

船舶用复合材料底座优化设计与试验研究

Shuailong Zhou

洛阳船舶材料研究所 河南洛阳

【摘要】水下航行器的隐身需求不断提高，机械振动噪声的控制显得更为重要。本研究从传统金属底座出发，采用有限元仿真技术对金属底座的隔振性能进行评估，设计了复合材料底座和阻尼钢金属底座，模拟金属底座的结构类型。通过修改肋条结构实现复合材料底座隔振性能的优化，结合仿真结果和减重考虑确定基本结构形式。通过制作三种不同材料体系的底座模型，建立试验方法和评估标准，结果表明优化后的复合材料底座隔振性能优异，优于金属底座约 4.7dB（10kHz 以内）。本研究揭示了复合材料底座在水下航行器减振降噪方面的贡献，有助于复合材料底座在工程中的应用。

【关键词】金属底座；隔振性能；优化设计；复合材料底座

【收稿日期】2024 年 9 月 25 日

【出刊日期】2024 年 11 月 21 日

【DOI】10.12208/j.met.20240002

Optimization Design and Experimental Research of Composite Material Bases for Marine Applications

Shuailong Zhou

Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang, Henan

【Abstract】The stealth needs of underwater vehicles are increasing, therefore the control of mechanical vibration noise becomes more important. Initiating from a conventional metallic base, this investigation employs finite element simulation techniques to assess the vibration isolation performance of a metallic base. Designed are composite material base and damping steel-metal base, mirroring the structural typology of metallic base. Optimization of the vibration isolation performance of the composite material base is achieved through the modification of the rib structure, determining the fundamental structural form by integrating simulation results with weight reduction considerations. Fabrication of base models using three distinct material systems, alongside the establishment of test methodologies and assessment standards, reveals that the optimized composite material base excels in vibration isolation performance, surpassing the metallic base by approximately 4.7 dB (within 10 kHz). This investigation reveals the contribution of composite bases in vibration and noise reduction for underwater vehicles, which contributes to the application of composite bases in engineering.

【Keywords】Metallic Bases; Vibration Isolation Performance; Optimization Design; Composite Material Base

1 简介

底座在连接设备与船体方面起着至关重要的支撑作用^[1]。底座除了起到固定设备的作用外，也是传递振动的重要通道，机械设备产生的振动经过设备本身、隔振系统、基座、船体等各个环节，形成复杂的振动传递链系统^[2]。振动在传递过程中会产生各种形式的辐射噪声，这些噪声不仅加剧船舶噪声污染，影响船员健康，而且会大大降低船舶的稳性和隐身性，因此，引入隔振性能好的基座来减弱振动的传

递对船舶的发展具有重要意义^[3]。

近年来，基础隔振技术得到了众多学者的研究。温^[4]设计了包含四个支撑底座的模块，研究了内部底座结构形式和布置位置对壳体传递加速度响应大小的影响，并给出了壳体机械导纳的分布规律。彭^[1]利用 ANSYS 对底座进行优化设计，结果表明底座腹板对振动传递特性影响较大，而底座面板和肋板的影响较小，据此确定了面板、腹板和肋板厚度的最优组合。塞库尔斯基^[5]针对船舶结构设计问题，开

注：本文于 2024 年发表在 Journal of Applied Mathematics and Computation 期刊 8 卷 2 期，为其授权翻译版本。

发了一种基于标量目标函数的优化算法,对大型船舶结构部件进行拓扑和尺寸的多目标优化。

目前,大多数船舶底座采用普通钢材^[6,7]。但由于其阻尼低、刚度弱的特点,使得其减振效果不够理想^[3,4]为有效降低船舶噪声水平,在底座设计中需采用比强度高、比模量大、阻尼性能好的材料,以减轻底座自重,抑制振动传递^[7]因此,本文以金属材料基础作为研究投入,以复合材料基础作为研究目标,旨在满足减轻重量和降低噪声的重要要求。

本文以柴油发电机房压载水泵底座为研究对象,首先以常规金属底座为优化基准,设计相同结构的阻尼钢底座;然后以金属底座为参考,设计等刚度或总重量约束的复合材料底座,优化参数包括复合材料底座上板和筋板厚度;建立有限元模型对其隔振特性进行评估,比较不同材料体系、不同结构底座的隔振性能;基于优化结果制作模型,设计振动试验,完成复合材料底座的最终优化设计。

2 优化设计

2.1 模型建立

本研究根据船舶实际需要,以某在役船舶金属底座为研究对象,以传递到船体的振动加速度响应水平和水平降作为底座减振效果的评价指标,利用

有限元分析软件 ANSYS^[8]建立了多个底座有限元模型,涵盖不同的材料和结构形式。在相同的约束和激励条件下,对这些底座的隔振效果进行了全面的对比分析,并进行了试验验证。为模拟底座与船体的接触面,在模型下方引入了一块尺寸为 1.2m×1.08m 的钢制金属底板,模拟船舶的实际工况。在金属底板周围设置对称边界条件,模拟无限大的金属船体底部。

底座结构模型采用普通钢材,如图 1 所示。在此基础上,通过调整底座上板、腹板、下板的材质及厚度,设计了多种底座方案,并对其减振效果进行了详细分析。

在 ANSYS 软件中,采用 Shell 181 壳单元对模型进行网格划分,具体设置为底板网格尺寸为 15mm,底座网格尺寸为 10 mm。有限元结构图如图 2 所示。随后,采用全方法进行谐响应分析。计算频率范围设置为 10 至 10000 Hz,频率步长为 10 Hz。边界条件为底板周边固定支撑,在底座上板施加 Z 方向 A 单位激振力,该力垂直于板面。为求解谐响应,在底座上板表面选取 4 个点,在底板上选取 4 个点作为监测点,获取底座 Z 方向加速度信息。施加激振力位置及监测点位置分别如图 2、图 3 所示。

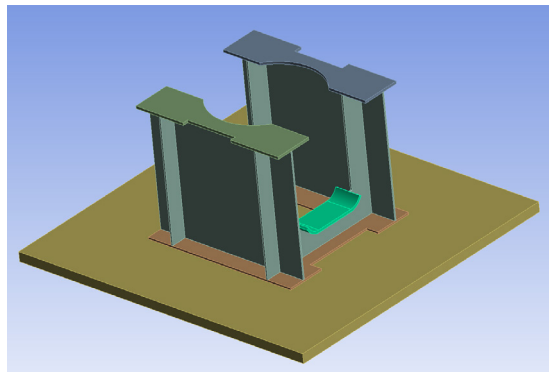


图 1 基础结构模型

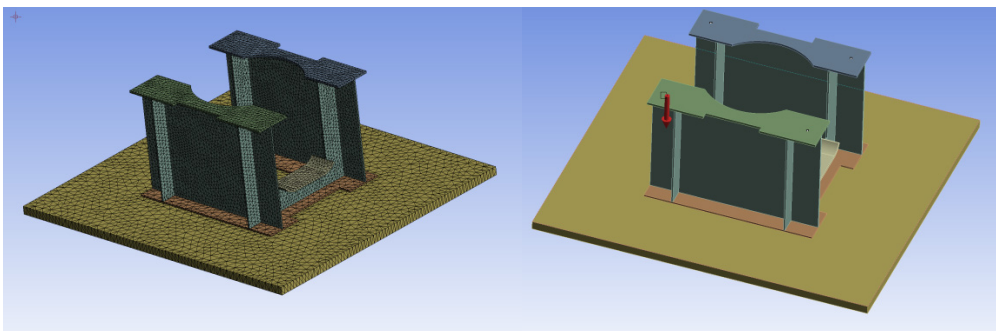


图 2 施加激励力的位置

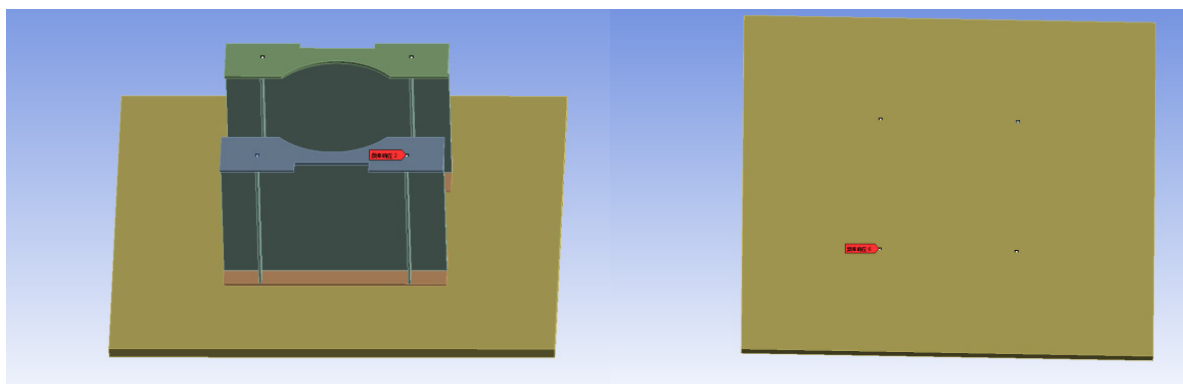


图3 监测点位置

表1 设计方案

	材料	上面板	腹板	底板	重量
方案1	钢	8毫米	6毫米	6毫米	55.2公斤
方案2	阻尼钢	8毫米	6毫米	6毫米	56.5公斤
方案3	复合材料	40毫米	32毫米	24毫米	55.1公斤
方案4	复合材料	40毫米	24毫米	32毫米	48.7公斤
方案5	复合材料	40毫米	24毫米	24毫米	46.5公斤
方案6	复合材料	40毫米	24毫米	18毫米	44.7公斤
方案7	复合材料	40毫米	18毫米	24毫米	40.2公斤

表2 材料特性

	弹性模量 (Gpa)		剪切模量 (Gpa)		密度 (千克/立方米)		泊松比	减震			
钢	196				7850		0.3	0.002			
阻尼钢	205				8081		0.3	0.025			
复合材料	18	18	6	5	5	4	1850	0.12	0.12	0.04	0.05

2.2 基础方案设计

为了优化底座的结构和材料,对模型的材料和厚度进行了更改,设计了如表1所示的几种方案。

方案一为基准方案,方案二在不改变钢底座结构尺寸的情况下,将材料由钢材改为阻尼钢,以增强其减振性能。方案三至方案七均为复合材料底座,复合材料类型相同。在保持钢底座外形尺寸不变的情况下,改变了底座面板、腹板和底板的厚度。方案三和方案四上面板厚度取钢底座上面板厚度40mm的5倍;方案五和方案六腹板和底板厚度分别取钢底座腹板和底板厚度的4倍和4倍;方案七分别取钢底座腹板和底板厚度的3倍和4倍。底座材料参数如表2所示。

3 结果与讨论

3.1 计算标准

计算了各基础方案的减振效果,七种基础方案下底板加速度响应水平对比图如图5所示。利用公式1提取基础上部面板振动加速度响应能量平均值。式2评价点处的振动加速度响应水平,式3综合了各频率点处的加速度响应水平,式4表示振动加速度响应水平的下降值。监测点平均振动加速度响应^[3,4,7]:

$$\bar{a} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m a_i^2} \quad (1)$$

公式中, m 为监测点数, a_i 为监测点处的加速度值。可以合成各频率点的加速度振动级^[3,4,7,9]:

$$L = 20 \lg \left(\frac{\bar{a}}{a_0} \right) \quad (2)$$

其中, a_0 是参考加速度, $a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$ 。总加速度振级可表示为^[3,9],

$$\bar{L}_a = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \cdot \Delta f \right) \quad (3)$$

其中, N 为采样点数, L_i 为采样点处的加速度振级, Δf 为谐响应计算的步长。加速度振级的下降 (L_p) 可以表示为^[3,9]:

$$L_p = 20 \lg \frac{\bar{a}_i}{\bar{a}_j} \quad (4)$$

其中, \bar{a}_i 和 \bar{a}_j 分别表示底座上、下板的总加速度级。

3.2 数值结果

7种基础方案振级降幅对比图如图6所示。由图5、图6可知,在大部分频段,钢基础的阻尼效果最差,其次是阻尼钢,复合材料基础的阻尼效果最好。其中方案6(上板厚度为40mm,腹板厚度为24mm,底板厚度为18mm)的阻尼效果最好。

为便于对比分析7种基础方案的减震效果,表3列出了各方案上板和底板的总加速度级(TAL),并计算了各方案的总加速度级降幅。对比底板加速度级,方案6的总级降幅最大,为47.8dB。另外,对比各方案上板和底板的总级降幅,方案6的复合

材料基础的级降幅也最大,约为24dB。方案6中复合材料基础的上板最厚,底板最薄,腹板厚度介于二者之间。

为进一步研究隔振规律,对方案3,5,7的阻尼效果进行了分析。这3种方案中,底座上板和底板厚度保持不变,仅改变腹板厚度。通过对比分析发现,底座的阻尼效果并不随腹板厚度的变化而呈线性变化。当腹板厚度为18mm时,底座总级降为23.2dB。当腹板厚度增加到24mm时,总级降降低为12.4dB,阻尼效果有所降低。但随着腹板厚度继续增加到32mm,底座总级降增加到18.5dB,级降呈增大趋势。

进一步分析了方案4,5,6的阻尼效果。这3种方案中,底座上板和腹板厚度保持不变,仅改变底板厚度。通过对比分析发现,底座的阻尼效果也不是随底板厚度线性变化的。当底板厚度为18mm时,底座总级降为24.8dB。当底板厚度增加到24mm时,总级降降低为12.4dB,阻尼效果有所降低。但当底板厚度继续增加到32mm时,底座总级降增加到20.2dB,级降呈增大趋势。

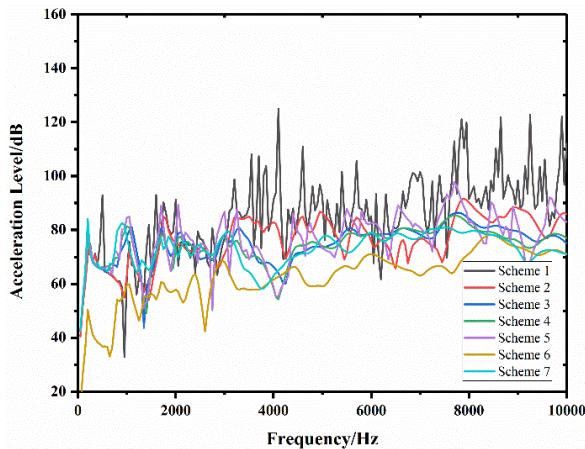


图4 底板加速度振动水平比较

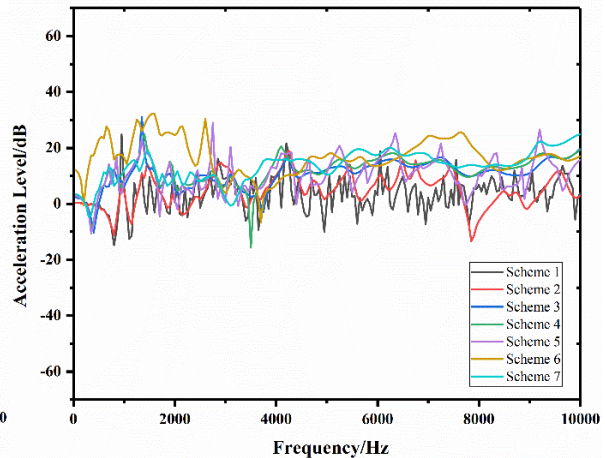


图5 加速度振动水平差异比较

表3 总体加速度水平统计表

	底部上面板的 TAL/dB (L1all)	底座底板 TAL/dB (全部 L2)	TAL 差/dB	与钢制底座相比 TAL 差异/dB
方案 1	172.5	169.2	3.3	
方案 2	143.5	137.3	6.2	31.9
方案 3	151.1	132.6	18.5	36.6
方案 4	151.8	131.6	20.2	37.6
方案 5	153.2	139.8	12.4	29.4
方案 6	146.6	121.8	24.8	47.4
方案 7	152.8	129.6	23.2	39.6

3.3 结构测定

由上述分析可知,在复合材料底座设计中,腹板与上面板厚度存在着对应的匹配关系,单纯增加肋板厚度并不能达到预期的隔振效果,应根据实际需求进行协调设计。

通过对7种底座方案的阻尼效果分析,可以确定上板厚度为40mm、腹板厚度为24mm、底板厚度为18mm的复合材料底座(方案6)可以达到本文所要求的最佳隔振效果,该结构底座重量低于钢底座和阻尼钢结构,在10~10000Hz频率范围内,总级降为24.8dB,比钢结构大21.5dB,比阻尼钢结构大18.6dB;与钢底座相比,传递到底板的加速度总级降减小47.4dB,与阻尼钢底座相比减小15.5dB,该设计同时满足了轻量化和减振的要求。

4 实验

为了验证上述复合材料底座优化设计的隔振特性,对钢、阻尼钢和复合材料底座进行了频响试验。边界条件、激励条件、激励点和测量点与仿真中的位置保持一致。总加速度级的计算值和测量值如表4所示。由于计算和测量时采用的激励信号不同,加速度的绝对值也不同。但可以根据总级降进行比较。

从表中可以看出,无论是计算结果还是实测结果,总水平落差和底板加速度总水平都呈现出钢基座<阻尼钢基座<复合材料基座的规律。这表明提高钢材的阻尼特性可以有效增强基座的隔振效果,其中复合材料基座的减振效果最好。将仿真结果与试验结果对比,可以得出仿真优化结果可以有效指导复合材料的设计。

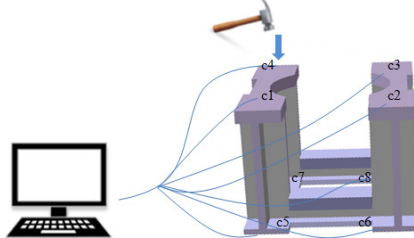


图6 振动测试实验概念图

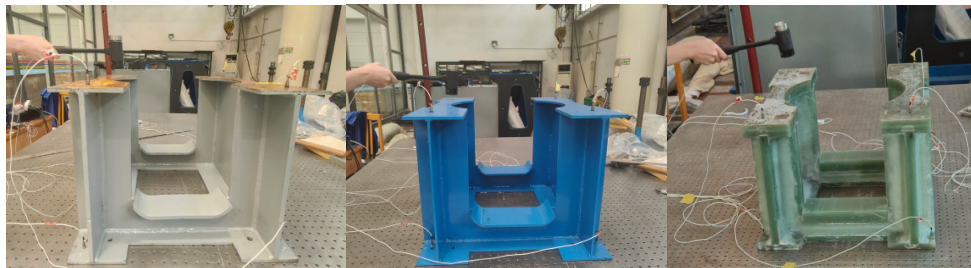


图7 底座振动试验现场图

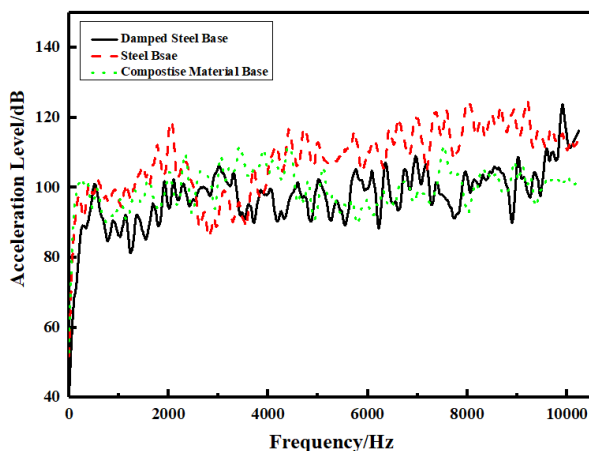


图8 实验测试结果

表4 总体加速度水平统计表

	底部上面板的	底座底板 TAL/dB (全)	TAL 差值/dB (L1 全部-L2)	与钢制底座相比 TAL
钢基座	111.4	111.7	2.7	
阻尼钢底座	119.9	107.7	7.2	4.0
复合材料基地	115.3	107.0	8.3	4.7

5 结论

以金属底座为设计输入对象，以等刚度、等重量为设计准则，设计不同结构的复合材料底座，通过仿真计算，对比不同复合材料方案、金属方案、阻尼钢方案的振动特性，结合仿真结果，确定最优的复合材料底座方案，最后进行试验验证，验证相应结论。

(1) 对于复合材料底座设计，肋板、面板及腹板厚度之间存在着对应的匹配关系，单纯增加肋板厚度并不能达到预期的隔振效果，需要根据实际需求进行协同设计。

(2) 采用等刚度、等重量作为优化设计约束，不同结构底座的试验结果与仿真计算规律一致，总水平跌落和底板加速度总水平大小顺序为：钢底座<阻尼钢底座<复合材料底座。

(3) 增强钢材的阻尼特性可有效增强底座的隔振效果，与钢制底座相比，复合材料不仅可减轻底座结构自重，还能提高隔振效果，从而同时满足船舶轻量化和减振降噪的设计要求。

参考文献

- [1] Pang, F. Z., Jin, Y. Q., Yao, X. L. APDL based vibration optimization of a ship foundation. *Advanced Materials Research*. 2011; 338:525-529.
- [2] Kitamura, M., Hamada, K., Takezawa, A., Uedera, T. Shape optimization system of bottom structure of ship incorporating individual mesh subdivision and multi-point constraint. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*. 2011; 21(3):209-215.
- [3] Cai, S., Zhang, W., Zhu, J., Gao, T. Stress constrained shape and topology optimization with fixed mesh: a b-spline finite cell method combined with level set function. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2014; 278:361-387.
- [4] Wen, H. B., Zuo, Y. Y., Peng, Z. L., Shen, H. Experimental study on vibrational transmission characteristics of a ring-stiffened cylindrical shell model. *Applied Mechanics and Materials*. 2012; 226-228, 285-289.
- [5] Sekulski, Z. Multi-objective topology and size optimization of high-speed vehicle-passenger catamaran structure by genetic algorithm. *Marine Structures*. 2009; 22(4):691-711.
- [6] Wang, R., Gu, Z., Wang, C., Yu, M., Han, W., Yu, L. (2024). Vibration shock disturbance modeling in the rotating machinery fault diagnosis: a generalized mixture Gaussian model. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 220.
- [7] Shahbazzadeh, Z. J., Vatankhah, R. Nonlinear mathematical modeling and vibration suppression control of a flexible tethered satellite system in an orbital transfer mission. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*. 2024; 48(3):1447-1458.
- [8] Jiang, J., Chen, L. J., Chai, W. C., Yong-Lin, A. I., Xiao-Duo, O. U. Analysis of deformation and force behavior of pile in double-parameter layered foundation subjected to combined horizontal dynamic load and torsional vibration. *Rock and Soil Mechanics*. 2024; 45(4):961-972.
- [9] Li, T., Zhao, X., Xiao, M. A. Dynamic Response Study of Overhead Contact System Portal Structure Based on Vehicle-Track-Bridge Coupled Vibration. 2024.

版权声明：©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS