这些处理方法不能完全反映大变形条件下对天线电性能的影响情况。

本文开辟一种更简捷、更快速的新研究途径, 利用 LS\_DYNA 对天线在爆炸冲击波载荷作用下的变形效应进行数值模拟得到天线变形模型, 采用 ANSYS 公司专注解决电大尺寸物理结果的高频电磁场分析模块 FEKO (任意复杂电磁场计算) 软件<sup>[7]</sup>, 对完好及天线变形模型进行仿真计算, 着重研究不同冲击波超压毁伤对圆抛物面天线远场辐射特性变化的规律。

## 1 LOAD\_BLAST 爆炸载荷加载分析

天线结构毁伤数值模拟中的爆炸冲击波加载方式采用直接在天线模型上施加爆炸波 (LOAD\_BLAST)<sup>[8]</sup>的方法, 这种方法无需建立爆炸场计算网格, 可以大大节省计算资源。爆炸波通过 CONWEP<sup>[9, 10]</sup>算法获得, 它通过结合反射压力和入射压力把入射角的影响考虑进来, 在无遮挡作用面上其表达式:

$$p_l = p_r \cos^2 \theta + p_i (1 + \cos^2 \theta - 2 \cos \theta) \quad (1)$$

其中,  $p_l$  为加载压力,  $p_r$  为正反射压力,  $p_i$  为入射压力。

当  $\cos \theta$  为负值时, 即加载面的法向不对准爆心时, 加载压力等于入射压力:

$$p_l = p_i \quad (2)$$

为了计算 LS\_DYNA 关键字 LOAD\_BLAST 的爆炸自由场超压值, 取  $\theta = 90^\circ$  时, 即加载面的法向正好与爆心相反时, 此时  $\cos \theta = 0$  代入 (1) 式, 则可得  $p_l = p_i$ 。建立一个尺寸为 100cm×100cm×0.1cm 铝板有限元模型, TNT 炸药 500g, 炸点在铝板上方一定距离处, 以此计算 TNT 炸药爆炸后的自由场超压值规律。模拟结果、经验公式计算结果如图 1 所示。

常用的空中爆炸经验公式<sup>[11]</sup>如下:

$$\Delta p = \frac{0.082}{\bar{r}} + \frac{0.265}{\bar{r}^2} + \frac{0.687}{\bar{r}^3} \quad (3)$$

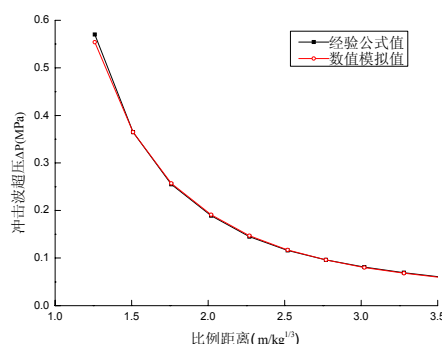


图 1 数值模拟与经验公式结果对比

Fig.1 results comparison of simulation and formula

由图 1 可知, 爆炸冲击波入射超压峰值的数值模拟结果和经验公式计算结果基本吻合, 说明 LS\_DYNA 程序关键字 LOAD\_BLAST 的爆炸冲击波在空气中传播的数值模拟计算具有很高的可靠性。

## 2 冲击波毁伤天线的 FEKO 模拟方法

### 2.1 天线变形毁伤模拟的方法

FEKO 模拟冲击波毁伤反射面天线的基本方法是: 在 ANSYS 里建立完好天线模型, 利用 LS\_DYNA 对天线结构的毁伤效应进行数值模拟, 得出不同冲击波超压下天线变形模型, 将这些模型导入 FEKO 软件中, 对它设定相关参数, 模拟变形后的天线电性能参数变化情况, 并与完好天线电性能参数比较, 以确定反射面天线毁伤程度。

### 2.2 天线变形毁伤的理论分析

由文献[12]可知, 对于旋转抛物面天线, 在  $\theta=0$ ,  $\varphi=0$  方向上各辐射面元相位相同, 同相叠加, 合成辐射场取最大值。此时天线增益公式为:

$$G_{\max} = G(0,0) = \frac{1}{\lambda^2} (|F_{01}|^2 + |F_{02}|^2) \quad (4)$$

式中:

$$F_{01} = \left\{ \int_S \frac{\sqrt{G_f(\xi, \psi)}}{\rho} [\vec{n} \times (\vec{i}_\rho \times \vec{e}_i)] \vec{i}_\theta dS \right\} e^{-jk \cdot 2f} = A e^{-jk \cdot 2f};$$

$$F_{02} = \left\{ \int_S \frac{\sqrt{G_f(\xi, \psi)}}{\rho} [\vec{n} \times (\vec{i}_\rho \times \vec{e}_i)] \vec{i}_\phi dS \right\} e^{-jk \cdot 2f} = B e^{-jk \cdot 2f};$$

$e^{-jk \cdot 2f}$  为抛物面天线的相位项。

假设反射面发生变形, 依变形量的大小, 将反射面分为若干个区域。设未变形部分的面积为  $S_0$ , 变形部分的面积分别为  $S_1, S_2 \cdots S_n$ , 与其相应的在  $\theta=0$  的方向分别产生了  $k\Delta_1, k\Delta_2, \cdots k\Delta_n$  的相位误差, 则:

$$F'_{01} = A_0 \cdot e^{-jk \cdot 2f} + A_1 \cdot e^{-jk \cdot (2f + \Delta_1)} + A_2 \cdot e^{-jk \cdot (2f + \Delta_2)} + \cdots + A_n \cdot e^{-jk \cdot (2f + \Delta_n)} \quad (5)$$

$$F'_{02} = B_0 \cdot e^{-jk \cdot 2f} + B_1 \cdot e^{-jk \cdot (2f + \Delta_1)} + B_2 \cdot e^{-jk \cdot (2f + \Delta_2)} + \cdots + B_n \cdot e^{-jk \cdot (2f + \Delta_n)} \quad (6)$$

将 (5) 和 (6) 代入 (4) 可知, 天线增益值  $G_{\max}$  随着反射面变形程度的增大, 即相位误差的增大而减小。

## 3 天线模型的建立

以圆抛物面天线为例, 利用 FEKO 软件模拟完好时和冲击波对其变形毁伤后的电性能变化规律。该天线反射面半径  $R=1\text{m}$ , 高度  $H=0.32\text{m}$ , 工作频率为  $3.7\text{GHz}$ , 根据公式 (7) 可计算该反射面天线焦距  $F$ 。

$$F = R^2 / 4H \quad (7)$$

可知, 焦距  $F=0.78\text{m}$ , 因此馈源的坐标为  $(0, 0, 0.78)$ 。图 2 中的工作平面坐标的 N、V 及 U 分别代表 x、y 及 z 方向。

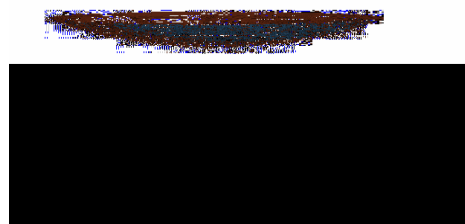


图 2 圆抛物面天线模型

Fig.2 model of circle parabolic reflector antenna

因为这种口径圆抛物反射面天线是电大尺寸,一般采用基于面电流近似的物理光学(P0)法进行分析计算<sup>[13]</sup>,而馈源采用  $TE_{11}$  模和  $TM_{11}$  模叠加激励的双模圆形喇叭,置于焦点上。计算方法采用物理光学法和矩量法混合使用,将反射面天线的馈源部分和反射面部分作为一个整体进行分析。

天线电性能包括效率、增益、副瓣电平等许多参数,一般给出其辐射方向图与轴向增益即可。由天线理论及设计可知,天线的远场辐射方向图半功率波束宽度(HPBW)越窄,副瓣越小,增益越高,而且波瓣宽度越窄,方向性越好,作用距离越远,抗干扰能力越强。

## 4 计算结果与分析

本文对无骨架、反射面中心底部固定、口径  $R=1\text{m}$  的圆抛物面天线在 500gTNT 空中爆炸产生的不同冲击波入射超压作用下进行数值模拟获得天线变形模型,并利用 FEKO 软件对其进行了仿真计算,得到以下不同冲击波超压毁伤天线的远场辐射特性图,并对这些计算结果进行分析,获得冲击波超压变化时反射面的变形毁伤对天线电性能影响的规律。天线馈源是双模圆形喇叭,反射面是对称旋转抛物面,因此它的波瓣图绕轴对称,垂直面和水平面幅度值重合,只取  $70^\circ \sim 110^\circ$  角度范围内的垂直面波瓣图即主平面波瓣图作为研究对象,分析其增益变化规律。

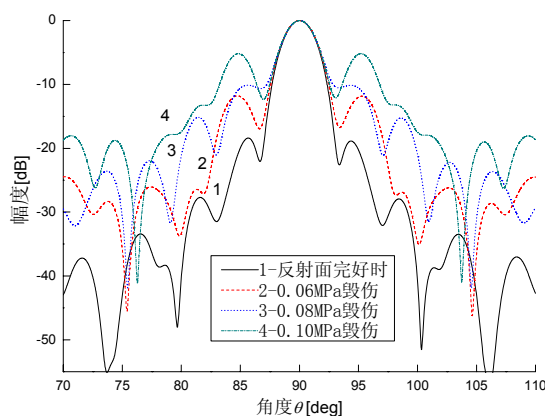


图3 冲击波超压变化时主平面方向图曲线

Fig.3 curves of principle plane pattern with different shock wave value

从图3及表1可知,冲击波超压分别为0.06MPa、0.08MPa、0.10MPa时,天线主平面方向图的主瓣宽度几乎没有变化,而副瓣抬高较大,从而导致天线增益逐渐下降。

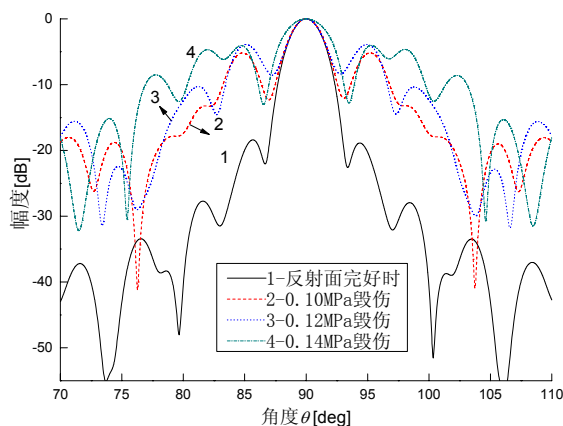


图4 冲击波超压变化时主平面方向图曲线

Fig.4 curves of principle plane pattern with different shock wave value

从图 4 及表 1 可知,冲击波超压分别为 0.06MPa、0.08MPa、0.10MPa 时,天线主平面方向图的主瓣宽度开始逐渐增大,副瓣抬高显著,天线抗干扰能力减弱,增益值下降很快。

表 1 天线主平面方向图参数变化值  
Tab 1 parameters of antenna principle plane pattern

超压 (MPa)	增益值 G/dB	HPBW $\theta /$ ( $^{\circ}$ )	第一旁瓣电平值 D/dB
0	35.3	2.71	-18.39
0.06	31.7	2.80	-11.78
0.08	29.7	2.88	-10.16
0.10	26.0	2.92	-5.18
0.12	23.6	3.01	-4.52
0.14	21.1	3.95	-4.18

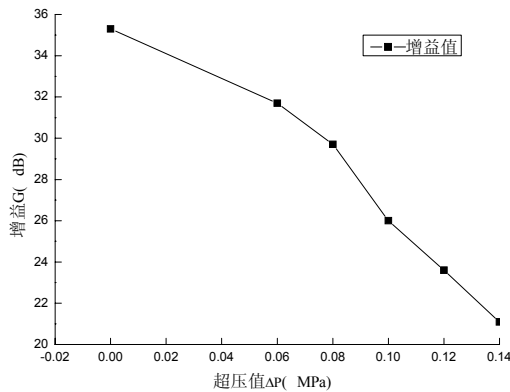


图 5 冲击波超压变化时天线增益变化图

Fig.5 gain of antenna with different shock wave value

从图 5 可知,随着冲击波超压的增大,天线增益值逐渐下降且降幅很大。

5 结 论

根据物理光学法和矩量法,利用 FEKO 软件,对圆抛物面天线进行了建模仿真,对不同冲击波超压下天线变形毁伤工况进行了仿真计算,获得了冲击波超压变化下的天线远场辐射特性图,并对计算结果进行了对比分析可知随着冲击波超压增大,天线增益值逐渐下降,且下降幅度很大。

本文重在提供一种解决由于结构毁伤引起天线的功能毁伤变化的思路和方法,将 LS\_DYNA 结构毁伤模拟和 FEKO 功能毁伤模拟相结合的新研究途径来解决涉及结构力学、爆炸力学、弹药工程、电磁学等众多领域知识的天线毁伤的复杂耦合问题,为将来研究天线毁伤程度的量化和确定天线的毁伤判据提供了一种新的研究途径。

参考文献

[1] 王五兔.反射面变形对天线辐射方向图的影响[J].电子学报,1994,22(12):46~49  
WANG Wutu.The effect of reflector surface distortion on the antenna radiation pattern[J].Acta Electronic Sinica, 1994,22(12):46~49

[2] The-Hong Lee,Roger C.Rudduck.A surface distortion analysis applied to the hoop/column deployable mesh reflector[J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation,1989,37(4):452~458

[3] Smith,W.T., Bastian, R.J.,An approximation of the radiation integral for distorted reflector antennas using

- surface-error decomposition[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, 45(1): 5~10
- [4] Duan Dah-Wei, Samii Y.R, A generalized diffraction synthesis technique for high performance reflector antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1995, 43(1): 27~40
- [5] Yahya Rahmat-Samii. Reflector antenna distortion compensation by array feeds: an experimental verification[J]. Electronic Lett. 1988, 24 (18): 1188~1190
- [6] 董涛, 徐晓文, 肖疆. 赋形反射面天线毁伤效应研究[J]. 现代雷达, Vol.25, No.10, 2003, 10, 54~56  
DONG Tao, XUE Xiaowen, Xiao Jiang. A Study on the Damaged Characteristics of the Shaped Reflector Antenna[J]. Modern Radar, Vol.25, No.10, 2003, 10, 54~56
- [7] 郑立志. FEKO 在天线设计中的应用[J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2004, No.9: 133-135  
ZHENG Lizhi. Application of FEKO in antenna design[J]. CAD/CAM and Manufacture information, 2004, No.9: 133-135
- [8] D. Hyde, User's Guide for Microcomputer Programs CONWEP and FUNPRO, Applications of TM 5-855-1, U.S. Army Engineer Waterways Experimental Station, Vicksburg, 1988
- [9] C.N. Kingery and G. Bulmash, Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst, Report ARBL-TR-02555, U.S. Army BRL, Aberdeen Proving Ground, MD, 1984.
- [10] Hyde, D.W. "User's Guide for Microcomputer Program CONWEP, Applications of TM 5-855-1, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons". SL-88-1, 1988, revised February, 1993
- [11] 隋树元, 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 287  
SUI Shuyuan, WANG SHUshan. Terminal effect theory[M]. Beijing: National Defense Press (in Chinese)
- [12] 赵文杰. 反辐射导弹战斗部毁伤效应研究[D], 北京理工大学, 1999  
ZHAO Wenjie. Study on the vulnerability of radar and the damage effect of antiradiation missile warhead[D], Beijing Institute of Technology. 1999
- [13] Duan D W, Yahya R S. A generalized diffraction synthesis technique for high performance reflector Antenna [J]. IEEE Trans A P, 1995, No.43: 27- 40.

## 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,一直致力和专注于微波、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>