

二次曲面建模在近场目标特性中的应用

吴万芳, 高宠, 周宗海

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要: 针对复杂目标的回波信号计算, 采用一组平面和二次曲面(柱面、锥面和椭球面)来逼近目标表面的元素, 并用一一对应的方法将其对接起来, 完成了对目标模型的仿真。改进了采用面元法(用三角形或四边形单元构造目标的表面)构造的目标形体建立的目标模型面元数多、计算速度低的问题。用二次曲面的方法建立了长空靶机的目标模型, 计算了目标回波信号, 并与实测数据进行了对比, 仿真结果和实测结果取得了较好的一致性, 因此用二次曲面建立复杂目标模型的方法是可行的。

关键词: 二次曲面; 目标近场电磁散射特性; 仿真; 面元

中图分类号: V218; TJ765.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)02-0104-05

Application of Quadric Surface Modeling in Near-field Target Characteristic

WU Wan-fang, GAO Chong, ZHOU Zong-hai

(Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: Target model was simulated through approximation of target surface elements by plan and quadric surface and one by one connection of piecewise models. Computing velocity was improved using target model simulated by this method. Changkong target drone model was simulated and the target echo signal was computed. It was proved that the simulation results agrees well with the measured by comparing numerical calculation with experimental measurements. It was concluded that the modeling method is feasible for complex targets simulation.

Key words: quadric surface; near-field; electromagnetic scattering; simulating; plane element

引信与一般的雷达系统不同, 引信与目标之间的距离和目标最大线尺寸属于同一数量级, 到达目标或从目标返回的电磁波是球面波, 不能近似为平面波; 目标不能象在雷达系统中那样视为点目标, 而是体目标。因此, 对目标近区电磁散射特性的研究比在雷达中对目标电磁散射特性的研究要复杂得

多。当目标表面的曲率半径远大于入射辐射的波长时, 使用目标表面的多个微元的反射信号的叠加原理计算反射信号。由于目标通常空间结构复杂, 研究引信的目标近场散射特性必须要对目标的空间构型进行数学描述。因此为了能够计算反射信号, 可以把目标的外表面描述成几种几何形状, 与目标的

收稿日期: 2012-10-12

作者简介: 吴万芳(1976—), 女, 山东济宁人, 硕士, 工程师, 主要从事近场目标特性研究工作。

形状几乎重合且容易进行数学描述。采用面元法(用三角形或四边形单元构造目标的表面)构造目标形体建立目标的表面模型,虽然可以作为研究近区散射特性的目标模型,但用面元法拟合目标时,存在面元数较多,计算速度低的问题。笔者用二次曲面的方法,建立长空靶机的模型,提高了仿真计算的速度。计算了某型号靶试条件下的目标回波信号,并与实测数据进行了对比,仿真结果和实测结果取得了较好的一致性。

1 二次曲面建模的方法

1.1 构造目标的基本几何元

文中所用的二次曲面建模方法的基本思路是用一组平面和二次曲面(柱面、锥面和椭球面)来逼近目标表面的元素,并用一一对应的方法将他们对接起来,完成对目标几何形状的仿真。曲面的对接是依靠边界条件系统来实现的,这些边界条件划定一定的空间区间,保证用以描述目标各个部分的曲面的点落在这些空间区间内。平面和二次曲面用它们的方程给出,因为这样可以把上述的目标几何模型表示成目标几何形状的分段解析模型。

文中构造的目标几何形状模型由三种基本几何元组成,前两种元是平面元,第三种几何元是二次曲面或部分二次曲面。

第一种平面元是凸多边形(如图1所示),第二种平面元的限定轮廓线包括一条二次曲线(如图2所示)。在目标坐标系的 x_0y_0 平面上, $(x_t^{(1)}, y_t^{(1)})$, $(x_t^{(2)}, y_t^{(2)})$, $(x_t^{(3)}, y_t^{(3)})$, $(x_t^{(m-1)}, y_t^{(m-1)})$, $(x_t^{(m)}, y_t^{(m)})$ 是多边形的顶点, (x_t, y_t) 是多边形平面元上的点。 x_0y_0 是以二次曲线的顶点为坐标原点,以二次曲线的主轴为 x 轴建立的坐标系。 F_c 是二次曲线的焦点。

以闭合的二次曲线为边界的平面元可看作是第二种平面元的特殊情况。

取平面正则方程作为两种平面元的基本说明。

$$n_{x_i}x_t + n_{y_i}y_t + n_{z_i}z_t - a_p = 0 \quad (1)$$

式中: $n_{x_i}, n_{y_i}, n_{z_i}$ 为平面法线的方向余弦。方程(1)的参数由限定边界的三个顶点坐标 $x_t^{(m)}, y_t^{(m)}, z_t^{(m)}$ 决定, $m=1, 2, 3$ 。

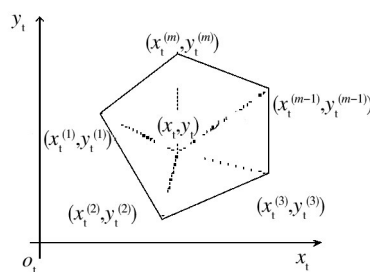


图1 第一种平面元

Fig. 1 Plane elements of the first type

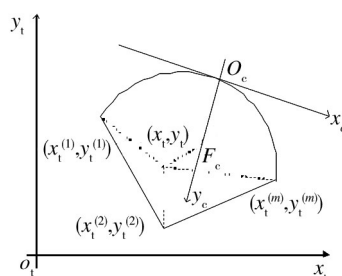


图2 第二种平面元

Fig. 2 Plane elements of the second type

$$n_{x_i} = \frac{B_{p1}}{D_{B_p}}, n_{y_i} = \frac{B_{p2}}{D_{B_p}}, n_{z_i} = \frac{B_{p3}}{D_{B_p}}, a_p = \frac{B_{p4}}{D_{B_p}} \quad (2)$$

$$B_{p1} = \begin{vmatrix} 1 & y_t^{(1)} & z_t^{(1)} \\ 1 & y_t^{(2)} & z_t^{(2)} \\ 1 & y_t^{(3)} & z_t^{(3)} \end{vmatrix}$$

$$B_{p2} = \begin{vmatrix} x_t^{(1)} & 1 & z_t^{(1)} \\ x_t^{(2)} & 1 & z_t^{(2)} \\ x_t^{(3)} & 1 & z_t^{(3)} \end{vmatrix}$$

$$B_{p3} = \begin{vmatrix} x_t^{(1)} & y_t^{(1)} & 1 \\ x_t^{(2)} & y_t^{(2)} & 1 \\ x_t^{(3)} & y_t^{(3)} & 1 \end{vmatrix}$$

$$B_{p4} = \begin{vmatrix} x_t^{(1)} & y_t^{(1)} & z_t^{(1)} \\ x_t^{(2)} & y_t^{(2)} & z_t^{(2)} \\ x_t^{(3)} & y_t^{(3)} & z_t^{(3)} \end{vmatrix}$$

$$D_{B_p} = \sqrt{B_{p1}^2 + B_{p2}^2 + B_{p3}^2}$$

限定多边形的顶点在描述相应的平面元时给出。所用的模型中假定:限定边界内两种平面元的顶点数可以是3到5个,但计算方程的参数时只使用前三个顶点的坐标。如果指定的顶点的序号正好与

逆时针绕过平面元外表面轮廓线一致,则式(1)的方向余弦就决定了目标几何模型表面的外法线。如果平面元以二次闭合曲线为界,则这时为了确定几何平面元在空间的位置和方位,需给出曲线的顶点,并直接给出平面法线的方向余弦。

二次曲线方程由平面和二次曲面方程组求出。

$$\begin{cases} n_x x_t + n_y y_t + n_z z_t + a_p = 0 \\ (a_{11}x_t + a_{12}x_t + a_{13}x_t + a_{14})x_t + \\ (a_{21}x_t + a_{22}x_t + a_{23}x_t + a_{24})y_t + \\ (a_{31}x_t + a_{32}x_t + a_{33}x_t + a_{34})z_t + \\ (a_{41}x_t + a_{42}x_t + a_{43}x_t + a_{44}) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 $a_{ij}(i,j=1,2,3,4)$ 为二次曲面一般方程的参数。

在所使用的几何模型中,为了对二次曲面的描述一致,柱面、锥面和椭球面的正则方程写成曲面主轴坐标系 $o_e x_e y_e z_e$ 中的通用形式:

$$\frac{m_{e1}}{a_{e1}^2} x_e^2 + \frac{m_{e2}}{a_{e2}^2} y_e^2 + \frac{m_{e3}}{a_{e3}^2} z_e^2 = m_{e4} \quad (4)$$

参数值 $m_{e1}, \dots, m_{e4}$ 决定了二次曲面的类型。例如,当 $m_{e1}=m_{e2}=m_{e3}=m_{e4}=1$ 时,式(4)得到的是半轴为 a_{e1}, a_{e2}, a_{e3} 的椭球面;当 $m_{e1}=-1, m_{e2}=m_{e3}=1, m_{e4}=0$ 时,得到一个轴与 $o_e x_e$ 重合、顶点与坐标原点重合的锥面,这时,曲面 $X_e=a_{e1}$ 的锥面截面是半轴等于 a_{e2} 和 a_{e3} 的椭圆。

假设二次曲面主轴坐标系 $o_e x_e y_e z_e$ 是相对目标几何模型大地坐标系 $o_t x_t y_t z_t$ 的当地坐标系。大地坐标系和当地坐标系的关系可以通过将大地坐标系平移至当地坐标系原点(至二次曲面中心)和分别绕 $o_t x_t y_t z_t$ 和 $o_t x_t$ 轴依次旋转欧拉角来确定。 $o_e x_e y_e z_e$ 坐标系坐标轴方向的选择与二次曲面的关联条件有关。

二次曲面的限定条件(相关条件)包括以下几种:部分二次曲面是几何模型元,它以 $x_e o_e y_e$ 平面上指定的四边形在该平面上的投影为边界(如图3所示), $x_e o_e y_e$ 平面上的四边形在很多情况下不能得到所需形状的几何元,因此, z_e 对于近似二次曲面的部分,使用坐标两个方向的边,近似曲面部分的点的坐标应满足条件 $z_{e1} \leq z_e \leq z_{e2}$,所以二次曲面部分可以由四个垂直(相对当地坐标系)平面和两个水平平面限定。

1.2 长空靶机的仿真建模

图4给出了根据长空靶机的几何尺寸建立的目

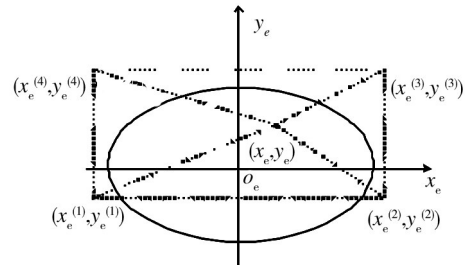


图3 二次曲面元

Fig. 3 Quadric surface elements

标模型。构造该模型时,用到了146个点的坐标,59个第一类平面元,1个第二类平面元,35个二次曲面。

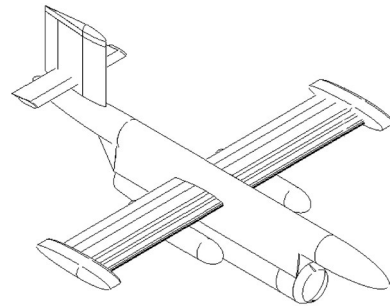


图4 长空靶机模型

Fig. 4 Model of Changkong target drone

2 目标回波信号的数学模型

2.1 目标部分光滑表面散射场的计算

令观测点接收天线所接收的物体光滑表面散射电磁场为 E_2, H_2 ,入射电磁场为平面波,可以得到目标光滑表面分块单元散射场的基本计算公式:

$$\begin{aligned} E_2 &= \frac{ik}{4\pi} E_1 \frac{\exp(ik(R_{01} + R_{02}))}{R_{01}R_{02}} \cdot \\ &\sum_{ij} \frac{F_A(x_i, y_j)}{\cos \xi} \exp(-i\Psi(x_i, y_j)) \cdot \\ &\frac{\sin(\omega_x \Delta x/2)}{\omega_x \Delta x/2} \frac{\sin(\omega_y \Delta y/2)}{\omega_y \Delta y/2} \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $F_A(x_i, y_i)$ 为慢变综合振幅函数; $\Psi(x_i, y_i)$ 为非线性相位函数; $\Delta x, \Delta y$ 为单元小区在 x 和 y 坐标上的尺寸; ω_x, ω_y 为沿坐标 x, y 的空间频率; ξ 为物体表面与 xoy 平面法线之间的夹角; R_{01} 为发射天

线到目标的距离; R_{02} 为目标到的接收天线的距离。

2.2 天线接收到的目标回波功率

从雷达学的距离方程可知,接收天线接收到的信号功率用式(6)表示:

$$P_2 = \frac{P_1 K_1 K_2 D_1 D_2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_{01}^2 R_{02}^2} \quad (6)$$

式中: P_1 为发射信号的功率; K_1, K_2 为发射机和接收机天线的方向系数; D_1, D_2 为发射机和接收天线功率增益; σ 为目标雷达散射截面,此系数与照射条件和观测条件有关。

式(6)是远场雷达目标回波功率计算公式,对于无线电引信这样近距离作用的无线电探测系统,在使用此式计算接收天线输出端回波信号功率时,将目标分解为一系列的小块,每一小块分别计算接收场强 E_2 与输入场强 E_1 之比,同时引入相位函数 $\exp(ikR')$,分别计算每一小块对总的回波功率的贡献。目标上每一小的分块单元(或尖劈上的分段)的有效散射截面系数,可以用接收场强 E_2 与目标输入场强 E_1 之比来表示:

$$\sigma_j = 4\pi R_{02}^2 \frac{|E_2^j|}{|E_1^j|} \quad (7)$$

式中 j 对应于目标表面分块单元的分块编号。

通过本分块单元在坐标空间的位置,确定相对于接收/发射天线的相对角度,从而由接收/发射天线方向图,求得对应本分块单元的方向系数 K_1^j, K_2^j 。

对于目标上的某一小的分块单元得到该分块单元的回波功率表达式:

$$|P_2^j| = \frac{1}{(4\pi)^2} p_1 \cdot k_1^j \cdot k_2^j \cdot D_1 \cdot D_2 \cdot \lambda^2 \left| \frac{E_2^j}{E_1^j} \right|^2 \quad (8)$$

考虑回波信号相位关系,得到总的回波信号功率表达式:

$$P_2 = \left| \sum_{j=1}^N \tilde{P}_2^j \right| = \left| \sum_{j=1}^N \frac{1}{(4\pi)^2} p_1 \cdot k_1^j \cdot k_2^j \cdot D_1 \cdot D_2 \cdot \lambda^2 \cdot \left| \frac{E_2^j}{E_1^j} \right| \cdot e^{jk(R_{01}^j + R_{02}^j)} \right| \quad (9)$$

式中: N 为复杂目标总的分块数。 E_2^j/E_1^j 为比例关系,可使用定位目标散射场的分量公式(8)来进行

计算。在混频器的输出端,电压信号幅值为:

$$U_{\max} = (ZP_2)^{1/2} \quad (10)$$

式中: Z 是输入阻抗。

3 实测结果与仿真计算结果的比较

图5给出了 $\phi 500$ mm标准球在脱靶量10 m、脱靶方位角 90° 、交会距离从10 m开始时的仿真计算结果曲线,横坐标是交会距离,纵坐标是接收电压。图6是相同条件下某引信对 $\phi 500$ mm标准球慢速交会实测多普勒信号数据曲线。图7给出了长空靶机在脱靶量4.8 m、脱靶方位角 90° 、交会距离从10 m开始时的仿真计算结果曲线,横坐标是交会距离,纵坐标是接收电压。图8是相同条件下某引信对长空靶机慢速交会实测多普勒信号数据曲线。计算结果和实测结果的“鼓包”个数和峰值电压都取得了较好的一致性。

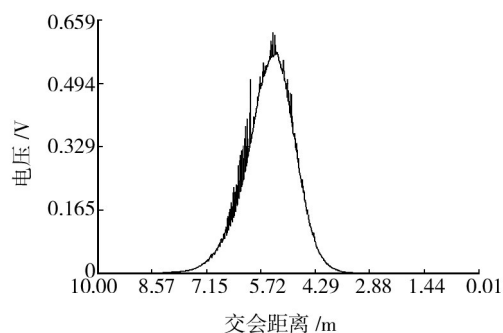


图5 $\phi 500$ mm标准球仿真回波信号

Fig. 5 Simulated echo signal curve of $\phi 500$ mm standard ball

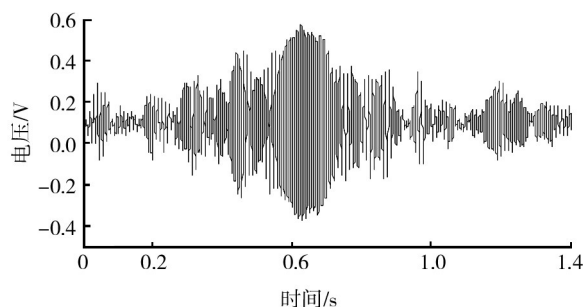


图6 $\phi 500$ mm标准球实测回波信号

Fig. 6 Measured echo signal curve of $\phi 500$ mm standard ball

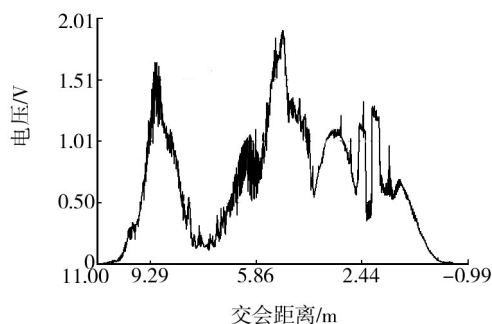


图7 长空靶机仿真回波信号

Fig. 7 Simulated echo signal curve of Changkong target drone

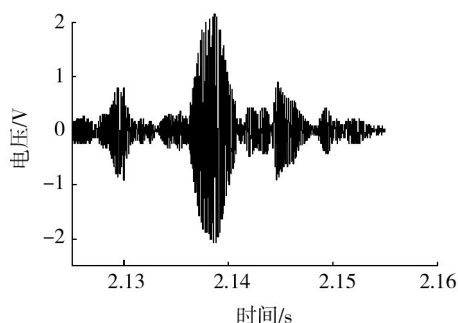


图8 长空靶机实测回波信号

Fig. 8 Measured echo signal curve of Changkong target drone

4 结论

用二次曲面的方法,建立长空靶机的目标模型,解决了用面元法拟合目标时,面元数多、计算效率低的问题。计算了某型号引信靶试条件下 $\phi 500\text{ mm}$ 金属球和长空靶机的回波信号,并与实测数据进行了对比,仿真结果和实测结果取得了较好的一致性。验证了二次曲面建立目标模型,计算目标回波信号的有效性。

参考文献:

- [1] 克拉特 E F. 雷达散射截面——预估、测量和减缩[M]. 阮颖铮,译. 北京:电子工业出版社,1988.
- [2] 金灿民. 复杂目标近场电磁散射特性研究[D]. 西安:西北工业大学,1998.
- [3] 袁正,孙志杰. 空空导弹引战系统设计[M]. 北京:国防工业出版社,2007:265.
- [4] 李应乐,王明军,董群峰. 各向异性介质椭球内电场的研究[J]. 装备环境工程,2010,7(4):1—4.

(上接第98页)

总控PLC直接控制;总控PLC通过485总线与设备级PLC通讯,从而完成试验室所有设备的控制。

机组冷量采用50%,75%,100%三级控制,加热器采用PID控制。当冷量不够时,可以增加机组的冷量或开启下一台机组;当冷量过载时,通过加热器的PID控制来进行平衡,从而确保了试验室室内温度稳定在设定值。系统控制流程如图1所示。

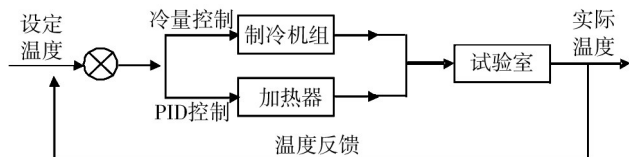


图1 制冷系统控制流程

Fig. 1 Flow of refrigeration system control

5 结语

针对大型低温环境试验室的特点,提出了基于复叠式蒸气压缩制冷技术的复合制冷方式,提高了设备效益和制冷效率,实现了试验室的节能运行;采用基于PLC的PID控制系统,达到对试验室温度精确控制的目的。该大型低温环境试验室制冷系统的设计方法,对同类环境试验室的建设具有一定的借鉴指导意义。

参考文献:

- [1] 王浚,黄本诚,万才大. 环境模拟技术[M]. 北京:国防工业出版社,1996.