

基于复合仿真技术的武器装备工业造型设计方法

陈登凯, 乔一丹, 刘佳璇, 高馨薇, 刘子琦
(西北工业大学, 西安 710072)

摘要: **目的** 将仿真技术作为武器装备工业造型设计中的重要手段, 使国防武器装备在满足隐身性能和结构强度的要求下, 提升装备工业造型的视觉气质。**方法** 首先依据隐身理论提出武器装备造型的隐身设计策略, 然后利用隐身仿真技术与有限元仿真技术对武器装备工业造型方案进行隐身性分析、静力学分析、动力学分析以选出最优设计方案, 并找到方案中的结构薄弱部位, 最后通过结构优化方法对其薄弱部位进行造型优化设计。**结论** 以舰载雷达天线座为例验证了基于隐身分析与有限元分析的工业造型设计方法可应用在武器装备领域。

关键词: 武器装备; 仿真技术; 隐身性; 有限元分析; 造型设计

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)20-0049-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.20.003

Industrial Modeling Design Method of Weaponry Based on Composite Simulation Technology

CHEN Deng-kai, QIAO Yi-dan, LIU Jia-xuan, GAO Xin-wei, LIU Zi-qi
(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

ABSTRACT: This paper aims to improve the visual impression of weaponry industrial modeling by using simulation technology as an important means, without reducing the performance and structural strength. First, the stealth design strategy of weaponry modeling is proposed based on the stealth theory. Then, the stealth analysis, static analysis and dynamic analysis of weaponry industrial modeling scheme are carried out by using stealth simulation technology and finite element simulation technology, so as to select the optimal design scheme and find the weak parts of the structure. Finally, the weak parts are optimized based on the structural optimization method. The Industrial modeling design method based on stealth analysis and finite element analysis proves applicable to the field of weaponry design by taking the shipborne radar antenna pedestal as an example.

KEY WORDS: weaponry; simulation technology; stealthy performance; finite element analysis; modeling design

武器装备建设逐渐成为我国国防和军队建设优先发展的重要战略方向^[1], 在信息化、智能化战争背景下保证军用武器装备功能、性能及质量可靠显得尤为重要。工业设计作为科学与美学的交叉学科, 通过创造和改善产品的外观、布局、可用性等因素引导产品开发全过程, 得出合理的整体视觉方案, 此方法已经被越来越多应用于新型武器装备设计过程中^[2]。在满足武器装备作战要求与性能指标的前提下, 工业设

计对武器装备的外形特征、人机交互等方面进行重新定义与设计, 提升了武器装备的视觉威严感和交互宜人性。工业设计介入武器装备设计, 是现在和未来武器装备研发的发展趋势, 已被世界各国尤其是欧美国家大量广泛运用。

刘永才院士在《战术导弹技术》期刊上指出, 在技术发展和军事需求的新形势驱动下, 武器装备的研制逐渐向隐身化、数字化、无人化、精确化等方面发

收稿日期: 2021-07-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB1405702); 中央高校基本科研业务费资助项目(31020190504007)

作者简介: 陈登凯(1975—), 男, 陕西人, 博士, 西北工业大学副教授, 主要研究方向为工业设计、人机工程学、技术美学、设计心理学。

展,并强调了引入数字孪生中的工程仿真技术对武器装备设计的必要性^[1]。在武器装备工业造型设计过程中引入工程仿真技术不但可以实现物理本体和仿真模型之间不断循环迭代和交互反馈,还可以及时发现设计缺陷,实现生产过程监控与优化^[3]。随着隐身分析、有限元分析、拓扑优化等高新技术的不断应用与发展,仿真技术已成为武器装备设计的主要方法之一^[4-5],而将仿真技术应用在武器装备工业造型设计上的方法研究目前还处于起步阶段,如何将仿真分析结果引入工业造型设计流程是此方法的关键与难点。

通过对国防武器装备工业造型技术要求研究可知,隐身性能和结构强度是影响造型设计的关键因素,也是武器装备造型仿真的重点。其中,有限元仿真技术是典型的结构强度计算方法,因此本文将基于隐身分析与有限元分析的复合仿真技术对武器装备工业造型的设计方法进行研究。

隐身分析方法的发展和已应用成为各国军事技术研究的重要方向。穆阳^[6]等人在无人目标机设计领域,引入隐身优化设计方法对雷达吸波材料进行实验对比和试飞探测;于伟强^[7]、师俊朋^[8]、张楠^[9]等人将隐身优化设计方法运用到雷达性能分析评估方面;宋洪震^[10]等人通过设计模型并进行后向散射截面(Radar Cross Section,简称RCS)仿真来评估舰船防护罩的隐身性能。然而大量的研究仅围绕对模型的隐身性能评估,较少对后续造型设计提供具体的设计决策或策略。

有限元分析方法现已应用在多个领域的造型设计中,闫胜咎^[11]、贾文东^[12]等人在汽车造型设计领域引入有限元分析方法,对轮毂造型设计方案进行结构和强度的校核设计;ZHAI H F^[13]、张磊^[14]等人将有限元分析方法用到自行车鞍座和齿轮箱的工业造型设计中;余文韬等人^[15]对载人潜水器的观察窗进行有限元动力学分析,考虑时间效力的影响,提升了有限元设计计算的准确性;尚坤^[16]、魏浩^[17]等人将有限元分析方法运用到航天服造型设计建模、舰炮武器等国防武器装备的结构设计中,并验证了此方法的有效性,但并未与造型设计实践结合。

综上所述,隐身分析与有限元分析仿真技术在国内外武器装备设计领域已有广泛应用,可见仿真技术在国防武器装备设计过程中的必要性与可行性。然而以往针对武器装备的造型设计研究仅是基于单个仿真技术对方案进行逐一评估,并且未对工业造型提出具体的设计方向。因此,为了得出隐身性能佳、结构强度高的工业造型方案,本文提出了一种复合仿真技术支持下的武器装备工业造型设计方法,依据隐身理论提出武器装备工业造型的隐身设计策略,基于隐身分析和有限元分析仿真技术对武器装备工业造型的隐身性和结构稳定性进行评估,并为工业造型优化提出具体的设计决策。

1 武器装备工业造型设计相关理论与方法

1.1 隐身理论与方法

武器装备的隐身技术是控制武器装备的某些特征信号延缓或减弱其被发现、被识别、被跟踪、被打击的低可探测性技术的统称^[18]。随着当代电子探测设备在精度和距离上的不断突破,目标装备被探测甚至命中的概率大幅度提高。因此,基于隐身技术降低武器装备的特征信号以减小被探测概率,提升作战生存能力,是新型武器装备研制的重要发展趋势^[19]。武器装备的隐身性能对于战场生存状态至关重要,已经成为国防武器装备设计的主要技术指标之一^[20]。

1.1.1 隐身性能研究方法

提升武器装备隐身性能的技术包括外形隐身技术、吸波技术和阻抗加载技术等^[21]。其中,外形隐身技术通过优化目标物造型特征,将目标强散射中心转化为弱散射中心或将高RCS区域移至威胁相对较小的空间域中去,以减小威胁方向范围内的散射截面,此技术可以达到70%~80%的隐身效果^[22]。此外,外形隐身技术具有改动性小、适应性广、投入性低等优点^[23]。因此,外形隐身技术是提高武器装备隐身性能的主要手段。

1.1.2 后向散射截面及计算方法

后向散射截面^[24]是度量目标物在电子探测设备发出的电磁波散射下所产生回波强度的一种物理量,简称RCS。RCS是目标物的一个假想面积,用一个各向均匀的等效反射器的投影面积来表示,该等效反射器与被定义的目标物在接收方向单位立体角内具有相同的回波功率,见图1。RCS与目标物的造型特征、尺寸大小、机械结构、入射波的频率特性有关。RCS值越大,目标物的散射能力越强,其产生的回波功率越大,越容易被探测到。因此,RCS值常用于衡量无人机、舰艇、坦克等电子探测对象反射电磁波的能力。形式上,RCS的定义如下:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{S_s}{S_i} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|H_s|^2}{|H_i|^2} \quad (1)$$

式(1)中, S_s 和 S_i 分别表征雷达接收机处散射波和目标处入射波的能量密度, E_s 和 E_i 分别表征雷达接收机处散射电场和目标处的入射电场, H_s 和 H_i 分别表征雷达接收机处散射磁场和目标处的入射磁场。

RCS表征一种极限,是距离R值趋于无穷大时得出的。然而因为假定入射波是平面波 S_i , E_i 和 H_i ,均为常量, S_s 在远场条件下正比于 $\frac{1}{R^2}$, E_s , H_s 在远场条件下正比于 $\frac{1}{R}$,因此在实际计算过程中,只需取R使雷达接收机位于目标散射的远区即可。显然,

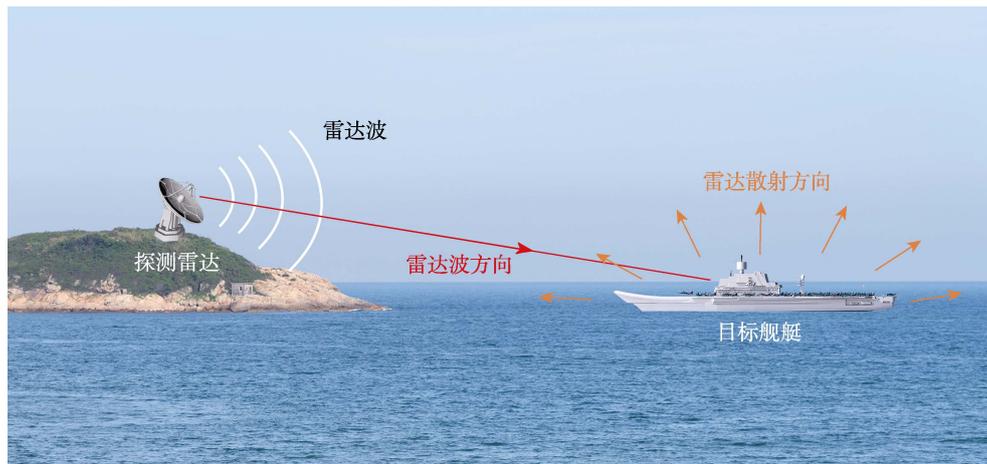


图 1 目标物对雷达的散射示意

Fig.1 Schematic of the scattering of the target to the radar

RCS 的量纲为长度的平方,常用单位是“ m^2 ”和“ $\text{dB}(\text{m}^2)$ ”。

1.1.3 武器装备工业造型的隐身设计策略

由以上分析可知,目标物的 RCS 直接影响被探测发现的概率。RCS 减小或隐身的原理即入射波应被吸收或偏离跟踪电子探测器^[25]。而大量实践证明,要降低物体的后向散射面积,应用外形的特殊造型技术是实现隐身的主要手段。通过武器装备的造型设计达到隐身效果的策略有以下几点:(1)尽量减小外形尺寸,采用全封闭式造型,最大限度减小反射面积;(2)采用多棱面外形,避免角反射器机构(如垂直平面和直角交叉平面),多棱面外形以多个棱面为设计要素对目标物进行造型设计,使其外侧向的散射峰值聚集在几个有限的少数棱角上,以降低其他宽方位角内的 RCS;(3)采用融合外形,即以融合连接曲面为设计要素对目标物进行造型设计,使其外侧向的镜面散射变为弧面漫反射,大幅度降低装备主体的 RCS;(4)消除镜面反射,避免大平面、大凸状弯曲面;(5)相联双面与不相联双面之间夹角都不能为 90° ;(6)减少目标外表面悬挂物,必要的固定件可用陶瓷、橡胶覆盖,提高表面的光洁度。

1.2 工业造型的结构优化理论

因国防武器装备应用场景的特殊性^[1],其工业造型优化设计必须以结构稳定性为核心,深度探究造型美观性与结构稳定性的关系。有限元分析^[26]是典型的结构强度计算与数值分析方法,可作为结构优化的前提,也是对优化结果评估的重要判别依据。

1.2.1 有限元分析

有限元分析(Finite Element Analysis,简称 FEA)利用数学近似的方法对真实物理系统进行模拟仿真,是一个实用高效的数值分析方法。有限元仿真技术具有提高结构工程强度、缩短产品设计周期、预检结构稳定性等优势^[27],因此被广泛应用在航天、航空、航

海等国防武器装备的设计过程中。

有限元仿真技术的应用主要包括静力分析、动力学分析、耦合分析等,在武器装备造型优化设计中主要应用的是静力学分析与动力学分析。目前常用的有限元分析软件有 MSC、ANASYS、Hyperworks 等。在造型优化设计领域,进行有限元仿真分析的过程分为以下几个步骤:一是建立有限元分析模型,通过有限元分析软件直接建模或者通过软件接口接入 CAD 工程模型;二是静力分析,对整个系统进行有限元仿真,分析传力路径、位移、应力等数据是否在选定材料的载荷范围内,判断结构的静强度是否达标;三是动力学分析,对有限元模型进行模态、扫频等分析,找出模型的薄弱结构。

将有限元分析方法运用在国防武器装备工业造型设计中,可以更高效快速地对初样机方案的结构强度和稳定性进行仿真评估,缩短对多个初样机设计方案评估决策的时间,同时有限元分析结果也是工业造型优化的基础。

1.2.2 造型设计的结构优化方法

结构优化方法包括尺寸优化、形状优化和拓扑优化 3 种^[28],若同时考虑尺寸、形状和拓扑之间的关系,则称为布局优化。尺寸优化对形状特征和拓扑关系保持不变,主要设计诸如桁架结构横截面积、薄壁结构壁厚等,寻求结构薄弱部位的最佳截面尺寸与材料分布的组合关系。形状优化对拓扑关系保持不变,寻求结构薄弱部位的最理想几何形状与边界特征,以改善应力分布。拓扑优化在载荷工况与材料用量指标要求下,寻求结构薄弱部位的最优材料布局,使得结构不仅满足应力、位移等条件的约束,也能最大限度发挥材料与结构的承载潜力,实现结构的轻量化与高性能设计。

通常针对某一造型的结构优化方式有多种,而如何将结构优化方式与造型设计相融合是工业设计师需要研究的重点,也是基于仿真技术的武器装备工业

造型设计的难点。

2 武器装备工业造型设计流程

本文提出的武器装备工业造型设计方法的具体流程可分为以下几个步骤，见图2。

第一，依据隐身理论提出武器装备工业造型的隐身设计策略，并基于此装备的机械结构基本特点与限制要求，使用三维建模软件对武器装备进行多个造型设计的建模。

第二，基于隐身仿真技术计算每个模型方案（之后称为初样机）的RCS值，计算各方位角的RCS平均值、峰值，并通过比较分析选出优选初样机方案。

第三，运用有限元分析软件建立有效的有限元仿真分析模型，通过静力学分析，判断模型的结构静强度是否达标。若静力学分析不达标，重新选择样机模型并建立有限元模型进行分析；若静力分析达标，进行动力学分析。通过模态、扫频等分析，即可找出优选初样机造型中的结构薄弱部位与优化方向。

第四，基于有限元分析结果，从尺寸优化、形状优化、拓扑优化3个方面对优选初样机工业造型的结构进行优化设计，得出正样机造型设计方案。

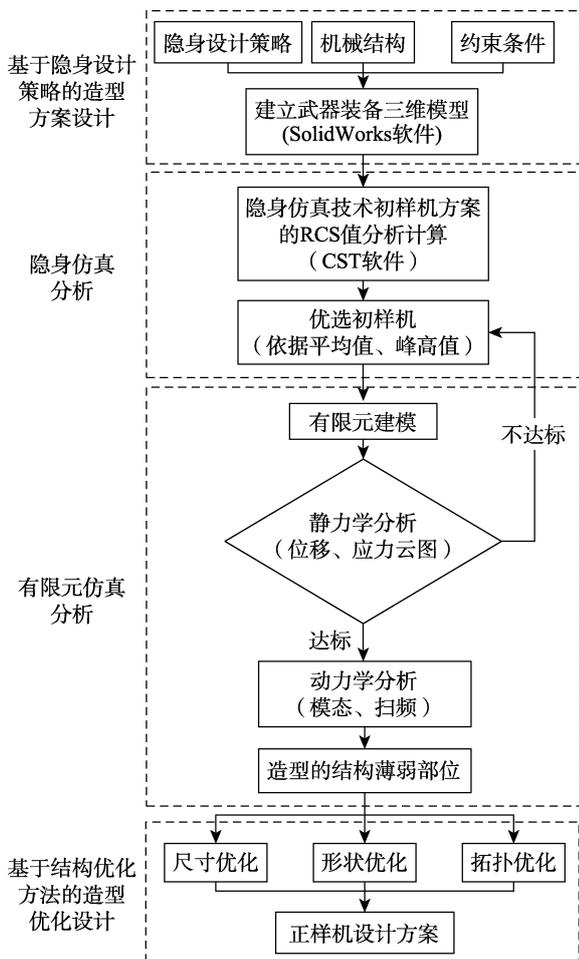


图2 造型优化设计流程
Fig.2 Design process of modeling optimization

2.1 基于隐身设计策略的工业造型方案设计

在进行武器装备初样机的造型方案设计时需要考虑2个重要因素：一个是武器装备的机械结构组成、运动方式、尺寸范围、工况场景等重要结构特点；另一个是造型的功能性约束、尺寸约束、内部尺寸约束等限制条件。从环境角度、装备角度、人机角度充分了解武器装备的造型设计要求，保证造型设计完全干扰武器装备的正常作业行为，完全不影响作业精度、速度，仅对武器装备的视觉效果进行提升与优化，表现出武器装备的威严感、震慑力、可靠性等高技术视觉气质。

新型武器装备普遍采用隐身造型特征，该特征也成为武器系统现代化、高科技的代名词，若新型武器系统没有采用此类造型语言，不仅在性能上无法达到隐身性基本要求，而且会大大消减其现代性与科技感。因此，隐身造型特征是现代武器装备工业设计的必然趋势。为降低RCS，可在设计中采取多棱面外形技术与融合外形技术，而这两种外形技术呈现的隐身造型特征也不同。其中，多棱面外形技术是指设计造型采用多棱面体，其在宽方位角的RCS较小，仅在主体少数棱角呈现几个后向散射峰值，代表设计为F-117隐身战斗机，见图3。融合外形技术通过对武器装备主体截面形状进行融合连接曲面设计，使其外侧向的镜面散射变为弧面漫反射，极大程度降低装备主体的RCS，代表设计为B-2隐身轰炸机，见图4。无论运用哪种隐身造型技术，都是以降低RCS提高隐身性能为核心，因此在进行武器装备初样机造型设计时不仅要考虑结构特点与约束条件，也要将隐身设计策略作为初样机造型设计的主要理论依据。



图3 F-117的多棱面外形
Fig.3 Polygonal shape of F-117



图4 B-2的融合外形
Fig.4 Fusion shape of B-2

进行武器装备的初样机建模时需基于 UG、SolidWorks 等三维建模软件按原比例建立三维数字模型，并对模型进行清理以减少仿真分析的复杂度。

2.2 基于隐身仿真技术的初样机方案评估

计算 RCS 常用的电磁分析软件有 CST、Ship EDF、FEKO+Cable Mod 等，本文将使用 CST 微波工作室软件对武器装备造型的隐身性能进行量化分析与评估。在计算武器装备 RCS 面积时，需要深度考虑探测电磁波频率和威胁区域范围 2 个参数值^[29]。军事上不同领域对目标物探测的电磁波频率都有所不同，比如针对舰艇的探测雷达波频率一般处于 8~12 GHz^[21]。威胁区域是指该目标对象 RCS 的考核方位角度与探测波入射仰角度所构成的空间范围，通常由于武器装备的应用领域和功能存在不同，所以其威胁区域的角度范围也有所不同。基于此对某武器装备进行仿真分析时，需要详细了解探测此装备的电磁波频率范围与威胁区域相关要求，以准确拟定隐身仿真分析的电磁波频率、电磁波水平与垂直的角度范围等参数值。

目前军事报道及军事刊物中传递的信息仅限于某型飞机或其他装备的正面 RCS 面积或者侧面 RCS 面积数据，但在实际作战中飞机、坦克、军舰面对的电子探测仪器的威胁并不会仅集中于某一两个方位，所以 RCS 的数据仿真计算是求其实际探测威胁角域的 RCS 平均值^[30]。因此，通过 CST 软件分析各方位角的 RCS 值后需进行均值计算。根据《HJB 180-1998 舰艇雷达散射截面测量方法》，需要去除正、横方向（方位角 0°、90°、180°、270°、360°）上±4°范围内的 RCS 值，再对剩余角度计算 RCS 平均值。RCS 平均值越小，说明隐身性能越强；RCS 平均值越大，说明隐身性能越弱。此外，各方位角的 RCS 峰高值也是隐身性能优劣的评判依据，峰高值越高，隐身性能越不稳定，峰高值越低，隐身性能越稳定。总之，需要依据平均值与峰高值，从多个初样机设计方案中择出优选初样机设计方案。

2.3 基于有限元仿真技术的工业造型优化设计

在对优选初样机进行造型优化之前，需要运用有限元分析软件建立有效的有限元仿真分析模型，并按照该武器装备的震动条件进行仿真分析，找出优选初

样机的结构造型薄弱环节。本文使用的有限元仿真软件为 ANSYS，ANSYS 的 Workbench 界面可接入 CAD 模型，在对模型进行材料设置、零部件几何清理、简化、网格划分等操作后，即可进行分析和后处理。

首先进行静力学分析，通过分析模型在固定约束情况下的位移和应力数据，判断模型的结构静强度是否达标（在预设材料的承载范围内）；然后进行动力学分析，通过模态与扫频等分析后，得到位移与应力的分布云图与最大值，即可找出模型造型中结构的薄弱部位与优化设计方向；最终依据有限元分析结果，基于结构优化的 3 个方法对优选初样机结构薄弱部位的工业造型进行优化设计。

3 案例应用——以舰载雷达天线座为例

本文提出的复合仿真技术支持下的工业造型设计方法可适用于军用无人机、舰艇、舰载装备、坦克、炮架等武器装备的工业造型设计中，具有一定的普适性。本文以舰载装备中的雷达天线座为例，验证所提出的设计方法在此装备上的可行性。

3.1 舰载雷达天线座的初样机工业造型设计

本文将以某型号叉臂式舰载雷达天线座为所提方法的案例应用对象。雷达天线座是武器装备领域中的重要装备之一，通过高速旋转放波扫描识别目标物，然后与炮配合联动，实现打击任务。此型号雷达天线座主要由 3 大部分组成：天线阵面、方位传动、俯仰传动，辅助功能模块包括起保护作用的俯仰锁定装置、俯仰缓冲器等。天线阵面主要由天线开发人员进行主设计，此部分不考虑造型设计。俯仰传动装置主要由俯仰壳体、俯仰电机、主轴、轴承、轴承座等组成。方位传动装置通过 2 个半轴将天线阵面联结在一起，它们相互独立、自成体系。方位传动装置主要由方位壳体、方位杯型件、方位轴承、下方位壳体等组成。方位传动装置通过轴承将方位壳体与杯形件相连，方位壳体通过方位安装面与炮架安装台相连，方位杯形件通过螺栓与俯仰部分连接组成天线座。

依据隐身设计策略，基于多棱面外形技术进行雷达天线座的初样机造型设计。依据造型优劣初筛出 4 个初样机设计方案，见图 5。

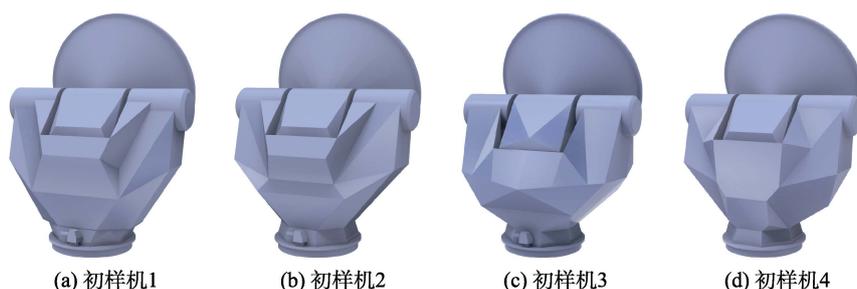


图 5 初样机造型设计方案

Fig.5 The initial prototype design plan

3.2 舰载雷达天线座的设计方案评估

运用 CST 软件对 4 个初样机进行 RCS 仿真分析, 见图 6。

经查阅资料可知, 水面舰艇及舰载装备的雷达威胁区域为由考核方位角 ($0^{\circ}\sim 360^{\circ}$) 与雷达波入射仰角 ($0^{\circ}\sim 20^{\circ}$) 所构成的空间范围组成^[23]。在实际应用中, 对舰载装备的雷达波最大威胁仰角范围 ($86^{\circ}\leq$

$\theta\leq 90^{\circ}$) 一般不超过 4° , 因此根据项目具体性能要求拟定雷达威胁区域角度范围值。而针对水面舰艇及舰载装备的探测雷达波频率多集中在 $8\sim 12\text{ GHz}$ ^[21], 因此在软件中分别将探测雷达波频率设为 3 GHz 、 7 GHz 、 12 GHz , 并对 4 个初样机进行隐身分析。将分析后的数据整理后得出 4 个初样机的 RCS 变化曲线, 见图 7。

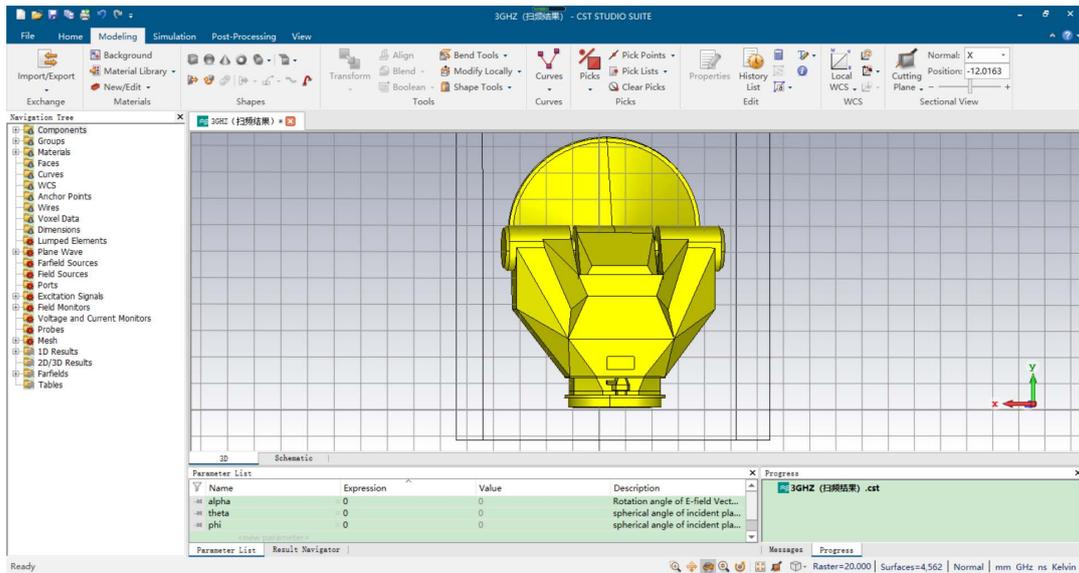


图 6 初样机 RCS 仿真界面

Fig.6 RCS simulation interface of the initial prototype

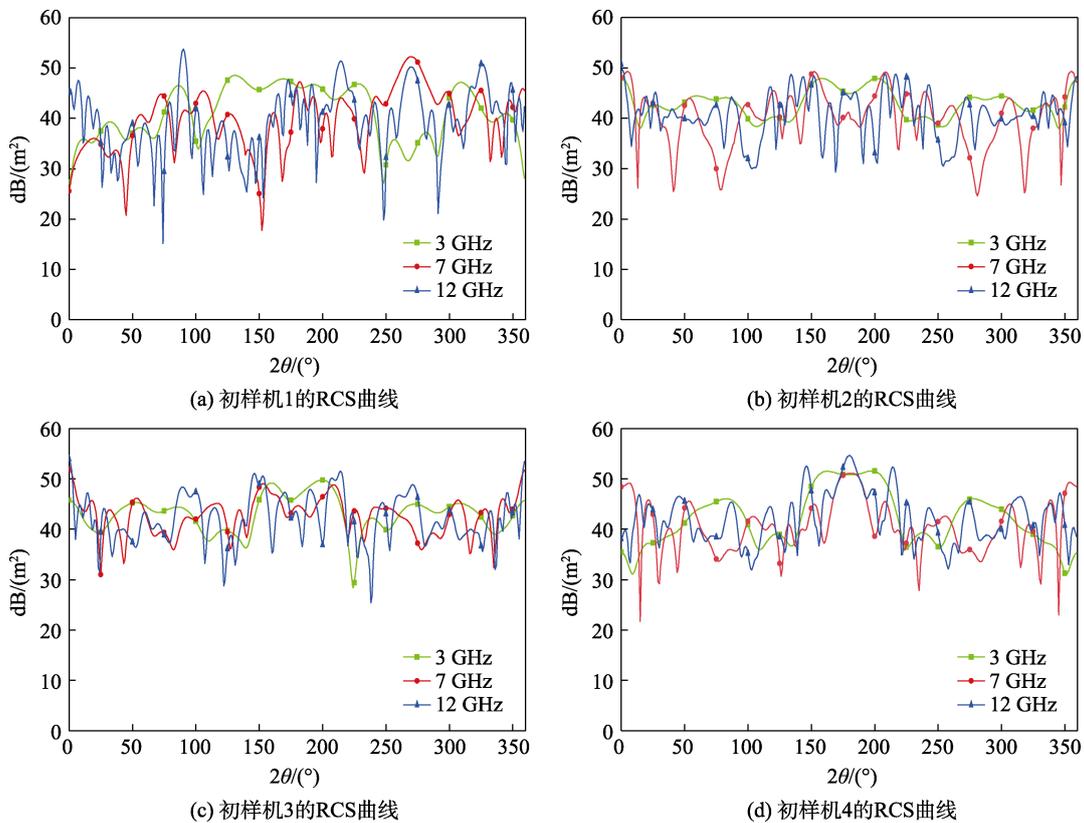


图 7 初样机方案 RCS 曲线

Fig.7 RCS curve of the initial prototype

去除每个初样机的正、横方向上 $\pm 4^\circ$ 范围内的 RCS 值后，均值和峰高值的计算结果，见表 1。4 个方案的均值排序为初样机 3>初样机 4>初样机 1>初样机 2，峰高值排序为初样机 4>初样机 3>初样机 1>初样机 2。因此，初样机 2 造型方案为优选初样机造型设计方案。

3.3 舰载雷达天线座的有限元仿真分析及优化

3.3.1 静力学分析

将雷达天线座优选初样机的 CAD 模型导入 ANSYS 软件中处理后，取全局网格尺寸为 5 mm 对模型进行有限元网格划分，并设置模型的材料为铸铝 (ZL101A)、高强度不锈钢 (仅俯仰轴)。依据天线座实际工作状态在 ANSYS 软件中进行结构的静力分析，将初样机与炮连接初施加固定约束，静力条件下只有重力作用，对简化后的模型进行静力分析，分析结果，见图 8。

有限元静力分析见表 2，静力分析时仅有重力作

用，最大位移仅有 0.8 mm，因此结构变形量非常小，最大应力集中在与炮连接的接触面上，见图 7(a)；最大应力仅有 42.8 MPa 见图 7(b)，远小于铸铝的强度极限。总之，雷达天线座初样机的静强度达标，不至于引起破坏。

3.3.2 动力学分析及结构优化

对雷达天线座优选初样机进行动力学中的模态分析，得出一阶共振频率点施加 X 方向激励、二阶共振频率点施加 Y 方向激励的 2 种工况是结构的最薄弱环节。通过对一阶 X 方向与二阶 Y 方向 2 种工况分别进行扫频分析，得出动力学分析及优化设计结果 (部分)，见图 9。由图 9 可知俯仰轴系旋变侧结构 (俯仰壳体与俯仰轴连接处)、俯仰壳体与方位壳体连接处结构、俯仰壳体细节造型 3 处部位的造型需要进一步的结构与造型优化。因为俯仰轴系旋变处结构更偏向机械结构需要优化的关键内容，造型优化对其改进较小，所以不对此部位造型进行优化设计。

表 1 不同频率下的 RCS 计算结果
Tab.1 RCS calculation results under different frequencies

项目	均值			峰值		
	3 GHz	7 GHz	12 GHz	3 GHz	7 GHz	12 GHz
初样机 1RCS dB (m ²)	41.14	39.48	39.11	48.54	52.17	53.21
初样机 2RCS dB (m ²)	39.82	39.01	39.44	47.92	49.31	48.96
初样机 3RCS dB (m ²)	44.96	42.66	42.96	49.77	51.66	53.36
初样机 4RCS dB (m ²)	43.70	41.68	41.13	51.60	52.47	53.98

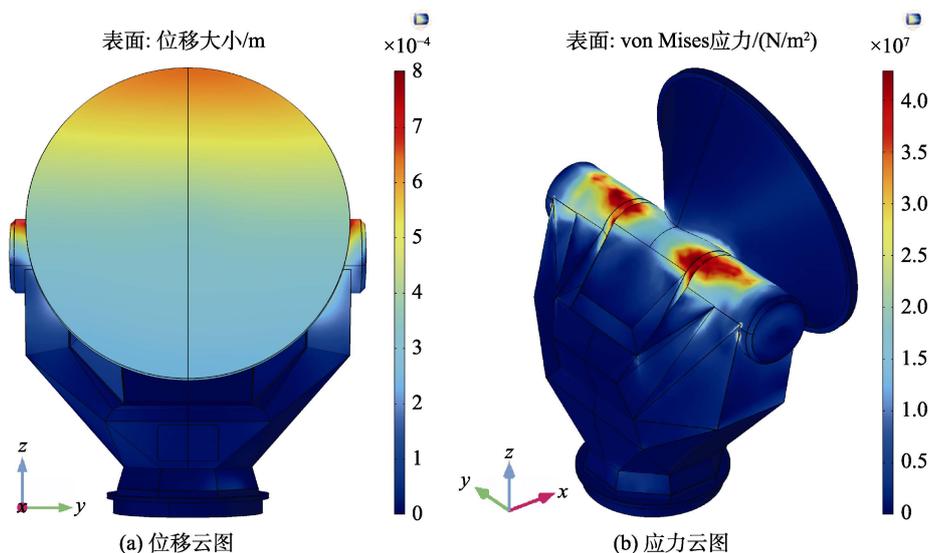


图 8 初样机的有限元静力分析
Fig.8 The finite element static analysis of the initial prototype

表 2 有限元静力分析
Tab.2 The finite element static analysis

模型	分析类型	最大位移/m	最大位移位置	最大应力/Pa	最大应力位置
雷达天线座优选初样机	静力学	8.02E-4	天线阵面顶部	4.28E7	俯仰壳体与俯仰轴连接处

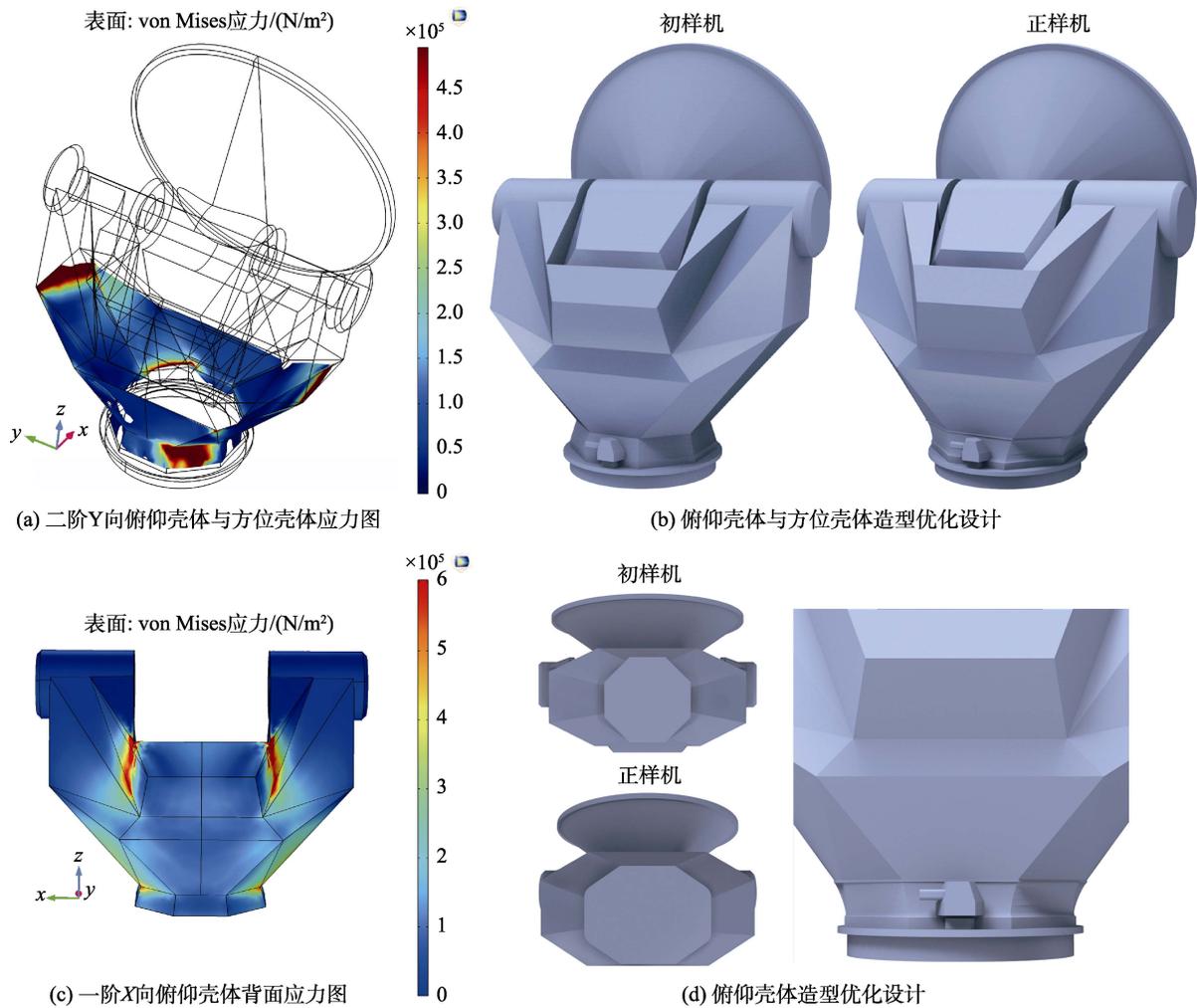


图9 动力学分析及优化设计结果

Fig.9 Dynamic analysis and optimized design results

基于有限元动力学分析结果与结构优化的3种方法,对俯仰壳体与方位壳体连接处结构、俯仰壳体细节造型进行造型优化。由图9(a)分析的应力图可知,俯仰壳体与方位壳体的接触面有较明显的应力集中现象,因此对俯仰壳体与方位壳体连接处造型优化设计将结合结构优化方法中的尺寸优化与形状优化。首先将俯仰壳体与方位壳体的接触面横向拉宽以增大接触面积,把原样机中的正八边形横截面改为异形八边形;然后将异形八边形的每个棱角进行圆角处理,避免使用棱角增大应力,见图9(b)。由图9(c)分析的应力图可知,俯仰壳体造型中一些细节棱面的设计会增大俯仰本身的应力,因此参考应力图中标识较大应力的棱面、棱角,结合结构优化方法中的形状优化进行造型优化设计。主要运用改变应力较大处棱面的切割方式,通过分散传力方向避免出现原样机中的5条棱线汇聚一点的现象,见图9(d)。

4 结语

为了保证武器装备隐身性能和结构强度的基

础上,使其工业造型具有美观性,本文提出了一种基于复合仿真技术的武器装备工业造型设计方法。首先依据隐身理论提出了武器装备工业造型的隐身设计策略;然后基于隐身仿真分析对多个武器装备初样机方案进行评估,选出了隐身性能较好的优选初样机;接着基于有限元仿真分析对优选初样机进行静力学和动力学分析,判断其造型是否符合结构强度要求,并得出造型中结构强度薄弱的部位;最终通过结构优化方法对优选初样机的造型进行优化。该方法运用复合仿真技术不仅对工业造型进行方案评估与筛选,而且提出了造型设计的具体设计决策,为武器装备造型优化设计提供了新的研究思路,此方法可广泛应用于航空、航天、航海等军事领域的武器装备工业造型设计。

参考文献:

- [1] 刘永才. 新形势下武器装备发展思考[J]. 战术导弹技术, 2020(4): 1-12.
LIU Yong-cai. Thoughts on the Development of Weap-

- ons and Equipment under the New Situation[J]. *Tactical Missile Technology*, 2020(4): 1-12.
- [2] 魏梦然. 工业设计在武器设计中的应用研究——以坦克装甲车为例[J]. *科技与创新*, 2017(20): 149-150.
WEI Meng-ran. Application of Industrial Design in Weapon: Take the Tank Armored Vehicle as an Example[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2017(20): 149-150.
- [3] 田凌, 刘果, 刘思超. 数字孪生与生产线仿真技术研究[J]. *图学学报*, 2021, 42(3): 349-358.
TIAN Ling, LIU Guo, LIU Si-chao. Digital Twin and Production Line Simulation Technology[J]. *Journal of Graphics*, 2021, 42(3): 349-358.
- [4] 闫杰, 符文星, 张凯, 等. 武器系统仿真技术发展综述[J]. *系统仿真学报*, 2019, 31(9): 1775-1789.
YAN Jie, FU Wen-xing, ZHANG Kai, et al. Review of the Weapon System Simulation Technology[J]. *Journal of System Simulation*, 2019, 31(9): 1775-1789.
- [5] 彭勇. 作战仿真模型体系分析及其模型设计与实现关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
PENG Yong. Key Technologies for Analysis of Model's Family Design and Implement of Its Model for Warfare Simulation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [6] 穆阳, 李皓, 王震, 等. 无人目标机隐身优化设计与改装技术研究[J]. *西北工业大学学报*, 2020, 38(2): 246-252.
MU Yang, LI Hao, WANG Zhen, et al. Optimized Stealth Design and Remolding of Target Unmanned Aerial Vehicle[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2020, 38(2): 246-252.
- [7] 于伟强, 汪飞, 孙萍, 等. 杂波背景下机载雷达信号参数的射频隐身优化[EB/OL]. (2021-06-23)[2021-07-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20210623.1459.008.html>.
YU Wei-qiang, WANG Fei, SUN Ping, et al. RF Stealth Optimization of Airborne Radar Signal Parameters under Clutter Background[EB/OL]. (2021-06-23)[2021-07-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20210623.1459.008.html>.
- [8] 师俊朋, 胡国平, 王馨. 基于证据融合的雷达反隐身性能评估方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2015, 41(6): 1095-1101.
SHI Jun-peng, HU Guo-ping, WANG Xin. Evaluation Method for Radar Anti-stealth Performance Based on Evidence Fusion[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(6): 1095-1101.
- [9] 张楠, 丁锋, 黄建冲. 网络雷达抗隐身性能分析[J]. *舰船电子对抗*, 2012, 35(1): 40-44.
ZHANG Nan, DING Feng, HUANG Jian-chong. Analysis of The Anti-stealth Performance of Network Radar [J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2012, 35(1): 40-44.
- [10] 宋洪震, 姚忠, 康总宽, 等. 基于 RCS 的舰炮防护罩隐身外形设计及优化[J]. *火炮发射与控制学报*, 2021, 42(2): 57-61.
SONG Hong-zhen, YAO Zhong, KANG Zong-kuan, et al. Stealth Shape Design and Optimization of Naval Gun Shield Based on RCS[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2021, 42(2): 57-61.
- [11] 闫胜咎, 刘伟鹏. 基于有限元分析的铝合金轮毂造型设计[J]. *机械设计*, 2014, 31(10): 109-112.
YAN Sheng-zan, LIU Wei-peng. Modeling Design of Alluminium Alloy Wheel Based on Finite Element Analysis Method[J]. *Journal of Machine Design*, 2014, 31(10): 109-112.
- [12] 贾文东, 李翠玉. 基于有限元分析的运动型轿车轮毂设计[J]. *机械设计*, 2019, 36(S2): 44-47.
JIA Wen-dong, LI Cui-yu. Design of Sports Car Wheel Hub Based on Finite Element Analysis[J]. *Journal of Machine Design*, 2019, 36(S2): 44-47.
- [13] ZHAI H F, ZHU C C, SONG C S, et al. Dynamic Modeling and Analysis for Transmission System of High-power Wind Turbine Gearbox[J]. *Journal of Technology & Science*, 2015, 29: 4073-4082.
- [14] 张磊, 杨秀萍, 朱芋锭. 有限元仿真技术在工业设计中的应用——以自行车鞍座设计为例[J]. *装饰*, 2012(3): 95-97.
ZHANG Lei, YANG Xiu-ping, ZHU Yu-ding. The Application of Finite Element Simulation Technology in Industrial Design: as an Example of Bicycle Saddle Design[J]. *Art & Design*, 2012(3): 95-97.
- [15] 余文韬, 胡震. 大开口载人潜水器球扇型有机玻璃观察窗有限元分析及试验验证[J]. *舰船科学技术*, 2020, 42(19): 78-82.
YU Wen-tao, HU Zhen. Finite Element Analysis and Test Verification of Spherical Sector Acrylic Windows of Manned Submersible with Large Opening[J]. *Ship Science and Technology*, 2020, 42(19): 78-82.
- [16] 尚坤, 刘向阳, 李猛. 基于有限元方法的航天服平褶式关节建模[J]. *航空学报*, 2015, 36(3): 1002-1010.
SHANG Kun, LIU Xiang-yang, LI Meng. Modeling of Spacesuit Flat Pattern Mobility Joint Based on Finite Element Method[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(3): 1002-1010.
- [17] 魏浩. 某舰炮非线性有限元结构动力学分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
WEI Hao. Nonlinear Finite Element Structural Dynamics Analysis of a Naval Gun[D]. Nanjing: Nanjing University of Science And Technology, 2015.
- [18] AHMAD H, TARIQ A, SHEHZAD A, et al. Stealth Technology: Methods and Composite Materials: a Review[J]. *Polymer Composites*, 2019, 40(6): 4457-4472.
- [19] 吴键. 军用隐身包装箱设计构想[J]. *包装工程*, 2008(7): 88-90.
WU Jian. Conception of Stealthy Packaging Box Design for Munitions[J]. *Packaging Engineering*, 2008(7): 88-90.

- [20] 桑建华, 张宗斌. 红外隐身技术发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 14-19.
SANG Jian-hua, ZHANG Zong-bin. Development Trends of Infrared Stealth Technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1): 14-19.
- [21] 常少游, 杨德庆. 考虑雷达隐身性能要求的舰艇外形截面设计[J]. 舰船科学技术, 2005(6): 13-18.
CHANG Shao-you, YANG De-qing. The Cross-sectional Shape Design of Naval Vessel Considering the Radar Stealthy Performance[J]. Ship Science and Technology, 2005(6): 13-18.
- [22] 王勇, 龙文刚. 从雷达隐身看飞机外形细节设计[J]. 飞机工程, 2008(4): 1-3.
WANG Yong, LONG Wen-gang. Detailed Design of Stealth Aircraft's Geometry Shape to Anti Radar Detection[J]. Aircraft Engineering, 2008(4): 1-3.
- [23] 杨德庆, 常少游. 舰艇外形雷达隐身设计特征面法[J]. 中国造船, 2008(2): 113-120.
YANG De-qing, CHANG Shao-you. The Characteristic Cross-section Method on the Shape Radar Stealthy Design of Naval Vessels Shipbuilding of China, 2008(2): 113-120.
- [24] 庄钊文, 袁乃昌, 莫锦军, 等. 军用目标雷达散射截面预估与测量[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
ZHUANG Zhao-wen, YUAN Nai-chang, MONG Jin-jun, et al. Estimation and Measurement of Radar Cross Section of Military Target[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [25] KUMAR N, VADERA S R. Stealth Materials and Technology for Airborne Systems[M]. Singapore City: Aerospace Materials and Material Technologies, 2017.
- [26] 郭鹏飞, 曲艳东. 有限元方法[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2015.
GUO Peng-fei, QU Yan-dong. Finite Element Method [M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2015.
- [27] LUBKIN J L. The Flexibility of a Tubular Welded Joint in Vehicle Frame[J]. SAE Transaction Paper, 1974(6): 1518-1522.
- [28] 陈树勋, 韦齐峰, 黄锦成. 利用导重法进行结构拓扑优化[J]. 计算力学学报, 2015, 32(2): 160-166.
CHEN Shu-xun, WEI Qi-feng, HUANG Jin-cheng. Guide-weight Method for Structural Topology Optimization[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2015, 32(2): 160-166.
- [29] 颜伟, 耿路, 周雷, 等. 基于海情和三次样条插值算法的舰船雷达散射截面优化分析方法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(3): 579-586.
YAN Wei, GENG Lu, ZHOU Lei, et al. Optimization Analysis Method on Ship RCS Based on Sea Conditions and Cubic Spline Interpolation Algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(3): 579-586.
- [30] 李莹, 黄沛霖, 武哲. 基于不同角域 RCS 均值的雷达探测模型[J]. 北京航空航天大学学报, 2008(6): 627-629.
LI Ying, HUANG Pei-lin, WU Zhe. Mode of Radar Network Detection Based on Average RCS Value of Different Angle Territory[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008(6): 627-629.