

海洋目标的雷达截面积预测

王荣成 赵晓楠

(中国舰船研究设计中心, 湖北武汉 430064)

摘要: 概述了海洋目标的雷达截面积 (RCS) 的预测方法, 讨论了模型测试雷达截面积的方法、满足测试要求的条件关系式以及在波动目标条件下测试距离的关系式。对于复杂的海面船舶目标, 其 RCS 的合成计算将遵循一定的规律。在一定的条件下, 复杂形体的目标平均雷达截面积近似地由局部反射区域平均雷达截面积的算术和来确定。

关键词: 雷达截面积; 测量; 计算

中图分类号: U 674 703 8

文献标识码: A

文章编号: 1673-3185(2006)02-0075-04

Calculation Methods for the Radar Cross Section of Sea Targets

Wang Rong-cheng Zhao Xiao-nan

Abstract In this paper, the calculation methods for the radar cross section (RCS) of sea targets are described. The test method of RCS through a theoretical model is discussed. However, the condition relations that satisfy the test requirements and test distance relations in the case of fluctuating targets are also focused on. For the complex targets like ships, the calculation normally should follow the rules. Under the certain conditions, the average RCS of targets with complex shape are generally subject to the arithmetic sum of their mean RCS by local reflection area.

Key words radar cross section; test; calculation

海洋中有取之不尽的宝藏和财富, 在 21 世纪它已经成为人类关注和开发的焦点。因而, 人们非常关心海洋中目标的各种特性, 尤其是船舶等各种金属物体的目标雷达特性, 以便定位、判别、测量和信息交流。

物体的雷达特性主要是它的雷达截面积, 为了获取目标的这些信息, 有二种途径可获得这些数据。一种是用理论分析计算等方法来预测目标的雷达截面积。另一种方法即为模型和实物测量方法。实物测量结果虽然较准确, 但对于要设计者所做的任何重大修改来说, 给出结果太迟了。而且, 在海洋中的金属物体越是复杂, 这种修改也就越难以实现, 因此, 必须研究和发展雷达截面积的模型预测方法。

1 预测方法

目标因入射的电磁波重新辐射而回到雷达接收机的多少取决于许多因素, 如雷达的工作波长、

目标的几何形状与尺寸、目标的视角以及它对电磁波的散射能力等。通常用目标的雷达截面积来表示目标对入射波的电磁能量的散射能力, 以 σ 代表这一截面积。其理论定义^[1, 2]为:

$$\sigma = 4\pi R^2 \lim_{R \rightarrow \infty} \left| \frac{E_r}{E_t} \right|^2 \quad (1)$$

式中, E 为场强, 下标 r 为回波, t 为发射。

在实际工作中常用下式计算雷达截面积:

$$\sigma = P_2 / P_1 \quad (2)$$

式中, P_1 是在目标处的发射功率密度, P_2 是目标的散射功率。

如果雷达的发射功率是 P_t , 天线的方向系数是 D_t , 目标与雷达的距离是 R , 则在目标处的发射功率密度 $P_1 = (P_t D_t) / (4\pi R^2)$, 所以, 目标的雷达截面积为 $\sigma = 4\pi R^2 P_2 / (P_t D_t)$ 。

用理论方法获得目标的 RCS 是科学家们一直在全心致力追求的目标。经过多年的发展, 已经经历了一个相当漫长的发展历程。计算目标的 RCS 常用的计算方法包括精确解法和高频近似计算两种。

收稿日期: 2005-12-20

作者简介: 王荣成 (1963-), 男, 研究员

1.1 精确解法

1.1.1 经典解法

即利用波动方程 $\nabla^2 E + K^2 E = 0$ 并考察边界条件来精确求解目标的散射场。由于求解方程必须使物体表面与某一个可分离的坐标系相吻合,因而当有严格系数解可以利用时,波动方程才有严格的解。

1.1.2 积分方程法

积分方程法的特点是公式严格,仅限于低频区和谐振区。尽管原则上该方法用于任意频率范围,但实际上高频区它们即受到两个限制。第一,大物体(相对波长而言)问题的矩阵变得很庞大,就是当今的大型高速计算机对其求解也非常困难。第二,在高频区,由于散射主要取决于局部效应而不是全体的总效应,所以,矩阵元素间的相互作用的需明显降低。

对于理想导体,表面上的总的切向分量为零,其电场和磁场的积分形式为^[2]:

$$E^s = \int_S \left(j\omega u J \varphi \times \frac{1}{\epsilon} \rho_s \cdot \varphi \right) ds \quad (3)$$

$$H^s = \int_S \nabla \times \varphi ds \quad (4)$$

1.2 高频近似计算

在高频区物体的每一部分基本上是独立地散射能量,而与其他部分无关。因此,在目标的某一部分感应场只取决于入射点附近,而与其他部分散射的能量无关,这使得高频区复杂目标 RCS 计算相对简单些。对于舰船这样大而复杂的目标,矩量法虽然是一种十分有用的工具,但不适用于计算如此大的目标。在舰船的高频 RCS 近似计算中,常常用到物理光学法,此外还用到物理绕射和几何绕射理论。

物理光学法通过对表面感应场的近似积分而求得散射场^[3],这样就克服了平镜表面和单曲面出现无限大的问题。由于感应场保持有限,散射场也就同样有限。通过高频假设、远场近似、切平面近似三个近似假设为基础,将积分方程简化为定积分问题,它能解决几何光学法所不能解决的平板和曲面目标(如圆柱、圆锥)的 RCS 计算问题。物理光学法的缺陷是没有考虑目标的边缘绕射,当散射方向离镜面反射方向较远时误差较大,而散射方向离镜面反射方向愈远误差愈大。

2 测量方法

2.1 模型测试法

人们常利用雷达方程来实现实物 RCS 测量,在海面上其回波功率 P_2 可用下式表示为:

$$P_2 = \frac{P_1 G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} |F|^4 \sigma \quad (5)$$

式中, G 为雷达天线增益, λ 为雷达工作波长, $|F|^4$ 为海上低空干涉因素, P_2 是雷达的回波功率。因而,可从上式得到目标在一定距离上的 RCS 测量值。但对于设计人员来说,模型(比例)测试是比较喜爱的一种。因为它可在船舶等目标开始建造前很方便地修改各种参数,同时获取相应的结果,以便作出选择。而模型测量的有关参数,可以很方便地从麦克斯韦方程组中推导出。

缩尺模型测试法必须满足的条件不难从麦克斯韦方程和线性关系得到。设实物(可视作天线) F 置于一个 XYZ 坐标系中,则天线的电磁场应满足下列方程:

$$\nabla \times E = -j\omega H \quad (6)$$

$$\nabla \times H = (\delta + j\omega\epsilon)E \quad (7)$$

式中, ϵ 为介质的介电常数, μ 为导磁率, δ 为导电率, ω 为工作角频率。

若其模型 M 置于 $X'Y'Z'$ 坐标系中,假设模型天线与真实天线各参量之间有如下关系:

$$E' = m_E E \quad H' = m_H H \quad X' = m_F X$$

$$\epsilon' = m_\epsilon \epsilon \quad \mu' = m_\mu \mu \quad Y' = m_F Y$$

$$\delta' = m_\delta \delta \quad \omega' = m_\omega \omega \quad Z' = m_F Z,$$

式中, ϵ' 为介质的介电常数, μ' 为导磁率, δ' 为导电率, ω' 为工作角频率, $m_E, m_H, m_\epsilon, m_\mu, m_\delta, m_\omega, m_F$ 分别是相应各参量的(缩比)换算因子。则模型天线应满足的电磁场方程变为:

$$\nabla \times E = -j \frac{m_\omega m_\mu m_H m_F}{m_E} \omega H \quad (8)$$

$$\nabla \times H = \left[\frac{m_\delta m_E m_F}{m_H} \delta + j \frac{m_\omega m_\epsilon m_E m_F}{m_H} \omega \epsilon \right] E \quad (9)$$

如果模型天线与真实天线具有相同的电磁场,则

$$\frac{m_\omega m_\mu m_H m_F}{m_E} = 1$$

$$\frac{m_\delta m_E m_F}{m_H} = 1 \quad (10)$$

$$\frac{m_\omega m_\epsilon m_E m_F}{m_H} = 1$$

假设模型天线和真实天线都置于自由空间,即 $m_\epsilon = 1, m_\mu = 1$ 。我们要求模型天线与真实天

线的电磁场应相同, 即 $E = E', H = H'$, 故有 $m_E = 1, m_H = 1$. 则 $m_{\omega F} = 1, m_{\beta F} = 1$. 这就是使用模型技术所必须满足的条件. 归纳后, 模型天线与真实天线各参量之间应满足以下关系:

线尺寸	$L_M = L_F / m$
工作频率	$f_M = m f_F$
导电率	$\sigma_M = m \sigma_F$
介电常数	$\epsilon_M = \epsilon_F$
导磁率	$\mu_M = \mu_F$

其中, 下标 M 代表模型天线, 下标 F 代表真实天线, m 是缩比因子.

2.2 测试距离

为使测试结果可信, 真实反映实际情况, 应要求信号源发出的探测波以均匀平面波的形式到达测试目标, 但现实中, 真正的均匀平面波的形式是难以实现的, 只能尽可能地去实现均匀平面波.

在一般测量时, 当测试距离 $R \geq 2L^2/\lambda$ 则认为已经处于远区, 可以认为满足要求. 但这一点对于船舶测量时仍然难以满足. 例如, 一艘长度为 100 m 的船舶, 对于波长为 10 cm 的入射探测波, 其测试距离要求大于 200 km, 这显然是难以做到的. 幸好, 根据专家的研究成果^[4,5], 对于波动着的目标的平均雷达截面积, 其测试距离可按下式考虑:

$$R \geq \frac{L}{4} / \sqrt{\frac{2}{K^2 L^2} + \frac{D^2}{2}} \quad (11)$$

式中, D^2 是目标波动的方差, L 为目标的最大长度, $K = 2\pi/\lambda$. 这样, 测试距离将大大缩短.

3 海面环境下目标的 RCS 计算

3.1 复杂目标的合成

由于海洋的起伏不定, 海面上的目标有其特殊的环境背景. 因而, 来自金属目标和海水表面所合成的反射信号具有较大的起伏. 为了能描述这种情况, 使用平均的概念以达到可计算平均雷达截面积的目的.

根据电磁场反射特性, 回波的后向反射场 (E_r) 可以表示为:

$$E_r = \sum_{n=1}^N E_n = \sum_{n=1}^N E_n \exp(j\omega t - jkR_n - j\varphi_n) \quad (12)$$

式中, R_n 为目标表面上第 n 个局部散射源到观测点的距离, φ_n 为反射场的相位, E_n 为目标表面第 n 个局部散射源反射场的电场强度. 因而, 反射场强度为:

$$EE^* = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N E_n E_m^* \cos[k(R_n - R_m) + \varphi_n - \varphi_m] \quad (13)$$

在上式中, 说明舰船的雷达截面积与各个参加叠加的反射场之间的相位有关系. 经过详细推算, 可以说明其反射场具有相干局部散射源平均强度的可加性. 例如对一对局部散射源的情况, 在探测角 2θ 范围内进行平均值计算. 设 I 为每一个局部散射源在探测角 2θ 内的平均强度, l 为两者间的距离, 则有

$$I = \overline{EE^*} = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \sin(kl\theta) / kl\theta \quad (14)$$

根据式 (13) 和式 (14), 通过计算可以看到随着 $kl\theta$ 参数的增大, 其反射能量的平均强度趋于 $E_1^2 + E_2^2$. 当我们取 $2\theta \geq 1/kl$ 时, 可使包括舰艇在内的目标的反射场具有可相加的条件. 对于常规的情况, 其扇区范围要超过几度. 因而, 有

$$I = \sum_{n=1}^N I_n (1 \pm \delta_i), \quad \delta_i \leq 1/kl\theta \quad (15)$$

因此, 可将局部散射源按它们的平均有效反射面积的大小排出顺序, 并可确定它们的降低幅度.

3.2 目标的 RCS 计算

当目标处于海面的条件下, 假定处于光滑的海面上时, 则海面上目标返回雷达站的电磁能量存在四种途径:

- 1) 探测天线—海面目标—至探测天线;
- 2) 探测天线—海面目标—海面—至探测天线;
- 3) 探测天线—海面—海面目标—至探测天线;
- 4) 探测天线—海面—海面目标—海面——至探测天线.

当以低入射角入射时, 对于点反射体的雷达截面积 σ 可简化表示为:

$$\sigma = 16\sigma_0 \sin^4(2\pi h \sin\theta/\lambda) \quad (16)$$

式中, h 为目标高度, θ 为入射角, σ_0 为在自由空间的 RCS.

当海情复杂, 海面变得显著起伏时, 则镜面反射的分量消失, 散射的漫射分量成为主要的分量.

3.3 地球曲率的影响

在自由空间条件下, 例如对远去的飞机, 在对目标的观察角为常数时, 它的雷达截面积也是一个常数, 其接收到的功率随距离的四次方减小. 但由于地球是一个巨大的球体, 因此, 海面上目标的探测必须考虑地球曲率的影响.

雷达的射线是一直线, 对于距离较远的目标, 由于地球的弯曲是无法发现的, 除非降低雷达的

频率,使雷达波能够沿地球表面传播,或依靠电离层的反射来传播,但这是一些例外的情况。

设 R_0 为地球的半径 ($R_0 = 6\,378\text{ km}$), A 是雷达天线, h_a 是离地面的高度; T 是目标, h_t 是离地面的高度,射线 AT 和地球相切于 D 点。显然,当 h_a 和 h_t 给定的情况下, ADT 就是雷达的最大作用距离。参照简单的几何关系^[6]可以求出这一距离。因

$$AD = \sqrt{(R_0 + h_a)^2 - R_0^2} = \sqrt{2h_a R_0 + h_a^2} \quad (17)$$

由于 $h_a^2 \ll 2R_0 h_a$, 所以上式近似为 $AD \approx \sqrt{2h_a R_0}$ 。

用同样的方法可以得到 $DT \approx \sqrt{2h_t R_0}$, 所以在考虑地球弯曲的情况下,雷达的作用距离最大只能达到

$$\begin{aligned} R_{\max} &= AD + DT \approx \sqrt{2h_a R_0} + \sqrt{2h_t R_0} \\ &= \sqrt{2R_0} (\sqrt{h_a} + \sqrt{h_t}) \end{aligned} \quad (18)$$

从上式可知,在考虑地球弯曲的情况下,雷达的作用距离由天线和目标的高度决定。天线架得越高,发现目标的距离越远。同样,目标离地面越高,越容易被发现。

4 结束语

根据上述分析,船舶的 RCS 可以由缩比模型

(上接第 69 页)数据缺乏的情况下,则根据实际情况参考国军标及相关规范制定详细的分级说明,并通过专家审核。基于风险等级的维护是针对系统的各种故障按照风险等级所提出的维护建议,具有很强的针对性,实际应用中应根据不同的故障建立各自的维护标准。文中为了介绍风险评估方法的方便,简单的列出了风险指标的分级定义和系统维护建议。

语言值集合、模糊等级定义是否细致对风险评估的结果有一定的影响,因此,在实际应用中,语言值集合、模糊等级及维护标准应该细致划分、合理制定,以保证评估结果的准确性。

5 结论

模糊逻辑的风险评估体系在援潜救生系统的安全性评估中具有很大的应用潜力。不论是在作业方案的决策中,还是在初始设计阶段,模糊逻辑体系都能很好解决统计数据缺乏的难题,将可用的统计数据 and 专家经验结合起来,对援潜救生系统作出合理的安全性评估。

参考文献

[1] JALAL Z. Probabilistic risk assessment applications in the nu-

clear-power industry [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1998, 47: 361-364

[2] 张圣坤,白勇,唐文勇.船舶与海洋工程风险评估[M].北京:国防工业出版社,2003.

[3] HOW S S, TOM R, JN W. A fuzzy logic-based approach to qualitative safety modeling for marine systems [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2001, 73: 19-34

[4] TAPID F, PETR IM. Fuzzy logic-based forecasting model [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2001, 14: 189-201

[5] SESHAMAN IN, SOHRAB A. A fuzzy-based approach for generation system reliability evaluation [J]. Electric Power Systems Research, 2000, 53: 133-138

[6] 杨纶标,高英仪.模糊数学原理及应用[M].广州:华南理工大学出版社,2003

[7] GB 768.故障模式、影响及危害性分析程序,故障树分析实施指南[S],1994

[8] DONG Y, YU D. Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2005, (18): 83-88

[9] 许树柏.实用决策方法——层次分析法原理[M].天津:天津大学出版社,1988.

[10] American Bureau of Shipping. Guidance Notes on Reliability-Centered Maintenance [S], 2004

[11] American Bureau of Shipping. Rules for Building and Classing Underwater Vehicles, Systems and Hyperbaric Facilities [S], 2002

参考文献

[1] 朱英富,张国良.舰船隐身技术[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2003

[2] 王大珩.现代仪器仪表技术与设计[M].北京:科学出版社,2002

[3] 邵开文,马运义.舰船技术与设计概论[M].北京:国防工业出版社,2005

[4] 陈开来, E·A·什塔盖尔.隐身技术的物理学基础[M].北京:兵器工业出版社,2002

[5] 王荣成.大型水面舰船的雷达截面积测试[J].舰船电子工程,2002,2:53-56.

[6] 蔡希尧.雷达系统概论[M].北京:科学出版社,1983.