

基于 AHP 方法的行星齿轮箱箱体阻尼敷设方案评价研究

魏博文, 常山, 栾圣罡, 张坤

(中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要: 针对行星齿轮箱箱体阻尼敷设方案减振效果评价问题, 以某型行星变频调速齿轮箱为研究对象, 基于层次分析法(AHP)建立阻尼敷设方案评价指标体系, 以阻尼层厚度和阻尼材料损耗因子作为方案的定量指标, 并结合方案的定性指标多方案对比分析, 选出最优的阻尼敷设方案。建立了5种箱体阻尼敷设方案的有限元模型, 仿真分析得出模型机脚测点的振动加速度级。结果表明: 阻尼层厚度和阻尼材料损耗因子对测点处机脚振动加速度级大小影响显著; 选用SA-3为阻尼材料、阻尼厚度为14 mm的方案5, 经指标体系评价确定为最优阻尼敷设方案, 较原模型振动加速度级峰值平均下降了1.64 dB, 优于其他4种阻尼敷设方案, 验证了评价方法的正确性。

关键词: 齿轮箱; 层次分析法; 综合评价; 阻尼减振

中图分类号: TH132 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.03.025

[引用本文格式] 魏博文, 常山, 栾圣罡, 等. 基于 AHP 方法的行星齿轮箱箱体阻尼敷设方案评价研究[J]. 热能动力工程, 2024, 39(3): 200-206. WEI Bo-wen, CHANG Shan, LUAN Sheng-gang, et al. Evaluation of damping laying scheme of planetary gear box based on AHP method[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(3): 200-206.

Evaluation of Damping Laying Scheme of Planetary Gear Box based on AHP Method

WEI Bo-wen, CHANG Shan, LUAN Sheng-gang, ZHANG Kun

(No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078)

Abstract: Aiming at the vibration reduction effect evaluation of damping laying scheme of planetary gear box, a certain type of planetary variable frequency and speed regulating gear box was taken as the research object, the index system of damping laying scheme was established based on analytic hierarchy process (AHP), and the damping layer thickness and damping material loss factor were taken as the quantitative indexes of the scheme. Combined with the qualitative index of the scheme, the optimal damping laying scheme was selected by comparing and analyzing the schemes. The finite element model of the damping laying scheme of five boxes was established, and the vibration acceleration level of the model foot at the measuring point was obtained by simulation analysis. The results show that the damping layer thickness and damping material loss factor have significant effects on the vibration acceleration level of the foot at the measuring point. The scheme 5 is selected as the optimal damping laying scheme by the index system, in which the damping layer thickness is 14 mm and the damping material is SA-3. The model peak vibration acceleration level decreases by 1.64 dB on average compared with the original model, which is better than other 4 damping laying schemes, verifying the correctness of the evaluation method.

Key words: gear box, analytic hierarchy process (AHP), comprehensive evaluation, damping vibration reduction

收稿日期: 2023-09-29; 修订日期: 2023-11-24

作者简介: 魏博文(1998-), 男, 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所助理工程师。

通信作者: 常山(1965-), 男, 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所研究员。

引言

船舶电力推进系统大多采用推进电机与螺旋桨直连的方式,省去了齿轮传动箱,在高频噪声的抑制方面有一定的作用。但该方式存在总重量大、布置空间大、电机长时间运行可靠性较低等问题^[1-2]。因此提出在推进电机与螺旋桨之间加入行星变频调速齿轮箱作为改进方案。行星变频调速齿轮箱具有结构紧凑、可靠性高、功率密度大和传动效率高等特点^[3],适用于船舱等空间较小的环境。

行星变频调速齿轮箱中同时参与啮合的齿轮副数量多,具有多个齿轮副之间载荷均匀分配要求高、传动系统振动模式多且固有频率分配密集等特点。针对加入行星变频调速齿轮箱可能带来的振动问题,采用敷设阻尼的方法对箱体进行减振处理^[4-6]。敷设阻尼材料的作用是通过阻尼层内部分子间的相对滑移产生较大的剪切变形,以此耗散振动能量,达到减振降噪的目的^[7]。但由于阻尼层厚度和阻尼材料的差异,不同的阻尼敷设方案减振效果也存在较为显著的差异。为此,选用合适的综合评价方法对方案进行合理评价尤为重要。

在对多方案进行对比分析并优选时,常引入数学统计领域的方法。王勇^[8]通过层次分析法建立评价指标体系,确定了隧道状态的各评价指标间的权重关系,进而对解决方案进行评价。王雷等人^[9]提出考虑融合权重优化与冲突信息来源的大坝安全综合评价方法,应用于中国西南地区某高心墙堆石坝的安全评价,处理了大坝多源信息融合中的证据冲突问题。顾艳玲等人^[10]将熵权法和灰色关联度有机结合,建立基于熵权和灰色关联分析的大坝安全综合评价方法,对安全性做出较为客观的评价。层次分析法由于其简单有效的结构特点,常用在多指标、多层次、多方案的综合评价中。

本文将基于层次分析法构建评价指标体系,对阻尼敷设方案进行综合评价优选,并利用仿真分析对阻尼敷设方案进行验证,证明了该评价体系的有效性和正确性。

1 层次分析综合评价法

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是一种处理多目标、多准则、多因素、多层次的定性与定量结合的决策法,能够为复杂的决策问题提供高效、简单的决策方法^[8]。该方法适用于本研究多

指标,多参数的复杂评价背景。首先,将复杂的决策问题(目标层)分解为多指标阶梯式(准则层)的层次结构,并构建评价指标体系。其次,对定量指标进行一致化处理,即不同类型的指标均转化为极大值指标,并对定量指标进行归一化处理。对于定性指标则邀请相关专家按照 0-9 标度法对同一层次的指标打分并进行归一化处理。然后,判断同一层次各指标的相对重要性,运用判断矩阵计算出每一层的各指标的权重值,并进行一致性检验。最后,利用各指标权重值计算阻各尼敷设方案分数,得分最高的方案即为最优方案。AHP 分析流程如图 1 所示。

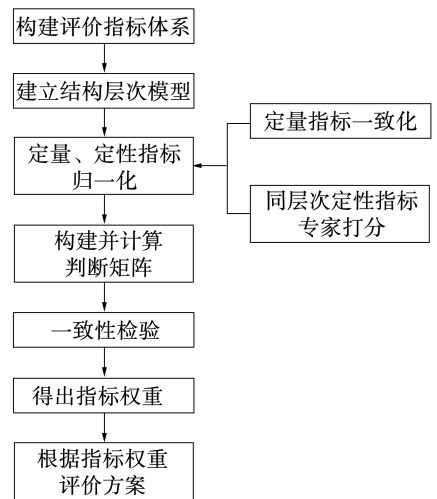


图 1 AHP 分析流程图

Fig. 1 AHP analysis flow chart

2 基于 AHP 法的齿轮箱阻尼方案建立

本文的研究对象为某型行星变频调速齿轮箱,针对齿轮箱敷设方案基于 AHP 法对方案进行优选。

2.1 箱体有限元模型的建立

由于箱体结构复杂,因此在不影响实体模型计算精度情况下,对箱体尤其是轴承座进行了简化。

齿轮箱体有限元模型如图 2 所示。箱体结构单元数为 534 526,节点数为 151 258。

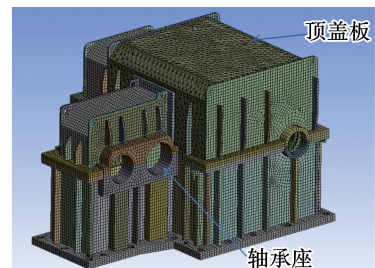


图 2 齿轮箱有限元模型

Fig. 2 Finite element model of gearbox

2.2 模态分析

在结构的动态分析中,各阶模态所具有的权重因子大小与该阶模态频率的倒数成正比,即频率越低,权重越大。采取底面约束方式(约束螺栓孔附近处的节点),计算得到箱体的前 20 阶模态频率如

表 1 未经阻尼敷设的箱体的前 20 阶模态频率

Tab.1 The first 20 order modal frequencies of undamped box

参 数	模态									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
频率/Hz	142.99	163.49	183.01	188.75	230.92	240.97	255.58	276.44	283.58	315.75
参 数	模态									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
频率/Hz	324.81	325.40	353.44	361.17	369.08	373.58	390.98	414.68	427.94	442.50

2.3 阻尼敷设方案

阻尼敷设方案中,阻尼材料和阻尼层厚度对箱体阻尼减振的效果影响很大。不同阻尼材料的阻尼损耗因子也不同,损耗因子越大,材料所消耗的振动能量越大,减振效果越明显。自由阻尼结构下,复合材料阻尼性能随着阻尼层厚度的增加,损耗因子呈逐渐增加的趋势。

考虑到影响阻尼减振的因素和实际阻尼敷设的难度和经济性,阻尼层厚度在 2 ~ 14 mm 范围内取值,按不同厚度和阻尼材料形成 5 种阻尼敷设方案,如表 2 所示。箱体材料为结构钢。材料参数如表 3 所示。

表 2 阻尼敷设方案

Tab.2 Damping laying schemes

方案	阻尼层厚度/mm	阻尼材料
1	2	SA-3
2	2	DFM
3	6	SA-3
4	10	SA-3
5	14	SA-3

表 3 材料参数

Tab.3 Material parameters

材料	密度/kg·m ⁻³	弹性模量/MPa	泊松比	损耗因子
结构钢	7 850	200	0.30	0.02
SA-3	1 760	314	0.49	1.38
DFM	1 420	181	0.45	1.06

2.4 AHP 法评价阻尼敷设方案

2.4.1 箱体阻尼敷设方案指标评价体系的构建

按照梯阶层次结构及建立原则,本研究建立的

表 1 所示。选取箱体的第 2 阶模态振型用以分析振型对振动的影响,通过分析第 2 阶模态振型得出,顶盖板的应变能变化较大。因此,主要对顶盖板进行自由阻尼处理。

阻尼敷设方案指标体系包含 3 个层次:第 1 层次是箱体阻尼敷设方案指标体系;第 2 层次是减振性能指标和保障指标;第 3 层是评价阻尼方案的具体指标(阻尼材料损耗因子、阻尼层厚度、可靠性、可维性)。

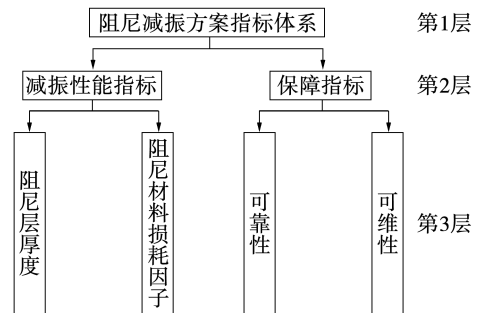


图 3 阻尼敷设方案指标体系构建

Fig.3 Index system construction of damping laying scheme

阻尼层厚度属于减振性能指标。自由阻尼结构下,复合材料的阻尼减振性能随着阻尼层厚度的增加而增强,阻尼结构的减振效果就越明显。

阻尼材料损耗因子属于减振性能指标。不同阻尼材料其阻尼损耗因子也不同,损耗因子越大,材料所消耗的振动能量越大,减振效果越明显。

可维性属于保障指标,指的是齿轮箱在满足阻尼减振效果的前提下结构简单、方便维修。阻尼减振方案在设计时要考虑到阻尼结构后续维护与保养是否简洁、方便,太过繁杂的阻尼结构设计会导致在后续维护时容易破坏阻尼结构,从而降低减振效果。

可靠性属于保障指标,指的是平均故障间隔时间。在船舱中空气湿度较高、流通较差且呈弱碱性

的条件下,较厚的阻尼层可使在被海水侵蚀后仍具有一定的减振效果,阻尼减振方案设计理论要求阻尼结构寿命无限长,维护周期长。

2.4.2 定量指标一致化

定量指标包括阻尼材料损耗因子和阻尼层厚度,均属于极大值指标,无需转换可直接进行定量指标归一化处理,处理结果如表4所示。

表4 定量指标分析

Tab.4 Quantitative index analysis

Table with 5 rows and 5 columns: 方案, 阻尼层厚度/mm (原始数据, 归一化处理), 阻尼材料损耗因子 (原始数据, 归一化处理). Values range from 1 to 14 for thickness and 1.38 to 1 for loss factor.

2.4.3 定性指标一致化

定性指标是指不能直接量化,需要通过其他手段对指标进行处理,转变成可以量化的评估指标。本研究中定性指标指的是性能指标下的可靠性与可维性指标。为消除主观性对评价结果的影响,邀请5位各领域专家对定性指标进行评分。在对方案的定性指标进行打分前,需要计算5位专家的权重系数。表5为专家资格评价指标体系。

表5中,准则层指标所表示的指标层的指标项总和由公式(1)计算:

R_i = sum_{j=1}^{k_i} R_ij (1)

式中:R_i—专家的第i个准则层指标;k_i—R_i中的指标层个数;R_ij—R_i中第j个指标层指标。

表5 专家资格评价指标体系

Tab.5 Expert qualification evaluation index system

Table with 4 columns: 目标层, 准则层, 权重, 指标层. Rows include criteria like 教育背景, 实践能力, 理论能力, 行业关注 with weights 20, 30, 30, 20.

在准则层指标权重方面,教育背景占总比例20%,实践能力占总比例30%,理论能力占总比例30%,行业关注占总比例20%。

根据式(2)计算专家资格综合评价指标的得分:

E = sum_{i=1}^4 P_i R_i (2)

式中:E—专家资格综合评价最终得分;P_i—准则层指标的权重值。

结合表5所示的4个准则层指标及其权重,得出专家1~专家5的权重分别为0.2,0.2,0.15,0.25和0.2。

定性指标的属性值由专家根据评价分要求决定,越接近评分要求专家给予的评分就越高。采用0~9标度法对指标进行评价,结合专家权重完成对定性指标的打分,并根据式(3)进行归一化处理。处理后的打分情况如表6所示。

x* = (x - x_min) / (x_max - x_min) (3)

式中:x*—归一化处理后的数值;x_max—样本数据的最大值;x_min—样本数据的最小值。

表6 定性指标专家打分情况

Tab.6 Expert scoring of qualitative index

Table with 14 columns: 方案, 可靠性 (专家1-5), 综合得分, 归一化处理, 可维性 (专家1-5), 综合得分, 归一化处理. Values range from 4.5 to 8 for reliability and 0.12 to 1 for normalization.

2.4.4 指标权重计算

根据前文建立的指标体系,构造判断矩阵 $C = (c_{ij})_{n \times n}$, 求解各指标的权重值。在构造判断矩阵之前,应先对同一层次的各指标重要程度进行比较,表 7 给出了同层次的指标 x_i 比 x_j 重要时两指标间重要程度量化值规定,若指标 x_j 比 x_i 更为重要,则其重要程度量化值为表 7 给出的量化值的倒数。

表 7 指标量化值

Tab.7 Quantitative value of index

相对重要程度	量化值
因素 i 比因素 j 同等重要	1
因素 i 比因素 j 稍微重要	3
因素 i 比因素 j 较强重要	5
因素 i 比因素 j 强烈重要	7
因素 i 比因素 j 极端重要	9
两相邻判断的中间值	2,4,6,8

在计算所有指标权重前,要先计算各层次指标权重。列出参数、性能指标间的判断矩阵,如表 8 所示。

表 8 参数、性能指标间判断矩阵

Tab.8 Judgment matrix between parameter and performance index

判断矩阵	参数指标	性能指标
参数指标	1	3
性能指标	0.33	1

采用 0~9 标度法对指标进行两两对比,计算每个判断矩阵的最大特征根 λ_{max} 并对矩阵进行一致性检验。

根据式(4)计算判断矩阵的最大特征根 λ_{max} :

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{nW_i} \quad (4)$$

式中: $(Aw)_i$ —向量 Aw 的第 i 个元素; W_i —权重向量; n —矩阵阶数。

根据式(5)对建立的判断矩阵进行一致性计算检验:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

式中: CI—一致性指标。

根据式(4)~(5)和表 8 计算出最大特征值为 2.0,平均随机一致性指标为 0,参数指标权重值 0.75;性能指标权重值为 0.25。

列出参数指标下的阻尼层厚度指标和阻尼材料损耗因子指标的判断矩阵如表 9 所示。

表 9 参数指标下各指标间判断矩阵

Tab.9 Judgment matrix of each index under parameter index

参数指标	阻尼层厚度	阻尼材料损耗因子
阻尼层厚度	1	4
阻尼材料损耗因子	0.25	1

根据式(4)~式(5)和表 9 计算得出参数指标最大特征值为 2.0,平均随机一致性指标为 0,阻尼层厚度权重值 0.8;阻尼材料损耗因子权重值为 0.2。

列出性能指标下的可维性指标和可靠性指标的判断矩阵,如表 10 所示。

表 10 性能指标下各指标间判断矩阵

Tab.10 Judgment matrix of each index under performance index

性能指标	可维性	可靠性
可维性	1	2
可靠性	0.5	1

根据式(4)、式(5)和表 10 计算得出,性能指标最大特征值为 2.0,平均随机一致性指标为 0,可维性权重值为 0.67,可靠性权重值为 0.33。

CI 值越大表明判断矩阵偏离程度越大;CI 值越小、越接近于 0 表明判断矩阵的一致性越好。当判断矩阵具有完全一致性时 $CI = 0$ 。以上 3 个判断矩阵皆具有完全一致性。最终,得到的方案得分情况如表 11 所示。

表 11 阻尼敷设方案得分

Tab.11 Scoring of damping laying scheme

方案	阻尼层厚度	损耗因子	可靠性	可维性	得分
1	0	1	0.12	1	0.33
2	0	0	0	0.72	0.12
3	0.33	1	0.37	0.37	0.44
4	0.67	1	0.72	0.12	0.63
5	1	1	1	0	0.83

对比5个方案的综合得分,方案5得分最高,为0.8325,因此选择方案5为最优阻尼敷设方案。

3 阻尼敷设方案减振效果仿真分析

建立阻尼敷设方案指标体系并选出最优方案后,通过仿真分析的方法,对5种方案进行模态分析和谐响应分析来验证评价系统的正确性。在某一频率处存在振动加速度级的峰值,通过附加阻尼来降低峰值处的振动能量,降低的幅值越大,敷设方案的减振效果越好。

3.1 箱体扫频分析

齿轮箱转频范围为0.5~35.2 Hz,啮频范围为61.5~1 275 Hz,扫频加载方式为轴承位置施加径向载荷,载荷值为500 N。在0~1 500 Hz区间内扫频分析,输出全部频率结果,得到测点激励响应。扫频结果表明,在260~400 Hz频段共振明显。因此,本文主要针对此频段进行阻尼敷设方案仿真分析。

3.2 各阻尼敷设方案下的箱体谐响应分析

采用模态叠加法对各阻尼敷设方案进行谐响应分析计算。选择转速和重载要求相对较大轴承的轴承力作为箱体输入激励。使用 masta 软件计算轴承力,其中电机转速为1 749 r/min,功率为225 kW。齿轮计算参数如表12所示。

表12 齿轮计算参数

Tab.12 Gear calculation parameters

参数	动力端齿数		传动端齿数	
	1	2	1	2
齿数	29	141	31	141
模数/mm	4.5	4.5	8	8
分度圆螺旋角/(°)	27.34	27.34	11.5	11.5
刀具齿形角/(°)	20	20	20	20

在轴承座上(位置如图2)施加垂向激振力(如图4)。该力考虑了包括齿轮啮合冲击、啮合刚度波动等内部激励,齿轮激励会通过传动轴传递到轴承再传递到箱体上,最终传递到箱体的机脚螺栓附近。因此,将箱体底面的5个典型的螺栓孔作为振动响应测点,5个测点的位置分布及编号如图5所示。

输入轴承激励后,测点1在不同方案下的振动加速度级如图6所示,其余测点趋势与测点1趋势相同。

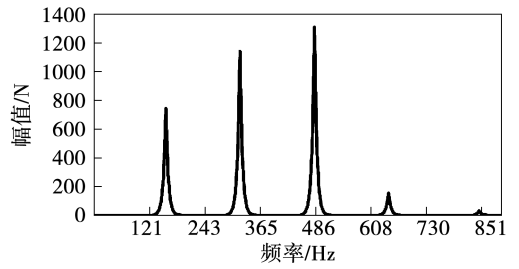


图4 轴承垂向激振力

Fig.4 Vertical exciting force of bearing

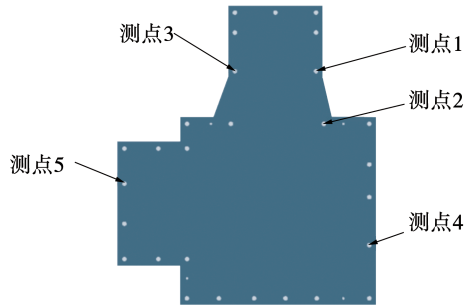


图5 机脚5个典型测点布置图

Fig.5 Layout of 5 typical measuring points at the foot of the machine

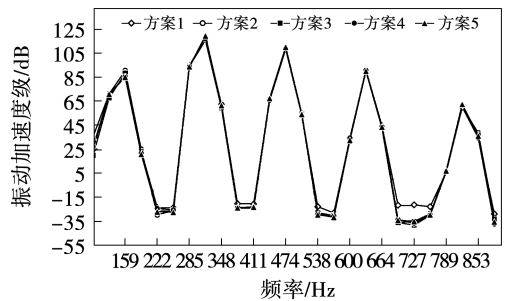


图6 测点1在5个方案下机脚振动加速度级响应图
Fig.6 Response diagram of vibration acceleration level of foot at measuring point 1 in 5 schemes

3.3 阻尼敷设方案结果对比

表13为各阻尼敷设方案下各测点振动加速度级峰值。根据表13可知,采用阻尼敷设方案5后测点3处振动加速度级峰值和原模型相比下降幅度为2.95 dB;机脚处的5个典型测点振动加速度级峰值平均下降幅度为1.64 dB。方案1,2,3,4机脚处的5个典型测点振动加速度级峰值平均下降幅度分别为0.57,0.50,0.47和1.27 dB。方案5优于其他4种敷设方案。仿真分析结果与阻尼敷设方案评估结果一致,证明了阻尼敷设方案评估方法的正确性。

表 13 各阻尼敷设方案下各测点振动加速度峰值
Tab. 13 Peak vibration acceleration at each measuring point in each damping laying scheme

测点	原模型/	阻尼处理方案/dB				
	dB	1	2	3	4	5
1	117.27	116.77	117.46	117.24	115.64	114.59
2	120.79	119.86	119.55	120.05	118.92	119.73
3	124.34	123.41	123.62	123.04	121.71	121.39
4	118.75	118.81	118.31	119.00	119.09	118.25
5	121.06	120.52	120.76	120.52	120.48	120.08
平均值	120.44	119.87	119.94	119.97	119.17	118.80

4 结 论

(1) 基于层次分析法建立了行星变频调速齿轮箱阻尼敷设方案的综合评价体系, 通过该评价方法可以快速有效地对阻尼敷设方案进行初步评估, 从而选出最优的阻尼敷设方案。

(2) 通过在顶盖板附加自由阻尼结构, 使得 5 个机脚典型测点的振动加速度级均有不同程度的降低, 方案 1, 2, 3, 4, 5 振动加速度级峰值均值分别下降 0.57, 0.50, 0.47, 1.27 和 1.64 dB。

(3) 通过对各阻尼敷设方案减振效果进行仿真分析发现, 顶盖板采用阻尼层厚度 14 mm、阻尼材料为 SA-3 自由阻尼结构的方案 5 为最优方案。验证了基于层次分析法建立的综合评价体系的准确性和有效性。

参考文献:

[1] 孙 玥. 船舶综合电力推进系统故障诊断技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
 SUN Yue. Research on fault diagnosis for the shipboard integrated electric propulsion system [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.

[2] 廖林豪. 船舶电力推进系统自适应控制策略研究 [D]. 武汉市: 武汉理工大学, 2021.
 LIAO Lin-hao. Research on adaptive control strategy of marine electric propulsion system [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2021.

[3] 尤明明, 彭龙龙, 靳 军. 基于相位调谐理论的高速行星齿轮箱振动抑制改进设计 [J]. 船舶工程, 2018, 40(4): 51 - 54, 65.

YOU Ming-ming, PENG Long-long, JIN Jun. Improved design for reducing vibration of high-speed planetary gear box based on phase tuning theory [J]. Ship Engineering, 2018, 40(4): 51 - 54, 65.

[4] 刘 岚, 亢 琨, 席英杰, 等. 薄壁齿轮箱结构声强可视化及减振方法研究 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2022, 36(11): 282 - 291.
 LIU Lan, KANG Kun, XI Ying-jie, et al. Study on visualization of structural sound intensity and vibration reduction method of thin-walled gearbox [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(11): 282 - 291.

[5] 李 辉. 大功率舰船用齿轮箱箱体结构的减振降噪方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
 LI Hui. Research on vibration and noise reduction method for high power marine gearbox housing structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

[6] 鄢条广. 舰船薄壁齿轮箱体的振动噪声特性及阻尼结构优化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
 YAN Tiao-guang. Research on vibration and noise characteristics and damping structure optimization for ship thin-walled gearbox housing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.

[7] KARDOMATEAS G A, RODCHEUY N, FROSTIG Y. First-order shear deformation theory variants for curved sandwich panels [J]. AIAA Journal, 2018, 56(2): 1 - 10.

[8] 王 勇. 铁路隧道状态综合评价方法及检修周期策略研究 [D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2023.
 WANG Yong. Research on comprehensive evaluation method of railway tunnel condition and maintenance cycle strategy [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2023.

[9] 王 雷, 王晓玲, 张 君, 等. 考虑融合权重优化与冲突信息源的大坝安全综合评价方法 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2023, 63(10): 1566 - 1575.
 WANG Lei, WANG Xiao-ling, ZHANG Jun, et al. Comprehensive evaluation method for dam safety considering fusion weight optimization and conflicting information sources [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2023, 63(10): 1566 - 1575.

[10] 顾艳玲, 杨永森. 一种基于熵权和灰色关联分析的大坝安全综合评价方法 [J]. 水利建设与管理, 2022, 42(7): 25 - 28.
 GU Yan-ling, YANG Yong-sen. A comprehensive evaluation method of dam safety based on entropy weight and grey correlation analysis [J]. Water Conservancy Construction and Management, 2022, 42(7): 25 - 28.

(姜雪梅 编辑)