

文章编号 1671-7953(2006)05-0102-04

隐身桅杆综合性能分析<sup>\*</sup>

杨德庆 常少游 金咸定

上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院 上海 200030

**摘要** 介绍进行雷达隐身性能评估的常用数值方法,讨论外形隐身数值分析与整体结构动力学特性数值分析在模型构造的关系,以某型舰桅杆为例,研究电磁散射分析模型与结构有限元分析模型的关系,给出与实验结果吻合的计算结果。

**关键词** 舰艇 桅杆 隐身技术 雷达散射截面

**中图分类号** U663.6 U674.71 **文献标识码** A

## The comprehensive performance analysis of stealthy mast

YANG De-qing CHANG Shao-you JIN Xian-ding

School of Naval Architecture &amp; Ocean and Civil Engineering Shanghai Jiao Tong University Shanghai 200030

**Abstract** The conventional numerical methods used to analyze the radar cross section (RCS) for naval vessels are introduced, and the relationship between shape design technology and structural dynamic characteristics are discussed. Take the design of X-type mast as an example, the RCS model and structural dynamic finite element model are constructed by sequential procedure that imply a belong-to set. The numerical results coincide with the experiment data perfectly.

**Key words** naval vessel mast stealth technique radar cross section

现代隐身舰艇设计追求整舰外形光顺流畅,甲板面简洁,采用圆滑的桅杆或烟囱。对于不宜改变形状的地方,通常涂敷雷达吸波材料或加装隐身外罩。

桅杆位于舰艇上层建筑的最高处,由于地球曲率的影响,往往成为敌方雷达最先探测到的部位。另外,许多电子导航与探测设备也安装于桅杆上,作为综合安装平台,必须保证桅杆具有良好的强度和刚度,具有很好的振动和抗冲击性能<sup>[1-5]</sup>。

我国隐身舰艇设计起步较晚,和国外相比有很大差距,近年建造的采用雷达隐身设计的某型护卫舰,在桅杆设计上吸取了国外雷达隐身的一些成熟技术。但总体上由于该技术属于新兴交叉领域,国内船舶设计师掌握并主动采用这一技术目前还有很大难度。

## 1 桅杆 RCS 分析方法与模型

## 1.1 雷达散射截面分析方法概述

原则上所有求解电磁散射的理论和方法都可用于雷达散射截面的分析和计算。这些方法主要包括严格的经典解法,基于积分方程的矩量法,时域有限差分法和各种高频近似方法,如物理光学方法,几何绕射方法以及等效电磁流法等<sup>[6-8]</sup>。

## 1.1.1 经典解法

从电磁场波动方程出发,由散射场的边界条件求得场的严格级数解。在实际应用中,只有当散射体的几何形状与某已分离的坐标面相吻合因而有严格级数解可利用时,波动方程才能按这种传统方法求解。所以这种方法只能适用简单外形的目标。

## 1.1.2 积分方程法

实际上是一种数值解法,利用矩量法将由斯托拉顿-朱兰成积分方程表示的麦克斯韦方程转化为矩阵方程,通过矩阵求逆得出物体表面的感应电磁流,从而计算出散射场。理论上可求解任意几何形状的电磁散射问题,但由于目前计算机处理速度和存储量的限制,这种方法仅用于低频

收稿日期 2006-02-28

修回日期 2006-05-14

作者简介 杨德庆(1968-),男,博士,副教授。

\* 国家自然科学基金资助项目(编号:10202014)

区和谐振区的目标,对于电大尺寸问题求解代价太高。

### 1.1.3 时域有限差分法

也是一种数值解法,通过对电磁场  $E$  和  $H$  分量在空间和时间上采取交替抽样的方式,将含时间变量的麦克斯韦旋度方程转化为一组差分方程,并在时间轴上逐步推进地求解空间电磁场。可以处理复杂形状目标和非均匀介质物体的电磁散射和辐射问题,相比高频近似法有计算入射频率带宽和更好的精度的优点。该方法在满足计算精度的前提下,对于高频区RCS分析,需要离散的网格必须足够小,目前同样受到计算机处理速度和存储量的限制。

### 1.1.4 高频近似法

与低频区及谐振区不同,在高频区散射变成了局部效应,各散射单元间的互相作用明显降低。物体的每一部分基本上是独立的散射能量,其上的感应场仅取决于入射波而与其它部分的散射能量无关。常见的方法包括几何光学法、物理光学法、一致几何绕射和等效电磁流法等。

决定雷达散射截面分析方法的因素包括两个,一是针对敌方探测雷达的频段,二是舰艇外形特征尺寸或装备构件特征尺寸。由于军用舰艇及其装备构件尺寸较大,军事上对舰艇进行探测的雷达波又集中在  $X$  和  $K_u$  波段( $9 \sim 12$  GHz),所以属于电大尺寸(几何尺寸较大的导体)和高频区分析问题,适于采用各种高频近似方法进行求解。对于桅杆的RCS分析,也只能选择高频方法。

## 1.2 桅杆雷达散射截面分析模型与计算结果

采用物理光学法分析桅杆雷达散射截面,其基本原理如下:对于给定的场  $E^i$  和  $H^i$ ,入射到导体表面  $S$  上的感应表面电流  $J_s$  可由电场积分方程或磁场积分方程来确定<sup>[9]</sup>。目标表面  $S$  上的电磁流矢量为

$$\begin{aligned} J_s &= \hat{n} \cdot (H^i + H^r) \\ M_s &= (E^i + E^r) \cdot \hat{n} \end{aligned} \quad (1)$$

则远区( $r \rightarrow \infty$ )散射场为

$$\begin{aligned} E_s &= \frac{jk}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \int_S \hat{s} \cdot (M_s + \eta_0 \hat{s} \cdot J_s) \cdot \\ &\quad \exp[jkr' \cdot (\hat{s} - \hat{i})] ds' \\ H_s &= -\frac{jk}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \int_S \hat{s} \cdot (J_s - \frac{1}{\eta_0} \hat{s} \cdot M_s) \cdot \\ &\quad \exp[jkr' \cdot (\hat{s} - \hat{i})] ds' \end{aligned} \quad (2)$$

式中矢量含义见文献[8]。再根据RCS的定义可以求出多个独立散射子合成的雷达散射截面。

关于雷达对水面舰艇的最大威胁,在竖直方向上局限在很小的仰角范围内,一般不超过  $4^\circ$  ( $86^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ),而在水平方向上每个角度的威胁都是等可能的,这些构成了舰艇雷达威胁角域。船体外壁和海面构成的两面角,以及上层建筑、桅杆侧壁与甲板构成的两面角是舰艇RCS的主要贡献。

军事上,雷达来波方向为  $0 \leq \theta \leq 90^\circ, 0 \leq \varphi \leq 360^\circ$ 。实际计算中如果船左右基本对称,只需计算  $0 \leq \varphi \leq 180^\circ$  范围内雷达散射截面,在竖直方向计算  $86^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  所确定的舰艇受威胁最大方向域。雷达波入射和散射方向见图1、2。

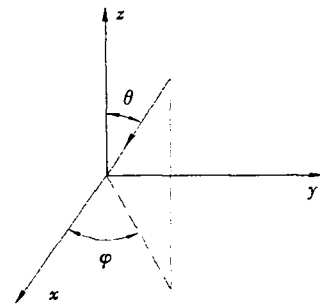


图1 雷达波入射方向示意图

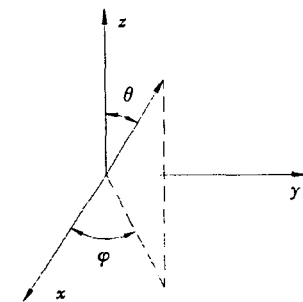


图2 雷达波散射方向示意图

本研究中某型桅杆主体高度为15.3 m,底部剖面尺寸为5.5 m×4.68 m。根据物理光学法建立的桅杆电磁场RCS分析模型见图3,设平面入射波波长为15 GHz,在入射角  $\theta = 89^\circ$  情况下计算出TM和TE极化时桅杆单站RCS曲线见图4、5。可以发现,该桅杆水平极化TM和垂直极化TE的RCS曲线非常接近。利用该模型在某类型入射波频率及入射角下的雷达散射截面的计算与实验进行对比,结果非常吻合。出于保密的考虑,这里没有给出相应的实际雷达波入射频率下实验和计算曲线,但雷达散射截面分析程序经验证是可靠的<sup>[9]</sup>。

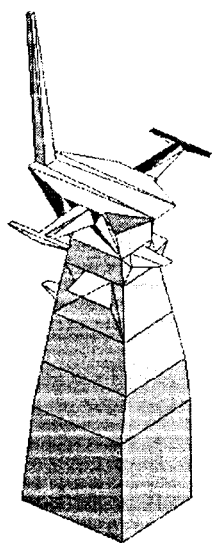


图 3 桅杆物理光学法 RCS 分析模型

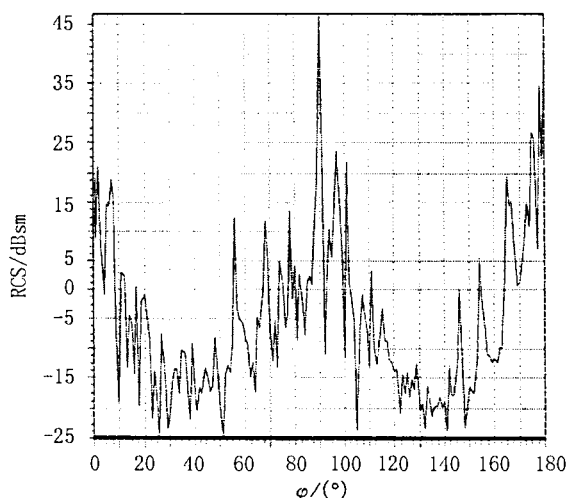


图 4 TM 极化下某型桅杆单站 RCS 曲线

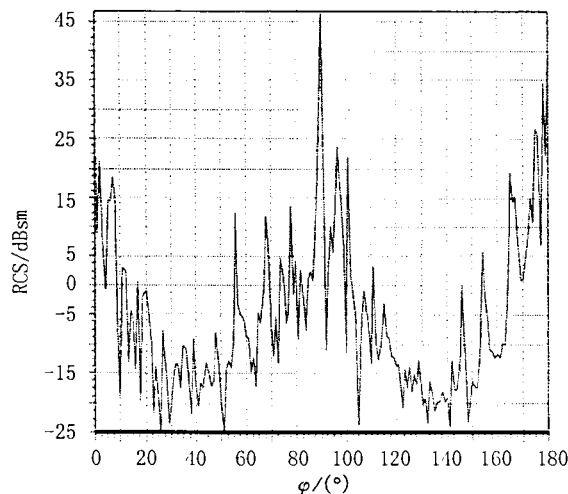


图 5 TE 极化下某型桅杆单站 RCS 曲线

## 2 隐身桅杆动力学分析

鉴于桅杆是细长结构,为使桅杆具有良好的动力学特性以及足够的强度,避免与船体自振频率、搭载电子设备的固有频率以及主要激振力频率耦合,建立了相应的有限元分析模型,检验动力学设计的效果。桅杆的三维有限元模型见图 6。

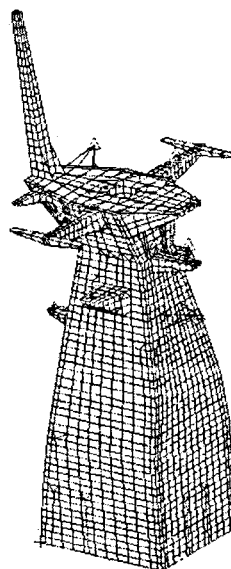


图 6 桅杆有限元分析模型

模型中使用了四边形和三角形板单元以及梁单元,为模拟搭载设备质量使用了质量点单元。为了模拟桅杆与甲板结合处的弹性支承这一边界条件,避免模态计算产生误差,桅杆的底部用弹性钢板基础进行连接。采用 MSC/NASTRAN 软件对桅杆进行了模态分析,模态计算结果见表 1。

表 1 桅杆固有频率与振型计算结果

固有频率/Hz	振型特征
10.170	桅杆 X 向一阶弯曲振动
10.290	桅杆 Y 向一阶弯曲振动
13.310	桅杆 X 向二阶弯曲振动
13.890	桅杆 Y 向二阶弯曲振动
21.124	桅杆一阶扭转振动

## 3 电磁散射分析模型与结构动力学分析模型的关系

### 3.1 桅杆雷达隐身与结构静动力学一体化设计

常规的桁架结构桅杆由于自身的特点不能满足隐身的要求,因此在当前舰艇设计中开始采用筒型或棱柱型桅杆,这大大提高了全船的隐身性

能。桅杆结构型式的改变不仅使外形隐身性能改变,其动静力学性能也发生了很大变化。筒型或棱柱型桅杆在自身及桅上设备重力、风载荷、舰艇摇摆时所引起的惯性力等作用下,可能产生抖动和局部共振,影响桅上设备正常工作,造成结构疲劳破坏,产生大的结构变形,降低桅杆隐身性能。因此进行桅杆雷达隐身性能与桅杆静动力学特性一体化设计,是今后设计发展趋势,桅杆结构强度、固有频率和动力响应特性必须在桅杆雷达隐身设计过程中加以考虑,外形隐身技术与整体结构静动力学特性设计是同等重要的,不应该在外形雷达隐身设计完成后才考虑桅杆结构强度和动力学性能,两者的设计应交叉进行,反复协调设计,直至共同达到最佳效果。

雷达隐身设计考虑的是结构外部形状对入射波反射最小化,而结构静动力学设计考虑的是寻找避免结构过大的变形与破坏,避免产生有害振动的传力结构构型。雷达隐身设计关键在桅杆外部形状,其电磁散射分析模型中的基本元素是点、线和面,是一种几何模型;结构静动力学设计关键在给定形状下桅杆内部承力构件的拓扑连接关系,有限元模型中的基本元素是节点和单元,可以通过几何模型中的点线面等元素生成。基于上述分析,可认为两种模型之间存在交叉或隶属关系的。实际研究中发现,电磁散射分析模型与结构动力学分析模型存在集合关系,电磁散射分析模型是结构动力学分析模型建模过程中的一个子模型,结构动力学分析模型建模过程中可以方便的建立出电磁散射分析模型。这将大大减少建模和计算的工作量,提高设计效率。

### 3.2 电磁散射分析模型与结构静动力学模型协同建模方法

电磁散射分析模型关注桅杆外部几何形状特征,是几何模型,现有的结构有限元分析软件前处理程序一般都可以实现几何模型的建模,因此,电磁散射分析模型的建立变得相对简单。可以在建立结构动力学有限元分析模型过程中,首先建立桅杆结构的几何模型,备份一个复件,在这个几何模型复件中删除桅杆内部其它几何元素,只保留桅杆外部几何形状元素,生成并输出几何模型数

据文件,加入相应的电磁边界条件,导入电磁散射分析程序,就可以进行隐身性能分析。其次,结构动力学有限元分析模型可以在上面建立的几何模型基础上,进行网格划分,生成节点和相应类型单元,加入力学边界条件,即可提交进行动静力学性能分析。

如果桅杆雷达隐身设计与桅杆结构静动力学设计是协同进行的,则必须建立桅杆外部几何形状变化与桅杆结构变化的映射关系,修改外形也应方便地修改单元的特性参数,这有待后续研究。

## 4 结束语

本文研究了桅杆雷达隐身性能与桅杆静动力学特性一体化设计分析方法,探讨了电磁散射分析模型与结构动力学有限元分析模型间存在的交叉关系,以及高效率建模方法。计算结果与实验结果较为吻合,说明了该方法是可行的。在未来隐身舰艇设计中,更好地采用优化方法,同时将舰艇外形隐身和结构动力学性能协同设计将成为研究的主题。

### 参考文献

- [1] Ola Alfredsson. The "Visby" Class Corvette-The Future is Now[J]. Naval Forces, March 2001:44.
- [2] 林忆宁. 21 世纪水面战舰设计的新攻略——隐身性和战斗力兼优[J]. 船舶工程, 2004, 26(5):1-7.
- [3] 声望之舟. 第四艘“拉斐特”——新加坡“威望”级隐身护卫舰[J]. 舰载武器, 2004(5):67-68.
- [4] 姚熊亮, 康 庄, 张洪鱼. 五边形筒型桅杆模拟风载试验研究[J]. 水动力学研究与进展, 2004, 19(5):648-654.
- [5] 许维军, 康 庄, 姚熊亮. 棱柱型隐身桅杆结构强度试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(2):131-135.
- [6] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1998:42-63.
- [7] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2002:1-20.
- [8] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京:电子工业出版社, 2005:12-35.
- [9] 孙宝国. 隐身桅杆的外形与结构设计研究[D]. 上海:上海交通大学, 2004:3-45.