

振动理论与工程应用

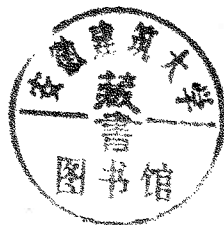
何琳 帅长庚 编著



科学出版社

振动理论与工程应用

何琳 帅长庚 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是一本很好的振动理论与船舶振动噪声控制应用相结合的教辅书,全书分为两篇,共计15章.第1篇为振动基础,主要运用实例论述单自由度线性系统的自由振动及其在谐波、周期、非周期激励下的强迫振动,两自由度系统的自由振动和强迫振动,多自由度系统的自由振动和强迫振动,多自由度系统固有频率及主振型的近似解法,连续系统的振动;第2篇为振动理论在船舶领域的应用,包括船舶振动噪声控制概论、船舶振动噪声源分析、船体振动、船舶推进轴系振动、船舶结构振动及其控制、船用隔振装置及其减振元器件技术.

本书可作为大专院校有关船舶、振动专业的教辅书,也可供有关专业的科研及工程技术人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

振动理论与工程应用/何琳,帅长庚编著. —北京:科学出版社,2015

ISBN 978-7-03-044033-4

I. ①振… II. ①何… ②帅… III. ①振动理论 IV. ①O32

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第066774号

责任编辑:刘凤娟/责任校对:邹慧卿

责任印制:赵博/封面设计:陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年3月第一次印刷 印张:44

字数:839 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

所谓振动,是指物质系统状态的某种周期性变化,而物体在平衡位置附近的往复运动则称为机械振动,它是在工程技术以及日常生活中经常遇到的物理现象.例如,悬挂在弹簧上的物体,受外界干扰离开了平衡位置.由于弹簧给物体的力总是要将物体拉向平衡位置(这种力称为恢复力),因此,物体就会围绕平衡位置上下运动,这是最简单的也是最直观的运动,如图 1 所示.各种机器设备及零件、各种基础、各种结构,都具有质量和不同程度的弹性,因此在一定条件下都会产生振动.本书主要论述机械振动及其在船舶领域的应用,但其理论是普遍适用的.

在许多情况下,机械振动是有害的,例如飞机和车船的振动会使乘客不舒适,尤其是舰船,振动引起的辐射噪声会增大其被探测发现的风险;另外,不利的振动可损害机件,影响加工精度;缩短机器和结构物的使用寿命,甚至造成事故;强烈的振动噪声还可形成严重的公害.

但是,机械振动也有可以利用的一面,例如,没有振动,就没有声音,没有振动就没有计时装置——钟表.此外,还有许多多利用振动原理设计制造的机器,如打桩机、造型机、清沙机、运输机、筛选机、研磨机等.研究振动的目的就是要认识和掌握振动的基本规律,利用其有利的方面,消除或控制其不利的方面.

对于一台存在振动的系统或设备而言,一般可认为其振动是由振源向设备(振动系统)输入了信号(激励),设备作出的响应,即振源—系统特性—响应.因而在振源—振动系统—响应三者之中,知道了其中任何两个量,就能推断出第三个量的振动性质,由此可将振动问题分为以下三类:

- (一) 振动分析,即已知振源和系统的特性,求系统的响应;
- (二) 振源分析,又称为振动环境预测,即已知系统的特性和响应,反过来预测系统的输入;
- (三) 振动特性测试或系统识别,已知振源和响应,来确定系统的特性,即在给定的振源条件下,如何来设计系统的特性,以期得到预先指定的响应,因此,也可以称之为振动设计或振动综合.

但是,通常在现场所发生的振动问题中,往往只能测定机械设备所产生的振动

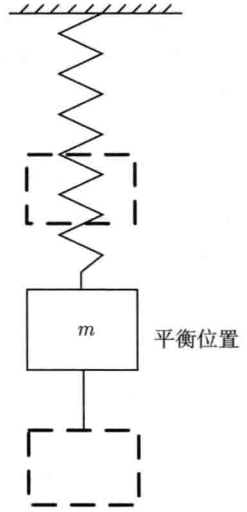


图 1

响应,而对系统的振动性质、振源都不清楚.在此情况下要想解决问题,只要先将已知的振源加在给定的设备上,测出它的响应,由此即可计算出系统的振动特性.系统的振动特性一经确定,对实际产生振动的振源也就清楚了.因此,一个实际问题往往既有识别又有分析综合,但是不论解决哪一类问题,首先必须掌握振动的基本理论和分析方法,才能具备解决实际振动问题的能力.

本书将着重阐述振动的基本理论、分析方法及其在工程中的应用.

实际的振动系统(包括机器、结构或它们的零部件等)都是很复杂的,研究它们的振动需要建立简化的模型,这种模型要既能反映实际系统的主要特征,又能用数学方法加以描述.常用的振动模型可分为两大类:离散系统和连续系统.

离散系统又称为集中参数系统,它是将系统各部分的物理参数(例如质量、弹簧刚度、阻尼系数等)加以集中,系统看成由具有集中参数的“元件”所组成.基本的集中参数元件是质量、弹簧和阻尼器,其中,“质量”反映系统的惯性;“弹簧”不具有质量,它反映系统的弹性,在运动中产生恢复力;“阻尼器”既无质量又不具弹性,是耗能元件,在运动中产生阻力.描述离散系统的数学工具是常微分方程.

所谓连续系统是由弹性体元件如梁、杆、板等所组成的系统,弹性体的惯性、弹性、阻尼都是连续分布的,因此,连续系统又称为分布参数系统,描写连续系统的数学工具是偏微分方程.

本书分为两大部分.第1篇(第1章~第7章)为振动理论基础,主要讨论单自由度线性系统的自由振动及其在谐波激励、周期激励、非周期激励下的强迫振动;两自由度系统的自由振动和强迫振动;多自由度系统的自由振动和强迫振动;多自由度系统固有频率及主振型的近似解法;连续系统的振动.第2篇(第8章~第15章)为振动理论在船舶领域的应用,主要讨论分析船舶振动噪声控制概论,船舶主要振源,船体、船舶推进轴系以及船舶结构的振动及其控制,船用隔振装置及其减振元器件技术.

振动理论与其在船舶领域的分析方法和应用正在日新月异的发展,新的方法及其应用技术会不断出现,此外振动理论在其他领域(如汽车、航空航天等)的应用,在一本书中无法全都囊括进去,只能选择一些基本的、有代表性的方法及其应用加以介绍.本书由何琳教授主编,并编写了第1篇第1章至第7章,第2篇第14章、第15章,负责全书的审校工作;帅长庚教授编写了第2篇第8章至第13章,并负责全书的统稿工作.为了反映振动理论与其在船舶领域的应用成果,本书收集了不少国内外公开发表的论文及资料,有兴趣的读者可以参阅这些文献,对这些文献资料的作者表示感谢.海军工程大学楼京俊教授对本书第1篇进行了校核,中国科学院声学所刘碧龙研究员对全书进行了校核,此外,本书在编写过程中得到了船舶振动噪声国家重点实验室的吕志强、赵应龙、徐伟、李彦等同事,以及英国南安普敦

大学振动与声音研究所 (ISVR) 的 Emiliano Rustighi 及其他同志的热情帮助, 特此致谢.

由于作者水平有限, 书中错误之处在所难免, 敬请读者不吝指正.

何 琳

2015 年 3 月 16 日于武汉

目 录

第 1 篇 振动基础

第 1 章 单自由度线性系统的自由振动	3
1.1 单自由度线性系统的运动微分方程	3
1.2 无阻尼系统的自由振动	7
1.3 确定固有频率的能量法	10
1.4 计算等效质量、等效刚度的能量法	13
1.5 有阻尼系统的自由振动	17
1.5.1 临界阻尼情况	18
1.5.2 过阻尼情况	20
1.5.3 小阻尼情况	23
第 2 章 单自由度线性系统谐波和周期激励下的强迫振动	30
2.1 无阻尼系统谐波激励下的强迫振动	30
2.2 有阻尼系统谐波激励下的强迫振动	36
2.3 基础谐波运动激励下的强迫振动	42
2.4 不平衡转子激励的强迫振动	47
2.5 强迫振动理论在工程中的应用	51
2.5.1 示压计	51
2.5.2 结构物固有频率的测定	51
2.5.3 测振仪	51
2.5.4 隔振	56
2.6 转轴的横向强迫振动	63
2.7 谐波激励下的能量平衡	67
2.8 谐波激励下的等效阻尼	68
2.9 周期激励下的强迫振动	73
2.10 振动能量收集	80
第 3 章 单自由度线性系统非周期激励下的强迫振动	86
3.1 非周期激励下的强迫振动——卷积积分法	86
3.2 基础非周期运动激励下的强迫振动	93
3.3 响应谱	95

3.4	响应的数值解法	99
3.5	非周期激励下的强迫振动——拉普拉斯变换法	105
3.6	瞬态冲击激励下的振动隔离	112
第 4 章	两自由度系统的振动	117
4.1	两自由度振动系统的运动微分方程	117
4.2	无阻尼两自由度系统的自由振动	120
4.3	拍击现象	126
4.4	无阻尼两自由度系统谐波激励下的强迫振动	130
4.5	无阻尼吸振器	132
4.6	有阻尼两自由度系统谐波激励下的强迫振动、有阻尼吸振器	139
第 5 章	多自由度系统的振动	144
5.1	多自由度振动系统的运动微分方程	144
5.2	推导运动方程的刚度法和柔度法	149
5.3	多自由度系统的自由振动	153
5.4	主振型 (特征矢量) 的正交性	158
5.5	等固有频率的情形	161
5.6	主振型矩阵和主坐标变换	164
5.7	固有频率随系统参数的变化	167
5.8	约束的增加对固有频率的影响	169
5.9	无阻尼多自由度系统的强迫振动	174
5.10	有阻尼多自由度系统的强迫振动	179
第 6 章	多自由度系统固有频率及主振型的近似解法	185
6.1	瑞利能量法	185
6.2	邓克利法 (迹法)	192
6.3	矩阵迭代法	194
6.4	高阶频率与振型	198
6.5	瑞利-李兹法	202
6.6	传递矩阵法	206
6.6.1	质量-弹簧系统的传递矩阵解法	207
6.6.2	扭振系统	209
6.6.3	梁的横向振动	211
第 7 章	连续系统的振动	215
7.1	弦的横向振动	215
7.2	杆的纵向振动	221
7.2.1	杆的纵向自由振动	221

7.2.2 杆的纵向强迫振动	229
7.3 轴的扭转振动	233
7.4 梁的弯曲振动	235
7.4.1 梁的自由弯曲振动	235
7.4.2 几种支撑情况下梁的振型函数和固有频率	237
7.4.3 振型函数的正交性	244
7.4.4 梁对初始激励的响应	246
7.4.5 梁的强迫弯曲振动	247
7.5 固有频率的近似解法	250
7.5.1 瑞利法	250
7.5.2 李兹法	253
参考文献	255

第 2 篇 船舶机械振动与控制

第 8 章 船舶振动噪声控制概论	259
8.1 基本概念	259
8.2 分贝运算	261
8.2.1 相干信号的加减法	261
8.2.2 非相干信号的加法	261
8.2.3 非相干声源的减法	263
8.3 船舶水下噪声能量概念及声转换效率	264
8.4 水下噪声的表现形式	266
8.5 船舶振动噪声控制的基本原则	266
8.6 船舶振动噪声控制研究频率范围的确定	267
8.7 船舶振动噪声分析频段划分	269
8.7.1 频段划分原则	269
8.7.2 低频	270
8.7.3 中频	270
8.7.4 高频	270
8.8 船舶声学设计计算方法的选择	271
8.9 船舶声学设计	271
8.9.1 从声学角度出发选择最佳的船舶体系架构	271
8.9.2 船舶结构声学设计	272
8.9.3 系统、船舶机械降噪设计	272

8.10 船舶声学性能评估	273
参考文献	273
第 9 章 船舶振动噪声源	275
9.1 船舶噪声特征	275
9.2 流体动力声源机理	278
9.3 螺旋桨激励	280
9.3.1 螺旋桨失衡力	280
9.3.2 螺旋桨叶频力	281
9.3.3 螺旋桨表面力	283
9.3.4 螺旋桨噪声	283
9.4 海水拍击	284
9.5 流激励空腔共振	284
9.6 流激励舵颤振	286
9.7 机械振动激励源	288
9.7.1 旋转不平衡	288
9.7.2 轴及轴承对旋转不平衡的影响	293
9.7.3 部件碰撞	294
9.7.4 往复不平衡	296
9.7.5 活塞拍击	297
9.7.6 流体激励	305
9.7.7 电磁激励	311
9.8 常见船用机械噪声源	313
9.8.1 声源表述	313
9.8.2 推进汽轮机声源级	313
9.8.3 减速齿轮声源级	314
9.8.4 船用汽轮发电机声源级	314
9.8.5 泵声源级	315
9.8.6 发电机声源级	315
9.8.7 电机声源级	316
9.9 声源运动	316
9.9.1 多普勒频移	317
9.9.2 平稳运动对声级的影响	317
9.9.3 周期运动	317
参考文献	318
第 10 章 船体振动及其控制	319

10.1 船体振动分析概论	319
10.1.1 引言	319
10.1.2 基础梁理论	319
10.1.3 船体振动分析方法	323
10.1.4 附加质量效应	338
10.1.5 局部效应	339
10.1.6 浅水效应	339
10.1.7 急机动	339
10.1.8 吃水条件	340
10.2 局部挠性对船体振动的影响	340
10.2.1 “簧上质量”	340
10.2.2 局部弹性结构	340
10.2.3 弹性安装设备	341
10.3 船体振动阻尼	344
10.3.1 概述	344
10.3.2 船体阻尼分析	345
10.3.3 测定船体阻尼的方法	346
10.3.4 升力面的阻尼作用	347
10.3.5 船体结构的耗散性能	347
10.4 船体振动控制	348
10.4.1 船体设计一般要求	348
10.4.2 降低螺旋桨激励力	351
10.4.3 避免船体共振	352
10.4.4 避免局部共振	353
10.4.5 平衡	355
10.5 防振装置	359
10.5.1 概述	359
10.5.2 动力吸振器	360
10.5.3 可调旋转偏心质量	367
10.5.4 同步设计	368
参考文献	369
第 11 章 船舶推进轴系振动及其控制	371
11.1 引言	371
11.2 扭转振动	371
11.2.1 概述	371

11.2.2	固有频率分析	372
11.2.3	扭转振动阻尼	379
11.2.4	振幅估算	382
11.2.5	扭转振动与尾流形式对推进性能的影响	384
11.2.6	扭转振动控制	386
11.3	纵向振动	388
11.3.1	概述	388
11.3.2	纵向振动分析方法	389
11.3.3	纵向振动分析参数估计	404
11.3.4	纵向振动阻尼	410
11.3.5	共振幅值计算	411
11.3.6	推力轴承位置对纵向振动的影响	412
11.3.7	纵向振动控制	412
11.4	回旋振动	413
11.4.1	概述	413
11.4.2	回旋振动分析	414
11.4.3	回旋振动影响因素	419
11.4.4	回旋振动控制	422
	参考文献	423
第 12 章	船舶结构振动与声辐射	425
12.1	引言	425
12.2	典型船舶结构及其构成	425
12.3	船舶结构中的波	427
12.3.1	概述	427
12.3.2	杆内弹性波	431
12.3.3	板内弹性波	433
12.3.4	圆柱壳体中的弹性波	434
12.3.5	无限结构中的弹性波	435
12.3.6	有限结构中的弹性波	436
12.4	船舶结构机械阻抗	446
12.4.1	基本概念	446
12.4.2	集总元件及其组合单元的阻抗及导纳	449
12.4.3	船舶基础结构单元的机械阻抗	451
12.4.4	船舶复合结构的机械阻抗	458
12.5	船舶结构振动传播	464

12.5.1	概述	464
12.5.2	均质结构中振动的传播	464
12.5.3	具有加强筋的周期结构的波动性质	465
12.5.4	非均质结构中振动的传播	468
12.5.5	非均质结构中的波型变换	471
12.5.6	声振吸收	472
12.5.7	船舶连接结构透射效率和耦合损耗因子的估测	473
12.5.8	典型船舶结构的传递函数	486
12.6	船舶结构声辐射	489
12.6.1	表征声辐射的参数	489
12.6.2	吻合频率	491
12.6.3	流体负载的影响	493
12.6.4	不同激励条件下无限板声辐射	497
12.6.5	有限板声辐射	499
12.6.6	板的声辐射传递函数分析	503
12.7	空气噪声向结构噪声的传递	504
	参考文献	505
第 13 章	船舶结构振动控制	506
13.1	选择声学特性适宜的船舶结构	506
13.2	抗弯刚度对结构声学特性的影响	511
13.3	船体结构声学设计	513
13.4	船用机械安装基座声学设计	514
13.5	船舶结构共振频率与激励频率的分离	516
13.6	船舶结构中的反共振现象及其应用	523
13.7	船舶结构导振性设计	525
13.7.1	概述	525
13.7.2	结构间连接部位的导振性	527
13.7.3	降低船舶结构导振性的方法	532
13.8	阻性减振技术	540
13.8.1	概述	540
13.8.2	阻性减振方法	540
13.8.3	通过吸振方式降低船体结构振动	555
13.8.4	吸振阻尼层对船用杆结构振动的衰减	557
13.9	抗性减振技术	560
13.9.1	基本原理	560

13.9.2	降低机械设备的结构振动	565
13.9.3	杆结构中振动的隔离	570
13.9.4	降低板结构的弯曲振动	579
	参考文献	581
第 14 章	船用隔振装置技术	583
14.1	隔振原理	583
14.1.1	简单隔振系统	583
14.1.2	隔振效果的影响因素	585
14.1.3	双层隔振系统	587
14.2	船舶隔振装置设计	590
14.2.1	一般步骤	590
14.2.2	机械设备特性参数的确定	590
14.2.3	隔振器性能参数的确定	593
14.2.4	单层隔振装置模态频率和模态向量计算	594
14.2.5	双层隔振装置模态频率和模态向量计算	597
14.2.6	隔振装置稳定性估算	599
14.3	浮筏双层隔振装置	599
14.3.1	一般模型	599
14.3.2	大型浮筏双层隔振装置固有频率的优化设计	601
14.3.3	浮筏双层隔振装置的应用	608
14.4	智能气囊隔振装置	609
14.5	推进动力系统新型隔振装置	613
14.6	主被动混合隔振装置	618
14.6.1	概述	618
14.6.2	主被动混合隔振系统的动力学分析	619
14.6.3	控制律设计	623
14.6.4	实验研究	635
	参考文献	639
第 15 章	船用减振元器件	641
15.1	引言	641
15.2	隔振器的类型	641
15.2.1	按决定隔振器弹性特性和阻尼特性的材料分类	641
15.2.2	按刚度特性分类	642
15.2.3	其他分类	643
15.3	隔振器主要性能参数	643

15.3.1	额定载荷	643
15.3.2	最大允许冲击载荷	643
15.3.3	刚度	644
15.3.4	静刚度	644
15.3.5	动刚度	644
15.3.6	冲击刚度	644
15.3.7	最大允许变形量	644
15.3.8	固有频率	644
15.3.9	阻尼	644
15.3.10	机械阻抗	644
15.4	隔振器主要性能测试方法	645
15.4.1	静态特性测试	645
15.4.2	动态特性测试	647
15.5	隔振器选用的基本原理	652
15.5.1	隔振器选用的要求	652
15.5.2	隔振系统模型化	652
15.5.3	单自由度系统	653
15.5.4	实际工程中的几个问题	659
15.6	隔振措施的应用	661
15.6.1	积极隔振	661
15.6.2	消极隔振	661
15.6.3	半刚性隔振	661
15.6.4	外部联接	662
15.7	隔振器选用实例	662
15.8	隔振器的安装方式	664
15.9	常见的船用低频隔振器	666
15.9.1	装配式低频隔振器	666
15.9.2	金属、橡胶混合低频隔振器	667
15.9.3	气囊隔振器	668
15.10	挠性接管	672
15.10.1	概述	672
15.10.2	可靠性评估方法	673
15.10.3	振动传递特性评估方法	673
15.10.4	位移补偿性能	677
	参考文献	678
	索引	682

第 1 篇 振动基础

