网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1755.TJ.20210303.1721.004.html 期刊网址：www.ship-research.com

引用格式：梅志远. 舰船复合材料结构物应用工程 技术特点及内涵分析 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(2): 1–8.
MEI Z Y. Characteristic analysis and prospect of applied engineering technology for composite structures of naval ships[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(2): 1–8.

舰船复合材料结构物应用工程技术特点及内涵分析

扫码阅读全文

梅志远*

海军工程大学 舰船与海洋学院，湖北 武汉 430033

摘　要：针对舰船平台技术所面临的发展需求与挑战，从总体平台特性、综合隐身以及综合保障技术发展需求的角度，简要分析开展舰船复合材料结构物应用工程的必要性和紧迫性。以西方国家潜艇应用为例，梳理国外舰船复合材料结构物应用发展思路，提出并阐明舰船功能复合材料结构物应用工程的 3 个“一体化”技术特点，着重探讨总体/结构设计技术的定义、内涵及关键技术组成。最后，针对我国未来在该领域的发展需求，提出应在尽快制定顶层规划的同时，着力加强设计基础研究和规范体系性建设。

关键词：舰船平台技术；功能复合材料结构；综合隐身；综合保障

中图分类号：U668.5　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.19693/j.issn.1673-3185.02098

Characteristic analysis and prospect of applied engineering technology for composite structures of naval ships

*MEI Zhiyuan**

College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract: In view of the development demand and challenge for the naval ship technology, this paper briefly analyzes the necessity and urgency of developing the application engineering of composite structures, from the perspective of the overall ship performance, integrated stealthiness, and integrated logistics support. Taking the application of submarines in western navies as examples, this paper summarizes the development approaches of the application of composite structures in naval ships, and puts forward and expounds upon three "integrated" technical features of the application engineering of functional composite structures. Moreover, a discussion is included to emphasize the definitions concerning overall and structural design technology of naval ships, as well as their connotation and composition of key technology. This paper concludes with the recommendation that the top-level design should be constructed as soon as possible, in the meantime, enhancing the capability of basic design research and establishment of standardization systems in response to the future development requirements demanded of Chinese naval ships in this field.

Key words: platform technology of naval ship; functional composite structures; integrated stealthiness; integrated logistics support

0 引　言

自 20 世纪 40 年代初玻璃钢研制获得成功以来，以纤维增强树脂基复合材料（FRP）为代表的舰船复合材料结构设计技术得到了持续的关注和发展。复合材料拥有众多固有的优良特性，如高比强度、无磁、高阻尼和耐腐蚀等，其结构的独特性、功能的“一体化”可设计性和优异的复杂曲面易加工性，必将为未来舰船平台技术的发展提供新的途径。更为重要的是，在结构可设计性方面，其不仅体现为材料的各向异性和铺层设计特性，而且在保证结构强度及刚度要求的前提下，还能够通过功能材料复合、结构形式设计与传感器、做动元器件的合理融合，实现多种功能特性的兼容，甚至是智能控制。因此，上述特性可为未来功能型和智能型舰船结构物的设计与建造提

收稿日期：2020–08–31　　**修回日期：**2020–10–23　　**网络首发时间：**2021–03–04 17:52

作者简介：梅志远，男，1973 年生，博士，教授，博士生导师。研究方向：舰船功能复合材料结构工程，舰船结构抗爆与防护工程。E-mail: zhiyuan_mei@163.com

***通信作者：**梅志远

供无限的发展空间及可能。

近 40 多年以来，复合材料结构设计技术在我国航空航天领域的发展势头极为迅猛，但在船舶与海洋工程领域的应用却相对迟缓，尤其是在舰船复合材料结构工程应用领域，甚至出现了“需求大于能力、工程先于理论”的尴尬局面。以猎/扫雷舰艇为例，截至 2010 年，全世界 32 个沿海国家已建造全复合材料的猎/扫雷舰艇共计 391 艘，而我国尚无 1 艘在役。究其原因，认为主要源于如下方面：其一，我国舰船设计者和管理者们长期以来总是将复合材料结构设计简单地归属为材料设计问题，而总体和结构设计的主导作用缺失；其二，与我国以往长期的粗放式经济发展模式和全寿期费用的概念流于形式不无关系；最后，舰船结构设计者们对于新材料的应用过于谨慎，在紧迫的工程进度要求下，熟悉而技术成熟度相对较高的钢质或铝质船体结构一般会成为首选。鉴于此，本文将以推动舰船功能复合材料结构应用工程技术为背景，从分析主要技术特点入手，着重探讨舰船总体和结构设计技术的内涵及其新兴研究方向的发展需求。

1 面临的困难与挑战

二战以后，随着电气化及信息化技术的日臻成熟和进步，电气化、自动化已与信息感知及融合技术一起成为现代舰船技术发展的主要特征。船体结构作为各种装置、系统及设备的载体平台和适用性设计的基础，是总体性能的综合集成与集中体现。平台与作战系统之间相辅相成，关联度极高，具有不可分割性。为了适应现代舰船技术快速发展的要求，总体设计技术，尤其是平台结构设计技术在发展中所面临的困难与挑战至少体现在以下几个方面：

1）先进系统设备陆续应用，总体设计难度加大。

目前，对舰船总体重量及其分布特征带来影响的增量因素主要源于减振降噪、先进的动力系统和作战系统这些工程应用的需求，例如，大型浮筏隔振装置、AIP 动力系统或核动力系统、电磁发射装置、先进的作战系统装置与设备等。在进行总体空间布置时，先进的动力系统和减振降噪装置一般处于舰船重心之下，并主要带来舰船有效装载需求的增加；而先进的作战系统装置与设备大多数则被布置在船体的上层空间，通常使舰船重心上移，导致稳性不足。这些因素加大了舰船总体设计的难度，集中体现为有效装载荷重比、浮态和稳性控制要求的增加。因此，在设计应用轻量化、高强度的新材料结构物时并非简单地替代，而更多地有赖于总体设计。

2）船体结构及装置系统保障性亟待提高。

船体结构及装置系统的防腐、防污和防漏（统称“舰船防护性”）与舰船全寿期费用尤其是降低维护费用及艇员维护负担密切相关。此外，舰船防护性问题还严重影响舰船的可用性、可靠性，甚至是作战效能[1]。上述问题尽管已受到业界的持续关注，然而自始至终也未得到有效或是彻底的解决。长久以来，舰船防腐技术主要围绕涂层、电化学保护，以及铜合金、钛合金等材料的应用技术来开展，核心机理均为界面绝缘处理和高电位保护，但对于长期处于复杂海洋环境中的舰船结构物而言，其结构特征之复杂、解决难度之大是不言而喻的。然而，除碳纤维增强复合材料外，迄今绝大多数的纤维增强复合材料以及高分子功能材料均属电绝缘材料，它们有着固有的防腐蚀特性，所以应用复合材料和各种功能材料的空间广阔，且全寿期经济效益良好。

3）综合隐身功能性设计要求越来越高。

舰船综合隐身技术应用属系统工程。从目标被探测到的特征信号和舰船结构隐身功能性设计的要求来看，主要包括雷达散射截面积（RCS）、电磁场、红外、声辐射以及声目标强度特性这几个方面[2]。以水面舰船为例，复合材料综合集成桅杆的应用[3]是综合解决电磁兼容、RCS 与舰船总体稳性相矛盾的成功案例，而目前全球近 400 艘复合材料猎/扫雷舰艇成功应用的则是低磁船体结构[4]。在潜艇隐身技术方面，近年来，针对低航速下机械激励源传递的声学通道及声辐射特征控制方面的机理研究已非常深入，并已取得显著成效[5]。然而，对于中、高航速下流激噪声和异常噪声产生的机理及其控制措施方面的相关研究，目前尚比较缺乏；在声目标强度特征控制方面，低频段内艇体声目标强度特征控制的技术路线仍不清晰，中、高频段内典型部件（例如，艏端部、指挥室围壳、舵翼）的声目标亮点问题依然突出；此外，随着声隐身技术的不断进步，非声综合隐身技术存在的问题也将日益突出。在各种功能材料不断涌现的情况下，功能复合材料结构应用将成为瓶颈突破的有效技术途径之一。

2 国外应用技术的发展

本文以西方国家海军的潜艇为例，分析复合材料结构物应用技术的发展思路，并总结相关经验。复合材料应用于潜艇结构最早可追溯到 20 世纪 50 年代。1953 年，美海军首次将“海狮”(Guppy) 级潜艇上各种外露设备的铝合金导流罩外壳替换为

玻璃钢结构，结果证明了潜艇复合材料结构的适用性[4]。早期在潜艇上应用复合材料结构采用的主要形式为玻璃钢加筋板，不但着重解决了船体结构的防腐问题，而且还降低了全寿期费用。1990 年代以后，夹层结构、高性能特种纤维和各种功能材料技术日臻成熟，使得潜艇上的复合材料结构应用逐渐迈入新的阶段——功能复合材料结构应用，且与武器装备性能的发挥和平台作战使用特性的联系越来越紧密。

2.1　应用回顾

2001 年，澳大利亚国防科学与技术机构（DSTO）所属的航空与海洋研究实验室发表了一篇很有意义的综述性论文[4]，文中较为全面地阐述了西方国家舰船复合材料结构物的应用需求、范围以及其应用状态方面存在的优缺点。此外，该文还按照工程应用（D）、技术验证 (TD) 和概念设计 (C) 这 3 个层面，较为系统地给出了 21 世纪初潜艇复合材料结构物的应用现状与发展规划（图 1）。由图可见，复合材料的应用范围极为广泛，应用对象并不限于潜艇的非耐压壳体、附体结构、装置及其附属设备，甚至已逐渐扩展到主承载的各型装置结构物，例如轴系、螺旋桨、设备基座等。

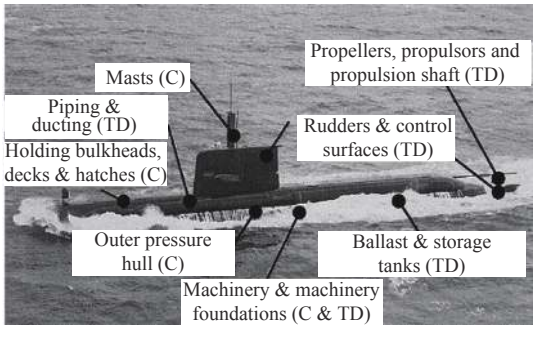


图 1　现代潜艇复合材料结构应用[4]

Fig. 1　Application of composite structures in modern submarine[4]

此外，德国潜艇技术的发展历程也是潜艇复合材料结构物工程应用的经典案例。自上世纪 60 年代以来，潜艇复合材料结构技术的发展特点在德国潜艇结构设计中得到了充分体现。由图 2 所示德国潜艇复合材料结构从上世纪 60 年代至 21 世纪的发展历程[6] 可见，潜艇复合材料结构的应用至少具有以下 3 个基本特点：

1）应用范围逐步扩大。上世纪 60 年代，在 209-1100 型潜艇上仅指挥室围壳和上层建筑局部使用了复合材料可拆板和导流罩体；上世纪 70 年代末，209 型潜艇指挥室围壳的大部分和上层建筑全面应用了复合材料；21 世纪以后，212 型和 214 型潜艇使用的复合材料延伸到了舵、翼等附

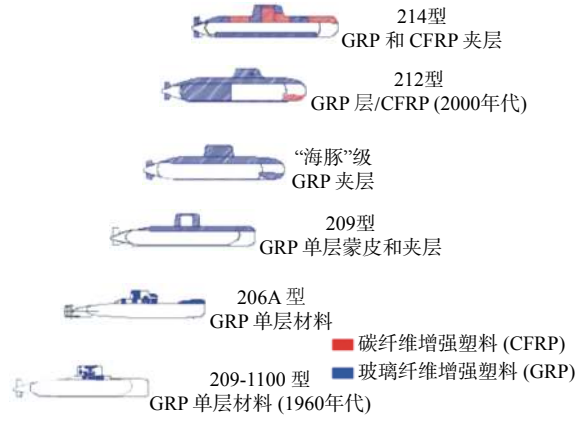


图 2　德国潜艇复合材料结构应用[6]

Fig. 2　Application process of composite structures in German submarine[6]

体结构及舷侧非耐压壳体结构，基本实现了舷外非耐压结构的全覆盖。

2）结构形式不断发展，呈现多样性。早期的复合材料结构形式主要为单壳加筋板架结构，209 型潜艇则是单壳加筋和夹层结构的混合应用，以色列海军设计建造的“海豚”级潜艇以后全面采用夹层结构方案。

3）材料体系不断更新完善，功能性设计特征逐渐显现。主要表现为 GRP 向 CFRP 体系的转变。CFRP 结构相比 GRP 结构重量更轻，刚度特性更优。

根据文献 [6]，在全面应用 PVC 泡沫夹层上层建筑和指挥室围壳等结构后，德国海军认为潜艇应用复合材料结构对于提高总体设计的裕度和灵活性极为有利。因此，近 10 多年来，德国海军开始转向研制复合材料的高压气瓶、螺旋桨等关键装置。目前，发展路线已非常清晰，工程应用也比较成功。

除上述 2 个经典案例外，有关西方海军强国潜艇复合材料结构物的系统应用鲜有报道，公开资料也较为缺乏。然而，典型的应用案例却并不少见，主要包括：复合材料耐压壳、操纵控制面（舵和翼）、集成式升降装置、舱内结构及装置系统、深海潜器等[4,6-9]。

2.2　经验分析

通过回顾西方国家海军潜艇上应用玻璃钢（FRP）材料结构的现状，可以对现代舰船复合材料结构的应用状态形成初步的认识。然而，如何在核心技术上实现突破，获得技术领先地位，还需要真正了解舰船复合材料结构应用工程的技术特点，把握其技术规律。因此，总结国外先进舰船复合材料结构应用工程的发展现状，至少可以

发现以下基本规律和特点：

1）在应用需求方面。早期舰船复合材料结构应用的主要目的是解决船体结构腐蚀和猎/扫雷舰艇的低磁化问题，然而随着新材料的不断涌现及其结构功能性的不断发掘（例如，阻尼约束夹层、轻质高刚度泡沫夹层、高透声玻璃钢和超材料夹层等），以减轻结构重量为目的的隔声型复合材料轻外壳、综合集成桅杆和复合材料机库等技术得到了工程应用。近年来，具有隐身功能要求的复合材料声呐导流罩、舵翼、螺旋桨、泵喷导管、烟囱和管路系统等，也逐渐进入先进舰船装备序列。由此可见，舰船复合材料结构的应用需求早已超越传统结构的范畴，而与总体性能、功能性和综合保障性设计融为一体，且彼此密切相关。

2）在应用形式方面。舰船复合材料结构应用已从简单的玻璃钢单层加筋结构向夹层含筋、多层复合转变，缠绕型结构也逐步得到关注。结构应用形式的多样化充分表明，应用对象及设计要求已逐渐丰富，开始呈现多样化、精细化的特征。同时，复合材料结构件制备工艺也是多种形式共存，例如，手糊成型、真空辅助成型（VARI）、树脂传递模塑（RTM）成型和缠绕成型等。

3）在材料体系内涵方面。在现代舰船复合材料结构应用工程中，“复合材料”一词的内涵已不再局限于传统意义上的玻璃钢层合板，各种高性能纤维（例如，碳纤维、芳纶纤维、高强聚乙烯纤维等）和树脂（例如，改性环氧、酚醛等各种适用于海洋环境的低成本树脂体系）不断涌现。随着复合材料结构应用形式的多样化，浮力材料、橡胶或者聚氨酯阻尼材料和 PVC/PMI 泡沫等各种功能材料与复合材料结构的联合应用，共同构成了舰船功能复合材料结构应用材料体系。由此可见，以实现最佳的性能及功能适用性为目的，各种先进材料和材料体系的组合以及复合形式的选择，必然成为相关应用研究的重要组成部分。

4）在设计技术范畴方面。随着应用对象的扩展、性能要求的提高和结构形式以及材料体系的不断丰富，舰船复合材料结构的设计问题已初步形成为一门涉及新功能材料学、船舶结构力学、减振降噪和综合隐身技术的多学科交叉融合的应用学科体系。

3 技术特点

3.1 定义与工程意义

基于国外先进国家工程应用的现状，本文认为现代舰船复合材料结构技术，应是以 FRP 材料为结构基础，以高分子材料应用为功能特色，并兼顾不同特性设计要求的舰船结构物多目标设计与应用技术的统称。

在上述定义的基础上，进一步建立复合材料结构可设计性与舰船性能及功能需求的对应关系，如图 3 所示。由于复合材料结构所具有的独特特性（例如，轻质低密度特性、高比强度和优良的刚度可设计性、固有的高阻尼性、优异的耐腐蚀性），及其与声、电、磁、热等功能材料极佳的可复合设计特点，所以开展复合材料结构应用工程的重要意义预计将主要体现为对诸如总体平台设计特性（坚固性与重量性）、综合隐身性、电磁兼容性和综合保障性等领域的技术瓶颈突破产生重大影响[10~13]。

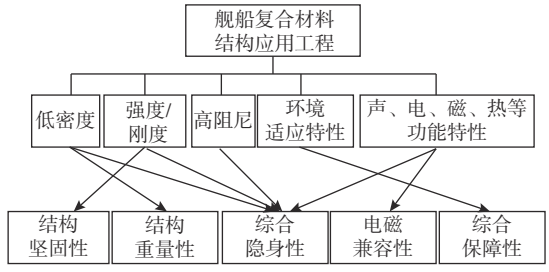


图 3 复合材料结构特性与舰船性能及功能需求的对应关系

Fig. 3 Characteristic relationships of composite structure corresponding to ship performance and functional requirements

3.2 三个“一体化”技术特点

1）材料与结构的“一体化”技术特征。

对于材料与结构关系的认识，一般存在宏观、细观和微观层面，材料与结构设计者能够参与的层面及其程度是决定材料或结构属性的关键。以传统合金钢为例，它同样具备了宏观、细观甚至是微观材料与结构的可设计性，例如合金、调质以及锻造等工艺设计。但是，这种“一体化”的操作一般局限于精密构件的制作，而对于传统的船体结构钢的建造，此类细观操作完全由材料工程设计人员掌握，一旦状态固化，材料性能仅能在许可范围内波动，结构设计者对材料性能的要求主要体现为选型。从此意义上看，可以认为船体结构钢的材料与结构可设计性实际上是分离的。在宏观层面上，复合材料可以被认为是一种材料。 而在细观层面上，复合材料的增强纤维、树脂基体和各种添加剂的选型、含胶量的控制及铺层设计等，在很大程度上取决于材料结构的性能要求，而且必须由结构设计者、材料供应商和生产制造商共同决定，并根据结构物设计要求的变化及优化需要，进行组分、含量以及工艺

方案的调整。因此，复合材料结构设计方案始于细观层面，而且是材料与结构共同设计的结果，这是复合材料结构设计的首个“一体化”技术特征，即材料与结构的“一体化”。

2）结构与功能的“一体化”技术特征。

在航空航天领域，降低结构重量是应用复合材料结构的首要目的，任何部（构）件重量的减轻都具有积极的现实意义。然而，由于与飞行器的航行支撑方式存在差异，舰船结构轻量化的实际工程价值显得并不那么突出。相比而言，舰船总体设计者们更关注基于稳性要求所提出的结构重量和结构功能化设计问题。究其原因，一是舰船结构重量效益仅在大尺度结构件或者复合材料结构规模化应用后才能得到集中体现，而且相对于浮性而言，稳性对于舰船总体设计和航行安全性而言更为重要；二是舰船结构的设计除了需要满足基本功能性要求外（例如，坚固性、密性和可靠性等），还应具有扩展的功能性设计要求（例如，安全性、隐身性及居住舒适性等），而扩展的功能性要求一般集中体现了舰船结构技术发展的平台特殊性和方向。

对于稳性设计的意义，理解起来比较容易。但是，何谓结构的扩展功能性设计呢？以功能复合材料的舵叶及稳定翼为例[14-15]，传统的钢质舵叶对于中、高频段的探测声波表现为强反射亮点特征。然而，功能复合材料的舵叶在保留钢质骨架的同时，通过透声浮力材料填充和复合材料蒙皮技术方案，不仅能够满足传统舵叶的结构性要求，而且还具有优异的声目标亮点和声辐射控制特性。再如，水面舰船的综合集成桅杆在复合材料夹层壳板结构中嵌入波段选择性功能材料——一种频率选择表面（frequency selective surface, FSS）[3]，实现了有益的电磁兼容功能特性。此类非结构性的特殊功能都是通过材料选型及内部构件的优化设计来实现的。这种以复合材料为基础，且通过与不同功能材料的复合及优化设计的结构物被称为功能复合材料结构，而舰船功能复合材料结构是指不仅能满足常规结构性能要求，而且还具有满足某些特殊性能要求的可设计性（例如，声学特征、电磁波反射特征、磁电场特征、防腐蚀及耐冲蚀、减振隔声等）的舰船结构物。功能复合材料结构设计主要表现为功能材料的选型设计和结构参数的多目标优化，而结构性与特殊的功能性彼此相互影响，必须开展匹配性设计。因此，完美的功能复合材料结构充分体现了结构与功能的“一体化”技术特征。

综上所述，舰船复合材料结构的应用并非原有钢质结构的等价替换，而是具有更高层面的功能性结构综合设计特征，这是与在航空航天领域应用截然不同的重要技术特征及需求。一般而言，舰船结构的坚固性设计要求（例如，强度、刚度、稳定性等）通常是确定的且容易得到满足，但结构的功能性设计要求则并非如此确定，而且设计水平还可随着材料及工艺技术水平的提高而取得不断进步，但这需要长期的跟踪和持续投入。

3）技术体系构成的“一体化”技术特点。

舰船结构应用工程属系统工程，主要包括 4 个技术模块：总体设计、结构设计、材料选型与研制，以及建造工艺与质量检测。以传统钢质船体结构为例，其一般由总体提出结构要求，然后通过分析完成材料选型，经计算迭代形成优化结构方案，最后完成工艺设计、建造与质量检测。在传统的舰船钢质结构应用工程中，总体、材料、结构、工艺与检测之间基本表现为如图 4 所示的串行技术特征，其根源在于船体钢材料的基本性能不可变性，以及缺乏功能的可设计性。

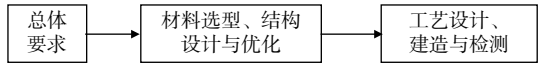


图 4　传统船体钢结构应用工程体系构成

Fig. 4　The system composition of traditional hull steel structure application engineering

然而，由于舰船功能复合材料结构存在“材料与结构”和“结构与功能”的“一体化”技术特点，故其应用技术体系构成特征呈现出如图 5 所示的形式。

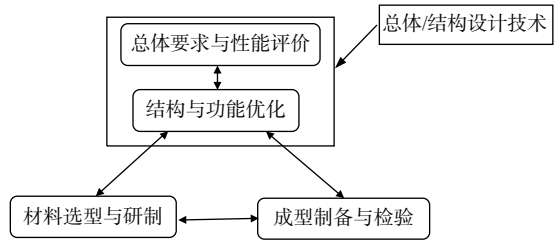


图 5　“一体化”应用工程技术体系特征

Fig. 5　Features of integrated application engineering system

如图 5 所示，本文将总体设计与结构设计合并，将其简称为总体/结构设计技术。其中，总体设计不仅需要提出最基本的结构性使用要求，而且还应充分考虑其功能性要求和舰船适用性要求，形成结构设计要求、材料选型或研制要求；在开展功能性结构设计时，结构设计者必须根据结构和功能要求进行材料选型，完成对材料各项性能指标的评估；此外，结构设计者还必须确保材料及结构的质量稳定，提出成型制备工艺方案的要求；总体与结构、材料和工艺之间具有十分鲜

明的一体化相互融合特点。综上所述，可见工程设计特点与现代工程设计的信息集成技术和系统管理方法进一步融合构成了环形的“一体化”应用技术体系特征，这也是舰船功能复合材料结构应用工程中最重要的技术特点。

由于复合材料结构研制特点与低成本设计的迫切需求，且复合材料结构相比金属结构更强调从研制开始就要求全寿期各阶段的专家、参与者协同工作，所以更需要严格遵循“一体化”设计体系规律。

3.3 总体/结构设计技术内涵

1）总体/结构设计技术研究范畴。

对图 5 所给出的复合材料结构应用工程技术体系特征进一步进行剖析，可知总体设计在整个应用工程技术体系中起着需求牵引、验收与评价的作用；材料技术是工程基础，是开展结构方案设计与性能优化的技术基础和设计源泉；成型制备工艺与检验则是结构方案最终实现的途径和保障。在整个技术体系中，结构设计技术具有承上启下的作用，是确保设计方案科学合理的关键节点。

总体设计的主要工作是提出结构物的设计要求，该要求必须基于舰船平台总体技术指标和功能特性技术指标的分解。其中，平台总体技术指标可包括结构物的结构性要求、环境适用性要求和保障性要求等；功能性技术指标则主要可以包括综合隐身性、电磁兼容性以及居住舒适性等相关结构与材料要求。平台总体设计技术要求永远是为满足平台总体发展需求，并基于特定的可选结构方案而提出。总体发展需求为结构方案的设计提供牵引，而新型或者合理的结构方案则为总体发展提供可能。可见，总体技术要求与结构方案之间存在密切的交互性，因此从此意义上来说，将之统称为总体/结构设计技术是合理可行的。

实船适用性要求包括材料及结构件的环境载荷适用性及其与船体接口的特性，两者均属于舰船结构的最基本要求；而功能性则比较复杂，它主要包括总体平台特性和隐身性。若将结构性和适用性通俗地理解为可用性，则功能性就属于“好用”范畴。实质上，复合材料结构总体/结构技术的研究正是围绕着这两类问题展开的。

2）关键技术体系探讨。

根据以上分析，可对功能复合材料结构总体/结构设计技术研究工作的性质做如下表述：基于总体技战术性能需求，建立与分解技术要求体系，开展结构形式与材料体系选型，进行结构性、功能性和实船适用性迭代计算，以及多目标综合分析与优化，以验证并最终确定技术方案。基于研究工作性质和设计特点，认为总体/结构设计的关键技术将主要来源于围绕总体技战术性能需求和“三性”要求的多目标综合优化问题，对关键技术体系构成可做如下探讨。

结构性设计技术是总体/结构技术的基础，主要是结构强度设计，一般包括应力强度、刚度及稳性设计。其中，变刚度设计技术[16]是复合材料结构设计的重要优势特点，也是大幅提高潜在结构性能的重要途径，但由于制造成本高、设计与制造交互难度大，所以目前的技术成熟度还远未达到要求。对于高精度主承载部（构）件，例如复合材料螺旋桨，设计时应加以关注。在结构性设计方面，目前更迫切需要解决的关键技术是确定结构设计许用系数（或安全系数）的方法。相关技术研究涉及了复合材料结构的极限强度、耐久性、容许缺陷以及健康监测[17]等一系列复杂问题，这些问题不仅是复合材料特性和舰船应用平台环境特性的综合体现，还是构建舰船复合材料结构设计规范体系的必要基础。此外，重量性、密性和连接接头设计也属于结构性设计范畴，尤其是考虑了舰船特殊应用要求的复合材料结构连接技术。其中，亟需重点关注对耐压水密性和振动传递等要求的特种连接技术的研究[18-19]。

复合材料结构的适用性设计实质上是其适应于海洋环境和船用环境的问题。复合材料本身虽然一般都具有优良的耐电化学腐蚀特性，但也同样存在典型海洋环境载荷作用下的性能退化和老化现象，例如，温/湿/紫外线照射/核辐射和海水侵蚀等。此外，关键技术瓶颈还体现为舱内环境使用时的卫生性、火灾释放性和火灾剩余强度特性，这也是限制复合材料结构在水面舰船结构和潜艇舱内规模化工程应用的核心问题。其中，火灾剩余强度特性评估涉及舰船典型复合材料结构的热–力耦合损伤特征演变规律，以及材料/结构的一体化交互设计特征，然而在此方面的相关研究目前极为有限[20]。

功能性设计是现代舰船复合材料结构工程应用的特色要求，也是体现总体/结构综合设计水平（或者称“先进性水平”）的最重要指标。舰船复合材料结构的功能性设计涵盖的领域非常广，从舰船信息特征角度来看，至少应包括以下方面：电磁波隐身、电磁兼容、温度场控制（红外特征）、振动与舱室噪声、振动与水下声辐射、声目标强度、电/磁场等。其中，近年来以电磁波隐身、振动与水下声辐射和声目标强度为工程背景的功能材料的技术研究尤其引人关注。在电磁波

隐身技术方面，结构−导电或吸波复合材料的研究[21-22]是电磁波隐身复合材料结构设计与应用的关键技术基础。而在水下声隐身技术方面，例如在水下吸波型超材料技术[12-13]及中、高航速流激复合材料结构振动与噪声特征机理的研究方面取得进展[23]，无疑将极为有利于推动未来功能复合材料结构应用的前进步伐。综上所述，舰船复合材料结构的功能性设计，首先是体现为根据总体性能需求，开展功能材料及复合结构构型的选型设计；其次，是多目标综合性能优化设计；最后，是综合评估与验证。舰船复合材料结构的功能性设计涉及的研究领域较广，已不再局限于材料科学和结构力学的学科交叉，而是多学科融合的设计。其中，关键技术集中表现为针对功能性结构物的多目标性能计算、分析、优化和试验验证。

4　结语与展望

迄今，复合材料已与合金钢、铝合金共同成为先进制造技术国家船舶结构工程材料之一。100 多年前，钢铁取代木材成为船舶结构建造的主要对象，给船舶结构的设计带来了一次革命性的飞跃。相信在可预见的未来，复合材料同样也会带来船舶结构设计技术的再次变革，成为有力推动舰船结构物设计技术飞速发展的新动力之一。

进入 21 世纪以来，功能复合材料结构已逐渐成为现代舰船结构物设计与建造的新兴技术领域。虽然我国近年来也加大了基础理论体系研究的支持力度，但是距离先进国家及其他行业领域仍存在一定的差距。基于舰船功能复合材料结构物的工程应用技术特点和我国国情，认为应给予持续支持和重点关注的方面如下：

1）开展行业领域发展的顶层设计，制定科学和可持续的发展路线与建设规划；

2）提高对多学科交叉领域基础问题研究的关注度，深入开展新功能、新机理以及新结构型式的基础性研究，以实现舰船复合材料结构物功能性设计领域的多点和全面突破；

3）大力开展设计标准及规范体系性建设，这是坚实前行的重要保障。

参考文献：

[1] 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.
SHAO K W, MA Y Y. Introduction to ship technology and design[M]. Beijing: National Defend Industry Press, 2005 (in Chinese).

[2] 朱英富, 张国良. 舰船隐身技术 [M]. 2 版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2015.
ZHU Y F, ZHANG G L. Ship stealth technology[M]. 2nd ed. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2015 (in Chinese).

[3] 周洋, 彭维雪. 水面舰船通信天线集成研究 [J]. 舰船科学技术, 2015, 37(3): 101–104.
ZHOU Y, PENG W X. Research on the communication antenna integration of surface warship[J]. Ship Science and Technology, 2015, 37(3): 101–104 (in Chinese).

[4] MOURITZ A P, GELLERT E, BURCHILL P, et al. Review of advanced composite structures for naval ships and submarines[J]. Composite Structures, 2001, 53(1): 21–41.

[5] 吴崇建, 陈志刚. 结构噪声核心价值与理论逻辑解读第一部分: 释义、价值及认知颠覆 [J]. 中国舰船研究, 2018, 13(1): 1–6.
WU C J, CHEN Z G. Core value and theoretical logic of structure-borne noise. part 1: summary, value and cognitive subversion[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13(1): 1–6 (in Chinese).

[6] BREFFKA G. Extended use of fibre reinforced plastics in submarine design[C]//2002 Conf. Proc. UDT Europe. La Spezia, Italy: [s.n.], 2002: 501-511.

[7] 杨珍菊. 国外复合材料行业进展与应用 (中)[J]. 纤维复合材料, 2017, 34(1): 30–42.
YANG Z J. Progress and application of foreign composite materials industry: part 2[J]. Fiber Composites, 2017, 34(1): 30–42 (in Chinese).

[8] 钱江, 李楠, 史文强. 复合材料在国外海军舰船上层建筑上的应用与发展 [J]. 舰船科学技术, 2015, 37(1): 233–237.
QIAN J, LI N, SHI W Q. The application and development of composites for foreign naval warships' superstructure[J]. Ship Science and Technology, 2015, 37(1): 233–237 (in Chinese).

[9] 罗珊, 李永胜, 王纬波. 非金属潜水器耐压壳发展概况及展望 [J]. 中国舰船研究, 2020, 15(4): 9–18.
LUO S, LI Y S, WANG W B. Development and prospects of non-metallic submersible pressure hull[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(4): 9–18 (in Chinese).

[10] 詹世革, 方岱宁, 李法新, 等. 层状电磁复合材料的界面结构与力学行为——国家自然科学基金重大项目成果综述 [J]. 中国科学基金, 2015, 29(5): 332–336.
ZHAN S G, FANG D N, LI F X, et al. Final report of key project of NSFC "the interfacial structure and mechanics of laminated magnetoelectric composites"[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2015, 29(5): 332–336 (in Chinese).

[11] 李东臻, 杨立, 陈翾. 舰船复合材料动态红外特征模拟与分析 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 413–417.

LI D Z, YANG L, CHEN X. Simulation and analysis on the dynamic infrared characteristics of ship composite materials[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(3): 413–417 (in Chinese).

[12] 王育人, 缪旭弘, 姜恒, 等. 水下吸声机理与吸声材料 [J]. 力学进展, 2017, 47(1): 201703.
WANG Y R, MIAO X H, JIANG H, et al. Review on underwater sound absorption materials and mechanisms[J]. Advances in Mechanics, 2017, 47(1): 201703 (in Chinese).

[13] 许伟龙, 彭伟才, 张俊杰, 等. 声隐身超材料发展综述 [J]. 中国舰船研究, 2020, 15(4): 19–27, 35.
XU W L, PENG W C, ZHANG J J, et al. Prospects of acoustic metamaterials for acoustic stealth[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(4): 19–27, 35 (in Chinese).

[14] 梅志远, 翟玉文, 周晓松. 一种潜艇高刚度特性复合材料稳定翼结构: 中国, 201418001405.8[P]. 2017-05-31.
MEI Z Y, ZHAI Y W, ZHOU X S. A composite material stabilized wing structure with high rigidity for submarine: 201418001405.8[P]. 2017-05-31 (in Chinese).

[15] 梅志远, 李华东, 刘令, 等. 一种高刚度轻质实芯复合材料舵叶: 中国, 105599889B[P]. 2019-12-27.
MEI Z Y, LI H D, LIU L, et al. Solid composite rudder blade high in rigidity and low in weight: 105599889B[P]. 2019-12-27 (in Chinese).

[16] 孔斌, 顾杰斐, 陈普会, 等. 变刚度复合材料结构的设计、制造与分析 [J]. 复合材料学报, 2017, 34(10): 2121–2133.
KONG B, GU J F, CHEN P H, et al. Design, manufacture and analysis of variable-stiffness composite structures[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(10): 2121–2133 (in Chinese).

[17] 陈雪峰, 杨志勃, 田绍华, 等. 复合材料结构损伤识别与健康监测展望 [J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(1): 1–10.
CHEN X F, YANG Z B, TIAN S H, et al. A review of the damage detection and health monitoring for composite structures[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(1): 1–10 (in Chinese).

[18] 梅志远, 谭大力, 杨坤. FRC/钢燕尾槽单向连接结构强度特性及损伤机理 [J]. 材料科学与工艺, 2012, 20(1): 144–148.
MEI Z Y, TAN D L, YANG K. The design and mechanical characteristic research of swallow-tailed slot joint of FRC/steel[J]. Materials Science and Technology, 2012, 20(1): 144–148 (in Chinese).

[19] 梅志远, 杨坤, 周晓松, 等. FRC/钢 T 型燕尾槽连接结构抗弯损伤机理及强度特性研究 [J]. 材料科学与工艺, 2014, 22(3): 114–118.
MEI Z Y, YANG K, ZHOU X S, et al. The damage mechanism and bending strength characteristic of T type swallow-tailed slot joint of FRC/steel[J]. Materials Science and Technology, 2014, 22(3): 114–118 (in Chinese).

[20] 尹俊杰, 李曙林, 姚学玲, 等. 含雷击热−耦合损伤复合材料层压板拉伸剩余强度预测 [J]. 复合材料学报, 2017, 34(10): 83–90.
YIN J J, LI S L, YAO X L, et al. Tensile residual strength prediction of composite laminate with lightning strike thermal-mechanical coupling damage[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(10): 83–90 (in Chinese).

[21] 王程成, 贺德龙, 崔溢. 结构−导电复合材料研究进展 [J]. 材料工程, 2018, 46(9): 1–13.
WANG C C, HE D L, CUI Y. Research progress in electrically conductive structural composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(9): 1–13 (in Chinese).

[22] 安锐, 韦红余, 何敏, 等. 碳基复合吸波材料研究进展分析 [J]. 材料导报, 2017, 31(11): 46–53, 61.
AN R, WEI H Y, HE M, et al. The progress analysis of carbon-based composites used for electromagnetic wave absorption[J]. Materials Review, 2017, 31(11): 46–53, 61 (in Chinese).

[23] 徐嘉启, 梅志远. 声呐导流罩边界层壁面脉动压力研究进展 [J]. 中国舰船研究, 2018, 13(4): 57–69.
XU J Q, MEI Z Y. Research progress in sonar dome turbulent boundary layer wall fluctuating pressure[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13(4): 57–69 (in Chinese).