

指导性文件
GUIDANCE NOTES

CG/Z-002-88



中华人民共和国船舶检验局

REGISTER OF SHIPPING OF
THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA

船上有害振动的预防

PREVENTION OF HARMFUL
VIBRATIONS ON BOARD SHIPS

1986

人民交通出版社

U661.4
Z 58

259451

指导性文件
GUIDANCE NOTES
CG/Z002-86



中华人民共和国船舶检验局

船上有害振动的预防

1 9 8 6

中华人民共和国船舶检验局
(86) 船规字第178号文批准

人民交通出版社

中华人民共和国船舶检验局

船上有害振动的预防

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

北京通县曙光印刷厂印

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张: 19.75 字数: 480千

1986年9月 第1版

1986年9月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—1,400册 定价: 8.30元

科技新书目[128-142]

统一书号: 6041.6035

前 言

为了有效控制船上有害振动与噪声的影响,保证船舶安全营运,我局组织国内有关专家及工程技术人员,编写了这本技术指导性文件《船上有害振动的预防》,供造船和航运部门试用。

编写本指导性文件,旨在供船舶设计中和建成后,船体和轮机工程技术人员综合分析和解决船上有害振动问题时参考。本文件不作为满足船舶入级和建造规范的内容,也不作为处理船舶振动问题的依据,同时也不排斥使用部门采用其他有效的方法来分析和解决船舶的振动问题。

目前,我们对船上各种振动研究的深度还不平衡,因而本指导性文件各章的内容也就存在详简不均的情况,编写时尽可能保持各章的独立性,但也注意到它们之间的相互关联,名词符号也力求做到统一。

船上各种振动及其相互影响是很复杂的,随着对这方面研究的深入发展,本指导性文件的内容将不断更新和修订,故恳望读者随时将使用的意见告知我局。

中华人民共和国船舶检验局

1985年5月

《船上有害振动的预防》

编辑委员会及编写成员名单

主任:

李勃仲 (上海交通大学)

马家骥 (船检局海船规范科学研究所)

委员 (以姓氏笔划为序):

张孝镛 (交通部上海船舶运输科学研究所)

陆鑫森 (上海交通大学)

周軼尘 (武汉水运工程学院)

周继良 (武汉水运工程学院)

蔡培荣 (人民交通出版社)

船体专业主编:

金咸定 (上海交通大学)

恽伟君 (交通部上海船舶运输科学研究所)

朱永峨 (船检局海船规范科学研究所)

轮机专业主编:

陈之炎 (上海交通大学)

许运秀 (船检局海船规范科学研究所)

各章执笔:

第一章: 钟学添 (船检局海船规范科学研究所)

贺继增 (中船总公司711所)

第二章: 朱永峨

第三章: 王国强 (上海交通大学)

第四章: 洪 铃 (船检局海船规范科学研究所)

第五章: 周軼尘

第六章: 贺继增

第七章: 聂德耀 (长江航运科学研究所)

第八章: 许运秀

第九章: 陈之炎

第十章: 邹鸿钧 (中船总公司611所)

第十一章: 金咸定

第十二章: 马广宗 (中船总公司上海船舶设计研究院)

第十三章: 恽伟君

第十四章: 赵德有 (大连工学院)

第十五章: 翁长俭 (武汉水运工程学院)

第十六章: 恽伟君

第十七章: 周顺序 (交通部上海船舶运输科学研究所)

目 录

第一章 通则	1
第一节 概述.....	1
第二节 定义.....	2
第三节 振动基础.....	2
第四节 船上振动与激励.....	5
第二章 防振设计流程	7
第一节 概述.....	7
第二节 第一设计阶段.....	9
第三节 第二设计阶段.....	10
第四节 第三设计阶段.....	11
第五节 其他.....	15
第三章 螺旋桨激励	17
第一节 概述.....	17
第二节 伴流场.....	17
第三节 激励.....	25
第四节 衡准.....	45
第五节 预防和减振措施.....	48
参考文献.....	55
第四章 柴油机不平衡力和力矩	57
第一节 概述.....	57
第二节 柴油机不平衡力和力矩.....	58
第三节 不平衡力矩对船舶的激励.....	61
第四节 衡准.....	63
第五节 预防措施.....	64
参考文献.....	67
第五章 柴油机机架振动	68
第一节 概述.....	68
第二节 激励源.....	69
第三节 机架振动计算.....	74
第四节 衡准.....	78
第五节 预防措施.....	78
参考文献.....	82
第六章 机械与设备的隔振	83
第一节 概述.....	83

第二节 固有频率计算	86
第三节 衡准	93
第四节 隔振措施	94
参考文献	100
第七章 轴系扭转振动	102
第一节 概述	102
第二节 当量系统	104
第三节 固有频率计算	107
第四节 响应计算	110
第五节 解析法——扩展的霍尔茨法	117
第六节 一缸不发火扭振计算	122
第七节 扭振产生的继发性激励	123
第八节 预防措施	128
参考文献	129
第八章 轴系纵向振动	131
第一节 概述	131
第二节 计算模型	132
第三节 固有频率计算	137
第四节 响应计算	139
第五节 衡准	148
第六节 预防措施	149
参考文献	151
第九章 轴系回旋振动	153
第一节 概述	153
第二节 回旋自由振动	155
第三节 固有频率计算	159
第四节 响应计算	175
第五节 衡准	178
第六节 回避措施	178
参考文献	179
第十章 轴系校中	181
第一节 概述	181
第二节 校中计算的内容和要求	182
第三节 静态校中计算	184
第四节 施工要则	193
第五节 校中检验	193
第六节 动态校中的研究	194
参考文献	199
第十一章 船体总振动	201
第一节 概述	201

第二节	船体梁固有频率的近似算法	202
第三节	船体梁振动的数学模型	210
第四节	船体梁总振动计算的有关参数的确定	212
第五节	船体梁固有频率的计算方法	218
第六节	避免总振动共振的设计考虑	225
	参考文献	226
第十二章	上层建筑振动	228
第一节	概述	228
第二节	影响上层建筑振动固有频率的主要因素	228
第三节	固有频率的估算	229
第四节	减振措施	230
	参考文献	231
第十三章	局部振动	232
第一节	概述	232
第二节	梁及梁部件的振动	232
第三节	平板的振动	234
第四节	板架的振动	244
第五节	机舱的振动	246
第六节	螺旋桨轴支架、轴包架、叶片、导管的振动	249
	参考文献	255
第十四章	船体振动响应及衡准	256
第一节	概述	256
第二节	船体梁振动响应	257
第三节	船体局部结构振动响应	259
第四节	上层建筑振动响应	264
第五节	船体振动衡准	266
第六节	减振措施	267
	参考文献	270
第十五章	内河船振动	272
第一节	概述	272
第二节	振动计算	272
第三节	衡准	274
第四节	防振与减振措施	277
	参考文献	278
第十六章	船舶耦合振动	279
第一节	概述	279
第二节	船体与船底的耦合振动	279
第三节	船体与上层建筑的耦合振动	284
第四节	船体与主机的耦合振动	284
	参考文献	285

第十七章	船舶噪声.....	286
第一节	概述.....	286
第二节	船舶舱室噪声级的预估.....	288
第三节	衡准.....	293
第四节	船舶噪声控制方法.....	295
	参考文献.....	305

第一章 通 则

第一节 概 述

1.1.1 船舶在海上航行,会产生不同程度的振动,如果振动系统固有频率与激励频率一致,就会产生共振。对于大功率推进装置,即使不处在共振状态,由于激励的增大,也可能引起剧烈的振动,甚至影响船舶的正常运行。为此强调指出,在设计阶段应认真考虑船上振动问题。

1.1.2 由于船上的振动而影响到:

- 船体结构和机械部件的疲劳损坏;
- 机器和设备的正常运转;
- 船上人员的正常工作与生活。

产生上述现象的振动称为有害振动。

1.1.3 船舶运行时,常见的振动现象有:

- 船体梁、上层建筑和尾部的振动;
- 板格、板架、桅杆和机舱等的振动;
- 推进轴系的振动;
- 机架和机械设备的振动。

1.1.4 振动控制的主要途径有:

- 减小激励力及其传递;
- 调频,改变振动系统的固有频率或激励频率,防止共振的产生;
- 增加阻尼,以吸收振动能量,达到减小振幅的目的;
- 装设减振装置。

1.1.5 为了在设计阶段进行船舶振动的预报,本指导性文件根据不同设计阶段,提供了一套减小船舶振动的设计流程,通过统计数据、经验公式或计算机程序估算及评价振动特性,以达到设计阶段就能预报或消除船上有害振动的目的。

对于营运中船舶的振动问题,可根据现有图纸资料进行必要的计算分析及实船测量,在实际可行的条件下,采取合适的减振措施,改善船舶振动特性。

1.1.6 为了达到良好的振动预报效果及处理好船上产生的振动问题,可从下面几方面进行研究:

- 激励力;
- 振动系统特性;
- 振动响应;
- 振动衡准;
- 减振措施。

1.1.7 船舶振动的激励源有原发性的,也有继发性的,它们会引起局部性或整体性的

振动。对船舶来说，不但要求原发性激励源引起的振动是可以接受的，同时也要求由继发性激励源引起的振动是可以接受的。

能够计算的继发性激励主要包括：

1. 轴系纵向振动；
2. 轴系扭转振动；
3. 轴系回旋振动；
4. 柴油机机架横向振动；
5. 柴油机机架纵向振动。

1.1.8 噪声同样会影响船上人员听力、健康和舒适感，因此在预防船上有害振动产生的同时，也要进行船上舱室噪声级的预报，并与衡准作相应对照。如果超过，应采取若干噪声控制措施。

第二节 定 义

本指导性文件所用的主要术语定义如下：

振动系统——包含有质量和弹性的有阻尼或无阻尼的任何系统。

稳态振动——持续的周期振动。

简谐振动——随时间按正弦函数规律变化的振动。

简谐次数——发动机或轴每一转出现的正弦波的个数。

固有频率——由系统的质量和刚度所决定的振动频率， n 个自由度系统，一般具有 n 阶固有频率，从小到大顺序排列，分别称为第 1 阶固有频率、第 2 阶固有频率，等等。

振幅——正弦波量（位移、速度、加速度）的最大值。

相对振幅——系统中某点振幅与参考点振幅的比值。

振型——表示系统各点相对振幅的曲线。

节点——系统某振型中相对振幅为零的位置。

波腹——系统某振型中相对振幅最大的位置。

激励——作用于系统并激起系统出现某种响应的外力或其他输入。

响应——系统对激励的反应。

共振——激励频率与系统某一阶固有频率相一致时的振动状态。

临界（共振）转速——发生共振时的转速。

第三节 振 动 基 础

1.3.1 简述

实际系统是十分复杂的，完全按其本来面目进行振动分析既不可能，也不必要。为此，必须首先建立能代表实际系统的简化的力学模型。这个模型应保持原系统的基本振动特性，但又不过于复杂。简化的程度取决于原系统的复杂程度、要求分析的精度以及拥有的计算手段。

简化模型一般可分为两大类，离散系统模型和分布系统模型。前者又可分为集总参数模型与有限元模型。

集总参数模型由三种基本元件组成,即惯性元件(集中质量)、阻尼元件(没有质量的阻尼器)、弹性元件(没有质量的弹簧)。它们分别把力与加速度、速度和位移联系起来,并以质量 m , 阻尼系数 c , 刚度 k 为其动力学参数。

分布系统模型由分布参数元件组成,分布参数元件通常是指质量、刚度均匀分布或按简单规律分布的连续弹性体。

显然对于同一实际系统,可以根据不同需要简化为几种不同的模型。在大多数情况下,都可近似离散为一多自由度系统,甚至可以简化为一单自由度系统。

在振动分析中单自由度系统的振动特性具有基础性质,由它可以引出振动的许多基本概念。

分布系统虽然理论上无穷多个固有频率,但具有实际意义的只有几个低阶固有频率及其相应的振型。

1.3.2 单自由度系统的自由振动

图 1.3.1 为一单自由度系统。

其运动方程式为:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (1.3.1)$$

式中: m ——质量, kg;

c ——粘性阻尼系数, N·s/m;

k ——刚度, N/m;

x , $\dot{x}$, $\ddot{x}$ ——质量 m 离静平衡位置的位移、速度、加速度, m, m/s, m/s²。

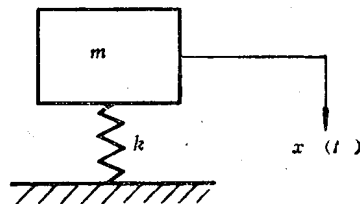


图 1.3.1 单自由度系统

如忽略系统阻尼,则振动位移随时间的变化可用下式描述:

$$x = A \cos(\omega_n t - \varepsilon) \quad (1.3.2)$$

式中: A ——振动位移幅值, m, 由初始条件决定;

ω_n ——系统固有频率, rad/s;

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.3.3)$$

ε ——振动位移初相角, 由初始条件决定。

这是一个简谐振动, 振动频率 ω_n 仅取决于系统的质量和刚度, 而与初始条件无关。

如考虑阻尼, 将式 (1.3.1) 改写为:

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = 0 \quad (1.3.4)$$

式中: ξ ——阻尼比, 按下式计算:

$$\xi = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (1.3.5)$$

ω_n ——系统无阻尼固有频率。

在大多数工程实际问题中, 阻尼比 ξ 均远小于 1, 此时, 振动位移随时间的变化可用下式描述:

$$x = Ce^{-\xi\omega_n t} \cos(\omega_d t - \varepsilon) \quad (1.3.6)$$

式中: C ——由初始条件决定的常数, m;

ω_d ——阻尼固有频率, rad/s,

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (1.3.7)$$

其余符号意义与式 (1.3.2) 相同。

这是一个振动幅值随时间按指数规律衰减的伪简谐振动。其时间历程如图 1.3.2 所示, 振动频率 ω_d 小于 ω_n , 但在实际问题中, 一般可不考虑它们间的微小差别。

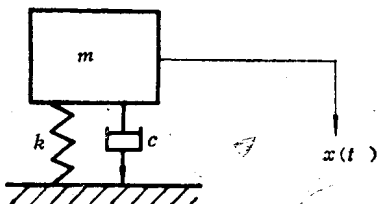


图1.3.2 有阻尼自由振动

其余符号意义与 (1.3.1) 式同。

其振动响应为:

$$x = A e^{i(\omega t - \varphi)} \quad (1.3.9)$$

式中: A ——振动响应幅值,

$$A = \frac{A_{st}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (1.3.10)$$

其中: A_{st} ——静振幅;

φ ——初相角, 按下式计算:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{2\xi \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}} \quad (1.3.11)$$

φ 随频率比变化的曲线称相频特性曲线, 如图 1.3.3 所示。

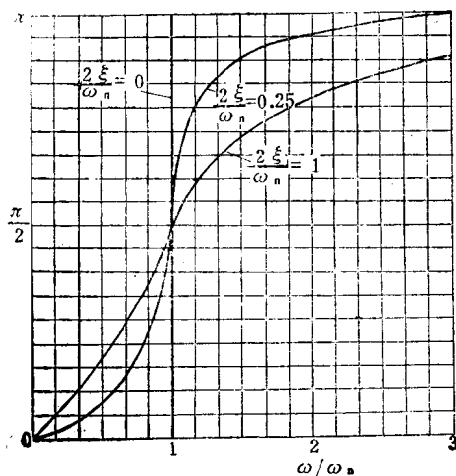


图1.3.3 相频特性曲线

系统的振动响应也常用动态放大系数 T_m 表示：

$$T_m = \frac{A_o}{A_{st}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (1.3.12)$$

它随频率比 ω/ω_n 的变化曲线称幅频特性曲线，如图1.3.4所示。

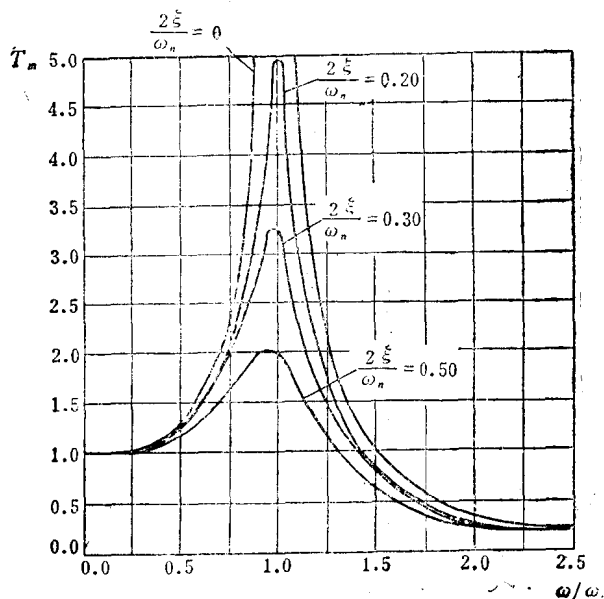


图1.3.4 幅频特性曲线

当 $\omega = \omega_n$ 时，式 (1.3.12) 可写成：

$$T_m = \frac{1}{2\xi} = Q \quad (1.3.13)$$

式中 Q 称品质因子，可用以描述系统阻尼特性。

第四节 船上振动与激励

由于船舶本身是一个复杂的弹性系统，在激励力作用下引起的某一局部结构或设备的振动响应对另一局部结构或设备来说可能是个继发性的激励，而且各种不同类型之间的振动还可能存在耦合关系。因此船上各部分之间的振动关系是错综复杂的，但又是设计人员一开始就应引起注意的问题。为了有利于今后分析、判断和限制船上有害振动的产生，并对船上出现的振动有一个总的概念，图1.4.1展示了船上可能出现的一些主要激励及其振动的关系。



图1.4.1 船上出现的主要激励及其振动的关系

第二章 防振设计流程

第一节 概 述

为指导船舶设计人员、造船厂和航运部门对新设计船舶或营运船舶可能产生的船上有害振动（总振动和局部振动）进行有效的控制，制定了振动预防流程。如图 2.1.1 所示。

本流程把新船设计过程分为三个阶段，即第一设计阶段、第二设计阶段和第三设计阶段。

每个设计阶段中，设计者应首先收集必要的资料，完成所需的设计图纸（详见图 2.1.1），然后分别从激励源和结构（设备或部件）响应两方面进行分析研究，预报船舶的振动特性，并根据振动衡准的评价，提出存在的问题和进一步研究的方向。

一般情况下，除非有相当一致的母型船振动资料（包括振动研究报告和实船测试报告），否则，对新设计船舶振动特性的了解，总是随着设计进程的逐步深入而逐渐深化的。

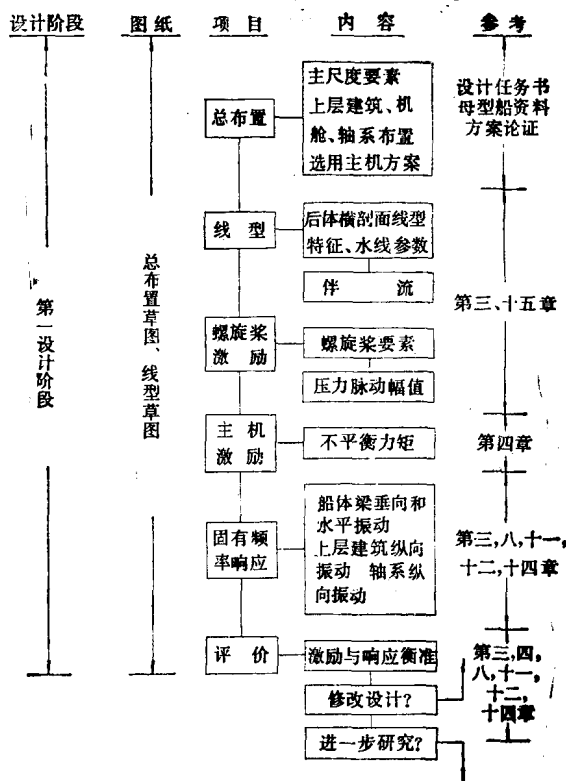


图2.1.1(a) 振动预防流程 第一设计阶段